



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและ
พลาสมาชั้นเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G
และอากาศยานไร้คนขับ

เสนอต่อ

สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์
และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (สำนักงาน กสทช.)

โดย

สำนักบริหารงานวิจัยและนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำนำ

รายงานฉบับนี้เป็นรายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับที่จัดทำขึ้นโดยสำนักบริหารงานวิจัยและนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อเสนอต่อสำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (สำนักงาน กสทช.) ภายใต้สัญญาเลขที่ B2-001/6-2-63 ระยะเวลาการดำเนินการตั้งแต่วันที่ 12 สิงหาคม 2564 - 8 พฤษภาคม 2565 (ระยะเวลา 9 เดือน) โดยมีวัตถุประสงค์หลัก 3 ประการ คือ

1) ศึกษา เก็บรวบรวมข้อมูล พร้อมวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัด RTK ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G, อากาศยานไร้คนขับ และอุปกรณ์อื่น ๆ

2) ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองโคคลุชาแบบใหม่ที่อาศัยวิธี Multishell-Spherical Harmonic Function (MS-SHF) ให้แก่เครื่องรับ GNSS และนำเสนอวิธีการใหม่ที่ปรับปรุง RTK โดยอาศัย network RTK (CORS network) ร่วมกับ Kalman Filter-Based Singular Spectrum Analysis เพื่อให้เครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G, อากาศยานไร้คนขับ และอุปกรณ์อื่นมีความแม่นยำในการระบุพิกัดที่แม่นยำขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเดิมก่อนหน้านี้

3) จัดประชุมกลุ่มย่อย (Focus Group) ผู้เกี่ยวข้องและผู้ได้รับผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

4) จัดทำรายงานการศึกษาข้อเสนอประเทศไทยต่อการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

ทั้งนี้ คณะผู้วิจัยคาดหวังว่าแนวทางการศึกษาและแนวทางแก้ไขปัญหานั้นที่นำเสนอในรายงานฉบับสมบูรณ์นี้จะสามารถลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเทคโนโลยี 5G อากาศยานไร้คนขับ และอุปกรณ์อื่น ๆ ได้ เพื่อที่จะทำให้การระบุพิกัดเรียลไทม์มีค่าความผิดพลาดที่ลดลงและมีความแม่นยำในการระบุพิกัด ซึ่งจะทำให้เทคโนโลยี 5G สามารถรองรับนวัตกรรมดิจิทัลใหม่ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสอดคล้องกับแนวนโยบายของรัฐบาลภายใต้แนวคิดไทยแลนด์ 4.0 และตอบสนองความต้องการของประชาชนไทยในอนาคต

คณะผู้จัดทำ

สำนักบริหารงานวิจัยและนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
คำนำ	1
สารบัญ	2
บทสรุปผู้บริหาร	5
บทที่ 1 บทนำ	28
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	28
1.2 วัตถุประสงค์	31
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	31
1.4 เป้าหมาย	31
1.5 ผลผลิตสำคัญ	33
1.6 แผนปฏิบัติการโครงการ	34
บทที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศที่มีต่อ RTK ของเครื่องรับ GNSS	37
2.1 ผลกระทบของพายุแม่เหล็กโลกที่มีต่อชั้นไอโอโนสเฟียร์	37
2.2 ผลกระทบของพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ทำให้เกิด TEC storm และ SED	58
2.3 ผลกระทบของพายุแม่เหล็กโลกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลง TEC พารามิเตอร์ชั้นไอโอโนสเฟียร์และตัวบ่งชี้สภาพบรรยากาศ	67
2.4 ภาพรวมของการตรวจจัดการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศในประเทศไทย เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ในตอนนี้	76
2.5 วิธีการแก้ปัญหาสำหรับการระบุพิกัด RTK พื้นที่กว้างที่อาศัย Multi-GNSSs ภายใต้สภาวะที่ชั้นไอโอโนสเฟียร์มีการเปลี่ยนแปลงและถูกรบกวนรุนแรง	81
2.6 เอกสารอ้างอิงบทที่ 2	87
บทที่ 3 พลาสมาบับเบิลที่มีต่อ RTK ของเครื่องรับ GNSS	88
3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของ EPB และซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์	90
3.2 ผลกระทบของซินทิลเลชันที่มีต่อการระบุพิกัด RTK ในระหว่างที่เกิดพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำ (ในแนวละติจูดที่ใกล้เคียงกับประเทศไทย)	108
3.3 ผลกระทบของพลาสมาบับเบิลที่ทำให้เกิดซินทิลเลชันที่ละติจูดต่ำเหนือประเทศอินโดนีเซีย	115
3.4 การตรวจจับพลาสมาบับเบิลด้วยเครือข่าย ASIs ราคาถูกที่เกาะอิซิงากิ ประเทศญี่ปุ่น	124
3.5 ผลของพลาสมาบับเบิลและสเปรดเอฟเฟกต์ที่แรงนำไปสู่ซินทิลเลชันรุนแรงที่โฮหนาน ประเทศจีน	128
3.6 การคำนวณค่าบ่งชี้ระดับความรุนแรง ได้แก่ ค่า ROT (rate of TEC change) และค่า ROTI (ROTI index) รวมถึงวิเคราะห์ผลกระทบของพลาสมาบับเบิล	130
3.7 เอกสารอ้างอิงบทที่ 3	139

สารบัญ (ต่อ)

หัวข้อ	หน้า
บทที่ 4 พารามิเตอร์การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและการเกิดพลาสมาบับเบิล	141
4.1 พารามิเตอร์ตัวที่ 1 - ค่าพายุสนามแม่เหล็ก (Kp index)	141
4.2 พารามิเตอร์ตัวที่ 2 - ค่าพายุรังสีสุริยะ (solar radiation storm)	144
4.3 พารามิเตอร์ตัวที่ 3 - ค่าการขาดหายของสัญญาณวิทยุ (radio blackout)	146
4.4 พารามิเตอร์ตัวที่ 4 - ค่า Disturbance Storm Time (Dst index)	149
4.5 พารามิเตอร์ตัวที่ 5-ค่า Planetary A-index (Ap)	150
4.6 พารามิเตอร์ตัวที่ 6 - ค่าฟลักซ์สุริยะ F10.7	151
4.7 เว็บไซต์แสดงค่าพารามิเตอร์ชั้นไอโอโนสเฟียร์และผลการทำนายการเกิดพลาสมาบับเบิล	154
4.8 การทำนายการเกิดขึ้นของพลาสมาบับเบิลด้วยค่า Range Spread-F	155
4.9 เอกสารอ้างอิงบทที่ 4	160
บทที่ 5 แบบจำลองโคลบุชา	161
5.1 แบบจำลองโคลบุชาแบบเดิม	161
5.2 Refined Klobuchar model ของ Ratnam และคณะ	167
5.3 Refined Klobuchar model ที่จำลองและนำเสนอสำหรับประเทศไทย	176
5.4 การประยุกต์ใช้แบบจำลองโคลบุชาในการประเมินสัญญาณ GNSS	181
5.5 เอกสารอ้างอิงบทที่ 5	193
บทที่ 6 การตรวจจับ PDOP และ Kalman Filter สำหรับ NRTK	197
6.1 การระบุพิกัดแบบ Network RTK ภายใต้พายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรง	199
6.2 วิธี Network RTK ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์เชิงเส้น	205
6.3 วิธี Network RTK ร่วมกับการพิจารณา PDOP และคาลมานฟิลเตอร์เชิงเส้น (วิธีใหม่ที่นำเสนอ)	217
6.4 เอกสารอ้างอิงบทที่ 6	226
บทที่ 7 Kalman Filter-Based Singular Spectrum Analysis	228
7.1 คาลมานฟิลเตอร์ (Kalman Filter)	229
7.2 singular spectrum analysis	230
7.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา KF-SSA	238
7.4 ขั้นตอนการศึกษาและทดสอบวิธี KF-SSA ที่นำเสนอ	239
7.5 ผลการศึกษาวิธี KF-SSA	241
7.6 เอกสารอ้างอิงบทที่ 7	244

สารบัญ (ต่อ)

หัวข้อ	หน้า
บทที่ 8 รายงานผลการจัดประชุมกลุ่ม (Focus Group) และภาพถ่าย	246
8.1 ประเด็นความต้องการของผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียจากการเปลี่ยนแปลง ชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิล	246
8.2 ประเด็นปัญหาที่พบในขณะใช้งานของผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียจากการ เปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิล	248
8.3 แนวทางการแก้ปัญหาในทางปฏิบัติ ผลดี ผลเสียและความคุ้มค่าต่อการดำเนินการ สำหรับประเทศไทย	250
8.4 แบบสำรวจความต้องการและปัญหาของผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้ที่ได้รับผลกระทบจากการ เปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัด RTK ของเครื่องรับ GNSS ในเทคโนโลยี 5G, UAV ฯลฯ	256
8.5 ชื่อวิทยากร ข้อเสนอแนะฯ รายชื่อผู้เข้าร่วมและภาพถ่าย	257
บทที่ 9 สถานภาพโครงการ สรุปการใช้งบฯ และแผนการดำเนินโครงการ	281
9.1 สถานภาพการดำเนินโครงการ (งานงวดที่ 4)	281
9.2 สรุปปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นจากการดำเนินโครงการ (งานงวดที่ 4)	283
9.3 รายงานการจัดซื้อครุภัณฑ์ในโครงการ (ถ้ามี)	284
9.4 รายงานสรุปการใช้จ่ายงบประมาณ (งานงวดที่ 4)	285
9.5 รายงานสรุปความก้าวหน้าทางการเงิน (งานงวดที่ 4)	285
9.6 รายละเอียดการบันทึกบัญชีรับ จ่ายเงิน (งานงวดที่ 4)	286
9.7 แบบแสดงรายละเอียดครุภัณฑ์	291
9.8 แผนการดำเนินโครงการตามเงื่อนไขและส่งมอบรายงานงวดที่ 4	292
9.9 ความเห็น/ข้อสังเกตของคณะกรรมการพิจารณาผลงานฯ จากการส่งมอบงานงวดที่ 1 - 3	294
ภาคผนวก (บทความวิจัยที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 5 เรื่องของโครงการฯ นี้)	295

บทสรุปผู้บริหาร

โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (real-time kinematic หรือ RTK) ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G อากาศยานไร้คนขับ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ พัฒนาแบบจำลองโคลนุชาแบบใหม่สำหรับเครื่องรับ GNSS ความถี่เดียว ที่ปรับปรุงค่า RMSE (root mean square error) ให้ดีขึ้นและระบุตำแหน่งเครื่องรับ GNSS ที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น รวมทั้งนำเสนอวิธีการใหม่เพื่อปรับปรุงวิธี RTK ให้มีความแม่นยำในการระบุพิกัดเรียลไทม์มากยิ่งขึ้น ได้แก่ วิธีการตรวจจับค่า PDOP ด้วย Linear Kalman Filter และวิธีการ Kalman Filter-Based Singular Spectrum Analysis สำหรับ Network RTK หรือ RTK ที่อาศัยการรับค่าปรับแก้ (correction data) จาก CORS network ของประเทศไทย ซึ่ง Network RTK เป็นวิธี RTK ที่อาศัยข้อมูลมากกว่า 1 สถานีฐานที่มาจาก CORS network รายละเอียดโดยภาพรวมของเนื้อหาผลการศึกษา มีดังนี้

สภาพอวกาศ (space weather) ที่แปรปรวนเป็นคุณลักษณะที่ทำให้เกิดการรบกวนกันของส่วนผสมต่าง ๆ ในอวกาศ สภาพอะพลวัตินามไฟฟ้า (electrodynamic) และการแปรปรวนของสนามแม่เหล็กโลกของชั้นบรรยากาศด้านบนของโลก เช่น ชั้นไอโอโนสเฟียร์และชั้นแมกเนโตสเฟียร์ ซึ่งบางครั้งทำให้เกิดภัยคุกคาม (threat) ที่รุนแรงต่อความแม่นยำในการระบุพิกัดของ real-time kinematic (RTK) และการนำทางของระบบดาวเทียมนำทางสากล (global navigation positioning system หรือ GNSS) ที่อาศัยเครื่องรับ GNSS การสื่อสารด้วยย่านความถี่ HF และการสื่อสารผ่านดาวเทียม สิ่งรบกวนในชั้นไอโอโนสเฟียร์ (ionospheric disturbances) ที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการระบุพิกัดเรียลไทม์ด้วย RTK แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่

1. การเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศ ได้แก่ พายุแม่เหล็กโลก พายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ และอิเล็กทรอนิกส์แปรปรวนสูงมาก-ปัจจัยนี้เกิดขึ้นในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ชั้นแมกเนโตสเฟียร์และชั้นอวกาศนอกสุดของโลก
2. พลาสมาบับเบิล (plasma bubble หรือ PB) เป็นปรากฏการณ์ที่ความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์หายไปจากสภาพปกติ (ambient atmosphere)

โดยหัวข้อ 2 กลุ่มหลักนี้เป็นสิ่งรบกวนชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรงและมีกระทบมากที่สุดต่อประเทศไทย และประเทศอื่น ๆ ที่ตั้งอยู่บนแผ่นดินในบริเวณแถบเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกและละติจูดต่ำที่อยู่ในบริเวณ EIA (Equatorial Ionization Anomaly) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 แต่สิ่งรบกวนจะมีต้นเหตุการเกิดขึ้น คุณลักษณะการเปลี่ยนแปลง และช่วงเวลาในการเกิดขึ้นที่แตกต่างกัน แต่ก็มีความสัมพันธ์และมีความเชื่อมโยงกันอย่างใกล้ชิด นักวิทยาศาสตร์ วิศวกร และนักวิจัยจำนวนมากทั่วโลกพยายามที่จะศึกษาและวิเคราะห์ประเด็นต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับแต่ละหัวข้อ เพื่อที่จะนำไปสู่การป้องกันและหลีกเลี่ยงการเกิดขึ้น ดังนั้น ทางสถาบัน NICT (National Institute of Information and Communications Technology) จึงร่วมมือกับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังจัดตั้งสถานีเฝ้าสังเกตการณ์ชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร โดยสถานีเฝ้าสังเกตการณ์ชั้นไอโอโนสเฟียร์นี้มีอยู่ 2 แห่ง ได้แก่ 1) สถานีไอโอโนซอนด์ ซึ่งมีเครื่องรับส่งเรดาร์ประเภท FMCW (frequency-modulated continuous wave) หรือเครื่องไอโอโนซอนด์ ทำงานย่านความถี่สูง (HF) ตั้งแต่ 2-30 MHz และ 2) สถานีเรดาร์วีเอชเอฟ ซึ่งมีเครื่องรับส่งเรดาร์ย่านความถี่ VHF เท่ากับ 39.65 MHz

ตัวอย่างของผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศที่มีต่อการคำนวณค่าปรับแก้เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ของ CORS network ให้แก่เครื่องรับ GNSS ที่อยู่ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ 5G, อากาศยานไร้คนขับ (อาทิ โดรน) ฯลฯ เมื่อ 2 สถานีฐานได้รับผลกระทบจากพายุแม่เหล็กโลก โดยมี ionospheric delay gradients เกิดขึ้นระหว่าง 2 สถานีฐานดังกล่าว จึงทำให้แต่ละสถานีคำนวณค่าปรับแก้ในการระบุพิกัดที่ผิดพลาด และส่งผลกระทบต่อการระบุพิกัดด้วยเทคนิค RTK ที่มีความผิดพลาดสูงระหว่าง 4-10 เมตร อีกตัวอย่างหนึ่งคือ ตัวอย่างของผลกระทบของการเกิดพลาสมาบับเบิลที่มีต่อระบบการลงจอดของเครื่องบิน (ground-based augmentation system หรือ GBAS) ซึ่งพลาสมาบับเบิลส่งผลกระทบต่อการลงจอดของเครื่องบินที่ผิดพลาด ไม่ตรงกับ runway ของเครื่องบิน ดังนั้น โครงการนี้จะดำเนินการจัดทำผลการศึกษา รวบรวมข้อมูล และนำเสนอผลงานวิจัยใหม่เพื่อที่ลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิล ซึ่งจะเพิ่มความแม่นยำในการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G รถยนต์ไร้คนขับ อากาศยานไร้คนขับ (UAV) เครื่องจักรกลที่ใช้ในสมาร์ตฟาร์ม และอุปกรณ์อื่น ๆ ซึ่งจะทำให้ประเทศไทยสามารถเตรียมความพร้อมในการรับมือกับผลกระทบดังกล่าวที่จะเกิดขึ้นกับระบบสื่อสารไร้สายในยุคที่ 5 (5G) ขึ้นไปได้เป็นอย่างดี

ที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายคนได้ศึกษาและรายงานผลกระทบของพายุแม่เหล็กโลก (geomagnetic storm) ที่มีต่อชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง “พายุวันเซนต์แพทริก” (St. Patrick’s day storm) [1] ที่เกิดขึ้นในช่วงวันที่ 17-19 มีนาคม 2558 ซึ่งนับว่าเป็นพายุที่มีความรุนแรงมากที่สุดของวัฏจักรสุริยะที่ 24 โดยค่า Sym-H มีค่าต่ำที่สุดถึง -232 nT จึงทำให้เป็นพายุที่รุนแรงที่สุดของวัฏจักรสุริยะที่ 24 โดยงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาว่าพายุลูกนี้มีอิทธิพลต่อชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ละติจูดบริเวณเส้นศูนย์สูตร, ต่ำและกลางในภูมิภาคอเมริกาและยุโรปอย่างไร โดยใช้ข้อมูลไอโอโนซอนด์และ GPS-TEC ผลกระทบที่เป็นไปได้ของการทะลุทันที่ได้ถูกสังเกตในทั้งสองภูมิภาค ในช่วงที่เกิดเฟสหลักของพายุในภูมิภาคอเมริกา การเกิดพร้อมกันของทั้งเฟสพายุไอโอโนสเฟียร์บวกและลบถูกสังเกตเห็นได้ที่ละติจูดต่ำและกลาง-สูง ตามลำดับ เฟสพายุบวกนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าเจาะทะลุแบบทันที (PPEFs) อย่างเป็นทางการซึ่งจะยังคงปรากฏอยู่ที่ละติจูดต่ำ ส่วนเฟสพายุลบในบริเวณละติจูดกลางเป็นผลกระทบรวมของสนามไฟฟ้าไดนาโมรบกวน (DDEFs) การเคลื่อนตัวในบริเวณเส้นศูนย์สูตรของร่อง (trough) ของความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ละติจูดกลางและการบีบกดในบริเวณเส้นศูนย์สูตรของพลาสมาพอสส์ เฟสพายุไอโอโนสเฟียร์ลบที่รุนแรงถูกสังเกตเห็นได้จากการสังเกตโดยใช้ไอโอโนซอนด์และ TEC ในเฟสพื้นผิวซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่สมมาตรของแต่ละซีกโลกที่รุนแรง นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงของ EIA (การไอโอไนซ์ที่ผิดปกติแถบเส้นศูนย์สูตร) ตามที่เคยตรวจจับการลอยเลื่อนของพลาสมาด้วยดาวเทียม SWARM ตลอดองติจูดที่ต่างกันได้อีกกล่าวถึงด้วย

พายุแม่เหล็กโลกเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนมาก ที่เริ่มต้นด้วยการบีบกดอย่างฉับพลันของชั้นแมกเนโตสเฟียร์ (magnetosphere) ของโลกและกระแสแวนที่มีความเข้มสูงที่สอดคล้องกัน ซึ่งสะท้อนให้เห็นในค่าดัชนี Dst เมื่อพลังงานและโมเมนตัมเข้าไปสู่บรรยากาศด้านบน ชั้นบรรยากาศบริเวณละติจูดสูงจะยกตัวขึ้นอย่างทันทีเนื่องจากความร้อนจูลสุทธิ ละติจูดสูงจะร้อนขึ้นและเริ่มขยายตัว ซึ่งก่อให้เกิดคลื่นยักษ์ (Surge) ในแนวเส้นศูนย์สูตรและการรบกวนบรรยากาศที่เคลื่อนตัวอยู่ (traveling atmospheric disturbances หรือ TADs) รวมถึงการเปลี่ยนส่วนผสมในชั้นเทอร์โมสเฟียร์ การรบกวนเวลาที่เกิดพายุสามารถส่งผลกระทบและปรับเปลี่ยนสนามไฟฟ้าชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ล้อมรอบ (ambient) ที่ละติจูดบริเวณเส้นศูนย์สูตร, ต่ำและกลาง อาจจะมีต้นเหตุมาจากการทะลุแบบทันทีของสนามไฟฟ้า (PPEF) ที่มีจุดกำเนิดจากชั้นแมกเนโตสเฟียร์หรือสนามไฟฟ้าไดนาโมรบกวน (DDEF) หรือการผสมกันทั้ง 2 แหล่งกำเนิด ในทอมของสนามความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยทั่วไป

พายุไอโอโนสเฟียร์จะถูกแบ่งออกเป็นสองประเภท พายุที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นจะถูกเรียกว่า พายุไอโอโนสเฟียร์บวก ส่วนพายุที่เกี่ยวข้องกับการลดลงของความหนาแน่นอิเล็กตรอนจะถูกเรียกว่า พายุไอโอโนสเฟียร์ลบ ในขณะที่การเกิดเฟสพายุลบส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนส่วนผสม แต่การเกิดพายุบวกมักจะมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนส่วนผสม การเคลื่อนย้ายของการไอออนไนซ์ หรือการเปลี่ยนสนามไฟฟ้าหรือลมในชั้นเทอร์โมสเฟียร์

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและการเกิดพลาสมาบับเบิล ได้แก่

1. ค่าพายุสนามแม่เหล็ก (Kp index)
2. ค่าพายุรังสีสุริยะ (solar radiation storm)
3. ค่าการขาดหายของสัญญาณวิทยุ (radio blackout)
4. ค่า Disturbance Storm Time (Dst index)
5. ค่า Planetary A-index (Ap)
6. ค่าฟลักซ์สุริยะ F10.7 (F10.7 solar flux)
7. จำนวนเฉลี่ยของจุดดับบนดวงอาทิตย์
8. ผลการทำนายการเกิดพลาสมาบับเบิลด้วยวิธี KNN (K-Nearest Neighbor)

ประเภทของเครื่องมือวัดและค่าข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิล ได้แก่

a) Ionosonde และ Digital Portable Ionosonde (Digisonde) เป็นอุปกรณ์ที่มีหลักการทำงานเหมือนเรดาร์ที่ใช้ตรวจจับสนองชั้นไอโอโนสเฟียร์ทั่วโลก ซึ่งมีการติดตั้งไว้ในประเทศต่าง ๆ ในเว็บไซต์ของ GIRO (<https://giro.uml.edu/didbase/scaled.php>) หรือข้อมูลดิจิทัลของสถานีที่ถูกดาวน์โหลดและถูกนำมาวิเคราะห์ได้โดยใช้ SAO Explorer ชื่อเว็บไซต์ <http://ulcar.uml.edu/SAO-X/SAO-X.html>

b) เครื่องรับ GNSS (Global Navigation Satellite System) เป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการวัดค่าข้อมูล TEC (total electron content) ที่ได้จากการวัดด้วยระบบการระบุพิกัดทั่วโลก (global positioning system หรือ GPS) โดยค่า GNSS TEC ที่นำมาใช้ในการศึกษานั้น เราสามารถที่จะนำมาจากสถานี IGS (International GNSS Service) ที่ปรากฏในเว็บไซต์ของ IGS หรือ SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) ชื่อเว็บไซต์ <http://sopac.ucsd.edu/dataBrowser.shtml>

c) SWARM – เป็นชื่อกลุ่มของดาวเทียม 3 ดวง (A คือ Alpha; B คือ Bravo และ C คือ Charlie) ภายใต้การดูแลขององค์การอวกาศยุโรป (ESA) ที่ทำหน้าที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลกและการมีปฏิสัมพันธ์ของมันกับระบบโลก ดาวเทียม A และ C จะบินที่ระดับความสูง 460 km ด้วยห่างกัน 1-2 องศา ในแนวลองจิจูด ดาวเทียม B บินที่ระดับความสูงประมาณ 540 km นอกจากจะให้ค่าข้อมูลสนามแม่เหล็กแล้ว มันก็ให้ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ได้รับจาก Langmuir Probe (LP) บนบอร์ดของดาวเทียม SWARM อีกด้วย

d) แผนภาพทั่วโลก IRTAM - เพื่อที่จะมีมุมมองทั่วโลกของสภาวะชั้นไอโอโนสเฟียร์ในช่วงเวลาที่มีพายุ เราได้ใช้แผนภาพ foF2 ทั่วโลกที่สร้างขึ้นโดยแบบจำลอง IRI Real-Time Assimilative Mapping (IRTAM) โดย IRTAM นี้มีความสามารถในการผลิตแผนภาพทั่วโลกของ foF2 และ hmF2 เกือบจะเป็นเวลาจริงที่ใช้ข้อมูลที่วัดได้จากสถานี ionosonde ประมาณ 70 สถานีของหน่วยงาน GIRO ปกติจะมีความละเอียดเท่ากับ 15 นาที IRTAM ใช้แบบจำลองความหนาแน่นอิเล็กตรอนของ IRI เสมือนเป็นแบบจำลองพื้นฐานด้วย แบบจำลอง IRI นั้นใช้

สัมประสิทธิ์ CCIR หรือ URSI สำหรับการกำหนดรายละเอียดของค่ามัธยฐาน foF2 และ hmF2 โดย IRTAM นั้น จะรวบรวมค่าข้อมูล GIRO ที่วัดได้ใน IRI และทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์ CCIR

e) **แผนภาพทั่วโลกค่าอัตราส่วน O/N2 ที่ได้จาก TIMED-GUVI** - เพื่อที่จะมีมุมมองโดยภาพรวมของความหนาแน่นนิวทรัลในชั้นเทอร์โมสเฟียร์ที่กำลังเปลี่ยนแปลงอยู่ เราได้ใช้แผนภาพทั่วโลกค่าอัตราส่วน O/N2 ในชั้นเทอร์โมสเฟียร์ที่ได้รับจากเครื่องมือ GUVI ที่อยู่บนบอร์ดของดาวเทียม TIMED โดยมันจะให้ค่า column number density ของอัตราส่วน O/N2 ที่ถูกอ้างอิงที่ระดับ column number density ของ N2 ด้วย 10^{17} cm^{-2} แผนภาพทั่วโลกค่า O/N2 สามารถพบได้ที่ http://guvi.jhuapl.edu/site/data/documents/on2_info.html

f) **All-Sky Airglow Imager** เป็นกล้องที่ใช้ตรวจจับการเกิดพลาสมาบับเบิลในชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยเครื่อง All-Sky Airglow Imager นี้มีหลายยี่ห้อที่ผลิตและสร้างขึ้นมาใช้งาน อาทิ หน่วยงาน Space-Earth Environmental Research Institute ของ Nagoya University ได้สร้างอุปกรณ์ Optical Mesosphere Thermosphere Imagers (OMTI) ขึ้นมาในปี ค.ศ. 1997 โดย Shiokawa et al. [2] เพื่อที่จะวิเคราะห์ความเป็นพลวัตของชั้นบรรยากาศด้านบนโดยผ่านทาง การปล่อย nocturnal airglow ตัวเครื่อง OMTI ประกอบไปด้วย all-sky cooled-CCD imagers, ตัวโฟโตมิเตอร์สแกนนิ่ง, ฟาบริเปรอตอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์และตัวโฟโตมิเตอร์อุณหภูมิ โดยในโครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอการตรวจจับภาพ PB โดยใช้ convolutional neural network [3] ของ YOLO version 3 [4] มาใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจจับภาพ ในที่นี้ จะกำหนดค่าเทรชโฮลด์เท่ากับ 0.4 และแสดงค่าว่า anomaly ที่ระดับ 40% ขึ้นไปเมื่อตรวจจับพบ PB เกิดขึ้นในรูปภาพ ซึ่งผลของการตรวจจับ PB แบบนี้มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้งานจริงได้

พลาสมาบับเบิลมักจะเกิดขึ้นที่บริเวณเส้นศูนย์สูตร จึงนิยมเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า equatorial plasma bubble หรือ EPB โดย EPB นี้เป็นโครงสร้างที่วางตัวขนานอยู่ในแนวของสนามแม่เหล็กโลกที่มีขนาดใหญ่ประเภทหนึ่ง ที่ถูกแสดงให้เห็นจากการหายไปของความหนาแน่นพลาสมาเมื่อเทียบกับปริมาณพลาสมาปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งจะถูกก่อดำเนินที่ด้านล่างของบริเวณ F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์เหนือเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก การเติบโตของมันนำไปสู่การก่อดำเนินของความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งขนาดสเกลโดยทั่วไปของมันมีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของสัญญาณวิทยุและก่อให้เกิดความแปรปรวนที่รวดเร็วในแอมพลิจูดเฟส การแพร่กระจายคลื่นและการโพลารไรซ์ของสัญญาณดาวเทียม อาทิเช่น ชินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ ส่วนประกอบของ EPB และความผิดปกติระดับเล็กที่เกี่ยวข้องได้ถูกเรียกกันโดยทั่วไปว่า equatorial spread-F หรือ ESF โดย EPBs เป็นภัยคุกคามที่ร้ายแรงต่อสัญญาณวิทยุข้ามชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งมีผลกระทบหลายอย่างในด้านการสื่อสารและการนำทาง อาทิ 1) การระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) การนำทางและความน่าเชื่อถือของการให้บริการระบบดาวเทียมนำทางสากล (GNSS) ถูกทำลายอย่างหนักเมื่อเกิด EPBs ซึ่งทำให้มีความผิดพลาดจากตำแหน่งที่ถูกต้องหลายสิบลเมตรหรือมากกว่า, 2) การขาดการติดต่อยานความถี่ UHF ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับเหตุการณ์ EPBs, 3) การเกิดชินทิลเลชันที่รุนแรงที่เกิดขึ้นจาก EPBs แอมพลิจูดของสัญญาณ GNSS อาจลดลงได้มากกว่า 25 dB ซึ่งสามารถก่อกวนวงจรติดตามคลื่นพาธของเครื่องรับ GNSS (ทำให้เกิดการ loss-of-lock ของสัญญาณ GNSS), ลดจำนวนของดาวเทียม GNSS ที่มีอยู่สำหรับการระบุพิกัด และนำไปสู่ความล้มเหลวในการสื่อสาร/การนำทาง เนื่องจากสัญญาณ GNSS ได้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในงานหลายด้านของสังคมไฮเทคโณโลยีสมัยใหม่ ความจำเป็นในการคาดการณ์การเกิดของ EPB และชินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ และการลดผลกระทบของพวกมันได้กลายเป็นประเด็นที่สำคัญกว่าที่เคยทำกัน แม้ว่าจะมีการพยายามทำนายชินทิลเลชันสัญญาณ

GNSS ที่ละติจูดต่ำ แต่ก็ยังไม่ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนแต่ต้องหาวิธีป้องกันและรับมือ EPB ที่เกิดขึ้นการใช้เทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเกต ยกตัวอย่างเช่น การวัดค่า Total Electron Content (TEC) และดัชนีชั้นไอโอโนสเฟียร์จากเครื่องรับ GNSS สัญญาณสะท้อนกลับจากเครื่องไอโอโนสเฟียร์ และเรดาร์วัดการเจิงคลื่นแบบโคฮีเร้นท์กับแบบนอนโคฮีเร้นท์ การถ่ายภาพอวกาศแอร์โกลว์ (airglow) และการวัดค่าแบบอินซิทู (in situ) จากดาวเทียมวงโคจรต่ำ EPB

ระบบระบุพิกัดสากล หรือ GPS (Global Positioning System) เป็นระบบดาวเทียมนำทางสากล (GNSS) ระบบแรกที่น่ามาใช้ในงานกันอย่างแพร่หลายในการระบุพิกัดและงานต่าง ๆ มากมาย ซึ่งประกอบไปด้วยดาวเทียมอย่างน้อย 32 ดวงที่โคจรอยู่ที่ระดับความสูง 20,200 กิโลเมตรจากพื้นโลก ในการส่งสัญญาณจีพีเอสนั้นเวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยระบบดาวเทียมนำทางสากล (GNSS) เป็นระบบการนำทางหรือการระบุพิกัดทั่วโลกที่อาศัยดาวเทียม ได้แก่ ระบบ GPS, ระบบ Galileo, ระบบ Beidou ฯลฯ แต่ในปัจจุบันนี้ ระบบ GNSS เริ่มนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ได้แก่ เกษตรอัจฉริยะที่ใช้เพื่อสร้างเส้นทางการขับเคลื่อนรถเกษตรอัตโนมัติ งานโยธา/ก่อสร้าง/ที่ดินที่ใช้เพื่อปกคลุมพื้นที่ที่ครอบคลุมด้วยการระบุพิกัดแบบแม่นยำสูง (precise point positioning หรือ PPP) อุตสาหกรรมยานยนต์ที่ใช้เพื่อสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ เป็นต้น ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นกิจกรรมที่ต้องใช้การระบุพิกัดที่แม่นยำสูงทั้งสิ้น อย่างไรก็ตาม การระบุพิกัดด้วยเครื่องรับ GNSS โดยทั่วไปยังมีความผิดพลาดเกิดขึ้นอยู่เสมอเนื่องจากสิ่งรบกวนภายนอกหลายประการ ได้แก่ ความผิดพลาดที่เกิดจากอุปกรณ์ของดาวเทียม ความผิดพลาดที่เกิดจากเครื่องรับ GNSS การบดบังสัญญาณของสิ่งกีดขวาง เวลาประวิงที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ รวมถึงเวลาประวิงที่เกิดจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ฯลฯ โดยปกติ ความผิดพลาดบางอย่างสามารถแก้ไขได้ด้วยการรับค่าแก้ไขจากสัญญาณดาวเทียม เช่น ความผิดพลาดที่เกิดจากอุปกรณ์ของดาวเทียม ความผิดพลาดที่เกิดจากเครื่องรับ GNSS การบดบังสัญญาณของสิ่งกีดขวาง เป็นต้น แต่ความผิดพลาดจากเวลาประวิงที่เกิดจากชั้นเป็นค่าที่เกิดขึ้นไม่แน่นอนและมีผลต่อความผิดพลาดในการระบุพิกัดมากที่สุด ในขณะที่ เราสามารถคำนวณค่าความผิดพลาดในการระบุพิกัดจากชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้วยค่าข้อมูลที่ได้รับได้จากเครื่องรับ GNSS 2 ความถี่ (dual-frequency GNSS receiver) แต่อุปกรณ์ที่ใช้เครื่องรับ GNSS (single-frequency GNSS receiver) เช่น โทรศัพท์มือถือถือ รถยนต์ หรืออากาศยาน เป็นต้น ไม่สามารถคำนวณค่าความผิดพลาดในการระบุพิกัดจากชั้นไอโอโนสเฟียร์นี้ได้ ในปัจจุบันนี้ มีเทคนิคที่สามารถแก้ไขค่าความผิดพลาดและระบุตำแหน่งด้วยความแม่นยำสูง ได้แก่ 1) เทคนิค PPP-RTK ที่ประมาณค่าพิกัดแม่นยำระดับต่ำกว่าเซนติเมตร โดยใช้ข้อมูลจากหลายสถานีฐาน (base stations) ที่นำมารวมกัน 2) เทคนิค DGPS (differential GPS) ที่ให้สถานีฐาน (Base) ที่ติดตั้งเครื่องรับ GNSS 2 ความถี่ส่งค่าแก้ไขไปยังตำแหน่งผู้ใช้งาน (Rover)

โครงการวิจัยนี้นำเสนอหลักการทำงานและสมรรถนะการระบุพิกัดที่แม่นยำของแบบจำลองโคลบูชาแบบใหม่ที่อาศัยวิธี MS-SHF [5] ซึ่งเป็นวิธี Refined Klobuchar model วิธีหนึ่งที่ดีกว่าวิธี Klobuchar model แบบเดิม จากผลการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า วิธี Refined Klobuchar model ที่นำเสนอสามารถที่จะปรับปรุงความแม่นยำในการระบุพิกัดได้อย่างชัดเจนโดยดูจากค่า APD ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 40.83 – 46.38% เมื่อเทียบกับ Original Klobuchar model และปรับปรุงค่า RMSE ที่ทำให้ค่าความผิดพลาดในการระบุพิกัดลดลงสูงถึง 1.26 – 1.41 เมตร ในที่นี้ ค่า AE (absolute error) ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 12% ส่วน AE สูงสุดมีค่าเท่ากับ 62% หลังจากนั้นคณะผู้วิจัยได้ตรวจสอบความแม่นยำในการระบุพิกัดที่ปรับปรุงขึ้น โดยทำการคำนวณหาค่าสมรรถนะดังกล่าวโดยอาศัยค่า AE เช่นเดียวกับ [5] พบว่า เปอร์เซ็นต์ของความแม่นยำในการระบุพิกัดได้รับการปรับปรุงดีขึ้นไม่ต่ำกว่า

50% ทั้งวันที่เจียบและวันที่เกิดพายุ เมื่อเทียบกับ Original Klobuchar model นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยได้ ทำการศึกษาการนำแบบจำลอง Klobuchar มาประยุกต์ใช้งานเพื่อคำนวณค่า STEC และนำไปใช้เพื่อการระบุ พิกัดที่แม่นยำมากขึ้นในสถานการณ์ที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก รวมทั้งเปรียบเทียบค่าดังกล่าวกับแบบจำลอง IRI และ GIM TEC ด้วย [6-8] ซึ่งจากผลการศึกษาได้แสดงให้เห็นว่า "เหนือพื้นที่ประเทศไทยนั้น การระบุพิกัดโดยอาศัย QZSS นั้นจะมีความแม่นยำในการระบุพิกัดมากที่สุดและมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ (GIM TEC) ในทางตรงข้าม ค่า VTEC ที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง IRI จะมีความผิดพลาดที่มากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า VTEC ในช่วงเวลากลางคืน

การระบุพิกัดที่อาศัยเครื่องรับ GNSS ที่แม่นยำนั้นเป็นเรื่องที่ทำหายเป็นอย่างมาก ซึ่งมีการประยุกต์ใช้ งานในทางปฏิบัติที่ชัดเจนและหลากหลายมากในตอนนี้ ปัญหาในทางปฏิบัติส่วนใหญ่ในขณะนี้สามารถที่จะถูก แก้ปัญหาได้สำเร็จโดยอาศัยระบบ GNSS ที่มีหลายระบบดาวเทียมและอาศัยเทคนิคการทำนายที่มีหลายวิธี ได้แก่

a) การทำนายด้วยคาลมานฟิลเตอร์ (Kalman Filter หรือ KF) โดย KF เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ ที่อาศัยวิธีการทำซ้ำ ใช้ค่าข้อมูลอินพุตที่เป็นลำดับกับเซตของสมการจำนวนมาก กระบวนการทำซ้ำสามารถ ประมาณค่าจริงของตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่ง และค่าอื่น ๆ ของวัตถุได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังมีค่าความ ผิดพลาด ความไม่แน่นอน และการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มที่ใหญ่จำกัดที่วัดได้อีกด้วย แบบจำลองแบบสโตแคสติกได้ นิยามคุณสมบัติของสัญญาณรบกวน และแบบจำลองแบบพลวัตได้นิยามพฤติกรรมตัวแปรสถานะ และเป็นปัจจัย หลักสำหรับสมรรถนะของวิธี KF ที่ผ่านมา

b) การทำนายด้วยวิธีวิเคราะห์สเปกตรัมเชิงเดี่ยว (Singular Spectrum Analysis หรือ SSA) จะถูก นำเสนอในงานวิจัยนี้ SSA เป็นเทคนิคการประมาณสเปกตรัมแบบไม่มีการกำหนดพารามิเตอร์ ซึ่งจะรวม องค์ประกอบของการวิเคราะห์ของอนุกรมทางเวลาแบบคลาสสิก ค่าสถิติแบบหลายตัวแปร โหมดพลวัต เรขาคณิต และการประมวลผลสัญญาณ เทคนิคนี้เป็นแบบจำลองการทำนายที่ได้รับการยอมรับวิธีนี้ที่ยังคงที่จะถูกนำไป ประยุกต์ใช้ในหัวข้องานต่าง ๆ มากมาย จากองค์ความรู้ที่ดีที่สุดที่มีอยู่ พบว่า ความสามารถในการประยุกต์ใช้ SSA สำหรับวิธี KF ยังไม่เคยที่จะถูกทดสอบกับค่าข้อมูลที่วัดได้ทั่วโลกเลย

ที่ผ่านมา Ansari และ Park [9] ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับ SSA ที่น่าสนใจแก่วงการ GNSS RTK คือ นำเสนอการระบุพิกัดจุดที่แม่นยำ (precise point positioning หรือ PPP) โดยอาศัย GNSS หลายระบบ (Multi-GNSS) และทำนายค่าความผิดพลาดการแพร่กระจายสัญญาณโดยใช้วิธี SSA เป้าหมายหลักของงานวิจัยนี้คือ พยายามที่จะลดความผิดพลาดสัญญาณรบกวนของสัญญาณ PPP ที่รับได้โดยการใช่วิธี SSA ร่วมกับการจำลอง เวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์และชั้นโทรโปสเฟียร์ รวมถึงทดสอบความเชื่อถือได้ของวิธี SSA สำหรับการรับค่า จากสัญญาณหลายกลุ่มของ GNSS หลายระบบ ได้แก่ GPS, GLONASS และ Beidou จากเครือข่าย MGEX ที่ตั้ง อยู่ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ หลังจากนั้น Ansari [10] ได้ทำการปรับปรุงวิธี RTK โดยอาศัยวิธีคาลมานฟิลเตอร์แบบ ปรับตัวได้และวิธีการทำนายแบบ SSA ในการประมาณสถานะแบบ 3 มิติ

ในโครงการวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยจึงได้นำเสนอวิธีการใหม่เพื่อปรับปรุงวิธี RTK ให้มีความแม่นยำในการระบุ พิกัดเรียลไทม์มากยิ่งขึ้น จำนวน 2 วิธี คือ

วิธีที่ 1 เป็นวิธีใหม่ที่มีการตรวจจับค่า PDOP (Position Dilution of Precision) ร่วมกับ Linear Kalman Filter สำหรับการระบุพิกัด RTK ที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น จากปัญหาที่พบในวิธี Network RTK (เครือข่าย CORS) จึงทำให้คณะผู้วิจัยมีแนวความคิดที่จะนำเสนอวิธีการใหม่ที่ใช้ในการปรับปรุงวิธี RTK ที่ใช้วิธี

network RTK ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์เชิงเส้นเพื่อกำจัดดาวเทียมที่มีผลต่อการระบุพิกัดที่แม่นยำโดยอาศัยค่า PDOP โดยเราพบว่าค่า weighted PDOP (WPDOP) กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (STD) ของความผิดพลาดจากการระบุพิกัด (ϵ/σ) มีความสัมพันธ์กันแบบไฮเปอร์โบล่าแบบสี่เหลี่ยม โดยระบบดาวเทียม GNSS ใดก็ตามที่มีค่า PDOP ที่สูงจะถูกตัดออกจากการคำนวณค่าปรับแก้พิกัดสำหรับโรเวอร์ ในกรณีที่ rover ตัวนั้นไม่สามารถที่จะได้ค่าปรับแก้พิกัดจาก CORS หรือว่า rover อาจอยู่ห่างจาก CORS มาก ซึ่งวิธีการใหม่นี้ที่นำเสนอมีประโยชน์เมื่อโรเวอร์กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วระดับต่าง ๆ และส่งผลทำให้การระบุพิกัดที่มีความแม่นยำทำได้ยากเนื่องจากจำนวนดาวเทียมที่มองเห็นได้มีการเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน โดยในที่นี้ จะทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการจำลองประสิทธิภาพการทำงานระหว่างวิธี RTK แบบเดิมกับวิธี RTK แบบใหม่ที่น่าสนใจ โดยอาศัยค่าข้อมูล RTK Drone โดยเทคนิคนี้จะสมมติว่า Base Station สามารถรับค่าปรับแก้พิกัดได้แต่สถานีฐานไม่มีอัลกอริทึมในการตัดดาวเทียมที่ได้รับผลกระทบต่าง ๆ จากสถานการณ์เลวร้ายที่เกิดขึ้นในระบบดาวเทียมนำทางหลายระบบ ดังนั้นอัลกอริทึมที่น่าสนใจจึงเป็นวิธีการที่น่าสนใจและมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากจะเป็นเงื่อนไขที่ตัดสินแบบเรียลไทม์สำหรับดาวเทียมแต่ละระบบที่ได้รับผลกระทบเชิงลบถูกตัดออกไปจากการพิจารณาค่าปรับแก้พิกัด ซึ่งจะ ทำให้พิกัดมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

สำหรับการศึกษา ความแม่นยำของการระบุพิกัดถูกวัดได้ด้วยค่า PDOP และมีความสัมพันธ์ในลักษณะที่แปรผกผันกับค่า PDOP กล่าวคือ ถ้า PDOP มีค่าที่สูง การวางตัว (geometry) ของดาวเทียมที่มองเห็นได้ก็จะไม่ดี ซึ่งจะนำไปสู่ความแม่นยำในการระบุพิกัดที่น้อย ในทางกลับกัน ถ้า PDOP มีค่าที่ต่ำ การวางตัว (geometry) ของดาวเทียมที่มองเห็นได้ก็จะดีและนำไปสู่ความแม่นยำในการระบุพิกัดที่น้อย ในกรณีของเครื่องรับ GNSS ที่หยุดนิ่งเมื่อตำแหน่งของเครื่องรับ GNSS หยุดนิ่ง ณ ขณะหนึ่งหรือเป็นเวลานาน การคำนวณค่า PDOP จะง่ายมาก แต่เมื่อไรก็ตามที่เครื่องรับ GNSS มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแบบแรนดัม นั่นก็หมายความว่า ตำแหน่งของมันก็จะกำลังเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งนั้นก็คือความสามารถในการมองเห็นดาวเทียม มุมเอlevation มุมอะซิมูท และท้ายที่สุดคือการวางตัวของดาวเทียมที่มองเห็นได้ก็กำลังจะเปลี่ยนแปลงเช่นกัน ในกรณีดังกล่าวเพื่อที่จะประมาณความคิดว่าความแม่นยำในการระบุพิกัดที่สูงขึ้นได้หรือไม่นั้นยังคงเป็นภาระกิจที่ยาก ซึ่งเพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว เราจะหาค่าตอบเชิงวิเคราะห์ของค่า weighted PDOP (WPDOP) ด้วยคาลมานฟิลเตอร์เชิงเส้น (กล่าวคือ เราต้องศึกษาผลกระทบของ WPDOP ที่มีต่อคาลมานฟิลเตอร์เชิงเส้น) เพื่อที่จะทำให้ความแม่นยำในการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ดีขึ้น และได้ทำการตรวจสอบสมรรถนะของพารามิเตอร์ DOP แบบต่าง ๆ การเปลี่ยนแปลงของ PDOP, GDOP, HDOP และ VDOP โดยเฉลี่ยตามจำนวนของดาวเทียมที่มองเห็นที่สถานีฐานในช่วงเวลาของการศึกษาจึงได้ถูกศึกษาพบว่า ค่า PDOP มีค่าที่ลดลงตามจำนวนของดาวเทียม GNSS ที่เพิ่มขึ้น ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันของค่า ϵ/σ และ WPDOP โดยการใช้ฟังก์ชันลอการิทึม KF ได้ถูกประมาณค่าได้พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϵ/σ และ WPDOP เป็นแบบ rectangular hyperbola ที่มีลักษณะความแบนราบที่น้อยลง กล่าวคือ “ความผิดพลาดจากการระบุพิกัดที่ลดลงเมื่อค่า WPDOP มีเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้น”

วิธีที่ 2 เป็นวิธีการ SSA ที่อาศัย Linear Kalman Filter-Based Singular Spectrum Analysis สำหรับ Network RTK โดยวิธีการนี้จะพิจารณาข้อมูล RTK drone ซึ่งประกอบไปด้วยตำแหน่งและความเร็วของโรเวอร์ (โดรน) มีความไม่แน่นอนในการเคลื่อนที่ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการถูกรบกวนด้วยพายุแม่เหล็กโลก การเกิด ionospheric delay gradients, plasma bubbles หรือสาเหตุต่าง ๆ จึงทำให้มีความเหมาะสมที่จะทดสอบความคงทนและความมีประสิทธิภาพของ linear Kalman filter เพื่อที่จะตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองหรือ

เทคนิคที่นำเสนอ ค่า root mean square (RMS) ได้ถูกประมาณค่าออกมาและได้แสดงไว้ในตารางที่ 7.1 พบว่า ค่า RMS หลังจากที่ใช้วิธี KF แล้วจะปรับปรุงความแม่นยำประมาณ 14.35% ในทิศเหนือ, 31.80% ในทิศตะวันออกและ 7.07% ในทิศแนวตั้ง และค่า RMS ของตำแหน่งที่ถูกรวมกันทุกค่าจะมีค่าสูงถึง 16.94% ทั้งนี้หลังจากที่ประยุกต์ใช้วิธี KF-SSA ที่นำเสนอ พบว่า ค่า RMS ได้ถูกประมาณค่าและสมรรถนะความแม่นยำในการระบุพิกัดแบบเรียลไทม์ได้ถูกปรับปรุงดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ค่า RMS ในทิศเหนือได้รับการปรับปรุงจาก 14.35% ของวิธี KF อย่างเดียวไปสู่ค่า 20.22% ด้วยวิธี KF-SSA (ปรับปรุงสูงถึง 41% ซึ่งแน่นอนถ้าเปรียบเทียบกับพิกัดจริงที่คลาดเคลื่อนไปก็แสดงว่าได้รับการปรับปรุงเกิน 50% อย่างแน่นอน) ค่า RMS ในทิศตะวันออกได้รับการปรับปรุงจาก 31.80% ของวิธี KF อย่างเดียวไปสู่ค่า 33.24% ด้วยวิธี KF-SSA (ปรับปรุงดีขึ้น 4.5%) ส่วนค่า RMS ในแนวตั้งได้รับการปรับปรุงจาก 7.07% ของวิธี KF อย่างเดียวไปสู่ค่า 13.20% ด้วยวิธี KF-SSA (ปรับปรุงดีขึ้น 86.7%) หลังจากนั้น เราได้รวมตำแหน่ง 3-D และค่าความผิดพลาดที่ประมาณได้ทั้งหมด พบว่า ค่า RMS ของตำแหน่งที่สังเกตได้ที่ 9.47 เมตร จะมีค่าที่ลดลงเท่ากับ 7.87 เมตรหลังจากที่ใช้วิธี KF และมีค่าที่ลดลงเท่ากับ 7.35 เมตรหลังจากที่ใช้วิธี KF-SSA แล้ว

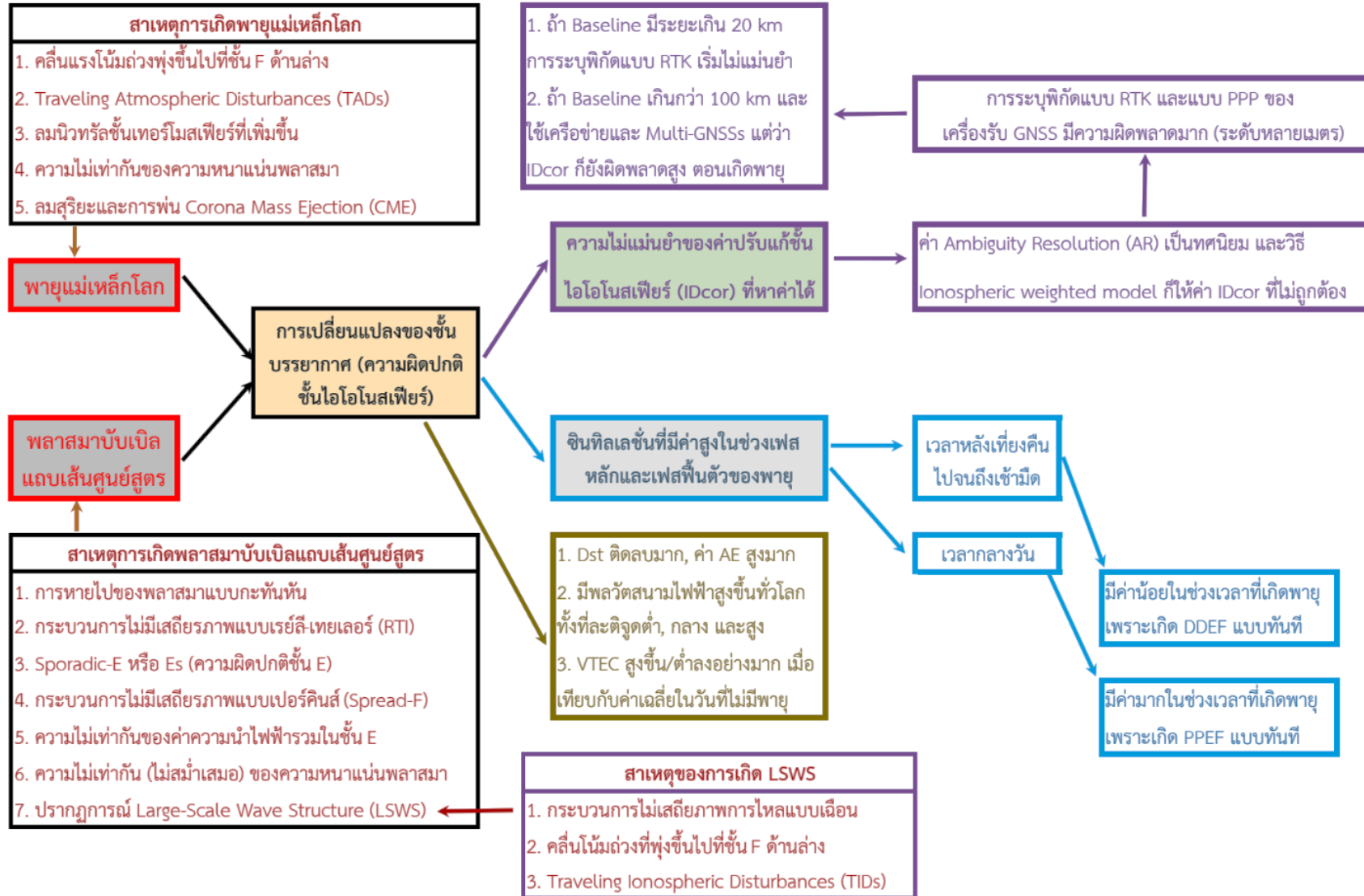
นอกจากนี้ ค่าข้อมูลรถยนต์เรียลไทม์นี้จะถูกนำมาใช้งานเพื่อยืนยันความถูกต้องของวิธี KF-SSA ที่นำเสนอในโครงการศึกษา นี้ จากการทดสอบประสิทธิภาพการทำงาน พบว่า ค่า RMS จากการระบุพิกัดด้วยวิธี KF ในทิศ (N, E, U) ที่มีค่าเท่ากับ (7.21, 4.42, and 4.20) เมตร มีค่าที่ลดลงได้หลังจากที่นำวิธี KF-SSA มาทดสอบการทำงาน โดยค่า RMS จะมีค่าที่ลดลงโดยมีค่าเท่ากับ (4.53, 3.9, 3.19) เมตร ตามลำดับ ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่า “ถึงแม้ว่าค่าความผิดพลาดในการระบุพิกัดแบบ RTK จะได้รับการปรับปรุงหลังจากใช้วิธี KF แล้วก็ตาม แต่ความแม่นยำของวิธี KF-SSA ที่นำเสนอก็ยังจะให้ค่าที่สูงกว่าความแม่นยำที่ได้จากการใช้วิธี KF วิธีเดียว” นอกจากนี้ เราก้ใช้ค่าข้อมูลตำแหน่งของเครื่องรับ GNSS ที่อยู่กับที่ ณ สถานี IISC ในเมือง Bangalore ที่ประเทศ India (ซึ่งเป็นสถานี IGS แห่งหนึ่งในภูมิภาคอินเดีย:- 13.02°N; 77.570°E) เสมือนเป็นข้อมูลชุดที่ 2 ที่ยืนยันความมีประสิทธิภาพในการระบุพิกัดของวิธีที่นำเสนอเช่นกัน ในกรณีนี้ เราใช้สัญญาณ GNSS ที่ได้จากระบบดาวเทียมนำทางภูมิภาคอินเดีย (IRNSS) ผลจากการศึกษาพบว่า ค่า RMS ในทิศ (N, E, U) มีค่า (14.36, 3.12 and 9.84) หลังจากที่ใช้วิธี KF เท่านั้น หลังจากที่ได้ใช้วิธี KF-SSA สมรรถนะความแม่นยำในการระบุพิกัดแบบเรียลไทม์ RTK ได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้นสูงถึง 23% สรุปได้ว่า เทคนิค KF-SSA ที่นำเสนอในโครงการศึกษานี้ทำงานได้ดีในการปรับปรุงความแม่นยำในการระบุพิกัดเหนือพื้นที่ประเทศไทย

นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยได้นำเสนอ Inforgraphic ที่แสดงภาพรวมโดยย่อของ “ผลการศึกษา สาเหตุผลกระทบที่แสดงถึงความเชื่อมโยงระหว่างการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่ส่งผลกระทบต่อความไม่แม่นยำในการระบุพิกัดแบบ RTK พร้อมกับไฟล์ชาร์ตที่แสดงแนวทางแก้ไขปัญหาทั้งหมดและการใช้งานวิธี KF-SSA ที่นำเสนอในโครงการวิจัยนี้ตั้งแสดงในรูปแบบที่ a - j และตารางที่ a - d

เอกสารอ้างอิง

[1] C. Nayak, L. Tsai, S. Su, I. Galkin, A.T.K. Tan, E. Nofri, and P. Jamjareegulgarn, “Peculiar features of the low-latitude and midlatitude ionospheric response to the St. Patrick's Day geomagnetic storm of 17 March 2015,” *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 121, no. 8, pp. 7941–7960, 2016.

- [2] Shiokawa, K., Otsuka, Y., Ogawa, T.: Propagation characteristics of nighttime meso-spheric and thermospheric waves observed by optical mesosphere thermosphere imagers at middle and low latitudes. *Earth Planet Space*, 61, 479–491, (2009); <https://doi.org/10.1186 /BF03353165/>.
- [3] W. Srisamoodkham, K. Shiokawa, Y. Otsuka, K. Ansari, and P. Jamjareegulgarn, “Detecting Equatorial Plasma Bubbles on All-Sky Imager Images Using Convolutional Neural Network,” in: *The 3rd International Conference on Communication and Intelligent Systems (ICCIS 2021)*, December 18-19, 2021. (OUTCOME OF THIS PROJECT)
- [4] How to Perform Object Detection with YOLOv3 in Keras, <https://machinelearningmastery.com/how-to-perform-object-detection-with-yolov3-in-keras/>, last accessed 2020/11/29.
- [5] D. V. Ratnam, J. R. K. K. Dabbakuti, and N. V. V. N. J. S. Lakshmi, “Improvement of Indian-Regional Klobuchar Ionospheric Model Parameters for Single-Frequency GNSS Users,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 15, no. 7, pp. 971-975, July 2018, doi: 10.1109/LGRS.2018.2827081.
- [6] H. W. Seok, K. Ansari, C. Panachai, and P. Jamjareegulgarn, “Individual performance of multi-GNSS signals in the determination of STEC over Thailand with the applicability of Klobuchar model,” *Advances in Space Research* vol. 69, no. 3, pp. 1301-1318, 2022; doi: 10.1016/j.asr.2021.11.025 (OUTCOME OF THIS PROJECT)
- [7] W. Srisamoodkham, K. Ansari, and P. Jamjareegulgarn, “Applicability of Klobuchar Model for STEC Estimation over Thailand Region,” in: *The 3rd International Conference on Communication and Intelligent Systems (ICCIS 2021)*, December 18-19, 2021. (OUTCOME OF THIS PROJECT)
- [8] W. Srisamoodkham, K. Ansari, and P. Jamjareegulgarn, “Positioning Comparison Using GIM, Klobuchar, and IRI-2016 Models during the Geomagnetic Storm in 2021,” in: *The 3rd International Conference on Data Science and Applications (ICDSA 2022)*, March 26-27, 2022. (OUTCOME OF THIS PROJECT)
- [9] K. Ansari and K. D. Park, “Multi constellation GNSS precise point positioning and prediction of propagation errors using singular spectrum analysis,” *Astrophys. Space Sci.*, vol. 363, no. 258, 2018.
- [10] K. Ansari, “Real-Time Positioning Based on Kalman Filter and Implication of Singular Spectrum Analysis,” *IEEE Geosci. Remote. Sens.*, vol. 18, no. 1, pp. 58-61, 2021.
- [11] W. Srisamoodkham, K. Ansari, and P. Jamjareegulgarn, “Improvement of Real-Time Kinematic Positioning Using Kalman Filter and singular Spectrum Analysis during Geomagnetic Storm for Thailand sector,” in: *The 3rd International Conference on Data Science and Applications (ICDSA 2022)*, March 26-27, 2022. (OUTCOME OF THIS PROJECT)
- [12] K. Ansari and P. Jamjareegulgarn, “Effect of PDOP on performance of Kalman Filters for GNSS based Real-time Positioning,” *During second revision of GRSL Journal* - (OUTCOME OF THIS PROJECT)



รูปที่ a ภาพรวมโดยสรุปของสาเหตุและผลกระทบของพายุแม่เหล็กโลกและพลาสมาบับเบิลที่นำไปสู่จินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์และความไม่แม่นยำในการระบุพิกัด RTK ของเทคโนโลยี 5G, UAV และอุปกรณ์อื่น ๆ พร้อมทั้ง จุดสังเกตก่อนเกิดความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์และจินทิลเลชันที่รุนแรง



รูปที่ 6 ภาพรวมโดยสรุปของสาเหตุและผลกระทบที่เกิดขึ้นของพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่นำไปสู่ความผิดปกติที่สามารถใช้แจ้งเตือนความผิดปกติชั้นบรรยากาศและใช้เป็นตัวบ่งชี้เพื่อจำแนกเหตุการณ์และแก้ปัญหาความผิดพลาดที่เกิดจากความไม่แม่นยำในการระบุพิกัดแบบ RTK ได้

สถานะที่เริ่มเกิดพายุไอโอโนสเฟียร์เชิงบวก
1. ค่าดัชนี Kp มีค่าที่สูงขึ้น
2. องค์ประกอบสนามแม่เหล็ก คือ ค่ากระแสไฟฟ้าวงแหวน Asym-H ที่เพิ่มขึ้น กับ Sym-H ที่ลดลง
3. IMF-Bz มีค่าลดลงและเคลื่อนตัวไปทางทิศใต้
4. การเพิ่มขึ้นของ PPEF ที่มีสนามไฟฟ้าเคลื่อนตัวไปทางทิศตะวันออก
5. การยกตัวสูงขึ้นของความสูงชั้น F (hmF2) และค่า TEC
6. ค่า Dst ตีลบมาก และ ค่า AE เพิ่มขึ้นสูงมากอย่างชัดเจน

เครื่องมือบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและ EPB (1)
1. ดัชนี Kp (ค่าพายุแม่เหล็กโลก) - G scale
2. ค่าพายุรังสีสุริยะ (Radiation Storm) - S scale
3. ค่าความผิดปกติคลื่นวิทยุ (Radio Blackout) - R scale
4. ดัชนี Planetary A-index (Ap index)
5. ค่า F10.7 Solar Flux
6. จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ (Mean SunSpot Number)
7. ค่าความน่าจะเป็นในการเกิด Range-type Spread-F
8. ค่า Disturbance Storm Time (Dst) - เว็บไซต์ Kyoto-u
9. แผนภาพจาก All-Sky Airglow Imagers (ASIs)
10. แผนภาพจาก VHF Radar/EAR ตรวจจับ EPBs, FAIs etc.
11. GNSS receivers วัดค่า TEC และ Scintillation (S4)
12. ผลการทำนายการเกิดพลาสมาบับเบิล
13. ปริมาณพลาสมา (Ne) ของดาวเทียม SWARM
14. ค่า O/N2 ชั้นเทอร์โมสเฟียร์จาก GUVI ดาวเทียม TIMED

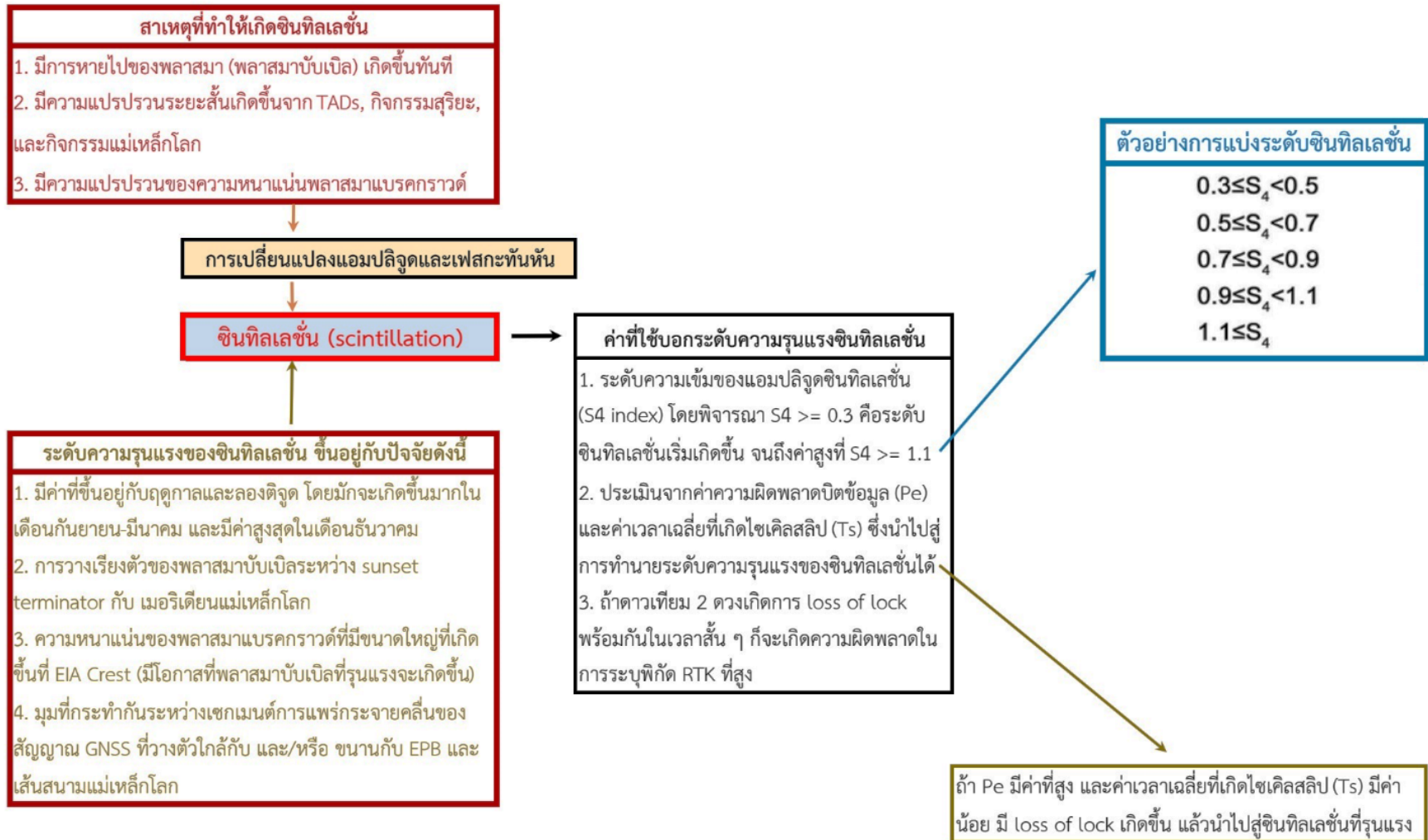
ปัจจัยที่ส่งผลต่อความรุนแรงของซินทิลเลชัน
1. ความหนาแน่นของไอโอโนสเฟียร์แบคราวด์
2. ความไม่เท่ากันของความหนาแน่นพลาสมา
3. ความหนาของโครงสร้างที่ผิดปกติ
4. ความแปรปรวนความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ผิดปกติ
5. เวลาท้องถิ่น, ฤดูกาล และกิจกรรมสุริยะ

สถานะชั้นไอโอโนสเฟียร์แบคราวด์
1. ความหนาแน่นของไอโอโนสเฟียร์แบคราวด์
2. ความสูงของชั้น F (hmF2, hF2)
3. การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากพลาสมาพลาสมาไฟฟ้าและลมโซลาร์ข้ามเส้นศูนย์สูตร
4. Traveling Ionospheric Disturbances (TIDs)
5. ปรากฏการณ์ Sporadic-E (Es) และ Spread-F
6. ระดับความรุนแรงของ EIA
7. ความหนาแน่นอิเล็กตรอนของชั้น F ด้านล่าง

เครื่องมือบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและ EPB (2)
15. Digisonde หรือ FMCW Ionosonde
16. แบบจำลอง IRI, NeQuick, IRTAM, IRI-Plus
17. บอร์ดวัดความหนาแน่นไอออน in situ บนดาวเทียม ROCSAT-1 และ C/NOFS
18. Magnetometer และเครื่องวัดสนามแม่เหล็กโลก (Sym-H, Asym-H, ค่า Dst)
19. GDRB (GNU Digital Beacon Receiver) ของ Kyoto University
20. Incoherent (Coherent) Scatter Radars เช่น EISCAT (SuperDARN)
21. เว็บไซต์ NOAA, ฐานข้อมูล GIRO, เว็บไซต์ค่า Dst ของ Kyoto U. เป็นต้น

ผลกระทบของ EPBs ที่มีต่อ 5G, UAV
1. ความผิดพลาดในการระบุพิกัด RTK ระดับหลายเมตร (4-10 เมตร)
2. การขาดการติดต่อยาน UHF
3. ความล้มเหลวการสื่อสาร/การนำทาง
4. การเกิดซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรง (แอมพลิจูดและเฟสเปลี่ยนทันที)
5. เกิด loss of lock (lol) ของ GNSS
6. จำนวนของดาวเทียม GNSS ที่ใช้ในการระบุพิกัดมีจำนวนที่ลดลง

รูปที่ c ภาพรวมโดยสรุปของสถานะที่เริ่มเกิดพายุไอโอโนสเฟียร์เชิงบวก เครื่องมือบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิล ปัจจัยที่ส่งผลต่อความรุนแรงของซินทิลเลชัน รวมถึงผลกระทบของพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดแบบ RTK ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G, UAV และอุปกรณ์อื่น ๆ



รูปที่ d ภาพรวมโดยสรุปของสาเหตุที่ทำให้เกิดซินทิลเลชัน ปัจจัยที่ส่งต่อระดับความรุนแรงของซินทิลเลชัน ตัวบ่งชี้ระดับความรุนแรงของซินทิลเลชัน ตัวอย่างการแบ่งระดับซินทิลเลชัน ซึ่งสามารถจะนำมาใช้เป็นการแจ้งเตือนและแนวทางป้องกันความผิดพลาดการระบุพิกัดที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G, UAV และอุปกรณ์อื่น ๆ ได้

การระบุพิกัดแบบ RTK ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G อากาศยานไร้คนขับ หรือ อุปกรณ์อื่น ๆ

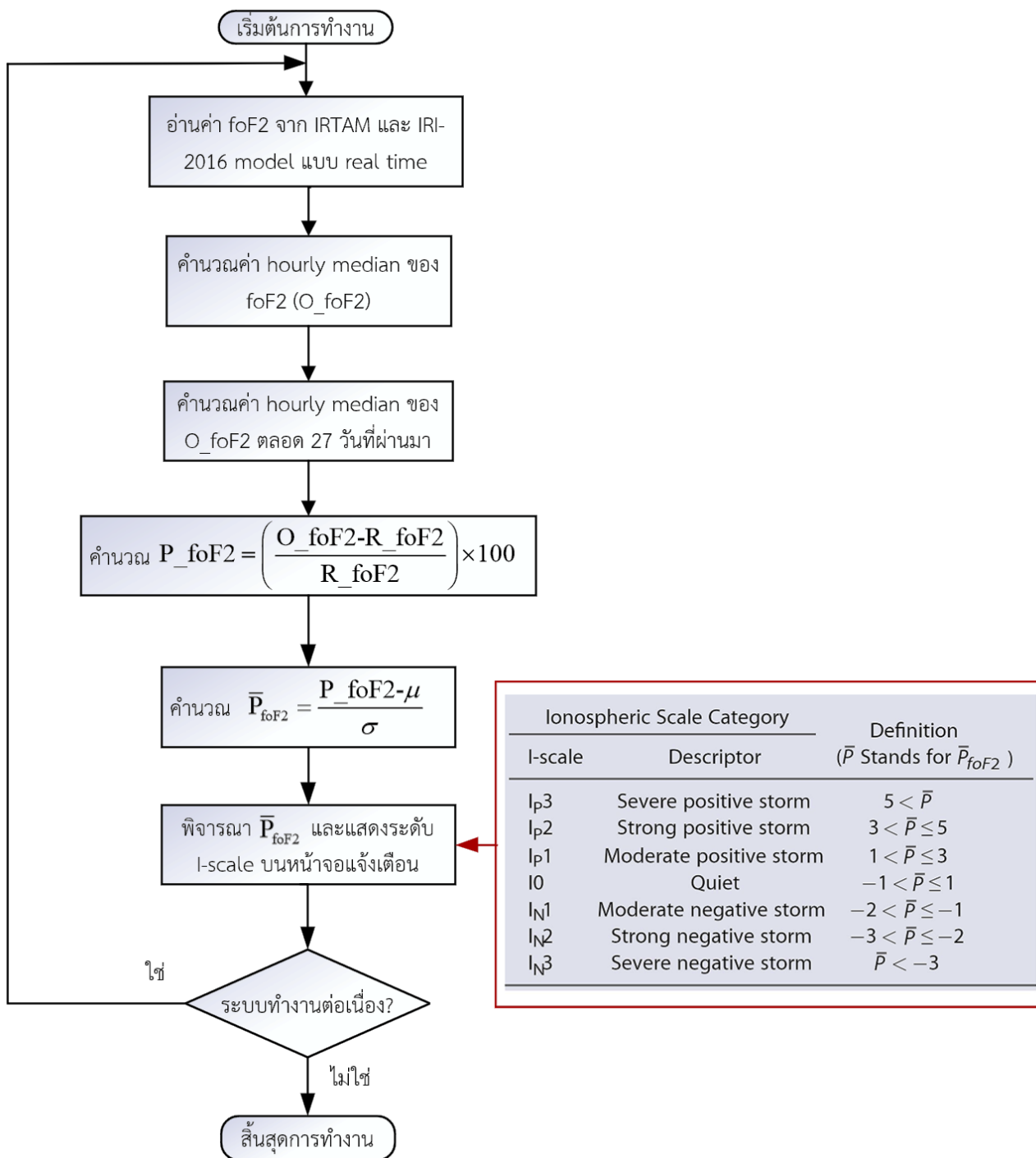
การแก้ปัญหาการระบุพิกัดแบบ RTK ด้วยวิธีใหม่ เพื่อให้มีความแม่นยำ

1. นำเสนอวิธีการปรับปรุง RTK แบบใหม่ โดยอาศัยอัลกอริทึมใหม่ เช่น singular spectrum analysis (SSA) หรือ Empirical Orthogonal Function (EOF) เพื่อลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพบรรยากาศในบทความของ Ansari (2020)
2. นำเสนอวิธีการปรับปรุง RTK แบบใหม่ โดยให้ผู้ใช้รับค่า IDcor มากกว่า 1 สถานีอ้างอิง ทำให้สามารถรับค่าปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์ (IDcor) ที่ถูกต้องอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นเทคนิคใหม่ที่จะให้บริการในธุรกิจใหม่ ๆ มีการติดตั้ง (กำหนด) สถานีอ้างอิงเป็นช่วง ๆ เพื่อที่จะส่ง IDcor ที่ถูกต้องไปให้กับผู้ใช้
3. นำเสนอวิธี Klobuchar model แบบใหม่ด้วย Multishell-Spherical Harmonics Function (MS-SHF) สำหรับความถี่เดียว โดย RMSEs ได้รับการปรับปรุงไม่ต่ำกว่า 60% เมื่อเทียบกับ Klobuchar model วิธีเดิม ในบทความ Ratnam และคณะ (2018) - ซึ่งเป็นวิธีใหม่ที่ลดค่า Range errors ให้ต่ำกว่า 50% ได้แน่นอน
4. นำเสนออัลกอริทึมใหม่ที่มีการกำจัดเทอมที่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงเวลาออกไป ทำให้ได้ค่า IDcor แม่นยำสูง
5. มีการแก้ปัญหาที่สถานีอ้างอิง 2 ขั้นตอน คือ 1) การรู้พิกัดที่แน่นอนของสถานีอ้างอิงเพื่อใช้ส่งค่า IDcor ที่แม่นยำ 2) หาค่า IDcor_network โดยใช้วิธี GFLC กับค่าข้อมูลเฟสคลื่นพาห์ 2 ความถี่และสมการ ROT (Rate of TEC change) ในบทความของ Paziewski และ Sieradzki (2020)
6. มีการแก้ปัญหาที่ผู้ใช้ (โรเวอร์) 4 ขั้นตอน คือ 1) ประมาณค่า IDcor ไปยังผู้ใช้งาน 2) หาค่า IDcor จาก IDcor_network ที่ได้จากข้อ 4(2), 3) หาค่า IDcor จากวิธี RTC, และ 4) หาค่า IDcor ที่อาศัยหลายสถานีอ้างอิงและ Multi-GNSSs ด้วยค่า AR ที่เป็นเลขจำนวนเต็ม ในบทความ Paziewski และ Sieradzki (2020)

ผลที่ได้หลังจากที่มีการแก้ไขปัญหา IDcor ด้วยวิธีใหม่

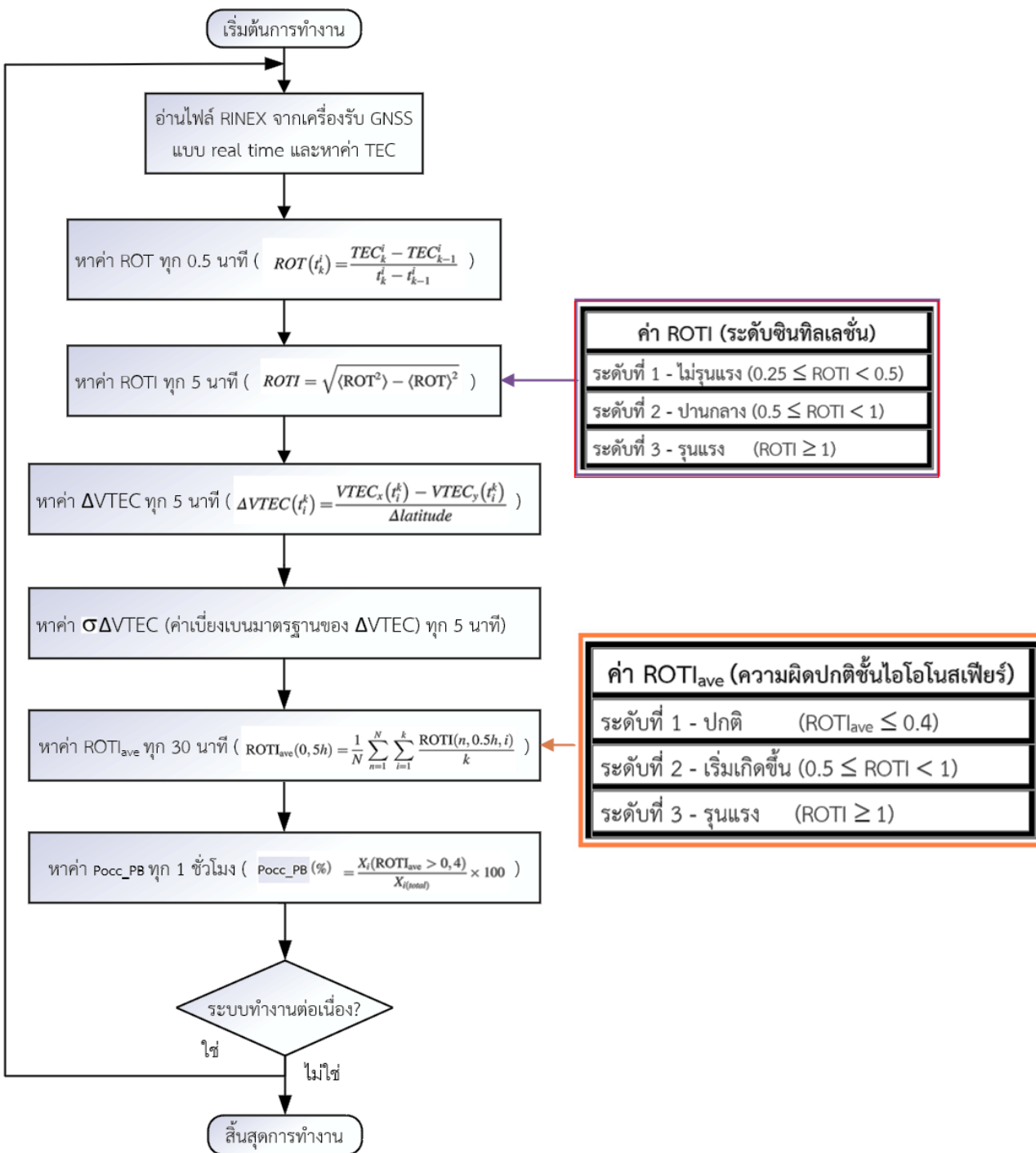
1. ระยะทางของ Baseline มีค่าสูงขึ้นมาก (123-201 km)
2. จำนวนดาวเทียมทั้งหมดที่ใช้งานได้เพิ่มขึ้น 11-21 ดวง
3. ค่า PDOP (P dillusion of positioning) < 1.5 เสมอ
4. ค่าเฉลี่ยของ time to fix (TTF) มีค่าที่ลดลงมาก
5. อัตรา AR success rate (ASR) มีค่าสูงขึ้นมาก ไม่ต่ำกว่า 90% หลังจากประมวลผลไปแล้ว 30 epochs

รูปที่ e แนวทางการแก้ปัญหาการระบุพิกัดแบบ RTK ด้วยวิธีใหม่และผลที่ได้รับหลังจากที่มีการแก้ไขปัญหาค่าปรับแก้เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้วยวิธีใหม่ เพื่อให้มีความแม่นยำในการระบุพิกัดแบบ RTK ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G, UAV และอุปกรณ์อื่น ๆ

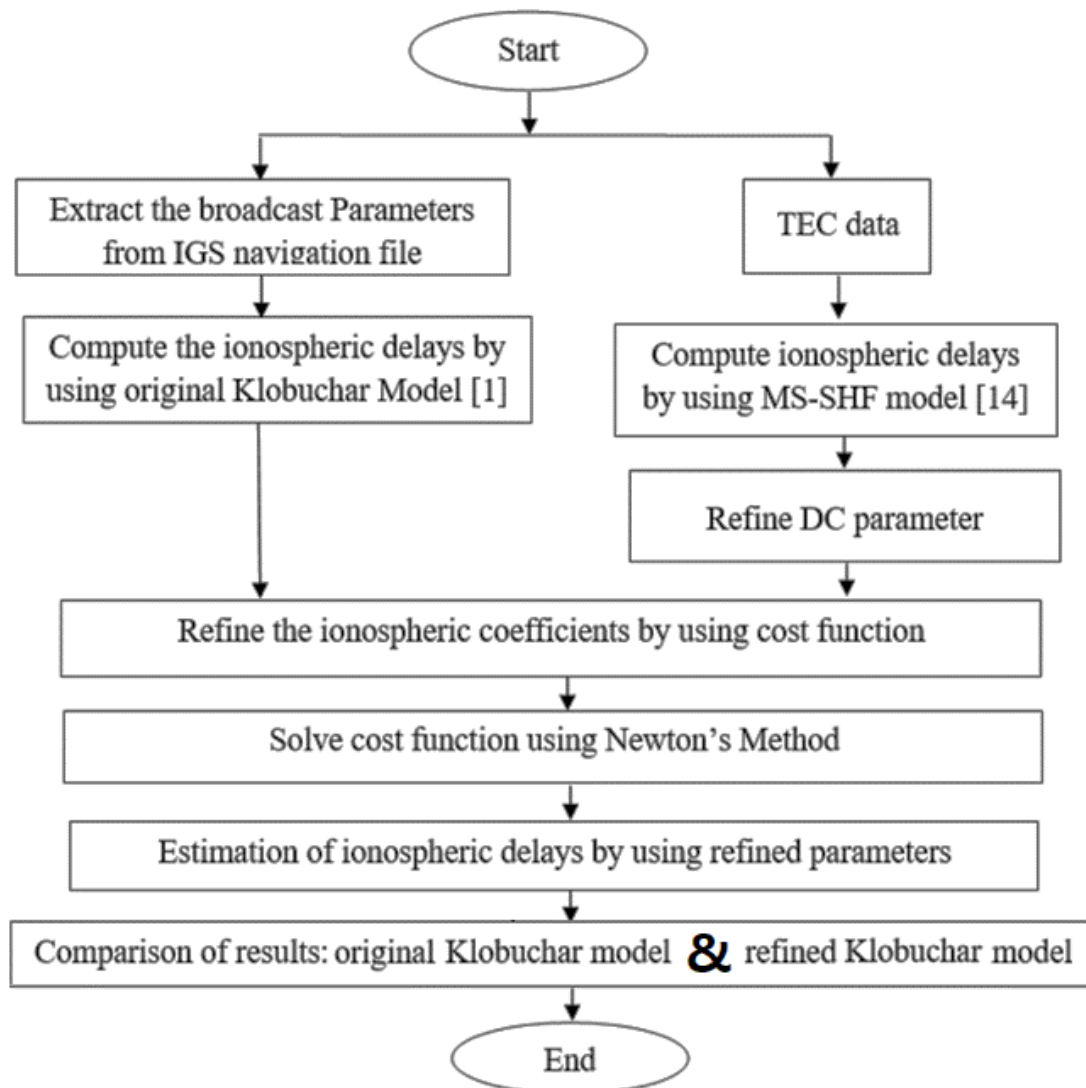


รูปที่ f แนวทางการแก้ปัญหาการระบุพิกัดแบบ RTK ด้วยการตรวจจับพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์โดยอาศัยการดึงค่า foF2 ออนไลน์มาจากแบบจำลอง IRI-2016 model และ IRTAM แล้วคำนวณ I-scale เพื่อบ่งชี้ความผิดปกติของชั้นบรรยากาศที่จะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการระบุพิกัด RTK ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G, UAV และอุปกรณ์อื่น ๆ

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ



รูปที่ ๑๖ แนวทางการแก้ปัญหาการระบุพิกัดแบบ RTK ด้วยการคำนวณค่าบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ ได้แก่ ROT, ROTI, ROTI_{ave}, $\sigma\Delta VTEC$, $\Delta VTEC$ และค่าความน่าจะเป็นการเกิดพลาสมาบับเบิล (ค่าบ่งชี้เหล่านี้หาค่าจาก TEC ที่ได้จาก RINEX files ของเครื่องรับ GNSS แบบออนไลน์) เพื่อบ่งชี้ความผิดปกติของชั้นบรรยากาศที่จะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการระบุพิกัด RTK ที่มีอยู่ใน 5G, UAV และอุปกรณ์อื่น ๆ



รูปที่ 4 โพลีชาร์ตแสดงหลักการทำงานของวิธี Multishell-Spherical Harmonics Function (MS-SHF) เพื่อทำให้ความแม่นยำในการระบุพิกัดดีขึ้นไม่น้อยกว่า 50% เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองโคลบูชาแบบเดิม [14-16]

Form for asking plasma bubble images

This form was aimed to receive the requests for plasma bubble images. The administrator will forward this form to Nagoya University in order to asking the permission again. However, the copyright owners will decide for whether the permissions will be allowed or not. Normally, if the plasma bubble images on the specific periods are allowed and sent to the requesters, the co-authors from Nagoya University should be appeared on those manuscripts as partial contributors.

Note: There are 4 stations, including Kototabang, Indonesia; Hainan, China; Ishigaki Island, Japan; and Chumphon, Thailand

punyawij.ja@kmitl.ac.th [Switch account](#)

* Required

Email *

Your email _____

Name-Surname: *

Your answer _____

Organization: *

Your answer _____

Dates/Durations for asking plasma bubbles (DD/MM/YY) *

Your answer _____

Identify the stations and the countries:

Your answer _____

The objectives for asking plasma bubbles *

Your answer _____

A copy of your responses will be emailed to the address you provided.

[Submit](#) [Clear form](#)

Never submit passwords through Google Forms.

รูปที่ i แบบฟอร์มร้องขอภาพสภาวะอวกาศ (พลาสมาบับเบิล) ที่ตรวจจับได้ อุปกรณ์ OI 630.0 nm all-sky airglow imagers ที่ติดตั้งที่ประเทศอินโดนีเซีย, ประเทศญี่ปุ่น, ประเทศจีน และประเทศไทย

หมายเหตุ แบบฟอร์มนี้ทางคณะผู้วิจัยต้องขออนุญาตจาก Nagoya University อีกครั้งหนึ่ง ก่อนจะส่งมอบภาพเหล่านั้นในช่วงเวลาที่ต้องการให้ได้

ตารางที่ a สรุปรวันที่ตรวจจับพบพลาสมาบับเบิลและไม่พบพลาสมาบับเบิลที่ต่างประเทศ 3 สถานี (ประเทศอินโดนีเซีย, ประเทศจีน, ประเทศญี่ปุ่น) และสถานีเรดาร์พระจอมเกล้าชุมพร ประเทศไทย

สถานีโกโตตะบัง, ประเทศอินโดนีเซีย	
030301	มีพลาสมาบับเบิล
030303	มีพลาสมาบับเบิล
030306	มีพลาสมาบับเบิล
040325	มีพลาสมาบับเบิล
040326	มีพลาสมาบับเบิล
040327	มีพลาสมาบับเบิล
040420	มีพลาสมาบับเบิล
040611	มีพลาสมาบับเบิล
040617	มีพลาสมาบับเบิล
040623	มีพลาสมาบับเบิล

สถานีเกาะไหหนาน, ประเทศจีน	
101001	มีพลาสมาบับเบิล
111019	มีพลาสมาบับเบิล
111020	มีพลาสมาบับเบิล
111021	มีพลาสมาบับเบิล
111022	มีพลาสมาบับเบิล
111023	มีพลาสมาบับเบิล
111024	มีพลาสมาบับเบิล
111116	มีพลาสมาบับเบิล
120126	มีพลาสมาบับเบิล
120221	มีพลาสมาบับเบิล
120416	มีพลาสมาบับเบิล
120417	มีพลาสมาบับเบิล
120419	มีพลาสมาบับเบิล

สถานีเกาะอิซิงากิ, ประเทศญี่ปุ่น	
150313	มีพลาสมาบับเบิล
150314	มีพลาสมาบับเบิล
150316	มีพลาสมาบับเบิล
150414	มีพลาสมาบับเบิล

สถานีเรดาร์พระจอมเกล้าชุมพร, ประเทศไทย	
210402	มีพลาสมาบับเบิล
210512	มีพลาสมาบับเบิล

หมายเหตุ

- ตัวเลข 6 หลัก แทน YY/MM/DD (ปี/เดือน/วัน) ที่มีพลาสมาบับเบิลเกิดขึ้น
- โดยวันที่พิจารณานี้เป็นวันที่มีค่า K_p , ค่า Dst และค่า $F10.7$ สูงที่อาจจะส่งผลที่ก่อให้เกิดพายุแม่เหล็กโลก และ/หรือ พายุ TEC และ/หรือ พายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ แล้วนำไปสู่ การเกิดพลาสมาบับเบิล, การเกิดซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ และความผิดพลาดในการระบุพิกัดแบบ RTK และ PPP ได้
- สำหรับวัน/เดือน/ปี อื่น ๆ ที่ไม่ปรากฏนั้นอาจจะมีสาเหตุหลายประการ เช่น
 - เป็นวันที่เจียบ (ไม่มีความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์) หรือ เป็นวันซ่อมบำรุงประจำปี
 - เป็นวันที่อุปกรณ์เสียหายใช้งานไม่ได้และไม่ได้รับการซ่อมทันที จึงทำให้ไม่มีข้อมูล
 - ประเด็นหลัก คือ คณะผู้วิจัยได้รับค่าข้อมูลจากผู้ประสานงานกับ Nagoya University เฉพาะวันเหล่านั้นที่ปรากฏพบพลาสมาบับเบิลเท่านั้น ส่วนวันอื่น ๆ ไม่พบตามข้อมูลที่ได้รับแจ้งมา ทั้งนี้ ตั้งแต่วันที่ 21 กันยายน 2564 เป็นต้นมา คณะผู้วิจัยเริ่มเก็บภาพเข้ามาไว้ในคลังข้อมูลภาพ ASI ของทั้ง 4 สถานีแล้ว

ตารางที่ b พารามิเตอร์การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้ (proxies) ความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ และเว็บไซต์ที่ใช้ดึงค่ามาแสดงในหน้าเว็บที่ 2 “Atmospheric Changes and Plasma Bubble Prediction for RTK Positioning of 5G Technology” ของโครงการศึกษา ที่นำเสนอนี้ โดยคลิกเข้าไปดูที่เว็บข้างล่างนี้

[“https://sites.google.com/view/acpb-rtk-5g/atmospheric-changes-and-epbs?authuser=0”](https://sites.google.com/view/acpb-rtk-5g/atmospheric-changes-and-epbs?authuser=0)

ลำดับ	พารามิเตอร์การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและการทำนายการเกิดพลาสมาบับเบิล	สเกลที่ใช้
1	ดัชนี Kp (ค่าพายุแม่เหล็กโลก)	G scale
	https://services.swpc.noaa.gov/text/3-day-forecast.txt	
2	ค่าพายุรังสีสุริยะ (Solar Radiation Storm)	S scale
	https://services.swpc.noaa.gov/text/3-day-forecast.txt	
3	ค่าความผิดปกติคลื่นวิทยุ (Radio Blackout)	R scale
	https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux-dynamic-plot	
4	ค่า Disturbance Storm Time (Dst)	
	http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/20211/index.html	
5	ดัชนี Planetary A-index (ap index)	
	https://www.swpc.noaa.gov/products/3-day-geomagnetic-forecast	
6	ค่า F10.7 Solar Flux (ใช้ค่ากลาง - Adjusted Flux เป็นตัวแทน)	
	https://www.spaceweather.gc.ca/forecast-prevision/solar-solaire/solarflux/sx-5-flux-en.php	
7	จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ (Mean SunSpot Number หรือ SSN)	
	ในโครงการศึกษา นี้ ค่า Mean SunSpot Number จะถูกคำนวณหาค่าโดยประมาณ จากค่าที่ 6 F10.7 Solar Flux (คณะผู้วิจัยเป็นผู้นำเสนอสมการใหม่ในการหาค่าเอง)	
8	ผลทำนายการเกิดพลาสมาบับเบิลด้วยวิธี KNN (K-nearest neighboring)	
	ในโครงการศึกษา นี้ จะใช้วิธี KNN ในการทำนายการเกิดพลาสมาบับเบิล ซึ่งเป็นแบบ supervised machine learning โดยชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบคือ ค่า Kp, ค่า Dst, ค่า ap, ค่า SSN และ ค่า F10.7 และมีเฉลยคือค่าความน่าจะเป็นในการเกิดและไม่เกิด Range-type Spread-F (RSF) ที่สเกลได้จากไอโอโนแกรมที่ สจล. ชุมพร ในช่วงปี 2013-2014 ในที่นี้ การเกิด/ไม่เกิด RSF แทนการเกิด/ไม่เกิดพลาสมาบับเบิล ตามลำดับ	
9	ผลสรุปสภาพอวกาศและระดับความรุนแรงของพายุแม่เหล็กโลก ณ ขณะนี้	
	จากองค์ความรู้ที่ดีที่สุดของคณะผู้วิจัย พบว่า ผลสรุปสภาพอวกาศ ณ ขณะใดขณะหนึ่ง ควรจะพิจารณาค่า Kp, ค่า Dst และค่า F10.7 มากที่สุด ซึ่งจะสะท้อนให้เห็นถึงความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์, พายุแม่เหล็กโลกและพลาสมาบับเบิล เป็นต้น	
10	การประมวลผลภาพ All-Sky Imagers เพื่อบอกการเกิด/ไม่เกิดพลาสมาบับเบิล	
	ในโครงการศึกษา นี้ จะใช้วิธี Convolution Neural Network กับภาพ ASIs ที่ตรวจจับและบันทึกได้ โดยระบบ ASIs จะเริ่มทำงานตั้งแต่วเวลา 18:30-05:30 น.	

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

1. เริ่มต้นจากการ 'fix' ตำแหน่งของเครื่องรับ GNSS โดยปกติโดยอาศัย code phase แล้วทำการกำจัดค่าความผิดพลาดโดยอาศัยวิธี double differencing หรือ การ error modelling
2. มีการแก้ปัญหา carrier phase ambiguity ซึ่งเป็นปัญหาหลักสำหรับเวลาที่ใช้ในการลู่เข้า
3. วิธี code phase มักจะมีความแม่นยำในการระบุพิกัดที่น้อยกว่าวิธี carrier phase หลายเท่า ดังนั้นการระบุพิกัดแม่นยำสูง (5G RTK, PPP และ RTK-PPP) จึงอาศัย carrier phase
4. มีการใช้งานระบบ GPS L1 C/A มาตรฐาน ได้แก่ a) แบบ code phase: chip length เท่ากับ ~300 m และ b) แบบ carrier phase: cycle length เท่ากับ ~0.2 m
5. เครื่องรับ GNSS ที่มีความแม่นยำสูงจะทำการวัดเฟสของคลื่นพาห์ โดยมีข้อดีหลายประเด็น ดังนี้
 - a) สามารถจะปรับพิกัดให้ละเอียดขึ้นได้ (finer scale)
 - b) เกิดสัญญาณรบกวนทางเฟสที่น้อยลง
 - c) มีความแม่นยำในการระบุพิกัดที่สูงขึ้น (น้อยกว่า 10 cm)
6. ความยากที่ต้องจัดการคือ ค่า AR (ambiguity resolution) โดยกำหนดใช้ Code: ~300 km, carrier: 20 cm โดยเริ่มใช้กับ high-end equipment ตั้งแต่ปลายปีทศวรรษที่ 1990
7. GNSS ที่แม่นยำสูงเริ่มใช้งานในปี 2010 โดยใช้งานในกลุ่ม high-end niche market เท่านั้น ได้แก่ งานสำรวจ, วิทยาศาสตร์ ฯลฯ แต่เครื่องรับ GNSS มีราคาที่สูงและต้องเสียค่าสมาชิกรายปีที่ค่อนข้างสูง

รูปที่ j ภาพรวมของ GNSS มาตรฐาน (ระบบเดิม) และ GNSS ที่แม่นยำสูงสำหรับเทคโนโลยี 5G

ตารางที่ c ภาพรวม GNSS ที่แม่นยำสูงที่อาศัยการระบุพิกัด RTK, PPP และ RTK-PPP สำหรับเทคโนโลยี 5G

ลำดับ	หัวข้อปัญหาและประเด็นที่ต้องแก้ไขและพัฒนา	ข้อจำกัดความแม่นยำในอดีต (ประมาณปี 2010)	ความทันสมัยของ GNSS ที่แม่นยำสูงในปี 2021 เป็นต้นไป
1	ข้อมูลค่าปรับแก้ที่ต่อเนื่อง	การร้องขอข้อมูลและค่าปรับแก้มีค่าใช้จ่ายที่สูง	การเชื่อมต่อไร้สายที่รวดเร็ว และการให้บริการค่าปรับแก้ที่ไม่สูง
2	ความซับซ้อนการประมวลผลสำหรับค่า AR	การลู่เข้าช้า (หลายสัปดาห์)	มีการปรับปรุงอัลกอริทึมและประสิทธิภาพในการประมวลผล
3	ระบบและสัญญาณ GNSS มีให้ใช้งานจำกัด	GPS L1 C/A และ codeless L2 มีให้ใช้งานเท่านั้นทั่วโลก	มีระบบ GNSS และความถี่พลเรือนที่ให้ใช้งานมากกว่าเดิม 4 เท่า รวมทั้งมีเครื่องรับ 2 ความถี่ใช้งานอย่างแพร่หลาย
4	ความคงทนในระหว่างที่เกิดการบล็อกสัญญาณ GNSS	ยังไม่มีเซนเซอร์ MEMS ราคาถูกให้ใช้งานเพื่อแฮนด์โอเวอร์ที่ตายตัว	มีการรวม MEMS เข้ามาและมีการปรับปรุงอัลกอริทึมการรวมสัญญาณ
5	สายอากาศที่ถูกปรับแต่งอย่างแม่นยำเป็นสิ่งจำเป็น	สายอากาศมีราคาแพง จึงไม่ได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย	มีสายอากาศราคาถูกและมีให้เลือกใช้งานหลายชนิด
6	เวลาการลู่เข้าที่เร็วในโหมด SSR	-	มีการพัฒนาวิธีการปรับแก้ค่าเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ (error modelling)

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

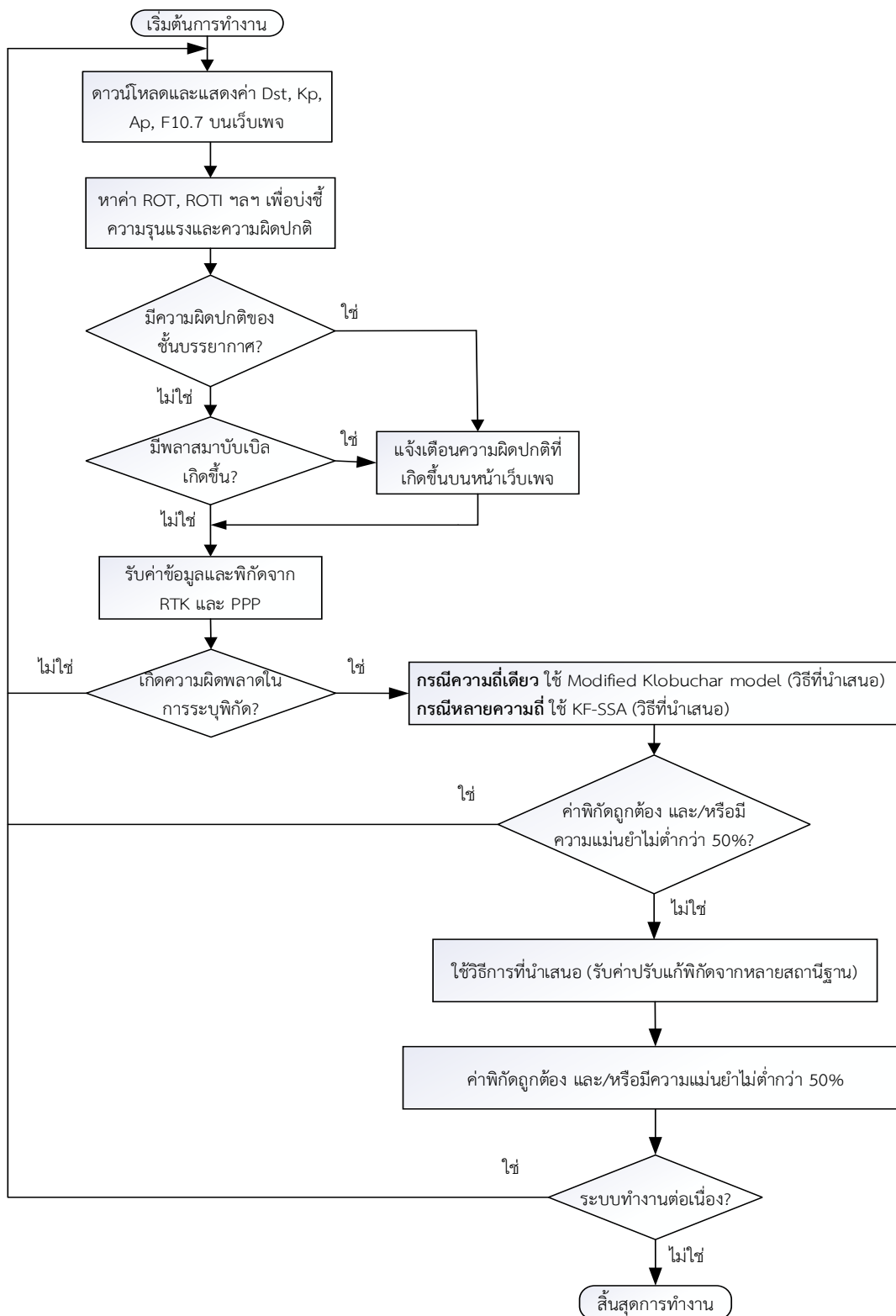
1. เวลาในการลู่เข้าที่เร็วมากขึ้น
 2. สถานีเฝ้าสังเกตการณ์ที่ติดตั้งมากขึ้นในพื้นที่ให้บริการ
 3. สามารถหาค่า AR แบบ 'fix' เกือบจะทันทีทันใดได้
 4. มีค่าใช้จ่ายที่ถูกลง
 5. GNSS ที่แม่นยำสูงสามารถที่จะเริ่มใช้งานต่าง ๆ ระดับ mass marketing ได้แล้ว
 6. การปฏิวัติระบบ GNSS เพื่อใช้งานร่วมกับเทคโนโลยี 5G กำลังจะเกิดขึ้นและเริ่มใช้งาน
 7. มีการใช้ดาวเทียมสื่อสาร GPS ในย่านความถี่ (L1, L2, L5), ระบบดาวเทียม Galileo และ QZSS ในย่านความถี่ L6 เพื่อส่งค่าปรับแก้เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ให้กับเครื่องรับ GNSS ซึ่งเราสามารถนำวิธีปรับปรุง RTK แบบใหม่ที่น่าเสนอในโครงการศึกษา คือเครือข่าย Multi-constellation system และมีการรับค่าปรับแก้จากสถานีอ้างอิงมากกว่า 1 สถานีและวิธีมาช่วยในการแก้ไขความผิดพลาดในการระบุพิกัดแบบ RTK
 8. มีการใช้เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ 4G/5G SIB (broadcast) และ 4G/5G-top-IP (unicast) เพื่อส่งค่าปรับแก้เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ให้กับเครื่องรับ GNSS
- อย่างไรก็ตาม แหล่งกำเนิดความผิดพลาดระดับพื้นที่ที่พบโดยทั่วไป คือ ระดับไอออโนสเฟียร์, ความผิดพลาดชั้นไอโอโนสเฟียร์, พายุแม่เหล็กโลกและพลาสมาบับเบิลในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งจะต้องตรวจจับและนำเอาวิธีการใหม่ที่น่าเสนอในโครงการศึกษา ในครั้งนี้มาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาดังกล่าวได้

รูปที่ k แสดงข้อดีของ GNSS ที่แม่นยำสูงและอาศัยเครือข่าย Multi-GNSSs และเทคโนโลยี 4G/5G

ตารางที่ d หลักการทำงานและข้อดีที่ได้รับจากการใช้งาน GNSS ที่แม่นยำสูงที่อาศัยการระบุพิกัด RTK, PPP และ RTK-PPP สำหรับเทคโนโลยี 5G

RTK (OSR)	PPP (SSR)	RTK-PPP (SSR)
<ul style="list-style-type: none"> - อาศัยวิธีการระบุพิกัดแบบผลต่าง - ค่าความผิดพลาดถูกกำจัดด้วยวิธี double-differencing (DD) ระหว่างสถานีอ้างอิงกับโรเวอร์ (สถานีที่กำลังเคลื่อนที่) 	<ul style="list-style-type: none"> - ค่าความผิดพลาดสัญญาณนาฬิกา/วงโคจรของดาวเทียมถูกหาค่าโดยใช้เครือข่ายของสถานีสังเกตการณ์บนพื้นโลก 	<ul style="list-style-type: none"> - ค่าความผิดพลาดสัญญาณนาฬิกา/วงโคจร/ไบอัส/ชั้นไอโอโนสเฟียร์/ชั้นโทรโปสเฟียร์หาค่าโดยใช้เครือข่ายของสถานีสังเกตการณ์และหัวข้อยื่น ๆ ที่ได้ปรับปรุงขึ้นจากวิธี PPP เดิม
<ul style="list-style-type: none"> - การลู่เข้าเกือบจะทันทีทันใดได้ - ต้องการเบสไลน์ระยะสั้น (< 20km) - พื้นที่ครอบคลุมเป็นแบบ regional - การแฮนด์โอเวอร์เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับโรเวอร์ 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่ต้องการสถานีอ้างอิงที่ใกล้ ๆ (ทำงานได้แม้กระทั่งจะอยู่ใจกลางมหาสมุทร) - เวลาการลู่เข้าสำหรับการ 'fix' ที่นานขึ้น (หลายนาที) 	<ul style="list-style-type: none"> - มีการรวมข้อดีของ RTK และ PPP เข้าด้วยกัน - เครือข่ายสถานีอ้างอิงระดับ Regional เป็นสิ่งที่จำเป็น - การลู่เข้าที่รวดเร็ว - พื้นที่ครอบคลุมที่กว้างขึ้น

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ



รูปที่ 1 โฟลว์ชาร์ตแนวทางแก้ไขปัญหาทั้งหมดของโครงการศึกษา ที่นำเสนอ พร้อมกับการใช้งานวิธี KF-SSA

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัด เร็วใหม่ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

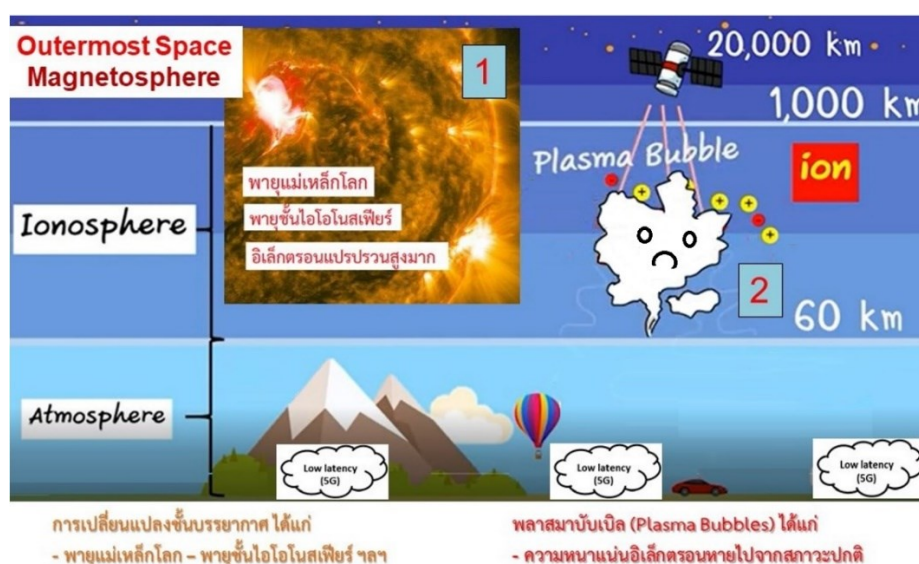
บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

สภาพอวกาศ (space weather) ที่แปรปรวนเป็นคุณลักษณะที่ทำให้เกิดการรบกวนกันของส่วนผสมต่าง ๆ ในอวกาศ สภาพะพลวัตสนามไฟฟ้า (electrodynamic) และการแปรปรวนของสนามแม่เหล็กโลกของชั้นบรรยากาศด้านบนของโลก เช่น ชั้นไอโอโนสเฟียร์และชั้นแมกเนโตสเฟียร์ ซึ่งบางครั้งทำให้เกิดภัยคุกคาม (threat) ที่รุนแรงต่อความแม่นยำในการระบุพิกัดของ real-time kinematic (RTK) และการนำทางของระบบดาวเทียมนำทางสากล (global navigation positioning system หรือ GNSS) ที่อาศัยเครื่องรับ GNSS การสื่อสารด้วยย่านความถี่ HF และการสื่อสารผ่านดาวเทียม สิ่งรบกวนในชั้นไอโอโนสเฟียร์ (ionospheric disturbances) ที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการระบุพิกัดเรียลไทม์ด้วย RTK แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ได้แก่

1. การเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศ ได้แก่ พายุแม่เหล็กโลก พายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ และอิเล็กตรอนแปรปรวนสูงมาก-ปัจจัยนี้เกิดขึ้นในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ชั้นแมกเนโตสเฟียร์และชั้นอวกาศนอกสุดของโลก
2. พลาสมาบับเบิล (plasma bubble) เป็นปรากฏการณ์ที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนหายไปจากสภาวะปกติ (ambient atmosphere)

โดยหัวข้อ 2 กลุ่มหลักนี้เป็นสิ่งรบกวนชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรงและมีกระทบมากที่สุดต่อประเทศไทยและประเทศอื่น ๆ ที่ตั้งอยู่บนแผ่นดินในบริเวณแถบเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกและละติจูดต่ำที่อยู่ในบริเวณ EIA (Equatorial Ionization Anomaly) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 แต่ละสิ่งรบกวนจะมีต้นเหตุการเกิดขึ้น คุณลักษณะการเปลี่ยนแปลง และช่วงเวลาในการเกิดขึ้นที่ต่างกันไป แต่ก็มีความสัมพันธ์และมีความเชื่อมโยงกันอย่างใกล้ชิด นักวิทยาศาสตร์ วิศวกร และนักวิจัยจำนวนมากทั่วโลกพยายามที่จะศึกษาและวิเคราะห์ประเด็นต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับแต่ละหัวข้อ เพื่อที่จะนำไปสู่การป้องกันและหลีกเลี่ยงการเกิดขึ้น



รูปที่ 1.1 สิ่งรบกวนในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการระบุพิกัดเรียลไทม์ด้วยเทคนิค RTK

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

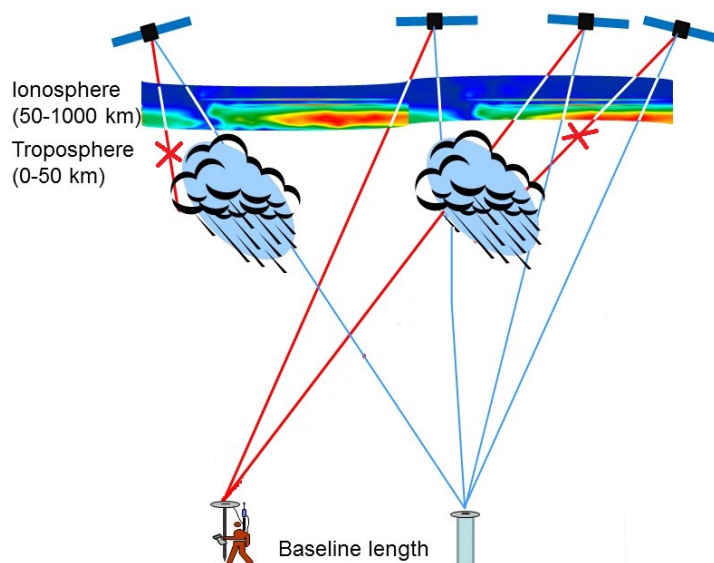


รูปที่ 1.2 ประเทศต่าง ๆ ที่ตั้งอยู่บนแผ่นดินที่ติดตั้งสถานีเฝ้าสังเกตการณ์ชั้นไอโอโนสเฟียร์ รวมถึงประเทศไทย (ที่มา: <https://www.youtube.com/watch?v=M9WRXHJPIOk>)

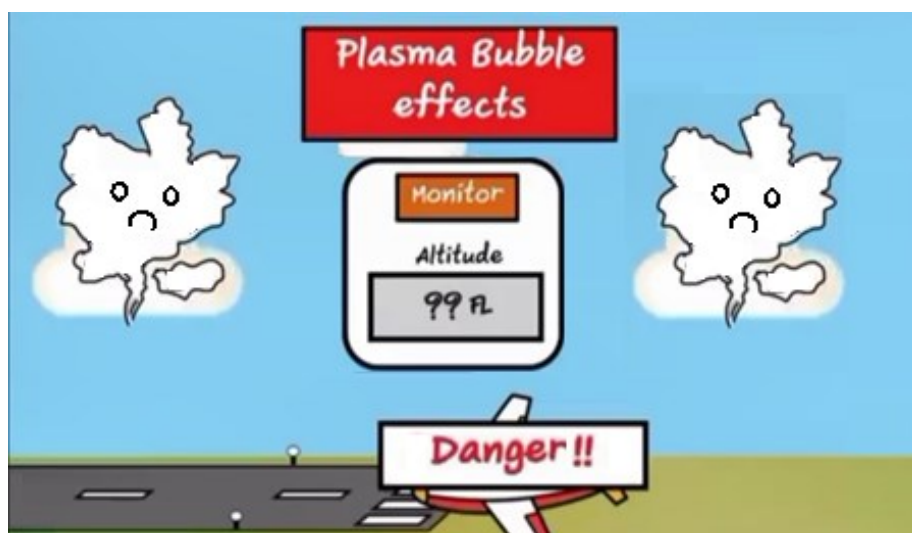
ดังนั้น ทางสถาบัน NICT (National Institute of Information and Communications Technology) จึงร่วมมือกับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังจัดตั้งสถานีเฝ้าสังเกตการณ์ชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร โดยสถานีเฝ้าสังเกตการณ์ชั้นไอโอโนสเฟียร์นี้มีอยู่ 2 แห่ง ได้แก่

- สถานีไอโอโนซอนด์ ซึ่งมีเครื่องรับส่งเรดาร์ประเภท FMCW (frequency-modulated continuous wave) หรือเครื่องไอโอโนซอนด์ ทำงานย่านความถี่สูง (HF) ตั้งแต่ 2-30 MHz (ขออนุญาตจาก กสทช. เป็นที่เรียบร้อยแล้ว โดยเป็นงานวิจัยชั้นไอโอโนสเฟียร์)
- สถานีเรดาร์วีเอชเอฟ ซึ่งมีเครื่องรับส่งเรดาร์ย่านความถี่ VHF เท่ากับ 39.65 MHz (ขออนุญาตจาก กสทช. เป็นที่เรียบร้อยแล้ว โดยเป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการตรวจจับพลาสมาบับเบิล)

ตัวอย่างของผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศที่มีต่อการคำนวณค่าปรับแก้เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ของ CORS network ให้แก่เครื่องรับ GNSS ที่อยู่ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ 5G, อากาศยานไร้คนขับ (อาทีโดรน) ฯลฯ เมื่อ 2 สถานีฐานได้รับผลกระทบจากพายุแม่เหล็กโลก ดังแสดงในรูปที่ 1.3 โดยมี ionospheric delay gradients เกิดขึ้นระหว่าง 2 สถานีฐานดังกล่าว จึงทำให้แต่ละสถานีคำนวณค่าปรับแก้ในการระบุพิกัดที่ผิดพลาด และส่งผลกระทบต่อระบุพิกัดด้วยเทคนิค RTK ที่มีความผิดพลาดสูงระหว่าง 4-10 เมตร อีกตัวอย่างหนึ่งคือ ตัวอย่างของผลกระทบของการเกิดพลาสมาบับเบิลที่มีต่อระบบการลงจอดของเครื่องบิน (ground-based augmentation system หรือ GBAS) ซึ่งพลาสมาบับเบิลส่งผลกระทบต่อลงจอดของเครื่องบินที่ผิดพลาด ไม่ตรงกับ runway ของเครื่องบิน ดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.3 ค่าปรับแก้เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ผิดพลาด เมื่อสถานีฐานได้รับผลกระทบจากพายุแม่เหล็กโลก
ที่มา: <https://www.otago.ac.nz/surveying/research/geodetic/otago633641.html>



รูปที่ 1.4 การลงจอดของเครื่องบินที่ผิดพลาด เนื่องจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล
(ที่มา: <https://www.youtube.com/watch?v=M9WRXHJPIOk>)

ดังนั้น โครงการนี้จะดำเนินการจัดทำผลการศึกษา รวบรวมข้อมูล และนำเสนอผลงานวิจัยใหม่เพื่อที่ลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิล ซึ่งจะเพิ่มความแม่นยำในการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G รถยนต์ไร้คนขับ อากาศยานไร้คนขับ (UAV) เครื่องจักรกลที่ใช้ในสมาร์ทฟาร์ม และอุปกรณ์อื่น ๆ ซึ่งจะทำให้ประเทศไทยสามารถเตรียมความพร้อมในการรับมือกับผลกระทบดังกล่าวที่จะเกิดขึ้นกับระบบสื่อสารไร้สายในยุคที่ 5 (5G) ขึ้นไปได้เป็นอย่างดี

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อทำการศึกษามลกระทบการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G อากาศยานไร้คนขับ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ
2. เพื่อทำการศึกษามลกระทบของพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G อากาศยานไร้คนขับ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ
3. เพื่อพัฒนาแบบจำลองโคลนุซาแบบใหม่ที่สามารถปรับปรุงค่า RMSE ให้ดีขึ้นและระบุตำแหน่งเครื่องรับ GNSS ที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองโคลนุซาแบบเดิม
4. เพื่อศึกษาและนำเสนอวิธี RTK ที่อาศัยข้อมูลมากกว่า 1 สถานีฐาน เพื่อให้รับค่าปรับแก้พิกัดเครื่องรับ GNSS อย่างมีประสิทธิภาพ
5. เพื่อศึกษาและนำเสนอวิธีใหม่ที่ทันสมัย เพื่อให้การระบุพิกัดเรียลไทม์ของเครื่องรับ GNSS มีความผิดพลาดลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายที่เหมาะสม สำหรับการกำกับดูแลที่เกี่ยวข้องจากผลกระทบการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ
2. พัฒนาเทคนิค RTK ให้สามารถรับค่าปรับแก้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อที่จะทำให้การระบุพิกัดเรียลไทม์มีความผิดพลาดที่ลดลงและมีความแม่นยำในการระบุพิกัด
3. ทำให้เทคโนโลยี 5G สามารถรองรับนวัตกรรมดิจิทัลใหม่ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสอดคล้องกับแนวนโยบายของรัฐบาลภายใต้แนวคิดไทยแลนด์ 4.0 และตอบสนองความต้องการของประชาชนไทยในอนาคต

1.4 เป้าหมาย

1. ที่ปรึกษาจะต้องเสนอแผนการดำเนินโครงการภายใน 30 วัน นับถัดจากวันลงนามในสัญญา โดยให้คณะกรรมการตรวจรับให้ความเห็นชอบก่อนดำเนินการ
2. ศึกษา เก็บรวบรวมข้อมูล พร้อมวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G อากาศยานไร้คนขับ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ
3. ศึกษา เก็บรวบรวมข้อมูล พร้อมวิเคราะห์ผลกระทบของพลาสมาบับเบิลที่เกิดขึ้นในต่างประเทศ จำนวน 3 ประเทศ ที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G อากาศยานไร้คนขับ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ
4. ศึกษาวิเคราะห์ ออกแบบ และพัฒนาแบบจำลองโคลนุซาแบบใหม่ให้แก่เครื่องรับ GNSS เพื่อปรับปรุงค่า RMSE ให้ดีขึ้นและระบุตำแหน่งที่แม่นยำมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองโคลนุซาแบบเดิม โดย
 - 4.1 ศึกษาและนำเสนอแบบจำลองโคลนุซาแบบใหม่ที่สามารถปรับปรุงค่า RMSE ให้ดีขึ้น
 - 4.2 เปรียบเทียบค่า TEC ที่วัดได้จริง, ค่า TEC ที่ได้จากแบบจำลองโคลนุซาแบบเดิม กับค่า TEC ที่ได้จากแบบจำลองโคลนุซาแบบใหม่ที่นำเสนอ

- 4.3 เปรียบเทียบค่าเวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่วัดได้จริงกับค่าเวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่คำนวณได้จากทั้งแบบจำลองโคลบุงซาแบบเดิมกับแบบใหม่ที่น่าเสนอ
- 4.4 ทำการศึกษา เก็บข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูลจากสถานี GNSS จำนวน 3 สถานีของประเทศไทย ในวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกหรือพลาสมาบับเบิล
5. ศึกษาและนำเสนอวิธี RTK ที่อาศัยข้อมูลมากกว่า 1 สถานีฐาน (วิธีใหม่) ให้แก่เครื่องรับ GNSS เพื่อให้รับค่าปรับแก้พิกัดเครื่องรับ GNSS อย่างมีประสิทธิภาพ โดย
 - 5.1 ศึกษาและนำเสนอวิธี RTK ที่อาศัยข้อมูลมากกว่า 1 สถานีฐาน เพื่อให้รับค่าปรับแก้พิกัดเครื่องรับ GNSS อย่างมีประสิทธิภาพ
 - 5.2 นำเสนออัลกอริทึมที่ใช้ในการตัดสินใจเพื่อเลือกใช้ข้อมูลจากสถานีฐานมากกว่า 1 สถานีฐาน อย่างน่าเชื่อถือ
 - 5.3 เปรียบเทียบผลลัพธ์จากการจำลองประสิทธิภาพการทำงานระหว่างวิธี RTK ที่อาศัยข้อมูล 1 สถานีฐาน (วิธีเดิม) และวิธี RTK ที่อาศัยข้อมูลมากกว่า 1 สถานีฐาน (วิธีใหม่)
 - 5.4 ทำการศึกษา เก็บข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูลจากสถานี GNSS จำนวน 2 สถานีของประเทศไทย ในวันที่เสียบ (ไม่เกิดพายุแม่เหล็กโลกหรือพลาสมาบับเบิล)
6. ศึกษาและนำเสนอวิธีใหม่ที่ทันสมัย เพื่อให้การระบุพิกัดเรียลไทม์ของเครื่องรับ GNSS มีความผิดพลาดลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น โดย
 - 6.1 ศึกษาและนำเสนอวิธีใหม่ที่ทำการระบุพิกัดเรียลไทม์มีความผิดพลาดลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นโดยอาศัยค่าข้อมูลจาก Multi-GNSS systems ของโลก
 - 6.2 นำเสนอวิธี Multi-GNSS systems and Multivariate Singular Spectrum Analysis (วิธีใหม่) ให้แก่เครื่องรับ GNSS
 - 6.3 เปรียบเทียบผลลัพธ์จากการจำลองประสิทธิภาพการทำงานระหว่างวิธีใหม่กับวิธีอื่นที่เคยมีการนำเสนอก่อนหน้านี้
 - 6.4 ทำการศึกษา เก็บข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูลจาก Multi-GNSS systems ของโลก โดยเครื่องรับ GNSS ดังกล่าวตั้งอยู่ในประเทศไทยและต่างประเทศ ไม่น้อยกว่า 2 ประเทศ
7. จัดประชุมกลุ่มย่อย (Focus Group) ผู้เกี่ยวข้องและผู้ได้รับผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งย่านความถี่ที่จะรองรับเทคโนโลยี 5G เช่น กลุ่มผู้ให้บริการโทรคมนาคม กลุ่มผู้ให้บริการดิจิทัล และกลุ่มอุตสาหกรรมต่าง ๆ
8. จัดทำรายงานการศึกษาข้อเสนอประเทศไทยต่อการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ ที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย เพื่อเป็นกรอบกำหนดแนวทางการปฏิบัติต่อไป รวมทั้งผลดี ผลเสีย และความคุ้มค่าต่อการดำเนินการตามข้อเสนอดังกล่าว
9. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ (Final Report) โดยจัดทำเป็นรายงานทางวิชาการจำนวน 6 เล่ม พร้อม DVD บรรจุไฟล์รายงานในรูปแบบ MS Word จำนวน 1 ชุด รวมทั้งจัดงานสัมมนาเพื่อเผยแพร่ผลงานต่อสาธารณชน

1.5 ผลผลิตสำคัญ

ลำดับ	ชื่อผลผลิต	หน่วยวัด	ตัวชี้วัด (เชิงปริมาณ/เชิงคุณภาพ)	ผลการ ดำเนินการ
1	สร้างเว็บที่แสดงพารามิเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและการเกิดขึ้นของพลาสมาบับเบิล	1 เว็บไซต์	ผู้ใช้สามารถทราบการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและการมี/ไม่มีพลาสมาบับเบิลแล้วนำไปสู่การตรวจสอบผลกระทบที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) บนเว็บไซต์	ได้ดำเนินการสร้างแล้วและอธิบายไว้ในบทที่ 4
2	2.1 ได้แบบจำลองโคลนุชาแบบใหม่ที่มีการปรับปรุงค่า RMSE ให้ดีขึ้นและระบุตำแหน่งเครื่องรับ GNSS 2.2 นำผลการศึกษานี้ไปตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติขึ้นไป ในฐานข้อมูล SCOPUS หรือ SJR จำนวน 1 บทความ	1 กระบวนการและ 1 บทความวิจัยที่ตีพิมพ์	1. มีแบบจำลองโคลนุชาแบบใหม่ที่มีการระบุพิกัดเครื่องรับ GNSS ที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองโคลนุชาแบบเดิม 2. นำเสนอและเผยแพร่แบบจำลองโคลนุชาแบบใหม่ที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองโคลนุชาแบบเดิม ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติขึ้นไป ในฐานข้อมูล SCOPUS หรือ SJR จำนวน 1 บทความ	ได้ตีพิมพ์บทความวิจัยเป็นที่เรียบร้อยแล้วและอธิบายวิธีการใหม่นี้ในบทที่ 5
3	ได้วิธี RTK ที่อาศัยข้อมูลมากกว่า 1 สถานีฐาน เพื่อให้รับค่าปรับแก้พิกัดเครื่องรับ GNSS อย่างมีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำในการระบุพิกัดมากขึ้น	1 กระบวนการ	ได้ค่าปรับแก้พิกัดเครื่องรับ GNSS อย่างต่อเนื่องและมีความแม่นยำในการระบุพิกัดมากขึ้น โดยใช้วิธี RTK ที่อาศัยข้อมูลมากกว่า 1 สถานีฐาน	ได้ดำเนินการนำเสนอแล้วและอธิบายไว้ในบทที่ 6
4	4.1 ได้วิธีใหม่คือการใช้วิธี SSA กับตำแหน่งของ UAV ที่ทำนายได้จากวิธี Kalman Filter (SSA-KF) เพื่อทำให้มีความแม่นยำในการระบุพิกัดมากขึ้น	1 กระบวนการและ 1 บทความวิจัยที่ตีพิมพ์	1. ได้ค่าปรับแก้พิกัดเครื่องรับ GNSS อย่างต่อเนื่องและได้พิกัดที่มีความแม่นยำมากขึ้น โดยใช้วิธี RTK ที่อาศัยวิธีใหม่ SSA-KF ที่นำเสนอ 2. นำเสนอและเผยแพร่วิธี RTK ใหม่ที่นำเสนอคือมีการใช้วิธี multivariate SSA and Kalman Filter (SSA-KF)	ได้ตีพิมพ์บทความวิจัยเป็นที่เรียบร้อยแล้วและ

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

	4.2 นำผลการศึกษานี้ไปตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติขึ้นไป ในฐานข้อมูล SCOPUS หรือ SJR จำนวน 1 บทความ		เพื่อให้มีความแม่นยำในการระบุพิกัดมากขึ้น ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติขึ้นไป ในฐานข้อมูล SCOPUS หรือ SJR จำนวน 1 บทความ	อธิบายวิธีการใหม่นี้ในบทที่ 7
--	--	--	--	-------------------------------

1.6 แผนปฏิบัติการโครงการ

ลำดับ	กิจกรรมที่สำคัญ	ระยะเวลาการดำเนินกิจกรรม				
		งานงวดที่ 1	งานงวดที่ 2	งานงวดที่ 3	งานงวดที่ 4	น้ำหนัก (%)
1	ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับผลกระทบการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อ RTK พร้อมทั้งจัดทำรายงานผลการศึกษาเบื้องต้นเพื่อส่งมอบรายงานฉบับที่ 1 ภายใน 45 วัน	12/8/2564-25/9/2564	-	-	-	10
2	2.1 ศึกษา เก็บรวบรวมข้อมูล พร้อมวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศที่มีต่อ RTK ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G, UAV ฯลฯ	-	26/9/2564-9/12/2564	-	-	35
	2.2 ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลของพลาสมาบับเบิลที่เกิดขึ้นในต่างประเทศ จำนวน 3 ประเทศ					
	2.3 คำนวณค่าบ่งชี้ระดับความรุนแรงและวิเคราะห์ผลกระทบของพลาสมาบับเบิลข้อที่ 2) ที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเครื่องรับ GNSS					
	2.4 จัดทำรายงานนำเสนอข้อมูลตามขอบเขตการดำเนินงานที่ 4.2 และ 4.3 พร้อมทั้งส่งมอบรายงานฉบับที่ 2 รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1 ภายใน 120 วัน					

ลำดับ	กิจกรรมที่สำคัญ	ระยะเวลาการดำเนินกิจกรรม				
		งานงวดที่ 1	งานงวดที่ 2	งานงวดที่ 3	งานงวดที่ 4	น้ำหนัก (%)
3	<p>3.1 ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองโคดบุชาแบบใหม่ให้แก่เครื่องรับ GNSS เพื่อปรับปรุงค่า RMSE ให้ดีขึ้นและระบุตำแหน่งที่แม่นยำมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเดิม และเปรียบเทียบค่า TEC และเวลาประวิงขึ้นไอโอโนสเฟียร์ของแบบจำลองโคดบุชาแบบใหม่และแบบเดิม โดยอาศัยค่าข้อมูลจาก 3 สถานี GNSS ของประเทศไทยในวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกหรือพลาสมาบับเบิล</p> <p>3.2 ศึกษาและนำเสนอวิธี RTK (แบบใหม่) ที่อาศัยข้อมูลมากกว่า 1 สถานีฐาน เพื่อให้รับค่าปรับแก้พิกัดเครื่องรับ GNSS อย่างมีประสิทธิภาพ และเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการจำลองประสิทธิภาพการทำงานระหว่างวิธี RTK แบบเดิมกับวิธี RTK แบบใหม่ โดยอาศัยค่าข้อมูลจากสถานี GNSS จำนวน 2 สถานีของประเทศไทยในวันที่เจียบ</p> <p>3.3 นำเสนอวิธี Multi-GNSS systems and Multivariate Singular Spectrum Analysis (วิธีใหม่) ให้แก่เครื่องรับ GNSS และเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการจำลองประสิทธิภาพการทำงานระหว่างวิธีใหม่กับวิธีอื่นที่เคยมีการนำเสนอก่อนหน้านี้ โดยอาศัยค่าข้อมูลจากเครื่องรับ GNSS ดังกล่าวตั้งอยู่ในประเทศไทยและต่างประเทศ ไม่น้อยกว่า 2 ประเทศ</p> <p>3.4 จัดทำรายงานนำเสนอข้อมูลตามขอบเขตการดำเนินงานที่ 4.4-4.6 พร้อมทั้งส่งมอบรายงานฉบับที่ 3 รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2 ภายใน 180 วัน</p>			10/12/2564-7/2/2565		20

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

ลำดับ	กิจกรรมที่สำคัญ	ระยะเวลาการดำเนินกิจกรรม				
		งานงวดที่ 1	งานงวดที่ 2	งานงวดที่ 3	งานงวดที่ 4	น้ำหนัก (%)
4	4.1 จัดประชุมกลุ่มย่อย (Focus Group) ผู้เกี่ยวข้องและผู้ได้รับผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อ RTK ของ 5G, UAV ฯลฯ				8/2/2565- 8/5/2565	35
	4.2 จัดทำรายงานการศึกษาข้อเสนอประเทศไทยต่อการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G, UAV ฯลฯ					
	4.3 จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ (Final Report) โดยจัดทำเป็นรายงานทางวิชาการจำนวน 6 เล่ม พร้อม DVD บรรจุไฟล์รายงานในรูปแบบ MS Word จำนวน 1 ชุด รวมทั้งจัดงานสัมมนาเพื่อเผยแพร่ผลงานต่อสาธารณชน					
รวม						100%

บทที่ 2 การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศที่มีต่อ RTK ของเครื่องรับ GNSS

2.1 ผลกระทบของพายุแม่เหล็กโลกที่มีต่อชั้นไอโอโนสเฟียร์

Nayak, หัวหน้าโครงการและคณะ [1] ได้ศึกษาและระบุผลกระทบของพายุแม่เหล็กโลก (geomagnetic storm) ที่มีต่อชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดขึ้นในช่วงวันที่ 17-19 มีนาคม 2558 โดยพายุลูกนี้ถูกเรียกว่า “พายุวันเซนต์แพทริก” (St. Patrick’s day storm) โดยนับว่าเป็นพายุที่มีความรุนแรงมากที่สุดของวัฏจักรสุริยะที่ 24 และได้ตีพิมพ์บทความลงใน Journal of Geophysical Research: Space Physics ปี 2559 (Nayak et al., 2016) โดยค่า Sym-H มีค่าต่ำที่สุดถึง -232 nT จึงทำให้เป็นพายุที่รุนแรงที่สุดของวัฏจักรสุริยะที่ 24 (24th solar cycle) โดยงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาว่าพายุลูกนี้มีอิทธิพลต่อชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ละติจูดบริเวณเส้นศูนย์สูตร, ต่ำและกลาง ในภูมิภาคอเมริกาและยุโรปอย่างไร โดยใช้ข้อมูลไอโอโนซอนด์และ GPS-TEC ผลกระทบที่เป็นไปได้ของการทะลุทันทันที่ได้ถูกสังเกตในทั้งสองภูมิภาคในช่วงที่เกิดเฟสหลักของพายุในภูมิภาคอเมริกา การเกิดพร้อมกันของทั้งเฟสพายุไอโอโนสเฟียร์บวกและลบถูกสังเกตเห็นได้ที่ละติจูดต่ำและกลาง-สูง ตามลำดับ เฟสพายุบวกนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าเฉาะทะเลแบบทันทัน (PPEFs) อย่างเป็นทางการซึ่งจะยังคงปรากฏอยู่ที่ละติจูดต่ำ ส่วนเฟสพายุลบในบริเวณละติจูดกลางเป็นผลกระทบรวมของสนามไฟฟ้าไดนาโมรบกววน (DDEFs) การเคลื่อนตัวในบริเวณเส้นศูนย์สูตรของร่อง (trough-จุดต่ำสุด) ของความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ละติจูดกลางและการบีบกดในบริเวณเส้นศูนย์สูตรของพลาสมาพอส เฟสพายุไอโอโนสเฟียร์ลบที่รุนแรงถูกสังเกตเห็นได้จากการสังเกตโดยใช้ไอโอโนซอนด์และ TEC ในเฟสพื้นผิวซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่สมมาตรของแต่ละซีกโลกที่รุนแรง นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงของ EIA (การไอโอไนซ์ที่ผิดปกติแถบเส้นศูนย์สูตร) ตามที่เคยตรวจจับการลอยเลื่อนของพลาสมาด้วยดาวเทียม SWARM ตลอดละติจูดที่ต่างกันได้ถูกกล่าวถึงด้วย นอกจากนี้ ยังได้กล่าวถึงสมรรถนะของ IRTAM (IRI Real-Time Assimilative Mapping) ในระหว่างที่เกิดพายุนี้เสมือนเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดสภาวะชั้นไอโอโนสเฟียร์อีกด้วย

โดยผลของการรบกวนแม่เหล็กโลกที่มีต่อชั้นไอโอโนสเฟียร์ของโลกได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง ไม่เพียงแต่เป็นความสนใจทางวิทยาศาสตร์ แต่ยังรวมถึงเพื่อวัตถุประสงค์ในทางปฏิบัติเกี่ยวกับกิจการของการสื่อสาร โทรคมนาคมและระบบนำทางด้วย พายุแม่เหล็กโลกเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนมาก ที่เริ่มต้นด้วยการบีบกดอย่างฉับพลันของชั้นแมกเนโตสเฟียร์ (magnetosphere) ของโลกและกระแสแวนที่มีความเข้มข้นสูงที่สอดคล้องกัน ซึ่งสะท้อนให้เห็นในค่าดัชนี Dst เมื่อพลังงานและโมเมนตัมเข้าไปสู่บรรยากาศด้านบน ชั้นบรรยากาศบริเวณละติจูดสูงจะยกตัวขึ้นอย่างทันทีเนื่องจากความร้อนจูลสุทธิ ละติจูดสูงจะร้อนขึ้นและเริ่มขยายตัว ซึ่งก่อให้เกิดคลื่นยักษ์ (Surge) ในแนวเส้นศูนย์สูตรและการรบกวนบรรยากาศที่เคลื่อนตัวอยู่ (traveling atmospheric disturbances หรือ TADs) รวมถึงการเปลี่ยนส่วนผสมในชั้นเทอร์โมสเฟียร์ การรบกวนเวลาที่เกิดพายุสามารถส่งผลกระทบและปรับเปลี่ยนสนามไฟฟ้าชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ล้อมรอบ (ambient) ที่ละติจูดบริเวณเส้นศูนย์สูตร, ต่ำและกลาง อาจจะมีต้นเหตุมาจากการทะเลแบบทันทันของสนามไฟฟ้า (PPEF) ที่มีจุดกำเนิดจากชั้นแมกเนโตสเฟียร์หรือสนามไฟฟ้าไดนาโมรบกววน (DDEF) หรือการผสมกันทั้ง 2 แหล่งกำเนิด ในเทอมของความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยทั่วไป พายุไอโอโนสเฟียร์จะถูกแบ่งออกเป็นสองประเภท พายุที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นจะถูกเรียกว่า พายุไอโอโนสเฟียร์บวก ส่วนพายุที่เกี่ยวข้องกับการลดลงของความหนาแน่นอิเล็กตรอนจะถูกเรียกว่า พายุไอโอโนสเฟียร์ลบ ในขณะที่การเกิดเฟสพายุลบส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้อง

กับการเปลี่ยนส่วนผสม แต่การเกิดพายุบวมมักจะมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนส่วนผสม การเคลื่อนย้ายของการไอออนไนซ์ หรือการเปลี่ยนสนามไฟฟ้าหรือลมในชั้นเทอร์โมสเฟียร์

ในตอนนี สภาอวกาศหรือโลกของเรามีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในวัฏจักรสุริยะลำดับที่ 24 นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรทั่วโลกได้พบเห็นพายุแม่เหล็กโลกที่รุนแรงที่สุดและที่ถูกสังเกตได้จนถึงตอนนี้ คือ พายุแม่เหล็กโลกที่เกิดขึ้นในวันที่ 17 มีนาคม 2558 หรือ “พายุวันเซนต์แพทริก” (St. Patrick’s day storm) นับว่าเป็นพายุที่พิเศษลูกหนึ่งในแง่ที่ว่า “กิจกรรมสุริยะ (solar activity) ของวัฏจักรสุริยะที่ 24 นี้ไม่ได้มีค่าที่สูงเมื่อเทียบกับกิจกรรมสุริยะลำดับก่อนหน้า” ดังนั้น มันก็คุ้มค่าที่จะตรวจสอบผลกระทบชั้นไอโอโนสเฟียร์ต่าง ๆ ในพายุวันเซนต์แพทริกที่มีต่อชั้นไอโอโนสเฟียร์ของโลก จากการที่มันเป็นพายุแม่เหล็กโลกที่แรงที่สุดของวัฏจักรสุริยะปัจจุบัน เหตุการณ์ที่น่าทึ่งครั้งนี้จึงดึงดูดความสนใจท่ามกลางประชาคมทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์เป็นอย่างมาก ก่อนหน้านี มีนักวิจัยจำนวนมากได้รายงานผลกระทบของพายุแม่เหล็กโลกที่มีต่อชั้นไอโอโนสเฟียร์ทั่วโลก และบริเวณใกล้ละติจูดในแนวเส้นศูนย์สูตรของประเทศอินเดียและบริเวณข้างเคียง รวมถึงได้ทำการศึกษาความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากพายุในช่วงเฟสหลักของพายุแม่เหล็กโลกด้วยเช่นกัน ในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้นำเสนอโครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของพายุแม่เหล็กโลกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ในละติจูดต่ำและกลาง พร้อมกลไกทางกายภาพที่สำคัญในแนวละติจูด 2 แห่งคือภูมิภาคอเมริกาและภูมิภาคยุโรป

2.1.1 ประเภทของเครื่องมือวัดและค่าข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

เพื่อที่จะมีภาพที่สมบูรณ์ของการเปลี่ยนแปลงเชิงระยะทาง-เวลาของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในช่วงเวลาที่เกิดการรบกวนด้วยพายุแม่เหล็กโลก การวัดสภาพชั้นบรรยากาศจากภาคพื้นดินและจากดาวเทียม in situ ได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้

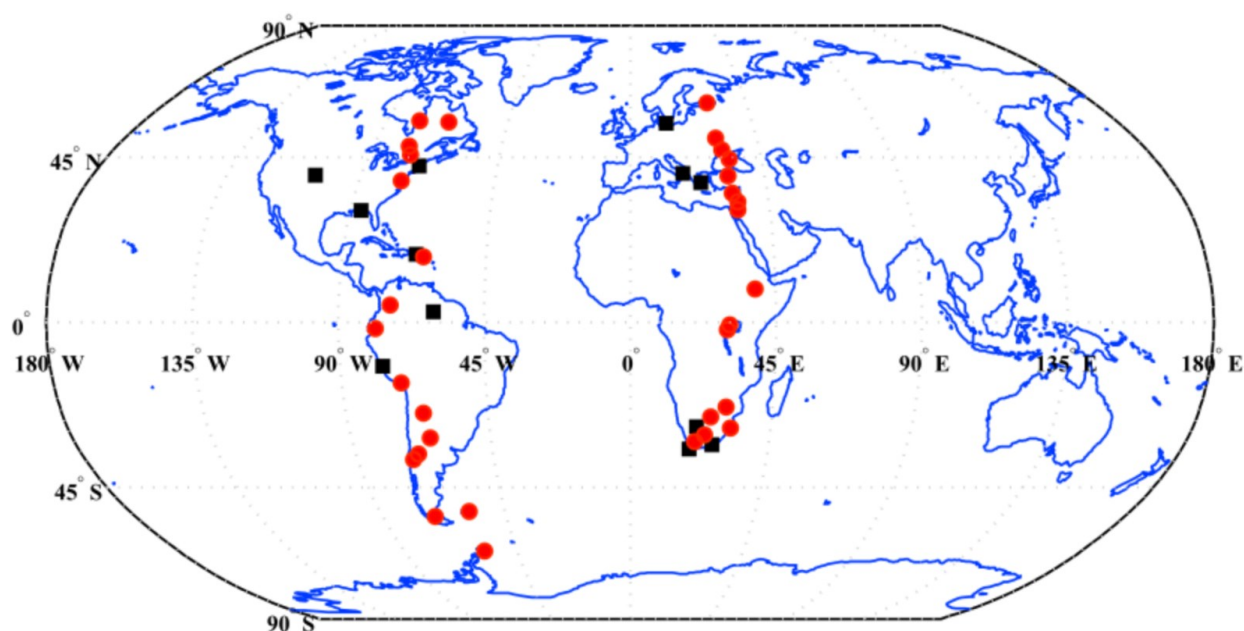
a) Ground-based ionograms and GPS-TEC

เนื่องจากเรากำลังมองเพื่อที่จะศึกษาการตอบสนองของชั้นไอโอโนสเฟียร์ทั่วโลก เราได้เลือกเครือข่ายที่ห่างกันในแนวละติจูดของสถานีไอโอโนซอนด์ (ดิจิสอนด์ หรือ Digisonde) ข้ามภูมิภาคละติจูดที่ต่างกัน 2 แห่งเพื่อที่จะมีภาพที่ดีขึ้นของทั้งภาพทางละติจูดและลองติจูด โดยตำแหน่งของสถานีไอโอโนซอนด์ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยฉบับนี้มีแสดงไว้ในรูปที่ 1 ด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสสีดำ ข้อมูลดิจิสอนด์เหล่านี้ถูกดาวน์โหลดและถูกนำมาวิเคราะห์ได้โดยใช้ SAO Explorer ชื่อเว็บไซต์ <http://ulcar.uml.edu/SAO-X/SAO-X.html> (ในที่นี้ SAO ย่อมาจากคำว่า Standard Archival Output ซึ่งเป็นคำย่อที่ใช้แทนค่าข้อมูลที่ได้มาจากไอโอโนแกรม นอกจากนี้ เรายังใช้ค่าข้อมูล TEC (total electron content) ที่ได้จากการวัดด้วยระบบการระบุพิกัดทั่วโลก (global positioning system หรือ GPS) บนภาคพื้นดิน โดยค่า GPS TEC ที่นำมาศึกษาในงานวิจัยฉบับนี้ นำมาสถานี IGS (International GNSS Service) ที่ปรากฏในเว็บไซต์ของ SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) ชื่อเว็บไซต์ <http://sopac.ucsd.edu/dataBrowser.shtml> โดยตำแหน่งของสถานีภาคพื้นดิน IGS (International GNSS Service) ที่นำค่า GPS TEC มาศึกษามีแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ด้วยวงกลมสีแดง ส่วนชื่อและพิกัดทางภูมิศาสตร์ของสถานี ionosonde จำนวน 12 สถานีและสถานี GPS-TEC จำนวน 25 สถานี บนภาคพื้นดินมีแสดงไว้ในตารางที่ 1.1

b) SWARM

SWARM เป็นภารกิจล่าสุดขององค์การอวกาศยุโรป (ESA) ซึ่งเปิดตัวโดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลกและการมีปฏิสัมพันธ์ของมันกับระบบโลก โดยจะประกอบไปด้วยกลุ่มของ

ดาวเทียม 3 ดวง (A คือ Alpha ; B คือ Bravo และ C คือ Charlie) ดาวเทียม A และ C จะบินที่ระดับความสูง 460 km ด้วยห่างกัน 1-2° ในแนวลองติจูด ดาวเทียม B บินที่ระดับความสูงประมาณ 540 km แม้ว่าจุดมุ่งหมายหลักของภารกิจ SWARM คือการให้ข้อมูลที่เป็นสนามแม่เหล็ก อย่างไรก็ตาม มันก็ให้ค่าการวัดที่จุด ๆ หนึ่ง (in situ) ของค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน (Ne) ที่ได้จาก Langmuir Probe (LP) บนบอร์ดของดาวเทียม SWARM อย่างไรก็ตาม ละดวงด้วย ในการศึกษาครั้งนี้เราได้ใช้ค่า in situ Ne ดังกล่าวเพื่อศึกษาโครงสร้างของ EIA (ความผิดปกติการไอออนไนซ์บริเวณเส้นศูนย์สูตร) เราจำกัดความสนใจของเราไปยังข้อมูลของ SWARM A เท่านั้น เนื่องจากดาวเทียมทุกดวงบินใกล้กันและข้อมูลจากดาวเทียมอีกสองดวง (other two) ก็ยังแสดงผลที่คล้ายกันด้วย อีกทั้ง เราได้พิจารณาการพาดผ่านหลังพระอาทิตย์ตกดินของ SWARM A เท่านั้น ซึ่งจะข้ามเส้นศูนย์สูตรประมาณ 20 LT เนื่องจากมุมเอียงวงโคจรของดาวเทียม 87.5° เวลาท้องถิ่นเกือบจะเท่ากันเมื่อพาดผ่านละติจูดที่ศึกษา



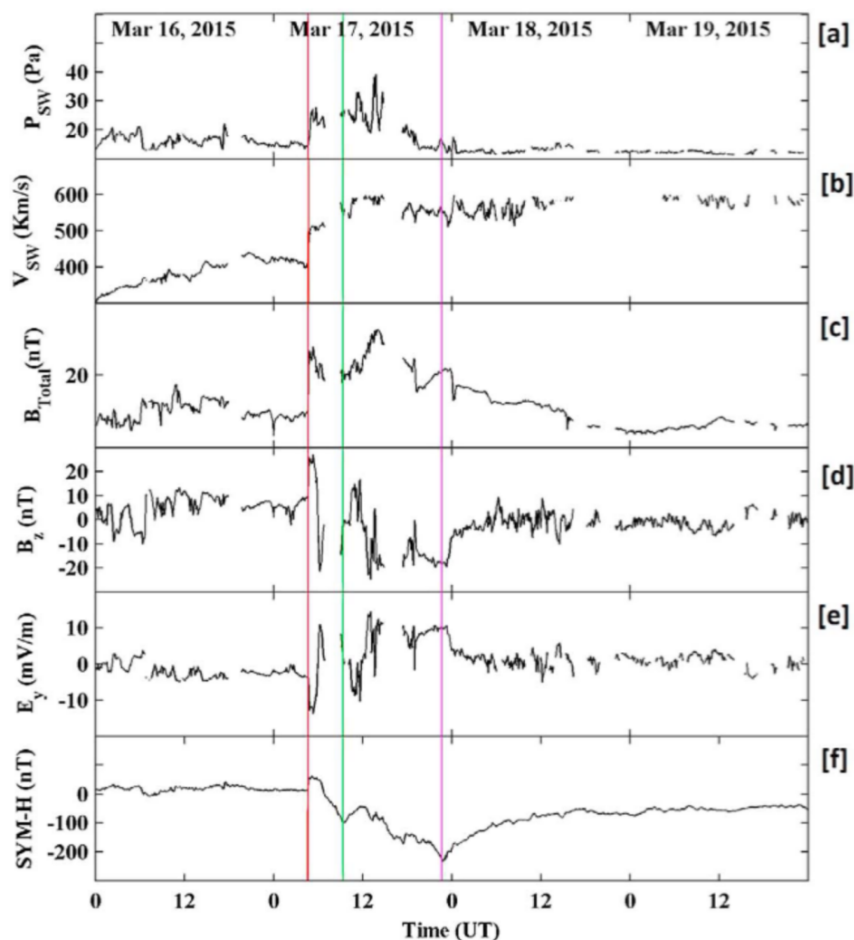
รูปที่ 2.1 ตำแหน่งของสถานีไอโอโนซอนด์ที่ใช้ศึกษา [1]

c) แผนภาพทั่วโลก IRTAM

เพื่อที่จะมีมุมมองทั่วโลกของสภาวะชั้นไอโอโนสเฟียร์ในช่วงเวลาที่มีพายุ เราได้ใช้แผนภาพ foF2 ทั่วโลกที่สร้างขึ้นโดยแบบจำลอง IRI Real-Time Assimilative Mapping (IRTAM) โดย IRTAM นี้มีความสามารถในการผลิตแผนภาพทั่วโลกของ foF2 และ hmF2 เกือบจะเป็นเวลาจริงที่ใช้ข้อมูลที่วัดได้จากสถานี ionosonde ประมาณ 70 สถานีของหน่วยงานสังเกตการณ์ไอโอโนสเฟียร์โลก (GIRO) ปกติจะมีความละเอียดเท่ากับ 15 นาที IRTAM ใช้แบบจำลองความหนาแน่นอิเล็กตรอนของ IRI เสมือนเป็นแบบจำลองพื้นฐานด้วย แบบจำลอง IRI นั้นใช้สัมประสิทธิ์ CCIR หรือ URSI สำหรับการกำหนดรายละเอียดของค่ามัธยฐาน foF2 และ hmF2 โดย IRTAM นั้นจะรวบรวมค่า (assimilate) ข้อมูล GIRO ที่วัดได้ใน IRI และทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์ CCIR (on-the-fly)

ตารางที่ 1.1 รายละเอียดของสถานีไอโอโนซอนด์บนภาคพื้นดิน จำนวน 12 สถานี [1]

Station Code	Station Name	Geographic Latitude (deg)	Geographic Longitude (deg)	Magnetic Dip (deg)
bldr	Boulder, USA	40.0	-105.3	66.52
bvst	Boa Vista, Brazil	2.80	-60.70	18.78
egln	Eglin, USA	30.50	-86.50	59.85
jmrc	Jicamarca, Peru	-12.00	-76.8	0.04
mlst	Milstone Hill, USA	42.6	-71.56	7.57
rame	Ramey, Puerto Rico	18.50	-67.10	44.15
athn	Athens, Greece	38.0	23.5	54.56
grst	Grahamstown, South Africa	-33.3	26.5	-64.10
hmn	Hermanus, South Africa	-34.42	19.22	-65.76
juli	Juliushru, Germany	54.6	13.4	69.35
lous	Louisevale, South Africa	-28.5	21.2	-65.69
snvt	San Vito, Italy	40.6	17.8	57.08
IGS Code	Station Name	Geographic Latitude (deg)	Geographic Longitude (deg)	Magnetic Dip (deg)
adis	Adis Ababa, Ethiopia	9.03	38.76	2.27
ankr	Ankara, Turkey	39.88	32.75	57.67
antc	Los Angeles, Chile	-37.33	-71.53	-37.97
arev	Arequipa, Peru	-16.46	-71.49	-8.92
bogt	Bogota, Colombia	4.64	-74.08	28.54
bshn	Haifa, Israel	32.77	35.02	49.08
cags	Gatineau, Canada	45.58	-75.80	70.73
cord	Cordoba, Argentina	-31.52	-64.47	-33.39
crao	Simeiz, Ukraine	44.41	33.99	62.34
cro1	Christiansted, USA	17.75	-64.58	42.19
dear	De Aar, South Africa	-30.66	23.99	-65.04
falk	Port Stanley, Falkland/Malvinas Islands	-51.69	-57.87	-49.82
glsv	Kiev, Ukraine	50.36	30.49	67.14
hnpt	Cambridge, USA	38.58	-76.13	65.46
kuuj	Kuujuarapik, Canada	55.27	-77.74	77.51
mbar	Mbarara, Uganda	-0.60	30.73	-24.68
mfdg	Mafikeng, South Africa	-25.80	25.53	-63.7
mgue	Malargue, Argentina	-35.77	-69.39	-36.65
mikl	Mykolaiv, Ukraine	46.97	31.97	64.48
nico	Nicosia, Cyprus	35.14	33.39	52.07
nurk	Kigali, Rwanda	-1.94	30.08	-28.05
ohi3	O,Higgins, Antarctica	-63.32	-57.90	-56.28
parc	Punta Arenas, Chile	-53.13	-70.87	-49.74
ramo	Mitze Ramon, Israel	30.59	34.76	45.86
rbay	Richardsbay, South Africa	-28.79	32.07	-62.47
riop	Riobamba, Ecuador	-1.65	-78.65	19.01
sch2	Schefferville, Canada	54.83	-66.83	75.36
sutm	Sutherland, South Africa	-32.38	20.81	-65.77
svtl	Svetloe, Russian Federation	60.53	29.78	73.85
tdou	Ihohoyandou, South Africa	-23.07	30.38	-60.65
unsa	Salta, Argentina	-24.72	-65.40	-24.48
vald	Val DOr, Canada	48.09	-77.56	72.8



รูปที่ 2.2 สภาวะค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระหว่างที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกในระหว่างวันที่ 16-19 มีนาคม 2558 [1]

d) แผนภาพทั่วโลกค่าอัตราส่วน O/N2 ที่ได้จาก TIMED-GUVI

เพื่อที่จะมีมุมมองโดยภาพรวมของความหนาแน่นนิวทรัลในชั้นเทอร์โมสเฟียร์ที่กำลังเปลี่ยนแปลงอยู่ เราได้ใช้แผนภาพทั่วโลกค่าอัตราส่วน O/N2 ในชั้นเทอร์โมสเฟียร์ที่ได้รับจากเครื่องมือ Global Ultraviolet Imager (GUVI) ที่อยู่บนบอร์ดของดาวเทียม TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics) โดยมันจะให้ค่า column number density ของอัตราส่วน O/N2 ที่ถูกอ้างอิงที่ระดับ column number density ของ N2 ด้วย 10^{17} cm^{-2} กระบวนการในการสร้างแผนภาพทั่วโลกค่า O/N2 นั้นสามารถพบได้ที่ http://guvi.jhuapl.edu/site/data/documents/on2_info.html. แผนภาพทั่วโลกค่าของพวกมันเองสามารถได้รับจาก <http://guvi.jhuapl.edu/site/gallery/guvi-gallery13on2.shtml>

e) พายุวันเซนต์แพทริก

วันที่ 15 มีนาคม 2558 การระเบิดฟิลาเมนต์แม่เหล็กจากจุดดับบนดวงอาทิตย์หมายเลข 2297 นั้นก่อให้เกิดการปลดปล่อยมวลโคโรนาฮาโลบางส่วน (CME) ที่มีองค์ประกอบพุ่งตรงเข้ามายังโลกไม่กี่ชั่วโมงต่อมา ชั้นแมกเนโตสเฟียร์ของโลกก็ได้รับผลกระทบจาก CME นี้ที่เวลา 04:30 UT และชุดของเหตุการณ์ต่าง ๆ ก็นำไปสู่การวิวัฒนาการของพายุแม่เหล็กโลกที่แรงที่สุดของวัฏจักรสุริยะ 24 พลาสมาลมสุริยะและพารามิเตอร์แม่เหล็กที่รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

จุมุกโบว์ช็อค (bow shock nose) ของโลกได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 โดยรูปที่ 2.2 นี้แสดงสภาวะค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระหว่างที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกในระหว่างวันที่ 16-19 มีนาคม 2558 โดยเส้นตั้งสีแดงแทนเวลาของการก่อตัวของพายุแบบทันที เส้นตั้งสีเขียวแทนเวลาเมื่อ Sym-H มีค่าเข้าใกล้ค่าต่ำสุดครั้งแรกก่อนที่จะมีการฟื้นตัวเล็กน้อย ส่วนเส้นตั้งสีม่วงแทนเวลาเมื่อ Sym-H มีค่าเข้าใกล้ค่าที่ต่ำสุดที่แท้จริง (-232 nT) ซึ่งแสดงถึงเฟสสูงสุดของพายุ โดยสัญลักษณ์ที่เหมือนกันนี้ได้ถูกนำไปใช้กับรูปอื่น ๆ ตลอดทั้งงานวิจัยนี้ การมาถึงของ CME สามารถที่จะเห็นได้เสมือนเป็นการเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันในความดันลมสุริยะ (รูปที่ 2.2a), ความเร็วการไหล (รูปที่ 2.2b) และสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ (IMF) (รูปที่ 2.2c) ที่ประมาณ 04:45 UT ในทางกลับกัน องค์ประกอบแกน z ของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ (IMF-Bz) (รูปที่ 2.2d) จะกลับไปยังทิศเหนือและดัชนีกระแสวงแหวนสมมาตร Sym-H (รูป 2f) ก็จะถูกเพิ่มขึ้นอย่างกระทันหันซึ่งเป็นตัวแทนของการเริ่มพายุฉับพลัน (SC) การเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องในค่า IEF (สนามไฟฟ้าระหว่างดาวเคราะห์) ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.2e ต่อจากนั้น IMF-Bz ก็จะหันไปทางทิศใต้ที่ 06:00 UT แม้ว่า IMF-Bz จะฟื้นตัวไม่กี่ชั่วโมงในตอนแรก มันก็จะหันไปทางทิศใต้อีกครั้งเป็นเวลาเกือบ 12 ชั่วโมงถัดไปก่อนที่จะฟื้นตัว ในระหว่างช่วงเวลานี้ Sym-H ก็ลดลงไปถึงจุดต่ำสุด -233 nT ที่ 22:45 UT ซึ่งมีความหมายว่าเป็นพายุที่แรงที่สุดของวัฏจักรสุริยะนี้ เพื่อความสะดวกของเรา เราจะแบ่งพายุออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกอาจจะถูกพิจารณาจาก 04:45-12:00 UT ในวันที่ 17 มีนาคม 2558 ในระหว่างช่วงเวลานี้ IMF-Bz จะหันไปทางทิศใต้เป็นครั้งแรกและ Sym-H มีค่าต่ำประมาณ 110 nT ก่อนที่จะเริ่มฟื้นตัวเล็กน้อยด้วย IMF-Bz ที่หันกลับไปทางทิศเหนือ ส่วนที่สองอาจจะถือว่าเป็นส่วนที่เหลือของพายุหลังจากเวลา 12:00 UT ในระหว่างช่วงเวลานี้ IMF-Bz จะหันและยังคงอยู่ในทางทิศใต้เป็นเวลาเกือบ 12 ชั่วโมงและ Sym-H มีค่าต่ำสุดเท่ากับ -232 nT ก่อนที่จะเริ่มเฟสการฟื้นตัว จากที่เห็นในรูปที่ 2.2 เวลาของการเริ่มฉับพลัน (SC) ได้ถูกทำเครื่องหมายเอาไว้ด้วยเส้นประสีแดงแนวตั้ง (4.65 UT, March 17th, 2558) ในขณะที่ เวลาที่ Sym-H มีค่าต่ำที่สุดครั้งที่ 1 จะถูกมาร์คไว้ด้วยเส้นประสีเขียวแนวตั้ง (9.4 UT, March 17th, 2558) ส่วนเวลาของจะต่ำสุดที่แท้จริงของ Sym-H (-232 nT ที่เวลา 22:45 UT) จะถูกมาร์คไว้ด้วยเส้นประสีม่วงแนวตั้ง (22.7 UT, March 17th, 2558)

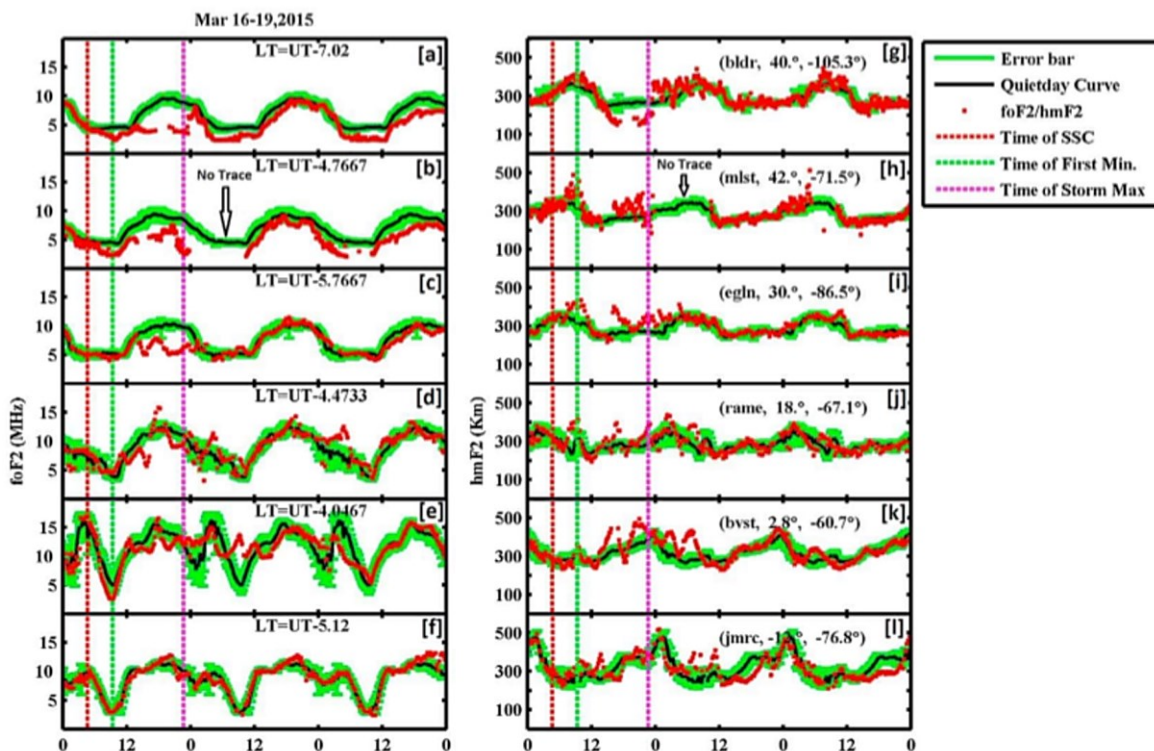
อย่างที่เข้าใจในตอนนี เมื่อ IMF-Bz หันไปทางทิศใต้เนื่องจากสนามไฟฟ้าคอนเวกชันที่เพิ่มขึ้น สนามไฟฟ้าเจาะทะลุทันที (PPEF) ไปทางทิศตะวันออกก็จะถูกสังเกตเห็นได้ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ตอนกลางวันและเมื่อ PPEF ไปทางทิศตะวันตกที่เกี่ยวข้องกันจะถูกสังเกตเห็นได้ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ตอนกลางคืน มันควรจะตั้งข้อสังเกตในกรณีนี้ (การหันเหไปทางทิศใต้ของ IMF) PPEFs จะอยู่ในทิศทางเดียวกับทิศของสนามไฟฟ้าโซลาร์ในแนวเส้นศูนย์สูตรตั้งแต่รุ่งอรุณไปจนถึงสนธยา (dawn-dusk) ทั่วโลก อย่างไรก็ตาม ในระหว่างที่มีการหันเหไปทางทิศเหนือแบบฉับพลันของ IMF-Bz โดยทั่วไป PPEFs ที่ซึ่งทะลุไปสู่ชั้นไอโอโนสเฟียร์ในแนวเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำนั้น จะอยู่ในทิศทางที่ตรงข้ามกับทิศของสนามไฟฟ้าโซลาร์ในแนวเส้นศูนย์สูตร dawn-dusk ทั่วโลกเหล่านั้น หรืออาจจะพูดง่าย ๆ ว่า ในระหว่างการหันเหไปทางทิศใต้ของ IMF สนาม PPEFs จะเสริมความแรงของสนามไฟฟ้าโซลาร์ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีอยู่ ในระหว่างการหันเหกลับไปทางทิศเหนือของ IMF นั้น สนาม PPEFs จะหักล้างกับสนามไฟฟ้าโซลาร์ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีอยู่ ดังนั้น ในกรณีของเรา ผลที่เกิดขึ้นจาก PPEFs ส่วนใหญ่ได้ถูกคาดหวังที่จะถูกสังเกตได้ประมาณ 2-3 ชั่วโมงบนทั้งสองด้านของเส้นสีเขียวแนวตั้ง การหันเหของ IMF-Bz โดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในระหว่างช่วงเวลานี้

2.1.2 การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศในภูมิภาคอเมริกา

ผลการศึกษาสามารถบรรยายได้ดังนี้ รูปที่ 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงชั้นไอโอโนสเฟียร์ตามที่เห็นได้ผ่านทาง ionograms ระหว่าง 17-19 มีนาคม 2558 ในภูมิภาคอเมริกา รูปที่ 2.3 (a-f) แสดงการเปลี่ยนแปลงในค่า foF2 ของชั้น F2 ของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ในขณะที่รูปที่ 2.3 (g-l) แทนการเปลี่ยนแปลงในค่า hmF2 เส้นกราฟสีดำ แทนการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของ foF2 ในวันที่เจียบพร้อมกับแถบข้อผิดพลาดที่แสดงเป็นสีเขียว การเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยในวันที่เจียบถูกคำนวณโดยใช้ค่าข้อมูลของวันที่เจียบที่สุดของเดือนจำนวน 5 วัน (วันที่ 5, 9, 10, 14, 15 มีนาคม) ส่วนเส้นกราฟสีแดงแทนค่าพารามิเตอร์ไอโอโนสเฟียร์ระหว่าง 17-19 มีนาคม 2558 สำหรับรูปที่ 2.3 (a-f) เส้นกราฟสีแดงแทนการเปลี่ยนแปลงในค่า foF2 ในทำนองเดียวกันในรูปที่ 2.3 (g-l) การเปลี่ยนแปลงในค่า hmF2 ก็แสดงผ่านเส้นกราฟสีแดง สัญลักษณ์ที่เหมือนกันก็ถูกใช้ในรูปที่ 4 สำหรับภูมิภาคยุโรป มันควรจะตั้งข้อสังเกตว่านอกเหนือจาก 6 สถานีที่กล่าวถึงในรูปที่ 2.3 Jicamarca เป็นสถานีที่อยู่ในแนวเส้นศูนย์สูตร (แนวแม่เหล็กโลก) ในขณะที่ สถานีอื่นอยู่ที่ละติจูดต่ำและกลางที่ซึ่งตั้งอยู่ในซีกโลกเหนือ อย่างไรก็ตาม นำเสียดายที่เราไม่สามารถหาข้อมูลจากสถานีในซีกโลกใต้ได้ สำหรับภูมิภาคยุโรป นอกเหนือจาก 6 สถานีนั้นแล้ว มี 3 สถานีอยู่ในละติจูดกลางในซีกโลกเหนือ ในขณะที่ อีก 3 สถานีอยู่ในละติจูดกลางในซีกโลกใต้ ไม่มีข้อมูลของสถานี ionosonde ในแนวเส้นศูนย์สูตรในภูมิภาคยุโรป ส่วนการเปลี่ยนแปลงของ hmF2 ในภูมิภาคอเมริกา ((g-l)) ก็ให้เห็นได้ว่าไม่มีผลกระทบที่เห็นได้ชัดในช่วงเวลาของการเริ่มฉับพลัน ผลกระทบแรกๆ ที่มากสามารถมองเห็นได้รอบเส้นประสีเขียว ซึ่งแทนค่าที่ต่ำที่สุดค่าแรกของ Sym-H มันเป็นเรื่องง่ายที่จะสังเกตเห็นว่ามี การเพิ่มขึ้นในค่า hmF2 ที่ทุก ๆ สถานี การเพิ่มขึ้นดูเหมือนว่ามีค่าต่ำกว่าที่ Jicamarca (สถานีในแนวเส้นศูนย์สูตร) อย่างไรก็ตาม ก็ค่อนข้างที่จะมีค่าที่สูงขึ้นที่สถานีอื่น ๆ ยกเว้นสถานี Boulder การเพิ่มขึ้นที่เหมือนกันในค่า hmF2 สามารถเห็นได้ในภูมิภาคยุโรป (รูปที่ 2.4(g-l)) แม้ว่า การเพิ่มขึ้นนี้จะมองเห็นไม่ชัดมากในซีกโลกใต้ มันก็สามารถเห็นได้ในซีกโลกเหนือ เหตุการณ์นี้สามารถถูกอธิบายได้โดยสนามไฟฟ้าเจาะทะลุแบบทันทีที่เกี่ยวข้องกับ IMF-Bz ที่มีความผันผวนในเวลานั้น ถึงแม้ว่า มันเป็นไปได้ที่ DDEF อาจจะถูกสร้างขึ้นเช่นกันในเวลานี้ในระดับความสูงที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม มันก็อาจจะไปไม่ถึงที่สถานีละติจูดในแนวเส้นศูนย์สูตรและต่ำในเวลานี้ นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นในค่า hmF2 ถูกเห็นได้ในทุก ๆ สถานีในช่วงเวลาที่สั้น (1-2 ชม.) ในกรณีของสนามไฟฟ้า DD นี้ ผลกระทบของมันสามารถที่จะยังคงอยู่ได้ในช่วงเวลาที่นานกว่า ดังนั้น เราอาจจะบ่งชี้คุณลักษณะนี้ว่าเกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้าเจาะทะลุแบบทันที (PPEFs) ได้ สำหรับค่า foF2 นั้น มันแสดงการลดลงที่น้อยมากในค่า foF2 สำหรับทุก ๆ สถานีที่อยู่ในภูมิภาคอเมริกา ในทางกลับกัน ภูมิภาคยุโรปแสดงการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในค่า foF2 สำหรับทุก ๆ สถานีที่เวลาประมาณ 12:00 UT นั่นคือหลังจากเส้นแนวตั้งสีเขียวไปแล้ว

2.1.3 การเกิดขึ้นพร้อมกันของการเกิดพายุไอโอโนสเฟียร์เชิงบวกและเชิงลบ

จากการศึกษาพบว่า หลังจากเวลาประมาณ 12:00 UT IMF-Bz เริ่มที่จะหันเหไปทางทิศใต้และคงอยู่ในทิศใต้เป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง และค่า Sym-H ก็จะมีค่าเข้าใกล้ค่าที่ต่ำที่สุด -232 nT ที่เวลาประมาณ 22:45 UT (ถูกแทนด้วยเส้นแนวตั้งสีม่วงแดง) ในช่วงเวลานี้ การเปลี่ยนแปลงจำนวนมากได้เกิดขึ้นกับทุก ๆ สถานีในทั้ง 2 ภูมิภาค ในภูมิภาคอเมริกา ยกเว้นที่ Boulder และ Millstone Hill สถานีอื่น ๆ ทั้งหมดแสดงการเพิ่มขึ้นในค่า hmF2 แล้วตามด้วยการลดลง โดยทั่วไป ค่า hmF2 ที่เพิ่มขึ้นนี้แสดงพฤติกรรมการแกว่งตัวที่สถานีเหล่านี้ ในกรณีของ Boulder (รูปที่ 2.3g) เราสามารถมองเห็นการลดลงในค่า hmF2 ที่ชัดเจนและมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชั้นไอโอ



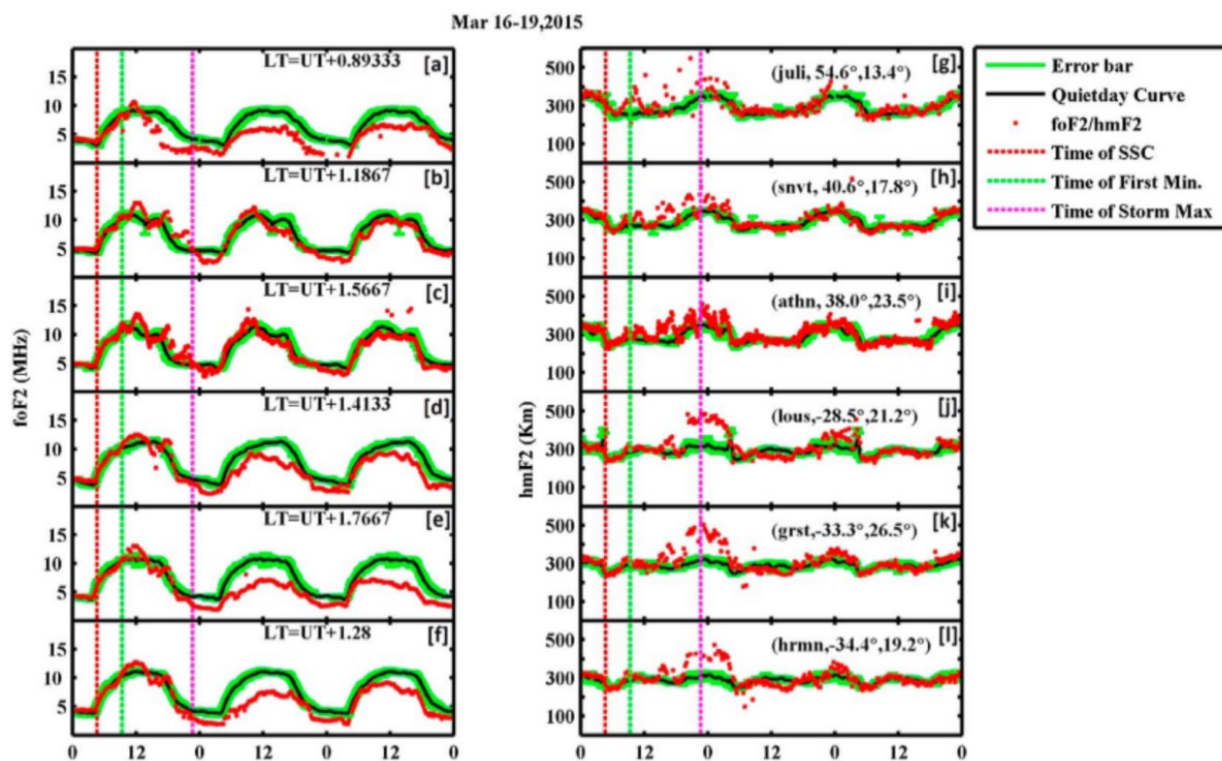
รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ชั้นไอโอโนสเฟียร์ในภูมิภาคอเมริกา ระหว่างวันที่ 16-19 มีนาคม 2558 [1]

โนสเฟียร์กำลังเคลื่อนลง สำหรับค่า foF2 นั้น Boulder (รูปที่ 2.3a) Millstone Hill (รูปที่ 2.3b) และ Eglin (รูปที่ 2.3c) รูปทั้งหมดนี้แสดงการลดลงในค่า foF2 ที่รุนแรง ในขณะที่ สถานีอื่น ๆ ไม่ได้แสดงการลดลงที่รุนแรงของ foF2 ดังกล่าว สิ่งนี้อาจจะเป็นการบ่งชี้ของการก่อตัวของโดนาโมรบกวนในชั้นไอโอโนสเฟียร์ การลดลงของ hmF2 และ foF2 ที่ Boulder เริ่มต้นประมาณ 12:00 UT เนื่องจากเกือบจะหกชั่วโมงที่ได้ผ่านไปแล้วจากการเกิดพายุ มันทึ่มีความเป็นไปได้เช่นกันที่กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับโดนาโมรบกวนในชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้เริ่มต้นแล้ว ซึ่งถูกสะท้อนให้เห็นจากค่า hmF2 และค่า foF2 ที่ Boulder ในขณะที่เราสังเกตเห็นการลื่นไถล (drift) ไปในทิศทางลงในชั้นไอโอโนสเฟียร์

ในกรณีนี้ การปรากฏตัวของสนามไฟฟ้าไปทางทิศตะวันตกที่ถูกสร้างขึ้นอันเนื่องมาจากโดนาโมรบกวนก็ไม่สามารถที่จะละลายได้ อย่างไรก็ตาม มันต้องถูกพิจารณาว่าเส้นสนามแม่เหล็กโลกถูกเอียงไปอย่างมากที่ตำแหน่งของ Boulder ดังนั้นการลื่นไถล ExB ที่สอดคล้องกันเพียงอย่างเดียวอาจจะไม่มีองค์ประกอบแนวตั้งที่แรงพอที่จะสร้างการลื่นไถลไปในทิศทางขาลงดังกล่าวของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ดังนั้นสนามไฟฟ้าไปทางทิศตะวันตกไม่สามารถที่จะเป็นตัวกระตุ้น (ต้นเหตุ) เพียงอันเดียวสำหรับการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วดังกล่าวในทั้งค่า foF2 และ hmF2 เราเชื่อว่าปัจจัยที่สำคัญอีกข้อหนึ่งในกรณีนี้จะต้องเป็นการเปลี่ยนแปลงลม thermosphere ที่เกี่ยวข้องกับโดนาโมรบกวนซึ่งก่อให้เกิดการรวมตัวกันใหม่ที่เร็วขึ้นที่ระดับความสูงเหล่านั้นซึ่งนำไปสู่การลดลงอย่างรวดเร็วในค่า foF2 (ความหนาแน่นอิเล็กตรอน) และการลดลงใน hmF2 ที่สอดคล้องกัน ผลของโดนาโมรบกวนยังมองเห็นได้ที่ Eglin ด้วย แม้ว่าผลจะค่อนข้างต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ Boulder และ Millstone Hill สถานีที่เหลือก็ไม่ได้แสดงผลกระทบใด ๆ ดังกล่าวเลย ในช่วงของเวลานี้ (ระหว่างเส้นแนวตั้งสีเขียวและสีม่วงแดง) เป็นช่วงเวลาที่เรา

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาแบบเบิลที่มีต่อการระบุทิศทางเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

สามารถเห็นผลกระทบที่แตกต่างชัดเจนของไดนาโมรบกวนและสนามไฟฟ้าเจาะทะลุแบบทันทีที่ละติจูดที่ต่างกััน ผลกระทบไดนาโมรบกวนอาจจะไปถึงละติจูดของ Eglin อย่างเป็นทางการได้ ในขณะที่ สถานีอื่น ๆ (Ramey, Boa Vista, Jicamarca) อาจจะยังไม่ได้รับผลกระทบและยังคงอยู่ภายใต้ผลกระทบของ PPEFs อย่างเป็นทางการ เมื่อเวลาผ่านไป DDEF จะค่อย ๆ แพร่กระจายและไปถึงสถานีในแนวเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำ



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ชั้นไอโอโนสเฟียร์ในภูมิภาคยุโรป ระหว่างวันที่ 16-19 มีนาคม 2558 [1]

ถ้าเราดูที่ภูมิภาคยุโรป (รูปที่ 2.4) มันยากจริง ๆ ที่จะแยก PPEF และผลกระทบไดนาโมรบกวนใด ๆ โดยภาพรวม สถานีทั้งหมดในซีกโลกทั้งสองแสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นของค่า hmF2 (รูปที่ 2.4 (g-l)) การเพิ่มขึ้นของ hmF2 ที่มากที่สุดได้ถูกบันทึกไว้ที่ช่วงเวลาประมาณเมื่อ Sym-H มีค่าต่ำที่สุด (แทนด้วยเส้นแนวตั้งสีม่วงแดง) การเพิ่มขึ้นของค่า hmF2 เริ่มต้นประมาณ 18:30 UT ในวันที่ 17 มีนาคม 2558 และมันยังคงคืออยู่เหนือเส้นกราฟวันที่เจียบ (แทนด้วยเส้นกราฟสีดำมีแถบค่าผิดพลาดสีเขียว) จนถึงเวลา 04:30 UT ของวันถัดไปคือ 18 มีนาคม 2558 ดังนั้นเกือบ 10 ชั่วโมง ชั้นไอโอโนสเฟียร์ในภูมิภาคยุโรปก็จะถูกสังเกตเห็นว่าอยู่เหนือระดับความสูงปกติของมันได้เป็นอย่างดี ส่วนใหญ่ของคาบเวลานี้ IMF-Bz จะเคลื่อนไปทางทิศใต้ก่อนที่จะหันเหกลับไปทางทิศเหนือที่เวลาประมาณ 00:00 UT ของวันที่ 18 มีนาคม 2105 การมองเข้าไปใกล้ ๆ จะแนะนำที่ว่า “ผลกระทบเป็นที่โดดเด่นมากในซีกโลกใต้เมื่อเทียบกับซีกโลกเหนือ” และ “ถ้าเราพิจารณาไปที่การเปลี่ยนแปลงของค่า foF2 เราจะเห็นว่า foF2 ลดลงอย่างมากที่ทุก ๆ สถานี ในขณะที่ เราจะเห็นการเพิ่มขึ้นในค่า hmF2” เหตุการณ์นี้อาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียเนื่องจากการเคลื่อนย้ายของพลาสมาไปตามเส้นสนาม ในขณะที่ย่านไอโอโนสเฟียร์ถูกยกขึ้น ดังนั้น หลังจาก foF2 เพิ่มขึ้นในช่วงแรกประมาณ 12:00 LT ของวันที่ 17 มีนาคม 2558 แล้ว foF2 จะค่อย ๆ เริ่ม

ลดลงที่ละน้อย จนกระทั่งมีค่าที่ต่ำกว่าค่าวันที่เทียบสำหรับทุก ๆ สถานี ดังในรูปที่ 2.4 (a-f) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ในเชิงลบ

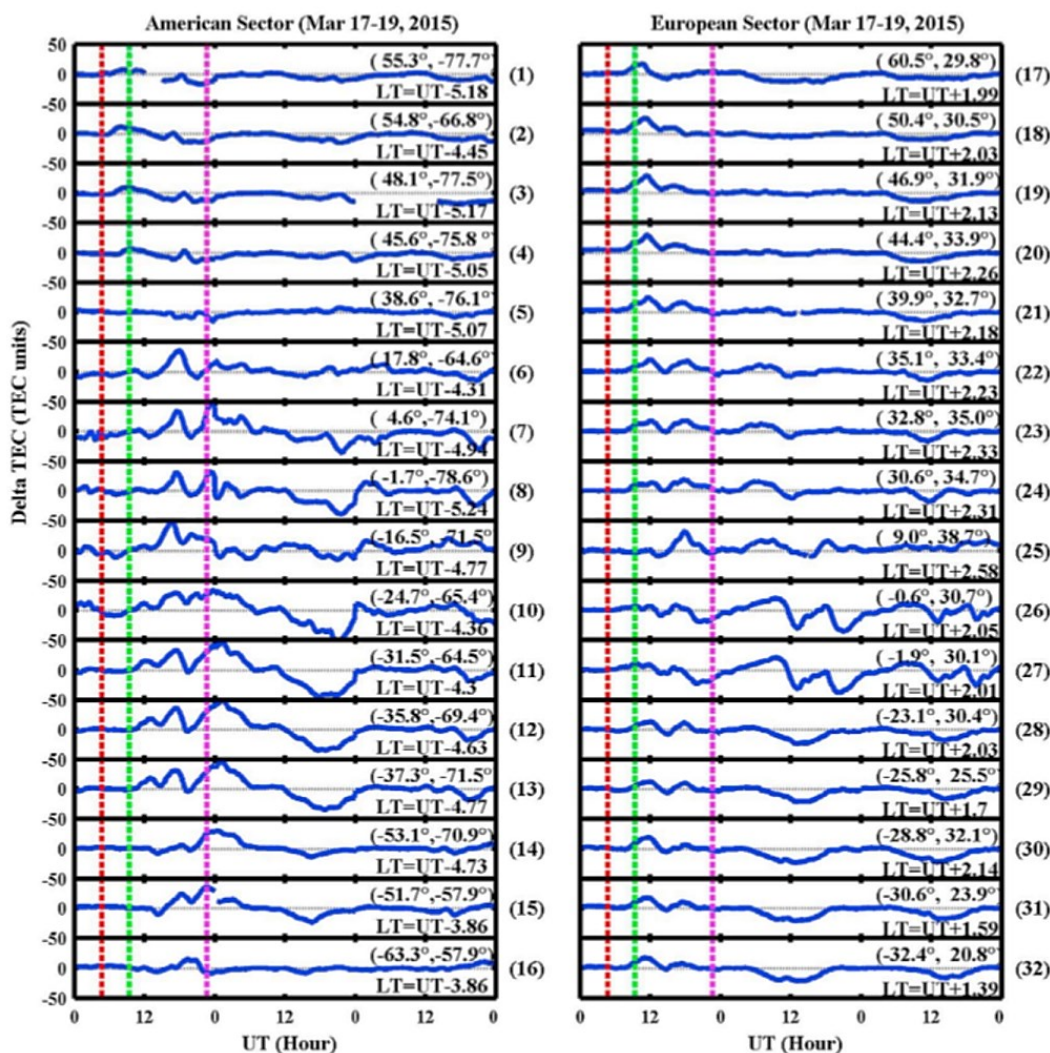
หลังจากเวลา 00:00 UT ในวันที่ 18 มีนาคม 2558 IMF-Bz จะไปถึงค่าวันที่เทียบของมันเป็นอย่างช้า ๆ ประมาณ 0 nT โดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรงมาก ดังนั้น เราไม่ได้คาดหวัง PPEFs ที่มากหลังจากช่วงเวลานี้ ผลกระทบอะไรก็ตามของ PPEFs อาจยังคงอยู่ ซึ่งถูกคาดว่าจะหายไปภายใน 2-3 ชม. ดังนั้น หลังจากเวลา 04:00 UT ในวันที่ 18 มีนาคม พลาสมาในชั้นไอโอโนสเฟียร์ถูกคาดว่าจะถูกควบคุมโดยไดนาโมรบกวน อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาก่อนหน้านี้เป็นช่วงเวลาที่ยากที่จะแยกความแตกต่างระหว่างผลกระทบของสนามไฟฟ้าเฉาะทะเลแบบทันทีกับสนามไฟฟ้าแบบไดนาโมรบกวน ในเวลาเดียวกัน PPEFs โดยทั่วไปมักจะมีอายุสั้นและไม่สามารถที่จะทำอะไรได้เลยเป็นเวลา 10 ชั่วโมง ดังนั้น การเพิ่มขึ้นเกือบ 10 ชั่วโมงใน hmF2 อาจจะเป็นเพราะการกระทำของทั้งสองเหตุการณ์ร่วมกัน (DDEF + PPEF) หรือเฉพาะ DDEF แต่มันก็อาจจะเป็นไปไม่ได้ที่จะสรุปด้วยข้อสังเกตดังกล่าวในตอนนี ผลการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกันนี้สามารถที่จะพบได้จากรูปที่ 2.5 โดยชื่อและรายละเอียดของสถานีต่าง ๆ ทั้งสองภูมิภาค ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ในรูปที่ 2.5 (แถวที่ 1-16) แทนค่า ΔTEC ที่เกิดขึ้นในภูมิภาคอเมริกา ในขณะที่ รูปที่ 2.5 (แถวที่ 17-32) แทนค่า ΔTEC ที่เกิดขึ้นในภูมิภาคยุโรป

ที่เวลาประมาณ 18:30 UT ในวันที่ 17 มีนาคม 2558 พบว่า การเพิ่มขึ้นของค่า TEC ในภูมิภาคอเมริกาสามารถที่จะเห็นได้ชัดเจนซึ่งจะเห็นได้ทุกสถานีที่ต่ำกว่าเส้นละติจูด 20°N <รูปที่ 2.5 (6)-(16)> อย่างไรก็ตาม สถานีที่อยู่เหนือกว่า 38°N <รูปที่ 2.5 (1)-(5)> แสดงการลดลงในค่า TEC ในเวลาเดียวกัน เหตุการณ์นี้พิสูจน์ให้เห็นถึงการปรากฏตัวพร้อมกันของการเกิดพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์เชิงบวกและเชิงลบในภูมิภาคอเมริกา เหตุผลข้อหนึ่งที่เป็นไปได้สำหรับเรื่องนี้คือว่า “การเปลี่ยนแปลงลมเทอร์โมสเฟียร์และสนามไฟฟ้าไดนาโมรบกวนที่เกี่ยวข้อง (ไปทางทิศตะวันตกในกรณีนี้) ได้ไปจนถึง 40°N ณ ตอนนีในภูมิภาคอเมริกา ในเวลาเดียวกัน สถานีที่ต่ำกว่า 40°N PPEF นั้นยังคงแอกทีฟอยู่” นั่นคือเหตุผลว่าทำไมเราจึงสามารถที่จะเห็นพลาสมาบูบเบิ้ลและลบที่เกิดขึ้นพร้อมกันในภูมิภาคอเมริกา การปรากฏตัวพร้อมกันที่เป็นไปได้ของการเกิดพายุไอโอโนสเฟียร์ทั้ง 2 ประเภทนี้สามารถที่จะพบได้ไปจนถึง 02:00 UT ของวันที่ 18 มีนาคม 2558 อย่างไรก็ตาม ภูมิภาคยุโรปไม่ได้แสดงการเกิดพายุพร้อมกันดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ผลกระทบใด ๆ ที่เกี่ยวข้องกับไดนาโมรบกวนนั้นจะยังคงมีอยู่ที่เหนือ 60°N นั่นคือเหตุผลว่าทำไมเราจึงไม่เห็นการเกิดพายุเชิงลบอย่างเช่นที่พบในละติจูดกลางของภูมิภาคยุโรป อย่างไรก็ตาม นอกเหนือจาก DD แล้ว ปัจจัยอื่น ๆ ที่ช่วยทำให้เกิดพายุเชิงลบในภูมิภาคอเมริกานั้นอาจจะมาจากการขยายตัวไปทางเส้นศูนย์สูตรของจุดต่ำสุดของความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ละติจูดกลางและการกดไว้ที่เส้นศูนย์สูตรของพลาสมาพอสส์ (plasmopause) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

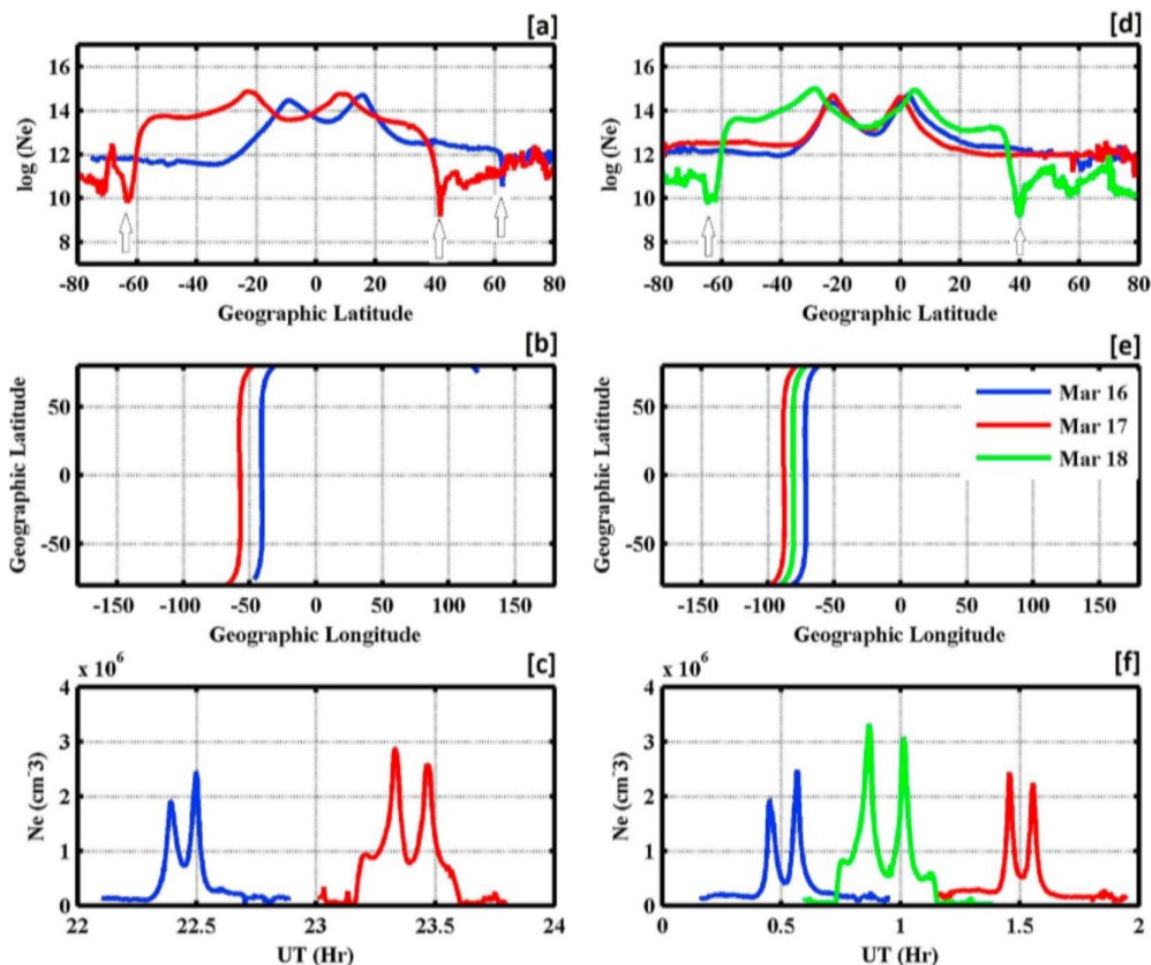
2.1.4 ร่องความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ละติจูดกลางและไหล่ที่ละติจูดกลาง

ร่อง (trough) ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ละติจูดกลางเป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่เกิดขึ้นได้ใกล้ ๆ ขอบไปทางเส้นศูนย์สูตรของ auroral oval ที่ถูกบ่งชี้คุณลักษณะได้โดยการจางหายความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่รุนแรง โดยทั่วไปอาจจะถูกแพร่ขยายจากหลังเที่ยงวันไปจนถึงรุ่งอรุณ (dawn) ได้ โดยทั่วไป มันจะมี 3 โครงสร้างที่เกี่ยวข้องกับประเด็นนี้ คือ ขอบไปทางเส้นศูนย์สูตร, ร่องที่ต่ำสุดและขอบไปทางขั้วโลก ปรากฏการณ์ที่ถูกเชื่อว่าจะเป็นต้นเหตุคือ ลักษณะตรงกันข้ามของพลาสมาลอยเลื่อนที่อยู่ในแนวอนที่เคลื่อนตัวไปใน 2 ทิศทาง (ส่วน) ของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ได้แก่ ส่วนที่ไปทางเส้นศูนย์สูตรและส่วนที่ไปทางขั้วโลก ในส่วนที่ไปทางเส้นศูนย์สูตรของบริเวณมีด

พลาสมาเลื่อนลอยไปทางทิศตะวันออกในขณะที่ในส่วนที่ไปทางขั้วโลก พลาสมาเลื่อนลอยไปทางทิศตะวันตกซึ่งส่งผลให้เกิดแถบแคบของละติจูดที่มีการสูญเสียที่รุนแรงของความหนาแน่นพลาสมาที่นำไปสู่การก่อตัวของร่องที่ละติจูดกลาง โดยทั่วไป ร่องถูกสังเกตได้ประมาณละติจูดทางภูมิศาสตร์ 60° ในซีกโลกทั้งสองที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยซึ่งขึ้นอยู่กับการวางตัวของเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก ยกตัวอย่างเช่น การใช้ระบบดาวเทียมของกรมอุตุนิยมวิทยา โปรไฟล์ความหนาแน่นอิเล็กตรอนในไอโอโนสเฟียร์และสภาพภูมิอากาศ นอกจากนี้ ยังพบอีกว่า ในภูมิภาคอเมริกา ร่องสามารถเกิดขึ้นประมาณละติจูด 50°N ในสภาวะที่เจียบทางแม่เหล็กโลกในระหว่างฤดูวีนอกซ์เดือนมีนาคม อย่างไรก็ตาม ร่องที่ละติจูดกลางถูกรู้ว่าจะเคลื่อนย้ายไปทางเส้นศูนย์สูตรในระหว่างที่มีกิจกรรมแม่เหล็กโลกเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของค่า ΔTEC ที่พบได้ใน 2 ภูมิภาค ระหว่างวันที่ 17-19 มีนาคม 2558 [1]



รูปที่ 2.6 ค่าลอการิทึมของความหนาแน่นอิเล็กตรอน in-situ (แถวบน), พื้นที่ครอบคลุมในทางละติจูด-ลองจิจูดของแต่ละเส้นทาง (แถวกลาง) และค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน in-situ (แถวล่าง) ของ SWARM A [1]

เพื่อพิสูจน์ประเด็นนี้เพิ่มเติม เราจะดูรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงการวัดความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่จุด ๆ หนึ่ง (in situ) โดยดาวเทียม SWARM-A ดาวเทียมที่ประมาณ 450 km ในที่นี้ เราจะพิจารณาเส้นทางของ SWARM-A ที่ติดกันสองเส้นทางในช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตกดินที่ผ่านเหนือภูมิภาคอเมริกาเพื่อพิสูจน์ความถูกต้องการปรากฏตัวพร้อมกันของการเกิดพายุเชิงบวกและเชิงลบ ในรูปที่ 2.6 นี้ เส้นกราฟสีฟ้า, สีแดงและสีเขียวแทนเส้นทาง SWARM-A ในวันที่ 16, 17 และ 18 มีนาคม ตามลำดับ เส้นทางเหล่านี้ทั้งหมดอยู่ในภูมิภาคหลังพระอาทิตย์ตกดินและเวลาท้องถิ่นของแต่ละเส้นทางในลองจิจูดที่ศึกษาจะอยู่ใกล้กันประมาณ 20 ชั่วโมงเวลาที่ท้องถิ่น (LT) แถวบนแสดงความหนาแน่นอิเล็กตรอน in-situ เสมือนเป็นฟังก์ชันของละติจูด แถวกลางแทนพื้นที่ครอบคลุมในทางละติจูด-ลองจิจูดของแต่ละเส้นทาง ในขณะที่แถวล่างแทนค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน in-situ ของแต่ละเส้นทาง เสมือนเป็นฟังก์ชันของเวลา UT ทางด้านซ้ายมือของรูปที่ 2.6 (รูปที่ 2.6 a-c) เส้นกราฟสีแดงเป็นเส้นทางของ SWARM-A ในช่วงเวลา 23:00-23:40 UT ในวันที่ 17 มีนาคม 2558 ซึ่งพาดผ่านลองจิจูด -60° ส่วนเส้นทางใน

วันที่ 16 มีนาคม 2558 ที่แสดงในเส้นกราฟสีน้ำเงินนั้นพาดผ่านลองติจูดที่อยู่ใกล้กัน ซึ่งสามารถที่จะถูกพิจารณาเสมือนเป็นแบบรูปช่วงเวลาที่ยียบในกรณีนี้ได้

ประการแรก การเพิ่มขึ้นในความหนาแน่นอิเล็กตรอนพีคในบริเวณ crest และการเพิ่มขึ้นที่สูงมากในขอบเขตทางละติจูดของบริเวณ EIA สามารถถูกสังเกตได้ในวันที่ 17 มีนาคม 2558 สิ่งนี้เป็นบทพิสูจน์ของการปรากฏของ PPEF ที่ซึ่งนำไปสู่การก่อตัวของความผิดปกติที่แรงขึ้นอันนี้ ซึ่งบางครั้งถูกเรียกว่า “super fountain effect” สิ่งที่สำคัญเป็นอันดับ 2 ที่ต้องบันทึกไว้ก็คือ “การลดลงแบบรวดเร็วมาก” ในค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ละติจูด 40°N ในซีกโลกเหนือและที่ประมาณ -60° ในซีกโลกใต้ พร้อมกับการจางหายเป็นรูปทรง V เพียงแต่หันเหไปทางขั้วโลกต่อมกันเท่านั้น โดย sharp drop ในความหนาแน่นที่ละติจูด 40°N นี้ที่รู้จักกันว่าเป็น “ไหลที่ละติจูดกลาง” นั้นยังเป็นสัญลักษณ์ของพลาสมาพอส ซึ่งโดยทั่วไป “ไหล” จะถูกสร้างขึ้นเมื่อความหนาแน่นพลาสมาที่ละติจูดกลาง/ละติจูดสูงถูกกีดขวางเนื่องจากการบีบอัดของ plasmopause ภายใต้การกระทำของสนามไฟฟ้าคอนเวกชันชั้นแมกเนโตสเฟียร์ การจางหายรูปตัววีแบบฉับพลันที่หันเหไปทางขั้วโลกของ “ไหล” แทนจุดต่ำสุดของความหนาแน่นที่ละติจูดกลาง ในกรณีนี้ จุดต่ำสุดของความหนาแน่นที่ละติจูดกลางได้ย้ายหันเหไปทางเส้นศูนย์สูตรจนถึง 40°N ในซีกโลกเหนือ ภายใต้สภาวะ (เงื่อนไข) ที่ถูกรบกวนทางแม่เหล็กโลก

เส้นทางของ SWARM-A ที่ต่อเนื่องตามลำดับ ถัดไปตอน 00:35-01:25 UT ในวันที่ 18 มีนาคม 2558 จะปรากฏอยู่ทางขวามือ (รูปที่ 2.6 (d-f)) ในกรณีนี้ เส้นกราฟสีเขียวแทนเวลาที่ถูกรบกวนที่ผ่านลองติจูดประมาณ -80° ส่วนเส้นกราฟสีน้ำเงินสำหรับวันที่ 16 มีนาคม แทนการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่เจียบตามปกติ ในเวลาเดียวกัน เส้นกราฟสีแดงสำหรับ 17 มีนาคม แทนการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่เจียบในกรณีนี้ ในขณะที่เวลาของการผ่านดาวเทียม (01:05-01:50 UT) ยังอยู่เป็นปกติก่อนการเกิดขึ้นของพายุแม่เหล็กโลก เส้นกราฟสีเขียวของรูปที่ 2.6 (d) ยังแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นตามแนวละติจูดของ EIA ที่รุนแรงที่ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 2.6 (a) ซึ่งจะบดบัง (บดบัง = overshadow) ผลกระทบของ EIAs สำหรับเส้นกราฟสีน้ำเงินและสีแดง การจางหายที่รวดเร็วมากในค่าความหนาแน่น (sharp drop) ได้ถูกสังเกตได้ที่ละติจูดประมาณ 40° และ -60°

การจางหายแบบเดียวกันถูกสังเกตได้ใน ionograms จากภาคพื้นดินตามที่แสดงในรูปที่ 2.3 (a-b) สำหรับ Boulder และ Millstone Hill ตามลำดับ ในความเป็นจริง ในกรณีของ Millstone Hill (42.6°N) การจางหายไปที่สมบูรณ์ใน ionograms จะสังเกตได้ในช่วงเวลา 0000-11:00 UT ของวันที่ 18 มีนาคม 2558 เมื่อไม่ได้รับ echoes ที่สะท้อนกลับมา การจางหายไปดังกล่าวอาจจะเกิดขึ้นเป็นหลักเนื่องด้วยเหตุผลสองประการ: (i) การลดลงของความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้น F ที่เกินกว่าความสามารถขั้นต่ำในการวินิจฉัย (ii) การดูดกลืนคลื่นวิทยุที่เคลื่อนที่อยู่ในชั้น D เนื่องจากการเร่งรัด (precipitation) ของอนุภาคที่รุนแรงในบรรยากาศด้านล่าง ในกรณีของเรา ทั้งสองเหตุการณ์อาจจะเป็นเหตุผลดังกล่าว ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนชั้นไอโอโนสเฟียร์ยังอยู่ที่ต่ำกว่าค่าปกติของมัน ในเวลาเดียวกัน การจางหายไปที่รุนแรงมากที่สุดที่ 40°N สามารถที่จะถูกสรุปเป็นหลักฐานอันหนึ่งของการขยายตัวที่หันเหไปทางเส้นศูนย์สูตรของร่องที่ละติจูดกลางและเป็นหลักฐานทางอ้อมของการขยายตัวที่หันเหไปทางเส้นศูนย์สูตรของ auroral oval ในซีกโลกเหนือของภูมิภาคอเมริกา สัญลักษณ์ของ auroral oval สามารถที่จะเห็นได้ประมาณ 50°N เสมือนเป็นพีคเล็ก ๆ ในค่าความหนาแน่น ที่ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการไอออนไนเซชันออโรรา (auroral ionization) อย่างไรก็ตาม ในซีกโลกใต้ การจางหายไปพบได้ที่ลองติจูดประมาณ -60°N เนื่องจากทั้งร่องที่ละติจูดกลางและไหลถูกตั้งวางไว้ที่บริเวณละติจูดดังกล่าว อย่างไรก็ตาม การจางหายใน

ค่า foF2 ที่ถูกพบที่เมือง Eglin (รูปที่ 2.3c) ไม่สามารถที่จะเกี่ยวข้องกับ (โยงไปหา) ร่องความหนาแน่นที่ละติจูดกลางได้ เนื่องจากตำแหน่งที่ตั้งของเมือง Eglin (30.5°N) นั้นอยู่นอกขอบเขตของร่องละติจูดกลาง

รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นรูปที่คล้ายกับรูปที่ 2.6 สำหรับภูมิภาคยุโรป เส้นทางของ SWARM-A ในกรณีนี้คือ ผ่านลองติจูด -10°E ระหว่าง 1820-1905 UT ในวันที่ 17 มีนาคม ขอบเขตที่ถูกทำเครื่องหมายไว้ด้วยการจางหายไปของความหนาแน่นอิเล็กตรอนตั้งอยู่ที่ละติจูด 50° ในซีกโลกทั้งสอง นอกจากนี้ การจางหายไปดูเหมือนว่าจะไม่รุนแรงเมื่อเทียบกับภูมิภาคอเมริกา นอกจากนี้ ขอบเขตเชิงละติจูดของ EIA ก็ดูเหมือนว่าจะค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับภูมิภาคอเมริกา อย่างไรก็ตาม เราก็ต้องจำไว้ว่า EIA ส่วนใหญ่จะถูกสร้างขึ้นชนิดที่รุนแรงมากกว่าอย่างมากในภูมิภาคลองติจูดอเมริกาเมื่อเปรียบเทียบกับลองติจูดตำแหน่งอื่น ๆ เนื่องจากความผิดปกติแม่เหล็กทางแอตแลนติกตอนใต้ สิ่งนี้จึงอาจจะเป็นเหตุผลข้อหนึ่งที่อยู่เบื้องหลังผลกระทบเร็วที่ค่อนข้างช้า (relatively less dramatic effects) ที่ถูกสังเกตได้ในภูมิภาคยุโรปและรอบ ๆ เฟสหลักของพายุเมื่อเปรียบเทียบกับภูมิภาคอเมริกา

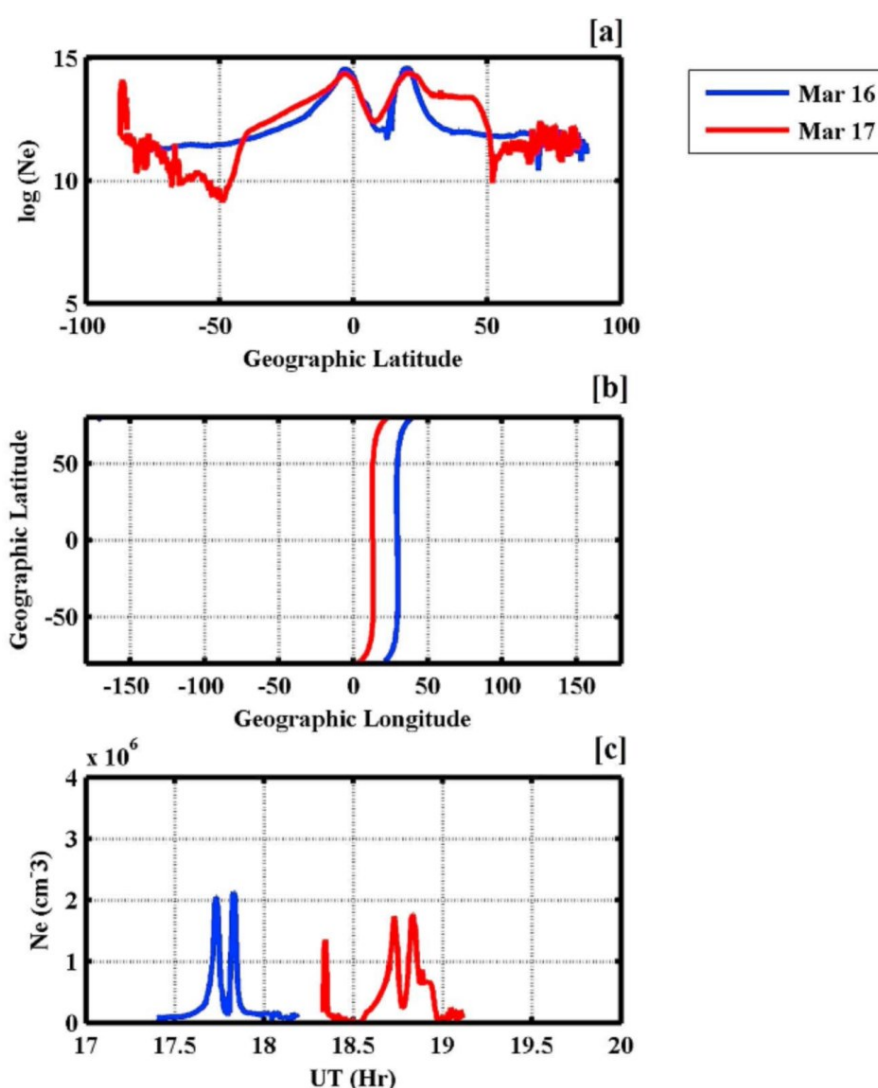
ดังนั้นบนพื้นฐานของหลักฐานดังกล่าวข้างต้น มันสามารถถูกรูปได้ว่าเฟสพายุเชิงลบที่ถูกสังเกตได้ในซีกโลกเหนือของภูมิภาคอเมริกามีส่วนที่นำมาเกี่ยวข้องได้หลายประเด็น ได้แก่ การขยายตัวที่หันเหไปทางเส้นศูนย์สูตรของร่องความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ละติจูดกลาง, การบีบอัดของพลาสมาพอสซึ่งถูกมองว่าเป็น “ไหล” ความหนาแน่น และการปรากฏที่เป็นไปได้ของสนามไฟฟ้าไดนาโมרבกวอน ในปี 2001 พบว่า มีการปรากฏตัวพร้อมกันของเฟสพายุบวกและลบในซีกโลกเหนือ (ฤดูหนาว) ในระหว่างที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกในวันที่ 10 ม.ค. 1997 โดยการปรากฏของเฟสที่ตรงข้ามกันทั้งสองจะถูกนำไปเกี่ยวข้องโยงกับปฏิกิริยาทางเคมีและเป็นแบบพลวัตที่ซับซ้อนระหว่างอนุภาคที่ถูกประจุกับบรรยากาศ (อนุภาค) นิวทริลในช่วงที่เกิดการรบกวอนแม่เหล็กโลก อย่างไรก็ตาม ในกรณีนี้ ลมเมอริโดอโนลที่ไม่สมมาตรจากซีกโลกฤดูร้อนไปยังฤดูหนาวก็อาจจะถูกพิจารณาได้ด้วยว่าเป็นตัวกระตุ้น (สาเหตุ) หลักตัวหนึ่งก็ได้ อีกทั้งการปรากฏตัวของทั้งเฟสพายุบวกและลบในช่วงฤดูอิควินอกซ์นั้นเป็นเรื่องที่ยากที่จะอธิบาย นอกจากนี้ แม้ว่าการมีส่วนร่วมเกี่ยวข้องของบรรยากาศนิวทริลที่เปลี่ยนแปลงแบบพลวัตในช่วงที่เกิดการรบกวอนแม่เหล็กโลกจะเกี่ยวข้องกันกับสิ่งที่เกิดขึ้นก็ตาม การมีส่วนร่วมเกี่ยวข้องของโครงสร้างสนามแม่เหล็กโลกในภูมิภาคอเมริกาก็ควรที่จะต้องถูกนำมาพิจารณาร่วมกันด้วย เนื่องจากการปรากฏตัวพร้อมกันของทั้งเฟสพายุบวกและลบนั้นโดยทั่วไปถูกสังเกตได้ในภูมิภาคอเมริกา

2.1.5 การเกิดพายุไอโอโนสเฟียร์เชิงลบในระหว่างที่เกิดการฟื้นตัวของพายุ

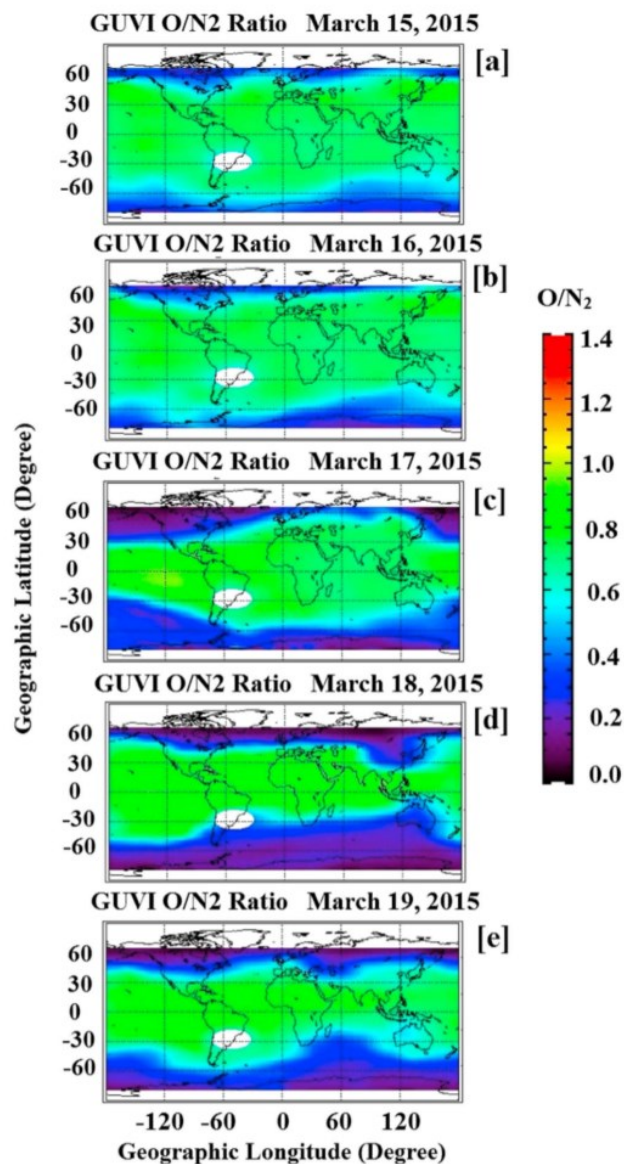
หลังจากเวลา 04 UT ของวันที่ 18 มีนาคม ไปแล้ว IMF-Bz เกือบจะฟื้นคืนสู่สภาวะปกติ (ค่าเข้าใกล้ 0 nT) ด้วยความผันผวนที่ค่อนข้างเล็กน้อย หลังจากช่วงเวลานี้เป็นต้นไป อิทธิพลของสนามไฟฟ้าเจาะทะลุแบบทันทีก็จะลดลงที่เล็กน้อย ในทำนองเดียวกัน สนามไฟฟ้าไดนาโมรบกวอนก็เริ่มที่จะเข้ามาแทนที่ความเป็นพลวัตในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ละติจูดในแนวเส้นศูนย์สูตร, ต่ำ และกลาง โดยภูมิภาคอเมริกา (รูปที่ 2.3) ไม่ได้แสดงความเปลี่ยนแปลงมากนักจากการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่เงียบ ภูมิภาคยุโรปได้รับผลกระทบอย่างรุนแรง ค่า hmF2 แสดงการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่เงียบปกติของมัน (รูปที่ 2.4 (g-l)) ในทางตรงกันข้าม ค่า foF2 (รูปที่ 2.4 (a-f)) ยังคงอยู่ที่ด้านต่ำกว่าอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่เงียบปกติของมัน ซึ่งบ่งบอกถึง (signify) พายุไอโอโนสเฟียร์เชิงลบที่เกิดขึ้นต่อเนื่องในวันที่ 18 และวันที่ 19 มีนาคม ดังนั้น สำหรับระยะเวลาเกือบ 48 ชั่วโมง ชั้นไอโอโนสเฟียร์ภูมิภาคยุโรปเจอกับพายุไอโอโนสเฟียร์เชิงลบในช่วงการฟื้นตัวของพายุแม่เหล็กโลก ผลกระทบเป็นที่โดดเด่นมากขึ้นในซีกโลกใต้เมื่อเทียบกับซีกโลกเหนือ ในความเป็นจริง สำหรับสถานี Athens การลดลงในค่า foF2 ดูเหมือนว่าจะเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก มันจะเห็นได้ว่าวันที่ 18 และ 19

มีนาคม 2558 หลายสถานีในซีกโลกใต้แสดงการลดลงในค่า TEC ที่ชัดเจนทั้งสองภูมิภาคซึ่งแทนพายุไอโอโนสเฟียร์เชิงลบ สำหรับหลายสถานีในซีกโลกเหนือ แม้ว่าจะมีการลดลงในค่า TEC มันเห็นไม่ชัดเมื่อเทียบกับซีกโลกใต้

การปรากฏตัวของพฤติกรรมที่ไม่เท่ากันในซีกโลกดังกล่าวเป็นเรื่องยากที่จะอธิบายซึ่งพิจารณาข้อเท็จจริงที่ว่าพายุลูกนี้ (17–19 มีนาคม 2558) เกิดขึ้นในฤดูออทโทน็อกซ์ หรือพุดง่าย ๆ ว่า โดยทั่วไป ความไม่เท่ากันในซีกโลกถูกสร้างขึ้นเนื่องจากความไม่เท่ากันในแบบรูปลมเทอร์โมสเฟียร์ในทั้งสองซีกโลก ลมจะยังไม่เท่ากันมากยิ่งขึ้นในช่วงฤดูโซลส์ตีซส์ (ฤดูร้อน/ฤดูหนาว) ในทางตรงข้าม ในช่วงฤดูออทโทน็อกซ์ ลมจะไม่เท่ากันค่อนข้างน้อยลง อย่างไรก็ตาม มันก็น่าจะผิดที่จะพูดว่า “ลมจะสมมาตร (เท่ากัน) อย่างแน่นอนในช่วงฤดูออทโทน็อกซ์” โดยทั่วไป ในช่วงที่เกิดการรบกวนแม่เหล็กโลก แบบรูปลมที่ถูกปรับแก้จะได้รับถูกวางซ้อนทับไปบนแบบรูปลมพื้นฐานซึ่งโดยทั่วไปจะเคลื่อนตัวจากซีกโลกฤดูร้อนไปยังซีกโลกฤดูหนาว



รูปที่ 2.7 ค่าต่าง ๆ ที่เหมือนกับรูปที่ 2.6 เพียงแต่เป็นค่าของภูมิภาคยุโรป [1]



รูปที่ 2.8 แผนภาพทั่วโลกของอัตราส่วน O/N₂ ในชั้นเทอร์โมสเฟียร์ที่เกิดขึ้นในวันที่ 15-19 มีนาคม 2558 [1]

เพื่อที่จะมีความคิดที่ดีขึ้นเกี่ยวกับความหนาแน่นนิวทรัลชั้นเทอร์โมสเฟียร์ เราจะมองไปที่แผนภาพทั่วโลก ค่าในแต่ละวันของอัตราส่วน O/N₂ ในชั้นเทอร์โมสเฟียร์ที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้อุปกรณ์ Global UV Imager (GUVI) บนบอร์ดของยานอวกาศ TIMED รูปที่ 2.8 (a-e) แสดงอัตราส่วน O/N₂ ทั่วโลกสำหรับวันที่ 15-19 มีนาคม 2558 ตามลำดับ สีเหลืองเปิดสีขาวในรูปที่ 2.8 (a-e) แทนบริเวณที่ผิดปกติแอดแลนติกทางตอนใต้ ในบริเวณนี้ สัญญาณจากการปลดปล่อยคลื่นในชั้นบรรยากาศจะถูกปนเปื้อน (contaminated) อันเนื่องมาจากการแผ่รังสีที่เพิ่มขึ้นจากอนุภาคจำนวนมากที่มาจาก radiation belt ของดวงอาทิตย์ ดังนั้นข้อมูลจากบริเวณดังกล่าวนี้จึงไม่มี (ถูกถอนออกไป) ซึ่งถูกแทนด้วยสีเหลืองเปิดสีขาว อย่างที่เห็นในรูปที่ 2.8c อัตราส่วน O/N₂ แสดงการลดลงที่รวดเร็วมากในภูมิภาคอเมริกาเมื่อเปรียบเทียบกับค่านี้ในวันที่เจียงของวันที่ 15-16 มีนาคม (รูปที่ 2.8(a-b)) การลดลงในค่า

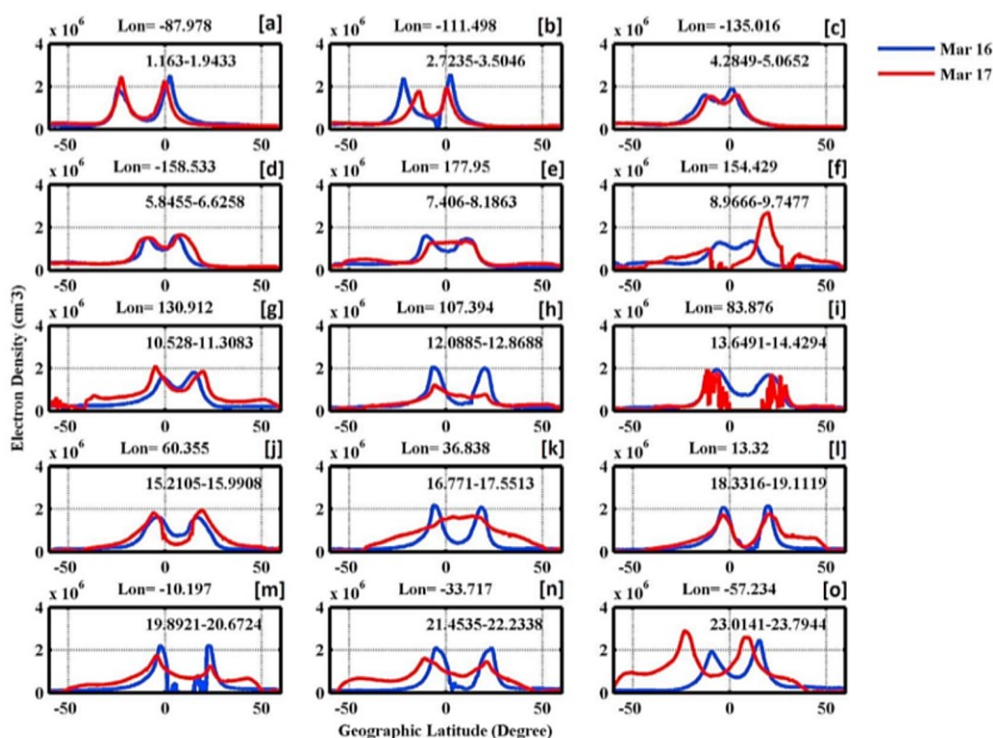
รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุทิศทาง
เรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

อัตราส่วน O/N2 ในวันที่ 17 มีนาคม นี้ยืนยันการเกิดขึ้นของเฟสพายุเชิงลบในภูมิภาคอเมริกาอย่างเช่นที่พบในค่า foF2 (รูปที่ 2.3) GPS-TEC (รูปที่ 2.5) และ SWARM-A ที่เคลื่อนที่ผ่านภูมิภาคอเมริกา (รูปที่ 2.6) ในวันที่ 18 มีนาคม (รูปที่ 2.8d) การลดลงในค่าอัตราส่วน O/N2 ดูเหมือนว่าจะเข้าไปถึงบริเวณที่หันเหไปทางเส้นศูนย์สูตรมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในซีกโลกใต้เมื่อเทียบกับซีกโลกเหนือ สิ่งนี้อาจจะอธิบายการเกิดพายุเชิงลบที่ถูกสังเกตได้ในซีกโลกใต้ทั้งในภูมิภาคอเมริกาและยุโรป ดังที่เห็นในรูปที่ 2.5 ในวันที่ 19 มีนาคม ค่าอัตราส่วน O/N2 ดูเหมือนว่าจะฟื้นตัวเล็กน้อยที่มุ่งไปสู่ค่าปกติในช่วงเวลาที่เจียบของมัน แม้ว่ามันยังคงแสดงค่าที่ลดลงในภูมิภาคยุโรป สิ่งนี้อธิบายการเกิดพายุเชิงลบที่ยังคงมีอยู่ ดังที่เห็นในรูปที่ 2.5 ในวันที่ 19 มีนาคม ในการศึกษาเมื่อไม่นานมานี้ พบว่า การเกิดพายุเชิงลบที่รุนแรงและความไม่เท่ากันของซีกโลกในระหว่างการเกิดการฟื้นตัวของพายุในวันที่ 17-19 มีนาคม เช่นกัน รวมถึงยังได้พยายามที่จะอธิบายความไม่เท่ากันของซีกโลกในทอมของความสัมพันธ์ในสนามแม่เหล็กโลกและการวางตัวของ IMF-By มันต้องถูกพิจารณาที่ว่า IMF-By แสดงบทบาทหนึ่งในการสร้างความไม่เท่ากันในระหว่างพลวัตเวลาที่เกิดพายุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในละติจูดสูง สิ่งที่เป็นต้นเหตุที่สำคัญที่สุดเบื้องหลังการเกิดพายุเชิงลบนี้คือการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมในลมนิวทรัลชั้นเทอร์โมสเฟียร์ ในช่วงระยะเวลาที่ถูกครอบคลุมแม่เหล็ก เหตุผลหลักเบื้องหลังความไม่เท่ากันดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับบางสถานที่ ในความเป็นพลวัตของลมเทอร์โมสเฟียร์เมอริโดเนียน แต่น่าเสียดาย ไม่มีการวัดลมนิวทรัลที่มากพอในตอนนี ในอนาคต ถ้ามีความพร้อมของการวัดลมที่มากขึ้นคำถามดังกล่าวสามารถที่จะถูกตอบได้

2.1.6 ภาพของ EIA ที่เห็นได้ผ่าน SWARM-A

อย่างที่เคยกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.1.2 ทั้งสามดาวเทียมในกลุ่มก้อนของ SWARM มีวงโคจรที่ขั้วโลกด้วยการเอียงของวงโคจรของแต่ละดวงเท่ากับ 87.5° ดังนั้น แต่ละเส้นทางของดาวเทียมดวงหนึ่งจะครอบคลุมหนึ่งภูมิภาคทางลองจิจูดในทางปฏิบัติ ดังนั้น มันจึงเป็นเครื่องมือที่ยอดเยี่ยมอันหนึ่งของเราในการมองไปที่ความเป็นพลวัตของบริเวณ EIA รูปที่ 2.9 (a-o) และรูปที่ 2.10 (a-o) แสดงเส้นทาง (passes) SWARM-A ที่ต่อเนื่องกันตามลำดับในตอนหลังพระอาทิตย์ตกดินของโลกในช่วงวันที่ 17 และ 18 มีนาคม 2558 ตามลำดับ ระดับความสูงของดาวเทียมจะอยู่ที่ประมาณ 450 km ในรูปทั้งสองนั้น เส้นกราฟสีฟ้าแทนเส้นทางในวันที่ 16 มีนาคม ซึ่งสามารถที่จะถูกนำมาใช้เสมือนเป็นการเปลี่ยนแปลงในวันที่เจียบในกรณีนี้ได้ ในรูปที่ 2.9 เส้นกราฟสีแดงแทนเส้นทางในวันที่ 17 มีนาคม ลองจิจูดของแต่ละเส้นทาง (ที่ข้ามผ่านแนวเส้นศูนย์สูตร) จะถูกแสดงไว้ที่ด้านบนของแต่ละแถว (panel) และช่วงเวลาของแต่ละเส้นทางก็ถูกแสดงไว้เป็นเวลา UT ในรูปตัวอักษรที่อยู่ด้านในแต่ละรูป (panel) มันควรจะถูกต้องสังเกตไว้ว่า สำหรับรูปที่ 2.9 (a-c) คาบเวลาก็ยังคงเจียบทางแม่เหล็กโลก ดังนั้น ผลกระทบของพายุควรจะคาดหวังได้ (มองเห็นได้) จากรูปที่ 2.9 (d-o)

รูปที่ 2.9e แสดง EIA ที่แปลกที่ว่า “ไม่มีการปรากฏทั้งร่อง (trough) และยอด (crest)” แต่แทนที่ โพรไฟล์ความหนาแน่นดูเหมือนว่าจะแบนราบระหว่าง 2 ยอด ที่บ่งชี้ถึงความหนาแน่นที่มีค่าใกล้เคียงกัน (near similar) ระหว่างเส้นละติจูดทั้งหมดที่อยู่ระหว่าง 2 ยอด รูปถัดไป (รูปที่ 2.9f) แสดงคุณลักษณะที่น่าสนใจอีกประเด็นหนึ่งกล่าวคือ เราสามารถเห็นได้ว่า EIA จะถูกยับยั้งไว้อย่างสิ้นเชิงในซีกโลกใต้ ในขณะที่ ในซีกโลกเหนือ EIA ถูกสร้างขึ้นอย่างรุนแรงมาก ความหนาแน่นพีคของยอดมีค่าเกือบเป็น 2 เท่าของความหนาแน่นของยอดในช่วงเวลาที่เจียบปกติ 2 รูปถัดไปแสดงพฤติกรรมที่ตรงข้ามกัน ในอีกด้านหนึ่ง รูปที่ 2.9g แสดงการเพิ่มขึ้นของ EIA ที่ลองจิจูดประมาณ 130° ในขณะที่ รูปที่ 2.9h แสดงการยับยั้งไว้ของ EIA ที่ลองจิจูดประมาณ 107°



รูปที่ 2.9 การก่อตัวของ EIA ที่ตำแหน่งลองจิจูดที่ต่างกันในวันที่ 17 มีนาคม 2558 [1]

ในรูปถัดไปที่แสดงในรูปที่ 2.9i แสดงคุณลักษณะที่น่าสนใจมากที่สุดอีกประเด็นหนึ่งในกรณีนี้ มันควรที่จะถูกตั้งข้อสังเกตที่ว่า แทนที่จะเป็นแบบรูปที่รู้จักเป็นอย่างดี เส้นกราฟสีแดงแสดงแบบรูปที่ผันผวนอย่างมาก สิ่งนี้แสดงให้เห็นถึงการปรากฏตัวของพลาสมาบับเบิลที่ภูมิภาคทางลองจิจูด (อินเดีย) การปรากฏตัวของพลาสมาบับเบิลดังกล่าวและการจางหายไปของความหนาแน่นที่เกี่ยวข้องในระหว่างที่เกิดพายุแม่เหล็กไม่ได้เป็นปรากฏการณ์ใหม่ อย่างไรก็ตาม มันก็ควรที่จะถูกตั้งข้อสังเกตอีกเช่นกันที่ว่า ไกล่บริเวณร่องของ EIA ซึ่งแทนเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก ความหนาแน่นถูกพบว่ามีความน้อยกว่า $1,000/\text{cm}^3$ ซึ่งเป็นค่าที่น้อยกว่าค่าในช่วงเวลาที่เงียบอย่างมาก คุณลักษณะที่คล้ายกันอีกอันหนึ่งที่มีมองเห็นได้เช่นกัน คือ เส้นกราฟสีน้ำเงิน (16 มีนาคม) ดังในรูปที่ 2.9m ปรากฏการณ์ที่แปลกดังกล่าวถูกสร้างขึ้นเนื่องจากการปรากฏตัวของสนามไฟฟ้าโซนัลไปทางทิศตะวันออก ซึ่งจะยกชั้น F ทั้งหมดเป็นอย่างดีให้เหนือกว่าความสูงของดาวเทียม (450 km ในกรณีนี้) เนื่องจากชั้นไอโอโนสเฟียร์ถูกยกตัวได้เป็นอย่างดีเหนือเส้นทางของมันด้วยตัวมันเอง ดาวเทียมจึงวัดค่าความหนาแน่นได้น้อยดังที่กล่าวไปแล้ว ซึ่งดูเหมือนว่าจะมีค่าที่น้อยกว่าค่าในช่วงเวลาที่เงียบเสียด้วย คุณลักษณะดังกล่าวนี้ได้ถูกตรวจพบครั้งแรกและได้ถูกอธิบายในปี 1991 โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการสังเกตด้วยดาวเทียม DMSP ในระหว่างวันที่ 13-14 มีนาคม 1989 โดยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "หลุมในแนวเส้นศูนย์สูตร" การสังเกตของ SWARM (ดังในรูปที่ 2.9i) ก็ได้ถูกกล่าวถึงเช่นกันในการศึกษาล่าสุด พบว่า การปรากฏตัวของสนามไฟฟ้าเจาะทะลุแบบทันทีไปทางทิศตะวันออกในลองจิจูดอินเดีย ซึ่งวางทับซ้อนไปบนสนามไฟฟ้าการเพิ่มขึ้นที่พลิกกลับมาก่อน-pre-reversal (PRE) เพื่อที่จะยกพลาสมาในแนวเส้นศูนย์สูตรไปยังความสูงที่มากขึ้นและเป็นการเพิ่ม EIA ที่สอดคล้องกัน การปรากฏตัวของ PPEF ก็ถูกรายงานด้วยเช่นกันในลองจิจูดอินเดียในวันที่ 18 มีนาคม โดยใช้ข้อมูล ionosonde ที่ได้จากภาคพื้นดิน รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุทิศทางรีเลย์ใหม่ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

ผู้เขียนได้แสดงให้เห็นถึงการยกตัวสูงขึ้นอย่างมากของชั้น F ในช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตกดิน ผู้เขียนยังได้รายงานถึงการเกิดขึ้นของชั้น F3 ในวันที่ 18 มีนาคม ที่สถานีในแนวเส้นศูนย์สูตร Tirunelveli มันควรจะตั้งข้อสังเกตว่าโดยทั่วไป ชั้น F3 มักเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่กิจกรรมสุริยะต่ำ ในขณะที่ ปี 2558 ก็ยังคงอยู่ใกล้กับจุดสูงสุดของวัฏจักรสุริยะ 24 โดยทั่วไป ชั้น F3 ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ในตอนกลางวันจะก่อตัวในช่วงเวลาหนึ่งเมื่อพลาสมาลอยเลื่อน โดย ExB drift ในแนวตั้งที่เส้นศูนย์สูตรมีความรุนแรงและมีค่าที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (แทนที่จะเป็น ExB drift ที่กำลังเพิ่มขึ้นแบบคงตัว) ในระหว่างที่ถูกรบกวนด้วยสนามแม่เหล็กนั้น การก่อตัวของชั้น F3 นั้นต้องการการปรากฏตัวของ PPEFs ดังนั้น การปรากฏตัวของชั้น F3 ที่ Tirunelveli ก็เป็นการแสดงให้เห็นทางอ้อมเกี่ยวกับการปรากฏตัวของ PPEFs ที่ไปทางทิศตะวันออกที่เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กในภูมิภาคอินเดีย โดย EIA ถูกมองเห็นว่ากำลังจะถูกก่อตัวอย่างสวยงามจากในรูปที่ 2.9 (j-o) ยกเว้นรูปที่ 2.9k อย่างน่าประหลาด รูปที่ 2.9k แสดง EIA ที่ถูกยับยั้งไว้ได้ทั้งหมดด้วยค่าพีคอยู่ที่เส้นศูนย์สูตร ซึ่งสิ่งนี้จะคล้ายกับรูปที่ 2.9e เพียงเดียว พฤติกรรมนี้อาจจะเกิดขึ้นเนื่องด้วยการปรากฏตัวที่เป็นไปได้ของ TIDs (การรบกวนชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เคลื่อนที่อยู่) และพบว่า การปรากฏตัวของ TIDs สามารถที่จะยับยั้งการก่อตัวของ EIA ได้อย่างมาก

รูปที่ 2.10 (a-o) ถูกมองว่ามีความต่อเนื่องมากขึ้น (เป็นอย่างดี) จากรูปที่ 2.9 เพราะมันแสดงเส้นทางที่ต่อเนื่องตามลำดับในภูมิภาคหลังจากพระอาทิตย์ตกดินในวันที่ 18 มีนาคม 2558 รูปที่ 2.10a แสดงการก่อตัวของ EIA ที่ลองติจูด -80° ในภูมิภาคอเมริกา อย่างโดยบังเอิญ อันนี้เป็น EIA ที่ถูกสร้างขึ้นที่แรงมากที่สุด ในเทอมของขอบเขตเชิงละติจูดที่มียอดทางด้านใต้อยู่ที่ (30° S) และยอดทางตอนเหนืออยู่ที่ (5° N) แม้กระทั่งที่ละติจูด ที่หันเหไปทางขั้วโลกของหลาย ๆ ยอด, ที่หลาย ๆ ยอด การไอออนไนซันสูงกว่าค่าในช่วงเวลาที่เสียบอย่างน่าทึ่งอย่างที่ไม่ต้องสงสัยเลย สิ่งนี้สามารถที่จะถูกจัดประเภทว่าเป็น “super-fountain effect” ซึ่งเกิดขึ้นจาก “การรุนแรงขึ้นของสนามไฟฟ้าการเพิ่มขึ้นที่พลิกกลับมา ก่อน (PRE) เนื่องจากการปรากฏตัวที่เพิ่มขึ้นของ PPEFs และผลกระทบของความผิดปกติทางแม่เหล็กที่แอตแลนติกทางตอนใต้ (SAMA) ซึ่งโดยทั่วไปจะทำให้ EIA มีความแรงมากกว่าในภูมิภาคอเมริกาเมื่อเทียบกับภูมิภาคในแนวลองติจูดตำแหน่งอื่น ๆ

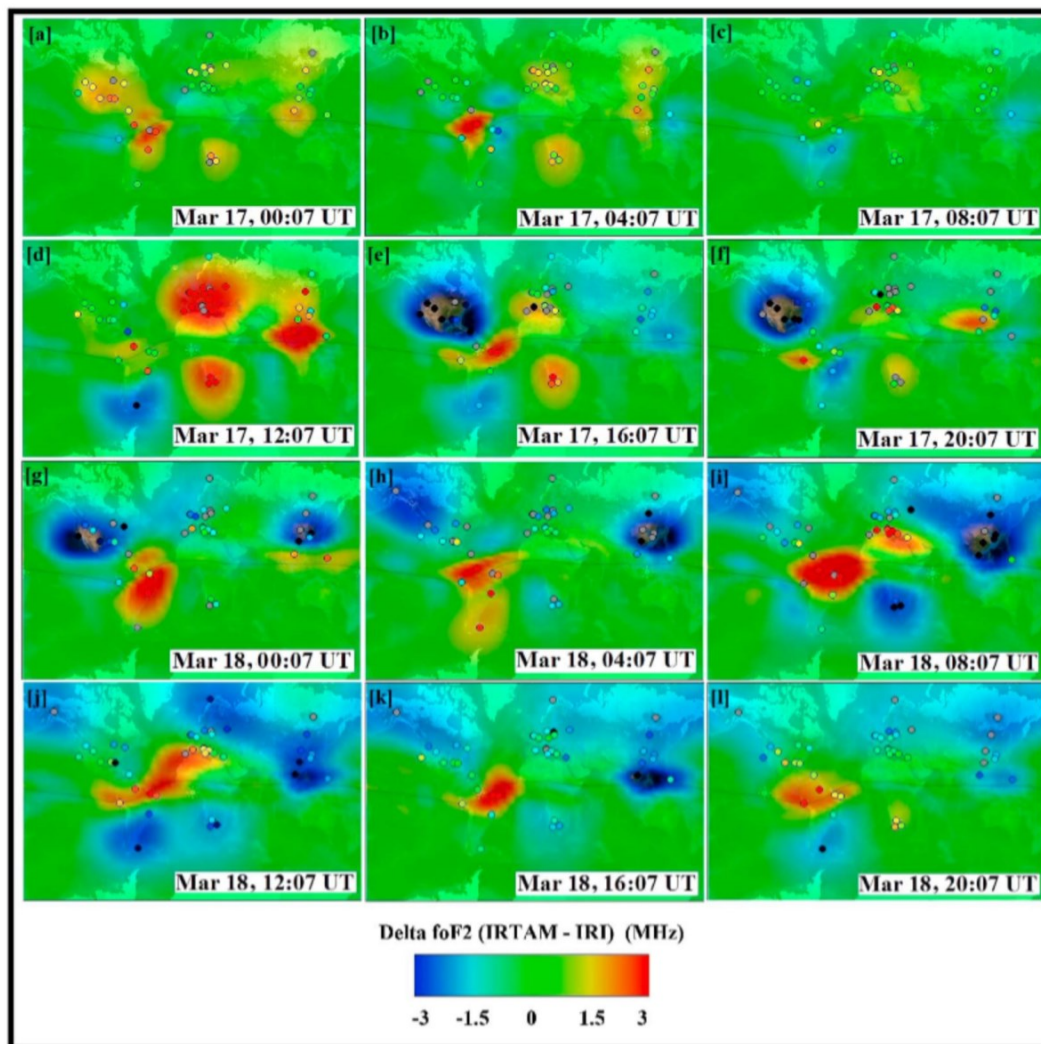
หลังจากตอน 02 UT ในวันที่ 18 มีนาคม ในช่วงเวลาการฟื้นตัวของพายุ IMF-Bz จะเข้าใกล้ 0 nT อย่างช้า ๆ ปราศจากความผันผวนอย่างฉับพลันที่มากดังในรูปที่ 2.2 ดังนั้น การเกิด PPEFs ที่แรงใด ๆ ก็สามารถที่จะถูกขัดขวางไม่ให้เกิดได้ หลังจากนั้นไป ก็มีความเป็นไปได้ที่จะมี DDEFs เคลื่อนตัวเข้าไปถึงละติจูดในแนวเส้นศูนย์สูตรในช่วงเวลานี้ สิ่งนี้สามารถที่จะถูกรูปร่างจากรูปที่ 2.10 (b-l) ที่ว่าเราสามารถมองเห็นการยับยั้งไว้อย่างช้า ๆ ของ EIA พร้อมกับการลดลงของความหนาแน่นอิเล็กตรอนด้วยเช่นกัน เรื่องสถานการณ์ดังกล่าวนี้มุ่งไปสู่การปรากฏตัวของ DDEF ที่ไปทางทิศตะวันตกโดยสนามไฟฟ้าที่ไปทางทิศตะวันตกนี้ก่อให้เกิด ExB drift ที่เคลื่อนตัวลงในแนวตั้ง โดย ExB drift ที่เคลื่อนตัวลงในแนวตั้งนี้เป็นตัวผลักดันให้พลาสมาเคลื่อนตัวลงตามความสูงข้ามผ่านเส้นสนามแม่เหล็กที่อยู่ในแนวนอน ซึ่งก่อให้เกิดบริเวณที่มีแรงดันของพลาสมาที่ต่ำในชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านบน เหตุการณ์นี้ นำไปสู่การก่อตัวของน้ำพุพลาสมาย้อนกลับอย่างช้า ๆ ณ ตรงนี้ พลาสมาจะไหลมุ่งไปสู่เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กจากบริเวณยอดที่มีแรงดันสูงเพื่อที่จะรักษาสมดุลให้แก่บริเวณที่มีแรงดันของพลาสมาต่ำดังกล่าว ในทางกลับกัน น้ำพุพลาสมาย้อนกลับนี้จะแตกและยับยั้ง EIA นอกจากนี้ ละติจูดที่ต่ำกว่าก็ก่อให้เกิดการรวมตัวกันใหม่ที่เพิ่มขึ้นและการไอออนไนซันลดลงที่สัมพันธ์กัน สิ่งนี้เห็นได้ชัดจากในรูปที่ 2.10 (f-h) ณ ที่นั้น ความหนาแน่นอิเล็กตรอนพีคที่เส้นศูนย์สูตรมีขนาดที่น้อยกว่าค่าในช่วงเวลาที่เสียบปกติ หลังจากเวลา 14 UT ไปแล้ว EIA ดู

เหมือนว่าจะเริ่มก่อตัวที่Longitudeที่ต่างกันและดูเหมือนว่าจะไปถึงขอบเขตทางแนวละติจูดปกติของมัน ดังที่เห็นในรูปที่ 2.10 (j-o)

2.1.7 ชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ถูกรบกวนดังที่เห็นผ่านแผนภาพทั่วโลกค่า IRTAM

ตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ IRTAM มีศักยภาพที่ถูกนำมาใช้งานเสมือนเป็นเครื่องมือที่ให้ค่าข้อมูลใกล้เคียงเวลาจริงตัวหนึ่งในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงชั้นไอโอโนสเฟียร์ในสภาวะที่ถูกรบกวนทางแม่เหล็กโลก ในเรื่องนี้ เราได้มองไปที่แผนภาพ foF2 ทั่วโลกสำหรับวันที่ 17-18 มีนาคม รูปที่ 2.11 (a-l) แสดงแผนภาพทั่วโลกของค่า Δ foF2 (ผลต่างระหว่าง IRTAM กับ IRI) ที่มีค่าความละเอียดของข้อมูลทุก ๆ 4 ชั่วโมง โดยแผนภาพ Δ foF2 นี้ถูกสร้างขึ้นโดยคิดผลต่างของค่า foF2 ที่ได้จาก IRTAM กับค่า foF2 ที่ได้จากแบบจำลอง IRI ณ ตรงนี้ IRI ถูกพิจารณาว่าเป็นแบบจำลองที่ใช้ศึกษาสภาวะภูมิอากาศที่แทนสภาวะที่ถูกรบกวนทางแม่เหล็กโลก รูปที่ 2.11 (a-c) ไม่ได้แสดงผลกระทบใด ๆ มากนักในเมื่อชั้นไอโอโนสเฟียร์ยังไม่ได้รับผลกระทบจากพายุ ผลกระทบเริ่มที่จะแสดงจนถึงเวลา 1207 UT ของวันที่ 18 มีนาคม 2558 (รูปที่ 2.11d) ณ ตรงนี้ เราสามารถดูความรุนแรงที่ชัดเจนขึ้นของค่า foF2 ในบริเวณยอดของ EIA ของภูมิภาคยุโรป การเพิ่มขึ้นที่คล้ายกันในค่า foF2 ยังสามารถมองเห็นได้ในรูปที่ 2.5 ใน 3 รูปแผนภาพถัดไป (รูปที่ 2.11 (e-g)) เราสามารถเห็นการปรากฏตัวของหลุมความหนาแน่นในภูมิภาคอเมริกา ซึ่งแทนของเฟสพายุเชิงลบในระหว่างเฟสหลักของพายุที่เราได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมา ในทำนองเดียวกัน เราสามารถเห็นการเพิ่มขึ้นในค่า foF2 ใกล้เคียงบริเวณเส้นศูนย์สูตร ที่บ่งชี้การปรากฏตัวที่เป็นไปได้ของทั้งเฟสพายุบวกและลบ รูปที่ 2.11 (i-l) แสดงถึงการยับยั้งไว้ของ EIA ในวันที่ 18 มีนาคม 2558 ภายใต้การปรากฏตัวของ wDDEFs เนื่องจากสิ่งนี้ เราสามารถเห็นการเพิ่มขึ้นในค่า foF2 ในบริเวณเส้นศูนย์สูตร โพรไฟล์ความหนาแน่นของ SWARM-A ก็ยังให้ภาพที่คล้ายกันตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา

อย่างไรก็ตาม แผนภาพ IRTAM ก็ไม่ได้แสดงผลพายุเชิงลบที่ชัดเจนในวันที่ 18 มีนาคม 2558 ในซีกโลกใต้ตามที่เคยกล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา แม้ว่ารูปที่ 2.11 (i-j) จะแสดงการจางหายในค่า foF2 ก็ตาม แต่มันก็ล้มเหลวในการแสดงการจางหายเดียวกันในรูปที่ 2.11 (k-l) นอกจากนี้ มันก็ล้มเหลวในการแสดงความไม่เท่ากันของซีกโลกในกรณีนี้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม แผนภาพ IRTAM แสดงคุณลักษณะที่น่าสนใจอีกอันหนึ่ง ในรูปที่ 2.11g เราสามารถมองเห็นหลุมความหนาแน่นหลุมหนึ่ง (การจางหายในค่า foF2) ที่ปรากฏเหนือบริเวณประเทศจีนที่เวลา 0007 UT ในวันที่ 18 มีนาคม 2558 ในแผนภาพถัดไป (รูปที่ 2.11 (h-k)) หลุมความหนาแน่นสามารถที่จะถูกเห็นถึงการพัฒนาและการเคลื่อนตัวที่มุ่งไปสู่เส้นศูนย์สูตร สิ่งนี้อาจจะเป็นต้นเหตุของการรบกวนชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เคลื่อนตัว (TIDs) อย่างไรก็ตาม สิ่งนี้อยู่นอกเหนือขอบเขตของการศึกษาในครั้งนี้ โดยรวมแล้ว IRTAM ดูเหมือนว่าจะดำเนินการได้ค่อนข้างดีเมื่อเทียบกับการวัดที่อิสระชนิดอื่น ๆ และมันสามารถที่จะถูกนำมาใช้งานเป็นเครื่องมือตัวหนึ่งเพื่อที่จะศึกษาสภาวะอากาศอวกาศเนื่องจากความสามารถของมันที่มีต่อการทำงานใกล้เคียงเวลาจริง



รูปที่ 2.11 แผนภาพทั่วโลกของค่า ΔfoF2 ที่ได้รับ (IRTAM-IRI) ในวันที่ 17-18 มีนาคม 2558 [1]

2.1.8 สรุปผลการศึกษาหัวข้อที่ 2.1 คือ ผลกระทบของพายุแม่เหล็กโลกที่มีต่อชั้นไอโอโนสเฟียร์

Nayak, หัวหน้าโครงการและคณะ [1] ได้ร่วมกันศึกษาผลกระทบของพายุแม่เหล็กโลกที่เกิดขึ้นในวันที่ 17-18 มีนาคม 2558 (พายุวันเซนต์แพทริก) ที่มีต่อชั้นไอโอโนสเฟียร์บริเวณละติจูดต่ำและกลางในภูมิภาคอเมริกาและยุโรป (ตำแหน่งลองจิจูดที่ต่างกัน) โดยใช้อุปกรณ์วัดจำพวกไอโอโนซอนด์ที่ภาคพื้นดิน การวัดค่า GPS-TEC ร่วมกับการวัดค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนด้วย SWARM การศึกษาของเราได้ดำเนินการวิเคราะห์อย่างละเอียดเกี่ยวกับผลกระทบของพายุโดยอาศัยกลไกทางกายภาพที่อยู่เบื้องหลังและพยายามที่จะอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นโดยอาศัยพื้นฐานของหลักฐานที่มีอยู่ทั้งสองภูมิภาค นอกจากนี้ เราได้ใช้ IRTAM เป็นครั้งแรกเสมือนเป็นเครื่องมือศึกษาสถานะชั้นไอโอโนสเฟียร์ ข้อสรุปที่สำคัญของการศึกษาคั้งนี้มีดังนี้

1. ในระหว่างเฟสหลักของพายุ การปรากฏตัวพร้อมกันของเฟสพายุไอโอโนสเฟียร์บวกลบและลบถูกสังเกตเห็นได้ในภูมิภาคอเมริกา ในขณะที่ ไม่มีการเกิดขึ้นพร้อมกันของเฟสทั้งสองในภูมิภาคยุโรป สำหรับภูมิภาคอเมริกา การปรากฏตัวพร้อมกันของเฟสพายุไอโอโนสเฟียร์บวกลบและลบถูกสังเกตเห็นได้ในซีกโลกเหนือ
2. ในภูมิภาคอเมริกา ร่องความหนาแน่นที่ละติจูดกลางถูกสังเกตเห็นได้-เพื่อที่จะเลื่อน (สนามไฟฟ้า ???) ที่หันเหไปทางเส้นศูนย์สูตรให้ไปจนถึงละติจูด 40°N การเลื่อนที่หันเหไปทางเส้นศูนย์สูตรของร่องความหนาแน่นที่ละติจูดกลางนี้ (นอกเหนือจาก การบีบอัดไว้ของ plasmopause และการปรากฏตัวของ DDEFs แล้ว) จะแสดงบทบาทที่สำคัญประการหนึ่งในพายุไอโอโนสเฟียร์เชิงลบที่ถูกสังเกตเห็นได้ในซีกโลกเหนือในช่วงเวลาที่เกิดเฟสหลักของพายุ ไม่มีเฟสพายุลบดังกล่าวที่ถูกสังเกตเห็นได้ในภูมิภาคยุโรปในระหว่างที่เกิดเฟสหลักของพายุ
3. ความไม่เท่ากันของซีกโลกที่รุนแรงถูกพบได้ในระหว่างเฟสการฟื้นตัวของพายุในทั้งสองภูมิภาคตามลองติจูด ความหนาแน่นอิเล็กตรอนชั้นไอโอโนสเฟียร์แสดงให้เห็นถึงการลดลงที่รวดเร็วมากในซีกโลกใต้ เช่นเดียวกับที่เห็นได้จากการสังเกตด้วยเครื่อง ionosonde ที่อยู่ที่พื้นดินและ GPS TEC ในทางกลับกัน ซีกโลกเหนือไม่ได้แสดงการจางหาย ของค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน
4. การวัดความหนาแน่นอิเล็กตรอนของ SWARM แสดงให้เห็นถึงการก่อตัวของน้ำพุซูเปอร์หลังจากเฟสที่มากที่สุดของพายุ ซึ่งพิสูจน์ (proves) การปรากฏตัวของ PPEFs อย่างไรก็ตาม หลังจากนั้น EIA ถูกสังเกตว่าจะถูกยับยั้งไว้ตลอด (ถูกยับยั้งไปทั่ว) ลองติจูดทั้งหมด ซึ่งแสดงถึงการปรากฏตัวของ wDDEFs ที่เส้นศูนย์สูตร
5. สำหรับครั้งแรกนี้ เราได้ใช้ IRTAM เป็นเครื่องมือในการศึกษาสภาวะอากาศอวกาศในชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดย IRTAM ทำงานได้ค่อนข้างดีที่สอดคล้องกับการวัดที่อิสระอื่น ๆ และสามารถที่จะถูกนำไปใช้งานในอนาคตเสมือนเป็นเครื่องมือที่ให้คำข้อมูลใกล้เคียงเวลาจริงในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงชั้นไอโอโนสเฟียร์ในสภาวะที่เกิดการรบกวนทางแม่เหล็กโลก

2.2 ผลกระทบของพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ทำให้เกิด TEC storm และ SED

2.2.1 บทนำพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์

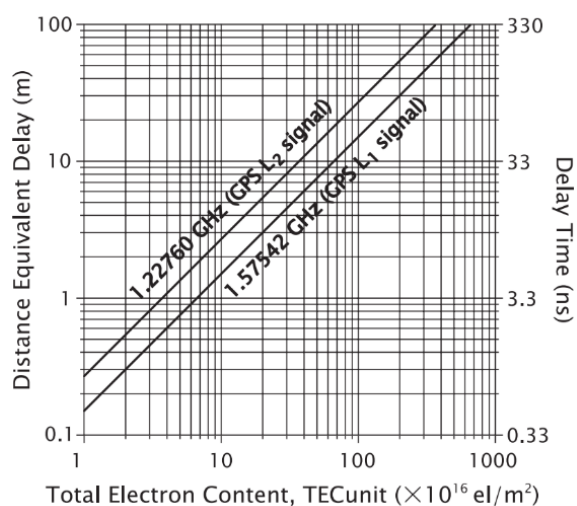
เทคโนโลยีที่อาศัยคลื่นวิทยุมีส่วนทำให้ชีวิตของเราสะดวกสบายมากขึ้นและทำให้หลาย ๆ ด้านของสังคมของเราดีขึ้น คุณลักษณะที่สำคัญข้อหนึ่งของคลื่นวิทยุคือความสามารถของพวกเขาในการแพร่กระจายไปในระยะทางที่ไกล เนื่องจากคลื่นวิทยุย่านความถี่สูง (High Frequency หรือ HF) สามารถไปถึงฝั่งตรงข้ามของโลกได้ ผ่านทางการสะท้อนข้ามระหว่างชั้นไอโอโนสเฟียร์และพื้นผิวโลก การสื่อสารและกระจายเสียงวิทยุย่าน HF ถูกนำมาใช้เป็นวิธีการหนึ่งที่สำคัญในการกระจายและการแลกเปลี่ยนข้อมูลในต่างประเทศ ในขณะที่การใช้งานดาวเทียมได้กลายเป็นส่วนหนึ่งที่ถาวรของสังคม คลื่นวิทยุดาวเทียมที่มีความถี่ที่สูงกว่าที่แพร่กระจายผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้เอื้อต่อการใช้งานได้หลากหลายประเภท แต่ทว่า ชั้นไอโอโนสเฟียร์ก็ไม่ได้เป็นตัวกลางที่โปร่งใสสมบูรณ์สำหรับคลื่นวิทยุดาวเทียม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คลื่นวิทยุในย่าน UHF เช่น สัญญาณที่ถูกส่งจากดาวเทียม GPS และที่มีความถี่ต่ำที่จะได้รับผลกระทบอย่างมากจากความล่าช้าในการแพร่กระจายสัญญาณ, ความผันผวนของความแรงของสัญญาณและผลกระทบอื่น ๆ ระดับความแรงของผลกระทบเหล่านี้ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับสภาวะของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นไอโอโนสเฟียร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ แบบปกติและแบบทันที การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนแบบปกติมีคุณลักษณะของความเป็นคาบเวลา

ที่เด่นชัด เช่น กิจกรรมสุริยะซึ่งมีวัฏจักรโดยประมาณ 11 ปี การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลที่เกี่ยวข้องกับการหมุนของโลกรอบดวงอาทิตย์และการเปลี่ยนแปลงแบบรายวัน ดังนั้นจึงค่อนข้างง่ายต่อการจำลอง ในทางตรงกันข้าม การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนอย่างรวดเร็ว เช่น เพลวไฟสุริยะ (solar flare-เพลวไฟพลังงานสูงที่เกิดจากการรบกวนช่วงเวลาสั้น ๆ บนพื้นผิวของดวงอาทิตย์) ก่อให้เกิดการรบกวนในชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านบนเหนือภาคพื้นดินเป็นระลอกอย่างต่อเนื่อง ซึ่งถูกขับเคลื่อนโดยพายุแม่เหล็กโลกด้วย จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนอย่างทันทีในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “พายุชั้นไอโอโนสเฟียร์”

พายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนลดลงจะถูกเรียกว่า “พายุลบ” และถ้าพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์นั้นมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นจะถูกเรียกว่า “พายุบวก” คุณลักษณะที่พายุบวกกับพายุลบนั้นประพจน์ตัวแตกต่างกันอย่างมาก ตัวอย่างเช่นพายุบวกอาจจะกลายเป็นพายุลบเมื่อเวลาผ่านไปเรื่อย ๆ หรือ ทั้งพายุบวกหรือพายุลบอาจจะเกิดขึ้นแบบใดแบบหนึ่ง หรือ พายุบวกและพายุลบอาจจะพัฒนาไปพร้อม ๆ กันที่ละติจูดที่ต่างกันก็ได้ โดยทั่วไป พายุชั้นไอโอโนสเฟียร์เป็นการรบกวนความหนาแน่นอิเล็กตรอนไปทั่วโลก แต่ก็ไม่บ่อยนักที่จะพบว่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนจะพุ่งขึ้นอย่างรวดเร็วในพื้นที่แคบ ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดพายุแม่เหล็กด้วย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า **SED-Storm Enhanced Density (ความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากพายุ)** ด้วยเหตุนี้ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนแปลงไปมาหลายครั้ง หรือแม้กระทั่งอาจจะมีความสูงกว่าค่าปกติ 20 เท่าก็ได้ในเวลาเดียวกันตอนราว ๆ พระอาทิตย์ตกดิน โดย SEDs นี้จะมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับการรบกวนแบบบวกในตอนกลางวัน เนื่องจากการลดลงของค่า foF2 ในพายุลบจะลดค่าความถี่ที่ใช้งานได้สูงสุด (MUF) สำหรับการสื่อสาร HF งานวิจัยที่ใช้เครื่องไอโอโนซอนด์ที่มีอยู่ในขณะนี้ยังคงที่จะศึกษากันต่อไป

ในตอนนี้ พายุบวกยังคงได้รับความสนใจที่จะศึกษาเพิ่มขึ้นในประเด็นที่เกี่ยวข้องกับเวลาประวิงในการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ เช่น คลื่นที่ถูกส่งจากดาวเทียม GPS ฯลฯ โดยเวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ของคลื่นวิทยุดาวเทียมจะแปรผันตรงกับค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ (total electron content หรือ TEC) โดยค่า TEC นี้คือค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ถูกปริพันธ์ตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นจากดาวเทียมไปยังเครื่องรับ รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง TEC กับเวลาหน่วงการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณจีพีเอส L1 และ L2 (โดย $1 \text{ TECU} = 1 \times 10^{16} \text{ อิเล็กตรอน/m}^2$) การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนแบบปกติหรือแบบที่ถูกรบกวนอย่างทันทีอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่า TEC เปลี่ยนได้จากหลาย ๆ TECU ไปจนถึง 200 TECU



รูปที่ 2.12 กราฟระหว่างเวลาการแพร่กระจายคลื่นใน ชั้นไอโอโนสเฟียร์กับค่า TEC ของสัญญาณ L1 และ L2

เมื่อไม่กี่ปีมานี้ ค่า TEC ที่สังเกตได้จากดาวเทียมจีพีเอสและค่า foF2 ที่ถูกสังเกตได้จากเครื่องไอโอโนซอนด์ก็ยังคงที่จะถูกใช้งานกันอย่างแพร่หลายสำหรับการศึกษาชั้นไอโอโนสเฟียร์ เหตุผลข้อหนึ่งสำหรับแรงผลักดันดังกล่าวก็คือ เครื่องรับสัญญาณ GPS มีความง่ายต่อการติดตั้งมากกว่าเครื่องไอโอโนซอนด์และมีจำนวนสถานีที่ใช้ในการสังเกตมากกว่า ถึงแม้ว่า foF2 และ TEC จะประพัตต์คล้ายกันราวกับว่าแต่ละตัวเป็นตัววัดการเปลี่ยนแปลงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ แต่ก็เป็นมาตรวัดที่ไม่เหมือนกัน ดังนั้นเราจึงควรใช้มาตรวัดทั้งสองตัวนี้ในลักษณะร่วมกันสำหรับการวิเคราะห์ที่ละเอียดขึ้น หน้าที่ที่สำคัญอีกอย่างของชั้นไอโอโนซอนด์คือการสังเกตความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์โดยกระบวนการทางแสง-เคมีนั้นมีความหมายอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงชั้นไอโอโนสเฟียร์และขึ้นอยู่กับความสูงอย่างมาก นอกจากนี้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์จะบ่งบอกถึงกระบวนการทางแสง-เคมีแบบพลวัตในชั้นบรรยากาศและพลาสมาโดยตรง ดังนั้น ความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์จึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญตัวหนึ่งในการที่ช่วยอธิบายกลไกของการก่อตัวของพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ร่วมกับค่า foF2 และค่า TEC

ดังนั้น ทีมวิจัยของสถาบัน NICT*¹ [2] ได้ทำการศึกษาพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์และการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เพื่อนำมาค่าข้อมูลและผลการวิเคราะห์ต่าง ๆ ไปใช้เป็นเครื่องมือในการแจ้งเตือนและเฝ้าระวังความผิดปกติของสภาพอวกาศ การระบุพิกัดที่แม่นยำขึ้น รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ เพื่อรักษาชีวิตและทรัพย์สินให้แก่ประชาชนได้ จากองค์ความรู้ที่ดีที่สุดของสถาบัน NICT พบว่ามีเหตุการณ์ที่ค่า TEC ในชั้นไอโอโนสเฟียร์เพิ่มขึ้นอย่างมากมีจำนวน 2 เหตุการณ์ที่จำเป็นอย่างยิ่งที่ควรจะต้องศึกษาและเป็นแนวทางรับมือต่อการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ เหตุการณ์แรกคือพายุ TEC (TEC storm) ที่เกิดขึ้นในวันที่ 6 พ.ย. 2001 ที่เกี่ยวข้องกับพายุแม่เหล็กโลก ค่า TEC ที่อ่านค่าได้จากเครือข่ายเครื่องรับสัญญาณจีพีเอสที่มีทั่วประเทศญี่ปุ่น (GEONET) นั้นมีค่าสูงถึง 200 TECU ที่ละติจูดต่ำ (27°N) และ 100 TECU ที่ละติจูดสูงกว่า (45°N) ค่าเหล่านี้เป็นสองเท่าของค่าเฉลี่ยที่วัดได้ในวันที่เงียบสงบ ค่า TEC ที่เพิ่มขึ้นนี้ส่วนใหญ่เกิดจากการเจาะทะลุแบบทันทีของสนามไฟฟ้าจากชั้น magnetosphere ที่เข้าไปสู่ละติจูดต่ำ ที่ซึ่งจะสัมพันธ์โดยตรงกับการรบกวนจากสนามแม่เหล็กโลก เหตุการณ์ที่สองคือพายุเพิ่มความหนาแน่น (SED) ที่เกิดขึ้นในวันที่ 8 พ.ย. 2004 ค่า TEC มีค่าเพิ่มขึ้นที่ละติจูดที่สูงขึ้นไป หลังจากพระอาทิตย์ตกดินและมีค่าสูงถึง 100 TECU ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่สูงสุดในเวลากลางวันในวันที่เงียบสงบในละติจูดเดียวกันและมีค่าสูงกว่า 20 เท่าของค่าวันที่เงียบสงบที่เวลาท้องถิ่นเดียวกัน เนื่องจากพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ มักจะก่อตัวที่มีความซับซ้อนเข้าไยากอยู่ 3 ประการ คือ 1) ความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่กำลังเพิ่มขึ้น, 2) ความหนาแน่นอิเล็กตรอนมีค่าลดลง และ 3) คงเหตุการณ์/ผลกระทบนั้นไว้ หัวข้อถัดไปจะทบทวนโดยย่อเกี่ยวกับกลไกของพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ แล้วหลังจากที่อธิบายชุดข้อมูลที่ใช้แล้วรายละเอียดที่เกี่ยวกับ 2 เหตุการณ์ดังกล่าวก็จะถูกกล่าวถึง

2.2.2 กลไกของพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์

พายุลบเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงในส่วนผสมในบรรยากาศชั้น thermosphere ที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานที่ได้รับการฉีดเข้าไปในบริเวณขั้วโลกในระหว่างที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก บรรยากาศชั้น thermosphere ที่มีส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลงจะเคลื่อนตัวไปยังละติจูดที่ต่ำกว่าในรูปของ TADs (การรบกวนในบรรยากาศที่เคลื่อนตัว) การเปลี่ยนแปลงในส่วนผสมถูกอธิบายได้ด้วย การเพิ่มขึ้นในค่าอัตราส่วน $[N_2]/[O]$ และก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ

*¹ ทีมวิจัยของสถาบัน NICT ยังคงทำงานวิจัยร่วมกับหัวหน้าโครงการ เพื่อตรวจจับชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้วยสถานีไอโอโนซอนด์และตรวจจับพลาสมาแบบเปิดด้วยสถานี VHF Radar ที่ สจล. วิทยาเขตชุมพรฯ จังหวัดชุมพร จนถึงบัดนี้

ค่าสัมประสิทธิ์การรวมตัวกันใหม่ของพลาสมาในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ดังนั้นจะก่อให้เกิดค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ลดลง (โดยปกติ $[O]$ มีค่าลดลงตาม h ที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้อัตราส่วน $[N2]/[O]$ ดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้น)

ต้นเหตุที่ทำให้เกิดพายุบวม (การรบกวนไอโอโนสเฟียร์เชิงบวม) มีสาเหตุหลัก 2 ประการ คือ

1. ลมที่ไปในทิศตะวันออกในสภาวะเริ่มต้นของ TAD โดยลมที่ไปในทิศตะวันออกนี้มีความรุนแรงมาก (เสมือนเป็น Surge – คลื่นยักษ์– ในทิศตะวันออก) ที่จะผลักดันพลาสมาให้ไปตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกที่ถูกเอียงไว้ ถ้าปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นในตอนกลางวัน ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราการจางหาย (loss) ของอิเล็กตรอนมีค่าลดลงที่ h ที่มากขึ้น ในลักษณะดังกล่าวนี้ พายุบวมอาจจะเกิดก่อนพายุลบ ทั้งนี้เหตุการณ์นี้จะขึ้นอยู่กับคาบเวลาที่เกิดที่คลื่นยักษ์ในทิศตะวันออกอย่างมาก

2. พลาสมาที่ถูกยกขึ้น (ExB drift) ในทิศทางที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก (B) โดยสนามไฟฟ้าไปทางทิศตะวันออกอัตราการจางหายของอิเล็กตรอนลดลงตามความสูงที่มากขึ้นเช่นเดียวกับในกรณีของผลกระทบของลม Surge ที่ไปในทิศตะวันออกเมื่อเหตุการณ์นี้เกิดขึ้นในตอนกลางวัน ความหนาแน่นอิเล็กตรอนก็จะมีเพิ่มขึ้น

สาเหตุที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในทิศตะวันออกนั้นมีอยู่ 2 ประเด็น ได้แก่

1. สนามไฟฟ้าคอนเวกชันในชั้นแมกเนโตสเฟียร์ที่ถูกทำให้รุนแรงขึ้นที่ทะลุผ่านเข้าไปในละติจูดที่ต่ำกว่า ซึ่งจะถูกเรียกว่า สนามไฟฟ้าเจาะทะลุแบบทันที (PPEF) ในชั้นแมกเนโตสเฟียร์
2. อีกแหล่งหนึ่งคือ การเปลี่ยนแปลงในลักษณะหมุนวนของสนามไฟฟ้าไดนาโมรบกวน (DDEF) ที่เกิดขึ้นในชั้นเทอร์โมสเฟียร์ที่เกิดขึ้นจากพลังงานภายนอกที่ถูกฉีดเข้าไปที่บริเวณขั้วโลก

ในกรณีของพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดขึ้นจริง ปัจจัยที่ซับซ้อนจำนวนมากอาจจะตอบโต้กันและกันเพื่อที่จะเพิ่มการรบกวนหรือแม้กระทั่งหักล้างกันและกันก็ได้ ที่ผ่านมามีนักวิจัยพยายามที่จะแยกแหล่งที่มาของการก่อตัวจำนวนมากโดยการใช้ข้อมูลที่ได้จากไอโอโนสเฟียร์ชุดหนึ่งที่ตรวจวัดอยู่ในแนวเมริเดียน อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปแหล่งที่มาหลักของการรบกวนอาจจะเปลี่ยนแปลงได้ตามเวลาที่ผ่านไป ด้วยความสำคัญของแต่ละกระบวนการการรบกวนที่มีการเปลี่ยนแปลงจากเหตุการณ์หนึ่งไปยังอีกเหตุการณ์หนึ่ง ดังนั้น จึงทำให้หัวข้อ “การระบุแหล่งที่มาของการรบกวน” นี้จึงเป็นงานที่ยากลำบากที่จะทำได้อย่างเต็มที่ ค่า f_oF2 เป็นพารามิเตอร์พื้นฐานมากที่สุดของพารามิเตอร์ทั้งหมดที่บ่งบอกคุณลักษณะของพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ แต่มันก็ไม่เพียงพอที่จะได้รับมุมมองที่สมบูรณ์เข้าไปถึงความซับซ้อนของการรบกวน ถึงแม้ว่าชั้น F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์จะถูกยกตัวไปยัง h ที่สูงขึ้นด้วยสนามไฟฟ้าที่ไปในทิศตะวันออกหรือลมนิวทรัลเทอร์โมสเฟียร์ในทิศตะวันออก (ETNW) มันอาจจะเป็นต้นเหตุให้ f_oF2 มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาที่ท้องถิ่นหรืออัตราของความสูงที่เพิ่มขึ้น (ที่ถูกยกขึ้น) การไหลของพลาสมาจากชั้นไอโอโนสเฟียร์ไปยังพลาสมาสเฟียร์ จะลดค่า $NmF2$ ภายใต้อุณหภูมิที่แน่นอนอันหนึ่ง แต่ระดับของผลกระทบนี้จะแตกต่างกันมากขึ้นอยู่กับลมนิวทรัลในชั้นบรรยากาศและ ExB drift การตกลงของค่า f_oF2 ที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของค่า $hmF2$ ของชั้น F นั้นเป็นผลมาจากพลาสมาที่ถูกผลักดันไปตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกและเปลี่ยนแปลงโพธิ์ไฟล์ความสูงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ชั้นพลาสมาสเฟียร์ มีหน้าที่ประการหนึ่งคือการดึงพลาสมาในชั้นไอโอโนสเฟียร์ออกไปในเวลากลางวัน แล้วเติมเต็มใหม่ (replenish) ชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้วยพลาสมาในตอนกลางคืน ผลของการเพิ่ม f_oF2 ที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของ $hmF2$ นั้นมีความเกี่ยวข้องกับการลดลงในอัตราการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและความก้าวหน้าของการแตกตัวเป็นไอออนในชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่าง การเพิ่มขึ้นหรือการลดลงใน f_oF2 จะถูกกำหนดในท้ายที่สุดซึ่ง

ขึ้นอยู่กับว่าอันไหนที่จะเด่นมากกว่ากันระหว่างผลกระทบที่ขัดแย้ง (ตรงข้าม) กันทั้งสอง ในทำนองเดียวกัน foF2 อาจจะมีเพิ่มขึ้นหรือลดลง แม้กระทั่งเมื่อความสูงของชั้น F ถูกทำให้มีค่าลดลงโดย ExB drift ที่เคลื่อนตัวลงมาที่ถูกขับเคลื่อน (กระตุ้น) ด้วยสนามไฟฟ้าไปทางทิศตะวันตกหรือลมนิวทรัลเทอร์โมสเฟียร์ที่ตรงขั้วโลก (poleward) การเพิ่มขึ้นในค่า foF2 จะยังคงอยู่ (transient) และจะหยุด (overcome) ในไม่ช้าเนื่องจากผลของการรวมตัวกันใหม่ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่าง พร้อมกับค่า foF2 เริ่มต้นที่จะมีค่าลดลง วิธีของการสังเกต TEC โดยใช้คลื่นวิทยุที่ส่งจากดาวเทียม GPS ได้รับการยอมรับกันอย่างแพร่หลายเมื่อเร็ว ๆ นี้ ดังนั้นจึงเป็นการสนับสนุนงานวิจัยเกี่ยวกับพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยใช้ TEC

ส่วนค่า TEC นั้น TEC เองก็ประพฤติตัวในลักษณะที่คล้ายกับ foF2 เมื่อเกิดพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ แต่ก็ไม่ได้สอดคล้องกันหมด ยกตัวอย่างเช่น เมื่อ foF2 มีการเปลี่ยนแปลงลดลงภายใต้การกระจายตัวใหม่ของพลาสมาตามเส้นสนามแม่เหล็กโลก ค่าที่ปริพันธ์ได้ของ TEC ก็ไม่ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเจนนักเนื่องจากการกระจายตัวใหม่เพียงตัวเดียวไม่สามารถที่จะทำให้เกิดการรวมตัวใหม่ได้และก็ได้สร้างพลาสมาด้วย ในทางกลับกัน เมื่อ foF2 มีค่าลดลงอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการรวมตัวกันใหม่ ค่า TEC เองก็จะมีค่าลดลงเช่นกัน เนื่องจาก TEC เป็นพารามิเตอร์ที่คิดเหนือชั้นไอโอโนสเฟียร์ไปยังชั้นพลาสมาสเฟียร์ TEC ก็จะมีค่าที่ช้าลงในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงในอัตราการจางหายอิเล็กตรอนในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับค่า foF2 อีกทั้ง TEC และ foF2 ก็ยังแสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่แตกต่างกัน ดังนั้นการวิเคราะห์ค่าที่สังเกตได้ทั้งสองที่แตกต่างในด้านพฤติกรรมควรช่วยอย่างมากในการแปลความหมายของพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์

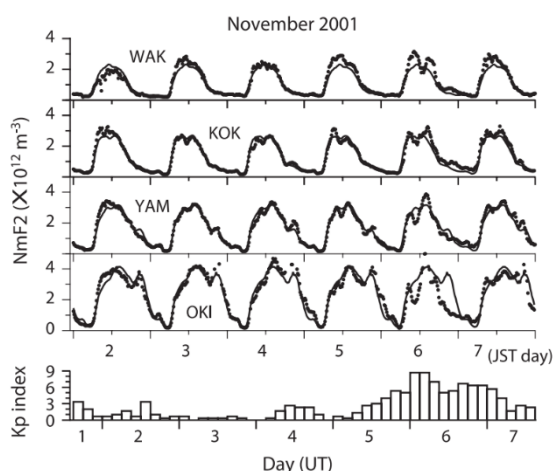
2.2.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์

ในงานวิจัยนี้มีการศึกษาพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์จำพวกพายุ TEC และ SED ดังนั้นค่าข้อมูล GPS TEC ที่วัดได้จากเครือข่าย GEONET ของประเทศญี่ปุ่นถูกนำมาใช้เป็นหลักในการศึกษา โดยเครือข่าย GEONET ถูกสร้างขึ้นโดยสถาบัน GSI ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องรับสัญญาณ GPS มากกว่า 1,200 ตัวที่ช่วยให้ค่า TEC ระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับนั้นถูกประมาณค่าได้โดยใช้สัญญาณหนึ่งที่ถูกส่งไปบนความถี่ 2 ค่า ในบรรดาวิธีการต่าง ๆ ของการประมาณค่าที่นำเสนอจนถึงปัจจุบันนี้ อ้างถึงวิธีการนี้ พื้นที่ครอบคลุมของเครือข่ายเครื่องรับจะถูกแบ่งออกเป็น 32 เซลล์ (2 x 2 องศาในละติจูด/ลองจิจูด) และด้วยค่า TEC ที่ถูกประมาณโดยใช้วิธีการทำฟิตติ้งกำลังสองน้อยที่สุด (least square fitting) บนสมมติฐานของค่า VTEC ที่คงที่ในแต่ละเซลล์ของเซลล์ทั้งหมด ในขณะที่ กระบวนการของการประมาณค่า TEC นี้ขึ้นอยู่กับความจริงที่ว่าคลื่นวิทยุที่แพร่กระจายคลื่นที่มีความถี่ที่แตกต่างกัน 2 ความถี่จะประสบกับเวลาประวิงในการแพร่กระจายคลื่นที่แตกต่างกันในชั้นไอโอโนสเฟียร์ มันจะแก้ปัญหาค่าไบอัสระหว่างความถี่ไปพร้อม ๆ กัน (หรือผลต่างในเวลาประวิงของอุปกรณ์ระหว่าง 2 ความถี่ภายในวงจรรีเลย์ทรอนิกส์) ที่มีค่าเฉพาะตัวต่อดาวเทียมและเครื่องรับ ค่า TEC จากทั้ง 32 เซลล์จะถูกหาค่าออกมาทุก ๆ 15 นาทีจากชุดข้อมูลตลอด 24 ชั่วโมง โดยสมมติที่ว่าค่าไบอัสดาวเทียมและเครื่องรับยังคงไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง โดยอาศัยค่าข้อมูล TEC ที่เกิดขึ้น (สุทธิ, ลัพธ์) แมป TEC ระหว่างเวลาที่ท้องถิ่นและละติจูดได้ถูกสร้างขึ้นจากข้อมูล TEC ตลอด 24 ชั่วโมง (24 ชม. x 4 ค่า/ชม. x 32 เซลล์) ด้วยวิธีการฟิตติ้งแบบ SHF โดยแมปของผลต่างระหว่างวันที่เปรียบกับวันที่ถูกรบวงนได้ถูกสร้างขึ้นจากแมป TEC นี้ จะทำให้เรามองเห็น (visualize) พายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ มากยิ่งขึ้น เช่นเดียวกับที่เห็นได้จากค่า TEC

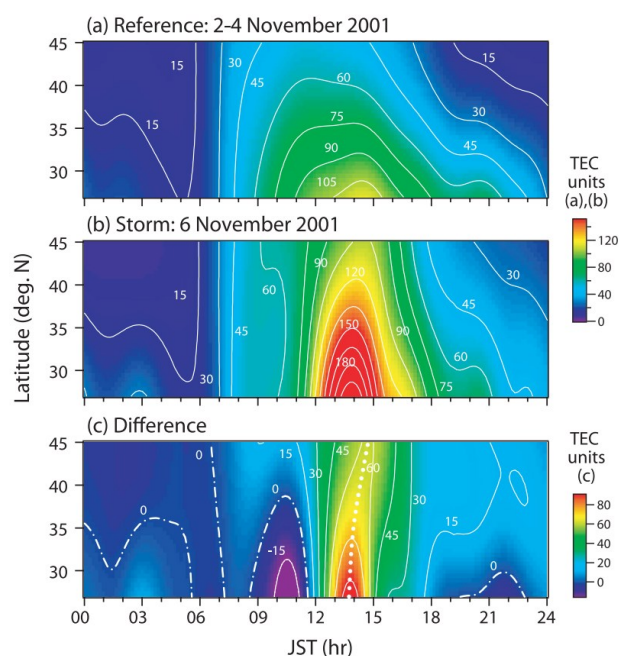
โดยเครื่องไอโอโนซอนด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะตั้งอยู่ที่จุดสังเกตการณ์จำนวน 4 จุด ได้แก่ เมือง Wakkanai, เมือง Kokubunji, เมือง Yamagawa และเมือง Okinawa/Ogimi แต่ละจุดจะให้แผนภาพไอโอโนแกรมออกมาทุกๆ ระยะเวลา 15 นาที ตารางที่ 2.3 คือที่ตั้งของไอโอโนซอนด์ 4 จุดในญี่ปุ่นดังกล่าว โดยใช้ค่า foF2 ที่ได้จากสเกลลิง และค่า NmF2 และ hmF2 ที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์เกิด TEC storm และ SED ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 2.3 ตำแหน่งของเครื่องไอโอโนซอนด์ 4 จุดในญี่ปุ่น [2]

Station	Latitude ($^{\circ}$ N)	Longitude ($^{\circ}$ E)	Magnetic inclination ($^{\circ}$)
Wakkanai	45.39	141.69	59.8
Kokubunji (Tokyo)	35.71	139.49	49.3
Yamagawa	31.20	130.62	44.5
Okinawa/Ogimi	26.68	128.16	37.8



รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงของค่า NmF2 และดัชนี Kp ระหว่างวันที่ 2-7 พ.ย. 2001 [2]



รูปที่ 2.14 ค่า TEC ในวันที่เสียบ, ค่า TEC storm ที่เกิดขึ้นในวันที่ 6 พ.ย. 2001 และผลต่างของ TEC ทั้งสองค่าดังกล่าว [2]

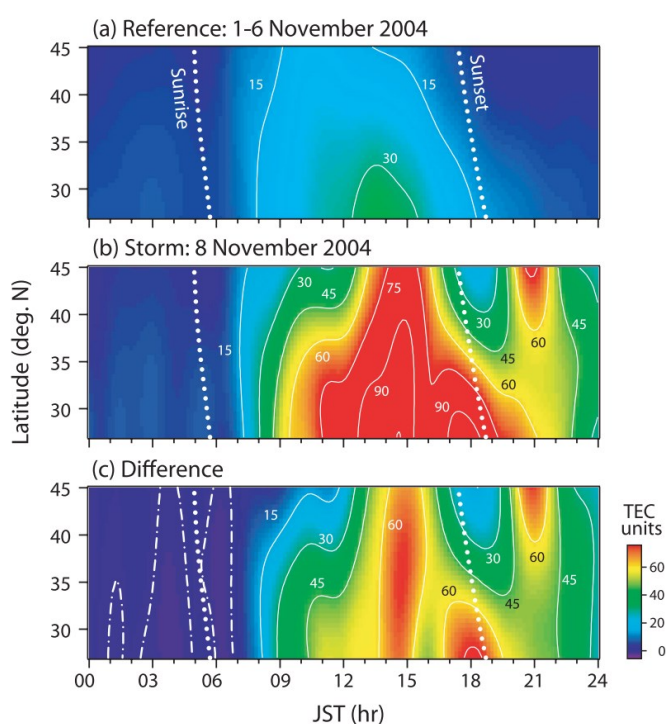
2.2.4 ผลการศึกษาพายุ TEC ระหว่างวันที่ 6 พ.ย. 2001

รูปที่ 2.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงในค่า NmF2 ที่สังเกตได้จากทั้ง 4 สถานี จากสถานี Wakkanai ไป Okinawa ในวันที่ 2-7 พ.ย. พร้อมกับดัชนี Kp แต่ละจุดหมายถึงค่าของ NmF2 ที่สังเกตได้ทุก ๆ 15 นาทีของวันที่ 2-7 พ.ย. แต่ละเส้นที่บ่งชี้ถึงค่าเฉลี่ยของ NmF2 ในวันที่เจียบสงบ [โดยค่าเฉลี่ยตั้งแต่วันที่ 2-4 พ.ย. ถูกใช้เป็นค่าอ้างอิงในวันที่เจียบสงบ (quiet day-reference)] - พล็อตเป็นเส้นทึบ พบว่า ค่า NmF2 ถูกพบว่ายังคงเกิดการรบกวนที่ทุกสถานีหลังจากที่มีการรบกวนแม่เหล็กในวันที่ 6 พ.ย. การรบกวนเริ่มต้นด้วยการเพิ่มขึ้นใน NmF2 ตอนพระอาทิตย์ แล้วตามด้วยการลดลงทันที ณ ตรงนั้น ที่สถานีละติจูดต่ำกว่า (ที่โอกินาวา) ส่วนหน้าจะเริ่มต้นด้วยการลดลงในค่า NmF2 ในปริมาณที่มาก. การรบกวนค่า NmF2 จะกลับเป็นค่าบวกที่เวลา 12:00 JST ที่สถานีละติจูดต่ำกว่า (โอกินาวา, ยามากาวา, โทคุบุงจิ) แล้วค่อยตามด้วย Wakkanai ที่กลับไปเป็นค่าบวกที่เวลา 13:30 JST หลังจากนั้น (Thereafter) NmF2 จะยังคงมีค่าสูงกว่าในวันที่เจียบสงบจนถึงเที่ยงคืนที่ละติจูดสูงกว่า (Wakkanai และ Kokubunji) ในขณะที่ การรบกวน NmF2 จะกลับไปเป็นค่าลบอีกครั้งที่เวลาประมาณ 15:00 น JST ที่ละติจูดต่ำ (Yamagawa และ Okinawa) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง NmF2 จะลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่เมือง Okinawa และการลดลงยังคงยาวนานไปจนถึงเที่ยงคืน NmF2 เริ่มที่จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นการรบกวนแบบบวกที่เวลา 22:00 JST ที่ Yagagawa และ 01:30 JST (ในวันถัดไป) ที่ Okinawa ด้วย ในลักษณะดังที่กล่าวไปนี้ การรบกวนในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่สังเกตเห็นได้ในค่า NmF2 นั้นค่อนข้างจะซับซ้อนทั้งในแง่ของเส้นรุ้งและเวลา แต่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างน้อยสำหรับขนาดของพายุแม่เหล็ก ยกเว้นในช่วงเย็นวันที่เมือง Okinawa

รูปที่ 2.14 แสดงแผนภาพการกระจายในเชิงเวลา-ละติจูดของ TEC แถวบนแสดงค่าเฉลี่ยในวันที่เจียบสงบ ตั้งแต่วันที่ 2 พ.ย. ถึง 4 เช่นเดียวกับในกรณีของ NmF2 พร้อมกับแต่ละค่าตัวเลขที่กำกับเส้น Contour ที่แสดงถึงค่า TEC (10^{16} อิเล็กตรอน/m²) TEC เริ่มที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นตอนพระอาทิตย์ขึ้น และมีค่าสูงสุดประมาณเที่ยงวันที่ภาคเหนือ (45°N) และราว ๆ 14:30 JST ทางภาคใต้ (27°N) ค่าพิกัดอันดับที่ 2 จะปรากฏที่เส้นละติจูดต่ำกว่า 30°N หลังจากที่มีพระอาทิตย์ตกดิน ราวกับว่าเป็นผลของมาจากความผิดปกติในแถบเส้นศูนย์สูตร (EIA) ที่เริ่มต้นจะก่อตัวอีกครั้งหนึ่งเสมือนว่าถูกขับเคลื่อนด้วย ExB drift ที่เพิ่มขึ้น ที่ซึ่งเป็นผลมาจาก prereversal enhancement (PRE) ของสนามไฟฟ้าที่ไปทางทิศตะวันออกแถวกลางแสดงให้เห็นถึงการกระจายของ TEC ในช่วงที่เกิดพายุแม่เหล็กในวันที่ 6 พ.ย. บันทึกไว้ว่า “การเพิ่มขึ้นถูกพบได้อย่างชัดเจนของค่า TEC ในเวลากลางวันในรูปที่ 2.15” TEC มีค่ามากที่สุดที่เวลา 13:45 JST ทางตอนใต้สุด (27°N) และค่อนข้างจะเกิดขึ้นภายหลังที่เวลาประมาณ 14:15-14:30 JST ที่ทางตอนเหนือ (45°N)

สาเหตุของ TEC storm นี้เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าแมกเนโตสเฟียร์ที่เจาะทะลุ (PPEF) พบว่า มีการยกตัวสูงขึ้นพร้อม ๆ กันของค่า Δ TEC และ Δ hmF2 ที่แต่ละค่าละติจูด ซึ่งอาจจะเข้าใจได้เป็นอย่างดีตามการแสดงตัวของสนามไฟฟ้าแมกเนโตสเฟียร์ที่เจาะทะลุเข้าไปในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ละติจูดที่ต่ำกว่า ตัว IMF-Bz จะไปทางทิศใต้เป็นเวลา 7 ชั่วโมงก่อนที่จะเกิดการก่อตัวทันที (SC) ของพายุแม่เหล็กที่เวลา 01.51 UT ในวันที่ 6 พ.ย. ด้วย IMF-Bz ที่ไปทางทิศใต้ที่จะรุนแรงขึ้นตอนประมาณ 02 UT และพร้อมกับการเพิ่มขึ้นในค่า ASym-H การรบกวนสนามไฟฟ้าที่ทะเลดังกล่าวอยู่ในทางทิศตะวันออกซึ่งจะสอดคล้องกับความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่กำลังยกตัวขึ้นที่เกิดขึ้นโดย ExB drift ที่ถูกสังเกตได้ ข้อมูลการสังเกตแม่เหล็กโลกที่ละติจูดต่ำก็ยืนยันการทะลุของสนามไฟฟ้าที่ไปในทิศตะวันออกด้วยเช่นกัน ความเข้มสนามไฟฟ้าสามารถที่จะถูกประมาณได้จากอัตราการยกตัวขึ้นของความสูงชั้น F และการลาดเอียงทางแม่เหล็กโลกเหนือเมืองโอกินาวา จากความชันของเส้นกราฟในคาบเวลา 30 นาทีที่

ตามหลังการเริ่มต้นของ hmF2 ที่กำลังยกตัวขึ้น อัตราการยกตัวขึ้นสามารถที่จะถูกประมาณค่าได้เท่ากับ 28 m/s ซึ่งเทียบเท่ากับสนามไฟฟ้าที่ไปทางทิศตะวันออกที่มีค่าเท่ากับ 1.4 mV/m เหตุการณ์นี้อาจจะดูเด่นชัดมากขึ้นได้เสมอเมื่อพิจารณาผลกระทบของการลดลงของชั้น F ที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นไปตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกโดยแรงโน้มถ่วงของโลก การเพิ่มขึ้นอย่างท่วมท้นของค่า TEC นั้นถูกอธิบายได้ด้วยการเจาะทะลุของสนามไฟฟ้าในชั้นแมกเนโตสเฟียร์ที่เข้าไปยังละติจูดที่ต่ำกว่า สนามไฟฟ้างกล่าวควรจะทำงานอย่างพร้อม ๆ กันที่ทุกค่าละติจูด ในความเป็นจริง การยกขึ้นในตัวชั้น F เองที่ถูกขับเคลื่อนด้วย ExB drift ก็เริ่มต้นพร้อมกันดังที่แสดงไว้ในแฉกต่าง แต่ทว่า ค่ามากที่สุดของการเพิ่มขึ้นของค่า TEC มีแนวโน้มที่จะตามมาทีหลังที่ละติจูดที่สูงขึ้น ที่ละติจูดที่สูงขึ้น เส้นสนามแม่เหล็กโลกถูกทำให้ยาวขึ้นเพื่อที่จะทะลุเป็นสัดส่วนที่มากขึ้นของชั้นพลาสมาสเฟียร์ผลที่ตามมา พลาสมาใช้เวลานานขึ้นในการที่จะค่อย ๆ ลดลงจากชั้นไอโอโนสเฟียร์ไปยังชั้นพลาสมาสเฟียร์โดยเหตุนี้ จึงเป็นไปได้ที่จะทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า TEC นั้นช้าลง



รูปที่ 2.15 ค่า TEC ในวันที่เงียบ, ค่า TEC storm และ SED ในวันที่ 8 พ.ย. 2004 และผลต่างของ TEC ทั้งสองค่าดังกล่าว [2]

2.2.5 ผลการศึกษาพายุ TEC และ SED ในวันที่ 8 พ.ย. 2004

จากการพิจารณาการกระจายตัวของค่า TEC ระหว่างเวลามาตรฐานญี่ปุ่น (JST) กับละติจูด พบว่า ค่า TEC มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นในวันที่ 8 พ.ย. 2004 เมื่อเทียบกับค่า TEC ในวันที่เงียบสงบ โดยเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า SED (storm enhanced density) หลังจากนั้น เมื่อพิจารณาผลต่างค่า dTEC ระหว่างวันที่เงียบสงบกับวันที่เกิด SED (TEC ถูกรบกวน) พบว่า ค่า dTEC เริ่มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในช่วงเวลาสั้น ๆ หลังจากทีพระอาทิตย์ตกดินไปแล้วและได้แสดงการเพิ่มขึ้นหลัก ๆ 3 ช่วงเวลา ดังนี้ การเพิ่มขึ้นครั้งที่ 1 เกิดขึ้นที่เวลา 14-15 JST เหนือตำแหน่งละติจูดทั้งหมดที่ศึกษา ด้วยเวลาประวิงเล็กน้อยที่ละติจูดที่สูงขึ้นไป การเพิ่มขึ้นครั้งที่ 2 ถูกสังเกตได้ตั้งแต่ 17-19 JST ตอนประมาณพระอาทิตย์ตกดินและจะถูกจำกัดไว้ในบริเวณหนึ่ง ๆ ที่ละติจูดต่ำกว่า 37°N ซึ่งจะแตกต่างการเพิ่มขึ้นครั้งแรก ส่วนการเพิ่มขึ้นครั้งสุดท้ายเกิดขึ้นประมาณ 21 JST ที่

ละติจูดอยู่สูงกว่า 35°N การศึกษาก่อนหน้านี้ได้เปิดเผยว่า SED กับ TEC plumes (SED/TEC plumes) นั้นมีความเกี่ยวข้องกับพายุบวมในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ละติจูดต่ำที่เกิดขึ้นจากการก่อตัวของความผิดปกติแถบเส้นศูนย์สูตร แต่ความผิดปกติแถบเส้นศูนย์สูตรและบริเวณที่ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นของ SED เองก็ปรากฏตัวที่ถูกแยกออกจากกันด้วยบริเวณที่มีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำระหว่างพวกมัน อย่างไรก็ตาม ดังที่รู้ความจริงกันว่า “ความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่สูงที่ละติจูดต่ำที่เกิดขึ้นจากการก่อตัวของความผิดปกติแถบเส้นศูนย์สูตรนั้นเป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดของความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่สูงของ SED/TEC plumes โดยทั้ง 2 บริเวณนี้จะถูกเชื่อมต่อกัน [33] จากหลักการดังกล่าว จึงเป็นที่ยืนยันได้ว่า พายุ TEC (TEC plumes) ที่เข้มลุกหนึ่งในตอนกลางวันและความผิดปกติแถบเส้นศูนย์สูตรที่แผ่ขยายไปถึงละติจูดที่สูงขึ้นไปในตอนเริ่มต้นของพายุ TEC ที่รุนแรงขึ้นในตอนกลางวันอาจจะมีความสัมพันธ์ ที่ใกล้ชิดกับการก่อตัวของ SED ก็ได้ ปัจจัยที่สำคัญอีกตัวหนึ่งเกี่ยวข้องกับการก่อตัวของ SED คือ แหล่งกำเนิดที่มีการผลักดันสำหรับการพาไปทางทิศตะวันตก/ไปทางขั้วโลกที่ยังคงถูกรังไว้ให้เกิดขึ้นนาน ๆ ที่ละติจูดกลางไปจนถึงละติจูดต่ำ ความสูงของชั้น F ยังคงที่จะมีค่าที่สูงตลอดช่วงเวลาในตอนกลางวันดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งเป็นหลักฐานของการหมุนเวียนของลมในชั้นเทอร์โมสเฟียร์ที่ไปตามแนวเส้นศูนย์สูตรที่รุนแรงขึ้น โดยการรบกวนลมในชั้นเทอร์โมสเฟียร์จะเป็นตัวสร้างสนามไฟฟ้าไดนาโมรบกวน (DDEF) อ่างถึงการคำนวณด้วยแบบจำลอง สนามไฟฟ้าที่ไปตามแนวเส้นศูนย์สูตรที่มีค่า 5 mV/m จะถูกสร้างขึ้นทั้งวันที่ยาวนานตามด้วยสนามไฟฟ้าที่ไปตามทิศตะวันออกที่มีค่า $1\text{--}3\text{ mV/m}$ ที่ละติจูดกลาง (41°) ในตอนกลางคืน หลังจากตอน 19 LT สนามไฟฟ้าเหล่านี้จะเป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิด SED ได้

2.2.6 บทสรุปผลกระทบของพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ทำให้เกิด TEC storm และ SED

ทีมวิจัยของสถาบัน NICT [2] ได้ทำการศึกษาพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์และการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เพื่อนำมาค่าข้อมูลและผลการวิเคราะห์ต่าง ๆ ไปใช้เป็นเครื่องมือในการแจ้งเตือนและเฝ้าระวังความผิดปกติของสภาพอวกาศ การระบุพิกัดที่แม่นยำขึ้น รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ เพื่อรักษาชีวิตและทรัพย์สินให้แก่ประชาชนได้ จากองค์ความรู้ที่ดีที่สุดของสถาบัน NICT พบว่า มีเหตุการณ์ที่ค่า TEC ในชั้นไอโอโนสเฟียร์เพิ่มขึ้นอย่างมากในวัฏจักรสุริยะล่าสุดของ 11 ปี (ไซเคิลที่ 23) มีจำนวน 2 เหตุการณ์ที่จำเป็นอย่างยิ่งที่ควรจะต้องศึกษาและเป็นแนวทางรับมือต่อการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ เหตุการณ์แรกคือพายุ TEC (TEC storm) ที่เกิดขึ้นในวันที่ 6 พ.ย. 2001 ที่เกี่ยวข้องกับพายุแม่เหล็กโลก ค่า TEC ที่อ่านค่าได้จากเครือข่ายเครื่องรับสัญญาณจีพีเอสที่มีทั่วประเทศญี่ปุ่น (GEONET) นั้นมีค่าสูงถึง 200 TECU ที่ละติจูดต่ำ (27°N) และ 100 TECU ที่ละติจูดสูงกว่า (45°N) ค่าเหล่านี้เป็นสองเท่าของค่าเฉลี่ยที่วัดได้ในวันที่เงียบสงบ ค่า TEC ที่เพิ่มขึ้นนี้ส่วนใหญ่เกิดจากการเจาะทะลุแบบทันทีของสนามไฟฟ้าจากชั้นแมกเนโตสเฟียร์ที่เข้าไปสู่ละติจูดต่ำ ที่ซึ่งจะสัมพันธ์โดยตรงกับการรบกวนจากสนามแม่เหล็กโลก เหตุการณ์ที่สองคือพายุเพิ่มความหนาแน่น (SED) ที่เกิดขึ้นในวันที่ 8 พ.ย. 2004 ค่า TEC มีค่าเพิ่มขึ้นที่ละติจูดที่สูงขึ้นไป หลังจากพระอาทิตย์ตกดินและมีค่าสูงถึง 100 TECU ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่สูงสุดในเวลากลางวันในวันที่เงียบสงบในละติจูดเดียวกันและมีค่าสูงกว่า 20 เท่าของค่าวันที่เงียบสงบที่เวลาท้องถิ่นเดียวกัน นอกเหนือจากสนามไฟฟ้าในชั้นแมกเนโตสเฟียร์ที่เจาะทะลุแบบทันทีแล้ว สนามไฟฟ้าไดนาโมรบกวน (DDEF) ก็อาจจะมึบทบาทในการก่อตัวของ SED ที่เคลื่อนตัวไปในทิศทางของลมนิวทรัลเทอร์โมสเฟียร์ที่ไปในทิศตะวันตก (west neutral wind หรือ WNW) ด้วยเช่นกัน

2.3 ผลกระทบของพายุแม่เหล็กโลกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลง TEC พารามิเตอร์ชั้นไอโอโนสเฟียร์และตัวบ่งชี้สภาพบรรยากาศ

2.3.1 บทนำผลกระทบของพายุแม่เหล็กโลกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลง TEC

จากการศึกษา เก็บรวบรวมข้อมูล พร้อมวิเคราะห์ผลกระทบของพายุแม่เหล็กโลกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลง TEC พารามิเตอร์ชั้นไอโอโนสเฟียร์และตัวบ่งชี้สภาพบรรยากาศ คณะผู้วิจัยพบว่า งานวิจัยของ Sharma และคณะ [3] มีการนำเสนอผลการศึกษาค้นคว้าและสามารถนำมาเป็นแนวทางในการรับมือกับผลกระทบการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G อากาศยานไร้คนขับ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ได้เป็นอย่างดี คณะผู้วิจัยจึงคิดว่าจะนำเสนอรายละเอียดของผลการศึกษาดังกล่าวในโครงการศึกษาฯ ดังนี้

Sharma และคณะ [3] ได้ศึกษาผลกระทบของพายุแม่เหล็กโลกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลง TEC พารามิเตอร์ชั้นไอโอโนสเฟียร์และตัวบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศไว้อย่างละเอียด ซึ่งจะนำไปสู่การบ่งชี้สถานะที่ชั้นบรรยากาศเกิดความผิดปกติในระหว่างที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก แล้วนำไปสู่การระบุพิกัดแบบ RTK ที่ผิดพลาดได้ในระดับหลายเซนติเมตรไปจนถึงหลายเมตร โดยพายุแม่เหล็กโลกที่รุนแรงที่นำมาศึกษาในครั้งนี้มีจำนวน 2 ลูก ได้แก่ พายุวันเซนต์แพทริก (17 มีนาคม 2558) และพายุแม่เหล็กโลกที่รุนแรง (7 ตุลาคม 2558) และพิจารณาข้อมูล GPS-TEC ที่วัดได้เหนือสถานี RASH ละติจูดต่ำ ($28^{\circ}29'N$, $34^{\circ}46'E$) ในประเทศซาอุดีอาระเบีย พบว่า การเปลี่ยนแปลงของ GPS-TEC นั้นขึ้นกับพลวัตสนามไฟฟ้าละติจูดต่ำ ละติจูดกลางและละติจูดสูง โดยในระหว่างที่เกิดพายุวันเซนต์แพทริกนั้น ค่า Dst มีค่าต่ำสุดถึง -223 nT และมีค่า AE สูงถึง 2215 nT และค่า VTEC มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 250.16% เมื่อเปรียบเทียบกับค่า VTEC เฉลี่ยในวันที่เงียบ ซึ่งเรียกว่า **ผลกระทบเชิงบวกของพายุแม่เหล็กโลก** และมีผลการตอบสนองในเชิงบวกของ VTEC ทั่วทั้งภูมิภาคเนื่องจากการอยู่ร่วมกันของสนามไฟฟ้า PPEF กับสนามไฟฟ้า DDEF ชั้น F2 ถูกยกตัวสูงขึ้นด้วยเพอร์เทนเอฟเฟกต์ผ่านการลอยเลื่อน ExB ที่บริเวณเส้นศูนย์สูตร ซึ่งสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของค่า hmF2 และค่าอัตราส่วน O/N2 ส่วนพายุแม่เหล็กโลกที่แรงอีกลูกหนึ่งเกิดขึ้นในวันที่ 7 ตุลาคม 2558 ค่า Dst ต่ำสุดถึง -124 nT และการเพิ่มขึ้นของค่า AE มีค่าสูงสุด 1209.30 โดยค่า VTEC มีค่าลดลงต่ำสุดถึง -72.14% เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของ VTEC ในวันที่เงียบ ซึ่งเรียกว่า **ผลกระทบเชิงลบของพายุแม่เหล็กโลก** การตอบสนองเชิงลบของ VTEC ได้สังเกตพบได้ในช่วงหลักของพายุอันเนื่องมาจากผลของ EIA (equatorial ionization anomaly หรือ ความผิดปกติของไอออโนสเฟียร์บริเวณเส้นศูนย์สูตร) ที่ถูกยับยั้งไว้เหนือสถานีสังเกตการณ์ การตอบสนองเชิงลบดังกล่าวอาจจะอธิบายได้โดยการเคลื่อนตัวต่ำลงของชั้น F2 ด้วยการลดลงอย่างเห็นได้ชัดของ hmF2 และการหายไปของค่าอัตราส่วน O/N2เหนือบริเวณละติจูดต่ำ ผลลัพธ์ในช่วงพายุเหล่านี้ยังแสดงให้เห็นด้วยว่าความเข้มของซินทิลเลชัน (scintillation) ได้เพิ่มขึ้นเหนือบริเวณละติจูดต่ำนี้ด้วยโดยระดับของซินทิลเลชันจะขึ้นอยู่กับความรุนแรงของพายุแม่เหล็กโลก

ความสัมพันธ์ (การคับปลิง) ทางไฟฟ้า ความเป็นกลางและพลวัตสนามไฟฟ้าระหว่างชั้นแมกเนโตสเฟียร์และชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ละติจูดสูงในระหว่างที่เกิดพายุแม่เหล็กนั้นได้พิสูจน์แล้วว่าส่งผลกระทบต่อพลวัตสนามไฟฟ้าในชั้นไอโอโนสเฟียร์บริเวณเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำ Particle precipitation และ Magnetospheric convection เป็นสาเหตุหลักของกระบวนการพลวัตสนามไฟฟ้าชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ละติจูดสูง การสะสมของพลังงานและโมเมนตัมที่เพิ่มขึ้นในละติจูดสูงอันเนื่องมาจาก Particle precipitation และ Joule Heating ได้เปลี่ยนความหนาแน่นพลาสมาและสามารถที่จะทำให้เกิดการลอยเลื่อนของชั้นไอโอโนสเฟียร์บริเวณเส้น

ศูนย์สูตร กระแสไฟฟ้าที่บริเวณละติจูดสูงได้ถ่ายเทพลังงานไปยังแก๊สนิวทรัลผ่านทางกระบวนการ Joule Heating แรงเคลื่อนทางไฟฟ้าทำงานเสมือนเป็นแรงผลักดันภายนอกที่จะเคลื่อนย้ายลมนิวทรัลจากบริเวณขั้วโลกไปยังเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำ ลมเทอร์โมสเฟียร์ที่มุ่งหน้าไปที่เส้นศูนย์สูตรที่ประมาณระดับความสูงของชั้น F เป็นผลมาจากแรงโมเมนตัมและ Joule Heating ที่บริเวณละติจูดสูง ลมเทอร์โมสเฟียร์เหล่านี้ย้อนกลับไปสู่ระดับความสูงชั้น E ในบริเวณเส้นศูนย์สูตร การยกตัวของชั้น F2 เป็นผลมาจากลมเทอร์โมสเฟียร์เหล่านี้ซึ่งทำให้ค่า foF2 และ hmF2 มีค่าที่เพิ่มขึ้นในเวลากลางวัน พวกเขายังเพิ่มปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ (TEC) และมีส่วนที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของส่วนผสมในบรรยากาศทั่วโลก แรงขับเคลื่อนหลักสองประการของพลวัตสนามไฟฟ้าละติจูดต่ำในระหว่างที่เกิดการก่อตัวของพายุแม่เหล็กโลกที่ข้ามผ่านละติจูดต่ำบนซีกโลกทั้งสอง อย่างแรกคือสนามไฟฟ้าไดนาโมรบกวน (DDEF) ซึ่งถูกบ่งบอกด้วยคุณลักษณะด้วยผลกระทบที่ยาวนานที่มีต่อการกระจายของพลาสมา และประการที่สองคือสนามไฟฟ้าเจาะทะลุทันที (PPEF) ที่เกิดขึ้นแบบกะทันหันและคงอยู่ได้ในระยะเวลาที่ค่อนข้างสั้น สนามไฟฟ้าตั้งแต่เช้ามีต้นจนถึงหลังพระอาทิตย์ตกนั้นถูกทำให้เกิดขึ้นที่ละติจูดสูงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในทิศทางของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ (IMF-Bz) เช่น เมื่อ IMF-Bz เคลื่อนตัวไปทางทิศใต้จากทิศเหนือ ดังนั้น มันจึงก่อตัวภายใต้ shielding ที่ชั้นไอโอโนสเฟียร์ละติจูดต่ำ การแพร่กระจายของคลื่นไฮโดรแมกเนติกที่มุ่งหน้าไปยังบริเวณละติจูดต่ำจากชั้นแมกเนโตสเฟียร์นั้นเป็นผลของการแมบปีงสนามไฟฟ้า undershielding ที่มุ่งหน้าไปสู่บริเวณละติจูดต่ำและเส้นศูนย์สูตรในช่วงที่เกิดเฟสหลักของพายุแม่เหล็กโลก พายุวันเซนต์แพทริกเมื่อวันที่ 17 มีนาคม 2558 เป็นเหตุการณ์ที่รุนแรงที่สุดของวัฏจักรสุริยะ 24 (ดัชนี Dst มีค่าเท่ากับ -223 nT) จุดกำเนิด การก่อตัว และผลกระทบชั้นไอโอโนสเฟียร์ของพายุแม่เหล็กโลกลูกนี้ได้รับการกล่าวถึงโดยผู้วิจัยจำนวนมากจากทั่วทุกมุมโลก งานวิจัยเหล่านี้ใช้คุณลักษณะที่โดดเด่นและใหม่ของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่บริเวณเส้นศูนย์สูตร ละติจูดต่ำ และละติจูดสูง นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับพลาสมาบับเบิล (EPBs) ในระหว่างพายุวันเซนต์แพทริกด้วย พบว่า มีการหายไปของความหนาแน่นอิเล็กตรอนในช่วงก่อตัวของ EPB ตอนหลังพระอาทิตย์ตก และมีการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นอิเล็กตรอนในช่วงเวลาหลังเที่ยงคืน

งานวิจัยนี้ใช้ค่าข้อมูล GNSS ที่บันทึกได้ที่สถานี RASH ในซาดูติอาระเบียเพื่อศึกษาการตอบสนองของชั้นไอโอโนสเฟียร์ละติจูดต่ำที่มีต่อเหตุการณ์พายุรุนแรงในช่วงวันเซนต์แพทริก (17 มีนาคม 2558) และพายุที่รุนแรง (7 ตุลาคม 2558) อีกทั้ง ยังได้ศึกษาพฤติกรรมทั่วโลกของพารามิเตอร์ชั้น F (NmF2 และ hmF2) และอัตราส่วน O/N2 ที่เป็นกลางซึ่งสนับสนุนการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมในช่วงเวลาที่เกิดพายุด้วย ค่าข้อมูล TEC ที่ได้รับจากระบบ GNSS และการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ชั้นไอโอโนสเฟียร์ทั่วโลกได้ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ในช่วงเวลาที่เกิดพายุโดยอาศัยคุณลักษณะเฉพาะตามฤดูกาลที่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ความรุนแรงของซินทิลเลชันที่เกิดขึ้นจากความไม่เท่ากันของพลาสมา (plasma gradient) ในชั้นไอโอโนสเฟียร์บริเวณเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำด้วย

2.3.2 ข้อมูลที่ใช้ในศึกษาผลกระทบของพายุแม่เหล็กโลกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลง TEC

การวัดค่า TEC จะกระทำด้วยเครื่องรับ GNSS ที่สถานี RASH (28°29'N, 34°46'E) ในประเทศซาดูติอาระเบีย โปรแกรม Rinex GPS-TEC ที่พัฒนาโดย Gopi Seemala ถูกนำมาใช้เพื่อหาค่า TEC แนวตั้ง (Vertical TEC หรือ VTEC) จากค่าที่วัดได้ทั้งแบบ differential phase carrier and pseudorange นอกจากนี้ ยังมีการใช้ค่า differential code biases (DCBs) และข้อมูล ephemeris ในการประมาณค่า TEC แนวเอียง

(Slant TEC หรือ STEC) ด้วย การปรับค่า GNSS pseudorange ให้เรียบขึ้นโดยวิธีการของ carrier phase labeling ช่วยกำจัดสัญญาณรบกวนให้แก่ค่า pseudorange TEC ซึ่งจากหลักการ ค่า STEC สามารถหาค่าได้จากผลรวมระหว่างค่า VTEC กับค่า instrumental bias (B) ดังนั้น ถ้าเราจะหาค่า VTEC เราก็นำค่า B นำไปลบออกจาก STEC หลังจากนั้น ค่า VTEC จะหาค่าได้จากการคูณค่า STEC ด้วยค่า mapping function ดังแสดงใน (2.1)

$$VTEC = STEC \times \left(1 - \left(\frac{R_E \cos(\alpha)}{R_E + h_{\max}} \right) \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

โดยค่า R_E แทนรัศมีของโลก, α เป็นค่า elevation cutoff (ในที่นี้ เราจะเลือกให้มีค่ามากกว่า 20 องศา เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงความผิดพลาดอันเนื่องมาจากสัญญาณมัลติพาทและการเปลี่ยนทางเรขาคณิตของดาวเทียม), และ h_{\max} เป็นค่าความสูงของจุด IPP ที่พิจารณาว่ามีค่าเท่ากับ 350 km

ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงใน VTEC ได้รับการคำนวณเพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงสูงสุดและต่ำสุดของค่า VTEC ระหว่างวันที่มีพายุ เปอร์เซนต์ VTEC คือความแตกต่างระหว่างค่า VTEC ในวันที่เกิดพายุ ($VTEC_{SD}$) กับค่า VTEC เฉลี่ยในวันที่เงียบจำนวน 10 วันของเดือนนั้น ๆ ($VTEC_{AQ}$) ซึ่งหาค่าได้จาก (2.2)

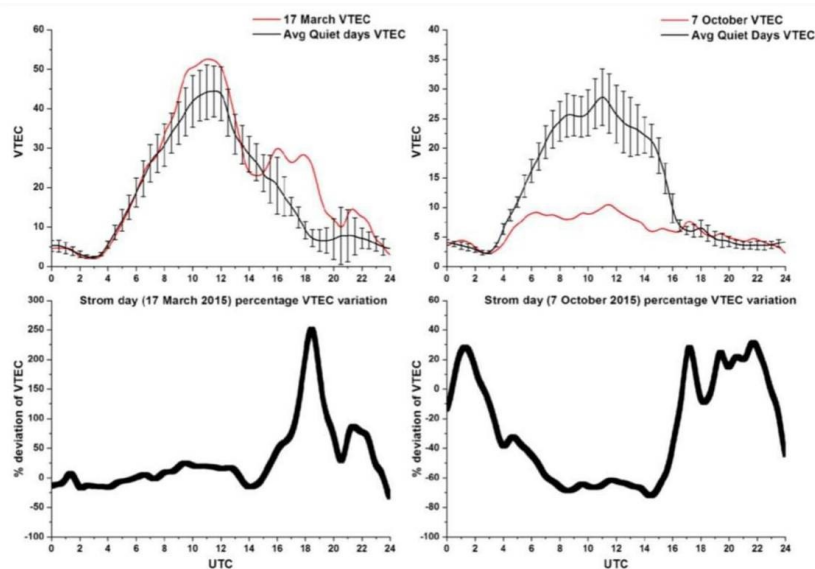
$$\%VTEC = (VTEC_{SD} - VTEC_{AQ}) / VTEC_{SD} * 100 \quad (2.2)$$

เพื่อที่จะศึกษาการตอบสนองของชั้นไอโอโนสเฟียร์ระหว่างพายุแม่เหล็กโลก พายุแม่เหล็กโลกที่รุนแรงจำนวน 2 ลูกของปี พ.ศ. 2558 (อิงตามดัชนีเวลาพายุแม่เหล็กโลก, Dst) ได้แก่ 17 มีนาคม 2558 (พายุวันเซนต์แพทริก) และ 7 ตุลาคม 2558 ได้ถูกศึกษา ข้อมูลสภาพทางธรณีฟิสิกส์พื้นฐาน (ได้แก่ IMF-Bz, ความหนาแน่นของโปรตอน, ความเร็วลมสุริยะและสนามไฟฟ้าระหว่างดาวเคราะห์-Ey, ดัชนี Kp และดัชนี AE) ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บเซิร์ฟเวอร์ OMNI (<https://iswa.ccmc.gsfc.nasa.gov>) ข้อมูลค่า Sym-H ก็สามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์มหาวิทยาลัยเกียวโต <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/index.html> และการกระจายทั่วโลกของค่าอัตราส่วน O/N2 ที่สามารถดาวน์โหลดได้หน่วยงาน integrated space weather analysis system (ISWA) ที่เว็บไซต์ <https://iswa.ccmc.gsfc.nasa.gov> นอกจากนี้ ค่าข้อมูลพารามิเตอร์ชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่สเกลอัตโนมัติของค่า foF2, ค่า hmF2, และค่าความสูงเสมือนที่ต่ำสุดของ F2 layer (hF2) ก็สามารถดาวน์โหลดได้จาก Global Ionosphere Radio observatory (GIRO) ที่เว็บไซต์ <http://giro.uml.edu/drift-data.html> ในกรณีนี้ เนื่องจากการสังเกตการณ์พารามิเตอร์ชั้น F โดยตรงด้วยอุปกรณ์ Ionosonde/Digisonde/ISR นั้นไม่มีพารามิเตอร์ของดิฟิซอนด์ที่สถานีละติจูดใกล้เคียงโดยประมาณที่เมือง Athens, ประเทศกรีซ (38°N, 23°E) จึงถูกนำมาใช้ศึกษาเพื่อวิเคราะห์ GNSS TEC

ผลศึกษาได้แบ่งออกเป็นสามส่วนที่แตกต่างกัน ส่วนแรกได้อธิบายผลกระทบของพายุเชิงบวกของเหตุการณ์พายุวันเซนต์แพทริก (วันที่ 17 มีนาคม 2558) ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่า TEC รายวัน ส่วนที่สองได้อธิบายผลตอบสนองเชิงลบของค่า TEC ในชั้นไอโอโนสเฟียร์อันเนื่องมาจากการเกิดพายุที่รุนแรงในวันที่ 7 ตุลาคม 2558 และบรรยายถึงซินทิลเลชันที่สังเกตได้ในระหว่างพายุแม่เหล็กโลกทั้ง 2 ลูกและการเปรียบเทียบระหว่างกันบนพื้นฐานของระดับความรุนแรงของซินทิลเลชัน รูปที่ 2.16 อธิบายการเปลี่ยนแปลงของ VTEC และค่า VTEC

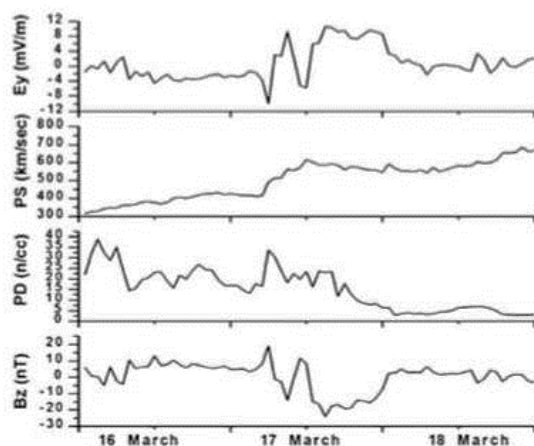
รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

เฉลี่ยในวันที่เงียบ โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างวันที่พายุ 17 มีนาคม 2558 และ 7 ตุลาคม 2558 ในแถบบน และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงใน VTEC ในวันที่มีพายุเมื่อเทียบกับค่า VTEC เฉลี่ยในวันที่เงียบในแถบล่าง จาก รูปที่ 2.16 จะเห็นได้ว่า VTEC สูงขึ้น 250.16% เมื่อเทียบกับค่า VTEC เฉลี่ยในวันที่เงียบจำนวน 10 วัน ในขณะที่ พายุในวันที่ 7 ตุลาคม 2558 ทำให้ค่า VTEC ลดลง 72.14% เมื่อเทียบกับ VTEC เฉลี่ยในวันที่เงียบจำนวน 10 วัน



รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงของค่า VTEC (แถบบน) และค่าผลต่างของ VTEC ในหน่วย % (แถบล่าง) ระหว่างวันที่ 17 มีนาคม 2558 และ 7 ตุลาคม 2558 [3]

2.3.3 ผลการตอบสนองเชิงบวกของ TEC พารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศและตัวบ่งชี้สภาพบรรยากาศ ระหว่างที่เกิดพายุเฮอริเคนแพทริก (16-18 มีนาคม 2558)

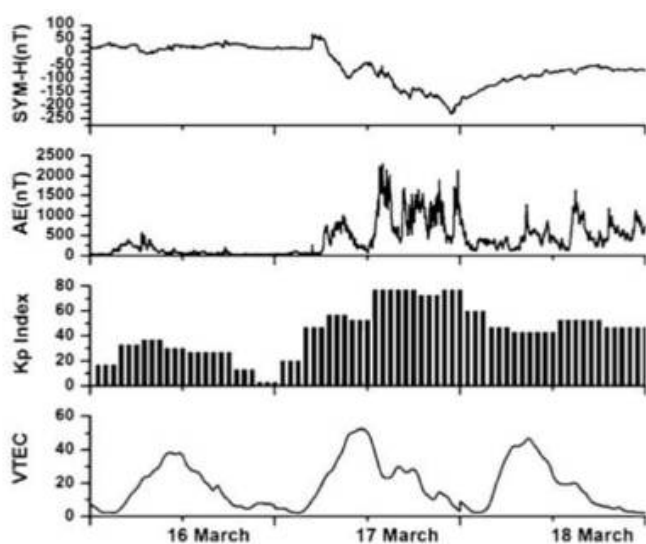


รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลงของค่า IEF-Ey, ความเร็วลมสุริยะ, ความหนาแน่นของโปรตอน และ IMF-Bz ระหว่าง วันที่ 16 ถึง 18 มีนาคม 2558 จากบนลงล่าง ตามลำดับ [3]

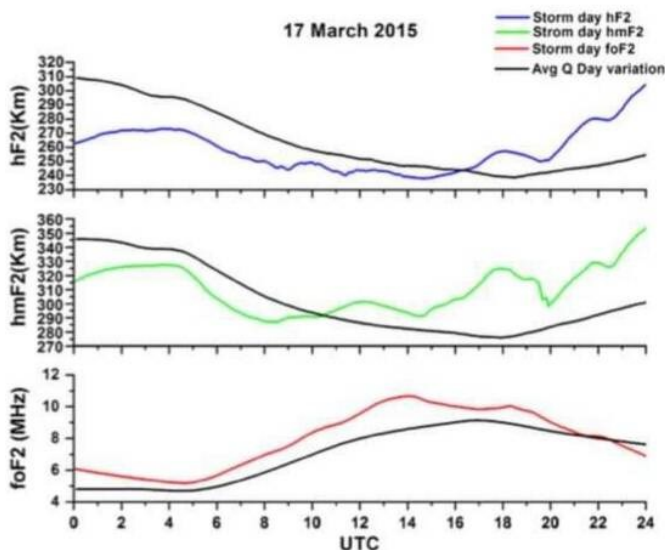
รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัด เรือใหม่ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

นอกจากนี้ ตัวบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ (สภาพชั้นบรรยากาศ) ก็ได้มีการศึกษาและวิเคราะห์เช่นกัน โดยสภาวะการเปลี่ยนแปลงของค่า IMF-Bz, ความหนาแน่นของโปรตอน (photon density หรือ PD), ความเร็วลมสุริยะ (solar wind หรือ SW) และองค์ประกอบยามรุ่งอรุณ-สนธยา (dawn-dusk) ของสนามไฟฟ้าระหว่างดาวเคราะห์ (IEF-Ey) มีแสดงไว้ในรูปที่ 2.17 ส่วนรูปที่ 2.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มกระแสไฟฟ้าวงแหวน (Sym-H) ตอนที่เกิดพายุ, ค่า AE, ดัชนี Kp และการเปลี่ยนแปลงของ TEC จากบนลงล่างตามลำดับ งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้แสดงให้เห็นว่า Halo CME ได้ถูกตรวจพบบนดวงอาทิตย์ในวันที่ 15 มีนาคม 2558 หลังจากนั้นก็จะเกิดกระแสลมสุริยะความเร็วสูงเคลื่อนตัวตามหลัง CME ที่มาจาก Coronal Hole ขนาดใหญ่บนดวงอาทิตย์ การเปลี่ยนแปลงของ Sym-H แสดงให้เห็นว่าพายุ geomagnetic เกิดขึ้นในสองเฟสระยะแรกสังเกตที่ 08:00 UT โดยมีขนาด Sym-H เท่ากับ -91 nT และระยะที่สองเกิดขึ้นประมาณ 22:00 UT โดยมีขนาด Sym-H เท่ากับ -221 nT ดัชนี AE ก็มีค่าที่เพิ่มขึ้นอย่างมากเช่นกันในวันที่ 17 มีนาคม 2558 ด้วยขนาดเท่ากับ 2215 nT การเพิ่มขึ้นอย่างมากของดัชนี AE ในช่วงที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกนั้นแสดงให้เห็นถึงการเกิดขึ้นแหล่งพลังงานที่สูงในละติจูดสูง ซึ่งทำให้เกิดลมและคลื่นใหญ่ที่มุ่งหน้าไปที่เส้นศูนย์สูตร โดย DDEF ที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตกในตอนกลางวันและที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันออกในตอนกลางคืนเป็นผลที่เกิดขึ้นจากลมและคลื่นใหญ่ที่มุ่งหน้าไปที่เส้นศูนย์สูตรดังกล่าว

การเปลี่ยนแปลงของค่า VTEC ยังแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของพายุเชิงบวก 2 ขั้นตอน การตอบสนองเชิงบวกครั้งแรกของ TEC เกิดขึ้นที่เวลา 10:00 UT ด้วยขนาด 52.45 TECU และการตอบสนองเชิงบวกครั้งที่สองเกิดขึ้นที่เวลาประมาณ 17:00 UT ด้วยขนาด 27.32 TECU ค่า VTEC ที่สังเกตพบเมื่อวันที่ 17 มีนาคม 2558 นั้นมีขนาดที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับค่า VTEC ในวันที่ 16 มีนาคม 2558 (วันที่มาก่อน) และ 18 มีนาคม 2558 (วันที่ตามหลัง) การตอบสนองเชิงบวกในระยะเวลาอันสั้นของพายุแม่เหล็กโลกอาจจะเกิดเนื่องจาก traveling atmospheric disturbances (TADS) โดย TADS เป็นปรากฏการณ์ที่พบได้ก่อนสำหรับผลกระทบพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ในเชิงบวกและผลกระทบของกิจกรรมแม่เหล็กโลกที่ละติจูดต่ำ ซึ่งเราพบว่า TADS เหล่านี้เกิดขึ้นที่ละติจูดสูงและเคลื่อนตัวด้วยความเร็วสูงไปยังละติจูดกลางและต่ำ แล้วพวกมันยังได้ไปรวมตัวกับลมเมอริเดียนแล้วส่งผลให้เกิดการยกชั้น F2 ให้สูงขึ้นไปหลายสิบลกม ภายในระยะเวลาครึ่งชั่วโมงหรือน้อยกว่านั้นก็ไม่ได้

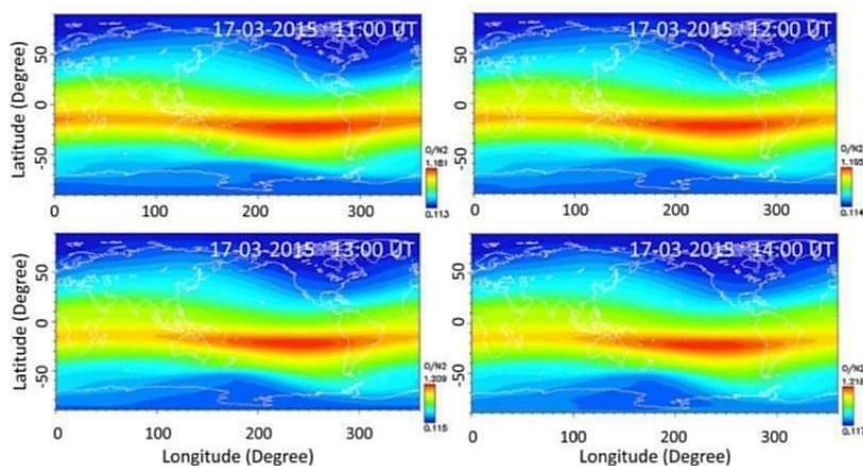


รูปที่ 2.18 การเปลี่ยนแปลงของค่า Sym-H, ดัชนี AE, ดัชนี Kp และค่า VTEC ในวันที่ 16-18 มีนาคม 2558 [3]



รูปที่ 2.19 การเปลี่ยนแปลงของค่า hF2, hmF2, และ foF2 พร้อมกับค่าเฉลี่ย ในวันที่ 17 มีนาคม 2558 [3]

รูปที่ 2.19 แสดงให้เห็นว่าในวันที่ 17 มีนาคม 2558 ค่า foF2, ค่า hmF2 และค่า hF2 มีค่าที่เพิ่มขึ้นหลังจากเกิดพายุและยังพบอีกว่า พารามิเตอร์ทั้งสามตัวนี้มีขนาดที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยที่วัดได้ในวันที่เงียบจำนวน 10 วัน การเพิ่มขึ้นในค่า hmF2 เริ่มต้นเมื่อเวลาประมาณ 11:50 UT หลังจากที่เกิดพายุเริ่มต้นเกิดขึ้นครั้งแรกและยังคงปรากฏอยู่เป็นเวลานาน ความรุนแรงของไอออน O+ ก็เริ่มที่จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นในชั้น F2 เช่นกันอันเนื่องมาจากอัตราการรวมตัวกันใหม่ที่ลดลง พร้อมกันนี้ความรุนแรงของ N2 ก็มีค่าลดลงอย่างทันทีทันใดเช่นกัน จึงส่งผลให้อัตราส่วน O/N2 สุทธิมีค่าที่เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงรายชั่วโมงทั่วโลกของอัตราส่วน O/N2 มีแสดงไว้ในรูปที่ 2.20 ปรากฏการณ์การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน O/N2 ตอนที่เกิดผลกระทบของพายุเชิงบวกรุนแรงนั้นได้ถูกอธิบายไว้เป็นอย่างดีแล้ว กล่าวคือ “ความหนาแน่นอะตอมออกซิเจนมีค่าที่เพิ่มขึ้น 50-60% ในขณะที่ ความหนาแน่นของโมเลกุลไนโตรเจนมีค่าที่ลดลง 30-35% และในช่วงที่เกิดพายุ นั้น พบว่า มีการเพิ่มขึ้นของ foF2 อย่างรวดเร็วซึ่งแสดงให้เห็นถึงการมีส่วนร่วมของ PPEF ในตอนกลางวันอย่างชัดเจน โดย PPEF ได้ถูกสร้างขึ้นที่ชั้นแมกเนโตสเฟียร์ แล้วถูกดึงลงไปและส่งผลกระทบต่อชั้นไอโอโนสเฟียร์บริเวณละติจูดต่ำด้วย”



รูปที่ 2.20 การเปลี่ยนแปลงรายชั่วโมงของ O/N2 ทั่วโลกที่เวลา 11:00-14:00 UT ในวันที่ 17 มีนาคม 2558 [3]

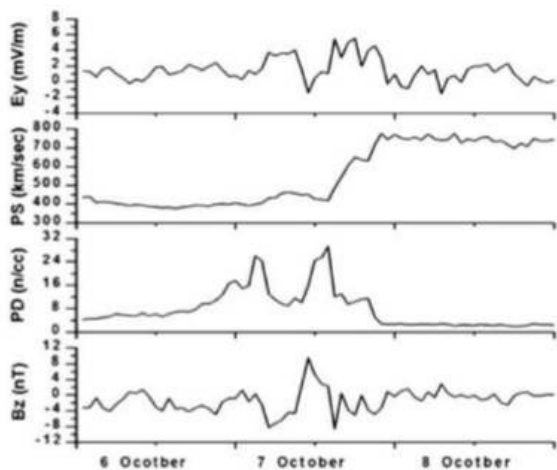
รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุทิศทางรีเลย์ใหม่และเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

2.3.4 ผลการตอบสนองเชิงลบของ TEC พารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศและตัวบ่งชี้สภาพบรรยากาศในวันที่ 7 ตุลาคม 2558

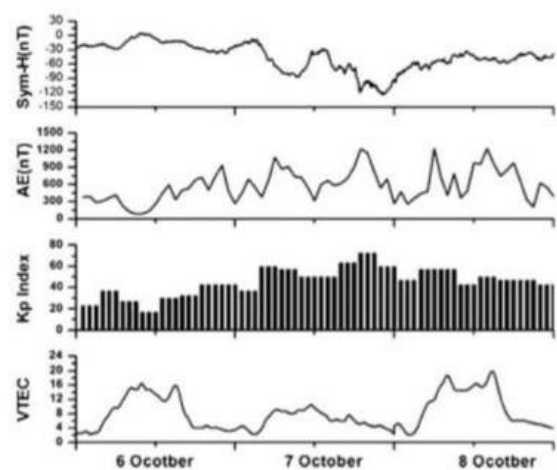
รูปที่ 2.21 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ (IMF-Bz), ความหนาแน่นโปรตอน ความเร็วลมสุริยะและสนามไฟฟ้าระหว่างดาวเคราะห์ (Ey) จากล่างขึ้นไปบน ตามลำดับ ตัว SSC (storm sudden commencement) หรือการก่อตัวของพายุแบบทันที ได้ถูกสังเกตและพบว่ามี 2 ขั้นตอน ดังนี้ SSC ตัวที่ 1 เกิดขึ้นตอน 05:00 UT ด้วยขนาด IMF-Bz เท่ากับ -8.45 nT (ที่มุ่งหน้าไปทางทิศใต้) และ PD มีค่าพีคที่เวลาประมาณ 03:00 UT ด้วยขนาด 25.55 n/cc ในขณะที่ SSC ตัวที่สองเกิดขึ้นที่เวลา 15:00 UT ด้วยขนาด IMF-Bz เท่ากับ -8.01 nT และ PD มีค่าเท่ากับ 28.8 n/cc ที่ 14:00 UT ส่วน SW มีค่าที่เพิ่มขึ้นที่เวลา 14:00 UT ด้วยขนาดของสนามไฟฟ้าที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันออกเท่ากับ 5.34 mV/meter ค่า IMF-Bz กับ IEF-Ey จะมีความสัมพันธ์เป็นอย่างดีมากกับ eastward directed Ey ในระหว่างที่ Bz มีการวกกลับไปทางทิศใต้ รูปที่ 2.22 แสดงภาพการเปลี่ยนแปลงของค่า Sym-H, AE, ดัชนี Kp และค่า VTEC จากบนลงล่าง จากการเปลี่ยนแปลงของค่า Sym-H พบว่า พายุเริ่มก่อตัวขึ้นเวลาประมาณ 03:00 UT และ 13:00 UT แล้วตามด้วยเฟสหลักของพายุที่เวลา 19:00 UT ด้วยขนาดของ Sym-H เท่ากับ -116.42 nT เมื่อวันที่ 7 ตุลาคม 2558 เฟสหลักของพายุแม่เหล็กโลกกลุณนี้ยังเกิดขึ้นยาวนานไปจนถึงตอนเช้าของวันที่ 8 ตุลาคม 2558 ดัชนี AE ก็มีค่าที่เพิ่มขึ้นอย่างมากเช่นกัน จากตอนเวลา 22:00 ในวันที่ 6 ตุลาคม 2558 เมื่อค่า IMF-Bz มุ่งหน้าไปจากทิศเหนือไปทางทิศใต้ในตอนแรก แล้วดัชนี AE ก็แสดงค่าพีคที่เวลาประมาณ 05:00 UT และ 18:00 UT ในวันที่ 7 ตุลาคม 2558 ด้วยขนาด 1065.34 nT และ 1209.30 nT ตามลำดับ ในช่วงเฟสหลักของพายุ ค่า VTEC ก็หายไปในช่วงที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกกลุณนี้ด้วย ค่าสูงสุดของ VTEC อยู่ที่ 16.01 TECU ในวันที่ 6 ตุลาคม 2558 ในขณะที่ ในวันที่เกิดพายุ ค่า VTEC มีค่าสูงสุดเพียง 10 TECU ซึ่งบ่งชี้ว่าเกิดผลกระทบชั้นไอโอโนสเฟียร์เชิงลบของพายุแม่เหล็กโลก การหายไปของค่า VTEC เริ่มต้นจากการก่อตัวของพายุ (SSC) ตั้งแต่เวลา 22:00 UT ในวันที่ 6 ตุลาคม 2558 ค่าของ VTEC ในระหว่างเฟสหลักของพายุนี้ก็มีค่าที่ต่ำมากในวันที่ 7 ตุลาคม 2558 สนาม Ey มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตกในช่วงก่อตัวของพายุด้วยขนาด 5.52 mV/m และมันได้ยับยั้ง EIA ที่ก่อให้เกิดผลกระทบชั้นไอโอโนสเฟียร์ในเชิงลบ จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่า ผลกระทบเชิงลบในละติจูดต่ำในระหว่างระยะการฟื้นตัวของพายุมีส่วนทำให้ EIA ถูกยับยั้งและทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนส่วนผสมของสารในชั้นเทอร์โมสเฟียร์ เมื่อบริเวณที่เกิดการยับยั้ง EIA ทับซ้อนกับบริเวณที่หายไปของค่า O/N2 ที่ละติจูดต่ำ จึงทำให้เกิดผลกระทบชั้นไอโอโนสเฟียร์ในเชิงลบ

รูปที่ 2.23 แสดงให้เห็นว่าในวันที่ 7 ตุลาคม 2558 ค่า foF2, ค่า hmF2 และค่า hF2 มีค่าที่ลดลงภายหลังที่พายุเริ่มก่อตัว และค่าเหล่านี้ก็มีค่าที่ลดลงเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของวันที่เจียบ 10 วัน การตอบสนองเชิงลบของพายุแม่เหล็กโลกนี้อาจจะเกิดขึ้นเพราะการลอยเลื่อนของ ExB ที่ทิศทางที่พุ่งลง (เช่น การลดลงของค่า hmF2) และการหายไปของค่า O/N2 การลดลงของค่า hmF2 เหนือบริเวณละติจูดต่ำเป็นผลกระทบที่รวมกันของลมนิวทรัลชั้นเทอร์โมสเฟียร์และการหายไปของ O/N2 รูปที่ 2.24 แสดงการเปลี่ยนแปลงรายชั่วโมงของ O/N2 ทั่วโลกตั้งแต่เวลา 11:00-14:00 UT ในวันที่ 7 ตุลาคม 2558 พบว่า ค่า O/N2 มีค่าที่สูงขึ้นอย่างมากที่บริเวณซีกโลกเหนือและเส้นศูนย์สูตรเมื่อเทียบกับบริเวณละติจูดต่ำ ในระหว่างที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกนั้น ไอออน O+ จะถูกเปลี่ยนไปเป็นไอออน NO+ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไอออน การเปลี่ยนไปของไอออน O+ ดังกล่าวจะเกิดขึ้นเร็วมากเมื่อเทียบกับการสร้าง O+ ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งนำไปสู่การลดลงของค่า O/N2 ซึ่งถ้า ค่า O/O2

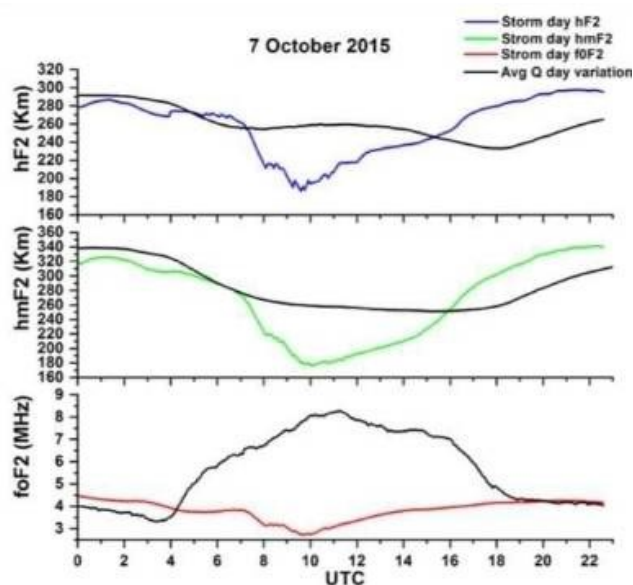
และค่า O/N2 มีค่าที่ลดลง มันก็ต้นเหตุที่ทำให้ค่า VTEC มีค่าลดลงได้หรืออาจจะเป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดผลกระทบ
ชั้นไอโอโนสเฟียร์ในเชิงลบของพายุสุริยะ



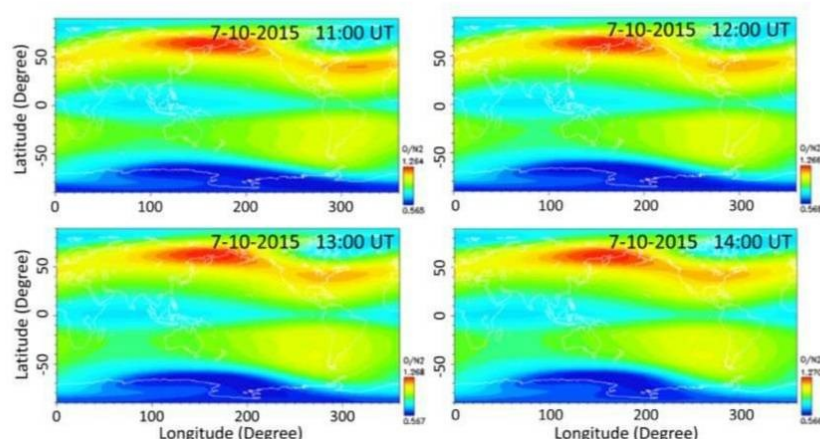
รูปที่ 2.21 การเปลี่ยนแปลงค่า IEF-Ey, ความเร็วลม
สุริยะ, ความหนาแน่นโปรตอนและ IMF-Bz ในวันที่
6-8 ตุลาคม 2558 จากบนลงล่าง [3]



รูปที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงค่า Sym-H, ดัชนี AE, ดัชนี
Kp และค่า VTEC ในวันที่ 6-8 ตุลาคม 2558 [3]



รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงของค่าที่วัดได้ของ hF2
(สีน้ำเงิน), hmF2 (สีเขียว), และ foF2 (สีแดง)
พร้อมกับค่าเฉลี่ยของวันที่เจ็ดจำนวน 10 วันของ
3 ค่าดังกล่าวในวันที่ 7 ตุลาคม 2558 จากบนลง
ล่าง ตามลำดับ [3]

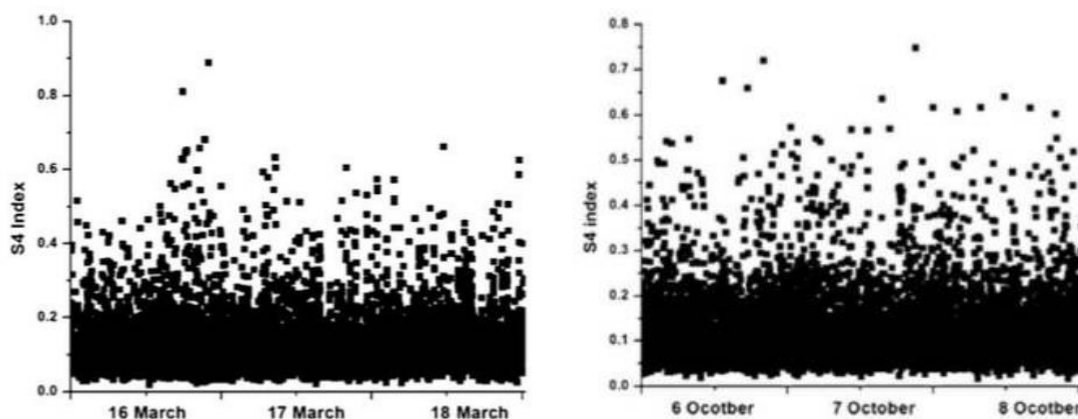


รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลง
รายชั่วโมงของ O/N2 ทั่ว
โลกตั้งแต่เวลา 11-14 UT
ในวันที่ 7 ตุลาคม 2558 [3]

2.3.5 ผลการศึกษาค่าซินทิลเลชันในระหว่างที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก

รูปที่ 2.25 ทางด้านซ้ายแสดงให้เห็นซินทิลเลชันที่มีค่าที่สูงขึ้นในช่วงเฟสหลักและเฟสฟื้นตัวของพายุวันเซนต์แพทริกเมื่อวันที่ 17 มีนาคม 2558 พบว่า ซินทิลเลชันมีค่าสูงสุดของดัชนี S4 (S4-index) เท่ากับ 0.8 ก่อนการเกิดเฟสหลักของพายุ ในช่วงเฟสหลักของพายุ ซินทิลเลชันก็ยังคงรุนแรง โดยมีดัชนี S4 เฉลี่ยเท่ากับ 0.6 และเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงเฟสฟื้นตัวของพายุ ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 2.25 ทางด้านขวาก็แสดงให้เห็นซินทิลเลชันในวันที่ 7 ตุลาคม พ.ศ. 2558 ซินทิลเลชันเกิดขึ้นก่อนเฟสหลักของพายุแม่เหล็กโลกลูกนี้ โดยดัชนี S4 มีค่าเท่ากับ 0.72 ในวันที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2558 และยังคงดำเนินต่อไปจนถึงระยะการฟื้นตัวของพายุ ค่าเฉลี่ยของดัชนี S4 เท่ากับ 0.55 และความถี่ของการเกิดซินทิลเลชันก็สูงขึ้นเช่นกันในทุก ๆ ช่วงของพายุแม่เหล็กโลก โดยดัชนี S4 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.75 ในช่วงเฟสหลักของพายุ ซินทิลเลชันเกิดจากความผิดปกติของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ก่อตัวขึ้น ความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่บริเวณละติจูดต่ำนั้นได้ถูกสังเกตเห็นได้ในช่วงเวลาที่ผิดปกติและในขณะที่มันเคลื่อนตัวมุ่งหน้าไปยังบริเวณเส้นศูนย์สูตร ช่วงเวลาของความผิดปกติก็จะยาวนานขึ้น โดยกลไก (สาเหตุ) ของการก่อตัวของความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งเหนือละติจูดต่ำนั้นสามารถที่จะอธิบายได้ในแง่ของความถี่การชนกันของไอออนที่เป็นกลาง คลื่นแรงโน้มถ่วง, ความไม่เท่ากันของพลาสมาขนาดใหญ่, ลมนิวทรัล ฯลฯ ในระหว่างที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกนั้น สนามไฟฟ้าที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันออกจะเพิ่มขึ้นและผลักให้พลาสมาเคลื่อนตัวไปตามการลอยเลื่อน ExB ซึ่งเป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิด “กระบวนการ RTI” (Rayleigh-Taylor Instability) แล้วส่งผลทำให้เกิดความผิดปกติของพลาสมาบีบเปิดและสเปรดเอฟที่ส่งผลให้เกิดซินทิลเลชันในสัญญาณวิทยุ

ซินทิลเลชันที่เพิ่มขึ้นในช่วงพายุเซนต์แพทริกนั้นเป็นผลกระทบรวมกันของความหนาแน่นนิวทรัลที่เพิ่มขึ้นกับ TADs เหนือละติจูดต่ำและบริเวณเส้นศูนย์สูตร ระดับความรุนแรงของซินทิลเลชัน (S4-index) มีค่าที่สูงขึ้นที่บริเวณรอบ ๆ EIA crests เนื่องจากในบริเวณดังกล่าว พลาสมามีการเคลื่อนตัวจากละติจูดต่ำไปยังบริเวณเส้นศูนย์สูตร พร้อม ๆ กับลมนิวทรัลเทอร์โมสเฟียร์ จึงทำให้เกิดความไม่เท่ากันของความหนาแน่นพลาสมา ในระหว่างที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกในวันที่ 7 ตุลาคม 2558 นั้น ความสูงของชั้น F มีค่าลดลง ซึ่งส่งผลทำให้ซินทิลเลชันเกิดขึ้นแบบกระจายตัว ถ้าพายุเกิดขึ้นที่ตอนกลางวัน ซินทิลเลชันก็จะมีค่าน้อยในช่วงเฟสหลักและเฟสฟื้นตัว อันเนื่องมาจากการเกิดขึ้นแบบทันทีของ DDEF แต่ถ้าพายุเกิดขึ้นที่ตอนเช้ามืดหรือหลังเที่ยงคืน (อย่างเช่นพายุในวันที่ 7 ตุลาคม 2558) ซินทิลเลชันจะมีค่าที่สูงขึ้นในช่วงเฟสหลักและเฟสฟื้นตัวของพายุ



รูปที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงของซินทิลเลชันในวันที่ 16-18 มีนาคม 2558 กับวันที่ 6-8 ตุลาคม 2558 [3]

2.3.6 สรุปผลกระทบของพายุแม่เหล็กโลกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลง TEC พารามิเตอร์ชั้นไอโอโนสเฟียร์และตัวบ่งชี้สภาพบรรยากาศ

การเปลี่ยนแปลงของค่า TEC ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ พารามิเตอร์ชั้นไอโอโนสเฟียร์และตัวบ่งชี้สภาพบรรยากาศในระหว่างที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกจำนวน 2 ลูก คือ พายุวันเซนต์แพทริกและพายุวันที่ 7 ตุลาคม 2558 โดยผลกระทบดังกล่าวได้ถูกศึกษาโดยอาศัย 1) ค่า GPS-TEC ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS เหนือสถานี RASH ($28^{\circ}29'N$, $34^{\circ}46'E$), 2) พารามิเตอร์ชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ได้จากเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลที่สถานี Athens ประเทศกรีซ, 3) ค่าซินทิลเลชันที่ได้จากเครื่องรับ GNSS เหนือสถานี RASH ผลการศึกษาสามารถสรุปประเด็นที่สำคัญได้ดังนี้

(1) ผลตอบสนองชั้นไอโอโนสเฟียร์ในเชิงบวกต่อพายุวันเซนต์แพทริกอาจเกิดจากผลกระทบที่มารวมกันของ traveling atmospheric disturbances (TADs) และสนามไฟฟ้าเจาะทะลุทันที (PPEF) ในขณะที่สนามไฟฟ้าไดนามิโอบกวน (DDEF) อยู่ในระยะที่เริ่มก่อตัว

(2) ผลตอบสนองชั้นไอโอโนสเฟียร์ในเชิงลบต่อพายุแม่เหล็กโลกเมื่อวันที่ 7 ตุลาคม พ.ศ. 2558 ที่สอดคล้องกับการเคลื่อนตัวลงมาของพลาสมาอันเนื่องมาจากการลอยเลื่อน ExB ที่ถูกยับยั้งและความผิดปกติการไอออไนซ์แถบเส้นศูนย์สูตร (EIA) ที่ถูกยับยั้ง

(3) ซินทิลเลชันที่เกิดขึ้นระหว่างพายุแม่เหล็กโลกอาจเกิดขึ้นจากการก่อตัวของความผิดปกติของพลาสมาบับเบิลและสเปรดเอฟเหนือบริเวณละติจูดต่ำ

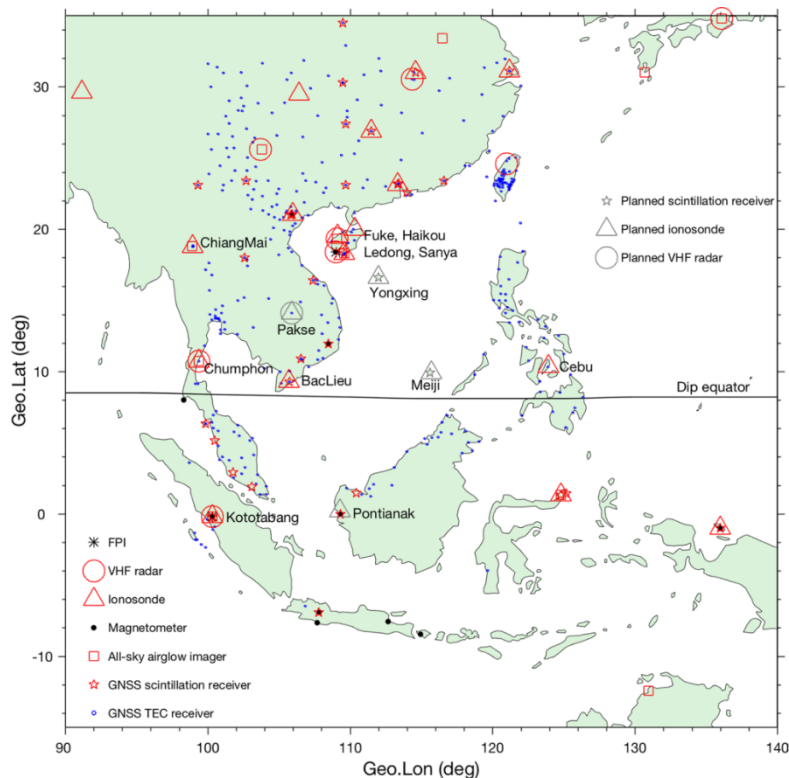
2.4 ภาพรวมของการตรวจจัดการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศในประเทศไทย เอเชียตะวันออกเฉียงใต้และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ในตอนนี้

มีเครือข่ายสังเกตการณ์และเครื่องมือวัดขนาดใหญ่เพียงไม่กี่แห่งเท่านั้นที่ยังคงได้รับการพัฒนาเพื่อศึกษาชั้นไอโอโนสเฟียร์ในเอเชียใต้-ตะวันออกเฉียงใต้ เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ยกตัวอย่างเช่น โครงการ SouthEast Asia Low-latitude Ionospheric Network (SEALION) [5], โครงการ Chinese Meridian Project (CMP) phase-I และ โครงการ Equatorial Ionosphere Characterization in Asia (ERICA) เครือข่ายเหล่านี้ประกอบด้วย

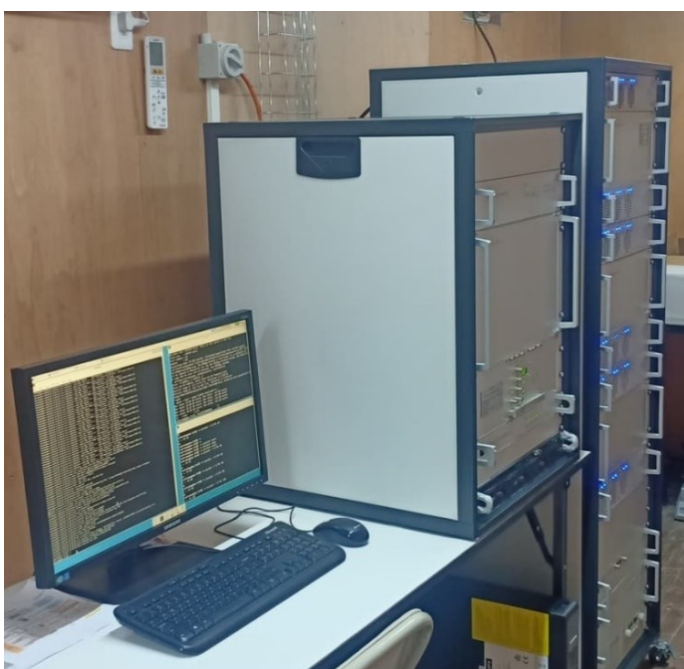
เครื่องมือวัดหลายชนิด ได้แก่ satellite beacon TEC/scintillation receiver, ionosonde, airglow imager และ VHF radar เครื่องมือรับ GNSS ระดับภูมิภาคและเครือข่าย all-sky airglow imager (ASI) ยังคงที่จะถูกนำมาใช้เพื่อเฝ้าสังเกตการณ์ชั้นไอโอโนสเฟียร์ เมื่อเร็ว ๆ นี้ เครือข่ายการตรวจวัดชั้นไอโอโนสเฟียร์สำหรับความผิดปกติและซินทิลเลชันในเอเชียใต้-ตะวันออกเฉียงใต้-ตะวันออกเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ionospheric observation network for irregularity and scintillation in the East and Southeast Asia หรือ IONISE) ก็กำลังจะถูกพัฒนาขึ้นมา ซึ่งประกอบไปด้วยเครือข่ายไขว้ของเครื่องรับ GNSS ที่วัดค่า TEC/ซินทิลเลชัน, อุปกรณ์ multi-static portable digital ionosondes (PDIs) and bistatic VHF coherent scatter radars รูปที่ 2.30 แสดงตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ของอุปกรณ์ตรวจวัดชั้นไอโอโนสเฟียร์แบคราวด์, EPBs, ความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์และซินทิลเลชันในบริเวณเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำ (สัญลักษณ์สีเทาแทนเครื่องมือวัดที่อยู่ระหว่างการวางแผน)

2.4.1 การสังเกตการณ์ชั้นไอโอโนสเฟียร์แบคราวด์ที่สถานีชุมพรและสถานีอื่น ๆ ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

ชั้นไอโอโนสเฟียร์แบคราวด์ (background ionosphere) ประกอบไปด้วยความสูงของชั้น F, ความหนาแน่นอิเล็กตรอนของชั้น F ด้านล่าง, ความหนาแน่นไอโอโนสเฟียร์แบคราวด์, EIA, ชั้น Es และ TIDs โดยมีปัจจัยกระตุ้นภายนอก (สนามไฟฟ้าและลมข้ามเส้นศูนย์สูตร) แสดงบทบาทที่สำคัญในการสร้างและการก่อตัวของ EPB, ความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ และซินทิลเลชันที่เกี่ยวข้องในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ สถานีไอโอโนซอนด์จำนวน 3 แห่งที่จังหวัดชุมพร (10.7°N, 99.4°E) เมืองบักลิว (9.3°N, 105.7°E) และเมืองเซบู (10.4°N, 123.9°E) ที่อยู่ใกล้กับเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก ดังแสดงในรูปที่ 2.30 สถานีไอโอโนซอนด์เหล่านี้ส่งสัญญาณคลื่น FMCW (frequency-modulated continuous wave) ออกไปตรวจวัดชั้นไอโอโนสเฟียร์และทำการบันทึกแผนภาพไอโอโนแกรมด้วยความละเอียดของเวลา 5 นาที พารามิเตอร์ไอโอโนสเฟียร์บางตัวสามารถประมาณได้จากไอโอโนแกรม เช่น ความสูงของชั้น F (h'F) ที่ได้จากการสเกลและความเร็วลอยเลื่อนพลาสมาในแนวตั้งที่ได้การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความสูงของชั้น F ($\Delta h'F/\Delta t$) ในทางกลับกัน จากการวัดผลต่างของขนาดขององค์ประกอบในแนวนอนของสนามแม่เหล็กโลก (ΔH) ที่เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกและที่ละติจูดต่ำ (6-9° ห่างจากเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก) ความเร็วลอยเลื่อนพลาสมาในแนวตั้งในตอนกลางวันสามารถที่จะหาค่าได้จากการใช้ความสัมพันธ์เส้นตรงที่สร้างขึ้นระหว่างความเร็วลอยเลื่อนพลาสมาในแนวตั้งกับค่า ΔH เครื่องแมกเนโตมิเตอร์บางแห่งยังคงถูกใช้งานเพื่อเฝ้าสังเกตสนามแม่เหล็กกระยะยาวที่เส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำ การสังเกตความหนาแน่นชั้น F ด้านล่างโดยตรงสามารถที่จะกระทำได้โดยใช้อุปกรณ์เรดาร์แบบ ISR (steerable incoherent scatter radar) ได้ โดยโครงสร้างคลื่นที่เกิดขึ้นก่อน EPB นั้นยังคงที่จะถูกสังเกตเห็นได้ทั้งที่เส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำ ในตอนนี้ ยังไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ ISR ที่เส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ภายใต้การสนับสนุนของ National Natural Science Foundation of China (NSFC) อุปกรณ์ ISR ตัวใหม่ที่มีการเคลื่อนย้ายบีมที่เร็วอยู่ระหว่างการก่อสร้างที่ละติจูดต่ำที่เมืองซานย่า ซึ่งคาดว่าจะเริ่มทำงานในปลายปี 2020 นอกจากนี้ ยังมีสถานี VHF radar ที่สถานีพระจอมเกล้าชุมพรที่ได้ติดตั้งและเริ่มใช้งานเพื่อตรวจจับพลาสมาบับเบิลตั้งแต่ต้นปี 2019 โดยทำงานด้วยเครื่องรับส่ง VHF radar เครื่องคอมพิวเตอร์จัดเก็บค่าข้อมูลที่วัดได้ และสายอากาศวิทยากิจจำนวน 18 ต้น ที่ย่านความถี่ 39.65 MHz ดังแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.30 ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ของอุปกรณ์ตรวจวัดชั้นไอโอโนสเฟียร์ แบริคราเวด, EPBs, ความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์และซินทิลเลชันในบริเวณเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำ [4]



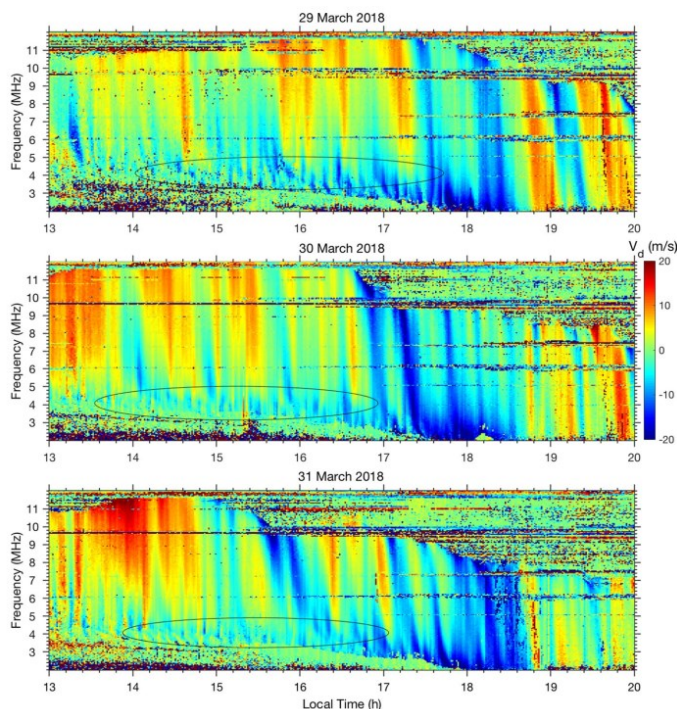
รูปที่ 2.31 เครื่องรับส่ง VHF radar และเครื่องคอมพิวเตอร์จัดเก็บค่าข้อมูล ที่วัดได้ที่ สจล. วิทยาเขตชุมพรฯ

เทคนิคที่เคยใช้มาก่อนหน้านี้ไม่สามารถที่จะวัดโครงสร้างคลื่นได้โดยตรงในภูมิภาคนี้ ตัวไอโอโซนดและ GNU radio beacon receiver (GRBR) สามารถใช้ในการวัด satellite trace จากไอโอแกรมและการเปลี่ยนแปลงตามลองติจูดของ TEC เพื่อแสดงคุณลักษณะการปรากฏตัวของโครงสร้างคลื่นด้านล่าง นอกจากนี้

การเปลี่ยนแปลงเป็นครั้งคราวของความสูงของชั้น F ที่พบได้จากค่าความถี่พลาสมาที่แตกต่างกันจะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างคลื่นด้านล่าง จากการพิจารณาที่ว่าโครงสร้างคลื่นด้านล่างนั้นมีความจำเป็นต่อการสร้าง EPB และอัตราการสร้าง EPB มีค่าเข้าใกล้ 100% ภายใต้สภาวะที่มีการลอยเลื่อนพลาสมาในแนวตั้งที่พุ่งขึ้นที่มาก เราจึงสรุปว่า “โครงสร้างคลื่นด้านล่างอาจจะเกิดขึ้นบ่อยมาก” จากการพิจารณาแผนภาพไอโอแกรมมีเกิดตอบเพลอร์เร็วด้วยอุปกรณ์ multi-static PDIs ของ IONISE ช่วยให้เราสามารถเข้าการเกิดขึ้นของการก่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนด้านล่างได้ดียิ่งขึ้น

รูปที่ 2.32 แสดง 3 กรณีของการแกว่งของความเร็วดอปเพลอร์ที่วัดได้ด้วยความถี่ของพลาสมาค่าต่าง ๆ ด้วยอุปกรณ์ PDI ที่เมืองซานย่าในวันที่ 29-31 มีนาคม 2561 ในแผนภาพความเร็วดอปเพลอร์ (ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาท้องถิ่นและความถี่พลาสมา) เราจะเห็นได้ว่า การแกว่งของค่าความเร็วเกิดขึ้นตั้งแต่ช่วงบ่ายถึงตอนพระอาทิตย์ตกตลอดระยะเวลา 3 วัน ปรากฏการณ์ superimposed ellipses แสดงการเกิดการรบกวนที่ด้านล่างของชั้น F ด้วยระยะเวลาสั้น ๆ ในช่วงบ่าย ตอนใกล้พระอาทิตย์ตก (17-19 LT) การแกว่งที่มากด้วยช่วงเวลาที่ค่อนข้างนานขึ้นและแอมพลิจูดที่มากขึ้นได้สังเกตเห็นได้ที่ชั้น F ใกล้กับความสูงพิก การวิเคราะห์ในเบื้องต้นของแผนภาพความเร็วดอปเพลอร์จากอุปกรณ์ PDI ที่เมืองซานย่าในช่วงเดือนมีนาคม-เมษายน ปี 2561 ได้แสดงให้เห็นว่า การแกว่งเหล่านี้ก็เกิดขึ้นเกือบทุกวัน (ยกเว้นหลายวันที่ไม่มีข้อมูลเนื่องจากไฟดับ) การเฝ้าสังเกตการณ์ในอนาคตด้วยอุปกรณ์ multi-static PDIs ด้วยระยะทางหลายสิบล้าน km ไปจนถึงหลายร้อย km ที่ครอบคลุมบริเวณเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำก็สามารถที่จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นที่สร้างการก่อความหนาแน่นให้กับชั้น F ได้” การเฝ้าสังเกตการณ์โพลาไรซ์ความหนาแน่นอิเล็กตรอนชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ต่ำกว่าความสูงพิกชั้น F, EIA, ชั้น Es และ TIDs นั้นสามารถวัดค่าได้สำเร็จด้วยเครือข่ายเครื่องรับสัญญาณ GNSS และสถานีไอโอโนซอนด์หลายแห่ง

นอกจากนี้ อุปกรณ์ all-sky meteor radar (ซึ่งถูกนำมาใช้เพื่อสังเกต specular meteor ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการพัดพาของลมนิวทริลที่ระดับความสูง 70-100 km) ก็สามารถใช้ในการตรวจจับโครงสร้างความผิดปกติของชั้น Es พร้อมกันได้ในพื้นที่ในบริเวณในแนวนอนที่กว้างและติดตามการเคลื่อนที่ของมันได้ โดยปราศจากการขัดจังหวะการสังเกตอุกกาบาตการสังเกตโครงการสร้างการเปลี่ยนแปลงเชิงระยะทางของชั้น Es โดย meteor radar นั้นสามารถที่จะปรับปรุงความเข้าใจกระบวนการการการคัปปลิงชั้น E-F ได้ โดยการพิจารณาการวัดค่าความเร็วลมเทอร์โมสเฟียร์ เทคนิคหนึ่งที่ใช้วัดค่าความเร็วลมดังกล่าวคือการใช้ Fabry-Perot interferometer (FPI) ซึ่งเป็นการวัดการปลดปล่อยคลื่นสีแดงจากอะตอมออกซิเจนที่ค่า 630 nm ซึ่งใช้ในการประมาณค่าความเร็วลมที่ความสูงประมาณ 250 km เหนือบริเวณที่วัดค่า ในที่นี้มี 2 แห่งของอุปกรณ์ FPIs ที่บริเวณละติจูดต่ำคือที่เมืองโกโตตะบังและเมือง Ledong (18.3°N, 109°E) ซึ่ง 2 เมืองนี้ตั้งอยู่ที่จุดศูนย์กลางเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก อีกเทคนิคหนึ่งสำหรับการวัดค่าความเร็วลมเทอร์โมสเฟียร์ที่ข้ามเส้นศูนย์สูตรคือใช้สถานีไอโอโนซอนด์ที่จุดศูนย์กลางเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก ความไม่สมมาตรกันของการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงชั้น F ที่สังเกตได้จากสถานีไอโอโนซอนด์ที่จุดศูนย์กลางเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก 2 แห่งคือที่จังหวัดเชียงใหม่ (18.8°N, 98.9°E) และเมืองโกโตตะบังได้ถูกแนะนำว่าเกิดขึ้นจากลมเทอร์โมสเฟียร์ที่ข้ามเส้นศูนย์สูตรที่ลองติจูด 100°E ซึ่งสามารถที่จะปิดกั้นการสร้าง EPBs ได้ นอกจากนี้ สถานีไอโอโนซอนด์ที่เมือง Ledong และเมือง Pontianak (0.2°N, 109.3°E) จากการที่อาศัยสถานีไอโอโนซอนด์ทั้ง 4 แห่งเหล่านี้ การเปลี่ยนแปลงที่เป็นไปได้ของลมเทอร์โมสเฟียร์ที่ข้ามเส้นศูนย์สูตรและผลกระทบต่อเกิดขึ้นของ EPB ในบริเวณลองติจูดที่ค่อนข้างแคบนี้สามารถที่จะศึกษาได้



รูปที่ 2.32 การแกว่งของความเร็วดอปเพลอร์ ที่วัดได้ด้วยอุปกรณ์ PDI ที่ซานย่าในวันที่ 29-31 มีนาคม 2561 [4]

2.4.2 การสังเกต EPB, ความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์และซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์

แผนภาพไอโอโนแกรมและการวัดค่า TEC ได้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการศึกษาสภาพอวกาศของการเกิด EPB ตั้งแต่หลายสิบปีที่แล้ว ปรากฏการณ์ range-type spread-F (RSF) ที่ได้จากแผนภาพไอโอแกรมสามารถที่นำมาใช้เพื่อบ่งชี้คุณลักษณะของโครงสร้างความผิดปกติที่มีขนาดสเกลที่ต่างกันได้ ตั้งแต่หลายร้อย km ไปจนถึง 2-3 เมตร โดยที่ขนาดสเกลที่ผิดปกติมีค่าลดลงผ่านทางกระบวนการที่แคสแคดกัน สัญญาณสะท้อน RSF ที่ละติจูดต่ำและเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกนั้นสามารถที่จะเกิดขึ้นแรกเริ่มจากกลไกการกระเจิงคลื่นย้อนกลับแบบโคฮีเรนต์ (coherent) เนื่องจากความบีบที่กว้างมากของชั้นไอโอโนสเฟียร์ การตั้งฉากของ ionosonde line-of-sight กับสนามแม่เหล็กโลกสามารถที่จะพบเห็นได้ในภายในระยะลองจิจูดและความสูงที่มาก การวัดค่าจากไอโอโนแกรมด้วยสถานีวัดจำนวนมากในละติจูดต่ำและเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกในบราซิลได้แสดงให้เห็นว่า “ระดับของการแพร่กระจายออกตามระยะทางของ RSF echoes มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามความถี่ของ echo trace และความเข้มของความผิดปกติได้แสดงให้เห็นว่ามีค่าที่เพิ่มขึ้นอย่างมากจากเส้นศูนย์สูตรไปยังยอด EIA (คล้ายกับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวของซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์) นอกจากนี้ คุณสมบัติหลักของการพัฒนา RSF trace มีความสัมพันธ์กับกระบวนการของ coherent backscattering ของคลื่นวิทยุ ไอโอโนสเฟียร์ที่ถูกติดตั้งและกระจายตัวที่เส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้เป็นเครื่องมืออย่างที่ดีสำหรับการศึกษาการเกิดความผิดปกติ EPB ที่มีขนาดสเกลที่ต่างกัน นอกจากนี้ จากการใช้เครือข่ายเครื่องรับสัญญาณ GNSS ระดับภูมิภาคจำนวนมากในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ แผนภาพสองมิติของค่า ROTI ก็สามารถที่สร้างขึ้นมาได้เช่นกันเพื่อบ่งบอกคุณลักษณะของ EPB ที่เกิดขึ้น พบว่า ที่วัฏจักรสุริยະที่ต่ำที่สุด ค่า ROTI ที่น้อยไม่จำเป็น ที่แสดงให้เห็นถึงการไม่มี EPB เสมอไปเนื่องจากความหนาแน่นพลาสมาแปรปรวนมีค่าค่อนข้างต่ำมากก็ได้ จากแผนภาพของแผนภาพ ROTI การพัฒนาโครงสร้างทางแนวนอนของ EPBs อาจจะถูกศึกษาอย่าง

ละเอียดได้ ไม่เหมือนกับเครื่องรับ GNSS ที่ติดตั้งกระจายทั่วไป เครื่องรับซินทิลเลชั่นในเอเชียตะวันออกและตะวันออกเฉียงใต้มีจำนวนที่จำกัด ดังแสดงด้วยสัญลักษณ์ห้าเหลี่ยมในรูปที่ 2.30 อีกเทคนิคหนึ่งที่จะได้รับแผนภาพ EPB 2 มิติคือการใช้ all-sky airglow imager (ASI) ซึ่งสามารถที่จะได้รับโครงสร้างการหายไปของ EPB สเกลใหญ่บนพื้นที่ที่กว้างประมาณ 2,000 km (พิจารณาตามเส้นผ่านศูนย์กลาง) ได้ ซึ่งจะรวมถึงการเปลี่ยนแปลงของมันด้วยความละเอียดเชิงเวลาที่ต่ำ จากการวัดด้วยเครือข่ายเครื่องรับ GNSS และอุปกรณ์ ASIs ที่มีเป็นจำนวนมากค่าการลอยเลื่อนโซ่และพื้นที่ครอบคลุมเชิงระยะทางของโครงสร้าง EPB และความผิดปกติทั้งในแนวลองติจูดและละติจูดสามารถที่จะหาออกมาได้ เนื่องจากคุณลักษณะที่วางตัวอยู่ในแนวที่ขนานกับสนามแม่เหล็กของ EPBs โครงสร้างทางแนวนอนของ EPB ก็สามารถที่จะถูกแมปไปอยู่บนระนาบแนวตั้งเหนือเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกได้

2.5 วิธีการแก้ปัญหาสำหรับการระบุพิกัดแบบ RTK พื้นที่กว้างที่อาศัย Multi-GNSSs ภายใต้สภาวะที่ชั้นไอโอโนสเฟียร์มีการเปลี่ยนแปลงและถูกรบกวนอย่างรุนแรง

สิ่งรบกวนไอโอโนสเฟียร์ต่าง ๆ (ionospheric disturbances) เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ชั้นไอโอโนสเฟียร์มีการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะปกติและส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของการระบุพิกัด RTK ได้ สิ่งนี้ยังคงเป็นจริงแม้กระทั่งสำหรับการระบุพิกัดที่อาศัยระบบ Multi-GNSSs และเครือข่าย RTK เพื่อหาค่าปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์แล้วก็ตาม โดยผลกระทบที่ไม่พึงประสงค์นี้ยังคงเกิดขึ้นจากค่าปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ไม่ถูกต้องจากระยะทางจากสถานีอ้างอิงมายังเครื่องรับ GNSS ของผู้ใช้ (rover) ที่เกินกว่า 100 km โดยการระบุพิกัดแบบแม่นยำ (เช่น PPP, RTK) เป็นหัวข้องานที่ทำหายมากยิ่งขึ้นแม้กระทั่งในพื้นที่ที่กว้างด้วยระบบเสถียรเกินกว่า 100 km ในบทความนี้ จะทำการประเมินวิธีการที่ใช้ซึ่งมีเป้าหมายที่ RTK พื้นที่กว้างที่เชื่อถือได้และแม่นยำและการระบุพิกัดแบบหยุดนิ่งอย่างรวดเร็วในระหว่างที่เกิดสภาวะไอโอโนสเฟียร์ที่ถูกรบกวนหรือมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง วิธีที่นำเสนอนี้จะใช้ประโยชน์จากค่าปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ได้จาก Multi-GNSS และอัลกอริทึมอื่นหนึ่งที่จะมีการกำจัดเทอมการเปลี่ยนแปลงเชิงเวลาของเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ การประเมินผลการทดลองได้ถูกกระทำบนพื้นฐานของ RTK หลายสถานีและการระบุพิกัดแบบหยุดนิ่งโดยใช้ข้อมูลจาก GPS, BDS และ Galileo ที่รวบรวมได้ในช่วงที่เกิดพายุไอโอโนสเฟียร์ระหว่างวันที่ 25-26 สิงหาคม 2561 ผลการศึกษายืนยันว่า ในช่วงที่เกิดพายุนี้เกิดการแย่งลงของความแม่นยำของค่าปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์และผลที่ตามมาคือการแย่งลงของสมรรถนะการระบุพิกัดอย่างชัดเจน ไม่ว่าจะเป็ค่า AR ที่เป็นทศนิยมและที่ถูกถ่วงน้ำหนัก ดังนั้น เทคนิคของ Paziewski และ Sieradzki [6] จึงได้ถูกนำมาเสนอในโครงการวิจัยนี้ เนื่องจากวิธีที่นำเสนอจะสามารถที่จะปรับปรุงค่า AR ที่เด่นชัดมากและมีสมรรถนะที่สูงกว่าแบบจำลองมาตรฐาน โดยให้ค่าอัตราการลู่เข้า AR แบบจำนวนเต็มที่ดีขึ้น 25% เมื่อเทียบกับแบบจำลองมาตรฐาน หลายทศวรรษที่ผ่านมา เทคนิคการระบุพิกัดที่อาศัย GNSS จำนวนมากได้ (อาทิ PPP, RTK ฯลฯ) ได้ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง วิธีต่าง ๆ ที่มีการนำเสนอนั้นถูกจำแนกตามลักษณะการใช้งาน ได้แก่ ค่าสัมบูรณ์และค่าสัมพัทธ์, การประมวลผลแบบเรียลไทม์หรือแบบประมวลผลภายหลัง การใช้งานรหัสเทียมหรือเฟสคลื่นพาห์ ฯลฯ อย่างไรก็ตาม วิธีเหล่านี้ทั้งหมดก็ล้วนแต่ประสบปัญหาจากสิ่งรบกวนในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรงทั้งสิ้น เงื่อนไขดังกล่าวนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนของปริมาณพลาสมา ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดความไม่เท่ากันของค่าเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ (ionospheric delay gradient หรือ IDG) ของ

สัญญาณ GNSS ที่สูงถึง 100 เมตร และที่สำคัญมากไปกว่านั้น ชั้นไอโอโนสเฟียร์ในช่วงเวลาที่มีพายุและผลที่ตามมาในส่วนของข้อมูลดาวเทียมที่ได้รับก็พบว่ามีเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่สูงมากเช่นกัน

เนื่องจากความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์และผลกระทบที่มีต่อการระบุพิกัดของ GNSS เป็นหัวข้อที่ได้รับความนิยมในการศึกษา จึงมีบทความวิจัยนำเสนอออกมามากมาย อาทิ การศึกษาคุณลักษณะความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์บริเวณเส้นศูนย์สูตรที่ซึ่งมีส่วนที่ทำให้เกิดร่องของความเข้มอิเล็กทรอนิกส์ที่เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกและยอดเหนือ/ใต้ที่ประมาณ 15 องศาของละติจูดแม่เหล็กโลก ปรากฏการณ์ดังกล่าวมีส่วนทำให้เกิดซินทิลเลชันสัญญาณ GNSS ที่เลวร้าย ซึ่งส่งผลทำให้เกิดไซเคิลสลิปในเฟสคลื่นพาห์และทำให้สมรรถนะการระบุพิกัดที่ผิดเพี้ยน ปรากฏการณ์อื่น ๆ ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ถูกศึกษาบ่อยเช่นกันก็คือ “สิ่งรบกวนชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีการเคลื่อนตัว (traveling ionospheric disturbance หรือ TID)” ซึ่งถูกนิยามเสมือนเป็นการเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอนเหมือนคลื่นของค่า TEC ที่แพร่กระจายผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ เรามักจะจำแนก TIDs ตามเงื่อนไขของขนาด ในขณะที่ TIDs ขนาดใหญ่เชื่อว่าจะถูกกระตุ้นให้เกิดขึ้นโดยพายุแม่เหล็กโลก ในขณะที่ TID ขนาดกลาง (MSTID) ถูกทำให้เกิดขึ้นโดยคลื่นโน้มถ่วงในชั้นบรรยากาศในชั้นบรรยากาศนิวโทรลและพายุย่อยออโรรา การจำลอง MSTID ด้วยสัญญาณ GNSS และอิทธิพลที่มีต่อสมรรถนะการระบุพิกัดที่แม่นยำยังคงถูกรายงานออกมา มากมาย ยกตัวอย่างเช่น มีการประยุกต์ใช้ค่า GNSS ที่วัดได้อย่างเป็นไปได้อย่างดีสำหรับการบ่งบอกคุณลักษณะของ MSTID ในทางกลับกัน ถึงแม้ว่าโครงสร้างเหล่านี้จะค่อนข้างอ่อน (มีค่า 2-3 TECU) พวกมันสามารถทำให้ตำแหน่งที่ประมาณได้ผิดเพี้ยนอย่างมากได้ และดังนั้นการระบุพิกัด GNSS ที่เชื่อถือได้ในสภาวะดังกล่าวจึงยังคงถูกพิจารณาว่าเป็นงานที่ยากงานหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การแย่งของสัญญาณ GNSS ที่สังเกตได้ได้ถูกสร้างขึ้นโดยความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ละติจูดสูงเหนือบริเวณขั้วโลกและออโรรา การเกิดขึ้นของสิ่งก่อกวนต่าง ๆ ในภูมิภาคดังกล่าวได้ถูกพิจารณาว่าได้ถูกกระตุ้นให้เกิดขึ้นโดยการคับปลิงระหว่างชั้นไอโอโนสเฟียร์, ลมสุริยะและชั้นแมกเนโตสเฟียร์ ระบบดังกล่าวนี้ (ซึ่งขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาของดวงอาทิตย์อย่างมากนี้) มีส่วนอย่างมากที่ทำให้เกิดหยาดน้ำฟ้าและแบบรูปการพาความร้อนที่ละติจูดสูง โดยผลกระทบของหยาดน้ำฟ้ามีส่วนต่อการกำเนิดความผิดปกติขนาดเล็กและขนาดกลาง ซึ่งมีความเข้มอย่างมากที่ auroral oval ส่วนแบบรูปการพาความร้อนนั้นมีส่วนที่จะบ่อนชั้นไอโอโนสเฟียร์บริเวณขั้วโลกด้วยพลาสมาจากบริเวณละติจูดกลางและการก่อตัวของแพทช์ขั้วโลก การเกิดขึ้นของโครงสร้างต่าง ๆ เหล่านี้เป็นต้นเหตุของความซับซ้อนทวีคูณของชั้นไอโอโนสเฟียร์และซินทิลเลชันที่บ่อกับสัญญาณ GNSS สืบเนื่องจากเหตุผลดังกล่าว การระบุพิกัดจึงต้องพิจารณาเสมือนเป็นกรณีที่เลวร้ายที่สุดและสถานการณ์ที่ท้าทายที่สุด ในทางกลับกัน ไม่มีข้อสงสัยที่ว่า การทดสอบอัลกอริทึมในสภาวะดังกล่าวควรจัดให้มีการประเมินที่เชื่อถือได้ของความมีประสิทธิภาพของพวกมันด้วย

เพื่อที่จะลดผลกระทบในเชิงลบของเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อการระบุพิกัดของ GNSS วิธีต่าง ๆ จำนวนมากยังคงได้ถูกพัฒนาตลอดหลายปีที่ผ่านมา กลุ่มแรกของอัลกอริทึมใช้แบบจำลองชั้นไอโอโนสเฟียร์เชิงการทดลอง เช่น IRI, Klobuchar, NeQuick และ Neustrelitz อย่างไรก็ตาม สืบเนื่องจากการทำให้อยู่ในรูปทั่วไปเชิงระยะทาง-เวลาระดับสูง พวกมันจึงยังไม่ตอบสนองความต้องการของการระบุพิกัดแม่นยำที่รวดเร็วแม้กระทั่งในสภาวะที่เสียบ อีกวิธีหนึ่งซึ่งถูกใช้งานเป็นหลักในการประมวลผลภายหลังนั้นใช้แผนที่ชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อาศัย GNSS อย่างไรก็ตาม แผนที่เหล่านี้บ่งบอกความละเอียดเชิงระยะทาง-เวลาที่ไม่มีเพียงพอที่จะตรวจจับสิ่งรบกวนชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรงได้ การวิเคราะห์ความเป็นไปได้อื่น ๆ มันควรที่จะบันทึกไว้ว่าประโยชน์จากการใช้วิธี ionosphere-free linear combination (IFLC) ไม่ได้ชัดเจนข้อบกพร่องของการจัดให้มีคำตอบแบบ float-only

ดังนั้น วิธีการแก้ปัญหาระบบ RTK ให้มีความแม่นยำมากที่สุด ก็คือจัดให้มีคำตอบที่เชื่อถือได้และแม่นยำ เป็นการระบุพิกัดสัมพัทธ์ที่ถูกช่วยเหลือด้วยค่าปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ได้จาก Multi-GNSSs แบบเรียลไทม์ โดย อัลกอริทึมนี้สามารถทำให้การระบุพิกัดแม่นยำระดับ cm ได้สำเร็จแม้กระทั่งเบสไลน์ระยะไกลก็ตาม แต่มันก็ยังคงเป็นงานที่ทำหายที่จะให้ค่าปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์ (หรือเรียกสั้น ๆ ว่า ค่าปรับแก้) ที่แม่นยำสำหรับการระบุพิกัด RTK ในระหว่างที่เกิดสิ่งรบกวนชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรง

(1) การระบุพิกัดแบบ RTK พื้นที่กว้างที่แม่นยำที่อาศัย multi-GNSSs ภายใต้สภาวะไอโอโนสเฟียร์ที่ถูกรบกวนอย่างรุนแรง [6]

วิธีการของการระบุพิกัด RTK ที่เสนอนี้ประกอบไปด้วยหลายขั้นตอนที่กระทำตามลำดับทั้งที่ด้านเครือข่าย (สถานี) อ้างอิงและผู้ใช้งาน (โรเวอร์) [6] มีดังนี้

1. การแก้ปัญหาค่าที่เครือข่ายอ้างอิง

- การแก้ปัญหาค่าที่เครือข่ายอ้างอิง-แบบจำลองที่อาศัยเรขาคณิตสัมพัทธ์ที่มีตำแหน่งตายตัว
- การสร้างค่าปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบเครือข่ายที่ใช้วิธี ionosphere-free linear combination (IFLC)

2. การแก้ปัญหาค่าผู้ใช้งาน

- การประมาณค่าปรับแก้ไปยังเครื่องรับผู้ใช้งาน
- ค่าปรับแก้ของค่าที่วัดได้ด้วยค่าปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบเครือข่ายที่ประมาณได้
- ค่าปรับแก้ของค่าที่วัดได้ด้วยค่า rate of TEC correction (RTC)
- การแก้ปัญหาค่าด้วยแบบจำลองหลายระบบ GNSSs หลายสถานีที่มีค่า AR แบบจำนวนเต็ม

ในขั้นตอนแรก เครือข่ายอ้างอิงจะประมวลผลในโหมดสัมพัทธ์จากการระบุพิกัดสถานีที่แน่นอน (ขั้นตอน 1.a) แล้วก็คำนวณหาค่าความกำกวมแบบ double differenced (DD) ที่หาค่าได้ (N) และค่าเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบ DD (DDID) ในแต่ละเส้นทางเบสไลน์ (ขั้นตอน 1.b) ด้วยวิธี geometry-free linear combination (IFLC) ของค่าที่วัดได้จากเฟสคลื่นพาห์ 2 ความถี่ โดยอาศัย (2.7)

$$I_{kl}^{mn} = \left(\lambda_{f_2} \varphi_{kl,f_2}^{mn} - \lambda_{f_1} \varphi_{kl,f_1}^{mn} + \lambda_{f_1} N_{kl,f_1}^{mn} - \lambda_{f_2} N_{kl,f_2}^{mn} \right) / \left(1 - f_1^2 / f_2^2 \right), \quad (2.7)$$

ค่า DDID ที่ได้รับจะถูกแยกพจน์ไปเป็นค่า undifferenced และถูกประมาณค่าโดยใช้วิธี ordinary kriging method เพื่อที่จะหาค่าตำแหน่งโดยประมาณของโรเวอร์ กระบวนการนี้ใช้จะอาศัยวิธีการประมาณค่ากำลังสองน้อยที่สุดด้วยพารามิเตอร์ที่ถูกจำกัดต่อการจัดการ rank deficiency ของแบบจำลองการแยกพจน์ ในที่สุด ค่าปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์สัมบูรณ์ได้ถูกแปลงไปสู่ค่า DD และถูกนำไปใช้เพื่อหาค่า DD ที่วัดได้จริงสำหรับผู้ใช้งาน

สืบเนื่องจากการปรากฏของความถี่สัญญาณที่ไม่ซ้ำกันใน GNSS หลายระบบที่ใช้กัน (GPS, Galileo, BDS) เราจึงใช้ข้อดีของแบบจำลองที่รวมกันอย่างหลวมสำหรับการรวมสัญญาณที่ได้รับจาก GNSS หลายระบบ ตามที่การศึกษาก่อนหน้านี้ได้แสดงไว้ ทั้งวิธีการรวมกันอย่างหลวมและแบบแน่นได้ถูกบ่งบอกคุณลักษณะในการแสดงสมรรถนะที่คล้ายกันในกรณีของความสามารถที่เห็นได้ที่ไม่ถูกบดบังของดาวเทียม เนื่องจากผลกระทบที่ประจักษ์ชัดของค่าเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ วิธีการที่นำเสนอจะสมมติไม่เพียงแต่สนับสนุนจากค่าปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบเครือข่ายเท่านั้น แต่ยังรวมถึงการหาค่าพารามิเตอร์ของค่าความผิดพลาดในชั้นไอโอโนสเฟียร์

ในแนวเฉียงคงเหลือ (residual slant ionospheric delays หรือ rSIDs) ด้วย ในเนื้อหานี้ แบบจำลองการสังเกตบ่อยครั้งจะถูกจัดอยู่ในรูปของค่าถ่วงน้ำหนักชั้นไอโอโนสเฟียร์ (iw) ดังนั้น ระบบของสมการการสังเกตด้วยค่าที่วัดได้ 2 ความถี่ที่ถูกหาผลต่างสองครั้ง จะอยู่ในรูปของ (2.8)

$$\begin{cases} \lambda_{f_1} \varphi_{kl,f_1}^{mn} - \rho_{kl}^{mn} - (\alpha_k^m T_k - \alpha_k^n T_k - \alpha_l^m T_l + \alpha_l^n T_l) + I_{kl}^{mn} - \lambda_{f_1} N_{kl,f_1}^{mn} = 0 \\ P_{kl,f_1}^{mn} - \rho_{kl}^{mn} - (\alpha_k^m T_k - \alpha_k^n T_k - \alpha_l^m T_l + \alpha_l^n T_l) - I_{kl}^{mn} = 0 \\ \lambda_{f_2} \varphi_{kl,f_2}^{mn} - \rho_{kl}^{mn} - (\alpha_k^m T_k - \alpha_k^n T_k - \alpha_l^m T_l + \alpha_l^n T_l) + \mu I_{kl}^{mn} - \lambda_{f_2} N_{kl,f_2}^{mn} = 0 \\ P_{kl,f_2}^{mn} - \rho_{kl}^{mn} - (\alpha_k^m T_k - \alpha_k^n T_k - \alpha_l^m T_l + \alpha_l^n T_l) - \mu I_{kl}^{mn} = 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

โดย T เป็นค่าเวลาประวิงชั้นโทรโปสเฟียร์ซินิก α เป็นค่าสัมประสิทธิ์การแมบปีงชั้นโทรโปสเฟียร์ และ P เป็นค่าระยะเทียมที่วัดได้ ส่วนระยะทางเชิงเรขาคณิตถูกแทนด้วย ρ และ μ เป็นสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ที่ถูกใช้สำหรับการแปลงเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ในรูปความถี่ที่ถูกใช้งานครั้งแรกไปสู่ค่าดังกล่าวในครั้งที่ 2 ดัง (2.9) หลังจากนั้น เวกเตอร์ของค่าที่ประมาณได้ที่เกี่ยวข้องจะหาค่าได้จาก (2.10)

$$\mu = f_1^2 / f_2^2 \quad (2.9)$$

$$x = [\delta X, \delta Y, \delta Z, \delta T, \delta I, N]^T, \quad (2.10)$$

ที่ซึ่งค่าปรับแก้เมื่อเทียบกับตำแหน่งที่รู้ค่าถ่วงหน้า (piori) ถูกแทนด้วย $\{\delta X, \delta Y, \delta Z\}$, ค่าประมาณค่าเวลาประวิงชั้นโทรโปสเฟียร์ซินิกและค่าเวลาประวิงแบบ DD ในแต่ละครั้งของการวัดชุดหนึ่งถูกแทนด้วย δT และ δI ตามลำดับ N แทนค่า phase ambiguities ชุดหนึ่ง

แบบจำลองค่าถ่วงน้ำหนักชั้นไอโอโนสเฟียร์ (iw) ใช้ข้อดีของการจำกัดค่า DD-SID ไปยังตำแหน่งที่รู้ค่าถ่วงหน้า ซึ่งถูกหาค่าได้ในที่นี้โดยการแนะนำการวัดค่ารหัสเทียมด้วยค่าคงที่ความแปรปรวนที่กำหนด วิธีที่คล้ายกันก็ถูกใช้งานด้วยสำหรับเวลาประวิงชั้นโทรโปสเฟียร์ซินิกและตำแหน่งสถานี ดังนั้นเวกเตอร์ผลรวมของการวัดค่ารหัสเทียมที่รวมกันไว้ทางด้านซ้ายมือของพารามิเตอร์ที่ประมาณค่าได้และตำแหน่งที่รู้ค่าถ่วงหน้าของพารามิเตอร์ที่ถูกจำกัดไว้ทางด้านขวามือ ดังแสดงในสมการที่ (2.11)

$$\begin{bmatrix} \delta X_k = \delta X'_k \\ \delta Y_k = \delta Y'_k \\ \delta Z_k = \delta Z'_k \\ I_{kl}^{mn} = I_{kl}^{mn'} \\ T_k = T'_k \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

แบบจำลองการวัดที่รู้จักกันเป็นอย่างดีนั้นถูกป้อนด้วยค่าปรับแก้ที่ถูกจำกัดเทอมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ หลังจากนั้น เราจะใช้นิยามของ ROT ที่หาค่าได้จากผลต่างทางเวลาของเทอม IFLC (L_d) ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา (epoch) i กับ j ดังแสดงใน (2.12) ในที่นี้ เทอม IFLC ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา i ที่เลือกไว้จะหาค่าได้จากค่าข้อมูลเฟสคลื่นพาห์ 2 ความถี่ตาม (2.13) และเทอม IFLC ที่ช่วงเวลา j ก็หาค่าได้จาก (2.13)

เช่นกัน ดังนั้น ผลต่างของค่าคอมบินชัน L_4 ที่ช่วงเวลา t_{ij} จะหาค่าได้จาก (2.14) ในที่นี้ สมมติว่า ไม่มีไซเคิลสลิปเกิดขึ้นระหว่างช่วงเวลา i กับ j ความกำกวมทางเฟสจะคงที่ ดังนั้น ค่าอนุพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงทางเวลาของเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์จะหาค่าได้จาก (2.15) การเพิ่มขึ้นที่หาค่าได้ของเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์จะสอดคล้องกับ GFLC แต่มันจะถูกแปลงไปสู่ความถี่ของสัญญาณที่ง่ายขึ้นและถูกใช้เป็นค่าปรับแก้ให้กับค่าที่วัดได้ ดังนั้นค่าที่วัดได้ในตอนนี้จะอิสระจากการเปลี่ยนแปลงทางเวลาของเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์เนื่องจากค่าที่วัดได้ที่ถูกปรับแก้ที่ช่วงเวลา t_j นั้นจะสอดคล้องกับค่าเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ช่วงเวลา t_i ดังที่แสดงไว้ใน (2.16)

$$\widetilde{ROT}_{k,t_{ij}}^m = \Delta I_{k,4,t_{ij}}^m = L_{k,4,t_j}^m - L_{k,4,t_i}^m, \quad (2.12)$$

$$L_{k,4,t_i}^m = \lambda_{f_1} \varphi_{k,f_1,t_i}^m - \lambda_{f_2} \varphi_{k,f_2,t_i}^m = I_{k,4,t_i}^m + \lambda_{f_1} N_{k,f_1}^m - \lambda_{f_2} N_{k,f_2}^m. \quad (2.13)$$

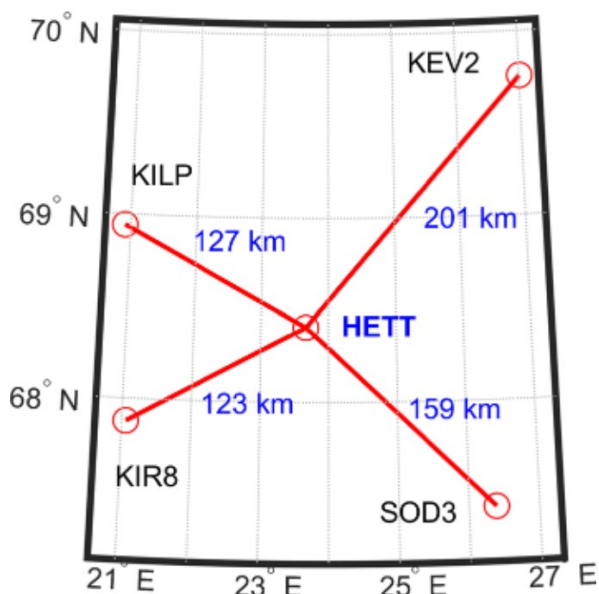
$$\begin{aligned} I_{k,4,t_j}^m - I_{k,4,t_i}^m + \lambda_{f_1} N_{k,f_1}^m - \lambda_{f_2} N_{k,f_2}^m - (\lambda_{f_1} N_{k,f_1}^m - \lambda_{f_2} N_{k,f_2}^m) \\ = \lambda_{f_1} \varphi_{k,f_1,t_j}^m - \lambda_{f_2} \varphi_{k,f_2,t_j}^m - (\lambda_{f_1} \varphi_{k,f_1,t_i}^m - \lambda_{f_2} \varphi_{k,f_2,t_i}^m). \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \Delta I_{(k,4,t_{ij})}^m = & \lambda_{(f_1)} \varphi_{(k,f_1,t_j)}^m - \lambda_{(f_2)} \varphi_{(k,f_2,t_j)}^m - (\lambda_{(f_1)} \varphi_{(k,f_1,t_i)}^m \\ & - \lambda_{(f_2)} \varphi_{(k,f_2,t_i)}^m). \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\Delta I_{k,f_1,t_{ij}}^m = \Delta I_{k,4,t_{ij}}^m \frac{f_2^2}{(f_2^2 - f_1^2)} \quad (2.16)$$

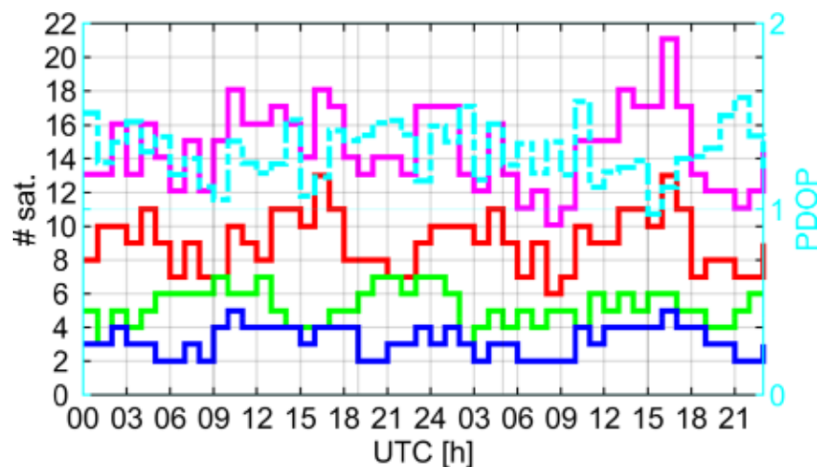
การยืนยันความถูกต้องและสมรรถนะการทำงานที่ดีในการปรับแก้ค่าเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ของวิธีที่นำเสนอจะถูกทดสอบโดยใช้ค่าข้อมูล GNSS ในวันที่ 25-26 สิงหาคม 2561 เนื่องจากมีพายุแม่เหล็กโลกระดับ G3 ที่รุนแรงที่สุดในรอบหลายปีที่ผ่านมา (ช่วงสุริยະที่ต่ำสุดของวัฏจักรสุริยະที่ 24) โดยเชื่อกันว่า มันมีจุดกำเนิดมาจาก coronal mass ejection (CME) ที่ระเบิดจากดวงอาทิตย์ในวันที่ 20 สิงหาคม 2561 การมาถึงของ CME ที่เคลื่อนตัวเข้าในวันที่ 25 สิงหาคม 2561 นี้ทำให้เกิดการวางตัวไปทางทิศใต้ของ interplanetary magnetic field (IMF) ซึ่งส่งผลให้เกิดพายุแม่เหล็กโลกระดับ G1 ในวันดังกล่าว ความต่อเนื่องของค่า IMF-Bz ที่เป็นลบในวันที่ 26 สิงหาคม 2561 จนมีค่าที่น้อยกว่า -10 nT และนำไปสู่ความรุนแรงที่มากขึ้นจนก่อตัวกลายเป็นของพายุระดับ G3 โดยรูปที่ 2.33 แสดงเครือข่ายที่ใช้ในการทดลองสมรรถนะการระบุพิกัด RTK ที่อาศัยเครือข่าย GNSSs ของวิธีที่นำเสนอ ในที่นี้ สถานี HETT จะถูกจำลองเป็นเครื่องรับโรเวอร์และสถานีข้างเคียงจำนวน 4 สถานี (ได้แก่ KILP, KEV2, SOD3, KIR8) ถูกใช้งานเป็นเครือข่าย (สถานี) อ้างอิง ดังนั้นระยะทางของเบสไลน์ในการแก้ปัญหาการระบุพิกัด RTK ให้กับโรเวอร์มีค่าระหว่าง 123-201 km (พื้นที่กว้าง) นอกจากนี้ สถานีต่าง ๆ สามารถที่จะรับสัญญาณได้จากหลายระบบ GNSS อาทิ GPS, Galileo และ BDS นอกจากนี้ รูปที่ 2.34 แสดงให้เห็นถึงจำนวนของดาวเทียมที่สามารถรับสัญญาณและค่า PDOP ที่ได้รับจากวิธีที่นำเสนอ ในที่นี้ เส้นสีแดง, สีเขียว และสีน้ำเงิน แทนจำนวนดาวเทียมที่รับได้ของระบบดาวเทียม GPS, Galileo และ BDS ตามลำดับ เส้นสีม่วงแทนผลรวมของดาวเทียมของระบบทั้งหมด ส่วนเส้นสีฟ้าแทนค่า PDOP ของ Multi-GNSSs พบว่า จำนวนของดาวเทียมทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่าง 11-21 ดวง ด้วยค่า PDOP ที่มีค่าน้อยกว่า 1.5 เสมอ

วิธีการของการระบุพิกัด RTK พื้นที่กว้างที่นำเสนอจะอาศัยค่าปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์เครือข่าย ซึ่งประมาณค่าตามระยะทางไปยังตำแหน่งเครื่องรับโรเวอร์ ดังนั้น ในกรณีนี้จึงไม่จำเป็นสำหรับการประมาณค่าตามเวลาของค่าปรับแก้เนื่องจากช่วงเวลาในการแซมปลิง (การวัดค่า) มีค่าเท่ากับช่วงเวลาในการแซมปลิงของการหาคำตอบ (พิกัด) ให้กับโรเวอร์



รูปที่ 2.33 เครือข่ายที่ใช้ในการทดลองสมรรถนะการระบุพิกัด RTK โดยอาศัย Multi-GNSSs ของวิธีที่เสนอ [6]

วิธีการระบุพิกัด RTK ที่อาศัย Multi-GNSSs พื้นที่กว้างที่ทำงานได้ดีในสภาวะที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงชั้นไอโอโนสเฟียร์อย่างรุนแรงนี้เป็นวิธีการที่ปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยอาศัยค่าปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ได้จาก Multi-GNSSs และอัลกอริทึม RTC ซึ่งจะกำจัด (ไม่ต้องพิจารณา) การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ ดังนั้นค่าผลต่าง DDID จะถูกลดรูป (ความซับซ้อน) ลงไปได้และอาจจะถูกประมาณว่าเป็นพารามิเตอร์ที่คงที่ได้สำหรับค่า DDID ที่วัดได้ วิธีที่นำเสนอนี้ได้ถูกทดสอบด้วยการระบุพิกัดแบบ RTK และแบบหยุดอย่างรวดเร็วกับระบบ GPS, BDS และ Galileo ในช่วงที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกระดับ G3 สมรรถนะของแบบจำลองที่ปรับปรุงขึ้นนี้จะถูกเปรียบเทียบกับสมรรถนะการทำงานกับคำตอบที่ได้จากวิธีมาตรฐาน (วิธี IF และวิธี IW) ผลจากทดสอบ พบว่า เมื่อเกิดพายุแม่เหล็กโลก ความแม่นยำของค่าปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบเครือข่าย (วิธี IF) จะลดลงและส่งผลให้การระบุพิกัดนั้นผิดพลาดด้วยแบบจำลองที่ชั้นไอโอโนสเฟียร์ถูกล่วงนำหน้า (IW) เช่นกันเนื่องจากคุณภาพที่แย่งของค่าปรับแก้ที่คำนวณได้ในทางตรงข้าม ผลที่ได้รับจากวิธีที่นำเสนอ [6] ได้แสดงถึงสมรรถนะการทำงานที่ดีขึ้นอย่างชัดเจนในเทอมของค่า AR และค่า ASR โดยค่า IW-RTC-ASR มีค่าที่สูงกว่าประมาณ 20% เมื่อเทียบกับแบบจำลองมาตรฐาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการทำงานที่เหนือกว่าวิธี IF และวิธี IW อย่างชัดเจน เนื่องจากหลังจาก 30 epochs แล้ว ค่า ASR จะมีค่าเข้าใกล้ระดับ 74.4% สำหรับวิธี IF และวิธี IW และประมาณ 94% สำหรับวิธี IW-RTC ที่นำเสนอ นอกจากนี้ วิธี IW-RTC ก็ยังแสดงสมรรถนะการทำงานที่ดีกว่าวิธี IF และวิธี IW ในเทอมของค่าพิกัดที่คำนวณได้ โดยการปรับปรุงที่เด่นที่สุดคือความแม่นยำขององค์ประกอบด้านแนวตั้ง (ความสูง) อาทิ ในโหมด RTK ค่าสถิติของความสูงในแนวตั้งมีค่าลดลงจาก 92 mm สำหรับวิธี IF ไปสู่ 54 mm สำหรับวิธี IW-RTC ในระหว่างที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกหรือการเปลี่ยนแปลงชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรง



รูปที่ 2.34 จำนวนของดาวเทียมที่สามารถรับสัญญาณและค่า PDOP ที่ได้รับจากวิธีที่เสนอ [6]

2.6 เอกสารอ้างอิงบทที่ 2

- [1] C. Nayak, L. Tsai, S. Su, I. Galkin, A. T. K. Tan, E. Nofri, P. Jamjareegulgarn, “Peculiar features of the low-latitude and midlatitude ionospheric response to the St. Patrick’s Day geomagnetic storm of 17 March 2558,” *J. Geophys. Res. Space Phys.*, vol. 121, no. 8, pp. 7941–7960, 2016.
- [2] M. Takashi, M. Guanyi, N. Maho, “Ionospheric Storm and Variation of Total Electron Content,” *Journal of the NICT*, vol. 56, nos.1-4, 2009.
- [3] S. K. Sharma, A. K. Singh, S. K. Panda, S. S. Ahmed, “The effect of geomagnetic storms on the total electron content over the low latitude Saudi Arab region: a focus on St. Patrick’s Day,” *Astrophys. Space Sci.*, vol. 365, no. 35, 2020, doi: 10.1007/s10509-020-3747-1.
- [4] G. Li, et al., “Challenges to Equatorial Plasma Bubble and Ionospheric Scintillation Short-Term Forecasting and Future Aspects in East and Southeast Asia,” *Surveys in Geophysics*, vol. 42, pp. 201–238, 2021, doi: 10.1007/s10712-020-09613-5.
- [5] T. Maruyama, M. Kawamura, S. Saito, “Low latitude ionosphere-thermosphere dynamics studies with ionosonde chain in Southeast Asia,” *Ann Geophys*, vol. 25, pp. 1569–1577, 2007, doi: 10.5194/angeo-25-1569-2007.
- [6] J. Paziewski, R. Sieradzki, “Enhanced wide-area multi-GNSS RTK and rapid static positioning in the presence of ionospheric disturbances,” *Earth Planets Space*, vol. 72, no. 110, 2020.

บทที่ 3 พลาสมาบับเบิลที่มีต่อ RTK ของเครื่องรับ GNSS

พลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตร (Equatorial plasma bubble หรือ EPB) เป็นโครงสร้างที่วางตัวขนานอยู่ในแนวของสนามแม่เหล็กโลกที่มีขนาดใหญ่ประเภทหนึ่ง ที่ถูกแสดงให้เห็นจากการหายไปของความหนาแน่นพลาสมาเมื่อเทียบกับปริมาณพลาสมาปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ (background ionosphere) ซึ่งจะถูกล้อมตัวเริ่มต้นที่ด้านล่างของบริเวณ F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์เหนือเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก การเติบโตของมันนำไปสู่การก่อตัวของความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งขนาดสเกล (scale) โดยทั่วไปของมันมีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของสัญญาณวิทยุและก่อให้เกิดความแปรปรวนที่รวดเร็วในแอมพลิจูดเฟส การแพร่กระจายคลื่นและการโพลาไรซ์ของสัญญาณดาวเทียม อาทิเช่น ซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ ส่วนประกอบของ EPB และความผิดปกติระดับเล็กที่เกี่ยวข้องได้ถูกเรียกกันโดยทั่วไปว่า เอกวอทอเรียล สเปรด เอฟบริเวณเส้นศูนย์สูตร (equatorial spread-F หรือ ESF) หรือพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีการนำพา ตั้งแต่การศึกษาในช่วงแรกที่เกี่ยวข้องกับซินทิลเลชันคลื่นวิทยุในย่านความถี่สูงมากไปจนถึงระดับความถี่สูงยิ่งยวด เป็นต้นมา ความสัมพันธ์ที่ใกล้ชิดระหว่างการเกิดขึ้นของ EPB กับซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรงที่ย่านคลื่นวิทยุค่าต่าง ๆ ยังคงที่จะถูกพบได้ที่บริเวณละติจูดต่ำ

EPBs เป็นภัยคุกคามที่ร้ายแรงต่อสัญญาณวิทยุข้ามชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งมีผลกระทบหลายอย่างในด้านการสื่อสารและการนำทาง อาทิ 1) การขาดการติดต่อย่านความถี่ UHF ระหว่างดาวเทียมกับเฮลิคอปเตอร์ที่อัฟกานิสถาน ในวันที่ 4 มีนาคม 2002 อาจเกี่ยวข้องกับเหตุการณ์ EPBs, 2) การนำทางและความน่าเชื่อถือของการให้บริการระบบดาวเทียมนำทางสากล (Global Navigation Satellite System หรือ GNSS) ถูกท้าทายอย่างหนักเมื่อเกิด EPBs ซึ่งทำให้มีความผิดพลาดจากตำแหน่งที่ถูกต้องหลายสิบลเมตรหรือมากกว่า, 3) การเกิดซินทิลเลชันที่รุนแรงที่เกิดขึ้นจาก EPBs แอมพลิจูดของสัญญาณ GNSS อาจจะลดลง (จางหาย) ได้มากกว่า 25 dB ซึ่งสามารถก่อกวนวงจรติดตามคลื่นพาห์ของเครื่องรับ GNSS (ทำให้เกิดการ loss-of-lock ของสัญญาณ GNSS), ลดจำนวนของดาวเทียม GNSS ที่มีอยู่สำหรับการระบุพิกัด และนำไปสู่ความล้มเหลวในการสื่อสาร/การนำทาง เนื่องจากสัญญาณ GNSS ได้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในงานหลายด้านของสังคมไฮเทคโนโลยีสมัยใหม่ ความจำเป็นในการคาดการณ์ (forecasting) การเกิดของ EPB และซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ และการลดผลกระทบของพวกมันได้กลายมาเป็นประเด็นที่สำคัญกว่าที่เคยทำกัน แม้ว่าจะมีการพยายามทำนายซินทิลเลชันสัญญาณ GNSS ที่ละติจูดต่ำ แต่ก็ยังไม่ได้ข้อสรุปที่ชัดเจน

การใช้เทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเกต ยกตัวอย่างเช่น การวัดค่า Total Electron Content (TEC) และดัชนีซินทิลเลชันจากเครื่องรับ GNSS สัญญาณสะท้อนกลับจากเครื่องไอโอโนซอนด์ และเรดาร์วัดการเจิงคลื่นแบบโคฮีเร้นท์กับแบบนอนโคฮีเร้นท์ การถ่ายภาพอวกาศแอร์โกลว์ (airglow) และการวัดค่าแบบอินซิตู (in situ) จากดาวเทียมวงโคจรต่ำ EPB และความผิดปกติที่เกี่ยวข้องก็ยังคงที่จะถูกวิเคราะห์กันอย่างแพร่หลาย สิ่งหนึ่งที่เด่นชัดของโครงสร้าง EPB ที่ได้ถูกเผยแพร่จากการศึกษาก่อนหน้านี้ก็คือ EPB สามารถเจาะเลยค่าความสูงของชั้น F เข้าสู่ชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านบนได้ รวมทั้งขยายไปตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกไปยังละติจูดต่ำ และแม้กระทั่งละติจูดกลางได้ด้วย โดยการใช้เรดาร์สังเกตการณ์ที่ไจกามาร์ก้า โครงสร้างแบบ backscatter plume ที่เริ่มที่ด้านล่างของชั้น F และยืดออกไปที่ความสูง 600 km

จากการสังเกตแผนภาพสองมิติของคลื่นสะท้อนที่กระเจิงกลับของเรดาร์ ALTAIR ร่วมกับดาวเทียมอินซิติวูที่วัดค่าความหนาแน่นพลาสมา พบว่า คลื่นยักษ์ (plumes) ที่กระเจิงกลับที่สังเกตได้นั้นเกี่ยวข้องกับ EPBs ที่มีการ bite-outs ของความหนาแน่นพลาสมาที่ลึกและมีขอบที่ชันมาก นอกจากนี้ จากการใช้เครื่อง all-sky airglow imager ที่เมือง Sata (31,0°N, 130,7°E) และที่สถานีคอนจุกเกตใกล้เคียง Darwin (12.4°S, 131.0°E) นอกจากนี้ โครงสร้างของ EPBs ที่คล้ายกันที่ถูกรวบรวมได้พร้อมกันจากกล้อง ASI จำนวน 2 ตัว และพบว่า EPBs ได้ถูกทำให้หายไปจากโครงสร้างความหนาแน่นพลาสมาที่ถูกยึดไปตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกไปยังละติจูดต่ำเหนือทั้งสองซีกโลก ในขณะที่ EPBs ส่วนใหญ่ได้ถูกจำกัดในพื้นที่แถบเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำ แต่เราก็กังพบว่า “มีบางกรณีของพลาสมาบับเบิลซูปเปอร์และเหตุการณ์ซินทิลเลชันที่รุนแรงก็เกิดขึ้นที่ละติจูดกลาง 40°N หรือสูงกว่า ในเซกเตอร์ลองติจูดบางแห่งในระหว่างที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกได้ด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่หายไปบริเวณ EPB นั้นสามารถขยายไปถึงระดับความสูงที่สูงถึง 3,400 km หรือสูงกว่า เหนือเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก ในทิศทางโซนัล (ตะวันออก-ตะวันตก) ความกว้างของการหายไปบริเวณ EPB อาจจะได้พบได้หลายสเกลตั้งแต่หลายสิบกิโลเมตรไปจนถึงหลายร้อย km ได้ ผลการศึกษาทางสถิติจากการวัดด้วยเครื่อง Ion Velocity Meter (IVM) ที่อยู่บนดาวเทียม Communications/Navigation Outage Forecasting System (C/NOFS) พบว่า ความกว้างของ EPBs อาจจะมีค่าได้ตั้งแต่ 110 ไปจนถึง 460 km ด้วยค่าพีคที่โดดเด่นเกิดขึ้นประมาณ 200 km การไม่ปรากฏของโครงสร้าง EPB ที่มีสเกลเล็กสามารถที่จะเกิดขึ้นได้โดย median filter ที่ถูกใช้ในกระบวนการของข้อมูลความหนาแน่นพลาสมาจากเครื่องวัด IVM

การสังเกตจาก ground-based airglow imagers ก็ได้แสดงให้เห็นว่า ความกว้างของ EPB ที่เกิดจากการก่อตัว (seeding) ของโครงสร้างคลื่นสเกลเล็กและของ bifurcated EPBs สามารถที่จะมีค่าลดลงได้ไปถึงระดับหลายสิบกิโลเมตร, ประมาณ 70 km และ 50 km ตามลำดับ ในขณะที่ ความกว้างของ EPBs โดยทั่วไปมีค่าอยู่ที่หลายร้อย km พวกมันอาจจะมีผลกระทบต่อเซกเตอร์ลองติจูดที่มากหลายพัน km อันเนื่องมาจาก zonal drifts ของพวกมันก็เป็นได้ ซึ่งจะถูกลักอย่างแรงโดยลมโซนัลชั้นเทอร์โมสเฟียร์ที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันออกภายใต้สภาวะที่เจียบทางแม่เหล็กโลกก็ได้ สำหรับสถานีเรดาร์ที่เมือง Kototabang (0.2°S, 100.3°E) และ Sanya (18.3°N, 109.6°E) ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และเอเชียตะวันออกได้แสดงให้เห็นว่า EPBs สามารถลอยเลื่อนอย่างโซนัลออกไปได้ไกลเกินกว่า 2,000 km จากตำแหน่งลองติจูดที่เกิดขึ้นของพวกมันได้ ในขณะที่ คุณลักษณะทั่วไปของ EPBs และการเปลี่ยนแปลงในระยะกลางของ EPBs สามารถที่จะเข้าใจได้เป็นอย่างดี แต่ปัจจัยต่าง ๆ ที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวัน (day-to-day) และในระยะสั้นของ EPB และการเกิดขึ้นซินทิลเลชันยังคงไม่ชัดเจนในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และตะวันออกเฉียงใต้ ฤดูกาลที่มีโอกาสสูงและต่ำของการเกิดขึ้นของ EPB เป็นเดือนอิกวีนอกซ์และเดือนโซติสซ์ ตามลำดับ แต่การสังเกตเหล่านั้นยังแสดงให้เห็นว่า EPBs อาจจะไม่ปรากฏ (ปรากฏ) ในบางคืนของเดือนอิกวีนอกซ์ (เดือนโซติสซ์) ก็ได้ ยกตัวอย่างเช่น ภายใต้สภาวะแบบคราวตในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่คล้ายกันและภายใต้การลอยเลื่อนของพลาสมาในแนวตั้งที่พุ่งขึ้นของชั้น F นั้น EPBs อาจจะไม่เกิดขึ้นเสมอไปในช่วงหลายวันที่ต่อกันของเดือนอิกวีนอกซ์ ในทางตรงข้าม ในช่วงเดือน June Solstice ตัว EPS จะยังคงสังเกตเห็นได้ในบางครั้ง ความยากหลักสำหรับการทำนาย EPBs และซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์จะเกี่ยวข้องกับคำถามต่อไปนี้

(1) ปัจจัยใดที่ควบคุมการก่อตัวของ EPB และปัจจัยที่ควบคุมดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันอย่างไร?

(2) ปัจจัยใดที่ควบคุมการพัฒนาและช่วงเวลาการเกิด (lifetime) ของ EPBs? เนื่องจาก EPBs ที่ลอยเลื่อนอย่างไชนอลาจจะมีส่วนเกี่ยวข้องต่อการเปลี่ยนแปลงของ EPBs รายชั่วโมงเหนือสองจุดที่กำหนด

(3) เราสามารถหาค่าซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์อย่างแม่นยำได้อย่างไรจากการวัด EPB?

ในงานวิจัยของ Li และคณะ [4] ได้นำเสนอองค์ความรู้ปัจจุบันเกี่ยวกับการเกิด EPB และซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์เหนือบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และได้วิพากษ์ปัญหาที่ยังแก้ไขไม่ได้บางประการที่เกี่ยวกับการคาดการณ์เหตุการณ์เหล่านี้ด้วยการเน้นเป็นพิเศษเกี่ยวกับการสังเกต EPB ตั้งแต่การก่อตัวของพวกมันไปจนถึงการไม่พบเห็นแล้ว ในการติดตามกระบวนการทั้งหมดของ EPBs การเฝ้าสังเกตการณ์ด้วยเครือข่ายสถานีตรวจวัดชั้นไอโอโนสเฟียร์หลายแห่งในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้ถูกนำเสนอ มุมมองต่าง ๆ ในอนาคตเกี่ยวกับอุปกรณ์ตรวจวัดชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่กำลังจะถูกวางแผนหรือติดตั้งเพิ่มเติมเพื่อที่จะทำให้เข้าใจการเปลี่ยนแปลงระยะสั้นของ EPB และซินทิลเลชันมากยิ่งขึ้นก็ได้ถูกนำเสนอด้วยเช่นกัน

3.1 คุณลักษณะพื้นฐานของ EPB และซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์

การก่อตัวของ EPBs ได้ถูกยอมรับเป็นอย่างดีว่าเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจากความไม่เสถียรภาพแบบเรย์ลีเทย์เลอร์ (generalized Rayleigh–Taylor instability หรือ RTI) ที่ค้นพบโดย Kelley (2009) อัตราการเติบโตเชิงเส้นของของ RTI (γ) ขึ้นอยู่กับความเร็วลอยเลื่อนพลาสมาแนวตั้งที่พุ่งขึ้นในชั้น F (V) ด้วยค่า $E \times B/B^2$ เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่พุ่งไปทางทิศตะวันออก (E), ลมนิวทรัลที่พุ่งขึ้นตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก (U), ความถี่การชนกันของอิออนและนิวทรัล (ν_{in}), ความยาวสเกลของความไม่เท่ากันของความหนาแน่นพลาสมา (L), อัตราการรวมตัวกันใหม่ (β), ค่าความนำตามเส้นสนามแม่เหล็กรวมในชั้น E กับ F ($\Sigma E_p, \Sigma F_p$) ซึ่งอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$\gamma = (1/L) \frac{\Sigma_p^F}{\Sigma_p^E + \Sigma_p^F} (V - U + g/\nu_{in}) - \beta, \quad (3.1)$$

โดยทั่วไป ความไม่เท่ากันของความหนาแน่นพลาสมาที่พุ่งขึ้นอย่างมาก (อยู่ในทิศทางขนานแต่ตรงข้ามกับทิศทางแรงโน้มถ่วงของโลก g) จะปรากฏตัวที่มีด้านล่างของชั้น F เหนือเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก ในตอนกลางวัน ค่าความนำในชั้น E ที่ละติจูดต่ำ (ΣE_p) จะมีค่าที่สูงมาก (เนื่องจากการแผ่รังสีสุริยะ) และสามารถตัด (short) สนามไฟฟ้าที่โพลาร์ไรซ์กับชั้น F แล้วนำไปสู่การปิดกั้นการก่อตัวของปรากฏการณ์ RTI ได้ EPBs จึงเป็นการยากที่จะถูกสร้างขึ้นในตอนกลางวันยกเว้นเหตุการณ์ผิดปกติในบางครั้ง ยกตัวอย่างเช่น เมื่อโครงสร้างการก่อกวนความหนาแน่นพลาสมาในลักษณะที่เกิดความไม่เท่ากันของความหนาแน่นพลาสมาขนาดใหญ่ที่รุนแรงที่สุดได้ถูกสร้างขึ้นโดยแหล่งกำเนิดเทียม การเฝ้าสังเกตการณ์ที่มีการหมุนลำบีมเรดาร์ได้ที่เมืองโกโตตะบงยังยังคงแสดงให้เห็นว่าเกือบจะทั้งหมดของ EPB plumes ได้ถูกสร้างขึ้นหลังจากที่พระอาทิตย์ตกไปแล้วเหนือบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก หลังจากพระอาทิตย์ตก ไม่มี photoionization ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ อนุภาคที่มีประจุที่ระดับความสูงที่ต่ำกว่าจะรวมตัวกันอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ความสูงของชั้น F สูงขึ้นและทำให้เกิดความยาวสเกลที่สั้นลงของความไม่เท่ากันพลาสมา (L) ค่าความนำของชั้น E ได้ลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากพระอาทิตย์ตก ซึ่งทำให้เกิดการไม่เท่ากันของค่าความนำที่มากในทิศทางโชนัลใกล้กับ sunset terminator ในการรักษาไว้ซึ่งสถานะ divergence-free ของกระแสไฟฟ้า องค์ประกอบโชนัลของสนามไฟฟ้าชั้น F จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นหลายครั้งไปสู่ค่าสนามไฟฟ้าที่มุ่ง

หน้าไปทางทิศตะวันออกที่มาก ซึ่งจะถูกรเรียกว่า pre-reversal enhancement (PRE) ของสนามไฟฟ้าที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันออก โดย PRE นี้สามารถที่จะผลักดันให้การลอยเลื่อนพลาสมาแนวตั้งที่พุ่งขึ้นมีค่าสูงขึ้นได้ ซึ่งสามารถที่จะยกชั้น F ให้สูงขึ้นได้ด้วยค่า v_{in} และ β ที่ลดลง และนำไปสู่อัตราการก่อตัวของ RTI ที่สูงขึ้นได้

อัตราการก่อตัวเชิงเส้นของ RTI ในเวลากลางคืน ซึ่งถูกควบคุมหลักด้วยความสูงของชั้น F และค่าความนำรวมตามแนวเส้นสนามแม่เหล็กโลกที่โดยทั่วไปจะมีค่าที่ต่ำกว่า 2 e-folds ต่อชั่วโมง อัตราการก่อตัวจะมีค่าน้อยมากจนกระทั่งสามารถที่จะบรรยายการก่อตัวอย่างรวดเร็วของ EPBs หลังจากพระอาทิตย์ตก ในทางกลับกัน เราก็พบความผิดปกติเหนือประเทศบราซิลด้วย กล่าวคือ “การลอยเลื่อนพลาสมาที่พุ่งขึ้นปริมาณที่สูงมากจนถึง ~1000 m/s ได้สังเกตเห็น แต่ไม่มี EPBs ในช่วงพายุแม่เหล็กโลกในเดือนตุลาคม 2003 ปัจจัยอื่น ๆ บางประเด็นก็แสดงบทบาทที่สำคัญต่อการก่อตัวของ EPBs ด้วย ในการจำลองเชิงตัวเลขของ EPBs ก่อนหน้านี้ การก่อตัว (seeding) ในช่วงเริ่มต้นด้วยการก่อความหนาแน่นของพลาสมาที่ด้านล่างของชั้น F ได้ถูกศึกษาด้วย ในขณะที่การก่อตัวการก่อตัวไม่ได้เปลี่ยนแปลงอัตราการก่อตัวของ RTI ด้วยตัวของมัน ผลการจำลองระบบพบว่า การก่อตัวในช่วงเริ่มต้น ~5% ขึ้นไปสามารถที่จะลดเวลาที่ต้องการสำหรับ RTI ในการก่อตัวไปสู่ EPBs ได้ คลื่นแรงโน้มถ่วงโลกที่ถูกสร้างขึ้นจากกิจกรรมการนำพาในชั้นบรรยากาศในชั้นบรรยากาศด้านล่าง ยกตัวอย่างเช่นในบริเวณ intertropical convergence zone (ITCZ) ก็เป็นอีกแหล่งกำเนิดหนึ่งที่เป็นไปได้ต่อการสร้างการก่อความหนาแน่นพลาสมา บางกรณีศึกษาได้แนะนำการเชื่อมต่อที่เป็นไปได้ระหว่างการเกิดขึ้นของพายุไซโคลนในบริเวณ tropical กับ EPB แหล่งกำเนิดที่เป็นไปได้อีกหนึ่งแหล่งหนึ่งก็คือ ปรากฏการณ์ collisional shear flow ที่เกิดขึ้นด้านล่างของชั้น F ซึ่งเป็นลักษณะที่พลาสมาลอยเลื่อนมุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตก แต่ลมนิวัตรกลับเคลื่อนตัวไปทางทิศตะวันออกในตอนช่วงใกล้เวลาที่พระอาทิตย์ตก

โดยปกติ ขนาดสเกลของโครงสร้าง EPB มีค่าหลายพัน km ตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกและมีค่าหลายสิบล้านถึงหลายร้อย km ในทิศทางที่ตั้งฉากกับเส้นสนามแม่เหล็กโลก โครงสร้างสเกลใหญ่เช่นนี้ไม่สามารถที่จะอธิบายได้ด้วยซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์และ backscatter plume echoes จากเรดาร์ได้ ค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชัน (หรือ S_4 index) ซึ่งยังคงถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในการศึกษาซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์และได้ถูกกำหนดให้เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของสัญญาณที่ถูกรบกวนมัลลิสซ์

$$S_4 = \sqrt{(\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2) / \langle I \rangle^2}, \quad (3.2)$$

ในที่นี้ I เป็นค่าความเข้มของสัญญาณ และ $\langle \rangle$ หมายถึงค่า ensemble average โดยความรุนแรงของซินทิลเลชันขึ้นอยู่กับความถี่คลื่นวิทยุ ซินทิลเลชันเกิดขึ้นโดยมีสาเหตุหลักมาจากความผิดปกติของความหนาแน่นพลาสมาที่มีขนาดสเกลต่ำกว่าสเกลเฟรสนเอลลำดับที่ 1 และหาค่าได้จากสมการที่ (3.3)

$$d_F = \sqrt{2\lambda z}, \quad (3.3)$$

ในที่นี้ z คือความสูงของบริเวณที่เกิดความผิดปกติและ λ คือความยาวคลื่นวิทยุ สำหรับความถี่ GPS L1 (1,575.42 MHz) สเกลเฟรสนเอลลำดับที่ 1 มีค่าประมาณ 390 เมตร (โดยสมมติว่า z เท่ากับ 400 km) ซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้ถูกบันทึกไว้โดยการใช้อุปกรณ์จากสัญญาณ beacon จากดาวเทียมในช่วงย่านความถี่

VHF/UHF ไปจนถึงย่านความถี่ L ซึ่งบ่งชี้ว่าสัญญาณที่เดินทางผ่านความผิดปกติที่มีขนาดหลายร้อยเมตร ตัว radar backscatter plumes จะถูกสร้างขึ้นจากคลื่นสะท้อนอันเนื่องมาจาก Bragg scattering จากความผิดปกติที่มีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเรดาร์ ส่วนใหญ่ของเรดาร์ชั้นไอโอโนสเฟียร์จะถูกใช้งานได้ที่ความถี่ประมาณ 30-50 เมตร เพื่อตรวจจับความผิดปกติด้วยขนาดสเกลเพียง 2-3 เมตร โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความผิดปกติความหนาแน่นพลาสมาที่ถูกตรวจจับได้ด้วยเรดาร์ย่านความถี่ X ด้วย (ด้วยความถี่ใช้งานที่สูงถึง 2-3 GHz) ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าขนาดของความผิดปกติสามารถที่จะลดลงได้ถึง 2-3 ซม. โดยการสังเกตพบว่า ภายใน EPBs มีสเกลของความผิดปกติขนาดต่าง ๆ ที่เติมเต็มโครงสร้างที่หายไปทั้งหมด อีกทั้งยังแนะนำว่า ความผิดปกติสเกลขนาดเล็กสามารถที่จะถูกสร้างขึ้นได้โดยกระบวนการที่เคสแคดกันในช่วงการก่อตัวที่พุ่งสูงขึ้นของโครงสร้างที่หายไปของ EPB สนามไฟฟ้าที่มีการโปลาไรซ์ที่ถูกสร้างขึ้นในโครงสร้างที่หายไปของ EPB ที่มีสเกลใหญ่นั้นสามารถที่จะขยายตัวไปตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกในระยะทางที่ไกลได้ มันได้ถูกคาดการณ์ว่า สนามไฟฟ้าที่มีการโปลาไรซ์ที่มีสเกลใหญ่ (ภายในโครงสร้าง EPB ที่มีสเกลใหญ่) สามารถที่จะแมปตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกได้เพื่อที่จะสร้างโครงสร้างที่มีสเกลใหญ่ที่คล้ายคลึงกันที่ละติจูดต่ำของทั้งสองซีกโลกได้ เช่นเดียวกับผลงานวิจัยที่สังเกตได้จาก airglow imager ที่สถานีคอนจูเกตแม่เหล็กโลก อย่างไรก็ตาม สำหรับความผิดปกติที่มีสเกลเล็กที่เกิดที่สร้างขึ้นภายใน EPBs เหนือบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกนั้น การแมปไปยังละติจูดต่ำเป็นเรื่องที่ยากเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่มีการโปลาไรซ์ที่มีสเกลเล็กที่เกี่ยวข้องกับความผิดปกติสามารถที่ถูกลัดวงจรเพียงบางส่วนหรือแบบเต็มที่ได้ นอกจากนี้ มีงานวิจัยที่ได้ประเมินประสิทธิภาพการแมปของสนามไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นภายในขนาดสเกลที่ต่างกันของความผิดปกติตามเส้นสนามแม่เหล็กโลก สำหรับโครงสร้างความผิดปกติของชั้น F ที่มีขนาดสเกลใหญ่กว่า 10 km ค่าประสิทธิภาพการแมปของสนามไฟฟ้าจากเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกไปยังละติจูดมีค่ามากกว่า 60% โครงสร้างขนาดสเกลที่ใหญ่ขึ้น (เช่น 50 km) จะสัมพันธ์กับค่าประสิทธิภาพการแมปที่สูงขึ้น (~90%) สำหรับสนามไฟฟ้าที่มีการโปลาไรซ์ที่มีขนาดสเกลเล็ก (ต่ำกว่า 1 km) ค่าประสิทธิภาพการแมปจะมีเข้าใกล้ 10% หรือต่ำกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้าที่มีการโปลาไรซ์ที่มีขนาดสเกลเล็กไม่สามารถที่จะแมปไปบนระยะทางที่ไกลได้ ความผิดปกติที่มีสเกลเล็กที่ก่อให้เกิด backscatter echo plumes และซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ละติจูดต่ำ/กลางนั้นอาจจะไม่ได้เกิดขึ้นเนื่องจากการแมปโดยตรงของสนามไฟฟ้าที่มีการโปลาไรซ์ที่ถูกสร้างขึ้นภายในความผิดปกติของ EPB ที่มีสเกลเล็กในบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก แต่ไม่ได้ถูกสร้างขึ้นเฉพาะที่โดยผ่านทางกระบวนการที่เคสแคดภายในการหายไปที่มีสเกลใหญ่ที่บริเวณละติจูดต่ำ/กลาง นอกจากความผิดปกติของ EPB แล้ว ยังมีอีก 2 ประเภทของความผิดปกติที่อาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ละติจูดต่ำ/กลาง ได้แก่ ความผิดปกติในชั้น E ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ Sporadic-E และความผิดปกติในชั้น F ที่ถูกสร้างขึ้นผ่านทางความไม่เสถียรภาพเปอร์คินส์ (Perkins) โดยปรากฏการณ์ frequency-type spread-F (FSF) จากไอโอโนแกรมที่ละติจูดกลางโดยทั่วไปมักจะเกิดขึ้นจากความผิดปกติที่ถูกสร้างขึ้นผ่านทางความไม่เสถียรภาพเปอร์คินส์ สำหรับเรขาคณิตการแพร่กระจายคลื่นที่เจาะจงของสัญญาณวิทยุที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างที่มีความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์นั้น ระดับความรุนแรงของซินทิลเลชันจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นชั้นไอโอโนสเฟียร์แบคราวด์ ความหนาของโครงสร้างความผิดปกติ และรากที่สองของค่ากำลังสองเฉลี่ยของค่าความแปรปรวนความหนาแน่นอิเล็กตรอน ($\langle \Delta N^2 \rangle^{1/2}$) ภายในโครงสร้างความผิดปกติดังกล่าว

บ่อยครั้งที่ EPBs จะครอบคลุมระยะทางหลายร้อย km หรือมากกว่านี้ในทิศตะวันออก-ตะวันตก, เหนือใต้ และทิศทางในแนวตั้ง (ระยะความสูง) และเจาะผ่านค่าความสูงพีคของชั้น F เข้าสู่ชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านบน

โดยค่าความหนาแน่นพลาสมาแบบคร่าวๆ และค่าความไม่เท่ากันของความหนาแน่นพลาสมาในบริเวณขอบของ EPBs ใกล้กับระดับค่าความสูงพีคชั้น F จะมีค่าที่มากที่สุด ซินทิลเลชันที่ถูกสร้างขึ้นจากความผิดปกติของ EPB สามารถที่จะมีค่าที่รุนแรงมากได้ด้วยค่าที่อิมพัลส์ของดัชนี S_4 อย่างไรก็ดีตาม สำหรับความผิดปกติอีก 2 ชนิดที่แฝงตัวอยู่ภายในแพทช์หรือโครงสร้างที่เป็นชั้นบางที่มีขนาดค่อนข้างเล็กนั้น โดยทั่วไป ซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์จะมีค่าที่น้อยและเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้น (ไม่กี่นาที) และไม่ได้ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบการสื่อสารที่อาศัยดาวเทียม

3.1.1 คุณลักษณะของ EPBs และซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ตรวจจับได้ที่ชุมพรและที่สถานีต่าง ๆ ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

EPBs สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทขึ้นอยู่กับช่วงเวลาของการเกิด EPBs ได้แก่ หลังพระอาทิตย์ตก (~18-24 LT), หลังเที่ยงคืน (~00-06 LT) และตอนกลางวัน (~06-18 LT) ภายใต้สภาพเงียบทางแม่เหล็กโลก EPBs จะถูกสร้างขึ้นเป็นหลักในช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตก ซึ่งตามหลังจากการเพิ่มขึ้นที่ลอยเลื่อนขึ้นในแนวตั้งของพลาสมาในชั้น F โดยทั่วไป EPBs ที่สังเกตเห็นได้หลังเที่ยงคืนนั้นมักจะเกิดขึ้นจากช่วงอายุที่ยาวนานของ EPBs ที่สร้างขึ้นหลังพระอาทิตย์ตก ยกตัวอย่างเช่น ผลการศึกษาเชิงสถิติของการเกิด EPB ที่ได้รับจากเครือข่ายเครื่องรับ GNSS TEC ทั่วโลก ในทางตรงข้าม EPBs ที่เกิดหลังเที่ยงคืนจำนวนหนึ่งก็ไม่ได้ต่อเนื่องจาก EPBs ที่สร้างขึ้นหลังพระอาทิตย์ตก แต่เพิ่งถูกสร้างขึ้นใหม่ในช่วงเที่ยงคืนหรือหลังเที่ยงคืนนี้เอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงปีที่มีวัฏจักรสุริยะที่ต่ำ อีกทั้ง EPBs ที่สร้างขึ้นในช่วงเที่ยงคืนหรือหลังเที่ยงคืนนั้นสามารถอยู่ยาวนานได้ถึงตอนกลางวัน นอกจากนี้ ยังมีรายงานกรณีพิเศษของ EPBs ที่ถูกสังเกตได้ตอนเริ่มแรกที่เวลา 0200 LT และอยู่ได้ประมาณ 12 ชั่วโมงถึงช่วงบ่าย (1400 LT) เมื่อเกิดพายุแม่เหล็กโลก EPBs สามารถที่ถูกสร้างภายหลังได้ในตอนกลางคืน (แม้จะใกล้กับเวลาที่พระอาทิตย์ขึ้น) เนื่องจากการมีส่วนร่วมเกี่ยวข้องของสนามไฟฟ้าที่ถูกกักเวลาเกิดพายุ โดย EPBs เกือบจะทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตอนกลางวันมักจะเป็นผลที่ต่อเนื่องมาจาก EPBs ที่ถูกสร้างขึ้นในตอนกลางคืน พฤติกรรมทางภูมิอากาศของ EPB ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาพเงียบทางแม่เหล็กโลกจึงสามารถที่เข้าใจได้ดี

โดยทั่วไป อัตราการเกิดขึ้นของ EPBs หลังพระอาทิตย์ตกสูงสุดที่สุริยะจะมีค่าพีคในช่วงที่วัฏจักรสุริยะมีค่าสูงที่สุด ที่ตำแหน่งลองจิจูดที่พิจารณา EPBs หลังพระอาทิตย์ตกจะเกิดขึ้นเป็นหลักในช่วงเดือนที่ sunset terminator ถูกวางตัวขนานกับเส้นเมริเดียนแม่เหล็กโลก โดยการเปลี่ยนแปลงตามแนวลองจิจูดและฤดูกาลของ EPBs หลังพระอาทิตย์ตกสามารถที่จะอธิบายได้โดย “ความไม่เท่ากันในแนวลองจิจูดของค่าความนำไฟฟ้าในชั้น E ที่รวมตัวกันตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกโดยแอมพลิฟิเคชันของ PRE ซึ่งมีผลกระทบต่อการทำงานของกระบวนการ RTI” และการก่อตัวของ EPB ก็จะมีผลที่อ่อนไหวต่อความไม่เท่ากันในแนวลองจิจูดของค่าความนำไฟฟ้าในชั้น E ที่รวมค่าตามเส้นสนามแม่เหล็กโลก ความสอดคล้องกันที่ระหว่งการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของ EPBs และพลาสมาที่ลอยเลื่อนแนวตั้งที่ถูกขับเคลื่อนด้วย PRE นั้นได้ถูกพบเห็นได้จากสถานีไอแกมมาร์ก้าและจากสถานีโลก ROCSAT ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราการเกิดขึ้นของ EPB กับพลาสมาที่ลอยเลื่อนแนวตั้งหลังพระอาทิตย์ตกถูกพบได้ในทุกฤดูกาลจากการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ ผลเชิงสถิติจากข้อมูลดาวเทียม C/NOFS ในช่วงปี 2008-2013, ข้อมูลไอโอโนซอนด์ที่จังหวัดชุมพร (10.7°N, 99.4°E) และเมืองเซบู (10.4°N, 123.9°E) ในช่วงปี 2011-2013 ได้แสดงให้เห็นว่า “อัตราการเกิดขึ้นของ EPB มีค่าที่เข้าใกล้ 100% เมื่อการลอยเลื่อนของพลาสมาในแนวตั้งที่พุ่งขึ้นที่ถูกทำให้เกิดขึ้นจาก PRE นั้นมีค่าสูงกว่า 40 m/s เหนือพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้

เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มุมการเอียงทางแม่เหล็กโลกมีค่าน้อยมาก ($\sim 1^\circ$) และค่าออฟเซตที่เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกจากเส้นศูนย์สูตรทางภูมิศาสตร์ก็ไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนักตามแนวลองจิจูด ค่า PRE ที่มากและอัตราการเกิดขึ้นของ EPB ที่สูงได้ถูกคาดการณ์ได้ในช่วงเดือนอิกวินอกซ์ (เดือนมีนาคม, เมษายน, กันยายน และตุลาคม) เมื่อชั้น E ในช่วงพระอาทิตย์ตกที่ละติจูดต่ำของทั้งสองซีกโลกเกิดขึ้นที่เวลาเดียวกันโดยประมาณด้วยค่า apex ในช่วงพระอาทิตย์ตกเหนือบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก การเฝ้าสังเกตการณ์ก่อนหน้านี้จากสถานีที่ตั้งอยู่ในละติจูดต่ำในพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้แสดงให้เห็นว่า “การเกิดขึ้นของ EPB มีค่ามากที่สุดในช่วงเดือนอิกวินอกซ์” โดยทั่วไป EPBs มักจะอยู่ในช่วงก่อกำเนิดที่ตอนช่วงเวลากลางหลังพระอาทิตย์ตก ในระหว่างนั้น พวกมันจะถูกสร้างขึ้นด้วยขนาดสเกลของความผิดปกติที่แตกต่างกัน ซึ่งจะมีส่วนที่เกี่ยวข้องกับซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยซินทิลเลชันในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเดือนอิกวินอกซ์เป็นส่วนใหญ่

จากผลการศึกษา “การขึ้นอยู่กับเวลาท้องถิ่น ฤดูกาลและกิจกรรมสุริยะของแอมพลิฟิเคชันซินทิลเลชันที่วัดได้จากเครื่องรับซินทิลเลชัน GPS ที่สถานีละติจูดต่ำ (Sanya)” โดยคำดัชนี S4 ทั้งหมดได้ถูกสังเกตได้ด้วยมุมยกที่สูงกว่า 25° และช่วงเวลา 1-min พบว่า “ซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์เกิดขึ้นในช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตกในช่วงเดือนอิกวินอกซ์ของวัฏจักรสุริยะที่มากที่สุด จากการลดลง (เพิ่มขึ้น) ในค่าพลาสมาสเฟียร์ ระดับความรุนแรงซินทิลเลชันจะลดลง (เพิ่มขึ้น) อย่างสอดคล้องกัน ซินทิลเลชันได้ถูกสังเกตให้เห็นน้อยมากในช่วงพลาสมาสเฟียร์ที่ต่ำในช่วงปี 2008–2009 และปี 2561–2019 รูปสองแถวด้านล่างขวาได้แสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการเกิดขึ้นของซินทิลเลชันหลังพระอาทิตย์ตกและหลังเที่ยงคืนและค่าพลาสมาสเฟียร์ F10.7 ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา ในปีที่มีวัฏจักรสุริยะสูงที่สุด อัตราการเกิดขึ้นของซินทิลเลชันหลังพระอาทิตย์ตกสามารถที่จะมีค่าสูงถึง 40% ในบางวันได้ ซึ่งเป็นการชี้ให้เห็นว่า “ในช่วงเวลาดังกล่าว 40% ของการเชื่อมต่อระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับสามารถที่จะได้รับผลกระทบจากซินทิลเลชันเหนือสถานี Sanya ได้” ซึ่งไม่เหมือนกับ post-sunset EPBs/ionospheric scintillations ที่มีค่าสหสัมพันธ์ในเชิงบวกกับวัฏจักรสุริยะและมีแพทเทิร์นตามแนวลองจิจูด/ฤดูกาลที่คล้ายกันสำหรับวัฏจักรสุริยะสูงและต่ำ การเกิดขึ้นของ EPB และซินทิลเลชันหลังเที่ยงคืนแสดงพฤติกรรมที่ซับซ้อนอย่างมาก โดยที่ EPBs หลังเที่ยงคืนไม่ได้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นอิเล็กตรอนทั้งหมด ตอนวัฏจักรสุริยะสูงที่สุด การเปลี่ยนแปลงในแนวลองจิจูด/ฤดูกาลของ EPBs หลังเที่ยงคืนจะคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงเหล่านั้นของ EPBs หลังพระอาทิตย์ตก ยกเว้นในช่วงที่มีอัตราการเกิดขึ้นของ EPB ที่ค่อนข้างต่ำ สิ่งนี้สามารถที่จะถูกอธิบายได้ด้วยข้อเท็จจริงที่ว่า EPBs หลังเที่ยงคืนโดยส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้นต่อเนื่องมาจาก EPBs ที่สร้างขึ้นหลังพระอาทิตย์ตก อย่างไรก็ตาม ตอนวัฏจักรสุริยะที่ต่ำที่สุด อัตราการเกิดของ EPB หลังเที่ยงคืน สามารถที่จะมีค่าที่สูงกว่าอัตราการเกิดของ EPB หลังพระอาทิตย์ตกเหนือเซกเตอร์ลองจิจูดบางแห่งได้ ซึ่งมันแสดงให้เห็นถึงการขึ้นอยู่กับลองจิจูด/ฤดูกาลที่ต่างกัน

การสังเกตสเปกตรัม (spread-F) จากแผนภาพไอโอโนแกรมบริเวณเส้นศูนย์สูตรที่เซกเตอร์ลองจิจูดอเมริกา, มหาสมุทรแปซิฟิกและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ในช่วงเดือน June solstice ของวัฏจักรสุริยะที่ต่ำที่สุดได้แสดงให้เห็นว่า “อัตราการเกิดขึ้นของความผิดปกติในตอนเที่ยงคืน/หลังเที่ยงคืนมีค่าที่สูงกว่าหลังพระอาทิตย์ตก” การเฝ้าสังเกตการณ์ด้วยดาวเทียม C/NOFS และ Swarm ได้ยืนยันว่า EPBs หลังเที่ยงคืนได้ปรากฏตัวขึ้นโดยส่วนใหญ่ในช่วงเดือน June solstice ด้วยค่าพลาสมาสเฟียร์ค่าหนึ่งในเซกเตอร์แอฟริกา ตรงจุดนี้เองซินทิลเลชันย่านความถี่ VHF ในช่วงเวลาหลังเที่ยงคืนก็ได้ถูกบันทึกไว้ด้วยจากเครื่องรับจำนวนมากบนภาคพื้นดิน และในเซกเตอร์

เอเชีย การเกิดที่เพิ่มสูงขึ้นของความผิดปกติหลังเที่ยงคืนได้ถูกพบที่สถานีละติจูดต่ำ ได้แก่ เมือง Gadanki, เมือง Kototabang และเมือง Sanya ในช่วง June solstice ของวัฏจักรสุริยะที่ต่ำที่สุด แต่ไม่มีซินทิลเลชันของสัญญาณ GPS ที่เกิดขึ้นร่วมกัน จากการศึกษาพบว่า โดยทั่วไปไม่มีซินทิลเลชันที่สังเกตเห็นได้ชัดเจนที่เมือง Sanya ใกล้เที่ยงคืน/หลังเที่ยงคืนในช่วง June solstice ของวัฏจักรสุริยะที่ต่ำที่สุด เหตุผลที่เกิดเหตุการณ์นี้ก็เพราะความหนาแน่นอิเล็กตรอนแบบคร่าวๆตอนเที่ยงคืน/หลังเที่ยงคืนมีค่าต่ำ การเปลี่ยนแปลงค่า TEC เนื่องจากความผิดปกตินี้มีค่าเล็กน้อย และอาจไม่ทำให้เกิดซินทิลเลชันที่ชัดเจน ในกรณีของความผิดปกติหลังเที่ยงคืนที่พบในละติจูดต่ำ แพทเทิร์นคลื่นสะท้อนในแผนภาพ RTI ที่ได้จากรadar อาจจะนำเสนอคุณลักษณะที่ละติจูดกลางหลายครั้งได้ โดยความผิดปกติหลังเที่ยงคืนเหล่านี้ อาจจะถูกสร้างขึ้นเฉพาะที่ผ่านทางกระบวนการความไม่เสถียรภาพเปอร์คินส์ก็ได้ ในทางตรงข้าม การแผ่รังสีเหตุการณ์พร้อมกันที่ละติจูดต่ำและแถบเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกได้นำเสนอหลักฐานที่ว่า “ความผิดปกติหลังเที่ยงคืนที่ละติจูดต่ำบางเหตุการณ์อาจจะเชื่อมโยงกับ (fresh) EPBs ที่ถูกสร้างขึ้นจากกลไก RTI ที่ก่อตัวอยู่ในช่วงเวลาเที่ยงคืน/หลังเที่ยงคืนได้” จากที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้น การเกิดขึ้นของ EPBs ต้องการอัตราการก่อตัวเชิงบวกสำหรับกลไก RTI ที่ซึ่งมันจะแปรผันตรงกับความสูงของชั้น F ผลทางสถิติจากไอโอโนซอนด์แถบเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกที่ลองจิจูดต่างกันในช่วง June solstice ของวัฏจักรสุริยะต่ำที่สุดได้แสดงให้เห็นว่า “ความผิดปกติหลังเที่ยงคืนโดยส่วนใหญ่จะถูกนำหน้าด้วยการเพิ่มขึ้นของระดับความสูงของชั้น F ที่ชัดเจนในตอนใกล้เที่ยงคืน

การลอยเลื่อนของพลาสมาแนวตั้งที่พุ่งขึ้นที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันออกในช่วงเวลาใกล้เที่ยงคืนนั้นก็ถูกตรวจจับได้เช่นกันจากบอร์ดิออนซิติวบนดาวเทียม ซึ่งการลอยเลื่อนขึ้น/พุ่งขึ้นในแนวตั้งนั้นเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อกลไก RTI อย่างยิ่งเนื่องจากความถี่การชนกันของไอออนกับนิวทรัลมีค่าลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้น ลมนิวทรัลเมอริเดียนที่สัมพันธ์กับค่ามากที่สุดของอุณหภูมิตอนเที่ยงคืนในชั้นเทอร์โมสเฟียร์ได้ถูกแนะนำว่าอาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่เป็นไปได้สำหรับการยกตัวสูงขึ้นของชั้น F ในตอนเที่ยงคืนด้วย (Otsuka, 2561) ในเวลากลางวัน การปรากฏตัวของ EPB ไม่ได้เป็นปรากฏการณ์ที่ปกติ การเฝ้าดูจากดาวเทียมอินซิติวได้แสดงให้เห็นว่า “ความแปรปรวนของความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่เกิดจาก EPBs ในตอนกลางวันมักจะมีย่านน้อย การขึ้นอยู่กับตำแหน่งลองจิจูด, ฤดูกาล และวัฏจักรสุริยะของ EPBs ในตอนกลางวันจะยังคงอธิบายได้ไม่ชัดเจน” โดย EPBs ในตอนกลางวันมักจะปรากฏที่ด้านบนของชั้น F และสัมพันธ์กับช่วงเวลาการเกิดที่ยาวนานขึ้นของ EPBs ที่ถูกสร้างเริ่มต้นในตอนกลางคืน ทั้งนี้ สาเหตุที่เป็นไปได้ของการปรากฏตัวที่นานของ EPBs ในตอนกลางวันก็คืออัตราการเกิดขึ้นของพลาสมาที่ค่อนข้างต่ำในบริเวณด้านบนของชั้น F

อัตราการเกิดของ EPBs ในเวลากลางวันมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจากตอนเช้าถึงตอนบ่าย การสังเกตการณ์ที่ได้จากรadar ที่บริเวณแถบเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกและละติจูดต่ำในเซกเตอร์อเมริกาและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ก็ได้พบว่า คลื่นสะท้อนที่กระเจิงกลับมา (backscatter echoes) ตอนกลางวันในชั้น F นั้นได้ถูกสังเกตเห็นได้เป็นครั้งคราวเท่านั้นด้วยระยะเวลา 1-2 ชั่วโมงในแผนภาพ RTI และความกว้างสเปกตรัม ดอปเปลอร์ที่แคบมาก ๆ เนื่องจากการสังเกตการณ์ด้วยเรดาร์ได้ถูกจำกัดในบริเวณลองจิจูด/ละติจูดที่จำกัดและภายในระยะเวลาที่จำกัด มันจึงไม่ชัดเจนที่ว่า “คลื่นสะท้อนที่กระเจิงกลับมาตอนกลางวันในชั้น F นั้นเป็นผลมาจาก EPBs ในเวลากลางวันที่ยืดยาวนานมาจากตอนกลางคืน และคลื่นสะท้อนในตอนกลางวันเหล่านี้จะปรากฏบ่อยครั้งแค่ไหน” ดังนั้น การศึกษาเชิงวิเคราะห์เพิ่มเติมเกี่ยวกับคลื่นสะท้อนที่กระเจิงกลับมาตอนกลางวันในชั้น F นั้นจึงเป็นงานในอนาคตที่มีค่าที่ผลักดันให้เกิดการวัดแบบมีการหมุนลำป้อม (beam steering) ด้วยเรดาร์หลายตัวที่ตำแหน่งลองจิจูดที่

ตั้งอยู่ใกล้กัน ในทางตรงข้าม การก่อตัวแบบเฟรช (fresh) ของความผิดปกติที่ดูเหมือนว่าเป็น EPB ตอนกลางวันในชั้น F นั้นก็ถูกสังเกตได้เช่นกันที่ละติจูดต่ำที่ตามด้วยการสร้างหลุมในชั้นไอโอโนสเฟียร์ขนาดใหญ่จากการปล่อยจรวด ความผิดปกติตอนกลางวันในชั้น F ทั้งแบบที่ถูกสร้างขึ้นแบบเฟรชและแบบที่กำลังลดลง อาจจะไม่ได้เกิดพร้อมกับซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ก็ได้ สเกลเชิงระยะทาง และ/หรือ ความรุนแรงของความผิดปกติตอนกลางวันในชั้น F อาจจะเป็นสภาวะที่ไม่เอื้อต่อการเกิดซินทิลเลชันก็ได้

3.1.2 ประเด็นที่ยังสรุปไม่ได้ในการทำนายระยะสั้นของ EPB และซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์

หัวข้อนี้เป็นหัวข้อที่สำคัญมากที่จะต้องหาคำตอบเพื่อแก้ปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นและส่งผลกระทบต่อตรงกับการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G อากาศยานไร้คนขับ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ คือ “ความต้องการที่เราควรจะสามารถคาดการณ์ระยะสั้นเกี่ยวกับการเกิดขึ้น การเคลื่อนตัวและการเปลี่ยนแปลงของ EPB และซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์” รายละเอียดมีดังนี้

ปัจจัยควบคุมและกลไกทางกายภาพที่เกี่ยวข้องและมีผลต่อคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงสภาพอวกาศของการเกิด EPB ที่ประกอบไปด้วยการขึ้นอยู่กับตำแหน่งลองจิจูด, ฤดูกาลและกิจกรรมสุริยะนั้นได้ถูกเข้าใจเป็นอย่างดี ซึ่งสิ่งนี้ทำให้เราสามารถที่จะพัฒนาความสามารถในการทำนายการเปลี่ยนแปลงระยะยาวของการเกิดขึ้น EPB ที่ลองจิจูดค่าใด ๆ ได้ ยกตัวอย่างเช่น การทำนายรายเดือนของซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ถูกทำได้สำเร็จด้วย WideBand MODel (WBMOD) ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ อย่างไรก็ตาม ปัจจัยต่าง ๆ ที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงระยะยาวได้ดีก็ไม่สามารถที่จะใช้เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดขึ้นของ EPB แบบรายวันและระยะสั้นได้อย่างน่าเชื่อถือ ซึ่งมีระยะทางที่ไม่มีสหสัมพันธ์กันเล็กน้อยตามแนวลองจิจูด เมื่อพิจารณาที่ว่าการศึกษาตามแนวลองจิจูดของ PRE ที่ครอบคลุม $\sim 30^\circ$ (~ 3000 km ในแนวทิศตะวันออก-ตะวันตก) มันอาจจะถูกคาดการณ์ได้ว่า “การก่อตัวของ EPBs เหนือบริเวณลองจิจูดที่ยาวนั้นอาจจะมีคุณลักษณะที่คล้ายกันได้ อย่างไรก็ตาม การเฝ้าสังเกตการณ์ด้วยเรดาร์ที่เมืองโกโตตะบังและเมืองซันยาที่มีระยะทางห่างกัน ~ 1000 km ในแนวลองจิจูดได้แสดงความแตกต่างกันมากของอัตราการก่อตัวของ EPB อัตราการก่อตัวของ EPB ที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่เมืองโกโตตะบังได้ถูกแนะนำว่าน่าจะมีเชื่อมโยงกับ ITCZ ที่แอคทีฟมากขึ้นใกล้ลองจิจูดโกโตตะบัง ซึ่งตรงตำแหน่งนี้ ระดับของคลื่นโน้มถ่วงโลกน่าจะพบบ่อยมากขึ้นซึ่งทำให้เกิดการเริ่มต้นก่อตัว (seeding) และการพัฒนาของกลไก RTI ที่รุนแรงมากยิ่งขึ้น ในขณะที่ อัตราการก่อตัวของ EPB มีความแตกต่างกันมาก อัตราการเกิดขึ้นของ EPB ซึ่งรวมถึงการลอยเลื่อนตามแนวโซนัลและ EPB ที่ถูกสร้างขึ้นเฉพาะที่เหนือตำแหน่งลองจิจูดทั้งสองแห่งมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เพื่อที่จะทำนาย EPBs และซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์เหนือลองจิจูดที่พิจารณาได้ มันจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการตัดสินใจว่า EPBs ได้ถูกสร้างขึ้นแบบเฉพาะที่ หรือว่า EPB ได้ถูกสร้างขึ้น ณ ที่ใดที่หนึ่งและเคลื่อนตัวไปยังลองจิจูดที่พิจารณาผ่านการลอยเลื่อนตามแนวโซนัล ซึ่งจะทำให้ EPB เป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้ ในทำนองเดียวกัน คำถามหลักเกี่ยวกับความสามารถในการทำนาย EPBs และซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ตั้งอยู่ใน 3 ประเด็น ดังนี้

(1) ปัจจัยใดบ้างที่ควบคุมการก่อตัวของ EPB และปัจจัยที่ควบคุมเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันอย่างไร? - การก่อตัวของ EPB มีสาเหตุเบื้องต้นที่ทำให้เกิดขึ้นหลายปัจจัย ได้แก่

(a) การก่อความหนาแน่นพลาสมา (โครงสร้างคลื่นในทิศทางตะวันออก-ตะวันตก) ที่ด้านล่างของชั้น F สำหรับการเริ่มก่อตัว (seeding) ของกระบวนการ RTI

- (b) การลอยเลื่อนพลาสมาในแนวตั้งแถบเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกและค่าความสูงของชั้น F และ
 (c) ค่าความนำรวมตามแนวเส้นสนามแม่เหล็กที่ควบคุมอัตราการเติบโตของ RTI

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่า ค่าความนำจะเป็นของการก่อตัวของ EPBs (P_{EPB}) ได้ถูกนิยามว่าเป็นผลคูณของค่าความนำจะเป็นของการเกิดขึ้น 2 เทอม นั่นคือ $P_{EPB} = P_{seed} * P_{inst}$, where P_{seed} and P_{inst} เป็นค่าความนำจะเป็นของ perturbation seeding และของกระบวนการ RTI ตามลำดับ ภายใต้สภาวะเมื่อค่าความนำจะเป็นตัวใดตัวหนึ่งมีค่าที่น้อย อีกตัวหนึ่งจะมีค่าที่สูง ดังนั้น มันจึงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อการก่อตัวของ EPBs ได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงรายวันของ EPBs ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของทั้ง P_{seed} และ P_{inst} ซึ่งเกิดขึ้นมาจากแหล่งกำเนิดที่ต่างกัน การเกิดขึ้นของการก่อความหนาแน่นพลาสมาด้านล่างชั้น F (P_{seed}) นั้นสามารถที่จะตรวจจับได้โดยตรงด้วย steerable incoherent scatter radar และ all-sky airglow imager และอาจจะตรวจจับได้ทางอ้อมจาก satellite traces ในแผนภาพไอโอโนแกรมและจากการก่อความหนาแน่นพลาสมาที่ตรวจจับได้ นอกจากนี้ ยังพบอีกว่า “การก่อตัวของ EPBs ได้ถูกนำหน้าด้วยการปรากฏของการก่อความหนาแน่นพลาสมาที่เป็นตัวแทนของโครงสร้างคลื่นสเกลใหญ่ (large-scale wave structure หรือ LSWS) ที่ด้านล่างชั้น F จากการวัดค่า 2 มิติ (ความสูงกับระยะทางที่วัดได้ในแนว E-W) ของความหนาแน่นพลาสมาชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้วยตัว incoherent scatter radar (ISR) แบบ ALTAIR โครงสร้างที่หายไปแบบขายนุชอยด์ของ LSWS สามารถที่ครอบคลุมพื้นที่ในแนวลองจิจูดที่เกินกว่า 1500 km ได้ดังที่ตรวจจับได้จาก all-sky airglow imagers ที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกและละติจูดต่ำ โดย EPBs ถูกทราบกันว่าก่อตัวขึ้นที่ยอด (crest) ของ LSWS โดย LSWS สามารถที่จะเห็นเกือบจะพร้อมกันที่ตำแหน่งคอนจูเกตแม่เหล็กโลกละติจูดต่ำ

การเกิดขึ้นของ satellite traces ในบางครั้งและการเปลี่ยนแปลงของความสูงเสมือนชั้น F ($h'F$) ที่ได้รับจากไอโอโนซอนด์ละติจูดที่สถานีซานย่า (เมืองทางตอนใต้สุดของ Hainan Island ประเทศจีน) ในช่วงเดือนกันยายน- ตุลาคม 2011 เป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาพการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศได้เป็นอย่างดี การแกว่ง $h'F$ ด้วยค่าแอมพลิจูดที่ต่ำได้ถูกสังเกตเห็นในช่วงบ่ายของบางวัน การแกว่งเหล่านี้อาจจะเชื่อมโยงกับ LSWS โดยมีลักษณะที่คล้ายกับปรากฏการณ์ที่สังเกตเห็นที่ละติจูดต่ำในอเมริกาใต้เช่นกัน ซึ่งการแกว่ง $h'F$ ที่สังเกตเห็นนั้นจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจากเที่ยงวันไปจนถึงพระอาทิตย์ตกด้วยแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้นไปจนถึงพระอาทิตย์ตก เมื่อการลอยเลื่อนในแนวตั้งของ PRE มีค่าเพิ่มขึ้นตอนใกล้พระอาทิตย์ตก แอมพลิจูดการก่อความนำที่เพิ่มขึ้น แล้วทำให้เกิด satellite traces ในไอโอโนแกรม ค่าที่เพิ่มสูงขึ้นนี้น่าจะเชื่อมโยงกับอัตราส่วนค่าความนำรวมตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกที่เพิ่มขึ้นไปจนถึงตอนพระอาทิตย์ตก และ/หรือกลไกเรโซแนนซ์เชิงระยะทางของคลื่นโน้มถ่วงโลกและ background plasma drift ผลเชิงสถิติจากการเฝ้าสังเกตการณ์บริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกและละติจูดต่ำ พบว่า การก่อตัวของ EPBs เกือบจะถูกนำหน้าด้วย satellite traces เสมอ โดยทั่วไป การก่อตัวของ LSWS จะเกิดขึ้นเนื่องจากกลไกที่เป็นไปได้ 3 ประเด็นต่อไปนี้

1. กลไก collisional shear instability ที่ถูกเชื่อว่าเป็นกลไกที่ถูกผลักดันให้เกิดขึ้นจาก velocity shear ที่เกี่ยวข้องกับ PRE ตอนใกล้พระอาทิตย์ตก โดยที่ shear flow instability (SFI) เริ่มต้นในตอนบ่ายและมีค่าสูงขึ้นตอนใกล้พระอาทิตย์ตกเมื่อความแตกต่างระหว่างลมนิวทรัลและความเร็ว plasma drift มีค่าเป็นมากกว่า 100 m/s โดยตัว SFI นั้นสามารถที่จะสร้างโครงสร้างการก่อความหนาแน่นพลาสมาที่ด้านล่างชั้น F ได้ที่ซึ่งอาจจะประพฤติตัวเป็น seeding source ของกลไก RTI ได้

2. คลื่นโน้มถ่วงโลกที่เดินทางพุ่งขึ้นไปสู่ด้านล่างชั้น F เหนือเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกอาจจะเป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิด LSWS ได้ คลื่นโน้มถ่วงโลกดังกล่าวอาจจะมีสาเหตุมาจากกิจกรรมกระแสคอนเวกชันในชั้นโทรโปสเฟียร์ที่ปรากฏตัวที่เวลาใดก็ได้ของวัน โดย LSWS ที่ถูกบ่งชี้ได้ในแผนภาพไอโอโนแกรมเสมือนเป็น “satellite traces” ที่ปรากฏตัวตอนบ่ายหรือเที่ยงคืน (เมื่อโดยทั่วไป shear flow มีค่าน้อยๆ) นั้นอาจจะถูกนำไปเชื่อมโยงกับคลื่นโน้มถ่วงโลก นอกจากนี้ ความแตกต่างที่มากอย่างท่วมท้นของอัตราการเกิดขึ้นของ EPB ที่ลองจิจูดที่ตั้งใกล้กัน (ในเซกเตอร์เอเชีย) ซึ่งอาจจะมีสาเหตุส่วนหนึ่งจากคลื่นโน้มถ่วงโลกที่มาจาก ITCZ ก็ได้ การสังเกตด้วย SpreadFEx campaign ก็แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันที่ตีระหว่างความยาวคลื่นทางแนวนอนของคลื่นโน้มถ่วงโลกกับระยะห่างระหว่าง EPB ในแนวลองจิจูด พบว่า ระยะห่างที่พบโดยทั่วไปจะมีค่ามากกว่า 100 km

3. สนามไฟฟ้าการโพลาริซ์ขนาดใหญ่ที่เกิดจากความแปรปรวนชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีการเคลื่อนตัวระดับปานกลาง (medium-scale traveling ionospheric disturbance หรือ MSTID) ที่ละติจูดต่ำนั้นสามารถที่จะวางตัวไปตามเส้นสนามแม่เหล็กไปสู่ด้านล่างของชั้น F บริเวณแถบเส้นศูนย์สูตรได้และทำให้เกิด LSWS จากการจำลองสถานการณ์โดยใช้แบบจำลอง SAMI3/ESF นั้น เมื่อ MSTIDs ที่ละติจูดต่ำได้เคลื่อนตัวไปในทิศทางที่ไม่ขนานกับเส้นสนามแม่เหล็กโลก สนามไฟฟ้าการโพลาริซ์ที่เกี่ยวข้องก็จะวางตัวไปสู่ด้านล่างของชั้น F บริเวณแถบเส้นศูนย์สูตรได้และทำให้เกิดคลื่นที่มีความหนาแน่นแปรปรวนเหมือนกับเป็น MSTID ได้ ซึ่งกระตุ้นให้เกิดการก่อตัวของ EPBs ได้ ผลทางสถิติจากการสังเกตที่อเมริกาใต้ได้แสดงความสัมพันธ์ที่ใกล้ชิดระหว่างระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิ้ลกับความยาวคลื่นทางแนวนอนของ MSTIDs โดยทั่วไป ทั้ง shear flow และคลื่นโน้มถ่วงโลก (ที่เกิดขึ้นทั้งทางตรงและทางอ้อมจากสนามไฟฟ้าการโพลาริซ์ MSTID) อาจจะสามารถสร้าง LSWS ได้ แล้วก็อาจจะนำไปสู่การก่อตัวของ EPBs เช่นกัน อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวัน (วันต่อวัน) ที่อธิบายคุณลักษณะของ shear flow และคลื่นโน้มถ่วงโลกก็ยังเป็นเรื่องที่ไม่รู้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับคลื่นโน้มถ่วงโลกที่ไม่สามารถที่จะสังเกตได้โดยตรง นอกจากนี้ ค่าขีดจำกัดเทรซโฮลด์ที่ถูกกำหนดด้วยพารามิเตอร์ LSWS สำหรับการเกิดขึ้นของ EPB ก็ยังเป็นเรื่องที่ไม่ชัดเจนเนื่องจากการสังเกต LSWS โดยตรงด้วยเรดาร์ชนิด steerable incoherent scatter radar ก็เป็นเรื่องที่มีข้อจำกัดมาก

ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการลอยเลื่อนพลาสมาในแนวตั้งและความสูงของชั้น F นั้น มันจะมีความเป็นไปได้หลายประการที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงในระยะสั้น ประเด็นข้อหนึ่งคือสนามไฟฟ้าแบรคคราวด์ที่อาจจะปรับเปลี่ยนได้ด้วยตัวแปรอื่น ๆ ในแต่ละวัน ตอนใกล้พระอาทิตย์ตก PRE ที่นำชั้น F ไปสู่ความสูงที่สูงขึ้นก็สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้ด้วยคลื่น planetary/Kelvin และด้วยสนามไฟฟ้าทะเลที่ในช่วงที่เกิดพายุ (PPEFs) หรือสนามไฟฟ้าไดนามิที่แปรปรวน (DDEFs) ปัจจัยเหล่านี้ที่ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของ PRE ในแต่ละวันยังคงที่จะถูกศึกษาอยู่ ลมพัด (tidal winds) ที่ส่งผลต่อค่าเกรเดียนต์ความนำชั้น E ตอนพระอาทิตย์ตก แล้วนำไปสู่ PRE และการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F นั้น สามารถที่จะปรับเปลี่ยนได้จากการเกิดปฏิสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นระหว่างคลื่น planetary/Kelvin และคลื่น tidal

การเกิดขึ้นของ EPB หลังจากพระอาทิตย์ตกที่ไม่ได้เป็นไปตามฤดูกาลที่เกิดขึ้นหลังจากการยกตัวที่มากของชั้น F แถบเส้นศูนย์สูตรในวันที่ 28 กรกฎาคม 2557 ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ถูกแนะนำว่ามีส่วนที่เกี่ยวข้องกับคลื่น planetary ที่ตอนเที่ยงคืนของวัฏจักรสุริยะที่ต่ำสุด เมื่ออุณหภูมิสูงสุดเกิดขึ้นบ่อยครั้งในซีกโลกช่วงฤดูร้อน การอ่อนตัวของสนามไฟฟ้าที่มุ่งไปทางทิศตะวันตกพร้อมกับการรวมตัวใหม่ที่มากเพียงพออาจจะเป็นสาเหตุการเพิ่มขึ้นของความสูงชั้น F ได้ ในช่วงพายุแม่เหล็ก ความสูงของชั้น F สามารถเพิ่มขึ้นหลังจากพระอาทิตย์ตก (ตอน

หลังเที่ยงคืน) ได้โดย PPEFs (DDEFs) หรือลดลงหลังจากพระอาทิตย์ตกด้วย DDEFs ได้ เพราะว่าขั้วของ PPEFs (DDEFs) มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันออก (ทิศตะวันตก) ตามแนวลองจิจูดในตอนกลางวัน และ มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตก (ทิศตะวันออก) ตามแนวลองจิจูดในตอนกลางคืน Super EPBs ขนาดใหญ่มากที่ครอบคลุมจากเส้นศูนย์สูตรไปยังละติจูดกลางในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้ถูกตรวจจับ

ในพายุแม่เหล็กโลกในเดือนมกราคม กรกฎาคม และ พฤศจิกายน 2004 ซินทิลเลชันที่รุนแรงด้วยค่า S_4 ที่สูงสุดที่มีค่าประมาณ 1.0 ที่ถูกบันทึกได้ที่สถานีละติจูดกลางทางด้านล่าง เมือง Wuhan (30.5°N, 114.4°E) โดยเฉพาะพายุเดือนกรกฎาคม 2004 ปรากฏการณ์ EPBs ได้ถูกสร้างขึ้นอย่างต่อเนื่องในระยะทางที่ยาวเกินกว่า 180 องศาตามแนวลองจิจูดที่บริเวณแถบเส้นศูนย์สูตรจากอเมริกาใต้ไปจนถึงเอเชียตะวันออกเฉียงใต้นับตั้งแต่ในเดือนเหล่านี้ EPBs โดยทั่วไป มักจะไม่ค่อยเกิดขึ้นในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และการแนะนำว่า PPEFs ที่เกิดขึ้นยาวนานและจำนวนมากนั้นมีส่วนที่ทำให้เกิดการยกตัวที่รวดเร็วของความสูงชั้น F แล้วนำสู่การเพิ่มขึ้นของการเกิดขึ้นของ RTI และการก่อตัวของ EPB อย่างเห็นได้ชัด ปรากฏการณ์ PPEF ซึ่งโดยทั่วไปมักจะเกิดขึ้นในช่วงเฟสหลักของพายุแม่เหล็กและอยู่ได้นานตั้งแต่หลายสิบนาทีไปจนถึง 1-2 ชั่วโมง ถ้าปรากฏตัวในตอนเย็น (มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันออก) สามารถที่จะเพิ่มการลอยเลื่อนของพลาสมาที่พุ่งขึ้นแบรคคราวด์ได้และทำให้มี EPB เกิดเพิ่มขึ้นได้ หลังจากที่เกิดเฟสหลักของพายุผ่านไปแล้ว 2-3 ชั่วโมง ตัว DDEF มักจะก่อตัวขึ้นและกลายมามีบทบาทมากขึ้นในช่วงเฟสฟื้นฟูของพายุ โดย DDEFs ที่มีขั้วมุ่งหน้าไปทางตะวันตก (ไปทางตะวันออก) ในตอนหลังพระอาทิตย์ตก (หลังเที่ยงคืน) นั้นสามารถที่จะยับยั้งหรือหักล้างการลอยเลื่อนของพลาสมาที่พุ่งขึ้น (ที่พุ่งลง) แบรคคราวด์ แล้วนำไปสู่การยับยั้ง (การเพิ่มขึ้น) การเกิดขึ้นของ EPB ได้ ในขณะที่การเกิดขึ้นของ Super EPBs ที่โดยทั่วไปมักจะเกิดจากพายุแม่เหล็กโลก ผลทางสถิติก่อนหน้านี้ก็ได้แสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดขึ้นของ EPBs ก็ถูกยับยั้งจากกิจกรรมแม่เหล็กโลกได้เช่นกัน โดยการใช้ค่า TEC ที่วัดได้ที่ละติจูดต่ำและแถบเส้นศูนย์สูตรในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ระหว่างปี 2001-2004 การลดลงของอัตราการเกิดขึ้นของ EPB ก่อนเที่ยงคืนตามกิจกรรมแม่เหล็กโลกที่เพิ่มขึ้น (พิจารณาจากดัชนี K_p)

มีผลการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_p ทั้งหมดรายวัน (ΣK_p) กับการเกิดขึ้นของ EPB/scintillation ที่เมือง Kototabang (ละติจูดต่ำ) ระหว่างปี 2011-2013 พบว่า การลดลงของอัตราการเกิดของ EPB ตามค่า ΣK_p ที่เพิ่มขึ้นก็ถูกสังเกตเห็นได้เหมือนกัน จากการจำลองด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข พบว่า แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่า K_p เพียงเล็กน้อยก็สามารถที่จะมีผลต่ออัตราการก่อตัวของ RTI และ EPB ในช่วงฤดูกาลที่มีการเกิดขึ้นที่สูงได้ สาเหตุอีกประการหนึ่งสำหรับการเปลี่ยนแปลงความสูงชั้น F ก็คือคลื่นโน้มถ่วงโลกที่อาจจะสร้างการเปลี่ยนแปลงทั้งทางตรงและทางอ้อม องค์ประกอบโซนิคของลมก่อกวนที่เกิดจากคลื่นโน้มถ่วงโลกสามารถที่จะปรับเปลี่ยน PRE และส่งผลต่อความสูงชั้น F ได้ องค์ประกอบเมอริตลของลมก่อกวน (perturbation winds) สามารถที่จะมีผลต่อความสูงของชั้น F ได้โดยตรงเช่นกัน (ที่ละติจูดที่ห่างออกไปจากเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก) ในทางกลับกัน การเปลี่ยนแปลงความสูงชั้น F สามารถที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับโครงสร้างการก่อกวนความหนาแน่นของพลาสมาที่ถูกสร้างขึ้นจากคลื่นโน้มถ่วงโลก ผลการศึกษาทางสถิติได้แสดงให้เห็นว่าความสูงชั้น F ($h'F$) ที่สถานีแถบเส้นศูนย์สูตรจำนวน 2 สถานีสามารถที่จะมีค่าที่ต่างกันมากเลยทีเดียวทีเดียวก็ได้ เมื่อมี EPBs ถูกพบได้หลายวัน โดยพวกเขาได้แนะนำว่า โครงสร้างการก่อกวนความหนาแน่นของพลาสมาเป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดผลต่างของค่า $h'F$ ได้ การเกี่ยวข้องกันของความสูงชั้น F เข้ากับคลื่นโน้มถ่วงโลกนั้นสามารถที่จะถูกยับยั้งที่ความสูงที่มากขึ้นได้ตามจุดเริ่มต้นของ EPBs โดย $h'F$ จะขึ้นอยู่กับ perturbation upwelling depth and zonal

distance ที่ห่างจากยอด (crest) ของโครงสร้างการก่อคลื่นฯ ดังกล่าว การศึกษาก่อนหน้านี้ได้แสดงให้เห็นว่า “แม้กระทั่งเมื่อ PRE มีค่าที่ต่ำ EPB ก็ยังคงที่จะเกิดขึ้นหลายครั้งเนื่องจากโครงสร้างการก่อคลื่นความหนาแน่นของพลาสมาที่รุนแรง” เนื่องจากค่า $h'F$ และค่าความเร็วลอยเลื่อนในแนวตั้งของทั้งวันที่เกิด EPB และวันที่ไม่มี EPB ที่บริเวณลองจิจูดเพียงค่าเดียวก็สามารถที่จะกระจายได้มากเช่นกัน มันจึงเป็นเรื่องที่ยากที่จะตัดสินว่า EPBs เกิดขึ้นบนพื้นฐานรายวันโดยใช้ค่าเทรซโฮลด์ที่แน่นอนของความสูงชั้น F ที่แน่นอนค่าหนึ่งหรือไม่ (หรือการลอยเลื่อนพลาสมาในแนวตั้ง) อัตราส่วนของค่าความนำในบริเวณชั้น F กับค่าผลรวมตามแนวเส้นสนามทั้งหมดในชั้น E กับชั้น F ที่ควบคุมการก่อตัวของ RTI ได้นั้น สามารถที่จะมีค่าที่ลดลงได้ด้วยลมที่เคลื่อนตัวข้ามเส้นศูนย์สูตรและชั้น Es ในละติจูดต่ำ ลมที่เคลื่อนตัวข้ามเส้นศูนย์สูตรเป็นต้นเหตุการยกตัวของความสูงชั้น F ในซีกโลกด้านหนึ่งและมีการลดลงในซีกโลกอีกด้านหนึ่ง และเช่นกันก็จะทำให้เกิดผลการกระทบที่หักล้างของค่าความนำในบริเวณชั้น F แต่ด้วยขนาดแอมพลิจูดที่มากขึ้นสำหรับการลดลงของค่าความนำในบริเวณชั้น F ดังนั้น มันจะทำให้เกิดการลดลงในค่าอัตราการก่อตัวของ EPB ได้ ซึ่งอธิบายได้จากการพิจารณาลมที่ข้ามผ่านเส้นศูนย์สูตรที่สังเกตได้จากสถานีไอโอโนซอนด์ที่คอนจูเกตกันตรงเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ($\sim 100^\circ E$) เช่น “เวลาการก่อตัวของ EPB ได้เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า เมื่อความเร็วลมที่ข้ามผ่านเส้นศูนย์สูตรมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 10 m/s ถึง 40 m/s ซึ่งบ่งชี้ว่ามีการยับยั้งการเกิด EPB ด้วยลมที่ข้ามผ่านเส้นศูนย์สูตร สำหรับค่าความนำในบริเวณชั้น E ที่ละติจูดต่ำที่มีการเชื่อมโยงไปยังชั้น F บริเวณเส้นศูนย์สูตรนั้นโดผ่านเส้นสนามแม่เหล็กโลกนั้น การเกิดขึ้นของชั้น Es ในละติจูดต่ำสามารถที่ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าความนำในบริเวณชั้น E แล้วนำไปสู่การลดลงในค่าอัตราส่วนความนำ ดังกล่าวด้วย Joshi et al. (2013) รายงานว่าเมื่อ blanketing-type Es layer เกิดขึ้นที่ละติจูดต่ำสำหรับช่วงเวลาที่ยาวไกลพระอาทิตย์ตก เราจะไม่พบ EPB มันจึงถูกแนะนำว่า “ชั้น Es ที่หนาที่มีค่าความนำในชั้น E ที่มากขึ้น จะสามารถลดอัตราการก่อตัวของ RTI ได้มาก โดยค่าความนำในชั้น E ที่เพิ่มขึ้นจากชั้น Es นั้น สามารถที่จะชะลอการเพิ่มขึ้นของความสูงของชั้น E หลังพระอาทิตย์ตกได้ กลไกพื้นฐานอันหนึ่งสำหรับชั้น Es เป็น tidal wind shear ซึ่งสามารถที่จะถูกปรับได้ด้วยโดยคลื่นโน้มถ่วงโลกและคลื่นระหว่างดาวเคราะห์

(2) ตัวแปรควบคุมการพัฒนาและช่วงเวลาปรากฏ (Lifetime) ของ EPBs

หลังจากการเกิดขึ้นในช่วงแรกที่ด้านล่างของชั้น F บริเวณเส้นศูนย์สูตร EPBs สามารถที่จะยกตัวไปยังความสูงที่มากขึ้นซึ่งจะยืดขยายออกไปตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกไปยังละติจูดต่ำ หรือแม้กระทั่งละติจูดกลางด้วย และก็จะเกิดการลอยเลื่อนไปในแนวโซนัล (มุ่งหน้าไปยังทิศตะวันออกหรือตะวันตก) ไปในระยะทางที่ไกลได้เกินกว่า 2,000 km ความสูงที่เพิ่มขึ้นและระยะทางการลอยเลื่อนในแนวโซนัลอาจจะเป็นตัวตัดสินได้ว่าพื้นที่หนึ่งอาจจะได้รับผลกระทบจาก EPB หรือซินทิลเลชั่นที่เกี่ยวข้องในระดับกว้างอย่างไร

งานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่า อัตราการเกิดขึ้นในแนวละติจูดของความผิดปกติในพลาสมาที่มีขนาดยาวหลาย km ที่สังเกตได้จากการวัดค่า GNSS TEC ที่ลองจิจูดประมาณ $110^\circ E$ โดยการใช้วิธีการที่คล้ายกันกับ Li et al. (2009a) อัตราการเปลี่ยนแปลงของ TEC (rate of TEC change index หรือ ROTI) ซึ่งถูกกำหนดว่าเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของ TEC (rate of TEC change หรือ ROT) ที่คำนวณค่าได้ทุก ๆ 5 นาที อัตราการเกิดขึ้นของความผิดปกติก็ได้เคยถูกใช้ศึกษาก่อนหน้านี้เช่นกันด้วยความละเอียดในแนวละติจูดทุก ๆ 1 องศา ตั้งแต่ $13^\circ N$ ไปจนถึง $40^\circ N$ ในบริเวณลองจิจูด $105^\circ E$ - $115^\circ E$ สำหรับค่าข้อมูล TEC ที่วัดค่าได้ในช่วงเวลา 30 วินาทีนั้น ขนาดสเกลของความผิดปกติที่พบได้จากค่า ROTI ที่มากนั้นก็จะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของ 2-3 km ได้ (ยกตัวอย่างเช่น 6 km) ซึ่งอยู่กับความเร็วลอยเลื่อนในแนวโซนัลเหนือจุด ionospheric pierce point

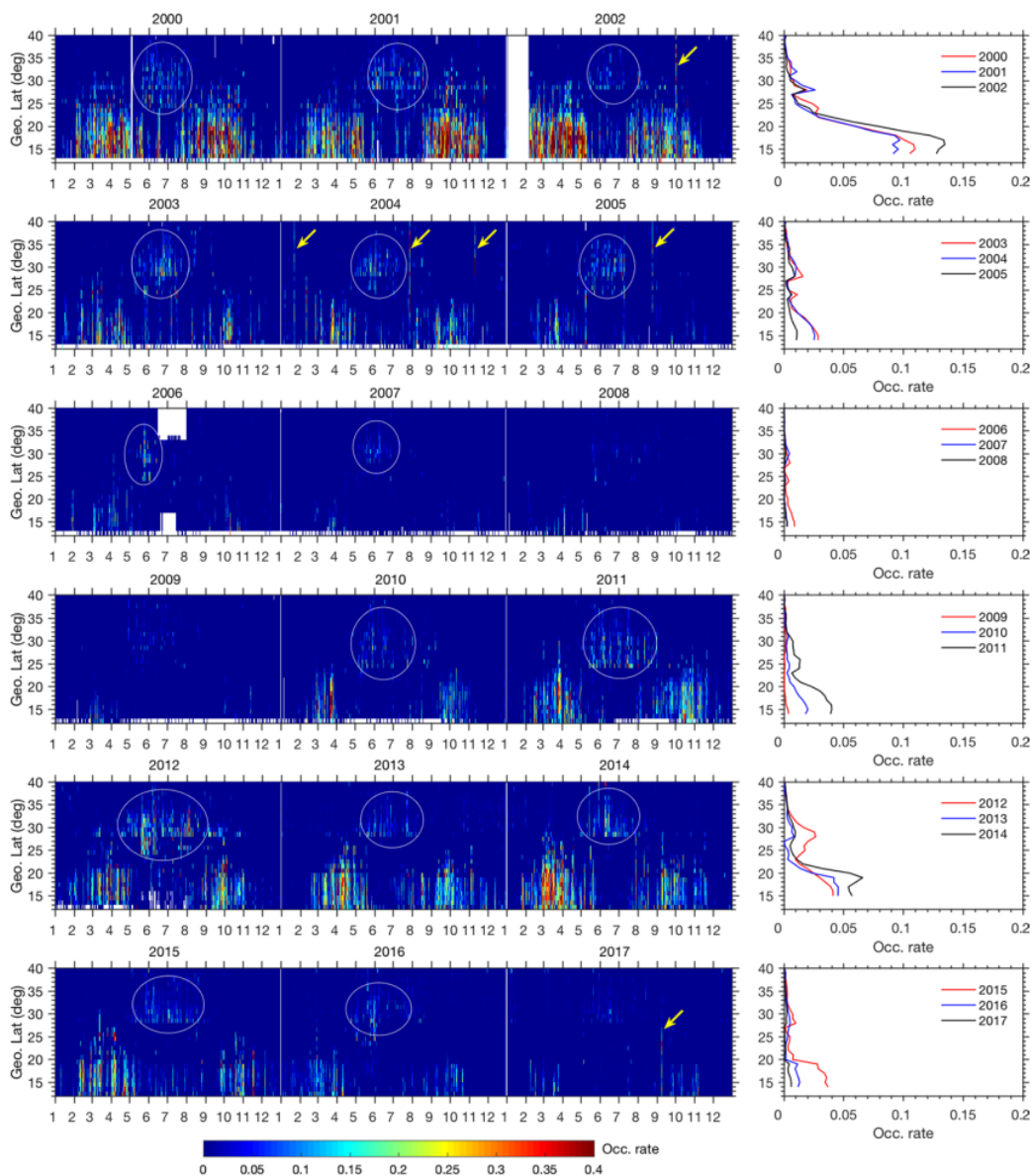
(เช่น 100 m/s) อย่างที่แสดงในภาพด้านซ้ายของรูปที่ 3.1 ของความผิดปกติพลาสมาที่เกิดขึ้นที่ละติจูดที่ต่างกันที่ ถูกบ่งชี้ได้จากการวัดค่า ROTI ชนิดแรกเป็นความผิดปกติพลาสมาในชั้น F ที่เกิดขึ้นที่ละติจูดกลางผ่านทาง กระบวนการ Perkins instability และมีส่วนเกี่ยวข้องกับ Es/MSTIDs ในช่วง June solstice ซึ่งถูกระบุได้ด้วยวิธี superimposed circles ส่วนรูปทางขวาของรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นถึงความผิดปกติที่ละติจูดกลางที่นำเสนออัตราการ การเกิดขึ้นที่ระดับ sub-peak โดยมีศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 28-29°N โดยใช้ข้อมูลเวลากลางคืนในช่วงปี 2000-2017 อีกประเภทหนึ่งก็คือความผิดปกติของ EPB ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดจุดสูงสุดของการเกิดขึ้นหลักที่ละติจูด ต่ำ ซึ่งโดยทั่วไป ความผิดปกติละติจูดกลางและความผิดปกติของ EPB (ละติจูดต่ำ) จะเพิ่มขึ้นตามกิจกรรมสุริยะ ในที่นี้ เราจะมุ่งความสนใจเฉพาะเรื่องความผิดปกติของ EPB ที่วัฏจักรสุริยะที่สูงที่สุด (ปี 2000-2002) ความ ผิดปกติของ EPB ส่วนใหญ่จะพบได้ที่ละติจูดไปจนถึงประมาณ 25°N (ที่สมมติว่าความสูงของความผิดปกติเกิดขึ้น ประมาณ 300 km) ซึ่งจะสอดคล้องกับความสูงสูงสุด ~1050 km เหนือเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกที่ 110°E จุดสูงสุดของการเกิดของความผิดปกติระดับ EPB km ถูกตั้งอยู่ประมาณ 17°N แทนที่ละติจูดที่ต่ำกว่าที่อยู่ใกล้กับ เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก เหตุการณ์นี้จะสอดคล้องกับค่าพีการเกิดขึ้นของความผิดปกติระดับหลายร้อยเมตรซึ่ง ได้ถูกคาดหวังที่จะสร้างซินทิลเลชันที่สูงที่สุดใกล้กับยอดของ EIA

ที่วัฏจักรสุริยะที่ต่ำที่สุด (ปี 2007-2009) ความผิดปกติของ EPB ได้ถูกพบได้โดยส่วนใหญ่ที่ละติจูดต่ำ กว่า 18°N ซึ่งชี้ให้เห็นว่า “ความสูงสูงสุดของ EPB plumes เหนือเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกที่โดยทั่วไปมักจะมี ค่าที่ต่ำกว่า 550 km ในทางกลับกัน จากรูปที่ 3.1 พบว่า ความผิดปกติของ EPB 2-3 เหตุการณ์สามารถที่จะพบ เห็นได้ที่ขยายตัวจากละติจูดต่ำไปยังละติจูดกลางจนถึง 40°N หรือมากกว่าได้ (ตามที่ถูกระบุไว้ด้วย superimposed arrows) ที่สอดคล้องกับความสูงสูงสุด ~3400 km เหนือเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกที่ 110°E โดยเหตุการณ์พลาสมาบับเบิลเหล่านี้ที่ละติจูดกลางเกิดขึ้นในช่วงพายุแม่เหล็กโลกเดือนตุลาคม 2002, มกราคม, กรกฎาคม และพฤศจิกายน 2004, สิงหาคม 2005 และกันยายน 2017 ตามลำดับ ในบางกรณีดังกล่าว พลาสมา บับเบิลที่ละติจูดกลางในช่วงที่เกิดพายุในเอเชียตะวันออกเฉียงและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ยังคงมีการศึกษาก่อนหน้านี้ กิจกรรมแม่เหล็กโลกอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าแบรคคราวด์และความหนาแน่น พลาสมาที่เพียงพออย่างมีนัยสำคัญที่ทำให้เกิดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับ EPBs ที่ยังคงเกิดที่ระดับความสูงที่มาก พอและแผ่ขยายไปสู่ละติจูดที่สูงขึ้นได้ โดยทั่วไป ความสูงพีคของ EPBs นั้นจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นอิเล็กตรอน รวมในแนวเส้นสนามแม่เหล็ก (field-line-integrated) ภายในพลาสมาบับเบิลและความหนาแน่นอิเล็กตรอน แบรคคราวด์ข้างเคียง โดยความเร็วที่ยกตัวในแนวตั้งจะตัดสินว่า “พลาสมาบับเบิลจะใช้เวลาเพื่อเดินทางไปถึง ความสูงพีคใช้เวลาเท่าไร” โดยความเร็วยกตัวนี้จะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าโชนัลแบรคคราวด์ในชั้น F ตามที่แนะนำไว้ โดยสนามไฟฟ้าแบรคคราวด์สามารถที่จะมีผลต่อความเร็วยกตัว 2 ประเด็นดังนี้

(1) ทำให้เกิดความแตกต่างในค่าความนำระหว่างพลาสมาบับเบิลกับบริเวณข้างเคียง แล้วนำไปสู่ การเปลี่ยนการโพลาริซชันของสนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้าโพลาริซชันที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันออกในโครงสร้างที่ มีการหายไปของความหนาแน่นอิเล็กตรอน (หรือ EPB) นั้นจะขับเคลื่อนการลอยเลื่อนที่พุ่งขึ้นของ พลาสมาที่มีความหนาแน่นต่ำผ่านทาง การลอยเลื่อนของ $E \times B$ และ

(2) ทำให้เกิดการยกตัวขึ้นของชั้น F ไปยังความสูงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งบริเวณเหล่านั้นจะมีความถี่การชน ของ ion-neutral ต่ำลงและอัตราการก่อตัวของ RTI มีเพิ่มขึ้น จากการสังเกตโดยอาศัยเรดาร์แบบ multi-beam steering ที่ละติจูดต่ำ โดยความเร็วยกตัวของ EPB ตอนพระอาทิตย์ตก (หลังเที่ยงคืน) จะ

มีค่าประมาณ 45–265 m/s (26–128 m/s) นอกจากนี้ ความเร็วในการยกตัวภายใต้สนามไฟฟ้าแบรคคราวด์ที่แตกต่างกันโดยใช้แบบจำลอง high resolution bubble (HIRB) ก็ได้ถูกศึกษาก่อนหน้านี้ด้วยพบว่า เมื่อสนามไฟฟ้าแบรคคราวด์ที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.5-1 mV/m ความเร็วยกตัวในแนวตั้งก็มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างสอดคล้องกันด้วยจาก 227-264 m/s ที่ค่าความสูงพีคที่ไปถึงได้โดย EPB นั้น และการเคลื่อนตัวที่พุ่งขึ้นของ EPB จะหยุดได้เมื่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนรวมตามแนวเส้นสนามแม่เหล็กภายในบับเบิลมีค่าเท่ากับค่าดังกล่าวของแบรคคราวด์ข้างเคียง ซึ่งสิ่งนี้ได้รับการยืนยันโดยการจำลองด้วยแบบจำลอง SAMI3 ด้วย



รูปที่ 3.1 อัตราการเกิดขึ้นตามแนวละติจูดของความผิดปกติพลาสมาที่สังเกตได้จากการวัดค่า TEC ในแต่ละวัน (ภาพซ้าย) และ อัตราการเกิดขึ้นตามแนวละติจูดโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากตอนกลางคืนตลอดทั้งปี (ภาพขวา) [4]

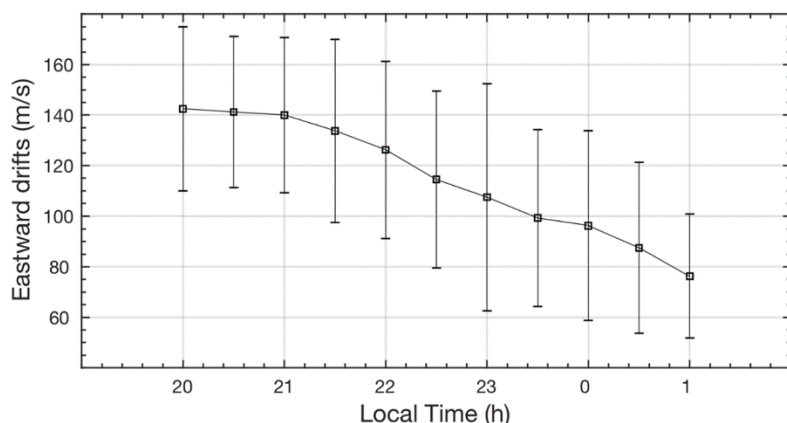
รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

ระยะห่างลอยเลื่อนในแนวโซ่ของ EPBs อาจจะขึ้นอยู่กับความเร็วลอยเลื่อนในแนวโซ่และช่วงเวลา ที่ปรากฏของ EPBs โดย EPBs มักจะลอยเลื่อนมุ่งหน้าไปทางตะวันตกในตอนกลางคืนด้วยความเร็วที่ลดลง ตามเวลาท้องถิ่นที่เพิ่มขึ้นและย้อนกลับไปทางตะวันตกตอนเช้าตรู่ เพราะ EPBs ถูกฝังอยู่กับพลาสมาแบรคราวด์ ที่อยู่รอบ ๆ ทั้งนี้ โดยทั่วไป ความเร็วลอยเลื่อนในแนวโซ่ของ EPBs และการเปลี่ยนแปลงของมันตามเวลา ท้องถิ่นและกิจกรรมสุริยะก็มีลักษณะที่คล้ายกับการลอยเลื่อนพลาสมาแบรคราวด์ในชั้น F สำหรับโครงสร้าง EPB ที่เอียงตัวไปในทิศตะวันตก/ตะวันออก การลอยเลื่อนในแนวโซ่ของ EPB สามารถที่จะมีขนาดใหญ่ขึ้น/เล็ก ลงกว่าการลอยเลื่อนพลาสมาแบรคราวด์ได้เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลาสมาภายในโครงสร้างพลาสมา

รูปที่ 3.2 แสดงค่าเฉลี่ยของความเร็วลอยเลื่อนในแนวโซ่ที่ได้มาจากการวัดซินทิลเลชันโดยใช้เครื่องรับ GPS ที่ตั้งอยู่ที่เมืองซานย่า ละติจูดต่ำ ในช่วงปี 2011-2013 (ช่วงกิจกรรมสุริยะที่สูง) พบว่า การลอยเลื่อนในแนว โซ่มีค่าลดลงในช่วงเวลา 20:00-01:00 LT จากค่าประมาณ 145 m/s ไปจนถึง 75 m/s ด้วยอัตราการลดลง โดยเฉลี่ย ~ 15 m/s/h ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับผลลัพธ์ระดับโลกที่ได้จากดาวเทียม C/NOFS ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเร็วมีค่าอยู่ระหว่าง 40-130 m/s ในช่วงเวลา high solar flux ซึ่งไม่เหมือนพฤติกรรมในช่วงเวลาที่ไม่ มีพายุ การลอยเลื่อนในแนวโซ่ของพลาสมาแบรคราวด์และ EPBs ในระหว่างที่มีพายุแม่เหล็กโลกอาจจะถูกรบกวนอย่างมากได้ด้วยการลอยเลื่อนที่มุ่งไปทางทิศตะวันออกที่ลดลงและยังคงไว้แม้กระทั่งการลอยเลื่อนที่มุ่งไปทางทิศตะวันตกที่มีปริมาณที่มากด้วย การสังเกตก่อนหน้านี้ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้แสดงให้เห็นว่าในช่วงพายุแม่เหล็กไฟฟ้า EPBs มีการลอยเลื่อนที่มุ่งไปทางทิศตะวันตกด้วยความเร็ว ~ 80 m/s หรือสูงกว่า บางครั้งการลอยเลื่อนที่มุ่งไปทางทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นตามละติจูด จึงทำให้เกิดโครงสร้าง EPB ในแนวตั้งที่เอียงไปทางทิศตะวันตก การลอยเลื่อนที่มุ่งไปทางทิศตะวันตกในช่วงเวลาที่มีพายุเหล่านี้มันอาจจะเกิดขึ้น เนื่องจากการลอยเลื่อนของกระแสไฟฟ้า Hall ที่เหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นจาก PPEF และ/หรือ เนื่องจากลมเทอร์โมสเฟียร์ที่มุ่งไปทางทิศตะวันตกที่เหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นจากการก่อกวน โดยช่วงเวลาที่ปรากฏของ EPBs ในเวลากลางคืนขึ้นอยู่กับอย่างมากกับคุณลักษณะของ EPBs เหล่านี้ และสภาพของชั้นไอโอโนสเฟียร์แบรคราวด์ อาทิ เช่น ขนาดสเกลและการหายไปของความลึกของโครงสร้าง EPB และอัตราการรวมตัวกัน และการแพร่กระจายของพลาสมาในทิศทางที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กโลก ภายใต้สภาพปกติ (แบรคราวด์) ที่คล้ายกัน EPBs ที่มีขนาดใหญ่กว่าและการหายไปที่ลึกกว่าสามารถที่จะปรากฏให้เห็นนานกว่า สำหรับโครงสร้างพลาสมาที่มีหมายเลขคลื่น k เวลาของการแพร่กระจายถูกกำหนดค่าอยู่ในเทอมของ $(k^2D)^{-1}$ โดย D คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวตั้งฉาก สำหรับค่า D จำเพาะ (1 m/s^2) เวลาการแพร่กระจาย 1 ของโครงสร้างที่ผิดปกติด้วยสเกลขนาด 1 km และ 400 m จะถูกประมาณว่าอยู่ได้ประมาณ 7 h และ 1 h ตามลำดับ สิ่งนี้สามารถอธิบายได้ว่า “ในช่วงท้ายของ EPB ความผิดปกติระดับร้อยเมตร (ที่ทำให้เกิดซินทิลเลชัน) จะมีสลายตัว แต่ว่าความผิดปกติระดับ km ยังคงปรากฏอยู่” ในทางกลับกัน อัตราการรวมตัวกันใหม่ที่สูงขึ้นก็สามารถที่จะเป็นสาเหตุของการสลายตัวของ EPBs ที่เร็วขึ้นได้ โดยทั่วไป อัตราการรวมตัวกันใหม่จะมีมากขึ้นที่วัฏจักรสุริยะที่สูงที่สุดมากกว่าที่วัฏจักรสุริยะที่ต่ำที่สุด และมีค่ามากขึ้นที่ระดับความสูงที่ต่ำกว่ามากกว่าระดับความสูงที่สูงขึ้น

นอกจากนี้ จากการสังเกตจาก C/NOFS ที่วัฏจักรสุริยะที่ต่างกัน พบว่า EPBs ที่วัฏจักรสุริยะที่ต่ำจะยังคงอยู่เป็นเวลานาน (7 h หรือนานกว่า) แต่ที่วัฏจักรสุริยะที่สูง เวลาของการปรากฏตัวจะสั้นกว่า ~ 3 h โดยความหนาแน่นชั้นบรรยากาศและอัตราการรวมตัวกันใหม่ได้ถูกควบคุมด้วยกิจกรรมสุริยะ ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อสังเกตได้แตกต่างกัน เวลาปรากฏตัวที่สั้นของ EPBs หลังพระอาทิตย์ตกที่วัฏจักรสุริยะที่สูงได้ถูกพิจารณามากขึ้น

ว่าอาจจะเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนตัวของชั้น F ที่พุ่งลง (ลดลง) อย่างรวดเร็วในช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตก ถ้าเราคิดค่าความเร็วเฉลี่ย (ลดลงจาก 130 m/s ไปยัง 40 m/s ด้วยอัตรา ~15 m/s/h ที่วัฏจักรสุริยะที่สูงที่สุด และจาก 70 m/s ไปยัง 20 m/s ด้วยอัตรา ~6 m/s/h ที่วัฏจักรสุริยะที่ต่ำสุด) และเวลาปรากฏตัวโดยเฉลี่ย (3 h และ 7 h ที่วัฏจักรสุริยะที่สูงที่สุดและต่ำสุด ตามลำดับ) EPBs ก็สามารถลอยเลื่อนในแนวโซนัลโดยเฉลี่ย ~1250 km

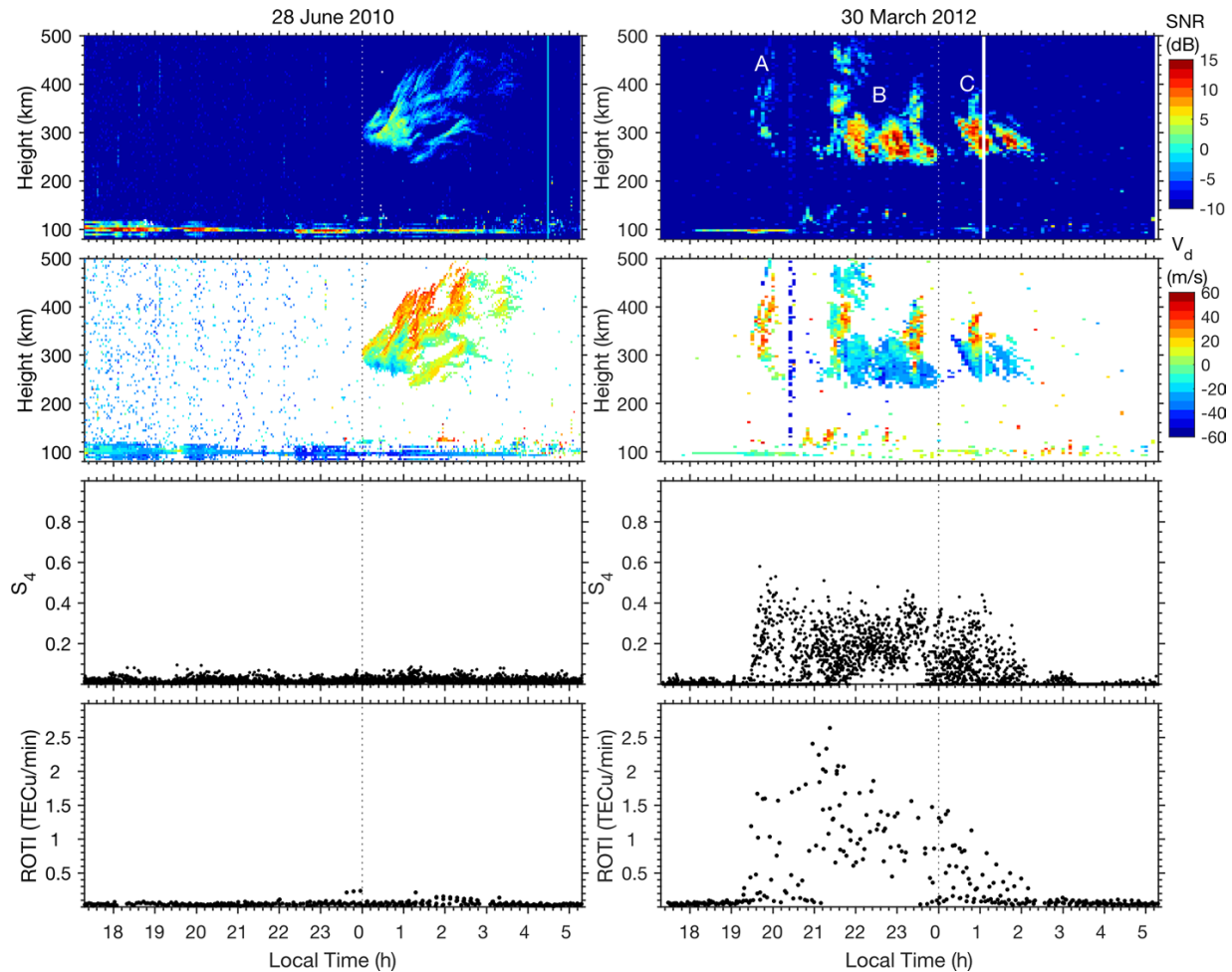


รูปที่ 3.2 ค่าเฉลี่ยของความเร็วลอยเลื่อนในแนวโซนัลที่ได้มาจากการวัดซินทิลเลชันโดยใช้เครื่องรับ GPS ที่ตั้งอยู่ที่เมืองซานย่า ละติจูดต่ำ ในช่วงปี 2011-2013 [4]

(3) การวัด EPB เพื่อตัดสินซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์

ซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์เกิดจากความผิดปกติขนาดเล็ก (ระดับที่ต่ำกว่าสเกลของเฟรสเนล) ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยผ่านทางความไม่เสถียรภาพอันดับที่สองภายในโครงสร้างที่หายไปของ EPB ที่กำลังเกิดขึ้นโดยผ่านทางกระบวนการทำซ้ำ ระดับความรุนแรงของซินทิลเลชันเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงของความแปรปรวนความหนาแน่น (Δn) ของโครงสร้างที่ผิดปกติ ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ การสังเกตซินทิลเลชันของสัญญาณ GPS ได้แสดงให้เห็นว่า “ค่าพีคของการเกิดขึ้นได้ตั้งอยู่ที่ยอด (crest) ของบริเวณ EIA ซึ่งคล้ายกับเหตุการณ์ที่สังเกตได้ที่ทวีปอเมริกาใต้” โดยมีสาเหตุมาจากความหนาแน่นพลาสมาแปรกรวดและความรุนแรงที่ผิดปกติที่บริเวณยอดของ EIA มีค่าที่สูงกว่าค่าดังกล่าวที่ละติจูดอื่นอย่างมาก การเปลี่ยนแปลงของเกรเดียนต์เชิงระยะทางตามทิศทางเหนือ-ใต้ที่ยอดของ EIA ได้ถูกแนะนำว่าเป็นต้นเหตุหลักประการหนึ่งของซินทิลเลชัน ผลจากแบบจำลองเชิงตัวเลขพบว่า โครงสร้าง EPB ขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นจากเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกไปยังละติจูดต่ำนั้นค่า Δn จะไม่คงที่แต่จะแปรผันกับค่าความหนาแน่นพลาสมาแปรกรวดตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกในระหว่างที่เกิดพายุแม่เหล็กนั้น เมื่อยอดของ EIA ตอนเย็นได้เกิดการเคลื่อนตัวมุ่งหน้าไปยังขั้วโลกไปสู่ละติจูดที่สูงขึ้น การขยายตัวที่มุ่งหน้าไปยังขั้วโลกของค่าพีคการเกิดซินทิลเลชันก็สามารถที่จะตรวจจับได้

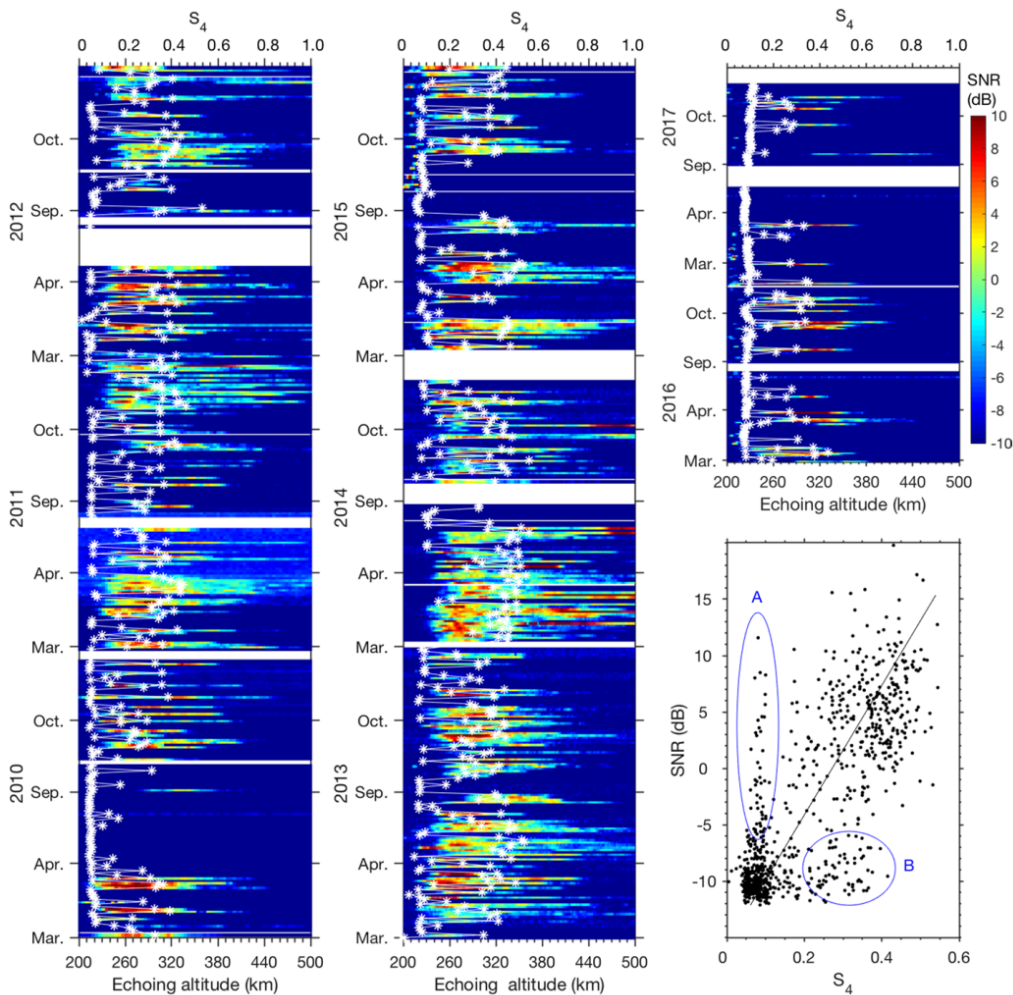
เพื่อตรวจสอบความสามารถของการวัด EPB เพื่อตัดสินการเกิดซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์เหนือตำแหน่งเดียวกันได้นั้น ค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง EPBs และ ซินทิลเลชันที่เกิดขึ้นต้องถูกระบุค่าได้เป็นลำดับแรก ดาวเทียมและข้อมูล in situ จากจรวด และข้อมูล coherent radar backscatter echo บ่อยครั้งที่แสดงค่าสหสัมพันธ์ที่ระหว่างการเกิดขึ้นของการหายไปของ EPB และ backscatter plumes ด้วยค่าพารามิเตอร์ S4 ในขณะที่ ความผิดปกติที่ตรวจจับได้ด้วยเรดาร์นั้นมีขนาดสเกล (ระดับ 2-3 เมตร) ที่มีขนาดเล็กกว่าความผิดปกติที่ทำให้เกิดซินทิลเลชันมาก (ระดับ 200-300 เมตร)



รูปที่ 3.3 กระจุกคลื่นที่สะท้อนกลับอันเนื่องมาจาก EPB ที่พบพร้อมกับซินทิลเลชันและการแปรปรวนของค่า TEC อย่างรวดเร็วที่ซานย่าในวันที่ 28 มิถุนายน 2553 และวันที่ 30 มีนาคม 2555 ตามลำดับ [4]

รูปที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบของ EPB backscatter plumes กับซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์เหนือสถานีซานย่า ในรูปบนขวาของรูปที่ 3.3 แสดง 3 กลุ่มของ EPB ที่ถูกตรวจจับได้ในวันที่ 30 มีนาคม 2555 ผลการศึกษาพบ โครงสร้าง EPB ที่เป็นคาบตามแนวลองติจูดในแผนภาพ RTI จากเรดาร์ในฤดูอิควินอกซ์เหนือสถานีซานย่า Plume ตัวที่หนึ่งในกลุ่ม 'A' เกิดขึ้นเวลา 19:30-20:00 LT ได้ถูกสร้างขึ้นทางด้านตะวันออกของซานย่า ซึ่งถูกตรวจจับได้โดยปริมเรดาร์ ส่วนอีก 2 Plumes (กลุ่ม 'B' และ 'C') ได้ถูกสร้างขึ้นทางด้านตะวันตกของซานย่า ระยะห่างตามแนวนอนของ EPBs ที่เป็นคาบโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นเป็นจำนวนเท่าของหลายร้อย km ซึ่งจะคล้ายกับความยาวคลื่นของ LSWs จากด้านขวาของรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่า จะมีความสอดคล้องเป็นอย่างดีระหว่าง EPBs กับซินทิลเลชัน (ค่า S_4 ที่มาก)/ความแปรปรวนของ TEC ที่รวดเร็ว (ค่า ROTI ที่มาก) ในช่วงเวลาทั้งหลังพระอาทิตย์ตกและหลังเที่ยงคืน ในทางตรงข้าม รูปทางซ้ายของรูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างของ EPB ที่สังเกตเห็นได้ตอนเที่ยงคืนประมาณ 00:00-04:00 LT ในวันที่ 28 มิถุนายน 2553 (วัฏจักรสุริยะที่ต่ำสุด) EPB นี้ไม่ได้ทำให้เกิดซินทิลเลชันกับความแปรปรวนของ TEC ที่รวดเร็ว การสังเกตเห็นที่พร้อมกันจากดาวเทียม C/NOFS ได้บ่งชี้ให้เห็นว่า

“EPB นี้ได้ถูกสร้างขึ้นใกล้เที่ยงคืนทั้งสองวัน ความเร็วตอบเพลอร์ของ backscatter plume echoes จะเป็นค่าบวกอย่างมีนัยสำคัญ” ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความผิดปกติของ Plume เหล่านี้กำลังจะก่อตัวขึ้น การไม่มีซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ในวันที่ 28 June 2553 นั้นอาจจะมีสาเหตุที่เป็นไปได้มาจากระดับความเข้มความผิดปกติที่ไม่มาก (ที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่นอิเล็กตรอนแปรครวรดต่ำ) ความรุนแรงสัญญาณสะท้อนของ backscatter plumes ที่เวลาประมาณ 00:00-04:00 LT ในวันที่ 28 มิถุนายน 2553 นั้นโดยส่วนใหญ่มีค่า ~ 2 dB (หรือน้อยกว่า) ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่าที่สังเกตเห็นที่เวลา 00:00-02:00 LT ในวันที่ 30 มีนาคม 2553 เป็นอย่างมาก (สูงถึง 10 dB หรือมากกว่า)



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง backscatter echo intensity และ the scintillation index S_4 [4]

จากการสังเกตพร้อมกันที่บันทึกได้จาก VHF Radar และเครื่องรับซินทิลเลชันที่สถานีชานย่าในช่วงเดือนอิกวินอกซ์ ปี 2553-2017 เราได้ศึกษาความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่างความเข้มของสัญญาณสะท้อนกระเจิงกลับจากชั้น F ที่ความสูง 200-500 km และค่า S_4 ที่มากที่สุดในตอนกลางคืนตั้งแต่เวลา 19:00-05:00 LT อย่างที่แสดงในรูปที่ 3.4 โดยทั่วไปมีสหสัมพันธ์เชิงบวกระหว่าง backscatter echo กับ scintillation intensities เมื่อ

ความผิดปกติของ EPB ครอบคลุมระยะความสูงที่มากตามระดับความเข้มของ echo ที่มาก ซินทิลเลชันที่เกิดขึ้นก็มีความรุนแรงตามไปด้วย ความผิดปกติที่เกิดขึ้นบริเวณที่แคบ ยกตัวอย่างเช่น ความผิดปกติที่ด้านล่างของชั้น F ที่ปรากฏตัวอยู่ประมาณ 200-220 km ในเดือนกันยายน 2558 (ตรงกลางของรูปบน) แม้จะมีความรุนแรงของ echo ที่มาก มันก็ไม่ได้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ รูปล่างทางด้านขวาในรูปที่ 3.4 นั้น แสดงความสัมพันธ์แบบหนึ่งต่อหนึ่งระหว่าง backscatter echo intensity และ the scintillation index S_4 นอกจากความสัมพันธ์เชิงบวกที่พบโดยทั่วไปแล้ว มันจะมี 2 กลุ่มของจุดข้อมูล (ถูกกำหนดด้วยพื้นที่วงกลม 'A' และ 'B') ที่แสดงแบบรูป (pattern) ที่ต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการมีเลเยอร์ที่บางผิดปกติหรือการผิดปกติของ EPB ที่ทำให้เกิดซินทิลเลชันที่ปรากฏด้านนอกที่ field-of-view (FOV) ของปีมเรดาร์ จากการพิจารณา FOVs ที่ต่างกันของปีมเรดาร์ (ขนาดเล็ก) และเครื่องรับซินทิลเลชัน (ขนาดใหญ่) การศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับค่าเทรซโฮลด์ที่เป็นไปได้ของระดับความเข้มของ EPB backscatter echo สำหรับการเกิดซินทิลเลชันนั้นมีค่าสำหรับงานในอนาคตที่จะนำไปสู่การทดลอง radar multi-beam steering ในระยะยาว สำหรับการทดลอง EPB โดยใช้เรดาร์ นั้น ระดับความเข้มของ backscatter echo (SNR) สามารถที่จะประมาณค่าได้จากเรดาร์และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความผิดปกติด้วยสมการต่อไปนี้

$$\text{SNR} \approx \frac{r_e^2}{32\pi^3 k_B} C_r C_m \frac{\langle \Delta N^2 \rangle}{r^2}, \quad (3.4)$$

เมื่อ r_e เป็นรัศมีของอิเล็กตรอน (2.82×10^{-15} m), k_B เป็นค่าคงที่ของ Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K), r เป็นระยะทางในแนวตั้ง, SNR เป็นอัตราส่วน signal-to-noise, C_m แทนกลุ่มของพารามิเตอร์ของรูปทรงสเปกตรัมที่ผิดปกติ (ขนาดสเกลด้านนอก, ขนาดสเกลที่แตกออก, ดัชนีสเปกตรัม 1 มิติ กับ 2 มิติ) และ C_r นำเสนอกลุ่มของพารามิเตอร์ของเรดาร์ (อัตราขยายสายอากาศและแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น, ความกว้างปีมกำลังครึ่งหนึ่ง, ความยาวพัลส์, กำลังส่งและความยาวคลื่นเรดาร์), ค่าสูญเสียการแผ่กระจายคลื่นและอุณหภูมิสัญญาณรบกวน มันชัดเจนที่ว่า ระดับความเข้มของ backscatter echo (SNR) มีค่าแปรผันตรงกับค่าความแปรปรวนความหนาแน่นอิเล็กตรอนยกกำลังสองเฉลี่ย $\langle \Delta N^2 \rangle$ ที่หารด้วยค่าระยะทางในแนวตั้งยกกำลังสองค่า SNR ที่สูงขึ้นแสดงถึงความแปรปรวนความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่แรงขึ้นและก็นำไปสู่ค่า S_4 ที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่สังเกตได้ดังในรูปที่ 3.4 ในขณะที่โครงสร้าง EPB ได้ถูกขยายไปตามเส้นสนามแม่เหล็ก การวัดค่าของ radar beam steering ในทิศทางตะวันออก-ตะวันตกก็สามารที่จะให้คำบรรยายเชิง 3 มิติของความเข้มที่ผิดปกติที่ถูกบ่งบอกคุณลักษณะได้ด้วย backscatter echo intensity และนำไปสู่การหาค่าซินทิลเลชันในบริเวณที่มากได้

3.1.3 การสังเกต EPB, ความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์และซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์

แผนภาพไอโอโนแกรมและการวัดค่า TEC ได้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการศึกษาสภาพอากาศของการเกิด EPB ตั้งแต่หลายสิบปีที่แล้ว ปรากฏการณ์ range-type spread-F (RSF) ที่ได้จากแผนภาพไอโอแกรมสามารถที่นำมาใช้เพื่อบ่งชี้คุณลักษณะของโครงสร้างความผิดปกติที่มีขนาดสเกลที่ต่างกันได้ ตั้งแต่หลายร้อย km ไปจนถึง 2-3 เมตร โดยที่ขนาดสเกลที่ผิดปกติมีค่าลดลงผ่านทางกระบวนการที่แคสแคดกัน สัญญาณสะท้อน RSF ที่ละเอียด

ต่ำและเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกนั้นสามารถที่จะเกิดขึ้นแรกเริ่มจากกลไกการกระเจิงคลื่นย้อนกลับแบบโคฮีเรนต์ (coherent) เนื่องจากความบีบที่กว้างมากของชั้นไอโอโนสเฟียร์ การตั้งฉากของ ionosonde line-of-sight กับสนามแม่เหล็กโลกสามารถที่จะพบเห็นได้ในภายในระยะลองจิจูดและความสูงที่มาก การวัดค่าจากไอโอโนแกรมด้วยสถานีวัดจำนวนมากในละติจูดต่ำและเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกในบราซิลได้แสดงให้เห็นว่า “ระดับของการแพร่กระจายออกตามระยะทางของ RSF echoes มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามความถี่ของ echo trace และความเข้มของความผิดปกติได้แสดงให้เห็นว่ามีค่าที่เพิ่มขึ้นอย่างมากจากเส้นศูนย์สูตรไปยังยอด EIA (คล้ายกับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวของซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์) นอกจากนี้ คุณสมบัติหลักของการพัฒนา RSF trace มีความสัมพันธ์กับกระบวนการของ coherent backscattering ของคลื่นวิทยุ ไอโอโนสเฟียร์ที่ถูกติดตั้งและกระจายตัวที่เส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้นั้นเป็นเครื่องมืออย่างดีที่สุดสำหรับการศึกษาการเกิดความผิดปกติ EPB ที่มีขนาดสเกลที่ต่างกัน นอกจากนี้ จากการใช้เครือข่ายเครื่องรับสัญญาณ GNSS ระดับภูมิภาคจำนวนมากในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ แผนภาพสองมิติของค่า ROTI ก็สามารถที่สร้างขึ้นมาได้เช่นกันเพื่อบ่งบอกคุณลักษณะของ EPB ที่เกิดขึ้น พบว่า ที่วัฏจักรสุริยะที่ต่ำที่สุด ค่า ROTI ที่น้อยไม่จำเป็น ที่แสดงให้เห็นถึงการไม่มี EPB เสมอไปเนื่องจากความหนาแน่นพลาสมาแปรครวดีมีค่าค่อนข้างต่ำมากก็ได้ จากแผนภาพของแผนภาพ ROTI การพัฒนาโครงสร้างทางแนวนอนของ EPBs อาจจะถูกศึกษาอย่างละเอียดได้ ไม่เหมือนกับเครื่องรับ GNSS ที่ติดตั้งกระจายทั่วไป เครื่องรับซินทิลเลชันในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีจำนวนที่จำกัด ดังแสดงด้วยสัญลักษณ์ห้าเหลี่ยมในรูปที่ 3.5 อีกเทคนิคหนึ่งที่จะได้รับแผนภาพ EPB 2 มิติคือการใช้ all-sky airglow imager (ASI) ซึ่งสามารถที่จะได้รับโครงสร้างการหายไปของ EPB สเกลใหญ่บนพื้นที่ที่กว้างประมาณ 2,000 km (พิจารณาตามเส้นผ่านศูนย์กลาง) ได้ ซึ่งจะรวมถึงการเปลี่ยนแปลงของมันด้วยความละเอียดเชิงเวลาที่ดี จากการวัดด้วยเครือข่ายเครื่องรับ GNSS และอุปกรณ์ ASIs ที่มีเป็นจำนวนมากค่าการลอยเลื่อนไซนัลและพื้นที่ครอบคลุมเชิงระยะทางของโครงสร้าง EPB และความผิดปกติทั้งในแนวลองจิจูดและละติจูดสามารถที่จะหาออกมาได้ เนื่องจากคุณลักษณะที่วางตัวอยู่ในแนวที่ขนานกับสนามแม่เหล็กของ EPBs โครงสร้างทางแนวนอนของ EPB ก็สามารถที่จะถูกแมปไปอยู่บนระนาบแนวตั้งเหนือเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกได้

3.2 ผลกระทบของซินทิลเลชันที่มีต่อการระบุพิกัดแบบ RTK ในระหว่างที่เกิดพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำ (ในแนวละติจูดที่ใกล้เคียงกับประเทศไทย)

เส้นทางการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณ GNSS ที่ผ่านพลาสมาบับเบิล (ความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์) แถบเส้นศูนย์สูตรได้ถูกประเมินผลกระทบที่มีต่อการระบุพิกัด RTK และการใช้งานได้ของ GNSS โดยอาศัยค่าข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องตรวจจับการเกิดซินทิลเลชัน ซึ่งจากการศึกษาพบว่า มีเหตุการณ์ซินทิลเลชันที่รุนแรงมากและโดดเด่นมากที่สุดของโลกก็คือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในขณะที่เส้นทางของรังสี GNSS อยู่ในแนวเดียวกับมุมอะซิมุมเท่ากับ 345 องศาเหนือเมือง Sao Jose, Brazil เหตุการณ์ดังกล่าวได้แนะนำที่ว่า “เหตุการณ์ซินทิลเลชันที่รุนแรงมากจะสัมพันธ์กับสัญญาณ GPS ที่เดินทางผ่านพลาสมาบับเบิลที่อยู่ในแนวเดียวกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก โดยภายใต้เงื่อนไขการวางตัวดังกล่าวนี้ ความยาวเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นที่ยาวขึ้นที่ผ่านพลาสมาบับเบิลนี้สามารถที่จะก่อให้เกิดซินทิลเลชันที่รุนแรงมากขึ้นและการสูญหายของการล็อคสัญญาณมากขึ้น ดังที่จะถูกบ่งชี้ให้เห็นจากค่าสถิติที่น่าเสนาของค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตและเวลาเฉลี่ยระหว่างไซเคิล

สลิป นอกจากนี้ ความผิดพลาดการระบุพิกัดที่แม่นยำที่มากก็มีความสัมพันธ์กับเหตุการณ์เหล่านี้เช่นกัน ดังที่จะถูกแสดงให้เห็นจากการทดลองเรื่อง Precise Point Positioning (PPP)

ซินทิลเลชันไอโอโนสเฟียร์มีผลทำให้ความแม่นยำในการนำทางและการระบุพิกัดของระบบดาวเทียมนำทางสากล (GNSS) ลดลง การเปลี่ยนแปลงเฟสอย่างรวดเร็วได้ถูกสังเกตว่ามีความสัมพันธ์กับปรากฏการณ์การเลื่อนดรออปเพลอร์ของสัญญาณ GPS ซึ่งอาจจะมีค่าที่เกินกว่าแบนด์วิธของวงจรถ่ายเฟสล็อกคูลูปก็ได้และส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียการล็อกเฟสได้ นอกจากนี้ การลดลงของแอมพลิจูดก็อาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่า SNR มีค่าที่ต่ำกว่าเทรชโฮลด์ของเครื่องรับ GNSS ได้ ผลกระทบเหล่านี้จะสะท้อนให้เห็นผ่านทางค่าเวลาประวิงการแพร่กระจายคลื่นและเพิ่มความผิดพลาดในการระบุพิกัด อีกทั้ง ยังเป็นสาเหตุที่ทำให้ลูบเฟสคลื่นพาห์และรหัสเทียมล็อกสัญญาณไม่ได้ด้วย ซินทิลเลชันอาจจะส่งผลต่อการระบุพิกัดอย่างรุนแรง ซึ่งส่งผลให้เกิดการขัดจังหวะการทำงานของเครื่องรับ GNSS แบบสิ้นเชิง ปรากฏการณ์ที่รุนแรงดังกล่าวเกิดขึ้นโดยปกติที่มากใกล้บริเวณเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำระหว่างละติจูดแม่เหล็กโลก $\pm 20^\circ$ มากกว่าโซนออโรราและขั้วโลกเหนือละติจูด 55° ขึ้นไป

Moraes และคณะ [1] ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลซินทิลเลชันที่ได้จากเครื่องรับ GPS ที่บันทึกได้ในช่วง 32 วันของกิจกรรมสุริยะสูงสุดที่เมือง São José dos Campos, Brazil (23.2°S , 45.9°W , dip: 19.2°S) ใกล้ EIA crest ทางซีกโลกใต้ ที่ซึ่งสถานีนี้ตั้งอยู่ในแนวละติจูดต่ำเช่นเดียวกับประเทศไทยและมีผลการศึกษาน่าสนใจ และสามารถนำมาเป็นแนวทางในการศึกษาซินทิลเลชันที่ส่งผลการระบุพิกัด RTK ที่ช่วงเวลาที่เกิดพลาสมาบับเบิลในประเทศไทยได้ โดยการวิเคราะห์ได้มีการศึกษาระดับความรุนแรงของซินทิลเลชันกับทิศทางของเส้นทางแพร่กระจายผ่านความผิดปกติของชั้นไอโอโนสเฟียร์ แล้วประเมินผลกระทบต่อการระบุพิกัดและการทำงานของ GPS ลักษณะของการกระจายตัวของพลาสมาบับเบิลที่ผิดปกติเมื่อเทียบกับโครงสร้างสนามแม่เหล็กโลกอาจช่วยอธิบายซินทิลเลชันได้ดีขึ้น จากผลการศึกษาก่อนหน้านี้ พบว่า มุมการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณ GPS เมื่อเทียบกับเส้นสนามแม่เหล็กที่มีค่าน้อยและความยาวของเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นที่มากขึ้นจะมีผลทำให้เกิดซินทิลเลชันที่รุนแรงได้และอาจจะรุนแรงมากจนส่งผลต่อการสูญเสียการล็อกเฟสก็เป็นได้

3.2.1 ความผิดปกติของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่นำไปสู่ซินทิลเลชัน

ความผิดปกติของพลาสมาอาจเกิดขึ้นในชั้นไอโอโนสเฟียร์แถบเส้นศูนย์สูตรหลังพระอาทิตย์ตกภายใต้กระบวนการพลวัตสนามไฟฟ้าไดนามิก PRE ในสนามไฟฟ้าไซนัลในตอนเย็นเป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดการยกตัวขึ้นอย่างรวดเร็วของบริเวณความไม่เท่ากันของความหนาแน่นอิเล็กตรอน (N_e) ที่ต่างกันมากที่ชั้น F ด้านล่าง ปัจจุบันนี้เป็นต้นเหตุสภาวะสำหรับกระบวนการแลกเปลี่ยน N_e ที่ไม่เท่าเทียมกันที่ถูกกระตุ้นโดยกลไก Rayleigh–Taylor (R–T) ที่ส่งผลทำให้เกิดการก่อกวนของการก่อกวน N_e ได้ การก่อกวนที่ไม่เป็นเชิงเส้นของความผิดปกติเกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของพลาสมาที่ชั้น F ด้านล่างให้เกิดการยกตัวสูงขึ้นไปยังชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านบนในรูปของหลอดพลาสมาแม่เหล็กที่เรียงตัวตามการหายไปของพลาสมา (รู้จักกันในนาม EPB) ในระหว่างที่มีการวิวัฒนาการนั้น พบว่า EPBs ได้ลอยเลื่อนข้ามผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ไปทางทิศตะวันออก ซึ่งทำให้เกิดแพทเทิร์นสนามไฟฟ้าพลวัตที่ซับซ้อนที่ภาคพื้นดินที่ทำให้เกิดการแปรปรวนแอมพลิจูดและเฟส โดยการแปรปรวนตามเวลาแบบสุ่มจะเกิดขึ้นกับทั้งแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณดาวเทียมที่ได้รับที่ภาคพื้นดิน (รู้จักกันในนามแอมพลิจูดและเฟสซินทิลเลชัน) ความผิดปกติที่มีขนาดสเกลไม่ก็ร้อยเมตรนี้มีส่วนที่ทำให้เกิดซินทิลเลชันของสัญญาณที่ข้ามผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ของดาวเทียม GNSS ภายใต้สภาวะที่เสียบ กิจกรรมซินทิลเลชันบริเวณเส้นศูนย์สูตรได้ก่อกวนขึ้นหลังพระอาทิตย์ตก

และโดยปกติจะอยู่ได้นาน 4–5 ชั่วโมงจนถึงเที่ยงคืน บางครั้งก็ขยายออกไปสักสองสามชั่วโมงหลังเที่ยงคืนก็ได้ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลและตามลองติจูดที่รุนแรงที่ขึ้นอยู่กับรูปแบบที่สอดคล้องกันในการวางเรียงตัวระหว่างจุดสิ้นสุดพระอาทิตย์ตกและเมอร์เดียนแม่เหล็ก รวมทั้งขึ้นอยู่กับปรากฏตัวของ seeding sources ในภูมิภาคบราซิลหรือแถบละติจูดแนวเดียวกับประเทศไทยนั้น ชินทิลเลชันมักจะเกิดขึ้นตั้งแต่เดือนกันยายนไปจนถึงเดือนมีนาคม และมีค่าสูงสุดประมาณเดือนธันวาคม นอกจากนี้ ความแปรปรวนในระยะสั้นอาจเกิดขึ้นเนื่องจากคลื่นในชั้นบรรยากาศที่เดินทางพุ่งขึ้นและการเปลี่ยนแปลงในกิจกรรมสุริยะและแม่เหล็กได้

EPBs มีการขยายตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตกตั้งแต่ความยาวไม่กี่สิบลเมตรไปจนถึงหลายร้อยกิโลเมตร และมักเกิดขึ้นต่อเนื่องด้วยระยะห่างในแนวซีก 200–300 km การหายไปของ TEC ที่เกี่ยวข้องกับ EPBs ขยายตัวจากบริเวณ EIA trough ตามแนวดิปละติจูด ไปจนถึงบริเวณ EIA crest ที่มีค่า TEC แปรครราวสูงกว่่าดังในรูปที่ 3.5 มี 2 สถานการณ์ที่นำไปสู่ชินทิลเลชันอย่างรุนแรง **สถานการณ์แรก**คือความหนาแน่นของพลาสมาแปรครราวที่มีขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นที่บริเวณ EIA crest ซึ่งแสดงถึงพลาสมาบับเบิลที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรง **สถานการณ์ที่ 2** คือ มุมที่ทำกับเซกเมนต์ของเส้นทางการแพร่กระจายสัญญาณ GPS อันใดที่ใกล้เข้ามาที่กำลังจะถูกวางตัวขนานไปกับโครงสร้างพลาสมาบับเบิลและสนามแม่เหล็กโลก เนื่องจากชินทิลเลชันเป็นผลมาจากผลกระทบที่อินทิเกรตไปตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น ยิ่งเซกเมนต์การแพร่กระจายคลื่นที่วางตัวขนานกับสนามมากขึ้นเท่าใด ระดับชินทิลเลชันก็จะยิ่งรุนแรงมากขึ้นเท่านั้น กล่าวอีกนัยหนึ่ง มุมการลดลงและความโน้มเอียงทางแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับเส้นทางการกระจายสัญญาณ GPS ของการกระจายตัวของจุด IPP เป็นปัจจัยควบคุมของการกระจายชินทิลเลชันที่บริเวณโดยรอบของเครื่องรับด้วย

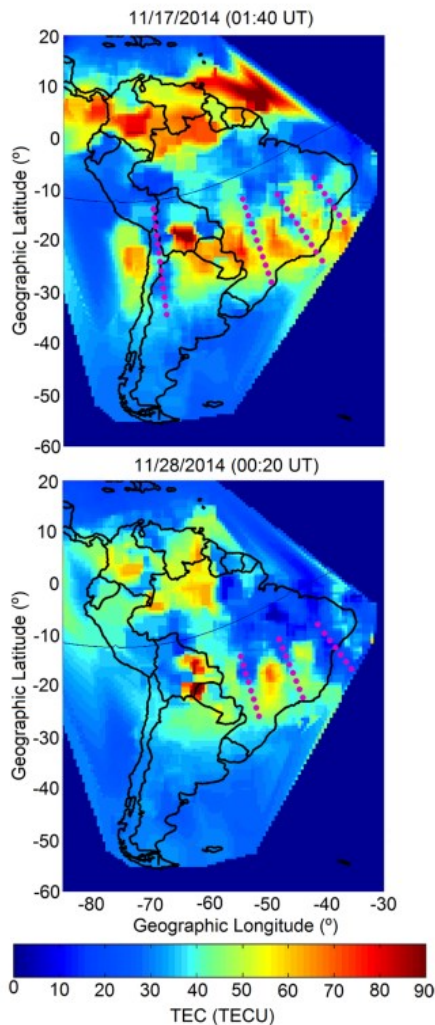
3.2.2 การวัดค่าชินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ การกระจายตัวและการวางตัวตามระยะทาง

ข้อมูลชินทิลเลชันที่ใช้ในการศึกษาคือค่าข้อมูลที่วัดได้จาก Septentrio PolaRxS ซึ่งเป็นของเครือข่าย CIGALA/CALIBRA ที่ตั้งอยู่ที่ São José dos Campos (SJC), Brazil โดยจะพิจารณาวันที่เกิด equatorial spread-F จำนวน 2 ช่วง คือ 15–30 พฤศจิกายน 2557 และ 4–18 กุมภาพันธ์ 2558 โดยจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์และค่า F10.7 solar flux โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 169 และ 133 s.f.u. ตามลำดับ โดย 1 s.f.u. = 10^{-22} W/m²/Hz และพิจารณาดาวเทียม GPS ดาวเทียมที่มีมุมสูงกว่า 20° โดยจะใช้ค่าข้อมูลแอมพลิจูดชินทิลเลชันของสัญญาณ GPS L1 ที่วัดได้ตั้งแต่ 19:00 LT ถึง 01:00 LT ระยะเวลา 32 คืน ประมาณ 179 h และพิจารณาการส่งสัญญาณจากดาวเทียมทั้งหมด ความเข้มของแอมพลิจูดชินทิลเลชัน (S_4 index) ที่นิยามว่าเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ถูกลอการมัลไลซ์ของความเข้มสัญญาณที่ได้รับ ดังแสดงใน (3.5)

$$S_4 = \sqrt{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2} / \langle I \rangle, \quad (3.5)$$

แอมพลิจูดชินทิลเลชันนี้เป็นพารามิเตอร์พื้นฐานของการศึกษานี้ ในพจน์ที่รู้จักกันดีนี้ $I = |R|^2$ คือความเข้มสัญญาณที่ได้รับ, R คือแอมพลิจูด และ $\langle \rangle$ คือการหาค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลทุก ๆ 1 นาที ตัวรับจะทำการบันทึกค่า S_4 index ที่ 50 Hz สำหรับดาวเทียมทั้งหมดที่ติดตามได้ ซึ่งเราจะได้ดัชนี S_4 ทุก ๆ 60 วินาที โดยเราจะพิจารณา $S_4 > 0.3$ เท่านั้นที่ถือว่าเป็นกรณีชินทิลเลชัน ซึ่งเป็นขนาดสเกลโซนเฟรสเนลครั้งแรกของความผิดปกติที่

field-aligned ที่มีส่วนที่ทำให้เกิดซินทิลเลชันและจมอยู่ในพลาสมาบับเบิลที่มีสเกลใหญ่ประมาณ 400 เมตรที่ตรวจจับได้ด้วยความถี่ GPS L1

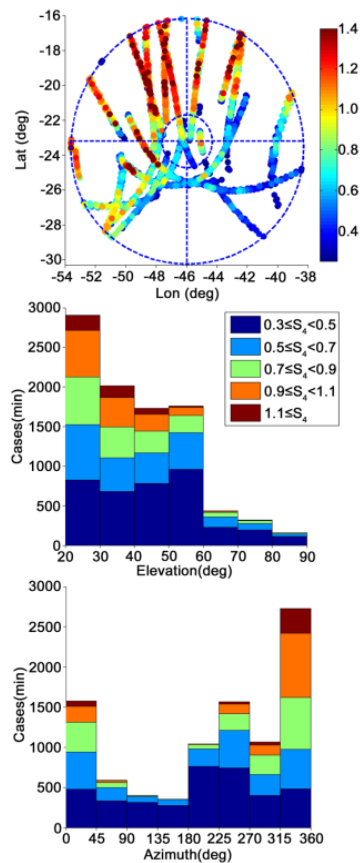


รูปที่ 3.5 ตัวอย่างภาพ TEC เหนือบราซิลที่แสดงพลาสมาบับเบิลที่ถูกวางตัวในแนวเหนือ-ใต้ของสนามแม่เหล็ก (จุดสีชมพู) ที่มีปลายขยายออกไปหลายองศาไปยังละติจูดแม่เหล็กโลกที่ต่ำกว่าและบริเวณ EIA crest ที่มีค่า TEC แบริค กราวด์สูงกว่าได้แสดงไว้ด้วยสีแดงและสีน้ำตาล [6]

รูปที่ 3.6 แสดงการกระจายตัวของ azimuth และ elevation ของแอมพลิจูดซินทิลเลชันที่สังเกตเห็นที่สถานี SJC ในระหว่างการสังเกต 2 ช่วงเวลา พบว่า ซินทิลเลชันที่มีค่า $S_4 > 0.3$ มีจำนวนทั้งหมด 10,743 กรณี ได้ถูกพล็อตในรูปแบบนี้ ประเด็นที่สำคัญที่พบคือ “ซินทิลเลชันที่รุนแรงที่มีค่า $S_4 > 0.9$ เกิดขึ้นที่เซกเตอร์ด้านเหนือและซินทิลเลชันมีค่าที่ขึ้นอยู่ apex altitude (AA) ของพลาสมาบับเบิล (EPB) อย่างมาก โดย AA จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 430-560 km ที่สอดคล้องกับทิศทางการวางตัวในเซกเตอร์ด้านเหนือ ทั้งนี้ EPB อาจจะขยายไปถึงบริเวณทางด้านใต้ของเครื่องรับได้ด้วยเช่นกัน

แผนภูมิแท่งตรงกลางและด้านล่างในรูปที่ 3.6 แทนการกระจายตัวของ azimuth และ elevation ของค่า S_4 ที่เปลี่ยนแปลงจาก $0.3 \leq S_4 < 0.5$ ไปถึง $S_4 > 1.1$ สังเกตว่า 80% ของกรณีที่มี $S_4 \geq 1.1$ มีส่วนที่สัมพันธ์กับมุมยกที่ต่ำกว่า 41° สำหรับ $0.9 \leq S_4 < 1.1$ และ $0.7 \leq S_4 < 0.9$ ที่สังเกตได้ที่มุมยกต่ำกว่า 41° นั้นพบว่ามีค่าที่พบเท่ากับ 75% และ 73% ตามลำดับ แผนภาพอะซิเมจเป็นข้อมูลยืนยันในเชิงปริมาณที่ชัดเจนว่าค่า S_4 ที่สูงพบได้ในช่วงอะซิ

มุม 315° and และ 360° สำหรับเซกเตอร์อะซิมุมนี้ $S_4 \geq 1.1$, $0.9 \leq S_4 < 1.1$ และ $0.7 \leq S_4 < 0.9$ จะมีโอกาสที่พบได้ที่ระดับ 68%, 62% และ 40% ของข้อมูลที่สังเกตได้ ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 เหตุการณ์แอมพลิจูดซินทิลเลชั่น GPS L1 พล็อตที่เกี่ยวข้อง ค่า IPP (แผงด้านบน) วงกลมภายนอกและวงในกำหนดความสูง ของ 20° และ 60° แผงกลางและด้านล่างแสดงการกระจายตัว S_4 เป็นฟังก์ชันของความสูงและราบ ตามลำดับ [6]

งานวิจัยที่ผ่านมามีการนำเสนอค่าความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาด P_e สำหรับสัญญาณ binary DPSK และเวลาเฉลี่ยระหว่างไซเคิลสลิป T_s มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดด้วยสมการ $T_s \approx T_b/P_e$ โดย $T_b = 0.02$ s คือระยะเวลาส่ง 1 บิตของสัญญาณ GPS L1 โดยอาศัยหลักการนี้และสมมติว่าช่องสัญญาณมีการจางหายแบบ Ricean จึงได้มีการนำเสนอแบบจำลองในการประมาณหาค่าอัตราไซเคิลสลิปที่เป็นฟังก์ชันของความเข้มของซินทิลเลชั่น ความเร็วในการแกว่งตัวและอัตราส่วนความหนาแน่นกำลังคลื่นพาร์ตต่อกำลังสัญญาณรบกวน (C/N_0) นอกจากนี้มีการใช้แบบจำลอง α - μ เพื่อให้คำอธิบายที่ยืดหยุ่นและสมจริงเกี่ยวกับแอมพลิจูดซินทิลเลชั่น ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น α - μ (pdf) ของเอนวิโลปแอมพลิจูด R ของสัญญาณที่ได้รับหาค่าได้จาก (3.6)

$$f_R(r) = \frac{\alpha \mu^\mu}{\Gamma(\mu) \tilde{r}} (r/\tilde{r})^{\alpha\mu-1} \exp[-\mu(r/\tilde{r})^\alpha], \quad (3.6)$$

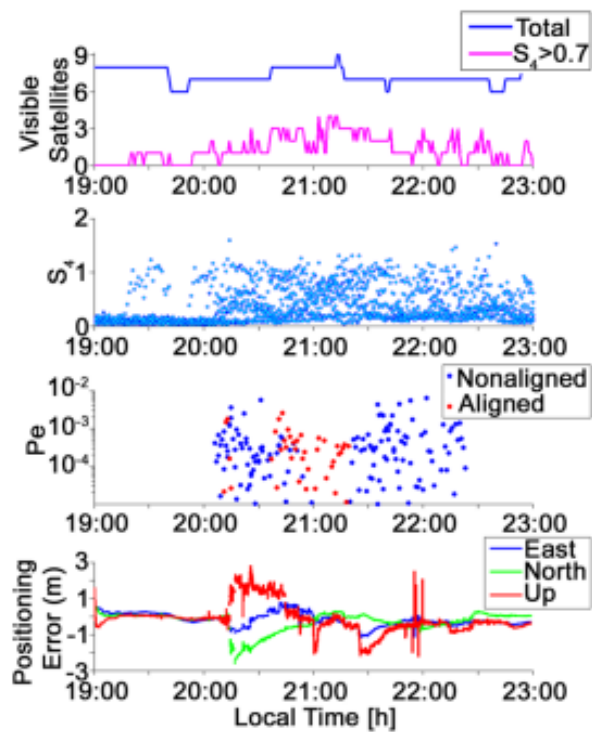
โดยที่ $\alpha > 0$ เป็นพารามิเตอร์การจางหายที่มีค่าใดๆ, $\tilde{r} = [E(R^\alpha)]^{1/\alpha}$ และ $\mu > 0$ คือค่าพิกนของความแปรปรวนที่ถุกนอร์มัลไลซ์ของค่า R^α นั่นคือ $\mu = E^2(R^\alpha) / \{E(R^{2\alpha}) - E^2(R^\alpha)\}$ นอกจากนี้ $\Gamma(z)$ คือฟังก์ชันแกมมาของอาร์กิวเมนต์ z ผลการพล็อตค่าความสัมพันธ์ระหว่าง T_s กับ P_e ที่ค่า C/N_0 (dB-Hz), \tilde{r} , α และ μ ต่าง ๆ กันสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ใน [6] ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ค่า S_4 เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง ± 0.025 (เช่น 0.8 ± 0.025) รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาชั้นเบสที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

ไปจนถึง 1.2 ± 0.025) พบว่า (1) โดยเฉลี่ยแล้ว T_s ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า S_4 ; และ (2) สำหรับค่าคงที่ของ S_4 ที่กำหนด การเพิ่มขึ้นของ α แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของการจางหายและการลดลงของ T_s การกระจายตัวที่สังเกตเห็นในค่า T_s เมื่อค่า S_4 และ α เป็นค่าคงที่นั้นเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่า C/N_0 ควรจำไว้ว่า Septentrio PolaRxS GPS monitor นั้นยังไม่ได้กำหนดการเซตค่าที่เป็นมาตรฐาน มันจึงถูกทำให้เหมาะสมสำหรับการติดตามในช่วงเวลาที่เกิดขึ้นที่เลขนั้น

3.2.3 การใช้งานได้และการระบุพิกัดในระหว่างที่สัญญาณ GPS ผ่าน EPB

จากการศึกษา พบว่า สัญญาณ GPS ที่แพร่กระจายคลื่นไปตามเส้นสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มมากขึ้นที่จะเดินทางได้ไกลขึ้นในสถานการณ์ที่เกิด EPB ดังนั้น alignment geometry จึงมีโอกาสมากขึ้นที่เป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดการขัดจังหวะการทำงานของเครื่องรับ GPS สำหรับการทดสอบการระบุพิกัดนั้น เราจะซอฟต์แวร์ RT-PPP ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) ที่สามารถดาวน์โหลดได้ที่ <http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/ppp/> โดย 3 แถวบนของรูปที่ 3.7 แสดงจำนวนดาวเทียมทั้งหมดที่ใช้ในการระบุพิกัดแบบ PPP, ค่าดัชนี S_4 ของดาวเทียมทุกดวง และค่า $P_e > 10^{-6}$ นั่นคือ $T_s < 20,000s$ ตามลำดับ โดยค่า P_e นี้จะส่งผลกระทบต่อ PRN18 เท่านั้นที่เริ่มต้นเวลาประมาณ 20:06-21:00 LT ส่วนแถวที่ 4 ของรูปที่ 37 แสดงความผิดพลาดในการระบุพิกัดของ PPP ในทิศเหนือ ตะวันออก และแนวตั้ง จากรูปที่ 37 พบว่า ซินทิลเลชันที่ค่า $S_4 > 0.7$ เริ่มเวลา 19:40-21:00 LT ในขณะที่ค่าตอบ PPP ให้พิกัดที่ผิดพลาดสูงขึ้น (บางครั้งผิดพลาดเป็นเมตร) ตอน 20:35-20:47 LT ซึ่งเหตุการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นพร้อมกับช่วงเวลาที่เส้นทางการแพร่กระจายคลื่นของ PRN18 พาดผ่าน EPB และตามที่เราสังเกตเห็นได้จากค่าของ P_e เช่นกัน นี่เป็นหลักฐานว่า P_e เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ได้จริงในการวินิจฉัยความยากลำบากในการประเมินสมรรถนะของวิธี PPP และ/หรือ RTK เมื่อตรวจพบค่าการระบุพิกัดที่ผิดพลาดแล้ว ระบบจะสามารถปรับแก้ให้ค่า AR เป็นจำนวนเต็มและ/หรือฟื้นตัวจากสถานะ loss of lock ได้เร็วขึ้น เนื่องจากรู้สาเหตุของปัญหาความผิดพลาดในการระบุพิกัด

ผลจากการศึกษาในครั้งนี้สรุปได้ว่า ความรุนแรงของซินทิลเลชันเพิ่มขึ้นได้เมื่อเส้นทางแพร่กระจายสัญญาณมีแนวโน้มที่จะพาดผ่านหรือวางตัวอยู่ในแนวที่ขนานใกล้กับ EPB ซึ่งเป็นที่ทราบกันว่าอาจจะถูกยึดออกไปตามหลอด (tube) พลักซ์แม่เหล็กโลก การเพิ่มขึ้นของซินทิลเลชันดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่มุมอะซิมุมประมาณ 345° ซึ่งเกือบจะวางตัวขนานไปกับเมริเดียนแม่เหล็กเหนือภูมิภาคนี้ ซึ่งมี large westward inclination ($21.4^\circ W$) ยิ่งไปกว่านั้น การสูญเสียการล็อกเฟสมีแนวโน้มที่จะเกิดมากขึ้นในโครงสร้างดังกล่าวด้วย กรณีที่ซินทิลเลชันมีความรุนแรงมากขึ้นด้วยค่า S_4 ที่สูงในขณะที่สัญญาณ GPS ผ่าน EPB จะมีผลทำให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ดังนี้ 1) ค่าเวลาเฉลี่ยที่เกิดไซเคิลสลิป (T_s) มีค่าน้อย ซึ่งนำไปสู่การสูญเสียการล็อกเฟส 2) การระบุพิกัดด้วยวิธี PPP นั้นเกิดความผิดพลาดมากขึ้น สำหรับค่า P_e ที่สูง รวมถึงแม้ว่าจะไม่ alignment condition เกิดขึ้นก็ตาม ตัวอย่างอันหนึ่งที่น่าสนใจและเกิดขึ้นก็คือ ความผิดพลาดในการระบุพิกัดมีค่าที่สูงขึ้นในการตอบสนองต่อการส่งสัญญาณของดาวเทียม 2 ดวงที่ประสบปัญหาจากการสูญเสียการล็อกเฟสพร้อมกันในเวลาสั้น ๆ เหตุการณ์เหล่านี้ส่งผลกระทบต่อการใช้งานได้และสมรรถนะการระบุพิกัดของสัญญาณ GPS



รูปที่ 3.7 จำนวนดาวเทียมทั้งหมดที่ใช้ใน PPP, ค่าดัชนี S_4 ของดาวเทียมทุกดวง, ค่า $P_e > 10^{-6}$ และความผิดพลาดจากการระบุพิกัดของวิธี PPP ในทิศเหนือ ตะวันออก และแนวตั้ง ในวันที่ 17 พฤศจิกายน 2557 (DOY 321) [6]

ผลกระทบของพลาสมาบับเบิลที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ในประเทศต่าง ๆ นั้นมีประเด็นและส่งผลทำให้เกิดความผิดพลาดในการระบุพิกัดแบบ RTK เราจะแบ่งหัวข้อการศึกษาออกเป็น 4 หัวข้อหลัก ๆ เพื่อให้เห็นแนวทางในการรับมือและป้องกันการเกิด range errors ในการระบุพิกัดแบบ RTK ให้แก่เทคโนโลยี 5G, อากาศยานไร้คนขับ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ในประเทศไทย ในโครงการศึกษาฯ นี้ได้ทำการรวบรวมภาพสภาพอวกาศที่ตรวจจับและบันทึกได้ด้วยอุปกรณ์ OI 630.0 nm all-sky airglow imagers (ASIs) ที่ติดตั้งและทำการวัดค่าอยู่ที่ในต่างประเทศจำนวน 3 สถานี และจังหวัดชุมพร ประเทศไทย อาทิ

1. เมืองโกโตตะบัง ประเทศอินโดนีเซีย
2. เกาะไหหนาน ประเทศจีน (ซึ่งอยู่แนวละติจูดใกล้เคียงกับจังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย)
3. เกาะฮิงงากิ ประเทศญี่ปุ่น
4. สถานีเรดาร์พระจอมเกล้าชุมพร ประเทศไทย (เริ่มใช้งานเดือนมกราคม 2563 เป็นต้นมา)

เหตุผลของการเลือกศึกษาทั้ง 3 ประเทศ คือ อินโดนีเซีย ญี่ปุ่น และ จีน มีดังนี้

1. อุปกรณ์ที่ติดตั้งที่ 3 ประเทศนี้มีหน่วยงานที่รับผิดชอบเพียงหน่วยงานเดียวคือ Institute for Space-Earth Environmental Research (ISEE), Nagoya University, Japan จึงทำให้นักวิจัยและหน่วยงานต่าง ๆ ในประเทศไทยสามารถติดต่อขอภาพตรวจจับสภาพอวกาศและพลาสมาบับเบิล (EPB) ได้ง่าย ซึ่งที่ผ่านมา คณะผู้วิจัยก็ทำงานวิจัยร่วมกับหน่วยงาน ISEE อยู่แล้ว จึงติดต่อและประสานงานได้

2. โดยส่วนใหญ่ EPB จะเกิดขึ้นที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก (ยกตัวอย่างเช่น จังหวัดชุมพร, ประเทศไทย) ซึ่งจะยกตัวขึ้นแนวตั้งแล้วลอยเลื่อนขนานไปกับเส้นสนามแม่เหล็กโลกที่มุ่งหน้าไปสู่ละติจูดที่สูงขึ้นทั้งทางด้านซีกโลกเหนือ (ประเทศจีนและญี่ปุ่น) และซีกโลกใต้ (ประเทศอินโดนีเซีย) โดย 3 ประเทศ

เหล่านี้จัดว่าอยู่ในบริเวณเส้นลองจิจูดที่ใกล้กันห่างกันเพียง 24.8 องศาเท่านั้น (วัดจากจังหวัดชุมพรประเทศไทย ถึง เกาะฮิงาจิ ประเทศญี่ปุ่น) ซึ่งจะทำให้สามารถตรวจจับตำแหน่งที่เกิด EPB แล้วทราบทิศทางและความเร็วในการเคลื่อนตัวของ EPB จากการตรวจจับทั้ง 3 ประเทศนี้ได้เป็นอย่างดี แล้วนำไปสู่การแจ้งเตือนผลกระทบที่เกิดขึ้นกับการระบุพิกัดแบบเรียลไทม์ RTK แล้วสามารถเตรียมการรับมือและสามารถปรับแก้ค่าความผิดพลาดในการระบุพิกัด RTK ของเทคโนโลยี 5G, UAV ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.3 ผลกระทบของพลาสมาบับเบิลที่ทำให้เกิดซินทิลเลชันที่ละติจูดต่ำเหนือประเทศอินโดนีเซีย

ความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์โนสเฟียร์ที่เกี่ยวข้องกับพลาสมาบับเบิลนั้นเป็นการเกิดขึ้นโดยปกติเหนือพื้นที่เส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำ พลาสมาบับเบิลมักถูกทำให้เกิดขึ้นที่ด้านล่างของชั้น F ที่เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกหลังจากที่พระอาทิตย์ตกดินโดยผ่านกลไกความไม่สมดุลแบบเรย์ลีเทย์เลอร์ (Rayleigh-Taylor instability: RTI) การศึกษาก่อนหน้านี้ได้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะเชิงโครงสร้างของพลาสมาบับเบิลและพบว่า พลาสมาบับเบิลขยายจากเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กไปสู่หรือเหนือกว่ายอดของบริเวณที่มีการแตกตัวเป็นไอออนที่ไม่เท่ากันบริเวณเส้นศูนย์สูตร (EIA) ภาพตัดขวางในทิศตะวันออก-ตะวันตกได้ขยายหลายร้อยกิโลเมตร อยู่ในแนวเฉียงไปทางทิศตะวันตกครอบคลุมทั้งสองซีกโลกด้วยละติจูดที่เพิ่มขึ้น มีคุณลักษณะเป็นแบบไบเฟอร์เคชัน (bifurcation) กำลังลอยเลื่อนไปทางทิศตะวันออก และมีความเกี่ยวข้องกับการหายไปของ TEC นักวิจัยก่อนหน้านี้ได้ทำการศึกษาร่วมอยู่กับกิจกรรมวัฏจักร ลองจิจูดและกิจกรรมแม่เหล็กโลกของพลาสมาบับเบิล อีกทั้ง การเกิดขึ้นของพลาสมาบับเบิลตามฤดูกาลและลองจิจูดของพลาสมาบับเบิลมักจะเกิดขึ้นบ่อยที่สุดเมื่อจุดสิ้นสุด (เวลาตกดิน) ของดวงอาทิตย์อยู่ในแนวที่ใกล้มากที่สุดกับเส้นเมอริเดียนแม่เหล็กโลก และสิ่งที่สำคัญมากที่สุดประเด็นหนึ่งก็คือ การเกิดขึ้นของพลาสมาบับเบิลมีความสัมพันธ์กับกิจกรรมสุริยะต่ำไปจนถึงสูงในบริเวณเส้นศูนย์สูตร ในช่วงเดือนอควินอกซ์ในซีกเตอร์เอเชีย และ ขนาดของความผิดปกติภายในพลาสมาบับเบิลมีขนาดที่แตกต่างกันไป ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้สัญญาณวิทยุเกิดการซินทิลเลชันจากย่านความถี่ VHF ไปจนถึงย่านความถี่ C และความผิดปกติการหายไปของพลาสมามีความสัมพันธ์กับพลาสมาบับเบิล โดยขนาดสเกลเชิงระยะทางที่ต่างกันของความผิดปกติระดับเมตรส่งผลทำให้เกิดการสะท้อนกลับย่านของสัญญาณความถี่ VHF และความผิดปกติระดับหลายร้อยเมตรไปจนถึงหลายกิโลเมตรส่งผลทำให้เกิดซินทิลเลชันกับสัญญาณย่านความถี่ UHF นอกจากนี้ ยังพบอีกว่า การเกิดขึ้นพร้อมกันของพลาสมาบับเบิลระดับหลายร้อยเมตรไปจนถึงหลายกิโลเมตรในพลาสมาที่เกิดขึ้นและการลอยเลื่อนของพลาสมาบับเบิลระดับหลายร้อยเมตรที่ตำแหน่งคู่สังยุคมีขนาดเท่ากัน ในกรณีของ GPS ความผิดปกติของขนาดประมาณ 400 เมตร ที่ระดับความสูงประมาณ 300 กิโลเมตรนั้นเป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดซินทิลเลชันในสัญญาณย่านความถี่ L1 (1.57542 GHz) สิ่งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากขนาดสเกลของความผิดปกติที่ความสูงค่าหนึ่งสอดคล้องกับบริเวณเฟสเนลอันดับที่ 1 โดยซินทิลเลชันที่พบบ่อยมากที่สุดและรุนแรงนั้นจะสัมพันธ์กับพลาสมาบับเบิลในช่วงเวลาวัฏจักรสุริยะที่มากที่สุดและการลดลงอย่างรวดเร็วทั้งความถี่และความเข้มของซินทิลเลชันในช่วงเวลาวัฏจักรสุริยะที่ต่ำที่สุด อีกทั้งสัญญาณวิทยุสะท้อนกลับย่าน VHF เกิดขึ้นในช่วงเวลาหลังเที่ยงคืน และมีความเกี่ยวข้องของคุณลักษณะที่แตกต่างกันของความผิดปกติของพลาสมาดังกล่าวด้วย ดังนั้น คำถามมากมายที่เกี่ยวข้องกับความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์โนสเฟียร์บริเวณละติจูดต่ำยังคงหาคำตอบไม่ได้

นอกเหนือจากความสนใจทางวิทยาศาสตร์สำหรับฟิสิกส์ในชั้นไอโอโนสเฟียร์โนสเฟียร์ งานวิจัยทางด้านความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์โนสเฟียร์ยังคงที่มีความสำคัญที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์เหล่านี้สามารถที่

ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของความเข้มสัญญาณของการติดต่อข้ามชั้นไอโอโนสเฟียร์โนสเฟียร์ ได้แก่ การนำร่องที่อาศัยระบบดาวเทียมนำร่องสากล (GNSSs) และระบบระบุตำแหน่งสากล (GPS) ซินทิลเลชั่นในชั้นไอโอโนสเฟียร์โนสเฟียร์ที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์โนสเฟียร์ยังคงเป็นปัญหาหลักหัวข้อหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของสภาพอวกาศที่มีต่อระบบการสื่อสารข้ามชั้นไอโอโนสเฟียร์โนสเฟียร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำ ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่าการทำนายซินทิลเลชั่นในบริเวณเส้นศูนย์สูตรยังคงเป็นเรื่องที่ยากและยังเป็นประเด็นที่น่าสนใจ เนื่องจากซินทิลเลชั่นเชิงขนาดที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอนเนื่องจากความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์โนสเฟียร์นั้น อีกทั้ง เครื่องรับ GPS อาจจะตัดขาดการถือการติดตามคลื่นพาห์ภายใต้การจางหายที่รุนแรงอันเนื่องมาจากซินทิลเลชั่นในชั้นไอโอโนสเฟียร์โนสเฟียร์ที่รุนแรงและช่องสัญญาณสื่อสารที่จางหายไปไม่สามารถที่ถูกใช้งานสำหรับการคำนวณเพื่อระบุตำแหน่งได้ จนกว่าการถือสัญญาณจะถูกสร้างขึ้นใหม่อีกครั้ง

การเกิดขึ้นของความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์โนสเฟียร์ที่ละติจูดต่ำแสดงความสามารถในการเปลี่ยนแปลงระดับภูมิภาคได้ ยกตัวอย่างเช่น มีความแตกต่างในเชิงลองติจูดที่มากในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล โดยขนาดของความผิดปกติมีแนวโน้มที่ใหญ่ขึ้นในบริเวณความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่สูง ยกตัวอย่างเช่น EIA ผลที่ตามมาคือ ซินทิลเลชั่นสัญญาณจีพีเอสจะมีค่าที่สูงขึ้นรอบ ๆ บริเวณนี้ อิเล็กโทรเจตแถบเส้นศูนย์สูตร (equatorial electrojet หรือ EEJ) แสดงการเปลี่ยนแปลงตามลองติจูดที่รุนแรง เนื่องจากอิเล็กโทรเจตในแถบเส้นศูนย์สูตรถูกกระตุ้นโดยสนามไฟฟ้าไดนาโม การเปลี่ยนแปลงระดับภูมิภาคใน EIA และในการเกิดขึ้นของซินทิลเลชั่นก็น่าจะเกิดขึ้นได้ การบ่งบอกคุณลักษณะซินทิลเลชั่นระดับภูมิภาคมีประโยชน์มากสำหรับระบบนำร่องที่อาศัย GNSS เราค้นหาเพื่อที่จะสร้างแบบจำลองซินทิลเลชั่นในชั้นไอโอโนสเฟียร์โนสเฟียร์ระดับภูมิภาคเหนือเซกเตอร์อินโดนีเซีย ก่อนหน้านี้ ได้มีการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลซินทิลเลชั่นเหนือเมืองบันดุง ประเทศอินโดนีเซีย ในปี 2006 พบว่า โดยทั่วไปมันจะเกิดขึ้นที่ทิศเหนือโดยส่วนใหญ่ของเมืองบันดุง อย่างไรก็ตาม ในขณะที่การวิเคราะห์ได้ถูกทำขึ้นจากข้อมูลที่ได้รับเพียง 1 ปีจากจุดเดียวเท่านั้นและในช่วงเวลาวัฏจักรสุริยะที่ต่ำ ดังนั้น ผลการศึกษาที่ยังไม่เพียงพอที่จะบอกได้ว่า “ซินทิลเลชั่นเนื่องจากพลาสมาบับเบิลจะขึ้นอยู่กับฤดูกาลหรือไม่”

เมื่อไม่นานมานี้ Abadi และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาซินทิลเลชั่นชั้นไอโอโนสเฟียร์ละติจูดต่ำในประเทศอินโดนีเซียโดยใช้เครื่องรับ GPS ที่ติดตั้งไว้ที่เมืองบันดุง - Bandung (107.6°E, 6.9°S; ดิปละติจูด 17.5°S) และเมืองพอนเทียนัค - Pontianak (109.3°E, 0.02°S; ดิปละติจูด 8.9°S) การศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายที่จะวิเคราะห์แผนภาพสภาพอวกาศและการเกิดซินทิลเลชั่นชั้นไอโอโนสเฟียร์อย่างมีทิศทาง ซึ่งมีประโยชน์ไม่เพียงแต่สำหรับการบ่งชี้ความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์และพลาสมาบับเบิล ยังรวมถึงการนำใช้งานเพื่อการระบุพิกัดแบบ RTK กับการนำทางที่อาศัยเครื่องรับ GNSS อีกด้วย โดยใช้ค่าซินทิลเลชั่นแอมพลิจูด (S4 index) ของเครื่องตรวจจับซินทิลเลชั่นของสัญญาณ GPS (GSV4004B) ในช่วงปี 2009-2011 ซึ่งมีจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายปีเท่ากับ 3.1, 6.5 และ 55.9 ตามลำดับ จากการศึกษาโดยสรุป พบว่า การเกิดซินทิลเลชั่นในช่วงหลังพระอาทิตย์ตก (เวลา 18:00–01:00 LT) ในช่วงเดือนอควินอกซ์ (ฤดูพลาสมาบับเบิล) ที่ทั้ง 2 สถานีมีสาเหตุเกิดขึ้นมาจากพลาสมาบับเบิล; (2) การใช้การวิเคราะห์การมีทิศทางของ 2 สถานี โดยเราพบว่าการกระจายของการเกิดซินทิลเลชั่นจะพบมากโดยทั่วไประหว่าง 2 สถานี ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งเฉลี่ยของ EIA crest; (3) การเพิ่มขึ้นของการเกิดซินทิลเลชั่นของทั้ง 2 สถานีในทิศทาง field-aligned ได้ถูกรายงานเป็นครั้งแรกในงานวิจัยนี้ท่ามกลางผลการศึกษาที่ได้จากสถานีภาคพื้นดินในบริเวณละติจูดต่ำ; (4) การกระจายของการเกิดซินทิลเลชั่นที่เมืองพอนเทียนัคจะพบมากในท้องฟ้า

ทางใต้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางภาคตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งมีแนวโน้มอย่างมากที่จะเกี่ยวข้องกับพลาสมาบับเบิลที่วางตัวเอียงมุ่งหน้าทางตะวันตกตามละติจูดที่เพิ่มขึ้น; และ (5) การเกิดซินทิลเลชันในตอนหลังเที่ยงคืนในฤดูกาลที่ไม่ใช่พลาสมาบับเบิลเป็นปรากฏการณ์ที่น่าสนใจมากที่สุดที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 สถานี (นั่นคือ post-midnight scintillations) ได้ถูกพบที่บับเบิลมากกว่าพอนเทียแน็ค โดยส่วนใหญ่ของ post-midnight scintillations ที่พบได้ที่บับเบิลจะพบมากในท้องฟ้าทางเหนือด้วยมุมยกที่ต่ำ สาเหตุหลักน่าจะเกิดจากแอมพลิฟิเคชันของความผิดปกติในทิศทางเฉพาะซึ่งอาจจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นอิเล็กตรอนแบบคราวด์โดย EIA และเนื่องจากเส้นทางเครื่องรับ-ดาวเทียมที่ไกลขึ้นในบริเวณ EIA crest และในทิศทางที่ขนานกับเส้นสนามแม่เหล็กโลก (field-aligned direction) รายละเอียดเชิงลึกของผลการศึกษาครั้งนี้

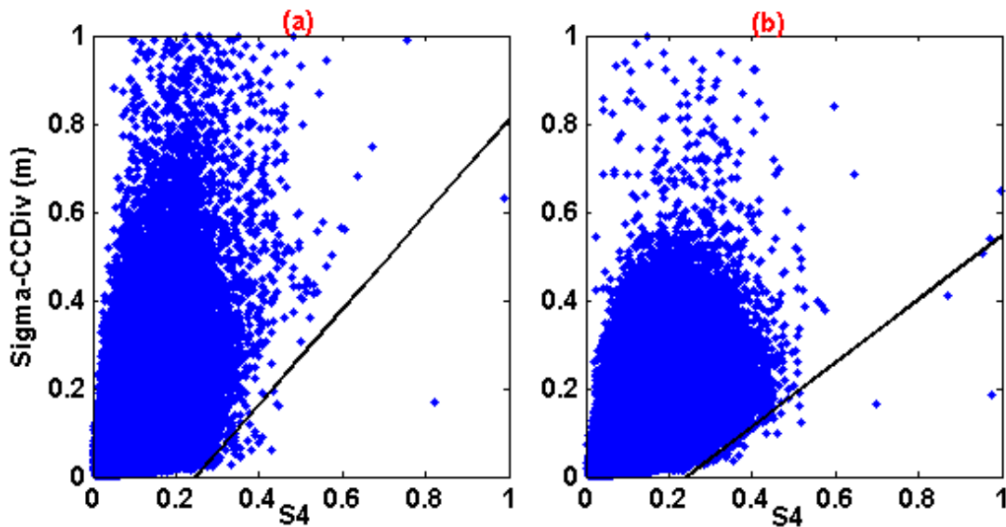
3.3.1 ข้อมูลที่ใช้ศึกษาและวิธีการวิเคราะห์ซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์

ในงานนี้ เราใช้ข้อมูลการซินทิลเลชันแอมพลิฟิเคชันที่ได้รับจากสถานีบับเบิลและพอนเทียแน็ค ในช่วงเดือนมกราคม 2009 ถึงธันวาคม 2011 (3 ปี) สำหรับการศึกษานี้ จะพิจารณาค่าข้อมูลที่วัดได้จากมุมยกสูงกว่า 10 องศาและค่า $S4_{tot}$ ได้ถูกปรับแก้โดยกำจัดผลกระทบของมัลติพาท (multipath) และสัญญาณรบกวนรอบข้างออกไป ดังนั้นค่า $S4$ ที่ปรับแก้ไข ($S4$) จะหาค่าได้จากสมการที่ (3.7)

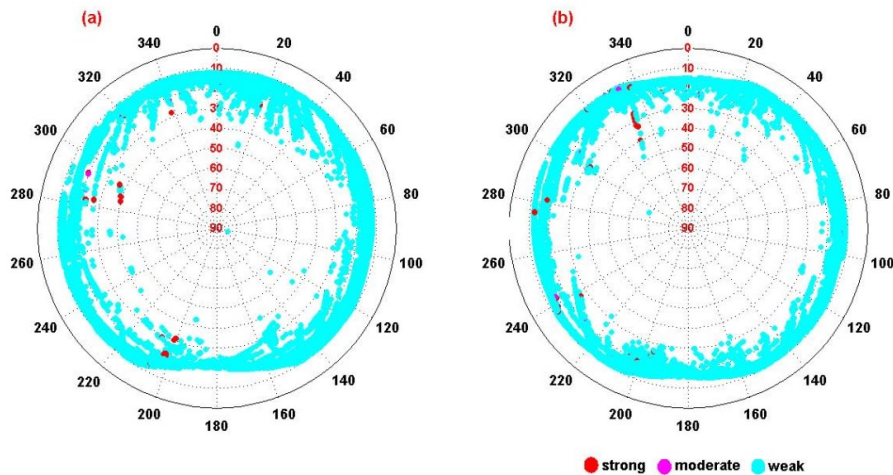
$$S4 = \sqrt{S4_{tot}^2 - S4_{corr}^2} \quad (3.7)$$

ในทางปฏิบัติ การใช้ระบบดาวเทียมนำทางสากลสำหรับการบินนั้น เราจะใช้ดาวเทียมที่มีมุมยกลดลงถึง 5 องศา ค่าข้อมูลซินทิลเลชันในมุมยกที่ต่ำก็อาจจะเกิดขึ้นได้ และค่าข้อมูลที่วัดได้จากมุมยกต่ำกว่า 30 องศาเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงผลของมัลติพาท ดังนั้น มันจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรจะต้องแยกแยะระหว่างซินทิลเลชันที่เกิดขึ้นในชั้นไอโอโนสเฟียร์กับสิ่งที่ได้รับผลกระทบจากมัลติพาทในสมการที่ (3.7) เสียก่อน ผลจากงานวิจัย พบว่า Sigma-CCDiv เป็นตัวบ่งชี้ผลของมัลติพาทและสัญญาณรบกวนได้ โดย CCDiv คือผลต่างระหว่าง code และ carrier-phase measurements ในสัญญาณ GPS เพราะ CCDiv อันเนื่องมาจากผลกระทบมัลติพาทนั้นมีค่าที่มากกว่าค่า CCDiv อันเนื่องมาจากซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์มาก พารามิเตอร์ตัวนี้สามารถใช้เพื่อจำแนกระหว่างค่า $S4$ ที่สูงอันเนื่องมาจากมัลติพาทเมื่อเทียบกับซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยการแยกสัญญาณมัลติพาทกับสัญญาณซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์สามารถพิจารณาได้ว่า “ข้อมูลที่มีค่า sigma-CCDiv สูงกว่า dividing-line separator จะถูกพิจารณาว่าได้รับผลกระทบจาก multipath ในขณะที่ค่า sigmaCCDiv ที่ต่ำด้วยค่า $S4$ ที่สูงจะถูกพิจารณาว่าได้รับผลกระทบจากชั้นไอโอโนสเฟียร์” ในการศึกษานี้ เราจะใช้วิธีนี้ในการตัดสัญญาณ multipath ออกไปในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยเราตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่าง $S4$ และ sigma-CCDiv ในวันที่ไม่มีซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ พบว่า มีจำนวน 55 วัน และ 46 วันในปี 2010 ที่ได้จากเมืองบับเบิลและเมืองพอนเทียแน็ค ตามลำดับ ได้ถูกนำมาศึกษา การเลือกวันที่ไม่มีซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์จะถูกระงับด้วยสายตายด้วยเงื่อนไขต่อไปนี้: (1) ชั้นแรก เราจะตรวจสอบจากรูปที่พล็อตระหว่างวันเทียบกับเวลาท้องถิ่น (LT) ที่เกิดซินทิลเลชันที่ยังไม่ถูกตัดแยกใด ๆ ทั้งสิ้นในตอนกลางคืนของปี 2010 เท่านั้น; (2) แล้วเราจะกำจัดวันที่เกิดซินทิลเลชันด้วยค่า $S4$ ที่มากกว่า 0.2 ที่ยาวนานเกินกว่า 1 ชั่วโมงและวันที่ไม่เกิดซ้ำทุก ๆ วันด้วยการเลื่อนออกไป 4 นาที เราทำการพล็อตค่า sigma-CCDiv เทียบกับ $S4$ ที่ได้รับจากวันที่ไม่เกิดซินทิลเลชันที่ทั้งสองสถานียังแสดงในรูปที่ 3.8 ในรูปที่ 3.9 จุดสีฟ้าแสดงการกระจายของสัญญาณด้วยผลกระทบของมัลติพาท (non-ionospheric effects);

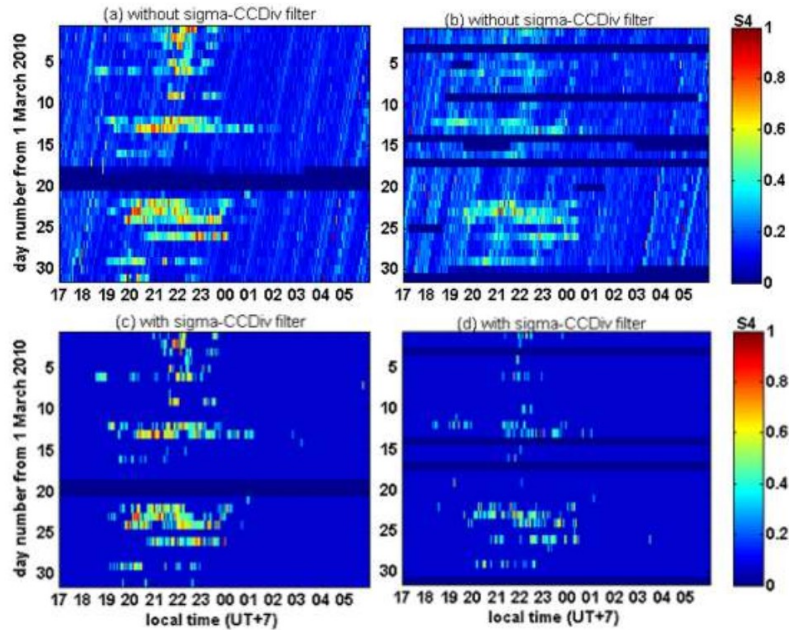
ค่า sigma-CCDiv ของสัญญาณที่มีค่าผลกระทบของ multipath สูงขึ้นเท่านั้น เราได้พิจารณา dividing-line separator เพื่อที่จะแยกข้อมูลที่ได้รับผลของซีลทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่แท้จริงกับข้อมูลที่ได้รับผลกระทบจากมัลติพาร์ได้อย่างถูกต้อง ข้อมูล non-scintillation จะอยู่สูงกว่าเส้น dividing line และอยู่ตรงขอบด้านล่างของข้อมูล non-scintillation พอดี นอกจากนี้ ตัว dividing-line separator ของเมืองบันดุงและเมืองพอนเทียนักจะต่างกันเนื่องจากสภาพแวดล้อมมัลติพาร์ที่แตกต่างกันของแต่ละสถานี นอกจากนี้ เราได้ทำการพล็อตการกระจายการเกิดซีลทิลเลชันด้วยค่า S_4 ที่มากกว่า 0.2 ที่ได้รับจากข้อมูลในวัน non-scintillation ในแผนภาพ azimuth-elevation coordinate (sky plot) ด้วย



รูปที่ 3.8 ผลกระทบค่า SNR หรือมัลติพาร์ที่เมืองบันดุง (ซ้าย) และเมืองพอนเทียนัก (ขวา) [3]



รูปที่ 3.9 ภาพในแนวมุมยก-อะซิมูธของการเกิดซีลทิลเลชันที่ได้รับผลกระทบมัลติพาร์ [3]



รูปที่ 3.10 การเปรียบเทียบภาพการเกิดซิลทิลเลชั่นที่ไม่ผ่านตัวกรอง Sigma-CCDiv กับภาพการเกิดซิลทิลเลชั่นที่ผ่านตัวกรอง Sigma-CCDiv สำหรับ (a,c) บันดุง และ (b,d) ฟอนเทียนัค [3]

เราจัดกลุ่มซิลทิลเลชั่นเป็น 3 ระดับความเข้ม ได้แก่ ระดับต่ำ ($0.2 < S_4 < 0.5$), ระดับปานกลาง ($0.5 < S_4 < 0.8$) และระดับรุนแรง ($S_4 > 0.8$) และพล็อตบนภาพ sky plot รูปที่ 3.9a แสดงการกระจายของซิลทิลเลชั่นที่ปราศจากผลของชั้นไอโอโนสเฟียร์แต่ได้รับผลกระทบของมัลติพาทกับพื้นดิน สำหรับ (a) เมืองบันดุงและ (b) เมืองฟอนเทียนัค โดยซิลทิลเลชั่นที่รุนแรง, ปานกลาง และต่ำจะถูกแสดงด้วยสีแดง, สีม่วง, และสีฟ้า ตามลำดับ มุมอะซิมุมถูกวัดตามเข็มนาฬิกาจากทิศเหนือ โดยซิลทิลเลชั่นเหล่านี้ได้ถูกกระจายในแนวอะซิมุมเท่า ๆ กันที่มุมยกที่ต่ำ (< 30 องศา) ผลเหล่านี้ได้สนับสนุนบทสรุปที่ว่า “ค่า S_4 ที่สูงขึ้นในวันที่ไม่มีซิลทิลเลชั่นจะเกิดขึ้นเนื่องจากผลของมัลติพาท ในที่นี้ เราได้แสดงความแตกต่างกันระหว่างการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีผ่านตัวกรอง Sigma-CCDiv กับการไม่ผ่านตัวกรอง Sigma-CCDiv ดังในรูปที่ 3.10 จากรูป ค่า S_4 ที่มากที่สุดท่ามกลางดาวเทียมทั้งหมดที่ถูกติดตามในเวลา 1 นาทีจากข้อมูลบันดุงและฟอนเทียนัคในช่วงเดือนมีนาคม 2553 รูปที่ 3.10a และ 3.10b แสดงค่าสูงสุดของ S_4 โดยไม่มีตัวกรองค่าข้อมูลที่เมืองบันดุงและฟอนเทียนัค ตามลำดับ รูปที่ได้จะมีสัญญาณรบกวนที่มากเนื่องจากรูปแบบ diagonal ของซิลทิลเลชั่น สิ่งนี้แสดงว่า “การเปลี่ยนแปลงของค่า S_4 ที่คล้ายกันจะถูกทำซ้ำทุก ๆ วันด้วยการเปลี่ยนทางเวลาอย่างต่อเนื่องแน่นอนค่าหนึ่งและแสดงให้เห็นถึงความชัดเจนว่ามันเป็นของปลอมดาวเทียม GPS แต่ละดวงจะถูกตรวจจับในทิศทางเดียวกันประมาณ 4 นาทีก่อนหน้านี้ทุก ๆ วันโดยเครื่องรับ GPS ที่ภาคพื้นดินและสภาวะมัลติพาทที่คล้ายกันก็就会被ทำซ้ำในลักษณะแบบนี้ด้วย” ดังนั้น แพทเทิร์น diagonal บนรูปต่าง ๆ ก็ล้วนแล้วแต่มีสาเหตุมาจากผลของมัลติพาททั้งสิ้น เราสามารถที่จะยังคงยอมรับถึงซิลทิลเลชั่นชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรงบนภาพดังกล่าวซึ่งบ่งชี้ให้เห็นถึงแพทช์แนวอนของซิลทิลเลชั่น แต่มันก็เป็นเรื่องที่ยากที่จะจำแนกซิลทิลเลชั่นที่ต่ำออกจากผลของมัลติพาท รูปที่ 3.10c และ 3.10d แสดงการวิเคราะห์ซิลทิลเลชั่นหลังจากที่ผ่านตัวกรอง sigma-CCDiv แล้วสำหรับเมืองบันดุงและฟอนเทียนัค ตามลำดับ ตัวกรองจะกำจัดแบบรูป

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

diagonal โดยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับผลของมัลติพาทรอนภาพการวิเคราะห์ ดังนั้น เราสามารถที่จะมองเห็นแพทช์ของซิลทิลเลชั่นจากระดับต่ำไปถึงระดับที่รุนแรงได้อย่างชัดเจน ในขณะที่ตัวกรองได้แสดงให้เห็นให้เราจำแนกผลของชั้นไอโอโนสเฟียร์ S4 ที่ต่ำกว่าออกจากผลของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดจากผลของมัลติพาทรอน เราจึงสามารถที่จะเลือกเหตุการณ์ที่แท้จริงของซิลทิลเลชั่นชั้นไอโอโนสเฟียร์ ได้ แม้ว่าซิลทิลเลชั่นจะเกิดขึ้นที่มุมยกที่ต่ำก็ตาม

3.3.2 ผลการศึกษาซิลทิลเลชั่นเนื่องจากพลาสมาบับเบิลในเวลาหลังพระอาทิตย์ตก

ค่าจุดดับดวงอาทิตย์เฉลี่ยต่อปี (SSN) มีค่าเท่ากับ 3.1, 16.5 และ 55.7 สำหรับปี 2009, 2010, and 2011 ตามลำดับ เราจะวิเคราะห์การเกิดซิลทิลเลชั่นชั้นไอโอโนสเฟียร์ในตอนกลางคืนตั้งแต่เวลา 17:00 - 06:00 LT (ในที่นี้ $LT=UT+7$ h) เราได้เลือกค่า S4 สูงที่สุดสำหรับดาวเทียมแต่ละดวงที่ถูกกรองด้วยช่วงเวลาทุก ๆ 1 นาที จากการศึกษา พบว่า การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลและเวลาท้องถิ่นของการเกิดซิลทิลเลชั่นชั้นไอโอโนสเฟียร์สำหรับที่บันดุงและพอนเทียนัคในช่วงปี 2009-2011 จากรูป การเกิดซิลทิลเลชั่นชั้นไอโอโนสเฟียร์มี 2 พิคระหว่างวันที่ 50 กับ 100 และระหว่างวันที่ 200 และ 300 นั่นคือประมาณเดือนอควินอกซ์ ซิลทิลเลชั่นชั้นไอโอโนสเฟียร์เกิดขึ้นอย่างชัดเจนหลังจากที่พระอาทิตย์ตกไปจนถึงประมาณเที่ยงคืน (ช่วงเวลา 19:00-01:00 LT) นอกจากนี้ การเกิดขึ้นของพวกมันได้เพิ่มขึ้นตั้งแต่ปี 2009 ไปจนถึงปี 2011 ตามวัฏจักรสุริยะที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เราได้นิยามซิลทิลเลชั่นหลังพระอาทิตย์ตกเสมือนเป็นซิลทิลเลชั่นชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดขึ้นหลังพระอาทิตย์ตกไปจนถึงเที่ยงคืนโดยประมาณ ที่ทั้ง 2 สถานี (ในกรณีนี้) ความผิดปกติขนาด 400 เมตรที่ทำให้เกิดซิลทิลเลชั่น GPS นั้นปรากฏให้เห็นที่เวลาประมาณ 01:00 LT ซึ่งผลลัพธ์นี้จะสอดคล้องกับผลวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่า “ซิลทิลเลชั่นหลังพระอาทิตย์ตกนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก EPBs”

อีกทั้ง เราวิเคราะห์การกระจายตัวของซิลทิลเลชั่นตามระยะทางที่บันดุงและพอนเทียนัคมีตำแหน่งละติจูดที่ห่างกันประมาณ 6 องศา ตามที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ระดับความรุนแรงของซิลทิลเลชั่นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นอิเล็กตรอนแบรคราวด์เนื่องจากความหนาแน่นอิเล็กตรอนในบริเวณ EIA มีค่าที่สูง การเกิดซิลทิลเลชั่นที่มากขึ้นก็ย่อมที่จะพบได้ในบริเวณนี้ การกระจายความหนาแน่นอิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนแปลงตามแนวละติจูดอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณ EIA พลาสมาบับเบิลที่เป็นต้นเหตุให้เกิดซิลทิลเลชั่นได้ถูกสร้างขึ้นที่โอเคเวเตอร์แม่เหล็กโลกและก่อตัวมุ่งหน้าไปทางขั้วโลก ดังนั้น การกระจายตัวตามระยะทางของการเกิดซิลทิลเลชั่นได้ถูกคาดหวังว่าจะมีความแตกต่างกันในแนวละติจูด มันจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการใช้งานในทางปฏิบัติที่ควรจะทำ (elucidate) การกระจายตัวตามระยะทางของการเกิดซิลทิลเลชั่นให้ได้เพื่อที่ว่าผู้ที่ออกแบบระบบการนำทางที่อาศัย GNSS สามารถประเมินผลกระทบของซิลทิลเลชั่นที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของระบบของพวกเขาได้ ดังนั้น เราจึงควรที่จะวิเคราะห์การเกิดซิลทิลเลชั่นชั้นไอโอโนสเฟียร์เสมือนเป็นฟังก์ชันของมุมยกและมุมอะซิมุมสำหรับทั้งสองสถานี นอกจากนี้ เราได้พิจารณาเปอร์เซ็นต์ของการเกิดซิลทิลเลชั่นชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ระดับ 10 องศาและ 20 องศา ในมุมยกและมุมอะซิมุม ตามลำดับ นอกจากนี้ จากการพิจารณาการกระจายตัวแบบมีทิศทางของซิลทิลเลชั่นชั้นไอโอโนสเฟียร์ (sky plots) และอัตราการเกิดขึ้นเหนือมุมยกและมุมอะซิมุมที่กำหนดที่เมืองบันดุง ในปี 2009, 2010 และ 2011 ด้วย พบว่า จำนวนของเหตุการณ์ซิลทิลเลชั่นชั้นไอโอโนสเฟียร์และความรุนแรงของซิลทิลเลชั่นได้เพิ่มขึ้นตามวัฏจักรสุริยะ การกระจายซิลทิลเลชั่นชั้นไอโอโนสเฟียร์ก่อตัวจากทางท้องฟ้าด้านเหนือไปทางด้านใต้ของบันดุง เมื่อวัฏจักรสุริยะเพิ่มขึ้น การกระจายตัวถูกกองรวมกันมากในท้องฟ้าทางเหนือ (equatorward) ของบันดุง อีกทั้ง เรายังได้พบผลที่น่าสนใจด้วยว่า จากวิเคราะห์ทิศทางที่บันดุงนี้ การรวมตัวกัน

ของการเกิดซิลทิลเลชันที่สูงสุดที่ 20–30 องศาในมุมยกที่อยู่ในท้องฟ้าทางเหนือ โดยซิลทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ยังคงเกิดขึ้นในท้องฟ้าทางเหนือ ถึงแม้ว่าวัฏจักรสุริยะจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากปี 2009 ไปยังปี 2011 ทั้งนี้ผลการศึกษาที่ได้จากเมืองพอนเทียนัค พบว่า จำนวนการเกิดซิลทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ ก็ยังคงเพิ่มขึ้นเช่นกันตามวัฏจักรสุริยะที่เพิ่มขึ้นจากปี 2009 ไปยังปี 2011 การกระจายการเกิดซิลทิลเลชันสำหรับเมืองพอนเทียนัคค่อนข้างที่จะแตกต่างจากผลที่ได้ของเมืองบันดุง กล่าวคือ มีการกระจายให้เห็นทั้งทางเหนือและตอนใต้ แต่การกระจายทาง poleward จะเกิดขึ้นมากกว่าที่เมืองพอนเทียนัค และการกระจายจะกองรวมกันมากในท้องฟ้าทางใต้ของเมืองพอนเทียนัค แต่การเกิดซิลทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ก็ยังคงเกิดขึ้นในท้องฟ้าทางเหนือ (equatorward) ของเมืองพอนเทียนัค และมีคุณลักษณะที่น่าสนใจอีกประการคือการรวมตัวกันที่สูงขึ้นในท้องฟ้าทางใต้ ด้วยการเกิดซิลทิลเลชันที่มากขึ้นไปในทิศตะวันตกของเมืองพอนเทียนัค (220–260 องศาในมุมอะซิมุท)

การกระจายตัวในแนวละติจูดของค่า NmF2 ที่นำมาจากแบบจำลอง IRI ในเดือนมีนาคม ปี 2011 ที่เชกเตอร์อินโดนีเซีย รูปดังกล่าวแสดงบริเวณยอด (crest) ของค่า NmF2 จะถูกวางโดยทั่วไประหว่างบันดุงและพอนเทียนัค ดังนั้น ความหนาแน่นของการเกิดซิลทิลเลชัน ในท้องฟ้าตอนเหนือของบันดุงและในท้องฟ้าตอนใต้ของพอนเทียนัคก็สามารถที่จะเกิดขึ้นได้ราวกับเป็นตำแหน่งเฉลี่ยของยอด EIA อย่างไรก็ตาม ตำแหน่งของ EIA crest ไม่สามารถที่จะบรรยายการเพิ่มขึ้นครั้งที่สองของการเกิดซิลทิลเลชันในท้องฟ้าตอนเหนือของพอนเทียนัคได้ นอกจากนี้ การเกิดซิลทิลเลชันที่มากที่สุดที่มุมยก 20–30° ในท้องฟ้าทางเหนือของบันดุงก็ไม่สามารถที่จะถูกอธิบายได้โดยตำแหน่งของ EIA ได้ เนื่องจากการเกิดซิลทิลเลชันที่มุมยก 20–30° มีค่าที่สูงกว่าค่าดังกล่าวในมุมยกที่ต่ำกว่า การเกิดซิลทิลเลชันที่สูงสุดเหล่านี้ก็ยังคงไม่สามารถที่จะถูกอธิบายได้โดยเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นที่ยาวกว่าในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มุมยกที่ต่ำกว่าด้วยเช่นกัน เราจึงตั้งสมมติฐานที่ว่า “การค้นพบเหล่านี้ก็เกิดขึ้นเนื่องจากผลที่คล้ายกันซึ่งจะเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ที่วางตัวอยู่ในแนวสนามแม่เหล็ก” งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้สรุปไว้ว่า จากการพิจารณามุมระหว่าง LOS และเส้นสนามแม่เหล็กที่ความสูง 300 km พบว่า ความผิดปกติที่วางตัวอยู่ในแนวสนามแม่เหล็กได้เกิดขึ้นด้วยการปรากฏความผิดปกติที่รุนแรงที่สุดใกล้กับค่า NmF2 ($h = 300$ km) และ ซิลทิลเลชันได้ถูกควบคุมด้วยทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ละติจูดสูงและกลาง โดยส่งผลกระทบต่อเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นในละติจูดสูงที่ใกล้กับเส้นสนามแม่เหล็กโลก อีกทั้ง ซิลทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ ไฮเคลสลิปและปัญหาต่าง ๆ ในการระบุพิกัดมักจะเกิดขึ้นบ่อยกับสัญญาณ GPS ทั้งในแนวข้าม แนวเดียวกัน และใกล้กับเส้นสนามแม่เหล็กโลกในละติจูดกลางและต่ำ

การเพิ่มขึ้นของซิลทิลเลชันในทิศทาง field-parallel ที่สังเกตได้จากสถานีภาคพื้นดินได้ถูกพิจารณาว่าเป็นการยืนยันครั้งแรกถึงผลกระทบ field-parallel ที่มีต่อสถานีภาคพื้นดินที่บริเวณละติจูดต่ำโดยการแสดงถึงความสอดคล้องกันระหว่างการเอียงของแม่เหล็กและทิศทางการเพิ่ม (ก่อตัว) ของซิลทิลเลชัน การใช้ตัวกรอง sigma-CCDiv ทำให้เราสามารถที่จะกำจัด contamination ที่เกิดขึ้นจากผลกระทบของมัลติพาสได้ ซึ่งทำให้ผลกระทบของ field-parallel ที่ตรวจจับได้จากสถานีภาคพื้นดินเป็นครั้งแรกก่อนหน้านี้ยังเป็นเรื่องยากและทำไม่ได้ที่จะตรวจจับด้วยค่ามาส์กมุมยก 30 องศาด้วยวิธีเดิม เนื่องจากทิศทาง field-parallel ในบริเวณละติจูดต่ำมีมุมยกที่ต่ำกว่า 30 องศา การกระทำแบบนี้ประโยชน์ที่สำคัญสำหรับการนำไปใช้กับ GNSS ยกตัวอย่างเช่น การบิน ที่ต้องมีการพิจารณาดาวเทียมที่มีมุมยกต่ำลงถึง 5 องศาด้วย คุณลักษณะที่น่าสนใจอีกหนึ่งประเด็นคือการเกิดซิลทิลเลชันที่สูงขึ้นในทิศทางตะวันตกเฉียงใต้เมื่อเทียบกับเมืองพอนเทียนัค คุณลักษณะนี้เกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้าง 3 มิติของพลาสมาบับเบิล โดยทั่วไป พลาสมาบับเบิลถูกทำให้เอียงไปทางทิศตะวันตกในขณะที่มันพัฒนาตัวขึ้นใน

แนวตั้ง ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจาก vertical shear ในการลอยเลื่อนของพลาสมาบับเบิ้ลที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันออกในชั้น F เหตุการณ์นี้บ่งชี้ว่าพลาสมาบับเบิ้ลจะถูกทำให้เอียงมุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตกด้วยละติจูดที่เพิ่มขึ้น ผลที่ตามมา พลาสมาบับเบิ้ลจะแสดงรูปร่างเป็นตัว “C” ตามที่เคยถูกรายงานไว้ด้วย Kelley et al. (2003) เมื่อมันถูกแมบไปตามเส้นสนามแม่เหล็กบนระนาบแนวนอนที่ความสูงแน่นอนค่าหนึ่ง นอกจากนี้ ซิลทิลเลชันอาจจะแรงขึ้นทางทิศตะวันตก ตรงจุดนี้ LOS มีแนวโน้มที่จะขนานกับโครงสร้างพลาสมาบับเบิ้ลและลดตัวต่ำลงทางทิศตะวันออกเมื่อเทียบกับสถานีเครื่องรับ แผนภาพสำหรับการอธิบาย LOS จากเครื่องรับสัญญาณไปยังทิศตะวันออกของพลาสมาบับเบิ้ล (ซึ่งควรจะชี้มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตกที่จะขนานกับกำแพงของพลาสมาบับเบิ้ล) และ LOS จากเครื่องรับไปยังทิศตะวันตกของพลาสมาบับเบิ้ล (ซึ่งควรจะชี้มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันออกเพื่อข้ามพลาสมาบับเบิ้ล) โครงสร้างทางละติจูดของพลาสมาบับเบิ้ลที่ถูกเอียงไปทางทิศตะวันตกในขณะที่มันก่อตัวขึ้นในแนวตั้งและมุ่งหน้าไปทางขั้วโลก ซึ่งมีแนวโน้มที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่จะสูงขึ้นในทิศตะวันตกและต่ำกว่าในทิศตะวันออก และปรากฏการณ์นี้อาจจะทำให้เกิดซิลทิลเลชันที่สูงขึ้นและมุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตก

3.3.3 ผลการศึกษาซิลทิลเลชันเนื่องจากพลาสมาบับเบิ้ลในเวลาหลังเที่ยงคืน

ผลที่น่าสนใจประเด็นหนึ่งของการศึกษานี้คือการเกิดซิลทิลเลชันหลังเที่ยงคืน ซึ่งเกิดขึ้นบ่อยหลังเที่ยงคืน โดยปราศจากซิลทิลเลชันหลังจากที่พระอาทิตย์ตกไปแล้วที่เวลาท้องถิ่นก่อนหน้านี้ โดยทั่วไป เราพบว่าส่วนมากของซิลทิลเลชันจะมีระดับความรุนแรงที่ต่ำกว่า เกิดขึ้นไม่บ่อยและมันจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้นกว่าซิลทิลเลชันหลังพระอาทิตย์ตก นอกจากนี้ พวกมันมักจะถูกลบออกบ่อยครั้งมากขึ้นในเดือน พ.ค., มิ.ย., ก.ค. และ ธ.ค. (ฤดูกาลที่ไม่ค่อยเกิดพลาสมาบับเบิ้ล) คุณลักษณะการเกิดซิลทิลเลชันจะแตกต่างจากคุณลักษณะการเกิดพลาสมาบับเบิ้ล พบว่า ซิลทิลเลชันที่บันดุงในปี 2011 เกิดขึ้นและมีความชัดเจนมาก แต่ซิลทิลเลชันที่พอนเทียนคมีจำนวนที่น้อยกว่าที่บันดุงมาก ซึ่งเป็นความแตกต่างที่น่าจะชัดเจนมากที่สุดระหว่างการวิเคราะห์ข้อมูลที่บันดุงและพอนเทียนค ในปี 2011 เราได้พิจารณาว่า วันที่มีซิลทิลเลชันหลังเที่ยงคืนเกิดขึ้นที่บันดุงคือวันที่ 128, 132, 138, 140, 142, 144, 154, 155, 159, 160, 170, 185, 207, 211, 326 และ 340; กิจกรรมแม่เหล็กมีค่าต่ำไปจนถึงค่าปานกลางในวันดังกล่าว ด้วยค่าระดับ ΣKp เท่ากับ 3+, 4-, 11-, 3+, 8+, 12-, 6+, 12+, 18-, 16+, 7-, 17+, 11+, 17+, 14-, และ 5+ ตามลำดับ โดย Otsuka และคณะ [4] ได้รายงานผลการศึกษาเกี่ยวกับ post-midnight FAI ที่ตรวจจับได้ด้วย VHF radar ที่ความถี่ 30.8 MHz ที่เมืองโกโตตะบัง โดยตำแหน่งละติจูดแม่เหล็กนี้มีค่าที่ใกล้เคียงกับเมืองพอนเทียนคมาก และ FAI ไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกับซิลทิลเลชันของ GPS การเกิดขึ้นของซิลทิลเลชันหลังเที่ยงคืนที่ต่ำกว่าที่เมืองพอนเทียนคจะสอดคล้องกับผลที่ได้รับจาก Otsuka และคณะ [4] ถึงแม้ว่าพวกเขาได้ใช้ค่ามาส์กมุ่มยกเท่ากับ 30 องศาในการวิเคราะห์ข้อมูลซิลทิลเลชัน โดยพวกเขาได้สรุปไว้ว่า “ความผิดปกติที่ตรวจจับได้จาก echo ของ VHF radar มีค่าอ่อนเกินไปที่จะทำให้เกิดซิลทิลเลชันของสัญญาณ GPS แต่การค้นพบของพวกเราเกี่ยวกับ post-midnight scintillation ที่เมืองบันดุงในปี 2011 นั้นแสดงให้เห็นว่า “มันสามารถที่จะมีความผิดปกติบางส่วนที่ทำให้เกิดซิลทิลเลชันกับสัญญาณ GPS ที่ตำแหน่งที่ต่างกันในตอนหลังเที่ยงคืน” แล้วทำไม post-midnight scintillation จึงไม่ถูกพบในงานวิจัยก่อนหน้านี้? รูปที่ 2.13a แสดงให้เห็นว่า post-midnight scintillations อยู่รวมกันที่มุ่มยกที่ต่ำในท้องฟ้าทางเหนือของเมืองบันดุง ในการศึกษาก่อนหน้านี้ มันเรื่องทั่วไปที่จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลซิลทิลเลชัน GPS โดยใช้มาส์กมุ่มยก 30 องศา เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบของมัลติพาทและทำให้ได้ค่า SNR ที่สูง จึงทำให้ไม่ปรากฏซิลทิลเลชัน แต่เมื่อทำการศึกษาการเกิดซิลทิล

เลขชั้นที่บันทึกในปี 2011 ด้วยการใช้ตัวกรอง sigma-CCDiv โดยใช้ค่ามุมยกเท่ากับ 10 องศาและด้วยค่ามาส์กมุ่มยก 30 องศา (วิธีเดิม) ซึ่ง post-midnight scintillations โดยส่วนใหญ่จะถูกกำจัดออกไปและมีเพียงซิลทิลเลขชั้นที่รุนแรงไม่กี่เหตุการณ์เท่านั้นที่ยังคงเหลืออยู่ เมื่อใช้มาส์กมุ่มยก 30 องศา แต่ diagonal patterns ที่เป็นตัวบ่งชี้ถึงผลกระทบของมัลติพาทก็ยังคงมองเห็นอยู่ ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่า ผลกระทบของมัลติพาทยังคงถูกพบได้ด้วยมุมยก 30 องศา สิ่งนี้อาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากสภาพแวดล้อมรอบ ๆ สายอากาศที่อยู่บนหลังคาของอาคาร แต่ก็ยังคงพบ post-midnight scintillations มากขึ้นโดยใช้ตัวกรอง sigma-CCDiv โดยการเปรียบเทียบเทคนิคตัวกรองเหล่านี้ post-midnight scintillations ที่สังเกตได้ที่บันทึกก็ยังคงเกิดขึ้นส่วนใหญ่ด้วยมุมยกที่ต่ำกว่า 30 องศาและอาจจะพลาดไปในการศึกษาก่อนหน้านี้ที่ใช้มาส์กมุ่มยกค่าเดิมเท่ากับ 30 องศา

คำถามถัดไปคือทำไมการเกิดซินทิลเลขชั้นหลังเที่ยงคืนสังเกตพบได้ที่บันทึก แต่ไม่พบที่พอนเทียนัค ค่า LOS ที่มุมยกต่ำในท้องฟ้าทางเหนือของบันทึกได้พาดผ่านช่วงเวลาที่ยาวนานขึ้นในบริเวณ EIA crest ที่ซึ่งความหนาแน่นอิเล็กตรอนแปรครวดีมีค่าสูง นอกจากนี้ ค่า LOS ที่มุมยกน้อยกว่า 30 องศาจากบันทึกที่ชี้มุ่งหน้าไปทางอิควาเตอร์เกือบจะขนาดไปกับเส้นสนามแม่เหล็กที่ระดับความสูง 300 km ดังนั้น คำอธิบายที่เป็นไปได้ของการเกิด postmidnight scintillation ที่บันทึกก็คือ “แอมพลิฟูดของความผิดปกติในทิศทางที่แน่นอนอาจจะเพิ่มขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพอันเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นอิเล็กตรอนแปรครวดีโดย EIA, ค่า slant factor ที่สูงขึ้น และผลของ field-parallel ที่เมืองพอนเทียนัค แอมพลิฟูดของความผิดปกติที่เพิ่มขึ้นโดย EIA นั้นเห็นได้ชัดเจน แต่ slant factor มีค่าที่ต่ำกว่าเนื่องจากมุมยกที่สูงและผลของ field-parallel ที่ไม่ชัดเจนเนื่องจากค่า LOS จากเมืองพอนเทียนัคที่ชี้มุ่งหน้าไปทางใต้ เนื่องจาก post-midnight scintillations มีระดับที่ต่ำ พวกมันจะถูกมองไม่เห็นที่เมืองพอนเทียนัคถ้าสภาวะที่ต้องการอันใดอันหนึ่งต่อไปนี้หายไป เช่น high background density, field-parallel factor, and larger slant factor เพื่อที่จะทดสอบสมมติฐานนี้ การวิเคราะห์ post-midnight scintillation ด้วยการตัดมุมยกที่ต่ำลงออกไปที่ละติจูดแม่เหล็กที่ต่างกันเป็นสิ่งที่จะต้องทำ การศึกษาก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวกับความผิดปกติหลังเที่ยงคืนในฤดูกาลที่ไม่ใช่พลาสมาบับเบิลได้แนะนำไว้ว่าพวกมันสามารถที่จะมีส่วนเกี่ยวข้องกับพลาสมาบับเบิลหรือเนื่องจาก MSTID (medium scale travelling disturbance) ที่เคลื่อนตัวจากละติจูดกลางไปยังละติจูดต่ำได้ มันไม่ชัดเจนว่าทำไมพลาสมาบับเบิลสามารถเกิดขึ้นในตอนหลังเที่ยงคืนและในฤดูกาลที่ไม่ใช่พลาสมาบับเบิล นอกจากนี้ มันก็ยังไม่ชัดเจนว่า mid-latitude MSTID สามารถที่จะเดินทางต่ำลงมาที่บริเวณละติจูดต่ำได้ แม้ว่าการวิเคราะห์ของเราไม่สามารถให้คำตอบที่แน่ชัดต่อกลไกดังกล่าวที่สามารถทำให้เกิด post-midnight scintillations แต่การค้นพบของเราเกี่ยวกับ post-midnight scintillations และสถานการณ์ที่ซินทิลเลขชั้นเพิ่มขึ้นก็นำเสนอประเด็นที่สำคัญและน่าสนใจที่ช่วยให้เข้าใจกลไกที่เกิดขึ้นได้ระดับหนึ่งแล้วนำไปสู่แนวทางการป้องกันและแจ้งเตือนการเกิดพลาสมาบับเบิลและนำไปสู่การระบุพิกัดที่แม่นยำขึ้นได้

3.3.4 ข้อสรุปซินทิลเลขชั้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากพลาสมาบับเบิลบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร

ข้อสรุปผลจากการศึกษาซินทิลเลขชั้นชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ละติจูดต่ำและใกล้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกที่ประเทศอินโดนีเซียในช่วงปี 2009–2011 โดยใช้เครื่องรับซินทิลเลขชั้น GPS (GSV4004B) ที่ติดตั้งที่ทางตอนเหนือ (เมืองบันดุง) และทางตอนใต้ (เมืองพอนเทียนัค) มีดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลกับเวลาท้องถิ่น (SL) ของ post-sunset scintillations ในเซกเตอร์อินโดนีเซียเกิดขึ้นเนื่องจากพลาสมาบับเบิล โดยเราได้พบค่าพิกของการเกิดซินทิลเลขชั้นหลังพระอาทิตย์ตกจำนวน

2 พีกในช่วงเดือนอควินอกซ์ ซึ่งจะถูกรเรียกว่า “เหตุการณ์เกิดพลาสมาบับเบิล” สำหรับเซกเตอร์อินโดนีเซีย และพวกมันก็มีค่าที่เพิ่มขึ้นตามวัฏจักรสุริยะที่สูงขึ้นตั้งแต่ปี 2009 - 2011

2. การกระจายของซินทิลเลชันจะเกาะกลุ่มหนาแน่นที่บริเวณ EIA crest ซึ่งเป็นตำแหน่งเฉลี่ยระหว่างบันดุงและพอนเทียนัค ผลที่ได้จากการวิเคราะห์การมีทิศทางของข้อมูลบันดุงและพอนเทียนัคบ่งชี้ว่า “การกระจายที่สูงขึ้นของซินทิลเลชันจะเกาะกลุ่มหนาแน่นในท้องฟ้าทางเหนือของบันดุงและในท้องฟ้าทางใต้ของพอนเทียนัค

3. การค้นพบที่โดดเด่นมากที่สุดของเราคือการเกิดซินทิลเลชันที่มากในทิศทางคู่ขนานกับสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มที่จะได้รับผลกระทบจากความผิดปกติพลาสมาบับเบิลที่อยู่ในแนวคู่ขนานกับสนามแม่เหล็ก (field-aligned plasma irregularities) ซึ่งผลการศึกษานี้ได้ถูกรายงานเป็นครั้งแรกในงานวิจัยนี้โดยการเฝ้าสังเกตภาคพื้นดินในบริเวณละติจูดต่ำ ซึ่งเราพบการเพิ่มขึ้นครั้งที่ 2 ของการเกิดซินทิลเลชันในท้องฟ้าทางเหนือของพอนเทียนัคที่ไม่สามารถจะอธิบายได้โดยตำแหน่งของ EIA crest นอกจากนี้ เรายังพบการเกิดซินทิลเลชันขึ้นโดยส่วนใหญ่ที่มุมยกเท่ากับ 20-30 องศาในท้องฟ้าทางเหนือของบันดุงที่มากกว่าที่มุมยกที่ต่ำกว่านั้น เนื่องจากการเดินทางของสัญญาณที่มากขึ้นในชั้นไอโอโนสเฟียร์

4. สำหรับเมืองพอนเทียนัค เราพบการกระจายที่สูงขึ้นของซินทิลเลชันในทิศทางตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างพลาสมาบับเบิลที่ถูกทำให้เอียงมุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตกด้วยละติจูดที่สูงขึ้น

5. Post-midnight scintillations ในฤดูที่ไม่ใช่พลาสมาบับเบิลที่ยังไม่เคยถูกรายงานในผลการศึกษาก่อนหน้านี้ได้ถูกพบที่เมืองบันดุงในปี 2011 (มีเพียงเล็กน้อยที่พบได้ที่เมืองพอนเทียนัค) โดย post-midnight scintillations นั้นพบมากที่สุดที่มุมยกต่ำที่มุ่งหน้าไปทางอิควีเตอร์ของบันดุง โดยซินทิลเลชันเหล่านี้อาจจะตรวจจับไม่พบในการศึกษาก่อนหน้านี้เนื่องจากการมอดูเลชันที่ 30 องศา การเกิด post-midnight scintillation ที่มากขึ้นที่บันดุงเมื่อเทียบกับพอนเทียนัคอาจจะมีสาเหตุมาจากเส้นทางระหว่างเครื่องรับ-ดาวเทียมที่มอดูเลชันต่ำในท้องฟ้าทางเหนือของบันดุงได้พาดผ่านบริเวณ EIA crest ที่ไกลขึ้นและอยู่ในทิศทางที่ขนานกับเส้นสนามแม่เหล็ก เพื่อทดสอบสมมติฐานนี้ การวิเคราะห์ post-midnight scintillation ด้วยการตัดมอดูเลชันที่ต่ำกว่าออกไปที่ละติจูดแม่เหล็กที่ต่างกันเป็นสิ่งจำเป็น

3.4 การตรวจจับพลาสมาบับเบิลด้วยเครือข่าย ASIs แบบใหม่ราคาถูกที่เกาะอิซิงากิ ประเทศญี่ปุ่น

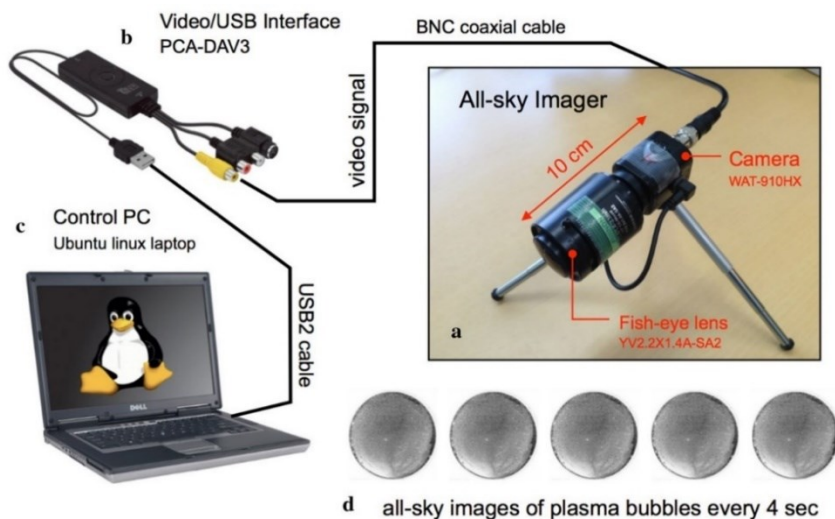
พลาสมาบับเบิลแถบเส้นศูนย์สูตร (EPB) เป็นปรากฏการณ์ที่ความหนาแน่นของพลาสมาในชั้น F หายไปบริเวณที่ใกล้กับเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก (แถบเส้นศูนย์สูตรทางภูมิศาสตร์) ตอนกลางคืน แล้วมีการยกตัวของพลาสมาที่มีความหนาแน่นต่ำจากชั้น F ด้านล่างไปในแนวที่ขนานกับเส้นสนามแม่เหล็กโลกไปยังละติจูดที่สูงขึ้นทั้งทางด้านซีกโลกเหนือและซีกโลกเหนือ (ไปตามผลของ EIA) ซึ่งเรามักจะเรียกต้นเหตุของ EPB นี้ว่า “กระบวนการไม่เสถียรภาพแบบเรย์ลี-เทย์เลอร์” ซึ่งจะครอบคลุมบริเวณละติจูดต่ำห่างจากเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกประมาณ 10-20° เป็นที่ทราบกันดีว่า EPBs นั้นเป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการระบุพิกัดของเครื่องรับ GNSS การนำทางที่ผิดพลาดของระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลก (GNSS) รวมถึงการสื่อสารที่ถูกรบกวนหรือใช้งานไม่ได้ของระบบการสื่อสารคลื่นวิทยุ VHF และ UHF ดังนั้น งานวิจัยเกี่ยวกับ EPB เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจจับ EPB และเทคนิคที่ใช้ในการทำนายการเกิด EPB จึงเป็นหัวข้อที่ท้าทายและมีการนำเสนอในงานวิจัยและผลการศึกษามากมายอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวัน (day-to-day) ในการเกิดขึ้นของ EPBs และอิทธิพลของ EPBs ที่มีต่อ GNSS ก็ยังไม่คาดการณ์ได้ นั่นก็บอกโดยนัยว่า “งานวิจัยในตอนนี้ยังคงต้องการการเฝ้าระวัง

(ตรวจจับ) EPBs ที่ต่อเนื่องเพื่อที่จะลดผลกระทบความผิดพลาดการระบุพิกัดของเครื่องรับ GNSS ที่ผ่านมาเทคนิคการส่งคลื่นวิทยุเพื่อใช้ในการสังเกต EPBs ยังคงถูกนำมาใช้งานหลายวิธีตั้งแต่ปี 1960 เป็นต้นมา อาทิ ไอโอโนซอนด์ (ใช้ตรวจจับ EPBs เสมือนเป็นสเปกตรัมของร่องรอยสัญญาณชั้น F หรือที่เรียกว่า Spread-F) และเรดาร์ประเภทต่าง ๆ ได้แก่ EAR (Equatorial Atmosphere Radar) – Kototabang, ประเทศอินโดนีเซีย, The middle and upper atmosphere (MU) radar - ประเทศญี่ปุ่น, VHF Radar ที่จังหวัดชุมพร ประเทศไทยและที่เกาะไหหลำ ประเทศจีน เป็นต้น การวัดความเข้มแอมป์โลว์ 630.0 nm (ซึ่งแปรผันโดยตรงกับความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้น F) ด้วยระบบ All-Sky Imagers (ASIs) นั้นยังคงจะถูกใช้งานเพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างสองมิติของ EPBs ตั้งแต่ปลายปีทศวรรษ 1990s เป็นต้นมา การใช้งาน ASIs ที่ประกอบไปด้วยกล้อง cooled CCD ยังคงที่จะทำให้เราสามารถที่จะตรวจจับการปลดปล่อยแก๊สออกซิเจนจากชั้น F ด้วยค่า SNR ของสัญญาณที่วัดได้เป็นอย่างดีเนื่องจากกล้อง CCD มีค่าประสิทธิภาพควอนตัมที่สูง ~90% สำหรับปริมาณโฟตอนที่ตกกระทบในย่านความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ จากการวัดการปลดปล่อยแก๊สออกซิเจนที่ 630.0 nm คุณสมบัติเฉพาะต่าง ๆ ของ EPBs ก็สามารถที่จะถูกค้นพบได้ เช่น การปรากฏตัวที่มีลักษณะคอนจูเกตกันทางแม่เหล็กโลกระหว่างซีกโลกเหนือกับซีกโลกใต้ อย่างไรก็ตาม ระบบ ASIs ดั้งเดิมที่ใช้ตัวตรวจจับ cooled CCD นั้นมีขนาดใหญ่และมีราคาแพง ดังนั้นมันจึงยากที่จะมองโครงสร้าง EPBs ที่มีสเกลใหญ่โดยการเซตอัพ ASIs หลายตัวตามสถานีต่าง ๆ จำนวนมากและเพื่อที่จะสร้างเครือข่ายการตรวจจับแอมป์โลว์จำนวนมากได้ เพื่อที่จะแก้ปัญหาข้อจำกัดนี้ ระบบ ASI ที่มีขนาดเล็กและราคาถูกสำหรับตรวจจับการเกิด faint airglow 630.0 nm ของ EPBs โดย ASIs ที่มีขนาดเล็กและราคาถูกที่คล้ายกันนี้ยังคงถูกนำไปใช้งานและถูกติดตั้งในหลายสถานที่ในบริเวณขั้วโลกทั้งสองซีกโลก ผลการศึกษาในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการใช้ระบบ ASIs มีขนาดเล็กและราคาถูกสำหรับตรวจจับการเกิด EPBs ในบริเวณละติจูดต่ำเหนือเกาะอิซิงากิ (Ishigaki) ประเทศญี่ปุ่น นอกจากนี้ ระบบ ASIs ดังกล่าวนี้ก็ถูกนำมาติดตั้งและใช้งานที่สถานีพระจอมเกล้าชุมพรเช่นกัน โดยระบบ ASI ใหม่ที่นำเสนอโดย Hosokawa และคณะ [4] มีขนาดเล็ก โครงสร้างไม่ซับซ้อนและราคาถูก ดังในรูปที่ 3.11 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ได้แก่ 1) กล้อง CCD ขนาดเล็ก (WAT-910HX ของ Watec Co. Ltd.), 2) เลนส์ตา ขนาดเล็ก (YV2.2X1.4ASA2 ของ บริษัท ฟุจินอน จำกัด) และ 3) ออปติคัลฟิลเตอร์รูรับแสงขนาดเล็ก (บริษัท เอ็ดมันด์ จำกัด) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของ optical filter เท่ากับ 25 มม. ความยาวคลื่นศูนย์กลางของ bandpass filter เท่ากับ 632 nm และ FWHM ของแบนด์วิดท์เท่ากับ 10 nm ซึ่งจะครอบคลุมการปลดปล่อยแก๊สออกซิเจนที่ 630.0 nm ได้ทั้งหมด โดยราคาทั้งหมดของระบบ ASI แบบใหม่นี้อยู่ที่ประมาณ 1,000\$US (รวมราคาคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานและอุปกรณ์เข้ารหัสสัญญาณวิดีโอแล้ว) ซึ่งราคานี้มีค่าประมาณ 1-2% ของราคา ASIs ระบบเดิมที่ใช้กล้อง cooled CCD

อย่างไรก็ตาม ปัญหาหนึ่งข้อของ low-cost ASI ดังกล่าวนี้คือค่าอัตราส่วน SNR ที่เกิดขึ้นเนื่องจากข้อด้อยของแบบสุ่มของกล้อง noncooled CCD การที่จะกำจัดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการดังกล่าวออกไปนั้นจะใช้วิธีการเฉลี่ยภาพต้นฉบับ (raw images) ที่บันทึกได้ ดังในรูปที่ 3.12 โดยรูปที่ 3.12(b-d) แสดงภาพเฉลี่ยที่ได้จากการรวมภาพต้นฉบับจำนวน 20, 30 และ 40 ภาพ และใช้เวลาในการรวมเท่ากับ 80, 120 และ 160 วินาทีตามลำดับ

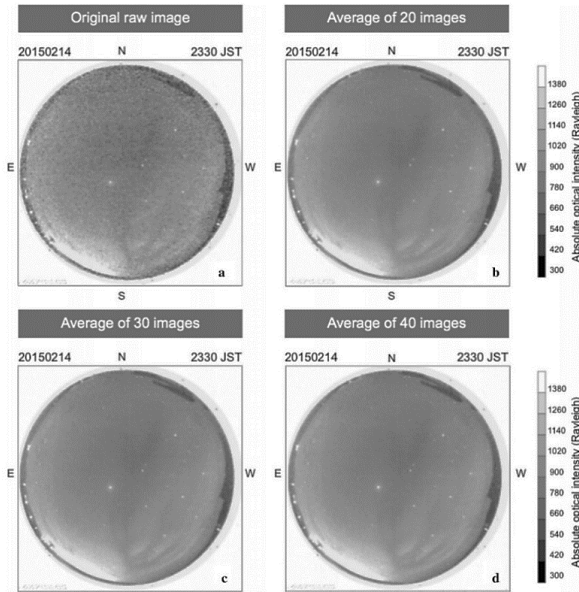
รูปที่ 3.12 แสดงการกระจายตัวการเกิดขึ้นของ EPBs ในช่วงระยะเวลา 1.5 ปีของการตรวจจับ EPBs ช่วงเริ่มต้นที่เกาะอิซิงากิ ประเทศญี่ปุ่น จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ EPBs จะเกิดขึ้นมากที่สุดในช่วงเดือนฤดูออกซิเจนในระหว่างกิจกรรมสุริยะมากที่สุดในช่วงเทออร์โลงติจูดของทวีปเอเชีย การกระจายตัวการเกิดขึ้นของ EPBs ในรูปที่

3.13a ค่อนข้างสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการศึกษาก่อนหน้านี้ กล่าวคือ EPBs เกิดขึ้นมากที่สุดในช่วงเดือนฤดูอิกวินออกซ์ อีกทั้ง EPBs ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นทันทีหลังจากเวลา 20:00 LT (ช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตก) และเกิดขึ้นน้อยลงในช่วงเวลาหลังเที่ยงคืน รูปที่ 3.13b แสดงสถิติการเกิดขึ้นของ EPBs ที่ตรวจจับได้โดย OMTI ASI ที่เกาะอิซิงากิ ซึ่งจะเห็นได้ว่า EPBs ส่วนใหญ่ที่ถูกตรวจจับได้ด้วย OMTI ASI ก็ถูกตรวจจับได้เช่นกันด้วย low-cost ASI ที่นำเสนอ อิทธิพลของ EPBs ที่มีต่อสภาพอวกาศที่สำคัญก็คือผลกระทบต่อ EPBs ที่มีต่อซินทิลเลชันของสัญญาณ GNSS (อัตราการวัดสัญญาณเท่ากับ 50 Hz) เพื่อที่จะเฝ้าติดตามผลกระทบของ EPBs ที่มีต่อคุณภาพของสัญญาณการนำทางที่ได้รับที่สถานีภาคพื้นดิน รูปที่ 3.14 แสดงการตรวจจับ EPBs ด้วย low-cost ASI พร้อมกับการวัดซินทิลเลชันของสัญญาณดาวเทียมที่เวลา 23:37 JST ภาพที่เบี่ยงเบนไปจาก low-cost ASI จะถูกแสดงเป็นภาพแบรคกราวด์ วงกลมในรูปแทนตำแหน่งของดาวเทียมภายในระยะ all-sky field-of-view และขนาดของวงกลมบ่งชี้ถึงขนาดของ S4 index ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้แอมพลิจูดซินทิลเลชัน ซึ่งจากการศึกษาพบว่า low-cost ASI สามารถที่จะตรวจจับและพบ EPBs ในช่วงเวลาเดียวกับที่ตรวจจับพบซินทิลเลชันจากค่า S4 index ที่วัดได้จากดาวเทียมหลายดวงของระบบ GNSS ที่เวลาเดียวกัน

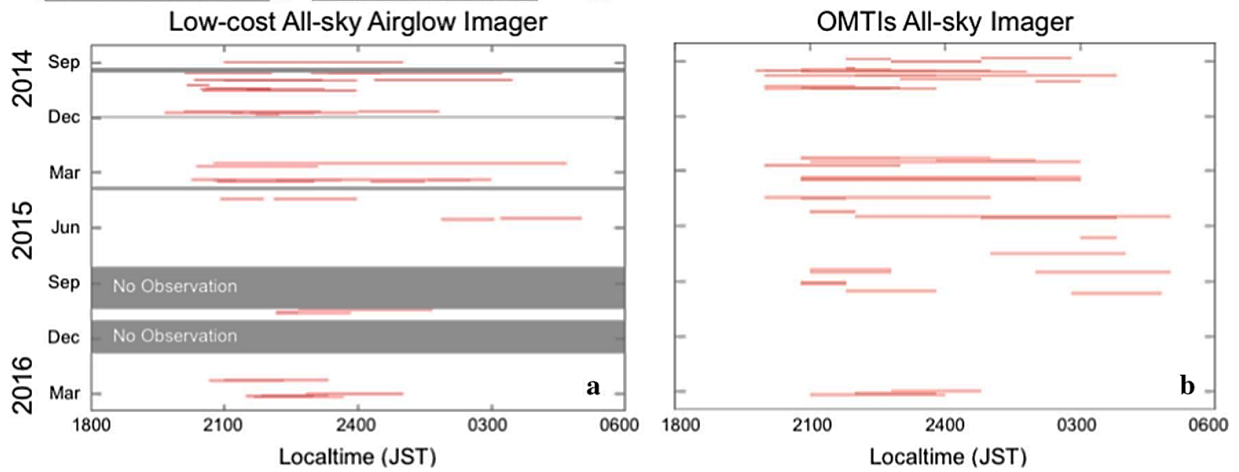


รูปที่ 3.11 ระบบ ASI ใหม่ที่นำเสนอโดยมีขนาดเล็ก โครงสร้างไม่ซับซ้อนและราคาถูก [4]

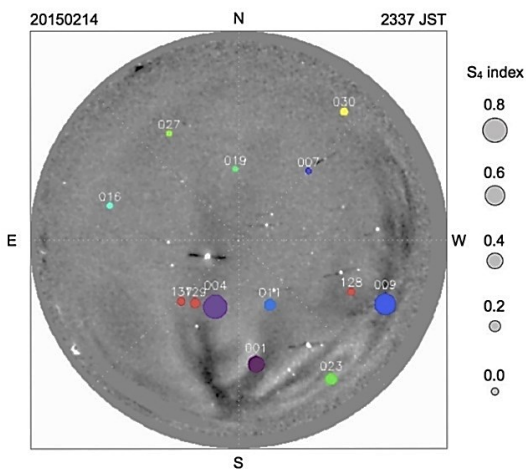
หลังจากนั้น เราสามารถนำ low-cost ASIs ไปติดตั้งที่สถานีที่ต่าง ๆ ในบริเวณเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำได้เพื่อที่ว่าจะสามารถเฝ้าตรวจจับการกระจายตัวของ EPBs ที่มีสเกลใหญ่ แล้วนำไปสู่การระบุการเกิดขึ้นและการก่อตัวของ EPBs เหล่านี้ได้ อย่างไรก็ตาม เพื่อที่จะประเมินความสามารถดังกล่าวสำหรับการเฝ้าตรวจจับ EPBs ที่มีสเกลใหญ่ จึงได้ติดตั้ง low-cost ASIs ที่เกาะอิซิงากิ ประเทศญี่ปุ่น กับเมืองไต้หวัน ประเทศไต้หวัน ที่แล้วทำแมปโครงสร้างของ EPBs โดยการรวมข้อมูล ASIs ที่สองตำแหน่งนี้เข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ผลการนำภาพ EPBs ที่ตรวจจับได้จากระบบ low-cost ASIs 2 แห่งที่เกาะอิซิงากิและเมืองไต้หวัน เวลา 13:55 UT ในวันที่ 16 มีนาคม 2558 ซึ่งเป็นช่วงเวลาก่อนเกิดพายุเฮอริเคนแพทริกที่รุนแรงที่สุดลูกหนึ่งในวัฏจักรสุริยะที่ 24 จากรูปที่ 3.15 จะเห็นว่า “low-cost ASIs สามารถจะติดตั้งหลายตำแหน่งในหลาย ๆ ประเทศในลักษณะเครือข่าย low-cost ASIs แล้วนำภาพทั้งหมดมาต่อกัน เพื่อเฝ้าตรวจจับ EPBs แล้วแจ้งเตือนตำแหน่งที่พบ และเพื่อวัดระดับซินทิลเลชัน แล้วนำไปสู่การกำจัดดาวเทียมของบางระบบ GNSS ออกจากการระบุพิกัด RTK ซึ่งจะทำให้การระบุพิกัด RTK ของเครื่องรับ GNSS ที่อาศัยเทคโนโลยี 5G, UAV, และอุปกรณ์อื่น ๆ มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น



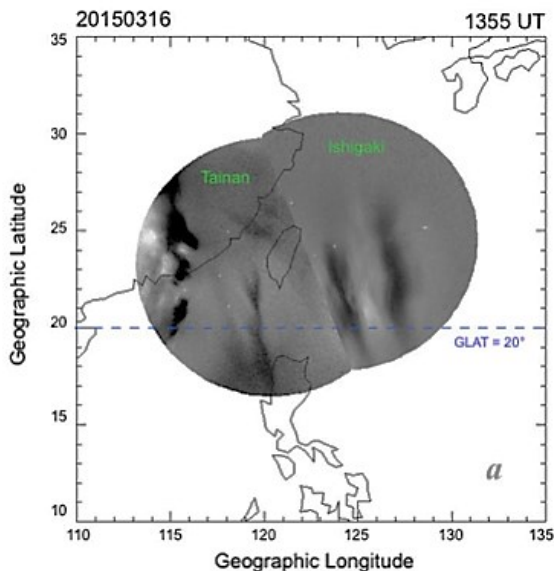
รูปที่ 3.12 (a) ภาพ EPBs ต้นฉบับที่บันทึกได้ที่มีนอยส์ และ (b-d) ภาพเฉลี่ยที่ได้จากการรวมภาพต้นฉบับ [4]



รูปที่ 3.13 การกระจายตัวการเกิดขึ้นของ EPBs ในช่วงระยะเวลา 1.5 ปี ที่เกาะอิซิงากิ ประเทศญี่ปุ่น [4]



รูปที่ 3.14 การตรวจจับ EPBs ด้วย low-cost ASI พร้อมกับการวัดซินทิลเลชันของสัญญาณดาวเทียม [4]



รูปที่ 3.15 ภาพ EPBs ที่ตรวจจับได้จาก low-cost ASIs 2 แห่งที่เกาะอิซิงากิและเมืองไต้หวัน มารวมกัน [4]

3.5 ผลของพลาสมาบับเบิลและสเปรดเอฟที่รุนแรงนำไปสู่ซินทิลเลชันที่รุนแรงที่ไต้หวัน ประเทศจีน

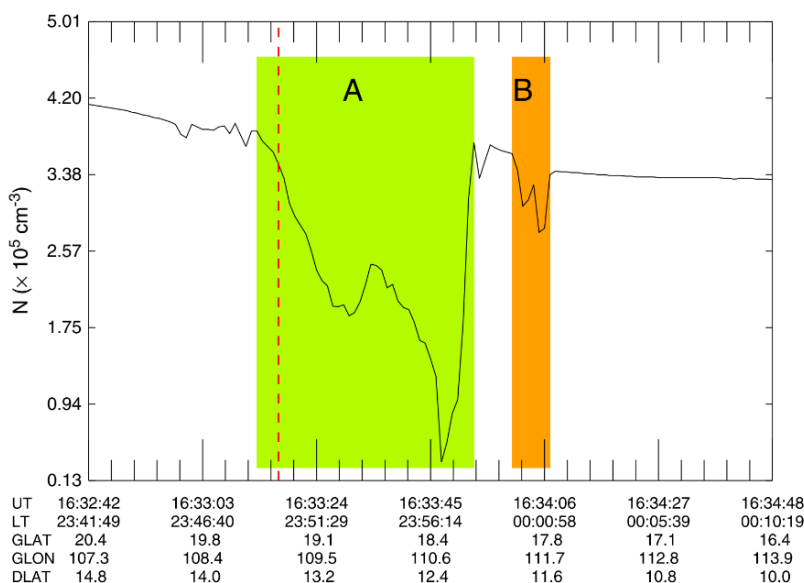
งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้แสดงให้เห็นว่า “strong range spread F” (SSF) ในชั้นไอโอโนสเฟียร์มีความสัมพันธ์กับการเกิดซินทิลเลชันที่มีต้นเหตุมาจาก EPBs เป็นที่ทราบกันดีว่า Spread F (SF) เกิดขึ้นจากความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยสเกลของความผิดปกติมีขนาดตั้งแต่หลายเมตรไปจนถึงหลายร้อย km เช่น

a) Large-scale irregularities จะถูกเรียกว่าเป็น equatorial plasma bubbles (EPBs) เมื่อพวกมันมีลักษณะคล้ายกับ backscatter plumes ที่ถูกตรวจจับได้ด้วยเครื่อง ISR ที่ Jicamarca ประเทศเปรู โดยทั่วไปการหายไปของความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่รุนแรงดังกล่าวถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการ RTIs ที่เกิดขึ้นที่ด้านล่างของชั้น F ในตอนกลางคืนที่แถบเส้นศูนย์สูตร ความกว้างตามแนวลองจิจูดของ EPBs มีขนาดหลายร้อย km และการหายไปของความหนาแน่นอิเล็กตรอนใน EPBs ก็อาจจะมียาค่า 20-30% ไปจนถึงขนาดที่สูงถึง 3 เท่า โดยทั่วไป EPBs จะวางตัวไปตามสนามแม่เหล็กโลกไปจนถึงละติจูดแม่เหล็กโลกประมาณ $\pm 20^\circ$ ที่ผ่านมา มีการพบ super plasma bubbles ที่ขยายตัวสูงมากไปจนถึง 2500 km และอาจจะขยายตัวเกินกว่าละติจูดแม่เหล็กโลก 31°N ในช่วงพายุแม่เหล็กโลกที่รุนแรง และหลังจากที่เกิด RTI แล้ว ความไม่เสถียรภาพอันดับที่ 2 สามารถที่จะนำไปสู่กระบวนการที่เกิดต่อเนื่องได้และสร้างสเปกตรัมที่กว้างของโครงสร้างความผิดปกติที่มีขนาดสเกลที่ต่างกัน

b) ส่วน Small-scale irregularities ที่สัมพันธ์กับ large-scale depletions นั้นก็สามารถที่จะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีความไม่เท่ากันของความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่มีทิศทางพุ่งลง ดังนั้น cross-field instability ก็อาจจะเป็นกลไกอันดับที่ 2 ที่เป็นสาเหตุของ small-scale plasma irregularities ได้

ความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ทำให้เกิดซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์นั้น มักจะเกิดขึ้นส่วนใหญ่ตอนกลางคืนในชั้นไอโอโนสเฟียร์แถบเส้นศูนย์สูตรและขั้วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ซินทิลเลชันของสัญญาณ GPS L band (1.575 GHz) scintillation จะมีความอ่อนไหวต่อระยะทางความผิดปกติ $\sim 360\text{--}400\text{ m}$ ที่ระดับความสูง 350 km ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ และซินทิลเลชันย่านความถี่ VHF (260 MHz) จะมีความอ่อนไหวต่อระยะทางความผิดปกติ $\sim 1\text{ km}$ ที่ระดับความสูง 350 km ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้รายงานว่าการหายไปอย่างรวดเร็วของ TEC ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ใกล้เส้นศูนย์สูตรและบริเวณ EIA นั้นมักจะเกิดขึ้นพร้อมกันกับซินทิ

เลขชี้ที่รุนแรง และมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิดระหว่าง EPBs และ scintillations” ถึงแม้ว่าจะมีงานวิจัยนำเสนอเสนอออกมาเกี่ยวกับซินทิลเลชันและ EPBs อย่างต่อเนื่องแล้วก็ตาม แต่ก็ยังไม่มีรายงานผลการเฝ้าติดตามการเกิด SSF (strong range spread F) และ EPB พร้อมกันด้วยการวัดค่าความหนาแน่นไอออนด้วย in situ ดังนั้น Wang และคณะ [5] จึงได้นำเสนอแนวความคิดใหม่ในการเฝ้าติดตามการเกิด EPBs ที่สถานีไฮหนาน ในบริเวณละติจูดต่ำ (19.5°N, 109.1°E) โดยใช้อุปกรณ์หลายประเภทเพื่อเฝ้าติดตามการเกิด SSF และ EPB พร้อมกัน ได้แก่ การใช้ดีจีซอนด์ (DPS4), เครื่องวัดซินทิลเลชัน และบอร์ดวัดค่าความหนาแน่นไอออน in situ บนดาวเทียม ROCSAT-1 ในปี 2004 (ช่วงวัฏจักรสุริยะที่สูง) จากการศึกษาพบว่า SSF เกิดขึ้นก่อนเที่ยงคืนและปรากฏให้เห็นนานถึง 3.5 ชั่วโมง โดยซินทิลเลชันเกิดขึ้นมาพร้อมกับ RSF ที่รุนแรง และ ROCSAT-1 ก็ได้สังเกตเห็น PBs พร้อมกันด้วยที่สถานีไฮหนาน โดย PBs ดังกล่าววางตัวอยู่ในแนว E-W ด้วยระยะทางที่มากกว่า ~200 km นอกจากนี้ยังพบ PBs จำนวน 2 ลูกที่สังเกตได้ในครั้งที่ 2 ก็ยังคงวางตัวอยู่ในแนว E-W เช่นเดิมด้วยระยะทางประมาณ ~220 km และ ~35 km โดยในการศึกษาครั้งนี้ จะทำการลดผลกระทบมลติพาร (ความผิดพลาดในการระบุพิกัดหรือติดตามที่ไม่ใช่ซินทิลเลชัน) โดยพิจารณาข้อมูลที่วัดได้จากมุมยกที่มากกว่า 25° เท่านั้น นอกจากนี้ เราต้องการที่จะแมทซ์มุมมองของเครื่องรับ GNSS ที่สอดคล้องกับพื้นที่ครอบคลุมของ Digisonde ด้วย เราจึงจะทำการวิเคราะห์โดยพิจารณาค่าข้อมูลจาก GPS receiver ที่มีมุมยกสูงกว่า 60° เท่านั้น เช่นกัน การวิเคราะห์เชิงสถิติที่ถูกสร้างขึ้นที่ระดับสัญญาณรบกวนของเครื่องตรวจจับซินทิลเลชัน GPS ที่สถานีไฮหนานจะกำหนดให้มีค่าที่น้อยกว่า 0.1 ดังนั้นเราจะพิจารณาค่า S4 index > 0.25 เป็นตัวบ่งชี้ซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ระดับปานกลางและรุนแรง



รูปที่ 3.16 ความหนาแน่นไอออนจากดาวเทียม ROCSAT-1 ที่ลดลงที่สอดคล้องกับการเกิด EPBs 2 ลูก [5]

จากระยะทางตามแนวลองติจูดในรูปที่ 3.16 พบว่า ขนาด E-W ของ EPB ลูกที่ A จะถูกประมาณว่ามีความยาวประมาณ 220 km ในขณะที่ ขนาด E-W ของ EPB ลูกที่ B จะถูกประมาณว่ามีความยาวประมาณ 40

km จากผลการศึกษาที่สำคัญและน่าสนใจในครั้งนี้คือ ดิจิซอนด์และ ROCSAT-1 ได้สังเกตเห็น EPB ลูกเดียวกันที่สถานีไฮหนานแต่มีระดับความสูงที่ต่างกัน พร้อมกับสามารถตรวจจับซินทิลเลชันที่มีความรุนแรงได้พร้อมกันด้วย นอกจากนี้ จากการใช้ข้อมูลที่วัดได้ร่วมกันจาก Digisonde และ GPS scintillation monitor ที่สถานีไฮหนาน ร่วมกับการวัดค่าความหนาแน่นไอออน in situ ด้วย ROCSAT-1 ในช่วงที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกและช่วงที่ไม่มีพายุ พบว่า ซินทิลเลชันมักจะเกิดพร้อมกับปรากฏการณ์ SSF และการหายไปของไอออนเสมอ อีกทั้ง ยังพบว่า EPBs จะวางตัวมุ่งหน้าไปทางขั้วโลกตามแนวของสนามแม่เหล็กโลกที่สร้างร่อง (troughs) ที่หายไปของความหนาแน่นอิเล็กตรอน โดย SSF เกิดขึ้นเนื่องจาก EPBs และสามารถที่จะพิจารณาว่าเป็นผลที่สืบเนื่องมาจากกระบวนการ RTI ได้

3.6 การคำนวณค่าบ่งชี้ระดับความรุนแรง ได้แก่ ค่า ROT (rate of TEC change) และค่า ROTI (ROT index) รวมถึงวิเคราะห์ผลกระทบของพลาสมาบับเบิล

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงค่าบ่งชี้ (proxy) ต่าง ๆ ที่ใช้เพื่อบอกความเป็นไปได้ของการเกิดความผิดปกติของพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตร (EPB) ได้แก่ ค่า ROT (rate of TEC change), ค่า ROTI (rate of TEC change index), ค่า ROTI_{ave} (ค่าเฉลี่ยของ ROTI), ค่า TEC gradient ระหว่างสถานี GNSS (ΔTEC), ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ ΔVTEC ($\sigma\Delta\text{VTEC}$), ค่าเฉลี่ยของ $\sigma\Delta\text{VTEC}$ ($\sigma\Delta\text{VTEC}_{\text{ave}}$) โดยคณะผู้วิจัยโครงการศึกษาฯ นี้ในนำเสนอผลงานวิจัยในวารสารวิชาการนานาชาติในปี 2020 [6] งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของความผิดปกติของ EPB ภายใต้พายุแม่เหล็กโลกที่แตกต่างกันในช่วงเดือนมีนาคม 2558 และเดือนกันยายน 2560 โดยเราจะใช้ค่าข้อมูล TEC ที่วัดได้เครื่องรับ GNSS ที่เมือง SGO (6.89°N, 79.87°E), IISC (12.94°N, 77.57°E) และ HYDE (17.40°N, 78.50°E) ในประเทศอินเดีย โดยสถานีเหล่านี้ตั้งอยู่ระหว่างร่อง (trough) และยอด (crest) ของความผิดปกติการไอออนบริเวณเส้นศูนย์สูตร (EIA) ในการศึกษาจะใช้ค่า ROT (Rate of TEC change) และค่า ROTI (Rate of TEC change index) แทนความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์อันเนื่องมาจากพลาสมาบับเบิล ซึ่งได้ถูกแนะนำโดย Pi และคณะ [7] ว่าเป็นตัวบ่งชี้ (proxy) ที่ดีสำหรับความแปรปรวนชั้นไอโอโนสเฟียร์และสามารถที่นำมาใช้ในการบรรยายคุณลักษณะของความผิดปกติพลาสมาบับเบิลได้ โดยค่า ROT (Rate of TEC change) หาค่าได้จากสมการที่ (3.8)

$$ROT(t_k^i) = \frac{TEC_k^i - TEC_{k-1}^i}{t_k^i - t_{k-1}^i} \quad (3.8)$$

โดยที่ TEC แทนค่า Slant TEC, i คือจำนวนดาวเทียมที่มองเห็นได้และ k คือ epoch time (ช่วงเวลาที่ทำการบินที่ค่า) ในที่นี้ $k = 0.5$ นาที หลังจากนั้น เราจะหาค่า ROTI (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ ROT) ที่หาค่าออกมาทุก ๆ 5 นาที โดยหาค่าได้จากสมการที่ (3.9)

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2} \quad (3.9)$$

โดยที่ $\langle \text{ROT} \rangle$ เป็นค่าเฉลี่ยของ ROT ในแต่ละ epoch time โดยในงานวิจัยนี้ $\text{ROTI} \geq 0.5 \text{ TECU min}^{-1}$ บ่งบอกถึงความผิดปกติของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เกี่ยวข้องกับซินทิลเลชัน โดยทั่วไป ระดับของความผิดปกติของชั้นไอโอโนสเฟียร์แบ่งออกเป็น 3 ระดับ: ระดับที่ 1 คือไม่รุนแรง ($0.25 \leq \text{ROTI} < 0.5$); ระดับที่ 2 คือปานกลาง ($0.5 \leq \text{ROTI} < 1$); และระดับที่ 3 คือรุนแรง ($\text{ROTI} \geq 1$) หลังจากนั้น เราก้หาค่าเฉลี่ยของ ROTI (ROTI_{ave}) ที่ใช้ในบ่งชี้ความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ทุก ๆ 30 นาที ของแต่ละสถานีสำหรับดาวเทียมที่เห็นได้ทุกดวงและดัชนีนี้ถูกใช้เพื่ออธิบายระดับความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ในบทความวิจัยก่อนหน้านี้เป็นจำนวนมาก โดยค่า ROTI_{ave} นี้สามารถหาค่าได้จากสมการที่ (3.10)

$$\text{ROTI}_{\text{ave}}(0, 5h) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^k \frac{\text{ROTI}(n, 0.5h, i)}{k} \quad (3.10)$$

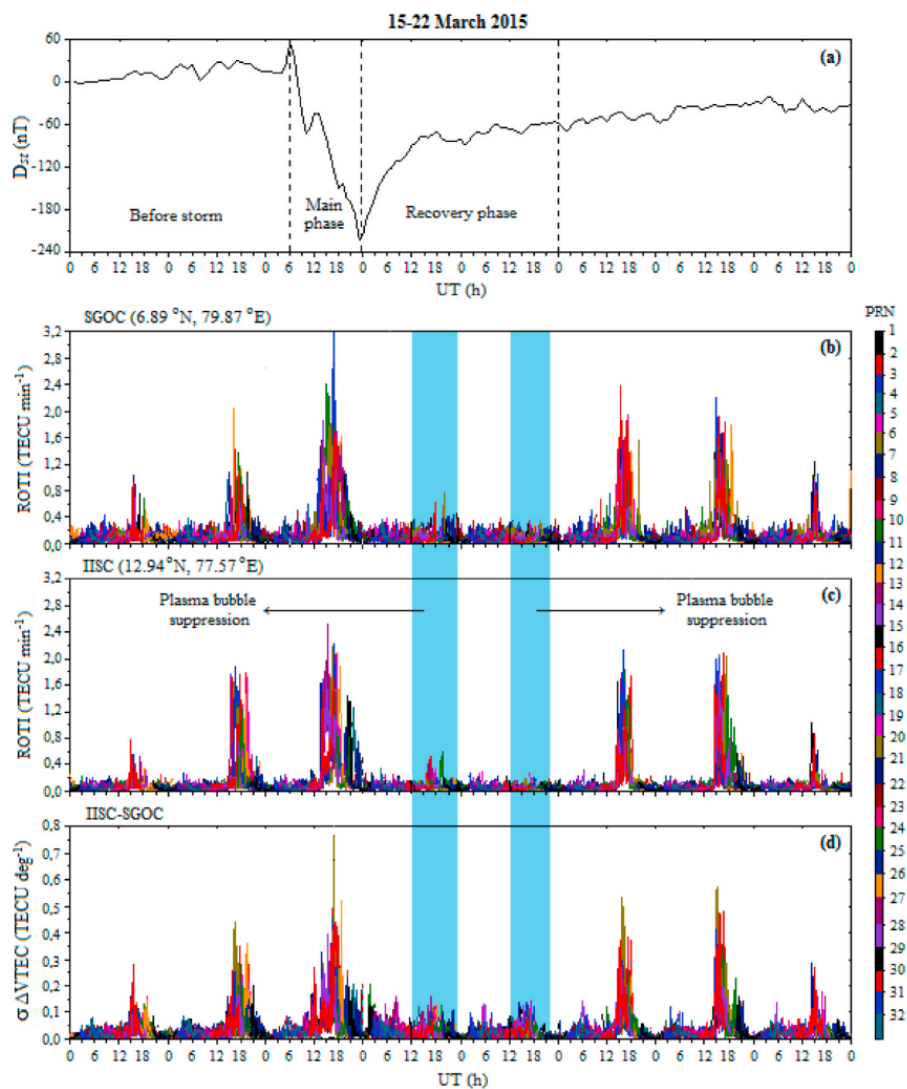
โดยที่ N คือจำนวนดาวเทียมที่มองเห็นได้, n คือหมายเลขดาวเทียม, ตัวเลข 0.5 หมายถึงระยะเวลาที่ใช้ในการหาค่าทุก ๆ ครึ่งชั่วโมง (0, 0.5, ... 23.5, 24 ชั่วโมง), i คือ epoch time ที่ใช้หาค่า ROTI ทุก ๆ 5 นาที ภายในช่วงเวลาทั้งหมด 30 นาทีในการหาค่า ROTI_{ave} , k เป็นจำนวนของค่า ROTI ที่หาค่าได้ในเวลา 30 นาที สำหรับดาวเทียมแต่ละดวง ค่าของ ROTI_{ave} แบ่งออกเป็น 3 ระดับเช่นกัน อาทิ ระดับที่ 1 คือไม่มีความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ ($\text{ROTI}_{\text{ave}} \leq 0.4$); ระดับที่ 2 คือมีความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์เกิดขึ้น ($0.4 < \text{ROTI} \leq 0.8$); และระดับที่ 3 คือมีความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์รุนแรง ($\text{ROTI} > 0.8$) หลังจากนั้น ค่า TEC gradient ระหว่างสถานี GNSS (ΔTEC) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงตามแนวละติจูดของค่า Vertical TEC ดังนั้น สถานีต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาจะพยายามเลือกสถานีที่ตั้งอยู่ในแนวลองจิจูดเดียวกันหรือใกล้ ๆ กันโดยประมาณ ค่า ΔVTEC สำหรับกลุ่มสถานี IISC-SGOC และ HYDE-IISC ได้ถูกหาค่าโดยใช้สมการที่ (3.11)

$$\Delta\text{VTEC}(t_i^k) = \frac{\text{VTEC}_x(t_i^k) - \text{VTEC}_y(t_i^k)}{\Delta\text{latitude}} \quad (3.11)$$

โดยที่ x และ y แทน 2 คู่สถานี ได้แก่ 1) สถานี IISC และ SGOC สำหรับคู่สถานี IISC-SGOC และ 2) สถานี HYDE และ IISC สำหรับคู่สถานี HYDE-IISC, i คือ epoch time (i = 1 ถึง 720), k คือจำนวนดาวเทียมที่มองเห็นได้และ $\Delta\text{latitude}$ คือผลต่างค่าละติจูดระหว่างสองสถานี โดย epoch time ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.5 นาที ซึ่งเท่ากับเวลาที่ใช้ในการหาค่า ROT ต่อจากนั้น เราจะหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ ΔVTEC ($\sigma\Delta\text{VTEC}$) บนช่วงเวลาที่พิจารณาเท่ากับ 5 นาที ต่อไป เราจะหาค่าเฉลี่ยของ $\sigma\Delta\text{VTEC}$ ($\sigma\Delta\text{VTEC}_{\text{ave}}$) ภายในช่วงเวลา 30 นาที สำหรับแต่ละคู่สถานี สุดท้าย เราจะพิจารณาค่าความน่าจะเป็นของการเกิดพลาสมาบับเบิลสำหรับแต่ละชั่วโมง ซึ่งหาค่าได้จากสมการที่ (3.12)

$$\text{Occurrence Probability}(t_i)\% = \frac{X_i(\text{ROTI}_{\text{ave}} > 0, 4)}{X_{i(\text{total})}} \times 100 \quad (3.12)$$

โดย i เป็นชั่วโมงของวัน, X คือจำนวนครั้ง (epoch) ที่ค่า $ROTI_{ave}$ มีค่ามากกว่า 0.4 และ X_{total} คือจำนวน epoch ทั้งหมด ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งหมดจะถูกเปรียบเทียบซึ่งกันและกันและกันตามชั่วโมง สภาพอากาศแม่เหล็กโลกและละติจูด ผลการศึกษาความผิดปกติพลาสมาบับเบิลแถบเส้นศูนย์สูตรที่เกิดขึ้นในช่วงพายุแม่เหล็กโลกมีดังนี้ จากรูปที่ 3.17 เป็นการเปลี่ยนแปลงรายวันของดัชนี Dst, ค่า ROTI ของสถานี SGOC, ค่า ROTI ของสถานี IISC และค่า $\sigma\Delta VTEC$ ของคู่สถานี IISC-SGOC ระหว่างวันที่ 15-22 มีนาคม 2558 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เกิดพายุเซนต์แพทริก - พายุที่รุนแรงมากที่สุดในวัฏจักรไซเคิลที่ 24 โดยค่า Dst มีค่าต่ำสุดถึง -234 nT ดังในรูปที่ 3.17(a) การเพิ่มขึ้นที่มากที่สุดในระดับความรุนแรงของ ROTI จะถูกพบได้ตั้งแต่เวลา 13-19 UT (ช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตก) โดยมีค่ามากกว่า 1 TECU min⁻¹ ซึ่งแสดงถึงการเกิดความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรง โดยความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่สังเกตเห็นได้ในช่วงเวลานี้จะถูกเรียกว่าความผิดปกติพลาสมาบับเบิลหลังพระอาทิตย์ตก



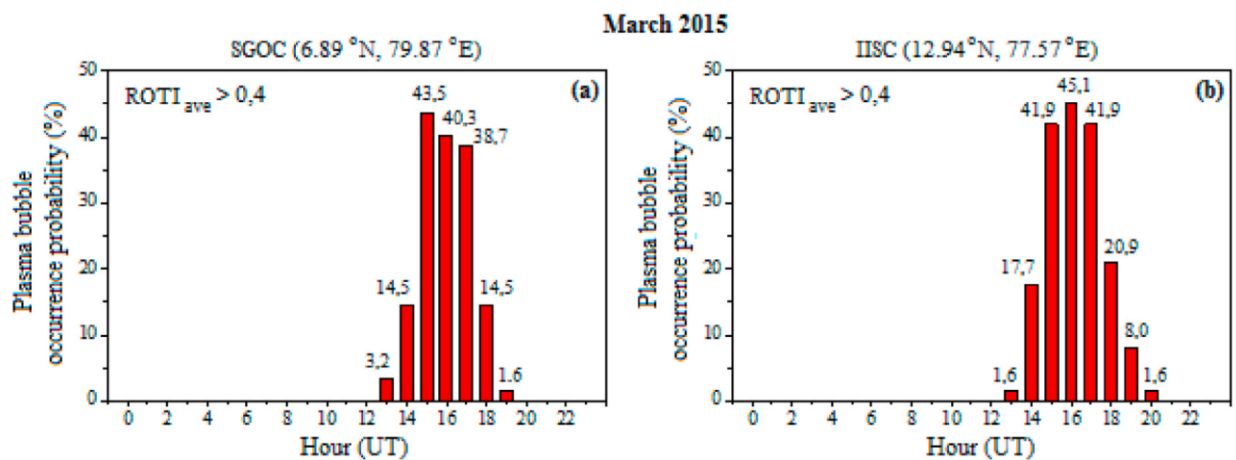
รูปที่ 3.17 การเปลี่ยนแปลงรายวันของ (a) ดัชนี Dst (b) ROTI ของสถานี SGOC (c) ROTI ของสถานี IISC และ (d) ค่า $\sigma\Delta VTEC$ ของคู่สถานี IISC-SGOC ระหว่างวันที่ 15-22 มีนาคม 2558 (LT = UT+5 ชั่วโมง)

โดยนักวิจัยได้รายงานไว้ว่า ค่าเกรเดียนต์ความหนาแน่นพลาสมาในแนวตั้งที่สูงอันเนื่องมาจากการรวมตัวกันใหม่ที่สูงที่ด้านล่างของชั้น F บริเวณเส้นศูนย์สูตรหลังพระอาทิตย์ตกนั้นเป็นสาเหตุการก่อตัวของกระบวนการ RTI โดยกระบวนการ RTI นี้เป็นต้นเหตุให้เกิดบริเวณพลาสมาที่หายไปหรือถูกเรียกว่า “ความผิดปกติพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตร” ที่จะเกิดการยกตัวขึ้นไปชั้น F ด้านบนได้ โดยความผิดปกติพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตรอาจจะถูกสร้างขึ้นเป็นปกติหลังจากที่พระอาทิตย์ตกอันเนื่องมาจากการก่อตัวของกระบวนการ RTI ที่ด้านล่างของชั้น F บริเวณเส้นศูนย์สูตรได้ จากรูปที่ 3.17(b) และ 3.17(c) การเพิ่มขึ้นในระดับความรุนแรงของ ROTI เมื่อเทียบกับค่า ROTI ในสภาวะที่ไม่มีพายุจะถูกพบได้ทั้งสองแห่งในช่วงเฟสหลักของพายุแม่เหล็กโลก นักวิจัยได้กล่าวไว้ว่า ระดับความรุนแรงของกิจกรรมแม่เหล็กโลกที่เพิ่มขึ้นนั้นอาจจะเป็นต้นเหตุที่ทำให้้อตราการเกิดพลาสมาบับเบิลเพิ่มสูงขึ้นได้ โดยสนามไฟฟ้าเจาะทะลุแบบทันที (PPEFs) ในช่วงเฟสหลักมีทิศทางมุ่งหน้าไปทางตะวันออกที่ตอนพระอาทิตย์ตก ทำให้ ExB drift ที่ชั้น F บริเวณเส้นศูนย์สูตรมีทิศทางพุ่งขึ้นและวางตัวขนานไปตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกไปยัง $\pm 15^\circ$ (EIA crest) ซึ่งสภาวะการณ์ดังกล่าวนี้เป็นสภาวะที่เอื้อต่อการเกิดกระบวนการ RTI เป็นอย่างยิ่ง ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของกระบวนการ RTI ในช่วงเฟสหลักของพายุแม่เหล็กโลกจึงเป็นต้นเหตุการเพิ่มขึ้นในระดับความรุนแรงของความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เราเรียกว่า “พลาสมาบับเบิลหลังพระอาทิตย์ตก” นอกจากนี้ จากรูปที่ 3.17(b) และ 3.17(c) การลดลงในระดับความรุนแรงของ ROTI ที่ทั้งสองแห่งก็ถูกพบเช่นกันในช่วงเวลา 13-19 UT ระหว่างวันที่ 18-19 มีนาคม 2558 โดยการเกิดพลาสมาบับเบิลในช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตกดังกล่าวจะถูกยับยั้ง (ไม่ให้เกิดขึ้น) อย่างสิ้นเชิงในช่วงเฟสพื้นตัวของพายุแม่เหล็กโลก

จากการศึกษาพบว่า มีกลไก 2 ประการที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการยับยั้งการเกิด EPBs ได้ในช่วงเฟสพื้นตัวของพายุแม่เหล็กโลก กลไกแรกคือสนามไฟฟ้าไดนาโมการรบกวน (DDEF) ที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตก โดยพายุแม่เหล็กโลกจะเป็นตัวสร้างลมนิวทรัลที่บริเวณออโรรา หลังจากนั้นการก่อกวนของลมนิวทรัลก็เดินทางมาถึงชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรภายในระยะเวลาไม่นาน (2-3 ชั่วโมง) แล้วทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตกตอนพระอาทิตย์ตก โดย DDEF ที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตกนี้เป็นต้นเหตุให้ชั้น F บริเวณเส้นศูนย์สูตรตอนพระอาทิตย์ตกนั้นเคลื่อนตัวต่ำลง (downward) แล้วนำไปสู่การยับยั้งกระบวนการ RTI กลไกที่ 2 คือสนามไฟฟ้าเจาะทะลุแบบทันที (PPEF) ในช่วงเฟสพื้นตัวของพายุแม่เหล็กโลกที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตกตอนพระอาทิตย์ตก โดย PPEF ที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตกนี้เป็นต้นเหตุให้ชั้น F บริเวณเส้นศูนย์สูตรตอนพระอาทิตย์ตกนั้นเคลื่อนตัวต่ำลง ซึ่งเป็นการยับยั้งกระบวนการ RTI ดังนั้น ทั้งสองกลไกนี้นำไปสู่การบีบกด (ยับยั้ง) ความผิดปกติพลาสมาบับเบิลที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรในช่วงเวลาพระอาทิตย์ตก อีกทั้ง การยับยั้งความผิดปกติพลาสมาบับเบิลที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรเกิดขึ้นในช่วงเฟสพื้นตัวมากกว่าที่จะเกิดในช่วงเฟสหลักของพายุแม่เหล็กโลก

รูปที่ 3.17(d) แสดงการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่า $\sigma\Delta VTEC$ สำหรับดาวเทียมที่มองเห็นได้ทุกดวงในระหว่างวันที่ 15-22 มีนาคม 2558 การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่า $\sigma\Delta VTEC$ จะแสดงพฤติกรรมที่คล้ายกับการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่า ROTI ตามที่สังเกตเห็นได้ที่สถานี SGO และ IISC แสดงให้เห็นว่า “มีความสัมพันธ์กันอย่างมากระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า VTEC gradient ตามแนวละติจูดกับการเกิดความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ แอมพลิจูดของ $\sigma\Delta VTEC$ มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดตอน 13-19 UT (ช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตก) ตอนที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก พฤติกรรมของค่า ROTI และค่า $\sigma\Delta VTEC$ ตอนหลังพระอาทิตย์ตกแสดงแนวโน้มและทิศทางการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกันทั้ง 2 แห่ง จากรูปที่ 3.17(d) พบว่า แอมพลิจูดของ $\sigma\Delta VTEC$ ที่สังเกตตอนหลังพระอาทิตย์ตกในช่วงเฟสหลักของพายุแม่เหล็กโลกนั้นจะมีค่าที่สูงกว่าค่าดังกล่าวในช่วงเวลาที่ไม่มีพายุ (เงียบ) การเพิ่มขึ้น

ของแอมพลิจูดของค่า TEC ที่สังเกตตอนหลังพระอาทิตย์ตกในช่วงเฟสหลักของพายุนั้นบ่งชี้ผลเชิงกระตุ้นการเกิดความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ อีกทั้ง แอมพลิจูดของ $\sigma\Delta VTEC$ ที่สังเกตได้ตอนหลังพระอาทิตย์ตกในช่วงเฟสพื้นตัวของพายุ (วันที่ 18-19 มีนาคม 2558) นั้นก็มีค่าที่ต่ำที่สุด การลดลงของแอมพลิจูดของค่า TEC ที่สังเกตตอนหลังพระอาทิตย์ตกในช่วงเฟสพื้นตัวของพายุนั้นบ่งชี้ผลเชิงยับยั้งการเกิดความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ กล่าวโดยสรุป “พายุแม่เหล็กโลกมีอิทธิพลอย่างมากต่อระดับแอมพลิจูดของ $\sigma\Delta VTEC$ โดยระดับแอมพลิจูดของ $\sigma\Delta VTEC$ มีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 17 มีนาคม 2558 (ในช่วงเฟสหลักของพายุ) ผลที่ได้รับเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า เฟสหลักของพายุตอนหลังพระอาทิตย์ตกส่งผลเชิงกระตุ้นให้เกิดปรากฏการณ์ EIA ในขณะที่เฟสพื้นตัวของพายุตอนหลังพระอาทิตย์ตกส่งผลเชิงยับยั้งให้เกิดปรากฏการณ์ EIA”



รูปที่ 3.18 การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่า ROTI เฉลี่ยที่สถานี SGOC และ IISC ในช่วงเดือนมีนาคม 2558

การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่า ROTI เฉลี่ย ($ROTI_{ave}$) ที่สถานี SGOC และ IISC ในช่วงเดือนมีนาคม 2558 มีแสดงไว้ในรูปที่ 3.18(a) และ 3.18(b) ตามลำดับ จากรูป พบว่า ค่าของ $ROTI_{ave}$ ตอน 13-20 UT นั้นมีค่าที่สูงเกินกว่า $0.4 \text{ TECU min}^{-1}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า “มีความผิดปกติพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตรเกิดขึ้น” ในขณะที่ ค่าของ $ROTI_{ave}$ ที่ช่วงเวลาอื่นมีค่าที่น้อยกว่า $0.4 \text{ TECU min}^{-1}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า “ไม่มีความผิดปกติพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตรเกิดขึ้น” นอกจากนี้ ค่าความน่าจะเป็นการเกิดขึ้นของความผิดปกติพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตรเหนือสถานี SGOC และ IISC ในช่วงเดือนมีนาคม 2558 ก็ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.19(a) และ 3.19(b) จากรูป พบว่า ความผิดปกติพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตรที่ทั้ง 2 แห่ง จะเกิดขึ้นตอน 13-20 UT เท่านั้น ค่าความน่าจะเป็นการเกิดขึ้นของความผิดปกติพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตรที่สถานี SGOC มีค่าสูงสุด 43.5% ที่เวลา 16 UT และมีค่าต่ำสุด 1.6% ที่เวลา 19 UT ส่วนที่สถานี IISC เราพบว่าค่าดังกล่าวมีค่าสูงสุด 45.1% ที่เวลา 17 UT และมีค่าต่ำสุด 1.6% ที่เวลา 13 UT และ 20 UT อีกทั้ง เราไม่พบความผิดปกติพลาสมาบับเบิลที่เวลาอื่น ๆ ของ 2 สถานีนี้เลย ผลที่ได้รับเหล่านี้บ่งบอกว่า “ความผิดปกติพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตรอาจจะถูกทำให้เกิดขึ้นเป็นปกติหลังพระอาทิตย์ตกเนื่องจากการก่อตัวของกระบวนการ RTI ทางด้านล่างของชั้น F แถบเส้นศูนย์สูตร” งานวิจัยก่อนหน้านี้จำนวนมากได้ศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของ EIA (equatorial ionization anomaly) และ ESF (equatorial spread-F) ที่มีต่อการเกิดความผิดปกติพลาสมาบับเบิลที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรในช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตก โดย EIA ถูกทำให้เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่เนื่องจากการยก

ตัวสูงขึ้นของพลาสมาบริเวณรอบ ๆ เส้นศูนย์สูตรด้วยปรากฏการณ์ ExB drift จึงนำไปสู่การเกิดร่อง (trough) และยอด (crests) รอบ ๆ ละติจูดแม่เหล็กโลก $\sim \pm 15^\circ$ โดย EIA มีปริมาณ TEC และค่าเกรเดียนต์สูงที่สุดในทั้ง 2 ด้านของดิปโพลีเคเตอร์ ($\sim \pm 15^\circ$) ทำให้ความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ก็จะได้ชัดมากที่สุดที่บริเวณ EIA ดังกล่าวนี้ โดยความรุนแรงของ EIA ที่ตอนพระอาทิตย์ตกมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงผลักของ eastward PPEF ในช่วงที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก ซึ่งมันทำให้เกิดการก่อกำเนิดของความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรงตอนพระอาทิตย์ตกในชั้นไอโอโนสเฟียร์แถบเส้นศูนย์สูตร อีกทั้ง EIA ตอนพระอาทิตย์ตกก่อให้เกิดเกรเดียนต์ความหนาแน่นพลาสมาที่มีค่าสูงตั้งแต่บริเวณร่องไปจนถึงบริเวณยอด โดยเกรเดียนต์ความหนาแน่นพลาสมาที่สูงนี้เป็นต้นเหตุที่นำไปสู่การเกิดการกระจายตัวความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ในแนวเหนือ-ใต้ ระดับแอมพลิจูดของ $\sigma\Delta VTEC$ ที่เพิ่มขึ้นหลังพระอาทิตย์ตกบ่งบอกว่า “EIA ตอนพระอาทิตย์ตกมีส่วนอย่างมากที่ทำให้เกิดพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตร”

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ก็ได้อธิบายผลของพายุแม่เหล็กโลกอีกหนึ่งลูกที่เกิดระหว่างวันที่ 6-11 กันยายน 2560 โดยเราพบค่า Dst ที่ต่ำสุดมี 2 ค่า เท่ากับ -142 nT (ที่เวลา 02 UT) และ -122 nT (ที่เวลา 15 UT) ในวันที่ 8 กันยายน 2560 ที่เกิดขึ้นกับพายุลูกนี้ จึงทำให้พายุลูกนี้มีคุณลักษณะพิเศษที่น่าสนใจการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ กล่าวคือ มี 2 เฟสหลักและมี 2 เฟสพื้นตัว โดยได้ทำการศึกษาค่า $ROTI_{ave}$ ที่เกิดขึ้นที่ 3 สถานี (SGOC, IISC และ HYDE) รวมถึงค่า $\sigma\Delta VTEC$ ที่เกิดขึ้นกับคู่สถานี IISC-SGOC และ HYDE-IISC จากการศึกษา พบว่า ผลการทดลองของพายุลูกพิเศษนี้จะสอดคล้องกับผลการทดลองที่เกิดขึ้นในช่วงพายุเซนต์แพทริก แต่ผลที่น่าสนใจมากที่สุดก็คือ ระดับแอมพลิจูดของ $\sigma\Delta VTEC$ ที่เพิ่มขึ้นของคู่สถานี HYDE-IISC จะสูงกว่าค่าดังกล่าวของคู่สถานี IISC-SGOC อีกทั้ง ระดับแอมพลิจูดของ $\sigma\Delta VTEC$ ที่เพิ่มขึ้นของคู่สถานี IISC-SGOC จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนในช่วงเวลา 14-18 UT ในขณะที่ ระดับแอมพลิจูดของ $\sigma\Delta VTEC$ ที่เพิ่มขึ้นของคู่สถานี HYDE-IISC จะสังเกตเห็นได้ตั้งแต่ก่อนพระอาทิตย์ขึ้นไปจนถึงพระอาทิตย์ตก (dawn-dusk) ระดับแอมพลิจูดของ $\sigma\Delta VTEC$ หลังจากทีพระอาทิตย์ตกนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดตอนที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า “พายุแม่เหล็กโลกที่เกิดตอนหลังพระอาทิตย์ตกนั้นจะส่งผลเชิงกระตุ้นให้เกิด EIA หลังจากนั้น EIA ก็ทำให้เกิดเกรเดียนต์ความหนาแน่นพลาสมาที่สูงระหว่างร่องกับยอดของ EIA แล้วเกรเดียนต์ความหนาแน่นพลาสมาที่สูงนี้ก็ส่งผลให้เกิดความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่กระจายตัวจากทางทิศเหนือ-ทิศใต้”

รูปที่ 3.19 แสดงค่าความน่าจะเป็นของการเกิดพลาสมาบับเบิลที่สถานี SGOC, IISC และ HYDE ที่เกิดขึ้นในช่วงของวันที่ต่างกันของเดือนกันยายน 2560 อย่างไรก็ตาม เราจะพบว่า ความผิดปกติ EPBs ที่เกิดขึ้นทั้ง 3 แห่งจะเกิดขึ้นตอน 14-18 UT โดยค่าความน่าจะเป็นของ EPBs มีค่ามากที่สุดตอน 16 UT และมีค่าต่ำที่สุดตอน 18 UT และก็ไม่พบความผิดปกติ EPBs ที่เวลาอื่น ๆ ของ 3 สถานีนี้เลย ผลที่ได้รับนี้บ่งบอกว่า “ความผิดปกติ EPBs อาจจะถูกทำให้เกิดขึ้นเป็นปกติหลังพระอาทิตย์ตกเนื่องจากการก่อกำเนิดของกระบวนการ RTI ทางด้านล่างของชั้น F แถบเส้นศูนย์สูตร” โดยภาพรวมของงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้ศึกษาและวิเคราะห์ความผิดปกติ EPBs ระหว่างการเกิดพายุแม่เหล็กโลกในเดือนมีนาคม 2558 และเดือนกันยายน 2560 โดยอาศัยค่า TEC ที่ได้จากรีเซปเตอร์ GNSS จำนวน 3 สถานีที่ตั้งอยู่ในบริเวณร่องและยอดของ EIA ($\sim \pm 20^\circ$) ผลการศึกษาสามารถสรุปประเด็นใหม่ที่ค้นพบและมีประโยชน์ต่อการระบุพิกัดแบบ RTK ดังนี้

a) ความผิดปกติ EPBs พบได้ที่ช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตกในฤดูอิกวินออกซ์ทั้ง 3 สถานี ความผิดปกติ EPB สำหรับสถานีตรวจจับทั้งหมดนั้นถูกสังเกตเห็นได้ตั้งแต่เวลา 13-20 UT หรือ 18-01 UT (ซึ่งเป็นช่วงเวลาหลัง

พระอาทิตย์ตกไปจนถึงหลังเที่ยงคืน) ในช่วงฤดูคิวโนน็อกซ์ ระดับความเข้มของ ROTI ในช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตกนั้นมีค่ามากกว่า 1 TECU min^{-1} ค่าของ ROTI เฉลี่ย (ROTI_{ave}) ระหว่างช่วงเวลา 13-20 UT นั้นมีค่าสูงกว่า $0.4 \text{ TECU min}^{-1}$ ในขณะที่ ค่าของ ROTI_{ave} ที่เวลาอื่นมีค่าที่น้อยกว่า $0.4 \text{ TECU min}^{-1}$

b) อัตราการเกิดขึ้นของความผิดปกติ EPBs เหนือทุกสถานีเพิ่มขึ้นเมื่อกิจกรรมแม่เหล็กโลกมีค่าเพิ่มขึ้น

c) ผลกระทบเชิงกระตุ้นของพายุที่มีต่อ (ก่อให้เกิด) ความผิดปกติ EPBs ตอนหลังพระอาทิตย์ตกถูกพบได้ในช่วงเฟสหลักของพายุแม่เหล็กโลก

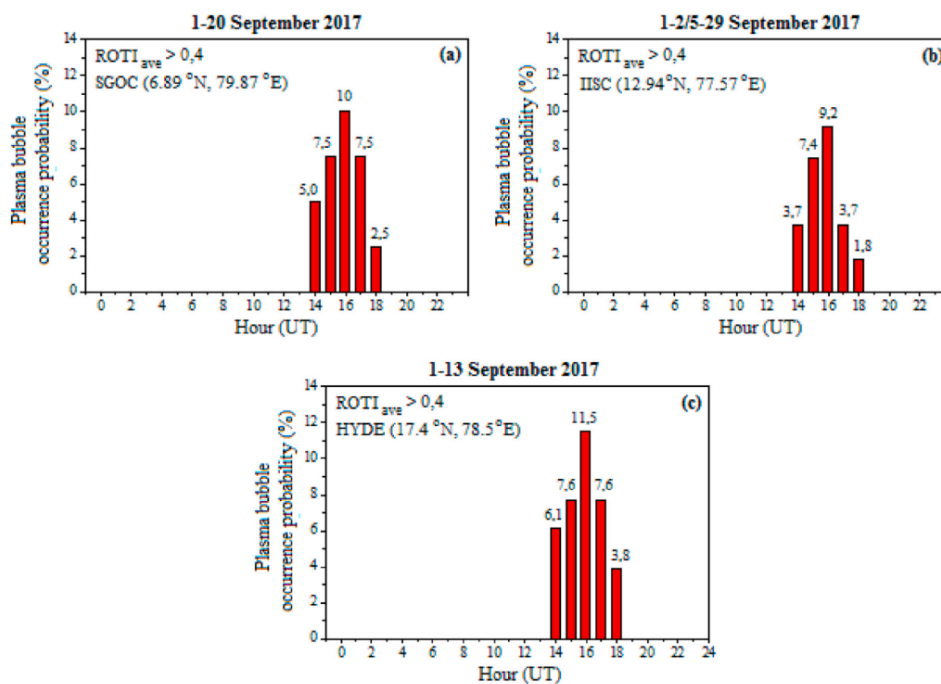
d) ผลกระทบเชิงยับยั้งของพายุที่มีต่อ (ก่อให้เกิด) ความผิดปกติ EPBs ตอนหลังพระอาทิตย์ตกถูกพบได้ในช่วงเฟสพื้นตัวของพายุแม่เหล็กโลก

e) ความไม่สมมาตรระหว่าง 2 ฤดูคิวโนน็อกซ์ในแต่ละปีสามารถที่จะสังเกตพบได้ กล่าวคือ อัตราการเกิด EPBs ของทั้ง 2 ฤดูคิวโนน็อกซ์นั้นไม่เท่ากัน

f) อัตราการเกิดขึ้นของความผิดปกติ EPB ใน March equinox มีค่าที่มากกว่าค่าดังกล่าวใน September equinox มาก โดยค่าความน่าจะเป็นการเกิดขึ้นของ EPB ใน March equinox มีค่าสูงสุด 45.1% ที่เวลา 17 UT ในขณะที่ค่าดังกล่าวใน September equinox มีค่าสูงสุด 11.5% ที่เวลา 16 UT

g) การเพิ่มขึ้นและการลดลงของค่า VTEC gradients ตามแนวละติจูดแสดงพฤติกรรม (แนวโน้มการเปลี่ยนแปลง) ที่คล้ายกับการเกิดขึ้นของความผิดปกติ EPBs

h) ค่า VTEC gradients ตามแนวละติจูดมีค่าเพิ่มขึ้นตามแนวลองจิจูดไปยัง EIA crest (ละติจูดแม่เหล็กโลก $\sim 15^\circ$) ดังนั้น ผลของ EIA ที่มีต่อการเกิดความผิดปกติ EPBs ก็จะทำให้สถานี HYDE ที่อยู่ใกล้กับ EIA crest จะมีจำนวนของ PBs ที่สูงกว่าสถานี SGOC และสถานี IISC



รูปที่ 3.19 ค่าความน่าจะเป็นของการเกิด EPBs ที่สถานี SGOC, IISC และ HYDE ในเดือนกันยายน 2560

ผลกระทบของพลาสมาบับเบิลที่เกิดขึ้นบริเวณเส้นศูนย์สูตร (รวมถึงประเทศไทย) มีต่อการระบุพิกัด RTK ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G, อากาศยานไร้คนขับ (UAV) และอุปกรณ์อื่น ๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความผิดพลาดในการระบุพิกัด RTK ระดับหลายเมตร (4-10 เมตร)
3. ความล้มเหลวของการสื่อสาร/การนำทาง
2. การขาดการติดต่อยานความถี่ UHF ระหว่างดาวเทียมกับสถานีภาคพื้นดิน
4. การเกิดซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ (การเปลี่ยนแอมพลิจูดและเฟสอย่างกะทันหัน)
5. การล๊อคเฟสของสัญญาณ GNSS ไม่ได้ หรือที่ว่า loss of lock (lol)
6. จำนวนของดาวเทียม GNSS ลดลง จึงมีผลต่อความแม่นยำในการระบุพิกัดแบบ RTK

ปัจจัยที่มีผลต่อระดับความรุนแรงของซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์

1. ความหนาแน่นพลาสมาในชั้นไอโอโนสเฟียร์ในสภาวะปกติ (แบรคคราวด์)
2. ความไม่เท่ากัน (ความไม่สม่ำเสมอ) ของความหนาแน่นพลาสมา
3. ความหนาแน่นของพลาสมาในบริเวณที่เกิดความผิดปกติ
4. ความแปรปรวนของความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่เกิดความผิดปกติ
5. สภาวะการเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นอยู่กับเวลาท้องถิ่น, ฤดูกาล และกิจกรรมสุริยะ

ในโครงการศึกษา นี้ได้ทำการรวบรวมสภาพสภาพอากาศที่ตรวจจับและบันทึกได้ด้วยอุปกรณ์ OI 630.0 nm all-sky airglow imagers (ASIs) ที่ติดตั้งและทำการวัดค่าอยู่ที่ในต่างประเทศจำนวน 3 สถานี และจังหวัดชุมพร ประเทศไทย อาทิ

1. เมืองโกโตตะบัง ประเทศอินโดนีเซีย
2. เกาะไหหนาน ประเทศจีน (ซึ่งอยู่แนวละติจูดใกล้เคียงกับจังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย)
3. เกาะอิซิงากิ ประเทศญี่ปุ่น
4. สถานีเรดาร์พระจอมเกล้าชุมพร ประเทศไทย (เริ่มใช้งานเดือนมกราคม 2563 เป็นต้นมา)

ในเบื้องต้น วันที่ตรวจจับพบพลาสมาบับเบิลและไม่พบพลาสมาบับเบิลที่ต่างประเทศ 3 สถานี (ประเทศอินโดนีเซีย, ประเทศจีน, ประเทศญี่ปุ่น) และสถานีเรดาร์พระจอมเกล้าชุมพร ประเทศไทย มีแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 โดยตัวเลข แหล่งที่มาของข้อมูล และข้อสังเกตต่าง ๆ ประกอบการนำเสนอข้อมูลในตารางที่ 3.1 มีดังนี้

1. ตัวเลข 6 หลัก แทน YY/MM/DD (ปี/เดือน/วัน) ที่มีพลาสมาบับเบิลเกิดขึ้นและได้ทำการประมวลผลด้วยโปรแกรม MATLAB ของ Nagoya University เป็นที่เรียบร้อยแล้ว
2. โดยวันที่พิจารณาเป็นวันที่มีค่า Kp, ค่า Dst และค่า F10.7 สูงที่อาจจะส่งผลที่ก่อให้เกิดพายุแม่เหล็กโลก และ/หรือ พายุ TEC และ/หรือ พายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ แล้วนำไปสู่ การเกิดพลาสมาบับเบิล, การเกิดซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ และความผิดพลาดในการระบุพิกัดแบบ RTK และ PPP ได้
3. สำหรับวัน/เดือน/ปี อื่น ๆ ที่ไม่ปรากฏนั้นอาจจะมีสาเหตุหลายประการ เช่น
 - 3.1 วันเหล่านั้นเป็นวันที่เจียบ (ไม่มีความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์)
 - 3.2 เป็นวันที่อุปกรณ์เสียหายใช้งานไม่ได้และไม่ได้รับการซ่อมทันที จึงทำให้ข้อมูลขาดเป็นระยะเวลาหลายเดือน
 - 3.3 เป็นวันที่ซ่อมบำรุงประจำปี
 - 3.4 ประเด็นหลัก คือ คณะผู้วิจัยได้รับค่าข้อมูลจากผู้ประสานงานกับ Nagoya

University เฉพาะวันเหล่านั้นที่ปรากฏพบพลาสติกแบบเปิดเท่านั้น ส่วนวันอื่น ๆ ไม่พบตามข้อมูลที่ได้รับแจ้งมา ตั้งแต่วันที่ 21 กันยายน 2564 เป็นต้นมา คณะผู้วิจัยเริ่มเก็บภาพเข้ามาไว้ในคลังข้อมูลภาพ ASI ของทั้ง 4 สถานี

4. ทั้งนี้ ในช่วงปี 2562-2564 (ค.ศ. 2019-2021) เป็นช่วงกิจกรรมสุริยะที่ต่ำที่สุดและลึกที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกิจกรรมสุริยะก่อนหน้านี้และที่บันทึกไว้ในประวัติศาสตร์ ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลว่าทำไมช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมาจึงไม่ค่อยเกิดพายุสุริยะ พายุแม่เหล็กโลก พายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ รวมถึงพลาสติกแบบเปิด และไม่ค่อยมีการตรวจจับพบพลาสติกแบบเปิดดังแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 3.1 สรุปวันที่ตรวจจับพบพลาสติกแบบเปิดและไม่พบพลาสติกแบบเปิดที่ต่างประเทศ 3 สถานี (ประเทศอินโดนีเซีย, ประเทศจีน, ประเทศญี่ปุ่น) และสถานีเรดาร์พระจอมเกล้าชุมพร ประเทศไทย

สถานีโกโตตะบัง, ประเทศอินโดนีเซีย		สถานีเกาะไหหนาน, ประเทศจีน	
030301	มีพลาสติกแบบเปิด	101001	มีพลาสติกแบบเปิด
030303	มีพลาสติกแบบเปิด	111019	มีพลาสติกแบบเปิด
030306	มีพลาสติกแบบเปิด	111020	มีพลาสติกแบบเปิด
040325	มีพลาสติกแบบเปิด	111021	มีพลาสติกแบบเปิด
040326	มีพลาสติกแบบเปิด	111022	มีพลาสติกแบบเปิด
040327	มีพลาสติกแบบเปิด	111023	มีพลาสติกแบบเปิด
040420	มีพลาสติกแบบเปิด	111024	มีพลาสติกแบบเปิด
040611	มีพลาสติกแบบเปิด	111116	มีพลาสติกแบบเปิด
040617	มีพลาสติกแบบเปิด	120126	มีพลาสติกแบบเปิด
040623	มีพลาสติกแบบเปิด	120221	มีพลาสติกแบบเปิด
		120416	มีพลาสติกแบบเปิด
		120417	มีพลาสติกแบบเปิด
		120419	มีพลาสติกแบบเปิด
สถานีเกาะอิซิงากิ, ประเทศญี่ปุ่น		สถานีเรดาร์พระจอมเกล้าชุมพร, ประเทศไทย	
150313	มีพลาสติกแบบเปิด	210402	มีพลาสติกแบบเปิด
150314	มีพลาสติกแบบเปิด	210512	มีพลาสติกแบบเปิด
150316	มีพลาสติกแบบเปิด		
150414	มีพลาสติกแบบเปิด		

3.7 เอกสารอ้างอิงบทที่ 3

- [1] A. O. Moraes, et al., “GPS availability and positioning issues when the signal paths are aligned with ionospheric plasma bubbles,” *GPS Solutions*, vol. 22, no. 95, 2018.
- [2] E. Timoçin, S. Inyurt, H. Temuçin, K. Ansari, P. Jamjareegulgarn, “Investigation of equatorial plasma bubble irregularities under different geomagnetic conditions during the equinoxes and the occurrence of plasma bubble suppression,” *Acta Astronautica*, vol. 177, pp. 341-350, 2020.
- [3] P. Abadi, S. Saito, W. Srigutomo, “Low-latitude scintillation occurrences around the equatorial anomaly crest over Indonesia,” *Ann. Geophys.*, vol. 32, pp. 7–17, 2014.
- [4] K. Hosokawa, et al., “Observations of equatorial plasma bubbles using a low-cost 630.0-nm all-sky imager in Ishigaki Island, Japan,” *Earth, Planets and Space*, vol. 72, no. 56, 2020.
- [5] G. J. Wang, J. K. Shi, B. W. Reinisch, X. Wang, Z. Wang, “Ionospheric plasma bubbles observed concurrently by multi-instruments over low-latitude station Hainan,” *J. Geophys. Res. Space Physics*, vol. 120, pp. 2288–2298, 2015, doi:10.1002/2014JA020245.
- [6] E. Timoçin, S. Inyurt, H. Temuçin, K. Ansari, P. Jamjareegulgarn, “Investigation of equatorial plasma bubble irregularities under different geomagnetic conditions during the equinoxes and the occurrence of plasma bubble suppression,” *Acta Astronautica*, vol. 177, pp. 341-350, 2020.
- [7] X. Pi, A. J. Mannucci, U. J. Lindqwister, C. M. Ho, “Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 24, pp. 2283–2286, 1997.
- [8] D. V. Ratnam, J. R. K. K. Dabbakuti, N. V. V. N. J. S. Lakshmi, “Improvement of Indian-Regional Klobuchar Ionospheric Model Parameters for Single-Frequency GNSS Users,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 15, no. 7, pp. 971-975, 2018, doi: 10.1109/LGRS.2018.2827081.
- [9] J. A. Klobuchar, “Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-23, no. 3, pp. 325–331, May 1987.
- [10] D. V. Ratnam, J. R. K. K. Dabbakuti, S. Sunda, “Modeling of ionospheric time delays based on a multishell spherical harmonics function approach,” *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, vol. 10, no. 12, pp. 5784–5790, Dec. 2017.
- [11] S. Raghunath, D. V. Ratnam, “Detection of Low-Latitude Ionospheric Irregularities from GNSS Observations,” *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, vol. 8, no. 11, pp. 5171-5176, 2015.
- [12] K. Ansari, K. D. Park, “Multi constellation GNSS precise point positioning and prediction of propagation errors using singular spectrum analysis,” *Astrophysics Space Science*, vol. 363, no. 258, 2018, doi: 10.1007/s10509-018-3479-7.
- [13] K. Ansari, S. K. Panda, P. Jamjareegulgarn, “Singular Spectrum Analysis of Ionospheric TEC Variations over Nepal during the low Solar Activity from GPS Network Observables,” *Acta Astronautica*, vol. 169, pp. 216-223, 2020, doi: 10.1016/j.actaastro.2020.01.014.

- [14] K. Ansari, “Real-time positioning based on Kalman Filter and implication of singular spectrum analysis,” *IEEE Geosci. Remote*, vol. 99, 2020, doi:10.1109/LGRS.2020.2964300.
- [15] S. Maier, A. C. Garcia, “High Accuracy GNSS in 5G RTK, PPP and RTK-PPP,” Rohde & Schwarz, 2021.
- [16] ศาสตราจารย์ ดร. พรชัย ทรัพย์นิธิ และคณะ, “รายงานฉบับสมบูรณ์ - การพัฒนาศูนย์ความเป็นเลิศด้านจีเอ็นเอสเอสและสภาวะอวกาศ (Center of Excellence in GNSS and Space Weather),” ทุนวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนจาก บพค. ของ สอวช. (สัญญาเลขที่ B16F630086), ระยะเวลาดำเนินโครงการ: 15 มิ.ย. 2563 - 15 มิ.ย. 2564.

บทที่ 4 พารามิเตอร์การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิล

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและการเกิดพลาสมาบับเบิล ได้แก่

1. ค่าพายุสนามแม่เหล็ก (Kp index)
2. ค่าพายุรังสีสุริยะ (solar radiation storm)
3. ค่าการขาดหายของสัญญาณวิทยุ (radio blackout)
4. ค่า Disturbance Storm Time (Dst index)
5. ค่า Planetary A-index (Ap)
6. ค่าฟลักซ์สุริยะ F10.7 (F10.7 solar flux)

รายละเอียดของพารามิเตอร์แต่ละตัวมีดังนี้

4.1 พารามิเตอร์ตัวที่ 1 - ค่าพายุสนามแม่เหล็ก (Kp index)

ค่าพายุสนามแม่เหล็ก (Planetary K index หรือ Kp index) เป็นค่าพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ให้เห็นถึงการเกิดขึ้นของพายุแม่เหล็กโลกบนโลก โดยสนามแม่เหล็กของโลกมีความแปรปรวนเนื่องจากถูกสนามแม่เหล็กจากดวงอาทิตย์รบกวน ทั้งนี้พายุแม่เหล็กโลกอาจเกิดขึ้นเนื่องจากทั้งลมสุริยะ (solar wind) หรือการพ่นมวลโคโรนา (Corona Mass Ejection หรือ CME) ดังนั้น ค่า Kp index จึงเกิดขึ้นจากการวัดการสั่นสะเทือนของสนามแม่เหล็กของโลก เมื่อโลกของเราปะทะกับการพ่น CME พอดินจะยืดยาวออกและตีกลับ จังหวะที่ตีกลับจะเกิดแรงสะเทือนกับสนามแม่เหล็กของโลก (ไม่ใช่หมายถึงพายุสุริยะโดยตรง) พบว่า ถ้าพายุสุริยะที่มีความเร็วเกินกว่า 800 กิโลเมตรต่อวินาทีขึ้นไป ค่า Kp จะมีค่าที่มากกว่า 7 ผลกระทบที่เกิดขึ้นคืออนุภาคจากพายุสุริยะที่ไหลเข้าทางขั้วแม่เหล็กเหนือจะทำให้เกิดแสงออโรราขึ้นที่ขั้วโลกและบริเวณละติจูดสูง ยิ่ง Kp มีค่ามากขึ้นเท่าไร แสงออโรราก็จะยิ่งมีโอกาสที่จะเกิดต่ำลงมาทางละติจูดกลางและละติจูดต่ำมากขึ้นเท่านั้น ส่วนค่า Kp ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 8 ถึง 9 นั้น จะเริ่มเหนี่ยวนำโลหะที่มีความยาวมาก ๆ เช่น ขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้า สายส่งไฟฟ้า ฯลฯ หรือท่อส่งน้ำมันบนผิวโลก แล้วทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยสนามแม่เหล็กโลก (geomagnetically induced current หรือ GIC) ไฟฟ้าดับ สายไฟไหม้ หม้อแปลงระเบิด การสื่อสารวิทยุและ/หรือระบบดาวเทียม อาจเกิดการขัดข้องและไม่ทำงานได้ เป็นต้น **ระดับความรุนแรงของพายุสนามแม่เหล็กหรือสเกลพายุแม่เหล็กโลก (Geomagnetic Storms Scale) จะถูกแสดงไว้ในเทอมของสเกล G (G-scale) ตามที่องค์การมหาสมุทรและบรรยากาศแห่งชาติ (National Oceanographic and Atmospheric Administration) หรือ โนอา (NOAA) ของสหรัฐอเมริกา (องค์กรสภาพอวกาศ พายุสุริยะ ฯลฯ) ได้กำหนดไว้ โดยเว็บไซต์ที่คณะผู้วิจัยตั้งค่าดัชนี Kp คือ <https://www.swpc.noaa.gov/products/3-day-forecast> มาใส่ไว้ในเว็บไซต์ที่จัดทำขึ้นของโครงการวิจัยนี้ ซึ่งมีสเกลและระดับความรุนแรงของค่า Kp index แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างของค่า Kp index ที่วัดค่าได้ในวันที่ 18 พ.ค. 2564**

คำบรรยายเกี่ยวกับพายุแม่เหล็กโลกและผลกระทบที่มีต่อโลก (เพิ่มเติม)

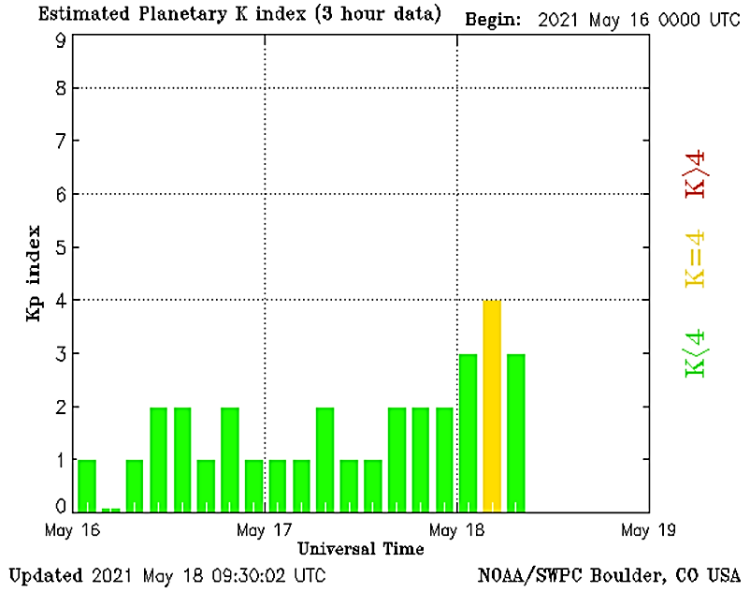
โลกของเรามีสนามแม่เหล็กของตัวเอง เรียกว่า สนามแม่เหล็กโลก (geomagnetic field) สนามแม่เหล็กโลกนี้ปกป้องโลกจากอนุภาคต่าง ๆ ที่มาจากอวกาศ บริเวณในอวกาศที่มีสนามแม่เหล็กโลกถูกเรียกว่า แมกเนโตสเฟียร์ (magnetosphere) เมื่อ CME (รวมทั้งกระแสอนุภาคความเร็วสูง) เคลื่อนมาถึงโลก จะทำให้สนามแม่เหล็ก

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อภาวะระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

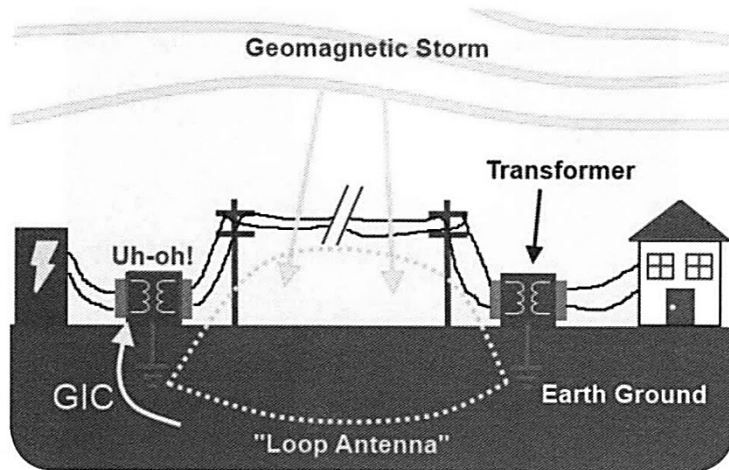
ของแมกเนโตสเฟียร์มีภาพร่างบิดเบี้ยวไป ในกรณีที่สนามแม่เหล็กที่มาพร้อมกับ CME (หรือกระแสอนุภาคความเร็วสูง) มีทิศทางพุ่งลงใต้ (ซึ่งตรงกันข้ามกับทิศทางสนามแม่เหล็กโลก) ก็จะทำให้สนามแม่เหล็กโลกถูกรบกวนอย่างรุนแรง จนบางส่วนจะเปิดออกและยอมให้อนุภาคจากดวงอาทิตย์พุ่งมาตามเส้นแรงแม่เหล็กเข้าสู่บริเวณขั้วโลกทั้งสอง ทำให้เกิดเป็นแสงออโรรา ส่วนที่บริเวณผิวโลก สนามแม่เหล็กโลกจะมีความเข้มลดลงอย่างฉับพลันและการลดลงนี้อาจคงตัวอยู่นานราว 6 ถึง 12 ชั่วโมง ก่อนที่จะค่อย ๆ ฟื้นคืนสภาพกลับไปเหมือนเดิมโดยใช้เวลาหลายวัน การที่สนามแม่เหล็กโลกรวนในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เกิดพายุแม่เหล็กโลก (geomagnetic storm) สนามแม่เหล็กที่ผิวโลกที่กำลังเปลี่ยนแปลงนี้อาจทำให้พื้นผิวโลกเกิดความต่างศักย์ได้สูงถึง 6 โวลต์ต่อกิโลเมตร ความต่างศักย์ดังกล่าวทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยสนามแม่เหล็กโลก (geomagnetically induced current, GIC) กระแส GIC นี้อาจไหลเข้าสู่ระบบต่าง ๆ เช่น ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าและท่อลำเลียงที่ทำจากโลหะ เป็นต้น ดังในรูปที่ 4.2 ในกรณีที่กระแส GIC ไหลเข้าสู่ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าก็อาจทำให้อุปกรณ์ (เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้า) เสียหาย เหตุการณ์เคยเกิดที่รัฐควิเบค ประเทศแคนาดา เมื่อวันที่ 13 มีนาคม ค.ศ. 1989 ทำให้คนกว่า 6 ล้านคน ไฟฟ้าดับนานถึง 9 ชั่วโมง ในกรณีที่กระแส GIC ไหลเข้าสู่ท่อลำเลียงที่ทำจากโลหะ ก็อาจทำให้มีเตอร็ตรวจวัดการไหลของของเหลวหรือแก๊สในระบบท่อส่งข้อมูลผิดพลาด อีกทั้งยังทำให้ท่อผู้กร่อนเร็วขึ้นอย่างมาก เชื่อกันว่าด้วยกลไก นี้ที่ทำให้ท่อส่งแก๊สธรรมชาติในรัสเซียผู้กร่อนและเกิด แก๊สรั่วไหลจนไฟลุกไหม้เสียหาย เมื่อวันที่ 5 มิถุนายน ค.ศ. 1991 กรณีที่ไฟฟ้าดับนาน 9 ชั่วโมง ที่รัฐควิเบค ก็เกิดจากพายุแม่เหล็กโลกในระดับ G5 (G5-class geomagnetic storm) เอกสารของโนอา (NOAA) ระบุว่าสำหรับความรุนแรงระดับ 5 จะทำให้ “ระบบไฟฟ้ากำลัง : ปัญหาเกี่ยวกับการ ควบคุมแรงดันไฟฟ้าในวงกว้างและปัญหาเกี่ยวกับ ระบบป้องกันอาจเกิดขึ้น ระบบจ่ายไฟฟ้าอาจมีปัญหา ทั้งหมด หรือเกิดไฟดับ หม้อแปลงไฟฟ้าอาจเสียหาย” โดยภาพรวมเกี่ยวกับสาเหตุที่ทำให้เกิดพายุแม่เหล็กโลก, พายุรังสีสุริยะ และการขาดหายของสัญญาณวิทยุแบบฉับพลันนั้นมีแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งล้วนแต่เป็นผลกระทบของความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อการระบุพิกัดแบบ RTK และ PPP ทั้งสิ้น

ตารางที่ 4.1 สเกลและระดับความรุนแรงของพายุสนามแม่เหล็ก (Kp index) ตั้งแต่ระดับ G1-G5

Kp index	สเกล	ระดับความรุนแรง		ความถี่ในรอบวัฏจักรสุริยะ (11 ปี)
		ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ	
0-5	G1	เล็กน้อย	minor	4 วัน
6	G2	ปานกลาง	moderate	60 วัน
7	G3	รุนแรง	strong	130 วัน
8	G4	รุนแรงมาก	severe	360 วัน
9	G5	รุนแรงที่สุด	Extreme	900 วัน







รูปที่ 4.1 ค่า Kp index ที่วัดค่าได้ในวันที่ 18 พ.ค. 2564 เวลา 09:30 UT (เวลาในไทย 16:30 LT)



รูปที่ 4.2 กระแสไฟฟ้า GIC ที่ไหลจากพื้นดินเข้าสู่ระบบไฟฟ้าแรงสูง

ตารางที่ 4.2 ผลกระทบของความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อการระบุพิกัดแบบ RTK และ PPP

สาเหตุ	ผลกระทบ		
	Geomagnetic Storm	Solar Radiation Storm	Radio Blackout
Solar Wind 	✓		
Solar Flare 			✓
CME 	✓		
SEP 		✓	✓

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

4.2 พารามิเตอร์ตัวที่ 2 - ค่าพายุรังสีสุริยะ (solar radiation storm)

พายุรังสีสุริยะ (solar radiation storm) คือพายุที่เกิดขึ้นจากการที่อนุภาคสุริยะพลังงานสูง (solar energetic particle หรือ SEP) จากดวงอาทิตย์ถูกปลดปล่อยออกมาและมีปริมาณเพิ่มขึ้นในชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก ดังนั้น ระดับความรุนแรงของพายุรังสีสุริยะจึงพิจารณาจากปริมาณอนุภาคสุริยะพลังงานสูง (proton flux unit) ที่ปล่อยออกมาและวัดได้จากดวงอาทิตย์ด้วยดาวเทียม GOES16 ระดับความรุนแรงของพายุรังสีสุริยะจะถูกแสดงไว้ในเทอมสเกล S (S-scale) ตามที่องค์การ NOAA ของสหรัฐอเมริกา ได้กำหนดไว้ โดยมีสเกลและระดับความรุนแรงของค่า S-scale แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ในที่นี้ อนุภาคสุริยะพลังงานสูง (solar energetic particle หรือ SEP) เป็นอนุภาคที่ถูกปลดปล่อยมาจากการระเบิดบนของดวงอาทิตย์เกิดขึ้นจากซึ่งมีพลังงานในช่วง 1 มินัน ถึง 1 มินันล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ที่เกิดขึ้นพร้อมกับการลุกจ้าหรือการพ่นมวลโคโรนา นอกจากนี้ สำหรับพายุรังสีสุริยะ (solar radiation storm) นั้น ผู้โดยสารเครื่องบินที่กำลังบินในระดับสูงและอยู่ในบริเวณละติจูดสูง ก็มีความเสี่ยงที่จะได้รับ อันตรายจากพายุรังสีสุริยะตั้งแต่ S2 ขึ้นไปเช่นกัน แต่หากเกิดพายุรังสีสุริยะขึ้น นักบินจะได้รับการแจ้งเตือนและจะเปลี่ยนเส้นทางการบินเพื่อหลีกเลี่ยงบริเวณอันตรายดังกล่าว โดยเว็บไซต์ที่คณะผู้วิจัยตั้งค่าพายุรังสีสุริยะ คือ <https://www.swpc.noaa.gov/products/3-day-forecast> มาใส่ไว้ในเว็บไซต์ที่จัดทำขึ้นของโครงการวิจัยนี้

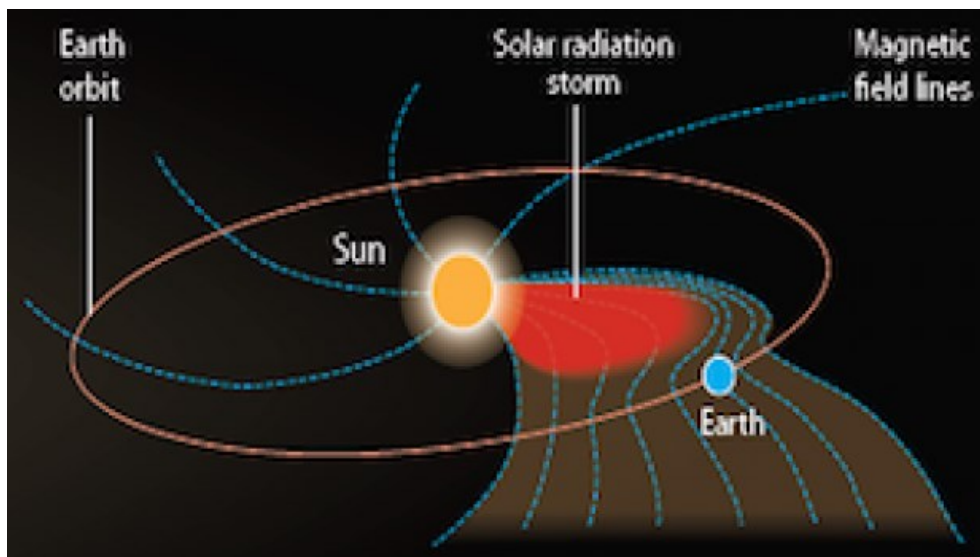
ตารางที่ 4.3 สเกลและระดับความรุนแรงของค่าพายุรังสีสุริยะตั้งแต่ระดับ S1-S5 (เว็บไซต์ NOAA)

Category		Effect	Physical measure	Average Frequency (1 cycle = 11 years)
Scale	Descriptor			
		Duration of event will influence severity of effects		
			Flux level of ≥ 10 MeV particles (ions)*	Number of events when flux level was met**
Solar Radiation Storms				
S 5	Extreme	Biological: unavoidable high radiation hazard to astronauts on EVA (extra-vehicular activity); passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to radiation risk.*** Satellite operations: satellites may be rendered useless, memory impacts can cause loss of control, may cause serious noise in image data, star-trackers may be unable to locate sources; permanent damage to solar panels possible. Other systems: complete blackout of HF (high frequency) communications possible through the polar regions, and position errors make navigation operations extremely difficult.	10^5	Fewer than 1 per cycle
S 4	Severe	Biological: unavoidable radiation hazard to astronauts on EVA; passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to radiation risk.*** Satellite operations: may experience memory device problems and noise on imaging systems; star-tracker problems may cause orientation problems, and solar panel efficiency can be degraded. Other systems: blackout of HF radio communications through the polar regions and increased navigation errors over several days are likely.	10^4	3 per cycle
S 3	Strong	Biological: radiation hazard avoidance recommended for astronauts on EVA; passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to radiation risk.*** Satellite operations: single-event upsets, noise in imaging systems, and slight reduction of efficiency in solar panel are likely. Other systems: degraded HF radio propagation through the polar regions and navigation position errors likely.	10^3	10 per cycle
S 2	Moderate	Biological: passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to elevated radiation risk.*** Satellite operations: infrequent single-event upsets possible. Other systems: effects on HF propagation through the polar regions, and navigation at polar cap locations possibly affected.	10^2	25 per cycle
S1	Minor	Biological: none. Satellite operations: none. Other systems: minor impacts on HF radio in the polar regions.	10	50 per cycle

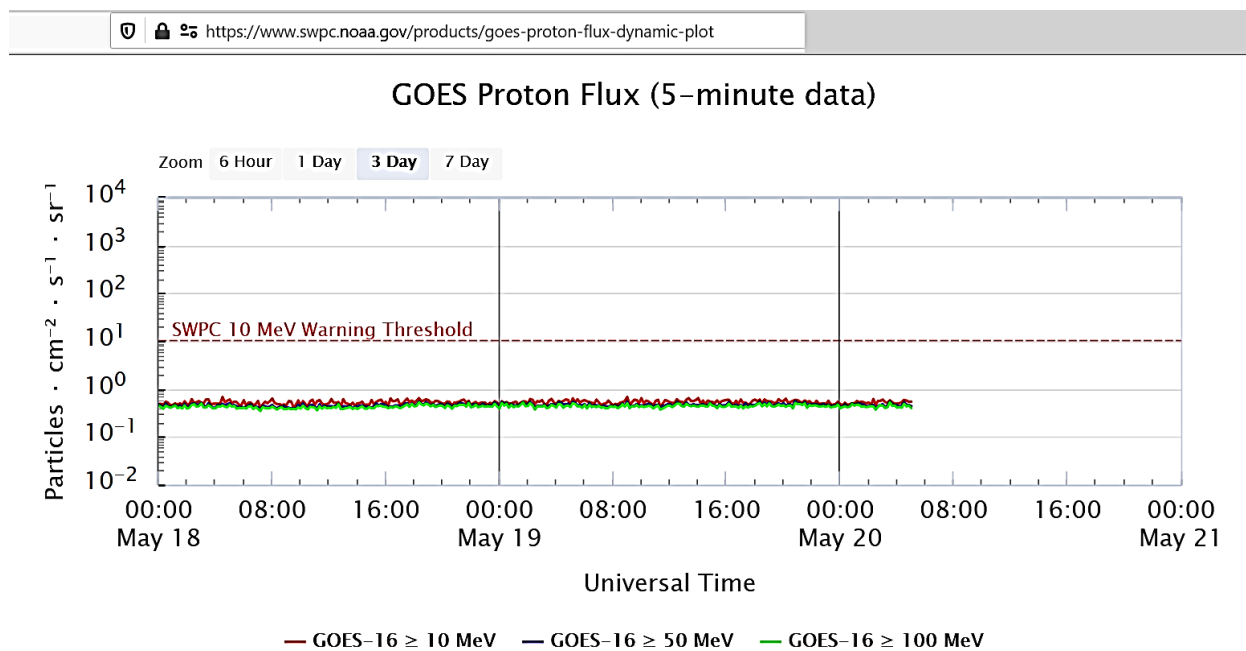
* Flux levels are 5 minute averages. Flux in particles $s^{-1}ster^{-1}cm^2$ Based on this measure, but other physical measures are also considered.

** These events can last more than one day.

*** High energy particle (~ 100 MeV) are a better indicator of radiation risk to passenger and crews. Pregnant women are particularly susceptible.



รูปที่ 4.3 อิทธิพลของ solar radiation storm ที่เกิดขึ้นจากดวงอาทิตย์แล้วเดินทางมายังโลก
(ที่มา : <https://www.weather.gov/images/akq/Briefing/solarRadiationStormScale.jpg>)



รูปที่ 4.4 ค่า Proton flux ที่วัดได้ระหว่างวันที่ 18-20 พฤษภาคม 2564
(ที่มา : <https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-proton-flux-dynamic-plot>)

ตารางที่ 4.4 สเกลและระดับความรุนแรงของพายุรังสีสุริยะ (ระดับความเข้มของ SEP) ตั้งแต่ระดับ S1-S5

R-Scale	SEP ions	ระดับความรุนแรง	Strength	ความถี่ในรอบวัฏจักรสุริยะ (11 ปี)
S1	1	เล็กน้อย	minor	เกิดขึ้นประมาณ 50 เหตุการณ์
S2	10	ปานกลาง	moderate	เกิดขึ้นประมาณ 25 เหตุการณ์
S3	100	รุนแรง	strong	เกิดขึ้นประมาณ 10 เหตุการณ์
S4	1,000	รุนแรงมาก	severe	เกิดขึ้นประมาณ 3 เหตุการณ์
S5	10,000	รุนแรงที่สุด	Extreme	เกิดขึ้นน้อยกว่า 1 เหตุการณ์

4.3 พารามิเตอร์ตัวที่ 3 - ค่าการขาดหายของสัญญาณวิทยุ (radio blackout)

การขาดหายของสัญญาณวิทยุ (radio blackout) คือเหตุการณ์ที่สัญญาณวิทยุความถี่สูง (HF) หรือถูกเรียกว่าวิทยุคลื่นสั้น และสัญญาณนำทางความถี่ต่ำถูกรบกวนอย่างฉับพลัน เนื่องจากโมเลกุลรังสีเอกซ์ในบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์มีการแตกตัวเป็นประจุมากขึ้นอย่างฉับพลันจึงทำให้ชั้นไอโอโนสเฟียร์ถูกรบกวนอย่างฉับพลัน (sudden ionosphere disturbance หรือ SID) โดยมีสาเหตุมาจากการลุกจ้าของดวงอาทิตย์ (solar flare) การขาดหายของสัญญาณวิทยุอาจจะเกิดขึ้นจากการลุกจ้าและอนุภาคสุริยะพลังงานสูงของดวงอาทิตย์ก็ได้ การลุกจ้าของดวงอาทิตย์หรือเรียกสั้น ๆ ว่าการลุกจ้าเป็นการระเบิดบนดวงอาทิตย์ ซึ่งเกิดจากการที่สนามแม่เหล็กปลดปล่อยพลังงานออกมาอย่างฉับพลันโดยจะเกิดเหนือจุดที่ดับบนดวงอาทิตย์ การลุกจ้าปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในทุกช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่คลื่นวิทยุ คลื่นไมโครเวฟ รังสีอินฟราเรด แสงที่ตามองเห็น รังสียูวี รังสีเอกซ์ไปจนถึงรังสีแกมมา รังสียูวีอาจทำให้อากาศในบรรยากาศชั้นบนร้อนและลอยตัวสูงขึ้นซึ่งทำให้ความหนาแน่นของอากาศที่ระดับ 1,000 กิโลเมตรเพิ่มขึ้น ผลก็คือดาวเทียมวงโคจรต่ำที่โคจรอยู่ในระดับความสูงนี้จะมีแรงฉุดต้านมากขึ้นและอาจหลุดวงโคจรตกลงมาได้ (หากไม่ได้ถูกเร่งกลับเข้าสู่วงโคจรเดิม) รังสีเอกซ์ดังกล่าวมีผลทำให้โมเลกุลในบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์แตกตัวมีประจุเพิ่มขึ้น เรียกว่า SID ซึ่งส่งผลให้สัญญาณวิทยุความถี่สูงหรือที่เรียกว่าวิทยุคลื่นสั้นและสัญญาณนำทางความถี่ต่ำถูกรบกวน เรียกว่า การขาดหายของสัญญาณวิทยุ ถึงแม้ว่าการลุกจ้าจะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในช่วงความยาวคลื่นทุกค่า แต่นักวิทยาศาสตร์ได้เลือกใช้รังสีเอกซ์ที่มีค่าความยาวคลื่นในช่วง 1-8 อังสตรอม (อาศัยดาวเทียม GOES 8) ความรุนแรงของ solar X-ray flux (หน่วย: W/m^2) แบ่งออกได้เป็นระดับ B, C, M และ X ดังในตารางที่ 4.5 โดยสเกล ระดับความรุนแรงและคำอธิบายของการขาดหายของสัญญาณวิทยุมีแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 กับ 4.7 และเว็บไซต์ที่คณะผู้วิจัยนำค่าการขาดหายของสัญญาณวิทยุมาแสดงผล คือ <https://www.swpc.noaa.gov/products/3-day-forecast>

ตารางที่ 4.5 ระดับความรุนแรงของและปริมาณความเข้มสูงสุดของ solar X-ray flux

ระดับ	ความเข้มสูงสุด (W/m ²)
B	$I < 10^{-6}$
C	$10^{-6} \leq I < 10^{-5}$
M	$10^{-5} \leq I < 10^{-4}$
X	$I \geq 10^{-4}$

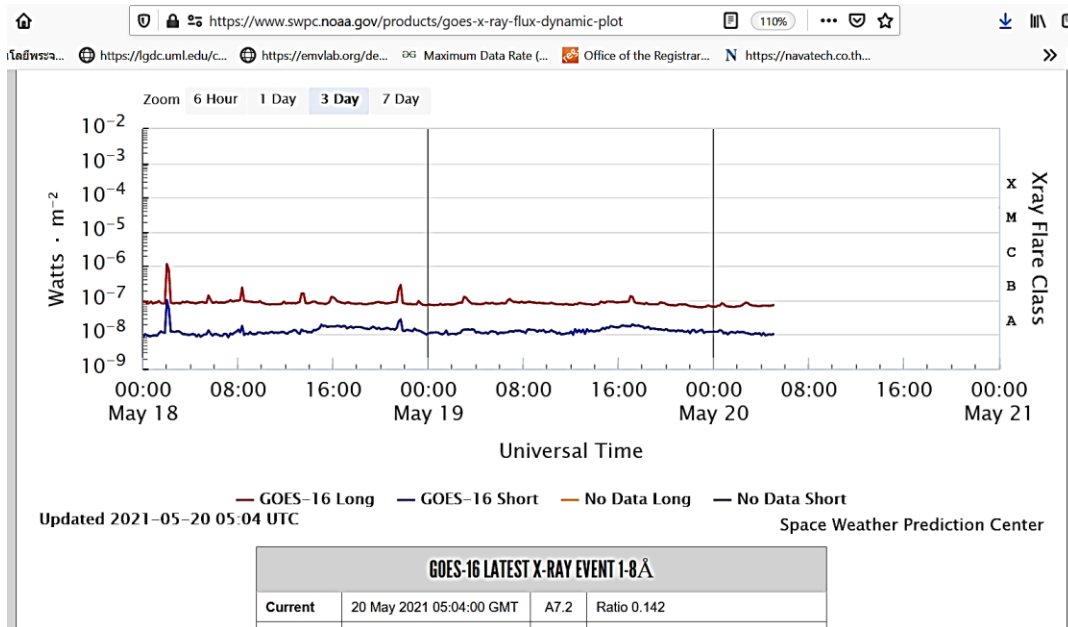
ตารางที่ 4.6 สเกลและระดับความรุนแรงของการขาดหายของสัญญาณวิทยุตั้งแต่ระดับ R1-R5

R-Scale	X-ray Flux Intensity	ระดับความรุนแรง		ความถี่ในรอบวัฏจักรสุริยะ (11 ปี)
		ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ	
R0	X-flux < M0 (A, B, C)	ปกติ	Normal	เกิดขึ้นเป็นปกติ โดยส่วนใหญ่
R1	X-flux = M1	เล็กน้อย	minor	เกิดขึ้นประมาณ 950 วัน
R2	M1 < X-flux ≤ M5	ปานกลาง	moderate	เกิดขึ้นประมาณ 300 วัน
R3	M5 < X-flux ≤ X1	รุนแรง	strong	เกิดขึ้นประมาณ 140 วัน
R4	X1 < X-flux ≤ X10	รุนแรงมาก	severe	เกิดขึ้นประมาณ 8 วัน
R5	X10 < X-flux ≤ X20	รุนแรงที่สุด	Extreme	เกิดขึ้นประมาณ 1 วัน

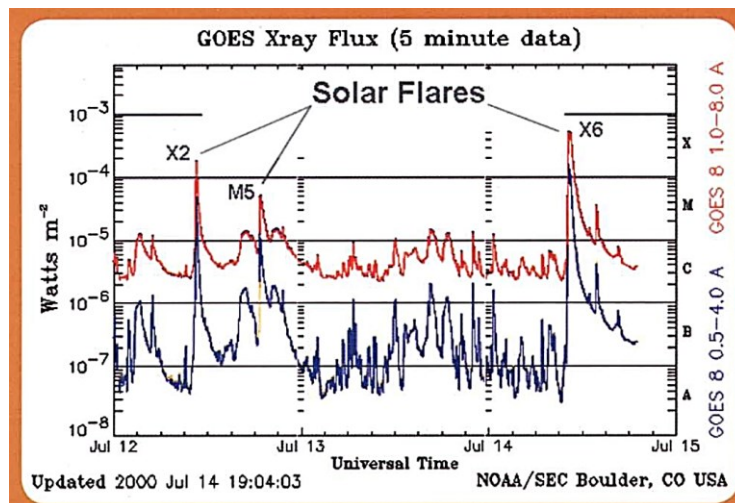
ตารางที่ 4.7 สเกล คำบรรยาย ผลกระทบที่เกิดขึ้นของการขาดหายของสัญญาณวิทยุตั้งแต่ระดับ R1-R5

สเกล	คำบรรยายสั้นๆ	ผลกระทบ (โดยย่อ)	ระดับความรุนแรงค่าทางกายภาพ	ความถี่ในรอบ 11 ปี
R5	Extreme	คลื่นวิทยุความถี่สูงอาจขาดหายไปหลายชั่วโมง	X20	ต่ำกว่า 1
R4	Severe	คลื่นวิทยุความถี่สูงอาจขาดหายไปประมาณ 1-2 ชั่วโมง	X10	8 วัน
R3	Strong	คลื่นวิทยุความถี่สูงอาจขาดหายไปประมาณ 1 ชั่วโมง	X1	140 วัน
R2	Moderate	คลื่นวิทยุความถี่สูงอาจขาดหายไปหลายสิบนาที	M5	300 วัน
R1	Minor	คลื่นวิทยุความถี่สูงอาจขาดหายไปบางครั้ง	M1	950 วัน

ในแต่ละระดับยังแบ่งย่อยออกเป็น 9 ระดับย่อยด้วยสเกลเชิงเส้น ได้แก่ B1 ถึง B9, C1 ถึง C9 และ M1 ถึง M9 ยกเว้นระดับ X ซึ่งมีระดับได้เกิน X9 ยกตัวอย่างเช่น การลุกจ้าระดับ M5 มีความเข้มเป็น 5 เท่าของระดับ M1 การลุกจ้าระดับ X2 มีความเข้มเป็น 2 เท่าของการลุกจ้าระดับ X1 การลุกจ้าระดับ X2 มีความเข้มเป็น 4 เท่าของระดับ M5 เป็นต้น นอกจากนี้ ค่าสเกลเชิงเส้นของระดับความรุนแรงของ solar X-ray flux ไม่จำเป็นต้องเป็นจำนวนเต็ม เช่น การลุกจ้าระดับ A8.1, B5.3, X3.5 เป็นต้น ดังในรูปที่ 4.5

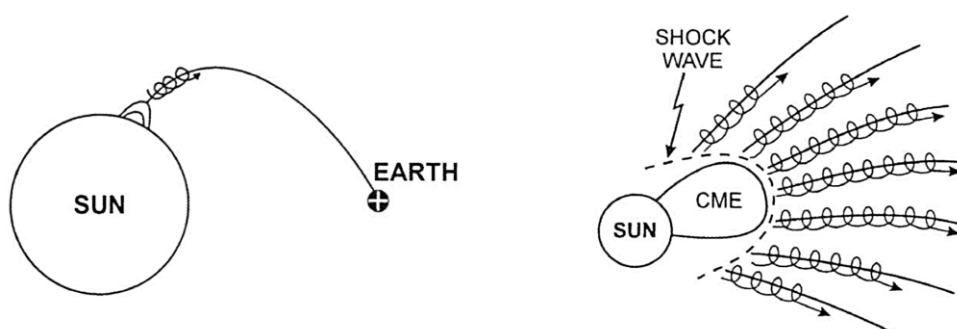


รูปที่ 4.5 ค่า X-ray flux ที่วัดได้ระหว่างวันที่ 18-20 พฤษภาคม 2564
(ที่มา : <https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux-dynamic-plot>)



รูปที่ 4.6 ค่า X-ray flux ที่วัดได้หลังจากเกิดการลุกจ้าระหว่างวันที่ 12-15 กรกฎาคม ค.ศ. 2000
(ที่มา : <http://spaceweather.com/glossary/flareclasses.html>)

คำบรรยายเกี่ยวกับการพ่นมวลโคโรนา หรือ CME (เพิ่มเติม) - การพ่นมวลโคโรนา (coronal mass ejection หรือ CME) คือ ก้อนพลาสมาขนาดมหึมาที่ดวงอาทิตย์ปลดปล่อยออกมา ก้อนพลาสมานี้มาพร้อมกับสนามแม่เหล็กที่แปรปรวน ก้อน CME มีมวลเฉลี่ยประมาณหนึ่งหมื่นล้านตันและเคลื่อนที่เร็วในช่วง 20-3,200 กิโลเมตรต่อวินาที โดยปกติ CME ส่วนใหญ่มักจะใช้เวลาราว 1-5 วันในการเคลื่อนที่มาถึงโลก ในช่วงที่ดวงอาทิตย์ค่อนข้างสงบเขาที่สุด (เรียกว่า solar minimum) อาจมี CME ออกมา 1 ก้อนในหนึ่งสัปดาห์ แต่ในช่วงที่ดวงอาทิตย์ขยับขึ้นที่สุด (เรียกว่า solar maximum) อาจมี CME ออกมาได้ถึง 2-3 ก้อนต่อวัน (ดูเรื่องดวงอาทิตย์ ‘ซบเซา’ หรือ ‘ขยับ’ ในข้อ 12) หาก CME พุ่งกระทบโลก จะทำให้เกิดพายุแม่เหล็กโลก ซึ่งจะไต่กล่าวถึงในข้อ 8 หาก CME ความเร็วสูงเคลื่อนไปในกระแสลมสุริยะจะเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) ทางด้านหน้าและบริเวณคลื่นกระแทกนี้ก็จะเกิดอนุภาคสุริยะพลังงานสูง ดังในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 (ซ้าย) อนุภาค SEP ที่เกิดพร้อมกับการลุกจ้าของดวงอาทิตย์ และ (ขวา) อนุภาค SEP ที่เกิดจาก shock wave ของ CME ที่แพร่กระจายมายังโลก

4.4 พารามิเตอร์ตัวที่ 4 - ค่า Disturbance Storm Time (Dst index)

คุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลกอาจจะถูกระบุได้ด้วยค่าดัชนี Dst ในทางปฏิบัติได้ โดยช่วงเวลาปกติที่ไม่มีพายุแม่เหล็กโลก ค่าดัชนี Dst จะมีค่าที่มากกว่า -20 นาโนเทสลา (nT) หากเกิดพายุแม่เหล็กโลก ค่าดัชนี Dst จะเปลี่ยนแปลงไปโดยมีค่าที่น้อยกว่า -20 นาโนเทสลา ดังแสดงในตารางที่ 4.8

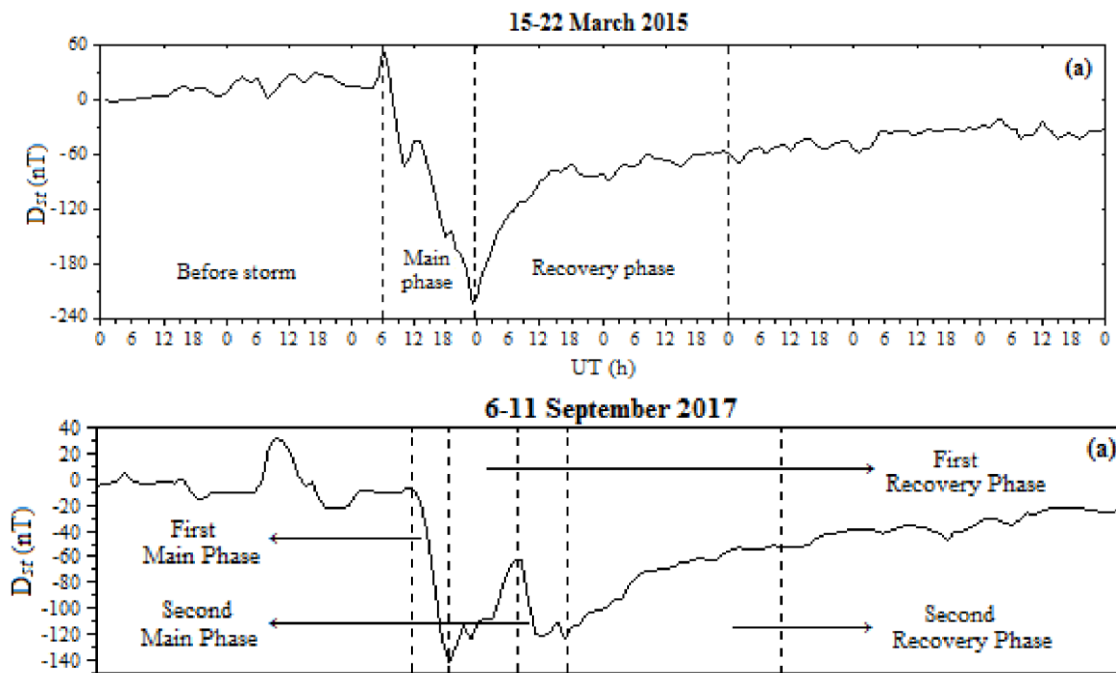
ตารางที่ 4.8 สเกล คำบรรยาย ผลกระทบที่เกิดขึ้นของค่าดัชนี Dst ตั้งแต่ระดับ G1-G5

G-Scale	Dst Intensity (nT)	Strength	ระดับความรุนแรง
G0	Dst \geq -20	quiet	เงียบ
G1	-50 \leq Dst $<$ -20	minor	เล็กน้อย
G2	-100 \leq Dst $<$ -50	moderate	ปานกลาง
G3	-200 \leq Dst $<$ -100	strong	รุนแรง
G4	-320 \leq Dst $<$ -200	severe	รุนแรงมาก
G5	Dst $<$ -320	Extreme	รุนแรงที่สุด

โดยอาจแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงเริ่มต้น ช่วงหลักและช่วงคืนตัว ดังนี้ ช่วงเริ่มต้น (initial phase) ค่าดัชนี Dst จะเพิ่มขึ้นอีก 20 ถึง 50 nT ในเวลาไม่กี่สิบนาที หลังจากนั้น ในช่วงหลัก (main phase) ค่าดัชนี Dst จะลดลงจนมีค่าที่ต่ำกว่า -50 nT (โดยทั่วไป ช่วงหลักนี้จะยาวนานประมาณ 2-8 ชั่วโมง) สุดท้าย ช่วงคืนตัว (recovery phase) ค่าดัชนี Dst จะเพิ่มจากค่าต่ำสุดกลับไปยังค่าในชวงเวลาปกติข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ภาพบน) ในระหว่างวันที่ 15-22 มีนาคม 2558 (วันพายุเซนต์แพทริก หรือ Saint's Patrick Day Storm) นอกจากนี้ ซึ่งจากการวิจัยที่ตีพิมพ์ในปี พ.ศ. 2563 [8] พบว่า พายุแม่เหล็กโลกทั่วไปที่เกิดขึ้นระหว่างวันที่ 6-11 กันยายน 2560 เกิดพายุจำนวน 2 ลูก ในเวลาไล่เลี่ยกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยค่าดัชนี Dst ได้รับการรวบรวมและจัดเก็บอย่างเป็นระบบโดย World Data Center for Geomagnetism ที่เมืองเกียวโต ประเทศญี่ปุ่น โดยเว็บไซต์คือ http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/202104/index.html ซึ่งมีตัวอย่างของค่าข้อมูล Dst ที่แสดงบนหน้าเว็บไซต์ของ WDC for Geomagnetism, Kyoto, Japan ดังแสดงในรูปที่ 4.9

4.5 พารามิเตอร์ตัวที่ 5-ค่า Planetary A-index (Ap)

ค่า Ap-index (Planetary A index) เป็นค่าที่เกิดขึ้นจากการนำ Kp index ทุก ๆ 3 ชั่วโมงที่เกิดขึ้นใน 1 วัน จำนวน 8 ค่า มาเฉลี่ย โดยค่านี้จะใช้คู่กับ Kp index เพื่อต้องการดูแนวโน้มของความรุนแรงของพายุสนามแม่เหล็ก หากสูงทั้งคู่แสดงว่าเกิดพายุสนามแม่เหล็กโลก หาก Kp index มีค่าที่สูง แต่ Ap index มีค่าที่ต่ำ แสดงว่ามีการสั่นสะเทือนของสนามแม่เหล็กโลกชั่วคราว ซึ่งจะก่อให้เกิดแสงออโรรา ระดับของค่า Ap-index (Planetary A index) และระดับความรุนแรงที่สัมพันธ์กับ G-scale มีแสดงไว้ในตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.8 (บน) พายุแม่เหล็กโลก Saint's Patrick Day ในระหว่างวันที่ 15-22 มีนาคม 2558 เกิดพายุจำนวน 1 ลูก และ (ล่าง) พายุแม่เหล็กโลกทั่วไปที่เกิดขึ้นระหว่างวันที่ 6-11 กันยายน 2560 เกิดพายุจำนวน 2 ลูก

WDC for Geomagnetism, Kyoto																								
Hourly Equatorial Dst Values (REAL-TIME)																								
MAY 2021																								
unit=nT																								
DAY	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	15	16	15	11	10	9	12	10	4	3	4	6	3	4	5	1	0	3	6	7	8	7	6	10
2	11	10	8	-2	-11	-15	-14	-8	0	-6	-6	-7	-8	-7	-4	-1	-1	3	4	8	15	17	15	23
3	25	22	21	21	21	22	15	10	7	4	4	2	0	-2	-2	-2	-2	-3	-4	-3	-1	1	0	3
4	8	13	14	13	12	9	12	13	13	8	9	10	6	5	4	3	1	3	2	4	5	3	4	4
5	4	7	8	8	5	4	5	7	6	5	7	7	5	5	4	3	1	2	3	7	12	10	7	8

รูปที่ 4.9 ค่า Dst ที่แสดงบนหน้าเว็บไซต์ของ WDC for Geomagnetism, Kyoto, Japan
 ตารางที่ 4.9 ระดับของค่า Ap-index (Planetary A index) และระดับความรุนแรงที่สัมพันธ์กับ G-scale

G-Scale	X-ray Flux Intensity	Strength	ระดับความรุนแรง
G1	Ap <= 56	quiet-minor	เจียบ ถึง เล็กน้อย
G2	56 < Ap <= 94	moderate	ปานกลาง
G3	94 < Ap <= 154	strong	รุนแรง
G4	154 < Ap <= 300	severe	รุนแรงมาก
G5	300 < Ap <= 400	Extreme	รุนแรงที่สุด

4.6 พารามิเตอร์ตัวที่ 6 - ค่าฟลักซ์สุริยะ F10.7

นอกจากนี้ ในการศึกษาสัญญาณวิทยุที่มาจากดวงอาทิตย์ นักวิจัยจะใช้ข้อเท็จจริงที่ว่า เมื่อบริเวณจุดดับบนดวงอาทิตย์ส่งรังสียูวีแบบสุดขีด (EUV) ออกมามากส่งผลให้มีคลื่นวิทยุความถี่ 2800 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) ออกมามากตามไปด้วย (คลื่นวิทยุความถี่นี้มีค่าความยาวคลื่นประมาณ 10.7 เซนติเมตร) ดังนั้น จึงมักเรียกว่า solar flux F10.7 หรือเรียกย่อ ๆ ว่า F10.7 ข้อมูลที่วัดได้ของคลื่นวิทยุ F10.7 จากดวงอาทิตย์จะถูกเก็บโดย Dominion Radio Astrophysical observatory ที่เมืองเพนทิกตัน (Penticton) รัฐบริติชโคลัมเบีย ประเทศแคนาดา โดยรายงานทุกวันตอนเที่ยงตามเวลาท้องถิ่น ค่าฟลักซ์สุริยะ F10.7 มีหน่วยคือ 10^{-22} วัตต์ต่อตารางเมตรต่อเฮิร์ตซ์ ข้อมูลทั้งหมดได้รับการรวบรวมโดย National Geographical Data Center แผนภาพแสดงการสั่นสะเทือนของดวงอาทิตย์ การตรวจจับการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กโลกเป็นการตรวจวัดผลกระทบจากพายุแม่เหล็กโลก (geomagnetic storm) พายุแม่เหล็กโลกเกิดจากการที่สนามแม่เหล็กของ CME ทำให้สนามแม่เหล็กโลกรวน ผลที่ตามมาคือ จะเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามแม่เหล็กโลก (geomagnetically induced current หรือ GIC) โดยกระแส GIC นี้หากไหลเข้าสู่ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้า ก็อาจทำให้เครื่องกำเนิดหรือหม้อแปลงไฟฟ้าเสียหาย เกิดไฟดับในพื้นที่กว้าง หรือหากไหลเข้าสู่ท่อลำเลียงที่ทำจากโลหะก็จะทำให้ท่อลำเลียงผุกร่อนรวดเร็วมากขึ้น เป็นต้น ระดับของค่า solar flux F10.7 และระดับความรุนแรงที่สัมพันธ์กับ G-scale มีแสดงไว้ในตารางที่ 4.10 ในที่นี้ ค่า solar flux F10.7 ที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้ใช้ค่า Adjusted Flux (ค่าตรงกลาง) ที่ดึงมาจากเว็บไซต์ <https://www.swpc.noaa.gov/products/3-day-geomagnetic-forecast>) รูปที่ 4.10 แสดงตัวอย่างของค่า solar flux F10.7 ที่วัดได้ในวันที่ 18-19 พฤษภาคม 2564

ตารางที่ 4.10 ระดับของค่า solar flux F10.7 และระดับความรุนแรงที่สัมพันธ์กับ G-scale

G-Scale	F10.7 Intensity	Strength	ระดับความรุนแรง
G1	F10.7 \leq 50	quiet-minor	เงียบ ถึง เล็กน้อย
G2	50 < F10.7 \leq 100	moderate	ปานกลาง
G3	100 < F10.7 \leq 150	strong	รุนแรง
G4	150 < F10.7 \leq 200	severe	รุนแรงมาก
G5	F10.7 > 200	Extreme	รุนแรงที่สุด

Daily flux values for the year 2021

Date	Time	Julian day	Carrington rotation	Observed Flux	Adjusted Flux	URSI Flux
2021-05-18	17:00:00	2459353.197	2244.270	77.0	78.8	70.9
2021-05-18	20:00:00	2459353.322	2244.270	76.4	78.2	70.4
2021-05-18	23:00:00	2459353.447	2244.270	77.2	79.0	71.1
2021-05-19	17:00:00	2459354.197	2244.300	79.5	81.4	73.2
2021-05-19	20:00:00	2459354.322	2244.310	75.9	77.7	70.0
2021-05-19	23:00:00	2459354.447	2244.310	65.2	66.8	60.1



รูปที่ 4.10 ค่า solar flux F10.7 ที่วัดได้ในวันที่ 18-19 พฤษภาคม 2564 (ใช้ค่า Adjusted Flux)
(ที่มา : <https://www.swpc.noaa.gov/products/3-day-geomagnetic-forecast>)

เนื้อหาที่น่าสนใจเพิ่มเติม

สำหรับการเฝ้าระวัง/สังเกตลมฟ้าอากาศและพายุสุริยะจากภาคพื้นดิน (solar-terrestrial observations) นั้น อาจทำได้โดยการศึกษาพื้นผิวของดวงอาทิตย์ การตรวจจับการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กของโลก การศึกษาสัญญาณวิทยุที่มาจากดวงอาทิตย์ และการตรวจหาปริมาณอิเล็กตรอนโดยรวม (total electron content หรือ TEC) เป็นต้น การศึกษาพื้นผิวของดวงอาทิตย์ ได้แก่ การเฝ้าติดตามจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ (sunspot number หรือ SSN) ในชั้นบรรยากาศของดวงอาทิตย์ เรียกว่า โฟโตสเฟียร์ (photosphere) เนื่องจากจุดดับบนดวงอาทิตย์ดังกล่าวเป็นบริเวณที่เกิดขึ้นหลังจากการลุกจ้า (solar flare) แล้วเกิดการพ่นมวลโคโรนา (coronal mass ejection หรือ CME) ออกมา ในการเฝ้าติดตามจุดดับบนดวงอาทิตย์ จะมีการระบุจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ (SSN) ซึ่งหมายถึง จำนวนจุดดับในช่วงแสงที่ตามองเห็น ทางด้านที่ดวงอาทิตย์หันเข้าหาโลก อีกทั้งยังต้องระบุพื้นที่รวมของจุดดับบนดวงอาทิตย์ดังกล่าวอีกด้วย ทั้งนี้ พื้นที่รวมดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์กับความสว่างของดวงอาทิตย์ในช่วงรังสีเอกซ์ (X-ray) และช่วงอัลตราไวโอเล็ตสุดขีด (Extreme Ultraviolet หรือ EUV เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีสเปกตรัมอยู่ระหว่างอัลตราไวโอเล็ตกับรังสีเอกซ์) ในปัจจุบัน มีเครือข่ายหอดูดาวที่เฝ้าจับตาดวงอาทิตย์อย่างต่อเนื่อง เช่น โครงการ GONG (global oscillation network group project) ซึ่งติดตามเก็บข้อมูลทั้งพื้นผิวและบริเวณภายในของดวงอาทิตย์ โดยใช้ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ขั้นสูง

สะท้อนดวงอาทิตย์ (helioseismology) วิชานี้เป็นการศึกษาโครงสร้างภายในของดวงอาทิตย์ โดยการศึกษาคลื่นเสียงที่ส่งผ่านชั้นบรรยากาศต่าง ๆ ของดวงอาทิตย์และปรากฏให้เห็นเป็นคลื่นกระเพื่อมที่พื้นผิว นอกจากนี้โครงการ GONG ยังสามารถตรวจจับกลุ่มจุดดับบนดวงอาทิตย์ทางด้านที่อยู่ตรงข้ามกับโลกได้อีกด้วย

การตรวจหาปริมาณอิเล็กตรอนโดยรวม (TEC) ของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์มีความสำคัญเนื่องจากค่านี้มีผลต่อความแม่นยำของข้อมูลตำแหน่งในระบบ GPS ค่า TEC คือจำนวนอิเล็กตรอนในแท่งอากาศแนวดิ่ง ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางเมตรและมีฐานล่างและฐานบนอยู่ที่ระดับชั้นล่างและชั้นบนของไอโอโนสเฟียร์ ตามลำดับ ค่า TEC นี้มีผลต่อเวลาในการเดินทางของสัญญาณ GPS และอาจวัดได้โดยการเฝ้าจับสัญญาณความถี่ 2 ค่าจากดาวเทียม GPS 75 ตำแหน่งที่อนุภาคสุริยะพลังงานสูงถูกเร่งในบรรยากาศชั้นโคโรนาระดับต่ำและในอวกาศระหว่างดาวเคราะห์ ดาวเทียม STEREO ยังช่วยให้เราเข้าใจโครงสร้างของลมสุริยะรอบโลกอีกด้วย การเฝ้าระวัง/สังเกต/ตรวจจับลมฟ้าอากาศและพายุสุริยะด้วยหอดูดาวอวกาศและดาวเทียมชนิดต่าง ๆ ในอวกาศ ได้แก่

1. หอดูดาวอวกาศ SOHO (solar and heliospheric observatory) : หอดูดาวอวกาศ SOHO ศึกษาโครงสร้างและการเปลี่ยนแปลงภายในดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นดาวเทียมดวงแรกของโลกที่ให้ภาพเขตพาความร้อน (convection zone) และภาพโครงสร้างของจุดดับบนดวงอาทิตย์บริเวณใต้พื้นผิว หอดูดาวอวกาศ SOHO ระบุบริเวณที่เกิดลมสุริยะและศึกษาว่าลมสุริยะถูกเร่งให้มีอัตราเร็วเพิ่มขึ้นได้อย่างไร นอกจากนี้ยังศึกษาว่าทำไมดวงอาทิตย์ จึงมีบรรยากาศชั้นโคโรนาและเหตุใดชั้นโคโรนาก็มีอุณหภูมิสูงถึง 1,000,000 องศาเซลเซียส

2. หอดูดาวอวกาศ SDO (solar Dynamics observatory) ที่ทำหน้าที่ศึกษาชั้นบรรยากาศของดวงอาทิตย์ในสเกลละเอียดเชิงระยะทาง (spatial) และเวลา (temporal) และศึกษาพร้อมกันในหลายช่วงคลื่น หอดูดาวอวกาศ SDO ศึกษาโครงสร้างและกลไกการเกิดสนามแม่เหล็กของดวงอาทิตย์ เนื่องจากสนามแม่เหล็กนี้เป็นต้นกำเนิดของกิจกรรมหลายอย่างในดวงอาทิตย์ ดาวเทียมนี้ยังศึกษาว่าพลังงานที่สะสมอยู่ในสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงและถูกปลดปล่อยออกมาในภาพแบบต่าง ๆ เช่น พลังงานของลมสุริยะ พลังงานของอนุภาคสุริยะ พลังงานสูงและการเปล่งรังสีในแบบต่าง ๆ เป็นต้น

3. ดาวเทียม solar dynamics observatory GOES (geostationary operational environmental satellite) โดยดาวเทียม GOES เป็นดาวเทียมค้างฟ้าดวงที่ 12 ถึง 15 มีอุปกรณ์สร้างภาพรังสีเอกซ์จากดวงอาทิตย์ (solar X-ray Imager) เพื่อคอยตรวจจับรังสีเอกซ์จากดวงอาทิตย์และเฝ้าระวังการลุกจ้าและการพ่น CME ที่มักเกิดร่วมกับการลุกจ้า ภาพดวงอาทิตย์ในช่วงรังสีเอกซ์จากดาวเทียม GOES-15 เมื่อวันที่ 23 เมษายน 2555

4. หอดูดาวอวกาศ STEREO (solar terrestrial relations observatory) : หอดูดาวอวกาศ STEREO มี 2 ดวง ดวงหนึ่งอยู่ในตำแหน่งลำนำวงโคจรของโลก อีกดวง หนึ่งอยู่ในตำแหน่งตามวงโคจรของโลก ทั้งสองดวงใช้ในการศึกษาดวงอาทิตย์และการพ่นมวลโคโรนา (CME) ใน ลักษณะ 3 มิติ คล้าย ๆ กับตาของคนเรา 2 ข้าง มองภาพเป็น 3 มิติ หอดูดาวอวกาศ STEREO ช่วยให้เข้าใจสาเหตุการเกิด CME ลักษณะการเคลื่อนที่ของ CME ในอวกาศ อีกทั้ง ยังศึกษากลไกการเกิดและภาพจำลอง CME ในแบบ 3 มิติด้วย

5. ดาวเทียม POES (polar operational environmental satellite) : ดาวเทียม POES เป็นดาวเทียมซึ่งเคลื่อนที่ผ่านบริเวณขั้วโลก มีเซ็นเซอร์ตรวจจับอนุภาคโปรตอนและอิเล็กตรอนรวมทั้งยังตรวจจับการเกิดแสงเหนือ-แสงใต้ (ออโรรา) ได้

6. ดาวเทียม ACE (advanced composition explorer) : ดาวเทียม ACE ศึกษาลมสุริยะ อนุภาคสุริยะ พลังงานสูงและสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ (interplanetary magnetic field) ดาวเทียม ACE สามารถเตือนภัยจากพายุแม่เหล็กโลกได้ล่วงหน้าราว 1 ชั่วโมง

7. โครงการ advanced composition explorer DMS (defense meteorological satellite program) : โครงการ DMS นี้มีดาวเทียมซึ่งติดอุปกรณ์ตรวจจับ อนุภาคพลังงานต่ำ (ในช่วง 30-30,000 อิเล็กตรอน โวลต์) ที่อาจทำให้เกิดแสงออโรราและมีอุปกรณ์ตรวจวัด ความแปรปรวนของสนามแม่เหล็กโลกที่เกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าในบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ในแถบละติจูดสูง เป็นต้น

4.7 เว็บไซต์แสดงค่าพารามิเตอร์ชั้นไอโอโนสเฟียร์และผลการทำนายการเกิดพลาสมาบับเบิล

จากหัวข้อที่ 4.1-4.6 ที่ผ่านมาได้อธิบายเนื้อหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและการเกิดพลาสมาบับเบิล ในหัวข้อนี้จะนำเสนอหน้าเว็บไซต์ที่ออกแบบขึ้นมาเพื่อแสดงพารามิเตอร์ การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและผลการทำนายการเกิดพลาสมาบับเบิล เพื่อที่จะนำไปสู่การแจ้งเตือนความผิดปกติของชั้นไอโอโนสเฟียร์ รวมถึงในสถานการณ์ที่มีพายุแม่เหล็กโลกและพลาสมาบับเบิลเกิดขึ้น โดยหน้าเว็บที่ ออกแบบและสร้างขึ้นมาเพื่อใช้งานโครงการศึกษา นี้ประกอบไปด้วย 5 หน้าเว็บหลัก ได้แก่

เว็บไซต์ที่ 1 - หน้าเว็บหลัก (homepage) ดังในรูปที่ 4.11(ก) และสามารถเข้าถึงได้ที่ลิงค์ URL ข้างล่างนี้ โดยหน้าเว็บหลักนี้จะบรรยายถึงชื่อโครงการวิจัยนี้ ความสำคัญและที่มาเบื้องต้น วัตถุประสงค์ ขอบเขตและ กิจกรรมการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ตัวชี้วัดผลผลิตและตัวชี้วัดผลลัพธ์

<https://sites.google.com/view/acpb-rtk-5g>

เว็บไซต์ที่ 2 - หน้าเว็บการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ ดังในรูปที่ 4.11 (ข) ซึ่งสามารถเข้าถึงได้ที่ลิงค์ URL และมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและผลการทำนายการเกิดพลาสมาบับเบิล ดังนี้

<https://sites.google.com/view/acpb-rtk-5g/atmospheric-changes-and-epbs?authuser=0>

1. ค่าพายุแม่เหล็กโลก (ดัชนี Kp) แสดงถึงระดับ G-scale
2. ค่าพายุรังสีสุริยะ (Radiation Storm) แสดงถึงระดับ S-scale
3. ค่าความผิดปกติคลื่นวิทยุ (Radio Blackout) แสดงถึงระดับ R-scale
4. ค่า Disturbance Storm Time (Dst) แสดงถึงระดับของ H-component ของโลก (หน่วย: nT)
5. ดัชนี Planetary A-index (Ap index) - ผลรวมของดัชนี Kp
6. ค่า F10.7 Solar Flux - มีความสัมพันธ์โดยตรงกับจุดดับบนดวงอาทิตย์ (sunspot number)
7. ผลการทำนายการเกิดพลาสมาบับเบิลด้วยวิธี KNN (K nearest neighbors)
8. สภาพอวกาศโดยสรุปและระดับความรุนแรงของความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ในตอนนั้น

โดยค่าข้อมูลลำดับที่ 1-6 นั้นถูกดึงค่าออกมาจากเว็บไซต์ที่บรรยายไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ส่วนหัวข้อที่ 7 จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ และหัวข้อที่ 8 ผลการทำนายการเกิดพลาสมาบับเบิลด้วยวิธี KNN เป็นหัวข้อที่คณะผู้วิจัย นำเสนอเพิ่มเติมเพื่อที่ว่าในอนาคตสามารถนำไปใช้เพื่อที่จะนำไปใช้ในการทำนายการเกิดพลาสมาบับเบิลแบบเวลา

จริง แล้วนำไปสู่การลดผลกระทบของพลาสมาบับเบิลที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการระบุพิกัดแบบ RTK ของเทคโนโลยี 5G, UAV และระบบอื่น ๆ ที่อาศัยเครือข่าย Multi-GNSSs ได้

เว็บไซต์ที่ 3 – หน้าเว็บการตรวจจับและประมวลผลภาพพลาสมาบับเบิล ดังในรูปที่ 4.11(ค) และสามารถเข้าถึงได้ที่ลิงค์ URL ต่อไปนี้

<https://sites.google.com/view/acpb-rtk-5g/plasma-bubbles?authuser=0>

โดยหน้าเว็บนี้อธิบายเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับพลาสมาบับเบิลคือ airglow OI 630.0 nm ASI images และวิธีการที่ใช้ในการประมวลผลภาพว่ามีพลาสมาบับเบิลเกิดขึ้นหรือไม่ด้วยวิธี Convolution Neural Network (CNN) ซึ่งในที่นี้จะใช้ Yolo v3 framework ของ Keras (deep learning API) ที่ปฏิบัติการอยู่บน TensorFlow (machine learning platform)

เว็บไซต์ที่ 4 – หน้าเว็บคำบรรยายพารามิเตอร์การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ ดังในรูปที่ 4.11(ง) และสามารถเข้าถึงได้ที่ลิงค์ URL ต่อไปนี้

<https://sites.google.com/view/acpb-rtk-5g/description?authuser=0>

โดยหน้าเว็บนี้อธิบายเนื้อหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.2.2.5.3 และเกี่ยวข้องกับเว็บไซต์ที่ 2 (หน้าเว็บการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ) โดยตรง

เว็บไซต์ที่ 5 – หน้าเว็บสำหรับกรอกข้อมูลลงในแบบฟอร์มเพื่อขอภาพพลาสมาบับเบิลที่ตรวจจับได้ในต่างประเทศจำนวน 3 แห่งและจังหวัดชุมพร ดังในรูปที่ 4.11(จ) โดยภาพที่ได้จัดเก็บและรวบรวมไว้เป็นลิขสิทธิ์ของ Nagoya University ถึงแม้ว่าคณะผู้วิจัยฯ จะทำการรวบรวมข้อมูลผ่านการวิเคราะห์และภาพพลาสมาบับเบิลในต่างประเทศจำนวน 3 แห่ง และจังหวัดชุมพร, ประเทศไทย ไว้ในโครงการฯ นี้ ของ กสทช. แล้ว คณะผู้วิจัยฯ ก็ไม่สามารถที่จะเปิดเผยและวางรูปเหล่านั้นในหน้าเว็บนี้ได้ แอดมินจะส่งคำร้องขอ ดังกล่าวส่งไปยัง Nagoya University เพื่อขออนุญาตอีกครั้งหนึ่งตามที่ร้องขอ โดยสามารถเข้าถึงได้ที่ลิงค์ URL ต่อไปนี้

<https://sites.google.com/view/acpb-rtk-5g/plasma-bubble-request?authuser=0>

โดยแบบฟอร์มกรอกข้อมูลเพื่อขอภาพพลาสมาบับเบิลที่ตรวจจับจะแสดงไว้ในรูปที่ 4.12 และสามารถเข้าถึงได้ที่ลิงค์ URL ต่อไปนี้

<https://forms.gle/8NiLDcmq74D6MLaw5>

4.8 การทำนายการเกิดขึ้นของพลาสมาบับเบิลด้วยค่า Range Spread-F

จากการศึกษาวิจัยของ Buhari และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลง EPB โดยใช้กิจกรรมสุริยะและกิจกรรมแม่เหล็กโลกที่ตรวจจับพบเหนือประเทศมาเลเซีย ในช่วงปี 2008-2013 และได้ทำการสรุปประเด็นที่สำคัญว่า “โดยส่วนใหญ่ EPB มักจะเกิดขึ้นและมีความสัมพันธ์กับกิจกรรมสุริยะที่รุนแรง แต่ไม่ค่อยขึ้นอยู่กับดัชนีกิจกรรมแม่เหล็กโลก” ในทำนองเดียวกัน จากผลการศึกษาของ Abdu และคณะ [12] และ Abdu [13] พบว่า ช่วงเวลาที่เกิด Equatorial Spread-F โดยส่วนใหญ่มักจะเกิดพร้อมกับปรากฏการณ์ EPB และมักจะเกิดในช่วงเวลาที่สนามไฟฟ้าของโลกถูกรบกวนในช่วงเวลาที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก (storm time disturbance electric fields) ซึ่งจะเห็นว่า “การเกิด EPB ก็น่าจะมีส่วนที่เกี่ยวข้องกับ (ดัชนี) แม่เหล็กโลกในช่วงที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกด้วย” ซึ่งจะขัดแย้งกับผลสรุปของ Buhari และคณะ [11]

ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่นำผลการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีกิจกรรมสุริยะและดัชนีแม่เหล็กโลกที่มีต่อการเกิดขึ้นของ RSF ที่สถานีชุมพร ในช่วงปี 2013-2014 ที่นำเสนอไว้ใน [11] โดยการเกิดขึ้นหรือการไม่เกิดขึ้นของ RSF ก็เป็นสมมติฐานประการหนึ่งที่ใช้ในการแจ้งเตือนการเกิดขึ้นหรือการไม่เกิดขึ้นของ EPB ทางอ้อมเช่นกัน ซึ่งทำให้ผลการศึกษาของโครงการวิจัยนี้ได้สามารถไปใช้งานจริงเพื่อทำนายการเกิดขึ้นและการแจ้งเตือน EPB ให้ได้ โดยอาศัยดัชนีกิจกรรมสุริยะและดัชนีแม่เหล็กโลกที่วัดได้ ณ ขณะนั้น ในที่นี้ ค่าดัชนีกิจกรรมสุริยะและดัชนีแม่เหล็กโลกที่ใช้ในการทำนายการเกิดขึ้นของ Range Spread-F ในโครงการวิจัยนี้ ได้แก่ ดัชนี Kp, ค่าจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์โดยเฉลี่ย (Average Solar Sunspot Number หรือ SSN), ดัชนี Dst, ดัชนี ap และค่าฟลักซ์สุริยะ (solar flux) F10.7 ตัวอย่างของดัชนีกิจกรรมสุริยะและแม่เหล็กโลกกับผลการตรวจจับการเกิด RSF ที่สถานีชุมพร ในปี 2013 มีแสดงไว้ในตารางที่ 4.11 โดย Yes กับ No ที่แสดงในตารางที่ 4.11 นั้นแสดงว่า “มี RSF เกิดขึ้น” และ “ไม่มี RSF เกิดขึ้น” ตามลำดับ

ตารางที่ 4.11 ตัวอย่างของดัชนีกิจกรรมสุริยะและแม่เหล็กโลกกับการเกิด RSF ที่สถานีชุมพร [25]

Kp	R	Dst	ap	F107	ผลการตรวจจับ RSF
0.7	99	3	3	113.9	No
0.3	99	2	2	113.9	No
0.3	99	1	2	113.9	No
0.3	99	3	2	113.9	No
0.7	83	-3	3	116.6	Yes
0.7	83	-5	3	116.6	Yes
0.7	83	-6	3	116.6	Yes
0.7	83	-6	3	116.6	Yes
0.7	83	-8	3	116.6	Yes
0.7	83	-8	3	116.6	Yes
1	83	-7	4	116.6	Yes
1	83	-5	4	116.6	Yes
1	83	-2	4	116.6	No
0.7	83	-1	3	116.6	Yes
0.7	83	-5	3	116.6	No
0.7	83	-12	3	116.6	No
1.3	77	-17	5	112.6	No

โดยแบบจำลองการทำนายการเกิดขึ้นของ RSF หรือพลาสมาบับเบิลที่อาศัยค่าพารามิเตอร์จำนวน 5 ค่า (SSN, F10.7, Dst, Kp, Ap) ที่นำเสนอนี้ให้ค่าความแม่นยำที่สูงเท่ากับ 88% ซึ่งจะส่งผลดีที่จะทำให้เราสามารถทำนายการเกิดขึ้นของ RSF และ EPB ในบริเวณละติจูดต่ำและเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์

อย่างยิ่งต่อโครงการศึกษาฯ ในครั้งนี้ เนื่องจากเราสามารถนำผลการทำนายนี้เป็นตัวบ่งชี้การเกิดซินทิลเลชัน ซึ่งเป็นต้นเหตุหลักที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการระบุพิกัด RTK ของเทคโนโลยี 5G, UAV และอุปกรณ์อื่น ๆ ได้

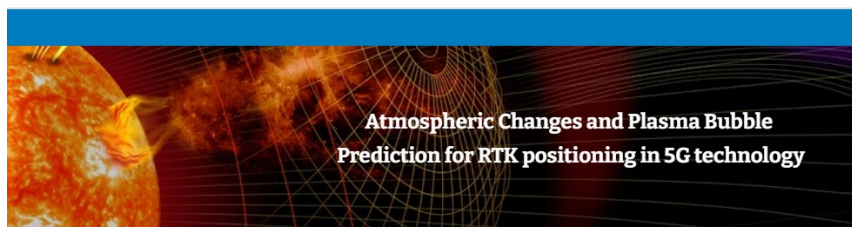
A study project of the impacts of atmospheric changes and plasma bubble on RTK positioning of 5G technology and unmanned automatic vehicle

เว็บไซต์นี้จัดทำขึ้นโดยทีมวิจัยภายใต้โครงการวิจัย "โครงการศึกษาการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีผลกระทบต่อ Real-Time Kinematic หรือ RTK ของเทคโนโลยี 5G และ UAV" โดยได้รับการส่งเสริมสนับสนุนการทำโครงการวิจัยจากกองทุนวิจัยและพัฒนาการกระจายเสียงกิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะภายใต้การกำกับดูแลของสำนักงานคณะกรรมการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ

วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อทำการศึกษผลกระทบการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G อากาศยานไร้คนขับ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ
2. เพื่อทำการศึกษผลกระทบของพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G อากาศยานไร้คนขับ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ
3. เพื่อพัฒนาแบบจำลองโคลนุซาแบบใหม่ที่สามารถปรับปรุงค่า RMSE ให้ดีขึ้นและระบุตำแหน่งเครื่องรับ GNSS ที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองโคลนุซาแบบเดิม
4. เพื่อศึกษาและนำเสนอวิธี RTK ที่อาศัยข้อมูลมากกว่า 1 สถานีฐาน เพื่อให้ปรับแก้พิกัดเครื่องรับ GNSS อย่างมีประสิทธิภาพ
5. เพื่อศึกษาและนำเสนอวิธีใหม่ที่เหมาะสม เพื่อให้ทำการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเครื่องรับ GNSS มีความผิดพลาดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น

รูปที่ 4.11(ก) เว็บไซต์ที่ 1 (homepage) ของโครงการฯ นี้



การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ

Sunday November 21, 2021

1. ค่าพายุแม่เหล็กโลก (Kp index) มีค่า **4** ระดับ **G1** ระดับความรุนแรง **เล็กน้อย**
2. ค่าพายุรังสีสุริยะ (Radiation Storm) มีค่า **1%** ระดับ **S1** ระดับความรุนแรง **เล็กน้อย**
3. ค่าความผิดปกติคลื่นวิทยุ (Blackout) มีค่า **1%** ระดับ **R1** ระดับความรุนแรง **เล็กน้อย**
4. ค่า Disturbance Storm Time มีค่า **-9mT** ระดับ **G0** ระดับความรุนแรง **ปกติ**
5. ค่า Planetary A-index (Ap) มีค่า **15** ระดับ **G1** ระดับความรุนแรง **เล็กน้อย**
6. ค่าฟลักซ์สุริยะ F10.7 มีค่า **79.7** ระดับ **G2** ระดับความรุนแรง **ปานกลาง**
7. จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ ประมาณ **33** ตำแหน่ง
8. ผลการทำนายการเกิดพลาสมาบับเบิลด้วยวิธี KNN คือ **ไม่เกิดพลาสมาบับเบิล**

สภาพอวกาศในตอนนี้เป็น **เจียม (สภาวะปกติ) - เกิดพายุเล็กน้อย** ระดับ **G1**

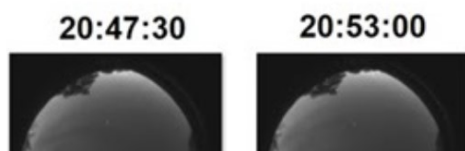
รูปที่ 4.11(ข) หน้าเว็บที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและผลการทำนายการเกิด EPB

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

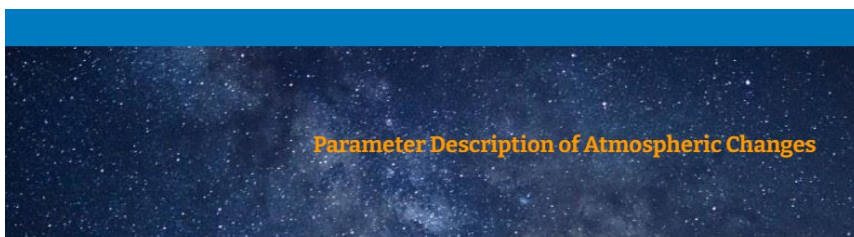


การตรวจจับพลาสมาบับเบิล และการประมวลผลภาพพลาสมาบับเบิลด้วยวิธี CNN

Based on several ground-based EPB studies, it is widely accepted that the nightglow OI 630.0 nm emissions are produced in low latitude F-region at the heights 250–300 km. The nightglow 630.0 nm emission is controlled dissociative recombination between electrons and ions, hence, the OI-630.0 ASI system has been used to investigate the characteristics of EPBs. Here, the all-sky imager is a crucial instrument for better understanding the coupling between ionosphere and thermosphere and detecting the EPBs using ASI images of nightglow OI 630.0 nm and OH- emissions. Note that OH- emissions are generating at around 100 km (iono-sphere) while OI 630.0 nm emissions are generating at around 250 km (thermosphere). The below figure shows the examples of airglow OI 630.0 nm ASI images at Chiang Mai, Thailand, on February 2, 2020 as taken from Nagoya University. Here, the EPBs appeared between 20:48 LT and 21:20 LT.



รูปที่ 4.11(ค) หน้าเว็บที่ 3 แสดง การตรวจจับและการประมวลผล พลาสมาบับเบิลด้วยวิธี CNN



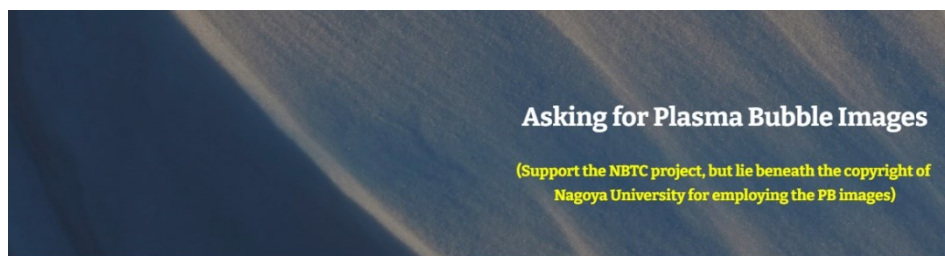
พารามิเตอร์เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ ได้แก่

1. ค่าพายุแม่เหล็กโลก (ดัชนี Kp) แสดงถึงระดับ G-scale
2. ค่าพายุรังสีสุริยะ (Radiation Storm) แสดงถึงระดับ S-scale
3. ค่าความมืดปกคดียุควิทยุ (Radio Blackout) แสดงถึงระดับ R-scale
4. ค่า Disturbance Storm Time (Dst) แสดงถึงระดับของ H-component ของโลก (หน่วย: nT)
5. ดัชนี Planetary A-index (Ap index) - ผลรวมของดัชนี Kp
6. ค่า F10.7 Solar Flux - มีความสัมพันธ์โดยตรงกับจุดดับบนดวงอาทิตย์ (sunspot number)

พารามิเตอร์ตัวที่ 1 - ค่าพายุสนามแม่เหล็ก (Kp index)

ค่าพายุสนามแม่เหล็ก (Planetary K index หรือ Kp index) เป็นค่าพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ให้เห็นถึงการเกิดขึ้นของพายุแม่เหล็กโลก (geomagnetic storm) บนโลก โดยสนามแม่เหล็กของโลกมีความแปรปรวน เนื่องจากถูกสนามแม่เหล็กจากดวงอาทิตย์รบกวน ทั้งนี้พายุแม่เหล็กโลกอาจเกิดขึ้นเนื่องจากทั้งลมสุริยะ (solar wind) หรือการพ่นมวลโคโรนา (CME) ดังนั้นค่า Kp index จึงเกิดขึ้นจากการวัดการสั่นสะเทือนของสนามแม่เหล็กของโลก เมื่อโลกของเราปะทะกับการพ่นมวลโคโรนา (Corona Mass Ejection หรือ CME) พอโดนจะ

รูปที่ 4.11(ง) คำบรรยาย พารามิเตอร์การเปลี่ยนแปลง ชั้นบรรยากาศที่แสดงไว้ในเว็บ หน้า ที่ 4



ภาพพลาสมาบับเบิล (PB) ได้ถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์ OI 630.0 nm all-sky airglow imagers (ASIs) เพื่อนำมาว่า "มีพลาสมาบับเบิลเกิดขึ้นหรือไม่" โดยภาพที่ได้จัดเก็บและรวบรวมไว้เป็นลิขสิทธิ์ของ Nagoya University ถึงแม้ว่าคณะผู้วิจัย จะทำการรวบรวมข้อมูลผ่านการวิเคราะห์และภาพพลาสมาบับเบิลในต่างประเทศจำนวน 3 แห่ง และ จังหวัดชุมพร , ประเทศไทย ไว้ในโครงการนี้ ของ กสทช. แล้ว คณะผู้วิจัย ก็ไม่สามารถที่จะเปิดเผยและวางรูปเหล่านั้นในหน้าเว็บนี้ได้ ดังนั้น ถ้านักวิจัยหรือผู้สนใจท่านใดต้องการภาพ PB ขอให้กรอกข้อมูลลงในแบบฟอร์มร้องขอภาพ PB ในลิงค์ข้างล่างนี้ แล้วแอดมินจะส่งคำร้องขอดังกล่าวส่งไปยัง Nagoya University เพื่อขออนุญาตอีกครั้งหนึ่งตามที่ร้องขอ

(English Words: The plasma bubble (PB) images were detected by OI 630.0 nm all-sky airglow imagers (ASIs) so as to be employed whether the PBs exist or not. These images were stored and gathered as the copyright of Nagoya University. Although the researcher team can collect both the analyzed data and the PB images in three foreign countries as well as Chumphon, Thailand, in this study project of NBTC, we can't disclose and pose those PB images on this web site due to Nagoya's copyright. Therefore, if any researchers or others want to get some PB images, please fill in a form for asking PB images in a link below, then the administrator will forward your filled form to Nagoya University for asking the permission once as your desire.)

รูปที่ 4.11(จ) หน้าเว็บที่ 5 สำหรับกรอกแบบฟอร์มขอภาพพลาสมาบับเบิล (สภาพอวกาศ)

Form for asking plasma bubble images

This form was aimed to receive the requests for plasma bubble images. The administrator will forward this form to Nagoya University in order to asking the permission again. However, the copyright owners will decide for whether the permissions will be allowed or not. Normally, if the plasma bubble images on the specific periods are allowed and sent to the requesters, the co-authors from Nagoya University should be appeared on those manuscripts as partial contributors.

Note: There are 4 stations, including Kototabang, Indonesia; Hainan, China; Ishigaki Island, Japan; and Chumphon, Thailand

Email *

Valid email

This form is collecting emails. [Change settings](#)

Name-Surname: *

Short answer text

Organization: *

Short answer text

รูปที่ 4.12 แบบฟอร์มกรอกข้อมูลเพื่อขอภาพพลาสมาบับเบิลที่ตรวจจับได้ในต่างประเทศและจังหวัดชุมพร

4.9 เอกสารอ้างอิงบทที่ 4

- [1] ค่า Kp index. <https://services.swpc.noaa.gov/text/3-day-forecast.txt>, สืบค้นวันที่ 5 กรกฎาคม 2564
- [2] ค่า Solar Radiation Storm. <https://services.swpc.noaa.gov/text/3-day-forecast.txt>, สืบค้นวันที่ 5 กรกฎาคม 2564
- [3] ค่า Radio Blackout. <https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux-dynamic-plot>, สืบค้นวันที่ 5 กรกฎาคม 2564
- [4] ค่า Dst, http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/202104/index.html, สืบค้นวันที่ 7 กรกฎาคม 2564
- [5] ค่า Planetary A-index (Ap index). <https://www.swpc.noaa.gov/products/3-day-geomagnetic-forecast>, สืบค้นวันที่ 7 กรกฎาคม 2564
- [6] ค่า F10.7 solar flux. <https://www.spaceweather.gc.ca/forecast-prevision/solar-solaire/solarflux/sx-5-flux-en.php>, สืบค้นวันที่ 10 กรกฎาคม 2564
- [7] Solar Radiation Storm. <https://www.weather.gov/images/akq/Briefing/solarRadiationStormScale.jpg>, สืบค้นวันที่ 15 กรกฎาคม 2564
- [8] Proton Flux. <https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-proton-flux-dynamic-plot>, สืบค้นวันที่ 25 กรกฎาคม 2564
- [9] X-ray Flux. <https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux-dynamic-plot>, สืบค้นวันที่ 25 กรกฎาคม 2564
- [10] Flare Classes. <http://spaceweather.com/glossary/flareclasses.html>, สืบค้นวันที่ 30 กรกฎาคม 2564
- [11] S. M. Buhari, et al., “The variations of equatorial plasma bubble with solar and geomagnetic activities in Malaysia (2008-2013),” United Nations/Nepal Workshop on the Applications of Global Navigation Satellite Systems, December 12-16, 2016.
- [12] M. A. Abdu, R. T. de Meiros, J. H. A. Sobrel, J. A. Bittencourt, “Spread F plasma bubble vertical rise velocities determined from spaced ionosonde observations,” J. Geophys. Res., vol. 88, pp. 9197–9204, 1983, doi:10.1029/JA088iA11p09197.
- [13] M. A. Abdu, “Equatorial spread F/plasma bubble irregularities under storm time disturbance electric fields,” J. Atmos. Sol. Terr. Phys., vol. 75–76, pp. 44-56, 2011.

บทที่ 5 แบบจำลองโคลบูชา

ระบบระบุพิกัดสากล หรือ GPS (Global Positioning System) เป็นระบบดาวเทียมนำทางสากล (GNSS) ระบบแรกๆ ที่นำมาใช้ในงานกันอย่างแพร่หลายในการระบุพิกัดและงานต่าง ๆ มากมาย ซึ่งประกอบไปด้วยดาวเทียมอย่างน้อย 32 ดวงที่โคจรอยู่ที่ระดับความสูง 20,200 กิโลเมตรจากพื้นโลก ในการส่งสัญญาณจีพีเอสนั้น เวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยระบบดาวเทียมนำทางสากล (global navigation satellite system หรือ GNSS) เป็นระบบการนำทางหรือการระบุพิกัดทั่วโลกที่อาศัยดาวเทียม ได้แก่ ระบบจีพีเอส (global positioning system หรือ GPS), ระบบ Galileo, ระบบ Beidou ฯลฯ แต่ในปัจจุบันนี้ ระบบ GNSS เริ่มนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ได้แก่ เกษตรอัจฉริยะที่ใช้เพื่อสร้างเส้นทางการขับเคลื่อนรถเกษตรอัตโนมัติ งานโยธา/ก่อสร้าง/ที่ดินที่ใช้เพื่อปกคลุมพื้นที่ที่ครอบคลุมด้วยการระบุพิกัดแบบแม่นยำสูง (precise point positioning หรือ PPP) อุตสาหกรรมยานยนต์ที่ใช้เพื่อสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ เป็นต้น ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นกิจกรรมที่ต้องใช้การระบุพิกัดที่แม่นยำสูงทั้งสิ้น อย่างไรก็ตาม การระบุพิกัดด้วยเครื่องรับ GNSS โดยทั่วไปยังมีความผิดพลาดเกิดขึ้นอยู่เสมอเนื่องจากสิ่งรบกวนภายนอกหลายประการ ได้แก่ ความผิดพลาดที่เกิดจากอุปสรรคของดาวเทียม ความผิดพลาดที่เกิดจากเครื่องรับ GNSS การบดบังสัญญาณของสิ่งกีดขวาง เวลาประวิงที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) รวมถึงเวลาประวิงที่เกิดจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) ฯลฯ โดยปกติ ความผิดพลาดบางอย่างสามารถแก้ไขได้ด้วยการรับค่าแก้ไขจากสัญญาณ (ข้อมูล) ดาวเทียม เช่น ความผิดพลาดที่เกิดจากอุปสรรคของดาวเทียม ความผิดพลาดที่เกิดจากเครื่องรับ GNSS การบดบังสัญญาณของสิ่งกีดขวาง เป็นต้น แต่ความผิดพลาดจากเวลาประวิงที่เกิดจากชั้นเป็นค่าที่เกิดขึ้นไม่แน่นอนและมีผลต่อความผิดพลาดในการระบุพิกัดมากที่สุด ในขณะนี้ เราสามารถคำนวณค่าความผิดพลาดในการระบุพิกัดจากชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้วยค่าข้อมูลที่รับได้จากเครื่องรับ GNSS 2 ความถี่ (dual-frequency GNSS receiver) แต่อุปกรณ์ที่ใช้เครื่องรับ GNSS (single-frequency GNSS receiver) เช่น โทรศัพท์มือถือ รถยนต์ หรืออากาศยาน เป็นต้น ไม่สามารถคำนวณค่าความผิดพลาดในการระบุพิกัดจากชั้นไอโอโนสเฟียร์นี้ได้ ในปัจจุบันนี้มีเทคนิคที่สามารถแก้ไขค่าความผิดพลาดและระบุตำแหน่งด้วยความแม่นยำสูง ได้แก่ 1) เทคนิค PPP-RTK ที่ประมาณค่าพิกัดแม่นยำระดับต่ำกว่าเซนติเมตร โดยใช้ข้อมูลจากหลายสถานีฐาน (base stations) ที่นำมารวมกัน 2) เทคนิค DGPS (differential GPS) ที่ให้สถานีฐาน (Base) ที่ติดตั้งเครื่องรับ GNSS 2 ความถี่ส่งค่าแก้ไขไปยังตำแหน่งผู้ใช้งาน (Rover)

แบบจำลองโคลบูชา (Klobuchar model) ถูกคิดค้นขึ้นมาโดย Klobuchar ในปี 1987 สำหรับระบบดาวเทียม GPS เพื่อแสดงคุณลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของของชั้นไอโอโนสเฟียร์ แล้วนำมาใช้ในการจำลองความผิดพลาดในการระบุพิกัดที่เกิดจากเวลาประวิงที่เกิดขึ้นจากชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยแบบจำลองโคลบูชาคำนวณความผิดพลาดในการระบุพิกัดโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ 8 ค่าที่ส่งผ่านสัญญาณ GPS แล้วนำมาคำนวณโดยใช้ฟังก์ชันโคไซน์ โดยจะมีความแตกต่างกันไปตามตำแหน่งที่ตั้งของเครื่องรับ GPS แบบจำลองโคลบูชาดั้งเดิมสามารถลดค่าความผิดพลาดในการระบุพิกัดที่เกิดจากเวลาประวิงที่เกิดขึ้นจากชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้สูงถึง 60% แต่ประเทศไทยตั้งอยู่ในพื้นที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกและบริเวณละติจูดต่ำ จึงทำให้ค่าความผิดพลาดจากชั้นไอโอโนสเฟียร์สูงกว่าบริเวณละติจูดอื่น ๆ

นอกจากนี้ การส่งสัญญาณจากดาวเทียมมายังเครื่องรับ GNSS นั้นมักจะมีแหล่งความผิดพลาด (error source) ต่าง ๆ มากมาย จึงทำให้การรับสัญญาณนั้นผิดพลาดหรือเกิดการหน่วงเวลา (delay) ที่มีสาเหตุมาจากแหล่งความผิดพลาดทั้งภายในอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณดาวเทียมเอง ความผิดพลาดที่เกิดจากสัญญาณนาฬิกาและการหมุนของโลก รวมถึงเวลาประวิงที่เกิดจากชั้นบรรยากาศ เป็นต้น ซึ่งสามารถสรุปดังนี้

$$dt_{error} = dt_1 + dt_2 + dt_3 + dt_4 \quad (5.1)$$

โดยที่ dt_1 คือ เวลาประวิงที่เกิดจากชั้นบรรยากาศ

dt_2 คือ เวลาประวิงที่เกิดจากสัญญาณรบกวน

dt_3 คือ เวลาประวิงที่เกิดจากสัญญาณสะท้อนหลายเส้นทาง

dt_4 คือ ค่าชดเชยสำหรับเวลาประวิงของเครื่องรับ

ดังนั้น ค่าระยะทางเทียมที่ได้รับจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจะคำนวณจากเวลาจริงที่รวมกับ เวลาประวิงที่เกิดจากแหล่งความผิดพลาดต่าง ๆ ดังนั้นเพื่อการระบุพิกัดที่แม่นยำจำเป็นต้องแก้ไขเวลาประวิงเหล่านี้ เพื่อให้ได้ช่วงเวลาและส่งสัญญาณจากดาวเทียมมายังเครื่องรับที่ต้องการ โดยทั่วไป เวลาประวิงจากชั้นไอโอโนสเฟียร์สามารถแทนเวลาประวิงโดยใช้แบบจำลองไอโอโนสเฟียร์ที่คำนวณได้โดยใช้ข้อมูลจากเครื่องรับ GNSS 2 ความถี่ แต่ในผู้ใช้ความถี่เดียว เช่น โทรศัพท์มือถือ ยานพาหนะ หรือเครื่องบิน เป็นต้น ไม่สามารถคำนวณเวลาประวิงนี้ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองที่ใช้ทดแทนเวลาประวิงนี้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาแบบจำลองโคลบูชาที่เป็นที่นิยมต่อผู้ใช้งานจีพีเอสความถี่เดียว และสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพแบบจำลองให้สามารถลดเวลาประวิงมากขึ้น

ในปี 1987 Klobuchar (1987) ได้สร้างแบบจำลองไอโอโนสเฟียร์ที่ได้จากการทดลอง (empirical model) เพื่อใช้ในการคำนวณหาเวลาประวิงโดยประมาณที่เกิดจากชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยแบบจำลองไอโอโนสเฟียร์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นรูปกราฟโคไซน์และมีแนวโน้มเดียวกับเวลาประวิงที่คำนวณได้จากการวัดจริง เมื่อพิจารณาความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์เท่ากับ 350 km สำหรับผู้ใช้งานจีพีเอสความถี่เดียว โดยปกติ ดาวเทียมจีพีเอสจะกระจายสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองโคลบูชาสำหรับการคำนวณเวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์สำหรับเครื่องรับจีพีเอสความถี่เดียว โดยผู้ใช้จะได้รับตำแหน่งของผู้รับ (ϕ_u, λ_u) ซึ่งเป็นค่า geodetic latitude and longitude, ตามลำดับ มุมเงยและมุมยกระหว่างผู้รับกับดาวเทียมที่สังเกตได้แทนด้วย E กับ A ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์ในข่าวสารการนำร่องที่ได้รับจากดาวเทียม (α, β) ซึ่งมี 10 ขั้นตอนในการคำนวณ หาเวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Jongsintawee et al., 2006a; 2006b) ดังนี้

1. คำนวณมุมเงยจากจุดศูนย์กลางโลก (Center of earth angle หรือ ψ)

$$\psi = \frac{0.0137}{E + 0.11} - 0.022 \quad (5.2)$$

โดย E คือมุมเงยจากตำแหน่งผู้รับไปยังดาวเทียมในหน่วยครึ่งวงกลม (Semi-circle)

2. คำนวณตำแหน่งละติจูด (ϕ_l) และลองจิจูด (λ_l) ณ จุด ionospheric pierce point (IPP) ในหน่วยครึ่งวงกลม ดังแสดงในสมการที่ (3) กับ (4) ตามลำดับ

$$\begin{aligned} \phi_l &= \phi_u + \psi \cos A \\ \lambda_l &= \lambda_u + \frac{\psi \sin A}{\cos \phi_l} \end{aligned} \quad (5.3)$$

โดย A คือมุมกวาดจากตำแหน่งผู้รับไปยังดาวเทียมในหน่วยครึ่งวงกลม ϕ_u คือตำแหน่งละติจูดของเครื่องรับ และ λ_u คือตำแหน่งลองจิจูดของเครื่องรับ

3. หาค่าละติจูดแม่เหล็กโลก (Geomagnetic latitude หรือ ϕ_m) ณ จุด IPP ในหน่วยครึ่งวงกลม

$$\phi_m = \phi_l + 0.064 \cos(\lambda_l - 1.617) \quad (5.4)$$

4. คำนวณเวลาท้องถิ่น ณ จุด IPP ในหน่วยครึ่งวงกลม (วินาที)

$$t = 43200\lambda_l + t_{GPS} \quad (5.5)$$

โดย t_{GPS} คือเวลาของดาวเทียม ในที่นี้ ถ้า t มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 86400 ค่า t ใหม่ที่ได้จะเท่ากับเอาค่า t ไปลบออกจาก 86400 แต่ถ้า t น้อยกว่า 0 ค่า t ใหม่ที่ได้จะเท่ากับ เอาค่า t ไปบวกกับ 86400

5. คำนวณค่าแอมพลิจูดของเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ (AMP)

$$AMP = \begin{cases} \alpha_0 + \alpha_1\phi_m + \alpha_2\phi_m^2 + \alpha_3\phi_m^3 & AMP > 0 \\ 0 & AMP \leq 0 \end{cases} \quad (5.6)$$

โดย $\alpha_{0,1,2,3}$ คือค่าสัมประสิทธิ์จากข้อมูลดาวเทียมส่วนแอมพลิจูดของแบบจำลอง

6. คำนวณค่าคาบของเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ (PER)

$$PER = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1\phi_m + \beta_2\phi_m^2 + \beta_3\phi_m^3 & PER > 0 \\ 72000 & PER \leq 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

โดย $\beta_{0,1,2,3}$ คือค่าสัมประสิทธิ์จากข้อมูลดาวเทียมส่วนคาบของแบบจำลอง

7. คำนวณเฟสของแบบจำลองเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ (เรเดียน)

$$X_l = \frac{2\pi(t - 50400)}{P_l} \quad (5.8)$$

8. คำนวณค่า Slant factor (วินาที)

$$F = 1.0 + 16.0 * (0.53 - E)^3 \quad (5.9)$$

9. คำนวณเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ (หน่วยวัดเป็นวินาที)

$$I_{L1} = \begin{cases} \left[5.10^{-9} + \sum_{n=0}^3 \alpha_n \alpha_m^n \cdot \left(1 - \frac{X_l^2}{2} + \frac{X_l^4}{24}\right) \right] \cdot F; & |x_l| \leq 1.57 \\ 5.10^{-9} \cdot F & ; |x_l| \geq 1.57 \end{cases} \quad (5.10a)$$

ดังนั้น เวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ (หน่วยวัดเป็นเมตร) สามารถที่จะคำนวณได้ดังนี้

$$I^k = I_{L1} \times c \quad (5.10b)$$

สำหรับความแม่นยำในการระบุพิกัดนั้น ภายหลังจากที่เราได้ทำการประมาณตำแหน่ง (พิกัด) ของเครื่องรับ GNSS แล้ว เราก็สามารถคำนวณค่าความผิดพลาดในแนวนอนของการเก็บค่าข้อมูลทุก ๆ ช่วงเวลาที่กำหนดได้ (คาบ) โดยการใช้อนุกรม Haversine หรือสมการอื่น ๆ ทั้งนี้ เราสามารถคำนวณค่าความผิดพลาด 95% เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำในการระบุพิกัดได้ โดยค่าความผิดพลาด 95% นี้ถูกนิยามว่าเป็นค่าที่มากที่สุด 95% ของค่าความผิดพลาดในแนวนอนที่มีค่าอยู่ภายในบริเวณ 2σ จากค่าเฉลี่ยของมัน นอกจากนี้ ค่าการความแม่นยำที่ปรับปรุงได้จะถูกรวบรวมในรูปแบบของ Percentage Reduction (PR) ของค่าความผิดพลาด โดยค่า PR นี้จะถูกใช้งาน

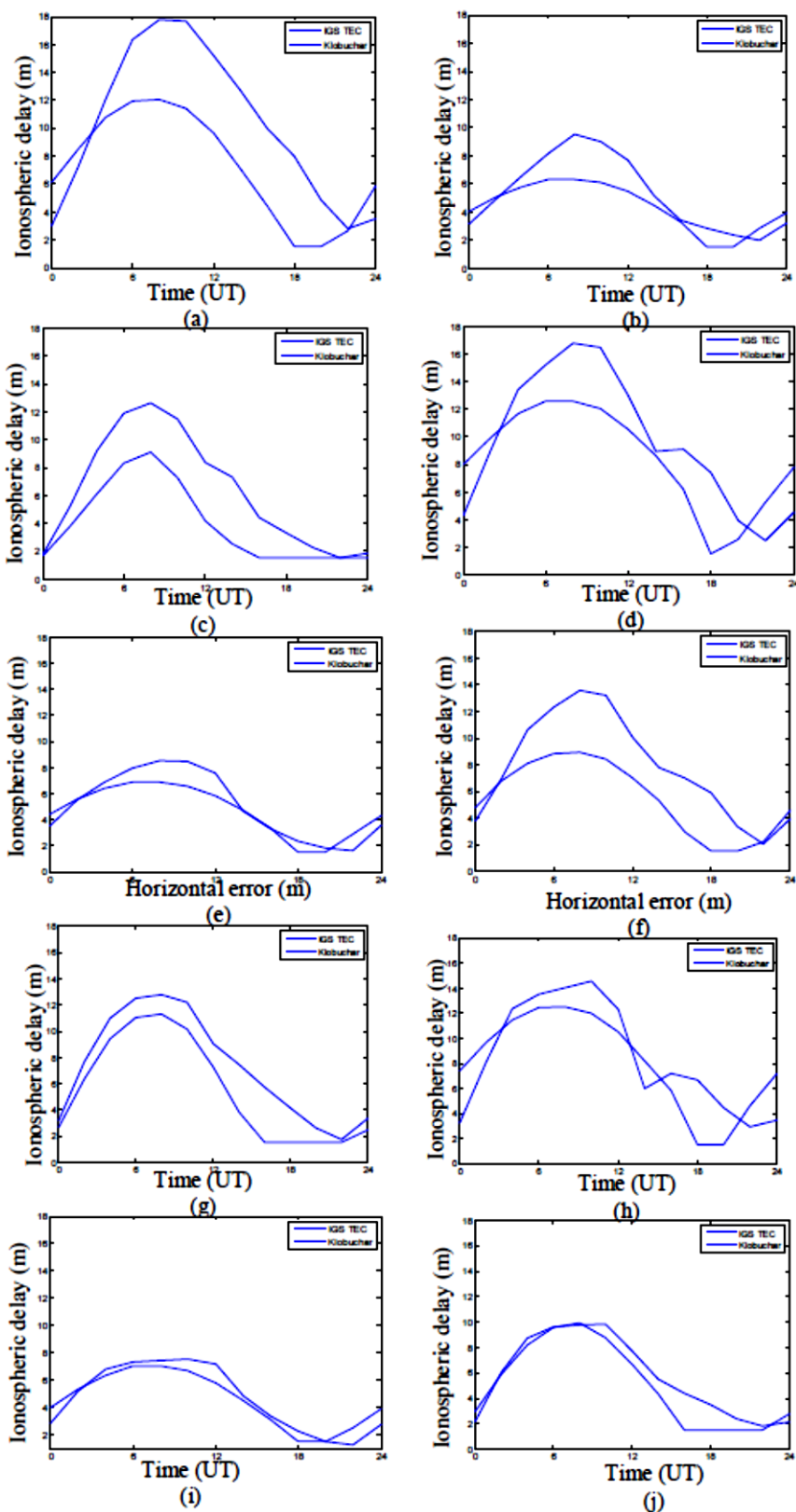
เพื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าความผิดพลาด 95% ที่มีการชดเชย (E1) กับที่ไม่มีการชดเชย (E2) เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์

$$PR(\%) = \left(\frac{E_2 - E_1}{E_2} \right) * 100 \quad (5.11)$$

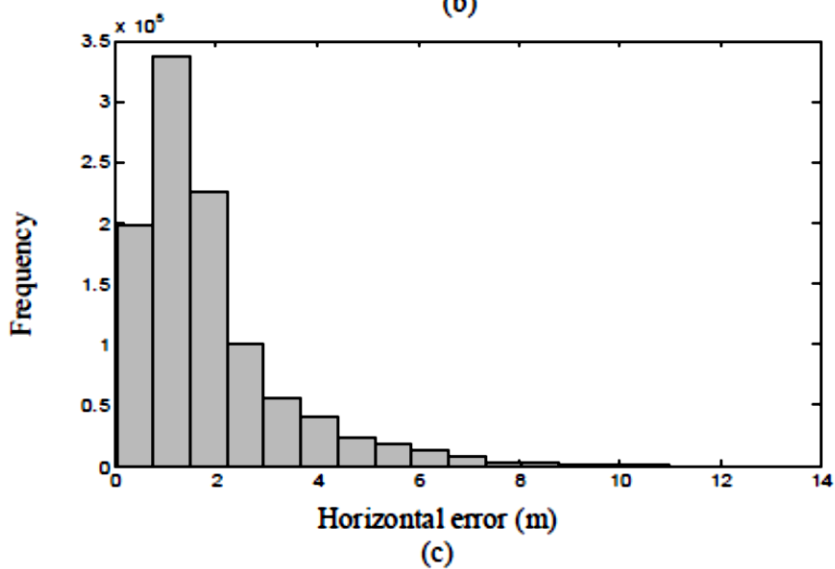
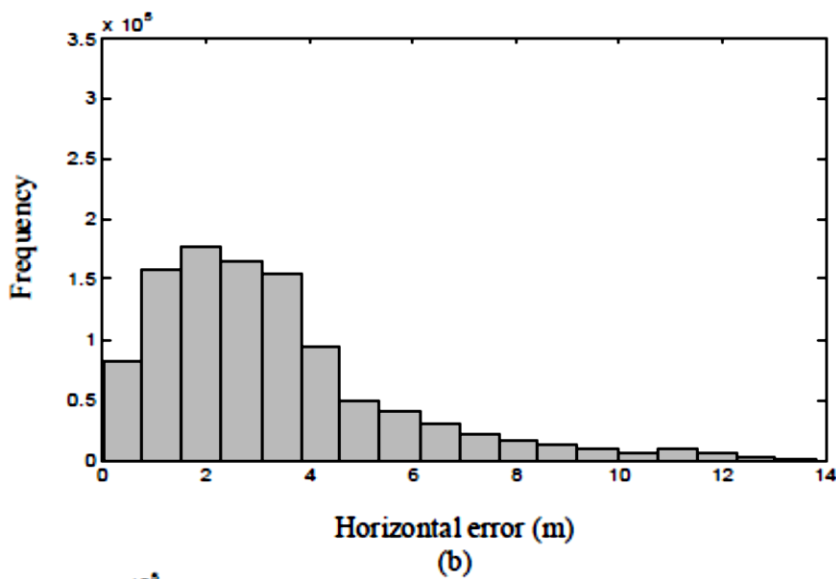
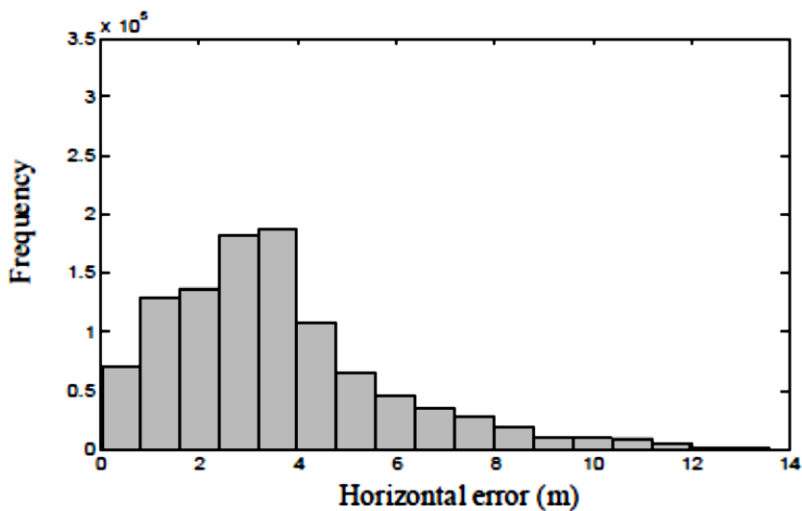
เมื่อเครื่องรับ GNSS ได้รับข้อมูลจากดาวเทียมจะสามารถนำช่วงเวลาที่สัญญาณเดินทาง นำไปคำนวณระยะทางระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับ โดยเครื่องรับ GNSS ชนิด 2 ความถี่จะสามารถนำระยะทางเทียม (Pseudorange) จากทั้ง 2 ความถี่มาคำนวณปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ (TEC) หลังจากนั้น เราจะนำค่า TEC ไปคำนวณหาเวลาประวิงที่เกิดจากชั้นไอโอโนสเฟียร์ เนื่องจากการคำนวณระยะทางเทียมจะขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณ ดังนั้นเวลาที่ได้รับจะมีความหน่วงเวลาที่เกิดจากชั้นนี้ด้วย โดยในแต่ละความถี่จะมีความยาวประวิงแตกต่างกัน เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ต่อค่า TEC และความถี่ มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$T_{\text{iono}} = \frac{40.3}{f^2} \text{TEC} \quad (5.12)$$

โดย T_{iono} คือเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ และ f คือความถี่ GPS ที่ใช้ในการส่งสัญญาณ เนื่องจากเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ในแต่ละความถี่ไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงใช้ค่า TEC ที่แสดงถึงเวลาประวิงที่เกิดจากชั้นไอโอโนสเฟียร์ในทุกความถี่ ยกตัวอย่างเช่น ค่า TEC ที่มีค่าเท่ากับ 1 TECu จะส่งผลทำให้เกิดเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ของสัญญาณความถี่ L1 (1.227 GHz) มีค่าประมาณ 0.5 นาโนวินาที หรือ 16 เซนติเมตรในระยะทางเทียมของเครื่องรับ GPS สำหรับการทดสอบการใช้งานเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้วยแบบจำลองโคลบูชานั้นมีนำเสนอในงานวิจัยจำนวนมาก ในที่นี้ จะขอยกตัวอย่างการทดสอบเพื่อใช้งานในทางปฏิบัติของ Jongsintawe et al. (2016) ซึ่งมีการเก็บค่า TEC จากสถานีเครื่องรับ GPS จำนวน 3 สถานี ได้แก่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ (KMITL), หน่วยงานบริการงานสาธารณะฯ เชียงใหม่ (CHMA) และหน่วยงานบริการงานสาธารณะฯ สุราษฎร์ธานี (SRTN) ในที่นี้ จะทำการพิจารณาค่าข้อมูลที่เกิดขึ้นใน 4 ฤดูกาล ได้แก่ March Equinox, June Solstice, September Equinox, และ December Equinox ปี 2014 รูปที่ 5.1 แสดงค่ามัธยฐานรายเดือนของเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ 3 สถานี (KMITL, CHMA, SRTN) ใน 4 ฤดูกาล เดือนมีนาคม, เดือนมิถุนายน, เดือนกันยายน และเดือนธันวาคม ปี 2014 และรูปที่ 5.2 แสดงฮิสโตแกรมค่าความผิดพลาดในแนวนอนที่ KMITL ในเดือนมีนาคม ปี 2014 (a) ไม่มีการชดเชยเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ (b) มีการชดเชยเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้วยแบบจำลองโคลบูชา และ (c) มีการชดเชยเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์โดยอาศัยค่า IGS TEC [23-24] นอกจากนี้ ผลการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองโคลบูชา (Klobuchar) ของนักวิจัยก่อนหน้านี้นี้ พบว่า เราสามารถพัฒนาแบบจำลองโคลบูชาให้แก่เครื่องรับ GPS เพื่อให้การระบุพิกัดมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นได้ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเกิดแนวความคิดที่จะศึกษาและพัฒนาแบบจำลองโคลบูชาแบบใหม่ให้แก่เครื่องรับ GNSS เพื่อปรับปรุงค่า RMSE ให้ดีขึ้นและระบุตำแหน่งที่แม่นยำมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองโคลบูชาแบบเดิม โดยจะทำการเปรียบเทียบค่า TEC ที่วัดได้จริง, ค่า TEC ที่ได้จากแบบจำลองโคลบูชาแบบเดิมกับค่า TEC ที่ได้จากแบบจำลองโคลบูชาแบบใหม่ที่นำเสนอ พร้อมกับเปรียบเทียบค่าเวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่วัดได้จริงกับค่าเวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่คำนวณได้จากทั้งแบบจำลองโคลบูชาแบบเดิมกับแบบใหม่ที่นำเสนอด้วย



รูปที่ 5.1 ค่ามัธยฐานรายเดือนของเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ 3 สถานี (KMITL, CHMA, SRTN) ในเดือนมีนาคม, เดือนมิถุนายน, เดือนกันยายน และเดือนธันวาคม ปี 2014 [23-24]



รูปที่ 5.2 ฮิสโตแกรมค่าความผิดพลาดในแนวนอนที่ KMITL ในเดือนมีนาคม ปี 2014 (a) ไม่มีการชดเชยเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ (b) มีการชดเชยเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้วยแบบจำลองโคลบูซา และ (c) มีการชดเชยเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์โดยอาศัยค่า IGS TEC [23-24]

5.2 Refined Klobuchar model ของ Ratnam และคณะ [25]

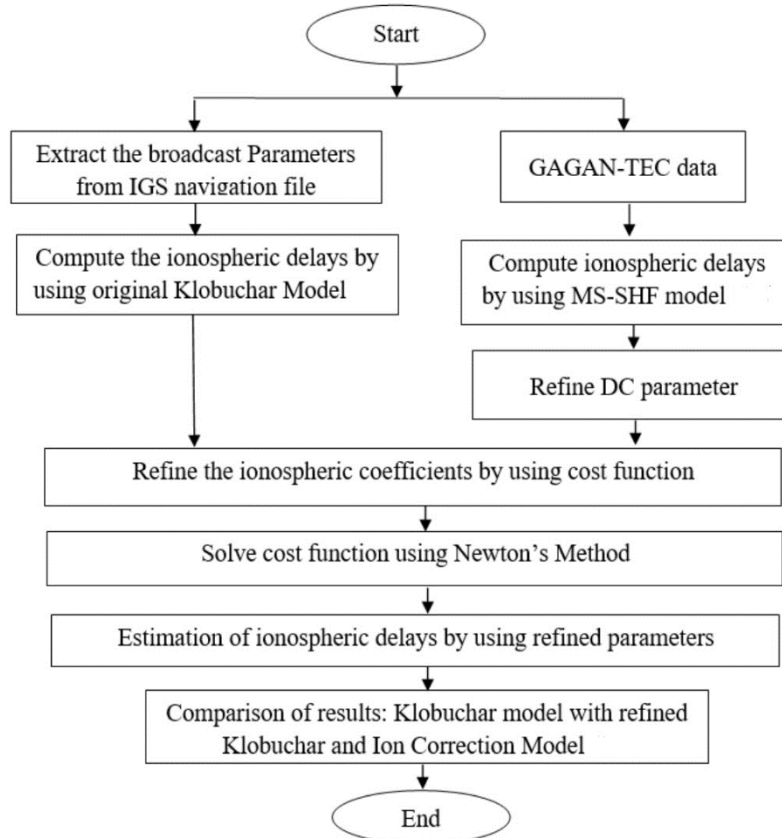
ในปัจจุบันนี้ วิธีทั่วไปที่ใช้ลดขนาดการปรับแก้เวลาประวิงของชั้นไอโอโนสเฟียร์สำหรับผู้ใช้งานระบบดาวเทียมนำทางสากล (global navigation satellite system หรือ GNSS) ได้แก่ แบบจำลองโคลบูชา (Klobuchar), วิธี Bent, วิธีค่าความนำไฟฟ้าและความหนาแน่นอิเล็กตรอนชั้นไอโอโนสเฟียร์, แบบจำลองไอโอโนสเฟียร์เชิงวิเคราะห์ทั้งหมด และแบบจำลองไอโอโนสเฟียร์อ้างอิงสากล จากวิธีการทั้งหมดดังกล่าว แบบจำลองโคลบูชาถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับผู้ใช้งาน GPS เพื่อปรับแก้เวลาประวิงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในการประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ ที่มีการระบุพิกัด, การนำทางและการติดตามโดยอาศัย GPS แบบเรียลไทม์แบบจำลองนี้ได้รับความสนใจจากนักวิจัยชั้นไอโอโนสเฟียร์มากขึ้นเนื่องจากมีคุณลักษณะเฉพาะที่เป็นประโยชน์หลายประการ เช่น โครงสร้างทางคณิตศาสตร์ที่เรียบง่าย ความแปรผันของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในระดับโลก ความสะดวกในการคำนวณของผู้ใช้ และดาวเทียมที่ส่งค่าสัมประสิทธิ์น้อยลง [26] อย่างไรก็ตาม เนื่องจากพฤติกรรมพลวัตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ซับซ้อนและเทคโนโลยีใหม่ที่ใช้ในงานในอุปกรณ์ ประสิทธิภาพของแบบจำลองโคลบูชาในแง่ของความแม่นยำในการปรับแก้มีข้อจำกัด ที่ผ่านมานักวิจัย Feess และ Stephens [27] ได้ทำการประเมินและเปรียบเทียบการวัดเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ได้จากแบบจำลองโคลบูชากับค่าที่วัดได้จากเครื่องรับ GPS ความถี่คู่ และสังเกตว่าแบบจำลองโคลบูชาสามารถลดความผิดพลาดของพิกัดที่วัดได้ประมาณ 60% RMS นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยของ Klobuchar [28] ที่ได้ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานโดยการทำนายค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองโคลบูชาด้วยการวัด GNSS ในระดับภูมิภาคอีกด้วย

นักวิจัยหลายคนได้ทำงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองโคลบูชาโดยการคำนวณพารามิเตอร์โคลบูชาทั้งแปดตัวใหม่ (ค่า α จำนวน 4 ตัว และค่า β จำนวน 4 ตัว) โดยส่วนใหญ่แล้ว พารามิเตอร์โคลบูชาเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับค่า TEC ที่วัดได้จากเครือข่าย GNSS ทั่วโลกหรือระดับภูมิภาค ศูนย์กำหนดวงโคจรในยุโรปได้ส่งพารามิเตอร์โคลบูชาที่คำนวณใหม่ออกมาตั้งแต่ปี 1997 โดยใช้ข้อมูล GPS ทั่วโลก [29] Yuan และคณะ [30] เสนอวิธีการใหม่ในการปรับปรุงสัมประสิทธิ์โคลบูชาด้วยการพิจารณาสถานีหลายร้อยสถานีของเครือข่าย CMON ของจีนและการให้บริการ GNSS นานาชาติ (IGS) เนื่องจากมีการใช้งานการระบุพิกัดจุดเดียว (single-frequency single point positioning หรือ SPP) ความถี่เดียวในภูมิภาคจีน ดังนั้นความแม่นยำยังคงที่จะถูกปรับปรุงได้เพียง 15% เมื่อเทียบกับแบบจำลองโคลบูชาที่ใช้ GPS นอกจากนี้ Shukla และคณะ [31] ยังได้ตรวจสอบประสิทธิภาพของค่าสัมประสิทธิ์โคลบูชาที่ปรับปรุงแล้วในภูมิภาคอินเดียโดยใช้วิธี SPP ความถี่เดียว แล้ว Denis [32] ก็ได้นำเสนอแบบจำลองค่าปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อาศัยพารามิเตอร์โคลบูชาที่ถูกสร้างขึ้นใหม่จำนวน 370 ชุดสำหรับเครื่องรับความถี่เดียว วิธีนี้ช่วยปรับปรุงค่าปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่สอดคล้องกันจากสถานี GNSS ที่ใช้งานทั่วโลกและระดับภูมิภาค รวมทั้งอัตราการอัปเดตของสัมประสิทธิ์แบบจำลองโคลบูชาที่ถูกทบทวนก็มีความยืดหยุ่นที่มากขึ้น อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ไม่สนใจการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในตอนกลางคืนและทอมเพลสของเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ และเน้นไปที่การกำหนดค่าพารามิเตอร์เฟสและแอมพลิจูดใหม่ให้กับอัลกอริทึมของแบบจำลองโคลบูชา

สรุปได้ว่า แบบจำลองโคลบุชายังคงเป็นการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับสำหรับภูมิภาคละติจูดกลางในช่วงที่ไม่มีพายุแม่เหล็กโลก (เจียบ) อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของมันค่อนข้างที่จะระบุไม่ได้สำหรับภูมิภาคเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำ เช่น อินเดียและบราซิล ในบริเวณเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำนั้น ชั้นไอโอโนสเฟียร์จะได้รับผลกระทบที่มากจากพลาสมาไฟฟ้าท้องถิ่นที่ทำให้เกิดความไม่เท่ากันที่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง-เวลาและในแนวตั้งอย่างมากของการกระจายความหนาแน่นอิเล็กตรอนตลอดทั้งพื้นที่ นอกจากนี้ ปัจจัยที่สำคัญสำหรับความแตกต่างท่ามกลางแบบจำลองชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบชั้นเดียว (single-shell ionospheric model) และสมรรถนะการทำงานของมันก็คือความไม่แน่นอนของค่าเกรเดียนต์ความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแนวตั้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหนือบริเวณเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำ ดังนั้น แบบจำลอง two shell/multishell จึงสามารถที่จะเป็นทางเลือกที่ดีกว่าสำหรับบริเวณอินเดียเพื่อที่จะหาค่าพารามิเตอร์การนำทาง GNSS [33] จากปัญหาที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แบบจำลองโคลบุชาที่อาศัยแบบจำลองชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เป็นฟังก์ชันฮาร์โมนิกทรงกลมแบบมัลติเชลล์ (multishell spherical harmonics function หรือ MS-SHF) จึงได้ถูกคัดเลือกและนำมาประยุกต์ใช้งานในโครงการศึกษาฯ นี้^a โดยพารามิเตอร์ของแบบจำลองชั้นไอโอโนสเฟียร์โคลบุชาได้ถูกปรับปรุงโดยการทำให้ค่าความผิดพลาด RMS ของเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ระหว่างแบบจำลองโคลบุชาและแบบจำลอง MS-SHF ที่ประมาณค่าได้มีค่าที่ต่ำที่สุดเหนือพื้นที่ประเทศไทย โดยอาศัยค่าข้อมูล TEC ที่วัดได้ที่สถานี GNSS ที่ติดตั้งที่จังหวัดเชียงใหม่และกรุงเทพฯ

ในโครงการศึกษาฯ นี้ เราจะประยุกต์ใช้วิธีการเดียวกับ [25] เพื่อหาค่าพารามิเตอร์แบบจำลองโคลบุชาที่ปรับปรุงใหม่ (refined Klobuchar model) ที่อาศัยทฤษฎีพื้นฐานของแบบจำลองโคลบุชาและแบบจำลอง MS-SHF โดยค่า constant night-time offset (dc) จะถูกปรับใหม่โดยการเฉลี่ยเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ในตอนกลางคืนที่ได้รับจากแบบจำลอง MS-SHF และ cost function จะถูกกำหนดเพื่อหาสัมประสิทธิ์ชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ถูกปรับปรุงโดยการทำให้ค่าความผิดพลาด RMS ของเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ระหว่างแบบจำลองโคลบุชาและแบบจำลอง MS-SHF มีค่าที่ต่ำที่สุด ในที่นี้ ขั้นตอนการทำงาน (โฟลว์ชาร์ต) ของแบบจำลองโคลบุชาแบบใหม่ที่อาศัยเทคนิค MS-SHF ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.3 และมีอัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการระบุพิกัดให้แก่เครื่องรับ GNSS ไม่ต่ำกว่า 50% ดังนี้

^a จากการศึกษาและทำวิจัยเกี่ยวกับ space communication และ Klobuchar model คณะผู้วิจัยพบว่า วิธีใหม่ต่าง ๆ ของนักวิจัยที่พยายามปรับปรุงแบบจำลองโคลบุชาก่อนหน้านี้ จะสามารถปรับปรุงความแม่นยำในการระบุพิกัดเครื่องรับ GNSS ได้ไม่เกิน 30% เท่านั้น อีกทั้งเป็นการพิจารณาแบบจำลองชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบชั้นเดียว (single-shell ionospheric model) เท่านั้น ซึ่งยังมีปัญหาที่พบความไม่แน่นอนของค่าเกรเดียนต์ความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแนวตั้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหนือบริเวณเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำ ดังนั้น จึงมีการนำเสนอและพัฒนาแบบจำลองโคลบุชาแบบใหม่ขึ้นมา เรียกว่า แบบจำลองโคลบุชาที่อาศัยแบบจำลองชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เป็นฟังก์ชันฮาร์โมนิกทรงกลมแบบมัลติเชลล์ (multishell spherical harmonics function หรือ MS-SHF) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2018 เป็นต้นมา [33]



รูปที่ 5.3 โฟลว์ชาร์ตของแบบจำลองโคลบุชาแบบใหม่ที่อาศัยเทคนิค MS-SHF

1. การประมาณเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์โดยใช้แบบจำลองโคลบุชา

แบบจำลองชั้นไอโอโนสเฟียร์โคลบุชาได้ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากความง่ายในการคำนวณของมัน ในแบบจำลองโคลบุชา ฟังก์ชัน half-cosine ถูกใช้งานเพื่อแทนการเปลี่ยนแปลงรายวันของค่า TEC ดังนั้น เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์สามารถที่จะหาค่าได้ดังนี้

$$T_{Klo} = \left\{ \begin{array}{l} F \cdot \left[dc + AMP \cdot \left(1 - \frac{(x_p)^2}{2} + \frac{(x_p)^4}{24} \right) \right] \\ \quad \text{if } |x_p| \leq 1.57 \\ F \cdot dc, \quad \text{if } |x_p| \geq 1.57 \end{array} \right\}$$

$$x_p = \frac{2\pi(t - 50400)}{P}$$

$$F = 1.0 + 16.0(0.53 - E)^3$$

$$AMP = \sum_{n=0}^3 \alpha_n \phi_m^n, \quad P = \sum_{n=0}^3 \beta_n \phi_m^n$$
(5.13)

โดย α_n และ β_n แทนสัมประสิทธิ์โคโลบรูชา, t คือเวลาท้องถิ่น (s) และ dc, แอมพลิจูดของฟังก์ชันโคไซน์ (AMP), P, F, และ E แทน constant night-time offset (มีค่าเท่ากับ 5 ns), แอมพลิจูดของฟังก์ชันโคไซน์, คาบของฟังก์ชันโคไซน์, obliquity factor และมุมยก ตามลำดับ

$$\begin{aligned} t &= 43200\lambda_p + t_{\text{GPS}} \\ \phi_m &= \phi_p + 0.064 \cos(\lambda_p - 1.617) \end{aligned} \quad (5.14)$$

เป็นละติจูดทางแม่เหล็กของจุด ionospheric pierce point (IPP)

$$\begin{aligned} \lambda_p &= \lambda_u + \frac{\varphi \sin A}{\cos \phi_p} \\ \phi_p &= \begin{cases} \phi_u + \varphi \cos A, & |\phi_p| \leq 0.416 \\ \phi_p = 0.416, & \phi_p > 0.416 \\ \phi_p = -0.416, & \phi_p < -0.416 \end{cases} \\ \varphi &= \frac{0.0137}{E + 0.11} - 0.022 \end{aligned} \quad (5.15)$$

เมื่อ ϕ_p และ λ_p แทนละติจูดและลองจิจูดแบบ geodetic, ϕ_u และ λ_u แทนละติจูดและลองจิจูดแบบ geodetic ของผู้ใช้ใน World Geodetic System-84, รวมทั้ง A กับ φ แทนมุมอะซิมุทและ earth-centered angle ตามลำดับ

2. การประมาณเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์โดยใช้แบบจำลอง MS-SHF

ค่า TEC ในแนวตั้ง (VTEC) ได้ถูกคำนวณด้วยแบบจำลอง SHF บนพื้นฐานของการประมาณมัลติเชลล์ [10] โดยแบบจำลอง MS-SHF ถูกใช้ในการประมาณเวลาประวิงที่จุด IPP สำหรับวัตถุประสงค์นี้ เวลาประวิงที่จุด IPP และตำแหน่งทางภูมิศาสตร์จะถูกหาค่า เวลาประวิงที่จุด IPP และตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ของจุด IPP ที่เกี่ยวข้องจะถูกใช้เป็นค่าอินพุตให้กับแบบจำลอง MS-SHF สำหรับการประมาณหาค่าสัมประสิทธิ์ อันดับที่ 2 และ ดีกรีที่ 2 แบบจำลอง MS-SHF ได้ถูกเลือกโดยหาค่าได้จากสมการดังนี้

$$T_{\text{MS-SHF}} = \sum_{i=1}^3 \left[M(h_i, el) \times \sum_{n=0}^n \sum_{m=0}^m \overline{P}_{nm}[\cos(\phi_i)] \times \{C_{nmi} \cos(m\lambda_i) + S_{nmi} \sin(m\lambda_i)\} \right] \quad (5.16)$$

โดย λ_i และ ϕ_i เป็นลองจิจูดและละติจูดทางภูมิศาสตร์ของจุด IPP และ C_{nmi} และ S_{nmi} เป็นสัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกทรงกลมที่ไม่ทราบค่าของลำดับที่ 2 และดีกรีที่ 2 ที่เซลล์บางที่ต่างกัน 3 ค่า (250, 450, และ 650 กิโลเมตร) และจะถูกประมาณค่าได้จากวิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ถูกถ่วงน้ำหนัก [32] $\overline{P}_{nm}[\cos(\phi)]$ เป็น normalized associated Legendre function, $M(h_i, el)$ แทน mapping function, h_i คือความสูงที่เซลล์ต่างกัน, รวมทั้งกำหนดให้ R_e และ el แทนรัศมีโลก (6,378 กม.) และ satellite elevation angle ตามลำดับ

3. แบบจำลองชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ปรับปรุงแล้ว

ในสมการที่ (1) เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์เวลากลางคืนจะถูกจำลองด้วยค่าคงที่ dc โดยค่า dc ของแบบจำลองโคโลบรูชาเดิมจะมีค่าคงที่เท่ากับ 5 ns เสมอ เนื่องจากค่า dc ที่คงที่ แบบจำลองโคโลบรูชาจึงไม่สามารถที่

จะทำนายคุณลักษณะของการเปลี่ยนแปลงชั้นไอโอโนสเฟียร์ในตอนกลางคืนได้ ดังนั้น พารามิเตอร์ dc จึงต้องปรับปรุงและรวมอยู่ในแบบจำลองชั้นไอโอโนสเฟียร์ความถี่เดียวทั้งในปัจจุบันและในอนาคต ดังนั้น ในโครงการศึกษาฯ นี้ ค่าพารามิเตอร์ dc จะถูกปรับปรุงโดยทำการเฉลี่ยเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์เวลากลางคืนที่ได้จากข้อมูล GNSS TEC ในประเทศไทย ในที่นี้ พารามิเตอร์ dc ที่ถูกปรับปรุงจะหาค่าได้จากสมการดังนี้ [33]

$$dc_{\text{new}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{\text{MS-SHF}}^i \quad (5.17)$$

เมื่อ n แทนจำนวนทั้งหมดของเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ได้จากแบบจำลอง MS-SHF ในตอนกลางคืน และ $T_{\text{MS-SHF}}^i$ แทนเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ตัวที่ i ที่ได้รับจากแบบจำลอง MS-SHF ในตอนกลางคืน

พารามิเตอร์โคลบูชาที่ถูกปรับปรุงจะถูกหาค่าได้จากแบบจำลอง MS-SHF ที่ถูกประมาณค่าไว้โดยอาศัยค่า MSE ที่ต่ำที่สุดระหว่าง 2 แบบจำลองดังสมการต่อไปนี้

$$J = \min \sum_p^{n_p} \sum_t^{n_t} (T_{\text{MS-SHF}} - T_{\text{RKlo}})^2 \quad (5.18)$$

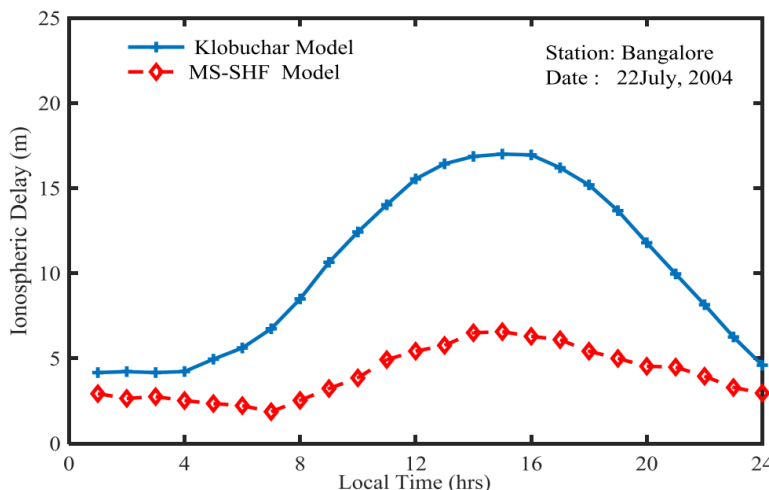
ทำการหาอนุพันธ์สมการที่ (18) เทียบกับ α_n และ β_n พร้อมกับหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial \alpha_n} &= \sum_p^{n_p} \sum_t^{n_t} 2\phi_m^n y_p [T_{\text{MS-SHF}} - T_{\text{RKlo}}] = 0 \\ \frac{\partial J}{\partial \beta_n} &= \sum_p^{n_p} \sum_t^{n_t} \left\{ 2[T_{\text{MS-SHF}} - T_{\text{RKlo}}] \times \left[\text{AMP} \frac{\partial y_p}{\partial \beta_n} \right] \right\} = 0 \end{aligned} \quad (5.19)$$

$$\begin{aligned} T_{\text{RKlo}} &= dc_{\text{new}} + \text{AMP} \times y_p, \quad y_p = \left(1 - \frac{(x_p)^2}{2} + \frac{(x_p)^4}{24} \right) \\ \frac{\partial y_p}{\partial \beta_n} &= \phi_m^n \left[\frac{4\pi^2(t - 50400)^2}{(\sum_{n=0}^3 \beta_n \phi_m^n)^3} \frac{8\pi^4(t - 50400)^4}{3(\sum_{n=0}^3 \beta_n \phi_m^n)^5} \right] \end{aligned} \quad (5.20)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองโคลบูชาที่ถูกปรับปรุงได้ถูกหาค่าออกมาได้จากสมการที่ (5.19) และ (5.20) โดยอาศัยวิธีนิวเมอริคัลแบบวนซ้ำที่ใช้ fsolve optimization สัมประสิทธิ์โคลบูชาที่ถูกปรับปรุงสามารถที่นำไปใช้ได้มีลักษณะเดียวกันกับพารามิเตอร์โคลบูชาที่ได้รับจากข่าวสารนำทางดาวเทียมแต่ละดวง ค่าตัวเลขที่บ่งชี้การปรับปรุงได้ถูกวัดจากความแตกต่างระหว่างความแม่นยำของแบบจำลองโคลบูชาที่ปรับปรุงแล้ว (RMSE_R) กับแบบจำลองโคลบูชาเดิม (RMSE_K) แล้วหารด้วยค่าความแม่นยำของแบบจำลองโคลบูชาเดิม

$$\text{IF} = \frac{\text{RMSE}_K - \text{RMSE}_R}{\text{RMSE}_K} \quad (5.21)$$



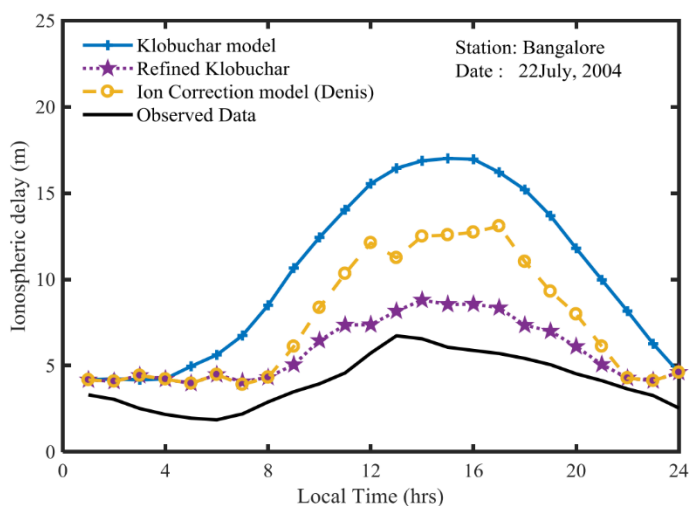
รูปที่ 5.4 เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ได้จากแบบจำลองโคลบูชาเดิม (เส้นสีฟ้า) และแบบจำลอง MS-SHF (เส้นสีแดง) ในวันที่เจียบสงบ (22 กรกฎาคม 2004)

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการศึกษาของ Ratnam และคณะ [25]

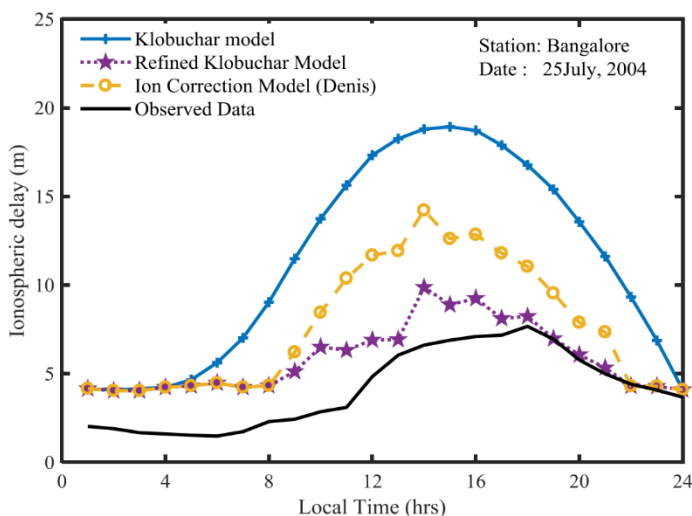
เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้ถูกประมาณค่าโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับจากข่าวสารนำทางของดาวเทียม GPS และค่า TEC ที่หาค่าได้จากสถานีเครื่องรับ GNSS ที่มีอัตราการแซมปลิ่งเท่ากับ 5 นาที วิธีการประมาณค่าที่นำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมาถูกนำไปใช้กับค่าข้อมูล TEC ที่ได้รับจากสถานี GNSS ที่สถานี Bangalore (13°N, 77°E) ประเทศอินเดีย และสมรรถนะของแบบจำลองโคลบูชาที่ได้รับการปรับปรุงแล้วจะถูกวิเคราะห์สำหรับการวิเคราะห์นั้นจะพิจารณาค่าข้อมูล TEC ที่วัดได้ในวันที่เจียบสงบ (22 กรกฎาคม 2004) และวันที่เกิดพายุ (25 กรกฎาคม 2004) เวลาประวิงในแนวตั้งโดยใช้แบบจำลองโคลบูชาและแบบจำลอง MS-SHF ได้ถูกหาค่าออกมา เส้นสีฟ้าที่มีสัญลักษณ์ + ในรูปที่ 5.4 แสดงเวลาประวิงในแนวตั้งที่มากที่สุดที่ได้รับจากแบบจำลองโคลบูชาที่สถานี Bangalore ซึ่งจะเห็นว่าเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ในตอนกลางคืนมีค่าที่คงที่ ส่วนเส้นสีแดงที่มีสัญลักษณ์ ◇ ในรูปที่ 5.4 แสดงเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ได้รับจากแบบจำลอง MS-SHF และเราสามารถสังเกตได้ว่า เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ในตอนกลางคืนมีค่าที่น้อยกว่าเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ในตอนกลางคืนที่คงที่ของแบบจำลองโคลบูชาเดิมมาก ดังนั้น เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ของแบบจำลองโคลบูชาได้รับการปรับปรุง ทั้งนี้ พารามิเตอร์แบบจำลองโคลบูชาที่ปรับปรุงแล้วสามารถที่จะหาค่าได้จากการทำให้ cost function ในสมการที่ (19) กับ (20) มีค่าน้อยที่สุดร่วมกับกระบวนการวนซ้ำในวิธีการที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้น ตารางที่ 5.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับจากแบบจำลองโคลบูชาที่ปรับปรุงแล้ว, แบบจำลองโคลบูชาเดิมกับแบบจำลอง Ion Correction [32] ในวันที่เจียบสงบ (22 กรกฎาคม 2004) และวันที่เกิดพายุ (25 กรกฎาคม 2004)

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับจากแบบจำลองชั้นไอโอโนสเฟียร์ต่าง ๆ ในวันที่เงียบสงบ (22 กรกฎาคม 2004) และวันที่เกิดพายุ (25 กรกฎาคม 2004)

Parameters	22-July-2004			25-July-2004		
	Refined Klobuchar Model	Klobuchar Model [1]	Ion Correction Model [11]	Refined Klobuchar Model	Klobuchar Model [1]	Ion Correction Model [11]
α_0	5.86E-09	1.74E-08	1.11E-08	3.90E-09	1.92E-08	1.11E-08
α_1	-4.18E-08	2.24E-08	2.23E-08	-1.00E-08	1.42E-08	2.23E-08
α_2	-4.12E-07	-3.74E-07	-5.96E-08	7.59E-07	-3.83E-07	-5.96E-08
α_3	1.718E-05	5.71E-07	-1.19E-07	4.53E-06	5.99E-07	-1.19E-07
β_0	1.06E+05	1.29E+05	1.064E-05	1.05E+05	1.34E+05	1.06E-05
β_1	2.11E+05	2.12E+05	1.47E-05	1.70E+05	1.70E+05	1.47E-05
β_2	-2.29E+04	-2.29E+04	-6.55E-04	-1.09E+06	-1.09E+06	-6.55E-04
β_3	2.73E+05	2.74E+05	-3.27E-05	3.26E+06	3.27E+06	-3.27E-05
DC	3.22 E-9	5.00E-09	5.00E-09	3.25E-09	5.00E-09	5.00E-09



รูปที่ 5.5 เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่วัดได้และที่จำลองได้ในวันที่เงียบสงบ (22 กรกฎาคม 2004)



รูปที่ 5.6 เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่วัดได้และที่จำลองได้ในวันที่เกิดพายุ (25 กรกฎาคม 2004)

เพื่อทำการตรวจสอบความมีประสิทธิภาพของแบบจำลองโคลนุชาที่ปรับปรุงแล้ว การเปรียบเทียบผลการทดลองได้ถูกกระทำขึ้นโดยใช้ข้อมูลที่วัดได้กับแบบจำลองชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่แตกต่างกันทั้งในวันที่เสียบสงบและวันที่ถูกรบกวน (เกิดพายุแม่เหล็กโลก)

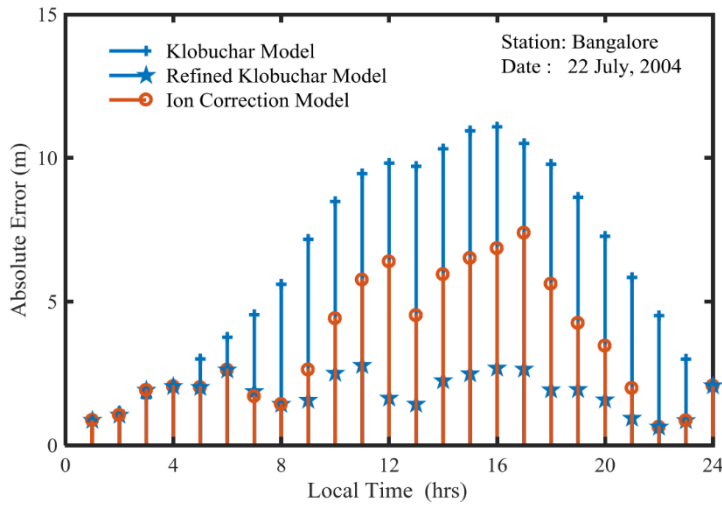
แบบจำลองที่ 1 : เวลาประวิงของแบบจำลองโคลนุชาเดิมที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์เดิมกับข่าวสารที่ส่งมา

แบบจำลองที่ 2 : เวลาประวิงของแบบจำลองโคลนุชาที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้ปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์ของ Denis [7]

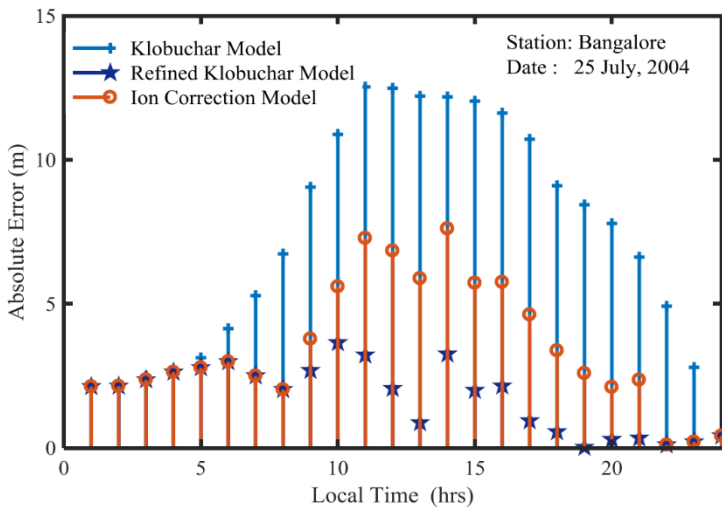
รูปที่ 5.5 แสดงเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองทั้งหมดที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ในวันที่เสียบสงบที่สถานี Bangalore พบว่า เวลาประวิงในแนวตั้งที่มากที่สุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 17.44 เมตร (แบบจำลองโคลนุชาเดิม), 8.87 เมตร (แบบจำลองโคลนุชาที่ปรับปรุง), 12.77 เมตร (แบบจำลองปรับแก้ Denis) และ 6.72 เมตร (ข้อมูลที่วัดได้จริง) จากรูปที่ 5.6 แสดงเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่คำนวณได้ในวันที่เกิดพายุที่สถานี Bengaluru เช่นกัน พบว่า เวลาประวิงในแนวตั้งที่มากที่สุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 19.74 เมตร (แบบจำลองโคลนุชาเดิม), 9.77 เมตร (แบบจำลองโคลนุชาที่ปรับปรุง), 14.26 เมตร (แบบจำลองปรับแก้ Denis) และ 7.67 เมตร (ข้อมูลที่วัดได้จริง) จากรูปที่ 5.5 และ 5.6 เราอาจจะสังเกตเห็นได้ว่า สมรรถนะของแบบจำลองโคลนุชาเดิมนั้นแย่มากสำหรับภูมิภาคละติจูดต่ำ

นอกจากนี้ ยังได้รับการยืนยันว่า เวลาประวิงในแนวตั้งก็มีค่าค่อนข้างสูงขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของ EIA ที่เพิ่มขึ้นในช่วงวันที่เกิดพายุ จากการวิเคราะห์ในรูปที่ 5.5 และ 5.6 จะเห็นได้ชัดว่าแบบจำลองโคลนุชาที่ปรับปรุงแล้วจะให้ผลที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองโคลนุชาเดิมและแบบจำลองปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์ของ Denis รูปที่ 5.7 และ 5.8 แสดงค่าผลต่างสัมบูรณ์ (absolute error หรือ AE) สำหรับแบบจำลองโคลนุชาเดิม, แบบจำลองปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์ของ Denis และแบบจำลองโคลนุชาที่ปรับปรุงแล้ว เมื่อเทียบกับข้อมูลที่วัดได้ทั้งในวันที่เสียบและวันที่เกิดพายุ ตามลำดับ โดยในวันที่เสียบสงบ (22 กรกฎาคม 2004) ค่าผลต่างสัมบูรณ์เฉลี่ย (AAE) ที่ได้จากแบบจำลองโคลนุชาเดิม, แบบจำลองปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์และแบบจำลองโคลนุชาที่ปรับปรุงแล้ว เมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้ จะมีค่าเท่ากับ 3.75, 3.13 และ 1.83 เมตร ตามลำดับ ส่วนในวันที่เกิดพายุ (25 กรกฎาคม 2004) ค่า AAE ที่ได้จากแบบจำลองโคลนุชาเดิม, แบบจำลองปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์และแบบจำลองโคลนุชาที่ปรับปรุงแล้ว เมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้ จะมีค่าเท่ากับ 7.31, 3.17 และ 1.74 เมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 5.2 แสดงการประเมินสมรรถนะของแบบจำลองชั้นไอโอโนสเฟียร์ทั้ง 3 วิธี ผลเหล่านี้ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนที่ว่า ค่า rms errors (RMSEs) และค่า AEs มีค่าที่ลดลงจากแบบจำลองโคลนุชาเดิม, แบบจำลองปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์และแบบจำลองโคลนุชาที่ปรับปรุงแล้ว ตามลำดับ จากผลของค่า RMSEs ในตารางที่ 5.2 พบว่า แบบจำลองโคลนุชาที่ปรับปรุงแล้วจะให้ค่า RMSEs ที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับแบบจำลองปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์เท่ากับ (21.53%/50.88%) และเมื่อเทียบกับแบบจำลองโคลนุชาเดิม เท่ากับ (62.69%/77.08%) ใน (วันที่เสียบสงบ,วันที่เกิดพายุ) ตามลำดับ สัมประสิทธิ์แบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นได้ถูกคาดหวังที่จะใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงที่แท้จริงของ TEC สัมประสิทธิ์ที่ปรับปรุงแล้วสามารถที่จะถูกอพยพไหลต่อไปยังดาวเทียม Navigation Indian Constellation (NAVIC) เพื่อใช้งานเป็นส่วนหนึ่งของข่าวสารนำทางด้วยช่วงเวลาในการอัปเดตทุก ๆ 5 นาที ช่วงเวลาอัปเดต 5 นาทีของสัมประสิทธิ์ชั้นไอโอโนสเฟียร์ความถี่เดียวสำหรับระบบ NAVIC เป็นสิ่งที่จำเป็นเหนือภูมิภาคอินเดียเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มาก



รูปที่ 5.7 การเปลี่ยนแปลงของค่า AE ในช่วงวันที่เงียบสงบ (22 July, 2004)



รูปที่ 5.8 การเปลี่ยนแปลงของค่า AE ในช่วงวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก (25 July, 2004)

ตารางที่ 5.2 ค่า RMSE กับค่า AAE ของ 3 วิธีที่นำเสนอใน [25] ในวันที่เงียบสงบและวันที่เกิดพายุ

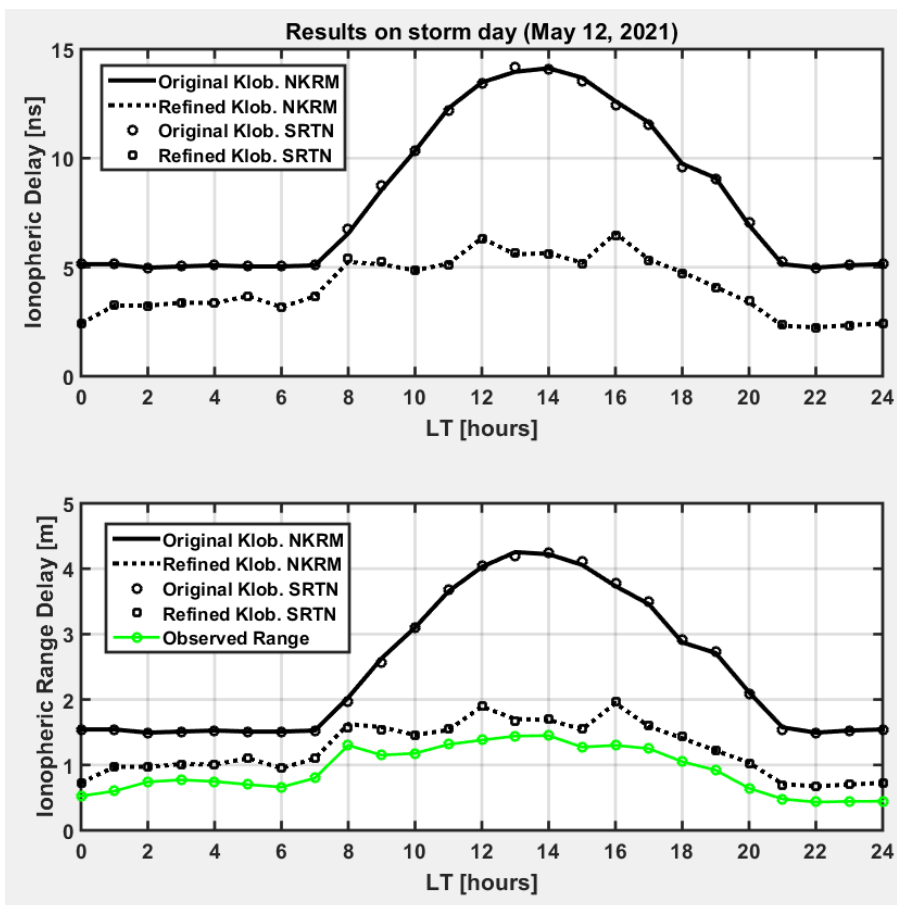
Model	22-July-2004 (Quiet Day)		25-July-2004 (Disturbed Day)	
	RMSE (m)	AAE (m)	RMSE (m)	AAE (m)
Klobuchar Model	5.20	3.75	8.51	7.31
Ion[1] Correction Model (Denis)[11]	4.08	3.48	4.18	3.52
Refined Klobuchar Model	1.94	1.83	1.95	1.74

5.3 Refined Klobuchar model ที่จำลองและนำเสนอสำหรับประเทศไทย

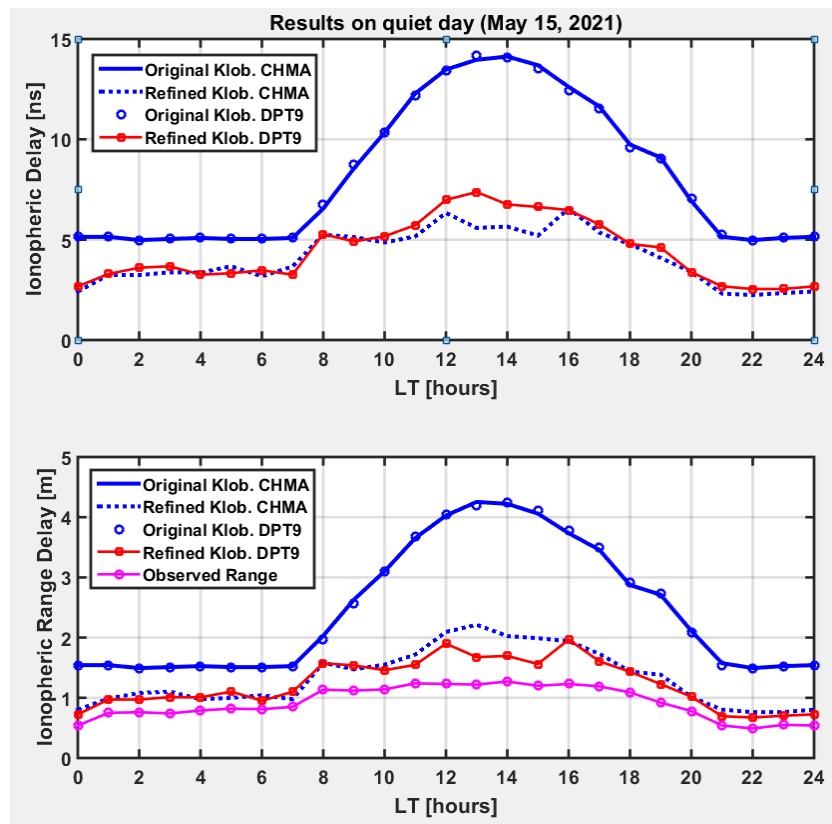
หลังจากที่หัวข้อ 5.2 ได้กล่าวถึงหลักการทํางานและสมรรถนะการระบุพิกัดที่แม่นยำของแบบจำลองโคลบูชาแบบใหม่ที่อาศัยวิธี MS-SHF ไปแล้ว ดังนั้นในหัวข้อที่ 5.2 นี้ จะกล่าวถึงผลการทดลองวิธี Refined Klobuchar model เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Klobuchar model แบบเดิม (original Klobuchar model) โดยรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10 แสดงเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์และเวลาประวิงเชิงระยะทางชั้นไอโอโนสเฟียร์ รวมถึงค่าระยะทางที่วัดได้ ในวันที่เกิดพายุ (วันที่ 12 พ.ค. 2564) ที่สถานีนครราชสีมา กับสถานีสุราษฎร์ธานี และในวันที่เจียบ (วันที่ 15 พ.ค. 2564) ที่สถานีเชียงใหม่ กับสถานี DPT9 (กรุงเทพฯ) ในที่นี้ การคำนวณหาเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ หรือ ionospheric delay (หน่วย ns) นั้น เราจะใช้สมการที่ (5.22) และคำนวณหาค่าหน่วยเชิงระยะทางชั้นไอโอโนสเฟียร์ หรือ ionospheric range delay (หน่วย m) โดยใช้สมการที่ (5.23) ดังนี้

$$I_{d_klo} = \begin{cases} \left[5 \cdot 10^{-9} + A_f \cdot \left(1 - \frac{X_f^2}{2} + \frac{X_f^2}{24} \right) \right]; |X_f| \leq 1.57 \\ 5 \cdot 10^{-9} & ; |X_f| > 1.57 \end{cases} \quad (5.22)$$

$$I_{r_klo} = I_{d_klo} \times c \quad (5.23)$$



รูปที่ 5.9 เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์และเวลาประวิงเชิงระยะทางชั้นไอโอโนสเฟียร์ในวันที่เกิดพายุ (วันที่ 12 พ.ค. 2564) ที่สถานีนครราชสีมาและสุราษฎร์ธานี รวมถึงค่าระยะทางที่วัดได้



รูปที่ 5.10 เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์และเวลาประวิงเชิงระยะทางชั้นไอโอโนสเฟียร์ในวันที่เกิดเงียบ (วันที่ 15 พ.ค. 2564) ที่สถานีเชียงใหม่กับสถานี DPT9 (กรุงเทพฯ) รวมถึงค่าระยะทางที่วัดได้

ตารางที่ 5.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของ original Klobuchar model และ refined Klobuchar Model

พารามิเตอร์	Original Klobuchar Model	Refined Klobuchar Model (Proposed values)
α_0	7.45E-09	1.51E-09
α_1	2.24E-08	-1.57E-08
α_2	-5.96E-08	1.18E-07
α_3	-1.19E-07	-9.02E-07
β_0	8.60E+04	6.74E+04
β_1	8.19E+04	8.19E+04
β_2	-1.31E+05	-1.31E+05
β_3	-5.24E+05	-5.23E+05

ตารางที่ 5.4 ค่า VTEC ที่คำนวณได้จากแบบจำลองโคลบูชาแบบเดิม (ก่อนการปรับปรุง)
ในวันที่เกิดพายุ (12 พ.ค. 2021) และวันที่เจียบสงบ (15 พ.ค. 2021)

	NKRM	SRTN	CHMA	DPT9
UT	VTEC_Klobuchar	VTEC_Klobuchar	VTEC_Klobuchar	VTEC_Klobuchar
0	9.5	9.5	9.5	9.5
1	9.5	9.5	9.5	9.5
2	9.2	9.2	9.2	9.2
3	9.3	9.3	9.3	9.3
4	9.4	9.4	9.4	9.4
5	9.3	9.3	9.3	9.3
6	9.3	9.3	9.3	9.3
7	9.4	9.4	9.4	9.3
8	12.5	12.1	11.9	11.5
9	16.2	15.8	15.3	14.5
10	19.1	19.1	18.5	18.4
11	22.5	22.7	21.3	22.2
12	24.8	24.9	24.3	24.9
13	26.2	25.8	26	26
14	26	26.1	26.2	26.4
15	25	25.3	25.1	25.6
16	23	23.3	23.6	24.3
17	21.3	21.5	21.1	21.9
18	17.7	18	17.2	18.4
19	16.7	16.8	14.5	14.3
20	13	12.8	10.6	9.7
21	9.7	9.5	9.4	9.4
22	9.2	9.2	9.2	9.2
23	9.4	9.4	9.4	9.4

นอกจากนี้ เรายังคำนวณสมรรถนะความแม่นยำในการระบุพิกัดหลังจากที่ได้ปรับปรุงค่าแบบจำลองโคลบูชาแล้ว โดยอาศัยค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ผลต่าง (absolute percentage deviation หรือ APD) และ RMSE (root mean square error) ดังแสดงในสมการที่ (5.24) และ (5.25) ตามลำดับ ถ้าเราหาค่าเฉลี่ยของ APD เราก็นำ APD แต่ละชั่วโมงในแต่ละสถานีมาบวกกันแล้วหารด้วยจำนวน N (ในที่นี้ $N = 24$)

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

$$PD (\%) = \frac{|R_{d_Klo} - R_{d_Refined}|}{R_{d_Klo}} \times 100 \quad (5.24)$$

$$RMSE = \sum_{i=1}^N \sqrt{(R_{d_Klo,i} - R_{d_Refined,i})^2} / N \quad (5.25)$$

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า วิธี Refined Klobuchar model ที่นำเสนอสามารถที่จะปรับปรุงความแม่นยำในการระบุพิกัดได้อย่างชัดเจนโดยดูจากค่า APD ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 40.83 – 46.38% เมื่อเทียบกับ Original Klobuchar model และปรับปรุงค่า RMSE ที่ทำให้ค่าความผิดพลาดในการระบุพิกัดลดลงสูงถึง 1.26 – 1.41 เมตร ในที่นี้ ค่า AE ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 12% ส่วน AE สูงสุดมีค่าเท่ากับ 62% ดังแสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ค่า APD (%) กับค่า RMSE (m) ของ 4 สถานีของประเทศไทยในวันที่เกิดพายุและวันที่เงียบ

เวลา UT	วันที่เกิดพายุ (12 พ.ค. 2564)		วันที่เงียบ (15 พ.ค. 2564)	
	AE (%) NKRM	AE (%) SRTN	AE (%) CHMA	AE (%) DPT9
0	52.9995	52.9995	48.0013	52.9995
1	36.9999	36.9999	36.0016	36.9999
2	34.9991	34.9991	13.0019	34.9991
3	33.0028	33.0028	11.9971	33.0028
4	33.9973	33.9973	36.0021	33.9973
5	27.0031	27.0031	22.0033	27.0031
6	37.0027	37.0027	11.9971	37.0027
7	28.0024	28.0024	36.0021	28.0024
8	20.0012	19.9982	22.0015	19.9982
9	39.9985	39.9996	44.0016	39.9996
10	53.0006	53.0006	49.9986	53.0006
11	58.0005	57.9989	52.9997	57.9989
12	53.0003	53.0011	47.9989	53.0011
13	59.9991	59.9996	47.9991	59.9996
14	59.9994	59.9993	52.0002	59.9993
15	62.0009	62.0012	50.9991	62.0012
16	47.9993	48.0001	47.9993	48.0001
17	54.0007	53.9990	49.9990	53.999
18	50.9985	51.0009	49.9999	51.0009
19	55.0011	55.0013	49.0010	55.0013

ตารางที่ 5.5 ค่า APD (%) กับค่า RMSE (m) ของ 4 สถานีของประเทศไทยในวันที่เกิดพายุและวันที่เงียบ (ต่อ)

เวลา UT	วันที่เกิดพายุ (12 พ.ค. 2564)		วันที่เงียบ (15 พ.ค. 2564)	
	APD (%) NKRM	APD (%) SRTN	APD (%) CHMA	APD (%) DPT9
20	51.0006	51.0000	52.0002	51.0000
21	54.9972	55.0027	48.9972	55.0027
22	55.0015	55.0015	48.9968	55.0015
23	53.9999	53.9999	49.9968	53.9999
APD เฉลี่ย	46.38 %	46.38 %	40.83 %	46.38 %
APD สูงสุด	62.00 %	62.00 %	53.00 %	62.00 %
APD ต่ำสุด	20.00 %	20.00 %	12.00 %	20.00 %
RMSE เฉลี่ย	1.4105 เมตร	1.4139 เมตร	1.2630 เมตร	1.4139 เมตร

หลังจากนั้น เราจะตรวจสอบความแม่นยำในการระบุพิกัดที่ปรับปรุงขึ้น เมื่อนำวิธี Refined Klobuchar model ที่อาศัย MS-SHF [25] มาใช้งาน โดยในที่นี้ จะทำการคำนวณหาค่าสมรรถนะดังกล่าวโดยอาศัยค่า AE (absolute error) เช่นเดียวกับ [25] ดังแสดงในสมการที่ (5.26) - (5.28) และมีผลการหาค่าแสดงในตารางที่ 5.6

$$AE1 = |R_{d_Klo} - R_{d_Observed}| \quad (5.26)$$

$$AE2 = |R_{d_Refined} - R_{d_Observed}| \quad (5.27)$$

$$\%Imp = \frac{(AE1-AE2)}{AE1} \times 100 \quad (5.28)$$

ตารางที่ 5.6 ค่า AE1, AE2 กับ %Imp ของ 4 สถานีของประเทศไทยในวันที่เกิดพายุและวันที่เงียบ

LT	NKSM			SRTN			CHMA			DPT9		
	AE1	AE2	%Imp	AE1	AE2	%Imp	AE1	AE2	%Imp	AE1	AE2	%Imp
0	1.02	0.20	80.34	1.02	0.20	80.34	1.00	0.26	73.86	1.00	0.19	81.55
1	0.94	0.37	60.55	0.94	0.37	60.55	0.79	0.24	70.07	0.79	0.22	72.01
2	0.75	0.23	69.45	0.75	0.23	69.45	0.73	0.32	56.26	0.73	0.21	71.25
3	0.74	0.24	67.50	0.74	0.24	67.50	0.77	0.36	52.99	0.77	0.27	64.72
4	0.78	0.26	66.62	0.78	0.26	66.62	0.74	0.19	74.63	0.74	0.22	70.47
5	0.81	0.40	50.34	0.81	0.40	50.34	0.69	0.18	74.21	0.69	0.28	59.09
6	0.85	0.29	65.83	0.85	0.29	65.83	0.70	0.23	66.86	0.70	0.14	79.82

ตารางที่ 5.6 ค่า AE1, AE2 กับ %Imp ของ 4 สถานีของประเทศไทยในวันที่เกิดพายุและวันที่เงียบ (ต่อ)

LT	NKSM			SRTN			CHMA			DPT9		
	AE1	AE2	%Imp	AE1	AE2	%Imp	AE1	AE2	%Imp	AE1	AE2	%Imp
7	0.73	0.30	58.76	0.73	0.30	58.76	0.68	0.13	81.25	0.68	0.25	63.20
8	0.73	0.32	55.64	0.66	0.27	59.11	0.78	0.33	57.28	0.71	0.32	54.97
9	1.48	0.43	71.07	1.42	0.39	72.50	1.51	0.35	76.63	1.45	0.42	70.99
10	1.92	0.28	85.44	1.92	0.28	85.44	1.96	0.41	79.06	1.96	0.32	83.81
11	2.34	0.22	90.59	2.37	0.23	90.15	2.41	0.48	80.23	2.45	0.31	87.40
12	2.65	0.51	80.63	2.66	0.52	80.47	2.80	0.86	69.11	2.81	0.67	76.18
13	2.81	0.26	90.76	2.75	0.23	91.48	3.03	0.99	67.30	2.97	0.46	84.65
14	2.77	0.24	91.35	2.79	0.25	91.16	2.95	0.76	74.37	2.97	0.43	85.67
15	2.79	0.27	90.31	2.84	0.29	89.83	2.86	0.79	72.40	2.91	0.36	87.59
16	2.43	0.64	73.63	2.48	0.67	73.13	2.50	0.71	71.57	2.55	0.74	71.12
17	2.21	0.34	84.56	2.24	0.36	84.12	2.27	0.54	76.23	2.30	0.42	81.93
18	1.82	0.36	80.36	1.87	0.38	79.60	1.78	0.35	80.55	1.83	0.34	81.33
19	1.79	0.30	83.24	1.81	0.31	82.99	1.79	0.46	74.16	1.81	0.31	82.99
20	1.47	0.39	73.34	1.44	0.38	73.85	1.33	0.23	82.48	1.30	0.24	81.64
21	1.10	0.23	79.02	1.06	0.22	79.76	1.04	0.26	74.56	1.00	0.15	84.63
22	1.06	0.24	77.39	1.06	0.24	77.39	1.00	0.27	72.91	1.00	0.18	81.85
23	1.08	0.26	76.02	1.08	0.26	76.02	0.98	0.21	78.16	0.98	0.15	84.42
24	1.10	0.28	74.49	1.10	0.28	74.49	1.00	0.26	73.86	1.00	0.19	81.55
mean	1.54	0.32	75.11	1.54	0.32	75.27	1.55	0.41	72.38	1.55	0.32	76.80
max.	2.81	0.64	91.35	2.84	0.67	91.48	3.03	0.99	82.48	2.97	0.74	87.59
min.	0.73	0.20	50.34	0.66	0.20	50.34	0.68	0.13	52.99	0.68	0.14	54.97

5.4 การประยุกต์ใช้แบบจำลองโคจรในการประเมินสัญญาณ GNSS

ในโครงการศึกษาฯ นี้ คณะผู้วิจัยได้ริเริ่มนำแบบจำลองโคจรมาประเมินสมรรถนะการทำงานของ multi-constellation GNSSs หลายระบบเหนือพื้นที่ประเทศไทยโดยอาศัยการคำนวณหาค่า STEC ที่คำนวณหาค่าได้จากชุดสมการของแบบจำลองโคจรแบบเดิมและ GIM Map รายละเอียดมีดังนี้

ประเทศไทยตั้งอยู่ในศูนย์กลางของเพนินซูลาร์อินโดนีเซีย-จีนที่มีทั้งหมด 10 ประเทศที่มีแนวโน้มที่จะเผชิญกับสภาพอากาศและสภาพอวกาศที่เปลี่ยนแปลงอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่แสดงบทบาทที่สำคัญต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว จึงทำให้ประเทศไทยเป็นที่น่าสนใจอย่างมากต่อการศึกษาระดับไอโอโนสเฟียร์ ดังนั้น ในโครงการศึกษาฯ นี้ เราจะเลือกสถานี GNSS จำนวน 4 สถานีที่ตั้งอยู่ที่ภูมิภาคต่าง ๆ ของ

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

ประเทศไทย เช่น สถานีเชียงใหม่ (CHMA), สถานีกรุงเทพฯ (DPT9), สถานีนครราชสีมา (NKRM), และสถานีสุราษฎร์ธานี (SRTN) และทำการศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงของค่า ionospheric slant total electron content (STEC) ในที่นี้ การวัดค่า STEC ได้ถูกประมาณค่าออกมาโดยใช้แบบจำลองโคโลบูชาแบบเดิม หรือ original Klobuchar model จึงถูกเรียกว่า Klobuchar-modeled STEC และถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่า STEC ที่หาค่าจาก Global Ionospheric Map (GIM) STEC สำหรับการพิสูจน์ความถูกต้อง โดยการศึกษานี้เป็นงานที่ริเริ่มทำเป็นครั้งแรก โดยค่า Klobuchar-modeled STEC ที่ได้รับจากระบบดาวเทียมนำทางสากล (GNSS) หลายระบบ (multi-constellation GNSSs) จำนวน 5 ระบบเหนือภูมิภาคประเทศไทย ได้แก่ GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou และ QZSS ได้ถูกคำนวณและเปรียบเทียบกับค่า GIM STEC ในช่วงที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกที่รุนแรงในวันที่ 12 พฤษภาคม 2564 (DOY 132) และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงรายเดือนในช่วงเดือนมิถุนายน 2563 ถึง พฤษภาคม 2564 นอกจากนี้ เพื่อที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Klobuchar-modeled STEC ที่นำเสนอกับค่า GIM STEC สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (root mean square error หรือ RMSE) ระหว่างทั้งสองค่าดังกล่าวก็ได้ถูกคำนวณออกมาด้วยเช่นกัน ผลจากการศึกษา พบว่า ท่ามกลางระบบดาวเทียมนำทางสากลทั้ง 5 ระบบที่ศึกษา ค่า GIM STEC จะมีค่าที่สูงกว่าค่า Klobuchar-modeled STEC หลายครั้ง ยกเว้นระบบ QZSS ที่มีผลต่างเพียงเล็กน้อยระหว่าง -10 TECU ถึง 20 TECU เท่านั้น นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า Klobuchar-modeled STEC ที่นำเสนอกับค่า GIM STEC มีค่าอยู่ระหว่าง 0.87-0.89 ค่า RMSEs มีค่าระหว่าง 10 TECU ถึง 11 TECU ยกเว้นระบบ QZSS ที่มีค่าน้อยกว่า 10 TECU เท่านั้น ในที่นี้ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่มีค่าสูงกว่า 0.85 สามารถที่จะพิจารณาว่าเป็นตัวบ่งชี้ที่ดีสำหรับการประยุกต์ใช้งานแบบจำลองโคโลบูชาในทางปฏิบัติสำหรับ multi-constellation GNSSs เหนือพื้นที่ประเทศไทย ในที่นี้ ระบบ multi-constellation GNSSs ที่พิจารณาในโครงการศึกษา นี้ประกอบไปด้วยระบบ Global Positioning System (GPS) ของ United States, ระบบ Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS) ของ Russia, ระบบ Galileo ของ Europe, ระบบ BeiDou ของ China และระบบ Quasi Zenith Satellite System (QZSS) ของ Japan

โดยสมการในการคำนวณจะเริ่มต้นจากชุดสมการของแบบจำลองโคโลบูชาแบบเดิมที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.1 ตามทฤษฎีที่กล่าวไว้โดย Klobuchar [3] เพื่อคำนวณเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่นำไปชดเชยเพื่อหาระบุพิกัดของเครื่องรับ GPS ได้ถูกต้องและแม่นยำขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีนี้สามารถที่จะเพิ่มความแม่นยำในการระบุพิกัดได้ไม่เกิน 50% หรือ ionospheric range error ประมาณ 50% (ค่า RMSE ~50% ของระยะทางจริงที่วัดได้) โดยสมการหลักที่ได้จากคำนวณนี้คือ เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ ดังแสดงในสมการที่ (5.29) ดังนี้

$$I_f = \begin{cases} \left(\frac{1575.42}{f}\right)^2 \times F \times 5 \times 10^{-9}; |x_{iono}| > 1.57 \\ \left(\frac{1575.42}{f}\right)^2 \times F \left[5 \times 10^{-9} + \sum_{n=0}^3 \left(1 - \frac{x_{iono}^2}{2} + \frac{x_{iono}^4}{24}\right) \alpha_n \lambda_m^n\right]; |x_{iono}| \leq 1.57 \end{cases} \quad (5.29)$$

หลังจากนั้น เราจะพิจารณาชุดสมการที่ใช้คำนวณหาค่า VTEC ของแบบจำลอง GIM ตามบทความวิจัยของ Schaer และคณะ [41] เพื่อที่จะนำมาใช้ในการหาค่า STEC_{GIM} (GIM STEC) และค่า Klobuchar-based STEC ดังแสดงในสมการที่ (5.30) และ (5.31) ดังนี้

$$STEC_{GIM} = \sec(MF) \times VTEC_{GIM}(TECU) \quad (5.30)$$

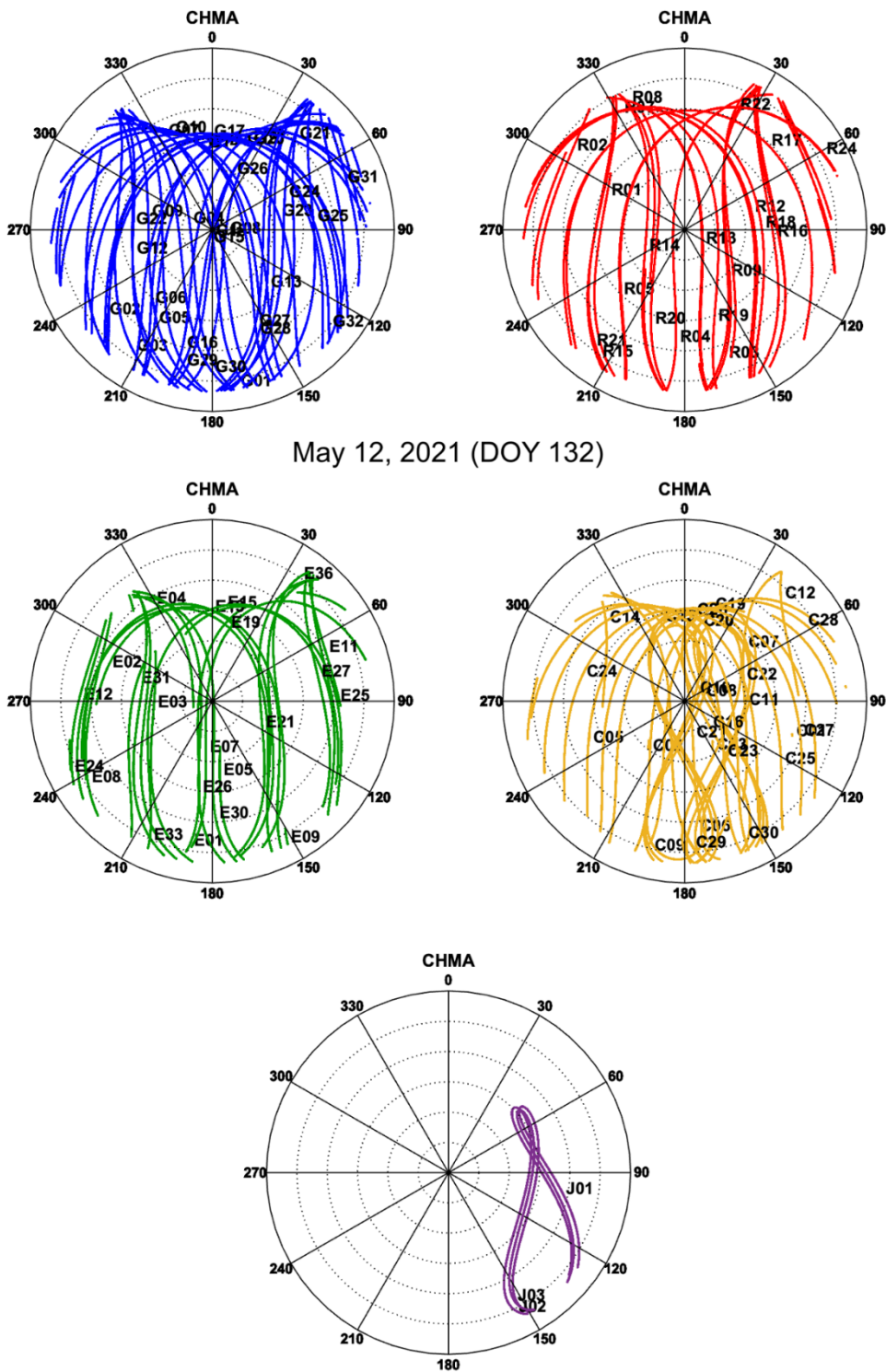
$$STEC_{klob} = cI_f \times \frac{f^2}{40.30 \times 10^{16}} TEC(TECU) \quad (5.31)$$

ในโครงการศึกษาฯ นี้ เราจะใช้ค่าข้อมูล RINEX ที่วัดได้จากเครื่องรับ GNSS ในประเทศไทยจำนวน 4 สถานี ได้แก่ สถานีเชียงใหม่ (CHMA), สถานีกรุงเทพฯ (DPT9), สถานีนครราชสีมา (NKRM), และสถานีสุราษฎร์ธานี (SRTN) โดยข้อมูลที่วัดได้อยู่ในรูปแบบ RINEX ที่สามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ <http://203.113.122.35/sbc> ของกรมโยธาธิการและผังเมือง (Department of Public Works and Town & Country Planning) หลังจากนั้น ชุดข้อมูล RINEX GNSS เหล่านี้จะถูกนำมาประมวลผลด้วยโปรแกรม MATLAB ร่วมกับการกรองค่าข้อมูล (data cleaning) เช่น ตัดดาวเทียมบางดวงที่มีมุมยกต่ำออกไป กำจัดสัญญาณรบกวนออกไป ฯลฯ ในที่นี้ ค่า precise ephemeris ถูกนำมาจาก German Research Centre for Geosciences (GFZ; <ftp://ftp.gfz-potsdam.de>) เพื่อใช้ในการคำนวณตำแหน่งของดาวเทียมทั้ง 5 ระบบ (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, and QZSS) และใช้คู่มือของ RINEX version 3.02 เพื่อประมวลผลข้อมูลนำร่องที่ได้รับเพื่อเอา GNSS Klobuchar coefficients ออกมา นอกจากนี้ ข้อมูล GIM TEC Map ก็สามารถดาวน์โหลดได้จาก Center for Orbit Determination in Europe (CODE) เว็บไซต์ <https://cddis.nasa.gov/archive/> เพื่อใช้ในการหาค่า TEC สำหรับดาวเทียมแต่ละระบบ

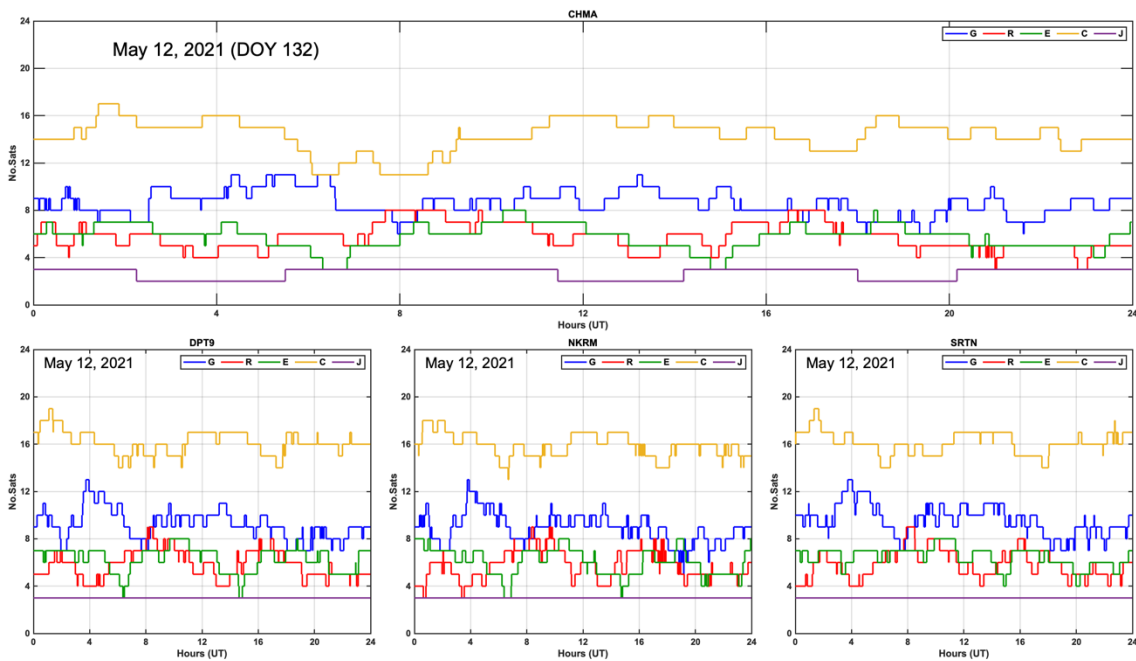
ผลของการศึกษาในโครงการศึกษาฯ นี้ [47]

ผลการทดลองที่ 1 เราพิจารณาวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกที่รุนแรงที่สุดในปี ค.ศ. 2021 คือพายุที่เกิดขึ้นในวันที่ 12 พ.ค. 2564 (DOY 132) พบว่าเป็น G3-storm ที่มีดัชนี Kp เท่ากับ 7 และเกิดขึ้นในช่วงเวลา 19:00 - 01:00 LT รูปที่ 5.11 แสดง sky plot สำหรับแต่ละระบบของ multi-constellation GNSSs ที่สถานีเชียงใหม่ ส่วนรูปที่ 5.12 แสดงจำนวนดาวเทียมที่มองเห็นได้ที่ 4 สถานี ในวันที่ May 12, 2021 (DOY 132) ได้แก่ สถานี CHMA, DPT9, NKRM, and SRTN โดยตัวอักษร (G, R, E, C, J) ในรูปที่ 5.13 และ 5.14 นั้นแทนระบบดาวเทียม นำทางสากลของ GPS, GLONASS, Galileo, Beidou และ QZSS ตามลำดับ และเวลาที่ท้องถิ่นของประเทศไทย (LT) จะเร็วกว่าเวลาสากล (UT) เท่ากับ 7 ชั่วโมง ทั้งนี้ จำนวนดาวเทียมที่มองเห็นได้ชัดเจนเหนือประเทศไทยจะเท่ากับ 12 -15 ดวงโดยเฉลี่ย โดยการมองเห็นได้ของดาวเทียม BeiDou จะดีที่สุด เนื่องจากมีดาวเทียมที่เกือบจะถาวรจำนวน 15 ดวง ในขณะที่ดาวเทียม GPS จะถูกติดตามได้พร้อมกันน้อยกว่า 12 ดวงเท่านั้น จำนวนดาวเทียมที่มองเห็นได้ของ GLONASS จะดีกว่าระบบ Galileo มาก ถึงแม้ว่าจำนวนดาวเทียมที่มองเห็นได้ของ Galileo จะแปรเปลี่ยนค่าระหว่าง 4 - 7 ดวง และที่สำคัญที่สุด ดาวเทียม QZSS สามารถมองเห็นในประเทศไทย จำนวน 3 ดวง

ในการประเมินสมรรถนะการทำงานของแต่ละระบบ multi-constellation GNSS เราเลือกดาวเทียม GPS มี 5 ดวง (G01, G02, G06, G10, G32), ดาวเทียม GLONASS มี 5 ดวง (R03, R04, R09, R16, R22), ดาวเทียม Galileo มี 5 ดวง (E01, E05, E19, E26, E36), กับดาวเทียม BeiDou มี 7 ดวง (C01, C07, C21, C22,



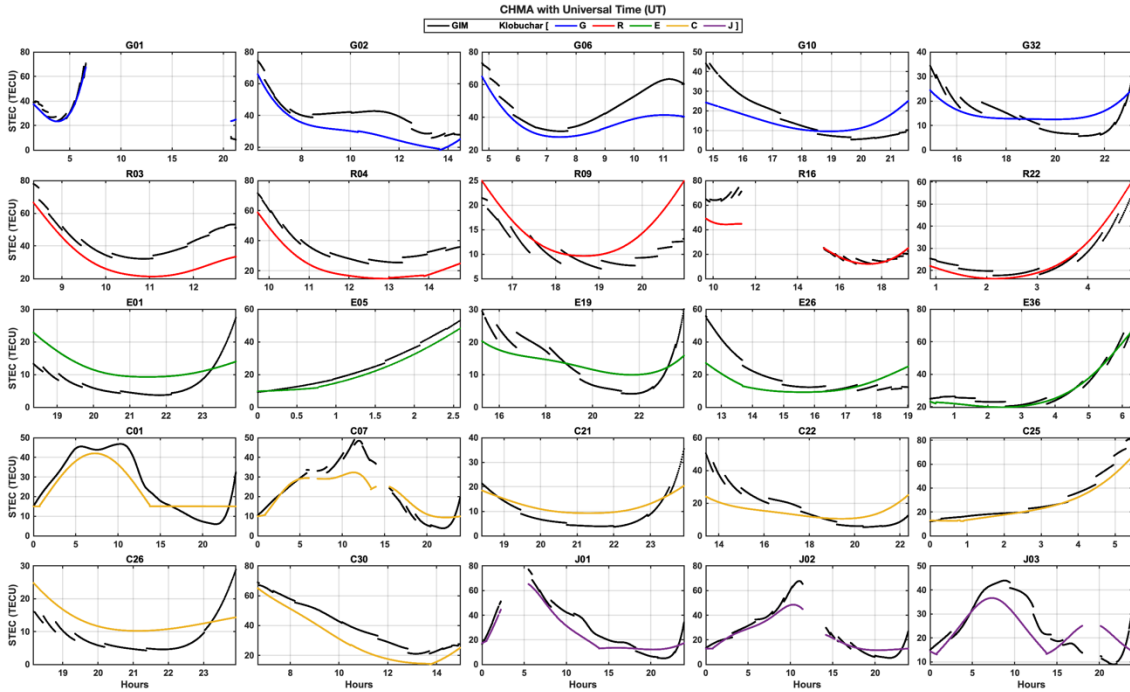
รูปที่ 5.11 Sky plot สำหรับ multi-constellation GNSSs ที่สถานีเชียงใหม่ (วันที่ May 12, 2021; DOY 132)



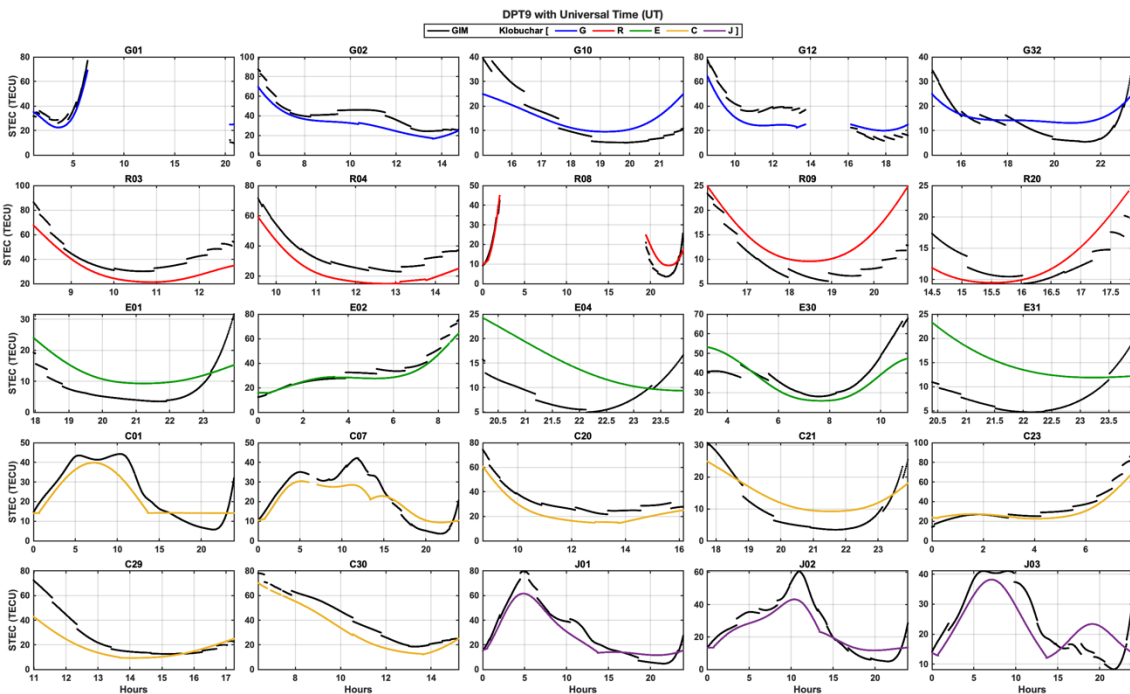
รูปที่ 5.12 จำนวนดาวเทียมที่มองเห็นได้ที่ 4 สถานี ในวันที่ May 12, 2021 (DOY 132)

C25, C26 and C30) และดาวเทียม QZSS 3 ดวง (J01, J02 and J03) รูปที่ 5.15 กับ 5.16 แสดงค่า Klobuchar-modeled STEC กับค่า GIM STEC plots ที่สถานี CHMA และ DPT9 ในวันที่ 12 พ.ค. 2564 ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 5.17 แสดงค่า Klobuchar-modeled STEC กับค่า GIM STEC plots เมื่อเทียบกับมุมมองค่าต่าง ๆ ที่สถานี CHMA ในวันที่ 12 พ.ค. 2564 นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยได้เริ่มหาค่าต่าง ๆ ที่นำเสนอในโครงการศึกษาฯ นี้ ดังนี้ รูปที่ 5.18 กับ 5.19 แสดงค่า Klobuchar-modeled STEC ของดาวเทียม GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou และ QZSS แทนด้วยเส้นทึบสีน้ำเงิน, สีแดง, สีเขียว, สีเหลืองและสีม่วง ตามลำดับ ส่วนค่า GIM STEC และค่าผลต่าง GIM-Klobuchar แทนด้วยเส้นทึบสีดำและสีฟ้าอ่อน (cyan) ที่สถานี NKRM กับสถานี SRTN ระหว่างวันที่ 10 - 13 พ.ค. 2564 (ซึ่งครอบคลุมวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกที่รุนแรงด้วย) รูปที่ 5.20 กับ 5.21 แสดงการเปลี่ยนแปลงรายเดือนของค่า Klobuchar-modeled STEC และค่า GIM STEC ที่สถานี CHMA และสถานี DPT9 ระหว่างเดือนมิถุนายน 2563 – พฤษภาคม 2564 ของ multi-constellation GNSSs จำนวน 5 ระบบ ส่วนรูปที่ 5.22 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และค่า RMSEs ของค่า Klobuchar-modeled STEC และค่า GIM STEC ทั้งนี้ ค่าข้อมูลของดาวเทียม GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou และ QZSS ในรูปที่ 5.20-5.22 ก็ถูกแทนด้วยสีน้ำเงิน, สีแดง, สีเขียว, สีเหลืองและสีม่วง ตามลำดับ ส่วนค่า GIM STEC และค่าผลต่าง GIM-Klobuchar ก็ถูกแทนด้วยเส้นทึบสีดำและสีฟ้าอ่อน (cyan) เช่นเดิม

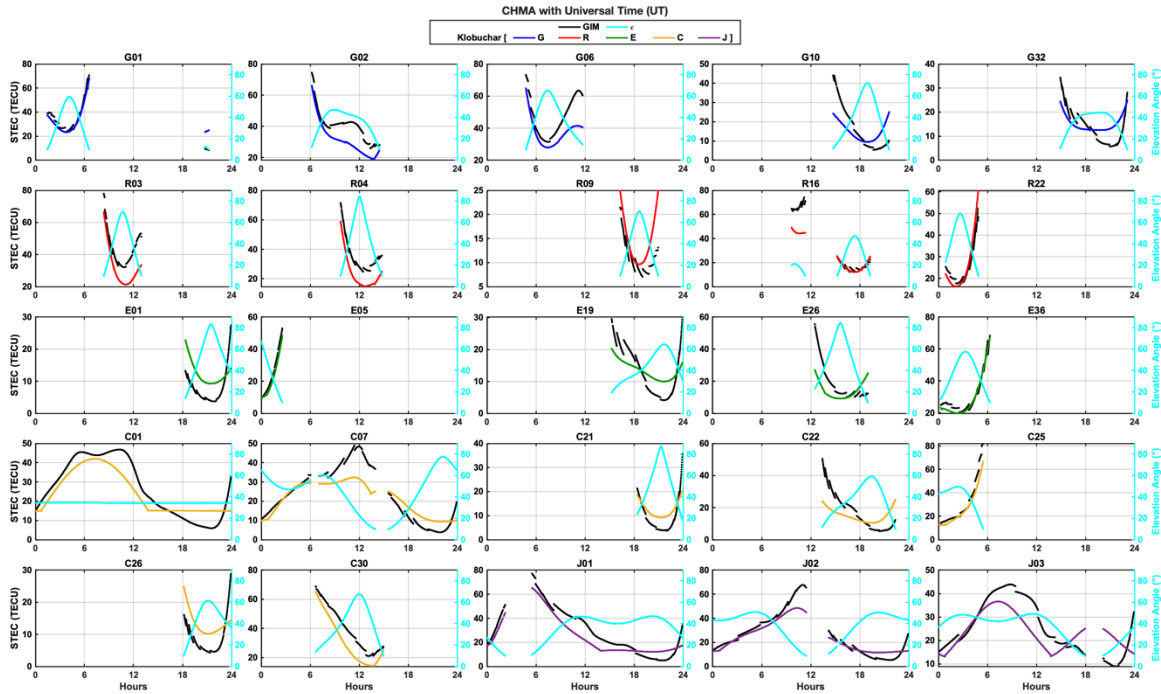
ประการแรก ทั้ง 2 สถานี (NKRM และ SRTN) จะเห็นได้ชัดว่าค่า GPS Klobuchar STEC ในวันปกติจะแตกต่างกันประมาณ 5 TECU ถึง 75 TECU ในขณะที่ ค่าในวันพายุ (12 พฤษภาคม 2021) มีค่าสูงถึง 80 TECU ได้ โดยทั่วไป ค่า GIM STEC จะสูงและต่ำในแต่ละวัน สลับกัน นอกจากนี้ ความแตกต่างระหว่าง GIM STECs และ



รูปที่ 5.13 ค่า Klobuchar-modeled STEC กับค่า GIM STEC plots ที่สถานี CHMA ในวันที่ 12 พ.ค. 2564



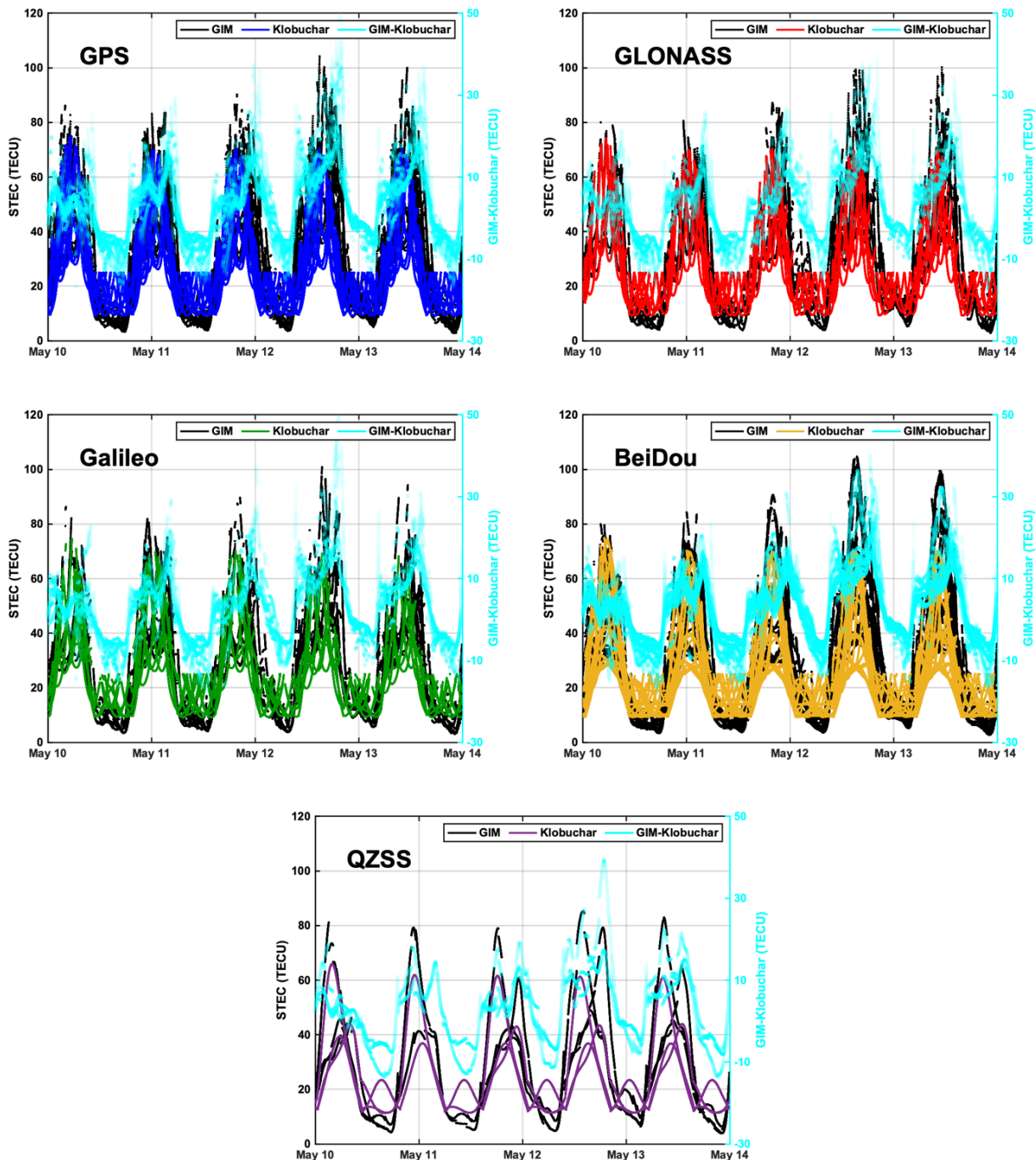
รูปที่ 5.14 ค่า Klobuchar-modeled STEC กับค่า GIM STEC plots ที่สถานี DPT9 ในวันที่ 12 พ.ค. 2564



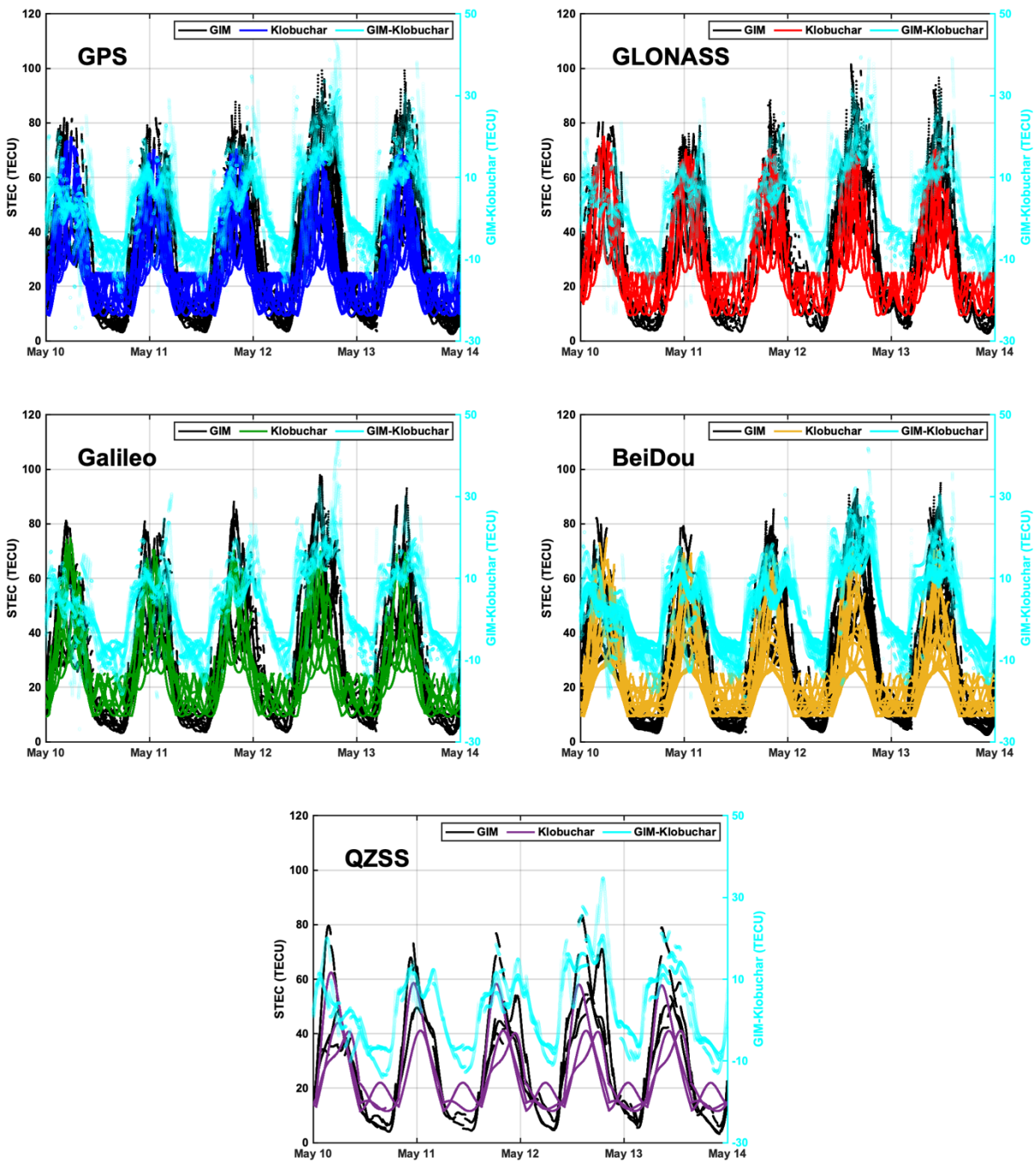
รูปที่ 5.15 ค่า Klobuchar-modeled STEC กับค่า GIM STEC plots เมื่อเทียบกับมุลมยค่าต่าง ๆ ที่สถานี CHMA ในวันที่ 12 พ.ค. 2564

GPS Klobuchar STECs (GIM-GPS Klobuchar) มีค่าระหว่าง -10 ถึง 30 TECU **ประการที่สอง** สำหรับค่า GLONASS Klobuchar STECs มีค่าตั้งแต่ 5 TECU ถึง 80 TECU ในวันปกติ ในขณะที่สามารถสูงขึ้นถึง 90 TECU ก็ได้ในวันที่เกิดพายุ ผลต่างระหว่าง GIM STECs และ GLONASS Klobuchar STECs (GIM-GLONASS Klobuchar) มีค่าอยู่ระหว่าง -8 ถึง 32 TECU **ประการที่สาม** ค่า Galileo Klobuchar STECs มีค่าระหว่าง 10 TECU ถึง 70 TECU ในแต่ละวัน และอาจสูงเล็กน้อยประมาณ 75 TECU ในวันที่มีพายุ ผลต่างระหว่าง GIM STECs และ Galileo Klobuchar STECs (GIM-Galileo Klobuchar) มีค่าระหว่าง -10 TECUs และ 25 TECU **ประการที่สี่** สำหรับค่า BeiDou Klobuchar STECs นั้น จะมีผลการทดลองที่คล้ายกับระบบ Galileo ซึ่งจะมีค่าระหว่าง 10 – 70 TECU ในแต่ละวัน และมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยประมาณ 75 TECU ในวันที่มีพายุ ผลต่างระหว่าง GIM STECs และ BeiDou Klobuchar STECs (GIM-BeiDou Klobuchar) มีค่าระหว่าง -8 TECU ถึง 32 TECU ผลการทดลองสุดท้ายคือค่า QZSS Klobuchar STECs ที่มีค่าระหว่าง 10 TECU ถึง 62 TECU โดยผลต่างระหว่าง GIM STECs และ QZSS Klobuchar STECs (GIM-QZSS Klobuchar) มีค่าระหว่าง -10 TECU ถึง 20 TECU

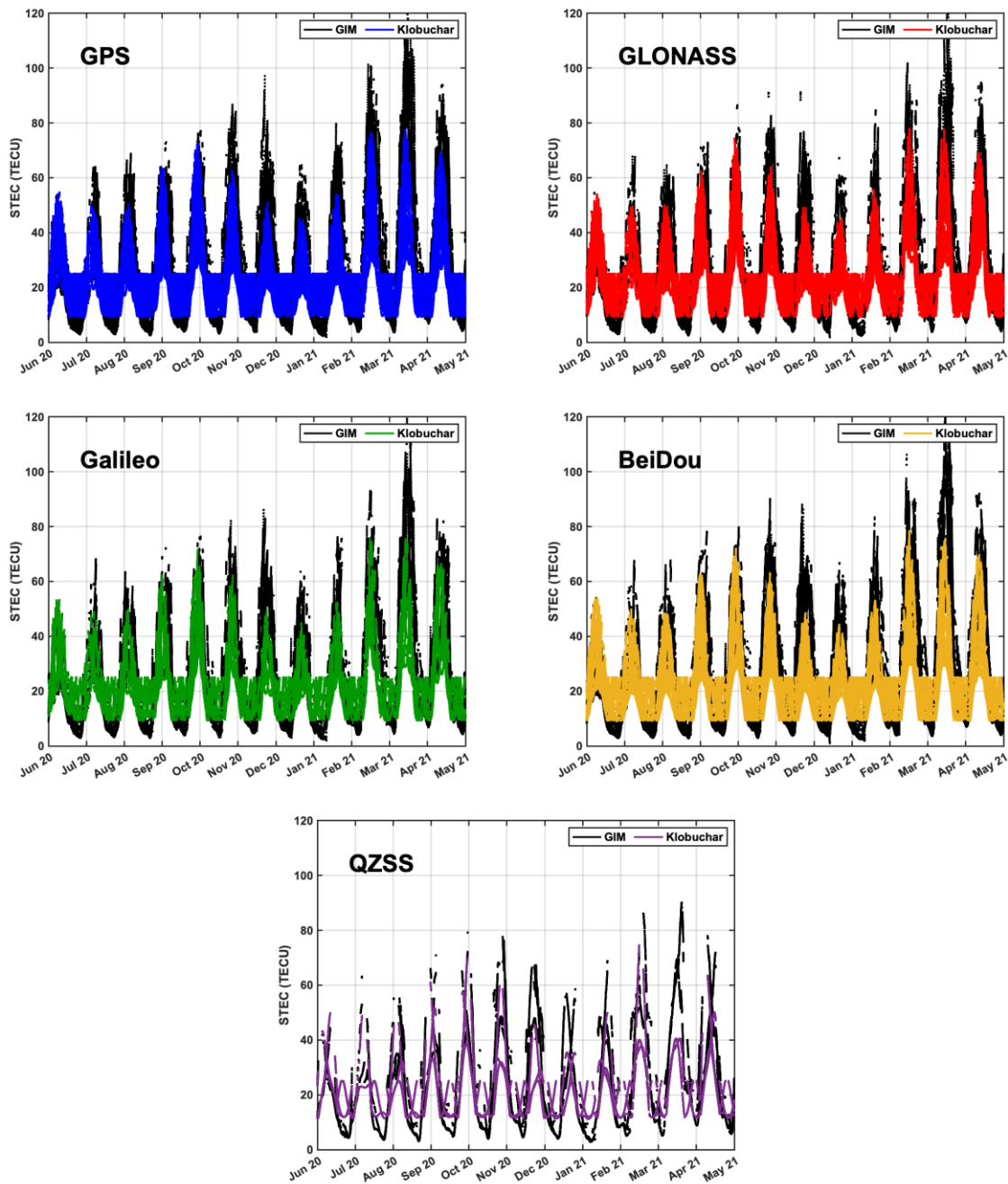
ในการอธิบายข้างต้น การเปลี่ยนแปลงของ GNSS STECs แต่ละชนิดและผลต่างจาก GIM STECs แสดงคุณลักษณะเฉพาะตัว ในบรรดา multi-constellation GNSSs จำนวน 5 ระบบที่ศึกษา ค่า QZSS Klobuchar STECs มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่า GIM STECs มากที่สุด สาเหตุหลักคือ ระบบ QZSS ได้รับการจัดตั้งเป็นระบบเสริมให้แก่ระบบ GPS เพื่อเพิ่มความแม่นยำ การเข้าถึงง่าย ความถูกต้องและความน่าเชื่อถือในการสื่อสารและการใช้งานต่าง ๆ ในภูมิภาคเอเชีย และวงโคจรของพวกมันได้รับการออกแบบเป็นพิเศษเพื่อเพิ่มกำลังสัญญาณที่ส่งมายัง



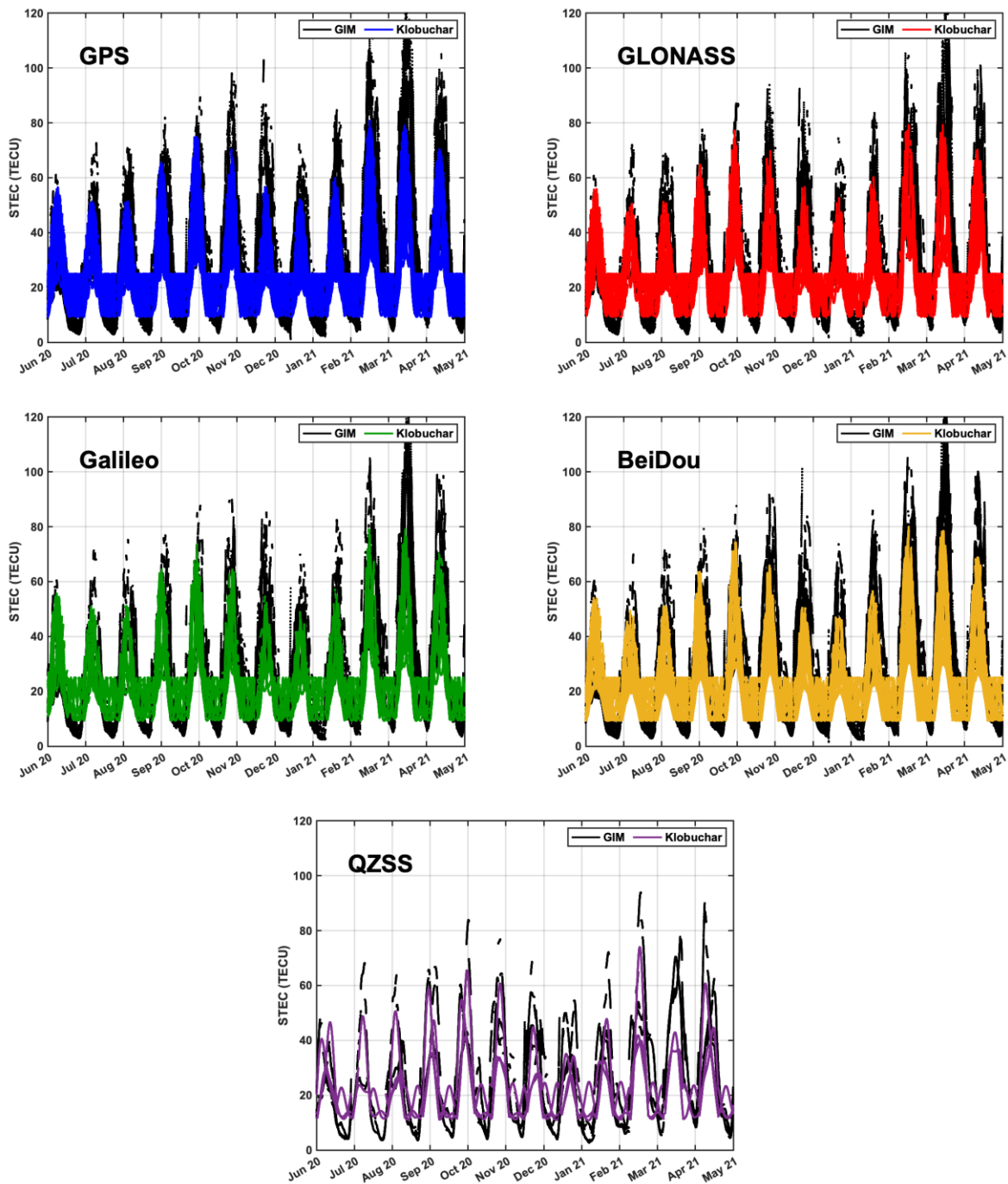
รูปที่ 5.16 ค่า Klobuchar-modeled STEC, ค่า GIM STEC และค่าผลต่าง GIM-Klobuchar ที่สถานี NKRM ระหว่างวันที่ 10-13 พ.ค. 2564



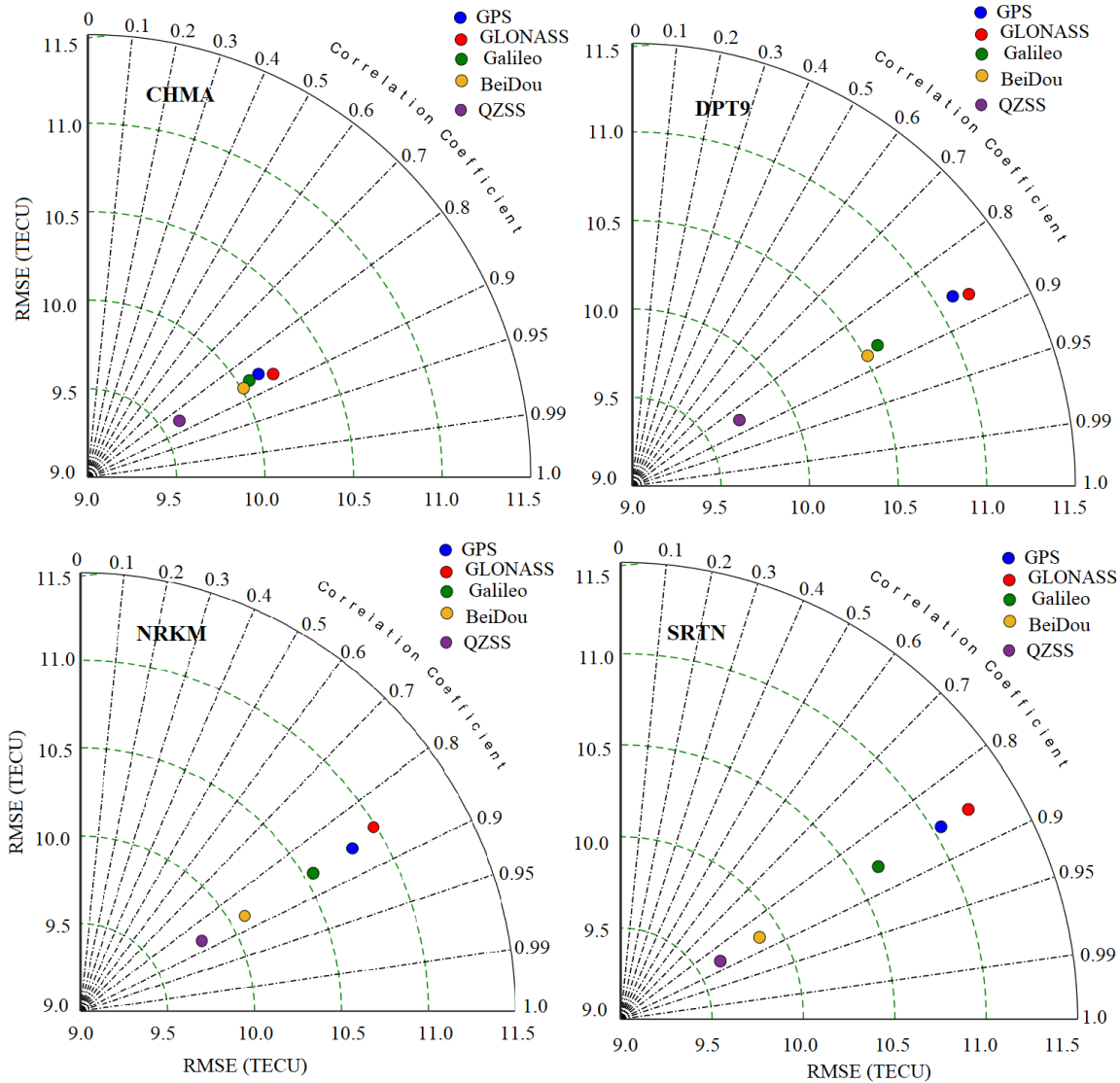
รูปที่ 5.17 ค่า Klobuchar-modeled STEC, ค่า GIM STEC และค่าผลต่าง GIM-Klobuchar ที่สถานี SRTN ระหว่างวันที่ 10-13 พ.ค. 2564



รูปที่ 5.18 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของค่า Klobuchar-modeled STEC และค่า GIM STEC ที่สถานี CHMA ระหว่างเดือนมิถุนายน 2563 – พฤษภาคม 2564 ของ multi-constellation GNSSs จำนวน 5 ระบบ



รูปที่ 5.19 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของค่า Klobuchar-modeled STEC และค่า GIM STEC ที่สถานี DPT9 ระหว่างเดือนมิถุนายน 2563 – พฤษภาคม 2564 ของ multi-constellation GNSSs จำนวน 5 ระบบ



รูปที่ 5.20 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และค่า RMSEs ของค่า Klobuchar-modeled STEC และค่า GIM STEC

เครื่องรับ GNSS บนพื้นโลก ผลต่างของ STEC มักจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับมุมยก ดังนั้นยิ่งมุมยกมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า STEC ก็ยิ่งมีค่าลดลง ในระบบ QZSS จะมีดาวเทียม 3 ดาวเทียมปรากฏให้เห็นเป็นลำดับทุก ๆ 8 ชั่วโมง จะมีดาวเทียมอย่างน้อย 1 ดาวเทียมตั้งอยู่ใกล้กับเส้นศูนย์สูตรโดยมีมุมยก 70° ขึ้นไป ถ้าคุณดูดาวเทียมหนึ่งดวงจากบริเวณใกล้กรุงโตเกียว มันจะยังคงอยู่ 8 ชั่วโมงในมุมสูง 70° ขึ้นไป, 12 ชั่วโมงที่ 50° ขึ้นไปและ 16 ชั่วโมงที่ 20° ขึ้นไป

อ้างอิงถึงการวิเคราะห์ขั้นสุดท้ายของเรา เราได้นำข้อมูลรายเดือน 1 ปี (ตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2563 ถึงเดือนพฤษภาคม 2564) ที่เว็บไซต์ CHMA และ DPT9 และตรวจสอบผลการดำเนินงานรายเดือนของพวกเขาตลอดทั้งปี ตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2563 ถึงเดือนพฤษภาคม 2564 (รูปที่ 5.20 และ 5.21) ค่า STEC ในเดือนแรก (มิถุนายน 2563) ลดลงประมาณ 50 TECU เมื่อเทียบกับเดือนอื่นๆ พวกเขาเริ่มเพิ่มขึ้นในเดือนถัดไป กลายเป็น

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาชั้นไอออโนสเฟียร์ที่มีต่อการระบุทิศทางเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

มากกว่า 60 TECU ในเดือนกันยายน 2020 จากนั้นก็เพิ่มขึ้นไปจนถึงจุดสูงสุดอันดับที่ 2 (70 TECU) ในเดือนตุลาคม 2063 (กันยายน equinox) หลังจากนั้นในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 ถึง กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2564 (เดือนธันวาคม พ.ศ. 2564) จะลดลงระหว่าง 50 TECU และ 55 TECU สุดท้าย ค่า STEC เพิ่มขึ้นอีกครั้งเพื่อบรรลุจุดสูงสุดเบื้องต้นถึง 80 TECU ในช่วงเดือนมีนาคม equinox จากนั้นลดลง 2 เท่า เป็นค่าต่ำกว่าประมาณ 70 TECU ในเดือนพฤษภาคม 2021 โดยรวมแล้ว การเปลี่ยนแปลงของ STEC ในประเทศไทยสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพอวกาศของโลก กล่าวคือ TEC มีค่าที่ต่ำในช่วงเดือนมิถุนายนโซลติสซ์ (เดือนพฤษภาคม มิถุนายน กรกฎาคม และสิงหาคม) TEC มีค่าที่สูงในเดือนกันยายนอิกวินอกซ์ (เดือนกันยายนและตุลาคม) ค่าต่ำสุดในเดือนธันวาคมโซลติสซ์ (เดือนพฤศจิกายน ธันวาคม มกราคม และกุมภาพันธ์) และค่าสูงสุดในเดือนมีนาคมอิกวินอกซ์ (เดือนมีนาคมและเมษายน) น่าสังเกตว่า ค่าของ STEC มีค่าสูงสุดในเดือนมีนาคมอิกวินอกซ์ และมีค่าลดลงในเดือนมิถุนายนโซลติสซ์ เหตุผลที่ทำให้เกิดความเข้มข้นสูงสุดของ STEC ในช่วงเดือนมีนาคมอิกวินอกซ์ อาจเป็นผลมาจากลมเมอริเดียนที่ไหลจากเส้นศูนย์สูตรไปยังขั้วโลก ส่งผลให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนที่สูงในทางตรงกันข้าม กระแสการแพร่กระจายของส่วนประกอบทางยาว (กลาง) ของลมกลาง ซึ่งขัดแย้งกับกระบวนการแพร่กระจายพลาสมาจากศูนย์สูตรแม่เหล็กและการลดอัตราส่วน O/N_2 ในชั้นบรรยากาศในช่วงเดือนมิถุนายนโซลติสซ์ อาจเป็นสาเหตุของการลดความเข้มข้นของอิเล็กตรอนในเดือนมิถุนายน

โดยทั่วไป ค่า GIM STEC จะสูงกว่าค่า Klobuchar-based STEC ของ multi-constellation GNSSs ยกเว้นค่า QZSS Klobuchar STEC ที่เกือบจะเท่ากับค่า GIM STEC เพื่อที่จะเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างค่า GIM STEC กับ Klobuchar-based STEC ของ multi-constellation GNSSs เราจะทำการประเมินค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และค่า RMSEs ของค่า Klobuchar-modeled STEC และค่า GIM STEC ของค่า STEC เหล่านั้น ซึ่งผลที่ได้รับมีแสดงไว้ในรูปที่ 5.20 จากรูปที่ 5.20 ค่าข้อมูลของระบบ GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou และ QZSS ถูกแสดงด้วยสีฟ้า, สีแดง, สีเขียว, สีเหลือง และสีม่วง ตามลำดับ โดย Multi-GNSS Klobuchar STEC มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า GIM STEC ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง 0.87 ถึง 0.89 ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นค่าที่สูงกว่า 0.85 ย่อมแสดงว่า “มีความสัมพันธ์ที่ดีมากสำหรับการนำไปใช้ได้ของแบบจำลองโคลบูชาแบบเดิม” ส่วนค่า RMSE ของ multi-constellation GNSSs พบว่า มีค่าอยู่ระหว่าง 10 TECU และ 11 TECU ในขณะที่ RMSE ของระบบ QZSS มีค่าน้อยกว่า 10 TECU เหตุผลหลักคือดาวเทียม QZSS สามารถทำงานได้ดีมากเพราะดาวเทียม QZSS มีมุมยกที่สูงเหนือพื้นที่ประเทศไทย

5.5 เอกสารอ้างอิงบทที่ 5

- [1] J. A. Klobuchar, “Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users,” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. AES-23, no. 3, pp. 325–331, 1987.
- [2] W. A. Feess and S. G. Stephens, “Evaluation of GPS ionospheric time delay model,” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. AES-23, no. 3, pp. 332–338, 1987.
- [3] J. A. Klobuchar, “Ionospheric effects on GPS,” Global Positioning Syst.,” Theory Appl., vol. 1, pp. 485–515, 1996.

- [4] S. Schaer, "Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System," Ph.D. dissertation, Geodätisch-Geophysikalische Arbeiten Schweiz, Schweizerische Geodaetische Kommission, Zürich, Switzerland, vol. 59, 1999.
- [5] Y. Yuan, et al., "Refining the Klobuchar ionospheric coefficients based on GPS observations," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 44, no. 4, pp. 1498–1510, 2008
- [6] A. K. Shukla, S. Das, A. P. Shukla, and V. S. Palsule, "Approach for near-real-time prediction of ionospheric delay using Klobuchar-like coefficients for Indian region," *IET Radar, Sonar Navigat.*, vol. 7, no. 1, pp. 67–74, 2013.
- [7] D. Denis, "Autonomous single-frequency ionospheric correction model for safety-of-life applications," in *Proc. 30th Int. Tech. Meeting Satellite Division Inst. Navigat.*, Portland, OR, USA, pp. 1735–1746, 2017.
- [8] J. Klobuchar, "Ionospheric corrections for the single frequency user of the global positioning system," in *Proc. Nat. Telesyst. Conf.*, pp. C1.4.1–C1.4.4, 1982.
- [9] A. K. Shukla, S. Das, N. Nagori, M. R. Sivaraman, and K. Bandyopadhyay, "Two-shell ionospheric model for Indian region: A novel approach," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 47, no. 8, pp. 2407–2412, 2009.
- [10] D. V. Ratnam, J. R. K. K. Dabbakuti, and S. Sunda, "Modeling of ionospheric time delays based on a multishell spherical harmonics function approach," *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, vol. 10, no. 12, pp. 5784–5790, 2017.
- [11] W. Menke, *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*, New York, NY, USA: Academic, 1984.
- [12] K. Nishimoto, M. Ohashi, Y. Kubo, and S. Sugimoto, "Determination of the parameters of a Japanese-regional Klobuchar ionospheric model based on GR models and SCH analysis by GEONET data," in *Proc. ION Pacific PNT Meeting*, Honolulu, HI, USA, pp. 723–734, 2013.
- [13] D. V. Ratnam, J. R. K. K. Dabbakuti, and N. V. V. N. J. S. Lakshmi, "Improvement of Indian-Regional Klobuchar Ionospheric Model Parameters for Single-Frequency GNSS Users," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 15, no. 7, pp. 971–975, 2018.
- [14] D. Bouvet, "Autonomous single-frequency ionospheric correction model for safety-of-life applications," in *Proc. 30th Int. Tech. Meeting Satellite Division Inst. Navigat.*, Portland, OR, USA, 2017, pp. 1735–1746.
- [15] K. Ansari, S. K. Panda, and P. Jamjareegulgarn, "Singular Spectrum Analysis of Ionospheric TEC Variations over Nepal during the low Solar Activity from GPS Network Observables," *Acta Astronautica*, vol. 169, pp. 216–223, 2020.
- [16] P. Wintoft and L. R. Cander, "Ionospheric foF2 storm forecasting using neural networks," *Phys. Chem. Earth, Part C: Solar, Terrestrial Planet. Sci.*, vol. 25, pp. 267–273, 2000

- [17] M. Ghil et al., “Advanced spectral methods for climatic time series,” *Rev. Geophys.*, vol. 40, pp. 3-1–3-41, 2002.
- [18] J. R. K. K. Dabbakuti and B. L. G., “Application of Singular Spectrum Analysis Using Artificial Neural Networks in TEC Predictions for Ionospheric Space Weather,” *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 12, no. 12, pp. 5101-5107, 2019.
- [13] K. Ansari and K. D. Park, “Multi constellation GNSS precise point positioning and prediction of propagation errors using singular spectrum analysis,” *Astrophys. Space Sci.*, vol. 363, no. 258, 2018.
- [20] K. Ansari, “Real-Time Positioning Based on Kalman Filter and Implication of Singular Spectrum Analysis,” *IEEE Geosci. Remote. Sens.*, vol. 18, no. 1, pp. 58-61, 2021.
- [21] H. W. Seok, K. Ansari, C. Panachai, and P. Jamjareegulgarn, “Individual performance of multi-GNSS signals in the determination of STEC over Thailand with the applicability of Klobuchar model,” *Advances in Space Research*, 2021.
- [22] T. Takasu, “RTKLIB: an open-source program package for GNSS positioning,” available online in 2018, url:- www.rtklib.com.
- [23] S. Jongsintawee, S. Runraengwajjake, P. Supnithi, and C. Panachai, “Comparison of GPS Positioning Accuracy Using Klobuchar Model and IGS TEC Model in Thailand,” *KMITL Sci. Tech. J.*, vol. 16, no. 1, pp. 1-10, 2016, <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/cast/article/view/130034/97662>.
- [24] S. Jongsintawee, S. Runraengwajjake, P. Supnithi, and C. Panachai, “Improvement of GPS positioning accuracy when utilizing Klobuchar model with ionospheric conditions in Thailand,” In 13th ECTI-CON, June 2016, doi:10.1109/ECTICon.2016.7561391.
- [25] D. V. Ratnam, J. R. K. K. Dabbakuti, and N. V. V. N. J. S. Lakshmi, “Improvement of Indian-Regional Klobuchar Ionospheric Model Parameters for Single-Frequency GNSS Users,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 15, no. 7, pp. 971-975, July 2018, doi: 10.1109/LGRS.2018.2827081.
- [26] J. A. Klobuchar, “Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-23, no. 3, pp. 325–331, May 1987.
- [27] W. A. Feess and S. G. Stephens, “Evaluation of GPS ionospheric timedelay model,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-23, no. 3, pp. 332–338, May 1987.
- [28] J. A. Klobuchar, “Ionospheric effects on GPS,” *Global Positioning Syst., Theory Appl.*, vol. 1, pp. 485–515, Aug. 1996.
- [29] S. Schaer, “Mapping and predicting the Earth’s ionosphere using the Global Positioning System,” Ph.D. dissertation, Geodätisch-Geophysikalische Arbeiten Schweiz, Schweizerische Geodaetische Kommission, Zürich, Switzerland, 1999, vol. 59.
- [30] Y. Yuan et al., “Refining the Klobuchar ionospheric coefficients based on GPS observations,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 44, no. 4, pp. 1498–1510, Oct. 2008.

- [31] A. K. Shukla, S. Das, A. P. Shukla, and V. S. Palsule, "Approach for near-real-time prediction of ionospheric delay using Klobuchar-like coefficients for Indian region," *IET Radar, Sonar Navigat.*, vol. 7, no. 1, pp. 67–74, Jan. 2013.
- [32] D. Bouvet, "Autonomous single-frequency ionospheric correction model for safety-of-life applications," in *Proc. 30th Int. Tech. Meeting Satellite Division Inst. Navigat.*, Portland, OR, USA, 2017, pp. 1735–1746.
- [33] D. V. Ratnam, J. R. K. K. Dabbakuti, and S. Sunda, "Modeling of ionospheric time delays based on a multishell spherical harmonics function approach," *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, vol. 10, no. 12, pp. 5784–5790, 2017.

บทที่ 6 การตรวจจับ PDOP และ Kalman Filter สำหรับ NRTK

ระบบดาวเทียมนำทางสากลและระดับภูมิภาค (Global and Regional Navigation Satellite Systems: GNSSs/RNSSs) ได้ถูกคาดหวังว่าจะติดตั้งกลุ่มของดาวเทียมเพื่อใช้งานอย่างเต็มที่ในปี 2020 นี้ โดยระบบ GNSSs (หรือเรียกว่าระบบ BDS) ประกอบไปด้วยระบบ GPS ของสหรัฐอเมริกา, GLONASS ของรัสเซีย, Galileo ของยุโรป และ BeiDou ของจีน ในขณะที่ระบบ RNSSs ประกอบไปด้วยระบบ QZSS ของญี่ปุ่น และ Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS) โดยระบบดาวเทียมนำทางสากล/ระดับภูมิภาค (GNSS/RNSS) ยังคงได้รับความสนใจไม่กี่ปีมานี้เพื่อใช้ในหัวข้องานทางด้านความถูกต้องในการระบุพิกัดที่แม่นยำสูงระดับไม่กี่มิลลิเมตรไปจนถึงเมตร กลุ่มของดาวเทียมต่าง ๆ เหล่านี้ได้สร้างโอกาสที่จะทำความถูกต้องในการระบุพิกัดที่แม่นยำสูงได้สำเร็จ ถึงแม้ว่ากลุ่มของดาวเทียมเพื่อระบบนำทางเหล่านี้ได้ถูกออกแบบเพื่อที่จะรักษาการเชื่อมต่อของสัญญาณจากจำนวนที่น้อยที่สุดของดาวเทียมที่ถูกใช้งานในการระบุพิกัดผู้ใช้ในแต่ละครั้งก็ตาม แต่บ่อยครั้งที่มีการขาดการติดต่อที่เครื่องรับเนื่องจากเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด ในขณะที่สัญญาณจากกลุ่มของดาวเทียมระบบอื่นอาจจะชดเชยหรือเสริมเพื่อช่วยในความถูกต้องในการระบุพิกัดที่แม่นยำได้ งานวิจัยอันแรกที่มีการใช้งานระบบ BDS เพียงระบบเดียวสำหรับการระบุพิกัดที่แม่นยำคืองานวิจัยของ Montenbruck และคณะ [1] ส่วนผลงานวิจัยที่ใช้การระบุพิกัดด้วย RTK ที่มีการผสมผสานกับระบบดาวเทียม GNSS/RNSS ด้วยนั้นสามารถศึกษาได้จาก Shi และคณะ [2], Kim และ Park [3] และ Jin และคณะ [4]

การทดลองการรับสัญญาณหลายระบบ GNSS (Multi-GNSS Experiment หรือ MGEX) ได้ถูกสร้างขึ้นโดยหน่วยงานบริการจีเอ็นเอสเอสสากล (International GNSS Service หรือ IGS) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ติดตาม และประเมินสัญญาณ GNSS ที่มีอยู่ทั้งหมดและสัญญาณจากระบบช่วยนำทางที่อาศัยดาวเทียม (Satellite-Based Augmentation System หรือ SBAS) การพัฒนาทางด้านเครื่องรับ GNSS และซอฟต์แวร์เมื่อเร็ว ๆ นี้ช่วยทำให้การจัดการและประมวลผลสัญญาณ (ค่าข้อมูล) GNSS ที่รับจากหลายระบบได้ โดยจำนวนดาวเทียมที่ปรากฏอยู่มีจำนวนที่เพิ่มขึ้นตามกลุ่มของ GNSS หลายระบบ (Multi-GNSS constellations) และการปรากฏอยู่ของสัญญาณได้ตอบสนองความต้องการสำหรับการปรับปรุงคุณภาพและความต่อเนื่องของการระบุพิกัด ความเชื่อถือได้และความแม่นยำของการระบุพิกัดขึ้นอยู่กับคุณภาพของสัญญาณที่ได้รับอย่างมาก นอกจากนี้ เทคนิค การระบุพิกัดพิกัดแม่นยำ (PPP) เป็นวิธีที่แสดงบทบาทที่สำคัญในงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ อาทิเช่น geodesy, geodynamics, mining และอุตสาหกรรมน้ำมันและแก๊สธรรมชาติ ซึ่งต้องการระดับความแม่นยำที่สูง การศึกษาจำนวนมากยังคงที่จะศึกษาการประมาณโดยอาศัยแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพและการกำจัดความผิดพลาดจากการนำทางที่มุ่งไปสู่การปรับปรุงความถูกต้องในการระบุพิกัด โดยงานวิจัยของ Shi และคณะ [2] ได้นำเสนอวิธี aerial triangulation ในการหาตำแหน่งของสายอากาศที่ติดตั้งไว้และได้ขยายการประยุกต์ใช้งานไปเป็น real-time PPP นอกจากนี้ Kim และ Park [3] ได้พัฒนาชุดของโปรแกรม PPP แบบเวลาจริง (real-time PPP Program) ในการประมวลผลสัญญาณ pseudorange ของ GPS ที่รับได้ และยืนยันความถูกต้องของสมรรถนะโดยใช้การทดสอบการระบุพิกัดแบบตายตัวและแบบเคลื่อนที่ ในขณะเดียวกัน Jin และคณะ [4] ได้นำเสนอวิธีคาลมานฟิลเตอร์ (KF) ร่วมกับแบบจำลองที่ทำนายได้แบบการถดถอยอัตโนมัติ (Auto-Regressive Predictive Model) สำหรับการนำทางของยานพาหนะ แต่ทั้งนี้ก็สามารถที่จะนำไปใช้งานใน PPP แบบตายตัวได้เช่นกัน ความผิดพลาดเนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลหรือค่าปรับแก้บางส่วนอัน

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบนเบสที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

เนื่องจากค่าเวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์และโทรโปสเฟียร์ในสัญญาณที่ได้รับสามารถที่จะถูกกำจัดออกไปได้ โดยอาศัยเทคนิคที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้นี้ หลังจากนั้น ก็ได้มีการนำเสนอวิธี singular spectrum analysis (SSA) เพื่อนำมาใช้ในจัดการกับความผิดพลาดเหล่านี้ได้สำเร็จ โดยวิธี SSA นี้ยังคงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงาน geodesy หลาย ๆ ด้าน เช่น จำลองอนุกรมเชิงเวลาของงานทางด้าน geodetic, ศึกษ GNSS pseudorange, และประมาณค่าความผิดพลาดของความเร็วในแนวตั้งของสถานี IGS แล้วนำไปใช้ในการจำลองสภาพแวดล้อม

การระบุพิกัดของเครื่องรับทางธรณีวิทยาที่แม่นยำเป็นเรื่องที่ทำหายทางวิทยาศาสตร์เป็นอย่างมาก ซึ่งมีการประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติที่ชัดเจนและหลากหลายมากในตอนนี้ ปัญหาในทางปฏิบัติส่วนใหญ่ในขณะนี้สามารถที่จะถูกแก้ปัญหามาได้สำเร็จโดยอาศัยระบบ GNSS ที่มีหลายระบบและอาศัยเทคนิคที่ใช้ในการทำนายที่มีหลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น วิธีคาลมานฟิลเตอร์ (Kalman Filter หรือ KF) โดย KF เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยวิธีการทำซ้ำ ใช้ค่าข้อมูลอินพุตที่เป็นลำดับกับเซตของสมการจำนวนมาก กระบวนการทำซ้ำสามารถประมาณค่าจริงของตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่ง และค่าอื่น ๆ ของวัตถุได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังมีค่าความผิดพลาด ความไม่แน่นอน และการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มที่ถูกจำกัดที่วัดได้อีกด้วย แบบจำลองแบบสโตแคสติกได้นิยามคุณสมบัติของสัญญาณรบกวน และแบบจำลองแบบพลวัตได้นิยามพฤติกรรมตัวแปรสถานะ และเป็นปัจจัยหลักสำหรับสมรรถนะของวิธี KF หรืออาจจะกล่าวได้ว่า วิธี KF นั้นขึ้นอยู่กับค่าทางสถิติของสัญญาณรบกวนที่วัดได้ แบบจำลองอนุพันธ์แบบดิฟเฟอเรนเชียล และค่าข้อมูลที่รู้ล่วงหน้าของกระบวนการที่ไม่มีเสถียรภาพที่เป็นไปได้ การที่ขาดค่าข้อมูลเกี่ยวกับฟิลเตอร์ค่าทางสถิติที่รู้ล่วงหน้านำไปสู่ค่าไบอัสที่ควรประมาณได้และลดค่าความแม่นยำของค่าที่ประมาณได้จากฟิลเตอร์ นอกจากนี้ การไดเวอร์เจนซ์ในทางปฏิบัติสามารถที่จะแก้ปัญหามาได้โดยใช้ฟิลเตอร์ประเด็นนี้สามารถที่จะแก้ปัญหามาและถูกพยากรณ์ได้โดยใช้วิธีการทำนายที่เหมาะสม โดยการพิจารณาประเด็นต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น วิธี KF แบบปรับตัวได้ที่อาศัยเทคนิคการทำนายด้วยวิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมเชิงเดี่ยว (Singular Spectrum Analysis หรือ SSA) จะถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ SSA เป็นเทคนิคการประมาณสเปกตรัมแบบไม่มีการกำหนดพารามิเตอร์ ซึ่งจะรวมองค์ประกอบของการวิเคราะห์ของอนุกรมทางเวลาแบบคลาสสิก ค่าสถิติแบบหลายตัวแปร โหมดพลวัต เรขาคณิตและการประมวลผลสัญญาณ เทคนิคนี้เป็นแบบจำลองการทำนายที่ได้รับการยอมรับวิธีนี้ที่ยังคงที่จะถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหัวข้องานต่าง ๆ มากมาย จากองค์ความรู้ที่ดีที่สุดที่มีอยู่พบว่า ความสามารถในการประยุกต์ใช้ SSA สำหรับวิธี KF ยังไม่เคยที่จะถูกทดสอบกับค่าข้อมูลที่วัดได้ทั่วโลกเลย ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ การนำ SSA มาใช้งานยังคงที่จะถูกศึกษาด้วยแบบจำลอง KF วิธี KF-SSA แบบปรับตัวได้สามารถที่นำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับข่าวสาร “การระบุพิกัดแบบเรียลไทม์” (real-time positioning หรือ RTP) อย่างมีประสิทธิภาพ ที่ผ่านมา Ansari และ Park [5] ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับ SSA ที่น่าสนใจแก่วงการ GNSS RTK คือนำเสนอการระบุพิกัดจุดที่แม่นยำ (precise point positioning หรือ PPP) โดยอาศัย GNSS หลายระบบ (Multi-GNSS) และทำนายค่าความผิดพลาดการแพร่กระจายสัญญาณโดยใช้วิธี SSA เป้าหมายหลักของงานวิจัยนี้คือพยายามที่จะลดความผิดพลาดสัญญาณรบกวนของสัญญาณ PPP ที่รับได้โดยการใช่วิธี SSA ร่วมกับการจำลองเวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์และชั้นโทรโปสเฟียร์ รวมถึงทดสอบความเชื่อถือได้ของวิธี SSA สำหรับการรับค่าจากสัญญาณหลายกลุ่มของ GNSS หลายระบบ ได้แก่ GPS, GLONASS และ Beidou จากเครือข่าย MGEX ที่ตั้งอยู่ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ หลังจากนั้น Ansari [6] ได้ทำการปรับปรุงวิธี RTK โดยอาศัยวิธีคาลมานฟิลเตอร์แบบปรับตัวได้และวิธีการทำนายแบบ SSA ในการประมาณสถานะแบบ 3 มิติ

6.1 การระบุพิกัดแบบ Network RTK ภายใต้พายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรง

เมื่อไม่นานมานี้ ความสนใจวิธี RTK (real-time kinematic) แบบเครือข่ายของ GPS เพื่อการระบุพิกัดแบบเคลื่อนที่ ยังคงเพิ่มขึ้นสำหรับผู้ใช้งาน GPS ที่ต้องการการระบุพิกัดแบบเคลื่อนที่ที่แม่นยำแบบเรียลไทม์บนระยะทางที่ไกลมากขึ้น โดยการระบุพิกัด RTK แบบเครือข่ายนั้นอนุญาตให้มีความแม่นยำระดับ cm สำหรับการระบุพิกัดแบบเคลื่อนที่ระหว่างเครื่องรับของผู้ใช้ (rover) กับสถานีฐานที่ใกล้ที่สุด ระยะทางที่ติดต่อดังกล่าวสามารถที่จะทำได้เกินกว่า 100 กิโลเมตรแล้ว ในวิธีการที่อาศัยเครือข่าย RTK นี้ การระบุพิกัดที่แม่นยำอาจจะกระทำได้เมื่อเทียบกับสถานีอ้างอิงเพียงจุดเดียวหรือหลายจุดก็ได้ ที่ซึ่งใช้ค่าปรับแก้ค่าเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ (ionospheric delay correction) หรือทางเรขาคณิตที่ได้จากเครือข่าย ทั้งนี้ ในงานวิจัยนี้ ค่าปรับแก้ค่าเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ จะเรียกสั้น ๆ ว่า “ค่าปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์” ประเด็นที่สำคัญต่อการระบุพิกัด GNSS แบบเคลื่อนที่ที่แม่นยำก็คือค่า ambiguity resolution (AR) ที่เป็นจำนวนเต็ม โดยมี 2 วิธีที่นิยมใช้งานกัน โดยส่วนใหญ่ต่อ AR ในโหมดเคลื่อนที่ คือ on-the-fly (OTF) และ instantaneous โดยวิธี instantaneous นั้นเป็นวิธีแบบ single-epoch nature ซึ่งเป็นวิธีที่ยากและทำหายมาก อีกทั้งไม่มีข้อมูลอะไรเลยที่สามารถได้รับจากข้อมูลที่สะสมหรือได้รับก่อนหน้านี้ เนื่องจากสถานการณ์ของการสังเกตแต่ละครั้ง (epoch) จะอิสระต่อกันและต้องการค่า AR ใหม่ค่าหนึ่งจากการสังเกตสถานการณ์ที่เกิดขึ้นในขณะนั้นเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ข้อดีของวิธีนี้ก็คือค่า ambiguities ที่ตรวจจับได้ที่ไม่ถูกต้องหรือไซเคิลสลิป (cycle slip) จะไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการแก้ปัญหาในสถานการณ์ต่อไป ในระยะทางที่สั้น (ประมาณ 10 km ที่ขึ้นอยู่กับสภาวะชั้นไอโอโนสเฟียร์) การปฏิบัติที่ง่ายที่สุดคือการไม่พิจารณาผลกระทบต่อชั้นไอโอโนสเฟียร์ แต่ในระยะทางที่ไกลขึ้น ความแตกต่างของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่แปรเปลี่ยนตามเวลา (differential) จะมีค่าที่มากขึ้นและอาจจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการ AR หรือแม้กระทั่งส่งผลให้ระบบใช้งานไม่ได้ ดังนั้น การลดผลกระทบของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่แปรเปลี่ยนตามเวลาก็คือขั้นตอนที่สำคัญมากที่สุดสำหรับการปรับปรุง AR และนำไปสู่การระบุพิกัดแบบเคลื่อนที่ในระยะทางปานกลางและไกลที่แม่นยำได้ ในเครือข่าย GPS ค่าที่มากที่สุดที่อัลกอริทึมการจำลองระบบสำหรับค่าความผิดพลาดจากชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ขึ้นกับระยะทางนั้นจะถูกสมมติว่า “ค่าความผิดพลาดเหล่านี้สามารถจะถูกประมาณหาค่าได้แบบเชิงเส้น” กล่าวคือ ความยาวคลื่นเชิงระยะทางเหล่านี้มีค่ามากกว่าระยะห่างระหว่างสถานีในเครือข่าย GPS มาก อย่างไรก็ตาม การสมมติดังกล่าวอาจจะไม่จริงเมื่อมีพายุแม่เหล็กโลกในระหว่างการเกิดขึ้นของ MS-TIDs (medium-scale traveling ionospheric disturbances) โดยทั่วไป MS-TIDs จะถูกบ่งบอกคุณลักษณะในช่วง เวลาที่เกิดขึ้นทั่วไปประมาณ 10 - 60 min และมีความยาวคลื่นประมาณ 100 - 1,000 km สถานการณ์ที่รุนแรงดังกล่าวทำให้เกิดค่าความผิดพลาดชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เร็วต่อการปรับแก้ค่าความผิดพลาดชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบเครือข่ายได้ ที่ผ่านมาห้องปฏิบัติการ SPIN ที่มหาวิทยาลัย OSU ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความแม่นยำในการปรับแก้ค่าชั้นไอโอโนสเฟียร์อยู่แล้วและอิทธิพลของค่าเหล่านี้ที่มีต่อ AR แบบ OTF และ instantaneous ใน RTK แบบเครือข่ายภายใต้สภาวะชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เสียบ พายุแม่เหล็กโลกที่เกิดขึ้นในวันที่ 29 - 31 ตุลาคม 2546 เป็นพายุที่รุนแรงลูกหนึ่งของโลก ซึ่งเป็นโอกาสที่ดีในการขยายการวิเคราะห์และการศึกษาความแม่นยำในการปรับแก้ค่าชั้นไอโอโนสเฟียร์สำหรับวิธี RTK แบบเครือข่ายในระหว่างสภาวะชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีพายุและอิทธิพลของสภาวะที่รุนแรงเหล่านั้นที่มีต่อ AR บนระยะทางที่ไกล นอกจากนี้ พบว่า สมรรถนะของ AR ในระยะห่างระหว่างสถานีฐานและผู้ใช้จากระดับปานกลาง (หลายสิบกิโลเมตร) ภายในสภาวะชั้นไอโอโนสเฟียร์ถูกรบกวน (มีพายุแม่เหล็กโลก) และ ionospheric tomography ถูกนำมาช่วยทำให้ AR เกิดขึ้นในระยะทางที่ไกลขึ้นภายใต้ K_p เท่ากับ 6 ได้ แต่ก็

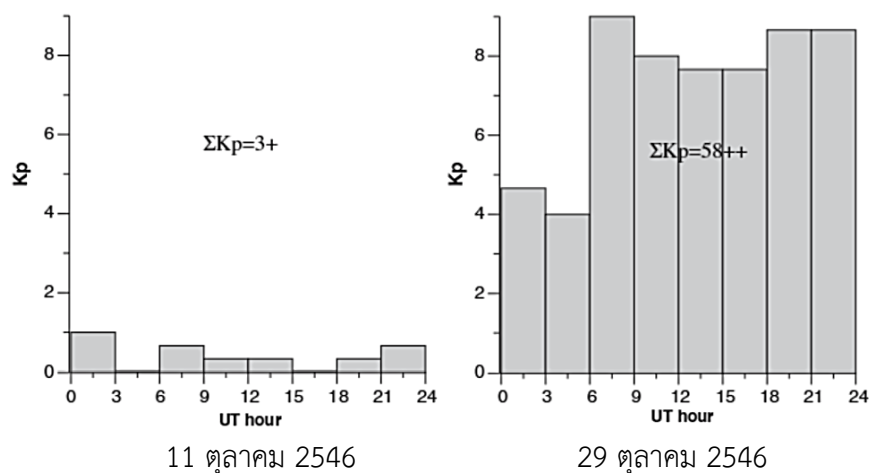
ไม่ได้ศึกษาเวลาที่ใช้ในการแก้ ambiguities ที่เกิดขึ้น ดังนั้น Wielgosz และคณะ [7] จึงได้ทำการศึกษาเครือข่ายการระบุพิกัดแบบ RTK ระยะไกล (ไม่ต่ำกว่า 100 km) ภายใต้สภาวะชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ถูกรบกวนรุนแรง (ดัชนี Kp มากที่สุดเท่ากับ 9) ในวันที่ 29-31 ตุลาคม 2546 โดยจะลดผลกระทบของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เลวร้ายดังกล่าวโดยอาศัย “ค่าปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์ถูกประมาณค่าได้ที่เครือข่ายอ้างอิงและถูกส่งไปยังผู้ใช้งาน” ระยะทางเฉลี่ยระหว่างสถานีอ้างอิงมีค่าประมาณ 200 km ที่สอดคล้องกับเครือข่าย CORS ของ U.S. ที่บริหารโดย NGS (National Geodetic Survey)

การวางตำแหน่งดาวเทียมและการนำทางแบบเฉื่อย (SPIN) ห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยรัฐโอไฮโอ (OSU) ได้ศึกษาความแม่นยำในการแก้ไขไอโอโนสเฟียร์และอิทธิพลของมันต่อระบบ AR ในเครือข่าย RTK ในสภาพไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรงดังกล่าว พายุสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่รุนแรงในวันที่ 29 - 31 ตุลาคม 2546 เป็นโอกาสที่ดีในการขยายการวิเคราะห์และศึกษาความแม่นยำในการแก้ไขไอโอโนสเฟียร์ของเครือข่าย RTK ในช่วงสภาพไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรงและผลกระทบต่อ AR ในระยะทางที่ยาวขึ้น นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของ AR จากสถานีอ้างอิงไปยังเครื่องรับ GNSS ที่ระยะทางปานกลาง (10 km) ภายใต้สภาวะสนามแม่เหล็กและไอโอโนสเฟียร์ที่รบกวน อย่างไรก็ตาม การวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่ระยะทางที่ยาวนานกว่า 100 km และภายใต้ชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรงที่สุด (สภาวะสูงสุด Kp เท่ากับ 9) นอกจากนี้ มีการประยุกต์ใช้ ionospheric tomography เพื่อช่วย AR ในระยะทางที่ยาวกว่า Kp เท่ากับ 6 แต่ไม่ได้รายงานเวลาที่ใช้ในการแก้ไขความกำกวม

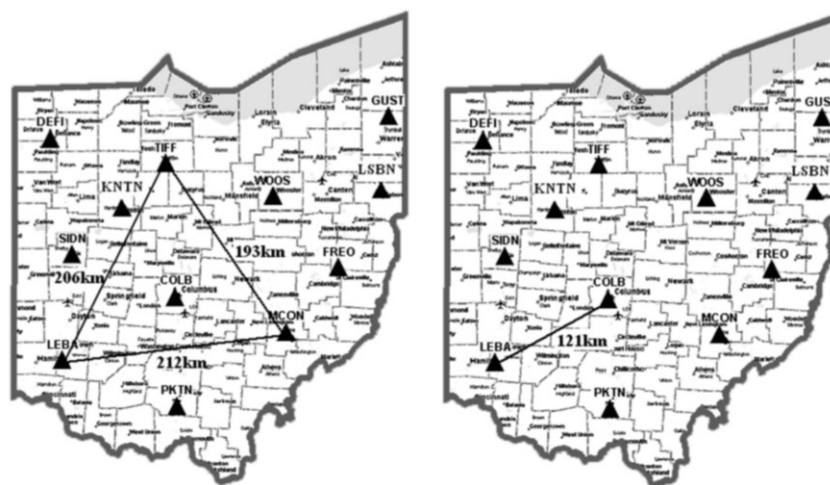
การทดสอบทั้งหมดที่น่าเสนอได้ดำเนินการโดยใช้ซอฟต์แวร์ประมวลผล GPS แบบบอเนกประสงค์ (MPGPS™) โดยซอฟต์แวร์ MPGPS™ ได้รับการพัฒนาที่ห้องปฏิบัติการ OSU SPIN โดยซอฟต์แวร์นี้ประกอบด้วยโมดูลการประมวลผลหลายแบบ ได้แก่ แบบกระตุ้นหัน/OTF RTK (เครือข่าย RTK), การวางตำแหน่งจุดที่แม่นยำ (PPP), DGPS แบบเดี่ยวและหลายสถานี, การจำลองและแผนที่ไอโอโนสเฟียร์, และการจำลองโทรโปสเฟียร์ ซอฟต์แวร์นี้ทำงานในโหมดคงที่, คงที่แบบเร็ว, kinematic และแบบกระตุ้นหัน และสามารถนำเสนอแนวทางการแก้ปัญหาในเครือข่ายและในโหมดเบสไลน์ ในระหว่างที่เกิดพายุไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรงในระหว่างวันที่ 29-31 ตุลาคม 2546 ดัชนี Kp มีค่าเข้าใกล้ค่าสูงสุดเท่ากับ 9 หลายครั้ง (รูปที่ 6.1) โดยดัชนี Kp เป็นตัวชี้วัดของกิจกรรมทางธรณีวิทยาทั่วโลกและคำนวณทุกๆ 3 ชั่วโมง (www.sec.noaa.gov) วันที่มีการรบกวนสูงที่สุดในปี 2546 คือวันที่ 29 ตุลาคม ($\Sigma Kp = 58+$) ข้อมูลที่รวบรวมในวันนั้นได้รับการคัดเลือกเพื่อการประมวลผลเพื่อวิเคราะห์ความแม่นยำในการปรับแก้ไอโอโนสเฟียร์ในช่วงพายุไอโอโนสเฟียร์รุนแรง ในทางกลับกัน วันที่ 11 ตุลาคม 2546 เป็นวันที่เงียบที่สุดในช่วงเดือนนั้น ($Kp = 1; \Sigma Kp = 3+$), และข้อมูลที่รวบรวมไว้ในวันนั้นได้ถูกนำมาใช้ที่นี่เพื่อจัดหาแนวทางแก้ไขปัญหอ้างอิง โดยดัชนี Kp เท่ากับ 5 ขึ้นไปจนถึงพายุแม่เหล็กโลกระดับปานกลาง (moderate) หรือระดับ G2 ขึ้นไป

เพื่อทดสอบความแม่นยำในการปรับแก้ไอโอโนสเฟียร์จากเครือข่าย มีการเลือกเครือข่ายย่อยของสถานี Ohio CORS ซึ่งรวมถึงสถานี LEBA, TIFF และ MCON (รูปที่ 6.2) โดยมีค่าเฉลี่ยการแยกสถานี ~200 km นอกจากนี้ สถานี COLB ได้รับการคัดเลือกให้เป็นเครื่องรับสำหรับการทดสอบ AR และเป็นสถานีติดตามการวิเคราะห์คุณสมบัติการปรับแก้ไอโอโนสเฟียร์ ระยะทางระหว่างเครื่องรับและสถานีอ้างอิงที่ใกล้ที่สุดคือ 121 km สถานีทั้งหมดได้รับการติดตั้งเครื่องรับ Trimble 5700 และรวบรวมรหัสความถี่คู่และข้อมูลเฟสพาหะที่มีอัตราการสุ่มตัวอย่าง 30 วินาที การวิเคราะห์นี้ใช้ช่วงเวลา 24 ชั่วโมงสองช่วงที่รวบรวมในวันที่ 11 และ 29 ตุลาคม พ.ศ.

2546 (วันที่เจียบสงบและมีพาย) เพื่อให้ได้มาซึ่งการปรับแก้ไอโอโนสเฟียร์ ควรสังเกตว่าวงโคจรที่แม่นยำของ International GNSS Service (IGS) ถูกใช้สำหรับการประมวลผล



รูปที่ 6.1 ดัชนีของ Kp ของวันที่ 11 และ 29 ตุลาคม 2546



รูปที่ 6.2 ตำแหน่งสถานีอ้างอิงของเครือข่าย (ด้านขวา) และการวิเคราะห์เบสไลน์ (ด้านซ้าย) ในรัฐโอไฮโอ

2.3 การปรับปรุงค่าปรับแก้ไอโอโนสเฟียร์ให้มีความแม่นยำมากขึ้นสำหรับการระบุพิกัดแบบ RTK

ในหัวข้อนี้เป็นการยกตัวอย่างอัลกอริทึมที่ใช้ในการปรับแก้ค่าเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ให้มีความแม่นยำมากขึ้นสำหรับการระบุพิกัดแบบ RTK โดยมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

ขั้นตอนแรก ข้อมูล GPS จากสถานีอ้างอิงทั้ง 3 แห่งถูกนำมาใช้ในการประเมินการปรับแก้ไอโอโนสเฟียร์ โดยใช้วิธีการที่สรุปต่อไปนี้เป็น อัลกอริทึมเครือข่าย RTK ใช้ค่าข้อมูลที่วัดได้จากเฟสคลื่นพาห์และรหัสของความถี่สองค่าที่ประมาณค่าได้และปรับแก้ (fix) ความกำกวมเฟสคลื่นพาห์ที่เกิดขึ้นได้แล้ว โดยเราจะรู้ค่าพิกัดของสถานีอ้างอิง

ที่ถาวรแน่นอน ซึ่งทำให้ AR มีความง่ายมากขึ้นในการหาค่าในเครือข่ายอ้างอิงดังกล่าว แม้กระทั่งจะมีระยะทางที่ไกลขึ้นประมาณ 200 km ห่างจากสถานี CORS แล้วก็ตาม วิธีปรับแก้ความกำกวมที่ใช้ในที่นี้เป็นวิธี LAMBDA (Least-squares ambiguity Decorrelation Adjustment) และใช้ค่า W-ratio สำหรับการยืนยันความถูกต้องของการเลือกค่าจำนวนเต็ม หลังจากหาค่าความกำกวมแบบจำนวนเต็มหาค่าได้แล้วสำหรับเครือข่าย RTK ทั้งหมด ค่าเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบผลต่างสองเท่า (DDID) ก็จะถูกหาค่าออกมาได้ด้วยวิธีคอมบิเนชันเชิงเส้นที่ไม่ขึ้นกับเรขาคณิต (GFLC) ของการวัดเฟสคลื่นพาดังสมการที่ (6.1)

$$I_{ij}^{kl} = (-L_{ij,4}^{kl} + \lambda_1 N_{1,ij}^{kl} - \lambda_2 N_{2,ij}^{kl}) / \xi_4 \quad (6.1)$$

เมื่อค่าพารามิเตอร์และตัวแปรต่าง ๆ ในสมการที่ (6.1) นิยามไว้ในบล็อคลี่เหลี่ยมข้างล่างนี้

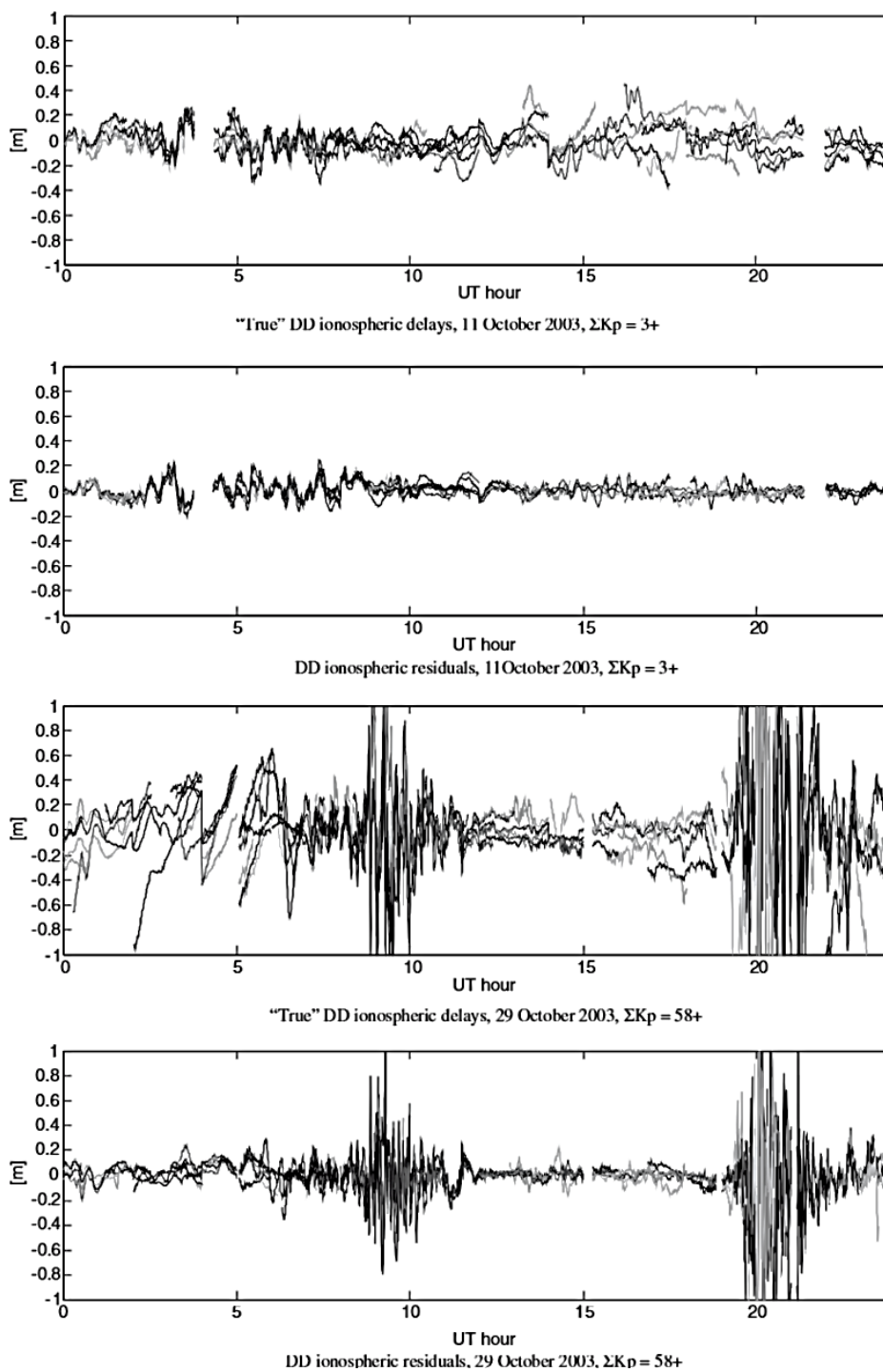
$$\begin{aligned} \xi_4 &\approx -0.647 - \text{scaling factor,} \\ i, j &- \text{station indexes,} \\ k, l &- \text{satellite indexes,} \\ \lambda_1, \lambda_2 &- \text{GPS wavelengths on } L_1 \text{ and } L_2 \\ &\text{signal frequencies,} \\ N_{1,ij}^{kl}, N_{2,ij}^{kl} &- \text{DD carrier phase ambiguities on } L_1 \text{ and } \\ &L_2 \text{ signal frequencies.} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (6.1) สามารถเห็นได้ว่า ถ้าพารามิเตอร์ความกำกวม, $N_{1,ij}^{kl}$ และ $N_{2,ij}^{kl}$ ได้ถูกปรับแก้จนเป็นจำนวนเต็ม เราก็จะเหลือพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าเพียงตัวเดียวคือ I_{ij}^{kl} ที่เป็นตัวแทนของค่าเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบ DD ของสัญญาณ L1 (หน่วย: เมตร) ที่สามารถหาค่าได้ด้วยความแม่นยำแค่ไม่กี่มิลลิเมตร ค่า DDID ได้ถูกประมาณค่าได้สำหรับเบสไลน์ที่เชื่อมต่อกับสถานีอ้างอิงแล้วถูกแยกเป็นส่วน ๆ ของค่า biased undifferenced ionospheric delays (ค่า BUID) โดยค่า BUID ที่ได้จากวิธีนี้จะถูกประมาณค่าแบบเชิงเส้นไปสู่ตำแหน่งของผู้ใช้โดยประมาณ แล้วค่า DDIDs จะถูกสร้างขึ้นสำหรับเบสไลน์ที่ใช้ทดสอบ (COLB-LEBA) ในระหว่างที่หาผลต่างนี้ เทอมของค่า BUID จะถูกหักล้างออกไป

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการแก้ปัญหาที่สถานีอ้างอิงโดยอาศัยข้อมูลจากสถานีอ้างอิงและโรเวอร์ ในกรณีนี้ เบสไลน์ทุกเส้นทางที่ติดต่อกับโรเวอร์จะถูกประมวลผลทั้งหมดและค่า DDID ที่แท้จริงก็ถูกหาค่าออกมาได้ โดยใช้ค่าความกำกวมที่ปรับแก้แล้วและ GFLC ของการวัดเฟสคลื่นพาด ต่อมา ค่า DDID สำหรับเครือข่าย RTK ที่หาค่าได้จากขั้นตอนที่ 1 จะถูกเปรียบเทียบกับค่า DDID ที่แท้จริงในสภาวะพายุแม่เหล็กโลกต่าง ๆ รูปที่ 6.2 แสดงค่า DDID ของสัญญาณ L1 สำหรับวันที่เจียบและวันที่เกิดพายุ รวมถึงผลต่างระหว่างค่า DDID ที่ได้จากเครือข่าย RTK สำหรับเบสไลน์ COLB-LEBA (121 km) กับค่า DDID ที่แท้จริง (คือ ความผิดพลาดในการระบุพิกัด RTK)

ผลจากการวิเคราะห์รูปที่ 6.3 แสดงให้เห็นว่า ในวันที่เจียบสงบ ค่า DDID ที่แท้จริงมีค่าไม่เกิน 30 - 40 ซม. (3.2% ของค่าเวลาประวิงที่ปรับแก้ตั้งในรูปที่ 6.4 บน) โดยในบางกรณี อาจจะมีค่าที่เกินกว่า 200 ซม. เราสามารถที่จะแยกช่วงเวลาที่พายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ออกได้เป็น 2 ช่วงเวลาที่ชัดเจนอันเนื่องมาจากค่า DDID ที่สูงมาก ครั้งแรกเริ่มต้นที่เวลาประมาณ 08:50 UT และครั้งที่ 2 เริ่มต้นที่เวลาประมาณ 19:40 UT โดยช่วงเวลาที่พายุแสดงความไม่เท่ากันของความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงมากและเกิดขึ้นนานประมาณ 1 ชั่วโมงในแต่ละครั้ง ซึ่ง

เป็นการแนะนำการเกิดขึ้นของ MS-TIDs ที่มีแอมพลิจูดที่สูง ซึ่งผลดังกล่าวสามารถที่จะลดความแม่นยำของค่า DDID ของเครือข่าย RTK ได้



รูปที่ 6.3 ค่า DDID ที่แท้จริงและค่าผลต่างของ DDID ที่เกิดขึ้นในวันที่เงียบและวันที่เกิดพายุ

(top)	COLB-LEBA (121 km)			
	0–20 cm	20–50 cm	50–100 cm	>100 cm
11 October 2003	93.0%	7.0%	0.0%	0.0%
29 October 2003	67.4%	23.6%	5.8%	3.2%

(bottom)	COLB-LEBA (121 km)	
	±10 cm	±5 cm
11 October 2003	92.2%	71.4%
29 October 2003	74.4%	52.5%

รูปที่ 6.4 ค่าสัมบูรณ์ของค่า DDID ที่แท้จริง (รูปบน) และ ค่าผลต่างของ DDID เมื่อเทียบกับค่าจริงของสถานีอ้างอิงตามระยะทางที่เลือก (รูปล่าง) ภายในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง

ในระหว่าง 2 ช่วงเวลาดังกล่าว ค่าที่มากที่สุดของ DDID มีค่าเข้าใกล้ 230 cm ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้ตอนเจียบโดยเฉลี่ยเกือบถึง 6 เท่า เพียงแค่ 74.4% ของค่าผลต่าง DDID ที่ได้จากเครือข่ายจะมีค่าอยู่ภายในช่วง ± 10 cm (รูปที่ 6.4 ล่าง) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าวันที่เจียบสงบ $\sim 20\%$ ในระหว่าง 2 ช่วงเวลาที่มีการรบกวนมากที่สุดในวันที่เกิดพายุดังกล่าว ค่าความแม่นยำในการปรับแก้ต่ำมาก และในบางกรณี ค่าผลต่างอาจจะมีค่าสูงถึงประมาณ 1 เมตร เนื่องจากการมีความไม่เท่ากันของความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่สูงและระยะห่างที่มาก ระหว่างสถานีอ้างอิงกับโรเวอร์ (121 km) โดยวิธี planar interpolation ไม่สามารถให้ความแม่นยำที่เพียงพอในการปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้ ดังนั้น มันจึงถูกคาดหวังไว้ว่า “ค่าผลต่างที่สูงดังกล่าวสามารถที่จะป้องกัน AR ที่เวลาขณะใดขณะหนึ่ง (instantaneous AR) ได้และอาจช่วยแก้ปัญหา OTF AR ได้”

เทคนิค instantaneous AR (IAR) นั้นสามารถกระทำได้ด้วยวิธี Generalized Least Squares (GLS) ที่มีอยู่ในซอฟต์แวร์ MPGPS™ พบว่า “เงื่อนไขค่าปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ระยะ 5-10 cm สำหรับค่า DDID ที่นำมาใช้สามารถที่จะให้อัตราความสำเร็จ (success rate หรือ SR) ที่สูงสุดของเทคนิค IAR ได้” ในที่นี้ SR หมายถึงอัตราส่วนของจำนวน epochs ที่แก้ปัญหาได้อย่างถูกต้องกับจำนวนของ epochs ที่ถูกประมวลผลทั้งหมด ในวันที่เจียบนั้น ค่า SR ที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค IAR นั้นจะมีสูงกว่า 94% แต่พออยู่ในช่วงที่มีพายุ ค่า SR จะลดลงอย่างรวดเร็วเหลือเพียงแค่ 31% เท่านั้น ในความเป็นจริง เทคนิค IAR สามารถที่จะปรับแก้ความกำกวมได้สำเร็จที่ตอนเริ่มต้นของการเกิดพายุเท่านั้น โดยความแม่นยำของวิธี DDIC นั้นยังให้ผลเป็นที่น่าพอใจ สรุปได้ว่าเทคนิค IAR เป็นวิธีที่ยังใช้ไม่ได้ผลเมื่อเกิดพายุที่รุนแรงดังกล่าวและระยะทางของเบสไลน์มีค่าเกินกว่า 100 km ใน single-baseline mode

ส่วน**เทคนิค OTF AR** ได้ถูกทดสอบโดยใช้ชุดข้อมูลที่มีนานกว่า 2 ชั่วโมงจำนวน 2 ชุดข้อมูลและเบสไลน์ 121 km (COLB-LEBA) ได้ถูกประมวลผล โดยจำนวนของ epochs ที่วัดได้ที่ต้องการในการปรับแก้ค่ากำกวม (time-to-fix) และค่า AR SR ทั้งหมด (ที่ได้นิยามก่อนหน้านี้) วิธี OTF AR ที่มีอยู่ในซอฟต์แวร์ MPGPS™ นั้นต้องการช่วงเวลาทีวัดอย่างน้อยที่สุดจำนวน 3 ครั้งเพื่อที่จะยืนยันค่ากำกวมที่คำนวณได้ แม้ว่าค่ากำกวมอาจจะถูกปรับแก้ได้สำเร็จตั้งแต่ครั้งแรกแล้วก็ตาม การทดสอบได้ถูกกระทำขึ้นดังนี้ ข้อมูลได้ถูกประมวลผล จนกระทั่งค่าความกำกวมได้ถูกปรับแก้และถูกยืนยันความถูกต้อง แล้วจำนวนของครั้งที่เข้าไปในการประมวลผลจะค่อยๆถูกนับ การประมวลผลได้ถูกเริ่มต้นใหม่ทุก ๆ ระยะเวลา 5 นาที (10 epochs) แล้วคำตอบจำนวน 24 ค่าจะถูกหาค่าได้

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

ทุกระยะเวลา 2 ชั่วโมง การเริ่มต้นการทำงานใหม่ทุก ๆ 5 นาทีจะส่งผลดีทำให้การแชมปลั๊กมีคุณภาพการปรับแก้ที่ต่างกันไปในแต่ละครั้ง ทำให้มีความเชื่อถือได้ในการระบุพิกัด RTK

ข้อมูลในช่วงเวลาที่เจียบจะถูกประมวลผลด้วยเงื่อนไขบังคับสโตแคสติก 10 cm ที่ถูกกำหนดไปบนค่า DDIC ที่อาศัยเครือข่าย RTK แล้วค่ากำกวมทั้งหมด (แต่ละค่าของคำตอบ 24 ค่า) จะถูกปรับแก้โดยใช้ค่าที่ต่ำที่สุดที่ต้องการจำนวน 3 epochs แล้วให้ค่า AR SR เท่ากับ 100% สิ่งนี้เป็นผลการวิจัยที่ยืนยันถึงสมรรถนะที่ดีของเทคนิค OTF AR ภายใต้สภาวะที่เจียบและสภาวะที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก

ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้ภายใต้ช่วงเวลาที่เกิดพายุได้ถูกประมวลผลโดยใช้เงื่อนไขทดสอบที่ต่างกันของค่า DDICs การทดลองแรกใช้เงื่อนไขทดสอบระยะ 10 ซม. ในช่วงที่เจียบสงบ พบว่า วิธี OTF AR สามารถที่จะให้ค่าปรับแก้ชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่รวดเร็ว (เพียง 3 epochs) เหมือนกับวิธี IAR แต่เมื่อมีพายุที่รุนแรงที่สุดเกิดขึ้น วิธี OTF AR ต้องการปรับแก้ค่ากำกวมเพิ่มสูงขึ้นถึง 35 epochs (17.5 นาที) พบว่า การปรับแก้ความกำกวมโดยเฉลี่ยจำเป็นต้องใช้ 14 epochs ในช่วงเวลาที่เกิดพายุและใช้เงื่อนไขทดสอบระยะ 10 ซม. ผลการศึกษาเหล่านี้จะคิดว่า “เงื่อนไขทดสอบระยะ 10 ซม. น่าจะเหมาะกับสภาวะที่เจียบ แต่น่าจะไม่เหมาะกับสภาวะที่เกิดพายุ หลังจากนั้นก็ได้ทำการทดสอบเพิ่มเติมด้วยเงื่อนไขทดสอบระยะ 20 ซม. กับ 40 ซม. สำหรับสภาวะที่เกิดพายุ พบว่า เงื่อนไขทดสอบระยะ 40 ซม. นั้นเป็นผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยมี epoch ของการสังเกตที่มากที่สุดจำนวน 19 epochs และมีค่าเฉลี่ยประมาณแค่ 7 epochs ก็เพียงพอต่อการได้รับค่าการปรับแก้ความกำกวมที่ถูกต้องตามที่ต้องการ

6.2 วิธี Network RTK ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์เชิงเส้น [8]

วิธี Network RTK (หรือ NRTK) ที่นำเสนอในโครงการศึกษา นี้จะศึกษาผลกระทบของ PDOP ที่มีต่อสมรรถนะของคาลมานฟิลเตอร์สำหรับการระบุพิกัดแบบเรียลไทม์ที่อาศัย GNSS พร้อมทั้งเปรียบเทียบพิกัดจริงที่ได้จาก NRTK (เครือข่าย CORS ของประเทศไทย) และพิกัดที่ไม่มีมีการปรับแก้และไม่ได้ใช้คาลมานฟิลเตอร์ (โดยใช้แนวทางการจำลองระบบเช่นเดียวกับงานวิจัย [8])

GNSS เป็นระบบที่มีส่วนช่วยเหลือการนำทางที่สำคัญระบบหนึ่งสำหรับเทคโนโลยี 5G โดรน UAV ยานพาหนะที่ทันสมัยบนพื้นโลกและและอวกาศ อุปกรณ์ที่ใช้เครือข่ายมือถือ 5G ดาวเทียมและยานพาหนะต่าง ๆ ประกอบไปด้วยเครื่องรับ GNSS สำหรับการนำทางแบบเรียลไทม์ (RTK) โดยความแม่นยำของการประมาณพิกัดโดยใช้การวัดสัญญาณ GNSS นั้นขึ้นอยู่กับเรขาคณิตของดาวเทียม GNSS ที่ใช้งานอยู่ โดย Position Dilution of Precision (PDOP) มักถูกใช้งานบ่อยครั้งในการหาค่าความแม่นยำของพิกัด (ตำแหน่ง) ที่ต้องการโดยใช้การประมาณกำลังสองน้อยที่สุด หรือ LSE สำหรับเซตของการวัดค่า GNSS ที่ใช้งาน อย่างไรก็ตาม สำหรับยานพาหนะอวกาศหรืออุปกรณ์เทคโนโลยี 5G ที่มีความเร็วและความแรงที่มากระดับหนึ่ง การคำนวณโดยใช้ LSE ไม่ได้เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดของอัลกอริทึมการประมาณค่า โดยทั่วไป คาลมานฟิลเตอร์ถูกใช้ในการผสมผสานระหว่างข่าวสารของความเป็นพลวัตของอุปกรณ์เหล่านั้นกับการวัดค่า GNSS เพื่อที่จะคำนวณค่าประมาณพิกัดที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น

ที่ผ่านมา คาลมานฟิลเตอร์หลายชนิดได้ถูกนำมาใช้งาน < เช่น Extended Kalman Filter (EKF), Unscented Kalman Filter (UKF) ฯลฯ > อย่างแพร่หลายในการประมาณตำแหน่งดาวเทียม ซึ่งถึงแม้ว่าในสภาวะพลวัตไม่เชิงเส้นที่สูง Unscented Kalman Filter (UKF) ได้ให้ความแม่นยำในการระบุพิกัดมากกว่าวิธี EKF ถึงแม้ว่าพลวัตดาวเทียมเป็นแบบไม่เชิงเส้น แต่วิธี UKF ก็ไม่ได้ปรับปรุงความแม่นยำในการประมาณพิกัดมากนัก แต่สำหรับการประมาณพิกัดยานพาหนะที่ปล่อยออกไป พบว่า UKF ได้ให้ความแม่นยำในการประมาณพิกัด

ดังกล่าวได้ดีกว่า EKF อย่างเห็นชัด สำหรับสมรรถนะของวิธี UKF นั้น จะแบ่งอัลกอริทึมการประมาณพิกัดที่มีการนำเสนอใหม่ 2 วิธีเรียกว่า วิธี SPUKF (single propagation unscented Kalman filter) กับวิธี ESPUKF (extrapolated single propagation unscented Kalman filter) โดย UKF สำหรับปัญหาการประมาณทิศทางเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่ปล่อยออกไปโดยใช้การวัดค่าสัญญาณ GNSS ได้ถูกเปรียบเทียบกัน พบว่า อัตราส่วนของความผิดพลาดของตำแหน่งที่คำนวณได้จากคาลมานฟิลเตอร์และตำแหน่งที่ทำนายได้โดยใช้ PDOP เปลี่ยนแปลงตามจำนวนของดาวเทียมนำทางที่ใช้ในการประมาณพิกัด การแปรผันของอัตราส่วนนี้ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6.5 ซึ่งในรูปที่ 6.5 อัตราส่วนความผิดพลาดพิกัดถูกนิยามได้จากสมการที่ (6.2)

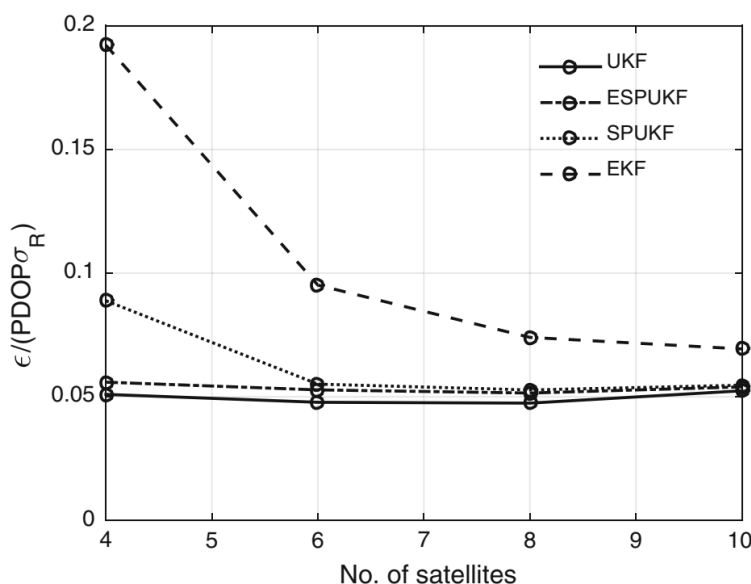
$$\text{Position error ratio} = \frac{\epsilon}{\text{PDOP} \times \sigma_R} \quad (6.2)$$

เมื่อ ϵ เป็นความผิดพลาดพิกัดโดยเฉลี่ย และ σ_R เป็นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนที่ได้จากวัดสัญญาณ GNSS โดยเมทริกซ์ DOP สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$\mathbf{G} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \quad (6.3)$$

เมื่อ \mathbf{H} เป็นจาโคเบียนการวัด และ PDOP นิยามได้ดังนี้

$$\text{PDOP} = \sqrt{G_{11} + G_{22} + G_{33}} \quad (6.4)$$



รูปที่ 6.5 อัตราส่วนความผิดพลาดพิกัดที่เป็นฟังก์ชันของจำนวนดาวเทียมนำทาง

ถ้าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของพิกัดที่ประมาณค่าโดยใช้ LSE ถูกแทนด้วย σ_{LSE} แล้ว $\sigma_{LSE} = \text{PDOP} \sigma_R$ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสำหรับวิธี LSE นั้น อัตราส่วนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของพิกัดกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนนั้นสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นตามค่า PDOP รูปที่ 6.5 แสดงให้เห็นว่า “สำหรับอัลกอริทึมที่อาศัยคาลมานฟิลเตอร์นั้น ความสัมพันธ์นี้ไม่ค่อยสมเหตุสมผลนัก เราจึงวางเป้าหมายเพื่อที่จะบรรยายผลลัพธ์ก่อนหน้า

นี้ในเชิงทฤษฎีโดยการสร้างความสัมพันธ์เชิงวิเคราะห์ระหว่าง PDOP และอัตราส่วนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของพิกัดที่ประมาณค่าได้ด้วยกาลมานฟิลเตอร์กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนจากการวัด

สมการที่สัมพันธ์กับ PDOP และอัตราส่วนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของพิกัดที่ประมาณค่าได้ด้วยกาลมานฟิลเตอร์และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการวัดถูกสร้างขึ้นโดยใช้สมการอัตราขยายกาลมานและสมการการอัปเดตความแปรปรวนร่วม สมการเหล่านี้ได้ถูกพิสูจน์ความถูกต้องโดยใช้ปัญหาการประมาณทิศทาง การเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่ปล่อยออกไปในอวกาศ การพิสูจน์ความถูกต้องเพิ่มเติม ปัญหาการประมาณพิกัดดาวเทียมที่วงโคจรโลกต่ำโดยใช้การวัด GNSS ได้ถูกนำมาใช้เป็นแนวทางของการพิจารณา Network RTK ที่นำเสนอในโครงการศึกษา นี้ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากกรณีดังกล่าวนี้ยังสนับสนุนสมการที่สร้างขึ้นด้วย ในที่นี้ หัวข้อต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องและใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีใหม่ที่น่าเสนอเปรียบเทียบกับพิกัดจริงที่ได้จาก NRTK มีดังนี้

- 1) ทำการสร้างชุดสมการของปัญหาและสร้างความสัมพันธ์ระหว่างวิธี EKF และ UKF - เริ่มต้นจากการพิจารณาพลวัตของยานพาหนะที่เคลื่อนที่อยู่สามารถถูกนิยามได้ด้วยสมการอนุพันธ์สโตแคสติกไม่เป็นเชิงเส้น
- 2) สร้างสมการอัปเดตกาลมานฟิลเตอร์เพื่อใช้ในการปรับค่าความผิดพลาดจากการระบุพิกัดแบบเรียลไทม์
- 3) สร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตำแหน่งและ PDOP สำหรับวิธี EKF (Extended Kalman Filter)
- 4) สร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตำแหน่งและ PDOP สำหรับวิธี UKF (Unscented Kalman Filter)

การเซตอัปเดตการทดลองสำหรับวิธี Network-RTK

a) การประมาณทิศทางเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่ปล่อยออกไป - พลวัตของยานพาหนะสามารถที่จะอธิบายได้โดยการเลือกปริมาณต่อไปนี้เป็นตัวแปรสถานะ ได้แก่

1. ระยะทางที่ห่างกัน
2. ความสูง
3. ความเร็วในทิศทางเคลื่อนที่ของยานพาหนะ
4. มุมเส้นทางของการบิน
5. อัตราการไหลของมวลแก๊สที่เผาผลาญ
6. สัมประสิทธิ์แอร์ไดนามิก

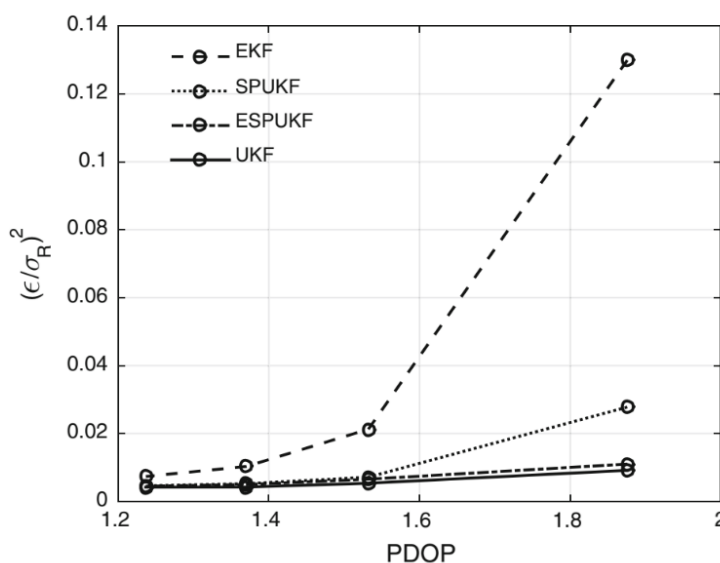
b) การประมาณตำแหน่งดาวเทียม LEO - ตำแหน่งและความเร็วของดาวเทียม LEO ในเฟรม ECI (Earth-Centered Inertial), ค่าไบอัสสัญญาณนาฬิกาเครื่องรับ GNSS และค่าไบอัสระหว่างระบบระหว่าง GPS กับ Galileo ได้ถูกเลือกเป็นตัวแปรสถานะที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของดาวเทียม LEO และพลวัตสัญญาณนาฬิกาเครื่องรับ GNSS

ผลการศึกษาวิธี Network RTK

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้นจาก ทิศทางการเคลื่อนที่ (trajectory) ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีเครื่องรับ GNSS ได้แก่ โทรศัพท์มือถือ 5G, โดรน, UAV ฯลฯ ได้ถูกประมาณค่าโดยใช้วิธี EKF และ UKF เนื่องจากพลวัตสูงของยานพาหนะ มันอาจจะเป็นไปได้สำหรับเครื่องรับ GNSS ที่จะได้รับสัญญาณ GNSS ที่ทุก ๆ ช่องสัญญาณที่มีอยู่ตลอดเส้นทางการเคลื่อนที่ ซึ่งก่อให้เกิดค่า PDOP ที่มาก เพื่อที่จะตรวจสอบสมรรถนะของอัลกอริทึมการประมาณ

ในสภาวะ PDOP ค่าต่าง ๆ การทดลองการประมาณค่าจะกระทำขึ้นสำหรับฟิลเตอร์ทุกตัวโดยการจำกัดจำนวนดาวเทียมนำทางเท่ากับ 4, 6, 8 และ 10 โดยจำนวนดาวเทียมนำทางจะถูกเลือกแบบสุ่ม กระบวนการจะวนทำซ้ำทุก ๆ 200 ครั้งด้วยสัญญาณรบกวนแบบสุ่มที่ต่างกันเพื่อที่จะทดสอบการทำงานที่ดีของฟิลเตอร์ ค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดพิกัดที่เฉลี่ยทางเวลาจากการรัน 200 ครั้งถูกพิจารณาเพื่อที่จะคำนวณอัตราส่วนความผิดพลาดพิกัดด้วยสมการที่ (33) และพล็อตกราฟดังในรูปที่ 6.5 สำหรับจำนวนดาวเทียมที่ต่างกัน

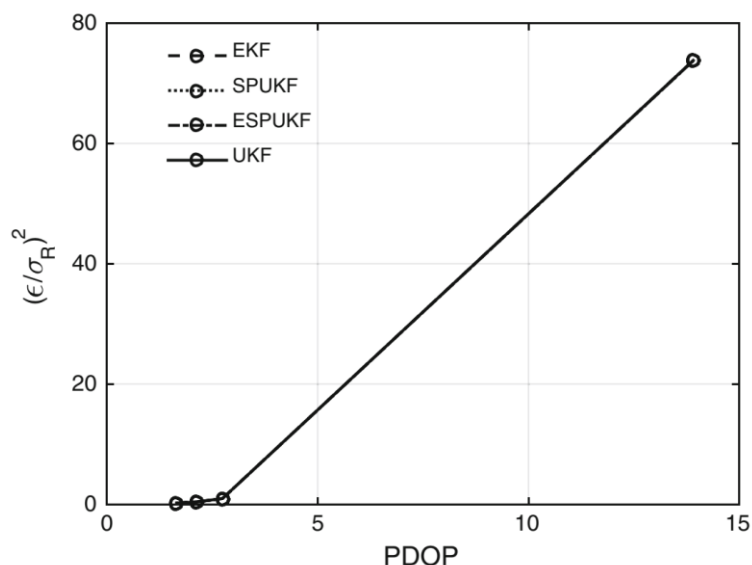
ขั้นตอนที่ 2 เราจะพิจารณาค่า PDOP ที่เป็นฟังก์ชันของ $(\epsilon/\sigma_R)^2$ พบว่า ค่า PDOP ไม่ได้เปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นตามจำนวนของดาวเทียม GNSS อย่างไรก็ตาม ค่า PDOP มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนดาวเทียม GNSS สำหรับค่า PDOP เฉลี่ยที่เกี่ยวข้อง ค่าของ $(\epsilon/\sigma_R)^2$ เฉลี่ยที่ได้รับจากอัลกอริทึมการประมาณที่ต่างกันจะถูกพล็อตกราฟในรูปที่ 6.6 พบว่า ทั้ง 4 วิธีของ PDOP เมื่อเทียบกับค่า $(\epsilon/\sigma_R)^2$ เฉลี่ยจะแสดงตัวเป็นกราฟไฮเปอร์โบลิกโดยประมาณ ความผิดพลาดในการระบุพิกัดของวิธี EKF สูงกว่าอีก 3 วิธีที่เหลือนมากสำหรับค่า PDOP ที่สูง และวิธี UKF จะให้ค่าความผิดพลาดในการระบุพิกัดที่ต่ำที่สุด กล่าวคือ เมื่อจำนวนดาวเทียมนำทางมีค่าที่น้อยลง ด้วยค่า PDOP ที่ลดลง ผลต่างของความผิดพลาดในการระบุพิกัดของคาลมานฟิลเตอร์ก็ลดลงด้วย



รูปที่ 6.6 ค่า PDOP ที่เป็นฟังก์ชันของ $(\epsilon/\sigma_R)^2$ ของการใช้คาลมานฟิลเตอร์ในวิธีต่าง ๆ กัน

ขั้นตอนที่ 3 พิจารณาค่า PDOP ที่เป็นฟังก์ชันของ $(\epsilon/\sigma_R)^2$ สำหรับดาวเทียมนำทาง LEO - จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่า ค่า PDOP สามารถที่จะมีค่าที่มากเท่ากับ 15 ได้ ขึ้นกับจำนวนของดาวเทียม GNSS ที่รับสัญญาณได้ ค่า PDOP เฉลี่ยเมื่อเทียบกับค่า $(\epsilon/\sigma_R)^2$ เฉลี่ยสำหรับ 4 วิธีที่น่าเสนอของดาวเทียม LEO ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6.7 พบว่า คุณสมบัติเฉพาะของกราฟทั้งหมดเป็นแบบไฮเปอร์โบลิก ซึ่งเป็นการยืนยันความถูกต้องของความสัมพันธ์ทางทฤษฎีระหว่างคาลมานฟิลเตอร์กับค่า PDOP ซึ่งกราฟทั้งหมดสำหรับอัลกอริทึมการประมาณที่ต่างกันจะคล้ายกันและกันสำหรับการประมาณพิกัดด้วยดาวเทียม LEO สิ่งนี้เป็นไปตามที่คาดหวังไว้เนื่องจากรายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

ความแตกต่างกันในค่าความผิดพลาดที่ประมาณได้สำหรับวิธี EKF และวิธีอื่น ๆ ของ UKF ต่างกันเพียง 2-3 cm เท่านั้นในระหว่างพลวัตของดาวเทียม LEO แบบไม่เชิงเส้น



รูปที่ 6.7 ค่า PDOP ที่เป็นฟังก์ชันของ $(\epsilon/\sigma_R)^2$ สำหรับดาวเทียมนำทาง LEO

คำบรรยายแนะนำ Dilution of Precision (DOP) มีดังนี้

การหาค่า dilution of precision (DOP) ของเครื่องรับ GNSS สามารถอธิบายได้โดยใช้เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม (covariance matrix) โดยที่ $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$ คือค่าความแปรปรวนในตำแหน่งของแกน x, y, z และ σ_t^2 คือค่าความแปรปรวนของเวลา ดังนั้น เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของพิกัดเครื่องรับ GNSS หาค่าได้จากสมการที่ (6.5)

$$\text{cov} \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \\ \delta_t \end{bmatrix} = \sigma_o^2 (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} = \sigma_o^2 \mathbf{G} \quad (6.5)$$

ในที่นี้ เราสามารถเขียนแจกแจงให้อยู่ในรูปของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ ได้ดังนี้

$$\sigma_o^2 \mathbf{H} = \sigma_o^2 \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} & \sigma_{xdt} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} & \sigma_{ydt} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z^2 & \sigma_{zdt} \\ \sigma_{dtx} & \sigma_{dty} & \sigma_{dtz} & \sigma_{dt}^2 \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

ค่า DOP นั้นถูกนำมาใช้เพื่อบ่งบอกลักษณะ (โครงสร้าง) ทางเรขาคณิตระหว่างตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณ GNSS กับตำแหน่งของดาวเทียมแต่ละระบบ GNSS โดย DOP แบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท ดังนี้

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

1. VDOP (vertical dilution of precision) - ค่าความเจือจางของความแม่นยำในแนวตั้ง
2. HDOP (horizontal dilution of precision) - ค่าความเจือจางของความแม่นยำในแนวราบ
3. PDOP (position dilution of precision) - ค่าความเจือจางของความแม่นยำในแนวตั้งและแนวราบ
4. TDOP (time dilution of precision) - ค่าความเจือจางของความแม่นยำในทางเวลา
5. GDOP (geometrical dilution of precision) - ค่าความเจือจางของความแม่นยำในแนวตั้ง แนวราบ

และเวลา

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่า DOP แต่ละประเภท - พิจารณาต่อจากสมการที่ (6.5) กับ (6.6) ได้ดังนี้

$$\text{VDOP} = \sqrt{G_{33}} \quad (6.7)$$

$$\text{HDOP} = \sqrt{G_{11} + G_{22}} \quad (6.8)$$

$$\text{PDOP} = \sqrt{G_{11} + G_{22} + G_{33}} \quad (6.9)$$

$$\text{GDOP} = \sqrt{G_{11} + G_{22} + G_{33} + G_{44}} \quad (6.10)$$

$$\text{TDOP} = \sqrt{G_{44}} \quad (6.11)$$

ในโครงการศึกษาฯ นี้ จะนำข้อมูลนำทางของระบบ GNSS มาคำนวณหาค่า PDOP พร้อมกับรับค่าปรับแก้จากเครือข่าย CORS ของประเทศไทย (Network RTK หรือ NRTK) เพื่อนำมาวิเคราะห์ช่วงเวลาที่มีค่า PDOP มีค่าสูง ซึ่งส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการระบุพิกัดของเครื่องรับ GNSS ณ ช่วงเวลานั้นได้ หลังจากนั้นเราจะคำนวณพิกัดและค่าความผิดพลาดของเครื่องรับ GNSS โดยนำข้อมูลที่ได้อ่านมาคำนวณพิกัดเครื่องรับ GNSS และเปรียบเทียบกับตำแหน่งจริงของเครื่องรับ GNSS ในแกน x, y, z เพื่อหาค่าความผิดพลาดในการระบุพิกัด ณ ขณะนั้น หลังจากนั้น เราพิจารณาพิจารณาผลกระทบของ PDOP ที่มีต่อสมรรถนะของคาลมานฟิลเตอร์สำหรับการประมาณพิกัดแบบเรียลไทม์ (RTK) ที่อาศัย GNSS เมื่อค่า PDOP มีการเปลี่ยนแปลง โดยวิธีนี้ได้ถูกคาดหวังไว้ว่า “PDOP จะบ่งชี้ความแม่นยำที่เป็นไปได้ของการวัด GNSS โดยอาศัยวิธีการประมาณกำลังสองน้อยที่สุด (LSE)” การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีที่น่าเสนอนี้จะอธิบายและบ่งบอกคุณลักษณะของคาลมานฟิลเตอร์ ผลการทดลองจะชี้ให้เห็นถึงสมรรถนะของคาลมานฟิลเตอร์ในสถานะที่ PDOP มีค่าที่สูง **ขั้นตอนการวิจัยและทดสอบมีดังนี้**

1. พัฒนาสมการเชิงวิเคราะห์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PDOP กับ KF
2. ประเมินสมรรถนะการทำงาน Network RTK โดยใช้การประมาณค่ากำลังสองน้อยที่สุด (least square estimation) หรือวิธีการอื่น ๆ
3. ตรวจสอบสมรรถนะของคาลมานฟิลเตอร์ในสถานะที่ PDOP มีค่าสูง
4. วิเคราะห์การปรับปรุงความแม่นยำในการระบุพิกัดเหนือภูมิภาคประเทศไทย

ในขณะนี้ มีความเป็นไปได้ที่จะได้รับพิกัดตรงจุดใดก็ได้ที่ถูกต้องและแม่นยำเพียงไม่กี่วินาทีโดยอาศัยเทคโนโลยี GNSS วิธี RTK (real-time kinematic) ที่ใช้เทคนิค GNSS แบบดิฟเฟอเรนเชียลนั้นอาศัยหลักการของเครือข่ายและให้บริการการวัดค่าที่เร็วและใช้งานได้ บางวิธีเพื่อที่จะได้รับพิกัดที่ถูกต้องและแม่นยำก็ต้องอาศัย long base RTK (LBRK) และ precise point positioning RTK (PPP-RTK) จากการที่มีการปรับแก้วงโคจรดาวเทียมและสัญญาณนาฬิกา การให้บริการ PPP จำนวนมากยังคงที่ได้รับพัฒนาขึ้นเรื่อย ๆ และ PPP-RTK เป็นประเภทหนึ่งของการให้บริการที่กล่าวถึงดังกล่าว ในวิธี PPP-RTK นั้น ข้อมูลของเครื่องรับ GNSS ตัวเดียวได้ถูกประเมินโดยใช้ค่าปรับแก้ที่ต่างกัน (เช่น วงโคจรและสัญญาณนาฬิกาดาวเทียมที่แม่นยำ เวลาประวิงชั้นไอโอโนส

เพียร์ และค่าไบอัสเฟสดาวเทียม) เพื่อที่คำนวณพิกัดของเครื่องรับ GNSS ที่มีความแม่นยำระดับ cm การแก้ปัญหา AR อย่างรวดเร็วและอย่างมีประสิทธิภาพมีความสำคัญอย่างมากสำหรับเทคนิค PPP-RTK และวิธีต่าง ๆ ที่ยังพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาย่างต่อเนื่อง เวลาการปัญหาที่นานของ AR เป็นปัญหาหนึ่งสำหรับการใช้เทคนิค PPP-RTK ในการใช้งานแบบเรียลไทม์ที่ต้องการความแม่นยำสูง

ในทางกลับกัน จากการใช้ LBRTK และ NRTK, ความยาวพื้นฐาน 3-5 km สามารถที่จะถูกขยายไปถึง 100 km ด้วยเวลาการวัดที่สั้น การส่งข้อมูล LBRTK แบบเรียลไทม์ถูกทำขึ้นตามเครื่องรับ rover และค่าปรับแก้ทั้งหมดถูกคำนวณจากหนึ่งสถานี ส่วน NRTK จะติดต่อแบบเรียลไทม์กับศูนย์กลางควบคุมของเครือข่ายสถานีอยู่กับที่และปรับแก้การส่งค่าข้อมูลแบบเรียลไทม์กับเครื่องรับ rover ซึ่งถูกกระทำขึ้นด้วยการหาค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการแก้ปัญหา (ที่เป็นคำตอบ) อาทิ VRS (virtual reference stations), MAC (master auxiliary concept), PRS (pseudo reference stations), และ FKP (Flächenkorrekturparameter)

สำหรับระยะทางที่สั้น (ประมาณ 10 km ที่ขึ้นอยู่กับสถานะชั้นไอโอโนสเฟียร์) ไปจนถึง 10 km นั้น การใช้งานในทางปฏิบัติทั่วไปจะไม่สนใจผลกระทบชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้ สำหรับเหตุผลนี้ การลดผลกระทบชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลนั้นเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากที่สุดประการหนึ่งในการปรับปรุงค่า AR ซึ่งก็นำไปสู่การระบุพิกัด RTK ที่แม่นยำในระยะปานกลางและไกลได้ สำหรับเครือข่าย GNSS หลายระบบดาวเทียมนั้น อัลกอริทึมของการสร้างแบบจำลองส่วนใหญ่ในความผิดพลาดชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ขึ้นอยู่กับระยะทางได้ถูกยอมรับ ราวกับว่า “ค่าความผิดพลาดเหล่านี้จะถูกประมาณเป็นเชิงเส้นแล้ว หรืออาจจะกล่าวได้ ความยาวคลื่นเชิงระยะทางของพวกมันมีค่าที่มากกว่าระยะห่างของสถานีเครือข่าย โดย AR เป็นเงื่อนไขบังคับที่สำคัญตัวหนึ่งในเวลาการหาค่าตอบของ NRTK สำหรับระยะทางที่ยาวขึ้น ค่าผลต่างชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลจะมีค่าที่สูงขึ้นและอาจจะขัดขวางกระบวนการ AR (หรือบางครั้งอาจจะทำให้ใช้งานไม่ได้เลยก็มี)

เป้าหมายของการศึกษานี้เป็นการเปรียบเทียบพิกัดที่ได้รับจากเทคนิค LBRTK, NRTK และการวัด GNSS แบบอยู่กับที่นาน ๆ โดยการวัดแบบ LBRTK นั้นจะถูกทำขึ้นโดยขึ้นอยู่กับสถานี AFKU และการวัดแบบ NRTK จะถูกทำขึ้นโดยอาศัยเครือข่าย CORS (Continuously Operating Reference Stations) ของประเทศไทยได้ โดยเนื้อหาและวิธีการที่ใช้ในการปรับปรุงวิธี RTK แบบเดิม มีดังนี้

1) วิธี RTK - วิธีการวัด GNSS ที่เคลื่อนที่แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ วิธี RTK แบบเดิม และ วิธี NRTK (network RTK) โดยวิธี RTK แบบเดิมประกอบไปด้วยอุปกรณ์ 2 ตัวคือสถานีฐานกับสถานีโรเวอร์ ค่าปรับแก้ที่ถูกได้รับที่สถานีฐานนั้นจะถูกส่งไปยังสถานีโรเวอร์ด้วยการใช้ radio modems ปัญหาที่ใหญ่ที่สุดของระบบนี้คือค่าปรับแก้ RTK ที่จำกัดระยะทางการโอนย้ายได้ภายในระยะทาง 5-10 km เนื่องจากกำลังส่งจำกัดของ radio modems ดังนั้นเพื่อที่กำจัดความบกพร่องของระบบนี้ สถานี GNSS แบบตายตัว (fixed) ที่จัดให้มีการโอนย้ายค่าข้อมูลต่อเนื่องผ่านทาง GSM modems (แทนที่ radio modems) จึงได้ถูกสร้างขึ้น เครือข่ายเหล่านี้จึงถูกเรียกว่า CORSs (Continuously Operating Reference Stations) หรือ network RTK ถึงแม้ว่าสถานี CORS ยังคงถูกใช้งานสำหรับวัตถุประสงค์ของ NRTK มันก็เป็นไปได้ที่นำไปใช้กับ LBRTK จุดประสงค์พื้นฐานของการสร้างเครือข่าย NRTK GNSS (CORS) ก็คือต้องการกำจัดความผิดพลาดที่ต่างกันที่ขึ้นกับระยะทาง (เช่น เวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์กับชั้นโทรโปสเฟียร์, วงโคจร ฯลฯ) และต้องการที่จะส่งค่าปรับแก้ไปในระยะทางที่ไกลขึ้นแบบเรียลไทม์ ระบบนี้ประกอบไปด้วยสถานีที่แน่นอนตั้งแต่ 3 แห่งขึ้นไปทำการวัดค่าข้อมูลอย่างต่อเนื่อง NRTK จะเอื้อต่อการแก้ปัญหา AR โดยจะ fix ค่าที่คำนวณจำนวนเต็มที่ได้มาจากสถานีเครื่องรับอ้างอิงที่อยู่กับที่จำนวนมาก

(CORSS) ด้วยพิกัดที่รู้แน่นอน เพื่อที่จะสร้างเครือข่ายขึ้นมา ระยะห่างของสถานีอ้างอิงถูกจำกัดที่มีค่าน้อยกว่า 100km สำหรับการหาค่า AR ที่เร็วและถูกต้อง เมื่อตัวนับสถานีเพิ่มขึ้น ค่าปรับแก้ก็จะหาค่าได้สำเร็จ คำตอบที่หาค่าได้จากค่าปรับแก้จำนวนมากนั้นได้มีการใช้งานในตอนนี้แล้ว เช่น VRS, MAC, PRS, และ FKP โดยเทคนิค VRS เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและนิยมนำมาใช้งานมากที่สุดในตอนนี้สำหรับการส่งค่าปรับแก้ผ่านดาต้าลิงค์ไปยังผู้ใช้งาน (โรเวอร์) สำหรับการระบุพิกัดแบบเรียลไทม์ RTK

	Traditional RTK	Long base RTK	Network RTK
Reduces startup costs to purchase an RTK system	Low	Low	High
Quickly setup and start surveying	Slow	Fast	Fast
License fee for UHF radios	Yes	No	No
Fee for communications	No	Yes	Yes
Distance to base	5-10 km	50-100 km	50-100 km
Distance-dependent errors	High	Investigated in this study	Low

รูปที่ 6.8 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของการใช้งานวิธี RTK ทั้ง 3 วิธี

ข้อเสียที่ใหญ่ที่สุดของ NRTK คือค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์จำนวนมากและสร้าง fixed stations ตั้งแต่ 3 สถานีขึ้นไปในระบบ ข้อเสีย 2 ประการดังกล่าวนี้จึงเป็นต้นเหตุให้เกิดเทคนิคใหม่ขึ้นมา เช่น วิธี LBRTK ที่มีการใช้งาน GSM modems แทน radio modems ที่ถูกนำมาใช้ในวิธี RTK แบบเดิม จึงทำให้ระยะทางระหว่างสถานีฐานกับสถานีโรเวอร์เพิ่มขึ้นประมาณ 100 km ได้ เนื่องจากระบบ CORSSs ต้องการค่าธรรมเนียมในการใช้งาน ดังนั้น LBRTK จึงเป็นวิธีที่ประหยัดและมีประโยชน์ แต่ต้องมีสถานี LBRTK จำนวนมากน้อยในประเทศไทย (ในตุรกี มี 100 สถานีที่ถูกสร้างขึ้น) ซึ่งถูกสร้างขึ้นสำหรับกิจกรรม mapping และ deformation monitoring โดยไม่มีค่าใช้จ่ายเกิดขึ้น การเปรียบเทียบคุณลักษณะของการใช้งานวิธี RTK ทั้ง 3 วิธีมีแสดงไว้ในรูปที่ 6.8

2) ค่าความผิดพลาดของวิธี RTK – ความแม่นยำการระบุพิกัด GNSS ขึ้นกับปัจจัย 5 ประการดังนี้

- 1) เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ (ionospheric error)
- 2) เวลาประวิงชั้นโทรโปสเฟียร์ (tropospheric error)
- 3) สิ่งกีดขวางสัญญาณและมลพิษ
- 4) โครงสร้างทางเรขาคณิต (การวางตัว) ของดาวเทียม
- 5) ค่าความผิดพลาดอื่น ๆ

1) เวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ – การแพร่กระจายสัญญาณ GNSS ขึ้นกับสภาวะของชั้นไอโอโนสเฟียร์ กล่าวคือ ความผิดปกติที่รุนแรง และ/หรือ เกรตเดียนต์ของความหนาแน่นอิเล็กตรอนแล้วแต่เปลี่ยนพารามิเตอร์คลื่น GNSS ที่เดินทางอยู่ทั้งสิ้น ซินทิเลชั่นในชั้นไอโอโนสเฟียร์มีอิทธิพลอย่างมากต่อการแพร่กระจายคลื่นวิทยุและสมรรถนะระบบอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้น มันจึงมีการศึกษาผลกระทบดังกล่าวอย่างมากมาย อิทธิพลของซินทิเลชั่นที่มีต่อ GNSS จะเห็นได้ชัดเจนอย่างยิ่ง ซึ่งทำให้ GNSS เป็นตัวกลางประสิทธิภาพในการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของซินทิเลชั่น ซินทิเลชั่นในชั้นไอโอโนสเฟียร์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในการกระจายตัวเชิงระยะทางและเชิงเวลา

พายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ (solar radio bursts) ที่รุนแรงอาจจะขัดจังหวะการสื่อสาร GNSS ที่ระดับรุนแรงมากได้เนื่องจากสิ่งเหล่านี้เป็นแหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวนคลื่นวิทยุ พายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้ถูกบ่งชี้ด้วยค่าดัชนี Kp โดยดัชนี Kp นั้นถูกพิจารณาได้จากการคำนวณการเปลี่ยนแปลงที่ได้มาจากกิจกรรมสุริยะในสนามแม่เหล็กของโลกและพายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้วยสถานีวัดสนามแม่เหล็กจำนวน 13 แห่งทั่วโลก ถ้าดัชนี Kp มีค่าน้อย สนามแม่เหล็กโลกก็จะเสถียร ดัชนี Kp ถูกแบ่งสเกลเป็นระดับ 0-9 ถ้ามีค่าต่ำกว่า 2 สนามแม่เหล็กโลกมีความเสถียรมาก ถ้ามีค่าเท่ากับ 3 สนามแม่เหล็กโลกเริ่มไม่เสถียร และถ้ามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 4 สนามแม่เหล็กโลกอยู่ที่แอกทีฟหรือไม่เสถียร

2) เวลาประวิงชั้นโทรโปสเฟียร์ – สัญญาณ GNSS ได้รับผลกระทบในขณะที่แพร่กระจายผ่านชั้นโทรโปสเฟียร์ ชั้นโทรโปสเฟียร์ก่อให้เกิดเวลาประวิงกับสัญญาณ GNSS เมื่อเทียบกับความสูงที่ต่างกันเหนือระดับน้ำทะเล แต่เวลาประวิงชั้นโทรโปสเฟียร์ที่เกิดขึ้นทุก ๆ 1 cm เป็นต้นเหตุให้เกิดความผิดพลาดในการระบุพิกัด 3 cm ส่วนใหญ่ของเครื่องรับ GNSS มีแบบจำลองชั้นโทรโปสเฟียร์ที่จะลดผลกระทบของชั้นโทรโปสเฟียร์ ในการวัด RTK ถ้าเป็นไปได้นั้น สถานีฐานกับโรเวอร์ควรถูกเลือกให้อยู่ที่ระดับความสูงเดียวกันโดยประมาณเพื่อลดผลกระทบของชั้นโทรโปสเฟียร์ ในมาตรฐานการใช้งานระบุไว้ว่า “ผลกระทบของผลต่างความสูงได้ถูกจำกัดไว้ให้น้อยกว่า 300 เมตรที่การวัดสัญญาณ GNSS และผลต่างของมุมยกระหว่างพื้นที่ที่ในการทดสอบควรมีค่าที่น้อยกว่า 200 เมตร”

3) สิ่งกีดขวางสัญญาณและมัลติพาท – สิ่งกีดขวางสัญญาณนั้นเป็นตัวจำกัดการทำงานของสายอากาศ GNSS โดยมันจะบดบังจำนวนดาวเทียมที่มองเห็นได้ อีกทั้งมันยังอาจจะเพิ่มมัลติพาทสัญญาณได้อีกด้วย วัตถุที่เป็นโลหะ ทะเลและพื้นผิวที่สะท้อนต่าง ๆ สามารถที่จะเป็นสาเหตุการสะท้อนของสัญญาณและมีผลต่อเวลาในการเคลื่อนที่ของสัญญาณ สำหรับการวัดเฟสและการระบุพิกัดแบบ RTK นั้น ความผิดพลาดมัลติพาทมีค่าอยู่ระหว่าง 1 – 5 cm การติดตั้งสถานีในสถานะที่โล่งด้วยมุมมองเปิดของท้องฟ้าสามารถช่วยลดมัลติพาทได้นอกจากนี้ สายอากาศ GNSS ที่มีระนาบกรวดควรจะถูกนำมาใช้เพื่อช่วยในการลดมัลติพาท (ให้ต่ำสุด) ที่เกิดกับสถานีทั้งหมดได้

4) การวางตัวของดาวเทียม – การวางตัว (geometry) ของดาวเทียมสำหรับการวัดที่ถูกต่อนั้น การออกแบบ GNSS โดยทั่วไปกำหนดเพื่อ unaided code observation และเจาะจงกับพื้นที่ครอบคลุมบนโลกด้วยดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวงที่มุมยก 5 องศาและมองเห็นตลอดเวลา 99.9% สำหรับสัญญาณ GNSS ทั้งหมดในที่นี้ กำแพงบ้านและบริเวณที่มีต้นไม้จำนวนมากจะบดบังสัญญาณ GNSS ได้ ในการระบุพิกัด 3-D นั้น การวัดสัญญาณด้วยเฟสจะทำให้ดาวเทียมที่สังเกตได้ 4 ดวงนั้นง่ายขึ้น ดังนั้น ช่วงเวลาที่สั้นถูกตรวจจับได้ในกรณีการวัด RTK ไม่สามารถที่จะรับได้สำหรับระบบ GNSS แต่ละระบบ การผสมผสานกัน GPS/GLONASS ได้เพิ่มความเป็นไปได้ในการแก้ปัญหา RTK นอกจากนี้ โครงสร้างดาวเทียมที่ไม่ดี (การกระจายดาวเทียมในมุมมองของผู้สังเกตการณ์) ก็ส่งผลกระทบต่อค่า DOP (dilution of the precision) ที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่าง σ_r และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (σ^*) ที่ถูกอธิบายได้ด้วยค่าปริมาณสเกลาร์ (DOP) ดังนี้

$$\sigma^* = \text{DOP} \cdot \sigma_r \quad (6.12)$$

เงื่อนไขบังคับในสมการที่ (6.12) นี้มีสัญลักษณ์ที่ต่างกัน เช่น แนวนอน (H), แนวตั้ง (V) และการระบุพิกัด 3D (P) – DOP โดยองค์ประกอบในแนวนอนและแนวตั้งได้ถูกเก็บไว้ภายใต้หัวข้อของ PDOP เมื่อความ

ผิดพลาดในการระบุพิกัดเกิดขึ้นเนื่องจากการวางตัวของดาวเทียม เมื่อค่าของ PDOP มีค่าอยู่ระหว่าง 1 กับ 2 (confidence level) การวัดตำแหน่งดังกล่าวจะถือว่าใช้ได้

5) ปัจจัยอื่น ๆ – ข้อมูลดาวเทียมสำหรับค่าออฟเซตสัญญาณนาฬิกาและวงโคจรของดาวเทียมได้ถูกส่งมาในข่าวสารการนำทางสำหรับเครื่องรับ GNSS โดยออฟเซตสัญญาณนาฬิกามีค่าผิดพลาดประมาณ 10 ns ที่โรเวอร์ แต่ผลกระทบดังกล่าวก็ส่งผลต่อสถานีอ้างอิงเช่นกัน ในที่สุด ค่าความผิดพลาดนี้ก็ถูกหักล้างออกไปได้เมื่อค่าปรับแก้เครือข่ายถูกนำมาใช้งาน สำหรับสถานีอ้างอิงตัวเดียวที่มีระยะเบสไลน์ “r” และความผิดพลาดวงโคจรดาวเทียม “e₀” ที่ระยะทาง R ไปยังดาวเทียมจะให้ค่าความผิดพลาดค่าหนึ่งในพิกัดที่ประมาณได้ (ep) ด้วยสมการดังนี้

$$ep = e_0 * r/R, \quad (6.13)$$

ซึ่งอาจจะถูกหาค่าออกมาได้จาก Taylor expansion สำหรับวงโคจรที่ส่งออกมาที่ถูกใช้โดย RTK นั้น มันอาจจะถูกยอมรับที่ว่า ความผิดพลาดวงโคจรมีค่าเท่ากับ 2 เมตร ถ้าระยะทางระหว่างสถานีฐานและสถานีโรเวอร์มีค่า 50 – 100 km และ R = 20,000 km เราจะได้ค่าความผิดพลาดเท่ากับ 5 – 10 mm เนื่องจากวงโคจรดาวเทียม อย่างไรก็ตาม สำหรับ NRTK ที่มีสถานีฐานอย่างน้อย 3 สถานีและมีการประมาณตำแหน่งแบบเชิงเส้น ผลกระทบดังกล่าวจะถูกหักล้างออกไปในกรณีค่าอันดับที่ 1 และพิกัดที่ถูกประมาณค่าได้จะหาค่าได้ดังนี้

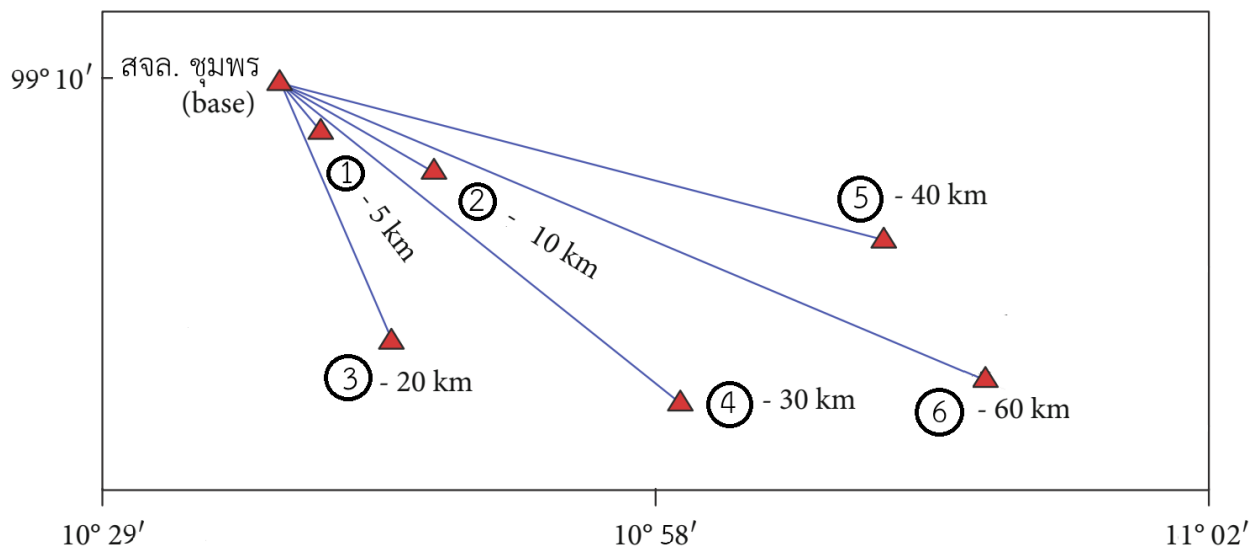
$$ep \approx e_0 * \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (6.14)$$

เมื่อคำนวณแล้ว พบว่า ep จะมีค่าประมาณ 0.1 mm ซึ่งเราจะสมมติว่าแหล่งกำหนดความผิดพลาดอันนี้มีค่าประมาณศูนย์

วิธีการทดสอบและใช้งาน Network RTK [9] มีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เซตอัพเครือข่ายทดสอบ (test network) - โดยเครือข่าย GNSS สามารถสร้างขึ้นได้โดยประกอบไปด้วยสถานีเครื่องรับ GNSS หลายสถานี ยกตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 6.9 เครือข่าย GNSS ประกอบไปด้วย 6 สถานี (สถานีลำดับที่ 1 – 6) รอบ ๆ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรฯ (สจล. ชุมพร) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Baybura และคณะ [9] โดยสถานีเหล่านี้ได้ถูกกำหนดขึ้นในตำแหน่งที่อยู่ห่างจากโรเวอร์ทดสอบ (objects) ที่จะบล็อกสัญญาณ GNSS ได้ แล้วนำไปสู่การสะท้อนสัญญาณได้ (อาคาร, ต้นไม้, ทะเล) โดยที่ตั้งแต่ละแห่งจะอยู่ห่างจาก สจล. ชุมพร ออกไปตั้งแต่ 5 – 60 km ซึ่ง สจล. ชุมพร เป็นสถานีฐาน LBRTK โดยการวัด NRTK นั้นจะถูกทำขึ้นโดยใช้เครือข่าย CORS ของประเทศไทยและใช้เทคนิค VRS

รูปที่ 6.9 แสดงที่ตั้งของสถานีเครื่องรับ GNSS ทั้งหมด 6 สถานีรอบ ๆ สถานีฐาน (สจล. ชุมพร) เพื่อทดสอบ NRTK โดยรูปที่ 6.9 นี้ปรับปรุงและแก้ไขมาจากเอกสารอ้างอิง [9] เพื่อนำเสนอความเป็นไปได้ในการใช้ NRTK สำหรับรองรับเครื่องรับ GNSS ในอุปกรณ์เทคโนโลยี 5G, โดรน, UAV เป็นต้น ในที่นี้ เราจะสมมติว่าเราจะติดตั้ง static survey เพื่อสร้างพิกัดสถานีฐานอ้างอิงไว้ที่ สจล. ชุมพร กับสถานีฐานหมายเลข 1



รูปที่ 6.9 ที่ตั้งของสถานีเครื่องรับ GNSS ทั้งหมด 6 สถานีรอบ ๆ สถานีฐาน (สจล. ชุมพร) เพื่อทดสอบ NRTK [9]

ขั้นตอนที่ 2 ทำการวัดค่าแบบสแตติกและวิเคราะห์ผลที่ได้รับ - ทำการวัดสัญญาณ GNSS แบบสแตติกที่วัดได้จากหน่วยงานกรมโยธาธิการและผังเมือง (Department of Public Works and Town & Country Planning) ประเทศไทย ในช่วงเวลาก่อนปี 2565 (ยกตัวอย่างเช่น ข้อมูล 3 ปี ตั้งแต่ปี 2562-2564) ถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณหาพิกัดของโรเวอร์ในเครือข่ายทดสอบ การสำรวจแบบสแตติกที่ถูกใช้งานในเครื่องรับ GPS แบบ PolaRxS ของ Septentrio การวัดค่าข้อมูลกระทำขึ้น 2 วันและใช้เวลา 8 ชั่วโมงต่อ 1 วัน และข้อมูลได้ถูกบันทึกทุก ๆ 30 วินาที ปัจจัยที่สำคัญมากที่สุดประการหนึ่งที่กระทบต่อความแม่นยำการระบุพิกัดในการใช้งานเทคนิค RTK คือความแม่นยำในการระบุพิกัดของสถานีฐาน ความผิดพลาดของพิกัดสถานีฐานจะส่งผลกระทบต่อตำแหน่งที่ตั้งอื่น ๆ ทั้งหมดที่ต้องคำนวณหาพิกัดที่ขึ้นอยู่กับสถานีฐานเช่นกัน

พิกัดถูกหาค่าได้โดยการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของแต่ละสถานีด้วยการวัด GNSS ที่นานระดับหนึ่ง พิกัดของ สจล. ชุมพร ซึ่งเป็นสถานีฐานแบบ LBRTK ถูกหาค่าได้จากการประเมินผลการวัดค่า GNSS ที่ทำมานานหลายปี (ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่แนะนำให้ใช้ค่าข้อมูลที่วัดได้ประมาณ 2.5 ปี) โดยในที่นี้ ข้อมูลจะถูกนำมาประมวลผลด้วย GAMIT เวอร์ชัน 10.5 ศูนย์กลางเฟสสายอากาศถูกหาค่าออกมาด้วยแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับความสูงเข้าสำรวจโคจรที่แม่นยำ (IGS-Final) ในฟอร์แมต SP3 ที่ต้องการสำหรับกระบวนการ GAMIT นั้นได้ถูกดาวน์โหลดได้จากฐานข้อมูล SOPAC (Scipps Orbit and Permanent Array Center) พารามิเตอร์การหมุนของโลก (ERPs) ถูกนำมาจาก USNO Bull. B (United States Naval Observatory Bulletin B) ส่วนในการวิเคราะห์สัญญาณนั้น สัญญาณ LC (L3) ซึ่งเป็นการผสมเชิงเส้นของคลื่นพาห์ L1 กับ L2 ที่ไม่ขึ้นกับชั้นไอโอโนสเฟียร์ ได้ถูกนำมาใช้งาน ตัว FES2004 OTL grid ได้ถูกนำมาใช้งานเพื่อประมาณองค์ประกอบ OTL จาก global grid โมดูล GAMIT สามารถประมาณพิกัด 3-D วงโคจรดาวเทียม เวลาประวิงเซนธิ์ชั้นบรรยากาศ และพารามิเตอร์การหมุนของโลก โดยใช้ค่าที่วัดได้จากระยะเสมือนและจากเฟสคลื่นพาห์ GLOBK ถูกใช้เพื่อที่จะประมาณความเร็วในเครือข่ายทดสอบ ในระหว่างการประมาณพิกัดของการแปลงพารามิเตอร์ 6 ตัวนั้น เงื่อนไขบังคับในรูปทั่วไปได้ถูกนำมาใช้

งาน และสถานีเครือข่าย IGS จำนวน 16 สถานีที่ถูกนำมาใช้สำหรับกระบวนการ stabilization ก็มีส่วนทำให้การหาค่าความเร็วของไซต์ต่าง ๆ ง่ายขึ้น พิกัดคาร์ทีเซียนและอนุกรมเวลาของไซต์ในเครือข่ายทดสอบก็จะถูกหาออกมาได้ที่ตอนสุดท้ายของกระบวนการ

ขั้นตอนที่ 3 ทำการวัดค่าและวิเคราะห์ LBRTK และ NRTK - การวัด LBRTK จะถูกวัดสมรรถนะเทียบกับสถานี สจล. ชุมพร ส่วนการวัด NRTK จะถูกวัดสมรรถนะเทียบกับเครือข่าย CORS-TH (เครือข่าย CORS ของประเทศไทย) โดยการวัดค่า LBRTK และ NRTK นั้นจะถูกวัดด้วยเครื่องมือ STONEX s9 ความแม่นยำ RTK GNSS โดยทั่วไปจะถูกกำหนดไว้ที่ 8 mm + 1 ppm ในแนวนอน และ 15 mm + 1 ppm ในแนวตั้ง การวัดค่า LBRTK และ NRTK นั้นจะถูกวัดที่ไซต์เครือข่ายทดสอบโดยอาศัย CORS-TH และสถานีฐาน สจล.ชุมพร เพื่อที่จะดูการทำซ้ำในแต่ละครั้ง (epoch repetition) ของการวัด LBRTK และ NRTK การวัดจำนวน 300 epoch ได้ถูกเก็บค่าข้อมูลที่แต่ละเซสชันที่ช่วงเวลา 1 วินาที ดังที่กล่าวถึงไว้ข้างต้น ปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อ การวัด RTK ก็คือค่า PDOP จากการคำนวณ พบว่า ค่า PDOP ที่ได้จากการวัดในวันและชั่วโมงที่ต่างกันได้แสดงให้เห็นว่ามีค่าน้อยกว่า 4 และมีค่าที่ไม่ต่างกันมากนัก พิจารณาความสามารถในการทำซ้ำของแต่ละการทดลอง (epoch repeatability) ของการวัด LBRTK และ NRTK การวัดจำนวน 300 epoch ได้ถูกเก็บค่าข้อมูลที่แต่ละเซสชันที่ช่วงเวลา 1 วินาที และผลต่างในค่าเฉลี่ยของการวัดเหล่านี้ได้ถูกหาค่าออกมา โดยค่าผลต่างเหล่านี้เห็นได้ชัดเจนจากผลที่วัดได้ที่ (สถานีที่ 1 – 5 km) ที่อยู่ใกล้ที่สุด และ (สถานีที่ 6 – 60 km) ที่อยู่ไกลที่สุด เมื่อเทียบกับสถานี สจล. ชุมพร

อ้างอิงผลการศึกษาใน [9] พบว่า ค่าเฉลี่ยของผลต่างดังกล่าวมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 1-2 cm ในแนวนอน และเท่ากับ 3-4 cm ในแนวตั้ง สำหรับการทดลองวัดค่าซ้ำในแต่ละวัน ค่าที่วัดได้ในวันแรกจะถูกใช้เป็นค่าอ้างอิง ทั้ง 2 ระบบ และผลต่างระหว่างวันอื่น ๆ ก็จะถูกคำนวณออกมา เมื่อการทดลองทำซ้ำในแต่ละวันของทั้ง 2 ระบบ ได้ถูกตรวจสอบ มันได้ถูกตรวจสอบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ ± 1.5 cm ในการวัดที่เกิดขึ้นในทิศเหนือและทิศตะวันออก การทำซ้ำนี้มีค่าเปลี่ยนแปลงภายในช่วงที่มากที่สุดประมาณ ± 4 cm ในองค์ประกอบ "Up" ในการทดสอบความแม่นยำของระบบ ความแตกต่างของพิกัดระหว่าง LBRTK และ NRTK ได้ถูกคำนวณ และพิกัดก็จะถูกหาค่าออกมาได้ในผลการวัดแบบหยุดนิ่ง นอกจากนี้ หลังจากที่ได้ศึกษาความแตกต่างระหว่างวิธี LBRTK และ NRTK ที่แต่ละไซต์ทดสอบแล้ว พบว่า พิกัดที่ได้รับจากการวัดจำนวน 300 epoch ที่ไซต์ต่าง ๆ จะมีค่าต่างกัน 1-2 cm ในแนวนอนและเท่ากับ 3-4 cm ในแนวตั้ง (รูปที่ 6.8) ซึ่งผลลัพธ์เหล่านี้ชี้ให้เห็นว่า “ระบบการวัดทั้งสองจะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไม่เกิน 3-4 cm เมื่อพิจารณาการทดลองวัดค่าซ้ำในแต่ละวันของวิธี LBRTK และ NRTK พบว่า มันได้ถูกตรวจสอบว่ามีการเปลี่ยนแปลงในแนวนอนที่มากที่สุดเท่ากับ ± 2.5 cm และมีการเปลี่ยนแปลงในแนวตั้งที่มากที่สุดเท่ากับ ± 3 cm ในขณะที่ ผลต่างมีค่าน้อยกว่า 1 cm สำหรับองค์ประกอบ “East” และผลต่างเหล่านี้มีค่าประมาณ ± 2.3 cm สำหรับองค์ประกอบ “North”

นอกจากนี้ จากการพิจารณาความผิดพลาดของการระบุพิกัดด้วยวิธี LBRTK และ NRTK ในองค์ประกอบ (N,E,U) พบว่า การเปลี่ยนแปลงประมาณ 2.5 cm และ 3.5 cm ในองค์ประกอบแนวนอนและแนวตั้งภายในระยะห่างของแต่ละไซต์ไม่เกิน 50 km หลังจาก 50 km ไปแล้ว พบว่า วิธี NRTK จะยังไม่เปลี่ยนแปลง แต่วิธี LBRTK จะมีค่าค่าเบี่ยงเบนอยู่ที่ประมาณ 8-10 cm เมื่อพิจารณาผลต่างของพิกัดที่ได้รับในแต่ละปี พบว่า ค่าผลต่างดังกล่าวมีค่าประมาณ 2.2 cm และ 3.8 cm ในองค์ประกอบแนวนอนและแนวตั้ง ตามลำดับ หลังจาก 50 km ไปแล้ว พบว่า องค์ประกอบแนวนอนมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่มาก แต่องค์ประกอบแนวตั้งมีค่าเบี่ยงเบน 5.5 cm นอกจากนี้ ค่าผลต่างของพิกัดระหว่างการวัดสแตติคของของวิธี LBRTK และ NRTK ที่ระยะห่าง 10 km

(สถานีที่ 2) พบว่ามีค่าประมาณ 2.7 cm ในทางตรงข้าม ที่ระยะห่างออกไป 20 km (สถานีที่ 3) ผลต่างของพิกัดระหว่างการวัดสแตติกของทั้ง 2 วิธีมีค่าสูงสุดประมาณ 1.7 cm ส่วนไฮด์ที่ 4 ที่ห่าง 30 km (ประมาณตรงกลางของเครือข่ายทดสอบ) พบว่า ค่าดังกล่าวมีค่าเข้าใกล้ 2 cm สำหรับไฮด์ที่ 5 (40 km) ผลต่างระหว่างวิธี LBRTK-static มีค่าน้อยกว่า 2 cm และผลต่างระหว่างวิธี NRTK-static มีค่าเกินกว่า 3 cm ส่วนไฮด์ที่ 6 (60 km) ผลต่างระหว่างวิธี LBRTK-static และผลต่างระหว่างวิธี NRTK-static มีค่าน้อยกว่า 4.5 cm และ 3 cm ตามลำดับ

6.3 วิธี Network RTK ร่วมกับการพิจารณา PDOP และกาลมานฟิลเตอร์เชิงเส้น (วิธีใหม่ที่นำเสนอ)

จากปัญหาที่พบในวิธี Network RTK (เครือข่าย CORS) จึงทำให้คณะผู้วิจัยมีแนวความคิดที่จะนำเสนอวิธีการใหม่ที่ใช้ในการปรับปรุงวิธี RTK ที่ใช้วิธี network RTK ร่วมกับการพิจารณาฟิลเตอร์เชิงเส้นเพื่อกำจัดดาวเทียมที่มีผลต่อการระบุพิกัดที่แม่นยำโดยอาศัยค่า PDOP (position dilution of positioning) โดยเราพบว่าค่า weighted position dilution of precision (WPDOP) กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation หรือ STD) ของความผิดพลาดจากการระบุพิกัด (ϵ/σ) มีความสัมพันธ์กันแบบไฮเปอร์โบล่าแบบสี่เหลี่ยม โดยระบบดาวเทียม GNSS ใดก็ตามที่มีค่า PDOP ที่สูงจะถูกตัดออกจากการคำนวณค่าปรับแก้พิกัด (correction data) สำหรับโรเวอร์ ในกรณีที่ rover ตัวนั้นไม่สามารถที่จะได้ค่าปรับแก้พิกัดจาก CORS หรือว่า rover อาจอยู่ห่างจาก CORS มาก ซึ่งวิธีการใหม่ที่นำเสนอนี้มีประโยชน์เมื่อโรเวอร์กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วระดับต่าง ๆ และส่งผลทำให้การระบุพิกัดที่มีความแม่นยำทำได้ยากเนื่องจากจำนวนดาวเทียมที่มองเห็นได้มีการเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน โดยในที่นี้ จะทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการจำลองประสิทธิภาพการทำงานระหว่างวิธี RTK แบบเดิมกับวิธี RTK แบบใหม่ที่นำเสนอ โดยอาศัยค่าข้อมูล RTK Drone โดยเทคนิคนี้จะสมมติว่า Base Station สามารถรับค่าปรับแก้พิกัดได้แต่สถานีฐานไม่มีอัลกอริทึมในการตัดดาวเทียมที่ได้รับผลกระทบต่าง ๆ จากสถานการณ์เลวร้ายที่เกิดขึ้นในระบบดาวเทียมนำทางหลายระบบ ดังนั้นอัลกอริทึมที่นำเสนอนี้จึงเป็นวิธีการที่น่าสนใจและมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากจะเป็นเงื่อนไขที่ตัดสินใจแบบเรียลไทม์สำหรับดาวเทียมแต่ละระบบที่ได้รับผลกระทบเชิงลบถูกตัดออกไปจากการพิจารณาปรับแก้พิกัด ซึ่งจะทำให้พิกัดมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

สำหรับการศึกษานี้ ความแม่นยำของการระบุพิกัดถูกวัดได้ด้วยค่า Position Dilution of Precision (PDOP) และมีความสัมพันธ์ในลักษณะที่แปรผกผันกับค่า PDOP กล่าวคือ ถ้า PDOP มีค่าที่สูง การวางตัว (geometry) ของดาวเทียมที่มองเห็นได้ก็จะไม่ดี ซึ่งจะนำไปสู่ความแม่นยำในการระบุพิกัดที่น้อย ในทางกลับกัน ถ้า PDOP มีค่าที่ต่ำ การวางตัว (geometry) ของดาวเทียมที่มองเห็นได้ก็จะดีและนำไปสู่ความแม่นยำในการระบุพิกัดที่น้อย ในกรณีของเครื่องรับ GNSS ที่หยุดนิ่ง เมื่อตำแหน่งของเครื่องรับ GNSS หยุดนิ่ง ณ หนึ่งหรือเป็นเวลานาน การคำนวณค่า PDOP จะง่ายมาก แต่เมื่อไรก็ตามที่เครื่องรับ GNSS มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแบบแรนด้อม นั่นก็หมายความว่า ตำแหน่งของมันกำลังเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งนั้นก็คือความสามารถในการมองเห็นดาวเทียม มุมเอเลเวชัน มุมอะซิมุม และท้ายที่สุดคือการวางตัวของดาวเทียมที่มองเห็นได้ก็กำลังจะเปลี่ยนแปลงเช่นกัน ในกรณีดังกล่าวเพื่อที่จะประมาณความคิดว่าความแม่นยำในการระบุพิกัดที่สูงขึ้นได้หรือไม่นั้นยังคงเป็นภาระกิจที่ยาก ซึ่งเพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว ขั้นแรก เราจะหาคำตอบเชิงวิเคราะห์ของค่า weighted PDOP (WPDOP) ด้วยกาลมานฟิลเตอร์เชิงเส้น (กล่าวคือ เราต้องศึกษาผลกระทบของ WPDOP ที่มีต่อกาลมานฟิลเตอร์เชิงเส้น) เพื่อที่จะทำให้ความแม่นยำในการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ดีขึ้น รายละเอียดของวิธีที่นำเสนอมีดังนี้

การศึกษาในครั้งนี้ได้สร้างความสัมพันธ์เชิงทฤษฎีระหว่าง weighted position dilution of precision (WPDOP) กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (STD) ของความผิดพลาดจากการระบุพิกัด (ϵ/σ) ที่หาค่าได้จากคาลมานฟิลเตอร์ (Kalman filter หรือ KF) เชิงเส้น ผลจากการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง WPDOP กับ STD ของความผิดพลาดจากการระบุพิกัดเป็นแบบ rectangular hyperbolic ข้อมูลโดรน RTK ที่ได้จากการบินทดสอบเป็นเวลา 50 นาที ตั้งแต่เวลา 7.37 AM - 8.28 AM ในวันที่ 12 พฤษภาคม 2021 เมื่อเทียบกับสถานีฐานที่ตั้งอยู่ที่ตำแหน่ง 13.841°N และ 100.288°E ของพื้นที่ประเทศไทย ผลจากการจำลองระบบได้ยืนยันความถูกต้องของความสัมพัทธ์แบบ rectangular hyperbolic ตามทฤษฎีที่นำเสนอด้วยค่าที่ราบเรียบที่ชัดเจนของพิกัดการเคลื่อนที่ของสถานีฐานและเครื่องรับโดรน ซึ่งค่าที่ราบเรียบจากการทดลองที่ต่างกันนี้แสดงให้เห็นถึงความผิดพลาดจากการระบุพิกัดในขณะที่มีการเคลื่อนที่ภายใต้พลวัตที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่สูงของเครื่องรับโดรน ในขณะที่เครื่องรับสถานีฐานตั้งอยู่กับที่ ณ จุดหนึ่ง

เมื่อไม่นานมานี้ ระบบ GNSS ที่อาศัยการระบุพิกัดแบบเรียลไทม์ (RTK) ได้รับความสนใจมากขึ้นสำหรับผู้ใช้งาน GNSS ที่ต้องการพิกัดที่เคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำ โดยทั่วไป การระบุพิกัดแบบเรียลไทม์ (RTK) สามารถที่จะใช้งานได้ทั้งในโหมดอยู่กับที่กับโหมดที่เคลื่อนที่อยู่หรือจะประมวลผลทั้งแบบเรียลไทม์หรือแบบภายหลังก็ได้ รวมทั้งให้ระดับความแม่นยำที่ต่างกันตามความต้องการของผู้ใช้ GNSS ใน multi-constellations GNSS system, ความแม่นยำของการระบุพิกัดได้รับผลกระทบจากความผิดพลาดในการระบุพิกัด (ranging errors) หรือการวางตัวของดาวเทียม โดยการวางตัวของดาวเทียมได้ถูกอ้างถึงเป็นค่า dilution of precision (DOP) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญตัวหนึ่งที่ใช้สำหรับการเลือกดาวเทียม พารามิเตอร์ DOP มีหลายชนิดที่ถูกนำมาใช้งานสำหรับการระบุพิกัดที่แม่นยำของ GNSS และสามารถที่จะประมาณหาค่าได้โดยใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขต่าง ๆ กัน ได้แก่ position DOP (PDOP), horizontal DOP (HDOP), vertical DOP (VDOP), time DOP (TDOP), and geometric DOP (GDOP) โดยทั่วไป วิธี inverse matrix method และวิธีการเลือกค่า DOP ที่ต่ำที่สุดได้ถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณหาค่า DOP สำหรับคอมบินชันของดาวเทียมทั้งหมด [10]

แต่บางครั้ง RTK GNSS ก็เผชิญกับปัญหานั้นประการเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น ไม่มีสถานีฐานที่อยู่ใกล้กับโรเวอร์, ไม่ได้รับค่าปรับแก้พิกัดที่ถูกต้อง, ไม่มีสัญญาณ GNSS และประเด็นที่สำคัญมากที่สุดคือ การประมาณหาค่า DOP ที่แม่นยำ ท่ามกลางพารามิเตอร์ DOP ค่า PDOP ได้ถูกนำมาใช้งานบ่อยครั้งเพื่อตัดสินใจแก้ปัญหาความแม่นยำในการระบุพิกัด ในระหว่างการหาค่า PDOP เราจะสมมติว่า “การวัดดาวเทียมที่ติดตามได้ (ใช้งานอยู่) ทั้งหมดจะอิสระต่อกันและมีระดับความแม่นยำในการระบุพิกัดระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติเมื่อดาวเทียมได้ถูกติดตาม (เชื่อมต่อ) จากระบบดาวเทียม GNSSs ที่ต่างกันก็มักจะก่อให้เกิดความไม่แน่นอน (ความผิดพลาด) ในการระบุพิกัดที่ชัดเจน [11-12] นอกจากนี้ เมื่อดาวเทียมจำนวน 1 ดวงหรือจำนวนหนึ่งได้ถูกรวมเข้ามาในระบบดาวเทียม GNSSs ที่ใช้งานอยู่ ดาวเทียมที่ถูกรวมเข้ามานั้นอาจจะอยู่หรือไม่อยู่ในระบบดาวเทียม GNSSs ที่เชื่อมต่อกันก็เป็นได้ เหตุการณ์นี้เป็นเงื่อนไขที่มีซับซ้อนมากขึ้นต่อการเปลี่ยนค่า PDOP ดังนั้น จึงมีความสำคัญที่จะศึกษาคุณลักษณะของ PDOP แบบใหม่ ได้แก่ weighted PDOP (WPDOP) สำหรับวิธีการ multi-GNSS และผลกระทบของความแปรปรวนดังกล่าวก็ควรที่จะได้รับการศึกษาด้วย [13-14] คาลมานฟิลเตอร์ (KF) เป็นอัลกอริทึมหนึ่งที่ถูกใช้สำหรับการวัดค่าข้อมูลที่สังเกตได้ตามเวลาที่มีการรวมค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติกับความผิดพลาดที่เกิดจากสัญญาณรบกวนต่าง ๆ และสร้างค่าตัวแปรโดยประมาณที่เราไม่ทราบค่าที่มีความแม่นยำสูงเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้ในทางปฏิบัติ ซึ่งอัลกอริทึมนี้ถูกใช้เพื่อที่ผสมผสานข้อมูลพลวัตของยานพาหนะในอากาศ

(อวกาศ) และค่าข้อมูลที่วัดได้จาก GNSS แล้วนำไปสู่การประมาณค่าพิกัดที่แม่นยำมากขึ้น โดย Biswas และคณะ [15] ได้ศึกษาสมรรถนะการทำงานของวิธี extended KF และ unscented KF และก็สร้างความสัมพันธ์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (STD) ที่ประมาณค่าได้กับค่า PDOP ซึ่งพบว่า เป็นแบบไฮเปอร์โพล่า สิ่งนี้บอกเป็นโดยนัยว่า “สมการที่สัมพันธ์กับค่า PDOP ด้วย STD ของตำแหน่งที่ถูกประมาณค่าได้จาก KF และ STD ของค่าที่วัดได้สามารถที่ถูกสร้างขึ้นได้โดยใช้เมตริกซ์ค่าแปรปรวนร่วมของกระบวนการ (process covariance) และเมตริกซ์อัตราขยายคาลมาน เนื่องจาก WPDOP ทำงานได้ดีกว่า PDOP อย่างง่ายสำหรับวิธี multi-GNSS และสนับสนุนการปรับปรุงวิธีการระบุพิกัดเรียลไทม์ RTK ด้วยความแม่นยำในการระบุพิกัดที่ดีขึ้น ดังนั้น ในการศึกษาขั้นแรก ผลกระทบของ WPDOP จะถูกหาค่าออกมาก่อนในทางทฤษฎี ซึ่งจะแตกต่างจากการหาค่า PDOP อย่างง่าย หลังจากนั้นความสัมพันธ์เชิงทฤษฎีของ WPDOP กับคาลมานฟิลเตอร์เชิงเส้น (แทนที่ extended KF และ unscented KF ที่ซับซ้อนในวิธีเดิม) จะถูกสร้างขึ้นและจะถูกพิสูจน์ความถูกต้องเชิงตัวเลขด้วยข้อมูล RTK drone ที่บินทดสอบเหนือพื้นที่ประเทศไทย

ขั้นตอนในการหา Weighted PDOP และ Linear Kalman Filter

ถ้ากำหนดให้ H เป็นจาโคเบียนการวัดและ w เป็นเมตริกซ์ที่ถูกถ่วงน้ำหนัก แล้วเมตริกซ์ weighted PDOP (WPDOP) จะถูกหาค่าได้จาก [13]:

$$W = (H^T w H)^{-1} \quad (6.15)$$

เมื่อค่า WPDOP หาค่าได้จากค่าในแนวเส้นทแยงมุมของเมตริกซ์ W ที่กำหนดได้ดังนี้:

$$WPDOP = \sqrt{W_{11} + W_{22} + W_{33}} \quad (6.16)$$

ในที่นี้ ความสัมพันธ์ระหว่าง H และ เมตริกซ์ WPDOP W หาค่าได้จากสมการที่ (6.16) ซึ่งเราสามารถที่อยู่ในรูปของ เฟรม ECEF (x , y , and z) ได้ดังนี้:

$$WPDOP_x = \sqrt{W_{11}}; \quad WPDOP_y = \sqrt{W_{22}}; \quad WPDOP_z = \sqrt{W_{33}} \quad (6.17)$$

ในกรณีของคาลมานฟิลเตอร์เชิงเส้น เราจะพิจารณาเมตริกซ์สถานะก่อนหน้าในรูปของ X_{k-1} และเมตริกซ์ค่าแปรปรวนร่วมของกระบวนการ (process covariance) ในรูปของ P_{k-1} สมมติว่า เมตริกซ์ที่ทำนายได้ X_{kp} และเมตริกซ์ค่าแปรปรวนร่วมของกระบวนการ P_{kp} เมื่ออ้างอิงคำจำกัดความของ KF เมตริกซ์ที่ทำนายได้ของสถานะใหม่สามารถที่จะหาค่าได้ดังนี้ [16]

$$X_{kp} = AX_{k-1} + B\mu_k + \xi_k \quad (6.18)$$

$$P_{kp} = AP_{k-1}A^T + Q_k \quad (6.19)$$

เมื่อ A และ B ทำงานเสมือนเป็นเมตริกซ์ของการปรับตัวและถูกใช้สำหรับการแปลงสถานะก่อนหน้าไปเป็นสถานะที่ทำนายได้ ในที่นี้ ξ เป็นเมตริกซ์สัญญาณรบกวนสถานะที่ทำนายได้, μ เป็นเมตริกซ์ที่เปลี่ยนได้เพื่อควบคุมและ Q เป็นเมตริกซ์สัญญาณรบกวนแปรปรวนร่วมของกระบวนการ

สมมติให้อัตราขยายคาลมานแทนด้วย K และ R เป็นความแปรปรวนร่วมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเซนเซอร์หรือความผิดพลาดที่เกิดจากการวัด แล้วสมการของเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของกระบวนการที่สัมพันธ์กับ K สามารถที่เขียนได้ดังนี้

$$K = \frac{P_{kp} H}{H^T P_{kp} H + R} \quad (6.20)$$

รูปแบบที่ง่ายขึ้นของสมการที่ (6.20) สามารถที่จะเขียนอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$KH^T P_{kp} H + KR = P_{kp} H \quad (6.21)$$

สมการสุดท้ายสำหรับเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของกระบวนการต่อไปที่ทำนายได้จากเมตริกซ์สถานะก่อนหน้าจะสามารถที่จะหาได้ดังนี้ [17]:

$$P_k = (I - KH)P_{kp} \quad (6.22)$$

ถ้าเรากำหนดให้ σ_R เป็นค่า STD ของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการวัดสัญญาณ GNSS แล้วเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนัก (W) ก็จะสามารถที่จะถูกเขียนแทนได้ด้วยสมการต่อไปนี้

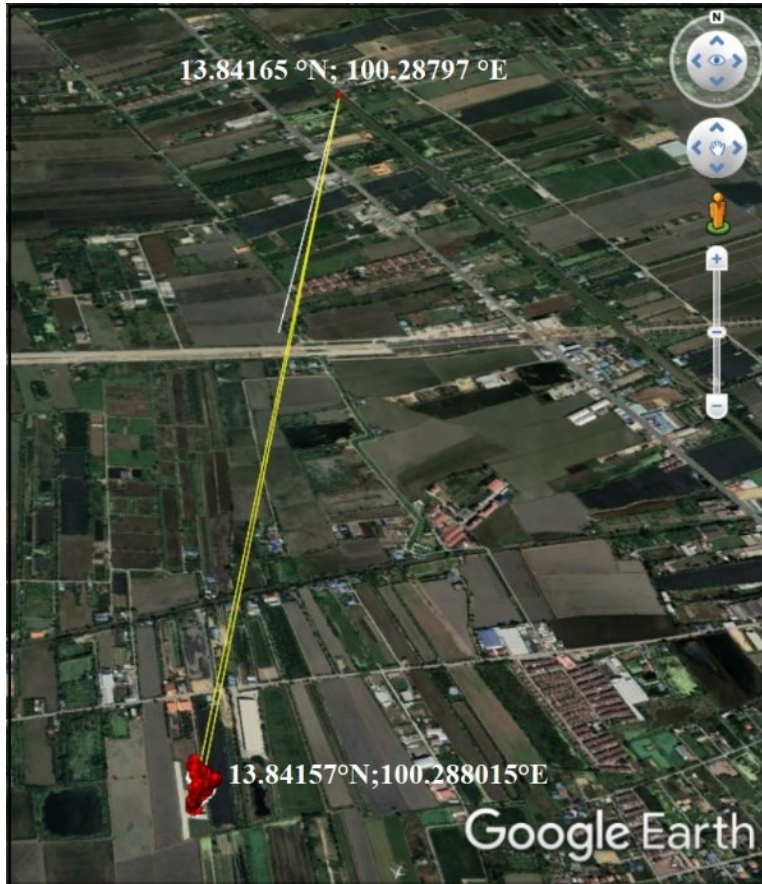
$$WR \frac{1}{\sigma_R^2} R^T = P_k (KK^T)^{-1} P_k \quad (6.23)$$

เมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเซนเซอร์ (ความผิดพลาดที่เกิดจากการวัด) สามารถที่จะเขียนแทนได้ด้วย $R = I_{m \times n} \sigma_R^2$ และเพื่อให้ง่ายขึ้น เราจะกำหนดให้ $KK^T = C^{-1}$ เราจะได้ว่า

$$W \sigma_R^2 = P_k C P_k \quad (6.24)$$

จากสมการที่ (6.24) พบว่า ที่เวลาขณะใดขณะหนึ่ง ค่า STD ของพิกัดที่คำนวณได้จาก linear KF จะมีคุณลักษณะที่มีความสัมพันธ์เป็นแบบไฮเปอร์โบล่าแบบสี่เหลี่ยม (นั่นคือ $xy=c^2$) กับค่า WPDOP ถ้าเราพิจารณา ค่า ϵ เป็นค่าความผิดพลาดพิกัดเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากการวัดด้วย GNSS เนื่องจากสมการที่ (6.24) นำเสนอคุณลักษณะที่เป็นแบบไฮเปอร์โบล่าแบบสี่เหลี่ยม ดังนั้น โดยการใช้ ϵ ความสัมพันธ์ใหม่ในรูปแบบของ $WPDOP \times (\epsilon \sigma_R)$ หรือ $WPDOP \times (\epsilon / \{1/\sigma_R\})$ จะถูกนำเสนอในรูปแบบไฮเปอร์โบล่าแบบสี่เหลี่ยมเช่นกัน กล่าวโดยสรุปคือ เราสามารถความแม่นยำในการระบุพิกัดจะลดลงเชิงผกผันกับการเพิ่มขึ้นในค่า WPDOP

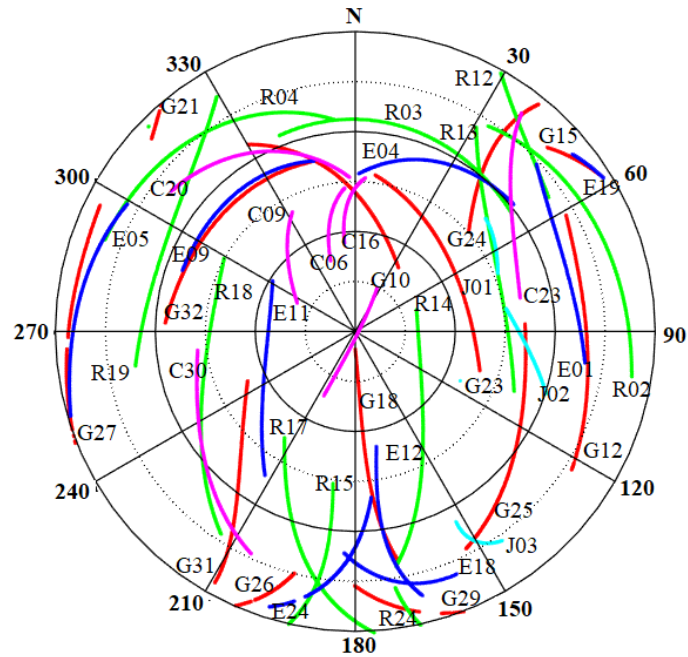
สำหรับการรวบรวมข้อมูลและการยืนยันความถูกต้องเชิงตัวเลขนั้น ข้อมูลโดรน RTK ที่ได้จากการบินทดสอบเป็นเวลา 50 นาที ตั้งแต่เวลา 7.37 AM - 8.28 AM ในวันที่ 12 พฤษภาคม 2021 เมื่อเทียบกับสถานีฐานที่ตั้งอยู่ที่ตำแหน่ง 13.841°N และ 100.288°E ของพื้นที่ประเทศไทย เมื่อเทียบกับตำแหน่งสถานีฐาน 13.84°N; 100.29°E ตำแหน่งของสถานีฐานและตำแหน่งของ RTK drone มีแสดงไว้ในรูปที่ 6.10 เส้นทางของ RTK Drone ที่ขยายใหญ่ให้มองดูชัดเจนขึ้นแสดงอยู่ในรูปที่ 6.11 ข้อมูล GNSS ถูกประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ RTKLib [18] และตำแหน่งและความเร็วของโรเวอร์ที่มีความไม่แน่นอนก็จะถูกบันทึกค่าไว้ แผนภาพ Sky plots (มุมอะซิเมธกับมุมเอเลเวชัน) ของสถานีฐานและโรเวอร์สำหรับดาวเทียมหลายระบบ <multi-GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, and QZSS) constellations> แสดงไว้ในรูปที่ 6.12 และ 6.13 ตามลำดับ โดยรูปภาพเหล่านี้ได้ถูกสร้างขึ้นโดยการรวม broadcast ephemeris ไปบนช่วงเวลาที่เลือกไว้ ซึ่งมันมีความชัดเจนจากรูปที่ว่า สถานีฐานสามารถติดต่อกับดาวเทียมได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับโรเวอร์ เหตุการณ์นี้เกิดขึ้นในขณะที่โดรนมีการเคลื่อนที่อยู่ โดยเครื่องรับโดรนไม่สามารถที่จะติดต่อกับดาวเทียมที่เวลาที่ยานมากขึ้นได้ที่มุมเอเลเวชันเฉพาะค่าหนึ่ง



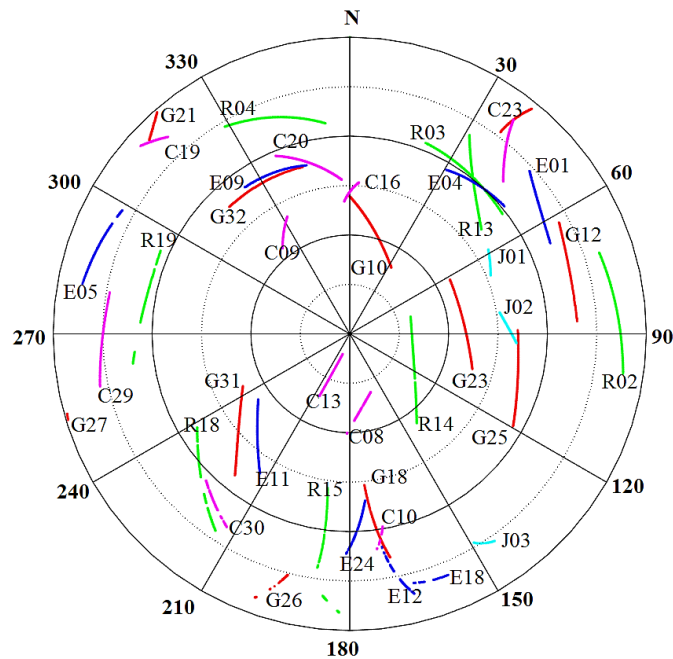
รูปที่ 6.10 ตำแหน่งและข้อมูลการเคลื่อนที่ของโดรนที่บันทึกได้ในช่วงเวลา 50 นาทีของวันที่ 12 พ.ค. 2564 [19]



รูปที่ 6.11 ภาพขยายขนาดที่ใหญ่ขึ้นของข้อมูล RTK drone ช่วงเวลา 50 นาที ในวันที่ 12 พ.ค. 2564 [19]

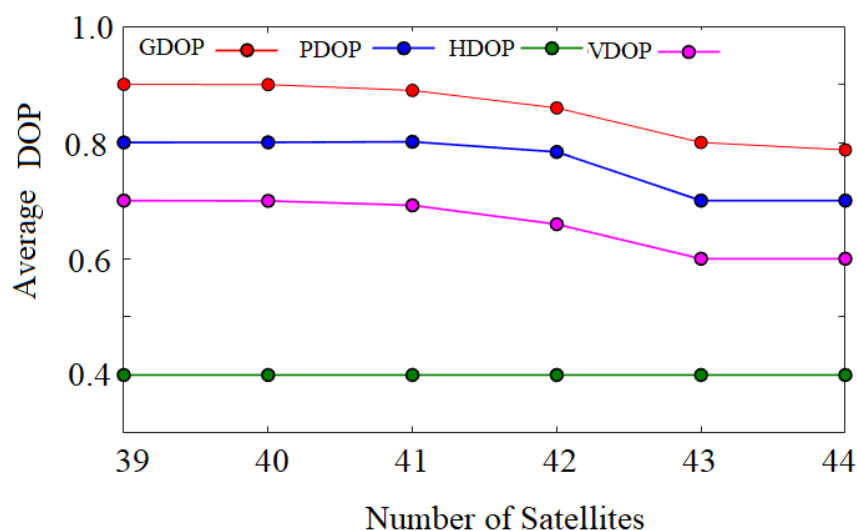


รูปที่ 6.12 Sky plots (azimuth vs elevation angle) ของระบบดาวเทียม multi-constellation (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, and QZSS) ที่สถานีฐาน ในระหว่างการเก็บข้อมูลการบินของโดรน [19]

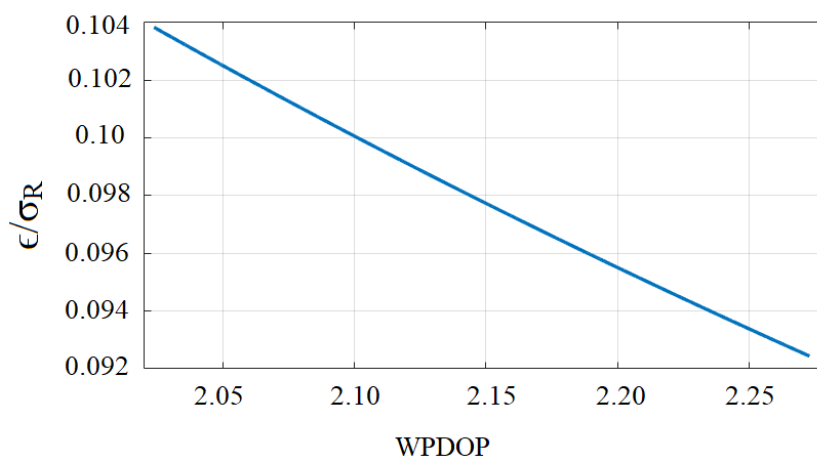


รูปที่ 6.13 Sky plots (azimuth vs elevation angle) ของระบบดาวเทียม multi-constellation (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, and QZSS) ที่โรเวอร์ ในระหว่างการเก็บข้อมูลการบินของโดรน [19]

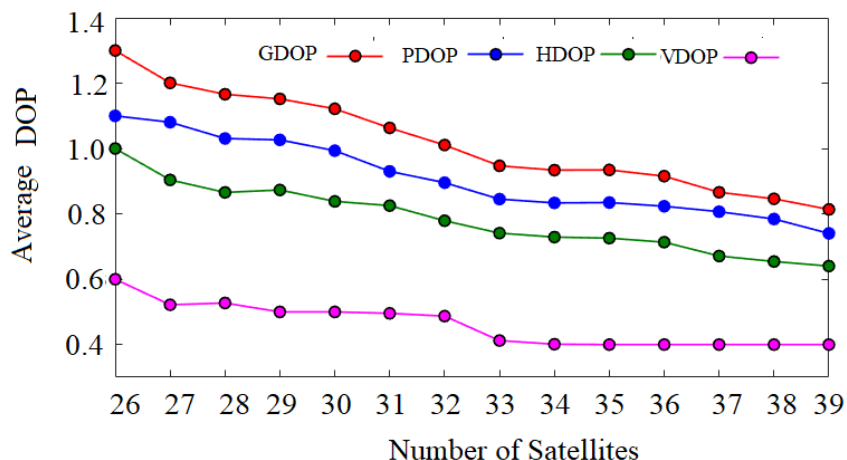
เพื่อที่จะตรวจสอบสมรรถนะของพารามิเตอร์ DOP แบบต่าง ๆ การเปลี่ยนแปลงของ PDOP, GDOP, HDOP และ VDOP โดยเฉลี่ยตามจำนวนของดาวเทียมที่มองเห็นที่สถานีฐานในช่วงเวลาของการศึกษาจึงได้ถูกนำเสนอแสดงไว้ในรูปที่ 6.14 พบว่า ค่า PDOP มีค่าที่ลดลงตามจำนวนของดาวเทียม GNSS ที่เพิ่มขึ้น ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันของค่า ϵ/σ_R และ WPDOP โดยการใช้ฟังก์ชันลอการิทึม KF ได้ถูกประมาณค่าได้และพล็อตไว้ในรูปที่ 6.15 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϵ/σ_R และ WPDOP เป็นแบบ rectangular hyperbola ที่มีลักษณะความแบนราบที่น้อยลง ซึ่งผลลัพธ์เหล่านี้เป็นการยืนยันความถูกต้องของสมการที่ (6.24) และแสดงให้เห็นว่า “ความผิดพลาดจากการระบุพิกัดที่ลดลงเมื่อค่า WPDOP มีเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้น”



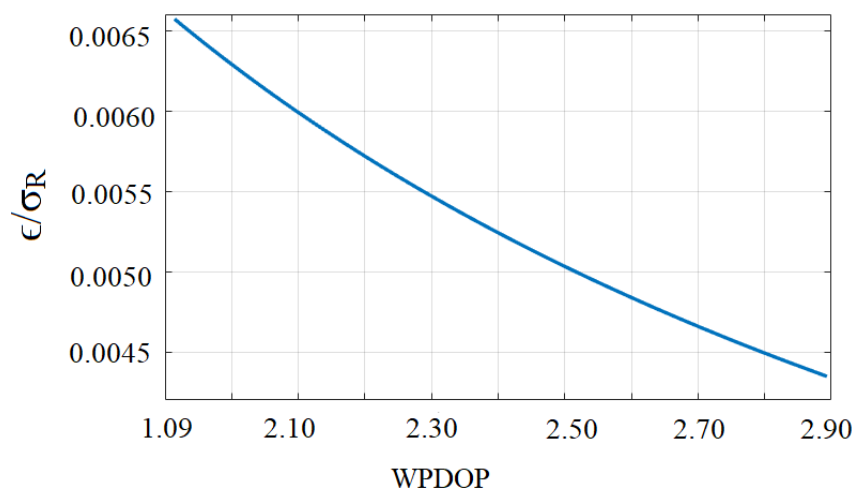
รูปที่ 6.14 การเปลี่ยนแปลงของ PDOP, GDOP, HDOP, VDOP ตามจำนวนดาวเทียมที่เห็นที่สถานีฐาน [19]



รูปที่ 6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϵ/σ_R และ WPDOP แบบ rectangular hyperbola ที่สถานีฐาน (ที่มีคุณลักษณะเด่นที่พบคือ ความแบนราบน้อย) [19]



รูปที่ 6.16 การเปลี่ยนแปลงของ PDOP, GDOP, HDOP และ VDOP ตามจำนวนดาวเทียมที่เห็นที่โรเวอร์ [19]



รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϵ/σ_R และ WPDOP แบบ rectangular hyperbola ที่สถานีฐาน (ที่มีคุณลักษณะเด่นที่พบคือ ความแบนราบมากขึ้น) [19]

หลังจากนั้น เราจะได้ทำการพิสูจน์ความถูกต้องของวิธีการที่นำเสนอมากขึ้น การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเดียวกันได้ถูกกระทำขึ้นกับเครื่องรับ GNSS ในโดรน ค่า WPDOP ที่ถูกเฉลี่ยตามเวลาสำหรับการวัดค่าของ GDOP, HDOP, and VDOP ตามจำนวนของดาวเทียมที่มองเห็นได้ในช่วงเวลาที่ศึกษาถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6.16 พบว่า ค่า PDOP มีค่าลดลงตามจำนวนดาวเทียม GNSS ที่เพิ่มขึ้น แต่ผลลัพธ์เหล่านี้จะแตกต่างจากสถานีฐาน (รูปที่ 6.14) ในที่นี้ แนวโน้มที่ลดลงของค่า DOP เมื่อเทียบกับจำนวนของดาวเทียมที่มองเห็นได้จะมีค่าที่สูง เหตุการณ์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากจำนวนของดาวเทียมที่ติดต่อได้โดยเครื่องรับโดรนนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงบ่อยครั้งเมื่อเทียบกับเครื่องรับ GNSS ที่สถานีฐาน ในตอนนี้ ในทำนองเดียวกัน ที่เครื่องรับ GNSS ที่สถานีฐาน ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน

ของ ϵ/σ_R และ WPDOP ที่คำนวณได้จากลอการิทึม KF แล้วจะถูกพล็อตกราฟดังแสดงในรูปที่ 6.17 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϵ/σ_R และ WPDOP เป็นแบบ rectangular hyperbola ที่มีความแบนราบมากขึ้น

จากที่เราได้ศึกษาข้อมูล RTK ของเครื่องรับ GNSS ที่สถานีฐานและโดรน และได้สังเกตถึงคุณลักษณะไฮเปอร์โบล่าแบบสี่เหลี่ยมของทั้งสองกราฟ สิ่งนี้เป็นการยืนยันความสัมพันธ์เชิงทฤษฎีระหว่างความผิดพลาดของ KF กับ WPDOP อย่างไรก็ตาม กราฟระหว่าง ϵ/σ_R กับ WPDOP สำหรับการทดลองที่ประมาณค่าได้ทั้ง 2 ชนิดนี้ ได้แสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะที่เด่นชัด ความแบนราบของฟังก์ชัน rectangular hyperbolas ระหว่างค่า ϵ/σ_R กับ WPDOP นั้นมีความแตกต่างกันสำหรับการทดลองที่ต่างกัน เนื่องจากความผิดพลาดในการระบุพิกัดสำหรับการเคลื่อนที่พลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องรับ GNSS ในโดรน [15] บทสรุปของวิธีการใหม่ที่น่าเสนอ มีดังนี้

1. WPDOP จะประมาณความแม่นยำในการระบุพิกัดได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ PDOP อย่างง่าย
2. Linear Kalman filter (KF) ถูกนำมาใช้งานและประมาณค่าได้โดยการใช้ค่าพิกัดที่จุดเริ่มต้นและค่าพิกัดที่จุดที่สองของโรเวอร์ (วัตถุ) ที่กำลังเคลื่อนที่ ซึ่งจะช่วยให้สามารถคำนวณค่าความเร็วและความเร่งของวัตถุได้ตลอดเวลา และวิธีการนี้จะกำจัดความผิดพลาดจากสัญญาณรบกวนในกรณีต่าง ๆ และปรับปรุงความแม่นยำในการระบุพิกัดของโรเวอร์ได้ตลอดระยะเวลาการเคลื่อนที่ (หรือระหว่างการใช้ Network RTK นั้นเอง)
3. WPDOP กับ KF มีความเกี่ยวข้องกันและกันในรูปของไฮเปอร์โบล่าแบบสี่เหลี่ยม ซึ่งสามารถจะช่วยให้การทำนายพิกัดที่แม่นยำได้ง่ายขึ้นด้วยค่าความผิดพลาดสัญญาณรบกวนที่ถูกกำจัดออกไปได้ด้วยกาลมานฟิลเตอร์
4. เราพิจารณาตำแหน่ง ความเร็วและความเร่งแบบ 3 มิติของโรเวอร์ ซึ่งจะช่วยให้วิธีการนี้ทำงานได้ไม่ยากในการตรวจจับ ฝ้าติดตามและควบคุมความแม่นยำในการระบุพิกัดที่สถานการณ์ต่าง ๆ ได้ตลอดเวลา
5. ในการทดสอบวิธีการที่น่าเสนอนั้น เราได้ทดสอบใช้กับสถานีฐานหลายประเภทและได้ทำการพิสูจน์ยืนยันความถูกต้องเป็นที่เรียบร้อยแล้ว โดยวิธีการนี้สามารถที่จะนำไปใช้ได้กับเครื่องรับ GNSS แบบอยู่กับที่ (static receiver) เครื่องรับ GNSS ที่เคลื่อนที่ (RTK receiver)

6. โดยตำแหน่งเริ่มต้นของโรเวอร์ (latitude, longitude, elevation) จะเริ่มต้นที่พิกัดใดก็ตามจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพิกัดจุดกำเนิด (0,0,0) เสียก่อน หลังจากนั้นพิกัดถัดไปก็จะถูกอ้างอิงห่างออกจากจุดกำเนิดไปเรื่อย ๆ ตามลำดับ ยกตัวอย่างเช่น ตำแหน่งเริ่มต้นของโรเวอร์ (latitude, longitude, elevation) คือ (45, 46, 34) หรือในพิกัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก (x, y, z) เท่ากับ (4, 5, 6) จะถูกกำหนดเป็นพิกัดจุดกำเนิด (0, 0, 0) เสียก่อน หลังจากนั้นพิกัดถัดไปคือ (6, 7, 9) ก็จะถูกอ้างอิงใหม่คือ (2, 2, 3) ไปเรื่อย ๆ ถึงห่างออกจากจุดกำเนิดไปเรื่อย ๆ ตามลำดับ

สำหรับการนำวิธี Network RTK พร้อมกับการวัดค่า PDOP และการใช้ Linear Kalman filter สำหรับ 5G นั้น เราพบว่า 5G ถูกออกแบบและสร้างขึ้นมาเพื่อส่งข้อมูลได้ที่อัตราการส่งข้อมูลพีคที่ 20 Gbps โดยอาศัยมาตรฐาน IMT-2020 โดย Qualcomm Snapdragon™ X65 (นั่นคือ Qualcomm Technologies' flagship 5G solutions) ได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นมาเพื่อบรรลุอัตราการส่งข้อมูลที่สูงถึง 10 Gbps สำหรับอัตราการส่งข้อมูลพีคในทิศทางดาวน์ลิงค์ (การดาวน์โหลดข้อมูลจากเซิร์ฟเวอร์มายังผู้ใช้งาน) นอกจากอัตราการส่งข้อมูลพีคที่สูงขึ้นแล้ว 5G ยังถูกออกแบบเพื่อจัดให้มีความจุเครือข่ายที่สูงขึ้นมากโดยการขยายไปสู่อุปกรณ์ความถี่ใหม่ เช่น ย่านความยาวคลื่นระดับมิลลิเมตร โดย 5G ยังส่งข้อมูลด้วยเวลาประวิงที่น้อยลงมากด้วยการตอบสนองที่รวดเร็วมาก ซึ่งอัตราการส่งข้อมูลยังคงมีค่าสูงเสมอแม้กระทั่งเมื่อผู้ใช้จะเคลื่อนที่อยู่ที่ตาม และเครือข่ายมือถือ 5G NR เวอร์ชันใหม่นี้ก็ยังถูกรองรับด้วยพื้นที่ครอบคลุมแบบ Gigabit LTE ซึ่งให้บริการการเชื่อมต่อระดับ Gigabit ที่ครอบคลุมทุกพื้นที่ ซึ่ง 5G จะส่งข้อมูลได้เร็วขึ้นและให้บริการบรอดแบนด์ไร้สายที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับ 4G LTE ใน

การศึกษานี้ เราได้ประยุกต์ใช้งานกาลมานพิลเตอร์ในการหาค่าความแม่นยำในการระบุพิกัดเรียลไทม์หรือ RTK ของวัตถุหรืออุปกรณ์จำพวกเทคโนโลยี 5G, UAV ที่ติดตั้งเครื่องรับ GNSS จากการใช้วิธีการใหม่ที่นำเสนอนี้ ความเร็วของอุปกรณ์ถูกนำมาพิจารณาและความผิดพลาดจากสัญญาณรบกวนก็สามารถที่จะกำจัดได้ ดังนั้น เราสามารถที่จะได้รับพิกัดของเครื่องรับ GNSS ที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

ขั้นตอนการทำงานของวิธี RTK ใหม่ที่นำเสนอ มีดังนี้

1. ที่แต่ละช่วงเวลาของการวัด เราจะแสดงสมรรถนะการทำงานของระบบ GNSS แต่ละระบบ
2. ทำการตัดสินใจค่า weighted position dilution of precision (WPDOP) เพื่อที่จะจำแนกระบบดาวเทียม GNSS ที่ดีและไม่ดี ซึ่งเราอาจจะเรียกวิธีใหม่นี้ว่า “PDOP-based impacted satellite removal”
3. ทำการกำจัดระบบดาวเทียม GNSS ที่ได้รับผลกระทบจากสถานการณ์ที่ผิดปกติและมีผลต่อการระบุพิกัดที่ผิดพลาดออกไป ผลลัพธ์ที่ได้ คือ ค่าปรับแก้พิกัดที่ถูกต้องที่ได้จากระบบดาวเทียม GNSS แล้วนำไปสู่การระบุพิกัดที่แม่นยำ

หมายเหตุ สำหรับสถานีเครื่องรับ GNSS ไม่สามารถที่จะนำมาใช้กับวิธีที่นำเสนอได้ เนื่องจากสถานีเครื่องรับ GNSS อยู่กับที่ ไม่มีความเร็วกับความเร่ง และสถานี IGS ก็ไม่สามารถที่จะนำมาใช้กับวิธีที่นำเสนอได้เช่นกัน เนื่องจากสถานี IGS มีค่าความผิดพลาดเนื่องจากสัญญาณรบกวนต่าง ๆ มีค่าเท่ากับ 0

นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยคิดว่าวิธีการนี้น่าจะมีประโยชน์ต่อการรองรับการใช้งานของโรเวอร์ ในขณะที่โรเวอร์ไม่สามารถที่จะได้รับค่าปรับแก้จาก CORS network ได้ หรือ โรเวอร์ติดต่อกับสถานีฐานไม่ได้ชั่วคราว ดังนั้น การทดสอบเพิ่มเติม คือ “เราควรจะสมมติให้โดรนไม่สามารถที่จะรับค่าข้อมูล CORS network (ลบค่าข้อมูลออกไปช่วงหนึ่ง) ได้ชั่วคราว แล้วลองสังเกตดูความคงทนของวิธีที่นำเสนอที่ว่า กาลมานพิลเตอร์เชิงเส้นสามารถที่จะแก้ปัญหาในกรณีที่โรเวอร์

6.4 เอกสารอ้างอิงบทที่ 6

- [1] O. Montenbruck, et al., “Initial assessment of the COMPASS/BeiDou-2 regional navigation satellite system,” GPS Solutions, vol. 17, no. 2, pp. 211-222, 2013; doi: 10.1007/s10291-012-0272-x
- [2] J. Shi, G. Wang, X. Han, and J. Guo, “Impacts of satellite orbit and clock on realtime GPS point and relative positioning,” Sensors, vol. 17, no. 6, pp. 1363, 2017; doi: 10.3390/s17061363
- [3] M. Kim and K. D. Park, “Development and Positioning Accuracy Assessment of Single-Frequency Precise Point Positioning Algorithms by Combining GPS Code-Pseudorange Measurements with Real-Time SSR Corrections,” Sensors, vol. 17, no. 6, pp. 1347, 2017; doi: 10.3390/s17061347
- [4] S. G. Jin, R. Jin, and H. Kutoglu, “Positive and negative ionospheric responses to the March 2015 geomagnetic storm from BDS observations,” J Geod., vol. 91, pp. 613–626, 2017; doi: 10.1007/s00190-016-0988-4
- [5] K. Ansari and K. D. Park, “Multi constellation GNSS precise point positioning and prediction of propagation errors using singular spectrum analysis,” Astrophys. Space Sci., vol. 363, no. 258, 2018.

- [6] K. Ansari, "Real-Time Positioning Based on Kalman Filter and Implication of Singular Spectrum Analysis," *IEEE Geosci. Remote. Sens.*, vol. 18, no. 1, pp. 58-61, 2021.
- [7] P. Wielgosz, L. Kashani, and D. Grejner-Brzezinska, "Analysis of long-range network RTK during a severe ionospheric storm," *J. Geod.*, vol. 79, pp. 524-531, 2005; doi: 10.1007/s00190-005-0003-y
- [8] S. K. Biswas, L. Qiao, and A. G. Dempster, "Effect of PDOP on performance of Kalman Filters for GNSS-based space vehicle position estimation," *GPS Solut.*, vol. 21, pp. 1379-1387, 2017; doi: 10.1007/s10291-017-0621-x
- [9] T. Baybura, İ. Tiryakioğlu, M. A. Uğur, H. İ. Solak, and Ş. Şafak, "Examining the Accuracy of Network RTK and Long Base RTK Methods with Repetitive Measurements," *Journal of Sensors*, vol. 2019, no. 3572605, 2019; doi: 10.1155/2019/3572605
- [10] S. Tafazoli, M. R. Mosavi, and N. Rahemi, "Comparing GPS GDOP Approximation Accuracy using Recurrent Wavelet Neural Network and ARMA Modeling," *Journal of Information and Communication Technologies*, vol. 1, no. 5, pp.1-6, 2011.
- [11] D. H. Won, J. Ahn, S. W. Lee, J. Lee, S. Sung, H. W. Park, J. P., and Y.J. Lee, "Weighted DOP with consideration on elevation-dependent range errors of GNSS satellites," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, no. 12, pp.3241-3250, 2012.
- [12] F. Meng, S. Wang, and B. Zhu, "GNSS reliability and positioning accuracy enhancement based on fast satellite selection algorithm and RAIM in Multiconstellation," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 30, no. 10, pp.14-27, 2015.
- [13] Y. Teng, J. Wang, Q. Huang, and B. Liu, "New characteristics of weighted GDOP in multi-GNSS positioning," *GPS Solutions*, vol. 22, no. 3, pp.1-9, 2018.
- [14] Y. Teng and J. Wang, "New characteristics of geometric dilution of precision (GDOP) for multi-GNSS constellations," *The Journal of Navigation*, vol. 67, no. 6, pp.1018-1028, 2014.
- [15] S. K. Biswas, L. Qiao, and A. G. Dempster, "Effect of PDOP on performance of Kalman Filters for GNSS-based space vehicle position estimation," *GPS Solutions*, vol. 21, no. 3, pp.1379-1387, 2017.
- [16] K. Ansari, "Real-time positioning based on Kalman filter and implication of singular spectrum analysis," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 18, no. 1, pp.58-61, 2020.
- [17] T. Takasu, "RTKLIB ver. 2.4.2 Manual - RTKLIB: An Open-Source Program Package for GNSS Positioning," pp. 29-49, 2013.
- [18] L. Pan, C. Cai, R. Santerre, and X. Zhang, "Performance evaluation of single-frequency point positioning with GPS, GLONASS, BeiDou and Galileo. *Survey Review*, 49, no. 354, pp. 197-205, 2017.
- [19] K. Ansari, K. and Jamjareegulgarn, 2022. Effect of Weighted PDOP on Performance of Linear Kalman Filter for RTK Drone data. **(During the seconde revision of GRSL Journal on May 5, 2022)**

บทที่ 7 Kalman Filter-Based Singular Spectrum Analysis

ระบบ GNSS ได้ถูกนำมาใช้เพื่อให้บริการที่แม่นยำสำหรับการระบุพิกัด การนำทางและการบอกเวลาในเทคโนโลยีที่ทันสมัยหลายประเภท วิธีการระบุพิกัดเครื่องรับ GNSS นั้นอาศัยวิธี trilateration (การตัดกันของดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวงเพื่อระบุพิกัด x, y, z) สำหรับการคำนวณเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์เชิงระยะทาง (ionospheric range delays) ที่อาศัยสัญญาณดาวเทียมที่รับได้และค่าไบอัสที่เกี่ยวข้องหลายค่า แหล่งกำเนิดความผิดพลาดหลักในระหว่างการหาพิกัดเครื่องรับก็คือชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ซึ่งเป็นบริเวณที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนมักจะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาท้องถิ่น ฤดูกาล กิจกรรมสุริยะ ตำแหน่ง ฯลฯ [1] นอกจากนี้ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนชั้นไอโอโนสเฟียร์ยังได้ตอบสนองต่อพายุแม่เหล็กโลกและเกิดสภาวะความผิดปกติต่าง ๆ มากมาย ได้แก่ พลาสมาบับเบิลแถบเส้นศูนย์สูตร (EPBs) พายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ และสนามไฟฟ้าเฉาะทะเลที่หนัก (PPEF) [2] ค่าความหน่วงชั้นไอโอโนสเฟียร์ของสัญญาณ GNSS มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ (TEC) และถูกใช้เพื่อบ่งชี้พิกัดของเครื่องรับ GNSS ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากมีความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ความแม่นยำในการระบุพิกัดก็อาจจะถูกทำให้แยลงอย่างมากในบางครั้ง ดังนั้นเทคโนโลยีที่ทันสมัยจำนวนมากสำหรับธุรกิจ การขนส่งและอุตสาหกรรมประเภทใหม่ก็ยังคงที่จะร้องขอหรืออยากให้มีระบบ GNSS แม่นยำสูงร่วมกับเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ 5G ยกตัวอย่างเช่น โดรน รถไร้คนขับและยานพาหนะอัตโนมัติไร้คนขับ (UAVs) ฯลฯ ในที่นี้ มีหลายวิธีที่ใช้ในการระบุพิกัดที่แม่นยำสูงโดยอาศัยระบบดาวเทียมนำทางสากลหลายระบบ (multi-constellation GNSSs) ได้แก่ RTK (real-time kinematic), PPP (precise point positioning) และ RTK-PPP ที่ผ่านมา ถึงแม้ว่าแบบจำลองการทำนายชั้นไอโอโนสเฟียร์มาตรฐาน เช่น แบบจำลอง IRI และ IRI-Plas จะได้รับการปรับปรุงอย่างมากเพื่อทำนายค่าพารามิเตอร์ชั้นไอโอโนสเฟียร์และ TECs ในระหว่างที่เกิดและไม่เกิดพายุแม่เหล็กโลกแล้วก็ตาม แบบจำลองเหล่านี้ก็ไม่เคยที่จะเน้นไปที่การระบุพิกัดเครื่องรับและเพิ่มเติมวิธีการเพื่อกำจัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระหว่างการระบุพิกัดเลย ในทางกลับกัน เครือข่าย GNSS สากล (IGS) :- เครือข่ายขนาดใหญ่ของเครื่องรับ GNSS ทั่วโลกที่ให้บริการ GIM TEC map; ยังคงที่จะวิจัยพัฒนา และนำเสนอเทคนิคใหม่อย่างต่อเนื่องเพื่อรองรับระบบ GNSS แม่นยำสูงสำหรับเทคโนโลยี 5G, รถไร้คนขับ และ UAV ฯลฯ ด้วยเทคโนโลยีใหม่สำหรับวิธี RTK และ PPP ดังนั้น เทคนิคใหม่สำหรับการระบุพิกัดแบบเรียลไทม์ (RTK) จึงเป็นหัวข้อที่สำคัญมากสำหรับเทคโนโลยีในอนาคต เมื่อไม่นานมานี้ มีงานวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอวิธี multivariate singular spectrum analysis หรือจะเรียกย่อ ๆ ว่า singular spectrum analysis (SSA) ² สำหรับการจำลองและการทำนายข้อมูลอนุกรมเวลา เช่น ค่า TEC, ตำแหน่ง, ความเร็ว เป็นต้น [3-7, 10] เนื่องจากมันจะใช้ข้อมูลในโดเมนเวลาเพื่อที่จะดึงข่าวสารอนุกรมเวลาที่สำคัญออกมาได้ แม้ว่าจะมีสัญญาณรบกวนมากโดยปราศจากการรู้พลวัตข้อมูลอนุกรมเวลาล่วงหน้า โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แนวโน้มข้อมูลที่ได้รับอาจจะไม่จำเป็นที่จะต้องเป็นเชิงเส้นและการแกว่งตัวสามารถที่จะผสมสัญญาณได้ทั้งเชิงแอมพลิจูดและเชิงเฟส [4] นอกจากนี้ Dabbakuti และ G [5] ได้นำเสนอแบบจำลองใหม่เพื่อทำนายชั้นไอโอโนสเฟียร์โดยอาศัยวิธี SSA และเครือข่ายประสาทเทียม เรียกว่า **แบบจำลอง SSA-ANN** โดยใช้ค่า GPS TEC ในช่วงปี 2009–2017 ที่วัดได้ที่ Bangalore

² วิธี multivariate singular spectrum analysis หมายถึงการประยุกต์ใช้วิธี singular spectrum analysis เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์หลายตัว (ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป) ในระบบ เช่น การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า VTEC, เวลาเป็นชั่วโมง, เวลาเป็นฤดูกาล และ เวลาเป็นปี เป็นต้น ในทางปฏิบัติ เราสามารถที่จะละคำว่า “multivariate” ได้

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

ผลจากการศึกษาพบว่า ค่ารากที่สองของผลต่างกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ระหว่างค่า TEC ที่วัดได้กับค่า TEC ที่จำลองด้วยวิธี SSA-ANN ซึ่งมีค่าไม่เกิน 1.40 TECU และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเข้าใกล้ 0.99 นอกจากนี้ Ansari และคณะ [3] ยังได้ประยุกต์ใช้วิธี SSA กับค่า GPS TECs ในช่วงกิจกรรมสุริยะที่ต่ำในปี 2017เหนือบริเวณประเทศเนปาลในละติจูดต่ำ พบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่า TEC ที่สูงขึ้นและต่ำลงสามารถที่จะพบได้อย่างชัดเจนในฤดูออทโทวันออกซ์และฤดูไซติลส์ ตามลำดับ อีกทั้ง ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอนุกรมเวลาที่วัดได้และที่สร้างขึ้นมาก็ได้ที่มีค่าประมาณ 1.00 นั้นแสดงให้เห็นว่า วิธี SSA เป็นเครื่องมือที่น่าสนใจสำหรับการทำนายค่า TECเหนือประเทศเนปาล สำหรับการระบุพิกัดที่อาศัยวิธี SSA นั้น Ansari และ Park [6] ได้นำเสนอวิธี PPP สำหรับ multi-constellation GNSSs เพื่อทำนายค่าความผิดพลาดของเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดขึ้นในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียง พบว่า ความแม่นยำของวิธี PPP ไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับค่า DOP (dilution of position) แล้วแต่ยังจะได้รับผลกระทบจากการปรับแก้ที่ผิดพลาดของเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์และชั้นโทรโปสเฟียร์อีกด้วย โดยความแม่นยำในการระบุพิกัดมีความแม่นยำสูงขึ้นประมาณ 70% หลังจากที่ประยุกต์ใช้วิธี SSA แล้ว หลังจากนั้น Ansari [7] ได้นำเสนอแนวความคิดเริ่มต้นในการนำเทคนิค adaptive Kalman filter (KF) มาใช้งานร่วมกับวิธีการทำนายแบบ SSA (มีชื่อเรียกว่าวิธี KF-SSA) สำหรับการระบุพิกัดแบบ RTK โดยมีการนำข้อมูลพิกัดรถแบบเรียลไทม์มาใช้เพื่อทดสอบและยืนยันความถูกต้องของวิธีใหม่ที่น่าเสนอ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความแม่นยำการระบุพิกัดที่อาศัย KF-SSA นั้นได้รับการปรับปรุงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเดิมที่อาศัย KF อย่างเดียว

ดังนั้น ในโครงการศึกษาฯ นี้ คณะผู้วิจัยได้วิจัยและพัฒนาเพื่อนำวิธี KF-SSA (Kalman filter and singular spectrum analysis) ไปใช้กับโดรนที่เคลื่อนที่ (RTK drone data) พร้อมทั้งทำการทดสอบความคงทนและความเชื่อถือได้ของพิกัดที่แม่นยำขึ้นในระหว่างที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกในวันที่ 12 พฤษภาคม 2564เหนือพื้นที่ประเทศไทย หัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของคาลมานฟิลเตอร์, singular spectrum analysis, ชุดข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา และผลการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังนี้

7.1 คาลมานฟิลเตอร์ (Kalman Filter)

คาลมานฟิลเตอร์ (KF) ถูกตั้งชื่อเพื่อให้เกียรติกับ Rudolf E. Kalman ซึ่งมีชื่ออีกชื่อหนึ่งว่า linear quadratic estimation (LQE) โดยคาลมานฟิลเตอร์นั้นเป็นอัลกอริทึมหนึ่งที่ใช้ค่าข้อมูลที่วัดได้อย่างต่อเนื่อง (อนุกรมเวลา) ที่ถูกบวกด้วยเทอมของสัญญาณรบกวนและความไม่แม่นยำต่าง ๆ ตลอดเวลา [7, 11-12] ค่าประมาณของตัวแปรที่ไม่ทราบค่าที่ได้จากวิธี KF นั้นมีแนวโน้มที่จะมีความแม่นยำมากกว่าค่าประมาณที่ได้จากการวัดเดี่ยว ๆ ทั่วไป อ้างถึงคาลมานฟิลเตอร์ เทอมของ X_{k-1} และ P_{k-1} เป็นเมทริกซ์สถานะ (state matrix) และเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของกระบวนการ (process covariance matrix) ก่อนหน้านี้ และเทอมของ X_{kp} และ P_{kp} เป็นเมทริกซ์สถานะและเมทริกซ์ความแปรปรวนของกระบวนการที่ทำนายได้ของชุดข้อมูลแล้วจากการใช้ทฤษฎีของคาลมานฟิลเตอร์ เมทริกซ์สถานะและเมทริกซ์ความแปรปรวนของกระบวนการที่ทำนายได้ในช่วงเวลาถัดไปสามารถที่จะเขียนได้ใหม่ดังแสดงในสมการที่ (7.1)

$$\begin{aligned} X_{kp} &= AX_{k-1} + B\mu_k + w_k \\ P_{kp} &= AP_{k-1}A^T + Q_k \end{aligned} \quad (7.1)$$

เมื่อ A เป็นแบบจำลองการเปลี่ยนระดับสถานะที่ถูกนำไปใช้กับสถานะก่อนหน้า, B เป็นแบบจำลองสัญญาณควบคุม-อินพุตที่ถูกนำไปใช้กับเวกเตอร์ควบคุม μ_k , w_k เป็นสัญญาณรบกวนกระบวนการซึ่งถูกสมมติว่ามีการแจกแจงแบบเกาส์เซียนที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และมีค่าความแปรปรวนร่วมเท่ากับ Q_k

อัตราขยายคาลมาน (K_G) เป็นค่าถ่วงน้ำหนักที่กำหนดให้กับค่าที่วัดได้และค่าประมาณสถานะปัจจุบัน ถ้าคาลมานฟิลเตอร์มีอัตราขยายที่สูง คาลมานฟิลเตอร์จะกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักที่มากขึ้นตามค่าที่วัดได้ล่าสุดให้มากที่สุด แคคาลมานฟิลเตอร์พยายามเข้าใกล้ค่าที่ทำนายได้ของแบบจำลองให้มากขึ้นด้วยค่าอัตราขยายที่ต่ำ โดยค่า K_G ถูกหาค่าได้จากสมการต่อไปนี้

$$K_G = \frac{P_{kp} M}{M P_{kp} M^T + R} \quad (7.2)$$

เมื่อ R เป็นเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากเซนเซอร์ (ค่าความผิดพลาดจากการวัด) และ M เป็นเมทริกซ์การปรับตัว สมมติว่า z_k เป็นเมทริกซ์สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับการวัด (ความไม่แน่นอน) และ C เป็นเมทริกซ์การปรับตัวอย่างง่าย เราจะหาค่าเมทริกซ์สถานะที่วัดได้ (Y_k) ด้วยค่าเมทริกซ์สถานะที่วัดได้ (X_{km}) ได้จากสมการที่ (7.3) ดังนี้

$$Y_k = C X_{km} + z_k \quad (7.3)$$

แล้วสมการสุดท้ายสำหรับการหาค่าเมทริกซ์สถานะถัดไปและเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของกระบวนการที่ทำนายได้จากสถานะก่อนหน้าสามารถที่จะคำนวณได้จากสมการที่ (7.4) ดังนี้

$$\begin{aligned} X_k &= X_{kp} + K_G [Y_k - M X_{kp}] \\ P_k &= (I - K_G M) P_{kp} \end{aligned} \quad (7.4)$$

ค่าที่ทำนายที่ได้รับ (X_k) จะถูกทำนายได้จากวิธี SSA ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

7.2 singular spectrum analysis

วิธี singular spectrum analysis (SSA) มีหลักการทำงาน (กระบวนการ) ที่สำคัญจำนวน 4 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 Embedding step, ขั้นตอนที่ 2 Singular value decomposition (SVD) step, ขั้นตอนที่ 3 Eigentriple grouping step, และขั้นตอนที่ 4 Diagonal averaging step โดยเนื้อหาและตัวอย่างผลการทดลองการใช้ SSA ที่อธิบายในหัวข้อนี้จะนำมาจาก Ansari และคณะ [3] รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

1. ขั้นตอนการฝัง (Embedding Step)

สมมติว่า TEC เป็นค่าอนุกรมเวลาในรูปแบบของ $T(t_1, t_2, t_3, \dots, t_N)$ ที่มีความยาว N มากกว่า 2 และมีอยู่อย่างน้อยหนึ่งค่าที่ไม่ใช่ศูนย์ (ในที่นี้ เมทริกซ์ T ถูกเรียกว่า Trajectory matrix) หลังจากที่ทำ Hankel matrix แล้ว เราจะได้เมทริกซ์ในรูปแบบดังนี้:

$$T = \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & t_3 & \dots & t_L \\ t_2 & t_3 & t_4 & \dots & t_{L+1} \\ t_3 & t_4 & t_5 & \dots & t_{L+2} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ t_L & t_{L+1} & t_{L+2} & \dots & t_N \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

โดย L เป็นค่าจำนวนเต็มและสามารถใช้งานได้ในช่วงของ $1 < L < N/2$

2. ขั้นตอนการแยกตัวประกอบของค่าเดียว

การแยกตัวประกอบของค่าเดียว (singular value decomposition หรือ SVD) ในพีชคณิตเชิงเส้นเป็นวิธีการแยกตัวประกอบของเมทริกซ์เชิงซ้อนหรือเมทริกซ์จริง เราสมมติว่ามีเมทริกซ์ค่าสัจ $n \times n$ $A = TT^T$ ที่มีการแยกตัวประกอบในรูปแบบ $U\Sigma V^T$ โดยที่ U แทนเมทริกซ์ออร์โธโกนัลซ้าย $n \times n$, Σ ย่อมาจากเมทริกซ์เส้นทแยงมุม $n \times n$ ที่มีค่าลักษณะเฉพาะลดลง ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \dots \geq \lambda_L$) และ V แทนเมทริกซ์ออร์โธโกนัลขวา $n \times n$ จากนั้นการแยกตัวประกอบของ A สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (7.6):

$$A = \sum_{i=1}^d \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T \quad (i = 1, 2, \dots, d) \quad (7.6)$$

โดยเทอม $(\sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T)$ เป็นเทอม i^{th} eigentriple ของ SVD และ d คืออันดับของเมทริกซ์ A

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component หรือ PC) อาจเป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้การเปลี่ยนออร์โธโกนัล การเปลี่ยนแปลงนี้ถูกกำหนดในลักษณะที่องค์ประกอบหลักตัวแรกมีความแปรปรวนที่ใหญ่ที่สุดและแต่ละองค์ประกอบที่ประสบความสำเร็จ ในทางกลับกัน มีความแปรปรวนสูงสุดที่เป็นไปได้ภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นออร์โธโกนัลกับองค์ประกอบก่อนหน้านี้ องค์ประกอบหลักของ Trajectory matrix (T) อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$PC = T' \times V \quad (7.7)$$

3. วิธีการจัดกลุ่มขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน

วิธีการจัดกลุ่มขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อนคือการแบ่งเมทริกซ์พื้นฐาน A_i ออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ (ควรน้อยกว่า d) และเพิ่มเมทริกซ์ในทุกกลุ่ม จะเรียกขั้นตอนว่าการจัดกลุ่มขั้นต้น ถ้าจำนวนกลุ่มจะเท่ากับ d การวิจัยในปัจจุบันเป็นไปตามขั้นตอนของการจัดกลุ่มขั้นต้นอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$A = \sum_{i=1}^d A_i = \sum_{i=1}^d \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T \quad (i = 1, 2, \dots, d) \quad (7.8)$$

4. ขั้นตอนการหาค่าเฉลี่ยในแนวทแยง

ในขั้นตอนนี้ แต่ละเมทริกซ์ A_i จะถูกถ่ายโอนไปยังลำดับเวลาใหม่ ซึ่งเราจะสมมติว่าเมทริกซ์แต่ละอันของ A_i ที่มีองค์ประกอบ (i, j) เป็นเมทริกซ์ที่มีขนาดเท่ากับ $(L \times L)$ ที่อยู่ในรูปสมการดังนี้

$$A_i = \begin{bmatrix} a_{(1,1)} & a_{(1,2)} & a_{(1,3)} & \dots & a_{(1,L)} \\ a_{(2,1)} & a_{(2,2)} & a_{(2,3)} & \dots & a_{(2,L)} \\ a_{(3,1)} & a_{(3,2)} & a_{(3,3)} & \dots & a_{(3,L)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{(L,1)} & a_{(L,2)} & a_{(L,3)} & \dots & a_{(L,L)} \end{bmatrix} \quad (7.9)$$

ตอนนี้ เมทริกซ์ A_i จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในอยู่ของลำดับเวลาใหม่ $a_1, a_2, \dots, a_k, \dots, a_N$ คือ

$$\tilde{a}_k^N = \begin{cases} \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k a_{(m,k-m+1)} & \text{for } 1 \leq k < L \\ \frac{1}{L} \sum_{m=1}^k a_{(m,k-m+1)} & \text{for } k = L \\ \frac{1}{N-k+1} \sum_{m=1}^k a_{(m,k-m+1)} & \text{for } L < k \leq N \end{cases} \quad (7.10)$$

การหาค่าเฉลี่ยในแนวทแยงมุมของเมทริกซ์ทั้งหมดของ A_i จะสร้างลำดับที่สร้างขึ้นใหม่ของลำดับดั้งเดิม T ถูกลดไปรวมกันของลำดับที่สร้างใหม่ เช่น

$$t_p = \sum \tilde{a}_k^N \quad \text{where } (p=1,2,3,\dots,N) \quad (7.11)$$

การแยกตัวประกอบนี้เป็นผลลัพธ์หลักของอัลกอริทึม SSA ที่จะนำ \tilde{a}_k^N ไปใช้การทำนายค่า VTEC

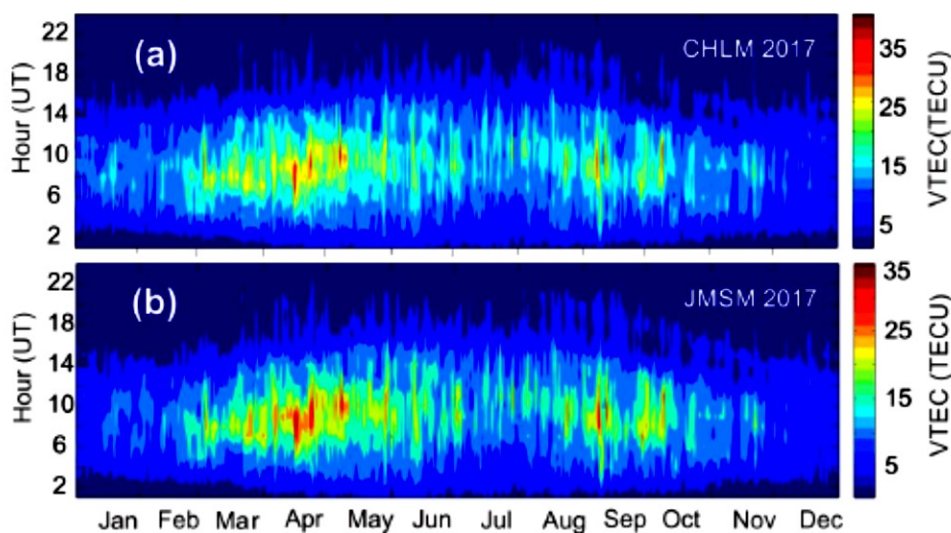
หลังจากที่ได้ทำการพัฒนาอัลกอริทึม SSA สำหรับ PPP-RTK แล้ว ผู้วิจัยจะทำการทดสอบและทำการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ โดยการคำนวณรากที่สองของค่าความผิดพลาดยกกำลังเฉลี่ย (Root Mean Square Error หรือ RMSE) ระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่จำลองได้ สูตรสำหรับค่า RMSE สามารถกำหนดได้โดยนิพจน์ต่อไปนี้:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{TEC=1}^N \frac{1}{N} (GPS_{TEC} - Model_{TEC})^2} \quad (7.12)$$

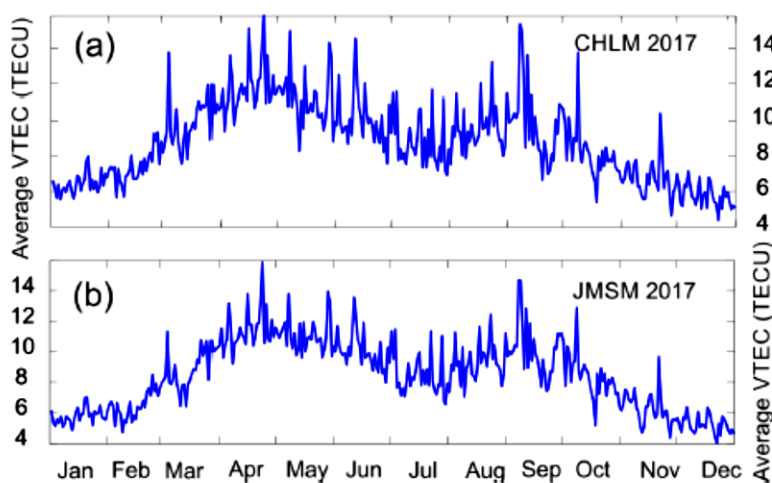
โดยที่ N คือจำนวนการสังเกต GPSTEC และ ModelTEC อ้างถึง GPS-TEC และ TEC ที่ได้รับจากผลลัพธ์ของแบบจำลอง SSA, GIM และ IRI-Plas ตามลำดับ

ในที่นี้ จะขอยกตัวอย่างผลงานวิจัยของคณะผู้วิจัยที่เคยนำเสนอก่อนหน้านี้ ได้แก่ ผลการเปลี่ยนแปลงอนุกรมเวลาของ VTEC เหนือพื้นที่ประเทศเนปาล [3] เริ่มต้นจากการพิจารณาอนุกรมเวลารายชั่วโมงของการเปลี่ยนแปลง VTEC ในกิจกรรมโซลาร์ต่ำปี 2017 จากสถานี GPS ที่พิจารณาในเวกเตอร์ T ซึ่งในเวกเตอร์ T นี้จะถูกเรียกว่าชุดข้อมูลเริ่มต้น จะมีจุดข้อมูลทั้งหมด 24×365 นั้นหมายถึงความยาวของข้อมูลเริ่มต้นที่มีเท่ากับ 8760 คะแนน ซึ่ง 8760 จุดเหล่านี้สำหรับสถานี CHLM และ JMSM ถูกอธิบายไว้ในรูปที่ 7.1 โดยใช้จุดแสดงรูปร่าง เป็นที่ชัดเจนจากโครงร่างที่ว่ารูปแบบการเปลี่ยนแปลงรายชั่วโมงของ VTEC นั้นลดลงประมาณ 4 TECU ในช่วงเช้าและค่าชั่วโมงตลอดทั้งปี ยิ่งไปกว่านั้นมันแตกต่างกันจาก 5 ถึง 10 TECU ตลอดทั้งวันเริ่มต้นปี เช่น มกราคม, กุมภาพันธ์ และสิ้นปี เช่น พฤศจิกายน และธันวาคม VTEC เผยการเติบโตจากตั้งแต่เช้าถึงค่ำ ค่าสูงสุดของ VTEC

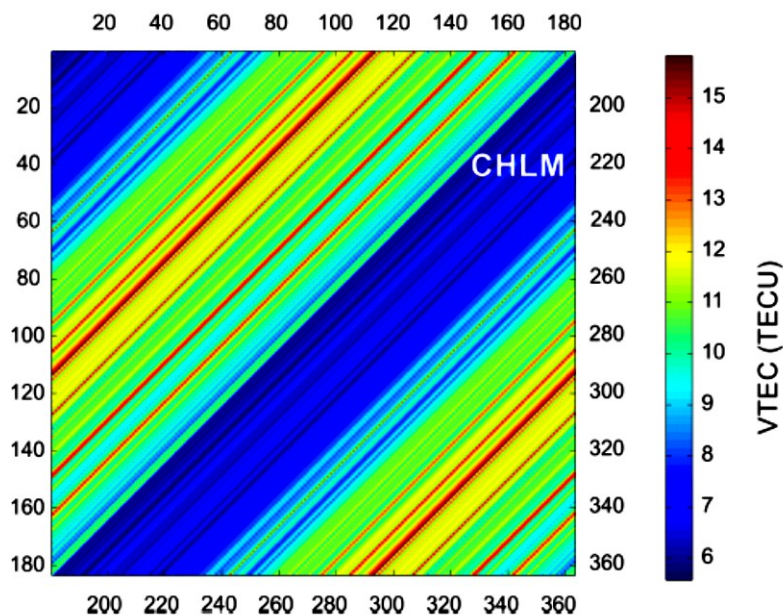
(ประมาณ 15 ถึง 30 TECU) หลังจากเวลากลางวันและลดลงเป็นค่าต่ำสุดก่อนช่วงค่ำในช่วงเดือนมีนาคมถึงตุลาคม โดยมีความแตกต่างของเวลาระหว่าง 1 ถึง 2 ชั่วโมง กล่าวคือ VTEC แสดงแนวโน้มปกติของการเปลี่ยนแปลงรายวันที่มีขนาดต่ำสุดในช่วงเช้าและค่าและสูงที่สุดในช่วงกลางวัน ผลลัพธ์นี้เป็นไปตามการหมุนของโลกในวงรีวงรี



รูปที่ 7.1 รูปแบบ VTEC รายชั่วโมงที่สถานี CHLM และ JMSM ระหว่างปี 2017



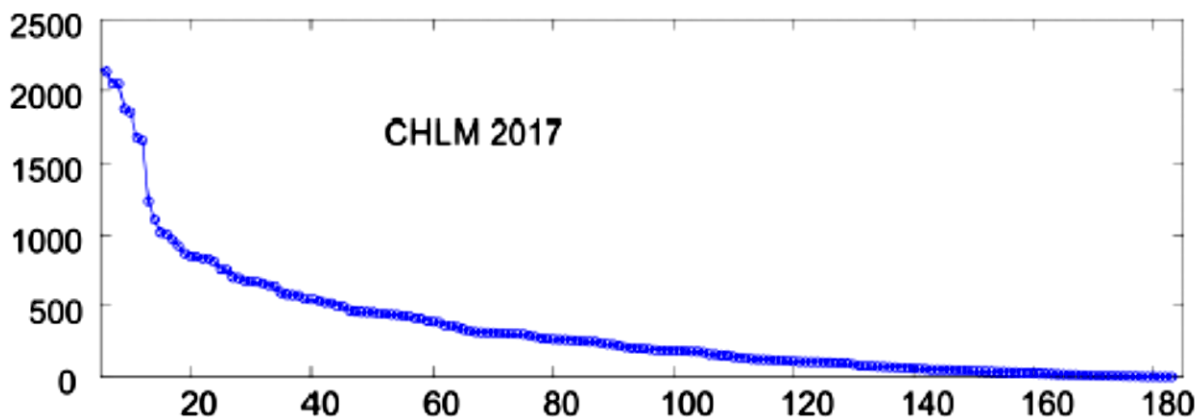
รูปที่ 7.2 รูปแบบ VTEC รายวันที่สถานี CHLM และ JMSM ระหว่างปี 2017



รูปที่ 7.3 เมทริกซ์วิธีถือนุกรมเวลาของ VTEC ที่สถานี CHLM ระหว่างปี 2017

5. หาเมทริกซ์วิธีถือนุกรมเวลา

รูปแบบ VTEC รายวันโดยใช้ค่าเฉลี่ยรายวันตลอดทั้งปี 2017 ได้รับการลงจุดในรูปที่ 7.2 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลง VTEC ทุกครั้งปีตลอดปี พล็อตแสดงขั้นต่ำในเดือนมกราคม (ประมาณ 5 TECU) ที่สูงสุดในเดือนเมษายน (ประมาณ 15 TECU) จากนั้นจะลดลงในเดือนมิถุนายนถึงกรกฎาคม (ประมาณ 10 TECU) ตามด้วยการเพิ่มขึ้นอีกขนาด เพื่อเข้าถึงสูงสุดที่สองในช่วงเดือนสิงหาคม (ประมาณ 15 TECU) และต่อมาลดลงจนมาถึงเดือนธันวาคม (ประมาณ 5 TECU) ได้วางแผนเส้นทางสำหรับค่าเฉลี่ยรายวันของการเปลี่ยนแปลง VTEC สำหรับสถานี-CHLM ในรูปที่ 7.3 โดยทั่วไปเมทริกซ์วิธีถือนุกรมเวลาเป็นเมทริกซ์ Hankel ซึ่งจะเป็นเมทริกซ์สมมาตร พฤติกรรมรายวันของ VTEC แสดงการเปลี่ยนแปลงครั้งปีระหว่างปี 2017 ซึ่งยืนยันความแปรปรวนสมมาตรของ VTEC สำหรับการวิเคราะห์เพิ่มเติม VTEC สำหรับครึ่งขึ้นไป (1 ถึง 183) ของปีได้แสดงค่า 185 ในแกน x ในขณะที่ VTEC สำหรับวันที่ลดลงในครึ่งลง (183 ถึง 365) ของปีถูกพล็อตในแกน y จะเห็นได้ว่าตัวเลขนั้นแบ่งออกเป็นสี่แถบอย่างชัดเจน แถบที่หนึ่งและสามมีค่าที่ค่อนข้างสูงในขณะที่แถบที่สองและสี่มีค่าที่ต่ำกว่าซึ่งเสริมการเปลี่ยนแปลงครั้งปีที่แข็งแกร่งในช่วงปี 2560 สิ่งนี้เกิดขึ้นเมื่อจุดย่อยข้ามเส้นศูนย์สูตรระหว่าง Equinoxes (มีนาคมและกันยายน) photoionization สูง ในขณะที่จุด subsolar ยังคงอยู่รอบ ๆ ซีกโลกเหนือในช่วงเดือนมิถุนายนและข้ามซีกโลกใต้ในช่วงเดือนธันวาคมซึ่งส่งผลให้มีการ photoionization ต่ำ โดยปกติในเดือนมิถุนายนจะแสดงค่าสูงกว่าในเดือนธันวาคม แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาที่ผ่านมาอย่างอ้างถึงความผิดปกติในพฤติกรรมแสดงให้เห็นถึงความผิดปกติในฤดูร้อนที่มี VTEC สูงกว่าในซีกโลกฤดูร้อนมากกว่าความผิดปกติในฤดูหนาว รายงานขนาด VTEC ที่ค่อนข้างสูงในซีกโลกฤดูหนาว



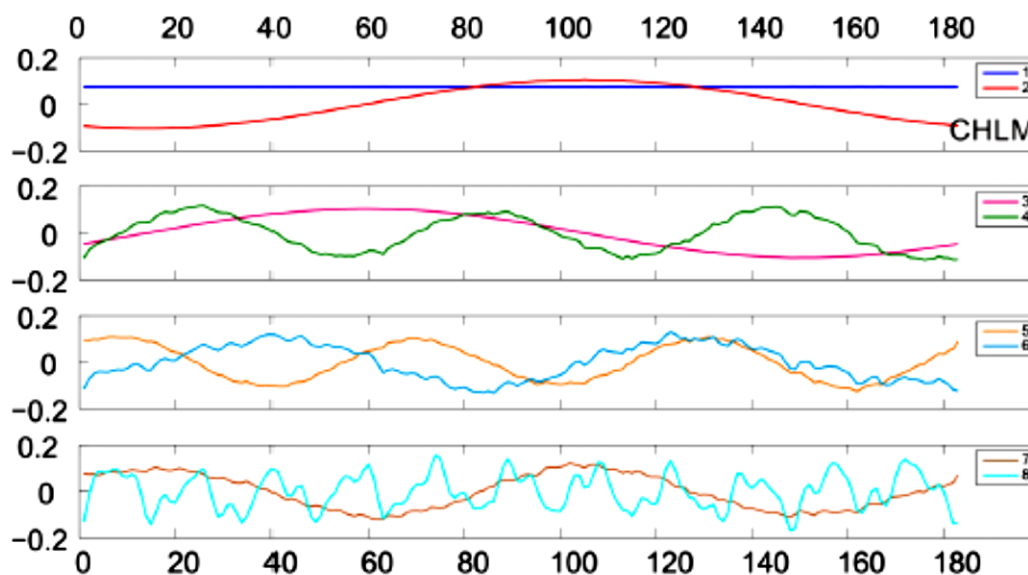
รูปที่ 7.4 เมทริกซ์วิถีของชุดเวลา VTEC ที่สถานี CHLM ในช่วงปี 2017

6. การวิเคราะห์ SVD อนุกรมเวลาของ VTEC

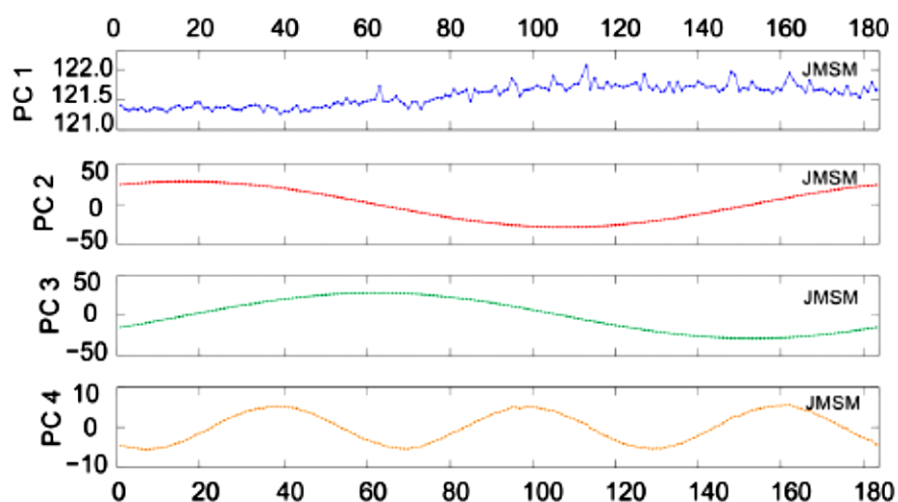
เมทริกซ์การเคลื่อนที่อนุกรมเวลาของ VTEC ได้ถูกแยกย่อยเป็นค่าลักษณะเฉพาะและค่าฟังก์ชันเฉพาะ ค่าลักษณะเฉพาะและผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นนั้นนำเสนอคำอธิบายที่เป็นนามธรรมและเชิงเวลาของการพัฒนาเฟสเปซ ตลอดเวลาที่เลือกและติดตามการรบกวนของสนามแม่เหล็ก เช่น พายุแม่เหล็ก จากรูปที่ 7.4 แสดงว่าค่าลักษณะเฉพาะเป็นค่าบวกทั้งหมดและ $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \dots \geq \lambda_L$ สิ่งนี้สอดคล้องกับการรบกวนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ลดลง ยิ่งไปกว่านั้นค่าลักษณะเฉพาะได้รับคำสั่งเพื่อให้ปฏิบัติตามคำสั่งที่ลดลงของการกระจายรัศมี ฟังก์ชัน eigenfunctions ที่สลายตัวของเมทริกซ์วิถีให้วิธีที่มีประสิทธิภาพในการอธิบายวิวัฒนาการของการติดตามการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันที่ขอบด้านในของพลาสมา เราได้วางแผน 8 Eigenvectors เริ่มต้น (V1, V2, ..., V8) ของเมทริกซ์ CHLM Trajectory ในรูปที่ 7.5 ค่าเดี่ยวแรก (V1) ทำซ้ำผลกระทบจากแสงอาทิตย์ในการสังเกตการณ์ ionospheric TEC และเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของกิจกรรมแสงอาทิตย์ F10.7 สัญญาณของค่าเดี่ยวที่สอง V2 เป็นค่าบวกและค่าลบที่ระบุความกว้างของยอดเขาตามฤดูกาลและ dips 208 มันสูงที่สุดในฤดูร้อนและต่ำสุดในฤดูหนาว ค่าเดี่ยวที่สาม (V3) แสดงให้เห็นว่า VTEC จะได้รับการปรับปรุงในระหว่างฤดู Equinoxes ในขณะที่ยังคงต่ำกว่าในช่วงโซลติสซ์ ถ้าเราดูค่าสัญญาณ V4 ที่สี่มันจะมีสามยอดและสามค่าขึ้นในระหว่างการแปรผันแบบสมมาตรรายปีซึ่งอาจบ่งบอกถึงความแปรปรวนรายเดือนของค่า VTEC ค่าสูงสุดที่เป็นเอกเทศ V5, V6 และ V7 และโครงสร้างที่ขึ้นในรูปแบบ VTEC ไม่ต่อเนื่อง มันยากมากที่จะตีความหรือสร้างความสัมพันธ์กับปรากฏการณ์ปกติใด ๆ ซึ่งถือว่าเป็นข้อผิดพลาดเสียงที่เกี่ยวข้องในสัญญาณ ในทำนองเดียวกันค่า V8 และค่าเดี่ยวต่อไปนี้อย่างไม่มีรูปแบบที่รู้จักได้ตลอดทั้งปี ดังนั้นพวกมันจึงสามารถถูกพิจารณาว่าเป็นความผิดพลาดของสัญญาณรบกวนและไม่ถูกนำมาพิจารณาในการสร้างแบบจำลองชั้นไอโอโนสเฟียร์

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ยังได้ทำการวิเคราะห์ค่า principle component (PC) ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของ VTEC ที่เกิดขึ้นที่สถานี GNSS เหนือประเทศเนปาลด้วย โดยเทคนิค PC ใช้คุณสมบัติของค่าลักษณะเฉพาะหลักเพื่อแยกแยะโครงสร้างเชิงพื้นที่ด้วยความผิดปกติของชั้นไอโอโนสเฟียร์โดยการพิจารณาการมีส่วนร่วมที่สำคัญต่อความแปรปรวนโดยรวม โดยสังเขปความแปรปรวนของบรรยากาศรอบนอกถูกเน้นโดยค่าไอเก้นเวกเตอร์ ในขณะที่

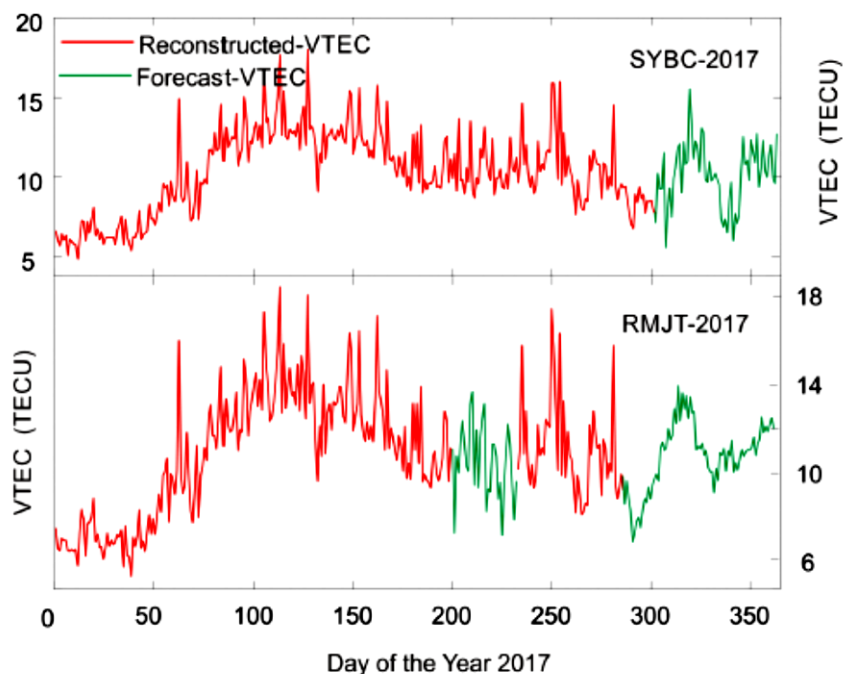
ที่ลักษณะทางโลกนั้นถูกนำเสนอโดยส่วนประกอบหลักและถูกเรียกรวมกันว่า “โหมด” ซึ่งโหมดหลักที่มีค่าลักษณะเฉพาะสูงสุดมีความแปรปรวนส่วนใหญ่ตามด้วยโหมดต่อมาที่มีค่าลักษณะเฉพาะค่อนข้างน้อย เราวางแผนส่วนประกอบหลักเริ่มต้นที่ 1 ถึง 4 ในอนุกรมเวลาของ VTEC ที่สถานี JMSM ในรูปที่ 7.6 การสนับสนุนความแปรปรวนของโหมดแรกคือ 51% ในขณะที่การสนับสนุนโหมดที่สองต่อความแปรปรวนคือ 27% ดังที่เราเห็นได้จากตัวเลขโหมดแรกแสดงการเปลี่ยนแปลงครึ่งปีทั้งรายวันและโหมดที่สองแสดงการเปลี่ยนแปลงครึ่งปีตามฤดูกาลของเว็บไซต์ JMSM คำอธิบายที่คล้ายกันสำหรับโหมดความแปรปรวนได้รับการสาธิตโดย Meza และคณะ [43]



รูปที่ 7.5 ค่า Eigenvectors ที่เกิดขึ้นของสถานี CHLM



รูปที่ 7.6 องค์ประกอบหลักอันดับที่ 1 ถึง 4 ในอนุกรมเวลาของ VTEC ที่สถานี JMSM



รูปที่ 7.7 ค่า VTEC ที่สร้างใหม่ (สีแดง) และที่ทำนายได้ (สีเขียว) ที่สถานี SYBC และ RMJT ในปี 2017

หลังจากนั้น ผู้วิจัยก็ได้ทำการสร้างค่า VTEC ใหม่ที่เปลี่ยนแปลงทางเวลา (อนุกรมเวลา) พบว่า การตรวจสอบอนุกรมเวลา VTEC ที่สถานี JMSM และ CHLM ในส่วนก่อนหน้าซึ่งมีข้อมูลรายปี แต่ไม่มีข้อมูลรายปีอย่างต่อเนื่องสำหรับเว็บไซต์อื่น ๆ ตอนนี้เราต้องวิจัยการสร้างใหม่และการคาดการณ์ค่า VTEC ที่เว็บไซต์ต่าง ๆ ดังนั้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการสร้างใหม่สถานี SYBC จึงถูกเลือกซึ่งมีข้อมูลอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วันที่ 1 มกราคมถึง 31 ตุลาคม (302 วัน) เราเริ่มตรวจสอบส่วนประกอบที่สร้างใหม่จากจุดเริ่มต้นและเปรียบเทียบกับชุดเวลาดั้งเดิม องค์ประกอบการสร้างใหม่ครั้งแรกแสดงให้เห็นว่าข้อมูล SSA ที่ทำตัวเป็นแบบ VTEC และการสังเกต GPS-VTEC นั้นมี CC เท่ากับ 0.7022 นั้นหมายความว่าพวกมันเกี่ยวข้องกัน 70.22% แต่มันก็ยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และในที่สุด CC ถึง 1.000 ที่ส่วนประกอบการสร้างใหม่ครั้งที่ 145 นั้นหมายความว่า VTEC ซีรี่ดั้งเดิมนั้นมีความเกี่ยวข้อง 100% กับค่าคาดการณ์ VTEC ของ SSA ดังนั้น จึงสนับสนุนว่าวิธี SSA เป็นเครื่องมือที่ประสบความสำเร็จในการคาดการณ์ชุด VTEC และตามความรู้ที่ดีที่สุดของเราไม่มีรูปแบบที่ดีกว่านี้ได้รับการทดสอบสำหรับการทำนายการแปรผันของไอโอโนสเฟียร์ในภูมิภาค แล้วผู้วิจัยก็ได้ทำนายค่า VTEC ทางอนุกรมเวลา โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากสถานี SYBC จากวันที่ปี 001 ถึง 302 และสถานี RMJT สำหรับ 001 ถึง 199 และ 233 ถึง 286 ก่อนอื่นเราสร้างข้อมูลที่มีอยู่ใหม่โดยวิธี SSA แล้วคาดการณ์ส่วนที่เหลือ (สำหรับ SYBC 303 ถึง 365 และ สำหรับ RMJT 200 ถึง 232 และ 287 ถึง 365) วัน (รูปที่ 7.7) สีแดงแสดงค่าที่ทำนายและสีเขียวใช้สำหรับค่าที่คาดการณ์ ตอนนี้ด้วยการใช้รูปนี้เราสามารถประเมินพฤติกรรม VTEC ได้ตลอดทั้งปี ตัวเลขแสดงพฤติกรรมรายวันที่เว็บไซต์ SYBC และ RMJT สถานีทั้งสองแสดงค่าต่ำในช่วงฤดูหนาวที่ค่อย ๆ มาถึงจุดสูงสุดในช่วงฤดูร้อนมีนาคมและลดลงหลังจากนั้น จะถึงค่าต่ำสุด ในฤดูหนาวจนถึงเดือนกันยายนซึ่งเท่ากับแนวโน้มปกติของ TEC ในหนึ่งปี นอกจากนี้ ผู้วิจัยก็ได้ทำการศึกษาทฤษฎีคาลมานฟิลเตอร์แบบทั่วไป (Kalman Filter หรือ KF) กับทฤษฎีคาลมานฟิลเตอร์แบบปรับตัว

ได้ (Adaptive Kalman Filter) เพื่อจะนำมาใช้ในการประมาณค่าความผิดพลาดในการระบุพิกัดแบบ 3 มิติ (North, East, Up) ร่วมกับวิธี SSA ซึ่งจะทำให้การระบุพิกัดแบบเรียลไทม์ (RTK) สำหรับเครื่องรับ GNSS ที่อยู่ในเทคโนโลยี 5G, โดรน, UAV ฯลฯ มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น รายละเอียดหลักการทำงานและสมการการคำนวณต่างๆ ของวิธี KF และวิธี Adaptive KF สำหรับระบบ GNSS สามารถอ่านเพิ่มเติมได้ในหัวข้อที่ 2.2.2.3.4

7.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา KF-SSA



รูปที่ 7.8 ตำแหน่งการเคลื่อนที่แบบเรียลไทม์ (RTK) ของโดรนในวันที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2564

ในโครงการศึกษาฯ นี้ คณะผู้วิจัยได้ทำการเก็บค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่แบบเรียลไทม์ (RTK) ของโดรนดังแสดงไว้ในรูปที่ 38 ประมาณ 50 นาที (ตั้งแต่เวลา 07:37 - 08:28) ในวันที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2564 เมื่อเทียบกับสถานีฐานที่ตำแหน่ง 13.84°N ; 100.29°E เหตุผลที่คณะผู้วิจัยเลือกวันที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2564 (DOY 132) เนื่องจากมีการปรากฏพายุแม่เหล็กไฟฟ้าที่รุนแรงมากที่สุดของปี พ.ศ. 2564 (พายุระดับ G3 ด้วยดัชนี Kp เท่ากับ 7) ตัว coronal mass ejection (CME) ได้ถูกส่งออกมาจากดวงอาทิตย์ในวันที่ 9 พฤษภาคม พ.ศ. 2564 ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการระเบิดของพลาสมาบนพื้นผิวดวงอาทิตย์ สัญญาณความรุนแรง (shock signature) จาก CME ถูกสังเกตได้จากข้อมูลดาวเทียม ACE และ DSCOVR ที่เวลาประมาณ 05:50 (UT) ในวันที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2564 และจุดแรกบนโลกที่บันทึกได้ทันทีเกิดขึ้นหลังจากตอน 06:30 (UT) ในตอนเช้าของวันที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2564 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ถูกรบกวนและสร้างความรุนแรงของพายุไปจนถึงระดับ G3 สิ่งนี้มีความสัมพันธ์กับช่วงเวลาของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ (interplanetary magnetic field หรือ IMF: มาตรฐานวัดลมสุริยะ) ที่พุ่งไปทางทิศใต้ จนกระทั่ง IMF มีการเปลี่ยนทิศทางการกลับทางทิศเหนือ ดังนั้นกิจกรรมแม่เหล็กโลกมีแนวโน้มที่จะลดความรุนแรงลง [8] ข้อมูล GNSS ได้ถูกประมวลผลโดยใช้ซอฟต์แวร์ RTKLib [9] และตำแหน่งและความเร็วของผู้ใช้งาน (rover) ที่มีความไม่แน่นอนได้ถูกบันทึกและแสดงให้เห็นในโครงการศึกษาฯ นี้

7.4 ขั้นตอนการศึกษาและทดสอบวิธี KF-SSA ที่นำเสนอ

ขั้นตอนการศึกษาและปรับปรุงวิธี RTK ด้วยวิธีการใหม่ เรียกว่า เทคนิค KF-SSA ให้แก่เครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในอุปกรณ์เทคโนโลยี 5G, โดรนและ UAV ฯลฯ สำหรับโครงการศึกษาฯ นี้ มีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 - ทำการตรวจจับสภาวะการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและการเกิดขึ้นของพลาสมาบับเบิล รวมถึงทำขั้นตอนต่าง ๆ แล้วมีการนำค่าข้อมูลต่าง ๆ มาประมวลผลในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 2 - ทำการรวบรวมค่าข้อมูลการเคลื่อนที่ 3 มิติของเครื่องรับ GNSS ในอุปกรณ์ UAV (ที่มีการติดตั้ง GNSS, RTK) ได้แก่ พิกัด, ความเร็ว และความเร่ง

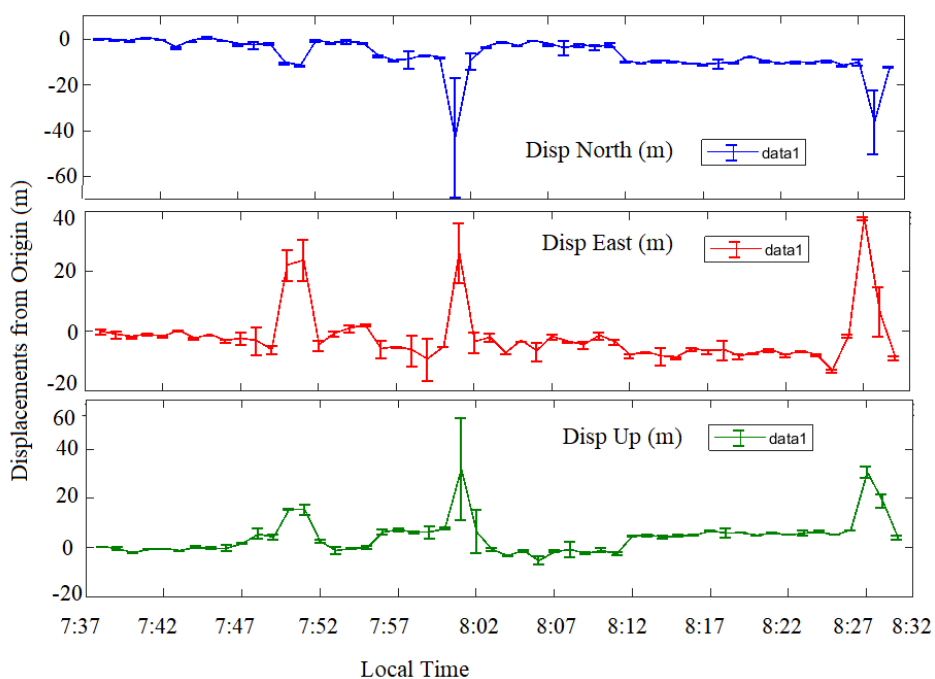
ขั้นตอนที่ 3 - ทำรับค่าพิกัด ณ ขณะนั้นของเครื่องรับ GNSS

ขั้นตอนที่ 4 - ใช้กาลมานฟิลเตอร์ (KF) ทำนายพิกัดของเครื่องรับ GNSS ให้แก่ RTK (วิธีเดิมของ [44-45])

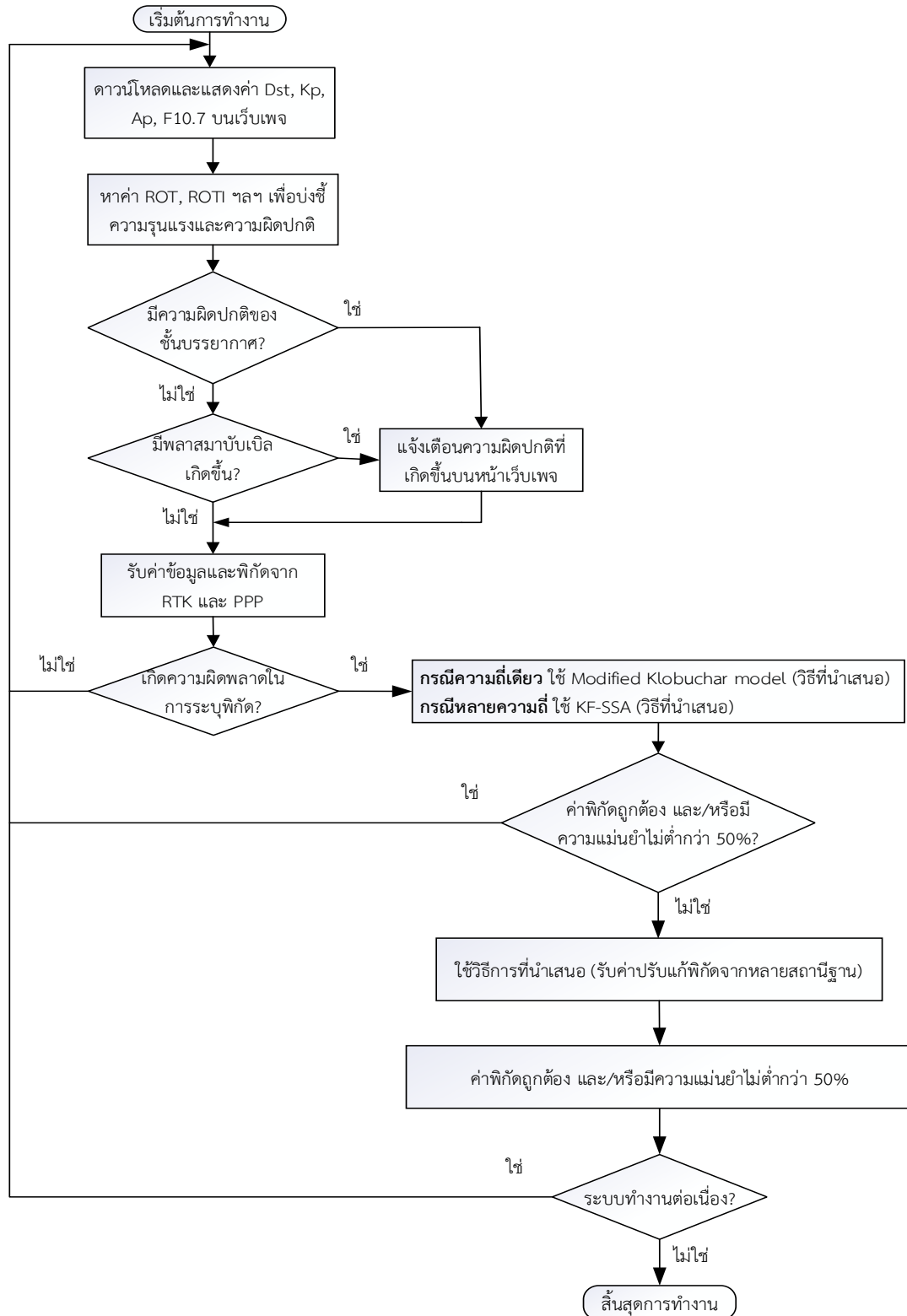
ขั้นตอนที่ 5 - ใช้เทคนิค SSA ร่วมกับพิกัดที่ทำนายได้ด้วยวิธีกาลมานฟิลเตอร์ (วิธี KF-SSA) ให้แก่ RTK (วิธีใหม่ที่น่าสนใจ) และตรวจสอบความแม่นยำของพิกัดที่ได้รับของเครื่องรับ GNSS

ขั้นตอนที่ 6 - ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีใหม่ KF-SSA ที่นำเสนอกับวิธี KF ที่มีการนำเสนอก่อนหน้านี้ในการระบุพิกัดของเครื่องรับ GNSS

พล็อตชาร์ตที่แสดงขั้นตอนการทำงานโดยรวมของวิธีการแก้ปัญหาความผิดพลาดในการระบุพิกัดแบบเรียลไทม์ RTK ของเครื่องรับ GNSS ในเทคโนโลยีสื่อสาร 5G, โดรน และ UAV ฯลฯ มีแสดงไว้ในรูปที่ 39 ดังนี้

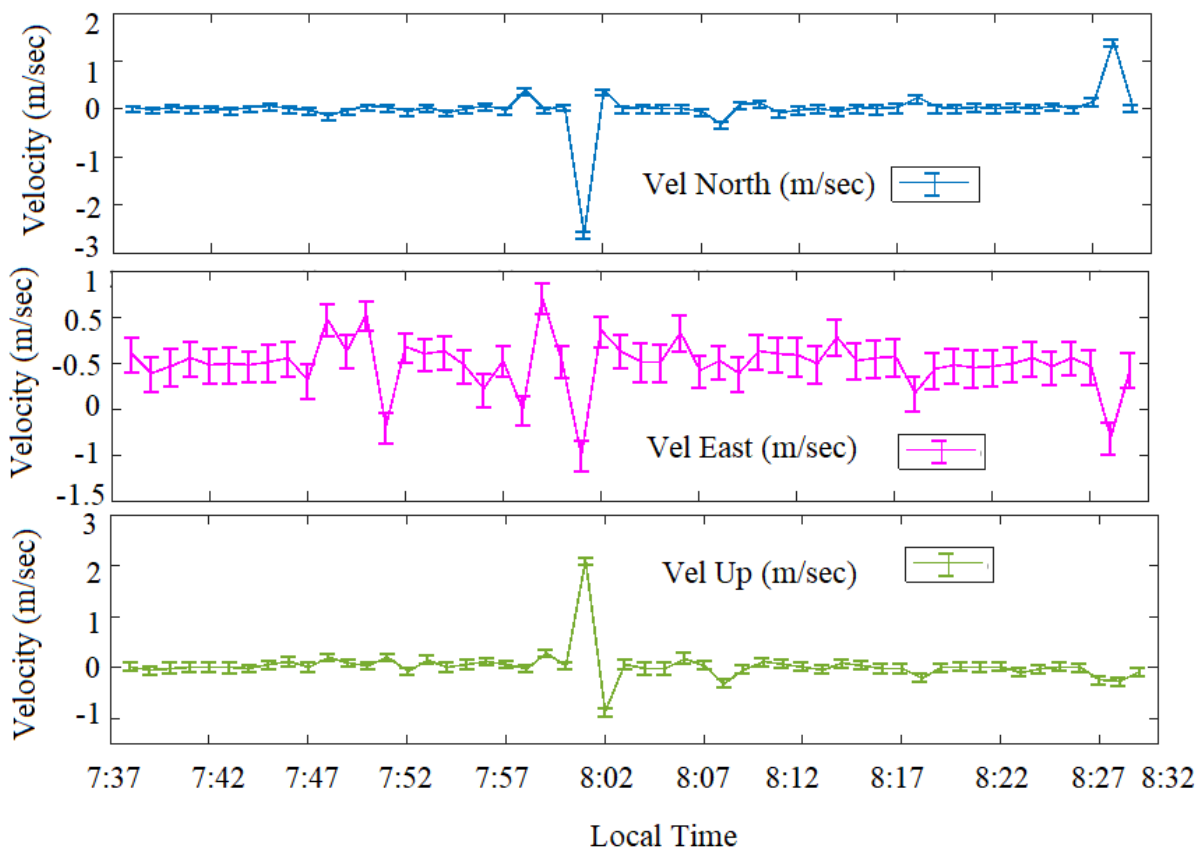


รูปที่ 7.10 ตำแหน่งของโรเวอร์ (โดรน) ที่เคลื่อนที่ (RTK drone) ที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน



รูปที่ 7.9 โฟลว์ชาร์ตแนวทางแก้ไขปัญหาทั้งหมดของโครงการศึกษา ที่นำเสนอ พร้อมกับการใช้งานวิธี KF-SSA

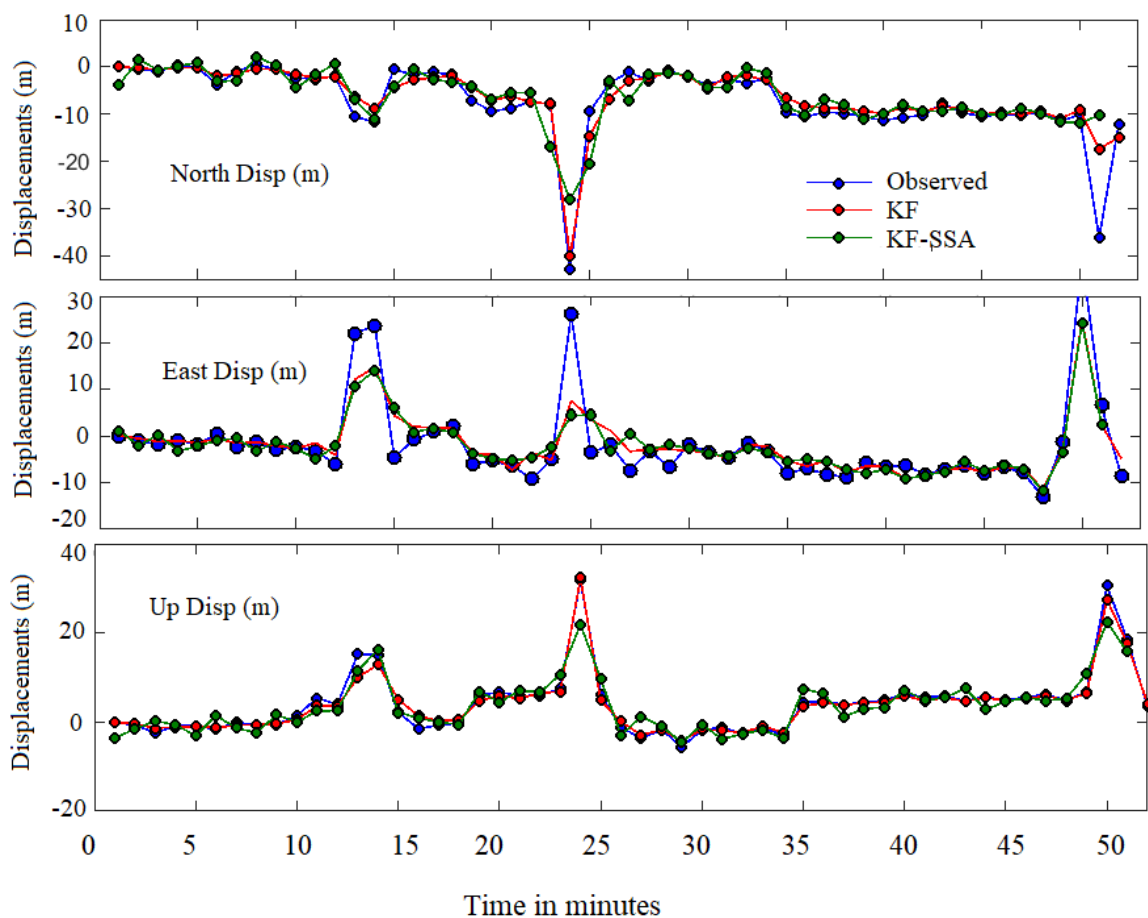
รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ



รูปที่ 7.11 ความเร็วของโรเวอร์ (โดรน) ที่เคลื่อนที่ (RTK drone) ที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน

7.5 ผลการศึกษาวิธี KF-SSA [46]

ข้อมูล GNSS ที่ถูกได้รับและเก็บบันทึกไว้ในรูปแบบ Rinex ได้ถูกประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ RTKLib ตำแหน่งและความเร็วของโรเวอร์ที่เกิดความไม่แน่นอนในการเคลื่อนที่มีแสดงไว้ในรูปที่ 7.10 และ 7.11 ตามลำดับ จุดเริ่มต้นของโดรนถูกพิจารณาว่าเป็นจุดกำเนิด และระยะขจัดจากจุดดังกล่าวไปในทิศทาง north-east และ up ได้ถูกประมาณค่าตามเวลา แกน x ของกราฟแสดงเวลาของข้อมูลที่จัดเก็บ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าโดรนกำลังเคลื่อนที่อย่างราบเรียบด้วยค่าพิกัดในทิศใต้, ตะวันออกและในแนวตั้ง ซึ่งข้อมูลประเภทนี้มีความเหมาะสมต่อการศึกษาศมรรถนะของ SSA สำหรับจุดประสงค์ของการระบุพิกัดเป็นอย่างดี กราฟความเร็วของโดรนในทิศทางเหนือ, ตะวันออกและแนวตั้งมีแสดงไว้ในรูปที่ 7.11 ความเร็วและตำแหน่งของโดรน รวมถึงพิกัดที่ประมาณค่าได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.12 ซึ่งจะถูกใช้เป็นสัญญาณอินพุตให้กับกาลมานฟิลเตอร์ หลังจากนั้นเทคนิค SSA ก็จะถูกนำมาใช้งานและพิกัดก็จะถูกทำนายค่าออกมา พิกัดที่สังเกตได้จะแสดงด้วยเส้นทึบสีน้ำเงิน ส่วนพิกัดที่ทำนายได้จากวิธี KF ทั้งหมดและวิธี KF-SSA ที่นำเสนอจะถูกแสดงด้วยเส้นทึบสีแดงและสีเขียว ตามลำดับ เราจะเห็นได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 7.12 ว่า “พิกัดที่วัดได้จริงกับพิกัดที่ทำนายได้จากวิธี KF แสดงตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงไม่แน่นอนเสมอ ส่วนพิกัดที่ทำนายได้จากวิธี KF-SSA จะให้ค่าตำแหน่งที่เรียกว่าในองค์ประกอบทั้ง 3 แกน (เหนือ, ตะวันออกและแนวตั้ง)



รูปที่ 7.12 พิกัดที่วัดได้จริง, พิกัดที่ได้จากวิธี KF และพิกัดที่ได้จากวิธี KF-SSA ในแนวเหนือ, ตะวันออกและแนวตั้ง

เพื่อที่จะตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองหรือเทคนิคที่น่าเสนอ ค่า root mean square (RMS) ได้ถูกประมาณค่าออกมาและได้แสดงไว้ในตารางที่ 7.1 พบว่า ค่า RMS หลังจากที่ใช้วิธี KF แล้วจะปรับปรุงความแม่นยำประมาณ 14.35% ในทิศเหนือ, 31.80% ในทิศตะวันออกและ 7.07% ในทิศแนวตั้ง และค่า RMS ของตำแหน่งที่ถูกรวมกันทุกค่าจะมีค่าสูงถึง 16.94% ทั้งนี้ หลังจากที่ใช้วิธี KF-SSA ที่นำเสนอ พบว่า ค่า RMS ได้ถูกประมาณค่าและสมรรถนะความแม่นยำในการระบุพิกัดแบบเรียลไทม์ได้ถูกปรับปรุงดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ค่า RMS ในทิศเหนือได้รับการปรับปรุงจาก 14.35% ของวิธี KF อย่างเดียวไปสู่ค่า 20.22% ด้วยวิธี KF-SSA (ปรับปรุงสูงถึง 41% ซึ่งแน่นอนถ้าเปรียบเทียบกับพิกัดจริงที่คลาดเคลื่อนไปก็แสดงว่าได้รับการปรับปรุงเกิน 50% อย่างแน่นอน) ค่า RMS ในทิศตะวันออกได้รับการปรับปรุงจาก 31.80% ของวิธี KF อย่างเดียวไปสู่ค่า 33.24% ด้วยวิธี KF-SSA (ปรับปรุงดีขึ้น 4.5%) ส่วนค่า RMS ในแนวตั้งได้รับการปรับปรุงจาก 7.07% ของวิธี KF อย่างเดียวไปสู่ค่า 13.20% ด้วยวิธี KF-SSA (ปรับปรุงดีขึ้น 86.7%) หลังจากนั้น เราได้รวมตำแหน่ง 3-D และค่าความผิดพลาดที่ประมาณได้ทั้งหมด พบว่า ค่า RMS ของตำแหน่งที่สังเกตได้ที่ 9.47 เมตร จะมีค่าที่ลดลงเท่ากับ 7.87 เมตรหลังจากที่ใช้วิธี KF และมีค่าที่ลดลงเท่ากับ 7.35 เมตรหลังจากที่ใช้วิธี KF-SSA แล้ว

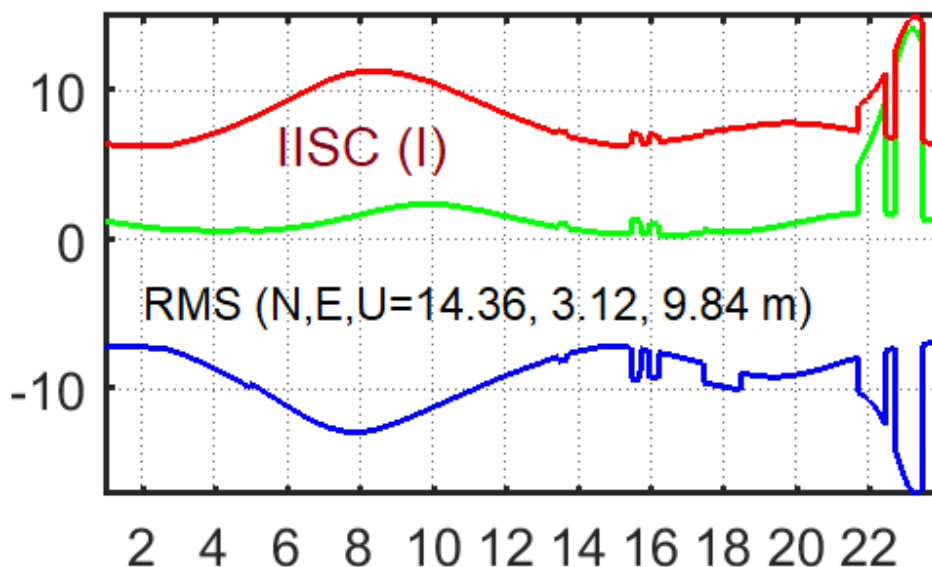
เมื่อไม่นานมานี้ Ansari [7] ได้ประเมินสมรรถนะของวิธี KF-SSA โดยใช้ข้อมูลรถยนต์ที่เคลื่อนที่แบบเรียลไทม์และติดตั้งอุปกรณ์ GNSS รุ่น Swift Piksi Multi 1.2 FW and u-blox M8T ที่เข้าถึงได้ที่เว็บไซต์ http://rtkexplorer.com/downloads/gpsdata/?fbclid=IwAR2O_8ixUQMxdanYUeFnhpgFGgoA0lxBJTa2pEi8h7C53LG6-cTV7qSJ7_M ดังนั้น ค่าข้อมูลรถยนต์เรียลไทม์นี้จะถูกนำมาใช้งานเพื่อยืนยันความถูกต้องของวิธี KF-SSA ที่นำเสนอในโครงการศึกษาฯ นี้ จากการทดสอบประสิทธิภาพการทำงาน พบว่า ค่า RMS จากการระบุพิกัดด้วยวิธี KF ในทิศ (N, E, U) ที่มีค่าเท่ากับ (7.21, 4.42, and 4.20) เมตร มีค่าที่ลดลงได้หลังจากที่นำวิธี KF-SSA มาทดสอบการทำงาน โดยค่า RMS จะมีค่าที่ลดลงโดยมีค่าเท่ากับ (4.53, 3.9, 3.19) เมตร ตามลำดับ ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่า “ถึงแม้ว่าค่าความผิดพลาดในการระบุพิกัดแบบ RTK จะได้รับการปรับปรุงหลังจากใช้วิธี KF แล้วก็ตาม แต่ความแม่นยำของวิธี KF-SSA ที่นำเสนออีกยังจะให้ค่าที่สูงกว่าความแม่นยำที่ได้จากการใช้วิธี KF วิธีเดียว” นอกจากนี้ เราก็ใช้ค่าข้อมูลตำแหน่งของเครื่องรับ GNSS ที่อยู่กับที่ ณ สถานี IISC ในเมือง Bangalore ที่ประเทศ India (ซึ่งเป็นสถานี IGS แห่งหนึ่งในภูมิภาคอินเดีย:- 13.02°N; 77.570°E) เสมือนเป็นข้อมูลชุดที่ 2 ที่ยืนยันความมีประสิทธิภาพในการระบุพิกัดของวิธีที่นำเสนอเช่นกัน ในกรณีนี้ เราใช้สัญญาณ GNSS ที่ได้จากระบบดาวเทียมนำทางภูมิภาคอินเดีย (IRNSS) ผลจากการศึกษาพบว่า ค่า RMS ในทิศ (N, E, U) มีค่า (14.36, 3.12 and 9.84) หลังจากที่ใช้วิธี KF เท่านั้น หลังจากที่ได้ใช้วิธี KF-SSA สมรรถนะความแม่นยำในการระบุพิกัดแบบเรียลไทม์ RTK ได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้นสูงถึง 23% ดังแสดงในรูปที่ 7.13 สรุปได้ว่าเทคนิค KF-SSA ที่นำเสนอในโครงการศึกษาฯ นี้ทำงานได้ดีในการปรับปรุงความแม่นยำในการระบุพิกัดเหนือพื้นที่ประเทศไทย

ตารางที่ 7.1 พิกัดในทิศ (N, E, U) ของค่าที่วัดได้กับค่าที่ทำนายได้จาก KF กับ KF-SSA และค่า RMS ที่ปรับปรุง

Direction	Observation (m)	KF (m)	KF-based RMS improvement	KF-SSA (m)	KF-SSA-based RMS improvement
North	10.5140	9.0051	14.35%	8.3886	20.22%
East	9.4893	6.4679	31.80%	6.3355	33.24%
Up	8.2777	7.6922	7.07%	7.1852	13.20%
Total	9.4712	7.8669	16.94%	7.3515	22.38%

กล่าวโดยสรุปก็คือ ถึงแม้ว่าเครื่องรับ GNSS ของอุปกรณ์เทคโนโลยี 5G, โดรน, UAV และอื่น ๆ จะสามารถใช้งานด้วยระบบดาวเทียมนำทางสากลหลายระบบ (multi-constellation GNSS systems หรือ multi-GNSSs) ที่จะทำให้ได้รับจำนวนของดาวเทียมที่มองเห็นได้เพิ่มขึ้นและมีความแม่นยำในการระบุพิกัดที่สูงขึ้นก็ตาม แต่ในความเป็นจริง สัญญาณ GNSS ที่ได้รับเหล่านั้นล้วนแล้วแต่มีสัญญาณรบกวนและค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวัดมากมาย ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงได้เริ่มที่จะนำวิธีการคาลมานฟิลเตอร์มาใช้งานเพื่อลดความผิดพลาดของสัญญาณรบกวนเหล่านั้นและปรับปรุงความแม่นยำในการระบุพิกัดของระบบ multi-GNSSs เช่นเดียวกับงานวิจัย [44-45] หลังจากนั้น ก็ได้นำเสนอวิธีการใหม่เรียกว่าเทคนิค KF-SSA ซึ่งเป็นวิธีที่นำ singular spectrum analysis (SSA) มาใช้งานร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ ผลที่ได้รับก็คือ สมรรถนะความแม่นยำในการระบุพิกัดแบบเรียลไทม์ได้

ถูกปรับปรุงดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด พบว่า ค่า RMS ของวิธี KF-SSA ได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้นเท่ากับ 41%, 4.5% และ 86.7% ตามลำดับ ในทิศ (N,E,U) ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่า RMS ของวิธี KF อย่างเดียว



รูปที่ 7.13 การระบุพิกัดแบบเรียลไทม์ที่อาศัยวิธี KF-SSA สำหรับเครื่องรับ GNSS ที่อยู่กัับที่
ณ สถานี IISC, Bangalore, India

7.6 เอกสารอ้างอิงบทที่ 7

- [1] D. Bouvet, "Autonomous single-frequency ionospheric correction model for safety-of-life applications," in Proc. 30th Int. Tech. Meeting Satellite Division Inst. Navigat., Portland, OR, USA, 2017, pp. 1735–1746.
- [2] P. Wintoft and L. R. Cander, "Ionospheric foF2 storm forecasting using neural networks," Phys. Chem. Earth, Part C: Solar, Terrestrial Planet. Sci., vol. 25, pp. 267–273, 2000
- [3] K. Ansari, S. K. Panda, and P. Jamjareegulgarn, "Singular Spectrum Analysis of Ionospheric TEC Variations over Nepal during the low Solar Activity from GPS Network Observables," Acta Astronautica, vol. 169, pp. 216-223, 2020.
- [4] M. Ghil et al., "Advanced spectral methods for climatic time series," Rev. Geophys., vol. 40, pp. 3-1–3-41, 2002.
- [5] J. R. K. K. Dabbakuti and B. L. G, "Application of Singular Spectrum Analysis Using Artificial Neural Networks in TEC Predictions for Ionospheric Space Weather," IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens., vol. 12, no. 12, pp. 5101-5107, 2019.
- [6] K. Ansari and K. D. Park, "Multi constellation GNSS precise point positioning and prediction of propagation errors using singular spectrum analysis," Astrophys. Space Sci., vol. 363, no. 258, 2018.

- [7] K. Ansari, “Real-Time Positioning Based on Kalman Filter and Implication of Singular Spectrum Analysis,” *IEEE Geosci. Remote. Sens.*, vol. 18, no. 1, pp. 58-61, 2021.
- [8] H. W. Seok, K. Ansari, C. Panachai, and P. Jamjareegulgarn, “Individual performance of multi-GNSS signals in the determination of STEC over Thailand with the applicability of Klobuchar model,” *Advances in Space Research* vol. 69, no. 3, pp. 1301-1318, 2022; doi: 10.1016/j.asr.2021.11.025 **(OUTCOME OF THIS PROJECT)**
- [9] T. Takasu, “RTKLIB: an open-source program package for GNSS positioning,” available online in 2018, url: - www.rtklib.com.
- [10] Q. Chen, T. V. Dam, N. Sneeuw, X. Collilieux, M. Weigelt, and P. Rebischung, “Singular spectrum analysis for modeling seasonal signals from GPS time-series,” *J. Geodyn.*, vol. 72, pp. 25–35, 2013; doi: 10.1016/j.jog.2013.05.005
- [11] A. Meza, M. P. Natali, and L. I. Fernández, “Analysis of the winter and semiannual ionospheric anomalies in 1999–2009 based on GPS global International GNSS Service maps,” *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, vol. 117, 2012; <https://doi.org/10.1029/2011JA016882>
- [12] S. Zhao, et al., “A Kalman filter-based short baseline RTK algorithm for single-frequency combination of GPS and BDS,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 14, no. 8, pp. 15415-15433, 2014, doi:10.3390/s140815415

บทที่ 8 รายงานผลการจัดประชุมกลุ่ม (Focus Group) และภาพถ่าย

ในบทนี้นำเสนอประเด็นความต้องการและปัญหาที่พบขณะใช้งานของผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียจากการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ที่ได้จากการจัดประชุมกลุ่ม (Focus Group) อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 8.1 และ 8.2 ตามลำดับ หลังจากนั้น หัวข้อที่ 8.3 และ 8.4 จะนำเสนอแนวทางการแก้ปัญหาในทางปฏิบัติที่เป็นไปได้หลังจากที่นำวิธีการใหม่ที่น่าสนใจในโครงการฯ นี้มาใช้งานและแบบสำรวจที่ใช้สอบถามที่เกี่ยวข้องและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียจากการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ (UAV) หัวข้อสุดท้ายกล่าวถึงรายละเอียดของการจัดงานประชุมกลุ่ม ได้แก่ รายชื่อวิทยากรและหัวข้อการนำเสนอของวิทยากร รายชื่อผู้เข้าร่วม รวมถึงภาพถ่ายของบรรยากาศการจัดงานประชุมกลุ่ม โดยรายละเอียดของแต่ละหัวข้อมีดังนี้

8.1 ประเด็นความต้องการของผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียจากการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิล สามารถจำแนกตามหัวข้อต่าง ๆ ในการใช้งานจริงได้ดังนี้

1. ด้านการใช้งานเครื่องรับ GNSS

- มีฟังก์ชัน 5G ในตัว เพื่อรับค่าแก้ RTK ผ่านอินเทอร์เน็ตมาปรับแก้ค่าพิกัดอย่างอัตโนมัติ
- เชื่อมต่อส่งค่าพิกัดที่ปรับแก้แล้วผ่าน WiFi หรือ network อื่น ๆ ได้
- ไม่จำเป็นต้องอยู่ในพื้นที่ฟ้าเปิดเพื่อรับสัญญาณดาวเทียม GNSS
- ต้องการงานรังวัดรูปแปลงที่ดินที่มีค่าพิกัดเป็นมาตรฐานเดียวกัน ทั่วประเทศและมีความแม่นยำในระดับ ซม. (< 4 ซม.)
 - เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่มีประสิทธิภาพสูง พร้อมทั้ง Firmware ในการประมวลผลที่มีความเสถียร
 - การสำรวจรังวัดพื้นที่/เขตแนวต่าง ๆ เช่น สำรวจขอบเขตสถานพินิจและคุ้มครองเด็กและเยาวชน เพื่อจัดทำแผนที่แนบท้ายประกาศกระทรวงยุติธรรมฯ
 - การตรวจสอบขอบเขตพื้นที่ตามภาพถ่ายดาวเทียมด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ในลักษณะ Static, Fast-static, PPK, RTK
 - ใช้เครื่องรับ GNSS โดยสามารถเชื่อมต่อ Internet ผ่านเครือข่ายโทรศัพท์มือถือ เพื่อรับค่าแก้ในระบบ Network RTK ได้รวดเร็ว มีความเสถียรตลอดเวลา
 - การเข้าถึงข้อมูล Raw GNSS Data (RINEX files) ย้อนหลังสำหรับการวิเคราะห์ Ionospheric Threat Model สำหรับระบบ GBAS

2. ด้านการใช้งานการระบุพิกัด RTK

- สามารถรับสัญญาณและประมวลผลจากดาวเทียมได้ทุกระบบ
- มีความถูกต้องแม่นยำสูงและใช้อุปกรณ์น้อยชิ้น

- รั้ววัดหาคาพิกัตภูมิศาสตร์ของตำแหน่ง หมู่ดหลักเขตที่ดินเพื่อให้ได้ข้อมูลรูปแปลงที่ดินที่มีความละเอียดถูกต้อง ทั้งรูปร่าง เนื้อที่และคาพิกัตทางภูมิศาสตร์เป็น มาตรฐานเดียวกันทั่วประเทศ

- การสำรวจรังวัดพื้นที่/เขตแนวบริเวณกว้าง จำเป็นต้องใช้การสำรวจรังวัดแบบ RTK เพื่อลดเวลาในการเก็บข้อมูล

- สามารถใช้งาน RTK สำรวจได้ทุกพื้นที่ ซึ่งจำเป็นต้องใช้การเชื่อมต่อ Internet สำหรับเครื่องรับ GNSS

3. ด้านความแม่นยำในการระบุพิกัด RTK

- มีความแม่นยำสูง คลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10 ซม.

- เนื่องจากตามแบบมาตรฐานหมู่ดหลักเขตของกรมที่ดินมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 ซม. การรังวัดจึงต้องการความแม่นยำของคาพิกัต < 4 ซม. เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการถือครองเอกสารสิทธิ์ ลดข้อพิพาทเกี่ยวกับที่ดิน และลดภาระของประชาชนในการระวางชี้แนวเขตที่ดิน

- การเก็บค่า GCP หรือ CP สำหรับปรับแก้ความถูกต้องของภาพถ่ายจากดาวเทียมจำเป็นต้องใช้การเก็บค่า Coordinate แบบ RTK เพื่อให้ได้ accuracy ระดับ ซม.

- การเก็บค่า GCP หรือ CP เพื่อใช้ปรับแก้ภาพถ่ายจาก UAV จำเป็น ต้องใช้การเก็บค่าพิกัดแบบ RTK เพื่อให้ได้ความแม่นยำระดับ ซม. ถึง มม. เนื่องจากค่าความละเอียดของภาพถ่ายจาก UAV อยู่ในระดับ ซม. (GSD อยู่ในระดับ 5 ซม.)

- มีความแม่นยำของพิกัดในเกณฑ์ที่กำหนด (ประมาณ 3 - 5 ซม.)

4. ด้านการรับส่งสัญญาณกับ CORS network (Network RTK)

- สามารถรับส่งสัญญาณและประมวลผลจากดาวเทียมได้ทุกระบบ

- รองรับ 5G

- การเก็บค่าพิกัด GCP หรือ CP จำนวนมาก ด้วยวิธี RTK แบบไม่ตั้ง Base Station

- สัญญาณ Internet ที่เสถียร และมีความรวดเร็ว

5. ด้านพื้นที่ครอบคลุมของเครือข่ายมือถือ

- ครอบคลุมทุกพื้นที่

- ขยายพื้นที่ให้บริการของเครือข่ายมือถือให้ครอบคลุม 100% หรือให้บริการเครื่องมือในการขยายสัญญาณมือถือในบางพื้นที่

- เครือข่ายมีการครอบคลุมทุกพื้นที่ บางพื้นที่ยังมีการอัปเดตสัญญาณ

6. ด้านความเร็วของการเชื่อมต่อกับเครือข่ายมือถือ (ทั้งอัฟโพลด และ ดาวน์โพลด)

- อัฟเกรดเครือข่ายจากเดิมที่เป็น 3G เป็น 4G ใ้ครอบคลุมทั่วประเทศ

- เปลี่ยนจากระบบใช้งาน Internet แบบ ADSL เป็น Fiber optic/ ระบบ Internet Leased line

- ความเร็วสูงทั้งอัฟโพลดและดาวน์โพลด Bandwidth กว้าง

- การอัปโหลดค่า RINEX ของ Rover เข้าระบบเพื่อประมวลผลแบบ PPK ร่วมกับค่า RINEX ของ Base Station หรือ VRS ที่ให้บริการจากเว็บไซต์ของกรมแผนที่ทหาร
- สัญญาณ Internet ที่มีความเสถียรและรวดเร็ว
- ติดต่อเช่าใช้บริการ 4G/5G เพื่อให้บริการ RTK GNSS Network โดยเฉพาะ
- ติดต่อเครือข่าย Internet แบบ WiFi และแบบ wireline เพื่อให้บริการ RTK GNSS Network โดยเฉพาะ

7. ด้านการบริหารจัดการ หรือ ด้านการอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ที่ต้องการเมื่อต้องใช้งานเครื่องรับ GNSS

- เพิ่มสถานี CORS ของกรมที่ดินให้ครอบคลุมทั่วประเทศเพื่อให้มีการบริหารจัดการและการให้บริการระบบโครงข่าย RTK GNSS อย่างมีประสิทธิภาพ
- ระบบการบริหารจัดการที่มีมาตรฐาน สะดวกรวดเร็วในการบริการและด้านการบำรุงรักษา
- มี Call center รับเรื่องเพื่อติดต่อประสานงานในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นขณะใช้งาน
- ข้อมูลพื้นที่ให้บริการของสัญญาณโทรศัพท์มือถือแต่ละผู้ให้บริการ เพื่อประกอบการพิจารณาเลือกใช้งานให้ครอบคลุมพื้นที่ทำการสำรวจ

8. ด้านอื่น ๆ

- พัฒนาการบริการที่ตอบสนองความต้องการของประชาชนผ่านระบบแพลตฟอร์ม ต่าง ๆ เพื่อลดภาระในเรื่องของการเดินทาง/ค่าใช้จ่าย/ระยะเวลา และขั้นตอน ฯลฯ
- ประชาสัมพันธ์การประยุกต์ใช้งาน GNSS ให้เห็นประโยชน์ เข้าใจง่ายและเข้าถึงสาธารณะชนให้มากขึ้น

8.2 ประเด็นปัญหาที่พบในขณะที่ใช้งานของผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียจากการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิล สามารถจำแนกตามหัวข้อต่าง ๆ ในการใช้งานจริงได้ดังนี้

1. ด้านการใช้งานเครื่องรับ GNSS

- คำนวณค่าพิกัด RTK Fixed ได้ แต่ค่าพิกัดอาจไม่เป็น RTK Fixed ก็ได้
- แม้ได้ค่าพิกัดแบบ RTK Fixed แล้ว ในบางขณะค่าพิกัดอาจปรับไปอยู่ในสถานะ RTK Float ได้ ซึ่งกรณีนี้จะมีความแม่นยำ ที่ประมาณ 20-30 ซม.
- เครื่องรับ GNSS บางรุ่นใช้งานมานาน คุณลักษณะการทำงานและฟังก์ชันการใช้งานของเครื่องล้าสมัย
- Firmware ที่ใช้ในการประมวลผลได้ค่า พิกัดในแต่ละครั้งแตกต่างกันไป ในขณะที่ใช้ข้อมูลชุดเดิม
- ไม่สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียม GNSSs ในบางขณะได้ (ไม่ Fix)
- บางพื้นที่ไม่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ มีอาการ Float บ่อย
- เครื่องรับ GNSS ไม่สามารถเชื่อมต่อ Internet ผ่านเครือข่ายโทรศัพท์มือถือได้ในบางขณะเวลา และเครื่องรับ GNSS แบบ Single frequency จะมีความคลาดเคลื่อนสูงเมื่อชั้นบรรยากาศแปรปรวน
- การเกิด Cycle Slip เนื่องจาก EPB ในช่วงหลังพระอาทิตย์ตกดิน ทำให้ข้อมูลขาดหายและยากต่อการวิเคราะห์

2. ด้านการใช้งานการระบุพิกัด RTK

- ยังมีบางพื้นที่ในประเทศไทยที่สัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ยังไม่ครอบคลุม เช่น พื้นที่ป่า พื้นที่ภูเขา และพื้นที่ทางไกลทุรกันดาร ฯลฯ
 - ความแตกต่างของระบบพิกัดหลักฐานสากลในแต่ละหน่วยงาน เช่น กรมที่ดินใช้ ITRF2005 epoch 2008.11/กรมแผนที่ทหารใช้ ITRF2008 epoch2013.10 ฯลฯ (ซึ่งศูนย์ข้อมูลอ้างอิงกาฬพิภคต่อเนื่องแห่งชาติระบุให้ใช้พิกัดหลักฐานสากล ITRF2014)
 - การรับสัญญาณดาวเทียมระบุตำแหน่งของ Rover มีอาการ Float ต้องเก็บค่าพิกัดด้วยวิธี Fast-static หรือ Static
 - บางพื้นที่ไม่มีสัญญาณโทรศัพท์ ทำให้ไม่สามารถเชื่อมต่อ Internet ได้หรือสัญญาณโทรศัพท์มือถือไม่เสถียร

3. ด้านความแม่นยำในการระบุพิกัด RTK

- สภาพอากาศมีเมฆมาก
- รับสัญญาณดาวเทียมได้ต่ำกว่า 9-11 ดวง
- การรับค่าจากดาวเทียมระบุตำแหน่งของตัว Rover บางครั้งมีอาการ Float
- ค่าปรับแก้ที่ส่งจากตัว Base Station ผ่านระบบ Cellular บางครั้งไม่เสถียร ทำให้ค่าปรับแก้ขาดหาย จำเป็นต้องกลับไปประมวลผลแบบ PPK
 - ค่าปรับแก้ที่ส่งจากตัว Base Station ผ่านระบบคลื่นความถี่สัญญาณวิทยุ ทำให้ Rover ไม่สามารถทำงานได้ไกลจาก Base และบาง ครั้งไม่สามารถรับค่าปรับแก้ได้จาก base เนื่องจากการบดบังสัญญาณ
 - ในบางสถานการณ์ ค่าพิกัดมีการกระจาย ต้องทำการรีเซ็ตซ้ำหลายครั้ง เพื่อให้ได้ค่าพิกัดที่เกาะกลุ่มกันมากที่สุด

4. ด้านการรับส่งสัญญาณกับ CORS network (Network RTK)

- การลบบัญชีของอินเทอร์เน็ตเนื่องจากหลายปัจจัย เช่น จากผู้ให้บริการมือถือเอง จากตัวผู้ใช้บริการ จากงานก่อสร้าง หรือจากปัจจัยภายนอก ส่งผลต่อการสื่อสารและบันทึกรับ-ส่ง ข้อมูล
- การเชื่อมต่อผ่าน server กับการเชื่อมต่อผ่านสถานี CORS โดยตรงที่ผ่านอินเทอร์เน็ตนั้น ยังมีความแตกต่างกันในเรื่องของการ delay ของสัญญาณเพราะใช้เครือข่ายมือถือต่างกัน
- ค่าปรับแก้จาก RTK GNSS Network ส่งไม่ถึงตัว Rover เนื่องจากอยู่นอกพื้นที่เครือข่ายมือถือ ไม่ครอบคลุม Rover
 - เพิ่มภาระ ต้องกลับไปรีเซ็ต RTK แบบตั้ง Base Station และ Rover
 - สัญญาณ Internet บางเวลาไม่เสถียร ทำให้ต้องใช้เวลาในการสำรวจนานกว่าปกติ

5. ด้านพื้นที่ครอบคลุมของเครือข่ายมือถือ

- การรังวัดออกโฉนดที่ดินด้วยเอกสาร ส.ค.1 พื้นที่ภาคเหนือส่วนใหญ่จะเป็นพื้นที่ป่าหรือภูเขา มักจะไม่มีสัญญาณมือถือ ทำให้ไม่สามารถรังวัดด้วยระบบ RTK GNSS Network ต้องใช้วิธีการรังวัดแบบ Fast Static แทน

และอาศัย Post Processing ปัญหาที่พบตามมาก็คือหากสัญญาณที่ได้รับมีคุณภาพของข้อมูลไม่ดีพอ เช่น ระยะเวลานานเกินไป จุดรับไม่โลกรกทึบ ฯลฯ ทำให้การประมวลผลไม่ผ่านเกณฑ์ และต้องกลับไปรับสัญญาณที่จุดเดิมอีกครั้ง

- พื้นที่ให้บริการเครือข่ายมือถือไม่ครอบคลุมพื้นที่การสำรวจ หรือพื้นที่ Rover (อยู่นอกพื้นที่บริการ)
- ความต้องการใช้งาน RTK แบบไม่ตั้ง Base Station โดยใช้ค่าปรับแก้จาก CORE GNSS Network เพื่อประหยัดเวลา และลดขั้นตอนการปฏิบัติงาน

6. ด้านความเร็วของการเชื่อมต่อกับเครือข่ายมือถือ (ทั้งอัฟโพลด และ ดาวน์โพลด)

- ในบางพื้นที่จะมีสัญญาณมือถือเฉพาะ 3G ส่งผลให้เกิดความล่าช้าของการสื่อสารระหว่างผู้ใช้งาน (rover) กับศูนย์ควบคุม (control center) ทำให้ได้รับค่าปรับแก้ความคลาดเคลื่อนในการใช้หาค่าพิกัดภูมิศาสตร์ได้ช้ากว่าในพื้นที่ที่มีความครอบคลุมของสัญญาณ 4G อย่างเห็นได้ชัด
- ปัจจุบันการสื่อสารระหว่างสถานี CORS กับศูนย์ควบคุมติดต่อกันผ่านระบบ ADSL ซึ่งระบบ Internet ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเป็น Fiber optic
- เครือข่ายมือถือไม่เสถียร ไม่ครอบคลุมพื้นที่ทำงาน ทำให้ส่งข้อมูลกลับมาประมวลผลยาก
- รับ/ส่งข้อมูลช้าและหลุด
- สัญญาณ Internet ในบางเวลาไม่เสถียร ทำให้ข้อมูลสัญญาณ GNSS ไม่ถูกส่งจาก CORS มาที่ Data Center

7. ด้านการบริหารจัดการ หรือ ด้านการอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ที่ต้องการเมื่อต้องใช้งานเครื่องรับ GNSS

- ติดตามแก้ปัญหาและตามเรื่องเอง บางครั้งทำให้ล่าช้าไม่ทันการ
- RTK GNSS Network ประกอบด้วยสถานี CORS ของหลายหน่วยงานภาครัฐบูรณาการ ทำงานร่วมกัน ทั้งกรมที่ดิน กรมแผนที่ทหารและกรมโยธาธิการและผังเมือง ในกรณีที่มีสถานี CORS ของหน่วยงานภายนอกเกิดปัญหาสัญญาณขัดข้องหรือชำรุด ไม่สามารถให้บริการได้ทางกรมที่ดินต้องประสานงานไปยังหน่วยงานที่รับผิดชอบเพื่อดำเนินการแก้ไข
- ไม่สามารถหาข้อมูลพื้นที่ให้บริการของสัญญาณโทรศัพท์มือถือแต่ละผู้ให้บริการที่ชัดเจนได้

8. ด้านอื่น ๆ

- ยังขาดบุคลากรที่เชี่ยวชาญในดาน IT/ โปรแกรมเมอร์
- คนยังไม่ค่อยรู้จักว่าเอาไปทำอะไรได้บ้าง

8.3 แนวทางการแก้ปัญหาในทางปฏิบัติ ผลดี ผลเสียและความคุ้มค่าต่อการดำเนินการ สำหรับประเทศไทย

หัวข้อนี้เป็นหัวข้อที่ทางคณะผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลและนำเสนอแนวทางการแก้ปัญหาในทางปฏิบัติ หลังจากที่น่าวิธีการใหม่ที่น่าเสนอในโครงการฯ นี้มาใช้งาน (บทที่ 4 – 7) รวมถึงได้ระบุถึงผลดีและผลเสียที่ได้รับ

จากการปรับปรุงและพัฒนาเทคนิค RTK สำหรับเทคโนโลยี 5G และ UAV รวมทั้งความคุ้มค่าต่อการดำเนินการตามข้อเสนอในโครงการฯ นี้ สำหรับประเทศไทย ดังนี้

8.3.1 แนวทางการแก้ปัญหาในทางปฏิบัติหลังจากที่นำวิธีการใหม่ที่น่าเสนอในโครงการฯ นี้มาใช้งาน

หัวข้อการใช้งาน	แนวทางการแก้ปัญหาในทางปฏิบัติ
1. ด้านการใช้งานเครื่องรับ GNSS	<p>1. การที่เราไม่สามารถ fix สัญญาณ GNSS ณ ขณะใดขณะหนึ่งได้ เราสามารถแก้ปัญหาได้อย่างไร?</p> <p>คำตอบ “การที่เราไม่สามารถ fix สัญญาณ GNSS ณ ขณะใดขณะหนึ่งได้ (แบบ float)” สามารถที่จะแก้ปัญหาได้ โดยการพิจารณาข้อมูล RINEX 2 ชนิด โดยชนิดที่ 1 เป็นไฟล์ RINEX ที่ถูกสร้างขึ้นโดยสถานีอ้างอิง ส่วนอีกหนึ่งไฟล์ถูกสร้างขึ้นโรเวอร์ (drone receiver) ซึ่งเราจะเห็นจาก sky plots ของ base receiver จะแสดงจำนวนดาวเทียมที่มองเห็นได้อย่างเพียงพอเนื่องจากตำแหน่งของมันหยุดนิ่ง ในทางตรงข้าม sky plots ของ drone receiver จะแสดงจำนวนดาวเทียมที่แย่มาก เนื่องจากตำแหน่งของมันมีการเปลี่ยนแปลงบ่อยครั้ง เราได้พิจารณาปัญหาดังกล่าวและพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่าง position dilution of precision หรือ PDOP (geometry of the satellite) กับคาลมานฟิลเตอร์ (drone position and velocity) โดยใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ เราก็ไม่จำเป็นต้องใส่ใจกับปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับสัญญาณจากดาวเทียม GNSS ที่รับได้ เราเพียงแต่ต้องการตำแหน่งและความเร็วของโดรนเท่านั้น โดยวิธีนี้ ปัญหามากมายที่เกิดขึ้นจากสัญญาณ GNSS ก็จะถูกแก้ปัญหาก็ได้</p> <p>2. บางพื้นที่ไม่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ ดังนั้นการใช้งาน RTK จะอยู่ในสถานะ float ambiguity resolution เราสามารถแก้ปัญหาได้อย่างไร?</p> <p>คำตอบ โดยทั่วไป มักเกิดขึ้นเป็นบางครั้งสำหรับการได้รับสัญญาณในพื้นที่ห่างไกลออกไปที่แยะหรือไม่มีสัญญาณดาวเทียมที่ตรงนั้น มีเทคนิคการทำนายหลายวิธีที่ถูกใช้เพื่อทำนายพิกัดที่ไม่รู้ค่า ในฟิลด์ของ GNSS geodesy เทคนิคคาลมานฟิลเตอร์เป็นวิธีที่นิยมกันมาก โดยมีคาลมานฟิลเตอร์หลายชนิดที่เรานำมาใช้งานได้ ได้แก่ Linear Kalman filter (LKF), Extended Kalman Filter (EKF), and Unscented Kalman Filter (UKF) ซึ่งแต่ละวิธีจะมีความเหมาะสมต่อการใช้งานที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสถานการณ์ที่เราจะไปใช้งาน</p>
2. ด้านการใช้งานการระบุพิกัด RTK	<p>1. เนื่องจากการระบุพิกัดโรเวอร์บ่อยครั้งที่อยู่ในสถานะ float เนื่องจากไม่มีเครือข่ายมือถือ การระบุพิกัดของการสำรวจจึงกระทำได้ในโหมด fast-static, static หรือประมวลผลภายหลัง แทนที่การใช้งาน RTK ดังนั้น คุณภาพสัญญาณไม่ดีหรือโรเวอร์อยู่ในพื้นที่ที่ไม่โล่ง (รกทึบ) ฯลฯ การประมวลผลสัญญาณที่ได้รับไม่ผ่านเกณฑ์ที่ต้องการ ทำให้ต้องกลับไปทดสอบที่พิกัดเดิมใหม่อีกครั้ง เราสามารถแก้ปัญหาได้อย่างไร?</p>

	<p>คำตอบ มีสัญญาณรบกวนหรือสิ่งก่อกวนหลายประเภทที่เกิดจากระบบ GNSS ที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการระบุพิกัด ท่ามกลางความผิดพลาดเหล่านี้ ความผิดพลาดแบบ user equivalent range error (มีค่าประมาณ 35%) และความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดของเครื่องรับ (มีค่าประมาณ 3%) ส่งผลกระทบต่อการระบุพิกัดที่แม่นยำสูง ในกรณีที่คุณภาพของสัญญาณดาวเทียมไม่ดีหรือโรเวอร์อยู่ในพื้นที่ที่ไม่โล่งทึบ ฯลฯ ซึ่งแน่นอนว่า มันจะมีความไม่แน่นอนและ noise error ที่เกิดขึ้นจากการวัดมากมาย ถึงแม้ว่าเทคนิคคาลมานฟิลเตอร์จะสามารถที่จะกำจัด noise error และความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากการวัด แต่ก็ทำได้ไม่มากนัก เราจึงนำเสนอเทคนิคใหม่คือ Kalman filter-based singular spectrum analysis (KF-SSA) และพยายามที่จะใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า “ความผิดพลาดต่าง ๆ ดังกล่าวสามารถที่จะกำจัดออกไปได้มากและทำให้ positioning error ได้รับการปรับปรุง ดังนั้น จึงไม่จำเป็นหรือมีโอกาสน้อยมากที่จะกลับไปทดสอบและเก็บค่าพิกัดใหม่อีกครั้ง</p> <p>2. บางพื้นที่ในประเทศไทยไม่มีสัญญาณ WiFi หรือเครือข่ายมือถือ เราสามารถที่จะใช้งาน RTK ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบใช้สายเพื่อปรับแก้ค่า RTK ได้ไหม?</p> <p>คำตอบ โรเวอร์ RTK ก็ต้องการที่จะเข้าถึงอินเทอร์เน็ตด้วย เนื่องจากโรเวอร์กำลังใช้อินเทอร์เน็ตเพื่อเข้าถึงค่าปรับแก้จาก CORS Network ด้วย การเข้าถึงอินเทอร์เน็ตสามารถที่จะทำได้โดยผ่านโมเด็ม (inbuilt phone modem) ที่อยู่ในบอร์ดของ GNSS (หรือตัวควบคุมของมัน) หรือสามารถที่จะทำได้โดยใช้ external phone modem ผ่านทาง Wi-Fi, บลูทูธหรือพอร์ต USB ก็ได้ ทำได้ง่ายที่จะสร้างเครือข่าย WiFi โดยอาศัย wired Internet</p> <p>3. เราควรทำอย่างไรเพื่อที่จะทำให้การสำรวจที่อาศัยการระบุพิกัดแบบ RTK ง่ายขึ้นในพื้นที่ที่กว้าง เพื่อที่จะลดระยะเวลาทำงาน?</p> <p>คำตอบ มันไม่ใช่ปัญหาเลย ถ้าเราเพิ่มโหนดของการเก็บค่าข้อมูลการวัดจาก 1 วินาทีไปเป็น 1 นาที เวลาการสำรวจ (การรังวัด) ก็จะมีค่าที่ลดลงด้วย หลังจากนั้นช่องว่างของโหนดสามารถที่จะเติมค่าได้โดยวิธีการประมาณค่า (cubic spline เป็นวิธีที่นิยม)</p>
<p>3. ด้านความแม่นยำในการระบุพิกัด RTK</p>	<p>1. การระบุพิกัดโรเวอร์บางครั้งจะอยู่ในสถานะ float ที่เป็นผลมาจากการรับสัญญาณดาวเทียม เราสามารถแก้ปัญหาได้อย่างไร?</p> <p>คำตอบ คาลมานฟิลเตอร์เป็นวิธีที่ดีที่สุดและนิยมมากในการทำนายตำแหน่งของโรเวอร์ที่เป็น float ซึ่งเราได้กล่าวถึงไปแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ทั้งนี้ วิธี least-squares (LS) ก็ถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวนี้ด้วยเช่นกัน</p> <p>2. ข้อมูลการปรับแก้พิกัดที่ส่งมาจากสถานีอ้างอิงผ่านทางเครือข่ายมือถือบางครั้งอาจจะไม่เสถียรและสูญหายได้ นอกจากนี้ ข้อมูลการปรับแก้พิกัดอาจจะไม่สามารถรับจากสถานีอ้างอิงในบางกรณีได้ เราสามารถแก้ปัญหาได้อย่างไร?</p>

	<p>คำตอบ เราสามารถใช้วิธีการประมาณค่า (interpolation) เช่น วิธี cubic spline, วิธี singular spectrum analysis และเทคนิคอื่น ๆ ในการแก้ปัญหานี้ได้</p> <p>3. ข้อมูลการปรับแก้พิกัดที่ส่งมาจากสถานีอ้างอิงผ่านมาทางสัญญาณ RF อาจจะไม่ถึงโรเวอร์ได้เนื่องจากมีสิ่งกีดขวางสัญญาณและระยะทางไกล เราสามารถแก้ปัญหาได้อย่างไร?</p> <p>คำตอบ ในกรณีนี้ เราจำเป็นต้องเพิ่มความแรงของสัญญาณ มี hardware และ software จำนวนมากที่เรานำมาใช้เพิ่มความแรงของสัญญาณได้</p> <p>4. ถึงแม้ว่าอินเทอร์เน็ตเป็นปัจจัยที่สำคัญมากต่อการได้รับ ส่งและรับข้อมูลระหว่าง เซิร์ฟเวอร์, สถานี CORS, และโรเวอร์ การขาดการติดต่อและการใช้งานอินเทอร์เน็ตไม่ได้ก็มักจะเกิดขึ้นบ่อยครั้งและกำหนดเวลาของสัญญาณอินเทอร์เน็ตในเครือข่ายผู้ให้บริการที่ต่างกันก็มีค่าต่างกันด้วย เราสามารถแก้ปัญหาได้อย่างไรเพื่อที่จะให้การระบุพิกัดแบบ RTK นั้นดีขึ้น?</p> <p>คำตอบ การเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตเป็นหัวข้อที่สำคัญ ก่อนที่เราจะเก็บค่าข้อมูลได้นั้น เราจำเป็นต้องใส่ใจให้อินเทอร์เน็ตทำงานมีเสถียรภาพเสียก่อน การเข้าถึงอินเทอร์เน็ตสามารถที่จะทำได้ผ่านทาง inbuilt phone modem ที่อยู่ในบอร์ดของ GNSS หรือตัวควบคุมของมันหรือสามารถที่จะทำได้โดยใช้ external phone modem ผ่านทาง Wi-Fi, บลูทูธหรือพอร์ต USB มันง่ายมากที่จะสร้างเครือข่าย WiFi โดยอาศัย wired Internet</p>
<p>4. ด้านการรับส่งสัญญาณกับ CORS network (Network RTK)</p>	<p>1. ข้อมูลการปรับแก้พิกัดจาก RTK GNSS network ไม่สามารถที่จะไปถึงโรเวอร์ได้เนื่องจากเครือข่ายมือถือไม่ได้ครอบคลุมบริเวณที่โรเวอร์เคลื่อนที่ ซึ่งเหตุการณ์นี้เป็นอุปสรรคหลัก เนื่องจากพนักงานจะต้องทำ RTK ใหม่ด้วยการติดตั้งสถานีอ้างอิงและโรเวอร์ใหม่อีกครั้ง มีข้อเสนอแนะหรือมีความคิดประการใดในการแก้ปัญหานี้?</p> <p>คำตอบ เราสามารถใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง geometry of the satellites (พิจารณาค่า position dilution of precision หรือ PDOP) กับ rover kinematic movement (พิจารณาด้วยกาลมานฟิลเตอร์)</p>
<p>5. ด้านพื้นที่ครอบคลุมของเครือข่ายมือถือ</p>	<p>1. พื้นที่ให้บริการของระบบเครือข่ายมือถือไม่ครอบคลุมพื้นที่ที่ทำการสำรวจและพื้นที่ของโรเวอร์ เราสามารถแก้ปัญหาได้อย่างไร?</p> <p>คำตอบ สิ่งนี้เป็นปัญหาของทาง geodesy วิธีที่นิยมมากคือวิธี triangulation ที่สามารถถูกนำมาใช้ตรงนี้ได้ สมมติว่าเรารู้ตำแหน่งของ 3 สถานี เราสามารถวาดรูปสามเหลี่ยมได้และตำแหน่งที่ไม่รู้ภายในสามเหลี่ยมก็สามารถที่จะประมาณค่าได้ง่าย</p> <p>2. บางครั้ง สัญญาณอินเทอร์เน็ตนั้นไม่เสถียร ดังนั้น ข้อมูลการปรับแก้พิกัดที่จะส่งจาก CORS ไปยัง data center และโรเวอร์ได้ รวมทั้งระยะเวลาที่ใช้ในการสำรวจก็นานกว่าช่วงเวลาปกติที่ใช้ทำงานอีกด้วย เราสามารถแก้ปัญหาได้อย่างไร?</p>

	<p>คำตอบ ชั้นแรก เราควรที่จะแก้ปัญหาอินเทอร์เน็ตเสียก่อน แล้วถ้าอินเทอร์เน็ตยังมีปัญหาอีก เราสามารถใช้วิธีการประมาณค่า (interpolation) เช่น วิธี cubic spline, วิธี singular spectrum analysis และเทคนิคอื่น ๆ ในการแก้ปัญหานี้ได้</p>
6. ด้านความเร็วของการเชื่อมต่อกับเครือข่ายมือถือ (ทั้งอัปโหลด และ ดาวน์โหลด)	<p>1. เครือข่ายมือถือไม่เสถียรและไม่ครอบคลุมพื้นที่ที่ทำการสำรวจ ดังนั้นข้อมูลการปรับแก้พิกัดหรือข้อมูลต่าง ๆ ก็ไม่สามารถที่จะส่งกลับมา เพื่อประมวลผลตามที่ต้องการได้ เราสามารถแก้ปัญหาได้อย่างไร?</p> <p>คำตอบ สิ่งนี้เป็นปัญหาของทาง geodesy วิธีที่นิยมมากคือวิธี triangulation ที่สามารถถูกนำมาใช้ตรงนี้ได้ สมมติว่าเรารู้ตำแหน่งของ 3 สถานี เราสามารถวาดรูปสามเหลี่ยมได้และตำแหน่งที่ไม่รู้ภายในสามเหลี่ยมก็สามารถที่จะประมาณค่าได้ง่าย</p> <p>2. บางพื้นที่มีระบบเครือข่ายมือถือที่แตกต่างกัน (เช่น 3G and 4G) ดังนั้น โรเวอร์สามารถที่จะได้รับค่าปรับแก้พิกัดที่แตกต่างกันจาก data center และ CORS เนื่องจากค่าหน่วงเวลาของสัญญาณที่ต่างกัน เราสามารถแก้ปัญหาได้อย่างไร?</p> <p>คำตอบ เครือข่ายที่แย่งจะสร้างสัญญาณรบกวนที่ได้จากการวัดในรูปของค่าผิดพลาดและความไม่แน่นอนต่าง ๆ (noise error and uncertainty in measurement) ซึ่งเราสามารถกำจัดออกไปได้โดยใช้วิธี KF-SSA</p>
7. ด้านการบริหารจัดการ หรือ ด้านการอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ที่ต้องการเมื่อต้องใช้งานเครื่องรับ GNSS	ไม่มี
8. ด้านอื่น ๆ	ไม่มี

8.3.2 ผลดีที่ได้รับจากการปรับปรุงและพัฒนาเทคนิค RTK สำหรับเทคโนโลยี 5G และ UAV

1. ติดตั้งเครือข่ายสื่อสาร 5G ให้ครอบคลุมทุกพื้นที่ เพื่อรองรับการใช้ RTK
2. มีฟังก์ชัน 5G ในตัว เพื่อรับค่าแก้ RTK ผ่านอินเทอร์เน็ตมาปรับแก้ค่าพิกัดอย่างอัตโนมัติ
3. เชื่อมต่อและส่งค่าพิกัดที่ปรับแก้ผ่านอินเทอร์เน็ตแบบ WiFi และ wireline รวมทั้งเครือข่าย 5G
4. รั้งวัดแปลงที่ดินมีค่าพิกัดเป้นมาตรฐานเดียวกันทั่วประเทศและมีแม่นยำในระดับ ซม. (< 4 ซม.)
5. มีการให้บริการ 4G/5G เพื่อให้บริการ RTK GNSS Network โดยเฉพาะ
6. ใช้เครื่องรับ GNSS โดยสามารถเชื่อมต่อ Internet ผ่านเครือข่ายโทรศัพท์มือถือ เพื่อรับค่าแก้ในระบบ Network RTK (หรือ NRTK) ได้รวดเร็วและมีเสถียรภาพตลอดเวลา
7. สามารถรับส่งสัญญาณ GNSS ทั้งตอนฟ้าเปิดและปิดได้ รวมถึงประมวลผลจากดาวเทียมได้ทุกระบบ
8. มีความแม่นยำสูง คลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10 ซม.
9. เปลี่ยนจากระบบใช้งาน Internet แบบ ADSL เป้นระบบ Fiber optic/ระบบ Internet Leased line
10. มีการให้บริการ 4G/5G เพื่อให้บริการ RTK โดยเฉพาะ
11. มีการให้บริการอินเทอร์เน็ตแบบ WiFi และแบบ wireline เพื่อให้บริการ RTK โดยเฉพาะ

12. เพิ่มสถานี CORS ของกรมที่ดินให้ครอบคลุมทั่วประเทศเพื่อให้บริการบริหารจัดการและการให้บริการ RTK อย่างมีประสิทธิภาพ
13. มี Call center รับเรื่องเพื่อติดต่อประสานงานในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นขณะใช้งาน
14. ข้อมูลพื้นที่ให้บริการของสัญญาณโทรศัพท์มือถือแต่ละผู้ให้บริการ เพื่อประกอบการพิจารณาเลือกใช้งานให้ครอบคลุมพื้นที่ทำการสำรวจ

8.3.3 ผลเสียที่ได้รับจากการปรับปรุงและพัฒนาเทคนิค RTK สำหรับเทคโนโลยี 5G และ UAV

1. จำเป็นต้องมีลงทุนเครือข่ายสื่อสาร 5G จำนวนมากเพื่อครอบคลุมการใช้งาน RTK ในประเทศไทย
2. มีการลงทุนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงและมีเสถียรภาพ
3. มีการลงทุนเพื่อจัดตั้งสถานี CORS (Network RTK) เพื่อให้ครอบคลุมทั่วประเทศ
4. มีการจ้างพนักงานในส่วนของ Call center รับเรื่องเพื่อติดต่อประสานงานในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นขณะใช้งาน
5. มีการจ้างพนักงานเพื่อจัดทำข้อมูลพื้นที่ให้บริการของสัญญาณโทรศัพท์มือถือแต่ละผู้ให้บริการ เพื่อประกอบการเลือกใช้งานให้ RTK ในพื้นที่ทำการสำรวจ

8.3.4 ความคุ้มค่าต่อการดำเนินการตามข้อเสนอในโครงการฯ นี้

1. ประเทศไทยมีภาพถ่ายดาวเทียมที่มีความละเอียดสูงเหมาะสมต่อการทำข่าวสารสารสนเทศเชิงภูมิศาสตร์ (GIS) เมื่อนำวิธีการใหม่ที่ปรับปรุง RTK (บทที่ 6 และ 7) ไปใช้งานแล้ว
2. ประเทศไทยสามารถทำรังวัดและเอนดที่ดินด้วยเอกสาร ส.ค.1 พื้นที่ภูเขา พื้นที่ป่า พื้นที่รกร้าง ด้วย RTK เมื่อนำวิธีการใหม่ที่ปรับปรุง RTK (บทที่ 6 และ 7) ไปใช้งานแล้ว
3. ประเทศไทยสามารถทำแผนที่ที่มีการกำหนดขอบเขตที่มีความแม่นยำและเที่ยงตรง เมื่อนำวิธีการใหม่ที่ปรับปรุง RTK (บทที่ 6 และ 7) ไปใช้งานแล้ว
4. คนไทยเข้าถึงเครือข่ายสื่อสาร 5G และอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงที่ครอบคลุมประเทศไทยมากขึ้น ซึ่งเป็นการกระจายความเสมอภาคและเท่าเทียมกันในการเข้าถึงเครือข่ายสื่อสาร 5G ตามนโยบายของสำนักงาน กสทช.
5. คนไทยมีเว็บไซต์ที่ใช้แจ้งสถานะการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อ RTK ของเครื่องรับ GNSS (บทที่ 4) ซึ่งเป็นแนวทางในการทำนายและตรวจจับการเกิดพลาสมาบับเบิลได้
6. คนไทยมีความรู้ความเข้าใจและมีความตื่นตัวเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่จะมีผลกระทบต่อเทคโนโลยีใหม่ที่อาศัยเทคโนโลยี 5G ที่จะมีการใช้งานในอนาคต
7. มีเทคนิคใหม่สำหรับการระบุพิกัดที่แม่นยำสูงสำหรับเครื่องรับ GNSS ความถี่เดียวโดยอาศัยแบบจำลองโคโลซุชาที่ปรับปรุงใหม่ ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการใช้งานในประเทศไทย (บทที่ 5)
8. มีเทคนิคใหม่สำหรับการปรับปรุงวิธี RTK (เครื่องรับ GNSS 2 ความถี่) โดยอาศัยการตรวจจับค่า PDOP ด้วย Linear Kalman Filter สำหรับ Network RTK (บทที่ 6) และ Kalman Filter-Based Singular Spectrum Analysis สำหรับประเทศไทย (บทที่ 7)

8.4 แบบสำรวจความต้องการและปัญหาของผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้ที่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัด RTK ของเครื่องรับ GNSS ในเทคโนโลยี 5G, UAV ฯลฯ

คำชี้แจง

แบบสำรวจฯ นี้ได้จัดทำขึ้นโดยสำนักบริหารงานวิจัยและนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง (KRIS) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในฐานะผู้รับทุนและทำงานวิจัยจากสำนักงาน กสทช. โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะรวบรวมความต้องการและปัญหาของผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้ที่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) และ/หรือ การใช้งานเครื่องรับ GNSS ที่อาศัยเทคโนโลยี 5G (หรือ 3G ขึ้นไป) อากาศยานไร้คนขับ งานสำรวจ ฯลฯ ดังนั้น ทาง KRIS จึงใคร่ขอความกรุณาช่วยให้ข้อมูลในการใช้งานของหน่วยงานให้มากที่สุด เพื่อที่ว่า ทาง กสทช. และคณะผู้วิจัยจะนำมารวบรวมและสรุปประเด็นต่าง ๆ ที่สำคัญเพื่อนำเสนอ กสทช. ในขั้นตอนต่อไป

ชื่อ-นามสกุล

ชื่อหน่วยงาน

ประเภทของงานที่ให้บริการ/งานที่ทำ.....

1. การวิเคราะห์ความต้องการและปัญหาของผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้ที่ได้รับผลกระทบของประชาชนในพื้นที่ โดยแยกตามประเด็นปัญหา ดังนี้

หัวข้อ	ความต้องการของผู้ใช้งาน	ปัญหาที่พบในขณะที่ใช้งาน
1. ด้านการใช้งานเครื่องรับ GNSS		
2. ด้านการใช้งานการระบุพิกัด RTK		
3. ด้านความแม่นยำในการระบุพิกัด RTK		
4. ด้านการรับส่งสัญญาณกับ CORS network (Network RTK)		
5. ด้านพื้นที่ครอบคลุมของเครือข่ายมือถือ		
6. ด้านความเร็วของการเชื่อมต่อกับเครือข่ายมือถือ		
7. ด้านการบริหารจัดการหรือด้านกรอำนวยการอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ที่ต้องการเมื่อต้องใช้งานเครื่องรับ GNSS		
8. ด้านอื่น ๆ		

2. ข้อเสนอแนะแนวทาง และ มาตรการ ในการลดผลกระทบ และ/หรือ การป้องกันผลกระทบดังกล่าวนี้

.....

***** ขอขอบคุณทุก ๆ ท่านเป็นอย่างสูง *****

8.5 ชื่อวิทยากร ข้อเสนอแนะฯ รายชื่อผู้เข้าร่วมและภาพถ่าย

ในหัวข้อสุดท้ายนี้กล่าวถึงรายละเอียดของการจัดงานประชุมกลุ่มผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียจากการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อ RTK ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G และ UAV ได้แก่ ชื่อวิทยากรและหัวข้อการนำเสนอของการประชุมกลุ่ม ข้อเสนอแนะและสิ่งที่ต้องการเพิ่มเติมจากการประชุมกลุ่ม รายชื่อผู้เข้าร่วมการประชุมกลุ่ม รวมถึงภาพถ่ายของบรรยากาศการประชุมกลุ่ม รายละเอียดมีดังนี้

8.5.1 ชื่อวิทยากรของการประชุมกลุ่ม

วิทยากรที่ร่วมนำเสนอในการประชุมกลุ่มของโครงการฯ นี้ มีจำนวน 2 ท่าน ดังนี้

ท่านที่ 1 คือ คุณสุดเขต อธิโย จาก กองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน หัวข้อการนำเสนอ คือ “ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเครื่องรับ GNSS ในเทคโนโลยี 5G, UAV ฯลฯ”

ท่านที่ 2 คือ คุณรัฐวิษฐ์ วสุหิรัณยฤทธิ์ จาก กลุ่มพัฒนาอุตสาหกรรมการบิน สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ หรือ GISTDA หัวข้อการนำเสนอ คือ “เทคนิค RTK เพื่องานสำรวจและแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับ”

8.5.2 ข้อเสนอแนะและสิ่งที่ต้องการเพิ่มเติมจากการประชุมกลุ่ม

1. การศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ (UAV) มีการนำเสนอปัญหาจากผู้ใช้งานจริงและนำเสนอแนวทางแก้ไขได้ดี
2. เนื้อหาในการบรรยายและการจัดประชุมกลุ่มตรงประเด็น กระชับได้ใจความมาก
3. มีสไลด์ประกอบการนำเสนอ จึงทำให้สามารถเข้าใจได้มากขึ้น
4. ควรให้อंकความรู้ (KM) หรือรวบรวมองค์ความรู้พื้นฐานการสำรวจ RTK GNSS เช่น การสำรวจการใช้งาน RTK GNSS, มาตรฐาน ASPRS 2014, FGCL หรืออื่น ๆ ให้ผู้เข้าร่วมได้ศึกษาล่วงหน้า
5. อยากให้มีการทำ workshop หรือแจกจ่ายกระบวนกรใหม่ที่นำเสนอให้ user ได้ทดลอง

8.5.3 รายชื่อผู้เข้าร่วมการประชุมกลุ่ม

การจัดประชุมกลุ่มแบบ on site ของโครงการฯ นี้ภายใต้การสนับสนุนของสำนักงาน กสทช. ได้รับความสนใจจากผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้ที่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ (UAV) เป็นอย่างมาก แต่เนื่องจากการประชุมกลุ่มในครั้งนี้อยู่ในสถานการณ์ของการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 จึงทำให้ผู้เข้าร่วมนักวิจัยและผู้สนใจจำนวนมากขอเข้าร่วมแบบ online เนื่องจากไม่สะดวกในการเดินทางมาเข้าร่วมแบบ on site ได้ จึงทำให้คณะผู้วิจัยฯ จึงจำเป็นต้องจัดการประชุมกลุ่มแบบออนไลน์ควบคู่กับ on site

1. ผู้เข้าร่วมแบบ on site มีจำนวน 41 คน ดังแสดงในสำเนาใบเซ็นชื่อ รูปที่ 8.1 – 8.8
2. ผู้เข้าร่วมแบบ online มีจำนวน 47 คน ดังแสดงในรูปที่ 8.9 – 8.12 (ภาพถ่ายหมู่ของผู้เข้าร่วมแบบ online ที่ได้จากการเคปเจอร์หน้าจอบทวีdeoโปรแกรม google meet ของ สจล.)



การประชุมกลุ่มย่อย (Focus group)

ภายใต้ โครงการศึกษามลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิล

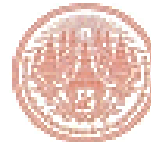
ที่มีต่อการระบุพิกัดเรดาร์ใหม่ (RTK) ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

วันอังคารที่ 26 เมษายน 2565 เวลา 09.00 น. - 16.00 น.

ณ ห้องบอลรูม ชั้น 7 โรงแรมฮอติเคย์อินน์ สุขุมวิท 22 กรุงเทพฯ

ลำดับ	ชื่อ-นามสกุล	หน่วยงาน	เบอร์โทรศัพท์	ลายมือชื่อ	หมายเหตุ
1	Mr.Yutthana Thowcharoen	ALT	080-3952659		
2	Mr.Thanachor Bunphan	ALT	081-1617256		
3	Mr.Surachai Mongkolmafai	ALT	080-4865923	ส.รช. มงคลมาไฟ	
4	คุณร่มฉัตร ชูโชติ	Urbandata Thailand	098-2525104		
5	คุณภาวีน ทวีศรี	Urbandata Thailand	063-0367789		
6	พันเอกจิตรกร โบรักษา	กรมแผนที่ทหาร	092-9504881	พ.อ. จิรกร	
7	พันโทสมบุญ ก่อหาญ	กรมแผนที่ทหาร	083-1987619	พ.ท. สมบุญ ก่อหาญ	
8	ร้อยโทชนะชล ไพจิตรประภาภรณ์	กรมแผนที่ทหาร	081-0993975	ร.ท. ชนะชล	
9	คุณกิตติ ศรีบุญญากร	กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม	095-5533771		
10	คุณณชัย กุลหิณตั้ง	กองกิจการสื่อสารโทรคมนาคม สำนักงานปลัดกระทรวงดิจิทัล			

รูปที่ 8.1 สำเนาใบเซ็นชื่อของผู้เข้าร่วมแบบ on site (หน้าที่ 1)



การประชุมกลุ่มย่อย (Focus group)

ภายใต้ โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเปิด

ที่มีต่อการระบุภัยคุกคามใหม่ (NTC) ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

วันอังคารที่ 26 เมษายน 2565 เวลา 09.00 น. - 16.00 น.

ณ ห้องบอลรูม ชั้น 7 โรงแรมฮอติลเคอ์สินธุ์ สุขุมวิท 22 กรุงเทพฯ

ลำดับ	ชื่อ-นามสกุล	หน่วยงาน	เบอร์โทรศัพท์	ลายมือชื่อ	หมายเหตุ
11	คุณสุดเขต อูธิโย	กองเทคโนโลยีท่าอากาศยานที่ กรมที่ดิน	095-4649799		
12	คุณชงชุตช กิมกระหา	กองเทคโนโลยีท่าอากาศยานที่ กรมที่ดิน	063-9165261		
13	คุณศุภสิทธิ์ รวรงค์วิวัฒน์	กองเทคโนโลยีท่าอากาศยานที่ กรมที่ดิน	093-5194564		
14	คุณธีฎประวีณ์ ศังศรีบูรณ์	กองเทคโนโลยีท่าอากาศยานที่ กรมที่ดิน	087-3984484		
15	คุณชนิษฐา เขื่อนอากาศ	กองเทคโนโลยีท่าอากาศยานที่ กรมที่ดิน	087-0662495		
16	คุณสนธยา รัตนบุรี	กองเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา	085-0381147		
17	น.ท.วิวัฒน์ รวรงค์	บริษัท NAC Drone	088-3785544		
18	คุณชนกฤต อภินัทพรณ์	บริษัท NAC Drone	088-151588		
19	คุณสุรภา อภินัทพรณ์	บริษัท Next InsurTech	080-4476771		
20	นายวิทยา เสิศพิริยภมร	บริษัท สวชนต้นไม้อัด จำกัด	081-6397350		

รูปที่ 8.2 สำเนาใบเซ็นชื่อของผู้เข้าร่วมแบบ on site (หน้าที่ 2)



การประชุมกลุ่มย่อย (Focus group)

ภายใต้ โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิล

ที่มีต่อการระบุกักเก็บเรย์ลโธม (RTK) ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

วันอังคารที่ 26 เมษายน 2565 เวลา 09.00 น. - 16.00 น.

ณ ห้องบอลรูม ชั้น 7 โรงแรมฮอติเคอ์อินน์ สุขุมวิท 22 กรุงเทพฯ

ลำดับ	ชื่อ-นามสกุล	หน่วยงาน	เบอร์โทรศัพท์	ลายมือชื่อ	หมายเหตุ
21	คุณนพภูถ ประเสริฐ	บริษัท หู คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)	089-1724107		
22	คุณเปรมชัย ตริยานุวัฒน์	บริษัท หู คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)			
23	คุณปรีดา ศิลปวิทยารักษ์	บริษัท ไทยคม จำกัด (มหาชน)	081-8137531		
24	คุณฉัตรเพชร บุณยเกตุ	บริษัท ไทยคม จำกัด (มหาชน)	081-9181478		
25	คุณทวีพงศ์ สุธรรมพันธุ์	บริษัท พาวเวอร์ อโกรเทค (ประเทศไทย) จำกัด	065-2258242		
26	คุณอารยา เพ็งยี่สน	บริษัท พาวเวอร์ อโกรเทค (ประเทศไทย) จำกัด	080-2505242		
27	คุณอินทรา โอภาตะ	บริษัท พาวเวอร์ อโกรเทค (ประเทศไทย) จำกัด	096-3831711		
28	คุณจิรายุส อมรเศรษฐริยา	บริษัท พาวเวอร์ อโกรเทค (ประเทศไทย) จำกัด	064-2511233		
29	คุณเสาวคนธ์ ภูมิมาลี	บริษัท เพิ่มสิน เอ็นเทอร์ไพรส์ จำกัด	093-5694592		permsinenterprise@gmail.com
30	คุณประสาทร วงศ์คำข้าง	บริษัท เพิ่มสิน เอ็นเทอร์ไพรส์ จำกัด			permsinenterprise@gmail.com

รูปที่ 8.3 สำเนาใบเซ็นชื่อของผู้เข้าร่วมแบบ on site (หน้าที่ 3)



การประชุมกลุ่มย่อย (Focus group)

ภายใต้ โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิล

ที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

วันอังคารที่ 26 เมษายน 2565 เวลา 09.00 น. - 16.00 น.

ณ ห้องบอลรูม ชั้น 7 โรงแรมฮอติเคย์อินน์ สุขุมวิท 22 กรุงเทพฯ

ลำดับ	ชื่อ-นามสกุล	หน่วยงาน	เบอร์โทรศัพท์	ลายมือชื่อ	หมายเหตุ
31	คุณอภิรัช นากะโอะ	บริษัท เอเชีย เทคโนโลยี อินเทลลิเจนท์ จำกัด	089-3923916		
32	คุณศณิน เกียรติอร่ามกุล	บริษัท เอเชีย เทคโนโลยี อินเทลลิเจนท์ จำกัด	086-7718586		
33	คุณปทุมณวิษ สุโชวัฒนะกิจ	บริษัท เอเชีย เทคโนโลยี อินเทลลิเจนท์ จำกัด	088-0176098		
34	คุณธีรภัทร ปิสิษฐ์	บริษัท เอเชีย เทคโนโลยี อินเทลลิเจนท์ จำกัด	062-4236194		
35	คุณเป็ร็องปรีช หันธุ์ดี	บริษัท แอควานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส จำกัด (มหาชน)	099-1655696		
36	คุณวสุพล เต็มวิจิตร	บริษัท แอควานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส จำกัด (มหาชน)	089-6659991		
37	คุณศิริวรรณ สุรวุฑ	บริษัท แอควานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส จำกัด (มหาชน)	084-2093568		
38	คุณอลงกรณ์ ตีฬงาม	บริษัท แอควานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส จำกัด (มหาชน)	083-1635358		
39	คุณชาลิต รัตนโกสิย์กิจ	ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานศึกษาธิการภาค ๑๑	086-6185664		
40	คุณอภิฏ เวืองรุ่ง	ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานศึกษาธิการภาค ๑๑	081-3850398		

รูปที่ 8.4 สำเนาใบเซ็นชื่อของผู้เข้าร่วมแบบ on site (หน้าที่ 4)



การประชุมกลุ่มย่อย (Focus group)

ภายใต้ โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาชั้นเบิล

ที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

วันอังคารที่ 26 เมษายน 2565 เวลา 09.00 น. – 16.00 น.

ณ ห้องบอลรูม ชั้น 7 โรงแรมฮอติเคย์อินน์ สุขุมวิท 22 กรุงเทพฯ

ลำดับ	ชื่อ-นามสกุล	หน่วยงาน	เบอร์โทรศัพท์	ลายมือชื่อ	หมายเหตุ
41	คุณธนบูลย์ แดงจุก	ศูนย์เทคโนโลยีและสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข	083-6057564		
42	น.อ.ณัฐพล นิยมไทย	สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ	064-6365929		
43	น.ท.สรณ์พัฒน์ กัณฑ์ปานนท์	สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ	064-1599535	น.ท. สรณ์พัฒน์ ก.	
44	ร.ท.เกรียงไกร วิชาคพิสุทธิ์	สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ	091-7158870	ร.ท. เกรียงไกร วิชาคพิสุทธิ์	
45	คุณวิชัย	สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร	089-2260291		
46	คุณทวีเกียรติ อิ่มสำราญ	สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย	089-4560188		
47	คุณประเวช กัญญา	สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย	090-9616407		
48	คุณสุพจน์ หุตุการ	สมาคมอากาศยานไร้คนขับแห่งประเทศไทย	081-9129868	สุพจน์	
49	ดร.เมธวิน กิติคุณ	สมาคมอากาศยานไร้คนขับแห่งประเทศไทย	090-9875078		
50	นาวาเอกปรเมศวร์ ขอนตะวัน	สมาคมอากาศยานไร้คนขับแห่งประเทศไทย	099-4414515	ปรเมศวร์	

รูปที่ 8.5 สำเนาใบเซ็นชื่อของผู้เข้าร่วมแบบ on site (หน้าที่ 5)



การประชุมกลุ่มย่อย (Focus group)

ภายใต้ โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิล
ที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ
วันอังคารที่ 26 เมษายน 2565 เวลา 09.00 น. - 16.00 น.
ณ ห้องบอลรูม ชั้น 7 โรงแรมซอติเคย์อินน์ สุขุมวิท 22 กรุงเทพฯ

ลำดับ	ชื่อ-นามสกุล	หน่วยงาน	เบอร์โทรศัพท์	ลายมือชื่อ	หมายเหตุ
51	คุณศรารุณี รุ่งเรืองวชิเอก	สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย		<i>ศรารุณี รุ่งเรืองวชิเอก</i>	
52	คุณพิทักษ์คณีย์ วุฒิสาน	สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย		<i>พิทักษ์คณีย์</i>	
53	คุณธีรวิฑูรี ธงภักดิ์	สำนักงานคณะกรรมการการดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ	081-1733620*		
54	คุณกฤษณ์ โกวิทพัฒนา	สำนักงานคณะกรรมการการดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ	097-1962491*		
55	คุณสิทธิพร ขาญน้ำสิน	สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน)	064-3396973		
56	คุณอัจฉราภรณ์ บำรุงกิจ	สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน)	086-4536179	<i>อัจฉราภรณ์</i>	
57	คุณวีรวิฑูรี วสุทิวรรณฤทธิ	สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน)	095-3539563	<i>วีรวิฑูรี</i>	
58	คุณพรพรหม ประภาภักดิ์กุล	สำนักงานพัฒนาธุรกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ ETDA			
59	คุณทศวรรษ นฤนาทวัฒนา	สำนักงานส่งเสริมเศรษฐกิจดิจิทัล		<i>ทศวรรษ</i>	
60	คุณวรกาน ลิขิตเทศาศักดิ์	สำนักงานส่งเสริมเศรษฐกิจดิจิทัล	0815644718	<i>วรกาน</i>	

รูปที่ 8.6 สำเนาใบเซ็นชื่อของผู้เข้าร่วมแบบ on site (หน้าที่ 6)



การประชุมกลุ่มย่อย (Focus group)

ภายใต้ โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิล

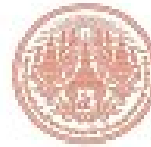
ที่มีต่อการระบุพิกัดเรดาร์ใหม่ (RTK) ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

วันอังคารที่ 26 เมษายน 2565 เวลา 09.00 น. - 16.00 น.

ณ ห้องบอลรูม ชั้น 7 โรงแรมฮอติลอินน์ สุขุมวิท 22 กรุงเทพฯ

ลำดับ	ชื่อ-นามสกุล	หน่วยงาน	เบอร์โทรศัพท์	ลายมือชื่อ	หมายเหตุ
61	คุณวิศุฑ ภัลลย์จาริก	สำนักงานส่งเสริมเศรษฐกิจดิจิทัล	096 7616741		
62	คุณทรงศักดิ์ ไชยชนะ	สำนักงานส่งเสริมเศรษฐกิจดิจิทัล	090 0315010		
63	คุณบรรณศักดิ์ วัชร	กรมอุตุนิยมวิทยา	085 7802746		
64					
65					
66					
67					
68					
69					
70					

รูปที่ 8.7 สำเนาใบเซ็นชื่อของผู้เข้าร่วมแบบ on site (หน้าที่ 7)



การประชุมกลุ่มย่อย (Focus group)

ภายใต้ โครงการศึกษามลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาชั้นเบส

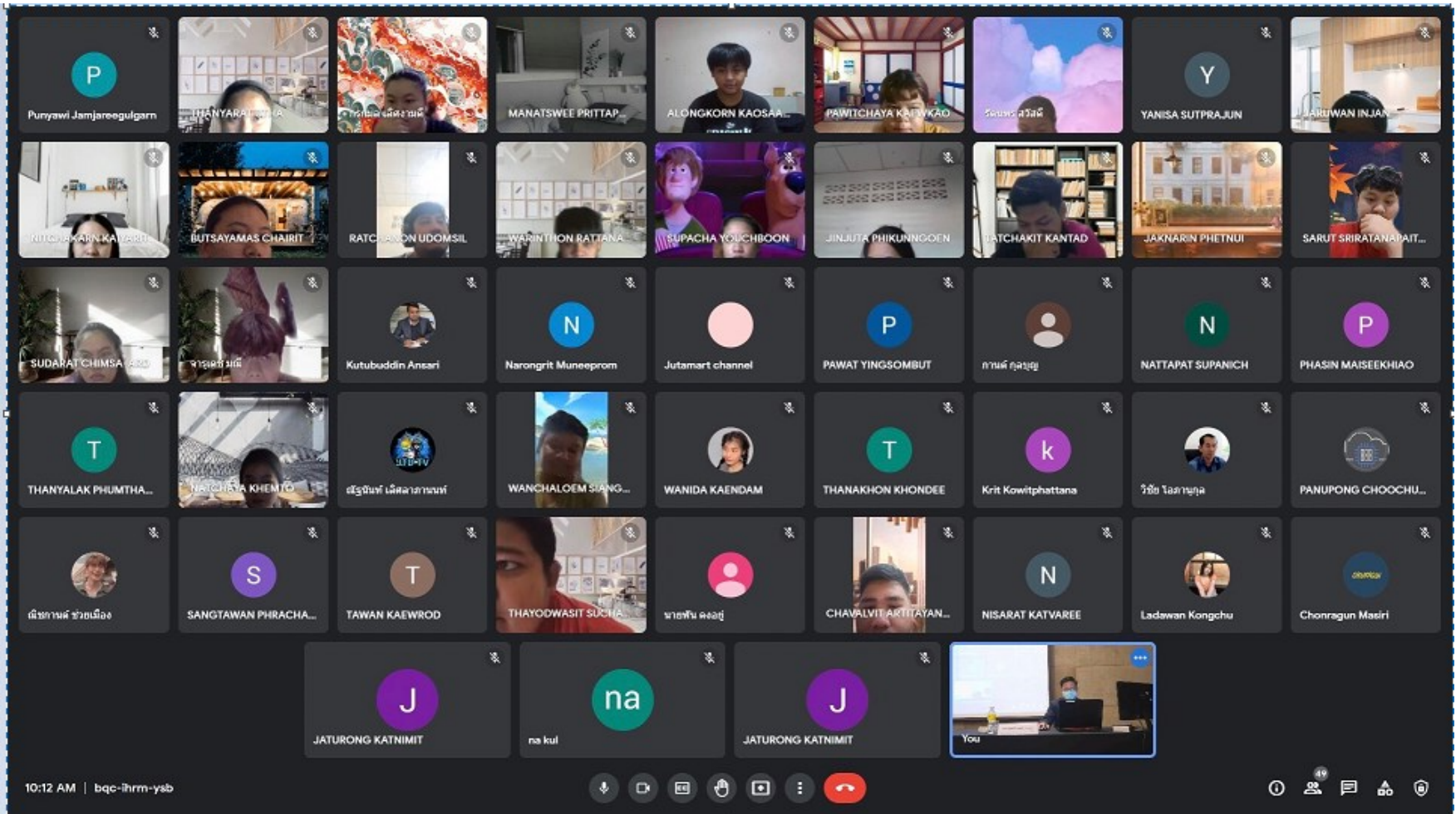
ที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

วันอังคารที่ 26 เมษายน 2565 เวลา 09.00 น. – 16.00 น.

ณ ห้องบอลรูม ชั้น 7 โรงแรมฮอติลเซ็นทรัล สุภูมิวิท 22 กรุงเทพฯ

ลำดับ	ชื่อ-นามสกุล	หน่วยงาน	เบอร์โทรศัพท์	ลายมือชื่อ	หมายเหตุ
1	ผศ.ดร. นภัทร อรรถเชียม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	081562362		
2	อ.พีระเมตร์ ใจศิริกิจจตุลา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง			
3	อ.สมพงษ์ วิเศษพานิชกิจ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	086-300-7800		
4	อ.จักรพรรดิ สุระสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง			
5	ดร.ณัฐพร งามวิจิตรกมลกุล	สอว.	088-541-0424		
6	อ.ณัฐพร งามวิจิตรกมลกุล	สอว.	0814638209		

รูปที่ 8.8 สำเนาใบเซ็นชื่อของผู้เข้าร่วมแบบ on site (หน้าที่ 8)



รูปที่ 8.9 ภาพถ่ายผู้เข้าร่วมการประชุมกลุ่มแบบ on line จำนวน 47 คน



รูปที่ 8.10 ภาพถ่ายผู้เข้าร่วมการประชุมกลุ่มแบบ on line จำนวน 47 คน พร้อมกับฉาก backdrop ของโครงการฯ นี้ (ก่อนเริ่มการประชุมกลุ่ม)

Punyawi Jamjareegulgarn is presenting

RTK-PPK 1-2,4,5

Better Horizontal DOP

Better Horizontal DOP

Raw Data RINEX

VRS.

BASE $(X_{t0...n}, Y_{t0...n})$

ค่าปรับแก้

(X_{t0}, Y_{t0})

GLONASS, COMPASS (GNSS : Global Navigation Satellite System)

Better Horizontal DOP

Fixed and Float

(X_{tn}, Y_{tn})

CORS GNSS Network

VRS.

NTRIP (RTCM) (5G Network)

Figure 3: Image Courtesy of Trimble

9:49 AM | bqc-ihrm-ysb

You

Narongrit Muneeprom

Kutubuddin Ansari

THANYARAT UTHA

Punyawi Jamjareegulgarn

40 others

รูปที่ 8.11 ภาพถ่ายเคปเจอร์หน้าจอร์หว่างการบรรยายของวิทยากรท่านที่ 2 จาก GISTDA และผู้เข้าร่วมการประชุมกลุ่มแบบ on line

Kutubuddin Ansari is presenting

Improvement of Real-Time Kinematic Positioning Using Kalman Filter-Based Singular Spectrum Analysis during Geomagnetic Storm for Thailand sector



KUTUBUDDIN ANSARI, PhD

Managing Director
Integrated Geoinformation (IntGeo) Solution
Private Limited, New Delhi, India
Email: kdansari@igeosol.com

Date: 26 Apr 2022

11:00 AM | bqc-lhnm-ysb

Participants: You, THANYARAT UTHA, Jutamart channel, Kutubuddin Ansari, Punyawati Jamjareeulgarn, 39 others

รูปที่ 8.12 ภาพถ่ายเคปเจอร์หน้าจอระหว่างการบรรยายของคณะผู้วิจัยฯ จากต่างประเทศและผู้เข้าร่วมการประชุมกลุ่มแบบ on line

8.5.4 ภาพถ่ายของบรรยากาศการประชุมกลุ่ม

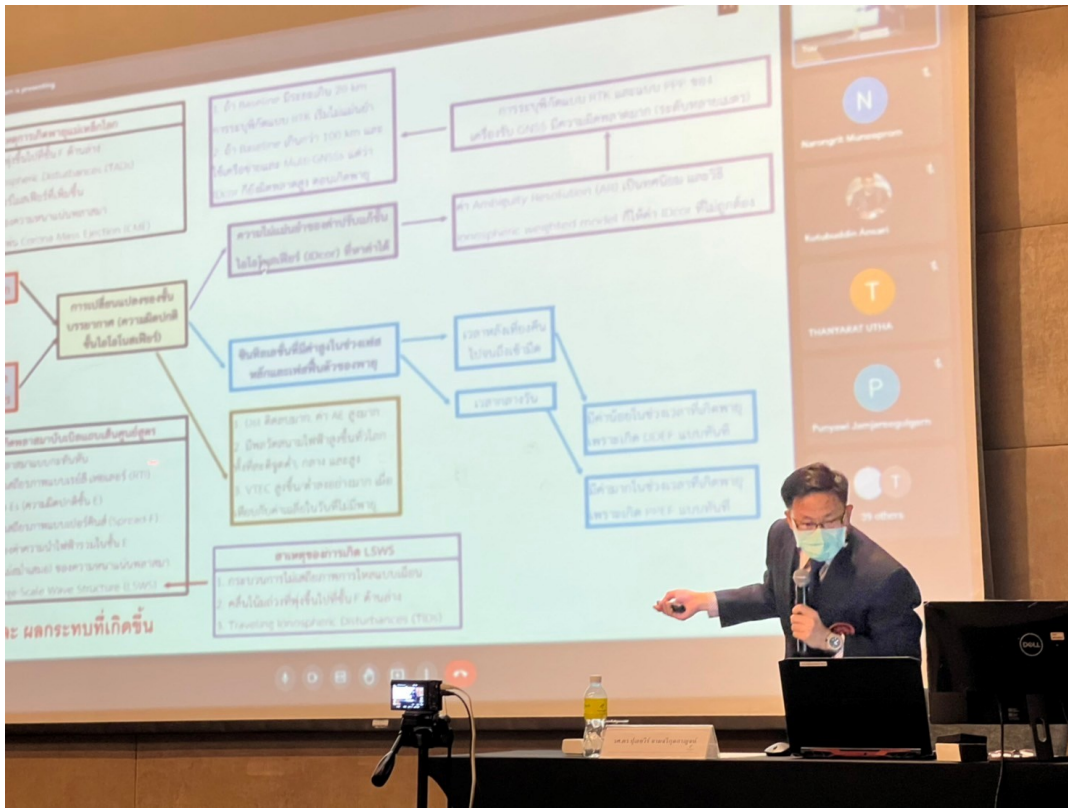


รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัด
เรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ



รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อภาวะบุพัตัด
เรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ





รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบนเบสที่ติดตั้งระบบนำทางด้วยดาวเทียม (RTK) ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ



รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษานผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาชั้นเบสที่มีต่อการระบุพิกัดเรียวใหม่ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ



รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุทิศทาง
เรียดใหม่ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ



รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาชั้นไอออนที่มีต่อการระบุพิกัด
เรียวใหม่ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ



รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาชั้นไอออนที่มีต่อการระบุพิกัด
เรียวใหม่ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ



รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาชั้นไอออนที่มีต่อการระบุพิกัด
เรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ



รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาชั้นเบสที่มีต่อการระบุพิกัด
เรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ



รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัด
เรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

บทที่ 9 สถานภาพโครงการ สรุปรายงานใช้งบฯ และแผนการดำเนินโครงการ

บทที่ 9 นี้กล่าวถึงสถานภาพการดำเนินโครงการและรายงานความก้าวหน้าทางการเงิน (งานงวดที่ 4) ความเห็น/ข้อสังเกตของคณะกรรมการพิจารณาผลงานฯ จากการส่งมอบงานงวดที่ 1 - 3 รายงานสรุปรายงานใช้งบประมาณและความก้าวหน้าทางการเงิน (งานงวดที่ 4) รายละเอียดการบันทึกบัญชีรับ/จ่ายเงิน ตั้งแต่รายงานงวดที่ 1 - 4 รวมถึงแผนการดำเนินโครงการตามเงื่อนไขและส่งมอบรายงานงวดที่ 4 รายละเอียดดังนี้

9.1 สถานภาพการดำเนินโครงการ (งานงวดที่ 4)

กิจกรรม	ระยะเวลา	สถานะกิจกรรม/ ผลการดำเนินงาน			แผนปฏิบัติการ ณ วันลงนามใน สัญญา		ความก้าวหน้า โปรดทำเครื่องหมาย (✓)			กรณีล่าช้าหรือเร็ว กว่าแผน	
		เสร็จ แล้ว	อยู่ระหว่าง ดำเนินการ	ยังไม่ ดำเนินการ	เริ่มต้น	สิ้นสุด	ล่าช้า	ตาม แผน	เร็วกว่า แผน	เริ่มต้น	สิ้นสุด
1. งานงวดที่ 1 (ขอบเขตการดำเนินงานที่ 4.1)	45 วัน	✓	-	-	12/8/ 2564	25/9/ 2564	-	✓	-	-	-
1.1 ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับผลกระทบการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อ RTK	ส่งมอบ งาน แล้ว	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
1.2 จัดทำรายงานผลการศึกษาเบื้องต้นเพื่อส่งมอบรายงานฉบับที่ 1 ภายใน 45 วัน	ส่งมอบ งาน แล้ว	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
2. งานงวดที่ 2 (ขอบเขตการดำเนินงานที่ 4.2 - 4.3)	90 วัน	✓	-	-	26/9/ 2564	9/12/ 2564	-	✓	-	-	-
2.1 ศึกษา เก็บรวบรวมข้อมูลพร้อมวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศที่มีต่อ RTK ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G, UAV ฯลฯ	ส่งมอบ งาน แล้ว	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
2.2 ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลของพลาสมาบับเบิลที่เกิดขึ้นในต่างประเทศ จำนวน 3 ประเทศ	ส่งมอบ งาน แล้ว	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
2.3 คำนวณค่าบ่งชี้ระดับความรุนแรงและวิเคราะห์ผลกระทบของพลาสมาบับเบิลต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเครื่องรับ GNSS	ส่งมอบ งาน แล้ว	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
2.4 จัดทำรายงานนำเสนอข้อมูลตามขอบเขตการดำเนินงานที่ 4.2 และ 4.3 พร้อมทั้งส่งมอบรายงานฉบับที่ 2	ส่งมอบ งาน แล้ว	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1 ภายใน 120 วัน											
3. งานงวดที่ 3 (ขอบเขตการดำเนินงานที่ 4.4 - 4.6)	60 วัน	-	-	-	10/12/2564	7/2/2565	-	-	√	1/11/2564	7/2/2565
3.1 ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองโกลบรูชาแบบใหม่ให้แก่เครื่องรับ GNSS เพื่อปรับปรุงค่า RMSE ให้ดีขึ้นและระบุตำแหน่งที่แม่นยำมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเดิม และเปรียบเทียบค่า TEC และเวลาประวิงชั้นไอโอโนสเฟียร์ของแบบจำลองโกลบรูชาแบบใหม่และแบบเดิม โดยอาศัยค่าข้อมูลจาก 3 สถานี GNSS ของประเทศไทย ในวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกหรือพลาสมาบับเบิล	ส่งมอบงานแล้ว	√	-	-	-	-	-	√	-	-	-
3.2 ศึกษาและนำเสนอวิธี RTK (แบบใหม่) ที่อาศัยข้อมูลมากกว่า 1 สถานีฐาน เพื่อให้รับค่าปรับแก้พิกัดเครื่องรับ GNSS อย่างมีประสิทธิภาพและเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการจำลองประสิทธิภาพการทำงานระหว่างวิธี RTK แบบเดิมกับวิธี RTK แบบใหม่ โดยอาศัยค่าข้อมูลจากสถานี GNSS จำนวน 2 สถานีของประเทศไทยในวันที่เทียบ	ส่งมอบงานแล้ว	√	-	-	-	-	-	√	-	-	-
3.3 นำเสนอวิธี Multi-GNSS systems and Multivariate Singular Spectrum Analysis (วิธีใหม่) ให้แก่เครื่องรับ GNSS และเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการจำลองประสิทธิภาพการทำงานระหว่างวิธีใหม่กับวิธีอื่นที่เคยมีการนำเสนอก่อนหน้านี้ โดยอาศัยค่าข้อมูลจากเครื่องรับ GNSS ดังกล่าวตั้งอยู่ในประเทศไทยและต่างประเทศ ไม่น้อยกว่า 2 ประเทศ	ส่งมอบงานแล้ว	√	-	-	-	-	-	√	-	-	-
3.4 จัดทำรายงานนำเสนอข้อมูลตามขอบเขตการดำเนินงานที่ 4.4-4.6 พร้อมทั้งส่งมอบรายงานฉบับที่ 3 รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2 ภายใน 180 วัน	ส่งมอบงานแล้ว	√	-	-	-	-	-	√	-	-	-

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

4. งานงวดที่ 4 (ขอบเขตการดำเนินงานที่ 4.7 - 4.9)	90 วัน	-	-	√	8/2/ 2565	8/5/ 2565	-	-	-	-	-
4.1 จัดประชุมกลุ่มย่อย (Focus Group) ผู้เกี่ยวข้อง และผู้ได้รับผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศ และพลาสมาบับเบิลที่มีต่อ RTK ของ 5G, UAV ฯลฯ	ส่งมอบ ครั้งนี้ ตาม แผน	√	-	-	-	-	-	√	-	-	-
4.2 จัดทำรายงานการศึกษา ข้อเสนอประเทศไทยต่อ การศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศ และพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการ ระบุพิกัดเรียลไทม์ของ เทคโนโลยี 5G, UAV ฯลฯ	ส่งมอบ ครั้งนี้ ตาม แผน	√	-	-	-	-	-	√	-	-	-
4.3 จัดทำรายงานฉบับ สมบูรณ์ (Final Report) โดย จัดทำเป็นรายงานทางวิชาการ จำนวน 6 เล่ม พร้อม DVD บรรจุไฟล์รายงานในรูปแบบ MS Word จำนวน 1 ชุด รวมทั้งจัดงานสัมมนาเพื่อ เผยแพร่ผลงานต่อสาธารณชน	ส่งมอบ ครั้งนี้ ตาม แผน	√	-	-	-	-	-	√	-	-	-

9.2 สรุปปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นจากการดำเนินโครงการ (งานงวดที่ 4)

9.2.1 การศึกษา เก็บรวบรวมข้อมูล พร้อมวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศ และพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดแบบเรียลไทม์ (RTK) ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G, UAV ฯลฯ นั้นมีข้อมูลและผลงานวิจัยที่นำเสนอเป็นจำนวนมาก

วิธีแก้ไข ต้องใช้เวลาศึกษา รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลเป็นเวลานาน เพื่อที่จะแสดงภาพรวมที่ ชัดเจนและเข้าใจง่ายเกี่ยวกับผลการศึกษา ข้อสรุปปัจจัย และ/หรือ สาเหตุที่มีผลกระทบ ข้อสรุปผลกระทบ รวมถึงแนวทางการแก้ไขปัญหาให้การระบุพิกัดแบบเรียลไทม์ RTK ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G, UAV ฯลฯ โดยรายละเอียดของผลกระทบดังกล่าวได้กล่าวถึงในบทที่ 2 และ 3

9.2.2 การศึกษา วิเคราะห์ เปรียบเทียบแบบจำลองโคลนุชาแบบใหม่และแบบจำลองโคลนุชาแบบเดิม ต้องมีระดับความแม่นยำไม่น้อยกว่าร้อยละ 50

วิธีแก้ไข ต้องพยายามและใช้เวลาอย่างมากในการหาวิธีที่ทำให้มีระดับความแม่นยำที่ได้รับการปรับปรุง ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ซึ่งจากการศึกษา ค้นคว้า ทดลองและเขียนโปรแกรม พบว่าวิธีการ Multishell-Spherical Harmonics Function (MS-SHF) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดที่จะทำให้ระดับความแม่นยำไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ได้ตามขอบเขตของโครงการศึกษาฯ นี้ โดยจะทำการทดสอบโดยใช้ไฟล์ RINEX ที่บันทึกได้จากเครื่องรับ GNSS ที่ 4 สถานีของประเทศไทย ได้แก่ เชียงใหม่, นครราชสีมา, DPT9 และสุราษฎร์ธานี) ในวันที่มีพายุแม่เหล็ก โลกเกิดขึ้นในวันที่ 12 พฤษภาคม 2564 (ความรุนแรงระดับ G3, Kp = 7) โดยรายละเอียดของหลักการทำงาน สมการและวิธีการ รวมถึงผลของค่าความแม่นยำในการระบุพิกัดได้กล่าวถึงในบทที่ 5

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัด เรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G และอากาศยานไร้คนขับ

9.2.3 การศึกษาและนำเสนอวิธี RTK (แบบใหม่) ที่อาศัยข้อมูลมากกว่า 1 สถานีฐาน เพื่อให้รับค่าปรับแก้พิกัดเครื่องรับ GNSS อย่างมีประสิทธิภาพและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานระหว่างวิธี RTK แบบเดิมกับวิธี RTK แบบใหม่

วิธีแก้ไข ต้องศึกษาและพยายามเขียนโปรแกรมเพื่อนำเสนอวิธี RTK แบบใหม่ที่อาศัยข้อมูลมากกว่า 1 สถานีฐาน (Network RTK หรือ CORS network) เพื่อให้รับค่าปรับแก้พิกัดเครื่องรับ GNSS อย่างมีประสิทธิภาพ พบว่า วิธีการใหม่ที่นำเสนอคือ “การตรวจจับค่า PDOP ด้วย Linear Kalman Filter สำหรับ Network RTK” สามารถลดความผิดพลาดในการระบุพิกัด RTK ได้ โดยการแก้ปัญหาจำนวนของดาวเทียม GNSSs และความเร็วของโรเวอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอนอยู่เสมอได้เป็นอย่างดี ทำให้ความแม่นยำในการระบุพิกัด RTK มีเสถียรภาพและดีขึ้น โดยรายละเอียดของวิธีใหม่ที่นำเสนอนี้ได้กล่าวถึงในบทที่ 6

9.2.4 นำเสนอวิธี Multi-GNSS systems and Multivariate Singular Spectrum Analysis (วิธีใหม่) ให้แก่เครื่องรับ GNSS และเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการจำลองประสิทธิภาพการทำงานระหว่างวิธีใหม่กับวิธีอื่นที่เคยมีการนำเสนอก่อนหน้านี้

วิธีแก้ไข ต้องศึกษาและพยายามเขียนโปรแกรมเพื่อนำเสนอวิธีใหม่เพื่อปรับปรุงการระบุพิกัด RTK ให้แก่เครื่องรับ GNSS และเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการจำลองประสิทธิภาพการทำงานระหว่างวิธีใหม่กับวิธีอื่นที่เคยมีการนำเสนอก่อนหน้านี้ พบว่า วิธีการใหม่ที่นำเสนอคือ “Kalman Filter-Based Singular Spectrum Analysis สำหรับ Network RTK” สามารถลดความผิดพลาดในการระบุพิกัด RTK ได้ โดยการแก้ปัญหาค่าความเร็วของโรเวอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอนและสัญญาณรบกวนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเสมอในระบบได้เป็นอย่างดี ทำให้ความแม่นยำในการระบุพิกัด RTK มีเสถียรภาพและดีขึ้น โดยรายละเอียดของวิธีใหม่ที่นำเสนอนี้ได้กล่าวถึงในบทที่ 7

9.3 รายงานการจัดซื้อครุภัณฑ์ในโครงการ (ถ้ามี)

9.3.1 ครุภัณฑ์สำหรับการวิจัยและพัฒนาฯ

ลำดับ	รายการจัดซื้อครุภัณฑ์ (สำหรับการวิจัยและพัฒนาฯ)	วัน/เดือน/ปี	มูลค่า	เอกสารอ้างอิง
	โครงการฯ นี้ ไม่มีการจัดซื้อครุภัณฑ์			

9.3.2 ครุภัณฑ์สำหรับการดำเนินโครงการ

ลำดับ	รายการจัดซื้อครุภัณฑ์ (สำหรับการดำเนินโครงการทั่วไป)	วัน/เดือน/ปี	มูลค่า	เอกสารอ้างอิง
	โครงการฯ นี้ ไม่มีการจัดซื้อครุภัณฑ์			

9.4 รายงานสรุปการใช้จ่ายงบประมาณ (งานงวดที่ 4)

รายละเอียดค่าใช้จ่ายในโครงการ								
หมวด ค่าใช้จ่าย	งบประมาณ	งวดที่ 1	งวดที่ 2	งวดที่ 3	งวดที่ 4	รวม	คงเหลือ	ร้อยละการ เบิกจ่าย
1. ค่าตอบแทน บุคลากร	2,636,600.00	427,500.00	855,000.00	570,000.00	784,100.00	2,636,600.00	-	61.27%
2. ค่าใช้สอย	1,273,000.00	30,000.00	765,000.00	290,000.00	188,000.00	1,273,000.00	-	29.58%
3. ค่าวัสดุ	77,109.07	16,814.00	30,000.00	20,000.00	10,295.07	77,109.07	-	1.79%
4. ค่าใช้จ่าย ครุภัณฑ์	-	-	-	-	-	-	-	0.00%
5. ค่าบริหาร จัดการ	301,203.91	-	-	301,203.91	-	301,203.91	-	7.00%
6. ค่าใช้จ่าย อื่น ๆ	15,000.00	-	-	-	15,000.00	15,000.00	-	0.35%
รวม	4,302,912.98	474,314.00	1,650,000.00	1,181,203.91	997,395.07	4,302,912.98	-	100.00%

9.5 รายงานสรุปความก้าวหน้าทางการเงิน (งานงวดที่ 4)

ประจำงวด	งบประมาณ	วัน/เดือน/ปี ที่ได้รับ	งบประมาณที่ ได้รับจริง	ค่าใช้จ่าย	คงเหลือ	หมายเหตุ
งวดที่ 1	430,291.30	1 ธ.ค. 2564	430,291.30	474,314.00	-44,022.70	ได้รับแล้ว
งวดที่ 2	1,290,873.89	8 ก.พ. 2565	1,290,873.89	1,650,000.00	-403,148.81	ได้รับแล้ว
งวดที่ 3	1,721,165.19	17 มี.ค. 2565	1,721,165.19	1,181,203.91	136,812.47	ได้รับแล้ว
งวดที่ 4	860,582.60	-	860,582.60	997,395.07	-	ยังไม่ได้รับ
รวม	4,302,912.98	-	4,302,912.98	4,302,912.98	-	-

9.6 รายละเอียดการบันทึกบัญชีรับ จ่ายเงิน (งานงวดที่ 4)

วันที่	เลขเอกสาร	รายการ	รับเงิน (บาท)	รายจ่าย						เงินคงเหลือ (บาท)
				ค่าตอบแทน	ค่าใช้สอย	ค่าวัสดุ	ค่าครุภัณฑ์	ค่าใช้จ่ายอื่น	ค่าบริหารโครงการ	
		งานงวดที่ 1								
19-ม.ค.-65	PLASMA-01-001	ค่าตอบแทน - รศ.ดร.ปทุมวีร์ จามจรีกุลกาญจน์		52,500.00						-52,500.00
19-ม.ค.-65	PLASMA-01-002	ค่าตอบแทน - Dr. Kutubuddin Ansari		45,000.00						-97,500.00
19-ม.ค.-65	PLASMA-01-003	ค่าตอบแทน - Assoc. Prof. Dr. Samed Inyurt		45,000.00						-142,500.00
19-ม.ค.-65	PLASMA-01-004	ค่าตอบแทน - Asst. Prof. Dr. Mir R. G. Razin		45,000.00						-187,500.00
19-ม.ค.-65	PLASMA-01-005	ค่าตอบแทน - Mr. Hong-Woo Seok		30,000.00						-217,500.00
19-ม.ค.-65	PLASMA-01-006	ค่าตอบแทน - นางสาวอุษา หลีกาญจนะ		30,000.00						-247,500.00
19-ม.ค.-65	PLASMA-01-007	ค่าตอบแทน - ดร.สมปอง วิเศษพานิชกิจ		45,000.00						-292,500.00
19-ม.ค.-65	PLASMA-01-008	ค่าตอบแทน - ผศ.ดร.นภัทร สระเอี่ยม		45,000.00						-337,500.00
19-ม.ค.-65	PLASMA-01-009	ค่าตอบแทน - อ.วารุณี บั้ววิรัตน์		45,000.00						-382,500.00
19-ม.ค.-65	PLASMA-01-010	ค่าตอบแทน - ผศ.ดร.อัศศิษฐ์ นรบิน		45,000.00						-427,500.00
19-ม.ค.-65	PLASMA-01-011	ค่าดำเนินการประสานงาน หน่วยงานต่างประเทศ			20,000.00					-447,500.00
19-ม.ค.-65	PLASMA-01-012	ค่าใช้จ่ายในบันทึกการประชุมกลุ่มและวิเคราะห์ข้อมูล			10,000.00					-457,500.00


วันที่	เลขเอกสาร	รายการ	รับเงิน (บาท)	รายจ่าย						เงินคงเหลือ (บาท)
				ค่าตอบแทน	ค่าใช้จ่าย	ค่าวัสดุ	ค่าครุภัณฑ์	ค่าใช้จ่ายอื่น	ค่าบริหารโครงการ	
19-ม.ค.-65	PLASMA-01-013	ค่าวัสดุสำนักงาน				6,814.00				-464,314.00
19-ม.ค.-65	PLASMA-01-014	ค่าวัสดุคอมพิวเตอร์				10,000.00				-474,314.00
		งานงวดที่ 2								-474,314.00
25-ก.พ.-65	PLASMA-02-001	ค่าตอบแทน - รศ.ดร.ปทุมวีร์ จามจรีกุลกาญจน์		105,000.00						-579,314.00
25-ก.พ.-65	PLASMA-02-002	ค่าตอบแทน - Dr. Kutubuddin Ansari		90,000.00						-669,314.00
25-ก.พ.-65	PLASMA-02-003	ค่าตอบแทน - Assoc. Prof. Dr. Samed Inyurt		90,000.00						-759,314.00
25-ก.พ.-65	PLASMA-02-004	ค่าตอบแทน - Asst. Prof. Dr. Mir R. G. Razin		90,000.00						-849,314.00
25-ก.พ.-65	PLASMA-02-005	ค่าตอบแทน - Mr. Hong-Woo Seok		60,000.00						-909,314.00
25-ก.พ.-65	PLASMA-02-006	ค่าตอบแทน - นางสาวอุษา หลีกาญจนะ		60,000.00						-969,314.00
25-ก.พ.-65	PLASMA-02-007	ค่าตอบแทน - ดร.สมปอง วิเศษพานิชกิจ		90,000.00						-1,059,314.00
25-ก.พ.-65	PLASMA-02-008	ค่าตอบแทน - ผศ.ดร.นภัทร สระเอี่ยม		90,000.00						-1,149,314.00
25-ก.พ.-65	PLASMA-02-009	ค่าตอบแทน - อ.วารุณี บั้ววิรัตน์		90,000.00						-1,239,314.00
25-ก.พ.-65	PLASMA-02-010	ค่าตอบแทน - ผศ.ดร.อัศศิษฐ์ นรบิน		90,000.00						-1,329,314.00
25-ก.พ.-65	PLASMA-02-011	ค่าดำเนินการประสานงาน หน่วยงานต่างประเทศ			60,000.00					-1,389,314.00
25-ก.พ.-65	PLASMA-02-012	ค่าเก็บรวบรวมข้อมูลของพลาสมาบับเบิลที่เกิดขึ้นในต่างประเทศ			390,000.00					-1,779,314.00
25-ก.พ.-65	PLASMA-02-013	ค่าเช่าอุปกรณ์ ในการทดสอบ และวัดระดับสัญญาณ			300,000.00					-2,079,314.00

วันที่	เลขเอกสาร	รายการ	รับเงิน (บาท)	รายจ่าย						เงินคงเหลือ (บาท)	
				ค่าตอบแทน	ค่าใช้จ่าย	ค่าวัสดุ	ค่าครุภัณฑ์	ค่าใช้จ่ายอื่น	ค่าบริหารโครงการ		
25-ก.พ.-65	PLASMA-02-014	ค่าใช้จ่ายในบันทึกการประชุมกลุ่มและวิเคราะห์ข้อมูล			15,000.00						-2,094,314.00
25-ก.พ.-65	PLASMA-02-015	ค่าวัสดุสำนักงาน				15,000.00					-2,109,314.00
25-ก.พ.-65	PLASMA-02-016	ค่าวัสดุคอมพิวเตอร์				15,000.00					-2,124,314.00
25-ก.พ.-65	PLASMA-02-017	รับเงินทุน งวดที่ 1	430,291.30								-1,694,022.70
		งานงวดที่ 3									-1,694,022.70
30-มี.ค.-65	PLASMA-03-001	รับเงินทุนงวดที่ 2	1,290,873.89								-403,148.81
30-มี.ค.-65	PLASMA-03-001	ค่าตอบแทน - รศ.ดร.ปณยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์		70,000.00							-473,148.81
30-มี.ค.-65	PLASMA-03-002	ค่าตอบแทน - Dr. Kutubuddin Ansari		60,000.00							-533,148.81
30-มี.ค.-65	PLASMA-03-003	ค่าตอบแทน - Assoc. Prof. Dr. Samed Inyurt		60,000.00							-593,148.81
30-มี.ค.-65	PLASMA-03-004	ค่าตอบแทน - Asst. Prof. Dr. Mir R. G. Razin		60,000.00							-653,148.81
30-มี.ค.-65	PLASMA-03-005	ค่าตอบแทน - Mr. Hong-Woo Seok		40,000.00							-693,148.81
30-มี.ค.-65	PLASMA-03-006	ค่าตอบแทน - นางสาวอุษา หลีกาญจนะ		40,000.00							-733,148.81
30-มี.ค.-65	PLASMA-03-007	ค่าตอบแทน - ดร.สมปอง วิเศษพานิชกิจ		60,000.00							-793,148.81
30-มี.ค.-65	PLASMA-03-008	ค่าตอบแทน - ผศ.ดร.นภัทร สระเอี่ยม		60,000.00							-853,148.81
30-มี.ค.-65	PLASMA-03-009	ค่าตอบแทน - อ.วารุณี บั้ววิรัตน์		60,000.00							-913,148.81
30-มี.ค.-65	PLASMA-03-010	ค่าตอบแทน - ผศ.ดร.อัครัญญ์ นรบิน		60,000.00							-973,148.81

วันที่	เลขเอกสาร	รายการ	รับเงิน (บาท)	รายจ่าย						เงินคงเหลือ (บาท)	
				ค่าตอบแทน	ค่าใช้จ่าย	ค่าวัสดุ	ค่าครุภัณฑ์	ค่าใช้จ่ายอื่น	ค่าบริหารโครงการ		
30-มี.ค.-65	PLASMA-03-011	ค่าเช่าอุปกรณ์ ในการทดสอบ และวัดระดับสัญญาณ			240,000.00						-1,213,148.81
30-มี.ค.-65	PLASMA-03-012	ค่าใช้จ่ายในบันทึกการประชุมกลุ่มและวิเคราะห์ข้อมูล			10,000.00						-1,223,148.81
30-มี.ค.-65	PLASMA-03-013	ค่าดำเนินการประสานงาน หน่วยงานต่างประเทศ			40,000.00						-1,263,148.81
30-มี.ค.-65	PLASMA-03-014	ค่าวัสดุสำนักงาน				10,000.00					-1,273,148.81
30-มี.ค.-65	PLASMA-03-015	ค่าวัสดุคอมพิวเตอร์				10,000.00					-1,283,148.81
30-มี.ค.-65	PLASMA-03-016	ค่าบริหารจัดการโครงการ (7%)							301,203.91		-1,584,352.72
		งานงวดที่ 4									-1,584,352.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-001	ค่าตอบแทน - รศ.ดร.ปยุตวิริ์ จามจรีกุลกาญจน์		87,500.00							-1,671,852.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-002	ค่าตอบแทน - Dr. Kutubuddin Ansari		75,000.00							-1,746,852.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-003	ค่าตอบแทน - Assoc. Prof. Dr. Samed Inyurt		75,000.00							-1,821,852.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-004	ค่าตอบแทน - Asst. Prof. Dr. Mir R. G. Razin		75,000.00							-1,896,852.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-005	ค่าตอบแทน - Mr. Hong-Woo Seok		50,000.00							-1,946,852.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-006	ค่าตอบแทน - นางสาวอุษา หลีกาญจนะ		50,000.00							-1,996,852.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-007	ค่าตอบแทน - ดร.สมปอง วิเศษพานิชกิจ		75,000.00							-2,071,852.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-008	ค่าตอบแทน - ผศ.ดร.นภัทร สระเอี่ยม		75,000.00							-2,146,852.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-009	ค่าตอบแทน - อ.วารุณี บั้ววิรัตน์		75,000.00							-2,221,852.72

วันที่	เลขเอกสาร	รายการ	รับเงิน (บาท)	รายจ่าย						เงินคงเหลือ (บาท)
				ค่าตอบแทน	ค่าใช้จ่าย	ค่าวัสดุ	ค่าครุภัณฑ์	ค่าใช้จ่ายอื่น	ค่าบริหารโครงการ	
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-010	ค่าตอบแทน - ผศ.ดร.อัครศิษฐ์ นรปิน		75,000.00						-2,296,852.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-011	ค่าตอบแทน - คุณรัฐวิชัย วสุหิรัณยฤทธิ์ (วิทยากร 1)		6,000.00						-2,302,852.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-012	ค่าตอบแทน - คุณสุดเขต อุธิโย (วิทยากร 2)		6,000.00						-2,308,852.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-013	ค่าตอบแทน - ผู้ช่วยวิทยากร (ประชุมนำเสนอ)		4,800.00						-2,313,652.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-014	ค่าตอบแทน - ผู้ดำเนินรายการ (ประชุมนำเสนอ)		4,800.00						-2,318,452.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-015	ค่าตอบแทนผู้ให้ข้อมูลการประชุมกลุ่ม (Focus Group)		50,000.00						-2,368,452.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-016	ค่าจัดการประชุมกลุ่ม (Focus Group)			33,000.00					-2,401,452.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-017	ค่าพิมพ์เอกสาร/ค่ากระดาษแผ่นพับ ค่าจัดทำเอกสารประกอบการประชุม			30,000.00					-2,431,452.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-018	ค่าดำเนินการประสานงาน หน่วยงานต่างประเทศ			60,000.00					-2,491,452.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-019	ค่าใช้จ่ายในบันทึกการประชุมกลุ่มและวิเคราะห์ข้อมูล			15,000.00					-2,506,452.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-020	ค่าจัดทำเอกสารเผยแพร่โครงการ			50,000.00					-2,556,452.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-021	ค่าวัสดุสำนักงาน				6,000.00				-2,562,452.72
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-022	ค่าวัสดุคอมพิวเตอร์				4,295.07				-2,566,747.79
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-023	ค่าตรวจสอบบัญชีโดยผู้รับใบอนุญาต						15,000.00		-2,581,747.79
30-เม.ย.-65	PLASMA-04-024	รับเงินทุน งวดที่ 3	1,721,165.19							-860,582.60

วันที่	เลขเอกสาร	รายการ	รับเงิน (บาท)	รายจ่าย						เงินคงเหลือ (บาท)
				ค่าตอบแทน	ค่าใช้จ่าย	ค่าวัสดุ	ค่าครุภัณฑ์	ค่าใช้จ่ายอื่น	ค่าบริหารโครงการ	
		ค้ำรับ เงินทุนงวดที่ 4	860,582.30							-0.30
			4,302,912.68	2,636,600.00	1,273,000.00	77,109.07	-	15,000.00	301,203.91	

ลงลายมือชื่อ 

(รศ.ดร.ปณยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์)
ตำแหน่ง หัวหน้าโครงการ
วันที่5.../.....พฤษภาคม...../..2565...

9.7 แบบแสดงรายละเอียดครุภัณฑ์

ลำดับ	รหัสครุภัณฑ์	รายละเอียดครุภัณฑ์	หมวดครุภัณฑ์	ชื่อ/ชนิดครุภัณฑ์	จัดซื้อเมื่อวันที่	ใช้ที่	การใช้ประโยชน์	หมายเหตุ
โครงการฯ นี้ไม่มีรายการครุภัณฑ์								

9.8 แผนการดำเนินโครงการตามเงื่อนไขและส่งมอบรายงานงวดที่ 4

หัวข้องาน (Tasks)	เดือน 1	เดือน 2	เดือน 3	เดือน 4	เดือน 5	เดือน 6	เดือน 7	เดือน 8	เดือน 9
งานงวดที่ 1 (ขอบเขตการดำเนินงานที่ 4.1) - ทำเสร็จแล้ว									
1) ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับผลกระทบการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อ RTK พร้อมทั้งจัดทำรายงานผลการศึกษาเบื้องต้นเพื่อส่งมอบรายงานฉบับที่ 1 ภายใน 45 วัน	ดำเนินการเสร็จสิ้นและส่งมอบแล้ว								
งานงวดที่ 2 (ขอบเขตการดำเนินงานที่ 4.2-4.3) - ทำเสร็จแล้ว									
2) ศึกษา เก็บรวบรวมข้อมูล พร้อมวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศที่มีต่อ RTK ของเครื่องรับ GNSS ที่มีอยู่ในเทคโนโลยี 5G, UAV ฯลฯ		ดำเนินการเสร็จสิ้นและส่งมอบแล้ว							
3) ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลของพลาสมาบับเบิลที่เกิดขึ้นในต่างประเทศ จำนวน 3 ประเทศ									
4) คำนวณค่าบ่งชี้ระดับความรุนแรงและวิเคราะห์ผลกระทบของพลาสมาบับเบิลข้อที่ 3) ที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ (RTK) ของเครื่องรับ GNSS									
5) จัดทำรายงานนำเสนอข้อมูลตามขอบเขตการดำเนินงานที่ 4.2 และ 4.3 พร้อมทั้งส่งมอบรายงานฉบับที่ 2 รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1 ภายใน 120 วัน									

หัวข้องาน (Tasks)	เดือน 1	เดือน 2	เดือน 3	เดือน 4	เดือน 5	เดือน 6	เดือน 7	เดือน 8	เดือน 9
งานงวดที่ 3 (ขอบเขตการดำเนินงานที่ 4.4-4.6) - ทำเสร็จแล้ว	คณะผู้วิจัยได้เริ่มทำงานงวดที่ 3 ไปแล้วบางส่วน ทำให้ผลงานเสร็จไปแล้วประมาณ 50% ซึ่งเป็นการทำงานที่ก้าวหน้ากว่าแผนที่วางไว้ 10%								
6) ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองโกลบรูชาแบบใหม่ให้แก่เครื่องรับ GNSS เพื่อปรับปรุงค่า RMSE ให้ดีขึ้นและระบุตำแหน่งที่แม่นยำมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเดิม และเปรียบเทียบค่า TEC และเวลาประวิงขึ้นไอโอโนสเฟียร์ของแบบจำลองโกลบรูชาแบบใหม่และแบบเดิม โดยอาศัยค่าข้อมูลจาก 3 สถานี GNSS ของประเทศไทยในวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกหรือพลาสมาบับเบิล						ดำเนินการ เสร็จสิ้นและ ส่งมอบแล้ว			
7) ศึกษาและนำเสนอวิธี RTK (แบบใหม่) ที่อาศัยข้อมูลมากกว่า 1 สถานีฐาน เพื่อให้รับค่าปรับแก้พิกัดเครื่องรับ GNSS อย่างมีประสิทธิภาพและเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการจำลองประสิทธิภาพการทำงานระหว่างวิธี RTK แบบเดิมกับวิธี RTK แบบใหม่ โดยอาศัยค่าข้อมูลจากสถานี GNSS จำนวน 2 สถานีของประเทศไทยในวันที่เสียบ									
8) นำเสนอวิธี Multi-GNSS systems and Multivariate Singular Spectrum Analysis (วิธีใหม่) ให้แก่เครื่องรับ GNSS และเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการจำลองประสิทธิภาพการทำงานระหว่างวิธีใหม่กับวิธีอื่นที่เคยมีการนำเสนอก่อนหน้านี้ โดยอาศัยค่าข้อมูลจากเครื่องรับ GNSS ดังกล่าวตั้งอยู่ในประเทศไทยและต่างประเทศ ไม่น้อยกว่า 2 ประเทศ									
9) จัดทำรายงานนำเสนอข้อมูลตามขอบเขตการดำเนินงานที่ 4.4 – 4.6 พร้อมทั้งส่งมอบรายงานฉบับที่ 3 รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2 ภายใน 180 วัน									
งานงวดที่ 4 (ขอบเขตการดำเนินงานที่ 4.7-4.9) - ส่งมอบในงานงวดนี้									
10) จัดประชุมกลุ่มย่อย (Focus Group) ผู้เกี่ยวข้องและผู้ได้รับผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อ RTK ของ 5G, UAV ฯลฯ							ดำเนินการเสร็จแล้วและ ส่งมอบในงานงวดนี้		

หัวข้องาน (Tasks)	เดือน 1	เดือน 2	เดือน 3	เดือน 4	เดือน 5	เดือน 6	เดือน 7	เดือน 8	เดือน 9
11) จัดทำรายงานการศึกษาข้อเสนอประเทศไทยต่อการศึกษผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่มีต่อการระบุพิกัดเรียลไทม์ของเทคโนโลยี 5G, UAV ฯลฯ									
12) จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ (Final Report) โดยจัดทำเป็นรายงานทางวิชาการจำนวน ๖ เล่ม พร้อม DVD บรรจุไฟล์รายงานในรูปแบบ MS Word จำนวน 1 ชุด รวมทั้งจัดงานสัมมนาเพื่อเผยแพร่ผลงานต่อสาธารณชน									

ดำเนินการเสร็จแล้วและ
ส่งมอบในงานงวดนี้

9.9 ความเห็น/ข้อสังเกตของคณะกรรมการพิจารณาผลงานฯ จากการส่งมอบงานงวดที่ 1 - 3

ลำดับ	รายละเอียดผลงาน	ความเห็นและข้อสังเกตของคณะกรรมการพิจารณาผลงานฯ จากการส่งมอบงานงวดที่ 3	ประเด็นที่ได้ดำเนินการปรับปรุง/แก้ไขตามความเห็นและข้อสังเกตของคณะกรรมการพิจารณาผลงานฯ ในงานงวดที่ 1-2 มีดังนี้
1	เนื้อหา แผนการ ดำเนินโครงการ วิธีการใหม่ที่นำเสนอ ผลลัพธ์ที่น่าส่ง รวมถึงภาพรวม ทั้งหมดของการ ดำเนินโครงการ	คณะกรรมการพิจารณาผลการดำเนินโครงการฯ มีมติเห็นชอบผลงานประจำงวดที่ 3 โดยไม่มีการปรับปรุง/แก้ไข	คณะผู้วิจัยได้นำประเด็นต่าง ๆ ที่ได้แก้ไขและเพิ่มเติมตามความเห็นและข้อสังเกตของคณะกรรมการพิจารณาผลงานฯ ในงานงวดที่ 1-2 ลงในเนื้อหาแต่ละบทแล้ว เช่น <ol style="list-style-type: none"> 1. แผนภาพผลการศึกษา สาเหตุ ผลกระทบที่แสดงถึงความเชื่อมโยงระหว่างการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่ส่งผลกระทบต่อความไม่แม่นยำในการระบุพิกัด RTK (บทที่ 2) 2. คณะผู้วิจัยได้ชี้แจงเหตุผลของการเลือกศึกษาพลาสมาบับเบิล 3 ประเทศ คือ ประเทศอินโดนีเซีย ประเทศญี่ปุ่น และประเทศจีน นอกจากประเทศไทย 3. คณะผู้วิจัยขอรับรองว่า “ข้อมูลผลการศึกษาสำหรับความผิดปกติของชั้นบรรยากาศและพลาสมาบับเบิลที่นำเสนอในโครงการศึกษาฯ นี้เป็นข้อมูลเชิงลึกของผลงานวิจัยล่าสุดที่ทันสมัย” เช่น งานของ G. Li และคณะ ใน Surveys in Geophysics ปี 2021 (Q1/WoS), งานของ P. Jamjareegulgarn และคณะ ใน Advances in Space Research ปี 2021 (Q1/WoS) เป็นต้น

ภาคผนวก

บทความวิจัยที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 5 เรื่องของโครงการฯ นี้

บทความวิจัยที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 5 เรื่องตามผลผลิตที่สำคัญของโครงการฯ นี้

1. บทความที่ 1 คือ W. Srisamoodkham, K. Shiokawa, Y. Otsuka, K. Ansari, and P. Jamjareegulgarn, “Detecting Equatorial Plasma Bubbles on All-Sky Imager Images Using Convolutional Neural Network,” in: Communication and Intelligent Systems, Lecture Notes in Networks and Systems 461, https://doi.org/10.1007/978-981-19-2130-8_38. – ฐานข้อมูล SCOPUS และ Q4 ของ SJR (หน้า 297 - 303)

2. บทความที่ 2 คือ W. Srisamoodkham, K. Ansari, and P. Jamjareegulgarn, “Positioning Comparison Using GIM, Klobuchar, and IRI-2016 Models during the Geomagnetic Storm in 2021,” in: Communication and Intelligent Systems, Lecture Notes in Networks and Systems 461, https://doi.org/10.1007/978-981-19-2130-8_56. – ฐานข้อมูล SCOPUS และ Q4 ของ SJR (หน้า 304 - 311)

3. บทความที่ 3 คือ H. W. Seok, K. Ansari, C. Panachai, and P. Jamjareegulgarn, “Individual performance of multi-GNSS signals in the determination of STEC over Thailand with the applicability of Klobuchar model,” *Advances in Space Research* vol. 69, no. 3, pp. 1301-1318, 2022; doi: 10.1016/j.asr.2021.11.025 (หน้า 312 - 329) – Q1 ในฐานข้อมูล WoS

4. บทความที่ 4 คือ K. Ansari and P. Jamjareegulgarn, “Investigating the Effect of PDOP on Kalman Filter performance for GNSS-based RTK Positioning,” – *During Second Revision of GRSJ Journal* – Q1 ในฐานข้อมูล WoS; ขอบเขตการดำเนินงานที่ 4.5 ไม่ได้อยู่ในเงื่อนไขที่จะต้องตีพิมพ์ - (หน้า 330 - 332)

5. บทความที่ 5 คือ W. Srisamoodkham, K. Ansari, and P. Jamjareegulgarn, “Improvement of Real-Time Kinematic Positioning Using Kalman Filter-Based Singular Spectrum Analysis during Geomagnetic Storm for Thailand sector,” in: *The 3rd International Conference on Data Science and Applications (ICDSA 2022)*, March 26-27, 2022 - อยู่ระหว่างการอ่านบทความของการประชุมวิชาการอยู่ในฐาน SCOPUS และ Q4 ของ SJR (หน้า 333 - 341)

บทความที่ 1 คือ W. Srisamoodkham, K. Shiokawa, Y. Otsuka, K. Ansari, and P. Jamjareegulgarn, “Detecting Equatorial Plasma Bubbles on All-Sky Imager Images Using Convolutional Neural Network,” in: Communication and Intelligent Systems, Lecture Notes in Networks and Systems 461, https://doi.org/10.1007/978-981-19-2130-8_38. – ฐานข้อมูล SCOPUS และ Q4 ของ SJR (หน้า 297 - 303)

Detecting Equatorial Plasma Bubbles on All-Sky Imager Images Using Convolutional Neural Network

Worachai Srisamoodkham¹, Kazuo Shiokawa^{2,0000-0002-6842-15521},
Yuichi Otsuka^{2,0000-0002-3098-38591}, Kutubuddin Ansari³ and Punyawee Jamjareegulgarn⁴

¹Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University.
Email: hs5xij@peru.ac.th

²Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Japan.
Email: shiokawa@nagoya-u.jp; otsuka@isee.nagoya-u.ac.jp

³Integrated Geoinformation (IntGeo) Solution Private Limited, New Delhi, India.
Email: kdansarix@gmail.com

⁴King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus,
Chumphon, Thailand

*Corresponding Author: kjpunyaw@gmail.com

Abstract. This paper proposes initially to apply convolutional neural network (CNN) for detecting the equatorial plasma bubbles on the ASI images. The considered CNN model is the YOLO v3 tiny model under a deep learning API (Keras), running on top of the machine learning platform (TensorFlow). Our program for EPB detection is written in Python that is extended easily to combine into a space weather web site for detecting and notifying EPBs in our next step. The results show that the YOLO v3-based CNN can detect the EPBs in ASI images with different intensities obtained from many countries. The threshold is tested and selected to be 0.40 suitably for detecting the anomaly (EPB existence). The maximum anomalous value is selected to decide the EPB occurrence.

Keywords: ASI, convolution neural network, plasma bubble, YOLO.

1 Introduction

Plasma instabilities over equatorial ionosphere can be a major source of large- and small-scale density depletions during after sunset and after midnight. The depleted plasma over magnetic equator (so-called equatorial plasma bubble or EPB) formulates at the bottomside F region and rises upwardly with its structure elongating along the magnetic field lines. The plasma instabilities exist various scales ranging from 10 cm to 1,000 km where they can disrupt HF communication, satellite communication, positioning, as well as navigation systems within $\pm 20^\circ$ latitudes around geomagnetic equator [1]. In general, these perturbed ionosphere conditions can lead to another phenomenon named as equatorial spread-F (ESF) in F region, because they affect directly the HF communications by producing the echo spreads in ionograms. Both EPB and ESF have been known as the main sources for Global Navigation Satellite

System (GNSS) disturbances. The scintillation is the amplitude and phase fluctuations of signals that leads to disrupt satellite-based communications and deteriorate the GNSS positioning accuracy [2-3]. The main reason is that the sudden density depletions inside EPBs disturb the GNSS velocities passing the ionosphere. This is why the occurrence characteristics as well as probabilities of EPB have been studied for space weather and ionospheric physics. (e.g., [4-5]).

Basically, the F-region plasma irregularities at height 250–350 km can be observed as dark EPBs and bright plasma blobs. The plasma blobs were observed firstly by OI 630.0 nm all-sky imagers (ASIs) at Brazil [4]. Nade et al. [5] investigated the simultaneous plasma blobs and EPBs over low latitudes, but the generation mechanism of EPBs and blobs is not obviously comprehended [6] and should be made additional investigation. Paznukhov et al. [7] studied firstly the EPBs and the scintillations over Africa in 2010 for monitoring the ionospheric irregularities. Their results released that the EPBs are directly related to the scintillations and the scintillation severity relies on EPB depth. The scintillation amplitude is identified by S4 index and the EPBs are analyzed based on spectral analysis and GPS TEC observation. Shiokawa et al. [8] conducted the experiments of atmospheric and ionospheric waves in the upper atmosphere over several countries using ASIs. Their results reported about the features of small gravity waves and medium disturbances in mesosphere, thermosphere and ionosphere. As for our earlier EPB investigations, the obvious airglow depletions incurred by EPBs can be observed by several OMTIs and analyzed at Chiang Mai, Darwin, and Kototabang etc. After storing the ASI images, they will be post-processed and analyzed with some kinds of program such as MATLAB, SCILAB etc.

Likewise, numerous literatures have proposed several methods to analyze the all-sky image data. For example, Kubota et al. [9] introduced a method to convert the pixel ASI images into the actual coordinates at the airglow emission layer. Afterwards, Narayanan et al. [10] presents an approach to convert the pixel values into the respective latitude-longitude values of each ASI image. In Thailand, the ASIs of optical mesosphere thermosphere imager were also installed at Chiang Mai and Chumphon provinces to monitor plasma bubbles. The ASI images of these two regions are very important so as to investigate the EPB generation mechanism, the EPB movement and the impact of EPB on HF communication, positioning, and navigation over equatorial and low latitudes. However, the EPB detection and notification have not proposed simultaneously, therefore, the authors have an idea to detect the nighttime ASI images and classify each ASI image with or without EPBs on web applications using convolution neural network (CNN). The ASI images at Chiangmai, Thailand is employed as the train dataset for the proposed CNN method. Meanwhile, the ASI images are also taken from previous published manuscripts to be the test dataset such as Lynn et al. [15], observed at Darwin, Australia; Takahashi et al. [16], observed at São Luis, Brazil; and Makela et al. [17], observed at Haleakala, Hawaii [17].

2 Optical Mesosphere Thermosphere Imagers (OMTI)

Optical Mesosphere Thermosphere Imagers (OMTI) was constructed by ISEE of Nagoya University in 1997 in order to investigate the dynamics of airglow emissions

in upper atmosphere. The OMTI consists of all-sky imagers (ASIs), photometers, and interferometer. The imagers employ some cooled CCDs of 512×512 pixels. All of the ASIs in the OMTI have at least four filters and some gases' filters. The BPF bandwidths are about 1–2 nm and the ASI sensitivities are less than 0.4 counts per second providing smaller than 4,000 count/R/s. Further details of the OMTI can be read and studied in Shiokawa et al. [8] and the airglow images of OMTI are obtained from the web: <https://stdb2.isee.nagoya-u.ac.jp/omti/index.html>. Otsuka et al. [9] suggested that the ASIs of OMTI are a crucial instrument for better understanding the coupling between ionosphere and thermosphere and detecting the EPBs. Fig. 1 shows the examples of airglow images detected by OMTI at Chiang Mai, Thailand, on February 2, 2020.

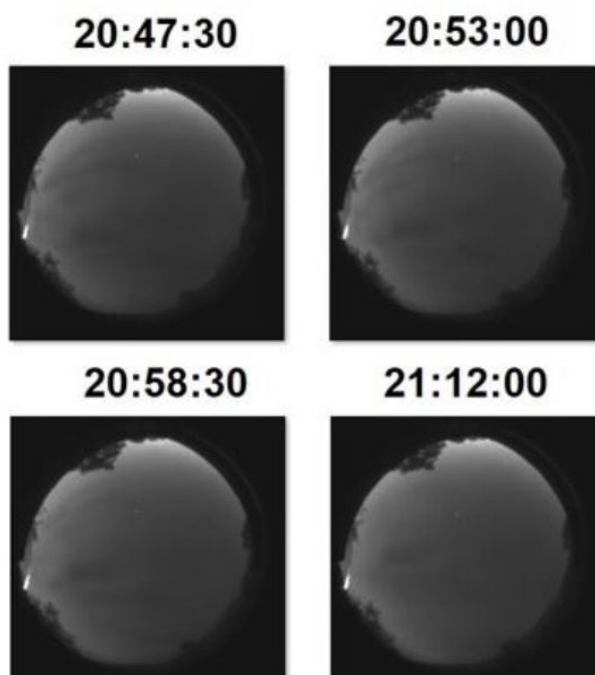


Fig. 1. The airglow images detected by all-sky airglow imagers of OMTI at Chiang Mai, Thailand, on February 2, 2020.

4

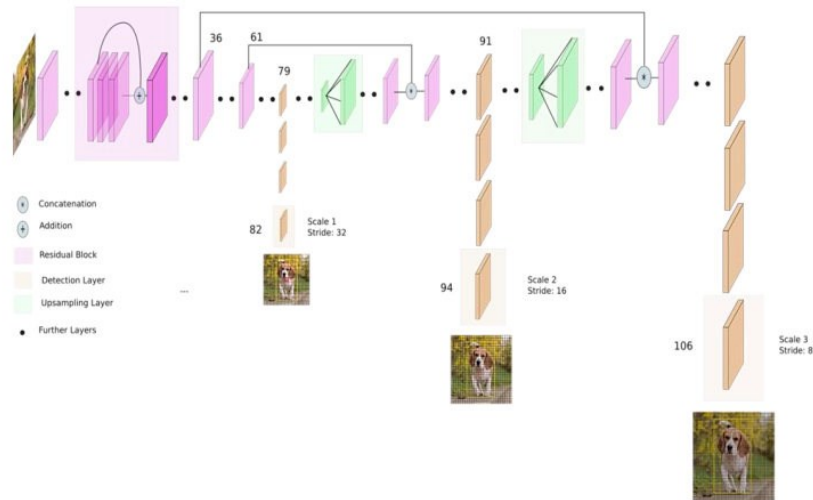


Fig. 2. The operating procedure of YOLO v3 [13]

3 YOLO Tool

Object detection is a significant mission that is concerned to identify the existence and the localization of one or more objects in a given figure. The methods of object recognition and classification seem to be the challenging tasks. Hence, the YOLO with convolutional neural networks (CNNs) approach has been proposed to be the modern tool for performing the real-time object detection [12]. That is the reason why the YOLO is selected to detect the real-time EPBs from ASI images in this work.

YOLO tool was built and released to the public in April, 2018. It is recognized to outperform the previous YOLO versions. Its algorithm depends on a variant of Darknet which has 53 hidden-layer network trained on Imagenet. The latest version of YOLO is YOLOv3. In this work, a CNN program is coded with python using YOLOv3 model that is contained in Keras API and TensorFlow. Note that TensorFlow is the open-source of Google for developing the applications based on machine learning and deep learning. It can be used on several platforms (e.g., windows, Linux etc.) for making machine learning.

As for YOLO v3, a fully convolutional neural network (CNN) with larger than 100 layers can be processed for its object detection due to 53-hidden layers. The operating procedure of YOLO v3 is depicted in Fig. 2 where YOLO v3 includes the down-sampling three levels for the input image dimensions. Especially, the object prediction of YOLO v3 are forecasted using logistic regression [13]. As for several advantages of YOLO v3, it is thus employed to train the all-sky imager (ASI) images and classify those images with or without plasma bubbles in this work.

4 Results

The ASI images with and without EPBs at Chiang Mai, Thailand, were used as the training images. Afterwards, those images were extracted the image features and classified with and without EPBs using YOLOv3 (CNN model). YOLOv3 tiny model was employed in this work, because it has a slightly lower recognition accuracy, but runs faster as compared to the standard model. The accuracy and the computational power of the tiny model are equal to 33.1 and 5.56 Bn, respectively, that are much less than those of the standard model [14]. During training the number of ASI images, we find that the suitable threshold is equal to 0.40 (or 40%) for classifying the EPBs and also use the word “anomaly” in each image to represent the EPB occurrence. In Table 1 case a)-d), the ASI images with EPBs show their anomalies of greater than and equal to 40%. The maximum anomalies in each ASI image are selected to decide surely the EPB existence. In contrast, the case e) of Table 1 depicts an ASI image without EPBs whose anomaly is less than 40% (no anomaly).

5 Conclusion

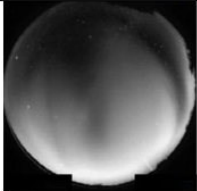
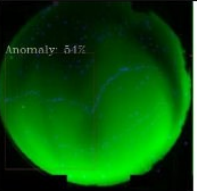
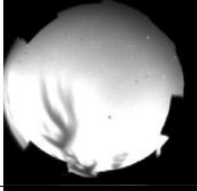
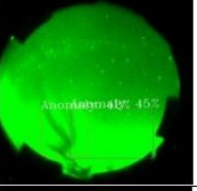
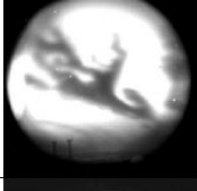
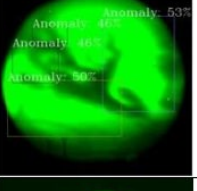
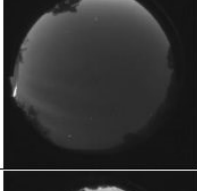
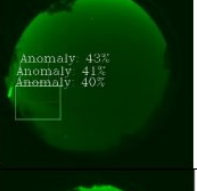
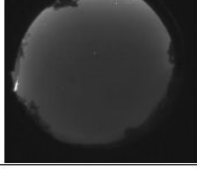
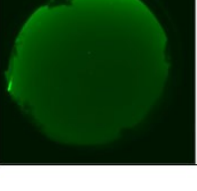
Equatorial plasma bubble (EPB) in all-sky imager (ASI) images are detected using the convolutional neural network (CNN) for the first time. The YOLO v3 “Tiny” model is used to detect the EPBs due to its several benefits. Our EPB detection program is written in Python that can be gathered into a web site at once. After gathering the ASI images from different countries and Chiang Mai, Thailand, we start extracting the features and classify the ASI images with and without EPBs like “supervised learning” with YOLO v3-based CNN. Note that the YOLO v3 framework is based on Keras API (deep learning) operated on TensorFlow (machine learning) platform. We find that the CNN model can be used to detect admirably the EPBs in ASI images with the suitable threshold setting of 0.40. This threshold was defined after more than two hundred ASI images with and without EPBs were trained and classified completely. In the future, this CNN-based EPB detection program will be combined on the space weather web site and will be used as an EPB precursor over Thailand.

6 Acknowledgement

This research is funded by BTFP organization (project code: B2-001/6-2-63). The authors would like to express the gratitude to the ASI images taken from [15-17]. Particularly, several ASI images employed to train the CNN model were obtained from Chiang Mai station owned by Nagoya University, Japan.

6

Table 1. ASI Images before and after CNN model with maximum anomalies and sources.

Case	ASI Images Before CNN model	ASI Images After CNN model	Maximum of Anomalies	Image Sources
a)			54%	Lynn et al [15], observed at Darwin, Australia
b)			45%	Takahashi et al [16], observed at São Luis, Brazil
c)			53%	Makela et al [17], observed at Haleakala, Hawaii
d)			43%	Chiang Mai, Thailand, observed by Nagoya University
e)			No Anomaly	Chiang Mai, Thailand, observed by Nagoya University

7 References

1. Woodman, R.F., Lohoz, C.: Radar observations of F region equatorial irregularities. *J. Geophys. Res.* 81, 5447–5466, (1976)
2. Datta-Barua, S., Doherty, P.H., Delay, S.H., Dehel, T., Klobuchar, J.A.: Ionospheric Scintillation Effects on Single and Dual Frequency GPS Positioning. In: Proceedings of the 2010 Institute of Navigation ION GNSS meeting, Portland, OR (2010).
3. Carrano, C.S., Groves, K.M.: Temporal decorrelation of GPS satellite signals due to multiple scattering from ionospheric irregularities. In: Proceedings of the 2010 Institute of Navigation ION GNSS meeting, Portland, OR (2010).
4. Pimenta A.A., Sahai Y., Bittencourt J.A., Rich F.J.: Ionospheric plasma blobs observed by OI 630 nm all-sky imaging in the Brazilian tropical sector during the major geomagnetic storm of April 6-7, 2000, *Geophysical Research Letters* 34(2), (2007).
5. Nade D.P., et al.: Observations of plasma blobs by OI 630 nm using ASI and photometer over Kolhapur, India. *Earth, Moon, and Planets* 112(1-4), 89-101, (2014).
6. Choi H.S., Kil H., Kwak Y.S., Park Y.D., Cho K.S.: Comparison of the bubble and blob distributions during the solar minimum. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 117(4), (2012).
7. Paznukhov, V.V., et al.: Equatorial plasma bubbles and L-band scintillations in Africa during solar minimum. *Ann. Geophys.* 30(2012682), 675–682, (2012).
8. Shiokawa, K., Otsuka, Y., Ogawa, T.: Propagation characteristics of nighttime mesospheric and thermospheric waves observed by optical mesosphere thermosphere imagers at middle and low latitudes. *Earth Planet Space*, 61, 479–491, (2009); <https://doi.org/10.1186/BF03353165/>.
9. Otsuka, Y., Shiokawa, K., Ogawa, T., Yokoyama, T., Yamamoto, M., Fukao, S.: Spatial relationship of equatorial plasma bubbles and field-aligned irregularities observed with an all-sky airglow imager and the equatorial atmosphere radar. *Geophysical Research Letters* 31(20), (2004).
10. Kubota, M., Fukunishi, H., Okano, S.: Characteristics of medium- and large-scale TIDs over Japan derived from OI 630-nm nightglow observation. *Earth, Planets and Space* 53(7), 741-751, (2001).
11. Lakshmi, N.V., Gurubaran, S., Emperumal, K.: Imaging observations of upper mesospheric nightglow emissions from Tirunelveli (8.7°N). *Indian Journal of Radio & Space Physics* 38(3), 150-158, (2009).
12. How to Perform Object Detection with YOLOv3 in Keras, <https://machinelearningmastery.com/how-to-perform-object-detection-with-yolov3-in-keras/>, last accessed 2020/11/29.
13. What's new in YOLO v3?, <https://towardsdatascience.com/yolo-v3-object-detection-53fb7d3bfe6b>, last accessed 2020/11/29.
14. YOLOv3: A Machine Learning Model to Detect the Position and Type of an Object, <https://medium.com/axinc-ai/yolov3-a-machine-learning-model-to-detect-the-position-and-type-of-an-object-60f1c18f8107>, last accessed 2020/11/29.
15. Lynn, K. J. W., Otsuka, Y., Shiokawa, K.: Simultaneous observations at Darwin of equatorial bubbles by ionosonde-based range/ time displays and airglow imaging. *Geophysical research letters* 38(L23101), (2011).
16. Takahashi, H., et al.: Equatorial plasma bubble seeding by MSTIDs in the ionosphere: *Progress in Earth and Planetary Science* 5(32), (2018).
17. Jonathan, J.M., Ledvina, B.M., Kelley, M.C., Kintner, P.M.: Analysis of the seasonal variations of equatorial plasma bubble occurrence observed from Haleakala, Hawaii, *Annales Geophysicae* 22(9), (2004).

บทความที่ 2 คือ W. Srisamoodkham, K. Ansari, and P. Jamjareegulgarn, “Positioning Comparison Using GIM, Klobuchar, and IRI-2016 Models during the Geomagnetic Storm in 2021,” in: *Communication and Intelligent Systems, Lecture Notes in Networks and Systems* 461, https://doi.org/10.1007/978-981-19-2130-8_56. – ฐานข้อมูล SCOPUS และ Q4 ของ SJR (หน้า 304 - 311)

Positioning Comparison Using GIM, Klobuchar, and IRI-2016 Models during the Geomagnetic Storm in 2021

Worachai Srisamoodkham¹, Kutubuddin Ansari²[0000-0002-6151-6241], and
Punyawi Jamjareegulgarn^{3*}[0000-0003-1259-1883]

¹Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University.
Email: hs5xij@pcru.ac.th

²Integrated Geoinformation (IntGeo) Solution Private Limited, New Delhi, India.
Email: kdansarix@gmail.com

³King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus,
Chumphon 86160, Thailand

*Corresponding Author: kjpunyaw@gmail.com

Abstract. This paper compares the positioning accuracy obtained from the GIM VTEC, the Klobuchar model, and the IRI-2016 model at Chiang Mai and DPT9 stations, Thailand, during an intense geomagnetic storm of 2021 (on May 12, 2021). The results show that the diurnal variation of the Klobuchar modeled VTECs show the same trend as that of the observed GIM VTECs with the same peaks and the maximum deviation of 22.5% at 05:00 UT. Meanwhile, the IRI2016-predicted VTECs show its peak at 07:00 UT and are not available obviously during 13:00-21:00 UT due to the impact of this intense geomagnetic storm. Most of the ionospheric delays obtained from the Klobuchar model underestimate those of the GIM VTEC whereas they overestimate those of GIM VTEC during after midnight and pre-sunrise period. At both stations, the mean ionospheric range delays of the GIM VTEC are highest during daytime period while those of the IRI-2016 model are largest during nighttime period. The positioning errors at higher latitude (CHMA station) are larger than those at lower latitude (DPT9 station).

Keywords: GIM TEC, IRI-2016 model, Klobuchar model, Positioning.

1 Introduction

The ionosphere is a layer of Earth's upper atmosphere ranging from 50 to 1,000 km. It is characterized by highly dynamical plasma density where the free ions and electrons affect largely both the refraction and the retardation of satellite signals. Hence, the ionospheric delay is one of the main error sources of the global navigation satellite systems (GNSSs), for example, GLONASS, Galileo, Beidou, QZSS, and GPS etc., which have been employed increasingly for numerous applications. The ionospheric delay is proportional to the total electron content (TEC) along the line of sight (LOS), and inversely proportional to the signal frequency. Generally, the ionospheric error covers from a few meters to tens of meters at the zenith, and can increase beyond 100 meters under extreme space weather situations. The violence of delay errors relies on

2

time of day, location, season, solar cycle, and other anomalies and irregularities [1-3]. The estimation failures of the ionospheric error make both the cycle slip correction and the ambiguity resolution more difficult and result in positioning errors in long baseline solutions [4]. It is well known that the ionospheric delay can be eliminated by using range measurements for any dual-frequency GNSS receivers. In contrast, it can be compensated to get the actual positions using the ionospheric models for single frequency GNSS receivers. Models using ionospheric parameters broadcasted along with navigation messages have been widely employed to mitigate the ionospheric influences on signal propagation for the users of single frequency GNSS receivers.

The ionospheric delay can be mitigated up to different levels based on various ionospheric error mitigation techniques. The main solution to neglect the ionospheric effects can be conducted by considering the GNSS observation during nighttime period, which assumes that the ionospheric condition is almost quiet. The most widely used model for single frequency GPS receiver is the Klobuchar model [5]. Klobuchar developed an algorithm to give 50% root mean square correction for the ionospheric delay. The coefficients were computed from an empirical model of global ionospheric behaviors as functions of solar activity and time of year, and broadcasted through the GPS navigation message. It can be used to compute a slant ionospheric delay to each satellite at various elevation and azimuth directions that are then applied to determine the final pseudoranges. However, the accuracy of Klobuchar model is deteriorated because of the intensities of solar activity and geomagnetic storm.

Thailand is located close to the geomagnetic equator within the equatorial ionization anomaly (EIA) region at $\pm 15^\circ$ in latitude where the TEC often fluctuate and can be affected by the geomagnetic storm. So, the positioning accuracy can be deteriorated at the EIA region [6]. Hence, this paper is aimed to identify the positioning accuracy of Klobuchar model and IRI-2016 model during the most intense geomagnetic storm of this year till now (on May 12, 2021) over Thailand region.

2 Data Used

The raw data on an intense geomagnetic storm of year 2021 (storm level G3, $A_p = 42$ and $K_p = 7$ between 12:00 and 18:00 UT) were gathered from the GNSS stations at Chiang Mai, namely CHMA (lat. 18.84°N , long. 98.97°E) and DPT9 (lat. 13.76°N , long. 100.57°E) stations from Department of Public Work and Country Planning. Afterwards, the raw data were converted to the RINEX (Receiver Independent Exchange Format) files which include the navigation data, observation data, and Klobuchar coefficients. This information was employed to estimate the ionospheric delay as described in the next section. Moreover, the vertical total electron content (VTEC) values from Global Ionospheric Model (GIM) map were also employed in this paper that can be downloaded through a web site: <https://urs.earthdata.nasa.gov/>. Likewise, the VTEC values obtained from the IRI-2016 model were also used to compare with the GIM VTEC and Klobuchar modeled VTECs and can download from a web site: https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php.

3 Ionospheric delay

Firstly, we start computing the ionospheric delay of Klobuchar model. The Klobuchar model has been utilized to compensate the GPS positioning accuracy for single-frequency GPS users since 1987. The GPS satellites broadcast eight coefficients of the Klobuchar model to estimate the ionospheric delay using two main issues as follows: a) the electron content is assumed to be concentrated as a thin layer at the height of 350 kilometers and b) the slant delay is computed from the vertical delay at the ionospheric pierce point (IPP) multiplying by an obliquity factor. Mathematical equations for computing the ionospheric delay of Klobuchar ionospheric model can be thoroughly found in [7]. Here, we show shortly the equation to compute vertical ionospheric time delay (I_d) of L1 frequency (1.575 MHz) in unit: ns as follow:

$$I_{d_klo} = \begin{cases} \left[5 \cdot 10^{-9} + A_f \cdot \left(1 - \frac{X_f^2}{2} + \frac{X_f^2}{24} \right) \right]; & |X_f| \leq 1.57 \\ 5 \cdot 10^{-9} & ; |X_f| > 1.57 \end{cases} \quad (1)$$

where A_f and X_f are the amplitude and phase of the ionospheric delay, respectively. Afterwards, the VTEC of Klobuchar model ($VTEC_{KLO}$) can be computed as follow.

$$VTEC_{KLO} = \frac{I_{d_klo} \cdot c \cdot f_{L1}^2}{40.3} \quad (2)$$

where c is the light velocity.

Secondly, the GIM VTEC data ($VTEC_{GIM}$) are routinely computed and stored in a large database owned by International GNSS Service (IGS). The ionospheric delay based on GIM VTEC data can also be determined by the following expression.

$$I_{d_GIM} = \frac{40.3 \times VTEC_{GIM}}{c \cdot f_{L1}^2} \quad (3)$$

Thirdly, the IRI VTEC data ($VTEC_{IRI}$) are also retrieved from a large database owned by the NASA and NSF organizations. The ionospheric delay based on IRI VTEC data can also be calculated by the below expression.

$$I_{d_IRI} = \frac{40.3 \times VTEC_{IRI}}{c \cdot f_{L1}^2} \quad (4)$$

As for Eq. (3) and (4), we assume that the GNSS receivers can receive and process the $VTEC_{GIM}$ and $VTEC_{IRI}$ values and employ them to compute the I_{d_GIM} and I_{d_IRI} values, respectively.

4

4 Ionospheric Range Delay

The ionospheric range delay (I_r) of each considered model can be computed as follow.

$$I_{r*} = I_{d*} \times c \quad (5)$$

where I_d represent the ionospheric delays of the observed GIM VTECs, the Klobuchar modeled VTECs, and the IRI2016-predicted VTECs, respectively, then the I_r denote the respective ionospheric range delays (i.e., I_{r_GIM} , I_{r_KLO} and I_{r_IRI}).

5 Results and Discussion

As for our experiments, we start calculating the ionospheric delays and VTEC values for all GNSS constellations at both CHMA and DPT9 stations over Thailand region during the most intense storm of year 2021 till now (on May 12, 2021). We find that the QZSS constellations can provide the best Klobuchar modeled VTEC values that behave the same trend as the GIM VTEC values. Therefore, all parameters related to the Klobuchar model in this paper are owned by the QZSS constellations. Firstly, the VTEC values obtained from the observed GIM, the Klobuchar model, and the IRI-2016 model are processed and analyzed. Their VTEC results are shown in Fig. 1 and Table 1. It is seen that the diurnal variation of the Klobuchar modeled VTECs show the same trend as that of the observed GIM VTECs with the same peaks and the maximum deviation of 22.5% at 05:00 UT (12:00 LT). Meanwhile, the IRI2016-predicted VTEC values show differently its peak at 07:00 UT. Also, they are not available during 13:00-21:00 UT due to the impact of this intense geomagnetic storm. At both stations, the ionospheric delay statistics of the observed GIM are mostly higher than those of the Klobuchar model and the IRI-2016 model during the storm day. However, the ionospheric delays during the whole day at CHMA station are mostly larger than those at DPT9 station as shown in Fig. 2 and Table 2. It can be seen obviously that the ionospheric delays during daytime period are bigger than those during nighttime period because of the existence of photoionization process. Refer to the ionospheric delay differences between the GIM and Klobuchar models of these two stations, the maximum and minimum values during daytime period are about 4.59-9.70 ns around 5:00 UT and about 0.00 ns at 0:00 UT, respectively. Meanwhile, those values during nighttime period are smaller of 2.41-3.38 ns around 13:00 UT and about 0.00 ns at different hours, respectively. It is worthy to note that most of the ionospheric delays obtained from the Klobuchar model underestimate those of the GIM VTEC whereas they overestimate those of GIM VTEC between 17:00 UT and 23:00 UT (00:00 – 06:00 LT). These results are good agreements with the results of Jongsintawee et al. [8].

As for the ionospheric range delays, the studied results are similar to the results of the ionospheric delays shown in Fig. 3 and Table 3. During daytime, the averaged range delays of the GIM VTEC are highest at both stations while the averaged range delays of the IRI-2016 model are largest during nighttime period at both stations. Moreover,

during daytime, the I_{r_GIM} , I_{r_KLO} and I_{r_IRI} at both stations behave the decreasing trend, respectively as a result of the orderly lower VTEC values. Meanwhile, during night time period, the I_{r_IRI} values seem to be highest as compared to I_{r_GIM} and I_{r_KLO} , although the IRI-2016 data are not available on this geomagnetic storm. It can be seen clearly that the positioning errors at higher latitude (CHMA station) are larger than those at lower latitude (DPT9 station) as reported in Jongsintawee et al. [8].

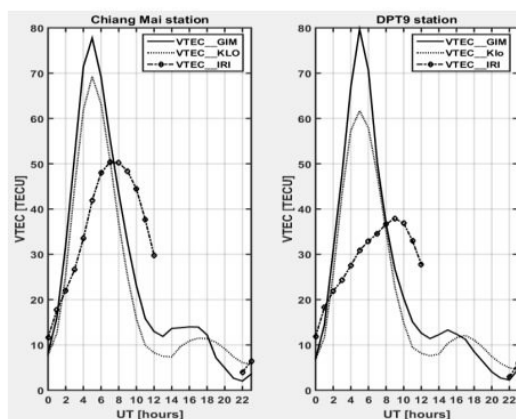


Fig. 1. The studied VTEC values obtained from CHMA and DPT9 on May 12, 2021.

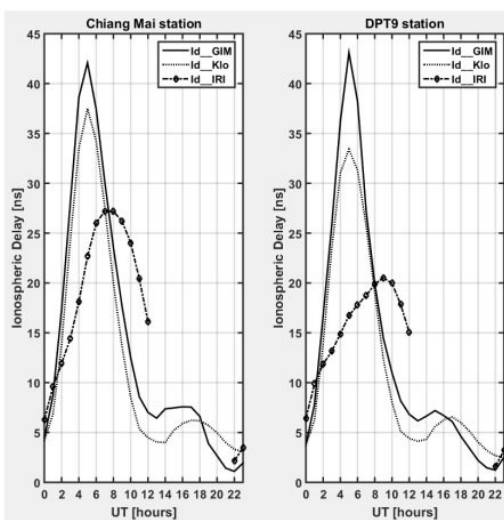


Fig. 2. The studied ionospheric delays for CHMA and DPT9 stations on May 12, 2021.

6

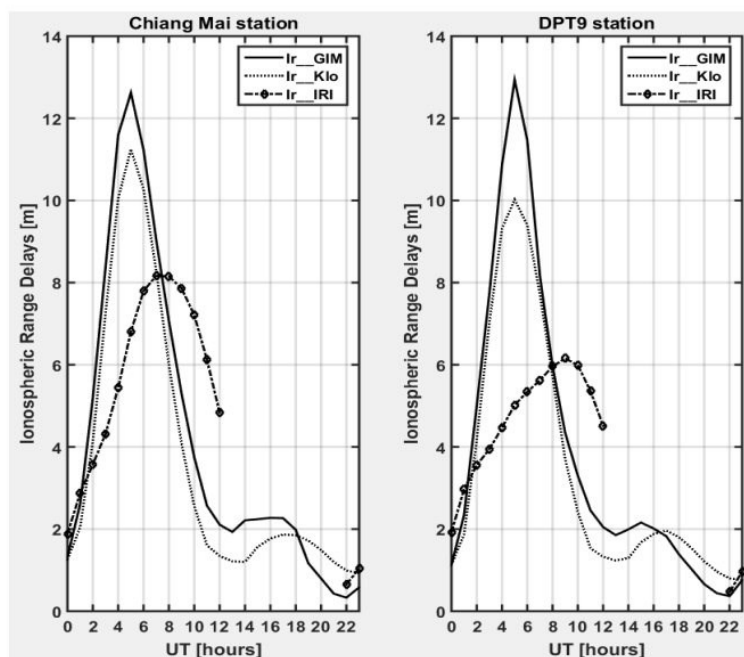


Fig. 3. The studied ionospheric range delays for CHMA and DPT9 stations on May 12, 2021.

Table 1. The VTEC statistics (unit: TECU) of the observed GIM VTEC, Klobuchar model, and IRI-2016 models at Chiang Mai and DPT9 stations on May 12, 2021.

Periods	VTEC statistics (Occurrence Time)	Chiang Mai station		
		Observed GIM	Klobuchar	IRI-2016
Daytime	Max. VTEC	77.75 (5 UT)	69.28 (5 UT)	50.3 (7 UT)
	Min. VTEC	8.16 (0 UT)	7.73 (0 UT)	11.6 (0 UT)
Nighttime	Max. VTEC	14.00 (16 UT)	11.49 (17 UT)	
	Min. VTEC	2.03 (22 UT)	5.72 (23 UT)	-
DPT9 station				
Daytime	Max. VTEC	79.66 (5 UT)	61.73 (5 UT)	37.9 (9 UT)
	Min. VTEC	6.90 (0 UT)	6.90 (0 UT)	11.8 (0 UT)
Nighttime	Max. VTEC	13.29 (15 UT)	12.11 (17 UT)	-
	Min. VTEC	2.26 (22 UT)	4.65 (23 UT)	-

Table 2. The ionospheric delays (unit: ns) of the GIM VTEC, Klobuchar model, and IRI-2016 models at Chiang Mai and DPT9 stations on May 12, 2021.

Periods	Ionospheric delay statistics (Id)	Chiang Mai station		
		Observed GIM	Klobuchar	IRI-2016
Daytime	Max. Id	42.08	37.50	27.22
	Min. Id	4.42	4.18	6.28
	Mean Id	22.41	19.11	19.50
Nighttime	Max. Id	7.58	6.22	-
	Min. Id	1.10	3.10	-
	Mean Id	5.09	4.76	-
DPT9 station				
Daytime	Max. Id	43.11	33.41	20.51
	Min. Id	3.73	3.73	6.39
	Mean Id	21.02	17.78	15.64
Nighttime	Max. Id	7.20	6.55	-
	Min. Id	1.22	2.51	-
	Mean Id	4.59	4.57	-

Table 3. The ionospheric range delays (unit: m) of the GIM VTEC, Klobuchar model, and IRI-2016 models at Chiang Mai and DPT9 stations on May 12, 2021.

Periods	Ionospheric range delay statistics (Ir)	Chiang Mai station		
		Observed GIM	Klobuchar	IRI-2016
Daytime	Max. Ir	12.62	11.25	8.17
	Min. Ir	1.32	1.26	1.88
	Mean Ir	6.72	5.73	5.85
Nighttime	Max. Ir	2.27	1.87	-
	Min. Ir	0.33	0.93	-
	Mean Ir	1.53	1.43	-
DPT9 station				
Daytime	Max. Ir	12.93	10.02	6.15
	Min. Ir	1.12	1.12	1.92
	Mean Ir	6.31	5.33	4.69
Nighttime	Max. Ir	2.16	1.97	-
	Min. Ir	0.37	0.75	-
	Mean Ir	1.38	1.37	-

6 Conclusion

This paper compares the positioning accuracy obtained from the GIM VTEC, Klobuchar model, and the IRI-2016 model at Chiang Mai and DPT9 stations over

8

Thailand region during an intense storm on May 12, 2021. The VTEC variations of GIM map behave the same trend as those of the Klobuchar model, so the ionospheric delays and the ionospheric range delays behave the same trends as the VTECs. The results show that the Klobuchar model is suitably employed for compensating the ionospheric delays during 07:00 – 23:00 LT whereas it should be improved during 00:00 – 06:00 LT due to the estimation beyond the GIM VTEC. Moreover, the IRI2016-predicted VTECs should be improved to be higher during daytime period and be more robust during the intense geomagnetic storm.

Acknowledgement

This research is financially supported by Broadcasting and Telecommunications Research and Development Fund for Public Interest (project code: B2-001/6-2-63). The authors would like to express the gratitude to OMNI Web of NASA for the IRI-2016 models and to the EARTHDATA web of NASA for GIM TEC. Moreover, the authors would like to thank to Department of Public Work and Town and Country Planning (DPT) for the RINEX data.

7 References

1. Panda, S.K., Gedam, S.S. Evaluation of GPS standard point positioning with various ionospheric error mitigation techniques. *J. Appl. Geodesy*. 10(4), 1-11, (2016).
2. Júnior, P.T.S., Alves, D.B.M., da Silva, C.M. Klobuchar and NeQuick G ionospheric models comparison for Multi-GNSS single-frequency code point positioning in the Brazilian region. *Bulletin of Geodetic Science* 25(3), e2019016, (2019).
3. Li, J., Wan, Q., Ma, G., Zhang, J., Wang, X., Fan, J. Evaluation of the Klobuchar model in Taiwan. *Adv. Space Res.* 60(6), 1210-1219, (2017).
4. Mageed, K.M.A. Effect of using Klobuchar, CODE, and no-ionosphere models on processing single frequency GPS static medium baselines. *Int. J. Sci. Eng. Res.* 5(5), (2014).
5. Klobuchar, J.A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. *IEEE T. Aero. Elec. Sys.* 23, 325-331, (1987).
6. Lee, C. Generation of Klobuchar ionospheric error model coefficients using Fourier series and accuracy analysis. *J. Astron. Space Sci.* 28(1), 71-77, (2011).
7. Klobuchar Model, https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Klobuchar_Ionospheric_Model, last accessed 2021/7/10.
8. Jongsintawee, S., Rungraengwajjake, S., Supnithi, P., Panachart, C. Comparison of GPS Positioning Accuracy Using Klobuchar Model and IGS TEC Model in Thailand. *KMITL Sci. Tech. J.* 16(1), 1-10, (2016).

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Advances in Space Research xxx (xxxx) xxx

ADVANCES IN
SPACE
RESEARCH

(a COSPAR publication)

www.elsevier.com/locate/asr

Individual performance of multi-GNSS signals in the determination of STEC over Thailand with the applicability of Klobuchar model

Hong-Woo Seok^a, Kutubuddin Ansari^b, Chaiwat Panachai^c, Punyawee Jamjareegulgarn^{d,*}

บทความที่ 3 คือ H. W. Seok, K. Ansari, C. Panachai, and P. Jamjareegulgarn, "Individual performance of multi-GNSS signals in the determination of STEC over Thailand with the applicability of Klobuchar model," *Advances in Space Research* vol. 69, no. 3, pp. 1301-1318, 2022; doi: [10.1016/j.asr.2021.11.025](https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.11.025) (หน้า 312 - 329)

Abstract

Thailand is situated in the southern low latitude region in the Asian longitude sector having much importance as major portion of southern hemisphere is covered by ocean resulting in a sparse density of ground-based monitoring systems. With the establishment of GNSS monitoring stations across the Thailand and neighboring region, it accentuates the ionospheric variability study in the southern hemisphere in the Asian longitude. Therefore, in the current study, we selected four GNSS station located at different part of the country (i.e., CHMA, DPT9, NKRM, and SRTN) and studied the variations of ionospheric slant total electron content (STEC). Here, the STEC observations are estimated by Klobuchar model (namely, Klobuchar-modeled STEC values) and compared with the Global Ionospheric Map (GIM) STEC values for its validation. As an initial study, the Klobuchar-modeled STEC values obtained from five multi-constellation GNSSs over Thailand region (i.e., GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou and QZSS) are computed and compared with the GIM STEC values during the intense geomagnetic storm on May 12, 2021 (DOY 132) and during June 2020 to May 2021 for monthly variations. Moreover, to show the relationships between the proposed Klobuchar-modeled STEC values and the GIM STEC values, the correlation coefficients and the root mean square errors between them are computed. The results showed that among the five multi-constellations of GNSSs, the GIM STEC values frequently overestimate the Klobuchar-modeled STEC values, except the QZSS system with the least differences ranging from -10 TECU to 20 TECU. Also, the correlation coefficient between the proposed Klobuchar-modeled and GIM STEC variations span between 0.87 and 0.89, and their RMSEs range from 10 TECU to 11 TECU, excluding QZSS system with less than 10 TECU. The correlation coefficients of higher than 0.85 can be considered as a good indicator for the applicability of Klobuchar model in practice with multi constellation systems.

© 2021 COSPAR. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

Keywords: BeiDou; Galileo; GIM; GLONASS; GPS; QZSS; STEC

1. Introduction

The ionosphere is the main source that affects the signals of global navigation satellite system (GNSS) for the measurement of single-point positioning. The propagation range of signals is directly proportional to the total electron

content (TEC) varying to the geomagnetic and solar activities, local time, geographic coordinates, and seasonal influences (Ansari et al., 2018; Junior et al., 2020). The magnitude of ionospheric delay gradients exists frequently and affects directly on TEC values, the positioning error can reach to the several tens of meters (Seeber, 2003). Since the ionosphere has a dispersive nature, the first-order approximation of ionospheric delay can thus be estimated by using the simultaneous observations at two distinct fre-

* Corresponding author.

E-mail address: kjpunyaw@gmail.com (P. Jamjareegulgarn).

<https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.11.025>

0273-1177/© 2021 COSPAR. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

Please cite this article as: H.-W. Seok, K. Ansari, C. Panachai et al., Individual performance of multi-GNSS signals in the determination of STEC over Thailand with the applicability of Klobuchar model, *Advances in Space Research*, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.11.025>

quencies. However, this approach failed for the single frequency users (Junior et al., 2020). The most famous ionospheric model is an empirical approach called Klobuchar model (Klobuchar 1987). The Klobuchar model was initially based on global positioning system (GPS) measurements, and it was supposed to reduce about 50% of the root mean square ionospheric range error at global level (Hobiger and Jakowski, 2017). It is considered as a single layer model in which the ionosphere is supposed to be placed at an average altitude of 350 km from the Earth surface (Junior et al., 2020). The ionospheric diurnal variation in the Klobuchar model is modeled as a half-cosine function with simple varying amplitude and period, that basically depends upon the time and geomagnetic latitude. The half-cosine form of amplitude and period remains at a center time (14:00 LT) while the ionospheric delay of GPS L1 frequency is fixed as a constant value of 1.5 m (Hobiger and Jakowski, 2017). As for given local time and geomagnetic location of an ionospheric pierce point, the slant total electron content (STEC) is calculated from the vertical total electron content (VTEC) (Newby, 1992; Ansari and Park, 2018). Because of the convenient calculation and simple structure, the Klobuchar model is widely used to correct the ionospheric delay for single frequency user (Yuan et al., 2008; Wang et al., 2013; Wang et al., 2016; Mallika et al., 2020). Moreover, the ionospheric researchers have greater attentions towards this model because of a useful characteristic at global level, i.e., broadcasting the satellite signals with few coefficients as a required input (Ratnam et al., 2018). The required input parameters include the elevation and azimuth of satellite, location of GNSS sites and the eight Klobuchar coefficients broadcasted by navigation message. Moreover, the Klobuchar model concentrates mainly on the amplitude and period estimation and ignores the initial phase and nighttime variation (Bi et al., 2017).

Although the Klobuchar model is considered to be an ideal for the ionospheric smooth behavior, however it is not quite sufficient for mid-latitude regions. It is proved that only 50–60% ionospheric delay can be corrected by the model during the quiet space weather condition (Luo et al., 2014). Several studies have been carried out to find a way and solve such kind of primary problems in last decades (Han et al., 2006; Filjar et al., 2009; Li et al., 2017). Han et al. (2006) established another model similar to the Klobuchar model with fourteen parameters instead of eight coefficients. They included two parameters out of fourteen coefficients to estimate the vertical ionospheric delay at night. This approach was quite useful, and the certain degree of improvement has been seen in ionospheric delay estimation. Later, Filjar et al. (2009) developed a kind of Klobuchar model to correct the vertical ionospheric delay at night by using linear fit simulation methodology. Moreover, this study also includes seasonal changes due to the changing of amplitude. This method was able to correct the ionospheric delay in the region of the south Adriatic. Li et al. (2017) evaluated the Klobuchar model in Taiwan

region and illustrated the differences between the measured dual-frequency ionospheric delays and the Klobuchar modeled ones with various latitudes and solar activities. Furthermore, there are some researchers who have used some regional data to enhance the Klobuchar model (Reithika et al., 2013; Chen et al., 2017). Reithika et al. (2013) proposed a methodology to enhance the Klobuchar coefficients based on Indian Regional Navigation Satellite System (or NavIC). Chen et al. (2017) proposed a Sophisticated Klobuchar Model (SKM) over China that are based on the Holt-Winters's exponential smoothing model to extend the Klobuchar model. Here, their SKM model was tested by them for one day data set using six days of training data (DOY 095 to DOY 100 in 2011). The main focus of this SKM method was to fill the missing data for dual-frequency GNSS receiver and forecast the ionospheric delay. Furthermore, numerous studies have been carried out to extend the Klobuchar model structure by adding some parameters for better representation of TEC variation (Yuan et al., 2008; Shukla et al., 2013). Yuan et al. (2008) employed both hundreds of crust movement observation network of China (CMONOC) and international GNSS service (IGS) stations network to propose a method to the refine Klobuchar coefficients. They noticed and improved of approximately 15% compared to GPS Klobuchar model over China for single-frequency and single point positioning. Shukla et al. (2013) also refined Klobuchar coefficients and validated their method over Indian region for single-frequency and single point positioning.

With the development of multi-GNSS receiver, the Klobuchar model need to be extended from GNSS single-frequency users for ionospheric corrections, navigation applications, and accurate positioning (Wang et al., 2016). The International Center for Theoretical Physics (ICTP), Italy, and the University of Graz have developed a three-dimension model for European Galileo system known as NeQuick model. The single-frequency operation for European Galileo system can use three correction coefficients transmitted as a part of Galileo navigation message to compute the ionospheric delay along the ground-to-satellite propagation path (Radicella and Leitinger 2001; Nava et al., 2008). A slightly modified Klobuchar model was also presented to calculate the ionospheric delay in the BeiDou satellite navigation system (BDS) using the broadcasted eight parameters known as BDS Klobuchar model (Wang et al., 2016). Their model is the same as the original Klobuchar model, except the reference frame and the updated frequencies of the used parameters. This BDS Klobuchar model was originated from the Institute of Geodesy and Geophysics Spherical Harmonic (IGGSH) model and named as the BeiDou global broadcast ionospheric delay correction model (BDGIM) in the BDS space interface control document or ICD (CSNO, 2018). Wu et al. (2013) reported that the BDS Klobuchar model performs 7.8–35.3% better than the GPS Klobuchar model in terms of single-frequency and single point positioning of ionospheric delay corrections in northern hemisphere

including Northern America, Europe and Asia. In this present study, we apply the Klobuchar algorithm on the observation data obtained from five multi-constellation GNSS receivers over Thailand region and evaluated the performances of the considered multi-GNSS Klobuchar model. All five multi-constellation GNSS receivers include Global Positioning System (GPS) of United States, Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS) of Russia, Galileo of Europe, BeiDou of China, and Quasi Zenith Satellite System (QZSS) of Japan. The Global Ionospheric map (GIM) model for multi-constellation GNSSs is used to compare the Klobuchar modeled STEC values computed in this present study. The set of mathematical equations for computing the Klobuchar-modeled STECs and the GIM STECs are explained in Section 2. The data used and methodology are described in Section 3. Section 4 is devoted to the results and discussion. Finally, the conclusion is given in Section 5.

2. GNSS signal features and STEC estimation

The determination of the absolute STEC value are greatly influenced by the satellite signals and receiver differential code biases (DCBs). During the ionospheric measurements, these values need to be extracted first from GNSS data and then used as inputs for further ionospheric representations (Li et al 2017). The STEC can be estimated using either dual- or single-frequency pseudorange and carrier phase measurements. In the first case, the linear combinations of phase (L_i and L_j) or pseudorange (P_i and P_j) measurements at two frequencies f_i and f_j give the STEC estimate along the receiver satellite line of sight via the following well-known relations (Hoffmann-Wellenhof et al 2001):

$$STEC = \frac{c}{K} \left(\frac{L_i}{f_i} - \frac{L_j}{f_j} \right) \frac{f_i^2 f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} + const$$

$$STEC = \frac{c}{K} (P_j - P_i) \frac{f_i^2 f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} + DCB$$

Here $K = 40.308 \text{ m}^3/\text{s}^2$, c is the speed of light in a vacuum, $const$ represents undefined carrier-phase ambiguities, and DCB stands for the sum of differential code biases in satellites transmitting and receivers receiving chains. Data from dual-frequency receivers are commonly used, because single-frequency measurement TEC much noisy. However, we can expect that the TEC estimations based on single-frequency measurements are quite adequate due to averaging. A single frequency pseudorange and carrier phase combination for STEC estimation can be also constructed by exploiting the fact that ionospheric contribution enters phase and group refractivity index with the opposite sign (Yasyukevich et al., 2017)

$$STEC = \frac{f_i^2}{2K} \left(P_i - \frac{L_i c}{f_i} \right) + const$$

The GPS satellites transmits L4 band at 1.379913 GHz is being studied for additional ionospheric correction (Penttinen, 2015). This frequency of GPS signals is mainly used for military and scientific research. The military aspect is mainly used in electronic warfare and scientific research. The CDMA signals are being researched for use with GLONASS since 2008. The GLONASS contains three open CDMA signals. The open L1OC and restricted L1SC signals are centered at 1600.995 MHz, and open L2OC and restricted L2SC signals are centered at 1248.06 MHz, overlapping with GLONASS FDMA signals. The open signal L3OC is centered at 1202.025 MHz and uses BPSK modulation for both data and pilot channels; the ranging code transmits at 10.23 million chips per second. The message can also contain Earth's rotation parameters, ionosphere models, long-term orbit parameters for GLONASS satellites, and COSPAS-SARSAT messages (Revnivykh, 2010). The Galileo satellites transmit E5 signals in the (1164–1215 MHz) band, which is the largest radionavigation satellite system (RNSS) band. It is also a highly protected aeronautical radio navigation services (ARNS) radio band, but it is not exclusive to RNSS. That means that Galileo E5 signals share this band with other GNSS signals, as well as with non-RNSS services. In particular, GPS L5 and L2C, QZSS L5S and L2, SBAS L5, IRNSS L5, BeiDou B2a/B2b, as well as future GLONASS L3 all fall within this (Padokhin et al 2021). The QZSS and its SBAS system known as Multi-functional Satellite Augmentation System (MTSAT or MSAS) have a capability to make a correction to ionospheric delay effects on GNSS in addition to satellite clock and orbit. The QZSS and MSAS signal on L1 frequency is called L1-SAIF. The ionospheric Correction Processor (ICP) has been integrated into the QZSS L1-SAIF master station (LISMS) so that it runs with the L1-SAIF message generator (LISMG). The initial results of real-time operation test demonstrate developed ICP is fully functional and has a capability to improve ionospheric correction performance (Sakai et al 2009).

Regarding to handle the DCB, it is assumed that GNSS satellite or a ground receiver during an entire day have constant DCB values (Mannucci et al 1998) and a zero-mean condition of satellite DCBs for separate GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou and QZSS. The calibrated data of GNSS satellites DCB is regularly released by five independent ionosphere associate analysis centers (IAACs), including the Jet Propulsion Laboratory (JPL), Pasadena, CA, USA, the Chinese Academy of Science (CAS), Beijing, China, the European Space Operations Center from European Space Agency (ESOC/ESA), Darmstadt, Germany, the Center for Orbit Determination in Europe (CODE), Astronomical Institute, University of Bern, Switzerland and the Technical University of Catalonia (UPC), Barcelona, Spain in the form of GIMs and the satellite DCB and receiver DCB for each GNSS station (She et al 2019). Komjathy et al. (2005) showed that the absolute value of the GNSS TEC and the receiver DCB for any ground-based station can be obtained by the GIM-aided

method with the help of abovementioned released satellite DCBs and GIMs. Later, the receiver DCB based on the interpolated GIM value can be estimated for the station by assuming assumption that the observed TEC is equal to GIM value on average (She et al 2019). The MIT Haystack Observatory's MIT automated processing of GPS (MAPGPS) algorithm was developed based on the known satellite bias provided by JPL which works on the basis of above technique (Rideout and Coster, 2006). Moreover, a general statistical framework such as single receiver with known satellite bias can be used to estimate biases in multiple special cases (Vierinen et al 2016).

3. Data used and methodology

In the current study, four GNSS receivers located in Thailand region such as CHMA (Chiang Mai), NKRM (Nakhonratchasima), DPT9 (Bangkok), and SRTN (Suratthani) are used to study the ionospheric irregularities during June 2020 to May 2021. Geographic locations of these four GNSS receivers are shown in Fig. 1 and Table 1. We selected these four GNSS stations because of different locations in Thailand, for instance, CHMA in the northern part, NKRM in the north-eastern part, DPT9 in the central

part, and SRTN in the southern part. The observation data in RINEX format have been downloaded from the web site (<http://203.113.122.35/sbc>) of Department of Public Works and Town & Country Planning. The GNSS receiver (LEICA GR50, Firmware: 4.50) and antenna (LEICA GR50, Firmware: 4.50) of these stations are manufactured by Leica Geosystems. The stations are operating with the dual frequencies of L1 (1.575 GHz) and L2 (1.227 GHz) bands and with the data registration rate of 30 s. The observation environments for all four stations have no multipath, disturbance, and high buildings, since they are located in suburban areas. These RINEX GNSS datasets were processed in MATLAB environment on a daily basis, with the cutoff of elevation angle more than set by receiver, and the elevation-dependent weighting function were applied to eliminate or alleviate noisy observations by receiver. The precise ephemeris from German Research Centre for Geosciences (GFZ; <ftp://ftp.gfz-potsdam.de>) was used to compute the satellite positions for GPS, GLO-NASS, Galileo, BeiDou, and QZSS systems. RINEX version is 3.02, so we followed 3.02 documented format navigation data to get GNSS Klobuchar coefficients. During the processing of GNSS observation data, each visible satellites was used by each epoch wise.

The GNSS data was selected for five continuous days (10–13 May 2021) which include an individual storm day on May 12, 2021 (DOY 132) and studied the STEC performance of individual GNSS signals during these days. The reason of selecting on May 12, 2021 (DOY 132) is due to the existence of the most intense geomagnetic storm (G3-storm with Kp index = 7) during 12:00–18:00 UT between January 2011 and May 2021. A coronal mass ejection (CME) left the Sun on May 9, 2021, associated with a filament eruption. A shock signature from this CME was observed in the ACE and DSCOVR satellite data at around 05:50 (UT) on May 12, 2021, and a sudden commencement was recorded at Earth just after 6:30 (UT) on the morning of the May 12. The geomagnetic field has been disturbed as a result and has reached STORM G3 conditions. This was associated with a period of southward pointing interplanetary magnetic field (IMF, as measured in the solar wind). The IMF has since turned back northwards so geomagnetic activity is likely to wane, for the moment. Later the GNSS data was collected for one year during June 2020 to May 2021 and the STEC variation are studied. Since the comparison of ionospheric variations plays a very important contribution to the prediction and forecasting study of the given regions. Hence, the GNSS derived STEC values are equated with corresponding values from the Global Ionospheric Map (GIM) data. The GIM data has been downloaded from the Center for Orbit Determination in Europe (CODE) website (<https://cd-dis.nasa.gov/archive/>) to compute TEC unit for each satellite frequencies. This data is freely available for the public. The GIM data is considered to have the highest quality and internal stability of all IGS products. The accuracy of the

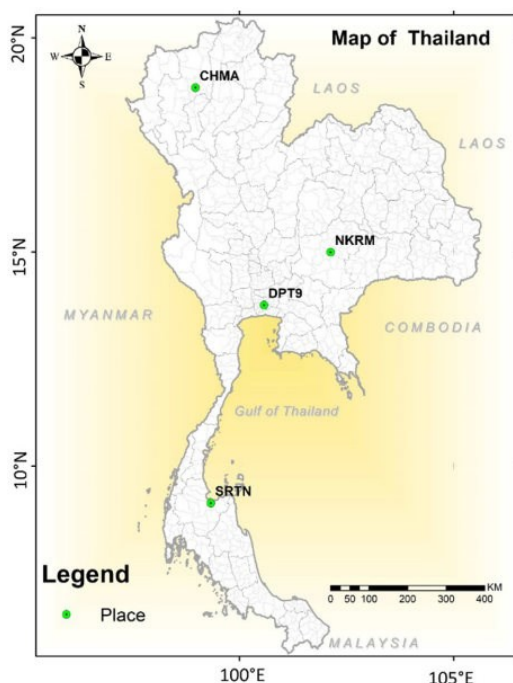


Fig. 1. The geographic locations of four GNSS receivers located in Thailand region named as CHMA (Chiang Mai), NKRM (Nakhonratchasima), DPT9 (Bangkok), and SRTN (Suratthani). Note that these selected stations are located in four different parts of Thailand such as CHMA in the northern part, NKRM in the north-eastern part, DPT9 in the central part, and SRTN in the southern part.

Table 1
Geographic locations of four GNSS receivers in Thailand.

Station name	Acronyms	Latitude	Longitude	Dip Latitude
Chiang Mai	CHMA	18.84°N	98.97°E	14.12°N
Bangkok	DPT9	13.76°N	100.57°E	7.95°N
Nakhonratchasima	NKRM	14.99°N	102.13°E	9.45°N
Suratthani	SRTN	9.13°N	99.33° E	2.36°N

TEC grid in these maps usually remains within a limit of 2–8 TECU (Hernández-Pajares et al., 2009).

Although the GPS satellites broadcast the parameters of Klobuchar model for single-frequency GPS users. Subsequently, the Klobuchar ionospheric model was also developed and proposed by Subirana et al., 2011 that was based on the initial Klobuchar model. Their main objective was to decrease the ionospheric range error about 50% in conjunction with two considered issues including a) the electron content is assumed to be concentrated as a thin layer at 350 km in height, and b) the slant delay is computed from the vertical delay at the ionospheric pierce point (IPP) multiplying by an obliquity factor. Although the algorithm is provided to estimate the ionospheric delay in the GPS L1 frequency signal, it can be also used to estimate the ionospheric time delay in the GPS L2 frequency signal or for the GLONASS and Galileo signals and other signals, as well (Subirana et al., 2011). The mathematical equations for computing the ionospheric delay of Klobuchar ionospheric model are shown in Appendix.

4. Results and discussion

Firstly, we selected an individual storm day on May 12, 2021 (DOY 132) and showed an example of sky plot for each multi-constellation GNSSs at CHMA station as shown in Fig. 2. Afterwards, the number of satellite visibilities at all four selected sites (i.e., CHMA, DPT9, NKRM, and SRTN) on May 12, 2021 are also depicted in Fig. 3. Note that the letters (G, R, E, C, J) in Figs. 2 and 3 represent the satellite constellations in GPS, GLONASS, Galileo, Beidou, and QZSS systems, respectively. The reason of selecting on May 12, 2021 (DOY 132) is due to the existence of the most intense geomagnetic storm (G3-storm with K_p index = 7) during 12:00–18:00 UT between January 2011 and May 2021. Thailand is seven hours ahead of the coordinated UT (GMT + 7), hence the duration of storm appearance in Thailand will be around 19:00 LT to next day of 01:00 LT with Thailand standard time (TST). The visibility of satellites is clear that as on an average number of 12–15 satellites are visible in the day in which GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou and QZSS are included. The visibility of BeiDou satellites is the best because of almost permanent 15 satellites whereas that of GPS satellites with less than 12 satellites are tracked simultaneously. Regarding the GLONASS system, the satellite visibility is much better than that of Galileo system, even though the simultaneous number of visible Galileo satel-

lites varies from 4 to 7 satellites. Most importantly, QZSS satellites are also available in Thailand region and provide their individual performance with their visibilities between 2 and 3 satellites.

To understand the individual performance of each multi-constellation GNSS, we selected five GPS satellites (G01, G02, G06, G10 and G32), five GLONASS satellites (R03, R04, R09, R16 and R22), five Galileo satellites (E01, E05, E19, E26 and E36), seven BeiDou satellites (C01, C07, C21, C22, C25, C26 and C30) and three QZSS satellites (J01, J02 and J03; only three were available), and showed Klobuchar-modeled STEC plots on the storm day (May 12, 2021) at CHMA station as shown in Fig. 4a. The Klobuchar-modeled STEC plots for each constellation have been shown with different colors, i.e., GPS with blue color, GLONASS with red color, Galileo with green color, BeiDou with yellow, and QZSS with purple color. On the other hand, the corresponding GIM STEC plots for each constellation have also been shown with black color in each plot of Fig. 4a. It is clear from each figure that the Klobuchar-modeled STEC for each satellite are different from the corresponding GIM STEC. There are some satellites which are visible before the storm time, the Klobuchar-modeled STEC values underestimated the respective GIM STEC values. Meanwhile, some satellites are visible during the storm time, the Klobuchar-modeled STEC values overestimated the GIM STEC values. Sometimes, the differences between the Klobuchar-modeled and GIM STEC values can reach up to 40 TECU while observing with G02, R04, E26, C01, and J02 satellites. Moreover, we used the same group of satellites at CHMA stations and plotted them with respect to elevation angle (Fig. 4b). As we can see from each satellite of constellations that when the elevation angle increases, the STEC values decrease. It means that the variation of STEC is inversely related to the elevation angle. One example was not enough, hence, we selected one more station, i.e., DPT9, and took different combinations of the satellites, i.e., G01, G02, G10, G12 and G32 for GPS; R03, R04, R08, R09 and R20 for GLONASS; E01, E02, E04, E30 and E31 for Galileo, C01, C07, C20, C21, C23, C29 and C30 for BeiDou, and finally J01, J02 and J03 for QZSS (Fig. 4c). Now, if we look the other results regarding another station, DPT9, and other combination of satellites as depicted in Fig. 4c. It can be seen that the underestimation and overestimation performance are the same trends as those in Fig. 4b. Also, it can be noted that there will be almost the same kind of plots for other stations. Various research scholars investigated the perfor-

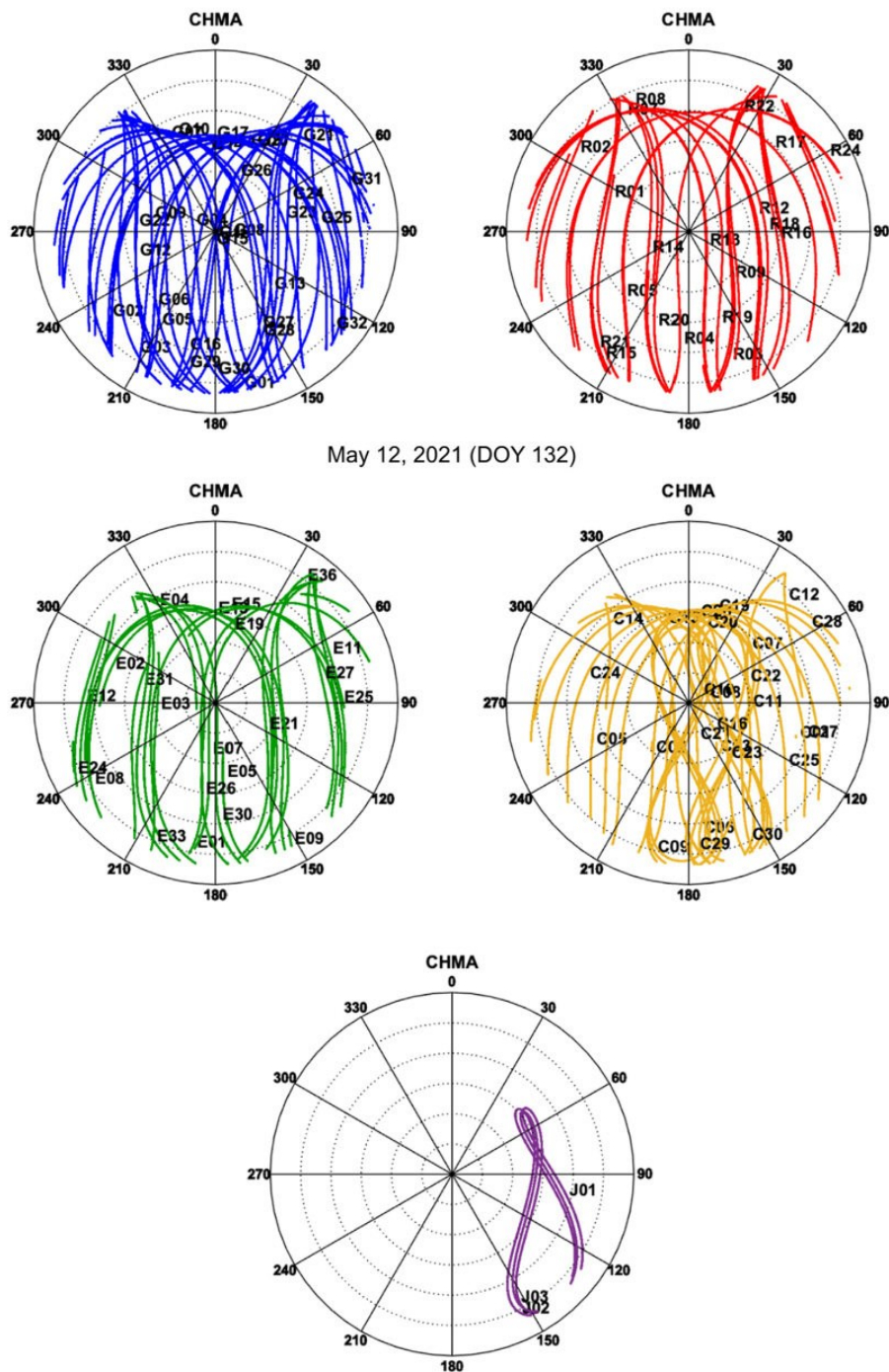


Fig. 2. The sky plots of five multi-constellation GNSSs at CHMA station on a selected individual storm day (May 12, 2021; DOY 132). Note that the letter (G, R, E, C, J) in each sequential plot represents the satellite constellations of GPS, GLONASS, Galileo, Beidou, and QZSS systems, respectively.

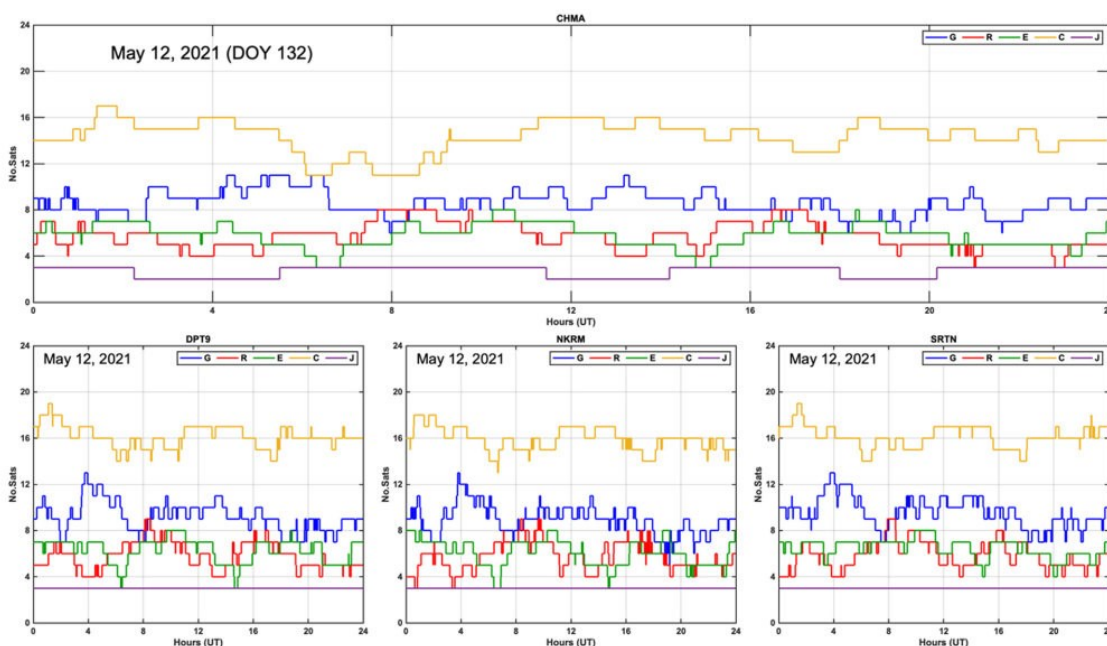


Fig. 3. The number of satellite visibilities at all four selected sites (i.e., CHMA, DPT9, NKRM, and SRTN) on a selected individual storm day (May 12, 2021; DOY 132). Note that the letters (G, R, E, C, J) in each plot represent the satellite constellations of GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, and QZSS systems, respectively.

mance of Klobuchar model and found its limited accuracy (e.g., Chen et al., 2017; Liu and Yang, 2016). They concluded that the accuracy of Klobuchar model is limited because of two main reasons. The first reason belongs to the predefined table that is used to update the coefficients in the GNSS system. These values are not set to update every day, and they are predefined on the basis of particular condition of solar cycle. Secondly, the ionosphere delay at daytime is estimated using the broadcasted ephemeris eight parameters and one at nighttime is set as a constant that cannot reflect well for temporal changes (Chen et al., 2017; Liu and Yang, 2016). There are some errors in comparison happening due to the GIM STEC values also. The GIM STEC values are extracted at the particular location from the IGS-GIM grids through the interpolation method. This means that they depend on the intensity of the original IGS database and can deviate from the considered locations. There might be some expectation to have the uncertainties of GIM STEC values (Ansari and Sharma 2021).

The above study and discussion were based on each constellation during the storm time (May 12, 2021). To understand the performance of STEC estimation better, we selected five continuous days (10–13 May 2021 covering the storm day) for two sites (NKRM and SRTN) as shown in Figs. 5a and 5b, respectively. The coloring of each figure plot is as usual mentioned above including GPS with blue

color, GLONASS with red color, Galileo with green color, BeiDou with yellow, and QZSS with purple color. As for each plot in Figs. 5a and 5b, the GIM STECs of each constellation are shown with black color while the difference between the GIM STECs and the respective Klobuchar-modeled STECs (namely, GIM-Klobuchar) are also computed and depicted with cyan color.

Firstly, at both sites (NKRM and SRTN), it can be seen obviously that the GPS Klobuchar STEC values on normal day vary from about 5 TECU to 75 TECU while those on the storm day (May 12, 2021) can reach up to 80 TECU. Generally, the GIM STEC values are high on each day and sometimes they become low. Also, the differences between the GIM STECs and the GPS Klobuchar STECs (GIM-GPS Klobuchar) range from -10 to 30 TECU. Secondly, as for the GLONASS Klobuchar STEC plots, they span from 5 TECU to 80 TECU on normal day while they can be high up to 90 TECU on the storm day, like the GPS Klobuchar STECs. Here, the differences between the GIM STECs and the GLONASS Klobuchar STECs (GIM-GLONASS Klobuchar) cover between -8 and 32 TECU. Thirdly, the Galileo Klobuchar STEC plots at both sites show their variations between 10 TECU to 70 TECU on each day and it can be a little high around 75 TECU on storm day. Here, the differences between the GIM STECs and the Galileo Klobuchar STECs (GIM-Galileo Klobuchar) vary between around -10 TECU and 25 TECU.

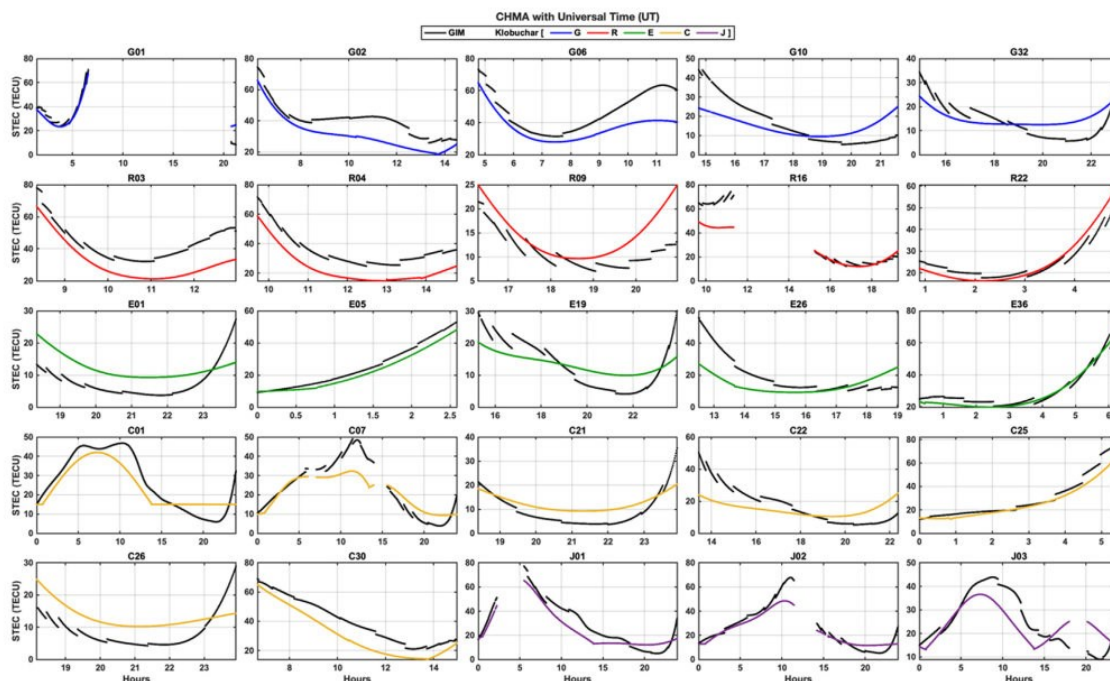


Fig. 4a. The plots of Klobuchar-modeled and GIM STEC plots obtained from five GPS satellites (G01, G02, G06, G10 and G32), five GLONASS satellites (R03, R04, R09, R16 and R22), five Galileo satellites (E01, E05, E19, E26 and E36), seven BeiDou satellites (C01, C07, C21, C22, C25, C26 and C30), and three QZSS satellites (J01, J02 and J03) at CHMA station during the intense geomagnetic storm on May 12, 2021 (DOY 132).

Fourthly, as for the BeiDou Klobuchar STEC plots, they are quite similar to Galileo constellations in which they vary from 10 TECU to 70 TECU on each day and also show a little high around 75 TECU on storm day. Here, the differences between the GIM STECs and the BeiDou Klobuchar STECs (GIM-BeiDou Klobuchar) range from -8 TECU to 32 TECU. Finally, refer to the QZSS Klobuchar STEC values, they vary from 10 TECU to 62 TECU and the differences between the GIM STECs and the QZSS Klobuchar STECs are the lowest ranging from -10 TECU to 20 TECU.

In the above discussion, the variations of each kind of GNSS STECs and their differences from the GIM STECs show unique characteristics. Among the studied multi-constellation GNSSs, the QZSS Klobuchar STEC values are comparable to the GIM STEC values. The main causes are that the QZSS system has been established as a GPS complementary system to improve the accuracy, accessibility, integrity, and reliability of positioning in the Asia-Oceania region and their orbits are specially designed to increase high-elevation signals (Li et al., 2015; Ansari et al., 2021). The STEC differences always relate inversely to the elevation angles, hence, the higher the elevation angles increase, the lower the STEC values decrease. In QZSS system, there will be three satellites appearing in order every eight hours, at least one satellite will be located near the zenith, with an elevation angle of 70° or more. If

you watch one satellite from the area near Tokyo, it will remain for eight hours at an elevation angle of 70° or more, 12 h at 50° or more, and 16 h at 20° or more.

Refer to our final analysis, we took the monthly data of one year (from June 2020 to May 2021) at CHMA and DPT9 sites and checked their monthly performance all over the year from June 2020 to May 2021 (Figs. 6a and 6b). The STEC values in the initial month (June 2020) were lower around 50 TECU as compared to those in other months. They started to increase in the next months, became more than 60 TECU in September 2020, then achieved its secondary peak up to 70 TECU in October 2020 (September equinox). Afterwards, they become lower ranging between 50 TECU and 55 TECU during December 2020 and February 2021 (December solstice). Finally, the STEC values increase again to reach the primary peak up to 80 TECU during March equinox, then they decrease twice to be the lower values around 70 TECU in May 2021. Overall, the STEC variations in Thailand correspond to the revolution motions of the Earth which can be at different levels including the low values in June solstice (May, June, July, and August), the high values in September equinox (September and October), the lowest in December solstice (November, December, January, and February), and the highest in March equinox (March and April). It is notable that the STEC values show the highest in March equinox and reduce in June solstice. The reason for obtaining

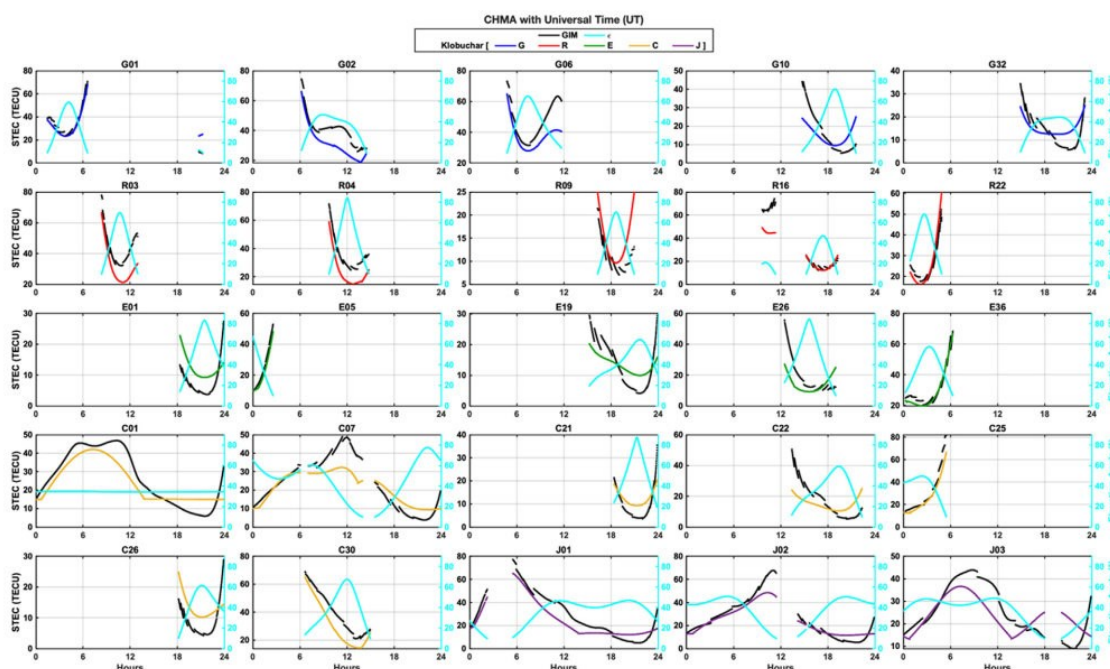


Fig. 4b. The plots of Klobuchar-modeled and GIM STEC plots obtained from five GPS satellites (G01, G02, G06, G10 and G32), five GLONASS satellites (R03, R04, R09, R16 and R22), five Galileo satellites (E01, E05, E19, E26 and E36), seven BeiDou satellites (C01, C07, C21, C22, C25, C26 and C30), and three QZSS satellites (J01, J02 and J03) with respect to the elevation angles at CHMA station during the intense geomagnetic storm on May 12, 2021 (DOY 132).

the maximum STEC intensity during the equinoctial months may be attributed to the meridional winds that flow from the Equator towards the poles, consequence high ionization (Wu et al., 2004; Ansari et al., 2017). On the other hand, the propagation flows of longitudinal (meridional) component of neutral winds, that are against the plasma diffusion process from magnetic equator and decrease in atmospheric O/N₂ ratio during June solstice, may be responsible to the diminished electron concentration in June solstice (Wu et al., 2004; Bhuyan and Borah, 2007)

Generally, the GIM STEC values are higher than the Klobuchar-modeled STEC values of every multi-constellation GNSSs GIM STEC values, except the QZSS Klobuchar STEC values that are almost comparable with the GIM ones. To understand more the relationships between the multi-GNSS Klobuchar STEC values and the GIM STEC values, we estimated the correlation coefficients and the root mean square errors (RMSEs) between them as shown in Table 2. The tailor diagrams of both correlation coefficients and RMSEs have been shown in Fig. 7 with different colors such as GPS with blue color, GLONASS with red color, Galileo with green color, BeiDou with yellow color, and QZSS with purple color. It is clear from Table 2 that most of the multi-GNSS Klobuchar STEC values are correlated with the GIM STEC values with the correlation coefficients between 0.87 and 0.89.

These correlation coefficients of higher than 0.85 can be considered as very good correlations for the applicability of Klobuchar model. The RMSEs of each constellation vary between 10 TECU and 11 TECU while the RMSE of QZSS constellation is less than 10 TECU. The main reason is that the QZSS performance can work very well because the QZSS satellites have high elevation angles.

5. Conclusion

This study investigated the variations of ionospheric slant total electron content (STEC) by taking four GNSS stations located in different part of Thailand. Five Multi-constellation GNSS systems (i.e., GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, and QZSS) are used to check their individual performance and compare one another over the country. Particularly, the STEC observations are predicted by Klobuchar model (namely, Klobuchar-modeled STEC values) and compared with the Global Ionospheric Map (GIM) STEC values. The Klobuchar-modeled STEC values obtained from different number of satellites of each multi-constellation GNSS over Thailand region are studied and compared with the GIM STEC values during June 2020 to May 2021. Although the Klobuchar model algorithm estimate ionospheric delay for all kind of multi-constellation signals, but the major factors which affect the ionospheric delay are signal frequency and elevation angle.

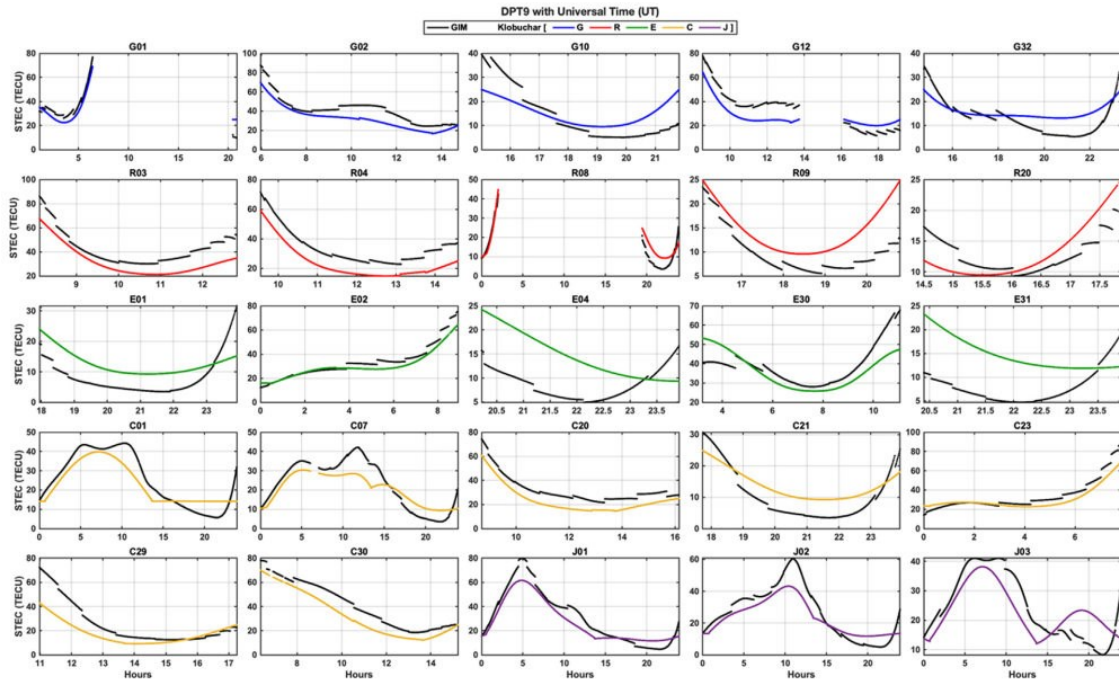


Fig. 4c. The plots of Klobuchar-modeled and GIM STEC plots obtained from five GPS satellites (G01, G02, G10, G12 and G32), five GLONASS satellites (R03, R04, R08, R09, and R20), five Galileo satellites (E01, E02, E04, E30 and E31), seven BeiDou satellites (C01, C07, C20, C21, C23, C29 and C30), and three QZSS satellites (J01, J02 and J03) at DPT9 station during the intense geomagnetic storm on May 12, 2021 (DOY 132).

Indeed, taking into account that the ionospheric delay is inversely proportional to the square of the signal frequency (see Eq. (11) in appendix). We also concluded, when each satellite constellations elevation angle increases, the STEC values decrease. It means that the STEC variation is inversely related to the elevation angle. This is the main reason, the QZSS Klobuchar STEC performance is better than other constellations because they have high elevation angles. Since all GNSS system have varying frequencies and at the same time each satellite contains different elevation angle, hence the GNSS Klobuchar and GIM-Klobuchar brings different STEC results for different GNSS systems.

In the future work, we have a plan to take a long-term data around 10 years and examine the scintillation occurrence characteristics over the territory. Finally, we hope that this kind of comparative analysis will play a significant role in ionospheric literature and will be useful for scientific community.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgement

This research is financially supported by Broadcasting and Telecommunications Research and Development Fund for Public Interest (project code: B2-001/6-2-63) as well as Visiting Research Scholar of KMITL research fund (grant No. KREF176401). The authors would also like to express their sincere thanks to the RINEX observation files of Department of Public Works and Town & Country Planning, Bangkok, Thailand (<http://203.113.122.35/sbc>).

Appendix. The equations of Klobuchar model

The mathematical equations for computing the ionospheric delay of Klobuchar ionospheric model are shown in (1)–(11). The first step begins with the calculation of earth-centered angle as follows:

$$\psi = \frac{0.0137}{\varepsilon + 0.11} - 0.022 \quad (\text{semicircles}) \quad (1)$$

where ψ is the earth-centered angle, ε and θ are the elevation and azimuth angles of the observed satellite. Then, compute the latitude and longitude of IPP:

$$\lambda_{IPP} = \lambda_{rcv} + \psi \cos(\theta) \quad (\text{semicircles}) \quad (2)$$

$$\lambda_{IPP} = \begin{cases} +0.416(\lambda_{IPP} > +0.416) \\ -0.416(\lambda_{IPP} < -0.416) \end{cases} \quad (3)$$

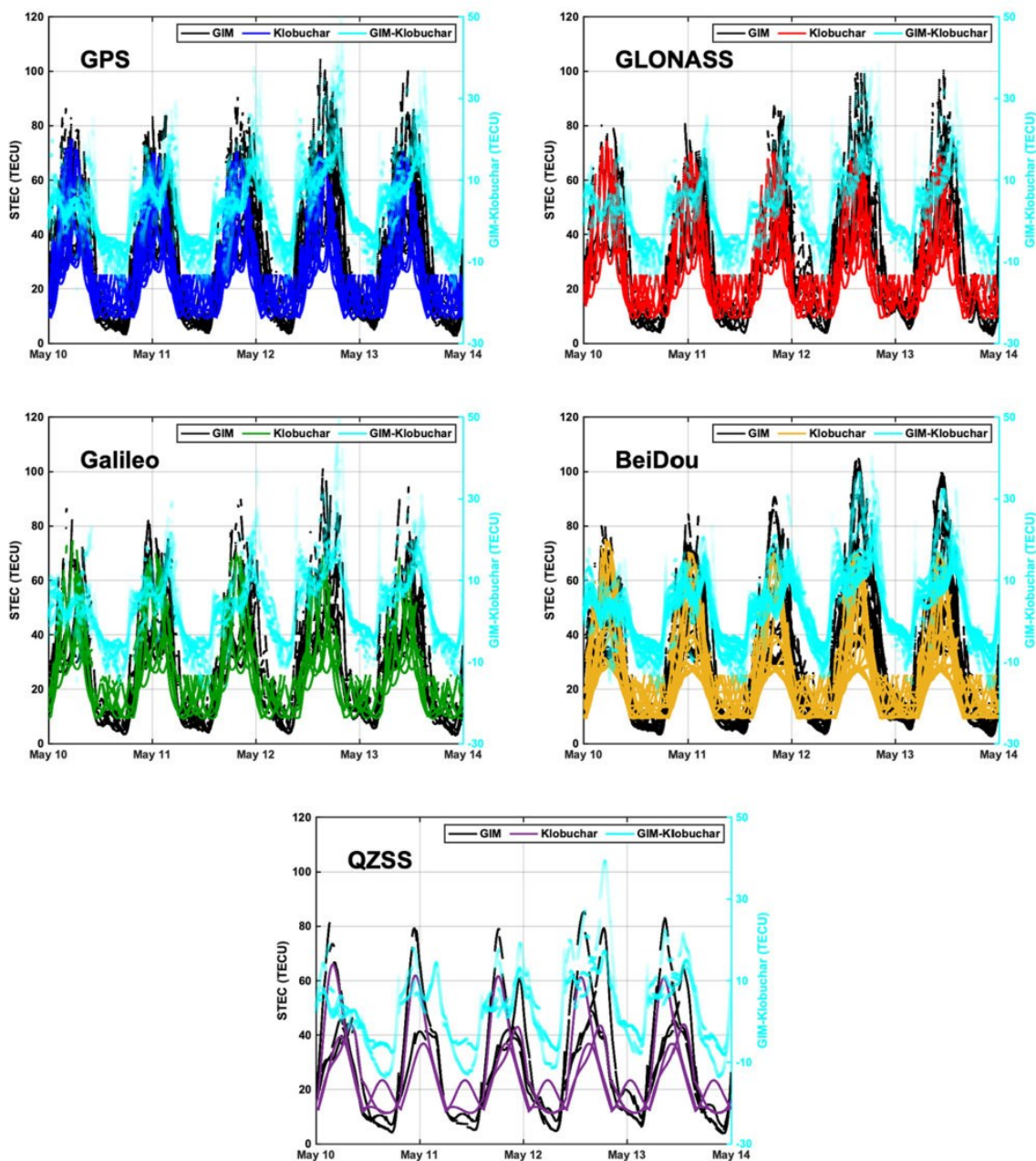


Fig. 5a. The Klobuchar-modeled STEC values, the GIM STEC values, and their differences (namely, GIM-Klobuchar) of five multi-constellation GNSSs during May 10–13, 2021 (including a storm day on May 21, 2021) at NKRK station with different colors, i.e., GPS with blue color, GLONASS with red color, Galileo with green color, BeiDou with yellow and QZSS with purple color. Note that both the GIM STEC values and the GIM-Klobuchar values of each constellation are depicted with black and cyan colors, respectively. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

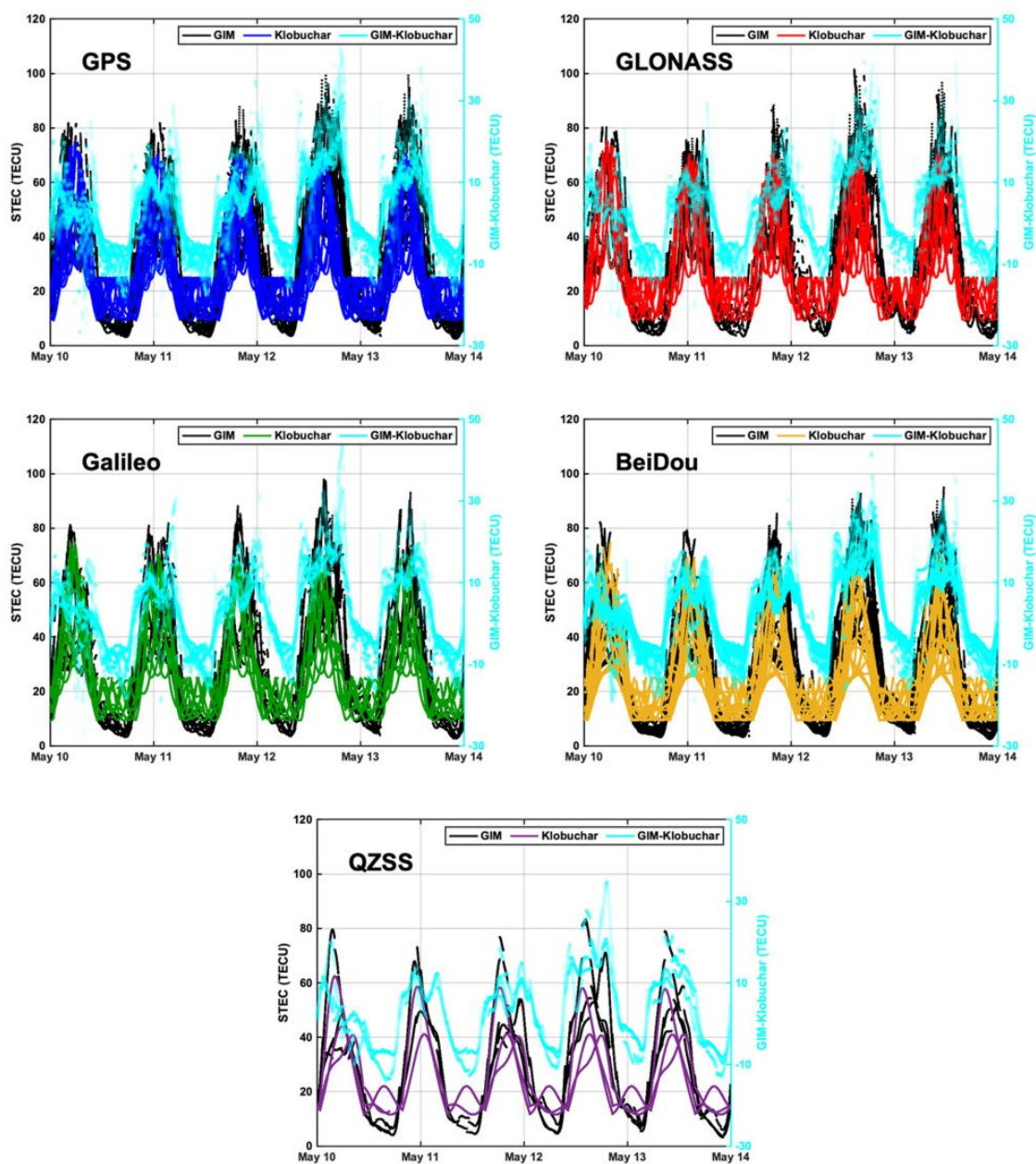


Fig. 5b. The Klobuchar-modeled STEC values, the GIM STEC values, and their differences (namely, GIM-Klobuchar) of five multi-constellation GNSSs during May 10–13, 2021 (including a storm day on May 21, 2021) at SRTN station with different colors, i.e., GPS with blue color, GLONASS with red color, Galileo with green color, BeiDou with yellow and QZSS with purple color. Note that both the GIM STEC values and the GIM-Klobuchar values of each constellation are depicted with black and cyan colors, respectively.

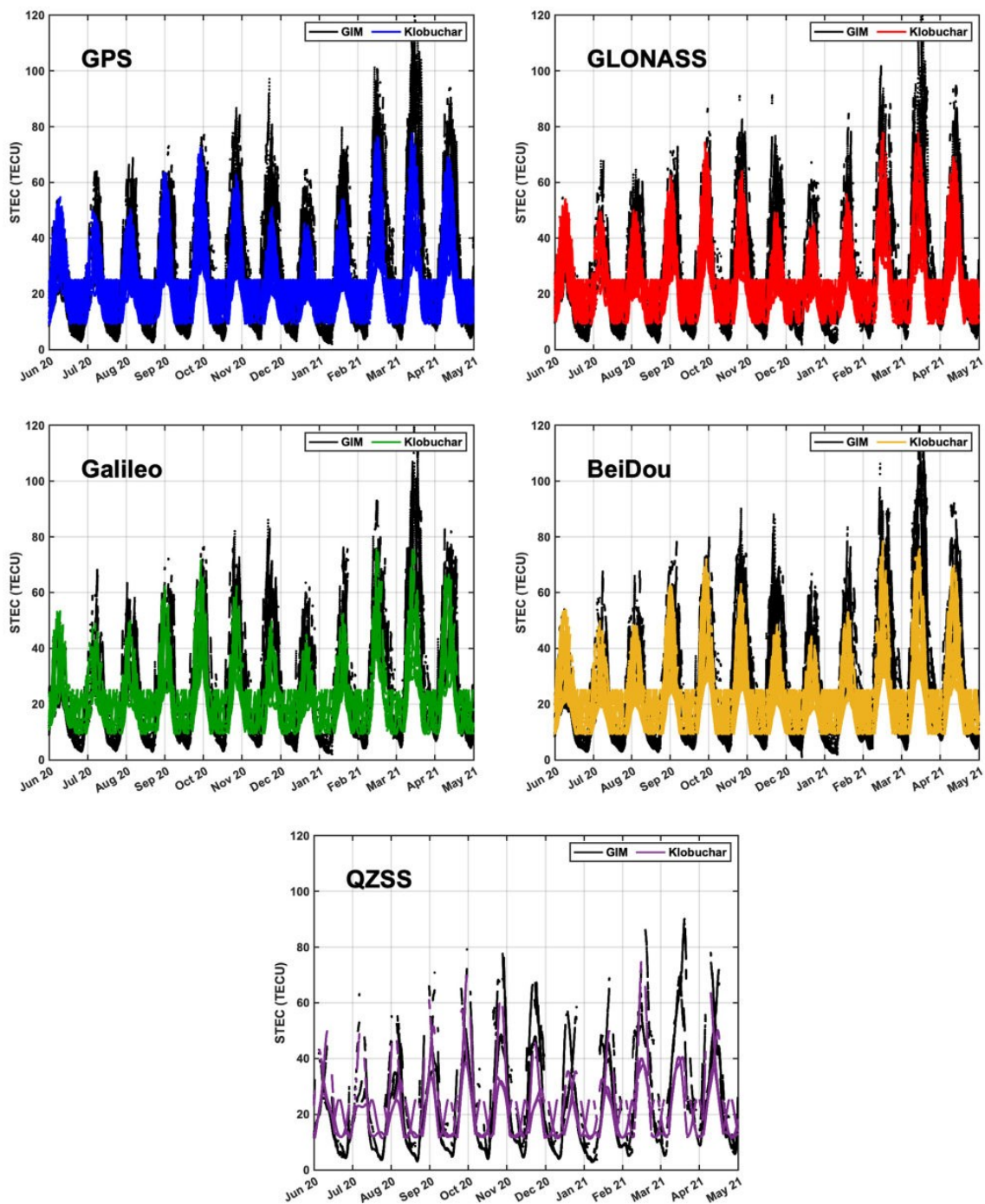


Fig. 6a. Monthly variations of the GIM and Klobuchar-modeled STEC values at CHMA station from June 2020 to May 2021 of five multi-constellation GNSSs with different colors of Klobuchar-modeled STECs, i.e., GPS with blue color, GLONASS with red color, Galileo with green color, BeiDou with yellow and QZSS with purple color. Meanwhile, the GIM STEC values of each constellation are shown with black color.

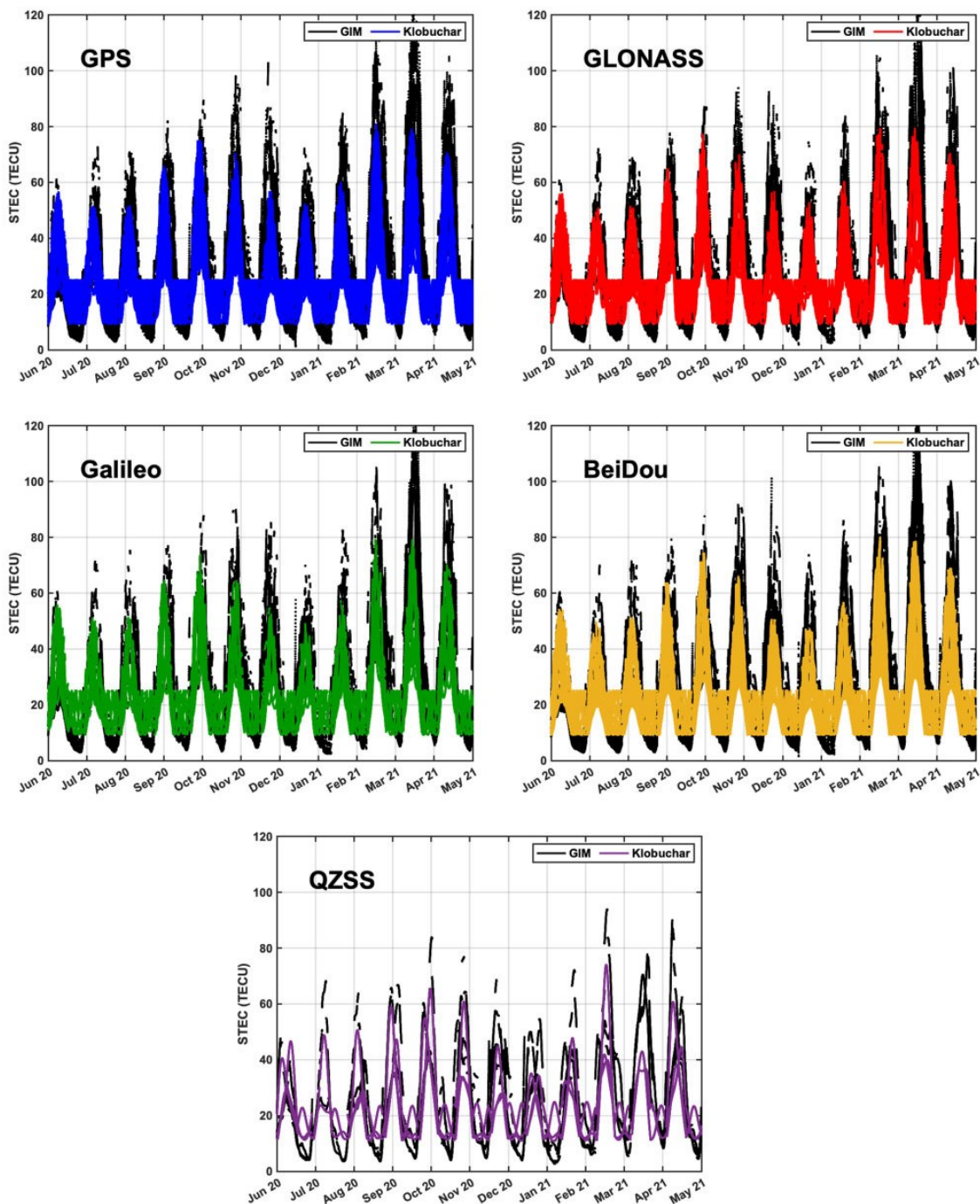


Fig. 6b. Monthly variations of the GIM and Klobuchar-modeled STEC values at DPT9 station from June 2020 to May 2021 of five multi-constellation GNSSs with different colors of Klobuchar-modeled STECs, i.e., GPS with blue color, GLONASS with red color, Galileo with green color, BeiDou with yellow and QZSS with purple color. Meanwhile, the GIM STEC values of each constellation are shown with black color.

Table 2

Correlation coefficients and RMSEs between the individual Klobuchar-modeled STEC values and the GIM STEC values at CHMA, DPT9, NRKM, and SRTN sites.

CORS	Constellation	Correlation (No unit)	RMSE (TECU)
CHMA	GPS	0.878	10.323
	GLONASS	0.871	10.434
	Galileo	0.877	10.178
	BeiDou	0.882	10.043
	QZSS	0.874	9.637
DPT9	GPS	0.882	11.023
	GLONASS	0.871	11.238
	Galileo	0.880	10.668
	BeiDou	0.887	10.061
	QZSS	0.883	9.747
NKRM	GPS	0.883	10.790
	GLONASS	0.875	10.997
	Galileo	0.880	10.567
	BeiDou	0.886	10.020
	QZSS	0.876	9.727
SRTN	GPS	0.884	11.043
	GLONASS	0.875	11.209
	Galileo	0.882	10.682
	BeiDou	0.890	9.806
	QZSS	0.890	9.622

$$\phi_{IPP} = \phi_{rcv} + \frac{\psi \sin(\theta)}{\cos(\lambda_{IPP})} \quad (\text{semicircles}) \quad (4)$$

where λ_{IPP} is the latitude of the IPP, ϕ_{IPP} is the longitude of the IPP, λ_{rcv} is the user approximate geodetic latitude, ϕ_{rcv} is the user approximate geodetic longitude. Afterwards, calculate the geomagnetic latitude and the local time at the IPP:

$$\lambda_m = \lambda_{IPP} + 0.064 \cos(\phi_{IPP} - 1.617) \quad (\text{semicircles}) \quad (5)$$

$$t_{local} = 43200\phi_{IPP} + t_{TOW} \quad (\text{seconds}) \quad (6)$$

where λ_m and t_{local} are the geomagnetic latitude and the local time at the IPP, and t_{TOW} is the time of week. Here, as for the t_{local} values, if $t_{local} \geq 86,400$, then $t_{local} = t_{local} - 86,400$; or if $t_{local} < 0$, then $t_{local} = t_{local} + 86,400$. Then, find the amplitude, period, and phase of ionospheric delay:

$$A_{iono} = \sum_{n=0}^3 \alpha_n \lambda_m^n \quad (\text{seconds}); \quad \text{if } A_{iono} < 0 \text{ then } A_{iono} = 0 \quad (7)$$

$$T_{iono} = \sum_{n=0}^3 \beta_n \lambda_m^n \quad (\text{seconds}); \quad \text{if } T_{iono} < 72,000 \text{ then } T_{iono} = 72,000 \quad (8)$$

$$x_{iono} = \frac{2\pi(t_{local} - 50,400)}{T_{iono}} \quad (\text{radians}) \quad (9)$$

where A_{iono} , T_{iono} , and x_{iono} are the amplitude, period, and phase of ionospheric delay, both α_n and β_n are the transmitted coefficients as a part of the satellite message.

$$F = 1.0 + 16.0(0.53 - \varepsilon)^3 \quad (10)$$

$$I_f = \begin{cases} \left(\frac{157.542}{f}\right)^2 \times F \times 5 \times 10^{-9}; & |x_{iono}| > 1.57 \\ \left(\frac{157.542}{f}\right)^2 \times F \left[5 \times 10^{-9} + \sum_{n=0}^3 \left(1 - \frac{x_{iono}^2}{2} + \frac{x_{iono}^4}{24}\right) \alpha_n \lambda_m^n\right]; & |x_{iono}| \leq 1.57 \end{cases} \quad (\text{seconds}) \quad (11)$$

where I_f is the ionospheric time delay of a specific frequency (f) in MHz, and F is the slant factor.

The GIM model for multi-constellation GNSS receivers

The mathematical equations for computing the VTEC values of GIM model (Schaer et al., 1998) are shown in (12)–(14) as follows:

$$\lambda_{IPP} = \lambda_{(0,0)} + p\Delta\lambda; \quad 0 \leq p < 1 \quad (12)$$

$$\phi_{IPP} = \phi_{(0,0)} + q\Delta\phi; \quad 0 \leq q < 1 \quad (13)$$

where λ_{IPP} and ϕ_{IPP} are the latitude and longitude of the IPP, $\lambda_{(0,0)}$ is the latitude of $E_{(0,0)}$, $\phi_{(0,0)}$ is the longitude of $E_{(0,0)}$, and $\Delta\lambda$ as well as $\Delta\phi$ are the grid width for the latitude and the longitude, respectively. Here, the p and q depend on the user's location and the reference grid, and the range is only defined. Also, $E_{(0,0)}$ is the nearest grid point 1 (bottom left), $E_{(1,0)}$ is the nearest grid point 2 (bottom right), $E_{(0,1)}$ is the nearest grid point 3 (top left), and $E_{(1,1)}$ is the nearest grid point 4 (top right).

VTEC_GIM is computed using real GIM VTEC. interpolating nearest 4 grid for all data epochs

Finally, the E_{IPP} is computed by the following equation.

$$E_{IPP} = (1-p)(1-q)E_{(0,0)} + p(1-q)E_{(1,0)} + q(1-p)E_{(0,1)} + pqE_{(1,1)} \quad (14)$$

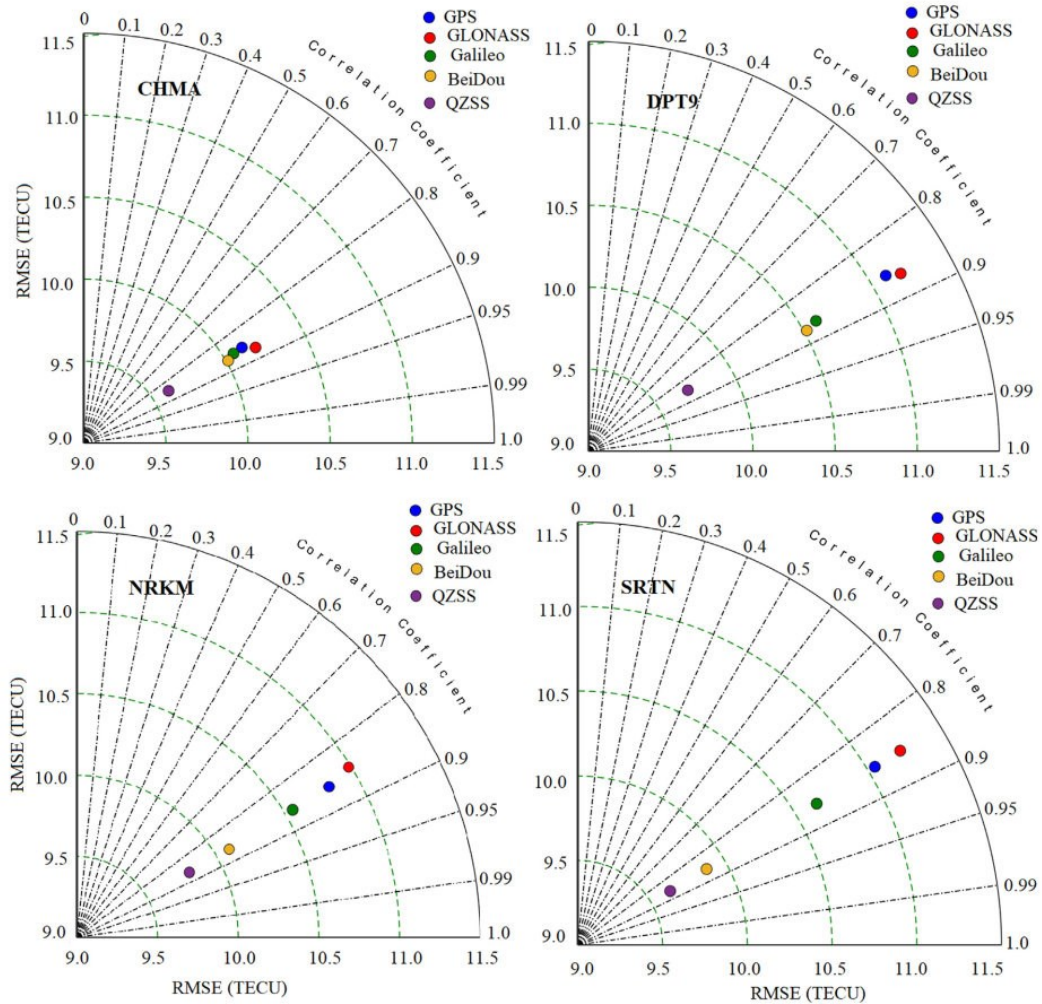


Fig. 7. The Taylor diagrams of both correlation coefficients and RMSEs between the Klobuchar-modeled STEC values and the GIM STEC values with different colors: GPS with blue color, GLONASS with red color, Galileo with green color, BeiDou with yellow color, and QZSS with purple color.

(Ansari and Park, 2018) Here, E_{ipp} is the bilinear interpolated VTEC on IPP for the time recorded on IONEX (GIM), then the $VTEC_{GIM}$ is subsequently determined as the third-order spline interpolation of the computed E_{ipp} .

The STEC computations of Klobuchar and GIM models

The following mathematical equations are used for a comparative analysis between Klobuchar and GIM models for multi-constellation GNSS receivers.

$$STEC_{klob} = cI_f \times \frac{f^2}{40.30 \times 10^{16}} \text{TEC(TECU)} \quad (15)$$

where I_f is the ionospheric time delay calculated by (11) based on Klobuchar model, f is the specific frequency (MHz) as defined in (11), and c is the speed of light. Partic-

ularly, $STEC_{klob}$ is the slant TEC that is computed using the Klobuchar ionospheric delay, hence, it is hereafter called “the Klobuchar-modeled STEC values”.

$$MF = \sin^{-1} \left(\frac{R_E}{R_E + h} \sin(\theta_z) \right) \text{(radians)} \quad (16)$$

where MF is the mapping function, R_E is the radius of the earth, h is the height of the IPP, and θ_z is the zenith angle. Note that h is assumed to be 450 km.

$$STEC_{GIM} = \sec(MF) \times VTEC_{GIM} \text{(TECU)} \quad (17)$$

Here, $\sec(MF)$ is the secant value of mapping function, $VTEC_{GIM}$ is the VTEC that are calculated using (14) Global Ionospheric Model (GIM) data. Likewise, $STEC_{GIM}$ is the slant TEC that is calculated using the GIM data, therefore, it is hereafter named “the GIM STEC values”.

References

- Ansari, K., Corumluoglu, O., Panda, S.K., 2017. Analysis of ionospheric TEC from GNSS observables over the Turkish region and predictability of IRI and SPIM models. *Astrophys. Space Sci.* 362 (4), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s10509-017-3043-x>.
- Ansari, K., Panda, S.K., Corumluoglu, O., 2018. Mathematical modelling of ionospheric TEC from Turkish permanent GNSS Network (TPGN) observables during 2009–2017 and predictability of NeQuick and Kriging models. *Astrophys. Space Sci.* 363 (3), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10509-018-3261-x>.
- Ansari, K., Bae, T.S., Seok, H.W., Kim, M.S., 2021. Multiconstellation global navigation satellite systems signal analysis over the Asia-Pacific region. *Int. J. Satell. Commun. Network.* 39 (3), 280–293. <https://doi.org/10.1002/sat.1389>.
- Ansari, K., Park, K.D., 2018. Multi constellation GNSS precise point positioning and prediction of propagation errors using singular spectrum analysis. *Astrophysics Space Science* 363 (258). <https://doi.org/10.1007/s10509-018-3479-7>.
- Ansari, K., Sharma, S.K., 2021. Ionospheric TEC variation based on GNSS data over the Arabian Peninsula and validation with the cubic spline interpolated GIM model. *Adv. Space Res.* 68 (9), 3814–3820. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.06.043>.
- Bhuyan, P.K., Borah, R.R., 2007. TEC derived from GPS network in India and comparison with the IRI. *Adv. Space Res.* 39 (5), 830–840. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.12.042>.
- Bi, T., An, J., Yang, J., Liu, S., 2017. A modified Klobuchar model for single-frequency GNSS users over the polar region. *Adv. Space Res.* 59 (3), 833–842. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.10.029>.
- CSNO, 2018. BeiDou Navigation Satellite System. Signal In Space: Interface Control Document by China Satellite Navigation Office (CSNO). Open Service Signal B3I (Version 1.0).
- Chen, J., Huang, L., Liu, L., Wu, P., Qin, X., 2017. Applicability analysis of VTEC derived from the sophisticated Klobuchar model in China. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 6 (3), 75. <https://doi.org/10.3390/ijgi6030075>.
- Filjar, R., Kos, T., Kos, S., 2009. Klobuchar-like local model of quiet space weather GPS ionospheric delay for northern Adriatic. *J. Navig.* 62 (3), 543–554. <https://doi.org/10.1017/S0373463309005281>.
- Han, L., Zhang, H., Huang, Y., Wang, M., Zhu, W., Ping, J., 2006. Improving Klobuchar type ionospheric delay model using 2D GPS TEC over China. In *36th COSPAR Scientific Assembly* 36, 2718.
- Hernández-Pajares, M., Juan, J.M., Sanz, J., Orus, R., García-Rigo, A., Feltens, J., Komjathy, A., Schaer, S.C., Krankowski, A., 2009. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. *J. Geod.* 83 (3–4), 263–275. <https://doi.org/10.1007/s00190-008-0266-1>.
- Hobiger, T., Jakowski, N., 2017. Atmospheric signal propagation. In: *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, Springer, pp. 165–193. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1_6.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J., 2001. *Global Positioning System: Theory and Practice*, fifth ed. Springer, New York, NY, USA, p. 313.
- Junior, P.D.T.S., Aquino, M., Veetil, S.V., Alves, D.B.M., da Silva, C. M., 2020. Seasonal analysis of Klobuchar and NeQuick G single-frequency ionospheric models' performance in 2018. *Adv. Space Res.* <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.11.013>.
- Klobuchar, J.A., 1987. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 23 (3), 325–331. <https://doi.org/10.1109/TAES.1987.310829>.
- Komjathy, A., Sparks, L., Wilson, B.D., Mannucci, A.J., 2005. Automated daily processing of more than 1000 ground-based GPS receivers for studying intense ionospheric storms. *Radio Sci.* 40 (6). <https://doi.org/10.1029/2005RS003279>.
- Luo, W., Liu, Z., Li, M., 2014. A preliminary evaluation of the performance of multiple ionospheric models in low-and mid-latitude regions of China in 2010–2011. *GPS Solut.* 18 (2), 297–308. <https://doi.org/10.1007/s10291-013-0330-z>.
- Li, J., Wan, Q., Ma, G., Zhang, J., Wang, X., Fan, J., 2017. Evaluation of the Klobuchar model in Taiwan. *Adv. Space Res.* 60 (6), 1210–1219. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.05.045>.
- Liu, Z., Yang, Z., 2016. Anomalies in broadcast ionospheric coefficients recorded by GPS receivers over the past two solar cycles (1992–2013). *GPS Solut.* 20 (1), 23–37. <https://doi.org/10.1007/s10291-015-0448-2>.
- Li, X., Zhang, X., Ren, X., Fritsche, M., Wickert, J., Schuh, H., 2015. Precise positioning with current multi-constellation global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo BeiDou. *Sci. Rep.* 5 (1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/srep08328>.
- Mallika, I.L., Ratnam, D.V., Raman, S., Sivavaraprasad, G., 2020. A new ionospheric model for single frequency GNSS user applications using Klobuchar model driven by auto regressive moving average (SAKARMA) method over Indian region. *IEEE Access* 8, 54535–54553. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2981365>.
- Mannucci, A.J., Wilson, B.D., Yuan, D.N., Ho, C.H., Lindqwister, U.J., Runge, T.F., 1998. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements. *Radio Sci.* 33 (3), 565–582. <https://doi.org/10.1029/97RS02707>.
- Nava, B., Coisson, P., Radicella, S.M., 2008. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 70 (15), 1856–1862. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.01.015>.
- Newby, S.P., 1992. Three alternative empirical ionospheric models—are they better than GPS broadcast model? In: *Proceedings of the Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning*, pp. 240–244.
- Padokhin, A.M., Mylnikova, A.A., Yasyukevich, Y.V., Morozov, Y.V., Kurbatov, G.A., Vesnin, A.M., 2021. Galileo E5 AltBOC signals: application for single-frequency total electron content estimations. *Remote Sens.* 13, 3973. <https://doi.org/10.3390/rs13193973>.
- Penttinen, J.T., 2015. *The Telecommunications Handbook: Engineering Guidelines for Fixed, Mobile and Satellite Systems*. John Wiley & Sons.
- Ratnam, D.V., Dabbakuti, J.K., Lakshmi, N.S., 2018. Improvement of Indian-regional Klobuchar ionospheric model parameters for single-frequency GNSS users. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 15 (7), 971–975. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2827081>.
- Radicella, S.M., Leitinger, R., 2001. The evolution of the DGR approach to model electron density profiles. *Adv. Space Res.* 27 (1), 35–40. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(00\)00138-1](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(00)00138-1).
- Revnivkyh, S., 2010. September. GLONASS Status and Progress. In: *Proc. ION GNSS*, pp. 609–633.
- Rethika, T., Mishra, S., Nirmala, S., Rathnakara, S.C., Ganeshan, A.S., 2013. Single frequency ionospheric error correction using coefficients generated from regional ionospheric data for IRNSS. 94.20. Vv; 84.40. Ua; 91.10. Fe. <http://hdl.handle.net/123456789/19405>.
- Rideout, W., Coster, A., 2006. Automated GPS processing for global total electron content data. *GPS Solut.* 10 (3), 219–228. <https://doi.org/10.1007/s10291-006-0029-5>.
- Sakai, Takeyasu, Yoshihara, Takayuki, Fukushima, Sonosuke, Ito, Ken, 2009. The ionospheric correction processor for SBAS and QZSS L1-SAIF. In: *Proceedings of the 2009 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Anaheim, CA, January 2009*, pp. 312–323.
- She, C., Yue, X., Hu, L., Zhang, F., 2019. Estimation of ionospheric total electron content from a multi-GNSS station in China. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 58 (2), 852–860. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2941049>.
- Schaer, S., Gurtner, W., Feltens, J., 1998. February. IONEX: The ionosphere map exchange format version 1. *Proceedings of the IGS AC Workshop*.
- Subirana, J.S., Juan Zornoza, J.M., Hernandez-Pajares, M., 2011. *Klobuchar Ionospheric Model*. Technical University of Catalonia, Spain.
- Seeber, G., 2003. *Satellite Geodesy*, 2nd completely revised and extended edition. Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 10785, pp. 303–304.
- Shukla, A.K., Das, S., Shukla, A.P., Palsule, V.S., 2013. Approach for near-real-time prediction of ionospheric delay using Klobuchar-like

ARTICLE IN PRESS

H.-W. Seok et al.

Advances in Space Research xxx (xxxx) xxx

- coefficients for Indian region. *IET Radar Sonar Navig.* 7 (1), 67–74. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2011.0371>.
- Vierinen, J., Coster, A.J., Rideout, W.C., Erickson, P.J., Norberg, J., 2016. Statistical framework for estimating GNSS bias. *Atmos. Meas. Tech.* 9 (3), 1303–1312. <https://doi.org/10.5194/amt-9-1303-2016>.
- Wang, N., Yuan, Y., Li, Z., Huo, X., 2013. Impact of ionospheric correction on single-frequency GNSS positioning. In: *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 471–486. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37404-3_39.
- Wang, N., Yuan, Y., Li, Z., Huo, X., 2016. Improvement of Klobuchar model for GNSS single-frequency ionospheric delay corrections. *Adv. Space Res.* 57 (7), 1555–1569. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.01.010>.
- Wu, C.C., Fry, C.D., Liu, J.Y., Liou, K., Tseng, C.L., 2004. Annual TEC variation in the equatorial anomaly region during the solar minimum: September 1996–August 1997. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 66 (3–4), 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2003.09.017>.
- Wu, X., Hu, X., Wang, G., Zhong, H., Tang, C., 2013. Evaluation of COMPASS ionospheric model in GNSS positioning. *Adv. Space Res.* 51 (6), 959–968. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.09.039>.
- Yasyukevich, Y.V., Mylnikova, A.A., Ivanov, V.B., 2017. Estimating the absolute total electron content based on single-frequency satellite radio navigation GPS/GLONASS data. *Solar-Terrestrial Physics* 3 (1), 128–135.
- Yuan, Y., Huo, X., Ou, J., Zhang, K., Chai, Y., Wen, D., Grenfell, R., 2008. Refining the Klobuchar ionospheric coefficients based on GPS observations. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 44 (4), 1498–1510. <https://doi.org/10.1109/TAES.2008.4667725>.

บทความที่ 4 คือ K. Ansari and P. Jamjareegulgarn, “Investigating the Effect of PDOP on Kalman Filter performance for GNSS-based RTK Positioning,” – อยู่ระหว่างกระบวนการอ่านครั้งที่ 2 (second revision) ของ GRSJ Journal - (ขอบเขตการดำเนินงานที่ 4.5 ไม่ได้อยู่ในเงื่อนไขที่จะต้องตีพิมพ์) (หน้า 330 - 332)

Investigating the Effect of PDOP on Kalman Filter performance for GNSS–based RTK Positioning

Abstract

The analysis will present a theoretical performance of Kalman Filters for GNSS–based real–time positioning estimation in varying Position Dilution of Precision (PDOP). It is expected that the PDOP will indicate the possible accuracy of GNSS measurements using Least Square Estimation (LSE). The presented theoretical analysis will explain and characterize the behavior for Kalman Filter. The experimental result will provide a real–time positioning the performance of the KF in high PDOP conditions.

1. Introduction

Recently, the GNSS–based RTK (real–time kinematic) positioning techniques have been drawing much attention among GNSS users who require the precise real–time kinematic positions. Although several methods have been proposed for RTK positions, all of them have still suffered from the influences of ionospheric irregularities, for example, geomagnetic storm, plasma bubble (PB), and traveling ionospheric disturbances (TID) etc. Such phenomena might increase the ionospheric delays of GNSS signal ranging from a few meters to tens meters [1]. Particularly, the disturbed ionosphere and time–series satellite data are also featured by high temporal variability. Basically, RTK positioning can be employed to perform in either static or kinematic mode as well as either real–time or post–processing, and provide different accuracy levels regarding to GNSS user’s requirement.

Like precise point positioning (PPP) approach, the RTK positioning accuracy is expected to be (5, 10) cm in (horizontal, vertical) directions [2]. Meanwhile, as for the post–processing positioning accuracy after 30 minutes, the cm–level accuracy is needed in static mode and the dm–level is desired in kinematic mode [3]. Although the ionospheric delay can be corrected to a first order through the ionosphere–free combination concept in RTK or PPP positioning, the prominent errors can still be observed under severe total electron content (TEC) fluctuations [4–5]. Moreover, the RTK GNSS sometimes encounters several problems, for instance, a) no the nearby base stations, b) no correction data, c) no GNSS signals. These problems can be mitigated using PPP technology or network RTK

About two decades ago, Rishbeth [6] investigated the equatorial ionization anomaly (EIA) at $\pm 15^\circ$ that is responsible for creating an electron density trough at geomagnetic equator. Such event can produce strong variations in amplitude and phase (namely, scintillation). Moreover, the F–region nighttime plasma irregularities over equatorial

and low latitudes are another main problem for GNSS users during post-sunset and post-midnight periods, because they may scatter and diffract GNSS signals, and lead to the scintillations [7]. The existence of scintillation may deteriorate the GNSS signals of several applications such as navigation, positioning and tracking etc. The RTK positioning accuracy under sudden changes in the ionosphere electron concentration relies on the GNSS receiver capability to handle the scintillation that may lead to cycle slip, loss of lock, or a complete tracking loss. Here, the GNSS signal loss is a violence threat for positioning, because the ambiguity resolution (AR) re-estimation is required some durations to converge ranging from a few minutes to more than ten minutes. Moreover, the high TEC variations and the impacted satellites still may lead to the positioning errors.

To resolve the adverse influence of the ionospheric delay on GNSS positioning, a lot of techniques have been proposed for the past decades for modern end users and/or applications, e.g., 4G/5G mobile terminals, unmanned aerial vehicle (UAV), autonomous car etc. There are three main groups of such algorithms in practice. For instance, the first group is based on empirical ionospheric models, e.g., NeQuick 2 model, International Reference Ionosphere (IRI) etc., however, they do not satisfy the rapid precise positioning even for undisturbed conditions. The second group is based on GNSS-based global ionospheric maps (GIM) for post-processing applications [8]. Nonetheless, the GIM values do not provide enough spatio-temporal resolution to capture the intense ionospheric irregularities [9]. The third group is based on the network-derived ionospheric corrections [10] that can provide reliable and precise positioning. The last algorithm has been recognized to achieve possibly the cm-level positioning accuracy even for long-range baselines based on Network RTK positioning. Unfortunately, it is a challenging task to obtain accurate ionosphere corrections for the reliable RTK positioning during ionospheric storm [11–13].

To improve the RTK positioning with better positioning accuracy, we propose the network RTK positioning along with the impacted satellite elimination and multi-constellation GNSS satellites over Thailand region in this work. The impacted and good satellites are selected using dilution of precision (DOP) as proposed by Roongpiboonsopit et al. [14] and the ionospheric irregularities during GNSS observations are detected using fast Fourier transform averaging ratio (FAR) algorithm as presented by Raghunath and Ratnam [15]. Moreover, a technique of multi-constellation network ionospheric correction proposed by Paziewski and Sieradzki [1] is also considered in this work to improve network RTK positioning successfully.

2. Methodology

1. To develop an analytical expression for showing the relationship between PDOP and KF
2. RTK positioning performance by using least square estimation or other methods
3. To check the performance of KF in high PDOP situation along with the corrected positions from the CORS
4. To analyze the accuracy improvement of RTK positioning over Thailand region

Reference

- [1] Paziewski, J., Sieradzki, R.: Enhanced wide-area multi-GNSS RTK and rapid static positioning in the presence of ionospheric disturbances. *Earth Planets Space*. 72(110), (2020).
- [2] Zhang, X.H., Li, X.X., Guo, F., Li, P., Wang, L.: Server-based realtime precise point positioning and its application. *Chin. J. Geophys.* 53(3), 372–379, (2010).
- [3] Bisnath, S. Gao., Y.: Current state of precise point positioning and future prospects and limitations. In: *Proceedings of IUGG 24th General Assembly*, (2007).
- [4] Pi, X., Manucci, A.J., Valant-Spaight, B., Bar-Sever, Y., Romans, L.J., Skone, S., Sparks, L., Hall, G.M.: Observations of global and regional ionospheric irregularities and scintillation using GNSS tracking networks. in: *ION Pacific PNT Conference*, Honolulu, Hawaii, April 22–25, (2013).
- [5] Rodríguez-Billbao, I., Moreno Monge, B., Rodríguez-Caderot, G., Herraiz, M., Radicella, S.M.: Evaluation of Precise Point Positioning accuracy under large total electron content variations in equatorial latitudes. *Advances in Space Research* 55(2), 605–616, (2015).
- [6] Rishbeth, H.: The equatorial F-layer: progress and puzzles. *Ann. Geoph.* 18, 730–739, (2000).
- [7] Jakowski, N., Mayer, C., Wilken, V., Hoque, M. M.: Ionospheric impact on GNSS signals. *Física de la Tierra* 20, 11–25, (2008).
- [8] Zhang, S., Zhao, L., Li, X. et al. A sequential and partial ambiguity resolution strategy for improving the initialization performance of medium-baseline relative positioning. *Earth Planet Sp* 68, 29 (2016). <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0411-7>
- [9] Park, J., Sreeja, V., Aquino, M., Cesaroni, C., Spogli, L., Dodson, A., de Franceschi, G.: Performance of ionospheric maps in support of long baseline GNSS kinematic positioning at low latitudes. *Radio Sci.* 51, 429–442, (2016).
- [10] Rizos, C.: Network RTK Research and Implementation – A Geodetic Perspective. *Journal of Global Positioning Systems* 1(2), 144–150, (2002).
- [11] Grejner-Brzezinska, D.A., Kashani, I., Wielgosz, P.: On accuracy and reliability of instantaneous network RTK as a function of network geometry, station separation, and data processing strategy. *GPS Solutions* 9(3), 212–225, (2005).
- [12] Wielgosz, P., Kashani, I., Grejner-Brzezinska, D.A.: Analysis of Long-Range Network RTK during Severe Ionospheric Storm. *Journal of Geodesy* 79(9), 524–531, (2005).
- [13] Paziewski, J.: Study on desirable ionospheric corrections accuracy for network-RTK positioning and its impact on time-to-fix and probability of successful single-epoch ambiguity resolution. *Advances in Space Research* 57(4), (2016).
- [14] Roongpiboonsopit, D., Karimi, H.A.: A Multi-Constellations Satellite Selection Algorithm for Integrated Global Navigation Satellite Systems. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, 13(3), 127–141, (2009).
- [15] Raghunath, S., Ratnam, D.V.: Detection of Low-Latitude Ionospheric Irregularities from GNSS Observations. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 8(11), 5171–5176, (2015).

บทความที่ 5 คือ W. Srisamoodkham, K. Ansari, and P. Jamjareegulgarn, “Improvement of Real-Time Kinematic Positioning Using Kalman Filter-Based Singular Spectrum Analysis during Geomagnetic Storm for Thailand sector,” in: The 3rd International Conference on Data Science and Applications (ICDSA 2022), March 26-27, 2022 - อยู่ระหว่างการอ่านบทความของการประชุมวิชาการอยู่ในฐาน SCOPUS และ Q4 ของ SJR (หน้า 333 - 341)

Improvement of Real-Time Kinematic Positioning Using Kalman Filter-Based Singular Spectrum Analysis during Geomagnetic Storm for Thailand sector

Worachai Srisamoodkham¹, Kutubuddin Ansari²[0000-0002-6151-6241] and
Punyawi Jamjareegulgarn³*[0000-0003-1259-1883]

¹Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University.
Email: hs5xij@pcru.ac.th

²Division of Mathematics, School of Advanced Sciences, Vellore Institute of Technology,
Chennai, Tamil Nadu, India. Email: kdansarix@gmail.com

³King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus,
Chumphon, 86160 Thailand.

*Corresponding Authors: kjpunyaw@gmail.com

Abstract. The ionospheric error is the largest error source of positioning, especially when electron density becomes high during geomagnetic storms. Real-time kinematic (RTK) positioning during the storm time often has higher fluctuation and noise errors in positioning. Therefore, a Kalman Filter based on singular spectrum analysis (namely, KF-SSA) forecasting method is proposed for RTK positioning in this work. The RTK drone data is collected around 50 minutes of interval (7.37 AM to 8.28 AM) on May 12, 2021, with respect to a base station located at 13.84°N; 100.29°E. The RTK positioning tests have been carried out to demonstrate the positioning accuracy of the proposed algorithm. The simulation results reveal that the implication of SSA with KF has high-precision estimates and improves the positioning accuracy.

Keywords: Global navigation satellite system, Kalman Filter, positioning, real-time kinematic, singular spectrum analysis.

1 Introduction

Global Navigation Satellite System (GNSS) systems have been implemented for accurate positioning, navigation and timing services in various modern technologies. The GNSS receiver positioning approach is based on a trilateration concept for computing ionospheric range delays based on the received satellite signals and several related biases. The main error source during calculating the receiver positioning is the ionosphere where the number of electron density always fluctuate regarding to local time, season, solar activity, location etc. [1]. Moreover, the ionospheric electron density also responses to geomagnetic storms and behaves numerous irregularities

2

such as equatorial plasma bubbles (EPBs), ionospheric storm, prompt penetrated electric field etc. [2] The ionospheric time delays of GNSS signals are related directly to the total electron content (TEC) and employed to indicate the precise receiver positioning effectively. However, due to several mentioned ionospheric anomalies, the receiver positioning accuracies sometimes are extremely deteriorated. Therefore, a lot of modern technologies for new businesses, transportations and industries have still asked for high accuracy GNSS in conjunction with the 5G mobile cellular networks, for example, drone, autonomous car, and other unmanned autonomous vehicles (UAVs) and so on. Here, there have been several approaches for GNSS-based high accuracy for 5G technology such as RTK (real-time kinematic), PPP (precise point positioning), and RTK-PPP. So far, although some prediction models like the IRI and IRI-Plas models have been considerably improved to predict and report the ionospheric parameters and TECs during with and without the geomagnetic storms, these models have never focused on the GNSS receiver positioning and added some methods for mitigating the positioning errors. In contrast, the international GNSS service (IGS), known as a very large network of GNSS receivers for providing the GIM TEC map, has been focusing on the high accuracy GNSS for 5G technology, UAV, autonomous car etc. with the new techniques for RTK and PPP. Therefore, the new techniques for real-time positioning are very important for future technologies. Recently, there have been numerous investigations about singular spectrum analysis (SSA) for modeling and forecasting the time-series data such as ionospheric TEC, positioning, velocity etc., because it employs time-domain data to extract noisy time-series information without prior knowledge of time-series dynamics. Particularly, the obtained data trends are not necessarily linear, and the oscillations can be modulated in both amplitude and phase [3]. Dabbakuti and G [4] proposed a new ionospheric prediction model based on SSA and artificial neural network, namely SSA-ANN model. The hourly global positioning system (GPS)-TEC observations from a period of 2009–2017 at the Bangalore station (13.02°N and 77.57°E) are taken into account for analysis. The root means square errors between the observed and the SSA-ANN TEC values were within 1.40 TECU and the correlation coefficient can be close to 0.99. Likewise, Ansari et al. [1] also applied SSA method on the GPS TECs during the low solar activity year of 2017 over low-latitude Nepal region. The higher and lower TEC variabilities can be found clearly during equinoctial and solstice seasons. Also, the correlation coefficients between the reconstructed and observed time-series of about 1.00 demonstrates that the SSA method could be a promising tool for the TEC prediction over the region. As for SSA-based positioning, Ansari and Park [5] investigated PPP method of multi-constellation GNSSs and predicted the propagation errors in the East-Asian sector. The PPP accuracy does not only rely on the DOP (dilution of positioning) but is also affected by the corrections of the ionospheric and tropospheric delays. The accuracies are enhanced of approximately 70% after applying the SSA method. Afterwards, Ansari [6] proposed initially an adaptive Kalman

filter (KF) based on the SSA forecasting method (so-called, KF-SSA) for RTK. The real-time car data were used for validating the proposed method. The results showed that the KF-SSA-based positioning accuracy is improved as compared to the common KF model. In this paper, we have continued to apply the KF-SSA method with the moving Drone and tested its robustness and reliability during geomagnetic storms on May 12, 2021, over Thailand sector.



Fig. 1. Location of RTK Drone data is collected around 50 minutes of interval (7.37 AM to 8.28 AM) on May 12, 2021, with respect to the base station located at 13.84°N; 100.29°E.

2 Data Used

The RTK Drone data is collected around 50 minutes of interval (7.37 AM to 8.28 AM) on May 12, 2021, with respect to the base station located at 13.84°N; 100.29°E (Fig. 1). The reason of selecting on May 12, 2021 (DOY 132) is due to the existence of the most intense geomagnetic storm (G3-storm with Kp index = 7). A coronal mass ejection (CME) left the Sun on May 9, 2021, associated with a filament eruption. A shock signature from this CME was observed in the ACE and DSCOVR satellite data at around 05:50 (UT) on May 12, 2021, and a sudden commencement was recorded at Earth just after 6:30 (UT) on the morning of the May 12, 2021. The geomagnetic fields were disturbed and reached to STORM G3 conditions. This was associated with a period of southward pointing interplanetary magnetic field (IMF, as measured in the solar wind). The IMF has since turned back northwards so geomagnetic activity is

4

likely to wane, for the moment [7]. GNSS data were processed with RTKLib software [8], and the rover positions and velocities with uncertainty were also recorded and shown in this present work.

3 Method of Modelling

The Kalman Filter (KF) was named to honor “Rudolf E. Kalman” that was also known as linear quadratic estimation (LQE). The KF is an algorithm that uses a series of the observed measurements added with the noise and other inaccuracies over time. The estimates of unknown variables based on KF method tend to be more accurate than those based on a single measurement. If we consider X_{k-1} and P_{k-1} are the previous state and process covariance matrices, as well as X_{kp} and P_{kp} are the predicted state and process covariance matrices of the data set, then by using KF theory, the next predicted state and process covariance matrices can be written as shown in (1).

$$\begin{aligned} X_{kp} &= AX_{k-1} + B\mu_k + w_k \\ P_{kp} &= AP_{k-1}A^T + Q_k \end{aligned} \quad (1)$$

where A is the state transition model which is applied to the previous state, B is the control-input model, which is applied to the control vector μ_k , w_k is the process noise, which is assumed to be drawn from a zero-mean multivariate normal distribution with covariance, Q_k .

The Kalman gain (K_G) is the weight given to the measurements and current-state estimate. A high gain, the filter places more weight on the most recent measurements, and thus conforms to them more responsively. The filter conforms to the model predictions more closely with a low gain. The K_G is calculated by the following equation.

$$K_G = \frac{P_{kp}M}{MP_{kp}M^T + R} \quad (2)$$

where R is sensor noise covariance (measurement error) matrix and M is simply an adaptation matrix. Suppose z_k is measurement noise (uncertainty) matrix and C is a simple adaptation matrix then measured of the state matrix (Y_k) with measured value (X_{km}). Then, the final formula for the next state matrix and process covariance matrix predicted by the previous state can be expressed as shown in (3).

$$\begin{aligned} X_k &= X_{kp} + K_G[Y_k - MX_{kp}] \\ P_k &= (I - K_GM)P_{kp} \end{aligned} \quad (3)$$

The obtained predicted values of X_k are predicted by singular spectrum analysis (SSA) method. The SSA includes four important steps, i.e., Step (i) Embedding step,

Step (ii) Singular value decomposition (SVD) step, Step (iii) Eigentriple grouping step, and Step (iv) Diagonal averaging step. Note that the SSA method has several equations and details that are not shown and described in this Section. However, those SSA explanations can be found and read additionally from Ansari 2021 [6].

4 Results

The GNSS data were obtained in Rinex format and processed with RTKLib software. The plots of rover position and velocity with uncertainty were shown in Fig. 2 and 3. The starting point of drone is considered as an origin point, and the displacements from that point in north-east and up directions are estimated with time. The X-axis of the plot showed the time of recorded data. Obviously, we can see that the drone was moving smoothly which has some peaks in south, east and up directions. Actually, this kind of data was needed to study the SSA performance for positioning purpose. The velocity plots of drone in north, east and up directions have been shown in Fig. 3. The velocity and position of drone as well as the estimated position shown in Fig. 4 were used as input signals for Kalman Filter (KF). Afterwards, the SSA techniques was implemented and the positions were predicted. The observed positions are plotted with blue color, the normal KF plots are shown with red color, and the KF-SSA plots are depicted with green color. It can be seen clearly from Fig. 4 that the observed and KF-estimated positions have some fluctuations in positioning. The predicted positions by KF-SSA are smoother in all of three.

To check the accuracy of the proposed model, the root mean square (RMS) values have been estimated and tabulated in Table 1. It is clear from the Table 1 that the RMS after using KF are improved around 14.35% in north direction, 31.80% in east direction, and 7.07% in up direction. Total combined position RMS has been reached up to 16.94%. After implementing KF-SSA method, the RMS values have also been estimated and the notable enhancements were recorded. The RMS in north direction was improved from 14.35% with only KF method to 20.22% with KF-SSA technique. Similarly, the RMS of 31.80% before applying SSA method was improved up to 33.24% in east direction, and it also increased from 7.07% to 13.20% in up direction. Afterwards, we combined all three-dimensional positions and estimated errors. The RMS of the observed position was 9.4712 m, which becomes lower around 7.8669 m after applying the KF-SSA, that means it was improved up to 16.94%. Likewise, it becomes 7.3515 m (22.28% improvement) when KF-SSA was utilized.

Recently, Ansari [6] evaluated the performance of KF-SSA method using the real-time car data: Swift Piksi Multi 1.2 FW and u-blox M8T that can be accessed via http://rtkexplorer.com/downloads/gpsdata/?fbclid=IwAR2O_8ixUQMxdanYuEFnhpgFGgoA0lxBjTa2pEi8h7C531G6-cTV7qSJ7_M). Hence, this real-time car data were also used as the first data set for validation purpose in this work. We found that the KF model estimated (north, east, up) residuals provide the RMS values (7.21, 4.42,

6

and 4.20) m that can be decreased with KF-SSA approach to be (4.53, 3.44, 3.54) m. These outcomes indicate that the accuracies of KF-SSA method are higher than those of KF model. Furthermore, we also used the positioning data of IISC station in Bangalore at India, one of Indian IGS stations (13.02°N; 77.570°E) as the second data set for validation purpose in this work. In this case, we use only IRNSS signals. The studied results shows that the RMS values in (north, east, up) directions are (14.36, 3.12 and 9.84) m before applying KF-SSA. After implementing this method, the accuracy was improved up to 23% as shown in Fig. 5. Finally, we concluded that the KF-SSA technique works well to improve the positioning accuracy over Thailand sector.

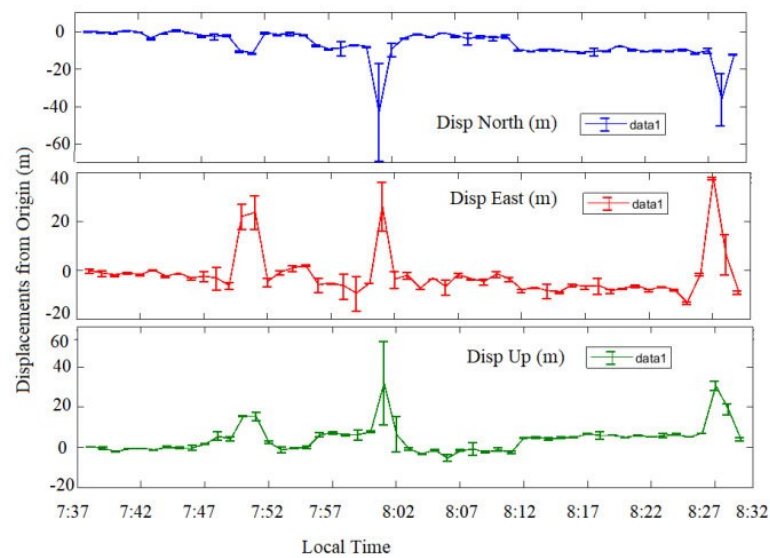


Fig. 2. The GNSS positioning plots of rover position with uncertainty.

Table 1. The range values in (north, east, up) directions of the observed, the KF-based, and the KF-SSA-based positioning, as well as the respective RMS improvements.

Direction	Observation (m)	KF (m)	KF-based RMS improvement	KF-SSA (m)	KF-SSA-based RMS improvement
North	10.5140	9.0051	14.35%	8.3886	20.22%
East	9.4893	6.4679	31.80%	6.3355	33.24%
Up	8.2777	7.6922	7.07%	7.1852	13.20%
Total	9.4712	7.8669	16.94%	7.3515	22.38%

7

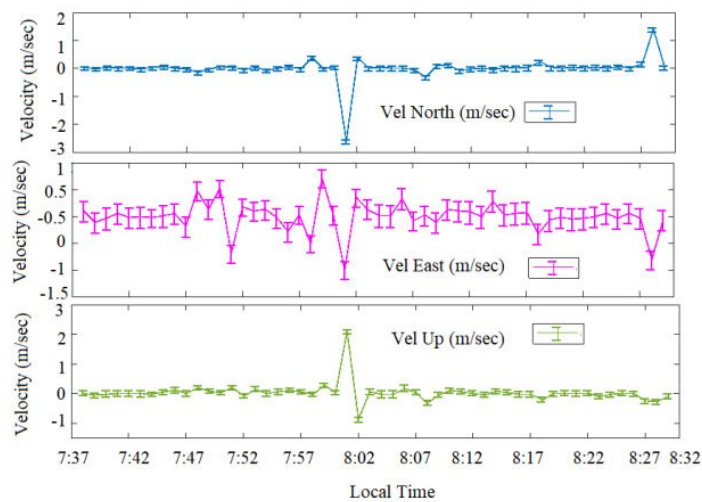


Fig. 3. The GNSS velocity plots of rover position with uncertainty.

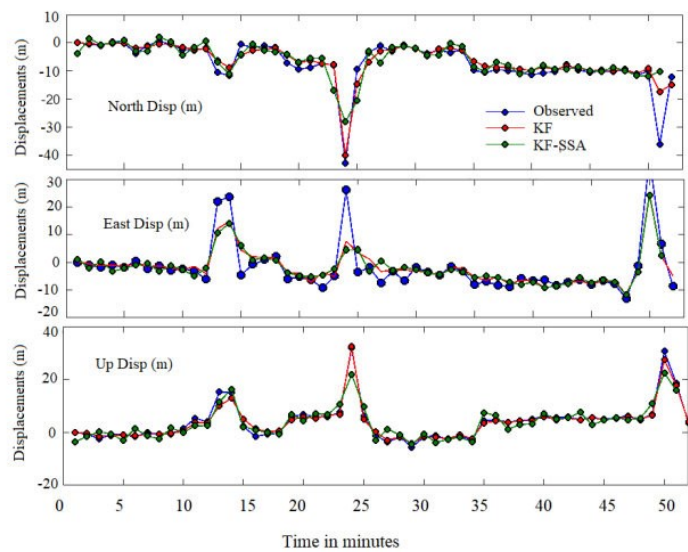


Fig. 4. The GNSS positioning plots of rover position obtained from the observation, the KF-based predicted values, and the KF-SSA-based predicted values.

8

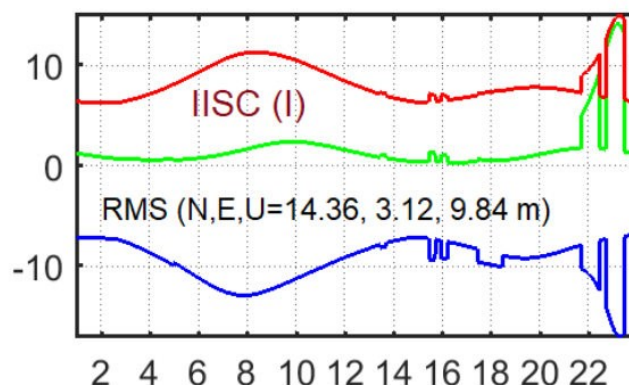


Fig. 5. The GNSS positioning plots of static position at IISC station, Bangalore, India.

5 Conclusion

This study investigates the positioning performance when the raw observations of a moving drone were taken during the storm time. This is clear and already proved that because of ionospheric errors, the RTK positioning provides lot of discrepancies along with noise errors in positioning. Although the KF model is widely used to predict the RTK positioning and remove the noise errors, but it is not sufficient. Hence, we implemented the SSA forecasting method in conjunction with KF (so-called KF-SSA) in this work. The results show that more noise errors can be removed and the positioning performance can be improved. Final positioning improvement in RMS was noted around 22%. The proposed KF-SSA technique has been proved as the suitable technique for RTK positioning improvement over Thailand sector. However, the improvement is only 22%, since the observed data has too much fluctuation.

Acknowledgement

This research is financially supported by Broadcasting and Telecommunications Research and Development Fund for Public Interest (project code: B2-001/6-2-63). The authors would also like to express their sincere thanks to the RINEX observation files of Department of Public Works and Town & Country Planning, Bangkok, Thailand.

References

- [1] K. Ansari, S.K. Panda, P. Jamjareegulgarn, "Singular Spectrum Analysis of Ionospheric TEC Variations over Nepal during the low Solar Activity from GPS Network Observables," *Acta Astronautica*, vol. 169, pp. 216-223, 2020.
- [2] P. Wintoft and L. R. Cander, "Ionospheric foF2 storm forecasting using neural networks," *Phys. Chem. Earth, Part C: Solar, Terrestrial Planet. Sci.*, vol. 25, pp. 267–273, 2000
- [3] M. Ghil et al., "Advanced spectral methods for climatic time series," *Rev. Geophys.*, vol. 40, pp. 3-1–3-41, 2002.
- [4] J. R. K. K. Dabbakuti and B. L. G, "Application of Singular Spectrum Analysis Using Artificial Neural Networks in TEC Predictions for Ionospheric Space Weather," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 12, no. 12, pp. 5101-5107, 2019.
- [5] K. Ansari, K. D. Park, "Multi constellation GNSS precise point positioning and prediction of propagation errors using singular spectrum analysis," *Astrophys. Space Sci.*, vol. 363, no. 258, 2018.
- [6] K. Ansari, "Real-Time Positioning Based on Kalman Filter and Implication of Singular Spectrum Analysis," *IEEE Geosci. Remote. Sens.*, vol. 18, no. 1, pp. 58-61, 2021.
- [7] HW Seok, Ansari K, Panachai C, Jamjareegulgarn P (2021) Individual performance of multi-GNSS signals in the determination of STEC over Thailand with the applicability of Klobuchar model, *Advances in Space Research*, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.11.025>
- [8] Takasu T. RTKLIB: an open-source program package for GNSS positioning, available online. 2018. www.rtklib.com

**** สิ้นสุดเนื้อหาางานงวดที่ 4 ****