



กทปส

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการขอรับการส่งเสริมและสนับสนุนจากเงินกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง
กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

การพัฒนาอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ที่มีความแม่นยำระดับ
เซนติเมตรสำหรับอุตสาหกรรม

Development of the GNSS receiver with centimeter accuracy
for industry

ผศ.ดร. กฤษณ์ วงศ์รุจิระ หัวหน้าโครงการวิจัย
นายณัฐฐนรงค์ นิลจันทร์ ผู้ร่วมวิจัย

ธันวาคม พ.ศ. 2564

กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ
(สำนักงาน กสทช.)

แบบ กทปส. ME-003

รายงานฉบับสมบูรณ์

ทุนส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา
สัญญารับทุนเลขที่ A63-1-(2)-004

การพัฒนาอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ที่มีความแม่นยำระดับเซนติเมตรสำหรับอุตสาหกรรม
Development of the GNSS receiver with centimeter accuracy for industry

คณะนักวิจัย

- | | |
|----------------------------|------------------------|
| 1. ผศ.ดร. กฤษณ์ วงศ์จิริระ | นักวิจัยหัวหน้าโครงการ |
| 2. นายณัฐธรรงค์ นิลจันทร์ | ผู้ร่วมวิจัย |

ได้รับทุนอุดหนุนจาก
กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ
(สำนักงาน กสทช.)

ธันวาคม พ.ศ. 2564

บทสรุปผู้บริหาร
การพัฒนาอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ที่มีความแม่นยำระดับเซนติเมตรสำหรับ
อุตสาหกรรม
ผศ.ดร. กฤษณ์ วงศ์รุจิระ
ธันวาคม พ.ศ. 2564

โครงการวิจัยการพัฒนาอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ที่มีความแม่นยำระดับเซนติเมตรสำหรับอุตสาหกรรมนี้ จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ชนิด 2 ความถี่ (L1 ที่ความถี่ 1.575 GHz และ L2 ที่ความถี่ 1.272 GHz) รุ่น UBX-F9P ร่วมกับเทคนิค RTK (Real-Time Kinematic) ที่มีความแม่นยำทางตำแหน่งสูง และมีขีดความสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้จริง

ในการประยุกต์ใช้เทคนิค RTK กับโครงการฯ นี้ ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบฮาร์ดแวร์สถานีอ้างอิง (สำหรับส่งค่าแก้ไขทางตำแหน่ง) และอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover (อุปกรณ์ที่ใช้ระบุตำแหน่งเป้าหมายที่มีความแม่นยำสูง โดยอาศัยค่าแก้ไขทางตำแหน่งจากสถานีอ้างอิง) ให้มีความทนทานต่อการใช้งานกลางแจ้ง รวมทั้งออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับคำนวณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK และซอฟต์แวร์ช่วยในการแสดงตำแหน่งบนพื้นโลกของอุปกรณ์ Rover ผ่านระบบมือถือแอนดรอยด์ สำหรับการวิเคราะห์ความแม่นยำทางตำแหน่งของอุปกรณ์ Rover ขณะอยู่ร่วมกับที่ จะคำนวณจากการกระจายตำแหน่ง และในกรณีเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแนววิถี จะคำนวณความแม่นยำด้วยระยะ XTE และคำนวณความคลาดเคลื่อนรัศมีในกรณีเคลื่อนที่เป็นวงกลม

จากผลการวิจัยและพัฒนาพบว่า เมื่ออุปกรณ์ Rover ที่พัฒนาขึ้น ได้รับค่าแก้ไขทางตำแหน่งจากชุดอุปกรณ์สถานีอ้างอิงที่พัฒนาขึ้นแล้ว จะสามารถระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ Rover กรณีอยู่ร่วมกับที่ โดยมีความคลาดเคลื่อนตามแนวราบไม่เกิน 2 เซนติเมตร และกรณีที่อุปกรณ์ Rover มีการเคลื่อนที่ในแนววิถีเส้นตรงหรือวงกลม จะมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 24 เซนติเมตร ดังปรากฏในหัวข้อที่ 5.2.6 นอกจากนี้ยังสามารถทำงานกลางแจ้งได้อย่างน้อย 5 ชั่วโมง และแสดงตำแหน่งของ Rover ผ่านซอฟต์แวร์แสดงตำแหน่งบนพื้นโลกผ่านมือถือแอนดรอยด์ได้แบบเวลาจริงดังปรากฏในหัวข้อที่ 6.2 อีกด้วย

จากความแม่นยำทางตำแหน่งขณะอยู่ร่วมกับที่ ผู้วิจัยขอเสนอแนะให้มีการนำไปใช้กับอุตสาหกรรม การสำรวจและรังวัด และในกรณีที่ระบุตำแหน่งแบบเคลื่อนที่ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการควบคุม การจราจรของรถจักรกลเกษตรบนพื้นที่เพาะปลูกพืชไร่ขนาดใหญ่ โดยการอาศัยการบอกตำแหน่งของรถอย่างแม่นยำด้วยอุปกรณ์ Rover เพื่อใช้ควบคุมการขับเคลื่อนให้ตรงตามแนวการจราจรบนพื้นที่อีกทอดหนึ่ง

บทคัดย่อ

การพัฒนาอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ที่มีความแม่นยำระดับเซนติเมตรสำหรับอุตสาหกรรม

ผศ.ดร. กฤษ วงศ์จิระ

ธันวาคม พ.ศ. 2564

โครงการวิจัยการพัฒนาอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ที่มีความแม่นยำระดับเซนติเมตรสำหรับอุตสาหกรรมนี้ มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ชนิด 2 ความถี่ ร่วมกับการใช้เทคนิค RTK (Real-Time Kinematic) เพื่อเพิ่มความแม่นยำทางตำแหน่ง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้จริง เช่น อุตสาหกรรมด้านการสำรวจและรังวัด หรืออุตสาหกรรมเกษตรกรรม ความแม่นยำสูง ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบสถานีอ้างอิงและอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover (หรือ Rover) ขึ้น โดยใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS ชนิด 2 ความถี่รุ่น UBX-F9P เป็นหลัก สำหรับการออกแบบฮาร์ดแวร์ของทั้งสองอุปกรณ์นี้ จะเน้นไปที่ความสามารถในการทำงานกลางแจ้ง มีช่องทางการเชื่อมต่อระหว่างกันผ่านเครือข่าย WIFI รวมทั้งเครือข่าย 3G/4G ได้ รวมทั้งสามารถแสดงตำแหน่งของอุปกรณ์ Rover ผ่านซอฟต์แวร์แสดงตำแหน่งบนพื้นโลกผ่านมือถือแอนดรอยด์ได้

ในการทดสอบความแม่นยำทางตำแหน่งของอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดสอบออกเป็นสองประเภท ได้แก่ การทดสอบแบบหยุดนิ่งกับที่ โดยที่ผู้วิจัยจะติดตั้งสถานีอ้างอิงเพื่อส่งค่าแก้ไขทางตำแหน่งไปยังอุปกรณ์ Rover ซึ่งอยู่นิ่งกับที่ จากนั้นจะนำพิกัดของ Rover ที่ได้ไปคำนวณหาการกระจายตัวเทียบกับตำแหน่งโดยเฉลี่ย สำหรับกรณีเคลื่อนที่ ผู้วิจัยจะกำหนดแนววิถีเส้นตรงและแนวการเคลื่อนที่แบบวงกลมขึ้น แล้วเคลื่อนที่ Rover ตามแนววิถีเหล่านั้นอย่างน้อย 3 รอบ สำหรับการวิเคราะห์ความแม่นยำของ Rover ขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง จะได้จากการวิเคราะห์ระยะห่างของ Rover ที่ตั้งฉากกับแนวเส้นตรง หรือระยะ XTE ในขณะที่การเคลื่อนที่แบบวงกลม สามารถวัดความแม่นยำได้จากความคลาดเคลื่อนรัศมีของ Rover เทียบกับรัศมีอ้างอิงตั้งระบุไว้ตามหัวข้อที่ 5.1.7 ขณะเดียวกัน จะมีการติดตามตำแหน่งของ Rover ผ่านซอฟต์แวร์แสดงตำแหน่งบนพื้นโลก SW Maps แบบเวลาจริงดังหัวข้อที่ 6.1 ด้วย โดยหลังจากใช้เทคนิค RTK จะสามารถระบุตำแหน่งของ Rover ขณะอยู่นิ่งกับที่โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 เซนติเมตรดังหัวข้อที่ 5.2.6.1 ในขณะที่การระบุตำแหน่งตามแนวเส้นตรงและแนววงกลม จะมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 24 เซนติเมตรดังหัวข้อที่ 5.2.6.2 และหัวข้อที่ 5.2.6.3 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานกลางแจ้งได้อย่างต่อเนื่องอย่างน้อย 5 ชั่วโมง รวมทั้งสามารถแสดงตำแหน่งของ Rover ผ่านแอปพลิเคชัน SW Maps ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์แสดงตำแหน่งบนพื้นโลกได้ดังหัวข้อที่ 6.2 อีกด้วย

จากผลการทดสอบการระบุตำแหน่งแบบอยู่นิ่งกับที่ ผู้วิจัยคาดว่าสามารถนำไปประยุกต์ในการอุตสาหกรรมการสำรวจและรังวัดได้ เนื่องจากใช้เวลาเพียง 18 วินาทีเพื่อให้พร้อมใช้งาน และมีความแม่นยำถึง 2 เซนติเมตร และสำหรับกรณีเคลื่อนที่ ผู้วิจัยคาดว่าสามารถนำไปประยุกต์กับการทำเกษตรกรรมความแม่นยำสูง เช่น การควบคุมการจราจรของรถจักรกลเกษตรบนพื้นที่เพาะปลูกขนาดใหญ่ ที่ต้องอาศัยการระบุตำแหน่งรถที่แม่นยำสูง เป็นต้น

ข

Abstract

Development of the GNSS receiver with centimeter accuracy for industry

Asst. Prof. Krit Wongrujira

December 2021

This project is the development of a centimeter-accurate GNSS satellite positioning device for the industry. Our goals aim to study and develop RTK (Real-Time Kinematic) dual-frequency GNSS satellite positioning equipment to reach a centimeter-level positioning accuracy. Then we can be applied at the actual industrial level, such as the surveying industry or high precision agriculture industry. Firstly, we have designed the Rover (or Rover) and reference station hardware which is based on the UBX-F9P dual-frequency GNSS receiver to focus on the ability to use in outdoors positioning.

This equipment provides an interconnection via WIFI and 3G/4G network. The rover can receive the correction from the reference station to calculate a precise position then display it via Android mobile software. To verify the positioning accuracy of the developed equipment, we propose two situations of the experiments. The first situation is stationary positioning, the reference station will be installed to transmit the position correction to the stationary Rover. Then the coordinates of the Rover are accumulated to calculate the distribution relative to the average position. The second situation is a moving rover positioning, we will determine the straight and the circular motion with the specified radius. Then move the Rover along those trajectories at least 3 times to accumulate rover position. Next, we can analyze the perpendicular distance between Rover and the straight line, or XTE distance. While in a circular motion, the positioning accuracy can be measured from the difference radius between Rover and the specified radius as shown in section 5.1.7. Moreover, the rover's position will also be tracked through the real-time SW Maps global positioning software described in section 6.1. As a result, the positioning accuracy of the rover in a stationary situation has a discrepancy lower than 2 centimeters as shown in section 5.2.6.1. In the case of straight-line and a circular movement, there are errors lower than 24 cm centimeters as shown in section 5.2.6.2 and section 5.2.6.3, respectively. In addition, it can be

operated outdoors for at least 5 hours continuously, and the rover's position can be displayed via the SW Maps application as shown in section 6.2 as well.

From these results, we can conclude our product can be applied in the surveying industry because it only takes 1.8 seconds to be ready to use with 2 centimeters-level accuracy. In a moving situation, we expect that it can be applied to high-precision agriculture such as traffic control of agricultural machinery on large plantations which requires highly accurate car positioning for plowing guidance, etc.

สารบัญ

บทสรุปผู้บริหาร	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เทคนิคการระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS	4
2.2 การระบุตำแหน่งด้วยเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ (Real-Time Kinematic หรือ RTK)	11
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	15
3.1 การสำรวจอุปกรณ์รังวัดที่วางจำหน่ายในปัจจุบัน	15
3.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอุปกรณ์ประจำโครงการเทียบกับอุปกรณ์ในระดับอุตสาหกรรม	16
3.2.1 ข้อกำหนดด้านความแม่นยำทางตำแหน่ง	17
3.2.2 ข้อกำหนดด้านอุณหภูมิใช้งาน	18
3.2.3 ข้อกำหนดด้านความสามารถในการสื่อสารข้อมูล	18
3.3 การออกแบบชุดอุปกรณ์สถานีอ้างอิง	19
3.3.1 การพัฒนาฮาร์ดแวร์ของสถานีอ้างอิง	19
3.3.2 การพัฒนาซอฟต์แวร์ของสถานีอ้างอิง	20
3.3.3 ชุดอุปกรณ์สถานีอ้างอิงที่เป็นทรัพย์สินทางปัญญา	21
3.4 การออกแบบอุปกรณ์สถานีจร	25
3.4.1 การพัฒนาฮาร์ดแวร์ Rover	25
3.4.2 การพัฒนาซอฟต์แวร์ของอุปกรณ์ Rover	27
3.4.3 ชุดอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover ที่เป็นทรัพย์สินทางปัญญา	28
3.5 การพัฒนาคลาวด์สำหรับการสื่อสารระหว่างสถานีอ้างอิงกับ Rover ผ่านเครือข่าย 3G/4G	30
3.6 การออกแบบระบบสื่อสารผ่านเครือข่าย WIFI และเครือข่าย 3G/4G	31
3.6.1 การออกแบบระบบการสื่อสารผ่านเครือข่าย WIFI [1]	31
3.6.2 การออกแบบระบบการสื่อสารผ่านเครือข่าย 3G/4G	32
	จ

3.7	การออกแบบซอฟต์แวร์แสดงตำแหน่งบนพื้นโลก	32
บทที่ 4 การออกแบบการทดสอบและผลการทดสอบอุปกรณ์สถานีอ้างอิง		34
4.1	การออกแบบการทดสอบอุปกรณ์สถานีอ้างอิงที่สอดคล้องกับตัวชี้วัด	34
4.1.1	การทดสอบสายอากาศและเครื่องรับสัญญาณ GNSS ชนิดสองความถี่	34
4.1.2	การทดสอบวงจรถ่ายส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย 3G/4G	35
4.1.3	การทดสอบวงจรถ่ายส่งสัญญาณนาฬิกาประเภท Real Time Clock (RTC)	35
4.1.4	การทดสอบแบตเตอรี่ของอุปกรณ์	35
4.1.5	การทดสอบหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) และหน่วยจัดเก็บข้อมูล (RAM)	36
4.1.6	การทดสอบซอฟต์แวร์ประมวลผลข้อมูล RTK สำหรับอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover	36
4.1.7	การวิเคราะห์ความแม่นยำทางตำแหน่ง	40
4.2	ผลการทดสอบอุปกรณ์สถานีอ้างอิงที่สอดคล้องกับตัวชี้วัด	46
4.2.1	ผลการทดสอบสายอากาศและเครื่องรับสัญญาณ GNSS ชนิดสองความถี่	46
4.2.2	ผลการทดสอบวงจรถ่ายส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย 3G/4G	46
4.2.3	ผลการทดสอบวงจรถ่ายส่งสัญญาณนาฬิกาประเภท Real-Time Clock (RTC)	47
4.2.4	ผลการทดสอบแบตเตอรี่ของอุปกรณ์สถานีอ้างอิง	48
4.2.5	ผลการทดสอบหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) และหน่วยจัดเก็บข้อมูล (RAM)	49
4.2.6	ผลการทดสอบซอฟต์แวร์ประมวลผลข้อมูล RTK สำหรับอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover	49
บทที่ 5 การออกแบบการทดสอบและผลการทดสอบอุปกรณ์ Rover		59
5.1	การออกแบบการทดสอบอุปกรณ์ Rover ที่สอดคล้องกับตัวชี้วัด	59
5.1.1	การทดสอบสายอากาศและเครื่องรับสัญญาณ GNSS ชนิดสองความถี่	59
5.1.2	การทดสอบวงจรถ่ายส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย 3G/4G และเครือข่าย WIFI	60
5.1.3	การทดสอบวงจรถ่ายส่งสัญญาณนาฬิกาประเภท Real Time Clock (RTC)	60
5.1.4	การทดสอบแบตเตอรี่ของอุปกรณ์	61
5.1.5	การทดสอบหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) และหน่วยจัดเก็บข้อมูล (RAM)	61
5.1.6	การทดสอบซอฟต์แวร์ประมวลผลข้อมูล RTK สำหรับอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover	61
5.1.7	การวิเคราะห์ความแม่นยำทางตำแหน่ง	65
5.2	ผลการทดสอบอุปกรณ์ Rover	66
5.2.1	ผลการทดสอบสายอากาศและเครื่องรับสัญญาณ GNSS ชนิดสองความถี่	66
5.2.2	ผลการทดสอบวงจรถ่ายส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย 3G/4G และ WIFI	67
5.2.3	ผลการทดสอบวงจรถ่ายส่งสัญญาณนาฬิกาประเภท Real-Time Clock (RTC)	68
5.2.4	ผลการทดสอบแบตเตอรี่ของอุปกรณ์ Rover	68
5.2.5	ผลการทดสอบหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) และหน่วยจัดเก็บข้อมูล (RAM)	69
5.2.6	ผลการทดสอบซอฟต์แวร์ประมวลผลข้อมูล RTK สำหรับอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover	69

บทที่ 6 การออกแบบการทดสอบและผลการทดสอบซอฟต์แวร์แสดงตำแหน่งบนพื้นโลก	74
6.1 การออกแบบการทดสอบซอฟต์แวร์แสดงตำแหน่งบนพื้นโลกที่สอดคล้องกับตัวชี้วัด	74
6.2 ผลการทดสอบซอฟต์แวร์แสดงตำแหน่งบนพื้นโลกที่สอดคล้องกับตัวชี้วัด	75
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	78
7.1 การทดสอบอุปกรณ์สถานีอ้างอิง	78
7.1.1 การทดสอบสายอากาศและเครื่องรับสัญญาณ GNSS ชนิดสองความถี่	78
7.1.2 การทดสอบวงจรสื่อสารข้อมูลผ่านเครือข่าย 3G/4G	78
7.1.3 การทดสอบวงจรสัญญาณนาฬิกาประเภท Real Time Clock (RTC)	78
7.1.4 การทดสอบแบตเตอรี่ของอุปกรณ์	78
7.1.5 การทดสอบหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) และหน่วยจัดเก็บข้อมูล (RAM)	78
7.1.6 การทดสอบซอฟต์แวร์ประมวลผลข้อมูล RTK สำหรับอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover	79
7.2 การทดสอบอุปกรณ์อุปกรณ์ Rover	79
7.2.1 การทดสอบสายอากาศและเครื่องรับสัญญาณ GNSS ชนิดสองความถี่	79
7.2.2 การทดสอบวงจรสื่อสารข้อมูลผ่านเครือข่าย 3G/4G และ WIFI	79
7.2.3 การทดสอบวงจรสัญญาณนาฬิกาประเภท Real Time Clock (RTC)	80
7.2.4 การทดสอบแบตเตอรี่ของอุปกรณ์	80
7.2.5 การทดสอบหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) และหน่วยจัดเก็บข้อมูล (RAM)	80
7.2.6 การทดสอบซอฟต์แวร์ประมวลผลข้อมูล RTK สำหรับอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover	80
7.3 การทดสอบซอฟต์แวร์แสดงตำแหน่งบนพื้นโลก	81
บรรณานุกรม	82
ภาคผนวก ก การประเมินผลกระทบทางเศรษฐกิจ	83
ภาคผนวก ข ข้อเสนอแนะแนวทางการนำชุดอุปกรณ์สถานีอ้างอิงและชุดอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover ไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม	85
ภาคผนวก ค บทความสำหรับลงวารสาร กสทช. หมายเลขทูน A63-1-(2)-004	87
ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย	100
ประวัตินักวิจัยร่วม	101

สารบัญตาราง

ชื่อตาราง	หน้าที่
ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์จากสมการที่ (2.1)	4
ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์จากสมการที่ (2.2)	5
ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์จากสมการที่ (2.3) และสมการที่ (2.4)	6
ตารางที่ 2.4 พารามิเตอร์จากสมการที่ (2.5)	7
ตารางที่ 2.5 ประเภทการคำนวณและส่งค่าแก่สำหรับการระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK	13
ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างของอุปกรณ์รับวัดที่วางขายอยู่ในปัจจุบัน	15
ตารางที่ 3.2 ฟังก์ชันการใช้งานของอุปกรณ์ระบุตำแหน่งฯ ระดับอุตสาหกรรมเทียบกับอุปกรณ์ฯ ประจำ โครงการ	18
ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบด้านฮาร์ดแวร์ของสถานีอ้างอิง	19
ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบด้านฮาร์ดแวร์ของ Rover	26
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์และค่าที่ใช้ในโปรแกรม RTKNAVI	38
ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งอ้างอิงในการทดสอบการระบุตำแหน่งแบบหยุดนิ่ง	42
ตารางที่ 4.3 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางวงกลมและรัศมีอ้างอิง	43
ตารางที่ 4.4 ตำแหน่งต้นทางและปลายทางของการทดสอบการความแม่นยำทางตำแหน่งเมื่อเคลื่อนที่แบบ เส้นตรง	45
ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK	49
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ระยะ Haversine จาก Rover ถึงจุดอ้างอิง กรณีอยู่นิ่งกับที่	54
ตารางที่ 4.7 ความคลาดเคลื่อนทางรัศมีของ Rover ที่เคลื่อนที่แบบวงกลม	56
ตารางที่ 4.8 ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของ Rover เทียบกับเส้นทาง	58
ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์และค่าที่ใช้ในโปรแกรม RTKRVCV	63
ตารางที่ 5.2 ตำแหน่งอ้างอิงในการทดสอบการระบุตำแหน่งแบบหยุดนิ่ง	65
ตารางที่ 5.3 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางวงกลมและรัศมีอ้างอิง	65
ตารางที่ 5.4 ตำแหน่งต้นทางและปลายทางของการทดสอบการความแม่นยำทางตำแหน่งเมื่อเคลื่อนที่แบบ เส้นตรง	66
ตารางที่ 5.5 ประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งอุปกรณ์ฯ Rover ด้วยเทคนิค RTK	69
ตารางที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์ระยะ Haversine จาก Rover ถึงจุดอ้างอิง กรณีอยู่นิ่งกับที่	72
ตารางที่ 5.7 ความคลาดเคลื่อนทางรัศมีของ Rover ที่เคลื่อนที่แบบวงกลม	72
ตารางที่ 5.8 ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของ Rover เทียบกับเส้นทาง	73

ช

สารบัญภาพ

ชื่อภาพ	หน้าที่
รูปที่ 1.1 การระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS กับเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ (RTK)	2
รูปที่ 2.1 สาเหตุความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งด้วย GNSS	5
รูปที่ 2.2 หลักการระบุตำแหน่งโดยใช้ดาวเทียม GNSS	7
รูปที่ 2.3 การระบุตำแหน่ง User ด้วยเทคนิค RTK	11
รูปที่ 2.4 การคำนวณและส่งค่าแก้ด้วยเทคนิค FKP [6]	12
รูปที่ 2.5 การคำนวณและส่งค่าแก้ด้วยเทคนิค MAC [6]	12
รูปที่ 2.6 การคำนวณและส่งค่าแก้ด้วยเทคนิค VRS [7]	13
รูปที่ 3.1 มาตรฐานความแม่นยำทางตำแหน่งที่จำแนกตามประเภทการใช้งาน [9]	17
รูปที่ 3.2 การพัฒนาด้านฮาร์ดแวร์สำหรับสถานีอ้างอิง	19
รูปที่ 3.3 แนวทางการพัฒนาซอฟต์แวร์ของสถานีอ้างอิง	21
รูปที่ 3.4 บอร์ดประมวลผลแบบ SBC สำหรับสถานีอ้างอิงที่ออกแบบขึ้น	22
รูปที่ 3.5 ลักษณะ PCB ของบอร์ดประมวลผลแบบ SBC ของสถานีอ้างอิง	22
รูปที่ 3.6 บอร์ดเครื่องรับสัญญาณ GNSS รุ่น UBX-F9P ที่ออกแบบขึ้น	23
รูปที่ 3.7 ลักษณะของ PCB ชิพประมวลผล UBX-F9P	23
รูปที่ 3.8 ภาพรวมของสถานีอ้างอิงประจำโครงการฯ (ในการทดสอบจะใช้ชื่อย่อว่า ANDA)	24
รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ภายในสถานีอ้างอิงประจำโครงการ (ซ้าย) ก่อนสวมบอร์ด UBX-F9P (ขวา) หลังสวมบอร์ด UBX-F9P	24
รูปที่ 3.10 การพัฒนาด้านฮาร์ดแวร์สำหรับ Rover	26
รูปที่ 3.11 แนวทางการพัฒนาซอฟต์แวร์ของ Rover	27
รูปที่ 3.12 ลักษณะของ PCB อุปกรณ์ Rover ที่ออกแบบใหม่	28
รูปที่ 3.13 องค์ประกอบของอุปกรณ์ Rover รุ่นล่าสุด	28
รูปที่ 3.14 บรรจุภัณฑ์ของอุปกรณ์ Rover	29
รูปที่ 3.15 อุปกรณ์รับสัญญาณ Rover	29
รูปที่ 3.16 การเชื่อมต่อแบบ VPN (Virtual Private Network)	30
รูปที่ 3.17 การทำงานของ NTRIP Caster [11]	31
รูปที่ 3.18 การออกแบบการเชื่อมต่อผ่านเครือข่าย WIFI	32
รูปที่ 3.19 การออกแบบการเชื่อมต่อผ่านเครือข่าย 3G/4G	32
รูปที่ 3.20 แนวทางการแสดงตำแหน่งบนพื้นโลกของ Rover ผ่านแอปพลิเคชัน SW Maps	33
รูปที่ 3.21 อุปกรณ์แสดงผลตำแหน่งบนพื้นโลก (ซอฟต์แวร์)	33

ณ

รูปที่ 4.1	สถานีอ้างอิงที่เชื่อมต่อกับสายอากาศ GPS-500WB แล้ว	34
รูปที่ 4.2	การทดสอบแบตเตอรี่กับสถานีอ้างอิงประจำโครงการฯ	36
รูปที่ 4.3	การเชื่อมต่อระหว่าง Rover กับสถานีอ้างอิง	37
รูปที่ 4.4	การติดตั้งสถานีอ้างอิงประจำโครงการ (ซ้าย) การต่ออุปกรณ์ (ขวา) การติดตั้งกลางแจ้ง	38
รูปที่ 4.5	การติดตั้ง Rover เพื่อทดสอบ	38
รูปที่ 4.6	การระบุตำแหน่งอุปกรณ์กรณีหยุดนิ่งกับที่	39
รูปที่ 4.7	การระบุตำแหน่งอุปกรณ์กรณีเคลื่อนที่	40
รูปที่ 4.8	ลักษณะตำแหน่งจากการทดสอบกรณีหยุดนิ่งกับที่	41
รูปที่ 4.9	ลักษณะตำแหน่งจากการทดสอบกรณีเคลื่อนที่แบบวงกลม	42
รูปที่ 4.10	ลักษณะตำแหน่งจากการทดสอบกรณีเคลื่อนที่แบบเส้นตรง	44
รูปที่ 4.11	การทดสอบรับข้อมูลจากบอร์ด UBX-F9P	46
รูปที่ 4.12	ผลการสถาปนาอินเทอร์เน็ตเฟส PPP0	46
รูปที่ 4.13	ผลการตรวจสอบอินเทอร์เน็ตเฟส PPP0 ของสถานีอ้างอิง	47
รูปที่ 4.14	ผลการเชื่อมต่อกับเว็บไซต์ Google	47
รูปที่ 4.15	ผลการตรวจสอบเวลาของวงจร RTC เทียบกับกรมอุทกศาสตร์ฯ	48
รูปที่ 4.16	กระแสนะใช้งานเต็มทีของสถานีอ้างอิง	48
รูปที่ 4.17	การทดสอบ CPU และ RAM ของสถานีอ้างอิง	49
รูปที่ 4.18	จำนวนดาวเทียมที่สถานีอ้างอิงกรมผังเมืองรับได้ในแต่ละเวลา	50
รูปที่ 4.19	สัญญาณพหุวิถีบริเวณสถานีอ้างอิงกรมผังเมือง	50
รูปที่ 4.20	จำนวนดาวเทียมที่สถานีอ้างอิงกรมที่ดินรับได้ในแต่ละเวลา	51
รูปที่ 4.21	สัญญาณพหุวิถีบริเวณสถานีอ้างอิงกรมที่ดิน	51
รูปที่ 4.22	จำนวนดาวเทียมที่สถานีอ้างอิงประจำโครงการฯ รับได้ในแต่ละเวลา	52
รูปที่ 4.23	ตำแหน่งของสถานีอ้างอิงประจำโครงการฯ (จุดสีเขียว)	52
รูปที่ 4.24	สัญญาณพหุวิถีบริเวณสถานีอ้างอิงประจำโครงการ	53
รูปที่ 4.25	ตำแหน่งของ Rover ของการทดสอบแบบหยุดนิ่งกับที่	53
รูปที่ 4.26	ระยะห่างแบบ Haversine จาก Rover ถึงจุดอ้างอิง	54
รูปที่ 4.27	ตำแหน่งของ Rover ของการทดสอบแบบเคลื่อนที่เป็นวงกลม	55
รูปที่ 4.28	จำนวนดาวเทียมที่ Rover และสถานีอ้างอิงใช้ร่วมกัน (สีน้ำเงิน) DPT9 (สีเหลือง) ANDA	55
รูปที่ 4.29	ความคลาดเคลื่อนรัศมีวงกลมของ Rover (ซ้าย) ภาพรวม (ขวา) กรณีที่ใช้สถานีฯ DPT9	56
รูปที่ 4.30	ตำแหน่งของ Rover ของการทดสอบแบบเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง	57
รูปที่ 4.31	ระยะตัดขวางของตำแหน่ง Rover ถึงเส้นทาง	57
รูปที่ 5.1	อุปกรณ์ฯ Rover ที่เชื่อมต่อกับสายอากาศ BT-147 แล้ว	59

รูปที่ 5.2 การทดสอบแบตเตอรี่กับอุปกรณ์ฯ Rover ประจำโครงการฯ	61
รูปที่ 5.3 การเชื่อมต่อระหว่างสถานีอ้างอิงกับอุปกรณ์ฯ Rover	62
รูปที่ 5.4 การติดตั้งสถานีอ้างอิง ANDA สำหรับทดสอบ	62
รูปที่ 5.5 การระบุตำแหน่งอุปกรณ์กรณีหยุดนิ่งกับที่	63
รูปที่ 5.6 การระบุตำแหน่งอุปกรณ์กรณีเคลื่อนที่	64
รูปที่ 5.7 การทดสอบรับข้อมูลจากอุปกรณ์ฯ Rover	66
รูปที่ 5.8 ผลการเชื่อมต่อเครือข่าย 4G (LTE)	67
รูปที่ 5.9 ผลการเชื่อมต่อกับเครือข่าย WIFI	67
รูปที่ 5.10 ผลการตรวจสอบเวลาของอุปกรณ์ฯ Rover	68
รูปที่ 5.11 อุปกรณ์ฯ Rover สามารถอัปโหลดโปรแกรมได้สำเร็จ	69
รูปที่ 5.12 จำนวนดาวเทียมที่สถานีอ้างอิง ANDA รับผิดชอบในแต่ละเวลา	70
รูปที่ 5.13 ตำแหน่งของ Rover ของการทดสอบแบบหยุดนิ่งกับที่	71
รูปที่ 5.14 ระยะห่างจาก Rover ถึงจุดอ้างอิงตามแนว (บน) ทิศตะวันออก (ล่าง) ทิศเหนือ	71
รูปที่ 5.15 ตำแหน่งของ Rover ของการทดสอบแบบเคลื่อนที่เป็นวงกลม	72
รูปที่ 5.16 ตำแหน่งของ Rover ของการทดสอบแบบเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง	73
รูปที่ 6.1 ซอฟต์แวร์ SW Maps [1]	74
รูปที่ 6.2 กติ “Bluetooth GNSS” เพื่อดูอุปกรณ์ Bluetooth ที่มีมือถือเชื่อมต่อได้	75
รูปที่ 6.3 กติอุปกรณ์ Bluetooth ของอุปกรณ์ฯ Rover แล้วกด Connect เพื่อเชื่อมต่อ	76
รูปที่ 6.4 สถานะการระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ฯ Rover	76
รูปที่ 6.5 ลักษณะของ Sky Plot จากข้อมูล NMEA ของอุปกรณ์ฯ Rover	77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการวิจัย

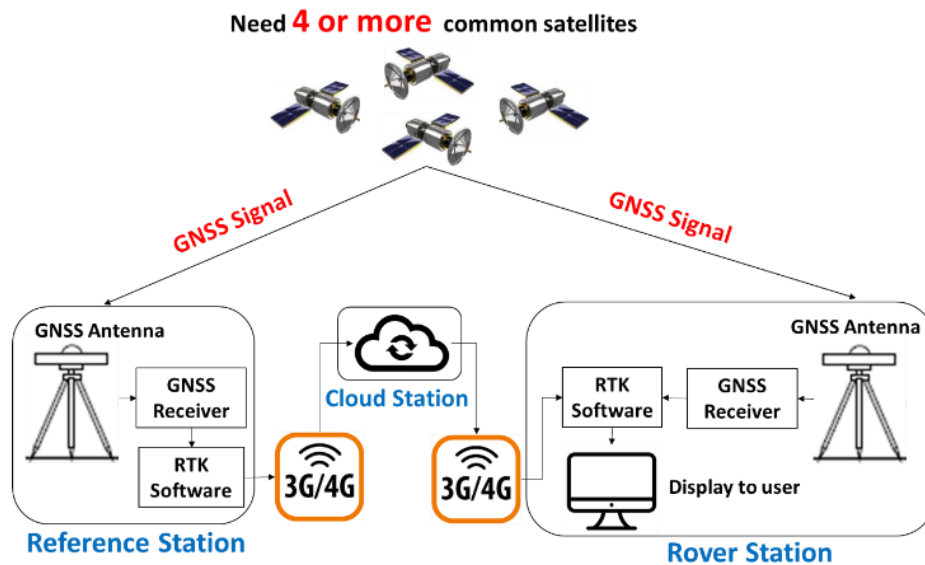
อุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ที่ใช้งานกันโดยทั่วไป จะมีค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งในแนบราบประมาณ 3 เมตร (rms) และในแนวตั้งประมาณ 5 เมตร (rms) ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ จำนวนดาวเทียมที่รับสัญญาณได้ การกระจายตัวของดาวเทียมในท้องฟ้า การรบกวนของปรากฏการณ์สัญญาณพหุวิถี การหน่วงสัญญาณในชั้นไอโอโนสเฟียร์และโทรโปสเฟียร์ รวมทั้งประสิทธิภาพในการลดสัญญาณรบกวนของเครื่องรับ เป็นต้น วิธีการหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งคือการใช้เทคนิค Real-Time Kinematic หรือ RTK ที่มีความสามารถในการหน่วงสัญญาณในชั้นไอโอโนสเฟียร์และโทรโปสเฟียร์ ทำให้ตำแหน่งที่ได้มีความแม่นยำอยู่ในระดับเซนติเมตรได้ โดยเทคนิคดังกล่าวจะต้องใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS อย่างน้อย 2 เครื่อง โดยมี 1 เครื่องที่ติดตั้งอยู่กับที่สำหรับเป็นสถานีอ้างอิงเพื่อส่งค่าแก้ไขทางตำแหน่งให้กับเครื่องรับฯ อื่นๆ ที่ต้องการระบุตำแหน่งด้วยความแม่นยำสูงถึงระดับเซนติเมตร ในกรณีที่ใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS ชนิด 1 ความถี่กับเทคนิคดังกล่าว จะต้องมีการจัดตั้งสถานีอ้างอิงไม่เกิน 20 กิโลเมตร แต่ในปัจจุบันมีความก้าวหน้าในการผลิตเครื่องรับสัญญาณ GNSS ชนิด 2 ความถี่มากขึ้น ทำให้มีราคาถูกลง ซึ่งเครื่องรับฯ ประเภทดังกล่าวมีประสิทธิภาพด้านความแม่นยำทางตำแหน่งที่สูงกว่ารวมทั้งสามารถขยายระยะจัดตั้งสถานีอ้างอิงได้ถึง 20 กิโลเมตรถึง 60 กิโลเมตรโดยประมาณ

ดังนั้นในโครงการ “การพัฒนาอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ที่มีความแม่นยำระดับเซนติเมตรสำหรับอุตสาหกรรม” จึงมุ่งหวังที่จะพัฒนาชุดอุปกรณ์นำร่องความแม่นยำสูงที่มีรัศมีการใช้งานที่กว้างขึ้น มีความสะดวกในการติดตั้งและทนทาน ประกอบไปด้วยสถานีอ้างอิงและ Rover ที่ใช้เครื่องรับฯ ชนิด 2 ความถี่เป็นหลัก พร้อมกับพัฒนาสถานีคลาวด์สำหรับสร้างช่องทางการเชื่อมต่อเสมือนส่วนตัวระหว่างสถานีอ้างอิงกับ Rover ที่สร้างขึ้นเอง จากนั้นจะพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับแสดงตำแหน่ง Rover บนพื้นโลกให้แก่ผู้ใช้งานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ร่วมกับเทคนิค RTK ที่มีความแม่นยำระดับเซนติเมตร
- 2) เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ระดับอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของโครงการ



รูปที่ 1.1 การระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS กับเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ (RTK)

จากรูปที่ 1.1 ในโครงการนี้ จะเน้นการพัฒนาอุปกรณ์ระบุตำแหน่งความแม่นยำสูงที่ใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS ชนิด 2 ความถี่ (ย่านความถี่ L1 ที่ 1575.42 MHz และย่านความถี่ L2 ที่ 1227.60 MHz) โดยชุดเครื่องรับฯ ที่ใช้เป็นสถานีอ้างอิง (Reference Station) ซึ่งตั้งอยู่ร่วมกับรวมทั้งทราบตำแหน่งที่แม่นยำอยู่แล้ว จะมีหน้าที่รับสัญญาณจากดาวเทียม GNSS ผ่านสายอากาศ GNSS (GNSS Antenna) เพื่อคำนวณค่าแก้ไขที่เกี่ยวข้องกับการระบุตำแหน่งบนซอฟต์แวร์สำหรับการรังวัดแบบจลน์ (RTK Software) แล้วส่งผ่านเครือข่าย 3G/4G ไปยังสถานีคลาวด์ (Cloud Station) เพื่อส่งต่อค่าแก้ไขฯ ให้กับผู้ใช้งาน (สถานีจร หรือ Rover Station)

ในส่วนของสถานีคลาวด์มีหน้าที่สร้างการเชื่อมต่อเครือข่ายส่วนตัวแบบเสมือน (Virtual Private Network หรือ VPN) เพื่อควบคุมการเข้าถึงและนำส่งค่าแก้ไขฯ จากสถานีอ้างอิงที่อยู่ใกล้ที่สุดให้แก่ผู้ใช้งาน การเชื่อมต่อในลักษณะนี้สามารถขยายการเข้าถึงค่าแก้ไขฯ จากสถานีอ้างอิงเดียวให้แก่ผู้ใช้งานที่อยู่ในรัศมีการใช้งานได้เป็นจำนวนมาก ซึ่งมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการระบุตำแหน่งความแม่นยำสูงระดับอุตสาหกรรมเป็นอย่างยิ่ง

ในฝั่งของผู้ใช้งาน (Rover Station หรือ Rover) จะติดตั้งเครื่องรับสัญญาณ GNSS ประเภทเดียวกับสถานีอ้างอิง จากนั้นจะรับสัญญาณจากกลุ่มดาวเทียม GNSS เดียวกันกับสถานีอ้างอิงอย่างน้อย 4 ดวง พร้อมกับนำค่าแก้ไขฯ จากสถานีอ้างอิงไปคำนวณตำแหน่งที่แม่นยำบนซอฟต์แวร์การรังวัดแบบจลน์ ส่งผลให้ตำแหน่งของผู้ใช้งานมีความแม่นยำในระดับเซนติเมตร โดยมีเงื่อนไขที่สำคัญ

คือ เครือข่ายการสื่อสารระหว่างทั้ง 2 สถานีจะต้องมีความเสถียร รวมทั้งระยะขจัดของทั้งสอง โดยประมาณควรอยู่ในช่วง 20 กิโลเมตรถึง 60 กิโลเมตร เพื่อให้ค่าแก้ไข จากสถานีอ้างอิงสามารถชดเชยความผิดพลาดทางตำแหน่งให้กับผู้ใช้งานได้อย่างเพียงพอด้วย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผู้วิจัยคาดว่าประโยชน์ที่ได้จะจากโครงการวิจัยนี้ คือ อุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ที่ใช้เทคนิค RTK ระดับอุตสาหกรรม ที่ประเทศไทยสามารถพัฒนาขึ้นได้เอง ลดการพึ่งพาการนำเข้าอุปกรณ์จากต่างประเทศ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนของทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ระบุตำแหน่งความแม่นยำสูง จะประกอบไปด้วยเนื้อหา 2 ส่วน ดังนี้

2.1 เทคนิคการระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS

ระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS (GNSS: Global Navigation Satellite System หรือ GNSS) หลักการทำงานของเครื่องรับสัญญาณ GNSS จะทำการวัดระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับฯ จากการเดินทางของสัญญาณจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ โดยที่เครื่องรับจะทำการสร้างรหัสสัญญาณสุ่มเทียม (Pseudo Random Noise หรือ PRN) ที่มีรูปแบบเดียวกันกับสัญญาณจากดาวเทียม หลังจากนั้นระยะทางจากเครื่องรับถึงดาวเทียมจะสามารถหาได้จาก

$$\rho = c \times \Delta t \quad (2.1)$$

จากสมการที่ (2.1) สามารถอธิบายตัวแปรได้ดังข้างล่าง

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์จากสมการที่ (2.1)

พารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย/ค่าที่ใช้
ρ	ระยะทางเทียมจากเครื่องรับถึงดาวเทียมที่ได้จากการทำ อัตราสหสัมพันธ์ของ PRN	เมตร
c	ความเร็วแสงในสุญญากาศ	299,792,458 เมตร/ วินาที
Δt	ผลต่างเวลาที่รับสัญญาณกับเวลาในการส่งสัญญาณจาก ดาวเทียม	วินาที

ในการวัดระยะดังกล่าวอีกรูปแบบหนึ่งที่มีความแม่นยำสูงกว่าจะอาศัย “การวัดเฟสคลื่นพาห์” (carrier phase) ซึ่งจะสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบสมการที่ (2.2)

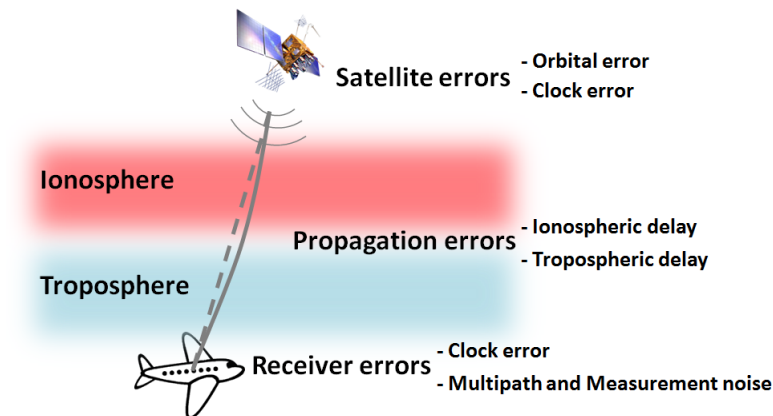
$$\phi = \frac{\lambda}{2\pi}(\theta + N) \quad (2.2)$$

จากสมการที่ (2.2) สามารถอธิบายตัวแปรได้ดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์จากสมการที่ (2.2)

พารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย/ค่าที่ใช้
ϕ	ระยะทางเทียมจากเครื่องรับถึงดาวเทียมที่วัดจากเฟสคลื่นพาห์	เมตร
λ	ค่าความยาวคลื่นของสัญญาณGNSSที่ใช้	เมตร
θ	ผลรวมการวัดผลต่างเฟสของคลื่นพาห์ของสัญญาณGNSS	เรเดียน
N	ค่าเฟสเริ่มต้นซึ่งไม่ทราบค่า (Initial phase ambiguity)	เรเดียน

อย่างไรก็ตามพบว่าการระบุตำแหน่งโดยเครื่องรับ GNSS นั้น ยังคงมีความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งอยู่ โดยสามารถจำแนกสาเหตุในการเกิดความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งได้ 3 สาเหตุหลักซึ่งแสดงดังนี้



รูปที่ 2.1 สาเหตุความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งด้วย GNSS

1). ค่าความผิดพลาดอันเนื่องมาจากดาวเทียม (Satellite Errors) ได้แก่ ความผิดพลาดในการคำนวณตำแหน่งของดาวเทียม (Orbital Error) และความคลาดเคลื่อนของสัญญาณนาฬิกาของดาวเทียม (Satellite Clock Error)

2). ค่าความผิดพลาดอันเนื่องมาจากสัญญาณเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศของโลก (Signal Propagation Errors) ได้แก่ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์ ตามลำดับ

3). ค่าความผิดพลาดอันเนื่องมาจากเครื่องรับGNSS (Receiver Errors) ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนของสัญญาณนาฬิกาของเครื่องรับ รวมไปถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดจากสัญญาณพหุวิถี (Multipaths) เป็นต้น

โดยจะสามารถเขียนสมการการวัดระยะทางเทียมได้ดังสมการที่ (2.3)

$$\rho_i^k = R^k + c(\Delta t - \Delta T^k) + I_i^k + T_i^k + \varepsilon_{\rho_i}^k \quad (2.3)$$

และสมการเฟสคลื่นพารวมกับผลของความผิดพลาดอื่นๆ ได้ดังสมการที่ (2.4)

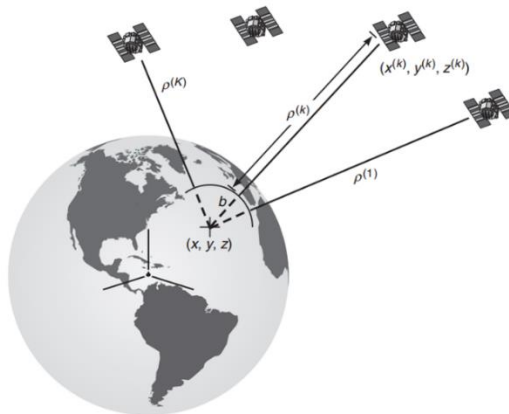
$$\phi_i^k = R^k + c(\Delta t - \Delta T^k) - I_i^k + T_i^k + \lambda_i N_i^k + \varepsilon_{\phi_i}^k \quad (2.4)$$

ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์จากสมการที่ (2.3) และสมการที่ (2.4)

พารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย/ค่าที่ใช้
ρ_i^k	ระยะทางเทียมที่ได้จากการทำอัตราสัมพันธ์ของ PRN ที่ความถี่ i จากดาวเทียมดวงที่ k	เมตร
ϕ_i^k	ระยะทางเทียมจากเครื่องรับถึงดาวเทียมที่วัดจากเฟสคลื่นพาร่วมด้วย ความถี่ i จากดาวเทียมดวงที่ k	เมตร
R^k	ระยะทางจริงจากดาวเทียม k ถึงเครื่องรับ	เมตร
ΔT^k	ความคลาดเคลื่อนของสัญญาณนาฬิกาดาวเทียม k	วินาที
I_i^k	ความผิดพลาดการส่งสัญญาณเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของดาวเทียม k	เมตร
T_i^k	ความผิดพลาดการส่งสัญญาณเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ของดาวเทียม k	เมตร
λ_i	ความยาวคลื่นของสัญญาณGNSSของความถี่ i	เมตร
N_i^k	เฟสเริ่มต้นซึ่งไม่ทราบค่าของความถี่ i จากดาวเทียมดวงที่ k	เรเดียน
$\varepsilon_{\rho_i}^k$	ความผิดพลาดการวัดระยะทางเทียมด้วยที่ได้จากการทำอัตราสัมพันธ์ของ PRN ความถี่ i จากดาวเทียมดวงที่ k	เมตร
$\varepsilon_{\phi_i}^k$	ความผิดพลาดการวัดระยะทางเทียมด้วยเฟสคลื่นพาร่วมของ	เมตร

	ความถี่ i จากดาวเทียมดวงที่ k
--	-----------------------------------

ในการคำนวณหาตำแหน่งของเครื่องรับ GNSS จะใช้หลักการสามเหลี่ยมระยะ (Trilateration) ซึ่งเป็นวิธีการระบุตำแหน่งจากจุดตัดของรูปทรงเรขาคณิต โดยจะต้องทราบตำแหน่งของดาวเทียมอ้างอิงอย่างน้อย 4 ดวง ซึ่งแทนด้วย $(x(k), y(k), z(k))$ และระยะทางจากจุดอ้างอิงเหล่านี้ถึงตำแหน่งที่ต้องการจะหาที่แทนด้วย (x, y, z) ดังข้างล่าง



รูปที่ 2.2 หลักการระบุตำแหน่งโดยใช้ดาวเทียม GNSS

สำหรับตำแหน่งดาวเทียมหาได้จากข้อมูล Ephemeris ที่ส่งมาใน Navigation Message (ตำแหน่งจะอ้างอิงอยู่ในรูปแบบ ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed)) [4] โดยจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าการวัดระยะทางเทียมที่วัดได้จากเครื่องรับและตำแหน่งของเครื่องรับ GNSS (เมื่อไม่ได้พิจารณาค่าความผิดพลาดอื่นๆ) ได้ดังสมการที่ (2.5)

$$\rho_c^{(k)} = \sqrt{(x^{(k)} - x)^2 + (y^{(k)} - y)^2 + (z^{(k)} - z)^2} + b \quad (2.5)$$

ตารางที่ 2.4 พารามิเตอร์จากสมการที่ (2.5)

พารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย/ค่าที่ใช้
$\rho_c^{(k)}$	ระยะทางเทียมที่วัดได้จากดาวเทียม GNSS (ดวงที่ $k = 1, 2, 3, \dots, N$) ถึงเครื่องรับ c	เมตร
$(x^{(k)}, y^{(k)}, z^{(k)})$	ตำแหน่งของดาวเทียมอ้างอิงในระบบ ECEF	เมตร
(x, y, z)	ตำแหน่งของเครื่องรับที่ต้องการทราบค่าในระบบ ECEF	เมตร

b	ไบอัสที่เกิดจากสัญญาณนาฬิกาที่เกิดจากเครื่องรับ	เมตร
-----	---	------

จากสมการที่ (2.5) นั้นจะมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าอยู่ทั้งหมด 4 ตัว ได้แก่ (x, y, z) และ b จึงต้องทราบระยะทางเทียมที่วัดจากดาวเทียม GNSS อย่างน้อย 4 ดวงขึ้นไป และแก้สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธี Newton-Raphson โดยจะทำการประมาณค่าสมการที่ (2.6) ให้เป็นสมการเชิงเส้นโดยใช้อนุกรม Taylor จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \rho_c^{(k)}(x_1, y_1, z_1, b_1) &= \rho_c^{(k)}(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y, z_0 + \Delta z, b_0 + \Delta b) \\ &\approx \rho_0^{(k)} - \frac{x^{(k)} - x_0}{\rho_0^{(k)}} \Delta x - \frac{y^{(k)} - y_0}{\rho_0^{(k)}} \Delta y - \frac{z^{(k)} - z_0}{\rho_0^{(k)}} \Delta z + \Delta b \end{aligned} \quad (2.6)$$

เมื่อแทนตำแหน่งเริ่มต้นที่เหมาะสมของตำแหน่ง (x_0, y_0, z_0) และไบอัสที่เกิดจากสัญญาณนาฬิกาของเครื่องรับ b_0 จะได้ว่า

$$\rho_0^{(k)} = \sqrt{(x^{(k)} - x_0)^2 + (y^{(k)} - y_0)^2 + (z^{(k)} - z_0)^2} + b_0 \quad (2.7)$$

ซึ่งในกรณีที่รับสัญญาณดาวเทียมได้มากกว่าหนึ่งดวงนั้นจะสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (2.8)

$$\delta \mathbf{p} = \begin{bmatrix} \rho_c^1 - \rho_0^1 \\ \rho_c^2 - \rho_0^2 \\ \vdots \\ \rho_c^k - \rho_0^k \end{bmatrix} = \mathbf{G} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta b \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

โดยที่เมทริกซ์ \mathbf{G} จะเท่ากับ

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -\frac{x^1 - x_0}{\rho_0^1} & -\frac{y^1 - y_0}{\rho_0^1} & -\frac{z^1 - z_0}{\rho_0^1} & 1 \\ -\frac{x^2 - x_0}{\rho_0^2} & -\frac{y^2 - y_0}{\rho_0^2} & -\frac{z^2 - z_0}{\rho_0^2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{x^k - x_0}{\rho_0^k} & -\frac{y^k - y_0}{\rho_0^k} & -\frac{z^k - z_0}{\rho_0^k} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

สำหรับในกรณีที่มีค่าวัดระยะทางเทียมที่วัดจากดาวเทียมมากกว่า 4 ดวงนั้น จะใช้การหาคำตอบแบบวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted Least Squares) ในการคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรจะได้ดังสมการที่ (2.10)

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta b \end{bmatrix} = (\mathbf{G}^T \mathbf{W} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W} \delta \mathbf{p} \quad (2.10)$$

เพื่อความง่ายจะนิยามให้

$$\mathbf{S} \equiv (\mathbf{G}^T \mathbf{W} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W} \quad (2.11)$$

โดยที่ S จะเรียกว่าเมทริกซ์ฉาย (Projection Matrix) เมื่อนำไปคูณกับระยะทางเทียมแล้วจะได้ตำแหน่งและไบอัสที่เกิดจากสัญญาณนาฬิกาของเครื่องรับ แต่เนื่องจากระยะทางเทียมที่วัดได้นั้นยังมีความผิดพลาดหลงเหลืออยู่ จึงจำเป็นต้องมีการถ่วงน้ำหนักค่าระยะทางเทียมที่วัดได้ด้วยเมทริกซ์ W โดยสมมติให้ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับดาวเทียมแต่ละดวงนั้นไม่มีความสัมพันธ์กัน (Uncorrelated) และมีลักษณะการกระจายตัวเป็นแบบปรกติ ซึ่งจะมีค่าดังสมการที่ (2.12)

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2^2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_k^2} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

โดยที่ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานนั้นจะขึ้นอยู่กับแบบจำลองของความผิดพลาด ซึ่งเรียกค่าความผิดพลาดในการวัดระยะทางเทียมว่า User range error (URE) ในกรณีสำหรับเครื่องรับ GNSS ชนิดหนึ่งความถี่ (L1) จะมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ URE ประมาณ 6 เมตร ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยสองอย่างได้แก่ ข้อมูลการวัดระยะทางเทียมและเมทริกซ์ S โดยที่ค่าของเมทริกซ์ S จะขึ้นอยู่กับจำนวนดาวเทียมและการวางตัวของดาวเทียมบนท้องฟ้า สำหรับความผิดพลาดในการประมาณตำแหน่งดาวเทียมจากข้อมูล Ephemeris จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 2 เมตร (rms) โดยที่ความผิดพลาดของการประมาณค่าตำแหน่งของเครื่องรับ GNSS นั้น จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลการวัดระยะทางเทียมเป็นส่วนใหญ่

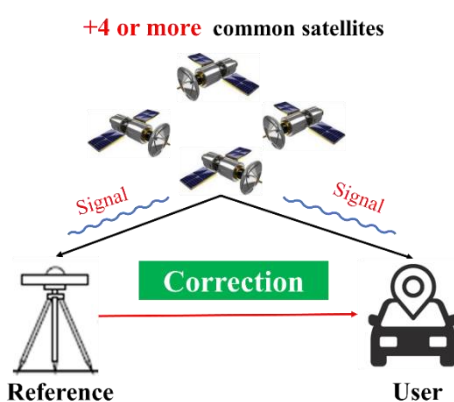
ในการประมาณหาตำแหน่งเครื่องรับฯ เป้าหมาย จะใช้ผลลัพธ์จากสมการที่ (2.12) และตำแหน่งเครื่องรับเริ่มต้น (x_0, y_0, z_0) จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

ในสมการที่ (2.13) ตำแหน่งของเครื่องรับเป้าหมายเริ่มต้น (x_0, y_0, z_0) จะมีการปรับแก้ด้วยพจน์ $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ ในแต่ละรอบการคำนวณ จากนั้นพจน์ (x, y, z) จากสมการดังกล่าวจะกลายเป็นตำแหน่งเริ่มต้นของการคำนวณในรอบถัดไป โดยจะมีการคำนวณซ้ำตามสมการดังกล่าวจนได้ตำแหน่งที่ลู่อู่เข้าสู่ตำแหน่งที่แท้จริงในที่สุด

2.2 การระบุตำแหน่งด้วยเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ (Real-Time Kinematic หรือ RTK)

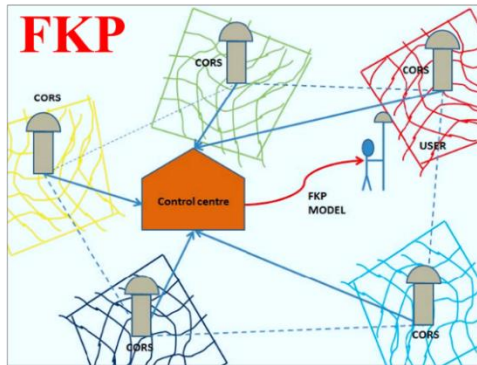
การระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK (Real-Time Kinematic) เป็นเทคนิคที่ใช้ระบุตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณ GNSS เป้าหมาย (User) โดยอาศัยข้อมูลหรือค่าแก้ไขจากโครงข่ายสถานีอ้างอิง (Reference) เพื่อลดผลกระทบจากความผิดพลาดสัญญาณนาฬิกา ความหน่วงสัญญาณในชั้นไอโอโนสเฟียร์และโทรโปสเฟียร์ ซึ่งจะช่วยให้คำนวณตำแหน่งของเครื่องรับฯ เป้าหมายที่แม่นยำได้อย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปจะมีความแม่นยำถึงระดับ 3 เซนติเมตร [5]



รูปที่ 2.3 การระบุตำแหน่ง User ด้วยเทคนิค RTK

จากรูปดังกล่าว ทั้งสถานีอ้างอิงและ User จะต้องรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ร่วมกันอย่างน้อย 4 ดวง โดย User จะเชื่อมต่อไปยังสถานีอ้างอิง หรือตัวโครงข่ายของสถานีอ้างอิงผ่านโครงข่ายไร้สาย จากนั้นจะรับข้อมูลค่าแก้ไขเพื่อขจัดความคลาดเคลื่อนทางสัญญาณนาฬิกา รวมทั้งความหน่วงสัญญาณจากชั้นไอโอโนสเฟียร์และโทรโปสเฟียร์ออกไป โดยทั่วไปแล้ว ระยะขจัดจากสถานีอ้างอิงถึง User จะอยู่ในช่วง 20 กิโลเมตรถึง 100 กิโลเมตร [5] เพื่อให้คุณลักษณะทางไอโอโนสเฟียร์และโทรโปสเฟียร์เหนือบริเวณสถานีอ้างอิงสามารถชดเชยความผิดพลาดทางสัญญาณให้กับ User ได้เต็มที่ จึงมีการพัฒนารูปแบบการคำนวณและส่งค่าแก้ไขที่เหมาะสมโดยอาศัยสถานีอ้างอิงมากกว่าหนึ่งสถานีดังต่อไปนี้

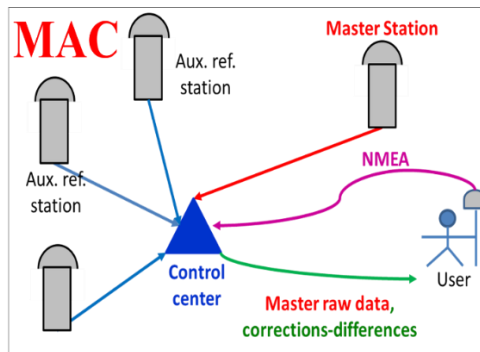
- 1) การคำนวณและส่งค่าแก้ไขด้วยเทคนิค Flächen Korrektur Parameter (FKP) [6]



รูปที่ 2.4 การคำนวณและส่งค่าแก้ด้วยเทคนิค FKP [6]

จากรูปที่ 2.4 เทคนิค FKP จะอาศัยข้อมูลการวัด (ระยะเทียมและเฟสคลื่นพาห์) จากสถานีอ้างอิงอ้างอิง (CORS) รอบ User เพื่อคำนวณชุดสัมประสิทธิ์ของค่าแก้ระยะเทียมจากผลกระทบของไอโอโนสเฟียร์ที่ศูนย์ควบคุม (Control Center) แล้วส่งไปยัง User เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่ง เนื่องจากค่าแก้ที่ส่งมีเฉพาะชุดของสัมประสิทธิ์ ทำให้ใช้ปริมาณช่องสัญญาณน้อย และมีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน โดยเทคนิคนี้จะนำไปสู่การพัฒนาเทคนิคการคำนวณและส่งค่าแก้แบบ MAC ดังข้อถัดไป

2) การคำนวณและส่งค่าแก้ด้วยเทคนิค Master Auxiliary Concept (MAC) [6]

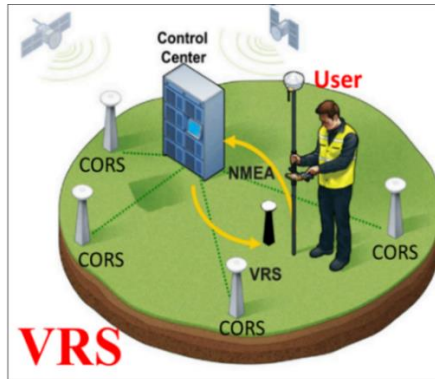


รูปที่ 2.5 การคำนวณและส่งค่าแก้ด้วยเทคนิค MAC [6]

จากรูปที่ 2.5 ศูนย์ควบคุมจะคำนวณหาชุดสัมประสิทธิ์ด้วยเทคนิค FKP จากสถานี CORS ในโครงข่าย (Aux. ref) พร้อมกับรับตำแหน่งโดยคร่าวของ User จากนั้นจะส่งชุดสัมประสิทธิ์รวมทั้งข้อมูลการวัดจากสถานี CORS ที่อยู่ใกล้ที่สุด (Master Station) กลับไปยัง User เพื่อลดผลกระทบของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในการคำนวณตำแหน่งที่แม่นยำต่อไป วิธีนี้จะใช้ช่องสัญญาณในปริมาณที่เยอะกว่าแบบ FKP เพื่อให้ User สามารถคำนวณและเลือกใช้ค่าแก้ที่เหมาะสมเองได้ ในขณะที่การใช้

เทคนิค VRS ศูนย์ควบคุมจะเป็นผู้เลือกค่าแก้ที่เหมาะสมให้กับ User เองซึ่งมีการทำงานดังหัวข้อถัดไป

3) การคำนวณและส่งค่าแก้ด้วยเทคนิค Virtual Reference Station (VRS) [7]



รูปที่ 2.6 การคำนวณและส่งค่าแก้ด้วยเทคนิค VRS [7]

จากรูปที่ 2.6 ศูนย์ควบคุมจะดึงข้อมูลการวัดจากแต่ละสถานี CORS รวมทั้งตำแหน่งโดยคร่าวของ User มาคำนวณหาความผิดพลาดระยะเทียบจากชั้นไอโอโนสเฟียร์และความผิดพลาดทางสัญญาณนาฬิกาดาวเทียมให้ได้ค่าแก้พร้อมกับสร้างตำแหน่งสถานีอ้างอิงแบบเสมือน (Virtual Reference Point) ที่เหมาะสมกับตำแหน่ง User มากที่สุด แล้วส่งกลับไปยัง User โดยเทคนิคนี้สามารถส่งค่าแก้ไปในรูปแบบของไฟล์ RTCM (Radio Technical Commission for Maritime) ซึ่งเป็นมาตรฐานกลางที่เครื่องรับสัญญาณ GNSS ส่วนใหญ่ใช้ร่วมกันได้

จากเทคนิคการคำนวณและส่งค่าแก้ที่กล่าวมานี้ สามารถเปรียบเทียบข้อเด่นและข้อด้อยได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ประเภทการคำนวณและส่งค่าแก้สำหรับการระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK

ประเภท	ทิศทางการเชื่อมต่อ	ข้อเด่น	ข้อด้อย
VRS	2 ทิศทาง	ศูนย์ควบคุมคำนวณค่าแก้ให้กับ User แล้ว ค่าแก้ที่ได้จากศูนย์ควบคุมมีการพิจารณาว่าเหมาะสมสุดกับตำแหน่งของ User แล้ว	หาก User เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา จะใช้เวลาในการลู่เข้าของตำแหน่งยาวนานขึ้น ใช้ช่องสัญญาณค่อนข้างมาก เนื่องจากสื่อสารแบบ 2 ทิศทาง

FKP	1 ทิศทาง	วิธีคำนวณค่าแก้มไม่ซับซ้อน ใช้ช่องสัญญาณในปริมาณน้อย สำหรับการส่งค่าแก้ม	รูปแบบของค่าแก้มอยู่ใน RTCM Type-59 ซึ่งในเครื่องรับบางรุ่น จะรับไม่ได้
MAC	1 หรือ 2 ทิศทาง	User สามารถคำนวณค่าแก้มที่ เหมาะสมกับตนเองได้โดยใช้ ข้อมูลจาก Master Station	อาจใช้ปริมาณช่องสัญญาณมาก

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

สำหรับขั้นตอนการวิจัย สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนสำคัญ ดังนี้

3.1 การสำรวจอุปกรณ์รังวัดที่วางจำหน่ายในปัจจุบัน

สำหรับอุปกรณ์รังวัดที่ผู้วิจัยสำรวจมาจะมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างของอุปกรณ์รังวัดที่วางขายอยู่ในปัจจุบัน

รูปประกอบ	คุณลักษณะ	ราคา
Emlid Reach RS+ [3] 	<ul style="list-style-type: none"> ● รับสัญญาณ GNSS ได้ 1 ความถี่ ● รองรับระบบดาวเทียม GPS/Beidou/Galileo/Glonass/QZSS/SBAS ● ช่วงเวลา TFF ประมาณ 1 – 2 นาที ● ความแม่นยำทางตำแหน่ง <ul style="list-style-type: none"> ○ แนวราบ 7 มิลลิเมตร ○ แนวตั้ง 1.4 เซนติเมตร ● ระยะใช้งาน ≤ 10 กิโลเมตร ● สื่อสารข้อมูลกับผู้ใช้ผ่านเครือข่ายไร้สายได้ 	799 USD
Trimble R8sv [6] 	<ul style="list-style-type: none"> ● รับสัญญาณ GNSS ได้ 3 ความถี่ ● รองรับระบบดาวเทียม GPS/Beidou/Galileo/Glonass/QZSS/SBAS ● ช่วงเวลา TFF ประมาณ 8 วินาที ● ความแม่นยำทางตำแหน่ง <ul style="list-style-type: none"> ○ แนวราบ 8 มิลลิเมตร ○ แนวตั้ง 1.5 เซนติเมตร ● ระยะใช้งาน ≤ 60 กิโลเมตร [7] 	10,200 USD

	<ul style="list-style-type: none"> • สื่อสารข้อมูลกับผู้ใช้ผ่านเครือข่ายไร้สายได้ 	
Novatel Propak6 [8] 	<ul style="list-style-type: none"> • รับสัญญาณ GNSS ได้ 3 ความถี่ • รองรับระบบดาวเทียม GPS/Beidou/Galileo/Glonass/QZSS/SBAS • ช่วงเวลา TFF ประมาณ 10 วินาที • ความแม่นยำทางตำแหน่ง <ul style="list-style-type: none"> ○ แนวราบ 1 มิลลิเมตร ○ แนวตั้ง 1 เซนติเมตร • ระยะใช้งาน ≤ 40 กิโลเมตร • สื่อสารข้อมูลกับผู้ใช้ผ่านเครือข่ายไร้สายได้ 	+ 10,495 USD

จากตารางที่ 3.1 พบว่าเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่สำรวจมามีราคาค่อนข้างสูง ซึ่งยังไม่รวมค่าบริการเสริมอื่นๆ อีก เช่น บริการค่าแก้ไขทางตำแหน่งของผู้จำหน่าย เป็นต้น โดยเครื่องรับฯ แต่ละรุ่นที่กล่าวนี้ มีระบบสื่อสารข้อมูลกับผู้ใช้งานผ่านเครือข่ายวิทยุและผ่านสายนำสัญญาณในตัวเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการใช้งานมากขึ้น โดยลักษณะที่เป็นมาตรฐานทางอุตสาหกรรมของอุปกรณ์ตามตารางดังกล่าวจะระบุเอาไว้ดังหัวข้อที่ 3.2

3.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอุปกรณ์ประจำโครงการเทียบกับอุปกรณ์ในระดับอุตสาหกรรม

เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอุปกรณ์ประจำโครงการ กับอุปกรณ์ระบุตำแหน่งความแม่นยำสูงสำหรับการทำรังวัดที่มีอยู่ในระดับอุตสาหกรรม ผู้วิจัยได้ศึกษามาตรฐานความแม่นยำทางตำแหน่งตามมาตรฐานขององค์กร EGSA (European GNSS Agency) แห่งสหภาพยุโรปที่รายละเอียดดังรูปที่ 3.1

Features	Surveying	Agriculture	GIS/Mapping
Number of channels	200-600	200-500	100-300
Observables	Code, code-smoothed phase and carrier phase		
Constellations	Multi-constellation		
Multipath rejection techniques	Usually yes	Usually yes	High-end models only
SBAS	Supported		
Receiver connectivity	Serial, USB, TCP/IP, Wi-Fi and Bluetooth ports, UHF and 3.5G radio modems, Serial Lemo, RTCM input/output	Wi-Fi, Bluetooth, 3.5G, NMEA, RTCM input, Serial Lemo/DB9	Wi-fi, Bluetooth, USB, 3.5G, NMEA, RTCM input
Multi-frequency	Yes	Usually yes	High-end models only
User interface	Hardware buttons, web interface, external controller	Hardware buttons, web interface, external controller	Hardware buttons, embedded virtual or physical keyboard
TTFB/TTC	RTK initialisation: < 10 s PPP convergence: < 1 min in selected regions, < 30 min worldwide	RTK initialisation: < 10 s PPP convergence: < 5 min worldwide	RTK initialisation: < 30 s PPP convergence: < 1 min in selected regions, < 30 min worldwide
Horizontal accuracy (95%)	Static: 2.5 mm + 0.5 ppm RTK: 8 mm + 1 ppm PPP: 4 cm DGNS: 0.25 m + 1ppm SBAS: submetre	- RTK: 8 mm + 1 ppm PPP: 20-50 cm DGNS: 0.25 m + 1ppm SBAS: submetre	- RTK: 1-2 cm + 1 ppm PPP: 10 cm DGNS: 0.5 m + 1ppm SBAS: submetre
Vertical accuracy (95%)	Static: 5 mm + 0.5 ppm RTK: 15 mm + 1 ppm PPP: 9 cm DGNS: 0.5 m + 1ppm SBAS: submetre	RTK: 8 mm + 1 ppm PPP: 9 - 20 cm DGNS: 0.5 m + 1ppm SBAS: submetre	RTK: 4-5 cm + 1 ppm PPP: 20 cm DGNS: 0.5 m + 1ppm SBAS: submetre
Form factor	Rugged smart antenna or modular unit with external antenna and remote controller	Rugged smart antenna, remote control box	Completely integrated handheld device
Antenna	Internal or external, active and passive supported	Internal	Internal or external
RTK readiness	All	Usually yes	High-end models only
PPP readiness	High-end models only	High-end models only	High-end models only

Disclaimer: The above specifications represent a typical product based on manufacturer's published literature for their latest products. Consequently, discrepancies may exist between the installed receiver's characteristics and those stated above.

รูปที่ 3.1 มาตรฐานความแม่นยำทางตำแหน่งที่จำแนกตามประเภทการใช้งาน [9]

จากรูปที่ 3.1 กรณีที่ระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK กับงานรังวัด จะกำหนดให้มีความแม่นยำตามแนวราบอย่างน้อย 8 มิลลิเมตร และในแนวตั้ง 1.5 เซนติเมตรขึ้นไป โดยวัดจากเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 95 ของความคลาดเคลื่อนตามแนวราบและแนวตั้งทั้งหมด แต่จากการสำรวจสมรรถนะของอุปกรณ์รังวัดที่วางขายจริงจาก [3] [10] และ [11] พบว่ามีความแม่นยำทางตำแหน่งแนวราบและแนวตั้งที่ต่ำกว่าเล็กน้อย โดยสามารถจำแนกคุณลักษณะที่สำคัญได้ดังนี้

3.2.1 ข้อกำหนดด้านความแม่นยำทางตำแหน่ง

1. กรณีรังวัดแบบหยุดนิ่งในที่โล่งแจ้ง จะต้องมีความแม่นยำทางตำแหน่งแนวราบไม่เกิน 5 เซนติเมตร และแนวความสูงไม่เกิน 10 เซนติเมตร โดยวัดจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตำแหน่งทั้งหมดที่ได้จากเทคนิค RTK แล้ว

2. กรณีใช้งานแบบเคลื่อนที่ในการทำเกษตรกรรมความแม่นยำสูง และอยู่ในพื้นที่โล่งแจ้ง จะต้องมีความแม่นยำทางตำแหน่งแนวราบไม่เกิน 30 เซนติเมตร โดยวัดจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะห่างเส้นทางเดินตัดขวาง (Cross Track Distance) กับตำแหน่งที่ได้จากการใช้เทคนิค RTK

และแนวความสูงไม่เกิน 40 เซนติเมตร โดยวัดจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตำแหน่งทั้งหมดที่ใช้เทคนิค RTK แล้วเช่นกัน

3.2.2 ข้อกำหนดด้านอุณหภูมิใช้งาน

เพื่อให้อุปกรณ์ฯ ประจำโครงการประยุกต์ใช้งานการในสภาพแวดล้อมแบบกลางแจ้งได้ ผู้วิจัยจะพัฒนาอุปกรณ์ให้สามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 25° ถึง 60° ได้ และสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง 3 ชั่วโมงเป็นอย่างน้อย

3.2.3 ข้อกำหนดด้านความสามารถในการสื่อสารข้อมูล

อุปกรณ์ที่ออกแบบ จะมีความสามารถด้านการสื่อสารข้อมูลที่สำคัญดังนี้

1. สามารถเชื่อมต่อกับเครือข่าย 3G/4G เพื่อระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK ผ่านอินเทอร์เน็ตโดยอาศัยโมดูล SIM7600E ได้
2. รองรับการเชื่อมต่อกับกรมที่ดิน กรมผังเมือง และกรมแผนที่ทหาร เพื่อรับค่าแก้ไขทางตำแหน่งได้
3. สามารถแสดงข้อมูลการทำงานและตำแหน่งของสถานีอ้างอิงหรือ Rover ผ่านเครือข่ายไร้สาย เช่น Bluetooth ได้ หรือผ่านการใช้สาย USB แล้วแสดงผลบนแอปพลิเคชัน Android ได้

จากข้อกำหนดเหล่านี้ ผู้วิจัยจะแสดงฟังก์ชันการใช้งานของอุปกรณ์ประจำโครงการเทียบกับอุปกรณ์รังวัดในระดับอุตสาหกรรม รวมทั้งเปรียบเทียบราคาไว้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ฟังก์ชันการใช้งานของอุปกรณ์ระบุตำแหน่งฯ ระดับอุตสาหกรรมเทียบกับอุปกรณ์ฯ ประจำโครงการ

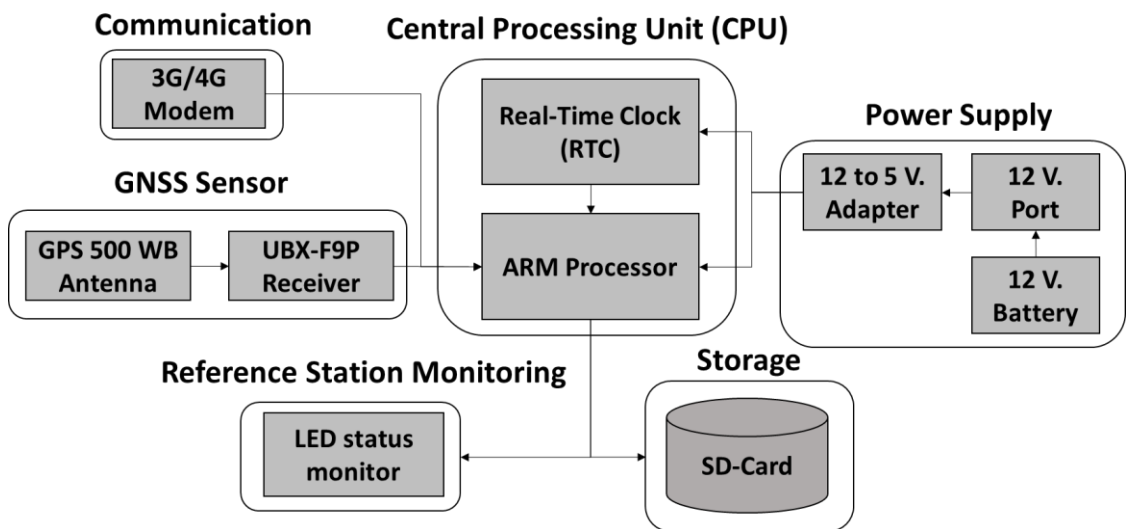
ฟังก์ชันการใช้งาน	อุปกรณ์ฯ ระดับอุตสาหกรรม	อุปกรณ์ฯ ประจำโครงการ
สื่อสารอินเทอร์เน็ตได้	✓	✓
สื่อสารผ่าน Bluetooth ได้	✓	✓
สื่อสารผ่านเครือข่ายวิทยุได้	✓	✓
ต่อ GNSS Network ได้	✓	✓
บันทึกข้อมูลดิบเพื่อระบุตำแหน่งแบบ PPK ได้	✓	✓
บันทึกตำแหน่งและเส้นทางเพื่อดูผลย้อนหลังได้	✓	✓
ราคาอุปกรณ์ต่อชุด	≥ 799 USD	≤ 800 USD

3.3 การออกแบบชุดอุปกรณ์สถานีอ้างอิง

ในการออกแบบสถานีอ้างอิง สามารถจำแนกได้ออกเป็นด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ดังต่อไปนี้

3.3.1 การพัฒนาฮาร์ดแวร์ของสถานีอ้างอิง

สำหรับสถานีอ้างอิง จะเป็นสถานีที่ใช้คำนวณหาค่าแก้ไข เพื่อส่งให้กับ Rover เป็นหลัก โดยจะมีการพัฒนาด้านฮาร์ดแวร์ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การพัฒนาด้านฮาร์ดแวร์สำหรับสถานีอ้างอิง

จากรูปที่ 3.2 สถานีอ้างอิงมีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 5 ส่วน ดังนี้

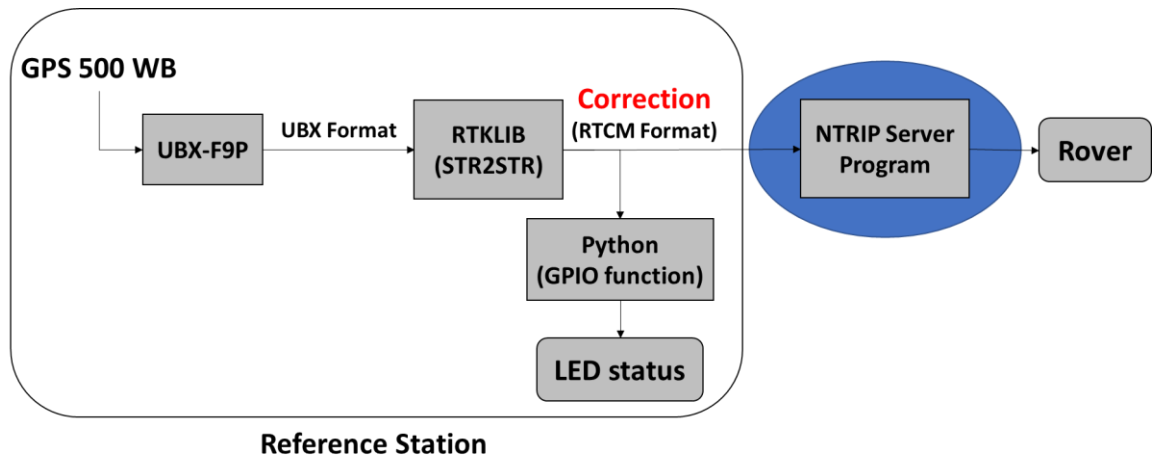
ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบด้านฮาร์ดแวร์ของสถานีอ้างอิง

องค์ประกอบหลักของฮาร์ดแวร์	องค์ประกอบย่อย	อุปกรณ์ที่ใช้	หน้าที่
Power Supply	อุปกรณ์แปลงไฟ 12 โวลต์เป็น 5 โวลต์	วงจรแปลงแรงดัน LM2596HV	แปลงแรงดันที่เหมาะสมกับการทำงานของหน่วยประมวลผล
	แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์	แบตเตอรี่ Panasonic รุ่น NCR18650BD	จ่ายไฟฟ้าให้กับฮาร์ดแวร์สถานีอ้างอิง
Central	หน่วยประมวลผล	หน่วยประมวลผล ARM	เป็นหน่วยประมวลผลค่า

Processor Unit	ประเภท ARM	Cortex V8 รุ่น BMC 5871X	แก้ไขและตำแหน่ง
	วงจรรีเลย์ ญาณนาฬิกาประเภท Real-Time Clock (RTC)	วงจรรวม RTC DS1307	ปรับเวลาของหน่วยประมวลผลให้ตรงกับเวลาปัจจุบัน
Communication	3G/4G Module	โมดูลสื่อสาร SIM7600E	เชื่อมต่อกับเครือข่าย 3G/4G
GNSS Sensor	GNSS Receiver	UBX-F9P Receiver	แปลงสัญญาณดาวเทียม เป็น ข้อมูล ไบ นารี สำหรับคำนวณตำแหน่งหรือค่าแก้ไข
	GNSS Antenna	GPS 500 WB	รับ สัญ ญาณ จากดาวเทียม GNSS
Reference Station Monitoring	LED Status	หลอด LED 3 Traffic Light 8 มิลลิเมตร	สำหรับแสดงสถานะการทำงานของสถานีอ้างอิง แทนการใช้จอแสดงผล

3.3.2 การพัฒนาซอฟต์แวร์ของสถานีอ้างอิง

เนื่องจากสถานีอ้างอิงมีหน้าที่คำนวณค่าแก้ไข ให้กับ Rover จึงมีแนวความคิดการพัฒนาในส่วน
ของซอฟต์แวร์เป็นดังรูปที่ 3.3



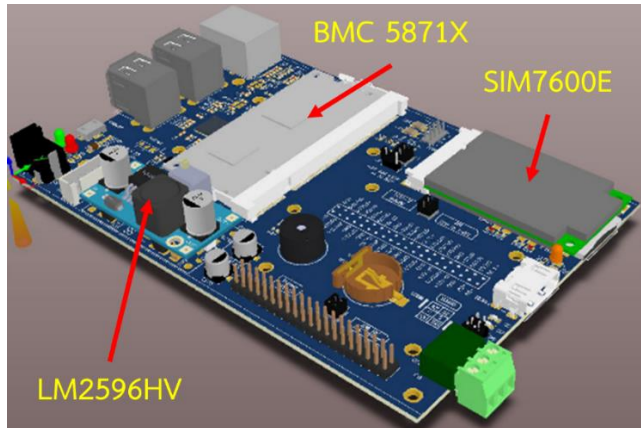
รูปที่ 3.3 แนวทางการพัฒนาซอฟต์แวร์ของสถานีอ้างอิง

จากรูปที่ 3.3 เครื่องรับฯ รุ่น UBX-F9P จะแปลงสัญญาณ GNSS ที่ได้ให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลไบนารี UBX (UBX Format) ซึ่งซอฟต์แวร์ RTKLIB จะมีซอฟต์แวร์ย่อยที่ชื่อว่า STR2STR ใช้สำหรับคำนวณค่าแก้ไขฯ จากข้อมูลไบนารีดังกล่าวให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐานกลาง RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services) แล้วส่งผ่านเครือข่าย 3G/4G ไปยังศูนย์กระจายค่าแก้ไขฯ NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) Server โดยจะมีซอฟต์แวร์ของ NTRIP ควบคุมการเข้าถึงและส่งต่อค่าแก้ไขฯ ให้แก่ Rover อีกทอดหนึ่ง การเชื่อมต่อในลักษณะนี้ มีข้อดี คือ สถานีอ้างอิงเพียง 1 สถานีสามารถกระจายค่าแก้ไขฯ ให้แก่ Rover จำนวนหลายชุดได้พร้อมกันแบบเวลาจริง โดยที่ประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งของแต่ละ Rover จะขึ้นอยู่กับความเสถียรของโครงข่าย 3G/4G ระยะขจัดจากสถานีอ้างอิงถึงตัวมันเอง รวมทั้งประสิทธิภาพของสายอากาศที่ Rover ใช้อีกด้วย

3.3.3 ชุดอุปกรณ์สถานีอ้างอิงที่เป็นทรัพย์สินทางปัญญา

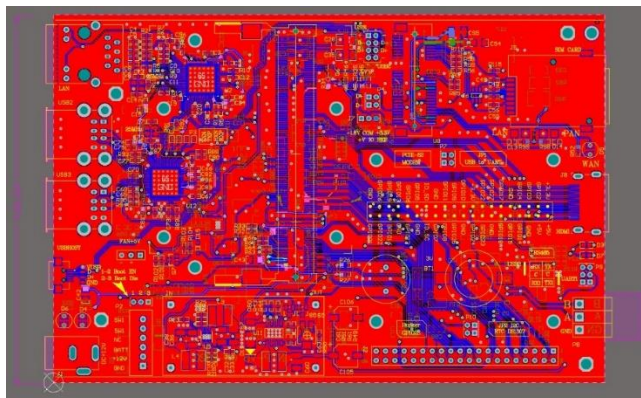
สำหรับอุปกรณ์สถานีอ้างอิงที่พัฒนาในโครงการ *ที่นับเป็นทรัพย์สินทางปัญญาได้* คือ

1. ออกแบบบอร์ดประมวลผลแบบ SBC (Single Board Computer) ที่รวมเอาเครื่องรับสัญญาณ GNSS ชนิด 2 ความถี่ โมดูลสื่อสาร SIM7600E รวมทั้งโมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้าไว้บนบอร์ดเดียวกันเอง และสามารถใช้งานกลางแจ้งได้ โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ออกแบบดังนี้



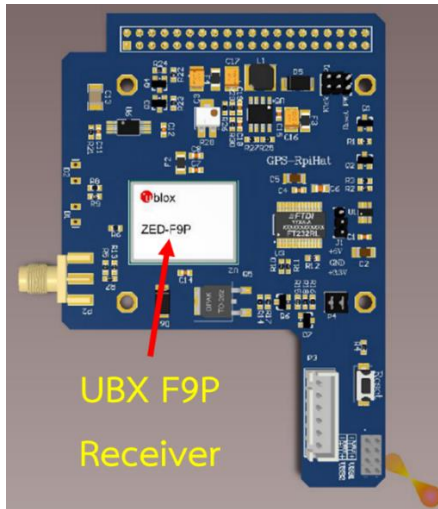
รูปที่ 3.4 บอร์ดประมวลผลแบบ SBC สำหรับสถานีอ้างอิงที่ออกแบบขึ้น

จากรูปที่ 3.4 วงจรแปลงแรงดัน LM259HV โมดูลสื่อสารเครือข่าย 3G/4G รุ่น SIM7600E จะนำมารวมไว้บนบอร์ดเดียวกันกับหน่วยประมวลผล BMC 5871X ซึ่งมีลักษณะของบอร์ดวงจร PCB ที่ออกแบบขึ้นดังรูปที่ 3.5



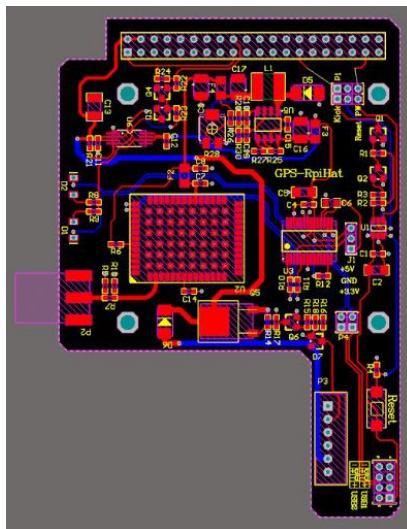
รูปที่ 3.5 ลักษณะ PCB ของบอร์ดประมวลผลแบบ SBC ของสถานีอ้างอิง

สำหรับเครื่องรับสัญญาณ GNSS รุ่น UBX-F9P จาก จะมีการออกแบบขึ้นใหม่ โดยนำชิพประมวล UBX-F9P ไปรวมไว้บนบอร์ดนี้เพื่อเชื่อมต่อผ่านขา UART โดยมีลักษณะดังรูปที่ 3.6

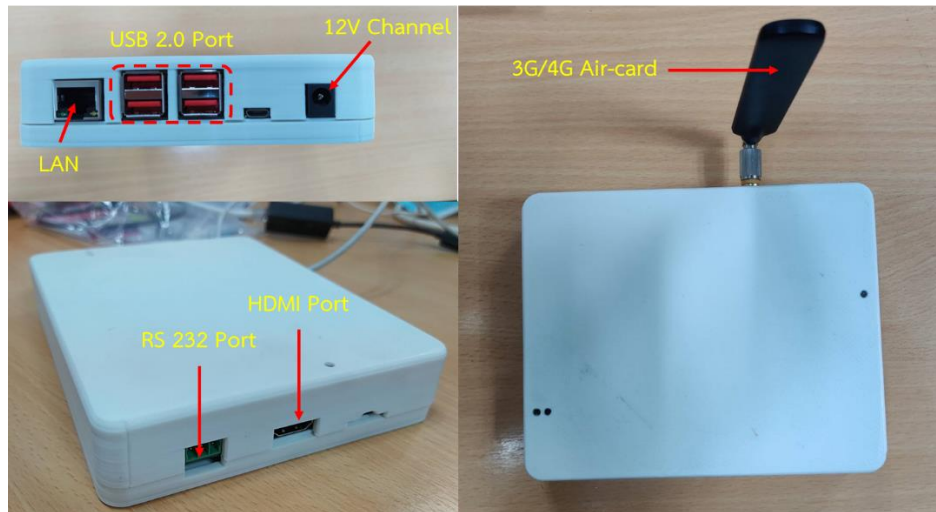


รูปที่ 3.6 บอร์ดเครื่องรับสัญญาณ GNSS รุ่น UBX-F9P ที่ออกแบบขึ้น

จากรูปที่ 3.6 จะมีการออกแบบบอร์ดที่ติดตั้งชิพประมวลผล UBX-F9P สำหรับเสียบกับบอร์ดจาก ทำให้ลดการต่อสาย USB จากภายนอกและง่ายต่อการพกพาขณะใช้งานมากยิ่งขึ้น โดยมีลักษณะของบอร์ด PCB ที่ออกแบบได้ดังรูปที่ 3.7

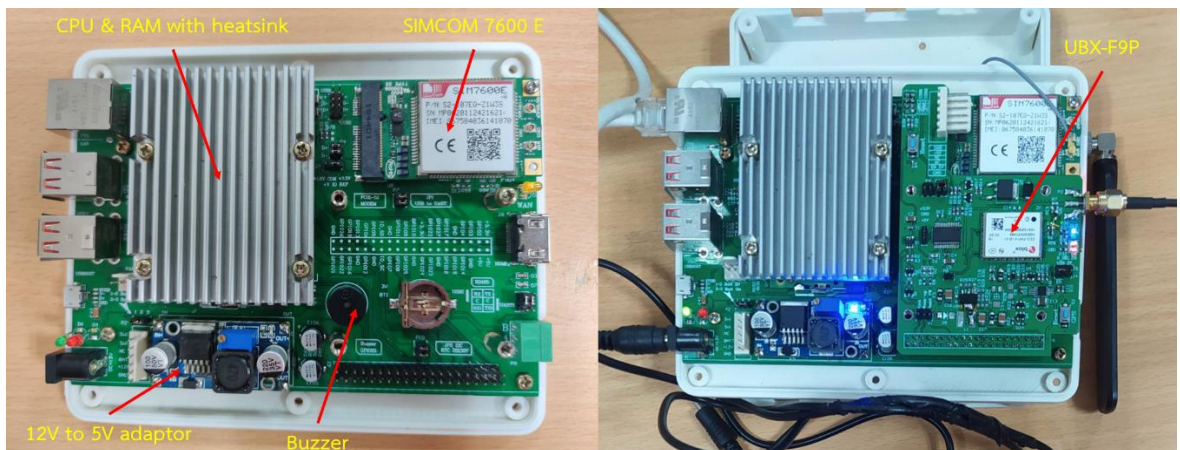


รูปที่ 3.7 ลักษณะของ PCB ชิพประมวลผล UBX-F9P



รูปที่ 3.8 ภาพรวมของสถานีอ้างอิงประจำโครงการฯ (ในการทดสอบจะใช้ชื่อย่อว่า ANDA)

จากรูปที่ 3.8 ผู้วิจัยได้ออกแบบบรรจุภัณฑ์ของสถานีอ้างอิงให้มีขนาดกะทัดรัด มีพอร์ต USB สำหรับเชื่อมต่อกับเครื่องรับสัญญาณ GNSS โมดูล WIFI หรือ Flash Drive สำหรับเก็บข้อมูลการทดสอบได้ หากสถานีอ้างอิงเกิดความขัดข้อง ทางผู้วิจัยได้เพิ่มพอร์ต LAN ซึ่งใช้เชื่อมต่อกับหน่วยประมวลผลของสถานีฯ เข้ากับ Laptop หรือคอมพิวเตอร์เพื่อทำการแก้ไขซอฟต์แวร์ได้ทันที ภายในบรรจุภัณฑ์จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ภายในสถานีอ้างอิงประจำโครงการ (ซ้าย) ก่อนสวมบอร์ด UBX-F9P (ขวา) หลังสวมบอร์ด UBX-F9P

จากรูปที่ 3.9 ที่หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) และหน่วยความจำ (RAM) ของสถานีอ้างอิงจะติดตั้ง Heatsink เพื่อลดความร้อนสะสมขณะใช้งานกลางแจ้ง รวมทั้งติดตั้งโมดูล SIMCOM 7600

E สำหรับส่งข้อมูลในรูปแบบ RTCM ไปยังคลาวด์ที่สร้างไว้ และวงจรแปลงแรงดันจาก 12 โวลต์เป็น 5 โวลต์เพื่อให้รองรับการใช้งานกับแบตเตอรี่แบบแห้งขนาด 12 โวลต์ ซึ่งมีความทนทานต่อการใช้งานกลางแจ้ง

2. ออกแบบบรรจุภัณฑ์อุปกรณ์ที่ติดตั้งได้สะดวก และสามารถติดตั้งเข้ากับเสารั้ววัดที่มีอยู่ในท้องตลาดได้

สำหรับการพัฒนาซอฟต์แวร์ในโครงการที่นับเป็นทรัพย์สินทางปัญญาได้ คือ

1. ออกแบบแอปพลิเคชันสำหรับแสดงตำแหน่งของอุปกรณ์ผ่านมือถือ Android ที่ใช้งานได้

2. ออกแบบโปรแกรมสำหรับการทำรั้ววัดพื้นที่ การคำนวณแผนที่แนวระดับความสูงของพื้นที่เอง แล้วเก็บเข้าสู่ฐานข้อมูลเพื่อย้อนหลังได้

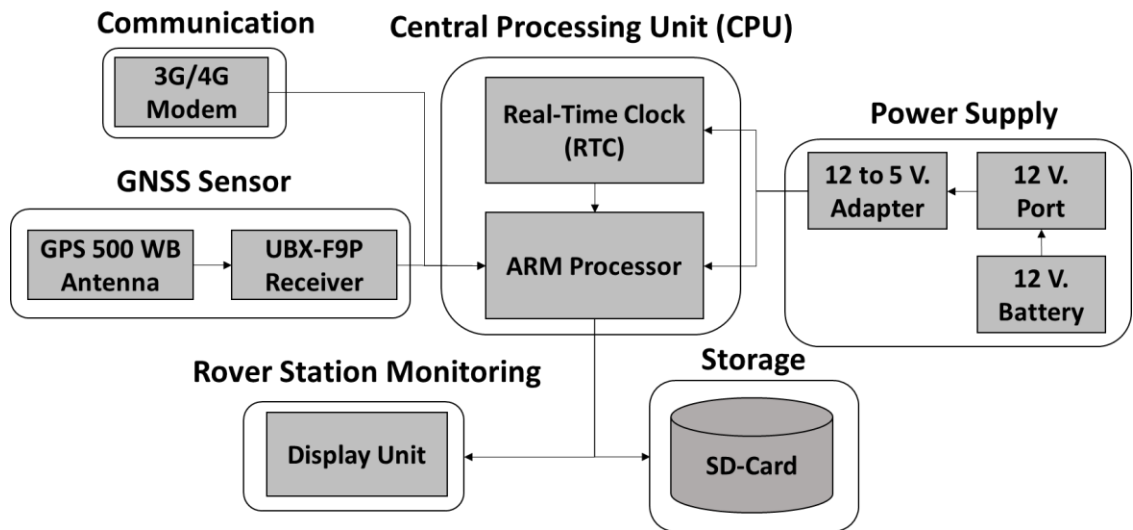
3. ออกแบบโปรแกรมสำหรับคำนวณตำแหน่งสถานีอ้างอิงชั่วคราวแบบอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มความรวดเร็วในใช้งานสถานีอ้างอิงบนพื้นที่ทดสอบจริง

3.4 การออกแบบอุปกรณ์สถานีจร

ในการออกแบบสถานีอ้างอิง สามารถจำแนกได้ออกเป็นด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ดังต่อไปนี้

3.4.1 การพัฒนาฮาร์ดแวร์ Rover

ในการพัฒนาด้านฮาร์ดแวร์ของ Rover จะมีองค์ประกอบที่คล้ายคลึงกับสถานีอ้างอิง แต่จะมีการแสดงตำแหน่งผ่านหน่วยแสดงผล (อาจเป็นหน้าจอหรือ Tablet) โดยจะมีแนวคิดการพัฒนาเป็นดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การพัฒนาด้านฮาร์ดแวร์สำหรับ Rover

ในส่วนของ Rover จะมีการแสดงตำแหน่งของผู้ใช้งานผ่านจอแสดงผล ทำให้มีการพัฒนาฮาร์ดแวร์ดังตารางที่ 3.4

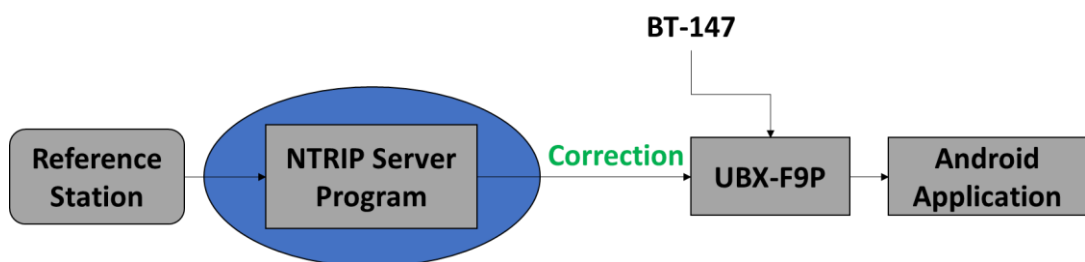
ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบด้านฮาร์ดแวร์ของ Rover

องค์ประกอบหลักของฮาร์ดแวร์	องค์ประกอบย่อย	อุปกรณ์ที่ใช้	หน้าที่
Power Supply	อุปกรณ์แปลงไฟ 12 โวลต์ เป็น 5 โวลต์	วงจรถแปลงแรงดัน LM2596HV	แปลงแรงดันที่เหมาะสมกับการทำงานของหน่วยประมวลผล
	แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์	แบตเตอรี่ Panasonic รุ่น NCR18650BD	จ่ายไฟฟ้าให้กับฮาร์ดแวร์สถานีอ้างอิง
Central Processor Unit	หน่วยประมวลผลประเภท ARM	หน่วยประมวลผล ARM Cortex V8 รุ่น BMC 5871X	เป็นหน่วยประมวลผลค่าแก้ไขและตำแหน่ง
	วงจรถ่ายสัญญาณเวลาประเภท Real-Time Clock (RTC)	วงจรรวม RTC DS1307	ปรับเวลาของหน่วยประมวลผลให้ตรงกับเวลาปัจจุบัน

Communication	3G/4G Module	โมดูลสื่อสาร SIM7600E	เชื่อมต่อกับเครือข่าย 3G/4G
GNSS Sensor	GNSS Receiver	UBX-F9P Spark Fun	แปลงสัญญาณดาวเทียมเป็นข้อมูลไบนารีสำหรับคำนวณตำแหน่ง Rover
	GNSS Antenna	GPS 500 WB	รับสัญญาณจากดาวเทียม GNSS
Reference Station Monitoring	จอแสดงผล/Tablet	หน้าจอสัมผัสขนาด 13.3 นิ้ว รุ่น Waveshare IPS	สำหรับแสดงตำแหน่งบนพื้นโลกของ Rover

3.4.2 การพัฒนาซอฟต์แวร์ของอุปกรณ์ Rover

ในการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับ Rover จะเน้นไปที่การเขียนโปรแกรมเพื่อรับค่าแก้ไขจากสถานีอ้างอิงที่เชื่อมต่ออยู่ เพื่อส่งเข้าไปยังเครื่องรับ UBX-F9P จากนั้นจะเขียนโปรแกรมดึงตำแหน่งและความเร็วที่ระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK ส่งไปยังแอปพลิเคชันแอนดรอยด์ดังรูปที่ 3.11

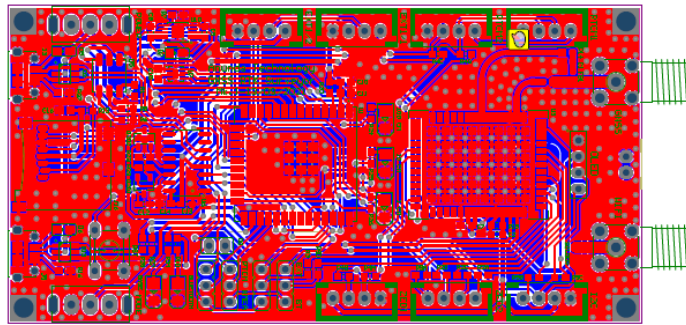


รูปที่ 3.11 แนวทางการพัฒนาซอฟต์แวร์ของ Rover

จากรูปที่ 3.11 เนื่องจาก Rover จะต้องแสดงผลตำแหน่งบนพื้นโลก ในโครงการนี้จะนำตำแหน่งรวมทั้งความเร็วที่ได้จากเครื่องรับ UBX-F9P แล้วส่งไปยังซอฟต์แวร์แสดงตำแหน่งบนพื้นโลก ที่ทำงานบนมือถือแอนดรอยด์ต่อไปดังหัวข้อที่ 3.7

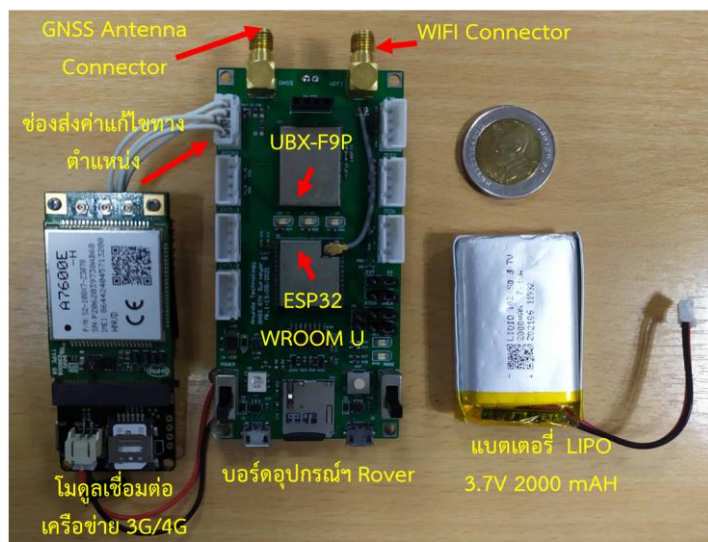
3.4.3 ชุดอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover ที่เป็นทรัพย์สินทางปัญญา

เพื่อให้อุปกรณ์รับสัญญาณ Rover มีความเป็นมาตรฐานทางอุตสาหกรรม ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบฮาร์ดแวร์โดยมีรูปแบบของ PCB เป็นดังรูปที่ 3.12



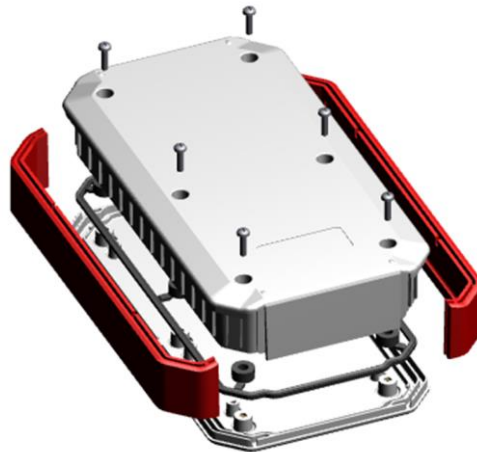
รูปที่ 3.12 ลักษณะของ PCB อุปกรณ์ Rover ที่ออกแบบใหม่

จากรูปที่ 3.12 บนบอร์ด PCB จะประกอบไปด้วยวงจรที่เชื่อมต่อเครื่องรับสัญญาณ UBX-F9P เข้ากับหน่วยประมวลผล ESP32 WROOM U ที่มีโมดูลรับสัญญาณ WIFI และ Bluetooth อยู่ในตัวเอง จากนั้นผู้วิจัยจะเขียนโปรแกรมให้บอร์ด TTGO-PCIE จากรายงานงวดที่ 3 ทำหน้าที่เป็นโมดูลเชื่อมต่อกับเครือข่าย 3G/4G แล้วนำมาประกอบกับอุปกรณ์ในรูปที่ 3.12 ใหม่ได้เป็นอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 องค์ประกอบของอุปกรณ์ Rover รุ่นล่าสุด

จากรูปที่ 3.13 ผู้วิจัยจะออกแบบบรรจุภัณฑ์สำหรับอุปกรณ์ Rover โดยมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 บรรจุภัณฑ์ของอุปกรณ์ Rover

จากรูปที่ 3.14 ลักษณะของบรรจุภัณฑ์จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นกล่อง (สีขาว) ทำจากวัสดุ ABS และส่วนของยางกันน้ำ (สีแดง) โดยหลังจากนำมาประกอบกับอุปกรณ์จากรูปที่ 3.13 แล้วจะได้อุปกรณ์รับสัญญาณ Rover ที่มีลักษณะดังรูปที่ 3.15

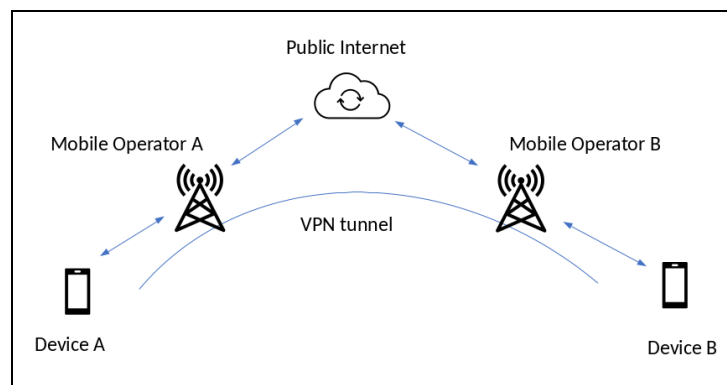


รูปที่ 3.15 อุปกรณ์รับสัญญาณ Rover

จากรูปที่ 3.15 ผู้วิจัยจะนำไปทดสอบการระบุตำแหน่งกลางแจ้ง ดังหัวข้อที่ 5.1.6 ต่อไป

3.5 การพัฒนาคลาวด์สำหรับการสื่อสารระหว่างสถานีอ้างอิงกับ Rover ผ่านเครือข่าย 3G/4G

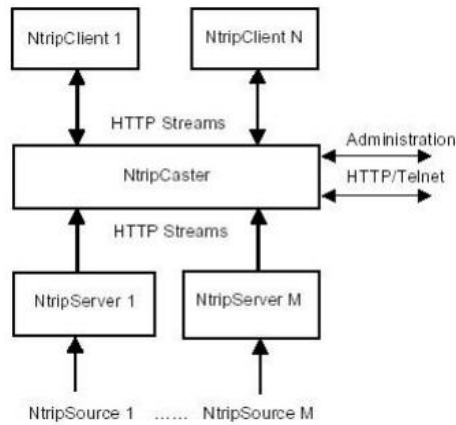
เพื่อให้สถานีอ้างอิงกับ Rover สามารถสื่อสารกันผ่านเครือข่าย 3G/4G ได้ โดยใช้คลาวด์เป็นตัวควบคุมการสื่อสารเป็นหลัก จะต้องใช้เทคโนโลยีการเชื่อมต่อเครือข่ายเสมือนส่วนตัว (Virtual Private Network หรือ VPN) เข้ามาช่วยสร้างช่องทางการสื่อสาร โดยการทำงานของ VPN จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การเชื่อมต่อแบบ VPN (Virtual Private Network)

จากรูปที่ 3.16 VPN เป็นเทคโนโลยีที่เชื่อมต่ออุปกรณ์ A และ B เข้าด้วยกันโดยอาศัยอินเทอร์เน็ต (Public Internet) เป็นตัวกลาง ซึ่งมีการสร้างอุโมงค์เสมือน (Tunneling) ไว้รับส่งข้อมูลที่เข้ารหัสป้องกันการลักลอบใช้ข้อมูล ทำให้มีความคล่องตัวในการติดต่อรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ เช่นเดียวกับเครือข่ายสื่อสารแบบส่วนตัว (Private Network) เสมือนอยู่บนเครือข่ายเดียวกัน อุปกรณ์ที่ใช้ในเทคโนโลยี VPN จะประกอบไปด้วย ซิมให้บริการอินเทอร์เน็ตจากผู้ให้บริการโครงข่ายที่แต่ละอุปกรณ์ใช้อยู่ และตัวกลาง (server) โดยในโครงการนี้ จะใช้คลาวด์เป็นตัวกลางสำหรับสร้างโครงข่ายเสมือนเพื่อเชื่อมต่อแต่ละอุปกรณ์เข้าด้วยกัน การเข้ารหัสของระบบเพื่อความปลอดภัย และมาตรฐานต่างๆ ซึ่งมีการออกแบบโปรโตคอลของ VPN ที่แตกต่างกัน เช่น PPTP, L2TP, IPSec, SSL, TLS, Wireguard และอื่นๆ VPN แต่ละแบบ จะมีความเร็ว การเข้ารหัส รักษาความปลอดภัย ที่ไม่เหมือนกัน โดยการเชื่อมต่อด้วย VPN ดังในรูปจะทำให้การสร้างเครือข่ายระหว่างสถานีอ้างอิงกับ Rover สามารถรับและส่งข้อมูลระหว่างกันได้ โดยไม่ขึ้นกับผู้ให้บริการโครงข่าย และทำให้อุปกรณ์เคลื่อนย้าย ได้สะดวกและง่ายต่อการใช้งาน

ในการควบคุมการเข้าถึงของ Rover บนคลาวด์เพื่อรับค่าแก้ไข จากสถานีอ้างอิงนั้น จะใช้ซอฟต์แวร์ที่ชื่อว่า BKG NTRIP Caster [11] ซึ่งมีหลักการทำงานเป็นดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การทำงานของ NTRIP Caster [11]

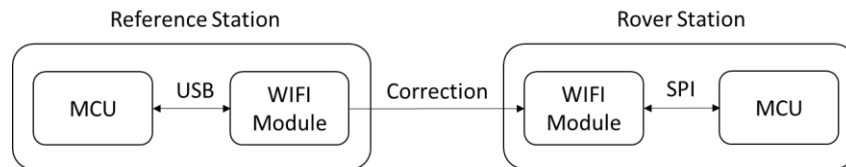
จากรูปที่ 3.17 ผู้ที่จะให้บริการค่าแก้ไข ผ่านคลาวด์ จะต้องติดตั้งซอฟต์แวร์ NTRIP Caster ไว้บนคลาวด์ซึ่งมีที่อยู่ IP จริง เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวกลางควบคุมการส่งค่าแก้ไข จากสถานีอ้างอิงไปยัง Rover โดยที่สถานีอ้างอิงจะต้องลงทะเบียนกับ NTRIP Caster ในฐานะ NTRIP Server เพื่อขออนุญาตนำเข้าข้อมูลค่าแก้ไข ในขณะที่ Rover จะต้องลงทะเบียนกับ NTRIP Caster เพื่อรับชื่อผู้ใช้กับรหัสผ่าน สำหรับรับค่าแก้ไข ไประบุตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK โดยที่ข้อดีของซอฟต์แวร์ดังกล่าว จะช่วยป้องกันการเข้าถึงข้อมูลจากบุคคลภายนอกที่ไม่ได้ลงทะเบียนไว้กับ NTRIP Caster เข้ามาโจมตีระบบ อีกทั้งยังสามารถรองรับการเชื่อมต่อจากสถานีอ้างอิงกับ Rover เป็นจำนวนมากได้ตามสมรรถนะของคอมพิวเตอร์หรือคลาวด์ที่ติดตั้งซอฟต์แวร์นี้ได้

3.6 การออกแบบระบบสื่อสารผ่านเครือข่าย WIFI และเครือข่าย 3G/4G

3.6.1 การออกแบบระบบการสื่อสารผ่านเครือข่าย WIFI [1]

เทคโนโลยี WIFI เป็นเครือข่ายการสื่อสารแบบไร้สาย มาตรฐาน IEEE 802.11 เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1997 โดยมีมาตรฐานที่ใช้อย่างเป็นทางการคือมาตรฐาน 802.11a, 802.11b และ 802.11g นิยมใช้เพื่อต่อกับอินเทอร์เน็ตผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า Access Point และมีระยะใช้งานครอบคลุมอยู่ที่ประมาณ 20 เมตรภายในอาคาร และมีระยะนี้ที่ไกลขึ้นที่โล่งแจ้ง ในการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลที่สื่อสารผ่าน WIFI จะมีการเข้ารหัสข้อมูลด้วยวิธี WPA, WPA2 เพื่อป้องกันการขโมยข้อมูลที่มีความปลอดภัยสูงอีกด้วย

เนื่องจากโครงการวิจัยนี้ ต้องการสร้างช่องทางการเชื่อมต่อระหว่างสถานีอ้างอิงกับอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover จึงได้ออกแบบระบบการเชื่อมต่อผ่านเครือข่าย WIFI ที่มีลักษณะดังนี้

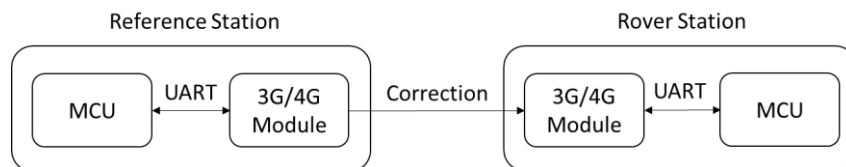


รูปที่ 3.18 การออกแบบการเชื่อมต่อผ่านเครือข่าย WIFI

จากรูปที่ 3.18 ในฝั่งของสถานีอ้างอิงจะเชื่อมต่อกับโมดูล WIFI ผ่านอินเตอร์เฟซ USB เนื่องจากมีพอร์ต USB 4 พอร์ต ในขณะที่อุปกรณ์รับสัญญาณ Rover จะออกแบบให้ฝั่งตัวอยู่กับหน่วยประมวลผล MCU ซึ่งเชื่อมต่อผ่านอินเตอร์เฟซแบบ SPI โดยจะมีการออกแบบการทดสอบดังหัวข้อที่ 4.1.2 และ 5.1.2

3.6.2 การออกแบบระบบการสื่อสารผ่านเครือข่าย 3G/4G

ในการสื่อสารผ่านเครือข่าย 3G/4G ของอุปกรณ์สถานีอ้างอิงและอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover จะมีการออกแบบดังนี้

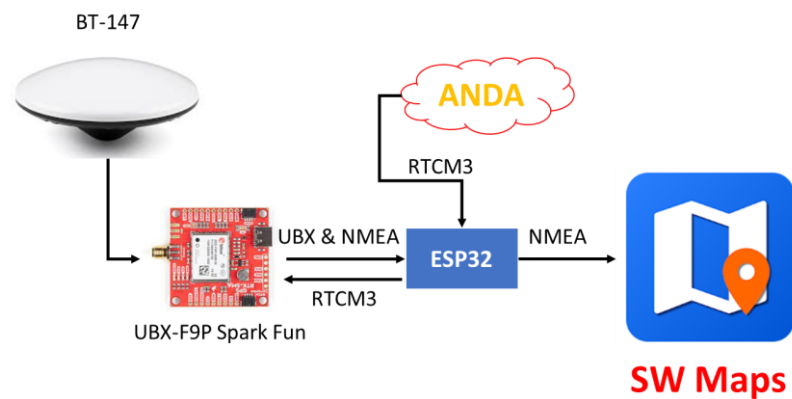


รูปที่ 3.19 การออกแบบการเชื่อมต่อผ่านเครือข่าย 3G/4G

จากรูปที่ 3.19 ทั้งสถานีอ้างอิงและอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover จะเชื่อมต่อกับโมดูล 3G/4G เป็น จึงออกแบบการเชื่อมต่อผ่านอินเตอร์เฟซแบบ UART ซึ่งฝั่งตัวอยู่บนบอร์ดเดียวกับหน่วยประมวลผล MCU โดยจะต่อสายอากาศสำหรับแยกต่างหาก พร้อมกับทำการทดสอบการใช้งานดังหัวข้อที่ 4.1.2 และ 5.1.2

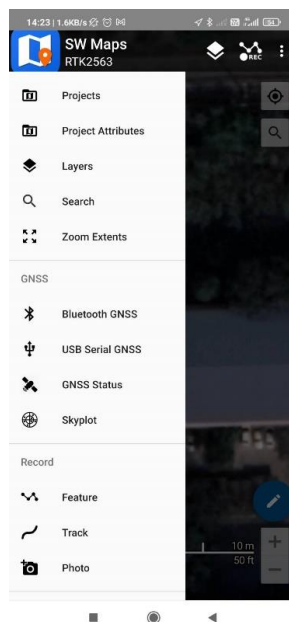
3.7 การออกแบบซอฟต์แวร์แสดงตำแหน่งบนพื้นโลก

หลังจากอุปกรณ์ Rover ได้ข้อมูลพิกัดแบบ NMEA แล้ว จะมีการส่งผ่านโมดูล Bluetooth ที่อยู่ภายในไปยังมือถือแอนดรอยด์ผ่านแอปพลิเคชัน SW MAP [3] ได้ตามแนวทางของรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 แนวทางการแสดงตำแหน่งบนพื้นโลกของ Rover ผ่านแอปพลิเคชัน SW Maps

จากรูปที่ 3.20 จะมีผลการแสดงข้อมูลอุปกรณ์ฯ Rover บนแอปฯ SW Maps ผ่านเครือข่าย Bluetooth โดยลักษณะของแอปพลิเคชัน SW Maps จะเป็นดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 อุปกรณ์แสดงผลตำแหน่งบนพื้นโลก (ซอฟต์แวร์)

จากรูปที่ 3.21 จะเป็นลักษณะของซอฟต์แวร์ที่นำมาใช้แสดงตำแหน่งของอุปกรณ์ฯ Rover โดยจะเลือกที่ Bluetooth GNSS เพื่อแสดงข้อมูล NMEA ของอุปกรณ์ฯ Rover ซึ่งส่งออกมาทาง Bluetooth ไปแสดง โดยจะมีการทดสอบดังหัวข้อที่ 6.1

บทที่ 4

การออกแบบการทดสอบและผลการทดสอบอุปกรณ์สถานีอ้างอิง

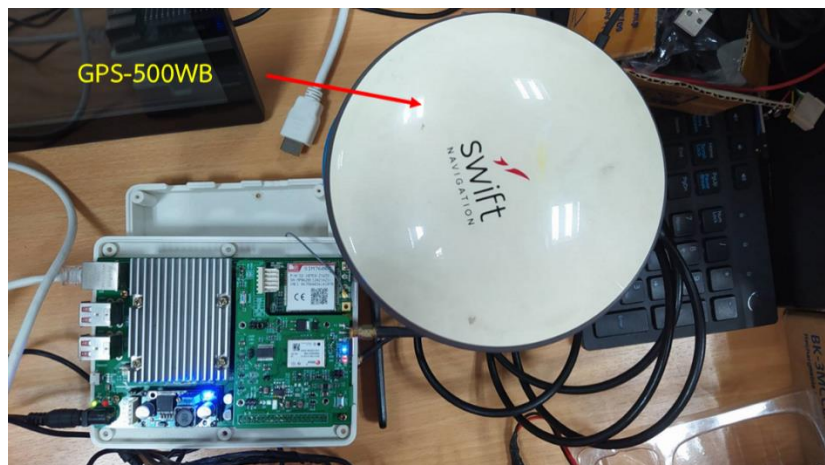
4.1 การออกแบบการทดสอบอุปกรณ์สถานีอ้างอิงที่สอดคล้องกับตัวชี้วัด

การออกแบบการทดสอบอุปกรณ์สถานีอ้างอิงที่สอดคล้องกับตัวชี้วัด

จากรายละเอียดการทดสอบอุปกรณ์สถานีอ้างอิงตามทีระบุไว้ในสัญญา จะแบ่งการทดสอบทั้งหมดออกเป็น 6 ส่วนดังนี้

4.1.1 การทดสอบสายอากาศและเครื่องรับสัญญาณ GNSS ชนิดสองความถี่

เพื่อทดสอบการทำงานของบอร์ดวงจร UBX-F9P ที่ออกแบบขึ้น ผู้วิจัยจะเชื่อมต่อสายอากาศ GPS-500WB เข้ากับสถานีอ้างอิงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สถานีอ้างอิงที่เชื่อมต่อกับสายอากาศ GPS-500WB แล้ว

จากรูปที่ 4.1 เมื่อนำไปทดสอบกลางแจ้ง สายอากาศฯ จะรับข้อมูลจากดาวเทียม GNSS ไปยังบอร์ด UBX-F9P จากนั้นจะใช้คำสั่งข้างล่าง เพื่ออ่านข้อมูลจากบอร์ดดังกล่าว โดยมีผลการทดสอบดังหัวข้อที่ 4.2.1

```
picocom /dev/ttyF9P -b 115200 # อ่านค่าจากพอร์ต ttyF9P ด้วย Baud rate 115200
```


4.1.2 การทดสอบวงจรสื่อสารข้อมูลผ่านเครือข่าย 3G/4G

เพื่อทดสอบการสื่อสารกับเครือข่าย 3G/4G ตามรูปที่ 3.9 ผู้วิจัยจะใช้คำสั่งแบบ Shell script ที่ชื่อว่า “modem4G.sh” เพื่อสถาปนาการเชื่อมกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตบนอินเทอร์เน็ตเฟซ ppp0 ของโมดูล SIMCOM 7600 E โดยภายในไฟล์ดังกล่าวจะมีกระบวนการดังข้างล่าง

```
#!/bin/bash
set -x # แสดงทุกอย่างที่ปรากฏบนหน้า Console
pppd call sara2Tmv dump debug logfd 2 nodetach & # เรียกใช้โมดูล pppd เพื่อสถาปนาการ
เชื่อมต่อ ppp0
```

4.1.3 การทดสอบวงจรสัญญาณนาฬิกาประเภท Real Time Clock (RTC)

เพื่อทดสอบวงจร RTC ที่ออกแบบขึ้น ผู้วิจัยจะมีการทดสอบดังนี้

1. เปิดใช้งานสถานีอ้างอิง แล้วบันทึกเวลาปัจจุบันของสถานีอ้างอิงและเวลาของกรมอุทกศาสตร์กองทัพเรือเอาไว้

2. ปิดการใช้งานสถานีอ้างอิงนาน 1 ชั่วโมงโดยประมาณ

3. เปิดใช้งานสถานีอ้างอิงอีกครั้ง แล้วบันทึกเวลาของสถานีฯ และเวลาจากกรมอุทกศาสตร์ฯ

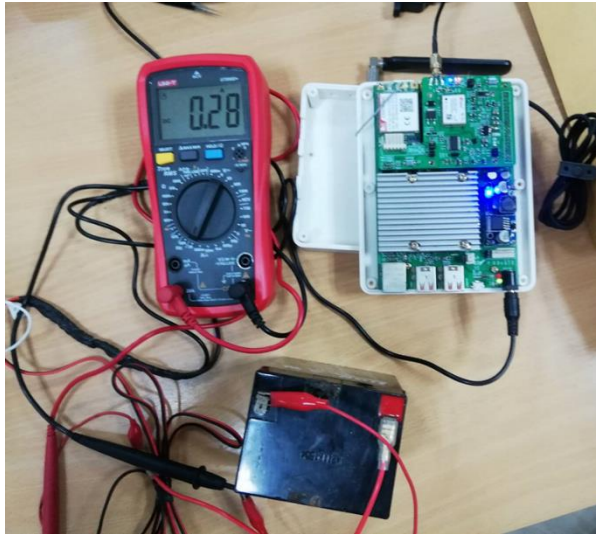
4. ตรวจสอบผลต่างทางเวลาของข้อที่ 3

สำหรับคำสั่งที่ใช้แสดงเวลาของสถานีอ้างอิงผ่าน Console คือ

```
date # ดูเวลาของสถานีอ้างอิง
```

4.1.4 การทดสอบแบตเตอรี่ของอุปกรณ์

ในการทดสอบนี้จะพิจารณากระแสที่สถานีอ้างอิงใช้ขณะทำงาน จะใช้มัลติมิเตอร์ต่อคั่นระหว่างขั้วลบของแบตเตอรี่กับขั้วลบของสวิตช์จ่ายไฟให้สถานีอ้างอิงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การทดสอบแบตเตอรี่กับสถานีอ้างอิงประจำโครงการฯ

จากรูปที่ 4.2 ในช่วงเริ่มต้น สถานีอ้างอิงจะกินกระแสไม่เกิน 300 mA แต่หลังจากสถานีอ้างอิงเชื่อมต่อเครือข่าย 3G/4G แล้วส่งข้อมูล RTCM ผ่านอินเทอร์เน็ตได้ จะใช้กระแสในปริมาณที่มากขึ้นเพื่อสนับสนุนการทำงานของโมดูล SIMCOM 7600 E และใช้ประมวลผลของสัญญาณดาวเทียมให้เป็นข้อมูล RTCM โดยจะมีผลการวัดกระแสขณะใช้งานดังผลการทดสอบในหัวข้อที่ 4.1.4 ต่อไป

4.1.5 การทดสอบหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) และหน่วยจัดเก็บข้อมูล (RAM)

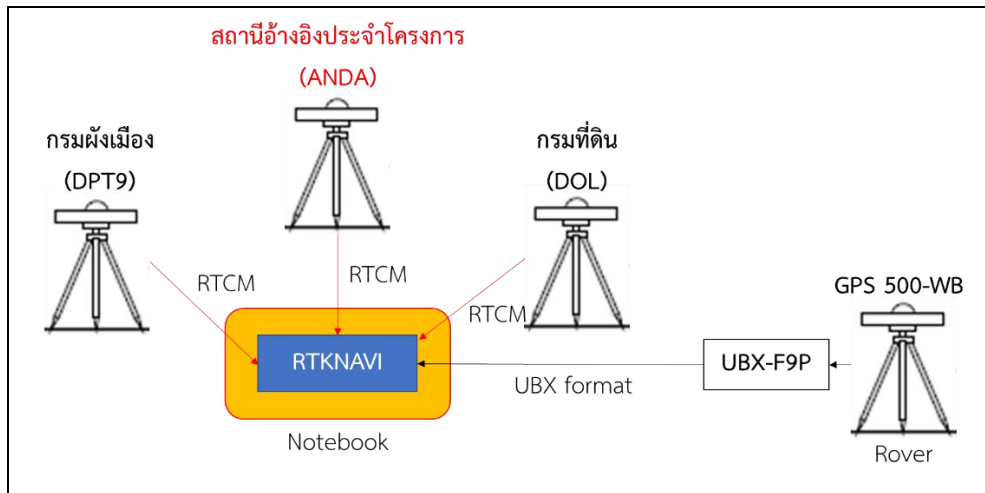
การทดสอบในส่วนนี้ ผู้วิจัยจะถือว่าหากอุปกรณ์ที่ออกแบบมีความพร้อมใช้งาน จะต้องเปิดระบบปฏิบัติการ สามารถใช้คำสั่งพื้นฐาน รวมทั้งดูพื้นที่หน่วยความจำได้ โดยจะมีคำสั่งที่ใช้ทดสอบดังนี้

```
vcgencmd measure_temp          # ดูอุณหภูมิของหน่วยประมวลผล
df -h                          # ดูพื้นที่หน่วยความจำภายใน
```

4.1.6 การทดสอบซอฟต์แวร์ประมวลผลข้อมูล RTK สำหรับอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover

ในการทดสอบอุปกรณ์ฯ ประจำโครงการ จะวัดประสิทธิภาพของการใช้สถานีอ้างอิงประจำโครงการฯ (ANDA) เพื่อระบุตำแหน่งของ Rover ด้วยเทคนิค RTK เทียบกับการใช้สถานีอ้างอิงกรม

ผังเมือง (DPT9) จากนั้นจะนำตำแหน่งของ Rover ที่ได้ไปวิเคราะห์ความแม่นยำโดยมีการเชื่อมต่อกับแต่ละสถานีอ้างอิงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การเชื่อมต่อระหว่าง Rover กับสถานีอ้างอิง

จากรูปที่ 4.3 ผู้วิจัยจะวัดประสิทธิภาพของสถานีอ้างอิงแต่ละแบบด้วยการส่งค่าแก้ไขในรูปแบบ RTCM ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตไปยัง Rover ชุดเดียวกัน เพื่อดูความแม่นยำทางตำแหน่งของ Rover ที่ได้ โดยมีเงื่อนไขคือ

1. ชุดของตำแหน่งที่ใช้เทคนิค RTK ร่วมกับค่าแก้ไขจากสถานีอ้างอิงกรมผังเมือง (DPT9) จะเป็นข้อมูลที่ถือว่ามีความถูกต้องที่สุด ใช้เป็นตัวเทียบได้
2. ชุดของตำแหน่งที่ใช้เทคนิค RTK ร่วมกับค่าแก้ไขจากสถานีอ้างอิงประจำโครงการ (ANDA) และจากสถานีอ้างอิงกรมที่ดิน (DOL) ถือว่าเป็นตัวที่นำมาทดสอบ

ในการระบุตำแหน่งของ Rover ผู้วิจัยจะใช้โปรแกรม RTKNAVI เพื่อระบุตำแหน่ง Rover ด้วยเทคนิค RTK แบบเวลาจริง โดยเครื่องรับสัญญาณและสายอากาศ GNSS ที่เลือกใช้จะเป็นรุ่น UBX-F9P และ GPS 500-WB ตามลำดับ และมีลักษณะการติดตั้งกลางแจ้งเป็นดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การติดตั้งสถานีอ้างอิงประจำโครงการ (ซ้าย) การต่ออุปกรณ์ (ขวา) การติดตั้งกลางแจ้ง

จากรูปที่ 4.4 สายอากาศของสถานี ANDA จะอยู่เหนือพื้นดินประมาณ 2.30 เมตร ทำงานโดยใช้แหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 5AH ขณะส่งค่าแก้ไขทางตำแหน่งผ่านเครือข่าย 3G/4G จะมีอัตราการกินกระแสเฉลี่ยอยู่ที่ 560 mA

สำหรับการทดสอบ Rover ผู้วิจัยจะติดตั้งสายอากาศรวมทั้งเครื่องรับสัญญาณ GNSS เข้ากับรถเข็นดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การติดตั้ง Rover เพื่อทดสอบ

หลังจากติดตั้ง Rover ตามรูปที่ 4.5 ผู้วิจัยจะตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับทดสอบในโปรแกรม RTKNAVI ดังนี้

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์และค่าที่ใช้ในโปรแกรม RTKNAVI

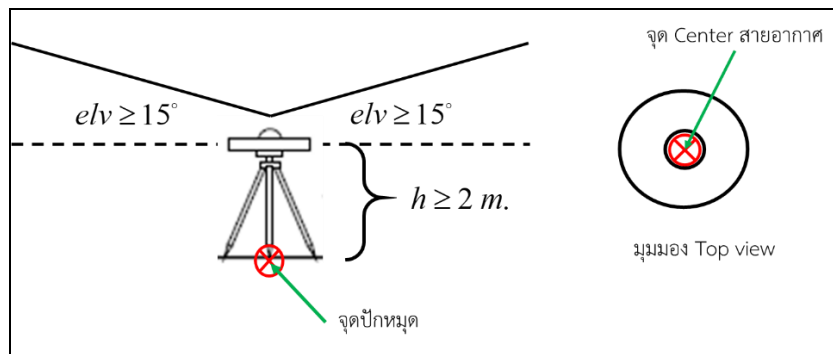
พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
ระบบดาวเทียม	GPS + Beidou + Glonass + Galileo + QZSS
โหมดการระบุตำแหน่ง	RTK – Kinematic
มุมเงย	$\geq 30^\circ$
ความสูงเหนือพื้นดินของสายอากาศ Rover	≤ 1 เมตร
ช่วงเวลาที่ทดสอบ	10:46:08.80 - 10:59:48.20

โมเดลการหน่วงเวลาในชั้นไอโอโนสเฟียร์	Broadcast
โมเดลการหน่วงเวลาในชั้นโทรโปสเฟียร์	Saastamoinen
ระยะขจัดถึงแต่ละสถานีอ้างอิง	DPT9 ≤ 2.57 กิโลเมตร / ANDA ≤ 5 เมตร / DOL ≤ 3 เมตร

จากการตั้งค่าโปรแกรม RTKNAVI ข้างต้น ผู้วิจัยจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณีดังนี้

4.1.6.1 กรณีรั้ววัดแบบหยุดนิ่ง

กรณีนี้จะมีลักษณะการติดตั้งเพื่อทดสอบดังรูปที่ 4.6

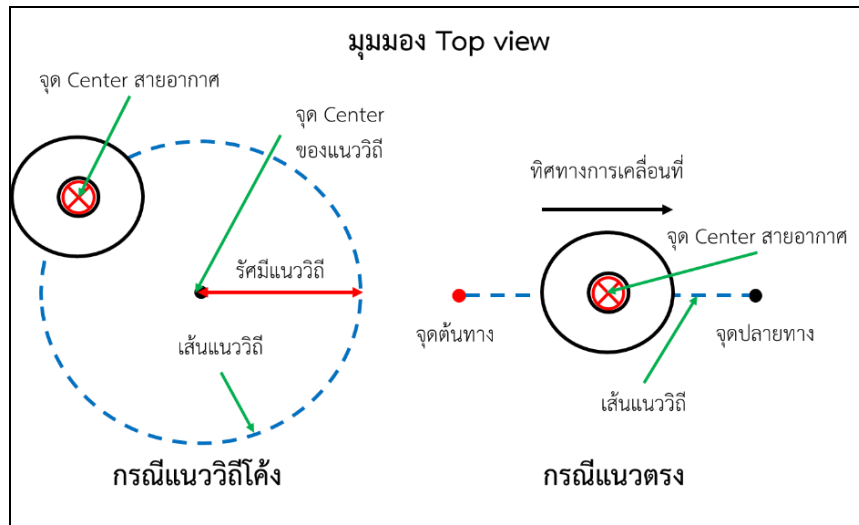


รูปที่ 4.6 การระบุตำแหน่งอุปกรณ์กรณีหยุดนิ่งกับที่

จากรูปที่ 4.6 จะติดตั้งอุปกรณ์ในที่โล่งแจ้งให้สายอากาศมีมุมเงยรับสัญญาณจากดาวเทียมอย่างน้อย 15° จากเส้นแนวระดับสายตา และอยู่สูงเหนือพื้นดินอย่างน้อย 2 เมตร รวมทั้งมีตำแหน่งตรงกันกับจุดปักหมุดบนพื้นดิน จากนั้นจะวัดความแม่นยำทางตำแหน่งจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตำแหน่งจากเทคนิค RTK ดังหัวข้อที่ 4.1.7.1 ต่อไป

4.1.6.2 กรณีรั้ววัดแบบเคลื่อนที่

เพื่อทดสอบความแม่นยำในการระบุตำแหน่งขณะเคลื่อนที่ ผู้วิจัยจะเคลื่อนที่ในแนววงกลมและในแนวเส้นตรงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การระบุตำแหน่งอุปกรณ์กรณีเคลื่อนที่

จากรูปที่ 4.7 เมื่อเคลื่อนที่แบบวงกลม จะมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. กำหนดจุดศูนย์กลางของวงกลม จากนั้นปักหมุดเอาไว้ตามกระบวนการจากรูปที่ 4.6
2. กำหนดความยาวรัศมีวงกลมอ้างอิงแล้วลากเส้นวงกลมขึ้น
3. นำอุปกรณ์ไปเก็บตำแหน่งตรงจุดศูนย์กลางวงกลมเอาไว้ จากนั้นให้เคลื่อนที่อุปกรณ์ตามแนวเส้นรอบวงในทิศวนเข็มหรือตามเข็มนาฬิกาอย่างน้อย 3 รอบ
4. คำนวณรัศมีจากระยะห่างของแต่ละตำแหน่งบนเส้นรอบวงถึงจุดศูนย์กลาง แล้วไปเปรียบเทียบกับรัศมีอ้างอิงที่ใช้วาดวงกลมอีกครั้ง โดยจะมีสมการที่เกี่ยวข้องดังหัวข้อที่ 4.1.7.2 ต่อไป

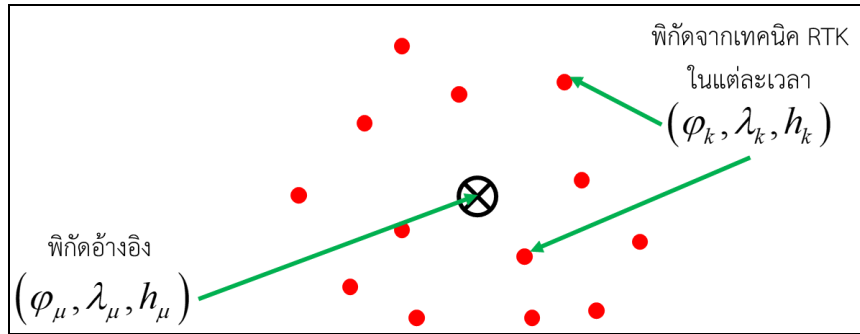
ในกรณีการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง จะมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. กำหนดจุดต้นทางและจุดปลายทางจากนั้นให้เก็บตำแหน่งทั้งสองด้วยอุปกรณ์
2. ลากเส้นตรงจากจุดต้นทางไปยังปลายทาง
3. นำอุปกรณ์ไปวางที่จุดต้นทาง จากนั้นเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ลากไปยังจุดปลายทาง
4. เดินตามเส้นทางกลับไปยังจุดต้นทางอีกครั้ง แล้วทำการทดสอบซ้ำ 3 รอบเพื่อเก็บข้อมูล

4.1.7 การวิเคราะห์ความแม่นยำทางตำแหน่ง

4.1.7.1 กรณีรั้ววัดแบบหยุดนิ่ง

ภายหลังจากทดสอบ ตำแหน่งที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ลักษณะตำแหน่งจากการทดสอบกรณีหยุดนิ่งกับที่

จากรูปที่ 4.8 ผู้วิจัยจะนำตำแหน่งที่ได้จากเทคนิค RTK ไปวิเคราะห์หาความแม่นยำด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. คำนวณหาตำแหน่งอ้างอิง โดยนำตำแหน่งจากเทคนิค RTK ทั้งไปหาค่าเฉลี่ยแบบปกติ สมมติให้เป็นตำแหน่ง $(\varphi_{\mu}, \lambda_{\mu}, h_{\mu})$
2. คำนวณระยะทางโค้ง l_k แบบ Haversine [1] ของตำแหน่งจากเทคนิค RTK ในแต่ละเวลา สมมติให้เป็น $(\varphi_k, \lambda_k, h_k)$ ดังนี้

$$a = \sin\left(\frac{\varphi_k - \varphi_{\mu}}{2}\right) \sin\left(\frac{\varphi_k - \varphi_{\mu}}{2}\right) + \cos(\varphi_{\mu}) \cos(\varphi_k) \sin\left(\frac{\lambda_k - \lambda_{\mu}}{2}\right) \sin\left(\frac{\lambda_k - \lambda_{\mu}}{2}\right) \quad (4.1)$$

$$l_k = R \times \tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{a}{1-a}}\right); R = 6,371,000 \text{ m.}$$

จากสมการดังกล่าวจะให้ระยะห่างจากตำแหน่ง $(\varphi_{\mu}, \lambda_{\mu}, h_{\mu})$ ถึงตำแหน่ง $(\varphi_k, \lambda_k, h_k)$ แต่ระยะเวลาซึ่งคำนึงถึงความโค้งของโลกแล้ว จากนั้นจะวัดความแม่นยำโดยนำไปคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่อไป

3. คำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะ l_k (แทนด้วย σ_l) ดังข้างล่าง

$$l_{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^k l_i}{k} \quad (4.2)$$

$$\sigma_l = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (l_i - l_{\mu})^2}$$

จากสมการที่ (4.2) จะทำให้ทราบถึงการเบี่ยงเบนของตำแหน่งในแต่ละเวลา (แทนด้วยระยะ l_i) โดยรวมเมื่อเทียบกับระยะ Haversine เฉลี่ย l_μ และสำหรับการวัดความแม่นยำทางตำแหน่งกรณีมีการเคลื่อนที่จะอธิบายได้ดังหัวข้อที่ 4.1.7.2 ต่อไป

ในการวัดความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งแบบหยุดนิ่งจะมีตำแหน่งอ้างอิงที่ระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK จากสถานีอ้างอิงกรมผังเมือง (DPT9) ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งอ้างอิงในการทดสอบการระบุตำแหน่งแบบหยุดนิ่ง

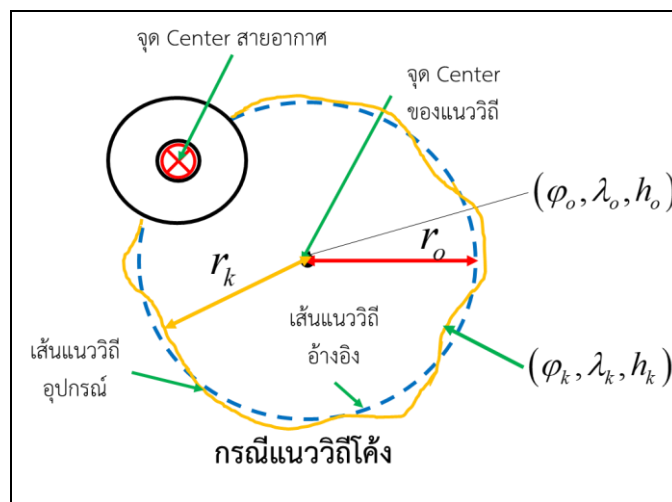
Latitude (deg.)	Longitude (deg.)	Height (m.)
13.751816883	100.595511242	-28.4580

ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ผู้วิจัยจะนำตำแหน่งอ้างอิงดังกล่าวไปคำนวณหาระยะห่างแบบ Haversine ตามสมการที่ (4.1) แล้วคิดค่าความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะห่างที่คำนวณได้ตามหัวข้อที่ 4.2.6.1 ต่อไป

4.1.7.2 กรณีรังวัดแบบเคลื่อนที่

กรณีที่ 1 เคลื่อนที่แบบวงกลม

สมมติให้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางเป็น $(\varphi_o, \lambda_o, h_o)$ ขณะที่ตำแหน่งตามเส้นแนววิถีอุปกรณ์เป็น $(\varphi_k, \lambda_k, h_k)$ มีรัศมีที่ใช้วาดวงกลมเป็น r_o เมตร ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ลักษณะตำแหน่งจากการทดสอบกรณีเคลื่อนที่แบบวงกลม

จากรูปที่ 4.9 ผู้วิจัยจะคำนวณรัศมี r_k จากตำแหน่งบนเส้นรอบวง $(\varphi_k, \lambda_k, h_k)$ และตำแหน่งที่จุดศูนย์กลาง $(\varphi_o, \lambda_o, h_o)$ ด้วยสมการ Haversine จากหัวข้อที่ 4.1.7.1 จากนั้นจะนำไปหาผลต่างกับรัศมีอ้างอิง r_o จะได้ระยะรัศมีคลาดเคลื่อน Δr โดยที่

$$\Delta r_k = r_k - r_o \quad (4.3)$$

นำ Δr ไปหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานดังข้างล่าง

$$\Delta r_\mu = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta r_i}{k} \quad (4.4)$$

$$\sigma_{\Delta r} = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (\Delta r_i - \Delta r_\mu)^2}$$

จากสมการข้างบนนี้ ผู้วิจัยจะวัดความแม่นยำตามแนวราบกรณีเคลื่อนที่แบบวงกลมด้วยค่า $\sigma_{\Delta r}$ ต่อไป

ในการทดสอบนี้ ผู้วิจัยจะกำหนดให้รัศมีอ้างอิงของวงกลมเท่ากับ 2 เมตร และมีจุดศูนย์กลางวงกลมตามตำแหน่งในตารางที่ 4.3

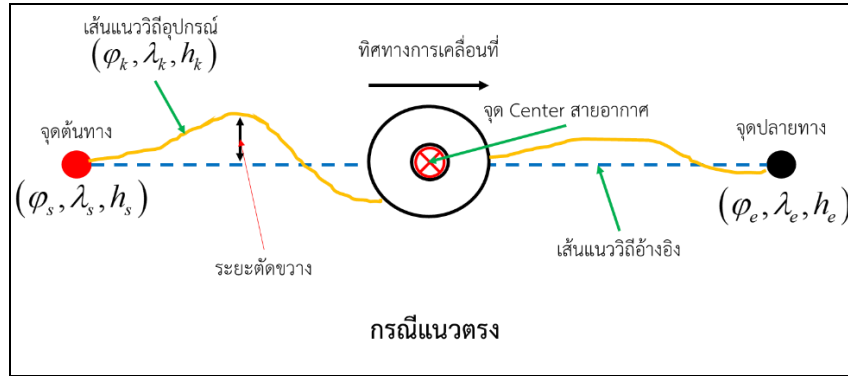
ตารางที่ 4.3 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางวงกลมและรัศมีอ้างอิง

Latitude (deg.)	Longitude (deg.)	Height (m.)	Radius (m.)
13.751814202	100.595566607	-28.4668	2

ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ผู้วิจัยจะนำตำแหน่งทั้งหมดที่ได้จากเทคนิค RTK ไปหาระยะห่างแบบ Haversine กับจุดศูนย์กลางวงกลมที่กำหนด จากนั้นจะนำไปหาผลต่างกับรัศมีอ้างอิงและคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากผลต่างที่ได้เพื่อระบุความแม่นยำทางตำแหน่งแนวราบของ Rover ขณะเคลื่อนที่ดังหัวข้อที่ 4.2.6.2 ต่อไป

กรณีที่ 2 เคลื่อนที่แบบเส้นตรง

ลักษณะของตำแหน่งอุปกรณ์เทียบกับเส้นทางที่ลากจะเป็นดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ลักษณะตำแหน่งจากการทดสอบกรณีเคลื่อนที่แบบเส้นตรง

จากรูปที่ 4.10 กำหนดตำแหน่งของจุดต้นทางเป็น $(\varphi_s, \lambda_s, h_s)$ และปลายทางเป็น $(\varphi_e, \lambda_e, h_e)$ โดยที่ตำแหน่งของอุปกรณ์เป็น $(\varphi_k, \lambda_k, h_k)$ จะสามารถคำนวณหาระยะตัดขวาง (Cross Track Distance แทนด้วย d_{xte_k}) [1] ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 a_{s \rightarrow k} &= \sin\left(\frac{\varphi_k - \varphi_s}{2}\right) \sin\left(\frac{\varphi_k - \varphi_s}{2}\right) + \cos(\varphi_s) \cos(\varphi_k) \sin\left(\frac{\lambda_k - \lambda_s}{2}\right) \sin\left(\frac{\lambda_k - \lambda_s}{2}\right) \\
 d_{s \rightarrow k} &= R \times \tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{a_{s \rightarrow k}}{1 - a_{s \rightarrow k}}}\right); R = 6,371,000 \text{ m.} \\
 \beta_{s \rightarrow e} &= \tan\left(\frac{\sin(\lambda_e - \lambda_s) \cos(\varphi_e)}{\cos(\varphi_s) \sin(\varphi_e) - \sin(\varphi_s) \cos(\varphi_e) \cos(\lambda_e - \lambda_s)}\right) \\
 \beta_{s \rightarrow k} &= \tan\left(\frac{\sin(\lambda_k - \lambda_s) \cos(\varphi_k)}{\cos(\varphi_s) \sin(\varphi_k) - \sin(\varphi_s) \cos(\varphi_k) \cos(\lambda_k - \lambda_s)}\right) \\
 d_{xte_k} &= R \times \sin\left(\sin\left(\frac{d_{s \rightarrow k}}{R}\right) \sin(\beta_{s \rightarrow k} - \beta_{s \rightarrow e})\right)
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

จากสมการดังกล่าว หากอุปกรณ์มีความแม่นยำตามแนวราบสูง ระยะตัดขวาง d_{xte_k} ควรจะมีค่าใกล้เคียงศูนย์ เพื่อวัดความแม่นยำโดยรวม ผู้วิจัยจะนำระยะดังกล่าวไปคำนวณหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานดังสมการที่ (4.6)

$$d_{xte_{\mu}} = \frac{\sum_{i=1}^k d_{xte_i}}{k} \quad (4.6)$$

$$\sigma_{d_{xte}} = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (d_{xte_i} - d_{xte_{\mu}})^2}$$

จากสมการข้างบน ผู้วิจัยจะวัดความแม่นยำทางตำแหน่งตามแนวราบกรณีเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงด้วยค่า $\sigma_{d_{xte}}$ ที่คำนวณไว้

สำหรับการวิเคราะห์ความแม่นยำทางด้านความสูงตามหัวข้อที่ 4.1.7.1 จะวัดจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความสูง σ_h ดังนี้

$$h_{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^k h_i}{k} \quad (4.7)$$

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (h_i - h_{\mu})^2}$$

เพื่อวัดประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งด้านความสูงโดยรวม จะวัดได้จากค่า σ_h สำหรับตำแหน่งของต้นทางและปลายทางในการทดสอบ จะระบุเอาไว้ในตารางที่ 4.4

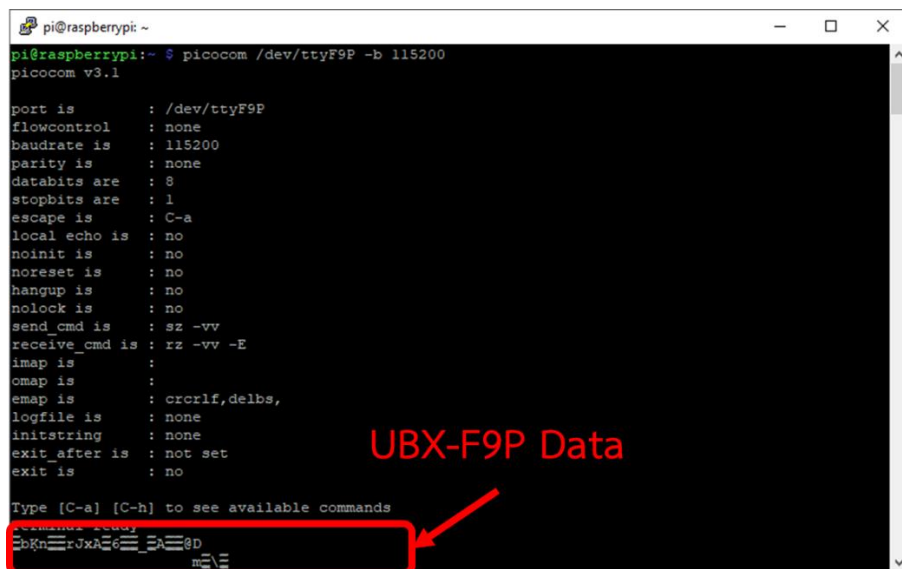
ตารางที่ 4.4 ตำแหน่งต้นทางและปลายทางของการทดสอบการความแม่นยำทางตำแหน่งเมื่อเคลื่อนที่แบบเส้นตรง

จุดบนเส้นทาง	Latitude (deg.)	Longitude (deg.)	Height (m.)
ต้นทาง	13.751816967	100.595511143	-28.4667
ปลายทาง	13.751795355	100.595577949	-28.4492

ภายหลังการทดสอบ ผู้วิจัยจะนำตำแหน่งของ Rover ไปคำนวณหาระยะตัดขวาง (XTE) กับตำแหน่งต้นทางและปลายทางดังกล่าวตามสมการที่ (4.5) จากนั้นจะคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากระยะ XTE ที่ได้โดยมีผลการทดสอบดังหัวข้อที่ 4.2.6.3

4.2 ผลการทดสอบอุปกรณ์สถานีอ้างอิงที่สอดคล้องกับตัวชี้วัด

4.2.1 ผลการทดสอบสายอากาศและเครื่องรับสัญญาณ GNSS ชนิดสองความถี่



```
pi@raspberrypi:~$ picocom /dev/ttyF9P -b 115200
picocom v3.1

port is       : /dev/ttyF9P
flowcontrol   : none
baudrate is   : 115200
parity is     : none
databits are  : 8
stopbits are  : 1
escape is     : C-a
local echo is : no
noinit is    : no
noreset is   : no
hangup is    : no
nolock is    : no
send_cmd is   : sz -vv
receive_cmd is : rz -vv -E
imap is      :
omap is      :
emap is      : crCrLf,delbs,
logfile is   : none
initstring   :
exit_after is : not set
exit is      : no

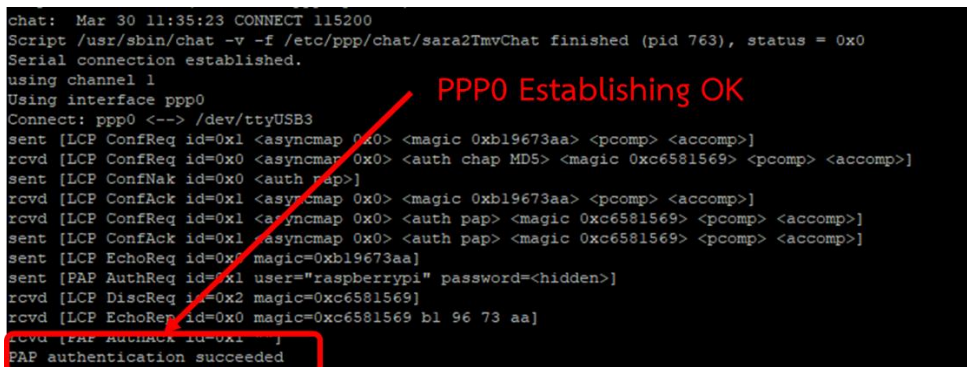
Type [C-a] [C-h] to see available commands

[raw data]
bKnJxAcE_A@D
m\;
```

รูปที่ 4.11 การทดสอบรับข้อมูลจากบอร์ด UBX-F9P

จากรูปที่ 4.11 หลังจากใช้คำสั่งอ่านข้อมูล พบว่าในกรอบสีแดงจะมีข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณ UBX-F9P ส่งออกมาซึ่งอยู่ในรูปแบบของ UBX Binary ที่จะนำไปประมวลผลเป็นข้อมูล RTCM แล้วส่งออกไปยังคลาวด์ NTRIP ต่อไป

4.2.2 ผลการทดสอบวงจรสื่อสารข้อมูลผ่านเครือข่าย 3G/4G



```
chat: Mar 30 11:35:23 CONNECT 115200
Script /usr/sbin/chat -v -f /etc/ppp/chat/sara2TmvChat finished (pid 763), status = 0x0
Serial connection established.
using channel 1
Using interface ppp0
Connect: ppp0 <-> /dev/ttyUSB3
sent [LCP ConfReq id=0x1 <asynmap 0x0> <magic 0xb19673aa> <pcomp> <accomp>]
rcvd [LCP ConfReq id=0x0 <asynmap 0x0> <auth chap MD5> <magic 0xc6581569> <pcomp> <accomp>]
sent [LCP ConfNak id=0x0 <auth pap>]
rcvd [LCP ConfAck id=0x1 <asynmap 0x0> <magic 0xb19673aa> <pcomp> <accomp>]
rcvd [LCP ConfReq id=0x1 <asynmap 0x0> <auth pap> <magic 0xc6581569> <pcomp> <accomp>]
sent [LCP ConfAck id=0x1 <asynmap 0x0> <auth pap> <magic 0xc6581569> <pcomp> <accomp>]
sent [LCP EchoReq id=0x0 magic=0xb19673aa]
sent [PAP AuthReq id=0x1 user="raspberrypi" password=<hidden>]
rcvd [LCP DiscReq id=0x2 magic=0xc6581569]
rcvd [LCP EchoReq id=0x0 magic=0xc6581569 b1 96 73 aa]
rcvd [PAP AuthAck id=0x1 ]
PPP authentication succeeded
```

รูปที่ 4.12 ผลการสถาปนาอินเทอร์เน็ตเฟส PPP0

จากรูปที่ 4.12 ในกรอบสีแดงแสดงผลว่า “PAP authentication succeeded” แปลว่าการ
สถาปนาการเชื่อมต่อของอินเทอร์เฟซ PPP0 สำเร็จแล้ว จากนั้นจะตรวจสอบว่าในสถานีอ้างอิงมี
อินเทอร์เฟซดังกล่าวเกิดขึ้นหรือไม่ดังรูปที่ 4.13

```
ppp0: flags=4305<UP, POINTOPOINT, RUNNING, NOARP, MULTICAST> mtu 1500
    inet 10.101.215.68 netmask 255.255.255.255 destination 10.64.64.64
    ppp encapsulation 0 (Point to Point Protocol)
    RX packets 6 bytes 102 (102.0 B)
    RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0
    TX packets 7 bytes 141 (141.0 B)
    TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0
```

PPP0 interface

รูปที่ 4.13 ผลการตรวจสอบอินเทอร์เฟซ PPP0 ของสถานีอ้างอิง

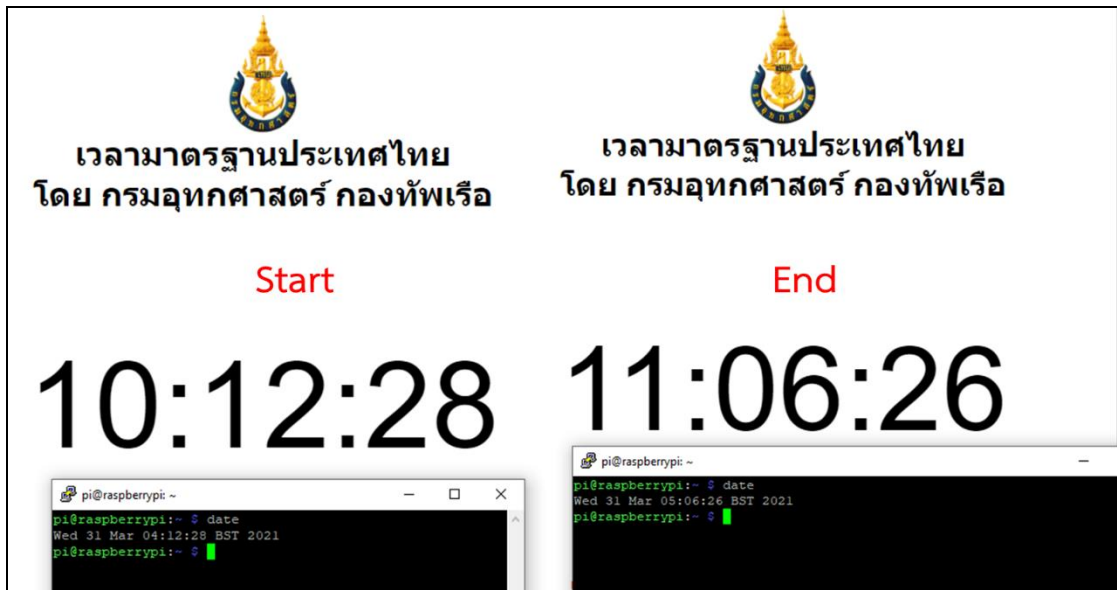
ต่อไปจะทดสอบการเชื่อมต่อกับเว็บไซต์ Google ผ่านที่อยู่ IP เป็น 8.8.8.8 ดังรูปที่ 4.14

```
pi@raspberrypi:~/3G $ ping 8.8.8.8
PING 8.8.8.8 (8.8.8.8) 56(84) bytes of data:
64 bytes from 8.8.8.8: icmp_seq=1 ttl=253 time=531 ms
64 bytes from 8.8.8.8: icmp_seq=2 ttl=253 time=221 ms
64 bytes from 8.8.8.8: icmp_seq=3 ttl=253 time=230 ms
64 bytes from 8.8.8.8: icmp_seq=4 ttl=253 time=230 ms
64 bytes from 8.8.8.8: icmp_seq=5 ttl=253 time=220 ms
64 bytes from 8.8.8.8: icmp_seq=6 ttl=253 time=220 ms
64 bytes from 8.8.8.8: icmp_seq=7 ttl=253 time=210 ms
```

รูปที่ 4.14 ผลการเชื่อมต่อกับเว็บไซต์ Google

จากรูปที่ 4.14 พบว่าสามารถเชื่อมต่อกับเว็บไซต์ Google ได้ โดยสังเกตว่ามีการแจ้งเวลาที่
ใช้ในการสื่อสารกลับมา (ตรง time= ...) แสดงว่าสถานีอ้างอิงสามารถเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตได้แล้ว

4.2.3 ผลการทดสอบวงจรสัญญาณนาฬิกาประเภท Real-Time Clock (RTC)



รูปที่ 4.15 ผลการตรวจสอบเวลาของวงจรร RTC เทียบกับกรมอุทกศาสตร์ฯ

จากรูปที่ 4.15 ทางซ้ายมือจะแสดงเวลาเริ่มต้นของสถานีอ้างอิงที่บันทึกเอาไว้แบบ UTC ในขณะที่เวลาของกรมฯ จะเป็นเวลาท้องถิ่น หลังจากปิดสถานีอ้างอิงครบตามเวลาที่กำหนดแล้วเปิดขึ้นอีกครั้ง พบว่าเวลาของสถานีฯ ยังคงนับต่อโดยมีค่าตรงกับเวลาของกรมฯ ครึ่งปัจจุบัน

4.2.4 ผลการทดสอบแบตเตอรี่ของอุปกรณ์สถานีอ้างอิง



รูปที่ 4.16 กระแสขณะใช้งานเต็มที่ของสถานีอ้างอิง

จากรูปที่ 4.16 จะพบว่าสถานีอ้างอิงใช้กระแสประมาณ 560 mA เท่านั้น โดยแบตเตอรี่ที่ผู้วิจัยใช้ในการทดสอบจะเป็นแบตเตอรี่แห้ง (เซลล์ตะกั่ว) ซึ่งทนทานต่อการใช้งานกลางแจ้งและทำงานได้ต่อเนื่องอย่างน้อย 3 ชั่วโมง เมื่อใช้แบตเตอรี่มีความจุตั้งแต่ 5 AH ขึ้นไป

4.2.5 ผลการทดสอบหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) และหน่วยจัดเก็บข้อมูล (RAM)

```

pi@raspberrypi:~ $ vcgencmd measure_temp
temp=37.6'C Temperature
pi@raspberrypi:~ $ df -h
Filesystem      Size  Used Avail Use% Mounted on
/dev/root       15G   3.1G  11G   23% /
devtmpfs        430M   0   430M   0% /dev
tmpfs           463M   0   463M   0% /dev/shm
tmpfs           463M  6.2M  456M   2% /run
tmpfs           5.0M  4.0K  5.0M   1% /run/lock
tmpfs           463M   0   463M   0% /sys/fs/cgroup
/dev/mmcblk0p1  253M   48M  205M  19% /boot
tmpfs           93M   0    93M   0% /run/user/1000
pi@raspberrypi:~ $

```

รูปที่ 4.17 การทดสอบ CPU และ RAM ของสถานีอ้างอิง

จากรูปที่ 4.17 ผู้ใช้งานทดสอบการทำงานของ CPU โดยป้อนคำสั่งตรวจสอบอุณหภูมิของ CPU ลงไป พบว่ามีการแสดงอุณหภูมิกลับขึ้นมาเป็น 37.6° และเมื่อใช้คำสั่งแสดงพื้นที่หน่วยความจำ จะมีข้อมูลเกี่ยวกับการใช้พื้นที่สำหรับระบบปฏิบัติการของสถานีอ้างอิงปรากฏขึ้นตามปกติ

4.2.6 ผลการทดสอบซอฟต์แวร์ประมวลผลข้อมูล RTK สำหรับอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover

4.2.6.1 การระบุตำแหน่งแบบหยุดนิ่ง

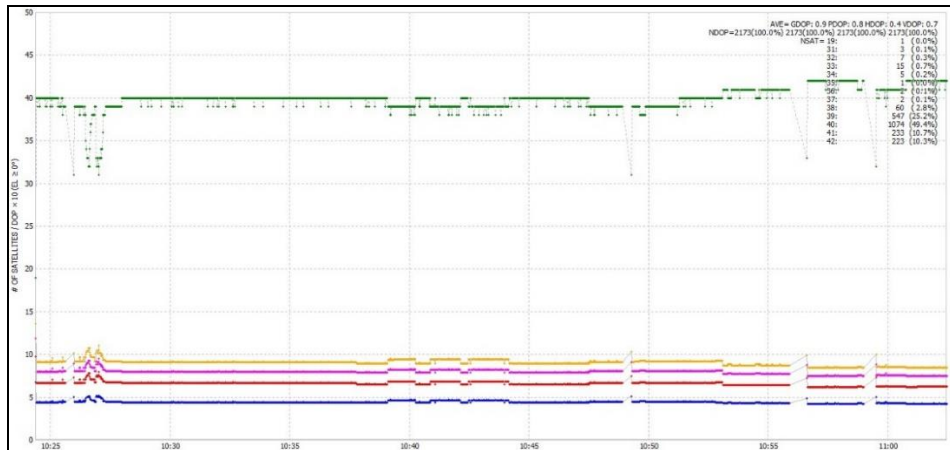
ตำแหน่งของ Rover ที่ระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK จากแต่ละสถานีอ้างอิง จะมีผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK

พารามิเตอร์ที่วัดได้	สถานีอ้างอิงที่ใช้		
	DPT9	DOL	ANDA
TTFA (วินาที)	40	36	320
Fix rate (%)	90.2	4.7	44.1

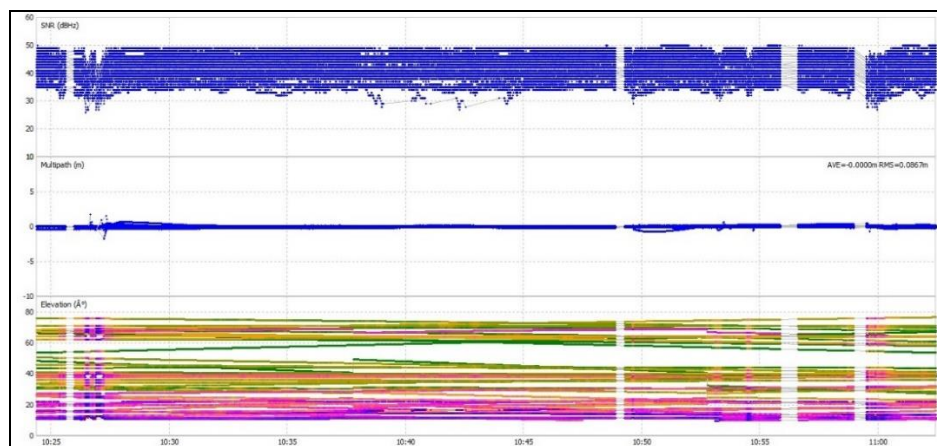
จากตารางที่ 4.5 ผู้วิจัยจะนำไฟล์ข้อมูลระยะเทียม (อยู่ในไฟล์ Observation) ของแต่ละสถานีอ้างอิงไปแสดงกราฟของระบบดาวเทียมที่มองเห็น รวมทั้งลักษณะของสัญญาณพหุวิถี (Multipath Signal) ได้ดังต่อไปนี้

ลักษณะจำนวนดาวเทียมในแต่ละเวลาที่สถานีอ้างอิงกรมผังเมืองรับได้ จะเป็นดังรูปที่ 4.18



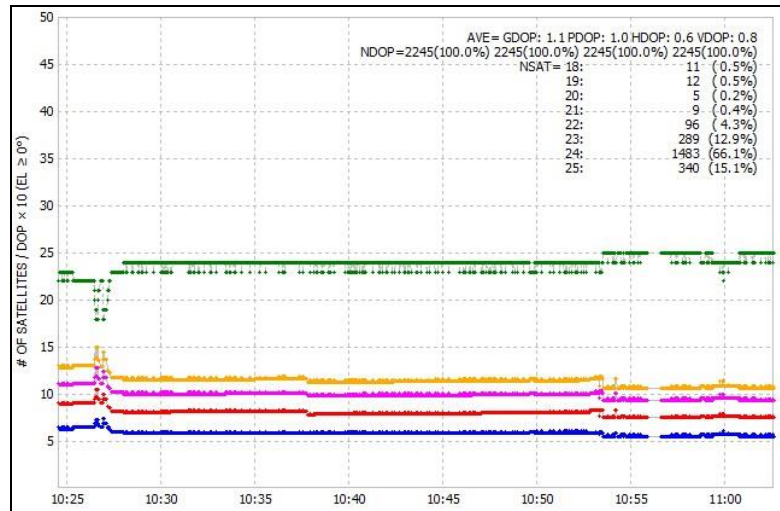
รูปที่ 4.18 จำนวนดาวเทียมที่สถานีอ้างอิงกรมผังเมืองรับได้ในแต่ละเวลา

จากรูปที่ 4.18 สถานีอ้างอิงกรมผังเมืองจะรับสัญญาณจากดาวเทียมได้เฉลี่ยถึง 40 ดวง มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนดาวเทียมตามเวลาที่ต่ำ และมีลักษณะของสัญญาณพหุวิถีบริเวณโดยรอบสถานีดังรูปที่ 4.19



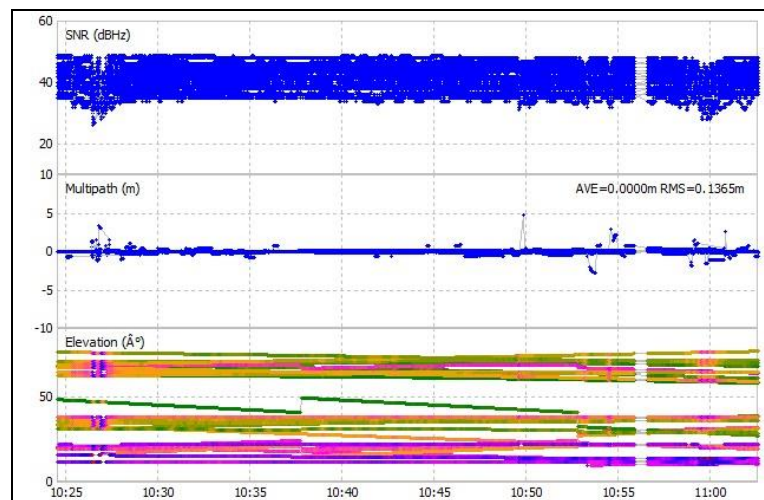
รูปที่ 4.19 สัญญาณพหุวิถีบริเวณสถานีอ้างอิงกรมผังเมือง

จากรูปที่ 4.19 ในกราฟที่สองคือระดับสัญญาณพหุวิถีที่ปะปนมากับสัญญาณ GNSS โดยมีค่าเฉลี่ย 8.7 เซนติเมตร ขณะที่สถานีอ้างอิงกรมที่ดิน (DOL) จะมีจำนวนดาวเทียมที่รับสัญญาณได้ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 จำนวนดาวเทียมที่สถานีอ้างอิงกรมที่ดินรับได้ในแต่ละเวลา

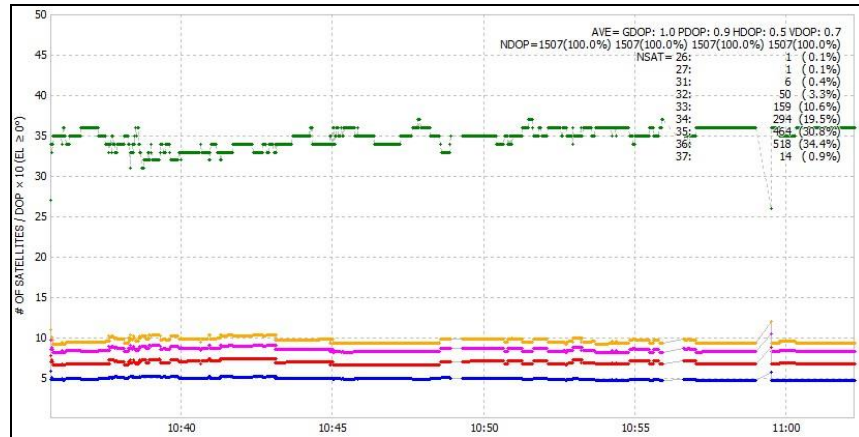
จากรูปที่ 4.20 สถานีอ้างอิงกรมที่ดินรับสัญญาณจากดาวเทียม GNSS ได้เฉลี่ย 24 ดวง ซึ่งต่ำกว่ากรมผังเมืองเกือบครึ่งหนึ่ง จากนั้นจะพิจารณาสัญญาณพหุวิถีที่ได้ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 สัญญาณพหุวิถีบริเวณสถานีอ้างอิงกรมที่ดิน

จากรูปที่ 4.21 ระดับสัญญาณพหุวิถีโดยเฉลี่ยของกรมที่ดินมีค่าประมาณ 13.7 เซนติเมตรซึ่งสูงกว่าของสถานีอ้างอิงกรมผังเมืองเล็กน้อย

ที่ตำแหน่งของสถานีอ้างอิงประจำโครงการ (ANDA) ซึ่งมีต้นไม้และสิ่งปลูกล้อมรอบ จะมีลักษณะของจำนวนดาวเทียมที่รับสัญญาณได้เป็นดังรูปที่ 4.22



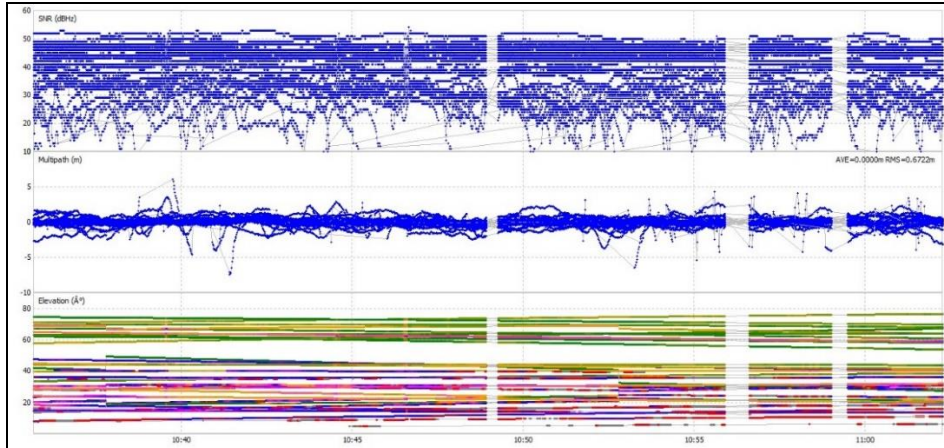
รูปที่ 4.22 จำนวนดาวเทียมที่สถานีอ้างอิงประจำโครงการฯ รับได้ในแต่ละเวลา

จากรูปที่ 4.22 จะมีจำนวนดาวเทียมที่รับได้โดยเฉลี่ย 36 ดวง และมีการเปลี่ยนแปลงของจำนวนดาวเทียมค่อนข้างสูง เนื่องจากสภาพแวดล้อมโดยรอบไม่โล่งแจ้งดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ตำแหน่งของสถานีอ้างอิงประจำโครงการฯ (จุดสีเขียว)

จากรูปที่ 4.23 จะพบว่าสถานีอ้างอิงล้อมรอบด้วยกำแพง ต้นไม้ และโครงสร้างบางส่วนของทางด่วน ซึ่งมีโอกาสเกิดสัญญาณพหุวิถีรบกวนได้มากและมีลักษณะของสัญญาณดังกล่าวตามรูปที่ 4.24



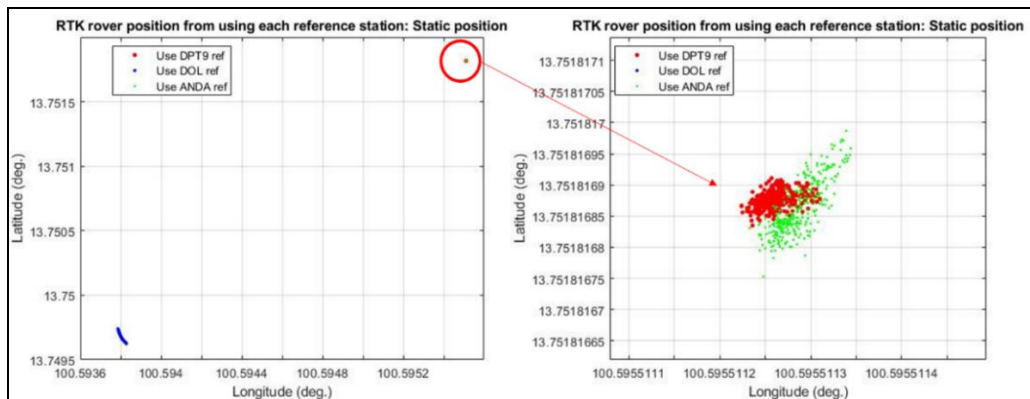
รูปที่ 4.24 สัญญาณพหุวิถีบริเวณสถานีอ้างอิงประจำโครงการ

จากรูปที่ 4.24 เนื่องจากมีสิ่งกีดขวางการรับสัญญาณ GNSS อยู่โดยรอบของสถานีอ้างอิง จึงทำให้เกิดสัญญาณพหุวิถีในระบบสูงถึง 67.22 เซนติเมตร

เมื่อลองวิเคราะห์ตามรูปที่ 4.18 ถึงรูปที่ 4.24 กับผลจากตารางที่ 4.5 จะพบว่าสถานีอ้างอิงที่มีการเปลี่ยนแปลงของจำนวนดาวเทียมและระดับของสัญญาณพหุวิถีต่ำ จะให้ตำแหน่งที่มีสถานะเป็น Fix ได้อย่างรวดเร็ว ขณะที่สถานีอ้างอิงซึ่งมีสัญญาณพหุวิถีปะปนสูง จะใช้เวลานานที่นานขึ้น เพื่อให้ได้ตำแหน่งที่มีสถานะเป็น Fix

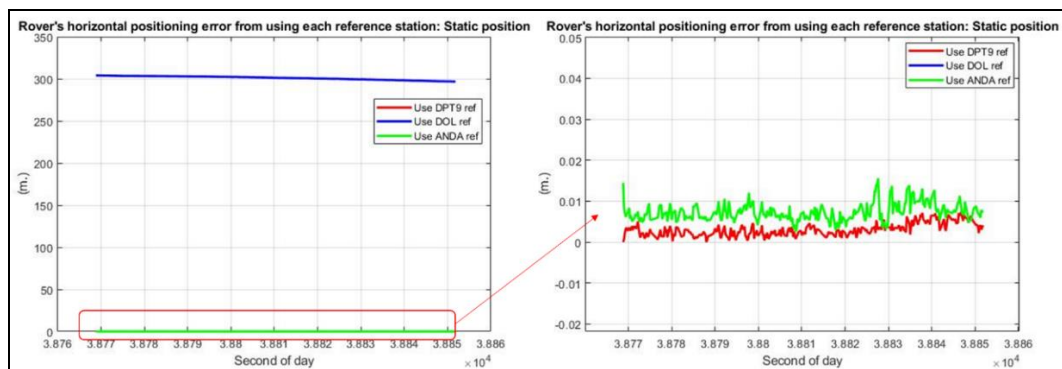
สำหรับอิทธิพลของจำนวนดาวเทียมโดยเฉลี่ยที่มีผลต่อการระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK หากมีข้อมูลจากดาวเทียมหลายดวง จะช่วยให้ระบบคำนวณตำแหน่งที่มีสถานะเป็น Fix ได้ต่อเนื่องมากขึ้น ขณะที่การมีจำนวนดาวเทียมน้อย แม้จะให้ตำแหน่งที่เป็น Fix เร็วกว่า แต่จะขาดเสถียรในการคำนวณตำแหน่งเนื่องจากมีข้อมูลมาแก้ไขจำนวนเฟสคลื่นพาห์ไม่เพียงพอ

ต่อไปจะแสดงตำแหน่งของ Rover ของการทดสอบแบบหยุดนิ่งกับที่ได้ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 ตำแหน่งของ Rover ของการทดสอบแบบหยุดนิ่งกับที่ได้ดังรูปที่

จากรูปที่ 4.25 ตำแหน่งของ Rover ที่ใช้สถานีอ้างอิงกรมผังเมือง (DPT9) กรมที่ดิน (DOL) และสถานีอ้างอิงประจำโครงการฯ (ANDA) จะแทนด้วยจุดสีแดง สีน้ำเงิน และสีเขียวตามลำดับ จากการทดสอบ การใช้ข้อมูลสถานีฯ กรมที่ดินจะให้ตำแหน่ง Rover ที่คลาดเคลื่อนสูงดังรูปซ้าย ขณะที่การใช้สถานีฯ DPT9 กับ ANDA จะให้ตำแหน่งของ Rover ที่ใกล้เคียงกันดังรูปขวา หลังจากนำไปวิเคราะห์ความแม่นยำทางตำแหน่งจะได้ผลดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ระยะห่างแบบ Haversine จาก Rover ถึงจุดอ้างอิง

จากรูปที่ 4.26 จะพบว่าตำแหน่งของ Rover จากการใช้สถานีฯ DOL จะอยู่ห่างจากจุดอ้างอิงประมาณ 300 เมตร ขณะที่การใช้สถานีฯ DPT9 และ ANDA จะมีตำแหน่งของ Rover ใกล้เคียงกันและอยู่ห่างจากจุดอ้างอิงไม่เกิน 2 เซนติเมตร เมื่อนำไปคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 95 ของระยะ Haversine ได้ผลดังตารางที่ 4.6

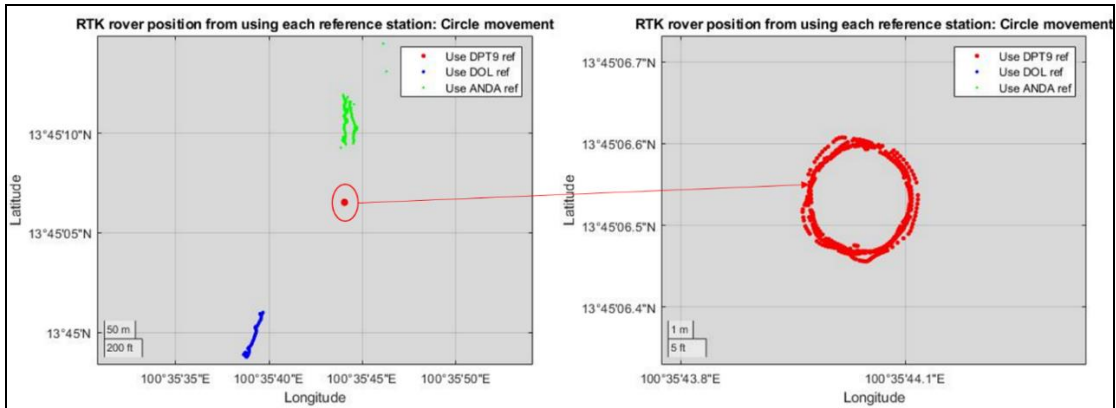
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ระยะ Haversine จาก Rover ถึงจุดอ้างอิง กรณีอยู่นิ่งกับที่

สถานีอ้างอิงที่ใช้	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เมตร)	เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 95 (เมตร)
DPT9	0.0015	0.0061
DOL	2.0752	303.7174
ANDA	0.0022	0.0121

จากตารางที่ 4.6 พบว่ากรณีที่ระบุตำแหน่ง Rover แบบอยู่นิ่งกับที่โดยใช้สถานีฯ ANDA จะมีความแม่นยำใกล้เคียงกับการใช้สถานีฯ กรมผังเมืองซึ่งเป็นตัวเทียบหลักได้ และเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการใช้สถานีอ้างอิงเพื่อระบุตำแหน่งของ Rover ขณะเคลื่อนที่ จะมีผลการทดสอบดังหัวข้อที่ 4.2.6.2 และ 4.2.6.3

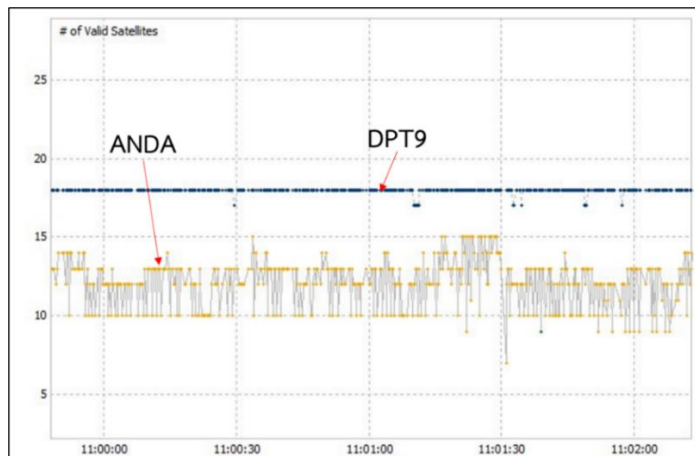
4.2.6.2 การระบุตำแหน่งเมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลม

จากการทดสอบ จะได้ตำแหน่งของ Rover ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ตำแหน่งของ Rover ของการทดสอบแบบเคลื่อนที่เป็นวงกลม

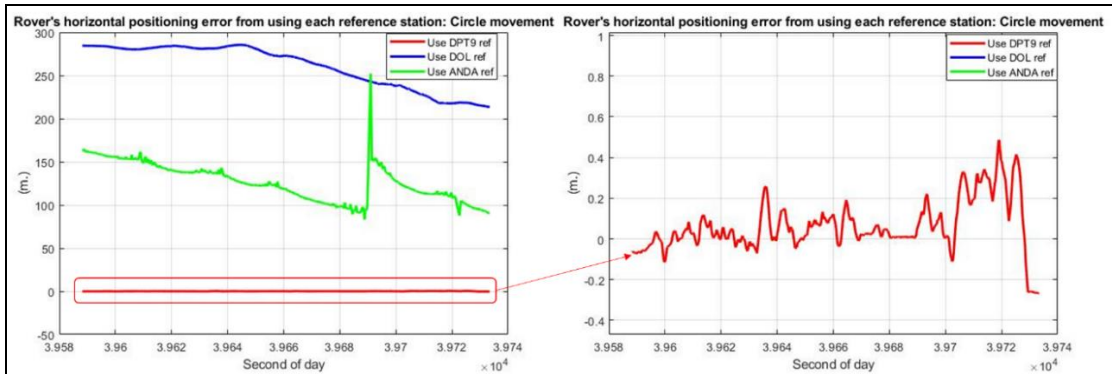
จากรูปที่ 4.27 จะพบว่าการใช้สถานีฯ DPT9 จะได้แนววิถีของ Rover เป็นวงกลมที่มีรัศมีประมาณ 2 เมตร และเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของความผิดพลาดทางตำแหน่งที่ใช้สถานีฯ ANDA จะแสดงการรับสัญญาณดาวเทียมของทั้งสองไว้ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 จำนวนดาวเทียมที่ Rover และสถานีอ้างอิงใช้ร่วมกัน (สีน้ำเงิน) DPT9 (สีเหลือง) ANDA

จากรูปที่ 4.28 จะพบว่าจำนวนดาวเทียมจากเทคนิค RTK ที่ใช้สถานีฯ ANDA มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาสูง เนื่องจากมีสัญญาณพหุวิถีรบกวนมาก ทำให้การประมาณจำนวนเฟสคลื่นพาห์ด้วยสถานีฯ ดังกล่าวได้ตำแหน่งที่ผิดพลาด ขณะที่การใช้ข้อมูลจากสถานีฯ DPT9 ซึ่งมี

สัญญาณพหุวิธีต่ำจะแก้ไขจำนวนเฟสคลื่นพาห์และให้ตำแหน่งที่แม่นยำกว่า หลังจากนำตำแหน่งของ Rover ไปคำนวณความคลาดเคลื่อนตามสมการที่ (4.3) ได้ผลดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ความคลาดเคลื่อนรัศมีวงกลมของ Rover (ซ้าย) ภาพรวม (ขวา) กรณีที่ใช้สถานีฯ DPT9

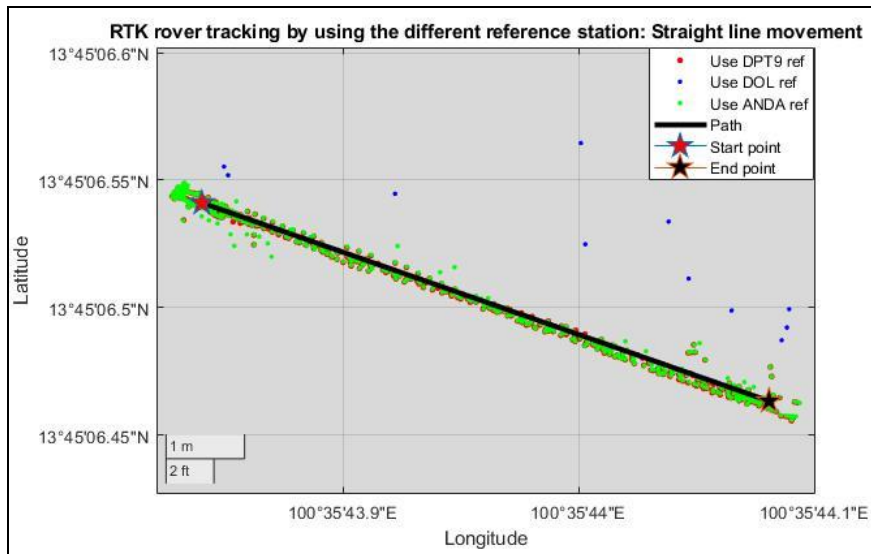
จากรูปที่ 4.29 จากการใช้สถานี DPT9 เพื่อระบุตำแหน่งของ Rover จะให้ความคลาดเคลื่อนทางรัศมีประมาณ 40 เซนติเมตร ขณะที่การใช้สถานีฯ ANDA จะระบุตำแหน่ง Rover ได้ผิดพลาดสูง เนื่องจากมีการเปลี่ยนจำนวนดาวเทียมที่สูง ขณะที่การใช้สถานีฯ DOL ซึ่งขาดความเสถียรในการระบุตำแหน่งจะมีความคลาดเคลื่อนทางรัศมีสูงที่สุด โดยสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ความคลาดเคลื่อนทางรัศมีของ Rover ที่เคลื่อนที่แบบวงกลม

สถานีอ้างอิงที่ใช้	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เมตร)	เปอร์เซนไทล์ที่ 95 (เมตร)
DPT9	0.1292	0.3241
DOL	24.5753	284.4218
ANDA	21.8146	158.3388

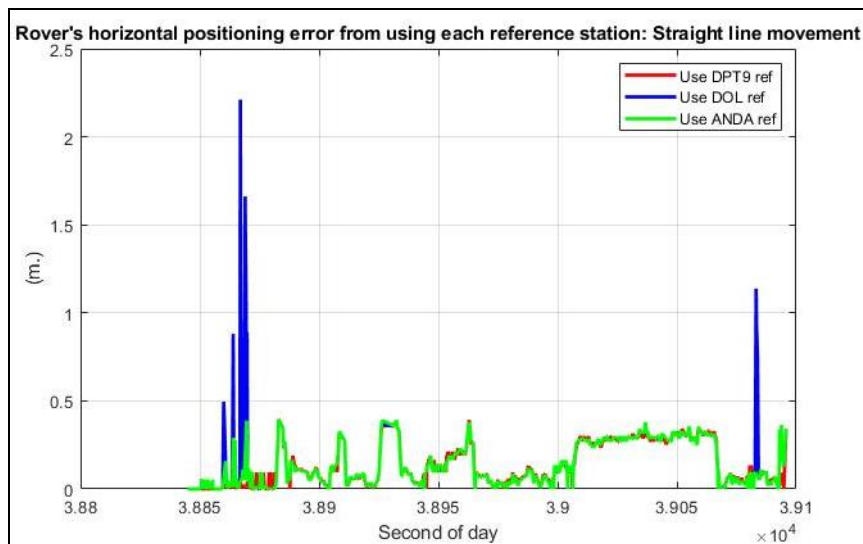
ต่อไปจะวัดประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งของ Rover ขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงดังหัวข้อที่ 4.2.6.3

4.2.6.3 การระบุตำแหน่งเมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง



รูปที่ 4.30 ตำแหน่งของ Rover ของการทดสอบแบบเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง

จากรูปที่ 4.30 จุดต้นทางและปลายทางจะแทนด้วยรูปดาวสีแดงและสีดำตามลำดับซึ่งเชื่อมถึงกันด้วยเส้นตรงสีดำ จากการทดสอบพบว่าตำแหน่งของ Rover ที่ใช้ค่าแก้ไขจากสถานี DPT9 กับ ANDA จะอยู่ใกล้กับเส้นทางเคลื่อนที่มากกว่าเมื่อเทียบกับตำแหน่งของ Rover ที่ใช้ค่าแก้ไขจากสถานี กรมที่ดิน หลังจากนำตำแหน่งของ Rover แต่ละกรณีไปคำนวณหาระยะตัดขวางตามสมการที่ (4.5) จะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ระยะตัดขวางของตำแหน่ง Rover ถึงเส้นทาง

จากรูปที่ 4.31 ผู้วิจัยสามารถคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมทั้งเปอร์เซ็นต์ที่ 95 ของ ระยะตัดขวางได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของ Rover เทียบกับเส้นทาง

สถานีอ้างอิงที่ใช้	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เมตร)	เปอร์เซ็นต์ที่ 95 (เมตร)
DPT9	0.1141	0.3149
DOL	0.2017	0.4453
ANDA	0.1163	0.3289

จากตารางที่ 4.8 จะพบว่ากรณีที่ระบุตำแหน่งของ Rover โดยใช้ค่าแก้ไขจากสถานีฯ ANDA จะได้ความแม่นยำทางตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับการใช้สถานีฯ DPT9 ขณะที่การใช้ค่าแก้ไขจากสถานีฯ กรมที่ดินจะให้ตำแหน่งของ Rover ที่คลาดเคลื่อนมากที่สุด เนื่องจากมีจำนวนดาวเทียมที่รับได้ต่ำกว่า จากผลการทดสอบทั้งหมดนี้ ผู้วิจัยสามารถสรุปผลได้ดังหัวข้อที่ 7.1.6

บทที่ 5

การออกแบบการทดสอบและผลการทดสอบอุปกรณ์ Rover

5.1 การออกแบบการทดสอบอุปกรณ์ Rover ที่สอดคล้องกับตัวชี้วัด

จากรายละเอียดการทดสอบอุปกรณ์ Rover ตามที่ระบุไว้ในสัญญา จะแบ่งการทดสอบทั้งหมดออกเป็น 6 ส่วนดังนี้

5.1.1 การทดสอบสายอากาศและเครื่องรับสัญญาณ GNSS ชนิดสองความถี่

เพื่อทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ Rover ที่ออกแบบขึ้น ผู้วิจัยจะเชื่อมต่อสายอากาศ BT-147 เข้ากับอุปกรณ์ Rover ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 อุปกรณ์ Rover ที่เชื่อมต่อกับสายอากาศ BT-147 แล้ว

จากรูปที่ 5.1 ส่วนที่ใช้รับสัญญาณ GNSS ซึ่งอยู่ภายใน Rover จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์จากรูปที่ 3.13 ผู้วิจัยได้เขียนโปรแกรมให้บอร์ด TTGO PCIE (หรือบอร์ดประมวลผล) ให้ส่งข้อมูลค่าแก้ไขทางตำแหน่งจากสถานีอ้างอิงประจำโครงการเข้าไปยังบอร์ดอุปกรณ์ Rover ผ่านทาง UART และรับตำแหน่งที่ระบุด้วยเทคนิค RTK ในรูปแบบ NMEA [2] จากการประมวลผลของเครื่องรับฯ กลับออกมา (ไม่จำเป็นต้องใช้โปรแกรม RTKLIB ในการระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK ดังในรายงานฯ วงดที่ 2) เมื่อนำไปทดสอบกลางแจ้ง จะมีการแสดงสถานะข้อมูลทางตำแหน่งดังกล่าวเอาไว้ในหัวข้อที่ 5.2.1 ต่อไป

5.1.2 การทดสอบวงจรสื่อสารข้อมูลผ่านเครือข่าย 3G/4G และเครือข่าย WIFI

เพื่อทดสอบการสื่อสารกับเครือข่าย 3G/4G (ในโครงการนี้เลือกใช้ LTE) ผู้วิจัยจะเขียนโปรแกรมลงบนบอร์ดประมวลผลในรูปที่ 3.12 เพื่อสถาปนาการเชื่อมกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโมดูล SIMCOM 7600 E โดยภายในโปรแกรมหดงกล่าวจะมีกระบวนการดังข้างล่าง

1. จ่ายไฟเลี้ยงเข้าสู่โมดูล SIMCOM A7600E ผ่านคำสั่ง `digitalWrite(POWER_PIN, HIGH);`
2. กำหนดการสื่อสารแบบ Serial ระหว่างบอร์ดประมวลผลกับโมดูล SIMCOM 7600E ด้วยคำสั่ง `SerialAT.begin(UART_BAUD, SERIAL_8N1, PIN_RX, PIN_TX);`
3. เริ่มต้นการใช้งานโมดูล SIMCOM 7600E ด้วยคำสั่ง `modem.init()`
4. เริ่มเชื่อมต่อกับโมดูลด้วยคำสั่ง `modem.gprsConnect(apn, gprsUser, gprsPass)`

สำหรับผลการเชื่อมต่อกับเครือข่าย LTE และ WIFI ผู้วิจัยจะแสดงผลไว้ในหัวข้อที่ 5.2.2 ต่อไป

5.1.3 การทดสอบวงจรสัญญาณนาฬิกาประเภท Real Time Clock (RTC)

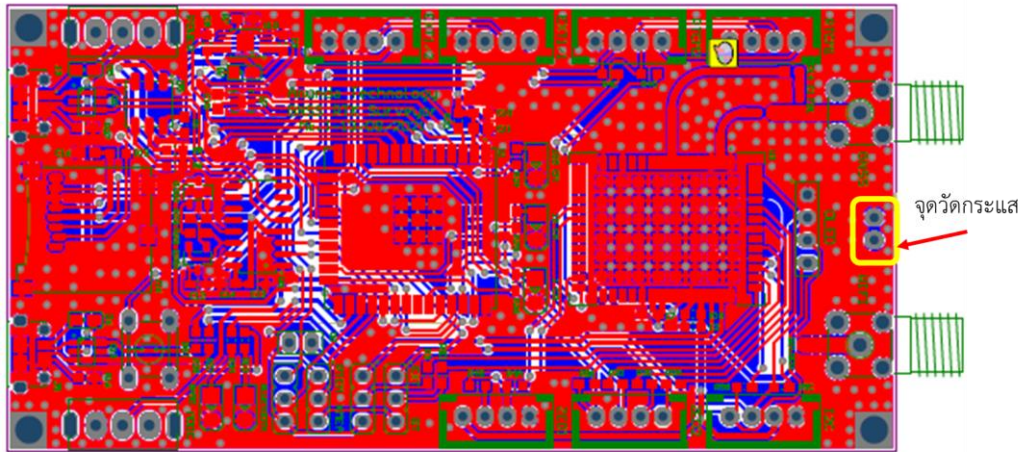
เนื่องจากบอร์ดประมวลผลอุปกรณ์ Rover เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานแบบชั่วคราว จึงไม่จำเป็นต้องตั้งหรือควบคุมเวลาการใช้งานด้วยวงจร RTC แต่จะมีการระบุเวลาผ่านการปรับแก้เวลาด้วยข้อมูล NMEA จากเครื่องรับสัญญาณ GNSS (ขณะที่สถานีอ้างอิงโดยส่วนใหญ่ มักจะเป็นอุปกรณ์ที่ต้องทำงานตลอดเวลา จึงต้องมีวงจร RTC ผังอยู่ภายในด้วย) สำหรับข้อมูล NMEA ที่ใช้แสดงเวลาของอุปกรณ์ Rover จะอยู่ในส่วนของข้อความตัวอย่าง ที่ขึ้นต้นด้วย "GNRMC" โดยมีตำแหน่งของเวลาเป็นตัวหนังสือที่เน้นสีแดงดังข้างล่าง

```
$GPRMC,184804.00,A,3723.476543,N, 2202.239745,W,000.0,0.0,051196,15.6,E*7C
```

จากตัวอย่างข้อความ GNRMC จะแสดงข้อมูลการระบุตำแหน่งพื้นฐานของอุปกรณ์ Rover โดยส่วนที่เน้นสีแดง จะเป็นเวลาในรูปแบบเวลาสากล UTC มีค่า 18:48:04 โดยหากต้องการให้แปลงเป็นเวลาท้องถิ่น จะต้องทำการตรวจสอบกับตำแหน่งของอุปกรณ์ Rover ที่รับได้ เพื่อระบุค่าปรับแก้เวลาที่ถูกต้องอีกครั้ง โดยหากเป็นการรับสัญญาณที่ประเทศไทย จะสามารถแปลงเวลา UTC ดังกล่าวให้กลายเป็นเวลาท้องถิ่นได้ โดยการบวกค่าปรับแก้เวลาเพิ่มไป 7 ชั่วโมง เป็นต้น

5.1.4 การทดสอบแบตเตอรี่ของอุปกรณ์

ในการทดสอบนี้จะพิจารณากระแสที่อุปกรณ์ Rover ใช้ขณะทำงาน จะใช้มัลติมิเตอร์ต่อคั่นที่จุดวัดกระแสดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การทดสอบแบตเตอรี่กับอุปกรณ์ Rover ประจำโครงการฯ

จากรูปที่ 5.2 หลังจากเปิดใช้อุปกรณ์ Rover จะมีการเชื่อมต่อเครือข่าย 3G/4G เพื่อรับข้อมูล RTCM จากสถานีอ้างอิง และส่งออกข้อมูล NMEA เพื่อแสดงตำแหน่งบนพื้นโลก จะใช้กระแสในปริมาณที่มากขึ้น โดยจะมีผลการวัดกระแสขณะใช้งานดังผลการทดสอบในหัวข้อที่ 5.2.4 ต่อไป

5.1.5 การทดสอบหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) และหน่วยจัดเก็บข้อมูล (RAM)

ในส่วนนี้ จะทดสอบโดย

1. อัปเดตโปรแกรมลงบนบอร์ดประมวลผล แล้วดูผลลัพธ์ที่ได้ผ่าน Terminal ของ VS Code (ระบบต้องแจ้งว่าสามารถอัปเดตโปรแกรมได้สมบูรณ์)
2. แสดงข้อมูล NMEA ได้ เมื่อทำการปิดและเปิดใช้งานอุปกรณ์

หลังจากทดสอบตามข้อกำหนดข้างต้นแล้ว จะระบุผลการทดสอบไว้ในหัวข้อที่ 5.2.5

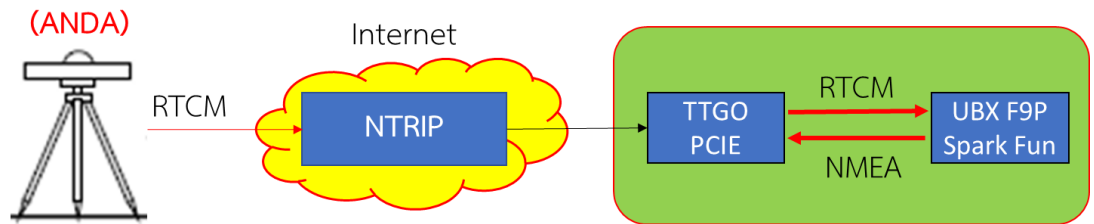
5.1.6 การทดสอบซอฟต์แวร์ประมวลผลข้อมูล RTK สำหรับอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover

ในการทดสอบอุปกรณ์ ประจำโครงการ จะวัดประสิทธิภาพของการใช้อุปกรณ์ Rover ประจำโครงการฯ (ANDA) เพื่อระบุตำแหน่งของ Rover ด้วยเทคนิค RTK เทียบกับการใช้อุปกรณ์ฯ

Rover กรมผังเมือง (DPT9) จากนั้นจะนำตำแหน่งของ Rover ที่ได้ไปวิเคราะห์ความแม่นยำโดยมีการเชื่อมต่อกับแต่ละอุปกรณ์ Rover ดังรูปที่ 5.3

สถานีอ้างอิงประจำโครงการ

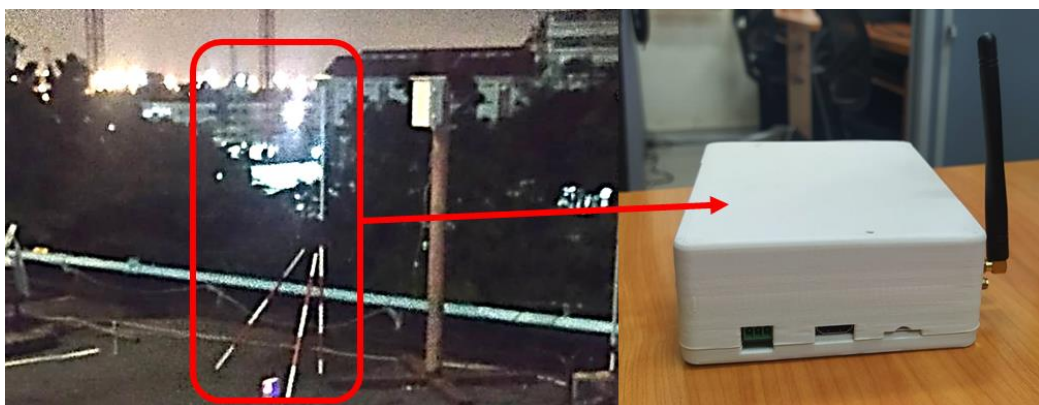
สถานี Rover



รูปที่ 5.3 การเชื่อมต่อระหว่างสถานีอ้างอิงกับอุปกรณ์ Rover

จากรูปที่ 5.3 ผู้วิจัยจะระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ Rover ด้วยเทคนิค RTK โดยอาศัยค่าแก้ไขในรูปแบบ RTCM จากสถานีอ้างอิง ANDA แล้วพิจารณาความแม่นยำทางตำแหน่งของ Rover จากข้อมูล NMEA ที่ได้ ในการติดตั้งอุปกรณ์ Rover กลางแจ้งโดยให้สายอากาศอยู่เหนือพื้นดิน ประมาณ 1 เมตร ทำงานโดยใช้แหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ Lithium Polymer ขนาด 3.7 โวลต์ 2AH ขณะเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตเพื่อรับค่าแก้ไขทางตำแหน่ง จะมีอัตราการกินกระแสเฉลี่ยไม่เกิน 250 mA

จากนั้นผู้วิจัยจะติดตั้งสถานีอ้างอิง ANDA เพื่อเตรียมส่งค่าแก้ไข ให้แก่อุปกรณ์ Rover ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 การติดตั้งสถานีอ้างอิง ANDA สำหรับทดสอบ

จากรูปที่ 5.4 ผู้วิจัยจะคำนวณหาตำแหน่งที่แม่นยำของสถานีอ้างอิง ANDA โดยใช้โปรแกรม RTKRCV (ทำงานคล้ายกับ RTKNAVI แต่ใช้งานได้กับระบบ Linux Ubuntu หรือ Raspbian แทน) ซึ่งจะต้องตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับทดสอบดังตารางที่ 5.1

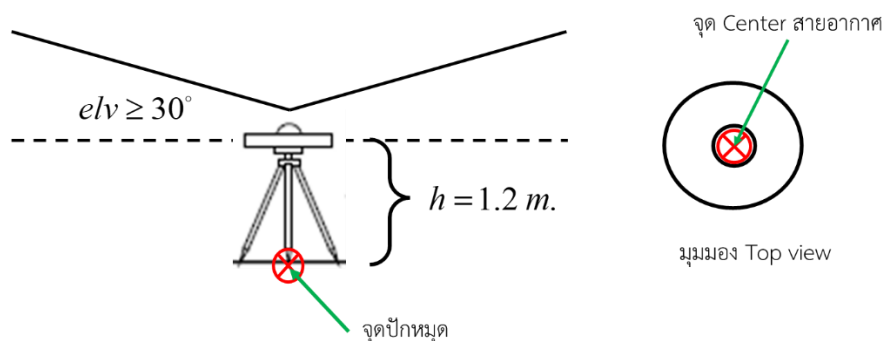
ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์และค่าที่ใช้ในโปรแกรม RTKRCV

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
ระบบดาวเทียม	GPS + Beidou + Glonass
โหมดการระบุตำแหน่ง	RTK – Kinematic
มุมเงย	$\geq 30^\circ$
ความสูงเหนือพื้นดินของสายอากาศ Rover	≥ 2 เมตร
ช่วงเวลาทดสอบ	14:05:19 - 14:08:42
โมเดลการห้วงเวลาในชั้นไอโอโนสเฟียร์	Broadcast
โมเดลการห้วงเวลาในชั้นโทรโปสเฟียร์	Saastamoinen
ระยะจำกัดถึงสถานีอ้างอิงกรมที่ดิน (DOL)	≤ 3 เมตร

หลังจากการตั้งค่าดังกล่าว และสามารถระบุตำแหน่งที่แม่นยำของสถานีอ้างอิง ANDA ได้แล้ว ผู้วิจัยจะทดสอบการระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ Rover ด้วยเทคนิค RTK ออกเป็น 2 กรณีดังนี้

5.1.6.1 กรณีรังวัดแบบหยุดนิ่ง

กรณีนี้จะมีลักษณะการติดตั้งเพื่อทดสอบดังรูปที่ 5.5

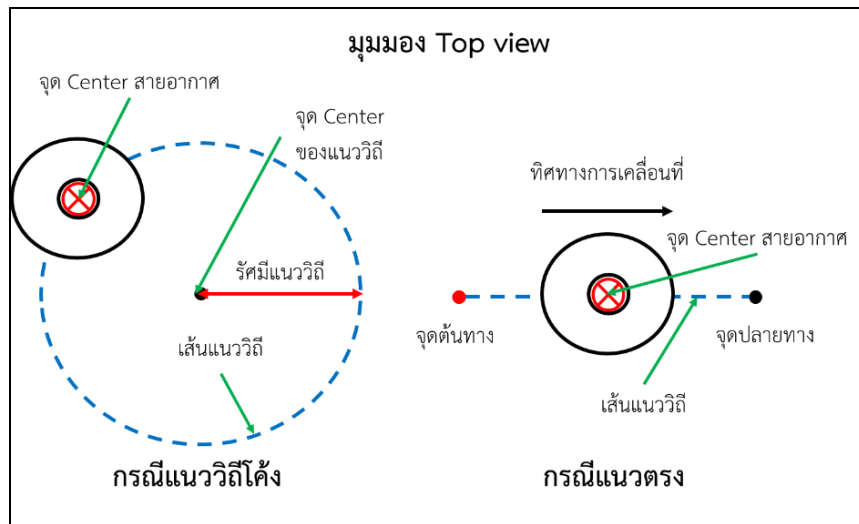


รูปที่ 5.5 การระบุตำแหน่งอุปกรณ์กรณีหยุดนิ่งกับที่

จากรูปที่ 5.5 จะติดตั้งอุปกรณ์ Rover กับรถเข็น กำหนดให้สายอากาศมีมุมเงยรับสัญญาณ จากดาวเทียมอย่างน้อย 30° จากเส้นแนวระดับสายตา มีความสูงเหนือพื้นดิน 1.2 เมตร รวมทั้งมี ตำแหน่งตรงกันกับจุดปักหมุดบนพื้นดิน จากนั้นจะวัดความแม่นยำทางตำแหน่งจากส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของตำแหน่งจากเทคนิค RTK ดังหัวข้อที่ 5.2.6.1 ต่อไป

5.1.6.2 กรณีรังวัดแบบเคลื่อนที่

เพื่อทดสอบความแม่นยำในการระบุตำแหน่งขณะเคลื่อนที่ ผู้วิจัยจะเคลื่อนที่ในแนววงกลม และในแนวเส้นตรงดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 การระบุตำแหน่งอุปกรณ์กรณีเคลื่อนที่

จากรูปที่ 5.6 เมื่อเคลื่อนที่แบบวงกลม จะมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. กำหนดจุดศูนย์กลางของวงกลม จากนั้นปักหมุดเอาไว้ตามกระบวนการตามรูปที่ 5.5
2. กำหนดให้มีความยาวรัศมีวงกลมอ้างอิงเป็น 1 เมตร แล้วลากเส้นวงกลมขึ้น
3. นำอุปกรณ์ไปเก็บตำแหน่งตรงจุดศูนย์กลางวงกลมเอาไว้ จากนั้นให้เคลื่อนที่อุปกรณ์ตาม แนวเส้นรอบวงในทิศทวนเข็มนาฬิกาอย่างน้อย 3 รอบ

4. คำนวณรัศมีจากระยะห่างของแต่ละตำแหน่งบนเส้นรอบวงถึงจุดศูนย์กลาง แล้วไป เปรียบเทียบกับรัศมีอ้างอิงที่ใช้วาดวงกลมอีกครั้ง โดยจะมีสมการที่เกี่ยวข้องเช่นเดียวกับหัวข้อที่

4.1.6.2

ในกรณีการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง จะมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. กำหนดจุดต้นทางและจุดปลายทางจากนั้นให้เก็บตำแหน่งทั้งสอง
2. ลากแนวเส้นตรงจากจุดต้นทางไปยังปลายทาง
3. นำอุปกรณ์ไปวางที่จุดต้นทาง จากนั้นเคลื่อนที่ตามแนวเส้นทางไปกลับซ้ำ 3 รอบเพื่อเก็บข้อมูล

5.1.7 การวิเคราะห์ความแม่นยำทางตำแหน่ง

5.1.7.1 กรณีรั้ววัดแบบหยุดนิ่ง

ภายหลังจากทดสอบ จะวิเคราะห์ผลตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 4.1.7.1 และสำหรับการวัดความแม่นยำทางตำแหน่งกรณีเคลื่อนที่จะเป็นดังหัวข้อที่ 4.1.7.2 โดยมีตำแหน่งอ้างอิงของการทดสอบแบบหยุดนิ่งดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ตำแหน่งอ้างอิงในการทดสอบการระบุตำแหน่งแบบหยุดนิ่ง

Latitude (deg.)	Longitude (deg.)	Height (m.)
13.727507407	100.775953695	-14.9882

ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ผู้วิจัยจะนำตำแหน่งอ้างอิงดังกล่าวไปคำนวณหาระยะห่างแบบ Haversine แล้วคิดค่าความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะห่างต่อไป

5.1.7.2 กรณีรั้ววัดแบบเคลื่อนที่

กรณีที่ 1 เคลื่อนที่แบบวงกลม

ในการทดสอบนี้ ผู้วิจัยจะกำหนดให้รัศมีอ้างอิงของวงกลมเท่ากับ 1 เมตร และมีจุดศูนย์กลางวงกลมตามตำแหน่งในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางวงกลมและรัศมีอ้างอิง

Latitude (deg.)	Longitude (deg.)	Height (m.)	Radius (m.)
13.727512167	100.776008833	-15.0000	1

ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ผู้วิจัยจะนำตำแหน่งทั้งหมดที่ได้จากเทคนิค RTK ไปหาระยะห่างแบบ Haversine กับจุดศูนย์กลางวงกลมที่กำหนด จากนั้นจะนำไปหาผลต่างกับรัศมีอ้างอิงและคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากผลต่างที่ได้เพื่อระบุความแม่นยำทางตำแหน่งแนวราบของ Rover ขณะเคลื่อนที่ดังหัวข้อที่ 5.2.6.2 ต่อไป

กรณีที่ 2 เคลื่อนที่แบบเส้นตรง

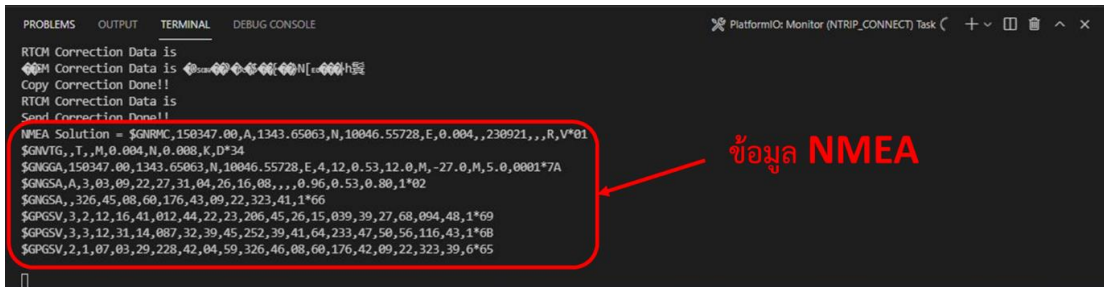
จะมีตำแหน่งของต้นทางและปลายทางในการทดสอบ จะระบุเอาไว้ในตารางที่ 5.4 ตารางที่ 5.4 ตำแหน่งต้นทางและปลายทางของการทดสอบการความแม่นยำทางตำแหน่งเมื่อเคลื่อนที่แบบเส้นตรง

จุดบนเส้นทาง	Latitude (deg.)	Longitude (deg.)	Height (m.)
ต้นทาง	13.727507407	100.775953695	-14.9882
ปลายทาง	13.727507651	100.776023428	-14.9777

ภายหลังการทดสอบ ผู้วิจัยจะนำตำแหน่งของ Rover ไปคำนวณหาระยะตัดขวาง (XTE) กับตำแหน่งต้นทางและปลายทาง จากนั้นจะคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากระยะ XTE ที่ได้โดยมีผลการทดสอบดังหัวข้อที่ 5.2.6.3

5.2 ผลการทดสอบอุปกรณ์อุปกรณ์ Rover

5.2.1 ผลการทดสอบสายอากาศและเครื่องรับสัญญาณ GNSS ชนิดสองความถี่



```
PROBLEMS OUTPUT TERMINAL DEBUG CONSOLE PlatformIO: Monitor (NTRIP_CONNECT) Task + ▢ ⌵ ×
RTCM Correction Data is
RTCM Correction Data is
Copy Correction Done!!
RTCM Correction Data is
Send Correction Done!!
NMEA Solution = $GNRMC,150347.00,A,1343.65063,N,10046.55728,E,0.004,,230921,,R,V*01
$GPRMB,T,M,0.004,M,0.008,K,D*34
$GNGGA,150347.00,1343.65063,M,10046.55728,E,4,12,0.53,12.0,M,-27.0,M,5.0,0001*7A
$GNSA,A,3,03,09,22,27,31,04,26,16,08,,0.96,0.53,0.00,1*02
$GNSA,,326,45,08,08,176,43,09,22,323,41,1*66
$GPGSV,3,2,12,16,41,012,44,22,23,206,45,26,15,039,39,27,68,094,48,1*69
$GPGSV,3,3,12,31,14,087,32,39,45,252,39,41,64,233,47,50,56,116,43,1*08
$GPGSV,2,1,07,03,29,228,42,04,59,326,46,08,08,176,42,09,22,323,39,6*65
```

รูปที่ 5.7 การทดสอบรับข้อมูลจากอุปกรณ์ Rover

จากรูปที่ 5.7 หลังจากใช้คำสั่งอ่านข้อมูล พบว่าในกรอบสีแดงจะมีข้อมูล NMEA จากเครื่องรับสัญญาณฯ ส่งออกมาแล้ว

5.2.2 ผลการทดสอบวงจรสื่อสารข้อมูลผ่านเครือข่าย 3G/4G และ WIFI

```
OK
[591700] IMEI: 867584031786911
AT+COPS?

+COPS: 0,0,"TRUE-H TRUE-H",7

OK
[591708] Operator: TRUE-H TRUE-H
AT+IPADDR

+IPADDR: 10.40.54.164

OK
[591713] Local IP: 10.40.54.164
AT+CSQ
```

รูปที่ 5.8 ผลการเชื่อมต่อเครือข่าย 4G (LTE)

จากรูปที่ 5.8 ในกรอบสีแดงแสดงถึงที่อยู่ IP จริงจากการเชื่อมต่อผ่านโมดูล SIMCOM7600 แสดงว่าอุปกรณ์ Rover สามารถเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตได้แล้ว และสำหรับการเชื่อมต่อกับ WIFI ของอุปกรณ์ Rover จะมีผลการทดสอบดังรูปที่ 5.9


```
rst:0x1 (POWERON_RESET),boot:0x13 (SPI_FAST_FLASH_BOOT)
configip: 0, SPIWP:0xee
clk_drv:0x00,q_drv:0x00,d_drv:0x00,cs0_drv:0x00,hd_drv:0x00,wp_drv:0x00
mode:DIO, clock div:2
load:0x3fff0018,len:4
load:0x3fff001c,len:1044
load:0x40078000,len:10124
load:0x40080400,len:5828
entry 0x400806a8
....WiFi connected
IP address:
192.168.43.195
--- exit ---
```

รูปที่ 5.9 ผลการเชื่อมต่อกับเครือข่าย WIFI

จากรูปที่ 5.9 ผู้วิจัยเชื่อมต่ออุปกรณ์ Rover เข้ากับเครือข่าย Hotspot ของมือถือส่วนตัว โดยจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ Rover สามารถเชื่อมต่อกับมือถือ และรับที่อยู่ IP จากมือถือเป็น 192.168.43.195 แล้ว โดยการเชื่อมต่อผ่านเครือข่าย LTE หรือ WIFI นี้ จะเป็นช่องทางการรับค่าแก้ไข จากเครือข่าย NTRIP มายังอุปกรณ์ Rover โดยหลังจากที่บอร์ดประมวลผลส่งค่าแก้ไข

ดังกล่าวเข้าไปยังเครื่องรับสัญญาณฯ UBX-F9P Spark Fun แล้วจะได้ตำแหน่งที่ระบุด้วยเทคนิค RTK ออกมา ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบข้อมูล NMEA ดังรูปที่ 5.7 ที่ได้กล่าวเอาไว้แล้ว

5.2.3 ผลการทดสอบวงจรสัญญาณนาฬิกาประเภท Real-Time Clock (RTC)



```
PROBLEMS OUTPUT TERMINAL DEBUG CONSOLE
RTCM Correction Data is
RTCM Correction Data is
Copy Correction Done!!
RTCM Correction Data is
Send Correction Done!!
NMEA Solution = $GNRMC,150347.00,A,1343.65063,N,10046.55728,E,0.004,,230921,,R,V*01
$GNWTG,,T,,M,0.004,N,0.008,K,D*34
$GNGGA,150347.00,1343.65063,N,10046.55728,E,4,12,0.53,12.0,M,-27.0,M,5.0,0001*7A
$GNGSA,A,3,03,09,22,27,31,04,26,16,08,,,0.96,0.53,0.80,1*02
$GNGSA,,326,45,08,60,176,43,09,22,323,41,1*66
$GPGSV,3,2,12,16,41,012,44,22,23,206,45,26,15,039,39,27,68,094,48,1*69
$GPGSV,3,3,12,31,14,087,32,39,45,252,39,41,64,233,47,50,56,116,43,1*68
$GPGSV,2,1,07,03,29,228,42,04,59,326,46,08,60,176,42,09,22,323,39,6*65
```

รูปที่ 5.10 ผลการตรวจสอบเวลาของอุปกรณ์ฯ Rover

จากรูปที่ 5.10 ผลการตรวจสอบเวลาของอุปกรณ์ฯ Rover ข้อมูล NMEA ในกรอบสีแดง จะเป็นเวลา 15:03:47 UTC ซึ่งเป็นเวลาของระบบนำร่อง GPS โดยหากต้องการแปลงเป็นเวลาท้องถิ่น ไทย สามารถบวกชั่วโมงเพิ่มไปอีก 7 ชั่วโมง (ค่าที่บวกเพิ่มนี้จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของเครื่องรับฯ ด้วย แต่ไม่ต้องการละเอียดในระดับเดียวกับ RTK) จะได้เวลา 22:03:47 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ผู้วิจัยเปิดใช้งาน อุปกรณ์ฯ Rover อยู่ โดยประโยชน์ของอ้างอิงเวลาจากข้อมูล NMEA นี้ คือ ไม่จำเป็นต้องเชื่อมต่อ อินเทอร์เน็ต มีเพียงเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่สามารถระบุตำแหน่งของตนเองได้ ก็จะปรับแก้เวลา ของอุปกรณ์ฯ Rover ได้อย่างถูกต้องเช่นกัน

5.2.4 ผลการทดสอบแบตเตอรี่ของอุปกรณ์ฯ Rover

จะพบว่าอุปกรณ์ฯ Rover ใช้กระแสบริเวณจุดวัดตามรูปที่ 5.2 จะวัดกระแสได้โดยประมาณ 250 mA ซึ่งหากประมาณว่าแบตเตอรี่ขนาด 3.7 V ความจุ 2000mAh มีความจุจริงเพียงร้อยละ 60 (1200 mAh) จะสามารถรองรับการใช้งานของอุปกรณ์ฯ Rover ได้นานถึง 5 ชั่วโมงเป็นอย่างน้อย

5.2.5 ผลการทดสอบหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) และหน่วยจัดเก็บข้อมูล (RAM)

```
Writing at 0x0008f254... (80 %)
Writing at 0x00095669... (84 %)
Writing at 0x0009b0f5... (88 %)
Writing at 0x000a13b3... (92 %)
Writing at 0x000a7178... (96 %)
Writing at 0x000acf14... (100 %)
Wrote 660144 bytes (404233 compressed) at 0x00010000 in 9.8 seconds (effective 541.3 kbit/s)...
Hash of data verified.

Leaving...
Hard resetting via RTS pin...
===== [SUCCESS] Took 27.89 seconds =====
```

รูปที่ 5.11 อุปกรณ์ Rover สามารถอัปเดตโปรแกรมได้สำเร็จ

จากรูปที่ 5.11 พบว่า CPU (หรือบอร์ดประมวลผล) ของอุปกรณ์ Rover สามารถใช้งานได้ เนื่องจากอัปเดตโปรแกรมได้สำเร็จ และหลังทำการปิด เปิดอุปกรณ์ พบว่าอุปกรณ์สามารถแสดงข้อมูล NMEA ได้ตามปกติ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าอุปกรณ์ Rover สามารถจดจำโปรแกรมที่อัปเดตไว้ได้ และเริ่มทำงานอีกครั้งเมื่อมีไฟเลี้ยงจ่ายเข้าสู่ระบบ

5.2.6 ผลการทดสอบซอฟต์แวร์ประมวลผลข้อมูล RTK สำหรับอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover

5.2.6.1 การระบุตำแหน่งแบบหยุดนิ่ง

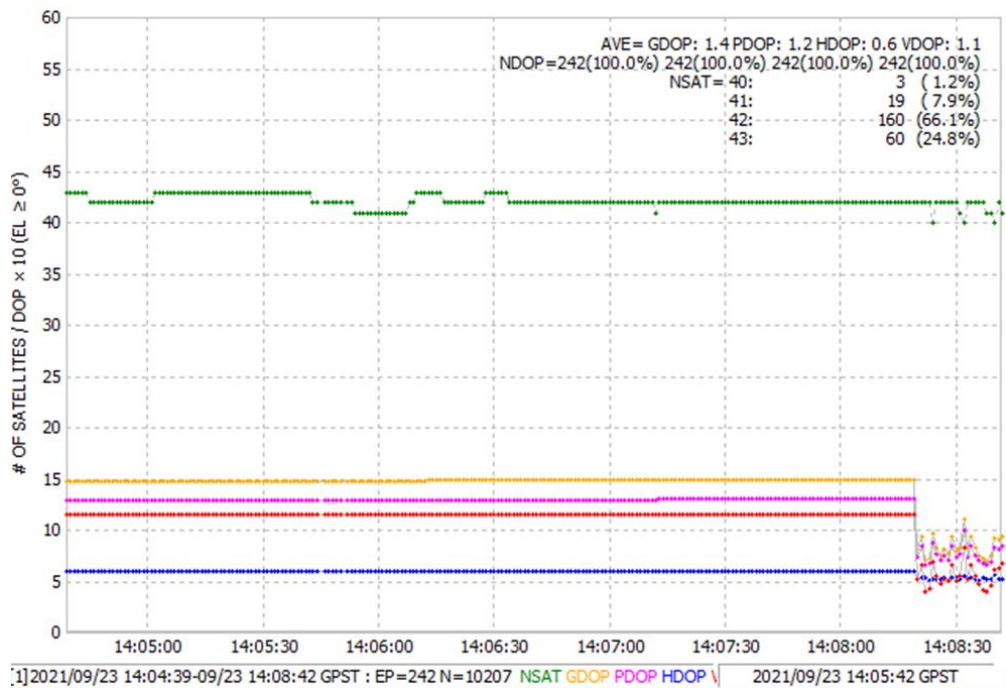
ตำแหน่งของอุปกรณ์ Rover ที่ระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK จากสถานีอ้างอิง ANDA จะมีผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 5.5 ประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งอุปกรณ์ Rover ด้วยเทคนิค RTK

พารามิเตอร์ที่วัดได้	สถานีอ้างอิงที่ใช้
	ANDA
TTFA (วินาที)	18
Fix rate (%)	98.5

จากตารางที่ 5.5 พบว่าการประมวลผลด้วยเทคนิค RTK ของอุปกรณ์ Rover ที่ออกแบบจะใช้เวลาเพียง 18 วินาทีเพื่อให้ได้พิกัดที่มีสถานะเป็น Fix (มีความแม่นยำในระดับเซนติเมตร) และมีสัดส่วนของพิกัดดังกล่าวจากการทดสอบสูงถึงร้อยละ 98.5

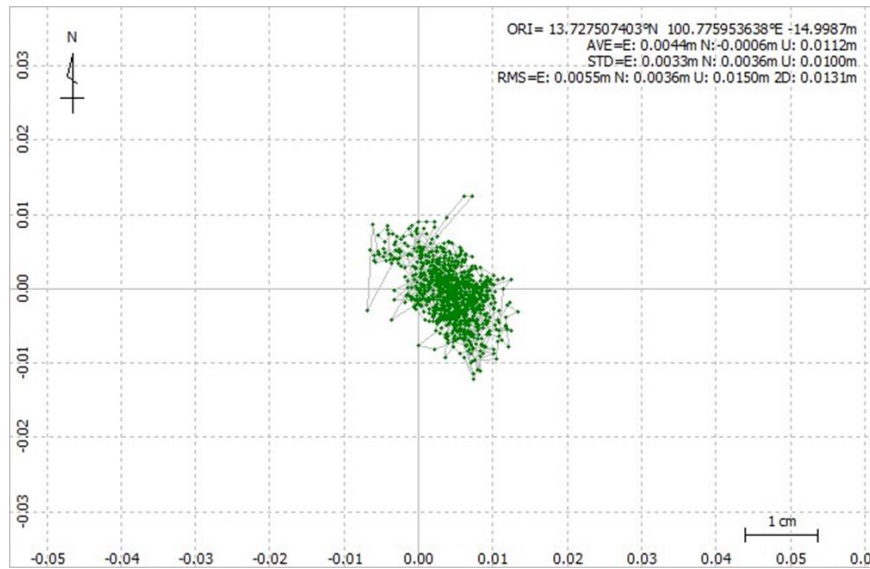
ในส่วนของสถานีอ้างอิง ANDA เนื่องจากตั้งอยู่ในบริเวณที่ค่อนข้างโล่ง จึงรับสัญญาณดาวเทียมได้สะดวก ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของจำนวนดาวเทียมค่อนข้างต่ำ และมองเห็นดาวเทียมได้ไม่ต่ำกว่า 40 ดวง ดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 จำนวนดาวเทียมที่สถานีอ้างอิง ANDA รับได้ในแต่ละเวลา

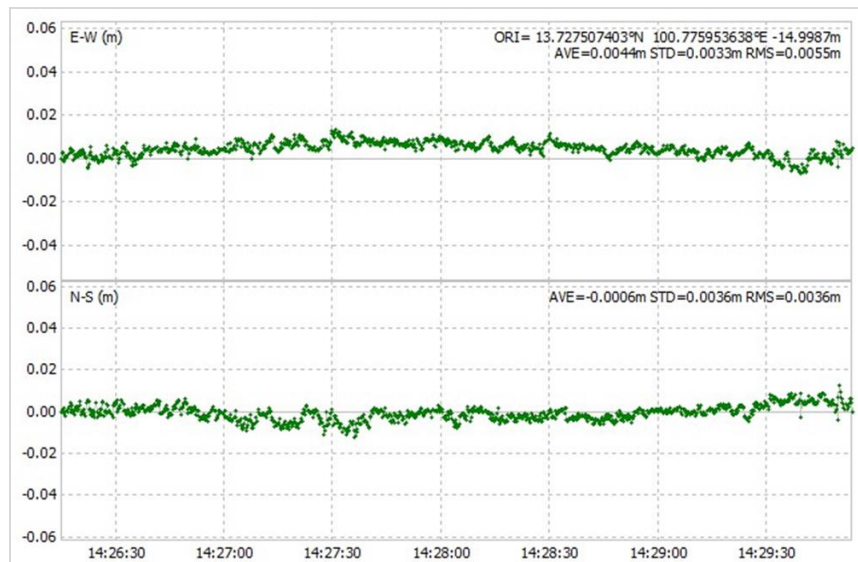
จากรายงานความก้าวหน้างวดที่ 2 ได้ระบุว่าการที่สถานีอ้างอิงรับดาวเทียมได้อย่างเสถียร จะส่งผลให้อุปกรณ์ฯ Rover สามารถระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเมื่อพิจารณาลักษณะของการรับสัญญาณดาวเทียมของสถานีอ้างอิง ANDA ตามรูปที่ 5.12 แล้ว พบว่ามีความสอดคล้องกันกับประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งอุปกรณ์ฯ Rover จากตารางที่ 5.5 อย่างชัดเจน

ต่อไปจะแสดงตำแหน่งของอุปกรณ์ฯ Rover ขณะทดสอบแบบหยุดนิ่งกับที่ได้ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 ตำแหน่งของ Rover ของการทดสอบแบบหยุดนิ่งกับที่

จากรูปที่ 5.13 ตำแหน่งของ Rover จะแทนด้วยจุดสีเขียวโดยหลังจากนำไปวิเคราะห์ความแม่นยำทางตำแหน่งจะได้ผลดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 ระยะห่างจาก Rover ถึงจุดอ้างอิงตามแนว (บน) ทิศตะวันออก (ล่าง) ทิศเหนือ

จากรูปที่ 5.14 จะพบว่าตำแหน่งของ Rover จากการใช้สถานีฯ ANDA จะอยู่ห่างจากจุดอ้างอิงไม่เกิน 1 เซนติเมตร เมื่อนำไปคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 95 ของระยะ Haversine ได้ผลดังตารางที่ 5.6

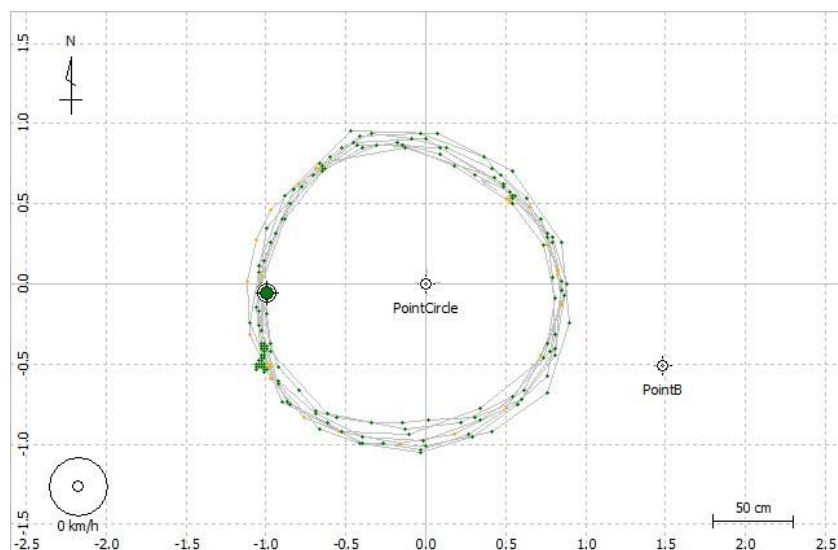
ตารางที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์ระยะ Haversine จาก Rover ถึงจุดอ้างอิง กรณีอยู่นิ่งกับที่

สถานีอ้างอิงที่ใช้	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เมตร)	เปอร์เซ็นต์ที่ 95 (เมตร)
ANDA	0.0049	0.0176

จากตารางที่ 5.6 พบว่ากรณีที่ระบุตำแหน่ง Rover แบบอยู่นิ่งกับที่โดยใช้สถานีฯ ANDA จะมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งไม่เกิน 2 เซนติเมตร และเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการใช้อุปกรณ์ฯ Rover เพื่อระบุตำแหน่งของ Rover ขณะเคลื่อนที่จะมีผลการทดสอบดังหัวข้อที่ 5.2.6.2 และ 5.2.6.3

5.2.6.2 การระบุตำแหน่งเมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลม

จากการทดสอบ จะได้ตำแหน่งของ Rover ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 ตำแหน่งของ Rover ของการทดสอบแบบเคลื่อนที่เป็นวงกลม

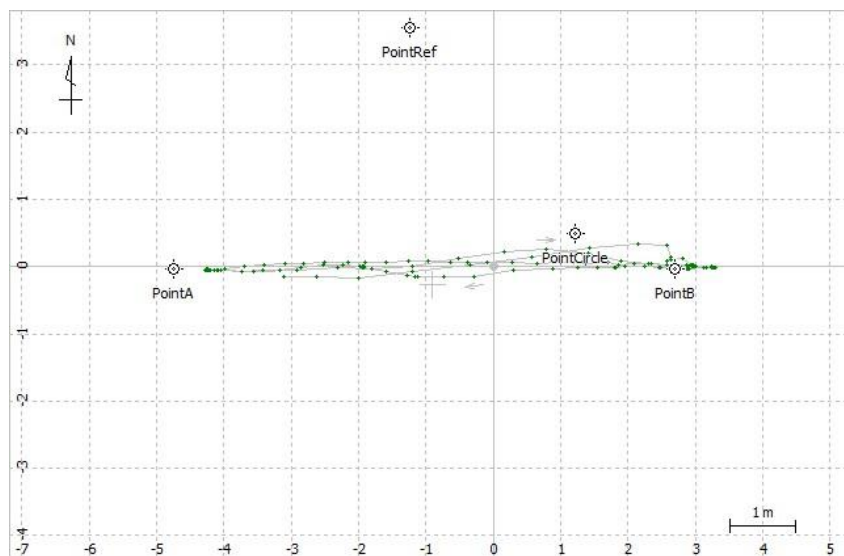
จากรูปที่ 5.15 จะได้แนววิถีของ Rover เป็นวงกลมรอบจุดศูนย์กลาง PointCircle ซึ่งนำไปวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนรัศมีได้ผลดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ความคลาดเคลื่อนทางรัศมีของ Rover ที่เคลื่อนที่แบบวงกลม

อุปกรณ์ฯ Rover ที่ใช้	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เมตร)	เปอร์เซ็นต์ที่ 95 (เมตร)
ANDA	0.0805	0.2389

ต่อไปจะวัดประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งของ Rover ขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงดังหัวข้อ
ที่ 4.2.6.3

5.2.6.3 การระบุตำแหน่งเมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง



รูปที่ 5.16 ตำแหน่งของ Rover ของการทดสอบแบบเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง

จากรูปที่ 5.16 จุดต้นทางและปลายทางจะแทนด้วย PointA และ PointB ตามลำดับซึ่งเชื่อมถึงกันด้วยแนวเส้นประสีเขียว (ตำแหน่งของอุปกรณ์ฯ Rover ตามแนวเส้นทาง) เมื่อคำนวณหา ระยะตัดขวางของตำแหน่งดังกล่าวกับเส้นทาง จะได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของ Rover เทียบกับเส้นทาง

อุปกรณ์ฯ Rover ที่ ใช้	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เมตร)	เปอร์เซ็นต์ที่ 95 (เมตร)
ANDA	0.08475	0.1922

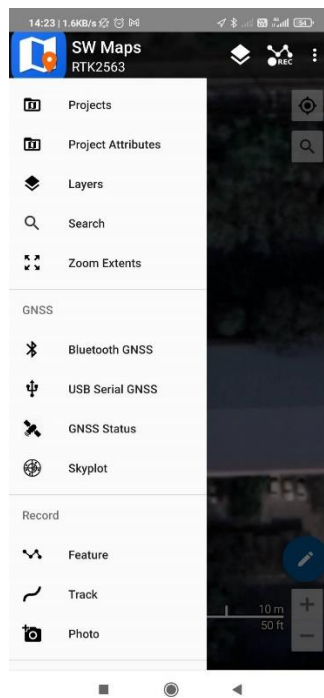
จากตารางที่ 5.8 จะพบว่ากรณีที่ระบุตำแหน่งของ Rover เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง จะมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 20 เซนติเมตร โดยมีค่านี้น้อยกว่าการเคลื่อนที่เป็นวงกลม เนื่องจากควบคุมทิศทางของรถขึ้นได้ง่ายกว่า จากผลการทดสอบทั้งหมดนี้ ผู้วิจัยสามารถสรุปผลได้ดังหัวข้อที่ 7.2.6

บทที่ 6

การออกแบบการทดสอบและผลการทดสอบซอฟต์แวร์แสดงตำแหน่งบนพื้นโลก

6.1 การออกแบบการทดสอบซอฟต์แวร์แสดงตำแหน่งบนพื้นโลกที่สอดคล้องกับตัวชี้วัด

แผนการทดสอบซอฟต์แวร์สำหรับแสดงตำแหน่งบนพื้นโลกของอุปกรณ์ Rover จะเริ่มต้นจากการรับข้อมูล NMEA จากที่อุปกรณ์ Rover กระจายออกมาผ่านเครือข่าย Bluetooth ไปยังมือถือแอนดรอยด์ จากนั้นจะแสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน SW Maps ดังรูปที่ 6.1

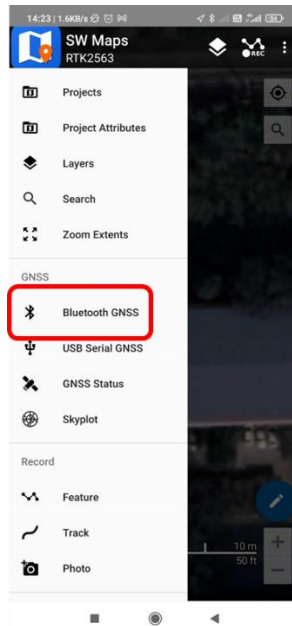


รูปที่ 6.1 ซอฟต์แวร์ SW Maps [1]


จากรูปที่ 6.1 จะเป็นลักษณะของซอฟต์แวร์ที่นำมาใช้แสดงตำแหน่งของอุปกรณ์ Rover โดยจะเลือกที่ Bluetooth GNSS เพื่อแสดงข้อมูล NMEA ของอุปกรณ์ Rover ซึ่งส่งออกมาทาง Bluetooth ไปแสดง โดยจะมีผลการทดสอบดังหัวข้อที่ 6.2

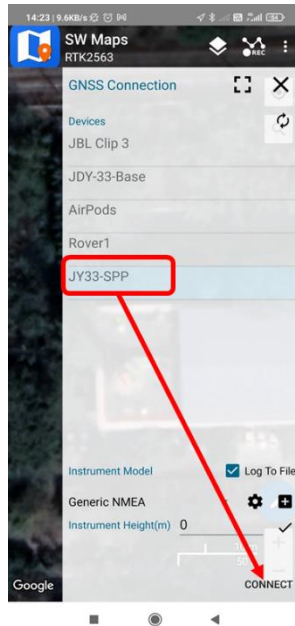
6.2 ผลการทดสอบซอฟต์แวร์แสดงตำแหน่งบนพื้นโลกที่สอดคล้องกับตัวชี้วัด

หลังจากบอร์ดประมวลผลส่งข้อมูล NMEA ผ่าน Bluetooth แล้ว ผู้วิจัยจะติดตั้งโปรแกรม SW Maps ลงในมือถือแอนดรอยด์ เชื่อมต่อกับเครือข่าย JY33-SPP พร้อมกับเปิดโปรแกรม SW Maps ขึ้นมาดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 กดที่ “Bluetooth GNSS” เพื่อดูอุปกรณ์ Bluetooth ที่มือถือเชื่อมต่อได้

คลิกที่ไอคอน  เพื่อเปิดเมนูการใช้งานแอปฯ กดที่ “Bluetooth GNSS” เพื่อดูรายการอุปกรณ์ Bluetooth ทั้งหมดที่มือถือเชื่อมต่อได้ จะได้ผลดังรูปที่ 6.3

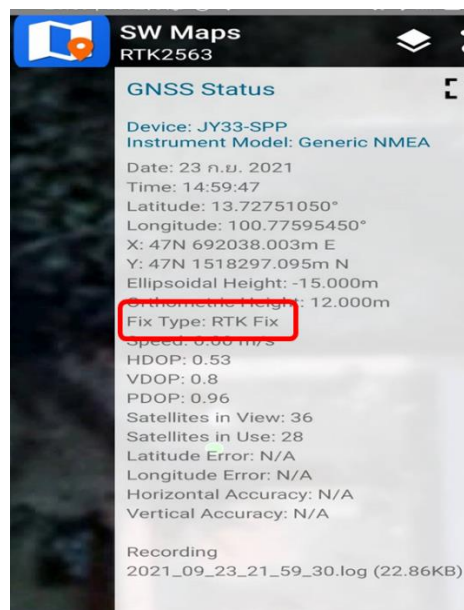


รูปที่ 6.3 กดที่อุปกรณ์ Bluetooth ของอุปกรณ์ Rover แล้วกด Connect เพื่อเชื่อมต่อ

จากรูปที่ 6.3 หลังจากกด Connect เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ Rover ได้สำเร็จแล้ว ปุ่ม Connect จะเปลี่ยนสถานะเป็น Disconnect เพื่อดูข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ Rover ให้กดที่ไอคอน

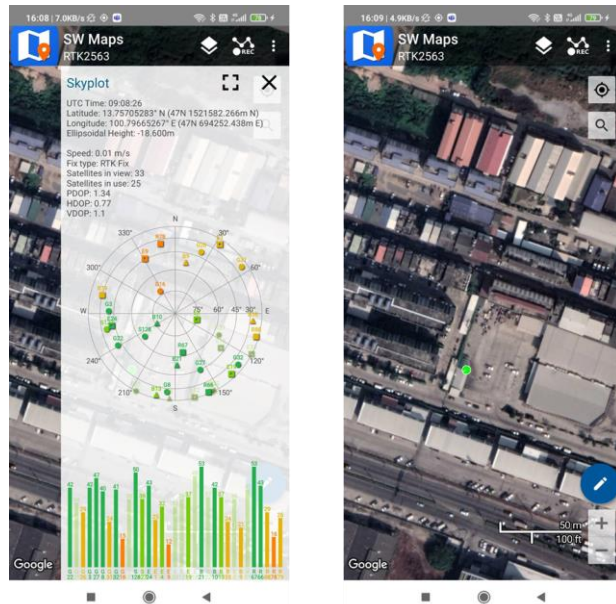


ตามด้วยการกดที่ GNSS Status ของรูปที่ 6.2 จะได้ผลดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 สถานะการระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ Rover

จากรูปที่ 6.4 ข้อมูล NMEA จากอุปกรณ์ Rover จะถูกนำมาจัดแสดงบนหน้าแอปฯ SW Maps โดยในหัวข้อ Fix Type จะพบว่าตำแหน่งที่ได้จากอุปกรณ์ Rover จะเป็น RTK Fix ซึ่งมีความแม่นยำสูง นอกจากนี้ ผู้ใช้งานสามารถดูข้อมูลการกระจายตัวของดาวเทียม (Constellation หรือ Sky Plot) ที่อุปกรณ์ Rover รับผิดชอบได้ โดยการกดที่เมนูแล้วเลือก Sky Plot ได้ผลดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 ลักษณะของ Sky Plot จากข้อมูล NMEA ของอุปกรณ์ Rover

จากรูปที่ 6.5 ด้านซ้าย จะแสดงการกระจายตัวของดาวเทียมที่อุปกรณ์ Rover รับผิดชอบ ร่วมกับสถานีอ้างอิง ANDA พร้อมกับแสดงความแรงของสัญญาณ GNSS ที่เชื่อมต่อได้ โดยปกติแล้วควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 40 dBHz. ซึ่งจากการทดสอบโดยรวมมีค่าดังกล่าวไม่ต่ำกว่ากำหนด ในด้านขวา เป็นการระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ Rover ณ บริเวณลานจอดรถบริเวณลานจอดรถ มีลักษณะค่อนข้างโล่งแจ้ง ระหว่างทดสอบพบว่าสามารถรับดาวเทียมได้อย่างน้อย 25 ดวง โดยมีความแม่นยำทางตำแหน่งตามแนวราบอยู่ที่ 1 เซนติเมตร พิกัดที่ได้มีสถานะเป็น Fix โดยใช้เวลาในการคำนวณตำแหน่งดังกล่าวประมาณ 35 วินาที

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 การทดสอบอุปกรณ์สถานีอ้างอิง

7.1.1 การทดสอบสายอากาศและเครื่องรับสัญญาณ GNSS ชนิดสองความถี่

บอร์ดวงจร UBX-F9P ที่ออกแบบและสายอากาศรับสัญญาณ GNSS สามารถรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ได้จริง โดยให้ข้อมูลในรูปแบบ UBX Binary ตามรูปที่ 4.11 ที่สามารถนำไปประมวลเป็นข้อมูล RTCM ต่อได้

7.1.2 การทดสอบวงจรสื่อสารข้อมูลผ่านเครือข่าย 3G/4G

สถานีอ้างอิงสามารถเชื่อมต่อกับเครือข่าย 3G/4G ได้จริงผ่านโมดูล SIMCOM 7600 E โดยจากการทดสอบพบว่าสามารถเชื่อมต่อกับเว็บไซต์ Google ได้ตามรูปที่ 4.14

7.1.3 การทดสอบวงจรสัญญาณนาฬิกาประเภท Real Time Clock (RTC)

สถานีอ้างอิงสามารถปรับเวลาปัจจุบันให้ตรงกับเวลามาตรฐานตามท้องถิ่นได้ แม้จะปิดใช้งานไปนานถึง 1 ชั่วโมงโดยประมาณแล้ว

7.1.4 การทดสอบแบตเตอรี่ของอุปกรณ์

สถานีอ้างอิงสามารถใช้แหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ได้ โดยมีอัตราการใช้กระแสเพียง 560 mA จึงสามารถทำงานต่อเนื่องได้อย่างน้อย 3 ชั่วโมงเมื่อความจุของแบตเตอรี่ที่ใช้มีขนาดตั้งแต่ 5 AH ขึ้นไป

7.1.5 การทดสอบหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) และหน่วยจัดเก็บข้อมูล (RAM)

บอร์ดของ CPU และ RAM ที่ออกแบบขึ้น สามารถทำงานได้ตามปกติ โดยจากการทดสอบพบว่าสามารถป้อนคำสั่งพื้นฐานเพื่อแสดงอุณหภูมิของ CPU รวมทั้งแสดงพื้นที่จัดข้อมูลภายในได้ตามปกติ

7.1.6 การทดสอบซอฟต์แวร์ประมวลผลข้อมูล RTK สำหรับอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover

7.1.6.1 กรณี Rover อยู่นิ่งกับที่

กรณีทดสอบอยู่นิ่งกับที่ การใช้สถานีฯ ANDA มีความแม่นยำที่ใกล้เคียงกับการใช้สถานีฯ DPT9 ซึ่งเป็นตัวเทียบหลัก รวมทั้งมีความแม่นยำตรงตามข้อกำหนดที่ระบุเอาไว้ในมาตรฐานทางอุตสาหกรรมการรังวัดด้วยเทคโนโลยี GNSS ขณะที่การใช้สถานีฯ DOL จะมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งที่สูงกว่า เนื่องจากรับสัญญาณดาวเทียมได้น้อยกว่า

7.1.6.2 กรณี Rover เคลื่อนที่แบบวงกลม

เนื่องจาก Rover เคลื่อนที่เกือบทั้งหมดในบริเวณที่มีโครงสร้างตึกบัง ทำให้การใช้ค่าแก้ไขสถานีฯ ANDA ซึ่งมีสัญญาณพหุวิถีรับทวนสูง ส่งผลให้ตำแหน่งของ Rover ที่ได้มีสถานะเป็น Float มีความผิดพลาดสูงตามไปด้วย ขณะที่การใช้ค่าแก้ไขจากสถานีฯ DPT9 ซึ่งมีสัญญาณพหุวิถีต่ำ สามารถชดเชยความผิดพลาดทางตำแหน่งของ Rover ได้ดีขึ้น

7.1.6.3 กรณี Rover เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง

กรณีที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ตำแหน่งที่ได้จากการใช้ค่าแก้ไขจากสถานีฯ DPT9 DOL และ ANDA บนช่วงดังกล่าวมีสถานะเป็น Fix ทั้งหมด จึงมีการวางตัวของตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับเส้นทาง โดยการใช้สถานีฯ ANDA ที่พัฒนาขึ้น จะให้ความแม่นยำทางตำแหน่งของ Rover ใกล้เคียงกับกรณีที่ ใช้ค่าแก้ไขจากสถานีฯ DPT9 ที่เป็นตัวเทียบหลัก ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุเอาไว้ในมาตรฐานทางอุตสาหกรรมการรังวัดด้วยเทคโนโลยี GNSS เช่นกัน

7.2 การทดสอบอุปกรณ์อุปกรณ์ฯ Rover

7.2.1 การทดสอบสายอากาศและเครื่องรับสัญญาณ GNSS ชนิดสองความถี่

ผลการรับสัญญาณฯ จากรูปที่ 5.7 พบว่าอุปกรณ์ฯ Rover สามารถรับสัญญาณ GNSS จากสายอากาศและเครื่องรับฯ จนระบุตำแหน่งตนเองได้สำเร็จ

7.2.2 การทดสอบวงจรสื่อสารข้อมูลผ่านเครือข่าย 3G/4G และ WIFI

จากผลการเชื่อมต่อกับเครือข่าย 4G ผ่านโมดูล SIMCOM A7600E ตามรูปที่ 5.8 พบว่าอุปกรณ์ฯ Rover ได้รับที่อยู่ IP จริงโดยเป็นการเชื่อมต่อผ่านเครือข่าย Truemove-H และสำหรับ

กรณีที่เชื่อมต่อผ่าน WIFI พบว่าอุปกรณ์ Rover สามารถเชื่อมต่อกับ Hotspot มือถือที่ปล่อยอยู่ได้ โดยสังเกตจากที่อยู่ IP ที่ปรากฏอยู่

7.2.3 การทดสอบวงจรสัญญาณนาฬิกาประเภท Real Time Clock (RTC)

เนื่องจากอุปกรณ์ Rover เป็นอุปกรณ์ที่ไม่จำเป็นต้องเปิดใช้งานถาวร หรือมีกระบวนการทำงานเบื้องหลังที่ต้องพึ่งพาการตั้งค่าเวลา จึงไม่จำเป็นต้องมีวงจร RTC ในตัวเอง แต่สามารถระบุเวลาที่ถูกต้องได้ผ่านการเวลา UTC จากข้อมูล NMEA ตามรูปที่ 5.10 เป็นตัวปรับแก้ได้ โดยจะนำไปใช้ประโยชน์ในการตั้งชื่อไฟล์ข้อมูล Binary จากเครื่องรับต่อไป

7.2.4 การทดสอบแบตเตอรี่ของอุปกรณ์

จากการทดสอบ พบว่าอุปกรณ์ Rover ที่ออกแบบขึ้น เมื่อจ่ายกระแสด้วยแบตเตอรี่แบบ Lithium Polymer ขนาด 3.7V 2000 mAH จะใช้กระแสเต็มที่ขณะระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK ไม่เกิน 250 mA โดยหากประมาณว่าแบตเตอรี่ที่ใช้มีความจุจริงเพียง 1200 mAH (ร้อยละ 60 ของความจุตามที่ระบุในสเปค) จะสามารถใช้งานได้ต่อเนื่องประมาณ 6 ชั่วโมง

7.2.5 การทดสอบหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) และหน่วยจัดเก็บข้อมูล (RAM)

จากการผลการอัปเดตโปรแกรมบนอุปกรณ์ Rover ตามรูปที่ 5.11 และการแสดงข้อมูลการระบุตำแหน่งของเครื่องรับ สรุปลงได้ว่าหน่วยประมวลผลกลางของอุปกรณ์ Rover และ RAM สามารถทำงานได้ตามปกติ เนื่องจากมีการส่งข้อมูล RTCM เข้าสู่เครื่องรับได้ รวมทั้งแสดงผลข้อมูล NMEA ได้ตามที่เขียนโปรแกรมเอาไว้ได้เช่นกัน

7.2.6 การทดสอบซอฟต์แวร์ประมวลผลข้อมูล RTK สำหรับอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover

จากการทดสอบการระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ Rover ด้วยเทคนิค RTK พบว่ามีประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งที่สูงรายงานความก้าวหน้างวดที่ 2 โดยมีช่วงเวลา TTFA เพียง 18 วินาที มีร้อยละของพิกัดที่มีสถานะเป็น Fix ถึงร้อยละ 98.5 และเมื่อระบุตำแหน่งแบบหยุดนิ่ง อุปกรณ์ Rover มีความแม่นยำทางตำแหน่งถึง 2 เซนติเมตร ในขณะที่การระบุตำแหน่งขณะเคลื่อนที่ กรณีที่เคลื่อนเป็นเส้นตรงและวงกลม จะมีความแม่นยำตามแนวราบไม่เกิน 25 เซนติเมตร

7.3 การทดสอบซอฟต์แวร์แสดงตำแหน่งบนพื้นโลก

จากการส่งข้อมูล NMEA จากอุปกรณ์ Rover ไปยังแอปพลิเคชัน SW Maps ผ่าน Bluetooth พบว่าอุปกรณ์ Rover สามารถส่งข้อมูล NMEA ไปแสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน SW Maps ได้ โดยสามารถแสดงทั้งการกระจายตัวของดาวเทียม รวมทั้งสถานะการระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ Rover ได้แบบเวลาจริงด้วย

บรรณานุกรม

- [1] Softwel, "SW Maps - GIS & Data Collector," [Online]. Available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=np.com.softwel.swmaps&hl=th&gl=US>.
- [2] M. T. Scripts, "Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points," [Online]. Available: <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>.
- [3] "NMEA-0183 messages: Overview," Trimble Inc., [Online]. Available: https://www.trimble.com/oem_receiverhelp/v4.44/en/NMEA-0183messages_MessageOverview.html.
- [4] Wikipedia, "ECEF," Wikimedia Foundation, Inc., 27 August 2020. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/ECEF>. [Accessed 3 November 2020].
- [5] P. Misra et al., "The Global Positioning System: Signals, measurements, and performance," Ganga-Jamuna Press, 2006, p. 569 .
- [6] A. Cina et al., "Network Real Time Kinematic (NRTK) Positioning – Description, Architectures and Performances," pp. 23-46, 11 03 2015.
- [7] E. Wei et al., "VRS Virtual Observations Generation Algorithm," *Journal of Global Positioning Systems*, vol. 5, 31 12 2006.
- [8] S. Electronics, "SparkFun RTK Surveyor," SparkFun Electronics, [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/17369>.
- [9] N. Microtek, "PANTAI PRBL2MOB," Nakra Microtek, [Online]. Available: <http://www.nakramicrotek.co.th/index.php/gnss-rtk/3-pantai-prbl2mob>.
- [10] "BKG Professional NtripCaster," BKG GNSS Data Center, [Online]. Available: <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/download>.
- [11] "openntripcaster," CodePlex Archive, 2018. [Online]. Available: <https://archive.codeplex.com/?p=openntripcaster>.

ภาคผนวก ก
การประเมินผลกระทบทางเศรษฐกิจ

จากคุณลักษณะด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น ผู้วิจัยสามารถประเมินผลกระทบทางเศรษฐกิจได้ดังนี้

1. ผลกระทบทางเศรษฐกิจด้านการทำรังวัด

1.1 เนื่องจากซอฟต์แวร์ที่จะพัฒนาขึ้น เน้นการทำงานบนระบบปฏิบัติการแบบ Android ที่ทำงานบนสมาร์ตโฟนหรือ Tablet ได้ ซึ่งคนไทยส่วนใหญ่มีความคุ้นเคยกับสิ่งเหล่านี้อยู่แล้ว หากมุ่งเป้าไปยังผู้ที่ต้องการทำรังวัดด้วยตนเอง โดยการพัฒนาซอฟต์แวร์ให้มีขั้นตอนการติดตั้งที่ไม่ซับซ้อนและใช้งานได้ง่าย จึงคาดว่าจะสามารถส่งเสริมให้คนไทยที่สนใจรู้จักการระบุตำแหน่งด้วย GNSS มากขึ้น

1.2 จากการประมาณราคาของอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับการทำรังวัด พบว่ามีราคาไม่เกิน 50,000 บาท ในขณะที่อุปกรณ์สำหรับทำรังวัดทั้งระบบที่นำเข้าจากต่างประเทศ เช่น ยี่ห้อ Novatel Propak 6 หรือ Trimble จะมีราคาในระดับไม่ต่ำกว่า 500,000 บาทโดยประมาณ จึงคิดว่าด้วยราคาที่ถูกลงกว่า จะทำให้คนไทยที่สนใจการทำรังวัด หรือนำไปประยุกต์ใช้กับเกษตรกรรมความแม่นยำสูงสามารถเข้าถึงได้มากขึ้นจนลดการนำเข้าอุปกรณ์ประเภทเดียวกันจากต่างประเทศได้

2. ผลกระทบทางเศรษฐกิจด้านการเกษตรกรรมแม่นยำสูง

2.1 ปัจจุบันเกษตรกรที่เพาะปลูกพืชไร่ เช่น ไร่อ้อย มีความต้องการทราบพื้นที่เพาะปลูก รวมทั้งระดับความสูงต่ำเพื่อดูการระบายน้ำ หรือต้องการชี้เขตพื้นที่กับแปลงอื่นๆ ที่อยู่ติดกัน เพื่อเตรียมทำเกษตรกรรม อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถเชื่อมต่อกับกรมที่ดิน หรือกรมแผนที่ทหารที่อยู่โดยรอบ พร้อมกับแสดงผลผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนของเกษตรกรได้ เพียงนำอุปกรณ์ไปติดตั้งกับเสาสำรวจภายในพื้นที่เพาะปลูก

2.2 สำหรับเกษตรกรรายใหญ่ที่มีรถจักรกลเกษตรและพื้นที่เพาะปลูกขนาดใหญ่ เมื่อต้องการสร้างแนวเพาะปลูกเป็นจำนวนมาก สามารถติดตามตำแหน่งรถเพื่อดูแนวไถจากตัวรถผ่านแผนที่บนสมาร์ตโฟนหรือ Tablet เพื่อคุณภาพรวมของแนวเพาะปลูกที่ได้

2.3 กรณีที่พื้นที่ทดสอบผู้ใช้ อยู่ห่างจากสถานีอ้างอิงกรมที่ดิน หรือกรมแผนที่ทหารมาก ผู้ใช้งานสามารถติดตั้งสถานีอ้างอิงที่พัฒนาขึ้นเองได้โดยใช้สถานีอ้างอิงประจำโครงการ เพื่อปล่อยค่าแก้ไขสำหรับระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK ได้เอง

ภาคผนวก ข

ข้อเสนอแนะแนวทางการนำชุดอุปกรณ์สถานีอ้างอิง
และชุดอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover ไปใช้ประโยชน์
ในอุตสาหกรรม

จากผลการทดสอบสถานีอ้างอิงและชุดอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover ที่พัฒนาขึ้น ผู้วิจัยสามารถแนะนำแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. การประยุกต์ใช้ด้านการสำรวจและรังวัด

จากผลการทดสอบตามรายงานฉบับสมบูรณ์ในหัวข้อที่ 5.2.6.1 พบว่าอุปกรณ์ Rover สามารถระบุตำแหน่งขณะอยู่นิ่งกับที่ได้อย่างแม่นยำ โดยมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งแนวราบต่ำกว่า 2 เซนติเมตร และใช้เวลาในการคำนวณตำแหน่งที่แม่นยำภายในเวลา 18 วินาที เมื่อใช้งานร่วมกับสถานีอ้างอิงที่พัฒนาขึ้น ซึ่งมีสมรรถนะเทียบเคียงได้กับข้อกำหนดของอุปกรณ์ด้านรังวัดในระดับอุตสาหกรรม

นอกจากนี้แล้ว อุปกรณ์ Rover ยังรองรับการเชื่อมต่อกับโครงข่าย GNSS ที่มีอยู่แล้วภายในประเทศไทย เช่น กรมโยธาธิการและผังเมือง ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงขอเสนอให้นำอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ ไปใช้ในการรังวัดกับทางเอกชนหรือร่วมกับกรมโยธา เพื่อลดการนำเข้าอุปกรณ์รังวัดจากต่างประเทศทั้งระบบได้

2. การทำเกษตรกรรมแม่นยำสูง

เนื่องจากประเทศไทย มีรายได้จากการส่งออกสินค้าทางด้านเกษตรเป็นหลัก เช่น ข้าว และน้ำตาลทราย เป็นอันดับต้นๆ ของโลก จึงต้องมีการจัดสรรพื้นที่เพาะปลูกที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดความคุ้มค่า ซึ่งในการทำเกษตรกรรมบนพื้นที่ขนาดใหญ่ (มักเป็นพืชไร่ ที่มีรูปแบบการเพาะปลูกที่เรียงตัวขนานกันหลายแนวเต็มทั้งพื้นที่) นั้น จะต้องใช้รถจักรกลเกษตรในการปรับหน้าดินและสร้างแนวเพาะปลูกเป็นหลัก โดยผู้วิจัย ขอเสนอให้นำอุปกรณ์ Rover และสถานีอ้างอิงที่พัฒนาขึ้น ไปใช้ในการทำเกษตรกรรมความแม่นยำสูงบนพื้นที่เพาะปลูกดังนี้

1) สำรวจขนาด และรังวัดพื้นที่เพาะปลูกที่ใช้ได้ ด้วยชุดอุปกรณ์สถานีอ้างอิงกับอุปกรณ์ Rover

2) กำหนดแนวเพาะปลูกบนพื้นที่ (ในทางเทคนิค จะเรียกว่า Shape file เป็นแนวการเคลื่อนที่ของรถจักรกลเกษตรบนพื้นที่เพาะปลูก) โดยอาศัยข้อมูลทางตำแหน่งที่มีความแม่นยำสูงจากข้อ 1

3) นำเข้า Shape file ไปยังระบบนำร่องรถจักรกลเกษตร พร้อมกับระบุตำแหน่งของรถฯ ด้วยอุปกรณ์ Rover (เพื่อใช้ประกอบการนำร่อง) จากนั้นทำขับรถเพื่อปรับหน้าดิน หรือสร้างแนวเพาะปลูกตามระบบนำร่องจนทั่วทั้งพื้นที่เพาะปลูก

จากขั้นตอนที่กล่าวมานี้ จะช่วยให้เกษตรกรสร้างแนวเพาะปลูกที่เป็นระเบียบ และลดการอัดแน่นของหน้าดินจากการบดอัดของรถฯ ได้ดีอีกด้วย

ภาคผนวก ค
บทความสำหรับลงวารสาร กสทช.
หมายเลขทุน A63-1-(2)-004

บทความเรื่อง “การพัฒนาอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ที่มีความแม่นยำระดับเซนติเมตรสำหรับอุตสาหกรรม”

โดย ผศ.ดร.กฤษณ์ วงจรจิระ

ที่อยู่ : ห้อง T-118 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยการพัฒนาอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ที่มีความแม่นยำระดับเซนติเมตรสำหรับอุตสาหกรรมนี้ มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ชนิด 2 ความถี่ ร่วมกับการใช้เทคนิค RTK (Real-Time Kinematic) เพื่อเพิ่มความแม่นยำทางตำแหน่ง และให้มีขีดความสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้จริง เช่น อุตสาหกรรมด้านการสำรวจและรังวัด หรืออุตสาหกรรมเกษตรกรรมความแม่นยำสูง

ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบสถานีอ้างอิงและอุปกรณ์รับสัญญาณ Rover (หรือ Rover) ขึ้น โดยใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS ชนิด 2 ความถี่รุ่น UBX-F9P เป็นหลัก สำหรับการออกแบบฮาร์ดแวร์ของทั้งสองอุปกรณ์นี้ จะเน้นไปที่ความสามารถในการใช้งานกลางแจ้ง มีช่องทางการเชื่อมต่อระหว่างกันผ่านเครือข่าย WIFI รวมทั้งเครือข่าย 3G/4G ได้ รวมทั้งสามารถแสดงตำแหน่งของอุปกรณ์ Rover ผ่านซอฟต์แวร์แสดงตำแหน่งบนพื้นโลกผ่านมือถือแอนดรอยด์ได้

ในการทดสอบความแม่นยำทางตำแหน่งของอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดสอบออกเป็นสองประเภท ได้แก่ การทดสอบแบบหยุดนิ่งกับที่ โดยที่ผู้วิจัยจะติดตั้งสถานีอ้างอิงเพื่อส่งค่าแก้ไขทางตำแหน่งไปยังอุปกรณ์ Rover ซึ่งอยู่นิ่งกับที่ จากนั้นจะนำพิกัดของ Rover ที่ได้ไปคำนวณหาการกระจายตัวเทียบกับตำแหน่งโดยเฉลี่ย สำหรับกรณีเคลื่อนที่ ผู้วิจัยจะกำหนดแนววิถีเส้นตรงและแนวการเคลื่อนที่แบบวงกลมขึ้น แล้วเคลื่อนที่ Rover ตามแนววิถีเหล่านั้นอย่างน้อย 3 รอบ สำหรับการวิเคราะห์ความแม่นยำของ Rover ขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง จะได้จากการวิเคราะห์ระยะห่างของ Rover ที่ตั้งฉากกับแนวเส้นตรง หรือระยะ XTE ในขณะที่การเคลื่อนที่แบบวงกลมสามารถวัดความแม่นยำได้จากความคลาดเคลื่อนรัศมีของ Rover เทียบกับรัศมีอ้างอิง ขณะเดียวกันจะมีการติดตามตำแหน่งของ Rover ผ่านซอฟต์แวร์แสดงตำแหน่งบนพื้นโลก SW Maps แบบเวลาจริงด้วย

ผลจากการทดสอบ พบว่าหลังจากใช้เทคนิค RTK สามารถระบุตำแหน่งของ Rover ขณะอยู่นิ่งกับที่โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 เซนติเมตร ในขณะที่การระบุตำแหน่งตามแนวเส้นตรงและแนววงกลม จะมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 24 เซนติเมตร นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานกลางแจ้งได้อย่างต่อเนื่องอย่างน้อย 5 ชั่วโมง รวมทั้งสามารถแสดงตำแหน่งของ Rover ผ่านแอปพลิเคชัน SW Maps ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์แสดงตำแหน่งบนพื้นโลกได้อีกด้วย

จากผลการทดสอบการระบุตำแหน่งแบบอยู่นิ่งกับที่ ผู้วิจัยคาดว่าสามารถนำไปประยุกต์ในการอุตสาหกรรมการสำรวจและรังวัดได้ เนื่องจากใช้เวลาเพียง 18 วินาทีเพื่อให้พร้อมใช้งาน และมีความแม่นยำถึง 2 เซนติเมตร และสำหรับกรณีเคลื่อนที่ ผู้วิจัยคาดว่าสามารถนำไปประยุกต์กับการทำเกษตรกรรมความแม่นยำสูง เช่น การควบคุมการจราจรของรถจักรกลเกษตรบนพื้นที่เพาะปลูกขนาดใหญ่ ที่ต้องอาศัยการระบุตำแหน่งรถที่แม่นยำสูง เป็นต้น

Abstract

This project aim to study and develop RTK (Real-Time Kinematic) dual-frequency GNSS satellite positioning equipment to reach a industrial centimeter-level positioning accuracy based on the UBX-F9P dual-frequency GNSS receivers.

This equipment provides an interconnection via WIFI and 3G/4G network. The rover can receive the correction from the reference station to calculate a precise position then display it via Android mobile software.

To verify the positioning accuracy of the developed equipment, we propose two situations of the experiments. The first situation is stationary positioning, the reference station will be installed to transmit the position correction to the stationary Rover. Then the coordinates of the Rover are accumulated to calculate the distribution relative to the average position. The second situation is a moving rover positioning, we will determine the straight and the circular motion with the specified radius. Then move the Rover along those trajectories at least 3 times to accumulate rover position. Next, we can analyze the perpendicular distance between Rover and the straight line. While in a circular motion, the positioning accuracy can be measured from the difference radius between Rover and the specified radius.

As a result, the positioning accuracy of the rover in a stationary situation has a discrepancy lower than 2 centimeters while in the case of straight-line and a circular

movement, there are errors lower than 24 cm centimeters. In addition, it can be operated outdoors for at least 5 hours continuously, and the rover's position can be displayed via the SW Maps application.

ความเป็นมา หรือความสำคัญของปัญหา

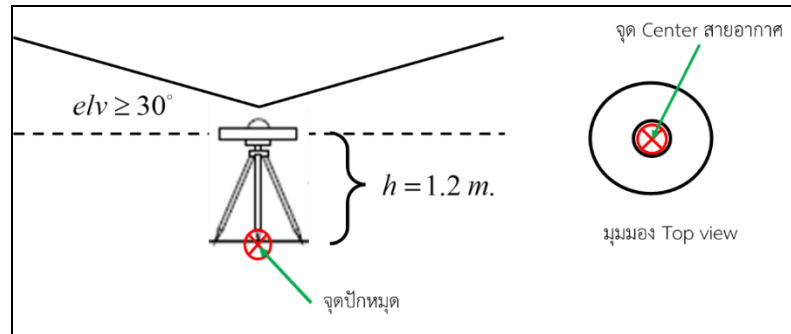
อุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ที่ใช้งานกันโดยทั่วไป จะมีค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งในแนวราบประมาณ 3 เมตร (rms) และในแนวตั้งประมาณ 5 เมตร (rms) ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ จำนวนดาวเทียมที่รับสัญญาณได้ การกระจายตัวของดาวเทียมในท้องฟ้า การรบกวนของปรากฏการณ์สัญญาณพหุวิถี การหน่วงสัญญาณในชั้นไอโอโนสเฟียร์และโทรโปสเฟียร์ รวมทั้งประสิทธิภาพในการลดสัญญาณรบกวนของเครื่องรับ เป็นต้น วิธีการหนึ่งที่ยินยอมใช้ในการเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งคือการใช้เทคนิค Real-Time Kinematic หรือ RTK ที่มีความสามารถในการหน่วงสัญญาณในชั้นไอโอโนสเฟียร์และโทรโปสเฟียร์ ทำให้ตำแหน่งที่ได้มีความแม่นยำอยู่ในระดับเซนติเมตรได้ โดยเทคนิคดังกล่าวจะต้องใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS อย่างน้อย 2 เครื่อง โดยมี 1 เครื่องที่ติดตั้งอยู่กับที่สำหรับเป็นสถานีอ้างอิงเพื่อส่งค่าแก้ไขทางตำแหน่งให้กับเครื่องรับฯ อื่นๆ ที่ต้องการระบุตำแหน่งด้วยความแม่นยำสูงถึงระดับเซนติเมตร ในกรณีที่ใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS ชนิด 1 ความถี่กับเทคนิคดังกล่าวจะต้องมีระยะขจัดถึงสถานีอ้างอิงไม่เกิน 20 กิโลเมตร แต่ในปัจจุบันมีความก้าวหน้าในการผลิตเครื่องรับสัญญาณ GNSS ชนิด 2 ความถี่มากขึ้น ทำให้มีราคาถูกลง ซึ่งเครื่องรับฯ ประเภทดังกล่าวมีประสิทธิภาพด้านความแม่นยำทางตำแหน่งที่สูงกว่ารวมทั้งสามารถขยายระยะขจัดถึงสถานีอ้างอิงได้ถึง 20 กิโลเมตรถึง 60 กิโลเมตรโดยประมาณ

ดังนั้นในโครงการ “การพัฒนาอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ที่มีความแม่นยำระดับเซนติเมตรสำหรับอุตสาหกรรม” จึงมุ่งหวังที่จะพัฒนาชุดอุปกรณ์นำร่องความแม่นยำสูงที่มีรัศมีการใช้งานที่กว้างขึ้น มีความสะดวกในการติดตั้งและทนทาน ประกอบไปด้วยสถานีอ้างอิงและ Rover ที่ใช้เครื่องรับฯ ชนิด 2 ความถี่เป็นหลัก พร้อมกับพัฒนาสถานีคลาวด์สำหรับสร้างช่องทางการเชื่อมต่อเสมือนส่วนตัวระหว่างสถานีอ้างอิงกับ Rover ที่สร้างขึ้นเอง จากนั้นจะพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับแสดงตำแหน่ง Rover บนพื้นโลกให้แก่ผู้ใช้งานต่อไป

วิธีการศึกษา

ในการศึกษาของโครงการนี้ จะมีการวิเคราะห์ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของ Rover ด้วยเทคนิค RTK ที่อาศัยค่าแก้ไขทางตำแหน่งจากสถานีอ้างอิงประจำโครงการฯ (ANDA) โดยจะแบ่งออกเป็น 2 กรณีดังนี้

1. การระบุตำแหน่งแบบอยู่นิ่งกับที่

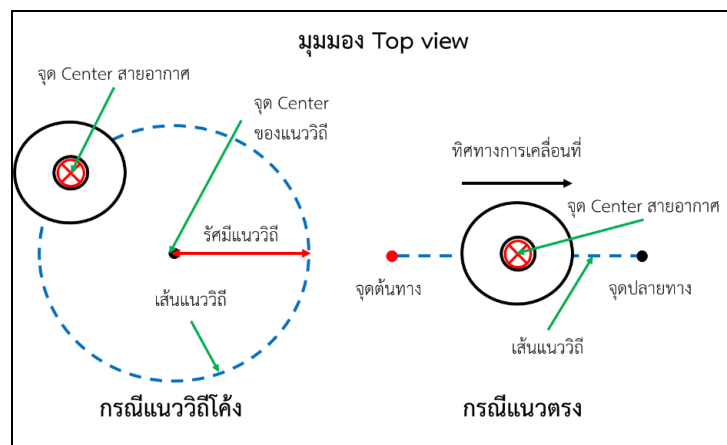


รูปที่ 1 การระบุตำแหน่งอุปกรณ์กรณีหยุดนิ่งกับที่

จากรูปที่ 1 จะติดตั้งอุปกรณ์ Rover กับรถเข็น กำหนดให้สายอากาศมีมุมเงยรับสัญญาณจากดาวเทียมอย่างน้อย 30° จากเส้นแนวระดับสายตา มีความสูงเหนือพื้นดิน 1.2 เมตร รวมทั้งมีตำแหน่งตรงกันกับจุดปักหมุดบนพื้นดิน

2. การระบุตำแหน่งแบบที่มีการเคลื่อนที่

ลักษณะของการเคลื่อนที่ สามารถแยกออกเป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การระบุตำแหน่งอุปกรณ์กรณีเคลื่อนที่ (ซ้าย) กรณีเคลื่อนที่เป็นวงกลม (ขวา) กรณีเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง

จากรูปที่ 2 เมื่อเคลื่อนที่แบบวงกลม จะมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

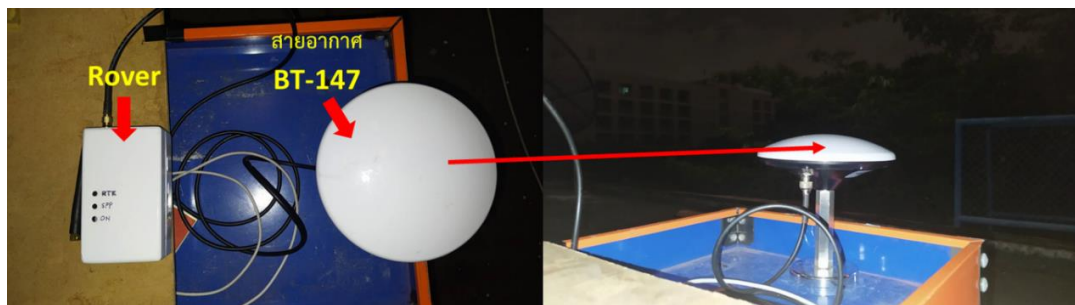
1. กำหนดจุดศูนย์กลางของวงกลม จากนั้นปักหมุดเอาไว้ตามกระบวนการตามรูปที่ 2
2. กำหนดให้มีความยาวรัศมีวงกลมอ้างอิงเป็น 1 เมตร แล้วลากเส้นวงกลมขึ้น
3. นำอุปกรณ์ไปเก็บตำแหน่งตรงจุดศูนย์กลางวงกลมเอาไว้ จากนั้นให้เคลื่อนที่อุปกรณ์ตามแนวเส้นรอบวงในทิศทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกาอย่างน้อย 3 รอบ

4. คำนวณรัศมีจากระยะห่างของแต่ละตำแหน่งบนเส้นรอบวงถึงจุดศูนย์กลาง แล้วไปเปรียบเทียบกับรัศมีอ้างอิงที่ใช่ว่าดวงกลมอีกครั้ง โดยจะมีสมการที่เกี่ยวข้องเช่นเดียวกับหัวข้อที่

4.1.6.2

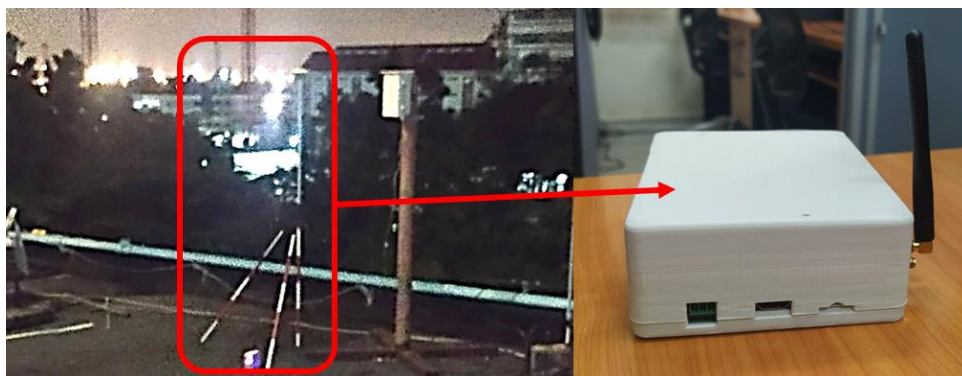
ในกรณีการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง จะมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. กำหนดจุดต้นทางและจุดปลายทางจากนั้นให้เก็บตำแหน่งทั้งสอง
2. ลากแนวเส้นตรงจากจุดต้นทางไปยังปลายทาง
3. นำอุปกรณ์ไปวางที่จุดต้นทาง จากนั้นเคลื่อนที่ตามแนวเส้นทางไปกลับซ้ำ 3 รอบเพื่อเก็บข้อมูลลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ Rover กลางแจ้งจะมีลักษณะดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์ Rover ประจำโครงการ (ซ้าย) การต่ออุปกรณ์ (ขวา) การติดตั้งกลางแจ้ง

สำหรับการติดตั้งสถานีอ้างอิง ANDA เพื่อเตรียมส่งค่าแก้ไข ให้แก่อุปกรณ์ Rover จะมีลักษณะดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การติดตั้งสถานีอ้างอิง ANDA สำหรับทดสอบ

จากรูปที่ 4 ผู้วิจัยจะคำนวณหาตำแหน่งที่แม่นยำของสถานีอ้างอิง ANDA โดยใช้โปรแกรม RTKRCV ด้วยค่าพารามิเตอร์สำหรับทดสอบดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์และค่าที่ใช้ในโปรแกรม RTKRCV

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
ระบบดาวเทียม	GPS + Beidou + Glonass
โหมดการระบุตำแหน่ง	RTK – Kinematic
มุมเงย	$\geq 30^\circ$
ความสูงเหนือพื้นดินของสายอากาศ Rover	≥ 2 เมตร
ช่วงเวลาที่ทดสอบ	14:05:19 - 14:08:42
โมเดลการห้วงเวลาในชั้นไอโอโนสเฟียร์	Broadcast
โมเดลการห้วงเวลาในชั้นโทรโปสเฟียร์	Saastamoinen
ระยะขจัดถึงสถานีอ้างอิงกรมที่ดิน (DOL)	≤ 3 เมตร

หลังจากการตั้งค่าดังกล่าว และสามารถระบุตำแหน่งที่แม่นยำของสถานีอ้างอิง ANDA ได้แล้ว ผู้วิจัยจะทดสอบการระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ Rover ด้วยเทคนิค RTK ดังระบุไว้ในรูปที่ 2

การวิเคราะห์ความแม่นยำทางตำแหน่ง

กรณีรังวัดแบบหยุดนิ่ง

มีตำแหน่งอ้างอิงของการทดสอบแบบหยุดนิ่งดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตำแหน่งอ้างอิงในการทดสอบการระบุตำแหน่งแบบหยุดนิ่ง

Latitude (deg.)	Longitude (deg.)	Height (m.)
13.727507407	100.775953695	-14.9882

ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ผู้วิจัยจะนำตำแหน่งอ้างอิงดังกล่าวไปคำนวณหาระยะห่างแบบ Haversine แล้วคิดค่าความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะห่างต่อไป

กรณีรั้ววัดแบบเคลื่อนที่

กรณีที่ 1 เคลื่อนที่แบบวงกลม

ในการทดสอบนี้ ผู้วิจัยจะกำหนดให้รัศมีอ้างอิงของวงกลมเท่ากับ 1 เมตร และมีจุดศูนย์กลางวงกลมตามตำแหน่งในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางวงกลมและรัศมีอ้างอิง

Latitude (deg.)	Longitude (deg.)	Height (m.)	Radius (m.)
13.727512167	100.776008833	-15.0000	1

ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ผู้วิจัยจะนำตำแหน่งทั้งหมดที่ได้จากเทคนิค RTK ไปหาระยะห่างแบบ Haversine กับจุดศูนย์กลางวงกลมที่กำหนด จากนั้นจะนำไปหาผลต่างกับรัศมีอ้างอิงและคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากผลต่างที่ได้เพื่อระบุความแม่นยำทางตำแหน่งแนวราบของ Rover ขณะเคลื่อนที่ดังหัวข้อที่ 5.2.6.2 ต่อไป

กรณีที่ 2 เคลื่อนที่แบบเส้นตรง

จะมีตำแหน่งของต้นทางและปลายทางในการทดสอบ จะระบุเอาไว้ในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 4 ตำแหน่งต้นทางและปลายทางของการทดสอบการความแม่นยำทางตำแหน่งเมื่อเคลื่อนที่แบบเส้นตรง

จุดบนเส้นทาง	Latitude (deg.)	Longitude (deg.)	Height (m.)
ต้นทาง	13.727507407	100.775953695	-14.9882
ปลายทาง	13.727507651	100.776023428	-14.9777

ภายหลังการทดสอบ ผู้วิจัยจะนำตำแหน่งของ Rover ไปคำนวณหาระยะตัดขวาง (XTE) กับตำแหน่งต้นทางและปลายทาง จากนั้นจะคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากระยะ XTE ที่ได้โดยมีผลการทดสอบดังหัวข้อถัดไป

ผลการศึกษา

ผลการระบุตำแหน่งแบบหยุดนิ่ง

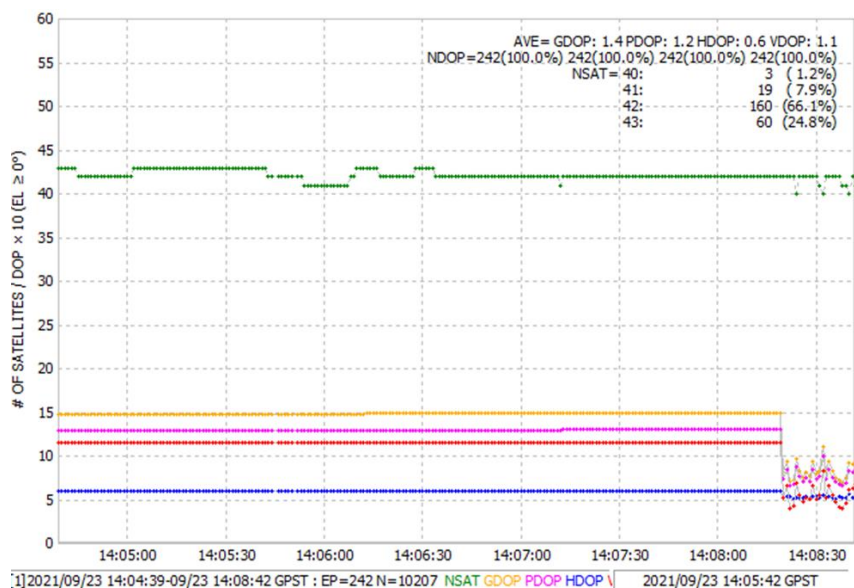
ตำแหน่งของอุปกรณ์ฯ Rover ที่ระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK จากสถานีอ้างอิง ANDA จะมีผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งอุปกรณ์ฯ Rover ด้วยเทคนิค RTK

พารามิเตอร์ที่วัดได้	สถานีอ้างอิงที่ใช้
	ANDA
TTFA (วินาที)	18
Fix rate (%)	98.5

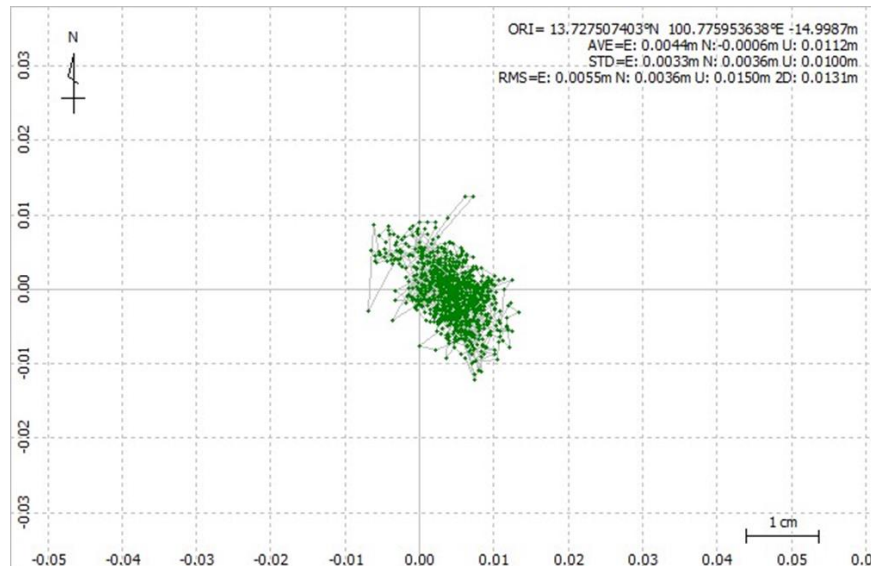
จากตารางที่ 5 พบว่าการประมวลผลด้วยเทคนิค RTK ของอุปกรณ์ฯ Rover ที่ออกแบบจะใช้เวลาเพียง 18 วินาทีเพื่อให้ได้พิกัดที่มีสถานะเป็น Fix (มีความแม่นยำในระดับเซนติเมตร) และมีสัดส่วนของพิกัดดังกล่าวจากทั้งการทดสอบสูงถึงร้อยละ 98.5

ในส่วนของสถานีอ้างอิง ANDA เนื่องจากตั้งอยู่ในบริเวณที่ค่อนข้างโล่ง จึงรับสัญญาณดาวเทียมได้สะดวก ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของจำนวนดาวเทียมค่อนข้างต่ำ และมองเห็นดาวเทียมได้ไม่ต่ำกว่า 40 ดวงดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5 จำนวนดาวเทียมที่สถานีอ้างอิง ANDA รับได้ในแต่ละเวลา

จากรูปที่ 5.12 พบว่าสถานีอ้างอิง ANDA ที่พัฒนาขึ้น สามารถรับดาวเทียมได้อย่างน้อยถึง 40 ดวง โดยหลังจากคำนวณหาค่าแก้ไขในการระบุตำแหน่งแล้วส่งผ่านเครือข่าย 3G/4G ไปยังอุปกรณ์ Rover จะได้ผลการระบุตำแหน่งแบบหยุดนิ่งกับที่ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 6 ตำแหน่งของ Rover ของการทดสอบแบบหยุดนิ่งกับที่

จากรูปที่ 5.13 ตำแหน่งของ Rover จะแทนด้วยจุดสีเขียวโดยหลังจากนำไปวิเคราะห์ความแม่นยำทางตำแหน่งจะได้ผลดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 7 ระยะห่างจาก Rover ถึงจุดอ้างอิงตามแนว (บน) ทิศตะวันออก (ล่าง) ทิศเหนือ

จากรูปที่ 5.14 จะพบว่าตำแหน่งของ Rover จากการใช้สถานีฯ ANDA จะอยู่ห่างจากจุดอ้างอิงไม่เกิน 1 เซนติเมตร เมื่อนำไปคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและเปอร์เซ็นต์ที่ 95 ของระยะ Haversine ได้ผลดังตารางที่ 5.6

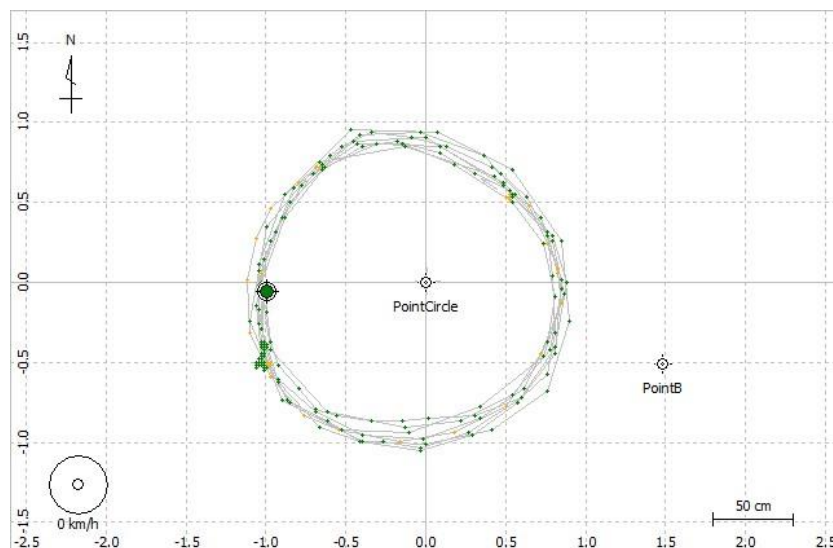
ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ระยะ Haversine จาก Rover ถึงจุดอ้างอิง กรณีอยู่กับที่

สถานีอ้างอิงที่ใช้	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เมตร)	เปอร์เซ็นต์ที่ 95 (เมตร)
ANDA	0.0049	0.0176

จากตารางที่ 5.6 พบว่ากรณีที่ระบุตำแหน่ง Rover แบบอยู่กับที่ที่ใช้สถานีฯ ANDA จะมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งไม่เกิน 2 เซนติเมตร และเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการใช้อุปกรณ์ฯ Rover เพื่อระบุตำแหน่งของ Rover ขณะเคลื่อนที่จะมีผลการทดสอบดังนี้

การระบุตำแหน่งเมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลม

จากการทดสอบ จะได้ตำแหน่งของ Rover ดังรูปที่ 5.15



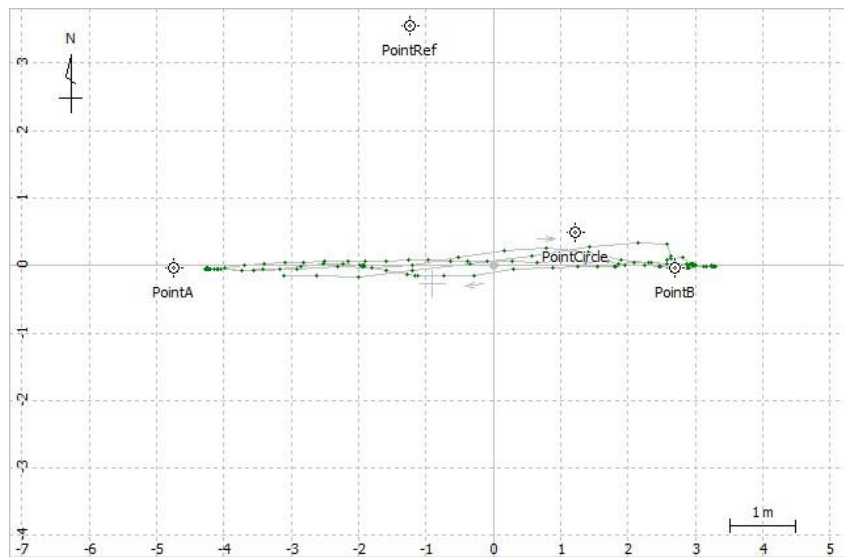
รูปที่ 8 ตำแหน่งของ Rover ของการทดสอบแบบเคลื่อนที่เป็นวงกลม

จากรูปที่ 5.15 จะได้แนววิถีของ Rover เป็นวงกลมรอบจุดศูนย์กลาง PointCircle ซึ่งนำไปวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนรัศมีได้ผลดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 7 ความคลาดเคลื่อนทางรัศมีของ Rover ที่เคลื่อนที่แบบวงกลม

อุปกรณ์ Rover ที่ใช้	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เมตร)	เปอร์เซ็นต์ที่ 95 (เมตร)
ANDA	0.0805	0.2389

การระบุตำแหน่งเมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง



รูปที่ 9 ตำแหน่งของ Rover ของการทดสอบแบบเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง

จากรูปที่ 5.16 จุดต้นทางและปลายทางจะแทนด้วย PointA และ PointB ตามลำดับซึ่งเชื่อมถึงกันด้วยแนวเส้นประสีเขียว (ตำแหน่งของอุปกรณ์ Rover ตามแนวเส้นทาง) เมื่อคำนวณหาระยะตัดขวางของตำแหน่งดังกล่าวกับเส้นทาง จะได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 8 ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของ Rover เทียบกับเส้นทาง

อุปกรณ์ Rover ที่ใช้	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เมตร)	เปอร์เซ็นต์ที่ 95 (เมตร)
ANDA	0.08475	0.1922

จากตารางที่ 5.8 จะพบว่ากรณีที่ระบุตำแหน่งของ Rover เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง จะมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 20 เซนติเมตร โดยมีค่าที่น้อยกว่าการเคลื่อนที่เป็นวงกลม เนื่องจากควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่า

บทสรุป

จากการทดสอบการระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ Rover ด้วยเทคนิค RTK พบว่ามีประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งที่สูง โดยมีช่วงเวลา TTFA เพียง 18 วินาที มีร้อยละของพิกัดที่มีสถานะเป็น Fix ถึงร้อยละ 98.5 และเมื่อระบุตำแหน่งแบบหยุดนิ่ง อุปกรณ์ Rover มีความแม่นยำทางตำแหน่งถึง 2 เซนติเมตร ในขณะที่การระบุตำแหน่งขณะเคลื่อนที่ กรณีที่เคลื่อนเป็นเส้นตรงและวงกลม จะมีความแม่นยำตามแนวราบไม่เกิน 25 เซนติเมตร

ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้การทดสอบสมบูรณ์ขึ้น อาจจะมีการทดสอบการระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ Rover โดยอาศัยค่าแก้ไขจากเครือข่าย GNSS ภายในประเทศ เช่น กรมที่ดิน หรือกรมโยธาธิการและผังเมือง ร่วมกันได้ ซึ่งจะช่วยยืนยันความถูกต้องในการระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นอีกทอดหนึ่ง

อ้างอิง

- [1] A. Cina et al. (11 03 2015). Network Real Time Kinematic (NRTK) Positioning – Description, Architectures and Performances. 23-46. doi:10.5772/58486
- [2] E. Wei et al. (31 12 2006). VRS Virtual Observations Generation Algorithm. Journal of Global Positioning Systems, 5. doi:10.5081/jgps.5.1.76
- [3] Movable Type Scripts. (ม.ป.ป.). Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points. เข้าถึงได้จาก <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>

ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ - นามสกุล : ผศ.ดร.กฤษณ์ วงรุจิระ (ASST.PROF.DR. Krit Wongrujira)

เบอร์ติดต่อ : 081-3612424 E-Mail :krit.wo@kmitl.ac.th

หน่วยงาน : สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติการศึกษา :

- Ph.D. (Electrical Eng.), University of New South Wales, Australia
- M.S. (Electrical Eng.), University of Southern California, USA
- วศ.บ. (อิเล็กทรอนิกส์), สจล.

งานวิจัย :



- [1] K. Wongrujira, P. Sookavatana and A. Seneviratne, "Provision resource bidding for special service provider in decoupling spaces network," *9th Asia-Pacific Conference on Communications (IEEE Cat. No.03EX732)*, 2003, pp. 363-367 Vol.1, doi: 10.1109/APCC.2003.1274376.
- [2] K. Wongrujira and A. Seneviratne, "Monetary incentive with reputation for virtual market-place based P2P," *Proceedings of the 2005 ACM conference on Emerging network experiment and technology*, 2005, pp 135-145, <https://doi.org/10.1145/1095921.1095940>.
- [3] K. Wongrujira, Tim Hsin-ting and A. Seneviratne, "Incentive service model for P2P," *The 3rd ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Application*, 2005, pp. 81-, doi: 10.1109/AICCSA.2005.1387075.

ประวัตินักวิจัยร่วม

ชื่อ - นามสกุล : นายณัฐธรรงค์ นิลจันทร์ (Mr. Natthanarong Nilchan)

เบอร์ติดต่อ : 082-852-1431 E-Mail : Telekom2559@gmail.com

หน่วยงาน : สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติการศึกษา :

- วศ.ม. (โทรคมนาคม), สจล.

- วศ.บ. (โทรคมนาคม), สจล.

งานวิจัย :

- [1] N. Nilchan, P. Supnithi and W. Phakphisut, "The comparison of position estimation by using Kalman filter and Unscented Kalman filter with linear model system," *2019 34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC)*, 2019, pp. 688-691.
- [2] N. Nilchan, P. Supnithi and W. Phakphisut, "Improvement of Kalman Filter for GNSS/IMU Data Fusion with Measurement Bias Compensation," *2020 35th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC)*, 2020, pp. 405-410.