



กทปส

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการขอรับการส่งเสริมและสนับสนุนจากเงินกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง
กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

“ศึกษาการใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานในแต่ละพื้นที่”

“TV White Space”

สัญญาเลขที่ B2-2-04/58

หัวหน้าโครงการ อัฐพงษ์ เทพารักษ์ษณการ
คณะนักวิจัยร่วม อติสรณ์ เลิศสินทรัพย์ทวี และนิศารัตน์ ต้นสกุล

มกราคม พ.ศ. 2562

รายงานฉบับสมบูรณ์

ทุนส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา
สัญญารับทุนเลขที่ B2-2-04/58

โครงการ “ศึกษาการใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานในแต่ละพื้นที่”
“TV White Space”

คณะนักวิจัย

- | | |
|---------------------------------|------------------------|
| 1. ดร. อัฐพงษ์ เทพารักษ์ษณากร | นักวิจัยหัวหน้าโครงการ |
| 2. ดร. อติสรณ์ เลิศสินทรัพย์ทวี | นักวิจัยร่วม |
| 3. นส. นิศารัตน์ ตันสกุล | นักวิจัยร่วม |

ได้รับทุนอุดหนุนจาก
กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ
(สำนักงาน กสทช.)

มกราคม พ.ศ. 2562

บทสรุปผู้บริหาร

โครงการ “ศึกษาการใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานในแต่ละพื้นที่”
“TV White Space”
มกราคม พ.ศ. 2562

ในโครงการนี้ ระบบการตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ได้ถูกศึกษาและพัฒนา การตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ได้ถูกออกแบบทั้งแบบ (Moving location measurement) เพื่อสามารถเก็บข้อมูลหลายๆ ตำแหน่งในแต่ละพื้นที่อย่างต่อเนื่อง และแบบ ณ ตำแหน่งตายตัว (Fixed location) เพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลได้ละเอียดมากขึ้น เบื้องต้นการทดสอบความถูกต้องของระบบวัดดังกล่าวถูกทำโดยการปรับเครื่องเข้าสู่ภาวะมาตรฐาน (Calibration) เทียบกับเครื่องมือวัดวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum analyzer) แบบมาตรฐานที่มีราคาแพงมาก และกินพลังงานมากต้องต่อสายกำลังไฟตลอดเวลา ใหญ่เทอะทะจะทำให้ไม่สะดวกในการทำงานภาคสนามได้ ระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นนั้นมีราคาถูก ทำให้องค์กรที่ต้องการการใช้งานแต่มีงบประมาณน้อยสามารถเข้าถึงได้ อีกทั้งทำให้โครงการหลายๆ สามารถมีระบบนี้ได้หลายชุด ซึ่งทำให้สามารถการวัดพร้อมๆ กันได้หลายพื้นที่ กินพลังงานน้อยทำให้ระบบทำงานไว้ตลอดทั้งวันไม่ต้องคอยชาร์จไฟหรือเปลี่ยนแบตเตอรี่ง่ายต่อการใช้งาน ไม่ซับซ้อน ซึ่งทำให้สะดวกในการหาทีมงานที่มาช่วยในวัด

หลังจากนั้น ระบบการตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ที่ออกแบบขึ้นได้ถูกทดสอบ ซึ่งเบื้องต้นถูกทดสอบในบริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียหรือเอไอที (Asian Institute of Technology (AIT)) จังหวัดปทุมธานี ทั้งแบบเคลื่อนที่ เพื่อสามารถเก็บข้อมูลหลายๆ ตำแหน่งในแต่ละพื้นที่อย่างต่อเนื่อง และแบบ ณ ตำแหน่งตายตัว ซึ่งในสถาบันเอไอที จังหวัดปทุมธานีเทียบได้กับเขตท้องที่ชุมชน ในเขตเมือง ต่างจังหวัด (Suburban area) จากการวิเคราะห์เบื้องต้น เมื่อใช้ค่าเทรสโฮลด์แบบตายตัวเช่น -100 เดซิเบลเอม (Decibel-milliwatts (dBm)) มีปัญหาความไม่แม่นยำในการตัดสินใจว่าช่องสัญญาณนั้นว่างหรือไม่ว่างเมื่อเทียบกับค่าความจริงขั้นพื้นฐาน (Ground truth) ซึ่งเป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลจากการวัดภายในอาคารซึ่งสัญญาณคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ได้ถูกบดบังอย่างสุดก่อนที่จะมาถึงสายอากาศของระบบวัดก็จะเกิดปรากฏการณ์เงาหรือ ซาโดว์อิงเอฟเฟกต์ (Shadowing effect) ทำให้การตัดสินใจเป็นไปอย่างไม่ถูกต้องนัก ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาได้ถูกเสนอขึ้น โดยพัฒนาอัลกอริทึมที่ใช้ตรวจจับช่องสัญญาณคลื่นความถี่หรือ สเปกตรัมเซนซิง (Spectrum sensing algorithm) เพื่อระบุชี้แจงคลื่นที่ไม่ได้ถูกใช้งานได้แม่นยำขึ้น อัลกอริทึมดังกล่าวทำให้การตั้งค่าเทรสโฮลด์เป็นไปแบบปรับเปลี่ยน (Adaptive threshold) ไม่ว่าจะเป็นวิธีเอฟซีเอ็มอี (Forward Consecutive Mean Excision (FCME)) หรือวิธีแอลเอดี (Localization Algorithm Based on Double-Thresholding (LAD)) ซึ่งทำให้ตัดสินใจได้ดีขึ้นว่า ช่องสัญญาณนั้น

ว่าง หรือไม่ ด้วยขั้นตอนของวิธีการดังกล่าว จำเป็นต้องการให้ข้อมูลหรือช่องสัญญาณที่ต้องการทำทดสอบมีส่วนที่ไม่มีสัญญาณและเป็นเพียงสัญญาณรบกวน (Noise) ก่อน ซึ่งเปรียบได้ว่าเป็นเซตที่สะอาด (Clean set) ซึ่งเซตเริ่มต้นนี้จะมีขนาดประมาณ 10% ของเซตข้อมูลทั้งหมด แต่เมื่อช่องสัญญาณนั้นไม่ว่างประกอบด้วยสัญญาณคลื่นกิกการโทรทัศน ทั้ง FCME และ LAD ไม่สามารถที่เพิ่มความถูกต้องในการตัดสินใจ ดังนั้นการแก้ไขได้ถูกเสนอขึ้นโดยการเสริมสัญญาณรบกวนเทียมเข้าไปเป็นวิธี Noise added FCME และวิธี Noise added LAD ซึ่งปริมาณสัญญาณรบกวนที่ใส่เข้าไปเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับข้อมูลทั้งหมด โดยจะปรับค่าดังกล่าวไปเรื่อยๆ จาก 0, 5, 10,...,100 เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียบกับข้อมูลทั้งหมดที่เหมาะสมที่สุด (Optimal percentage) และค่าที่ได้ถูกยืนยันโดยวิธีการของทางวิเคราะห์เชิงลึก (Analytical framework) ซึ่งวิธีการที่เราใช้คือ วิธีการเอเอ็นเอ็นหรือโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks (ANN)) ซึ่งเป็นเทคนิคที่เลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์ ผลจากการเสริมสัญญาณรบกวนเทียมนี้ ทำให้สามารถตัดสินใจว่าช่องสัญญาณนั้นว่างหรือไม่ว่างได้ถูกต้องแม่นยำขึ้น นอกจากนี้ที่สถาบันเอไอทีแล้ว การตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิกการโทรทัศน ได้ถูกทำในพื้นที่ตัวอย่างในกรุงเทพมหานครด้วย ซึ่งเปรียบได้กับท้องที่หนาแน่นในเขตเมืองใหญ่ (Urban area) และในพื้นที่ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งถือว่าเป็นพื้นที่ห่างไกลเข้าถึงยาก (Rural area) และในที่สุดสรุปได้ว่า จำนวนคลื่นความถี่ที่สามารถนำมาใช้งานได้ (Spectrum availability) หรือปริมาณคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศนที่ไม่มีการใช้งานในแต่ละพื้นที่หรือที่เรียกว่าทีวีไวท์สเปซ (TV white space (TWWS)) ในพื้นที่ห่างไกลเข้าถึงยากมีจำนวนมากที่สุด ดังนั้นเพื่อเป็นการขยายการใช้งานบรอดแบนอินเทอร์เน็ต ในพื้นที่ที่ยังไม่มีการเข้าถึงหรือพื้นที่ที่เข้าถึงยาก ทีวีไวท์สเปซ (TWWS) เป็นทางเลือกใหม่ที่ดี สำหรับเชื่อมต่อเครือข่ายหลัก (Backhaul connection) ที่มีการราคาถูกกว่าการเชื่อมต่อโดยใช้ใยแก้วนำแสง (Fiber optics) ดาวเทียม (Satellite) หรือระบบวายแมกซ์ (Worldwide interoperability for Microwave Access (WiMAX))

ซึ่งจากผลการศึกษาวิจัยในส่วนการตรวจวัดและวิเคราะห์ การใช้งานคลื่นความถี่กิกการโทรทัศนนี้ ได้ถูกนำไปตีพิมพ์วารสารทางวิชาการ ที่มีกรรมกรภายนอกมาร่วมกลั่นกรอง (Peer Review) ที่ประชุมวิชาการ The Annual ACM SIGCAS Conference on Computing and Sustainable Societies (COMPASS 2018) ที่ Facebook, Menlo Park, San Jose, CA, USA ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- Bipun Man Pati, Attaphongse Taparugssanagorn, Adisorn Lertsinsrubtavee, Kanchana Kanchanasut, and Arjuna Sathiaselan, "Adaptive Threshold Setting for Determining Spectrum Occupancy in TV White Space," in Proc. the Annual

ACM SIGCAS Conference on Computing and Sustainable Societies (COMPASS 2018), 2018.

และวารสารทางวิชาการที่มีกรรมการภายนอกมาร่วมกันกรอง ที่ประชุมวิชาการ The 14th Asian Internet Engineering Conference (AINTEC) ที่กรุงเทพมหานคร ประเทศไทยดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- Bipun Man Pati, Attaphongse Taparugssanagorn, Nisarath Tunsakul, and Adisorn Lertsinsrubtavee, “Analysing the Performance of Adaptive Threshold Setting for TV White Space,” in Proc. The 14th Asian Internet Engineering Conference (AINTEC), 2018.

และวารสารทางวิชาการที่ประชุม IETF Applied Networking Research Workshop (ANRW) ที่ Montreal, Quebec, Canada ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- Adisorn Lertsinsrubtavee, Nunthaphat Weshsuwannarugs, Nisarath Tunsakul, Attaphongse Taparugssanagorn, and Kanchana Kanchanasut, “Wireless Edge Network for Sustainable Rural Community Networks,” in Proc. The IETF Applied Networking Research Workshop (ANRW), 2018.

ซึ่งผลงานตีพิมพ์วารสารทางวิชาการเป็นผลงานเพิ่มเติม ไม่ได้มีอยู่ในแผนงาน แต่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ซึ่งทำให้นักวิจัยสามารถแสดงผลงาน แลกเปลี่ยนความคิด ผลงานต่อสังคม

ส่วนต่อไปของงานในโครงการคือ การศึกษาและพัฒนาทดสอบและติดตั้งระบบสื่อสารต้นแบบความเร็วสูงผ่านคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ เบื้องต้นการทดสอบระบบได้ถูกเริ่มต้นที่สถาบันเอไอที และหลังจากนั้นระบบได้ถูกนำไปติดตั้งและทดสอบในพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตากอันเป็นพื้นที่เป้าหมาย ทำการสำรวจชุมชน การเชื่อมโยงของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตในพื้นที่ และพิจารณาหาตำแหน่งที่ใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์ให้เหมาะสม โดยการวัดระดับสัญญาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) หาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ตัวรับสัญญาณ เพื่อให้มั่นใจว่า ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์นั้นเหมาะสม อุปกรณ์ระบบสื่อสารต้นแบบความเร็วสูงผ่านคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์นี้ได้ถูกออกแบบตามหลักเทคโนโลยีวิทยุรู้คิด (CR) มีสถาปัตยกรรมแบบที่สามารถปรับเปลี่ยนการทำงานได้ตามโปรแกรมหรือที่เรียกกันว่า ซอฟต์แวร์ดีไฟน์เรดิโอ (Software defined radio (SDR)) และ (Dynamic spectrum sharing (DSS)) ซึ่งได้คำนึงถึงเรื่องรบกวนแทรกสอด (Interference) สัญญาณไปยังผู้ใช้หลัก (Primary user (PU)) อันได้แก่สัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลเป็นหลักสำคัญอยู่แล้ว ดังนั้นเราสามารถมั่นใจได้ว่า ในการทดลอง ทดสอบ เราสามารถเลือกใช้ช่องสัญญาณที่ว่างเปล่าไม่ได้ใช้งาน นอกจากนั้น การวัดระดับสัญญาณสเปกตรัมหรือแถบคลื่นความถี่ของสัญญาณก่อนและหลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าไม่มี

การรบกวนแทรกสอด แม้จะเป็นช่องสัญญาณที่ติดกัน นอกจากนี้ยังมีข้อเสนอแนะ จากผลจากงานวิจัย ว่าสำหรับโทรทัศน์ดิจิทัล แต่ละช่องที่จัดสรรให้ใช้งานจะต้องเว้นไป 4 ช่องถึงจะเป็นช่องที่จัดสรรถัดไป และสำหรับผู้ใช้งานอันดับรอง (Secondary user (SU)) เช่นทีวีไวท์สเปซ (TVWS) แต่ละช่องที่จัดสรรให้ใช้งานจะต้องเว้นไป 2 ช่องจากช่องที่จัดสรรของผู้ใช้หลัก ดังนั้นนอกจากช่องที่ติดกันจะไม่มีผลแล้ว โดยการทำงานจริงเราจะเว้นช่องด้วย ทำให้เรามั่นใจมากขึ้นว่า สามารถกำหนดช่องที่เหมาะสมให้แก่อุปกรณ์ระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ได้

นอกจากนี้ มีการพิจารณาผลของโพลาไรเซชัน (Polarization) ของสายอากาศมีผลต่อระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) อย่างไร ซึ่งสามารถเปรียบได้กับการทดสอบสัญญาณแทรกสอดรบกวน (Interference) ด้วย เมื่อใช้โพลาไรเซชันเป็นแบบแนวนอน กำลังสัญญาณที่วัดได้ มีความแรงมากกว่าเมื่อใช้โพลาไรเซชันแนวตั้ง เนื่องจากสายอากาศของโทรทัศน์ดิจิทัลทั่วไปจะมีโพลาไรเซชันเป็นแบบแนวนอน นอกจากสัญญาณจากการติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) เรายังรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลได้ด้วย ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลว่าทำไมเราจึงต้องเลือกใช้โพลาไรเซชันแนวตั้ง

จากนั้นได้ทำการทดสอบวัด ความเร็ว (Speed test) หรือค่าทราฟฟิค (Throughput) อัตราการล่าช้า (Round-trip latency) อัตราการสูญเสียของแพ็กเก็ตข้อมูลหรือที่เรียกว่า แพ็กเก็ตลอส (Packet loss) และค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ในการรับส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์ทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ซึ่งในการทดสอบวัดประสิทธิภาพค่าต่างๆ ดังกล่าว มีแปรเปลี่ยนตัวแปรที่มีผลต่อค่าอื่นๆ ต่างๆ กันดังต่อไปนี้

- การทดสอบความเร็วหรือค่าทราฟฟิค (Throughput) ในการรับส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์ระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ที่ระยะทางระหว่างเครื่องสถานีฐานไปยังอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ d ต่างกัน ซึ่งอธิบายได้ว่าระยะไกลกว่าค่าทราฟฟิค (Throughput) ลดลงเนื่องการสูญเสียกำลังของสัญญาณ นอกจากนี้การจางหายของสัญญาณ (Channel fading) ก็น่าจะมีผลต่อค่าทราฟฟิค (Throughput) ด้วย ซึ่งทำให้ถึงแม้จะเป็นระยะทางไกลๆ แต่สภาพแวดล้อมไม่มีเส้นทางโดยตรงหรือแนวเส้นสายตา (Visual line-of-sight (LoS)) หรือแม้กระทั่งมีแนวเส้นสายตา แต่ยังมีสิ่งที่มีผลกระทบอีกอย่างที่ต้องพิจารณาถึงด้วยคือ ปรากฏการณ์เฟรสเนลหรือเฟรย์แนล (Fresnel effect) หรือเฟรย์แนล หากอ่านออกเสียงตามชื่อผู้คิดค้นโอกุสแตง-ซองเฟรย์แนล (Augustin-Jean Fresnel) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ซึ่งปรากฏการณ์นี้อาจเกิดขึ้นเมื่อสิ่งบดบังต่างๆ เช่น ยอดเขา ยอดต้นไม้หรือยอดอาคาร อยู่ใกล้กับเส้นทางตรงของคลื่นหรือเส้นแนวเส้นสายตา มากเกินไป จนก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการสื่อสารได้
- การทดสอบวัดค่าสูญเสียของแพ็กเก็ตข้อมูลหรือที่เรียกว่า แพ็กเก็ตลอส (Packet loss) ในการรับส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์ระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ที่ขนาดแพ็กเก็ตข้อมูลที่ตายตัวเท่ากับ 1470 ไบต์ (Bytes) ส่งแพ็กเก็ตข้อมูลด้วยขนาด 1470 Bytes และแปรเปลี่ยนอัตรา

ความเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล 5, 10, 15, and 20 Mbps ตามลำดับในกรณีของ Links#1 และ 2 และ 0.5, 2, 5, and 6 Mbps ตามลำดับในกรณีของ Link#3 ซึ่งคาดการณ์ว่าแพ็กเก็ตสูญ (Packet loss) มากขึ้นเมื่ออัตราความเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเร็วขึ้น

- การทดสอบวัดค่าอัตราการล่าช้า (Round-trip latency) ที่ขนาดแพ็กเก็ตข้อมูลที่ต่างๆ กัน ดังนี้ 32 512 และ 1500 Bytes ที่ระยะทางระหว่างเครื่องสถานีฐานไปยังอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ d ต่างกัน ซึ่งคาดการณ์ว่าขนาดแพ็กเก็ตข้อมูลมีผลต่อค่าอัตราการล่าช้า (Round-trip latency) ซึ่งขนาดแพ็กเก็ตข้อมูลมากขึ้นทำให้อัตราการล่าช้า (Round-trip latency) มากขึ้น แต่ระยะทางไม่มีผลต่ออัตราการล่าช้า (Round-trip latency) มากนัก ซึ่งตามข้อมูลจำเพาะของเครื่องระบบสื่อสาร RuralConnect Gen 3 นี้ อัตราการล่าช้า (Round-trip latency) จะอยู่ระหว่าง 5-35 ms ขึ้นกับโหลดของผู้ใช้นั้นหมายถึงขนาดแพ็กเก็ตข้อมูลที่ใช้นั้นเอง
- ค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ระยะทางระหว่างเครื่องสถานีฐานไปยังอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ d ต่างกัน ส่งแพ็กเก็ตข้อมูลด้วยขนาด 1470 Bytes และแปรเปลี่ยนอัตราความเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล 5, 10, 15, and 20 Mbps ตามลำดับในกรณีของ Links#1 และ 2 และ 0.5, 2, 5, and 6 Mbps

ผลที่ได้จากการทดสอบการรับส่งสัญญาณของอุปกรณ์ทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ในพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก มีทั้งแบบการเชื่อมโยงแบบจุดต่อจุด (Point-to-point) เพื่อให้สามารถวัดประสิทธิภาพที่สูงที่สุดในแต่ละเส้นทางหรือลิงค์ (Link) และวัดประสิทธิภาพโดยรวมแบบการเชื่อมโยงแบบจุดไปยังหลายจุด (Point-to-multi-point) ด้วยย่านความถี่กิจการโทรทัศน์ รวมทั้งการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) และโครงข่ายของผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตผ่านโครงข่ายใยแก้วนำแสงในท้องถิ่นของบริษัทริปเปิลที อินเทอร์เน็ต จำกัด (3BB) ที่มีความเร็วที่ 100/50 Mbps จะเห็นได้ว่าเครือข่ายมีค่าทรูพุตที่ดีในแต่ละลิงค์ประมาณ 4 ถึง 13 Mbps ค่าอัตราการล่าช้าและค่าผันแปรของความล่าช้ามีค่าต่ำน้อยกว่า 16 ms และ 2.5 ms ตามลำดับทั้งกรณีเชื่อมโยงแบบจุดต่อจุดและแบบจุดต่อหลายจุด ส่วนค่าแพ็กเก็ตสูญ ซึ่งมีอัตราที่แปรผันตามอัตราส่งข้อมูล ซึ่งที่อัตราส่งข้อมูล 5 Mbps ค่าแพ็กเก็ตสูญส่วนมากมีค่าไม่สูงกว่า 10% ซึ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพที่ดีของเครือข่าย ซึ่งสามารถรองรับการประยุกต์ใช้ในการส่งรับสัญญาณเสียง (Voice) วีดีโอ (Video) และข้อมูลเรียลไทม์ (Real-time data) ได้

เนื่องจากชุมชนในเขตพื้นที่ชนบทห่างไกลเข้าถึงยาก โดยทั่วไปมีปัญหาเรื่องการรับสัญญาณที่ไม่ดี ได้รับบริการที่ไม่มีประสิทธิภาพ จากการให้บริการของระบบโทรศัพท์มือถือเซลลูลาร์ (Cellular

mobile systems) หรืออาจไม่มีสัญญาณเลย การเชื่อมต่อโดยใช้ใยแก้วนำแสง (Fiber optics) ดาวเทียม (Satellite) หรือระบบวิทยุแมกซ์ (Worldwide interoperability for Microwave Access (WiMAX)) ก็มีราคาแพง ดังนั้นระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงหรือบรอดแบนด์ (Broadband) ในพื้นที่ห่างไกล อาจรวมถึงการนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ อีกมากมาย เช่น เกษตรอัจฉริยะ (Smart farming) โทรเวชกรรม (Telemedicine) หรือการศึกษาทางไกล (E-Learning) เป็นต้น การประยุกต์ใช้งานอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things (IoT)) หรือจะเป็นการมาช่วยออฟโหลด (Offload) ในที่ที่มีการใช้งานระบบแลนไร้สาย หรือไว-ไฟ (Wi-Fi) อยู่มากอยู่แล้วเช่นในเมืองใหญ่ (Ultra dense urban area) เช่นในกรุงเทพมหานคร

ในส่วนของการศึกษาและพัฒนาทดสอบและติดตั้งระบบสื่อสารต้นแบบความเร็วสูงผ่านคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์นี้ นอกจากผลลัพธ์ได้เป็นระบบสื่อสารต้นแบบดังที่อธิบายไว้ข้างต้น ผลจากการศึกษาวิจัยนี้ ยังได้ถูกเขียนเป็นบทความวิชาการเพื่อตีพิมพ์ที่ NBTC Journal ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- Bipun Man Pati, Attaphongse Taparugssanagorn, Nisarath Tunsakul, and Adisorn Lertsinsrubtavee, “Performance Study of Television White Spaces (TVWS) Pilot Network in Thailand” เพื่อตีพิมพ์ที่ NBTC Journal 2019

บทคัดย่อ

“ศึกษาการใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์
ที่ไม่มีการใช้งานในแต่ละพื้นที่”

สัญญาเลขที่ B2-2-04/58

หัวหน้าโครงการ อัฐพงษ์ เทพารักษ์ษณากร

คณะนักวิจัยร่วม อติสรณ์ เลิศสินทรัพย์ทวี และนิศารัตน์ ต้นสกุล

มกราคม พ.ศ. 2562

กิจการโทรทัศน์ เมื่อเปลี่ยนมาเป็นยุคโทรทัศน์ดิจิทัล ได้นำมาซึ่งช่องว่างคลื่นความถี่ที่ไม่ได้ถูกจัดสรรให้ใช้หรือไว้สเปซอย่างมากในช่วงความถี่ประมาณ 50 เมกะเฮิรตซ์ (MHz) ถึง 700 MHz ที่เรียกว่าทีวีไวท์สเปซ เนื่องจากเวลาส่งสัญญาณดิจิทัล ข้อมูลถูกรวมและส่งในช่องสัญญาณที่ติดกันได้ ซึ่งในระบบอนาล็อกไม่สามารถทำได้ นั่นหมายความว่าข้อมูลถูกบีบอัด ส่งไปด้วยจำนวนช่องสัญญาณที่น้อยลง การวางแผนของคลื่นออกอากาศแยกเป็นส่วนๆ ทำให้เกิดเป็นไวท์สเปซปริมาณมาก ซึ่งมีไว้ส่งไม่เพียงแต่สัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล หากแต่ยังมีไว้ใช้กับบริการอื่นๆ ที่ไม่ต้องมีใบอนุญาตที่ใช้กำลังส่งต่ำ เช่นระบบไมโครโฟนไร้สาย ในประเทศไทยช่องสัญญาณคลื่นความถี่เหล่านี้จะครอบคลุมตั้งแต่ 510 MHz ถึง 790 MHz ที่ได้ถูกจัดสรรสำหรับกิจการโทรทัศน์ดิจิทัล ซึ่งความเป็นจริงแล้ว คลื่นความถี่เหล่านี้ไม่ได้มีการใช้งานพร้อมๆ กัน ในแต่ละพื้นที่แตกต่างกัน ตามหลักการทฤษฎีของเทคโนโลยีวิทยุรู้คิด คลื่นความถี่ที่ไม่ได้ใช้งาน สามารถถูกนำใช้งานโดยผู้ใช้งาน เมื่อมีโอกาส ในที่นี้หมายถึง เมื่อมีช่องสัญญาณว่าง สามารถประยุกต์ใช้งานสำหรับอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง และอุปกรณ์ที่ใช้กำลังส่งต่ำ ไม่ว่าจะเป็นการขยายการใช้งานบรอดแบนด์อินเทอร์เน็ตในพื้นที่ที่ยังไม่มีการเข้าถึงหรือพื้นที่ที่เข้าถึงยาก หรือจะเป็นการมาช่วยออฟโหลดในที่ที่มีการใช้งานระบบแลนไร้สายหรือไวไฟ อยู่มากอยู่แล้ว เช่นในเมืองใหญ่มีความหนาแน่น เช่นในกรุงเทพมหานคร ช่วยให้การขยายการปกคลุมของการใช้อินเทอร์เน็ต ทำให้มีการบริการที่ไร้รอยต่อได้มากขึ้น หรือจะเป็นการประยุกต์ใช้งานการสื่อสารจากอุปกรณ์หนึ่งไปสู่อุปกรณ์หนึ่งโดยตรง หรือการประยุกต์ใช้งานด้านรีโมทเซนซิงหรือรีโมทมอนิเตอร์ริง สำหรับคอยตรวจสอบสภาพอากาศ สภาพแวดล้อมมลพิษ หรือการจราจร หรือตรวจสอบความปลอดภัยสาธารณะ จึงสมควรที่ประเทศไทยจะศึกษาการใช้ประโยชน์จากทีวีไวท์สเปซและพัฒนาระบบสื่อสาร ตัวอย่างเพื่อเป็นอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับพัฒนาระบบใช้งานจริงและเป็นแนวทางในการวางแผนกำหนดนโยบายที่เกี่ยวข้องในอนาคต

Abstract

“TV White Space”

Principal Investigator Attaphongse Taparugssanagorn

Co-investigators Adisorn Lertsinsrubtavee and Nisarat Tansakul

January B. E. 2561

Transition to the Digital Television (DTV) has freed up large spectrum bands, known as a digital dividend. Because of digital broadcast or transmission data can be packed and transmitted in adjacent channels, while analog transmission cannot. This means that data can be compressed with fewer channels. These frequency bands are not only for DTV signals, but also are used for other services, for example, the low power wireless microphone. In Thailand frequencies covering from 510 MHz to 790 MHz are allocated for the DTV. In fact, these frequencies are not used simultaneously in different areas. Based on the Cognitive Radio (CR) technology, unused spectrum can be used by Secondary User (SU) opportunistically, meaning that when there is an empty channel. It can be used for broadband high-speed Internet and low power transmission equipment. Not only can we use it expand the use of the broadband high-speed Internet in areas where there is no access or hard-to-access in rural areas, but also it can help offload in the presence of Wi-Fi. For example, in an urban area (Ultra dense urban area) big city like Bangkok. Expanding the coverage of Wi-Fi Internet usage has made seamless services. In addition, it can be used to communicate directly from one device to another, i.e., Machine-to-machine (M2M) communications or remote sensing or remote monitoring for weather monitoring applications. Therefore, it is very appropriate for Thailand to study the use of TVWS and develop a TVWS based communication system as an example or a research prototype for actual deployment and for making plans for relevant policy in the future.

ศึกษาการใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานในแต่ละพื้นที่

TV White Space

สารบัญ

บทสรุปผู้บริหาร	หน้า 1
บทคัดย่อภาษาไทย	หน้า 7
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	หน้า 8
สารบัญตาราง	หน้า 10
สารบัญภาพ	หน้า 12
สรุปตัวย่อ	หน้า 19
บทที่ 1. บทนำ	หน้า 22
- ที่มา และความสำคัญของโครงการ	หน้า 22
- วัตถุประสงค์ และขอบเขตของโครงการ	หน้า 28
- ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	หน้า 33
บทที่ 2. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	หน้า 35
- ทฤษฎี และแนวความคิด	หน้า 35
- ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	หน้า 49
บทที่ 3. ระเบียบวิธีวิจัย	หน้า 53
- วิธีการ/ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยและพัฒนา	หน้า 53
บทที่ 4. ผลการวิจัย และการวิจารณ์ผล	หน้า 111
- ผลการวิจัย และวิจารณ์ผล	หน้า 111
บทที่ 5. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	หน้า 209
- สรุปผลการวิจัย	หน้า 209
- ข้อเสนอแนะ	หน้า 211
บรรณานุกรม	หน้า 213
ประวัติผู้วิจัย	หน้า 220

สารบัญตาราง

- ตารางที่ 1.1 กำหนดช่องความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล
- ตารางที่ 1.2 กำหนดการจัดกลุ่มช่องความถี่วิทยุและคุณลักษณะทางเทคนิคของสถานีวิทยุคมนาคมสำหรับกิจการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลตามจังหวัดต่างๆ ของประเทศ (ตามประกาศคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ เรื่อง แผนความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล)
- ตารางที่ 1.3 กำหนดการจัดกลุ่มช่องความถี่วิทยุ
- ตารางที่ 4.1 สรุปรูปการตั้งค่าพารามิเตอร์ในการวัด (Measurement parameters setting)
- ตารางที่ 4.2 ความจริงขั้นพื้นฐาน (Ground truth) ช่องความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลในพื้นที่จังหวัดตาก
- ตารางที่ 4.3 ผลการวัดตำแหน่งตายตัวและการวิเคราะห์โดยใช้ค่าเทรชโฮลด์ที่เป็นค่าตายตัว (Fixed threshold) (-100dBm) ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก
- ตารางที่ 4.4 ผลการวัดตำแหน่งตายตัวและการวิเคราะห์โดยใช้ค่าเทรชโฮลด์แบบปรับเปลี่ยนได้ ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ในอาคารระดับชั้น 1 เฉพาะช่องสัญญาณที่ไม่ว่าง
- ตารางที่ 4.5 ผลการวัดตำแหน่งตายตัวและการวิเคราะห์โดยใช้ค่าเทรชโฮลด์แบบปรับเปลี่ยนได้ (Adaptive thresholds) ณ พื้นที่หมู่บ้านไทยสามัคคี ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ในอาคารระดับพื้นดิน เฉพาะช่องสัญญาณที่ไม่ว่าง
- ตารางที่ 4.6 ค่าข้อมูลต่างๆ (Info Value) ของการวัดแบบเคลื่อนที่เส้นทางจากสถาบันเอไอทีเขตปทุมธานี ไปจังหวัดตาก
- ตารางที่ 4.7 สเปกตรัมหรือคลื่นความถี่ที่สามารถนำมาใช้งานได้ (Spectrum availability) หรือ ปริมาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ทั้งหมดที่วัดและวิเคราะห์จากการใช้วิธี Noise added FCME ทั้งพื้นที่ที่ใช้ในการวัดทั้งสามพื้นที่
- ตารางที่ 4.8 การวัดค่าทราฟฟิค (Throughput) ที่สถาบันเอไอที
- ตารางที่ 4.9 การวัดค่าแพ็กเก็ตลอส (Packet loss) ที่สถาบันเอไอที
- ตารางที่ 4.10 การทดสอบวัดค่าอัตราความล่าช้า (Round-trip latency) ที่สถาบันเอไอที
- ตารางที่ 4.11 การทดสอบวัดค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ที่สถาบันเอไอที
- ตารางที่ 4.12 กำลังของสัญญาณที่ได้รับได้ P_R , การสูญเสียกำลังที่แท้จริง (Actual path loss) L_P , การสูญเสียกำลังในช่องว่างอิสระ (Free space path loss) L_{PF} , การสูญเสียกำลังจากแบบจำลองแบบจำลองลองเลย์-ไรซ์ (L-R path loss) $L_{P,L-R}$, และรัศมี

- ของปรากฏการณ์เฟรย์แนล ลำดับที่ 1 (Radius of first order Fresnel zone) F_1
 ของแต่ละเส้นทางที่จังหวัดตาก
- ตารางที่ 4.13 การวัดค่าทราฟฟิค (Throughput) ของแต่ละเส้นทางของการเชื่อมโยงแบบจุดต่อจุด (Point-to-point)
- ตารางที่ 4.14 การวัดค่าทราฟฟิค (Throughput) ของ Link#2 เชื่อมเข้า WMN
- ตารางที่ 4.15 การวัดค่าทราฟฟิค (Throughput) ของระบบโดยรวม (Overall system) มีการเชื่อมโยงแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-multipoint)
- ตารางที่ 4.16 การวัดค่าแพ็กเก็ตลอส (Packet loss) ของ Link#1
- ตารางที่ 4.17 การวัดค่าแพ็กเก็ตลอส (Packet loss) ของ Link#2
- ตารางที่ 4.18 การวัดค่าแพ็กเก็ตลอส (Packet loss) ของ Link#3
- ตารางที่ 4.19 การวัดค่าแพ็กเก็ตลอส (Packet loss) ของ Link#2 เชื่อมเข้า WMN
- ตารางที่ 4.20 การวัดค่าแพ็กเก็ตลอส (Packet loss) ของระบบโดยรวม (Overall system) มีการเชื่อมโยงแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-multipoint)
- ตารางที่ 4.21 การวัดค่าอัตราการล่าช้า (Round-trip latency) ของ Link#1 และ Link#2
- ตารางที่ 4.22 การวัดค่าอัตราการล่าช้า (Round-trip latency) ของ Link#3
- ตารางที่ 4.23 การวัดค่าอัตราการล่าช้า (Round-trip latency) ของ Link#2 เชื่อมเข้า WMN
- ตารางที่ 4.24 การวัดค่าอัตราการล่าช้า (Round-trip latency) ของระบบโดยรวม (Overall system) มีการเชื่อมโยงแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-multipoint)
- ตารางที่ 4.25 การวัดค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ของ Link#1
- ตารางที่ 4.26 การวัดค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ของ Link#2
- ตารางที่ 4.27 การวัดค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ของ Link#3
- ตารางที่ 4.28 การวัดค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ของ Link#2 เชื่อมเข้า WMN
- ตารางที่ 4.29 การวัดค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ของระบบโดยรวม (Overall system) มีการเชื่อมโยงแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-multipoint)

ศึกษาการใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานในแต่ละพื้นที่

TV White Space

สารบัญภาพ

- รูปที่ 1.1 รายละเอียดแผนการดำเนินงานและกรอบระยะเวลาดำเนินงานของโครงการ
- รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมหรือแผนภาพบล็อก (Block diagram) ของ Narrowband spectrum sensing เทคนิคที่ใช้อัลกอริทึมต่างๆ กัน (a) matched-filtering (b) energy detection และ (c) cyclostationary feature
- รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมของ Wideband spectrum sensing แบบใช้อัลกอริทึมแบบ Nyquist wideband sensing algorithms: (a) Multiband joint detection, (b) Wavelet detection, (c) Sweep-tune detection, and (d) Filter-bank detection
- รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมของ Wideband spectrum sensing แบบใช้อัลกอริทึมแบบ Sub-Nyquist wideband sensing algorithms: (a) Analog-to-information converter-based wideband sensing, (b) Modulated wideband converter-based wideband sensing, (c) Multi-coset sampling-based wideband sensing, and (d) Multi-rate sub-Nyquist sampling-based wideband sensing
- รูปที่ 2.4 (a) ตัวอย่างค่าเทรสโฮลด์ต่างๆ กันโดยคำนวณจากวิธี FCME และ (b) ตัวอย่างสัญญาณถูกตรวจจับโดยใช้ค่าเทรสโฮลด์สองค่าโดยวิธี LAD
- รูปที่ 2.5 สัญญาณรบกวนที่มีการกระจายแบบเกาส์ (AWGN) พร้อมทั้งเทรสโฮลด์ที่คำนวณจากวิธี FCME และวิธี LAD
- รูปที่ 3.1 พื้นที่ในกรุงเทพมหานคร สะท้อนถึงท้องที่หนาแน่น (Urban area)
- รูปที่ 3.2 พื้นที่ในสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (เอไอที)
- รูปที่ 3.3 พื้นที่ที่ยังไม่มีการเข้าถึงหรือพื้นที่ที่เข้าถึงยากที่อำเภอแม่สอดจังหวัดตาก
- รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์คลื่นสเปกตรัมแบบพกพา RF Explorer
- รูปที่ 3.5 สายเคเบิล OTG แบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย
- รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์คลื่นสเปกตรัมแบบพกพา RF Explorer ต่อกับแอนดรอยด์สมาร์ตโฟนผ่านสายเคเบิล OTG
- รูปที่ 3.7 ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ (User interface) บนแอนดรอยด์สมาร์ตโฟน
- รูปที่ 3.8 ราบบอร์ดพายรุ่น Raspberry Pi 3 Model B SBC พร้อมทั้งเคส

- รูปที่ 3.9 แสดงการต่อเชื่อมเครื่องวิเคราะห์คลื่นสเปกตรัมแบบพกพา RF Explorer กับราสเบอร์รี่พาย
- รูปที่ 3.10 โครงสร้างการตรวจวัดโดยรวม (Overall measurement configuration)
- รูปที่ 3.11 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมาตรฐานเช่น Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer
- รูปที่ 3.12 รูปแบบการติดตั้งการปรับค่าชดเชย (Offset) เพื่อทดสอบความถูกต้องของตัว RF Explorer โดยต่อโดยตรงกับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมาตรฐานเช่น Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer
- รูปที่ 3.13 หน้าจอ RF Explorer บน Windows ในการทดสอบการปรับค่าชดเชย (Offset) เพื่อทดสอบความถูกต้องของตัว RF Explorer ต่อโดยตรงกับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมาตรฐานเช่น Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer
- รูปที่ 3.14 การทดสอบความถูกต้องของระบบต้นแบบที่ใช้ระบบตรวจวัด การปรับเครื่องเข้าสู่ภาวะมาตรฐาน (Calibration) จากเครื่องสร้างสัญญาณ (Signal generator) แบบผ่านแบบผ่านสายเคเบิล
- รูปที่ 3.15 การทดสอบความถูกต้องของระบบต้นแบบที่ใช้ระบบตรวจวัด การปรับเครื่องเข้าสู่ภาวะมาตรฐาน (Calibration) จากเครื่องสร้างสัญญาณ (Signal generator) แบบผ่านคลื่นความถี่ไร้สาย
- รูปที่ 3.16 การทดสอบความถูกต้องของระบบต้นแบบที่ใช้ระบบตรวจวัด การปรับเครื่องเข้าสู่ภาวะมาตรฐาน (Calibration) จากสัญญาณคลื่นความถี่ของกิจการโทรศัพท์เคลื่อนที่จริง
- รูปที่ 3.17 อุปกรณ์ส่งสัญญาณคลื่นความถี่โทรศัพท์เคลื่อนที่หรือเครื่องสถานีฐาน (TWWS BS)
- รูปที่ 3.18 อุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ (TWWS CPE)
- รูปที่ 3.19 การเปรียบเทียบ OFDM และ FDM แบบดั้งเดิม
- รูปที่ 3.20 แผนภาพบล็อก (Block diagrams) แสดง (a) ตัวส่ง (Transmitter) และ (b) ตัวรับ (Receiver) ของ OFDM
- รูปที่ 3.21 สายอากาศแบบแบ่งส่วนหรือเซ็กเตอร์แบบ 120 องศา (120-degree sector antenna) ของเครื่องสถานีฐาน
- รูปที่ 3.22 การต่อเชื่อมสถานีฐานเข้ากับสายอากาศแบบแบ่งส่วน (เซ็กเตอร์)
- รูปที่ 3.23 ส่วนต่อเชื่อมเครื่องสถานีฐานเข้ากับสายอากาศทั้งสามส่วน
- รูปที่ 3.24 สายอากาศแบบกำหนดทิศทางแบบล็อกเพอริโอดิกไดโพล (Directional log-periodic dipole antenna) ของส่วนอุปกรณ์รับสัญญาณ
- รูปที่ 3.25 อุปกรณ์ภายนอกพีโออี (External power-over-ethernet (POE) injector)

- รูปที่ 3.26 ลักษณะการกระจาย (Radio pattern) และแผนภูมิการแสดงผลค่าขยายสัญญาณ (Gain chart) ของสายอากาศแบบกำหนดทิศทางแบบล็อกเพอริโอดิกไดโพล (Directional log-periodic dipole antenna) ของส่วนอุปกรณ์รับสัญญาณ (CPE)
- รูปที่ 3.27 (a) ข้อความแจ้งเตือนด้านความเป็นส่วนตัวจากการลือคอิน ผ่าน GUI และ (b) การลือคอินผ่าน GUI
- รูปที่ 3.28 สถานะของระบบโครงข่ายทีวีไวท์स्पेซ (TVWS)
- รูปที่ 3.29 อุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ (CPE) ที่ได้ลงทะเบียนไว้กับเครื่องสถานีฐาน (BS)
- รูปที่ 3.30 สถานะของ Radio Manager ที่เครื่องสถานีฐาน (BS)
- รูปที่ 3.31 สถานะของตำแหน่ง GPS
- รูปที่ 3.32 การตั้งค่าตำแหน่ง GPS แบบปรับตั้งค่าเองหรือแบบแมนนวล
- รูปที่ 3.33 ข้อมูลคุณลักษณะจำเพาะของอุปกรณ์เครื่องระบบสื่อสาร RuralConnect Gen 3 TVWS
- รูปที่ 3.34 ปรากฏการณ์เฟรย์แนล (Fresnel effect) และเส้นทางตรงของคลื่นหรือ (LoS)
- รูปที่ 3.35 การวัดค่ากำลังสัญญาณที่รับได้ที่ตัวเครื่องรับสัญญาณ P_R โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมาตรฐาน
- รูปที่ 3.36 แผนภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ระบบทีวีไวท์स्पेซ (TVWS) ในสามชุมชนชนบท
- รูปที่ 3.37 แผนภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ระบบทีวีไวท์स्पेซ (TVWS) ในสามชุมชนชนบท
- รูปที่ 3.38 การก่อสร้างฐานที่ตั้งเสาสูงที่โรงเรียนเพื่อสำหรับติดตั้งเสาอากาศของเครื่องสถานีฐาน (BS) (a)-(f)
- รูปที่ 4.1 สภาพแวดล้อมทั้งภายในอาคาร ห้องที่วัด ณ ระดับพื้นดิน
- รูปที่ 4.2 สภาพแวดล้อมทั้งภายในอาคาร ห้องที่วัด ณ ระดับชั้น 1
- รูปที่ 4.3 สภาพแวดล้อมทั้งภายนอกอาคาร ที่ระดับพื้นดิน สูงประมาณ 1 m
- รูปที่ 4.4 สภาพแวดล้อมทั้งภายนอกอาคาร ที่ระดับชั้นดาดฟ้า สูงประมาณ 15 m
- รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการเปรียบเทียบกำหนดค่าเทรสโพลด์ตายตัว และแบบปรับเปลี่ยนได้ที่ช่องสัญญาณต่างๆ ของการวัดในอาคารระดับพื้นดิน ในสถาบันเอไอที
- รูปที่ 4.6 ระดับค่าเทรสโพลด์ที่เปลี่ยนไปกับเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนที่เสริมเข้าไป สำหรับช่องสัญญาณที่ไม่ว่างต่างๆ UHF 26 UHF 29 UHF 32 UHF 36 UHF 40 UHF 44 UHF 52 สำหรับการวัดภายในอาคารระดับพื้นดินที่สถาบันเอไอที
- รูปที่ 4.7 ค่าเปอร์เซ็นต์ของ False alarm ของการวัดทั้งสี่แบบ
- รูปที่ 4.8 ค่าเปอร์เซ็นต์ของ Miss detection ของการวัดทั้งสี่แบบ

- รูปที่ 4.9 ระดับค่าเทรสโฮลด์ที่เปลี่ยนไปกับเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียมที่เสริมเข้าไป สำหรับช่องสัญญาณที่ไม่วางต่างๆ UHF 26 UHF 29 UHF 32 UHF 36 UHF 40 UHF 44 UHF 52 สำหรับการวัดภายในอาคารสูงชั้น 5 (20 m) ณ ตำแหน่งระเบียง เขตกรุงเทพมหานคร
- รูปที่ 4.10 ค่าเปอร์เซ็นต์ของ False alarm ของการวัดภายในอาคารสูงชั้น 5 (20 m) ณ ตำแหน่งระเบียง เขตกรุงเทพมหานคร
- รูปที่ 4.11 ค่าเปอร์เซ็นต์ของ Miss detection ของการวัดภายในอาคารสูงชั้น 5 (20 m) ณ ตำแหน่งระเบียง เขตกรุงเทพมหานคร
- รูปที่ 4.12 แผนที่อุณหภูมิแสดงระดับกำลังของคลื่นกิจการโทรทัศน์ตามเส้นทาง สถาบันเอไอที่ไปยังตลาดไท
- รูปที่ 4.13 ระดับกำลังของคลื่นกิจการโทรทัศน์ตามเส้นทาง (Power levels) ตามความถี่ต่างๆ 510-800 MHz และตามเวลาต่างๆ หรือจำนวนการวัด (Number of measurements) บนเส้นทางสถาบันเอไอที่ไปยังตลาดไท
- รูปที่ 4.14 เปอร์เซนต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ - 85dBm
- รูปที่ 4.15 เปอร์เซนต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ - 85dBm ตามแต่ละช่วงความถี่
- รูปที่ 4.16 เปอร์เซนต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ - 90dBm
- รูปที่ 4.17 เปอร์เซนต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ - 90dBm ตามแต่ละช่วงความถี่
- รูปที่ 4.18 เปอร์เซนต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ - 95dBm
- รูปที่ 4.19 เปอร์เซนต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ - 95dBm ตามแต่ละช่วงความถี่
- รูปที่ 4.20 เปอร์เซนต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ - 100dBm
- รูปที่ 4.21 เปอร์เซนต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ - 100dBm ตามแต่ละช่วงความถี่
- รูปที่ 4.22 ค่าระดับสัญญาณรบกวน (Noise floor) ในแต่ละจุดหรือตัวอย่างการวัด

- รูปที่ 4.23 สถานที่การวัดในพื้นที่ชนบทห่างไกลเข้าถึงยาก (Rural area) ณ ที่ หมู่บ้านไทยสามัคคีระดับ ชั้น 1 (First floor) ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก
- รูปที่ 4.24 ระดับค่าเทรชโฮลด์ที่เปลี่ยนไปกับเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียมที่เสริมเข้าไป สำหรับสำหรับช่อง UHF 31 UHF 35 UHF 39 UHF 47 และ UHF 51 สำหรับการวิเคราะห์โดยใช้ค่าเทรชโฮลด์แบบปรับเปลี่ยนได้ (Adaptive thresholds) ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ในอาคารระดับชั้น 1 เฉพาะช่องสัญญาณที่ไม่ว่าง
- รูปที่ 4.25 แผนภาพบล็อก (Block Diagrams) วิธีการเอเอ็นเอ็นหรือโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks (ANN))
- รูปที่ 4.26 เปอร์เซนต์ของสัญญาณรบกวนเทียมและค่าเอาต์พุตของโครงข่ายและค่าเป้าหมาย (Targets) (ค่าเทรชโฮลด์)
- รูปที่ 4.27 ค่าเฉลี่ยค่าผิดพลาดยกกำลังสอง (Mean square error (MSE) ที่แต่ละอีพอคหรือช่วงเวลา (Epoch)
- รูปที่ 4.28 กราฟความถดถอย (Regression plots) ของเอาต์พุตของโครงข่ายและค่าเป้าหมาย
- รูปที่ 4.29 ค่าเปอร์เซนต์ของ False alarm ของการวัดทั้งสองแบบ สำหรับการวิเคราะห์ผลการวัด ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก
- รูปที่ 4.30 ค่าเปอร์เซนต์ของ Miss detection ของการวัดทั้งสองแบบ สำหรับการวิเคราะห์ผลการวัด ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก
- รูปที่ 4.31 แผนที่อุณหภูมิแสดงระดับกำลังของคลื่นกิจการโทรทัศน์ตามเส้นทางจากสถาบันเอไอทีไปยังหมู่บ้านไทยสามัคคี ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก
- รูปที่ 4.32 ระดับกำลังของคลื่นกิจการโทรทัศน์ตามเส้นทาง (Power levels) ตามความถี่ต่างๆ 510-800 MHz และตามเวลาต่างๆ หรือจำนวนการวัด (Number of measurements) บนเส้นทางจากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (เอไอที) ไปยังหมู่บ้านไทยสามัคคี ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก
- รูปที่ 4.33 เปอร์เซนต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรชโฮลด์ที่ตั้งไว้ - 85dBm
- รูปที่ 4.34 เปอร์เซนต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรชโฮลด์ที่ตั้งไว้ - 85dBm ตามแต่ละช่วงความถี่
- รูปที่ 4.35 เปอร์เซนต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรชโฮลด์ที่ตั้งไว้ - 90dBm
- รูปที่ 4.36 เปอร์เซนต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรชโฮลด์ที่ตั้งไว้ - 90dBm ตามแต่ละช่วงความถี่

- รูปที่ 4.37 เเปอร์เซ็นต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ - 95dBm
- รูปที่ 4.38 เเปอร์เซ็นต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ - 95dBm ตามแต่ละช่วงความถี่
- รูปที่ 4.39 เเปอร์เซ็นต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ - 100dBm
- รูปที่ 4.40 เเปอร์เซ็นต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ - 100dBm ตามแต่ละช่วงความถี่
- รูปที่ 4.41 ค่าระดับสัญญาณรบกวน (Noise floor) ในแต่ละจุดหรือตัวอย่างการวัด
- รูปที่ 4.42 จำนวนของสัญญาณที่ว่างทั้งหมด (Total Idle Channel or White Spaces) ในแต่ละพื้นที่
- รูปที่ 4.43 การวัดสัญญาณ ณ สถานีเอไอที โดยใช้ RF Explorer ที่ระยะ 80 m เมื่อยังการไม่มีการส่งข้อมูล
- รูปที่ 4.44 การวัดสัญญาณ ณ สถานีเอไอที โดยใช้ RF Explorer ที่ระยะ 80 m เมื่อมีการส่งข้อมูล
- รูปที่ 4.45 การวัดสัญญาณ ณ สถานีเอไอที โดยใช้ RF Explorer ที่ระยะ 130 m เมื่อยังการไม่มีการส่งข้อมูล
- รูปที่ 4.46 การวัดสัญญาณ ณ สถานีเอไอที โดยใช้ RF Explorer ที่ระยะ 130 m เมื่อมีการส่งข้อมูล
- รูปที่ 4.47 การวัดสัญญาณ ณ สถานีเอไอที โดยใช้เครื่อง Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer ที่ระยะ 80 m เมื่อยังไม่มีมีการส่งข้อมูล
- รูปที่ 4.48 การวัดสัญญาณ ณ สถานีเอไอที โดยใช้เครื่อง Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer ที่ระยะ 80 m เมื่อมีการส่งข้อมูล
- รูปที่ 4.49 การวัดสัญญาณ ณ สถานีเอไอที โดยใช้เครื่อง Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer ที่ระยะ 130 m เมื่อยังไม่มีมีการส่งข้อมูล
- รูปที่ 4.50 การวัดสัญญาณ ณ สถานีเอไอที โดยใช้เครื่อง Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer ที่ระยะ 130 m เมื่อมีการส่งข้อมูล
- รูปที่ 4.51 การวัดค่าทราฟฟิค (Throughput) ที่สถานีเอไอที
- รูปที่ 4.52 การวัดค่าแพ็กเก็ตลอส (Packet loss) ที่สถานีเอไอที
- รูปที่ 4.53 การวัดค่าอัตราเวลาล่าช้า (Round-trip latency) ที่สถานีเอไอที
- รูปที่ 4.54 การวัดค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ที่สถานีเอไอที

- รูปที่ 4.55 แสดงการแผนภาพการทดสอบความเร็วของทีวีไวท์สเปซ (TVWS)
- รูปที่ 4.56 การวัดสเปกตรัมหรือแถบคลื่นความถี่ของสัญญาณ เราจะวัดเปรียบเทียบ (a) ก่อน และ (b) หลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) วัดที่ Link#1 (CPE M1)
- รูปที่ 4.57 การวัดสเปกตรัมหรือแถบคลื่นความถี่ของสัญญาณ เราจะวัดเปรียบเทียบ (a) ก่อน และ (b) หลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) วัดที่ Link#2 (CPE M9)
- รูปที่ 4.58 การวัดสเปกตรัมหรือแถบคลื่นความถี่ของสัญญาณ เราจะวัดเปรียบเทียบ (a) ก่อน และ (b) หลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) วัดที่ Link#3 (CPE M10)
- รูปที่ 4.59 การวัดสเปกตรัมหรือแถบคลื่นความถี่ของสัญญาณ เราจะวัดเปรียบเทียบ (a) ก่อน และ (b) หลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) วัดที่ BS (หันไปทิศทางของ CPE M1 และ CPE M9)รูปที่ 4.60: การวัดสเปกตรัมหรือแถบคลื่นความถี่ของสัญญาณ เราจะวัดเปรียบเทียบ (a) หลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) วัดที่ BS (หันไป ทิศทางของ CPE M10)
- รูปที่ 4.61 การวัดสเปกตรัมหรือแถบคลื่นความถี่ของสัญญาณ เราจะวัดเปรียบเทียบ (a) โพลาริซเซชันแนวนอน (Horizontal polarization) และ (b) โพลาริซเซชัน แนวตั้ง (Vertical polarization)
- รูปที่ 4.62 ค่าทราฟฟิค (Throughput) ของ Link#1, Link#2, Link#3, overall TVWS, และ overall TVWS+WMN
- รูปที่ 4.63 ค่าแพ็กเก็ตลอส (Packet loss) ของ Link#1, Link#2, และ Link#3
- รูปที่ 4.64 ค่าแพ็กเก็ตลอส (Packet loss) ของ overall TVWS และ overall TVWS+WMN
- รูปที่ 4.65 ค่าอัตราความล่าช้า (Round-trip latency) ของ Link#1, Link#2, Link#3, overall TVWS, และ overall TVWS+WMN
- รูปที่ 4.66 ค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ของ Link#1, Link#2, และ Link#3
- รูปที่ 4.67 ค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ของ overall TVWS และ overall TVWS+WMN

สรุปตัวย่อ

ADC	Analog to Digital Converter
AGL	Above Ground Level
AIT	Asian Institute of Technology
AM	Amplitude Modulation
ANN	Artificial Neural Networks
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BPF	Bandpass filter
Bps	Bits per second
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base Station
CFAR	Constant False Alarm Rates
CPE	Customer Premises Equipment
CR	Cognitive Radio
CS	Client Station
dB	Decibel
dBm	Decibel-milliwatts
DFT	Discrete Fourier Transform
DSA	Dynamic Spectrum Allocation, Dynamic Spectrum Access
DSP	Digital Signal Processing
DSS	Dynamic Spectrum Sharing
DTV	Digital Television
DVB-T2	Digital Video Broadcasting-Terrestrial Second Generation, Second Generation Digital Terrestrial Television Broadcasting System
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCC	Federal Communication Commission
FCME	Forward Consecutive Mean Excision
FDM	Frequency Division Multiplexing
FFT	Fast Fourier Transform

FM	Frequency Modulation
Gbps	Gigabits per second
GPS	Global Positioning System
GSDB	Geo-location Spectrum DataBase
h	hour
HAAT	Height Above Average Terrain
HAGL	Height Above Ground Level
HNM	Hidden Node Margin
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial Sciences Medicine
km	kilometer
LAD	Localization Algorithm Based on Double-Thresholding
LAN	Local Area Network
LCD	Liquid Crystal Display
LM	Link Margin
LO	Local oscillator
LoS	Line-of-Sight
LPF	Low-Pass Filter
LTE	Long Term Evolution
Mbps	Megabits per second
mm	millimeter
MSE	Mean Square Error
MWC	Modulated Wideband Converter
M2M	Machine-to-Machine
NLoS	Non-Line-of-Sight
NP	Neyman-Pearson
ODU	OutDoor Unit
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OTG	On The Go
PAWS	Protocol to Access White Space

Pfa	Probability of False Alarm
PHY	Physical
Pixel	Picture element
POE	Power Over Ethernet
PPDR	Public Protection and Disaster Relief
PSD	Power Spectral Density
PU	Primary User
PWMS	Professional Wireless Microphone System
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality-of-Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)
RBW	Resolution Bandwidth
RF	Radio Frequency
SDR	Software Defined Radio
SMA	SubMiniature version A
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SoC	System-on-a-Chip
S/P	Serial-to-parallel
SSD	Solid State Drive
SU	Secondary User
TVWS	TV White Space
UHF	Ultra High Frequency
USB	Universal Serial Bus
UTP	Unshielded Twisted Pairs
VHF	Very High Frequency
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
WiMAX	Worldwide interoperability for Microwave Access
WMN	Wireless Mesh Network
WRAN	Wireless Regional Area Networks
WSDS	White Space DatabaSe

บทที่ 1

บทนำ

1) ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ไวท์สเปซ (White space) คือคลื่นความถี่ที่ไม่ได้ถูกจัดสรรให้ใช้งาน (Unused spectrums) ในอดีตมี ไวท์สเปซ อยู่มากเพราะเราใช้วิธีส่งสัญญาณแบบอนาล็อก ซึ่งต้องเว้นช่วงห่างระหว่างคลื่นที่ถูกใช้งานไว้ช่วงหนึ่ง เพื่อป้องกันไม่ให้เวลาแพร่ภาพ หรือกระจายเสียงแล้วเกิดการรบกวนหรือแทรกสอด (Interfere) กัน ตัวอย่างง่ายๆ คือ การค้นหาช่องวิทยุแล้วมีอีกช่องแทรกมา ไวท์สเปซ หรือช่องว่างในสมัยก่อนทำหน้าที่กันการรบกวนกัน แต่ปัจจุบันเราใช้ระบบดิจิทัล จึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้คลื่น ไวท์สเปซ เพื่อเป็นตัวกันการรบกวนระหว่างช่องอีกต่อไปแล้ว ก็เลยกลับกลายเป็นว่าที่จริงเรามี ไวท์สเปซ ที่สามารถเอามาใช้งานให้เกิดประโยชน์ได้มากมาย ปัจจุบันมีหลายหน่วยงานทั้ง มหาวิทยาลัยและบริษัทต่างๆ หลายหน่วยงานรวมตัวกันคิดค้นเทคโนโลยีระดับสูงเพื่อหาทางนำคลื่น ไวท์สเปซ มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

สำหรับกิจการโทรทัศน์ เมื่อเปลี่ยนมาเป็นยุคโทรทัศน์ดิจิทัล ได้นำมาซึ่งช่องว่างคลื่นความถี่ที่ไม่ได้ถูกจัดสรรให้ใช้หรือ ไวท์สเปซ อย่างมากในช่วงความถี่ประมาณ 50 MHz ถึง 700 MHz ที่เรียกว่าทีวีไวท์สเปซ (TVWS)) เนื่องจากเวลาส่งสัญญาณดิจิทัลสามารถแพคข้อมูลลงในช่องสัญญาณที่ติดกันได้ (Adjacent channels) ซึ่งในระบบอนาล็อกไม่สามารถทำได้ นั่นหมายความว่าข้อมูลสามารถถูกบีบอัด (Compressed) ส่งไปด้วยจำนวนช่องสัญญาณที่น้อยลง ในสหรัฐอเมริกาช่วงคลื่นความถี่โทรทัศน์ที่ถูกละทิ้งไม่ต้องใช้หลักๆ จะอยู่ในแถบของ บนย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency (UHF)) นั่นคือแถวๆ 700 MHz (698-806 MHz) นั่นคือสเปกตรัม 108 MHz สามารถถูกนำไปใช้งานอย่างอื่นได้เช่น เนื่องจากความกะทัดรัดของสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล (จากการถูกบีบอัด) และการวางแผนของความถี่ออกอากาศแยกเป็นส่วนๆ ทำให้เกิดเป็น ไวท์สเปซ ปริมาณมาก ช่วงความถี่ 54-698 MHz จะมีไว้ส่งไม่เพียงแต่สัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล หากแต่ยังมีไว้ใช้กับบริการอื่นๆ ที่ไม่ต้องมีใบอนุญาตที่ใช้กำลังส่งต่ำ เช่นระบบไมโครโฟนไร้สาย (Professional wireless microphone system (PWMS)) ส่วนที่อื่นๆ ในโลกช่วงคลื่นความถี่โทรทัศน์ที่ถูกละทิ้งจะอยู่ในย่านบนย่านความถี่สูงมาก (Very High Frequency (VHF)) ซึ่งทำให้มี ไวท์สเปซ ในช่วงนี้มาก กล่าวโดยรวมทีวีไวท์สเปซ (TVWS) หมายถึง การนำคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานในแต่ละพื้นที่มาใช้ประโยชน์สำหรับกิจการอื่นๆ ซึ่งหลักการนี้ได้รับความสนใจมากทั่วโลก ทั้งในทวีปอเมริกา ทวีปยุโรป ทวีปแอฟริกาและทวีปเอเชีย ที่จะนำมาคลื่นความถี่ดังกล่าว ประยุกต์ใช้งาน

สำหรับอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงและอุปกรณ์ที่ใช้กำลังส่งต่ำ เนื่องจาก คลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ นั้นเป็นช่วงความถี่ที่อยู่ย่าน UHF หรือ VHF มีข้อดีอันได้แก่ คลื่นความถี่ในย่านนี้เดินทางในแนวเส้นตรง สามารถเดินทางผ่านสิ่งกีดขวาง (Non-line-of-sight (NLoS)) รวมทั้งอาคารได้ดี สามารถเดินทางได้ไกล ทำให้มีระบบสามารถครอบคลุมได้ไกล (ถึง 10 กม.ขณะที่ Wi-Fi ได้ไกล 500 ม) ดังนั้นเหมาะที่จะนำใช้งานในพื้นที่ห่างไกลที่เข้าถึงยาก (Rural area) และสามารถส่งข้อมูลจำนวนมากได้ดี และกินกำลังน้อย ซึ่งดีกว่าคลื่นในช่วงความถี่สูงกว่า เช่นที่คลื่นไมโครเวฟซึ่งใช้สำหรับระบบโทรศัพท์มือถือเซลลูลาร์ (Cellular mobile systems) เช่น 3G/4G Long Term Evolution (LTE) คือ 900, 1,800 และ 2,100 MHz และระบบวิทยุแมกซ์ที่ 2 ถึง 11 กิกะเฮิรตซ์ (GHz) และไอเอสเอ็มแบนด์ (Industrial sciences medicine (ISM)) ซึ่งเป็นคลื่นความถี่สาธารณะสำหรับอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์และการแพทย์ โดยแบ่งเป็นสามย่านความถี่ คือ 900 MHz, 2.4 GHz และ 5.7 GHz (ซึ่งระบบ Wi-Fi จะใช้สองความถี่หลัง) นอกจากนี้ราคาในการลงทุนทำระบบและการทำงานนั้นถูกมากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้โครงข่ายใยแก้วนำแสง ดาวเทียมหรือระบบวิทยุแมกซ์ ถึงแม้ว่าจะมีความพยายามที่จะวัดคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่ได้ถูกจัดสรรให้ใช้งานในยุโรป อเมริกา หรือญี่ปุ่น [1]-[7] เครื่องมือที่ใช้สแกนวัดคลื่นความถี่ตลอดช่วงความถี่ของกิจการโทรทัศน์มีราคาแพงไม่ว่าจะเป็นเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum analyzer) และอุปกรณ์ที่มีการประเมินผลสัญญาณ (Signal processing) ที่ซับซ้อน ดังนั้นระบบที่มีราคาถูกและใช้งานง่ายกว่าสามารถพบปะได้สะดวกย่อมเป็นที่ต้องการมากกว่า

ในประเทศไทยคลื่นความถี่ที่มีอยู่จำกัด การใช้งานรูปแบบการส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลใช้คลื่นความถี่ย่าน Band III (174-230 MHz) และ Band IV/V (470-862 MHz) สำหรับให้บริการในการส่งโทรทัศน์ดิจิทัล (Band III ยังว่างอยู่ไม่ได้ใช้งาน) ย่านความถี่นี้โดยข้อกำหนดสากลจะใช้สำหรับในการส่งโทรทัศน์โดยเฉพาะ อย่างไรก็ตามความต้องการใช้ความถี่ย่านดังกล่าว เป็นความต้องการอย่างมากของการให้บริการด้านอื่น ๆ โดยเฉพาะด้านสื่อสาร โทรคมนาคม ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของคลื่นความถี่ Band IV/V สามารถนำมาใช้กับอินเทอร์เน็ตบรอดแบนไร้สาย (Mobile broadband Internet) การให้บริการอินเทอร์เน็ตผ่านสายโทรศัพท์จะมีราคาแพงมากในเขตชนบทที่เข้าถึงยาก ซึ่งหากนำในคลื่นความถี่ในย่าน Band IV/V นี้มาใช้งานกับบริการบรอดแบนไร้สายก็จะเป็นประโยชน์อย่างมาก

นอกจากนี้ในบางประเทศในยุโรป คลื่นความถี่ในย่านคลื่นความถี่ Band IV/V ถูกใช้งานเกี่ยวกับบริการเสริมการกระจายเสียง (SAB/SAP) ซึ่งรวมถึงอุปกรณ์ เช่นระบบไมโครโฟนไร้สาย (Professional wireless microphone system (PWMS)) ซึ่งก็ถือเป็นผู้ใช้งานที่มีความสำคัญอันดับ

แรก (Primary user (PU)) อีกอย่างหนึ่งนอกจากโทรทัศน์แล้ว และใช้อย่างกว้างขวางในเกี่ยวกับ อุปกรณ์การแสดงผลละคร ดนตรี และกิจกรรมกีฬา ความถี่นี้ยังใช้ในบางกรณี สำหรับใช้กับบริการด้าน สื่อสารฉุกเฉิน หรือใช้งานเกี่ยวกับภัย พิบัติสาธารณะ (Public protection and disaster relief (PPDR)) นอกจากนี้ปัจจุบันมีมาตรฐานของอุปกรณ์มากมายที่รองรับคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ (TV band devices standards) ดังต่อไปนี้

- **IEEE 802.22** Wireless Regional Area Networks (WRAN) สำหรับการสื่อสารระยะทางไกล
- **IEEE 802.11af: Super Wi-Fi หรือ WhiteFi** สำหรับการสื่อสารระยะทางไกล ใช้เทคโนโลยี OFDM PHYs with 5, 10 and 20 MHz channel widths
- **IEEE 802.15.4m** สำหรับการสื่อสารระยะทางไกลควบคุมอุปกรณ์และแอปพลิเคชันส่งคำสั่ง (Device control and command applications)
- **IEEE 802.19** สำหรับโครงข่ายทีวีไวท์สเปซ (TVWS) หลายโครงข่ายที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน (Coexistence among multiple TVWS networks)
- **IEEE DySPAN** สำหรับโครงข่ายที่มีการเข้าถึงคลื่นความถี่แบบไดนามิก (Dynamic Spectrum Access Networks)
- **IEEE 802.16h** มาตรฐานของระบบวายแมกซ์ที่ตอนแรกจะจะใช้ความถี่ 3650 ถึง 3700 MHz แต่เปลี่ยนไปใช้ที่คลื่นความถี่โทรทัศน์
- **ECMA 392** สำหรับ Personal และ portable wireless devices โดยที่สามารถใช้การสื่อสารแบบ Machine-to-Machine interactions
- **IETF PAWS** เป็น Specification ของกลไกวิธีการค้นหาและเข้าถึงระบบฐานข้อมูล (ไวท์สเปซ s database)

ดังนั้นระบบสื่อสารที่ใช้คลื่นทีวีไวท์สเปซ (TVWS) นี้ น่าจะมีศักยภาพที่ดี ที่เป็นเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายที่เติมเต็มในส่วนที่ขาด ดังนั้นจึงสมควรที่ประเทศไทยจะศึกษาการใช้ประโยชน์จากทีวีไวท์สเปซ (TVWS) และพัฒนาระบบสื่อสารตัวอย่าง เพื่อเป็นอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการศึกษาวิจัย และพัฒนาโครงข่ายที่ใช้ทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ได้ยั่งยืน ในประเทศไทย

แผนความถี่วิทยุของประเทศไทยที่ทางสำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช) ได้กำหนดช่องความถี่วิทยุและเงื่อนไขการใช้งานความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลอัตราระบบในยุคที่สองนั่นคือ Second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2) บนย่าน UHF สำหรับสถานีหลัก (Main station) และสถานีเสริม (Additional station) เป็นไปตามดังตารางที่ 1.1 คลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ 510 ถึง 790 MHz กำหนดความกว้างแถบคลื่นความถี่หรือแบนด์วิดท์(Bandwidth) 8 MHz

ได้มีการศึกษาความเป็นไปได้และงานเกี่ยวกับการวัดปริมาณ ช่วงความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีใช้งานนี้หรือทีวีไวท์สเปซ (TVWS) หรืออาจจะเป็นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ถูกใช้งานแล้ว (TV spectrum occupancy) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณพื้นที่ชนบทที่เข้าถึงยาก หลายโครงการ ใช้เครื่องมือวัดวิเคราะห์สเปกตรัมที่ราคาแพง (High-end spectrum analyzers) และมีขนาดใหญ่เทอะทะซึ่งไม่สะดวกในการพกพานำไปใช้งานวัดภาคสนามจริง ซึ่งต้องเคลื่อนที่เป็นตำแหน่งตลอดเวลา พร้อมทั้งต้องเก็บข้อมูลให้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ในพื้นที่หนึ่งๆ

ตารางที่ 1.1: กำหนดช่องความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล

หมายเลขช่องความถี่วิทยุ	ความถี่วิทยุ (เมกะเฮิรตซ์)		ความถี่กึ่งกลาง (Center Frequency)
	ขอบล่าง	ขอบบน	
26	510	518	514
27	518	526	522
28	526	534	530
29	534	542	538
30	542	550	546
31	550	558	554
32	558	566	562
33	566	574	570
34	574	582	578
35	582	590	586
36	590	598	594
37	598	606	602
38	606	614	610
39	614	622	618
40	622	630	626
41	630	638	634
42	638	646	642
43	646	654	650
44	654	662	658
45	662	670	666
46	670	678	674
47	678	686	682
48	686	694	690
49	694	702	698
50	702	710	706
51	710	718	714
52	718	726	722
53	726	734	730
54	734	742	738
55	742	750	746
56	750	758	754
57	758	766	762
58	766	774	770
59	774	782	778
60	782	790	786

ดังนั้นกรอบแนวคิดทิศทางและแนวทางในการทำโครงการ เราจะออกแบบ

- 1) ระบบเครื่องมือวัดให้มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- ราคาถูก (Low cost) ทำให้องค์กรที่ต้องการใช้งานสามารถเข้าถึงได้และทำให้โครงการหนึ่งๆ สามารถมีระบบนี้ได้หลายชุด ซึ่งทำให้สามารถการวัดพร้อมๆ กันได้หลายพื้นที่
- กินพลังงานน้อย (Low energy consumption) เนื่องจากระบบอาจต้องถูกรันทำงานไว้ตลอดทั้งวัน หากกินไฟหรือพลังงานมากก็จะทำให้ไม่สะดวกในการทำงานเนื่องจากต้องคอยชาร์ตหรือเปลี่ยนแบตเตอรี่
- ง่ายต่อการใช้งาน (Ease of use) ระบบควรจะใช้งานง่ายไม่ซับซ้อน ซึ่งทำให้สะดวกในการหาทีมงานที่มาช่วยในวัด
- ต้องมีระบบซึ่งเป็นฐานเก็บข้อมูล (Data logging) ระบบควรจะเก็บข้อมูลที่วัดได้นั้นเป็นระยะเวลานานหนึ่งๆ เช่นหนึ่งอาทิตย์ ถ้าสั้นไปต้องเสียเวลาคอยมาอัปเดตไปที่คอมพิวเตอร์ (Computer)
- การทดสอบความถูกต้อง การปรับเครื่องเข้าสู่ภาวะมาตรฐาน (Calibration) ต้องมีการทดสอบความถูกต้องกับเครื่องมาตรฐานเพื่อมั่นใจว่าผลลัพธ์ที่ได้นั้นมีความถูกต้อง
- หลักการโอเพนซอร์ส (Open source concept) นั่นคือซอฟต์แวร์ที่เปิดเผยแพร่ซอร์สโค้ด (Source code) ซึ่งสาธารณชนสามารถเข้ามาแก้ไข ดัดแปลงซอฟต์แวร์ (Software) ได้โดยง่าย

2) ระบบสื่อสารต้นแบบให้มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- ระบบสื่อสารนี้ใช้อุปกรณ์เทคโนโลยีวิทยุรู้คิด (Cognitive radio (CR)) ที่ใช้คลื่นทีวีไวท์สเปซ (TVWS) เป็นอุปกรณ์ยี่ห้อ Carlson Wireless Technologies นำเข้าจากอเมริกา อันประกอบได้ด้วยเครื่องสถานีฐาน (Base station (BS)) 1 เครื่องและเครื่องลูกหรือเครื่องอุปกรณ์รับสัญญาณ (Client station (CS)) หรือ (Customer premises equipment (CPE)) 3 เครื่อง พร้อมสายอากาศ ที่มีใช้งานอยู่ในหลายโครงการ ในหลายประเทศมากถึง 30 กว่า ทางคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสารของรัฐบาลสหรัฐอเมริกา (Federal Communication Commission (FCC)) ได้มีออกเอกสารการรับรองอุปกรณ์นี้เมื่อวันที่ 15 มกราคม 2557 ให้สามารถใช้งานในการสื่อสารโดยการใช้ช่องว่างในคลื่นความถี่ย่าน UHF 470-790 MHz ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานยุโรป อีทีเอสไอ (The European Telecommunications Standards Institute (ETSI)) ในการส่งสัญญาณข้อมูล และได้เปิดโอกาสให้ทีวีไวท์สเปซ (TVWS) นี้สามารถใช้งานได้สำหรับอุปกรณ์ที่ไม่มีใบอนุญาต (Unlicensed device)

- อุปกรณ์นี้ได้ถูกออกแบบตามหลักเทคโนโลยีวิทยุรู้คิด (CR) มีสถาปัตยกรรมแบบ Software defined radio (และ Dynamic spectrum sharing ซึ่งได้คำนึงถึงเรื่องรบกวนแทรกสอด (Interference) สัญญาณไปยังผู้ใช้หลัก อันได้แก่สัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ดิจิทัลเป็นหลักสำคัญอยู่แล้ว ดังนั้นเราสามารถมั่นใจได้ว่า ในการทดลอง ทดสอบในงานช่วงหลักของโครงการนี้ เดือนที่ 6-12 ซึ่งจะมีทดสอบระบบสื่อสารต้นแบบในสถาบันเอไอที และติดตั้งและทดสอบในพื้นที่ จังหวัดตากดังที่กล่าวถึงข้างต้น จะไม่มีปัญหาเรื่องรบกวนแทรกสอดสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ดิจิทัลแต่อย่างใด
- จากผลการวัดและวิเคราะห์ช่วงความถี่ของกิจการโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ไม่มีการใช้งานหรือทีวีไวท์สเปซ (TVWS) นี้หรืออาจจะเป็นความถี่ของกิจการโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ถูกใช้งานแล้ว และตามข้อมูลในแผนความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรศัพท์เคลื่อนที่ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล ในประกาศคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ เรื่อง แผนความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรศัพท์เคลื่อนที่ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล เราจะทราบช่องความถี่ไหนที่ใช้งานกิจการโทรศัพท์เคลื่อนที่ ในแต่ละพื้นที่เป็นอย่างไร ดังตัวอย่างเช่น พื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตากอันเป็นพื้นที่เป้าหมายที่จะติดตั้งและทดสอบ ในตารางที่ 1.2 กลุ่มความถี่ที่ใช้ คือกลุ่ม Da และหากดูตามตารางที่ 1.3 นั่นก็คือช่องความถี่ที่ 28 31 35 39 47 51 เวลาทดสอบระบบสื่อสารต้นแบบ เราสามารถกำหนดอุปกรณ์ เทคโนโลยีวิทยุรู้คิด (CR) นี้เลยว่าจะไม่ให้ใช้ช่องความถี่เหล่านี้เป็นต้น ซึ่งทำให้เรามั่นใจได้ว่า งานวิจัยในโครงการนี้จะไม่มีรบกวนการใช้งานจากคลื่นความถี่ของกิจการโทรศัพท์เคลื่อนที่แต่อย่างใด

ตารางที่ 1.2: กำหนดการจัดกลุ่มช่องความถี่วิทยุและคุณลักษณะทางเทคนิคของสถานีวิทยุคมนาคมสำหรับกิจการโทรศัพท์เคลื่อนที่ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลตามจังหวัดต่างๆ ของประเทศ (ตามประกาศคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ เรื่อง แผนความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรศัพท์เคลื่อนที่ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล)

ตารางที่ 6 ตารางแสดงแผนความถี่วิทยุและคุณลักษณะทางเทคนิคของสถานีวิทยุคมนาคมสำหรับกิจการโทรศัพท์เคลื่อนที่ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลของประเทศ

ลำดับ	ชื่อสถานี	ประเภท	ลองจิจูด	ละติจูด	ความสูง เสาอากาศ (เมตร)	กลุ่ม ความถี่	#1	#2	#3	#4	#5	#6	กำลังส่งออก อากาศสูงสุด (กิโลวัตต์)
1.00	กรุงเทพ	M	100.540270	13.754300	328	Db	26	36	40	44	32 (52)	29	100.00
1.01	เขาสาก	A1	100.949558	13.190653	40	De	45	59	53	56	43	48	1.00

ตารางที่ 6 ตารางแสดงแผนความถี่วิทยุและคุณลักษณะทางเทคนิคของสถานีวิทยุคมนาคมสำหรับกิจการโทรศัพท์เคลื่อนที่ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลของประเทศ (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อสถานี	ประเภท	ลองจิจูด	ละติจูด	ความสูง เสาอากาศ (เมตร)	กลุ่ม ความถี่	#1	#2	#3	#4	#5	#6	กำลังส่งออก อากาศสูงสุด (กิโลวัตต์)
28.00	ตาก	M	98.927687	16.778691	80	Da	31	35	39	51	47	28	50.00
28.01	แม่สอด	A1	98.566522	16.732602	100	Da	31	35	39	51	47	28	5.00
28.02	พบพระ	A2	98.691930	16.392920	70	Da	31	35	39	51	47	28	0.50

ตารางที่ 1.3: กำหนดการจัดกลุ่มช่องความถี่วิทยุ

กลุ่มช่องความถี่วิทยุ	จำนวนช่องความถี่วิทยุ	หมายเลขช่องความถี่วิทยุ					
Da	6	28	31	35	39	47	51
Db	6	26	29	32	36	40	44
Dc	6	27	30	33	37	41	49
Dd	6	34	38	46	50	54	57
De	6	43	45	48	53	56	59
Df	5	42	52	55	58	60	-
TDa	6	26	50	34	38	42	46
TDb	6	28	32	36	40	44	48

2) วัตถุประสงค์ และขอบเขตของโครงการ

วัตถุประสงค์และขอบเขตของโครงการมีดังต่อไปนี้

2.1) วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานในแต่ละพื้นที่ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานจริงและออกแบบและพัฒนาระบบสื่อสารที่เกิดจากการใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานในแต่ละพื้นที่หรือทีวีไวท์สเปซ (TVWS) การใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งาน อันที่จริงสามารถแบ่งเป็นสองส่วนใหญ่ก็คือ

- 1) การขยายสเปกตรัมใช้งานจากคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานมาช่วยลดโหลตที่มีอยู่มากในเครือข่าย Wi-Fi ณ ปัจจุบันนี้เช่นในเมืองหรือจังหวัดใหญ่ เช่น กรุงเทพมหานคร (Ultra dense urban) และ จังหวัดขนาดกลางเล็กลงมาเช่นใน AIT จังหวัดปทุมธานี (Suburban area)
- 2) การขยายการใช้งานบรอดแบนด์อินเทอร์เน็ตในพื้นที่ที่ยังไม่มีการเข้าถึงหรือพื้นที่ที่เข้าถึงยาก (Rural area) เช่นพื้นที่ หมู่บ้านไทยสามัคคี ตำบลแม่กาษา อำเภอมะนัง จังหวัดตากและหมู่บ้านใกล้เคียง โดยเชื่อมต่อจากโรงเรียนในพื้นที่ซึ่งมีการเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตอยู่แล้ว

2.2) ขอบเขตการดำเนินงาน

ในส่วนขอบเขตของการทำโครงการนี้ มีหัวข้อและรายละเอียดดังต่อไปนี้ต่อไปนี้เป็นแผนการดำเนินงาน แนวคิด แนวทางและวิธีการดำเนินงาน และขั้นตอนการทำงานรวมถึงกรอบระยะเวลาดำเนินงานในแต่ละกิจกรรมที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของโครงการในแต่ละข้อ

แผนการดำเนินงาน แนวคิด แนวทางและวิธีการดำเนินงาน และขั้นตอนการทำงานรวมถึงกรอบระยะเวลาดำเนินงานมีดังต่อไปนี้

เดือนที่ 1-5:

เดือนที่ 1:

- แผนงานชุดที่ 1: ศึกษาและสำรวจ
 - ดำเนินการขอใบอนุญาตจาก กสทช ในการทดสอบคลื่นความถี่โทรทัศน์และจัดซื้ออุปกรณ์
 - ศึกษาและกำหนดขอบเขตของพื้นที่เป้าหมาย
- แผนงานชุดที่ 2: ศึกษาและพัฒนาระบบการตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์
 - ออกแบบการตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์โดยเคลื่อนที่โดยรถยนต์ (Moving location measurement) เพื่อสามารถเก็บข้อมูลหลายๆ ตำแหน่งในแต่ละพื้นที่อย่างต่อเนื่อง
 - ออกแบบการตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ ณ ตำแหน่งตายตัว (Fixed location) เพื่อสามารถเก็บข้อมูลได้ละเอียดมากขึ้น
 - จัดทำเอกสารรายงานความก้าวหน้าของโครงการฉบับที่ 1 รายงานผลการศึกษาเบื้องต้น (Inception report) ส่งภายใน 30 วันแรก
 - หมายเหตุ: รายงานเบื้องต้น (Inception report) ที่ได้ยื่นส่งตามเวลาที่กำหนด และได้รับการตรวจสอบโดยคณะกรรมการตรวจสอบมีมติเห็นชอบผลงานและให้เบิกจ่ายเงินประจำงวดที่ 1 เป็นเงินจำนวน 756,892.32 บาท (20%) ได้ เป็นที่เรียบร้อยแล้ว โดยได้รับเงิน 749,323.40 บาท ณ วันที่ 19 พ.ค. 61

เดือนที่ 2:

- แผนงานชุดที่ 2: ศึกษาและพัฒนาระบบการตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการ

โทรทัศน์ (ต่อ)

- ศึกษาการใช้งานและทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับคลื่นความถี่โทรทัศน์ที่ไม่ได้ใช้งาน
- การทดสอบความถูกต้อง การปรับเครื่องเข้าสู่ภาวะมาตรฐาน (Calibration)
- การทดสอบวัดคลื่นสัญญาณในบริเวณสถาบันเอไอทีโดยรอบ

เดือนที่ 3:

- แผนงานชุดที่ 2: ศึกษาและพัฒนาระบบการตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ (ต่อ)
 - พัฒนาสเปกตรัมเซนซิงอัลกอริทึมเพื่อระบุชี้แจงคลื่นที่ไม่ได้ถูกใช้งานได้แม่นยำ

เดือนที่ 4-5:

- แผนงานชุดที่ 2: ศึกษาและพัฒนาระบบการตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ (ต่อ)
 - สำรองตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ในพื้นที่ตัวอย่างในกรุงเทพมหานคร
 - วิเคราะห์และสรุปผลผลการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ในพื้นที่ตัวอย่าง
 - จัดทำเอกสารรายงานความก้าวหน้าของโครงการฉบับที่ 2 รายงานผลการศึกษาระดับกลาง (Interim report)
 - **หมายเหตุ:** รายงานฉบับนี้จะต้องส่งภายในวันที่ 17 ก.พ. 61 ตามที่ได้มีการปรับขยายเวลาแผนการปฏิบัติงาน โดยคณะกรรมการตรวจสอบมีมติเห็นชอบผลงานและให้เบิกจ่ายเงินประจำงวดที่ 2 เป็นเงินจำนวน 1,135,338.48 บาท (30%) ได้ เป็นที่เรียบร้อยแล้ว โดยได้รับเงิน 1,135,338.48 บาท ณ วันที่ 27 มี.ค. 61

เดือนที่ 6:

- แผนงานชุดที่ 2: ศึกษาและพัฒนาระบบการตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ (ต่อ)
 - สำรองตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ในพื้นที่ตัวอย่างในบริเวณนอกเมืองชนบทหรือพื้นที่ที่เข้าถึงยาก (Rural area)
 - วิเคราะห์และสรุปผลผลการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ในพื้นที่ตัวอย่าง

เดือนที่ 7-10:

- แผนงานชุดที่ 3:ทดสอบและติดตั้งระบบสื่อสารต้นแบบในพื้นที่เป้าหมาย
 - ศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์ทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ทดสอบการรับส่งสัญญาณของอุปกรณ์ทีวีไวท์สเปซ (TVWS)
 - ทดสอบการปรับเปลี่ยนช่องสัญญาณของอุปกรณ์ทีวีไวท์สเปซ (TVWS) แบบพลวัตหรือไดนามิก (Dynamic)
 - ทดสอบการเชื่อมต่อโครงข่ายไร้สายแบบเมช (Wireless mesh network (WMN)) กับทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ที่สถาบันเอไอที
 - จัดเตรียมอุปกรณ์และ Firmware สำหรับการติดตั้ง
 - จัดทำเอกสารรายงานความก้าวหน้าของโครงการฉบับที่ 3 ร่างรายงานฉบับสมบูรณ์ (Draft final report)
 - **หมายเหตุ:** รายงานฉบับนี้ตามกำหนดการเดิมจะต้องส่งภายในวันที่ 18 กค..61 ตามที่ได้มีการปรับขยายเวลาแผนการปฏิบัติงานครั้งแรก
 - อย่างไรก็ตามเนื่องจากมีความล่าช้าเกิดขึ้นอีกเป็นครั้งที่สองตามที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น ในขั้นตอนการนำเข้าอุปกรณ์เครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้ในการทดลองหรือทดสอบ จนกระทั่งในที่สุดวันที่ 27 กันยายน 2561 อุปกรณ์เครื่องวิทยุคมนาคมได้ถูกส่งมาถึงสถาบันเอไอที ดังนั้นสถาบันเอไอทีได้ขอความกรุณาขยายเวลาการส่งมอบผลงานงวดที่ 3 และงวดสุดท้ายออกไปอีก 120 วัน จากแต่เดิมจะต้องส่งมอบผลงานงวดสุดท้ายในวันที่ 21 กันยายน 2561 ขอยขยายเป็นภายในวันที่ 19 มกราคม 2562
 - เอกสารรายงานความก้าวหน้าของโครงการฉบับที่ 3 ร่างรายงานฉบับสมบูรณ์ (Draft final report) นี้ได้ส่งในวันที่ 31 ตุลาคม 2561

เดือนที่ 10-12:

- **แผนงานชุดที่ 4: สรุปผลการดำเนินงานโครงการ**

- แนะนำชุมชนถึงการใช้งานและศักยภาพของระบบ
- ติดตั้ง ทดสอบการเชื่อมต่อโครงข่ายไร้สายแบบเมช (Wireless mesh network (WMN)) กับทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ดูการเชื่อมโยงของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตในพื้นที่ทดสอบ วิเคราะห์และสรุปผลถึงประสิทธิภาพของระบบ
- จัดทำเอกสารสรุปผลงานโครงการรายงานฉบับสมบูรณ์ (Final report) ประกอบด้วย รายละเอียดผลการศึกษาวิจัย ตามแผนงานดำเนินโครงการ **ซึ่ง** รายงานฉบับนี้จะต้องส่งภายในวันที่ 19 มกราคม 2562 ตามที่ได้มีการปรับขยาย **เวลาแผนการปฏิบัติงาน**
- เอกสารรับรองความถูกต้องครบถ้วนของค่าใช้จ่ายทั้งหมดของโครงการ โดยผู้สอบบัญชีรับอนุญาต

แผนการดำเนินงานและกรอบระยะเวลาดำเนินงานมีรายละเอียดสรุปไว้ในแผนภูมิแกนต์ (Gantt chart) ดังรูปที่ 1.1

รายละเอียดแผนการดำเนินงานโครงการ

รายละเอียดแผนงานในเดือนที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
แผนงานชุดที่ 1: ศึกษาและสำรวจ												
ศึกษาและกำหนดขอบเขตของพื้นที่เป้าหมาย												
ทำการสำรวจตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ในพื้นที่ตัวอย่าง												
วิเคราะห์และสรุปผลการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ในพื้นที่ตัวอย่าง												
แผนงานชุดที่ 2: ศึกษาและพัฒนาระบบสื่อสารต้นแบบ												
ดำเนินการขอใบอนุญาตจาก กสทช. ในการทดสอบคลื่นความถี่โทรทัศน์และจัดซื้ออุปกรณ์												
ศึกษาการใช้งานและทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับคลื่นความถี่โทรทัศน์ที่ไม่ได้ใช้งาน												
การทดสอบวัดคลื่นสัญญาณในบริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย โดยรอบ												
พัฒนาระบบฐานข้อมูลเพื่อจัดเก็บข้อมูล												
พัฒนาสเปคตรัมเร็นจ์อัลกอริทึมเพื่อระบุแรงคลื่นที่ไม่ได้ถูกใช้งานได้อย่างแม่นยำ												
พัฒนาระบบแสดงผลการใช้งานความถี่ของกิจการโทรทัศน์และแสดงผลผ่านทางเว็บไซต์												
ศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์ TVWS												
ทดสอบการรับส่งสัญญาณของอุปกรณ์ TVWS												
ทดสอบการรับเปลี่ยนช่องสัญญาณของอุปกรณ์ TVWS แบบไดนามิก												
ทดสอบการเชื่อมต่อโครงข่ายแบบเมชกับ TVWS												
แผนงานชุดที่ 3: ทดสอบและติดตั้งระบบสื่อสารต้นแบบในพื้นที่เป้าหมาย												
สำรวจชุมชน การเชื่อมโยงของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตในพื้นที่												
จัดเตรียมอุปกรณ์และ Firmware สำหรับการติดตั้ง												
แนะนำชุมชนถึงการใช้งานและศักยภาพของระบบ												
ทำการติดตั้งและทดสอบ												
วิเคราะห์และสรุปผลถึงประสิทธิภาพของระบบ												
แผนงานชุดที่ 4: สรุปผลการดำเนินงานโครงการ												
จัดทำเอกสารสรุปผลงาน โครงการ												

รูปที่ 1.1: รายละเอียดแผนการดำเนินงานและกรอบระยะเวลาดำเนินงานของโครงการ

3) ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับมีทั้งผลที่ได้รับจากงานวิจัยพัฒนาในโครงการและดังนี้

- มีรายงานผลการศึกษาการใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานในย่านแต่ละพื้นที่หรือทีวีไวท์สเปซ (TVWS)
- มีระบบการตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์และมีการประมวลผลที่ดีขึ้นทำให้เราสามารถตัดสินใจช่องสัญญาณนั้นว่างหรือไม่ว่างได้ถูกต้องแม่นยำขึ้น
- มีระบบสื่อสารต้นแบบที่เกิดจากการใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานในย่านแต่ละพื้นที่หรือทีวีไวท์สเปซ (TVWS)

- บทสรุปการศึกษาเปรียบเทียบการใช้งานคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานในแต่ละพื้นที่กับการใช้งานอินเทอร์เน็ตผ่านเครือข่าย
- มีการพัฒนาต่อยอดระบบสื่อสารที่เกิดจากการใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานในแต่ละพื้นที่หรือทีวีไวท์สเปซ (TVWS)
- สามารถนำคลื่นความถี่ที่ไม่มีการใช้งานมาใช้ประโยชน์ได้เต็มความสามารถ ทั้งนี้ทำให้ทรัพยากรคลื่นความถี่ถูกใช้งานได้มีประสิทธิภาพสูงสุด
- เป็นโอกาสให้ประชาชนคนไทยสามารถใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่ที่ไม่มีการใช้งานนี้ได้

บทที่ 2

[ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง]

1) ทฤษฎี และแนวความคิด

การใช้งานด้านสื่อสารไร้สายได้เติบโตอย่างรวดเร็วในทศวรรษที่ผ่านมา ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีจะเติบโตอย่างมากแต่ปัญหาการขาดแคลนคลื่นความถี่ยังมีอยู่เนื่องจากบริหารจัดการการใช้งานคลื่นความถี่เป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดปัญหาคอขวด ป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย การจัดการคลื่นความถี่ในปัจจุบันนั้นเป็นแบบตายตัวต่อการใช้งานหนึ่งๆ ซึ่งทำให้มีช่องว่างคลื่นความถี่ที่ไม่มีการใช้งานเหลืออยู่ เพื่อให้เราสามารถใช้งานคลื่นความถี่เหล่านั้น เทคนิคการจัดการสรรคลื่นความถี่แบบพลวัต (Dynamic spectrum allocation (DSA)) หรือการเข้าถึงคลื่นความถี่แบบพลวัต (Dynamic spectrum access (DSA)) และเทคโนโลยีวิทยุรู้คิด (Cognitive radio (CR)) เป็นสองเทคนิคที่มีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาประสิทธิภาพการใช้งานคลื่นความถี่ [4]

1.1) การตรวจจับช่องสัญญาณคลื่นความถี่หรือสเปกตรัมเซนซิง (Spectrum Sensing)

การตรวจจับช่องสัญญาณคลื่นความถี่หรือสเปกตรัมเซนซิง (Spectrum Sensing) เป็นหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญที่สุดสำหรับเทคโนโลยีและอุปกรณ์ CR ซึ่งจะทำให้ระบบรู้ว่าคลื่นความถี่ส่วนไหนที่ยังไม่ได้ถูกใช้งานโดยผู้ใช้งานที่มีใบอนุญาตซึ่งเป็นผู้ใช้งานที่มีความสำคัญอันดับแรก (Primary user (PU)) ผู้ใช้งานอันดับรอง (Secondary user (SU)) ที่ไม่มีใบอนุญาต อาจจะสามารถใช้งานในช่องคลื่นความถี่ที่ยังไม่ได้ใช้งานโดยไม่รบกวน ได้มีงานวิจัยที่พัฒนาเทคนิควิธีการสเปกตรัมเซนซิง แบบต่างๆ ใช้วิธีการและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แตกต่างกัน

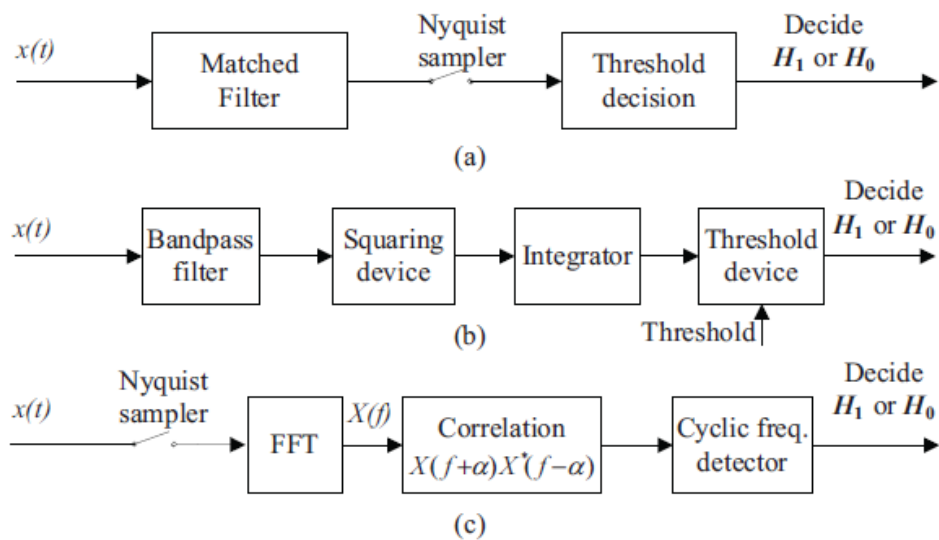
เทคนิคสเปกตรัมเซนซิงแบบต่างๆ (Classification of Spectrum Sensing Techniques)

เราสามารถแบ่งเทคนิคสเปกตรัมเซนซิงเป็นสองประเภทหลัก ได้แก่

- 1) สเปกตรัมเซนซิงสำหรับแถบความถี่แคบ (Narrowband spectrum sensing) [8]-[10]
- 2) สเปกตรัมเซนซิงสำหรับแถบความถี่กว้าง (Wideband spectrum sensing) [11]-[18]

1.1.1) สเปกตรัมเซนซิงสำหรับแถบความถี่แคบ (Narrowband spectrum sensing) [8]-[10]

สเปกตรัมเซนซิงสำหรับแถบความถี่แคบซึ่งเป็นช่วงความถี่แคบจนเราสามารถประมาณ ค่าตอบสนอง ความถี่ของช่องส่งสัญญาณ (Channel frequency response) นั้นคงที่ (Flat) หรืออีกนัยหนึ่งความ กว้างแถบคลื่นความถี่หรือแบนด์วิดท์ของระบบ (System bandwidth) นั้นมีค่าน้อยกว่าโคเฮเรนต์ แบนด์วิดท์ (Coherent bandwidth) ของช่องส่งสัญญาณ (Channel) ช่องส่งสัญญาณ สเปกตรัม เซนซิงสำหรับแถบความถี่แคบ ประกอบไปด้วยเทคนิคที่ใช้อัลกอริทึมต่างๆ กันดังต่อไปนี้ Matched-filtering energy detection และ Cyclostationary feature detection ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1: บล็อกไดอะแกรมหรือแผนภาพบล็อก (Block diagram) ของ Narrowband spectrum sensing เทคนิคที่ใช้อัลกอริทึมต่างๆ กัน (a) matched-filtering (b) energy detection และ (c) cyclostationary feature [8]-[10]

- เทคนิค Matched-filtering [8] เป็นวิธีสเปกตรัมเซนซิงสำหรับแถบความถี่แคบที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด (Optimal) เนื่องจากอัลกอริทึมคำนวณโดยมีเงื่อนไขจากการทำให้ค่าระดับสัญญาณเทียบสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio (SNR)) มีค่าสูงสุด ซึ่งทำได้โดยเทียบเคียงความสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างสัญญาณที่รับมาได้กับสัญญาณต้นแบบ (Template) เพื่อจะตรวจจับสัญญาณส่วนที่เหมือนกับสัญญาณต้นแบบ (รู้ล่วงหน้า) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเราต้องมีข้อมูลของ ผู้ใช้งานที่มีความสำคัญอันดับแรก (Primary user (PU))

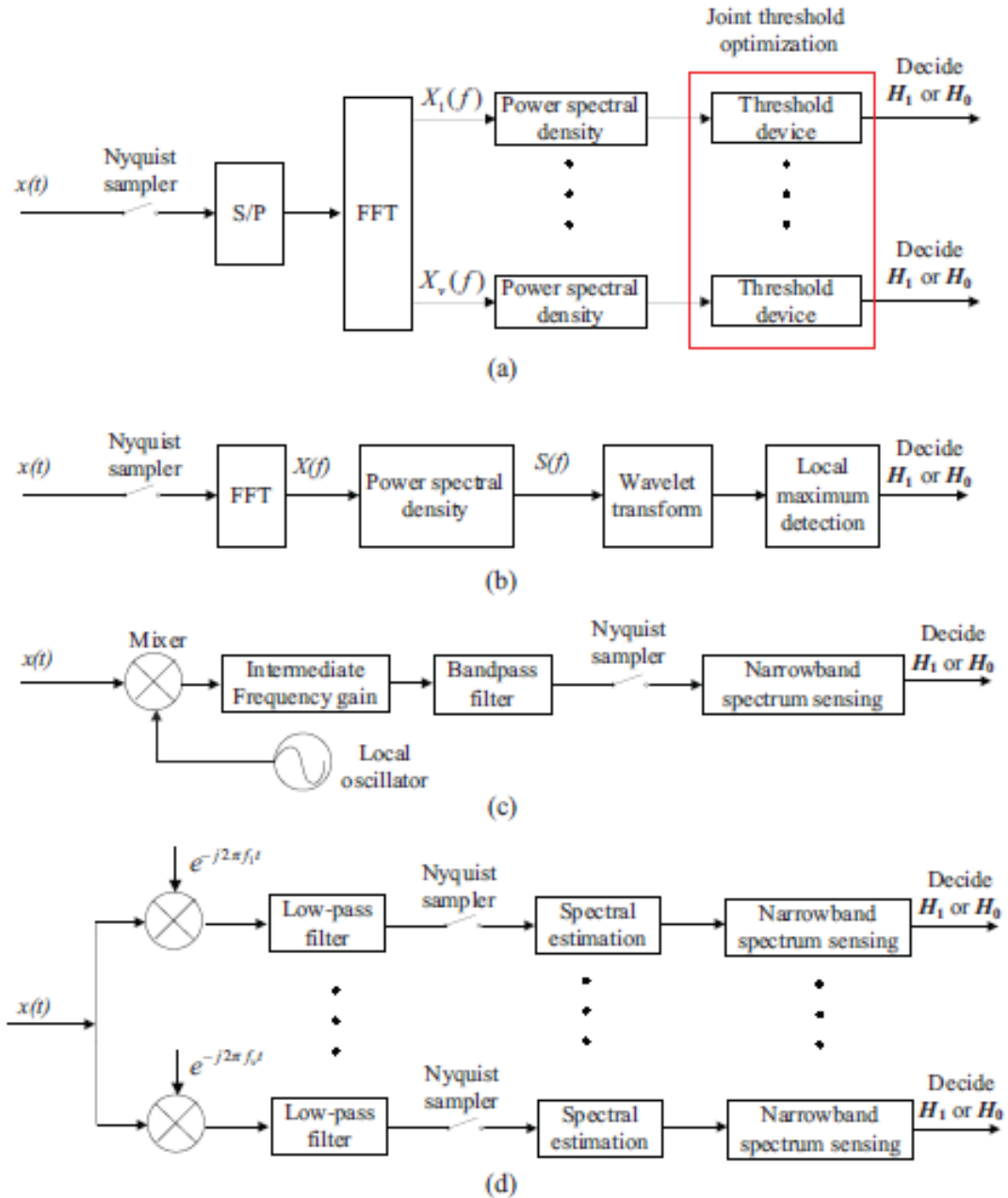
ล่วงหน้าและอุปกรณ์ต้องมีชิงโครไนซ์เซชันทั้งทางความถี่และทางเวลาที่ดี นำไปสู่ต้นทุนอุปกรณ์ที่ซับซ้อนมากขึ้น

- เทคนิค Energy detection [9] เป็นวิธีการตรวจจับแบบนอนโคฮีเร็นท์ (Non-coherent) เลี่ยงการใช้ข้อมูลของผู้ใช้งานที่มีความสำคัญอันดับแรก (Primary user (PU)) และการคำนวณที่ซับซ้อน ซึ่งให้ประสิทธิภาพที่ไม่ดีถ้าหากระดับ SNR ต่ำ และไม่สามารถที่แยกแยะความต่างระหว่างสัญญาณที่มาจาก ผู้ใช้งานที่มีความสำคัญอันดับแรก (Primary user (PU)) และสัญญาณแทรกสอดจากอุปกรณ์เทคโนโลยีวิทยุรู้คิด (CR) อื่นได้
- เทคนิค Cyclostationary feature detection สามารถตรวจจับและแยกแยะสัญญาณชนิดต่างๆ จาก PU ต่างๆกันโดยใช้คุณสมบัติทาง Cyclostationary ของสัญญาณ อย่างไรก็ตามการคำนวณนั้นซับซ้อนมากกว่าแบบเทคนิค Energy detection เนื่องจากต้องคำนวณฟังก์ชันสองมิติที่ขึ้นกับทั้งความถี่พาหะ (Carrier frequency) และความถี่ของรอบของคุณสมบัติ Cyclostationary (Cyclic frequency)

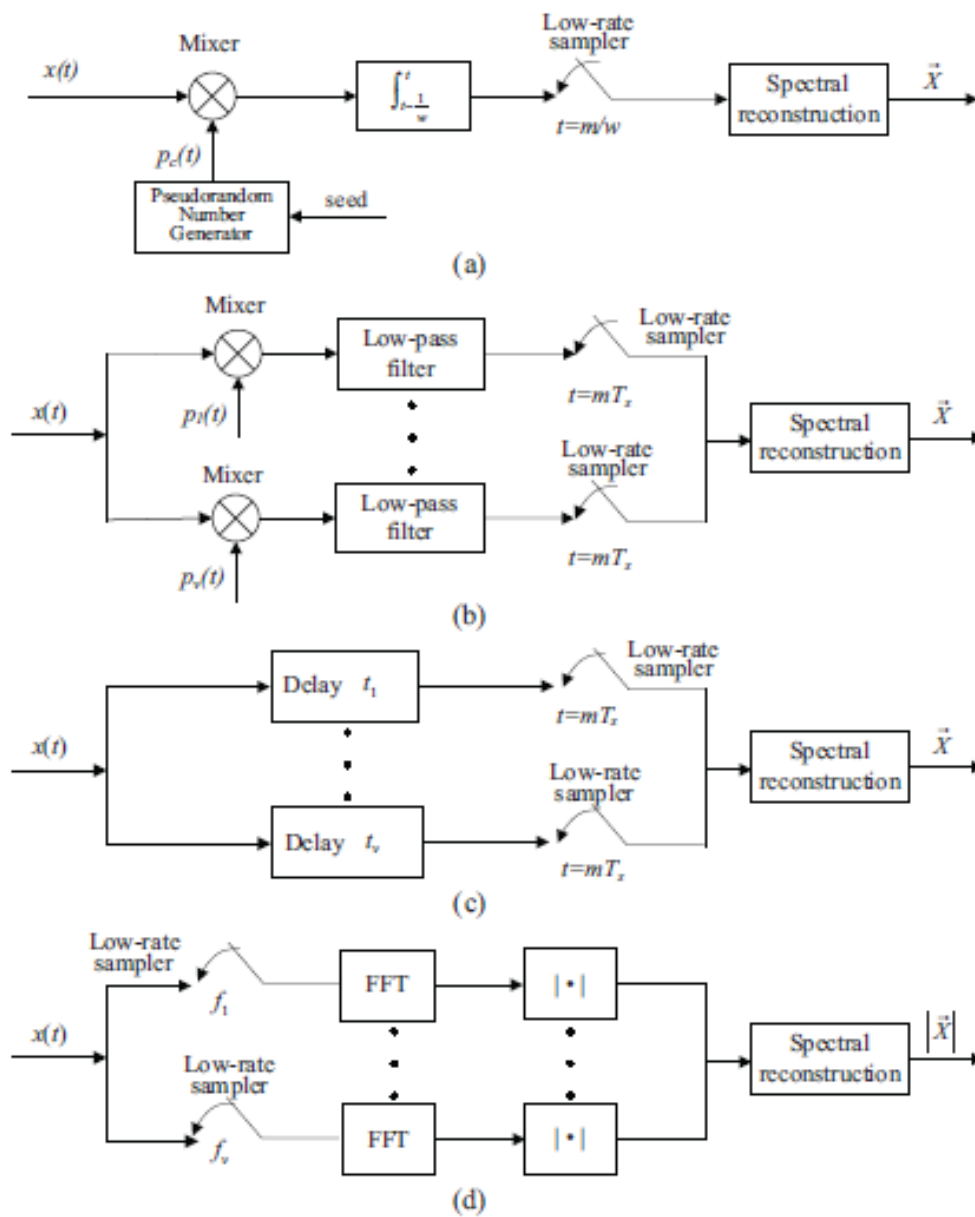
การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับ Narrowband spectrum sensing วิธีต่างๆ เหล่านี้มีกระบวนการ เงื่อนไขและประสิทธิภาพการตรวจจับสัญญาณที่แตกต่างกัน ข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีมีได้สรุปไว้ดังต่อไปนี้

- Matched-filtering
 - ข้อดี มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด (Optimal performance)
 - ข้อเสีย ต้องการข้อมูลของ ผู้ใช้งานที่มีความสำคัญอันดับแรก (Primary user (PU)) ล่วงหน้า
- Energy detection
 - ข้อดี ไม่ต้องการข้อมูลของ ผู้ใช้งานที่มีความสำคัญอันดับแรก (Primary user (PU)) ล่วงหน้า มีต้นทุนการคำนวณต่ำไม่ซับซ้อน (Low computational cost)
 - ข้อเสีย ประสิทธิภาพไม่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งขณะที่มีระดับสัญญาณเทียบสัญญาณรบกวน SNR ต่ำ และไม่สามารถจำแนกผู้ใช้ได้ (บอกไม่ได้ว่าเป็นสัญญาณจากใคร)
- Cyclostationary feature
 - ข้อดี มีประสิทธิภาพดีขึ้นในกรณีที่ค่า SNR ต่ำและต้องการข้อมูลของผู้ใช้งานที่มีความสำคัญอันดับแรก (Primary user (PU)) ล่วงหน้าเพียงบางส่วน นอกจากนี้ยังทนต่อสถานะที่มีสัญญาณสอดแทรก (Interference) ได้

○ ข้อเสีย มีต้นทุนการคำนวณสูง



รูปที่ 2.2: บล็อกไดอะแกรมของ Wideband spectrum sensing แบบใช้อัลกอริทึมแบบ Nyquist wideband sensing algorithms: (a) Multiband joint detection, (b) Wavelet detection, (c) Sweep-tune detection, and (d) Filter-bank detection [11]-[18]



รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมของ Wideband spectrum sensing แบบใช้อัลกอริทึมแบบ Sub-Nyquist wideband sensing algorithms: (a) Analog-to-information converter-based wideband sensing, (b) Modulated wideband converter-based wideband sensing, (c) Multi-coset sampling-based wideband sensing, and (d) Multi-rate sub-Nyquist sampling-based wideband sensing [11]-[18]

1.1.2) สเปกตรัมเซนซิงสำหรับแถบความถี่กว้าง (Wide spectrum sensing) [11]-[18]

สเปกตรัมเซนซิงสำหรับแถบความถี่กว้างจะสแกนตรวจจับแถบความถี่กว้างซึ่งเป็นช่วงความถี่กว้างจนเรามองเห็น ค่าตอบสนองความถี่ของช่องส่งสัญญาณ (Channel frequency response) นั้นเปลี่ยนแปลงมาก (Frequency selective) หรืออีกนัยหนึ่งความกว้างแถบคลื่นความถี่หรือแบนด์วิดท์ของระบบ (System bandwidth) นั้นมีค่ามากกว่าโคเฮเรนต์แบนด์วิดท์ (Coherent bandwidth) ของช่องส่งสัญญาณ (Channel) ช่องส่งสัญญาณ ตัวอย่างเช่นในการจะสแกนหา คลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานในแต่ละพื้นที่ ซึ่งคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์โดยตามทฤษฎีอยู่ในตลอดช่วงของ Ultra-high frequency (UHF) ตั้งแต่ 300 MHz ถึง 3 GHz ดังนั้นสเปกตรัมเซนซิงสำหรับแถบความถี่กว้างจึงเหมาะสมกว่าแบบสำหรับแถบความถี่แคบ

สเปกตรัมเซนซิงสำหรับแถบความถี่กว้างสามารถถูกจำแนกเป็นสองประเภทได้แก่

- 1) แบบไนควิสต์ (Nyquist wideband sensing)
- 2) แบบซับ-ไนควิสต์ (Sub-Nyquist wideband sensing)

สเปกตรัมเซนซิงแบบแรกจะทำงานประมวลผลสัญญาณที่อัตราสุ่มหรือแซมปลิงสัญญาณ (Sampling rate) ที่หรือเหนือ อัตราไนควิสต์ (Nyquist rate) ขณะที่สเปกตรัมเซนซิงแบบที่สองจะทำงานที่อัตราแซมปลิงสัญญาณที่ต่ำกว่า อัตราไนควิสต์ แต่ละเทคนิคสำหรับ สเปกตรัมเซนซิงสำหรับแถบความถี่กว้างแบบไนควิสต์ ได้ถูกแสดงในรูปที่ 2.2

วิธีที่ง่ายสุดของสเปกตรัมเซนซิงแบบแรกก็คือใช้ ตัวแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล (Analog to digital converter (ADC)) มาตรฐานและใช้เทคนิคทาง (Digital signal processing (DSP)) เพื่อตรวจจับการใช้สเปกตรัม ตัวอย่างเช่น ใน [11] ได้เสนอวิธีอัลกอริทึมแบบตรวจจับหลายช่องแคบสัญญาณร่วมกัน (Multi-band joint detection) ซึ่งสามารถสแกนและตรวจจับสัญญาณของผู้ใช้งานที่มีความสำคัญอันดับแรก (Primary user (PU)) ตลอดช่วงแถบความถี่กว้าง สัญญาณแถบความถี่กว้างจะถูกแซมปลิงโดยตัวแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกแบ่งเป็นดาต้าสตรีมที่ขนานกัน (Parallel data streams) โดยวงจรแปลงจากอนุกรมเป็นขนาน (Serial-to-parallel circuit (S/P)) หลังจากนั้นสัญญาณก็จะถูกแปลงสัญญาณโดยการแปลงฟูริเยร์แบบดิสครีต Discrete Fourier transform (DFT) ซึ่งในทางปฏิบัติการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier transform (FFT)) ถูกใช้เพื่อให้ประมวลผลได้เร็ว ซึ่ง ณ ตอนนี้นี้สัญญาณก็ได้ถูกแปลงมาอยู่ในโดเมนความถี่ (Frequency domain) หรือแถบสเปกตรัม ขั้นตอนสุดท้าย

สัญญาณในโดเมนความถี่หรือแถบสเปกตรัมนี้ก็จะถูกตรวจจับโดยกาทดสอบสมมุติฐานแบบไบนารี (Binary hypotheses tests) โดยที่ H_0 ถูกสมมุติเป็นกรณีที่ไม่มีความหมายของสัญญาณของผู้ใช้งานที่มีความสำคัญอันดับแรก (Primary user (PU)) และ H_1 ถูกสมมุติเป็นกรณีที่มีความหมายของสัญญาณของผู้ใช้งานที่มีความสำคัญอันดับแรก (Primary user (PU)) ซึ่งระดับค่าเทรชโวลต์ที่ดีที่สุด (Optimal detection threshold) จะถูกเลือกโดยใช้วิธีทางหาจุดที่ดีที่สุด (Optimization techniques) ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพการตรวจจับดีกว่าการตรวจจับสัญญาณเพียงช่องแคบช่องเดียว (Single band detection)

นอกจากนี้ใน [12] ได้ใช้ตัวแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลมาตรฐานร่วมกับอัลกอริทึมการเซนซิงแบบเวฟเล็ต (Wavelet-based spectrum sensing algorithm) ซึ่งโดยวิธีนี้ ความหนาแน่นสเปกตรัม (Power Spectral Density (PSD)) จะถูกโมเดลเป็นขบวนของช่วงความถี่ย่อยติดต่อกัน (A train of consecutive frequency subbands) ซึ่ง PSD เรียบคงที่ภายในช่วงความถี่ย่อยแต่ละช่วงแต่มีความไม่ต่อเนื่องที่ขอบของสองช่วงที่ติดกัน จากนั้นขบวนของช่วงความถี่ย่อยจะถูกแปลงแบบการแปลเวฟเล็ต (Wavelet transform) เพื่อหาตำแหน่งของขอบใน ความหนาแน่นสเปกตรัม (Spectral edge detection problem) ซึ่งวิธีนี้เราจะสุ่มสัญญาณแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่อย่างน้อยอัตราในคริสตนั้นคือสองเท่าของแบนด์วิดท์ ของสัญญาณเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปรากฏการณ์ทับซ้อน (Aliasing effect) เช่นหากสัญญาณของเรามีช่วงความถี่ตั้งแต่ 0 ถึง 10 GHz ดังนั้นอัตราสุ่มสัญญาณแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่อย่างน้อยอัตราในคริสตนั้นก็คือ 20 GHz ซึ่งโดยปกติเป็นอัตราสุ่มที่สูงมาก ซึ่งเทคโนโลยีทางด้านการผลิตฮาร์ดแวร์ ณ ปัจจุบันยังไม่สามารถที่จะทำได้ที่มีความละเอียดสูงเพียงพอเช่น 16 bits (High resolution)โดยให้มีพลังงานที่ยอมรับได้

เราสามารถที่จะลดอัตราการสุ่มโดยใช้เทคนิคซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ (Superheterodyne) หรือการผสมความถี่ (Frequency mixing techniques) โดยการกวาดไปที่ช่วงความถี่ที่ต้องการ โดยลักษณะโครงสร้างของวิธีนี้จะประกอบด้วยโลคัลออสซิลเลเตอร์ (Local oscillator (LO)) ทำหน้าที่ผลิตสัญญาณไซน์เวฟ (Sine wave) มาผสมกับสัญญาณแถบความถี่กว้างของเรา ซึ่งทำให้เราสามารถแปลงเป็นสัญญาณความถี่ต่ำตามต้องการได้ (Down-converted signal) หลังจากนั้นก็จะถูกกรองโดยแบนด์พาสฟิลเตอร์ (Bandpass filter (BPF)) ซึ่งสามารถถูกตรวจจับโดยเทคนิคสเปกตรัมเซนซิงสำหรับแถบความถี่แคบต่อไปได้ แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้มีข้อเสียคือช้าและไม่ค่อยยืดหยุ่นเนื่องจากส่วนประกอบการปรับกวาดสัญญาณมายังความถี่ต่ำตามต้องการและแบนด์พาสฟิลเตอร์ที่จำเป็น

อีกวิธีหนึ่งใช้อัลกอริทึมแบบฟิลเตอร์แบงก์ (Filter bank algorithm) ถูกคิดค้นโดย Farhang-Boroujeny ใน [13] การประมวลผลของสัญญาณแถบความถี่กว้างถูกทำโดยวิธีการใช้แถบของแบงก์ของฟิลเตอร์ต้นแบบ (Bank of prototype filters) ที่ใช้ความถี่ศูนย์กลางที่ขยับห่างแตกต่างกัน ช่วงเบสแบนด์ถูกประมวลโดยใช้ฟิลเตอร์ต้นแบบโดยตรง ส่วนในช่วงแถบความถี่อื่นๆ เราจะใช้ฟิลเตอร์ต้นแบบที่ถูกปรับ วิธีฟิลเตอร์แบงก์นี้มีข้อดีคือสามารถตรวจจับธรรมชาติการเปลี่ยนแปลงของแถบความถี่กว้างได้ (Dynamic nature of wideband spectrum) แต่อย่างไรก็ตามมีข้อเสียคือเราต้องใช้ส่วนประกอบคลื่นวิทยุหรืออาร์เอฟ (Radio frequency (RF)) จำนวนมากในโครงสร้างของฟิลเตอร์แบงก์

จะเห็นได้ว่าวิธีการสเปกตรัมเซ็นซิงแบบไนควิสต์ นั้นต้องใช้อัตราสุ่มที่สูงหรือไม่หากหลีกเลี่ยงอัตราที่สุ่มที่สูงเราต้องใช้เทคนิคที่ซับซ้อนขึ้น ดังนั้นอีกทางเลือกที่แก้ปัญหาเหล่านั้นก็คือวิธีการสเปกตรัมเซ็นซิงแบบซับไนควิสต์ ซึ่งทำงานโดยใช้อัตราสุ่มที่ต่ำกว่าอัตราไนควิสต์ และตรวจจับความถี่ที่ถูกใช้งานโดยกระบวนการเพียงบางส่วนของวิธีการสเปกตรัมเซ็นซิงแบบไนควิสต์ วิธีการแบบซับไนควิสต์ ที่เป็นที่แพร่หลายก็คือ วิธีการแบบคอมเพรสซิฟเซนซิง (Compressive sensing-based wideband sensing) และวิธีแบบซับไนควิสต์หลายช่องสัญญาณ (multi-channel sub-Nyquist wideband sensing) [14]-[18]

- 1) วิธีแรก วิธีการแบบคอมเพรสซิฟเซนซิง นั้นมีพื้นฐานจากการที่ธรรมชาติของสเปกตรัมแถบความถี่กว้าง (Wideband spectrum) นั้นเป็นแบบกระจายบางๆ ห่างๆ (Sparse) ดังนั้นคอมเพรสซิฟเซนซิง ซึ่งเป็นการเซ็นซิงแบบบีบอัดได้โดยใช้อัตราสุ่มที่ซับไนควิสต์ หลังจากประกอบใหม่ (Reconstruction) ได้เป็นสเปกตรัมแถบความถี่กว้างแล้วนั้นจะใช้เทคนิคการเซ็นซิงแบบเวฟเล็ตมาตรวจจับช่วงความถี่ที่ไม่มีการใช้งาน นอกจากนี้ได้มีการศึกษาใช้เทคนิคการตรวจจะบาคคุณลักษณะที่เป็นรอบ (Cyclic feature detection) มาร่วมใช้กับคอมเพรสซิฟเซนซิงนี้เพื่อให้สามารถทนต่อความไม่แน่นอนของสัญญาณรบกวน (Noise) ได้
- 2) วิธีที่สอง วิธีการแบบซับไนควิสต์หลายช่องสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 2.3 ใช้แบบจำลองมอดูเลตคอนเวอร์เตอร์ (Modulated wideband converter (MWC)) ซึ่งใช้ช่องสัญญาณในการสุ่มหลายช่องพร้อมกับ ฟิลเตอร์กรองเอาสัญญาณความถี่ต่ำ (Low-pass filter (LPF)) หรืออาจจะทำโดยใช้อีกวิธีหนึ่งคือใช้วิธีการสุ่มเซตร่วมเกี่ยวหลายเซต (Multi-coset sampling) ซึ่งเลือกสุ่มตัวอย่างสัญญาณจากกริดที่สม่ำเสมอ (Uniform grid) และใช้อัตราสุ่มที่สูงกว่าอัตราไนควิสต์

1.2) การวัดคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานหรือทีวีไวท์สเปซ (TVWS Measurement)

ในการวัดคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานในแต่ละพื้นที่หรือทีวีไวท์สเปซ (TVWS) สามารถแบ่งประเภทได้สองวิธีหลักๆ อันได้แก่

- 1) วิธีการใช้เครื่องมือวัดตรวจจับ (Detector approach) ซึ่งป็นวิธีใช้อุปกรณ์หรือเครื่องมือมา สแกนวัดคลื่นเพื่อตรวจจับว่ามีสัญญาณโทรทัศน์ อยู่หรือไม่
- 2) วิธีการใช้ฐานข้อมูลของตัวส่งสัญญาณโทรทัศน์ (Database approach)

ทั้งสองวิธีเราจะต้องแปลข้อมูลที่วัดได้มาช่วงความถี่ไหนในเวลาใดที่เป็นช่วงความถี่ของ กิจการ โทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานหรือทีวีไวท์สเปซ (TVWS)

1.2.1) การใช้เครื่องมือวัดตรวจจับ (Detector approach)

วิธีนี้ใช้ทั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดพร้อมกับการวางแผนในการวัด ซึ่งเครื่องมือวัดนี้โดยทั่วไป จะต้องสามารถตรวจจับพลังงานของสัญญาณเช่น เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum analyzer) หรือจะเป็นอุปกรณ์ตรวจจับชนิดของสัญญาณจำเพาะ ความไว (Sensitivity) ของอุปกรณ์เครื่องมือ วัดจะเป็นตัวกำหนดความแรงของสัญญาณที่น้อยที่สุดต้องมีค่าเป็นเท่าไร เครื่องมือวัดถึงยังจะ สามารถตรวจจับได้ โดยทั่วไปนั้น ข้อจำกัดพื้นฐานต่อความไวของอุปกรณ์เครื่องมือวัดจะขึ้นอยู่กับ ระดับของสัญญาณรบกวน (Noise floor) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับแบนด์วิดท์ ที่เราใช้ในการวัดสัญญาณด้วย และค่าน้อยส์ฟิกเกอร์ (Noise figure) ของอุปกรณ์ อุปกรณ์ที่มีคุณภาพดีมีค่า ค่าน้อยส์ฟิกเกอร์ที่ต่ำ จะสามารถมองเห็นแยกแยะสัญญาณซึ่งถึงแม้จะอ่อนแวกจากสัญญาณรบกวนได้ เราสามารถที่ทำให้ ค่าความไวของเครื่องมือวัดนั้นดีขึ้นโดยใช้เทคนิคประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) และ ฟิลเตอร์ (Filters) นอกจากนี้องค์ประกอบของสายอากาศ (Antenna configuration) ยังมีส่วนสำคัญ หากสายอากาศมีการขยายสัญญาณที่มาก (High gain) ก็จะช่วยให้อุปกรณ์มีความไวในการตรวจจับ มากขึ้นและยังมีทิศทางของการเคลื่อนที่คลื่นที่ชัดเจน (แคบ) ขึ้น (Narrower beam) นอกจากนี้ค่า ความสูญเสียพลังงานจากสายสัญญาณ (Cable loss) และจากตัวต่อ (Connector loss) ระหว่าง สายอากาศและอุปกรณ์เครื่องมือวัดมีผลต่อประสิทธิภาพในการตรวจจับด้วย หากมีค่าความสูญเสีย พลังงานมากก็ทำให้ประสิทธิภาพในการตรวจจับนั้นแย่ลง

การตั้งค่าเทอร์สโฮลด์ (Threshold) ซึ่งคือค่าสมมุติที่ตั้งไว้เหมือนเป็นจุดตรวจสอบที่เหมาะสม จะช่วยให้ลดผลกระทบต่อความไวของเครื่องมือวัดที่เกิดจากปัจจัยที่เกิดองค์ประกอบของสายอากาศ ได้ นอกจากนี้ตำแหน่งของสายอากาศก็มีผลต่อความไวของเครื่องมือวัดด้วย เช่นหากสายอากาศที่ถูกติดตั้งสูงจากพื้นดิน ย่อมมีโอกาสที่คลื่นสัญญาณจะถูกบดบังได้น้อยกว่ากรณีที่สายอากาศที่ถูกติดตั้งไว้ต่ำ

1.2.2) วิธีการใช้ฐานข้อมูลของตัวส่งสัญญาณโทรทัศน์ที่รู้จัก (Database approach)

วิธีนี้ใช้การเข้าถึงฐานข้อมูลของตัวส่งสัญญาณโทรทัศน์ที่รู้จัก (Database of known TV transmitters) ซึ่งจะมีข้อมูลคุณลักษณะในการปฏิบัติการ ไม่ว่าจะเป็นตำแหน่ง พารามิเตอร์ของสายอากาศเช่น รูปแบบการกระจายคลื่น (Radiation pattern) ความสูงเหนือพื้นดิน กำลังส่ง เวลาในการปฏิบัติงาน ซึ่งจากฐานข้อมูลเหล่านี้และข้อมูลแผนที่ภูมิประเทศ (Topographic data) หรืออาจจะเพิ่มเติมด้วยข้อมูลสถิติประชากร (Demographic statistics) เราสามารถทำนายที่ช่วงความถี่เท่าไรที่ยังว่างไม่ได้ใช้งาน ณ เวลาหนึ่งๆ และตำแหน่งสถานที่หนึ่งๆ ใดๆ ดังนั้นความแม่นยำ ความถูกต้องในการชี้ว่ามีสัญญาณโทรทัศน์อยู่หรือไม่ ขึ้นอยู่ กับความเที่ยงตรงของฐานข้อมูลและแบบจำลองการกระจายคลื่น (Propagation model) ซึ่งใช้ในการบอกการปกคลุมของสัญญาณ (Signal coverage) ดังนั้นวิธีการใช้ฐานข้อมูลนี้ ความท้าทายอยู่ที่ทำอย่างไรให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำถูกต้อง ซึ่งอาจเป็นไปได้ในการขอให้ข้อมูลเหล่านั้น หรือแม้หากเป็นไปได้วิธียังยุ่งยากเกินไปในการคำนวณการทำนาย ดังนั้นในโครงการนี้เราจะโฟกัสการวัดคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานโดยวิธีแรกนั่นคือ วิธีการใช้เครื่องมือวัดตรวจจับ

1.3) การอธิบายลักษณะของช่วงความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานหรือทีวีไวท์สเปซ (TVWS)

ในการตรวจจับช่วงความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งาน สิ่งที่เราหวังก็คือไม่ให้ไปรบกวนตัวรับของผู้ใช้งานที่มีความสำคัญอันดับแรก (Primary users (PU)) นั่นคือระดับค่าเทอร์สโฮลด์ต้องถูกเลือกและตั้งค่าอย่างเหมาะสมค่ากำลังของสัญญาณไม่ว่าจะเป็นค่าที่ได้จากการวัดจากวิธีแรกหรือการคำนวณจากวิธีที่สอง ต้องต่ำกว่า

ค่าเทอร์สโฮลด์นี้ เพื่อที่จะสรุปได้ว่าเป็นทีวีไวท์สเปซ (TVWS) หรือไม่ หากค่าเทอร์สโฮลด์ถูกตั้งไว้สูงเกินไปก็จะได้ช่วงความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานหรือทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ที่กว้างเกินไป ในทางกลับกันหากค่าเทอร์สโฮลด์ถูกตั้งไว้ต่ำเกินไปก็จะได้ช่วงความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งาน

การใช้งานหรือทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ที่น้อยเกินไป โดยทั่วไปแล้วการเลือกค่าเทรสโฮลด์จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของการให้บริการสำหรับผู้ใช้งานที่มีความสำคัญอันดับแรก (Primary user (PU)) และคุณลักษณะของผู้ใช้งานอันดับรอง (Secondary user (SU)) ที่ไม่มีใบอนุญาต เช่นสำหรับการให้บริการสำหรับงานอันดับรองที่มีกำลังส่งต่ำ (Lower power secondary service) ค่าเทรสโฮลด์ก็ควรถูกเลือกให้สูง นอกจากนี้คุณลักษณะด้านความถี่ของตัวรับของผู้ใช้งานที่มีความสำคัญอันดับแรก (Primary user (PU)) ตัวส่งก็เป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกค่าเทรสโฮลด์ด้วย ซึ่งหากตัวรับของผู้ใช้งานที่มีความสำคัญอันดับแรก (Primary user (PU)) มีฟรอนต์เอนด์ฟิลเตอร์ (Front end filter) ที่ไม่คมชัด หรือตัวส่งสัญญาณของผู้ใช้งานอันดับรอง (Secondary user (SU)) มีการส่งสัญญาณเลยมาช่วงความถี่ที่ติดกัน ในกรณีเช่นนี้เราต้องเพื่อให้มีการด์แบนด์ (Guard band) ที่แต่ละข้างของความถี่ของสเปกตรัมสัญญาณส่งของผู้ใช้งานที่มีความสำคัญอันดับแรก (Primary user (PU)) หากใช้การด์แบนด์กว้างไป นั่นทำให้เหลือแบนด์วิดท์ หรือช่องสัญญาณที่ไม่ใช้งานจริงๆ น้อยลง ดังนั้น การด์แบนด์ต้องถูกกำหนดค่าให้เหมาะสม

เราสามารถกำหนดความถี่ความถี่ของช่วงความถี่ได้สองระดับ ระดับแรกก็คือระดับของช่องสัญญาณหนึ่งๆ (Channel level) อีกระดับหนึ่งก็คือ ในระดับของช่วงแถบความถี่ (Band level) [2] ในแบบแรกการวัดตรวจสอบสัญญาณก็เป็นไปสำหรับแต่ละช่องสัญญาณ อาจจะมีค่าที่เหมือนหรือแตกต่างกันแล้วแต่จะกำหนด ซึ่งอาจจะกระจายไปที่ช่วงความถี่ต่างๆ ซึ่งกำหนดให้เป็นสัดส่วนของช่องสัญญาณที่ยังว่างอยู่ ส่วนในแบบที่สอง เวลาวัดเราจะกำหนดช่วงความถี่ เริ่มจากความถี่เริ่มต้น (Start frequency) และความถี่สุดท้าย (Stop frequency) และ ความถี่ความถี่ของแต่ละความถี่ของสเต็ปการวัด (Step width) หรือเรียกเป็นความละเอียดของความถี่ (Frequency resolution)

ซึ่งไม่ว่าจะเป็นวิธีใดๆ ระดับของช่องสัญญาณหนึ่งๆ หรือระดับของช่วงแถบความถี่ ค่าเมตริก (Metric) ที่สำคัญก็คือแบนด์วิดท์ ทั้งหมดที่เป็นช่วงความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานหรือทีวีไวท์สเปซ (TVWS) และค่าขนาดบล็อก (Block size) ที่ใหญ่ที่สุดของไวท์สเปซ นอกจากนี้ยังมี การกระจายของความถี่ (Frequency distribution) ของทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ดูว่าทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ส่วนมากอยู่ที่ช่วงความถี่ใด ก็เป็นคุณลักษณะที่สำคัญเช่นกัน

จากการศึกษาจากประเทศต่างๆ [19]-[36] ช่วงความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานหรือทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ย่านความถี่ UHF จาก 30 ถึง 100MHz แต่ละประเทศก็มีการจัดสรรคลื่นความถี่ที่แตกต่างกัน ของประเทศไทยคลื่นความถี่ที่มีอยู่จำกัดการใช้งาน รูปแบบการส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลใช้คลื่นความถี่ย่าน Band III (174-230 MHz) และ Band IV/V (470-862

MHz) สำหรับให้บริการในการส่งโทรทัศน ย่านความถี่นี้โดยข้อกำหนดสากลจะใช้สำหรับในการส่งโทรทัศนโดยเฉพาะ อย่างไรก็ตามความต้องการ ใช้ความถี่ย่านดังกล่าว เป็นความต้องการอย่างมากของการให้บริการด้านอื่น ๆ โดยเฉพาะด้านสื่อสาร โทรคมนาคม และผู้ประกอบการด้านเทคโนโลยี

1.4.) การหาระดับค่าเทรชโฮลด์ (Threshold) แบบปรับเปลี่ยน

วิธีการการตั้งระดับค่าเทรชโฮลด์แบบปรับเปลี่ยนได้ ที่เราใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาวิจัยในโครงการนี้ เราคำนวณหาระดับค่าเทรชโฮลด์ โดยใช้พื้นฐานจากค่าความน่าจะเป็นในการให้สัญญาณเตือนที่ผิดพลาด (Probability of false alarm (Pfa)) ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า โดยแบ่งเป็นวิธีการต่างๆ สามวิธีดังต่อไปนี้

- 1) วิธีการโดยใช้เกณฑ์เนย์แมนและเพียร์สัน (Neyman-Pearson (NP) Criterion) [37]
- 2) วิธีการแบบเอฟซีเอ็มอี (Forward Consecutive Mean Excision (FCME) Method) [38],[39]
- 3) วิธีการแบบแอลเอดี (Localization Algorithm Based on Double-Thresholding (LAD)) [40],[41]

1.4.1) วิธีการโดยใช้เกณฑ์เนย์แมนและเพียร์สัน (Neyman-Pearson (NP) Criterion) [37]

วิธีการนี้ใช้กฎเกณฑ์การตัดสินใจ (Decision rule) เพื่อให้ได้ค่าความน่าจะเป็นในการตีเทคหรือตรวจจับนั้นมีความมากที่สุดหรืออีกนัยหนึ่งก็คือมีโอกาที่จะให้ค่าทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ที่ได้มีความถูกต้องมากที่สุด โดยมีเงื่อนไขคือ Pfa ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า โดยการตัดสินใจนั้นจะถูกทำในโดเมนความถี่ (Frequency domain) เนื่องจากสะดวกเพราะสัญญาณที่เราวัดได้โดย RF Explorer การตัดสินใจเป็นการตัดสินใจระหว่างสมมติฐานสองสมมติฐาน H_0 และ H_1 ซึ่ง H_0 และ H_1 มีความหมายดังต่อไปนี้

H_0 เป็นสมมติฐานในกรณีที่สัญญาณที่เราจับได้มีแต่สัญญาณรบกวนไม่มีสัญญาณคลื่นความถี่โทรทัศน ส่วน H_1 เป็นสมมติฐานในกรณีที่สัญญาณที่เราจับได้มีสัญญาณที่ต้องการส่งคือสัญญาณคลื่นความถี่โทรทัศนและสัญญาณรบกวน ดังแสดงในสมการดังต่อไปนี้

$$H_0: R(n) = W(n), n = 0, 1, \dots, M - 1, \quad (2.1)$$

$$H_1: R(n) = S(n) + W(n), \quad (2.2)$$

โดยที่

- $W(n)$ เป็นสัญญาณรบกวนที่มีฟังก์ชันการแจกแจง (Distribution function) หรือการกระจายของโอกาส (Probability distribution) แบบเกาส์ (Gaussian distribution) หรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าแบบปกติ (Normal distribution) หรือ Additive white Gaussian

noise (AWGN) มีค่าความหนาแน่นกำลังของสเปกตรัม (Power spectrum density (PSD)) เป็นค่าคงที่ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และค่าความแปรปรวน (Variance) เท่ากับ σ_W^2

- $S(n)$ เป็นส่วนของสัญญาณที่ต้องการส่ง (Desired signal) ที่รับได้ที่ตัวรับสัญญาณหรือตัววัดสัญญาณหลังจากผ่านช่องสัญญาณ (Channel)
- n เป็นดัชนีบอกตำแหน่งความถี่ต่างๆ (Frequency sample index)
- M เป็นจำนวนความถี่ที่สนใจทั้งหมด (Frequency of interest)

โดยไม่สูญเสียคุณลักษณะทั่วไป (Without loss of generality) $S(n)$ และ $W(n)$ ถูกสมมติให้อิสระต่อกันไม่ขึ้นอยู่กันและกัน (Independent of each other) ดังนั้น $R(n)$ ภายใต้สมมติฐาน H_0 สามารถประมาณให้เป็นตัวแปรสุ่ม (Random variable) ที่มีฟังก์ชันการแจกแจงหรือการกระจายของโอกาสแบบเกาส์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และค่าความแปรปรวน (Variance) เท่ากับ σ_W^2 ดังนั้นขนาดของสเปกตรัมสัญญาณ $|R(n)|$ ภายใต้สมมติฐาน H_0 จึงสามารถประมาณให้เป็นตัวแปรสุ่ม (Random variable) ที่มีฟังก์ชันการแจกแจงหรือการกระจายของโอกาสแบบเรเลย์ห์ (Rayleigh) ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative density function (CDF)) ของตัวแปรสุ่มแบบเรเลย์ห์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$F(y) = \Pr\{R(n) \leq y\} |H_0\} = 1 - \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_W^2}\right). \quad (2.3)$$

ค่าความน่าจะเป็นในการให้สัญญาณเตือนที่ผิดพลาดหรือ Pfa สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\Pr\{R(n) > T\} |H_0\} = \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_W^2}\right). \quad (2.4)$$

ดังนั้น T สามารถถูกคำนวณโดย

$$T_{NP} = \sqrt{-2\sigma_W^2 \ln(Pfa)}. \quad (2.5)$$

วิธีการนี้ถือว่าเป็นวิธีแบบกึ่งอำพราง (Semi-blind) เนื่องจากต้องการความรู้รายละเอียดเกี่ยวกับสัญญาณที่ส่งมา เพียงแต่ต้องการขนาดความแรงของสัญญาณและกำลังหรือค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเท่านั้น

1.4.2) วิธีการเอฟซีเอ็มอี (Forward Consecutive Mean Excision (FCME)) [38],[39]

วิธีการ FCME จะคำนวณค่าเทรสโพลด์แบบคำนวณวนซ้ำ (Iterative approach) โดยอัลกอริทึมจะเริ่มจากการจัดเรียงตัวอย่างสัญญาณใหม่โดยเริ่มจากส่วนตัวอย่างที่มีพลังงานน้อยสุดเรียงไปจนถึงตัวอย่างสัญญาณโดยเริ่มจากส่วนตัวอย่างที่มีพลังงานมากที่สุด โดยที่ n เทอมที่เล็กที่สุดของเซตที่เรียงลำดับจะถูกเลือกเป็นเซตเริ่มต้นซึ่งจะถูกสมมติให้เป็นอิสระจากสัญญาณแทรกสอด

(Free of interference) นั่นคือเป็นเซตที่สะอาด (Clean set) ซึ่งเซตเริ่มต้นนี้จะมีขนาดประมาณ 10% ของเซตข้อมูลทั้งหมด ซึ่งได้แก่เซต Q โดยมีค่าเฉลี่ยขนาดสัญญาณในเซต Q นี้เท่ากับ

$$\bar{R} = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q |R_i|, \quad (2.6)$$

วิธีการ FCME นี้เพิ่มส่วนตัวอย่างของสัญญาณ R_i , นั่นคือเพิ่มในส่วน $Q+1, \dots, N$ ไปยัง the set Q ครอบคลุมที่เงื่อนไขเป็นไปตามสมการดังนี้

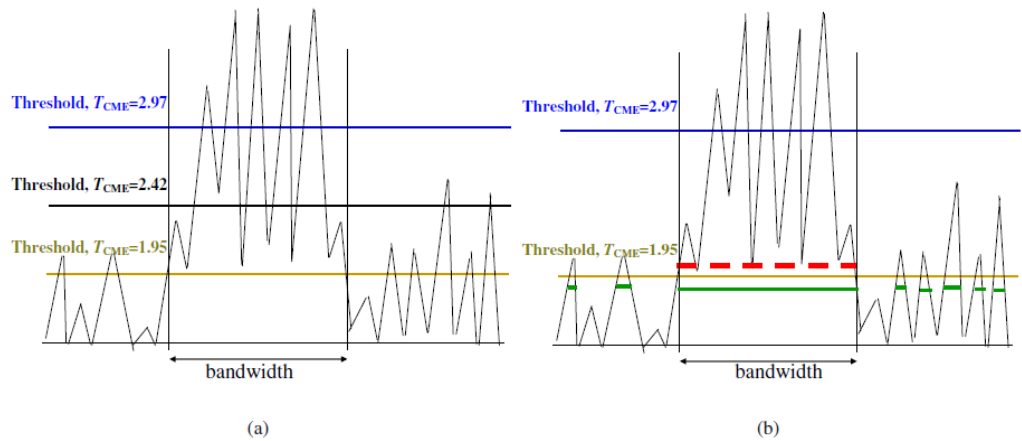
$$|R_i| < t_h = T_{\text{CME}} \bar{R}, \quad (2.7)$$

โดย T_{CME} สามารถถูกคำนวณโดย

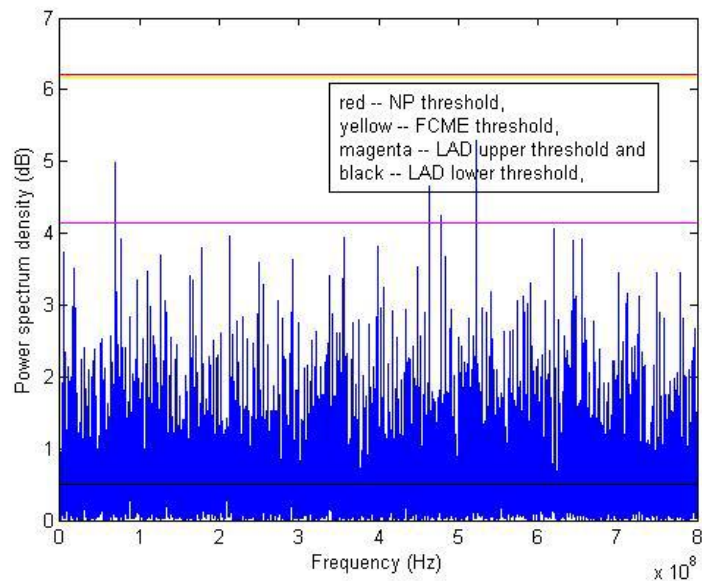
$$T_{\text{CME}} = \sqrt{\frac{4}{\pi}} \sqrt{-\ln(\text{Pfa})}. \quad (2.8)$$

1.4.3) วิธีแอลเอดี (Localization Algorithm Based on Double-Thresholding (LAD))

ดังที่อธิบายข้างต้น ค่าเทรชโอล์ดนั้นขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์เทรชโอล์ด T_{CME} ที่ใช้ หากค่านี้ถูกตั้งให้สูงเกินไป สัญญาณที่ต้องการตรวจสอบเช่นสัญญาณคลื่นความถี่โทรศัพท์จะถูกแยกส่วนโดยค่าเทรชโอล์ดนี้ ในทางกลับกันหากค่านี้ถูกตั้งให้ต่ำเกินไป เป็นไปได้ว่าสัญญาณรบกวน อาจจะอยู่เหนือค่าเทรชโอล์ดซึ่งทำให้เกิดการตรวจจับหรือดีเทคที่ผิดพลาด (False detection) เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเหล่านี้ วิธีการ LAD นี้ซึ่งใช้ค่าเทรชโอล์ดสองค่าได้แก่ค่าเทรชโอล์ดสูงและค่าเทรชโอล์ดต่ำ (Upper threshold and lower threshold) ดังแสดงในรูปตัวอย่างในรูปที่ 2.4 จะเห็นจากรูปที่ 2.4 a) เมื่อเราใช้ค่าเทรชโอล์ดพารามิเตอร์ที่มีค่าสูงเช่น 2.97 เราจะสามารถจับส่วนของสัญญาณได้น้อยที่สุดคือเพียง 5 จุดตัวอย่างหรือแซมเปิ้ล (Samples) นั่นหมายถึงสัญญาณคลื่นความถี่โทรศัพท์ถูกแยกส่วน เพราะความเป็นจริงไม่ใช่เพียง 5 Samples แต่หากเราใช้ค่าเทรชโอล์ดพารามิเตอร์ที่มีค่าต่ำเช่น 1.95 ค่าสัญญาณรบกวนอยู่เหนือค่าเทรชโอล์ดซึ่งทำให้เกิดการตรวจจับหรือดีเทคที่ผิดพลาด ดังนั้นวิธีการ LAD ซึ่งใช้ค่าเทรชโอล์ดสองค่าได้แก่ค่าเทรชโอล์ดสูงและค่าเทรชโอล์ดต่ำดังแสดงในรูปที่ 2.4 b) ช่วยให้ตรวจจับได้ถูกต้องมากขึ้น รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่มีการกระจายแบบเกาส์ (AWGN) พร้อมทั้งเทรชโอล์ดที่คำนวณจากวิธี NP Criterion และวิธี FCME และวิธี LAD ตามลำดับ



รูปที่ 2.4: a) ตัวอย่างค่าเทรชโฮลด์ต่างๆ กันโดยคำนวณจากวิธี FCME และ b) ตัวอย่างสัญญาณถูกตรวจจับโดยใช้ค่าเทรชโฮลด์สองค่าโดยวิธี LAD



รูปที่ 2.5: สัญญาณรบกวนที่มีการกระจายแบบเกาส์ (AWGN) พร้อมทั้งเทรชโฮลด์ที่คำนวณจากวิธี FCME และวิธี LAD

2) ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีการศึกษาในประเทศต่างๆ ที่เกี่ยวกับการวัดและประเมินผลปริมาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ได้เปิดเผยว่ามีปริมาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) มาก และมากพอสำหรับใช้งานของผู้ใช้รอง จากคลื่นความถี่ 30 MHz ถึงหลายร้อย MHz ซึ่งผลลัพธ์ในเชิงปริมาณ อาจแตกต่างกันไปบ้างในแต่ละประเทศ เนื่องจากการจัดการคลื่นความถี่และกฎเกณฑ์ที่ต่างกัน [19]-[36] อย่างไรก็ตาม มีข้อสังเกตร่วมกัน ที่

ได้จากการศึกษาเหล่านี้ ที่เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อปริมาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ที่วิเคราะห์ได้จากผลการวัดคลื่นสัญญาณ ดังสามารถที่จะสรุปได้ดังต่อไปนี้

2.1) วิธีการกำหนดค่า แบบอนุรักษ์ (Conservative settings) หรือแบบผ่อนคลาย (Relaxed settings) [27],[33]

วิธีการกำหนดค่าแบบอนุรักษ์ ก็จะกำหนดค่าตามกฎที่ตั้งไว้ตามแต่ละประเทศอย่างเข้มงวด เช่นในอเมริกาก็จะกำหนดค่าตามคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสารหรือเอฟซีซี (FCC) ก็จะให้ได้ปริมาณของทีวีไวท์สเปซ (TVWS) น้อยกว่าวิธีการกำหนดค่าแบบ ผ่อนผัน ซึ่งจะกำหนดค่าต่างๆ เช่นระดับค่าเทรสโฮลด์ไว้สูงกว่า ซึ่งดังที่อธิบายไว้ข้างต้น ระดับค่าเทรสโฮลด์มีผลอย่างมากในการวัดตรวจจับทีวีไวท์สเปซ (TVWS) เช่นเมื่อตั้งระดับค่าเทรสโฮลด์ไว้ที่ -114dBm เท่ากันหมด ซึ่งเป็นการกำหนดค่าแบบอนุรักษ์ และประเมินหาค่าปริมาณของทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ในแต่ละพื้นที่ ผลก็คือแทบจะไม่มีปริมาณของทีวีไวท์สเปซ (TVWS) Lopez-Benitez และทีมงานได้ศึกษาและตั้งข้อสังเกตว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระดับค่าเทรสโฮลด์ ประมาณ 5dBm หรือแม้แต่ต่ำกว่า ทำให้ค่าปริมาณความถี่หรือสเปกตรัมที่ถูกใช้งาน หรือกล่าวในทางตรงกันข้าม ปริมาณของความถี่หรือสเปกตรัมที่ว่างหรือทีวีไวท์สเปซ (TVWS) มีเปลี่ยนแปลง และแปรเปลี่ยนอย่างมาก ตั้งแต่ 100% ถึง 0% [37]

2.2) วัดในอาคาร (Indoor) หรือนอกอาคาร (Outdoor) [29],[34]

การวัดในอาคารหรือนอกอาคาร ก็มีผลต่อปริมาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ที่วัดได้ ซึ่งการวัดในอาคารจะได้ปริมาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ที่มากกว่าการวัดนอกอาคาร เนื่องจากคลื่นสัญญาณ ถูกลดทอนโดยอาคาร

2.3) พื้นที่บริเวณที่ใช้ในการวัด บริเวณนอกเมืองชนบทหรือพื้นที่ที่เข้าถึงยาก (Rural area) หรือบริเวณในเขตเมือง [23], [33]

บริเวณชนบทมีปริมาณ TVWS ที่มากกว่าในเมือง เนื่องจากในเมืองหรือจังหวัดมีจำนวนสถานีกระจายสัญญาณทีวี (TV broadcasting stations) มากกว่า ซึ่งแน่นอนทำให้สัญญาณ TV นั้นครอบคลุมได้มากกว่าในบริเวณชนบทยากที่จะเข้าถึง

2.4) การแปรเปลี่ยนตามภูมิภาค (Regional variations) [31]

ได้มีการศึกษาของ Van de Beek และคณะ เกี่ยวกับการเปรียบเทียบปริมาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ตามแต่ละภูมิภาค [31] พวกเขาได้เปรียบเทียบผลจากการศึกษาปริมาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ในบางประเทศในทวีปยุโรป และที่ประเทศอเมริกา ผลจากการคำนวณค่าเฉลี่ยของบางประเทศในทวีปยุโรป ได้ค่าประมาณ 56% ของคลื่นความถี่โทรทัศน์ทั้งหมดที่ไม่ได้ใช้งานหรือเป็นปริมาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) นั่นเอง ขณะเดียวกัน ที่ประเทศอเมริกามีค่าเฉลี่ยปริมาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) มากถึง 79% นอกจากนี้พวกเขายังได้ตั้งข้อสังเกตอีกว่า โดยทั่วไปแล้ว ในพื้นที่ที่มีการพัฒนาแล้วจะมีปริมาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) น้อยกว่าในพื้นที่ที่กำลังพัฒนา เนื่องจากปริมาณของสถานีกระจายคลื่นโทรทัศน์ที่แตกต่างอย่างมาก

จะเห็นได้ว่า โดยทั่วไประดับค่าเทรสโฮลด์ที่นักวิจัยส่วนใหญ่เลือกใช้ ไม่ว่าจะเป็นค่าแบบอนุรักษ์ ที่ถูกกำหนดไว้โดย FCC ที่ระดับ -114dBm ซึ่งเป็นค่าที่ตั้งไว้เพื่อป้องกันในกรณีที่แย่มากที่สุด (Worst case) ของช่องสัญญาณที่มีการลดลงหรือเพิ่มขึ้นของระดับสัญญาณอย่างทันทีทันใดหรือที่เราเรียกกันว่าเฟดดิ้ง (Fading) ซึ่งในกรณีที่แย่มากที่สุดนั้นคือเราไม่มีเส้นทางตรงหรือแนวเส้นสายตาของสัญญาณจากตัวส่งมายังตัวรับ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเฟดดิ้งในกรณีนี้เป็นฟังก์ชันการแจกแจงหรือกระจายของโอกาสแบบเรเล่ห์ และถูกเรียกว่าเรเล่ห์เฟดดิ้ง (Rayleigh fading) ซึ่งช่องสัญญาณก็จะถูกเรียกว่าช่องสัญญาณเรเล่ห์เฟดดิ้ง (Rayleigh fading channel)

หรือบางทีนักวิจัยก็จะเลือกใช้ค่าค่าเทรสโฮลด์จากประสบการณ์ (Rule of Thumb) เช่นค่าที่ประมาณที่ใช้กันอยู่ทั่วไปอันได้แก่ -100dBm [31] ในโครงการนี้นอกจากเราใช้ค่าเทรสโฮลด์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปอันได้แก่ -100dBm เป็นค่าเส้นอ้างอิง (Baseline) ไว้เปรียบเทียบกับค่าเทรสโฮลด์จากวิธีที่เราวิจัยและนำเสนอ โดยเมื่อใช้ค่าเทรสโฮลด์แบบตายตัว -100dBm โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลจากการวัดภายในอาคารซึ่งสัญญาณคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ได้ถูกบดบังอย่างสุดมาก่อนที่จะมาถึงสายอากาศของระบบวัดก็จะเกิดปรากฏการณ์บดบังเหมือนเงาบดบังที่เรียกว่า ซาโดว์อิ้งเอฟเฟกต์ (Shadowing effect) ทำให้การตัดสินใจจำนวนปริมาณของทีวีไวท์สเปซ (TVWS) เป็นไปอย่างไม่ถูกต้องนัก

เราวิจัยศึกษาเชิงลึกในการหาค่าเทรสโฮลด์ที่เหมาะสมด้วย เนื่องจากการตั้งค่าเทรสโฮลด์ที่เป็นค่าตายตัว (Fixed threshold setting) เพื่อใช้ในการตัดสินใจว่าเป็นช่องว่าง

หรือทีวีวีเอส (TVWS) หรือมีสัญญาณโทรทัศน์ตลอดทั่วทุกช่วงความถี่โทรทัศน์นั้นไม่เหมาะสม เนื่องจากคุณสมบัติของสัญญาณรบกวน (Noise) เช่นค่าความหนาแน่นของกำลังสเปกตรัม (Power spectral density (PSD)) หรือค่าความแปรปรวน (Variance) นั้นมีค่าไม่คงที่ตลอดทั้งช่วงความถี่โทรทัศน์ (Noise fluctuation) หากเราใช้ค่าเทรสโฮลด์ที่เป็นค่าเดียวตายตัวตลอดทั่วทุกช่วงความถี่โทรทัศน์นั้น ทำให้เกิดการตีเทคหรือตรวจจับที่ผิดพลาดคลาดเคลื่อน อันส่งผลให้จำนวนช่องความถี่โทรทัศน์ที่ว่างหรือทีวีวีเอส (TVWS) ที่คำนวณได้ไม่ถูกต้อง ดังนั้นเราศึกษาวิจัยหลากหลายวิธีต่างๆ โดยใช้ความรู้พื้นฐานจากการประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) และการประมวลผลสัญญาณแบบสุ่ม (Stochastic signal processing) มาคำนวณหาค่าเทรสโฮลด์ที่เหมาะสมกว่า นั่นคือการตั้งระดับค่าเทรสโฮลด์แบบปรับเปลี่ยนได้ ดังที่อธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องไว้ข้างต้น

บทที่ 3 [ระเบียบวิธีวิจัย]

1) วิธีการและขั้นตอนการดำเนินการวิจัยและพัฒนา

ขั้นตอนการดำเนินโครงการ สามารถแบ่งเป็นสามส่วนหลักดังต่อไปนี้

1.1) แผนงานชุดที่ 1: ศึกษาและสำรวจ (Work Package 1: Conduct a Survey)

ในส่วนของแผนการดำเนินงานที่หนึ่ง จะศึกษาวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ในพื้นที่ต่างๆ เพื่อให้ได้ภาพรวมของการใช้คลื่นความถี่ อันจะเป็นพื้นฐานต่อการทำ ทิวทัศน์สเปซ (TVWS) ของประเทศ โครงการนี้สำรวจการใช้คลื่นในท้องที่ตัวอย่าง จากพื้นที่

- 1) ท้องที่หนาแน่นในเขตกรุงเทพมหานคร (Urban area)
- 2) ท้องที่ชุมชน ในเขตเมือง ต่างจังหวัด (Suburban area)

ซึ่งทั้งสองพื้นที่ เป็นการวางแผนการขยายสเปกตรัมใช้งานจากคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานมาช่วยลดโหลดที่มีอยู่มากในเครือข่าย Wi-Fi หรือระบบโทรศัพท์มือถือเซลลูลาร์ (Cellular) ไม่ว่าจะมาเป็นมาตรฐานโทรศัพท์มือถือในยุคที่ 3 (3G) หรือยุคที่ 4 (4G)

- 3) ท้องที่ชนบทห่างไกลเข้าถึงยาก (Rural area)

เพื่อการขยายการใช้งานบรอดแบนด์อินเทอร์เน็ตในพื้นที่ที่ยังไม่มีการเข้าถึงหรือพื้นที่ที่เข้าถึงเป็นตัวเลือกใหม่สำหรับเชื่อมต่อเครือข่ายหลัก (Backhaul connection) ที่มีการราคาถูกกว่าการเชื่อมต่อโดยใช้ใยแก้วนำแสง ดาวเทียมหรือระบบสายแมกซ์

จากผลการสำรวจและวิเคราะห์ เราจะสามารถเข้าใจถึงพฤติกรรมการใช้คลื่นความถี่กิจการพื้นที่ตัวอย่างทั้งสามประเภท ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการจัดทำแผนแม่บทการจัดคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ให้มีความเหมาะสมและประสิทธิภาพ เนื่องด้วยโครงการนี้ ต้องการศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิค จึงไม่ควรแสวงหาพื้นที่ ที่ห่างไกลมากจนเกินความจำเป็น เราจึงกำหนดคุณสมบัติของพื้นที่ศึกษาดังต่อไปนี้

- เป็นพื้นที่ไม่เหมาะสมกับ เชื่อมโยงโดยคลื่นความถี่สูง อันเนื่องจากภูมิประเทศ ที่ไม่เอื้อต่อโครงข่ายประเภทอื่น

- เป็นพื้นที่ที่การเดินทางเข้าถึงเพื่อการทดลอง ไม่เสียเวลาและ เสียทรัพยากรจนเกินไป
- เป็นพื้นที่ที่มีความตอบสนองจากบุคลากรในพื้นที่ เพื่อความสำเร็จของโครงการนำร่อง

รายละเอียดของการดำเนินงานสามารถจำแนกได้ดังนี้

- ศึกษาและกำหนดขอบเขตของพื้นที่เป้าหมาย
- สำรวจตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ในพื้นที่ตัวอย่าง
- วิเคราะห์และสรุปผลผลการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ในพื้นที่ตัวอย่าง

พื้นที่ตัวอย่างที่เลือกใช้ในโครงการนี้ ที่จะดำเนินการในแผนงานการศึกษาและพัฒนาระบบการตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ มีดังนี้

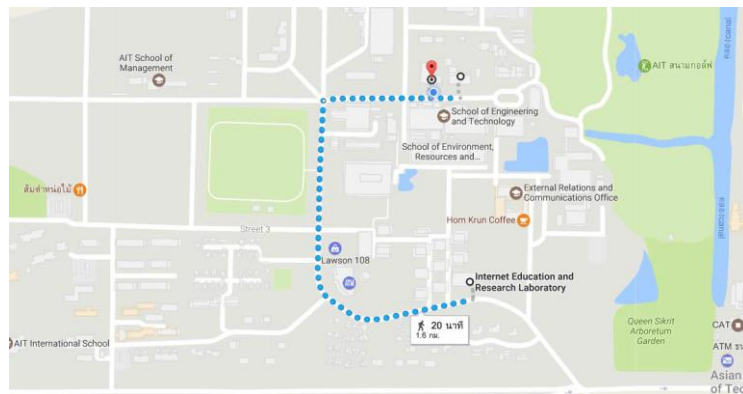
- 1) เขตบางรัก (เพื่อความสะดวกการตรวจวัดถูกดำเนินการในที่พักอาศัยของผู้ร่วมโครงการ) ซึ่งเป็นตัวอย่างที่สะท้อนถึงท้องที่หนาแน่น (Urban area) ในกรุงเทพมหานครดังแสดงในรูปที่

3.1



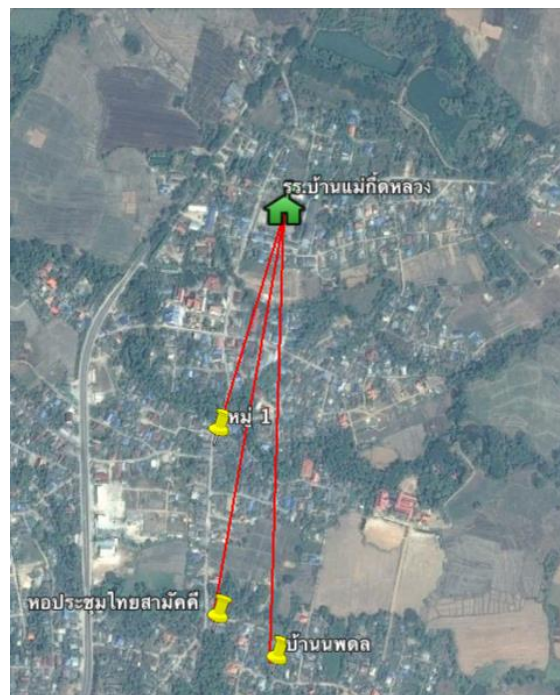
รูปที่ 3.1: พื้นที่ในกรุงเทพมหานคร สะท้อนถึงท้องที่หนาแน่น (Urban area)

ส่วนท้องที่ชุมชนในเขตเมือง ต่างจังหวัด (เพื่อความสะดวกเราเลือกห้องปฏิบัติการอินเทอร์เน็ตเพื่อการศึกษาและวิจัย (internet Education and Research Laboratory (intERLab)) และ Telecommunications building สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย จังหวัดปทุมธานีในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2: พื้นที่ในสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (เอไอที)

- 2) ในส่วนพื้นที่ที่ยังไม่มีการเข้าถึงหรือพื้นที่ที่เข้าถึงยาก เราจะทดสอบในพื้นที่หมู่บ้านไทยสามัคคี ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตากและหมู่บ้านใกล้เคียง ได้แก่ บ้านผู้ช่วยผู้ใหญ่บ้าน (บ้านนพดล) โรงเรียนบ้านแม่กีดหลวงกัญไชยมิตรภาพที่ 182 บ้านแม่กีดหลวงบ้านไทยสามัคคี หมู่ที่ 1 ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด บ้านไทยสามัคคี หมู่ที่ 9 ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด และ บ้านใหม่ริมเมย หมู่ที่ 10 ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เนื่องจากทาง intERLab ได้มีการทำโครงข่ายไร้สายแบบเมช (Wireless mesh network (WMN)) ไว้อยู่แล้ว ซึ่งจะเป็นพื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบในแผนงานชุดที่ 3 อันได้แก่ การทดสอบและติดตั้งระบบสื่อสารต้นแบบในพื้นที่เป้าหมาย (System deployment) ด้วย



รูปที่ 3.3: พื้นที่ที่ยังไม่มีการเข้าถึงหรือพื้นที่ที่เข้าถึงยากที่อำเภอแม่สอดจังหวัดตาก

1.2) แผนการดำเนินงานที่ 2: ศึกษาและพัฒนาระบบต้นแบบที่ใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ (Work Package 2: Research and Development)

ในการศึกษาและพัฒนาระบบต้นแบบที่ใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์หรือทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ระบบต้นแบบนี้จะถูกออกแบบและพัฒนาภายในสถาบันเอไอที ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ ได้แก่ ระบบตรวจวัดและจัดทำฐานข้อมูลของคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์และระบบเครือข่ายความเร็วสูงผ่านคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์

1.2.1) ศึกษาและพัฒนาระบบต้นแบบระบบตรวจวัดและจัดทำฐานข้อมูลของคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์

เนื่องด้วยคลื่นความถี่โทรทัศน์ มีการจัดสรรและมอบใบอนุญาตให้แก่ผู้ประกอบการทั้งภาครัฐและเอกชน (Licensed users) เพื่อประกอบกิจการโทรคมนาคม เพื่อเป็นการป้องกันการใช้งานคลื่นความถี่ทับซ้อน (Interference) กับกิจการเหล่านั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการตรวจวัดและระบุคลื่นความถี่ที่ไม่ได้ถูกใช้งานหรือทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ในพื้นที่ต่างๆ โดยผลการตรวจวัดนั้นจะต้องมีการจัดทำเป็นฐานข้อมูลกลางเพื่อใช้ในการตัดสินใจนำความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่ได้ถูกใช้เหล่านั้นไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ

ระบบต้นแบบที่ใช้ระบบตรวจวัดและจัดทำฐานข้อมูลของคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์จะแบ่งเป็นสองระบบด้วยกันดังต่อไปนี้

- 1) ระบบการวัดโดยเคลื่อนที่ (Mobile measurements) เพื่อสามารถเก็บข้อมูลหลายๆ ตำแหน่งในแต่ละพื้นที่อย่างต่อเนื่อง
- 2) ระบบการวัด ณ ตำแหน่งตายตัว (Fixed location or static measurements) ซึ่งในแต่ละพื้นที่ที่เราจะวัดข้อมูลได้ละเอียดมากขึ้นและยังสามารถที่จะวัดในตำแหน่งความสูงต่างๆ กันด้วย

ในตำแหน่งความสูงต่างๆ กันหรือตำแหน่งของอาคารในห้องต่างๆ กันทำให้เราสามารถประเมินค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญตัวหนึ่งที่เรียกว่าค่าฮิดเดนโนดมาร์จิ้น (Hidden node margin (HNM)) ซึ่งนิยามว่าเป็นพารามิเตอร์บอกปริมาณความแตกต่างระหว่าง 1) สัญญาณโทรทัศน์ณ ตำแหน่งที่วัด (ที่ความสูงต่างๆ กันหรือห้องต่างๆ กัน) ที่เป็นไปได้จะถูกแทรกสอดรบกวน (Interfere) อันสืบเนื่องจากเส้นทางการเคลื่อนที่ของสัญญาณโทรทัศน์ถูกบดบังอย่างสุม ทำให้เกิดปรากฏการณ์ชาโดว์อิงเอฟเฟกต์ (Shadowing effect) และ 2) สัญญาณที่แท้จริง ณ ตำแหน่งของสายอากาศ ซึ่งค่า HNM นี้จะเป็นตัวบอกถึงความต้องการในการป้องกันไม่ให้อุปกรณ์เทคโนโลยีวิทยุคิดที่ไม่มี

ใบอนุญาต (Unlicensed cognitive radio (CR) device) นี้ส่งสัญญาณไปแทรกสอดรบกวนกับเครื่องรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล ในทางปฏิบัติของการวัดเราจะวัดกำลังของสัญญาณ (Signal power) ที่ณ ตำแหน่งบนอาคาร (Rooftop level) และ ที่ชั้นอื่นๆ และคำนวณความแตกต่าง ซึ่งค่า HNM สามารถถูกคาดคะเนล่วงหน้าได้ว่าการแปรผันตามความสูงของอาคารที่เราไปวัดและสภาพแวดล้อมของตัวรับด้วย นอกจากนี้ประเภทของพื้นที่ที่มีส่วนด้วย เช่นใน Urban area ที่มีตึกสูงมากๆ ย่อมมีการเปลี่ยนแปลง HNM ที่สม่าเสมอกว่าใน Suburban area และ Rural area

นอกจากพารามิเตอร์ HNM ที่สำคัญต่อการวัด ยังมีพารามิเตอร์อีกสองตัวที่สำคัญและมีผลต่อผลลัพธ์ของการวัด ด้วยนั่นก็คือ ระดับค่าเทรสโฮลด์ (Threshold) หรือระดับค่าเทรสโฮลด์ของการครอบครอง (Occupancy threshold) ซึ่งก็คือค่ากำลังของสัญญาณต่ำที่สุดที่วัดได้โดยอุปกรณ์เทคโนโลยีวิทยุรู้คิด (CR) และถูกใช้เพื่อตรวจจับสัญญาณโทรทัศน์ว่ามีหรือไม่มีในแต่ละช่วง แบนด์วิดท์ในการวัด (Sensing bandwidth) ระดับค่าเทรสโฮลด์ควรที่จะถูกตั้งไว้อย่างเหมาะสม ซึ่งหากเราตั้งค่าไว้สูงเกินไปเราไม่สามารถการตรวจจับสัญญาณคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ก็จะทำให้เราได้ TVWS หรือช่องว่างที่มากเกินความจริง ซึ่งหากเรานำข้อมูลนี้มาประกอบการใช้ในระบบสื่อสารก็จะทำให้เกิดการแทรกสอดของสัญญาณได้ (Interference) เพราะจริงๆ มีสัญญาณคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ แต่เราคิดว่าเป็นทีวีไวท์สเปซ (TVWS) หากเราตั้งค่าไว้ต่ำเกินไปก็จะทำให้เกิดการตีเทคหรือตรวจจับที่ผิดพลาด (False detection) นั่นคือเราตีเทคว่ามีสัญญาณคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์แต่ในความเป็นจริงไม่มี มีแต่สัญญาณรบกวน (Noise signal) โดยทั่วไปค่าเทรสโฮลด์ที่นักวิจัยส่วนใหญ่เลือกใช้ จะใช้ค่าที่ถูกกำหนดไว้โดยคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร เอฟซีซีของรัฐบาลสหรัฐอเมริกา (FCC) ที่ระดับ -114dBm ซึ่งเป็นค่าที่อนุรักษ์นิยม (Conservative) หรือระวังจนเกินไป หรือบางที่นักวิจัยก็จะเลือกใช้ค่าประมาณง่ายๆ จากประสบการณ์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป (Rule of Thumb) เป็นค่าที่ประมาณว่าเหมาะสมเช่น -100dBm ซึ่งในโครงการนี้เราวิจัยศึกษาเชิงลึกเพื่อในการหาค่าเทรสโฮลด์ที่เหมาะสมกว่าด้วย

แบนด์วิดท์ความละเอียดในการวัด (Resolution bandwidth (RBW)) คือค่าของ แบนด์วิดท์ ที่มีผลต่อผลการวัด ถ้าค่ายิ่งน้อยจะได้ผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรงแม่นยำมากขึ้น แต่เวลาในการกวาด (Sweep) ก็จะนานตามไปด้วยเพราะใช้เวลาในการฟิลเตอร์นานกว่า ดังนั้นแบนด์วิดท์ความละเอียดในการวัดเป็นอีกพารามิเตอร์ ที่สำคัญต่อแคมเปญการวัดอีกตัวหนึ่ง โดยปกติค่าช่วงความถี่หรือแบนด์วิดท์ในการวัดที่ใช้จะอยู่ที่ 500 kHz ซึ่งเป็นค่าตามแบบฉบับที่อุปกรณ์เทคโนโลยีวิทยุรู้คิด (Cognitive radio (CR)) ที่ไม่ต้องมีใบอนุญาต สามารถทำกระบวนการตรวจจับสเปกตรัมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ส่วนประกอบของระบบต้นแบบที่ใช้ระบบตรวจวัด

1) ระบบการวัดโดยเคลื่อนที่ (Mobile measurements)

เพื่อสามารถเก็บข้อมูลหลายๆ ตำแหน่งในแต่ละพื้นที่อย่างต่อเนื่องทำให้สามารถวัดได้พื้นที่กว้าง (Large area measurements) โดยระบบประกอบไปด้วยส่วนของฮาร์ดแวร์ (Hardware) ซึ่งทำหน้าที่วัดคลื่นสเปกตรัมที่อยู่บริเวณโดยรอบ และชุดซอฟต์แวร์ (Software suite) ประกอบไปด้วย แอนดรอยด์แอปพลิเคชัน (แอป) (Android App) ด้วยลินุกซ์สคริปต์ (Linux scripts) ซึ่งติดต่อทางไกลไปยังเซิร์ฟเวอร์ (Server) หรือ เครื่องบริการ หรือเครื่องแม่ข่าย ที่คอยจัดการข้อมูลอยู่ทางไกล การวัดคลื่นความถี่นี้มีการระบุพิกัดหรือจีโอ-แท็กกิ้ง (Geo-tagging) เพื่อให้เราทราบข้อมูลตำแหน่งที่เรากำลังวัดได้แม่นยำ นั่นคือเมื่อการวัดถูกทำให้เสร็จสิ้นข้อมูลจะถูกส่งไปเซิร์ฟเวอร์ ซึ่งเซิร์ฟเวอร์ จะประมวลผล วิเคราะห์ และแสดงผลลัพธ์ออกมาเป็นรูปแบบของเว็บเพจ (Web page)

ส่วนประกอบฮาร์ดแวร์มีดังต่อไปนี้

- 1) **RF Explorer** เป็นเครื่องวิเคราะห์คลื่นสเปกตรัมแบบพกพา (Portable spectrum analyzer) มีขนาดเล็กที่เราเลือกใช้เป็นส่วนประกอบหลักในระบบตรวจวัดเนื่องจากให้ผลการวัดได้ค่อนข้างแม่นยำและราคาไม่แพง (ราคาประมาณ 5,500 บาท) ซึ่งถือว่าถูกมากเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมาตรฐานซึ่งมีราคาแพงประมาณหลายแสนถึงหลักล้านบาท



รูปที่ 3.4: เครื่องวิเคราะห์คลื่นสเปกตรัมแบบพกพา RF Explorer

RF Explorer ที่ใช้นี้คือรุ่น Wide Band SUB 1G RF Range (Wideband UHF 240-960 MHz model (WSUB1G)) ซึ่งสามารถวัดคลื่นสัญญาณที่อยู่ในช่วงความถี่ UHF TV band ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 นี้ อุปกรณ์มีคุณลักษณะดังต่อไปนี้

- มีน้ำหนักขนาดเล็กขนาดพกพาเล็กใส่กระเป๋าได้ (Pocket size) 113×70×25 มิลลิเมตร (mm) และเบามาก 185 กรัม (g)
- มีเคสเป็นอลูมิเนียมแข็ง (Solid aluminum metal case)
- ครอบคลุมช่วงคลื่นความถี่ที่มีการใช้งานอย่างมากในย่านต่ำกว่า 6.1 กิกะเฮิรตซ์ (GHz) ในระบบของเราใช้ Sub 1GHz พร้อมกับ Silicon Labs Si4431 receiver chip ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 240 MHz ถึง 960 MHz
- Frequency span: 112 กิโลเฮิรตซ์ (KHz) ถึง 100 MHz โหมดการทำงาน อาจจะเป็นโหมด Peak Max and Hold โหมด Normal โหมด Overwrite และ โหมด Averaging
- ฟรีอัปเดต Firmware ตลอดอายุการใช้งาน (Lifetime)
- High capacity Lipo สามารถทำงานได้ต่อเนื่องถึง 16 ชั่วโมง (hr) ซึ่งเราสามารถชาร์จแบตเตอรี่ผ่านพอร์ตแบบยูเอสบี (Universal serial bus (USB) port) มีหัวคอนเนคเตอร์ไปยังสายอากาศแบบเอสเอ็มเอ (Subminiature version A (SMA) antenna connector) แบบ 50 โอห์ม (Ohm) ค่าช่วงไดนามิก (Dynamic Range) อยู่ที่ -115dBm ถึง 0dBm
- หน้าจอแบบกราฟิกแอลซีดี (Graphics Liquid Crystal Display (LCD)) ความละเอียด 128×64 พิกเซล (Picture element (Pixel)) สามารถเห็นชัดได้ดีเวลาใช้งานภายนอกอาคาร
- มี Backlight ซึ่งทำให้สามารถเห็นชัดได้ดีเวลาใช้งานภายในอาคาร
- มีพร้อมตัวต่อมาตรฐาน Standard SMA 50 Ohm connector และสายอากาศแบบแถบกว้าง (Wideband) Nagoya NA-773 telescopic antenna มีกำลังขยาย (Gain) เท่ากับ 2.15 dBi ความยาวเท่ากับ 40.3 cm มีค่าอัตราส่วนของแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุดของรูปคลื่นนิ่งบนสายนำสัญญาณ (Voltage standing wave ratio (VSWR)) เท่ากับ 1.5:1
- ความละเอียดของค่าแอมพลิจูด (Amplitude resolution): 0.5dBm
- ค่าระดับสัญญาณรบกวน (Average noise level) (typical): -110dBm

- ค่าความเสถียรและความถูกต้องของความถี่ (Frequency stability and accuracy) (typical): $\pm 10\text{ppm}$
 - ค่าความเสถียรและความถูกต้องของค่าแอมพลิจูด (Amplitude stability and accuracy) (typical): $\pm 3\text{dBm}$
 - ค่าความละเอียดของความถี่ (Frequency resolution): 1 kHz
 - ค่าความละเอียดของแบนด์วิดท์ (Resolution bandwidth) (RBW): automatic 2.6 ถึง 600 kHz
- 2) **โทรศัพท์มือถือแอนดรอยด์สมาร์ทโฟน (Android phone)** เราใช้โทรศัพท์มือถือสมาร์ทโฟน (Smart phone) ที่มีระบบปฏิบัติการแบบแอนดรอยด์ (Android) เพื่อในการเก็บข้อมูลในการวัดคลื่นสเปกตรัม (หากกล่าวอย่างเจาะจงนั้นก็คือคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่เราต้องการจะทราบ) และเพื่อในการระบุพิกัดของตำแหน่งที่เรากำลังตรวจวัด เหตุผลหลักที่ใช้สมาร์ทโฟนที่มีระบบปฏิบัติการแบบแอนดรอยด์ เนื่องจากระบบปฏิบัติการแบบแอนดรอยด์มีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากที่สุด และด้วย ซอฟต์แวร์โอเพนซอร์ซ (Open source software) อย่าง Android SDK ทำให้การพัฒนาซอฟต์แวร์ เป็นไปอย่างสะดวกไม่ต้องขออนุญาตใช้แต่อย่างใด ที่สำคัญโทรศัพท์มือถือสมาร์ทโฟนแบบแอนดรอยด์ ที่เลือกใช้งานนั้นจะต้องรองรับโอทีจี (On the go (OTG)) หรือที่เรียกชื่อเต็มๆ ว่า USB on the go พร้อมกับสายเคเบิล OTG
- 3) **สายเคเบิลโอทีจี OTG (OTG Cable)** นี้มีหน้าตามากมายหลายหลากตามแต่ละผู้ผลิตจะออกแบบมาขาย แบบที่แสดงในรูปที่ 3.5 จะเป็นแบบธรรมดาที่คั่นหน้าคั่นตาคันดี ซึ่งอุปกรณ์เสริมตัวนี้เป็นอุปกรณ์เสริมอีกตัวหนึ่งที่ช่วยเพิ่มศักยภาพให้กับโทรศัพท์มือถือสมาร์ทโฟนที่ใช้ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์นี้ ให้กลายเป็น Host Device ขนาดพกพาที่มีประสิทธิภาพสูงได้ ซึ่งโดยปกติแล้วการเชื่อมต่อ USB เข้ากับมือถือโดยตรงจะไม่สามารถทำได้เนื่องจากมือถือส่วนใหญ่ไม่รองรับ และไม่สามารถจ่ายไฟไปยังอุปกรณ์ต่างๆได้ อธิบายง่ายๆ คือสาย USB เส้นนี้มีหน้าที่เสมือนกับเป็นคนกลางที่จะคอยช่วยให้มือถือของเรานั้นสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เสริมภายนอกตัวอื่นๆได้ และช่วยให้สามารถใช้งานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ ใช้งานง่ายและสะดวก ตัวเครื่องโทรศัพท์มือถือสมาร์ทโฟนหรือแท็บเล็ตนั้นจะต้องรองรับ OTG และสามารถจ่ายไฟให้อุปกรณ์ที่ต่อ OTG ได้



รูปที่ 3.5: สายเคเบิล OTG แบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย



รูปที่ 3.6: เครื่องวิเคราะห์คลื่นสเปกตรัมแบบพกพา RF Explorer ต่อกับแอนดรอยด์
สมาร์ตโฟนผ่านสายเคเบิล OTG

เมื่อต่อเครื่อง RF Explorer เข้ากับโทรศัพท์มือถือสมาร์ตโฟนเราจะใช้สายเคเบิล OTG นี้ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งข้างหนึ่งจะเป็นหัวต่อแบบ mini USB-A connector และแบบ micro USB-B connector อีกข้างหนึ่ง

- 4) **สายอากาศ (Antenna)** เพื่อจับสัญญาณที่มาจากทิศทางต่างๆในระนาบ เราจะใช้สายอากาศแบบรอบตัว (Omnidirectional antenna) ในการตรวจวัดที่วีโวลต์สเปซ (TVWS) ถึงแม้ว่ากำลังขยายของสายอากาศ (Antenna gain) จะมีส่วนสำคัญในการตรวจวัด แต่ในกรณีนี้ เราต้องการที่จะค่าสัมพัทธ์ของสัญญาณ (Relative values of signal level) ดังเช่นความแตกต่างในการใช้สเปกตรัม ดังนั้นสายอากาศแบบรอบตัว

ใดๆ สามารถใช้ได้ในการตรวจวัดนี้ แม้ว่าการวัดที่แม่นยำมากขึ้น สามารถทำได้หาก คำนึงถึงกำลังขยายของสายอากาศที่เหมาะสมในแต่ละช่วงความถี่ที่แตกต่างกัน สายอากาศที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้คือ Nagoya Telescopic NA-773 ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งมีการตอบสนองของสัญญาณที่ดีในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 1 GHz

ส่วนประกอบซอฟต์แวร์มีดังต่อไปนี้

1) แอนดรอยด์แอปชื่อว่า “RFtrack” (RFtrack Application)

(สามารถดาวน์โหลดได้ที่ Google play) ใช้ในการอ่านข้อมูลจาก RF Explorer ผ่านสายเคเบิลและใช้ในการวัดพิกัดตำแหน่งและเก็บข้อมูลในหน่วยความจำใน สมาร์ทโฟนโดยใช้ ฐานข้อมูลแบบ เอสคิวแอลไลท์ (SQLite database) ซึ่งเป็น ฐานข้อมูลหรือไลบรารี (Library) ขนาดเล็กที่ได้รับความนิยมอย่างมากกับแอปที่ ทำงานบนสมาร์ทโฟนประเภทต่าง ๆ รูปแบบการทำงานของ SQLite เป็น แบบ Standalone ทำงานอยู่ในแอฟนั้น ๆ SQLite มีโครงสร้างง่ายต่อการจัดเก็บ และนำไปใช้ และไฟล์ที่จัดเก็บนั้นก็มีความเล็กมากเกือบเท่ากับการเก็บข้อมูลจริง เพราะฉะนั้น SQLite database จึงเหมาะสมกับ แอปที่ทำงานบนสมาร์ทโฟนอย่าง ยิ่ง เมื่อมีการติดต่อไปยังอินเทอร์เน็ตข้อมูลก็จะถูกส่งผ่านทางอีเมลล์

ขั้นตอนการติดตั้ง (Setup) เพื่อตรวจวัดมีดังต่อไปนี้

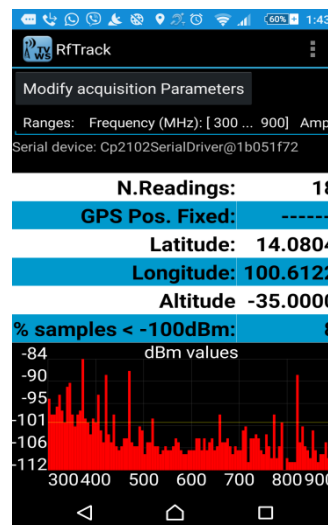
เมื่อต่อสมาร์ทโฟนที่ได้มีการติดตั้งลงแอปที่ชื่อว่า “RFtrack” เข้ากับ RF Explorer เรียบร้อยแล้ว แอป RFtrack ก็จะถูกเปิดขึ้นมาอย่างอัตโนมัติ ผู้ใช้สามารถ ระบุช่วงของความถี่คลื่นที่จะตรวจวัดหรือใช้ค่าเริ่มต้นที่กำหนดไว้ (Default value) ที่ 300 ถึง 900 MHz แม้ว่าสายอากาศที่ให้มาพร้อมกับชุด RF Explorer จะเป็น สายอากาศแบบรอบตัว (Omnidirectional antenna) แต่เราสามารถเลือกใช้ สายอากาศแบบทิศทาง (Directional antenna) ได้ด้วย จากนั้นกระบวนการ ตรวจวัดก็จะถูกเริ่มต้นทันที ทุกๆ ครั้งเมื่อตรวจวัดสลับครั้งเสร็จ จะมีการเตือนโดย ผลิตสัญญาณบี๊ป (Beep) ว่าสมาร์ทโฟนได้รับข้อมูลอย่างถูกต้อง จากนั้นเมื่อการ ตรวจวัดเสร็จสิ้น ผู้ใช้สามารถส่งข้อมูลไปทางอีเมลล์ที่เราวิเคราะห์ข้อมูลอย่างอิสระ หรือไปยังอีเมลล์ที่สามารถประมวลผลข้อมูลอัตโนมัติ รวมทั้งแสดงผล การส่งผ่าน ข้อมูลทางอีเมลล์ทำให้ลดระยะเวลาการส่งผ่านข้อมูลจากเครื่องมือตรวจวัดไปยัง เซิร์ฟเวอร์

2) ฐานข้อมูล (Database)

ในฐานข้อมูลแบบ เอสคิวแอลไลต์ (SQLite database) ที่ใช้นั้นเราจะเก็บชื่อและข้อมูลของการตรวจวัด ชนิดของสายอากาศ ตำแหน่งพิกัดที่ตรวจวัด ละติจูด (Latitude) ลองจิจูด (Longitude) ความสูง (Altitude) จากระดับน้ำทะเล ความเร็ว ถ้าเราไม่สามารถได้ข้อมูลพิกัดจากสัญญาณจีพีเอส (Global positioning system (GPS)) เช่นในอาคารที่สัญญาณ GPS เข้าไม่ถึง ให้ป้อนข้อมูลเหล่านี้เอง

3) ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ (User Interface)

เมื่อเริ่มตรวจวัด ซึ่งอาจจะเป็นแคมเปญ (Measurement campaign) ใหม่หรือที่มีอยู่แล้ว (ซึ่งออกแบบนี้ดีมากเมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ทำให้เราต้องหยุดตรวจวัด เราสามารถตรวจวัดต่อได้ต่อเนื่องโดยไม่ต้องเริ่มใหม่ตั้งแต่ต้น) จากนั้นโปรแกรมก็จะส่งข้อมูลที่วัดได้ไปทางอีเมลล์และเราสามารถตรวจสอบวิเคราะห์ได้ ตัวอย่างหน้าจอส่วนต่อประสานกับผู้ใช้บนแอนดรอยด์สมาร์ทโฟนแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7: ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ (User interface) บนแอนดรอยด์สมาร์ทโฟน

ในส่วนของซอฟต์แวร์วิเคราะห์ทีวีไวท์สเปซ (TWWS analyzer) ประกอบไปด้วย ชุดของสคริปต์คำสั่ง (Scripts) ซึ่งรันบนเซิร์ฟเวอร์ที่ใช้ระบบปฏิบัติการลินุกซ์ (Linux server) เมื่อเซิร์ฟเวอร์รับข้อมูลมา (ทางอีเมลล์) จะวิเคราะห์ผล แสดงผลเป็นกราฟและข้อมูลต่างๆ ดังต่อไปนี้

- แผนที่ความร้อนหรือฮีทแมพ (Heatmap) ซึ่งแกน x แสดงถึงหมายเลขการวัด (Measurement number) แกน Y แสดงถึงความถี่และสี แสดงถึงระดับความแรงของสัญญาณที่ถูกวัดมา
- ค่าทางสถิติ (Statistics) ของจำนวนของการวัดความแรงของสัญญาณที่ต่ำกว่าระดับค่าเทรชโฮลด์ที่ตั้งไว้

กราฟแสดงผลเหล่านี้จะถูกแสดงผลบนเว็บเพจ (Webpage) อย่างอัตโนมัติ

2) ตำแหน่งตายตัว (Fixed location or static measurements)

ซึ่งในแต่ละพื้นที่ที่เราจะวัดข้อมูลได้ละเอียดมากขึ้น (Fine grained measurements) และยังสามารถที่จะวัดในตำแหน่งความสูงต่างๆ กันด้วย โดยระบบมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

- 1) RF Explorer เป็นเครื่องวิเคราะห์คลื่นสเปกตรัมแบบพกพา (Portable spectrum analyzer) ที่ใช้ในการวัดสัญญาณแบบเคลื่อนที่
- 2) ราวสเบอร์รี่พายคอมพิวเตอร์ในบอร์ดเดียว (Raspberry Pi Single-board computer) หรือเรียกสั้นๆ ว่า Pi



รูปที่ 3.8: ราวสเบอร์รี่พายรุ่น Raspberry Pi 3 Model B SBC พร้อมทั้งเคส

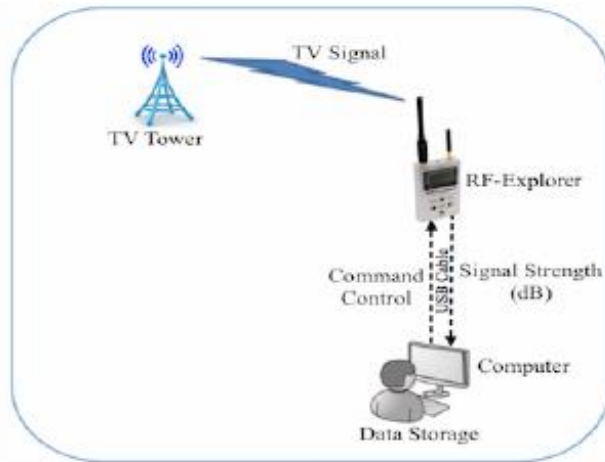
เป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กมากโดยขนาดเท่ากับบัตรเครดิต ได้ถูกพัฒนาในประเทศอังกฤษเพื่อการศึกษา Computer sciences ในโรงเรียน ใช้ระบบ Broadcom BCM2835 บนชิพ (System-on-a-chip (SoC)) ประกอบไปด้วยโปรเซสเซอร์ ARM1176JZF-S 700MHz VideoCore IV GPU และหน่วยความจำแรม (RAM) 512 เมกะไบต์ (Megabytes) ไม่มีฮาร์ดดิสต์หรือโซลิดสเตตไดรฟ์ (Solid state drive (SSD))

แต่จะใช้ SD card ในการบูทระบบ (Booting) และเก็บข้อมูลระยะยาวแทน รัสเบอร์รี่พายมีโมเดล (Model) แบบ Model A และ Model B Model A มีเพียง USB ช่องเดียว Model B มีสองช่อง เนื่องจากรัสเบอร์รี่พายรันอยู่บนโปรเซสเซอร์ ARM และ Debian ARM distribution ดังนั้นรัสเบอร์รี่พายจึงสามารถใช้ซอฟต์แวร์ที่สร้างบนพื้นฐานลินุกซ์ (Linux based software) รัสเบอร์รี่พายที่เราใช้ในโครงการนี้จะเป็นรุ่น Raspberry Pi 3 Model B SBC พร้อมทั้งกล่องเคสใส ดังแสดงในรูปที่ 3.8 การต่อเชื่อมเครื่องวิเคราะห์คลื่นสเปกตรัมแบบพกพา RF Explorer กับรัสเบอร์รี่พายได้ถูกแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9: แสดงการต่อเชื่อมเครื่องวิเคราะห์คลื่นสเปกตรัมแบบพกพา RF Explorer กับ รัสเบอร์รี่พาย

โครงสร้างการตรวจวัดโดยรวม (Overall measurement configuration) ได้ถูกสรุปแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10: โครงสร้างการตรวจวัดโดยรวม (Overall measurement configuration)

หากเราไม่ใช้รหัสเบอร์รีพายคอมพิวเตอร์ เรามีทางเลือกโดยใช้ ซอฟต์แวร์สำเร็จ (Software package) ที่ชื่อ Rfstatic

- 3) ยูเอสบีจีพีเอส (USB GPS) ใช้ในการเก็บข้อมูลพิกัดตำแหน่งและเวลาที่ตรวจวัด
- 4) แบตเตอรี่ขนาดเล็กพร้อมทั้ง Micro USB output เพื่อให้กำลังไฟแก่รหัสเบอร์รีพาย ซึ่งรหัสเบอร์รีพายก็จะส่งต่อกำลังไปยังเครื่องวิเคราะห์คลื่นสเปกตรัมแบบพกพา RF Explorer

1.2.2) การทดสอบความถูกต้องของระบบต้นแบบที่ใช้ระบบตรวจวัด การปรับเครื่องเข้าสู่ภาวะมาตรฐาน (Calibration)

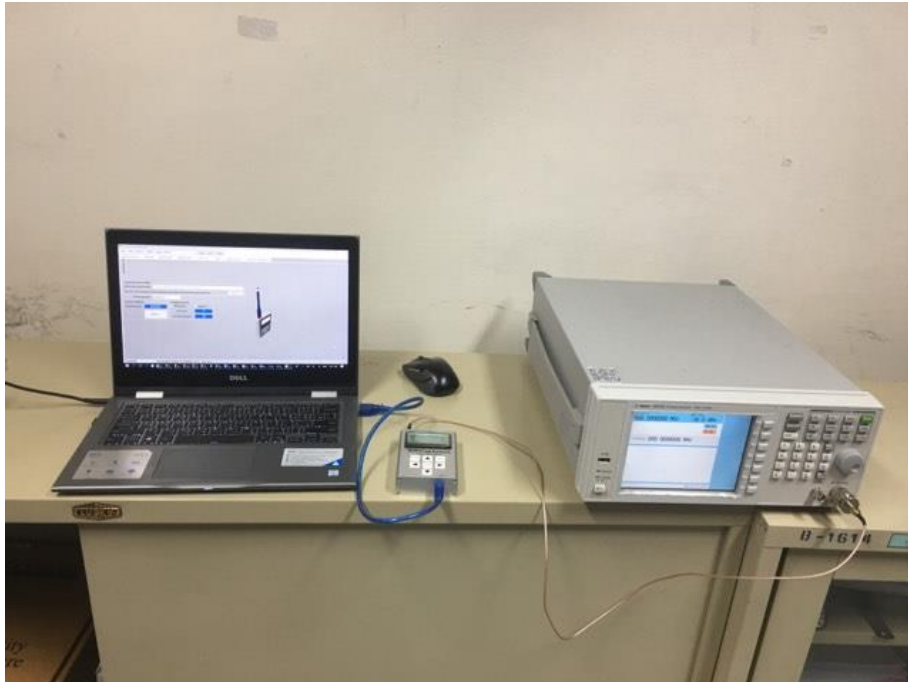
การประเมินทดสอบความถูกต้องของผลจากการตรวจวัดจากระบบที่เสนอไปซึ่งวัดโดย RF Explorer จะถูกเปรียบเทียบกับผลจากการวัดโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมาตรฐานเช่น Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer (ซึ่งปัจจุบันได้เปลี่ยนชื่อเป็น Keysight) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งมีราคาแพงประมาณ 900,000 บาท โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



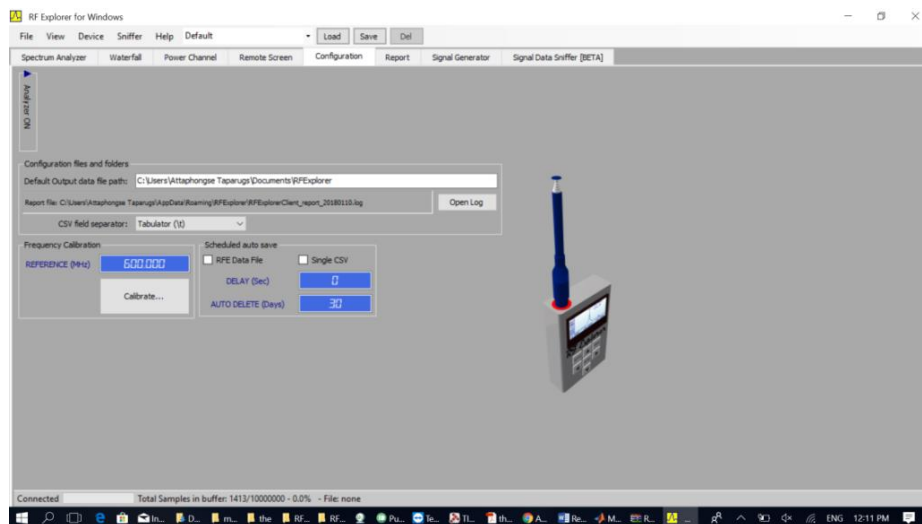
รูปที่ 3.11: เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมาตรฐานเช่น Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer

สายอากาศที่ใช้ต่อไปยังทั้ง RF Explorer และ Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer เป็นสายอากาศชนิดเดียวกัน และเป็นชนิดเดียวกันกับที่จะใช้ในการวัดที่อธิบายไว้ในข้างต้น อันได้สายอากาศ wideband Nagoya NA-773 telescopic antenna มีกำลังขยาย (Gain) เท่ากับ 2.15 dBi ความยาวเท่ากับ 40.3 cm มีค่าอัตราส่วนของแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุดของรูปคลื่นนิ่งบนสายนำสัญญาณ (Voltage standing wave ratio (VSWR)) เท่ากับ 1.5:1

1) **ขั้นแรก**คือการทดสอบความถูกต้องของตัว RF Explorer ต่อโดยตรงกับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมาตรฐานเช่น Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer เพื่อเป็นการปรับค่าชดเชย (Offset) ทั้งชดเชยความถี่ (Frequency offset) และค่าชดเชยขนาดสัญญาณ (Amplitude offset) ของ RF Explorer ให้สอดคล้องกับ Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer ซึ่งมีรูปแบบการติดตั้งแสดงในรูปที่ 3.12 และหน้าจอ RF Explorer บน Windows ตามรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12: รูปแบบการติดตั้งการปรับค่าชดเชย (Offset) เพื่อทดสอบความถูกต้องของตัว RF Explorer โดยต่อโดยตรงกับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมาตรฐานเช่น Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer



รูปที่ 3.13: หน้าจอ RF Explorer บน Windows ในการทดสอบการปรับค่าชดเชย (Offset) เพื่อทดสอบความถูกต้องของตัว RF Explorer ต่อโดยตรงกับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมาตรฐานเช่น Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer

2) **ขั้นที่สอง**คือการการประเมินทดสอบความถูกต้องของผลจากการตรวจวัดจากระบบที่เสนอไปซึ่งวัดโดย RF Explorer ที่ได้ปรับค่าชดเชยแล้ว จะถูกเปรียบเทียบกับผลจากการวัดโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมาตรฐานเช่น Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer โดยการทดสอบจะแบ่งเป็นสองส่วนดังนี้

2.1) **การทดสอบโดยการใช้สายเคเบิล** โดยทำตรวจวัดสัญญาณที่ถูกสร้างและปล่อยมาจากเครื่องสร้างสัญญาณ (Signal generator) และรับสัญญาณผ่านสายเคเบิลเข้าไปยัง RF Explorer และเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมาตรฐานเช่น Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ที่ระดับกำลัง 10 ระดับที่แตกต่างกัน จาก -95 dBm ถึง -50 dBm โดยมีสลับขั้นละ 5 dBm ในแต่ช่วงถี่ 500 ถึง 800 MHz เพื่อให้ครอบคลุม ความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลในประเทศไทยซึ่งมี ความถี่ที่ใช้ 510 ถึง 790 MHz



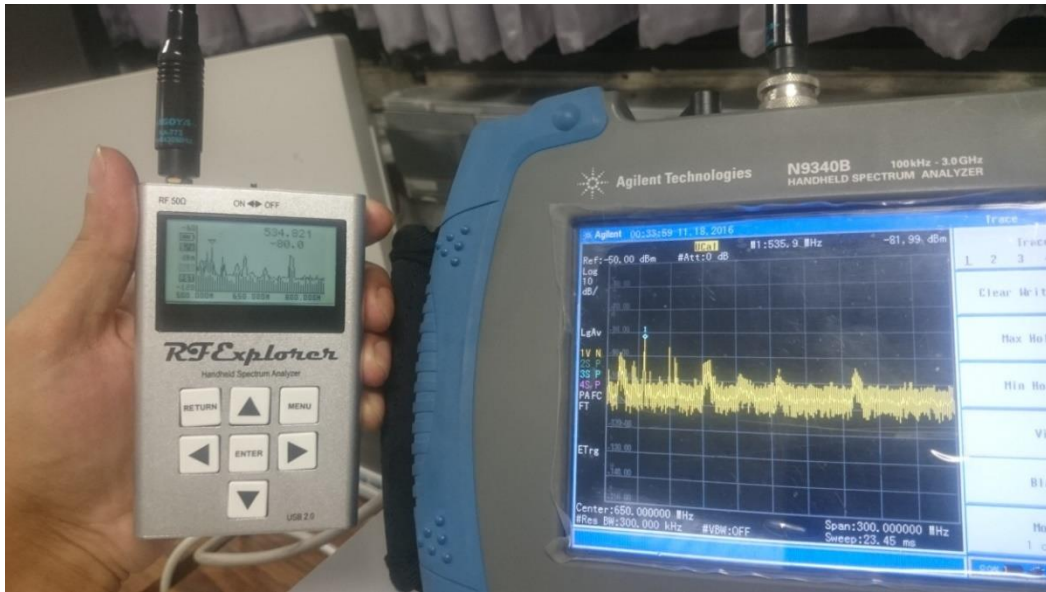
รูปที่ 3.14: การทดสอบความถูกต้องของระบบต้นแบบที่ใช้ระบบตรวจวัด การปรับเครื่องเข้าสู่ภาวะมาตรฐาน (Calibration) จากเครื่องสร้างสัญญาณ (Signal generator) แบบผ่านสายเคเบิล

2.2) **การทดสอบโดยการใช้คลื่นความถี่ไร้สาย** โดยทำตรวจวัดสัญญาณที่ถูกสร้างและปล่อยมาจากเครื่องสร้างสัญญาณ (Signal generator) และรับสัญญาณผ่านสายอากาศเข้าไปยัง RF Explorer

และเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมาตรฐานเช่น Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer ที่ระดับกำลัง 10 ระดับที่แตกต่างกัน จาก -40 dBm ถึง 5 dBm โดยมีสเกลขั้นละ 5 dBm ในแต่ละช่วงถี่ 500 ถึง 800 MHz เพื่อให้ครอบคลุม ความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรศัพท์เคลื่อนที่ในระบอดิจิตอลในประเทศไทยซึ่งมี ความถี่ที่ใช้ 510 ถึง 790 MHz ดังแสดงในรูปที่ 3.15 เนื่องจากคลื่นเดินทางผ่านอากาศมีการลดทอนมากกว่า ดังนั้นเพื่อให้ได้รับสัญญาณที่แรงดีพอ เราจึงใช้ระดับสัญญาณที่แรงกว่าวิธีผ่านสายเคเบิล ซึ่งใช้ระดับกำลังส่งจาก -95 dBm ถึง -50 dBm นั้น จากนั้นให้ลองตรวจวัดคลื่นความถี่ของกิจการโทรศัพท์จริงๆ ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15: การทดสอบความถูกต้องของระบบต้นแบบที่ใช้ระบบตรวจวัด การปรับเครื่องเข้าสู่ภาวะมาตรฐาน (Calibration) จากเครื่องสร้างสัญญาณ (Signal generator) แบบผ่านคลื่นความถี่ไร้สาย

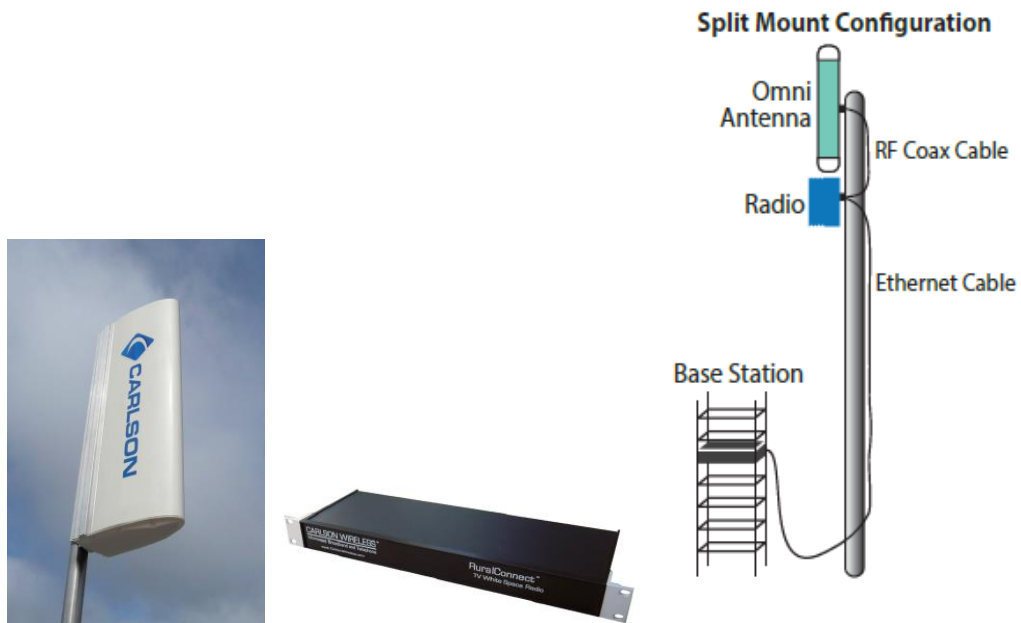


รูปที่ 3.16: การทดสอบความถูกต้องของระบบต้นแบบที่ใช้ระบบตรวจวัด การปรับเครื่องเข้าสู่ภาวะมาตรฐาน (Calibration) จากสัญญาณคลื่นความถี่ของกิจการโทรศัพท์จริง

1.2.3) ศึกษาและพัฒนาระบบต้นแบบระบบเครือข่ายความเร็วสูงผ่านคลื่นความถี่กิจการโทรศัพท์

การศึกษาและพัฒนาระบบต้นแบบของการให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงผ่านคลื่นความถี่กิจการโทรศัพท์ได้ถูกพัฒนาและทดสอบในสถาบันเอไอทีในเบื้องต้นก่อนที่จะนำไปติดตั้งในพื้นที่เป้าหมายที่ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

อุปกรณ์ส่งสัญญาณหรือสถานีฐาน (Base station (BS)) ของคลื่นความถี่โทรศัพท์ ดังแสดงในรูปที่ 3.17 จะเชื่อมต่อกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตด้วยสายเคเบิลความเร็วสูง ในขณะที่เดียวกัน อุปกรณ์ส่งสัญญาณนี้จะเลือกใช้ความถี่ที่ไม่ได้ใช้งานจากระบบฐานข้อมูลคลื่นความถี่ในพื้นที่ต่างๆ (Geo-location database) และส่งสัญญาณเชื่อมต่อไปยังอุปกรณ์ตัวรับสัญญาณ (Customer premises equipment (CPE)) ดังแสดงในรูปที่ 3.18 โดยการส่งสัญญาณนี้จะปฏิบัติตามมาตรฐาน IEEE802.22 WRAN หรือ IEEE802.11af Super Wi-Fi แล้วแต่รุ่นของอุปกรณ์ (ในโครงการนี้ใช้รุ่นอุปกรณ์รุ่นล่าสุด Gen3 RuralConnect® TVWS system ที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE802.11af Super Wi-Fi) [42]



รูปที่ 3.17: อุปกรณ์ส่งสัญญาณคลื่นความถี่โทรทัศน์หรือเครื่องสถานีฐาน (TVWS BS) [42]



รูปที่ 3.18: อุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ (TVWS CPE) [42]

เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ที่ไม่ได้ใช้งาน โครงการนี้ มีความประสงค์ที่จะนำคลื่นความถี่นี้ไปขยายการให้บริการอินเทอร์เน็ตสู่ชุมชนที่ห่างไกล ที่ระบบโครงข่ายพื้นฐานยังมีไม่เพียงพอ โดยระบบสื่อสารต้นแบบความเร็วสูงผ่านคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์นี้จะนำข้อมูลจากระบบฐานข้อมูล (Geo-location database) มาใช้ในการตัดสินใจเลือกใช้ความถี่ที่ไม่ทับซ้อนกับคลื่นความถี่ที่มีการใช้งานอยู่ในท้องที่ โดยอุปกรณ์ส่งสัญญาณคลื่นความถี่โทรทัศน์หรือเครื่องสถานีฐาน (TVWS BS) ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ส่งสัญญาณนี้จะเลือกใช้ความถี่ที่ไม่ได้ใช้งานจากระบบฐานข้อมูลคลื่นความถี่ในพื้นที่ต่างๆ และส่งสัญญาณเชื่อมต่อไปยังอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ

(TVWS CPE) ดังแสดงในรูปที่ 3.18 โดยการส่งสัญญาณนี้จะช่วยรองรับ การให้บริการอินเทอร์เน็ต ส่วนขยายไปสู่พื้นที่ห่างไกลผ่านโครงข่ายไร้สายแบบเมช (WMN) โดยในการติดตั้งระบบต้นแบบนี้ เราจะใช้อุปกรณ์เราเตอร์แบบไร้สายเชื่อมต่อกันด้วยเทคโนโลยีโมบายล์แอดฮอคเน็ตเวิร์ค (Mobile ad hoc network) ซึ่งข้อดีของการใช้เทคโนโลยีนี้คือ หากอุปกรณ์บางชิ้นเสียหาย โครงข่ายจะปรับตัว โดยอัตโนมัติและยังคงให้บริการต่อได้ วิธีการในการดำเนินงานสามารถจำแนกหลักๆ ได้ดังนี้

- ตรวจสอบและศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่จะจัดซื้อให้เหมาะสมกับพื้นที่เป้าหมายที่ ต้องการระบบต้นแบบไปติดตั้ง
- สัมภาษณ์ชุมชน ดูการเชื่อมโยงของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตในพื้นที่ และพิจารณาหาตำแหน่งที่ใช้ ในการติดตั้งอุปกรณ์ให้เหมาะสม
- ทดสอบการรับส่งสัญญาณของอุปกรณ์ทีวีไวท์สเปซ (TVWS) แบบการเชื่อมต่อจุดต่อจุด (Point-to-point) ที่สถาบันเอไอที
- แนะนำชุมชนถึงการใช้งานและศักยภาพของระบบ
- ทดสอบการรับส่งสัญญาณของอุปกรณ์ทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ทั้งแบบ Point-to-point และ แบบการเชื่อมต่อจากหนึ่งจุดสู่หลายจุด (Point-to-multi-point) ด้วยย่านความถี่กิจการ โทรทัศน์
 - ติดตั้งและทดสอบในพื้นที่เป้าหมาย อันได้แก่หมู่บ้านไทยสามัคคี ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตากและหมู่บ้านใกล้เคียงที่กล่าวไว้ข้างต้น
- ทดสอบและศึกษาผลกระทบของการปรับเปลี่ยนช่องสัญญาณของอุปกรณ์ทีวีไวท์สเปซ (TVWS) แบบไดนามิกอันเป็นการจัดสรรคลื่นความถี่แบบพลวัต (Dynamic spectrum access)
- ทดสอบการเชื่อมต่อโครงข่ายไร้สายแบบเมช (WMN)
- เชื่อมต่ออุปกรณ์ทีวีไวท์สเปซ (TVWS) เข้ากับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตและขยายการเชื่อมต่อไป ยังโครงข่ายไร้สายแบบเมช (WMN)
- สรุปการติดตั้งและทดสอบ
- วิเคราะห์และสรุปผลถึงประสิทธิภาพของระบบ

พื้นที่เป้าหมายที่กล่าวไว้ข้างต้น เป็นพื้นที่ชนบทห่างไกล โดยเราได้เลือกพื้นที่เป้าหมายไว้ที่ ชุมชนพื้นที่หมู่บ้านไทยสามัคคี ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตากและหมู่บ้านใกล้เคียง ได้แก่ บ้านผู้ช่วยผู้ใหญ่บ้าน (บ้านนพดล) โรงเรียนบ้านแม่กีดหลวงกัญไชยมิตรภาพที่ 182 บ้านแม่กีดหลวง

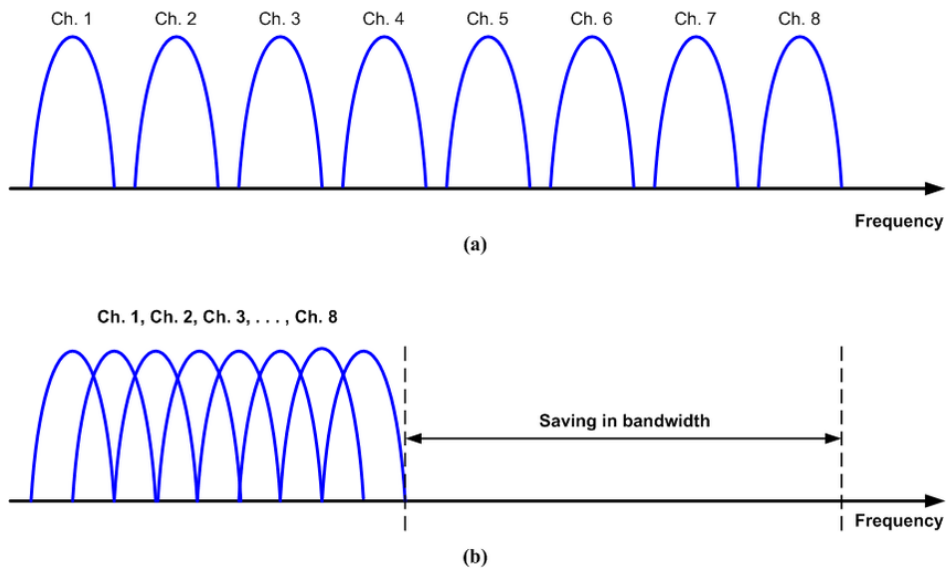
บ้านไทยสามัคคี หมู่ที่ 1 ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด บ้านไทยสามัคคี หมู่ที่ 9 ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด และ บ้านใหม่ริมเมย หมู่ที่ 10 ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด ดังแสดงไว้ในรูปภาพที่ 3.3 ซึ่งเราสามารถขยายสัญญาณอินเทอร์เน็ตให้ไปยังชุมชนหมู่บ้านไทยสามัคคี โดยมีจุดเชื่อมต่อที่ใกล้ที่สุดอยู่ที่ โรงเรียนบ้านแม่กีดหลวงวิทยุวิทยุภาพที่ 182 โดยมีระยะทางประมาณ 1 กิโลเมตร (km) โดยจุดเชื่อมต่อจะเป็นทางออกไปยังโครงข่ายอินเทอร์เน็ต (Internet gateway) เราจะติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณคลื่นความถี่โทรทัศน์หรือเครื่องสถานีฐาน (BS) ไว้ที่ โรงเรียนบ้านแม่กีดหลวงวิทยุวิทยุภาพที่ 182 และเชื่อมต่อเข้ากับโครงข่าย UniNet ผ่านสายอีเธอร์เน็ตความเร็วสูง หลังจากนั้นตัวอุปกรณ์จะกระจายสัญญาณความถี่โทรทัศน์ไปยัง หมู่บ้านไทยสามัคคี หมู่ที่ 9 ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด โดยคลื่นความถี่ที่นำมาใช้นั้นจะเป็นคลื่นความถี่ไม่ได้ใช้งานซึ่งได้มาจากการทำสำรวจในแผนงานที่ 1 โดยฐานข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ จะถูกจัดเก็บไว้ที่เซิร์ฟเวอร์ที่ติดตั้งไว้ที่ โรงเรียนบ้านแม่กีดหลวงวิทยุวิทยุภาพที่ 182 เพื่อให้เข้าถึงได้รวดเร็ว การเชื่อมต่อระหว่างชุมชนหมู่บ้านไทยสามัคคีกับโรงเรียนบ้านแม่กีดหลวงวิทยุวิทยุภาพที่ 182 ในส่วนของหมู่บ้านไทยสามัคคี เราจะติดตั้งอุปกรณ์รับสัญญาณคลื่นความถี่โทรทัศน์ไว้เพื่อรับและส่งสัญญาณกลับไปโรงเรียนบ้านแม่กีดหลวงวิทยุวิทยุภาพที่ 182 ซึ่งที่หมู่บ้านไทยสามัคคีได้มีการติดตั้งโครงข่ายแบบเมซกระจายสัญญาณไปให้ทั่วถึงภายในหมู่บ้านไว้แล้ว ผ่านอุปกรณ์เราเตอร์แบบไร้สายติดตั้งกระจายไว้ตามชายคาบ้านในหมู่บ้านโดยรอบ ซึ่งชาวบ้านสามารถใช้อุปกรณ์มือถือ แท็บเล็ต (Tablet) หรือเครื่องคอมพิวเตอร์ ของตนเองเชื่อมต่อกับโครงข่ายผ่านช่องสัญญาณ Wi-Fi ต่อไป

1.2.3.1) ภาพรวมของอุปกรณ์ (Product Overview)

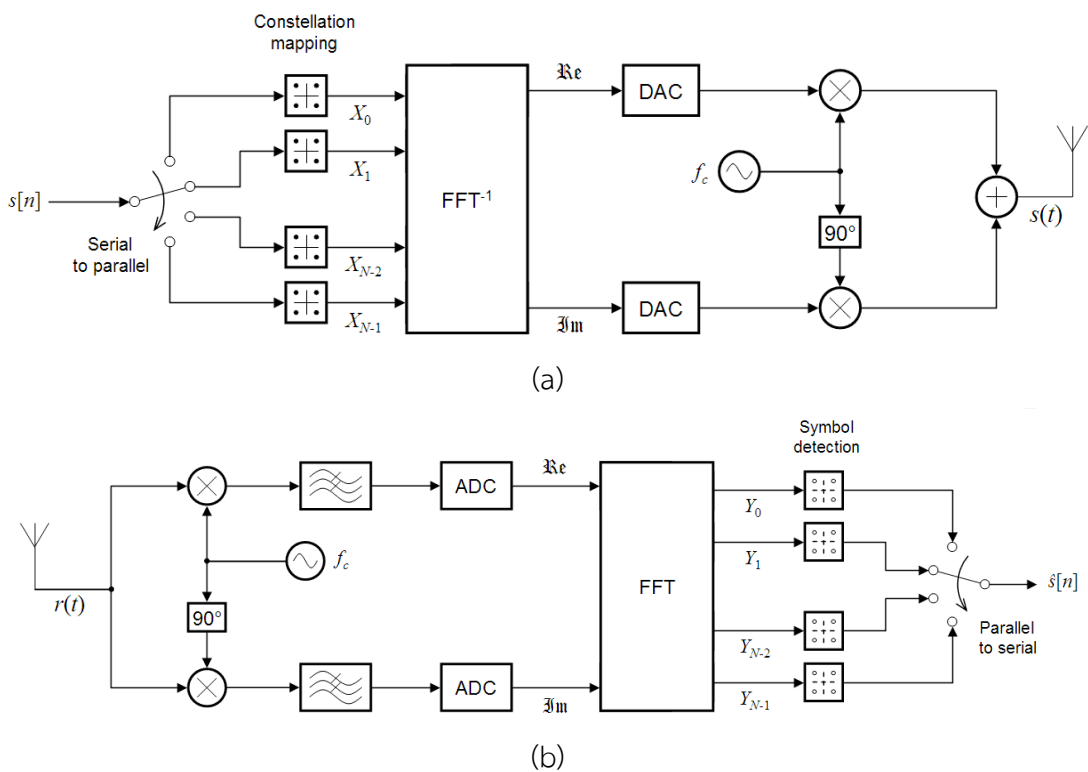
โดยระบบสื่อสารนี้ใช้อุปกรณ์เทคโนโลยี Cognitive radio TVWS ซึ่งเป็นอุปกรณ์ยี่ห้อ Carlson Wireless Technologies รุ่น Gen3 RuralConnect® TVWS system [42] นำเข้าจากอเมริกา อันประกอบได้ด้วย เครื่องสถานีฐาน (BS) 1 เครื่องและเครื่องอุปกรณ์รับสัญญาณ (CPE) 3 เครื่อง พร้อมสายอากาศ ที่มีใช้งานอยู่ในหลายโครงการ ในหลายประเทศมากถึง 30 กว่าประเทศ ทางคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสารของรัฐบาลสหรัฐอเมริกา (FCC) ได้มีออกเอกสารการรับรองอุปกรณ์นี้เมื่อวันที่ 10 มกราคม 2557 ให้สามารถใช้งานในการสื่อสารโดยการใช้ช่องว่างในคลื่นความถี่ย่าน UHF จาก 470 ถึง 698 MHz (ในบางประเทศรวมทั้งประเทศไทยถึง 790 MHz ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานยุโรปหรืออีทีเอสไอ (The European Telecommunications Standards Institute (ETSI)) ในการส่งสัญญาณข้อมูลและได้เปิดให้ คลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ที่ไม่ได้ใช้งาน หรือทีวีไวท์สเปซ (TVWS) นี้สามารถใช้งานได้สำหรับอุปกรณ์ที่ไม่มีใบอนุญาต (Unlicensed device) ระบบสื่อสารนี้เป็นรุ่น RuralConnect Gen 3 ที่เป็นรุ่นที่ดีที่สุด ณ ปัจจุบันนี้ที่สามารถใช้คลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ที่ไม่ได้ใช้งาน สำหรับการสื่อสารบรอดแบนด์ไปยังพื้นที่ชนบท

ห่างไกลเข้าถึงยาก ในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีเส้นทางตรงหรือแนวเส้นสายตา ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง (NLoS) ได้ นั่นคือคลื่นสามารถเดินทางผ่านต้นไม้ กำแพง หรือหุบเขาได้ ระบบสื่อสารนี้เป็นรุ่น RuralConnect Gen 3 เป็นระบบสื่อสารตามหลักเทคโนโลยีวิทยุรู้คิด (CR) โดยมีมาตรฐานตาม Standardization IEEE 802.11af Fully Compliant หรือ Super Wi-Fi ที่สามารถทำงานโดยใช้คลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ที่ไม่ได้ใช้งาน ระบบใช้เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณแบบโอเอฟดีเอ็ม (Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการเข้ารหัสในชั้นกายภาพ (Physical (PHY) layer) ซึ่งจะแบ่งสัญญาณ ความถี่ออกเป็นหลาย ๆ เซ็กเมนต์ (Segment) และในแต่ละเซ็กเมนต์จะมีความถี่ เฉพาะตัวด้วยรหัสที่ต่างกัน ซึ่งจะทำให้สามารถรองรับความจุได้มากกว่า คลื่นวิทยุในความถี่แต่ละเซ็กเมนต์มีความตั้งฉากซึ่งกันและกัน (Orthogonality) โดยสัญญาณที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันหมายความว่า สถานะของสัญญาณเป็นอิสระจากกัน ตัวอย่างเช่น การมอดูเลตสัญญาณทางความถี่ (Frequency modulation (FM)) และทางขนาด (Amplitude modulation (AM)) บนสัญญาณพาหะเดียวกัน (ในระบบ FM สเตอริโอ) สามารถแยกสัญญาณทั้งสองออกจากกัน โดยปราศจากการรบกวนซึ่งกันและกัน ซึ่งเราสามารถเรียกสัญญาณทั้งสองนี้ว่า ความตั้งฉากซึ่งกันและกัน ทำให้ทางด้านรับสามารถถอดเอาสัญญาณในแต่ละพาหะออกกลับมาได้ ซึ่งต่างกับเทคนิคเอฟดีเอ็มแบบดั้งเดิม (Traditional frequency division multiplexing (FDM)) ที่ต้องมีการเว้นระยะห่างของแต่ละคลื่นพาหะดังแสดงในรูปที่ 3.19 ซึ่งเป็นการใช้คลื่นความถี่ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

OFDM เป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์โดยการแบ่งความถี่ เมื่อช่องความถี่ถูกแบ่งออกเป็นความถี่ขนาดเล็กๆ N ช่องแต่ละช่องมีขนาดเท่ากับขนาดของสัญลักษณ์ดิจิทัล ซึ่งทำให้สัญญาณพาหะย่อยเหล่านี้มีความตั้งฉากซึ่งกันและกัน ทางด้านส่งสัญญาณดิจิทัลความเร็วสูงที่ถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มข้อมูลที่ความถี่ต่ำลงจำนวนสิบหรือร้อยกลุ่ม ซึ่งแต่ละกลุ่มข้อมูลย่อยที่มีความเร็วต่ำกว่า จะถูกนำไปมอดูเลตกับสัญญาณพาหะย่อยทั้งหมดส่งขนาดกันออกไป ดังแสดงในแผนภาพบล็อก (Block diagrams) ส่วนของตัวส่ง (Transmitter) ในรูปที่ 3.20 (a) รูปแบบในการมอดูเลตสัญญาณพาหะย่อยที่นิยมทั่วไปได้แก่ Binary phase shift keying (BPSK), Quadrature phase shift keying (QPSK), 16Quadrature amplitude modulation (16QAM), 64QAM, และ 256QAM



รูปที่ 3.19: การเปรียบเทียบ OFDM และ FDM แบบดั้งเดิม



รูปที่ 3.20: แผนภาพบล็อก (Block diagrams) แสดง (a) ตัวส่ง (Transmitter) และ (b) ตัวรับ (Receiver) ของ OFDM [43]

ใน OFDM กลุ่มของข้อมูลจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปขนานกัน โดยการมอดูเลตกับสัญญาณพาหะย่อย ดังนั้นพวกมันจะกลายเป็นสัญญาณบนแกนความถี่ ในการที่จะแปลงกลับมาเป็นสัญลักษณ์บนแกนเวลาอีกครั้งนั้นทำได้โดย การใช้งานแปลงกลับฟาสต์ฟูเรียร์ (Inverse fast Fourier

transform (IFFT)) โดยที่สัญลักษณ์ทางแกนเวลาเหล่านี้จะถูกมัลติเพล็กซ์เข้าด้วยกันเป็นอนุกรม ของสัญลักษณ์ และสัญลักษณ์ที่ได้ทางเอาต์พุตของ IFFT จะถูกส่งบนความถี่ที่เหมาะสมในระบบสื่อสารสัญญาณ ในระบบ OFDM แต่ละสัญญาณพาหะย่อยจะถูกทำให้รูปร่างมีความถี่ตั้งฉากซึ่งกันละกันกับสัญญาณพาหะย่อยอื่นๆด้วยวิธีการจัดการสัญญาณในลักษณะนี้ทำให้แม้แต่สัญญาณพาหะย่อย ที่อยู่ใกล้กัน ซ้อนทับกันก็ไม่ก่อให้เกิดการรบกวนซึ่งกันละกัน ดังนั้นในระบบนี้จึงไม่ต้องการแถบป้องกัน (Guard Band) ระหว่างแต่ละช่องสื่อสารย่อย ทำให้ช่องสื่อสารระหว่างแต่ละสัญญาณพาหะย่อยมีความแคบที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งในระบบนี้จะให้ประสิทธิภาพในการใช้แถบความถี่สูงสุด ความสัมพันธ์ระหว่างทุกสัญญาณพาหะย่อยในระบบ OFDM จะต้องถูกควบคุมอย่างระมัดระวังเพื่อรักษาให้มีลักษณะของความถี่ตั้งฉากซึ่งกัน และกันการแปลงกลับฟาสท์ฟูเรียร์เป็นการแปลงที่มีประสิทธิภาพสูงมากและเป็นวิธีการขั้นต้นอย่างง่าย ๆ ที่สามารถทำให้เรามั่นใจได้ว่าสัญญาณพาหะที่สร้างขึ้นมีความถี่ตั้งฉากซึ่งกัน และกัน รูปที่ 3.20 (b) แสดงแผนภาพบล็อก (Block diagrams) ในส่วนตัวรับ (Receiver) ของ OFDM

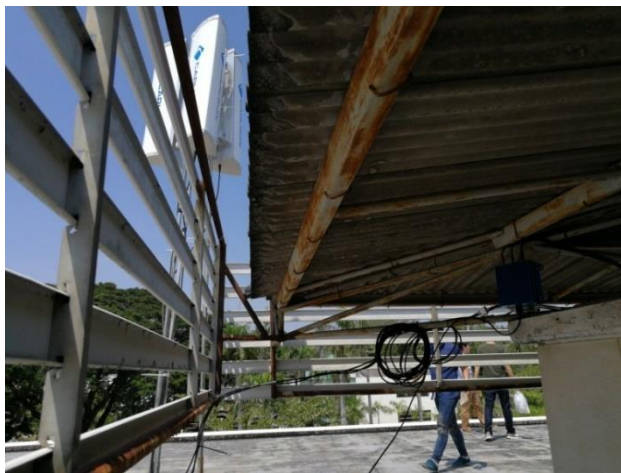
อย่างไรก็ตาม ในระบบแถบกว้าง (Wideband) เช่น OFDM มีผลกระทบจากการเคลื่อนที่หลายเส้นทาง (Multipath propagation) ของความถี่ที่ต่างกัน (หรือสัญญาณพาหะย่อยใน OFDM) จะแตกต่างกันซึ่งทำให้เกิดการเลือนหายของความถี่ที่เลือก (Frequency selective fading) เพื่อให้เข้าใจลักษณะการเลือนหายของความถี่ที่เลือก เราลองพิจารณาสิ่งที่เกิดขึ้นกับความถี่ (สัญญาณพาหะย่อย) 2 ความถี่บนแถบความถี่ที่ใช้นำข่าวสารมาจาก เครื่องส่งไปยังเครื่องรับ ถ้าความถี่ทั้งสองอยู่ใกล้ซึ่งกันและกัน ดังนั้นความแตกต่างของเส้นทางที่เคลื่อนที่จะมีผลต่อกับความถี่ทั้งสองใกล้เคียงกัน ทำให้การเปลี่ยนแปลงขนาดและเฟสใกล้เคียงกันมาก อย่างไรก็ตามถ้าความถี่ทั้งสองอยู่ห่างกันออกไปทำให้ความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่ทั้งสองแย่งเพราะว่าการเลือนของเฟสตามแต่ละเส้นทางจะต่างกันมาก ซึ่งการลดลงของความสัมพันธ์ของความถี่จะขึ้นอยู่กับค่าหน่วยเวลาระหว่าง สัญญาณที่รับเข้ามาจากเส้นทางที่ต่างกันดังนั้นการที่หลายๆ ความถี่พาหะมาจับจองอยู่บนแถบความถี่เดียวกันมากจนทำให้ความเปลี่ยนแปลงแต่ละความถี่เกิดความแตกต่างกันมากจะทำให้สัญญาณผิดพลาดได้ ดังนั้นเพราะว่าขนาดและเฟสของความถี่ที่จะประกอบกันเป็นสัญญาณข่าวสารที่ เครื่องรับจะไม่เหมือนกันกับที่เป็นในเครื่องส่ง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเลือนหายของความถี่ที่เลือก ในสภาวะแวดล้อมที่คลื่นวิทยุมีการเดินทางหลายเส้นทาง การเลือนหายของความถี่ที่เลือกสามารถส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงอย่างสูงต่อกำลังงานของสัญญาณที่เครื่องรับสามารถรับได้ สำหรับช่องสื่อสารที่ไม่มีสัญญาณจากเส้นทางโดยตรงจากการเครื่องส่ง การเลือนหายของคลื่นวิทยุเหล่านี้อาจสูงถึง 30dB ผลที่ตามมาคืออัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนลดลงและข้อมูลที่รับมี ความผิดพลาดมากขึ้น แต่เนื่องจากข้อมูลถูกส่งไปกับสัญญาณพาหะย่อยที่แยกจากกันดังนั้นการแก้ไข ข้อผิดพลาดของข้อมูลในแต่ละสัญญาณพาหะย่อยอาจจะใช้วิธีการตรวจสอบและแก้ไข ข้อผิดพลาดที่ปลายทาง

(Forward error detection and correction) หลังจากการมอดูเลตแบบ OFDM จะมีการสอดแทรก ช่วงแถบป้องกันแคบๆ เพื่อลดสัญญาณรบกวนระหว่างสัญลักษณ์ (Inter symbol Inter-ference (ISI)) ที่เกิดจากสัญญาณหลายเส้นทาง (Multipath propagation) เราเรียกแถบป้องกันแคบๆ นี้ว่าการเสริมไซคลิก (Cyclic prefix)

เพื่อให้เรามั่นใจได้ว่าระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ของเรานั้นไม่ไปรบกวนสอดแทรก (Interfere) กับสัญญาณของผู้ใช้ที่มีใบอนุญาต (Licensed users) ในที่นี้ก็คือความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่มีการใช้งานซึ่งอาจจะเป็น โทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลหรือไมโครโฟนไร้สาย (Professional wireless microphone system (PWMS)) โดยปกติระบบสื่อสารทีวีไวท์สเปซ (TVWS) RuralConnect Gen 3 นี้จะใช้ข้อมูลจีพีเอส (Global positioning system (GPS)) ที่เชื่อมต่อกับฐานข้อมูลของ ไวท์สเปซ (ไวท์สเปซ database (WSDS)) ซึ่งใช้มาตรฐานการเข้าถึงฐานข้อมูลของทีวีไวท์สเปซ (TVWS) (Protocol to access ไวท์สเปซ (PAWS) databases standard) อย่างไรก็ตามในประเทศไทยเรายังไม่มีระบบฐานข้อมูล และโครงการนี้เป็นครั้งแรกที่มีการศึกษาการใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานในแต่ละพื้นที่ ดังนั้นเราจะใช้วิธีเลือกช่องสัญญาณที่ว่างตามที่เราได้วัดและวิเคราะห์มาแล้วในแผนงานชุดที่ 2 (ศึกษาและพัฒนาระบบการตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์) แทนที่ใช้ PAWS



รูปที่ 3.21: สายอากาศแบบแบ่งส่วนหรือเซ็กเตอร์แบบ 120 องศา (120-degree sector antenna) ของเครื่องสถานีฐาน



รูปที่ 3.22: การต่อเชื่อมสถานีฐานเข้ากับสายอากาศแบบแบ่งส่วน (เซ็กเตอร์)

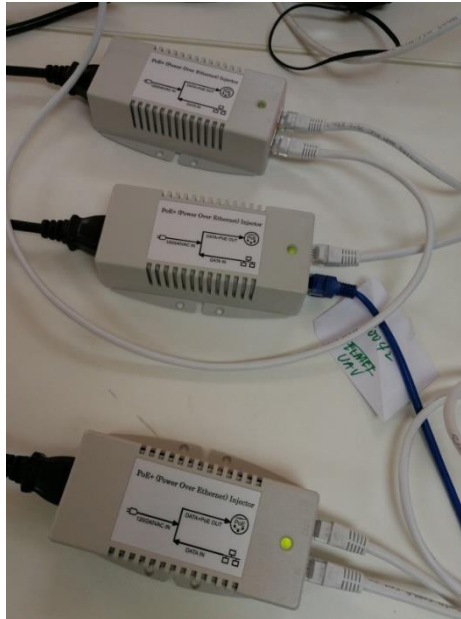


รูปที่ 3.23: ส่วนต่อเชื่อมเครื่องสถานีฐานเข้ากับสายอากาศทั้งสามส่วน

อุปกรณ์ประกอบไปด้วย ส่วนของเครื่องสถานีฐาน (BS) ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ติดตั้งภายนอกอาคาร (Outdoor unit (ODU)) โดยมีส่วนของที่เชื่อมต่อผ่านอากาศ (Radio interface) สามส่วน โดยแต่ละส่วนต่อเข้ากับสายอากาศแบบแบ่งส่วนหรือเซ็กเตอร์แบบ 120 องศา (120-degree sector antenna) ดังแสดงในรูปที่ 3.22 สถานีฐานทำหน้าที่เป็นเหมือน อินเทอร์เน็ตเกตเวย์ (Internet gateway) ที่มีความสามารถสูงในการเชื่อมต่อเครือข่ายต่างๆ เข้าด้วยกันโดยสามารถเชื่อมต่อแลน (Local area network (LAN)) หลายๆ เครือข่ายที่ใช้โปรโตคอลต่างกัน และใช้สื่อสารส่งข้อมูลต่างชนิดกันได้ไม่มีขีดจำกัด ผ่าน 10/100 Base-T Ethernet connection สถานีฐานสามารถกระจายข้อมูลได้เร็วถึง 72 Mbps (หากความกว้างแถบคลื่นความถี่ (Bandwidth) เท่ากับ 6 MHz) หรือ 96 Mbps (หากความกว้างแถบคลื่นความถี่เท่ากับ 8 MHz) โดยใช้ Radio interface ทั้งสามช่องผ่านสายอากาศแบบแบ่งส่วนทั้งสามเซ็กเตอร์ ผ่านตัวต่อ 75-Ohm F-connectors โดยทั้งหมดสามารถรองรับผู้ใช้ได้มากถึง 100 Subscribers รูปที่ 3.23 แสดงการต่อเชื่อมสถานีฐานเข้ากับสายอากาศแบบแบ่งส่วน (เซ็กเตอร์) 120 องศา (120-degree sector antenna)



รูปที่ 3.24: สายอากาศแบบกำหนดทิศทางแบบล็อกเพอริโอดิกไดโพล (Log-periodic dipole antenna) ของส่วนอุปกรณ์รับสัญญาณ



รูปที่ 3.25: อุปกรณ์ภายนอกพีโออี (External power-over-ethernet (POE) injector)

นอกจากส่วนของตัวสถานีฐาน (BS) แล้ว ส่วนถัดมาได้แก่อุปกรณ์รับ (CPE) ที่ใช้ Radio interface เพียงตัวเดียวดังแสดงในรูปที่ 3.18 ต่อกับตัวต่อ 75-Ohm F-connector เช่นกัน อุปกรณ์รับสัญญาณใช้สายอากาศแบบกำหนดทิศทางแบบล็อกเพอริโอดิกไดโพล (Directional log-periodic dipole antenna) ของส่วนอุปกรณ์รับสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 3.24 ซึ่งสามารถรับข้อมูลได้เร็วถึง 24 Mbps (หากความกว้างแถบคลื่นความถี่เท่ากับ 6 MHz) หรือ 32 Mbps (หากความกว้างแถบคลื่นความถี่เท่ากับ 8 MHz) อุปกรณ์ทั้งสองหน่วยได้รับกำลังไฟฟ้าจากอุปกรณ์ภายนอกพีโออี (External power-over-ethernet (POE) injector) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีเพื่อส่งกระแสไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับอุปกรณ์เครือข่าย ผ่านสายบิดคู่ที่ไม่หุ้มฉนวน (Unshielded twisted pairs (UTP)) โดยสถานีฐานกินไฟมากถึง 25 วัตต์ (Watt: W) ขณะที่อุปกรณ์รับสัญญาณกินไฟมากถึง 8 Watt ดังแสดงในรูปที่ 3.25

ดังที่กล่าวข้างต้น สายอากาศของสถานีฐานคือสายอากาศแบบแบ่งส่วนหรือเซกเตอร์แบบ 120 องศา (120-degree sector antenna) ซึ่งทำให้สามารถรับสัญญาณได้ครอบคลุมทั้ง 360 องศา โดยในแต่ละส่วนหรือเซกเตอร์ต่อเข้ากับแต่ละส่วนต่อผ่านอากาศของสถานีฐานที่มีอยู่สามส่วน (One of the three Base Station radios) สายอากาศดังกล่าวมีข้อมูลคุณลักษณะจำเพาะ (Specification) ดังต่อไปนี้

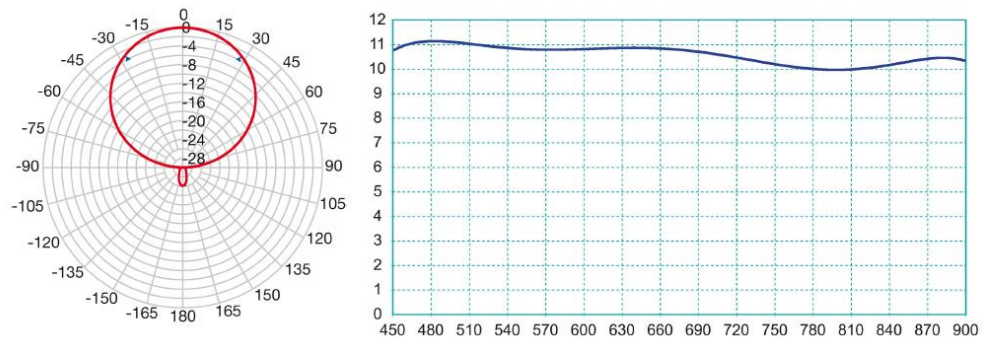
- Model Number 053-470-786-75-8
- Antenna Type 2-Bay sector
- Beamwidth 120 degrees

- Polarity Vertical
- Antenna Connector “F” type female 75 Ohms
- Frequency Range 470-790 MHz
- Gain 8 dBi
- Weight & Dimensions 8 lbs – 9.5” x 17” x 10”
- Mounting Kit Part # 920-7215
- Pole Mast 1” - 2 1/4”

ส่วนสายอากาศของตัวรับสัญญาณคือสายอากาศแบบกำหนดทิศทางแบบล็อกเพอริโอดิกไดโพล (Directional log periodic dipole antenna) (model #: 057-470-862-10.5-F) ประกอบไปด้วยตัวต่อตัวเมียแบบเอฟ Female F-type connector สายอากาศดังกล่าวมีข้อมูลคุณลักษณะจำเพาะ (Specification) ดังต่อไปนี้

- Model Number 057-470-862-10.5-F
- Antenna Type Log Periodic
- Polarity Vertical or Horizontal
- Front-to-back-ratio 36 dB
- Return Loss -15 dB
- Beamwidth (-3 dB) +/- 28 degrees
- Maximum Mast Diameter 2 ¼” (60 millimeter (mm))
- Antenna Connector “F” type female 75 Ohms
- Frequency Range 470-862 MHz
- Gain 10 - 11 dBi
- Weight & Dimensions 2 lbs - 15” x 14”

ลักษณะการกระจายคลื่น (Radio pattern) และแผนภูมิการแสดงผลค่าขยายสัญญาณ (Gain chart) ของสายอากาศแบบกำหนดทิศทางแบบล็อกเพอริโอดิกไดโพล ของส่วนอุปกรณ์รับสัญญาณ (CPE) ได้ถูกแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ลักษณะการกระจาย (Radio pattern) และแผนภูมิการแสดงข้อมูลค่าขยายสัญญาณ (Gain chart) ของสายอากาศแบบกำหนดทิศทางแบบล็อกเพอริโอดิกไดโพล (Directional log-periodic dipole antenna) ของส่วนอุปกรณ์รับสัญญาณ (CPE)

1.2.3.2) การจัดวางแนวสายอากาศ (Antenna Alignment)

สายอากาศแบบแบ่งส่วนหรือเซ็กเตอร์แบบ 120 องศา (120-degree sector antenna) ของสถานีฐาน

เมื่อสายอากาศแบบแบ่งส่วนหรือเซ็กเตอร์แบบ 120 องศา สามส่วนมารวมกัน สายอากาศโดยรวมสามารถเป็นสายอากาศแบบรอบทิศทาง (Omni-directional antenna) ซึ่งโดยปกติเราไม่จำเป็นต้องจัดวางแนวสายอากาศ (Antenna alignment) แต่เราก็ต้องคำนึงถึงตำแหน่งจัดวาง เราต้องหลีกเลี่ยงการติดตั้งติดกับวัตถุหรือส่วนโครงสร้างที่เป็นโลหะ ซึ่งเวลานำไปติดที่ข้างของเสา เราต้องห่างออกมาอย่างน้อยเป็นระยะ 3 ฟุต (ft) หรือประมาณ 1 m ส่วนการวางสายเคเบิล โดยปกติเราจะติดไว้ใกล้กับสายอากาศเพื่อความปลอดภัย

สายอากาศแบบกำหนดทิศทางแบบ Log periodic (Directional log periodic antenna) ของตัวรับสัญญาณ

ข้อดีของสายอากาศแบบกำหนดทิศทางแบบ Log periodic คือการติดตั้งและการจัดวางแนวสายอากาศสามารถทำได้ง่ายตาย เมื่อวางแนวสายอากาศในแนวตั้ง สายอากาศจะมีความกว้างของบีมหรือลำคลื่นในแนวราบ ซึ่งเป็นความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-power beamwidth) ไม่เกิน 28 องศา

การจัดวางแนวสายอากาศเบื้องต้น (Initial Antenna Alignment)

เมื่อในสถานการณ์ที่เราไม่มีเส้นทางตรงหรือแนวเส้นสายตาของสัญญาณจากตัวส่งมายังตัวรับ (Line-of-Sight (LoS)) การจัดวางแนวสายอากาศอย่างระมัดระวังเพื่อให้มั่นใจได้ว่าเราสามารถรับสัญญาณได้มีประสิทธิภาพดีที่สุด เป็นสิ่งจำเป็น และมีวิธีการแตกต่างหลายวิธีในการจัดวางแนวสายอากาศดังต่อไปนี้

- วางสายอากาศของตัวรับให้หันไปในทิศทางของสายอากาศของสถานีฐาน
- วางสายอากาศของตัวรับในทิศทางที่ปลอดภัยที่ใกล้สิ่งกีดขวางที่กั้นเส้นทางตรงให้มากที่สุด
- เนื่องด้วยความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth) ของสายอากาศของ Log periodic ของตัวรับไม่เกิน 28 องศา (+/- 28 องศา) เราสามารถได้รับประสิทธิภาพของสัญญาณที่ดีที่สุดที่ +/- 5 องศา

เนื่องประสิทธิภาพของโครงข่าย (Network performance) จะแปรเปลี่ยนไปตามประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อสัญญาณ (Link performance) ดังนั้นเราสามารถทดสอบและหาตำแหน่งแนวของสายอากาศของตัวรับสัญญาณ ที่ให้ประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อสัญญาณที่ดีที่สุด โดยการทดสอบวัด อัตราล่าช้าซึ่งเป็นค่าเวลาในการเดินทางในโครงข่าย จากต้นทางไปยังปลายทาง และกลับมาที่เครื่องต้นทางอีกครั้ง (Round-trip latency หรือ delay) โดยการทดสอบ Ping test ซึ่งเราสามารถทำได้โดยใช้ Command prompt ของระบบปฏิบัติการวินโดวส์ ส่งคำสั่ง “ping -t {ip address}” สำหรับค่าไอพีแอดเดรส (IP address) ให้ใช้ของอุปกรณ์โครงข่ายที่อยู่หรืออยู่ใกล้เครื่องสถานีฐานที่สุด เราจะปรับแนวของสายอากาศให้ได้ค่าเวลาในการเดินทางในโครงข่ายน้อยที่สุด นอกจากนี้เรายังทดสอบความเร็ว (Speed Test) หรือค่าปริมาณงานต่อหน่วยเวลา หรือที่เรียกว่าค่าทรูพุต (Throughput) ในการรับส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์ทีวีไวท์สเปซ (TVWS) โดยให้ทำเหมือนกับการทดสอบวัด อัตราล่าช้าคือ ณ ตำแหน่งหนึ่งของสายอากาศของตัวรับสัญญาณวัดค่าทรูพุต และลองปรับแนวสายอากาศดูและวัดค่าทรูพุตใหม่ จนสามารถหาแนวที่ได้รับค่าทรูพุตที่ดีที่สุด

เนื่องจากอุปกรณ์นี้ได้ถูกออกแบบตามหลักเทคโนโลยีเทคโนโลยีวิทยุรู้คิด (CR) มีสถาปัตยกรรมแบบที่สามารถปรับเปลี่ยนการทำงานได้ตามโปรแกรมหรือที่เรียกกันว่า ซอฟต์แวร์ดีฟิเนดเรดิโอ (Software defined radio (SDR)) และ (Dynamic spectrum sharing (DSS)) ซึ่งได้คำนึงถึงระวังไม่ให้เกิดปัญหาเรื่องของสัญญาณรบกวนแทรกสอด (Interference) ไปยังผู้ใช้หลัก อันได้แก่สัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลเป็นหลักสำคัญอยู่แล้ว โดยระบบสามารถกำหนดใช้ช่องสัญญาณที่ว่างเพื่อใช้งานได้ ดังนั้นเราสามารถมั่นใจได้ว่า ในการทดลอง ทดสอบระบบสื่อสารต้นแบบใน สถาบันเอไอที และติดตั้งและทดสอบในพื้นที่ จังหวัดตากดังที่กล่าวถึงข้างต้น จะไม่มีปัญหาเรื่องรบกวนแทรกสอด (Interference) สัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลแต่อย่างใด ตามข้อมูลจากการวัดที่เราได้วิเคราะห์และ

ข้อมูลความจริงในแผนความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรทัศนภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล เราจะทราบช่องความถี่ไหนที่ใช้งานกิจการโทรทัศน ในแต่ละพื้นที่เป็นอย่างไร ดังตัวอย่างเช่น พื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตากอันเป็นพื้นที่เป้าหมายที่จะติดตั้งและทดสอบ ในตารางที่ 1.2 และ 1.3 กลุ่มความถี่ที่ใช้คือกลุ่ม Da กำหนดการจัดกลุ่มช่องความถี่วิทยุ ก็คือช่องความถี่ที่ 28 31 35 39 47 51 เวลาทดสอบระบบสื่อสารต้นแบบ เราสามารถกำหนดอุปกรณ์เทคโนโลยีวิทยุรู้คิด (CR) นี้เลยว่าจะไม่ให้ใช้ช่องความถี่เหล่านี้เป็นต้น ซึ่งทำให้เรามั่นใจได้ว่า งานวิจัยในโครงการนี้จะไม่รบกวนการใช้งานจากคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศนแต่อย่างใด

1.2.3.3) การวางแผนระบบ (System Planning)

1) การจัดการอย่างเหมาะสม (Proper Handling)

การทำงานกับเครื่องระบบสื่อสาร RuralConnect Gen 3 นี้ต้องเป็นไปตามขั้นตอนอย่างระมัดระวัง ซึ่งหากปฏิบัติการณ์อย่างไม่เหมาะสมอาจเกิดความเสียหายได้ เนื่องจากส่วนประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องระบบสื่อสาร RuralConnect Gen 3 มีความไวต่อไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharge (ESD)) ทุกครั้งที่ทำงานเราต้องคำนึงถึง ESD นี้เช่น สวมสายรัดข้อมือป้องกัน ESD (Grounded anti-static wrist strap) นอกจากนี้ระวังอย่าใช้เครื่องมือที่เป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น เหล็ก

2) ระบบการต่อวงจรกระแสไฟกับพื้นดิน (Grounding)

ระบบการต่อวงจรกระแสไฟกับพื้นดิน (Grounding) มีความสำคัญมากต่อระบบไฟฟ้า ดังนั้นการทำ Grounding เครื่องระบบสื่อสาร RuralConnect Gen 3 เป็นสิ่งจำเป็น เพื่อความปลอดภัยและป้องกันไม่ไห้ระบบเกิดความเสียหายจากฟ้าแลบ หรือเมื่อมีกระแสไฟฟ้าสถิต คำแนะนำเราควรจะใช้สายทองแดงแข็ง ขนาดอย่างน้อย 8 เกจ (Gauge) ความต้านทานไม่ควรเกิน 5 Ohm (Ohms) ซึ่งทางบริษัท Carlson แนะนำให้ลง Ground น้อยกว่า 3 Ohm ระวังการเกิดไฟฟ้าช็อตก่อนที่จะปลดการต่อวงจรกระแสไฟกับพื้นดิน อย่าลืมนที่จะปลดแหล่งกระแสไฟฟ้าทั้งหมด รวมทั้งสายเคเบิล

1.2.3.4) การจัดการแถบคลื่นความถี่หรือสเปกตรัม (Spectrum Management)

ตามข้อกำหนดขององค์กรด้านบริหารความถี่ของประเทศสหรัฐอเมริกาหรือเอฟซีซี (FCC) (ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับทีวีไวท์สเปซ (TVWS)) ได้กำหนดว่าอุปกรณ์ที่ยึดติดประจำที่ (Fixed devices) ต้องเข้าถึงฐานข้อมูลช่องสัญญาณย่านความถี่โทรทัศน ผ่านอินเทอร์เน็ตเพื่อพิจารณาช่องความถี่โทรทัศนที่ไม่ได้ใช้งาน ณ ตำแหน่งพิกัดนั้นๆ เพื่อให้สอดคล้องกับตามข้อกำหนดนี้ เครื่องระบบสื่อสาร RuralConnect Gen 3 รองรับระบบฐานข้อมูลที่ทางเอฟซีซีได้รับรองแล้ว (FCC-approved ไวท์สเปซ databases (WSDB)) ซึ่งอาจจะปฏิบัติการเข้าถึงฐานข้อมูลช่องสัญญาณย่านความถี่โทรทัศนนี้

ฐานข้อมูลของ บริษัท Spectrum Bridge, iConnectiv หรือ Google สำหรับการปฏิบัติการเข้าถึง ฐานข้อมูลของระบบยุโรป มีของบริษัท Nominet เป็น WSDB partner นอกจากนี้ยังมี WSDB providers อื่นๆ ที่ประเทศอื่นๆ

เพื่ออนุญาตให้สามารถใช้งานได้เครื่องระบบสื่อสาร RuralConnect Gen 3 จะถูกลงทะเบียนกับระบบฐานข้อมูล ซึ่งจะเป็นแบบครั้งเดียว (One-time process) โดยทางโรงงานก่อนส่งออก เมื่อได้ลงทะเบียนแล้ว และต่อเข้ากับอินเทอร์เน็ต ระบบก็จะพยายามลงทะเบียนระบบฐานข้อมูล และริเคสขอการจัดสรรช่องความถี่ (Channel allocations) ส่วนของการลงทะเบียน (Unit registration) ต้องการข้อมูลของทั้งเจ้าของระบบ ข้อมูลของผู้ให้บริการ และข้อมูลตำแหน่งพิกัดสถานที่ หลังจากการกำหนดค่าต่างๆ ของระบบตามระบบฐานข้อมูล หากยังมีข้อความ ความผิดพลาด (Error messages) หรือไม่สามารถที่จะได้รับการจัดสรรช่องความถี่ ให้ติดต่อ Carlson Technical Support

หมายเหตุ: ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ในประเทศไทย เรายังไม่มีระบบฐานข้อมูล และโครงการนี้เป็นครั้งแรกที่มีการศึกษาการใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานในแต่ละพื้นที่ ดังนั้นเราจะใช้วิธีเลือกใช้ช่องสัญญาณที่ว่างตามที่เราได้วัดและวิเคราะห์มาแล้วในแผนงานชุดที่ 2 (ศึกษาและพัฒนาระบบการตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์) แทนที่ใช้ PAWS

1.2.3.5) คำแนะนำในการรับระบบอุปกรณ์และทดสอบ (Receiving and Testing - Quick Start Guide)

ขั้นตอนสำหรับลงติดตั้งซอฟต์แวร์ (Software) และทดสอบระบบเบื้องต้นก่อนติดตั้งใช้งานจริง (Initial bench test) ก่อนทำขั้นตอนนี้ เราต้องเตรียมสิ่งจำเป็นดังต่อไปนี้

- ชุดทดสอบอย่างง่าย (RuralConnect® Bench Test Kit)
- คอมพิวเตอร์สองเครื่องที่เข้ากันได้ (Two compatible computers)
- สายสัญญาณอีเทอร์เน็ตแบบ CAT5 (Four standard CAT5 Ethernet cables)
- การเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต (Internet connection)

1) ติดตั้งชุดทดสอบอย่างง่าย (Setting up the Bench)

ระวัง: อย่าป้อนไฟฟ้า การไม่มีการต่อสาย (Cabling) และตัวลดความแรงของสัญญาณ (Attenuator) อย่างเหมาะสม ค่าตัวลดความแรงของสัญญาณอย่างน้อย 60 dB ระหว่างเครื่องสถานีฐานและอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณแต่ละตัว

2) การเชื่อมต่อสัญญาณอาร์เอฟ (RF Connections)

ต่อตัวลดความแรงของสัญญาณ สามตัวไปที่อุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ แต่ละเครื่อง และ หนึ่งเครื่องที่เครื่องสถานีฐาน ใช้สายเชื่อมแต่ละหน่วยต่อกันด้วย RG6 coax jumper หากเราทดสอบอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ สองเครื่องพร้อมๆ กัน ให้ต่อ RG6 coax jumper ไปแต่ละเครื่องและต่อไปยังตัวแยกสัญญาณ (Splitter)

หมายเหตุ: ตัวแยกสัญญาณทำให้มีค่าความสูญเสียกำลังจากสายและจากคอนเนกเตอร์เพิ่มเติม (Additional cable/connector loss)

3) การเชื่อมกำลังไฟฟ้าและเชิงโครงข่าย (Power & Network Connections)

จาก “OUT” jack ของแต่ละอุปกรณ์ในการจ่ายไฟแบบพีโออี (Power Over Ethernet (POE) Injector) (POE เป็นเทคโนโลยีในการจ่ายไฟเลี้ยงผ่านสายแลน (Local area network (LAN)) (สาย UTP) ให้กับอุปกรณ์เครือข่ายที่รองรับ โดยที่เราไม่ต้องหาปลั๊กไฟติดตั้งไว้ใกล้ๆกับอุปกรณ์เครือข่าย) รั้นเคเบิล CAT5 Ethernet cable (ไม่ต้องป้อนกำลังไฟฟ้า) ไปแต่ละอุปกรณ์ จากพอร์ต “IN” ของ Base Station POE injector เชื่อมต่อไปยังตัวเชื่อมต่อแลนหรือเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต จากนั้นให้เชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ไปยังแลนสถานีฐานเชื่อมต่ออยู่ จากพอร์ต “IN” ของ CPE POE injector ให้เชื่อมต่อคอมพิวเตอร์อีกเครื่องหนึ่ง และให้เชื่อมต่อแต่ละ POE injector ไปแหล่งจ่ายไฟ จากนั้นรอสองสามนาทีเพื่อระบบเริ่มต้นทำงาน

1.2.3.6) ข้อมูลสำหรับการลงทะเบียน (Registration Information)

ขั้นตอนการลงทะเบียนนี้จำเป็นสำหรับการกำหนดค่าต่างๆ ของระบบ หากใส่ข้อมูลไม่ครบหรือไม่ถูกต้อง อาจจะทำให้ระบบทำงานได้ไม่ถูกต้อง ในบางประเทศที่ต้องใช้ระบบฐานข้อมูลการให้ข้อมูลที่ผิดยังเป็นเรื่องผิดกฎหมายอีกด้วย

รายละเอียดการลงทะเบียนของเครื่องสถานีฐานและอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ (Base Station: BS and Customer Premise Equipment: CPE Registration Details)

แมคแอดเดรส (MAC Addresses)

เป็นตัวเลขเฉพาะในแต่ละอุปกรณ์ เป็นเลขฐานสิบหก 12 หลักที่อยู่ภายในอุปกรณ์ติดตั้งของระบบ Wireless LAN หรือ Wi-Fi แต่ละ Radio interface จะมีแมคแอดเดรสที่แตกต่างกันเป็นของตัวเองซึ่งถูกใช้เพื่อลงทะเบียนการใช้ระบบฐานข้อมูล (WSDB) และการควบคุมการเข้าถึงเครื่องลูก (Client access controls) ซึ่งในแต่ละเครื่องมีสติ๊กเกอร์แมคแอดเดรสที่เฮาส์ซิง (Housing) ถึงแม้ว่าเครื่องสถานีฐานมีหลาย Radio interface ภายใน แต่เวลาลงทะเบียนฐานข้อมูล เราใช้ Radio/Sector 1 โดยใช้คำนำหน้า “RAD” เช่น RAD: 70:B3:D5:xx:xx:xx เครื่องสถานีฐานมีแมค

แอดเดรสที่แยกต่างหากอีกแมคแอดเดรสหนึ่งสำหรับการเชื่อมต่ออีเทอร์เน็ต (Ethernet) โดยใช้คำนำหน้าว่า “ETH” บนสติ๊กเกอร์ ส่วนอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ มีเพียงแมคแอดเดรสเดียวโดยใช้คำนำหน้าว่า “MAC” บนสติ๊กเกอร์

หากเราทำงานระบบสื่อสาร RuralConnect นี้ด้วยระบบฐานข้อมูลเราควรเพียงลงทะเบียนอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ กับเครื่องสถานีฐานเดียว เพื่อป้องกันการลงทะเบียนทับซ้อนที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ซึ่งจะทำให้มันถูกลบล้างกันไปและทำให้การทำงานนั้นหยุดไป

รายละเอียดการระบุพิกัดละติจูด/ลองจิจูด (Geo-location Details: Latitude/Longitude)

เราต้องมีการระบุพิกัดละติจูดและลองจิจูด เพื่อบอกตำแหน่งที่อยู่ของเครื่อง เป็นค่าตัวเลขทศนิยม (Decimal degree) สำหรับเครื่อง Radio interface ที่ไม่ใช้งานเราจะใส่พิกัดที่เป็นตำแหน่งของการเก็บรักษา (Storage) ของเครื่องนั้นๆ

หมายเหตุ: ข้อกำหนดของ FCC ค่าเหล่านี้ต้องแม่นยำภายใน 50 m ซึ่งในแต่ละประเทศอาจมีข้อกำหนดค่านี้ที่แตกต่างกันไป

ความสูงของสายอากาศ (Antenna Height)

การลงทะเบียนฐานข้อมูล (WSDB) registrations ของแต่ละเครื่องนั้นมีข้อมูลค่าความสูงของสายอากาศเหนือระดับพื้นดิน (Antenna height above ground level (HAGL)) ในหน่วยเมตร (m) เนื่องจากระบบใช้ GPS เป็นเทคโนโลยีช่วยในการหาตำแหน่งพิกัดซึ่งมีค่าความถูกต้องแม่นยำ 8 m ความแตกต่างของความสูงของสายอากาศ GPS และ สายอากาศของ TVWS ต้องถูกพิจารณา

หมายเหตุ: ข้อกำหนดของ FCC บังคับให้ ความสูงของสายอากาศต้องไม่เกิน 30 m เหนือระดับพื้นดิน (AGL) หรือไม่เกิน 250 m เหนือค่าเฉลี่ยระดับของภูมิประเทศ (Height above average terrain (HAAT)) ซึ่งในแต่ละประเทศอาจมีข้อกำหนดค่านี้ที่แตกต่างกันไป

การติดตั้งซอฟต์แวร์ (Software Configuration)

การบริหารจัดการส่วนใหญ่ของระบบสื่อสาร RuralConnect นี้ใช้ผ่านเว็บไซต์ติดต่อกับผู้ใช้ โดยใช้ภาพสัญลักษณ์ (Web-based graphical user interface (GUI)) ซึ่งรันบนเครื่องสถานีฐานทันทีที่เครื่องถูกติดตั้ง เราสามารถเข้าถึงการติดต่อกับผู้ใช้โดยใช้ภาพสัญลักษณ์นี้

1.2.3.7) การหาเครื่องสถานีฐานบนโครงข่าย (Finding the Base Station on Network)

เราสามารถเข้าถึงเครื่องที่ต้องการผ่านโครงข่าย Local network โดยใช้ไอพีแอดเดรส (IP address) หรือชื่อโฮสต์ที่ใช้เข้าถึงเว็บไซต์ (Hostname)

ไอพีแอดเดรส (IP Address)

ไอพีแอดเดรส (IP Address) ของเครื่องสถานีฐาน อาจเป็นค่าคงที่ (Static) หรือ กำหนดค่าแบบไดนามิกโดยดีเอชซีพีเซิร์ฟเวอร์ (Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) server) ซึ่งทำหน้าที่จ่ายไอพีแอดเดรส ให้แก่เครื่องลูก (Clients) โดยอัตโนมัติ สำหรับโครงข่ายที่มีเครื่องลูกหลายเครื่อง เครื่องที่ได้มาจากโรงงานจะมีค่าไอพีแอดเดรสเริ่มต้นที่เป็นค่าไอพีแอดเดรสเริ่มต้น (Default IP address) ซึ่งจะเขียนอยู่กระดาษหรือบนสติ๊กเกอร์ เพื่อที่จะสามารถลงชื่อล็อกอิน (Log in) ไปที่ของเว็บเพจ ของอุปกรณ์ Rural connect ในการค้นหาค่าไอพีแอดเดรสนี้ สามารถตรวจสอบได้จากระบบโครงข่าย Local network ที่เครื่องสถานีฐานเชื่อม (BS) ต่ออยู่ หรือ จะใช้ (Address Resolution Protocol (ARP) โพรโทคอลในการค้นหาก็ได้ โดยที่ให้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ค้นหาจะต้องอยู่ในวง subnet เดียวกัน

การใช้ ARP ซึ่งเป็นโพรโทคอลที่ใช้ในการค้นหาแมคแอดเดรสของอุปกรณ์จากไอพีแอดเดรส การทำงานของ ARP หากมีเครื่องในเครือข่ายต้องการติดต่อกับเครื่องอื่น โดยทราบแค่ ไอพีแอดเดรส แต่ไม่ทราบแมคแอดเดรสของเครื่องปลายทาง ทำให้เราสามารถหาแมคแอดเดรส ของเครื่องสถานีฐาน (BS) ในเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ (Windows) เราเพียงเปิดหน้าจอป้อนคำสั่ง (Command prompt) หรืออีกชื่อที่เป็นที่รู้จักก็คือ Cmd.exe / Cmd ซึ่งเป็นโปรแกรมตัวหนึ่งที่เป็นส่วนหนึ่งของระบบปฏิบัติการวินโดวส์ที่ทำงานในรูปแบบ Command-line interpreter คือต้องสั่งงานด้วยชุดคำสั่งเป็นตัวอักษร ไม่ใช่กราฟฟิก GUI และรันคำสั่ง “arp -a” ทำให้เราเห็นลิสต์ของไอพีแอดเดรสและแมคแอดเดรส เมื่อต้องการที่จะหาแมคแอดเดรสให้เริ่มต้นด้วย “70-b3-d5-17” เรายังสามารถที่จะป้อน ไอพีแอดเดรสที่เกี่ยวข้องเพื่อเชื่อมต่อไปยังเครื่องสถานีฐาน นอกจากนี้ เรายังสามารถดาวน์โหลดและใช้ปิงสแกนเนอร์ (Ping scanner) utility ซึ่งคือการทดสอบส่งข้อมูลไปยังโฮสต์ (Host) หรือเซิร์ฟเวอร์ ปลายทาง แล้วกลับมายังเครื่องของเรา (เหมือนเล่นปิงปอง) เพื่อในการค้นหาเครื่องสถานีฐาน เช่น “Angry IP Scanner” ซึ่งฟรี เป็น Open software ซึ่งสามารถปิงช่วงไหนของไอพีแอดเดรสก็ได้เพื่อที่จะดูว่าตัวไหนถูกใช้งานอยู่ (Active)

ในส่วนของอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ จะมีดีเอชซีพีเซิร์ฟเวอร์ (DHCP server) ติดตั้งไว้อยู่ แล้ว เราสามารถที่จะนำคอมพิวเตอร์ที่จะใช้ในตั้งคามาเชื่อมต่อผ่านสาย RJ45 ซึ่งดีเอชซีพีเซิร์ฟเวอร์ จะแจกไอพีแอดเดรสให้โดยอัตโนมัติด้วยค่าเริ่มต้น ของอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ จะเป็น 192.168.2.1 คอมพิวเตอร์ที่นำมาเชื่อมต่อจะสามารถแอกเซส ไปที่อุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณนี้สามารถใช้ โปรแกรมเปิดเว็บเบราว์เซอร์ ล็อกอินไปที่ URL <https://192.168.2.1>

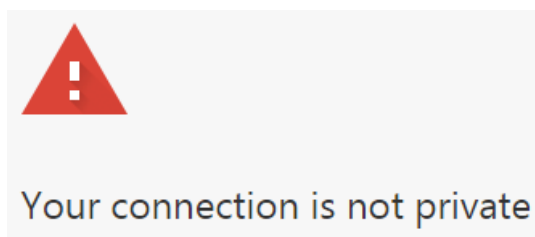
ชื่อโฮสต์ที่ใช้เข้าถึงเว็บไซต์ (Hostname)

ชื่อโฮสต์ที่ใช้เข้าถึงเว็บไซต์ของเครื่องสถานีฐาน RuralConnect ได้ถูกกำหนดค่าไว้ตั้งแต่ที่โรงงานและสามารถปรับเปลี่ยนได้ โดยมีชื่อเริ่มต้น (Default base station hostname) คือ “twws_bs” เครื่องคอมพิวเตอร์ของเราถูกโฮสต์บนโครงข่ายด้วยดีเอ็นเอสเซิร์ฟเวอร์ (Domain name server: DNS) ซึ่งทำหน้าที่แปลงชื่อ Domain เป็นหมายเลข IP ของ เซิร์ฟเวอร์ต่างๆ ตามที่ผู้ให้บริการตั้งค่าไว้ ดังนั้นเราสามารถเข้าถึงเครื่องผ่านชื่อโฮสต์โดยใช้ URL: https://twws_bs ซึ่งดีเอ็นเอสเซิร์ฟเวอร์ ถือเป็นลำดับความสำคัญที่สูงที่สุดเกี่ยวกับความเสถียรภาพของระบบ เพราะเมื่อดีเอ็นเอสเซิร์ฟเวอร์นั้นล่ม ก็จะทำให้ไม่สามารถแปลงชื่อ Domain เป็น IP ได้

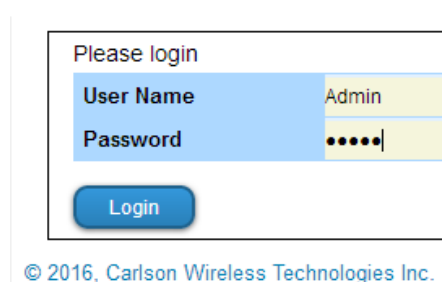
1.2.3.8) การบริหารจัดการของอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ (CPE Management)

จากนาวิเกชันบาร์ (Navigation bar) ซึ่งเป็น เมนูหลักหรือลิงค์ที่เชื่อมโยงไปสู่เนื้อหาของเว็บไซต์ ทางด้านบนของ GUI ให้คลิกเลือกปุ่ม “CPE Management” และคลิกปุ่ม “New” ที่ด้านขวาของ “Hardware Address” ให้คลิก Address field ป้อนแมคแอดเดรสของอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณและคลิก “Enter” หรือคลิกเครื่องหมายถูกสีเขียวเพื่อบันทึกค่า หลังจากนั้นให้เลื่อนมาที่ท้ายของหน้าและคลิกปุ่ม “Close”

1.2.3.9) การบริหารจัดการส่วนที่เชื่อมต่อไปยังอากาศ (Radio Manager)



รูปที่ 3.27: (a) ข้อความแจ้งเตือนด้านความเป็นส่วนตัวจากการล็อกอิน ผ่าน GUI



© 2016, Carlson Wireless Technologies Inc.

รูปที่ 3.27: (b) การล็อกอินผ่าน GUI

ล็อกอินผ่าน GUI

การล็อกอินผ่าน GUI ให้เปิดเว็บเบราว์เซอร์ และพิมพ์ URL ที่เริ่มต้นด้วย <http://> ตามด้วย ไอพีแอดเดรสของอุปกรณ์ ดูตามขั้นตอนที่ 1) ถ้าหากมีข้อความแจ้งเตือนเกี่ยวกับความปลอดภัยว่า

“Your connection is not private.” ดังแสดงในรูป 3.27 (a) สำหรับ Google Chrome ให้คลิกไปที่ปุ่ม Advance ด้านล่างของกล่องข้อความโดยให้คลิก “Proceed” แล้วตามด้วยไอพีแอดเดรสของเครื่องสถานีฐานสำหรับ Firefox ให้คลิกไปที่ “Add Exception” เพื่อที่จะดำเนินการต่อ โดยให้ป้อนยูสเซอร์เนม (User name) และพาสเวิร์ด (Password) เป็น “Admin” ทั้งคู่ หลังจากนั้นให้คลิกไปที่ปุ่ม “Log in” ดังแสดงในรูป 3.27 (b)



Home Ethernet Port Application Software CPE Ma

System Status

Host Name	TVWS_BS
System Location	
Ethernet MAC Address	70-b3-d5-17-40-50
Software Version	0.0_848
Local Time	Tue Oct 10 09:06:3
Up Time	8:53

รูปที่ 3.28: สถานะของระบบโครงข่ายทีวีไวท์สเปซ (TVWS)

โสมเพจของการตั้งค่าอุปกรณ์เครื่องสถานีฐาน

ในหน้าโสมเพจนี้จะแสดงสถานะพื้นฐานของระบบโครงข่ายทีวีไวท์สเปซ (TVWS) โดยสถานะพื้นฐานของระบบมีดังต่อไปนี้ รูปที่ 3.28 แสดงสถานะของระบบโครงข่ายทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ในแถบสถานะจะแสดงชื่อโฮสต์ของเครื่องสถานีฐาน แมคแอดเดรส เวอร์ชันของซอฟต์แวร์ เวลาท้องถิ่น และค่าช่วงเวลาให้บริการเป็นระยะเวลาที่เครื่องทำงานได้มีประสิทธิภาพ (Uptime) ซึ่งจะเป็นเวลาที่ทั้งหมดตั้งแต่เครื่องสถานีฐานได้เปิดใช้งาน

สถานะของส่วนการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุเชื่อมต่อกับอากาศแบ่งส่วน (เซ็กเตอร์) (Radio Transmission Sector)

อุปกรณ์เครื่องสถานีฐานรุ่น Rural Connect Gen 3 นี้ สามารถติดตั้งส่วนการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ เชื่อมต่อกับอากาศ (Radio sector) ได้สูงสุด สามส่วน ในแถบสถานะของ ระบบจะมีค่าบีเอสไอดี (Basic service set identifier (BSID)) แสดงอยู่ซึ่งก็คือค่าแมคแอดเดรสของแต่ละส่วนที่

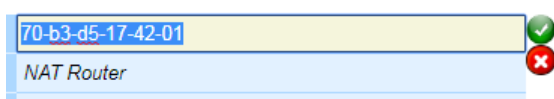
ผ่านอากาศ (Radio sector) โดยที่แต่ละส่วนจะทำงานที่ช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน ระบบที่ติดตั้งใหม่ จะไม่แสดงช่องสัญญาณ จนกว่าระบบจะตั้งค่าช่องสัญญาณที่ถูกต้องให้แก่แต่ละส่วนที่ผ่านอากาศ

สถานะของอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ

ในหน้าแสดงสถานะของระบบทีวีโวลต์สเปซ (TVWS) จะแสดงอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ ที่ได้ลงทะเบียนและตั้งค่าไว้กับเครื่องสถานีฐานเท่านั้น อุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณทุกตัวจะต้องลงทะเบียนกับเครื่องสถานีฐานก่อนใช้งาน

การลงทะเบียนอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ (CPE)

ในการลงทะเบียนอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ (CPE) กับเครื่องสถานีฐาน (BS) ให้เริ่มจากแถบสถานะของ GUI (Navigation bar) แล้วเลือก ไปที่ “CPE Management” คลิกปุ่ม “New” เลื่อนไปที่ทางด้านขวาจะปรากฏแถบ “Hardware Address” คลิกไปที่ ช่องใส่ address แล้วป้อนค่าแมคแอดเดรสของอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ (CPE) จากนั้นให้ กดปุ่ม “Enter” ดังแสดงในรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29: อุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ (CPE) ที่ได้ลงทะเบียนไว้กับเครื่องสถานีฐาน (BS)
การบริหารจัดการคลื่นวิทยุเชื่อมต่อผ่านอากาศ (Radio Manager)

จากแถบแสดงสถานะที่อยู่ด้านบนของ GUI ให้เลือก “Radio Manager” รูปที่ 3.30 แสดงสถานะของ Radio Manager ที่เครื่องสถานีฐาน (BS) ในช่อง “Enabled” จะต้องเลือกเป็นเครื่องหมายถูกเพื่อสั่งให้ระบบทำงาน เมื่อลงทะเบียนของ Radio sector เรียบร้อย Radio Manager ก็ จะแสดงผลจำนวนแต่ละส่วน (Sector) ทั้งหมดที่ลงทะเบียนไว้ ในช่องสถานะของส่วนบริหารจัดการ (Manager status) จะต้องถูกเลือก เป็น “Channels allocated” เพื่ออนุญาตให้มีการส่งสัญญาณจากเครื่องสถานีฐาน (BS) ไปยังอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ (CPE)

	Enabled	<input checked="" type="checkbox"/>
Manager	Number of TVWS radio sectors	1
	Manager status	Channels allocated

รูปที่ 3.30: สถานะของ Radio Manager ที่เครื่องสถานีฐาน (BS)

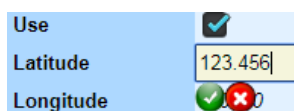
รูปที่ 3.31 แสดง GPS โมดูลที่ติดตั้งไว้ในเครื่องสถานีฐานจะแสดง จำนวนดาวเทียม GPS ทั้งหมดที่มันสามารถตรวจจับได้ โดยมันจะแสดงตำแหน่งพิกัดละติจูดและลองจิจูดของอุปกรณ์โดยอัตโนมัติ

	Number of GPS Satellites	9
Location	Latitude	40.80353500 +/- nan
	Longitude	-124.13189167 +/- nan
	Antenna Height (metres)	10.0000

รูปที่ 3.31: สถานะของตำแหน่ง GPS

การตั้งค่าตำแหน่งและความสูงของสายอากาศแบบแมนนวล

รูปที่ 3.32 การตั้งค่าตำแหน่ง GPS แบบปรับตั้งค่าเองหรือแบบแมนนวล (Manual) ในกรณีที่ GPS โมดูลไม่สามารถอ่านค่าตำแหน่ง GPS หรือ ในบริเวณที่ติดตั้งเครื่องสถานีฐาน ไม่ได้อยู่ในพื้นที่ของสัญญาณดาวเทียม จะต้องป้อนตำแหน่งและความสูงของเสาอากาศด้วยตัวเอง โดย ให้เลือก “Location Manual Override”, เป็น “Use” และกรอกพิกัดละติจูดและละติจูด ด้วยตัวเอง



รูปที่ 3.32: การตั้งค่าตำแหน่ง GPS แบบปรับตั้งค่าเองหรือแบบแมนนวล

1.2.3.10) โพรโทคอลเพื่อเข้าถึงช่องสัญญาณที่ว่าง (Protocol to Access ไร้สเปซ : PAWS)

เพื่อเป็นการการปฏิบัติตามข้อกำหนดการแบ่งปันคลื่นความถี่สเปกตรัม (Spectrum sharing) เครื่อง RuralConnect รองรับมาตรฐานโพรโทคอลเพื่อเข้าถึงฐานข้อมูลช่องสัญญาณที่ว่าง (Protocol to access ไร้สเปซ (PAWS)) ของ ไออีทีเอฟ (Internet engineering task force (IETF)) PAWS เป็นมาตรฐานโดยเครื่องสถานีฐานสำหรับเชื่อมต่อไปยังระบบฐานข้อมูล (WSDB) รับลิสต์ของช่องสัญญาณที่มีอยู่สามารถใช้งานได้โดยดูจากข้อมูลการระบุพิกัดของแต่ละ Radio interface สำหรับเครื่องที่มีการใช้ GPS อยู่แล้วไม่จำเป็นต้องขอรายละเอียดข้อมูลพิกัดตำแหน่ง อย่างไรก็ตามการลงทะเบียนกับระบบฐานข้อมูล WSDB ต้องใส่รายละเอียดข้อมูลติดต่อให้ครบถ้วน ทั้งเจ้าของเครื่องและผู้ที่ทำงานกับเครื่อง หลังจากทีลงทะเบียน PAWS และขอช่องสัญญาณเสร็จเรียบร้อยแล้ว เราจะเห็นข้อความ “Channel list available” ในส่วนของ Radio Manager PAWS “Message”

การตั้งค่า (Configuration)

เพื่อเป็นการทดสอบ ให้เลือกที่ช่อง “Automatic Channel Selection” และ “Enabled” และป้อนค่า หลังจากนั้นให้คลิก “Enter” หรือที่เครื่องหมายถูกสีเขียว หลังจากทำการตั้งค่าทั้ง PAWS และ Wireless configuration เสร็จสิ้น เครื่องสถานีฐานควรจะได้รับช่องสัญญาณจากระบบฐานข้อมูล และเริ่มส่งสัญญาณ ให้สังเกตค่า ถัดจาก “Center Frequency (MHz)” และเบราว์เซอร์ (Browse) ไปยังหน้าโฮมเพจ (Homepage) เพื่อดูสถานะของแต่ละส่วนและอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณที่ได้เชื่อมต่อแล้ว

1.2.3.11) การทดสอบการเชื่อมต่อ (Connection Testing)

การทดสอบการเชื่อมต่อไปยังอินเทอร์เน็ต (Internet Connection Testing)

เปิดเว็บเบราว์เซอร์ (Web browser) และเปิดหน้าเว็บเพจ (Webpage) ที่ต้องการ ซึ่งเป็นหน้า ที่ทดสอบ ให้ทดสอบการเชื่อมต่อไปยังอินเทอร์เน็ตซ้ำๆ สำหรับอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณแต่ละเครื่อง

การเชื่อมต่อไปยังสถานีฐาน (Connecting to the Base Station)

เพื่อเป็นการเริ่มต้นการทำงาน เราเสียบเครื่องสถานีฐานเข้าโครงข่ายอีเทอร์เน็ต (Ethernet network) ใช้เว็บเบราว์เซอร์เพื่อติดต่อไปยัง GUI จากนั้นที่เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อกับ LAN แล้วให้เปิดเว็บเบราว์เซอร์และเบราว์เซอร์ไปยัง <http://fip address> หน้าแรก que แสดงขึ้นมาคือหน้าโฮมเพจ ซึ่งจะแสดงการสรุปข้อมูลของระบบ ส่วนต่างๆ และสถานะของลิงค์ต่างๆ และอนุญาตให้สามารถเข้าถึงหน้าอื่นๆ ที่แสดงสถานะอื่นๆ และสำหรับการป้อนค่า ติดตั้งได้

1.2.3.12) ส่วนบริหารจัดการส่วนที่เชื่อมต่อไปอากาศ (Radio Manager)

ที่หน้านี้มีไว้สำหรับการบริหารจัดการส่วนที่เชื่อมต่อไปอากาศ (Radio manager) ซึ่งจะอนุญาตให้เราสามารถติดตั้ง (Installation) และการทดสอบการทำงานทั้งระบบ (Commissioning) สถานีฐานได้ ในส่วนนี้จะแบ่งเป็นส่วนย่อยๆ ได้แก่

- 1) ส่วนบนคือส่วนควบคุมกฎระเบียบที่มีอยู่สำหรับเครื่องสถานีฐาน ซึ่งมีไว้ตั้งแต่ตอนผลิต ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงอะไรได้
- 2) ส่วนถัดมาได้แก่ ส่วนการบริหารจัดการส่วนที่เชื่อมต่อไปอากาศโดยรวม (Overall radio manager) ในการทำงานปกติส่วนการบริหารจัดการนี้จะถูกให้สามารถใช้งานได้ ซึ่งอาจมีสถานะของส่วนการบริหารจัดการ (Manager status) สถานะใดสถานะหนึ่งดังต่อไปนี้

- **Awaiting GPS:** ระบบกำลังรอสำหรับส่วนของจีพีเอสโมดูล (GPS module) เพื่อรายงานตำแหน่งพิกัดของเครื่องสถานีฐานที่ถูกต้อง เช็คช่อง Location หรือหน้าเพจที่เกี่ยวกับรายละเอียดของ GPS module
 - **Disabled:** ถ้าสถานะปัจจุบันของส่วนการบริหารจัดการของ Radio interface เป็น disabled จะไม่สามารถใช้งาน เมื่อเลือกในช่อง Manager Enabled tick box ก็จะสามารถเปิดใช้ส่วนการบริหารจัดการได้
 - **Awaiting PAWS:** ก่อนที่เครื่องสถานีฐานสามารถเปลี่ยนสถานะให้สามารถใช้งานที่เชื่อมต่อไปอากาศได้ ต้องได้รับอนุญาตในการเข้าถึงฐานข้อมูลของทีวีไวท์สเปซ (TVWS) (PAWS)
 - **Channels Allocated:** สถานะนี้ส่วนการบริหารจัดการของส่วนเชื่อมต่อวิทยุ (Radio interface) ได้จัดสรรช่องความถี่ไปยังการ์ดวิทยุ (Radio card) ที่อยู่ในสถานะใช้งานได้ทั้งหมดและเปิดใช้งาน เครื่องสถานีฐานจะเริ่มทำงาน
 - **Not all Radios have Channels:** สถานะนี้ มีบางการ์ดวิทยุที่ยังไม่ได้รับช่องสัญญาณเพียงการ์ดเดียวก็ได้ไม่ สาเหตุที่เป็นไปได้คือ PAWS ไม่อนุญาตเข้าช่องสัญญาณที่พอเพียงต่อทุกการ์ด
- 3) ส่วนสุดท้ายได้แก่สรุปข้อมูลของตำแหน่ง นอกจากข้อมูลของตำแหน่งแล้ว ความสูงของสายอากาศเหนือพื้นดินก็จะถูกป้อนที่นี้ ข้อมูลความสูงจะถูกใช้เมื่อมีการสื่อสารกับฐานข้อมูล PAWS เราสามารถได้รับข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับสถานะของ GPS module โดยคลิกที่ปุ่ม “GPS Details”

ที่ช่อง PAWS แสดงถึงสถานะของการสื่อสารของฐานข้อมูลทีวีไวท์สเปซ (TVWS) และอนุญาตให้กำหนดค่าได้ โดยปกติ ตำแหน่งของอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ ก็สามารถตรวจสอบได้จากฐานข้อมูล PAWS ด้วย แต่เราสามารถที่จะสั่งไม่ให้งานโดยการเลือกที่ Do CPE Location Checking checkbox ที่ท้ายสุดช่องนี้ก็จะแสดงผลพัธของการติดต่อสื่อสาร การสื่อสารสำเร็จลุล่วงด้วยดีข้อความ “indicate channel list available” ก็จะถูกแสดงออกมา สุดท้าย มีช่อง Configuration ด้านท้าย แต่ละการปรับตั้งค่าของการ์ดวิทยุ Radio card สามารถถูกทำได้ แต่ถ้าเราเลือก “Automatic Channel Selection” ระบบก็จะเลือกเอาช่องสัญญาณที่ว่างและมีระดับสัญญาณรบกวนที่ตรวจจับได้ (Detected noise) น้อยที่สุดสำหรับการ์ดวิทยุ (Radio card) แต่ละการด้อย่างอัตโนมัติ

1.2.3.13) แผนการติดตั้งและทดสอบอุปกรณ์ระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) (Installation and Field-Testing)

เบื้องต้นก่อนที่ได้ติดตั้งและทดสอบอุปกรณ์ระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ที่ออกแบบที่พื้นที่เป้าหมายในจังหวัดตาก เราได้ติดตั้งและทดสอบอุปกรณ์ระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ภายในสถาบันเอไอที ให้มั่นใจเสียก่อนว่าระบบสามารถทำงานได้ดีมีประสิทธิภาพไม่มีข้อบกพร่องก่อนที่จะทำไปติดตั้งที่ โดยติดตั้งอุปกรณ์ระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) และทดสอบวัดระดับสัญญาณและค่าประสิทธิภาพต่างๆ ของโครงข่ายดังต่อไปนี้ อุปกรณ์เครื่องสถานีฐาน (BS) พร้อมทั้งส่วนส่วนที่เชื่อมต่อไปอากาศ (Radio module) สามชุดและสายอากาศแบบแบ่งส่วนเซ็กเตอร์ 120 องศา ติดตั้งอยู่บนชั้นดาดฟ้า (Rooftop) ของอาคาร AIT extension ส่วนอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ (CPE) เราติดตั้งและทำงานทดสอบวัดระดับสัญญาณและค่าประสิทธิภาพต่างๆ ที่ระยะ 80 และ 130 m

การทดสอบอุปกรณ์ระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ประกอบไปด้วยทดสอบวัดระดับสัญญาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ณ จุดที่จะติดตั้งอุปกรณ์และทดสอบประสิทธิภาพของระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ซึ่งประกอบไปด้วย

- 1) การทดสอบความเร็ว (Speed Test) หรือค่าปริมาณงานต่อหน่วยเวลา หรือที่เรียกว่าค่าทรูพุต (Throughput) ในการรับส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์ระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS)
- 2) การทดสอบวัดค่าสูญเสียของแพ็กเก็ตข้อมูลหรือที่เรียกว่า แพ็กเก็ตลอส (Packet loss) ในการรับส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์ระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS)
- 3) การทดสอบวัดค่าอัตราการล่าช้า (Latency) ซึ่งเป็นช่วงเวลาในการเข้าถึงของกลุ่มแพ็กเก็ตข้อมูล หรือช่วงเวลากลุ่มแพ็กเก็ตข้อมูลเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง หากกล่าวถึง อัตราการล่าช้าจากปลายหนึ่งไปอีกปลายหนึ่ง (End-to-end latency) นั่นก็คือช่วงเวลากลุ่มแพ็กเก็ตข้อมูลเคลื่อนที่จากสถานีฐานไปยังอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ แต่อัตราการล่าช้าที่เราสนใจก็คือ อัตราล่าช้าที่คำนวณจากค่าเวลาในการเดินทางในโครงข่ายจากต้นทางไปยังปลายทางและกลับมาที่เครื่องต้นทางอีกครั้ง (Round-trip latency) และ
- 4) ค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ซึ่งคือค่าและช่วงเวลาของความผันแปรของค่าอัตราการล่าช้า ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างระหว่างค่าเวลาของสัญญาณนาฬิกา (Clock pulse) ที่มาถึงและค่าเวลาที่มาถึงทางทฤษฎี (ซึ่งในทางปฏิบัติค่าเวลาของสัญญาณนาฬิกา (Clock pulse) ที่มาถึงจะถูกเปรียบเทียบกับค่าเวลาของสัญญาณนาฬิกาอ้างอิง (Reference clock) ที่มีความถูกต้องสูงแทนค่าเวลาที่มาถึงทางทฤษฎี) ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนั้นมีสาเหตุได้หลายอย่าง เช่นเนื่องจากอายุของวงจรรนาฬิกา ความร้อน จำนวนโหนด ความถี่เลื่อนหรือการเลื่อนดอปเพลอร์ (Doppler shifts)

การวัดระดับสัญญาณระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ณ จุดติดตั้งอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ

GEN 3 RURALCONNECT® SPECIFICATIONS

Below are examples of different distances and modulation settings to show throughputs and link margin in a single 8 MHz channel. With an additional radio module in the client station, use of two 8 MHz channels would deliver end-user throughputs ~twice that of the 8 MHz channel. Note that the OTA data rate has to be divided between uplink and downlink, e.g., if 80/20, then 36 Mbps = 29 DL and 7 UL. To understand how many CPE's can be used with a Base station, divide the base station capacity by the number of CPE's multiplied by the contention ratio (typically 6). For example, Base cap = 32 x 3 = 96Mbps. 48 CPEs x 6 = 96/288 = 3Mbps for 48 active CPE's.

Modulation and Coding	OTA Data Rate in Mbps	Range in km*	Base Ant Gain in dBi	CPE Ant Gain in dBi	Frequency in MHz	Base EIRP in dBm	Free Space Loss in dB	RX Signal in dBm	CPE Sens in dBm	Link Margin in dB**	Rayleigh Fading %
QPSK 3/4	7.2	33	7.8	10.3	569	28.5	118.0	-79.7	-95.2	15.5	98.21
16 QAM 3/4	14.4	16	7.8	10.3	545	28.5	111.3	-73.0	-88.2	15.1	98.07
64QAM 5/6	24	5.0	7.8	10.3	521	28.5	100.8	-62.5	-77.9	15.3	98.15
256QAM5/6	32	2.5	7.8	10.3	473	28.5	94.0	-55.7	-71.0	15.3	98.14

*The distance is optimized for 98% availability

** if the path is unobstructed

รูปที่ 3.33: ข้อมูลคุณลักษณะจำเพาะของอุปกรณ์เครื่องระบบสื่อสาร RuralConnect Gen 3 TVWS

[42]

หลังจากติดตั้งอุปกรณ์เครื่องสถานีฐาน เราจะทดสอบวัดระดับสัญญาณระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ณ จุดที่จะติดตั้งอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณสามจุด โดยเราจะใช้ระบบอุปกรณ์ที่ใช้ RF Explorer เป็นตัววัดสัญญาณ โดยเราวัดค่าชี้วัดความแรงของสัญญาณที่รับได้ (Receive signal-strength indicator (RSSI) หรือค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้ (Received signal power) และค่าเอสเอ็นอาร์หรือค่าอัตราส่วนกำลังของสัญญาณที่รับได้เทียบกับค่ากำลังของสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio (SNR) โดยตัวอย่างค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้หรือค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้ ได้ถูกแสดงในข้อมูลคุณลักษณะจำเพาะของอุปกรณ์เครื่องระบบสื่อสาร RuralConnect Gen 3 TVWS นี้ดังแสดงในรูปที่ 3.33 [42] คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีการสูญเสียพลังงานในตัวเองเมื่อเดินทางผ่านสื่อกลางจากสายอากาศเครื่องส่งมายัง สายอากาศเครื่องรับ กล่าวคือ ค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณภาครับจะน้อยกว่าค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณภาคส่งเสมอ ความสัมพันธ์ของค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณภาคส่งและค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณภาครับที่คิดเฉพาะ ความสูญเสียของกำลังจากการเดินทางผ่านสื่อกลาง L_P สามารถอธิบายได้ ด้วยสมการ

$$P_R = \frac{P_T}{L_P} \quad (3.1)$$

โดยที่ P_R คือค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่รับได้ มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt: W)

P_T คือค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่ส่งมีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt: W)

กำลังเฉลี่ยของสัญญาณภาครับเป็นตัวกำหนดค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดความผิดพลาดจากการถอดรหัสสัญญาณให้กลายเป็นบิต โดยที่ภาครับจะมีการกำหนดค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณภาครับต่ำสุดที่เรียกว่า ความไวเครื่องรับ (Receiver sensitivity) P_{Rmin} ที่จะทำให้ ค่าความน่าจะเป็นที่

เกิดความผิดพลาดของบิต (Probability of bit error) ไม่เกินค่าที่ระบุไว้ เช่น 10^{-6} (หมายถึง ความผิดพลาด 1 บิต (Bit) เกิดขึ้นในทุก 10^6 บิต หรือ 1 ล้านบิตโดยเฉลี่ย) ดังนั้นเงื่อนไขของกำลังเฉลี่ยของสัญญาณภาครับคือ

$$P_R > P_{Rmin} \quad (3.2)$$

ค่าความไวเครื่องรับสามารถหาได้จากผลรวมของกำลังสัญญาณรบกวน (Noise) ในหน่วย เดซิเบล มิลลิวัตต์ กับ อัตราส่วนค่ากำลังเฉลี่ยสัญญาณภาครับต่อค่ากำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio (SNR)) ในหน่วยเดซิเบล (dB) ความไวเครื่องรับขึ้นอยู่กับวิธีการมอดูเลตสัญญาณ (Modulation) และเพิ่มขึ้นตามความเร็วของการรับส่งข้อมูล ตัวอย่างเช่น ถ้ากำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวนเป็น -115 เดซิเบลมิลลิวัตต์ (dBm) และ SNR เป็น 12 เดซิเบล จะได้ความไวเครื่องรับเท่ากับ $-115 + 12 = -103$ เดซิเบลมิลลิวัตต์

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น การส่งสัญญาณในแนวเส้นทางตรงหรือแนวเส้นสายตา (LoS) หมายถึง สัญญาณจากเครื่องส่ง เดินทางไปถึงเครื่องรับในเส้นทางของแนวสายตา โดยที่ไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างทาง ในกรณีนี้แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางที่นิยมใช้มีอยู่สองแบบ คือ 1) แบบที่สัญญาณจากด้านส่งเดินทางเป็นเส้นทางตรงไปยังด้านรับมีสัญญาณทางตรง (Direct signal) เพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการสะท้อนจากพื้นผิวโลกก่อนไปถึงด้านรับ และ 2) แบบที่สัญญาณที่ได้รับมีทั้งสัญญาณทางตรงและสัญญาณที่สะท้อนจากพื้นผิวโลกก่อนถึงด้านรับ (Ground-reflected signal)

แบบจำลองการสูญเสียกำลังจากการส่งสัญญาณแบบ LoS ในช่องว่างอิสระ (Free-Space Path Loss Model)

การส่งแบบ LoS ในช่องว่างอิสระหมายถึงการสื่อสารที่สัญญาณไม่มีการสะท้อนกับพื้นผิวโลกก่อนเดินทางไปถึงด้านรับ ซึ่งเป็นลักษณะการส่งในอุดมคติ เสมือนกับการสื่อสารเกิดขึ้นในช่องว่างอิสระที่ไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆระหว่าง เครื่องส่งกับเครื่องรับเช่น การสื่อสารระหว่างดาวเทียมที่โคจรอยู่ในอวกาศ (Satellite communication) หรือ การสื่อสารระหว่างดาวเทียมกับสถานีภาคพื้นดิน โดยสมมติให้เครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณแทนด้วยจุดในช่องว่าง ดังนั้นเราจึงเรียก แบบจำลองการสูญเสียกำลังแบบนี้ว่า แบบจำลองการสูญเสียในช่องว่างอิสระ (Free-space path loss model) ในกรณีนี้กำลังเฉลี่ยของสัญญาณภาครับ (P_R) หาได้ จากสมการ

$$P_R = P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 = P_T G_T G_R \left(\frac{c}{4\pi f d}\right)^2 \quad (3.3)$$

โดยที่ G_T คือ อัตราขยายของสายอากาศด้านส่ง

G_R คือ อัตราขยายของสายอากาศด้านรับ

d ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ (หน่วย m)

λ ความยาวคลื่นของสัญญาณ (หน่วย m)

c คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s

f คือ ความถี่ของสัญญาณ (หน่วย Hz)

ถ้าทราบความไวเครื่องรับ (P_{Rmin}) ระยะทางสูงสุดระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ d สามารถหาได้จากสมการ

$$P_T G_T G_R \left(\frac{c}{4\pi f d}\right)^2 > P_{Rmin} \quad (3.4)$$

แก้สมการ (3.4) เพื่อหาค่า d จะได้

$$d \leq \frac{c}{4\pi f} \sqrt{\frac{P_T G_T G_R}{P_{Rmin}}} \quad (3.5)$$

และการสูญเสียกำลังในช่องว่างอิสระ (Free-space path loss) L_{PF} คำนวณได้จาก

$$L_{PF} = \left(\frac{4\pi f d}{c}\right)^2 \quad (3.6)$$

ยกตัวอย่างการคำนวณ หากระยะทางระหว่างอุปกรณ์เครื่องสถานีฐานและอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ อยู่ที่ระยะไมไกลมากนักเช่น 2.5 km ระบบใช้มอดูเลชันและการเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel coding) แบบ 256QAM5/6 โดย 5/6 คือ อัตราการเข้ารหัส (Coding rate) และมีการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน (Convolution code) เราสามารถคำนวณ การสูญเสียในช่องว่างอิสระ L_{PF} ได้เท่ากับ 2.4535×10^9 หรือประมาณ $10\log_{10}(2.4535 \times 10^9) = 94\text{dB}$ ดังแสดงในตารางตามรูปที่ 3.33 ส่วนค่าอีไออาร์พี EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) มีหน่วยเป็น dBm หมายถึงกำลังส่งออกจากสายอากาศทางด้านส่ง ซึ่งเป็นผลรวมของกำลังของเครื่องส่ง P_T การสูญเสียที่เกิดจากสายนำสัญญาณ (Cable loss) L_C ระหว่างเครื่องส่งถึงสายอากาศ อัตราเพิ่มกำลัง (Gain) ของสายอากาศ G_T มีสูตรการคำนวณดังนี้

$$EIRP \text{ (dBm)} = P_T + G_T - L_C \quad (3.7)$$

ดังนั้นค่า $EIRP$ ตามตารางในรูปที่ 3.34 มีค่าเท่ากับ $+21 \text{ dBm} + 7.8 \text{ dB} - 0.3 \text{ dB} = 28.5 \text{ dBm}$ เราสามารถคำนวณค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณภาครับโดยคำนึงถึง การสูญเสียกำลังอื่นๆ (Miscellaneous losses) L_M เช่นการจางหายของสัญญาณหรือเฟดดิ้ง (Channel fading) ซึ่งเกิดจากการที่สัญญาณในแต่ละเส้นทางของการแพร่กระจายแบบหลายเส้นทางเดินทางมาถึงเครื่องรับไม่พร้อมกันและกำลังของสัญญาณถูกลดทอนไม่เท่ากันเนื่องจากความแตกต่างของสภาพแวดล้อมและ

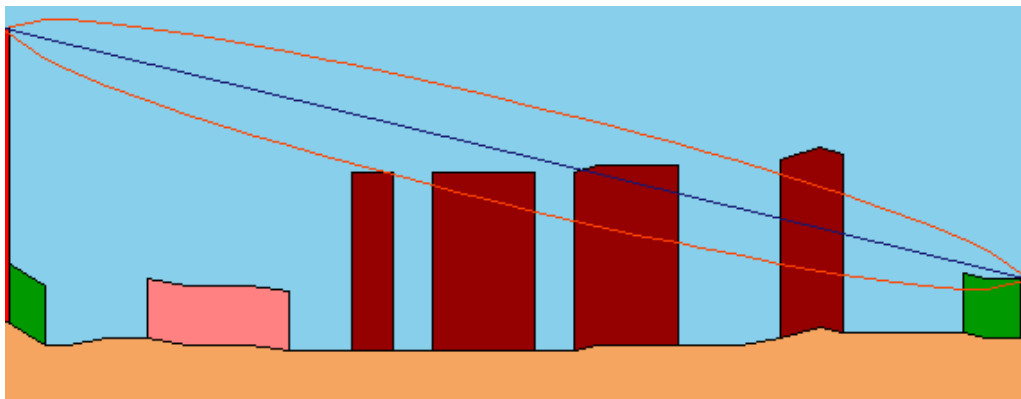
สิ่งกีดขวางในเส้นทาง เมื่อสัญญาณที่เดินทางจากหลายเส้นทางมารวมกันที่ด้านรับ ผลรวมสัญญาณที่ได้ อาจจะมีค่าสูงกว่าสัญญาณด้านส่งมากถ้าสัญญาณเสริมกันเองเมื่ออยู่ในเฟสเดียวกัน (In phase) หรืออาจมีค่าต่ำกว่าสัญญาณด้านส่งมาก ถ้าสัญญาณหักล้างกันเองจากการกลับเฟส (Out of phase) ดังนั้นสัญญาณที่ด้านรับจากการแพร่กระจายแบบหลายเส้นทาง จึงมีการผันผวนอย่างรวดเร็ว (Rapid fluctuation) และ (Polarization mismatch) ดังนั้นค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณภาครับในหน่วย dBm ในกรณีนี้สามารถคำนวณดังต่อไปนี้

$$P_R(\text{dBm}) = P_T + G_T - L_T - L_{PF} - L_M + G_R - L_R \quad (3.8)$$

และค่าลิงค์มาร์จิ้น (Link margin) L_M จะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$L_M = P_R(\text{dBm}) - P_{R\text{min}}(\text{dBm}) \quad (3.9)$$

ซึ่งตามตารางในรูปที่ 3.33 ค่า Link margin L_M คำนวณได้เท่ากับ $L_M = -55.7 \text{ dBm} - (-71.0 \text{ dBm}) = 15.3 \text{ dB}$



รูปที่ 3.34: ปรากฏการณ์เฟรย์แนล (Fresnel effect) และเส้นทางตรงของคลื่นหรือ (LoS)

นอกจากจะมี LoS แล้วสิ่งๆที่เข้ามามีผลกระทบอีกอย่างที่ต้องพิจารณาถึงด้วยคือ ปรากฏการณ์เฟรย์แนล (Fresnel effect) ซึ่งอาจเกิดขึ้นเมื่อสิ่งบดบังต่างๆ เช่น ยอดเขา ยอดต้นไม้หรือยอดอาคาร อยู่ใกล้กับเส้นทางตรงของคลื่นหรือ LoS มากเกินไป จนก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการสื่อสารได้ ถึงแม้สิ่งกีดขวางนั้นจะไม่ได้บังเส้นทางของคลื่นโดยตรงก็ตาม Fresnel zone คือพื้นที่รูปไข่ที่อยู่รอบๆ LoS ดังแสดงตามรูปที่ 3.34 โดยขนาดของมันจะขึ้นอยู่กับระยะห่าง (d) ของสถานีต้นทางที่ส่งคลื่นออกมาและความถี่ของคลื่นนั้นๆ f โดยรัศมี (Radius) ของมัน F_n สามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$F_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}, \quad d_1, d_2 \geq n\lambda \quad (3.10)$$

โดยที่ F_n คือรัศมีของ Fresnel zone ลำดับที่ n

d_1, d_2 คือระยะทางจากปลายข้างหนึ่งมายังตำแหน่งหนึ่งบน LoS ที่ตั้งฉากกับจุดหนึ่งบน Fresnel zone ดังนั้นหากเราพิจารณา Fresnel zone ลำดับที่ 1 F_1 ซึ่งเพียงพอและเป็นประโยชน์ที่จะรู้ค่าในทางปฏิบัติ และพิจารณาที่ระยะกึ่งกลางนั้นคือ $d_1 = d_2 = d/2$ ดังนั้นเราสามารถคำนวณ Fresnel zone ลำดับที่ 1 ได้ดังนี้

$$F_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{cd}{f}} \quad (3.11)$$

และเราสามารถมีสูตรสำเร็จรูป เมื่อแทนค่า $c = 3 \times 10^8$ m/s ได้ดังนี้

$$F_1 [m] = 8.656 \sqrt{\frac{d[km]}{f[GHz]}} \quad (3.12)$$

จากรูปจะเห็นได้ว่า มีสิ่งที่มีลักษณะใหญ่และมีความหนาแน่น มาบดบังในเขตของ Fresnel zone ซึ่งสถานะการแบบนี้จะทำให้คลื่นบางส่วนที่ถูกบดบัง เดินทางไปถึงปลายทางช้ากว่าส่วนอื่นๆ เล็กน้อย จนทำให้เกิดการผิดเฟสกับคลื่นที่มาก่อนหน้า (LoS) ส่งผลให้ความแรงของคลื่นลดลง หรืออาจจะหักล้างกันจนหายไปเลยก็เป็นได้ ถ้าความแรงของสัญญาณที่ผิดเฟสนั้นมีความแรงพอ ในกรณี que สิ่งที่เข้ามาบดบังในเขตของ Fresnel zone เป็นสิ่งที่มีความหนาแน่นต่ำเช่น ต้นไม้ ก็อาจส่งผลแค่ทำให้ความแรงของสัญญาณลดลงเท่านั้น จากปัญหาข้างต้น ก็หมายความว่าถึงแม้จะมี LoS แล้วก็ตาม อาจยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลให้ คุณภาพของการสื่อสารไม่ได้ดีอย่างที่ควรจะเป็น โดยปกติแล้ว หากเส้นทางของสัญญาณถูกบดบังโดย Fresnel zone 20% ถือว่าเล็กน้อย สัญญาณถูกลดทอนเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าเส้นทางของสัญญาณถูกบดบังโดย Fresnel zone 40% ขึ้นไปถือว่าสัญญาณถูกลดทอนอย่างมาก

แนวทางการแก้ปัญหาไม่มี LoS และการมีสิ่งบดบัง Fresnel zone สามารถทำตามวิธีต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

- 1) เพิ่มความสูงของเสาอากาศให้มากขึ้นโดยอาจต่อความสูงของทาวเวอร์ หรือเลื่อนความสูงของเสาอากาศ
- 2) หาสิ่งปลูกสร้างที่ใช้ติดตั้งเสาอากาศใหม่ให้มีความสูงมากขึ้นกว่าเดิม
- 3) เปลี่ยนตำแหน่งที่ใช้ติดตั้งเสาอากาศทั้งสองด้าน ให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกบดบังน้อยที่สุด
- 4) เปลี่ยนประเภทของเสาอากาศที่มี Beam เล็กๆ เพื่อลดขนาดของ Fresnel zone

แบบจำลองการสูญเสียกำลังจากการส่งสัญญาณแบบในช่องว่างอิสระเป็นแบบจำลองที่ง่ายและอุดมคติ (Ideal) เกินไป ซึ่งห่างไกลจากความเป็นจริง นอกจากความถี่ของสัญญาณที่ใช้งานและระยะทางระหว่างตัวส่งและตัวรับแล้ว แบบจำลองการสูญเสียกำลังควรคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ เช่น

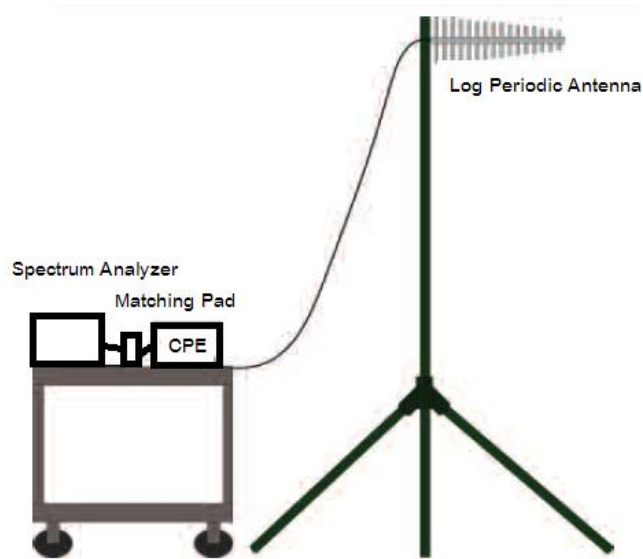
ความสูงของเสาอากาศทั้งตัวส่งและตัวรับ ลักษณะของสภาพแวดล้อม สภาพภูมิประเทศ ตัวอย่างเช่น แบบจำลองลองเลย์-ไรซ์ (Longley-Rice (L-R) model) [44-45] อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่มีชื่อเสียงใซ้อย่างแพร่หลายอย่างแบบจำลองแบบจำลองของโอคุมุระ-ฮาทะ (Okumura-Hata model) ซึ่งสร้างแบบจำลองจากข้อมูลจากการทดลองวัด (Empirical based model) [44-45] ถึงแม้จะครอบคลุมความถี่ในช่วง UHF จาก 150 ถึง 1500 MHz แต่ไม่เหมาะสมกับกรณีของเรา เนื่องจากแบบจำลองนั้นได้ครอบคลุมความสูงของเสาอากาศของเครื่องสถานีฐาน (BS) จาก 30 ถึง 200 m ซึ่งในกรณีของเราใช้ความสูงของเสาอากาศของเครื่องสถานีฐาน (BS) 24 m

แบบจำลองการสูญเสียกำลังลงเลย์-ไรซ์ (Longley-Rice (L-R)) Path Loss Model

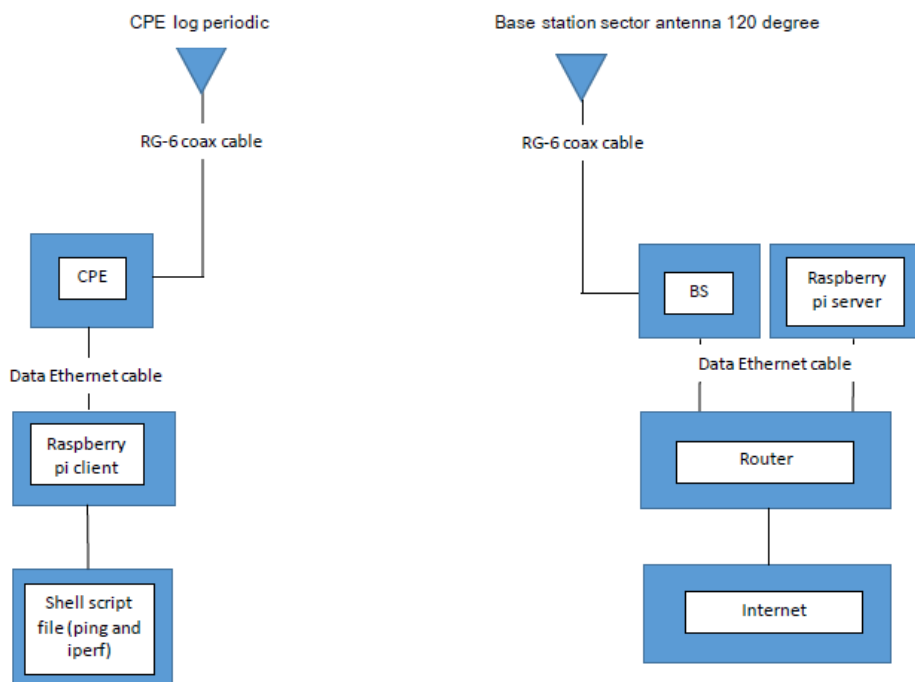
หนึ่งในแบบจำลองที่คำนึงถึงภูมิประเทศที่ไม่สม่ำเสมอ (Irregular terrain) และใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ แบบจำลองการสูญเสียกำลังลงเลย์-ไรซ์ (Longley-Rice (L-R)) Path Loss Model) ซึ่งมีรู้จักกันในนาม แบบจำลองที่คำนึงถึงภูมิประเทศที่ไม่สม่ำเสมอ (Irregular Terrain Model (ITM)) โดยแบบจำลองนี้รองรับคลื่นความถี่ตั้งแต่ 20 ถึง 20,000 MHz คำนวณการสูญเสียกำลังโดยใช้เส้นทางเรขาคณิตของโปรไฟล์ภูมิประเทศ แบบจำลองยังคำนึงถึงสภาพสภาพภูมิอากาศและสภาพผิวดิน เราสามารถคำนวณได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลอง (Simulation program) ที่เข้าถึงได้โดยสาธารณะเพื่อใช้ (โอเพนซอร์ฟแวร์) (Open software) ที่ชื่อว่า “Radio Mobile - RF propagation simulation software)” [46]

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ เราสามารถคำนวณการสูญเสียกำลังที่แท้จริงได้จากอัตราส่วนของค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่ส่ง (โดยมีหน่วยเป็นวัตต์) ต่อค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่รับได้ (โดยมีหน่วยเป็นวัตต์) ตามสมการ (3.1) หรือผลต่างระหว่างค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่ส่ง (โดยมีหน่วยเป็น dBm) และค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่รับได้ (โดยมีหน่วยเป็น dBm)

ในการวัดค่ากำลังสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับสัญญาณ P_R หากต้องการวัดค่าให้ได้แม่นยำที่สุดเราใช้ค่าที่อ่านจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมาตรฐานเช่น Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer ที่ทางสถาบันเอไอทีมีใซ้อยู่ ดังรูปที่ 3.35 หรือหากเราใช้เครื่องวิเคราะห์คลื่นสเปกตรัมแบบพกพา RF Explorer เราจะต้องชดเชยค่าขึ้นมาตามที่เราได้ปรับเครื่องเข้าสู่ภาวะมาตรฐาน (Calibration) ข้างต้น และสายอากาศที่ใซ้กับ RF Explorer แน่นอนมีลักษณะที่ไม่เหมือนกับสายอากาศแบบกำหนดทิศทางแบบล็อกเพอริโอดิกไดโพล (Directional log-periodic dipole antenna) ที่ใซ้กับตัวเครื่องรับสัญญาณ (CPE)

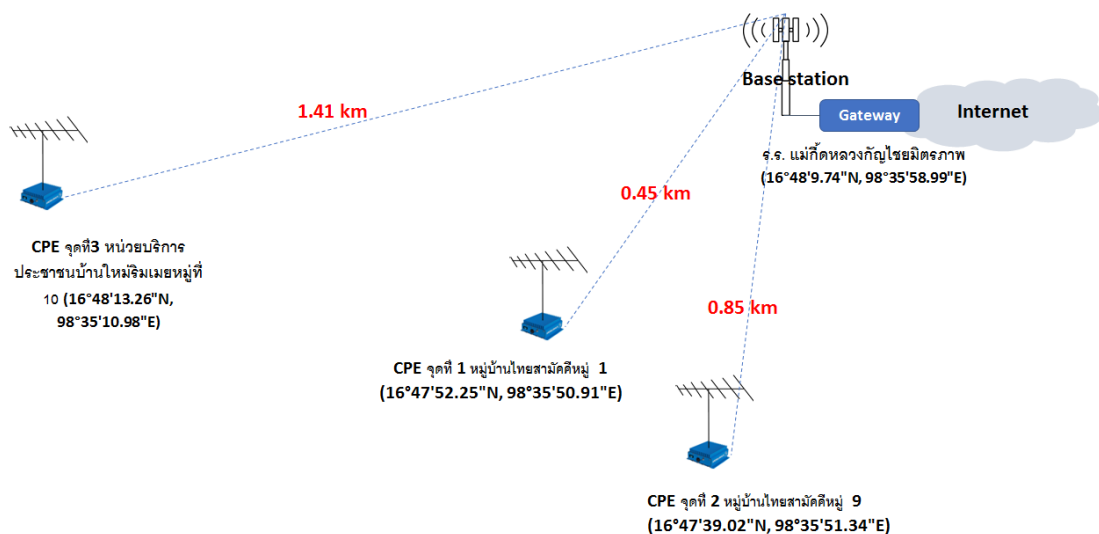


รูปที่ 3.35: การวัดค่ากำลังสัญญาณที่รับได้ที่ตัวเครื่องรับสัญญาณ P_R โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมาตรฐาน



รูปที่ 3.36: แผนภาพบล็อก (Block Diagrams) ของการทดสอบประสิทธิภาพของระบบโครงข่ายระบบทีวีไวส์แปช (TVWS)

ดังที่อธิบายไว้ข้างต้น เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) เราทดสอบค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้โดยเราวัดค่าต่างๆ ทั้ง อัปลิงค์ (Uplink) การส่งสัญญาณขาขึ้นซึ่งคือการสื่อสารจากเครื่องรับสัญญาณ CPE ไปยังเครื่องสถานีฐานและในทางกลับกัน ดาวน์ลิงค์ (Downlink) หรือการส่งสัญญาณขาลงซึ่งคือการสื่อสารจากเครื่องสถานีฐานไปยังเครื่องรับสัญญาณ CPE โดยมีค่าต่างๆ ดังนี้ 1) การทดสอบความเร็ว (Speed Test) หรือค่าปริมาณงานต่อหน่วยเวลา หรือที่เรียกว่า ค่าทราฟฟิค (Throughput) ในการรับส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์ระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ได้สำเร็จในช่วงเวลานั้นๆ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีหน่วยเป็น บิตต่อวินาที (Bits per second (bps)) หรือเมกะบิตต่อวินาที (Megabits per second (Mbps)) หรือกิกะบิตต่อวินาที (Gigabits per second (Gbps)) 2) การทดสอบวัดค่าสูญเสียของแพ็กเก็ตข้อมูลหรือที่เรียกว่า แพ็กเก็ตลอส (Packet loss) ในการรับส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์ระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) 3) การทดสอบวัดค่าอัตราการล่าช้า (Latency) ซึ่งเป็นช่วงเวลาในการเข้าถึงของกลุ่มแพ็กเก็ตข้อมูล หรือช่วงเวลากลุ่มแพ็กเก็ตข้อมูลเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง ซึ่งเราสนใจอัตราการล่าช้าที่คำนวณจากค่าเวลาในการเดินทางในโครงข่าย จากต้นทางไปยังปลายทางและกลับไปที่เครื่องต้นทางอีกครั้ง (Round-trip latency) และ 4) ค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ในการทดสอบนี้เราใช้อุปกรณ์มินิคอมพิวเตอร์ ราสเบอร์รี่พาย (Raspberry Pi) เชื่อมต่อกับเครื่องสถานีฐาน ด้วยสายอีเทอร์เน็ต (Ethernet) โดยอุปกรณ์ตัวนี้จะรัน iperf and ping เซิร์ฟเวอร์ เพื่อทดสอบความเร็วของระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ซึ่งโปรแกรมเชลล์สคริปต์ (Shell Script) หรือคำสั่งในเชลล์ของลินุกซ์มาเรียงต่อกันให้ทำงานตามที่เราต้องการได้ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก หลังจากนั้นเราจะใช้คอมพิวเตอร์ เชื่อมต่อกับอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ ด้วยสายอีเทอร์เน็ต (Ethernet cable) ดังแสดงตามแผนภาพบล็อก (Block Diagrams) ในรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.37: แผนภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ในสามชุมชนชนบท

โครงข่ายระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ที่ออกแบบในโครงการนี้เป็นโครงข่ายที่มีรูปแบบโครงสร้างเป็นรูปดาว (Star topology) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.37 โดยที่อุปกรณ์เครื่องสถานีฐาน (BS) จะถูกติดตั้งไว้ที่โรงเรียนบ้านแม่กั๊ดหลวงกัญไชยมิตรภาพที่ 182 ซึ่งได้มีสายอินเทอร์เน็ทความเร็วสูงโดยใช้สายไฟเบอร์ออฟติก (Fiber optic) หรือโครงข่ายใยแก้วนำแสงในท้องถิ่นของบริษัทที่เปิดอินเทอร์เน็ท จำกัด (3BB) ที่มีความเร็ว (Speed) อยู่ที่ 100/50 Mbps (อัปลิงค์ (Uplink)/ดาวนลิงค์ (Downlink)) ส่วนของสายอากาศนั้นจะถูกติดตั้งไว้เหนือพื้นดินประมาณ 24 m ซึ่งเป็นความสูงมาตรฐานที่สามารถรับส่งสัญญาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ได้ดี อุปกรณ์เครื่องสถานีฐาน (BS) พร้อมทั้งส่วนส่วนที่เชื่อมต่อไปอากาศ (Radio module) สามชุดพร้อมสายอากาศแบบแบ่งส่วนเชิงเคเตอร์ 120-degree ซึ่งสามารถรับส่งสัญญาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ได้ในสามช่องคลื่นความถี่ที่แตกต่างกันในเวลาเดียวกัน จากคุณสมบัตินี้เราจะติดตั้ง อุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณพร้อมทั้งสายอากาศแบบกำหนดทิศทางแบบล็อกเพอริโอดิกไดโพล (Directional log-periodic dipole antenna) กระจายไปตามหมู่บ้านในเขตตำบล แม่กาษา ดังแสดงในรูปที่ 3.37 ซึ่งเป็นพื้นที่หมู่บ้านไทยสามัคคี ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตากและหมู่บ้านใกล้เคียง ได้แก่ บ้านผู้ช่วยผู้ใหญ่บ้าน (บ้านนพดล) โรงเรียนบ้านแม่กั๊ดหลวงกัญไชยมิตรภาพที่ 182 บ้านแม่กั๊ดหลวง บ้านไทยสามัคคี หมู่ที่ 1 ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด บ้านไทยสามัคคี หมู่ที่ 9 ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด และ บ้านใหม่ริมเมย หมู่ที่ 10 ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด โดยเลือกใช้สามช่องสัญญาณที่ว่าง ตำแหน่งและระยะทางระหว่างอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ (CPE) กับ เครื่องสถานีฐาน (BS) ซึ่งแต่ละตำแหน่งมีลักษณะพื้นที่ก็จะแตกต่างกันไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น ตำแหน่งของอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณจุด CPE M1 (บ้านไทยสามัคคี หมู่ที่ 1) จะมีระยะที่ใกล้ที่สุด เพียงประมาณ 0.45 km มีเส้นทางตรงหรือแนวเส้นสายตาของสัญญาณจากตัวส่งมายังตัวรับ (LoS) พื้นที่โดยรอบมีต้นไม้สูง (10-15 m) เส้นทางของสัญญาณถูกบดบังโดย Fresnel zone น้อยกว่า 40% ซึ่งถือว่าปลอดภัย ในส่วนของตำแหน่งของอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ จุด CPE M10 จะเป็นหมู่บ้านใหม่ริมเมยที่อยู่ไกลออกไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือเป็นระยะทาง 1.41 km โดยพื้นที่จะมีทั้งสิ่งกีดขวาง ต้นกล้วย ต้นมะขามและทุ่งโล่งสลับกันไป มีเนินเขาเล็กคั่นกลาง ทำให้สัญญาณ ผ่านมาได้ยาก

การติดตั้งเสาสูงที่โรงเรียนเพื่อสำหรับติดตั้งสายอากาศของเครื่องสถานีฐาน (BS) ทางทีมช่างขนาดของฐานมีขนาด 2.5×2.5 m และมีความลึกของหลุม เป็น 1.2 m โดยเสามีความสูง 24 m ดังแสดงในรูปที่ 3.38 (a)-(f)



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

รูปที่ 3.38: การก่อสร้างฐานที่ตั้ง เสาสูงที่โรงเรียนเพื่อสำหรับติดตั้งเสาอากาศของเครื่องสถานีฐาน (BS) (a)-(f)

ทิศทางของสายอากาศและคลื่นนั้น มีโพลาไรซ์เชิงเส้นเป็นแบบโพลาไรซ์ของคลื่นวิทยุแบบแนวตั้ง (Vertical polarization) ซึ่งทำให้สนามไฟฟ้า (Electric field) ของคลื่นสั้นไปในทิศทางแนวตั้ง และทำให้ได้การแยกตัวของสัญญาณ (Isolation) จากช่องสัญญาณอื่นๆ ได้มากที่สุด

บทที่ 4

[ผลการวิจัย และการวิจารณ์ผล]

1) การทดสอบความถูกต้อง การปรับเครื่องเข้าสู่ภาวะมาตรฐาน (Calibration)

ในส่วนของการประเมินทดสอบความถูกต้องของผลจากการตรวจวัดจากระบบของเราซึ่งวัดโดย RF Explorer เปรียบเทียบกับผลจากการวัดโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมาตรฐาน Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer (ปัจจุบันเปลี่ยนชื่อเป็น Keysight) โดยวิธีทั้งต่อผ่านสายเคเบิลโดยตรงและผ่านสายอากาศระหว่างเครื่องสร้างสัญญาณ (Signal generator) และตัวรับสัญญาณทั้ง RF Explorer และเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมาตรฐาน Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer ที่ระดับกำลัง 10 ระดับที่แตกต่างกันจาก -95 dBm ถึง -50 dBm โดยมีสเตร็ปชันละ 5 dBm ในแต่ละช่วงที่ 500 ถึง 800 MHz เราได้ควบคุมตัวแปรหรือปัจจัยต่างๆ เช่น ตำแหน่งที่วัดสัญญาณ สายอากาศ ขั้วต่อ สาย ให้มีค่า มีคุณสมบัติ เหมือนกัน ซึ่งได้

ค่าความแตกต่างของกำลังของสัญญาณที่รับได้ในแต่ละช่วงความถี่ต่างๆ ที่รับโดย RF Explorer และ โดย Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer ในกรณี ไร้สายมีค่า 6.98 dB มีค่ามากกว่าค่าความแตกต่างที่ได้รับในกรณีผ่านสายเคเบิลมีค่า 1.96 dB เนื่องจากคลื่นต้องเดินทางผ่านอากาศและมีลดทอนสัญญาณมากกว่าผ่านสายเคเบิล และค่าที่กำลังของสัญญาณที่รับได้นั้นขึ้นอยู่กับความไวในการตอบสนอง (Sensitivity) ของแต่ละอุปกรณ์ซึ่งแน่นอน Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer ซึ่งเป็นเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมาตรฐานราคาแพงย่อมมีความไวในการตอบสนองที่ดีกว่า

นอกจากนี้ มีข้อสังเกตจากการคณะกรรมการว่าบางช่วงความถี่ มีความแตกต่างกันมาก เช่น บนความถี่ 675 MHz มีค่าแตกต่างกันถึง 13.68 dB เราได้มีการทดสอบซ้ำ รวมทั้งใช้สัญญาณอื่นๆ ด้วย สรุปได้ว่าเป็นเนื่องมาจากเครื่อง Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer ไม่ได้ถูกปรับเครื่องเข้าสู่ภาวะมาตรฐาน (Calibration) ในช่วงความถี่ดังกล่าว

นอกจากนั้นเราได้ ขยายช่วงความถี่สำหรับการทดสอบให้ครอบคลุมขอบล่างบนความถี่ 470 MHz เพื่อรองรับการปรับเปลี่ยนความถี่สำหรับกิจการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลในอนาคต การทดลองเพิ่มเติมที่ความถี่ 470 MHz ได้ถูกทำซึ่งมีค่าความแตกต่างที่ 1.83 dB

2) ศึกษาการใช้งานและทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับคลื่นความถี่โทรทัศน์ที่ไม่ได้ใช้งาน

เราได้ทำศึกษาและพัฒนาระบบการตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ ออกแบบการตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ทั้งแบบเคลื่อนที่ (Moving location measurement) เพื่อสามารถเก็บข้อมูลหลายๆ ตำแหน่งในแต่ละพื้นที่อย่างต่อเนื่อง และออกแบบ

ณ ตำแหน่งตายตัว (Fixed location) เพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลได้ละเอียดมากขึ้น หลังจากที่เราทดสอบความถูกต้องของระบบวัดดังกล่าวโดยการปรับเครื่องเข้าสู่ภาวะมาตรฐาน (Calibration) เทียบกับเครื่องมือวัดสเปกตรัมแบบมาตรฐานที่มีราคาแพง เราได้ทดสอบระบบการตรวจวัดการใช้ งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ โดยการวัดคลื่นสัญญาณในบริเวณสถาบันเอไอที จังหวัดปทุมธานี ซึ่งเทียบได้กับเขตท้องที่ชุมชน ในเขตเมือง ต่างจังหวัด (Suburban area) จากปัญหาความไม่แม่นยำในการตัดสินใจว่าช่องสัญญาณนั้นว่างหรือไม่ว่างเมื่อเทียบกับค่าความจริงขั้นพื้นฐาน (Ground truth)

โดยทั่วไปค่าเทรสโฮลด์ที่นักวิจัยส่วนใหญ่เลือกใช้ จะใช้ค่าที่ถูกกำหนดไว้โดยคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร เอฟซีซีของรัฐบาลสหรัฐอเมริกา (FCC) ที่ระดับ -114dBm ซึ่งเป็นค่าที่ Conservative เกินไปซึ่งเขาตั้งไว้เพื่อป้องกันในกรณีที่ย่ำแย่ที่สุด (Worst case) ของช่องสัญญาณที่มีการลดลงหรือเพิ่มขึ้นของระดับสัญญาณอย่างทันทีทันใดหรือที่เราเรียกกันว่าเฟดดิ้ง (Fading) ซึ่งในกรณีที่แย่มากที่สุดนั้นคือเราไม่มีเส้นทางตรงหรือแนวเส้นสายตาของสัญญาณจากตัวส่งมายังตัวรับ (Line-of-Sight (LoS)) ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเฟดดิ้งในกรณีจะถูกเรียกว่าเรียกว่าเรเลห์เฟดดิ้ง (Rayleigh fading) ซึ่งช่องสัญญาณก็จะถูกเรียกว่าช่องสัญญาณเรเลห์เฟดดิ้ง (Rayleigh fading channel) บางทีนักวิจัยก็จะเลือกใช้ค่าค่าเทรสโฮลด์จากประสบการณ์ (Rule of Thumb) เช่นค่าที่ประมาณที่ใช้กันอยู่ทั่วไปอันได้แก่ -100dBm [31] ในโครงการนี้นอกจากเราใช้ค่าเทรสโฮลด์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปอันได้แก่ -100dBm เมื่อใช้ค่าเทรสโฮลด์แบบตายตัว -100dBm โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลจากการวัดภายในอาคารซึ่งสัญญาณคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ได้ถูกบดบังอย่างสุดก่อนที่จะมาถึงสายอากาศของระบบวัดก็จะเกิดปรากฏการณ์ชาโดว์อิงเงฟเฟกต์ (Shadowing effect) ทำให้การตัดสินใจเป็นไปอย่างไม่ถูกต้องนัก

เราจะวิจัยศึกษาเชิงลึกในการหาค่าเทรสโฮลด์ที่เหมาะสมด้วย เนื่องจากการตั้งค่าเทรสโฮลด์ที่เป็นค่าตายตัว (Fixed threshold setting) เพื่อใช้ในการตัดสินใจว่าเป็นช่องว่าง TVWS หรือมีสัญญาณโทรทัศน์ตลอดทั่วทุกช่วงความถี่โทรทัศน์นั้นไม่เหมาะสม เนื่องจากคุณสมบัติของสัญญาณรบกวน (Noise) เช่นค่าความหนาแน่นของกำลังสเปกตรัม (Power spectral density) หรือค่าความแปรปรวน (Variance) นั้นมีค่าไม่คงที่ตลอดทั้งช่วงความถี่โทรทัศน์ (Noise fluctuation) หากเราใช้ค่าเทรสโฮลด์ที่เป็นค่าตายตัวตลอดทั่วทุกช่วงความถี่โทรทัศน์นั้น ทำให้เกิดการตีเทคหรือตรวจจับที่ผิดพลาดคลาดเคลื่อน อันส่งผลให้จำนวนช่องความถี่โทรทัศน์ที่ว่าง (TVWS) ที่คำนวณได้ไม่ถูกต้อง ดังนั้นเราศึกษาวิจัยหาวิธีต่างๆ โดยใช้ความรู้พื้นฐานจากการประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) และการประมวลผลสัญญาณแบบสุ่ม (Stochastic signal processing) มาคำนวณหาค่าเทรสโฮลด์ที่เหมาะสมกว่า นั่นคือการตั้งระดับค่าเทรสโฮลด์แบบปรับเปลี่ยนได้ (Adaptive threshold setting) ซึ่งวิธีการการตั้งระดับค่าเทรสโฮลด์แบบปรับเปลี่ยนได้

การตั้งค่าเทรชโฮลด์เป็นไปแบบปรับเปลี่ยนได้ไม่ว่าจะเป็นวิธีการแบบเอฟซีเอ็มอี (Forward Consecutive Mean Excision (FCME) Method) หรือวิธีการแบบแอลเอดี (Localization Algorithm Based on Double-Thresholding (LAD)) สามารถได้ผลลัพธ์การตัดสินได้ดีขึ้นเมื่อช่องสัญญาณนั้นว่าง เนื่องจากวิธีการดังกล่าวต้องการให้มี ส่วนที่ไม่มีสัญญาณและเป็นเพียงสัญญาณรบกวน (Noise) ก่อน เป็นเซตที่สะอาด (Clean set) ซึ่งเซตเริ่มต้นนี้จะมีขนาดประมาณ 10% ของเซตข้อมูลทั้งหมด แต่เมื่อช่องสัญญาณนั้นไม่ว่างประกอบด้วยสัญญาณคลื่นกิจการโทรทัศน์ ทั้ง FCME และ LAD ไม่สามารถที่เพิ่มความถูกต้องในการตัดสินได้ ดังนั้นเราแก้ไขโดยการเสริม สัญญาณรบกวนเทียมเข้าไปเป็นวิธี Noise added FCME และวิธี Noise added LAD ซึ่งปริมาณสัญญาณรบกวนที่ใส่เข้าไปเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับข้อมูลทั้งหมด โดยเราจะปรับค่าดังกล่าวไปเรื่อยๆ จาก 0, 5, 10, 15, 20, 25,... เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียบกับข้อมูลทั้งหมดที่เหมาะสมที่สุด (Optimal percentage) ทำให้เราสามารถตัดสินว่าช่องสัญญาณนั้นว่างหรือไม่ว่างได้ถูกต้องแม่นยำขึ้น

ในการทดสอบวัดคลื่นสัญญาณเราจะพิจารณาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบวัด (Measurement parameters) ต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1) ชนิดที่ใช้ในการทดสอบวัด (Measurement type)
- 2) พื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบวัด (Measurement location)
- 3) สภาพแวดล้อม (Measurement environment)
- 4) ระดับความสูงที่ใช้ในการทดสอบวัด (Measurement height level)
- 5) เวลาใช้ในการทดสอบ (Measurement time)

ชนิดที่ใช้ในการทดสอบวัด (Measurement type)

- 1) ระบบการวัด ณ ตำแหน่งตายตัว (Fixed location or static measurements) ซึ่งในแต่ละพื้นที่ที่เราจะวัดข้อมูลได้ละเอียดมากขึ้นและยังสามารถที่จะวัดในตำแหน่งความสูงต่างๆ กันด้วย
- 2) ระบบการวัดโดยเคลื่อนที่ (Mobile measurements) เพื่อสามารถเก็บข้อมูลหลายๆ ตำแหน่งในแต่ละพื้นที่อย่างต่อเนื่อง

พื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบวัด (Measurement location)

- 1) ท้องที่หนาแน่นในเขตกรุงเทพมหานคร (Urban area)
- 2) ท้องที่ชุมชน ในเขตเมือง ต่างจังหวัด (Suburban area) ซึ่งเราใช้สถาบันเอไอทีเพื่อความสะดวกในการทดสอบเบื้องต้น

- 3) ท้องที่ชนบทห่างไกลเข้าถึงยาก (Rural area) ในพื้นที่หมู่บ้านไทยสามัคคี ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ที่กล่าวไว้ข้างต้น

สภาพแวดล้อมในการทดสอบวัด (Measurement environment)

- 1) ในอาคาร (Indoor)
- 2) นอกอาคาร (Outdoor)

ระดับความสูงที่ใช้ในการทดสอบวัด (Measurement height level)

- 1) ระดับพื้นดิน (Ground floor)
- 2) ระดับชั้นหนึ่ง (First floor)
- 3) ระดับชั้นดาดฟ้า (Rooftop)

ตารางที่ 4.1: สรุปลการตั้งค่าพารามิเตอร์ในการวัด (Measurement parameters setting)

พารามิเตอร์ในการวัด (Measurement Parameters)	ค่า (Value)	หมายเหตุ (Remark)
ช่วงความถี่ในการวัด (Frequency range)	500-800 MHz	UHF TV band (510-790 MHz)
แบนด์วิธที่ความละเอียด ในการวัด (Resolution bandwidth or Frequency step)	500 kHz 250 kHz	500 kHz เป็นค่ากำหนด แรกเริ่ม (Default value) 250 kHz ปรับเพื่อสังเกตผล ของค่าความละเอียดของแบนด์ วิธ
แบนด์วิธของสัญญาณ 1 ช่อง (Signal bandwidth)	8 MHz	ETSI Standard มาตรฐานยุโรป
จำนวนช่องสัญญาณ (Number of channels)	35 Channels	
วิธีการตั้งค่าเทรชโฮลด์ (Threshold setting method)	-100 dBm, NP, FCME, LAD	ค่าอัตราการตรวจจับผิดพลาดที่ กำหนดขึ้นล่วงหน้า Constant false alarm rates

		(CFAR) กรณี NP (0.001), กรณี FCME (0.001), กรณี LAD upper threshold (0.001) กรณี LAD low threshold (0.001)
ความถี่กลาง (Center frequency)	650 MHz	
หลักการพิจารณาตัดสินว่าช่อง ความถี่ว่างหรือไม่ว่างโดยดูจาก เปอร์เซ็นต์ของจุดตัวอย่างที่ มีกำลังสัญญาณเทียบกับค่าเทรส โฮลด์ (Percentage of samples for channel availability)	มากกว่า (Greater than) 80 % ถือว่าไม่ว่าง	เพื่อชดเชย Spikes
สายอากาศ (Antenna)	Nagoya NA-773 telescopic antenna	เป็นสายอากาศที่มีการกระจาย สัญญาณรอบด้านทุกทิศทาง (Omni-directional)

ข้อมูลในการวัดทั้งหมดจะถูกเก็บในเซิร์ฟเวอร์ที่แชร์ข้อมูล (File sharing server) ซึ่งจะ
เป็นเก็บข้อมูลและแสดงผลเบื้องต้นที่ได้จากการวัด TWWS ทั่วโลก เราสามารถอัปโหลดและ
ดาวน์โหลดทั้งข้อมูลจากการวัดตามลิงค์ <http://wireless.ictp.it/twvs/>

หมายเหตุ*

Number of detection หมายถึง จำนวนช่องสัญญาณที่ไม่ว่างที่ตรวจจับได้ ซึ่งหมายความว่า
เป็นจำนวนช่องสัญญาณที่วัดได้ว่าไม่ว่างและในความเป็นจริงขั้นพื้นฐานก็ไม่ว่าง $Pr\{H1|H1\}$

Number of miss detection หมายถึง จำนวนช่องสัญญาณความเป็นจริงขั้นพื้นฐานไม่ว่าง แต่วัด
ไม่ได้ วัดได้เป็นว่าง $Pr\{H0|H1\}$

Number of False alarm จำนวนช่องสัญญาณที่ในความเป็นจริงขั้นพื้นฐานว่างแต่วัดได้เป็นไม่ว่าง
 $Pr\{H1|H0\}$

2.1) การทดสอบระบบการวัด ณ ตำแหน่งตายตัว ในสถาบันเอไอที (ปทุมธานี) ซึ่งถือเป็นท้องที่ชุมชน ในเขตเมือง ต่างจังหวัด (Suburban area)

เราได้เริ่มต้นทดสอบวัด (Measurement environment) สภาพแวดล้อมทั้งภายในอาคาร (Indoor) และภายนอกอาคาร (Outdoor) ในสถาบันเอไอที (ปทุมธานี) โดยเราพิจารณาความสูงของตำแหน่งสายอากาศของระบบวัดเป็นปัจจัยหลัก ในการทดสอบวัดภายในอาคาร เราพิจารณาสองตำแหน่งได้แก่ ที่ระดับพื้นดิน สูงประมาณ 1 m และระดับชั้น 1 สูงประมาณ 5 m โดยที่ระดับพื้นดิน มีสภาพแวดล้อมดังแสดงในรูปที่ 4.1 และระดับชั้น 1 มีสภาพแวดล้อมดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1: สภาพแวดล้อมทั้งภายในอาคาร ห้องที่วัด ณ ระดับพื้นดิน



รูปที่ 4.2: สภาพแวดล้อมทั้งภายในอาคาร ห้องที่วัด ณ ระดับชั้น 1

ส่วนในการทดสอบวัดภายนอกอาคาร เราพิจารณาสองตำแหน่งได้แก่ ที่ระดับพื้นดิน สูงประมาณ 1 m และระดับชั้นดาดฟ้า สูงประมาณ 15 m โดยมีสภาพแวดล้อมดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3: สภาพแวดล้อมทั้งภายนอกอาคาร ที่ระดับพื้นดิน สูงประมาณ 1 m



รูปที่ 4.4: สภาพแวดล้อมทั้งภายนอกอาคาร ที่ระดับชั้นดาดฟ้า สูงประมาณ 15 m

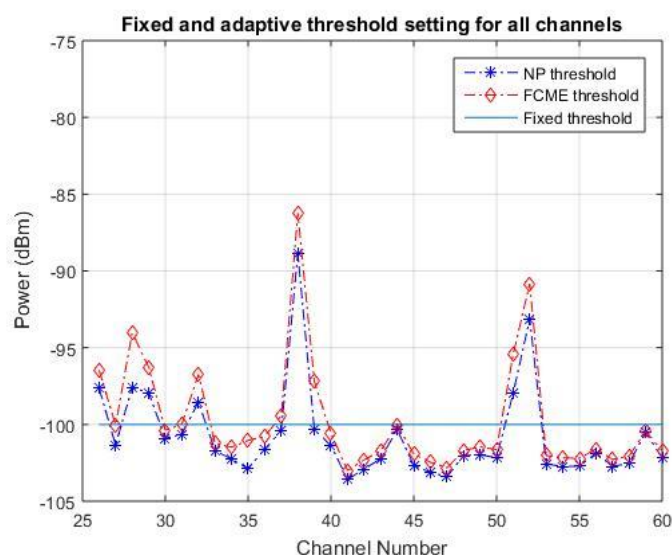
เราเริ่มจากพิจารณาตำแหน่งตายตัวและการวิเคราะห์โดยใช้กำหนดค่าเทรสโฮลด์ตายตัว (Fixed threshold) ที่ -100dBm เป็นผลลัพธ์อ้างอิง ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลลัพธ์มีความคลาดเคลื่อนไม่แม่นยำโดยเฉพาะอย่างยิ่ง การวัดภายในอาคาร สิ่งที่เกิดขึ้นจะมีปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ฮิดเดนโนดมาร์จิ้น (Hidden node margin (HNM)) ซึ่งอธิบายได้ว่า สัญญาณโทรทัศน์ ตำแหน่งที่วัด (ที่ความสูงต่างๆ กัน) ที่เป็นไปได้จะถูกแทรกสอดรบกวน (Interfere) อันสืบเนื่องจากเส้นทางการเคลื่อนที่ของสัญญาณโทรทัศน์ถูกบดบังอย่างสุ่ม ทำให้เกิดปรากฏการณ์ ชาโดว์อิงเอฟเฟกต์ (Shadowing effect) รวมถึง เฟดดิ้งขนาดเล็ก (Small-scale fading) ซึ่งเกิดจากการแพร่กระจายหลายวิถีทิศทางของคลื่นสัญญาณ (Multipath fading) ซึ่งโดยปกติภายในอาคารเราไม่ได้รับ เส้นทางโดยตรงหรือแนวเส้นสายตาจากตัวส่งมาตัวรับ (Non line-of-sight (NLoS)) แบบจำลองเฟดดิ้งแพร่กระจายหลายวิถีทิศทางมีการแจกแจงตัวแปรสุ่มแบบเรย์เลห์ (Rayleigh distribution) โดยทั้งเฟดดิ้งขนาดเล็กและชาโดว์อิงเอฟเฟกต์นี้ ทำให้ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อน จึงทำให้จำนวนช่องสัญญาณที่ไม่ว่างที่ตรวจจับได้ ซึ่งหมายความว่า เป็นจำนวนช่องสัญญาณที่วัดได้ว่าไม่ว่างและในความเป็นจริงขั้นพื้นฐานก็ไม่ว่าง $\Pr\{H1|H1\}$ มีค่าต่ำ จำนวนช่องสัญญาณที่ไม่ว่างแต่วัดได้เป็นว่าง $\Pr\{H0|H1\}$ มีค่าสูง

สำหรับการวัดภายนอกอาคาร (Outdoor) เราได้วัดที่สองระดับอันได้บนพื้นดินและระดับชั้นดาดฟ้า จะเห็นว่าถึงแม้ภายนอกอาคารแต่อยู่บนระดับพื้นดิน ผลที่ได้ไม่แตกต่างจากการวัดภายในอาคารระดับพื้นดิน อย่างไรก็ตามในการวัดระดับชั้นดาดฟ้า ผลจากการวัดและการวิเคราะห์ที่เรา กำหนดค่าเทรสโฮลด์ตายตัวที่ -100dBm นี้ได้ผลที่น่าพอใจมากขึ้น

เมื่อพิจารณาค่า Resolution bandwidth ที่แตกต่างกันได้แก่ 250 kHz และ 500 kHz ตามลำดับ โดยทั้งสองเป็นการวัดเดียวกันแต่เราปรับ Resolution bandwidth เพื่อดูผลการวิเคราะห์ ซึ่งกล่าวโดยรวม Resolution bandwidth ค่าน้อยที่ 250 kHz ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีกว่า

นอกจากปัจจัยการเดินทางของคลื่นภายในอาคารแล้ว สายอากาศที่ใช้ก็มีส่วนต่อผลลัพธ์จากการวัดที่ได้ ซึ่งเราใช้สายอากาศแบบรอบตัวทุกทิศทาง (Omnidirectional antenna) เราสามารถทำให้รับคลื่นได้ทุกต้องแม่นยำขึ้นโดยใช้สายอากาศแบบทิศทาง (Directional antenna) ซึ่งตามมาตรฐานระบบ IEEE 802.22 WRAN ได้ชี้แจงเช่นกัน ดังนี้ อุปกรณ์ตัวรับสัญญาณ ควรใช้สายอากาศแบบทิศทางและควรติดตั้งบนระดับ 10 m เหนือพื้นดินภายนอกอาคาร ด้วยผลรับที่ได้นี้เป็นข้อมูลที่สำคัญอย่างมากในการออกแบบกำหนดตำแหน่งของ อุปกรณ์ตัวรับสัญญาณในแผนการดำเนินงานที่ 3 ที่ศึกษาและพัฒนาทดสอบและติดตั้งระบบสื่อสารต้นแบบความเร็วสูงผ่านคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ในพื้นที่เป้าหมาย

เราได้เสนอวิธีการใช้ค่าเทรชโฮลด์แบบปรับเปลี่ยนได้ (Adaptive thresholds) เพื่อปรับปรุงผลการวิเคราะห์ให้ได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำขึ้น ซึ่งเราเสนอวิธีการตั้งค่าเทรชโฮลด์แบบปรับเปลี่ยนได้ 3 วิธีตามที่อธิบายไว้แล้วเบื้องต้นดังต่อไปนี้ 1) NP Criterion 2) FCME และ 3) LAD จะเห็นได้จากตัวอย่างในรูปที่ 4.5 ค่าระดับเทรชโฮลด์ของ FCME นั้นเปลี่ยนแปลงไปตามความแรงของสัญญาณที่รับได้ตามช่องสัญญาณต่างๆ ขณะที่ค่าเทรชโฮลด์ที่กำหนดตายตัวมีค่าอยู่ที่ -100dBm ทุกช่องสัญญาณต่างๆ ซึ่งชัดเจนว่าการใช้ค่าเทรชโฮลด์ที่กำหนดตายตัว ไม่เหมาะสมสำหรับการตรวจจับช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลง



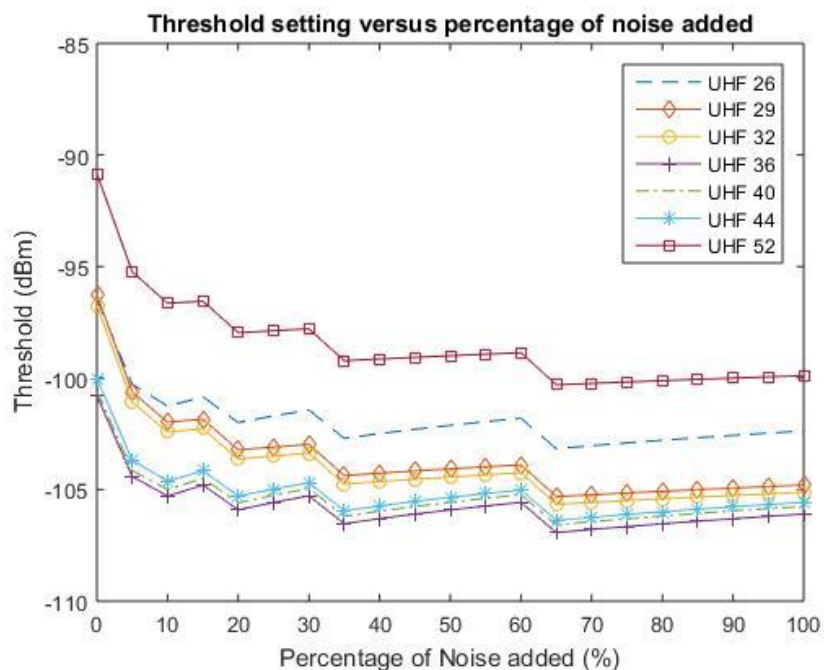
รูปที่ 4.5: ตัวอย่างการเปรียบเทียบกำหนดค่าเทรชโฮลด์ตายตัว และแบบปรับเปลี่ยนได้ที่ช่องสัญญาณต่างๆ ของการวัดในอาคารระดับพื้นดิน ในสถาบันเอไอที

เมื่อพิจารณาช่องสัญญาณที่ว่างเช่น UHF 38 เมื่อเราวัดค่าด้วยระบบ RF Explorer และตรวจจับด้วย Fixed threshold -100dBm ตัดสินเป็นไม่ว่างซึ่งไม่ถูกต้องด้วยเหตุผลตามที่อธิบายไว้เบื้องต้น เมื่อใช้ Adaptive threshold ในกรณีนี้ไม่ว่าจะเป็นวิธีใดๆ NP Criterion FCME หรือว่า LAD เราสามารถที่เพิ่มความถูกต้องในการตัดสินใจได้ เนื่องจากช่อง UHF 38 เป็นช่องที่ว่างไม่มีสัญญาณและเป็นเพียงสัญญาณรบกวน (Noise) ถือเป็นเซตที่สะอาด (Clean set) โดยเห็นได้จากระดับค่าเทรสโฮลด์นั้นขยับขึ้นจาก -100 dBm NP (-87.3914dBm) FCME (-84.6877dBm) และ LAD upper (-84.6877dBm) ตามลำดับ ซึ่งทำให้ได้รับค่าจำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลังเหนือระดับค่าเทรสโฮลด์และเปอร์เซ็นต์จำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลังเหนือระดับค่าเทรสโฮลด์น้อยลงตามลำดับ ซึ่งสามารถทำให้ตัดสินใจได้เป็นช่องว่างตรงตามค่าความจริงขั้นพื้นฐาน

ในทางตรงกันข้าม หากพิจารณาช่องสัญญาณที่ไม่ว่างเช่น UHF 26 เมื่อเราวัดค่าด้วยระบบ RF Explorer และตรวจจับด้วย Fixed threshold -100dBm ไม่เจอโดยตัดสินใจเป็นว่างซึ่งไม่ถูกต้องด้วยเหตุผลตามที่อธิบายไว้เบื้องต้น เมื่อใช้ค่าเทรสโฮลด์แบบปรับเปลี่ยนได้ ในกรณีนี้ไม่ว่าจะเป็นวิธีใดๆ FCME หรือว่า LAD ไม่สามารถที่เพิ่มความถูกต้องในการตัดสินใจได้ เนื่องจากวิธีการดังกล่าวต้องการให้มี ส่วนที่ไม่มีสัญญาณและเป็นเพียงสัญญาณรบกวน (Noise) ก่อน เป็นเซตที่สะอาด (Clean set) ซึ่งเซตเริ่มต้นนี้จะมีขนาดประมาณ 10% ของเซตข้อมูลทั้งหมดตั้งที่อธิบายไว้ข้างต้น ดังนั้นในเมื่อช่อง UHF 26 นั้นไม่ว่างวิธีดังกล่าวก็ไม่สามารถทำงานได้ถูกต้อง ซึ่งเราจะนำเสนอวิธีการแก้ไขในภาควิเคราะห์ถัดไป โดยการเสริม สัญญาณรบกวนเทียมเข้าไปเป็นวิธี Noise added FCME และวิธี Noise added LAD

กล่าวโดยรวมการใช้ค่าเทรสโฮลด์แบบปรับเปลี่ยนได้ ไม่ว่าจะเป็น FCME หรือว่า LAD ใช้ได้ดีเมื่อช่องสัญญาณนั้นว่าง เนื่องจากวิธีการดังกล่าวต้องการให้มี ส่วนที่ไม่มีสัญญาณและเป็นเพียงสัญญาณรบกวน ก่อน เป็นเซตที่สะอาด ซึ่งเซตเริ่มต้นนี้จะมีขนาดประมาณ 10% ของเซตข้อมูลทั้งหมด เมื่อช่องสัญญาณนั้นไม่ว่างประกอบด้วยสัญญาณคลื่นกิจการโทรทัศน์ ทั้ง FCME และ LAD ไม่สามารถที่เพิ่มความถูกต้องในการตัดสินใจได้ ดังนั้นเราแก้ไขโดยการเสริม สัญญาณรบกวนเทียมเข้าไปเป็นวิธี Noise added FCME และวิธี Noise added LAD ซึ่งปริมาณสัญญาณรบกวนที่ใส่เข้าไปเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับข้อมูลทั้งหมด จะเห็นจากรูปที่ 4.6 เป็นกรณีตัวอย่างที่ได้จากการวัดภายในอาคาร ระดับพื้นดิน ที่สถาบันเอไอที ว่าเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียบกับข้อมูลทั้งหมด ค่าเทรสโฮลด์แบบปรับเปลี่ยนได้ก็จะมีค่าลดลงจนถึงค่าเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียบกับข้อมูลทั้งหมดค่าหนึ่ง ค่าเทรสโฮลด์ก็จะเริ่มคงที่ ซึ่งแน่นอนว่า การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal percentage) ของค่าเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียบกับข้อมูลทั้งหมดนั้นเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจาก การเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนมีผลโดยตรงต่อค่าเวลาการตรวจจับ (Sensing time) ของตัวจับสัญญาณ (Detector) โดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ในเบื้องต้นเราจะปรับค่าดังกล่าวไป

เรื่อยๆ จาก 0 ถึง 100 โดยเพิ่มทีละ 5 นั่นคือ 0, 5, 10,..., 100 เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียบกับข้อมูลทั้งหมดที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งเป็นระดับค่าเทรสโฮลด์ที่เปลี่ยนไปกับเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนที่เสริมเข้าไปในแต่ละช่องสัญญาณ (ในแต่ละช่องสัญญาณไม่จำเป็นต้องมีค่าเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียบกับข้อมูลทั้งหมดที่เหมาะสมที่สุดเท่ากัน) จะเห็นได้ว่าค่าต่ำสุดในกรณีตัวอย่าง อยู่ที่ 65 % สัญญาณรบกวนเทียบกับข้อมูลทั้งหมด นอกจากนี้ เราหาวิธีการค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการของทางวิเคราะห์เชิงลึก (Analytical framework) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการใช้วิธีการลองปรับค่าดังกล่าวไปเรื่อยๆ เช่นนี้ ซึ่งจะอธิบายในส่วนถัดไป

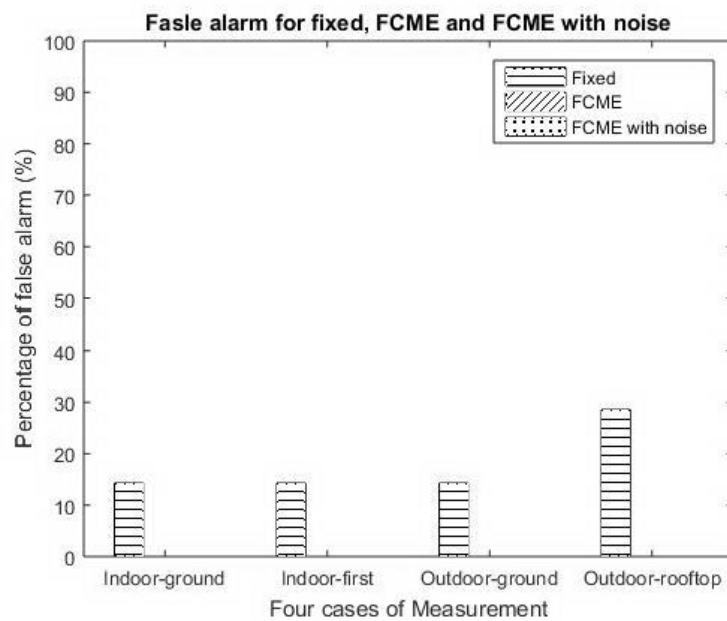


รูปที่ 4.6: ระดับค่าเทรสโฮลด์ที่เปลี่ยนไปกับเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนที่เสริมเข้าไปสำหรับช่องสัญญาณที่ไม่วางต่างๆ UHF 26 UHF 29 UHF 32 UHF 36 UHF 40 UHF 44 UHF 52 สำหรับการวัดภายในอาคารระดับพื้นดินที่สถาบันเอไอที

หลังจากที่เสริมสัญญาณรบกวนเข้าไป เราก็คำนวณหาค่าเทรสโฮลด์แบบปรับเปลี่ยนใหม่เป็นวิธี Noise added FCME และวิธี Noise added LAD ซึ่งนำไป เปรียบเทียบกับค่าเทรสโฮลด์แบบปรับเปลี่ยน FCME และ LAD แบบเดิม ซึ่งเห็นได้จากผลลัพธ์ว่า ด้วยวิธีการดังกล่าวทำให้เห็นเปอร์เซ็นต์จำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลังเหนือระดับค่าเทรสโฮลด์เทียบกับจำนวนจุดตัวอย่างทั้งหมดและการตัดสินใจตรวจจับ ได้ถูกต้องมากขึ้น ในการปฏิบัติจริง การเสริมสัญญาณรบกวนเข้าไปอาจจะทำโดยใช้ระดับสัญญาณรบกวนของช่องสัญญาณว่างเปล่าที่อยู่ใกล้มากที่สุด แทนการใช้สัญญาณรบกวนที่เสริมเข้า

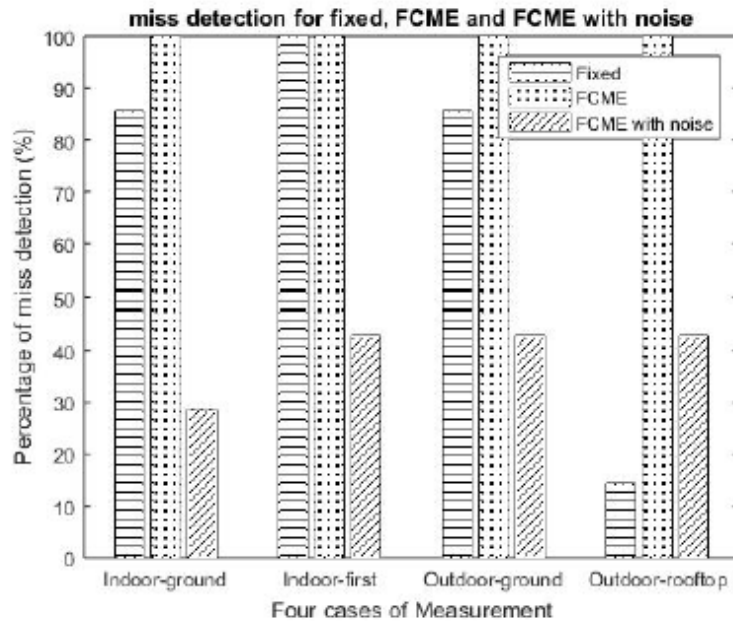
ในการวิเคราะห์ผลประสิทธิภาพในการตรวจจับของแต่ละวิธี เราจะประเมินจากค่าดังต่อไปนี้

- 1) Number of detection หมายถึง จำนวนช่องสัญญาณที่ไม่ว่างที่ตรวจจับได้ ซึ่งหมายความว่า เป็นจำนวนช่องสัญญาณที่วัดได้ว่าไม่ว่างและในความเป็นจริงชั้นพื้นฐานก็ไม่ว่าง $\Pr\{H1|H1\}$
- 2) Number of miss detection หมายถึง จำนวนช่องสัญญาณความเป็นจริงชั้นพื้นฐานไม่ว่าง แต่วัดไม่ได้ วัดได้เป็นว่าง $\Pr\{H0|H1\}$ และ
- 3) Number of False alarm จำนวนช่องสัญญาณที่ในความเป็นจริงชั้นพื้นฐานว่างแต่วัดได้เป็นไม่ว่าง $\Pr\{H1|H0\}$



รูปที่ 4.7: ค่าเปอร์เซ็นต์ของ False alarm ของการวัดทั้งสี่แบบ

ดังแสดงในรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ของ False alarm ซึ่งสามารถแปลได้ว่า ช่องสัญญาณที่ในความเป็นจริงชั้นพื้นฐานว่างแต่วัดได้เป็นไม่ว่าง ในกรณีของวิธี FCME และวิธี Noise added FCME มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ค่าเทรสโวลต์มีค่าค่อนข้างสูง ขณะที่ค่าเทรสโวลต์ที่ตั้งแบบตายตัวได้ค่าเปอร์เซ็นต์ของ False alarm 15% ในการวัดส่วนใหญ่ ยกเว้นในกรณีของการวัดนอกรอาคาร บนชั้นดาดฟ้าที่ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ของ False alarm 30%



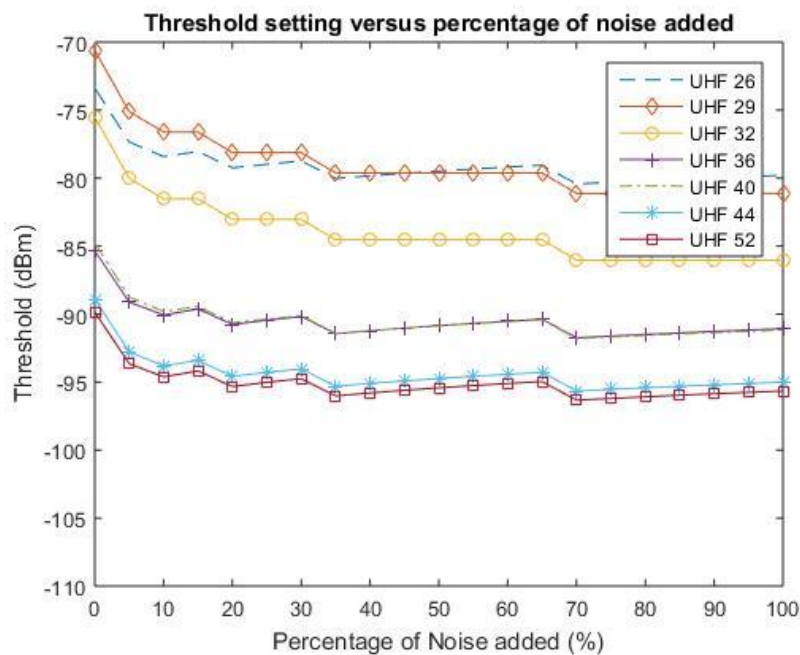
รูปที่ 4.8: ค่าเปอร์เซ็นต์ของ Miss detection ของการวัดทั้งสี่แบบ

ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยทั่วไป วิธี Noise added FCME จะมีผลค่า Miss detection ที่ดีกว่าทั้งแบบตั้งค่าเทรสโพลด์ตายตัวและแบบวิธี FCME ขณะที่ วิธี FCME ได้ผลลัพธ์ 100% Miss detection ในทุกกรณี นั่นคือ ช่องสัญญาณความเป็นจริงขึ้นพื้นฐานไม่ว่าง แต่วัดได้เป็นว่าง เราสามารถอธิบายได้ตามเหตุผลที่ได้อธิบายแล้วข้างต้นว่า วิธี FCME นั้นต้องการ ส่วนที่ไม่มีสัญญาณ และเป็นเพียงสัญญาณรบกวนก่อน เป็นเซตที่สะอาด เริ่มต้นนี้จะมีขนาดประมาณอย่างน้อย 10% ของเซตข้อมูลทั้งหมดเพื่อให้สามารถตรวจจับสัญญาณได้ดีขึ้น เราสามารถสังเกตได้ว่าในกรณี กรณีของการวัดนอกอาคาร บนชั้นดาดฟ้า แม้เราจะใช้การตั้งค่าเทรสโพลด์แบบตายตัว สามารถได้ผลลัพธ์ % Miss detection ได้ดีนั่นคือมีค่าน้อยกว่าวิธีอื่นๆ เหตุผลที่สามารถอธิบายผลลัพธ์เช่นนี้ก็ คือ การตั้งค่าเทรสโพลด์แบบตายตัวเราตั้งค่าไว้ที่ -100dB ซึ่งเป็นค่าที่สูง และสามารถกรองเอาการรบกวนของสเปกตรัมใน Sideband ของสัญญาณที่รับได้แรงสุด ณ ตำแหน่งนอกอาคาร บนชั้นดาดฟ้า อย่างไรก็ตาม ณ ตำแหน่งอื่น โดยเฉพาะภายในอาคาร เราจำเป็นต้องใช้ค่าเทรสโพลด์แบบปรับเปลี่ยน และการตรวจจับช่องสัญญาณที่ไม่ว่าง เราต้องมีการเสริมเสริม สัญญาณรบกวนเข้าไปอย่างน้อย 10% ของเซตข้อมูลทั้งหมดดังเช่น วิธี Noise added FCME หรือดังเช่น วิธี Noise added LAD

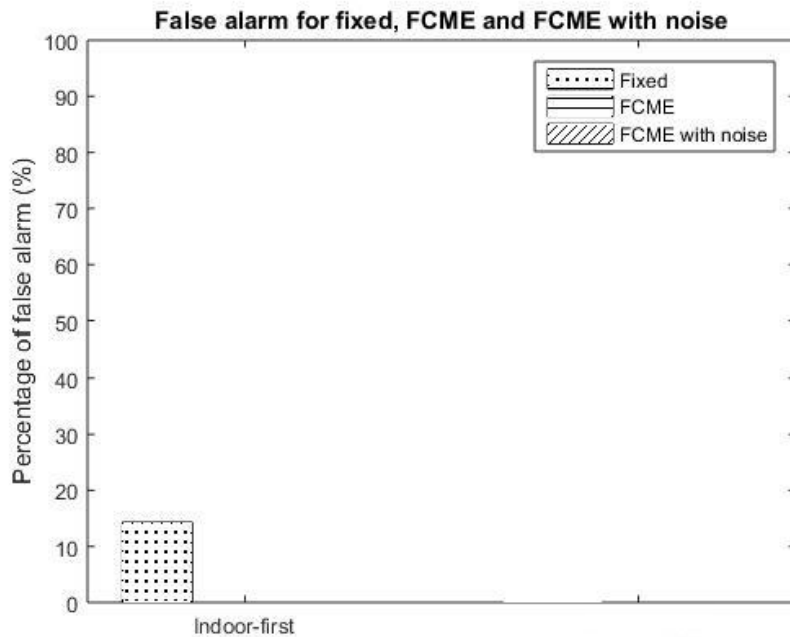
2.2) การทดสอบระบบการวัด ณ ตำแหน่งตายตัว ณ พื้นที่หนาแน่นในเขตกรุงเทพมหานคร (Urban area)

ในการทดสอบวัด ณ พื้นที่หนาแน่นในเขตกรุงเทพมหานคร (Urban area) เราได้รับสัญญาณมาจากสถานีฐานกระจายคลื่นความถี่กิจการโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ตึกใบหยกทาวเวอร์ ตามข้อมูลในตารางที่ 1.2 เช่นเดียวกันกับที่ได้รับที่สถาบันเอไอที ปทุมธานี แต่ความแรงของกำลังสัญญาณที่ได้รับในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร แนนอนต้องแรงกว่า เนื่องจากสัญญาณลดทอนตามระยะทาง ซึ่งผลการวิเคราะห์เป็นได้ทิศทางเดียวกันกับผลการวิเคราะห์ของข้อมูลที่วัดได้ที่สถาบันเอไอที เพื่อความสะดวกเราวัดที่ห้องพักอาศัยอาคาร ชั้น 5 สูงประมาณ 20 m ที่ตำแหน่งระเปียงของห้อง

เช่นกันกับผลการวิเคราะห์ของข้อมูลที่วัดได้ที่สถาบันเอไอที หลังจากที่เสริมสัญญาณรบกวนเข้าไป เราก็คำนวณหาค่าเทรสโฮลด์แบบปรับเปลี่ยนใหม่เป็นวิธี Noise added FCME ซึ่งนำไปเปรียบเทียบกับค่าเทรสโฮลด์แบบปรับเปลี่ยน FCME แบบเดิม ซึ่งเห็นได้จากผลลัพธ์ในรูปที่ 4.9 ว่าด้วยวิธีการดังกล่าวทำให้เห็นเปอร์เซ็นต์จำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลังเหนือระดับค่าเทรสโฮลด์เทียบกับจำนวนจุดตัวอย่างทั้งหมดและการตัดสินใจตรวจจับ ได้ถูกต้องมากขึ้น ในการปฏิบัติจริง การเสริมสัญญาณรบกวนเข้าไป อาจจะทำโดยใช้ระดับสัญญาณรบกวนของช่องสัญญาณว่างเปล่าที่อยู่ใกล้มากที่สุด แทนการใช้สัญญาณรบกวนเทียมที่เสริมเข้า



รูปที่ 4.9: ระดับค่าเทรสโฮลด์ที่เปลี่ยนไปกับเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียมที่เสริมเข้าไปสำหรับช่องสัญญาณที่ไม่ว่างต่างๆ UHF 26 UHF 29 UHF 32 UHF 36 UHF 40 UHF 44 UHF 52 สำหรับการวัดภายในอาคารสูงชั้น 5 (20 m) ณ ตำแหน่งระเปียง เขตกรุงเทพมหานคร

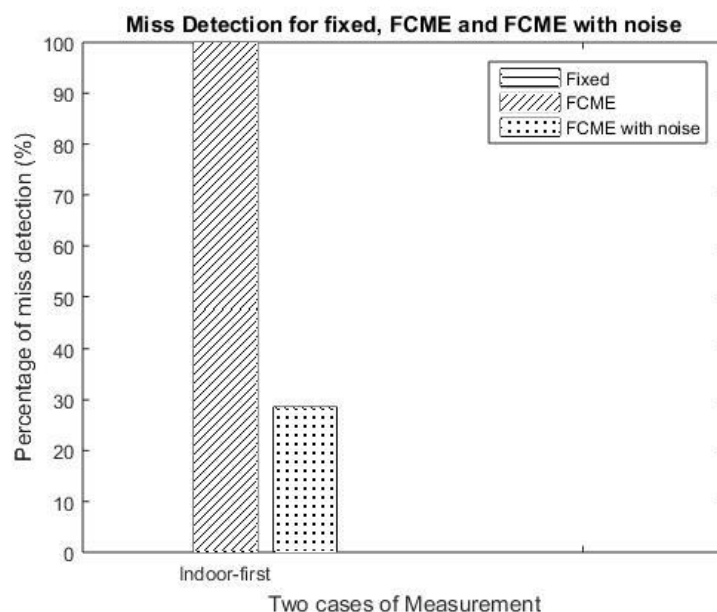


รูปที่ 4.10: ค่าเปอร์เซ็นต์ของ False alarm ของการวัดภายในอาคารสูงชั้น 5 (20 m) ณ ตำแหน่ง
ระเปียง เขตกรุงเทพมหานคร

ในการวิเคราะห์ผลประสิทธิภาพในการตรวจจับของแต่ละวิธี ดังแสดงในรูปที่ 4.10 จะเห็นได้
ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ของ False alarm ซึ่งสามารถแปลได้ว่าช่องสัญญาณที่ในความเป็นจริงชั้นพื้นฐานไม่
แต่วัดได้เป็นไม่ว่าง ในกรณีของวิธี FCME และวิธี Noise added FCME มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งสามารถ
อธิบายได้ว่า ค่าเทรสโพลด์มีค่าค่อนข้างสูง ขณะที่ค่าเทรสโพลด์ที่ตั้งแบบตายตัวได้ค่าเปอร์เซ็นต์ของ
False alarm 15%

และรูปที่ 4.11 แสดงค่า Miss detection ของการวัดภายในอาคารสูงชั้น 5 (20 m) ณ
ตำแหน่งระเปียง เขตกรุงเทพมหานคร ซึ่งหมายถึง จำนวนช่องสัญญาณความเป็นจริงชั้นพื้นฐานไม่
ว่าง แต่วัดไม่ได้ จากผลตามรูปแสดงว่าโดยทั่วไป วิธี Noise added FCME จะมีผลค่า Miss
detection ที่ดีกว่าการตั้งค่าเทรสโพลด์แบบวิธี FCME โดยที่วิธี FCME ได้ผลลัพธ์ 100% Miss
detection นั่นคือ ช่องสัญญาณความเป็นจริงชั้นพื้นฐานไม่ว่าง แต่วัดได้เป็นว่าง เราสามารถอธิบาย
ได้ตามเหตุผลที่ได้อธิบายแล้วข้างต้นว่า วิธี FCME นั้นต้องการ ส่วนที่ไม่มีสัญญาณและเป็นเพียง
สัญญาณรบกวนก่อน เป็นเขตที่สะอาด เริ่มต้นนี้จะมีขนาดประมาณอย่างน้อย 10% ของเขตข้อมูล
ทั้งหมดเพื่อให้สามารถตรวจจับสัญญาณได้ดีขึ้น ขณะที่การตั้งค่าเทรสโพลด์แบบตายตัว สามารถได้
ผลลัพธ์ % Miss detection ได้ดีนั้นคือมีค่าน้อยกว่าวิธีอื่นๆ เหตุผลที่สามารถอธิบายผลลัพธ์เช่นนี้ก็
คือ การตั้งค่าเทรสโพลด์แบบตายตัวเราตั้งค่าไว้ที่ -100dB ซึ่งเป็นค่าที่สูง และสามารถกรองเอาการ

ร้าวไหลของสเปกตรัมใน Sideband ของสัญญาณที่รับได้แรงสุด ซึ่งสามารถตรวจจับจำนวนช่องสัญญาณความเป็นจริงขั้นพื้นฐานไม่ว่างได้ รวมถึงช่องที่ว่างด้วย ซึ่งทำให้เกิดค่าเปอร์เซ็นต์ของ False alarm ดังแสดงในรูปที่ 4.10



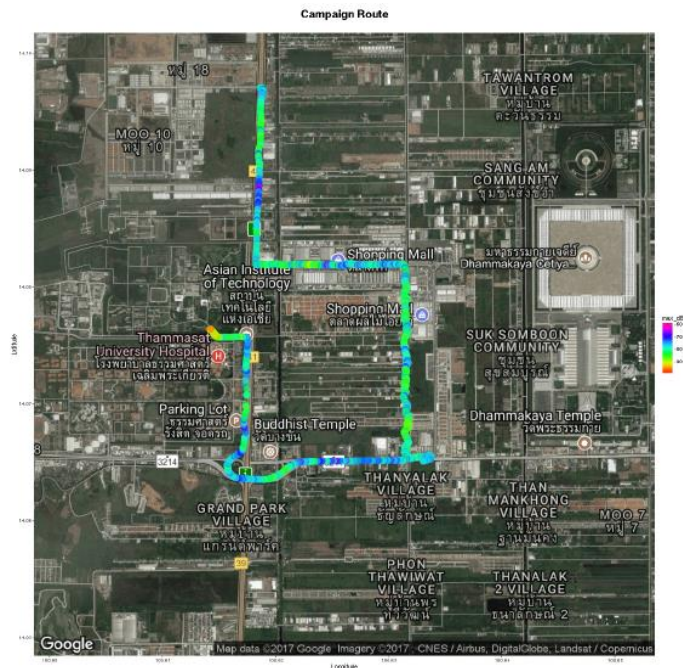
รูปที่ 4.11: ค่าเปอร์เซ็นต์ของ Miss detection ของการวัดภายในอาคารสูงชั้น 5 (20 m) ณ ตำแหน่งระเปียง เขตกรุงเทพมหานคร

2.3) การทดสอบระบบการวัด แบบเคลื่อนที่ บนเส้นทางจากสถาบันเอไอทีไปยังตลาดไท

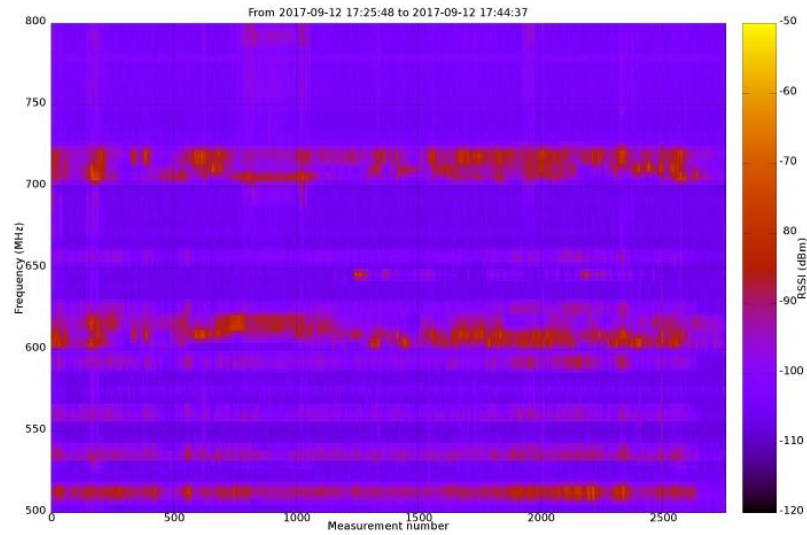
ก่อนนี้จากความเห็นของคณะกรรมการพิจารณาผลการดำเนินโครงการเกี่ยวกับปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler effect) เนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ v อยู่ที่ประมาณ 40-60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (kilometer/hour (km/h)) ดังนั้นผลจากปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ มีน้อยมากจนสามารถละทิ้งไม่พิจารณาได้ ความถี่เลื่อนที่เกิดจากปรากฏการณ์ (Doppler shift) f_s ซึ่งคำนวณจาก $f_s = vf/c$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ ความถี่วิทยุที่ใช้ f อันได้แก่ 500 ถึง 800 MHz ซึ่งคำนวณแล้วมีค่าความถี่เลื่อน f_s เท่ากับ 18.52-29.62 Hz

สำหรับการวัดแบบเคลื่อนที่เบื้องต้น เราวัดบนเส้นทางจากสถาบันเอไอทีไปยังตลาดไทการวัดแบบเคลื่อนที่นี้ เราจะวิเคราะห์เพียงใช้การตั้งเทรสโฮลด์แบบตายตัวเพื่อความสะดวก แต่เพื่อให้สามารถเลือกใช้ค่าเทรสโฮลด์ที่เหมาะสม เราจะตั้งค่าไว้สี่ระดับดังต่อไปนี้ -85dBm, -90dBm, -95dBm, และ -100dBm รูปที่ 4.12 แสดงแผนที่อุณหภูมิ (Heatmap) ระดับกำลังของคลื่นกิจการโทรทัศน์ที่วัดได้ตามเวลาต่างๆ หรือจำนวนการวัด ณ ตำแหน่งบนเส้นทาง (Number of

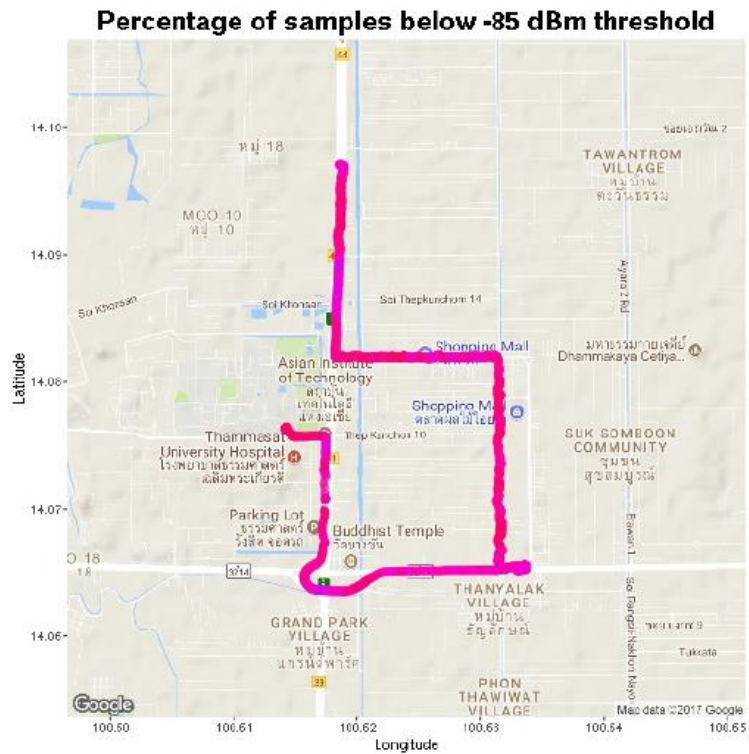
measurements) ซึ่งได้เฉลี่ยรูปที่ 4.13 ซึ่งแสดงรายละเอียดของแผนที่อุณหภูมิในรูปที่ 4.12 โดยแสดงระดับกำลังของคลื่นกิจการโทรทัศน์ที่วัดได้ในแต่ละความถี่ต่างๆ 510-800 MHz (**หมายเหตุ:** ในรูปนี้ในสเกลสีที่แตกต่างไปจากเดิมอันได้แก่จากสีเหลือง สีส้ม สีแดง สีม่วง สีนํ้าเงิน สีนํ้าเงินเข้มจาก -50dbm ถึง -120dbm) รูปที่ 4.14-4.21 การครอบครองคลื่น (Spectrum occupancy) ที่ระดับค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ต่างๆ กัน -85dbm, -90dbm, -95dbm, และ -100dbm ตามลำดับ ซึ่งค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ต่างกัน รูปที่ 4.14 ซึ่งแสดงเปอร์เซ็นต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ -85dbm จะเห็นได้ว่ามีเปอร์เซ็นต์ที่สูง หรือในการกลับกัน Samples ที่มีกำลังสูงกว่าค่าเทรสโฮลด์ (ช่องสัญญาณไม่ว่างถูกใช้) มีเปอร์เซ็นต์ที่ต่ำ เมื่อเราเพิ่มระดับค่าเทรสโฮลด์ -90dbm, -95dbm, และ -100dbm แสดงในรูปที่ รูปที่ 4.16, รูปที่ 4.18 และ รูปที่ 4.20 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ามีเปอร์เซ็นต์ที่ต่ำลง หรือในการกลับกัน Samples ที่มีกำลังสูงกว่าค่าเทรสโฮลด์ (ช่องสัญญาณไม่ว่างถูกใช้) มีเปอร์เซ็นต์ที่สูงขึ้น นอกจากนี้ในรูปที่ 4.17, รูปที่ 4.19, และ รูปที่ 4.21 แสดงถึงรายละเอียดเปอร์เซ็นต์ Samples ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ -90dbm, -95dbm, และ -100dbm ตามแต่ละช่วงความถี่ต่างๆ 510-800 MHz รูปที่ 4.22 แสดง ค่าระดับสัญญาณรบกวน (Noise floor) ในแต่ละจุดหรือตัวอย่างการวัด จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์การวัดโดยเคลื่อนที่มีข้อดีคือสามารถเก็บข้อมูลหลายๆ จุดตำแหน่งในแต่ละพื้นที่อย่างต่อเนื่องซึ่งจำเป็นอย่างมากหากเราต้องการทำแผนที่อุณหภูมิให้ครอบคลุมพื้นที่ที่กว้างๆ เช่นทั่วประเทศ แต่ข้อมูลที่ได้อาจจะไม่ละเอียดเท่ากับการวัด ณ ตำแหน่งตายตัว



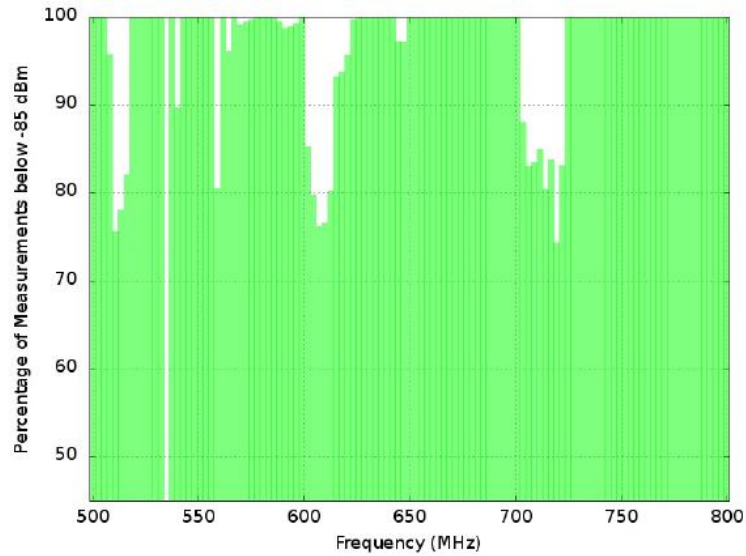
รูปที่ 4.12: แผนที่อุณหภูมิแสดงระดับกำลังของคลื่นกิจการโทรทัศน์ตามเส้นทาง สถาบันเอไอทีไปยัง ตลาดไท



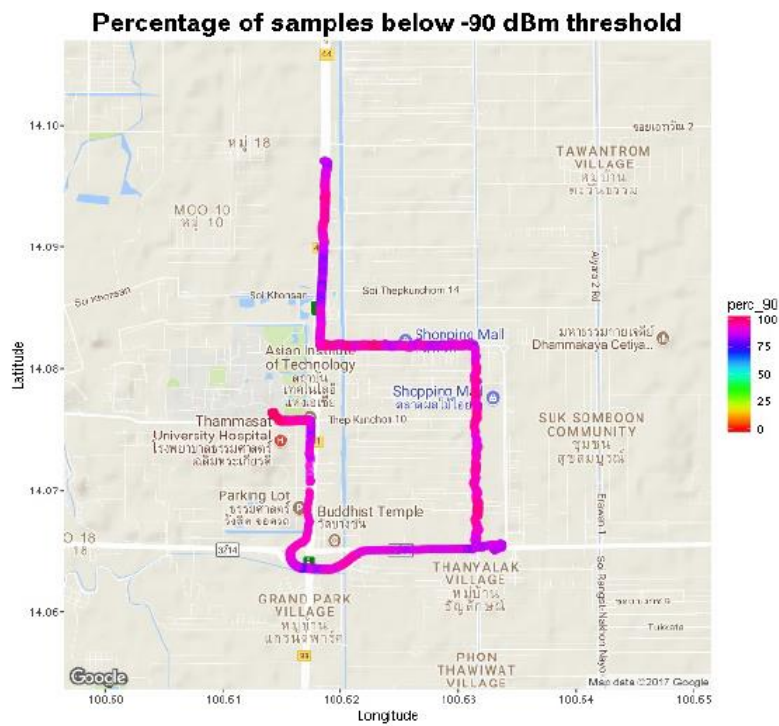
รูปที่ 4.13: ระดับกำลังของคลื่นกิจการโทรทัศน์ตามเส้นทาง (Power levels) ตามความถี่ต่างๆ 510-800 MHz และตามเวลาต่างๆ หรือจำนวนการวัด (Number of measurements) บนเส้นทาง สถาบันเอไอทีไปยังตลาดไท



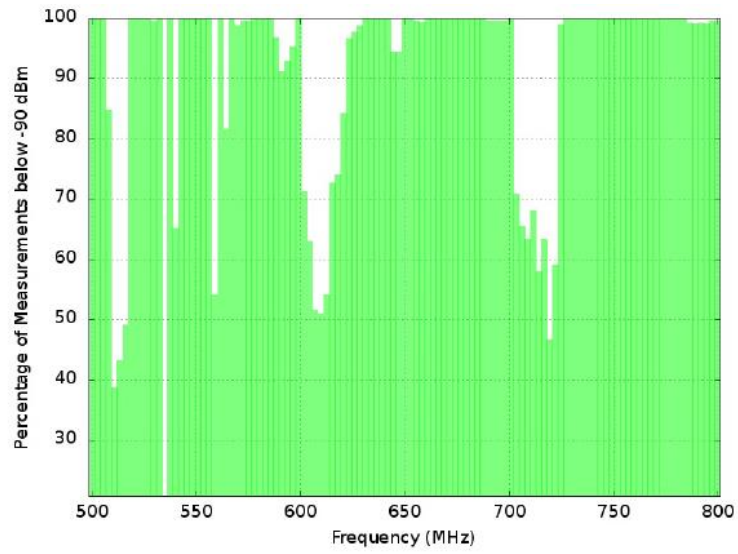
รูปที่ 4.14: เปอร์เซ็นต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้
-85dBm



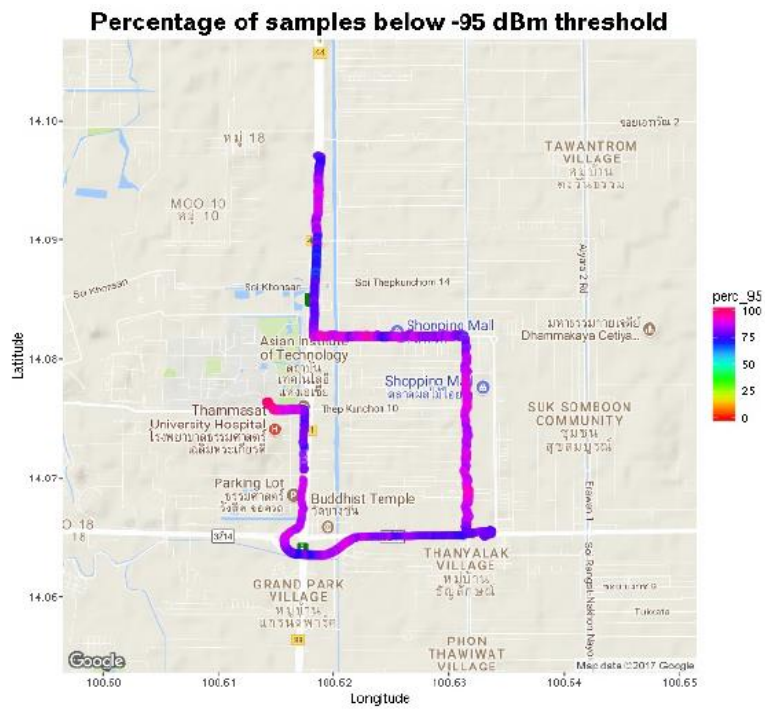
รูปที่ 4.15: เปอร์เซ็นต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้
-85dBm ตามแต่ละช่วงความถี่



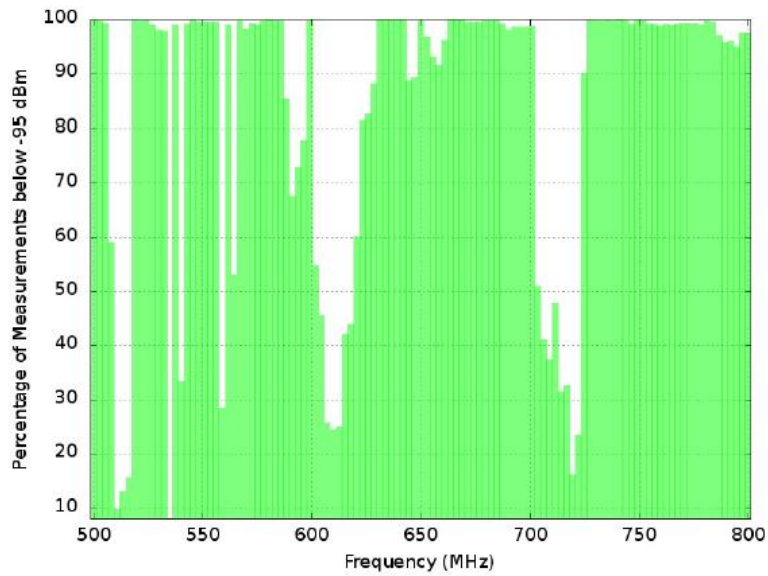
รูปที่ 4.16: เปอร์เซ็นต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้
-90dBm



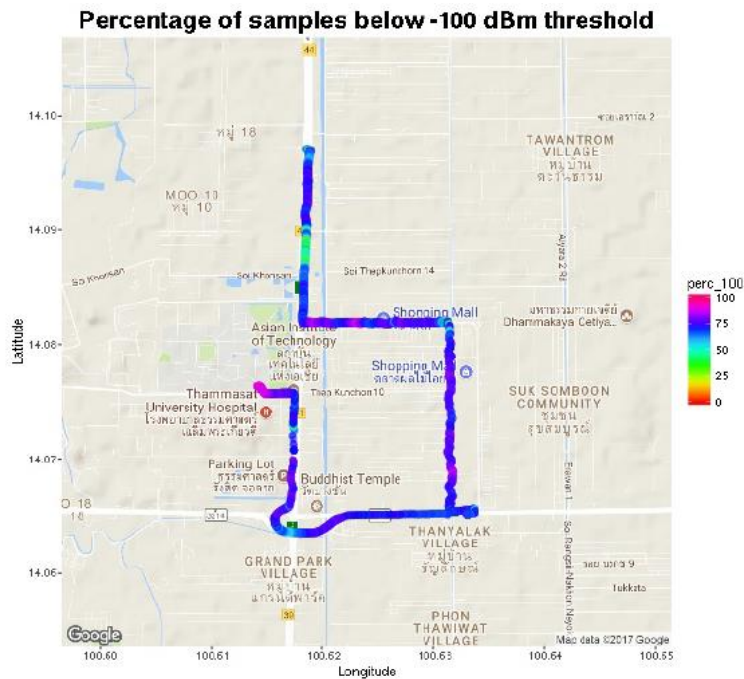
รูปที่ 4.17: เปอร์เซ็นต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ -90dBm ตามแต่ละช่วงความถี่



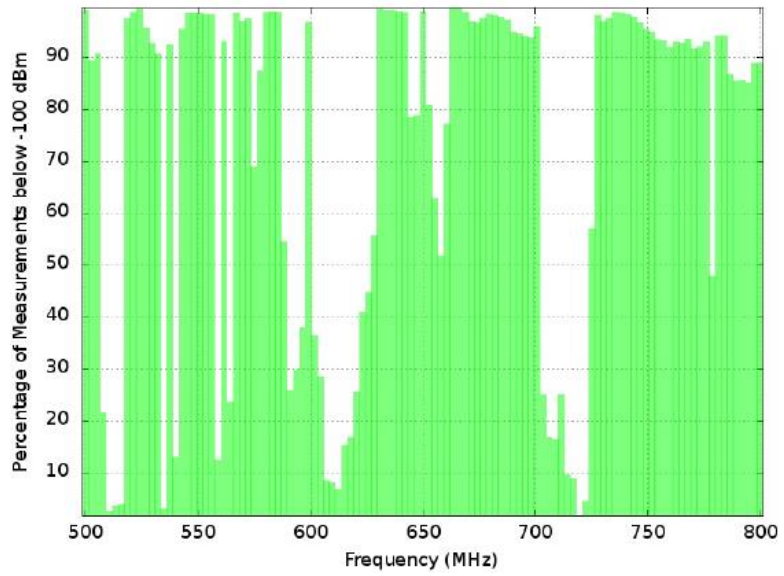
รูปที่ 4.18: เปอร์เซ็นต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ -95dBm



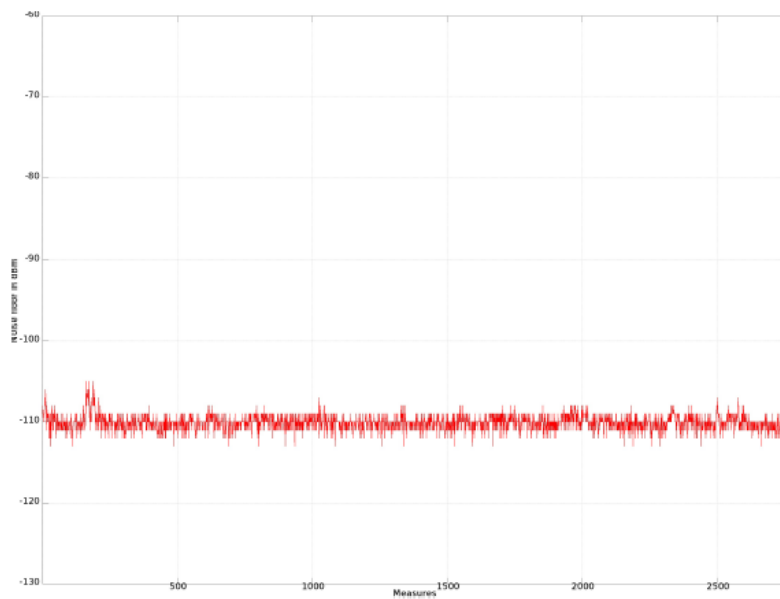
รูปที่ 4.19: เปอร์เซ็นต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ -95dBm ตามแต่ละช่วงความถี่



รูปที่ 4.20: เปอร์เซ็นต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ -100dBm



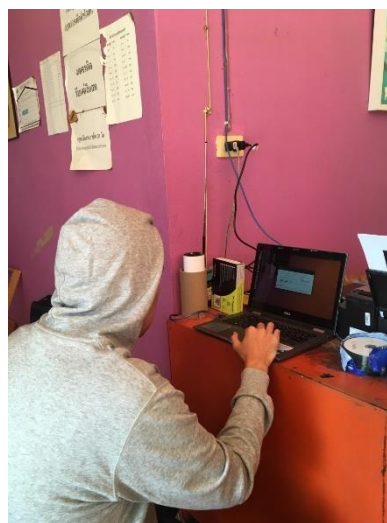
รูปที่ 4.21: เปอร์เซนต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ -100dBm ตามแต่ละช่วงความถี่



รูปที่ 4.22: ค่าระดับสัญญาณรบกวน (Noise floor) ในแต่ละจุดหรือตัวอย่างการวัด

2.4) การทดสอบระบบการวัด ณ ตำแหน่งตายตัว ในบริเวณชนบทห่างไกลเข้าถึงยาก ตำบลแม่ ภาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

การทดสอบวัดคลื่นสัญญาณเบื้องต้นเพื่อทดสอบระบบวัดคลื่นสัญญาณที่ได้ถูกออกแบบใน
โครงการนี้ ได้ถูกทำแรกเริ่มที่บริเวณสถาบันเอไอทีโดยรอบเพื่อความสะดวกในการทดสอบและยัง
เปรียบเทียบกับได้กับเป็นพื้นที่ท้องที่ชุมชน ในเขตเมือง ต่างจังหวัด (Suburban area) และพื้นที่ใน
กรุงเทพมหานคร ซึ่งเปรียบเทียบกับได้กับเป็นพื้นที่ที่หนาแน่น (Urban area) ในส่วนนี้จะรายงานผลการ
วัดวิเคราะห์ในพื้นที่ชนบทห่างไกลเข้าถึงยาก (Rural area) ณ พื้นที่หมู่บ้านไทยสามัคคี ตำบลแม่
ภาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก



รูปที่ 4.23: สถานที่การวัดในพื้นที่ชนบทห่างไกลเข้าถึงยาก (Rural area) ณ ที่ หมู่บ้านไทยสามัคคี
ระดับ ชั้น 1 (First floor) ตำบลแม่ภาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

ตารางที่ 4.2 แสดงความจริงพื้นฐาน (Ground truth) อันได้แก่การจัดกลุ่มช่องความถี่วิทยุ
สำหรับกิจการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล ณ ต. แม่ภาษา จังหวัดตากซึ่งรับสัญญาณมาจาก
สถานีเดียวกันที่ อ. แม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งได้จากข้อมูลในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 4.2: ความจริงขั้นพื้นฐาน (Ground truth) ช่องความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรศัพท์เคลื่อนที่ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลอนินในพื้นที่จังหวัดตาก

การวัด (Measurement location)	พื้นที่ใช้ใน ช่องความถี่วิทยุที่ใช้งาน (Channel busy)
ต. แม่กาษา จังหวัดตาก	UHF 31, UHF 35, UHF 39, UHF 47, UHF 51

2.4.1) การวิเคราะห์ที่ใช้ค่าเทรชโฮลด์ที่เป็นค่าเดียวตายตัว (Fixed threshold) (-100dBm)

ตารางที่ 4.3: ผลการวัดตำแหน่งตายตัวและการวิเคราะห์ที่ใช้ค่าเทรชโฮลด์ที่เป็นค่าเดียวตายตัว (Fixed threshold) (-100dBm) ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

ลำดับการวัด (Measurement number)	1.1	1.2
สภาพแวดล้อมในการทดสอบ วัด (Measurement environment)	ในอาคาร (Indoor)	ในอาคาร (Indoor)
ระดับความสูงที่ใช้ในการ ทดสอบวัด (Measurement height level)	ระดับพื้นดิน (Ground floor)	ระดับชั้น 1 (First Floor)
ข้อมูลการวัด (Measurement Info)	Latitude 16.7944, Longitude 98.5974 Antenna height: 1m Start acquisition time: 2017-12-22, 09:03:33 End acquisition time: 2017-12-25, 02:03:30	Latitude 16.8805, Longitude 98.6281 Antenna height: 5m Start acquisition time: 2017-12-21, 22:09:55 End acquisition time: 2017-12-25, 06:09:47

จำนวนช่องสัญญาณที่ไม่ว่าง ที่วัดจาก RF Explorer (Number of busy channels detected by RF Explorer)	2 UHF 31, UHF 52	2 UHF 31, UHF 50
จำนวนช่องสัญญาณที่ไม่ว่าง ที่ตรวจจับได้ (Number of detection*) $Pr\{H1 H1\}$	1 UHF 31	1 UHF 31
จำนวนช่องสัญญาณที่ไม่ว่าง แต่วัดได้เป็นว่าง (Number of miss detection*) $Pr\{H0 H1\}$	4 UHF 35, UHF 39, UHF 47, UHF 51	4 UHF 35, UHF 39, UHF 47, UHF 51
ช่องสัญญาณที่ว่างแต่วัดได้ เป็นไม่ว่าง (Number of False alarm*) $Pr\{H1 H0\}$	1 UHF 52	1 UHF 50

ตารางที่ 4.3 ได้แสดงผลการวัดตำแหน่งตายตัวและการวิเคราะห์โดยใช้กำหนดค่าเทรสโฮลด์ตายตัว ที่ -100dBm ในต. แม่กาษา จังหวัดตาก เมื่อเราพิจารณาความจริงขึ้นพื้นฐานตามตารางที่ 1.2 ช่องสัญญาณ UHF 31, UHF 35, UHF 39, UHF 47, UHF 51 เป็นช่องที่ไม่ว่างถูกใช้งานในกิจการโทรทัศน์ สิ่งที่เราวัดได้ในการวัดที่ 1.1 นี้ ซึ่งเป็นการวัดที่ระดับพื้นดิน ที่ความสูง 1 m เหนือพื้นดิน ช่องสัญญาณ UHF 31 และ UHF 52 ซึ่งช่องสัญญาณ UHF 52 นั้นว่างเปล่าตามความจริงขึ้นพื้นฐานที่ไม่ได้ใช้ช่องนี้ใช้ส่งสัญญาณโทรทัศน์ ขณะเดียวกันช่องสัญญาณ UHF 35, UHF 39, UHF 47 และ UHF 51 ที่ควรจะวัดได้ว่าไม่ว่าง แต่มีเพียงช่องสัญญาณเดียวคือช่องสัญญาณ UHF 31 ที่วัดได้ว่าไม่ว่างและสามารถตรวจจับได้ว่าไม่ว่าง ความไม่แม่นยำนี้ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ผลการวัดที่สถาบันเอไอทีและที่กรุงเทพมหานคร เราสามารถอธิบายได้จากในการวัดภายในอาคาร สิ่งที่เกิดขึ้นจะมีปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ฮิตเดนโนนดมาร์จิ้น ซึ่งได้อธิบายไว้แล้วข้างต้นว่า สัญญาณโทรทัศน์ ณ ตำแหน่งที่วัด ที่ความสูงต่างๆ กัน ที่สภาวะแวดล้อมต่างๆ กัน มีความเป็นไปได้จะถูกแทรกสอด

รบกวน อันสืบเนื่องจากเส้นทางการเคลื่อนที่ของสัญญาณโทรทัศน์ถูกบดบังอย่างสุ่ม ทำให้เกิดปรากฏการณ์ ซาโดว์อิงเอฟเฟกต์ รวมถึง เพดดิ้งขนาดเล็ก ซึ่งเกิดจากการแพร่กระจายหลายวิถีทิศทางของคลื่นสัญญาณ ซึ่งโดยปกติภายในอาคารเราไม่ได้รับ เส้นทางโดยตรงจากตัวส่งมาตัวรับแบบจำลองเพดดิ้งแพร่กระจายหลายวิถีทิศทางมีการแจกแจงตัวแปรสุ่มแบบเรย์เลห์ โดยทั้งเพดดิ้งขนาดเล็กและซาโดว์อิงเอฟเฟกต์นี้ ทำให้ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อน อาทิเช่น ทำให้จำนวนช่องสัญญาณที่ไม่ว่างที่ตรวจจับได้ ซึ่งหมายความว่า เป็นจำนวนช่องสัญญาณที่วัดได้ว่าไม่ว่างและในความเป็นจริงขั้นพื้นฐานก็ไม่ว่าง $Pr\{H1|H1\}$ มีค่าต่ำ จำนวนช่องสัญญาณที่ไม่ว่างแต่วัดได้เป็นว่าง $Pr\{H0|H1\}$ มีค่าสูง

การวัดที่ 1.2 ซึ่งเป็นการวัดที่ระดับชั้น 1 ที่ความสูง 5 m เหนือพื้นดิน ได้ผลที่ใกล้เคียงกับผลจากการวัดที่ 1.1 คือมีเพียงช่องสัญญาณเดียวคือช่องสัญญาณ UHF 31 ที่วัดได้ว่าไม่ว่างและสามารถตรวจจับได้ว่าไม่ว่าง เหตุผลที่สำคัญที่ได้ผลไม่แม่นยำในการวิเคราะห์เนื่องจากเรากำหนดค่าเทรสโฮอล์ดตายตัวที่ -100dBm ซึ่งการตั้งค่าเช่นนี้ เราสมมติว่าเราทราบระดับกำลังของสัญญาณรบกวนล่วงหน้า แต่อย่างไรในความเป็นจริงเราไม่ทราบมันล่วงหน้า

2.4.2) การวิเคราะห์ที่ใช้ค่าเทรสโฮอล์ดแบบปรับเปลี่ยนได้ (Adaptive thresholds)

จากการวิเคราะห์ผลการวัดตำแหน่งตายตัวและการวิเคราะห์ที่ใช้ค่าเทรสโฮอล์ดแบบตายตัวที่ -100dBm เบื้องต้น จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์มีความคลาดเคลื่อนไม่แม่นยำ ในการวิเคราะห์ผลตอนนี้เราจะแสดงให้เห็นถึงข้อดีของการใช้ค่าเทรสโฮอล์ดแบบปรับเปลี่ยนได้ ตารางที่ 4.4 ได้แสดงผลการวัดตำแหน่งตายตัวและการวิเคราะห์ที่ใช้ค่าเทรสโฮอล์ดแบบปรับเปลี่ยนได้ ซึ่งเราพิจารณาวิธีการตั้งค่าเทรสโฮอล์ดแบบปรับเปลี่ยนได้ 3 วิธีตามที่อธิบายไว้แล้วเบื้องต้นดังต่อไปนี้

- 1) วิธีการโดยใช้เกณฑ์เนย์แมนและเพียร์สัน (Neyman-Pearson (NP) Criterion)
- 2) วิธีการแบบเอฟซีเอ็มอี (Forward Consecutive Mean Excision (FCME) Method)
- 3) วิธีแอลเอดี (Localization Algorithm Based on Double-Thresholding (LAD))

ตารางที่ 4.4: ผลการวัดตำแหน่งตายตัวและการวิเคราะห์โดยใช้ค่าเทรสโฮลด์แบบปรับเปลี่ยนได้
 ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ในอาคารระดับชั้น 1 เฉพาะช่องสัญญาณที่ไม่ว่าง

หมายเลขช่องสัญญาณ	UHF 31		
ค่าเทรสโฮลด์แบบเดิม (Threshold without addition of noise) (dBm)	FCME (-90.5339)		
เปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนที่เสริม (Percentage of noise added) (%)	0	5	10
ค่าเทรสโฮลด์แบบใหม่ที่เสริมด้วยสัญญาณรบกวน (Threshold after the addition of noise) (dBm)	FCME (-90.5339)	NP (-94.4552) FCME (-94.7147) LAD upper (-94.7147) LAD lower (-99.6556)	NP (-95.1581) FCME (-95.9304) LAD upper (-95.9304) LAD lower (-100.8690)
ค่าจำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลังเหนือระดับค่าเทรสโฮลด์ (Number of samples above threshold) (Samples)	8840	NP (82045) FCME (82049)	NP (112426) FCME (114109)

เปอร์เซ็นต์จำนวนจุด ตัวอย่างที่มีกำลัง เหนือระดับค่าเทรส โฮลด์เทียบกับ จำนวนจุดตัวอย่าง ทั้งหมด (Percentage of samples above the threshold (%))	8840/449760 ×100=1.97%	18.24% (NP) 18.24% (FCME)	24.9969% (NP) 25.3711% (FCME)
การตัดสินใจ ตรวจจับ (Detection Decision) (Yes/No)	No	No No	Yes Yes

หมายเลขช่อง สัญญาณ	UHF 35			
ค่าเทรสโฮลด์แบบเดิม (Threshold without addition of noise) (dBm)	FCME (-99.2090)			
เปอร์เซ็นต์ของสัญญาณ รบกวนที่เสริม (Percentage of noise added) (%)	0	5	10	15
ค่าเทรสโฮลด์แบบใหม่ที่ เสริมด้วยสัญญาณรบกวน (Threshold after the addition of noise) (dBm)	FCME (-99.2090)	NP (-104.6360) FCME (-103.5270) LAD upper	NP (-105.1903) FCME (-104.8483)	NP (-104.5308) FCME (-104.6777)

		(-103.5270) LAD lower (-108.3674)	LAD upper (-104.8483) LAD lower (-109.6979)	LAD upper (-104.6776) LAD lower (-109.5359)
ค่าจำนวนจุดตัวอย่างที่มี กำลังเหนือระดับค่า เทรสโฮลด์ (Number of samples above threshold) (Samples)	2131	NP (21506) FCME (12842)	NP (39878) FCME (21575)	NP (21524) FCME (21545)
เปอร์เซ็นต์จำนวนจุด ตัวอย่างที่มีกำลังเหนือระดับ ค่าเทรสโฮลด์เทียบกับ จำนวนจุดตัวอย่างทั้งหมด (Percentage of samples above the threshold (%))	0.47%	4.78% (NP) 2.86% (FCME)	8.8665% (NP) 4.7970% (FCME)	NP (4.7857) FCME (4.7903)
การตัดสินใจการตรวจจับ (Detection Decision) (Yes/No)	No	No No	No No	No No

หมายเลขช่อง สัญญาณ	UHF 39			
ค่าเทรสโฮลด์แบบเดิม (Threshold without addition of noise) (dBm)	FCME (-85.7635)			
เปอร์เซ็นต์ของสัญญาณ รบกวนที่เสริม (Percentage of noise added) (%)	0	5	10	15

ค่าเทรลโฮลด์แบบใหม่ที เสริมด้วยสัญญาณรบกวน (Threshold after the addition of noise) (dBm)		NP (-88.6886) FCME (-90.2817) LAD upper (-90.2817) LAD lower (-95.3156)	NP (-105.5259) FCME (-106.6553) LAD upper (-106.6553) LAD lower (-111.6071)	NP (-90.1868) FCME (-91.7827) LAD upper (-91.7826) LAD lower (-96.8162)
ค่าจำนวนจุดตัวอย่างที่มี กำลังเหนือระดับค่า เทรลโฮลด์ (Number of samples above threshold) (Samples)	19389	NP (37249) FCME (53292)	NP (53292) FCME (59376)	NP (53292) FCME (59376)
เปอร์เซนต์จำนวนจุด ตัวอย่างที่มีกำลังเหนือระดับ ค่าเทรลโฮลด์เทียบกับ จำนวนจุดตัวอย่างทั้งหมด (Percentage of samples above the threshold (%))	4.31%	8.28% (NP) 11.85% (FCME)	11.8490% (NP) 13.2017% (FCME)	11.8490% (NP) 13.2017% (FCME)
การตัดสินใจการตรวจจับ (Detection Decision) (Yes/No)	No	No No	No No	No No

หมายเลขช่อง สัญญาณ	UHF 47		
ค่าเทรลโฮลด์แบบเดิม (Threshold without addition of noise) (dBm)	FCME (-101.6533)		
เปอร์เซนต์ของสัญญาณรบกวน เทียมที่เสริม	0	5	10

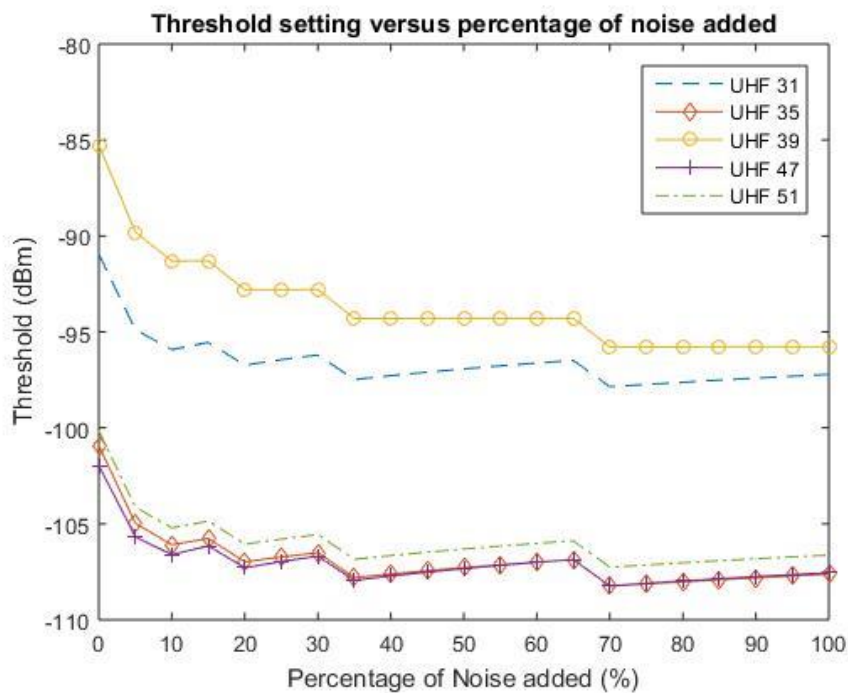
(Percentage of noise added) (%)			
ค่าเทรสโฮลด์แบบใหม่ที่เสริมด้วย สัญญาณรบกวน (Threshold after the addition of noise) (dBm)		NP (-105.0946) FCME (-105.6012) LAD upper (-105.6012) LAD lower (-110.5569)	NP (-105.5259) FCME (-106.6553) LAD upper (-106.6553) LAD lower (-111.6071)
ค่าจำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลัง เหนือระดับค่า เทรสโฮลด์ (Number of samples above threshold) (Samples)	4664	NP (33071) FCME (33453)	NP (33653) FCME (92493)
เปอร์เซ็นต์จำนวนจุดตัวอย่างที่มี กำลังเหนือระดับค่าเทรสโฮลด์ เทียบกับจำนวนจุดตัวอย่างทั้งหมด (Percentage of samples above the threshold (%))	1.04%	7.35% (NP) 7.44% (FCME)	7.4824% (NP) 20.5650% (FCME)
การตัดสินใจการตรวจจับ (Detection Decision) (Yes/No)	No	No No	No Yes

หมายเลขช่อง สัญญาณ	UHF 51			
ค่าเทรสโฮลด์แบบเดิม (Threshold without addition of noise) (dBm)	FCME (-98.2411)			

เปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนที่เสริม (Percentage of noise added) (%)	0	5	10	15
ค่าเทรสโฮลด์แบบใหม่ที่เสริมด้วยสัญญาณรบกวน (Threshold after the addition of noise) (dBm)		NP (-103.2062) FCME (-102.5342) LAD upper (-102.5341) LAD lower (-107.4714)	NP (-103.8725) FCME (-103.8370) LAD upper (-103.8370) LAD lower (-108.7776)	NP (-103.6512) FCME (-108.5942) LAD upper (-106.2824) LAD lower (-111.2310)
ค่าจำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลังเหนือระดับค่าเทรสโฮลด์ (Number of samples above threshold) (Samples)	3957	NP (34253) FCME (22201)	NP (34377) FCME (34359)	NP (7.6176) FCME (7.6321)
เปอร์เซ็นต์จำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลังเหนือระดับค่าเทรสโฮลด์เทียบกับจำนวนจุดตัวอย่างทั้งหมด (Percentage of samples above the threshold (%))	0.88%	7.62% (NP) 4.94% (FCME)	7.6434% (NP) 7.6394% (FCME)	7.6176% (NP) 7.6321% (FCME)
การตัดสินใจการตรวจจับ (Detection Decision) (Yes/No)	No	No No	No No	No No

เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการวัดมีจำนวนมาก เราจะวิเคราะห์ใน กรณีหลักๆ สำหรับ ประเมินผลในวิธีการที่เราได้นำเสนอตามที่อธิบายไว้ข้างต้น ค่าเทรสโฮลด์แบบปรับเปลี่ยน ไม่ว่าจะ

เป็น FCME หรือว่า LAD ใช้ได้ดีเมื่อช่องสัญญาณนั้นว่าง เนื่องจากวิธีการดังกล่าวต้องการให้มี ส่วนที่ไม่มีสัญญาณและเป็นเพียงสัญญาณรบกวน ก่อน ซึ่งเซตเริ่มต้นนี้จะมีขนาดประมาณ 10% ของเซตข้อมูลทั้งหมด เมื่อช่องสัญญาณนั้นไม่ว่างประกอบด้วยสัญญาณคลื่นกิจการโทรทัศน์ ทั้ง FCME และ LAD ไม่สามารถที่เพิ่มความถูกต้องในการตัดสินใจได้ ดังนั้นเราแก้ไขโดยการเสริม สัญญาณรบกวนเทียมเข้าไปเป็นวิธี Noise added FCME และวิธี Noise added LAD ซึ่งปริมาณสัญญาณรบกวนที่ใส่เข้าไปเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับข้อมูลทั้งหมด โดยเราจะปรับค่าดังกล่าวไปเรื่อยๆ จาก 0, 5, 10,...,100 เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียบกับข้อมูลทั้งหมดที่เหมาะสมที่สุด (Optimal percentage) ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ซึ่งเป็นระดับค่าเทรสโฮลด์ที่เปลี่ยนไปกับเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียมที่เสริมเข้าไปสำหรับช่อง UHF 31 UHF 35 UHF 39 UHF 47 และ UHF 51 จะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียบกับข้อมูลทั้งหมดที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 70% สัญญาณรบกวนเทียบกับข้อมูลทั้งหมด



รูปที่ 4.24: ระดับค่าเทรสโฮลด์ที่เปลี่ยนไปกับเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียมที่เสริมเข้าไปสำหรับสำหรับช่อง UHF 31 UHF 35 UHF 39 UHF 47 และ UHF 51 สำหรับการวิเคราะห์โดยใช้ค่าเทรสโฮลด์แบบปรับเปลี่ยนได้ (Adaptive thresholds) ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ในอาคารระดับชั้น 1 เฉพาะช่องสัญญาณที่ไม่ว่าง

หลังจากที่เสริมสัญญาณรบกวนเข้าไป เราก็คำนวณหาค่าเทรสโฮลด์แบบปรับเปลี่ยนใหม่เป็นวิธี Noise added FCME และวิธี Noise added LAD ซึ่งนำไป เปรียบเทียบกับค่าเทรสโฮลด์แบบปรับเปลี่ยน FCME และ LAD แบบเดิม ดังแสดงผลลัพธ์ในตารางที่ 4.4 จะทำให้เห็นเปอร์เซ็นต์จำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลังเหนือระดับค่าเทรสโฮลด์เทียบกับจำนวนจุดตัวอย่างทั้งหมดและการตัดสินใจการตรวจจับ ได้ถูกต้องมากขึ้นเช่น ช่อง UHF 31 ซึ่งเป็นช่องสัญญาณที่ไม่ว่างเมื่อเราเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียมที่เสริมถึง 10% เราสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์จำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลังเหนือระดับค่าเทรสโฮลด์เทียบกับจำนวนจุดตัวอย่างทั้งหมดได้ 25.3711% สำหรับ FCME ทำให้เราสามารถ ตัดสินได้ว่า ช่องไม่ว่างได้ถูกต้อง เช่นเดียวกันช่อง UHF 47 เราต้องเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียมที่เสริมถึง 10% เราสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์จำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลังเหนือระดับค่าเทรสโฮลด์เทียบกับจำนวนจุดตัวอย่างทั้งหมดได้ 20.5650% สำหรับ FCME ทำให้เราสามารถ ตัดสินได้ว่า ช่องไม่ว่างได้ถูกต้อง

อย่างไรก็ตามช่อง UHF 35 และ UHF 51 ไม่ว่าเราจะเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเท่าไรก็ไม่สามารถตัดสินได้ว่าเป็นช่องไม่ว่างได้ถูกต้อง แต่ในขณะเดียวกัน เราได้ตรวจสอบช่องสัญญาณที่ใกล้เคียง UHF 34 และ UHF 52 ปรากฏได้ว่าเป็นช่องสัญญาณที่ไม่ว่าง เมื่อเป็นเช่นนั้นเรา วัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมาตรฐานเช่น Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer ซึ่งปรากฏผลว่า UHF 34 และ UHF 52 เป็นช่องสัญญาณที่ไม่ว่างจริง ส่วนช่อง UHF 35 และ UHF 51 เป็นช่องที่ว่าง

ตารางที่ 4.5: ผลการวัดตำแหน่งตายตัวและการวิเคราะห์โดยใช้ค่าเทรสโฮลด์แบบปรับเปลี่ยนได้ (Adaptive thresholds) ณ พื้นที่หมู่บ้านไทยสามัคคี ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ในอาคารระดับพื้นดิน เฉพาะช่องสัญญาณที่ไม่ว่าง

หมายเลขช่องสัญญาณ	UHF 31		
ค่าเทรสโฮลด์แบบเดิม (Threshold without addition of noise) (dBm)	FCME (-95.6014)		
เปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียมที่เสริม (Percentage of noise added) (%)	0	5	10

ค่าเทรลโฮลด์แบบใหม่ที่เสริมด้วย สัญญาณรบกวน (Threshold after the addition of noise) (dBm)	FCME (-95.6014)	NP (-98.8269) FCME (-99.5234) LAD upper (-99.5234) LAD lower (-104.4605)	NP (-99.29) FCME (-100.56) LAD upper (-100.5644) LAD lower (-105.4958)
ค่าจำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลัง เหนือระดับค่า เทรลโฮลด์ (Number of samples above threshold) (Samples)	FCME (11526)	NP (92334) FCME (154874)	NP (154874) FCME (282706)
เปอร์เซ็นต์จำนวนจุดตัวอย่างที่มี กำลังเหนือระดับค่าเทรลโฮลด์ เทียบกับจำนวนจุดตัวอย่างทั้งหมด (Percentage of samples above the threshold (%))	11526/983328 ×100 =1.1722%	NP (9.39%) FCME (15.75%)	NP (15.74%) FCME (28.75%)
การตัดสินใจการตรวจจับ (Detection Decision) (Yes/No)	No	No No	No Yes

หมายเลขช่อง สัญญาณ	UHF 35		
ค่าเทรลโฮลด์แบบเดิม (Threshold without addition of noise) (dBm)	FCME (-94.8935)		
เปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวน ที่เติมที่เสริม (Percentage of noise added) (%)	0	5	10

ค่าเทรลโฮลด์แบบใหม่ที่เสริมด้วย สัญญาณรบกวน (Threshold after the addition of noise) (dBm)	FCME (-94.8935)	NP (-102.4200) FCME (-99.3778) LAD upper (-99.3778) LAD lower (-104.2012)	NP (-103.50) FCME (-100.85) LAD upper (-100.8520) LAD lower (-105.6783)
ค่าจำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลัง เหนือระดับค่า เทรลโฮลด์ (Number of samples above threshold) (Samples)	FCME (11526)	NP (10620) FCME (374)	NP (1.08%) FCME (0.038%)
เปอร์เซ็นต์จำนวนจุดตัวอย่างที่มี กำลังเหนือระดับค่าเทรลโฮลด์ เทียบกับจำนวนจุดตัวอย่างทั้งหมด (Percentage of samples above the threshold (%))	11526/983328 ×100 =1.1722%	NP (24878) FCME (1278)	NP (2.53%) FCME (0.13%)
การตัดสินใจการตรวจจับ (Detection Decision) (Yes/No)	No	No No	No No

หมายเลขช่อง สัญญาณ	UHF 39		
ค่าเทรลโฮลด์แบบเดิม (Threshold without addition of noise) (dBm)	FCME (-93.2876)		
เปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวน ที่เติมที่เสริม (Percentage of noise added) (%)	0	5	10

ค่าเทรสโฮลด์แบบใหม่ที่เสริมด้วยสัญญาณรบกวน (Threshold after the addition of noise) (dBm)	FCME (-93.2876)	NP (-98.1310) FCME (-97.7688) LAD upper (-97.7688) LAD lower (-102.7529)	NP (-99.49) FCME (-99.23) LAD upper (-99.2393) LAD lower (-104.2226)
ค่าจำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลังเหนือระดับค่าเทรสโฮลด์ (Number of samples above threshold) (Samples)	FCME (29303)	NP (71783) FCME (62539)	NP (85156) FCME (85156)
เปอร์เซ็นต์จำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลังเหนือระดับค่าเทรสโฮลด์เทียบกับจำนวนจุดตัวอย่างทั้งหมด (Percentage of samples above the threshold (%))	2.98%	NP (7.30%) FCME (6.36%)	NP (8.66%) FCME (8.66%)
การตัดสินใจการตรวจจับ (Detection Decision) (Yes/No)	No	No No	No No

หมายเลขช่องสัญญาณ	UHF 47		
ค่าเทรสโฮลด์แบบเดิม (Threshold without addition of noise) (dBm)	FCME (-105.1728)		
เปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนที่เสริม (Percentage of noise added) (%)	0	5	10

ค่าเทรสโฮลด์แบบใหม่ที่เสริมด้วยสัญญาณรบกวน (Threshold after the addition of noise) (dBm)	FCME (-105.1728)	NP (-107.8639) FCME (-108.8341) LAD upper (-108.8341) LAD lower (-113.7518)	NP (-108.1677) FCME (-109.72) LAD upper (-109.7294) LAD lower (-114.6432)
ค่าจำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลังเหนือระดับค่าเทรสโฮลด์ (Number of samples above threshold) (Samples)	FCME (2163)	NP (31564) FCME (90859)	NP (84664) FCME (369338)
เปอร์เซ็นต์จำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลังเหนือระดับค่าเทรสโฮลด์เทียบกับจำนวนจุดตัวอย่างทั้งหมด (Percentage of samples above the threshold (%))	FCME (0.22%)	NP (3.21%) FCME (9.24%)	NP (8.61%) FCME (37.56%)
การตัดสินใจการตรวจจับ (Detection Decision) (Yes/No)	No	No No	No Yes

หมายเลขช่องสัญญาณ	UHF 51		
ค่าเทรสโฮลด์แบบเดิม (Threshold without addition of noise) (dBm)	FCME (-96.3327)		
เปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนที่เสริม (Percentage of noise added) (%)	0	5	10

ค่าเทรลโฮลด์แบบใหม่ที่เสริมด้วย สัญญาณรบกวน (Threshold after the addition of noise) (dBm)	FCME (-96.3327)	NP (-102.3756) FCME (-100.7922) LAD upper (-100.7921) LAD lower (-105.7974)	NP (-103.5193) FCME (-102.24) LAD upper (-102.2436) LAD lower (-107.2455)
ค่าจำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลัง เหนือระดับค่า เทรลโฮลด์ (Number of samples above threshold) (Samples)	FCME (14748)	NP (115442) FCME (74438)	NP (136879) FCME (115442)
เปอร์เซ็นต์จำนวนจุดตัวอย่างที่มี กำลังเหนือระดับค่าเทรลโฮลด์ เทียบกับจำนวนจุดตัวอย่างทั้งหมด (Percentage of samples above the threshold (%))	FCME (1.4998%)	NP (11.74%) FCME (7.57%)	NP (13.92%) FCME (11.74%)
การตัดสินใจการตรวจจับ (Detection Decision) (Yes/No)	No	No No	No No

ผลการวิเคราะห์การวัดในอาคารระดับพื้นดิน เฉพาะช่องสัญญาณที่ไม่ว่าง ได้สรุปตามตารางที่ 4.5 และเป็นในลักษณะเดียวกันกับการวัดในอาคารระดับชั้น 1 หลังจากที่เราเสริมสัญญาณรบกวนเข้าไป เราก็คำนวณหาค่าเทรลโฮลด์แบบปรับเปลี่ยนใหม่เป็นวิธี Noise added FCME ซึ่งนำไปเปรียบเทียบกับค่าเทรลโฮลด์แบบปรับเปลี่ยน FCME แบบเดิม จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์จำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลังเหนือระดับค่าเทรลโฮลด์เทียบกับจำนวนจุดตัวอย่างทั้งหมดและการตัดสินใจการตรวจจับได้ถูกต้องมีมากขึ้นเช่น ช่อง UHF 31 ซึ่งเป็นช่องสัญญาณที่ไม่ว่างเมื่อเราเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียมที่เสริมถึง 10% เราสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์จำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลังเหนือระดับค่าเทรลโฮลด์เทียบกับจำนวนจุดตัวอย่างทั้งหมดได้ 28.75% สำหรับ FCME ทำให้เราสามารถตัดสินใจได้ว่า ช่องไม่ว่างได้ถูกต้อง เช่นเดียวกันช่อง UHF 47 เราต้องเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณ

รบกวนเทียมที่เสริมถึง 10% เราสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์จำนวนจุดตัวอย่างที่มีกำลังเหนือระดับค่า เทรสโพลด์เทียบกับจำนวนจุดตัวอย่างทั้งหมดได้ 37.56% สำหรับ FCME ทำให้เราสามารถ ตัดสินใจได้ว่า ช่องไม่ว่างได้ถูกต้อง

อย่างไรก็ตามช่อง UHF 35 และ UHF 51 ไม่ว่าจะเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเท่าไรก็ไม่สามารถตัดสินได้ว่าเป็นช่องไม่ว่างได้ถูกต้อง แต่ในขณะเดียวกัน เราได้ตรวจสอบช่องสัญญาณที่ใกล้เคียง UHF 34 และ UHF 52 ปรากฏได้ว่าเป็นช่องสัญญาณที่ไม่ว่าง ซึ่งเราก็ได้วัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมมาตรฐานเช่น Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer และได้ผลว่า UHF 34 และ UHF 52 เป็นช่องสัญญาณที่ไม่ว่างจริง ส่วนช่อง UHF 35 และ UHF 51 เป็นช่องที่ว่าง

นอกจากการใช้วิธีการลองปรับค่าดังกล่าวไปเรื่อยๆ เช่นนี้ เราหาวิธีการที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการของทางวิเคราะห์เชิงลึก (Analytical framework) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการใช้วิธีการลองปรับค่าดังกล่าวไปเรื่อยๆ เช่นนี้ ซึ่งวิธีการที่เราใช้คือ วิธีการเอเอ็นเอ็นหรือโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks (ANN)) ซึ่งเป็นเทคนิคที่เลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์ ซึ่งประกอบด้วยเซลล์ประสาท (Neuron) และแต่ละเซลล์จะถูกเชื่อมโยงกันเป็นโครงข่าย ซึ่งในซอฟต์แวร์เซลล์ประสาท จะเรียกว่า “โหนด (Node)” และแต่ละโหนดจะถูกแบ่งออกเป็นชั้น (Layer) ทั้งนี้เราใช้เอเอ็นเอ็นหรือโครงข่ายประสาทเทียม พร้อมด้วย ดีพเลิร์นนิงหรือการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ซึ่งเป็นชุดคำสั่ง (Algorithm) ที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อการเรียนรู้ของเครื่องจักรหรือเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยชุดคำสั่งนี้จะทำให้ตัวเครื่องจักรสามารถประมวลผลข้อมูลจำนวนมาก ด้วยการจำลองเครือข่ายประสาทแบบเดียวกับในสมองของมนุษย์ เป็นวิธีการหนึ่งของการเรียนรู้ของเครื่องที่พยายามเรียนรู้วิธีการแทนข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยให้การเรียนรู้ของเครื่องสามารถให้ผลลัพธ์ในการตัดสินใจและคาดการณ์ได้ดีมากยิ่งขึ้น เช่น รูปภาพหนึ่งสามารถแทนได้เป็นเวกเตอร์ของความสว่างต่อจุดพิกเซล หรือมองในระดับสูงขึ้น เป็นเซตของขอบของวัตถุต่างๆ หรือมองว่าเป็นพื้นที่ของรูปร่างใดๆก็ได้ การแทนความหมายดังกล่าวจะทำให้การเรียนรู้ที่จะทำงานต่างๆทำได้ง่ายขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการเรียนรู้จดจำใบหน้าหรือการรู้จำการแสดงออกทางสีหน้า

ตามหลักการพื้นฐาน เราสามารถแยกชั้นต่างๆ ในโครงข่ายประสาทเทียมเป็นส่วนส่วนดังแสดงในรูปที่ 4.25 อันได้แก่ชั้นต่างๆ ดังต่อไปนี้

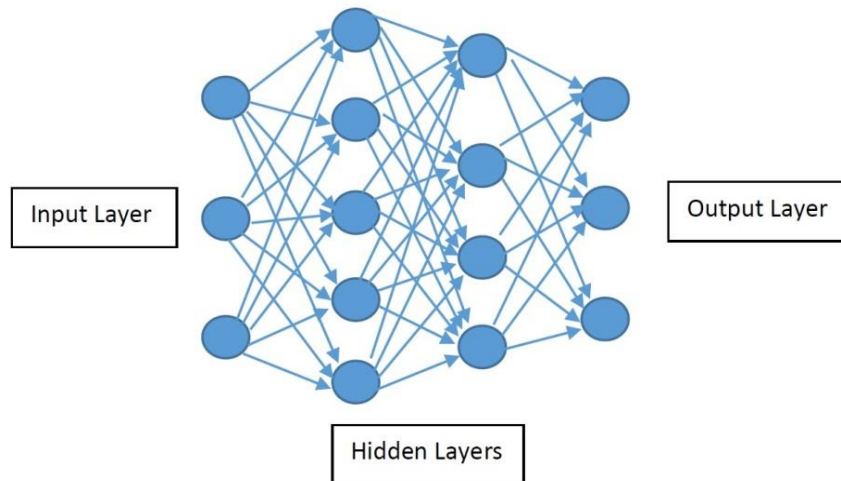
- 1) ชั้นอินพุตหรือชั้นข้อมูลเข้า (Input Layer) เป็นชั้นที่รับข้อมูล ทุกๆ อินพุตของโครงข่ายประสาทแสดงถึงตัวแปรที่อิสระ ที่มีผลต่อเอาต์พุตของโครงข่ายประสาท
- 2) ชั้นซ่อน (Hidden Layer) เป็นส่วนเรียนรู้ของโครงข่าย ชั้นซ่อนเป็นเหมือนจุดรวมของเซลล์ประสาทซึ่งมีฟังก์ชันสำหรับคำนวณเมื่อได้รับสัญญาณ (Output) จากโหนดในชั้นก่อนหน้านี้นี้

เรียกว่าแอกทิเวชันฟังก์ชัน (Activation function) ซึ่งประกอบไปด้วยค่าน้ำหนัก (Weight) ค่าเบี่ยงเบน (Bias) และตัวบวก(Summation) ในโครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งสามารถมีชั้นซ่อนหลายชั้นได้ โดยในแต่ละชั้นไม่จำเป็นต้องเป็นฟังก์ชันเดียวกันก็ได้ ชั้นซ่อนตัวนั้นมีหน้าที่สำคัญคือ จะพยายามแปลงข้อมูลที่เข้ามาในชั้นนั้นๆให้สามารถแยกแยะความแตกต่างโดยใช้เส้นตรงเส้นเดียว (Linearly separable) และก่อนที่ข้อมูลจะถูกส่งไปถึงชั้นข้อมูลออก (Output layer)

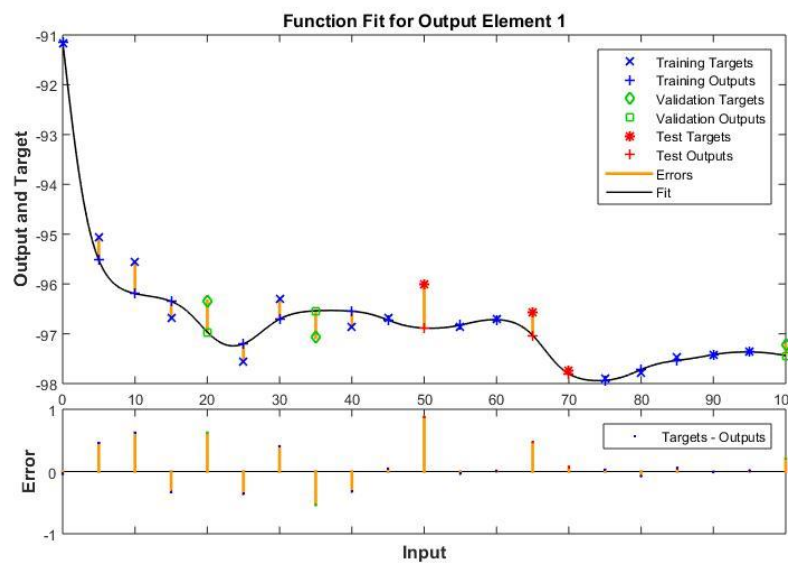
- 3) ชั้นเอาต์พุตหรือชั้นข้อมูลออก (Output Layer) เป็นชั้นที่รวมผลลัพธ์ที่ได้จาก ชั้นซ่อนและแปลงข้อมูลเพื่อส่งออกข้อมูล ในการคำนวณหาข้อมูลออก (Output) ในปัญหาการจำแนกทำได้โดยการใส่ข้อมูลเข้า (Input) เข้าไปในโครงข่ายประสาทเทียมที่เราได้หาไว้แล้ว จากนั้นให้เปรียบเทียบค่าของข้อมูลออก ในชั้นเอาต์พุตและให้เลือกค่าของข้อมูลออกที่มีค่าสูงกว่า (Neuron ที่มีค่าสูงกว่า) และรับค่าของพยากรณ์ที่ตรงกับ Neuron ที่เลือก และให้นำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ยอมรับได้ หากค่า อยู่ในช่วงที่รับได้ (ค่าผิดพลาด (Error) น้อยกว่าที่เรา กำหนด) ก็ให้รับข้อมูลชุดถัดไป แต่หากค่าผิดพลาดมากกว่าค่าที่ยอมรับได้ ให้ปรับค่าน้ำหนัก และค่าเบี่ยงเบน เมื่อปรับน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนเรียบร้อยแล้ว ให้รับข้อมูลชุดถัดไปและทำตามขั้นตอนซ้ำอีกรอบจนกระทั่งถึงข้อมูลชุดสุดท้าย และเมื่อทำข้อมูลชุดสุดท้ายเสร็จจะนับเป็น 1 รอบของการคำนวณ (1 Epoch) จากนั้นจะหาค่าผิดพลาดรวมเฉลี่ย จากค่าเฉลี่ยที่ได้เก็บค่าเอาไว้ เพื่อใช้ในการตรวจสอบว่าโดยเฉลี่ยแล้วในการจำแนกนั้น มีค่าน้อยกว่าค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้หรือไม่ ถ้าใช่แสดงว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้นนั้นสามารถให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องของทุกๆ ข้อมูลแล้ว จึงจบการเรียนรู้ได้ แต่ถ้าไม่ใช่ ให้กลับไปทำตามขั้นตอนแรก โดยเริ่มรับข้อมูลชุดที่ 1 ใหม่ กล่าวโดยรวมการสร้างโครงข่ายประสาทเทียมมี 3 ขั้นตอน ดังนี้ 1) สร้าง (Build) 2) ฝึก (Train) และ 3) ทดสอบ (Test)

เราประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมนี้เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียมที่เหมาะสมที่สุด เราเริ่มจากการฝึกโครงข่ายประสาทเทียมนี้สำหรับการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูล (Curve fitting) 70% ของข้อมูลตัวอย่างการวัด (Samples) ถูกใช้เป็นข้อมูลในการฝึก (Training data) 15% ของข้อมูลถูกใช้เพื่อการยืนยัน (Validation) และอีก 15% ของข้อมูลถูกใช้เพื่อในการทดสอบ ซึ่งข้อมูลในแต่ละจุดประสงค์สามารถเลือกใช้อย่างสุ่ม หลังจากนั้นเราหาเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียมที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมที่เราใช้ชั้นซ่อน 10 ชั้นซึ่งเป็นจำนวนชั้นที่น้อยที่สุดที่เราสามารถเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูลได้ เราได้แสดงกราฟต่างๆ เพื่อประเมินผลจากการใช้โครงข่าย

ประสาทเทียมนี้เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียมที่เหมาะสมที่สุด ดังรูปที่ 4.26-4.28



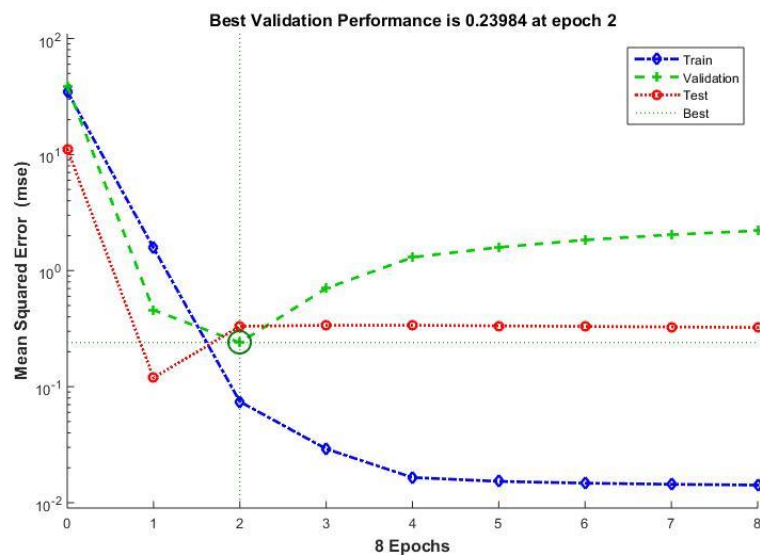
รูปที่ 4.25: แผนภาพบล็อก (Block Diagrams) วิธีการเอเอ็นเอ็นหรือโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks (ANN))



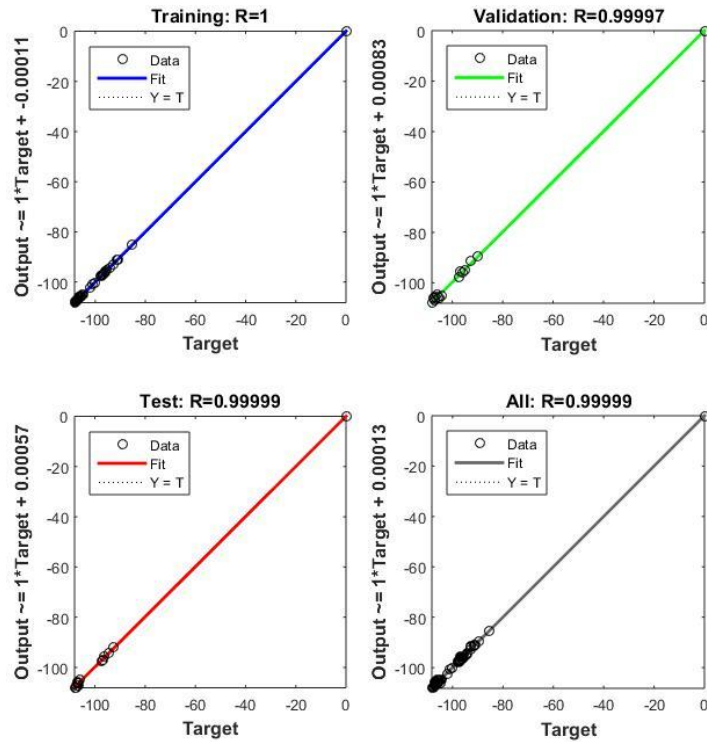
รูปที่ 4.26: เปอร์เซนต์ของสัญญาณรบกวนเทียมและค่าเอาต์พุตของโครงข่ายและค่าเป้าหมาย (Targets) (ค่าเทรสโฮอล์ด)

รูปที่ 4.26 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียมและค่าเอาต์พุตของโครงข่ายและค่าเป้าหมาย (Targets) ซึ่งเป็นค่าเทรสโฮอล์ดของเรานั้นเอง จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟที่เลือกนั้นเหมาะสมกับ

ข้อมูลดีมาก มีเพียงค่าผิดพลาดเพียงเล็กน้อย เปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียมที่เหมาะสมที่สุดอยู่ 73% ซึ่งเปรียบเทียบกับผลที่เราได้จากการที่ปรับค่ากล่าวไปเรื่อยๆ จาก 0, 5, 10,...,100 เพื่อหาค่า เปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียมกับข้อมูลทั้งหมดที่เหมาะสมเบื้องต้นได้ค่าเท่ากับ 70% ซึ่งเราปรับค่าเป็นสเต็ป สเต็ปละ 5 % ซึ่งความละเอียดที่ได้แน่นอนไม่เท่ากับวิธีหลังนั้นคือใช้โครงข่ายประสาทเทียม รูปที่ 4.27 แสดงถึงค่าเฉลี่ยค่าผิดพลาดยกกำลังสอง (Mean square error (MSE)) สำหรับขั้นตอนการฝึก (Train) การยืนยัน (Validation) และการทดสอบ (Test) ค่าเฉลี่ยค่าผิดพลาดยกกำลังสอง (MSE) ของข้อมูลการฝึกลดลงไปเรื่อยๆ ซึ่งขัดกับข้อมูลการยืนยันและข้อมูลการทดสอบที่หลังจาก 2 อีพอคหรือช่วงเวลา (Epoch) ค่าเฉลี่ยค่าผิดพลาดยกกำลังสอง (MSE) เพิ่มขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของโครงข่ายประสาทได้รับเมื่อ อีพอคที่ 2 เราสังเกตได้ว่า ค่าอีพอคที่ดีที่สุดคือค่าอีพอคเมื่อค่าผิดพลาดของการยืนยันหยุดลดลง



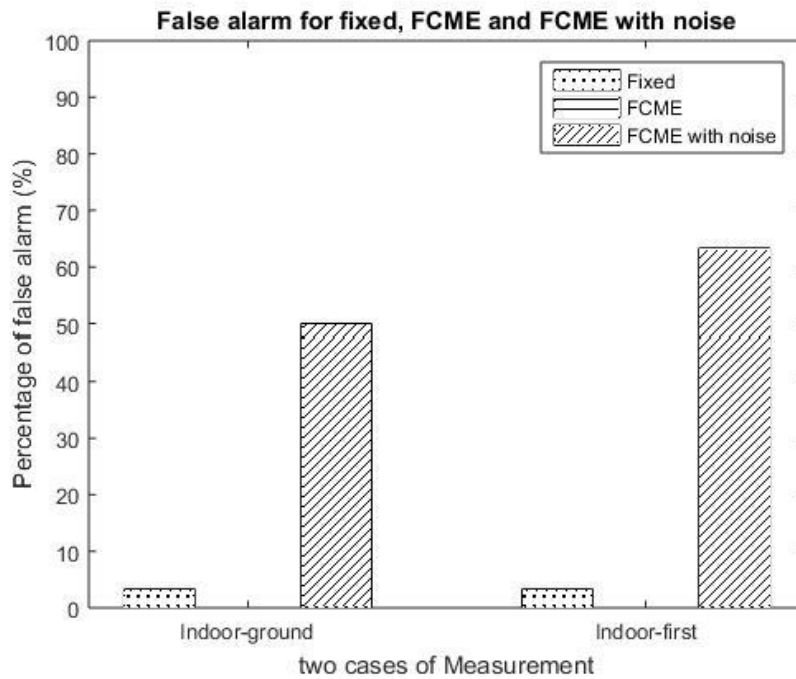
รูปที่ 4.27: ค่าเฉลี่ยค่าผิดพลาดยกกำลังสอง (Mean square error (MSE)) ที่แต่ละอีพอคหรือช่วงเวลา (Epoch)



รูปที่ 4.28: กราฟความถดถอย (Regression plots) ของเอาต์พุตของโครงข่ายและค่าเป้าหมาย

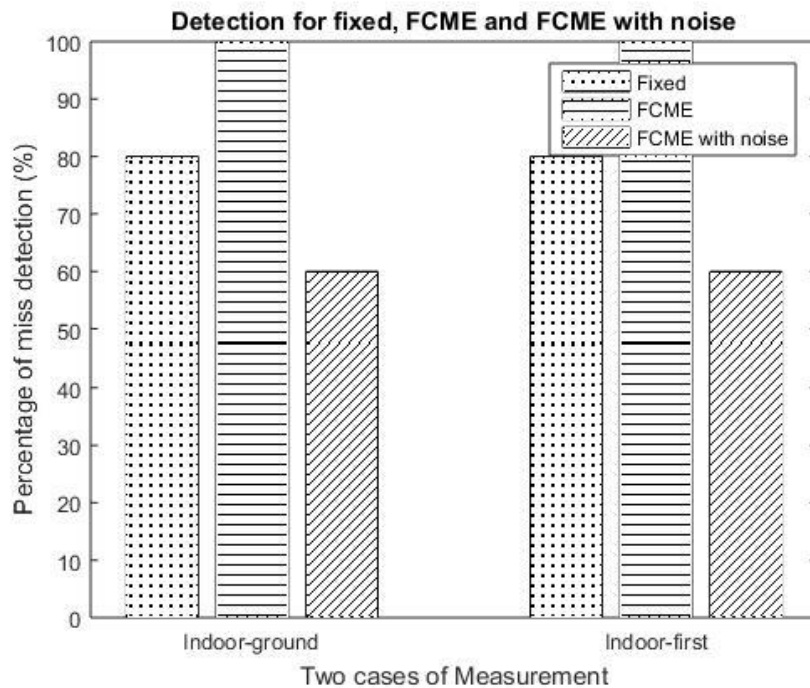
รูปที่ 4.28 แสดงถึงรูปกราฟความถดถอย (Regression plots) ซึ่งแสดงถึงเอาต์พุตของโครงข่าย เกี่ยวกับค่าเป้าหมายของการฝึก การยืนยันและการทดสอบ หากเส้นกราฟที่เลือกนั้นเหมาะสมกับข้อมูลที่สุด ข้อมูลจะอยู่บนเส้น 45 องศา เอาต์พุตของโครงข่ายมีค่าเท่ากับค่าเป้าหมายสำหรับปัญหาของเรา เส้นกราฟที่เลือกนั้นเหมาะสมกับข้อมูลดีมาก มีค่าอาร์หรือค่าวิเคราะห์ความสอดคล้อง (Regression) (R values) ในแต่ละกรณีเท่ากับ 0.99 หรือมากกว่า

ในการวิเคราะห์ผลประสิทธิภาพในการตรวจจับของแต่ละวิธี เราจะประเมินจากค่าดังต่อไปนี้
 1) Number of detection หมายถึง จำนวนช่องสัญญาณที่ไม่ว่างที่ตรวจจับได้ ซึ่งหมายความว่า เป็นจำนวนช่องสัญญาณที่วัดได้ว่าไม่ว่างและในความเป็นจริงชั้นพื้นฐานก็ไม่ว่าง $Pr\{H1|H1\}$
 2) Number of miss detection หมายถึง จำนวนช่องสัญญาณความเป็นจริงชั้นพื้นฐานไม่ว่าง แต่วัดไม่ได้ วัดได้เป็นว่าง $Pr\{H0|H1\}$ และ
 3) Number of False alarm จำนวนช่องสัญญาณที่ในความเป็นจริงชั้นพื้นฐานว่างแต่วัดได้เป็นไม่ว่าง $Pr\{H1|H0\}$



รูปที่ 4.29: ค่าเปอร์เซ็นต์ของ False alarm ของการวัดทั้งสองแบบ สำหรับการวิเคราะห์ผลการวัด
ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

ดังแสดงในรูปที่ 4.29 จะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ของ False alarm ซึ่งสามารถแปลได้ว่า
ช่องสัญญาณที่ในความเป็นจริงขึ้นพื้นฐานว่างแต่วัดได้เป็นไม่ว่าง ในกรณีของวิธี FCME และวิธี Noise
added FCME มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ค่าเทรสโพลด์มีค่าค่อนข้างสูง ขณะที่ค่าเทรส
โพลด์ที่ตั้งแบบตายตัวได้ค่าเปอร์เซ็นต์ของ False alarm 5% ในการวัดทั้งสอง



รูปที่ 4.30: ค่าเปอร์เซ็นต์ของ Miss detection ของการวัดทั้งสองแบบ สำหรับการวิเคราะห์ผลการวัด ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

ดังแสดงในรูปที่ 4.30 โดยทั่วไป วิธี Noise added FCME จะมีผลค่า Miss detection ที่ดีกว่าทั้งแบบตั้งค่าเทรชโวลต์ตายตัวและแบบวิธี FCME ขณะที่ วิธี FCME ได้ผลลัพธ์ 100% Miss detection ในทั้งสองกรณี นั่นคือ ช่องสัญญาณความเป็นจริงขึ้นพื้นฐานไม่ว่าง แต่วัดได้เป็นว่าง เราสามารถอธิบายได้ตามเหตุผลที่ได้อธิบายแล้วข้างต้นว่า วิธี FCME นั้นต้องการ ส่วนที่ไม่มีสัญญาณและเป็นเพียงสัญญาณรบกวนก่อน ต้องเป็นเซตที่สะอาด และเริ่มต้นนี้จะมีขนาดประมาณอย่างน้อย 10% ของเซตข้อมูลทั้งหมดเพื่อให้สามารถตรวจจับสัญญาณได้ดีขึ้น เราต้องมีการเสริมเสริม สัญญาณรบกวนเข้าไปอย่างน้อย 10% ของเซตข้อมูลทั้งหมดดังเช่น วิธี Noise added FCME ค่า % Miss detection ลดลงอย่างมาก

2.5) การทดสอบระบบการวัด แบบเคลื่อนที่ ในบริเวณชนบทห่างไกลเข้าถึงยาก ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

เราวัดแบบเคลื่อนที่เส้นทางจากสถาบันเอไอทีเขตปทุมธานี ไปจังหวัดตากด้วย และในพื้นที่ที่เราจะทดสอบในพื้นที่หมู่บ้านไทยสามัคคี ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก สำหรับข้อมูลต่างๆ ของการวัดแบบเคลื่อนที่นี้ได้ถูกแสดงในตารางที่ 4.6 การวัดแบบเคลื่อนที่นี้เราจะวิเคราะห์เพียงใช้การตั้งเทรสโฮลด์แบบตายตัวเพื่อความสะดวก แต่เพื่อให้สามารถเลือกใช้ค่าเทรสโฮลด์ที่เหมาะสม เราจะตั้งค่าไว้สี่ระดับดังต่อไปนี้ -85dBm, -90dBm, -95dBm, และ -100dBm

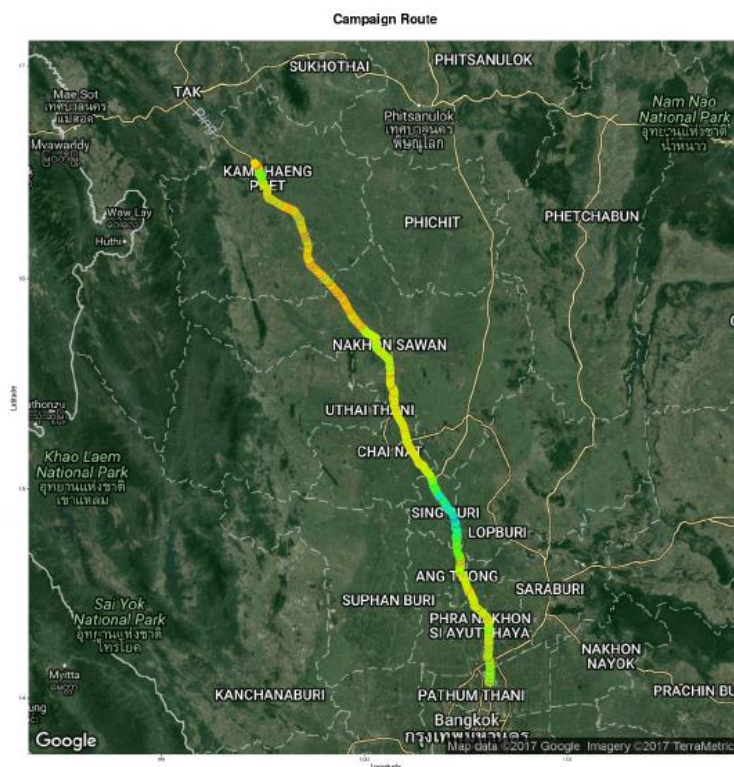
ตารางที่ 4.6: ค่าข้อมูลต่างๆ (Info Value) ของการวัดแบบเคลื่อนที่เส้นทางจากสถาบันเอไอทีเขตปทุมธานี ไปจังหวัดตาก

ค่าข้อมูลต่างๆ (Info Value)	
วันที่วัด (Campaign date)	2017-12-12
ระยะเวลาใช้ในการวัด (Campaign duration)	5:13:42 (hour:min:sec)
ความยาวของเส้นทางในการวัด (Route length)	321.5 km
จำนวนจุด (ตัวอย่าง) (N points)	47356
พื้นที่ในการวัด (Place of measurement)	สถาบันเอไอที-จังหวัดตาก
เขตในการวัด (Region)	ปทุมธานี (Pathum Thani)-จังหวัดตาก

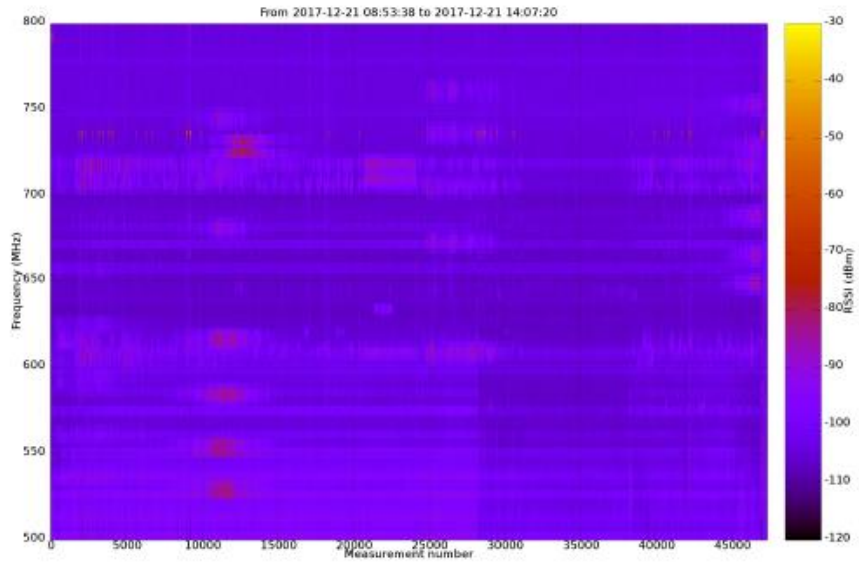
รูปที่ 4.31 แสดงแผนที่อุณหภูมิ (Heatmap) ระดับกำลังของคลื่นกิจการโทรทัศน์ที่วัดได้ตามเวลาต่างๆ หรือจำนวนการวัด ณ ตำแหน่งบนเส้นทาง ซึ่งได้เฉลี่ยรูปที่ 4.32 ซึ่งแสดงรายละเอียดของแผนที่อุณหภูมิในรูปที่ 4.31 โดยแสดงระดับกำลังของคลื่นกิจการโทรทัศน์ที่วัดได้ในแต่ละความถี่ต่างๆ 510-800 MHz (**หมายเหตุ:** ในรูปนี้ในสเกลสีที่แตกต่างไปจากเดิมอันได้แก่จากสีเหลือง สีส้ม สีแดง สีม่วง สีน้ำเงิน สีน้ำเงินเข้มจาก -50dbm ถึง -120dBm) รูปที่ 4.33-4.40 การครอบครองคลื่น (Spectrum occupancy) ที่ระดับค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ต่างๆ กัน -85dBm, -90dBm, -95dBm, และ -100dBm ตามลำดับ ซึ่งค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งค่าเหนือกว่าระดับสัญญาณรบกวนซึ่งแสดงในรูปที่ 4.41 เช่นรูปที่ 4.33 ซึ่งแสดงเปอร์เซ็นต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ -85dBm จะเห็นได้ว่ามีเปอร์เซ็นต์ที่สูง หรือในการกลับกัน Samples ที่มีกำลังสูงกว่าค่าเทรสโฮลด์ (ช่องสัญญาณไม่ว่างถูกใช้) มีเปอร์เซ็นต์ที่ต่ำ เมื่อเราเพิ่มระดับค่าเทรสโฮลด์ -90dBm, -95dBm, และ -100dBm แสดงในรูปที่ รูปที่ 4.33, รูปที่ 4.35, รูปที่ 4.37, และ รูปที่ 4.39 ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่ามีเปอร์เซ็นต์ที่ต่ำลง หรือในการกลับกัน Samples ที่มีกำลังสูงกว่าค่าเทรสโฮลด์ (ช่องสัญญาณไม่ว่างถูกใช้) มีเปอร์เซ็นต์ที่สูงขึ้น นอกจากนี้ในรูปที่ 4.34, รูปที่ 4.36, รูปที่ 4.38, และรูปที่ 4.40 แสดงถึงรายละเอียดเปอร์เซ็นต์ Samples ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ -85dBm, -90dBm, -95dBm, และ -100dBm ตามแต่ละช่วงความถี่ต่างๆ 510-800 MHz

จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์การวัดโดยเคลื่อนที่มีข้อดีคือสามารถเก็บข้อมูลหลายๆ จุดตำแหน่งในแต่ละพื้นที่อย่างต่อเนื่องซึ่งจำเป็นอย่างมากหากเราต้องการทำแผนที่อุณหภูมิให้ครอบคลุมพื้นที่กว้างๆ เช่นทั่วประเทศ แต่ข้อมูลที่ได้จะไม่ละเอียดเท่ากับการวัด ณ ตำแหน่งตายตัว เช่นในรูปที่ 4.33, รูปที่ 4.35, รูปที่ 4.37, และ รูปที่ 4.39 ซึ่งแสดงเปอร์เซ็นต์จุดหรือตัวอย่างการวัด ตามเส้นทางซึ่งค่าได้ได้ถูกเฉลี่ยจากค่าที่ได้ในแต่ละความถี่ต่างๆ 510-800 MHz ขณะที่ในรูปที่ 4.34, รูปที่ 4.36, รูปที่ 4.38, และ รูปที่ 4.40 ซึ่งแสดงเปอร์เซ็นต์จุดหรือตัวอย่างการวัด ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ตามแต่ละช่วงความถี่ซึ่งค่าได้ได้ถูกเฉลี่ยจากค่าที่ได้ในแต่ละจุดการวัดตามเส้นทาง ดังนั้นเราสามารถวัดและวิเคราะห์ ณ ตำแหน่งตายตัวที่ตำแหน่งสำคัญๆ ที่เหมือนเป็นศูนย์รวมของพื้นที่นั้นๆ และเชื่อมพื้นที่เหล่านั้นโดยการวัดแบบเคลื่อนที่

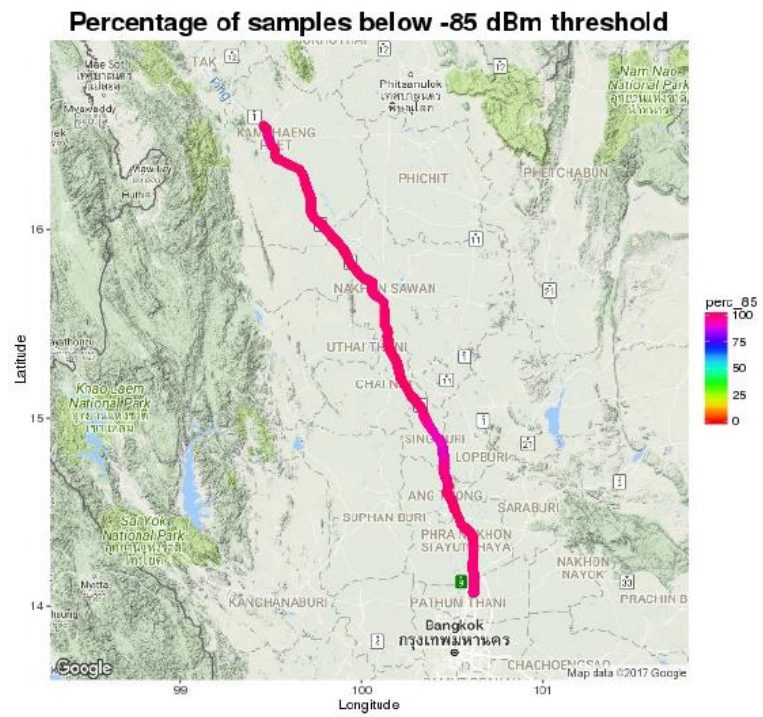


รูปที่ 4.31: แผนที่อุณหภูมิแสดงระดับกำลังของคลื่นกิจการโทรทัศน์ตามเส้นทางจากสถาบันเอไอทีไปยังหมู่บ้านไทยสามัคคี ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

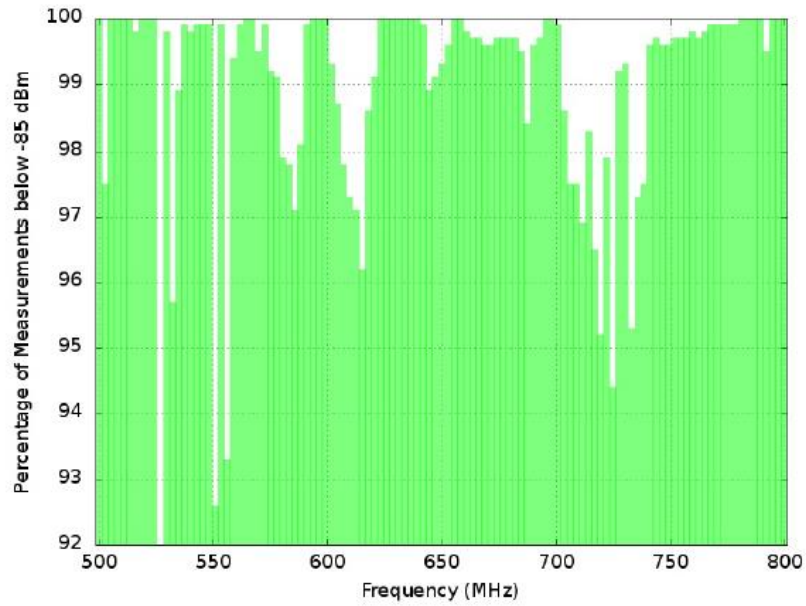


รูปที่ 4.32: ระดับกำลังของคลื่นกิจกรรมโทรศัพท์เคลื่อนที่ตามเส้นทาง (Power levels) ตามความถี่ต่างๆ 510-800 MHz และตามเวลาต่างๆ หรือจำนวนการวัด (Number of measurements) บนเส้นทางจากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (เอไอที) ไปยังหมู่บ้านไทยสามัคคี ตำบลแม่กาษา อำเภอสอด จังหวัด

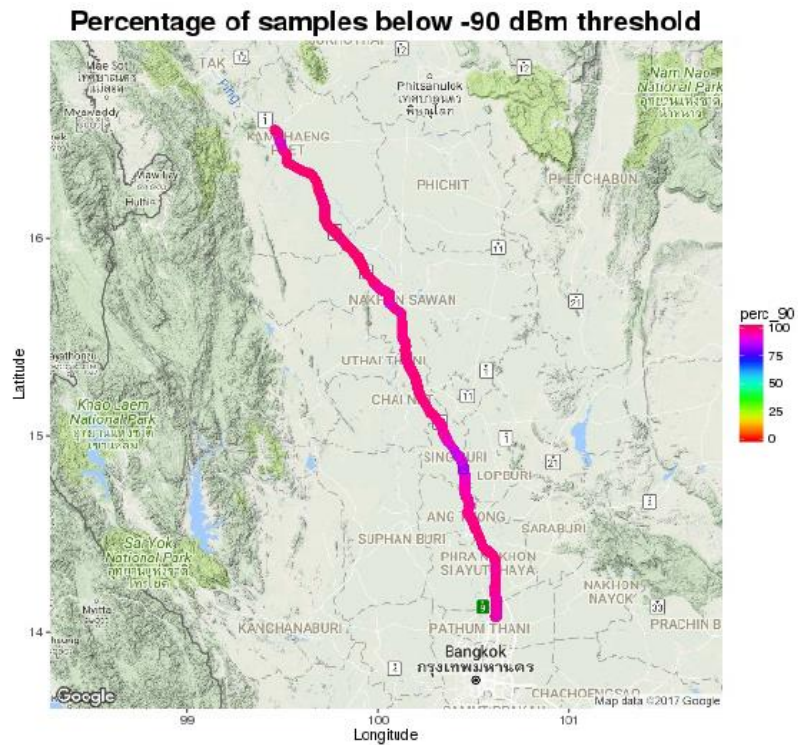
ตาก



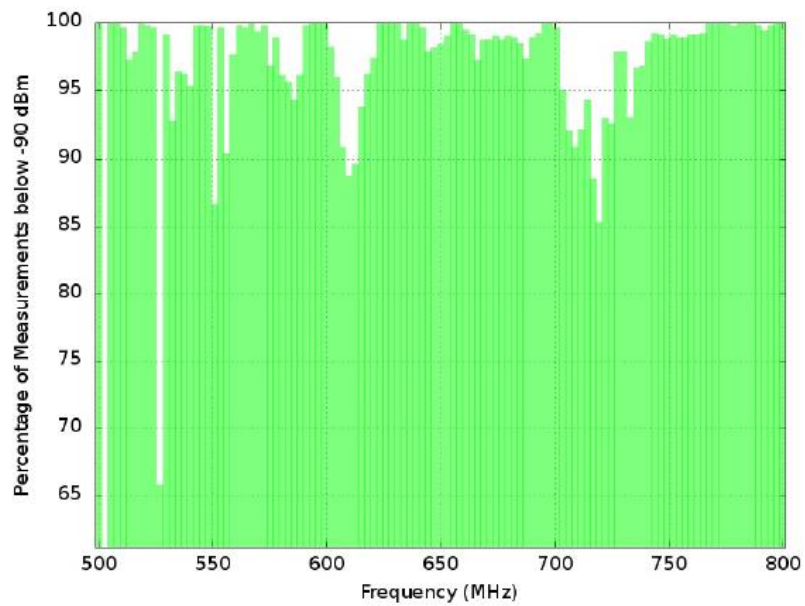
รูปที่ 4.33: เปอร์เซนต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ -85dBm



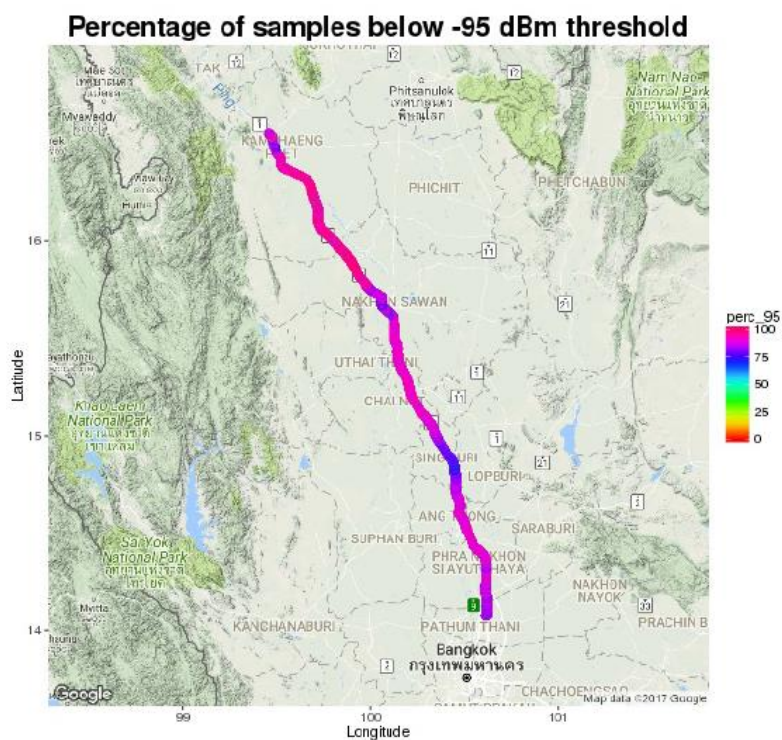
รูปที่ 4.34: เปอร์เซนต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ -85dBm ตามแต่ละช่วงความถี่



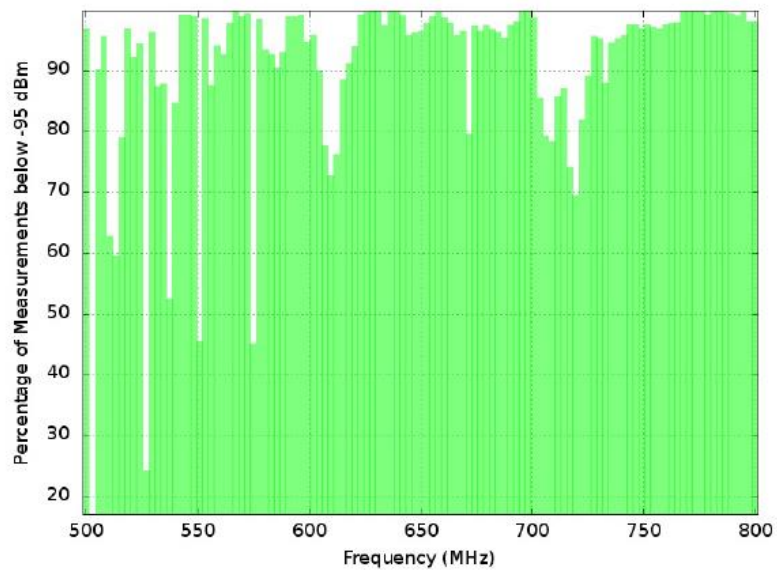
รูปที่ 4.35: เปอร์เซนต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ -90dBm



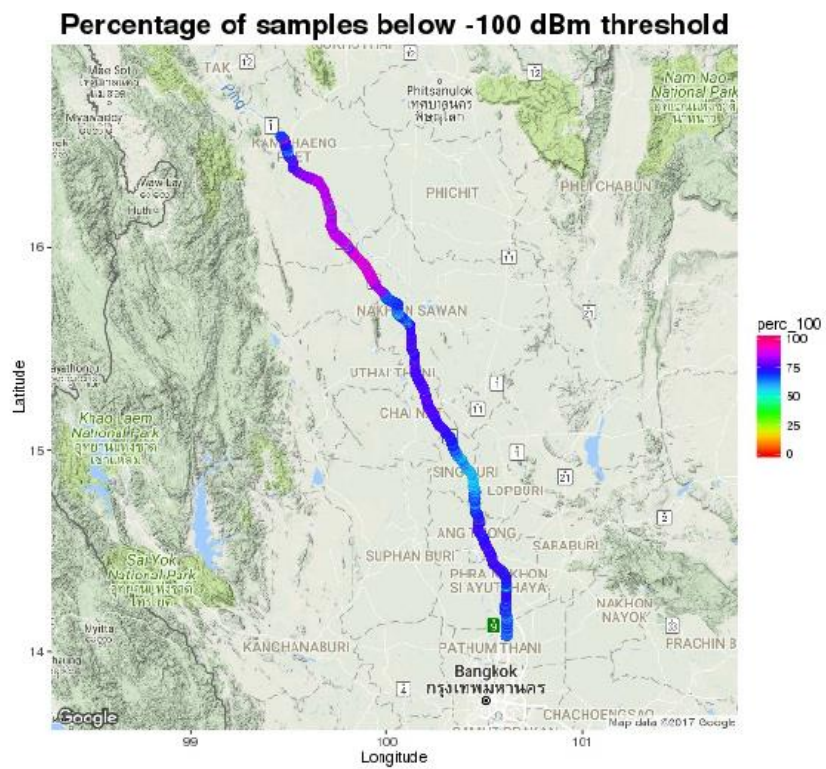
รูปที่ 4.36: เปอร์เซ็นต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ -90dBm ตามแต่ละช่วงความถี่



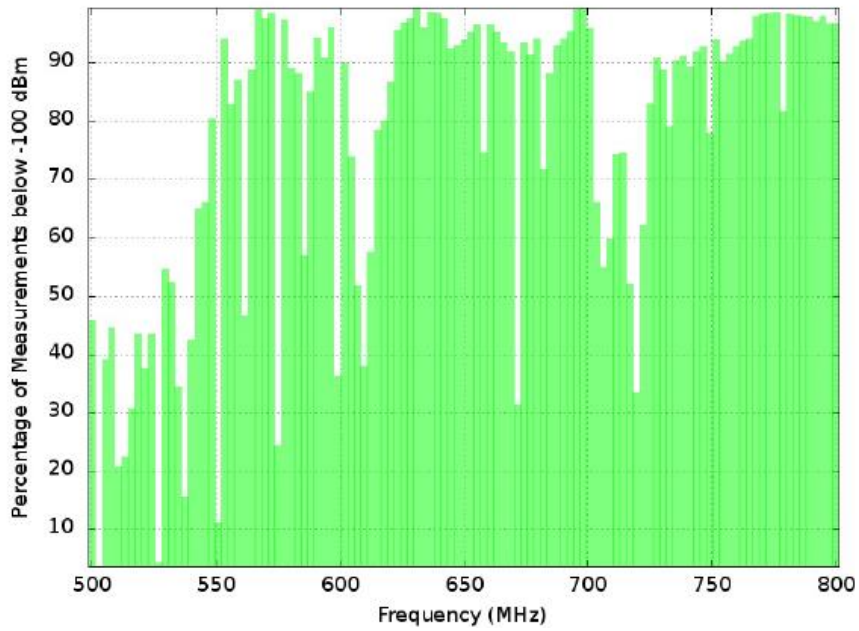
รูปที่ 4.37: เปอร์เซ็นต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ -95dBm



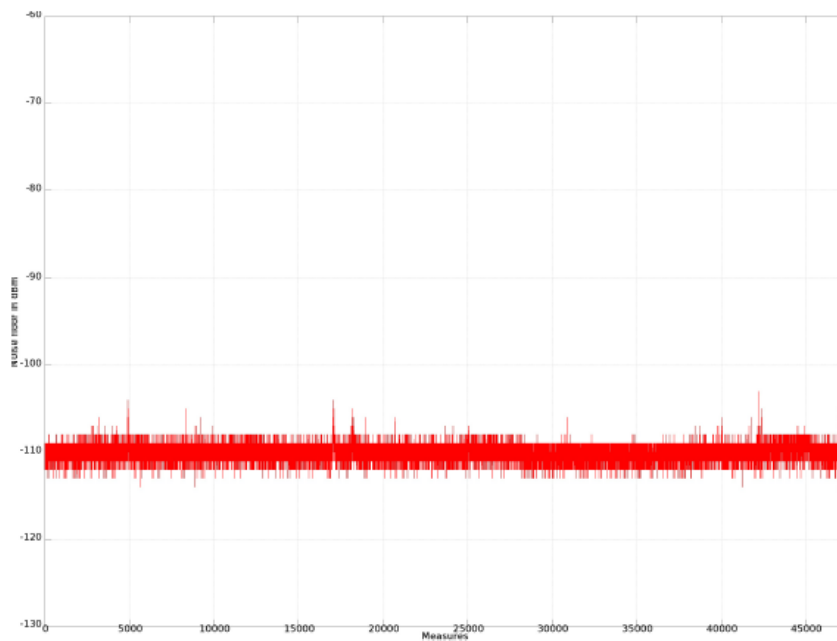
รูปที่ 4.38: เปอร์เซนต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ -95dBm ตามแต่ละช่วงความถี่



รูปที่ 4.39: เปอร์เซนต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ -100dBm



รูปที่ 4.40: เปอร์เซนต์จุดหรือตัวอย่างการวัด (Samples) ที่มีกำลังต่ำกว่าค่าเทรสโฮลด์ที่ตั้งไว้ -100dBm ตามแต่ละช่วงความถี่



รูปที่ 4.41: ค่าระดับสัญญาณรบกวน (Noise floor) ในแต่ละจุดหรือตัวอย่างการวัด

2.6) สรุปการตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์

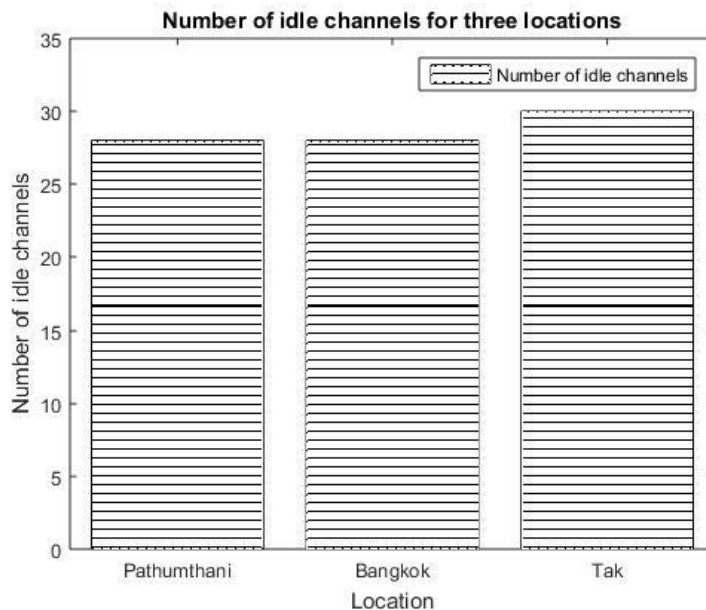
เราได้ทำศึกษาและพัฒนาระบบการตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ ออกแบบการตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ทั้งแบบ ณ ตำแหน่งตายตัว เพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลได้ละเอียดและแบบเคลื่อนที่ เพื่อสามารถเก็บข้อมูลหลายๆ ตำแหน่งในแต่ละพื้นที่อย่างต่อเนื่อง เราต้องทดสอบความถูกต้องของระบบวัดดังกล่าวโดยการ การปรับเครื่องเข้าสู่ภาวะมาตรฐาน เทียบกับเครื่องมือวัดสเปกตรัมแบบมาตรฐานที่มีราคาแพงมาก และกินพลังงานมากต้องต่อสายกำลังไฟตลอดเวลา ใหญ่เทอะทะจะทำให้ไม่สะดวกในการทำงานภาคสนามได้ ระบบของเรา ราคาถูกทำให้องค์กรที่ต้องการใช้งานสามารถเข้าถึงได้และทำให้โครงการหนึ่งๆ สามารถมีระบบนี้ได้หลายชุด ซึ่งทำให้สามารถการวัดพร้อมๆ กันได้หลายพื้นที่ กินพลังงานน้อยทำให้ระบบต้องถูกรันไว้ตลอดทั้งวันไม่ต้องคอยชาร์ตหรือเปลี่ยนแบตเตอรี่ง่ายต่อการใช้งาน ไม่ซับซ้อน ซึ่งทำให้สะดวกในการหาทีมงานที่มาช่วยในวัด

หลังจากนั้นเราได้ทดสอบวัดคลื่นสัญญาณในบริเวณสถาบันเอไอที จังหวัดปทุมธานีทั้งแบบเคลื่อนที่ เพื่อสามารถเก็บข้อมูลหลายๆ ตำแหน่งในแต่ละพื้นที่อย่างต่อเนื่อง และออกแบบ ณ ตำแหน่งตายตัว ซึ่งเทียบได้กับเขตท้องที่ชุมชน ในเขตเมือง ต่างจังหวัด จากปัญหาความไม่แม่นยำในการตัดสินใจว่าช่องสัญญาณนั้นว่างหรือไม่ว่างเมื่อเทียบกับค่าความจริงขั้นพื้นฐาน เมื่อใช้ค่าเทรสโฮลด์แบบตายตัว -100dBm โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลจากการวัดภายในอาคารซึ่งสัญญาณคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ได้ถูกบดบังอย่างรุนแรงก่อนที่จะมาถึงสายอากาศของระบบวัดก็จะเกิดปรากฏการณ์ ซาโดว์อิงเอฟเฟกต์ รวมถึง เฟดดิ้งขนาดเล็ก ซึ่งเกิดจากการแพร่กระจายหลายวิถีทิศทางของคลื่นสัญญาณ ซึ่งโดยปกติภายในอาคารเราไม่ได้รับ เส้นทางโดยตรงจากตัวส่งมาตัวรับ แบบจำลองเฟดดิ้งแพร่กระจายหลายวิถีทิศทางมีการแจกแจงตัวแปรสุ่มแบบเรย์เลห์ โดยทั้งเฟดดิ้งขนาดเล็กและซาโดว์อิงเอฟเฟกต์นี้ ทำให้ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อน การตัดสินใจเป็นไปอย่างไม่ถูกต้องนัก ดังนั้นเราจึงเสนอวิธีการแก้ปัญหาโดยพัฒนาสเปกตรัมเซนซิงอัลกอริทึมเพื่อระบุชี้แจงคลื่นที่ไม่ได้ถูกใช้งานได้แม่นยำขึ้น อัลกอริทึมดังกล่าวทำให้การตั้งค่าเทรสโฮลด์เป็นไปแบบปรับเปลี่ยน ไม่ว่าจะเป็วิธี FCME ซึ่งสามารถได้ผลลัพธ์การตัดสินใจดีขึ้นเมื่อช่องสัญญาณนั้นว่าง เนื่องจากวิธีการดังกล่าวต้องการให้มีส่วนที่ไม่มีสัญญาณและเป็นเพียงสัญญาณรบกวนก่อน เป็นเขตที่สะอาด ซึ่งเขตเริ่มต้นนี้จะมีขนาดประมาณ 10% ของเขตข้อมูลทั้งหมด แต่เมื่อช่องสัญญาณนั้นไม่ว่างประกอบด้วยสัญญาณคลื่นกิจการโทรทัศน์ ทั้ง FCME ไม่สามารถที่เพิ่มความถูกต้องในการตัดสินใจ ดังนั้นเราแก้ไขโดยการเสริมสัญญาณรบกวนเทียมเข้าไปเป็นวิธี Noise added FCME ซึ่งปริมาณสัญญาณรบกวนที่ใส่เข้าไปเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับข้อมูลทั้งหมด โดยเราจะปรับค่าดังกล่าวไปเรื่อยๆ จาก 0, 5, 10,..., 100 เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียบกับข้อมูลทั้งหมดที่เหมาะสมที่สุด (Optimal percentage) ทำให้เราสามารถตัดสินใจว่าช่องสัญญาณนั้นว่างหรือไม่ว่างได้ถูกต้องแม่นยำขึ้น

จากผลการวิเคราะห์การวัดที่ได้ทำนี้ สรุปได้ว่า สเปกตรัมหรือคลื่นความถี่ที่สามารถนำมาใช้งานได้ที่ได้จากการใช้วิธี Noise added FCME ทั้งพื้นที่ที่ใช้ในการวัดทั้งสามพื้นที่ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และสรุปจำนวนของสัญญาณที่ว่างทั้งหมด (Total idle channel or white space) แสดงในรูปแบบที่ 4.42 จะเห็นได้ว่า ในพื้นที่ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งถือว่าเป็นพื้นที่ห่างไกล เข้าถึงยาก มีจำนวนคลื่นความถี่ที่สามารถนำมาใช้งานได้ (Spectrum availability) หรือปริมาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) มากที่สุด ดังนั้นเพื่อเป็นการขยายการใช้งานบรอดแบนด์อินเทอร์เน็ตในพื้นที่ที่ยังไม่มีการเข้าถึงหรือพื้นที่ที่เข้าถึงยาก ทีวีไวท์สเปซ (TVWS) จะสามารถเป็นตัวเลือกใหม่สำหรับเชื่อมต่อเครือข่ายหลัก (Backhaul connection) ที่มีการราคาถูกกว่าการเชื่อมต่อโดยใช้ใยแก้วนำแสง ดาวเทียมหรือระบบสายแมกซ์

ตารางที่ 4.7: สเปกตรัมหรือคลื่นความถี่ที่สามารถนำมาใช้งานได้ (Spectrum availability) หรือ ปริมาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ทั้งหมดที่วัดและวิเคราะห์จากการใช้วิธี Noise added FCME ทั้งพื้นที่ที่ใช้ในการวัดทั้งสามพื้นที่

พื้นที่ที่ใช้วัด (Measurement Location)	หมายเลขช่องสัญญาณ (Idle Channel Numbers)	จำนวนของสัญญาณที่ว่าง ทั้งหมด (Total White Spaces)
สถาบันเอไอที (ปทุมธานี)	27, 28, 30, 31, 33, 34, 35, 37, 38, 39, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60	28
กรุงเทพมหานคร	27, 28, 30, 31, 33, 34, 35, 37, 38, 39, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60	28
ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก	26, 27, 28, 29, 30, 32 33, 34, 36, 37, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60	30



รูปที่ 4.42: จำนวนของสัญญาณที่ว่างทั้งหมด (Total Idle Channel or white spaces) ในแต่ละพื้นที่

3.) ศึกษาและพัฒนาทดสอบและติดตั้งระบบสื่อสารต้นแบบความเร็วสูงผ่านคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ในพื้นที่เป้าหมาย

เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ที่ไม่ได้ใช้งาน โครงการนี้ มีความประสงค์ที่จะนำคลื่นความถี่นี้ไปขยายการให้บริการอินเทอร์เน็ตสู่ชุมชนที่ห่างไกล ที่ระบบโครงข่ายพื้นฐานยังมีไม่เพียงพอ โดยระบบสื่อสารต้นแบบความเร็วสูงผ่านคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์นี้จะนำข้อมูลจากระบบฐานข้อมูล (Geo-location database) มาใช้ในการตัดสินใจเลือกใช้ความถี่ที่ไม่ทับซ้อนกับคลื่นความถี่ที่มีการใช้งานอยู่ในท้องที่ โดยอุปกรณ์ส่งสัญญาณคลื่นความถี่โทรทัศน์หรือเครื่องสถานีฐาน (TVWS BS) ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ส่งสัญญาณนี้จะเลือกใช้ความถี่ที่ไม่ได้ใช้งานจากระบบฐานข้อมูลคลื่นความถี่ในพื้นที่ต่างๆ และส่งสัญญาณเชื่อมต่อไปยังอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ (TVWS CPE) ดังแสดงในรูปที่ 3.18 โดยการส่งสัญญาณนี้จะช่วยรองรับ การให้บริการอินเทอร์เน็ตส่วนขยายไปสู่พื้นที่ห่างไกลผ่านโครงข่ายไร้สายแบบเมช (Wireless Mesh Network (WMN)) โดยในการติดตั้งระบบต้นแบบนี้เราจะใช้ อุปกรณ์เราเตอร์แบบไร้สายเชื่อมต่อกันด้วย เทคโนโลยีโมบายล์ แอดฮอกเน็ตเวิร์ค (Mobile ad hoc network)

3.1) การทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์ระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) เบื้องต้นที่สถาบันเอไอที

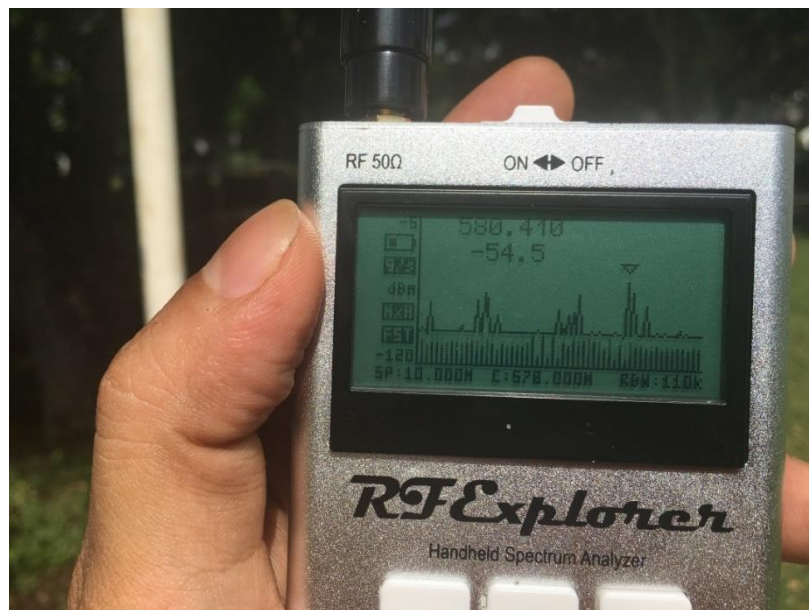
เพื่อเป็นการเตรียมความพร้อมก่อนที่จะนำอุปกรณ์ระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ไปติดตั้งที่พื้นที่ทดสอบจังหวัดตาก ณ โรงเรียนบ้านแม่ก๊กหลวงวิทยุไชยมิตรภาพที่ 182 เราติดตั้งและทดสอบอุปกรณ์ TVWS ที่สถาบันเอไอที โดยติดตั้งอุปกรณ์เครื่องสถานีฐาน (BS) พร้อมทั้งส่วนส่วนที่เชื่อมต่อไปอากาศ (Radio module) สามชุดและสายอากาศแบบแบ่งส่วนเชิงเคออร์ 120-degree ดังแสดงในรูปที่ 3.22 และ 3.23 ตามลำดับ ติดตั้งอยู่บน Rooftop ของอาคาร AIT extension ส่วนที่อุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ (CPE) เราติดตั้งและทำงานทดสอบวัดระดับสัญญาณและค่าประสิทธิภาพต่างๆ ในบริเวณ Internet Education and Research Laboratory (intERLab) ที่ระยะทางจากเครื่องสถานีฐานสองระยะทางต่างกัน ได้แก่ที่ระยะ 80 m และที่ 130 m

โดยอุปกรณ์ทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ได้กำหนดใช้คลื่นความถี่ที่ 580 MHz เป็นช่องสัญญาณที่ว่างไม่ได้ใช้งาน รูปภาพที่ 4.43 แสดงผลการวัดกำลังคลื่นสัญญาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) โดยใช้ RF Explorer ที่ระยะทาง 80 m เมื่อยังการไม่มีการส่งข้อมูล คลื่นสัญญาณที่วัดได้ อยู่ที่ ระดับ -62.0 dBm และกำลังคลื่นสัญญาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ที่วัดได้โดยใช้ RF Explorer เมื่อมีการส่งข้อมูล อยู่ที่ ระดับ -54.5 dBm ดังแสดงตามรูปภาพที่ 4.44 รูปภาพที่ 4.45 แสดงผลการวัดกำลังคลื่นสัญญาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) โดยใช้ RF Explorer ที่ระยะทาง 130 m เมื่อยังการไม่มีการส่งข้อมูล คลื่นสัญญาณที่วัดได้ อยู่ที่ ระดับ -62.5 dBm และกำลังคลื่นสัญญาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ที่วัดได้โดยใช้ RF Explorer เมื่อมีการส่งข้อมูล อยู่ที่ ระดับ -55.5 dBm ดังแสดงตามรูปภาพที่ 4.46 สาเหตุที่กำลังคลื่นสัญญาณที่วัดได้เมื่อยังการไม่มีการส่งข้อมูลน้อยเพราะอุปกรณ์ทีวีไวท์สเปซ (TVWS) นั้นอยู่ในโหมดประหยัดพลังงาน (Standby mode)

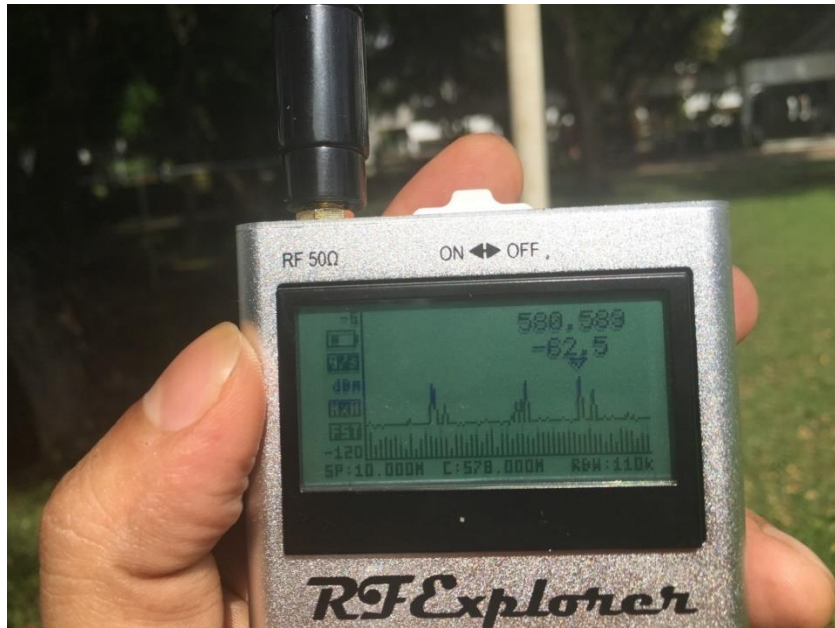
นอกจากนี้เราวัดสัญญาณให้แม่นยำขึ้นเป็นการตรวจสอบให้มั่นใจขึ้น โดยใช้เครื่อง Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer ด้วยตามรูป 3.35 โดยผลที่วัดที่ระยะทางจากเครื่องสถานีฐานสองระยะทางต่างกัน 80 m และที่ 130 m ได้ถูกแสดงตามรูปภาพที่ 4.47 และ 4.48 และ รูปภาพที่ 4.49 และ 4.50 ผลที่ได้ก็เป็นไปตามแนวทางเดียวกันกับผลที่ได้โดยใช้ RF Explorer



รูปที่ 4.43: การวัดสัญญาณ ณ สถาบันเอไอที โดยใช้ RF Explorer ที่ระยะ 80 m เมื่อยังการไม่มีการส่งข้อมูล



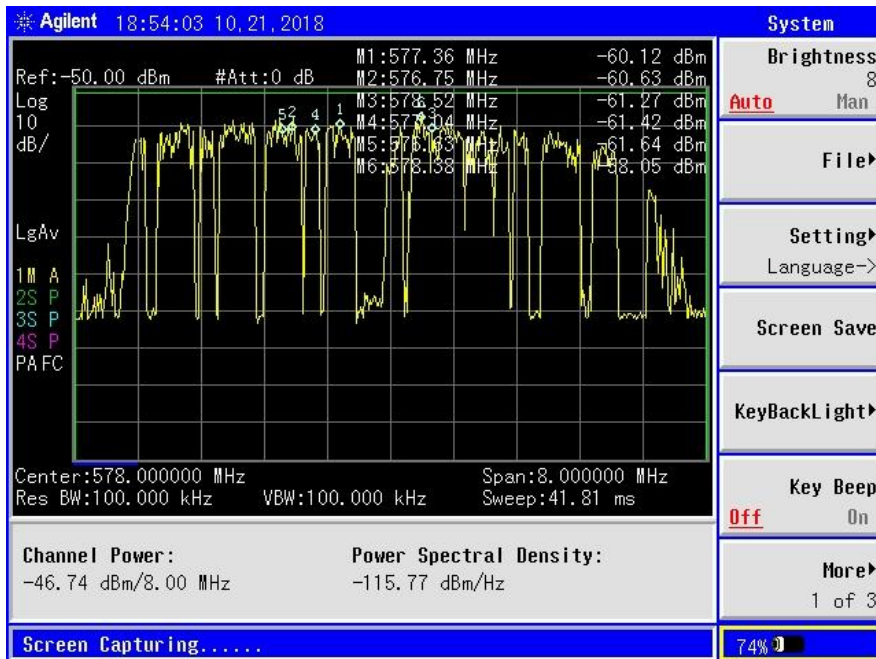
รูปที่ 4.44: การวัดสัญญาณ ณ สถาบันเอไอที โดยใช้ RF Explorer ที่ระยะ 80 m เมื่อมีการส่งข้อมูล



รูปที่ 4.45: การวัดสัญญาณ ณ สถาบันเอไอที โดยใช้ RF Explorer ที่ระยะ 130 m เมื่อยังการไม่มีการส่งข้อมูล

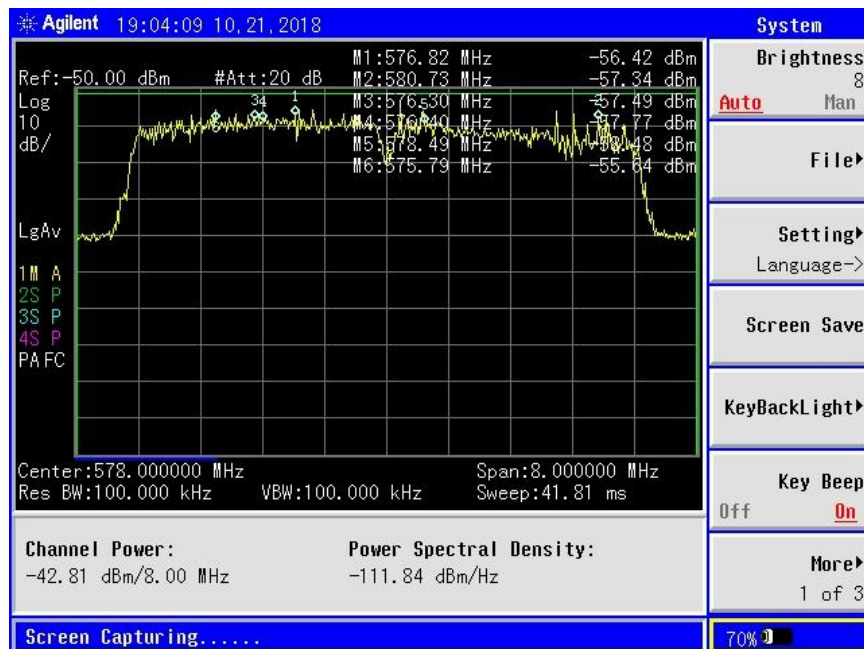


รูปที่ 4.46: การวัดสัญญาณ ณ สถาบันเอไอที โดยใช้ RF Explorer ที่ระยะ 130 m เมื่อมีการส่งข้อมูล



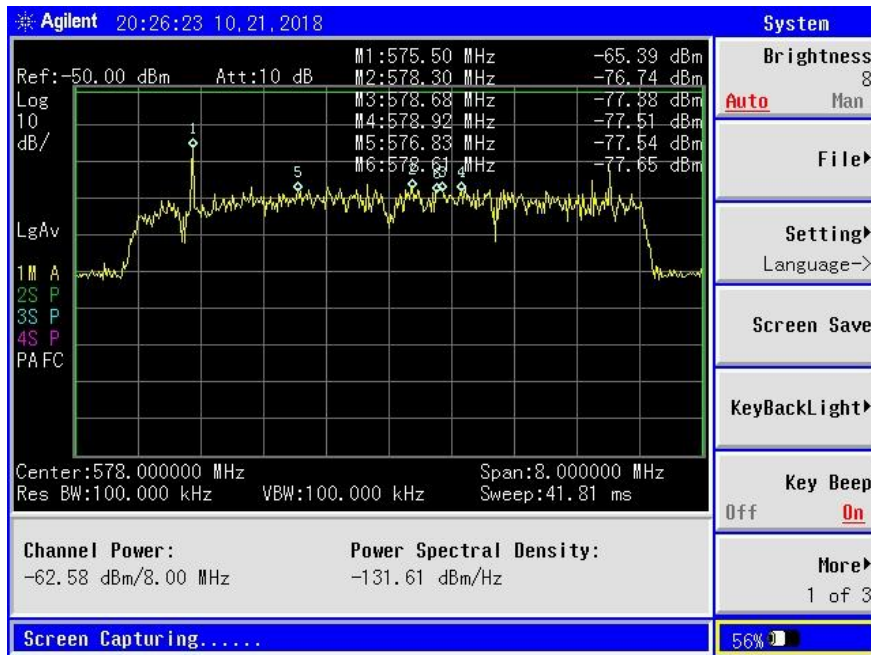
รูปที่ 4.47: การวัดสัญญาณ ณ สถาบันเอไอที โดยใช้เครื่อง Agilent N9340B RF Spectrum

Analyzer ที่ระยะ 80 m เมื่อยังไม่มีการส่งข้อมูล

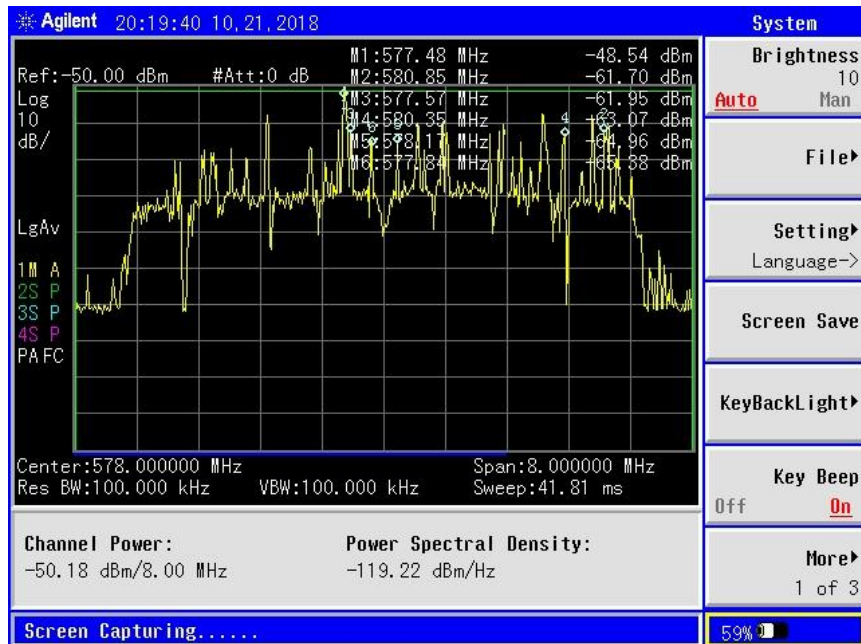


รูปที่ 4.48: การวัดสัญญาณ ณ สถาบันเอไอที โดยใช้เครื่อง Agilent N9340B RF Spectrum

Analyzer ที่ระยะ 80 m เมื่อมีการส่งข้อมูล



รูปที่ 4.49: การวัดสัญญาณ ณ สถาบันเอไอที โดยใช้เครื่อง Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer ที่ระยะ 130 m เมื่อยังไม่มีการส่งข้อมูล



รูปที่ 4.50: การวัดสัญญาณ ณ สถาบันเอไอที โดยใช้เครื่อง Agilent N9340B RF Spectrum Analyzer ที่ระยะ 130 m เมื่อมีการส่งข้อมูล

ในการทดสอบวัดค่าต่างๆ มีแปรเปลี่ยนตัวแปรที่มีผลต่อค่านั้นๆ ต่างๆ กันดังต่อไปนี้

- 1) การทดสอบความเร็ว (Speed Test) หรือค่าทราฟฟิค (Throughput) ในการรับส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์ระบบ TVWS ที่ระยะทางระหว่างเครื่องสถานีฐานไปยังอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ d ต่างกัน ซึ่งเราคาดการณ์ว่าที่ระยะไกลกว่าค่าทราฟฟิคลดลงเนื่องการสูญเสียกำลังของสัญญาณตามที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น นอกจากนี้การจางหายของสัญญาณ (Channel fading) ก็น่าจะมีผลต่อค่าทราฟฟิคด้วย ซึ่งทำให้ถึงแม้จะเป็นระยะทางใกล้ๆ แต่สภาพแวดล้อมไม่มีเส้นทางโดยตรงหรือแนวเส้นสายตา
- 2) การทดสอบวัดค่าสูญเสียของแพ็กเก็ตข้อมูลหรือที่เรียกว่า แพ็กเก็ตลอส (Packet loss) ในการรับส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์ระบบ TVWS ที่ขนาดแพ็กเก็ตข้อมูลที่ตายตัวเท่ากับ 1470 ไบต์ (Bytes) เราส่งแพ็กเก็ตข้อมูลด้วยขนาด 1470 ไบต์ (Bytes) และแปรเปลี่ยนอัตราความเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล 5, 10, 15, and 20 Mbps ตามลำดับในกรณีของ Links#1 และ 2 และ 0.5, 2, 5, and 6 Mbps ตามลำดับในกรณีของ Link#3 ซึ่งเราคาดการณ์ว่าแพ็กเก็ตลอสมากขึ้นเมื่ออัตราความเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเร็วขึ้น
- 3) การทดสอบวัดค่าอัตราการล่าช้า (Round-trip latency) ที่ขนาดแพ็กเก็ตข้อมูลที่ต่างๆ กัน ดังนี้ 32 512 และ 1500 ไบต์ (Bytes) ที่ระยะทางระหว่างเครื่องสถานีฐานไปยังอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ d ต่างกัน ซึ่งเราคาดการณ์ว่าขนาดแพ็กเก็ตข้อมูลมีผลต่อค่าอัตราการล่าช้า ซึ่งขนาดแพ็กเก็ตข้อมูลมากขึ้นทำให้อัตราการล่าช้ามากขึ้น แต่ระยะทางไม่มีผลต่ออัตราการล่าช้ามากนัก ซึ่งตามข้อมูลจำเพาะของเครื่องระบบสื่อสาร RuralConnect Gen 3 นี้้อัตราการล่าช้าจะอยู่ระหว่าง 5-35 ms ขึ้นกับโหนดของผู้ใช้นั้นหมายถึงขนาดแพ็กเก็ตข้อมูลที่ใช้นั่นเอง
- 4) ค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ระยะทางระหว่างเครื่องสถานีฐานไปยังอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ d ต่างกัน เราส่งแพ็กเก็ตข้อมูลด้วยขนาด 1470 ไบต์ (Bytes) และแปรเปลี่ยนอัตราความเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล 5, 10, 15, and 20 Mbps ตามลำดับในกรณีของ Links#1 และ 2 และ 0.5, 2, 5, and 6 Mbps

ค่าที่ได้จากการทดสอบวัดค่าต่างๆ ถูกสรุปได้ตามตารางที่ 4.8-4.11 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.8: การวัดค่าทราฟฟิค (Throughput) ที่สถาบันเอไอที

	อัปลิงค์ (Uplink) ระยะทาง 80 (m)	ดาวนลิงค์ (Downlink) ระยะทาง 80 (m)	อัปลิงค์ (Uplink) ระยะทาง 130 (m)	ดาวนลิงค์ (Downlink) ระยะทาง 130 (m)
ค่าทราฟฟิค (Throughput) (Mbps)	22.6	23.6	23.5	22.9

ตารางที่ 4.9: การวัดค่าแพ็กเก็ตลอส (Packet loss) ที่สถาบันเอไอที

	อัตราความเร็ว (Data rate) (Mbps)	แพ็กเก็ตลอส (Packet loss) (%)
อัปลิงค์ (Uplink) ระยะทาง 80 (m)	5	0
	10	0.16
	15	0.36
	20	8.9
ดาวนลิงค์ (Downlink) ระยะทาง	5	0
	10	0.07

80 (m)		
	15	0.5
	20	0.38
อัปลิงค์ (Uplink) ระยะทาง 130 (m)	5	0
	10	0.25
	15	0.43
	20	7.8
ดาวนลิงค์ (Downlink) ระยะทาง 130 (m)	5	0
	10	0.01
	15	0.53
	20	0.49

ตารางที่ 4.10: การทดสอบวัดค่าอัตราการล่าช้า (Round-trip latency) ที่สถาบันเอไอที

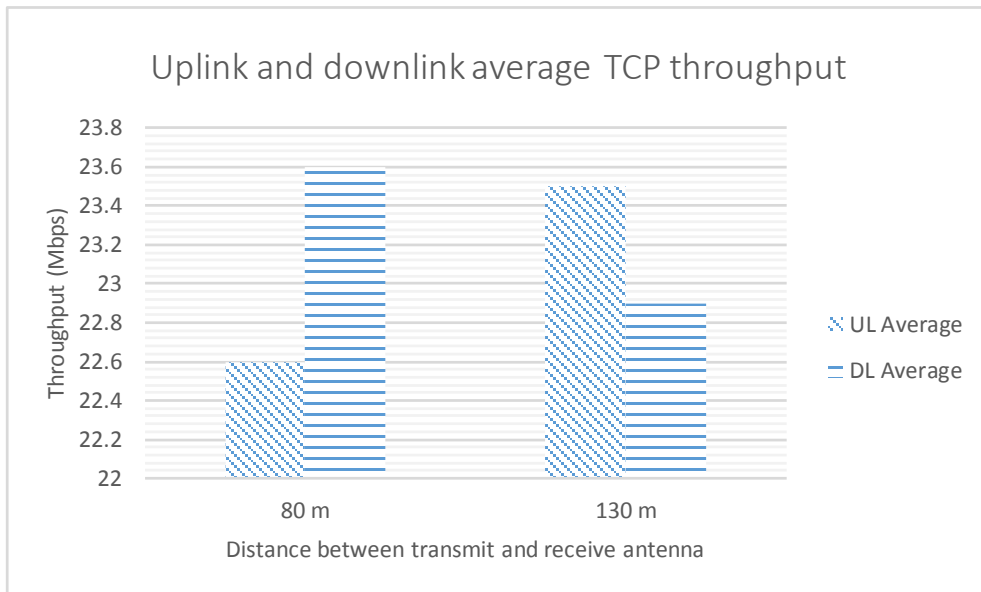
	ขนาดแพ็กเก็ต (Packet size) (Bytes)	การทดสอบวัดค่าอัตราการ ล่าช้า (Round-trip latency) (ms)
อัปลิงค์ (Uplink) ระยะทาง 80 (m)	32	4.215
	512	4.967
	1500	8.029
ดาว์นลิงค์ (Downlink) ระยะทาง 80 (m)	32	4.173
	512	4.613
	1500	6.594
อัปลิงค์ (Uplink) ระยะทาง 130 (m)	32	4.968
	512	4.831
	1500	7.193

ดาว์นลิงค์ (Downlink) ระยะทาง 130 (m)	32	3.825
	512	4.736
	1500	6.898

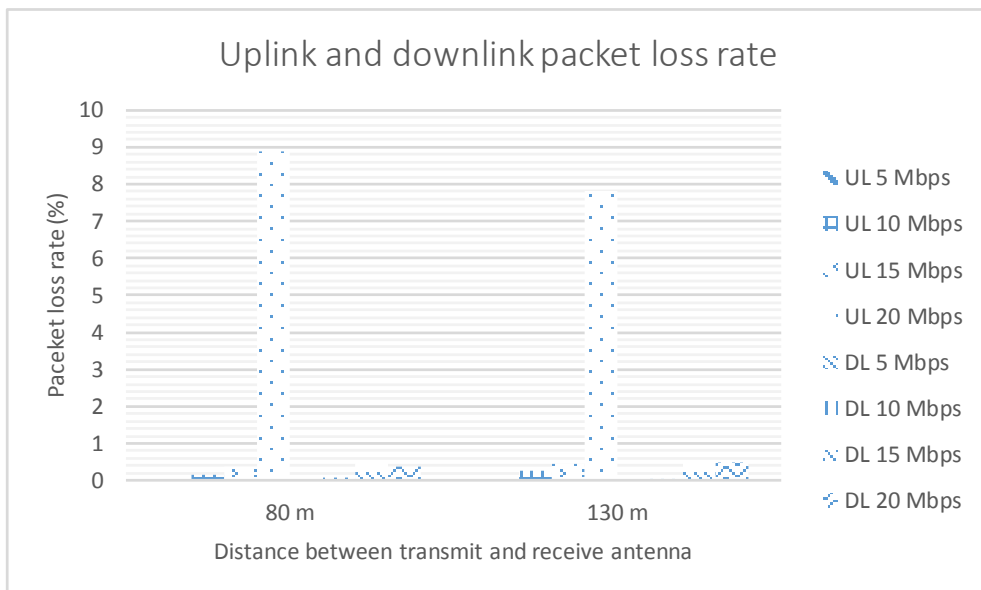
ตารางที่ 4.11: การทดสอบวัดค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ที่สถาบันเอไอที

	อัตราความเร็ว (Data rate) (Mbps)	ค่าผันแปรของความ ล่าช้า (Jitter) (ms)
อัปลิงค์ (Uplink) ระยะทาง 80 (m)	5	7.680
	10	12.928
	15	11.106
	20	3.668
ดาว์นลิงค์ (Downlink) ระยะทาง 80 (m)	5	2.675
	10	3.275
	15	2.992

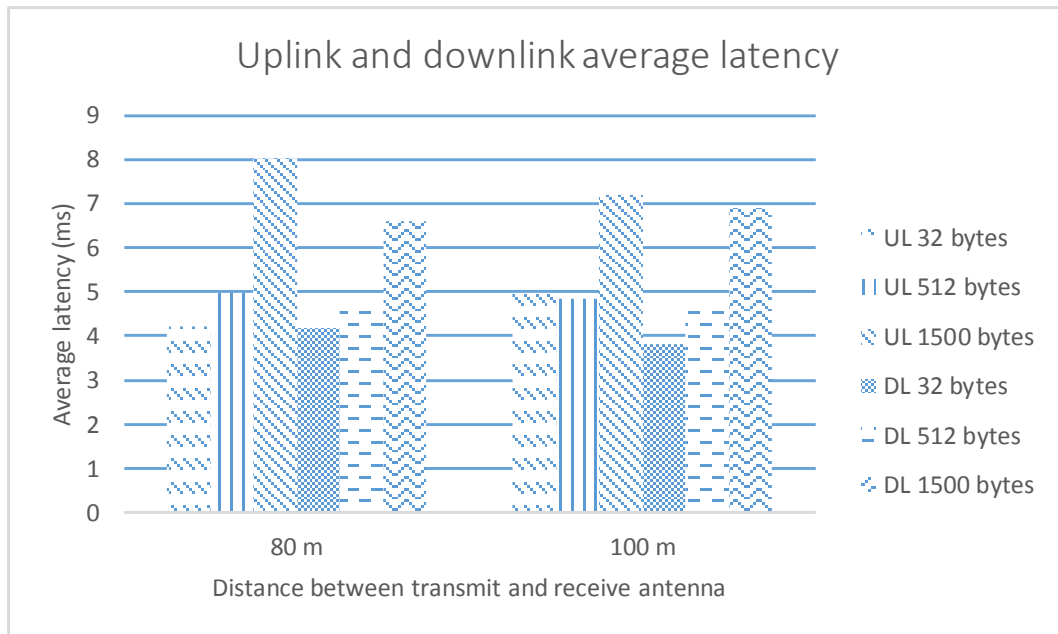
	20	2.884
อัปลิงค์ (Uplink) ระยะทาง 130 (m)	5	8.698
	10	7.038
	15	10.226
	20	5.350
ดาวนลิงค์ (Downlink) ระยะทาง 130 (m)	5	3.569
	10	2.566
	15	2.944
	20	2.673



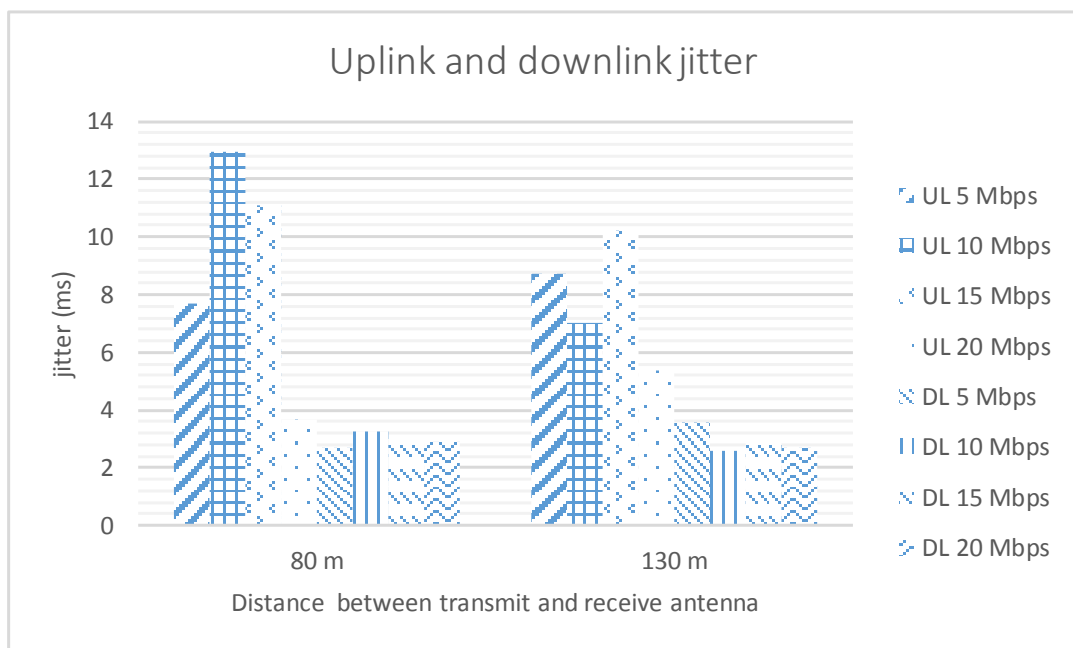
รูปที่ 4.51: การวัดค่าทราฟฟิค (Throughput) ที่สถาบันเอไอที



รูปที่ 4.52: การวัดค่าแพ็กเก็ตที่สูญหาย (Packet loss) ที่สถาบันเอไอที



รูปที่ 4.53: การวัดค่าอัตราการล่าช้า (Round-trip latency) ที่สถาบันเอไอที



รูปที่ 4.54: การวัดค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ที่สถาบันเอไอที

ข้อมูลตามตารางที่ 4.8-4.11 ถูกนำมาแสดงเป็นแผนภูมิกราฟแท่ง (Bar graph) ได้ดังรูปที่ 4.51-4.54 จะเห็นได้ว่าค่าทราฟฟิค (Throughput) ที่วัดได้ทั้งสองระยะทาง ไม่ต่างกันมากนัก ประมาณ

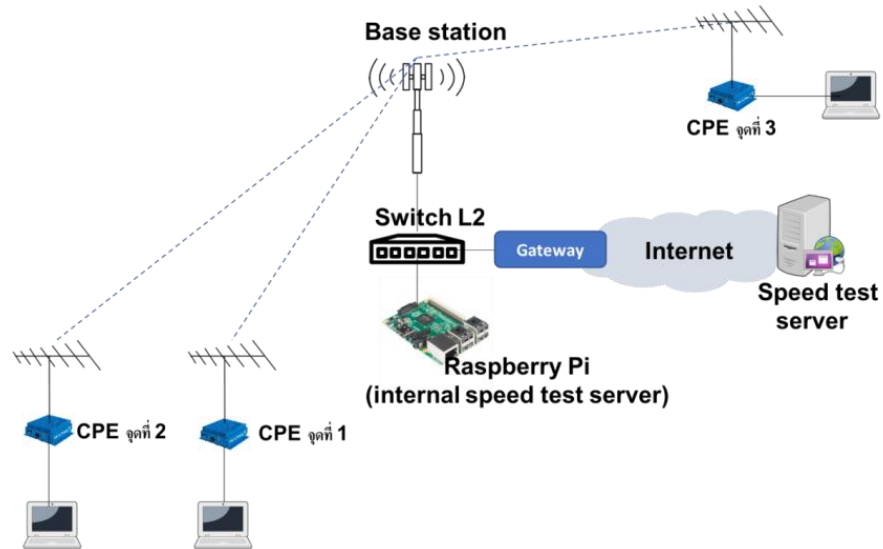
22-23 Mbps สิ่งที่เราคาดการณ์ไว้ว่าที่ระยะไกลกว่าค่าทฤษฎีลดลงเนื่องการสูญเสียกำลังของสัญญาณตามที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น จะเห็นผลชัดเจนมากกว่านี้เมื่อเราติดตั้งและทดสอบที่พื้นที่เป้าหมายในจังหวัดตาก อย่างไรก็ตาม เพื่อให้มีการเปรียบเทียบที่ยุติธรรม ในแต่ละเส้นทางควรมีสภาพแวดล้อมที่คล้ายคลึงกันด้วย เนื่องจากการจางหายของสัญญาณ (Channel fading) และปรากฏการณ์เฟรย์แนล (Fresnel effect) ก็มีผลต่อค่าทฤษฎีด้วย เช่นจะเป็นระยะทางไกลๆ แต่สภาพแวดล้อมไม่มีเส้นทางโดยตรงหรือแนวเส้นสายตา อาจมีค่าทฤษฎีที่น้อยกว่าระยะทางไกลกว่าแต่สภาพแวดล้อมมีเส้นทางตรง ปลอดภัย ส่วนค่าสูญเสียของแพ็กเก็ตข้อมูลหรือที่เรียกว่าแพ็กเก็ตลอส (Packet loss) มีค่าน้อยมาก ไม่เกิน 0.5% เมื่ออัตราการความเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลต่ำกว่า 20 Mbps ซึ่งเราคาดการณ์ว่าแพ็กเก็ตลอสมีมากขึ้น เมื่อเราส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วที่เกินขีดจำกัดพื้นฐาน (Fundamental limit) หรือที่เรียกว่าความจุของช่องสัญญาณ (Channel capacity) ซึ่งความจุของช่องสัญญาณของเราน่าจะอยู่ที่ประมาณ 15-18 Mbps และเราสามารถคาดการณ์ได้อีกว่าแพ็กเก็ตลอสมีมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออัตราการความเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเร็วขึ้นการเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel coding) ก็ตาม

ส่วนในการทดสอบวัดค่าอัตราการล่าช้า (Round-trip latency) ผลที่ได้เป็นไปตามที่เราคาดการณ์ว่าขนาดแพ็กเก็ตข้อมูลมากขึ้นทำให้อัตราการล่าช้ามากขึ้น แต่ระยะทางไม่มีผลต่ออัตราการล่าช้ามากนัก สุดท้ายค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ซึ่งผลโดยทั่วไปค่าผันแปรของความล่าช้าของอัลลิงค์มีค่ามากกว่าของดาวนลิงค์

3.2) การทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์ระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ที่พื้นที่จังหวัดตาก

การทดสอบประสิทธิภาพโครงข่ายในพื้นที่จังหวัดตากอันเป็นพื้นที่เป้าหมาย ดังที่อธิบายไว้ข้างต้น พื้นที่เป้าหมายเป็นพื้นที่ที่เข้าถึงยาก ในพื้นที่หมู่บ้านไทยสามัคคี ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตากและหมู่บ้านใกล้เคียง ได้แก่ บ้านผู้ช่วยผู้ใหญ่บ้าน (บ้านนพดล) โรงเรียนบ้านแม่กีดหลวง กัญไชยมิตรภาพที่ 182 บ้านแม่กีดหลวง บ้านไทยสามัคคี หมู่ที่ 1 ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด บ้านไทยสามัคคี หมู่ที่ 9 ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด และหน่วยบริการประชาชน บ้านใหม่ริมเมย หมู่ที่ 10 ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด เนื่องจากทาง intERLab ได้มีการทำโครงข่ายไร้สายแบบเมช (Wireless mesh network (WMN)) ไว้อยู่แล้ว เราจะทดสอบวัดค่าความเร็ว (ค่าทฤษฎี) ในการส่งข้อมูลจากชุมชนที่เราติดตั้ง อุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ (CPE) ทั้งสามจุด ไปยังโรงเรียนบ้านแม่กีดหลวงกัญไชยมิตรภาพที่ 182 วัดค่าทฤษฎี ลิงค์ไปที่อุปกรณ์ราสเบอร์รี่พายที่ติดตั้งไว้ที่เครื่องสถานี

ฐาน (BS) แผนภาพแสดงการทดสอบความเร็วหรือค่าทรูพุด ในการรับส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์ทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ดังแสดงในรูปที่ 4.55



รูปที่ 4.55: แสดงการแผนภาพการทดสอบความเร็วของทีวีไวท์สเปซ (TVWS)

นอกจากค่าความเร็ว (ค่าทรูพุด) เราทดสอบวัดค่าอัตราการล่าช้า (Latency) ซึ่งเป็นช่วงเวลาในการเข้าถึงของกลุ่มแพ็กเก็ตข้อมูล หรือช่วงเวลากลุ่มแพ็กเก็ตข้อมูลเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง ซึ่งเราสนใจก็คือ ซึ่งเป็นอัตราการล่าช้าที่คำนวณจากค่าเวลาในการเดินทางในโครงข่าย จากต้นทางไปยังปลายทางและกลับมาที่เครื่องต้นทางอีกครั้ง (Round-trip latency) และค่าสูญเสียของแพ็กเก็ตข้อมูลหรือที่เรียกว่า แพ็กเก็ตตอส (Packet loss) รวมถึงค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

หลังจากทดสอบประสิทธิภาพภายในโครงข่ายระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ของตัวมันเอง (Internal test) แล้ว เรายังทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่สื่อสารไปที่เซิร์ฟเวอร์ที่ติดตั้งในระบบอินเทอร์เน็ตด้วย โดยเราจะทดสอบประสิทธิภาพของเซิร์ฟเวอร์ที่ติดตั้งอยู่ในกรุงเทพมหานคร โดยผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตในท้องถิ่น (3BB) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) และโครงข่ายของผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตในท้องถิ่น (3BB) สายอากาศแบบแบ่งส่วนหรือเซ็กเตอร์แบบ 120 องศาของเครื่องสถานีฐานใช้ ความถี่ 658 MHz (ช่องความถี่วิทยุ 44) 522 MHz (ช่องความถี่วิทยุ 27) และ 538 MHz (ช่องความถี่วิทยุ 29) สำหรับเซ็กเตอร์ที่ 1, 2, และ 3 ตามลำดับ ซึ่งความถี่ (ช่องความถี่วิทยุ) ดังกล่าวเป็นความถี่ที่เราวัดและวิเคราะห์แล้วว่าเป็นช่องสัญญาณที่ว่างสามารถนำมาใช้งานได้ (TVWS) ดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยเส้นทางหรือลิงค์ที่ไปหมู่ 1 และเส้นทางที่ไปหมู่ 9 ได้แบ่งใช้เซ็กเตอร์ที่ 1 ความถี่ 658 MHz (ช่องความถี่วิทยุ 44) กัน เนื่องจากทั้งสอง

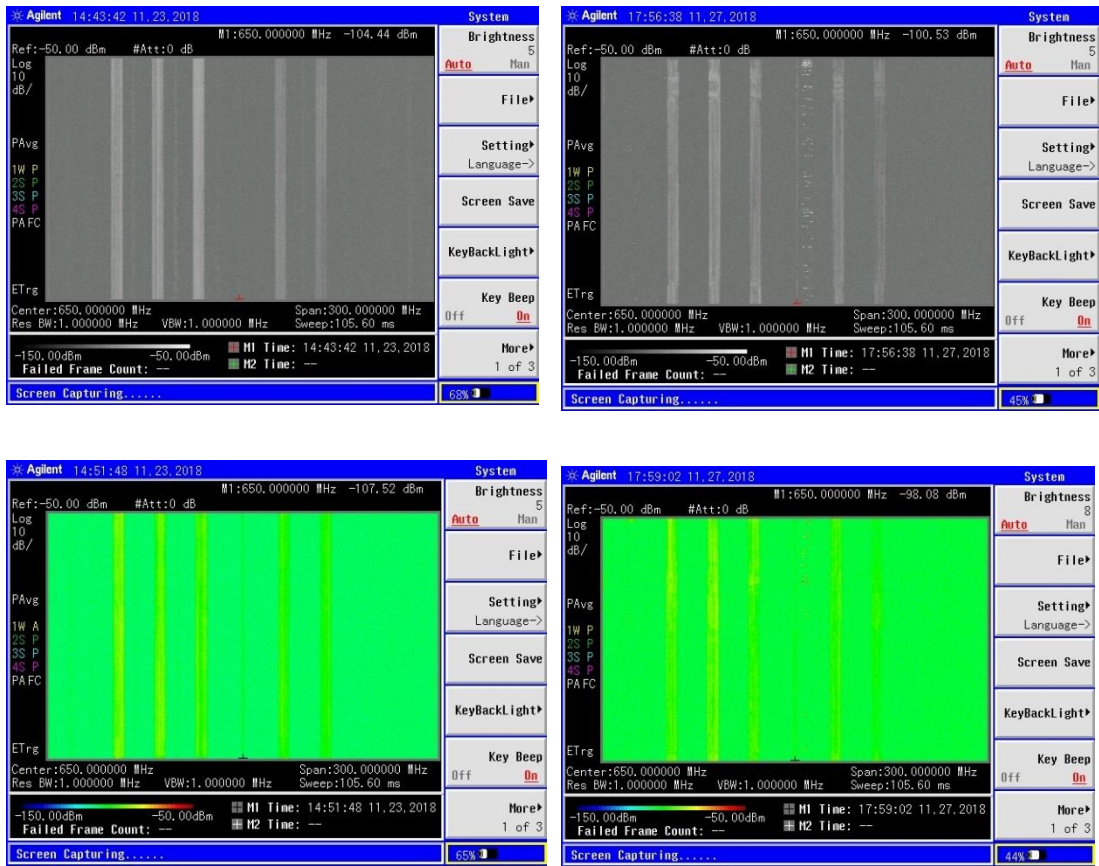
หมู่บ้านอยู่ใน ทิศทางใกล้เคียงที่สามารถถูกปกคลุมได้โดยเซ็กเตอร์เดียว ส่วนเส้นทางที่ไปหมู่ 10 รับ สัญญาณจาก เซ็กเตอร์ที่ 2 ความถี่ 522 MHz (ช่องความถี่วิทยุ 27) สายอากาศของเครื่องสถานีฐาน (BS) ได้ถูกติดตั้งบนเสามีความสูง 24 m ส่วนสายอากาศของอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ (CPE) ทั้ง สามจุด ได้ถูกติดตั้งบนเสามีความสูง 10 m

ตำแหน่งของอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณจุดที่ 1 CPE M1 (หมู่บ้านไทยสามัคคี หมู่ที่ 1) จะมีระยะที่ใกล้ที่สุด เพียงประมาณ 0.45 km มีเส้นทางตรงหรือแนวเส้นสายตาของสัญญาณจากตัวส่ง มายังตัวรับ (LoS) พื้นที่โดยรอบมีต้นไม้สูง (10-15 m) เส้นทางของสัญญาณถูกบดบังโดย ปรากฏการณ์เฟรย์แนล (Fresnel effect) โดยคำนวณรัศมีของปรากฏการณ์เฟรย์แนลลำดับที่ 1 F_1 ตาม สมการ (3.12) ได้ 7.16 m (ณ จุดกึ่งกลางของระยะทาง) ซึ่งถือว่าปลอดภัย ส่วนเส้นทางไปยัง อุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ จุดที่ 2 CPE M9 (บ้านไทยสามัคคี หมู่ที่ 9) มีระยะทาง 0.85 km โดย สภาพแวดล้อมเส้นทางนี้คล้ายคลึงกับเส้นทางไปยัง CPE M1 ในส่วนของตำแหน่งของอุปกรณ์เครื่อง ตัวรับสัญญาณ จุดที่ 3 CPE M10 จะเป็นหน่วยบริการประชาชน หมู่บ้านใหม่ริมเมย ที่อยู่ไกลออกไป ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือเป็นระยะทาง 1.41 km โดยพื้นที่ระหว่างเส้นทางจะมีทั้งสิ่งกีดขวาง ต้น กกล้วย ต้นมะขามและทุ่งโล่งสลับกันไป มีเนินเขาเล็กคั่นกลาง ทำให้สัญญาณ ผ่านมาได้ยาก

3.2.1) การวัดสเปกตรัมหรือแถบคลื่นความถี่ของสัญญาณและการวัดค่ากำลังสัญญาณที่รับได้ที่ เครื่องรับสัญญาณ P_R

ก่อนที่เราวัดค่าประสิทธิภาพต่างๆ ของโครงข่ายดังที่กล่าวไว้ เราวัดสเปกตรัมหรือแถบคลื่น ความถี่ของสัญญาณและค่ากำลังสัญญาณที่รับได้ โดยการวัดสเปกตรัมหรือแถบคลื่นความถี่ของ สัญญาณ เราจะวัดเปรียบเทียบก่อนและหลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) เพื่อต้องการดูว่าระบบ ทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ที่เราติดตั้งมีผลกระทบต่อสัญญาณโทรทัศน์หรือไม่ นอกจากนี้ โพลาริเซชัน (Polarization) ของสายอากาศได้ถูกทดลองปรับจากแบบแนวตั้ง (Vertical polarization) เป็น แนวนอน (Horizontal polarization) เพื่อต้องการดูว่าระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) อย่างไร ซึ่งเมื่อโพลาริเซชันเป็นแบบแนวนอน ผลที่คาดไว้ควรมีผลกระทบต่อสัญญาณโทรทัศน์ เนื่องจากสายอากาศ ของโทรทัศน์ดิจิตอลทั่วไปจะมีโพลาริเซชันเป็นแบบแนวนอน

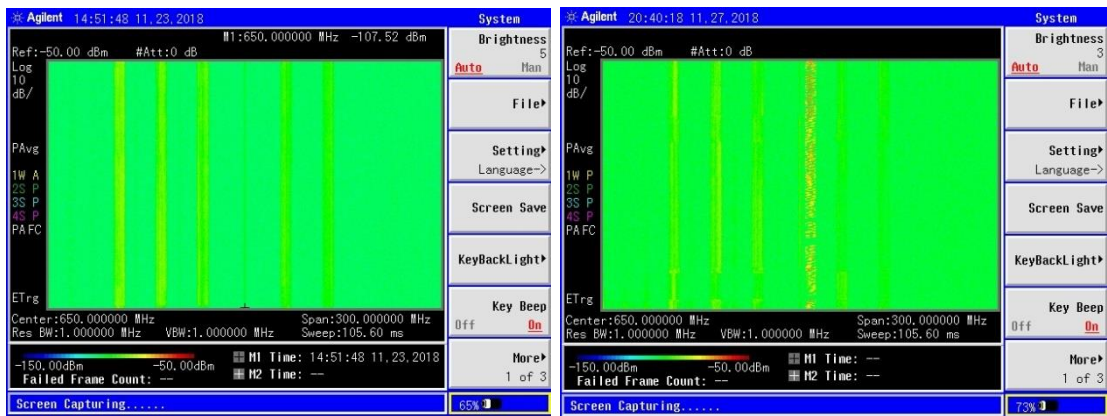
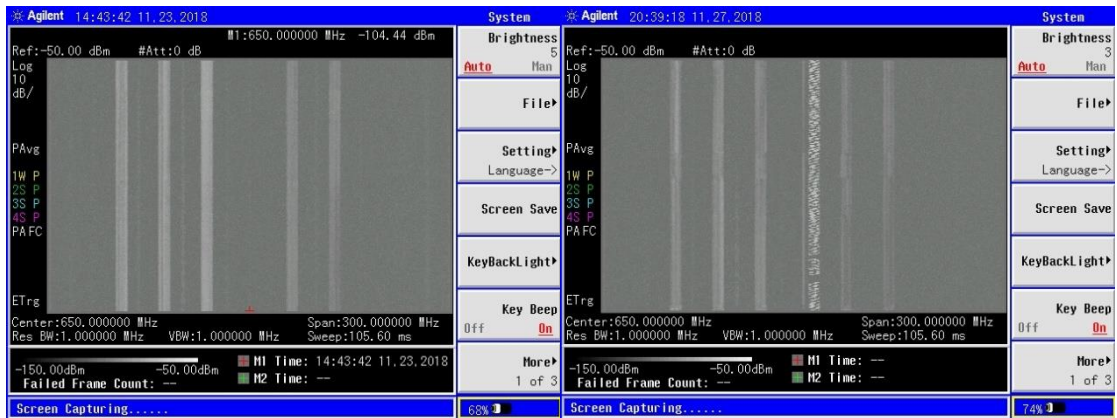
3.2.1.1) การวัดสเปกตรัมหรือแถบคลื่นความถี่ของสัญญาณก่อนและหลังติดตั้งระบบทีวีไวท์ สเปซ (TVWS)



(a) ก่อนติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) (b) หลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS)

รูปที่ 4.56: การวัดสเปกตรัมหรือแถบคลื่นความถี่ของสัญญาณ เราจะวัดเปรียบเทียบ (a) ก่อน และ (b) หลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) วัดที่ Link#1 (CPE M1)

ตามรูปที่ 4.56 เห็นได้ว่าช่องสัญญาณที่ 658 MHz นั้นถูกใช้งานหลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ซึ่งเปรียบเทียบกับก่อนติดตั้งระบบไม่มีแถบช่องสัญญาณที่ 658 MHz

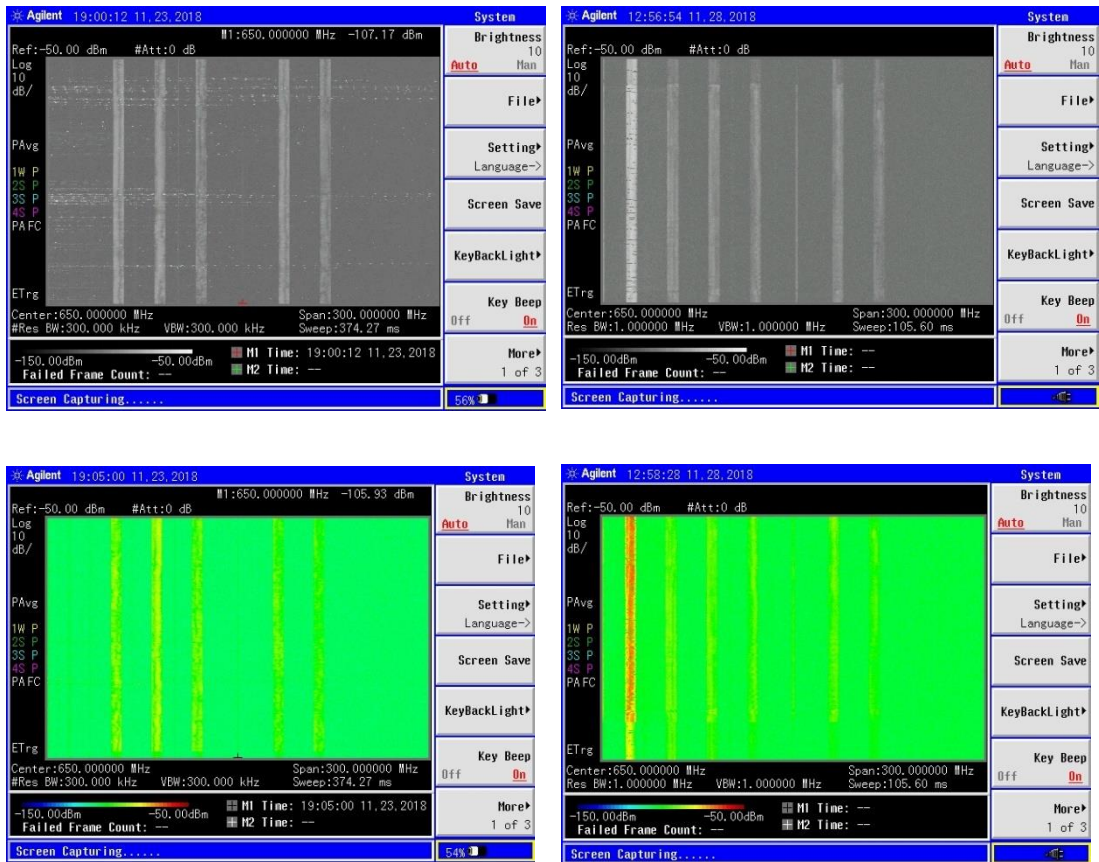


(a) ก่อนติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS)

(b) หลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS)

รูปที่ 4.57: การวัดสเปกตรัมหรือแถบคลื่นความถี่ของสัญญาณ เราจะวัดเปรียบเทียบ (a) ก่อนและ (b) หลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) วัดที่ Link#2 (CPE M9)

ตามรูปที่ 4.57 เห็นได้ว่าช่องสัญญาณที่ 658 MHz นั้นถูกใช้งานหลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ซึ่งเปรียบเทียบกับก่อนติดตั้งระบบไม่มีแถบช่องสัญญาณที่ 658 MHz

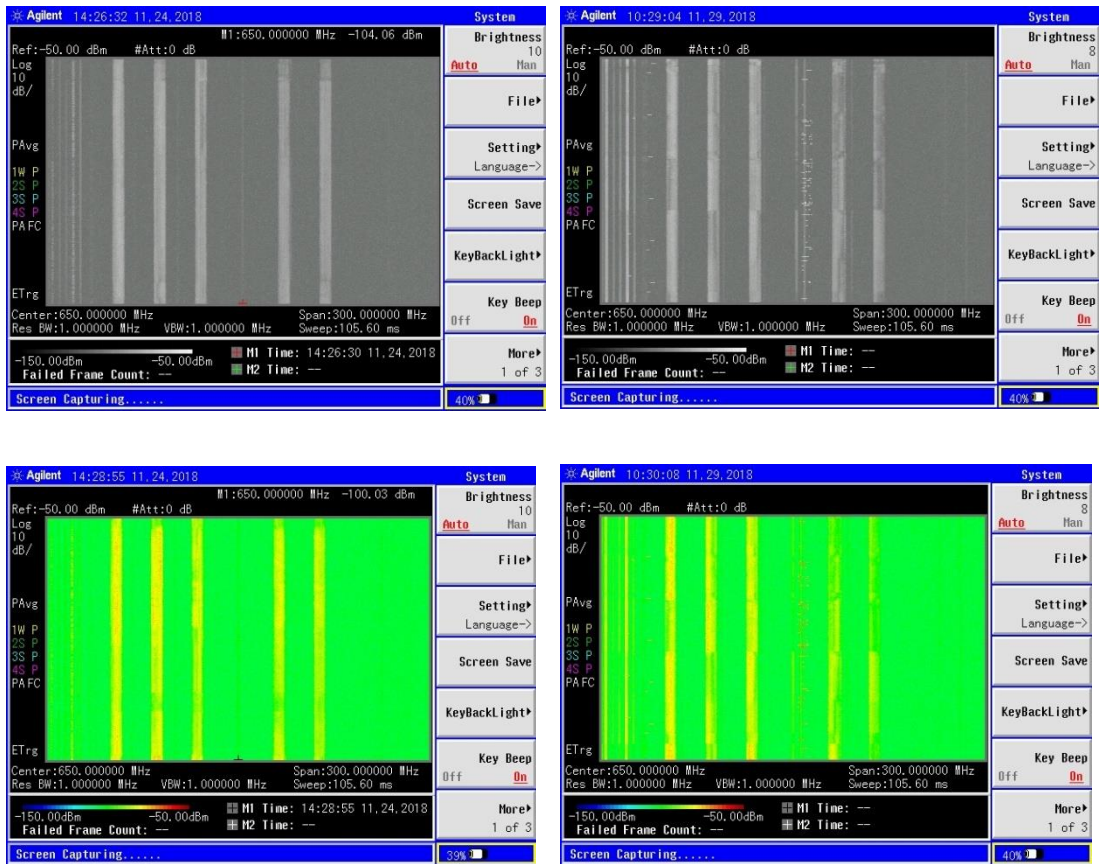


(a) ก่อนติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS)

(b) หลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS)

รูปที่ 4.58: การวัดสเปกตรัมหรือแถบคลื่นความถี่ของสัญญาณ เราจะวัดเปรียบเทียบ (a) ก่อนและ (b) หลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) วัดที่ Link#3 (CPE M10)

ตามรูปที่ 4.58 เห็นได้ว่าช่องสัญญาณที่ 522 MHz นั้นถูกใช้งานหลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ซึ่งเปรียบเทียบกับก่อนติดตั้งระบบไม่มีแถบช่องสัญญาณที่ 522 MHz

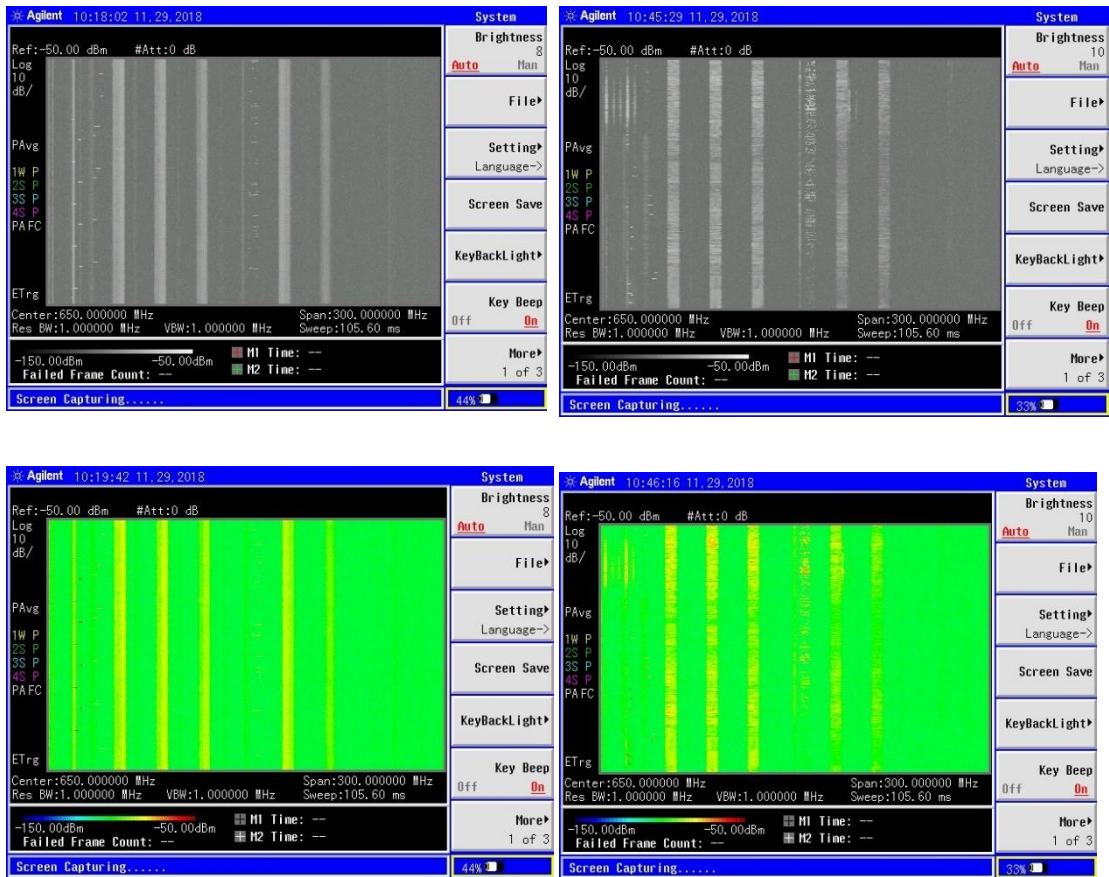


(a) ก่อนติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS)
วัดที่ BS

(b) หลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS)
วัดที่ BS หันไปทิศทางของ CPE M1 และ CPE
M9

รูปที่ 4.59: การวัดสเปกตรัมหรือแถบคลื่นความถี่ของสัญญาณ เราจะวัดเปรียบเทียบ (a) ก่อนและ (b) หลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) วัดที่ BS (หันไปทิศทางของ CPE M1 และ CPE M9)

ตามรูปที่ 4.59 เห็นได้ว่าช่องสัญญาณที่ 658 MHz นั้นถูกใช้งานหลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ซึ่งเปรียบเทียบกับก่อนติดตั้งระบบไม่มีแถบช่องสัญญาณที่ 658 MHz



(a) หลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) วัดที่ BS หันไปทิศทางของ CPE M10

(b) หลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) เคลื่อนที่วัดหมุนรอบ BS ที่ระยะทาง 100 m

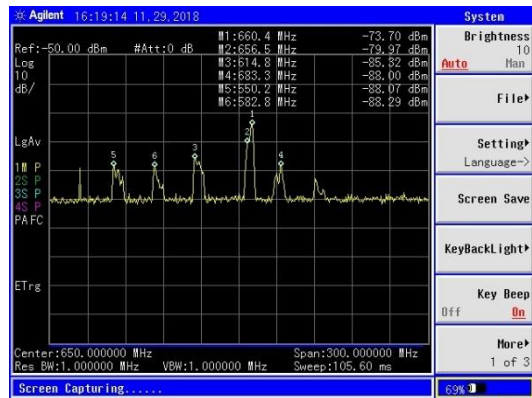
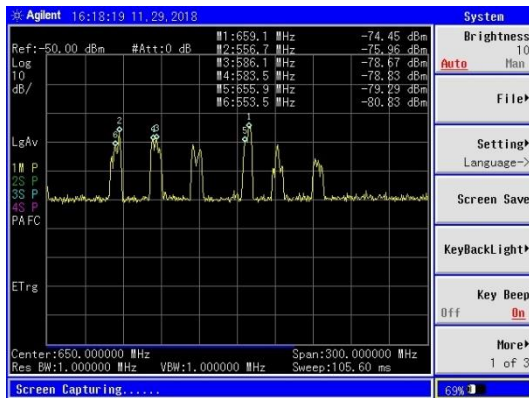
รูปที่ 4.60: การวัดสเปกตรัมหรือแถบคลื่นความถี่ของสัญญาณ เราจะวัดเปรียบเทียบ (a) หลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) วัดที่ BS (หันไปทิศทางของ CPE M10) และ (b) หลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) เคลื่อนที่วัดหมุนรอบ BS ที่ระยะทาง 100 m

ตามรูปที่ 4.60 เห็นได้ว่าช่องสัญญาณที่ถูกใช้งานมากขึ้นหลังติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) นอกจากนี้ หากวิเคราะห์ในแง่ของการทดสอบสัญญาณแทรกสอดรบกวน (Interference) เมื่อใช้ระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ขนาดสัญญาณในช่องสัญญาณที่ถูกใช้งาน มีขนาดมากขึ้น เช่นในช่องสัญญาณที่ 522 MHz วัดขนาดสัญญาณได้ $-65\text{dBm}/8\text{MHz}$ และสังเกตได้ว่า อาจมีสัญญาณขนาดเล็กที่ช่องสัญญาณที่ติดกัน ซึ่งเกิดจากความถี่สองความถี่มาผสมกันก็เป็นความถี่ใหม่อันดับที่สาม (Third order intermodulation) เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linearity) ของอุปกรณ์ มีขนาดประมาณ -85 dBm ซึ่งถือว่าน้อยมาก และมีความปลอดภัยในแง่สัญญาณแทรกสอดรบกวน

(Interference) เนื่องจากความไว (Sensitivity) ของเครื่องรับสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่อยู่ที่ -75dBm ถึง -55dBm ขึ้นกับคุณภาพของโทรศัพท์ แต่โดยโทรศัพท์ทุกๆ ไปมีความไวอยู่ที่อยู่ที่ -65dBm [48] นอกจากนี้ มีข้อเสนอแนะจากผลจากงานวิจัย [49] ว่า สำหรับระบบโทรศัพท์ดิจิทัลแต่ละช่องที่จัดสรรให้ใช้งานจะต้องเว้นไป 4 ช่องถึงจะเป็นช่องที่จัดสรรถัดไปสำหรับ ผู้ใช้งานอันดับรอง (Secondary user (SU)) เช่นทีวีไวท์สเปซ (TVWS) แต่ละช่องที่จัดสรรให้ใช้งานจะต้องเว้นไป 2 ช่องจากช่องที่จัดสรรของ ผู้ใช้งานที่มีความสำคัญอันดับแรก (Primary user (PU)) เช่นระบบโทรศัพท์ดิจิทัลหรือระบบไมโครโฟนไร้สาย (Professional wireless microphone system (PWMS)) [50] ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า นอกจากช่องที่ติดกันจะไม่มีผลของการแทรกสอดรบกวนกันแล้ว โดยการดำเนินงานจริงเราจะเว้นช่องด้วย ทำให้เรามั่นใจมากขึ้นว่า สามารถกำหนดช่องที่เหมาะสมให้แก่ระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) ได้

3.2.1.2) การวัดสเปกตรัมหรือแถบคลื่นความถี่ของสัญญาณเพื่อพิจารณาผลของโพลาไรเซชัน (Polarization)

เราทดสอบผลของโพลาไรเซชัน (Polarization) โดยปรับเปลี่ยนโพลาไรเซชันแนวตั้ง (Vertical) และแนวนอน (Horizontal) ที่ CPE M9 เมื่อทดสอบผลกระทบของโพลาไรเซชันของสายอากาศ เราเห็นได้ว่าโพลาไรเซชันของสายอากาศมีผลต่อระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) อย่างไร ซึ่งเมื่อโพลาไรเซชันเป็นแบบแนวนอน ผลที่ได้คือน่าจะมีผลกระทบต่อสัญญาณโทรศัพท์ เนื่องจากสายอากาศของโทรศัพท์ดิจิทัลทั่วไปจะมีโพลาไรเซชันเป็นแบบแนวนอน ดังนั้นเมื่อใช้โพลาไรเซชันแนวนอน นอกจากสัญญาณจากการติดตั้งระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) เรายังรับสัญญาณโทรศัพท์ดิจิทัลได้ด้วย ดังนั้นกำลังสัญญาณที่วัดได้ มีความแรงมากกว่าเมื่อใช้โพลาไรเซชันแนวตั้ง ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลว่าทำไมเราจึงต้องเลือกใช้โพลาไรเซชันแนวตั้ง ซึ่งทำให้เพิ่มความมั่นใจได้ว่าระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) จะไม่ไปรบกวนแทรกสอดระบบโทรศัพท์ดิจิทัล



(a) โพลาริเซชันแนวนอน
(Horizontal polarization)

(b) โพลาริเซชันแนวตั้ง
(Vertical polarization)

รูปที่ 4.61 การวัดสเปกตรัมหรือแถบคลื่นความถี่ของสัญญาณ เราจะวัดเปรียบเทียบ (a) โพลาริเซชันแนวนอน (Horizontal polarization) และ (b) โพลาริเซชันแนวตั้ง (Vertical polarization)

3.2.1.3) การวัดค่ากำลังสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับสัญญาณ P_R

ส่วนค่ากำลังสัญญาณที่รับได้ P_R เราได้สรุปในตารางที่ 4.12 เราวัดเพื่อตรวจสอบความแรงของสัญญาณที่เหมาะสมต่อการที่ลิงค์สามารถทำงานได้ และจากข้อมูลคุณลักษณะจำเพาะ (Specification) ของระบบอุปกรณ์ RuralConnect® Gen 3 Carlson TVWS radio system มีค่ากำลังส่ง P_T อยู่ที่ +21 dBm หรือ 0.126 Watt ดังนั้นเราสามารถคำนวณการสูญเสียกำลังที่เกี่ยวข้องได้ รวมทั้งค่ารัศมีของปรากฏการณ์เฟรย์แนล ลำดับที่ 1 (Radius of first order Fresnel zone) F_1 ค่าการสูญเสียกำลังในช่องว่างอิสระ (Free space path loss) L_{PF} คำนวณได้จากสมการ (3.3) ส่วนการสูญเสียกำลังที่แท้จริง (Actual path loss) คำนวณได้จากสมการ (3.1) ส่วน

การสูญเสียกำลังจากแบบจำลองแบบจำลองลองเลย์-ไรซ์ (L-R path loss) $L_{P,L-R}$ คำนวณได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลอง (Simulation program) ที่เข้าถึงได้โดยสาธารณะเพื่อใช้ (โอเพนซอฟต์แวร์) (Open software) ที่ชื่อว่า “Radio Mobile - RF propagation simulation software)” [45]

ตารางที่ 4.12: กำลังของสัญญาณที่ได้รับได้ P_R , การสูญเสียกำลังที่แท้จริง (Actual path loss) L_P , การสูญเสียกำลังในช่องว่างอิสระ (Free space path loss) L_{PF} , การสูญเสียกำลังจากแบบจำลองแบบจำลองลองเลย์-ไรซ์ (L-R path loss) $L_{P,L-R}$, และรัศมีของปรากฏการณ์เฟรย์แนล ลำดับที่ 1 (Radius of first order Fresnel zone) F_1 ของแต่ละเส้นทาง ที่จังหวัดตาก

	Link#1 (CPE M1)	Link#2 (CPE M9)	Link#3 (CPE M10)
P_R (dBm)	-62.94	-64.61	-65.80
L_P (dB)	83.94	85.61	86.8
L_{PF} (dB)	81.87	87.39	91.79
$L_{P,L-R}$ (dB)	81.50	87.60	98.10
F_1 (m)	7.16	9.84	14.22

3.2.2) การวัดค่าประสิทธิภาพต่างๆ ของโครงข่าย

ในส่วนนี้ เราวัดค่าประสิทธิภาพต่างๆ ของโครงข่ายซึ่งประกอบไปด้วย ทราฟฟิค (Throughput) ค่าแพ็กเก็ตลอส (Packet loss) ค่าอัตราการล่าช้า (Round-trip latency) และค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ของแต่ละเส้นทางของการเชื่อมโยงแบบจุดต่อจุด (Point-to-point) และการเชื่อมโยงแบบจุดต่อจุด (Point-to-point) ที่ต่อกับ WMN โดยการทดสอบกับ WMN เราได้เชื่อม TWWS Link#2 ที่หมู่บ้านไทยสามัคคีหมู่ที่ 9 เพื่อวัตถุประสงค์ที่ว่าจะใช้ TWWS link เป็น อินเทอร์เน็ตเกตเวย์ (Internet gateway) ซึ่งแต่เดิมที่หมู่บ้านไทยสามัคคีหมู่ที่ 9 มีอินเทอร์เน็ตเกตเวย์แรกอยู่อีกฟากหนึ่ง การใช้ TWWS link เป็นเกตเวย์ที่สองนี้จะช่วยให้บ้านที่อยู่ใกล้หอประชุม ลดจำนวนฮอป (Hop) ในการใช้ Internet ได้ อีกทั้งยังช่วยลดโหลดของเกตเวย์เดิม

นอกจากนี้เราดูภาพรวมของทั้งระบบโดยการวัด ของระบบโดยรวม (Overall system) โดยการเชื่อมโยงแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-multi-point) ซึ่งเราทดสอบ iperf และ ping จาก CPE M1 และ M9 ไปพร้อมๆกัน ไปที่ เครื่องสถานีฐาน (BS)

ตารางที่ 4.13: การวัดค่าทราฟฟิค (Throughput) ของแต่ละเส้นทางของการเชื่อมโยงแบบจุดต่อจุด (Point-to-point)

Communication Link Uplink or Downlink	ค่าทราฟฟิค (Throughput) (Mbps)
Link#1 (CPE M1) (Uplink)	12.3
Link#1 (CPE M1) (Downlink)	12.9
Link#2 (CPE M9) (Uplink)	9.89
Link#2 (CPE M9) (Downlink)	11.8
Link#3 (CPE M10) (Uplink)	3.59
Link#3 (CPE M10) (Downlink)	4.39

ตารางที่ 4.14: การวัดค่าทราฟฟิค (Throughput) ของ Link#2 เชื่อมเข้า WMN

	Link#2 (CPE M9) (Up link)	Link#2 (CPE M9) (Down link)
ค่าทราฟฟิค (Throughput) (Mbps)	8.74	8.45

ตารางที่ 4.15: การวัดค่าทราฟฟิค (Throughput) ของระบบโดยรวม (Overall system) มีการเชื่อมโยงแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-multipoint)

	TVWS (Uplink)	TVWS (Downlink)
ค่าทราฟฟิค (Throughput) (Mbps)	3.32	2.34

ตารางที่ 4.16: การวัดค่าแพ็กเก็ตที่สูญหาย (Packet loss) ของ Link#1

	อัตราความเร็ว (Data rate) (Mbps)	แพ็กเก็ตที่สูญหาย (Packet loss) (%)
อัปลิงค์ (Uplink)	5	4.9
	10	0.054
	15	7.9
	20	5.1
ดาวนลิงค์ (Downlink)	5	2.4
	10	5
	15	0.0013

	20	0.015

ตารางที่ 4.17: การวัดค่าแพ็กเก็ตที่สูญ (Packet loss) ของ Link#2

	อัตราความเร็ว (Data rate) (Mbps)	แพ็กเก็ตที่สูญ (Packet loss) (%)
อัปลิงค์ (Uplink)	5	3.75
	10	14.05
	15	10.036
	20	12
ดาวนลิงค์ (Downlink)	5	5.501
	10	15.25
	15	16.45
	20	12

ตารางที่ 4.18: การวัดค่าแพ็กเก็ตที่สูญ (Packet loss) ของ Link#3

	อัตราความเร็ว (Data rate) (Mbps)	แพ็กเก็ตสูญ (Packet loss) (%)
อัปลิงค์ (Uplink)	0.5	0
	2	0.048
	5	2.4
	6	4.3
ดาวนลิงค์ (Downlink)	0.5	0
	2	0.0096
	5	0
	6	0

ตารางที่ 4.19: การวัดค่าแพ็กเก็ตที่สูญ (Packet loss) ของ Link#2 เชื่อมเข้า WMN

	อัตราความเร็ว (Data rate) (Mbps)	แพ็กเก็ตสูญ (Packet loss) (%)

อัปลิงค์ (Uplink)	0.5	9.7
	1	9.4
	2	3.8
ดาวนลิงค์ (Downlink)	0.5	9.4
	1	9.8
	2	9.4

ตารางที่ 4.20: การวัดค่าแพ็กเก็ตที่สูญหาย (Packet loss) ของระบบโดยรวม (Overall system) มีการเชื่อมโยงแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-multipoint)

	อัตราความเร็ว (Data rate) (Mbps)	แพ็กเก็ตที่สูญหาย (Packet loss) (%)
อัปลิงค์ (Uplink)	0.5	0.5
	1	0
	2	10
ดาวนลิงค์ (Downlink)	0.5	0

	1	4.9
	2	2.5

ตารางที่ 4.21: การวัดค่าอัตราการล่าช้า (Round-trip latency) ของ Link#1 และ Link#2

	ขนาดแพ็กเก็ต (Packet size) (Bytes)	การทดสอบวัดค่าอัตราการ ล่าช้า (Round-trip latency) (ms)
อัปลิงค์ (Uplink) Link#1	32	5.238
	512	6.370
	1500	10.561
ดาวนลิงค์ (Downlink) Link#2	32	5.044
	512	4.751
	1500	11.542

ตารางที่ 4.22: การวัดค่าอัตราการล่าช้า (Round-trip latency) ของ Link#3

	Link#3		
	32 Bytes	512 Bytes	1500 Bytes
Round-trip latency (ms)	4.730	8.129	15.729

ตารางที่ 4.23: การวัดค่าอัตราการล่าช้า (Round-trip latency) ของ Link#2 เชื่อมเข้า WMN

	Link#2		
	32 Bytes	512 Bytes	1500 Bytes
Round-trip latency (ms)	15.142	25.476	42.943

ตารางที่ 4.24: การวัดค่าอัตราการล่าช้า (Round-trip latency) ของระบบโดยรวม (Overall system) มีการเชื่อมโยงแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-multipoint)

	TVWS (Uplink)		
	32 Bytes	512 Bytes	1500 Bytes
Round-trip latency (ms)	5.340	5.444	12.165

ตารางที่ 4.25: การวัดค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ของ Link#1

	Data Rate (Mbps) (Uplink)				Data Rate (Mbps) (Downlink)			
	5 Mbps	10 Mbps	15 Mbps	20 Mbps	5 Mbps	10 Mbps	15 Mbps	20 Mbps
Jitter (ms)	0.377	2.483	0.751	0.484	0.727	0.575	0.663	0.493

ตารางที่ 4.26: การวัดค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ของ Link#2

	Data Rate (Mbps) (Uplink)				Data Rate (Mbps) (Downlink)			
	5 Mbps	10 Mbps	15 Mbps	20 Mbps	5 Mbps	10 Mbps	15 Mbps	20 Mbps
Jitter (ms)	0.814	2.156	0.754	1.216	0.149	0.735	0.672	0.687

ตารางที่ 4.27: การวัดค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ของ Link#3

	Data Rate (Mbps) (Uplink)				Data Rate (Mbps) (Downlink)			
	0.5 Mbps	2 Mbps	5 Mbps	6 Mbps	0.5 Mbps	2 Mbps	5 Mbps	6 Mbps
Jitter (ms)	0.356	0.45	1.909	2.987	1.388	0.112	2.828	3.455

สังเกตได้ว่าค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ของ Link#3 ได้ปรับอัตราเร็วการส่งข้อมูลเท่ากับ 0.5, 2, 5, และ 6 Mbps เนื่องการทดสอบ iperf ไม่สามารถทำได้ในกรณีนี้เมื่อ อัตราเร็วการส่งข้อมูลเท่ากับ 10 Mbps เป็นต้นไป

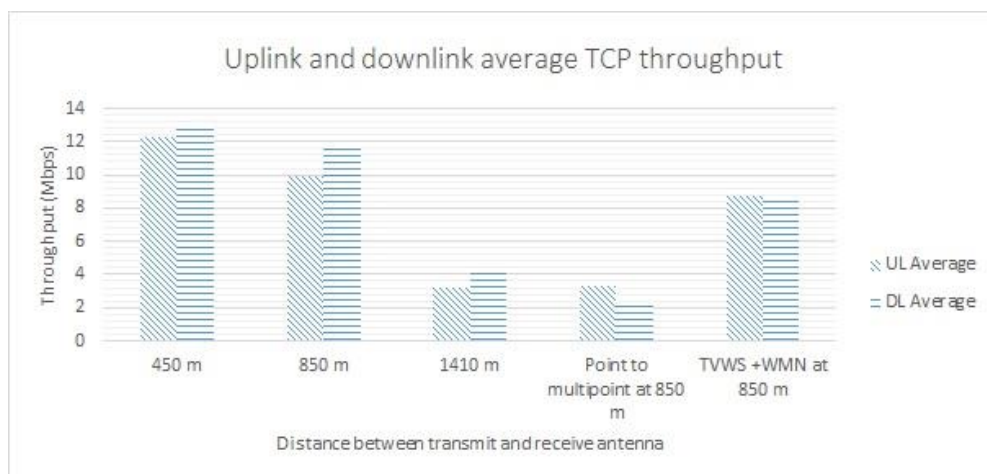
ตารางที่ 4.28: การวัดค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ของ Link#2 เชื่อมเข้า WMN

	Data Rate (Mbps) (Uplink)				Data Rate (Mbps) (Downlink)			
	0.5 Mbps	1 Mbps	2 Mbps	5 Mbps	0.5 Mbps	1 Mbps	2 Mbps	5 Mbps
Jitter (ms)	3.167	10.193	24.624	--	23.359	16.588	12.403	--

สังเกตได้ค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ของ TVWS+WMN มีแค่เมื่ออัตราเร็วการส่งข้อมูลถึง 5 Mbps เนื่องการทดสอบ iperf ไม่สามารถทำได้ในกรณีนี้เมื่อ อัตราเร็วการส่งข้อมูลเท่ากับ 5 Mbps เป็นต้นไป

ตารางที่ 4.29: การวัดค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ของระบบโดยรวม (Overall system) มีการเชื่อมโยงแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-multipoint)

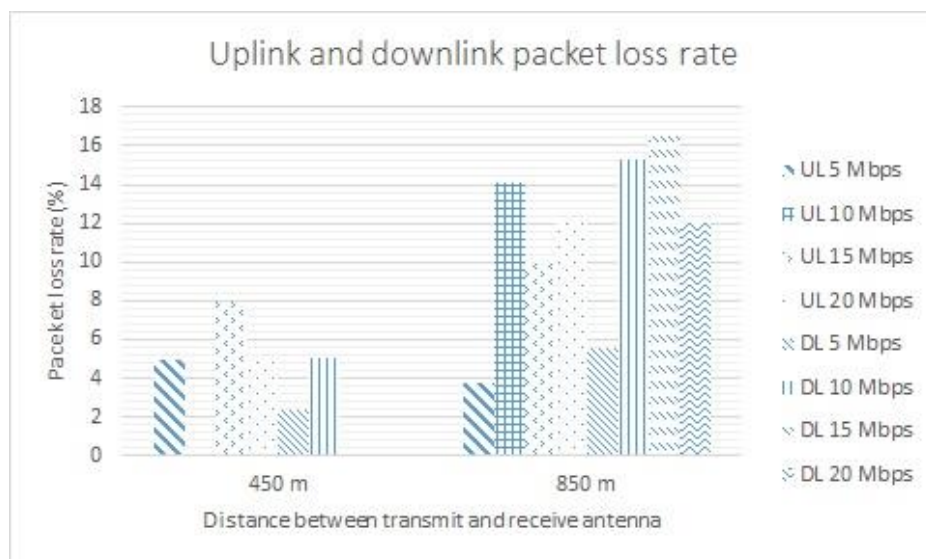
	Data Rate (Mbps) (Uplink)			Data Rate (Mbps) (Downlink)		
	0.5 Mbps	1 Mbps	2 Mbps	0.5 Mbps	1 Mbps	2 Mbps
Jitter (ms)	1.420	0.840	2.146	0.246	0.210	1.061



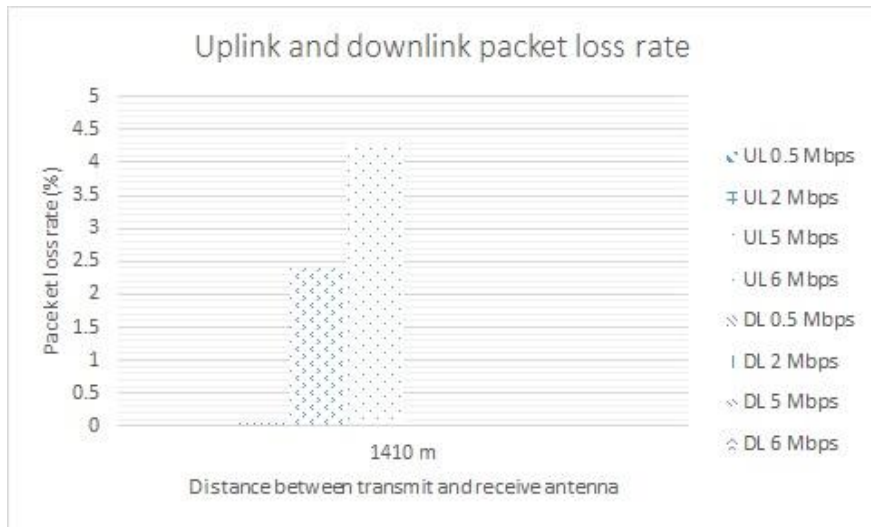
รูปที่ 4.62: ค่าทราฟฟิค (Throughput) ของ Link#1, Link#2, Link#3, overall TVWS, และ overall TVWS+WMN

จากตาราง 4.13-4.29 เราสามารถนำมาแสดงในแผนภูมิกราฟแท่ง (Bar graph) ดังแสดงในรูปที่ 4.62-4.67 การวัดค่าทราฟฟิค (Throughput) ทั้งอัปลิงค์และดาวนลิงค์ในทุกกรณีได้ถูกแสดงในรูปที่ 4.62 เมื่อพิจารณากรณีการเชื่อมโยงแบบจุดต่อจุด (Point-to-point) ซึ่งเราสามารถวัดประสิทธิภาพที่สูงที่สุดในแต่ละเส้นทางหรือลิงค์ (Link) จะเห็นว่าค่าทราฟฟิคนั้นแปรผกผันกับระยะทางที่ระยะ 0.45 km ของ Link#1 (CPE M1) วัดค่าเฉลี่ยทราฟฟิคได้ 12.9 Mbps และ 12.3 Mbps สำหรับ

ดาวนลิงค์และอัปลิงค์ตามลำดับ ส่วนที่ระยะ 1.41 km ของ Link#3 (CPE M10) วัดค่าเฉลี่ยทรูพุตได้ 4.39 Mbps และ 3.59 Mbps สำหรับดาวนลิงค์และอัปลิงค์ตามลำดับ เราจะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยทรูพุตของการเชื่อมโยงแบบจุดต่อจุดดาวนลิงค์จะมากกว่าอัปลิงค์ ซึ่งเป็นไปตามที่ตั้งระบบไว้เนื่องจาก การประยุกต์ใช้งานโดยส่วนมากจะเน้นไปที่การให้บริการอินเทอร์เน็ตบรอดแบนด์ไร้สาย (Mobile broadband Internet) ซึ่งเราต้องการใช้ค่าความจุของช่องสัญญาณ (Capacity) ในดาวนลิงค์มากกว่าอัปลิงค์ อย่างไรก็ตามการตั้งค่าอัตราส่วนดาวนลิงค์ อัปลิงค์นี้จะเข้าไปในทางตรงกันข้ามสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบการบันทึกภาพจากกล้องที่เป็นระบบรักษาความปลอดภัย หรือที่ใช้เพื่อการสอดส่องดูแลเหตุการณ์ (Video surveillance) ซึ่งต้องมีการส่งข้อมูลวิดีโอจากกล้องที่เครื่องปลายทาง (Terminal) หลังจากวัดประสิทธิภาพที่สูงที่สุดในแต่ละเส้นทางแล้ว เราวัดประสิทธิภาพโดยรวมโดยการเชื่อมโยงแบบจุดไปยังหลายจุด (Point-to-multi-point) ทดสอบจาก CPE M1 และ CPE M9 พร้อมๆกัน เนื่องด้วย CPE ทั้งสองจุดนี้ ใช้คลื่นความถี่เดียวกัน ในการติดต่อกับเครื่องสถานีฐาน (BS) ผลปรากฏว่า ค่าเฉลี่ยทรูพุตนั้นลดลงมากกว่าขึ้น เนื่องจากการที่ต้องแบ่งใช้ช่องสัญญาณกันโดยลดไปจาก 11.8 Mbps และ 9.89 Mbps ที่ CPE M9 ไปเป็น 2.34 Mbps และ 3.32 Mbps สำหรับดาวนลิงค์และอัปลิงค์ตามลำดับ สุดท้ายค่าเฉลี่ยทรูพุตของแต่ละเส้นทางหรือลิงค์เมื่อมีการเชื่อมต่อเข้ากับ WMN ลดลงเนื่องจากค่าเฉลี่ยทรูพุตในกรณีนี้ มีการคำนึงถึงการส่งผ่านข้อมูล (Traffic) ของ WMN ด้วย ยกตัวอย่างเช่นที่ CPE M9 ลดลงไปเป็น 8.45 Mbps และ 8.74 Mbps สำหรับดาวนลิงค์และอัปลิงค์ตามลำดับ

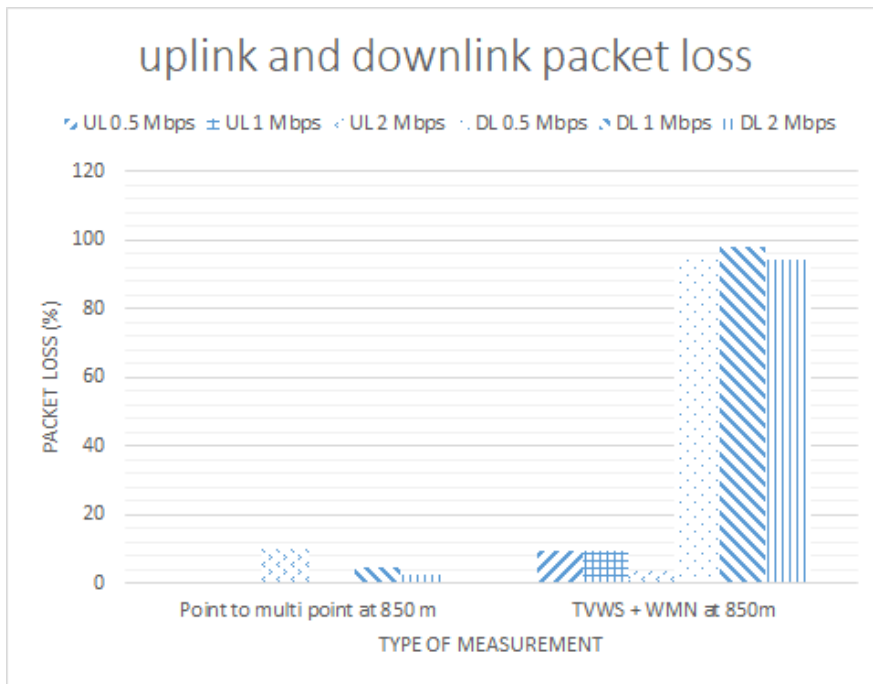


a) Links#1 และ #2



b) Link#3

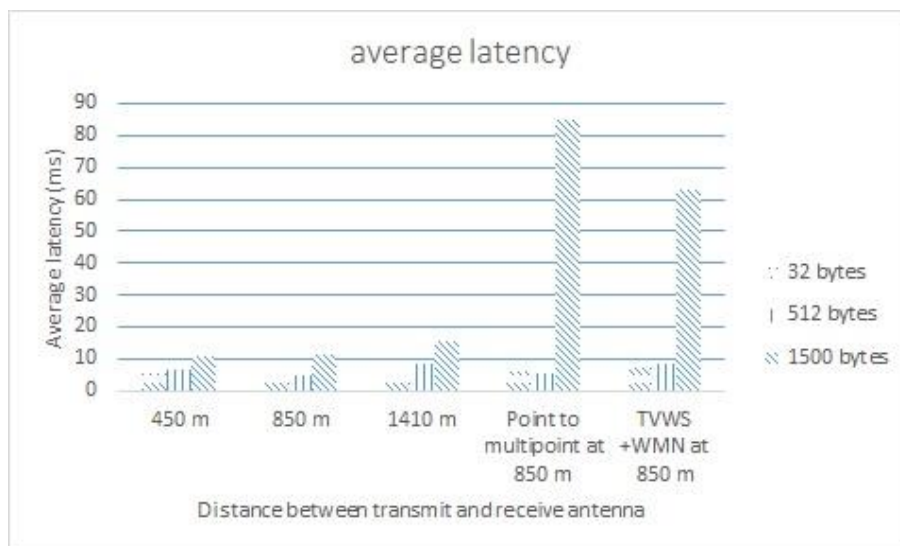
รูปที่ 4.63: ค่าแพ็กเก็ตทอส (Packet loss) ของ a) Link#1, Link#2, และ b) Link#3



รูปที่ 4.64: ค่าแพ็กเก็ตทอส (Packet loss) ของ Link#2+WMN และ overall TVWS

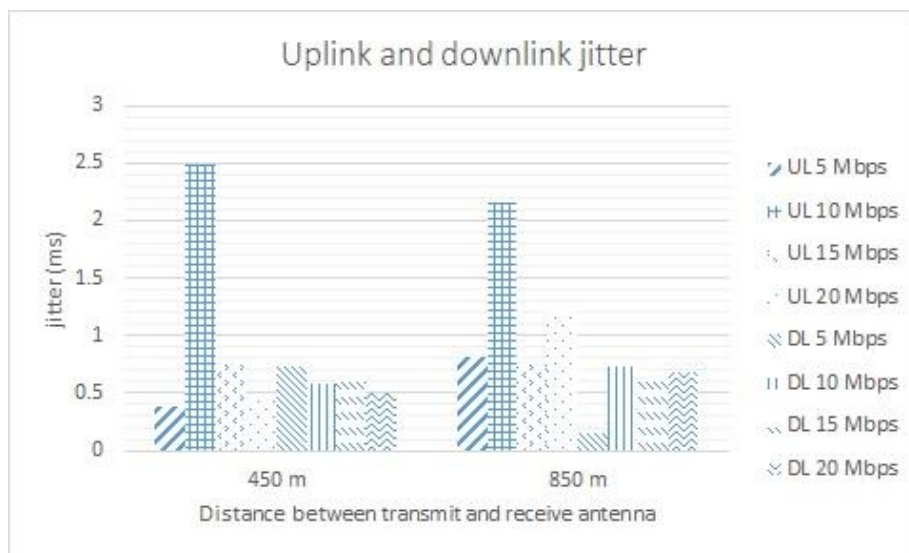
สำหรับกรณีของค่าแพ็กเก็ตทอส (Packet loss) ได้แสดงรูปที่ 4.63 and 4.64 เราส่งแพ็กเก็ตข้อมูลด้วยขนาด 1470 ไบต์ (Bytes) และแปรเปลี่ยนอัตราการความเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล 5,

10, 15, and 20 Mbps ตามลำดับในกรณีของ Link#1 และ 2 และ 0.5, 2, 5, and 6 Mbps ตามลำดับในกรณีของ Link#3 จะเห็นได้ว่าโดยทั่วไปค่าแพ็กเก็ตตอสแปรผันตามอัตราความเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล ในกรณีของอัตราความเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลที่ 5 Mbps ค่าแพ็กเก็ตตอสของแต่ละเส้นทางทั้งกรณีที่ไม่มีการต่อเชื่อมเข้ากับ WMN และมีการต่อเชื่อมเข้ากับ WMN มีค่าไม่เกิน 10% แต่เมื่อเพิ่มอัตราความเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเป็น 10 Mbps เป็นต้นไป แพ็กเก็ตตอสมากขึ้นอย่างมากโดยเฉพาะในเส้นทาง Link#3 ซึ่งสรุปได้ว่าเส้นทาง Link#1 และ Link#2 นั้นมีข้อสัญญาณที่ต่ำกว่าอีกสองเส้นทาง ใน Link#3 ไม่สามารถรองรับอัตราความเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลที่ 6 Mbps เป็นต้นไป ดังนั้นเราจึงลดอัตราความเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเป็น 0.5 Mbps, 2 Mbps, 5 Mbps, และ 6 Mbps ตามลำดับ ซึ่งค่าแพ็กเก็ตตอสได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.63 b) ส่วนกรณีที่เชื่อมโยงแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-multipoint) และกรณีของ TVWS plus WMN ค่าแพ็กเก็ตตอสสูงมากตั้งแต่ 5 Mbps เป็นต้นไป ดังนั้นเรา จึงลดอัตราความเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเป็น 0.5 Mbps, 1 Mbps, และ 2 Mbps ตามลำดับ ซึ่งค่าแพ็กเก็ตตอสได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.64 ทั้งเราจะเห็นได้ว่าทั้งอัปลิงค์ (Uplink) และดาวนลิงค์ (Downlink) ค่าแพ็กเก็ตตอสเป็นที่น่าพึงพอใจที่อัตราความเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเหล่านี้ ยกเว้นในกรณีดาวนลิงค์ (Downlink) ของ TVWS plus WMN ที่มีค่าแพ็กเก็ตตอส ซึ่งเป็นไปได้เพราะว่ามีการจราจร (Traffic) ของการส่งข้อมูลในดาวนลิงค์ของ WMN อย่างมากในเวลาที่ยาว ซึ่งในกรณีเช่นนี้เราควรที่จะวัดด้วยระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น

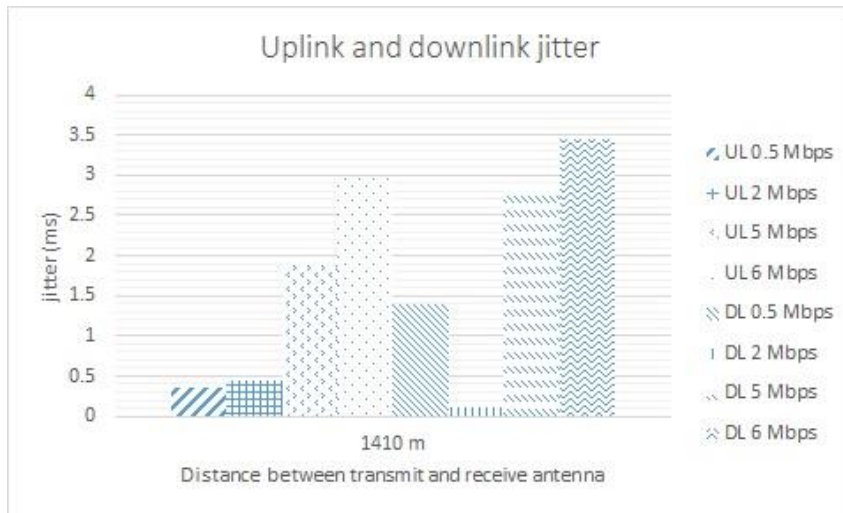


รูปที่ 4.65: ค่าอัตราการล่าช้า (Round-trip latency) ของ Link#1, Link#2, Link#3, Link#2+WMN, และ overall TVWS

เราสามารถวัดค่าอัตราการล่าช้า (Round-trip latency) โดยใช้ ping command ได้เพียงที่อัปลิงค์ (Uplink) สำหรับดาวนลิงค์ (Downlink) ต้องวัดโดยใช้บริดจ์โหมดหรือโหมดสะพาน Bridge mode ซึ่งทำหน้าที่เพียงแปลงสัญญาณหนึ่งไปเป็นอีกสัญญาณ เหมือนทำสะพานเชื่อมระหว่าง 2 อุปกรณ์เท่านั้น รูปที่ 4.65 แสดงค่าอัตราการล่าช้า (Round-trip latency) ที่สัมพันธ์กับขนาดของขนาดแพ็กเก็ต จากผลลัพธ์ แสดงให้เห็นว่าทุกๆ เส้นทางมีค่าเฉลี่ยอัตราการล่าช้าที่ค่านั้นคือน้อยกว่า 16 ms เมื่อปรับเปลี่ยนค่าของขนาดแพ็กเก็ตเกิด 32, 512, และ 1500 ไบต์ (Bytes) เราจะเห็นว่าอัตราการล่าช้าแปรผันตรงกับขนาดแพ็กเก็ต ดังเห็นได้จากการที่อัตราการล่าช้าเมื่อขนาดแพ็กเก็ตเท่ากับ 32 ไบต์มีค่าเท่ากับ 5.238 ms ขณะที่เมื่อขนาดแพ็กเก็ตเท่ากับ 1500 ไบต์ (Bytes) อัตราการล่าช้าเท่ากับ 10.561 ms อย่างไรก็ตามอัตราการล่าช้าไม่แปรผันโดยตรงกับระยะทางของเส้นทาง กล่าวโดยรวมจากผลการวัดอัตราการล่าช้า เครือข่ายระบบทีวีวีทสเปซ (TVWS) สามารถรองรับการประยุกต์ใช้งานแบบที่ต้องเร็ว ไม่ควรมีอัตราการล่าช้ามากนักและแบบเรียลไทม์ ที่ต้องตอบสนองทันที (Delay-sensitive and real-time applications) เนื่องจากค่าอัตราการล่าช้าที่วัดได้ในทุกกรณี มีค่าต่ำกว่าค่าความต้องการมาตรฐานเพื่อให้ได้คุณภาพของการบริการ (Quality-of-Service (QoS) ที่ยอมรับได้ สำหรับการส่งรับสัญญาณเสียง (Voice) วิดีโอ (Video) และข้อมูลเรียลไทม์ (Real-time data) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 300 ms [47]

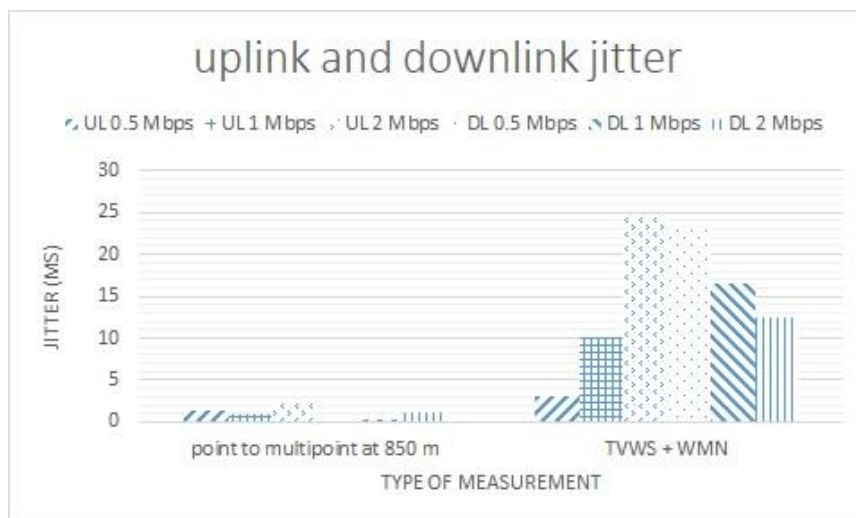


a) Links#1 and #2



b) Link#3

รูปที่ 4.66: ค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ของ a) Link#1, Link#2, และ b) Link#3



รูปที่ 4.67: ค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ของ Link#2+WMN และ overall TVWS

เช่นเดียวกับกับกรณีของค่าแพ็กเก็ตทอส (Packet loss) ในการวัดค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) เราส่งแพ็กเก็ตข้อมูลด้วยขนาด 1470 ไบต์ (Bytes) และแปรเปลี่ยนอัตราการความเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล 5, 10, 15, and 20 Mbps ตามลำดับในกรณีของ Links#1 และ 2 และ 0.5, 2, 5, and 6 Mbps ตามลำดับในกรณีของ Link#3 รูปที่ 4.66 a) และ b) แสดงค่าผันแปรของความล่าช้า

(Jitter) ของแต่ละเส้นทาง Links#1 และ 2 และ Link#3 ตามลำดับ Links#1 and #2 มีค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) อยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจอยู่ที่ 3 ms ทั้งอัปลิงค์ (Uplink) สำหรับดาวนลิงค์ (Downlink) ขณะที่ Link#3 ซึ่งเสถียรน้อยกว่า ไม่สามารถรองรับอัตราความเร็วในการส่งแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลที่ 5 Mbps เป็นต้นไป เช่นกันกับการวัดค่าแพ็กเก็ตตลอส (Packet loss) เราลดอัตราความเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเป็น 0.5 Mbps, 2 Mbps, 5 Mbps, และ 6 Mbps ตามลำดับ ซึ่งผลลัพธ์ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.66 b) ส่วนกรณีที่เชื่อมโยงแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-multipoint) และกรณีของ TVWS plus WMN เช่นกัน เราลดอัตราความเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเป็น 0.5 Mbps, 1 Mbps, และ 2 Mbps ตามลำดับ ซึ่งผลลัพธ์ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.67 จะเห็นได้ว่าในกรณีที่มีการเชื่อมโยงแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-multipoint) ค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ที่วัดได้นั้นน้อยกว่า 3 ms ซึ่งน้อยกว่าในกรณีของ TVWS plus WMN อย่างมาก ที่มีค่าถึง 25 ms แต่กล่าวโดยรวมแล้วค่าผันแปรของความล่าช้า (Jitter) ของระบบโดยทั่วไปน้อยกว่า 2.5 ms นั้นมีค่าน้อยมาก แม้แต่ในกรณีของ TVWS plus WMN อย่างมาก ที่มีค่าถึง 25 ms เมื่อเทียบกับค่าความต้องการมาตรฐานเพื่อให้ได้คุณภาพของการบริการ (Quality-of-Service (QoS) ที่ยอมรับได้ สำหรับการส่งรับสัญญาณเสียง (Voice) วิดีโอ (Video) และข้อมูลเรียลไทม์ (Real-time data) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 30 ms [47]

3.2.3) การทดสอบประสิทธิภาพภายในโครงข่ายที่ใช้ผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตในท้องถิ่น (3BB)

1) การทดสอบจากอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ จุดที่ 1, Fiber 100/30 Mbps

```
Retrieving speedtest.net configuration...
Testing from 3BB Broadband (223.204.170.222)...
Retrieving speedtest.net server list...
Selecting best server based on ping...
Hosted by 3BB (Bangkok) [343.76 km]: 35.059 ms
Testing download speed.....
Download: 85.91 Mbit/s
Testing upload speed.....
Upload: 33.67 Mbit/s
```

ค่าการทดสอบความเร็วอินเทอร์เน็ตจากชุมชนหมู่บ้านไทยสามัคคี หมู่ 9 ไปยังเซิร์ฟเวอร์อยู่ที่กรุงเทพมหานครโดยผ่านโครงข่าย 3BB โดยค่าความเร็วจะอยู่ที่ 85.91 Mbit/s สำหรับการดาวน์โหลด และ 33.67 Mbit/s สำหรับการอัปโหลด และอัตราการล่าช้าอยู่ที่ 35.059 ms

2) การทดสอบจากอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ จุดที่ 2, Fiber 100/30 Mbps

```
pi@raspi-NH3:~ $ ./speedtest.py --server 8990
Retrieving speedtest.net configuration...
Testing from 3BB Broadband (223.205.89.221)...
Retrieving speedtest.net server list...
Selecting best server based on ping...
Hosted by 3BB (Bangkok) [343.76 km]: 32.466 ms
Testing download speed.....
Download: 88.49 Mbit/s
Testing upload speed.....
Upload: 33.66 Mbit/s
```

ค่าการทดสอบความเร็วอินเทอร์เน็ตจากชุมชนหมู่บ้านแม่กีดใหม่ดอนแสง ไปยังเซิร์ฟเวอร์ที่อยู่กรุงเทพมหานครโดยผ่านโครงข่าย 3BB โดยค่าความเร็วจะอยู่ที่ 88.49 Mbit/s สำหรับการดาวน์โหลด และ 33.66 Mbit/s สำหรับการอัปโหลด และอัตราการล่าช้าอยู่ที่ 32.466 ms

3) การทดสอบจากอุปกรณ์เครื่องตัวรับสัญญาณ จุดที่3, VDSL 50/10 Mbps

```
pi@raspi-nh6:~ $ speedtest --server 8990
Retrieving speedtest.net configuration...
Testing from 3BB Broadband (49.48.190.101)...
Retrieving speedtest.net server list...
Selecting best server based on ping...
Hosted by 3BB (Bangkok) [343.76 km]: 58.382 ms
Testing download speed.....
Download: 29.56 Mbit/s
Testing upload speed.....
Upload: 11.16 Mbit/s
```

ค่าการทดสอบความเร็วอินเทอร์เน็ตจากชุมชนตำบล แม่กาษา ไปยังเซิร์ฟเวอร์ที่อยู่กรุงเทพมหานครโดยผ่านโครงข่าย 3BB โดยค่าความเร็วจะอยู่ที่ 29.56 Mbit/s สำหรับการดาวน์โหลด และ 11.16 Mbit/s สำหรับการอัปโหลด และอัตราการล่าช้าอยู่ที่ 58.382 ms

บทที่ 5

[สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ]

1) สรุปผลการวิจัย

เราได้ทำศึกษาวิจัยพัฒนาระบบการตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรศัพท์เคลื่อนที่ ออกแบบการตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่กิจการโทรศัพท์เคลื่อนที่ทั้งแบบ ณ ตำแหน่งตายตัว เพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลได้ละเอียดและแบบเคลื่อนที่ เพื่อสามารถเก็บข้อมูลหลายๆ ตำแหน่งในแต่ละพื้นที่อย่างต่อเนื่อง เราต้องทดสอบความถูกต้องของระบบวัดดังกล่าวโดยการ การปรับเครื่องเข้าสู่ภาวะมาตรฐาน เทียบกับเครื่องมือวัดสเปกตรัมแบบมาตรฐานที่มีราคาแพงมาก และกินพลังงานมากต้องต่อสายกำลังไฟตลอดเวลา ใหญ่เทอะทะจะทำให้ไม่สะดวกในการทำงานภาคสนามได้ ระบบของเราราคาถูกทำให้องค์กรที่ต้องการใช้งานสามารถเข้าถึงได้และทำให้โครงการหนึ่งๆ สามารถมีระบบนี้ได้หลายชุด ซึ่งทำให้สามารถการวัดพร้อมๆ กันได้หลายพื้นที่ กินพลังงานน้อยทำให้ระบบต้องถูกรันไว้ตลอดทั้งวันไม่ต้องคอยชาร์ตหรือเปลี่ยนแบตเตอรี่ง่ายต่อการใช้งาน ไม่ซับซ้อน ซึ่งทำให้สะดวกในการหาทีมงานที่มาช่วยในวัด

เริ่มต้นเราได้ทดสอบวัดคลื่นสัญญาณในบริเวณสถาบันเอไอที จังหวัดปทุมธานี ซึ่งเทียบได้กับเขตท้องที่ชุมชน ในเขตเมือง ต่างจังหวัด (Suburban area) เราได้พบปัญหาความไม่แม่นยำในการตัดสินใจช่องสัญญาณนั้นว่างหรือไม่ว่างเมื่อเทียบกับค่าความจริงขั้นพื้นฐาน เมื่อใช้ค่าเทรสโวลต์แบบตายตัว -100dBm โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลจากการวัดภายในอาคารซึ่งสัญญาณคลื่นความถี่กิจการโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ถูกบดบังอย่างสุ่มก่อนที่จะมาถึงสายอากาศของระบบวัดก็จะเกิดปรากฏการณ์ ซาโดว์อิงเงฟเฟกต์ (Shadowing effect) รวมถึง เฟดดิ้งขนาดเล็ก (Small-scale fading) ซึ่งเกิดจากการแพร่กระจายหลายวิถีทิศทางของคลื่นสัญญาณ (Multipath propagation) ซึ่งโดยปกติภายในอาคารเราไม่ได้รับ เส้นทางโดยตรงจากตัวส่งมาตัวรับ แบบจำลองเฟดดิ้งแพร่กระจายหลายวิถีทิศทาง (Multipath fading) มีการแจกแจงตัวแปรสุ่มแบบเรย์เลห์ (Rayleigh distribution) โดยทั้งเฟดดิ้งขนาดเล็กและซาโดว์อิงเงฟเฟกต์นี้ ทำให้ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อน การตัดสินใจเป็นไปอย่างไม่ถูกต้องนัก ดังนั้นเราจึงเสนอวิธีการแก้ปัญหาโดยพัฒนาสเปกตรัมเซนซิงอัลกอริทึมเพื่อระบุชี้แจงคลื่นที่ไม่ได้ถูกใช้งานได้แม่นยำขึ้น อัลกอริทึมดังกล่าวทำให้การตั้งค่าเทรสโวลต์เป็นไปแบบปรับเปลี่ยน ไม่ว่าจะป็นวิธี FCME ซึ่งสามารถได้ผลลัพธ์การตัดสินใจดีขึ้นเมื่อช่องสัญญาณนั้นว่าง เนื่องจากวิธีการดังกล่าวต้องการให้มี ส่วนที่ไม่มีสัญญาณและเป็นเพียงสัญญาณรบกวน (Noise) ก่อน เป็นเซตที่สะอาด (Clean set) ซึ่งเซตเริ่มต้นนี้จะมีขนาดประมาณ 10% ของเซตข้อมูลทั้งหมด แต่เมื่อช่องสัญญาณนั้นไม่ว่างประกอบด้วยสัญญาณคลื่นกิจการโทรศัพท์เคลื่อนที่ ทั้ง FCME ไม่สามารถที่เพิ่มความถูกต้องในการตัดสินใจ

ได้ ดังนั้นเราแก้ไขโดยการเสริม สัญญาณรบกวนเทียมเข้าไปเป็นวิธี Noise added FCME ซึ่งปริมาณสัญญาณรบกวนที่ใส่เข้าไปเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับข้อมูลทั้งหมด โดยเราจะปรับค่าดังกล่าวไปเรื่อยๆ จาก 0, 5, 10,..., 100 เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนเทียบกับข้อมูลทั้งหมดที่เหมาะสมที่สุด (Optimal percentage) ทำให้เราสามารถตัดสินใจว่าช่องสัญญาณนั้นว่างหรือไม่ว่างได้ถูกต้องแม่นยำขึ้น

จากนั้นเราวัดที่กรุงเทพมหานคร ซึ่งเปรียบได้กับท้องที่หนาแน่นในเขตเมืองใหญ่ (Urban area) รวมทั้ง ในพื้นที่ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งถือว่าเป็นพื้นที่ห่างไกลเข้าถึงยาก (Rural area) เมื่อสรุปผลการวิเคราะห์การวัดที่ได้ทำนี้ สรุปได้ว่า สเปกตรัมหรือคลื่นความถี่ที่ว่างทั้งหมด (Total idle channel หรือ ไวท์สเปซ s) ที่สามารถนำมาใช้งานได้ จะเห็นได้ว่า ในพื้นที่ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งถือว่าเป็นพื้นที่ห่างไกลเข้าถึงยาก มีจำนวนคลื่นความถี่ที่สามารถนำมาใช้งานได้ หรือปริมาณทีวีไวท์สเปซ (TVWS) มากที่สุด ดังนั้นเพื่อเป็นการขยายการใช้งานบรอดแบนด์อินเทอร์เน็ตในพื้นที่ที่ยังไม่มีการเข้าถึงหรือพื้นที่ที่เข้าถึงยาก TVWS จะสามารถเป็นตัวเลือกใหม่สำหรับเชื่อมต่อเครือข่ายหลัก (Backhaul connection) ที่มีการราคาถูกกว่าการเชื่อมต่อโดยใช้ใยแก้วนำแสง (Fiber optics) ดาวเทียม (Satellite) หรือระบบวายแมกซ์ (Worldwide interoperability for Microwave Access (WiMAX))

หลังจากนั้นในส่วนของการสร้างระบบสื่อสารต้นแบบความเร็วสูงผ่านคลื่นความถี่กิจการโทรทัศน์ เราได้ศึกษา พัฒนา ติดตั้งทดสอบระบบสื่อสาร ซึ่งในการทดสอบวัดประสิทธิภาพค่าต่างๆ ได้แก่ ค่ากำลังสัญญาณที่รับได้ ค่าทรูพุต ค่าอัตราสูญเสียของแพ็กเก็ตข้อมูลหรือที่เรียกว่า แพ็กเก็ตลอส ค่าอัตราการล่าช้า ค่าผันแปรของความล่าช้า ทั้งแบบการเชื่อมโยงแบบจุดต่อจุด (Point-to-point) เพื่อให้เราสามารถวัดประสิทธิภาพที่สูงที่สุดในแต่ละเส้นทางหรือลิงค์ (Link) และวัดประสิทธิภาพโดยรวมแบบการเชื่อมโยงแบบจุดไปยังหลายจุด (Point-to-multi-point) ด้วย รวมถึงในกรณีที่มีการเชื่อมต่อระบบ TVWS เข้ากับโครงข่ายไร้สายแบบเมช (Wireless mesh network (WMN)) ด้วย จะเห็นได้ว่าเครือข่ายมีค่าทรูพุตที่ดีในแต่ละลิงค์ประมาณ 4 ถึง 13 Mbps ค่าอัตราการล่าช้าและค่าผันแปรของความล่าช้ามีค่าต่ำน้อยกว่า 16 ms และ 2.5 ms ตามลำดับทั้งกรณีเชื่อมโยงแบบจุดต่อจุดและแบบจุดต่อหลายจุด ส่วนค่าแพ็กเก็ตลอส ซึ่งมีอัตราที่แปรผันตามอัตราส่งข้อมูล ซึ่งที่อัตราส่งข้อมูล 5 Mbps ค่าแพ็กเก็ตลอสส่วนมากมีค่าไม่สูงกว่า 10% ซึ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพที่ดีของเครือข่าย ซึ่งสามารถรองรับการประยุกต์ใช้ในการส่งรับสัญญาณเสียง (Voice) วิดีโอ (Video) และข้อมูลเรียลไทม์ (Real-time data) ได้

2) ข้อเสนอแนะ

2.1) ข้อเสนอแนะจากผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการ

จากประสิทธิภาพของระบบ TVWS และลักษณะของโครงข่าย WMN เดิมที่มีอยู่ของทั้งสามจุดที่แตกต่างกัน เราจะนำไปเชื่อมต่อกับโครงข่ายดังต่อไปนี้

- ที่หมู่ 1 จะใช้ TVWS link เป็นจุดต่อเชื่อมของโครงข่ายหรือเกตเวย์ (Gateway) ของโครงข่าย Microsoft (MS) LTE เนื่องจาก บริเวณนั้น WMN ไม่สามารถ ขยายไปถึงได้
- ที่หมู่ 9 เราจะใช้ TVWS link ไปเชื่อมต่อ กับ WMN ซึ่ง จะเป็นเกตเวย์อีกทาง เนื่องจากจุดเชื่อมต่อนี้จะเส้นทางออกไปยังโครงข่ายอินเทอร์เน็ตหรืออินเทอร์เน็ตเกตเวย์ (Internet gateway) เดิม ของ หมู่ 9 จะอยู่ อีกฟากหนึ่ง การใช้ TVWS link เป็นเกตเวย์ที่สอง จะช่วยให้บ้านที่อยู่ใกล้หอประชุม ลดจำนวนฮอป (Hop) ในการใช้ Internet ได้ อีกทั้งยังช่วยลดโหลดของเกตเวย์เดิม
- ที่หมู่ 10 เนื่องจาก link มีทรูพุด ค่อนข้างต่ำ ไม่เพียงพอ ที่จะรองรับผู้ใช้หลายๆ คนพร้อมกันได้ เราจึงตัดสินใจว่า ที่ จุด นี้ เราจะติดตั้ง แค่ 1 Wi-Fi hotspot เพื่อให้คนที่จดบริการชุมชน ใช้อินเทอร์เน็ตได้เท่านั้น เหมือนกับโครงการ Net ประชากร

เนื่องจากชุมชนในเขตพื้นที่ชนบทห่างไกลเข้าถึงยาก โดยทั่วไปมีปัญหาเรื่องการรับสัญญาณที่ไม่ดี ได้รับบริการที่ไม่มีประสิทธิภาพ จากการใช้บริการของระบบโทรศัพท์มือถือเซลลูลาร์ (Cellular mobile systems) หรืออาจไม่มีสัญญาณเลย การเชื่อมต่อโดยใช้ใยแก้วนำแสง (Fiber optics) ดาวเทียม (Satellite) หรือระบบวายแมกซ์ (Worldwide interoperability for Microwave Access (WiMAX)) ก็มีราคาแพง ดังนั้นระบบทีวีไวท์สเปซ (TVWS) จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงหรือบรอดแบนด์ (Broadband) ในพื้นที่ห่างไกล อาจรวมถึงการนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ อีกมากมาย เช่น เกษตรอัจฉริยะ (Smart farming) โทรเวชกรรม (Telemedicine) หรือการศึกษาทางไกล (E-Learning) เป็นต้น การประยุกต์ใช้งานอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things (IoT)) หรือจะเป็นการมาช่วยออฟโหลด (Offload) ในที่ ที่มีการใช้งาน Wi-Fi อยู่มากอยู่แล้วเช่นในเมืองใหญ่ (Ultra dense urban area) เช่นในกรุงเทพมหานคร

2.2) ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไปในอนาคต

ในปัจจุบันนี้ การใช้ระบบฐานข้อมูลของตำแหน่งทางภูมิศาสตร์เป็นวิธีการที่ใช้ในการตรวจหาคลื่นความถี่ทีวีไวท์สเปซ (TVWS) รวมทั้งอุปกรณ์ของเรา นั่นคือ RuralConnect® Gen 3 Carlson TVWS radio system ซึ่งวิธีนี้สามารถป้องกันเครื่องส่งสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณ

โทรทัศน์จากสัญญาณแทรกสอดรบกวน (Interference) ได้เหมาะสม ด้วยการเก็บบันทึกข้อมูลของเครื่องส่งสัญญาณโทรทัศน์ และส่วนใหญ่จะใช้แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น เพื่อกำหนดพื้นที่ถูกป้องกัน ปลอดภัยของเครื่องส่งสัญญาณโทรทัศน์ เครื่องสถานีฐาน (BS) จะเลือกใช้ช่องจากรายการช่องสัญญาณที่มีอยู่โดยใช้ โพรโตคอลเพื่อเข้าถึงฐานข้อมูลช่องสัญญาณที่ว่าง (Protocol to access white space (PAWS)) เพื่อสื่อสารกับฐานข้อมูลตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ อย่างไรก็ตามระบบฐานข้อมูลดังกล่าวยังไม่มีใช้งานในประเทศไทย ดังนั้นช่องสัญญาณความถี่สำหรับที่ใช้งานในโครงการนี้ เราได้เลือกช่องสัญญาณ จากผลของการวัดและวิเคราะห์ TVWS ในส่วนแรก

สำหรับงานในอนาคต ระบบฐานข้อมูลตำแหน่งทางภูมิศาสตร์และการออกแบบโปรโตคอลเพื่อเข้าถึงฐานข้อมูลช่องสัญญาณที่ว่าง (PAWS) สามารถทำได้ เทคนิคการเข้าถึงคลื่นความถี่แบบไดนามิก (Dynamic spectrum access) ที่มีประสิทธิภาพ โดยใช้ระบบฐานข้อมูล (White space database (WSDB)) มีโปรโตคอลมาตรฐาน ที่ใช้ในการแบ่งใช้ TVWS และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องระหว่างระบบฐานข้อมูล WSDB และฐานข้อมูลพิกัดทางภูมิศาสตร์ (Geo-location spectrum database (GSDB)) เป็นหัวข้อวิจัยที่ทำหาย การทดลองในอนาคต สามารถทำได้เพื่อตรวจสอบว่า TVWS สามารถรองรับช่วยขยายความครอบคลุมจากเทคโนโลยี Wi-Fi ทั่วไปได้ได้อย่างไร

บรรณานุกรม

- [1] M. Mehdawi, N. Riley, K. Paulson, A. Fanan, and M. Ammar, "Spectrum occupancy survey in HULL-UK for cognitive radio applications: measurement & analysis," International Journal of Scientific & Technology Research, vol. 2, issue 4, April 2013.
- [2] T. Harrold, R. Cepeda, and M. Beach, "Long-term measurements of spectrum occupancy characteristics," in Proc. IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), Aachen, Germany, pp. 83-89, May 2011.
- [3] M. López-Benitez and F. Casadevall, "A radio spectrum measurement platform for spectrum surveying in cognitive radio," in Proc. International ICST conference on testbeds and research infrastructures for the development of network communities, Shanghai, pp. 1-16, 2011.
- [4] V. Valenta, R. Maršálek, G. Baudoin, M. Villegas, M. Suarez, and F. Robert, "Survey on spectrum utilization in Europe: measurements, analyses and observations," in Proc. The fifth International ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, Cannes, France, 2010.
- [5] L. Pedraza, A. Molina and I. Perez, "Spectrum occupancy statistics in Bogota-Colombia," in Proc. The IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM), May 2013.
- [6] M. McHenry, P. A. Tenhula, D. McCloskey, D. A. Roberson, and C. S. Hood, "Chicago spectrum occupancy measurements & analysis and a long-term studies proposal", in Proc. The first International ICST Workshop on Technology and Policy for Accessing Spectrum, Aug. 2006.
- [7] M. T. Masonta, D. Johnson and M. Mzyece, "The white space opportunity in Southern Africa: measurements with Meraka cognitive radio platform," Springer Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, R. Popescu-Zeletin et al., Eds., vol. 92, part 1, pp. 64-73, 2012.

- [8] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE Commun. Surveys and Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 116–130, Jan. 2009.
- [9] D. Cabric, A. Tkachenko, and R. Brodersen, "Spectrum sensing measurements of pilot, energy and collaborative detection," in *Proc. IEEE Military Commun. Conference*, Washington, D.C., USA, pp: 1-7, 2006
- [10] H. Sun, D. Laurenson, and C.-X. Wang, "Computationally tractable model of energy detection performance over slow fading channels," *IEEE Commun. Letters*, vol. 14, no. 10, pp. 924–926, Oct. 2010.
- [11] Z. Quan, S. Cui, A. H. Sayed, and H. V. Poor, "Optimal multiband joint detection for spectrum sensing in cognitive radio networks," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 57, no. 3, pp. 1128–1140, Mar. 2009.
- [12] Z. Tian and G. Giannakis, "A wavelet approach to wideband spectrum sensing for cognitive radios," in *Proc. IEEE Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Commun.*, Mykonos Island, Greece, pp. 1–5, June 2006.
- [13] B. Farhang-Boroujeny, "Filter bank spectrum sensing for cognitive radios," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 56, no. 5, pp. 1801–1811, May 2008.
- [14] Z. Tian and G. Giannakis, "Compressive sensing for wideband cognitive radios," in *Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Honolulu, HI, USA, pp. 1357–1360, April 2007.
- [15] Z. Tian, Y. Tafesse, and B. M. Sadler, "Cyclic feature detection with sub-Nyquist sampling for wideband spectrum sensing," *IEEE J. Sel. Topics in Signal Processing*, vol. 6, no. 1, pp. 58–69, Feb. 2012.

- [16] F. Zeng, C. Li, and Z. Tian, "Distributed compressive spectrum sensing in cooperative multihop cognitive networks," *IEEE J. Sel. Topics in Signal Processing*, vol. 5, no. 1, pp. 37–48, Feb. 2011.
- [17] J. A. Tropp, J. N. Laska, M. F. Duarte, J. K. Romberg, and R. G. Baraniuk, "Beyond Nyquist: efficient sampling of sparse bandlimited signals," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 56, no. 1, pp. 520–544, Jan. 2010.
- [18] M. Mishali and Y. C. Eldar, "Blind multiband signal reconstruction: Compressive sensing for analog signals," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 57, no. 3, pp. 993–1009, March 2009.
- [19] V. N. Q. Bao, T. D. Thuan, N. T. Quy, and L. M. Trung, "Vietnam spectrum occupancy measurements and analysis for cognitive radio applications," In *Proc. IEEE International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, pp. 135-143, 2011.
- [20] S. D. Barnes, P. A. Jansen van Vuuren, and B. T. Maharaj BT, "Spectrum occupancy investigation: measurements in South Africa. *Measurement*, vol. 46, no. 9, pp. 3098-3112, 2013.
- [21] L. Bedogni, M. Di Felice, F. Malabocchia, L. Bononi, and T. I. Spa TI, "Indoor communication over TV gray spaces based on spectrum measurements. In *Proc. IEEE Wireless Communication and Networking Conference (WCNC)*, 2014.
- [22] H. Elshafie, N. Fisal, M. Abbas, W. A. Hassan, H. Mohamad, N. Ramli, and S. Zubair, "A survey of cognitive radio and TV white spaces in Malaysia," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2014.
- [23] P. Kumar, N. Rakheja, A. Sarswat, H. Varshney, P. Bhatia, S. R. Goli, and M. Sharma, "White space detection and spectrum characterization in urban and rural India," In *Proc. IEEE 14th International Symposium and Workshops on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, pp. 1-6, 2013.

- [24] M. Lopez-Benitez and F. Casadevall, "Spectrum usage in cognitive radio networks: from field measurements to empirical models," *IEICE Transactions on Communications*, vol. 97, no. 2, pp. 242-250, 2014.
- [25] D. Makris, G. Gardikis, and A. Kourtis, "Quantifying TV white space capacity: a geolocation-based approach," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 9, pp. 145, 2012.
- [26] A. Martian, "Evaluation of spectrum occupancy in urban and rural environments of Romania," *Revue Roumaine Des Sciences Techniques, Serie Electrotechnique et Energetique*, vol. 59, no. 1, pp. 87-96, 2014.
- [27] M. McHenry, K. Seadman, and M. Lofquist, "Determination of detection thresholds to allow safe operation of television band white space devices," In Proc. The third IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), vol. 3, no. 1, pp. 144-155, 2008.
- [28] G. Naik, S. Singhal, A. Kumar, and A. Karandikar, "Quantitative assessment of TV white space in India," in Proc. IEEE Twentieth National Conference on Communications (NCC), pp. 1-6, 2014.
- [29] M. Nekovee, "Quantifying the TV white spaces spectrum opportunity for cognitive radio access," Springer Berlin Heidelberg in *Communications Infrastructure Systems and Applications in Europe*, pp. 46-57, 2009.
- [30] A. L. C. Pintor, M. R. S. To, J. S. Salenga, G. M. Geslani, D. P. Agpawa, and M. K. Cabatuan, "Spectrum survey of VHF and UHF bands in the Philippines," in Proc. IEEE TENCON Region 10 Conference, pp. 1-6, 2012.
- [31] J. Van de Beek, J. Riihijarvi, A. Achtzehn, and P. Mahonen, "UHF white space in Europea quantitative study into the potential of the 470790 MHz band," in Proc. IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), pp. 1-9, 2011.

- [32] J. Xue, Z. Feng, and K. Chen, "Beijing spectrum survey for cognitive radio applications," in Proc. IEEE 78th on In Vehicular Technology Conference (VTC Fall), pp. 1-5, 2013.
- [33] L. Yin, K. Wu, S. Yin, J. Li, S. Li, and L. M. Ni, "Digital dividend capacity in China: A developing country's case study," in Proc. IEEE International Symposium on In Dynamic Spectrum Access Networks (DYSPAN), pp. 121-130, 2012.
- [34] X. Ying, J. Zhang, L. Yan, G. Zhang, M. Chen, and R. Chandra, "Exploring indoor white spaces in metropolises," in Proc. The 19th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM), pp. 255-266, 2013.
- [35] IEEE Std 802.22-2011TM, standard for wireless regional area networks— Part 22: cognitive wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: policies and procedures for operation in the TV Bands, July 2011.
- [36] H. Elshafie, N. Fisal, M. Abbas, W. A. Hassan, H. Mohamad, N. Ramli, and S. Zubair, "A survey of cognitive radio and TV whitespaces in Malaysia," Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2014.
- [37] M. Lopez-Benitez and F. Casadevall, "Spectrum usage in cognitive radio networks: from field measurements to empirical models," IEICE Transactions on Communications, vol. 97, no. 2, pp. 242-250, 2014.
- [38] J. Neyman and E. S. Pearson, "On the problem of the most efficient tests of statistical hypotheses," Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, vol. 231, pp. 289-337, 1933.
- [39] P. Henttu and S. Aromaa, "Consecutive mean excision algorithm," in Proc IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, vol. 3, no. 2, pp. 450-454, 2002.

- [40] H. Saarnisaari, "Consecutive mean excision algorithms in narrowband or short time interference mitigation," in Proc Position location and navigation symposium, vol. 1, pp. 447-454, 2004.
- [41] J. Vartiainen, J. J. Lehtomäki, S. Aromaa, H. Saarnisaari, "Localization of multiple narrowband signals based on the FCME algorithm," in Proc. The Nordic Radio Symposium (NRS), Aug. 2004.
- [42] RuralConnect Gen 3 TV White Spaces Radio. [On-line] Available: <https://www.carlsonwireless.com/ruralconnect/>. [Accessed: 01-01-2019], 2019.
- [43] R. Hermann, "OFDM concepts for future communication systems," Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Signals and Communication Technology, 1st edition, ISBN 978-3-642-17496-4, 254 pages, 2011.
- [44] COST 259, "Wireless flexible personalised Communications," Final Report, Ed. Luis M. Correia, Wiley, New York, United States of America, 2001.
- [45] COST 231, "Digital mobile radio towards future generation systems," Final Report, Office Official Publ. Eur. Commission, EUR 18957, ISBN 92-828-5416-7, 1999.
- [46] Radio Mobile. [On-line] Available: <http://radiomobile.pe1mew.nl>. [Accessed: 21-05-2014], 2014.

[47] L. Chris and P. Steve, “Implementing Quality of Service Over Cisco MPLS VPNs,” Sample Chapter is provided courtesy of Cisco Press, 2006.

[48] TV Minimum Signal. [On-line] Available: http://otadtv.com/digital_tv/signals.html. [Accessed: 01-01-2019], 2019.

[49] H. Mauwa, A. Bagula, and Marco Zennaro, “Exploring TV White Spaces for Use in Campus Networks,” International Conference on e-Infrastructure and e-Services for Developing Countries, 12 pages, Oct. 2016.

[50] Rogério Dionisio, Paulo Marques, and Jonathan Rodriguez, “TV White Spaces Maps Computation through Interference Analysis,” Future Network Mobile Summit (FutureNetw), 8 pages, June 2011.

ศึกษาการใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ที่ไม่มีการใช้งานในแต่ละพื้นที่

TV White Space

ประวัตินักวิจัย

หัวหน้าโครงการ (ผู้รับผิดชอบโครงการ)

ชื่อ-นามสกุล ดร. อัฐพงษ์ เทพารักษ์ษณกร (Attaphongse Taparugssanagorn)

ตำแหน่ง อาจารย์ประจำ ภาควิชา Telecommunications/ School of Engineering and Technology สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Asian Institute of Technology (AIT))

ประวัติโดยย่อ

Attaphongse Taparugssanagorn received the Bachelor of Engineering degree in 1997 from the Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand in 1997. After that he worked as an engineer for Siemens Ltd, Bangkok in Telecommunications transmission department for two years. He then obtained the Master of Science (in Electrical Engineering) degree in 2001 from the Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany. He gained an experience as a researcher in the institute of communications, the University of Stuttgart until 2003. Then, he joined Centre for Wireless Communications, University of Oulu, Oulu, Finland at the end of 2003 and completed his Doctor of Technology degree there in 2007. In 2008, he worked as a visiting postdoctoral researcher in Yokohama National University, Yokohama, Japan. After he returned home in Bangkok in 2011, he joined the Asian Institute of Technology, Thailand as an adjunct faculty. At the end of 2012, he has also joined at the National Electronics and Computer Technology Center, Thailand. In August semester 2015 until present he has been with the Asian Institute of Technology as a full-time faculty. His research interest includes signal processing, statistical signal processing, detection and estimation techniques, as well as machine learning and deep learning for various applications, for example, advanced wireless communications, radio channel estimations, pattern recognition, coexistence problems, and many others.

ชื่อผู้ร่วมโครงการ (นักวิจัย)

ชื่อ-นามสกุล ดร. อติสรณ์ เลิศสินทรัพย์ทวี (Adisorn Lertsinsrubtavee)

ตำแหน่ง Research Specialist ห้องปฏิบัติการอินเทอร์เน็ตเพื่อการศึกษาและวิจัย (Internet Education and Research Laboratory (intERLab)), สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Asian Institute of Technology (AIT))

ประวัติโดยย่อ

Adisorn Lertsinsrubtavee is a professional staff at intERLab (Internet Education and Research Laboratory), Asian Institute of Technology, Thailand. Prior to that, he was a research associate at the department of computer science and technology of the University of Cambridge. He earned his PhD. degree in computer science from UPMC Sorbonne University, France in September 2013. He received M.E. degree in Information and Communications Technologies from Asian Institute of Technology, Thailand and M.S. degree in Communication Networks and Services from Telecom Management SudParis, Evry, France in 2009. He also received B.E. degree in telecommunication engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand in 2006. He has been involved in several European and national projects dealing with wireless networks and future Internet architecture such as the European H2020 UMOBILE, French ANR LICoRNe, TakNet project and TVWS project supported by NBTC. His research interests include networked technologies for developing regions, mobile ad hoc networks, Internet measurements and Information Centric Networking. He has served as technical reviewers in several top international journals such as IEEE TMC, JSAC and Communication Magazine. He was a TPC Co-chair of IEEE CCNC Workshop on Future Internet Architecture for Developing Regions (FI4D) 2016 and 2017.

ชื่อผู้ร่วมโครงการ (นักวิจัย)

ชื่อ-นามสกุล นางสาว นิสาร์ตน์ ตันสกุล (Nisarat Tansakul)

ตำแหน่ง Helpdesk Manager ห้องปฏิบัติการอินเทอร์เน็ตเพื่อการศึกษาและวิจัย (Internet Education and Research Laboratory (intERLab)), สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Asian Institute of Technology (AIT))

ประวัติโดยย่อ

Nisarat Tansakul is IT Helpdesk Manager at Internet Education and Research Laboratory, Asian Institute of Technology, Thailand. She also work as a project manager for Community Wireless Mesh Network project called “TakNet” which mainly deployed in Tak province in the north of Thailand to increase number of Internet user in Thailand. She earned her M.S. degree in Information Technology from Kasetsart University, Thailand in 2007. She also received B.S. degree in Computer Science from Mahidol University, Thailand in 2002.



กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ
(สำนักงาน กสทช.)