การศึกษาสมรรถนะของการใช้สายอากาศไดเวอร์ซิตีแบบอีจีซีที่เฟสไม่ร่วมภายในอาคาร

A study performance of non-cophase EGC diversity for indoor application

โดย

นายธนาวุฒิ ธารารัตนสกุล B4804253

นายนัณฐพงษ์ แช่มช้อย B4805137

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 โครงงานวิศวกรรมโทรคมนาคม

และวิชา 427494 โครงงานศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2545

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประจำภาคการศึกษาที่ 1 และ2 ปีการศึกษา 2552

โครงงาน การศึกษาสมรรถนะของการใช้สายอากาศไดเวอร์ซิตีแบบ อีจีซีที่เฟสไม่ร่วมภายในอาคาร
โดย นายธนาวุฒิ ธารารัตนสกุล B4804253
นายนัณฐพงษ์ แช่มช้อย B4805137
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล
สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
ภาคเรียนที่ 1 และ 2/2552

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันระบบสื่อสารแบบไร้สายได้มีการพัฒนาออกมาหลากหลายรูปแบบเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นเรื่องความเร็วในการรับ /ส่งข้อมูลที่สูงขึ้น หรือจะเป็นเรื่องของคุณภาพ ความน่าเชื่อถือในการให้ บริการที่ดีในระบบ ทั้งนี้ก็เพื่อรองรับกับความต้องการในการสื่อสารข้อมูลมัลติมีเดีย ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลภาพ ข้อมูลเสียงและข้อมูลสื่อสารอื่นๆ จึงได้มีการพัฒนาในหลายๆด้าน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสารไร้สายให้ดีขึ้น ซึ่งความหลากหลายของช่องสัญญาณหรือไดเวอร์ซิตีก็ เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถช่วยให้การรับสัญญาณมีคุณภาพที่ดีขึ้น โครงงานนี้จึงได้มีการนำเสนอการศึกษาสมรรถนะของการใช้สายอากาศไดเวอร์ซิตีแบบอีจีซีที่เฟสไม่ร่วมภายในอาคาร เพื่อศึกษาดูว่าความหลากหลายของช่องสัญญาณหรือไดเวอร์ซิตี สามารถช่วยให้การรับสัญญาณมีคุณภาพที่ดีขึ้นได้อย่างไรบ้าง

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ผศ.ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ที่ได้แนะนำเหลือเกี่ยวกับแนวคิด ดูแลเอาใจใส่ติดตามงาน ชี้แนะข้อบกพร่อง ตลอดจน ให้การสนับสนุนคณะผู้จัดทำให้มีความสามารถในการทำโครงงานจนเสนอผลงานให้เป็นที่รู้จักและยอมรับได้

ขอขอบ พระ คุณ คณาจ ารย์และบุคลากรสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือแก่คณะผู้จัดทำมาโดยตลอด พี่บัณฑิตศึกษาปริญญาโท วิศวกรรมโทรคมนาคม และเพื่อนนักศึกษาสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคนที่เป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด

คณะผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณทุกๆ ท่านที่ได้กล่าวมาแล้วไว ณ ที่นี้ สำหรับส่วนดีของโครงงาน นี้ขออุทิศให้แก่คณาจารย์ และ บิดามารดา ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่คณะผู้จัดทำ

ธนาวุฒิ ธารารัตนสกุล

นัณฐพงษ์ แช่มช้อย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ความหลากหลายของช่องสัญญาณหรือไดเวอร์ซิตี (diversity) เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถช่วยให้การรับสัญญาณมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น หลักการของไดเวอร์ซิตีอาศัยคุณสมบัติพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สาย (wireless communication system) ซึ่งมักจะมีเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณหลายเส้นทาง โดยทั่วไปแล้วถ้าหากการแพร่กระจายของคลื่นในเส้นทางหนึ่ง ถูกรบกวนอย่างมากจากการจางหาย (fading) ทำให้สัญญาณที่รับมามีกำลังที่อ่อนมาก ก็อาจจะมีคลื่นสัญญาณจากเส้นทางอื่นที่ให้สัญญาณที่รับมามีกำลังสูง ดังนั้นถ้าหากเราทำการติดตั้งจุดรับสัญญาณ มากกว่าหนึ่งแห่งก็จะสามารถรับสัญญาณได้จากหลายเส้นทาง จากนั้นระบบก็สามารถที่จะทำการเลือกเฉพาะสัญญาณที่มีกำลังสูงมาใช้ได้ วิธีการนี้จะสามารถช่วยทำให้ค่า อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio) ของสัญญาณที่ภาครับมีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยไดเวอร์ซิตีทางตำแหน่ง (space diversity) หรือไดเวอร์ซิตีทางสายอากาศ (antenna diversity) ซึ่งเป็นไดเวอร์ซิตีที่นิยมใช้และให้ประโยชน์ในการแก้ไขปัญหาผลกระทบจากการจางหายของสัญญาณ

การรวมสัญญาณเข้าด้วยกันซึ่งจะมีอยู่ 3 วิธีหลักคือ วิธีการรวมสัญญาณแบบเลือก (selection combining), วิธีการรวมสัญญาณแบบปรับค่า อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ให้สูงสุด (maximal ratio combining) และวิธีการรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากัน (equal gain combining) เมื่อเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพของการรับส่งสัญญาณทั้ง 3 วิธีในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติแล้ว วิธีการรวมสัญญาณแบบปรับ ค่าอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ให้สูงสุดนั้นให้ผลดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้วมีความซับซ้อนและยุ่งยากของฮาร์ดแวร์เมื่อเทียบกับ วิธีการรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากันที่ง่ายกว่าและให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันซึ่งค่า อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนน้อยกว่าประมาณ 1-2 dB ซึ่งเป็นเหตุผลให้ในโครงงานนี้เราเลือกใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตีทางสายอากาศแบบวิธีรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากันเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการรับสัญญาณ การวางตัวของสายอากาศตั้งแต่สองต้นขึ้นไปบนพื้นที่จำกัดนั้น แต่ละตำแหน่งที่วางตัวของสายอากาศจะส่งผลกระทบต่อความเป็นอิสระกัน (correlation) ของสัญญาณ การหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางตัวของสายอากาศแต่ละต้นย่อมมีผลต่อการเพิ่ม

ประสิทธิภาพในการรับสัญญาณ ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่ได้มีการศึกษาส่วนที่กล่าวมา รวมถึงผลจากการวัดสัญญาณภายใต้สิ่งแวดล้อมจริงเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีอีกด้วย

ในโครงงานนี้จึงได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการรับสัญญาณจากเทคนิคไดเวอร์ซิตีทางสายอากาศด้วยวิธีรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากัน โดยการวิเคราะห์สัญญาณแบบเฟสไม่ร่วม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานและทฤษฎีพื้นฐานของเทคนิคไดเวอร์ซิตี้ทางสายอากาศด้วยวิธีรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากัน

1.2.2 เพื่อทำการทดสอบวัดผลภายใต้สภาพแวดล้อมจริงโดยเปรียบเทียบผลการวางสายอากาศในแต่ละแบบมีผลต่อการรับสัญญาณ

1.3 ขอบเขตการทำงาน

1.3.1 ศึกษาหลักการและทฤษฎีของไดเวอร์ซิตีทางสายอากาศด้วยการรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขายให้เท่ากันแบบเฟสไม่ร่วม

1.3.2 ศึกษาการวางสายอากาศบนพื้นที่จำกัดเมื่อมีผลกระทบของการจางหายมาเกี่ยวข้องด้วยด้วยการจำลองแบบ

1.3.3 วัดสัญญาณภายใต้สภาพแวดล้อมจริงของการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางตัวของสายอากาศบนพื้นที่จำกัดในแต่ละตำแหน่ง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของไดเวอร์ซิตีทางสายอากาศด้วยวิธีการรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากันแบบเฟสไม่ร่วม

1.4.2 ศึกษาการวางสายอากาศบนพื้นที่จำกัดเมื่อมีปัจจัยของการจางหายเกี่ยวข้อง

1.4.3 วัดสัญญาณภายใต้สภาพแวดล้อมจริงของการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางตัวของสายอากาศบนพื้นที่จำกัดในแต่ละตำแหน่ง

1.4.4 ทำการวิเคราะห์และสรุปผลที่ได้ในการวัดสัญญาณภายใต้สภาพแวดล้อมจริง

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ระบบสื่อสารไร้สาย เป็นรูปแบบหนึ่งในหลายๆวิธีของระบบสื่อสาร ที่ใช้สำหรับส่งข้อมูลข่าวสารแบบอนาล็อกหรือดิจิตอล จากภาคส่งไปยังภาครับ ผ่านช่องสัญญาณสื่อสารแบบไร้สาย ตัวอย่างเช่น การส่งข้อมูลโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม (satellite system) และ ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ (mobile system) เป็นต้น แต่เนื่องจากคุณลักษณะของช่องสัญญาณไร้สายที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามองค์ประกอบต่างๆ อย่างเช่น สิ่งแวดล้อมทางกายภาพ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ภาครับหรือส่ง รวมถึง อุณหภูมิ เป็นต้น เป็นผลให้สัญญาณข้อมูลที่ถูกตรวจจับได้ ณ ภาครับ มีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไปจากเดิม ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยี และวิธีการต่าง ๆ ขึ้นมา เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวนี้

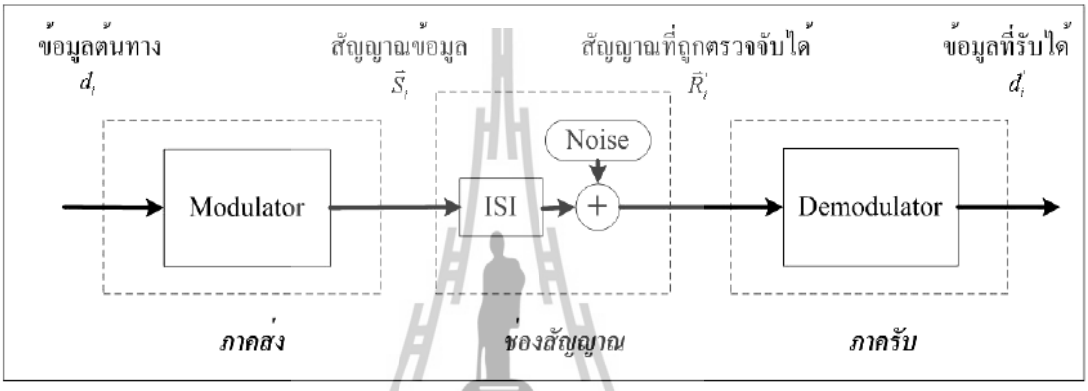
สำหรับในบทนี้ จะกล่าวถึง หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย ความหลากหลายของช่องสัญญาณ (diversity) ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้า หลายทางออก การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ -เวลา ช่องสัญญาณและการจางหาย (fading) เทคนิคการรวมสัญญาณแบบต่างๆ และความหมายของค่าต่าง ๆ ทั้งนี้เพื่อให้เข้าใจถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในการรับและส่งข้อมูลข่าวสารผ่านช่องสัญญาณไร้สาย และเหตุผลจำเป็นที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเอาหลักการของการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ -เวลา และวิธีการของการสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือมาใช้ ก็เพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้น ดังกล่าวข้างต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.2 หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย

ในการออกแบบและใช้งานระบบสื่อสารไร้สายเพื่อรับ /ส่งข้อมูลดิจิตอลนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบสื่อสาร เช่น ขนาดแบนด์วิดท์ ของช่องสัญญาณที่ใช้งาน อัตราเร็วในการส่งข้อมูล และ กำลังส่ง เป็นต้น โดยจะต้องมีการออกแบบให้เหมาะสม เพื่อให้สามารถใช้งานระบบสื่อสารนั้นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่เป็นการรบกวนช่องสัญญาณอื่นๆ ดังนั้นข้อมูลดิจิตอล d_i ต้องผ่านกระบวนการมอดูเลต ก่อนถูกส่งผ่านระบบสื่อสาร เพื่อแปลงข้อมูลให้กลายเป็นสัญญาณข้อมูล S_i ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการส่งผ่านช่องสัญญาณ และเมื่อสัญญาณข้อมูล R_i ถูกตรวจจับได้ที่ภาครับก็จะถูกนำมาผ่านกระบวนการดีมอดูเลต เพื่อแปลงสัญญาณข้อมูลให้กลายเป็นข้อมูลดิจิตอล d_i เพื่อนำไปใช้งานต่อไป โดยจะพบว่าข้อมูลดิจิตอลที่ได้จากทำงานของภาครับนั้นอาจมีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไป เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่

ถูกส่งออกไปจากภาคส่ง ซึ่งเกิดมาจากผลขององค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบสื่อสาร สำหรับองค์ประกอบหลักที่ส่งผลให้ข้อมูลที่ถูกส่งผ่านมาเกิดความผิดพลาดขึ้นนั้น เกิดมาจากการถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวน (noise) และเกิดจากลักษณะในการส่งข้อมูลที่สัญญาณข้อมูล S_i สามารถเดินทางไปถึงภาครับได้จากหลายวิถีด้วยกัน (multi-path) โดยที่ในแต่ละเส้นทางนั้น อาจจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณในลักษณะของการทับซ้อนระหว่างสัญลักษณ์ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณไร้สาย

2.3 ความหลากหลายของช่องสัญญาณ

ความหลากหลายของช่องสัญญาณ หรือไดเวอร์ซิตี้ (diversity) เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถช่วยให้การรับส่งสัญญาณมีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องมีการเพิ่มบิตรหัส (code bits) รวมเข้ากับบิตข้อมูล (data bits) อย่างที่ต้องใช้ในการเข้ารหัสช่องสัญญาณ (channel codes) และยังไม่ต้องมีการส่งสัญญาณ ที่เรียกว่า training sequence สำหรับใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์การคูณของวงจรอีควอไลเซอร์ ซึ่งหมายถึงว่า ไม่มีการแบ่งเอาแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของการรับ /ส่งสัญญาณเลย นอกจากนี้ สวนของอุปกรณ์ที่ต้องเพิ่มเข้ามา สำหรับการทำไดเวอร์ซิตี้ ก็มีราคาที่ไม่แพงจนเกินไป ดังนั้นเทคนิคไดเวอร์ซิตี้จึงมีประโยชน์อย่างมากในทางปฏิบัติ

หลักการของไดเวอร์ซิตี้ คือ การอาศัยคุณสมบัติพื้นฐาน ของการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สาย ซึ่งมักจะมีเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณหลายเส้นทาง และโดยทั่วไปแล้ว ถ้าหากการแพร่กระจายของคลื่นในเส้นทางหนึ่ง ถูกรบกวนอย่างมากจากการจางหายทำให้สัญญาณที่รับมามีกำลังที่อ่อนมาก ก็อาจจะมีคลื่นสัญญาณจากเส้นทางอื่น ที่ให้สัญญาณที่รับมามีกำลังสูง ดังนั้นถ้าหากเราทำการติดตั้งจุดรับสัญญาณ มากกว่าหนึ่งแห่งก็จะสามารถรับสัญญาณได้

จากหลายเส้นทาง จากนั้นระบบก็สามารถที่จะทำการเลือกเฉพาะสัญญาณที่มีกำลังสูงมาใช้ได้ ซึ่งวิธีการนี้สามารถช่วยทำให้ค่า SNR ของสัญญาณที่ภาครับมีคุณภาพที่ดีขึ้นได้ถึง 20-30 dB สังเกตว่าคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ดีขึ้น โดยที่ทางภาครับสัญญาณมิได้มีส่วนเกี่ยวข้องด้วยเลย ซึ่งวิธีการไดเวอร์ซิตี้ชนิดที่นิยมใช้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะดังนี้ คือ

2.3.1 ไดเวอร์ซิตี้ทางเวลา

ไดเวอร์ซิตี้ทางเวลา (time diversity) คือ การส่งสัญญาณข้อมูลเดิมซ้ำ มากกว่าหนึ่งครั้ง ที่เวลาแตกต่างกัน โดยการส่งแต่ละครั้งจะต้องเว้นช่วงเวลาให้ห่างกันมากพอ คือ ต้องมากกว่าช่วง coherence time ของช่องสัญญาณ ผลที่ได้คือ ภาครับจะไดรับสัญญาณข้อมูลซ้ำหลายครั้ง โดยสัญญาณข้อมูลที่รับได้ในแต่ละครั้งนี้ จะได้รับผลกระทบจากการจางหายในช่องสัญญาณด้วยลักษณะที่แตกต่างกัน ค่าของ coherence time ขึ้นอยู่กับค่า doppler spread ของคลื่นสัญญาณ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่และความถี่ของคลื่นพาห์ ตัวอย่างเบื้องต้น ของการใช้งานเทคนิคไดเวอร์ซิตี้ทางเวลา คือ วงจร RAKE receiver ในระบบ CDMA

2.3.2 ไดเวอร์ซิตี้ทางความถี่

ไดเวอร์ซิตี้ชนิดนี้ จะใช้ความถี่ถึงสองช่องสัญญาณ ระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับข้อมูลจะถูกส่งโดยเครื่องส่งสองตัว ที่ทำงานที่ความถี่แตกต่างกัน ซึ่งสัญญาณทั้งสองจะถูกรวมกันไปสู่ท่อนำคลื่นและสายอากาศตามลำดับ โดยสัญญาณจะถูกส่งออกไปในสายอากาศเดียวกัน (แต่อาจมีโพลาไรเซชั่นต่างกัน) ที่ด้านรับสายอากาศจะรับสัญญาณและผ่านท่อนำคลื่นไปยังตัวกรองความถี่แยกความถี่ทั้งสองออกมา เครื่องรับแต่ละตัวก็จะแยกสัญญาณข้อมูลออกมา ด้วยวิธีการดังกล่าวก็จะทำให้สามารถลดผลกระทบจากการจางหายได้ ถ้าหากการแยกกันของความถี่ของเครื่องส่งสัญญาณมีมาก การจางหายซึ่งเกิดเฉพาะที่ความถี่หนึ่งๆ จะมีโอกาสน้อยมากๆที่จะเกิดกับสัญญาณทั้งสองความถี่พร้อมๆกัน จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบ สำหรับความถี่ที่ห่างกันประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ถือว่าเพียงพอ และถ้ายิ่งห่างกัน 5 เปอร์เซ็นต์ ก็จะดีมากที่สุด ข้อเสีย ของไดเวอร์ซิตี้ทางความถี่คือ จะต้องใช้แถบความถี่มากกว่าปกติ จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับพื้นที่ในเมืองใหญ่จำนวนช่องสัญญาณก็มีจำกัด การเพิ่มประสิทธิภาพของไดเวอร์ซิตี้ทางความถี่ถือว่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับไดเวอร์ซิตี้แบบสเปซ จากการคำนวณพบว่าเพิ่มขึ้นเพียง 10 เท่า เท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีไดเวอร์ซิตี

2.3.3 ไดเวอร์ซิตี้ทางสเปซ หรือ ไดเวอร์ซิตี้ทางสายอากาศ

ไดเวอร์ซิตี้ชนิดนี้ เครื่องรับจะรับสัญญาณจากสายอากาศ ตั้งแต่สองต้นขึ้นไป ซึ่งติดตั้งอยู่ห่างกัน เป็นระยะหลายเท่าของความยาวคลื่น โดยสัญญาณที่ได้รับจากแต่ละสายอากาศจะถูกต่อเข้ากับตัวไดเวอร์ซิตี้คอมไบเนอร์ (diversity combiner) ซึ่งหน้าที่ของตัวคอมไบเนอร์ก็คือ จะทำการ

เลือกสัญญาณที่ดีที่สุดหรือทำการรวมสัญญาณเข้าด้วยกัน ซึ่งก็แล้วแต่การออกแบบ สัญญาณจากด้านส่งจะเดินทางเป็นเส้นตรงสองเส้นทางไปยังสายอากาศทางด้านรับทั้งสองต้น และสัญญาณจากเครื่องส่งอาจจะเดินทางไปในอีกหลายเส้นทางที่แตกต่างกัน และเส้นทางที่สัญญาณเกิดมีความต่างเฟสกับสัญญาณทางตรง ก็จะทำให้เกิดมัลติพาธเฟดดิงขึ้นที่สายอากาศด้านรับ แต่สายอากาศทั้งสองต้นนั้น จะไม่เกิดมัลติพาธเฟดดิง ที่เหมือนกัน เพราะระยะทางของสายอากาศทั้งสองต้นแตกต่างกัน นั่นคือ แม้ว่าสัญญาณที่เดินทางในระยะทางจากสายอากาศด้านส่งไปยังสายอากาศด้านรับ ข้างใดข้างหนึ่งอาจเกิดการหักล้างทางเฟสกัน แต่ในสายอากาศด้านรับอีกข้างหนึ่งก็จะไม่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าว จากสถิติพบว่า การใช้ไดเวอร์ซิตี้แบบสเปซทำให้คุณภาพของสัญญาณดีขึ้นหลายร้อยเท่า ซึ่งเป็นที่น่าพอใจมาก และสายอากาศมักติดตั้งห่างกันเป็นระยะทาง 200 เท่า ของความยาวคลื่นที่ใช้จากการค้นพบล่าสุด การจัดสายอากาศไดเวอร์ซิตี้ที่ดีที่สุดจะอยู่ในแนวนอนให้สายอากาศอยู่ข้าง ๆ กัน นอกจากนี้ การใช้ไดเวอร์ซิตี้แบบสเปซยังมีประสิทธิภาพดีกว่าฟรีเควนซี่ไดเวอร์ซิตี้ เพราะว่าไดเวอร์ซิตี้แบบสเปซ ใช้ความถี่น้อยกว่า และใช้สำหรับช่องสัญญาณเพียงช่องเดียวก็จะประหยัดกว่าด้วย

ไดเวอร์ซิตี้แบบนี้มีประโยชน์ ที่ใช้ในการแก้ปัญหาผลกระทบจากการจางหาย เราจะใช้เทคนิคการรวมความหลากหลายของสัญญาณจากไดเวอร์ซิตี้คอมไบเนอร์ สำหรับช่องสัญญาณแบบ SIMO ซึ่งจะมีอยู่ 3 วิธีการหลักๆ คือ 1. วิธีการรวมสัญญาณแบบเลือก (selection combining), 2. วิธีการรวมสัญญาณแบบปรับค่า SNR ให้สูงสุด (maximal ratio combining) และ 3. วิธีการรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากัน (equal gain combining) โดยทั้งหมดนี้จะอธิบายอย่างละเอียด ในหัวข้อต่อๆไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

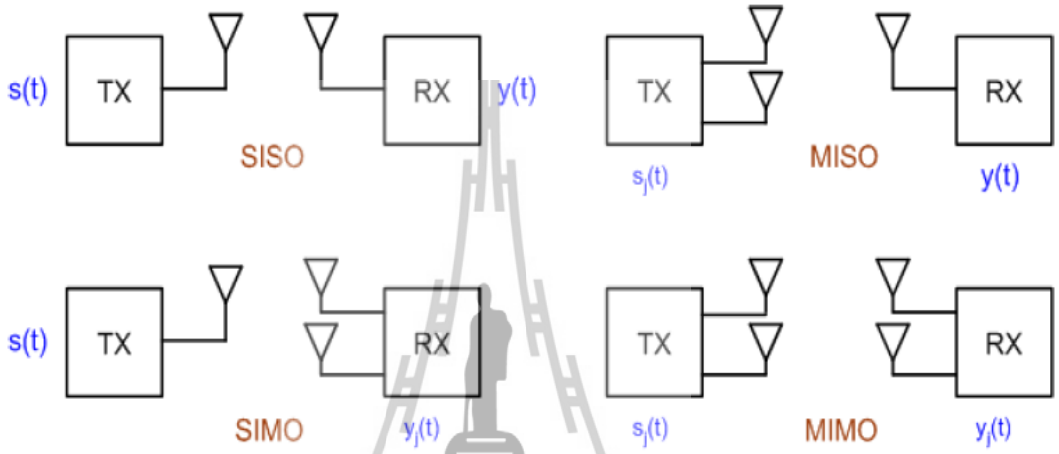
2.4 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบสื่อสารไร้สาย แบบหลายทางเข้า หลายทางออก

ช่วงแรกๆของงานวิจัยในระบบการสื่อสารไร้สาย จะเป็นการส่งผ่านข้อมูลในระบบโดยใช้สายอากาศที่ภาครับและภาคส่งเพียงแค่ต้นเดียว ที่เรียกว่า ระบบหนึ่งทางเข้า หนึ่งทางออก (single-input single-output system: SISO) ต่อมาได้มีการพัฒนางานวิจัยมาศึกษา ระบบการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศ (multiple antennas) ดังแสดงในรูปที่ 2-2 ซึ่งจะพบว่าเมื่อมีการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศนี้ ทำให้ความจุในระบบเพิ่มขึ้น สามารถรับ/ส่งข้อมูลได้มากขึ้น โดยในระบบการสื่อสารไร้สายที่มีการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

1. ระบบหนึ่งทางเข้า หลายทางออก (single-input multiple-output system: SIMO) คือ ระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหนึ่งสายอากาศ และสายอากาศทางภาครับหลายสายอากาศ

2. ระบบหลายทางเข้า หนึ่งทางออก (multiple-input single-output system: MISO) คือ ระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหลายสายอากาศ และสายอากาศทางภาครับหนึ่งสายอากาศ

3. ระบบหลายทางเข้า หลายทางออก (multiple-input multiple-output system: MIMO) คือ ระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหลายสายอากาศ และสายอากาศทางภาครับหลายสายอากาศ เช่นกันดังแสดงในรูปที่2.2



รูปที่ 2.2 การรับส่งข้อมูลแบบสายอากาศเดียว และหลายสายอากาศ

ในระบบทั้ง 3 รูปแบบนี้ ระบบหลายทางเข้า หลายทางออก (MIMO) จะให้สมรรถนะทางด้านความจุช่องสัญญาณสูงที่สุด จึงมีการวิจัยและพัฒนารูปแบบ เพื่อนำมาใช้งานแทนระบบหนึ่งทางเข้า หนึ่งทางออก (SISO) ซึ่งทำให้เกิดการพัฒนาสมรรถนะของระบบ ดังนี้

1. อัตราการขยายแถวลำดับ

การใช้สายอากาศหลายๆเสา จะทำให้อัตราการขยายของสัญญาณที่ออกมาจากสายอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระยะทาง (range) และพื้นที่ครอบคลุม (coverage) ในการส่งสัญญาณเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากในกรณีที่เพิ่มพื้นที่ที่ต้องการส่งสัญญาณให้กว้างขึ้น หรือกรณีที่จำนวนของผู้ใช้งานในพื้นที่นั้นมีอยู่ไม่มาก จะทำให้จำนวนการติดตั้งสถานีฐานลดลง เพราะพื้นที่ที่ครอบคลุมมีมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีข้อดีที่ทำให้กำลังงานส่งจากตัวสถานีเคลื่อนที่ (โทรศัพท์มือถือ) มีค่าลดลง ตามอัตราการขยายของสายอากาศที่สถานีฐานนั้นมีมากขึ้น หรือค่าความไวที่สายอากาศแถวลำดับที่สถานีฐานรับได้มีมากขึ้นนั่นเอง

2. อตราการขยายไดเวอร์ซิตี้

ค่ากำลังของสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนตามการลดทอนที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ เทคนิคไดเวอร์ซิตี้จึงเป็นวิธีที่มีประโยชน์มากในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการจางหายนั้นๆ (หรือที่เรียกว่า fading) ดังนั้นระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออก (MIMO) จึงมีการใช้สายอากาศภาคส่ง M_T เสา และสายอากาศภาครับ M_R เสา ที่มีการจางหาย หรือเฟดดิงเป็นอิสระต่อกัน เมื่อส่งสัญญาณออกไปจะทำให้ภาครับสามารถรวมสัญญาณที่เข้ามาได้ โดยลดปัญหาเรื่องของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังของสัญญาณในระบบออกไปได้มาก เมื่อเทียบกับระบบสื่อสารหนึ่งทางเข้า หนึ่งทางออก (SISO)

3. กำลังขยายของการส่งหลายระยะทาง

ช่องสัญญาณในระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออก จะมีการเพิ่มขึ้นของความจุช่องสัญญาณในระบบเป็นเส้นตรง และมีค่าเท่ากับค่าที่น้อยที่สุดระหว่างจำนวนสายอากาศที่ภาคส่งและภาครับ โดยไม่มีผลต่อค่ากำลังงานหรือการใช้แบนด์วิดท์ ค่ากำลังขยายของการส่งหลายระยะทาง (spatial multiplexing gain) จะส่งผลให้ความจุของช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการส่งแบบหลายระยะทางนั้น ทางภาคส่งจะทำการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระต่อกันออกจากสายอากาศแต่ละเสา ภายใต้เงื่อนไขของช่องสัญญาณที่มีการแพร่กระจายของสัญญาณมากพอ (rich scattering) ทำให้ทางภาครับสามารถแยกสัญญาณต่างๆ ออกจากกันได้

4. การลดการแทรกสอด

การแทรกสอดแบบร่วมภายในช่องสัญญาณ (co-channel interference) เกิดจากการใช้ความถี่ซ้ำ (frequency reuse) เมื่อมีการใช้สายอากาศหลายๆเสา จะเกิดความแตกต่างระหว่างระยะห่างของสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณที่อยู่ในช่องสัญญาณข้างเคียง จึงทำให้สามารถลดการแทรกสอดได้

2.4.1 เทคนิคการส่งสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้า หลายทางออก

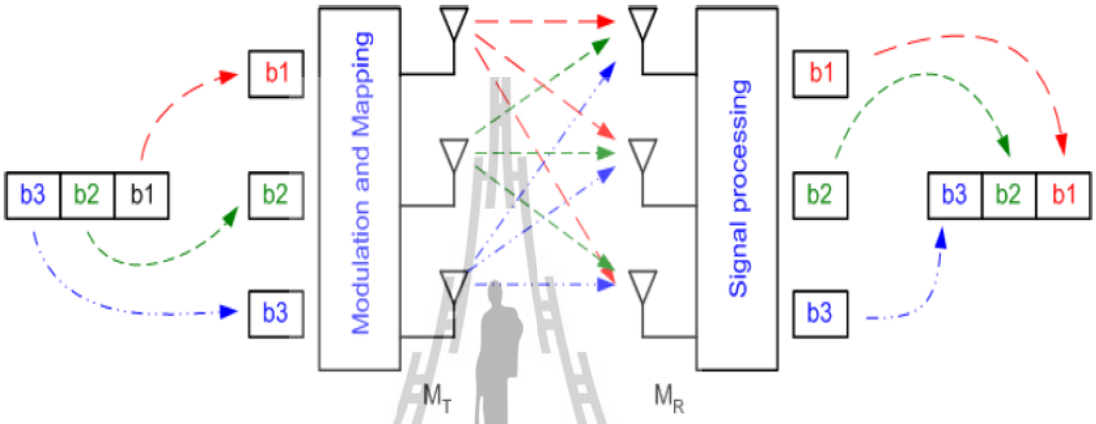
ในระบบการสื่อสารไร้สายที่มีช่องสัญญาณเป็นแบบหลายทางเข้า หลายทางออก จะมีเทคนิคการส่งข้อมูลอยู่หลายเทคนิค แต่ก็สามารถจัดกลุ่มรวมกันตามเทคนิคหลักๆ ได้ 2 กลุ่ม คือ

1. การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา

เทคนิคนี้จะใช้สายอากาศที่เพิ่มเข้ามาในระบบ มาช่วยกันเข้ารหัส เพื่อให้ได้ไดเวอร์ซิตี้ทางปริภูมิ-เวลา ทำให้ข้อมูลที่ส่งมีความน่าเชื่อถือ และมีความทนทานต่อการผิดพลาดมากขึ้น เมื่อช่องสัญญาณที่ส่งผ่านเป็นแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ ซึ่งวิธีการส่งแบบนี้มีข้อดี คือ มีรูปแบบการส่งสัญญาณที่ง่ายและมีความซับซ้อนต่ำ

2. การมัลติเพล็กซ์ทางปริภูมิ

เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้า หลายทางออก ซึ่งเทคนิคการส่งข้อมูลแบบนี้จะให้อัตราการส่งข้อมูลที่สูง โดยขั้นตอนการส่ง จะมีการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระกันทั้งหมด MT ค่า (เท่ากับจำนวนของสายอากาศที่ภาคส่ง) ต่อหนึ่งคาบสัญลักษณ์ คือ ข้อมูลที่ถูกส่งไปในแต่ละสายอากาศจะเป็นข้อมูลที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองการมัลติเพล็กซ์เชิงปริภูมิ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.5 ช่องสัญญาณและการจางหาย

2.5.1 ช่องสัญญาณ

ช่องสัญญาณ หมายถึง ตัวกลางที่ให้สัญญาณผ่าน จากสายอากาศเครื่องส่งไปยังสายอากาศเครื่องรับ ซึ่งมีความเป็นไปได้หลายรูปแบบ ทั้งที่เป็นอากาศ เป็นสายทองแดง หรือใยแก้วนำแสง โดยที่ช่องสัญญาณนั้นจะทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณอินพุตชุดหนึ่ง ให้เป็นสัญญาณเอาต์พุตชุดหนึ่ง และในระบบการสื่อสารไร้สาย คลื่นสัญญาณที่ถูกส่งออกมาทางเครื่องส่ง จะไม่ได้เดินทางมาถึงยังทางเครื่องรับปลายทางเป็นแนวเส้นตรง เพราะจะต้องพบกับสิ่งกีดขวางในสภาพแวดล้อมที่สัญญาณจะต้องเคลื่อนที่ผ่าน โดยที่คลื่นสัญญาณที่มาถึงทางเครื่องรับจะเกิดขึ้นจากการรวมกันของคลื่นหลายวิถีที่มาถึงจากหลายทิศทาง ซึ่งเกิดจากการสะท้อน (reflection) การเลี้ยวเบน (diffraction) และการกระจัดกระจาย (scattering) ผ่านสิ่งกีดขวางต่าง ๆ เช่น สิ่งก่อสร้าง ต้นไม้ ยานพาหนะ โดยจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดพหุวิถี (multi-path) และผลจากการเกิดพหุวิถีนี้ทำให้สัญญาณที่มาถึงทางเครื่องรับนั้น มีผลมาจากสัญญาณมากกว่าหนึ่งทาง ซึ่งในแต่ละทางนั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนที่แตกต่างกันไป ทั้งในเชิงแอมพลิจูด และเฟส สัญญาณที่ได้รับจะ

ประกอบไปด้วยผลจากวิถีต่าง ๆ สัญญาณในแต่ละทางอาจเขียนให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ของแอมพลิจูดและเฟสได้ ถ้าอุปกรณ์ปลายทางกำลังเคลื่อนที่ หรือสภาพแวดล้อมรอบ ๆ มีการเปลี่ยนแปลง ผลกระทบจากช่องสัญญาณอาจเปลี่ยนแปลงอย่างสุ่มไปตามเวลา ดังนั้น ณ ขณะหนึ่ง สัญญาณที่รับได้อาจจะมีการรวมกันแบบหักล้าง และในอีกขณะหนึ่ง อาจจะรวมกันแบบเสริม ซึ่งรูปแบบของการกระจายตัวที่ใช้กันทั่วไป ในการบอกลักษณะของแอมพลิจูดสุ่ม ที่เป็นผลมาจากช่องสัญญาณพหุวิถี จะมีอยู่ด้วยกัน 2 รูปแบบ ได้แก่ การกระจายตัวแบบเรย์ลี (rayleigh) และการกระจายตัวแบบไรเชียน (ricean)

ถ้าในสัญญาณที่ได้รับไม่มีองค์ประกอบตามเส้นแนวสายตา (line-of-sight : LOS) ซึ่งก็คือเมื่อวิถีตรงถูกบดบัง เช่น การแพร่กระจายสัญญาณระยะไกล ในสภาพแวดล้อมกลางแจ้ง (outdoor) สัญญาณที่ได้รับจะประกอบไปด้วย องค์ประกอบที่กระจัดกระจาย (scattered) อันเนื่องมาจากการสะท้อนที่ไม่มีวิถีหลัก ซึ่งสามารถแยกออกเป็นองค์ประกอบร่วมเฟส (in-phase) และองค์ประกอบตั้งฉาก (quadrature) ซึ่งวิถีแต่ละวิถีมีผลต่อทั้งสองส่วนนี้ด้วย จากทฤษฎีขีดจำกัดกลาง (central limit theorem) เมื่อวิถีมีจำนวนมาก จะทำให้สามารถอนุมานได้ว่าองค์ประกอบร่วมเฟส และองค์ประกอบตั้งฉากเป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ดังนั้นแอมพลิจูดทั้งหมดของสัญญาณที่ได้มาจากการบวกเวกเตอร์ขององค์ประกอบทั้งหมด จึงเป็นไปตามนิยามของการกระจายตัวแบบเรย์ลี นอกจากนี้เฟสก็มีการกระจายตัวแบบ เอกรูปในช่วง $[0, 2\pi]$ การกระจายตัวแบบเรย์ลีของแอมพลิจูดของสัญญาณ ρ มีนิยามดังนี้

$$f_\rho(\rho) = \frac{\rho}{\sigma^2} e^{-\left(\frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right)} \tag{2-1}$$

โดยที่ σ^2 คือ แวเรียนซ์ขององค์ประกอบร่วมเฟส และองค์ประกอบตั้งฉาก ซึ่งปริมาณทางสถิติสองค่าที่เกี่ยวข้องในที่นี้คือ ค่าเฉลี่ยและโมเมนต์ที่สองของตัวแปรสุ่มแบบเรย์ลี ซึ่งมีค่าเป็น

$$E\{\rho\} = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma \tag{2-2}$$

$$E\{\rho^2\} = 2\sigma^2 \tag{2-3}$$

ถ้ามีองค์ประกอบ LOS แนวตรงดังในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร (indoor) สัญญาณที่ได้รับจะมีองค์ประกอบตาม LOS หลัก และองค์ประกอบกระเจิงอันเนื่องมาจากการสะท้อน เมื่อกำหนดให้องค์ประกอบ LOS อยู่ในแนวร่วมเฟส โดยแอมพลิจูดของสัญญาณที่ได้รับ ρ จะมีการกระจายตัวแบบไรเชียนดังนี้

$$f_\rho(\rho) = \frac{\rho}{\sigma^2} e^{-\left(\frac{\rho^2+a_0^2}{2\sigma^2}\right)} I_0\left(\frac{a_0\rho}{\sigma^2}\right) \quad (2\text{-}4)$$

โดยที่ σ^2 แทนกำลังขององค์ประกอบร่วมเฟส และองค์ประกอบตั้งฉากกระเจิง คือ แอมพลิจูดขององค์ประกอบ LOS และ $I_0(\rho)$เป็นฟังก์ชันเบสเซลดัดแปลงอันดับศูนย์ (zero order modified bessel function) การกระจายตัวแบบไรเชียนนี้มักจะใช้ตัวประกอบ K ของไรเชียนเป็นตัวกำหนดลักษณะ ดังนี้

$$K = \frac{a_0^2}{2\sigma^2} \quad (2\text{-}5)$$

จากการวัดในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารต่าง ๆ พบว่าโดยทั่วไปค่าของ K จะมีค่าเป็น 10 ปริมาณทางสถิติที่เกี่ยวข้องในที่นี้คือ ค่าเฉลี่ยของการกระจายตัวแบบไรเชียนซึ่งมีค่าเป็น

$$E\{\rho\} = e^{-K/2}\sqrt{\frac{\pi}{2(K+1)}}P\left[(1+K)I_0\left(\frac{K}{2}\right) + KI_1\left(\frac{K}{2}\right)\right] \quad (2\text{-}6)$$

โดยที่ $I_1(K)$ แทนฟังก์ชันเบสเซลดัดแปลงอันดับหนึ่ง (first order modified bessel function)

2.5.2 ดอปเพลอร์

นอกจากการเกิดพหุวิถีขึ้นแล้ว การเกิดปรากฏการณ์ดอปเพลอร์นั้น ก็จะส่งผลกระทบต่อการสื่อสารของระบบสื่อสารไร้สายด้วย เนื่องจากผลที่ผู้ใช้งานมีการเคลื่อนที่จึงทำให้คลื่นสัญญาณที่มาถึงนั้นมีความถี่ที่เปลี่ยนไป โดยมุมของสัญญาณที่มาถึง (angle of arrival α_n) ที่ถูกนิยามให้เป็น

มุมระหว่างคลื่นสัญญาณที่มาถึงวิถีที่ *n* และทิศทางเคลื่อนที่ของผู้ใช้งาน ดังแสดงในภาพที่ 2-4 และค่าความถี่ ดอปเพลอร์ของคลื่นสัญญาณวิถีที่ *n* จะมีค่าดังนี้

$$f_n = f_{max}\, cos\alpha_n \tag{2-7}$$

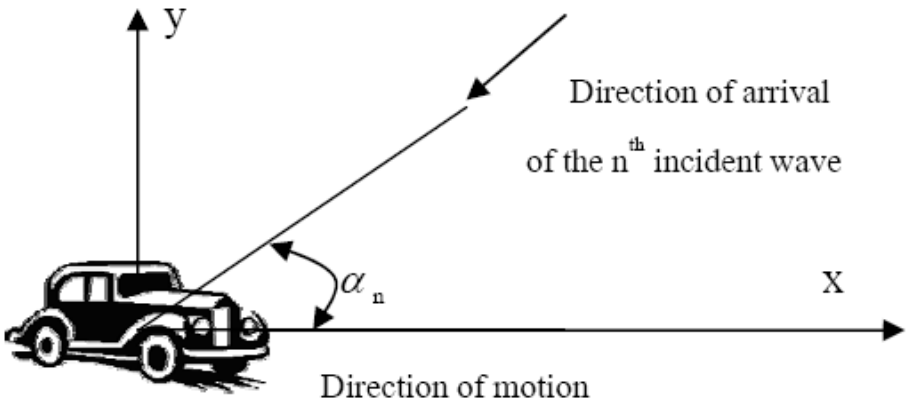
โดยที่ f_{max} คือ ค่าความถี่ดอปเพลอร์สูงสุด ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเร็วของผู้ใช้งาน (v) และค่าความถี่กลางที่ใช้ในการส่งข้อมูลดังสมการที่ (2-7)

$$f_{max} = \frac{v}{c_0} f_0 \tag{2-8}$$

เมื่อ f_0 คือ ความถี่คลื่นสัญญาณพาห์

c_0 คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที

เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ ดอปเพลอร์นี้เอง จะทำให้สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณที่ถูกส่งนั้นกระจายออกระหว่างการส่งข้อมูล เมื่อพิจารณาเชิงเวลาผลของปรากฏการณ์ ดอปเพลอร์นี้จะทำให้ผลตอบสนองอิมพัลส์ (impulse response) ของช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงทางเวลา ดังรูปที่2.4



ภาพที่ 2.4 แสดงมุมของคลื่นสัญญาณที่มาถึงของปรากฏการณ์ดอปเพลอร์

2.5.3 การจางหายหรือเฟดดิง

ในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ คุณลักษณะของช่องสัญญาณไม่อยู่ในสภาพคงที่ (stationary) และสามารถคาดเดาได้เหมือนช่องสัญญาณในระบบสื่อสารที่เชื่อมต่อด้วยสาย (wired channel) แต่ช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเชิงสุ่ม (random) และเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ทั้งนี้เนื่องจากการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณไร้สายระหว่างโทรศัพท์เคลื่อนที่กับสถานีฐาน เกิดขึ้นสูงจากพื้นดินไม่มากนัก ดังนั้นสัญญาณที่ส่งอาจเกิดการสะท้อนกับสิ่งกีดขวาง ที่อยู่ในบริเวณนั้น เช่น อาคาร ต้นไม้ หรือ พื้นดิน ส่งผลให้สัญญาณที่ปลายทางได้รับ ประกอบไปด้วยสัญญาณสะท้อนจากหลากหลายเส้นทาง ซึ่งมีขนาดและเฟสที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ การเคลื่อนที่ของสถานีส่งขณะที่มีการส่งสัญญาณ หรือการที่สภาพแวดล้อมที่อยู่ระหว่างภาคส่งและภาครับมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา อย่างเช่น การเคลื่อนที่ของรถยนต์ที่อยู่บริเวณรอบๆเครื่องส่ง ก็มีผลต่อสัญญาณที่ปลายทางจะได้รับด้วยเช่นกัน ปัจจัยต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น ส่งผลให้สัญญาณที่ปลายทางได้รับ มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างรวดเร็ว ทั้งในแง่ของขนาดแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การจางหายของสัญญาณ (small-scaled fading) หรือ เฟดดิง (fading) ทั้งนี้ในกรณีที่ช่องสัญญาณไร้สายมีสัญญาณสะท้อนจากทิศทางต่างๆจำนวนมาก แต่ไม่มีสัญญาณที่มาจากเส้นทางตรง (line of sight :LOS) ระหว่างภาคส่งกับภาครับ จะเรียกการจางหายที่เกิดขึ้นนี้ว่า เรย์ลีเฟดดิง (Rayleigh fading) ทั้งนี้เนื่องจากสภาพของเอนเวโลป (envelop) ของสัญญาณที่ได้รับมีการกระจายตัวทางสถิติเป็นแบบเรย์ลี ซึ่งในตอนต่อไปจะกล่าวถึง ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดการจางหาย และรูปแบบของการจางหาย

2.5.4 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดการจางหาย

ปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดการจางหายมีอยู่ 2 ประการ คือ

2.5.4.1. การแผ่แบบประวิงเวลา (delay spread)

เนื่องจากสัญญาณที่ถูกส่งมาจากต้นทาง เมื่อไปกระทบกับสิ่งกีดขวางที่อยู่ระหว่างภาคส่งกับภาครับ ก็จะเกิดการสะท้อนและหักเห ทำให้สัญญาณที่ปลายทางได้รับประกอบด้วยสัญญาณสะท้อนจากหลายเส้นทาง ซึ่งมาถึงยังปลายทางในเวลาที่แตกต่างกัน ดังนั้นสัญญาณรวมที่ปลายทาง จึงเป็นสัญญาณที่มีการประวิงเวลาไป หรืออาจเรียกได้ว่า สัญญาณเกิดการแผ่ทางเวลา (time spread) ผลของการประวิงเวลานั้นทำให้การเดินทางไปยังปลายทางของสัญญาณ ใช้เวลานานกว่าปกติ ก่อให้เกิดการรบกวนกันของสัญญาณในแต่ละสัญลักษณ์ หรือการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ ทั้งนี้การประวิงเวลาของสัญญาณจะเกิดขึ้นมากหรือน้อย ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของช่องสัญญาณ

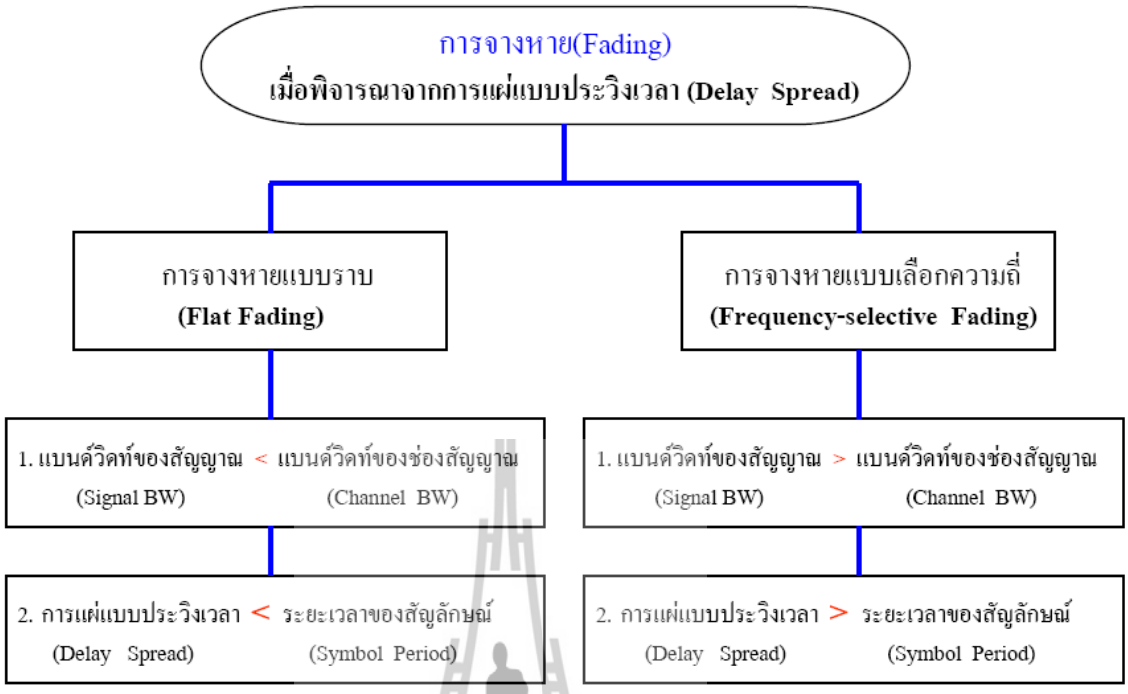
2.5.4.2. การแผ่แบบดอปเพลอร์ (doppler spread)

การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างสถานีเคลื่อนที่กับสถานีฐาน ส่งผลให้สัญญาณที่เดินทางมาในแต่ละเส้นทางเกิดการเลื่อนทางความถี่ เรียกว่า การเลื่อนความถี่แบบดอปเพลอร์ (doppler shift) ซึ่งความถี่ที่เลื่อนไปจะมีค่าเป็นบวกหรือลบมากน้อยเพียงใด ก็ขึ้นอยู่กับทิศทางและความเร็วในการเคลื่อนที่ของสถานีโมบายล์ด้วย นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของวัตถุที่อยู่บริเวณรอบๆสถานีโมบายล์ก็ยังส่งผลให้เกิดการเลื่อนความถี่แบบดอปเพลอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเหมือนกัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า การแผ่แบบดอปเพลอร์นี้ ทำให้ช่องสัญญาณมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (time-varying channel) และอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นก็ส่งผลโดยตรงต่อความเร็วของการเกิดการจางหายด้วย

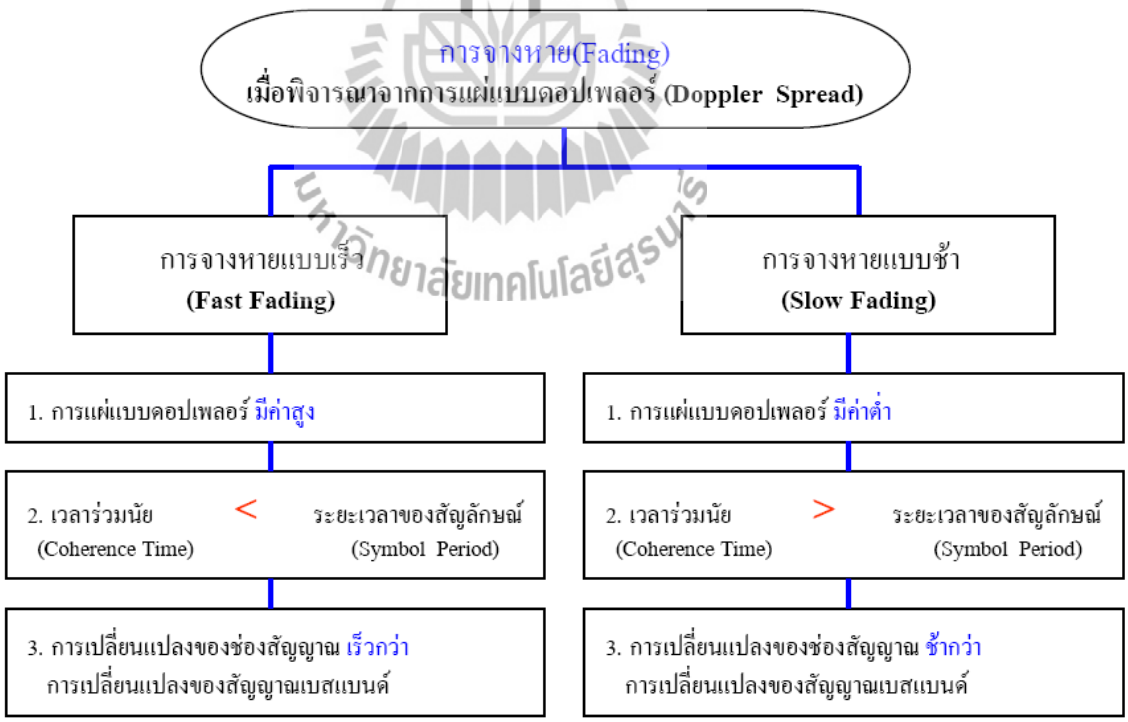
2.5.5 รูปแบบของการจางหาย

การจางหายที่เกิดขึ้นในการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณไร้สายนั้น มีอยู่หลายประเภท การที่จะพิจารณาว่าเป็นการจางหายแบบใด จะพิจารณาจากลักษณะของสัญญาณที่ส่งเปรียบเทียบกับคุณลักษณะของช่องสัญญาณ (channel characteristic) เป็นหลัก พารามิเตอร์ของสัญญาณที่ใช้พิจารณาได้แก่ แบนด์วิดท์ (bandwidth) , ช่วงเวลาของสัญลักษณ์ (symbol period) หรือ อัตราการส่งสัญญาณ (transmission rate) ส่วนปัจจัยของช่องสัญญาณที่ส่งผลต่อลักษณะของการจางหาย ได้แก่ การแผ่แบบประวิงเวลา (delay spread) และการแผ่แบบดอปเพลอร์ (doppler spread) เมื่อทำการพิจารณลักษณะของการจางหายจากการแผ่แบบประวิงเวลา จะได้การจางหาย 2 รูปแบบ คือ การจางหายแบบแนวราบ (flat fading) และการจางหายแบบเลือกความถี่ (frequency-selective fading) ในขณะที่ การแผ่แบบดอปเพลอร์ จะส่งผลกระทบต่อการจางหายอีก 2 รูปแบบ คือ การจางหายแบบเร็ว (fast fading) และการจางหายแบบช้า (slow fading)

ซึ่งการพิจารณารูปแบบของการจางหายจากการแผ่แบบประวิงเวลา และการแผ่แบบดอปเพลอร์ดังกล่าว เกิดขึ้นอย่างเป็นอิสระต่อกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5



(ก) เมื่อพิจารณาจากการแผ่แบบประวิงเวลา



(ข) เมื่อพิจารณาจากการแผ่แบบดอปเพลอร์

รูปที่ 2.5 แสดงรูปแบบของการจางหาย (ก) เมื่อพิจารณาจากการแผ่แบบประวิงเวลา และ (ข) เมื่อพิจารณาการแผ่แบบดอปเพลอร์

2.5.5.1.รูปแบบของการจางหายเมื่อพิจารณาจากการแผ่แบบประวิงเวลา

การแผ่แบบประวิงเวลา อันเนื่องมาจากคลื่นหลายวิถีทาง (multi-path) ทำให้เกิดการจางหาย อยู่ 2 รูปแบบ คือ การจางหายแบบราบ และการจางหายแบบเลือกความถี่

ก) การจางหายแบบราบ

ถ้าช่องสัญญาณมีผลตอบสนองอัตราขยายคงที่ และมีผลตอบสนองเฟสที่เป็นเชิงเส้นในช่วงแบนด์วิดท์ที่กว้างกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณแล้ว จะทำให้การจางหายที่เกิดขึ้นเป็นแบบราบ กล่าวคือ สัญญาณที่ปลายทางได้รับ จะมีคุณลักษณะเชิงสเปกตรัม (spectrum characteristic) เหมือนเดิม แต่ค่ากำลังของสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เนื่องจากผลของคลื่นหลายวิถีทางที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ ดังนั้นช่องสัญญาณที่เกิดการจางหายแบบราบนี้ จึงสามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งได้ว่า ช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงทางแอมพลิจูด (amplitude varying channel) การแจกแจงของแอมพลิจูดที่มักพบโดยทั่วไปจะเป็นการแจกแจงแบบเรย์ลีย์ (rayleigh distribution)

ข) การจางหายแบบเลือกความถี่

ถ้าช่องสัญญาณมีผลตอบสนองอัตราขยายคงที่ และมีผลตอบสนองเฟสที่เป็นเชิงเส้นในช่วงแบนด์วิดท์ที่แคบกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณแล้ว การจางหายที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบเลือกความถี่ กล่าวคือ สเปกตรัมของสัญญาณจะได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณไม่เท่ากันทั้งหมด โดยส่วนประกอบสเปกตรัมที่อยู่นอกช่วงแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณ จะได้รับผลกระทบที่แตกต่างออกไป ซึ่งช่วงพิสัยของความถี่ที่ช่องสัญญาณ ส่งผลกระทบต่อส่วนประกอบของสเปกตรัมโดยเท่าเทียมกันเรียกว่า แบนด์วิดท์ร่วมนัย (coherent dandwidth) เมื่อช่องสัญญาณเกิดการจางหายแบบเลือกความถี่ ผลตอบสนองช่องสัญญาณจะเกิดการแผ่ออกทางเวลา ซึ่งยาวกว่าช่วงเวลาของสัญลักษณ์ ทำให้สัญญาณที่ได้รับถูกลดทอนขนาด และมีการประวิงทางเวลา ส่งผลให้เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (intersymbol interference) ขึ้น

2.5.5.2. รูปแบบของการจางหายเมื่อพิจารณาจากการแผ่แบบดอปเพลอร์

การเลื่อนความถี่แบบดอปเพลอร์ อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ที่สัมพัทธ์กันระหว่างโคลื่อนที่กับสถานีฐาน ส่งผลต่อความเร็วของการจางหาย ทำให้เกิดการจางหายขึ้นมา 2 รูปแบบ คือ การจางหายแบบเร็ว และการจางหายแบบช้า

ก) การจางหายแบบเร็ว

การแผ่แบบดอปเพลอร์ และเวลาร่วมนัย (coherence time) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้บ่งบอกถึงคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของช่องสัญญาณ ซึ่งมีผลมาจากการเคลื่อนที่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ เวลาร่วมนัยนั้นคือ ช่วงเวลาทางสถิติที่ผลตอบสนองต่อช่องสัญญาณมีค่าไม่

เปลี่ยน ทั้งนี้ยังเป็นค่าที่บอกให้ทราบถึง ความคล้ายคลึงกันของผลตอบสนองช่องสัญญาณในช่วงเวลาหนึ่งอีกด้วย กล่าวคือ สัญญาณที่มาถึงภาครับที่เวลาต่างกันแต่ไม่เกินเวลาร่วมนัย จะได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณใกล้เคียงกัน

ในกรณีของการจางหายแบบเร็ว ผลตอบสนองช่วงสัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วภายในช่วงเวลาที่ส่งสัญญาณ ดังนั้นเวลาร่วมนัยของช่องสัญญาณ จะมีค่าน้อยกว่าช่วง เวลาของสัญลักษณ์ และคุณลักษณะของการจางหายจะเปลี่ยนแปลงไปมาหลายครั้งในขณะที่สัญลักษณ์หนึ่งๆถูกส่งไป ส่งผลให้รูปร่างของสัญญาณเบสแบนด์ผิดเพี้ยนไป

ข) การจางหายแบบช้า

การจางหายแบบช้า เกิดขึ้นเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองช่องสัญญาณมีค่าน้อยกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ หรือ เวลาร่วมนัยมีค่ามากกว่าเวลาของสัญลักษณ์ ในกรณีนี้ ช่องสัญญาณจะมีผลตอบสนองคงที่ภายในช่วงเวลาหลายสัญลักษณ์ ทำให้ได้รับผล กระทบจากช่องสัญญาณติดกันเป็นช่วงยาว

2.6 เทคนิคการรวมสัญญาณ

เนื่องจากเครื่องรับในระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ มีการรับสัญญาณชุดเดียวกันจากเครื่องส่งและ Relay ในแต่ละช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการรวมสัญญาณทางด้านเครื่องรับ เพื่อให้ได้สัญญาณรวมที่ดีที่สุดไปใช้งาน พิจารณาระบบสื่อสารไร้สายที่มีการรับสัญญาณที่มาจากช่องสัญญาณที่แตกต่างกันจำนวน N ช่อง สัญญาณทั้งหมดนี้สามารถนำมารวมกันแบบเชิงเส้น (linear combination) เนื่องจากระบบทางการศึกษาเป็นระบบที่มีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้น โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการรวมแต่ละช่องสัญญาณคือ a_j แสดงได้ดังสมการที่ (2-9)

$$f(t) = a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t) + \cdots + a_N f_N(t) = \sum_{j=1}^{N} a_j f_j\ (t) \quad (2\text{-}9)$$

โดยกำหนดให้ $f_j(t) = x_j(t)m(t)+n_j(t)$

และ $x_j(t)$ คือ ช่องสัญญาณที่ใช้สำหรับการส่งข้อมูล

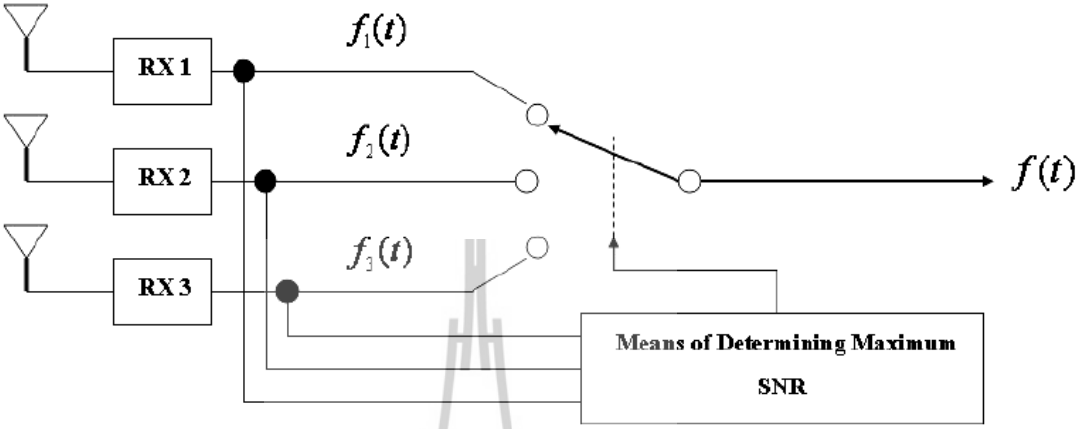
$m(t)$ คือ ข้อมูลที่ต้องการส่ง

a_j คือ ค่าสัมประสิทธิ์การรวมของแต่ละช่องสัญญาณ

$n_j(t)$ คือ สัญญาณรบกวนระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง

ในปี 1958 D.G. Brennan ได้นำเสนอเทคนิคการรวมสัญญาณไว้ทั้งหมด 3 เทคนิค ดังนี้

2.6.1 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือก (selection combining: SC)



รูปที่ 2.6 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือก

สำหรับเทคนิคการรวมสัญญาณแบบเลือกจะทำการรวมสัญญาณ โดยเลือกสัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณที่ดีที่สุดเพียง 1 สัญญาณเท่านั้น ซึ่งจะพิจารณาเลือกสัญญาณที่มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากที่สุดของสัญญาณที่รับมาทั้งหมด และจากสมการที่ (2-9) กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณได้ดังนี้

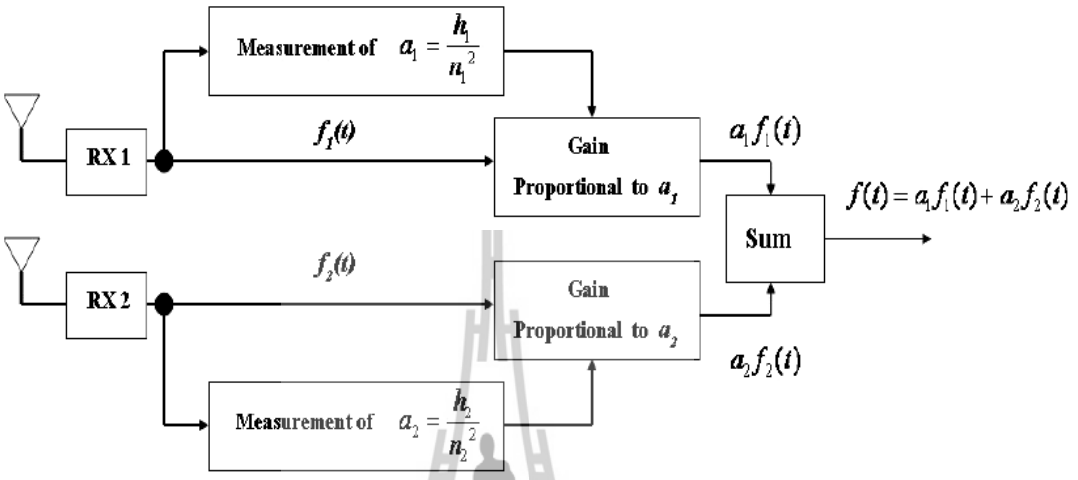
$$a_j(t) = \begin{cases} 1 \ , for \ \ j = k \\ 0 \ , for \ \ j \neq k \end{cases} \qquad (2\text{-}10)$$

เมื่อกำหนดให้ k คือ ดัชนีชี้สำหรับสัญญาณที่มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากที่สุด

2.6.2 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุด (maximal-ratio combining : MRC)

เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณสูงสุดเป็นการรวมสัญญาณโดยการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณ ให้มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด หลังจากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้ทั้งหมดบวกกัน ซึ่งจะส่งผลให้ ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสัญญาณรวมทั้งหมด มีค่าสูงที่สุดและสามารถปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณได้ดังนี้

$$a_j(t) = \frac{x_j}{n_j^2} \tag{2-11}$$



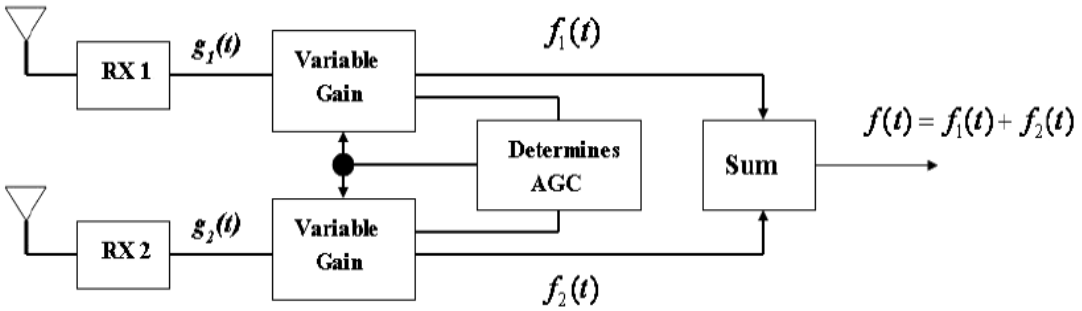
รูปที่ 2.7 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้ค่าอัตราส่วนสัญญาสูงสุด

เทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้ค่าอัตราส่วนสัญญาสูงสุด จะมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเฉลี่ย γ_t เท่ากับ

$$\gamma_t = \sum_{j=1}^{N} \gamma_j \tag{2-12}$$

เมื่อ γ_j คือ ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณ

2.6.3 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (equal gain combining : EGC)



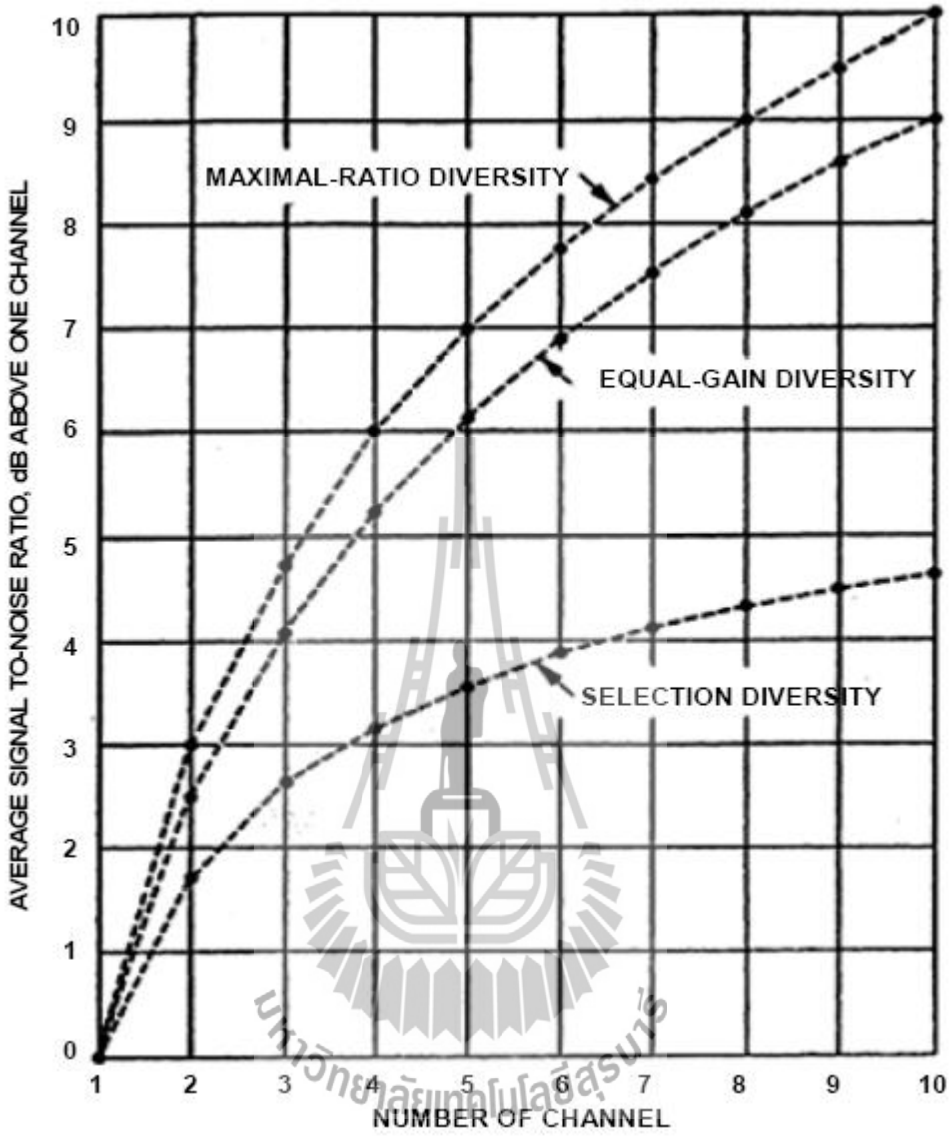
รูปที่ 2.8 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน

เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน จะทำการรวมสัญญาณ โดยการปรับค่าของอัตราการขยาย (gain) ของแต่ละช่องสัญญาณ เพื่อทำให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของทุกช่องสัญญาณเท่ากันหมด จากนั้นนำสัญญาณทั้งหมดรวมกัน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้น ในอัตราส่วนเท่ากับจำนวนของช่องสัญญาณทางด้านเครื่องรับ

เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากันนี้สามารถหาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน γ_t ดังนี้ คือ

$$\gamma_{\mathrm{t}} = \frac{1}{N} \cdot \frac{\left[\sum_{j=1}^{N} x_j\right]^2}{\sum_{j=1}^{N} n_j^2} \qquad (2\text{-}13)$$

จากเทคนิคการรวมสัญญาณทั้ง 3 เทคนิคที่กล่าวถึงดังข้างต้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เทียบกับจำนวนช่องสัญญาณได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเทียบกับจำนวนช่องสัญญาณของเทคนิคการรวมสัญญาณทั้ง 3 เทคนิค

จากการเปรียบเทียบเทคนิคการรวมสัญญาณทั้ง 3 เทคนิค ดังภาพที่ 2-17 สามารถสรุปได้ว่าเทคนิคการรวมสัญญาณแบบทำให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด เป็นเทคนิคที่ทำให้ผลรวมของสัญญาณดีที่สุด เมื่อเทียบกับการรวมสัญญาณแบบเลือกและการรวมสัญญาณแบบให้อัตราขยายเท่ากัน

2.7 กล่าวสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึง หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย ความหลากหลายของช่องสัญญาณ ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออกช่องสัญญาณและการจางหาย และเทคนิคการรวมสัญญาณ ซึ่งจะสามารถนำความรู้เบื้องต้นเหล่านี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ศึกษาผลที่ได้จากทำโครงงานการศึกษาสมรรถนะของการใช้สายอากาศไดเวอร์ซิตีแบบอีจีเฟสที่เฟสไม่ร่วมภายในอาคารต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
ชุดอุปกรณ์ในการวัดสัญญาณ

3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณ ทั้งสายอากาศ ตัวรวมสัญญาณ ตำแหน่งการวางสายอากาศ ตำแหน่งในการวัด รวมทั้งโปรแกรมที่ใช้วัดสัญญาณและโปรแกรมในจำลองแบบซึ่งโปรแกรมที่ใช้ในการวัดสัญญาณคือโปรแกรม WirelessMon ส่วนโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองแบบคือ โปรแกรมMATLAB

3.2 สายอากาศ

สายอากาศที่ใช้วัดสัญญาณ คือ สายอากาศโมโนโพล (monopole) เป็นสายอากาศเส้นลวดตรงที่มีต้นแบบมาจากสายอากาศไดโพล เพียงแต่นำมาใช้เพียงครึ่งหนึ่งของความยาวไดโพลและมีการป้อนสัญญาณเข้าที่กึ่งกลางของไดโพลโดยเทียบกับระนาบกราวด์ ดังนั้นความยาวของโมโนโพลจึงเท่ากับหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นใช้งาน และมีอัตราขยายเท่ากับ 6 dB

3.3 ตัวรวมสัญญาณ

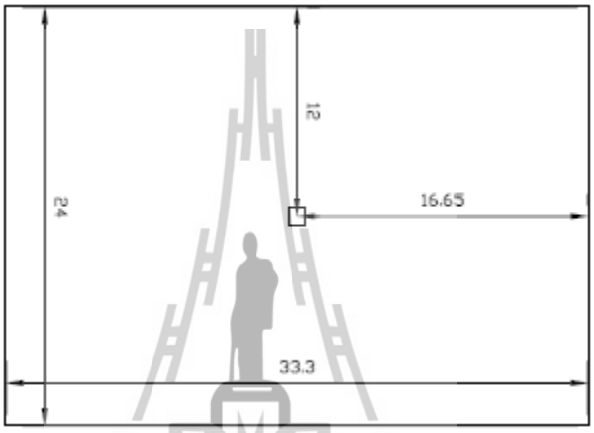
เป็นตัวรวมสัญญาณโดยใช้เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) โดยมีย่านความถี่ที่ใช้งานคือ 2000 ถึง 4200 MHz ค่าการลดทอนของสัญญาณต่ำที่ผ่านจุดต่อ มีค่าเท่ากับ 0.8dB และทำงานได้ดีที่ 23 dB ดังแสดงในรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 แสดงตัวรวมสัญญาณ

3.4 ตำแหน่งของสายอากาศ

ในการวัดสัญญาณเราจะทำการวางสายอากาศออกเป็นหลายๆแบบเพื่อทดสอบ ว่าในการวางสายอากาศในแบบที่แตกต่างกัน จะทำให้ได้ผลที่ต่างกัน โดยในแต่ละแบบจะทำการวัดสัญญาณทั้งหมด 5 ครั้ง ซึ่งในโครงงานนี้เราได้แบ่งการวางสายอากาศและจำนวนสายอากาศดังนี้

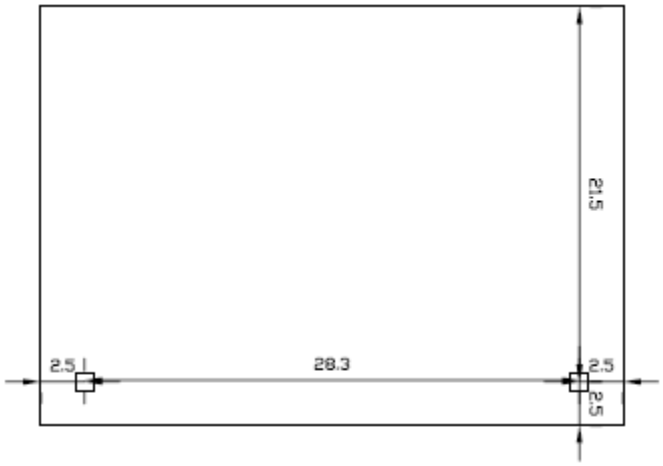
ใช้สายอากาศจำนวน 1 ต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงการวางสายอากาศเมื่อใช้สายอากาศเพียง 1 ต้น โดยจะวางตรงกลางของเครื่องคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

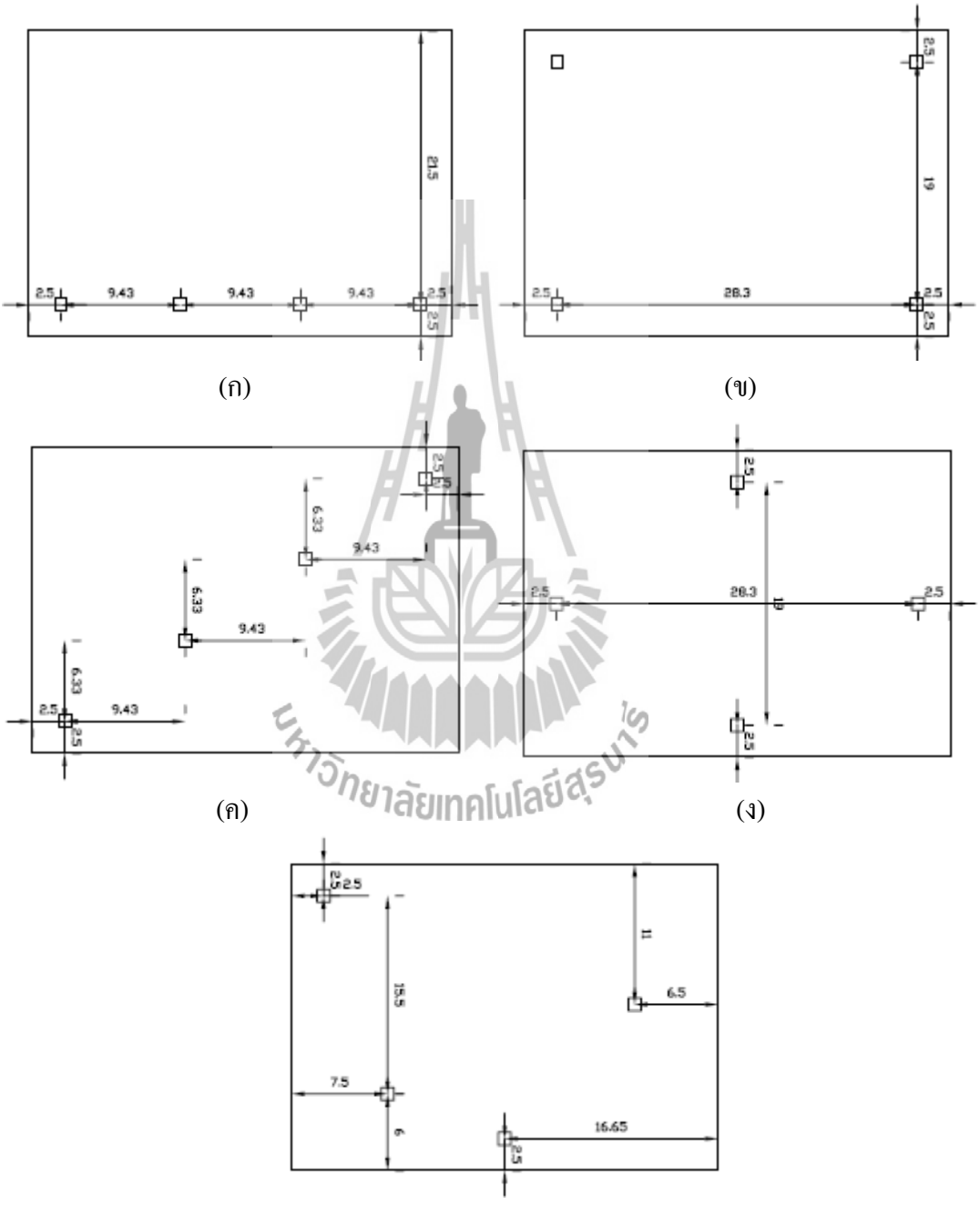
ใช้สายอากาศจำนวน 2 ต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงการวางสายอากาศเมื่อมีสายอากาศ 2 ต้น

ใช้สายอากาศจำนวน 4 ต้น

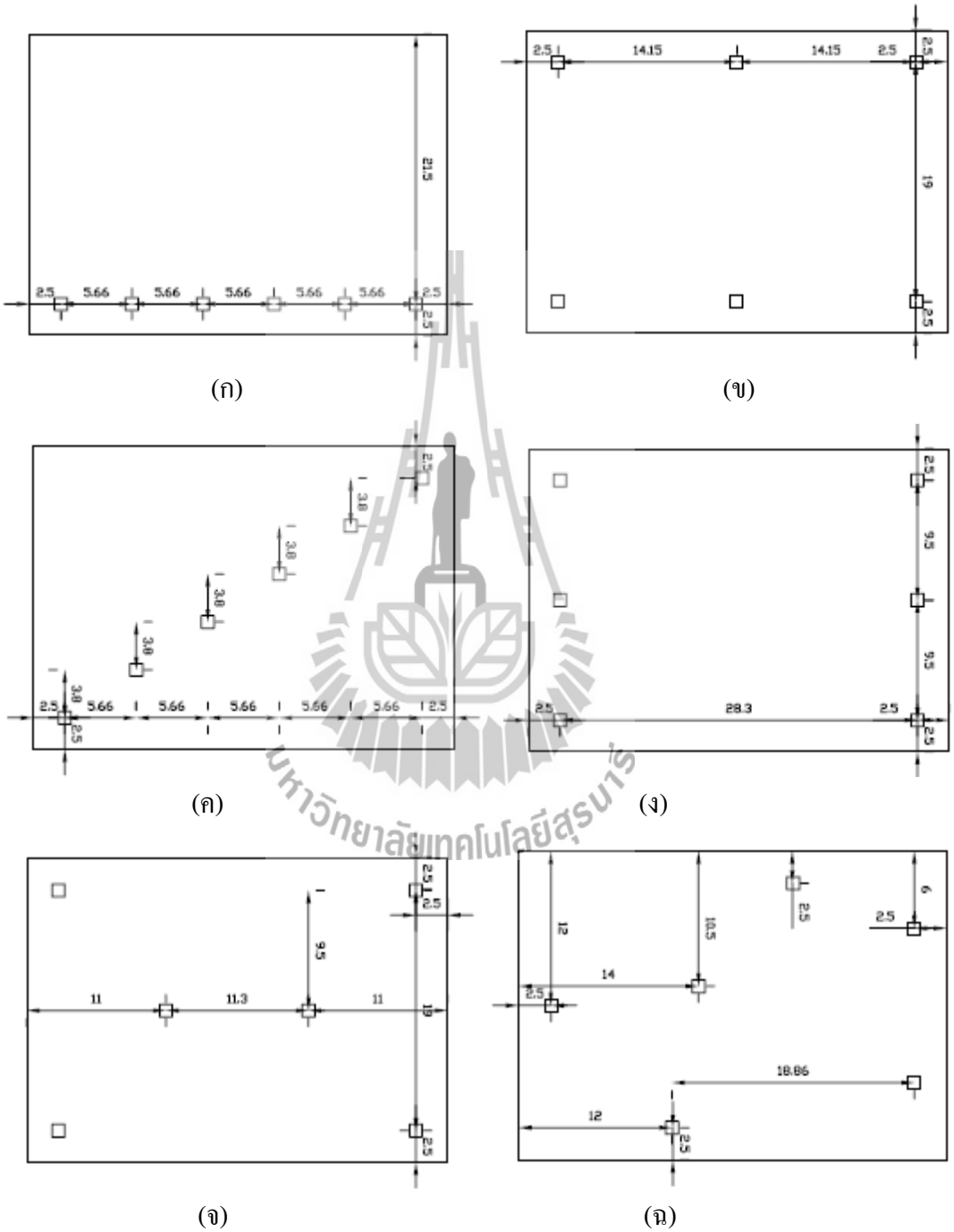
ในการใช้สายอากาศ 4 ต้น เราได้แบ่งการวางสายอากาศทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงการวางสายอากาศเมื่อมีสายอากาศ 4 ต้น

ใช้สายอากาศจำนวน 6 ต้น

ในการใช้สายอากาศ 6 ต้น เราได้แบ่งการวางสายอากาศทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 3.5

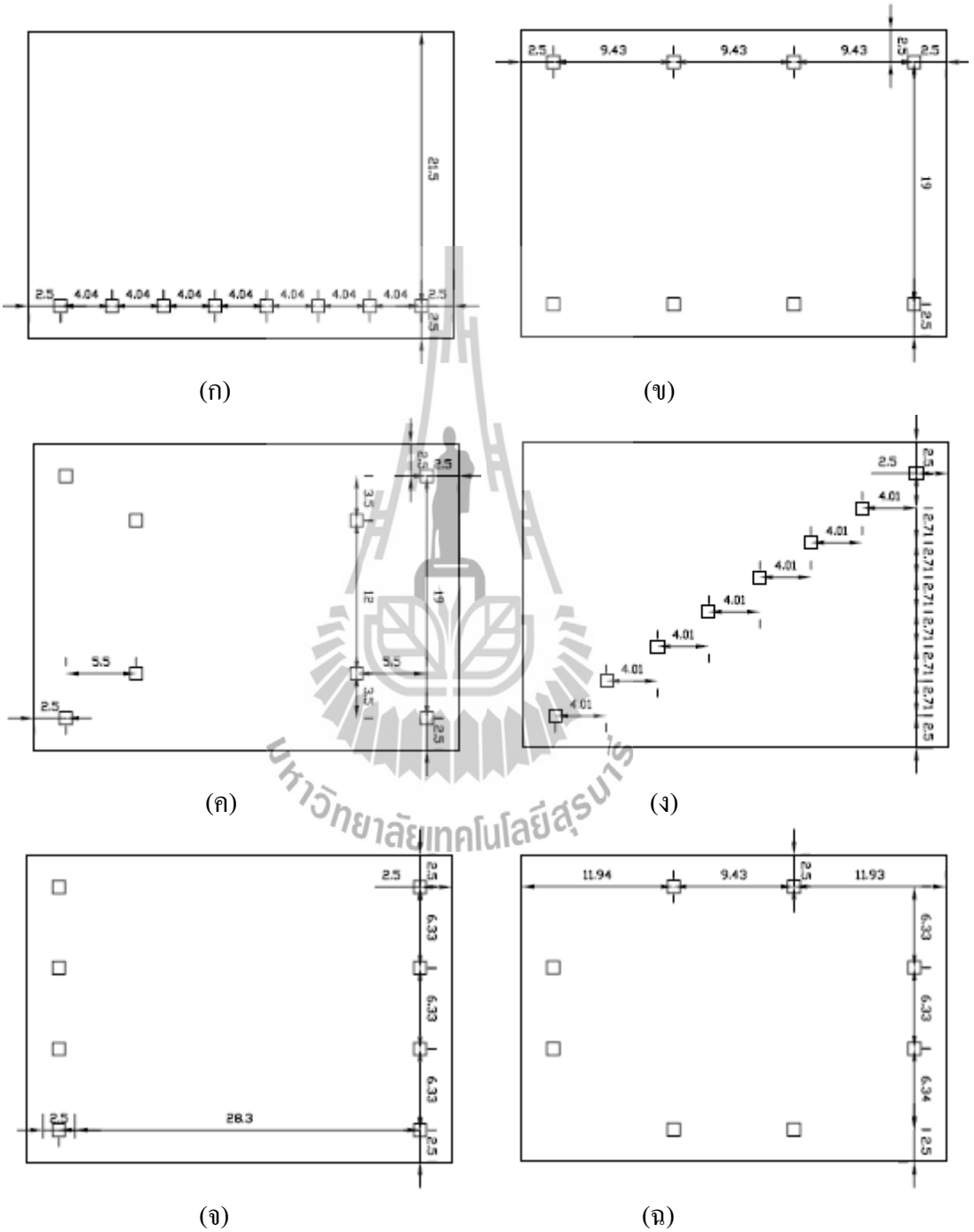


รูปที่ 3.5 แสดงการวางสายอากาศเมื่อมีสายอากาศ 6 ต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ใช้สายอากาศจำนวน 8 ต้น

ในการใช้สายอากาศ 8 ต้น เราได้แบ่งการวางสายอากาศทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 3.6

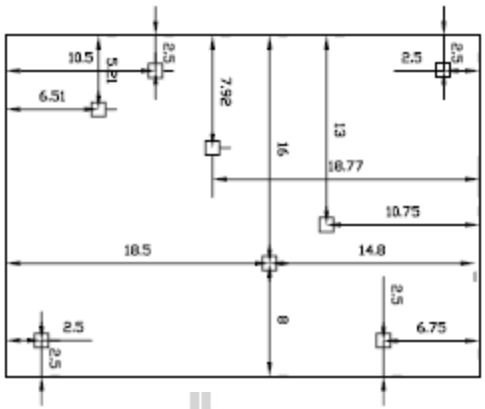


(ก) (ข)

(ค) (ง)

(จ) (ฉ)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



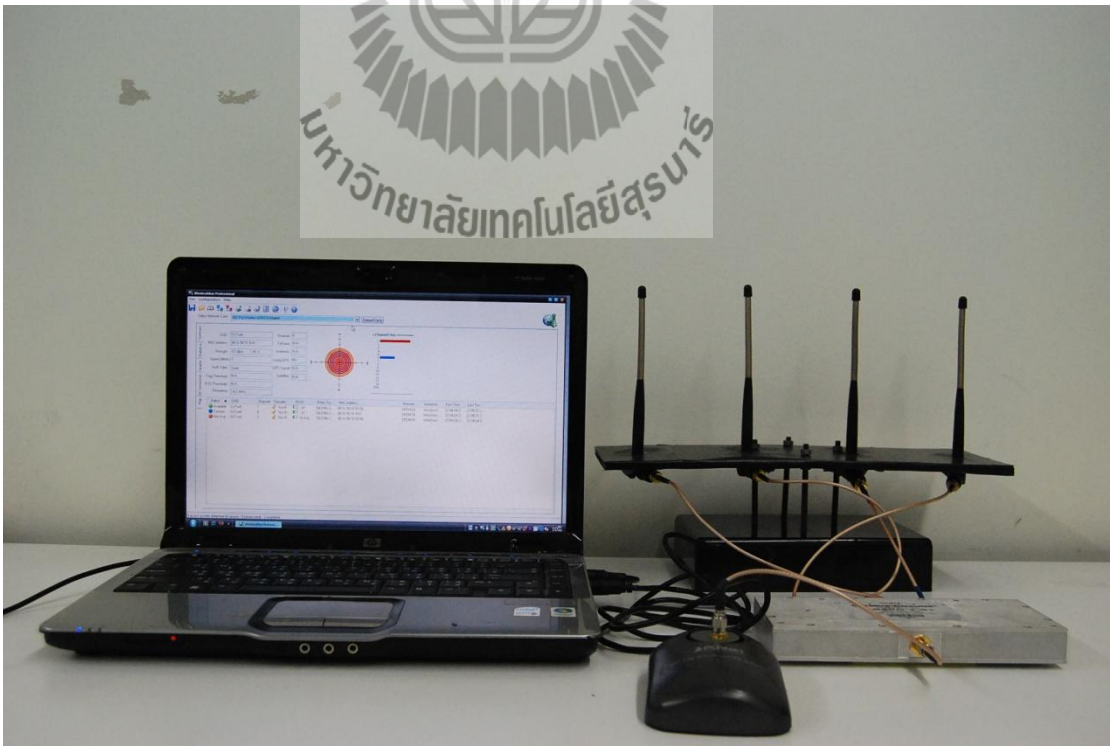
(ช)

รูปที่ 3.6 แสดงการวางสายอากาศเมื่อมีสายอากาศ 8 ต้น

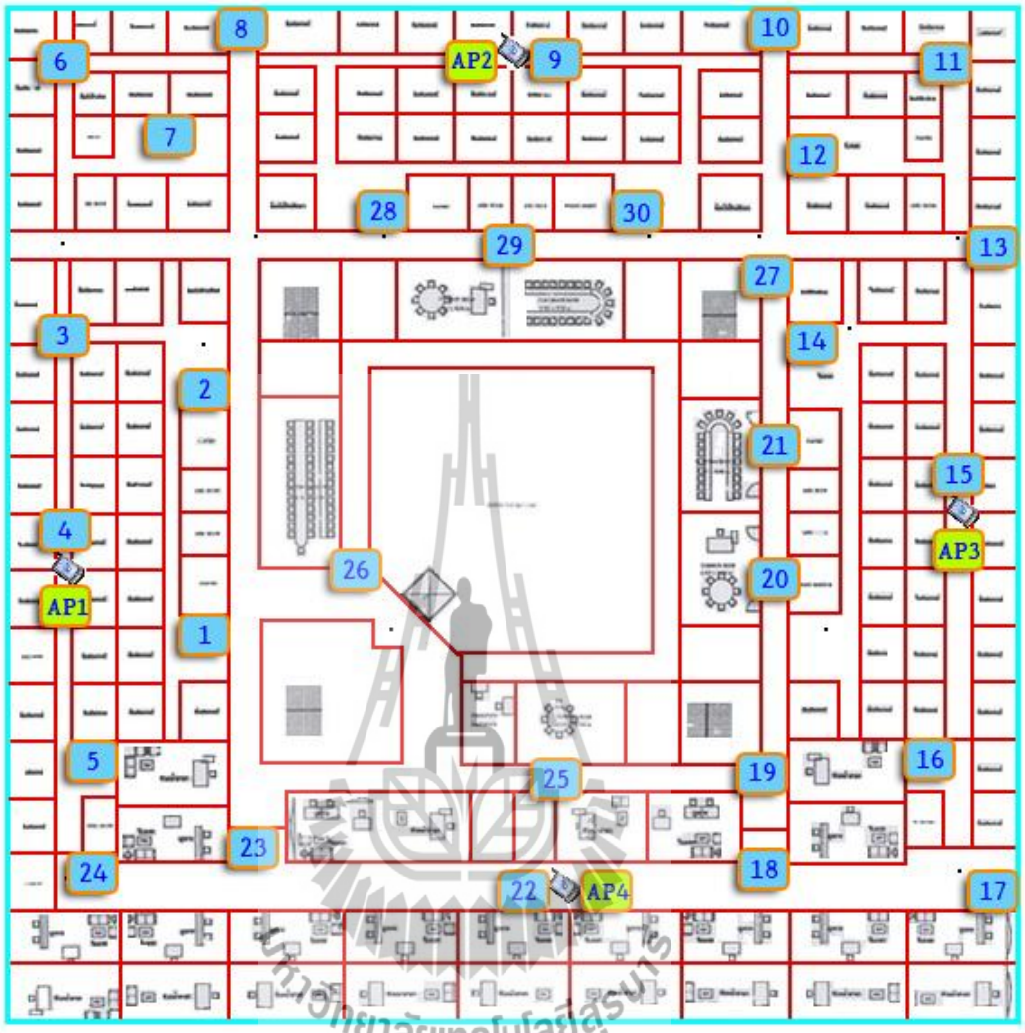
(หมายเหตุ : ในหน่วยเซนติเมตร)

3.5 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณ

บริเวณที่ใช้เป็นตำแหน่งในการวัดสัญญาณ คือ บริเวณทางเดินภายในอาคารวิชาการชั้น4 โดยมีการกำหนดตำแหน่งทั้งหมด 30 ตำแหน่งเพื่อใช้ในการวัดสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณที่ทำการต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์แล้ว



รูปที่ 3.8 แสดงแผนที่ภายในอาคารวิชาการชั้น4ซึ่งได้มีการกำหนดตำแหน่งในการวัดสัญญาณ

จากรูป จะเห็นว่าภายในอาคารวิชาการชั้น 4 มีการติดตั้งจุดรับสัญญาณ (access point) ทั้งหมด 4 จุด และมี MAC Address ดังนี้

AP1 MAC Address คือ 00 1b d4 f5 15 70

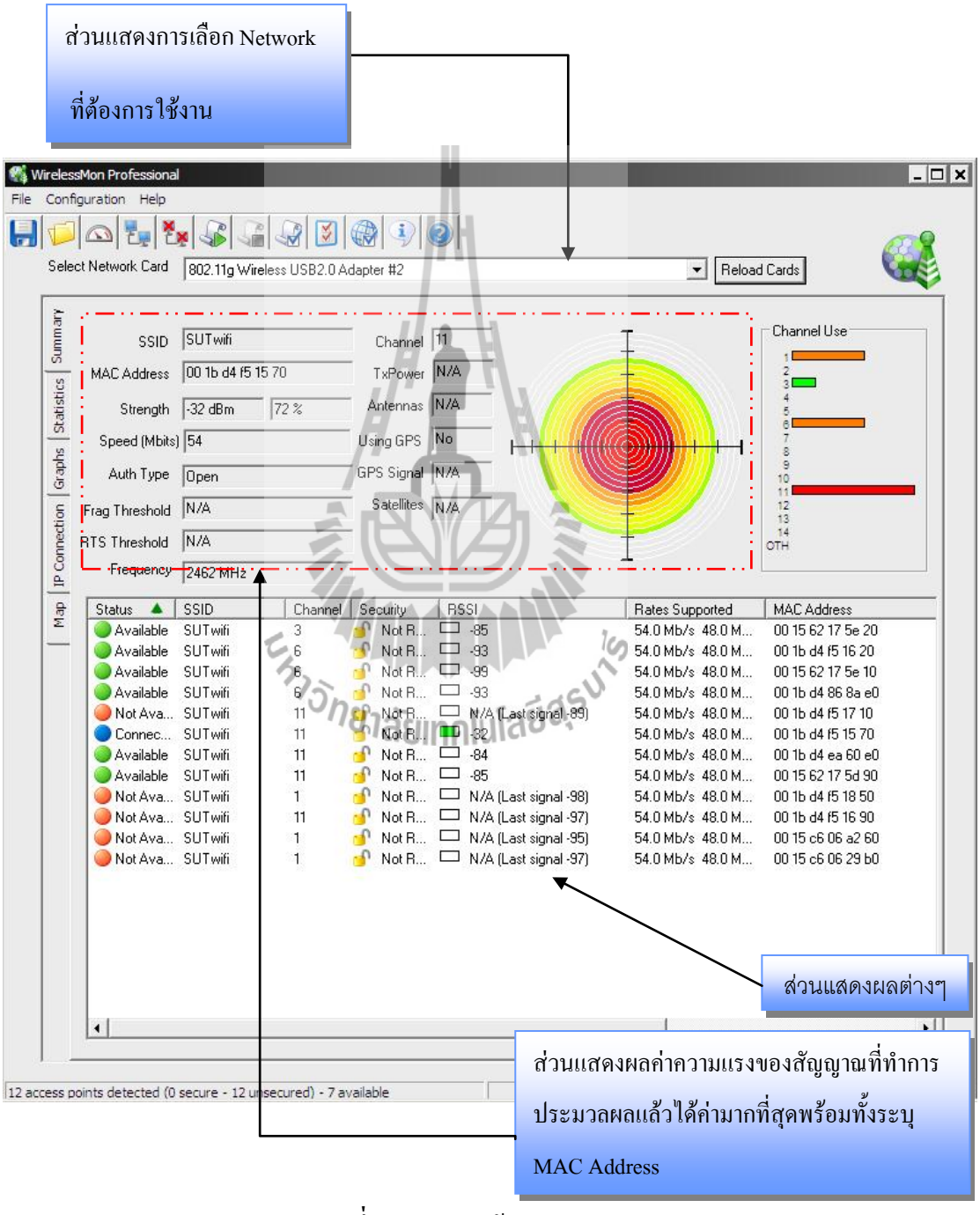
AP2 MAC Address คือ 00 1b d4 f5 16 90

AP3 MAC Address คือ 00 1b d4 f5 18 50

AP4 MAC Address คือ 00 1b d4 f5 17 10

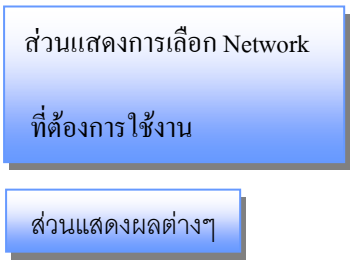
3.6 การใช้งานโปรแกรม WirelessMon

ในรูปที่ 3.9 ได้แสดงหน้าต่างโปรแกรม พร้อมทั้งอธิบายส่วนต่างๆที่สำคัญของโปรแกรม อาทิเช่น การแสดงสถานะของสัญญาณที่มีความแรงของสัญญาณสูงสุด พร้อมทั้งระบุ MAC Addressของ Access point เป็นต้น



รูปที่ 3.9 แสดงหน้าต่างโปรแกรม

คำอธิบายส่วนประกอบต่างๆของโปรแกรม



ในส่วนนี้เราสามารถเลือก Network ที่ต้องการใช้งาน ซึ่งเราสามารถเลือกได้โดยทำการคลิ้กที่ปุ่ม Drop down list แล้วทำการกดปุ่ม Reload Cards

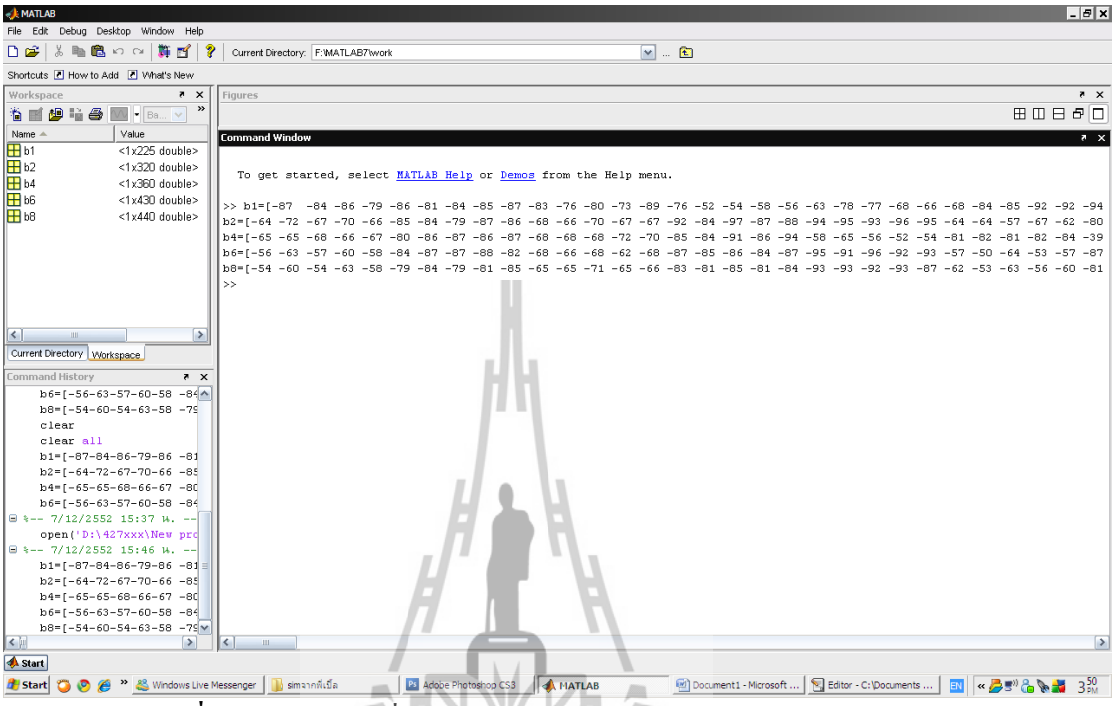
ในส่วนนี้โปรแกรมจะแสดงค่าต่างๆ ดังนี้

- **Status** เป็นการบอกสถานะของ Access point แต่ละตัวว่าทำงานอยู่หรือไม่
- **Service Set Identifier (SSID)** ทำหน้าที่เป็นชื่อเรียกของเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN แต่ละเครือข่ายโดยการตั้งชื่อ SSID นั้นต้องไม่เกิน 32 ตัวอักษร และตัวพิมพ์ใหญ่ตัวพิมพ์เล็กก็มีค่าต่างกันด้วย
- **Channel** เป็นค่าที่บอกถึงช่องสัญญาณที่ใช้ ซึ่งในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนี้จะมีการใช้ทั้งหมด 11 ช่องสัญญาณ ส่วนมากนิยมใช้ช่องสัญญาณที่ 1,6 และ 11 เพื่อป้องกันการซ้อนทับกันของช่องสัญญาณ
- **Security** แสดงความปลอดภัยของเครือข่าย
- **Received signal strength indication (RSSI)** ทำหน้าที่บอกระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ ในหน่วย mW หรือ dBm
- **Rates Supported** บอกถึงอัตราการรับส่งข้อมูลที่รองรับ
- **MAC Address** เป็นแอดเดรสที่มาพร้อมกับการ์ด LAN ซึ่งเป็นแอดเดรสที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ และเป็นแอดเดรสที่ไม่มีโอกาสซ้ำกันไม่ว่าจะอยู่ในเครือข่ายใดก็ตาม เนื่องจากเป็นแอดเดรสที่ถูกบรรจุอยู่บนไมโครชิป และถูกกำหนดไว้เรียบร้อยแล้วจากบริษัทผู้ผลิตการ์ด LAN

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

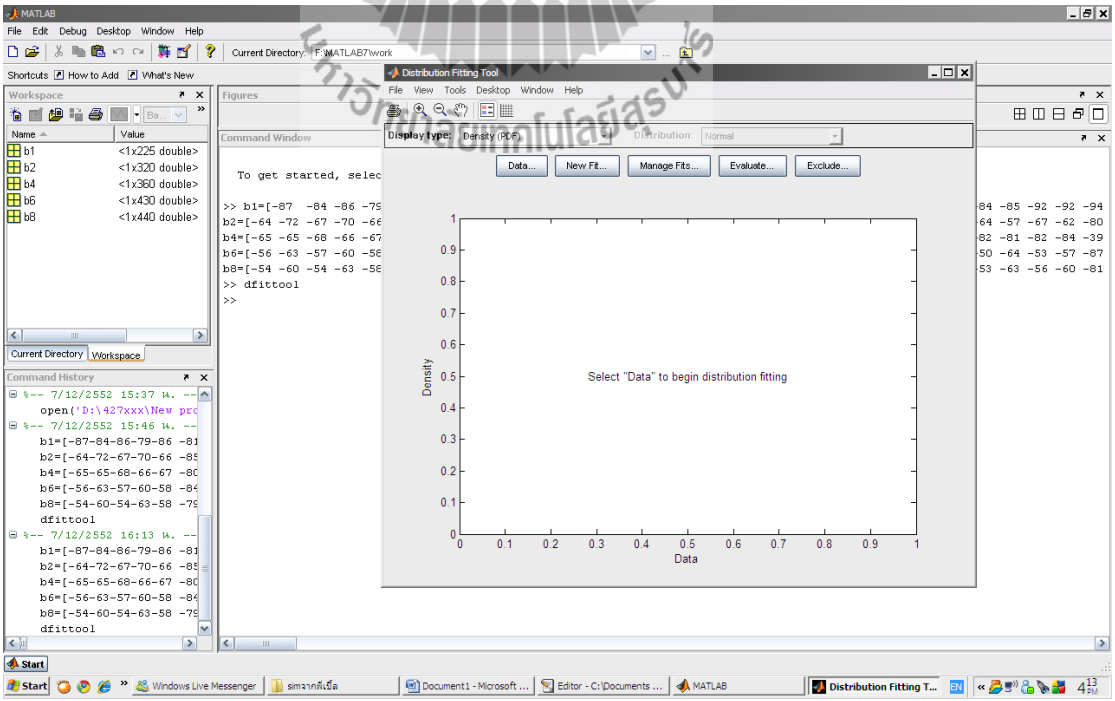
3.7 การพล็อตกราฟแบบ PDF ในโปรแกรม MATLAB

1.พิมพ์ข้อมูลที่ต้องการพล็อตในหน้า command window ดังแสดงในรูปที่ 3.10



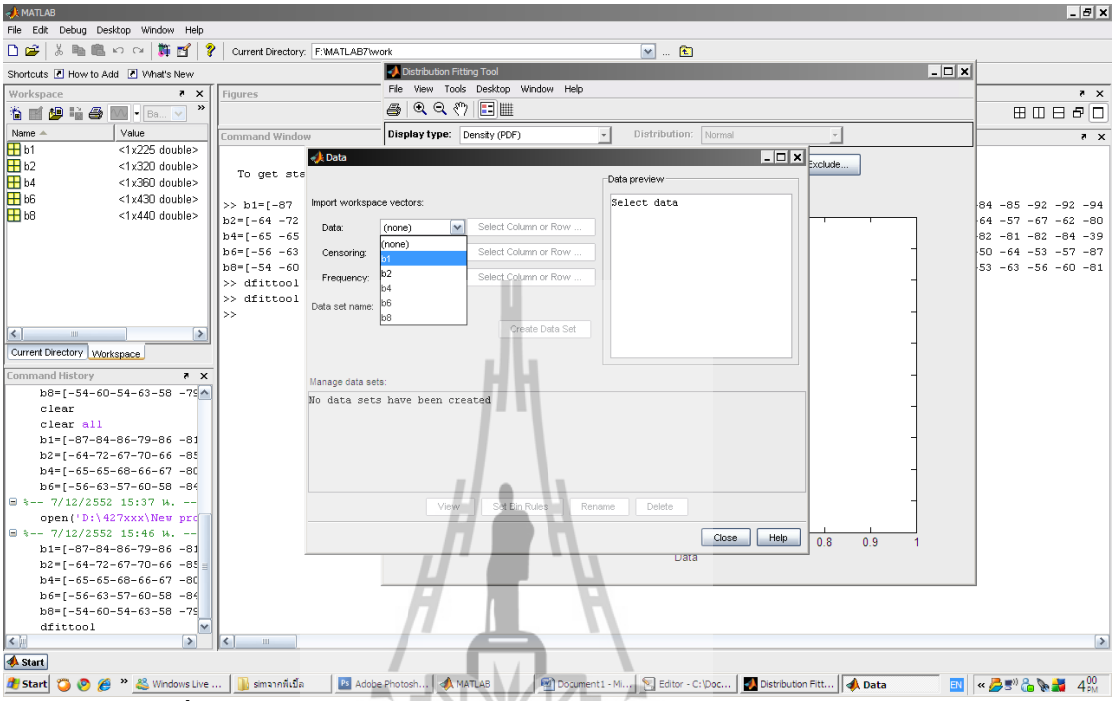
รูปที่ 3.10 แสดงการเริ่มพล็อตกราฟแบบPDF ด้วยโปรแกรม MATLAB

2. พิมพ์คำสั่ง dfittool ลงไปจะปรากฏหน้าต่างที่มีชื่อว่า Distribution Fitting Tool ขึ้นมาดังรูปที่3.11



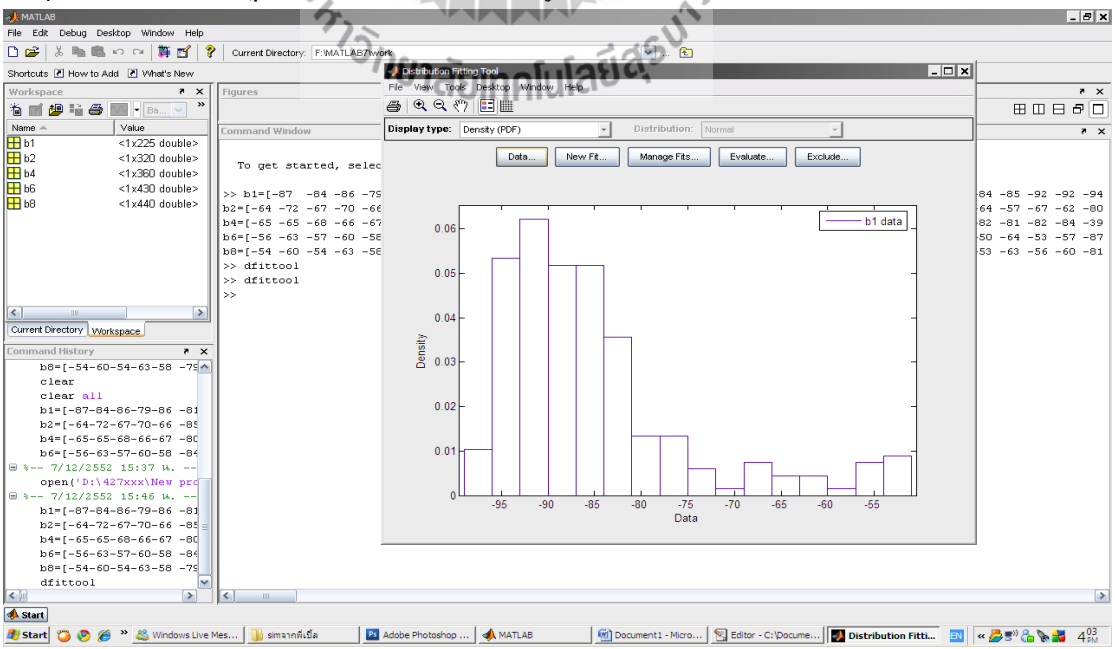
รูปที่ 3.11 แสดงหน้าต่าง Distribution Fitting Tool

3. โดยปกติแล้วโปรแกรม MATLAB จะตั้งค่า Display type เป็น Density (PDF) อยู่แล้ว จากนั้นกดที่ปุ่ม Data จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมาให้ทำการเลือกข้อมูลที่เราต้องการดังแสดงในรูปที่ 3.12



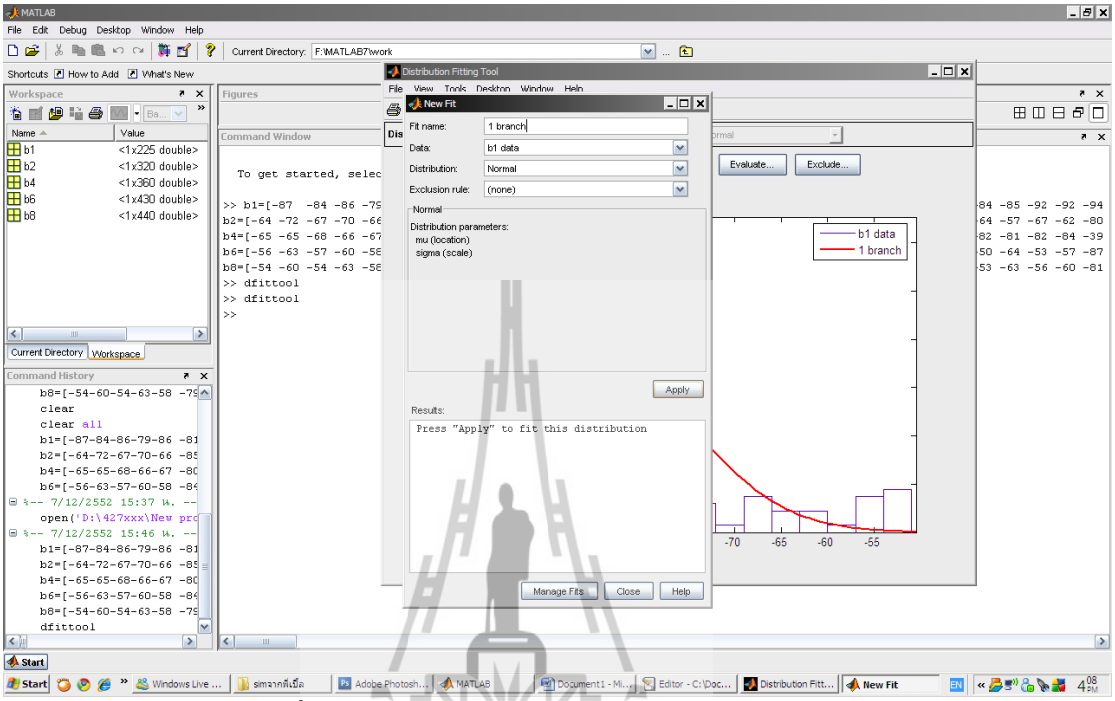
รูปที่ 3.12 แสดงหน้าต่างData เพื่อทำการเลือกข้อมูลที่ต้องการพล็อตกราฟ

4.เมื่อเลือกข้อมูลที่ต้องการแล้วจะปรากฏรูปกราฟออกมาให้เราทำการกดปุ่ม Create Data Set แล้วกดปุ่ม Close จะปรากฏกราฟออกมา ดังแสดงในรูปที่ 3.13



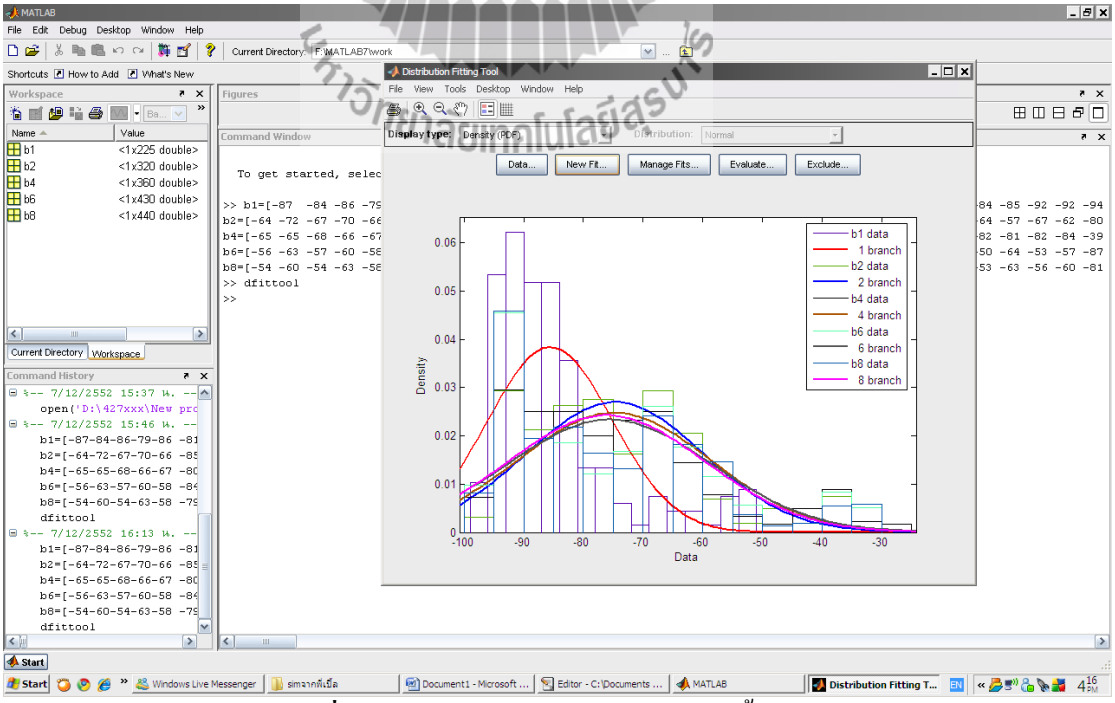
รูปที่ 3.13 แสดงกราฟของข้อมูลในแต่ละชุด

5. เมื่อได้กราฟแล้วจากนั้นกดที่ปุ่ม New Fit จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมาให้ทำการตั้งชื่อข้อมูลที่ต้องการ fit จากนั้นกด Apply แล้วกด Close ดังแสดงในรูปที่ 3.14



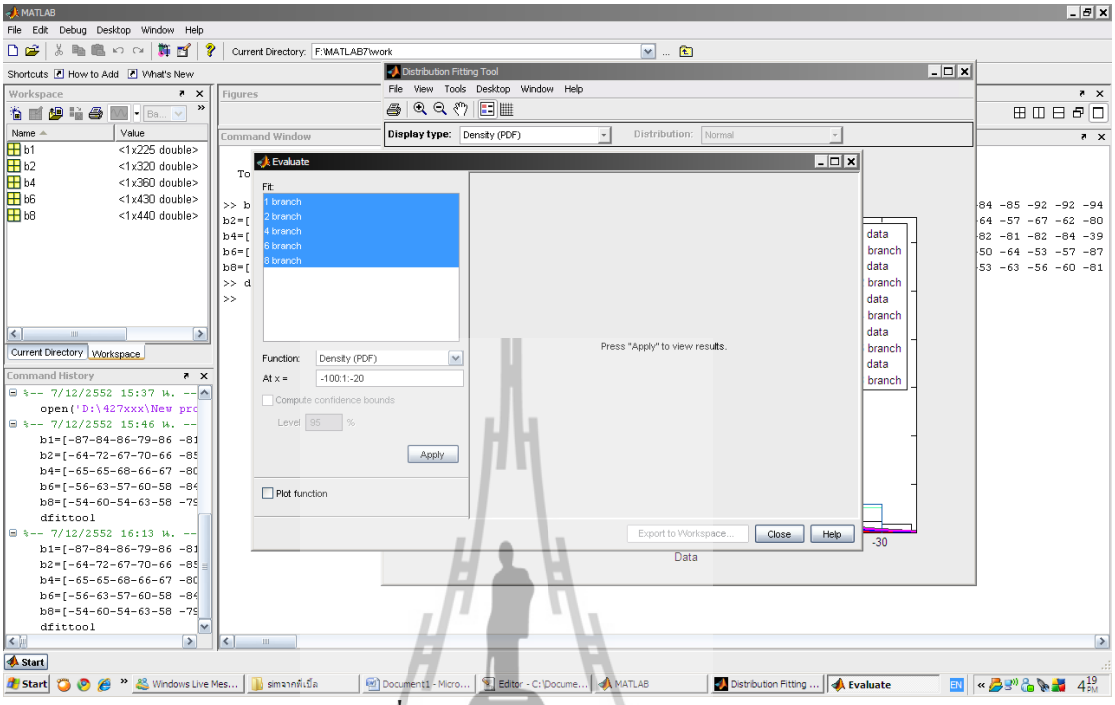
รูปที่ 3.14 แสดงการfit ข้อมูลที่ได้จากการพล็อตกราฟ

6. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 – 5 จนหมดข้อมูลที่ต้องการ fit ดังแสดงในรูปที่ 3.15



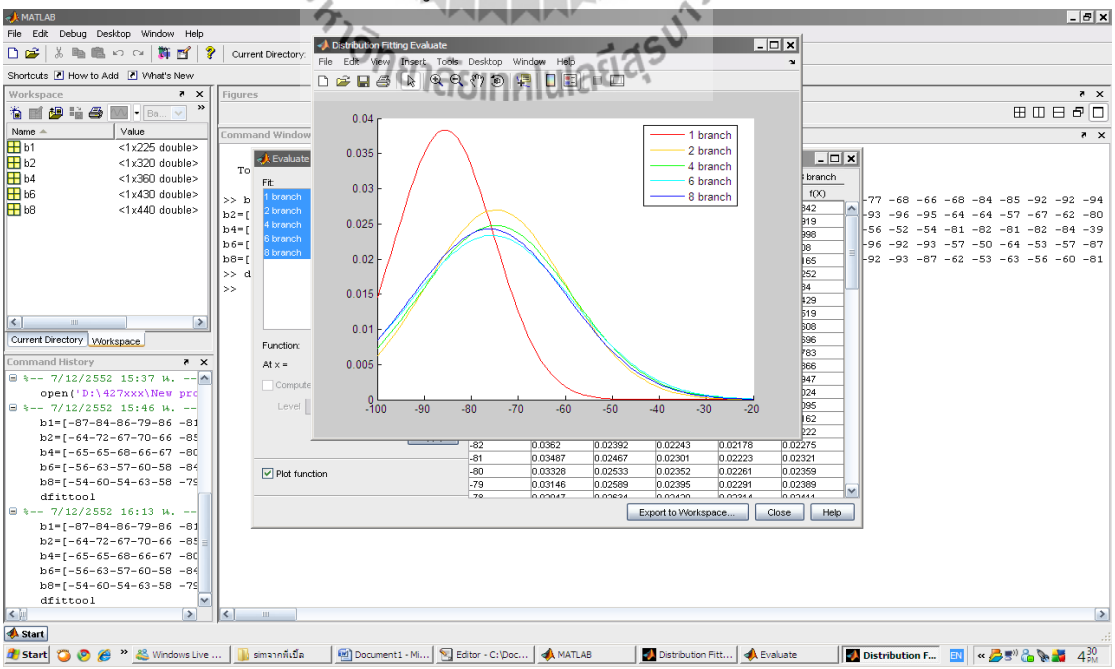
รูปที่ 3.15 แสดงการพล็อตและfit ข้อมูลทั้งหมด

7. จากนั้นกดปุ่ม Evaluate ดังแสดงในรูปที่ 3.16



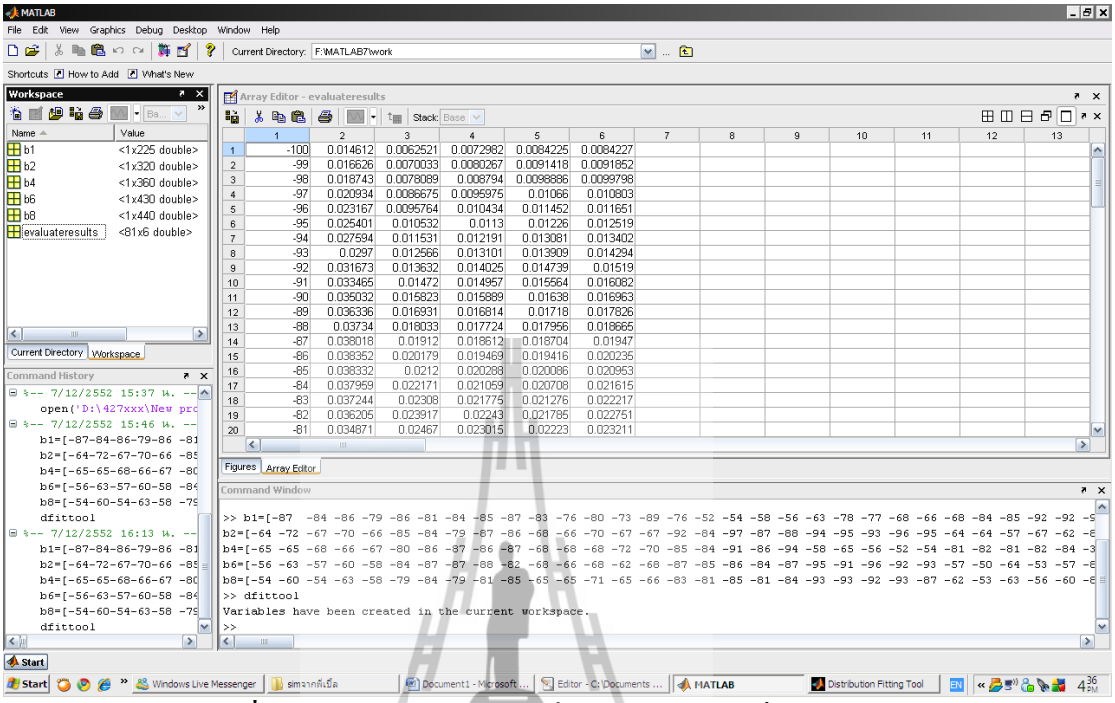
รูปที่ 3.16 แสดงการกดปุ่ม Evaluate

8. ให้ทำการเลือกข้อมูลทั้งหมดแล้วเปลี่ยนช่วงของข้อมูลที่ช่อง At x = เช่น -100:1:-20 หมายถึงให้แกน x มีค่าตั้งแต่ -100 ถึง -20 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 1 เท่าๆกัน จากนั้นเลือก Plot function แล้วกด Apply จะได้กราฟออกมา ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แสดงกราฟที่ได้จากการfit ข้อมูลแล้ว

9. เลือก Export to Workspace เพื่อทำการเก็บค่าของข้อมูลไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงการเก็บข้อมูลที่ได้จากการ fit ไว้ที่ workspace

3.8 กล่าวสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึง อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการวัดสัญญาณ ตำแหน่งของการวางสายอากาศในแต่ละแบบ ตำแหน่งในการวัดสัญญาณ รวมถึงอธิบายการใช้โปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการวัดสัญญาณ และ อธิบายการใช้โปรแกรมในการพล็อตกราฟ

บทที่ 4
ผลที่ได้จากการจำลองแบบและการวัดสัญญาณ

4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการจำลองผลของการวัดสัญญาณ โดยใช้เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากันแบบเฟสไม่ร่วมด้วยโปรแกรม MATLAB และแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดสัญญาณจริงกับการจำลองผล

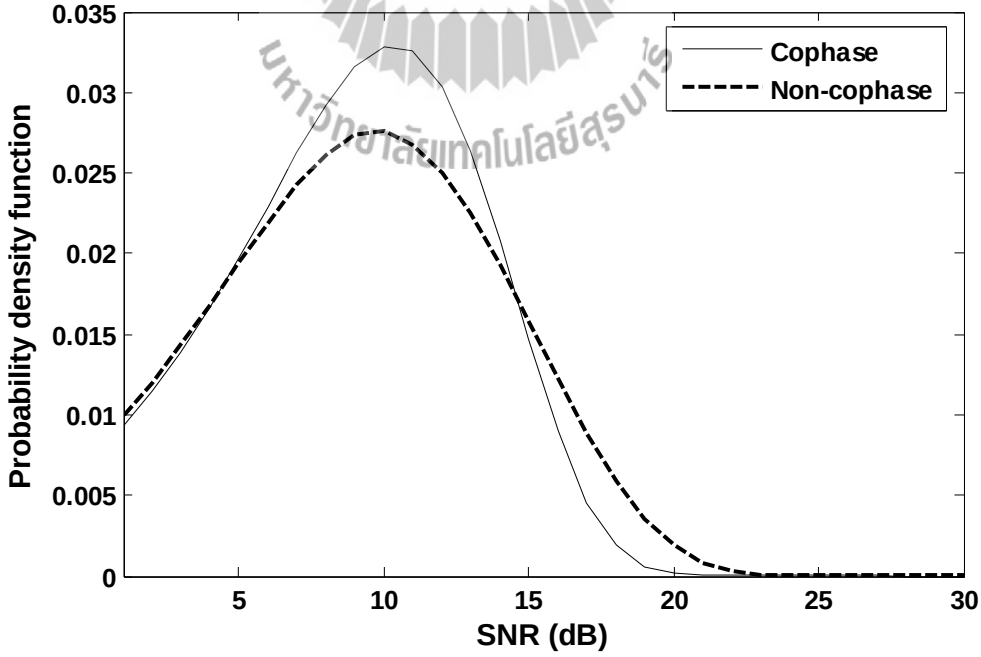
4.2 เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากันที่เฟสไม่ร่วม

ในส่วนของการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสไม่ร่วมว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสร่วม จะทำการวิเคราะห์ใน 2 ส่วน คือ

4.2.1 การจำลองผลด้วยสมการคณิตศาสตร์

4.2.2 การจำลองแบบ

4.2.1 การจำลองผลด้วยสมการคณิตศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบ Probability density function ของEGC แบบ เฟสร่วม และ EGC แบบ เฟสไม่ร่วม

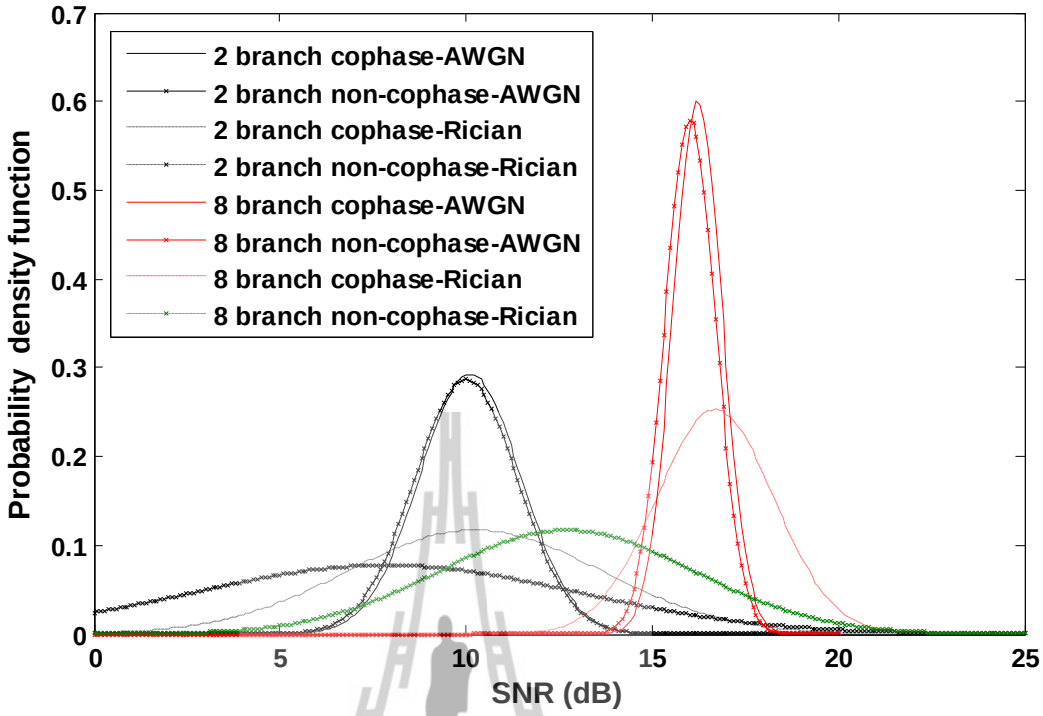
จากรูปจะเห็นได้ว่า Probability density function ของของเทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสไม่ร่วม และ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสร่วม มีความใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้จากตารางที่ 4.1

	Cophase	Non-cophase
Peak (dB)	10.4	9.9
Average(dB)	9.7582	9.2561
Prob(Average SNR)	0.2784	0.2872

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบ การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการรับสัญญาณ ของ EGC เฟสร่วม และ EGC เฟสไม่ร่วม

4.2.2 การจำลองแบบ

ในการวิเคราะห์ การจำลองผลด้วยสมการคณิตศาสตร์ ทำให้เห็นว่า ประสิทธิภาพ ของการรับสัญญาณด้วยการใช้ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) ทั้ง แบบเฟสไม่ร่วม และแบบร่วมเฟส มีความใกล้เคียงกันแต่อย่างไรก็ตามเรายังไม่ได้พิจารณาผลกระทบจากการจางหาย (fading) ที่เกิดขึ้นกับระบบดังนั้น ในการจำลองผล(simulation)จึงจะวิเคราะห์ผลกระทบทั้ง AWGN fading และ Rician fading ด้วยเพื่อยืนยันว่า ประสิทธิภาพของ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสไม่ร่วม ว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสร่วม ดังแสดงในรูปที่ 4.2

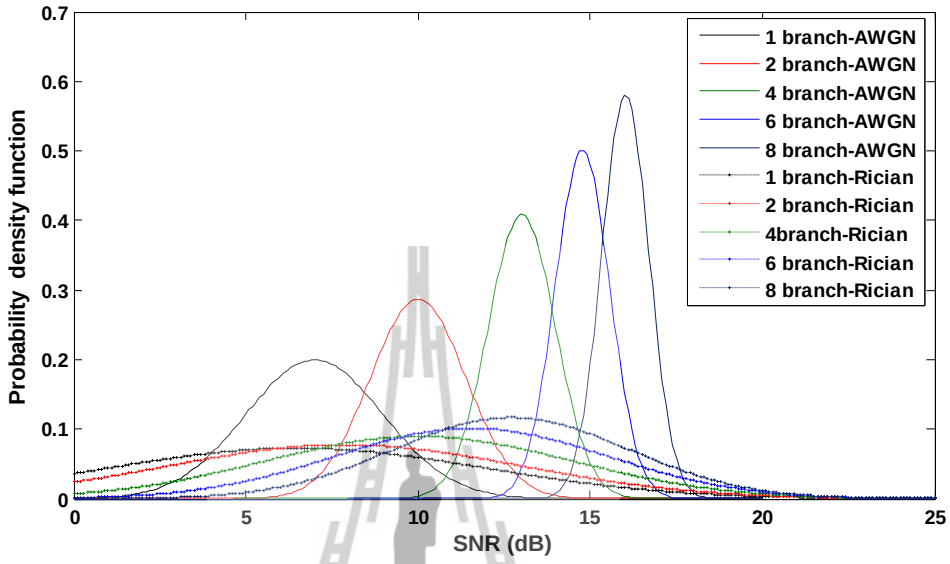


รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบ Probability density function ของEGC แบบเฟสร่วม และ EGC แบบ เฟสไม่ร่วม ใน AWGN และ Rician fading.

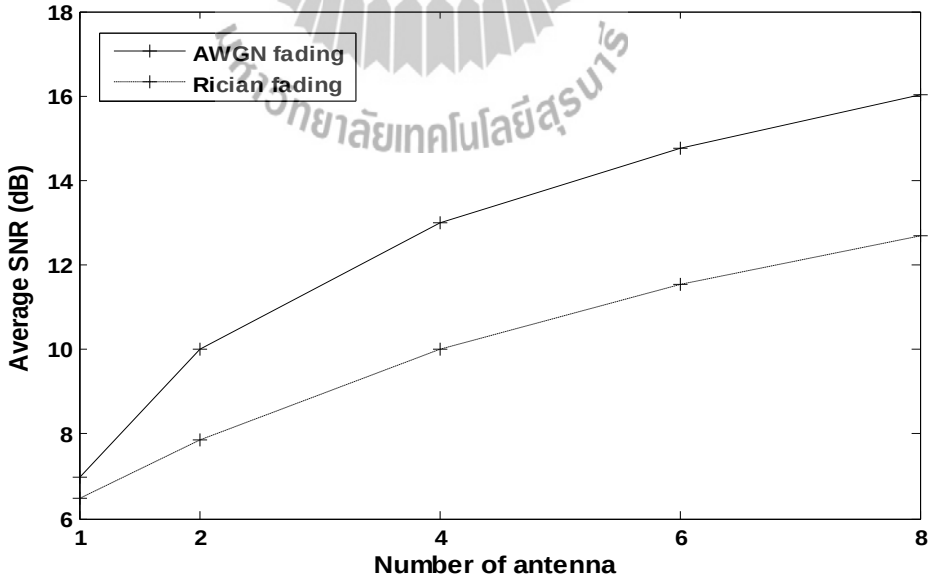
จากรูปแสดงให้เห็นว่าใน AWGN Fading จะประสิทธิภาพใกล้เคียงกันของทั้งสองแบบ แต่เมื่อมาพิจารณาใน Rician Fading กรณีของ เฟสไม่ร่วม จะมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า แบบร่วมเฟส และเมื่อเราเพิ่มสายอากาศมากขึ้น ประสิทธิภาพ แบบเฟสไม่ร่วม จะต่ำกว่า แบบร่วมเฟส อย่างชัดเจน

จากผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของทั้งสองว่ามีความใกล้เคียงกัน แต่ก็มีความแตกต่างกันเมื่อมีผลกระทบของการจางหาย (fading) มาเกี่ยวข้อง ซึ่งในความแตกต่างนั้นก็ยอมรับได้เมื่อมาพิจารณาในทางปฏิบัติของ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสไม่ร่วม ที่มีความง่าย ไม่ซับซ้อนในด้านฮาร์ดแวร์ กว่า เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) เฟสร่วม ดังนั้นในโครงงานจึงได้เลือกใช้ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสไม่ร่วม ในการศึกษาสมรรถนะการใช้สายอากาศแบบเฟสไม่ร่วมภายในอาคาร ต่อไป

4.3 การวิเคราะห์ ประสิทธิภาพของการรับสัญญาณ ของ EGC แบบเฟสไม่ร่วม เมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศใน fading channel ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบ Probability density function ของ EGC แบบ เฟสไม่ร่วม เมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศใน AWGN และ Rician fading.

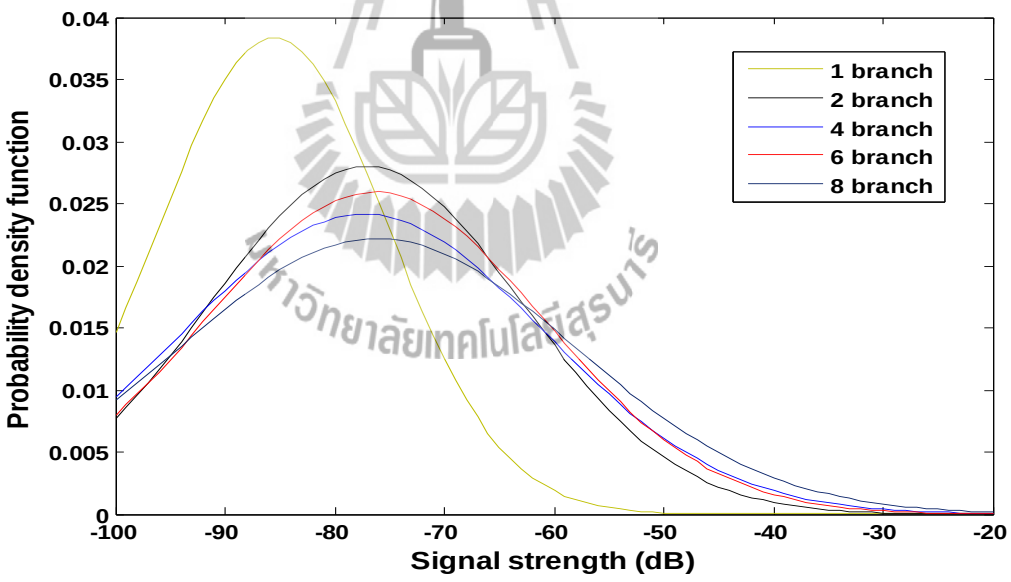


รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบ average SNR ของ EGC แบบ เฟสไม่ร่วม เมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศใน AWGN และ Rician fading.

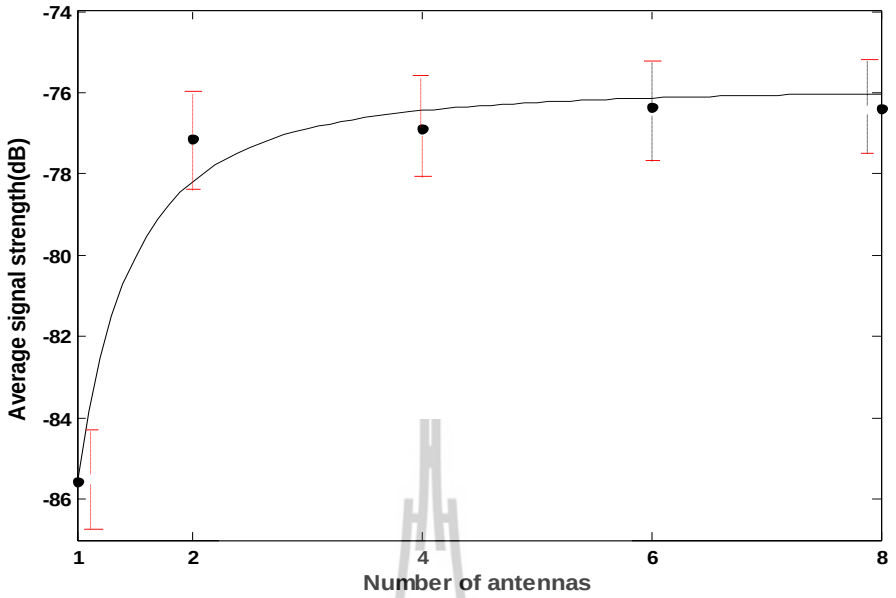
จากรูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของการรับสัญญาณโดยใช้ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสไม่ร่วม จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น เมื่อเราเพิ่ม สายอากาศ และในช่องสัญญาณ AWGN fading จะมี ประสิทธิภาพของการรับสัญญาณดีกว่าช่องสัญญาณ Rician fading

4.4 ผลการวัดภายในอาคาร

จากการ จำลอง ผลทำให้ทราบว่าการเพิ่มจำนวนสายอากาศในการใช้ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสไม่ร่วม ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการรับสัญญาณมากขึ้นด้วย ซึ่งแต่ละการจางหาย (fading) ก็ให้ผลที่แตกกันไม่ว่าจะเป็น AWGN fading และ Rician fading แต่อย่างไรก็ตามในสภาพแวดล้อมภายจริง เราไม่สามารถคาดเดาหรือจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ได้ ว่าเป็น การจางหาย (fading) แบบใด ดังนั้นผลวัดจะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการใช้ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสไม่ร่วม เพื่อเทียบกับผลการจำลองผล ดังแสดงในรูปที่ 4.5



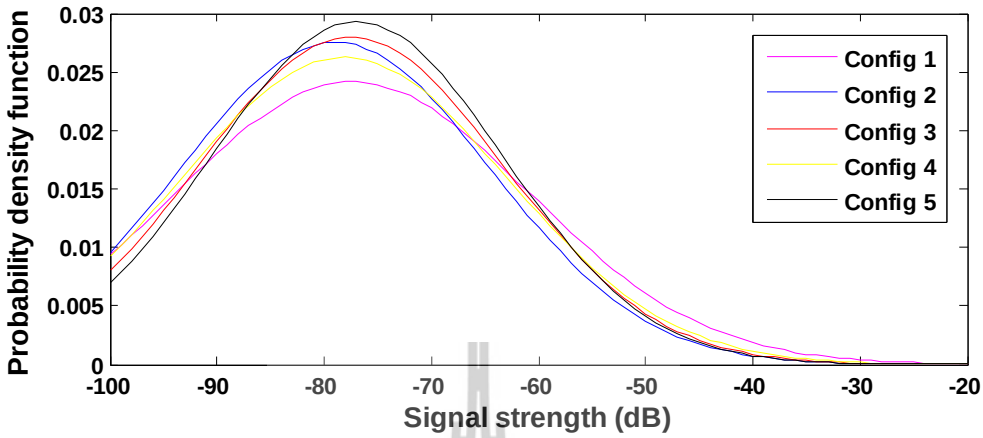
รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบ Probability density function ของ EGC แบบ เฟสไม่ร่วม เมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศ สำหรับการวัดภายในอาคาร



รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบ Average SNR ของ EGC แบบ เฟสไม่ร่วม เมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศ สำหรับการวัดภายในอาคาร

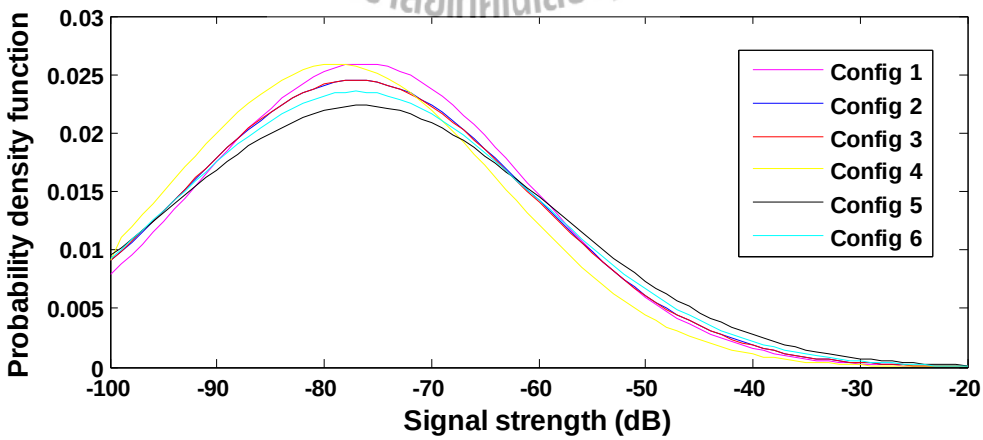
จากผลวัดในรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศในการวัดภายในอาคารทำให้ ความแรงสัญญาณ เพิ่มขึ้นตามด้วย แต่เมื่อเปรียบเทียบการใช้สายอากาศ 1 ต้น ให้ ความแรงสัญญาณ ประมาณ -86dB แต่การใช้สายอากาศ 4 ต้น ได้ ความแรงสัญญาณประมาณ -77 dB ซึ่งมีการเพิ่มประมาณ 9 dB แต่เมื่อเพิ่มสายอากาศจาก 2 ต้น เป็น 4,6,8 ต้น จะพบว่ามีความแรงสัญญาณเพิ่มขึ้นแค่ 1 dB ทำให้เราทราบว่าการใช้ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสไม่ร่วม ในทางปฏิบัตินั้นเมื่อต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการรับสัญญาณ เราไม่จำเป็นต้องใช้สายอากาศมากกว่า 2 ต้น ก็ได้ เพียงใช้สายอากาศแค่ 2 ต้น ก็เพียงพอ ทั้งนี้ยังช่วยลดต้นทุนของการใช้สายอากาศที่จำนวนมากขึ้นอีกด้วย

4.5 ผลการวัดในการวางสายอากาศบนพื้นที่จำกัด



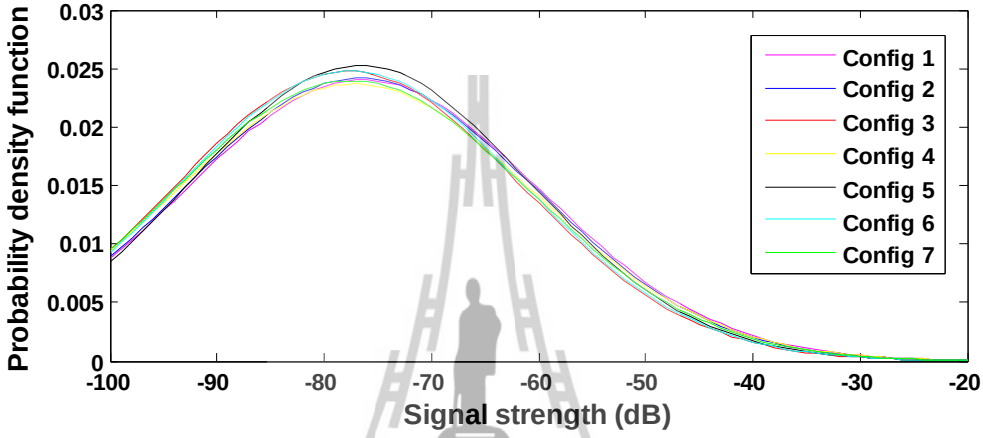
รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบ Probability density function ของ EGC แบบ เฟสไม่ร่วม เมื่อมีจำนวนสายอากาศ 4 ต้น

จากรูปที่ 4.7 เป็นการวัดสัญญาณโดยการใช้ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสไม่ร่วมบนพื้นที่จำกัดโดยใช้ สายอากาศ ทั้งหมด 4 ต้น มีทั้งหมด 5 แบบ โดยแต่ละแบบนั้น มีผลของการวัดสัญญาณที่แตกต่างกันเนื่องจากมีการจางหาย (fading) ของสัญญาณเข้ามาเกี่ยวข้อง และจะเห็นได้ว่า แบบที่ 1 มีประสิทธิภาพในการรับสัญญาณดีที่สุดจากทั้งหมด 5 แบบ ซึ่งจะเห็นได้จากกราฟ



รูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบ Probability density function ของ EGC แบบ เฟสไม่ร่วม เมื่อมีจำนวนสายอากาศ 6 ต้น

จากรูปที่ 4.8 เป็นการวัดสัญญาณโดยการใช้ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสไม่ร่วมบนพื้นที่จำกัดโดยใช้ สายอากาศ ทั้งหมด 6 ต้น มีทั้งหมด 6 แบบ โดยแต่ละแบบนั้น มีผลของการวัดสัญญาณที่แตกต่างกันเนื่องจากมีการจางหาย (fading) ของสัญญาณเข้ามาเกี่ยวข้อง และจะเห็นได้ว่า แบบที่ 6 มีประสิทธิภาพในการรับสัญญาณดีที่สุดจากทั้งหมด 6 แบบ ซึ่งจะเห็นได้จากกราฟ



รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบ Probability density function ของ EGC แบบ เฟสไม่ร่วม เมื่อมีจำนวนสายอากาศ 8 ต้น

จากรูปที่ 4.9 เป็นการวัดสัญญาณ โดยการใช้ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสไม่ร่วมบนพื้นที่จำกัดโดยใช้ สายอากาศ ทั้งหมด 8 ต้น มีทั้งหมด 7 แบบ โดยแต่ละแบบนั้น มีผลของการวัดสัญญาณที่แตกต่างกันเนื่องจากมีการจางหาย (fading) ของสัญญาณเข้ามาเกี่ยวข้อง และจะเห็นได้ว่า แบบที่ 1 มีประสิทธิภาพในการรับสัญญาณดีที่สุดจากทั้งหมด 7 แบบ ซึ่งจะเห็นได้จากกราฟ

4.6 กล่าวสรุป

จากผลการจำลองผลและผลการวัดสัญญาณที่ได้แสดงไว้แล้วจากข้างบนนั้น ทำให้เราสรุปได้ว่า ในการวัดสัญญาณโดยใช้ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสไม่ร่วม นั้นจะมีประสิทธิภาพ น้อยกว่า การวัดสัญญาณโดยใช้ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสร่วม และจะเห็นชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อเราเพิ่มจำนวนสายอากาศ แต่เนื่องจากความง่าย และ ไม่ซับซ้อนทางด้านฮาร์ดแวร์ จึงได้เลือกใช้ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบ

ใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสไม่ร่วม และจากผลการวัดจริงทำให้เราสรุปได้ว่า ในการวางสายอากาศในแต่ละแบบนั้น จะทำให้มีผลต่อการรับสัญญาณที่แตกต่างกันด้วย

บทที่ 5
วิเคราะห์ สรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปของโครงงาน การศึกษาสมรรถนะการใช้สายอากาศแบบเฟสไม่ร่วมภายในอาคาร ซึ่งจะได้อธิบายถึงปัญหาที่พบในระหว่างการทำโครงงาน วิธีการแก้ไขปัญหา ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาต่อไป

5.2 ปัญหาที่พบในระหว่างการทำโครงงานและวิธีการแก้ไขปัญหา

ปัญหา	สาเหตุและวิธีการแกไขปัญหา
1.ในการวัดสัญญาณ ค่าที่อ่านได้จากโปรแกรมจะไม่คงที่	สาเหตุ อาจเกิดจากตัวส่งสัญญาณ ส่งสัญญาณมาไม่คงที่ **วิธีการแก้ไขปัญหา** ใช้เวลาได้การอ่านค่าที่ได้ดูว่าค่าที่ไม่คงที่นั้นใกล้เคียงกับค่าใดมากที่สุด
2.ในการวัดสัญญาณค่าที่ได้ ผิดเพี้ยนไปจากเดิมมาก หรือ ไม่สามารถวัดค่าได้เลย	สาเหตุ อาจเกิดจากการต่ออุปกรณ์ไม่ดี หรืออุปกรณ์ชำรุด **วิธีการแก้ไขปัญหา** ตรวจเช็คอุปกรณ์ ให้เรียบร้อย ก่อนการวัดสัญญาณทุกครั้ง

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในการอ่านค่าสัญญาณที่วัดได้ในโปรแกรมนั้น ควรหยุดรอสักพัก เพื่อสังเกตดูว่าค่าที่วัดได้นั้น มีค่าอยู่ที่ประมาณเท่าไร

5.3.2ก่อนการวัดสัญญาณทุกครั้ง ควรตรวจสอบอุปกรณ์ให้ดีก่อน เนื่องจากบางครั้งการต่อสายโคแอกเชียลไม่ดี หรือไม่ติดกับตัวรวมสัญญาณให้ดี ก็จะมีผลต่อการับสัญญาณ

5.4 แนวทางการพัฒนาต่อไป

ทำการศึกษาและหาตำแหน่งที่ดีที่สุดในการวางตำแหน่งของสายอากาศบนพื้นที่จำกัดโดยใช้เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสไม่ร่วม

5.5 บทสรุปของโครงงาน

โครงงานของเรานั้นได้นำเสนอ การศึกษาสมรรถนะการใช้สายอากาศแบบเฟสไม่ร่วมภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสไม่ร่วม แต่เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสไม่ร่วม นั้น มีประสิทธิภาพน้อยกว่าเทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบ เฟสร่วม แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติจริงนั้น การใช้เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสไม่ร่วม ง่ายกว่า ไม่ซับซ้อนทางด้านฮาร์ดแวร์ และได้ผลที่สามารถรับได้ โครงงานของเราจึงได้เลือกใช้ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสไม่ร่วม และผลจากการศึกษา สมรรถนะการใช้สายอากาศแบบเฟสไม่ร่วมภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคการรวมสัญญาณแบบใช้อัตราขยายเท่ากัน (EGC) แบบเฟสไม่ร่วม นั้น ทำให้เราทราบว่า ในการวัดสัญญาณบนพื้นที่จำกัด ในการวางสายอากาศในแต่ละแบบจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการรับสัญญาณด้วย เนื่องด้วยมาจากการจางหาย(fading) และในการวางสายอากาศในแต่ละแบบนั้น หากได้มีการวางในตำแหน่งที่เหมาะสมก็จะสามารถทำให้ประสิทธิภาพในการรับสัญญาณนั้นจะดีที่สุดอีกด้วย ซึ่งจะต้องศึกษาในขั้นต่อไป

บรรณานุกรม

[1] M. Yacoub, Fundations of Mobile Radio Engineering. CRC Press, Boco Raton, 1993.

[2] Lee, W. C. Y., Mobile Communications Engineering, McGraw-Hill, Newyork, 1982

[3] Jakes, W. C., Jr., Microwave Mobile Communications, john Wiley and Sons, New York, 1973.

[4] R. H. Clarke, "A Statistical Theory of Mobile-Radio Reception", The Bell System Technical Journal, Vol. 47, No. 6,pp.957-1000, July-Aug. 1968.

[5] Süli, Endre and Mayers, David, An Introduction to Numerical Analysis, Cambridge University Press, 2003.

[6] รังสรรค์ วงศ์สรรค์ . "วิศวกรรมสายอากาศ " เอกสารประกอบคำสอน สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา, 2550

[7] http://minicircuits.com/pdfs/ZB8PD-4.pdf

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี