



การสร้างแบบจำลองการสูญเสียคลื่นสัญญาณวิทยุ ในเขตพื้นที่เมืองของประเทศไทย
โดยใช้สายอากาศชนิดทิศทางเดียว บนเทคโนโลยีการสื่อสารลอว์แวน
สำหรับสมาร์ทมิเตอร์

Path Loss Modelling in Urban Area of Thailand using Unidirectional
Antenna on LoRaWAN Technology for Smart Meter

เอกพงศ์ คงสวัสดิ์
Akekapong Kongsavat

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master in Electrical Engineering
Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การสร้างแบบจำลองการสูญเสียคลื่นสัญญาณวิทยุ ในเขตพื้นที่เมืองของประเทศไทย
โดยใช้สายอากาศชนิดทิศทางเดียว บนเทคโนโลยีการสื่อสารลอว์แวน
สำหรับสมาร์ทมิเตอร์

Path Loss Modelling in Urban Area of Thailand using Unidirectional
Antenna on LoRaWAN Technology for Smart Meter

เอกพงศ์ คงสวัสดิ์
Akekapong Kongsavat

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master in Electrical Engineering
Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การสร้างแบบจำลองการสูญเสียคลื่นสัญญาณวิทยุ ในเขตพื้นที่เมืองของ
ประเทศไทย โดยใช้สายอากาศชนิดทิศทางเดียว บนเทคโนโลยีการสื่อสาร
ลORAWAN สำหรับสมาร์ตมิเตอร์

ผู้เขียน นายเอกพงศ์ คงสวัสดิ์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ดร.ชลากร ครุพงศ์ศิริ)

.....ประธานกรรมการ
(ดร.ไพโรจน์ วุ่นชุม)

.....กรรมการ
(ดร.กมล เขมะรังษี)

.....กรรมการ
(ดร.อภิเดช บุรณวงศ์)

.....กรรมการ
(ดร.ชลากร ครุพงศ์ศิริ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งแสง)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ

(ดร.ชลากร ครุพงศ์ศิริ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ

(นายเอกพงศ์ คงสวัสดิ์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ

(นายเอกพงศ์ คงสวัสดิ์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การสร้างแบบจำลองการสูญเสียคลื่นสัญญาณวิทยุ ในเขตพื้นที่เมืองของประเทศไทย โดยใช้สายอากาศชนิดทิศทางเดียว บนเทคโนโลยีการสื่อสารลอว์แวน สำหรับสมาร์ตมิเตอร์
ผู้เขียน	นายเอกพงศ์ คงสวัสดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

สมาร์ตมิเตอร์ (Smart Meter) คือ อุปกรณ์วัดปริมาณการใช้ไฟฟ้า ซึ่งสามารถรายงานปริมาณการใช้ไฟฟ้าไปยังศูนย์ข้อมูลกลางได้อย่างต่อเนื่อง ผ่านเทคโนโลยีการสื่อสารรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งสามารถรองรับสมาร์ตมิเตอร์จำนวนมาก และครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาการใช้งานเครือข่ายการสื่อสารแบบไร้สายลอว์แวน (Long Range Wide Area Network: LoRaWAN) ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตามความต้องการของสมาร์ตมิเตอร์ โดยออกแบบสายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna) ทำงานที่ความถี่ 920-925 MHz ซึ่งมีแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) แบบทิศทางเดียว ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสาร ด้วยการลดสัญญาณรบกวน (Noise) ลดการแทรกสอด (Interference) และเพิ่มความจุช่องสัญญาณ (Channel Capacity) การวิเคราะห์ระบบการสื่อสารแบบไร้สาย ใช้แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss Model) ที่มีความแม่นยำ เพื่อทำนายการลดทอนกำลังของสัญญาณที่เกิดจากปัจจัยของสภาพแวดล้อม ทั้งนี้ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองการสูญเสียดั้งเดิม มีความคลาดเคลื่อนสูง กว่างานวิจัยที่นำเสนอ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการสร้างแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางใหม่ สำหรับสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์ (Smart Meter Environment) ในพื้นที่เขตเมือง (Urban Area) ของประเทศไทย โดยการใช้วิธีการเชิงประจักษ์ (Empirical Method) และการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่า สายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ มีสมรรถนะใกล้เคียงกับสายอากาศเชิงพาณิชย์ที่นำมาเปรียบเทียบ ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน นอกจากนี้ แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ สามารถทำนายค่าการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss) ได้แม่นยำมากกว่าแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง ของ Okumura-Hata ด้วยการประเมินความคลาดเคลื่อน Root Mean Square Error (RMSE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination) หรือ R-squared

คำสำคัญ: ลอว์แวน, ลอว์แวน, สมาร์ตมิเตอร์, แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง, แบบจำลองเชิงประจักษ์, สายอากาศไมโครสตริป, สายอากาศแบบทิศทางเดียว, การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น, พื้นที่เขตเมือง

Thesis Title	Path Loss Modelling in Urban Area of Thailand using Unidirectional Antenna on LoRaWAN Technology for Smart Meter
Author	Mr.Akekapong Kongsavat
Major Program	Electrical Engineering
Academic Year	2019

ABSTRACT

Smart Meter (SM) is a device used to measure electricity consumption. The SM can report power consumption to control center via communication link automatically via wireless communication technologies. LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) has been widely used for sensor network included the SM. The antenna is a key component to indicate an effective communication system. A MicroStrip (MS) antenna works based on unidirectional radiation pattern, which operates at a frequency of 920-925 MHz. Unidirectional pattern increases the efficiency of the communication system by reducing some interference and some noise. The MS antenna is used to design a new Path Loss (PL) model for LoRaWAN in urban areas. The PL model is used to predict the attenuation of signals caused by environmental and distance between transmitter and receiver. The result shows that proposed path loss model is developed by our proposed MS antenna that is more accurately than the traditional path loss model.

This thesis proposes a new path loss model for smart meter environment in the urban area of Thailand by using Empirical method and Linear Regression Analysis. The results show the Microstrip antenna performance is work in this environment, when compared to the commercial antenna. In addition, our model can predict the path loss more accurately than the Okumura-Hata model by estimating the Root Mean Square Error (RMSE) and the Coefficient of Determination or R-squared.

Keyword: LoRa, LoRaWAN, smart meter, path loss model, empirical model, microstrip antenna, unidirectional antenna, linear regression analysis, urban area

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ดร.ชลากร ครุพงศ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาอุทิศเวลาในการให้คำปรึกษาแนะนำองค์ความรู้ที่มีประโยชน์ ช่วยพัฒนากระบวนการคิด การเรียนรู้และการแก้ปัญหาในการทำวิจัย รวมทั้งให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าเสมอมา ตลอดจนได้ช่วยตรวจทาน วิจารณ์ และแก้ไขวิทยานิพนธ์จนแล้วเสร็จสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ดร.ไพโรจน์ วุ่นชุม ประธานกรรมสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ และกรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัย ถ่ายทอดความรู้ทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ และช่วยตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปได้อย่างสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ดร.กมล เขมะรังษี และ ดร.อภิเดช บุรณวงศ์ ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาเป็นกรรมสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัย และตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มิตรชัย จงเขียวชำนาญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รักกฤตว์ ดวงสร้อยทอง ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาเป็นกรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยเสมอมา

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ และให้ความช่วยเหลือด้านการประสานงานต่าง ๆ ด้วยดีเสมอมา

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ ห้องปฏิบัติการ และสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา และให้โอกาสพนักงานได้ศึกษาต่อในระดับที่สูงขึ้น เพื่อนำองค์ความรู้ที่ได้ กลับไปพัฒนาองค์กรต่อไป

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คณาจารย์ บุคลากร รวมถึงมิตรสหาย ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดามารดา และครอบครัว ที่ให้ความรักความห่วงใย คอยส่งเสริมสนับสนุน ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจที่ดีเยี่ยมแก่ข้าพเจ้า จนกระทั่งทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จ

เอกพงศ์ คงสวัสดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(5)
ABSTRACT	(6)
กิตติกรรมประกาศ.....	(7)
สารบัญ.....	(8)
รายการตาราง	(12)
รายการภาพประกอบ	(14)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(17)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้องานวิจัย	1
1.2 การทบทวนวรรณกรรม	2
1.2.1 เทคโนโลยีการสื่อสารของสมาร์ทมิเตอร์	2
1.2.2 สายอากาศแบบทิศทางเดียว	4
1.2.3 แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายสัญญาณ.....	8
1.2.4 สรุปประเด็นช่องว่างของการวิจัย	10
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	11
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	11
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	11
1.6 วิธีการดำเนินงานวิจัย	12
1.7 สถานที่ทำการวิจัยและเก็บข้อมูล.....	12
1.8 แผนการดำเนินงานวิจัย	13
1.9 สรุปท้ายบท	13
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	14
2.1 สมาร์ทมิเตอร์ (Smart Meter).....	14
2.1.1 โครงสร้างของสมาร์ทมิเตอร์	15
2.1.2 ประโยชน์ของสมาร์ทมิเตอร์	16
2.1.3 ชุดข้อมูลของสมาร์ทมิเตอร์ (Smart Meter Packet).....	18
2.1.4 ตัวอย่างของสมาร์ทมิเตอร์ที่ใช้งานจริงในประเทศไทย	19
2.2 เทคโนโลยีเครือข่ายการสื่อสารลอร์่า.....	20
2.2.1 การมอดูเลตสัญญาณลอร์่า.....	21
2.2.2 การดีมอดูเลตสัญญาณลอร์่า	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.3	สถาปัตยกรรมลอร่าแวน..... 24
2.2.4	ข้อกำหนดด้านการใช้งานย่านความถี่ของลอร่าแวน 27
2.3	ทฤษฎีสายอากาศไมโครสตริป..... 27
2.3.1	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป 28
2.3.2	การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป 29
2.3.2.1	คุณสมบัติของคลื่นบนสายอากาศไมโครสตริป 30
2.3.2.2	สตริปสายนำสัญญาณ (Microstrip Line Feed)..... 31
2.3.2.3	แพตช์รูปสี่เหลี่ยม (Rectangular Patch)..... 32
2.3.2.4	ระนาบกราวด์ (Ground Plane) 33
2.3.2.5	อิมพีแดนซ์ด้านเข้า และวงจรสมมูลของแพตช์รูปสี่เหลี่ยม 34
2.3.2.6	การป้อนสัญญาณแบบอินเซต (Inset Feed) 35
2.3.3	พารามิเตอร์สายอากาศ 36
2.3.3.1	อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance)..... 36
2.3.3.2	สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient) 37
2.3.3.3	การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)..... 38
2.3.3.4	อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio)..... 38
2.3.3.5	แบนด์วิดท์ (Bandwidth)..... 39
2.3.3.6	แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern)..... 39
2.3.3.7	พู่คลื่นการแผ่พลังงาน (Radiation Lobe)..... 40
2.3.3.8	ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beamwidth)..... 42
2.3.3.9	ประสิทธิภาพสายอากาศ (Antenna Efficiency) 42
2.3.3.10	สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)..... 42
2.3.3.11	อัตราขยาย (Gain)..... 43
2.3.3.12	โพลาไรเซชัน (Polarization)..... 43
2.3.3.13	บริเวณสนามไกล (Far-Field Region)..... 45
2.4	ทฤษฎีการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ 46
2.4.1	กลไกการแพร่กระจายสัญญาณ (Propagation Mechanisms) 46
2.4.2	การสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss) 47
2.4.3	การจางหายของสัญญาณ (Fading)..... 48
2.4.3.1	การจางหายสเกลเล็ก..... 49
2.4.3.2	การจางหายสเกลใหญ่ 49
2.4.4	แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss Model) 50
2.4.4.1	แบบจำลองการสูญเสียในช่องว่างอิสระ 50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.4.2 แบบจำลองการสูญเสียแบบสะท้อนพื้นผิว	51
2.4.4.3 แบบจำลองการสูญเสียแบบ Log-distance	52
2.4.4.4 แบบจำลองการสูญเสียแบบ Log-normal Shadowing.....	53
2.4.4.5 แบบจำลองการสูญเสียของโอคูมูระ-ฮาทะ	55
2.5 สรุปท้ายบท	56
บทที่ 3 การออกแบบและการติดตั้งอุปกรณ์	57
3.1 บทนำ	57
3.2 ต้นแบบสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ.....	58
3.2.1 คำนวณโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป	58
3.2.2 จำลองการทำงานของสายอากาศไมโครสตริป	62
3.2.3 การหาขนาดโครงสร้างที่เหมาะสม	63
3.2.3.1 การปรับปรุงโครงสร้างด้วยการจำลองแบบ.....	63
3.2.3.2 การปรับปรุงโครงสร้างทางกายภาพ.....	65
3.2.4 การวัดคุณลักษณะของต้นแบบสายอากาศ	67
3.3 การทดสอบสมรรถนะของต้นแบบสายอากาศ.....	73
3.4 สภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์	76
3.5 อุปกรณ์เครือข่ายลอร่าแวน.....	78
3.5.1 End Device (ED).....	79
3.5.2 Gateway (GW)	79
3.5.3 Network Server (NS)	80
3.5.4 Application Server (AS).....	80
3.6 สรุปท้ายบท	82
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	83
4.1 ประสิทธิภาพการส่งสัญญาณลอร่า	83
4.1.1 ระดับความเข้มของสัญญาณฝั่งรับ (RSSI) และระยะทางการสื่อสาร.....	83
4.1.2 อัตราส่วนการส่งชุดข้อมูลสำเร็จ (Packet Delivery Ratio).....	85
4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	86
4.3 การทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ.....	90
4.4 การทดสอบใช้งานแบบจำลองที่นำเสนอ	93
4.5 สรุปท้ายบท	96

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทสรุป.....	97
5.1 บทสรุป.....	97
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข.....	98
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาต่อไป.....	98
บรรณานุกรม.....	99
ภาคผนวก.....	104
ภาคผนวก ก. ตารางมาตรฐาน และข้อมูลผลการทดลอง.....	105
ภาคผนวก ข. การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน.....	112
ประวัติผู้เขียน.....	131

รายการตาราง

	หน้า
ตาราง 1-1 ความแม่นยำของแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง ก่อนและหลังการปรับปรุง [14].....	9
ตาราง 2-1 เปรียบเทียบการใช้งานระหว่างมิเตอร์ไฟฟ้าแบบดั้งเดิมและสมาร์ตมิเตอร์.....	16
ตาราง 2-2 ตัวอย่างขนาดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของสมาร์ตมิเตอร์ [22].....	18
ตาราง 2-3 ข้อมูลทางเทคนิคของสมาร์ตมิเตอร์ที่ติดตั้งจริงในระบบไฟฟ้าของ กฟภ.....	19
ตาราง 2-4 อัตราเร็ว Bit Rate ของเทคโนโลยีลอร์่า คำนวนจากสมการ (2-3).....	22
ตาราง 2-5 ค่าความไวของเครื่องรับและ SNR ขั้นต่ำสำหรับการติดต่อคุณลักษณะสัญญาณลอร์่า.....	23
ตาราง 2-6 แผนการจัดการช่องสัญญาณของเครือข่าย The Things Network.....	26
ตาราง 2-7 เลขชี้กำลังการสูญเสียในเส้นทางของสภาพแวดล้อมต่าง ๆ [38].....	52
ตาราง 2-8 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Shadowing Effect ในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ [40].....	54
ตาราง 2-9 เกณฑ์การจำแนกลักษณะของสภาพแวดล้อม [36].....	56
ตาราง 3-1 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปจากการคำนวณทางทฤษฎี.....	62
ตาราง 3-2 ขนาดระนาบกราวด์เปรียบเทียบกับคุณลักษณะสายอากาศจากการจำลอง.....	65
ตาราง 3-3 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ.....	67
ตาราง 3-4 ผลการวัดความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ.....	71
ตาราง 3-5 การเปรียบเทียบคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศที่ใช้ในการทดลอง.....	74
ตาราง 3-6 รายละเอียดการกำหนดค่าของอุปกรณ์เครือข่ายลอร์่าแวน.....	81
ตาราง 4-1 ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถดถอยของแบบจำลองเชิงประจักษ์.....	87
ตาราง 4-2 สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางแบบดั้งเดิม.....	90
ตาราง 4-3 สรุปผล Regression Statistics เปรียบเทียบชนิดของสายอากาศที่ทดลอง.....	91
ตาราง 4-4 การวิเคราะห์ ANOVA เปรียบเทียบชนิดของสายอากาศที่ทดลอง.....	91
ตาราง 4-5 สรุปผลการหา T-statistic และ P-value ของข้อมูลแต่ละสายอากาศที่ทดสอบ.....	91
ตาราง 4-6 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง.....	95
ตาราง ก-1 การแปลงอัตราส่วนคลื่นนิ่ง การสูญเสียย้อนกลับ กำลังงานส่งผ่านและสะท้อนกลับ [45]	106
ตาราง ก-2 ข้อมูลทางเทคนิคของสายอากาศมาตรฐานที่ใช้วัดทดสอบ [43].....	107
ตาราง ก-3 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ (สายอากาศ A)..	108
ตาราง ก-4 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเชิงพาณิชย์ (สายอากาศ B และ C).....	109

รายการตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตาราง ก-5 สรุปผลการวัดคุณภาพสัญญาณของสายอากาศ A.....	111
ตาราง ก-6 สรุปผลการวัดคุณภาพสัญญาณของสายอากาศ B.....	111
ตาราง ก-7 สรุปผลการวัดคุณภาพสัญญาณของสายอากาศ C.....	111
ตาราง ก-8 สรุปผลการวัดคุณภาพสัญญาณของสายอากาศ D.....	111

รายการภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1-1 ระบบการสื่อสารของสมาร์ตมิเตอร์ผ่านเครือข่ายลอร่าแวน [8].....	3
ภาพประกอบ 1-2 แบบจำลองเส้นทางการสื่อสารระหว่างสายอากาศแบบทิศทางเดียว [3]	5
ภาพประกอบ 1-3 การกำหนดชนิดของสายอากาศที่ใช้งานกับอุปกรณ์ AP และ STA.....	5
ภาพประกอบ 1-4 ความจุช่องสัญญาณเปรียบเทียบแต่ละชนิดของสายอากาศ [4].....	6
ภาพประกอบ 1-5 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแพตช์รูปลี่เหลี่ยม [11]	7
ภาพประกอบ 1-6 ค่าการสูญเสียในเส้นทางเปรียบเทียบระหว่าง ผลการวัดจริง ผลการทำนายจาก แบบจำลองดั้งเดิม และแบบจำลองที่ปรับปรุงแล้ว [13].....	8
ภาพประกอบ 2-1 บล็อกไดอะแกรมของมิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ ชนิดสามเฟส [18]	15
ภาพประกอบ 2-2 ตัวอย่างข้อมูล Load Profile จากสมาร์ตมิเตอร์ของ กฟภ.	17
ภาพประกอบ 2-3 ตัวอย่างของสมาร์ตมิเตอร์ที่ใช้งานในระบบไฟฟ้าของ กฟภ.....	19
ภาพประกอบ 2-4 สัญญาณ chirp ขี่ขึ้น (Up-chirp).....	21
ภาพประกอบ 2-5 แผนภาพ Spectrogram ของการมอดูเลตสัญญาณลอร่า	21
ภาพประกอบ 2-6 เปรียบเทียบลักษณะของโทโพโลยีแบบต่าง ๆ	24
ภาพประกอบ 2-7 สถาปัตยกรรมลอร่าแวนเมื่อประยุกต์ใช้งานกับสมาร์ตมิเตอร์	24
ภาพประกอบ 2-8 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแพตช์รูปลี่เหลี่ยม.....	28
ภาพประกอบ 2-9 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนไมโครสตริปสายส่ง	29
ภาพประกอบ 2-10 การพิจารณาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล.....	31
ภาพประกอบ 2-11 โครงสร้างสตริปสายนำสัญญาณ	31
ภาพประกอบ 2-12 โครงสร้างแพตช์ตัวนำและเส้นแรงไฟฟ้าที่ขอบ	32
ภาพประกอบ 2-13 วงจรสมมูลของโครงสร้างแพตช์รูปลี่เหลี่ยม	34
ภาพประกอบ 2-14 โครงสร้างแพตช์รูปลี่เหลี่ยมที่มีการป้อนสัญญาณแบบอินเซิต	36
ภาพประกอบ 2-15 วงจรสมมูลเทวินินของเครื่องส่งสัญญาณ	36
ภาพประกอบ 2-16 พารามิเตอร์การกระจายของอุปกรณ์โครงข่าย 2 พอร์ต.....	37
ภาพประกอบ 2-17 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพล	40
ภาพประกอบ 2-18 องค์ประกอบของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบชี้ทิศทาง	41
ภาพประกอบ 2-19 ชนิดของโพลาริเซชันแบบต่าง ๆ [34].....	44
ภาพประกอบ 2-20 การแบ่งประเภทบริเวณสนามของสายอากาศ.....	45
ภาพประกอบ 2-21 กลไกการแพร่กระจายสัญญาณแบบหลายเส้นทาง [35].....	46

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพประกอบ 2-22 การสูญเสียกำลังงานในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย	48
ภาพประกอบ 2-23 การจางหายของสัญญาณ [37].....	49
ภาพประกอบ 2-24 แบบจำลองการสูญเสียแบบสะท้อนพื้นผิว [36]	51
ภาพประกอบ 2-25 การวิเคราะห์แบบจำลองการสูญเสีย Log-normal Shadowing [39].....	53
ภาพประกอบ 3-1 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศบนสมาร์ตมิเตอร์.....	57
ภาพประกอบ 3-2 กระบวนการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป.....	58
ภาพประกอบ 3-3 พารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป	61
ภาพประกอบ 3-4 สัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) จากการจำลองสายอากาศที่คำนวณทางทฤษฎี....	62
ภาพประกอบ 3-5 สัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) จากการจำลองปรับปรุงความยาวแพตช์	63
ภาพประกอบ 3-6 สัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) จากการจำลองปรับปรุงความกว้างแพตช์	64
ภาพประกอบ 3-7 การวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของต้นแบบสายอากาศที่ปรับปรุง ด้วยวิธีการ จำลองแบบ	65
ภาพประกอบ 3-8 การวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของต้นแบบสายอากาศที่นำเสนอ	66
ภาพประกอบ 3-9 ต้นแบบสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ	67
ภาพประกอบ 3-10 ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ	68
ภาพประกอบ 3-11 ผลการวัดอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันของสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ.....	68
ภาพประกอบ 3-12 อุปกรณ์และสภาพแวดล้อมการวัดทดสอบภายนอกอาคาร	69
ภาพประกอบ 3-13 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ.....	70
ภาพประกอบ 3-14 ผลการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ในการทดสอบอัตราขยาย	72
ภาพประกอบ 3-15 สายอากาศที่ใช้ในการทดลอง	73
ภาพประกอบ 3-16 ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของสายอากาศที่ใช้ในการทดลอง	74
ภาพประกอบ 3-17 มาตรฐานการติดตั้งสมาร์ตมิเตอร์บนเสาไฟฟ้า (ที่มา: กฟภ.)	76
ภาพประกอบ 3-18 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณลora ในสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์.	77
ภาพประกอบ 3-19 พื้นที่ตรวจวัดสัญญาณในเขตเทศบาลเมืองนราธิวาส (ที่มา: Google Earth)....	77
ภาพประกอบ 3-20 รูปแบบการส่งผ่านข้อมูลการทดลองผ่านเครือข่ายลoraแวน	78
ภาพประกอบ 3-21 อุปกรณ์ลora End Device ที่ใช้ในการทดลอง.....	79
ภาพประกอบ 3-22 อุปกรณ์ลoraเกตเวย์ที่ใช้ในการทดลอง	80
ภาพประกอบ 3-23 เครือข่ายลoraแวน Network Server ที่ใช้ในการทดลอง.....	80

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพประกอบ 3-24 การจัดการข้อมูลใน Application Server ด้วยซอฟต์แวร์ Node-Red.....	81
ภาพประกอบ 4-1 ผลการวัดคุณภาพสัญญาณลORAเปรียบเทียบชนิดของสายอากาศ	85
ภาพประกอบ 4-2 อัตราการส่งชุดข้อมูลสำเร็จ (PDR) เปรียบเทียบแต่ละช่วงระยะทาง	86
ภาพประกอบ 4-3 ผลการวัดค่าการสูญเสียในเส้นทางเปรียบเทียบแต่ละชนิดของสายอากาศที่ทดลอง	88
ภาพประกอบ 4-4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการถดถอยเชิงเส้น	90
ภาพประกอบ 4-5 การทดสอบใช้งานจริงของแบบจำลองการสูญเสียที่นำเสนอ	93
ภาพประกอบ 4-6 การวิเคราะห์ Downtilt และ Coverage ของระบบการสื่อสาร.....	96
ภาพประกอบ ก-1 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ B และ C.....	110
ภาพประกอบ ก-2 การวัดค่าการสูญเสียในสายนำสัญญาณของสายอากาศ A	110
ภาพประกอบ ก-3 การวัดค่าการสูญเสียในสายนำสัญญาณของสายอากาศ B และ D	110

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

WSNs	Wireless Sensor Networks
SM	Smart Meter
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWAN	Low Power Wide Area Network
CSS	Chirp Spread Spectrum
SF	Spreading Factor
DR	Data Rate
BW	Bandwidth
CR	Coding Rate
AS923	Asia 920-925 MHz of LoRaWAN
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
PHY	Physical Layer
MAC	Medium Access Control
RF	Radio Frequency
GPS	Global Positioning System
ACK	Acknowledgment
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SNR	Signal to Noise Ratio
LHCP	Left Hand Circularly Polarization
RHCP	Right Hand Circularly Polarization
AR	Axial Ratio
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
IP	Internet Protocol
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
LOS	Line of Sight
NLOS	Non Line of Sight
Tx	Transmitter
Rx	Receiver
RMSE	Root Mean Square Error
PLE	Path Loss Exponent
PLI	Path Loss Intercept
RL	Return Loss

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

ϵ_r	Relative Permittivity (ไม่มีหน่วย)
ϵ_0	Permittivity of Free Space (ฟารัดต่อเมตร)
μ_0	Permeability of Free Space (เฮนรี่ต่อเมตร)
W	Width of The Patch (เมตร)
L	Length of The Patch (เมตร)
f_0	Operating Frequency (เฮิรตซ์)
h	Thickness of Substrate (เมตร)
S_{11}	Reflection Coefficient at port 1 (ไม่มีหน่วย)
S_{21}	Transmission Coefficient from port 1 to port 2 (ไม่มีหน่วย)
Γ	Reflection Coefficient (ไม่มีหน่วย)
Z_{in}	Input Impedance (โอห์ม)
Z_{out}	Output Impedance (โอห์ม)
λ_0	Wavelength of Electromagnetic Wave in Free Space (เมตร)
R_{in}	Input Resistance of Patch Antenna (โอห์ม)
ω	Angular Frequency (เรเดียนต่อวินาที)
\vec{E}	Electric Field Vector (โวลต์ต่อเมตร)
\vec{H}	Magnetic Field Vector (แอมป์ต่อเมตร)
n	Path Loss Exponent (ไม่มีหน่วย)
β	Path Loss Intercept (เดซิเบล)
σ	Standard Deviation of Shadowing Effect (เดซิเบล)
T_s	Symbol Period (วินาที)
R_s	Symbol Rate (symbols ต่อวินาที)
R_b	Bit Rate (บิตต่อวินาที, bps)
SLL	Side Lobe Level (เดซิเบล)
SLR	Side Lobe Ratio (เดซิเบล)
F/R ratio	Front to Back Ratio (เดซิเบล)
AR	Axial Ratio (ไม่มีหน่วย)
G	Antenna Gain (ไม่มีหน่วย, dBi)
D	Antenna Directivity (ไม่มีหน่วย, dB)
e	Antenna Efficiency (ไม่มีหน่วย)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้องานวิจัย

มิเตอร์อัจฉริยะ หรือสมาร์ตมิเตอร์ (Smart Meter) คือ อุปกรณ์วัดปริมาณการใช้ไฟฟ้า มีลักษณะเด่นคือ สามารถวัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าได้ตามเวลาจริง (Real time) ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถรับรู้และตระหนัก เพื่อการบริหารจัดการพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสมาร์ตมิเตอร์มีลักษณะเด่นอีกหนึ่งประการคือ สามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายสื่อสารในรูปแบบต่าง ๆ ได้ เช่น เทคโนโลยีการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้า (Power Line Communications: PLC) เครือข่ายเซลลูลาร์ (Cellular Network) เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) และเครือข่ายแอลพีแวน (Low Power Wide Area Network: LPWAN) เป็นต้น [1] การเลือกใช้งานเครือข่ายการสื่อสารสำหรับสมาร์ตมิเตอร์ ปัจจัยที่ต้องพิจารณา ได้แก่ ปริมาณลูกข่ายที่รองรับได้ พื้นที่ครอบคลุมการสื่อสาร การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล และการทนต่อสัญญาณรบกวนหรือการส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมภายนอกเป็นต้น

เทคโนโลยีการสื่อสารลอว์แวน (Long Range Wide Area Network: LoRaWAN) เป็นเครือข่ายการสื่อสารแบบไร้สาย ครอบคลุมระยะทางสื่อสารบริเวณกว้าง อัตราสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ สามารถรองรับลูกข่ายจำนวนมาก การมอดูเลตด้วยเทคนิคเชิร์ปสเปกตรัม (Chirp Spread Spectrum: CSS) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการรับสัญญาณให้มีค่าความไว (Sensitivity) ที่ดีขึ้นกว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบอื่น ๆ [2] ซึ่งลักษณะเด่นที่กล่าวมานี้ ตรงกับความต้องการของระบบการสื่อสารของสมาร์ตมิเตอร์ นอกจากนี้ สายอากาศ (Antenna) เป็นองค์ประกอบสำคัญในการวัดประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบไร้สาย สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna) มีลักษณะเด่น ได้แก่ มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว (Unidirectional Pattern) โดยพลังงานส่วนใหญ่ของสายอากาศ จะถูกแพร่กระจายไปสู่ทิศทางที่ต้องการ สามารถลดสัญญาณรบกวน (Noise Signal) ลดการแทรกสอด (Interference) ของสัญญาณจากทิศทางอื่นหรือแหล่งกำเนิดสัญญาณอื่นข้างเคียง [3] และช่วยเพิ่มความจุช่องสัญญาณ (Channel Capacity) [4] โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปมีน้ำหนักเบา แบนราบ และมีต้นทุนการผลิตต่ำ [5] ซึ่งลักษณะที่กล่าวมานี้ ตรงกับความต้องการของสายอากาศสมาร์ตมิเตอร์ อีกทั้งในการออกแบบและการวิเคราะห์ระบบการสื่อสารแบบไร้สาย จำเป็นต้องอาศัยโมเดลที่เรียกว่า แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss Model) ที่มีความถูกต้องแม่นยำ และเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมใช้งาน เพื่อประมาณหรือทำนายการสูญเสียในเส้นทางของสัญญาณ (Path Loss) ที่เกิดในระบบ ด้วยปัจจัยจากตัวกลางการสื่อสารหรือสภาพแวดล้อม [6] จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางแบบดั้งเดิม มีความคลาดเคลื่อนของผลการทำนายสูง ไม่สอดคล้องกับผลการวัดการสูญเสียในสภาพแวดล้อมจริง

วิทยานิพนธ์นี้ จึงนำเสนอการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปสำหรับใช้งานกับสมาร์ตมิเตอร์ และการสร้างแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางใหม่ ด้วยวิธีการเชิงประจักษ์ (Empirical Method) และการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) [7] เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่เหมาะสมสำหรับใช้งานในสภาพแวดล้อมเขตเมือง (Urban Area)

ของประเทศไทย ผ่านเทคโนโลยีเครือข่ายการสื่อสารลอร์ราแวน ทำงานที่ความถี่ 920-925 MHz โดยเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางที่นำเสนอ กับแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางแบบดั้งเดิม การเปรียบเทียบสมรรถนะของสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ กับสายอากาศไมโครสตริปเชิงพาณิชย์ ผลการทดลองตรวจวัดระดับกำลังเฉลี่ยของสัญญาณภาครับ (Received Signal Strength Indicator: RSSI) แสดงให้เห็นว่า สายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอสามารถใช้งานได้ดี ไม่แตกต่างจากสายอากาศเชิงพาณิชย์ ในสภาพแวดล้อมของสมาร์ทมิเตอร์ (Smart Meter Environment) ที่กำหนด นอกจากนี้ แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางที่นำเสนอสามารถทำนายค่าการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss) ได้ใกล้เคียงกับผลการวัดในสภาพแวดล้อมจริง และแม่นยำมากกว่า แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางแบบดั้งเดิม ได้แก่ แบบจำลองการสูญเสียในช่องว่างอิสระ (Free Space Model) และแบบจำลองการสูญเสีย Okumura-Hata ด้วยการประเมินขนาดความคลาดเคลื่อน Root Mean Square Error (RMSE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination) หรือ R-squared

สายอากาศไมโครสตริป และแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางที่นำเสนอ สามารถประยุกต์ใช้งานได้จริงกับระบบการสื่อสารของสมาร์ทมิเตอร์ บนเครือข่ายลอร์ราแวน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสาร ใช้วางแผนการออกแบบระบบการสื่อสาร และการหาตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ที่เหมาะสมที่สุด ในสภาพแวดล้อมเขตเมือง ซึ่งมีลักษณะตรงกับ Smart Meter Environment ของวิทยานิพนธ์นี้

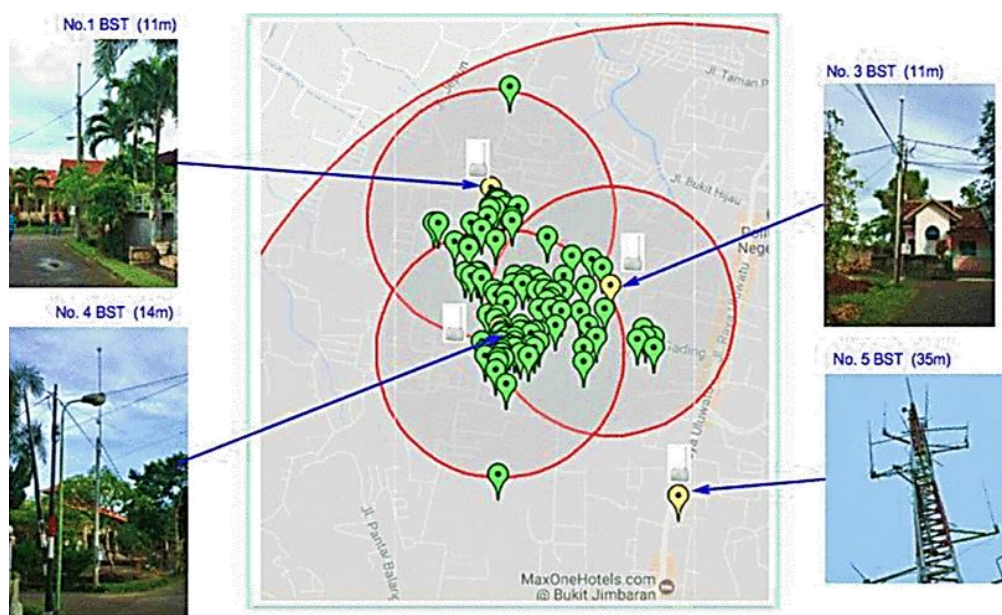
1.2 การทบทวนวรรณกรรม

สำหรับเนื้อหาในหัวข้อการตรวจสอบเอกสารนี้ แบ่งออกเป็นสี่หัวข้อย่อย ซึ่งหัวข้อย่อยที่หนึ่งถึงสาม นำเสนองานวิจัยสามประเภท ได้แก่ เทคโนโลยีการสื่อสารของสมาร์ทมิเตอร์, สายอากาศแบบทิศทางเดียว และแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง การแพร่กระจายสัญญาณ ซึ่งในแต่ละหัวข้อย่อย ได้อธิบายผลการสำรวจงานวิจัย ข้อดี ข้อด้อย ของแต่ละงานวิจัย และหัวข้อย่อยสุดท้าย นำเสนอการสรุปประเด็นช่องว่างของการวิจัย (Research Gap) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.2.1 เทคโนโลยีการสื่อสารของสมาร์ทมิเตอร์

บทความ [1] นำเสนอบทวิเคราะห์ภาพรวมของเทคโนโลยีสมาร์ทมิเตอร์ ซึ่งถูกพัฒนาและถูกนำมาติดตั้งทดแทนมิเตอร์แอนะล็อกแบบดั้งเดิม ด้วยแนวโน้มที่สูงขึ้นทั่วโลก ความสามารถเด่นของสมาร์ทมิเตอร์ คือ การสื่อสารสองทิศทางระหว่างผู้บริโภคกับผู้ให้บริการ การอ่านหน่วยอัตโนมัติ มีระบบติดตามและควบคุม มีระบบจัดเก็บข้อมูลและประมวลผล และมีระบบแจ้งเตือนความผิดปกติ เป็นต้น รูปแบบการสื่อสารของสมาร์ทมิเตอร์เป็นไปได้ทั้ง แบบมีสาย (Wire) และแบบไร้สาย (Wireless) การสื่อสารผ่านสายให้ประสิทธิภาพที่สูง มีความน่าเชื่อถือและปลอดภัยมากกว่าการสื่อสารแบบไร้สาย ซึ่งอาศัยคลื่นวิทยุในการส่งสัญญาณ อย่างไรก็ตาม การสื่อสารผ่านสายต้องใช้งบลงทุนสูงสำหรับการวางระบบโครงสร้าง และไม่เหมาะสมสำหรับลักษณะงานสมาร์ทมิเตอร์ ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ในเขตที่พักอาศัย เป็นต้น

บทความ [8] นำเสนอผลการทดลองใช้งานสมาร์ตมิเตอร์ ผ่านเครือข่ายลอร่าแวน ดำเนินการโดยหน่วยงานพีแอลเอ็น (The national power utility company: PLN) ในพื้นที่เมืองบาห์ลี ประเทศอินโดนีเซีย ในอดีตพีแอลเอ็นได้ปรับปรุง และพัฒนาระบบสื่อสารของสมาร์ตมิเตอร์มาอย่างต่อเนื่อง เช่น เครือข่ายจีเอสเอ็ม (Global System for Mobile Communications: GSM) การสื่อสารผ่านสายไฟฟ้า (PLC) และการสื่อสารสนามใกล้ (Near Field Communication: NFC) ซึ่งเทคโนโลยีเหล่านี้ ค่อนข้างมีต้นทุนสูง จึงยังไม่สามารถใช้งานได้จริง สำหรับระบบการสื่อสารของสมาร์ตมิเตอร์ อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารประเภทแอลพีแวน (LPWAN) ซึ่งประกอบไปด้วยเทคโนโลยีลอร่า เอ็นบีไอโอที (Narrow Band Internet of Things: NB-IoT) และซิกฟอกซ์ (SigFox) ได้ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายมากขึ้น ในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย รวมถึงการประยุกต์ใช้งานกับสมาร์ตมิเตอร์ ในช่วงเวลาที่บทความนี้ถูกนำเสนอ เทคโนโลยีเอ็นบีไอโอทียังไม่สามารถใช้งานได้ เนื่องจากไม่มีผู้ให้บริการเครือข่ายโทรศัพท์รายใด ดำเนินการวางโครงสร้างพื้นฐานของระบบเทคโนโลยีซิกฟอกซ์ทำงานที่ความถี่ 868 MHz ซึ่งทับซ้อนกับย่านความถี่ของดิจิทัลทีวี ในประเทศอินโดนีเซีย จึงไม่สามารถใช้งานได้ ดังนั้น เครือข่ายการสื่อสารลอร่าแวน จึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสม มีความยืดหยุ่นในการออกแบบระบบ และสามารถทำงานที่ย่านความถี่ซึ่งไม่ต้องขออนุญาต (Unlicensed) ระหว่าง 902 ถึง 928 MHz บริษัทพีแอลเอ็นได้ทำการสับเปลี่ยนมิเตอร์ไฟฟ้าแบบดั้งเดิมด้วยสมาร์ตมิเตอร์ ให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าจำนวน 1,000 เครื่อง ดังภาพประกอบ 1-1 การออกแบบโครงสร้างระบบสื่อสาร เป็นไปตามสถาปัตยกรรมของลอร่าแวน กำหนดการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังแม่ข่ายทุก ๆ 30 นาที ผลการวิเคราะห์ระบบแสดงให้เห็นว่า การควบคุมการทำงานของสมาร์ตมิเตอร์มีความถูกต้อง 100% สามารถลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานลงได้ 90% และมีประสิทธิภาพด้านการลงทุนคิดเป็น 60% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานมิเตอร์ไฟฟ้าแบบดั้งเดิม



ภาพประกอบ 1-1 ระบบการสื่อสารของสมาร์ตมิเตอร์ผ่านเครือข่ายลอร่าแวน [8]

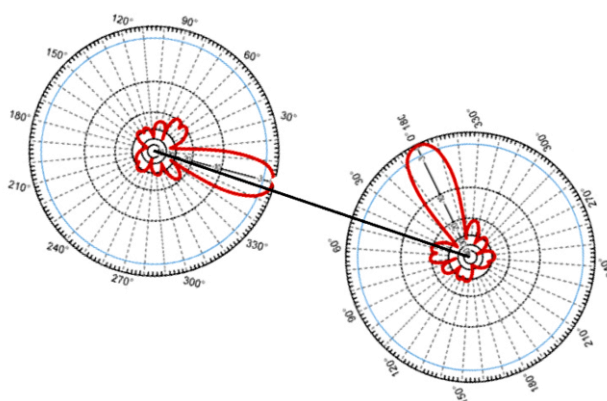
บทความ [9] นำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อจำกัดของเทคโนโลยีลอร่าแวน สำหรับใช้งานกับสมาร์ตมิเตอร์ ด้วยวิธีการจำลองแบบ (Simulation) ของเครือข่ายลอร่าแวน การออกแบบระบบเลือกพิจารณากรณีที่สำคัญที่สุด คือ สมาร์ตมิเตอร์ถูกติดตั้งภายในอาคาร (Deep Indoor) ของพื้นที่เขตเมืองหนาแน่น ครอบคลุมพื้นที่ 17 ตารางกิโลเมตร ด้วยเกตเวย์ทั้งหมด 19 เครื่อง ติดตั้งห่างกันระยะทาง 1 กิโลเมตร เกตเวย์แต่ละเครื่อง รองรับสมาร์ตมิเตอร์ที่ใช้สายอากาศ 0 dBi จำนวน 1,000 เครื่อง กำหนดแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นของ Okumura-Hata ร่วมกับการพิจารณาผลกระทบ Shadowing และค่าลดทอนการสูญเสียภายในอาคาร การจำลองระบบถูกวัดประสิทธิภาพด้วยค่าการรับประกันคุณภาพ หรือคิวโอเอส (Quality of Service: QoS) และอัตราคลาดเคลื่อนของชุดข้อมูล (Packet Error Rate: PER) พบว่า เมื่อพิจารณาเฉพาะการส่งข้อมูลขาขึ้น (Up Link) ระบบมีค่าเฉลี่ย QoS เท่ากับ 98% และ PER ของแต่ละโหนดที่มีค่าน้อยกว่า 10% คิดเป็นร้อยละ 98.8 ของจำนวนโหนดทั้งหมด อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาการส่งข้อมูลขาขึ้นร่วมกับขาลง (Down Link) ที่ใช้สำหรับบอกรัฐสภาพตอบกลับจากแม่ข่าย (Acknowledge) พบว่าค่าเฉลี่ย QoS เท่ากับ 92.25% และ PER ของแต่ละโหนดที่มีค่าน้อยกว่า 10% คิดเป็นร้อยละ 76 ของจำนวนโหนดทั้งหมด ดังนั้น ในบทความนี้ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเครือข่ายลอร่าแวน จากการพิจารณาด้วยค่าเฉลี่ย QoS และ PER ในกรณีที่กำหนดให้มีการส่งข้อมูลขาขึ้นและขาลง ประสิทธิภาพของเครือข่ายจะต่ำลงจากค่า PER และ QoS ที่ต่ำลง ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับการมีระบบการสื่อสารอื่น หรือแหล่งกำเนิดสัญญาณของระบบอื่น มาใช้งานในช่องสัญญาณหรือความถี่ใกล้เคียงกัน ซึ่งถือว่าเป็นข้อจำกัดประการหนึ่งของเครือข่ายการสื่อสารลอร่าแวน

แม้ว่าเทคโนโลยีการสื่อสารที่สามารถประยุกต์ใช้งานกับสมาร์ตมิเตอร์ มีหลากหลายเทคโนโลยี [1] แต่ในปัจจุบัน การเลือกใช้เทคโนโลยีเครือข่ายลอร่าแวน ก็เป็นตัวเลือกที่มีความเหมาะสม ทั้งด้านการลงทุน พื้นที่ครอบคลุม การวางระบบโครงสร้างพื้นฐานไม่ซับซ้อน ยืนยันจากผลการทดลองติดตั้งจริงใน [8] และผลการจำลองใน [9] แม้ว่าประสิทธิภาพของเครือข่ายจะลดลง เมื่อกำหนดให้สมาร์ตมิเตอร์ ต้องรอรับการยืนยันการส่งชุดข้อมูลจากแม่ข่าย แต่ในทางปฏิบัติ สมาร์ตมิเตอร์อาจไม่จำเป็นต้องได้รับการยืนยันความสำเร็จของการส่งชุดข้อมูลทุกครั้ง เนื่องจาก สมาร์ตมิเตอร์ไม่ได้ส่งข้อมูลต่อเนื่องตลอดเวลา แต่สามารถกำหนดรอบการส่งข้อมูล เช่น ส่งข้อมูลทุก 15 นาที หรือทุก 1 ชั่วโมง เป็นต้น ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้เลือกศึกษาเทคโนโลยีการสื่อสารลอร่าแวน มาประยุกต์ใช้งานกับสมาร์ตมิเตอร์ในพื้นที่เขตเมือง ของประเทศไทย

1.2.2 สายอากาศแบบทิศทางเดียว

บทความ [3] นำเสนอการใช้งานสายอากาศแบบทิศทางเดียว (Unidirectional Pattern) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบไร้สาย จากการที่เครื่องรับสามารถรับสัญญาณที่มีความแรงมากขึ้น และการช่วยลดสัญญาณรบกวน (Noise) หรือผลกระทบจากการแทรกสอด (Interference) ที่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณอื่น ในทิศทางที่ไม่ต้องการ จึงเหมาะสำหรับระบบสื่อสารที่ติดตั้งอยู่กับที่ เช่น ระบบสมาร์ตมิเตอร์ เป็นต้น ในบทความนี้ สร้างแบบจำลองทางสถิติสำหรับวิเคราะห์ผลกระทบจากการใช้สายอากาศแบบทิศทางเดียว โดยปัจจัยหลักที่นำมาพิจารณา คือ อัตราขยาย (Gain) และรูปแบบการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) ของสายอากาศ

ภายใต้เส้นทางการสื่อสารระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ ดังภาพประกอบ 1-2 แสดงรูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบทิศทางเดียว ระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ จากการพิจารณาทิศทางของพู่คลื่นหลัก (Main Lobe) ของสายอากาศทั้งสอง ไม่ได้เห็นด้านที่มีการแผ่พลังงานสูงสุดเข้าหากัน ดังนั้น พารามิเตอร์อัตราขยาย เมื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาระดับความแรงของสัญญาณเครื่องรับ จะไม่ใช่ค่าอัตราขยายสูงสุด แต่จะขึ้นอยู่กับมุมที่สายอากาศหันพู่คลื่นหลักเข้าหากัน และรูปแบบการแผ่พลังงานของแต่ละสายอากาศ ซึ่งผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองการหาระดับความแรงของสัญญาณเครื่องรับที่สร้างขึ้นมานี้ มีความถูกต้องแม่นยำ สะดวกในการใช้งาน และสามารถทำนายประสิทธิภาพของระบบการสื่อสาร ที่ใช้สายอากาศแบบทิศทางเดียวได้อย่างแม่นยำ



ภาพประกอบ 1-2 แบบจำลองเส้นทางการสื่อสารระหว่างสายอากาศแบบทิศทางเดียว [3]

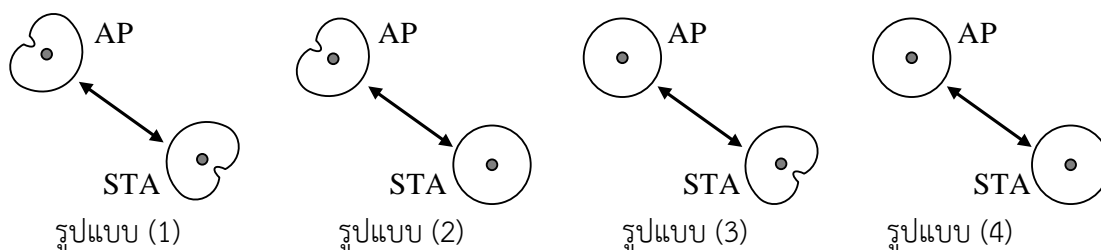
บทความ [4] นำเสนอการปรับปรุงความจุช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ของระบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) ที่มีความหนาแน่น และมีการแทรกสอดสัญญาณ (Interference) สูง ด้วยการใช้งานสายอากาศชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Directional Antenna) ในการชี้ทิศทางลำคลื่นระหว่างอุปกรณ์ Access Point (AP) และสถานีส่ง (Station: STA) ค่าความจุช่องสัญญาณ คำนวณได้จากสมการของแชนนอน (Shannon's equation) ดังนี้ [4]

$$\frac{C}{B} = \sum_{i=1}^m \log_2(1 + SINR_i) \quad (1-1)$$

เมื่อ C/B = ความจุช่องสัญญาณ (bit/s/Hz)

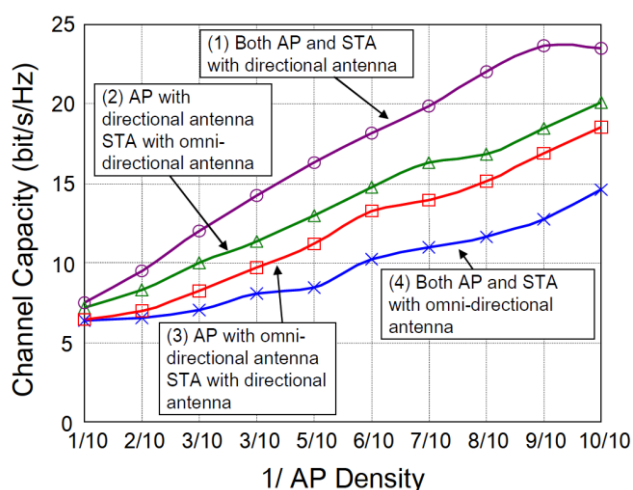
$SINR_i$ = Signal to Interference and Noise Ratio ของเส้นทางการสื่อสาร i (ไม่มีหน่วย)

m = จำนวนเส้นทางการสื่อสารทั้งหมด



ภาพประกอบ 1-3 การกำหนดชนิดของสายอากาศที่ใช้ร่วมกับอุปกรณ์ AP และ STA

การประเมินความจุช่องสัญญาณ ใช้วิธีการจำลองแบบ (Simulation) โดยทดลองเปรียบเทียบความหนาแน่นของ AP ตั้งแต่ 1 ถึง 10 เครื่อง และตำแหน่ง STA ในสภาพแวดล้อมที่กำหนด จากภาพประกอบ 1-3 แสดงการกำหนดชนิดของสายอากาศระหว่าง Unidirectional และ Omnidirectional ซึ่งถูกติดตั้งให้กับ AP และ STA ทั้งหมด 4 รูปแบบ จากผลการทดลอง สรุปได้ดังภาพประกอบ 1-4 แสดงกราฟความจุช่องสัญญาณ เปรียบเทียบกับความหนาแน่นอุปกรณ์เครือข่าย โดยรูปแบบ (1) ซึ่งใช้งานสายอากาศชนิด Unidirectional มีความจุช่องสัญญาณสูงที่สุดในทุกระดับความหนาแน่น ในขณะที่ การใช้งานสายอากาศชนิด Omnidirectional ของรูปแบบ (2) มีค่าความจุช่องสัญญาณต่ำที่สุดในทุกระดับความหนาแน่น ดังนั้น สายอากาศชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Directional Antenna) ซึ่งมีความสามารถในการกำหนดทิศทาง สามารถเพิ่มความจุช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ของระบบการสื่อสารให้สูงขึ้นได้

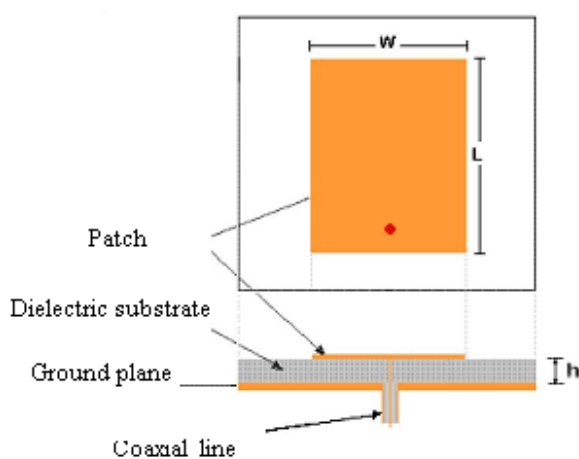


ภาพประกอบ 1-4 ความจุช่องสัญญาณเปรียบเทียบแต่ละชนิดของสายอากาศ [4]

บทความ [10] นำเสนอการจำลองผลกระทบจากการแทรกสอด (Interference) ในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย WiLD (WiFi-based Long Distance) ด้วยโปรแกรม Network Simulation เวอร์ชันสาม (NS-3) โดยกำหนดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เป็นแบบทิศทางเดียว ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าพู่ข้าง (Side Lobe) ของสายอากาศแต่ละตัว ส่งผลให้เกิดการแทรกสอดของสัญญาณวิทยุขึ้นภายในระบบ เนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ และส่งผลกระทบต่อ Throughput ของระบบได้

บทความ [5] และบทความ [11] นำเสนอการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna) และเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ ลักษณะเด่นของสายอากาศชนิดนี้ คือ มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โครงสร้างขนาดเล็ก แบนราบ ต้นทุนการผลิตต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศชนิดอื่น เนื่องจากวัสดุโครงสร้างสายอากาศสามารถสร้างได้จากแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board: PCB) และสามารถปรับเปลี่ยนรูปร่างของสายอากาศเพื่อให้ได้คุณลักษณะที่ต้องการ จึงได้รับความนิยมอย่างมากจากนักวิจัยด้านสายอากาศ เพื่อ

ประยุกต์ใช้งานในระบบการสื่อสารหรืออุปกรณ์การสื่อสารต่าง ๆ ทั้งสองบทความนี้ ออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแพทช์รูปสี่เหลี่ยม (Rectangular Microstrip Patch Antenna) ซึ่งเป็นรูปร่างพื้นฐาน ดังภาพประกอบ 1-5 การคำนวณขนาดโครงสร้างทำได้ง่าย ด้วยแบบจำลองสายนำสัญญาณ (Transmission Line Model) แม้ว่าสายอากาศไมโครสตริปโครงสร้างพื้นฐาน จะมีข้อด้อยคือ ประสิทธิภาพต่ำ และแบนด์วิดท์แคบ แต่สามารถปรับปรุงคุณลักษณะดังกล่าวได้ด้วยเทคนิคต่าง ๆ เช่น การเพิ่มชั้นวางซ้อนเหนือแพทช์ของสายอากาศ (Superstrate) หรือการเพิ่มโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap: EBG) สามารถปรับปรุงอัตราขยาย และเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศให้ดีขึ้น หรือการเพิ่มโครงสร้างสลอต (Slot) ลงบนส่วนแพทช์ของสายอากาศไมโครสตริป สามารถทำให้เกิดการเรโซแนนซ์หลายย่านความถี่ที่มีการทับซ้อนกัน ส่งผลให้สายอากาศมีแบนด์วิดท์ที่กว้างขึ้นได้ เป็นต้น



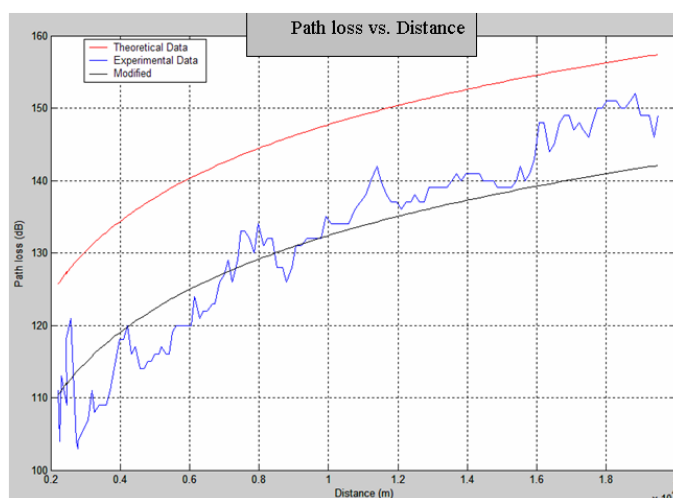
ภาพประกอบ 1-5 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแพทช์รูปสี่เหลี่ยม [11]

จากข้อดีของการใช้งานสายอากาศแบบทิศทางเดียว ในด้านการลดการแทรกสอดและลดสัญญาณรบกวน รวมถึงความสามารถในการเพิ่มความจุของสัญญาณ [3], [4], [10] วิทยานิพนธ์นี้ จึงสนใจนำคุณสมบัติดังกล่าว มาประยุกต์ใช้งานกับสมาร์ตมิเตอร์ ซึ่งจะถูกติดตั้งเป็นจำนวนมาก เพื่อลดปัญหาการรบกวนกันของสัญญาณวิทยุ และเนื่องจากสมาร์ตมิเตอร์ถูกติดตั้งอยู่กับที่บนเสาไฟฟ้า เส้นทางสื่อสารจึงถูกกำหนดไว้ตั้งแต่แรก ในขั้นตอนการติดตั้งระบบ สายอากาศแบบทิศทางเดียวจึงมีความเหมาะสมกว่าสายอากาศแบบรอบตัว (Omnidirectional Pattern) สายอากาศไมโครสตริปแพทช์รูปสี่เหลี่ยมที่นำเสนอใน [5] และ [11] มีโครงสร้างเหมาะสมกับการติดตั้งใช้งานจริงบนเสาไฟฟ้า ซึ่งมีขนาดพื้นที่การติดตั้งจำกัด ต้นทุนการผลิต หรือราคาจำหน่ายของสายอากาศเป็นปัจจัยสำคัญที่ถูกนำมาพิจารณา เนื่องจากปริมาณของสมาร์ตมิเตอร์มีจำนวนมาก การใช้งานสายอากาศไมโครสตริปซึ่งสร้างจากวัสดุแผ่นวงจรพิมพ์ จึงมีต้นทุนที่ถูกกว่าสายอากาศชนิดอื่น อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยของสายอากาศไมโครสตริปโครงสร้างพื้นฐาน คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศต่ำ และช่วงแบนด์วิดท์ใช้งานแคบ ซึ่งปัจจัยทั้งสองนี้ จะถูกนำมาเป็นประเด็นพิสูจน์ ในงานวิจัยนี้ต่อไป

1.2.3 แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายสัญญาณ

บทความ [12] นำเสนอผลการเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายสัญญาณ (Propagation Path Loss Model) ทั้งหมด 6 แบบจำลอง เพื่อทำนายผลการวัดค่าการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss) ในสภาพแวดล้อมจริง ของเมือง Narnaul ประเทศอินเดีย พิจารณาการสื่อสารที่ความถี่ 900 และ 1,800 MHz แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางที่ถูกเปรียบเทียบ ได้แก่ Log-distance Path Loss Model, Stanford University Interim (SUI) Model, Okumura Model, Hata Model, COST-231 Model และ ECC-33 model ผลการวิเคราะห์ข้อมูล แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่เหมาะสมกับพื้นที่เขตเมือง คือ แบบจำลอง COST-231 และ SUI แบบจำลองที่เหมาะสมกับพื้นที่เขตชานเมือง คือ แบบจำลอง ECC-33, SUI และ COST-231 และแบบจำลองที่เหมาะสมกับพื้นที่เปิดโล่ง คือ แบบจำลอง HATA และ Log-distance ดังนั้น บทความนี้ ได้ชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางแต่ละแบบจำลอง มีผลการทำนายที่แตกต่างกันไปในแต่ละสภาพแวดล้อม และแต่ละแบบจำลองมีเงื่อนไข หรือข้อกำหนดการใช้งานแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม แบบจำลองเหล่านี้ ถูกใช้เป็นเครื่องมือในการประมาณค่าการสูญเสียในเส้นทางเท่านั้น ค่าผลลัพธ์ที่ได้ยังคงมีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริง

บทความ [13] นำเสนอการออกแบบแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง ด้วยวิธีการปรับปรุงความถูกต้องจากแบบจำลอง Okumura-Hata สำหรับเครือข่ายการสื่อสาร GSM ในพื้นที่เปิดโล่งของประเทศมาเลเซีย โดยทำการตรวจวัดค่าการสูญเสียในเส้นทาง ในสภาพแวดล้อมจริงอย่างต่อเนื่อง เปรียบเทียบกับค่าทำนายที่ได้จากแบบจำลอง Okumura-Hata พบว่าค่าการสูญเสียจากการวัดจริง มีค่าน้อยกว่าผลการทำนายตลอดระยะเวลาการทดสอบ ดังภาพประกอบ 1-6 คำนวณขนาดความคลาดเคลื่อน Root Mean Square Error (RMSE) มีค่าเท่ากับ 15.31 dB ดังนั้น สามารถนำค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวปรับปรุงแบบจำลอง Okumura-Hata แบบดั้งเดิม สร้างเป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ใหม่ สำหรับใช้งานกับเครือข่ายการสื่อสาร GSM ในสภาพแวดล้อมซึ่งคล้ายกับพื้นที่ทดสอบ



ภาพประกอบ 1-6 ค่าการสูญเสียในเส้นทางเปรียบเทียบระหว่าง ผลการวัดจริง (เส้นข้อมูล), ผลการทำนายจากแบบจำลองดั้งเดิม (เส้นโค้งบน) และแบบจำลองที่ปรับปรุงแล้ว (เส้นโค้งล่าง) [13]

บทความ [14] นำเสนอการออกแบบแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง ด้วยวิธีการปรับปรุงความถูกต้องจากแบบจำลอง Hata สำหรับเครือข่ายการสื่อสาร GSM ที่ความถี่ 900 MHz และ 1,800 MHz การออกแบบการทดลองคล้ายกับงานวิจัย [13] แต่วิธีการปรับปรุงแบบจำลองใช้การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของข้อมูลทางภูมิศาสตร์ ได้แก่ แบบจำลองภูมิประเทศดิจิทัล (Digital Terrain Model) คือ แผนที่ซึ่งระบุรายละเอียดของภูมิประเทศในแต่ละพิกเซล และใช้แผนที่ดาวเทียมแสดงวัตถุทางกายภาพภายในพื้นที่ทดสอบ ซึ่งกระบวนการนี้ดำเนินการบนซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ แบบจำลอง Hata ที่ถูกปรับปรุงใหม่ สามารถประเมินความถูกต้องได้จากการเปรียบเทียบกับข้อมูลผลการวัดค่าการสูญเสียจริงของสถานที่อื่น ซึ่งมีสภาพแวดล้อมคล้ายกับพื้นที่ทดสอบ พิจารณาจากการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อน Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อน (Standard Deviation: SDE) ผลการประเมินดังตาราง 1-1 แสดงให้เห็นว่า ในพื้นที่ทดสอบ C แบบจำลองที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองแบบดั้งเดิม และเมื่อนำแบบจำลองดังกล่าวมาใช้ทำนายการสูญเสียในเส้นทางของพื้นที่ทดสอบ D พบว่า ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ปรับปรุงแล้ว มีค่าน้อยกว่าแบบจำลองแบบดั้งเดิม จากการเปรียบเทียบค่า MAE, RMSE และ SDE

ตาราง 1-1 ความแม่นยำของแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง ก่อนและหลังการปรับปรุง [14]

พารามิเตอร์	พื้นที่ทดสอบ C (Design)		พื้นที่ทดสอบ D (Verify)	
	แบบจำลองดั้งเดิม	แบบจำลองที่ปรับปรุง	แบบจำลองดั้งเดิม	แบบจำลองที่ปรับปรุง
MAE (dB)	18.15	5.49	18.26	6.07
RMSE (dB)	21.49	6.96	21.75	7.46
SDE (dB)	11.51	4.29	11.83	4.33

บทความ [15] และบทความ [16] นำเสนอการทดสอบประสิทธิภาพ และการออกแบบแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางของเครือข่ายลอร์ราแวน ทำงานที่ความถี่ 868 MHz ด้วยสายอากาศแบบ Omnidirectional ในสภาพแวดล้อมเขตเมือง โดยทดสอบวัดค่าการสูญเสียในเส้นทางของสภาพแวดล้อมจริง วิเคราะห์ข้อมูลผลการวัดด้วยเครื่องมือทางสถิติ Linear Polynomial Fit เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการทางคณิตศาสตร์ ของแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง ผลการศึกษาใน [15] คำนวณค่า Path Loss Exponent (PLE) เท่ากับ 2.32 และ Path Loss Intercept (PLI) เท่ากับ 128.95 dB ซึ่งใกล้เคียงกับโมเดลของ [16] มีค่า PLE เท่ากับ 2.87 และมี PLI เท่ากับ 130.98 dB ผลการทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารของเครือข่ายลอร์ราแวน เมื่อพิจารณาจากอัตราการสูญเสียชุดข้อมูล (Packet Loss Ratio: PLR) ใน [15] มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 34% ด้วยระยะทางการสื่อสารสูงสุด 15 กิโลเมตร ในขณะที่ [16] มีค่าเฉลี่ยของ PLR เท่ากับ 30% ด้วยระยะทางการสื่อสารสูงสุด 8 กิโลเมตร จากบทความทั้งสองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเครือข่ายลอร์ราแวน ที่สามารถครอบคลุมพื้นที่การสื่อสารได้บริเวณกว้าง ด้วยอัตราการสูญเสียชุดข้อมูลที่ไม่สูงมากนัก พร้อมกันนี้ นำเสนอแบบจำลองการสื่อสารในเส้นทางสำหรับใช้งานในพื้นที่เขตเมืองหนาแน่น ด้วยเครือข่ายการสื่อสารลอร์ราแวน ทำงานที่ความถี่ 868 MHz แพร่สัญญาณผ่านสายอากาศแบบ Omnidirectional

บทความ [17] นำเสนอการออกแบบแบบจำลองการสูญเสียสำหรับเมืองอัจฉริยะ หรือ Smart City ผ่านเครือข่ายการสื่อสารลอร์ราแวน เปรียบเทียบระหว่างสองมาตรฐานความถี่ คือ ความถี่ 433 และ 868 MHz ในสภาพแวดล้อมแบบเมืองหนาแน่นของประเทศเยอรมนี การออกแบบระบบสำหรับทดสอบวัดค่าการสูญเสียในเส้นทาง ติดตั้งเกตเวย์สูง 30 เมตร และติดตั้งเครื่องส่งบนหลังคารถยนต์สูง 1.7 เมตร ซึ่งลักษณะของระบบนี้ ใกล้เคียงกับรูปแบบการติดตั้งจริงของสมาร์ตมิเตอร์ ซึ่งถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้าที่เรียงต่อกันไปตามแนวถนน ที่ระดับความสูงใกล้เคียงกัน ผลการวัดค่าการสูญเสียในเส้นทางในพื้นที่จริง ถูกนำมาวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลการวิจัยนำเสนอแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย พบว่าที่ความถี่ 433 MHz มีค่า PLE เท่ากับ 2.65 และ PLI เท่ากับ 126.5 dB และที่ความถี่ 868 MHz มีค่า PLE เท่ากับ 2.65 และ PLI เท่ากับ 132.25 dB ดังนั้น แม้ว่าสภาพแวดล้อมจะเหมือนกันทุกประการ แต่การสื่อสารผ่านเครือข่ายลอร์ราแวน ที่ทำงานด้วยความถี่ต่างกัน ส่งผลให้แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางที่ออกแบบ มีความแตกต่างกัน

แม้ว่างานวิจัยจำนวนมาก ได้นำเสนอการออกแบบแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางขึ้นมาใหม่ สำหรับใช้งานกับระบบหรือสภาพแวดล้อมที่ต้องการ ด้วยเทคนิควิธีการต่าง ๆ เช่น การออกแบบโดยปรับปรุงแบบจำลองดั้งเดิมใน [13] และ [14] หรือการออกแบบด้วยวิธีการเชิงประจักษ์ (Empirical Method) ใน [15] ถึง [17] แต่ก็ไม่มีงานวิจัยใด ที่ออกแบบแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง สำหรับใช้งานกับสมาร์ตมิเตอร์ เชื่อมต่อผ่านเครือข่ายการสื่อสารลอร์ราแวน ทำงานที่ความถี่ 920-925 MHz ด้วยเครื่องส่งที่ใช้งานสายอากาศแบบทิศทางเดียว จึงเป็นช่องว่างของความรู้ที่สามารถนำมาวิจัยต่อได้

1.2.4 สรุปประเด็นช่องว่างของการวิจัย

จากการสำรวจงานวิจัยในหัวข้อ 1.2.1 ถึง 1.2.3 สามารถสรุปองค์ความรู้ ประเด็นปัญหา และช่องว่างของงานวิจัยต่าง ๆ ที่สามารถนำมาประกอบรวมกัน เพื่อศึกษาและต่อยอดเป็นงานวิจัยใหม่ มีดังนี้

- ก. เทคโนโลยีเครือข่ายลอร์ราแวน สามารถรองรับการสื่อสารของสมาร์ตมิเตอร์ได้
- ข. สายอากาศแบบทิศทางเดียว มีความเหมาะสมกับการใช้งานในระบบการสื่อสารของสมาร์ตมิเตอร์ จากคุณสมบัติการลดสัญญาณรบกวน ช่วยลดการแทรกสอด และการเพิ่มความจุช่องสัญญาณ
- ค. สายอากาศไมโครสตริป มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบทิศทางเดียว ขนาดโครงสร้างเหมาะสมกับการติดตั้งใช้งานจริงบนเสาไฟฟ้า และมีราคาถูก
- ง. ข้อด้อยของสายอากาศไมโครสตริป คือ ประสิทธิภาพต่ำ และมีแบนด์วิดท์แคบ ต้องได้รับการพิสูจน์ว่าข้อด้อยนี้ ส่งผลกระทบต่อการนำไปใช้งานบนเครือข่ายลอร์ราแวนในระบบสมาร์ตมิเตอร์หรือไม่
- จ. แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางที่เหมาะสม กับระบบของสมาร์ตมิเตอร์ ซึ่งเชื่อมต่อผ่านเครือข่ายลอร์ราแวน และเครื่องส่งสัญญาณใช้งานสายอากาศแบบทิศทางเดียว คือแบบจำลองใด และสามารถสร้างแบบจำลองใหม่ได้ด้วยวิธีใด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยศึกษาการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป สำหรับใช้งานที่ความถี่ 920-925 MHz ผ่านเครือข่ายการสื่อสารลอร์ราแวน และศึกษาการสร้างแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง ด้วยวิธีการเชิงประจักษ์ เพื่อใช้ทำนายค่าการสูญเสียในเส้นทาง และใช้พิจารณาประกอบการวางแผนการติดตั้งระบบการสื่อสารของสมาร์ตมิเตอร์ ในสภาพแวดล้อมเขตเมือง ของประเทศไทย การประเมินผลสำเร็จของงานวิจัย แบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การประเมินสมรรถนะของสายอากาศไมโครสตริป พิจารณาจากผลการใช้งานจริง โดยเปรียบเทียบกับสายอากาศเชิงพาณิชย์ และการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง พิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ เปรียบเทียบกับแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางแบบดั้งเดิม

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.3.1 เพื่อออกแบบสายอากาศไมโครสตริป ที่มีสมรรถนะเพียงพอสำหรับใช้งานกับสมาร์ตมิเตอร์ รองรับการใช้งานที่ความถี่ 920-925 MHz ของเครือข่ายการสื่อสารลอร์ราแวน
- 1.3.2 เพื่อสร้างแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง ที่มีความแม่นยำ สำหรับใช้งานกับสภาพแวดล้อมของระบบสมาร์ตมิเตอร์ ในพื้นที่เขตเมือง ของประเทศไทย บนเครือข่ายการสื่อสารลอร์ราแวน ใช้งานที่ความถี่ 920-925 MHz

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 สามารถออกแบบและสร้างต้นแบบสายอากาศไมโครสตริป มีสมรรถนะเพียงพอสำหรับใช้งานกับสมาร์ตมิเตอร์ รองรับการใช้งานที่ความถี่ 920-925 MHz ของเครือข่ายการสื่อสารลอร์ราแวน
- 1.4.2 สามารถสร้างแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง ที่มีความแม่นยำ สำหรับใช้งานกับสภาพแวดล้อมของระบบสมาร์ตมิเตอร์ ในพื้นที่เขตเมือง ของประเทศไทย บนเครือข่ายการสื่อสารลอร์ราแวน ใช้งานที่ความถี่ 920-925 MHz
- 1.4.3 สามารถประยุกต์ใช้งานสายอากาศไมโครสตริป และแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง ที่นำเสนอกับระบบการสื่อสารของสมาร์ตมิเตอร์ อุปกรณ์ IoT และเครือข่ายเซนเซอร์ ไร้สายอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.5.1 ต้นแบบสายอากาศไมโครสตริป มีขนาดโครงสร้างเล็กกว่า 20x20 ตารางเซนติเมตร เพื่อให้สอดคล้องกับขนาดพื้นที่บนเสาไฟฟ้า ตามมาตรฐาน กฟภ.
- 1.5.2 ต้นแบบสายอากาศไมโครสตริป สร้างจากแผ่นวงจรพิมพ์ชนิดเอพอาร์โพร์ (FR-4) ซึ่งมีราคาถูก และสามารถหาซื้อได้ทั่วไป
- 1.5.3 การสร้างแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง กำหนดพื้นที่เก็บข้อมูลในเขตเทศบาลเมืองนราธิวาส ตำบลบางนาค อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส ซึ่งเป็นพื้นที่ปฏิบัติงานของผู้วิจัย โดยมีต้นสังกัด คือ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดนราธิวาส

- 1.5.4 เครื่องรับ (Gateway) ถูกติดตั้งบนเสาไฟฟ้าสูงจากพื้นดิน 6.2 เมตร ซึ่งเป็นระดับที่ต่ำกว่าแนวของสายไฟฟ้าแรงต่ำ และเครื่องส่ง (End Device) ติดตั้งบนแท่นรองซึ่งสามารถเคลื่อนย้ายได้ ที่ความสูง 2 เมตร

1.6 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1.6.1 ศึกษาและทบทวนวรรณกรรม เกี่ยวกับเทคโนโลยีการสื่อสารของสมาร์ตมิเตอร์
- 1.6.2 ศึกษาและทบทวนวรรณกรรม ของเทคโนโลยีการสื่อสารลอว์แวน (LoRaWAN)
- 1.6.3 ศึกษาทฤษฎีการแพร่กระจายสัญญาณ (Propagation) สายอากาศ (Antenna) และการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna Design)
- 1.6.4 สำรวจและทบทวนวรรณกรรม เพื่อให้เข้าใจถึงความรู้ที่ทันสมัย เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss Model)
- 1.6.5 ออกแบบระบบสำหรับวัดค่าการสูญเสียในเส้นทาง มีรายละเอียดดังนี้
- ก. คำนวณโครงสร้าง จำลองแบบ และสร้างต้นแบบสายอากาศไมโครสตริป ที่รองรับการใช้งานช่วงความถี่ 920-925 MHz บนเครือข่ายการสื่อสารลอว์แวน
 - ข. ออกแบบระบบการสื่อสารที่ใช้ในการทดสอบ ตามโครงสร้างสถาปัตยกรรมลอว์แวน โดยกำหนดให้เครื่องส่งหนึ่งเครื่อง ใช้สายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ และเครื่องส่งอีกสามเครื่อง ใช้สายอากาศเชิงพาณิชย์ที่นำมาอ้างอิง
 - ค. ติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการสูญเสียในเส้นทาง ในสภาพแวดล้อมจริงของระบบสมาร์ตมิเตอร์ ในพื้นที่เขตเมือง (Urban Area) ที่กำหนด
- 1.6.6 เก็บข้อมูลผลการวัดคุณภาพสัญญาณ และวิเคราะห์ผลการวัดค่าการสูญเสียในเส้นทาง เพื่อสร้างแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางแบบใหม่ เปรียบเทียบ สมรรถนะของสายอากาศ และประเมินความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง
- 1.6.7 สรุปผลการวิจัย เขียนบทความตีพิมพ์ และเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์

1.7 สถานที่ทำการวิจัยและเก็บข้อมูล

- มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
- เทศบาลเมืองนราธิวาส ตำบลบางนาค อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส

1.8 แผนการดำเนินงานวิจัย

กิจกรรม/ขั้นตอนการดำเนินงาน	เดือน																
	ส.ค.61	ก.ย.61	ต.ค.61	พ.ย.61	ธ.ค.61	ม.ค.62	ก.พ.62	มี.ค.62	เม.ย.62	พ.ค.62	มิ.ย.62	ก.ค.62	ส.ค.62	ก.ย.62	ต.ค.62	พ.ย.62	
1. ศึกษาและทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับเทคโนโลยีการสื่อสารของสมาร์ตมิเตอร์	■	■															
2. ศึกษาและทบทวนวรรณกรรมของเทคโนโลยีการสื่อสารลoraWAN		■	■														
3. ศึกษาทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นทฤษฎีสายอากาศ และการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป			■	■	■												
4. สำรวจและทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง				■	■	■											
5. ออกแบบระบบสำหรับวัดค่าการสูญเสียในเส้นทาง ในสภาพแวดล้อมเขตเมือง						■	■	■	■	■							
6. เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดลองสร้างแบบจำลองใหม่ เปรียบเทียบสมรรถนะของสายอากาศ ประเมินความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง												■	■	■	■		
7. เขียนบทความ และเขียนรายงานสรุป																	■

1.9 สรุปท้ายบท

เนื้อหาโดยภาพรวมของบทนี้ ได้อธิบายถึงที่มาและความสำคัญของการสร้างแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางใหม่ ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของระบบสมาร์ตมิเตอร์ ที่เชื่อมต่อผ่านเครือข่ายการสื่อสารลoraWAN เมื่อเครื่องส่งสัญญาณใช้งานสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งมีลำคลื่นหลักแบบทิศทางเดียว เนื้อหาที่จะกล่าวต่อไปในบทที่ 2 ได้แก่ หลักการพื้นฐานของเครือข่ายลoraWAN พารามิเตอร์สายอากาศ และแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง ในบทที่ 3 นำเสนอการออกแบบระบบการสื่อสารสำหรับการวัดทดสอบ ซึ่งจะนำไปสู่การวิเคราะห์ผลการทดลองในบทที่ 4 และบทที่ 5 สรุปผลการวิจัย ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

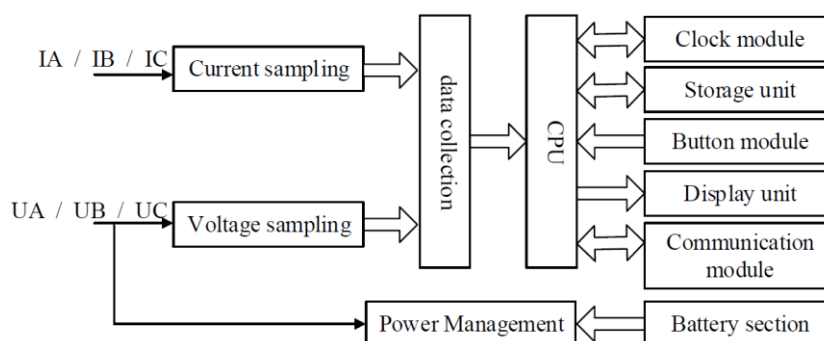
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

สมาร์ตมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้า ที่สามารถรายงานปริมาณการใช้ไฟฟ้า และพารามิเตอร์คุณภาพไฟฟ้า ไปยังศูนย์ข้อมูลกลาง ด้วยการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารรูปแบบต่าง ๆ สายอากาศเป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย การใช้งานสายอากาศที่เหมาะสม สามารถเพิ่มสมรรถนะของการสื่อสาร ของระบบสมาร์ตมิเตอร์ให้สูงขึ้น เครือข่ายการสื่อสารลora แวน มีลักษณะเด่นเหมาะสมกับการใช้งานในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย เช่น ระบบส่งข้อมูลของสมาร์ตมิเตอร์ ซึ่งกำลังจะถูกติดตั้งใช้งานจริงเป็นจำนวนมาก แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น หรือแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง ถูกใช้เป็นเครื่องมือสำคัญ ในการใช้ออกแบบระบบการสื่อสารดังกล่าว ซึ่งแบบจำลองการสูญเสียนี้ ต้องมีความถูกต้อง แม่นยำ และเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่ใช้งานจริง ในบทนี้ นำเสนอทฤษฎีและหลักการของสิ่งที่กล่าวมา เพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจ และสามารถหาทางแก้ปัญหาได้ ตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้

2.1 สมาร์ตมิเตอร์ (Smart Meter)

สมาร์ตมิเตอร์ (Smart Meter) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่สามารถวัดพลังงานไฟฟ้า และคุณภาพไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น หน่วยการใช้ไฟฟ้า หรือค่ากิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh), แรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้า, ความถี่, การแจ้งเตือนสิ่งผิดปกติ และการคำนวณบิลล์ค่าไฟฟ้า เป็นต้น นอกจากนี้ ยังสามารถรายงานผลการวัดดังกล่าว ไปยังศูนย์ข้อมูลกลาง (Data Center) หรือการไฟฟ้าได้อย่างอัตโนมัติ ผ่านการใช้งานเทคโนโลยีการสื่อสารต่าง ๆ สมาร์ตมิเตอร์จะถูกนำมาติดตั้งทดแทนมิเตอร์จานหมุนแบบดั้งเดิม ที่ใช้หลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก ในการวัดค่า kWh เพียงอย่างเดียวเท่านั้น และการคำนวณค่าไฟฟ้า (Billing) จำเป็นต้องส่งพนักงานไปอ่านค่า kWh จากมิเตอร์แต่ละเครื่อง ดังนั้น ข้อด้อยของมิเตอร์แบบจานหมุน คือ 1) มีค่าใช้จ่ายในการเดินทางและการจ้างพนักงานอ่านหน่วย; 2) ใช้เวลานานหลายวัน ในการอ่านหน่วยมิเตอร์ครบทุกเครื่องในแต่ละเดือน และ 3) ความผิดพลาดของคน (Human Error) มีโอกาสเกิดขึ้นได้สูง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือ และความเป็นธรรมในการคำนวณค่าไฟฟ้า เป็นต้น [1]

สมาร์ตมิเตอร์ เป็นส่วนหนึ่งของระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ หรือสมาร์ตกริด (Smart Grid) ซึ่งเป็นระบบที่ช่วยให้การบริหารจัดการ ความต้องการกำลังไฟฟ้า (Demand) และกำลังการผลิตไฟฟ้า (Supply) เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยการใช้ข้อมูลที่ได้จากสมาร์ตมิเตอร์ ในการบริหารจัดการตามเวลาจริง (Realtime) และสามารถควบคุมสั่งการอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้จากระยะไกล ผ่านเครือข่ายการสื่อสารที่กำหนด ซึ่งโครงข่ายไฟฟ้าแบบดั้งเดิม ไม่มีการนำข้อมูลการใช้ไฟฟ้า ในระดับของผู้ใช้ไฟฟ้าย่อย (ความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำกว่า 30 กิโลวัตต์) ที่ยังคงใช้งานมิเตอร์แบบจานหมุน แต่จะมีเพียงผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่ ที่ได้ดำเนินการติดตั้งสมาร์ตมิเตอร์ไปแล้ว ในระบบไฟฟ้าของ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หรือ กฟภ. (Provincial Electricity Authority: PEA) แต่คิดเป็นจำนวนที่น้อยมาก เมื่อเทียบกับจำนวนมิเตอร์ของผู้ใช้ไฟฟ้าย่อย ที่ติดตั้งให้กับ บ้านพักอาศัย สำนักงาน ส่วนราชการ บริษัท หรือสถานประกอบการขนาดเล็ก ทั่วประเทศไทย



ภาพประกอบ 2-1 บล็อกไดอะแกรมของมิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ ชนิดสามเฟส [18]

2.1.1 โครงสร้างของสมาร์ทมิเตอร์

ในปัจจุบัน มิเตอร์ไฟฟ้าที่มีการใช้งานมากที่สุด คือ มิเตอร์แบบ Electro-mechanical ที่ใช้หลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก ในการหมุนจานโลหะ (Metal Disc) และใช้การนับจำนวนรอบการหมุน เพื่อแสดงถึงปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า จึงนิยมเรียกมิเตอร์ชนิดนี้ว่า มิเตอร์แบบจานหมุน อย่างไรก็ตาม มิเตอร์แบบจานหมุนนี้ สามารถวัดได้เฉพาะ หน่วยการใช้ไฟฟ้า หรือค่า kWh เท่านั้น และจำเป็นต้องใช้คนในการอ่านตัวเลขหน่วยการใช้ไฟฟ้า ซึ่งมีค่าใช้จ่าย และมีโอกาสผิดพลาดสูง ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ ดังนั้น มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ และสมาร์ทมิเตอร์ จึงเป็นเทคโนโลยีที่จะมาแทนที่มิเตอร์แบบจานหมุน ต่อไปในอนาคต

สมาร์ทมิเตอร์ คือ มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีความสามารถในการเชื่อมต่อกับเครือข่ายการสื่อสารรูปแบบต่าง ๆ เพื่อส่งข้อมูลผลการวัด ไปยังศูนย์ข้อมูลกลาง ซึ่งโครงสร้างของสมาร์ทมิเตอร์โดยทั่วไป มีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (Central Processing Unit: CPU), โมดูลสัญญาณนาฬิกา (Clock Module), หน่วยบันทึกผล (Storage Unit), จอแสดงผล (Display), ปุ่มกด (Button), แบตเตอรี่ (Battery), โมดูลการสื่อสาร (Communication Module), เซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า (Voltage Sensor) และกระแสไฟฟ้า (Current Sensor) เป็นต้น

จากภาพประกอบ 2-1 แสดงส่วนประกอบและทิศทางการส่งผ่านข้อมูล ในแต่ละส่วนประกอบของสมาร์ทมิเตอร์ หลักการทำงานของสมาร์ทมิเตอร์ เริ่มจากการซึ่กตัวอย่าง (Sampling) จากสัญญาณไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับสมาร์ทมิเตอร์ ด้วยค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า จากนั้น ส่งต่อข้อมูลให้ซีพียู ซึ่งเชื่อมต่อกับโมดูลสัญญาณนาฬิกา จึงสามารถประมวลผลข้อมูลในรูปแบบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับการพิจารณาค่าไฟฟ้า และคุณภาพไฟฟ้า เช่น หน่วยการใช้ไฟฟ้า (kWh), ความถี่, กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power), ความต้องการพลังไฟฟ้าเฉลี่ย 15 นาที (Demand Charge) เป็นต้น สามารถแสดงผลผ่านทางจอภาพ และรายงานผลข้อมูลผ่านทาง Interface ต่าง ๆ ซึ่งรองรับเทคโนโลยีการสื่อสารทั้งแบบมีสาย (Wire) และไร้สาย (Wireless) นอกจากนี้ สมาร์ทมิเตอร์สามารถนำกระแสไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า มาใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับตัวสมาร์ทมิเตอร์และโมดูลการสื่อสารต่าง ๆ ในสถานะที่ระบบไฟฟ้าปกติ แต่ในขณะที่เกิดเหตุไฟฟ้าดับ สมาร์ทมิเตอร์ยังสามารถทำงาน และรายงานผลต่อไปได้ ด้วยการใช้จ่ายพลังงานจากแบตเตอรี่ ซึ่งซีพียูจะทำหน้าที่ประมวลผล เหตุการณ์ผิดปกติต่าง ๆ รายงานให้ศูนย์ควบคุมทราบโดยอัตโนมัติ ส่งผลให้การแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น เป็นไปอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

ตาราง 2-1 เปรียบเทียบการใช้งานระหว่างมิเตอร์ไฟฟ้าแบบดั้งเดิมและสมาร์ทมิเตอร์

คุณสมบัติ	มิเตอร์ไฟฟ้าแบบดั้งเดิม	สมาร์ทมิเตอร์
หลักการทำงาน	Electromechanical	Digital
ความปลอดภัย	Low Security	High Security
รูปแบบการสื่อสาร	Manual Reading	Two-way Communication
คาบเวลาการอ่านมิเตอร์	One Time per Month	Interval Reading (15 min, 1 hr, ...)
การคำนวณค่าไฟฟ้า	Manual Billing	Automatic Billing
สถิติการใช้ไฟฟ้า	Monthly Statistics	Load Profile
การแจ้งเตือนไฟฟ้าดับ	No Outage Alarm	Automatic Outage Alarm
การแจ้งเตือนสิ่งผิดปกติ	No Failures Alarm	Automatic Failures Alarm

2.1.2 ประโยชน์ของสมาร์ทมิเตอร์

ข้อดีและประโยชน์ของการใช้งานสมาร์ทมิเตอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานมิเตอร์แบบจานหมุน มีด้วยกันหลายประการ ดังสรุปในตาราง 2-1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติและประสิทธิภาพการใช้งานในด้านต่าง ๆ สามารถอธิบายเป็นหัวข้อย่อย ดังต่อไปนี้

ก. หลักการทำงานของมิเตอร์ไฟฟ้า และความปลอดภัย

มิเตอร์ไฟฟ้ามีหน้าที่หลักคือ การวัดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า หรือหน่วยการใช้ไฟฟ้า (kWh) โดยที่ มิเตอร์แบบจานหมุน สามารถวัดค่าดังกล่าวได้ด้วยวิธีการทาง Electro-mechanical ซึ่งเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน คุณสมบัติทางแม่เหล็กของขดลวด หรือวัสดุต่าง ๆ จะเสื่อมคุณภาพลง ส่งผลต่อความแม่นยำในการวัดพลังงานไฟฟ้า หรืออาจมีผู้ไม่หวังดี กระทบการบางอย่างกับมิเตอร์ชนิดนี้ เพื่อรบกวนการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก โดยหวังผลให้มิเตอร์ทำงานผิดพลาด วัดพลังงานไฟฟ้าได้น้อยกว่าความเป็นจริง

สำหรับหลักการทำงานของสมาร์ทมิเตอร์ ถูกสร้างจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์เซนเซอร์ต่าง ๆ ทำการประมวลผลข้อมูลในรูปแบบดิจิทัล (Digital) ซึ่งมีความแม่นยำในการคำนวณและประมวลผล ค่าพลังงานไฟฟ้าที่วัดได้มีความน่าเชื่อถือ และยากต่อการดัดแปลงแก้ไข มิเตอร์จากผู้ไม่หวังดี เนื่องจาก กระบวนการวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้า รวมถึงการคำนวณหน่วยการใช้ไฟฟ้า มีการใช้งานเซนเซอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความซับซ้อน ต่างจากมิเตอร์แบบจานหมุน ที่ถูกใช้งานมาเป็นเวลานาน หลักการทำงานเข้าใจง่าย เสี่ยงต่อการดัดแปลงแก้ไข

ข. รูปแบบการสื่อสาร คาบเวลาการอ่านมิเตอร์ไฟฟ้า และการคำนวณค่าไฟฟ้า

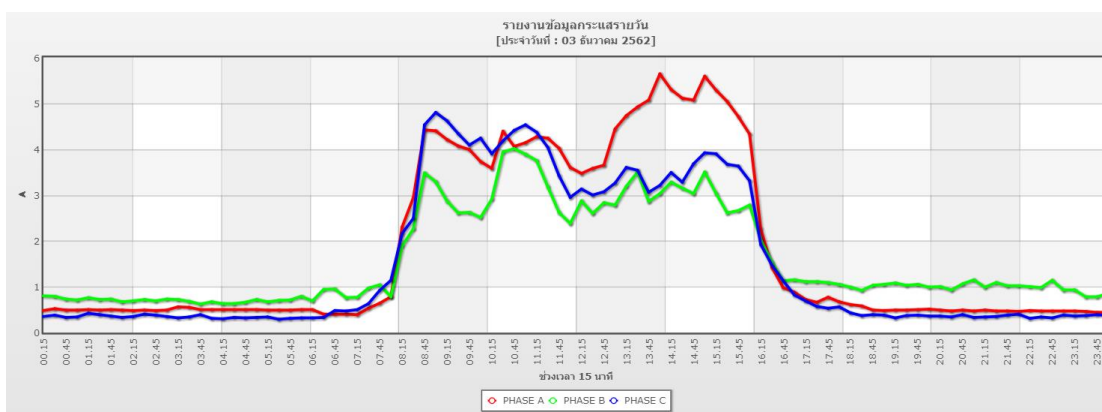
ในปัจจุบัน การอ่านหน่วยมิเตอร์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ใช้การส่งเจ้าหน้าที่ออกไปทำการจดหรือบันทึกตัวเลขหน่วยการใช้ไฟฟ้าสะสม (Manual Reading) ที่แสดงบนหน้ามิเตอร์แบบจานหมุน เป็นรายเดือน ทุกเครื่อง ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการเดินทางและการจ้างพนักงาน นอกจากนี้ อาจเกิดความผิดพลาดของมนุษย์ จากความเร่งรีบและความเหนื่อยล้า ดังที่กล่าวในหัวข้อก่อนหน้า สำหรับการคำนวณค่าไฟฟ้า (Billing) จะถูกคำนวณและแจ้งให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าทราบ เดือนละครั้งเท่านั้น ซึ่งในระหว่างเดือน ผู้ใช้ไฟฟ้าไม่สามารถทราบหรือติดตามปริมาณการใช้ไฟฟ้าได้

ในขณะที่ สมาร์ทมิเตอร์สามารถเชื่อมต่อกับโมดูลการสื่อสารต่าง ๆ ผ่านพอร์ตการสื่อสารหรือ Interface เช่น RS485, RS232 หรือพอร์ตอนุกรมต่าง ๆ เพื่อใช้ในการส่งผ่านข้อมูลผลการวัด รายงานไปยังศูนย์ข้อมูลกลาง เพื่อให้ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถตรวจสอบปริมาณการใช้ไฟฟ้าได้ตามเวลาจริง (Realtime) จัดเป็นสื่อสารแบบสองทาง (Two-way Communication) ระหว่างการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า ลักษณะการส่งข้อมูลของสมาร์ทมิเตอร์เป็นแบบ ส่งตามคาบเวลา (Time Interval) ตามที่การไฟฟ้ากำหนด หรือตามมาตรฐานของเทคโนโลยีการสื่อสารที่เลือกใช้งาน เช่น มาตรฐานลอว์แวน AS923 MHz กำหนด Duty Cycle น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1% [19] ซึ่งคิดเป็นเวลารวม ที่ใช้ในการส่งข้อมูลขาขึ้น (Up Link) จากสมาร์ทมิเตอร์ เท่ากับ 864 วินาทีต่อวันต่อสมาร์ทมิเตอร์หนึ่งเครื่อง ($1\% \times 24\text{hr} \times 60\text{min} \times 60\text{sec}$) หากสมาร์ทมิเตอร์ส่งชุดข้อมูล (Payload) ขนาด 100 bytes จะใช้เวลาในการส่งผ่านอากาศ (Time on Air) ประมาณ 4.43 วินาที เมื่อพิจารณาที่ Data Rate ต่ำสุดที่ SF12 [20] ดังนั้น สมาร์ทมิเตอร์เครื่องนี้ สามารถส่งข้อมูลได้สูงสุด 195 ครั้งต่อวัน หรือคิดเป็นคาบเวลาการส่งทุก ๆ 7.4 นาที ภายใต้เงื่อนไข 1% Duty Cycle

นอกจากนี้ การคำนวณค่าไฟฟ้า (Billing) ของสมาร์ทมิเตอร์ สามารถทำได้อัตโนมัติ เนื่องจาก มีข้อมูลผลการวัดที่สมาร์ทมิเตอร์รายงานมายังศูนย์ข้อมูลกลางอยู่แล้ว ไม่จำเป็นต้องส่งเจ้าหน้าที่ออกไปอ่านหน่วยการใช้ไฟฟ้าที่ละเครื่อง จึงเป็นการลดต้นทุน เพิ่มความรวดเร็ว และเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการให้ดีขึ้น กว่าการใช้งานมิเตอร์จานหมุนแบบดั้งเดิม [21]

ค. ข้อมูลสถิติการใช้ไฟฟ้า

ข้อมูลสถิติการใช้ไฟฟ้าของมิเตอร์แบบจานหมุน มีเพียงสถิติที่ได้จากการอ่านหน่วยการใช้ไฟฟ้าในแต่ละเดือน ซึ่งเป็นข้อมูลที่จัดเก็บอยู่ในระบบฐานข้อมูลของการไฟฟ้าเท่านั้น ในขณะที่ สมาร์ทมิเตอร์ รายละเอียดสถิติการใช้ไฟฟ้า รวมถึงผลการวัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ จะถูกบันทึกไว้ในหน่วยความจำหลัก (Storage Unit) ภายในสมาร์ทมิเตอร์ และระบบฐานข้อมูลของการไฟฟ้า ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถเรียกดูประวัติการใช้ไฟฟ้า (Load Profile) ได้จากระยะไกล (Remote) ผ่านทางเว็บไซต์หรือแอปพลิเคชัน ดังตัวอย่างในภาพประกอบ 2-2 แสดงผลการวัดค่ากระแสไฟฟ้า 3 เฟส แบบรายวัน โดยทำการบันทึกค่าทุก ๆ 15 นาที มีประโยชน์ในการติดตามตรวจสอบลักษณะการใช้ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา และสามารถใช้ในการวิเคราะห์สิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าได้



ภาพประกอบ 2-2 ตัวอย่างข้อมูล Load Profile จากสมาร์ทมิเตอร์ของ กฟภ. [22]

ง. การแจ้งเตือนไฟฟ้าดับ และสิ่งผิดปกติของมิเตอร์ไฟฟ้า

สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้า เครือข่ายไฟฟ้าที่มีเสถียรภาพ จำเป็นต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ได้อย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ดังนั้น สมาร์ทมิเตอร์ สามารถใช้เป็นเครื่องวัด หรือเครื่องมือในการตรวจจับสิ่งผิดปกติ ที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ยกตัวอย่างเช่น เมื่อเกิดเหตุกระแสไฟฟ้าดับ สมาร์ทมิเตอร์สามารถแจ้งเตือนไปยังศูนย์ควบคุม จากการพิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ มีค่าเท่ากับศูนย์ และยังสามารถระบุบริเวณที่เกิดเหตุได้ จากพิกัดการติดตั้งสมาร์ทมิเตอร์ ส่งผลให้การไฟฟ้า สามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ช่วยลดผลกระทบที่เกิดกับผู้ใช้ไฟฟ้า และลดข้อร้องเรียนต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นกับการไฟฟ้าลงได้

2.1.3 ชุดข้อมูลของสมาร์ทมิเตอร์ (Smart Meter Packet)

การส่งข้อมูลพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ ที่สมาร์ทมิเตอร์ตรวจวัดได้ จะถูกจัดอยู่ในรูปแบบชุดข้อมูล (Packet) ซึ่งขนาดของตัวแปรที่บรรจุแต่ละพารามิเตอร์ ต้องรองรับขนาดจริงของข้อมูลที่วัดได้ เพื่อใช้พิจารณาของชุดข้อมูลที่ต้องการส่ง ยกตัวอย่างในบทความ [23] ศึกษาการสร้างสมาร์ทมิเตอร์ ด้วยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์จากบริษัท Microchip โมเดล dsPIC30F4011 ใช้การส่งข้อมูลผ่านเทคโนโลยีการสื่อสาร ZigBee โครงสร้างของชุดข้อมูลดังตาราง 2-2 แสดงการแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ 1) กลุ่มของการวัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าตามเวลาจริง ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานของคุณภาพไฟฟ้า มีขนาดเท่ากับ 41 bytes; 2) กลุ่มของการวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริง โดยเพิ่มพารามิเตอร์ของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือน แยกตามคาบเวลาที่กำหนด ซึ่งข้อมูลในกลุ่มนี้ สามารถใช้ในการคำนวณค่าไฟฟ้าแบบปกติ และแบบ Time of Use (TOU) มีขนาดชุดข้อมูลรวม เท่ากับ 58 bytes และ 3) กลุ่มของชุดข้อมูลที่บันทึกเหตุการณ์กระแสไฟฟ้าดับ และสิ่งผิดปกติต่าง ๆ โดยบันทึกวันเวลาที่เกิดเหตุ และวันเวลาที่กลับเข้าสู่สภาวะปกติ มีขนาดชุดข้อมูลรวมเท่ากับ 93 bytes เงื่อนไขของเหตุการณ์ผิดปกติ ถูกโปรแกรมไว้ในไมโครคอนโทรลเลอร์ องค์กรที่จัดการชุดข้อมูลของสมาร์ทมิเตอร์ ขึ้นอยู่กับโมเดล หรือยี่ห้อของสมาร์ทมิเตอร์ที่เลือกใช้งาน รวมถึงการพิจารณาประสิทธิภาพ และข้อจำกัดของเทคโนโลยีการสื่อสารที่เลือกใช้งาน สำหรับเทคโนโลยีลora แวน รองรับขนาดชุดข้อมูลสูงสุด 230 bytes ด้วยการใช้งาน Data Rate สูงสุดที่ SF7 ในขณะที่ Data Rate ต่ำสุดที่ SF12 สามารถรองรับขนาดชุดข้อมูลได้สูงสุด 59 bytes [19]

ตาราง 2-2 ตัวอย่างขนาดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของสมาร์ทมิเตอร์ [23]

Group 1: Real-time Measured Data (41 bytes)								
Power Meter ID	Date/Time	Voltage	Current	Power Factor	Frequency			
16 bytes	9 bytes	4 bytes	4 bytes	4 bytes	4 bytes			
Group 2: Power Consumption Data (58 bytes)								
Power Meter ID	Date/Time	Voltage	Current	Power Facto	Frequency	Date/Time for Power Consumption	Real Power (kWh)	Reactive Power (kVARh)
16 bytes	9 bytes	4 bytes	4 bytes	4 bytes	4 bytes	9 bytes	4 bytes	4 bytes
Group 3: Outage Event Data (93 bytes)								
No. of Event	Date/Time	Interruption Time	Restoration Time	Pre-outage Real Power (kW)	Pre-outage Reactive			
1 bytes	2 bytes	5 bytes x5	5 bytes x5	4 bytes x5	4 bytes x5			



(ก) EDM I-MK6N

(ข) EDM I-MK10E

(ค) PRECISE I-21BWEBAG

ภาพประกอบ 2-3 ตัวอย่างของสมาร์ทมิเตอร์ที่ใช้งานในระบบไฟฟ้าของ กฟภ.

2.1.4 ตัวอย่างของสมาร์ทมิเตอร์ที่ใช้งานจริงในประเทศไทย

จากภาพประกอบ 2-3 แสดงตัวอย่างของสมาร์ทมิเตอร์ที่ติดตั้งใช้งานจริง ในระบบไฟฟ้าของ กฟภ. โดยมิเตอร์ (ก) และ (ข) ถูกติดตั้งให้กับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่ (มีความต้องการกำลังไฟฟ้ามากกว่า 30 กิโลวัตต์) ในโครงการมิเตอร์อ่านหน่วยอัตโนมัติหรือ AMR (Automatic Meter Reading) สามารถวัดไฟฟ้าได้ในระบบ 3 เฟส 4 สาย และ 3 เฟส 3 สาย ในขณะที่มิเตอร์ (ค) เป็นมิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ในระบบ 1 เฟส 2 สาย (Single Phase) สามารถติดตั้งให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าทั่วไปได้ และมี Interface รองรับโมดูลการสื่อสารภายนอก เพื่อการส่งข้อมูลที่ตรวจวัด ไปยังศูนย์ข้อมูลกลางในอนาคต ผ่านเทคโนโลยีการสื่อสารต่าง ๆ รวมถึงเทคโนโลยีลora แวนที่นำเสนอ

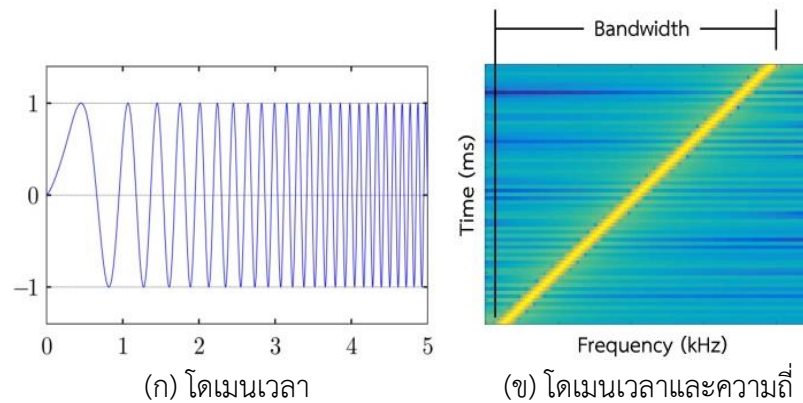
ตาราง 2-3 ข้อมูลทางเทคนิคของสมาร์ทมิเตอร์ที่ติดตั้งจริงในระบบไฟฟ้าของ กฟภ.

พารามิเตอร์	EDMI-MK6N	EDMI-MK10E	PRECISE I-21BWEBAG
Voltage Rating	3x220 V (57 – 240 V)	3x220 V (57.7 – 240 V)	230 V (184 – 264.5 V)
Current Rating	5(6) A	5(6) A	5(100) A
Service Type	3 phase 4 wire with CT, 3 phase 3 wire with CT-VT	3 phase 4 wire with CT, 3 phase 3 wire with CT-VT	1 phase 2 wire (Direct Connect)
Frequency	45 – 65 Hz	45 – 65 Hz	50 Hz
Measured Values	Import/Export/Absolute of Wh, Varh, VAh, W, Var, VA, Vrms, Irms, PF, Freq, phasor angles	Import/Export/Absolute of Wh, Varh, VAh, W, Var, VA, Vrms, Irms, PF, Freq, phasor angles	kWh, W, Var, Vrms, Irms, PF, Freq
Communication	- Optical (IEC 62056-21) - RS-485 - RS-232 (Optional modem 2G/3G/4G LTE)	- Optical (IEC 62056-21) - RS-485 - RS-232 (Optional modem 2G/3G/4G LTE)	- Optical (IEC 62056-21) - RS-485 - G3-PLC (Optional) - Zigbee (Optional)
Protocol	- EDM I command line - MODBUS	- EDM I command line - DLMS & MODBUS	- DLMS/COSEM
Standard (Accuracy)	IEC 62053-22 (Class 0.5S)	IEC 62053-22 (Class 0.5S)	- IEC 62052-11, 62053-21 (Class 1), - IEC 62053-23 (Class 2)
Backup Power	Lithium Battery	Lithium Battery	Lithium Battery
Dimension (mm)	260x173x93	262x175x95	216x146x80
Weight	2 kg	2 kg	1.4 kg

จากตาราง 2-3 เปรียบเทียบข้อมูลทางเทคนิคของตัวอย่างสมาร์ทมิเตอร์ที่ติดตั้งใช้งานจริง ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของ กฟภ. โดยมีเตอร์ผลิตภัณท์ EDMl รุ่น MK-6N [24] และ MK-10E [25] สามารถใช้วัดพลังงานไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 220 V และ 33 kV ในระบบ 3 เฟส ใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Current Transformer: CT) และหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า (Voltage Transformer: VT) ในการลดระดับกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับพิกัดของมิเตอร์ ในขณะที่มิเตอร์ผลิตภัณท์ PRECISE รุ่น I-21BWEBAG [26] ใช้วัดพลังงานไฟฟ้าในระบบ 1 เฟส ที่แรงดันไฟฟ้าปกติ 230 V และกระแสไฟฟ้า 5 A (สูงสุด 100 A) โดยไม่ผ่าน CT และ VT ที่ความถี่ไฟฟ้าเท่ากับ 50 Hz ในระบบไฟฟ้าของประเทศไทย สมาร์ทมิเตอร์ผลิตภัณท์ EDMl สามารถวัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าได้มากกว่าผลิตภัณท์ PRECISE โดยมีพารามิเตอร์ที่เหมือนกันคือ kWh, W, Var, Vrms, Irms, PF และ Frequency พารามิเตอร์ที่มีเพิ่มขึ้นคือ Varh, VAh และ phasor angles นอกจากนี้ สมาร์ทมิเตอร์ทั้งสามแบบ รองรับการสื่อสารกับเครือข่ายภายนอกผ่าน Interface RS-485 ซึ่งจัดเป็นพอร์ตการสื่อสารพื้นฐานของสมาร์ทมิเตอร์ส่วนใหญ่ ผ่านโปรโตคอล MODBUS สำหรับมิเตอร์ผลิตภัณท์ EDMl รุ่น MK-6N ส่วนรุ่น MK-10E ใช้งานโปรโตคอล MODBUS หรือ DLMS และมิเตอร์ผลิตภัณท์ PRECISE ใช้งานโปรโตคอล DLMS/COSEM (IEC 62056) ทั้งนี้ สมาร์ทมิเตอร์ทั้งสามแบบ ยังคงสามารถส่งสัญญาณได้อย่างต่อเนื่อง แม้ว่าจะเกิดเหตุไฟฟ้าดับ หรือไม่มีกำลังไฟฟ้าป้อนให้กับมิเตอร์ด้วยการใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม (Lithium Battery) เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง ดังนั้น ปัจจัยสำคัญที่ทำให้สมาร์ทมิเตอร์ แตกต่างจากมิเตอร์แบบจานหมุนที่ใช้งานในปัจจุบัน คือ ความสามารถในการเชื่อมต่อกับเครือข่ายการสื่อสาร ของเทคโนโลยีการสื่อสารรูปแบบต่าง ๆ ที่มีความเหมาะสมกับลักษณะสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน

2.2 เทคโนโลยีเครือข่ายการสื่อสารลอร่า

เทคโนโลยีการสื่อสารลอร่า (LoRa) เป็นกระบวนการในชั้นกายภาพ (Physical Layer) ลอร่าถูกตั้งชื่อตามคุณสมบัติเด่นด้านระยะส่งสัญญาณไกล หรือ Long Range ซึ่งถูกพัฒนาโดยบริษัท Semtech มีมาตรฐานรองรับการใช้งานหลายย่านความถี่ รวมถึงย่าน 920 ถึง 925 MHz [19] สำหรับประเทศไทย ซึ่งได้รับอนุญาตให้ใช้งานได้ตามประกาศในราชกิจจานุเบกษา [27] ลักษณะเฉพาะของลอร่า คือ ใช้การมอดูเลตด้วยเทคนิคเชิร์ปสเปกตรัม (Chirp Spread Spectrum: CSS) โดยใช้สัญญาณเชิร์ป (Chirp) ที่มีความชันคงที่ ดังภาพประกอบ 2-4 ในการเพิ่มสมรรถนะการรับสัญญาณ ให้มีค่าความไว (Sensitivity) ดีขึ้น สามารถรับความเข้มของกำลังสัญญาณ ได้ที่ระดับต่ำกว่า -140 dBm ซึ่งถือว่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับเทคนิคการมอดูเลตแบบอื่น ๆ เช่น ชิกบี (Zigbee) และไวไฟ (WiFi) ที่มีค่าความไวการรับสัญญาณต่ำสุด อยู่ที่ระดับ -100 dBm ถึง -110 dBm เท่านั้น [28] นอกจากนี้ ความสามารถที่โดดเด่นของลอร่าอีกหนึ่งประการ คือ สามารถมอดูเลตหลายสัญญาณที่ความถี่เดียวกัน ได้พร้อมกัน ด้วยการกำหนดอัตราเชิร์ปที่แตกต่างกันในแต่ละชุดสัญญาณ จากแฟกเตอร์การกระจาย (Spreading Factor: SF) ที่แตกต่างกัน จึงทำให้เครือข่ายการสื่อสารลอร่า สามารถรองรับอุปกรณ์ได้จำนวนมาก

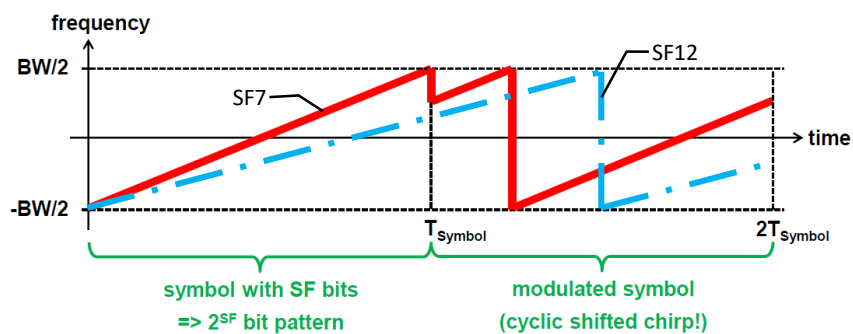


ภาพประกอบ 2-4 สัญญาณเชิร์ปขาขึ้น (Up-chirp)

ภาพประกอบ 2-4 แสดงรูปแบบของสัญญาณเชิร์ปขาขึ้น (Up-chirp) ในหนึ่งลูกคลื่น สัญญาณเชิร์ป (Chirp) เป็นคำย่อของคำว่า Compressed High Intensity Radar Pulse ซึ่งถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบเรดาร์ ลักษณะของสัญญาณเชิร์ป คือ สัญญาณวิทยุซึ่งความถี่ของคลื่นพาห์ (Carrier) ถูกทำให้เพิ่มขึ้น หรือลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังภาพประกอบ 2-4 (ก) แสดงสัญญาณเชิร์ปเป็นคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากความถี่ต่ำสุด ไปถึงความถี่สูงสุด ด้วยความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth) คงที่ ดังแสดงในภาพประกอบ 2-4 (ข)

2.2.1 การมอดูเลตสัญญาณลอรา

จากที่ได้กล่าวถึงข้อดีของสัญญาณลอรา และลักษณะเด่นของเทคนิคการมอดูเลตแบบเชิร์ปสเปกตรัม (CSS) ในหัวข้อก่อนหน้า พารามิเตอร์ที่สำคัญในการกำหนดรูปแบบการมอดูเลต ได้แก่ แบนด์วิดท์ (BW) แฟกเตอร์การกระจาย (SF) และอัตราเข้ารหัส (Code Rate: CR) ในการสร้างชุดข้อมูล (Packet) พารามิเตอร์ SF แสดงถึงจำนวนบิตของข้อมูลต่อหนึ่งสัญลักษณ์ (Bit per symbol) มีค่าระหว่าง 7 ถึง 12 หรือหมายถึง ในหนึ่งสัญลักษณ์สามารถจัดเรียงบิตข้อมูลของสัญญาณเชิร์ป เท่ากับ 2^{SF} รูปแบบ ด้วยแบนด์วิดท์คงที่ตลอดการมอดูเลต ดังภาพประกอบ 2-5



ภาพประกอบ 2-5 แผนภาพ Spectrogram ของการมอดูเลตสัญญาณลอรา

จากภาพประกอบ 2-5 แสดงการมอดูเลตสัญญาณลอว์ ด้วยเทคนิค CSS จำนวนสองสัญญาณซีร์ป ที่มีความชันเท่ากัน (กำหนด SF เท่ากัน) โดยพิจารณาตำแหน่งของความถี่เริ่มต้นของแต่ละสัญญาณซีร์ป หรือตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่แบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเป็นเทคนิคในการเข้ารหัสข้อมูล (Encode) เพื่อสร้างสัญญาณซีร์ป ที่เรียงต่อกันตามมาตรฐานของลอว์แวน [29]

ความเร็วการส่งสัญญาณลอว์ ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแต่ละสัญญาณซีร์ป ถูกกำหนดโดยแฟกเตอร์การกระจาย (SF) และความกว้างแบนด์วิดท์ของสัญญาณซีร์ป (BW) สรุปได้ดังตาราง 2-4 หรือสามารถหาความสัมพันธ์ได้จากสมการต่อไปนี้ [20]

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2-1)$$

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (2-2)$$

$$R_b = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \cdot \left(\frac{4}{4 + CR} \right) \quad (2-3)$$

- เมื่อ
- T_s = Symbol Period (วินาที)
 - R_s = Symbol Rate (symbols ต่อวินาที)
 - R_b = Bit Rate (บิตต่อวินาที, bps)
 - SF = Spreading Factor มีค่าระหว่าง 7-12 (ไม่มีหน่วย)
 - BW = Bandwidth ได้แก่ 125, 250 และ 500 kHz
 - CR = Code Rate มีค่าระหว่าง 1 ถึง 4

ตาราง 2-4 อัตราเร็ว Bit Rate ของเทคโนโลยีลอว์ คำนวณจากสมการ (2-3)

Code Rate (CR)	Bandwidth (kHz)	Bit Rate (kbps)					
		SF7	SF8	SF9	SF10	SF11	SF12
1	125	5.469	3.125	1.758	0.977	0.537	0.293
1	250	10.938	6.250	3.516	1.953	1.074	0.586
1	500	21.875	12.500	7.031	3.906	2.148	1.172
2	125	4.557	2.604	1.465	0.814	0.448	0.244
2	250	9.115	5.208	2.930	1.628	0.895	0.488
2	500	18.229	10.417	5.859	3.255	1.790	0.977
3	125	3.906	2.232	1.256	0.698	0.384	0.209
3	250	7.813	4.464	2.511	1.395	0.767	0.419
3	500	15.625	8.929	5.022	2.790	1.535	0.837
4	125	3.418	1.953	1.099	0.610	0.336	0.183
4	250	6.836	3.906	2.197	1.221	0.671	0.366
4	500	13.672	7.813	4.395	2.441	1.343	0.732

ตาราง 2-4 แสดงอัตราเร็วบิตของสัญญาณลอรา เปรียบเทียบระหว่าง Spreading Factor, Bandwidth และ Code Rate สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังนี้ 1) Spreading Factor (SF) เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดความชันของสัญญาณเซิร์ป หาก SF มีค่าต่ำ สัญญาณเซิร์ปจะมีความชันสูง มี Time duration ต่ำ อัตราเร็วบิตจึงมีค่าสูง ดังภาพประกอบ 2-4; 2) Bandwidth (BW) เป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความชันของสัญญาณเซิร์ปเช่นกัน หาก BW มีค่าสูง สัญญาณเซิร์ปจะมีความชันสูง อัตราเร็วบิตจึงมีค่าสูง และ 3) Code Rate (CR) หากมีค่าต่ำ อัตราเร็วบิตจะมีค่าสูงจากการคำนวณด้วยสมการ (2-3)

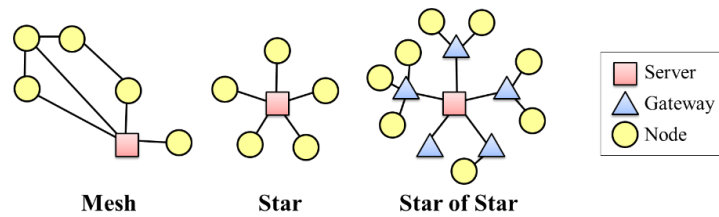
2.2.2 การดีมอดูเลตสัญญาณลอรา

การดีมอดูเลตสัญญาณลอรา (LoRa Demodulation) โดยส่วนใหญ่แล้ว จะถูกกระทำที่ฝั่งของเครื่องรับ หรือเกตเวย์ (Gateway) ซึ่งการดีมอดูเลตสัญญาณของเทคโนโลยีลอรา สามารถทำได้พร้อมกันในหลาย ๆ ช่องความถี่ (Multi-Channels) หรือสามารถรับสัญญาณที่ถูกส่งมาด้วยความถี่เดียวกันได้หลายสัญญาณ ในเวลาเดียวกัน หากสัญญาณนั้น ถูกส่งมาด้วยค่าแพ็คเกจการกระจาย (SF) ที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ ไม่ว่าสัญญาณที่ถูกส่งมานั้น จะใช้ช่องสัญญาณใด หรือถูกมอดูเลตมาด้วยความถี่ใด สัญญาณที่เครื่องรับตรวจจับได้ จะต้องมียกระดับความเข้มของสัญญาณฝั่งรับ (Received Signal Strength Indicator: RSSI) มากกว่าค่าความไว (Sensitivity) ของอุปกรณ์ลอรา นอกจากนี้ เทคโนโลยีการสื่อสารลอรา สามารถรับและส่งสัญญาณภายใต้สัญญาณรบกวน (Noise) ที่มีความเข้มสูงได้ ดังนั้น อัตราส่วนกำลังเฉลี่ยสัญญาณภาครับต่อกำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio: SNR) จึงมีค่าเป็นลบได้ อย่างไรก็ตาม ค่า Sensitivity และ SNR ที่แสดงถึงความสามารถในการดีมอดูเลตสัญญาณลอราของเครื่องรับนั้น จะมีค่าขึ้นอยู่กับระดับของแพ็คเกจการกระจาย (SF) สรุปได้ดังตารางต่อไปนี้ [20]

ตาราง 2-5 แสดงค่าความไวของอุปกรณ์ (Sensitivity) และระดับ SNR ขั้นต่ำ สำหรับการดีมอดูเลตสัญญาณลอรา ซึ่งข้อจำกัดทั้งสองนี้ ถูกกำหนดด้วยระดับ Spreading Factor โดยที่ SF ที่มีค่าต่ำ ค่าความไวของอุปกรณ์ และ SNR Limit จะมีค่าต่ำ (ดีดลบน้อย) ในทางตรงข้าม SF ที่มีค่าสูง ค่าความไวของอุปกรณ์ และ SNR Limit จะมีค่าสูง (ดีดลบมาก) ยกตัวอย่างเช่น ที่ระดับ SF7 มีค่าความไวของอุปกรณ์ เท่ากับ -125 dBm และ SNR Limit เท่ากับ -7.5 dB ในขณะที่ SF12 มีค่าความไวของอุปกรณ์ เท่ากับ -137 dBm และ SNR Limit เท่ากับ -20 dB เป็นต้น

ตาราง 2-5 ค่าความไวของเครื่องรับและ SNR ขั้นต่ำสำหรับการดีมอดูเลตสัญญาณลอรา

Spreading Factor (SF)	Receiver Sensitivity (dBm)	SNR Limit (dB)
7	-125	-7.5
8	-127	-10
9	-130	-12.5
10	-132	-15
11	-135	-17.5
12	-137	-20

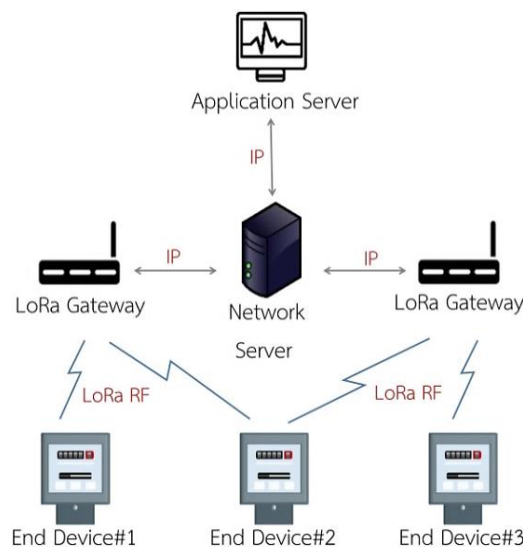


ภาพประกอบ 2-6 เปรียบเทียบลักษณะของโทโพโลยีแบบต่าง ๆ

2.2.3 สถาปัตยกรรมลอว์แวน

สถาปัตยกรรมลอว์แวน (Long Rang Wide Area Network: LoRaWAN) คือรูปแบบโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (Media Access Control: MAC) ที่เชื่อมโยงข้อมูลจากภาคส่งผ่านสัญญาณวิทยุที่มอดูเลตแบบลอว์แวน ส่งเข้าสู่เครือข่ายอินเทอร์เน็ต ผ่านอุปกรณ์ลอว์แวนเกตเวย์ ลักษณะโทโพโลยีของเครือข่ายลอว์แวน เป็นแบบดาวที่ขยายออก (Star of Star) มีจุดเด่นคือ การบริหารจัดการข้อมูล และการออกแบบระบบไม่ซับซ้อนเท่าโทโพโลยีแบบตาข่าย (Mesh) และยังสามารถขยายพื้นที่ของเครือข่ายให้ครอบคลุมบริเวณกว้าง (Wide Area Network: WAN) ด้วยการติดตั้งลอว์แวนเกตเวย์ เพิ่มเติมในตำแหน่งต่าง ๆ ดังภาพประกอบ 2-6 มาตรฐานเครือข่ายลอว์แวน มีกลุ่มพันธมิตร LoRa Alliance ที่เกิดจากการรวมตัวกันขององค์กรชั้นนำด้านการสื่อสารทั่วโลก คอยขับเคลื่อน และกำหนดรูปแบบมาตรฐาน ของเทคโนโลยีเครือข่ายการสื่อสารลอว์แวน [30]

จากภาพประกอบ 2-6 แสดงรูปแบบโทโพโลยีแบบตาข่าย (Mesh), แบบดาว (Star) และแบบดาวที่ขยายออก (Star of Star) โดยที่โทโพโลยีแบบตาข่าย เป็นโครงข่ายการสื่อสารที่โหนด (Node) สามารถสื่อสารกันเองได้ หรือสามารถติดต่อกับแม่ข่ายได้โดยตรง รูปแบบเส้นทางการส่งข้อมูลมีความซับซ้อน แต่มีเสถียรภาพสูง ในขณะที่โทโพโลยีแบบดาว หรือดาวที่ขยายออก จำเป็นต้องมีศูนย์กลางการติดต่อสื่อสาร เช่น แม่ข่าย หรือเกตเวย์ ในการรวมเส้นทางการสื่อสารในแต่ละตำแหน่ง สามารถบริหารจัดการเส้นทางการสื่อสารได้ง่าย ไม่ซับซ้อน สามารถขยายพื้นที่การให้บริการ ด้วยการติดตั้งเกตเวย์เพิ่มในตำแหน่งที่ต้องการ เช่น เครือข่ายลอว์แวน เป็นต้น



ภาพประกอบ 2-7 สถาปัตยกรรมลอว์แวนเมื่อประยุกต์ใช้งานกับสมาร์ตมิเตอร์

โครงสร้างของสถาปัตยกรรมลอว์แวน ประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่ End Device, Gateway, Network Server และ Application Server สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย อุปกรณ์ไอโอที ระบบแจ้งเตือนหรือเฝ้าระวังภัย และเครือข่ายการสื่อสารของสมาร์ตมิเตอร์ ดังภาพประกอบ 2-7 เป็นต้น ซึ่งแต่ละส่วนของลอว์แวน มีรายละเอียดดังนี้

ก. End Device

End Device หรือ ลูกข่าย คือ อุปกรณ์ส่งข้อมูลของเซนเซอร์ หรือรับคำสั่งจากแม่ข่าย เพื่อการเข้าถึงข้อมูลหรือการควบคุมอุปกรณ์ สำหรับลูกข่ายของลอว์แวน แบ่งออกเป็น 3 คลาส

- คลาส A โดยปกติอุปกรณ์จะหลับเพื่อประหยัดพลังงาน และจะตื่นขึ้นเฉพาะตอนที่ต้องการส่งข้อมูลขาขึ้น (Up Link) ตามรอบเวลาที่กำหนดในสล็อตเวลา หากต้องการรับข้อมูลขาลง (Down Link) จากแม่ข่าย สามารถทำได้เฉพาะสล็อตเวลาที่เปิดรับเท่านั้น คลาสนี้มี Latency สูงสุด
- คลาส B ถูกพัฒนาเพิ่มเติมจากคลาส A โดยมีการปล่อย Beacon Frame เพื่อรอรับการส่งข้อมูลขาลงตามสล็อตเวลาที่กำหนดไว้บนซอฟต์แวร์
- คลาส C อุปกรณ์จะตื่นตลอดเวลา เพื่อรอข้อมูลขาลงจากแม่ข่ายอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น อุปกรณ์คลาส C จึงมี Latency ต่ำที่สุด แต่อัตราการใช้พลังงานสูงที่สุด จึงไม่เหมาะกับการใช้งานร่วมกับแบตเตอรี่

ข. Gateway

เกตเวย์ (Gateway) คือ ตัวกลางการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ลูกข่ายกับแม่ข่าย โดยการดักจับส่วน Preamble ของสัญญาณลาร์ว่า ที่ถูกส่งมาจากแต่ละลูกข่าย แล้วส่งต่อชุดข้อมูลไปประมวลผลบนแม่ข่าย หรือเซิร์ฟเวอร์ ผ่านอินเทอร์เน็ตโพรโตคอล (IP) ทั้งนี้ อาจมีเกตเวย์มากกว่าหนึ่งตัว ที่ตรวจจับชุดข้อมูลเดียวกัน ดังนั้น การคัดแยกชุดข้อมูล จะอาศัยกลไกการยืนยันตัวตน (Activation) บนระบบของเซิร์ฟเวอร์ ที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

ค. Network Server

Network Server หรือ แม่ข่าย คือ อุปกรณ์หรือโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งทำงานให้บริการในระบบเครือข่ายลอว์แวน โดยการนำชุดข้อมูลจากเกตเวย์มาประมวลผล เริ่มจากตรวจสอบการรับรอง หรือ Authenticate ชุดข้อมูลด้วยกุญแจ (Key) ตามที่ได้ลงทะเบียนไว้แล้วในระบบ โดยจะมีเฉพาะแม่ข่ายที่เกี่ยวข้องเท่านั้น ที่จะสามารถถอดรหัสชุดข้อมูลได้ สำหรับมาตรฐานลอว์แวนกำหนดวิธีการยืนยันตัวตน (Activation) แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่

- Activation By Personalization (ABP) คือ การลงทะเบียน Key อุปกรณ์ลูกข่ายไว้ในระบบของแม่ข่ายตั้งแต่แรก ด้วยการใส่กุญแจที่แตกต่างกัน ในแต่ละอุปกรณ์ ได้แก่ Device EUI, Device Address, Network Session Key และ Application Session Key วิธีการนี้จะยอมให้ลูกข่ายที่ลงทะเบียนไว้แล้ว เข้าใช้งานเครือข่ายได้ทันที

- Over The Air Activation (OTAA) วิธีการนี้ เริ่มจากลูกข่ายส่งกุญแจ ได้แก่ Device EUI, Application EUI, Application KEY ซึ่งถูกฝังไว้ภายใน ไปให้แม่ข่ายตรวจสอบการยืนยันตัวตน จากนั้น แม่ข่ายจะส่งกลับกุญแจต่าง ๆ เช่นเดียวกับวิธี ABP เพื่ออนุญาตให้ลูกข่ายนั้น เข้ามาใช้งานเครือข่ายได้ วิธีนี้ จะมีการหน่วยเวลา (Delay) ในช่วงแรกของการยืนยันตัวตนเล็กน้อย แต่แลกมาด้วยความยืดหยุ่นที่มากกว่าแบบ ABP

ง. Application Server

Application Server หรือ แอปพลิเคชัน คือ ส่วนของการใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่ได้มาจากแม่ข่าย เช่น ระบบรายงานผล หรือแสดงผลข้อมูลด้วยกราฟ ระบบฐานข้อมูล การนำเสนอ หรือ การรายงานข้อมูลไปยังแอปพลิเคชันของสมาร์ทโฟน เป็นต้น

ตาราง 2-6 แผนการจัดการช่องสัญญาณของเครือข่าย The Things Network

มาตรฐาน	ช่องสัญญาณ	ความถี่ (MHz)	Uplink	Downlink	
				RX1	RX2
AS920-923	1	923.2	SF7BW125 to SF12BW125	SF7BW125 to SF12BW125	SF10BW125
	2	923.4	SF7BW125 to SF12BW125	SF7BW125 to SF12BW125	
	3	922.2	SF7BW125 to SF12BW125	SF7BW125 to SF12BW125	
	4	922.4	SF7BW125 to SF12BW125	SF7BW125 to SF12BW125	
	5	922.6	SF7BW125 to SF12BW125	SF7BW125 to SF12BW125	
	6	922.8	SF7BW125 to SF12BW125	SF7BW125 to SF12BW125	
	7	923.0	SF7BW125 to SF12BW125	SF7BW125 to SF12BW125	
	8	922.0	SF7BW125 to SF12BW125	SF7BW125 to SF12BW125	
AS923-925	1	923.2	SF7BW125 to SF12BW125	SF7BW125 to SF12BW125	SF10BW125
	2	923.4	SF7BW125 to SF12BW125	SF7BW125 to SF12BW125	
	3	923.6	SF7BW125 to SF12BW125	SF7BW125 to SF12BW125	
	4	923.8	SF7BW125 to SF12BW125	SF7BW125 to SF12BW125	
	5	924.0	SF7BW125 to SF12BW125	SF7BW125 to SF12BW125	
	6	924.2	SF7BW125 to SF12BW125	SF7BW125 to SF12BW125	
	7	924.4	SF7BW125 to SF12BW125	SF7BW125 to SF12BW125	
	8	924.6	SF7BW125 to SF12BW125	SF7BW125 to SF12BW125	

2.2.4 ข้อกำหนดด้านการใช้งานย่านความถี่ของลอว์แวน

การกำหนดย่านความถี่ใช้งานตามมาตรฐานลอว์แวน ถูกออกแบบให้ทำงานบนย่านความถี่ ที่เรียกว่า ISM Band (Industrial Sciences Medicine) หรือย่านความถี่ร่วมสาธารณะ สำหรับอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ เพื่อการศึกษา พัฒนา และการวิจัยด้านเทคโนโลยี การสื่อสารแบบไร้สายโดยเฉพาะ เช่น ย่านความถี่ 920-925 MHz, 2.4 GHz, 5 GHz เป็นต้น ซึ่งย่านความถี่เหล่านี้ สามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องมีใบอนุญาต (Unlicensed band) ตามประกาศราชกิจจานุเบกษา โดยคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ในประเทศไทยเครือข่ายลอว์แวน ใช้งานได้บนย่านความถี่ 920-925 MHz [27] ซึ่งตรงตามมาตรฐานลอว์แวน AS923 MHz [19] ที่ใช้ในทวีปเอเชีย ได้แก่ประเทศ บรูไน, กัมพูชา, อินโดนีเซีย, ญี่ปุ่น, ลาว, สิงคโปร์, เวียดนาม และไทย เป็นต้น ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวนี้ เปิดโอกาสให้ผู้ให้บริการเครือข่าย (Network Server) สามารถกำหนดช่องสัญญาณ (Channel) ด้วยจำนวนขั้นต่ำ 16 ช่องสัญญาณ ในช่วงความถี่ 920 ถึง 925 MHz ที่แบนด์วิดท์เท่ากับ 125 kHz ดังตัวอย่างในตาราง 2-6 แสดง Frequency Plans ของผู้ให้บริการเครือข่าย The Things Network (TTN) [31] ซึ่งเป็นเครือข่ายลอว์แวน ที่มีจำนวนผู้ใช้งานสูงทั่วโลก และเมื่อพิจารณาช่องสัญญาณ 16 ช่อง ร่วมกับแพกเกจการกระจาย (SF) ระหว่าง 7 ถึง 12 จะทำให้สมรรถนะของเครื่องส่งลอว์แวน สามารถส่งข้อมูลไปยังเกตเวย์เดียวกันได้ มากถึง 96 เครื่องส่ง พร้อมกันในเวลาเดียวกัน (Simultaneously) บนช่วงความถี่ 920-925 MHz

2.3 ทฤษฎีสายอากาศไมโครสตริป

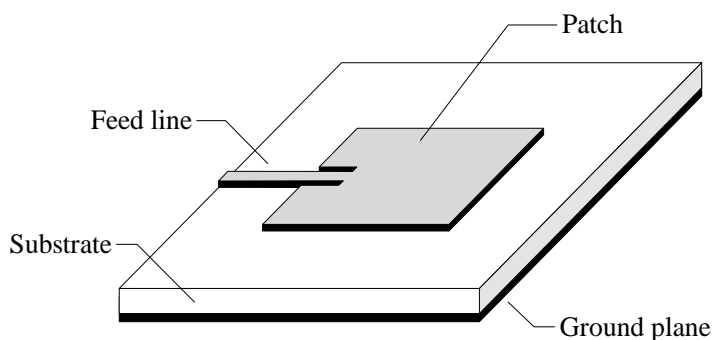
สายอากาศ (Antenna) คือ อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการแพร่กระจายกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปสู่อากาศ (Transmitting Antenna) ในทางกลับกัน สายอากาศทำหน้าที่รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากอากาศ และแปลงกลับเป็นคลื่นสัญญาณไฟฟ้า (Receiving Antenna) โดยทั่วไปการทำงานของสายอากาศทั้งสองหน้าที่ ควรมีประสิทธิภาพเท่าเทียมกัน และแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากที่ได้ออกแบบไว้ นอกจากนี้ ช่วงความถี่การทำงานของสายอากาศ จะถูกออกแบบให้ทำงานได้บนช่วงความถี่เฉพาะ ไม่สามารถใช้งานสายอากาศร่วมกันได้หมดทุกช่วงความถี่ การออกแบบและการเลือกใช้งานสายอากาศที่เหมาะสม จึงมีความสำคัญ ต่อประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารโดยภาพรวม หลักการทำงานและการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสามารถศึกษาได้จาก [32]

สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna) เป็นสายอากาศที่นักวิจัยด้านสายอากาศนิยมศึกษา และพัฒนาประสิทธิภาพให้สูงขึ้น เนื่องจาก สามารถออกแบบให้ใช้งานได้หลายย่านความถี่ ประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายระบบ กำหนดแบบรูปการแผ่พลังงาน และคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศได้ นอกจากนี้ โครงสร้างสายอากาศ มีขนาดเล็กกะทัดรัด แบบราบ สามารถแบนติดกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ และมีราคาถูก สร้างได้ง่ายโดยใช้วัสดุแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ใย่ไรก็ดี ข้อเสียของสายอากาศไมโครสตริป คือ ประสิทธิภาพโดยรวมของสายอากาศต่ำ มีแถบกว้างความถี่หรือแบนด์วิดท์ที่แคบ และไม่สามารถทนต่อกำลังงานของสัญญาณที่สูงมากได้ เมื่อเทียบกับสายอากาศชนิดอื่น ที่สร้างจากโลหะตัวนำ

วิทยานิพนธ์นี้ มุ่งเน้นการออกแบบสายอากาศที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานจริง บนสมาร์ตมิเตอร์ โดยเลือกออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแพตช์รูปสี่เหลี่ยม ที่สามารถทำงานบนย่านความถี่ 920-925 MHz ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีทิศทางของลำคลื่นเพียงทิศทางเดียว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร และช่วยลดระดับการรบกวนจากทิศทางอื่นที่ไม่ต้องการ ทั้งนี้ในการออกแบบสายอากาศดังกล่าวให้ประสบผลสำเร็จ จำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศไมโครสตริป รวมถึงวิธีการออกแบบ และการตรวจวัดคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อย่อย ดังต่อไปนี้

2.3.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปแพตช์รูปสี่เหลี่ยม (Rectangular Microstrip Patch Antenna) คือ หนึ่งในรูปร่างพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป แสดงดังภาพประกอบ 2-8 โครงสร้างประกอบด้วย 4 องค์ประกอบ ได้แก่ 1) โครงสร้างแผ่นตัวนำขนาดเล็ก เรียกว่า แพตช์ (Patch) ทำหน้าที่แผ่กระจายพลังงานออกไปสู่อากาศ โดยทั่วไปจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉาก รูปวงกลม หรือรูปทรงเรขาคณิต; 2) ชั้นวัสดุฐานรอง (Substrate) เป็นชั้นของสารไดอิเล็กตริก ทำหน้าที่ชั้นระหว่างแผ่นตัวนำด้านบนและด้านล่าง; 3) ระนาบกราวด์ (Ground Plane) เป็นชั้นของแผ่นตัวนำที่อยู่ด้านล่างสุด โดยทั่วไปเป็นระนาบของตัวนำแบบเต็มแผ่น และ 4) ส่วนป้อนสัญญาณ (Feed Line) ทำหน้าที่ป้อนคลื่นสัญญาณเข้าไปในส่วนแผ่พลังงาน (แพตช์) และยังคงใช้ในการควบคุมอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ สำหรับวิธีการป้อนสัญญาณที่ง่าย และเป็นที่ยอมรับ 2 วิธี ได้แก่ การป้อนด้วยสตริปสายนำสัญญาณ (Microstrip Line Feed) ที่งานวิจัยนี้เลือกใช้ และการป้อนด้วยโพรบแชนแนลร่วม (Coaxial Probe Feed)



ภาพประกอบ 2-8 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแพตช์รูปสี่เหลี่ยม

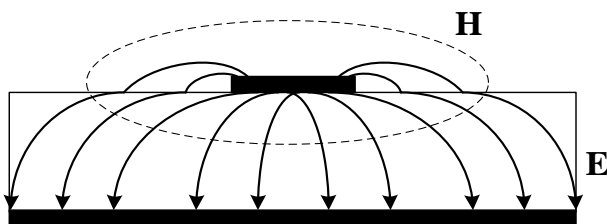
เงื่อนไขของการออกแบบโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป ถูกนำเสนอใน [32] อธิบายว่า ความหนาของแพตช์ (t) ต้องมีความบางมาก โดยค่า $t \ll \lambda_0$ (λ_0 คือ ความยาวคลื่นในช่องว่างอิสระ), ความสูงของชั้นวัสดุฐานรอง (h) โดยทั่วไปอยู่ในช่วง $0.003 \lambda_0 \leq h \leq 0.05 \lambda_0$, ระยะความยาวแพตช์ (L) มีค่าอยู่ในช่วง $\lambda_0/3 \leq L \leq \lambda_0/2$ และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง (ϵ_r) ควรมีค่าอยู่ระหว่าง $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ เพื่อประสิทธิภาพที่ดีของสายอากาศ นอกจากนี้ ความกว้างของแพตช์ (W) และความสูงของชั้นวัสดุฐานรอง (h) มีผลโดยตรงต่อค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) ของสายอากาศไมโครสตริป

สำหรับวัสดุฐานรอง (Substrate) ที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไปมีอยู่หลายชนิด คุณสมบัติของวัสดุฐานรองที่ต้องพิจารณา ได้แก่ 1) ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant: ϵ_r) ซึ่งบ่งบอกถึงคุณสมบัติ การเป็นสารไดอิเล็กตริกเมื่อเทียบกับช่องว่างอิสระ (Free Space) ค่านี้จะส่งผลให้อิมพีแดนซ์คุณลักษณะมีการเปลี่ยนแปลงไป; 2) ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย (Loss Tangent) คือ ค่าที่บ่งบอกว่าสารไดอิเล็กตริก มีการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสมากน้อยเพียงใด ยิ่งมีค่าน้อยยิ่งดี; 3) ค่าคงตัวของการนำความร้อน (Thermal Conductivity) แสดงถึงความสามารถในการระบายความร้อนของสารไดอิเล็กตริก ค่านี้ยิ่งสูงก็ยิ่งดี; 4) ค่าความขรุขระของผิว มีผลต่อการใช้เทคโนโลยีแบบฟิล์มบางในการสร้างแพตช์ตัวนำบนวัสดุฐานรอง และมีผลกระทบต่อ การส่งผ่านของคลื่นบนไมโครสตริปแพตช์ และ 5) ความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength) บ่งบอกถึงความสามารถในการรับกำลังงานคลื่น ยิ่งมีค่าสูงยิ่งสามารถทนกำลังงานได้ดี ดังนั้นในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป ความแม่นยำของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง เป็นปัจจัยที่สำคัญ เพราะเป็นพารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อการเดินทางของคลื่นสัญญาณ, ความถี่เรโซแนนซ์ และคุณลักษณะการแผ่พลังงานของสายอากาศ

2.3.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

วิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยเลือกออกแบบสายอากาศไมโครสตริป ชนิดแพตช์รูปสี่เหลี่ยม (Rectangular Microstrip Patch Antenna) ที่ป้อนสัญญาณด้วยสตริปสายนำสัญญาณ ดังแสดงในภาพประกอบ 2-8 เนื่องจาก สายอากาศชนิดนี้ มีโครงสร้างที่เป็นรูปทรงเรขาคณิต ซึ่งง่ายต่อการออกแบบ และการสร้างต้นแบบสายอากาศจริง มีหลักการและทฤษฎีการออกแบบรองรับ และไม่จำเป็นต้องเจาะโครงสร้างสายอากาศ หรือใช้เทคนิคที่ซับซ้อนในการป้อนสัญญาณ

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป และการอธิบายหลักการการทำงาน สามารถอธิบายได้จากหลายทฤษฎี แต่ทฤษฎีที่อธิบายการทำงานไว้อย่างง่าย และนิยมนำมาใช้ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป คือ แบบจำลองของสายส่ง (Transmission Line Model) ซึ่งมีจุดเด่น คือ สามารถอธิบายการทำงานเชิงกายภาพได้เข้าใจง่าย แต่มีจุดด้อย คือ ยากต่อการอธิบายการ Coupling และความถูกต้องแม่นยำอาจน้อยกว่าการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีอื่น ๆ เช่น แบบจำลองของ Cavity หรือแบบจำลอง Full-Wave อย่างไรก็ตาม แบบจำลองทั้งสองนี้ มีความซับซ้อนกว่ามากเมื่อเทียบกับแบบจำลองของสายส่ง ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้งานแบบจำลองของสายส่ง ในการสร้างต้นแบบสายอากาศไมโครสตริปแพตช์รูปสี่เหลี่ยม อธิบายได้ดังหัวข้อย่อยต่อไปนี้



ภาพประกอบ 2-9 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนไมโครสตริปสายส่ง

2.3.2.1 คุณสมบัติของคลื่นบนสายอากาศไมโครสตริป

จากภาพประกอบ 2-9 แสดงองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\mathbf{E}) และสนามแม่เหล็ก (\mathbf{H}) ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของคลื่นสัญญาณ ที่ป้อนให้กับส่วนของไมโครสตริปสายส่ง โดยสนามทั้งสองมีทิศทางตามขวาง กับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ซึ่งคล้ายกับโหมด TEM (Transverse ElectroMagnetic) แต่จะไม่ใช้โหมด TEM อย่างสมบูรณ์ จึงเรียกลักษณะดังกล่าวว่า โหมดกึ่ง TEM หรือ Quasi-TEM เนื่องจาก บริเวณรอยต่อของอากาศ จะทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งอยู่เหนือชั้นของไมโครสตริปสายส่ง ทั้งนี้ เส้นแรงของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จะอยู่ภายในฉนวนไฟฟ้าของอากาศเกือบทั้งหมด แต่จะมีบางส่วนที่อยู่ภายในฉนวนของชั้นวัสดุฐานรอง ส่งผลให้ความเร็วเฟส (Phase Velocity: V_p) ของคลื่นที่อยู่ในฉนวนของวัสดุฐานรอง มีค่าน้อยกว่าความเร็วคลื่นในอากาศ ดังนั้น ความเร็วเฟสที่อยู่บริเวณผิวของฉนวนไฟฟ้ากับอากาศ จึงไม่เป็นไปตามกฎของโหมด TEM

คลื่นสัญญาณที่เคลื่อนที่บนสายอากาศไมโครสตริป เป็นผลมาจากองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก มีลักษณะเป็นโหมด Quasi-TEM ภายใต้เงื่อนไขของฉนวนไฟฟ้าของชั้นวัสดุฐานรองที่อยู่ด้านล่างสตริป จะต้องมีความบาง ($h \ll \lambda$) สามารถหาค่าความเร็วเฟส, ความยาวคลื่น, ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น และความยาวทางไฟฟ้า ได้จากสมการต่อไปนี้ [32]

$$V_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (2-4)$$

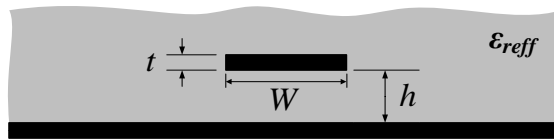
$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} = k_0 \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} \quad (2-5)$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (2-6)$$

$$\theta = \beta L \quad (2-7)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (2-8)$$

เมื่อ	V_p	= ความเร็วเฟส (เมตรต่อวินาที)
	ω	= ความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)
	β	= ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น (เรเดียนต่อเมตร)
	c	= ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที
	λ_g	= ความยาวคลื่นในสายอากาศ (Guided Wavelength) (เมตร)
	λ_0	= ความยาวคลื่นในช่องว่างอิสระ (เมตร)
	k_0	= เลขคลื่น (Wave Number) หรือแฟคเตอร์แพร่กระจายคลื่น
	θ	= ความยาวทางไฟฟ้า (Electrical Length) (องศา)
	L	= ความยาวสตริปตัวนำ (เมตร)
	ϵ_{reff}	= ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (ไม่มีหน่วย)



ภาพประกอบ 2-10 การพิจารณาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล

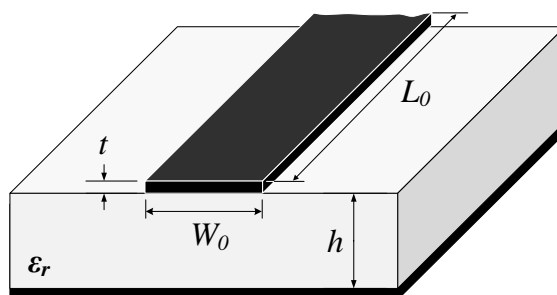
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant: ϵ_{reff}) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ในการใช้วิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่แตกต่างกันระหว่างสองตัวกลาง โดยพิจารณาเสมือนว่า ตัวนำหรือไมโครสตริปนั้น อยู่ภายใต้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเดียวกัน โดยที่ขนาดและตำแหน่งของไมโครสตริปยังคงเท่าเดิม ดังภาพประกอบ 2-10 ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลนี้มีค่าขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นวัสดุฐานรอง (h) และความกว้างของสตริปตัวนำไฟฟ้าด้านบน (W) โดยทั่วไปแล้วขนาดของ W จะมีค่ามากกว่า h มาก ๆ ($W \gg h$) เส้นแรงไฟฟ้าส่วนใหญ่ จะอยู่ระหว่างบริเวณแถบสตริปตัวนำกับระนาบกราวด์ ส่งผลให้ค่า ϵ_{reff} มีค่าเข้าใกล้ ϵ_r ของวัสดุฐานรอง ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้ [32]

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} ; \frac{W}{h} > 1 \quad (2-9)$$

เมื่อ ϵ_{reff} = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (ไม่มีหน่วย)
 ϵ_r = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง (ไม่มีหน่วย)
 W = ความกว้างของสตริปตัวนำ (เมตร)
 h = ความหนาของวัสดุฐานรอง (เมตร)

2.3.2.2 สตริปสายนำสัญญาณ (Microstrip Line Feed)

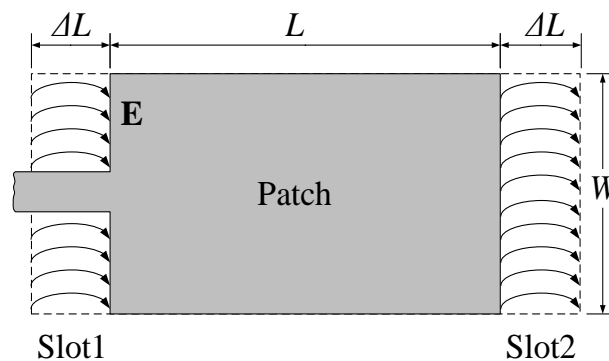
การป้อนสัญญาณด้วยสตริปสายนำสัญญาณ ดังภาพประกอบ 2-11 คือ ส่วนของการนำพาสัญญาณจากแหล่งกำเนิด เคลื่อนที่เข้าสู่ส่วนแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งเป็นแพตช์ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า การออกแบบส่วนของสตริปสายนำสัญญาณนี้ สามารถกำหนดค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Z_0) ของสายนำสัญญาณ ได้จากขนาดความกว้างสตริป (W_0) ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (ϵ_{reff}) และความหนาของวัสดุฐานรอง (h) ซึ่งจะไม่ขึ้นกับความยาวของสตริปสายนำสัญญาณ (L_0) โดยทั่วไป W_0 จะมีค่ามากกว่า h ซึ่งหาความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้ [32]



ภาพประกอบ 2-11 โครงสร้างสตริปสายนำสัญญาณ

$$Z_0 = \frac{Z_f}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}} \left[\frac{W_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1.444 \right) \right]}} ; \frac{W_0}{h} > 1 \quad (2-10)$$

- เมื่อ Z_0 = อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสตริปนำสัญญาณ (โอห์ม)
 Z_f = อิมพีแดนซ์ของช่องว่างอิสระ มีค่าเท่ากับ $\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$ หรือ 376.8 โอห์ม
 ϵ_{reff} = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (ไม่มีหน่วย)
 ϵ_r = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง (ไม่มีหน่วย)
 W_0 = ความกว้างของสตริปนำสัญญาณ (เมตร)
 h = ความหนาของวัสดุฐานรอง (เมตร)



ภาพประกอบ 2-12 โครงสร้างแพตช์ตัวนำและเส้นแรงไฟฟ้าที่ขอบ

2.3.2.3 แพตช์รูปสี่เหลี่ยม (Rectangular Patch)

การออกแบบส่วนของแพตช์ตัวนำรูปสี่เหลี่ยม ดังภาพประกอบ 2-12 ขนาดโครงสร้างของแพตช์ประกอบไปด้วย ความกว้าง (W) และความยาวของแพตช์ (L) อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก ผลของปรากฏการณ์สนามฟรินจิงก์ (Fringing Effect) ที่สนามไฟฟ้า (\mathbf{E}) เดินทางระหว่างแพตช์ตัวนำและระนาบกราวด์ ผ่านสารไดอิเล็กตริกของชั้นวัสดุฐานรอง ด้วยเส้นแรงไฟฟ้าที่มีลักษณะโค้ง เสมือนว่าความยาวของแพตช์ทางไฟฟ้า มีขนาดใหญ่กว่าความยาวแพตช์ทางกายภาพ เรียกว่า ความยาวประสิทธิผล (L_{eff}) ซึ่งผลต่างระหว่างความยาวประสิทธิผล กับความยาวทางกายภาพ มีค่าเท่ากับสองเท่าของ ΔL ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการนี้ [32]

$$\Delta L = 0.412 \cdot h \cdot \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2-11)$$

สามารถหาความยาวประสิทธิผล (L_{eff}) ความยาวทางกาย (L) และค่าความกว้างของแพตช์รูปสี่เหลี่ยม (W) ได้จากความสัมพันธ์ของสมการนี้ [32]

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (2-12)$$

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (2-13)$$

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (2-14)$$

- เมื่อ ΔL = ระยะของสนามฟรินจิงก์บริเวณขอบสายอากาศ (เมตร)
 L_{eff} = ความยาวประสิทธิผล (เมตร)
 L = ความยาวแพตช์ตัวนำ (เมตร)
 h = ความหนาของวัสดุฐานรอง (เมตร)
 W = ความกว้างของแพตช์ (เมตร)
 c = ความเร็วแสงมีค่า 3×10^8 (เมตรต่อวินาที)
 f_r = ความถี่เรโซแนนซ์ หรือความถี่กลางของสายอากาศ (เฮิรตซ์)
 ϵ_{reff} = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (ไม่มีหน่วย)

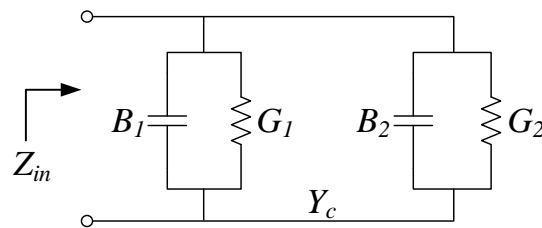
2.3.2.4 ระนาบกราวด์ (Ground Plane)

โดยพื้นฐานแล้วการใช้แบบจำลองของสายส่ง (Transmission Line Model) จะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขขนาดของระนาบกราวด์เป็นอนันต์ อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติสามารถออกแบบระนาบกราวด์ที่มีขนาดจำกัดได้ ซึ่งขนาดความกว้างของระนาบกราวด์อย่างน้อยที่สุด ต้องมีขนาดเพียงพอสำหรับรองรับสนามฟรินจิงก์ (Fringing Effect) ที่บริเวณของของแพตช์ตัวนำทั้งสองด้าน ดังภาพประกอบ 2-12 หรือ อาจใช้การพิจารณาจากขนาดของความยาวคลื่น ในการประมาณขนาดของระนาบกราวด์ ดังสมการต่อไปนี้ [33]

$$W_g \geq 2 \left(\frac{\lambda_g}{4} \right) + W \quad (2-15)$$

$$L_g \geq 2 \left(\frac{\lambda_g}{4} \right) + L \quad (2-16)$$

- เมื่อ W_g = ความกว้างของระนาบกราวด์ (เมตร)
 L_g = ความยาวของระนาบกราวด์ (เมตร)
 W = ความกว้างของแพตช์ (เมตร)
 L = ความยาวแพตช์ตัวนำ (เมตร)
 λ_g = ความยาวคลื่นในสายอากาศ (เมตร)



ภาพประกอบ 2-13 วงจรสมมูลของโครงสร้างแพตช์รูปสี่เหลี่ยม

2.3.2.5 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า และวงจรสมมูลของแพตช์รูปสี่เหลี่ยม

จากทฤษฎีการวิเคราะห์ของแบบจำลองสายส่ง อธิบายพฤติกรรมการแผ่พลังงานของช่องเปิด (Radiating Slot) ที่ขอบทั้งสองข้างของแพตช์รูปสี่เหลี่ยม (Slot1 และ Slot2) ด้วยวงจรสมมูลดังภาพประกอบ 2-13 ซึ่งแสดงองค์ประกอบของช่องเปิดที่ 1 ด้วยค่าความนำไฟฟ้า (Conductance) G_1 และค่าอินดักทีฟซีเซพแดนซ์ B_1 ในส่วนของช่องเปิดที่ 2 ประกอบด้วยค่า G_2 และ B_2 เช่นเดียวกับช่องเปิดที่ 1 และสามารถหาค่าแอดมิตแดนซ์ (Admittance: Y) ของค่าความนำทั้งหมดภายในวงจร จากผลรวมของค่าความนำไฟฟ้าและค่าอินดักทีฟซีเซพแดนซ์ ดังนั้น การหาค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance) ของแพตช์รูปสี่เหลี่ยม (Z_{in}) ทำได้โดยหาส่วนกลับของค่าแอดมิตแดนซ์ดังกล่าว จากความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้ เขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้ [32]

$$Y_1 = G_1 + jB_1 \quad (2-17)$$

$$G_1 = \frac{W}{120\lambda_0} \left[1 - \frac{1}{24} (k_0 h)^2 \right] \quad ; \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10} \quad (2-18)$$

$$B_1 = \frac{W}{120\lambda_0} [1 - 0.636 \ln(k_0 h)] \quad ; \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10} \quad (2-19)$$

$$Y_2 = Y_1 \quad (2-20)$$

$$G_2 = G_1 \quad (2-21)$$

$$B_2 = B_1 \quad (2-22)$$

- เมื่อ
- Y_i = ค่าแอดมิตแดนซ์ของช่องเปิดที่ i (ซีเมนส์)
 - G_i = ค่าความนำไฟฟ้าของช่องเปิดที่ i (ซีเมนส์)
 - B_i = ค่าอินดักทีฟซีเซพแดนซ์ของช่องเปิดที่ i (ซีเมนส์)
 - W = ความกว้างของแพตช์ (เมตร)
 - h = ความหนาของวัสดุฐานรอง (เมตร)
 - λ_0 = ความยาวคลื่นในช่องว่างอิสระ (เมตร)
 - k_0 = เลขคลื่น หรือ Wave Number (ไม่มีหน่วย)

การวิเคราะห์วงจรสมมูลของแพตช์รูปสี่เหลี่ยม พิจารณาตำแหน่งทางฝั่งด้านเข้าหรือทางด้านช่องเปิดที่ 1 การหาค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ทำได้โดยวิธีการแปลง (Transformation) ค่าแอดมิตแตนซ์ของช่องเปิดที่ 2 มาไว้ที่ฝั่งช่องเปิดที่ 1 เพื่อหาค่าแอดมิตแตนซ์รวมของวงจรสมมูล (Y_{in}) ที่เป็นเรโซแนนซ์กันระหว่างสองช่องเปิด แล้วค่าส่วนกลับ ดังสมการต่อไปนี้ [32]

$$\tilde{Y}_2 = \tilde{G}_2 + j\tilde{B}_2 = G_1 - jB_1 \quad (2-23)$$

$$Y_{in} = Y_1 + \tilde{Y}_2 = 2G_1 \quad (2-24)$$

$$Z_{in} = R_{in} = \frac{1}{Y_{in}} = \frac{1}{2G_1} \quad (2-25)$$

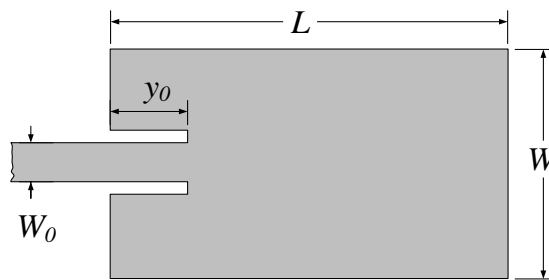
- เมื่อ Y_{in} = ค่าแอดมิตแตนซ์ของอินพุต (ซิเมนส์)
 Z_{in} = ค่าอิมพีแดนซ์ของอินพุต (โอห์ม)
 \tilde{Y}_2 = ผลการแปลงค่าแอดมิตแตนซ์ของช่องเปิดที่ 2 (ซิเมนส์)
 \tilde{G}_2 = ผลการแปลงค่าความนำไฟฟ้าของช่องเปิดที่ 2 (ซิเมนส์)
 \tilde{B}_2 = ผลการแปลงค่าอินดักทีฟซีพแอดมิตแตนซ์ของช่องเปิดที่ 2 (ซิเมนส์)

2.3.2.6 การป้อนสัญญาณแบบอินเซต (Inset Feed)

จากภาพประกอบ 2-14 แสดงพารามิเตอร์ y_0 ซึ่งเป็นระยะการอินเซต (Inset) หรือระยะของสตริปสายนำสัญญาณที่ตัดเข้าไปด้านในของแพตช์ตัวนำ ซึ่งระยะการอินเซตนี้ เป็นเทคนิคในการปรับอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของแพตช์ตัวนำ ให้เหมาะสมกับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสตริปสายนำสัญญาณ เรียกว่า การแมตซ์อิมพีแดนซ์ (Impedance Matching) ในการวิจัยนี้ กำหนดค่าการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ 50 โอห์ม ซึ่งสอดคล้องกับอิมพีแดนซ์ด้านออก (Output Impedance) ของโมดูลการสื่อสารลอร่า [34] การคำนวณระยะอินเซต ใช้การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของแพตช์จากสมการ (2-25) เป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่ระยะ $y=0$ ในขณะที่ ระยะอินเซตกำหนดที่ $y=y_0$ คือ ตำแหน่งที่มีอิมพีแดนซ์ด้านเข้า เท่ากับ 50 โอห์ม พอดี สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้ [32]

$$y_0 = \left(\frac{L}{180^\circ} \right) \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{R_{in(y=y_0)}}{R_{in(y=0)}}} \right) \quad (2-26)$$

- เมื่อ $R_{in(y=y_0)}$ = อินพุตรีซิสแตนซ์ที่ระยะการอินเซต (โอห์ม)
 $R_{in(y=0)}$ = อินพุตรีซิสแตนซ์ที่ขอบด้านเข้าของแพตช์ตัวนำ (โอห์ม)
 y_0 = ระยะการอินเซต (เมตร)
 L = ความยาวของแพตช์ตัวนำ (เมตร)
 $\cos^2 \left(\frac{\pi}{L} \cdot y_0 \right)$ = มีหน่วยเป็นเรเดียน ($degrees = radians \times 180^\circ / \pi$)



ภาพประกอบ 2-14 โครงสร้างแพตช์รูปสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนสัญญาณแบบอินเซต

2.3.3 พารามิเตอร์สายอากาศ

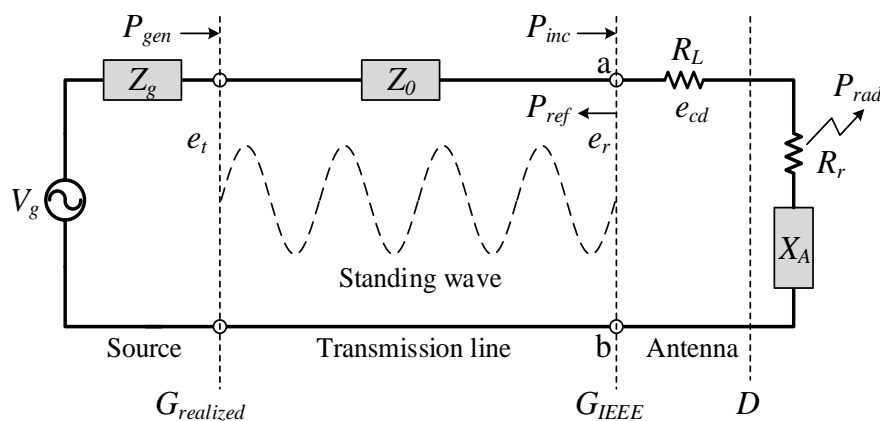
พารามิเตอร์สายอากาศ ถูกใช้อธิบายคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศไมโครสตริป หรือใช้ในการตรวจวัดประสิทธิภาพหรือสมรรถนะของสายอากาศ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน, อัตราขยาย, สภาพเจาะจงทิศทาง, แบบรูปการแผ่พลังงาน เป็นต้น ในหัวข้อนี้ จะขออธิบายพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ และจำเป็นต่อการสร้างต้นแบบสายอากาศ รวมถึงการวัดทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริปที่ต้องการนำเสนอ มีรายละเอียดดังหัวข้อย่อยต่อไปนี้

2.3.3.1 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance)

จากภาพประกอบ 2-15 แสดงองค์ประกอบของการส่งกำลังงานจากเครื่องส่ง ผ่านสายนำสัญญาณ และไปสู่สายอากาศ ในรูปแบบของวงจรสมมูลเทวินิน โดยอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Z_{in}) ที่ขั้ว a-b หรืออิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Z_A) มีองค์ประกอบดังสมการ [32]

$$Z_{in} = Z_A = R_A + jX_A \tag{2-27}$$

- เมื่อ Z_{in}, Z_A = ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ขั้ว a-b (โอห์ม)
- R_A = ค่าความต้านทานของสายอากาศที่ขั้ว a-b (โอห์ม)
- X_A = ค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศที่ขั้ว a-b (โอห์ม)



ภาพประกอบ 2-15 วงจรสมมูลเทวินินของเครื่องส่งสัญญาณ

ค่าความต้านทานของสายอากาศ (R_A) ประกอบด้วยสององค์ประกอบ ได้แก่ 1) ความต้านทานของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (R_r) และ 2) ค่าความต้านทานที่เกิดจากการสูญเสียของวัสดุที่ใช้ทำสายอากาศ (R_L) ซึ่งความต้านทาน R_r บ่งบอกถึงสมรรถนะของสายอากาศ ยิ่งมีค่าสูงยิ่งดี โดยจะขึ้นอยู่กับรูปร่าง ขนาด และชนิดของสายอากาศ แต่ไม่ขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำสายอากาศ ดังนั้น กำลังงานที่ตกคร่อม R_r จะถูกใช้ในการแพร่กระจายคลื่นทั้งหมด ในขณะที่ค่าความต้านทาน R_L ถูกใช้เป็นตัวแทนของการสูญเสียในรูปของความร้อน ที่เกิดบนสายอากาศ หรือการสูญเสียจากความเป็นฉนวน (Dielectric) หรือความเป็นตัวนำ (Conducting) สรุปลงสมการ [32]

$$R_A = R_r + R_L \quad (2-28)$$

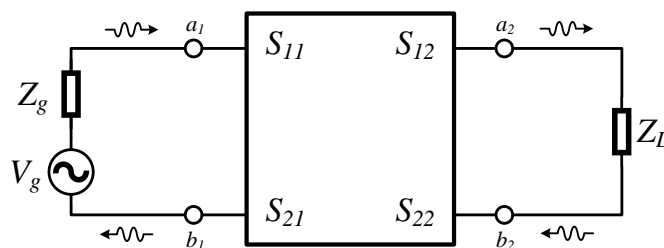
เมื่อ R_r = ค่าความต้านทานของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (โอห์ม)
 R_L = ค่าความต้านทานที่เกิดจากการสูญเสียของวัสดุที่ใช้ทำสายอากาศ (โอห์ม)

2.3.3.2 สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient)

จากภาพประกอบ 2-15 แสดงการส่งกำลังงานจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ ผ่านสายนำสัญญาณ ไปถึงโหลดซึ่งเป็นสายอากาศ โดยคลื่นสัญญาณจากแหล่งกำเนิด (Incident Wave) เดินทางไปยังสายอากาศ (Transmitted Wave) แต่บางส่วนจะถูกสะท้อนกลับเข้าไปในแหล่งกำเนิดต้นทาง (Reflected Wave) ซึ่งการสะท้อนกลับนี้ เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างสายอากาศและสายนำสัญญาณ เนื่องจากการไม่แมตช์กันของอิมพีแดนซ์ (Mismatch) ระหว่างอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ (Z_0) กับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Z_A) สามารถนิยามค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient: Γ) คำนวณได้ดังสมการ [32]

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (2-29)$$

เมื่อ Γ = สัมประสิทธิ์การสะท้อน (ไม่มีหน่วย)
 V_0^- = แรงดันไฟฟ้าของคลื่นสะท้อน (โวลต์)
 V_0^+ = แรงดันไฟฟ้าของคลื่นที่พุ่งกระทบ (โวลต์)
 Z_A = อิมพีแดนซ์ที่ขั้วขาเข้าของสายอากาศ หรือ Z_A (โอห์ม)
 Z_0 = ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ (โอห์ม)



ภาพประกอบ 2-16 พารามิเตอร์การกระจายของอุปกรณ์โครงข่าย 2 พอร์ต

ในทางปฏิบัติ สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) สามารถตรวจวัดได้ด้วยการใช้เครื่องมือวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) วัดทดสอบพารามิเตอร์การกระจาย S_{11} แสดงดังภาพประกอบ 2-16 เมื่อ S_{11} คือ อัตราส่วนระหว่างแรงดันของคลื่นที่สะท้อนออกมาจากพอร์ต 1 เทียบกับแรงดันของคลื่นที่เราป้อนเข้าไปในพอร์ต 1 ดังนั้น หากอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ มีสถานะแมตช์กับอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ แรงดันที่สะท้อนออกมาจากพอร์ต 1 จะตํ่ากว่าแรงดันที่เราป้อนเข้าไปเสมอ เมื่อพิจารณา S_{11} ในหน่วยเดซิเบล (dB) จึงมีค่าต่ำกว่า 1 (ติดลบ) เสมอ

จากสมการ (2-29) สังเกตได้ว่า ในกรณีการแมตช์อิมพีแดนซ์สมบูรณ์ ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างสายนำสัญญาณและสายอากาศมีค่าเท่ากัน สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ , S_{11}) จะเท่ากับ 0 ในขณะที่ การแมตช์อิมพีแดนซ์ที่แย่มาก สัมประสิทธิ์การสะท้อนจะมีค่าเท่ากับ -1 หรือ 1 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์สายอากาศ มีการลัดวงจร ($Z_A=0$) หรือเปิดวงจร ($Z_A=\infty$) ตามลำดับ

2.3.3.3 การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss: RL) ถูกนิยามด้วย ขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อน ที่พิจารณาในหน่วยเดซิเบล โดยมีเครื่องหมายตรงกันข้าม ดังนั้น ค่า RL สามารถใช้บ่งบอกถึงการสูญเสียกำลังงานของคลื่นสัญญาณ เนื่องจากการสะท้อนกลับของคลื่นสัญญาณ บริเวณรอยต่อระหว่างสายนำสัญญาณกับสายอากาศ โดยการสูญเสียย้อนกลับนี้ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามผลการตอบสนองต่อความถี่ต่าง ๆ ของสัญญาณ จึงสามารถใช้อุปกรณ์นี้ บ่งบอกถึงช่วงความถี่หรือแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ที่ใช้งานได้ของสายอากาศ เมื่อพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่ดี ควรมีค่า RL สูงกว่า 10 dB (S_{11} น้อยกว่า -10 dB) คำนวณได้จากสมการนี้ [32]

$$RL \text{ (dB)} = -10 \log |S_{11}|^2 = -10 \log |\Gamma|^2 \quad (2-30)$$

เมื่อ RL = การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (เดซิเบล)
 Γ , S_{11} = ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (ไม่มีหน่วย)

2.3.3.4 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio)

การสะท้อนของคลื่น ที่รอยต่อระหว่างสายนำสัญญาณกับสายอากาศ ทำให้เกิดคุณลักษณะของอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio: $VSWR$) ซึ่งคลื่นที่ถูกส่งไปจากแหล่งกำเนิด เกิดการรวมกันกับคลื่นที่สะท้อนกลับมา ส่งผลให้คลื่นที่อยู่ในสายนำสัญญาณเสมือนอยู่นิ่งและสลับเฟส ไม่เคลื่อนที่ไปยังไหนเลย ดังแสดงภาพประกอบ 2-15 ในการวัดค่า $VSWR$ พิจารณาได้จากอัตราส่วนของแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นนิ่ง กับแอมพลิจูดต่ำสุดของคลื่นนิ่ง หรือคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน สำหรับค่าที่ยอมรับได้ของอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ควรมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 คำนวณได้ดังสมการ [32]

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (2-31)$$

เมื่อ $VSWR$ = อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (ไม่มีหน่วย)
 $|\Gamma|$ = ขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (ไม่มีหน่วย)
 V_{max} = แอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นนิ่ง (โวลต์)
 V_{min} = แอมพลิจูดต่ำสุดของคลื่นนิ่ง (โวลต์)

2.3.3.5 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)

แถบกว้างความถี่ หรือแบนด์วิดท์ (Bandwidth: BW) ของสายอากาศ คือ ช่วงของความถี่ที่สายอากาศสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่สูญเสียคุณลักษณะต่าง ๆ ไปจากที่ออกแบบไว้ การคำนวณหาแบนด์วิดท์ของสายอากาศ นิยมพิจารณาจากแถบกว้างความถี่ของอิมพีแดนซ์ (Impedance Bandwidth) ด้วยพารามิเตอร์อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ($VSWR$) หรือขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) หรือการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

ในกรณีสายอากาศแถบกว้าง (Broadband Antenna) ที่รองรับการใช้งานช่วงความถี่กว้างมาก ๆ มักจะใช้วิธีบอกค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศ ในรูปอัตราส่วนของความถี่สูงสุด (f_{max}) ต่อกความถี่ต่ำสุด (f_{min}) ที่สามารถใช้งานได้ดี โดยไม่ทำให้คุณสมบัติในการทำงานของสายอากาศเสียไป ดังสมการ (2-32) ในขณะที่สายอากาศแถบแคบ (Narrowband Antenna) มักใช้วิธีบอกค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศ ในรูปเปอร์เซ็นต์ของผลต่างจากความถี่กลาง (f_{center}) ที่เป็นความถี่ใช้งานสามารถคำนวณแบนด์วิดท์ของสายอากาศแถบแคบ ดังสมการ (2-33) และ (2-34) [32]

$$BW_{\text{broadband}} = \frac{f_{\text{max}}}{f_{\text{min}}} \quad (2-32)$$

$$BW_{\text{narrowband}} (\%) = \left(\frac{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}}{f_{\text{center}}} \right) \times 100 \quad (2-33)$$

$$f_{\text{center}} = \frac{f_{\text{max}} + f_{\text{min}}}{2} \quad (2-34)$$

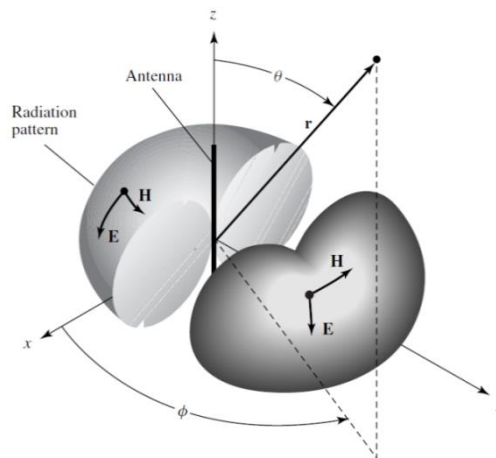
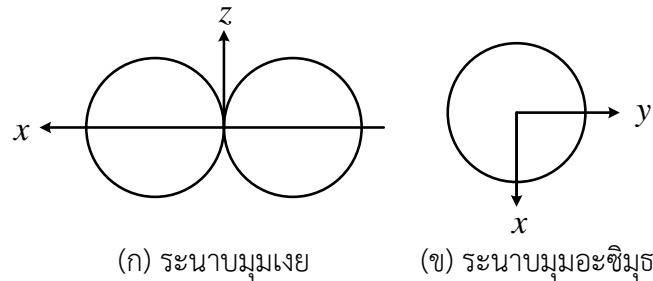
เมื่อ $BW_{\text{broadband}}$ = แบนด์วิดท์ของสายอากาศแถบกว้าง (ไม่มีหน่วย)
 $BW_{\text{Narrowband}}$ = แบนด์วิดท์ของสายอากาศแถบแคบ (เปอร์เซ็นต์)
 f_{max} = ความถี่สูงสุดของสายอากาศที่แมตซ์อิมพีแดนซ์แล้ว (เฮิร์ตซ์)
 f_{min} = ความถี่ต่ำสุดของสายอากาศที่แมตซ์อิมพีแดนซ์แล้ว (เฮิร์ตซ์)
 f_{center} = ความถี่กลางหรือความถี่ใช้งาน (เฮิร์ตซ์)

2.3.3.6 แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern)

แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) คือ รูปภาพหรือรูปแบบการนำเสนอที่ใช้แสดงคุณสมบัติการแพร่กระจายพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตามแนวรัศมีคงที่ บนระบบพิกัดทรงกลม (Spherical Coordinates) สามารถแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานได้ง่าย บนแกนสามมิติ ตัวอย่างเช่นภาพประกอบ 2-17 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพล ได้แก่ ก) ระนาบ x-z กำหนดให้มุม ϕ เท่ากับ 0° และเปลี่ยนแปลงมุม θ เพื่อใช้แสดงถึงระนาบมุมเงย (Elevation Plane) ซึ่งบรรจุเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า (E-Plane); ข) ระนาบ x-y กำหนดให้มุม θ เท่ากับ 90°

และเปลี่ยนแปลงมุม ϕ) ใช้บ่งบอกถึงระนาบมุมอะซิมูท (Azimuth Plane) ซึ่งมีเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กบรรจุอยู่ (H-Plane) และ ψ แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสามมิติ ทั้งนี้ แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ นิยมพิจารณาที่บริเวณสนามระยะไกล (Far-Field Region) เนื่องจากที่บริเวณนี้ แบบรูปการแผ่พลังงานมีการจัดเรียงกันเป็นแนวระนาบ ไม่ขึ้นกับระยะทางที่วัดทดสอบ ดังรายละเอียดในหัวข้อ 2.3.3.13

แบบรูปการแผ่พลังงานพื้นฐาน สามารถจำแนกออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) แบบไอโซทรอปิก (Isotropic) คือ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดแบบจุดที่มีการแผ่คลื่นออกมาเท่ากันในทุกทิศทาง ซึ่งยากต่อการสร้างจริง; 2) แบบชี้ทิศทาง (Directional) มีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่น ๆ และ 3) แบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omnidirectional) มีการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวของสายอากาศในแนวระนาบ



(ค) ระบบพิกัดทรงกลม 3 มิติ [32]

ภาพประกอบ 2-17 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพล

2.3.3.7 พุคส์ของการแผ่พลังงาน (Radiation Lobe)

พุคส์ของการแผ่พลังงาน คือ รูปแบบของลำคลื่น (Beam) ที่สายอากาศแพร่กระจายออกมา สามารถจำแนกออกเป็นประเภทต่าง ๆ เพื่อใช้อธิบายแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ซึ่งใช้บ่งบอกถึงบริเวณที่มีความเข้มของการแผ่พลังงาน ที่แตกต่างกัน สามารถแบ่งลักษณะของพุคส์ออกเป็นสองประเภทหลัก ได้แก่ พุคส์หลัก (Main Lobe) และพุคส์เล็ก (Minor Lobe) ดังภาพประกอบ 2-18 อย่างไรก็ตาม พุคส์เล็กสามารถแบ่งย่อยตามทิศทางของพุ ได้แก่ พุข้าง (Side Lobe) และพุหลัง (Back Lobe) รายละเอียดของพุคส์แต่ละประเภท อธิบายได้ดังต่อไปนี้

- ก. พุคส์หลัก คือ พุคส์ที่มีความแรงมากที่สุด ในแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ซึ่งอาจใช่หรือไม่ใช่พุคส์ที่ต้องการใช้งาน
- ข. พุคส์เล็ก คือ พุคส์ใด ๆ ที่ปรากฏในแบบรูปการแผ่พลังงาน นอกเหนือจากพุคส์หลัก ประกอบไปด้วย พุคส์ข้าง และพุคส์หลัง
- ค. พุคส์ข้าง คือ พุคส์เล็กที่อยู่ด้านข้างของพุคส์หลัก และอยู่บนครึ่งวงกลมเดียวกันกับพุคส์หลัก ของแบบรูปการแผ่พลังงาน
- ง. พุคส์หลัง คือ พุคส์เล็กที่อยู่ในครึ่งวงกลมทิศตรงข้ามกับพุคส์หลัก ของแบบรูปการแผ่พลังงาน

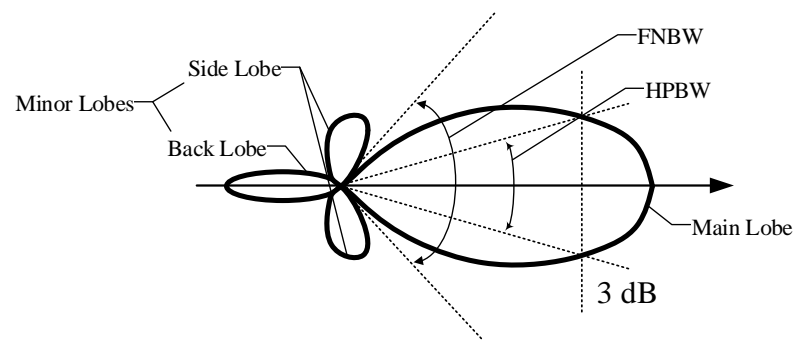
โดยทั่วไปแล้ว พุคส์เล็กจะเกิดขึ้นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ซึ่งสายอากาศที่ดีควร ออกแบบให้เกิดพุคส์เล็กเหล่านี้ ให้น้อยที่สุด สามารถใช้การพิจารณาพารามิเตอร์ระดับพุคส์ข้าง (Side Lobe Level: *SLL*) และอัตราส่วนพุคส์ข้าง (Side Lobe Ratio: *SLR*) ดังสมการ (2-35) และ (2-36) ควรมีค่าต่ำกว่าระดับ -20 dB เพื่อลดการผิดพลาดในการชี้เป้าหมายดังกล่าว นอกจากนี้ สายอากาศ แบบชี้ทิศทางเดียว จำเป็นต้องออกแบบให้มีพุคส์หลังน้อยที่สุด เนื่องจากเป็นทิศตรงข้ามกับทิศทางที่ต้องการ เพื่อลดการสูญเสียกำลังงานของสายอากาศ โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์อัตราส่วนหน้าต่อหลัง (Front-to-Back ratio: *F/B ratio*) คำนวณได้จากสมการ (2-37) [32]

$$SLL(\text{dB}) = \text{Sidelobe}(\text{dB}) - \text{Mainlobe}(\text{dB}) \quad (2-35)$$

$$SLR(\text{dB}) = \text{Mainlobe}(\text{dB}) - \text{Sidelobe}(\text{dB}) \quad (2-36)$$

$$F/B \text{ ratio}(\text{dB}) = \text{Mainlobe}(\text{dB}) - \text{Back lobe}(\text{dB}) \quad (2-37)$$

- เมื่อ
- SLL* = ระดับพุคส์ข้าง (เดซิเบล)
 - SLR* = อัตราส่วนพุคส์ข้าง (เดซิเบล)
 - F/R ratio* = อัตราส่วนหน้าต่อหลัง (เดซิเบล)
 - Side Lobe* = ความหนาแน่นพลังงานของพุคส์ข้างที่สนใจ (เดซิเบล)
 - Main Lobe* = ความหนาแน่นพลังงานของพุคส์หลัก (เดซิเบล)
 - Back Lobe* = ความหนาแน่นพลังงานของพุคส์หลัง (เดซิเบล)



ภาพประกอบ 2-18 องค์ประกอบของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบชี้ทิศทาง

2.3.3.8 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beamwidth)

ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beamwidth: HPBW) คือ ขนาดเชิงมุมของพหุคลื่นหลัก ที่ถูกวัดในช่วงตำแหน่งที่กำลังงานของคลื่น ลดลงเป็นครึ่งหนึ่งจากกำลังสูงสุดบนระนาบหนึ่ง ๆ หรือมีค่าลดลง 3 dB ดังภาพประกอบ 2-18 นอกจากนี้ ความกว้างลำคลื่นศูนย์แรก (First Null Beamwidth: FNBW) คือ ขนาดเชิงมุมของลำคลื่นหลักที่วัดตรงช่วงระหว่างตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์คู่แรก ซึ่งอาจนำไปใช้ในการประมาณค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) ด้วยระยะเชิงมุมมากกว่าหรือเท่ากับ ครึ่งหนึ่งของมุม FNBW ดังภาพประกอบ 2-18

2.3.3.9 ประสิทธิภาพสายอากาศ (Antenna Efficiency)

ประสิทธิภาพของสายอากาศ คือ แฟกเตอร์ที่ใช้อธิบายกำลังงานของสัญญาณเมื่อพิจารณาร่วมกับค่าการสูญเสียต่าง ๆ ได้แก่ การสูญเสียที่เกิดจากการไม่แมตซ์อิมพีแดนซ์ และการสูญเสียจากไดอิเล็กตริกและตัวนำของวัสดุที่ใช้สร้างสายอากาศ เพื่อบ่งบอกประสิทธิภาพโดยรวม (Total Efficiency) และประสิทธิภาพที่พิจารณาจากค่าการสูญเสียต่าง ๆ ในภาพประกอบ 2-15 สามารถคำนวณประสิทธิภาพต่าง ๆ ดังสมการต่อไปนี้ [32]

$$e_t = e_r e_c e_d = e_r e_{cd} \quad (2-38)$$

$$e_r = 1 - |\Gamma|^2 \quad (2-39)$$

$$e_{cd} = \frac{R_r}{R_r + R_L} \quad (2-40)$$

เมื่อ

- e_t = ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย)
- e_r = ประสิทธิภาพที่เกิดจากการสะท้อนหรือจากไม่แมตซ์อิมพีแดนซ์ (ไม่มีหน่วย)
- e_c = ประสิทธิภาพที่เกิดจากตัวนำที่ใช้เป็นโครงสร้างของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย)
- e_d = ประสิทธิภาพที่เกิดจากฉนวนที่ใช้เป็นโครงสร้างของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย)
- e_{cd} = ประสิทธิภาพที่เกิดจากตัวนำและฉนวนที่ใช้สร้างสายอากาศ (ไม่มีหน่วย)

2.3.3.10 สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity: D) ของสายอากาศ คือ พารามิเตอร์ที่ใช้วัดระดับความเข้มข้นแผ่พลังงานของสายอากาศในทิศทางเดียวที่กำหนด คำนวณได้จากอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่พลังงานในทิศทางที่กำหนด ต่อความเข้มของการแผ่พลังงานเฉลี่ยทุกทิศทาง ค่าสภาพเจาะจงทิศทางนี้ เป็นองค์ประกอบสำคัญในการพิจารณาอัตราขยาย (Gain) และประสิทธิภาพของสายอากาศ ดังภาพประกอบ 2-15 แสดงสภาพเจาะจงทิศทาง (D) ที่พิจารณาเฉพาะค่าความต้านทานของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (R_r) ในการสร้างกำลังงานรวมที่ใช้แผ่พลังงาน (P_{rad}) โดยไม่พิจารณาการสูญเสียอื่น ๆ ที่มีในระบบ ดังนั้น ค่าสภาพเจาะจงทิศทางนี้จะมีค่ามากกว่าอัตราขยาย (G) เสมอ

2.3.3.11 อัตราขยาย (Gain)

อัตราขยายของสายอากาศ (Antenna Gain: G) คือ พารามิเตอร์สำคัญในการวัดสมรรถนะของสายอากาศ ถูกนิยามด้วยอัตราส่วนของอัตราขยายกำลังในทิศทางกำหนด ต่ออัตราขยายกำลังของสายอากาศอ้างอิงในทิศทางนั้น โดยสายอากาศอ้างอิงที่นิยมใช้ ได้แก่ สายอากาศไอโซทรอปิก และสายอากาศไดโพล มีหน่วยเป็น dBi และ dBd ตามลำดับ โดยทั่วไปแล้ว อัตราขยายของสายอากาศยิ่งสูง ระยะทางการส่งสัญญาณยิ่งไปได้ไกลขึ้น จากการบีบลำคลื่นการแผ่กระจายให้แคบลง สามารถใช้วัตถุดิบสมบัติในการชี้ทิศทางของแบบรูปการแผ่พลังงาน ร่วมกับการพิจารณาประสิทธิภาพสายอากาศ ในขณะที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง จะอธิบายถึงคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเท่านั้น นอกจากนี้ มาตรฐาน IEEE ได้ระบุให้อัตราขยายของสายอากาศ ไม่พิจารณาการสูญเสียที่เกิดจากการไม่แมตช์ของอิมพีแดนซ์ และการสูญเสียที่เกิดจากการไม่แมตช์ของโพลาริเซชัน แต่จะพิจารณาเฉพาะการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากไดอิเล็กตริกและตัวนำของวัสดุที่ใช้สร้างสายอากาศ เท่านั้น ดังภาพประกอบ 2-15 สามารถคำนวณได้ดังสมการ [32]

$$G_{IEEE} = e_{cd} D_0 \quad (2-41)$$

ทั้งนี้ จากมาตรฐานของ IEEE การคำนวณอัตราขยายของสายอากาศยังไม่ครอบคลุมทุกองค์ประกอบของความสูญเสียทั้งหมด จึงได้มีการนิยามอัตราขยายที่พิจารณา ผลของการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนของคลื่น จากการไม่แมตช์กันของอิมพีแดนซ์ ระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ เพิ่มเติมจากมาตรฐาน IEEE เรียกว่า Absolute Gain หรือ Realized Gain ดังแสดงในภาพประกอบ 2-15 และสามารถคำนวณได้ดังนี้ [32]

$$G_{abs} = G_{realized} = e_r e_{cd} D_0 = e_t D_0 \quad (2-42)$$

- เมื่อ
- G_{IEEE} = อัตราขยายตามมาตรฐาน IEEE (ไม่มีหน่วย)
 - $G_{abs}, G_{realized}$ = อัตราขยายที่ปรากฏจริงของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย)
 - D_0 = สภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (ไม่มีหน่วย)
 - e_t = ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย)
 - e_r = ประสิทธิภาพที่เกิดจากการสะท้อนหรือการไม่แมตช์อิมพีแดนซ์ (ไม่มีหน่วย)
 - e_{cd} = ประสิทธิภาพที่เกิดจากตัวนำและฉนวนที่ใช้สร้างสายอากาศ (ไม่มีหน่วย)

สรุปความสัมพันธ์ระหว่างสภาพเจาะจงทิศทาง และอัตราขยายของสายอากาศ เมื่อแยกพิจารณาในแต่ละจุดอ้างอิงของค่าการสูญเสีย ดังที่ได้กล่าวมา สรุปได้ว่า $D \geq G_{IEEE} \geq G_{realized}$

2.3.3.12 โพลาริเซชัน (Polarization)

โพลาริเซชัน (Polarization) หรือการโพลาไรซ์ คือ การจัดเรียงตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกจากแหล่งกำเนิด เมื่อมองในทิศทางหลังคลื่น มีประโยชน์ในการกำหนดการติดตั้งสายอากาศ เพื่อให้สายอากาศอยู่ในลักษณะที่สามารถรับส่งคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้การอ้างอิงจากทิศทางของสนามไฟฟ้าเป็นหลัก จากภาพประกอบ 2-19 แสดงชนิดของโพลาริเซชัน

ของสายอากาศ แบ่งได้เป็นสามชนิด ได้แก่ โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น (Linear Polarization: LP), โพลาริเซชันแบบวงกลม (Circular Polarization: CP) และโพลาริเซชันแบบวงรี (Elliptical Polarization: EP) ดังนั้น การติดตั้งสายอากาศ ควรกำหนดทิศทางระหว่างสายอากาศเครื่องรับและส่ง ให้มีการโพลาริเซชันแบบเดียวกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแผ่พลังงาน และลดการสูญเสียจากค่าตัวประกอบการสูญเสียการโพลาริเซชัน (Polarization Loss Factor) ซึ่งจะถูกลำดับถึงในลำดับถัดไป

การแยกแยะโพลาริเซชันแต่ละประเภท พิจารณาได้จากอัตราส่วนแกน (Axial Ratio: AR) ซึ่งเป็นอัตราส่วนขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้าบนแกนหลัก (Major Axis) ต่อองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าบนแกนรอง (Minor Axis) คำนวณได้จากสมการ (2-43) กล่าวคือ โพลาริเซชันแบบวงกลม จะมีค่าอัตราส่วนแกนเท่ากับ 1 หมายถึง การมีองค์ประกอบสนามไฟฟ้าบนแกนหลักเท่ากับแกนรอง ด้วยเฟสต่างกัน 90° ในขณะที่โพลาริเซชันแบบวงรี จะมีค่าอัตราส่วนแกนมากกว่า 1 และโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น มีค่าอัตราส่วนแกนเป็นค่าอนันต์ [32]

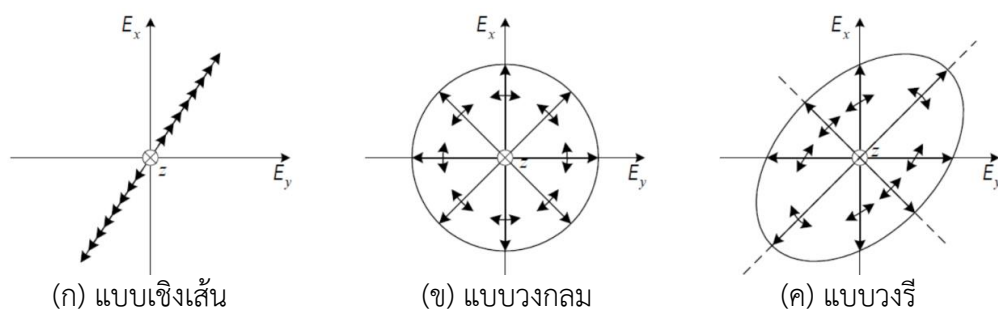
$$AR = \frac{\text{Major axis}}{\text{Minor axis}}, \quad 1 \leq AR \leq \infty \quad (2-43)$$

เมื่อ $AR =$ อัตราส่วนแกน (ไม่มีหน่วย)
 $Major Axis =$ องค์ประกอบสนามไฟฟ้าบนแกนหลัก (เดซิเบล)
 $Minor Axis =$ องค์ประกอบสนามไฟฟ้าบนแกนรอง (เดซิเบล)

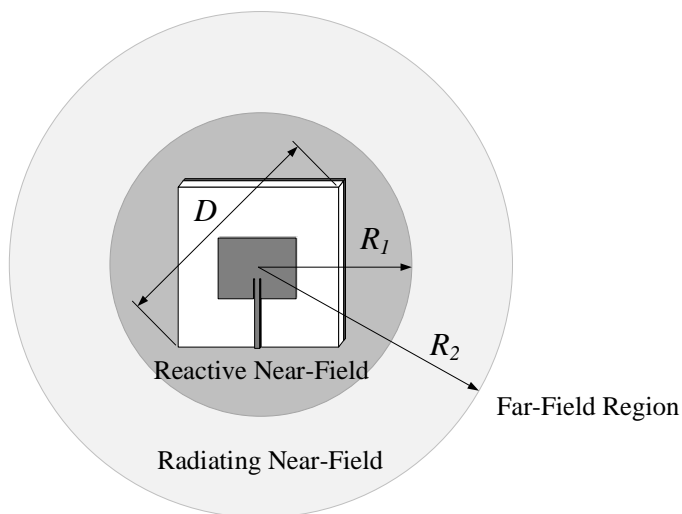
ในทางปฏิบัติ โพลาริเซชันของคลื่นที่ถูกส่งมาจากเครื่องส่ง อาจไม่แมตช์กับโพลาริเซชันของสายอากาศเครื่องรับ เรียกว่า โพลาริเซชันมิสแมตช์ (Polarization mismatch) ส่งผลให้สายอากาศเครื่องรับ ไม่สามารถดึงเอากำลังงานออกมาจากคลื่นได้สูงสุด เนื่องจากการสูญเสียของการโพลาริเซชัน ซึ่งถูกอธิบายได้ด้วย ค่าตัวประกอบการสูญเสียการโพลาริเซชัน (Polarization Loss Factor: PLF) สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้ [32]

$$PLF = |\hat{\rho}_w \cdot \hat{\rho}_a|^2 = |\cos \Psi_\rho|^2 \quad (2-44)$$

เมื่อ $\hat{\rho}_w =$ เวกเตอร์หน่วย ของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของคลื่น (ไม่มีหน่วย)
 $\hat{\rho}_a =$ เวกเตอร์หน่วย ของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสายอากาศ (ไม่มีหน่วย)
 $\Psi_\rho =$ มุมระหว่างเวกเตอร์หน่วย $\hat{\rho}_w$ และ $\hat{\rho}_a$ หรือ มุมระหว่างสายอากาศ (องศา)



ภาพประกอบ 2-19 ชนิดของโพลาริเซชันแบบต่าง ๆ [35]



ภาพประกอบ 2-20 การแบ่งประเภทบริเวณสนามของสายอากาศ

2.3.3.13 บริเวณสนามไกล (Far-Field Region)

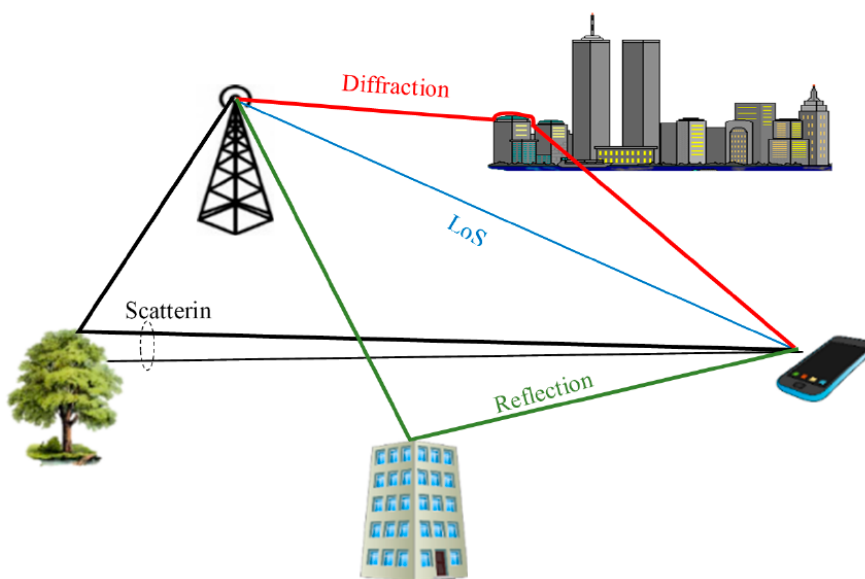
บริเวณสนามของสายอากาศ (Field Regions) โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) บริเวณสนามใกล้รีแอกทีฟ (Reactive Near-Field Region); 2) บริเวณสนามใกล้แผ่คลื่น (Radiating Near-Field Region) และ 3) บริเวณสนามไกล (Far-Field Region) ดังภาพประกอบ 2-20 ซึ่งบริเวณสนามที่สำคัญ และนิยมใช้สำหรับการวัดคุณลักษณะของสายอากาศ คือ บริเวณสนามไกล (ระยะห่างมากกว่า R_2) เนื่องจาก ในบริเวณนี้ สนามของสายอากาศจะมีการกระจายของสนามเชิงมุม ไม่ขึ้นกับระยะห่างจากตัวสายอากาศ กล่าวคือ เกิดการแผ่พลังงานด้วยรูปแบบสม่ำเสมอ โดยไม่ขึ้นอยู่กับระยะทาง การแผ่พลังงานเป็นลักษณะของระนาบคลื่น (Plane Wave) ดังนั้น ในสนามบริเวณนี้ สามารถพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงาน การวัดทดสอบ และการอธิบายคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ เช่น การวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน การวัดอัตราขยาย หรือการทดสอบโพลาไรเซชันของสายอากาศ เป็นต้น ระยะห่างขั้นต่ำเมื่อวัดจากสายอากาศถึงบริเวณสนามไกล คำนวณได้ดังนี้

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2-45)$$

- เมื่อ λ = ความยาวคลื่น (เมตร)
 D = มิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ (เมตร)
 R_2 = ระยะสั้นสุดบริเวณสนามไกลแผ่คลื่น (เมตร)

2.4 ทฤษฎีการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ

ในหัวข้อนี้ อธิบายหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง กับการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ (Radio Propagation) เพื่อชี้ให้เห็นถึงกลไกในการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การลดทอนกำลังของสัญญาณ และแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์การสูญเสียที่เกิดขึ้นในเส้นทางการสื่อสาร โดยทฤษฎีและหลักการเหล่านี้ สามารถนำมาใช้อธิบาย และวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครือข่ายลอร่าแวน ในสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์ ที่เป็นวัตถุประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้



ภาพประกอบ 2-21 กลไกการแพร่กระจายสัญญาณแบบหลายเส้นทาง [36]

2.4.1 กลไกการแพร่กระจายสัญญาณ (Propagation Mechanisms)

การรับส่งข้อมูลในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย อาศัยการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายอากาศส่ง ออกไปสู่อากาศ และตรวจจับสัญญาณที่ถูกส่งมา ด้วยสายอากาศรับ ซึ่งในสภาพแวดล้อมจริงของการสื่อสารแบบไร้สาย เส้นทางการสื่อสารระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง มีโอกาสที่จะอยู่ในแนวเส้นสายตา (Line Of Sight: LOS) เมื่อเป็นพื้นที่เปิดโล่ง แต่หากสภาพแวดล้อมประกอบด้วยสิ่งปลูกสร้างหรือวัตถุใด ๆ บดบังแนวการส่งสัญญาณ จะเรียกว่า เส้นทางการสื่อสารนอกแนวเส้นสายตา (Non Line Of Sight: NLOS) แต่ยังคงมีโอกาสที่เครื่องรับ จะรับสัญญาณได้จากการที่คลื่นสัญญาณสามารถเคลื่อนที่ มาจากเส้นทางที่แตกต่างกันหลายเส้นทาง (Mutipath) ซึ่งต้องอาศัยกลไกการแพร่กระจายสัญญาณ ได้แก่ 1) การสะท้อนของคลื่น (Reflection); 2) การเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction) และ 3) การกระจัดกระจายของคลื่น (Scattering) ดังภาพประกอบ 2-21 การพิจารณาการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณทั้งสามแบบ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับขนาดของความยาวคลื่น สามารถอธิบายได้ดังนี้

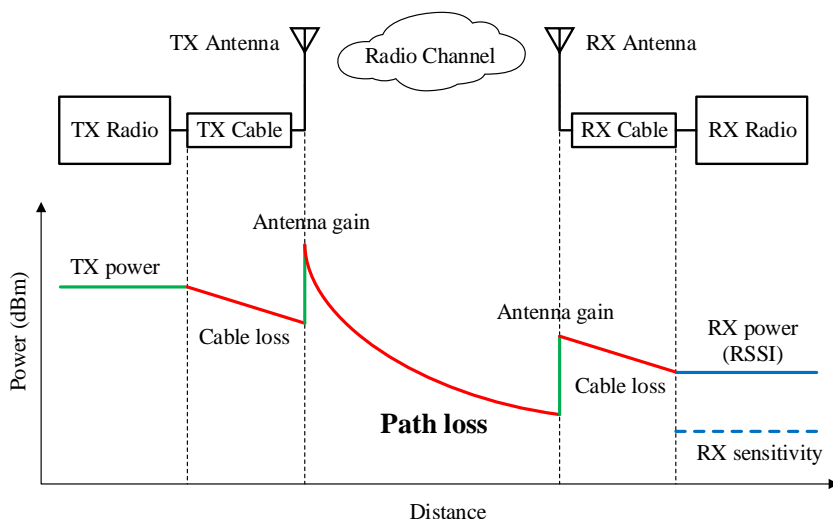
- ก. การสะท้อน (Reflection) เกิดจากคลื่นสัญญาณเดินทางตกกระทบกับวัตถุใด ๆ ที่มีความหนา มากกว่าความยาวคลื่นมาก ๆ เช่น กำแพง ผนัง พื้นดิน เป็นต้น โดยคลื่นสัญญาณบางส่วนจะสะท้อนกลับ และบางส่วนสามารถเดินทางผ่านวัตถุ หากความหนาของวัตถุ มีขนาดเท่ากับความยาวคลื่น
- ข. การเลี้ยวเบน (Diffraction) คลื่นเดินทางใกล้บริเวณขอบของวัตถุ ที่มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นมาก ๆ เช่น ยอดตึกสูง หรือภูเขา เป็นต้น จะเกิดการเลี้ยวเบนของคลื่น ที่บริเวณขอบของวัตถุ เสมือนกับว่าคลื่นเดินทางหักเห อ้อมขอบของวัตถุ หรือสิ่งกีดขวางได้
- ค. การกระจัดกระจาย (Scattering) เกิดจากคลื่นที่เดินทางผ่านวัตถุที่มีขนาดใกล้เคียง หรือน้อยกว่าความยาวคลื่น ส่งผลให้คลื่นเกิดการกระจัดกระจายไปหลายทิศทาง เมื่อปะทะกับวัตถุนั้น ๆ และพลังงานของคลื่นจะมีค่าลดลง

2.4.2 การสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss)

การสูญเสียในเส้นทาง หรือการลดทอนกำลังงานของสัญญาณ ในเส้นทาง การแพร่กระจายคลื่นระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ เรียกว่า Path Loss ซึ่งการสูญเสียนี้ เกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย ได้แก่ ลักษณะของสภาพแวดล้อม, ระยะทางระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ, ความถี่ หรือความยาวคลื่น และความสูงของสายอากาศจากพื้นดิน เป็นต้น การสูญเสยกำลังงานนี้ ถูกนิยามด้วยอัตราส่วนของกำลังงานส่ง (Transmitted Power) ต่อกำลังงานรับ (Received Power) ซึ่งค่าการสูญเสียจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อระยะทางการสื่อสารระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ มีระยะมากขึ้น ดังภาพประกอบ 2-22 สามารถประยุกต์ใช้สมการ Friis Transmission Equation ในรูปแบบของหน่วยเดซิเบล เพื่อคำนวณการสูญเสียในเส้นทาง ที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมจริง ของแต่ละตำแหน่ง การตรวจวัดสัญญาณ ดังสมการต่อไปนี้ [37]

$$PL_m (dB) = P_t - RSSI + G_t + G_r - L_t - L_r + PLF \quad (2-46)$$

- เมื่อ
- PL_m = การสูญเสียในเส้นทาง การแพร่กระจายคลื่นจากการวัดจริง (dBm)
 - P_t = กำลังงานของเครื่องส่ง (dBm)
 - $RSSI$ = กำลังงานเฉลี่ยของเครื่องรับ หรือ Received Signal Strength Indicator (dBm)
 - G_t = อัตราขยายของสายอากาศส่ง (dBi)
 - G_r = อัตราขยายของสายอากาศรับ (dBi)
 - L_t = การสูญเสียของสายนำสัญญาณฝั่งส่ง (dB)
 - L_r = การสูญเสียของสายนำสัญญาณฝั่งรับ (dB)
 - PLF = ค่าตัวประกอบการสูญเสียการโพลาไรซ์ (Polarization Loss Factor) (dB)



ภาพประกอบ 2-22 การสูญเสียกำลังงานในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย

ภาพประกอบ 2-22 แสดงองค์ประกอบของระบบการสื่อสารแบบไร้สาย ได้แก่ เครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณวิทยุ สายอากาศฝั่งส่งและฝั่งรับ สายนำสัญญาณฝั่งส่งและฝั่งรับ และตัวกลางการสื่อสารหรือช่องสัญญาณ ซึ่งในแต่ละองค์ประกอบที่กล่าวมานี้ มีความสัมพันธ์กันกับกำลังงานของสัญญาณ ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านไปในแต่ละส่วน ดังแสดงในกราฟของกำลังงาน กับระยะทางการสื่อสาร จากกราฟแสดงกำลังงานเครื่องส่ง มีค่าคงที่ จากนั้นเกิดการสูญเสียภายในสายนำสัญญาณฝั่งส่ง สายอากาศส่งที่มีอัตราขยายสูง ช่วยยกระดับกำลังงานของสัญญาณ และแพร่สัญญาณออกสู่อากาศ เมื่อคลื่นเดินทางผ่านอากาศในระยะทางที่ไกลขึ้น กำลังงานของสัญญาณจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล จนเคลื่อนที่มาถึงสายอากาศฝั่งรับ กำลังงานจะเพิ่มขึ้นตามอัตราขยายของสายอากาศฝั่งรับ และจะลดลงอีกครั้ง ภายในสายนำสัญญาณที่เชื่อมต่อกับเครื่องรับ ลำดับสุดท้าย เครื่องรับสามารถวัดระดับกำลังงานสัญญาณได้เท่ากับค่า RSSI ซึ่งจะมีค่ามากกว่าความไวของอุปกรณ์เสมอ

2.4.3 การจางหายของสัญญาณ (Fading)

การจางหายของสัญญาณ (Fading) คือ การแกว่งแบบสุ่มของสัญญาณภาครับ เมื่อเกิดการแพร่กระจายสัญญาณแบบหลายเส้นทาง (Multipath) ซึ่งในแต่ละเส้นทาง คลื่นจะเดินทางมาถึงเครื่องรับไม่พร้อมกัน และกำลังงานของสัญญาณมีการลดทอนที่ไม่เท่ากัน ด้วยปัจจัยจากสภาพแวดล้อม ดังนั้น เมื่อสัญญาณที่มาจากหลายเส้นทาง มารวมกันที่เครื่องรับ ผลของการรวมสัญญาณอาจเสริมกัน (In Phase) หรือหักล้างกัน (Out of Phase) นอกจากนี้ การผันผวนของสัญญาณดังกล่าว จะมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา จากลักษณะสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป หรือจากการเคลื่อนที่ของเครื่องรับ หรือวัตถุอื่น ๆ ในเส้นทางการแพร่กระจายสัญญาณ ดังนั้น กำลังงานของสัญญาณเครื่องรับ ที่เกิดจากผลรวมสัญญาณ ของการแพร่กระจายแบบหลายเส้นทาง จะมีการผันผวนอย่างรวดเร็ว แม้ว่าระยะทางระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับจะต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งสามารถจำแนกประเภทการจางหายของสัญญาณ แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบหลัก ได้แก่ 1) การจางหายสเกลเล็ก (Small Scale Fading) และ 2) การจางหายสเกลใหญ่ (Large Scale Fading) ดังภาพประกอบ 2-23 และสามารถอธิบายการจางหายของสัญญาณแต่ละรูปแบบ ได้ดังต่อไปนี้

2.4.3.1 การจางหายสเกลเล็ก

การจางหายสเกลเล็ก (Small Scale Fading) คือ ปรากฏการณ์ที่กำลั้งงานของสัญญาณเครื่องรับ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว มีความผันแปรสูง แม้ว่าระยะทางระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ประมาณครึ่งหนึ่งของความความคลื่น หรืออาจไม่มีการเปลี่ยนแปลงระยะทางดังกล่าว แต่มีการเปลี่ยนแปลงบางส่วนของสภาพแวดล้อมโดยรอบ เช่น การเคลื่อนที่ของวัตถุ หรือสิ่งกีดขวางในเส้นทางการแพร่กระจายสัญญาณ ดังนั้น การจางหายสเกลเล็กของสัญญาณที่เครื่องรับ สามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา และตลอดระยะเวลาการส่งสัญญาณในสภาพแวดล้อมจริง

2.4.3.2 การจางหายสเกลใหญ่

การจางหายสเกลใหญ่ (Large Scale Fading) คือ ปรากฏการณ์ที่กำลั้งงานเฉลี่ยของสัญญาณเครื่องรับ (Average Received Power) มีการผันผวนอย่างช้า ๆ ในระยะทางสั้น ๆ ประมาณ 5 ถึง 40 เท่าของความยาวคลื่น การลดทอนกำลั้งสัญญาณของการจางหายสเกลใหญ่เกิดขึ้นได้จาก การที่เส้นทางระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ ถูกบดบังโดยวัตถุขนาดใหญ่ เช่น ตึกสูงหรือภูเขา เป็นต้น ในการพิจารณาการจางหายของสัญญาณนี้ สามารถใช้ค่าเฉลี่ยของกำลั้งงานสัญญาณเครื่องรับในพื้นที่แคบ ๆ หรือระยะทางสั้น ๆ ประมาณ 5 ถึง 40 เท่าของความยาวคลื่น จะได้เส้นกราฟที่เปลี่ยนอย่างช้า ๆ บริเวณกึ่งกลางของกราฟสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของการจางหายสเกลเล็ก ดังภาพประกอบ 2-23



ภาพประกอบ 2-23 การจางหายของสัญญาณ [38]

ภาพประกอบ 2-23 แสดงองค์ประกอบของการจางของสัญญาณ เปรียบเทียบระหว่างการจางหายสเกลเล็ก และการจางหายสเกลใหญ่ เมื่อพิจารณาจากกำลั้งงานของสัญญาณฝั่งรับ และระยะทางที่เพิ่มขึ้น จากภาพแสดงให้เห็นว่า การจางหายสเกลใหญ่ (เส้นประ) มีกำลั้งงานของสัญญาณ ลดลงอย่างต่อเนื่อง ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ช้า ในขณะที่ การจางหายสเกลเล็ก (เส้นทึบ) มีระดับกำลั้งงานของสัญญาณ ผันผวน แกว่งขึ้นลง เปลี่ยนแปลงไม่มีรูปแบบชัดเจน แต่ยังคงมีแนวโน้มเป็นไปตามการจางหายสเกลใหญ่

2.4.4 แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss Model)

แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss Model) คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้ในการทำนายค่าการลดทอนกำลังงานของสัญญาณวิทยุ เนื่องมาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ระยะทางระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ, ความถี่หรือความยาวคลื่น, ลักษณะสภาพแวดล้อม และ ความสูงของสายอากาศ เป็นต้น แบบจำลองการสูญเสียนี้ มีประโยชน์อย่างมากในการออกแบบระบบสื่อสารแบบไร้สาย และการหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์สื่อสาร โดยแบบจำลองที่เลือกใช้ ต้องมีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมจริงมากที่สุด เพื่อความถูกต้องและแม่นยำในการทำนายค่าการสูญเสียกำลังงานของสัญญาณ ที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมจริง

การทำนายการสูญเสียกำลังงานของสัญญาณนั้น สามารถเลือกใช้เครื่องมือแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง ที่มีความเหมาะสมกับรูปแบบการใช้งาน ซึ่งแบบจำลองการสูญเสียนี้ จำแนกประเภทของแบบจำลองการสูญเสียได้หลายประเภท ได้แก่ 1) แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางในแนวเส้นสายตา (LOS) คือ แบบจำลองการสูญเสียที่สัญญาณจากเครื่องส่ง เดินทางเป็นเส้นตรงมายังเครื่องรับ โดยไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างเส้นทางการสื่อสาร ยกตัวอย่างแบบจำลองประเภทนี้ เช่น แบบจำลองการสูญเสียในช่องว่างอิสระ (Free Space Model) และแบบจำลองการสูญเสียแบบสะท้อนพื้นผิว (Ground Reflected Model) เป็นต้น; 2) แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางนอกแนวเส้นสายตา (NLOS) คือ แบบจำลองการสูญเสียที่เครื่องส่งและเครื่องรับไม่อยู่ในแนวเส้นทางการมองเห็น หรือมีสิ่งกีดขวางอยู่ในเส้นทางการสื่อสาร ยกตัวอย่างเช่น แบบจำลองการสูญเสียแบบ Log-distance และ Log-normal Shadowing เป็นต้น และ 3) แบบจำลองเชิงประจักษ์ (Empirical Model) เป็นแบบจำลองที่ได้มาจากการตรวจวัดสัญญาณ และวิเคราะห์ทางสถิติของการสูญเสียกำลังสัญญาณในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น พื้นที่เขตเมือง ชานเมือง และพื้นที่เปิดโล่ง ตัวอย่างของแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่นิยมนำมาใช้งาน ได้แก่ แบบจำลองของโอกูมูระ-ฮาทะ (Okumura-Hata) เป็นต้น ดังนั้น ในหัวข้อย่อยต่อไปนี้จะขออธิบายแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง ที่ได้ยกตัวอย่างมาข้างต้น เพื่อทราบถึงแนวคิด เงื่อนไข และข้อจำกัดต่าง ๆ ในการพิจารณาใช้งานแต่ละแบบจำลอง

2.4.4.1 แบบจำลองการสูญเสียในช่องว่างอิสระ

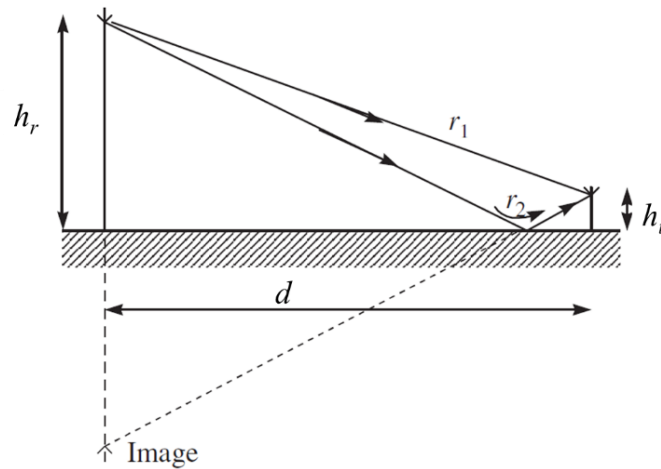
แบบจำลองการสูญเสียในช่องว่างอิสระ (Free Space Model) คือ แบบจำลองที่ใช้ทำนายการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายสัญญาณ ที่แปรตามระยะทางระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ ด้วยการพิจารณาเส้นทางการสื่อสารแบบ LOS ซึ่งไม่มีสิ่งกีดขวางใด ๆ ในเส้นทางการส่งสัญญาณ ดังนั้น นิยมใช้แบบจำลองการสูญเสียในช่องว่างอิสระ ในการอ้างอิงการสูญเสียขั้นต่ำที่เกิดขึ้นในระบบการสื่อสาร สามารถทำนายการสูญเสียในหน่วยเดซิเบล ได้จากสมการต่อไปนี้ [37]

$$PL_{FS} \text{ (dB)} = 20\log f_{\text{MHz}} + 20\log d_{\text{km}} + 32.4 \quad (2-47)$$

เมื่อ PL_{FS} = การสูญเสียกำลังของสัญญาณในช่องว่างอิสระ (dB)

f_{MHz} = ความถี่ของสัญญาณ (MHz)

d_{km} = ระยะทางระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ (km)



ภาพประกอบ 2-24 แบบจำลองการสูญเสียแบบสะท้อนพื้นผิว [37]

2.4.4.2 แบบจำลองการสูญเสียแบบสะท้อนพื้นผิว

แบบจำลองการสูญเสียแบบสะท้อนพื้นผิว (Ground Reflected Model) คือแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางของสัญญาณ เมื่อเครื่องส่งและเครื่องรับติดตั้งสูงเหนือพื้นดิน สัญญาณส่วนหนึ่งจากเครื่องส่ง เคลื่อนที่อยู่ในแนวสายตา (LOS) ไปยังเครื่องรับ และสัญญาณอีกส่วนเกิดการสะท้อนกับพื้นผิวโลก ก่อนจะเดินทางมารวมกับสัญญาณส่วนแรกที่เครื่องรับ ดังภาพประกอบ 2-24 แบบจำลองการสูญเสียนี้ มีความถูกต้องมากกว่าแบบจำลองการสูญเสียในช่องว่างอิสระ (Free Space Model) จากการพิจารณาความสูงของสายอากาศ และกลไกการแพร่กระจายสัญญาณ ทั้งนี้แบบจำลองการสูญเสียแบบสะท้อนพื้นผิว จะไม่มีการพิจารณาความถี่ของสัญญาณ (f) แต่จะใช้การตรวจเช็คเงื่อนไขเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นดังสมการ (2-49) สามารถคำนวณค่าการสูญเสียในหน่วยเดซิเบล ได้จากสมการดังต่อไปนี้ [39]

$$PL_{GR}(\text{dB}) = 40\log d - 20\log h_t - 20\log h_r \quad (2-48)$$

$$d \gg \frac{h_t \cdot h_r}{\lambda/4} \quad (2-49)$$

- เมื่อ PL_{GR} = การสูญเสียกำลังของสัญญาณจากการสะท้อนพื้นผิว (dB)
 d = ระยะทางระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ (m)
 h_t = ความสูงของสายอากาศเครื่องส่ง (m)
 h_r = ความสูงของสายอากาศเครื่องรับ (m)
 λ = ความยาวคลื่นของสัญญาณ (m)

2.4.4.3 แบบจำลองการสูญเสียแบบ Log-distance

แบบจำลองการสูญเสียแบบ Log-distance คือ แบบจำลองที่ใช้ทำนายค่าเฉลี่ยของการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss) ที่แปรตามระยะทางระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับเพียงอย่างเดียว ด้วยการลดทอนในฟังก์ชันของลอการิทึม จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้งาน เนื่องจาก การใช้งานที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และมีความแม่นยำสูง ในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีสิ่งกีดขวางเส้นทางสัญญาณมากนัก สามารถใช้ได้ทั้งภายนอกและภายในอาคาร ด้วยการกำหนดแฟกเตอร์เลขชี้กำลังการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss Exponent) ที่ใช้บ่งบอกถึงลักษณะของสภาพแวดล้อมแบบต่าง ๆ ในตาราง 2-7 และสามารถหาความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยการสูญเสียในเส้นทาง ได้ดังต่อไปนี้ [39]

$$\overline{PL}(d) \propto \left(\frac{d}{d_0}\right)^n \quad (2-50)$$

$$\overline{PL}_{(d)}[\text{dB}] = \overline{PL}_{(d_0)} + 10n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2-51)$$

เมื่อ $\overline{PL}_{(d)}$ = การสูญเสียกำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณของแบบจำลอง Log-distance (dB)
 n = เลขชี้กำลังการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss Exponent) (ไม่มีหน่วย)
 d = ระยะทางระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ (m)
 d_0 = ระยะทางอ้างอิง พิจารณาจากระยะทางที่อยู่ใกล้เครื่องส่ง (m)
 $\overline{PL}_{(d_0)}$ = การสูญเสียกำลังงานของสัญญาณที่ระยะทางอ้างอิง (dB) สามารถใช้ค่าเฉลี่ยจากการตรวจวัดสัญญาณจริง หรือพิจารณาใช้แบบจำลองการสูญเสียในช่องว่างอิสระ ในสมการ (2-47)

จากตาราง 2-7 นำเสนอขนาดของเลขชี้กำลังการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss Exponent: PLE) เปรียบเทียบกับลักษณะสภาพแวดล้อมแบบต่าง ๆ ซึ่งค่าเหล่านี้ สามารถหาได้จากการตรวจวัด หรือการทดลอง ในสภาพแวดล้อมที่สนใจ เช่น สภาพแวดล้อมแบบช่องว่างอิสระ มีค่าเลขชี้กำลังเท่ากับ 2 และหากสภาพแวดล้อมใด มีอุปสรรคกีดขวางเส้นทางการส่งสัญญาณ ค่าเลขชี้กำลังการสูญเสียนี้ จะมีค่าสูงขึ้นได้ เช่น พื้นที่เขตเมือง มีค่าเลขชี้กำลังอยู่ระหว่าง 2.7 ถึง 3.5 เป็นต้น

ตาราง 2-7 เลขชี้กำลังการสูญเสียในเส้นทางของสภาพแวดล้อมต่าง ๆ [39]

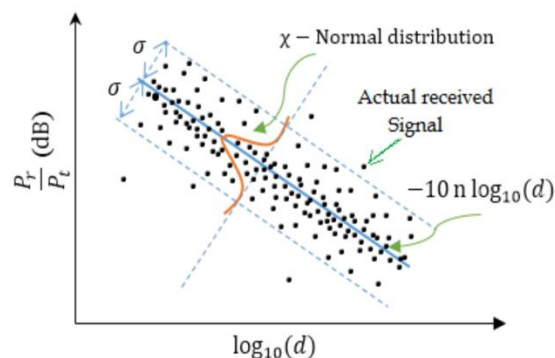
สภาพแวดล้อม	เลขชี้กำลังการสูญเสียในเส้นทาง (n)
ช่องว่างอิสระ (Free space)	2
ภายในอาคาร แบบ LOS	1.6 – 1.8
ภายในอาคาร แบบ NLOS	4 – 6
ภายในโรงงาน	2 – 3
เขตเมือง (Urban)	2.7 – 3.5
เขตเมือง (Urban) ที่มีการบดบังสูง	3 – 5
ชนบท (Rural)	2.5

2.4.4.4 แบบจำลองการสูญเสียแบบ Log-normal Shadowing

จากแบบจำลองการสูญเสียใน (2-51) เป็นการทำนายการสูญเสียในเส้นทางด้วยค่าเฉลี่ย ไม่ได้พิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นจริง ในสภาพแวดล้อมรอบ ๆ เส้นทางสื่อสาร โดยปกติแล้ว การลดทอนสัญญาณในสภาพแวดล้อมจริง จะต้องพิจารณาผลกระทบจากการถูกบัง (Shadowing Effect) ซึ่งไม่สามารถละเลยได้ จึงทำการปรับปรุงแบบจำลองการสูญเสีย Log-distance ด้วยการเพิ่มตัวแปรสุ่มของการกระจายแบบเกาส์เซียน ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ขึ้นอยู่กับลักษณะสภาพแวดล้อมแบบต่าง ๆ ดังตาราง 2-8 เพื่อแสดงถึงความผันผวนของสัญญาณที่ระยะทาง (d) ไต ๆ จึงเรียกแบบจำลองการสูญเสียนี้ใหม่ว่า Log-normal Shadowing และสามารถคำนวณค่าการสูญเสียในเส้นทาง ที่ระยะทางใด ๆ ในหน่วยเดซิเบล ได้ดังสมการต่อไปนี้ [39]

$$PL_{(d)}[\text{dB}] = \overline{PL}_{(d)} + X_{\sigma} = \overline{PL}_{(d_0)} + 10n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma} \quad (2-52)$$

เมื่อ $PL_{(d)}$ = การสูญเสียกำลังของสัญญาณของแบบจำลอง Log-normal Shadowing (dB)
 $\overline{PL}_{(d)}$ = การสูญเสียกำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณจากแบบจำลอง Log-distance (dB)
 n = เลขชี้กำลังการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss Exponent) (ไม่มีหน่วย)
 d = ระยะทางระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ (m)
 d_0 = ระยะทางอ้างอิง พิจารณาจากระยะทางที่อยู่ใกล้เครื่องส่ง (m)
 $\overline{PL}_{(d_0)}$ = การสูญเสียกำลังงานของสัญญาณที่ระยะทางอ้างอิง (dB) สามารถใช้ค่าเฉลี่ยจากการตรวจวัดสัญญาณจริง หรือพิจารณาใช้แบบจำลองการสูญเสียในช่องว่างอิสระ ในสมการ (2-47)
 X_{σ} = ตัวแปรสุ่มของการกระจายแบบเกาส์เซียนที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ (Zero Mean Gaussian Random Variable) และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ในหน่วย dB ซึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานนี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงผลกระทบจากการถูกบัง (Shadowing Effect) ซึ่งเป็นหนึ่งในชนิดของการจางหายสเกลเล็กของสัญญาณ (Small Scale Fading) โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานนี้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเกิดการบดบังแนวการแพร่กระจายสัญญาณ ดังภาพประกอบ 2-25 ในทำนองเดียวกัน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานนี้จะมีค่าลดลง เมื่อสภาพแวดล้อมเป็นแบบเปิดโล่ง หรือไม่มีการบดบังแนวสัญญาณ



ภาพประกอบ 2-25 การวิเคราะห์แบบจำลองการสูญเสีย Log-normal Shadowing [40]

ตาราง 2-8 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Shadowing Effect ในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ [41]

สภาพแวดล้อม	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ (dB)
ภายนอกอาคาร	4 – 12
ภายในสำนักงาน	7.0 – 9.6
ภายในโรงงาน แบบ LOS	3 – 6
ภายในโรงงาน แบบ NLOS	6.8
เขตเมืองหนาแน่น (Dense Urban)	10
เขตเมือง (Urban)	8
เขตชานเมือง (Suburban)	6
เขตชนบท (Rural)	3

ภาพประกอบ 2-25 แสดงกราฟตัวอย่างของข้อมูลการสูญเสียในเส้นทาง และผลการทำนายของแบบจำลองการสูญเสีย Log-normal Shadowing จากภาพแสดงให้เห็นว่า ผลการทำนายของแบบจำลอง แสดงได้ด้วยเส้นตรง ที่อยู่บริเวณกึ่งกลางของข้อมูลที่มีการกระจายตัว (ค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์) ซึ่งการกระจายตัวของข้อมูลนี้ เป็นการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) คือ ข้อมูลมีการกระจายแบบสุ่ม และไม่มีรูปแบบชัดเจน ด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ σ ซึ่งแสดงถึงขนาดของการกระจายตัวของข้อมูล รอบ ๆ เส้นค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ของการทำนายจากแบบจำลอง ดังนั้น การกระจายตัวของข้อมูลการสูญเสียในเส้นทางนี้ สามารถใช้ตัวแปรสุ่มของการกระจายแบบเกาส์เซียน มาอธิบายผลกระทบจาก Shadowing Effect ได้

ตาราง 2-8 นำเสนอค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลกระทบจาก Shadowing ที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ซึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเหล่านี้ ได้มาจากการทดลอง หรือการตรวจวัดสัญญาณ ในสภาพแวดล้อมที่กำหนด เช่น สภาพแวดล้อมเขตเมืองหนาแน่น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Shadowing จะมีค่าสูง เท่ากับ 10 dB เนื่องจากมีอุปสรรคบังเส้นทางการสื่อสาร ในขณะที่หากพิจารณาสภาพแวดล้อมที่มีอุปสรรคขวบว่น้อย เช่น สภาพแวดล้อมเขตชนบท จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Shadowing ต่ำ เท่ากับ 3 dB เป็นต้น

การใช้งานแบบจำลองการสูญเสียแบบ Log-distance และแบบ Log-normal Shadowing นอกจากจะใช้เพื่อทำนายการสูญเสียในเส้นทางที่ตำแหน่งใด ๆ ด้วยการแทนค่า n และ σ ที่เป็นแฟกเตอร์สำหรับบ่งบอกลักษณะของสภาพแวดล้อมแล้ว ยังสามารถใช้งานแบบจำลองการสูญเสียนี้ ในการคำนวณหาค่า n และ σ ที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมการใช้งานจริง โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการทำนายการลดทอนกำลังสัญญาณ ที่เฉพาะเจาะจงกับลักษณะสภาพแวดล้อมที่ต้องการได้

2.4.4.5 แบบจำลองการสูญเสียของโอคูมูระ-ฮาทะ

แบบจำลองการสูญเสียของโอคูมูระ-ฮาทะ (Okumura-Hata Model) คือแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายสัญญาณ ที่สร้างมาจากการใช้วิธีการเชิงประจักษ์ (Empirical Method) ด้วยการใช้ผลการตรวจวัดสัญญาณ ในพื้นที่เมืองโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น ตั้งแต่ช่วงความถี่ 200 MHz ถึง 2 GHz เหมาะสำหรับระบบการสื่อสารขนาดใหญ่ (Macrocell) ที่มีพื้นที่ให้บริการ (Coverage) เป็นบริเวณกว้าง เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ย่านความถี่ 800-900 MHz และเครือข่ายของ WiMAX เป็นต้น จุดเด่นของแบบจำลองการสูญเสียของโอคูมูระ-ฮาทะ ซึ่งแตกต่างจากแบบจำลองการสูญเสียอื่น ๆ ที่กล่าวมา คือ มีการพิจารณาความสูงของสายอากาศเครื่องส่งและเครื่องรับ มีการพิจารณาความถี่ของสัญญาณ และมีการจำแนกลักษณะภูมิประเทศ แบ่งออกเป็นพื้นที่เขตเมือง (Urban) เขตชานเมือง (Suburban) และเขตชนบท (Open Area) รายละเอียดดังตาราง 2-9 การสูญเสียในเส้นทางของแบบจำลองโอคูมูระ-ฮาทะ ในหน่วยเดซิเบล สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้ [37]

$$\text{Urban Area: } PL_{OH} \text{ (dB)} = A + B \cdot \log d - E \quad (2-53)$$

$$\text{Suburban Area: } PL_{OH} \text{ (dB)} = A + B \cdot \log d - C \quad (2-54)$$

$$\text{Open Area: } PL_{OH} \text{ (dB)} = A + B \cdot \log d - D \quad (2-55)$$

$$\text{เมื่อ } A = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_b$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log h_b$$

$$C = 2(\log(f_c / 28))^2 + 5.4$$

$$D = 4.78(\log f_c)^2 - 18.33 \log f_c + 40.94$$

$$E = 3.2(\log(11.75 h_m))^2 - 4.97, \quad \text{สำหรับ Large cities; } f_c \geq 300 \text{ MHz}$$

$$E = 8.29(\log(1.54 h_m))^2 - 1.1, \quad \text{สำหรับ Large cities; } f_c < 300 \text{ MHz}$$

$$E = (1.1 \log f_c - 0.7) h_m - (1.56 \log f_c - 0.8), \quad \text{สำหรับ Medium ถึง Small cities}$$

$$f_c = \text{ความถี่ของสัญญาณ (Hz)}$$

$$h_b = \text{ความสูงของสายอากาศเกตเวย์ (m)}$$

$$h_m = \text{ความสูงของสายอากาศ End Device (m)}$$

ตาราง 2-9 เกณฑ์การจำแนกลักษณะของสภาพแวดล้อม [37]

สภาพแวดล้อม	รายละเอียด
เขตเมือง (Urban)	มีอาคาร หรือบ้านพักอาศัยที่มีสองชั้นขึ้นไป หรือพื้นที่เขตหมู่บ้าน ซึ่งมีบ้านพักอาศัย ตั้งอยู่ใกล้ชิดกัน หรือมีต้นไม้สูงปกคลุมหนาแน่น
เขตชานเมือง (Suburban)	มีหมู่บ้าน หรือถนนทางหลวง ที่มีบ้านเรือนและต้นไม้ กระจายอยู่ทั่วไป ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อระบบการสื่อสารในระดับปานกลาง ไม่แออัดมากนัก
เขตชนบท (Open Area)	พื้นที่เปิดโล่ง ไม่มีต้นไม้หรือสิ่งปลูกสร้างใด ๆ ตลอดแนวสายตาในระยะ 300 ถึง 400 เมตร เช่น พื้นที่ไร่นา และทุ่งโล่ง เป็นต้น

ตาราง 2-9 แสดงการจำแนกสภาพแวดล้อมสามรูปแบบ ที่ใช้ในแบบจำลองการสูญเสียของไอคูมูระ-ฮาดะ ซึ่งทำให้สามารถพิจารณาเลือกใช้สมการ การคำนวณค่าการสูญเสียในเส้นทางของแบบจำลองดังกล่าว ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำขึ้น ซึ่งการระบุประเภทของสภาพแวดล้อมนั้น ทำได้โดยการสังเกตสภาพแวดล้อมจริง หรือการใช้ข้อมูลแผนที่ทางอากาศ เป็นต้น

2.5 สรุปท้ายบท

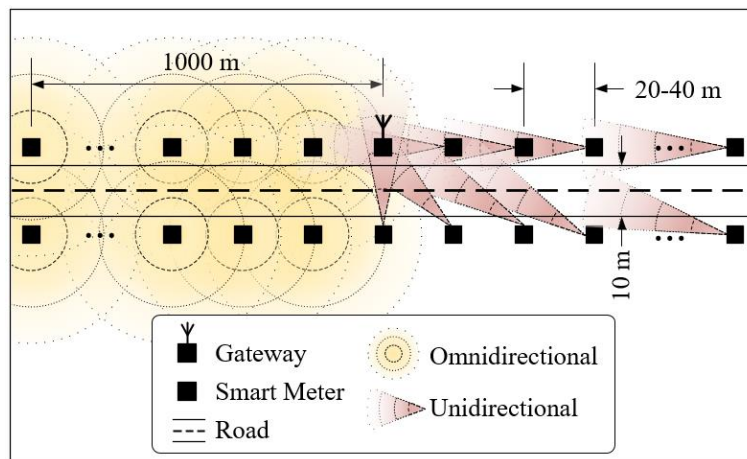
เนื้อหาโดยภาพรวมของบทนี้ อธิบายหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป วิธีการวัดและคำนวณคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ การนำสายอากาศมาใช้แพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การประมาณค่าการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss) ด้วยแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งมีความแตกต่างกัน ในสภาพแวดล้อมที่ใช้งานแตกต่างกัน จากนั้น ในบทถัดไป นำเสนอการออกแบบและการติดตั้งอุปกรณ์ บนเครือข่ายลอร่าแวน สำหรับตรวจวัดคุณภาพของสัญญาณ ในสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์ เปรียบเทียบผลการวัดระหว่าง สายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ กับสายอากาศเชิงพาณิชย์

บทที่ 3 การออกแบบและการติดตั้งอุปกรณ์

3.1 บทนำ

ในบทนี้ อธิบายขั้นตอนการออกแบบ และการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง เพื่อทดสอบการใช้งานและเปรียบเทียบสมรรถนะสายอากาศ รวมถึงการตรวจวัดคุณภาพสัญญาณลอร่า โดยเนื้อหาในบทนี้ เริ่มด้วยการสร้างต้นแบบสายอากาศไมโครสตริป ที่ใช้งานในช่วงความถี่ 920-925 MHz ตรวจวัดคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ และปรับปรุงจนมีคุณสมบัติตามที่ได้ออกแบบไว้ จากนั้น ทำการออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์เครือข่ายลอร่าแวน สำหรับใช้ตรวจวัดคุณภาพของสัญญาณในสภาพแวดล้อมจริงที่กำหนด จัดเก็บข้อมูลผลการตรวจวัดสัญญาณ ที่ได้จากสายอากาศ แต่ละชนิด เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และสรุปผลข้อมูล ซึ่งจะขออธิบายในบทที่ 4 ต่อไป

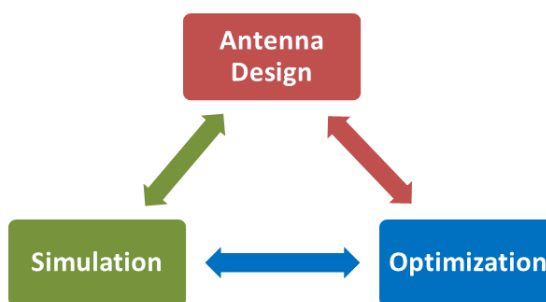
จากภาพประกอบ 3-1 แสดงสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์ (Smart Meter Environment) ประกอบไปด้วย สมาร์ตมิเตอร์ที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้า เรียงกันเป็นแนวเส้นตรงตลอดสองข้างถนน โดยเปรียบเทียบการใช้งานระหว่างสายอากาศแบบ Unidirectional และ Omnidirectional จากภาพแสดงให้เห็นว่า แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบ Omnidirectional จะเกิดการซ้อนทับกัน เนื่องจากมีสมาร์ตมิเตอร์ ติดตั้งอยู่ใกล้กันเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดการรบกวน หรือการแทรกสอดกัน (Interference) ของสัญญาณจากทิศทางด้านหลังหรือด้านข้างของสายอากาศ [3] ในขณะที่การใช้งานสายอากาศแบบ Unidirectional ทิศทางการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ถูกบีบให้แคบลงในทิศทางที่กำหนด ส่งผลให้การรบกวนที่เกิดจากทิศทางโดยรอบลดลง และยังช่วยเพิ่มความจุช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ของระบบการสื่อสารให้สูงขึ้น เมื่อเทียบกับการใช้งานสายอากาศแบบ Omnidirectional [4] ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้ สนใจออกแบบสายอากาศที่มีการแผ่พลังงานแบบ Unidirectional สำหรับใช้งานจริง ในสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสาร รวมถึงการสร้างแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง ที่มีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมลักษณะนี้ ด้วยการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารลอร่าแวน



ภาพประกอบ 3-1 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศบนสมาร์ตมิเตอร์

3.2 ต้นแบบสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ

วิทยานิพนธ์นี้ เลือกออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแพทช์รูปสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็นรูปร่างเรขาคณิตพื้นฐาน สร้างได้ง่าย โครงสร้างมีน้ำหนักเบา มีขนาดเล็กกระทัดรัด และต้นทุนการผลิตต่ำ เหมาะสมที่จะติดตั้งใช้งานจริงบนเสาไฟฟ้าในสภาพแวดล้อมของสมาร์ทมิเตอร์ สำหรับขั้นตอนการออกแบบสายอากาศ แบ่งได้ออกเป็นสามส่วนหลัก ดังภาพประกอบ 3-2 ได้แก่ 1) การออกแบบสายอากาศ (Antenna Design) เป็นการคำนวณโครงสร้างทางทฤษฎี; 2) การจำลองแบบ (Simulation) คือการจำลองพฤติกรรมการทำงานของสายอากาศ ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และ 3) การหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) เป็นขั้นตอนการปรับปรุงขนาดโครงสร้างสายอากาศให้เหมาะสม เพื่อให้ได้คุณลักษณะของสายอากาศตามที่ได้ออกแบบไว้ จากนั้น ทำการสร้างต้นแบบสายอากาศไมโครสตริป ตามผลที่ได้ออกแบบ



ภาพประกอบ 3-2 กระบวนการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

3.2.1 คำนวณโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป

การสร้างต้นแบบสายอากาศไมโครสตริป เลือกใช้วัสดุแผ่น PCB (Printed Circuit Board) ชนิด FR-4 (Glass Epoxy) ซึ่งมีราคาถูกและสามารถหาซื้อได้ทั่วไป กำหนดให้สายอากาศมีการตอบสนองต่อความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) ที่ 922.5 MHz ซึ่งเป็นความถี่กลางของช่วง 920-925 MHz เพื่อให้ครอบคลุมทุกช่องสัญญาณของมาตรฐาน LoRaWAN AS923 [19] กำหนดอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ควรมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม กำหนดคุณสมบัติของ FR-4 ด้วยค่ามาตรฐาน ได้แก่ 1) Relative Dielectric Constant (ϵ_r) เท่ากับ 4.4; 2) ค่าการสูญเสีย Loss Tangent ($\tan \delta$) เท่ากับ 0.02; 3) ความหนาของชั้นทองแดง (t) เท่ากับ 0.035 mm; 4) ความหนาของชั้นวัสดุฐานรอง (h) เท่ากับ 1.6 mm และกำหนดวิธีการป้อนสัญญาณแบบใช้สตริปนำสัญญาณ เชื่อมต่อกับหัวต่อ SMA (Sub Miniature version A) การออกแบบขนาดโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป ดำเนินการได้ตามหัวข้อ 2.3.2 ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังต่อไปนี้

ก. ความกว้างแพทช์ (W) – สมการ (2-14)

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} = \frac{3 \times 10^8}{2(922.5 \times 10^6) \sqrt{\frac{4.4 + 1}{2}}} = 98.95 \text{ mm}$$

ข. ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (ϵ_{reff}) – สมการ (2-9)

$$\begin{aligned}\epsilon_{\text{reff}} &= \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \\ &= \frac{4.4 + 1}{2} + \frac{4.4 - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{1.6}{98.95} \right]^{-1/2} \\ \epsilon_{\text{reff}} &= 4.2557\end{aligned}$$

ค. ความยาวประสิทธิผล (L_{eff}) – สมการ (2-12)

$$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} = \frac{3 \times 10^8}{2(922.5 \times 10^6) \sqrt{4.2557}} = 78.82 \text{ mm}$$

ง. ผลต่างความยาวแพตช์ (ΔL) – สมการ (2-11)

$$\begin{aligned}\Delta L &= 0.412 \cdot h \cdot \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \\ &= 0.412(0.0016) \frac{(4.2557 + 0.3) \left(\frac{98.95}{1.6} + 0.264 \right)}{(4.2557 - 0.258) \left(\frac{98.95}{1.6} + 0.8 \right)} \\ \Delta L &= 0.745 \text{ mm}\end{aligned}$$

จ. ความยาวจริงของแพตช์ (L) – สมการ (2-13)

$$L = L_{\text{eff}} - 2\Delta L = 78.82 - 2(0.745) = 77.33 \text{ mm}$$

ฉ. ความยาวคลื่นในช่องว่างอิสระ (λ_0)

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_r} = \frac{3 \times 10^8}{922.5 \times 10^6} = 32.52 \text{ cm}$$

ช. ความเร็วเฟส (V_p) – สมการ (2-4)

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{4.2557}} = 1.454 \times 10^8 \text{ m/s}$$

ซ. ความยาวคลื่นในสายอากาศ (λ_g) - สมการ (2-6)

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} = \frac{0.325}{\sqrt{4.2557}} = 15.75 \text{ cm}$$

ฌ. ขนาดระนาบกราวด์ (L_g) - สมการ (2-16)

$$L_g \geq 2\left(\frac{\lambda_g}{4}\right) + L = 2\left(\frac{157.5}{4}\right) + 77.33 = 156.08 \text{ mm} \approx 160 \text{ mm}$$

ญ. ค่าความนำไฟฟ้าของช่องเปิดที่ 1 (G_1) - สมการ (2-8) และ (2-18)

$$\begin{aligned} G_1 &= \frac{W}{120\lambda_0} \left[1 - \frac{1}{24}(k_0h)^2 \right] \\ &= \frac{0.09895}{120(0.3252)} \left[1 - \frac{1}{24} \left(\frac{2\pi}{0.3252} \times 0.0016 \right)^2 \right] \\ G_1 &= 2.535 \times 10^{-3} \text{ siemens} \end{aligned}$$

ฎ. อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของแพตช์ (Z_{in}) - สมการ (2-25)

$$Z_{in} \approx \frac{1}{2G_1} = \frac{1}{2(2.535 \times 10^{-3})} = 197.24 \Omega$$

ฏ. ความกว้างช่องว่างอินเซิร์ต (W_s) - กำหนดเป็นค่าคงที่

$$W_s = 1 \text{ mm}$$

ฐ. ความกว้างสตริปนำสัญญาณ (W_0) - สมการ (2-9) และ (2-10)

$$\text{จาก } \epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2}$$

$$\text{และ } Z_0 = \frac{Z_f}{\sqrt{\epsilon_{reff}} \left[\frac{W_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1.444 \right) \right]}$$

แทนค่าอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม

$$50 = \frac{\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}}{\left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W_0} \right]^{-1/2} \right)^{1/2} \cdot \left[\frac{W_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1.444 \right) \right]}$$

$$50 = \frac{\sqrt{\frac{4\pi \times 10^{-7}}{\frac{1}{36} \times 10^{-9}}}}{\left(\frac{4.4 + 1}{2} + \frac{4.4 - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{0.0016}{W_0} \right]^{-1/2} \right)^{1/2} \cdot \left[\frac{W_0}{0.0016} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W_0}{0.0016} + 1.444 \right) \right]}$$

$$W_0 = 3.083 \text{ mm}$$

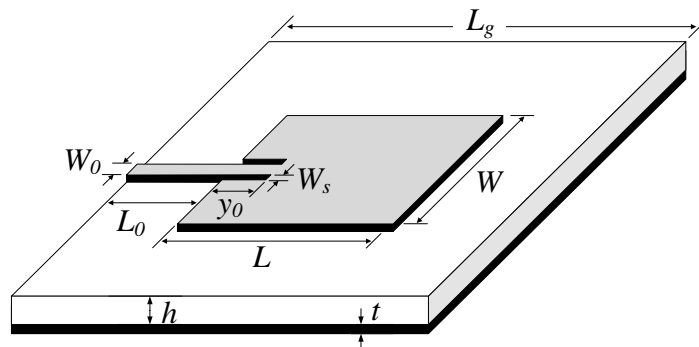
๗. ระยะอินเซิร์ต (y_0) - สมการ (2-26)

$$y_0 = \left(\frac{L}{180^\circ} \right) \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{R_{in}(y=y_0)}{R_{in}(y=0)}} \right) = \frac{0.07733}{180^\circ} \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{50}{197.24}} \right) = 25.67 \text{ mm}$$

๘. ความยาวสตรีปนำสัญญาณ (L_0) - จากภาพประกอบ 3-3

$$L_0 = \frac{L_g}{2} - \frac{L}{2} + y_0 = \frac{156.08}{2} - \frac{77.33}{2} + 25.67 = 65.05 \text{ mm}$$

โครงสร้างสายอากาศไมโครสตรีป ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี สรุปดังตาราง 3-1 และแสดงดังภาพประกอบ 3-3 ขั้นตอนต่อไปคือ การนำขนาดโครงสร้างที่คำนวณได้ ไปจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศ



ภาพประกอบ 3-3 พารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตรีป

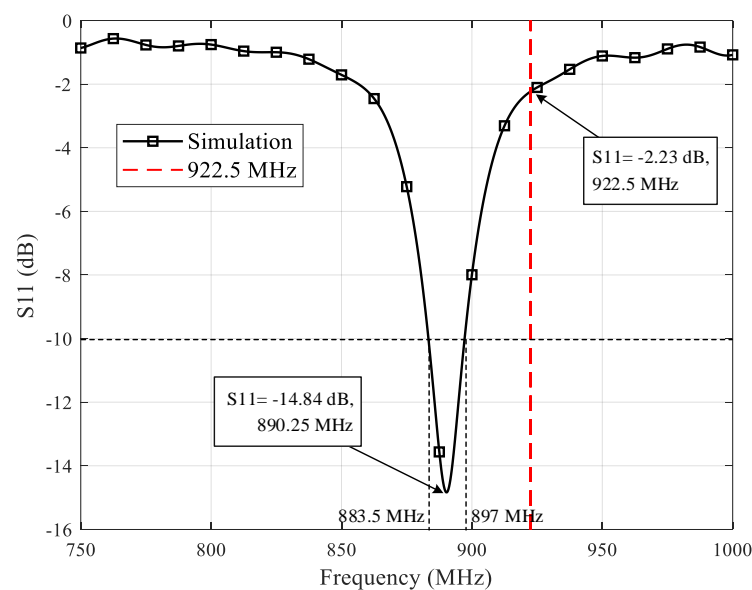
ตาราง 3-1 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปจากการคำนวณทางทฤษฎี

พารามิเตอร์	W	L	L_g	W_0	L_0	y_0	h	t	W_s
ขนาด (mm)	98.95	77.33	160	3.083	65.05	25.67	1.6	0.035	1

3.2.2 จำลองการทำงานของสายอากาศไมโครสตริป

จากผลการคำนวณขนาดโครงสร้าง ของสายอากาศไมโครสตริปทางทฤษฎี สามารถนำพารามิเตอร์ในตาราง 3-1 และคุณสมบัติของวัสดุ FR-4 ที่นำเสนอก่อนหน้านี้ มาจำลองการทำงานของสายอากาศ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้โปรแกรม CST STUDIO SUITE – Student Edition [42] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ศึกษาและวิเคราะห์ปรากฏการณ์ทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ด้วยการจำลองพฤติกรรมการณ์คลื่นสัญญาณเข้าสู่สายอากาศ เพื่อศึกษาผลการตอบสนองต่อความถี่ และคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ ดังที่นำเสนอในหัวข้อ 2.3.3

จากผลการจำลอง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) แสดงดังภาพประกอบ 3-4 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่ำสุด เท่ากับ -14.84 dB ที่ความถี่ 890.25 MHz ซึ่งคลาดเคลื่อนไปจากความถี่เรโซแนนซ์ที่ออกแบบ (922.5 MHz) ดังนั้น จำเป็นต้องปรับขนาดโครงสร้างสายอากาศใหม่ให้มีความเหมาะสม เป้าหมายคือ ให้ผลการจำลองสายอากาศ มีแถบกว้างความถี่หรือแบนด์วิดท์ครอบคลุมช่วงความถี่ 920 - 925 MHz จากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) มีค่าน้อยกว่า -10 dB ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้งาน เนื่องจาก แสดงถึงความสามารถในการส่งผ่านกำลังงาน (Transmitted Power) มีค่าสูง เท่ากับ 90.1% ของกำลังงานที่ป้อนเข้าไปในสายอากาศ หรือแสดงถึงกำลังงานสะท้อน (Reflected Power) มีค่าต่ำ เท่ากับ 9.9% ดังตาราง ก-1 ในภาคผนวก ก. ดังนั้น จำเป็นต้องปรับปรุงขนาดโครงสร้างใหม่ โดยพิจารณาปรับขนาดพารามิเตอร์ ได้แก่ ความยาวแพตช์ (L), ความกว้างแพตช์ (W) และขนาดของระนาบกราวด์ (L_g) รายละเอียดแสดงไว้ในหัวข้อย่อยถัดไป



ภาพประกอบ 3-4 สัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) จากการจำลองสายอากาศที่คำนวณทางทฤษฎี

3.2.3 การหาขนาดโครงสร้างที่เหมาะสม

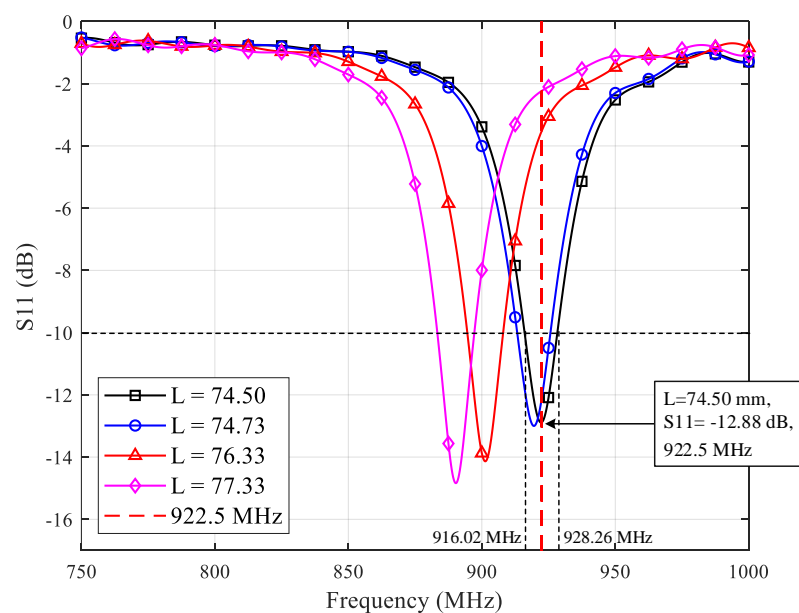
การปรับปรุงขนาดโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริบ เพื่อให้ได้มีคุณลักษณะของสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานของสายอากาศ หากพิจารณาวิธีการออกแบบโครงสร้างของแพตช์ในทางทฤษฎี พบว่าสมการ (2-12) และ (2-14) ที่ใช้คำนวณขนาดความยาว (L) และความกว้างแพตช์ (W) มีองค์ประกอบของความถี่เรโซแนนซ์อยู่ในสมการ การหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) ของโครงสร้างสายอากาศนี้ จึงเลือกพิจารณาปรับปรุงพารามิเตอร์ L และ W ด้วยวิธีการ ได้แก่ 1) การปรับปรุงด้วยการจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และ 2) การปรับปรุงโครงสร้างทางกายภาพ รายละเอียดวิธีการปรับปรุง มีดังต่อไปนี้

3.2.3.1 การปรับปรุงโครงสร้างด้วยการจำลองแบบ

จากผลการจำลองพฤติกรรมการทำงานของสายอากาศ ดังภาพประกอบ 3-4 แสดงถึงการไม่แมตช์กันระหว่างอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ กับส่วนของสายนำสัญญาณ ที่ความถี่เท่ากับ 922.5 MHz ตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้น เป้าหมายของการปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศ เพื่อต้องการกำหนดความถี่การเกิดเรโซแนนซ์ ให้อยู่ในช่วง 920 - 925 MHz ด้วยวิธีการปรับปรุงดังนี้

ก. ปรับปรุงความยาวของแพตช์ตัวนำ (L)

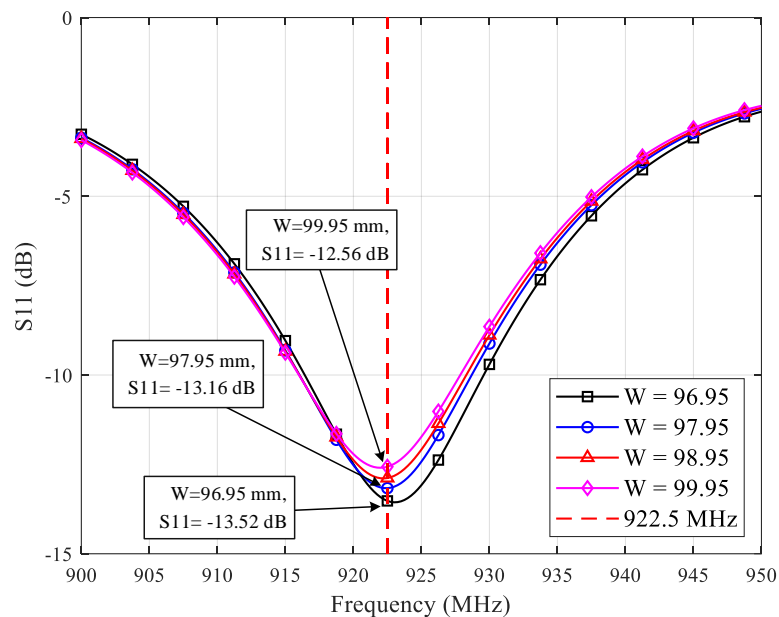
จำลองพฤติกรรมของสายอากาศ โดยทดลองปรับเปลี่ยนความยาวของแพตช์ตัวนำ (L) ได้แก่ 74.50 mm, 74.73 mm, 76.33 mm และ 77.33 mm ตามลำดับ โดยให้ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ มีค่าคงที่ ผลการจำลองดังภาพประกอบ 3-5 แสดงให้เห็นว่า เมื่อแพตช์ตัวนำมีความยาวลดลง จะส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์มีค่าสูงขึ้น ดังนั้น จึงเลือกใช้พารามิเตอร์ L เท่ากับ 74.50 mm เนื่องจากสามารถตอบสนองต่อความถี่เรโซแนนซ์ที่ 922.5 MHz มีค่า S_{11} เท่ากับ -12.88 dB ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน และมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ต่ำกว่า -10 dB ตามต้องการ



ภาพประกอบ 3-5 สัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) จากการจำลองปรับปรุงความยาวแพตช์

ข. ปรับปรุงความกว้างของแพตช์ตัวนำ (W)

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของแพตช์ตัวนำ โดยกำหนดให้ W มีค่าเท่ากับ 96.95 mm, 97.95 mm, 98.95 mm และ 99.95 mm ตามลำดับ และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อื่นมีค่าคงที่ จากการจำลองพบว่า เมื่อ W มีขนาดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แบนด์วิดท์ของสายอากาศแคบลง และความถี่เรโซแนนซ์มีค่าลดลงเล็กน้อย ดังภาพประกอบ 3-6 แสดงการจำลอง S_{11} ของความกว้างแพตช์ที่มีค่า W เท่ากับ 97.95 mm มีค่า S_{11} อยู่ในตำแหน่งที่ต่ำที่สุด ที่ความถี่ เท่ากับ 922.5 MHz ซึ่งเป็นความถี่กลางที่ใช้ออกแบบสายอากาศ จึงเลือกใช้ความกว้างดังกล่าว ในการสร้างต้นแบบสายอากาศ



ภาพประกอบ 3-6 สัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) จากการจำลองปรับปรุงความกว้างแพตช์

ค. ปรับปรุงขนาดของระนาบกราวด์ (L_g)

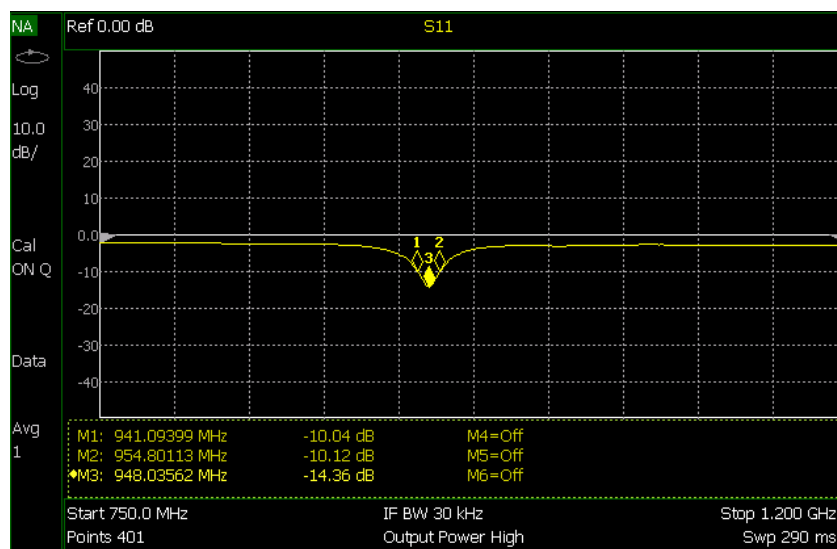
หลังจากปรับปรุงโครงสร้างของแพตช์ตัวนำแล้วเสร็จ โครงสร้างหลักอีกส่วนของสายอากาศไมโครสตริบ คือ ระนาบกราวด์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ ในการออกแบบครั้งนี้ สายอากาศต้องมีขนาดเล็กกว่า 20×20 cm² เพื่อสอดคล้องกับพื้นที่ติดตั้งจริงบนเสาไฟฟ้า ตามมาตรฐาน กฟภ. ทั้งนี้ ได้ทดลองปรับขนาดของระนาบกราวด์ (L_g) เท่ากับ 160, 170, 180 และ 200 mm โดยให้พารามิเตอร์อื่น ๆ คงที่ ผลการจำลองสายอากาศ พบว่า สัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) มีค่าไม่แตกต่างกันมาก ในแต่ละค่าที่ทดสอบ อย่างไรก็ตาม ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะอื่น ๆ ของสายอากาศ ดังสรุปในตาราง 3-2 แสดงให้เห็นว่า สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ของทุก L_g มีค่าเท่ากัน และเมื่อ L_g มีขนาดใหญ่ขึ้น ประสิทธิภาพรวมจะยิ่งต่ำลง ส่งผลให้อัตราขยายจริง (Realized Gain) ที่ได้จากการจำลองมีค่าต่ำลง ในทางตรงกันข้าม L_g ที่มีขนาดใหญ่ จะทำให้มุม HPBW มีค่าแคบลง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่งานวิจัยนี้ต้องการนำเสนอ ดังนั้น จึงกำหนดขนาด L_g สำหรับการสร้างต้นแบบสายอากาศ เท่ากับ 170 mm ซึ่งมีขนาดไม่ใหญ่มากเกินไปที่กำหนด และมีค่าอัตราขยายจริงไม่น้อยเกินไปที่ -0.705 dBi แต่ยังคงมีมุม HPBW ที่แคบ เท่ากับ 91°

ตาราง 3-2 ขนาดระนาบกราวด์เปรียบเทียบกับคุณลักษณะสายอากาศจากการจำลอง

ขนาดระนาบกราวด์ (L_g)	160 mm	170 mm	180 mm	200 mm
Directivity (D)	6.56 dBi	6.56 dBi	6.57 dBi	6.57 dBi
Total Efficiency (e_t)	-7.178 dB	-7.267 dB	-7.352 dB	-7.797 dB
Realized Gain ($G_{realized}$)	-0.618 dBi	-0.705 dBi	-0.784 dBi	-1.23 dBi
HPBW	92.4°	91.0°	90.1°	88.4
Side Lobe Level (SLL)	-14 dB	-14.9 dB	-15.7 dB	-16.8 dB

3.2.3.2 การปรับปรุงโครงสร้างทางกายภาพ

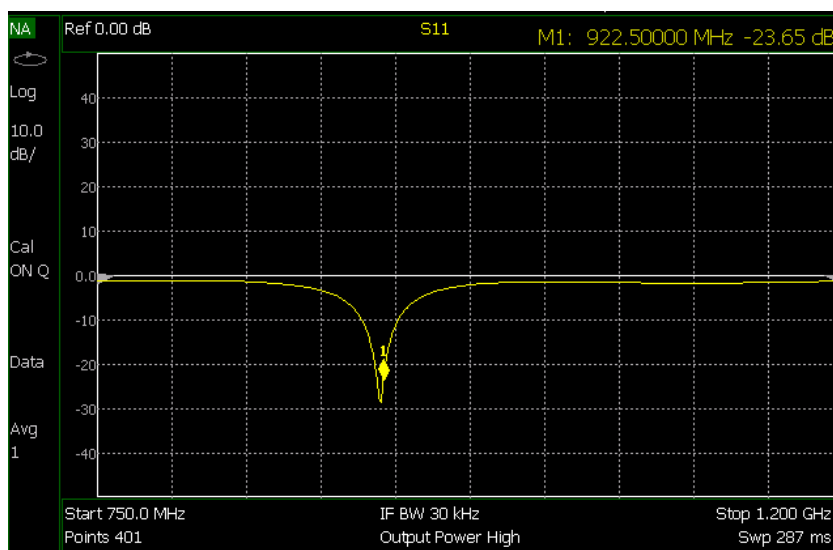
หลังจากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมของโครงสร้างสายอากาศ ด้วยวิธีการจำลองในหัวข้อย่อยที่ผ่านมา ผู้วิจัยได้สร้างต้นแบบสายอากาศไมโครสตริป จากขนาดโครงสร้างดังกล่าว ด้วยการใช้วัสดุแผ่น PCB ชนิด FR-4 ที่มีความหนา 1.6 mm เชื่อมต่อกับคอนเน็กเตอร์แบบ SMA จากนั้น ทำการวัดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ด้วยเครื่อง Network Analyzer ยี่ห้อ Agilent รุ่น N9912A [43] พบว่า ต้นแบบสร้างอากาศที่สร้างขึ้นนี้ มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ต่ำสุดเท่ากับ -14.36 dB ที่ความถี่ 948.03 MHz ดังภาพประกอบ 3-7 ซึ่งความถี่เรโซแนนซ์ที่วัดได้นี้ คลาดเคลื่อนไปจากผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยผลการวัดมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่สูงกว่า ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ของโครงสร้างที่ผ่านการปรับปรุงแล้วในหัวข้อก่อนหน้า เมื่อ ความถี่เรโซแนนซ์ เท่ากับ 922.5 MHz จะมีระดับ S_{11} เท่ากับ -13.52 dB จากภาพประกอบ 3-6



ภาพประกอบ 3-7 การวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของต้นแบบสายอากาศที่ปรับปรุงด้วยวิธีการจำลองแบบ

ปัญหาความคลาดเคลื่อนนี้เกิดขึ้นได้จาก การกำหนดค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) ที่ใช้ในการคำนวณและการจำลองแบบ ด้วยค่ามาตรฐานทั่วไปที่ 4.4 นั้น มีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ที่แท้จริงของแผ่น PCB ชนิด FR-4 ที่ใช้สร้างต้นแบบสายอากาศ นอกจากนี้ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ดังกล่าว ยังมีค่าแปรผันขึ้นกับความถี่ของสัญญาณที่ถูกป้อน และคุณภาพการผลิตแผ่น PCB ก็เป็นปัจจัยสำคัญ ที่ทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของ FR-4 คลาดเคลื่อนไปจากค่ามาตรฐาน

ดังนั้น ในทางปฏิบัติแล้ว การออกแบบขนาดโครงสร้างที่เหมาะสมของสายอากาศ ไมโครสตริป สามารถใช้วิธีการติดเทปทองแดง (Copper Tape) บนโครงสร้างแพตช์ตัวนำของต้นแบบสายอากาศที่ถูกสร้างขึ้น โดยใช้การปรับปรุงความยาวของแพตช์ ให้อยู่ในระดับของความถี่เรโซแนนซ์ลง เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ที่ได้มาจากการจำลองแบบในหัวข้อก่อนหน้า และพิจารณาร่วมกับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงของความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นจริง ทดลองปรับยาวของแพตช์ที่ระยะต่าง ๆ จนได้ผลการวัด S_{11} ที่ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 920-925 MHz ที่ต้องการใช้งานบนเครือข่ายลอว์แวน



ภาพประกอบ 3-8 การวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของต้นแบบสายอากาศที่นำเสนอ

ภาพประกอบ 3-8 แสดงผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของสายอากาศที่ปรับปรุงโครงสร้างแล้วเสร็จ มีค่า S_{11} น้อยกว่า -10 dB อยู่ในช่วงความถี่ 909 ถึง 931 MHz ซึ่งครอบคลุมการใช้งาน บนย่านความถี่ลอว์แวน จากนั้น ทำการวัดขนาดโครงสร้างของสายอากาศ ไมโครสตริปที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว ผลการวัดขนาดโครงสร้าง สรุปลงตาราง 3-3 ดังนั้น ผู้วิจัยสามารถนำขนาดโครงสร้างที่ผ่านการปรับปรุงใหม่นี้ มาสร้างต้นแบบสายอากาศไมโครสตริปแพตช์รูปสี่เหลี่ยมใหม่ ดังภาพประกอบ 3-9 สำหรับใช้ในการทดลอง การเปรียบเทียบสมรรถนะของสายอากาศ และการตรวจวัดคุณภาพสัญญาณในสภาพแวดล้อมจริง ในลำดับถัดไป

ตาราง 3-3 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ

พารามิเตอร์	W	L	L_g	W_o	L_o	y_o	h	t	W_s
ขนาด (mm)	97.2	79.5	170	3.083	61.45	16.2	1.6	0.035	1



(ก) มุมมองด้านหน้า



(ข) มุมมองด้านหลัง

ภาพประกอบ 3-9 ต้นแบบสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ

3.2.4 การวัดคุณลักษณะของต้นแบบสายอากาศ

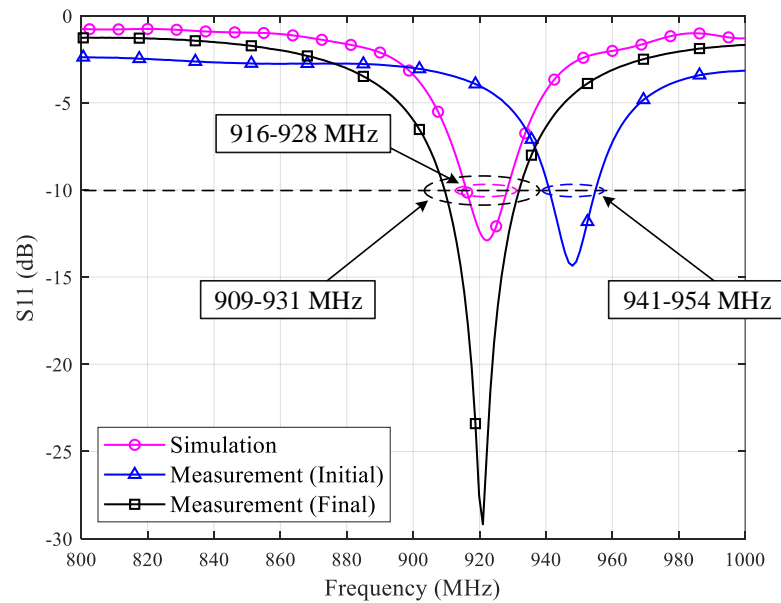
ในหัวข้อนี้ นำเสนอการวัดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ดังหัวข้อ 2.3.3 ของต้นแบบสายอากาศไมโครสตริป เปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}), แบนด์วิดท์ (Bandwidth), อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน (VSWR), แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern), ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) และอัตราขยาย (Gain) มีรายละเอียดดังนี้

ก. สัมประสิทธิ์การสะท้อนและแถบกว้างความถี่ (Reflection Coefficient and Bandwidth)

สัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของสายอากาศไมโครสตริป เปรียบเทียบระหว่างการจำลองสายอากาศ (Simulation), ต้นแบบสายอากาศขั้นต้น (Initial Design) และต้นแบบสายอากาศที่นำเสนอ (Final Design) แสดงดังภาพประกอบ 3-10 พบว่า สัมประสิทธิ์การสะท้อนของต้นแบบสายอากาศที่นำเสนอ มีความกว้างแถบความถี่มากกว่า ผลการจำลองสายอากาศ เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การสะท้อน มีค่าต่ำกว่า -10 dB สามารถครอบคลุมช่วงความถี่ 909.7 ถึง 931.1 MHz ซึ่งรองรับมาตรฐานลอว์แวน AS923 ซึ่งทำงานที่ช่วงความถี่ 920 ถึง 925 MHz นอกจากนี้ สามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ ของต้นแบบสายอากาศที่นำเสนอ ได้จากสมการ (2-33) ดังนี้

$$BW_{\text{narrowband}} (\%) = \left(\frac{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}}{f_{\text{center}}} \right) \times 100 = \left(\frac{931.1 - 909.7}{(931.1 + 909.7)/2} \right) \times 100 = 2.33\%$$

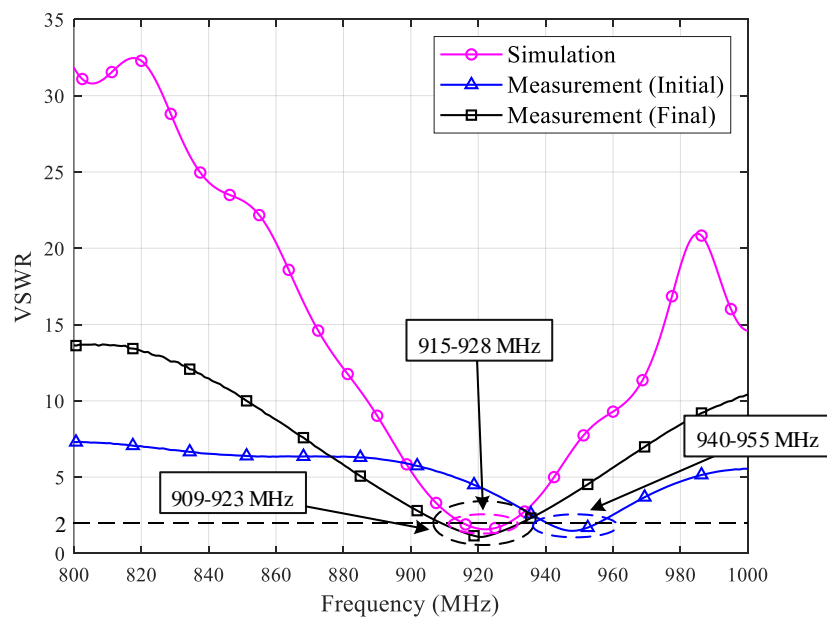
การบอกขนาดแบนด์วิดท์ของต้นแบบสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ จากผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน แสดงแถบกว้างความถี่มีค่า 909.7 ถึง 931.1 MHz ซึ่งถือเป็นช่วงความถี่แคบ (Narrowband) ดังนั้น สามารถคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ มีค่าเท่ากับ 2.33%



ภาพประกอบ 3-10 ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ

ข. อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน (VSWR)

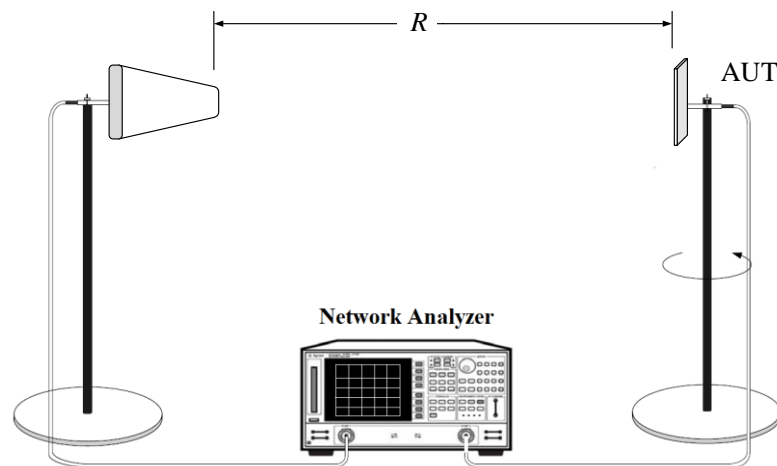
การวัดอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน (VSWR) นิยมพิจารณาระดับ VSWR ที่มีค่าต่ำกว่า 2 ซึ่งคิดการส่งผ่านกำลังงาน เท่ากับ 88.9% ดังตาราง ก-1 ในภาคผนวก ก. ผลการเปรียบเทียบ VSWR ระหว่างการวัดจริงกับการจำลองสายอากาศ พบว่า ความกว้างแถบความถี่จากผลการวัดจริงของต้นแบบสายอากาศที่นำเสนอ มีค่าระหว่าง 909.7 ถึง 923.2 MHz ซึ่งกว้างกว่า ผลการจำลองแบบ ที่ช่วงความถี่ 915.5 ถึง 928.7 MHz ดังภาพประกอบ 3-11 ซึ่งต้นแบบสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดี สามารถนำมาใช้กับเครือข่ายลอร่าแวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ



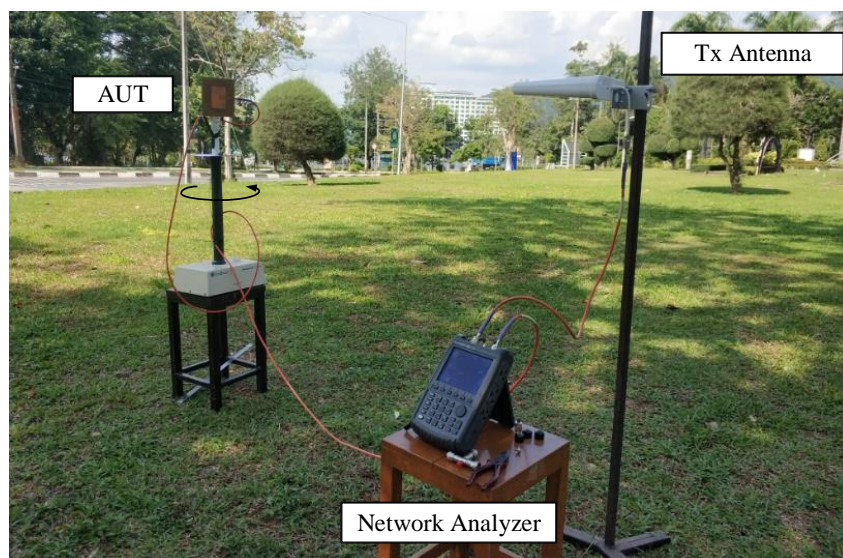
ภาพประกอบ 3-11 ผลการวัดอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันของสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ

ค. แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern)

การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน ของสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ สามารถใช้การวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ระหว่างสายอากาศมาตรฐาน ที่มีอัตราขยาย 8.2 dBi ทำงานที่ความถี่กว้าง รายละเอียดดังตาราง ก-3 ในภาคผนวก ก. ทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง และ กำหนดให้สายอากาศไมโครสตริป ทำหน้าที่เป็นสายอากาศทดสอบ (Antenna Under Test: AUT) วัดทดสอบด้วยเครื่อง Network Analyzer ยี่ห้อ Agilent รุ่น N9912A [43] ในสภาพแวดล้อม ภายนอกอาคาร (Outdoor Measurement) เนื่องจาก ในปัจจุบันมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และ พื้นที่ใกล้เคียง ไม่มีห้องป้องกันการรบกวนสัญญาณ (Chamber Room) อย่างไรก็ตาม การวัดทดสอบ สามารถทำได้ ในบริเวณสนามไกล (Far-Field Region) ของสายอากาศทั้งสอง และทดสอบในพื้นที่ เปิดโล่ง เพื่อลดการสะท้อนของคลื่นสัญญาณกับวัตถุต่าง ๆ โดยรอบ ดังภาพประกอบ 3-12 (ข)



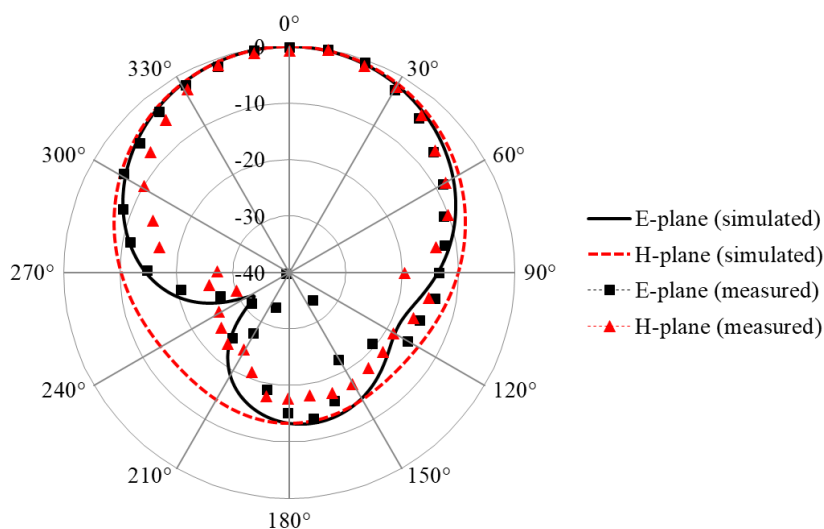
(ก) อุปกรณ์การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน



(ข) สภาพแวดล้อมการวัดทดสอบ

ภาพประกอบ 3-12 อุปกรณ์และสภาพแวดล้อมการวัดทดสอบภายนอกอาคาร

จากการคำนวณบริเวณสนามไกล (Far-Field Region) ของสายอากาศทั้งสอง ด้วยสมการ (2-45) จะสามารถกำหนดระยะห่างระหว่างสายอากาศ (R) เท่ากับ 1.5 เมตร และกำหนดให้มีการแมตซ์กันระหว่างโพลาริเซชันของสายอากาศทั้งสอง การทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน ทำได้โดยหมุนสายอากาศไมโครสตริปรอบแกนหมุน จากมุม 0 ถึง 360 องศา ดังภาพประกอบ 3-12 (ก) จดบันทึกค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ทุก ๆ 10 องศา โดยทำการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานบน 2 ระนาบ ได้แก่ ระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ข้อมูลผลการวัด สรุปได้ดังตาราง ก-3 ในภาคผนวก ก. จากนั้น ทำการ Normalized ค่า S_{21} ในแต่ละตำแหน่งด้วยค่าสูงสุด แล้วพล็อตข้อมูลลงบนกราฟพิกัดเชิงขั้ว (Polar Plot) เปรียบเทียบระหว่างระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก ดังภาพประกอบ 3-13



ภาพประกอบ 3-13 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ

ภาพประกอบ 3-13 แสดงผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) ของสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ บนระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ซึ่งเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ตามลำดับ จากภาพแสดงรูปแบบการแผ่พลังงานแบบทิศทางเดียว (Unidirectional) ทั้ง E-plane และ H-plane ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลอง (Simulation) ด้วยโปรแกรมแกรมคอมพิวเตอร์ มีขนาดของลำคลื่นหลัก (Main Lobe) ที่มีความเข้มมากกว่า ลำคลื่นด้านหลัง (Back Lobe) จึงสามารถลด การแทรกสอดของสัญญาณ (Interference) จากทิศทางด้านหลังสายอากาศได้ดี สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัย นอกจากนี้ สามารถใช้แบบรูปการแผ่พลังงานนี้ ในการหาขนาดความกว้างลำคลื่น HPBW ซึ่งอธิบายไว้ในหัวข้อถัดไป

ง. ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW)

จากผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน ของสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ ดัชนีภาพประกอบ 3-13 แสดงรูปภาพของการแผ่พลังงานที่ทำการ Normalize บนระนาบ 2 มิติ การวัดความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) พิจารณาได้จากขนาดของมุม ที่กำลังงานของสัญญาณ มีค่าเท่ากับ -3 dB สรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 3-4 ผลการวัดความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ

พารามิเตอร์	ระนาบสนามไฟฟ้า	ระนาบสนามแม่เหล็ก
การวัดทดสอบจริง	85 องศา	80 องศา
การจำลองแบบ	91 องศา	104 องศา

ตาราง 3-4 แสดงผลการวัดความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) ของต้นแบบสายอากาศไมโครสตริป บนระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก มีค่าเท่ากับ 85° และ 80° ตามลำดับ ซึ่งมุมทั้งสอง มีค่าน้อยกว่า HPBW ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งวัดค่าบนระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก มีค่าเท่ากับ 91° และ 104° ตามลำดับ ซึ่งมุม HPBW นี้ แสดงถึงความกว้างของลำคลื่น ที่สายอากาศแพร่กระจายคลื่นออกไปสู่อากาศ สำหรับสายอากาศแบบทิศทางเดียวแล้ว ยิ่ง HPBW มีค่าน้อย ยิ่งดีต่อการชี้ทิศทาง โดยทั่วไปจะให้ความสำคัญกับ HPBW บนระนาบสนามไฟฟ้าเป็นหลัก เนื่องจาก ใช้แสดงถึงความกว้างของลำคลื่นบนระนาบเดียวกับ ทิศทางของการโพลาไรซ์ (Polarization) ของสายอากาศ

จ. อัตราขยาย (Gain)

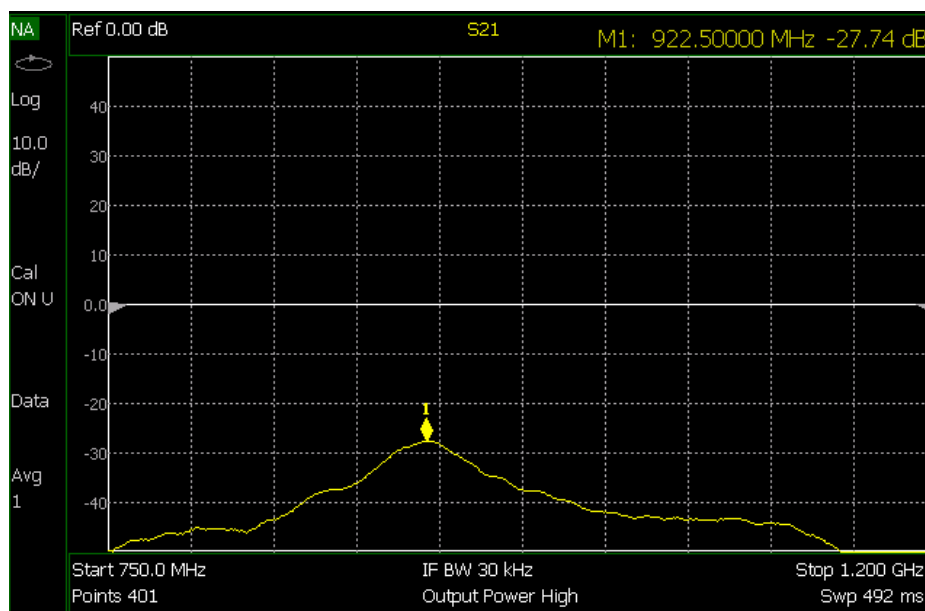
การวัดอัตราขยายของต้นแบบสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ ทำได้โดยใช้วิธีการเดียวกับ การทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน ดัชนีภาพประกอบ 3-12 แต่ไม่จำเป็นต้องหมุนสายอากาศ โดยจะทำการวัดทดสอบในแนวเส้นสายตา (LOS) กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศ (R) เท่ากับ 1.2 เมตร อัตราขยายของสายอากาศมาตรฐาน เท่ากับ 8.2 dBi [44] ความถี่ที่ทดสอบเท่ากับ 922.5 MHz จากนั้น ทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ซึ่งอยู่ในรูปฟังก์ชันของผลต่างกำลังงาน ระหว่างสายอากาศทางด้านฝั่งรับ (พอร์ต 2) ต่อกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศส่ง (พอร์ต 1) สมมติสภาพแวดล้อมที่วัดทดสอบเป็นช่องว่างอิสระ (Free Space) จะสามารถประยุกต์ใช้สมการการส่งผ่านของฟรีส ในการคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศ ดังนี้ [37]

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r \quad (3-1)$$

$$G_r \text{ (dBi)} = P_r \text{ (dBm)} - P_t \text{ (dBm)} - G_t \text{ (dBi)} + 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (3-2)$$

$$G_r \text{ (dBi)} = S_{21} \text{ (dB)} - G_t \text{ (dBi)} + 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (3-3)$$

- เมื่อ P_r = กำลังงานที่รับได้ (dBm)
 P_t = กำลังงานที่ส่ง (dBm)
 G_r = อัตราขยายของสายอากาศที่ทดสอบ (dBi)
 G_t = อัตราขยายของสายอากาศอ้างอิงที่ทราบค่า (dBi)
 S_{21} = สัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากพอร์ต 1 ไปพอร์ต 2 (dB)
 λ = ความยาวคลื่น (m)



ภาพประกอบ 3-14 ผลการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ในการทดสอบอัตราขยาย

ภาพประกอบ 3-14 แสดงผลการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ระหว่างสายอากาศอ้างอิง กับสายอากาศไมโครสตริปที่วัดทดสอบ พิจารณาที่ความถี่ทดสอบ เท่ากับ 922.5 MHz สามารถอ่านค่า S_{21} เท่ากับ -27.74 dB นำมาแทนค่าในสมการ (3-3) สามารถคำนวณอัตราขยายจริง (Realized Gain) ของต้นแบบสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ ดังนี้

$$G_r (dBi) = -27.74 - 8.2 + 20 \log \left(\frac{4\pi (1.2)}{(3 \times 10^8) / (922.5 \times 10^6)} \right) = -2.61 \text{ dB}$$

จากผลการคำนวณ อัตราขยายจริง (Realized Gain) ของต้นแบบสายอากาศไมโครสตริป มีค่าเท่ากับ -2.61 dBi ในขณะที่ อัตราขยายจริงที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีค่าเท่ากับ -0.705 dBi จากตาราง 3-2 ซึ่งค่าอัตราขยายทั้งสอง มีค่าต่ำ และติดลบ เนื่องจากการใช้วัสดุ FR-4 ที่ใช้สร้างสายอากาศ มีประสิทธิภาพต่ำ แม้ว่าจะทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์ได้ดีแล้วก็ตาม อย่างไรก็ตาม อัตราขยายจริงที่วัดได้นี้ จะได้รับการพิสูจน์การใช้งานจริงในลำดับถัดไป

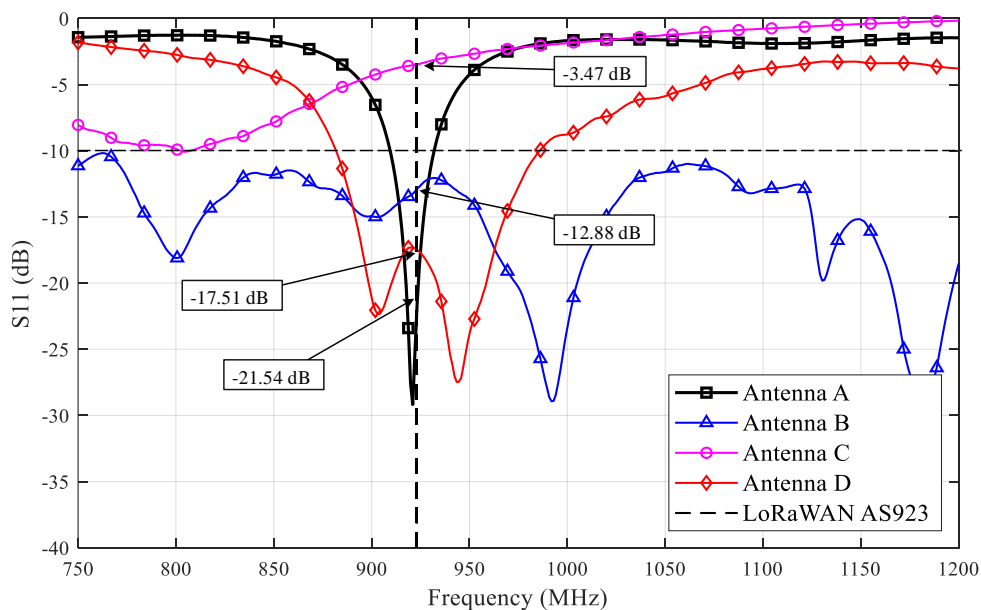
3.3 การทดสอบสมรรถนะของต้นแบบสายอากาศ

เพื่อการพิสูจน์และยืนยันการทำงานของต้นแบบสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ ในวิทยานิพนธ์นี้ ทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของสายอากาศที่นำเสนอ กับสายอากาศเชิงพาณิชย์ อีก 3 ชนิด โดยกำหนดให้ 1) สายอากาศ A คือ สายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ; 2) สายอากาศ B คือ สายอากาศชนิด Log-Periodic ซึ่งมีรูปแบบการแผ่พลังงานแบบทิศทางเดียว (Unidirectional) [44]; 3) สายอากาศ C คือ สายอากาศชนิดโมโนโพล ที่ได้รับมาจากอุปกรณ์ลอร่า End Device ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ Omnidirectional [34] และ 4) สายอากาศไมโครสตริปเชิงพาณิชย์ ซึ่งมีรูปแบบการแผ่พลังงานแบบทิศทางเดียว แต่มีการโพลาริเซชันแบบวงกลม [45] แสดงดังภาพประกอบ 3-15 กำหนดให้สายอากาศทั้ง 4 แบบ ทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง เพื่อแพร่กระจายสัญญาณไปยังสายอากาศรับ ของอุปกรณ์ลอร่าเกตเวย์ ซึ่งใช้งานสายอากาศชนิดโมโนโพล จึงสามารถรับสัญญาณของ End Device ได้จากรอบทิศทางบนแนวระนาบ



ภาพประกอบ 3-15 สายอากาศที่ใช้ในการทดลอง

ทดสอบวัดคุณลักษณะของสายอากาศทั้ง 4 ชนิด ด้วยเครื่อง Network Analyzer [43] เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ก่อนการนำไปใช้ทดสอบวัดสัญญาณจริง โดยเริ่มจากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) พิจารณาที่ระดับต่ำกว่า -10 dB ผลการวัดแสดงดังภาพประกอบ 3-16 พบว่า สายอากาศ A, B และ D มีช่วงอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์อยู่ในมาตรฐานของลอร่าแวน AS923 MHz [19] วัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) เท่ากับ 21.54, 12.88 และ 17.51 dB ตามลำดับ ในขณะที่ สายอากาศ C ซึ่งเป็นสายอากาศที่ให้มาพร้อมกับอุปกรณ์ลอร่า End Device ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ที่ความถี่ 923 MHz มีค่าเท่ากับ 3.47 dB ซึ่งมีค่าสูงกว่าระดับที่นิยมใช้พิจารณาที่ -10 dB อย่างไรก็ตาม สายอากาศ C ยังคงสามารถใช้งานได้ที่ความถี่ดังกล่าว ด้วยกำลังการส่งผ่านเท่ากับ 55.5% [46] นอกจากนี้ ผลการวัดคุณลักษณะอื่น ๆ ของสายอากาศทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ อัตราขยาย (Gain), อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR), มุมความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW), โพลาริเซชัน, ขนาดโครงสร้าง, น้ำหนัก และราคา หรือต้นทุนการผลิตสายอากาศ สรุปดังตาราง 3-5



ภาพประกอบ 3-16 ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของสายอากาศที่ใช้ในการทดลอง

ตาราง 3-5 การเปรียบเทียบคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	สายอากาศ A	สายอากาศ B [44]	สายอากาศ C [34]	สายอากาศ D [45]
Antenna Type	Microstrip (Proposed)	Log-Periodic (Commercial)	Monopole (Commercial)	Microstrip (Commercial)
Operating Frequency	909-931 MHz	752-2700 MHz	800-825 MHz	882-985 MHz
Radiation Pattern	Unidirectional	Unidirectional	Omnidirectional	Unidirectional
Realized Gain	-2.61 dBi	8.2 dBi	-2.58 dBi	5 dBi
VSWR	1.17	1.58	5.1	1.3
S_{11} , Return Loss	-21.54 dB	-12.88 dB	-3.47 dB	-17.51 dB
Polarization	Linear	Linear	Linear	Circular (LH)
HPBW (E, H-plane)	85°, 80°	60°, 85°	100°, 180°	70°, 72°
Cable Loss	0.48 dB	0.41 dB	0 dB (Direct)	0.41 dB
Weight	0.1 kg	0.6 kg	0.01 kg	0.6 kg
Dimension (mm ³)	170x170x10	282x210x65	10x10x50	210x180x43
Cost (USD)	~\$5	~\$40	~\$5	~\$160

ตาราง 3-5 สรุปผลการวัดคุณลักษณะของต้นแบบสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอเปรียบเทียบกับคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศเชิงพาณิชย์อีก 3 ชนิด เพื่อใช้ยืนยันสมรรถนะของสายอากาศไมโครสตริปที่ออกแบบ ว่ามีสมรรถนะใกล้เคียง หรือแตกต่างกันในด้านใดบ้าง จากผลการทดสอบวัดคุณลักษณะของสายอากาศในห้องปฏิบัติการ สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ความกว้างแถบความถี่ หรือแบนด์วิดท์ (Bandwidth) พบว่า สายอากาศ A และ C เป็นสายอากาศที่มีความกว้างแถบความถี่ที่แคบ ขณะที่สายอากาศ B และ D สามารถใช้งานในย่านความถี่ที่กว้าง อย่างไรก็ตาม การใช้งานสายอากาศที่มีแถบความถี่แคบนั้น สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกรองสัญญาณ (Filter) ในช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการใช้งานได้ จึงเป็นประโยชน์ทางอ้อม สำหรับการนำมาใช้งานบนเครือข่ายลอร์ราแวน ที่ทำงานบนย่านความถี่ 920-925 MHz ในประเทศไทย

2) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) ของสายอากาศ A, B และ D เป็นแบบทิศทางเดียว (Unidirectional) ในขณะที่ สายอากาศ C มีการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional) พิจารณาจากคุณสมบัติเฉพาะของชนิดสายอากาศ และผลการทดลองวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน ดังตาราง ก-3 ถึงตาราง ก-4 และภาพประกอบ ก-1 ในภาคผนวก ก.

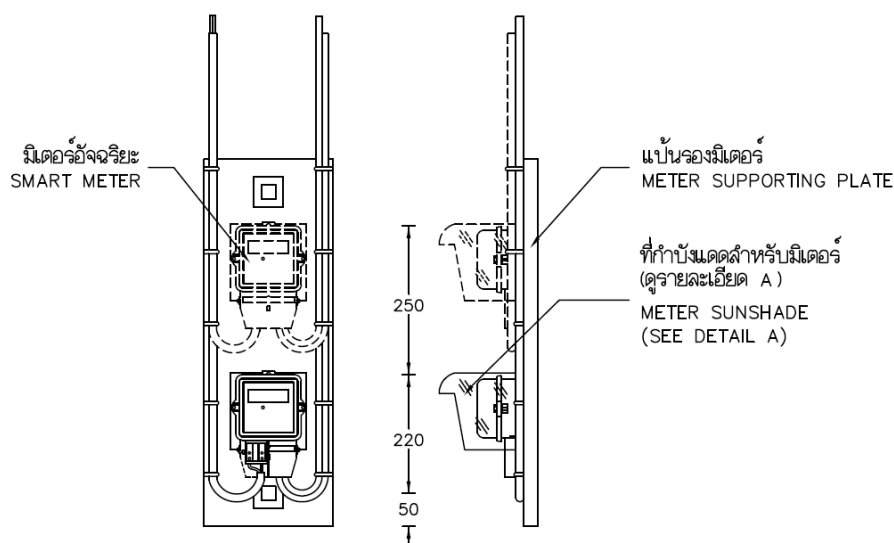
3) การวัดอัตราขยายจริง (Realized Gain) ของสายอากาศ พบว่า สายอากาศ B และ D ซึ่งเป็นสายอากาศเชิงพหุทิศทางที่มีการแผ่พลังงานแบบทิศทางเดียว และมีอัตราขยายสูงเท่ากับ 8.2 และ 5 dBi ตามลำดับ สายอากาศ C ซึ่งเป็นสายอากาศเชิงพหุทิศทาง แต่มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่แย่มากกว่าที่ความถี่เท่ากับ 923 MHz อัตราขยายจึงมีค่าต่ำและติดลบ ในขณะที่สายอากาศ A การวัดทดสอบอัตราขยาย อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2.4 มีค่าเท่ากับ -2.61 dBi แม้ว่าสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ จะมีอัตราขยายที่ต่ำมาก เมื่อเทียบกับสายอากาศเชิงพหุทิศทางอื่น ๆ แต่สำหรับการสื่อสารในสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์นี้ จะมีลักษณะเฉพาะ และจำเป็นต้องได้รับการพิสูจน์

4) การแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) และอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน (VSWR) พบว่า สายอากาศ A, B และ D มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ อยู่ในช่วงความถี่ของลอร์ราแวน AS923 MHz ในขณะที่ สายอากาศ C ไม่มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ ณ ช่วงความถี่ดังกล่าว

5) การโพลาไรซ์ (Polarization) ของสายอากาศ A, B, C เป็นแบบเชิงเส้น (Linear) ซึ่งจะแมตซ์กับการโพลาไรซ์ของสายอากาศรับ ที่อุปกรณ์ลอร์ราเกตเวย์ ในขณะที่ สายอากาศ D มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม ส่งผลให้กำลังงานสัญญาณ ที่สายอากาศฝั่งรับ มีค่าลดลงไปครึ่งหนึ่ง หรือเท่ากับ -3 dB จากผลของการไม่แมตซ์กันของโพลาไรเซชัน ระหว่างแบบเชิงเส้นและแบบวงกลม

6) การสูญเสียในสายส่ง (Cable Loss) ผลการทดสอบวัดการสูญเสียด้วยเครื่อง Network Analyzer [43] แสดงดังภาพประกอบ ก-2 และภาพประกอบ ก-3 ในภาคผนวก ก. โดยที่สายนำสัญญาณของสายอากาศ A มีค่าการสูญเสียเท่ากับ 0.48 dB สายนำสัญญาณของสายอากาศ B และ D มีค่าการสูญเสีย เท่ากับ 0.41 dB ในขณะที่ สายอากาศ C ทำการเชื่อมต่อกับโมดูลการสื่อสารโดยตรง จึงไม่มีค่าการสูญเสียดังกล่าว

7) ขนาดโครงสร้างและน้ำหนักของสายอากาศ ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาความเหมาะสม สำหรับการติดตั้งจริงบนเสาไฟฟ้า ดังภาพประกอบ 3-17 แสดงการติดตั้งสมาร์ตมิเตอร์ และพื้นที่วางโดยรอบบนเสาไฟฟ้า พบว่า สายอากาศ C มีน้ำหนักเบาและขนาดเล็กที่สุด สายอากาศ B และ D มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก จึงไม่เหมาะสมกับการติดตั้งในพื้นที่จำกัด ในขณะที่ สายอากาศ A มีน้ำหนักเบาและโครงสร้างที่บาง สามารถติดตั้งให้แบนราบไปกับผิววัตถุ อย่างไรก็ตาม สายอากาศ A ที่นำเสนอนี้ เป็นเพียงต้นแบบที่สร้างขึ้น จึงไม่ได้มีส่วนของการห่อหุ้มเหมือนกับสายอากาศเชิงพหุทิศทางชนิดอื่น ๆ



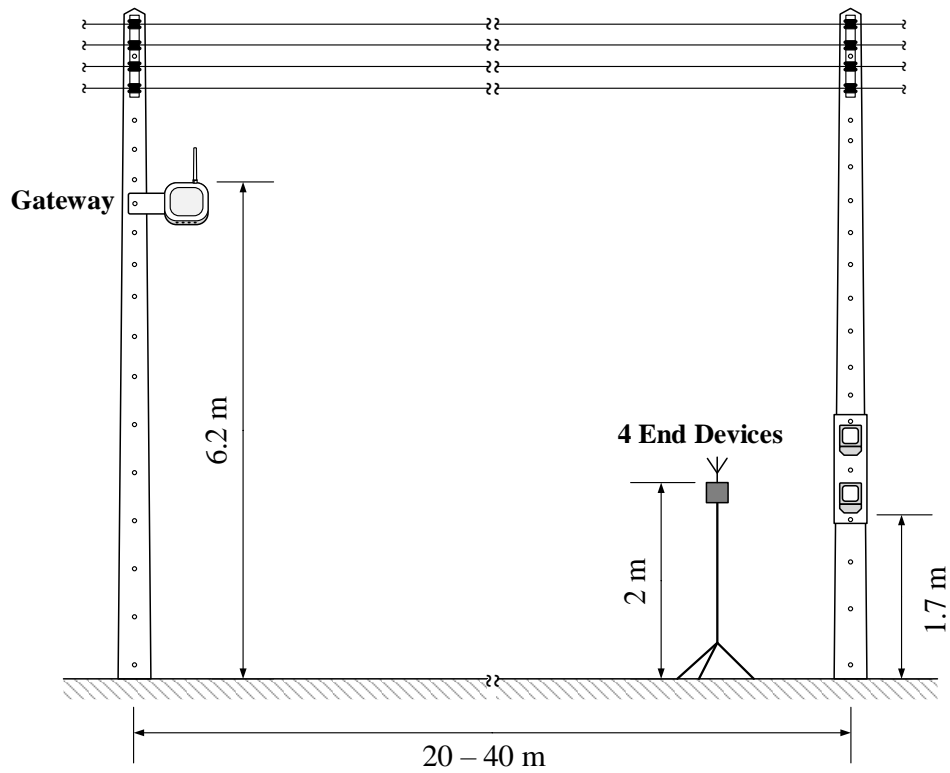
ภาพประกอบ 3-17 มาตรฐานการติดตั้งสมาร์ทมิเตอร์บนเสาไฟฟ้า [47]

8) ราคาจำหน่ายและต้นทุนการผลิตของสายอากาศ พบว่า สายอากาศ A และ C มีราคาจำหน่ายและต้นทุนการผลิตที่ไม่แพงมากนัก ประมาณ \$5 USD หากเปรียบเทียบกับสายอากาศ B และ D ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ มีส่วนห่อหุ้มสายอากาศ และวัสดุที่ใช้สร้างสายอากาศสามารถทนต่อกำลังงานสัญญาณที่สูงได้ ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้ต้นทุนการผลิต และราคาจำหน่ายสูง

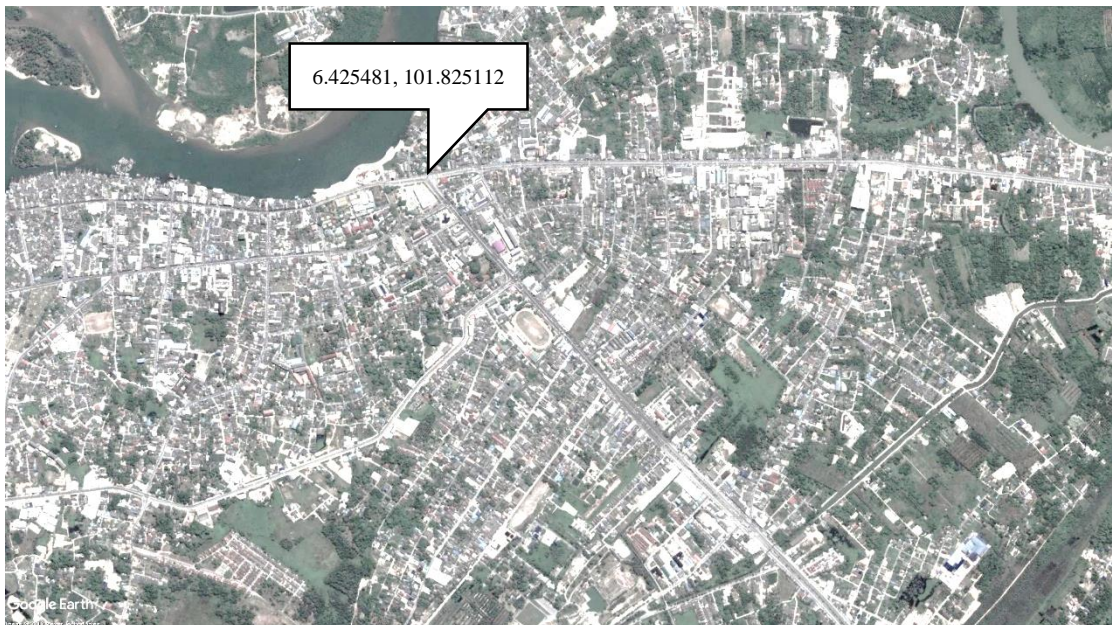
อย่างไรก็ตาม การยืนยันสมรรถนะของสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ นั้น จะต้องได้รับการทดสอบจากการใช้งาน ในสภาพแวดล้อมจริงของระบบสมาร์ทมิเตอร์อีกครั้ง โดยการนำสายอากาศดังกล่าว มาทดสอบวัดสัญญาณ เปรียบเทียบกับสายอากาศเชิงพาณิชย์อื่น เพื่อทดสอบประสิทธิภาพด้านการใช้งานจริง และทดสอบหาระยะการส่งสัญญาณสูงสุด ขอแต่ละสายอากาศ ซึ่งจะขออธิบายการทดสอบ ในลำดับถัดไป

3.4 สภาพแวดล้อมของสมาร์ทมิเตอร์

การติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าในประเทศไทย ใช้มาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หรือ PEA (Provincial Electricity Authority) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งกำหนดให้ติดตั้งมิเตอร์บนเสาไฟฟ้า ความสูงจากพื้นขั้นต่ำ 1.7 m ระยะห่างระหว่างเสาไฟฟ้าประมาณ 20 ถึง 40 m เรียงต่อกันไปตลอดความยาวถนน ดังภาพประกอบ 3-18 กำหนดให้สภาพแวดล้อมลักษณะดังกล่าว เป็นสภาพแวดล้อมของสมาร์ทมิเตอร์ หรือ Smart Meter Environment สำหรับพื้นที่เขตเมือง งานวิจัยนี้ กำหนดพื้นที่เขตเทศบาลเมืองนราธิวาส ประเทศไทย เป็นสถานที่ที่ทดลองเก็บข้อมูลการตรวจวัดสัญญาณ ลักษณะของสภาพแวดล้อมจริง แสดงดังภาพประกอบ 3-19 ซึ่งสภาพแวดล้อมแบบนี้ พบได้ทั่วไป ในทุก ๆ จังหวัดของประเทศไทย ซึ่งในอนาคต ความต้องการใช้งานสมาร์ทมิเตอร์จะมีมากขึ้น ในพื้นที่เขตเมืองของสภาพแวดล้อมดังกล่าว สำหรับพื้นที่เทศบาลเมืองนราธิวาสนี้ มีขนาดพื้นที่ 7.5 ตารางกิโลเมตร มีจำนวนประชากร 42,000 คน มีจำนวนมิเตอร์ 13,000 เครื่อง และมีการแบ่งโซนพื้นที่ ตามหลักปกครองของเทศบาล แบ่งเป็น 35 ชุมชน แต่ละชุมชนมีขนาดพื้นที่ประมาณ 1 ตารางกิโลเมตร [48]



ภาพประกอบ 3-18 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณลร่า ในสภาพแวดล้อมของสมาร์ทมิเตอร์



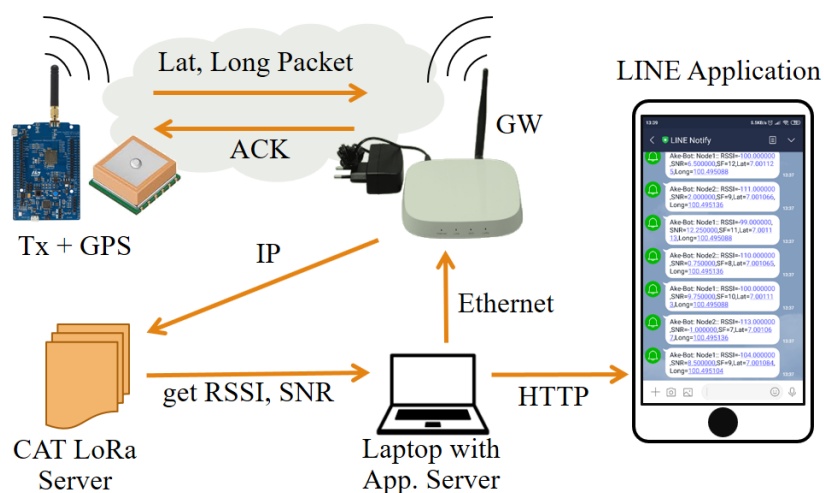
ภาพประกอบ 3-19 พื้นที่ตรวจวัดสัญญาณในเขตเทศบาลเมืองนครพนม [49]

ในการตรวจวัดสัญญาณลอร่า เพื่อใช้เปรียบเทียบสมรรถนะของสายอากาศแต่ละชนิด ทำการออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ ดังภาพประกอบ 3-18 กำหนดจุดติดตั้งเครื่องรับ หรือลอร่าเกตเวย์ บริเวณใจกลางเมืองนราธิวาส ที่พิกัดละติจูดที่ 6.425481 และลองจิจูดที่ 101.825112 โดยที่ตำแหน่งดังกล่าว มีลักษณะพื้นที่เป็นทางแยกใหญ่ ของถนนสายหลัก สามารถตรวจวัดสัญญาณในสภาพแวดล้อมจริง ได้ตลอดความยาวของถนน และสามารถครอบคลุมพื้นที่ได้เป็นบริเวณกว้าง ทั้งนี้ ความสูงในการติดตั้งเกตเวย์ ถูกจำกัดอยู่ใต้แนวของสายไฟฟ้าแรงต่ำ (220 volts \pm 10%) โดยติดตั้งเกตเวย์สูงจากพื้นดิน 6.2 m และกำหนดความสูงของเครื่องส่งหรือ End Device เท่ากับ 2 เมตร คงที่ ซึ่งเป็นความสูงเฉลี่ยของมิเตอร์ที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้า

การตรวจวัดสัญญาณใช้วิธีการ Drive Test ในการเคลื่อนที่อุปกรณ์ End Devices จำนวน 4 เครื่อง (4 สายอากาศ) ออกห่างจากเกตเวย์ ไปตามแนวเสาไฟฟ้า ด้วยความเร็วประมาณ 10 ถึง 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อลดปรากฏการณ์ Doppler พร้อมทั้งส่งค่าพิกัดตำแหน่งละติจูดและลองจิจูด สำหรับใช้คำนวณระยะทางระหว่างเครื่องส่งกับเกตเวย์ และออกแบบให้มีการบันทึก ระดับ SNR และ RSSI เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพสัญญาณในแต่ละตำแหน่ง เพื่อใช้คำนวณหาค่าการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss) ที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมจริง

3.5 อุปกรณ์เครือข่ายลอร่าแวน

การออกแบบและการติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดสัญญาณลอร่า แสดงดังภาพประกอบ 3-20 ซึ่งออกแบบโดยยึดตาม สถาปัตยกรรมของลอร่าแวน (LoRaWAN) ประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.2.3 สำหรับงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นการตรวจวัดกำลังงานของสัญญาณลอร่า บนชั้น Physical Layer ดังนั้น การออกแบบการทำงาน ในแต่ละส่วนของเครือข่ายลอร่าแวน สรุปได้ดังตาราง 3-6 และมีรายละเอียดการออกแบบดังต่อไปนี้

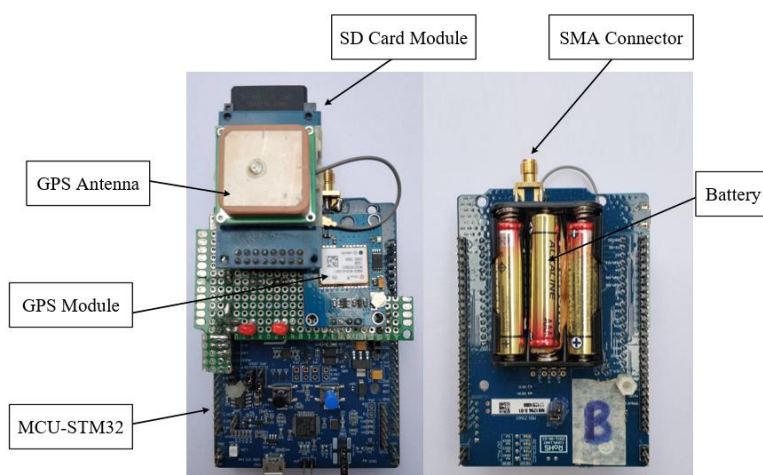


ภาพประกอบ 3-20 รูปแบบการส่งผ่านข้อมูลการทดลองผ่านเครือข่ายลอร่าแวน

3.5.1 End Device (ED)

End Device คือ อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับสมาร์ตมิเตอร์ และส่งข้อมูลไปยังเกตเวย์ผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โมเดล STM32 [34] ดังภาพประกอบ 3-21 ในงานวิจัยนี้ ใช้งานอุปกรณ์ End Device จำนวน 4 เครื่อง สำหรับติดตั้งสายอากาศ A, B, C และ D ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.3 กำหนดให้แต่ละอุปกรณ์ ทำงานที่ช่องสัญญาณแตกต่างกัน ได้แก่ 923.2, 923.4, 923.6 และ 923.8 MHz ตามลำดับ เพื่อให้สามารถส่งข้อมูลได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่เกิดการชนกันของชุดข้อมูล (Collision) กำหนดกำลังการส่งสัญญาณ เท่ากับ 12 dBm ซึ่งพิจารณาจากกำลังส่งออกอากาศสมมูลไอโซทรอปิก (Equivalent Isotropically Radiated Power: EIRP) ของค่าเริ่มต้น ตามมาตรฐานลอว์แวน AS923 [19] และประกาศของ กสทช. [27] ระบุว่า กำลังส่งสูงสุด EIRP ที่ต่ำกว่า 50 mW (16.98 dBm) ถึง 0.5 W (26.98 dBm) สามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องมีใบอนุญาต ดังนั้นกำลังส่งที่ 12 dBm เมื่อพิจารณาร่วมกับอัตราขยายของแต่ละสายอากาศ ยังคงอยู่ในเงื่อนไข EIRP สูงสุดที่อนุญาตให้ใช้งาน

อุปกรณ์ End Device แต่ละตัว สามารถรับค่าพิกัดตำแหน่ง GPS (Global Positioning System) จากโมดูลภายนอก มาสร้างเป็นชุดข้อมูล Payload ขนาด 11 bytes กำหนดคาบเวลาการส่งข้อมูล (Time Interval) ทุก ๆ 5 วินาที กำหนด Code Rate (CR) เท่ากับ 4/5 ความเร็วข้อมูล (Data Rate) กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงในทุกครั้งที่มีการชุดข้อมูล ด้วยการกำหนดแพกเกจการกระจาย (SF) ได้แก่ 7, 10 และ 12 และออกแบบให้มีการบันทึกพารามิเตอร์ที่สำคัญลงบนการ์ดหน่วยความจำ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับข้อมูลที่แม่ข่ายได้รับ



ภาพประกอบ 3-21 อุปกรณ์ลอว์แวน End Device ที่ใช้ในการทดลอง

3.5.2 Gateway (GW)

เกตเวย์ (Gateway) คือ อุปกรณ์ที่ใช้รับคลื่นสัญญาณลอว์แวนที่ถูกส่งมาจาก End Device ผ่านสายอากาศโมโนโพล รองรับการสื่อสารหลายช่องสัญญาณ (Muti-channel) จากนั้นจะส่งต่อชุดข้อมูลให้กับ Network Server ที่อยู่บนเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ผ่าน Internet Protocol (IP) วิทยานิพนธ์นี้ ใช้งานเกตเวย์เชิงพาณิชย์ ผลิตภัณฑ์ของ UfiSpace [50] ดังภาพประกอบ 3-22



ภาพประกอบ 3-22 อุปกรณ์ลอราเกตเวย์ที่ใช้ในการทดลอง

3.5.3 Network Server (NS)

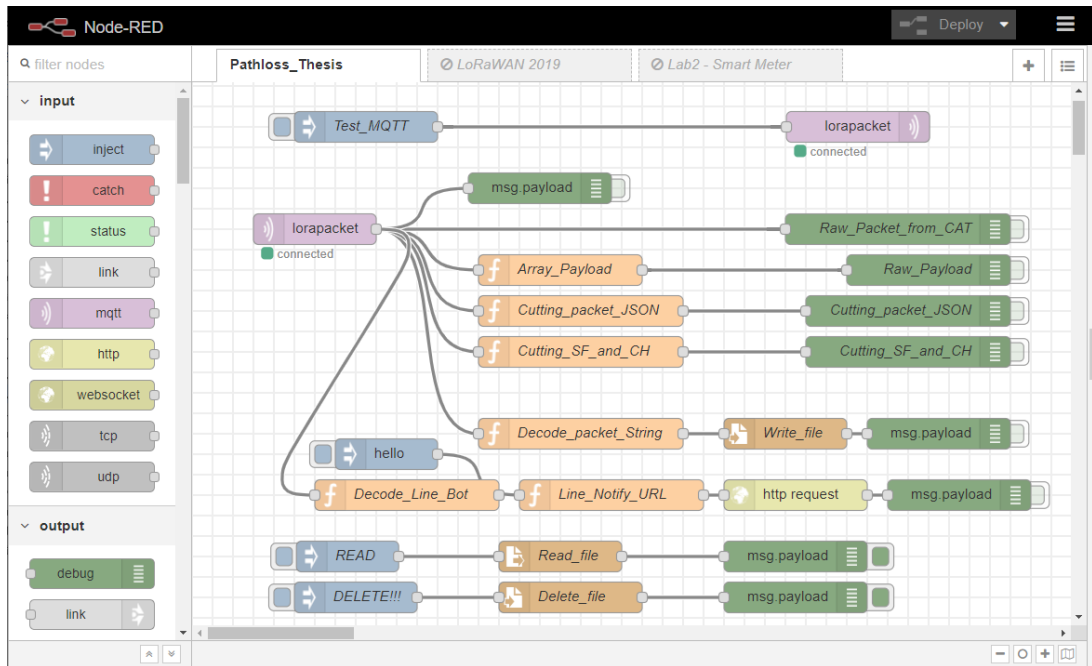
Network Server ทำหน้าที่บริหารจัดการข้อมูล ที่ได้รับมาจากเกตเวย์ เช่น การยืนยันตัวตนอุปกรณ์ (Authentication) การส่งต่อข้อมูลให้กับส่วน Application และการส่งข้อมูลขาลง (Downlink) เป็นต้น วิทยานิพนธ์นี้ ใช้บริการเครือข่ายของบริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน) ซึ่งเป็นผู้ให้บริการเครือข่ายลอราแวนสาธารณะในประเทศไทย [51] ดังภาพประกอบ 3-23

CAT		Logger Data											
	Timestamp	Device Address	DevEUI	Payload	FPort	FCnt	FCnt	RSSI	SNR	SubBand	Channel	LRR ID	
ROUTING PROFILE	↑ 25/10/2019 14:47:23	E01AF974	AA01BB02CC03DD04	6201d506118f1800000072	1	114	1	-78.000000	9.000000	G1	LC1	C00017	
DEVICE MANAGEMENT	↑ 25/10/2019 14:47:17	E01AF974	AA01BB02CC03DD04	6201bc06118f2800000071	1	113	1	-79.000000	7.500000	G1	LC1	C00017	
CONNECTIVITY	↑ 25/10/2019 14:47:11	E01AF974	AA01BB02CC03DD04	62015e06118f6800000070	1	112	1	-52.000000	8.000000	G1	LC1	C00017	
LOGGER	↑ 25/10/2019 14:47:08	E01AF974	AA01BB02CC03DD04	61ffe1061190e00000006f	1	111	1	-66.000000	7.750000	G1	LC1	C00017	
DOWNLINK	↑ 25/10/2019 14:47:02	E01AF974	AA01BB02CC03DD04	61ffe1061190e00000006e	1	110	1	-71.000000	8.750000	G1	LC1	C00017	
USERS	↑ 25/10/2019 14:46:56	E01AF974	AA01BB02CC03DD04	61ffe1061190e00000006d	1	109	1	-77.000000	6.750000	G1	LC1	C00017	
	↑ 25/10/2019 14:46:53	E01AF974	AA01BB02CC03DD04	61ff56061191700000006c	1	108	1	-79.000000	9.750000	G1	LC1	C00017	

ภาพประกอบ 3-23 เครือข่ายลอราแวน Network Server ที่ใช้ในการทดลอง

3.5.4 Application Server (AS)

Application Server คือ ระบบหรือกระบวนการทางฝั่งของผู้ใช้ (User) ในการนำข้อมูลจาก Network Server มาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่าง ๆ วิทยานิพนธ์นี้ ออกแบบส่วนของ Application Server บนเครื่องคอมพิวเตอร์ สร้างเป็นเครือข่ายแบบ Local Server ด้วยการติดตั้งซอฟต์แวร์ Node-Red [52] ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพ นิยมใช้ในการพัฒนาระบบของเครือข่ายไอโอที (Internet Of Things) ด้วยการสร้างบล็อกคำสั่ง แทนการเขียนโปรแกรมในภาษา Javascript ดังภาพประกอบ 3-24 แสดงการนำเข้าข้อมูลจาก Network Server ด้วยโปรโตคอล MQTT (Message Queue Telemetry Transport) สร้างการบันทึกข้อมูลในลักษณะของ Data Logger พร้อมทั้ง สร้างระบบการแจ้งเตือนผ่าน LINE Application ของเครื่องสมาร์ทโฟน ด้วยโปรโตคอล HTTP (Hypertext Transfer Protocol) [53] ดังภาพประกอบ 3-20



ภาพประกอบ 3-24 การจัดการข้อมูลใน Application Server ด้วยซอฟต์แวร์ Node-Red

ตาราง 3-6 รายละเอียดการกำหนดค่าของอุปกรณ์เครือข่ายลอว์แวน

พารามิเตอร์	รายละเอียด
End Device (ED)	STM32 LoRa Discovery kit (SX1276) [34]
เกตเวย์ (GW)	UfiSpace GPE810A-923U (SX1301) [50]
ช่องสัญญาณ	923.2, 923.4, 924.6 และ 924.8 MHz
แฟกเตอร์การกระจาย (SF)	SF7, SF10 และ SF12
ค่าความไวเครื่องรับ	-125, -132 และ -137 dBm (สำหรับ SF7,10,12)
แบนด์วิดท์มอดูเลต (BW)	125 kHz
กำลังงานส่ง (Tx power)	12 dBm
Coding Rate	4/5
ความสูงสายอากาศส่ง ED	2 m
ความสูงสายอากาศรับ GW	6.2 m
สายอากาศส่ง (ED antennas)	สายอากาศ A, B, C และ D
สายอากาศรับ (GW antenna)	สายอากาศโมโนโพล, 1.5 dBi
พิกัดการตำแหน่งเกตเวย์	6.425481, 101.825112
โมดูลภายนอก	Ublox NEO-6M GPS และ SD Card Module

ตาราง 3-6 สรุปรายละเอียดการกำหนดค่าของพารามิเตอร์ ๆ สำหรับเครือข่าย
 ลอว์แวนที่ใช้สำหรับการทดลอง ได้แก่ อุปกรณ์ End Device เลือกใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์
 โมเดล STM32 เนื่องจาก เป็นบอร์ดที่มีสมรรถนะสูง มีขา input/output เพียงพอต่อการใช้งาน
 ร่วมกับโมดูล GPS โมเดล Ublox NEO-6M และโมดูลการ์ดหน่วยความจำ (SD Card Module)
 นอกจากนี้ จุดเด่นอีกประการของบอร์ดดังกล่าว คือ มีการติดตั้งชิพ SX1276 ซึ่งสามารถมอดูเลต
 สัญญาณลอว์แวน ช่วงความถี่ 860 ถึง 930 MHz รวมอยู่ในบอร์ดเดียวกัน ในขณะที่ อุปกรณ์ลอว์แวน
 เกตเวย์ ใช้งานชิพ SX1301 ซึ่งออกแบบสถาปัตยกรรม ให้สามารถรับสัญญาณได้หลายช่องสัญญาณ
 (Multi-channel) ได้ในเวลาเดียวกัน หรือรับสัญญาณที่มีความถี่เดียวกัน บนช่องสัญญาณที่มีการสุ่ม
 Spreading Factor (SF) ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของเทคโนโลยีลอว์แวน ที่แตกต่างจากเทคโนโลยี
 การสื่อสารแบบไร้สายอื่น ๆ

3.6 สรุปท้ายบท

ในบทนี้ นำเสนอการสร้างต้นแบบสายอากาศไมโครสตริป การทดสอบวัด
 คุณลักษณะ และการเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศที่นำเสนอ กับสายอากาศเชิงพาณิชย์
 เพื่อยืนยันสมรรถนะของสายอากาศที่สร้างขึ้นใหม่ จากนั้น ออกแบบระบบสำหรับการตรวจวัด
 สัญญาณ ในสภาพแวดล้อมของสมาร์ทมิเตอร์ ด้วยเครือข่ายลอว์แวนที่ออกแบบ และติดตั้งจริง
 ในสภาพแวดล้อมที่กำหนด ในบทที่ 4 จะนำเสนอผลการทดลองการตรวจวัดสัญญาณ เปรียบเทียบ
 ระหว่างสายอากาศ 4 ชนิด เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะ และสร้างแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง
 สำหรับสภาพแวดล้อมแบบสมาร์ทมิเตอร์ พร้อมทั้งทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองที่สร้างขึ้น

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในวิทยานิพนธ์นี้ ออกแบบระบบสำหรับการวัดระดับความเข้มสัญญาณ RSSI ของเครือข่ายลอร์ราแวน บนชั้น Physical Layer ของแบบจำลองโอเอสไอ (Open Systems Interconnection: OSI) เพื่อพิจารณาระดับการลดทอนสัญญาณ หรือค่าการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss) ที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมจริงของสมาร์ตมิเตอร์ ดังแสดงในภาพประกอบ 3-19 ในบทนี้ นำเสนอการวิเคราะห์กำลังสัญญาณลอร์รา ที่ตรวจวัดได้ในสภาพแวดล้อมจริง เปรียบเทียบแต่ละชนิดของสายอากาศ เพื่อการสร้างแบบจำลองการสูญเสียสำหรับสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์

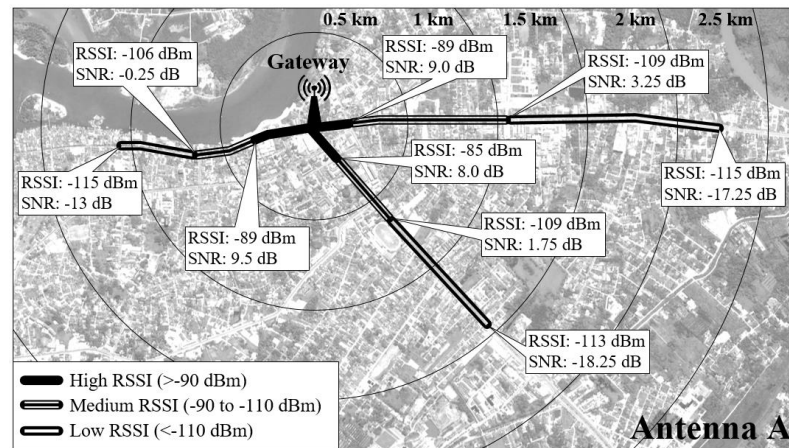
4.1 ประสิทธิภาพการส่งสัญญาณลอร์รา

การเก็บข้อมูลผลการตรวจวัดคุณภาพสัญญาณลอร์รา เปรียบเทียบระหว่างสายอากาศ 4 ชนิด ในสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์ ดังหัวข้อ 3.4 ผลการวัดระดับความเข้มของสัญญาณฝั่งรับ (RSSI) และ SNR ที่ตำแหน่งต่าง ๆ แสดงบนแผนที่ภาพถ่ายดาวเทียมของโปรแกรม Google Earth ในภาพประกอบ 4-1 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเกตเวย์บริเวณสามแยก ซึ่งเป็นจุดตัดของถนนสายหลักในพื้นที่เขตเทศบาลเมืองนราธิวาส และทำการตรวจวัดสัญญาณด้วยวิธี Drive Test ไปตามแนวสายไฟฟ้าของถนนทั้งสามสาย ดังนั้น ค่า RSSI และ SNR ที่ตรวจวัดได้จากทั้งสามเส้นทาง จะถูกพิจารณารวมกัน เพื่อเป็นตัวแทนข้อมูลการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss) ของสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์ ในพื้นที่เขตเมืองของประเทศไทย ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

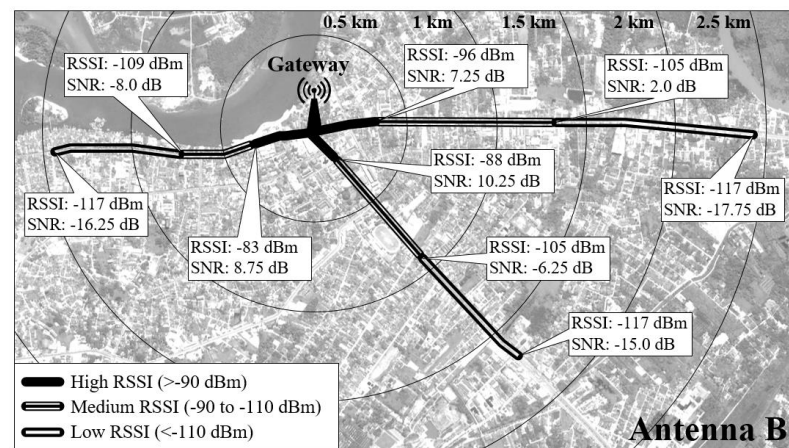
4.1.1 ระดับความเข้มของสัญญาณฝั่งรับ (RSSI) และระยะทางการสื่อสาร

จากภาพประกอบ 4-1 แสดงผลการวัดระดับ RSSI ในแต่ละตำแหน่งของพื้นที่ทดสอบ โดยพิจารณาแบ่งระดับ RSSI ออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ High, Medium และ Low [15] เพื่อใช้ในการแบ่งโซนพื้นที่ จากระดับความเข้มของสัญญาณลอร์รา ในแนวรัศมีรอบ ๆ เกตเวย์ จากภาพแสดงให้เห็นว่า สายอากาศ A, B และ D มีพิสัยการส่งสัญญาณ เมื่อเทียบกับระดับ RSSI Level มีค่าใกล้เคียงกัน คือ ระดับ High RSSI พิสัยการส่งสัญญาณอยู่ในช่วง 0-0.4 km, Medium RSSI พิสัยการส่งสัญญาณเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.4-1.2 km และ Low RSSI ที่พิสัยการส่งสัญญาณเฉลี่ย มากกว่า 1.2 km ในขณะที่ สายอากาศ C มีพิสัยการส่งสัญญาณเปรียบเทียบกับระดับ RSSI Level ต่ำกว่าสายอากาศ A, B และ D ทุกช่วงระดับของ RSSI Level

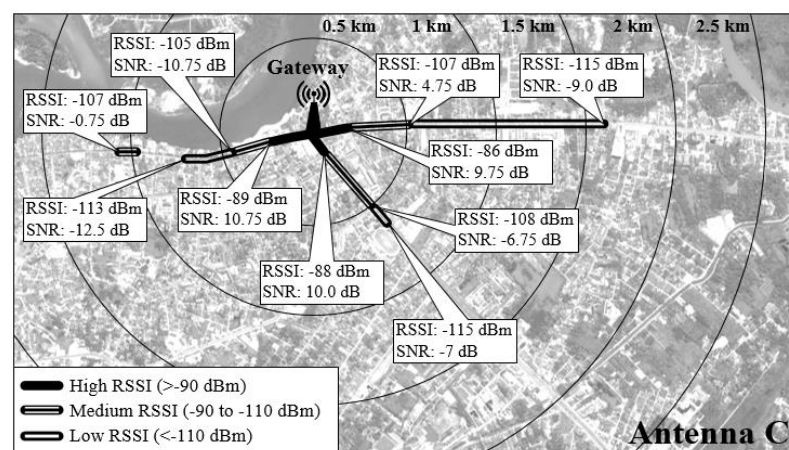
ผลการทดสอบการใช้งานจริงของสายอากาศ A, B, C และ D ในสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์ ที่ทดสอบในพื้นที่เขตเมือง บนเครือข่ายการสื่อสารลอร์ราแวน เมื่อพิจารณาระยะการส่งสัญญาณไกลที่สุด (Maximum Range) พบว่า สายอากาศ A สามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุด ประมาณ 2.2 km, สายอากาศ B สามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุด ประมาณ 2.4 km, สายอากาศ C มีระยะการส่งสัญญาณต่ำที่สุดในสายอากาศที่นำมาทดสอบ ที่ระยะประมาณ 1.6 km และ สายอากาศ D สามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุด ประมาณ 2.4 km ในสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์ ที่ทำการทดสอบ



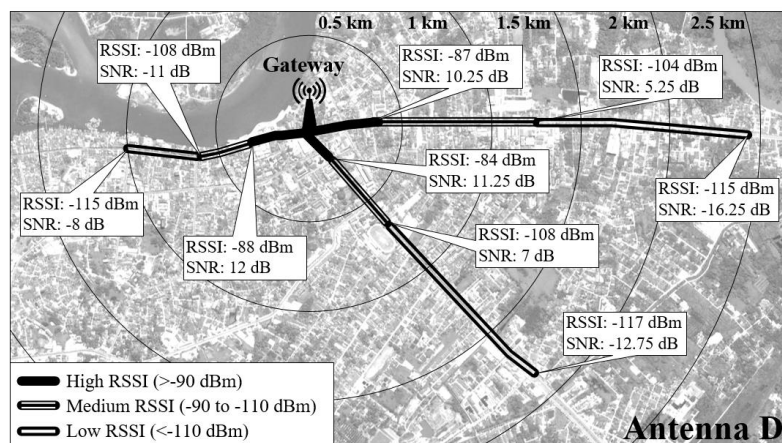
(ก) ผลการวัดจากสายอากาศ A (นำเสนอ)



(ข) ผลการวัดจากสายอากาศ B



(ค) ผลการวัดจากสายอากาศ C



(ง) ผลการวัดจากสายอากาศ D

ภาพประกอบ 4-1 ผลการวัดคุณภาพสัญญาณลอร่าเปรียบเทียบชนิดของสายอากาศ

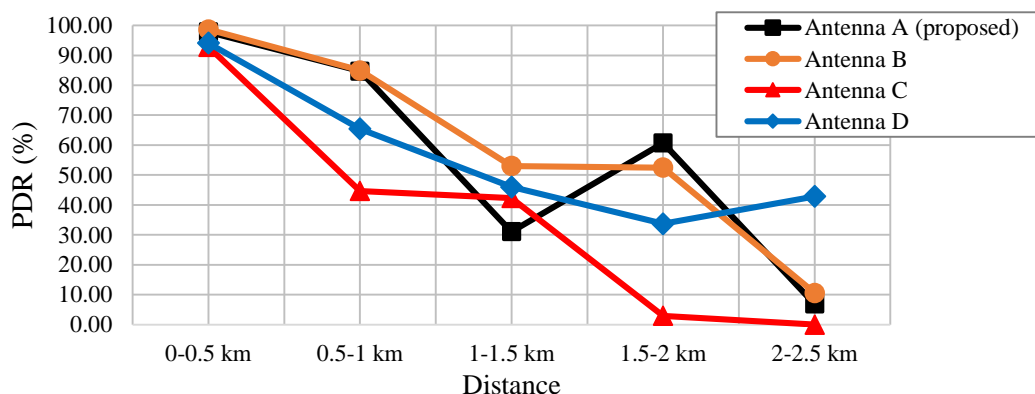
ดังนั้น จากผลการทดลองนี้ แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของสายอากาศ ที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ Unidirectional (สายอากาศ A, B และ D) ที่เหนือกว่าสายอากาศแบบ Omnidirectional (สายอากาศ C) ด้วยการทดสอบใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง ทั้งนี้ แม้ว่าสายอากาศ A (สายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอน) จะมีระยะการส่งสัญญาณสูงสุด ที่ด้อยกว่าสายอากาศ B และ D แต่ระยะการส่งสัญญาณไกลเท่านี้ ก็เพียงพอสำหรับการใช้งานจริงในสภาพแวดล้อมของสมาร์ทมิเตอร์ ที่ต้องการให้มีพื้นที่ครอบคลุมแหล่งชุมชน (Community Area) ซึ่งมีขนาดพื้นที่ประมาณ 1 km² บนเครือข่ายการสื่อสารลอร่าแวน

4.1.2 อัตราส่วนการส่งชุดข้อมูลสำเร็จ (Packet Delivery Ratio)

ในการส่งข้อมูลของอุปกรณ์ลอร่า End Device นอกจากการส่งข้อมูลพิกัดตำแหน่ง GPS แล้ว ยังบรรจุข้อมูลของ Counting Number สำหรับใช้นับจำนวนครั้งของการส่งแพ็กเก็ต สามารถเปรียบเทียบจำนวนนับดังกล่าว กับจำนวนแพ็กเก็ตที่เกิดเวียที่ได้รับ เพื่อบ่งบอกประสิทธิภาพของการสื่อสาร ได้แก่ อัตราส่วนการส่งชุดข้อมูลสำเร็จ (Packet Delivery Ratio: PDR) ซึ่งค่า PDR นี้ นิยมใช้การทดสอบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย คำนวณได้จากสมการ [54]

$$PDR (\%) = \frac{\text{Total packets received}}{\text{Total packets sent}} \times 100 \quad (4-1)$$

ผลการทดลองพบว่า สายอากาศ A สามารถส่งข้อมูลได้สำเร็จ เท่ากับ 388 แพ็กเก็ต จากการส่งทั้งหมด 646 แพ็กเก็ต, สายอากาศ B ส่งชุดข้อมูลได้สำเร็จ เท่ากับ 415 แพ็กเก็ต จากการส่งทั้งหมด 605 แพ็กเก็ต, สายอากาศ C ส่งชุดข้อมูลได้สำเร็จ เท่ากับ 208 แพ็กเก็ต จากการส่งทั้งหมด 508 แพ็กเก็ต และสายอากาศ D ส่งข้อมูลได้สำเร็จ 535 แพ็กเก็ต จากการส่งทั้งหมด 831 แพ็กเก็ต ดังนั้น สามารถคำนวณหา PDR มีค่าเท่ากับ 60.06, 68.60, 40.94 และ 64.38% ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาแบ่งช่วงของระยะทางระหว่างเครื่องส่งกับเกตเวีย โดยกำหนดการแบ่งระยะทางทุก ๆ 0.5 km สามารถหา PDR ที่แบ่งตามช่วงระยะทาง แสดงดังภาพประกอบ 4-2



ภาพประกอบ 4-2 อัตราการส่งชุดข้อมูลสำเร็จ (PDR) เปรียบเทียบแต่ละช่วงระยะทาง

จากภาพประกอบ 4-2 แสดงอัตราส่วนการส่งชุดข้อมูลสำเร็จ (PDR) เปรียบเทียบในแต่ละช่วงระยะทาง พบว่า อัตรา PDR จะมีค่าลดลง เมื่อระยะห่างระหว่าง End Device และเกตเวย์ มีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาชนิดของสายอากาศ พบว่า ที่ระยะทางระหว่าง 0-0.5 km สายอากาศทุกชนิด มีค่า PDR สูงมากกว่า 90% ที่ระยะทาง 0.5-1 km สายอากาศ A และ B มีประสิทธิภาพการส่งสัญญาณที่ดีกว่าสายอากาศชนิดอื่น จากอัตรา PDR มีค่าเท่ากับ 84% และช่วงระยะไกลสุดของการทดลอง ที่ระยะ 2-2.5 km สายอากาศ A, B และ D ยังสามารถส่งข้อมูลได้สำเร็จ ในอัตรา PDR ต่ำ แต่สายอากาศ C ไม่สามารถส่งสัญญาณได้ที่ระยะทางดังกล่าว หรือ PDR เท่ากับ 0% ดังสรุปในตาราง ก-5 ถึง ตาราง ก-8 ในภาคผนวก ก.

ดังนั้น จากผลการพิจารณาอัตราการส่งชุดข้อมูลสำเร็จ (PDR) ของการตรวจวัดสัญญาณล่อร่า สามารถยืนยันสมรรถนะของสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ (สายอากาศ A) ว่ามีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณล่อร่า ด้วยคุณภาพสัญญาณที่ใกล้เคียงกับสายอากาศเชิงพาณิชย์ ที่มีราคาที่สูงกว่ามาก ดังสรุปในตาราง 3-5 อย่างไรก็ตาม ต้นแบบสายอากาศที่นำเสนอนี้ ถูกสร้างมาเพื่อทดสอบสมมติฐานและแก้ปัญหาของงานวิจัย ยังต้องผ่านกระบวนการทดสอบ, การปรับปรุงและการทำซ้ำ หรือการตรวจมาตรฐานต่าง ๆ จึงจะสามารถเทียบเท่าสายอากาศเชิงพาณิชย์ได้ในทุกด้าน

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองเชิงประจักษ์ (Empirical Model) คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสร้างได้จากวิธีการเชิงประสบการณ์ สามารถประยุกต์ใช้สร้างแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง โดยใช้ข้อมูลการสูญเสียที่ได้จากการวัดทดสอบ ในสภาพแวดล้อมจริง จากการคำนวณใน (2-46) สามารถแสดงข้อมูลการสูญเสียในเส้นทางที่ได้จากการวัด ของแต่ละสายอากาศ เปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างเครื่องส่งกับเกตเวย์ ที่แสดงบนแกน Log scale ของกราฟการกระจาย (Scatter Plot) ดังภาพประกอบ 4-3 พบว่า ข้อมูลทั้งหมดมีการกระจายในลักษณะเชิงเส้น (Linear Model) จึงสามารถใช้เครื่องมือทางสถิติ ได้แก่ Linear Regression Analysis สร้างเส้น Fitting Line ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นตัวแทนข้อมูลการสูญเสียในเส้นทาง ของสายอากาศแต่ละชนิด ในสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์ การสร้างแบบจำลองเชิงประจักษ์ และการหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficients) คำนวณได้จากสมการต่อไป [55]

$$PL_{EMP} = 10n \log_{10}(d) + \beta + \chi_{\sigma} \quad (4-2)$$

$$n = \frac{\sum_{i=1}^N (d_{m(i)} - \bar{d}_m) \cdot (PL_{m(i)} - \overline{PL}_m)}{\sum_{i=1}^N (d_{m(i)} - \bar{d}_m)^2} \quad (4-3)$$

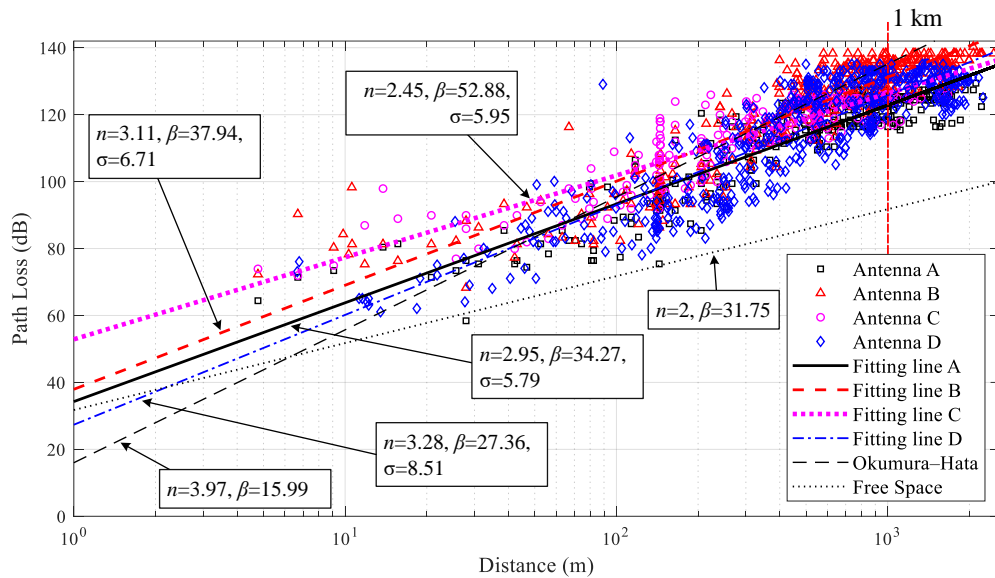
$$\beta = \overline{PL}_m - n \cdot (\bar{d}_m) \quad (4-4)$$

$$\sigma \text{ (dB)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (PL_{m(i)} - \overline{PL}_m)^2}{N - k}} \quad (4-5)$$

เมื่อ PL_{EMP} = ค่าการสูญเสียกำลังในเส้นทางของแบบจำลองเชิงประจักษ์ (dB)
 n = Path Loss Exponent (ไม่มีหน่วย)
 β = Path Loss Intercept (dB)
 d = ระยะทางระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ ที่ตำแหน่งใด ๆ (m)
 $d_{m(i)}$ = ผลการวัดระยะทางระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ ของตัวอย่างที่ i (m)
 \bar{d}_m = ค่าเฉลี่ยของระยะทางระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับที่ได้จากการวัด (m)
 $PL_{m(i)}$ = ค่าการสูญเสียกำลังในเส้นทางที่ได้จากการวัด ของตัวอย่างที่ i (dB)
 \overline{PL}_m = ค่าเฉลี่ยของการสูญเสียกำลังในเส้นทางที่ได้จากการวัด (dB)
 k = จำนวนตัวแปรทั้งหมดในแบบจำลอง มีค่าเท่ากับ 2 (ตัวแปร PL_{EMP} และ d)
 X_{σ} = ตัวแปรสุ่มของการกระจายแบบเกาส์เซียนที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ (Zero Mean Gaussian Random Variable) และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ในหน่วย dB ซึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานนี้ เป็นตัวบ่งชี้ถึงผลกระทบจากการถูกบัง (Shadowing Effect) เช่นเดียวกับแบบจำลอง Log-normal Shadowing ที่อธิบายในหัวข้อ 2.4.4.4

ตาราง 4-1 ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถดถอยของแบบจำลองเชิงประจักษ์

สายอากาศ	Path Loss Coefficient		
	n	β (dB)	σ (dB)
A (Proposed)	2.95	34.27	5.79
B	3.11	37.94	6.71
C	2.45	52.88	5.95
D	3.28	27.36	8.51



ภาพประกอบ 4-3 ผลการวัดค่าการสูญเสียในเส้นทางเปรียบเทียบแต่ละชนิดของสายอากาศที่ทดลอง

ตาราง 4-1 สรุปผลการคำนวณสัมประสิทธิ์ Regression Coefficients ของข้อมูลการสูญเสียในเส้นทาง ที่ได้จากการวัดด้วยสายอากาศ A, B, C และ D และนำมาสร้างเป็นเส้นที่เหมาะสมกับข้อมูล (Fitting line) ได้ดังภาพประกอบ 4-3 ได้แก่ Fitting line A, B, C และ D ตามลำดับ ซึ่งสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้นี้ มีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของสายอากาศ เนื่องจากคุณภาพของสัญญาณ และค่าการสูญเสียในเส้นทางที่ตรวจวัดได้ มีค่าขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของสายอากาศ ที่แตกต่างกัน เช่น แบบรูปการแผ่พลังงาน อัตราขยาย ความกว้างลำคลื่น เป็นต้น

ภาพประกอบ 4-3 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองเชิงประจักษ์ ของเส้น Fitting line ซึ่งเป็นตัวแทนของข้อมูลสายอากาศแต่ละชนิด ด้วยความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด (Least Squares Method) สามารถใช้แสดงแนวโน้มของข้อมูลที่มีการกระจายตัวได้ดี จากผลการคำนวณพบว่า Path Loss Exponent (PLE) ของ Fitting line D มีค่าสูงสุด เมื่อเทียบกับเส้น Fitting ทั้งหมดคือมีค่าเท่ากับ 3.28 ซึ่งใกล้เคียงกับ PLE ของเส้น Fitting line B ที่มีค่าเท่ากับ 3.11 ในขณะที่ Fitting line A และ C มีค่าเท่ากับ PLE เท่ากับ 2.95 และ 2.45 ตามลำดับ

Path Loss Exponent (PLE) คือ ขนาดเลขชี้กำลัง ของระยะทางระหว่างอุปกรณ์ End Device และเกตเวย์ ดังความสัมพันธ์ใน (2-50) หาก PLE มีค่าสูง จะหมายถึงสภาพแวดล้อมที่ทดสอบนั้น มีการสูญเสียกำลังสัญญาณ Path Loss ที่สูงตามไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบค่า PLE ที่ได้จากการคำนวณ ด้วยค่าทั่วไปของ PLE ในสภาพแวดล้อมเขตเมือง (Urban) มีค่าระหว่าง 2.7 ถึง 3.5 ดังตาราง 2-7 พบว่า ค่า PLE ของเส้น Fitting line A, B และ D มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของสภาพแวดล้อมเขตเมือง ในขณะที่ เส้น Fitting line C ค่า PLE ที่ได้จากการคำนวณ มีค่าต่ำกว่าค่าทั่วไป แสดงถึงการสูญเสียในเส้นทางที่ทำนายได้ มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ทั่วไป

Path Loss Intercept (PLI) ใช้เพื่อแสดงค่าการสูญเสียในเส้นทาง ที่ตำแหน่งระยะทางอ้างอิงใด ๆ นิยมใช้ระยะอ้างอิง เท่ากับ 1 m เพื่อแสดงถึงจุดตัดแกน y ของภาพประกอบ 4-3 จากผลการคำนวณ พบว่า Fitting line A และ B มีค่า PLI ใกล้เคียงกันที่ 32.27 และ 37.94 dB Fitting line C มีค่า PLI ที่ระดับสูง เท่ากับ 52.88 dB ในขณะที่ Fitting line D มีค่า PLI ที่ระดับต่ำ เท่ากับ 27.36 dB โดยเปรียบเทียบจาก PLI ในทางทฤษฎี ซึ่งสามารถใช้ค่าการสูญเสียในเส้นทาง ของแบบจำลองการสูญเสีย Free Space ที่ระยะทางอ้างอิงเดียวกัน คำนวณได้จาก (2-47) ซึ่งจะได้ค่า PLI เท่ากับ 31.75 dB ซึ่งใกล้เคียงกับ PLI ของเส้น Fitting line A มากที่สุด ดังภาพประกอบ 4-3

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) ใช้แสดงความแปรปรวนของการลดทอนสัญญาณ เนื่องจากการบดบังแนวเส้นทางการส่งสัญญาณของวัตถุใด ๆ ในสภาพแวดล้อม เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Shadow fading จากผลการคำนวณ แสดงให้เห็นว่า Fitting line A, B และ C มีค่า SD เท่ากับ 5.79, 6.71 และ 5.95 dB ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า SD ทั่วไปในสภาพแวดล้อมเขตเมืองที่ 8 dB ดังตาราง 2-8 ซึ่งค่า SD ที่ระดับต่ำนี้ เนื่องจากสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์ มีลักษณะเส้นทางการสื่อสารส่วนใหญ่ เป็นเส้นตรงตามแนวถนน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ตรวจวัดได้ จึงน้อยกว่ามาตรฐานทั่วไป ของพื้นที่เขตเมือง ในขณะที่ Fitting line D มีค่า SD สูงกว่าค่าทั่วไป คือ มีค่าเท่ากับ 8.51 dB อาจมีสาเหตุมาจากการไม่แมตช์ของโพลาริเซชัน แบบวงกลม และแบบเชิงเส้น จึงทำให้กำลังงานของสัญญาณที่ฝั่งรับ เกิดการแกว่งแบบสุ่ม ด้วยความเข้มที่สูง ดังนั้น จากการทดสอบตรวจวัดสัญญาณในครั้งนี้ พบว่าเส้น Fitting line A มีค่า SD น้อยที่สุดจาก แสดงให้เห็นถึง สมรรถนะการใช้งานของสายอากาศไมโครสตริป มีเส้นทางการสื่อสารที่มีคุณภาพ มีการแกว่งของสัญญาณฝั่งรับ รอบเส้น Fitting line ต่ำกว่าการใช้งานสายอากาศชนิดอื่น ที่นำมาทดสอบเปรียบเทียบ

นอกจากนี้ ภาพประกอบ 4-3 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองของเส้น Fitting lines ที่สร้างขึ้นใหม่ กับแบบจำลองการสูญเสียแบบดั้งเดิม ได้แก่ 1) แบบจำลองการสูญเสียของ Okumura-Hata ดังหัวข้อที่ 2.4.4.5 เป็นแบบจำลองที่นิยมนำมาใช้วิเคราะห์ เครือข่ายการสื่อสารขนาดใหญ่ ในพื้นที่เขตเมือง และ 2) แบบจำลองการสูญเสีย Free Space ดังหัวข้อ 2.4.4.1 นิยมใช้สำหรับการอ้างอิง การสูญเสียในเส้นทางขั้นต่ำของระบบการสื่อสารแบบไร้สาย ผลการเปรียบเทียบ แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองของ Okumura-Hata มีค่า PLE เท่ากับ 3.97 จากตาราง 4-2 ซึ่งมีค่ามากกว่า ทุกแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบ และมีค่า PLI ต่ำที่สุด เท่ากับ 15.99 dB ซึ่งยังไม่สอดคล้องกับผลการวัดค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมจริง ของข้อมูลที่มาจกสายอากาศแต่ละชนิด ในขณะที่ แบบจำลองการสูญเสีย Free Space แสดงลักษณะเป็นเส้นฐาน (Baseline) ของข้อมูลการสูญเสียที่ได้จากการวัดจริงทุกสายอากาศ จากตาราง 4-2 มีค่า PLE เท่ากับ 2 และ PLI เท่ากับ 31.75 dB ซึ่งไม่มีความสอดคล้องกับผลการวัดจริง ในสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์

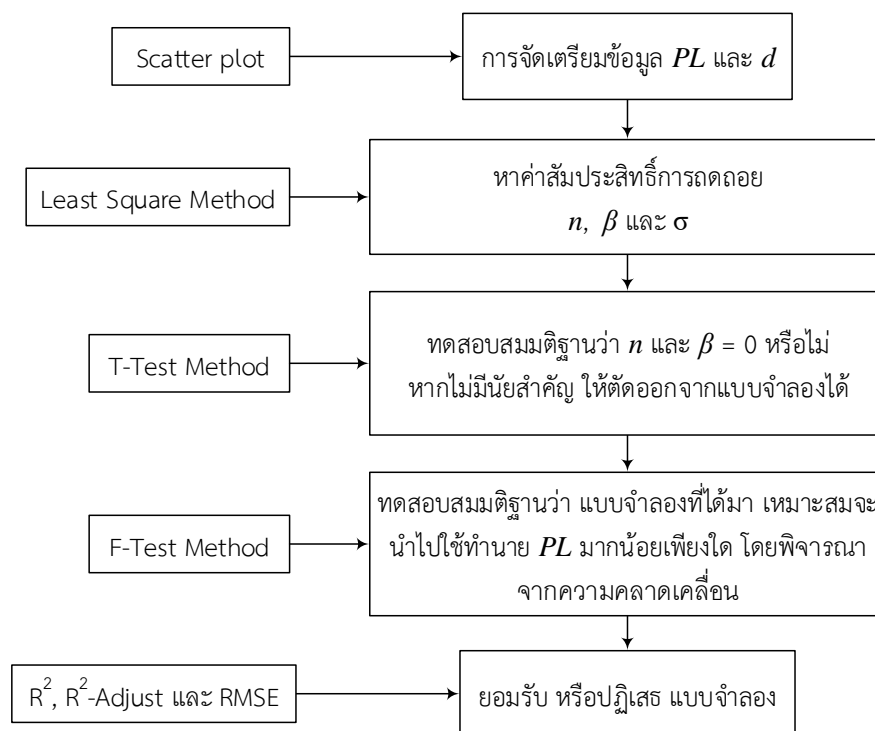
สำหรับแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเส้น Fitting line ที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ทั้ง 4 แบบจำลองนี้ ยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้ทันที จำเป็นต้องทำการทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ (Statistical Significance) เพื่อยืนยันว่าแบบจำลองนี้ มีความถูกต้อง เหมาะสมกับการนำมาใช้งาน มากน้อยเพียงใด โดยรายละเอียดการทดสอบนัยสำคัญ อธิบายในหัวข้อถัดไป

ตาราง 4-2 สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางแบบดั้งเดิม

แบบจำลอง	n	β (dB)	σ (dB)
Okumura-Hata	3.97	15.99	NA
Free space	2	31.75	NA

4.3 การทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ

การทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ (Statistical Significance Test) ของแบบจำลองที่ถูกออกแบบด้วย Linear Regression Analysis ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล อธิบายได้ดังภาพประกอบ 4-4 แสดงเครื่องมือทางสถิติ ที่เหมาะสมในการนำมาใช้ทดสอบ ได้แก่ 1) T-test คือ การตรวจสอบว่าค่าคงที่ หรือสัมประสิทธิ์การถดถอยที่หามานั้น มีนัยสำคัญต่อแบบจำลองที่สร้างหรือไม่ หากไม่สามารถตัดค่าคงที่นั้นออกไปได้; 2) F-test คือ การพิสูจน์ทราบว่าเป็นแบบจำลองที่ออกแบบนั้น มีความคลาดเคลื่อนในการทำนายค่าการสูญเสียในเส้นทาง (PL) ในระดับที่สามารถยอมรับได้หรือไม่; 3) ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination) หรือ R-squared (R^2) ใช้บอกความสัมพันธ์ของข้อมูล PL ที่ทำนายกับข้อมูล PL ที่ได้จากการวัดว่ามีความสัมพันธ์ไปในทิศทางไปในแนวทางเดียวกันหรือไม่ และ 4) Adjusted- R^2 คือ การทดสอบเพื่อยืนยันว่าขนาดของตัวอย่างที่เก็บข้อมูลมานั้น มีปริมาณมากเพียงพอสำหรับการใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือไม่ [7], [55]



ภาพประกอบ 4-4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการถดถอยเชิงเส้น

ตาราง 4-3 สรุปผล Regression Statistics เปรียบเทียบชนิดของสายอากาศที่ทดลอง

Regression Statistics	สายอากาศ A	สายอากาศ B	สายอากาศ C	สายอากาศ D
Multiple-R	0.92	0.91	0.89	0.88
R-Square	0.84	0.84	0.79	0.77
Adjusted R-Square	0.84	0.84	0.79	0.77
Standard Error	5.79	6.71	5.95	8.51
Observations	388	415	208	535

ตาราง 4-4 การวิเคราะห์ ANOVA เปรียบเทียบชนิดของสายอากาศที่ทดลอง

สายอากาศ	ANOVA	df	SS	MS	F	P-value
A	Regression	1	68100.67	68100.67	2032.19	0.00
	Residual	386	12935.25	33.51	NA	NA
	Total	387	81035.92	NA	NA	NA
B	Regression	1	94577.78	94577.78	2098.69	0.00
	Residual	413	18611.95	45.07	NA	NA
	Total	414	113189.73	NA	NA	NA
C	Regression	1	27466.61	27466.61	774.99	0.00
	Residual	206	7300.88	35.44	NA	NA
	Total	207	34767.50	NA	NA	NA
D	Regression	1	130746.22	130746.22	1805.44	0.00
	Residual	533	38598.78	72.42	NA	NA
	Total	534	169345.00	NA	NA	NA

ตาราง 4-5 สรุปผลการหา T-statistic และ P-value ของข้อมูลแต่ละสายอากาศที่ทดสอบ

สายอากาศ	Parameter	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
A	PLI	34.27	1.80	19.05	0.00	30.74	37.81
	PLE	2.95	0.07	45.08	0.00	2.82	3.08
B	PLI	37.94	1.87	20.27	0.00	34.26	41.62
	PLE	3.11	0.07	45.81	0.00	2.98	3.24
C	PLI	52.88	2.19	24.13	0.00	48.56	57.20
	PLE	2.45	0.09	27.84	0.00	2.28	2.62
D	PLI	27.36	2.08	13.16	0.00	23.28	31.44
	PLE	3.28	0.08	42.49	0.00	3.13	3.43

จากตาราง 4-3 ถึง ตาราง 4-5 สรุปผลการทดสอบนัยสำคัญทางสถิติของแบบจำลอง Fitting line A, B, C และ D เมื่อกำหนดระดับนัยสำคัญ (Significance level) เท่ากับ 0.05 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) ผลการวิเคราะห์ข้อมูล สามารถสรุปได้ดังนี้

1) การทดสอบ T-Test พิจารณาจากค่า P-value ในตาราง 4-5 พบว่า มีค่าน้อยกว่า ค่านัยสำคัญ 0.05 ทั้งสัมประสิทธิ์ PLE และ PLI ในทุกชนิดสายอากาศ สามารถสรุปได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ของเส้น Fitting line A ถึง D เป็นค่าที่มีนัยสำคัญ ต่อแบบจำลองที่สร้างขึ้น ไม่สามารถตัดค่าสัมประสิทธิ์ใดออกได้

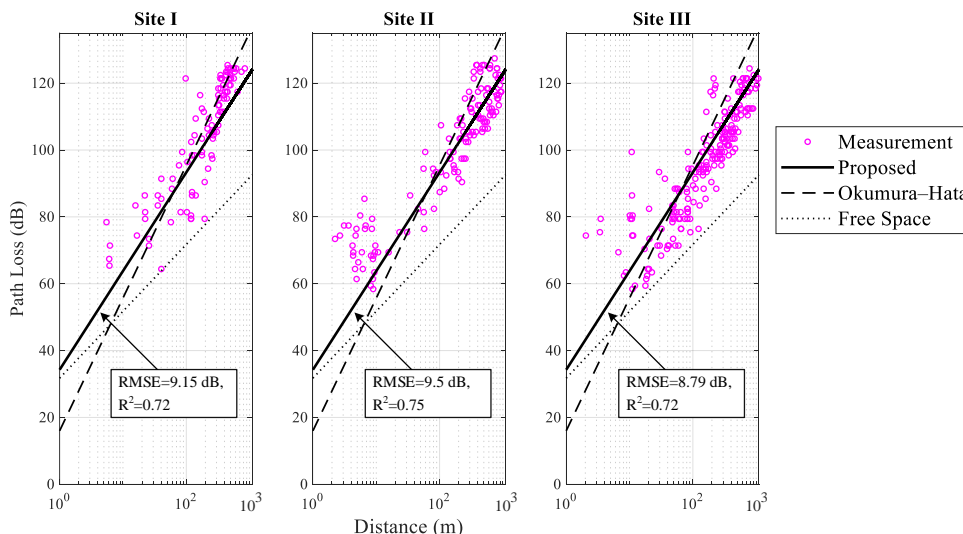
2) การทดสอบ F-Test พิจารณาจากค่า P-value ในตาราง 4-4 พบว่า ค่าน้อยกว่า ค่านัยสำคัญ 0.05 ในทุกชนิดสายอากาศ และเมื่อพิจารณาตามลำดับขั้นตอนในภาพประกอบ 4-4 สามารถสรุปได้ว่า ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการทำนายค่าการสูญเสียในเส้นทาง (*PL*) ของแต่ละแบบจำลอง มีความคลาดเคลื่อนต่ำ อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ หรือหมายถึงแบบจำลองนั้น มีความแม่นยำมากพอ ที่จะนำไปใช้งานจริง สำหรับการทำนายการสูญเสียในเส้นทาง ของแต่ละแบบจำลอง

3) การทดสอบค่า R-squared ในตาราง 4-5 แสดงผลการหาค่า R-squared ของแบบจำลอง Fitting line A, B, C และ D มีค่าเท่ากับ 0.84, 0.84, 0.79 และ 0.77 ตามลำดับ โดยทั่วไปค่า R-squared ที่อยู่ในเกณฑ์ดี นิยมพิจารณาที่มีค่ามากกว่า 0.8 ขึ้นไป [7], [55] ซึ่งหมายถึง ข้อมูล *PL* ที่ได้จากการวัดจริง มีการกระจายตัวน้อยมารอบ ๆ เส้น Fitting line ของแต่ละแบบจำลอง ดังภาพประกอบ 4-3

4) การทดสอบ Adjusted-R² คือ การทดสอบเพื่อยืนยันว่าค่า R-squared ที่หามา นั้น มีความเหมาะสมกับจำนวนของตัวอย่าง ที่เก็บข้อมูลมาหรือไม่ โดยทำการลดจำนวนตัวอย่างข้อมูล (Samples) ลงไป 1 ตัวอย่าง แล้วคำนวณหาค่า R-squared ใหม่อีกครั้ง สรุปดังตาราง 4-3 แสดงให้เห็นว่า Adjusted-R² ที่คำนวณใหม่ และ R-squared ก่อนการลดตัวอย่างข้อมูล มีค่าไม่แตกต่างกันทั้ง 4 แบบจำลอง ได้แก่ 0.84, 0.84, 0.79 และ 0.77 สำหรับเส้น Fitting line A, B, C และ D ตามลำดับ ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า จำนวนของตัวอย่างข้อมูล *PL* ที่ได้จากการวัดจริง ของแต่ละสายอากาศ มีจำนวนมากเพียงพอ สำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการทำนายการสูญเสียในเส้นทาง

ดังนั้น จากผลการทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ ด้วย 4 เครื่องมือที่กล่าวมา สามารถยืนยันได้ว่า แบบจำลอง Fitting line A, B, C และ D เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำนายการสูญเสียในเส้นทางได้จริงทั้งหมด ด้วยระดับความคลาดเคลื่อนที่ต่ำ ในสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์ บนเครือข่ายลอว์แวน ทำงานที่ความถี่ 920-925 MHz

อย่างไรก็ดี ในวิทยานิพนธ์นี้ ต้องการพิสูจน์ความถูกต้องของ แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางที่สร้างขึ้นใหม่ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ได้จากการใช้งาน สายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ (สายอากาศ A) ดังนั้น ในหัวข้อถัดไป ได้สรุปผลการทดลอง การใช้งานแบบจำลองการสูญเสียที่นำเสนอ (Fitting line A) เพื่อทำนายค่า *PL* ที่เกิดขึ้นในสถานที่อื่น ๆ ซึ่งมีสภาพแวดล้อมใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมของระบบสมาร์ตมิเตอร์ ที่ใช้ทดลองเก็บข้อมูล โดยตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง ด้วยการเปรียบเทียบ Prediction Error ระหว่างข้อมูลที่ตรวจวัดจริง กับผลการทำนาย



ภาพประกอบ 4-5 การทดสอบใช้งานจริงของแบบจำลองการสูญเสียที่นำเสนอ

4.4 การทดสอบใช้งานแบบจำลองที่นำเสนอ

การพิสูจน์ความถูกต้องแม่นยำ ของแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางที่นำเสนอ (Proposed model) ซึ่งถูกออกแบบสำหรับใช้งานร่วมกับสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ ในสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์ ทำได้โดยทดลองตรวจวัดคุณภาพสัญญาณ เพื่อหาการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss) ในสถานที่ทดสอบอื่น ที่มีลักษณะตรงกับสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์

การพิจารณากำหนดพื้นที่การทดสอบ เลือกจากพื้นที่แหล่งชุมชน ในเขตเทศบาล เมืองนราธิวาส จำนวน 3 แหล่งชุมชน ได้แก่ 1) ชุมชน ณ นคร กำหนดให้เป็น Site I ติดตั้งเกตเวย์ที่พิกัดตำแหน่งละติจูด 6.412402 ลองจิจูด 101.816947; 2) ชุมชนละม้ายอุทิศ กำหนดให้เป็น Site II ติดตั้งเกตเวย์ที่พิกัดตำแหน่งละติจูด 6.426752 ลองจิจูด 101.811783 และ 3) ชุมชนสี่แยกตากใบ กำหนดให้เป็น Site III ติดตั้งเกตเวย์ที่พิกัดตำแหน่งละติจูด 6.423585 ลองจิจูด 101.824926 ด้วยความสูง 6.2 m เท่ากันหมดทั้งสามพื้นที่ ติดตั้งอุปกรณ์เครือข่ายลอร์ราแวน ด้วยการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตาราง 3-6 เพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขเดียวกับแบบจำลองที่นำเสนอ

ผลการวัดการสูญเสียค่าการสูญเสียในเส้นทาง ของแต่ละพื้นที่ทดสอบ แสดงด้วยกราฟการกระจายการกระจาย ดังภาพประกอบ 4-5 เปรียบเทียบค่า PL ที่ได้จากการวัดจริงกับ PL ที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองที่นำเสนอ (Proposed model) และแบบจำลองการสูญเสียแบบดั้งเดิม ได้แก่ แบบจำลองของ Okumura-Hata และแบบจำลอง Free space เพื่อใช้ในการอ้างอิงความแม่นยำการทำนาย PL ของแบบจำลองที่นำเสนอ จากการสังเกต พบว่า ผลการทำนาย PL ของแบบจำลองที่นำเสนอ มีความเหมาะสม (Fitting) กับข้อมูลผลการวัดจริง มากกว่าแบบจำลอง Free space อย่างชัดเจน ในพื้นที่ทดสอบทั้ง 3 Sites ในขณะที่ แบบจำลองของ Okumura-Hata แสดงแนวโน้มในทิศทาง ที่ใกล้เคียงกับผลการวัด PL จริง เช่นเดียวกับแบบจำลองการสูญเสียที่นำเสนอ จึงไม่สามารถแยกแยะได้ด้วยการสังเกต โดยจะต้องใช้เครื่องมือทางสถิติ เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำ ได้แก่ Root Mean Square Error (RMSE) และ R-squared ดังสมการต่อไปนี้ [55]

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (PL_{m(i)} - PL_{p(i)})^2}{N}} \quad (4-6)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (PL_{m(i)} - PL_{p(i)})^2}{\sum_{i=1}^N (PL_{m(i)} - \overline{PL_m})^2} \quad (4-7)$$

เมื่อ $RMSE$ = Root Mean Square Error (dB)

R^2 = ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination)

SSE = Sum of Squares Error

SST = Total corrected sum of squares

$PL_{m(i)}$ = ค่าการสูญเสียกำลังในเส้นทางที่ได้จากการวัด ของตัวอย่างที่ i (dB)

$\overline{PL_m}$ = ค่าเฉลี่ยของการสูญเสียกำลังในเส้นทางที่ได้จากการวัด (dB)

N = จำนวนของข้อมูลตัวอย่าง

การวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางที่นำเสนอ พิจารณาได้จากค่าความคลาดเคลื่อน ในการทำนายผลลัพธ์ (Prediction Errors) เพื่อบอกขนาดความคลาดเคลื่อนในการทำนาย PL ของแต่ละแบบจำลอง ด้วยการใช้เครื่องมือทางสถิติ ได้แก่ R-squared ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้า และเครื่องมือบอกระดับของความคลาดเคลื่อน Root Mean Square Error (RMSE) คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาด ของผลการทำนาย ซึ่งให้ผลลัพธ์ในหน่วยเดียวกับข้อมูล จึงง่ายต่อการตีความผลลัพธ์ที่ได้ ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำของแต่ละแบบจำลอง สรุปได้ดังตาราง 4-6 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่นำเสนอ มีความแม่นยำในการทำนาย PL มากกว่า แบบจำลองของ Okumura-Hata และแบบจำลอง Free space ในสภาพ แวดล้อมจริงของ Site I, II และ III ที่มีลักษณะคล้ายกับสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์ที่ทดสอบเก็บข้อมูล โดยแบบจำลองการสูญเสียที่นำเสนอ มีขนาดความคลาดเคลื่อน RMSE เท่ากับ 9.15, 9.5 และ 8.79 dB ในพื้นที่ Site I, II และ III ตามลำดับ และมีค่า R-squared เท่ากับ 0.72, 0.75 และ 0.72 ตามลำดับ ซึ่งค่าเหล่านี้ มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองของ Okumura-Hata และแบบจำลอง Free space ในทุกพื้นที่การทดสอบ เมื่อประเมินด้วย RMSE และ R-squared

ตาราง 4-6 แสดงผลการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน ในการทำนายข้อมูลการสูญเสียในเส้นทาง ของพื้นที่ทดสอบทั้ง 3 สถานที่ พบว่า แบบจำลองการสูญเสียที่นำเสนอ (Proposed model) มีค่า RMSE ต่ำที่สุด ในทุกพื้นที่การทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ ค่า R-squared ของแบบจำลองที่นำเสนอ มีค่าสูงที่สุด ในทุกพื้นที่การทดสอบ จากผลการทดลองนี้ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพ การทำนายผล ของแบบจำลองการสูญเสียที่นำเสนอ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้จริง ในสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์ ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้

ตาราง 4-6 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง

พื้นที่ทดสอบ (Site)	แบบจำลองการสูญเสีย	RMSE (dB)	R-squared
I	Proposed	9.15	0.72
	Okumura-Hata	10.19	0.65
	Free space	27.32	-1.52
II	Proposed	9.50	0.75
	Okumura-Hata	15.45	0.35
	Free space	24.73	-0.67
III	Proposed	8.79	0.72
	Okumura-Hata	14.15	0.27
	Free space	20.82	-0.59

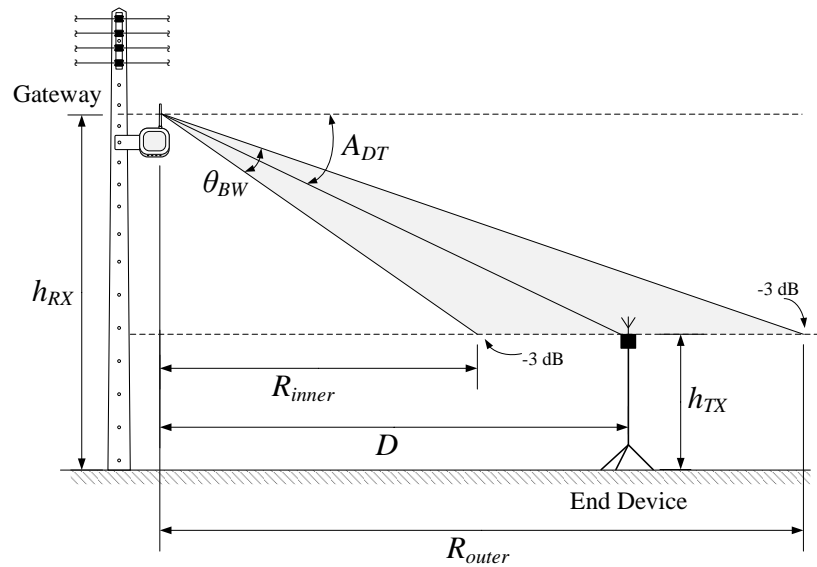
จากภาพประกอบ 4-5 แสดงความคลาดเคลื่อนของผลการทำนายการสูญเสียในเส้นทาง จะมีค่าสูงในช่วงต้นของระยะทางการสื่อสาร ระหว่างเครื่องส่งกับเกตเวย์ ในทุก ๆ พื้นที่การทดสอบ สาเหตุเกิดจากทิศทางและความเข้มของลำคลื่น (Beamwidth) หรือแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) ของสายอากาศโมโนโพล ซึ่งถูกติดตั้งสูงบนเสาไฟฟ้า ซึ่งมีความเข้มต่ำ บริเวณใต้สายอากาศ ดังนั้น เมื่อเครื่องส่งอยู่ใกล้กับเกตเวย์ ความเข้มสัญญาณ RSSI จึงมีค่าต่ำ ส่งผลให้การสูญเสียในเส้นทาง (PL) มีค่าสูงในบริเวณนี้ ซึ่งอธิบายได้จากภาพประกอบ 4-6 และสมการต่อไปนี้

$$A_{DT} = \tan^{-1}\left(\frac{h_{TX} - h_{RX}}{D}\right) \quad (4-8)$$

$$R_{outer} = \frac{h_{TX} - h_{RX}}{\tan\left(A_{DT} - \frac{\theta_{BW}}{2}\right)} \quad (4-9)$$

$$R_{inner} = \frac{h_{TX} - h_{RX}}{\tan\left(A_{DT} + \frac{\theta_{BW}}{2}\right)} \quad (4-10)$$

- เมื่อ
- A_{DT} = มุม Downtilt ของสายอากาศ (องศา)
 - h_{TX} = ความสูงเครื่องส่ง (เมตร)
 - h_{RX} = ความสูงเครื่องรับ (เมตร)
 - D = ระยะห่างระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง (เมตร)
 - R_{outer} = รัศมีด้านนอกของพื้นที่ครอบคลุมการส่งสัญญาณ (เมตร)
 - R_{inner} = รัศมีด้านในของพื้นที่ครอบคลุมการส่งสัญญาณ (เมตร)
 - θ_{BW} = มุมความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง หรือ **HPBW** (องศา)



ภาพประกอบ 4-6 การวิเคราะห์ Downtilt และ Coverage ของระบบการสื่อสาร

จากภาพประกอบ 4-6 พิจารณาพารามิเตอร์การติดตั้งอุปกรณ์เครือข่ายลอร์ราแวน ในหัวข้อ 3.4 จะได้ว่า h_{RX} เท่ากับ 6.2 m, h_{TX} เท่ากับ 2 m, A_{DT} เท่ากับ 0 องศา และ θ_{BW} ของสายอากาศโมโนโพลทางทฤษฎี เท่ากับ 45 องศา ผลการคำนวณด้วย (4-8) ถึง (4-10) พบว่า 1) ระยะ D มีค่าเท่ากับอนันต์ เนื่องจากไม่มีการ Downtilt ของสายอากาศ; 2) รัศมี R_{outer} มีค่าติดลบ ไม่สามารถบอกระยะทางสิ้นสุดได้ และ 3) รัศมี R_{inner} มีค่าเท่ากับ 10.6 m ซึ่งเป็นระยะของลำคลื่นหลักหรือ HPBW ที่สายอากาศมีความเข้มการแผ่พลังงานสูง ดังนั้น ผลการวัดการสูญเสียในเส้นทางในภาพประกอบ 4-5 จะมีค่าคลาดเคลื่อนไปจากผลการทำนาย PL ของแบบจำลองที่นำเสนอ ในช่วงระยะทาง 0 m จนถึงระยะ R_{inner} ที่ระยะประมาณ 10.6 m จากนั้น ค่าการสูญเสียในเส้นทางที่วัดได้ จะเริ่มมีค่าใกล้เคียงกับผลการทำนายด้วยแบบจำลองที่นำเสนอ ในทุก ๆ พื้นที่ทดสอบ ในทางปฏิบัติสามารถติดตั้งสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ ให้มีมุมเอียงขึ้น (Tilt Up) ขึ้นไปยังตำแหน่งของเกตเวย์ เพื่อเพิ่มความเข้มของคลื่นสัญญาณ บรรเทาปัญหาที่เกิดจากแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศชนิดไดโพล หรือโมโนโพล ในบริเวณใต้สายอากาศลงได้

4.5 สรุปท้ายบท

ในบทนี้ได้อภิปรายผลการทดลอง วิเคราะห์ และเปรียบเทียบ การตรวจวัดสัญญาณลอร์รา ในสภาพแวดล้อมที่ใช้งานจริง ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของสายอากาศพบว่า สายอากาศไมโครสตริปที่ออกแบบในบทที่ 3 สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในสภาพแวดล้อมที่กำหนด และสามารถสร้างแบบจำลองการสูญเสีย จากสายอากาศดังกล่าว สำหรับใช้งานในสภาพแวดล้อมของสมาร์ตมิเตอร์ ในพื้นที่เขตเมือง ของประเทศไทย ในบทถัดไป ทำการสรุปผลงานวิจัย ปัญหาและอุปสรรคที่พบระหว่างการทำวิจัย และเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาต่อยอดงานวิจัยในอนาคต

บทที่ 5 บทสรุป

หลังจากที่ได้ทำการศึกษาและออกแบบระบบการวัดค่าการวัดค่าการสูญเสีย และสร้างแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางขึ้นมาใหม่ พร้อมทั้งทดสอบ ประเมินผลความแม่นยำของแบบจำลองด้วยหลักสถิติ ดึงนำเสนอในบทที่ 3 และ 4 สำหรับบทที่ 5 นี้ จะกล่าวถึงบทสรุปของการวิจัย ปัญหาและอุปสรรคที่พบตลอดงานวิจัย พร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาต่อไป รายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบทิศทางเดียว สำหรับใช้งานที่ความถี่ 920-925 MHz ผ่านเทคโนโลยีการสื่อสารลอร์ราแวน ที่ประยุกต์ใช้งานกับสมาร์ตมิเตอร์ ซึ่งติดตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมเขตเมือง (Urban Area) ของประเทศไทย จากผลการตรวจวัดคุณภาพสัญญาณ สามารถสร้างแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss Model) ขึ้นมาใหม่ สำหรับใช้งานในสภาพแวดล้อมของระบบสมาร์ตมิเตอร์ ด้วยวิธีการเชิงประจักษ์ (Empirical Method) และใช้การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ด้วยการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ สำหรับใช้ทำนายการสูญเสีย Path Loss ในสภาพแวดล้อมที่กำหนด

จากผลการทดลอง สายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ พิสัยการส่งสัญญาณไกลสุด 2.2 km มีอัตราการส่งชุดข้อมูลสำเร็จ (PDR) เฉลี่ยเท่ากับ 60.06% ที่ระยะทาง 0 ถึง 2.2 km ซึ่งผลการทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารนี้ แสดงให้เห็นว่า สายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ มีสมรรถนะใกล้เคียงกับสายอากาศเชิงพาณิชย์ที่นำมาเปรียบเทียบ ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน ทั้งนี้ การสร้างต้นแบบสายอากาศไมโครสตริป มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า สายอากาศเชิงพาณิชย์ที่นำมาทดสอบ นอกจากนี้ ขนาดโครงสร้างของสายอากาศ เป็นปัจจัยที่ถูกนำมาพิจารณา เนื่องจากสายอากาศจำเป็นต้องติดตั้งบนเสาไฟฟ้า สำหรับใช้งานกับสมาร์ตมิเตอร์ ซึ่งมีพื้นที่การติดตั้งจำกัด สายอากาศไมโครสตริปที่มีโครงสร้างบาง น้ำหนักเบา จึงมีความเหมาะสมกับการใช้งานในพื้นที่ลักษณะดังกล่าว

แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางที่ออกแบบใหม่ จากการใช้งานสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ มีความแม่นยำในการทำนายการสูญเสีย Path Loss มากกว่าแบบจำลองการสูญเสียแบบดั้งเดิม ได้แก่ แบบจำลองของ Okumura-Hata และแบบจำลอง Free space จากการประเมินความคลาดเคลื่อน RMSE และค่า R-squared นอกจากนี้ จากผลการนำแบบจำลองที่นำเสนอไปใช้งานจริง ในสถานที่อื่น ๆ สามารถยืนยันความแม่นยำของแบบจำลองการสูญเสียที่นำเสนอได้ ดังนั้น การใช้งานแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางที่มีความแม่นยำ และเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมนี้ มีประโยชน์อย่างมากในการวางแผน การออกแบบระบบการสื่อสารของสมาร์ตมิเตอร์ และใช้พิจารณาหาตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ลอร์ราแวน เพื่อเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมการสื่อสารเครือข่ายลอร์ราแวน ในพื้นที่เขตเมือง ของประเทศไทย

5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

- 5.2.1 สายอากาศไมโครสตริปแพตช์รูปสี่เหลี่ยมมีประสิทธิภาพต่ำ ส่งผลให้อัตราขยายจริงของสายอากาศ มีค่าต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศเชิงพาณิชย์ที่ทดสอบ การแก้ไขอาจพิจารณาใช้เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น การเพิ่มความสูงชั้นฐานรอง หรือเพิ่มชั้นของช่องว่างอากาศ ในการเพิ่มประสิทธิภาพและอัตราขยายให้สูงขึ้น
- 5.2.2 ความสูงในการติดตั้งเกตเวย์ถูกจำกัดอยู่ที่แนวสายไฟฟ้าแรงต่ำ เนื่องจาก ในการวิจัยครั้งนี้ ใช้วิธีป็นเสาไฟฟ้าขึ้นไปติดตั้งอุปกรณ์เกตเวย์ ซึ่งไม่สามารถผ่านแนวสายไฟดังกล่าวได้ การแก้ไขปัญญ อาจใช้รถกระเช้าแก่กระแสไฟฟ้าขัดข้อง ซึ่งจะมีความปลอดภัยมากกว่า โดยที่ความสูงที่ปลายยอดเสาไฟฟ้า สูงประมาณ 12 ถึง 15 เมตร ซึ่งเป็นระดับที่สูงกว่าหลังคาบ้านเรือนโดยทั่วไป
- 5.2.3 การเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตของตัวอุปกรณ์เกตเวย์ มีข้อจำกัดคือ ต้องเชื่อมต่อผ่านพอร์ต Ethernet เท่านั้น จึงเกิดความไม่สะดวกในการใช้งานนอกสถานที่ ปัญหานี้ ผู้วิจัยแก้ไข โดยให้คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก เปิดการแชร์อินเทอร์เน็ตผ่าน Ethernet เชื่อมต่อผ่านสายไปยังเกตเวย์ จึงสามารถใช้งานได้ อย่งไรก็ดี ปัจจุบันอุปกรณ์เกตเวย์ ได้พัฒนาให้สามารถเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตได้หลายวิธีมากขึ้น เช่น ใช้โมดูล 4G LTE, WiFi หรือ Power on Ethernet (PoE) เป็นต้น

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาต่อไป

สำหรับงานวิจัยนี้ กำหนดสภาพแวดล้อมในการตรวจวัดสัญญาณ เฉพาะพื้นที่เขตเมือง เนื่องจากสามารถรองรับสมาร์ตมิเตอร์จำนวนมาก ที่จะถูกติดตั้งใช้งานจริงในอนาคต อย่งไรก็ดี การสร้างแบบจำลองการสูญเสีย ที่สามารถครอบคลุมลักษณะพื้นที่ได้หลากหลาย จะมีความยืดหยุ่นในการใช้งานมากขึ้น เช่น รองรับพื้นที่เขตชานเมือง พื้นที่นอกเมือง หรือพื้นที่ของสมาร์ตฟาร์ม สำหรับเครือข่ายไอโอที เป็นต้น นอกจากนี้ อาจปรับปรุงแบบจำลอง ให้สามารถปรับเปลี่ยน หรือพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ เพิ่มเติม เช่น ความสูงของสายอากาศเครื่องส่งและเครื่องรับ, ความถี่ที่ใช้งานตามมาตรฐานอื่น ๆ ของลอว์แวน และกำลังการส่งสัญญาณ เป็นต้น

บรรณานุกรม

- [1] Q. Sun, H. Li, Z. Ma, C. Wang, J. Campillo, Q. Zhang, *et al.*, "A Comprehensive Review of Smart Energy Meters in Intelligent Energy Networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, pp. 464-479, 2016.
- [2] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne, "Understanding the limits of LoRaWAN," *IEEE Communications magazine*, vol. 55, pp. 34-40, 2017.
- [3] E. Anderson, G. Yee, C. Phillips, D. Sicker, and D. Grunwald, "The impact of directional antenna models on simulation accuracy," in *2009 7th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks*, 2009, pp. 1-7.
- [4] M. Umehira and R. Matsuoka, "Capacity improvement of high density wireless LAN networks using adaptive directional antenna," in *2009 Second International Workshop on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management*, 2009, pp. 40-44.
- [5] V. Bankey and N. A. Kumar, "Design and performance issues of Microstrip Antennas," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 6, pp. 1572-1580, 2015.
- [6] V. Abhayawardhana, I. Wassell, D. Crosby, M. Sellars, and M. Brown, "Comparison of empirical propagation path loss models for fixed wireless access systems," in *2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference*, 2005, pp. 73-77.
- [7] M. Cheffena and M. Mohamed, "Empirical Path Loss Models for Wireless Sensor Network Deployment in Snowy Environments," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, pp. 1-1, 2017.
- [8] G. Wibisono, S. G. Permata, A. Awaludin, and P. Suhasfan, "Development of advanced metering infrastructure based on LoRa WAN in PLN Bali toward Bali Eco smart grid," in *2017 Saudi Arabia Smart Grid (SASG)*, 2017, pp. 1-4.
- [9] N. Varsier and J. Schwoerer, "Capacity limits of LoRaWAN technology for smart metering applications," in *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2017, pp. 1-6.
- [10] M. Rademacher and K. Jonas, "Interference of simulated IEEE 802.11 links with directional antennas," in *2017 Wireless Days*, 2017, pp. 27-32.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] A. Alami, S. D. Bennani, M. Bekkali, and A. Benbassou, "Design, analysis and optimization of a microstrip patch antenna at frequency 3.55 GHz for WiMAX application," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 53, 2013.
- [12] P. K. Sharma and R. Singh, "Comparative analysis of propagation path loss models with field measured data," *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 2, pp. 2008-2013, 2010.
- [13] N. Elfadil, "Impact of Using Modified Open Area Okumura-Hata Propagation Model in Determination of Path-loss: Malaysia as Case Study," *International Journal of Modern Engineering Research*, vol. 7, pp. 1-6, 2017.
- [14] S. I. Popoola, A. A. Atayero, N. Faruk, C. T. Calafate, E. Adetiba, and V. O. Matthews, "Calibrating the standard path loss model for urban environments using field measurements and geospatial data," 2017.
- [15] J. Petajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen, and M. Pettissalo, "On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology," in *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, 2015, pp. 55-59.
- [16] R. M. Seye, B. Ngom, B. Gueye, and M. Diallo, "A Study of LoRa Coverage: Range Evaluation and Channel Attenuation Model," presented at the 2018 1st International Conference on Smart Cities and Communities (SCCIC), 2018.
- [17] P. Jörke, S. Böcker, F. Liedmann, and C. Wietfeld, "Urban channel models for smart city IoT-networks based on empirical measurements of LoRa-links at 433 and 868 MHz," in *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2017, pp. 1-6.
- [18] G. Tong, X. Liu, X. Li, G. Sun, J. Mu, and L. Liu, "Research on Three-Phase Electronic Multifunctional Energy Meter," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, p. 042098.
- [19] *LoRaWAN™ 1.0.2 Regional Parameters*, LoRa Alliance, 2017.
- [20] S. Corporation. (2013). *SX1272/3/6/7/8: LoRa Modem Designer's Guide AN1200.13*. Available: <https://www.rs-online.com/designspark/rel-assets/ds-assets/uploads/knowledge-items/application-notes-for-the-internet-of-things/LoRa%20Design%20Guide.pdf>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [21] D. Alahakoon and X. Yu, "Smart electricity meter data intelligence for future energy systems: A survey," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, pp. 425-436, 2015.
- [22] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. *AMR Load Profile*. Available: amr.pea.ac.th
- [23] S.-W. Luan, J.-H. Teng, S.-Y. Chan, and L.-C. Hwang, "Development of a smart power meter for AMI based on ZigBee communication," in *2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 2009, pp. 661-665.
- [24] EDM Limited. *Mk6N-Factsheet-English*. Available: <https://www.edmi-meters.com/wordpress/wp-content/uploads/2018/03/Mk6N-Factsheet-English.pdf>
- [25] EDM Limited. *Mk10E-Factsheet-English*. Available: <https://www.edmi-meters.com/wordpress/wp-content/uploads/2018/03/Mk10E-Factsheet-English.pdf>
- [26] Precise Electric Manufacturing. *Precise-catalog*. Available: <https://www.precise.co.th/storage/content/business/power-distribution/downloads/precise-catalog.pdf>
- [27] มาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องโทรคมนาคมและอุปกรณ์ สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคม ประเภท *Radio Frequency Identification: RFID*, ราชกิจจานุเบกษา, 2560.
- [28] รศ.ดร.ปรีชา กอเจริญ, ผศ.เพชร นันทิวัฒนา, เต็มพงษ์ ศรีเทศ, and รศ.ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม, "เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายสำหรับอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง," *NBTC Journal*, vol. 2, pp. 268-287, 2017.
- [29] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. Townsley, "A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things," *Sensors*, vol. 16, p. 1466, 2016.
- [30] L. Alliance. (2019). *About LoRa Alliance*. Available: <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance>
- [31] The Things Network (TTN). *Frequency Plans*. Available: <https://www.thethings-network.org/docs/lorawan/frequency-plans.html>
- [32] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*, 3th ed.: John wiley & sons, 2005.
- [33] A. Hanafi, "DESIGN ASPECTS MIC ANTENNA OFFOUR AP AUTOMATIC DEPENDEN BROADCAST," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 9, 2018.
- [34] Semtech. (2019). *B-L072Z-LRWAN1*. Available: https://www.st.com/resource/en/data_brief/b-l072z-lrwan1.pdf
- [35] โมไนย ไกรฤกษ์, วิศวกรรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า: บริษัท พิมพ์สวย จำกัด, 2544.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [36] A. Al-Barrak, A. Al-Sherbaz, T. Kanakis, and R. Crockett, "Enhancing BER performance limit of BCH and RS codes using multipath diversity," *Computers*, vol. 6, p. 21, 2017.
- [37] S. R. Saunders and A. Aragón-Zavala, *Antennas and propagation for wireless communication systems*: John Wiley & Sons, 2007.
- [38] X.R. (2017). *Fading, Diversity & Interference in Telecommunication*. Available: <http://wirelesscellularnetwork.blogspot.com/2017/05/fading-diversity-interference-in.html>
- [39] T. S. Rappaport, *Wireless communications: principles and practice*: Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, 2002.
- [40] Mathuranathan. (2013). *Log Distance Path Loss or Log Normal Shadowing Model*. Available: http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electronic_engineering/Log_Distance_Path_Loss_or_Log_Normal_Shadowing_Model.pdf
- [41] F. J. Casadevall Palacio, R. Agustí Comes, J. Pérez Romero, M. López Benítez, S. Grimoud, B. Sayrac, *et al.*, "Radio environmental maps: information models and reference model. Document number D4. 1," 2011.
- [42] Dassault Systemes. *CST STUDIO SUITE FREE ELECTROMAGNETIC SIMULATION SOFTWARE*. Available: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/student-edition/>
- [43] Keysigh. *N9912-90006*. Available: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/N9912-90006.pdf>
- [44] TechnicalAntennas. *Wide Band Cellular Log Periodic Yagi 08 dBi*. Available: <https://technicalantennas.com/collections/yagi/products/wide-band-cellular-log-periodic-yagi-08-dbi>
- [45] S. Systems. (2018). *PAVO-5 – Compact Size Circular Antenna*. Available: <https://star-int.net/products-services/rfid-antennas/pavo-5/#>
- [46] F. M. Inc. *VSWR/RETURN LOSS vs. TRANSMITTED POWER*. Available: <https://www.dhwebsites.com/fsm/engineering/vswr.html>
- [47] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, "การติดตั้งมิเตอร์อัจฉริยะบนเสาคอนกรีต," ed, 2556.
- [48] เทศบาลเมืองนราธิวาส. ชุมชนในเขตเทศบาลเมืองนราธิวาส จังหวัดนราธิวาส. Available: <http://www.naracity.go.th/index.php/2015-11-24-04-26-30>
- [49] E. Google, "Thailand Map," ed, 2019.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [50] L. Hon Hai Precision Industrial Co. *Indoor LoRa Gateway (GPE810U)*. Available: <https://fccid.io/MCLGPE810U/User-Manual/Users-Manual-3393820.pdf>
- [51] C. Telecom. (2019). *LoRa IoT Server*. Available: <https://loraiot.cattelcom.com/portal/login>
- [52] Node-RED. *Node-RED Low-code programming for event-driven applications*. Available: <https://nodered.org/>
- [53] LINE. (2019). *LINE Notify API*. Available: <https://notify-bot.line.me/th>
- [54] R. El Chall, S. Lahoud, and M. El Helou, "LoRaWAN Network: Radio Propagation Models and Performance Evaluation in Various Environments in Lebanon," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, pp. 2366-2378, 2019.
- [55] J. O. Rawlings, S. G. Pantula, and D. A. Dickey, *Applied regression analysis: a research tool*: Springer Science & Business Media, 2001.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
ตารางมาตรฐาน และข้อมูลผลการทดลอง

ตาราง ก-1 การแปลงอัตราส่วนคลื่นนิ่ง การสูญเสียย้อนกลับ กำลังงานส่งผ่านและสะท้อนกลับ [46]

VSWR (:1)	Return Loss (dB)	Reflection Coefficient (Γ)	Mismatch loss (dB)	Reflected Power (%)	Transmitted Power (%)	VSWR (:1)	Return Loss (dB)	Reflection Coefficient (Γ)	Mismatch loss (dB)	Reflected Power (%)	Transmitted Power (%)
1.001	66.025	0.0005	0	0	99.99998	1.32	17.207	0.1379	0.08338	1.9016	98.09836
...	...	...	...	...	...	1.33	16.977	0.1416	0.08796	2.0051	97.99494
1.136	23.921	0.0637	0.01766	0.4058	99.59423	1.34	16.755	0.1453	0.09267	2.1112	97.88879
1.138	23.803	0.0645	0.01811	0.416	99.58398	1.35	16.54	0.1489	0.09737	2.2171	97.78288
1.14	23.686	0.0654	0.01862	0.4277	99.57228	1.36	16.322	0.1527	0.10247	2.3317	97.66827
1.142	23.571	0.0663	0.01913	0.4396	99.56043	1.37	16.131	0.1561	0.10714	2.4367	97.56328
1.144	23.457	0.0672	0.01966	0.4516	99.54842	1.38	15.936	0.1597	0.1122	2.5504	97.44959
1.146	23.346	0.068	0.02013	0.4624	99.5376	1.39	15.747	0.1632	0.11724	2.6634	97.33658
1.148	23.235	0.0689	0.02067	0.4747	99.52528	1.4	15.563	0.1667	0.12239	2.7789	97.22111
1.15	23.127	0.0698	0.02121	0.4872	99.5128	1.41	15.385	0.1701	0.12751	2.8934	97.1066
1.152	23.02	0.0706	0.0217	0.4984	99.50156	1.42	15.211	0.1736	0.1329	3.0137	96.9863
1.154	22.914	0.0715	0.02226	0.5112	99.48878	1.43	15.043	0.1769	0.13808	3.1294	96.87064
1.156	22.81	0.0724	0.02282	0.5242	99.47582	1.44	14.879	0.1803	0.14353	3.2508	96.74919
1.158	22.708	0.0732	0.02333	0.5358	99.46418	1.45	14.719	0.1837	0.14909	3.3746	96.62543
1.16	22.607	0.0741	0.02391	0.5491	99.45092	1.46	14.564	0.187	0.15459	3.4969	96.5031
1.162	22.507	0.0749	0.02443	0.561	99.439	1.47	14.412	0.1903	0.16019	3.6214	96.37859
1.164	22.408	0.0758	0.02502	0.5746	99.42544	1.48	14.264	0.1936	0.16591	3.7481	96.2519
1.166	22.311	0.0766	0.02556	0.5868	99.41324	1.49	14.12	0.1968	0.17155	3.873	96.12698
1.168	22.215	0.0775	0.02616	0.6006	99.39938	1.5	13.979	0.2	0.17729	4	96
1.17	22.12	0.0783	0.02671	0.6131	99.38691	1.52	13.708	0.2063	0.18888	4.256	95.74403
1.172	22.027	0.0792	0.02733	0.6273	99.37274	1.54	13.449	0.2126	0.20087	4.5199	95.48012
1.174	21.934	0.08	0.02788	0.64	99.36	1.56	13.201	0.2188	0.21305	4.7873	95.21266
1.176	21.843	0.0809	0.02852	0.6545	99.34552	1.58	12.964	0.2248	0.22521	5.0535	94.9465
1.178	21.753	0.0817	0.02909	0.6675	99.33251	1.6	12.736	0.2308	0.23773	5.3269	94.67314
1.18	21.664	0.0826	0.02973	0.6823	99.31772	1.62	12.518	0.2366	0.25019	5.598	94.40204
1.182	21.576	0.0834	0.03031	0.6956	99.30444	1.64	12.308	0.2424	0.26299	5.8758	94.12422
1.184	21.489	0.0842	0.0309	0.709	99.29104	1.66	12.107	0.2481	0.27591	6.1554	93.84464
1.186	21.403	0.0851	0.03157	0.7242	99.2758	1.68	11.913	0.2537	0.28893	6.4364	93.56363
1.188	21.318	0.0859	0.03216	0.7379	99.26212	1.7	11.725	0.2593	0.30228	6.7236	93.27635
1.19	21.234	0.0868	0.03284	0.7534	99.24658	1.72	11.545	0.2647	0.31548	7.0066	92.99339
1.192	21.151	0.0876	0.03346	0.7674	99.23262	1.74	11.37	0.2701	0.32899	7.2954	92.7046
1.194	21.069	0.0884	0.03407	0.7815	99.21854	1.76	11.202	0.2754	0.34255	7.5845	92.41548
1.196	20.988	0.0892	0.03469	0.7957	99.20434	1.78	11.039	0.2806	0.35616	7.8736	92.12636
1.198	20.907	0.0901	0.0354	0.8118	99.1882	1.8	10.881	0.2857	0.3698	8.1624	91.83755
1.2	20.828	0.0909	0.03603	0.8263	99.17372	1.82	10.729	0.3062	0.42756	9.3758	90.62416
1.21	20.443	0.095	0.03937	0.9025	99.0975	1.84	10.581	0.2958	0.39766	8.7498	91.25024
1.22	20.079	0.0991	0.04286	0.9821	99.01792	1.86	10.437	0.3007	0.41159	9.042	90.95795
1.23	19.732	0.1031	0.04641	1.063	98.93704	1.88	10.298	0.3056	0.4258	9.3391	90.66086
1.24	19.401	0.1071	0.0501	1.147	98.85296	1.9	10.163	0.3103	0.43969	9.6286	90.37139
1.25	19.085	0.1111	0.05394	1.2343	98.76568	1.92	10.032	0.3151	0.45414	9.9288	90.0712
1.26	18.783	0.115	0.05782	1.3225	98.6775	1.94	9.904	0.3197	0.46824	10.2208	89.77919
1.27	18.493	0.1189	0.06184	1.4137	98.58628	1.96	9.78	0.3243	0.4826	10.517	89.48295
1.28	18.216	0.1228	0.06599	1.508	98.49202	1.98	9.66	0.3289	0.4972	10.8175	89.18248
1.29	17.949	0.1266	0.07017	1.6028	98.39724	2	9.542	0.3333	0.51142	11.1089	88.89111
1.3	17.692	0.1304	0.07448	1.7004	98.29958	...	...	...	...	...	...
1.31	17.445	0.1342	0.07893	1.801	98.19904	100	0.174	0.9802	14.06626	96.0792	3.9208

ตาราง ก-2 ข้อมูลทางเทคนิคของสายอากาศมาตรฐานที่ใช้วัดทดสอบ [44]

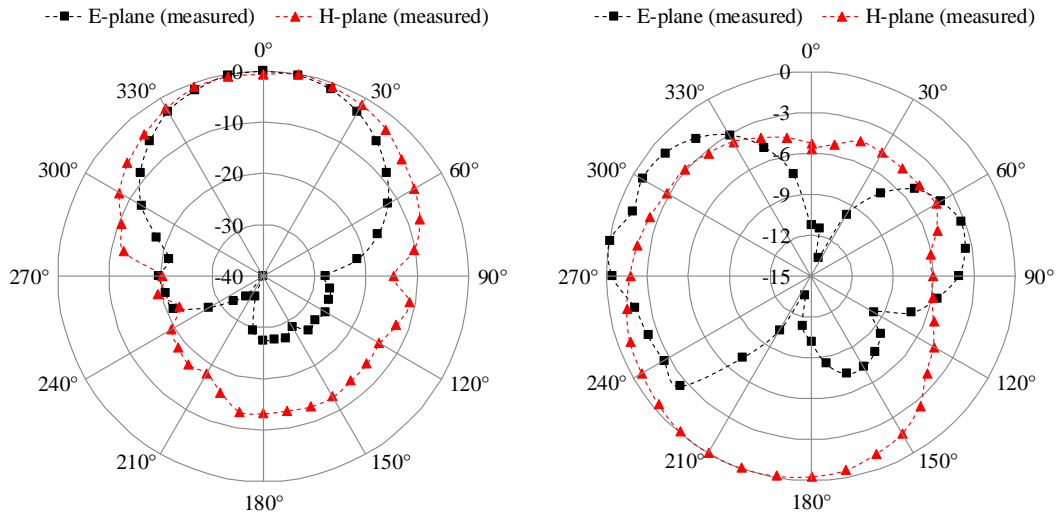
Technical Specs	
Frequency Range (MHz)	698-2700
Polarization	Horizontal, Vertical, Cross
Gain (dBi)	8.2
F/B Ratio	20 dB
Horizontal Beamwidth (°)	80
Impedance (Ω)	50 Ohm
VSWR 698-2700	1.5:1 AVG
Max Input Power (W)	50
Connector	Your Choice (See Above)
Cable Length	4 Inches
Cable Type	RG-58
Dimensions (in)	11.1"x8.27"x2.56"
Antenna Weight	13 Oz
Materials	ABS - UV Stable, Aluminum
Color	White
Operating Temperature (°C)	-55 to +60
Operational Humidity	< 95
Country of Origin	Made In U.S.A. with Imported Parts

ตาราง ก-3 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไมโครสตริปที่นำเสนอ (สายอากาศ A)

Angle (degree)	E-plane		H-plane	
	S_{21} (dB)	Normalize	S_{21} (dB)	Normalize
0	-31.81	-0.13	-31.42	-0.59
10	-31.68	0	-30.83	0
20	-32.09	-0.41	-31.6	-0.77
30	-33.66	-1.98	-32.4	-1.57
40	-34.86	-3.18	-33.58	-2.75
50	-36.72	-5.04	-35.5	-4.67
60	-38.09	-6.41	-36.88	-6.05
70	-39.81	-8.13	-38.42	-7.59
80	-40.7	-9.02	-41.04	-10.21
90	-41.71	-10.03	-45.5	-14.67
100	-41.96	-10.28	-41.95	-11.12
110	-43.17	-11.49	-43.23	-12.4
120	-43.45	-11.77	-44.73	-13.9
130	-47.08	-15.4	-44.44	-13.61
140	-56.8	-25.12	-44.29	-13.46
150	-48.27	-16.59	-43.71	-12.88
160	-43.53	-11.85	-43.82	-12.99
170	-41.97	-10.29	-44.24	-13.41
180	-43.01	-11.33	-44.09	-13.26
190	-45.79	-14.11	-44.04	-13.21
200	-56.67	-24.99	-46.69	-15.86
210	-52.27	-20.59	-48.92	-18.09
220	-50.11	-18.43	-48.32	-17.49
230	-55.22	-23.54	-49.15	-18.32
240	-61.24	-29.56	-50.1	-19.27
250	-51.95	-20.27	-53.41	-22.58
260	-47.06	-15.38	-50.05	-19.22
270	-42.84	-11.16	-51.24	-20.41
280	-40.13	-8.45	-43.23	-12.4
290	-38.05	-6.37	-41.4	-10.57
300	-36.06	-4.38	-38.38	-7.55
310	-35.44	-3.76	-36.37	-5.54
320	-34.23	-2.55	-34.76	-3.93
330	-33.28	-1.6	-33.03	-2.2
340	-32.75	-1.07	-31.69	-0.86
350	-31.9	-0.22	-31.3	-0.47

ตาราง ก-4 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเชิงพาณิชย์ (สายอากาศ B และ C)

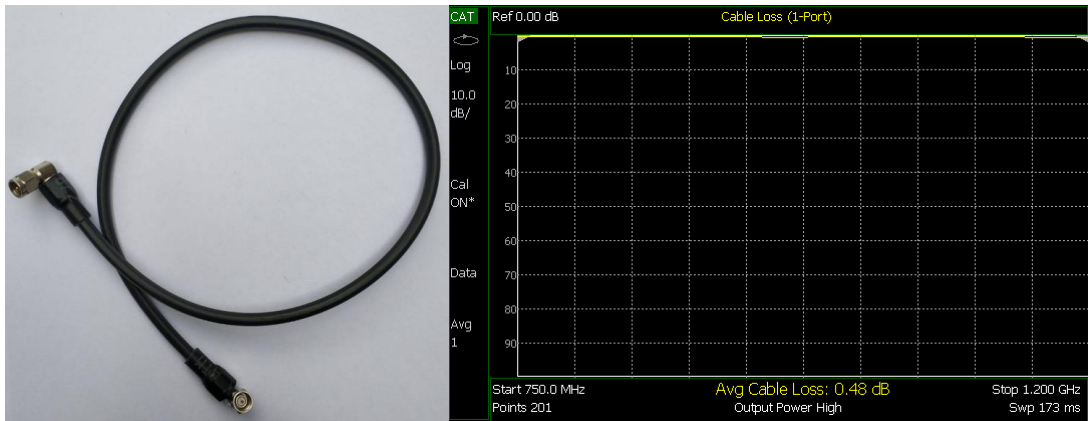
Angle (degree)	สายอากาศ Log-periodic (สายอากาศ B)				สายอากาศโมโนโพล (สายอากาศ C)			
	E-plane		H-plane		E-plane		H-plane	
	S_{21} (dB)	Normalize	S_{21} (dB)	Normalize	S_{21} (dB)	Normalize	S_{21} (dB)	Normalize
0	-30.82	0	-31.42	-0.59	-39.75	-12.02	-34.97	-6.04
10	-31.1	-0.28	-30.83	0	-39.92	-12.19	-34.51	-5.58
20	-32.14	-1.32	-31.6	-0.77	-42.2	-14.47	-33.73	-4.8
30	-33.93	-3.11	-32.4	-1.57	-38.2	-10.47	-33.8	-4.87
40	-36.44	-5.62	-33.58	-2.75	-35.31	-7.58	-33.88	-4.95
50	-39.43	-8.61	-35.5	-4.67	-33.14	-5.41	-33.85	-4.92
60	-42.74	-11.92	-36.88	-6.05	-32.01	-4.28	-33.65	-4.72
70	-46.94	-16.12	-38.42	-7.59	-31.24	-3.51	-34.42	-5.49
80	-52.12	-21.3	-41.04	-10.21	-31.47	-3.74	-35.41	-6.48
90	-58.62	-27.8	-45.5	-14.67	-32.17	-4.44	-35.42	-6.49
100	-57.45	-26.63	-41.95	-11.12	-33.72	-5.99	-35.28	-6.35
110	-57.1	-26.28	-43.23	-12.4	-35.36	-7.63	-34.7	-5.77
120	-56.68	-25.86	-44.73	-13.9	-38.08	-10.35	-33.83	-4.9
130	-57.5	-26.68	-44.44	-13.61	-36.66	-8.93	-33.11	-4.18
140	-56.9	-26.08	-44.29	-13.46	-35.94	-8.21	-31.67	-2.74
150	-59.45	-28.63	-43.71	-12.88	-35.5	-7.77	-30.66	-1.73
160	-57.9	-27.08	-43.82	-12.99	-35.62	-7.89	-30.1	-1.17
170	-58.29	-27.47	-44.24	-13.41	-36.77	-9.04	-29.49	-0.56
180	-58.31	-27.49	-44.09	-13.26	-38.61	-10.88	-29.25	-0.32
190	-60.05	-29.23	-44.04	-13.21	-39.8	-12.07	-29.06	-0.13
200	-66.5	-35.68	-46.69	-15.86	-42.16	-14.43	-28.95	-0.02
210	-73.31	-42.49	-48.92	-18.09	-38.85	-11.12	-28.93	0
220	-65.71	-34.89	-48.32	-17.49	-35.42	-7.69	-29.02	-0.09
230	-63.34	-32.52	-49.15	-18.32	-30.35	-2.62	-29.34	-0.41
240	-58.57	-27.75	-50.1	-19.27	-30.44	-2.71	-29.65	-0.72
250	-52.33	-21.51	-53.41	-22.58	-30.14	-2.41	-29.84	-0.91
260	-51.6	-20.78	-50.05	-19.22	-29.7	-1.97	-30.28	-1.35
270	-50.62	-19.8	-51.24	-20.41	-28.16	-0.43	-30.75	-1.82
280	-52.29	-21.47	-43.23	-12.4	-27.73	0	-31.12	-2.19
290	-48.82	-18	-41.4	-10.57	-28.87	-1.14	-31.5	-2.57
300	-43.5	-12.68	-38.38	-7.55	-28.49	-0.76	-31.9	-2.97
310	-39.61	-8.79	-36.37	-5.54	-28.78	-1.05	-31.96	-3.03
320	-36.58	-5.76	-34.76	-3.93	-29.67	-1.94	-32.42	-3.49
330	-33.76	-2.94	-33.03	-2.2	-30.98	-3.25	-32.8	-3.87
340	-32.3	-1.48	-31.69	-0.86	-33.02	-5.29	-33.44	-4.51
350	-31.04	-0.22	-31.3	-0.47	-35.61	-7.88	-33.95	-5.02



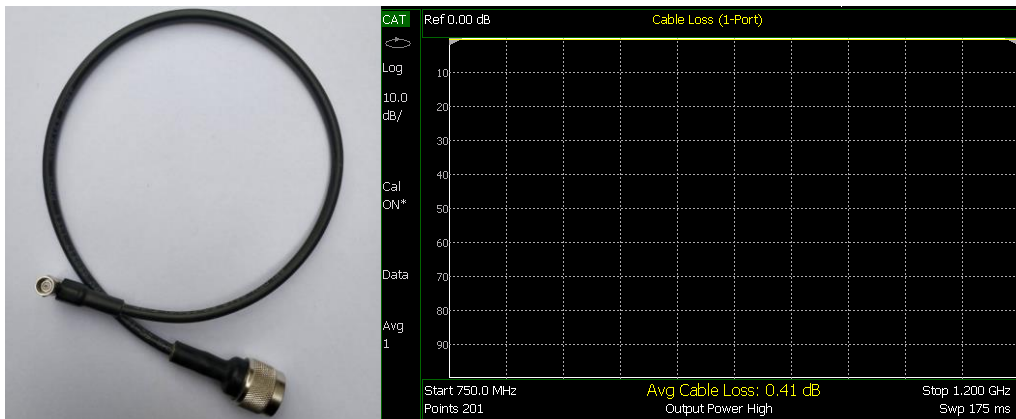
(ก) สายอากาศ B

(ข) สายอากาศ C

ภาพประกอบ ก-1 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ B และ C



ภาพประกอบ ก-2 การวัดค่าการสูญเสียในสายนำสัญญาณของสายอากาศ A



ภาพประกอบ ก-3 การวัดค่าการสูญเสียในสายนำสัญญาณของสายอากาศ B และ D

ตาราง ก-5 สรุปผลการวัดคุณภาพสัญญาณของสายอากาศ A

ระยะทาง	ค่าเฉลี่ย RSSI (dBm)	ค่าเฉลี่ย SNR (dB)	RSSI ต่ำสุด (dBm)	SNR ต่ำสุด (dB)	จำนวนแพ็กเก็ตที่รับได้	จำนวนแพ็กเก็ตที่ส่ง	PDR (%)
0-0.5 km	-89.26	6.07	-114.00	-7.25	137	140	97.86
0.5-1 km	-110.38	-2.32	-117.00	-14.25	144	170	84.71
1-1.5 km	-113.35	-7.46	-117.00	-18.25	69	222	31.08
1.5-2 km	-114.35	-7.61	-117.00	-16.75	34	56	60.71
2-2.5 km	-115.75	-17.38	-119.00	-19.25	4	58	6.90
0-2.5 km	-103.86	-0.89	-119.00	-19.25	388	646	60.06

ตาราง ก-6 สรุปผลการวัดคุณภาพสัญญาณของสายอากาศ B

ระยะทาง	ค่าเฉลี่ย RSSI (dBm)	ค่าเฉลี่ย SNR (dB)	RSSI ต่ำสุด (dBm)	SNR ต่ำสุด (dB)	จำนวนแพ็กเก็ตที่รับได้	จำนวนแพ็กเก็ตที่ส่ง	PDR (%)
0-0.5 km	-83.82	8.88	-115.00	-6.25	146	148	98.65
0.5-1 km	-107.74	1.46	-117.00	-16.00	147	173	84.97
1-1.5 km	-113.31	-6.29	-117.00	-18.50	62	117	52.99
1.5-2 km	-113.53	-6.08	-117.00	-18.25	53	101	52.48
2-2.5 km	-117.29	-13.32	-119.00	-17.75	7	66	10.61
0-2.5 km	-101.06	1.70	-119.00	-18.50	415	605	68.60

ตาราง ก-7 สรุปผลการวัดคุณภาพสัญญาณของสายอากาศ C

ระยะทาง	ค่าเฉลี่ย RSSI (dBm)	ค่าเฉลี่ย SNR (dB)	RSSI ต่ำสุด (dBm)	SNR ต่ำสุด (dB)	จำนวนแพ็กเก็ตที่รับได้	จำนวนแพ็กเก็ตที่ส่ง	PDR (%)
0-0.5 km	-96.04	5.82	-115.00	-12.50	130	140	92.86
0.5-1 km	-111.24	-5.39	-115.00	-17.25	63	141	44.68
1-1.5 km	-112.45	-11.68	-115.00	-19.25	11	26	42.31
1.5-2 km	-114.75	-15.88	-115.00	-18.50	4	136	2.94
2-2.5 km	NA	NA	NA	NA	0	65	0.00
0-2.5 km	-101.87	1.08	-115.00	-19.25	208	508	40.94

ตาราง ก-8 สรุปผลการวัดคุณภาพสัญญาณของสายอากาศ D

ระยะทาง	ค่าเฉลี่ย RSSI (dBm)	ค่าเฉลี่ย SNR (dB)	RSSI ต่ำสุด (dBm)	SNR ต่ำสุด (dB)	จำนวนแพ็กเก็ตที่รับได้	จำนวนแพ็กเก็ตที่ส่ง	PDR (%)
0-0.5 km	-83.30	9.22	-119.00	-3.75	240	255	94.12
0.5-1 km	-108.53	0.17	-119.00	-15.25	178	272	65.44
1-1.5 km	-114.27	-5.81	-119.00	-16.25	52	113	46.02
1.5-2 km	-112.02	-4.20	-119.00	-16.00	62	184	33.70
2-2.5 km	-113.00	-12.08	-115.00	-16.25	3	7	42.86
0-2.5 km	-98.20	3.07	-119.00	-16.25	535	831	64.38

ภาคผนวก ข.
การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

1. เอกพงศ์ คงสวัสดิ์ และ ชลากร ครุพงศ์สิริ, “การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการสื่อสารระหว่าง LoRa และ NB-IoT,” ใน *งานประชุมวิชาการ และนวัตกรรม กฟผ. ปี 2561 PEA4.0 : Road to Digital Utility*, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย, กันยายน 24-25, 2561, น. 428-433
2. A. Kongsavat and C. Karupongsiri, “Path Loss Model for Smart Meter on LoRaWAN Technology with Unidirectional Antenna in an Urban Area of Thailand,” presented at the 2020 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM), Marina Square, Singapore, Mar. 25-27, 2020. (Accepted Paper)
3. A. Kongsavat, P. Wouchoum and C. Karupongsiri, “Empirical Path Loss Model on Microstrip Antenna for LoRaWAN Communication in Urban Area of Thailand,” *IEEE Internet of Things Journal*, 2020. (Submitted Paper)



งานประชุมวิชาการ และนวัตกรรม กฟภ. ปี 2561

“PEA4.0 : Road to Digital Utility”

24 - 25 กันยายน 2561

ณ ศูนย์ประชุมวายุภักษ์ ศูนย์ราชการเฉลิมพระเกียรติ แจ้งวัฒนะ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการสื่อสารระหว่าง LoRa และ NB-IoT

เอกพงศ์ คงสวัสดิ์, ชลากร คุรุพงศ์ศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

6010120121@psu.ac.th, chalakom.s@psu.ac.th

บทคัดย่อ

หนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของ Smart Meter (SM) คือ การเลือกเทคโนโลยีการสื่อสารที่เหมาะสม บทความนี้ นำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเทคโนโลยี LoRa (Long Range) และ NB-IoT (Narrow Band Internet of Things) เพื่อประยุกต์ใช้งานกับ SM โดยเปรียบเทียบด้านอัตราการส่งสัญญาณ และอัตราการสูญเสียข้อมูล (Packet Loss Rate: PLR) ในสภาพพื้นที่แตกต่างกัน ผลการทดลอง คือ

- 1) NB-IoT มีอัตราข้อมูล (Data Rate: DR) ที่ 15 Kbps ระยะการส่งสัญญาณขึ้นอยู่กับพื้นที่ให้บริการเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 4 (Long Term Evolution: LTE) โดยสภาพแวดล้อมพื้นที่การทดลองเป็นเขตชานเมือง (suburban) ตามแบบจำลองของ Okumura-Hata ผลการทดลองภายนอกอาคาร PLR เท่ากับ 9.62 % ที่ระยะ 415 เมตร และทดลองภายในอาคาร PLR เท่ากับ 2-3% ที่ระยะไม่เกิน 235 เมตร
- 2) LoRa ที่ Spreading Factor(SF) เท่ากับ 12 มี DR ที่ 0.29 Kbps ระยะส่งสัญญาณน้อยกว่า 500 เมตร ในพื้นที่ทดสอบเดียวกันกับ NB-IoT การทดลองนอกอาคาร PLR มีค่าสูงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น คือที่ระยะ 100 เมตร PLR เท่ากับ 3.77% และที่ระยะ 415 เมตร PLR เท่ากับ 21.57% ในขณะที่ทดลองภายในอาคาร PLR เท่ากับ 92.86% ที่ระยะทาง 130 เมตร
- 3) ในด้านการประยุกต์ใช้งาน เทคโนโลยี LoRa มีความยืดหยุ่นสามารถพัฒนาระบบได้เอง และทำงานในย่านความถี่ ซึ่งไม่ต้องขออนุญาต ต่างกับ NB-IoT ผู้ให้บริการเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นผู้ติดตั้งระบบ มีการเรียกเก็บค่าใช้จ่ายรายปี แต่จะมีการบริหารจัดการระบบเครือข่ายให้มีเสถียรภาพสรุปได้ว่า พื้นที่ที่ไม่ครอบคลุมสัญญาณ LTE การใช้ LoRa จะเหมาะสม เนื่องจากต้นทุนการพัฒนาระบบต่ำกว่า ในทางกลับกัน ถ้าเป็นพื้นที่ที่ครอบคลุมสัญญาณ LTE และสภาพแวดล้อมพื้นที่เป็นเมืองหนาแน่น มีปริมาณการรับส่งข้อมูลสูง เทคโนโลยี NB-IoT เป็นทางเลือกที่ดีกว่า เพราะมี DR สูง, Latency ต่ำ

คำสำคัญ: Smart Meter, LoRa, LoRaWAN, LPWAN, NB-IoT

1. บทนำ

Smart Meter (SM) เป็นอุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดใหม่ ซึ่งช่วยให้สามารถติดตามข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง และมีการบันทึกข้อมูลดังกล่าว เพื่อผู้ใช้งานสามารถควบคุมการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า การเลือกเทคโนโลยีการสื่อสารที่เหมาะสมจะช่วยให้การใช้งาน SM มีประสิทธิภาพมากขึ้น [1] รองรับโครงข่าย Smart Grid ในอนาคต

LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) [2] คือ เทคโนโลยีการสื่อสารที่เน้นการใช้พลังงานต่ำ แต่สามารถสื่อสารได้ไกล ความเร็วการส่งสัญญาณต่ำ เหมาะกับงานด้าน Internet of Things (IoT) หรือด้าน Sensor Network เช่น ระบบแจ้งเตือนอุทกภัย, ระบบตรวจจับแผ่นดินไหว, ลานจอดรถอัจฉริยะ รวมถึง SM เป็นต้น เทคโนโลยี LPWAN ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย คือ LoRa และ NB-IoT ทั้งสองเทคโนโลยีนี้สามารถเปรียบเทียบได้ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติ LoRa และ NB-IoT [2], [5]

คุณสมบัติ	LoRa	NB-IoT
Spectrum	Unlicensed	Licensed
Frequency	923.2 MHz	900 MHz (Band 8)
Modulation	CSS	UL: SC-FDMA DL: OFDMA
Bandwidth	125 KHz	200 KHz
Data Rate	SF7: 5.468 Kbps SF12: 0.293 Kbps	DL: 24 Kbps UL: 15.625 Kbps
Tx Power	25 mW	200 mW

1. LoRa (Long Range) [3], [5] คือ เทคโนโลยีสื่อสารแบบไร้สายที่ถูกพัฒนาขึ้น โดยบริษัท Semtech ที่งานที่ย่านความถี่ 920-925 MHz Unlicensed Band ในประเทศไทย การ Modulation สัญญาณแบบ Chirp-Speed Spectrum (CSS) [10] ซึ่งใช้ Frequency Modulation (FM) กับข้อมูลแบบดิจิทัล ทำให้สามารถส่งสัญญาณได้ไกล, ใช้งานในช่อง

ความถี่ที่มีสัญญาณรบกวนได้ดี และใช้พลังงานต่ำ CSS มีที่มา จาก 2 ส่วน คือ 1.1) Chirp (Compressed High Intensity Radar Pulse) เป็นสัญญาณ Linear FM Pulses เมื่อความถี่ เปลี่ยนจากต่ำสุดไปสูงสุด เรียกว่า Up-chirp และถ้าเปลี่ยน จากสูงสุดไปต่ำสุด เรียกว่า Down-chirp 1.2) Spread Spectrum คือ การกระจายรหัสข้อมูลไปในช่องความถี่ต่าง ๆ กำหนดโดยตัวประกอบการแพร่กระจาย (Spreading Factor: SF) เช่น SF7 หมายถึง มีการกระจายข้อมูลไปใน 7 ช่อง ความถี่ ซึ่งความเร็วการส่งข้อมูลสามารถปรับค่าได้ ดังสมการ (1) และ (2) เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง SF, Bandwidth (BW) และอัตราการเข้ารหัส (Code Rate: CR) [2]

$$R_b = SF * \frac{\text{Rate Code}}{\left[\frac{2^{SF}}{BW} \right]} \quad (\text{bit/s}) \quad (1)$$

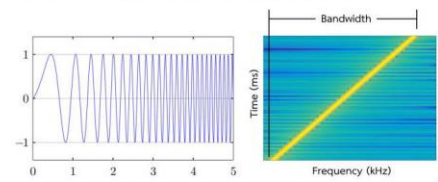
$$\text{Rate Code} = \frac{4}{4 + CR} \quad (2)$$

เมื่อ R_b =Bit Rate (bit/s), SF=Spreading Factor (7...12)
CR=Code Rate(1...4), BW=Modulation Bandwidth(Hz)

2. NB-IoT (Narrow Band Internet of Things) [4], [5] เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารที่พัฒนาต่อมาจากเทคโนโลยี โทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคที่ 4 (Long Term Evolution: LTE) เพื่อให้อุปกรณ์ต่าง ๆ สามารถเชื่อมต่อเข้าหากันผ่านโครงข่าย ของสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ในรูปแบบ M2M (Machine to Machine) ทำงานที่ความถี่ 900 MHz Licensed Band ในประเทศไทย กำหนดมาตรฐานโดย 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project) หรือกลุ่มมาตรฐาน อุตสาหกรรมโทรคมนาคม เทคโนโลยี NB-IoT ใช้การ Modulation 2 แบบ คือ 2.1) แบบ OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) สำหรับรับข้อมูล (Downlink: DL) ซึ่งใช้ 12 subcarriers ที่ 15 KHz tone spacing ได้อัตราเร็วในการสื่อสารสูง 2.2) แบบ SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access) สำหรับส่งข้อมูล (Uplink: UL) ใช้ 3.75 KHz หรือ 15 KHz tone spacing โดย SC-FDMA ถูกพัฒนาเพื่อทดแทนการ สื่อสารแบบ OFDMA เดิม เพราะการ UL แบบ OFDMA ต้อง ใช้เครื่องส่งวิทยุที่มีกำลังสูง จึงไม่เหมาะกับอุปกรณ์สื่อสารที่มี ขนาดเล็ก โดย SC-FDMA สามารถจัดสรรช่องสัญญาณเพื่อ ลดกำลังการส่ง และทำให้ระดับสัญญาณรบกวนลดลง

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง เทคโนโลยี LoRa และ NB-IoT เพื่อประยุกต์ใช้งานกับ SM ในสภาพแวดล้อมเขตชานเมือง (suburban) สำหรับภายนอก อาคาร (Outdoor) และภายในอาคาร (Indoor) ตามแบบ

จำลองของ Okumura-Hata โดยเปรียบเทียบด้วยระยะการส่ง สัญญาณ และอัตราการสูญเสียชุดข้อมูล (Packet Loss Rate: PLR) บทความนี้ได้อธิบายโครงสร้างสถาปัตยกรรมของระบบ เครือข่ายในหัวข้อที่ 2, การออกแบบการทดลองในหัวข้อที่ 3, หัวข้อที่ 4 นำเสนอผลการทดลอง, หัวข้อที่ 5 สรุปผลการ ทดลอง และหัวข้อที่ 6 แผนการดำเนินงานในอนาคต

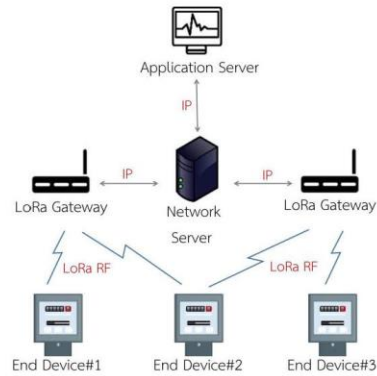


รูปที่ 1 Spectrogram ของสัญญาณ 1 Up-chirp [8]

2. สถาปัตยกรรมของระบบเครือข่าย

2.1 LoRa Architecture

LoRaWAN (Long Rang Wide Area Network) คือ โครงสร้างของระบบ Network Protocol รูปแบบหนึ่ง บนชั้น MAC Layer (Medium Access Control) กำหนดขึ้นโดย LoRa Alliance ซึ่งเป็นองค์กรที่ตั้งขึ้นเพื่อขับเคลื่อน และ กำหนดมาตรฐานเทคโนโลยี LoRaWAN



รูปที่ 2 สถาปัตยกรรม LoRaWAN

สถาปัตยกรรม LoRaWAN แบ่งเป็น 4 ส่วน คือ

1. End-Device (Node) คือ อุปกรณ์ที่รับส่งข้อมูล จาก sensor ไปยังแม่ข่าย (Server) แบ่งได้เป็น 3 Class

1.1 Class A จะส่งข้อมูล TX แล้วรอ 2 RX slot ซึ่ง Gateway สามารถส่งข้อมูล DL ได้เฉพาะในช่วง RX slot เปิด เท่านั้น มีข้อดีคือใช้พลังงานต่ำสุด แต่มี Latency สูง

1.2 Class B เพิ่มเติมจาก Class A คือมีการปล่อย beacon frame เพื่อรอ ด้วย RX slot ตามที่กำหนดจำนวนไว้

1.3 Class C สามารถรอข้อมูลจาก Gateway อย่างต่อเนื่อง ทำให้ใช้พลังงานมากที่สุด แต่มี Latency ต่ำที่สุด

2. Gateway (GW) ทำหน้าที่เชื่อมต่อ Protocol ที่แตกต่างกันระหว่าง LoRa RF Protocol และ IP (Internet Protocol) แล้วส่งต่อ packet ผ่านช่องสื่อสาร LAN, WiFi, หรือ 3G/4G ทั้งนี้ Gateway มากกว่า 1 ตัวที่ตรวจจับข้อมูลเดียวกัน ซึ่งการคิดแยกข้อมูลจะใช้วิธี Activation หรือการยืนยันตัวตนบน Network Server

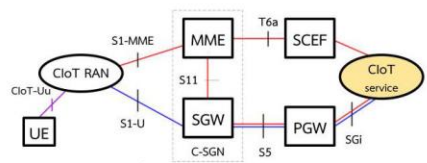
3. Network Server ทำหน้าที่รับข้อมูลจาก Gateway มาประมวลผล โดยเริ่มจากการ Authenticate ด้วย key ตามที่ได้ลงทะเบียนไว้ ซึ่งมาตรฐาน LoRaWAN กำหนดวิธีการ Activation เป็น 2 รูปแบบ คือ

3.1 Over-The-Air Activation (OTAA) จะเริ่มจาก Node ส่ง DEV EUI, APP EUI, APPK KEY ซึ่งฝังไว้ในแต่ละอุปกรณ์ไปให้ระบบแม่ข่ายยืนยัน จากนั้นทางระบบจะส่ง Network Address กลับมา วิธีการนี้จะมี delay ในช่วงแรกของการ join เครื่องข่ายก่อนจะได้ AppSKey และ NwSKey เพื่อใช้ติดต่อกับ Application Server ต่อไป

3.2 Activation by Personalization (ABP) มีการลงทะเบียนอุปกรณ์ตั้งแต่แรก ด้วย AppSKey, NwSKey, Dev Address ก่อนการเชื่อมต่อเครื่องข่าย

4. Application Server คือ ส่วนที่สามารถดึงข้อมูลจาก Network Server มาประมวลผลในรูปแบบต่าง ๆ ตามที่ผู้ใช้ออกแบบ เช่น การเก็บลงฐานข้อมูล, หน้าต่างแสดงผล เป็นต้น

2.2 NB-IoT Architecture



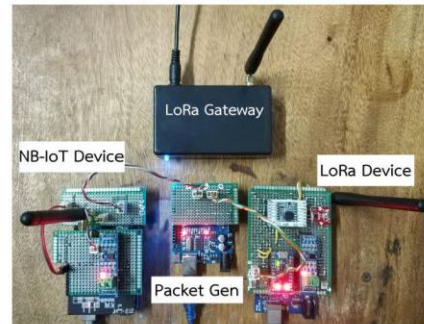
รูปที่ 3 สถาปัตยกรรม NB-IoT [9]

สถาปัตยกรรม NB-IoT พัฒนาต่อยอดมาจาก LTE มีรูปแบบไม่ซับซ้อน เพื่อลดปัญหาข้อมูลหน่วงภายในเครื่องข่าย และเพื่อสนับสนุนการใช้งานประเภท IP ได้อย่างเต็มรูปแบบ อุปกรณ์หลัก ๆ มี 3 ส่วน 1) eNB (eNodeB) หรือ Clot RAN หมายถึง เสาสัญญาณ, 2) SAE Gateway (SGW), 3) MME (Mobility Management Entity) ทำหน้าที่จัดการสัญญาณควบคุม ซึ่งใช้ตรวจสอบและปรับตำแหน่งที่อยู่ของผู้ใช้บริการ

ในการรับส่งข้อมูลระหว่างผู้ใช้กับเครื่องข่ายจะใช้ Clot (Cellular Internet of Things) 2 ชนิด ในกระบวนการ EPS (Evolved Packet System) คือ

1. Control Plane Clot EPS Optimization (รูปที่ 3 เส้นสีแดง) การส่งข้อมูล UL เริ่มจาก eNB รับข้อมูลจาก UE (User Equipment) แล้วส่งข้อมูลไปที่ MME เพื่อตรวจสอบชนิดข้อมูล 2 ประเภท คือ 1.1) แบบ non-IP จะเคลื่อนที่ผ่าน SCEF (Service Capability Exposure Function) ไปยังเป้าหมายที่ Application Server (Clot Services), 1.2) แบบมี IP ข้อมูลเคลื่อนที่ผ่าน SGW (Serving Gateway) และผ่าน PGW (Packet Data Network Gateway) ไปยัง Application Server และสำหรับการรับข้อมูล DL ทำได้โดยย้อนกลับกระบวนการเดิม

2. User Plane Clot EPS Optimization (รูปที่ 3 เส้นสีน้ำเงิน) ข้อมูลทั้งแบบ IP และ non-IP สามารถเคลื่อนที่บน Radio bearers ผ่าน SGW และ PGW ไปจนถึง Application Server



รูปที่ 4 อุปกรณ์ LoRa และ NB-IoT ที่ใช้ในการทดลอง

3. การออกแบบการทดลอง

3.1 LoRa Design

บทความนี้ใช้ LoRa module RFM95 ทำงานบน Microcontroller Unit (MCU) ชนิด Arduino Mega 2560 เชื่อมต่อกับ MCU Packet Generator ซึ่งใช้ Arduino UNO จำลองค่าพารามิเตอร์จาก SM ขนาด 16 byte เรียกส่วนนี้เป็น End-Device ทำหน้าที่สร้าง Packet ส่งผ่านทาง LoRa RF Protocol จากนั้นอุปกรณ์ GW ใช้ WiFi MCU ชนิด Wemos D1 mini เชื่อมต่อกับ RFM95 สร้างเป็น LoRa Single Gateway เพื่อรับและส่งต่อข้อมูลดังกล่าวไปที่ TTN (The Think Network) Server ซึ่งให้บริการ LoRa Public Server ผ่าน IP จากนั้น TTN บริหารจัดการ packet ที่ได้รับส่งต่อไปที่ส่วน Application Server ใช้เครื่องมือ Node-Red ซึ่งเป็น Application Programming Interface (API) สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อเชื่อมต่อข้อมูลกับหลาย ๆ Protocol เพื่อทำ User Interface (UI) ลักษณะ Dashboard และส่งข้อมูลไปบันทึกผลด้วย Google Sheet

3.2 NB-IoT Design

บทความนี้ใช้บอร์ด AIS NB-Shield ซึ่งใช้ชิพสื่อสารชนิด Quectel BC95 ทำงานบน Arduino Mega 2560 อ่านค่าจาก Packet Generator แล้วส่งข้อมูลผ่านสัญญาณ LTE ไปบน AIS Magellan IoT Platform ซึ่งทำงานเป็น CoAP (Constrained Application Protocol) Server จากนั้นใช้ Node-Red ดึงข้อมูลมาแสดงผลบน Dashboard พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลลง Google Sheet เพื่อใช้วิเคราะห์ประสิทธิภาพเช่นเดียวกับ LoRa

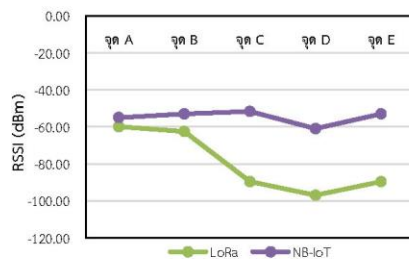


รูปที่ 5 Node-Red Dashboard เปรียบเทียบข้อมูลจาก 2 protocol

4. ผลการทดลอง

4.1 ค่า Receiver Sensitivity

Receiver Sensitivity Indicators (RSSI) เป็นระดับบ่งชี้ของความแรงของสัญญาณวิทยุ ซึ่งในที่นี้หมายถึงสัญญาณระหว่าง LoRa-Device กับ GW และ NB-IoT Device กับสถานีฐาน (Base Station: BS) การทดลองกำหนดจุดเริ่มต้นจาก BS พร้อมติดตั้ง LoRa GW ในบริเวณเดียวกัน (รูปที่ 7 จุด A) จากนั้นทดลองส่ง packet ข้อมูลไปตามระยะทางต่างๆ โดย LoRa จะกำหนดค่า Transmission Power เท่ากับ 14 dBm (25 mW), CR เท่ากับ 4/5, BW เท่ากับ 125 KHz และ SF เท่ากับ 12 เพื่อระยะการส่งที่ไกล



รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่า RSSI ตามระยะทาง

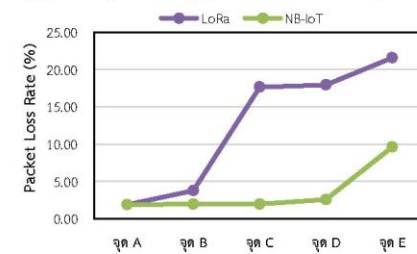
ผลการทดลองดังรูปที่ 6 พบว่าค่า RSSI ของ LoRa ที่จุด A เท่ากับ -59.90 dBm และจะลดลงเมื่อระยะทางห่างออกจาก GW จนถึงจุด E ที่ระยะทาง 415 เมตร ค่า RSSI เท่ากับ -89.60 dBm ในขณะที่ NB-IoT ค่า RSSI อยู่ระหว่าง -50 ถึง -60 dBm ที่ระยะตั้งแต่จุด A ถึง จุด E



รูปที่ 7 ระยะห่างแต่ละจุดทดสอบ (Outdoor)

4.2 ค่า Packet Loss ภายนอกอาคาร

Packet Loss จะทดสอบในรูปแบบอัตราการสูญหายชุดข้อมูล PLR โดยทดลองเพิ่มระยะทาง ระหว่างอุปกรณ์รับสัญญาณ และอุปกรณ์ส่งสัญญาณ กำหนดระยะทางดังรูปที่ 7



รูปที่ 8 Packet Loss เทียบตำแหน่งการส่งสัญญาณ (Outdoor)

ผลการทดลองในรูปที่ 8 ระยะทางระหว่างจุดรับส่งสัญญาณ มีผลต่อความสำเร็จในการรับส่งข้อมูล โดยเริ่มต้นที่จุด A ทั้ง LoRa และ NB-IoT มี PLR เท่ากับ 1.89% เท่ากัน จากนั้นตั้งแต่จุด B ถึง E LoRa มี PLR เท่ากับ 3.77%, 17.65%, 17.95%, 21.57% ตามลำดับ และ NB-IoT มี PLR เท่ากับ 1.96%, 1.96%, 2.56%, 9.62% ตามลำดับ

4.3 ค่า Packet Loss ภายในอาคาร

ทดสอบการรับส่งสัญญาณเมื่อมีสิ่งกีดขวางปิดกั้นเส้นทางสัญญาณ (Line of Sight Path) กำหนดจุด A เป็น

ตำแหน่ง GW และ BS เช่นเดิม จากนั้นติดตั้ง LoRa และ NB-IoT Device ภายในอาคาร ที่จุด F, G และ H ดังรูปที่ 9 ผลการทดลองดังรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่า NB-IoT มี PLR น้อยกว่า LoRa ทุกตำแหน่งทดสอบ คือ ตั้งแต่จุด F ถึง H LoRa มี PLR เท่ากับ 58.0%, 92.86%, 100% ตามลำดับ และ NB-IoT มี PLR เท่ากับ 2.0%, 3.57%, 3.45% ตามลำดับ



รูปที่ 9 ระยะห่างแต่ละจุดทดสอบ (Indoor)

5. สรุป

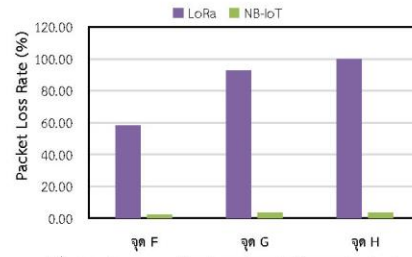
ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเทคโนโลยีทั้งสอง คือ 1) NB-IoT มี Data rate ที่ 15 Kbps สามารถรับสัญญาณ LTE จาก BS ได้คุณภาพดี ค่า RSSI เท่ากับ -50 ถึง -60 dBm ในพื้นที่ทดลอง ซึ่งสภาพแวดล้อมเขตชานเมือง (suburban) การทดลอง Outdoor PLR เท่ากับ 9.62% ที่ระยะ 415 เมตร และ Indoor PLR เท่ากับ 2-3% ที่ระยะไม่เกิน 235 เมตร NB-IoT มีความสามารถทะลุทะลวงได้ดีกว่า

2) LoRa กำหนด SF เท่ากับ 12 เพื่อสามารถส่งสัญญาณได้ไกล แต่จะทำให้ DR ต่ำ ที่ 0.29 Kbps ทดลองส่งสัญญาณจาก End-Device ถึง GW ระยะ 415 เมตร คุณภาพสัญญาณ RSSI เท่ากับ -89.60 dBm ในสภาพพื้นที่ทดลองเดียวกันกับ NB-IoT การทดลอง Outdoor PLR มีค่าสูงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น คือที่ระยะ 100 เมตร PLR เท่ากับ 3.77% และที่ระยะ 415 เมตร PLR เท่ากับ 21.57% ในขณะที่ทดลอง Indoor PLR เท่ากับ 92.86% ที่ระยะทาง 130 เมตร จนถึงระยะที่ไม่สามารถรับสัญญาณได้ที่จุด H ระยะทาง 235 เมตร

3) ในด้านการพัฒนาระบบเครือข่าย เทคโนโลยี LoRa มีความยืดหยุ่นสูง สามารถออกแบบได้เองทั้งระบบ เนื่องจาก LoRa เป็นเทคโนโลยี open source และไม่ต้องขออนุญาตใช้ย่านความถี่ ต่างกับ NB-IoT การวางระบบ ผู้ให้บริการเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นผู้ดำเนินการ และมีการเรียกค่าใช้จ่ายบริการ

ในการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีการสื่อสารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับ SM นั้น เทคโนโลยี LoRa และ NB-IoT สามารถนำมาใช้ได้ทั้งคู่ ขึ้นอยู่กับปัจจัย เช่น สภาพแวดล้อมในพื้นที่ที่ไม่ครอบคลุมสัญญาณ LTE การใช้ LoRa มีความ

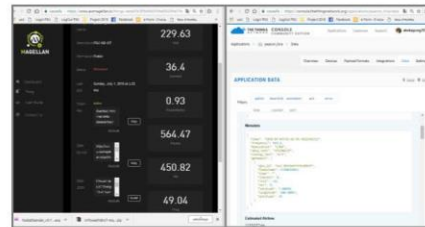
เหมาะสม เนื่องจากต้นทุนการพัฒนาระบบต่ำกว่า ในทางกลับกัน ถ้าเป็นพื้นที่ที่ครอบคลุมสัญญาณ LTE และสภาพพื้นที่เป็นเมืองหนาแน่น มีปริมาณการรับส่งข้อมูลสูง NB-IoT เป็นตัวเลือกที่ดีกว่า เพราะมี Data rate สูง Latency ต่ำ สามารถจัดการข้อมูลที่มีปริมาณมากได้ดี



รูปที่ 10 Packet Loss เทียบตำแหน่งการส่งสัญญาณ (Indoor)

6. แผนการดำเนินงานในอนาคต

ในบทความนี้ การทำงานของระบบเครือข่ายอยู่ในรูปแบบ IoT ซึ่งใช้ Platform สำเร็จรูปต่าง ๆ ทำงานอยู่บน Cloud มีข้อดีคือไม่ต้องบริหารจัดการระบบ Network Server เอง แต่ในทางกลับกัน ก็ต้องพึ่งพาระบบของผู้อื่นใช้งาน ซึ่งข้อมูลบางอย่างต้องการเก็บเป็นความลับ ดังนั้นในการศึกษาต่อไปจะดำเนินการในส่วนของระบบ Network Server เพื่อสามารถใช้งานบนระบบเครือข่ายที่พัฒนาขึ้นเอง



รูปที่ 11 AIS Magellan และ TTN Server

จากนั้นสิ่งที่ต้องพิจารณาคือหากมีการใช้งานเทคโนโลยีสื่อสารร่วมกับ SM เป็นปริมาณมาก ทั้ง GW และ Device จำเป็นต้องคำนึงถึงข้อกำหนดคาบเวลาการทำงาน (Duty Cycles) โดยช่องสัญญาณ LoRaWAN กำหนด Duty Cycles ที่ 1% ดังนั้น จำเป็นต้องออกแบบระบบเครือข่ายให้สามารถบริหารลำดับการทำงานได้ เช่น เลือกใช้งาน Gateway ที่วางอยู่ดำเนินการแทน หรือให้ใช้ช่องสัญญาณที่มีคาบเวลาการทำงานที่สูงกว่าจัดการแทน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Xu, S., Qian, Y., & Hu, R. Q. (2017). A Study on Communication Network Reliability for Advance Metering Infrastructure in Smart Grid. In 2017 IEEE 15th Intl Conf on Dependable. IEEE.
- [2] Bardyn, J.-P., Melly, T., Seller, O., & Somin, N. (2016). IoT: The era of LPWAN is starting now. In ESSCIRC Conference 2016: 42nd European Solid-State Circuits Conference. IEEE.
- [3] LoRa Alliance, LoRaWAN What is it. Technical Marketing Workgroup 1.0, Nov., 2015. Available: <https://www.lora-alliance.org/portals/0/documents/whitepapers/LoRaWAN101.pdf>
- [4] Chen, J., Hu, K., Wang, Q., Sun, Y., Shi, Z., & He, S. (2017). Narrowband Internet of Things: Implementations and Applications. IEEE Internet of Things Journal, 4(6), 2309–2314.
- [5] Persia, S., Carciofi, C., & Faccioli, M. (2017). NB-IoT and LoRA connectivity analysis for M2M/IoT smart grids applications. In 2017 AETT International Annual Conference. IEEE.
- [6] Wang, S.-Y., Chen, Y.-R., Chen, T.-Y., Chang, C.-H., Cheng, Y.-H., Hsu, C.-C., & Lin, Y.-B. (2017). Performance of LoRa-Based IoT Applications on Campus. In 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). IEEE.
- [7] Kodali, R. K. (2017). Radio data infrastructure for remote monitoring system using lora technology. In 2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI). IEEE.
- [8] Ghosly, S. (2017). *LoRa: Symbol Generation*. Retrieved June 1, 2018, from Web site: <http://www.sghosly.com/p/lora-is-chirp-spread-spectrum.html>
- [9] Afzal, J. (2017). *NB-IoT Deployment – What it Takes*. Retrieved June 5, 2018, from Web site: <https://www.netmanias.com/en/post/blog/11743/iot-nb-iot/nb-iot-deployment-what-it-takes>
- [10] Semtech. (2015). *LoRa Modulation basics*, AN 1200.22. Retrieved May 5, 2018, from Web site: <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>

Path Loss Model for Smart Meter on LoRaWAN Technology with Unidirectional Antenna in an Urban Area of Thailand

Akekapong Kongsavat
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering, Prince of Songkla University
Songkla, Thailand
6010120121@psu.ac.th

Chalacom Karupongsiri
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering, Prince of Songkla University
Songkla, Thailand
chalacom.s@psu.ac.th

Abstract—Smart Meter (SM) is a device that measures electrical energy and reports power consumption to the control center via communication systems, such as LoRaWAN (Long Range Wide Area Network). The antenna is a key component of wireless communication improvement. Moreover, unidirectional antenna radiates most power in desired direction. Design of wireless communication system requires accurate Path Loss (PL) model, which predicts the losses in channels. In this paper, we propose a new PL model using the empirical method in an urban area of Thailand. Also, PL model is designed to SM scenario via LoRaWAN at frequency of 920-925 MHz. That model can estimate real measured PL accurately. Likewise, proposed model is more correctly than the Okumura-Hata model, which was evaluated by the Root Mean Square Error (RMSE) and the R-square.

Keywords—Lora, LoRaWAN, smart meter, path loss model, empirical model, unidirectional antenna, linear regression

I. INTRODUCTION

The Smart Meter (SM) is an electronic device that records power consumption and reports to the control center for monitoring and billing via communication systems. The LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) can be applied for SM systems since the property of LoRa is Long Range, low power consumption, support for many devices and secure data transmission, but the data rate is low and the duty cycle is limited [1], [2]. However, this data rate and 1% duty cycle are enough to SM data communication. Because the SMs are fixed on electric poles, the unidirectional antenna can be improved link quality by increased signal strength and decreased radio interference [3]. In addition, the Path Loss (PL) models are important tools in wireless communication for predicting the behavior of propagation links between Transmitter (Tx) and Receiver (Rx) in channels. The PL models are useful for planning and designing the wireless network.

Currently, the PL model was invented to many models, each model is based on different conditions and a particular environments [4]. Similarly, In [5] and [6] designed the PL model using an empirical method for the LoRa network, operating at frequency of 868 MHz in an urban area, and the end device used an omnidirectional antenna. Also, in [7] reported the evaluation of the LoRa performance and a proposed PL model using an empirical method with the linear regression analysis. The proposed model can be deployed to smart city scenario based on LoRaWAN at frequency of 433 MHz and 868 MHz. Although many researchers may have designed the

PL models for many environments or different systems, there is no report that has designed the PL model for SM systems via LoRaWAN at frequency of 920-925 MHz, and the end device uses unidirectional antenna.

This paper is presented a new PL model for the SM scenario via LoRaWAN in an urban area of Thailand. The accuracy of the proposed model is more than the Okumura Hata model when evaluated by the Root Mean Square Error (RMSE) and the R-squared. Moreover, the antenna of each SMs was designed by the microstrip antenna due to features consist of light weight, low profile, compact size and low cost [8]. Thus, the LoRa link quality is improved by increasing the signal strength and decreasing unwanted interference when the microstrip antenna is used. The rest of a paper is organized as follows. In section II, we present the background. Section III discusses the system design and experimental setup. Section IV presents the results. Section V concludes the paper.

II. BACKGROUND

A. Overview of LoRa

The LoRa is a physical layer of wireless communication systems which is low power consumption and robust against some noise using the Chirp Spread Spectrum (CSS) modulation [2]. In Thailand, the LoRa network or LoRaWAN is operating at frequency of 920-925 MHz with 125 kHz of bandwidth [2]. For CSS modulation, it has an important parameter called Spreading Factor (SF), which represents the number of bits per symbol on 7 to 12 range. Moreover, the SF is used to control Data Rates (DR), coverage and sensitivity. For example, SF7 can transmit data with 5,470 bps of data rate, low sensitivity as -126.5 dBm, so the coverage is low. While the sensitivity of SF12 is -139.5 dBm, so a higher SF can increase range, but the speed is low approximately 250 bps [2]. Therefore, if the available SFs are suitable for the specific environment, the LoRa link efficiency can be increased.

B. Path Loss and Path Loss Model

Path loss (PL) is the reduction of radio energy in the wireless communication channels. Hence, the signals are obstructed by some objects in the environment. The path loss measurement (L_m) is calculated using the Friis equation [4] as

$$L_m = P_t - RSSI + G_t + G_r \quad (1)$$

where P_t is the Tx power in dBm. $RSSI$ is the Received Signal Strength Indicator in dBm. G_t and G_r are antenna gain in dBi.

TABLE I. EXPERIMENTAL SETUP PARAMETERS

Parameters	Values
End Device (ED)	STM32 LoRa Discovery kit (SXI276)
Gateway (GW)	UfiSpace GPE810A-923U (SXI301)
Frequency	923.2-924.6 MHz (CH0-CH7)
Bandwidth	125 MHz
Transmit power	12 dBm (16 mW)
Spreading Factor	SF7-SF12
Coding Rate	4/5
ED antenna	Microstrip antenna, -2.6 dBi
GW antenna	Monopole antenna, 1.5 dBi
ED antenna high	2 m
GW antenna high	6.2, 6.7, 6.4 m (Site A, B and C)
Extension module	Ublox NEO-6M GPS Module

Path loss model is mathematical model that is designed to predict the PL in channels or particular environments. For example, the free space model is a lower bound of possible PL when Tx and Rx are within Line-of-Sight (LOS), so it is commonly used as the reference model. Besides, the Okumura Hata model was developed based on the free space model by extension factors, such as antenna height and categories of environment: open area, suburban area and urban area [4]. For this paper, we considered the urban environment that have many houses and buildings with 2nd or more floors, or the average height of the building is around 10 to 15 m. Therefore, the urban areas are suitable for the SM scenario in Thailand.

III. SYSTEM DESIGN AND EXPERIMENTAL SETUP

A. System Design

An overview of our system design based on LoRaWAN architecture, which consists of four components as follows and shows the configured parameters in TABLE I.

- End Device (ED) is designed on the STM32 LoRa Discovery Kit with a microstrip antenna [8], which is designed to operate at frequency of 920-925 MHz. Moreover, the ED periodically transmits 7 bytes per packet of the Global Positioning System (GPS) data every 10 seconds, and each packet is switched the spreading factor between SF7 to SF12 and random 8 channels from 923.2 MHz to 924.6 MHz.
- Gateway (GW) is equipped to the UfiSpace GPE810 A-923U gateway with 1.5 dBi monopole antenna, which radiates equally radio powers in all directions. The GW can be received data from the EDs, and it sending data to the server via the Internet Protocol (IP).
- Network Server (NS) manages the entire packets from gateway such as handling device authentication, joining requests, and forwarding data to our application server.
- Application Server (AS) is designed in laptop to record the data. MQTT (Message Queue Telemetry Transport) protocol is used to get packets from the NS. Also, LINE application program notify via an HTTP protocol is utilized to create notification on smart phone.

B. Experimental Setup

The most of energy meter installations in Thailand are based on the Provincial Electricity Authority (PEA) standards,

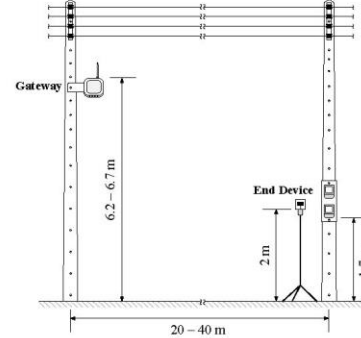


Fig. 1. LoRaWAN experimental setup on SM scenario

which requires the meters installed on the electric poles at 1.7 m height of the ground. Also, the range between electric poles is around 20 m to 40 m arranged along the road as shown in Fig. 1. During the measurement, the GW is fixed on an electric pole, whereas the position of the ED is moved out of the GW with constant height of 2 m above the ground which is the average height of meter position. Therefore, we defined this specific environment as the SM scenario, which is conducted in Narathiwat city of Thailand consisting of site A, B and C. Each site is different characteristic, and the desired area is less than 1 km² in practice because the area is divided into groups to reduce management issues and high reliability. In site A, the GW is fixed in the center of straight road with 6.2 m of height on the electric pole in community area. In site B, the location of the GW is at the crossroads and height of 6.7 m. In site C, this area is a small housing village, and the height of the GW as 6.4 m. So, the three site locations are represented the sample of SM scenario in an urban areas of Thailand.

IV. EXPERIMENTAL RESULT

All of received packets, we saved the RSSI level at each distance as shown in Fig. 2, and used it to calculate the PL measurement by (1). The average RSSI is divided to three levels, namely high, medium and low. For site A and B, most of the path between the ED and the GW is LOS, but the ED to GW path is mixed between LOS and NLOS at site C.

A. Mathematical model

The empirical model is a method to create a new path loss model using measured data [5]-[7]. Also, the linear regression analysis can be applied to find the mathematical model for SM scenario. The simple equation of the empirical model and the regression coefficients are as follows

$$L_{EMP} = 10 n \log_{10}(d) + \beta \quad (2)$$

$$n = \frac{\sum_{i=1}^N (d_{m(i)} - \bar{d}_m) (L_{m(i)} - \bar{L}_m)}{\sum_{i=1}^N (d_{m(i)} - \bar{d}_m)^2} \quad (3)$$

$$\beta = \bar{L}_m - n (\bar{d}_m) \quad (4)$$

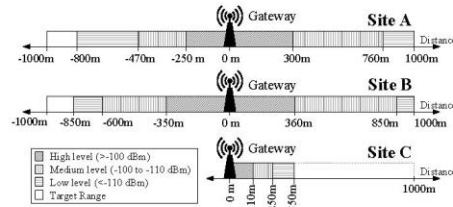


Fig. 2. The RSSI measurement in three locations

where L_{EMP} is the empirical path loss in dB. d is the distance between ED to GW in meters. n is the path loss exponent. β is the path loss intercept in dB. $d_{m(i)}$ is the measured distance of each samples. $L_{m(i)}$ is the measured path loss of each samples. \bar{d}_m and \bar{L}_m are the mean of measured distance and measured path loss. Finally, N is the number of the samples.

Using the empirical model with the linear regression analysis, we calculated the regression coefficients by (3) and (4). Thus, the proposed model (L_P) in dB as follows

$$L_P = 23.82 \log_{10}(d) + 49.59 \quad (5)$$

Figure 3 shows the scatter plot of measured data containing site A, B and C at different distances in log scale axis. By observing, the pattern of all data are similar to a linear model, so we can use linear regression analysis to design a new model as shown in (5). Moreover, the proposed model is compared with the free space model and the Okumura-Hata model. The result shows that the free space model (dotted line) is the baseline of all measured data. For the Okumura-Hata model (dashed line) is highest slope and lowest PL intercept. Therefore, the proposed model can be fitted to the measured data with more accuracy compared to other models such as the summary in TABLE II.

B. Model Evaluation

To accurately evaluate the proposed model, two statistical parameters consisting of the Root Mean Square Error (RMSE) and the R-squared are applied [4]. The RMSE is a good measure of how accurately the new model predicts the observed data, so lower values of RMSE indicate better fit. Likewise, the R-squared has useful property that represents the proportion of the variance for the measured PL points can be explained by the proposed model. The R-squared values range from 0 to 1, and the acceptable values are normally greater than 0.6. Moreover, we compare the accuracy of the proposed model with the free space model and the Okumura-Hata model.

The proposed model shows the RMSE as 9.69 dB and R-squared as 0.70 that are more accurate than traditional model. Due to the Okumura-Hata model has RMSE as 14.39 dB and R-squared as 0.34. The free space model has RMSE as 30.98 dB and R-squared is 0 that there is no correlation between the measured data and the predicted values as shown in TABLE II.

V. CONCLUSION

In this paper, we present a new PL model for SM scenario in an urban area of Thailand based on the empirical method and linear regression analysis. Besides, each SM communicates

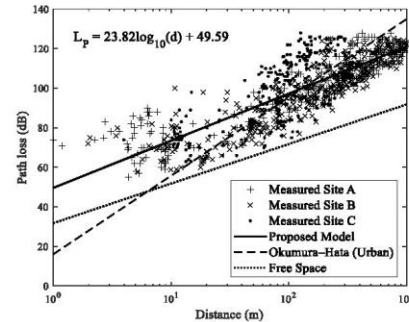


Fig. 3. Scatter plot of PL measurement compared with difference PL models

TABLE II. REGRESSION COEFFICIENTS AND EVALUATION PARAMETERS

Path loss model	n	β (dB)	RMSE (dB)	R-Squared
Proposed	2,382	49.59	9.695	0.70
Okumura-Hata	3,961	16.089	14.388	0.34
Free space	2	31.747	30.977	0

in LoRaWAN AS923 MHz with the microstrip antenna for improved signal quality and decreased interference. Therefore, the proposed model is useful to predict the PL measurement of LoRaWAN communication. The evaluated result shows that the predicted error of our proposed model is less than the Okumura-Hata model. It is the most used in an urban environment. Thus, this accurate PL model can be utilized to planning and optimization of the SM communication in the similar environments.

REFERENCES

- [1] G. Wibisono, G. Permata S, A. Awaludin and P. Suhasfan, "Development of advanced metering infrastructure based on LoRa WAN in PLN Bali toward Bali Eco smart grid," in *2017 Saudi Arabia Smart Grid (SASG)*, Jeddah, Saudi Arabia, 2017.
- [2] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui and T. Watteyne, "Understanding the Limits of LoRaWAN," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 34-40, 2017.
- [3] E. Anderson, G. Yee, C. Phillips, D. Sicker and D. Grunwald, "The impact of directional antenna models on simulation accuracy," in *2009 7th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks*, Seoul, South Korea, 2009.
- [4] H. K. Hoomod, I. Al-Mejibli and A. I. Jabboory, "Analyzing Study of Path loss Propagation Models in Wireless Communications at 0.8 GHz," in *IBN AL-HAITHAM FIRST INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE*, Baghdad, Iraq, 2017.
- [5] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen and M. Pettissalo, "On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology," in *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, Denmark, 2015.
- [6] M. R. Seye, B. Ngom, B. Gueye and M. Diallo, "A Study of LoRa Coverage: Range Evaluation and Channel Attenuation Model," in *2018 1st International Conference on Smart Cities and Communities (SCCIC)*, Ouagadougou, Burkina Faso, 2018.
- [7] P. Jörke, S. Böcker, F. Liedmann and C. Wietfeld, "Urban channel models for smart city IoT-networks based on empirical measurements of LoRa-links at 433 and 868 MHz," in *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Montreal, QC, Canada, 2017.
- [8] V. Bankey and A. K. Nella, "Design and performance issues of Microstrip Antennas," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 6, no. 3, pp. 1572-1580, 2015.

> REPLACE THIS LINE WITH YOUR PAPER IDENTIFICATION NUMBER (DOUBLE-CLICK HERE TO EDIT) < 1

Empirical Path Loss Model on Microstrip Antenna for LoRaWAN Communication in Urban Area of Thailand

Akekapong Kongsavat, Phairote Wouchoum and Chalakorn Karupongsiri

Abstract—LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) has been widely used for sensor network included Smart Meter (SM). The SM can report power consumption to control center via communication link automatically. Antenna is a key component to indicate an effective communication system. A MicroStrip (MS) antenna works based on unidirectional radiation pattern. Advantages of the MS antenna are light weight, small size, and easily etched on any print circuit board. Those advantages are needed for the SM communication that is installed at electric poll. In this paper, we implement the MS antenna for the SM communication via the LoRaWAN technology which operates at frequency of 920-925 MHz in Thailand. The MS antenna is used to design a new Path Loss (PL) model for LoRaWAN in urban areas. The rectangular MS patch antenna and PL model are designed by Empirical method. The result shows that unidirectional MS antenna is more effective than omnidirectional antenna in range 2.2 km and Packet Delivery Ratio (PDR) is 52.93%. Those performances are close to commercial antennas. Moreover, we analyze the results by mathematical model that includes Free space model, Okumura-Hata model, Root Mean Square Error (RMSE), and Coefficient of Determination or R-Squared.

Index Terms—LoRa, LoRaWAN, smart meter, path loss model, empirical model, microstrip antenna, unidirectional, linear regression

I. INTRODUCTION

THE Smart Meter (SM) is an electronic device that can measure the electric energy and record power consumption. Those parameters can be monitored and transmitted to control center for billing proposes via communication link [1]. A LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) technology is invoked for SM communication because of coverage area, huge number of clients, low energy consumption, and noise tolerance [2]. The disadvantages of LoRaWAN technology are low data rate and duty cycle of transmitting data is also low [3]. However, lowest data rate 0.3 kbps and 1% of duty cycle on the LoRaWAN are sufficient for the SM communication [2] [4]. In practice, the SM is installed at an electric poll which is limited of area. Thus, rectangular MicroStrip (MS) antenna is selected

for implementation with size issue. The MS antenna works based on a unidirectional pattern that releases a radio pattern on one direction. It can reduce interference to another transmission sources when compares with an Omni directional pattern [5]. So, the advantage of the MS antenna for SM communication is light weight, small size, and low cost [6].

Performance analysis on wireless communication wants Path Loss (PL) model to predict loss on a link between Transmitter (Tx) and Receiver (Rx). Each PL model has been implemented under condition and environments. In [7] proposed PL model at the frequency of 868 MHz on LoRaWAN technology in urban areas by Empirical Method and Linear Polynomial Fit are applied in order to find the coefficient of the PL model such as PL Exponent (PLE) and PL Intercept (PLI). This proposed model can predict the PL accurately. In [8] also designed a PL model for Smart City at the frequency of 433 MHz and 868 MHz on LoRaWAN in urban areas. Its gateway height is 30 m and End Device (ED) on the roof of a car is high 1.7 m. Both of gateway and ED height are close with our proposed model. Linear Regression analysis is applied to create mathematical model each frequency. The model can predict PL more correctly than traditional model. In [9]-[10] a PL model is developed by using the Empirical method. It is high precisely under the similar condition of frequency, Tx and Rx height, environments, and radio pattern. Most of PL model are implemented to predict more accurately in scenario.

In this research, we implement a rectangular MS antenna operating at the frequency of 920-925 MHz which used in the LoRaWAN technology in Thailand. Our proposed MS antenna is used to develop a new PL model for SM communication scenario. The results is compared with two commercial antennas. The proposed MS antenna performance is more effective than monopole antenna. However, our MS antenna is suffer than log periodic antenna [11] [12], but it is lower cost, smaller size and easier to install at electric poll than log periodic antenna. Moreover, proposed PL model is more accurately than Okumura-Hata model which estimate by Root Mean Square Error (RMSE) and R-squared.

The rest of the paper is organized as follows. In the section II, we introduce the background. Section III describes the MicroStrip antenna design. Section IV discusses the measurement setup. Section V analysis the experimental result and Section VI concludes the paper.

This work was supported by the Provincial Electricity Authority (PEA) in Thailand.

The authors are with the Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90110, Thailand (e-mail: 6010120121@psu.ac.th; wphairote@eng.psu.ac.th; chalakom.s@psu.ac.th).

> REPLACE THIS LINE WITH YOUR PAPER IDENTIFICATION NUMBER (DOUBLE-CLICK HERE TO EDIT) < 2

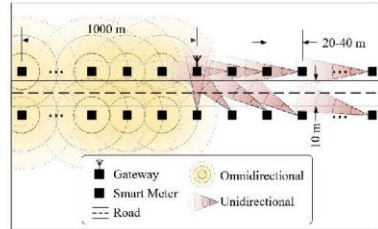


Fig. 1. Comparison of unidirectional and omnidirectional antennas

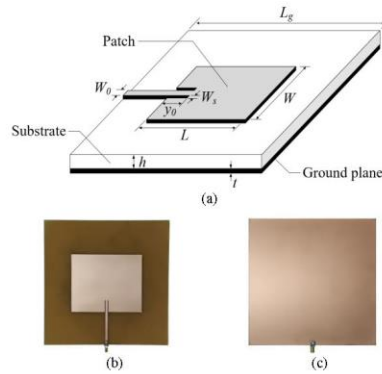


Fig. 2. Proposed MS antenna: (a) antenna structure; (b) top view; and (c) bottom view of the antenna prototype

II. BACKGROUND

A. Unidirectional Antenna

Unidirectional antenna is one direction of a main lobe of the antenna in order to transmit radio frequency such as Yagi-Uda, Horn, and MS antenna [13]. The unidirectional antenna is used to increase the performance of communication system. Especially, transmitter and receiver are fixed, the radio frequency can move directly from the transmitter to the receiver and low interference each other [5]. So, the unidirectional antenna is designed for fixed node. On the other hand, the radio pattern of the omnidirectional antenna is transmitted around itself [14]. It is used for a moving nodes such as mobile phone antenna.

Figure 1 shows the installation of SM at electric poll along the road. The SM scenario is compared between unidirectional and omnidirectional radio pattern. Energy of the omnidirectional antennas are overlapped each other. This is because many SMs are installed in range 100 m or every 20-40 m. Therefore, all nodes are interference each other including the gateway. On the other hand, the unidirectional antenna is the one direction of radio pattern that can reduce interference more than the omnidirectional antenna.

B. Overview of LoRa

Long Range (LoRa) communication technology is designed for long distance (up to 15 km), low energy consumption (less than 50 mW) [3] and noise tolerance with Chirp Spread Spectrum (CSS) technique. The LoRa operates at the frequency of 920-925 MHz in Thailand. The key operation of the CSS technique is Spreading Factor (SF) that represents a bit in symbol. The SF can vary from 7 to 12. This is a data rate on LoRa communication. The data rate on LoRa also depends on sensitivity level at receiver. For example, SF7 can communicate the maximum data rate at 5.470 kbps with the sensitivity level -126.5 dBm. This is the maximum sensitivity on LoRa communication, but lower coverage. On the other hand, the sensitivity is -139.5 dBm on SF12 can cover longer distance than SF7, but lower DR. It is lower than 250 bps [15]. Therefore, selection of the SF is importance for LoRaWAN performance.

LoRa architecture consists of: End Device, Gateway, Network Server, and Application Server [16]. It can be called LoRaWAN. The LoRaWAN can be applied for wireless sensor network [17], Internet of Things (IoT) [18], smart grid network including SM communication [2].

C. Path Loss Model

Path Loss is a predication of radio propagation loss over distance between Tx and Rx depending on environments. The PL is defined by transmitted power - received power. In order to measure the PL in Decibel (dB) in real environment, the Friis Transmission Equation can be applied [19].

$$PL_m = P_t - RSSI + G_t + G_r - L_t - L_r \quad (1)$$

where PL_m is the measured in dB. P_t is the Tx power in dBm. $RSSI$ is the Received Signal Strength Indicator in dBm. G_t and G_r are antenna gain in dBi. Finally, L_t and L_r are transmission line loss in dB.

Path Loss model is a mathematical model to estimate the radio frequency loss in dB depending on distance and environments. The PL model is useful for prediction the radio signaling for planning and designing propose [20]. Each PL model is created for specific area and operating frequency. Free space model is a reference model on the communication system. Okumura-Hata model is used at the frequency range of 200 MHz to 2 GHz in urban areas [21]. Tx and Rx antenna height are considered on the Okumura-Hata model. In this paper, we develop a new path loss model for SM communication via LoRaWAN in urban area in Thailand. Those locations are a residential area which two stories building. The proposed PL model is useful for SM installed at the electric poll around this area.

III. MICROSTRIP ANTENNA DESIGN

Rectangular Microstrip patch antenna is employed to a SM antenna because of unidirectional beaming, light weight, and low cost [22]-[23]. Those key properties are needed to implement for SM scenario at the electric poll as described above. The MS prototype consists of: 1) patch is used to release

> REPLACE THIS LINE WITH YOUR PAPER IDENTIFICATION NUMBER (DOUBLE-CLICK HERE TO EDIT) < 3

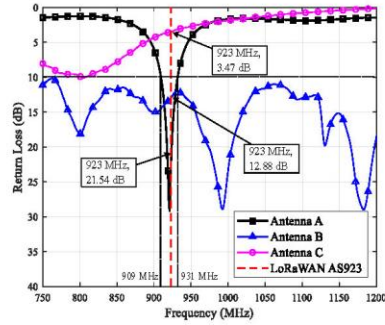


Fig. 3. Return loss measurement is compared with the operating frequency

TABLE I
PROPOSED MICROSTRIP ANTENNA STRUCTURE

Parameter	W	L	L_g	W_0	y_0	h	t
Dimension (mm)	97.2	79.5	170	3.083	16.2	1.6	0.035

the electromagnetic wave on the air; 2) substrate is a layer of dielectric that used to separate the conductors; and 3) ground plane is an opposite size of the dielectric substrate. Figure 2 illustrates the MS with patch width (W), patch length (L), width of the MS line feed (W_0), position of the feed from the edge along the direction of the patch length (y_0), patch width inset (W_g), length of square ground plane (L_g). The MS model is created by Printed Circuit Board (PCB) which is low cost and easy to make it as seen in Fig.2 (b),(c). Those parameters are also used in equation (2)-(5)

Glass Epoxy substrate (FR-4) of PCB is used to build the MS antenna. Assume that the resonant frequency (f_r) of the MS antenna is at 922.5 MHz. This is an operation frequency for LoRaWAN AS923 standard [15]. Define a property of the antenna as: 1) Antenna impedance is 50 ohm; 2) Dielectric constant (ϵ_r) of the substrate is 4.4; 3) Loss tangent ($\tan \delta$) is 0.02; 4) Copper plate thickness (t) is 0.035 mm; and 5) Substrate height (h) is 1.6 mm. Microstrip line feed is employed to connect with a Sub Miniature version A (SMA) connector. Thus, we can calculate the size of the rectangular MS patch antenna as seen below [13], [22].

$$W = \frac{c}{2f_r} \left[\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right]^{-1/2} \quad (2)$$

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (3)$$

$$\Delta L = 0.412 \cdot h \cdot \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (4)$$

TABLE II

ANTENNA SPECIFICATION

Parameter	Antenna A	Antenna B [11]	Antenna C [12]
Type	Microstrip (Proposed)	Log-Periodic (Commercial)	Monopole (Commercial)
Frequency	909-931 MHz	752-2700 MHz	800-825 MHz
Radiation pattern	Unidirectional	Unidirectional	Omnidirectional
Realized Gain	-2.61 dBi	8.2 dBi	-2.58 dBi
VSWR	1.17	1.58	5.1
Return loss (S_{11})	21.54 dB	12.88 dB	3.47 dB
HPBW (E, H-plane)	85°, 80°	60°, 85°	100°, 180°
Cable loss (L_c)	0.48 dB	0.41 dB	0 dB (Directed)
Weight	0.2 kg	0.6 kg	0.01 kg
Dimensions (mm ³)	170x170x10	282x210x65	10x10x50
Cost (USD)	\$5	\$40	\$5

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} - 2\Delta L \quad (5)$$

In practice, these calculated characteristics from the equation (2) – (5) may not be accuracy. This is because the dielectric constant on the FR-4 of PCB might not be as the parameter on data sheet exactly. Therefore, a new MS patch antenna is optimized by considering a return loss more than 10 dB of operating frequency as seen in Fig. 3 [24]. The square marker illustrates that power from Tx is efficiency transmitted via the MS antenna at the frequency of 909 to 931 MHz. Table I shows a new parameter of the MS antenna after the return loss has been applied.

In order to verify our proposed antenna A, two commercial antennas are compared. Antenna B is a Log-Periodic antenna type that works based on unidirectional beam [11]. Antenna C is a Monopole antenna that operates based on omnidirectional beam [12]. All of them are linear polarization which transmit a radio frequency to a LoRa gateway. The LoRa gateway uses a monopole antenna that can sense all LoRa EDs.

Figure 3 demonstrates Return Loss (RL) of all antennas with network analyzer [25]. The RL is a critical parameter to consider the antenna performance that should be more than 10 dB. This is because transmitted power is 97% or reflected power is 3% [22], [26]. The RL of the antenna A is more than 10 dB at the frequency of 909 to 931 MHz. It is 21.54 dB at 923 MHz. For the antenna B, it is 12.88 dB at the frequency of 752 to 2700 MHz. On the other hand, the RL on antenna C is more than 10 dB at the frequency of 800 to 825 MHz that is not match with the operating frequency for LoRaWAN. It also loss approximately 60% of the transmitted power on the air [26].

Table II compares the antenna specification of all antennas at the frequency of 922.5 MHz which is a center frequency of 920 to 925 MHz. The realized gain of antenna A is equal to -2.61 dBi that is in a negative value because of FR-4 of the PCB. The negative value also show that the realized gain of antenna C do not match at the frequency of 922.5 MHz. Both of them can operate within 1 km² coverage which responses our design for SM communication. The antenna A and C are low cost, approximately \$5. On the other hand, the antenna B is more

> REPLACE THIS LINE WITH YOUR PAPER IDENTIFICATION NUMBER (DOUBLE-CLICK HERE TO EDIT) < 4

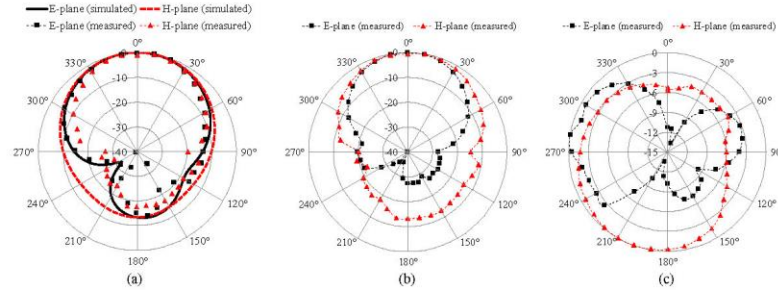


Fig. 4. Radiation pattern of (a) proposed MS antenna; (b) log-periodic commercial antenna; and (c) monopole commercial antenna

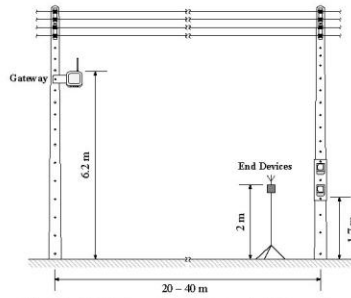


Fig. 5. LoRaWAN measurement setup in SM scenario

expensive than antenna A and C, around \$40 and its dimension is too big which is not suitable to install at the electric poll.

Figure 4 demonstrates a unidirectional radiation pattern on E-plane and H-plane. The maximum energy of antenna A and B are released at zero degree that follow our design. Conversely, the maximum energy of antenna C is at 280 degree of the E-plane. The radiation pattern at -3 dB is called Half Power Beam Width (HPBW). This is a key identify of antenna efficiency that shows the polarization of all antennas. The HPBW of antenna A, B, and C are approximately 85° , 60° , and 100° respectively. The small value of HPBW means the direction of energy to the font of antenna and low interference each other for SM scenario as described in Fig.1 section II.

IV. MEASUREMENT SETUP

In order to create a new PL model for SM communication on LoRaWAN technology, Fig. 5 demonstrates a SM scenario in Thailand. The proposed MS antenna is applied to investigate a new PL model by using an Empirical Method. Following by LoRaWAN setup indicates four main devices of LoRa communication.

A. Sampling Environment

Meter installing in Thailand controlled by Provincial Electricity Authority (PEA) that defines a meter height at least 1.7 m from ground. A gab of each electric poll is range 20 to 40

Parameter	Value
End Device (ED)	STM32 LoRa Discovery kit (SX1276) [12]
Gateway (GW)	UfiSpace GPE810A-923U (SX1301) [31]
Frequency	923.2 MHz, 923.4 MHz, 924.6 MHz
Spreading Factor (SF)	SF7, SF10, SF12
LoRa Bandwidth	125 MHz
Transmit Power	12 dBm
Coding Rate	4/5
ED antenna high	2 m
RX antenna high	6.2 m
ED Extension Module	Ublox NEO-6M GPS & SD Card Module

m along roadside as seen in Fig. 5. The sampling environment is as an urban area in Thailand. Residential area covers approximately 7.5 km^2 with 13,000 meters. The residential area is classified to 35 communities. Each community size is around 1 km^2 [27]. These information are useful for planning and implement the SM. LoRa gateway is installed at an electric poll at latitude 6.425481 and longitude 101.825112. This location is on the corner of main road and back road. For ED, it is also installed at the electric poll at height 2 m as described in Background Section. During finding radio signaling, the ED is move out from the gateway along electric poll. Position of the ED is record by their latitude and longitude to calculate a distance between ED and gateway. Signal to Noise Ratio (SNR) and RSSI are also collect to calculate its PL each position. All parameters are used for analysis a link quality on system.

B. LoRaWAN Setup

System diagram of LoRaWAN communication consists of four components. The LoRaWAN setup indicates key parameters of each system that affected to PL model as follow below.

1) End Device

A ED is used to connection with the SM and sends data to gateway via microcontroller board model STM32 [12]. As described in Section III, three antenna types are used in this research. Antenna A, B, and C operate at the frequency of

> REPLACE THIS LINE WITH YOUR PAPER IDENTIFICATION NUMBER (DOUBLE-CLICK HERE TO EDIT) < 5

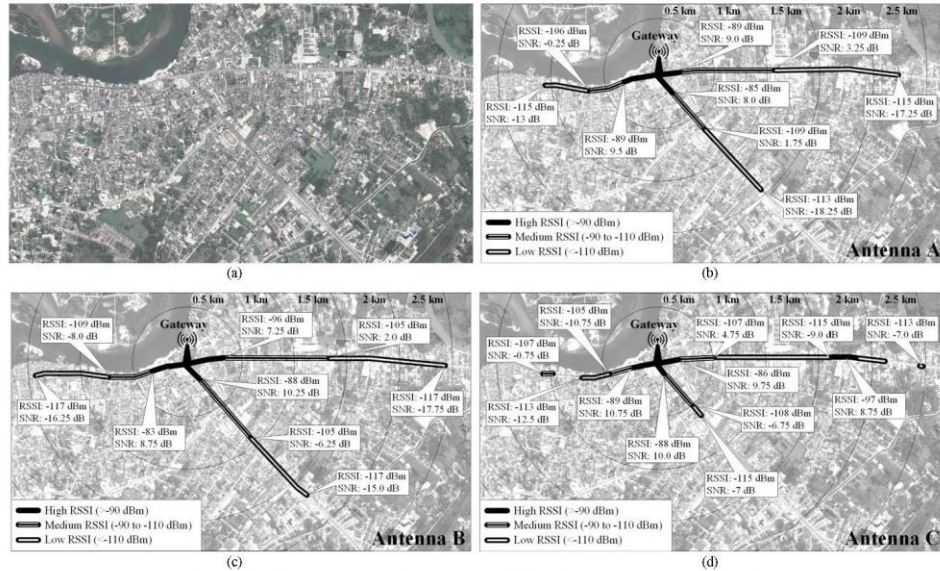


Fig. 6. Map of urban environment showing received RSSI level in Narathiwat province, Thailand. (a) real environment from Google Earth; (b) antenna A; (c) antenna B; (d) antenna C measurement

TABLE IV
LINK QUALITY, PATH LOSS REGRESSION COEFFICIENTS AND STATISTICAL RESULTS

Antenna	Link Quality		Path Loss Coefficient			Statistical Parameter				
	Max Range (m)	PDR (%)	n	β (dB)	σ (dB)	F -critical	F -statistic	P -value	R^2	Adjusted- R^2
A (Proposed)	2,233.77	52.93	2.95	32.27	5.79	3.87	2,032.19	0	0.84	0.84
B	2,459.07	56.62	3.11	37.94	6.71	3.86	2,098.69	0	0.84	0.84
C	1,667.63	28.38	2.45	52.88	5.95	3.89	774.99	0	0.79	0.79

923.2, 923.4, and 924.6 MHz. The ED gets its position by using a Global Positioning System (GPS). The GPS packet size is 11 bytes that sent to gateway at 5 seconds interval time. Transmission power of the ED is 12 dBm with code rate is 4/5. The data rate of the ED can be very by SF that is configured as 7, 10, and 12. All parameters in the ED are recorded into memory card in order to compare with received data at network server (NS) as seen in Table III.

2) Gateway

Gateway is employed to collect data from the ED with monopole antenna. The gateway uses a commercial product model UfiSpace [28]. It operates on the Internet Protocol (IP) to send the ED data to NS.

3) Network Server (NS)

An NS is applied for user authentication in order to verify and charging on Telecom Public Company Limited, Thailand.

4) Application Server (AS)

User can monitor or check the result form the ED via AS. In this research, Message Queue Telemetry Transport is used to select data and display on a Line application program via a smart phone on Hypertext Transfer Protocol [29].

V. RESULT AND DISCUSSION

LoRaWAN communicates on underlying of the Open Systems Interconnection (OSI) model. This paper focus on a RSSI level on the physical layer of the OSI model. It operates at frequency of 920-925 MHz in Thailand. We consider a PL of the radio frequency on real environment of the SM scenario. The results show a LoRa link quality, PL coefficient and statistical parameter. Mathematical analysis, statistical evaluation, and model implementation are discussed to validate our proposed PL model.

A. LoRa Link Quality

The performance of LoRa link quality describes a Packet Delivery Ratio (PDR) and a RSSI parameter. The PDR is collected by sending 733 packets to antenna A, B, and C. The antenna A, B, and C can receive 388, 415, and 208 packets respectively. Thus, the PDR can be rewritten as 52.93%, 56.62%, and 28.38% as seen in TABLE IV. Distance of transmission signal of three antennas are also investigated. The

> REPLACE THIS LINE WITH YOUR PAPER IDENTIFICATION NUMBER (DOUBLE-CLICK HERE TO EDIT) < 6

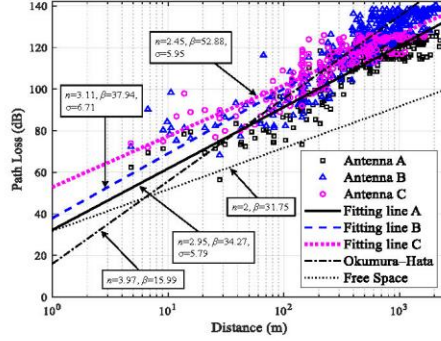


Fig. 7. PL measurement and proposed PL model of three antennas

coverage area of each antenna is antenna A (2.2 km); antenna B (2.5 km); and antenna C (2.1 km). Although the antenna A is lower performance than the antenna B, the coverage area is enough for the SM communication which implemented in community area (approximately 1 km²).

The RSSI level of antenna A, B, and C can be classified as high, medium, and low as seen in Fig. 6 [7]. The antenna A and B are high RSSI at distance 0-0.4 km, medium RSSI at distance 0.4-1.2 km, and low RSSI of distance more than 1.2 km. For the antenna C, it is lower RSSI level than the antenna A and B all positions. Moreover, the sensitivity of the antenna A and B are more than -90 dBm which the maximum required on the LoRa is -126.5 dBm. This sensitivity value offers data rate up 5,470 kbps on the LoRaWAN communication [15]. However, a gateway device is installed at the electric poll at height 6.2 m which is lower than two stores house. Those building may block the radio signal between the ED and gateway. It leads to the radio signaling dropping at lower than 2.2 km. Furthermore, a curve of roadside makes a Non Line Of Sight (NLOS) as seen in Fig. 6 (b). The gateway height and NLOS issues degrade the RSSI level on the LoRaWAN communication. From the experiment, the propose MS patch antenna performance is close to commercial product.

B. Mathematical Analysis

The Empirical model is used to verify our PL model by collecting data from the PL [8], [19], [30]-[31]. Equation (1) shows the PL of each antenna depending on distance between the ED and gateway. It indicates in the Log scale by Scatter plot as seen in Fig. 7. All data are in linear. Thus, we can use the linear regression analysis to build a Fitting line of each antenna. It also includes predication the PL from SM scenario. The empirical model and regression coefficients can be calculated by [32], [33].

$$PL_{EMP} = 10 n \log_{10}(d) + \beta + \chi_{\sigma} \quad (6)$$

$$n = \frac{\sum_{m=1}^N (d_{m(i)} - \bar{d}_m) \cdot (PL_{m(i)} - \overline{PL_m})}{\sum_{m=1}^N (d_{m(i)} - \bar{d}_m)^2} \quad (7)$$

$$\beta = \overline{PL_m} - n \cdot (\bar{d}_m) \quad (8)$$

where PL_{EMP} is the empirical PL in dB. d is distance between ED to GATEWAY in meters. n is the PL Exponent (PLE). β is the PL Intercept (PLI) in dB. χ_{σ} is a random errors of zero mean Gaussian random variable with standard deviation (σ), which describes the shadowing effects. $d_{m(i)}$ is the measured distance each samples. $PL_{m(i)}$ is the measured PL each samples. \bar{d}_m and $\overline{PL_m}$ are the mean of measured distance and measured PL. N is the number of samples. Finally, the standard deviation (σ) describes a deviation between the measured PL (PL_m) and the predicted PL (PL_p) when expressed in dB. Thus, the standard deviation or the standard error is calculated as [30].

$$\sigma \text{ (dB)} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^N (PL_{m(i)} - PL_{p(i)})^2}{N-1}} \quad (9)$$

Table IV shows regression coefficients of the PL measurement on antenna A, B, and C. It represents by fitting line A (solid line), B (dash line), and C (dot line) as seen in Fig. 7. Each fitting line demonstrates the trend of data by Least Squares method. PLE shows loss on distance between ED and gateway. The PLE of fitting line A, B, and C are around 2.95, 3.11, and 2.45, respectively. So, all fitting line antennas are in the range of 2.7-3.5 under urban area as mention by [34]. PLI is used to shows the PL at 1 m distance between Tx and Rx. The PLI can be calculated as a fitting line A (32.27 dB) and B (37.94 dB). The PLI of fitting line A is close with the PLI of Free space model as seen in Fig. 7.

Standard Deviation (SD) is used to illustrate a fluctuation of loss signal because of shadow fading. As refer in [35], the SD in urban Macrocell is 8 dB. So, the SD of fitting line A, B, and C are 5.79, 6.71, and 5.95 dB, respectively. Those SD are less than SD of Urban Macrocell. It is show that our proposed mode is better than commercial product.

C. Statistical Evaluation

Statistical significance test of linear regression analysis tools are used: 1) F-test is a tool to prove our PL model accuracy; 2) Coefficient of determination or R-Squared (R^2) is used to identify the relationship between measured and predicted PL and 3) Adjusted- R^2 is applied to verify the number of sampling data [30], [33].

Table IV illustrates the statistical significance test result of fitting line A, B, and C which significance level is 0.05. The results consist of; 1) F-Test is investigated by F-critical. It is less than F-statistic or P-value is lower than 0.05. Thus, error on prediction PL model of each fitting line are accepted; 2) R-Squared of Fitting line A, B, and C are 0.84, 0.84, and 0.79 respectively. Normally, the R-Squared should be more than 0.8. That means the data from measured PL is less distribute around the fitting lines as seen in Fig. 7 [33]; and 3) Adjusted- R^2 is used to validate the R-Squared. The Adjusted- R^2 fitting line A, B, and C are 0.84, 0.84, and 0.79 respectively. This value is similar with R-Squared. So, our samples is good enough to create a mathematical model.

> REPLACE THIS LINE WITH YOUR PAPER IDENTIFICATION NUMBER (DOUBLE-CLICK HERE TO EDIT) <

7

TABLE V
PREDICTION ERRORS OF THE PROPOSED MODELS, OKUMURA HATA MODEL
AND FREE SPACE MODEL IN THREE SITE LOCATIONS

Testing Site	Path Loss Model	RMSE (dB)	R ²
I	Proposed	9.15	0.72
	Okumura-Hata	10.19	0.65
	Free space	27.32	-1.52
II	Proposed	9.50	0.75
	Okumura-Hata	15.45	0.35
	Free space	24.73	-0.67
III	Proposed	8.79	0.72
	Okumura-Hata	14.15	0.27
	Free space	20.82	-0.59

D. Model Implementation

In order to investigate our proposed PL model in the SM scenario, the proposed model is applied to three sites: Site I, Site II, and Site III which is close to previous experimental environment. All of them use a gateway height 6.2 m and all parameters are taken from the first experimental configuration on LoRaWAN as seen in Table III.

Figure 8 compared the PL of Site I, II, and III by Scatter plot with our proposed model and Okumura-Hata model. The results show our proposed PL model is close to measured raw data than Free space model. Moreover, the Okumura-Hata model illustrates a trend of PL that are close to value from practice. Therefore, Root Mean Square Error (RMSE) and R-Squared are used to validate the PL model accuracy that consider the Prediction Errors by R-Squared and Root Mean Square Error (RMSE) [30]. Our proposed model can predict the PL more accurately than Okumura-Hata model in SM scenario by comparing with site I, II, and III as seen in Table V.

VI. CONCLUSION

The rectangular patch MS antenna is implemented on the frequency of 920 to 925 MHz for LoRaWAN in order to apply as the MS antenna in urban area, Thailand. The MS antenna has been taken to find a new Path loss model for SM scenario by using Empirical method. Measuring the path loss in real environment and Linear Regression analysis are used to create a new path loss model. The proposed MS is validated with commercial antennas at distance covering 2.2 km. Its quality of signal on the LoRa frequency as good as commercial products. However, our proposed antenna is lower cost than commercial antennas approximately ten times and smaller size which is suitable for installation at the electric poll.

Furthermore, the new PL model is developed by our proposed MS antenna that is more accurately than Okumura-Hata by RMSE and R-Squared verification. Therefore, our PL model and MS antenna are useful for SM communication on LoRaWAN technology in urban area of Thailand.

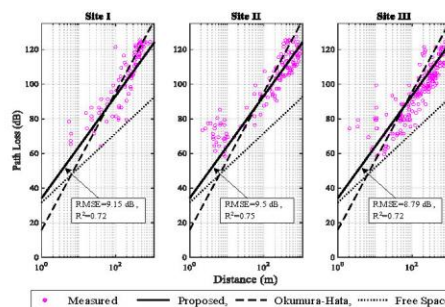


Fig. 8. Testing of the proposed model compares with the Okumura-Hata model and free space model in three locations

REFERENCES

- [1] Q. Sun, H. Li, Z. Ma, C. Wang, J. Campillo, Q. Zhang, *et al.*, "A Comprehensive Review of Smart Energy Meters in Intelligent Energy Networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, pp. 464-479, 2016.
- [2] G. Wibisono, S. G. Permata, A. Awaludin, and P. Suhasfan, "Development of advanced metering infrastructure based on LoRaWAN in PLN Bali toward Bali Eco smart grid," in *2017 Saudi Arabia Smart Grid (SASG)*, 2017, pp. 1-4.
- [3] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne, "Understanding the limits of LoRaWAN," *IEEE Communications magazine*, vol. 55, pp. 34-40, 2017.
- [4] J. Laveyne, G. Van Etvelde, and L. Vandeveld, "Application of LoRaWAN for smart metering: an experimental verification," *Int. J. Contemp. Energy*, vol. 4, pp. 61-67, 2018.
- [5] E. Anderson, G. Yee, C. Phillips, D. Sicker, and D. Grunwald, "The impact of directional antenna models on simulation accuracy," in *2009 7th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks*, 2009, pp. 1-7.
- [6] V. Bankey and N. A. Kumar, "Design and performance issues of Microstrip Antennas," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 6, pp. 1572-1580, 2015.
- [7] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen, and M. Pettissalo, "On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology," in *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, 2015, pp. 55-59.
- [8] P. Jörke, S. Böcker, F. Liedmann, and C. Wietfeld, "Urban channel models for smart city IoT-networks based on empirical measurements of LoRa-links at 433 and 868 MHz," in *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2017, pp. 1-6.
- [9] N. Elfadil, "Impact of Using Modified Open Area Okumura-Hata Propagation Model in Determination of Path-loss: Malaysia as Case Study," *International Journal of Modern Engineering Research*, vol. 7, pp. 1-6, 2017.
- [10] S. I. Popoola, A. A. Atayero, N. Faruk, C. T. Calafate, E. Adetiba, and V. O. Matthews, "Calibrating the standard path loss model for urban environments using field measurements and geospatial data," 2017.
- [11] TechnicalAntennas, *Wide Band Cellular Log Periodic Yagi 08 dBi*. Available: <https://technicalantennas.com/collections/yagi/products/wide-band-cellular-log-periodic-yagi-08-dbi>
- [12] Semtech, (2019). *B-L072Z-LRWANI*. Available: https://www.st.com/resource/en/data_brief/b-l072z-lrwan1.pdf
- [13] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*, 3th ed. John Wiley & sons, 2005.
- [14] M. Rademacher and K. Jonas, "Interference of simulated IEEE 802.11 links with directional antennas," in *2017 Wireless Days*, 2017, pp. 27-32.
- [15] *LoRaWAN™ 1.0.2 Regional Parameters*, LoRa Alliance, 2017.

> REPLACE THIS LINE WITH YOUR PAPER IDENTIFICATION NUMBER (DOUBLE-CLICK HERE TO EDIT) < 8

- [16] R. Sanchez-Iborra, J. Sanchez-Gomez, J. Ballesta-Viñas, M.-D. Cano, and A. Skarmeta, "Performance evaluation of LoRa considering scenario conditions," *Sensors*, vol. 18, p. 772, 2018.
- [17] M. E. E. Alahi, N. Pereira-Ishak, S. C. Mukhopadhyay, and L. Burkitt, "An internet-of-things enabled smart sensing system for nitrate monitoring," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, pp. 4409-4417, 2018.
- [18] A. Mdhaffar, T. Chaari, K. Larbi, M. Jmaiel, and B. Freisleben, "IoT-based health monitoring via LoRaWAN," in *IEEE EUROCON 2017-17th International Conference on Smart Technologies*, 2017, pp. 519-524.
- [19] R. El Chall, S. Lahoud, and M. El Helou, "LoRaWAN Network: Radio Propagation Models and Performance Evaluation in Various Environments in Lebanon," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, pp. 2366-2378, 2019.
- [20] H. K. Hoomod, I. Al-Mejibli, and A. I. Jabboory, "Analyzing Study of Path loss Propagation Models in Wireless Communications at 0.8 GHz," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, p. 012028.
- [21] J. Milanovic, S. Rimac-Drfje, and K. Bejuk, "Comparison of propagation models accuracy for WiMAX on 3.5 GHz," in *2007 14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, 2007, pp. 111-114.
- [22] H. Werfelli, K. Tayari, M. Chaoui, M. Lahiani, and H. Ghariani, "Design of rectangular microstrip patch antenna," in *2016 2nd International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, 2016, pp. 798-803.
- [23] L. Trinh, T. Q. K. Nguyen, D. Phan, V. Tran, V. Bui, N. Truong, et al., "Miniature antenna for IoT devices using LoRa technology," in *2017 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, 2017, pp. 170-173.
- [24] A. Alami, S. D. Bennani, M. Bekkali, and A. Benbassou, "Design, analysis and optimization of a microstrip patch antenna at frequency 3.55 GHz for WiMAX application," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 53, 2013.
- [25] Keysigh. N9912-90006. Available: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/N9912-90006.pdf>
- [26] F. M. Inc. *VSWR/RETURN LOSS vs TRANSMITTED POWER*. Available: <https://www.dhwebsites.com/fsm/engineering/vswr.html>
- [27] Wikipedia. *Mueang Narathiwat District*. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Mueang_Narathiwat_District
- [28] L. Hon Hai Precision Industrial Co. *Indoor LoRa Gateway (GP810U)*. Available: <https://fccid.io/MCLGPE810U/user-Manual/Users-Manual-3393820.pdf>
- [29] LINE. (2019). *LINE Notify API*. Available: <https://notify-bot.line.me/th>
- [30] M. Cheffena and M. Mohamed, "Empirical Path Loss Models for Wireless Sensor Network Deployment in Snowy Environments," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, pp. 1-1, 2017.
- [31] O. P. Omolaye, G. A. Igatewayue, and G. A. Akpakwu, "Okumura-Hata: A Perfect Model for Driving Route UHF Investigation," *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol. 4, pp. 2320-0847.
- [32] S. R. Saunders and A. Aragón-Zavala, *Antennas and propagation for wireless communication systems*: John Wiley & Sons, 2007.
- [33] J. O. Rawlings, S. G. Pantula, and D. A. Dickey, *Applied regression analysis: a research tool*: Springer Science & Business Media, 2001.
- [34] T. S. Rappaport, *Wireless communications: principles and practice*: Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, 2002.
- [35] F. J. Casadevall Palacio, R. Agusti Comes, J. Pérez Romero, M. López Benítez, S. Grimoud, B. Sayrac, et al., "Radio environmental maps: information models and reference model. Document number D4. 1," 2011.



Akekapong Kongsavat received the B.Eng. degree in electrical engineering from the Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand, in 2014.

Since 2015, he is an electrical engineer at meter department of the Provincial Electricity Authority (PEA) in Narathiwat, Thailand. He joined the Prince of Songkla University (PSU), Songkhla, Thailand, as a M.Eng. degree student of electrical engineering in 2018, during which time he was involved with wireless communication for the smart meter. His current research interests include wireless communication, LoRaWAN network, path loss model and smart meter systems.



Phairote Wounchoum received the B.Eng. degree in electrical engineering from Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand, in 1997, and the M.Eng. and Ph.D. degree in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL), Bangkok, Thailand, in 2004 and 2010, respectively.

He is currently a lecturer at the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University. His research interests are in the area of antennas and microwave for wireless communication and Agronomic.



Chalakorn Karupongsiri (S'13) received B.Ind. Tech. degree in electronics engineering from South-East Asia University, Bangkok, Thailand in 1998, the M.Eng. degree in electrical engineering from Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand, in 2006, the M.Eng. degree in telecommunication engineering from the University of

Wollongong, Wollongong, N.S.W., Australia, in 2011, and the Ph.D. degree in electrical and information engineering from the University of Sydney, Sydney, N.S.W., Australia, in 2017.

Dr. Chalakorn is a lecturer in the Department of Electrical Engineering, Prince of Songkla University, Thailand. His current research interests include smart meter communication, smart grid, LTE network, and wireless network.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายเอกพงศ์ คงสวัสดิ์

รหัสประจำตัวนักศึกษา 6010120121

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2557

ทุนการศึกษา

1. ทุนโครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่าง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กับมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
2. ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

วิศวกร ระดับ 5 แผนกมิเตอร์ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดนราธิวาส อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

1. เอกพงศ์ คงสวัสดิ์ และ ชลากร ครุพงศ์ศิริ, “การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการสื่อสารระหว่าง LoRa และ NB-IoT,” ใน งานประชุมวิชาการ และนวัตกรรม กฟภ. ปี 2561 *PEA4.0 : Road to Digital Utility*, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย, กันยายน 24-25, 2561, น. 428-433
2. A. Kongsavat and C. Karupongsiri, “Path Loss Model for Smart Meter on LoRaWAN Technology with Unidirectional Antenna in an Urban Area of Thailand,” presented at the 2020 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM), Marina Square, Singapore, Mar. 25-27, 2020. (Accepted Paper)
3. A. Kongsavat, P. Wouchoum and C. Karupongsiri, “Empirical Path Loss Model on Microstrip Antenna for LoRaWAN Communication in Urban Area of Thailand,” *IEEE Internet of Things Journal*, 2020. (Submitted Paper)