

การประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบ
สะท้อนในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

EVALUATION OF THE PROBE EXCITED CIRCULAR RING ANTENNA ABOVE
THE REFLECTOR IN WIRELESS LAN SYSTEM



วิเชษฐ์ อ่อนรำพรรณ
WICHET ON-RAMPAN



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

๖๖.
๑๕๕๘๗ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
๑๕๕๘๗ พ.ศ. ๒๕๕๗

ISBN 974-15-1239-2

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 58615/
วันเดือนปี 27 ส.ค. 2549

114561150

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง
b.
i.

EVALUATION OF THE PROBE EXCITED CIRCULAR RING ANTENNA ABOVE
THE REFLECTOR IN WIRELESS LAN SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATION ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2004

ISBN 974-15-1239-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย
นักศึกษา	นายวิเชษฐ์ อ่อนรำพรรณ
รหัสนักศึกษา	45061063
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนสำหรับการสื่อสารแบบจุดต่อจุดในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11 การประเมินพิจารณาจากระยะบริการสูงสุด (Maximum Link Distance) และ ค่าวิสัยสามารถ (Throughput) ของโครงข่ายเมื่อใช้สายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนและสายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศอ้างอิง ขั้นตอนการประเมินเริ่มจากการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง และ อัตราการขยาย จากนั้นคำนวณระยะบริการสูงสุดของโครงข่ายโดยใช้แบบจำลองอากาศว่าง แบบจำลองสองรังสี แบบจำลองฮาตะ และ แบบจำลองความชันคู่ การคำนวณค่าวิสัยสามารถหาได้จากค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุด อัตราความผิดพลาดบิต และ อัตราความผิดพลาดแพ็คเก็ตโดยสมมติให้ช่องสื่อสารเป็นแบบไร้ทศ การทดสอบและการวิเคราะห์เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการคำนวณประกอบด้วยการทดสอบระยะบริการสูงสุดและการทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนโดยเปรียบเทียบผลกับสายอากาศอ้างอิง ซึ่งพบว่าสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนให้ระยะบริการสูงสุดและค่าวิสัยสามารถดีกว่าสายอากาศไดโพล ผลการประเมินประสิทธิภาพสายอากาศมีประโยชน์อย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

Thesis Title	Evaluation of the Probe Excited Circular Ring Antenna above the Reflector in Wireless LAN System
Student	Mr. Wichet On-Rampan
Student ID.	45061063
Degree	Master of Engineering
Programme	Telecommunication Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

ABSTRACT

This thesis presents the evaluation of the probe excited circular ring antenna above the reflector in point-to-point IEEE 802.11 Wireless LAN bridge system. The evaluation is considered by the maximum link distance and the throughput of systems. The results of the probe excited circular ring antenna above the reflector is compared with the dipole antenna. First, the numerical and experimental results of radiation characteristics such as radiation pattern, half power beamwidth, maximum directivity and gain of the antenna are presented. Then, the maximum link distance are determined from the Free-Space model, Two-Ray model, Hata model and Dual-Slope model. The throughput of system is calculated by Theory Maximum Throughput, Bit Error Rate (BER) and Packet Error Rate (PER) in Ricain fading channel. Finally, the measured and calculated results are compared. It is found that, probe excited circular ring antenna above the reflector obtains the maximum link distance and the throughput better than dipole antenna. The evaluations of these antennas are very useful for designing the Wireless LAN system.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้าโดยเป็นผู้ให้ความช่วยเหลือและแนะนำแนวทางในการศึกษาเสมอมา ตลอดจนอบรมสั่งสอน ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สมผล โภคสวัสดิ์ ผู้ซึ่งให้คำแนะนำและอนุเคราะห์สายอากาศสำหรับการทดสอบ และขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ หัวหน้าห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายสำหรับคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการวิจัยและกรุณาให้ข้าพเจ้าได้เสนอความก้าวหน้าของวิทยานิพนธ์ตลอดช่วงเวลาที่ศึกษา

ขอขอบคุณ คุณกฤตยา นาคประสิทธิ์ คุณสุธาสินี ละมุลตรี คุณไพโรจน์ วุ่นชุ่ม และขอบคุณสมาชิกห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายทุกท่านสำหรับคำแนะนำและข้อคิดดีๆ ระหว่างการอภิปราย และมีความสนุกสนานเป็นกันเองระหว่างทำกิจกรรมต่างๆ ตลอดช่วงเวลาที่ผ่านมา

สุดท้ายขอกราบพระคุณบิดา มารดา สมาชิกในครอบครัว และนางสาวศุภระวรรณ ตาลวงศ์ ที่ให้ความรักความห่วงใย ตลอดจนให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาด้วยดีตลอดมา ขอขอบพระคุณครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

วิเชษฐ์ อ่อนรำพรรณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.5 เนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 สายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อน.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 โครงสร้างสายอากาศ.....	4
2.3 การออกแบบ.....	5
2.4 ผลการคำนวณและการทดสอบ.....	7
2.5 สรุป.....	9
บทที่ 3 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นและช่องสี่เหลี่ยมจางหาย.....	10
3.1 บทนำ.....	10
3.2 ทฤษฎีและแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น.....	10
3.3 แบบจำลองอากาศว่าง.....	10
3.4 แบบจำลองสองรังสี.....	13
3.5 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นเชิงประสพการณ์.....	19
3.5.1 แบบจำลองฮาดะ (Hata Model).....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

3.5.2 แบบจำลองซีซีไออาร์ (CCIR Model).....	20
3.6 แบบจำลองลอการิทึม (Log-Distance Path Loss Model).....	21
3.7 แบบจำลองความชันคู่ (Dual-Slope Model).....	23
3.8 ช่องสื่อสารจางหาย (Fading Channel).....	24
3.9 การจางหายเร็ว (Fast-Fading).....	27
3.9.1 การแจกแจงแบบเรย์ลี (The Rayleigh Distribution).....	28
3.9.2 การแจกแจงแบบไรซ์ (The Rician Distribution).....	30
3.9.3 การแจกแจงแบบนาคากามิ (The Nakagami Distribution).....	32
3.10 การจางหายช้า (Slow-Fading).....	34
3.10.1 การแจกแจงปกติล็อก (Log-normal Distribution).....	36
3.11 สรุป.....	38
บทที่ 4 การประเมินประสิทธิภาพโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE 802.11.....	39
4.1 บทนำ.....	39
4.2 พื้นฐานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE 802.11.....	39
4.2.1 โทโปโลยี (Topology).....	40
4.2.2 การควบคุมการเข้าถึงสื่อ (Medium Access Control).....	40
4.2.3 รูปแบบเฟรม.....	40
4.2.4 ชั้นสื่อสารกายภาพ.....	41
4.2.5 ค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุด.....	42
4.3 ระยะเวลาบริการสูงสุด.....	43
4.4 อัตราผิดพลาดบิตโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE 802.11.....	46
4.5 อัตราผิดพลาดแพ็คเก็ตเกิดและค่าวิสัยสามารถ.....	49
4.6 สรุป.....	52
บทที่ 5 การประเมินประสิทธิภาพและผลการทดสอบ.....	53
5.1 บทนำ.....	53
5.2 การทดสอบประสิทธิภาพ.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

5.2.1 การวัดกำลังงานรับ.....	55
5.2.1 การวัดค่าวิสัยสามารรถ.....	55
5.3 ผลทดสอบระยะเวลาบริการ.....	57
5.4 ผลทดสอบค่าวิสัยสามารรถ.....	59
5.5 สรุป.....	61
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	62
6.1 บทนำ.....	62
6.2 สรุปเนื้อหาโดยรวม.....	62
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	63
เอกสารอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	68
ประวัติผู้เขียน.....	69

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อน.....	4
2.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศวงแหวน.....	5
2.3 คุณลักษณะที่ได้รับผลกระทบเมื่อระยะห่างระหว่างวงแหวนและแผ่นสะท้อนเปลี่ยนไป.....	6
2.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศวงกลมเหนือระนาบสะท้อน.....	8
2.5 สายอากาศวงกลมและแผ่นสะท้อน.....	8
2.6 ผลการวัดอิมพีแดนซ์ด้านเข้าและอัตราส่วนคลื่นนิ่ง.....	9
3.1 ความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นของแบบจำลองอากาศว่างที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5 GHz.....	13
3.2 แบบจำลองสองรังสี.....	14
3.3 ตัวอย่างแบบจำลองสองรังสี เมื่อ $f = 2.45$ GHz.....	16
3.4 อัตราขยายเมื่อเทียบกับความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นในอากาศว่าง เมื่อ $h_t = 5$ m, $h_r = 1.5$ m, $f = 2.45$ GHz.....	16
3.5 อัตราการสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นของแบบจำลองสองรังสี เมื่อ $h_t = 5$ m, $h_r = 1.5$ m, $f = 2.45$ GHz.....	18
3.6 เขตเฟรสเนล.....	19
3.7 เปรียบเทียบอัตราการสูญเสียการแพร่กระจายแบบฮาตะและสองรังสี เมื่อความสูงสายอากาศส่งและรับเท่ากับ 1 เมตร.....	21
3.8 อัตราการสูญเสียแบบจำลองความชันคู่และผลการที่ความถี่ 2.45 GHz.....	24
3.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังงานรับของลูกข่ายที่ระยะห่างจากสถานีฐานเท่ากันแต่เส้นทางต่างๆกัน.....	25
3.10 การแบ่งประเภทของช่องสื่อสารจางหาย.....	26
3.11 องค์ประกอบและเส้นทางย่อยของคลื่นหลายวิถี.....	28
3.12 การแจกแจงแบบเรย์ลี (Rayleigh).....	30
3.13 การแจกแจงแบบไรซ์ เมื่อตัวประกอบ K เท่ากับ 0 1 3 10 และ 30 ตามลำดับ.....	32
3.14 การแจกแจงแบบนาคาเกมิ เมื่อ $m = 0.5, 1, 2$ และ 5.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 การประมาณการแจกแจงแบบไรซ์ด้วยการแจกแจงแบบนาคาเกมิ	
เมื่อ $K = 0, 1, 5$ และ 10	34
3.16 การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการจางหายซ้ำ.....	35
3.17 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นของการจางหายซ้ำจากการวัดและทฤษฎี.....	35
3.18 ความสัมพันธ์ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นแบบลอกปกติและแบบปกติ	
เมื่อ $\mu_z = 0$	36
4.1 มาตรฐาน IEEE 802.11 ในมาตรฐาน IEEE 802.....	39
4.2 เฟรมชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อ.....	41
4.3 กลุ่มบริการพื้นฐาน (BSS) กลุ่มบริการขยาย (ESS) และระบบกระจาย (DS).....	41
4.4 ปรากฏการณ์การซ้อนตัวในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย.....	41
4.5 พลีแอมเบิล PLCP ส่วนหัว PLCP และ MPDU.....	42
4.6 แผนผังเวลาการส่งข้อมูล IEEE 802.11.....	43
4.7 ค่าวิสัยสามารถอดุมคติสูงสุดและขนาด MSDU ที่อัตราบิต 1 2 5.5 และ 11 Mbps.....	43
4.8 การทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนวงกลมในระบบ โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย.....	45
4.9 การทำนายระยะบริการสูงสุดจากแบบจำลองต่างๆ.....	45
4.10 การทำนายระยะบริการสูงสุดกับอัตราขยายสายอากาศโดยใช้แบบจำลองความชันคู่.....	46
4.11 ความผิดพลาดบิตสำหรับช่องสื่อสารจางหายแบบไรซ์.....	48
4.12 ความผิดพลาดแพ็กเก็ตสำหรับช่องสื่อสารจางหายแบบไรซ์.....	50
4.13 ค่าวิสัยสามารถสำหรับช่องสื่อสารจางหายแบบไรซ์.....	51
4.14 ค่าวิสัยสามารถสำหรับช่องสื่อสารจางหายแบบไรซ์ เมื่อ $K = 10$ dB	
สำหรับอัตราขยายของสายอากาศ $0 - 10$ dBi	51
5.1 สถานที่ทดสอบและอุปกรณ์ (ก) สถานที่ทดสอบ (ข) อุปกรณ์ทดสอบ.....	54
5.2 การทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศ (ก) พารามิเตอร์การทดสอบ	
(ข) แผนผังการทดสอบ.....	54
5.3 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ (ก) ด้านสถานีฐาน (ข) ด้านลูกข่าย.....	54

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 กำลังรับที่วัดระยะ 20 m เมื่อสายอากาศสถานีฐานคือสายอากาศวงแหวน.....	56
5.5 ค่าวิสัยสามารถที่ระยะ 20 m เมื่อสายอากาศสถานีฐานคือสายอากาศวงแหวน.....	56
5.6 การเปรียบเทียบผลทดสอบกำลังงานรับกับผลคำนวณจากแบบจำลองชนิดต่างๆ เมื่อสายอากาศสถานีฐานคือสายอากาศไดโพล.....	58
5.7 การเปรียบเทียบผลทดสอบกำลังงานรับกับผลคำนวณจากแบบจำลองชนิดต่างๆ เมื่อ สายอากาศสถานีฐานคือสายอากาศวงแหวน.....	58
5.8 ผลทดสอบค่าวิสัยสามารถกรณีสายอากาศสถานีฐานคือ สายอากาศไดโพลและวงแหวน....	59
5.9 ผลทดสอบค่าวิสัยสามารถกรณีที่สายอากาศสถานีฐานคือ สายอากาศไดโพลและวงแหวน.....	60
5.10 การเปรียบเทียบผลทดสอบและผลคำนวณค่าวิสัยสามารถที่ระยะห่างต่างๆ กรณีที่ สายอากาศสถานีฐานคือสายอากาศไดโพล.....	60
5.11 การเปรียบเทียบผลทดสอบและผลคำนวณค่าวิสัยสามารถที่ระยะห่างต่างๆ กรณีที่ สายอากาศสถานีฐานคือสายอากาศวงแหวน.....	61

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 กฎกำลังงานของฮาดะ เมื่อ $h_r = 1.5\text{ m}$ ความถี่ 2.45 GHz.....	22
3.2 ค่าแอมพลิจูดโปรแวนเชี่ยล (n) สำหรับสภาวะแวดล้อมต่างๆ.....	23
4.1 ค่าเวลาต่างๆที่ใช้ในการส่งข้อมูล.....	43
4.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการคำนวณระยะบริการสูงสุด.....	44
5.1 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบ.....	55
5.2 ระยะบริการสูงสุด.....	57
6.1 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศวงกลมเหนือระนาบสะท้อน.....	62
ก.1 คุณสมบัติสถานีฐาน D-Link DWL-2000AP+.....	68
ก.2 คุณสมบัติการ์ดโครงข่ายไร้สาย Cisco Aironet 350 Series Client Adapter.....	68



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การใช้งานโครงข่ายไร้สายแบบจุดต่อจุดมีแนวโน้มมากขึ้นเช่น การเชื่อมโยงโครงข่ายท้องถิ่น (LAN) ระหว่างอาคารเข้าด้วยกันโดยใช้โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) หรือการให้บริการโครงข่ายเฉพาะที่ การใช้งานดังกล่าวต้องการสายอากาศที่สามารถชี้ทิศทางไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้เช่นสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของสายอากาศมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายซึ่งการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพนี้แสดงถึงประสิทธิภาพของสายอากาศ ดังนั้นสามารถทำการประเมินประสิทธิภาพสายอากาศในพจน์ของระยะบริการสูงสุด (Maximum Link Distance) และ ค่าวิสัยสามารถ (Throughput) ได้ การประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศเพื่อหาผลกระทบต่อประสิทธิภาพโครงข่ายก่อนนำไปใช้งานนั้นมีความจำเป็นต่อการออกแบบ ทั้งนี้เพราะสามารถนำไปใช้ในการทำนายคุณภาพการให้บริการ (Quality of Service) ของโครงข่ายได้ การประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อน [1] เป็นสายอากาศทดสอบและเลือกสายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศอ้างอิง สายอากาศนี้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบจุดต่อจุดเพราะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวและให้อัตราการขยายสูง สายอากาศสร้างง่ายโครงสร้างไม่ซับซ้อน การหาระยะบริการสูงสุดทำได้โดยใช้วิธีแปลงค่าอัตราการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่ระบบยอมรับได้ให้มีหน่วยเป็นระยะทาง [19] ซึ่งความแม่นยำของการทำนายขึ้นอยู่กับทางเลือกแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น สำหรับค่าวิสัยสามารถนั้นแสดงถึงคุณภาพการให้บริการของโครงข่ายซึ่งมีผลต่อการออกแบบโปรแกรมประยุกต์ที่ใช้ในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพสายอากาศในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายซึ่งสายอากาศที่ใช้ในการทดสอบคือสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อน การประเมินประสิทธิภาพพิจารณาจากผลการคำนวณและผลการทดสอบค่าระยะบริการสูงสุดและค่าวิสัยสามารถของโครงข่ายที่ได้จากสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อน โดยนำผลการคำนวณและการทดสอบนี้ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากสายอากาศไดโพล ซึ่งผลของการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการออกแบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายได้

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เสนอการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบจุดต่อจุดภายนอกอาคารที่มีเส้นแนวระดับสายตา (Line of Sight) ระหว่างสถานีฐานและลูกข่าย ในการวิเคราะห์ระยะบริการสูงสุดของโครงข่ายนั้น ใช้แบบจำลองหลายแบบได้แก่ แบบจำลองอากาศว่าง แบบจำลองสองรังสี แบบจำลองฮาดะ และแบบจำลองความชันคู่เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของระยะบริการสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองแต่ละแบบ สำหรับการวิเคราะห์ค่าวิสัยสามารถนั้นสามารถคำนวณได้จากอัตราผิดพลาดบิตและอัตราผิดพลาดแพ็คเก็ต ซึ่งในการคำนวณสมมติให้ช่องสื่อสารเป็นแบบไร้ซีเรียลและไม่มีแทรกสอดของสัญญาณ การยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการคำนวณด้วยผลการทดสอบนั้นประกอบด้วย ระยะบริการสูงสุดและค่าวิสัยสามารถของโครงข่ายที่ได้จากสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนและสายอากาศไดโพล การทดสอบกำหนดให้โครงข่ายใช้อัตราบิตที่ 1 Mbps ความสูงสายอากาศที่สถานีฐานและลูกข่ายมีค่าเท่ากับ 1.5 m และ 1 m ตามลำดับ จากนั้นทำการประเมินประสิทธิภาพสายอากาศจากผลที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบโดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนกับผลที่ได้จากสายอากาศไดโพล

สำหรับรูปภาพและเนื้อหาบางตอนที่อ้างอิงถึงสายอากาศวงแหวนนั้นให้หมายถึงสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนเพื่อให้การเขียนนั้นกระชับขึ้น

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาเริ่มจากการศึกษาและการออกแบบสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อน เริ่มจากการหาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง อัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นด้านข้าง และ ค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสม การเปรียบเทียบการคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 กับผลการทดสอบ จากนั้นศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเดินทางผ่านช่องสื่อสาร เช่น การทำนายการสูญเสียการแพร่กระจายด้วยแบบจำลองต่างๆ เช่น แบบจำลองอากาศว่าง (Free-Space Model) แบบจำลองสองรังสี (Two-Ray Model) [19] แบบจำลองฮาดะ (Hata Model) [4] แบบจำลองความชันคู่ (Dual-Slope Model) เพื่อให้คำนวณหาระยะบริการสูงสุด [19] การอธิบายการเกิดการจางหายด้วยวิธีทางสถิติ ได้แก่ การแจกแจงแบบเรย์ลี (Rayleigh Distribution) การแจกแจงแบบไรซ์ (Rice Distribution) การแจกแจงแบบนาคาเกมิ (Nakagami Distribution) การแจกแจงแบบปกติล็อก (Log-Normal Distribution) และการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) ลำดับต่อมาคำนวณหาอัตราความผิดพลาดบิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(BER) [18] อัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ต (PER) และ ค่าวิสัยสามารถ แล้วทำการทดสอบหาระยะบริการและค่าวิสัยสามารถเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณเพื่อยืนยันการทำนายทางทฤษฎีและใช้สรุปการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศที่ใช้ในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบจุดต่อจุด

1.5 เนื้อหาวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยมีเนื้อหาทั้งหมด 6 บท ซึ่งแต่ละบทมีรายละเอียดสรุปดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตการวิจัย ขั้นตอนการศึกษาและบทสรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์แต่ละบท

บทที่ 2 เป็นการศึกษาโครงสร้างสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อน การวิเคราะห์และการออกแบบสายอากาศ นอกจากนี้ได้ผลการคำนวณและการทดสอบคุณลักษณะสายอากาศ ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

บทที่ 3 ศึกษาและวิเคราะห์แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นได้แก่ แบบจำลองอากาศว่าง แบบจำลองสองรังสี แบบจำลองฮาดะ และแบบจำลองความชันคู่ การเกิดการจางหายในช่องสื่อสาร นอกจากนี้ได้อธิบายการเกิดการจางหายด้วยวิธีทางสถิติ ได้แก่ การแจกแจงแบบเรย์ลี การแจกแจงแบบไรซ์ การแจกแจงแบบปกติล็อก และการแจกแจงแบบปกติ

บทที่ 4 แสดงการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยเริ่มจากพื้นฐานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โทโปโลยี (Topology) การควบคุมการเข้าถึงสื่อ (Medium Access Control) รูปแบบเฟรม (Frame Format) ชั้นสื่อสารกายภาพ (Physical Layer) ค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุด อัตราผิดพลาดบิต อัตราผิดพลาดแพ็กเก็ต การหาระยะบริการสูงสุดและการคำนวณค่าวิสัยสามารถ

บทที่ 5 แสดงการทดสอบค่าระยะบริการสูงสุดและค่าวิสัยสามารถของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยใช้สายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนและสายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศของสถานีฐาน วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณและผลที่ได้จากการทดสอบ

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยทั้งหมดและขอเสนอแนะแนวทางการพัฒนาการประเมินประสิทธิภาพสายอากาศในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

บทที่ 2

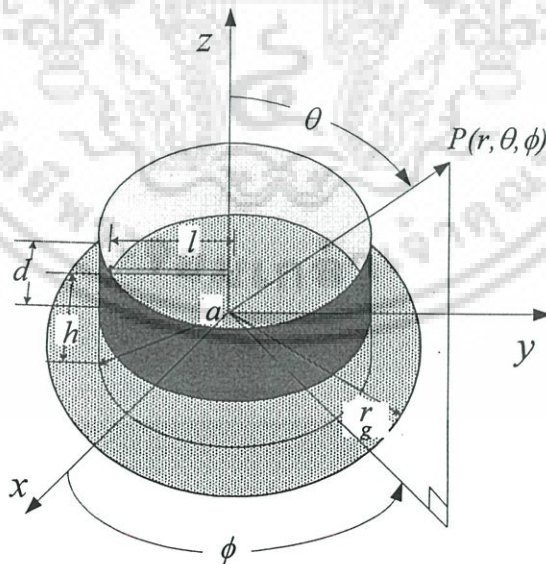
สายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อน

2.1 บทนำ

การขยายโครงข่ายท้องถิ่น (LAN) ด้วยโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบจุดต่อจุดจำเป็นต้องใช้สายอากาศที่สามารถชี้ทิศทางไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้เช่น สายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว โดยวิทยานิพนธ์นี้ใช้สายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อน [1] ซึ่งเป็นสายอากาศแบบทิศทางเดียว สำหรับข้อดีของสายอากาศชนิดนี้คือ การออกแบบและสร้างได้ง่าย โครงสร้างไม่ซับซ้อน มีค่าอัตราการขยายสูง และมีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากไม่มีส่วนประกอบเป็นไดอิเล็กตริก เนื้อหาบทนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์ การออกแบบ และแสดงคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อน

2.2 โครงสร้างสายอากาศ

สายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วยโพรงป้อนสัญญาณมีความยาวเท่ากับ l ถูกล้อมรอบด้วยโลหะรูปวงแหวนวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ a และยาวเท่ากับ d โดยสายอากาศวางอยู่เหนือระนาบสะท้อนวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ r_g และมีระยะห่างเท่ากับ h

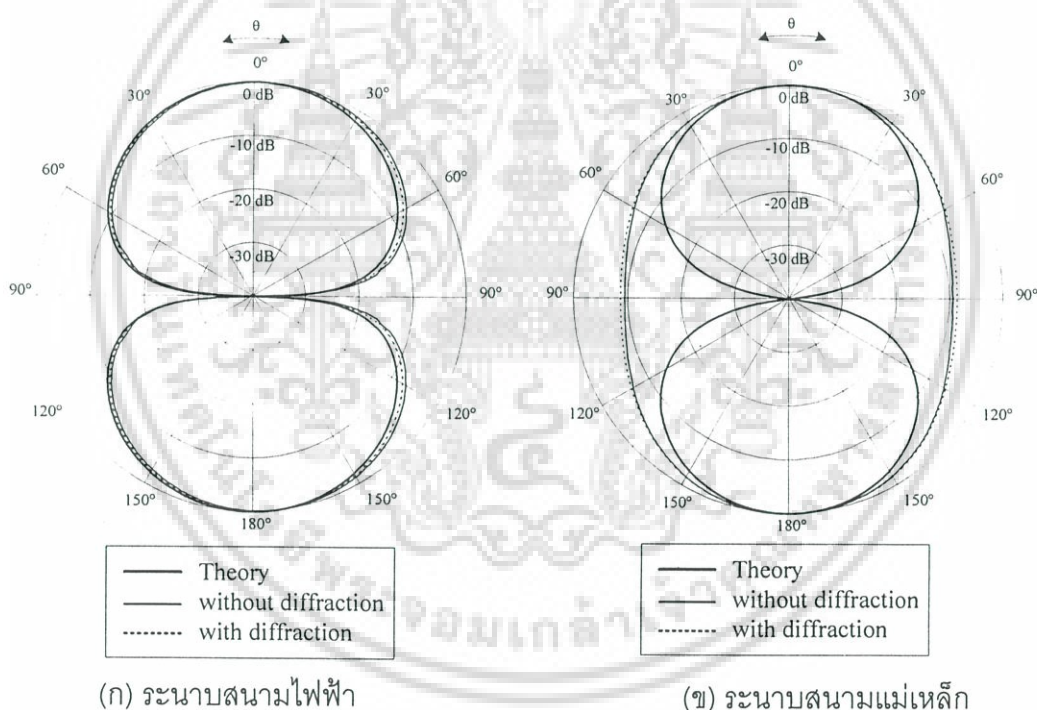


รูปที่ 2.1 โครงสร้างสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การออกแบบ

การออกแบบสายอากาศเริ่มต้นจากการพิจารณาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ สำหรับการเลือกรัศมีวงแหวนวงกลมที่เหมาะสมคือค่ารัศมีที่ทำให้วงแหวนวงกลมแพร่กระจายคลื่นในโหมดหลัก (Dominant Mode: TE_{11}) จากนั้นเลือกความยาวของวงแหวนเพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เหมาะสม ต่อมาทำการเลือกความยาวของโพรบป้อนสัญญาณเพื่อให้เกิดการแมทซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างสายอากาศและสายนำสัญญาณ ผลจากการคำนวณพบว่ารัศมีวงแหวน ความยาววงแหวน และความยาวโพรบป้อนสัญญาณมีค่าเท่ากับ 0.294λ 0.335λ และ 0.294λ ตามลำดับ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตามค่าที่ออกแบบได้แสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากฟังก์ชันของกรีนและโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 (NEC2) พบว่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 70.83 และ 60.58 องศา ตามลำดับ

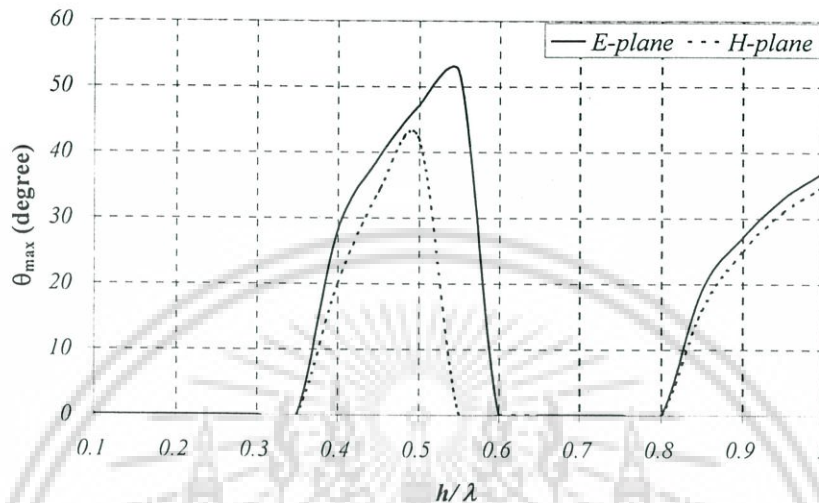


รูปที่ 2.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวน

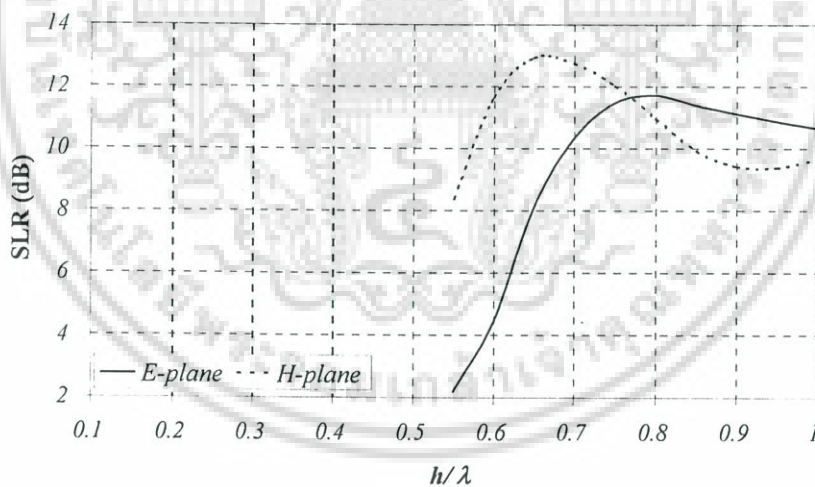
สายอากาศนี้มีค่าสภาพจะจกทิศทางสูงสุดเท่ากับ 6.79 dBi เมื่อนำสายอากาศวงแหวนวงกลมวางเหนือระนาบสะท้อนจะทำให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวซึ่งมีคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศและแผ่นสะท้อน ดังรูปที่ 2.3 พบว่าระยะห่างมีผลกับค่ามุมยกที่สนามสูงสุด อัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านข้าง และค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด ถ้าระยะห่างมีค่า 0.10λ ถึง 0.35λ หรือ 0.60λ ถึง 0.80λ แล้ว สายอากาศมีแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว อย่างไรก็ตามถ้าระยะห่างมีค่าในช่วง 0.60λ ถึง 0.80λ แล้วพบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีค่ามากแต่ทว่าระดับลำคลื่นข้างสูงขึ้น ระยะห่างที่เหมาะสมคือ 0.286λ ซึ่งให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดเท่ากับ 9.94 dBi



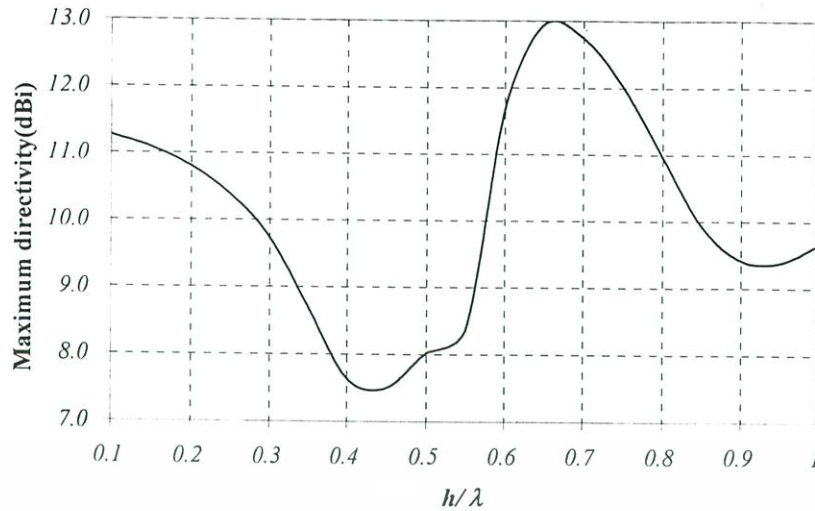
(ก) มุมยกที่สนามสูงสุด



(ข) อัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง

รูปที่ 2.3 คุณลักษณะของสายอากาศวงแหวนวงกลมที่วางเหนือระนาบแผ่นสะท้อนที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศกับแผ่นสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



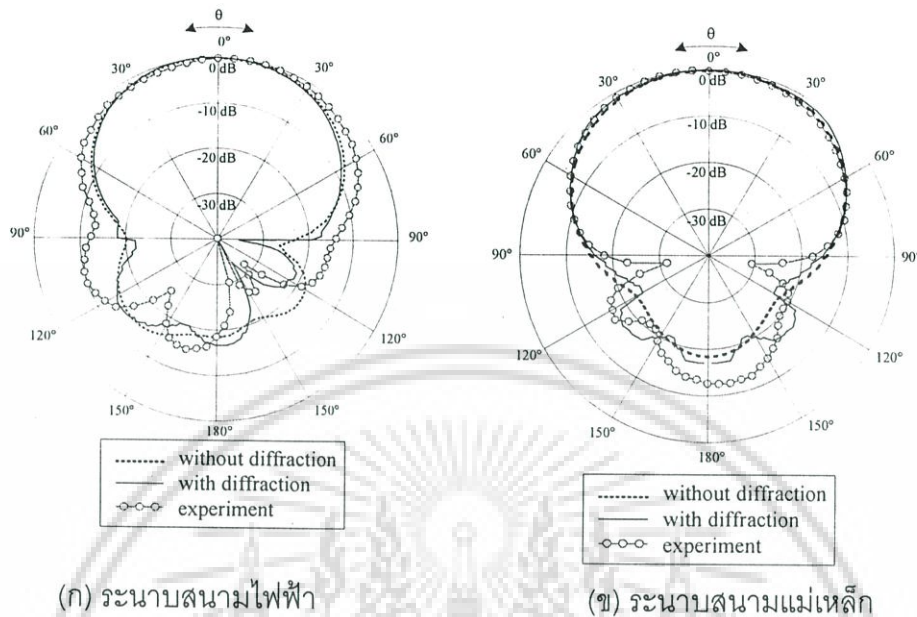
(ค) ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด

รูปที่ 2.3 (ต่อ)

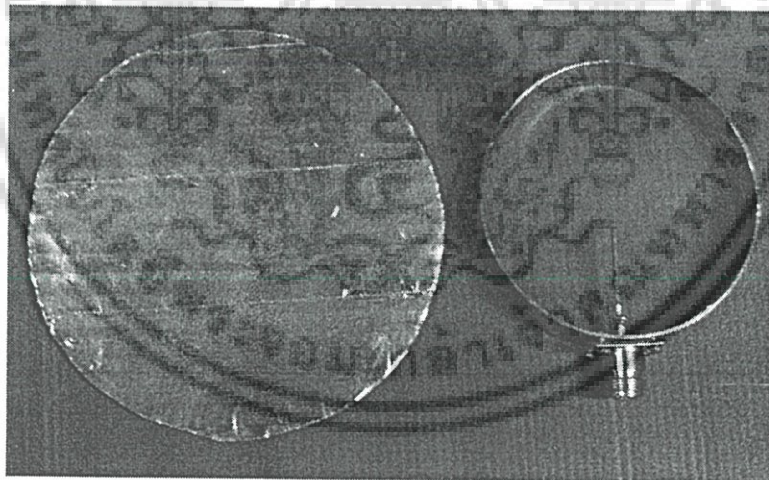
2.4 ผลการคำนวณและการทดสอบ

ผลการทดสอบและผลการคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ รัศมีวงแหวน ความยาววงแหวน ความยาวโพรบ ป้อนสัญญาณ และ ระยะห่างระหว่างวงแหวนวงกลมกับแผ่นสะท้อนมีค่าเท่ากับ 0.294λ 0.335λ 0.294λ และ 0.286λ ตามลำดับ สำหรับรัศมีของแผ่นสะท้อนเป็นพารามิเตอร์สุดท้ายในการออกแบบซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.478λ เพราะให้ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลังที่เหมาะสมและขนาดของแผ่นสะท้อนไม่ใหญ่เทอะทะ ผลการคำนวณและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศนี้แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งประกอบด้วยผลการคำนวณเชิงตัวเลขในกรณีที่พิจารณาและไม่พิจารณาผลการเลี้ยวเบนของคลื่น และผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งพบว่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นรองกรณีพิจารณาการเลี้ยวเบนมีค่า 17 dB และไม่พิจารณาการเลี้ยวเบนมีค่า 19 dB ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเท่ากับ 79 และ 89 องศา ตามลำดับ สายอากาศวงกลมและแผ่นสะท้อนแสดงดังรูปที่ 2.5 ผลการคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความแม่นยำดีอยู่ในช่วงความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่ลดลงเมื่อเทียบกับผลการทดสอบ ถ้าการคำนวณพิจารณารวมผลการเลี้ยวเบนของคลื่นทำให้ได้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากยิ่งขึ้น ผลการทดสอบอิมพีแดนซ์ด้านเข้าและอัตราส่วนคลื่นนิ่งในฟังก์ชันของความถี่แสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งพบว่าคุณลักษณะอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าที่ยอมรับได้ กล่าวคือค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50 โอห์ม

และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่าต่ำกว่า 2:1 ตลอดย่านความถี่ใช้งาน ค่าอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบมีค่าประมาณ 6.5 dBi

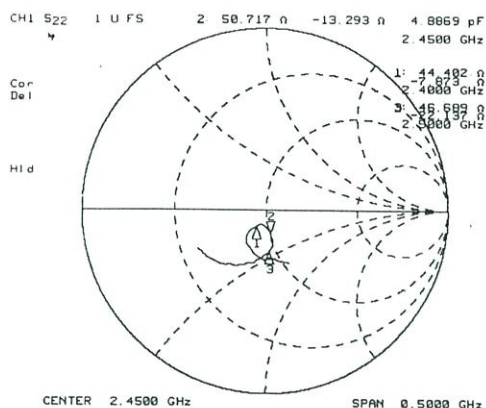


รูปที่ 2.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศวงกลมเหนือระนาบสะท้อน

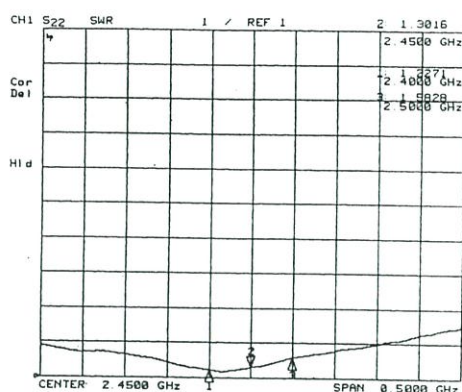


รูปที่ 2.5 สายอากาศวงกลมและแผ่นสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) อิมพีแดนซ์ด้านเข้า



(ข) อัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 2.6 ผลการวัดอิมพีแดนซ์ด้านเข้าและอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

2.5 สรุป

เนื้อหาบทนี้ทำการศึกษา วิเคราะห์และออกแบบสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนซึ่งสายอากาศนี้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว การออกแบบสายอากาศเริ่มจากการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สายอากาศที่ประกอบด้วยคุณลักษณะดังนี้ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว มีอัตราขยายสูง มีอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยสูง มีอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเท่ากับหรือใกล้เคียง 50 โอห์ม และมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่ำกว่า 2:1 ตลอดย่านความถี่ใช้งาน โดยพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมีดังนี้ รัศมีวงแหวน ความยาววงแหวน ความยาวโพรบป้อนสัญญาณ ระยะห่างระหว่างวงแหวนวงกลมกับแผ่นสะท้อน และ รัศมีแผ่นสะท้อน มีค่าเท่ากับ 0.294λ 0.335λ 0.294λ 0.286λ และ 0.478λ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและผลทดสอบพบว่า ผลการคำนวณมีความแม่นยำในช่วงความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งและผลการคำนวณจะมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากขึ้นถ้าการคำนวณพิจารณารวมผลการเลี้ยวเบนของคลื่น อัตราขยายที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศมีค่าประมาณ 6.5 dBi การศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศในบทนี้จำเป็นต่อการประเมินประสิทธิภาพสายอากาศในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายในบทต่อไป

บทที่ 3

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นและช่องสื่อสารจางหาย

3.1 บทนำ

เนื้อหาในบทที่ 3 นี้กล่าวถึงพื้นฐานการแพร่กระจายคลื่นในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ซึ่งเน้นที่การสื่อสารแบบจุดต่อจุด การศึกษาเริ่มจากการวิเคราะห์แบบจำลองการแพร่กระจายทางทฤษฎี ได้แก่ แบบจำลองอากาศว่าง แบบจำลองสองรังสี ถัดไปเป็นแบบจำลองเชิงประสบการณ์ ได้แก่ แบบจำลองฮาทะ แบบจำลองซีซีไออาร์ แบบจำลองลอการิทึม และแบบจำลองความชันคู่ แล้วศึกษาการเกิดการจางหายในช่องสื่อสารที่ใช้การแจกแจงทางสถิติอธิบาย เช่น การแจกแจงเรย์ลี การแจกแจงแบบไรซ์ การแจกแจงแบบนาคากามิ การแจกแจงแบบปกติล็อก การศึกษาแบบจำลอง และการแจกแจงดังกล่าว สามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบและการประเมินประสิทธิภาพสายอากาศของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายในบทต่อไป

3.2 ทฤษฎีและแบบจำลองการแพร่กระจาย

เนื้อหาส่วนนี้กล่าวถึงทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นซึ่งมีความสำคัญสำหรับระบบสื่อสารไร้สาย อธิบายความแตกต่างและความสัมพันธ์ของการแพร่กระจายคลื่นในอากาศว่างและการแพร่กระจายคลื่นในสภาวะแวดล้อมจริงที่ประกอบด้วยสิ่งกีดขวางและลักษณะภูมิประเทศ ในการพิจารณาได้ใช้แบบจำลองต่างๆประกอบด้วย แบบจำลองอากาศว่าง (Free-Space Model) แบบจำลองสองรังสี (Two-Ray Model) แบบจำลองฮาทะ (Hata Model) แบบจำลองซีซีไออาร์ (CCIR Model) แบบจำลองลอการิทึม (Log-Distance Path Loss Model) และแบบจำลองความชันคู่ (Dual-Slope Model)

3.3 แบบจำลองอากาศว่าง

แบบจำลองนี้ใช้ทำนายความเข้มของสัญญาณในกรณีที่ไม่มีวัตถุใดๆ ขวางกั้นการเดินทางของคลื่นโดยพิจารณาสัญญาณไซนูซอยด์ที่ปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดแบบจุดซึ่งแพร่กระจายคลื่นในสูญญากาศ (อากาศว่าง) แหล่งกำเนิดนี้เรียกว่า “ตัวแพร่กระจายแบบไอโซทรอปิก (isotropic radiator)” ถ้ากำหนดให้กำลังงานที่แพร่กระจายออกมาและระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแทนด้วย P_{rad} มีหน่วยเป็นวัตต์และ R มีหน่วยเป็นเมตร ตามลำดับ ดังนั้นขนาดของเวกเตอร์พอยนติงของคลื่น (กำลังงานต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย) เขียนได้ดังนี้

$$P_{fs} = \frac{P_{rad}}{4\pi R^2} \quad \text{W/m}^2 \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีสายอากาศไม่ใช่ตัวแพร่กระจายแบบไอโซทรอปิกและระยะห่างมีค่ามากกว่าขนาดของสายอากาศ ดังนั้นสามารถแทน P_{rad} ด้วย $P_t G_t$ โดยที่

$$P_{rad} \text{ คือ กำลังงานที่ชี้วัดต่อสายอากาศ} \quad (3.2 \text{ ก})$$

$$G_t \text{ คือ อัตราขยายสายอากาศส่ง} \quad (3.2 \text{ ข})$$

ความเข้มสนามไฟฟ้าเขียนได้ดังนี้

$$E_{fs} = \sqrt{Z_{fs} P_{fs}} \quad (3.3)$$

โดยที่ Z_{fs} คืออิมพีแดนซ์อากาศว่าง [2] ซึ่ง

$$Z_{fs} = \sqrt{\mu_{fs} / \epsilon_{fs}} \approx 120\pi \doteq 377\Omega \quad (3.4)$$

เมื่อ μ_{fs} และ ϵ_{fs} คือค่าความซึมซาบแม่เหล็กและค่าสภาพยอมไฟฟ้า ตามลำดับ ในกรณีอากาศว่าง

$$\mu_{fs} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ v-s/A} \cdot \text{m} \quad (3.5 \text{ ก})$$

$$\epsilon_{fs} \approx (10^{-9} / 36\pi) \text{ F/m} = (10^{-9} / 36\pi) \text{ A-S/V} \cdot \text{m} \quad (3.5 \text{ ข})$$

ความเข้มสนามไฟฟ้าในอากาศว่างสำหรับกรณีที่ไม่ใช่ตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E_{fs} = \sqrt{120\pi \frac{P_t G_t}{4\pi R^2}} = \frac{\sqrt{30 P_t G_t}}{R} \quad \text{V/m} \quad (3.6)$$

การแพร่กระจายคลื่นในสภาวะแวดล้อมใดๆ เมื่อ E_{rec} คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า P_{rec} และ G_r คือ กำลังงานรับที่สายอากาศ และ อัตราขยายสายอากาศรับ ตามลำดับ ดังนั้นค่ากำลังงานสูงสุดที่รับจากเครื่องรับโดยใช้ตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก คือ [2]

$$E_{fs} = \frac{\lambda^2}{4\pi} P_{rec} G_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{E_{rec}}{Z_{fs}} G_r = \left(\frac{E_{rec} \lambda}{2\pi} \right)^2 \frac{G_r}{120} \quad (3.7)$$

อัตราส่วนระหว่างกำลังงานรับและส่งคือ

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{E_{rec} \lambda}{2\pi} \right)^2 \frac{G_r}{120} \frac{(E_{fs} R)^2}{30 G_t} \quad (3.8)$$

$$= \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_r G_t \left(\frac{E_{rec}}{E_{fs}} \right) \quad (\text{กรณีทั่วไป}) \quad (3.9 \text{ ก})$$

$$= \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_r G_t \quad (\text{กรณีอากาศว่าง}) \quad (3.9 \text{ ข})$$

จากสมการที่ 3.9 ก และ 3.9 ข แสดงความสัมพันธ์และความแตกต่างความเข้มสนามไฟฟ้ารับระหว่างกรณีทั่วไปและแบบอากาศว่าง โดยสมการการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นคือ

$$\text{การสูญเสียการแพร่กระจายคลื่น} = -10 \log \left(\frac{P_r}{P_t} \frac{1}{G_r G_t} \right) \quad (3.10)$$

$$= 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{E_{fs}}{E_{rec}} \right) \quad (3.11)$$

$$= L_{fs} + L_{nfs} \quad (3.12)$$

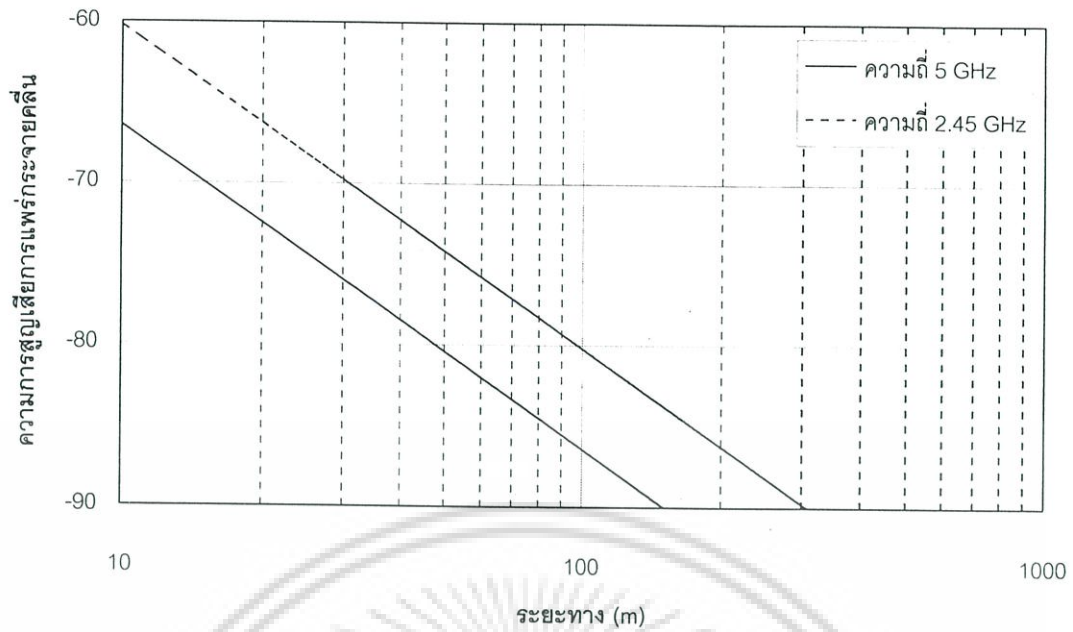
โดยที่ L_{nfs} คือ การสูญเสียในสภาวะที่ไม่ใช่อากาศว่าง ซึ่งการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นในกรณีอากาศว่างสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$L_{fs} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi 1,000 R_{km}}{299.8 / f_{MHz}} \right) \quad (3.13)$$

$$= 32.45 \text{ dB} + 20 \log_{10} (R_{km} f_{MHz}) \quad (3.14)$$

$$= 36.58 \text{ dB} + 20 \log_{10} (R_{mi} f_{MHz}) \quad (3.15)$$

การสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นจากสมการที่ 3.13 ความถี่ใช้งานมีค่าเท่ากับ 2.45 และ 5 GHz แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งพบว่าเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นสิบเท่าแล้วการสูญเสียการแพร่กระจายจะเพิ่มขึ้น 20 dB ถ้าระยะทางเท่ากันแต่ความถี่ใช้งานมีค่าต่างกันแล้วการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นจะไม่เท่ากันโดยความถี่สูงกว่าจะมีการสูญเสียมากกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

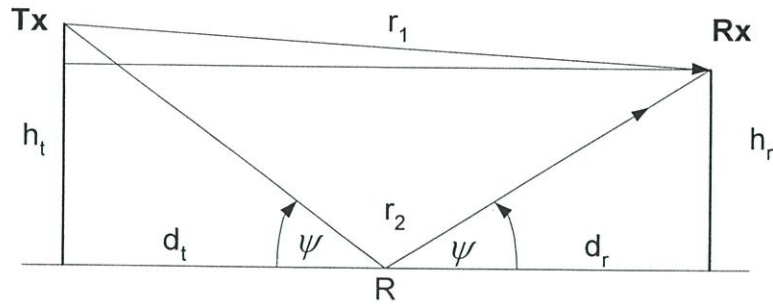


รูปที่ 3.1 การสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นของแบบจำลองอากาศว่างที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5 GHz

3.4 แบบจำลองสองรังสี

การสื่อสารแบบจุดต่อจุดในสภาวะแวดล้อมมีเส้นทางการมองเห็นระดับสายตา (LOS) ดังในรูปที่ 3.2 คลื่นเดินทางตามเส้นทางตรง (r_1) และเส้นทางสะท้อน (r_2) จากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับ ความแตกต่างระหว่าง r_1 และ r_2 เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 r_2 - r_1 &= \sqrt{(h_t + h_r)^2 + R^2} - \sqrt{(h_t - h_r)^2 + R^2} \\
 &\approx R \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_t + h_r}{R} \right)^2 \right] - R \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_t - h_r}{R} \right)^2 \right] \\
 &= \frac{2h_t h_r}{R}
 \end{aligned} \tag{3.16}$$



รูปที่ 3.2 แบบจำลองสองรังสี

ความแตกต่างของเส้นทางเดินคลื่นทำให้เกิดความต่างเฟส เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda R} = 1.3343 \times 10^{-5} \frac{f_{\text{MHz}} h_t h_r}{R_{\text{km}}} \quad (3.17)$$

โดยที่ความสูงของสายอากาศมีหน่วยเป็นเมตร มุมสะท้อน ψ มีค่าเท่ากับ

$$\tan \psi = \frac{h_t}{R_t} = h_t \div \frac{h_r R}{h_t + h_r} = \frac{h_t + h_r}{R} \quad (3.18)$$

ในการสื่อสารย่าน VHF และ UHF สามารถยกเว้นบางสัญญาณที่สะท้อนแล้วมีผลกระทบน้อย ดังนั้นขนาดสนามไฟฟ้าที่สายอากาศรับสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$E_{\text{rec}} = E_{\text{direct}} + E_{\text{reflection}} = E_{\text{direct}} [1 + \eta e^{j\Delta}] \quad (3.19)$$

อัตราส่วนกำลังสองของสนามไฟฟ้ารับและส่งคือ

$$\left| \frac{E_{\text{rec}}}{E_{\text{direct}}} \right|^2 \approx |1 + \eta e^{j\Delta}|^2 = 1 + |\eta|^2 + 2|\eta| \cos(\Delta + \xi) \quad (3.20)$$

โดยที่ η คือสัมประสิทธิ์เชิงซ้อนของการสะท้อนและมีความสัมพันธ์กับมุมสะท้อน ψ คือ

$$\eta = \frac{\sin \psi - Z}{\sin \psi + Z} = |\eta| e^{j\xi} \quad (3.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมพีแดนซ์พื้นดินมีความสัมพันธ์กับค่า ϵ_g ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกพื้นดิน มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Z = \sqrt{\epsilon_g - \cos^2 \psi} \approx \sqrt{\epsilon_g - 1} \quad (\text{สำหรับการโพลารไรซ์แนวตั้ง}) \quad (3.22)$$

$$= \sqrt{\epsilon_g - \cos^2 \psi} / \epsilon_g \approx \sqrt{\epsilon_g - 1} / \epsilon_g \quad (\text{สำหรับการโพลารไรซ์แนวนอน}) \quad (3.23)$$

ค่าของ ϵ_g มีความสัมพันธ์กับค่าสภาพยอมไฟฟ้าของอากาศว่าง (ϵ_{fs}) ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (ϵ) และค่าความนำของพื้นดิน (σ) ดังนี้

$$\epsilon_g = \epsilon - j \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_{fs}} = \epsilon - 1.796 \times 10^4 \frac{j\sigma}{f_{MHz}} \quad (3.24)$$

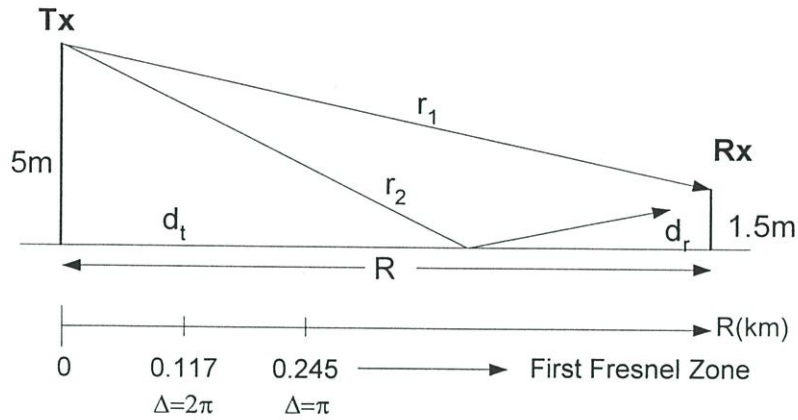
เนื่องจากผิวโลกมีค่า $\sigma = 0.005 \text{ S/m}$ และ $\epsilon = 15$ ได้

$$\epsilon_g = 15 - j90 / f_{MHz} \quad (3.25)$$

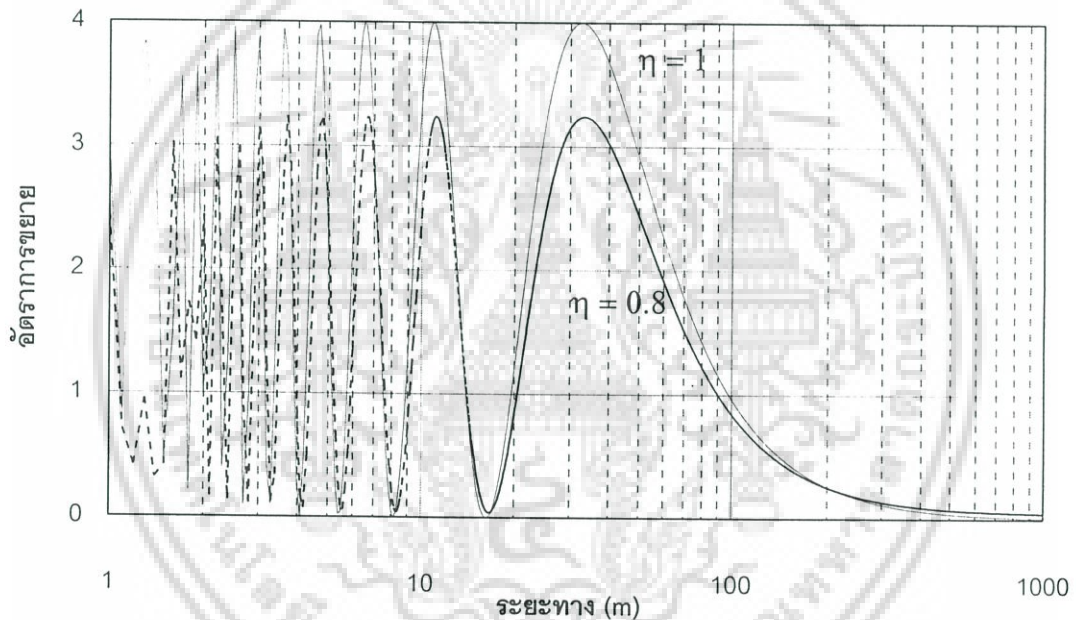
ที่ความถี่ 2.45 GHz ค่า Z เท่ากับ $3.42 \angle -0.075$ และ $0.25 \angle -0.065$ กรณีที่เป็นการโพลารไรซ์แนวตั้งและแนวนอน ตามลำดับ ดังนั้นมุมสะท้อนจะมีค่าน้อยมาก $\eta \approx -1$ ดังนั้นเขียนสมการที่ (3.20) ใหม่ได้ดังนี้

$$\left| \frac{E_{rec}}{E_{fs}} \right|^2 \approx 2(1 - \cos \Delta) = 4 \sin^2 (\Delta/2) = 4 \sin^2 \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda R} \right) \quad (3.26)$$

จากสมการที่ 3.25 แสดงว่าการแพร่กระจายคลื่นในสภาวะแวดล้อมมีเส้นทางการเดินแนวสายตา และพื้นมีลักษณะราบเรียบจะมีกำลังงานเพิ่มขึ้น 6 dB เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอากาศว่าง โดยที่ $\Delta/2$ มีค่าเท่ากับ $\pi/2$ คูณกับจำนวนเต็มคี่แล้ว $\sin(\Delta/2) = \pm 1$ ถ้า $\Delta/2$ มีค่าเท่ากับ π คูณกับจำนวนเต็มแล้ว $\sin(\Delta/2) = 0$ การเปลี่ยนแปลงของมุมขึ้นอยู่กับความสูงสายอากาศและระยะห่าง



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างแบบจำลองสองรังสี เมื่อ $f = 2.45$ GHz



รูปที่ 3.4 อัตราการขยายเมื่อเทียบกับการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นในอากาศว่าง เมื่อ

$$h_t = 5 \text{ m}, h_r = 1.5 \text{ m}, f = 2.45 \text{ GHz}$$

ถ้าสายอากาศสถานีฐานสูง 5 m สายอากาศลูกข่ายสูง 1.5 m และความถี่ 2.45 GHz จากสมการที่ 3.17 จะได้ $\Delta = 245\pi / R_{km}$ ถ้า $R < 0.245$ km แล้ว $\Delta/2$ ดังนั้นสมการที่ 3.25 มีค่ามากกว่า $\pi/2$ ทำให้เกิดอัตราขยายออกสปีเคิล ขณะที่ระยะห่างระหว่างลูกข่ายและสถานีฐานเพิ่มมากขึ้น ถ้า $R > 0.245$ km แล้วมุม $\Delta/2$ มีค่าน้อยกว่า $\pi/2$ เสมอ ทำให้อัตราสูญเสียไม่เกิด

การออสซิลเลตเมื่อระยะห่างระหว่างลูกข่ายและสถานีฐานเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 3.4 การเกิดออสซิลเลตน้อยลงถ้าขนาดของ η มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง

ระยะห่างที่ทำให้ $\Delta = n\pi$ หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_n = 4h_t h_r / n\lambda \quad (3.27)$$

ถ้า $R > d_1 = 4h_t h_r / \lambda$ แล้ว $\Delta/2 < \pi/2$ และไม่เกิดการออสซิลเลตในสมการที่ 3.25 ดังนั้นกำลังงานรับลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างลูกข่ายและสถานีฐานเพิ่มขึ้นเสมอ สำหรับตำแหน่งที่ทำให้ $\Delta < n\pi$ มีความสัมพันธ์กับลำดับ n ของเขตเฟรสเนล (Fresnel Zone) เมื่อ $R > d_1$ ทำให้เกิดเขตเฟรสเนลลำดับแรก กรณีที่ $R > d' \triangleq 12h_t h_r / \lambda$ ทำให้ $\Delta/2 < \pi/6$ และ $\sin(\Delta/2) < 0.5$ กำลังงานรับในสภาวะมีเส้นทางเดินทางแนวสายตาจะน้อยกว่าสภาวะอากาศว่างเสมอ ดังนั้นฟังก์ชันไซน์ในสมการที่ 3.26 สามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\left| \frac{E_{rec}}{E_{fs}} \right|^2 \approx \left(\frac{4\pi h_t h_r}{\lambda R} \right)^2, R > d' \quad (3.28)$$

อัตราขยายสำหรับเส้นทางเดินทางในสมการที่ 3.26 คูณด้วยอัตราการสูญเสียอากาศว่าง

$$\frac{P_r}{P_t} = 4 \sin^2 \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda R} \right) \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (3.29)$$

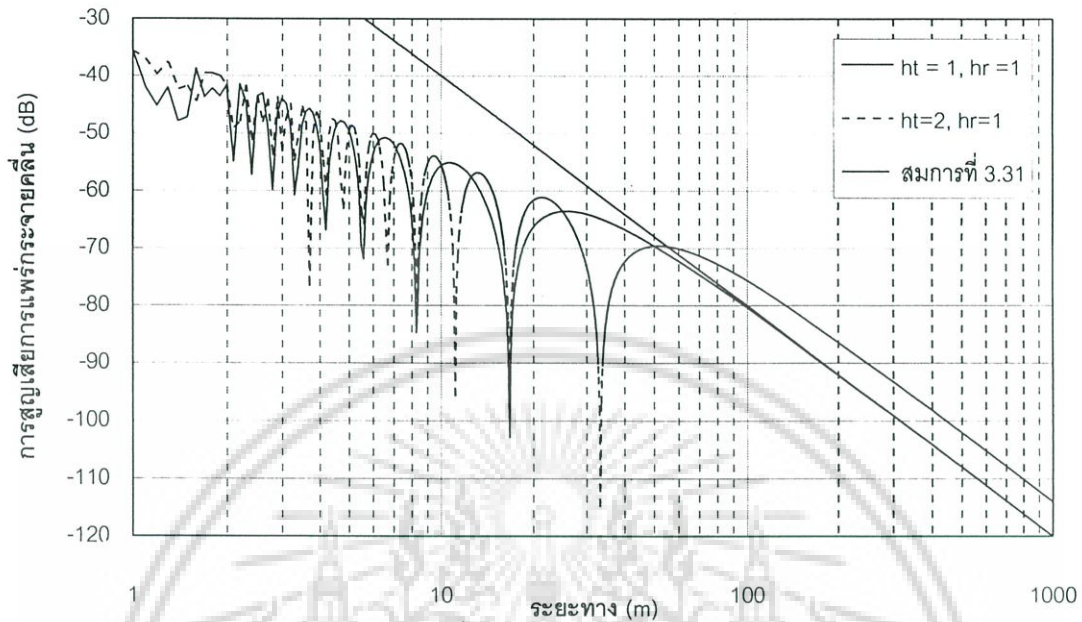
$$\approx 4 \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda R} \right)^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 = \frac{(h_t h_r)^2}{R^4}, R > d' \quad (3.30)$$

จากสมการที่ 3.30 แสดงให้เห็นว่ากำลังงานลดลงด้วยอัตราขยายกำลังสี่ เมื่อระยะ $R > d'$ การสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นในภาวะมีเส้นทางเดินทางแนวสายตา สามารถเขียนในหน่วย dB ได้ดังนี้

$$L_{LOS} = 10 \log_{10} \left[\frac{(h_t h_r)^2}{R^4} \right] = 120 + 40 \log_{10} R_{km} - 20 \log_{10} (h_{tm} h_{rm}) \quad (3.31)$$

โดยที่ R_{km} คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร h_{tm} และ h_{rm} คือความสูงสายอากาศด้านส่งและด้านรับมีหน่วยเป็นเมตร ถ้าพิจารณาค่าพารามิเตอร์เดียวกับรูปที่ 3.2 อัตราขยายในสมการที่ 3.29

เขียนกราฟได้ดังรูปที่ 3.5 ภายในรูปแสดงเขตเฟรสเนลลำดับที่ 1 และที่ 2 รวมถึงผลกระทบเมื่อค่า η เปลี่ยนแปลง

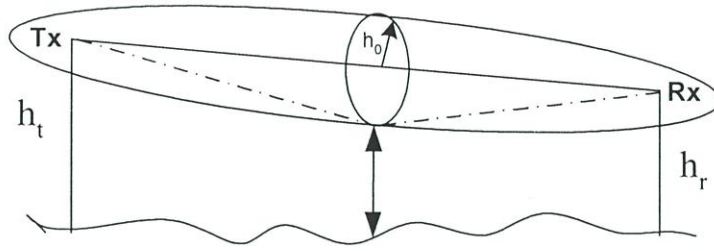


รูปที่ 3.5 การสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นของแบบจำลองสองรังสี

โดยปกติเขตเฟรสเนลลำดับที่ 1 กำหนดโดยปริมาณวงรีซึ่งมีจุดสะท้อนที่ทำให้เส้นทางเดินตรงและสะท้อนมีค่าแตกต่างกันน้อยกว่าครึ่งของความยาวคลื่น ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.6 รัศมีของ h_0 ของเขตเฟรสเนลลำดับที่ 1 ที่ตำแหน่งเส้นทางเดิน R ที่ตำแหน่ง d_t และ d_r คือระยะห่างของเครื่องส่งและรับ ตามลำดับ เขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \lambda/2 &= \text{เส้นทางสะท้อน} - R \\
 &= \text{ระยะห่างจากจุดสะท้อนถึงเครื่องส่ง} + \text{ระยะห่างจากจุดสะท้อนถึงเครื่องรับ} - R \\
 &= \sqrt{d_t^2 + h_0^2} + \sqrt{d_r^2 + h_0^2} - R \\
 &= d_t \left[1 + \frac{h_0^2}{2d_t^2} + \dots \right] + d_r \left[1 + \frac{h_0^2}{2d_r^2} + \dots \right] - (d_t + d_r) \\
 &\approx \frac{h_0^2}{2} \cdot \frac{d_t + d_r}{d_t d_r} \Rightarrow h_0 (m) = \sqrt{\frac{\lambda d_t d_r}{d}} = 548 \sqrt{\frac{d_{tkm} d_{rkm}}{d_{km} f_{MHz}}} \quad (3.32)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 เขตเฟรสเนล

3.5 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นเชิงประสบการณ์

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นเชิงประสบการณ์ (Empirical Propagation Model) คือแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลการทดสอบความความเข้มของสัญญาณในสภาวะแวดล้อมจริงแล้ว นำข้อมูลที่ได้จากการวัดหลายๆครั้งเขียนเป็นสมการเพื่อใช้ในการทำนายค่าการสูญเสียการแพร่กระจาย

3.5.1 แบบจำลองฮาดะ (Hata Model)

ในปี 1968 โอคามุระ (Okamura) เสนอผลการวัดความเข้มและการเปลี่ยนแปลงสนามในย่านความถี่ VHF และ UHF เพื่อใช้ในการออกแบบระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์ [3] หลังจากนั้นฮาดะได้เสนอสมการที่ใช้พื้นฐานจากข้อมูลวัดเหล่านั้นเรียกว่า แบบจำลองฮาดะ [4] ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย สมการค่าการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นพื้นฐานของฮาดะ เขียนได้ดังนี้

$$L_{Hata} = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f_{MHz}) - 13.82 \log_{10} h_t - a(h_r) + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_t) \log_{10} R_{km} - K \quad (3.33)$$

โดยที่ h_t และ h_r คือความสูงของสายอากาศที่สถานีฐานและลูกข่าย ตามลำดับ R_{km} คือระยะห่างระหว่างสถานีฐานและลูกข่าย f_{MHz} คือความถี่ใช้งานมีหน่วยเป็นเมกะเฮิรตซ์ และ $a(h_r)$ คือตัวประกอบปรับแก้สำหรับความสูงสายอากาศลูกข่าย

$$\begin{aligned} a(h_r) &= (1.1 \log_{10} f_{MHz} - 0.7) h_r - (1.56 \log_{10} f_{MHz} - 0.8) \quad (\text{สำหรับเมืองขนาดเล็กและกลาง}) \\ &= 8.29 (\log_{10} 1.54 h_r)^2 - 1.1 \quad (\text{สำหรับเมืองใหญ่และ } f_{MHz} < 200) \\ &= 3.2 (\log_{10} 11.75 h_r)^2 - 4.97 \quad (\text{สำหรับเมืองใหญ่และ } f_{MHz} > 400) \end{aligned} \quad (3.34)$$

ตัวประกอบ K ในสมการที่ 3.33 ใช้สำหรับปรับแก้สมการในกรณีขนาดเล็กสำหรับพื้นที่ชานเมืองและพื้นที่เปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K = 2[\log_{10}(f_{MHz}/28)]^2 + 5.4 \quad (\text{สำหรับพื้นที่ชานเมือง}) \quad (3.35)$$

และ

$$K = 4.78(\log_{10} f_{MHz})^2 - 18.33 \log_{10} f_{MHz} + 40.94 \quad (\text{สำหรับพื้นที่เปิด}) \quad (3.36)$$

3.5.2 แบบจำลองซีซีไออาร์ (CCIR Model)

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นเชิงประสบการณ์ของ CCIR (Comite' Consultatif International des Radio-Communication (ปัจจุบันคือ ITU-R)) ซึ่งรวมผลการสูญเสียเนื่องจากการเดินทางของคลื่นในอากาศว่างและผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$L_{CCIR} = 69.55 + 26.16 \log_{10} f_{MHz} - 13.82 \log_{10} h_t - a(h_r) + (43.9 - 6.55 \log_{10} h_t) \log_{10} R_{km} - B \quad (3.37)$$

โดยที่ h_t และ h_r คือความสูงสายอากาศที่สถานีฐานและลูกข่าย ตามลำดับ มีหน่วยเป็นเมตร d_{km} คือระยะห่างระหว่างสถานีฐานและลูกข่ายมีหน่วยเป็นกิโลเมตร f_{MHz} คือความถี่กลางมีหน่วยเป็นเมกะเฮิรตซ์

$$a(h_r) = (1.1 \log_{10} f_{MHz} - 0.7) h_r - (1.56 \log_{10} f_{MHz} - 0.8) \quad (3.38)$$

$$B = 30 - 25 \log_{10} (\text{พื้นที่ครอบคลุมหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์}) \quad (3.39)$$

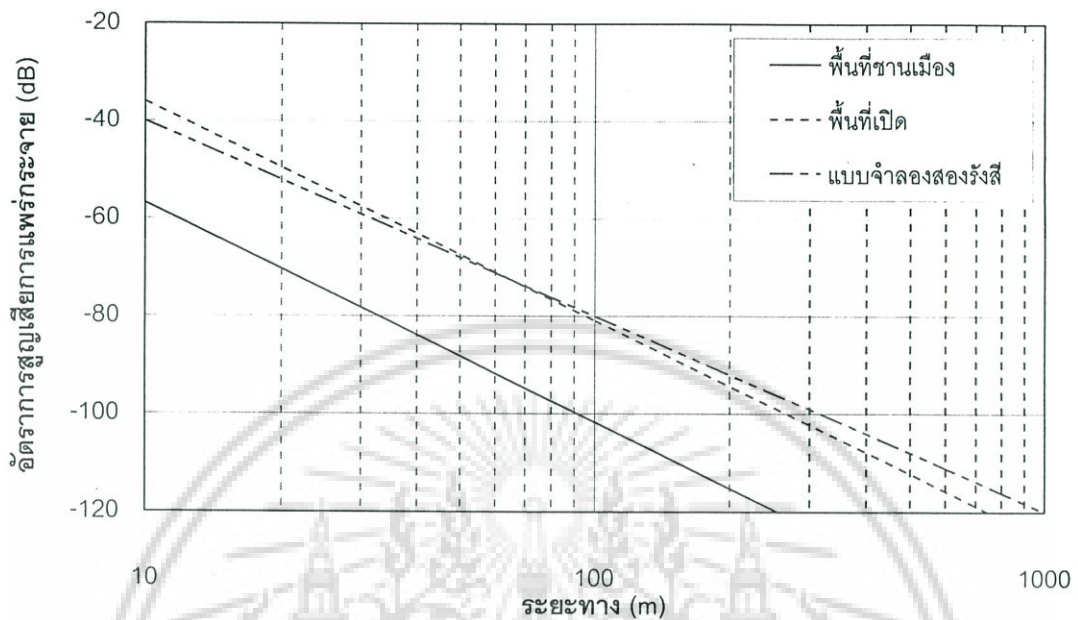
จากสมการที่ 3.37 สังเกตว่ามีความคล้ายคลึงกับสมการของฮาดะในเงื่อนไขสำหรับเขตเมืองขนาดกลางและเล็ก โดยเพิ่มตัวประกอบ B ดังนั้นสมการ CCIR สำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz และ h_r มีค่าเท่ากับ 1.5 เมตรคือ

$$L_{CCIR} = 155.72 - 43.75 \log_{10}(h_t) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_t)) \log_{10}(R_{km}) - B = \alpha + \beta \log_{10}(R_{km}) - B \quad (3.40)$$

โดยที่ α และ β คือความชันการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นจาก $L = \alpha \times R^\beta$ ในตารางที่ 3.1 แสดงตัวอย่างค่า α β และ γ ที่ค่า h_t ต่างๆ

จากตารางที่ 3.1 สมการ CCIR ให้ค่าความชันการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นระหว่าง 3.8 และ 4.6 สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ในขณะที่ความชันการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นมีค่า

เท่ากับ 2 และสำหรับกรณีของแบบจำลองสองรังสีมีค่าเท่ากับ 4 เมื่อมีวัตถุในเขตเฟรตเนลและระยะห่างระหว่างสถานีฐานและลูกข่ายมีค่ามากๆ



รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแบบฮาดะและสองรังสี เมื่อความสูงสายอากาศส่งและรับเท่ากับ 1 เมตร

จากรูปที่ 3.7 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นของแบบจำลองฮาดะและแบบจำลองสองรังสีพบว่า ความชันการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นของทั้งสองแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกันและค่าการสูญเสียที่ระยะเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกันยกเว้น กรณีแบบจำลองฮาดะสำหรับพื้นที่ขานเมืองจะมีค่าการสูญเสียมากกว่า

3.6 แบบจำลองลอการิทึม (Log-Distance Path Loss Model)

โดยปกติการหาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นมักใช้วิธีวิเคราะห์และสังเกตร่วมกันเพื่อหาแบบจำลองที่มีความแม่นยำ วิธีการสังเกตใช้วิธีการประมาณค่าเส้นโค้งจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีเพราะรวมตัวแปรและเงื่อนไขทั้งหมดของการแพร่กระจายคลื่นผ่านทางข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ อย่างไรก็ตามวิธีการสังเกตยังมีข้อเสียเพราะต้องใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเท่านั้น และกรณีที่สิ่งแวดล้อมหรือความถี่ใช้งานเปลี่ยนไปจะต้องทำการทดสอบหาค่าใหม่ การออกแบบระบบสื่อสารไร้สายใช้แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นเพื่อประมาณความเข้มของสัญญาณในฟังก์ชันของระยะทาง ซึ่งวิธีนี้มีความเป็นไปได้ที่จะประมาณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณรบกวน (SNR) เช่นการประมาณความจุของระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์โดยใช้แบบจำลองสองรังสี [5]

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นทั้งจากแบบจำลองที่มีพื้นฐานมาจากการวัดหรือการวิเคราะห์จะพบว่ากำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณจะลดลงแบบลอการิทึมเมื่อระยะทางลดลง การสูญเสียเนื่องจากคลื่นเดินทางเฉลี่ยระหว่างเครื่องรับส่งที่มีระยะห่างเท่ากับ R เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$L = L(r_0) + 10n \log \left(\frac{R}{r_0} \right) \quad (3.41)$$

ตารางที่ 3.1 ความชันการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นของฮาต๊ะ เมื่อ $h_r = 1.5$ m
ความถี่ 2.45 GHz

ความสูงสายอากาศ (h_t) หน่วย (m)	α	β	γ
1	158.156	44.900	4.490
1.5	155.722	43.747	4.375
2	153.995	42.928	4.293
3	151.562	41.775	4.177
4	149.835	40.957	4.096
5	148.496	40.322	4.032
6	147.402	39.803	3.980
7	146.476	39.365	3.936
8	145.675	38.985	3.898
9	144.968	38.650	3.865
10	144.336	38.350	3.835

โดยที่ n คือความชันการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่น แสดงค่าความการสูญเสียเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น R_0 คือระยะที่ทำการทดสอบที่ใกล้เครื่องส่งเพื่อใช้สำหรับอ้างอิงซึ่งปกติจะมีค่าเท่ากับ 1 เมตร เมื่อนำสมการที่ 3.41 เขียนเป็นแผนภาพกราฟจะพบว่าเส้นกราฟอัตราการสูญเสียเนื่องจากคลื่นเดินทางมีค่าเท่ากับ $10n$ dB เมื่อระยะห่างเพิ่มสิบเท่าและค่าของ n ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในการแพร่กระจายคลื่น

สิ่งที่สำคัญสำหรับแบบจำลองนี้คือการเลือกระยะอ้างอิง สำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระยะอ้างอิงที่เหมาะสมคือประมาณ 1 กิโลเมตร แต่ระบบสื่อสารไร้สายขนาดไมโครเซลล์ระยะ อ้างอิงจะใกล้กว่าเช่น 1 หรือ 100 เมตรขึ้นอยู่กับสถานะแวดล้อม อย่างไรก็ตามระยะอ้างอิงจะต้อง เป็นระยะสนามระยะไกลของสายอากาศใช้งานด้วย ค่าอัตราการสูญเสียที่ระยะอ้างอิงอาจหาได้จากแบบจำลองอากาศว่างหรือใช้ค่าที่ได้จากการวัดที่ระยะ R_0 ความชันการสูญเสียการ แพร่กระจายคลื่น (n) สำหรับสถานะแวดล้อมต่างๆแสดงในตารางที่ 3.2

ตาราง 3.2 ความชันการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่น (n) สำหรับสถานะแวดล้อมต่างๆ

สถานะแวดล้อม	ความชันการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่น (n)
อากาศว่าง (free space)	2
ตัวเมือง	2.7 ถึง 3.5
ตัวเมือง (เกิดเงา)	3 ถึง 5
ในตัวอาคาร (มีเส้นทางตรง)	1.6 ถึง 1.8
ในตัวอาคาร (มีสิ่งกีดขวาง)	4 ถึง 6
ในตัวโรงงาน (มีสิ่งกีดขวาง)	2 ถึง 3

3.7 แบบจำลองความชันคู่ (Dual-Slope Model)

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้แบบสองรังสีร่วมกับแบบจำลองลอการิทึมในการประมาณการสูญเสีย ของสัญญาณหรือเรียกว่าแบบจำลองความชันคู่ โดยเริ่มจากใช้หลักการของแบบจำลองสองรังสีใน การหาค่าจุดเปลี่ยนของความชันอัตราการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแล้ว แบ่งความชันของ กราฟออกเป็นสองช่วงคือ ก่อนจุดเปลี่ยนและหลังจุดเปลี่ยน ความชันของกราฟหาได้จากการ ประมาณค่าเชิงเส้นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบหรือใช้ค่าจากตารางที่ 3.2 สามารถเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

$$L(R)_{Dual-Slope} = \begin{cases} 10n_1 \log(R) + L_1 ; R \leq r_b \\ 10n_2 \log\left(\frac{R}{r_b}\right) + 10n_1 \log r_b + L_1 ; R > r_b \end{cases} \quad (3.42)$$

โดยที่ R คือระยะห่างระหว่างเครื่องรับและส่ง L_1 คือการสูญเสียการแพร่กระจายอ้างอิง r_b คือ จุดเปลี่ยน n_1 และ n_2 คือกฎกำลังงานสำหรับ $R \leq r_b$ และ $R > r_b$ ตามลำดับ

สิ่งที่สำคัญสำหรับแบบจำลองนี้คือการเลือกระยะอ้างอิง สำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระยะอ้างอิงที่เหมาะสมคือประมาณ 1 กิโลเมตร แต่ระบบสื่อสารไร้สายขนาดไมโครเซลล์ระยะ อ้างอิงจะใกล้กว่าเช่น 1 หรือ 100 เมตรขึ้นอยู่กับสถานะแวดล้อม อย่างไรก็ตามระยะอ้างอิงจะต้อง เป็นระยะสนามระยะไกลของสายอากาศใช้งานด้วย ค่าอัตราการสูญเสียที่ระยะอ้างอิงอาจหาได้ จากแบบจำลองอากาศว่างหรือใช้ค่าที่ได้จากการวัดที่ระยะ R_0 ความชันการสูญเสียการ แพร่กระจายคลื่น (n) สำหรับสถานะแวดล้อมต่างๆแสดงในตารางที่ 3.2

ตาราง 3.2 ความชันการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่น (n) สำหรับสถานะแวดล้อมต่างๆ

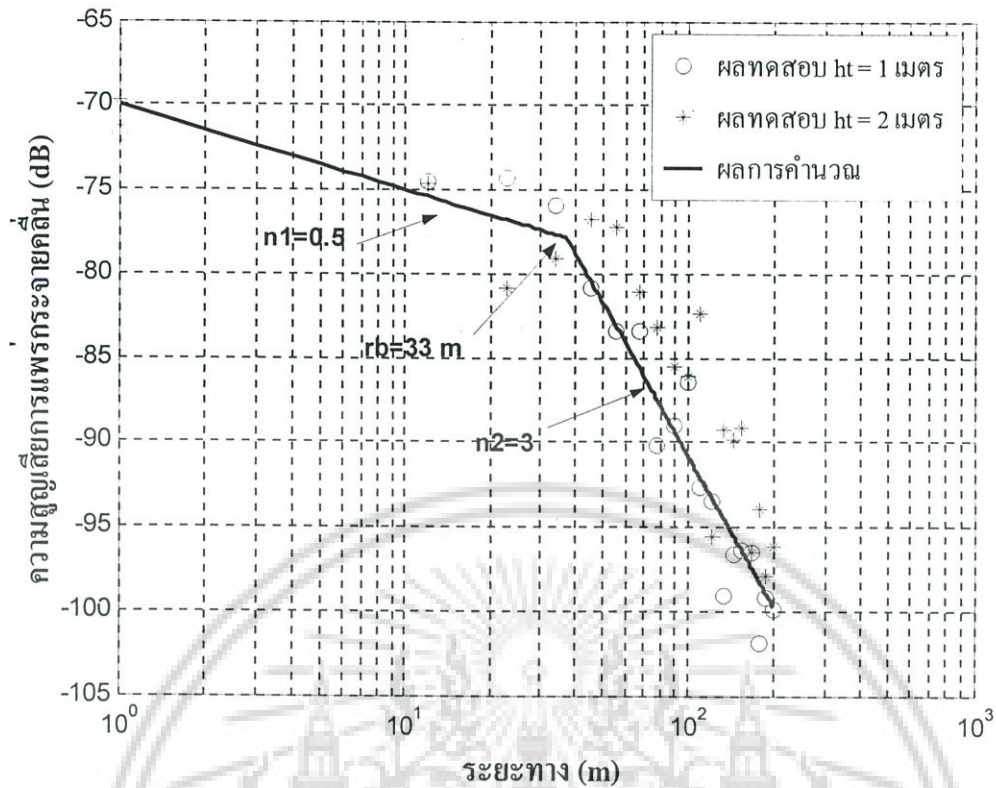
สถานะแวดล้อม	ความชันการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่น (n)
อากาศว่าง (free space)	2
ตัวเมือง	2.7 ถึง 3.5
ตัวเมือง (เกิดเงา)	3 ถึง 5
ในตัวอาคาร (มีเส้นทางตรง)	1.6 ถึง 1.8
ในตัวอาคาร (มีสิ่งกีดขวาง)	4 ถึง 6
ในตัวโรงงาน (มีสิ่งกีดขวาง)	2 ถึง 3

3.7 แบบจำลองความชันคู่ (Dual-Slope Model)

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้แบบสองรังสีร่วมกับแบบจำลองลอการิทึมในการประมาณการสูญเสีย ของสัญญาณหรือเรียกว่าแบบจำลองความชันคู่ โดยเริ่มจากใช้หลักการของแบบจำลองสองรังสีใน การหาค่าจุดเปลี่ยนของความชันอัตราการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแล้ว แบ่งความชันของ กราฟออกเป็นสองช่วงคือ ก่อนจุดเปลี่ยนและหลังจุดเปลี่ยน ความชันของกราฟหาได้จากการ ประมาณค่าเชิงเส้นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบหรือใช้ค่าจากตารางที่ 3.2 สามารถเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

$$L(R)_{Dual-Slope} = \begin{cases} 10n_1 \log(R) + L_1 ; R \leq r_b \\ 10n_2 \log\left(\frac{R}{r_b}\right) + 10n_1 \log r_b + L_1 ; R > r_b \end{cases} \quad (3.42)$$

โดยที่ R คือระยะห่างระหว่างเครื่องรับและส่ง L_1 คือการสูญเสียการแพร่กระจายอ้างอิง r_b คือ จุดเปลี่ยน n_1 และ n_2 คือกฎกำลังงานสำหรับ $R \leq r_b$ และ $R > r_b$ ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 อัตราการสูญเสียแบบจำลองความชันคู่และผลการทดสอบ เมื่อ $h_t = 1$ m และ $h_r = 1$ และ 2 m ตามลำดับ ความถี่ 2.45 GHz

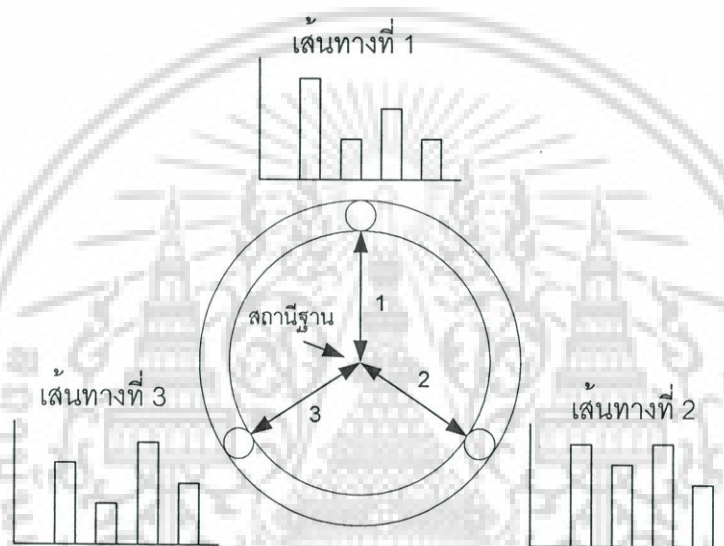
จากรูปที่ 3.8 แสดงอัตราการสูญเสียแบบจำลองความชันคู่จากสมการที่ 3.42 โดยให้ $L_1 = -70$ dBm $r_b = 33$ m ค่ากฎกำลังงาน n_1 และ n_2 มีค่าเท่ากับ 0.5 และ 3 ความสูงสายอากาศรับ = 1 m และส่งมีค่าเท่ากับ 1 m และ 2 m เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบและคำนวณพบว่าค่าการสูญเสียจากแบบจำลองความชันคู่มีค่าผิดพลาดน้อยเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ ความผิดพลาดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่า L_1 n_1 n_2 และ r_b ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถหาได้จากตารางที่ 3.2 หรือจากผลการทดสอบ

3.8 ช่องสื่อสารจางหาย (Fading Channel)

จากหัวข้อที่ 3.2 ถึง 3.7 ได้กล่าวถึงแบบจำลองอัตราการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง ความสูงของสายอากาศ และพารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อม การทำนายอัตราการสูญเสียได้ผลเป็นค่าคงที่ ซึ่งขัดแย้งกับสภาวะความเป็นจริงที่มีค่าไม่คงที่เนื่องจากสิ่งแวดล้อมเส้นทางคลื่น การสะท้อน การหักเห และอื่นๆ เมื่อพิจารณาการสูญเสียที่ระยะทางเท่ากันรอบๆ

สถานีฐานในรูปที่ 3.8 แต่ทว่าแม้ระยะห่างจากสถานีฐานจะเท่ากันแต่การสูญเสียไม่เท่ากัน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเงา (Shadow) หรือ การจางหายช้า (Slow-Fading)

นอกจากนี้ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงความแรงสัญญาณขนาดเล็กกว่าการจางหายช้า เรียกว่า การจางหายเร็ว (Fast Fading) การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดอย่างรวดเร็วซึ่งสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงนี้ได้โดยใช้หลักสถิติสำหรับการทำนายระยะเวลาบริการ คุณภาพการให้บริการ และเสถียรภาพของระบบต้องพิจารณาปรากฏการณ์ทั้งสองนี้ด้วย ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงคุณลักษณะของช่องสื่อสารที่ประกอบด้วยการจางหายช้าและการจางหายเร็วเพื่อใช้สำหรับการประเมินประสิทธิภาพโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายในบทต่อไป

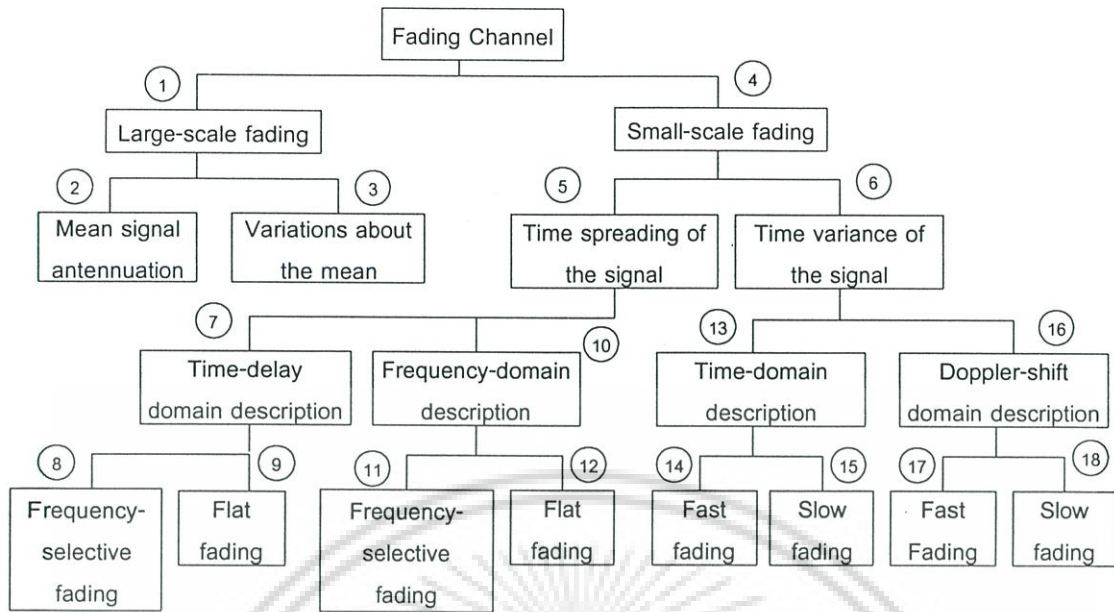


รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงกำลังงานรับของลูกข่ายที่ระยะห่างจากสถานีฐานเท่ากันแต่เส้นทางต่าง ๆ กัน

ช่องสื่อสารจางหายสามารถแยกประเภทได้ดังรูปที่ 3.10 ช่องสื่อสารจางหายแบ่งเป็นสองประเภทคือ การจางหายมาตราส่วนใหญ่ (Large-Scale Fading) และการจางหายมาตราส่วนเล็ก (Small-Scale Fading)

การจางหายมาตราส่วนใหญ่ หมายถึงการลดทอนกำลังงานเฉลี่ยหรืออัตราการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่น (Path Loss) แสดงในรูปที่ 3.10 หมายเลข 1 2 และ 3 ปรากฏการณ์เหล่านี้มีคุณลักษณะขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศระหว่างเครื่องรับและส่ง การประมาณค่าอัตราการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางสามารถใช้วิธีทางสถิติของการจางหายมาตราส่วนใหญ่ ซึ่งใช้หาค่าการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นและการเปลี่ยนแปลงขึ้นๆลงๆของค่านี้มีการกระจายแบบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 การแบ่งประเภทของช่องสื่อสารจางหาย

การจางหายมาตราส่วนเล็ก หมายถึงการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ของแอมพลิจูดและเฟสในช่วงเวลาสั้นๆ หรือระยะทางสั้นๆ การจางหายมาตราส่วนเล็กแบ่งเป็นสองประเภทคือ การแผ่อกเวลาของสัญญาณ (Time Spread of Signal) และการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของสัญญาณ (Time Variance of Signal) แสดงในรูปที่ 3.10 หมายเลข 5 และ 6 ตามลำดับ ช่องสัญญาณสำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับทำให้เส้นทางการแพร่กระจายคลื่นเปลี่ยนแปลง ถ้าคลื่นเส้นทางการสะท้อนรวมกันเป็นจำนวนมากและไม่มีองค์ประกอบแนวเส้นระดับสายตาแล้ว กรอบคลื่น (Envelop) ของสัญญาณสามารถอธิบายโดยการแจกแจงแบบเรย์ลี (Rayleigh Distribution) แต่ถ้ามีองค์ประกอบแนวเส้นระดับสายตาแล้วสามารถอธิบายโดยการแจกแจงแบบไรซ์ (Rician Distribution) [6]

การแผ่ออกทางเวลาสามารถอธิบายได้สองโดเมนคือ โดเมนประวิงเวลา (Time-Delay Domain) และโดเมนความถี่ (Frequency Domain) แสดงในรูปที่ 3.10 หมายเลข 5 และ 6 การอธิบายโดเมนประวิงเวลา พิจารณาจากเค้าโครงความเข้มหลายวิถี (Multipath-Intensity Profile) $S(\tau)$ ที่เป็นฟังก์ชันของการประวิงเวลา τ ส่วนกรณีที่ส่งสัญญาณเป็นพัลส์ เวลาที่ใช้รับองค์ประกอบแรกจนถึงองค์ประกอบสุดท้ายเท่ากับ T_m แสดงค่าการประวิงส่วนเกินสูงสุด (Maximum Excess Delay) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการประวิงส่วนเกินสูงสุด T_m กับเวลาสัญลักษณ์ T_s (Symbol Time) ของช่องสื่อสารจางหายซึ่งแบ่งเป็นสองกรณีคือกรณีแรกเมื่อ

$T_m > T_s$ เรียกช่องสัญญาณนี้ว่า ช่องสัญญาณจางหายเฉพาะความถี่ (Frequency-Selective Fading Channel) แสดงในรูปที่ 3.10 หมายเลข 8 การแผ่อกเวลาสัญญาณเหมือนกับกรณีของการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (ISI) ของวงจรกรองอิเล็กทรอนิกส์ กรณีที่สองเมื่อ $T_m < T_s$ เรียกว่าช่องสัญญาณจางหายไม่เฉพาะความถี่ (Frequency-Nonselective Fading Channel) หรือ การจางหายแบบเรียบ (Flat Fading) เกิดขึ้นเมื่อเวลารับองค์ประกอบหลายวิถีทั้งหมดอยู่ไม่เกินเวลาสัญลักษณ์ แสดงในรูปที่ 3.10 หมายเลข 9

การอธิบายโดเมนความถี่จะพิจารณาจากฟังก์ชันสหสัมพันธ์ความถี่และตำแหน่ง $|R(\Delta f)|$ (Spaced-Frequency Correlation) คือ ผลการแปลงฟูรีเยร์ของ $S(\tau)$ ซึ่งแสดงสหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรับที่ตำแหน่งความถี่ $\Delta f = f_1 - f_2$ และใช้อธิบายช่วงกว้างแถบความถี่ร่วม f_0 (Coherence Bandwidth) มีค่าประมาณ $f_0 \approx 1/T_m$ แสดงในรูปที่ 3.10 ถ้า $f_0 < 1/T_s$ โดยที่ $1/T_s \approx W$ เรียกช่องสื่อสารนี้ว่าช่องสื่อสารเฉพาะความถี่ และถ้า $f_0 > 1/T_s$ เรียกว่า ช่องสื่อสารไม่เฉพาะความถี่

การเปลี่ยนแปลงตามเวลาอธิบายได้สองแบบคือ โดเมนเวลา (Time-Domain Description) และโดเมนการเลื่อนความถี่แบบดอปเปลอร์ (Doppler-Shift Domain) การอธิบายโดเมนเวลาใช้ฟังก์ชันสหสัมพันธ์เวลาและตำแหน่ง $R(\Delta t)$ (Spaced-Time Correlation Function) ซึ่งขึ้นอยู่กับ การเคลื่อนที่ของเครื่องรับ $R(\Delta t)$ แสดงความเร็วการจางหายของช่องสื่อสาร และใช้หาค่าเวลาร่วม T_0 (Coherence Time) ถ้า $T_0 < T_s$ เรียกช่องสื่อสารจางหายเร็ว และถ้า $T_0 > T_s$ เรียกช่องสื่อสารจางหายช้า

การอธิบายโดเมนการเลื่อนความถี่แบบดอปเปลอร์ ใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังงานดอปเปลอร์ $S(\nu)$ ซึ่งเป็นผลแปลงฟูรีเยร์ของ $R(\Delta t)$ แสดงความกว้างที่เปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันของอัตราการเปลี่ยนแปลงสถานะในช่องสื่อสาร

เนื้อหาในส่วนนี้กล่าวถึงการแบ่งประเภทช่องสื่อสารจางหายเบื้องต้น สำหรับรายละเอียดสามารถศึกษาเพิ่มเติมจาก [7]

3.9 การจางหายเร็ว (Fast-Fading)

เนื้อหาส่วนนี้กล่าวถึงการแจกแจงขนาดคลื่นภายใต้สภาวะแวดล้อมการแพร่กระจายหลายวิถี เวลาที่แตกต่างกันเนื่องจากการหน่วงเวลาของเส้นทางเดินจำนวนต้องน้อยกว่าส่วนกลับช่วงกว้างแถบความถี่ส่งเป็นผลให้เส้นทางเดินไม่สามารถแยกออกเป็นพัลส์ได้อย่างเด่นชัด เส้นทางเดินเหล่านั้นไม่สามารถแยกเป็นเส้นทางเดินย่อยในรูปแบบการบวกของเวกเตอร์ได้ แต่เมื่อสังเกตกรอบคลื่น (Envelope) ที่เกิดการรวมกันของเส้นทางเดินย่อย ค่ากรอบเหล่านั้นเป็นตัวแปร

สุ่ม จากรูปที่ 3.11 ถ้า $t_{k_i} - t_{k_j} < 1/W$, $i, j = 1, 2, \dots, n$, และ W คือ ความกว้างของแถบความถี่ส่ง ดังนั้น

$$a_k e^{j\theta_k} = \sum_{i=1}^n a_{k_i} e^{j\theta_{k_i}} \quad (3.43)$$

สำหรับกรณี $r = a_k$ ทุกค่า k ได้ว่า r คือการรวมคลื่นจางหายของคลื่นต่อเนื่อง (CW Fading Envelope) แอมพลิจูดจางหายภายใต้สภาวะแวดล้อมหลายวิถี การแจกแจงขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมทางกายภาพ ความแรงองค์ประกอบหลัก และเงื่อนไขอื่นๆ



รูปที่ 3.11 องค์ประกอบและเส้นทางย่อยของคลื่นหลายวิถี

3.9.1 การแจกแจงแบบเรย์ลี (The Rayleigh Distribution)

การแจกแจงแบบเรย์ลีเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายซึ่งอธิบายการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างรวดเร็วที่ปราศจากองค์ประกอบหลัก สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$P_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad r \geq 0 \quad (3.44)$$

เมื่อ σ คือ เรย์ลีพารามิเตอร์ซึ่งค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าความแปรปรวน (Variance) มีค่าเท่ากับ $\sqrt{\pi/2}\sigma$ และ $(2-\pi/2)\sigma^2$ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

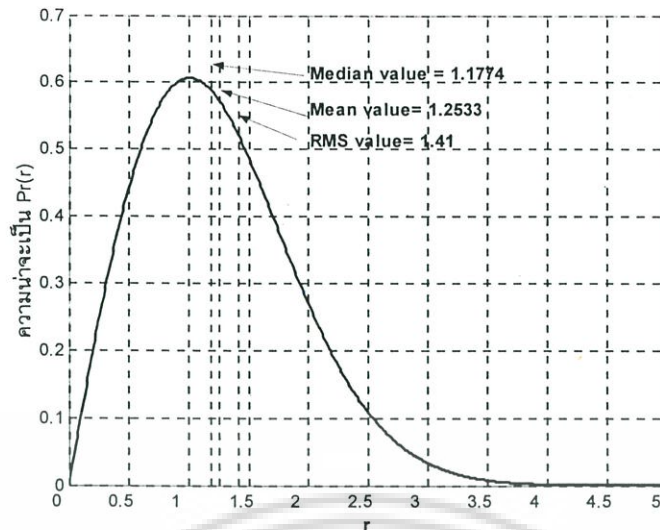
การแจกแจงแบบเรย์ลีใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการอธิบายการจางหายหลายวิถี เพราะสามารถอธิบายในส่วนของทฤษฎีได้อย่างเหมาะสมและเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบซึ่งผลดีเป็นครั้งคราวในทางทฤษฎีสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองคลาร์ก (Clarke) [8] โดยสมมติให้สัญญาณส่งมีเส้นทาง N ทิศทาง แต่ละเส้นทางกำหนดเป็นเชิงซ้อน $r_i e^{j\theta_i}$ โดยที่ r_i และ θ_i คือ กรอบคลื่น และเฟส ตามลำดับ สัญญาณเหล่านั้นรวมกันแบบเวกเตอร์ที่เครื่องรับสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$re^{j\theta} = \sum_i r_i e^{j\theta_i} \quad (3.45)$$

ครากสมมติให้พื้นที่มีขนาดเล็กและไม่มีเส้นทางเดินระดับสายตา (Line-of-Sight) r_i, s และสมมติให้ $r_i = r' = 1, 2, \dots, N$ เขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$re^{j\theta} = r' \sum_i e^{j\theta_i} \quad (3.46)$$

โดยที่เฟส θ_i ขึ้นอยู่กับความยาวเส้นทางเดิน ถ้าความยาวเส้นทางเดินเปลี่ยนเท่ากับความยาวคลื่นทำให้เฟสเปลี่ยนไป 2π ดังนั้นการแจกแจงเฟสมีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอตลอดช่วง $[0, 2\pi)$ สัญญาณรับมีองค์ประกอบ I และ Q ซึ่งเป็นอิสระต่อกัน จากทฤษฎีบทจำกัดกลาง (central limit theorem) และตัวแปรสุ่มเกาส์เขียนจะได้การแจกแจงร่วมของ r ($r = \sqrt{I^2 + Q^2}$) และ θ ($\theta = \arctan[Q/I]$) ซึ่งนำเสนอครั้งแรกโดยเรย์ลี (Lord Rayleigh) [7] r และ θ เป็นอิสระต่อกันแล้ว r มีการแจกแจงแบบเรย์ลี ส่วน θ มีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอตลอดช่วง $[0, 2\pi)$ การแจกแจงแบบเรย์ลีสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การแจกแจงแบบเรย์ลี (Rayleigh)

3.9.2 การแจกแจงแบบไรซ์ (The Rician Distribution)

การแจกแจงแบบไรซ์ใช้อธิบายการแจกแจงของแอมพลิจูดในกรณีที่มีเส้นทางแรง (Strong Path) ร่วมกับเส้นทางที่มีความแรงน้อยกว่าซึ่งเกิดจากการกระจัดกระจาย เส้นทางแรงอาจเป็นเส้นทางเดินมองเห็นระดับสายตาหรือเส้นทางเดินที่เกิดการลดทอนน้อยเมื่อเทียบกับเส้นทางเดินอื่นๆ โดยทูริน (Turin) [9] เรียกเส้นทางเดินนี้ว่า "เส้นทางคงที่ (Fixed Path)" เมื่อเกิดเส้นทางแรงขึ้น เวกเตอร์สัญญาณรับสามารถหาได้จากเวกเตอร์สององค์ประกอบ องค์ประกอบแรกคือการกระจัดกระจายเวกเตอร์แบบเรย์ลีที่แอมพลิจูดและเฟสเป็นตัวแปรสุ่ม องค์ประกอบที่สองคือเวกเตอร์เส้นทางแรง ถ้า $ue^{j\alpha}$ คือองค์ประกอบแบบตัวแปรสุ่ม ประกอบด้วย u ซึ่งเป็นการแจกแจงแบบเรย์ลี และ α มีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ เส้นทางแรงแทนด้วย $ve^{j\beta}$ ซึ่ง v และ β ไม่ใช่ตัวแปรสุ่ม ดังนั้น $re^{j\theta}$ คือผลรวมเฟสเซอร์ของทั้งสององค์ประกอบ ไรซ์ (Rice) [10] ได้แสดงผลรวมการแจกแจงของ r และ θ ดังนี้

$$P_r(r, \theta) = \frac{r}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{r^2 + v^2 - 2rv\cos(\theta - \beta)}{2\sigma^2}\right\} \quad (3.47)$$

โดยที่ $r \geq 0, -\pi \leq (\theta - \beta) \leq \pi$ เมื่อความยาวและเฟสของเส้นทางคงที่จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับค่า β ซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอตลอดช่วง $[0, 2\pi)$ เนื่องจากการ

สุมของ β เกิดจาก r และ θ ดังนั้น β จึงกลายเป็นตัวแปรสุมแบบอิสระ θ มีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอและ r มีการแจกแจงแบบไรท์เซียนได้ดังนี้

$$P_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{r^2 + v^2}{2\sigma^2}\right\} I_0\left(\frac{rv}{\sigma^2}\right) \quad (3.48)$$

โดยที่ $r \geq 0$ I_0 คือฟังก์ชันเบสเซลดัดแปลงอันดับศูนย์ชนิดแรก (Zeroth-Orders Modified Bessel function of the first kind) v คือขนาดขององค์ประกอบแรง และ σ^2 คือกำลังงานเฉลี่ยขององค์ประกอบกระจัดกระจาย

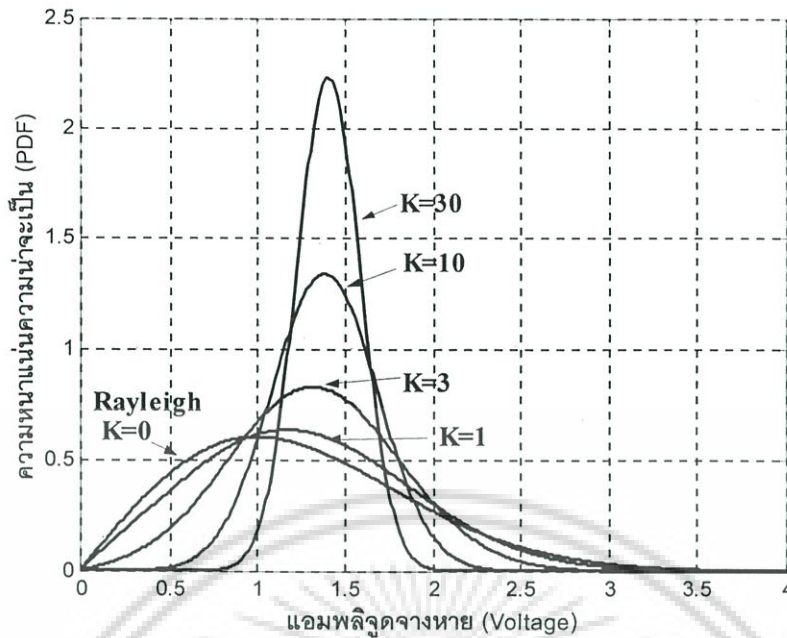
กำลังงานเฉลี่ยท้องถิ่น (Local Mean \bar{p}_l) เกิดจากผลรวมกำลังงานองค์ประกอบเส้นทางแรง ($0.5v^2$) และองค์ประกอบเส้นทางกระจัดกระจาย (σ^2) ค่าตัวประกอบ (Factor) K ของการแจกแจงแบบไรท์คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังงานเส้นทางแรง ($0.5v^2$) และกำลังงานกระจัดกระจาย (σ^2) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sigma^2 = \frac{\bar{p}_l}{1+K} \quad \text{และ} \quad v = \sqrt{\frac{2K\bar{p}_l}{1+K}} \quad (3.49)$$

ดังนั้นการแจกแจงแอมพลิจูดสัญญาณในพจน์ของกำลังงานเฉลี่ยท้องถิ่น (\bar{p}) และตัวประกอบไรท์ (K) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_r(r | \bar{p}, K) = (1+K) e^{-K} \frac{r}{p} \exp\left\{-\frac{1+K}{2p} r^2\right\} I_0\left(\sqrt{\frac{2K(1+K)}{p}} r\right) \quad (3.50)$$

การแจกแจงสมการที่ 3.50 แสดงดังรูปที่ 3.13 โดยปกติค่าตัวประกอบไรท์มีค่าอยู่ในช่วง $K = 4$ ถึง 1000 (6 ถึง 30 dB) สำหรับระบบไมโครเซลลูลาร์ [11] และจากการนำเสนอบัติจุด (Bultitude) และ บีดีล (Bedal) [12] ค่าตัวประกอบไรท์ของช่องสื่อสารระบบไมโครเซลลูลาร์มีค่าประมาณ 7 dB ($K \approx 5$) และบางกรณีอาจมีค่าประมาณ 12 dB ($K \approx 16$) ขึ้นอยู่เงื่อนไขของสภาวะแวดล้อม



รูปที่ 3.13 การแจกแจงแบบไรซ์ เมื่อตัวประกอบ K เท่ากับ 0 และ 1 และ 3 และ 10 และ 30 ตามลำดับ

3.9.3 การแจกแจงแบบนาคากามิ (The Nakagami Distribution)

การแจกแจงแบบนาคากามิ (Nakagami Distribution) หรือ การแจกแจงแบบเอ็ม (M-Distribution) ซึ่งประกอบด้วย การแจกแจงหลายชนิดโดยการแจกแจงแบบเรย์ลีส์สมมติให้ความยาวเวกเตอร์กระจัดกระจายมีค่าเท่ากัน และการแจกแจงเฟสเป็นตัวอย่างสุ่ม แต่นาคากามิเสนอแบบจำลองที่สมจริงกว่า [13] ซึ่งสมมติให้ความยาวเวกเตอร์เป็นตัวอย่างสุ่มแล้วกำหนดให้ $r = |\sum r_i e^{j\theta_i}|$ การแจกแจงแบบนาคากามิเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_r(r) = \frac{2m^m r^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp\left(-\frac{mr^2}{\Omega}\right) \quad (3.51)$$

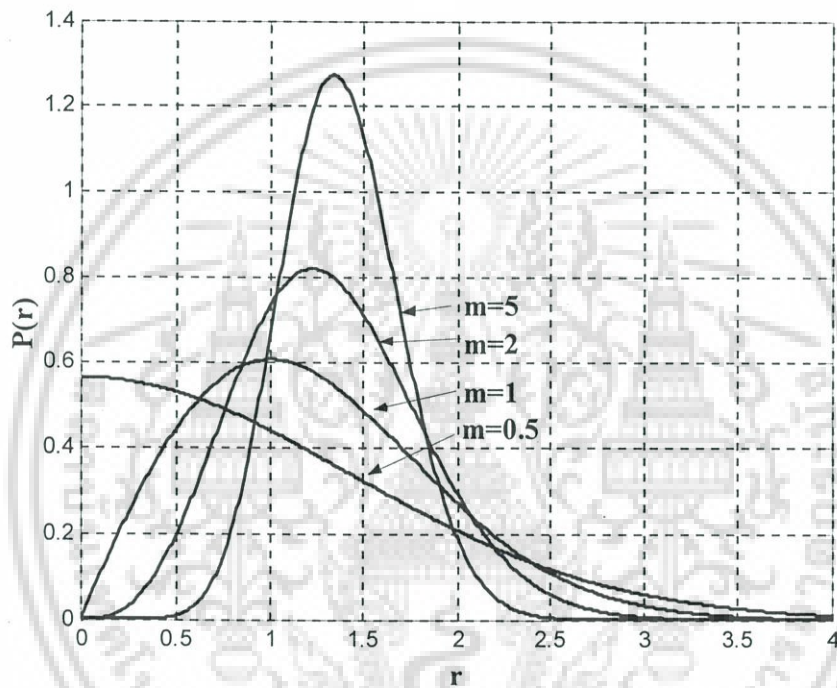
$$\Omega = E\{r^2\} \quad (3.52)$$

$$m = \frac{\{E[r^2]\}^2}{\text{Var}[r^2]} \quad (3.53)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $r \geq 0$ และ $m \geq 1/2$ โดยที่ $\Gamma(m)$ คือแกมมาฟังก์ชัน การแจกแจงแบบนาคากามิให้ค่าการแจกแจงแบบเรย์ลีเมื่อ $m=1$ และแบบเกาส์เซียนแถบเดี่ยว เมื่อ $m=1/2$ แสดงในรูปที่ 3.14 นอกจากนี้ยังให้ค่าประมาณการแจกแจงแบบไวท์อย่างเที่ยงตรง วิธีการประมาณการแจกแจงแบบไวท์โดยการแจกแจงแบบนาคากามิ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

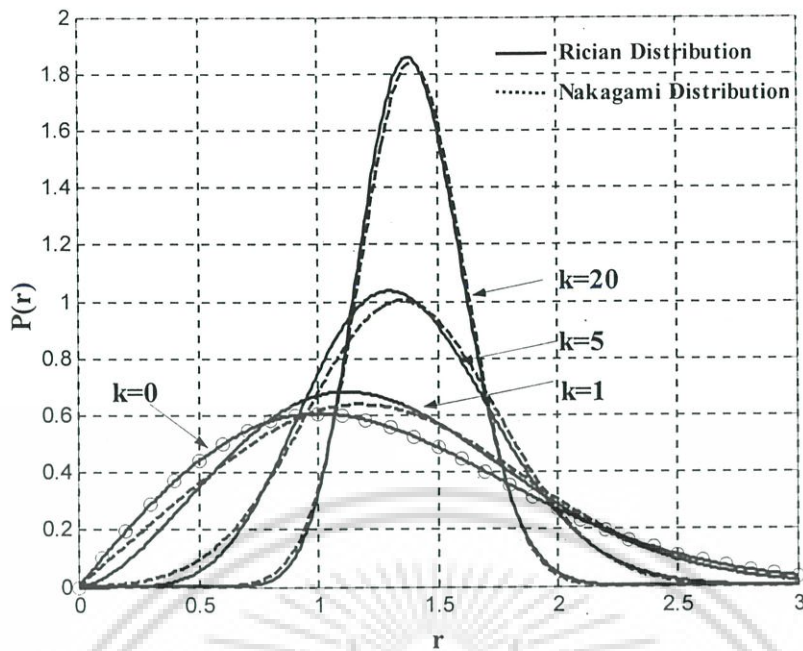
$$m = \frac{(K+1)^2}{2K+1} \quad (3.54)$$



รูปที่ 3.14 การแจกแจงแบบนาคากามิ เมื่อ $m = 0.5$ และ 1 และ 2 และ 5

จากรูปที่ 3.15 แสดงการเปรียบเทียบการประมาณการแจกแจงแบบไวท์ ด้วยสมการที่ 3.51 กรณีที่ K หรือ m มีค่ามากขึ้นทำให้การประมาณมีความเที่ยงตรงสูงขึ้น การแจกแจงแบบนาคากามิให้ผลลัพธ์เที่ยงตรงเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากการใช้งานจริง นอกจากนี้ผลการจำลองโดยใช้เทคนิคติดตามรังสี (Ray Tracing Techniques) ภายในอาคารแสดงให้เห็นว่าช่องสื่อสารจางหายเร็วมีการแจกแจงแบบนาคากามิ [14]

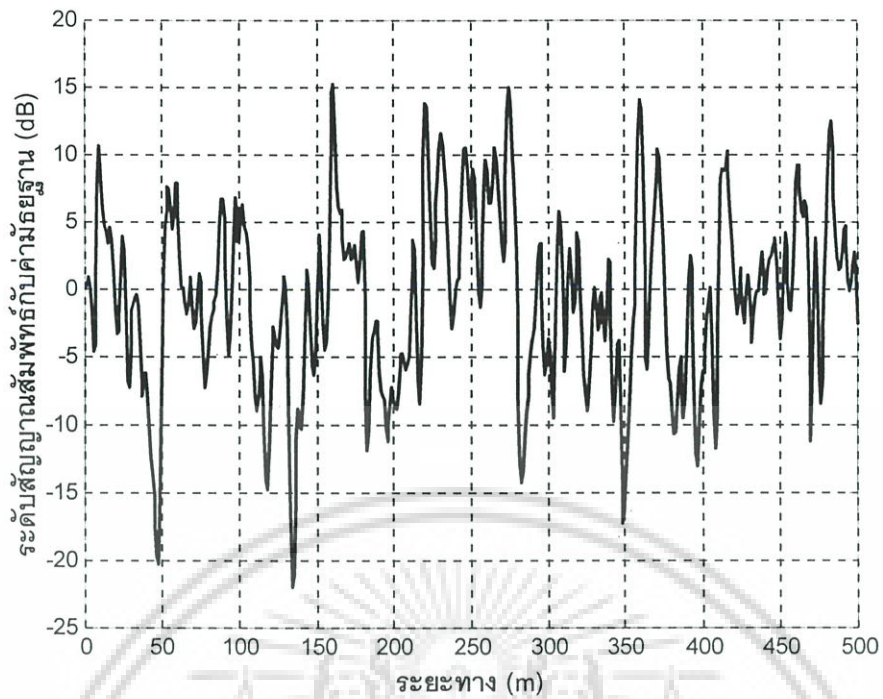
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



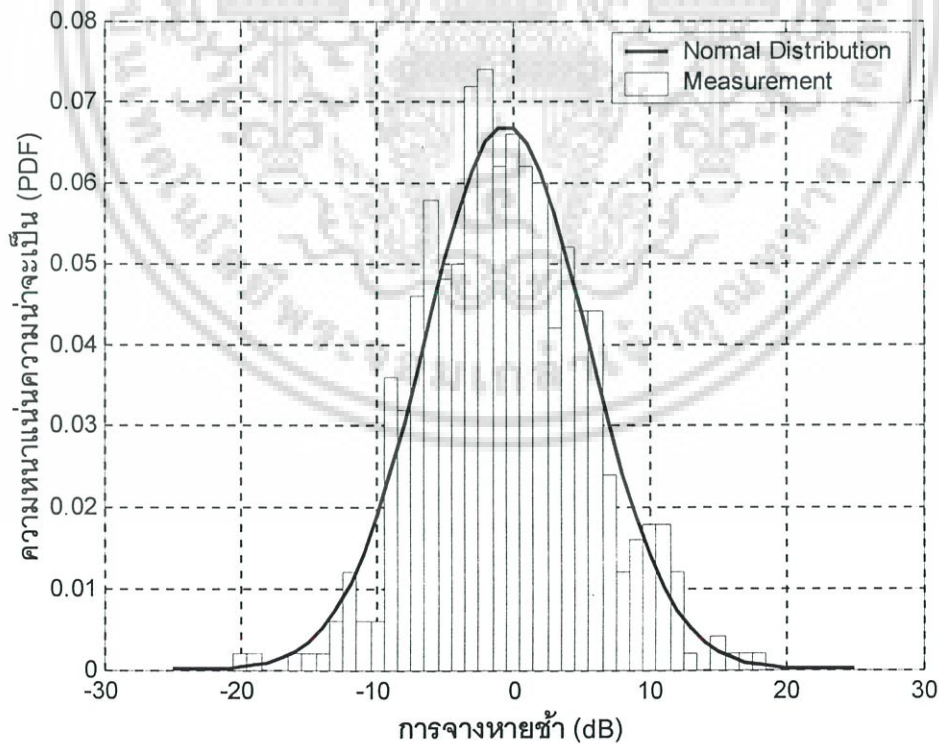
รูปที่ 3.15 การประมาณการแจกแจงแบบไรซ์ด้วยนาคากามิ เมื่อ $K = 0$ และ 1 และ 5 และ 10

3.10 การจางหายช้า (Slow-Fading)

เมื่อลูกข่ายเคลื่อนที่ไปรอบๆ สถานีฐานด้วยระยะห่างคงที่แล้วค่าเฉลี่ยท้องถิ่นจะมีลักษณะเหมือนรูปที่ 3.16 หลังจากทำการหักล้างกับค่ามัธยฐานในหน่วยเดซิเบลแล้ว ถ้าฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นของสัญญาณเป็นดังรูปที่ 3.17 การแจกแจงของกำลังงานสัญญาณนั้นจะเป็นแบบปกติล็อก ถ้าสัญญาณวัดมีเป็นหน่วยเดซิเบลทำให้การแจกแจงเป็นแบบปกติ การเบี่ยงเบนมาตรฐานการจางหายช้ามีชื่อเรียกอีกแบบหนึ่งว่า “การเปลี่ยนแปลงที่ตั้ง (Location variability)” ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับความถี่ ความสูงของสายอากาศและสภาวะแวดล้อมโดยค่านี้มีค่ามากในสภาวะแวดล้อมที่หนาแน่น และจะมีค่าน้อยในสภาวะแวดล้อมเปิดโล่งซึ่งโดยปกติจะมีค่าประมาณ 5 - 12 dB



รูปที่ 3.16 การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการจางหายซ้ำ



รูปที่ 3.17 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นของการจางหายซ้ำจากการทดสอบและทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10.1 การแจกแจงแบบปกติล็อก (Log-normal Distribution)

จากผลการทดลองของเอกลิก (Eglin) [15] พบว่ากำลังงานรับมีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบการแจกแจงแบบปกติล็อกรอบๆค่าเฉลี่ยพื้นที่ (area-mean) เขียนฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นได้ดังนี้

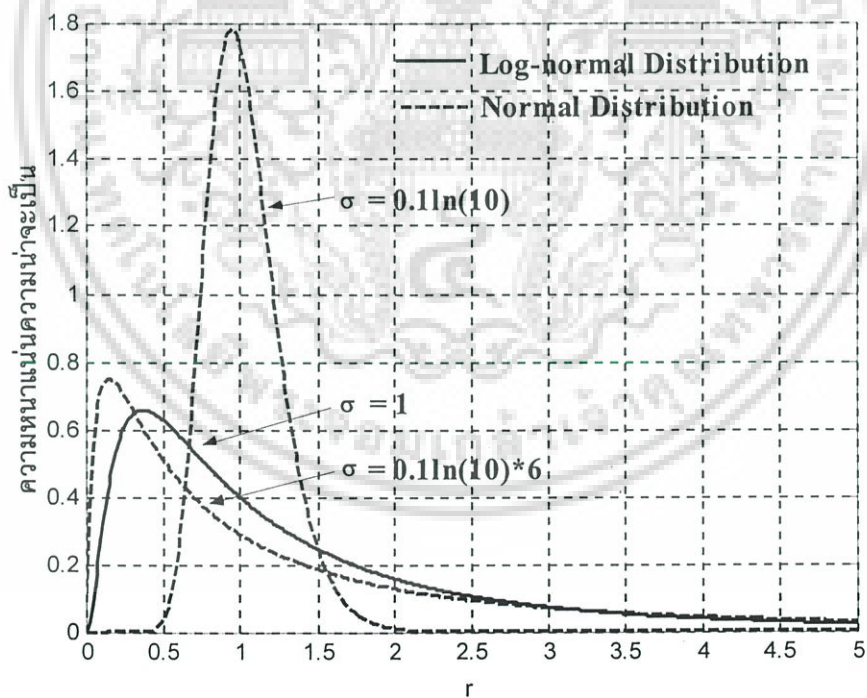
$$P_r(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma r} \exp\left\{-\frac{(\ln r - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (3.55)$$

โดยที่ $r \geq 0$ ถ้าให้ r มีหน่วยเป็นเดซิเบล และ $z = 10\log(r)$ จาก (3.55) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$P_r(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left\{-0.5\left(\frac{z - \mu_z}{\sigma_z}\right)^2\right\} \quad (3.56)$$

โดยที่

$$\mu_z = \frac{\mu}{0.1\ln(10)} \quad (3.57)$$



รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติล็อกและแบบปกติ เมื่อ $\mu_z = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_z = \frac{\sigma}{0.1 \ln(10)} \quad (3.58)$$

จากรูปที่ 3.18 จะพบว่าเมื่อให้การแจกแจงแบบปกติล็อกมีหน่วยเป็นเดซิเบล จะได้การแจกแจงแบบปกติ และถ้าให้ค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 6 dB ฟังก์ชันการแจกแจงจะไม่สมมาตรและมีลักษณะใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบปกติล็อก

การสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นจากสมการที่ 3.13 และ 3.31 และ 3.33 และ 3.41 และ 3.42 ไม่ได้พิจารณาผลกระทบที่เกิดจากสภาวะแวดล้อมจริง ทำให้ค่าคำนวณและค่าทดสอบมีผลแตกต่างกันแม้ว่าระยะทางจะเท่ากัน การสูญเสียการแพร่กระจายคลื่น $P_L(R)$ ที่ระยะทาง R สำหรับกรณี que เลือกสถานที่ทดสอบแบบสุ่มและเกิดการกระจายแบบปกติล็อกรอบๆค่าเฉลี่ย [23-24] สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_L(R) = \bar{P}_L(R) + X_\sigma = \bar{P}_L(r_0) + 10n \log\left(\frac{R}{r_0}\right) + X_\sigma \quad (3.59)$$

ถ้าพิจารณารณินี้ที่ใช้แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบความชันคู่จากสมการที่ 3.42 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$P_L(R) = \begin{cases} 10n_1 \log(R) + L_1 ; R \leq r_b \\ 10n_2 \log\left(\frac{R}{r_b}\right) + 10n_1 \log r_b + L_1 ; R > r_b \end{cases} + X_\sigma \quad (3.60)$$

โดยที่ X_σ คือ ตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติ ค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ σ การเลือกค่า σ ขึ้นอยู่กับผลการทดสอบ โดยปกติแล้วมีค่าเท่ากับ 6-10 dB ค่า σ หาได้จากผลต่างของผลคำนวณและผลการทดสอบ จากนั้นใช้หาผลต่างรวมโดยใช้วิธีผลต่างกำลังสองน้อยสุดซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$J(n_1, n_2) = \sum_{i=1}^k (p_i - \hat{p}_i)^2 \quad (3.61)$$

เมื่อ p_i คือ กำลังงานรับที่ระยะ r_i และ \hat{p}_i คือ ผลการคำนวณกำลังงานรับสำหรับ p_i ซึ่งหาจากสมการที่ 4.4 และ สมการที่ 3.42 โดยการหาค่า n_1 และ n_2 ที่ทำให้สมการที่ 3.61 มีค่าน้อยที่สุด

ซึ่งสามารถทำได้โดยการทำอนุพันธ์สมการที่ 3.61 และกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ค่า σ หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\sigma^2 = \sum J(n_1, n_2) / N \quad (3.62)$$

โดยที่ N คือจำนวนกำลังงานรับที่ใช้ในการคำนวณ

3.11 สรุป

ในบทนี้นำเสนอแบบจำลองอากาศว่าง แบบจำลองสองรังสี แบบจำลองฮาตะ แบบจำลองซีซีไออาร์ แบบจำลองลอการิทึม แบบจำลองความชันคู่ เพื่อใช้ทำนายการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่น แบบจำลองอากาศว่างเหมาะสมที่ใช้กับระบบสื่อสารดาวเทียมหรือไมโครเวฟที่ไม่มีวัตถุใดๆ มาขวางกั้นระหว่างเครื่องรับและส่ง แบบจำลองสองรังสีใช้อธิบายผลกระทบจากการสะท้อนคลื่นของพื้นดินสำหรับแบบจำลองฮาตะ และซีซีไออาร์เหมาะสำหรับการทำนายการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นในสภาวะแวดล้อมเมืองและชานเมือง แบบจำลองลอการิทึมใช้ผลการทดสอบเพื่อหาความชันการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่น ส่วนแบบจำลองความชันคู่ที่ประยุกต์ใช้แบบจำลองลอการิทึมร่วมกับแบบจำลองสองรังสีเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนาย ความเที่ยงตรงของการทำนายขึ้นอยู่กับทางเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้แบบจำลองความชันคู่เพราะแบบจำลองนี้ให้ความเที่ยงตรง มีความยืดหยุ่น คำนวณง่าย และใช้กับสภาวะแวดล้อมได้หลากหลาย

การแจกแจงที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของช่องสื่อสารได้แก่แบบจำลองเรย์ลีใช้อธิบายช่องสื่อสารที่ไม่มีคลื่นเดินทางในแนวเส้นระดับสายตา การแจกแจงแบบไรซีใช้อธิบายช่องสื่อสารมีคลื่นเดินทางแนวเส้นระดับสายตาและคลื่นเส้นทางอ้อมใช้เป็นแบบจำลองสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ การแจกแจงแบบนาคามีสามารถอธิบายช่องสื่อสารได้หลายแบบขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ m ปกติการแจกแจงนาคามีสามารถอธิบายได้โดยแบบแจกแจงปกติล็อก การศึกษาแบบจำลองและการแจกแจงในบทนี้เป็นพื้นฐานที่นำไปใช้ในการคำนวณระยะบริการ และประสิทธิภาพของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายในบทต่อไป

บทที่ 4

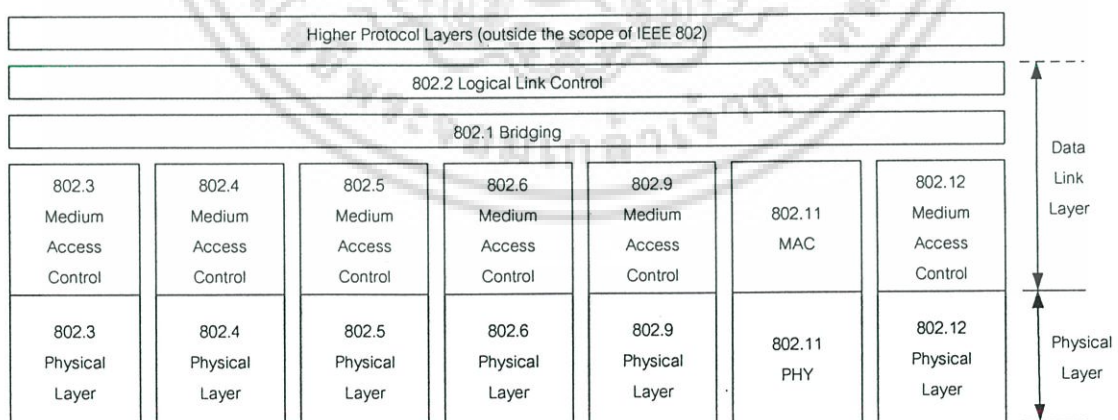
การประเมินประสิทธิภาพโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE 802.11

4.1 บทนำ

เนื้อหาบทนี้นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 ซึ่งมีความจำเป็นต่อการออกแบบและการทำงานของโครงข่าย เริ่มจากศึกษาพื้นฐานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายซึ่งประกอบด้วย โทโปโลยี การควบคุมการเข้าถึงสื่อ รูปแบบเฟรม ชั้นสื่อสาร กายภาพ และค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุด แล้ววิเคราะห์การหาค่าระยะบริการสูงสุด อัตราผิดพลาดบิต อัตราผิดพลาดแพ็คเก็ต และค่าวิสัยสามารถ โดยเน้นผลกระทบเนื่องมาจากประสิทธิภาพสายอากาศต่อประสิทธิภาพโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายเพื่อนำผลคำนวณไปใช้ในการออกแบบสายอากาศเพื่อให้ได้คุณภาพการบริการ (Quality of Service) ตามที่กำหนดไว้

4.2 พื้นฐานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11

มาตรฐานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 ประกาศครั้งแรกในปี 1997 สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นที่ใช้สายอากาศเป็นช่องสื่อสาร [16] IEEE 802.11 เป็นส่วนหนึ่งของมาตรฐานโครงข่ายท้องถิ่นและเมืองโดยแสดงดังรูปที่ 4.1 สำหรับชั้นสื่อสาร IEEE 802.11 แบ่งออกเป็นสองชั้นคือ ชั้นการควบคุมเข้าถึงสื่อ (Medium Access Control: MAC) และชั้นกายภาพ (Physical Layer: PHY)



รูปที่ 4.1 มาตรฐาน IEEE 802.11 ในมาตรฐาน IEEE 802

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 โทโปโลยี (Topology)

มาตรฐาน IEEE 802.11 ประกอบด้วยกลุ่มสื่อสารได้แก่ สถานีฐาน (Access Point) และลูกข่าย (Client) โดยที่กลุ่มสื่อสารนี้เรียกว่า กลุ่มบริการพื้นฐาน (Basic Service Set: BSS) โปโตคอลชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ การรวมตัวแบบแอดฮอค (Ad-Hoc) หมายถึงการติดต่อสื่อสารระหว่างลูกข่ายโดยไม่ต้องใช้สถานีฐาน และการรวมตัวแบบโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) คือการติดต่อสื่อสารโดยใช้สถานีฐานเป็นศูนย์กลางการควบคุม กลุ่มสถานีฐานที่สื่อสารกันโดยการส่งต่อเฟรมข้อมูลจากกลุ่มบริการพื้นฐานหนึ่งไปยังกลุ่มอื่นเพื่ออำนวยความสะดวกเมื่อลูกข่ายเคลื่อนย้ายไปยังสถานีฐานอื่นซึ่งเรียก กลุ่มบริการขยาย (Extended Service Set: ESS) ถ้าสถานีฐานหนึ่งสื่อสารกับสถานีอื่นเพื่อส่งต่อเฟรมข้อมูลให้กับสถานีฐานอื่นเพื่อให้ลูกข่ายสามารถเคลื่อนที่จากสถานีหนึ่งไปยังสถานีอื่นและแลกเปลี่ยนเฟรมข้อมูลผ่านทางเครือข่ายไร้สายซึ่งเรียกกลไกนี้ว่า ระบบกระจาย (Distribution System: DS) แสดงดังรูปที่ 4.2

4.2.2 การควบคุมการเข้าถึงสื่อ (Medium Access Control)

เครือข่ายไร้สายใช้อากาศเป็นสื่อนำสัญญาณทำให้เกิดปัญหาการชนตัวของลูกข่ายซึ่งปัญหานี้ไม่เกิดขึ้นกับเครือข่ายใช้สาย การชนตัวเกิดจากระยะทำงานที่จำกัดทำให้ลูกข่ายไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้อย่างทั่วถึงทั้งกลุ่ม ตัวอย่างเช่น ลูกข่าย A และ C จะไม่สามารถติดต่อกันได้เนื่องจากเกินระยะทำการแล้ว ถ้า A และ C ส่งเฟรมไปยัง B พร้อมๆกันทำให้เกิดการชนกัน การส่งเฟรมข้อมูลพร้อมๆกันของ A และ C เนื่องจาก A และ C ไม่ทราบว่ามี B ติดต่อกับสถานีอื่นๆ ด้วยแสดงดังรูปที่ 4.3 IEEE 802.11 ซึ่งสามารถแก้ปัญหาโดยใช้กลไก RTS/CTS

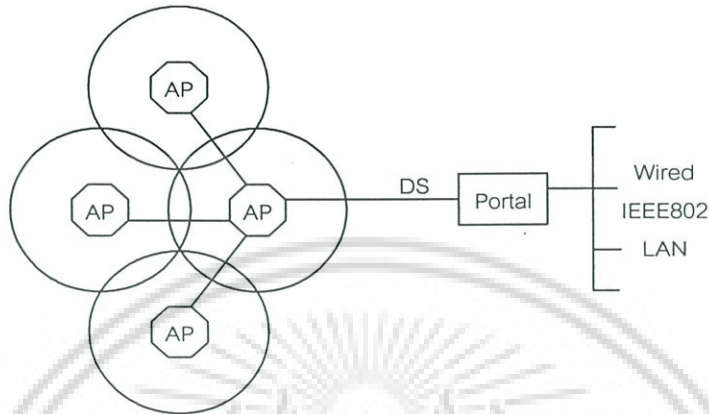
การควบคุมการเข้าถึงสื่อใช้กลไกซึ่งเรียกว่า CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance) ใช้หลักการตรวจสอบสื่อก่อนส่งข้อมูล ถ้าสื่อว่างแล้วจะทำการส่งข้อมูลเมื่อส่งแล้วฝ่ายรับได้รับข้อมูลถูกต้องจะส่งเฟรมตอบรับกลับมา ถ้าไม่มีเฟรมตอบรับให้ถือว่าการส่งนั้นเกิดชนกัน จากนั้นฝ่ายส่งจะทำการส่งใหม่โดยหน่วงเวลาก่อนส่ง การหน่วงเวลาเป็นแบบสุ่มและถ้ายังมีการชนกันเวลาที่ใช้น่องจะเพิ่มขึ้น

4.2.3 รูปแบบเฟรม

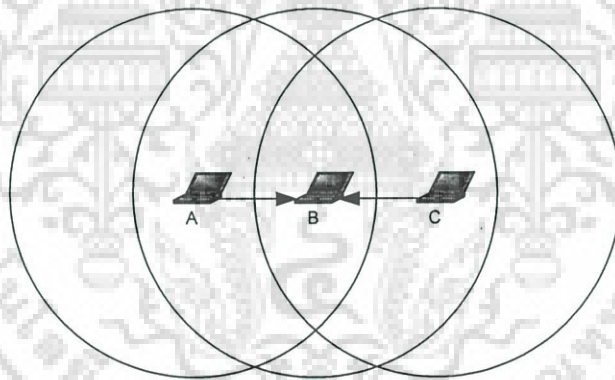
รูปแบบเฟรมในชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อ (MSDU) IEEE 802.11 แสดงดังรูปที่ 4.4 ข้อมูลเฟรมประกอบด้วย ข้อมูลที่อยู่ ข้อมูลโปรโตคอล IEEE 802.11 ข้อมูล NAV (Network Allocation Vector) และข้อมูลการจัดลำดับเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของเฟรม

FC	D/ID	Addr.1	Addr.2	Addr.3	Seq Cont.	Addr. 4	Data	FCS	Bytes
2	2	6	6	6	2	6	0-2312	4	

รูปที่ 4.2 เฟรมชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อ



รูปที่ 4.3 กลุ่มบริการพื้นฐาน (BSS) กลุ่มบริการขยาย (ESS) และระบบกระจาย (DS)



รูปที่ 4.4 ปรัชญาการณการซ่อนตัวในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

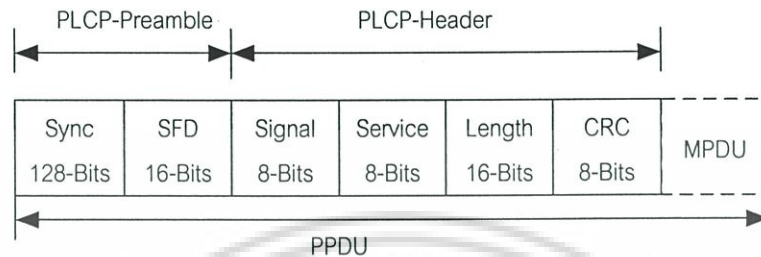
4.2.4 ชั้นสื่อสารกายภาพ

IEEE 802.11 กำหนดให้ก่อนส่งเฟรมข้อมูลจากชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อจะต้องเติมข้อมูลที่เรียกว่า ฟร็อมเบิล-PCLP และ ส่วนหัว-PLCP ดังรูปที่ 4.5 ฟร็อมเบิล-PCLP ประกอบด้วย ฟิลด์ Sync และ SFD เพื่อบรรจุข้อมูลใช้สำหรับการซิงโครไนส์และบอกจุดเริ่มต้นเฟรม ตามลำดับ ส่วนหัว-PLCP ประกอบด้วยฟิลด์ Signal ซึ่งแสดงการมอดูเลตที่ใช้ ฟิลด์ Service คือฟิลด์ที่สงวนไว้ ฟิลด์ Length แสดงค่าที่ใช้คำนวณจุดสิ้นสุดของเฟรม ฟิลด์ CRC คือฟิลด์ที่บรรจุข้อมูลการตรวจสอบความถูกต้องของเฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การมอดูเลตสำหรับมาตรฐาน IEEE 802.11 เป็นแบบโคเร็คซีแควนส์มีอัตราเร็วบิต 1 Mbps และ 2 Mbps ซึ่งอัตราชีพเท่ากับ 11 MHz และ ใช้การเข้ารหัสแบบเบเคอร์ (Baker) แสดงได้ดังนี้

$$B_n = [-1, +1, -1, -1, +1, -1, -1, -1, +1, +1] \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.5 เฟรมเบิล PLCP ส่วนหัว PLCP และ MPDU

4.2.5 ค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุด

ค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุด (Theoretical Maximum Throughput) สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 คืออัตราส่วนข้อมูล MSDU กับเวลาที่ใช้ส่งทั้งหมด [17] เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$TMT = \frac{MSDU}{T_{MSDU}} \quad (4.2)$$

โดยที่ $MSDU$ คือขนาดข้อมูลจากชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อ ส่วน T_{MSDU} คือเวลารวมจากการส่งข้อมูล 1 รอบ แสดงดังรูปที่ 4.6 เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$T_{MSDU} = (T_{DIFS} + T_{SIFS} + T_{BO} + T_{RTS} + T_{CTS} + T_{ACK} + T_{Data}) \times 10^{-6} \quad (4.3)$$

โดยที่ค่าใน (4.3) ได้จากตารางที่ 4.1 รูปที่ 4.7 แสดงค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุดเปรียบเทียบกับขนาด MSDU ที่อัตราบิต 1 2 5.5 และ 11 Mbps ซึ่งพบว่าเมื่อขนาด MSDU เพิ่มขึ้นค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามถ้าขนาด MSDU มากเกินไปทำให้ความผิดพลาดแพ็คเก็ตเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง ปกติแล้วขนาดของ MSDU มีค่าประมาณไม่เกิน 1500 ไบต์

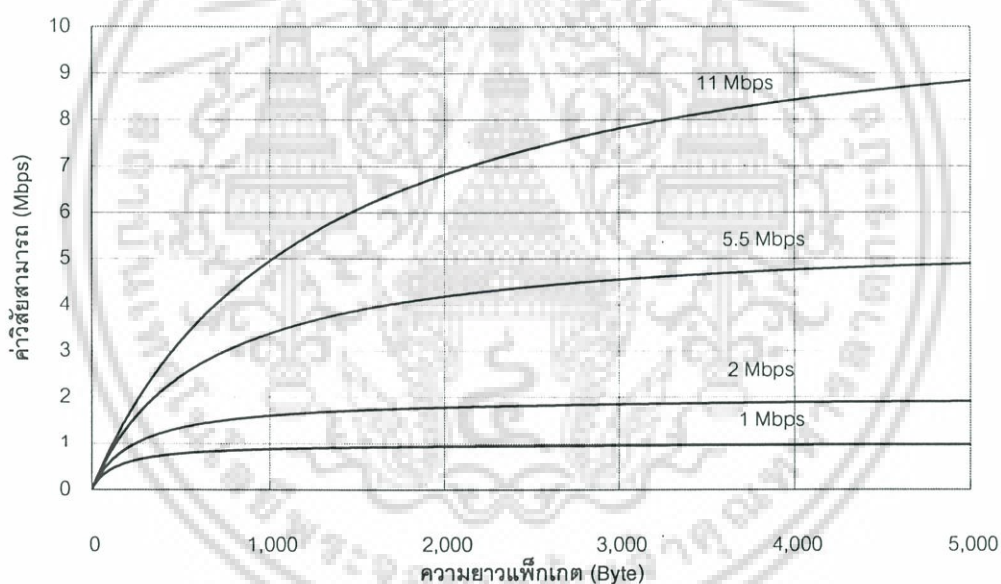
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แผนผังเวลาการส่งข้อมูล IEEE 802.11

ตารางที่ 4.1 ค่าเวลาต่างๆที่ใช้ในการส่งข้อมูล

อัตราบิต	T_{DIFS}	T_{SIFS}	T_{ACK}	T_{RTS}	T_{CTS}	T_{data}
1 Mbps	50	10	304	-	-	$192+8(34+MSDU)/1$
2 Mbps	50	10	304	-	-	$192+8(34+MSDU)/2$
5.5 Mbps	50	10	304	-	-	$192+8(34+MSDU)/5.5$
11 Mbps	50	10	304	-	-	$192+8(34+MSDU)/11$



รูปที่ 4.7 ค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันของขนาด MSDU ที่อัตราบิต 1, 2, 5.5 และ 11 Mbps ตามลำดับ

4.3 ระยะเวลาการส่งสูงสุด

จุดประสงค์หลักของแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นที่กล่าวถึงในบทที่ 3 คือการทำนายค่าความสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายให้มีความแม่นยำที่สุดเพื่อหาระยะทำงานของระบบสื่อสารก่อนการติดตั้ง ระยะทำงานไกลสุดของระบบเกิดขึ้นเมื่อระดับกำลังงานรับเท่ากับระดับที่ให้

คุณภาพการสื่อสารตามที่กำหนดไว้ ซึ่งระดับนี้เรียกว่า ความไวเครื่องรับ (Receiver Sensitivity) อัตราการสูญเสียการแพร่กระจายที่ให้ค่ากำลังงานรับเท่ากับความไวเครื่องรับเรียกว่า ค่าอัตราสูญเสียการแพร่กระจายสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Acceptable Path Loss) แสดงเป็นหน่วย เดซิเบลได้ดังนี้

$$L_{\max} = P_t - L_t + G_t - L_r + G_r - S \quad (4.4)$$

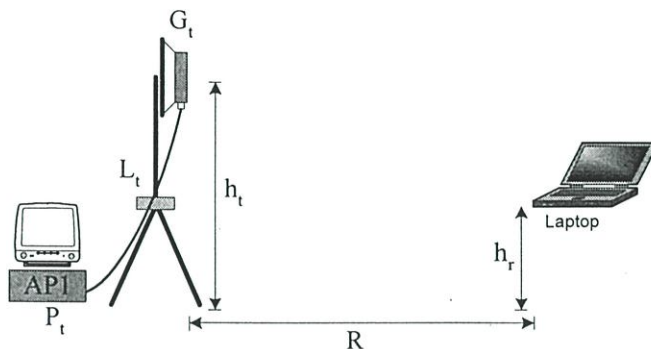
เมื่อ P_t คือกำลังงานส่ง G_t และ G_r คืออัตราการขยายของสายอากาศส่งและรับ ตามลำดับ L_t และ L_r คืออัตราการสูญเสียจากสายนำสัญญาณด้านส่งและรับ S คือค่าความไวเครื่องรับ ซึ่งตัวแปรทั้งหมดมีหน่วยเป็น dB ซึ่งจากทฤษฎีย้อนกลับ (Reciprocity Theorem) ได้นิยามว่า ความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการสลับหน้าที่รับส่งระหว่างสายอากาศส่งและรับ แต่อย่างไรก็ตามอัตราการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่ยอมรับได้ระหว่างสองทิศทางอาจมีความแตกต่างกันเนื่องจากความไวเครื่องรับด้านรับและด้านส่งต่างกัน ตัวอย่างเช่น เครื่องรับที่สถานีฐานถูกออกแบบให้มีความไวเครื่องรับมากกว่าลูกข่ายเพื่อลดกำลังงานส่งจากลูกข่าย

การหาระยะบริการสูงสุดระหว่างสถานีฐานและลูกข่ายที่มีคุณสมบัติตามภาคผนวก ก นั้นใช้ค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 4.2 และจัดเงื่อนไขตามรูปที่ 4.8 โดยเริ่มจากการหาอัตราการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่ยอมรับได้จากสมการที่ 4.4 แล้วแปลงกลับเป็นระยะทางด้วยแบบจำลองอากาศว่าง แบบจำลองสองรังสี แบบจำลองฮาตะสำหรับเขตเมืองใหญ่ที่ความถี่มากกว่า 400 MHz สำหรับพื้นที่เปิด และแบบจำลองความชันคู่มือเมื่อค่าพารามิเตอร์เท่ากับ $L_1 = -54.65$ dB $n_1 = -1.02$ $n_2 = 4.32$ ผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.9

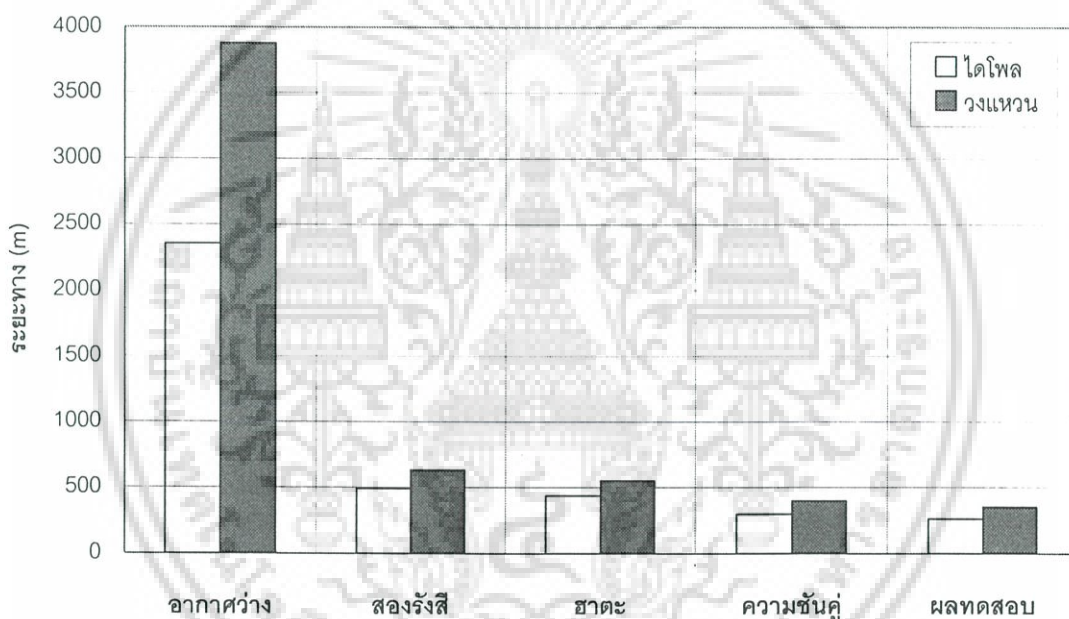
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณระยะบริการสูงสุด

พารามิเตอร์	ด้านสถานีฐาน	ด้านลูกข่าย
P_t	15 dBm	-
L_t	0.6 dB (LRM-195)	0 dB
G_t	ไดโพล = 2 dBi วงแหวน = 6.5 dBi	0 dBi
ความสูงสายอากาศ	$h_t = 1.5$ m	$h_r = 1$ m
ความไวเครื่องรับ	-	-94 dBm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 การทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนวงกลมในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

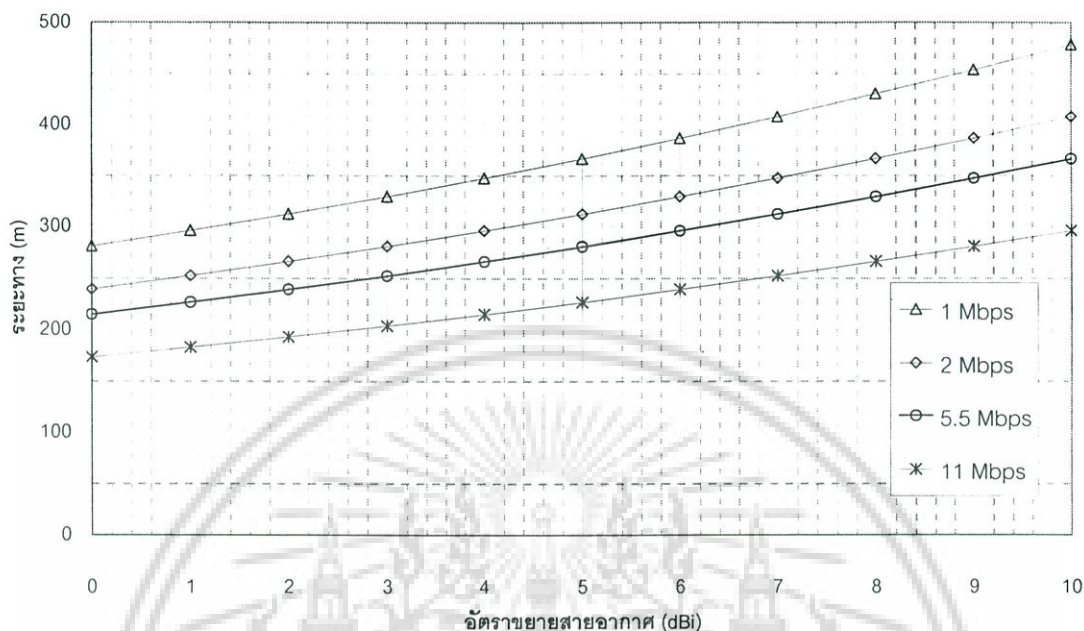


รูปที่ 4.9 การทำนายระยะบริการสูงสุดจากแบบจำลองต่างๆ

พบว่าค่าระยะบริการสูงสุดที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความชันคู่ นั้นให้ค่าใกล้เคียงกับการทดสอบมากที่สุด รองลงมาได้แก่ แบบจำลองฮาตะ แบบจำลองความชันคู่ และแบบจำลองอากาศว่าง อย่างไรก็ตามการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองความชันคู่ นั้นมีขั้นตอนมากกว่าและจำเป็นต้องใช้ค่าจากการทดสอบ ระยะบริการสูงสุดเมื่อสายอากาศที่สถานีฐานมีอัตราขยาย 0 - 10 dBi แสดงได้ดังรูปที่ 4.10 โดยในการคำนวณใช้แบบจำลองความชันคู่และใช้เงื่อนไขเดิมพบว่าที่อัตราขยายเท่ากับสายอากาศวงแหวน (6.5 dBi) สำหรับอัตราบิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 2 5.5 และ 11 Mbps แล้วระยะบริการสูงสุดเท่ากับ 478.4 407.5 366.3 และ 295.8 เมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 การทำนายระยะบริการสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันของค่าอัตราขยายสายอากาศโดยใช้แบบจำลองความชันคู่ ที่อัตราบิต 1, 2, 5.5 และ 11 Mbps

4.4 อัตราความผิดพลาดบิตโครงข่ายไร้สาย IEEE 802.11

มาตรฐานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายอัตราบิต 1 Mbps ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK [22] ซึ่งสมมติให้ช่องสื่อสารเป็นแบบเกาส์เซียนแต่ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้เป็นช่องสื่อสารจางหายแบบโรซท์เนื่องจากการสื่อสารแบบจุดต่อจุดส่วนมากแล้วเป็นช่องสื่อสารแบบโรซท์และมีเงื่อนไขในการคำนวณดังนี้

- ช่องสื่อสารจางหายแบบโรซท์เซี่ยล
- เกิดการจางหายซ้ำและราบเรียบเมื่อเทียบกับเวลาและแบนวิดท์สัญญาณ
- ไม่มีการแทรกสอดของสัญญาณ

สัญญาณถูกคูณด้วยการจางหายแบบโรซท์ ρ และบวกด้วยสัญญาณรบกวนขาวเกาส์เซียนแบบบวก (AWGN) ซึ่งมีความหนาแน่นสเปกตรัม $N_0/2$ ด้านเครื่องรับมีการตัดสินใจ (Decision) ใช้หลักการพิจารณารูปแบบสัญญาณลักษณะด้านนอกของวงจรรองแบบเชิงเส้นไม่ผิดเพี้ยน ดังนั้นความน่าจะเป็นการเกิดความผิดพลาดสัญญาณทำให้สัญญาณรบกวนเกาส์เซียนคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับ SNR ขณะหนึ่งของแต่ละสัญญาณลักษณะ ด้วยเหตุนี้ SNR ช่วงขณะต่อสัญญาณจะกลายเป็นตัวแปรสุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งการเปลี่ยนตัวแปรทำให้เขียนฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของ SNR ช่วงขณะ ρ ได้ดังนี้

$$p(\rho) = \left(\frac{1+K}{m_p} \right) \exp\left(-\frac{(1+K)\rho + Km_p}{m_p} \right) I_0\left(2\sqrt{\frac{K(1+K)\rho}{m_p}} \right) \quad (4.5)$$

เมื่อ $m_p = E\{\rho\}$ คือค่าความคาดหวังของ ρ ซึ่งแสดงได้จาก ρ คือการแจกแจงเป็นแบบโดกำลังสอง (χ^2) ประกอบด้วยสองระดับความชันเสรี (Degree of Freedom) และพารามิเตอร์ไม่กึ่งกลาง $m_p K / 1 + K$

เมื่อพิจารณา SNR ช่วงขณะหนึ่งโดยที่ ρ เป็นฟังก์ชันตัวประกอบไรต์ K และ m_p ของระบบสามารถหาได้จากการเฉลี่ยเงื่อนไขความผิดพลาดของความน่าจะเป็นตลอดฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ρ ดังนี้

$$P_s(\varepsilon) = \int_0^{\infty} P_s(\varepsilon | \rho) p(\rho) d\rho \quad (4.6)$$

เมื่อ $P_s(\varepsilon | \rho)$ คือเงื่อนไขความน่าจะเป็นของความผิดพลาดสัญลักษณ์ที่ทราบค่า SNR ช่วงขณะ ρ

การมอดูเลตแบบ MDPSK ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบสื่อสารไร้สายเนื่องจากง่ายและมีความคงทนเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ แต่ให้ประสิทธิภาพแยกว่า MPSK ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดสัญลักษณ์ของ MDPSK แสดงดังนี้

$$P_s(\varepsilon | \rho) = \frac{\sin \frac{\pi}{M}}{2\pi} \int_{-(\pi/2)^{\pi/2}}^{\pi/2} \frac{\exp\left(-\rho \left(1 - \cos \frac{\pi}{M} \cos \theta \right) \right)}{1 - \cos \frac{\pi}{M} \cos \theta} d\theta \quad (4.7)$$

เมื่อ M คือจำนวนสัญลักษณ์ เมื่อแทนค่าสมการที่ 4.7 ในสมการที่ 4.6 และใช้ความสัมพันธ์จาก [18]

$$\int_0^{\infty} e^{-\alpha x} I_0(2\sqrt{\beta x}) dx = \frac{1}{\alpha} \exp\left(\frac{\beta}{\alpha} \right) \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

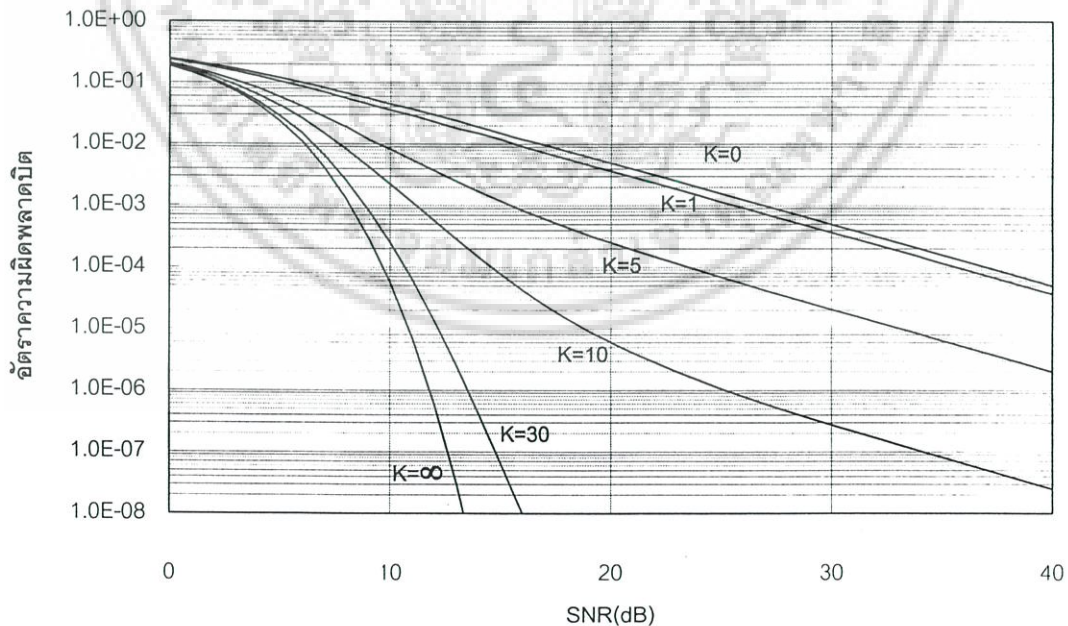
ดังนั้นอัตราผิดพลาดบิตสำหรับช่องสื่อสารจางหายแบบไร้ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$P_s(\varepsilon | \rho) = \frac{\sin \frac{\pi}{M} \left(\frac{1+K}{m_p} \right)^{(\pi/2)}}{2\pi} \int_{-(\pi/2)}^{(\pi/2)} \frac{\exp \left(-\frac{K \left(1 - \cos \frac{\pi}{M} \cos \theta \right)}{\frac{1+K}{m_p} + 1 - \cos \frac{\pi}{M} \cos \theta} \right)}{\left(1 - \cos \frac{\pi}{M} \cos \theta \right) \left(\frac{1+K}{m_p} + 1 - \cos \frac{\pi}{M} \cos \theta \right)} d\theta \quad (4.9)$$

เมื่อ $M=2$ สำหรับ DBPSK $m_p = SNR$ และ K คือตัวประกอบไรซ์ ถ้า $K=0$ แล้วได้ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตของช่องสื่อสารจางหายแบบเรย์ลีซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_s(\varepsilon) = \frac{\sin \frac{\pi}{M} \int_{-(\pi/2)}^{(\pi/2)} d\theta}{2\pi \left(1 - \cos \frac{\pi}{M} \cos \theta \right) \left(1 + m_p \left(1 - \cos \frac{\pi}{M} \cos \theta \right) \right)} \quad (4.10)$$

จากสมการที่ 4.9 ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตเมื่อ $K=0, 1, 5, 10, 30$ และ ∞ dB แสดงได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความผิดพลาดบิตสำหรับช่องสื่อสารจางหายแบบไร้ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 อัตราผิดพลาดแพ็คเกิดและค่าวิสัยสามารถ

การสื่อสารข้อมูลแบบแพ็คเกิดคือ การแบ่งข้อมูลบิตสื่อสารออกเป็นกลุ่มๆ โดยแต่ละกลุ่มบิตเรียกว่าแพ็คเกิด ถ้าหนึ่งแพ็คเกิดมีจำนวนบิต N ตัวให้พิจารณาเป็นข้อมูลหนึ่งเดียว เมื่อเกิดบิตผิดพลาดอย่างน้อยหนึ่งบิตแล้วข้อมูลทั้งแพ็คเกิดให้ถือว่าผิดพลาดทั้งหมด คุณภาพการให้บริการของระบบโทรคมนาคมสามารถแสดงได้โดยอัตราความผิดพลาดบิตหรืออัตราความผิดพลาดแพ็คเกิด ความน่าจะเป็นที่มีอย่างน้อยหนึ่งบิตผิดพลาด เขียนได้ดังนี้

$$P(\text{อย่างน้อยหนึ่งบิตผิดพลาด}) = 1 - P(\text{ทุกบิตถูกต้อง}) \quad (4.11)$$

เมื่อสมมติให้ความน่าจะเป็นความผิดพลาดแต่ละบิตเป็นอิสระต่อกันแล้ว

$$\begin{aligned} P(\text{อย่างน้อยหนึ่งบิตผิดพลาด}) &= 1 - P(\text{บิตลำดับที่หนึ่งผิดพลาด}) \\ &\quad \cdot P(\text{บิตลำดับที่สองผิดพลาด}), \dots \\ &\quad \cdot P(\text{บิตลำดับที่ } N \text{ ผิดพลาด}) \\ P(\text{อย่างน้อยหนึ่งบิตผิดพลาด}) &= 1 - P(\text{บิตไม่ผิดพลาด})^N \end{aligned} \quad (4.12)$$

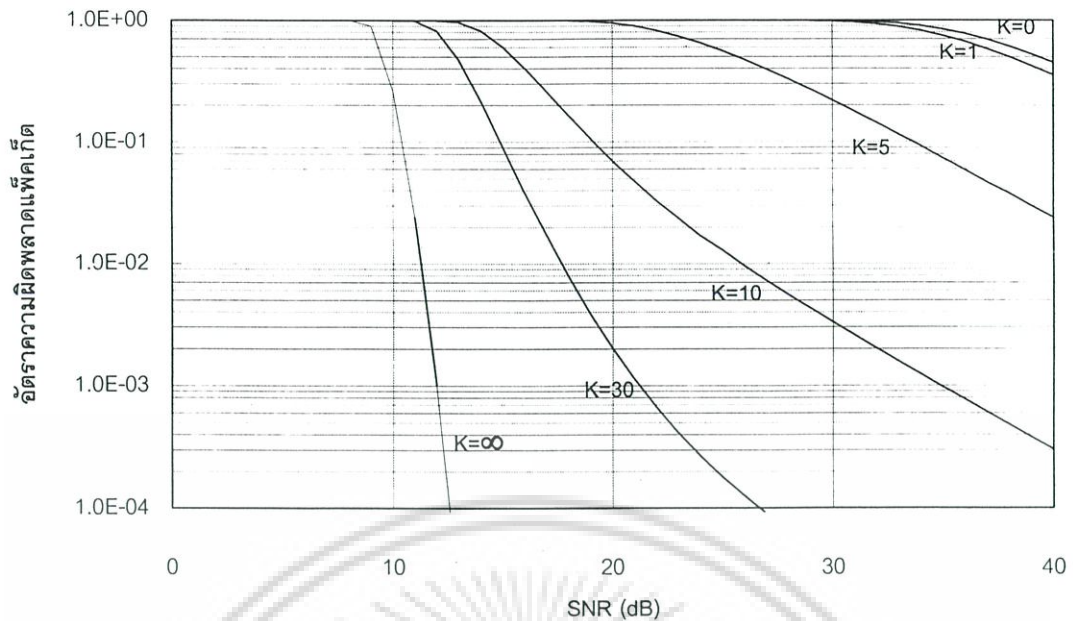
ความน่าจะเป็นที่บิตไม่ผิดพลาดเขียนได้ดังนี้

$$P(\text{บิตไม่ผิดพลาด}) = 1 - BER \quad (4.13)$$

แทนสมการที่ 4.13 ใน 4.12 ดังนี้

$$P(\text{อย่างน้อยหนึ่งบิตผิดพลาด}) = 1 - (1 - BER)^N \quad (4.14)$$

เมื่อ N คือจำนวนบิตของแพ็คเกิด ถ้า $N = 1500$ ไบต์แล้ว อัตราความผิดพลาดแพ็คเกิดสำหรับ DBPSK สำหรับช่องสื่อสารจางหายแบบไร้สายแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ความผิดพลาดแพ็คเกจสำหรับช่องสื่อสารจางแบบไรซ์

ค่าวิสัยสามารถคือ อัตราเฉลี่ยข้อมูลต่อเวลาที่สามารถส่งหรือรับได้จริง ปกติแล้วมีหน่วยเป็น kbps หรือ Mbps ค่าวิสัยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [22]

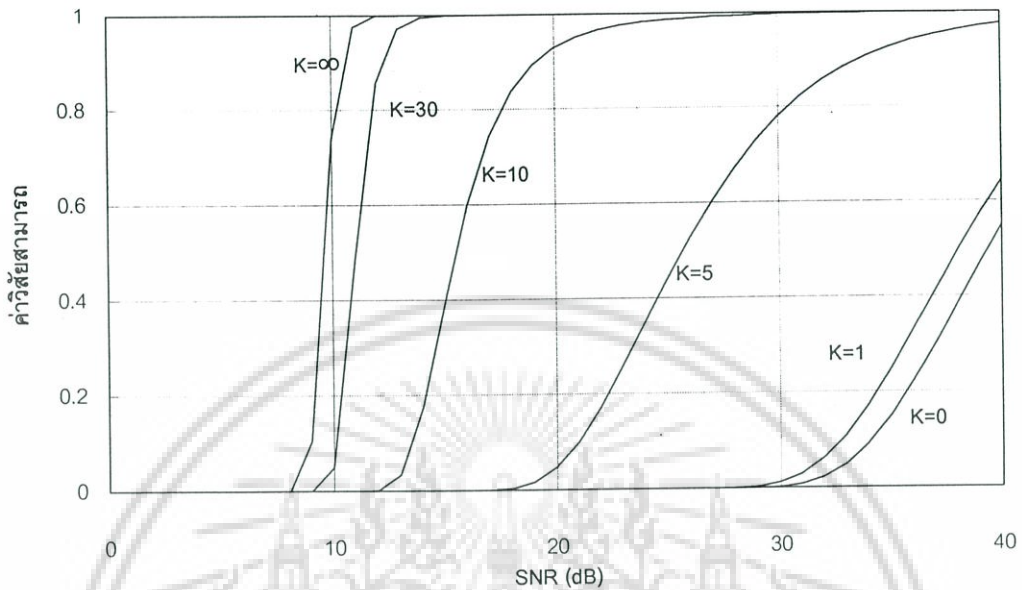
$$\text{Throughput} = R(1 - \text{PER}) \quad (4.15)$$

เมื่อ R คืออัตราบิตซึ่งเป็นอัตราเร็วส่งข้อมูลทั้งหมดซึ่งรวมข้อมูลอื่นนอกเหนือจากข้อมูลจริง ตัวอย่างเช่น ข้อมูลส่วนหัวที่บรรจุข้อมูลที่อยู่ ฯลฯ ดังนั้นข้อมูลที่ส่งหรือรับได้จริงไม่ตรงกับค่าอัตราบิต จากหัวข้อที่ 4.2.5 สามารถแทนอัตราบิตด้วยค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุดเพื่อใช้ทำนายค่าวิสัยสามารถที่ระบบรับหรือส่งได้จริงดังนี้

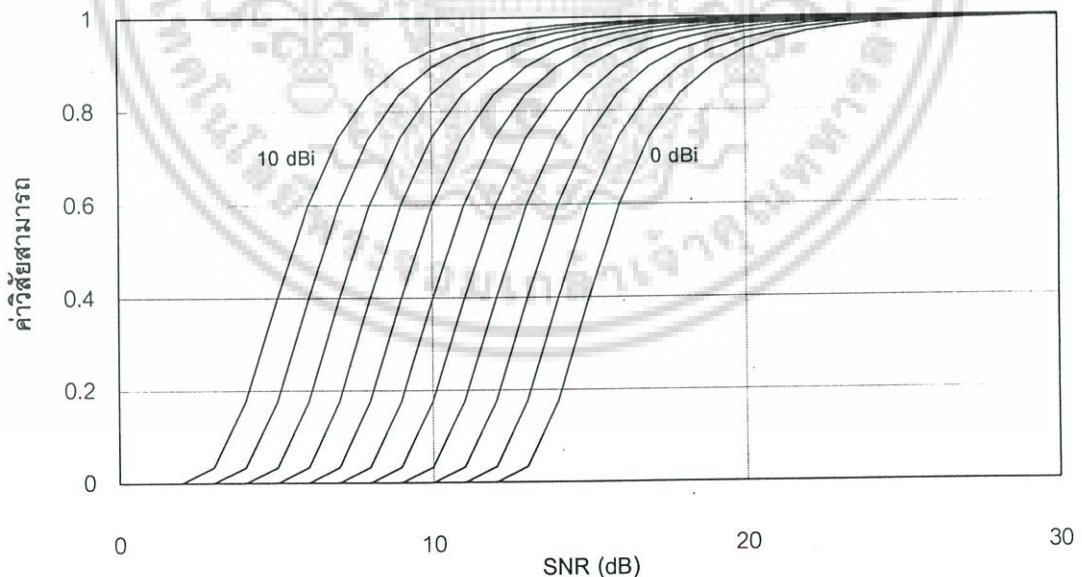
$$\text{Throughput}_{\text{real}} = \text{TMT}(1 - \text{PER}) \quad (4.16)$$

โดยที่ TMT คือค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุด ถ้าให้ค่า TMT เท่ากับ 1 ค่าวิสัยสามารถสำหรับช่องสื่อสารแบบไรซ์ สามารถแสดงดังรูปที่ 4.13 โดยที่ค่า K มีค่ามากจะทำให้ค่าวิสัยสามารถมีค่าสูงสุดที่ระดับ SNR ต่ำกว่าและอัตราการเปลี่ยนหรือความชันจากค่าวิสัยสามารถต่ำไปค่าสูงสุดเร็วกว่า K ค่าน้อยๆ ดังนั้นการออกแบบให้ระบบมีค่าวิสัยสามารถสูงที่สุดนั้นควรเลือกติดตั้งให้

กำลังงานการแพร่กระจายคลื่นอยู่ในระดับแนวเส้นสายตามีมากที่สุดหรือ K ค่ามากๆ การเลือกอัตราขยายสายอากาศมีผลต่อค่าวิสัยสามารถดังรูปที่ 4.15 เมื่อค่า $K = 10$ dB



รูปที่ 4.13 ค่าวิสัยสามารถสำหรับช่องสื่อสารจางหายแบบไวท์



รูปที่ 4.14 ค่าวิสัยสามารถสำหรับช่องสื่อสารจางหายแบบไวท์ เมื่อ $K = 10$ dB สำหรับอัตราขยายของสายอากาศ 0 – 10 dBi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 สรุป

เนื้อหาบทนี้กล่าวถึง การประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยการพิจารณาจากระยะบริการสูงสุดและค่าวิสัยสามารถ ซึ่งเริ่มจากการศึกษาพื้นฐานระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11 โทโพโลยี การควบคุมการเข้าถึงสื่อ รูปแบบเฟรมชั้นสื่อสารกายภาพ ค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุด และการทำนายระยะบริการสูงสุดหาได้จากอัตราสูญเสียการแพร่กระจายสูงสุดที่ยอมรับได้ จากนั้นแปลงกลับเป็นระยะทาง ความแม่นยำขึ้นอยู่กับวิธีการเลือกแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น ผลคำนวณพบว่าแบบจำลองความจำคู่ให้ความแม่นยำในการทำนายมากที่สุด สายอากาศไดโพลและวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนให้ระยะบริการสูงสุดที่ 298 และ 397 เมตร ตามลำดับ โดยระยะบริการสูงสุดที่คำนวณด้วยแบบจำลองความจำคู่ที่อัตราการขยายสายอากาศค่า 0 – 10 dBi แสดงดังรูปที่ 4.10 อัตราผิดพลาดบิตแสดงถึงคุณภาพของโครงข่ายซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการมอดูเลตและช่องสื่อสารวิทยานิพนธ์นี้สมมติได้สมมติให้ช่องสื่อสารเป็นแบบโรซีเซียส ผลคำนวณพบว่าเมื่อค่า K มากขึ้นทำให้ความผิดพลาดบิตลดลงเมื่อให้ SNR คงที่ ผลกระทบจากอัตราความผิดพลาดบิตมากขึ้นทำให้ค่าวิสัยสามารถลดลง ถ้าอัตราการขยายสายอากาศมากจะทำให้ได้ค่าวิสัยสามารถสูงสุดที่ SNR ระดับต่ำกว่าอัตราการขยายต่ำดังรูปที่ 4.15 ผลการคำนวณระยะบริการสูงสุดและค่าวิสัยสามารถที่อัตราการขยายของสายอากาศค่าต่างๆซึ่งสามารถนำไปใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพสายอากาศและออกแบบสายอากาศเพื่อให้โครงข่ายท้องถิ่นไร้สายมีคุณภาพการบริการตามที่กำหนดได้

บทที่ 5

การประเมินประสิทธิภาพและผลการทดสอบ

5.1 บทนำ

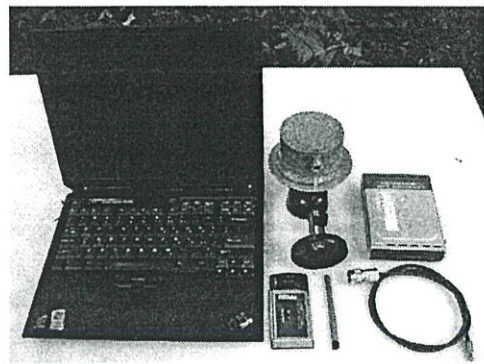
ในบทที่ 4 ได้แสดงถึงผลกระทบเนื่องจากประสิทธิภาพสายอากาศต่อระบบบริการและค่าวิสัยสามารถแต่เพื่อเป็นการยืนยันและความถูกต้องของการคำนวณ จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลดังกล่าว โดยการทดสอบจะต้องอยู่ในเงื่อนไขการสื่อสารแบบจุดต่อจุดภายนอกอาคาร เนื้อหาบทนี้ประกอบด้วย การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ วิธีการทดสอบ ผลการทดสอบ ประกอบด้วยกำลังงานรับที่ลูกข่าย ระยะเวลาบริการสูงสุด ค่าวิสัยสามารถ จากนั้นนำผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ การศึกษาผลการทดสอบและการคำนวณมีประโยชน์ต่อการออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของโครงข่ายไร้สาย

5.2 การทดสอบประสิทธิภาพ

การสื่อสารแบบจุดต่อจุดสำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายซึ่งโดยทั่วไปใช้เชื่อมต่อสองเครือข่ายที่อยู่ระหว่างอาคารเข้าด้วยกันซึ่งเป็นการเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐานกับสถานีฐาน การทดสอบด้วยเงื่อนไขนี้ทำได้ยากเนื่องจากมีระยะเวลาบริการสูงสุดไกลมากและการวัดกำลังงานรับที่สถานีฐานทำได้ยาก ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงสมมติให้ลูกข่ายทำหน้าที่แทนสถานีฐานด้านรับเพื่อให้การทดสอบทำได้ง่ายและลดความผิดพลาดลง ซึ่งการสื่อสารแบบจุดต่อจุดส่วนมากแล้วมีช่องสื่อสารแบบไร้สายคือแนวเส้นระดับสายตาระหว่างเครื่องรับและส่ง ดังนั้นจึงเลือกสถานที่ทดสอบคือริมถนนหน้าอาคารเรียนรวมวิศวกรรมศาสตร์ (6 ชั้น) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นถนนคอนกรีตลักษณะเส้นตรงดังรูปที่ 5.1 (ก) สถานีฐานติดตั้งบริเวณหน้าอาคารซึ่งเป็นช่วงต้นถนน การวัดเริ่มต้นจากต้นถนนจนถึงระยะสูงสุดสามารถวัดได้ อุปกรณ์ทดสอบทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 5.1 (ข) ด้านสถานีฐานประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลซึ่งติดตั้งโปรแกรมทดสอบและเชื่อมต่อกับสถานีฐานด้วยโครงข่ายท้องถิ่น (LAN) สถานีฐานเชื่อมต่อกับสายอากาศทดสอบด้วยสายนำสัญญาณยาว 1 เมตร สายอากาศทดสอบติดตั้งบนขาตั้งมีความสูงจากพื้น 1.5 เมตร ด้านลูกข่ายประกอบด้วยคอมพิวเตอร์พกพาติดตั้งการ์ดโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายวางอยู่บนรถเข็นมีความสูงจากพื้น 1 เมตร ดังรูปที่ 5.2 และ 5.3 ในการทดสอบเป็นจุดไม่ต่อเนื่องโดยแต่ละจุดห่างกัน 10 เมตรตามความยาวถนน การทดสอบแบ่งออกเป็นสองแบบคือ การวัดกำลังงานรับและการวัดค่าวิสัยสามารถมีรายละเอียดดังนี้

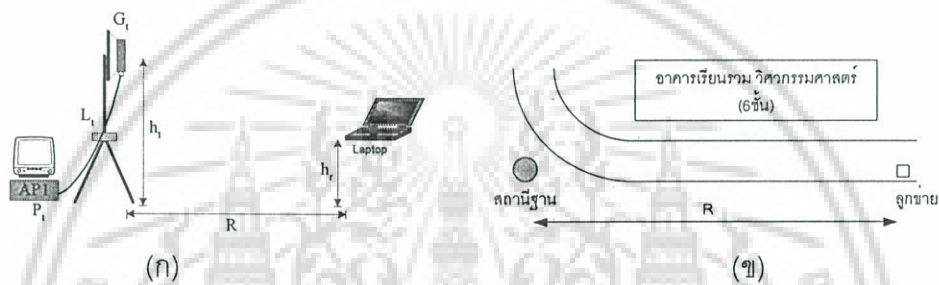


(ก)



(ข)

รูปที่ 5.1 สถานที่ทดสอบและอุปกรณ์ (ก) สถานที่ทดสอบ (ข) อุปกรณ์ทดสอบ



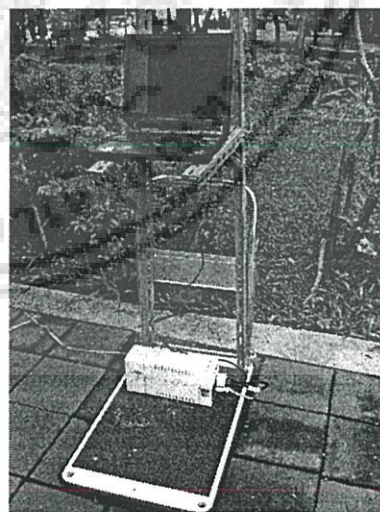
(ก)

(ข)

รูปที่ 5.2 การทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศ (ก) พารามิเตอร์การทดสอบ (ข) แผนผังการทดสอบ



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.3 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ (ก) ด้านสถานีฐาน (ข) ด้านลูกข่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบ

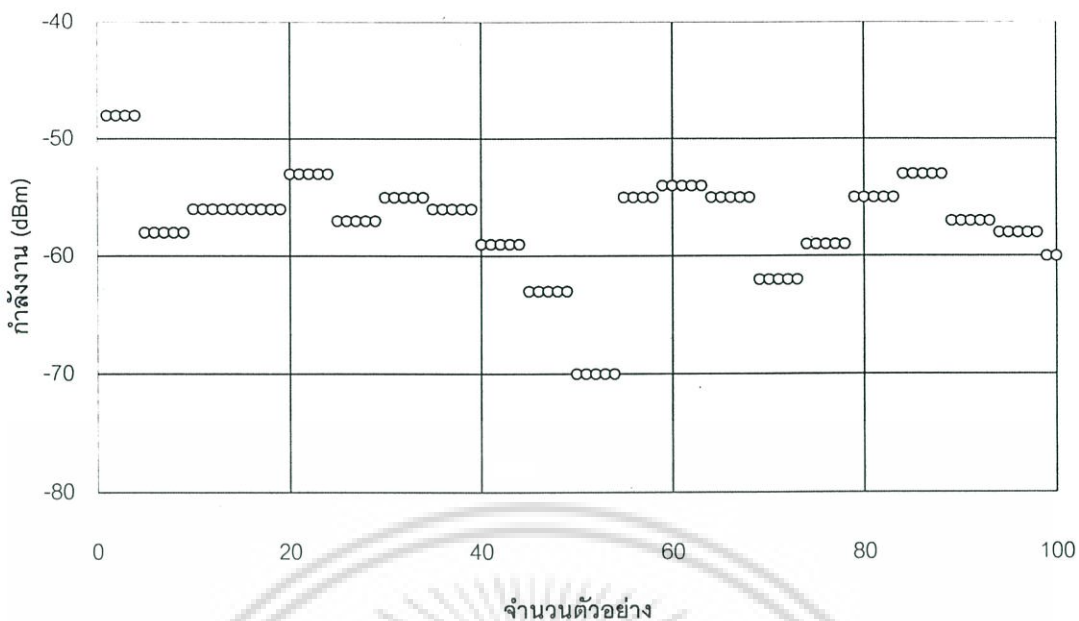
พารามิเตอร์	ด้านสถานีฐาน	ด้านลูกข่าย
กำลังงานส่ง (P_t)	15 dBm	-
การสูญเสียเนื่องจากสายนำสัญญาณ (L_t)	0.6 dB (LRM-195)	0 dB
อัตราการขยายสายอากาศ (G_t)	ไดโพล = 2 dBi วงแหวน = 6.5 dBi	0 dBi
ความสูงสายอากาศ	$h_t = 1.5$ m	$h_r = 1$ m
เครื่องรับส่ง	D-Link DWL-2000AP+	Cisco Aironet 350 Series Client Adapter
ระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับลูกข่าย (R)	10–500 m	

5.2.1 การวัดกำลังงานรับ

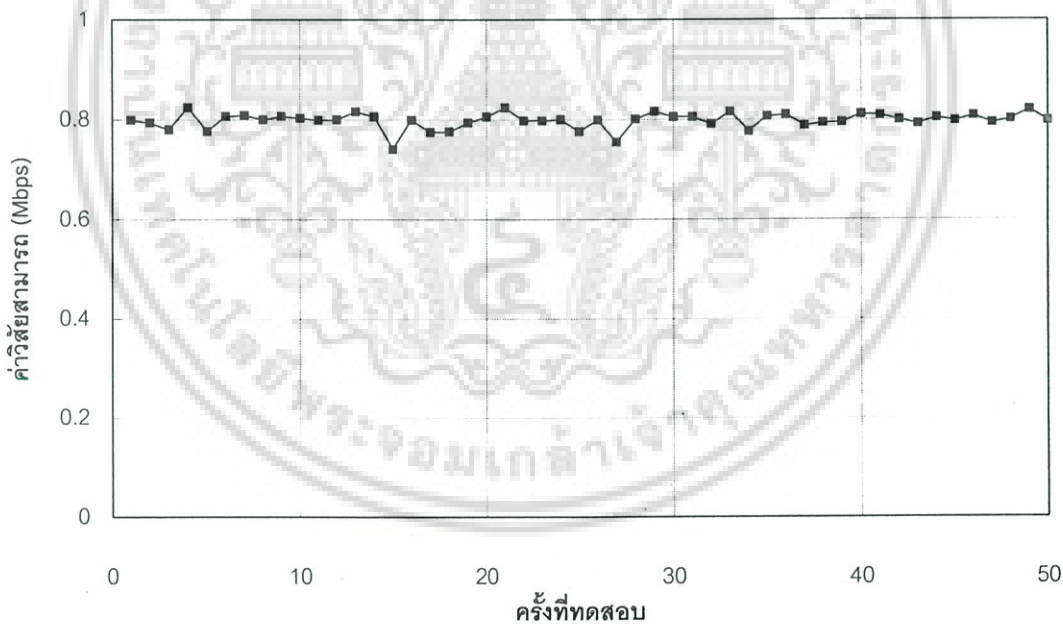
กำลังงานรับทดสอบจากค่า RSSI (Received Signal Strength Intensity) จากการ์ดด้านลูกข่าย ซึ่งมาตรฐาน IEEE 802.11 กำหนดให้กำลังงานรับจากการ์ดแทนด้วยตัวเลข 0 – 255 ซึ่งผู้ผลิตแต่ละรายกำหนดค่าไม่เหมือนกัน โปรแกรมทดสอบกำลังงานรับมีชื่อว่า NetStumbler ค่าที่ได้จากโปรแกรมแสดงค่ากำลังงานรับในหน่วย dBm ซึ่งได้จากเปลี่ยนค่า RSSI เป็นกำลังงานรับค่าที่ทดสอบได้แสดงดังรูปที่ 5.4 แต่ละจุดทดสอบ โปรแกรมทำการบันทึกค่ากำลังงานรับไม่ต่ำกว่า 100 ครั้งซึ่งบันทึกระยะเวลาห่างกัน 1 วินาที จากรูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าค่ากำลังงานรับที่วัดได้มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นๆลงๆเนื่องการรบกวนกันของคลื่นที่มาจากหลายทิศทางซึ่งมีแอมพลิจูดและเฟสต่างกัน

5.2.2 การทดสอบค่าวิสัยสามารถ

การทดสอบค่าวิสัยสามารถทำได้โดยใช้โปรแกรม Chariot ซึ่งขั้นตอนการทำทดสอบเริ่มจากลูกข่ายส่งไฟล์คำสั่ง (Script) ไปยังคอมพิวเตอร์ด้านสถานีฐานเพื่อเตรียมความพร้อมของโปรแกรมทั้งด้านรับและส่ง จากนั้นคอมพิวเตอร์ด้านส่งทำการส่งไฟล์ขนาด 100,000 ไบต์ผ่านสถานีฐานไปยังลูกข่ายแล้วทำการคำนวณค่าวิสัยสามารถ ในการทดสอบแต่ละครั้งทำการวัดไม่ต่ำกว่า 50 ครั้ง ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.4 กำลังรับที่วัดระยะ 20 m เมื่อสายอากาศสถานีฐานคือสายอากาศวงแหวน



รูปที่ 5.5 ค่าวิสัยสมารถที่ระยะ 20 m เมื่อสายอากาศสถานีฐานคือสายอากาศวงแหวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

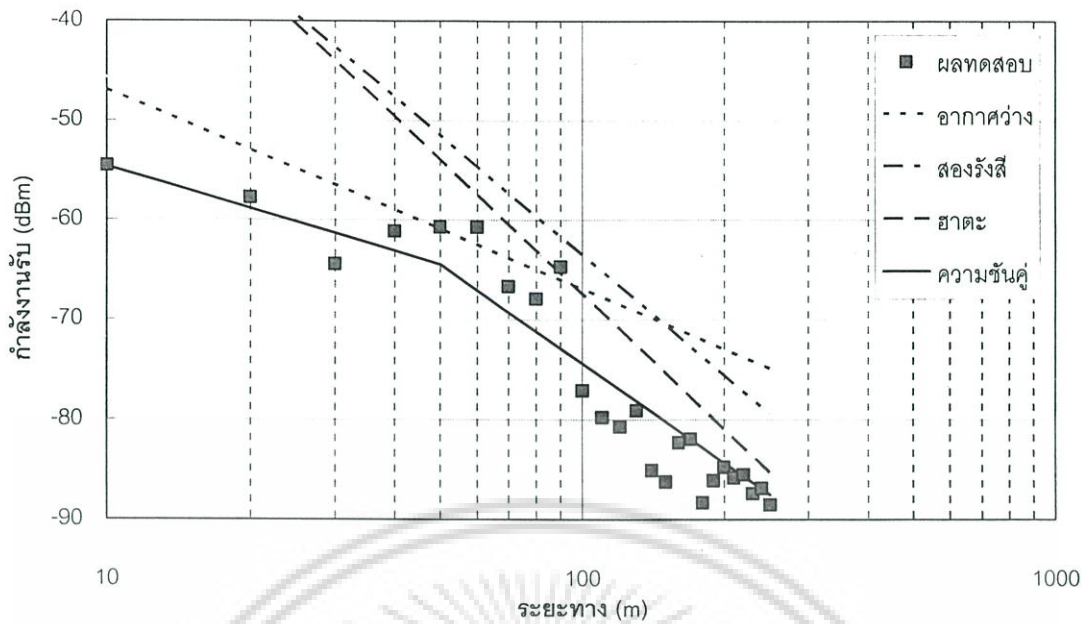
5.3 ระยะเวลาบริการ

ผลการทดสอบระยะเวลาบริการสูงสุดแสดงได้ดังตารางที่ 5.2 โดยค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองมีค่าดังนี้ แบบจำลองฮาตะใช้เงื่อนไขพื้นที่เมืองและเปิดโล่ง แบบจำลองความชันคู่ กำหนด $L_1 = -54.1$ $n_1 = 1.4$ และ $n_2 = 3.3$ สำหรับสายอากาศไดโพล $L_1 = -48.1$ $n_1 = 1.8$ และ $n_2 = 3.5$ ผลประเมินประสิทธิภาพสายอากาศจากระยะเวลาบริการสูงสุด พบว่าสายอากาศไดโพลและสายอากาศวงแหวนมีระยะเวลาบริการสูงสุดเท่ากับ 250 และ 350 เมตร ตามลำดับ หรือสายอากาศวงแหวนมีระยะเวลาบริการสูงสุดไกลกว่าสายอากาศไดโพล 40 %

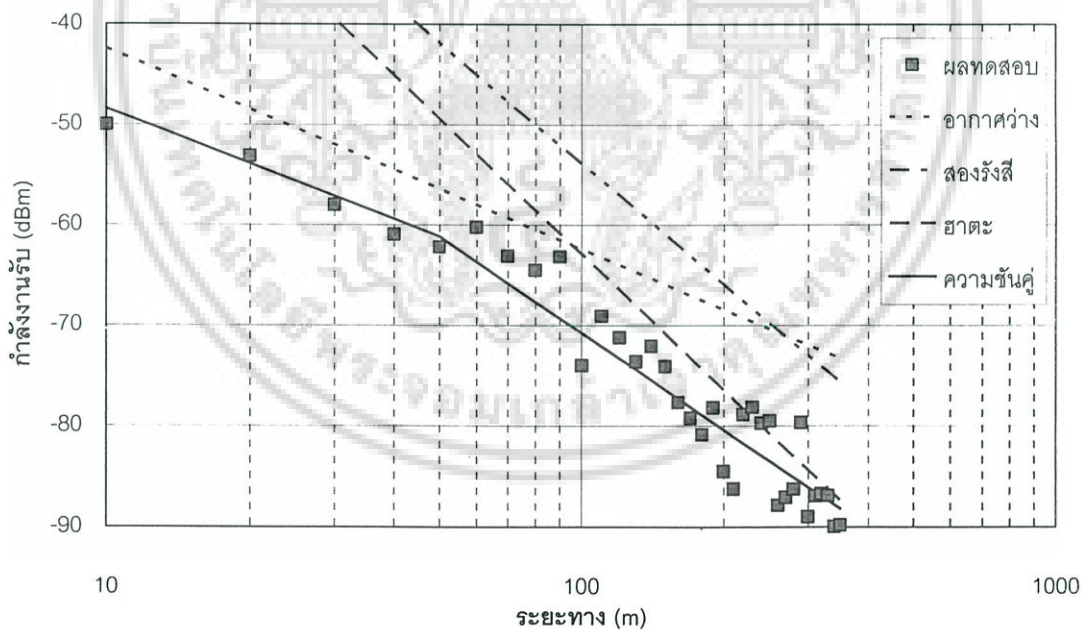
การประมาณกำลังงานรับที่ถูกลบออกจากแบบจำลองอากาศว่าง แบบจำลองสองรังสี แบบจำลองฮาตะ และแบบจำลองความชันคู่ พบว่าแบบจำลองความชันคู่ให้ความแม่นยำที่สุด รองลงมาได้แก่ แบบจำลองฮาตะ แบบจำลองสองรังสีและแบบจำลองอากาศว่าง ดังรูปที่ 5.6 และ 5.7 สำหรับสายอากาศไดโพลและวงแหวนตามลำดับ

ตารางที่ 5.2 ระยะเวลาบริการสูงสุด

แบบจำลอง	ระยะเวลาบริการสูงสุด (m)		ความคลาดเคลื่อน (%)	
	ไดโพล	วงแหวน	ไดโพล	วงแหวน
ผลการทดสอบ	250	350	0%	0%
ความชันคู่	298	397	19.2	13.4
ฮาตะ	437	550	74.8	51.1
สองรังสี	490	631	96	83
อากาศว่าง	2354	3877	841.6	1007.7



รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบผลทดสอบกำลังงานรับกับผลคำนวณจากแบบจำลองชนิดต่างๆ เมื่อสายอากาศสถานีฐานคือสายอากาศไดโพล



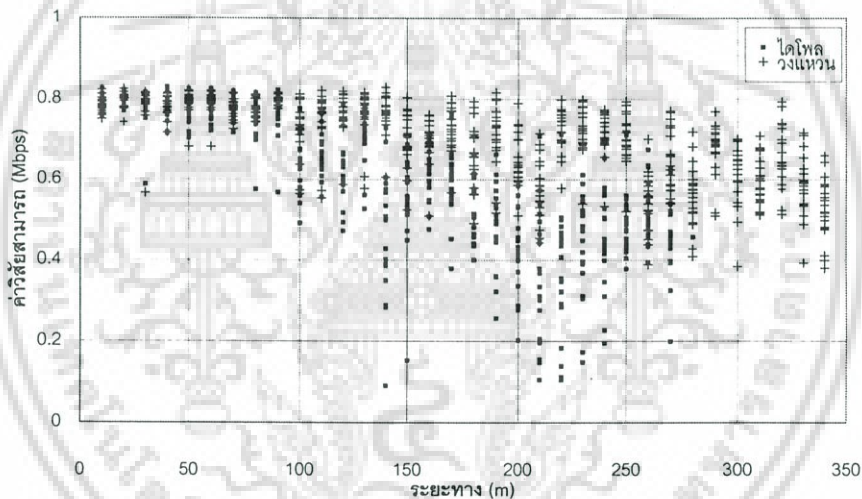
รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบผลทดสอบกำลังงานรับกับผลคำนวณจากแบบจำลองชนิดต่างๆ เมื่อสายอากาศสถานีฐานคือสายอากาศวงแหวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ค่าวิสัยสามารถ

ผลการทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศโดโพลและวงแหวนแสดงดังรูปที่ 5.8 โดยค่าวิสัยสามารถสูงสุดที่สายอากาศทั้งสองทำได้คือ 0.822 Mbps ซึ่งต่างจากค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุดที่มีค่าเท่ากับ 0.91 Mbps ที่ความยาวบิตเท่ากับ 1500 ไบต์ เนื่องจากข้อจำกัดจากซอฟต์แวร์และตัวโปรโตคอลเอง จากผลการทดสอบสายอากาศวงแหวนให้ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยสูงกว่าสายอากาศโดโพลตลอดระยะทางทดสอบ ดังรูปที่ 5.9 เนื่องจากอัตราสูงกว่าและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแคบกว่า

ผลจากการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศเมื่อพิจารณาจากค่าวิสัยสามารถพบว่าสายอากาศโดโพลและสายอากาศวงแหวนให้ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยตลอดระยะทางทดสอบเท่ากับ 0.698 และ 0.705 Mbps ตามลำดับ หรือสายอากาศวงแหวนให้ค่าวิสัยสามารถสูงกว่าสายอากาศโดโพล 16.33%

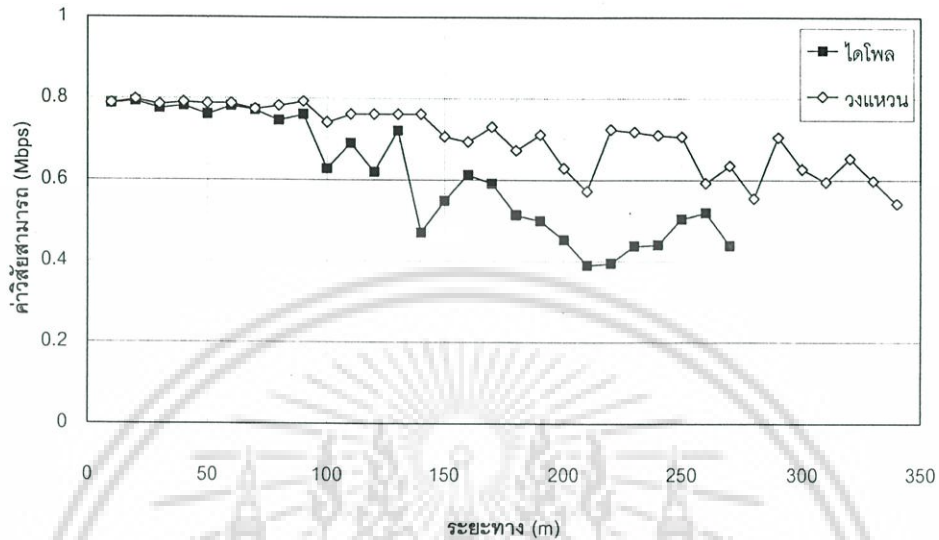


รูปที่ 5.8 ผลทดสอบค่าวิสัยสามารถกรณีสายอากาศสถานีฐานคือ สายอากาศโดโพลและวงแหวน

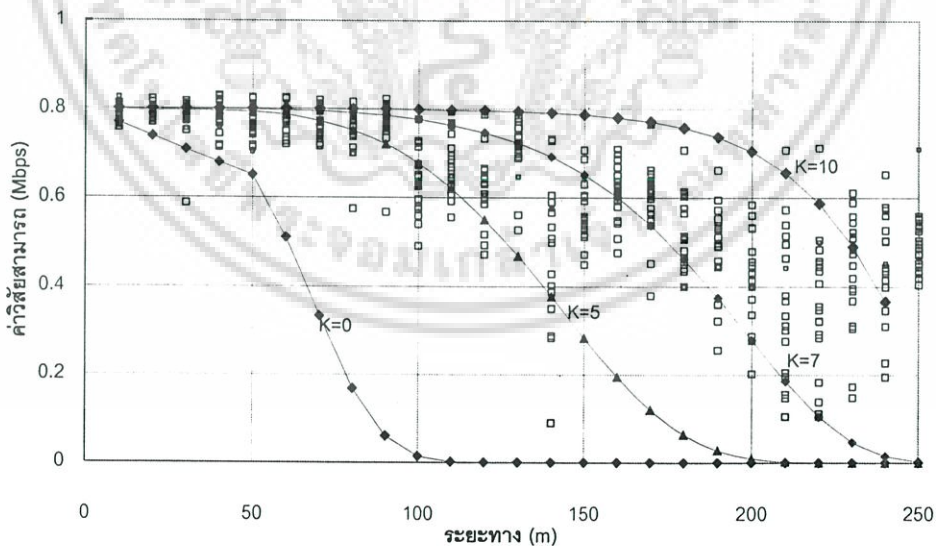
การคำนวณค่าวิสัยสามารถ เริ่มจากการคำนวณค่า SNR ที่ระยะทดสอบต่างๆจากนั้นหาอัตราผิดพลาดบิตเพื่อคำนวณค่าวิสัยสามารถจากที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบกับผลคำนวณ สำหรับกรณีสายอากาศโดโพลพบว่าการเมื่อให้ค่า $K = 7$ dB ได้ผลใกล้เคียงกับการทดสอบมากที่สุด ส่วนผลจากการคำนวณกรณีสายอากาศวงแหวนให้ผลใกล้เคียงกับการทดสอบกับเมื่อ $K = 9$ dB ซึ่งค่าวิสัยสามารถทั้งสองกรณีแสดงดังรูปที่ 5.10 และ 5.11 ตามลำดับ สำหรับค่า SNR ที่ได้จากการคำนวณเป็นเชิงเส้นซึ่งแตกต่างจากค่าที่ทดสอบจริงซึ่งมีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงขึ้นลงตลอดเวลา ด้วยเหตุนี้ทำให้ทำให้ผลการทดสอบและการคำนวณมีค่าแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยจากผลทดสอบและผลคำนวณพบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มลักษณะเดียวกัน

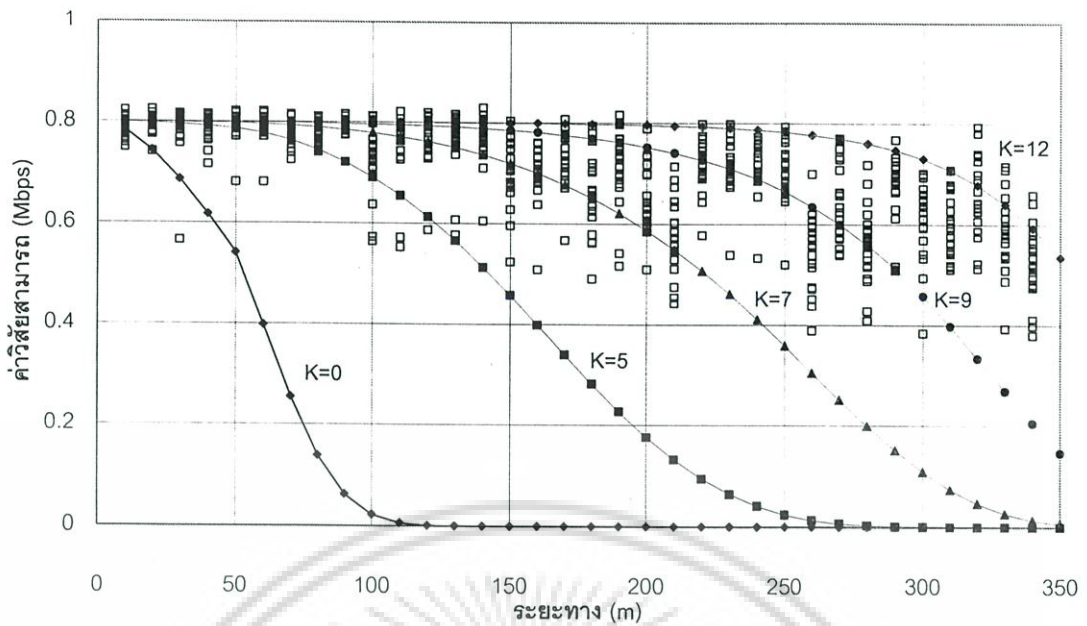


รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบค่าวิสัยสามารถกรณีที่สายอากาศสถานีฐานคือ สายอากาศโดโพล และวงแหวน



รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบผลการทดสอบและผลการคำนวณค่าวิสัยสามารถที่ระยะห่างต่างๆ กรณีที่สายอากาศสถานีฐานคือสายอากาศโดโพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 การเปรียบเทียบผลการทดสอบและผลการคำนวณค่าวิสัยสามารถที่ระยะห่างต่างๆ กรณีที่สายอากาศสถานีฐานคือสายอากาศวงแหวน

5.5 สรุป

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง การทดสอบสายอากาศประสิทธิภาพของสายอากาศวงแหวนและสายอากาศไดโพล ความแม่นยำการหาค่าบริการสูงสุดขึ้นอยู่กับทางเลือกแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าแบบจำลองความชันคู่ให้ผลแม่นยำที่สุดมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 19.2% และ 13.4% สำหรับสายอากาศไดโพลและวงแหวน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้จำเป็นต้องใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบซึ่งต่างจากแบบจำลองอื่นๆ ค่า σ สำหรับสายอากาศไดโพลและสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนมีค่าเท่ากับ 3.4 และ 3 dB ตามลำดับ ผลการประเมินประสิทธิภาพสายอากาศจากระยะบริการสูงสุดและค่าวิสัยสามารถคือ สายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนให้ระยะบริการสูงสุดของโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายเท่ากับ 350 m และค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยเท่ากับ 0.705 Mbps ซึ่งให้ผลที่ดีกว่าสายอากาศไดโพลทุกระยะของการทดสอบ การประเมินประสิทธิภาพสายอากาศในบทนี้แสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีของสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนซึ่งความเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบจุดต่อจุด

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงการสรุปเนื้อหาโดยรวม ข้อเสนอแนะ และแนวทางการประเมินประสิทธิภาพสายอากาศ ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษา วิเคราะห์ และทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศวงกลมเหนือระนาบสะท้อนในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยการวิจัยเริ่มจาก การศึกษาคุณลักษณะสายอากาศ แบบจำลองการสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายคลื่น คุณสมบัติของช่องสื่อสาร โครงข่ายท้องถิ่นไร้สายเบื้องต้น การหาค่าระยะบริการสูงสุด การคำนวณค่าวิสัยสามารถ การทดสอบเพื่อหาค่าระยะบริการสูงสุดและค่าวิสัยสามารถของสายอากาศวงกลมเหนือระนาบสะท้อนและทำการเปรียบเทียบกับสายอากาศไดโพล พบว่าผลการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศวงกลมเหนือระนาบสะท้อนในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายนั้นให้ระยะบริการสูงสุดและค่าวิสัยสามารถดีกว่าสายอากาศไดโพลเท่ากับ 40% และ 16.33 % ตามลำดับ

6.2 สรุปเนื้อหาโดยรวม

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตการวิจัย ขั้นตอนการศึกษาและเนื้อหาวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ศึกษาโครงสร้างสายอากาศวงกลมเหนือระนาบสะท้อน การวิเคราะห์และการออกแบบสายอากาศ ผลการคำนวณและทดสอบคุณลักษณะสายอากาศได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง อัตราส่วนคลื่นนิ่งและอิมพีแดนซ์ โดยการออกแบบได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศวงกลมเหนือระนาบสะท้อน

พารามิเตอร์	ขนาดหรือความยาวของสายอากาศ
รัศมีวงแหวน	0.294λ
ความยาววงแหวน	0.335λ
ความยาวโพรบ์อนสัญญาณ	0.294λ
ระยะห่างระหว่างวงกลมกับแผ่นสะท้อน	0.286λ
รัศมีของแผ่นสะท้อน	0.478λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 ศึกษาและวิเคราะห์แบบจำลองการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นได้แก่ แบบจำลอง อากาศว่าง แบบจำลองสองรังสี แบบจำลองฮาตตะ และแบบจำลองความชันคู่ การเกิดการจางหาย ของช่องสื่อสาร การอธิบายการเกิดการจางหายด้วยวิธีทางสถิติได้แก่ การแจกแจงเรย์ลี การแจกแจงไรซ์ การแจกแจงปกติล็อกและการแจกแจงปกติ การหาค่าความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่น ด้วยแบบจำลองความชันคู่ให้ผลที่แม่นยำที่สุด รองลงมาได้แก่ แบบจำลองฮาตตะ แบบจำลองสอง รังสี และแบบจำลองอากาศว่าง ส่วนการสื่อสารแบบจุดต่อจุดนั้นจะพิจารณาให้ช่องสื่อสารจางหาย เป็นแบบไรซ์

บทที่ 4 แสดงการประเมินประสิทธิภาพสายอากาศในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย เริ่มจากพื้นฐาน โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โทโพลยี การควบคุมการเข้าถึงสื่อ รูปแบบเฟรม ชั้นสื่อสารกายภาพ ค่า วิสัยสามารถอุดมคติสูงสุด การหาระยะบริการสูงสุด การคำนวณความผิดพลาดบิต การคำนวณ ความผิดพลาดแพ็คเก็ต การคำนวณค่าวิสัยสามารถ และ สรุปผลกระทบอัตราขยายสายอากาศ ต่อค่าวิสัยสามารถของโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

บทที่ 5 แสดงการทดสอบค่าระยะบริการสูงสุดและค่าวิสัยสามารถของระบบโครงข่าย ท้องถิ่นไร้สายที่ใช้สายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนและสายอากาศไดโพลเป็น สายอากาศของสถานีฐาน วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลคำนวณกับผลทดสอบ จากผลการทดสอบ พบว่าสายอากาศวงแหวนให้ระยะบริการสูงสุดเท่ากับ 350 m และค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยเท่ากับ 0.705 Mbps

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยทั้งหมด และข้อเสนอแนะแนวทางในการพัฒนา การประเมิน ประสิทธิภาพสายอากาศในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย จากผลการทดสอบและผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าสายอากาศวงแหวนวงกลมมีประสิทธิภาพดีกว่าสายอากาศไดโพลโดยให้ระยะบริการ สูงสุดและค่าวิสัยสามารถที่ดีกว่า การวิเคราะห์และการทดสอบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการ ออกแบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายได้

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

ผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในบทที่ผ่านมา พบว่าการคำนวณค่าบริการสูงสุดมีความแม่นยำ เพราะเลือกใช้แบบจำลองความชันคู่ซึ่งเป็นแบบจำลองเชิงประสบการณ์ แต่ทว่ามีข้อเสียคือ จำเป็นต้องใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ อย่างไรก็ตามการคำนวณค่าวิสัยสามารถนั้นไม่ค่อย แม่นยำนักเนื่องจากมีหลายปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้เช่น การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของ ช่องสัญญาณตลอดเวลา ความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์ทดสอบ เป็นต้น แนวทางการพัฒนา ต่อไปอาจจะเปลี่ยนการแจกแจงแบบจางไรซ์เป็นแบบอื่นๆ เช่น การแจกแจงแบบนาคากามิอาจ ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณขึ้น การคำนวณค่าวิสัยสามารถในวิทยานิพนธ์นี้พิจารณา

คุณลักษณะสายอากาศเฉพาะอัตราการขยายของสายอากาศเท่านั้นด้วยเหตุนี้การพัฒนาต่อไป อาจจะพิจารณารวมคุณลักษณะอื่นๆของสายอากาศเช่น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Phongcharoenpanich, I. Rattanachote, P. Wouchoum, S. Kosulvit and M. Krairiksh, "Design of a probe excited circular ring above the reflector for bridging outdoor wireless LAN applications," *2003 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Vol. 2, June 2003, pp. 950 – 953.
- [2] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, Prentice Hall, 1999.
- [3] T. Okumura, E. Ohmori, and K. Fukuda, "Field strength and its variability in VHF and UHF land mobile service," *Review Electrical Communication Laboratory*, Vol. 16, No. 9-10, September-October 1968, pp. 825-873.
- [4] M. Hata, "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Service," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. VT-29, No.3, August 1980, pp. 317-325.
- [5] M. J. Feuerstein, K. L. Blackard, T. S. Rappaport, S. Y. Seidel and H. H. Xia, "Path loss, delay spread, and outage models as functions of antenna height for microcellular system design," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 43, No. 3, August 1994, pp. 487-498.
- [6] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communication*, New York: John Wiley and Sons, 1978.
- [7] J. D. Parsons, *The Mobile Radio Channel*, New York: John Wiley and Sons, 1992.
- [8] R. H. Clarke, "A Statistical Theory of Mobile-radio Reception," *Bell Systems Technical Journal*, Vol. 47, 1968, pp. 957-1000.
- [9] G. L. Turin, "Communication through noisy, random multipath channels," *IRE Convention Record*, part 4, 1956, pp. 154-166.
- [10] S. O. Rice, "Mathematical analysis of random noise," *Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 23, pp. 282-292, 1944 and Vol. 24, 1954, pp. 46-156.
- [11] E. Green, "Path loss and signal variability analysis for microcells," *5th IEEE International Conference on Mobile Radio and Personal Communication*, Warwick, U.K., 11-14 December 1989, pp. 38-42.

- [12] R. J. C. Bultitude, and G. K. Bedal, "Propagation Characteristics on Microcellular Urban Mobile Radio Channels at 910 MHz," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, Vol. JSAC-7, No. 1, 1989, pp. 31-39.
- [13] M. Nakagami, "The m-Distribution—A General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading," *Statistical Method in Wave Propagation*, W. C. Hoffman, ed., Oxford:Pergamon, 1960, pp.3-36.
- [14] B. D. I. Laurenso, A. U. H. Sheikh, and S. Mclushlin, "Characterization of indoor mobile channel using a ray tracing technique, in *Proc. 1992 IEEE Int. Conf. Selected Topics in Wireless Commun.*, Vacouver, B. C., 25-26 June 1992, pp.65-68.
- [15] J. J. Egli, "Radio Propagation Above 40 MC/s over Irregular Terrain," *Proc. IRE*, Oct 1957, pp. 38-42.
- [16] IEEE 802.11, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Standard, IEEE, Aug. 1999.
- [17] J. Jangeun, P. Peddabachagari and M. Sichitiu, "Theoretical Maximum Throughput of IEEE 802.11 and its Applications," *Network Computing and Applications*, 2003. NCA 2003. Second IEEE International Symposium on, 16-18 April 2003.
- [18] S. Jonqyin and I. S. Reed, "Performance of MDPSK, MPSK, and noncoherent MFSK in Wireless Rician Fading Channels," *Communications, IEEE Transactions on*, Vol. 47, Issue. 6, June 1999.
- [19] S. R. Saunders, *Antenna and Propagation for Wireless Communication Systems*, New York:John Wiley and Sons, 1999.
- [20] Product Data Sheet for CISCO (Aironet) Series 340 Adapters, Cisco Systems of San Jose, CA, 2001, http://www.cisco.com/warp/public/cc/pd/witc/ao340ap/prod lit/airoi_ds.pdf.
- [21] Product Data Sheet D-Link DWL-2000AP+, D-Link Co.,Ltd., 2004.
- [22] P. Lettieri and M. B. Srivastava, "Adaptive Frame Length Control for Improving Wireless Link Throughput, Range, and Energy Efficiency," *NFOCOM '98. Seventeenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, Vol. 2, 1998, pp. 564-571.

- [23] D. C. Cox, R. Murray and A. Norris, "800 MHz Attenuation Measured in and around Suburban Houses," *AT&T Bell Laboratory Technical Journal*, Vol. 673, No. 6, July-August 1984.
- [24] R.C. Bernhardt, "Macroscopic Diversity in Frequency Reuse Systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol-SAC 5, June 1987, pp. 862-878.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติสถานีฐาน D-Link DWL-2000AP+ [21]

มาตรฐาน	IEEE 802.11, 802.11b, 802.11G
อัตราบิต	1, 2, 5.5, 11, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps
ความถี่ใช้งาน	2.4 – 2.4897 GHz
กำลังงานส่ง	15 dBm
ความไวเครื่องรับ	54 Mbps OFDM, 10% PER, -68 dBm 48 Mbps OFDM, 10% PER, -68 dBm 36 Mbps OFDM, 10% PER, -75 dBm 24 Mbps OFDM, 10% PER, -79 dBm 18 Mbps OFDM, 10% PER, -82 dBm 12 Mbps OFDM, 10% PER, -84 dBm 11 Mbps CCK, 8% PER, -82 dBm 9 Mbps OFDM, 10% PER, -87 dBm 6 Mbps OFDM, 10% PER, -88 dBm 5.5 Mbps CCK, 8% PER, -85 dBm 2 Mbps QPSK, 8% PER, -86 dBm 1 Mbps BPSK, 8% PER, -89 dBm

ตารางที่ ก.2 คุณสมบัติการ์ดโครงข่ายไร้สาย Cisco Aironet 350 Series Client Adapter [20]

มาตรฐาน	IEEE 802.11, 802.11b
อัตราบิต	1, 2, 5.5, 11 Mbps
ความถี่ใช้งาน	2.4 – 2.4897 GHz
กำลังงานส่ง	15 dBm
ความไวเครื่องรับ	1 Mbps BPSK , -94 dBm 2 Mbps QPSK, -91 dBm 5.5 Mbps CCK, -89 dBm 11 Mbps CCK, -85 dBm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายวิเชษฐ์ อ่อนรำพรรณ เกิดเมื่อวันที่ 15 พฤษภาคม พ.ศ.2520 ที่จังหวัดลำปาง สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี 2544

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

W. On-Rampan, K. Nakprasit, P. Wouchoum, C. Phongcharoenpanich, S. Kosulvit and M. Krairiksh, "Performance Evaluation of a Probe Excited Circular Ring above the Reflector in the Outdoor Environment," *Proc. of the First Electrical Engineering/ Electronic, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Annual Conference, Thailand, pp.54-57 , May. 2004*



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้