

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการรับสัญญาณในการสื่อสารไร้สายภายใต้
สภาวะแวดล้อมต่างๆ

A STUDY OF FACTORS EFFECTING WIRELESS NETWORKING
IN ANY ENVIRONMENT



T139365



กท.
ร 852 ก
2556

.b.....
.i.....

๖. 12719870

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 139365
วัน,เดือน,ปี..... 30 ต.ค. 2558

รายงานส่วนนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิชาการศึกษาระดับ 2
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ
คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A STUDY OF FACTORS EFFECTING WIRELESS NETWORKING
IN ANY ENVIRONMENT**



**A REPORT SUBMITTED PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS OF THE COURSE
INDEPENDENT STUDY 2
MASTER OF SCIENCE PROGRAM IN INFORMATION TECHNOLOGY
FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2/2013



COPYRIGHT 2014

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยกระทรวงศึกษาธิการ ห้ามมิให้ผู้ใดทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบรับรองการศึกษาอิสระ 2 (INDEPENDENT STUDY 2)

เรื่อง

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการรับสัญญาณในการสื่อสารไร้สายภายใต้
สถานะแวดล้อมต่างๆ

A STUDY OF FACTORS EFFECTING WIRELESS NETWORKING IN
ANY ENVIRONMENTS

นาย สุรพล ไกรจักร์

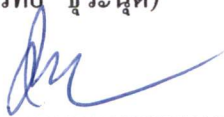
รหัสประจำตัว 55661001

ขอรับรองว่ารายงานฉบับนี้ ข้าพเจ้าไม่ได้คัดลอกมาจากที่ใด
รายงานฉบับนี้ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาวិชาการศึกษาอิสระ 2 หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีสารสนเทศ)
ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2556



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.ปานวิทย์ ฐวานูดี)



.....กรรมการสอบ

(ผศ.ดร.กันต์พงษ์ วรรัตน์ปัญญา)



.....กรรมการสอบ

(รศ.ดร.โชติพัชร ภรณ์วลัย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาอิสระ 2	การศึกษาวิจัยที่ส่งผลต่อการรับสัญญาณในการสื่อสารไร้สาย ภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ
นักศึกษา	นายสุรพล ไกรจักร์
รหัสนักศึกษา	55661001
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีสารสนเทศ
แขนงวิชา	เทคโนโลยีเครือข่ายและระบบ
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. ปานวิทย์ ฐะนุติ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาวิจัยที่ส่งผลต่อการรับสัญญาณในการสื่อสารไร้สาย ภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ โดยมุ่งเน้นการค้นคว้าและวิจัยในมุมมองที่แตกต่างไปจากเดิม ซึ่งเนื้อหา จะถูกแบ่งออกเป็น 5 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 บทนำ เป็นส่วนที่แสดงให้เห็นถึงความเป็นมาและความสำคัญ ของปัญหาที่พบในปัจจุบัน ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการศึกษา ขอบเขตของการศึกษา ขั้นตอนของการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ส่วนที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เป็นส่วนที่แสดงให้เห็นถึงทฤษฎีทั้งหมดที่นำมาใช้ในการ ค้นคว้าและวิจัย ซึ่งประกอบด้วย ทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่น ทฤษฎีสายอากาศ ทฤษฎีของเทคโนโลยี ไวแมกซ์ ทฤษฎีแบบจำลองการลดทอนตามระยะทาง และทฤษฎีแบบจำลองการจางหายของกำลัง สัญญาณ ส่วนที่ 3 การวิเคราะห์และออกแบบการทดลอง เป็นส่วนที่แสดงให้เห็นถึงแนวทางการศึกษา ในรูปแบบเดิม ปัญหาที่พบในปัจจุบัน และขั้นตอนการทดลอง ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 แนวทาง คือ การ ทดลองโดยการเลียนแบบจาก โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งในที่นี้จะทำการทดลองบนโปรแกรม MATLAB และการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริง ส่วนที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง เป็นส่วนที่ แสดงให้เห็นถึงการทดลองในแต่ละขั้นตอนและผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรม คอมพิวเตอร์และการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริง ส่วนที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ เป็น ส่วนที่แสดงให้เห็นถึงการสรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง รวมทั้งข้อเสนอแนะจากทางผู้จัดทำ โครงการวิจัยในแง่มุมต่างๆ

Title	A Study of Factors Effecting Wireless Networking in Any Environment
Student	Mr. Surapon Kraijak
Student ID.	55661001
Degree	Master of Science
Program	Information Technology
Major	Networking System and Technology
Academic Year	2013
Advisor	Dr. Panwit Tuwanuti

ABSTRACT

This thesis proposes a study of factors effecting wireless network in any environment. In this thesis, we focus on investigate and research of suitable path loss and fading model for each environments in the different perspective. We can be divided all of contents into 5 sections. In section 1 introduction described about background and important of problems that found at the present time, proposes and objectives of study in research, assumptions of study in research, theories and concepts of study in research, scopes of study in research, procedures of study in research and expected benefits. Section 2 relevant theories which composed of wave propagation theory, antenna theory, WiMax technology theory, path loss model theory and fading model theory. Section 3 analysis and design of experiment described about previous research approaches, current problems and experimental procedures which can be divided into 2 systems were experimental by using computer simulation (In this thesis was simulation based on MATLAB) and experimental in real environments. Section 4 experiments and experimental results described about experiment in each steps and experimental results from both systems. And the last section, Section 5 research summary and recommendations described about analysis and summary of experimental results including researcher's recommendations in various aspects.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา หน่วยงาน การศึกษาอิสระ ดร. ปานวิทย์ ชูระนฤติ ที่ได้สละเวลาให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไข ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีในการทำงาน

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า คอยให้คำปรึกษา และ ชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆให้สำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้องคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ให้กำลังใจ และให้การ สนับสนุนในทุกๆเรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำโครงการการศึกษาอิสระฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจาก โครงการฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุรพล ไกรจักร์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	XI
สารบัญตาราง.....	XVI

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการศึกษา.....	2
1.5 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายคลื่น (Wave propagation).....	5
2.1.1 การแผ่พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	6
2.1.1.1 หลักมูลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	6
2.1.1.2 คลื่นในอวกาศว่าง.....	7
2.1.1.3 โพลาไรเซชัน (Polarization).....	10
2.1.2 การแพร่กระจายของคลื่นในชั้นบรรยากาศ.....	11
2.1.2.1 การลดทอนและการดูดกลืน (Attenuation and Absorption).....	11
2.1.2.2 การสะท้อนของคลื่น (Reflection).....	13
2.1.2.3 การหักเหของคลื่น (Refraction).....	14
2.1.2.4 การเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction).....	16
2.1.2.5 การแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.1.3 ผลกระทบของชั้นบรรยากาศบนโลกต่อคลื่นวิทยุ.....	18
2.1.4 การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ.....	20
2.1.4.1 คลื่นดิน (Ground wave).....	21
2.1.4.2 คลื่นอวกาศ (Space wave).....	22
2.1.4.3 คลื่นฟ้า (Sky wave).....	23
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศ (Antenna).....	24
2.2.1 ประเภทของสายอากาศ.....	24
2.2.1.1 สายอากาศแบบลวดตัวนำ (Wire antenna).....	24
2.2.1.2 สายอากาศแบบช่อง (Aperture antenna).....	25
2.2.1.3 สายอากาศแบบอาร์เรย์ (Array antenna).....	26
2.2.1.4 สายอากาศแบบสะท้อนคลื่น (Reflector antenna).....	26
2.2.1.5 สายอากาศแบบเลนส์ (Lens antenna).....	27
2.2.1.6 สายอากาศแบบโมโนโพล (Monopole antenna).....	28
2.2.1.7 สายอากาศแบบวนรอบ (Loop antenna).....	30
2.2.1.8 สายอากาศแบบช่อง (Slot antenna).....	32
2.2.1.9 สายอากาศแบบยาคิ (Yagi antenna).....	32
2.2.1.10 สายอากาศแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (Rhombic antenna).....	36
2.2.1.11 สายอากาศแบบล็อกพรีโอดิก (Log-Periodic antenna).....	42
2.2.1.12 สายอากาศแบบพาราโบลิก รีเฟลคเตอร์.....	46
2.2.2 กลไกการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....	48
2.2.3 ตัวแพร่กระจายคลื่นในอากาศ.....	49
2.2.3.1 การแพร่กระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในสายอากาศ.....	49
2.2.3.2 สายอากาศรีโซแนนซ์ (Resonant antenna).....	50
2.2.3.3 สายอากาศไม่รีโซแนนซ์ (Non-Resonant antenna).....	52
2.2.4 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศ.....	53
2.2.4.1 อัตราการขยาย (Gain).....	53
2.2.4.2 อัตราการขยายกำลัง (Power gain).....	54
2.2.4.3 ความต้านทานในสายอากาศ.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.2.4.4	แบนด์วิดท์ในสายอากาศ.....	56
2.2.4.5	รูปแบบการแพร่กระจายสัญญาณ (Radiation pattern).....	57
2.2.4.6	โลบข้าง (Side lobe).....	58
2.2.4.7	ความกว้าง빔 (Beamwidth).....	58
2.2.4.8	โพลาไรเซชัน (Polarization).....	59
2.2.4.9	อัตราส่วนจากด้านหน้าถึงด้านหลัง (Front back ratio).....	59
2.3	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการลดทอนตามระยะทาง (Path loss models).....	59
2.3.1	แบบจำลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง.....	60
2.3.1.1	Simplified Model.....	60
2.3.1.2	Walfish Model.....	60
2.3.1.3	Lee Model.....	61
2.3.2	แบบจำลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง.....	62
2.3.2.1	Ericsson Model.....	62
2.3.2.2	Hata Model.....	62
2.3.2.3	Cost-231 Model.....	63
2.3.2.4	Erceg Model.....	63
2.3.2.5	ECC-33 Model.....	64
2.3.2.6	Lee Model.....	65
2.3.2.7	COST231 Walfish-Ikegami (WI) Model.....	65
2.3.3	แบบจำลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง.....	66
2.3.3.1	Okumura Model.....	66
2.3.3.2	Ericsson Model.....	67
2.3.3.3	Hata Model.....	68
2.3.3.4	COST-231 Model.....	68
2.3.3.5	Erceg Model.....	69
2.3.3.6	ECC-33 Model.....	69
2.3.3.7	Lee Model.....	70
2.3.3.8	Okumura-Hata Model.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3.4 แบบจำลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท.....	72
2.3.4.1 Okumura Model.....	72
2.3.4.2 Ericsson Model.....	73
2.3.4.3 Hata Model.....	73
2.3.4.4 COST-231 Model.....	73
2.3.4.5 Erceg Model.....	74
2.3.4.6 Lee Model.....	74
2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณ (Fading models).....	75
2.4.1 Ricean Distribution.....	75
2.4.2 Rayleigh Distribution.....	76
2.3.3 Log-Normal Fading Model.....	77
2.3.4 Suzuki Model.....	78
2.3.5 Nakagami Model.....	79
2.3.6 Weibull Model.....	79
2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMax Technology).....	80
2.5.1 มาตรฐานของเทคโนโลยีไวแมกซ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน.....	81
2.5.1.1 IEEE 802.16.....	81
2.5.1.2 IEEE 802.16a.....	81
2.5.1.3 IEEE 802.16.....	82
2.5.1.4 IEEE 802.16e.....	82
2.5.2 องค์ประกอบของเทคโนโลยีไวแมกซ์.....	83
2.5.2.1 เครื่องลูกข่ายไวแมกซ์ (Subscriber Station).....	83
2.5.2.2 สถานีฐานหรือสถานีสัญญาณ (Base Station).....	84
2.5.3 เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารไร้สายความเร็วสูง.....	85
2.5.3.1 การสื่อสารแบบเป็นเส้นตรงและการสื่อสารแบบไม่เป็นเส้นตรง....	85
2.5.3.2 เทคโนโลยี OFDM.....	87
2.5.3.3 เทคโนโลยี Sun-Channelization สำหรับความถี่ขึ้น.....	88
2.5.3.4 ระบบสายอากาศสำหรับการใช้งานไวแมกซ์แบบประจำที่.....	90

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.5.3.5 เทคโนโลยี Diversity.....	91
2.5.3.6 เทคโนโลยี Adaptive Modulation.....	92
2.5.3.7 เทคโนโลยีสับสวูนอื่นๆ.....	93
2.5.4 คุณสมบัติเด่นของเทคโนโลยีไวแมกซ์.....	95
2.5.4.1 อัตราเร็วในการรับส่งข้อมูล.....	95
2.5.4.2 แพร่กระจายสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการได้กว้างขวาง.....	95
2.5.4.3 สามารถต่อเติมและขยายระบบได้ง่าย.....	96
2.5.4.4 การจัดลำดับความสำคัญของงานบริการ.....	96
2.5.4.5 ระบบรักษาความปลอดภัย.....	96
บทที่ 3 การวิเคราะห์และออกแบบการทดลอง.....	97
3.1 ศึกษาระบบงานเดิม.....	97
3.2 ปัญหาที่พบในปัจจุบัน.....	102
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	104
3.3.1 การทดลองโดยการเลียนแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	104
3.3.2 การทดลองในสถานะแวดล้อมจริง.....	106
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	108
4.1 การทดลองโดยการเลียนแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	108
4.1.1 การทดลองในสถานะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง.....	109
4.1.1.1 ผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง.....	109
4.1.1.2 ผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ.....	110
4.1.2 การทดลองในสถานะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง.....	111
4.1.2.1 ผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง.....	112
4.1.2.2 ผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ.....	113
4.1.3 การทดลองในสถานะแวดล้อมแบบชานเมือง.....	114
4.1.3.1 ผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง.....	114
4.1.3.2 ผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ.....	116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.1.4 การทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท.....	117
4.1.4.1 ผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง.....	117
4.1.4.2 ผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ.....	118
4.2 การทดลองในสภาวะแวดล้อมจริง.....	120
4.2.1 การทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิดโล่ง.....	121
4.2.1.1 ผลการทดลองตามระยะทาง.....	123
4.2.1.2 ผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ.....	124
4.2.2 การทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมือง.....	125
4.2.2.1 ผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง.....	127
4.2.2.2 ผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ.....	128
4.2.3 การทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชานเมือง.....	128
4.2.3.1 ผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง.....	130
4.2.3.2 ผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ.....	131
4.2.4 การทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชนบท.....	132
4.2.4.1 ผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง.....	134
4.2.4.2 ผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ.....	134
4.3 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลอง.....	135
4.3.1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง.....	136
4.3.1.1 วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง.....	136
4.3.1.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ.....	137
4.3.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่ชุมชนเมือง.....	139
4.3.2.1 วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง.....	139
4.3.2.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ.....	140

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3.3 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่ ชานเมือง.....	142
4.3.3.1 วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง.....	142
4.3.3.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลัง สัญญาณ.....	144
4.3.4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่ ชนบท.....	145
4.3.4.1 วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง.....	145
4.3.4.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลัง สัญญาณ.....	147
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและแนวทางการวิจัยในอนาคต.....	149
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	149
5.2 ปัญหาและอุปสรรค.....	151
5.3 แนวทางการวิจัยในอนาคต.....	153

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอวกาศว่าง.....	7
2.2 แสดงหน้าคลื่นรูปทรงกลม.....	7
2.3 แสดงการแพร่กระจายคลื่นแบบเวดดิคคอลลโพราไรซ์และฮอริโซนทอลโพราไรซ์.....	10
2.4 แสดงการลดทอนและการดูดกลืนคลื่นวิทยุในชั้นบรรยากาศจากออกซิเจนและไอน้ำ.....	13
2.5 แสดงการสะท้อนของคลื่นบนพื้นผิวโลก.....	14
2.6 แสดงการหักเหของคลื่น.....	15
2.7 แสดงการหักเหของคลื่นภายในชั้นบรรยากาศโลก.....	16
2.8 แสดงการเลี้ยวเบนของคลื่นเมื่อกระทบกับสิ่งกีดขวาง.....	17
2.9 แสดงระดับชั้นบรรยากาศของโลก.....	19
2.10 แสดงลักษณะการเดินทางของคลื่นวิทยุ.....	20
2.11 แสดงลักษณะการเดินทางของคลื่นดิน.....	22
2.12 แสดงลักษณะการเดินทางของคลื่นอวกาศ.....	23
2.13 แสดงลักษณะการเดินทางของคลื่นฟ้า.....	23
2.14 แสดงรูปร่างของสายอากาศชนิดลวดตัวนำแบบต่างๆ.....	25
2.15 แสดงรูปร่างของสายอากาศแบบช่องชนิดต่างๆ.....	25
2.16 แสดงรูปร่างของสายอากาศแบบอาร์เรย์ชนิดต่างๆ.....	26
2.17 แสดงรูปร่างของสายอากาศชนิดสะท้อนคลื่นแบบต่างๆ.....	27
2.18 แสดงรูปร่างของสายอากาศแบบเลนส์ชนิดต่างๆ.....	28
2.19 แสดงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบ โมโนโพลหรือยูนิโพล.....	29
2.20 แสดงลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าบนสายอากาศแบบไดโพลชนิดครึ่งคลื่น.....	29
2.21 แสดงรูปร่างของสายอากาศแบบวนรอบ.....	30
2.22 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในแนวราบของสายอากาศแบบวนรอบ.....	30
2.23 แสดงโครงสร้างของแท่งเฟอไรต์.....	31
2.24 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่งเฟอไรต์.....	31
2.25 แสดงรูปร่างของสายอากาศแบบช่อง.....	32
2.26 แสดงลักษณะของสายอากาศแบบ ไดโพลชนิดครึ่งคลื่นพร้อมกับรีฟเลกเตอร์และไดเรกเตอร์.....	33
2.27 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไดโพลชนิดครึ่งคลื่นในแนวระนาบ.....	33
2.28 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไดโพลชนิดครึ่งคลื่นในระนาบแนวตั้ง.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.29 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบ ไค โพลชนิดครึ่งคลื่นพร้อมกับรีเฟลกเตอร์และไดเรกเตอร์ในระนาบแนวนอน.....	35
2.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนไดเรกเตอร์กับอัตราขยายของสายอากาศยาก็.....	35
2.31 แสดงตัวแพร่กระจายคลื่นแบบลวดตัวนำยาว (Long-wire radiator).....	36
2.32 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของลวดตัวนำยาว.....	38
2.33 แสดงรูปร่างของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน.....	38
2.34 แสดงค่ามุมต่างๆและรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในแต่ละส่วนของสายอากาศ.....	38
2.35 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน.....	39
2.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับอัตราขยายของสายอากาศสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน.....	40
2.37 แสดงแนวเดินทางของคลื่นจากสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน.....	40
2.38 แสดงการนำสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนไปใช้งานจริง.....	41
2.39 แสดงสายอากาศแบบ ไค โพลชนิดครึ่งคลื่นสองเสาที่วางห่างกันในระยะครึ่งหนึ่งของครึ่งคลื่นในแนวตั้ง.....	42
2.40 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในแนวระนาบของสายอากาศแบบ ไค โพลชนิดครึ่งคลื่นทั้งสองเสาที่วางในแนวตั้งและมีระยะห่างระหว่างกันที่ครึ่งหนึ่งของครึ่งคลื่น.....	43
2.41 แสดงลักษณะของสายอากาศแบบล๊อคเพอริ โอติกแบบ ไค โพล.....	44
2.42 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศล๊อคเพอริ โอติกแบบ ไค โพล.....	44
2.43 แสดงการนำสายอากาศล๊อคเพอริ โอติกแบบ ไค โพล ไปใช้งานจริง.....	45
2.44 แสดงการนำสายอากาศล๊อคเพอริ โอติกแบบ ไค โพล ไปใช้งานในย่านความถี่สูง.....	45
2.45 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบพาราโบลิกรีเฟลกเตอร์.....	46
2.46 แสดงรูปร่างของสายอากาศแบบพาราโบลิกรีเฟลกเตอร์.....	47
2.47 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบพาราโบลิกรีเฟลกเตอร์.....	48
2.48 แสดงการแพร่กระจายคลื่นจากสายส่ง.....	48
2.49 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจากสายส่ง.....	49
2.50 แสดงการแพร่กระจายของกระแสและแรงดัน ไฟฟ้าบนสายอากาศแบบ ไค โพลชนิดครึ่งคลื่น.....	50
2.51 แสดงการแพร่กระจายของกระแสไฟฟ้าบนสายอากาศแบบ ไค โพลชนิดต่างๆ.....	50
2.52 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรีโซแนนซ์ไค โพลชนิดต่างๆ.....	51
2.53 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบ ไค โพลชนิดครึ่งคลื่นในระนาบแนวตั้ง.....	52

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.54 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรีโซแนนซ์.....	53
2.55 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบต่างๆ.....	57
2.56 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่มีโลบข้างแบบต่างๆ.....	58
2.57 แสดงความกว้างของบีมของสายอากาศ.....	58
2.58 แสดงวิวัฒนาการของมาตรฐานเทคโนโลยีไวแมกซ์.....	82
2.59 แสดงรูปแบบการให้บริการสื่อสารไร้สายความเร็วสูงด้วยเทคโนโลยีไวแมกซ์.....	83
2.60 แสดงองค์ประกอบหลักของเทคโนโลยีไวแมกซ์.....	84
2.61 แสดงการสื่อสารแบบเป็นเส้นตรงและความเกี่ยวข้องกับ Fresnel Zone.....	85
2.62 แสดงการสื่อสารแบบไม่เป็นเส้นตรงและผลกระทบจากปรากฏการณ์ Multi-path Fading.....	87
2.63 แสดงความแตกต่างระหว่างการสื่อสารแบบ Spread Spectrum แบบ Single Carrier Mode กับ การสื่อสารบนเทคโนโลยี OFDM.....	88
2.64 แสดงผลกระทบที่เกิดจากความไม่สมดุลระหว่างระยะทางการแพร่กระจายของสถานีฐานกับ เครื่องลูกข่ายในการสื่อสารบนเทคโนโลยีไวแมกซ์.....	90
2.65 แสดงการมอดูเลตสัญญาณแบบต่างๆ และผลกระทบต่อพื้นที่ให้บริการ.....	92
2.66 แสดงกลไกการควบคุมกำลังส่งของเครื่องลูกข่าย.....	94
4.1 แสดงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง.....	109
4.2 แสดงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง.....	111
4.3 แสดงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง.....	112
4.4 แสดงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง.....	113
4.5 แสดงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง.....	115
4.6 แสดงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง.....	116
4.7 แสดงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท.....	117
4.8 แสดงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท.....	119
4.9 แสดงลักษณะของอุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณ HP8560A.....	120
4.10 แสดงลักษณะของอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณ IFR2025.....	121
4.11 แสดงสภาพแวดล้อมจริงที่ใช้สำหรับการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง.....	122
4.12 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตามจุดทดลองต่างๆ ในสภาวะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิดโล่ง.....	123
4.13 แสดงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิดโล่ง.....	124

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.14 แสดงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิดโล่ง.....	124
4.15 แสดงสภาพแวดล้อมจริงที่ใช้สำหรับการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง.....	125
4.16 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตามจุดทดลองต่างๆ ในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมือง.....	126
4.17 แสดงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมือง.....	127
4.18 แสดงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมือง.....	128
4.19 แสดงสภาพแวดล้อมจริงที่ใช้สำหรับการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง.....	129
4.20 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตามจุดทดลองต่างๆ ในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชานเมือง.....	130
4.21 แสดงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชานเมือง.....	130
4.22 แสดงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชานเมือง.....	131
4.23 แสดงสภาพแวดล้อมจริงที่ใช้สำหรับการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท.....	132
4.24 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตามจุดทดลองต่างๆ ในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชนบท.....	133
4.25 แสดงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชนบท.....	134
4.26 แสดงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชนบท.....	135
4.27 แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง.....	136
4.28 แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง.....	138
4.29 แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง.....	139
4.30 แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง.....	141
4.31 แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง.....	142
4.32 แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง.....	144
4.33 แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท.....	146

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.34 แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแบบ
แวดล้อมแบบชนบทชนบท.....147



สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางกับสถานะแวดล้อมต่างๆ.....	104
3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณกับสถานะแวดล้อมต่างๆ.	105
4.1 แสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดลองการลดทอนตามระยะทางโดยการเลียนแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	108
4.2 แสดงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ โดยการเลียนแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	109
4.3 แสดงอัตราการลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่งที่ได้จากการทดลองในแต่ละแบบจำลอง.....	110
4.4 แสดงอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่งที่ได้จากการทดลองในแต่ละแบบจำลอง.....	111
4.5 แสดงอัตราการลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองที่ได้จากการทดลองในแต่ละแบบจำลอง.....	112
4.6 แสดงอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองที่ได้จากการทดลองในแต่ละแบบจำลอง.....	114
4.7 แสดงอัตราการลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมแบบชานเมืองที่ได้จากการทดลองในแต่ละแบบจำลอง.....	115
4.8 แสดงอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมแบบชานเมืองที่ได้จากการทดลองในแต่ละแบบจำลอง.....	117
4.9 แสดงอัตราการลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมแบบชนบทที่ได้จากการทดลองในแต่ละแบบจำลอง.....	118
4.10 แสดงอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมแบบชนบทที่ได้จากการทดลองในแต่ละแบบจำลอง.....	119
4.11 แสดงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิดโล่งไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง.....	137
4.12 แสดงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิดโล่งไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง.....	138

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่

หน้า

4.13 แสดงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมืองไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง.....	140
4.14 แสดงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมืองไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง.....	141
4.15 แสดงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชานเมืองไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง.....	143
4.16 แสดงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชานเมืองไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง.....	145
4.17 แสดงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชนบทไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง.....	146
4.18 แสดงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชนบทไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง.....	148
5.1 แสดงแบบจำลองที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้พยากรณ์การลดทอนตามระยะทางในแต่ละสภาวะแวดล้อม.....	149
5.2 แสดงแบบจำลองที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้พยากรณ์การจางหายของกำลังสัญญาณในแต่ละสภาวะแวดล้อม.....	150

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการดำเนินกระบวนการทางธุรกิจขององค์กรอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทำให้ผู้บริหารเริ่มมีความตระหนักถึงการนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ภายในองค์กรมากขึ้น แต่ด้วยข้อจำกัดที่ผู้บริหารองค์กรส่วนใหญ่ มักขาดความรู้และทักษะทางด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ จึงส่งผลทำให้เกิดการวิเคราะห์ ออกแบบ และนำเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายไปใช้อย่างไม่เหมาะสม เช่น นำเทคโนโลยีไวไฟไปใช้รับ-ส่งข้อมูลระหว่างอาคาร นำเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงแบบไร้สาย (Free Space Optic: FSO) ไปใช้รับ-ส่งข้อมูลในพื้นที่ที่เต็มไปด้วยสิ่งกีดขวาง ซึ่งการกระทำดังกล่าวนอกจากจะก่อให้เกิดความไม่ปลอดภัยในการติดต่อสื่อสารแล้ว ยังส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำงานของเทคโนโลยีสื่อสารแบบไร้สายอีกด้วย ในเวลาต่อมาองค์กรธุรกิจก็ได้เริ่มมีการจัดตั้งแผนกเทคโนโลยีสารสนเทศขึ้น ซึ่งแผนกดังกล่าวจะทำหน้าที่ในการวิเคราะห์ ออกแบบ แก้ไขปัญหา และดูแลรักษาระบบเครือข่ายขององค์กรให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปราศจากข้อบกพร่องใดๆ แต่การจะวิเคราะห์ ออกแบบระบบเครือข่ายให้มีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองที่มีความเหมาะสมและใกล้เคียงกับสภาวะแวดล้อมจริงมากที่สุด ซึ่งเป็นเรื่องที่ยากสำหรับนักคอมพิวเตอร์ในการเลือกแบบจำลองมาใช้ในการทดลองหรือวิเคราะห์ออกแบบ เนื่องจากแบบจำลองที่ถูกคิดค้นขึ้นมาในปัจจุบันมีอยู่มากมาย และไม่สามารถทราบได้เลยว่าแบบจำลองใดเหมาะกับสภาวะแวดล้อมแบบใด ซึ่งถ้าหากเลือกแบบจำลองผิดพลาดก็อาจจะส่งผลกระทบต่อการวิเคราะห์ ออกแบบ รวมไปถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบเครือข่ายในระยะยาวได้

จากปัญหาดังกล่าว ทำให้เกิดแนวความคิดในการศึกษาและเปรียบเทียบแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์และออกแบบระบบเครือข่ายไร้สาย เช่น แบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับการลดทอนสัญญาณตามระยะทาง (Path loss model) แบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับการจางหายของกำลังสัญญาณ (Fading model) เพื่อให้วิศวกรและออกแบบระบบเครือข่ายไร้สาย หรือผู้ที่สนใจได้นำไปใช้เป็นแนวทางประกอบการวิเคราะห์ ออกแบบหรือนำไปต่อยอดในงานวิจัยของตนเองต่อไป ตลอดจนเพื่อลดเวลาและข้อผิดพลาดในการวิเคราะห์ออกแบบระบบเครือข่ายไร้สายลง อันจะส่งผลดีต่อองค์กร โดยรวมในแง่ของการลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพ รวมทั้งผลิตภาพ (Productivity) ในการทำงานของพนักงานภายในองค์กรให้เพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการรับสัญญาณในการสื่อสารไร้สายภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาการลดทอนตามระยะทาง (Path loss) ของระบบเครือข่ายไร้สาย
2. เพื่อศึกษาเกี่ยวกับสัญญาณแทรกสอด (Interference signal)
3. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์หาคุณสมบัติของช่องสัญญาณเครือข่ายไร้สาย
4. เพื่อศึกษาสภาพพื้นที่ต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อระดับสัญญาณ
5. เพื่อทำการปรับปรุงการส่งสัญญาณให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. เนื่องจากแบบจำลองการลดทอนตามระยะทาง (Path Loss model) มีอยู่มากมาย จึงส่งผลต่อการเลือกแบบจำลองมาวิเคราะห์ที่เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมจริง
2. เนื่องจากแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณ (Fading model) มีอยู่มากมาย จึงส่งผลต่อการเลือกแบบจำลองมาวิเคราะห์ที่เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมจริง
3. คุณภาพของช่องสัญญาณและระดับของสัญญาณที่รับได้ มีผลต่อประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลของเครือข่ายไร้สาย
4. สภาวะแวดล้อมแบบต่างๆ เช่น พื้นที่โล่ง (Free Space area) ชานเมือง (Suburban) ชุมชนเมือง (Urban) ชนบท (Rural) ล้วนมีผลกระทบต่อระดับกำลังสัญญาณที่รับได้
5. เมื่อรวมผลกระทบทั้งการลดทอนตามระยะทาง (Path loss) และการจางหายของกำลังสัญญาณ (Fading) จะทำให้ระดับสัญญาณที่รับได้ เมื่อคำนวณจากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับระดับสัญญาณที่วัดได้จริง

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการศึกษา

1. ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการสื่อสารดิจิทัล โดยมุ่งเน้นในเรื่องการวิเคราะห์สัญญาณ
2. ทฤษฎีไฟฟ้าสื่อสาร โดยมุ่งความสนใจไปในเรื่องรูปแบบการกระจายของคลื่นวิทยุ
3. ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับสัญญาณแทรกสอด โดยมุ่งความสนใจไปในเรื่องรูปแบบและคุณลักษณะของสัญญาณแทรกสอดแต่ละประเภท
4. ทฤษฎีเกี่ยวกับการลดทอนสัญญาณตามระยะทาง โดยมุ่งความสนใจไปในส่วนของแบบจำลองต่างๆ ที่จะนำมาใช้ในการทดลองและเปรียบเทียบ
5. ทฤษฎีเกี่ยวกับการจางหายของกำลังสัญญาณ โดยจะมุ่งความสนใจไปในส่วนของแบบจำลองต่างๆ ที่จะนำมาใช้ในการทดลองและเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. แนวคิดในการการทดลอง โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ

6.1 การทดลองการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งในที่นี้จะใช้โปรแกรม MATLAB

6.2 การทดลองในสถานที่จริง ซึ่งการทดลองในรูปแบบนี้จะอาศัยอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณไวแมกซ์ (WiMAX Signal Generator) เป็นตัวทดสอบการลดทอนกำลังสัญญาณ โดยจะแบ่งการทดลองออกไปตามสภาวะแวดล้อมต่างๆ ดังนี้

6.2.1 สภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง (Free Space Environment)

6.2.2 สภาวะแวดล้อมแบบในเมือง (Urban Environment)

6.2.3 สภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง (Suburban Environment)

6.2.4 สภาวะแวดล้อมแบบชนบท (Rural Environment)

1.6 ขอบเขตของการศึกษา

■ การศึกษาอิสระ 1

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารดิจิทัล (Digital)
2. ศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับหลักการไฟฟ้าสื่อสาร
3. ศึกษาและค้นคว้าบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์คุณภาพช่องสัญญาณสื่อสารแบบไร้สาย (Analysis of Wireless Channel Quality)
4. ศึกษาและค้นคว้าบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณแทรกสอด (Interference signal)

■ การศึกษาอิสระ 2

1. ศึกษาและค้นคว้าบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดทอนตามระยะทาง (Path loss)
2. ศึกษาและค้นคว้าบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจางหายของกำลังสัญญาณ (Fading)
3. ศึกษาค้นคว้าถึงวิธีการจำลองและบันทึกผลการส่งสัญญาณด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์
4. ศึกษาค้นคว้าวิธีการทดลองและบันทึกผลสำหรับการส่งสัญญาณภายใต้สภาพพื้นที่จริง

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

1. วางแผน ตั้งสมมติฐาน กำหนดเป้าหมาย และวิธีการในการศึกษาค้นคว้า
2. ศึกษาถึงแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
3. รวบรวมทฤษฎีและแนวคิดที่ได้จากการศึกษาค้นคว้ามาทำการสรุปใจความสำคัญ
4. จำลองรูปแบบการส่งสัญญาณในสภาพพื้นที่ต่างๆ ด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์
5. ทดลองการส่งสัญญาณในสภาพพื้นที่จริง
6. สรุปผลและวิเคราะห์เปรียบเทียบปัจจัยในสภาพพื้นที่ต่างๆ ที่มีผลต่อการส่งสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้เกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการรับสัญญาณของเครือข่ายไร้สาย
2. ได้รับความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติและกลไกการทำงานภายในช่องสัญญาณของเครือข่ายไร้สาย
3. แนวทางในการแก้ไขการลดทอนตามระยะทาง (Path loss) ที่มีศักยภาพเพิ่มมากขึ้น
4. แนวทางในการลดทอนสัญญาณแทรกสอดที่มีศักยภาพเพิ่มมากขึ้น
5. แนวทางในการปรับการรับสัญญาณที่ด้านรับ (Receiver) ที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
6. รายงานสรุปปัจจัยที่มีผลต่อการรับสัญญาณในสภาพแวดล้อมต่างๆ
7. เป็นแนวทางให้กับนักวิจัยหรือผู้ที่สนใจทางด้านการศึกษาแบบไร้สายได้นำไปใช้ต่อยอดในงานวิจัยหรือกรณีศึกษาต่างๆ ของตน



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการรับสัญญาณในการสื่อสารไร้สายภายใต้สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ นั้น จำเป็นจะต้องทำความเข้าใจกับทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวกับการแพร่กระจายคลื่น สายอากาศ แบบจำลองการลดทอนตามระยะทาง แบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณสัญญาณรบกวน และเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) โดยเฉพาะในเรื่องของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกำลังสัญญาณในการรับ-ส่งข้อมูลเพื่อเป็นพื้นฐาน แนวทางในการศึกษา และเพื่อให้ได้องค์ความรู้ที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้

ในบทนี้ผู้จัดทำงานวิจัยจะขอแนะนำเสนอแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายคลื่น สายอากาศ แบบจำลองการลดทอนตามระยะทาง แบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณสัญญาณรบกวน และเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) รวมถึงภูมิหลังทางด้านประวัติศาสตร์และความเป็นมาของทฤษฎีดังกล่าว โดยสังเขปดังนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายคลื่น (Wave propagation)

ตามที่เราทราบแล้วว่าในระบบสื่อสาร การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง จำเป็นต้องส่งสัญญาณผ่านตัวกลาง โดยตัวกลางที่เรารู้จักและคุ้นเคยเป็นอย่างดีคือ สายส่ง เช่น สายโทรศัพท์ สายเคเบิลใต้น้ำ สายเคเบิลใยแก้ว เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีตัวกลางอีกประเภทที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันและคาดว่าจะยังคงใช้ต่อไปในอนาคตด้วย ซึ่งก็คืออากาศ หรือ อวกาศ โดยตัวกลางดังกล่าวเป็นตัวกลางที่สามารถนำมาใช้ได้โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย มีอยู่ทั่วไป และมีอยู่ตลอดไปไม่สูญสลาย แต่การรับส่งสัญญาณผ่านตัวกลางประเภทนี้ จำเป็นต้องอาศัยสายอากาศ ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นในการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง

ในส่วนแรกจะกล่าวถึงการแผ่พลังงาน (Radiation) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ธรรมชาติการแพร่กระจายคลื่น (Wave propagation) การลดทอน (Attenuation) และการดูดกลืน (Absorption) เมื่อคลื่นเดินทาง ตลอดจนการสะท้อน (Reflection) การหักเห (Refraction) การแทรกสอด (Interference) และการเลี้ยวเบน (Diffraction)

ส่วนที่สองจะกล่าวถึงรายละเอียดการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งมีทั้งหมดสามรูปแบบที่ใช้ในการแพร่กระจายคลื่น ในปัจจุบัน การแพร่กระจายคลื่น ไมโครเวฟ และผลกระทบจากชั้นบรรยากาศเมื่อคลื่นเดินทางผ่าน

2.1.1 การแผ่พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อพลังงานไฟฟ้าถูกป้อนเข้าสู่วงจร ซึ่งมีส่วนประกอบเป็นรีแอคทีฟ (Reactive) เช่น ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) จะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และส่งผลให้พลังงานส่วนหนึ่งหลุดออกไปในอวกาศว่าง (Free space) เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การแผ่พลังงาน (Radiation) โดยพลังงานนี้จะแพร่กระจายออกไปในอวกาศว่างในรูปแบบที่เราเรียกว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอวกาศว่าง หมายถึง สภาวะแวดล้อมที่ปราศจากการสอดแทรกจากการแผ่พลังงานและแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ดังนั้นจึงไม่มีสนามแม่เหล็กและสนามโน้มถ่วง ไม่มีวัตถุแข็ง และไม่มีอนุภาคไอออนใดๆ กระจายอยู่ แต่ในความเป็นจริงแล้วอวกาศว่างดูเหมือนจะไม่มีอยู่จริงและคงไม่อยู่ใกล้โลกอย่างแน่นอน อย่างไรก็ตามแนวความคิดส่วนใหญ่มักใช้อวกาศว่างเป็นตัวกลางในการรับส่งสัญญาณ เพราะทำให้การเข้าถึงคลื่นที่แพร่กระจายอยู่เป็นไปได้ง่าย และทำให้ได้ผลจากการคำนวณในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เพื่อนำไปใช้ในการพยากรณ์และเปรียบเทียบกับสภาวะแวดล้อมจริงของพื้นที่นั้นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในย่านความถี่ที่สูงกว่าย่าน UHF (Ultra High Frequency) การแผ่พลังงานและการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ นั้นไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นการอธิบายทั้งหมดจึงต้องอาศัยพื้นฐานทางทฤษฎี และยอมรับได้เพียงเป็นค่าทางการพยากรณ์เท่านั้น เช่น ใช้เพื่อการพยากรณ์ว่าจะเกิดอะไรขึ้นต่อไป โดยทฤษฎีของการแผ่พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ถูกคิดค้นขึ้นโดยนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษที่ชื่อว่า เจมส์ เคลิร์ก แมกเวลล์ (James Clerk Maxwell) ในปี ค.ศ. 1857

2.1.1.1 หลักมูลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การแกว่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายในอวกาศว่าง (Free space) จะมีความเร็วเท่ากับความเร็วแสง คือ

$$V_c = 299,792,500 \pm 300 \text{ m/s} \quad (2.1)$$

$$\approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

เป็นค่าคงที่ที่ได้มาจาก

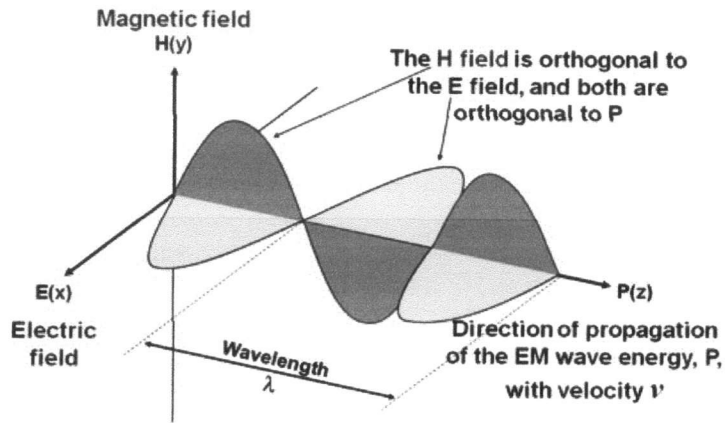
$$V_c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (2.2)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} = 1.257 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$\epsilon_0 = 1/36\pi \times 10^9 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอวกาศว่าง

การแพร่กระจายของคลื่นจะมีความคล้ายคลึงกับการเคลื่อนที่ออกของคลื่นหลังจากที่เราโยนก้อนหินลงในสระน้ำ แต่มีข้อแตกต่างกันอย่างมากระหว่างที่คลื่นน้ำเป็น Longitudinal คือ แกว่งในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของการแพร่กระจาย ส่วนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นแบบ Transverse คือ แกว่งในทิศทางตั้งฉากกันกับทิศทางการแพร่กระจาย ดังนั้น สนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นสมมติฐานในทางทฤษฎีที่ไม่สามารถตรวจสอบได้ เพราะมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นคลื่นได้ด้วยตาเปล่า แต่อย่างไรก็ตาม เรายังสามารถใช้ประโยชน์จากทฤษฎีดังกล่าวในการพยากรณ์พฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในทุกสภาวะการณ์ได้ เช่น การสะท้อน การหักเห และการเลี้ยวเบน

2.1.1.2 คลื่นในอวกาศว่าง



รูปที่ 2.2 แสดงหน้าคลื่นรูปทรงกลม

เนื่องจากคุณสมบัติปราศจากสัญญาณแทรกสอดและสิ่งกีดขวางในอวกาศว่าง

ส่งผลให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแผ่กระจายออกจากแหล่งกำเนิดได้ในทุกทิศทางอย่างมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพ โดยมีหน้าคลื่น (Wave front) เป็นรูปทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 หรือเปรียบเทียบได้กับการจินตนาการว่าคือเส้นรังสีที่กระจายออกมาจากจุดศูนย์กลางของแสงในทุกทิศทาง และมาตกกระทบบดบังกับพื้นหน้าคลื่นเสมือนกับซี่ล้อรถยนต์

ณ ระยะเวลายาวเท่ากันกับรังสี P คลื่นจะมีเฟส (Phase) ที่แน่นอน โดยคลื่นจะแพร่กระจายออกจากแหล่งกำเนิดในขณะที่แรงดันและกระแสสูงสุดถูกป้อนเข้าสู่วงจร เช่นขนาดแอมพลิจูดที่มีค่ามากที่สุดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งถ้าหากระยะการเดินทางของคลื่นเท่ากันทั้งหมดที่ 100000.25 จะส่งผลให้ความยาวคลื่น ความเข้มของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าชั่วขณะนั้นเท่ากับศูนย์กลางทุกจุด หากในทุกๆจุดนั้นเป็นพื้นเดียวกัน ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาในข้างต้นคือ คำจำกัดความของหน้าคลื่น (Wave front) โดยในที่นี้จะแสดงหน้าคลื่นในรูปทรงกลม ถ้าหากความยาวของรังสี λ ยาวเป็นสองเท่าของรังสี P พื้นที่ทรงกลมของรังสี λ ย่อมมากกว่าเป็นสี่เท่าของพื้นที่ทรงกลมของรังสี P จะเห็นได้ว่ากำลังงานทั้งหมดจากแหล่งกำเนิดจะต้องแผ่ให้ครอบคลุมพื้นที่ที่เป็นสี่เท่าเมื่อระยะทางห่างจากแหล่งกำเนิดเป็นสองเท่า ดังนั้นหากความเข้มของกำลังงานถูกกำหนดเป็นการแพร่กำลังงานต่อหน่วยพื้นที่แล้ว ที่ระยะทางห่างออกไปเป็นสองเท่า กำลังงานก็ย่อมต้องลดน้อยลงตามขนาดพื้นที่ที่เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งจะแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$P = P_1 / 4\pi r^2 \quad (2.3)$$

เมื่อกำหนดให้

P คือ ความหนาแน่นของกำลังงานที่ระยะทาง r ซึ่งห่างจากแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิก
 P_1 คือ กำลังของเครื่องส่ง

แหล่งกำเนิดไอโซทรอปิก (Isotropic) คือ ชื่อของแหล่งกำเนิดที่มีการแผ่พลังงานอย่างสม่ำเสมอและทุกทิศทางในอวกาศว่าง แม้ว่าแหล่งกำเนิดชนิดนี้จะไม่ได้อยู่จริงในทางปฏิบัติ แต่แนวความคิดของการแผ่พลังงานชนิดไอโซทรอปิกนั้นมีประโยชน์อย่างมากและถูกหยิบยกไปใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยที่มีชื่อเสียงระดับนานาชาติ และสิ่งที่น่าสนใจอีกสิ่งหนึ่งคือ กฎของส่วนกลับกำลังสอง ก็ยังนิยมนำมาใช้สำหรับหน้าคลื่นรูปทรงกลม เนื่องจากคลื่นรูปทรงกลมดังกล่าวจะมีความเร็วของการแผ่พลังงานที่คงที่ในทุกๆ จุด ซึ่งรวมไปถึงตัวกลางที่ก่อให้เกิดการแพร่กระจายด้วย

ความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถือเป็นส่วนที่มีความสำคัญมากส่วนหนึ่ง เพราะปริมาณของความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะแปรผันตรงกับแรงดันและกระแสที่ไหลเวียนอยู่ในวงจร โดยหน่วยของการวัดจะเป็นโวลต์ต่อเมตรและแอมแปร์ต่อเมตร ตามลำดับ สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีสมการที่ใช้สำหรับคำนวณความเข้มของสนามดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = ZH \quad (2.4)$$

เมื่อกำหนดให้

E คือ ค่าความแรงของสนาม (Field strength) หรือ ความเข้มของสนาม มีหน่วยเป็น V/m

H คือ ค่าความแรงของสนามแม่เหล็ก (Magnetic field strength) หรือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น A/m

Z คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic impedance) ของตัวกลางมีหน่วยเป็น Ω

โดยอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของตัวกลางสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.5)$$

เมื่อกำหนดให้

μ คือ ความซึมซาบได้ของสนามแม่เหล็ก (Permeability)

ϵ คือ ความซึมซาบได้ของสนามไฟฟ้า (Permittivity)

สำหรับในอวกาศว่าง (Free space)

ค่าความซึมซาบได้ของสนามแม่เหล็ก (μ) จะมีค่าเป็น $4\pi \times 10^{-7} = 1.257 \times 10^{-6}$ H/m

ค่าความซึมซาบได้ของสนามแม่ไฟฟ้า (ϵ) จะมีค่าเป็น $1/36\pi \times 10^9 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m

จากหน่วยของทั้งสองค่านี้ทำให้เราทราบได้ว่า ความซึมซาบได้ของสนามแม่เหล็กเป็นสมมูลของตัวเหนี่ยวนำ และความซึมซาบได้ของสนามไฟฟ้าเป็นสมมูลของตัวเก็บประจุในวงจรไฟฟ้า และจากสมการที่ 2.5 เราก็สามารถคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะในอวกาศว่างได้ ดังนี้

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{4\pi \times 10^{-7}}{1/36\pi \times 10^9}} = \sqrt{144\pi^2 \times 100} = 120\pi = 377 \Omega \quad (2.6)$$

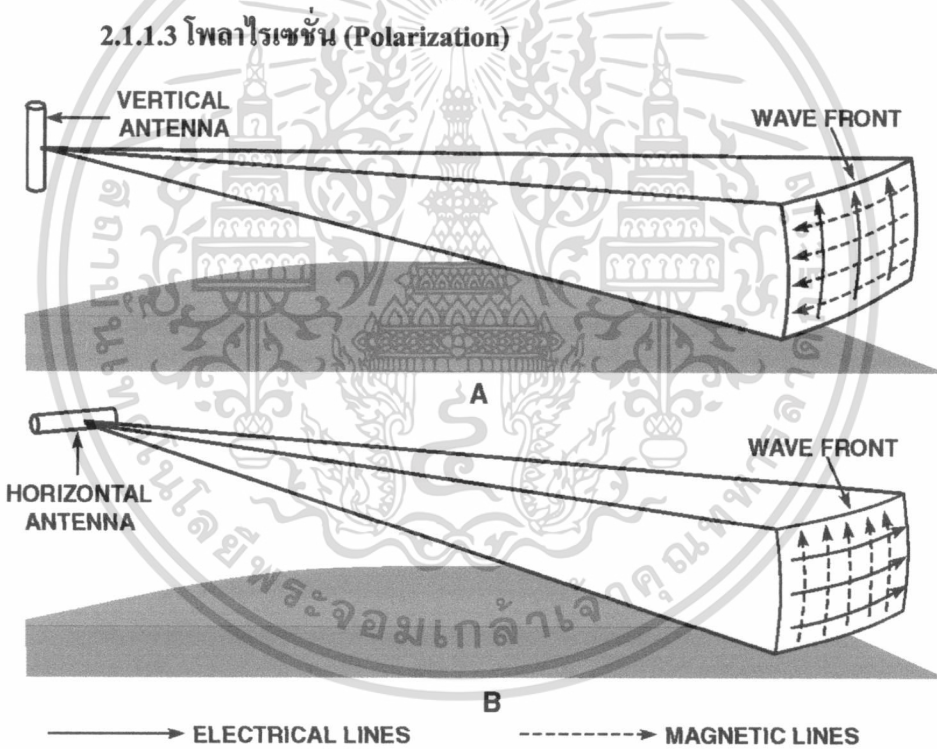
ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะคำนวณหาความเข้มสนามที่ระยะห่าง r จากแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิก ดังนั้น สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ($E = \sqrt{PZ}$) หากแทนค่า P ด้วยสมการที่ 2.3 และแทนค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะในอวกาศว่าง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 377Ω ลงในสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะได้ดังนี้

$$Z = \sqrt{\frac{Pt \times 120\pi}{4\pi r^2}} = \sqrt{\frac{30Pt}{r^2}} = \frac{\sqrt{30Pt}}{r} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าความเข้มของสนามแปรผกผันกับระยะทางจากแหล่งกำเนิด แต่แปรผันตรงกับรากที่สองของความหนาแน่นกำลังงาน

สุดท้ายนี้ลองพิจารณาหน้าคลื่นอีกครั้ง ดังที่เคยกล่าวไว้แล้วในข้างต้นว่าหน้าคลื่นมีลักษณะเป็นทรงกลมในตัวกลางไอโซทรอปิก แต่ในกรณีพื้นที่น้อยแต่ระยะทางอยู่ห่างไกลจากแหล่งกำเนิดมาก เราก็สามารถที่จะพิจารณาหน้าคลื่นเป็นเชิงระนาบได้ เช่น เราสามารถบอกได้ว่าสนามฟุตบอลมีลักษณะแบน แม้จะรู้ว่าพื้นผิวของโลกมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม แต่เมื่อพิจารณาในรายละเอียดด้านระยะทางจากจุดศูนย์กลางมายังผิวโลกเทียบกับพื้นที่ของสนามฟุตบอล จะเห็นได้ว่ามีส่วนทางด้านระยะทางที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน จากเหตุผลที่กล่าวในข้างต้นถือเป็นข้อเท็จจริงที่สนับสนุนให้แนวคิดเรื่องคลื่นเชิงระนาบมีประโยชน์อย่างมาก เพราะจะช่วยทำให้นักวิจัยเข้าใจถึงวิธีในการแสดงคุณสมบัติทางแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ง่ายมากยิ่งขึ้น เช่น การสะท้อน การหักเห



รูปที่ 2.3 แสดงการแพร่กระจายคลื่นแบบเวดดิคอลลโพราไรซ์ (Vertical polarized) และฮอริซอนทอลโพลาไรซ์ (Horizontal polarized)

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง โดยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน หมายความว่า สนามแม่เหล็กจะตั้งฉากกับขดลวด ส่วนสนามไฟฟ้าจะขนานกับขดลวด ซึ่งทรวงทรงดังกล่าวถือเป็นรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไปจากขดลวดตัวนำ และก่อให้เกิดขั้วของคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศขึ้น เรียกว่า โพลาริเซชัน (Polarization) เช่น สายอากาศชนิดแนวตั้ง (Vertical) จะแพร่กระจายเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นโดยเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าเป็นแนวตั้ง จึงเรียกว่า เวกติกอลโพลาไรซ์ (Vertical polarized) ส่วนสายอากาศชนิดแนวนอน (Horizontal) จะแพร่กระจายคลื่นโดยเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าเป็นแนวนอน จึงเรียกว่า ฮอริซอนทอลโพลาไรซ์ (Horizontal polarized) แต่สำหรับดวงอาทิตย์การแพร่กระจายแสงจะมีเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าที่ไม่เป็นรูปเป็นร่างและไม่แน่นอน จึงเรียกว่า แรนดอมโพลาไรซ์ (Random polarized) นอกจากนี้ยังมีสายอากาศที่เรียกว่า เฮลิคอล (Helical) ซึ่งเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าในสายอากาศชนิดนี้จะเป็นการแพร่กระจายแบบหมุนเวียนเป็นวง จึงเรียกว่า เซอคูล่าโพลาไรซ์ (Circular polarized) โดยทั่วไปตามหลักของการติดตั้งสายอากาศในเครื่องรับและเครื่องส่งนั้นจะต้องมีโพลาไรซ์ที่เหมือนกันหรือตรงกันจึงจะทำให้การรับส่งสัญญาณมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

2.1.2 การแพร่กระจายของคลื่นในชั้นบรรยากาศ

ภายในชั้นบรรยากาศของโลก คลื่นวิทยุที่แพร่กระจายอยู่ในอากาศนั้น มีโอกาสที่จะเกิดการลดทอน (Attenuation) การดูดกลืน (Absorption) การสะท้อน (Reflection) การหักเห (Refraction) การเลี้ยวเบน (Diffraction) และการแทรกสอด (Interference) เช่นเดียวกันกับแสงและคลื่นความร้อน

2.1.2.1 การลดทอนและการดูดกลืน (Attenuation and Absorption)

จากกฎกำลังสองผกผันแสดงให้เห็นได้ว่าความหนาแน่นของกำลังงานจะลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกลดทอนกำลังลงเมื่อระยะทางไกลออกไป โดยการลดทอนของกำลังงานจะเป็นสัดส่วนที่แปรผันตรงกับระยะทางยกกำลังสอง มีหน่วยวัดเป็น เดซิเบล (Decibels) หรือ เนเปอร์ (Napers) โดย 1 เนเปอร์มีค่าเท่ากับ 8.686 เดซิเบล ดังนั้นการลดทอนความหนาแน่นของกำลังงานจึงมีค่าเท่ากับกับความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และเมื่อนำมาอธิบายในรูปสมการ โดยกำหนดให้ P_1 และ E_1 แทนความหนาแน่นของกำลังงานและความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามลำดับ r_1 แทนระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และ r_2 แทนระยะทางที่ห่างออกไปจากแหล่งกำเนิด ซึ่งมีค่าเป็น P_2 และ E_2 เมื่อนำตัวแปรต่างๆ มาแทนลงในสมการการลดทอนของกำลังงานที่ระยะไกลเทียบกับระยะใกล้จะได้ดังนี้

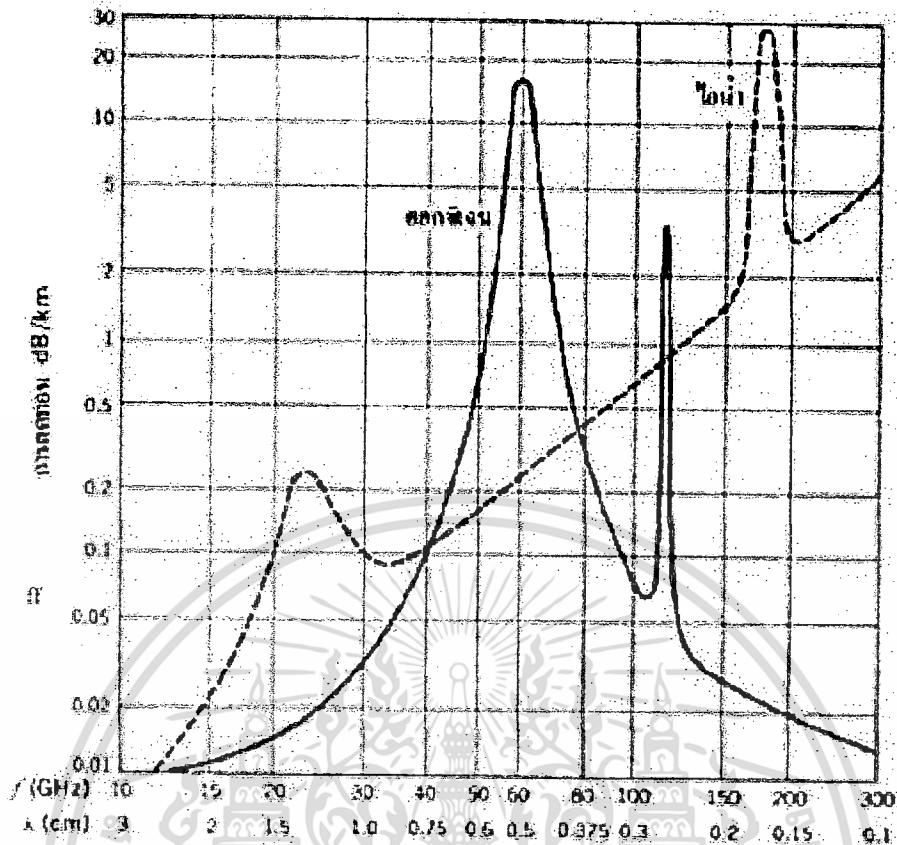
$$\alpha_p = 10 \log \frac{P_1}{P_2} = 10 \log \frac{P_1/4\pi r_1^2}{P_2/4\pi r_2^2} = 10 \log \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \quad (2.8)$$

เมื่อนำค่าที่ได้ดังกล่าวไปใช้ประกอบการคำนวณการลดทอนความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะได้ดังนี้

$$\alpha_E = 20 \log \frac{\sqrt{30P_1}/r_1}{\sqrt{30P_2}/r_2} = 20 \log \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \quad (2.9)$$

จะเห็นได้ว่าทั้งสมการที่ 2.8 และ 2.9 มีรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน และในระยะที่ห่างออกไปจากแหล่งกำเนิดสองเท่า (2r) จะเห็นได้ว่าทั้งความหนาแน่นของกำลังงานและความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเท่ากับ 6 เดซิเบล เมื่อนำค่าดังกล่าวไปเทียบกับระยะห่างจากแหล่งกำเนิดปกติ (r) ในอวกาศว่าง ซึ่งไม่มีสิ่งใดดูดกลืนคลื่นวิทยุ แต่ในชั้นบรรยากาศสัณฐานวิทยุจะถูกดูดกลืนได้ เนื่องจากพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกถ่ายโอนไปเป็นอะตอมและโมเลกุลของชั้นบรรยากาศ ซึ่งการถ่ายโอนนี้จะส่งผลให้อะตอมและโมเลกุลที่จับกันเป็นพันธะเกิดการสั่นสะเทือนได้ แต่ในขณะที่ชั้นบรรยากาศมีความอบอุ่นอัตราการดูดกลืนคลื่นวิทยุจะมีอยู่น้อยมาก และถ้าหากส่งสัญญาณคลื่นวิทยุออกไปในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 10 GHz อัตราการดูดกลืนคลื่นวิทยุของชั้นบรรยากาศจะมีอยู่น้อยมากหรือแทบไม่มีอยู่เลย ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยทั่วไปแล้วการดูดกลืนคลื่นวิทยุที่เกิดจากออกซิเจนและไอน้ำในชั้นบรรยากาศจะเริ่มส่งผลกระทบต่อเมื่อมีการส่งสัญญาณในย่านความถี่สูง และในบางย่านความถี่จะมีอัตราการดูดกลืนคลื่นวิทยุที่สูงมากเนื่องจากเกิดการเรโซแนนซ์กัน (Resonance) ของโมเลกุลในชั้นบรรยากาศ และมักพบในย่านความถี่ 60 GHz และ 120 GHz จากการศึกษาและทดลองในอดีตพบว่าการดูดกลืนคลื่นวิทยุจากออกซิเจนนั้นมักพบในย่านความถี่ช่วง 33 GHz ถึง 110 GHz ส่วนการดูดกลืนคลื่นวิทยุจากไอน้ำมักพบในย่านความถี่ช่วง 23 GHz ถึง 180 GHz ซึ่งย่านความถี่ดังกล่าวไม่เหมาะสมกับการแพร่กระจายคลื่นเป็นอย่างมาก ยกเว้นในกรณีที่สภาพอากาศในบริเวณนั้นแห้งมาก

รูปที่ 2.4 แสดงการดูดกลืนในชั้นบรรยากาศโดยจำแนกออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนของการดูดกลืนคลื่นวิทยุที่เกิดจากไอน้ำและการดูดกลืนคลื่นวิทยุจากออกซิเจน โดยในที่นี้จะเน้นอธิบายการดูดกลืนคลื่นวิทยุที่เกิดจากไอน้ำเป็นสำคัญ เนื่องจากส่งผลกระทบต่อทั้งการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุมากกว่าการดูดกลืนจากออกซิเจน โดยค่าความชื้นที่ใช้ในการทดลองเป็นค่าความชื้นมาตรฐาน แต่ความชื้นภายในชั้นบรรยากาศก็สามารถเพิ่มขึ้นได้ ในกรณีที่เกิดมีหมอก ฝน หรือหิมะ โดยปริมาณของเม็ดฝนนั้นจะส่งผลกระทบต่อทั้งการดูดกลืนคลื่นวิทยุสูงที่สุด ดังตัวอย่างเช่น ระบบเรดาร์ที่ส่งสัญญาณด้วยความถี่ 10GHz สามารถตรวจสอบพื้นที่ได้ดีในระยะ 75 กิโลเมตร ในสภาวะอากาศแห้งมาก แต่จะลดลงเหลือ 68 กิโลเมตร 22 กิโลเมตร และ 8 กิโลเมตร เมื่อมีฝนตกปรอยๆ ฝนตกพอประมาณ และฝนตกหนัก ตามลำดับ จากตัวอย่างต้องการแสดงให้เห็นถึงผลกระทบจากการดูดกลืนคลื่นความถี่ในย่าน ไมโครเวฟ แต่การดูดกลืนคลื่นวิทยุโดยทั่วไปแล้วจะเกิดขึ้นน้อยมาก สำหรับการส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำ ยกเว้นจะเป็นการส่งในระยะทางที่ไกลมากๆ



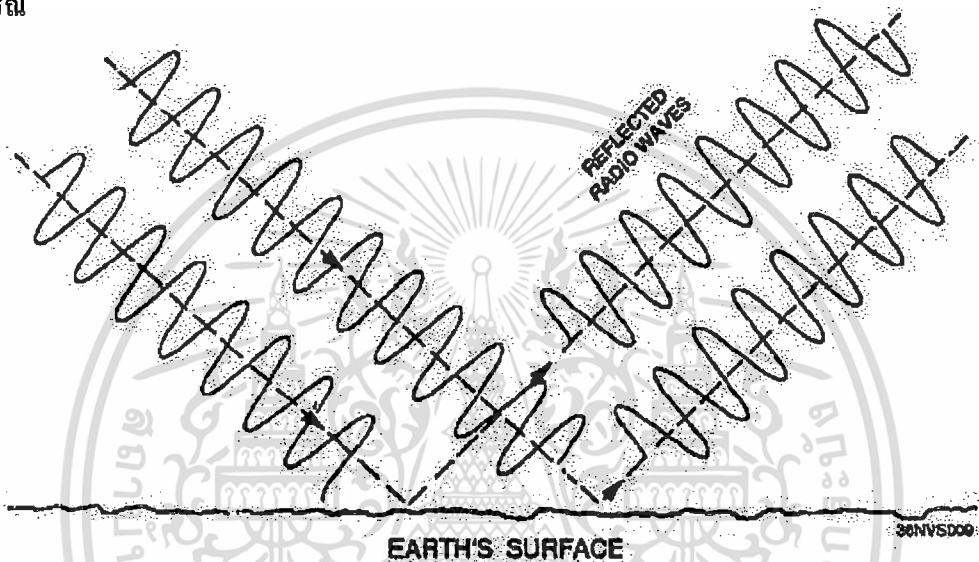
รูปที่ 2.4 แสดงการลดทอนและดูดกลืนคลื่นวิทยุในชั้นบรรยากาศจากออกซิเจนและไอน้ำ

2.1.2.2 การสะท้อนของคลื่น (Reflection)

การสะท้อนของคลื่นอาจเกิดจากการไปกระทบกับสสารหรือวัตถุระหว่างการเดินทางที่จากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ โดยปริมาณของการสะท้อนจะขึ้นอยู่กับพื้นผิวและชนิดของวัตถุแต่ละประเภท เช่น แผ่นโลหะที่มีพื้นผิวเรียบ จะส่งผลก่อให้เกิดการสะท้อนของคลื่นเป็นอย่างมาก เนื่องจากวัสดุชนิดนี้มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าสูง หรือแม้แต่พื้นผิวโลกก็ส่งผลก่อให้เกิดการสะท้อนของคลื่นได้เช่นเดียวกัน โดยทั่วไปคลื่นจะไม่เกิดการสะท้อน ณ จุดๆ เดียวบนวัตถุ แต่จะมีการกระจายการสะท้อนไปทั่วพื้นผิวของวัตถุนั้น นอกจากการสะท้อนของคลื่นจะขึ้นอยู่กับพื้นผิวและชนิดของวัตถุแล้ว ยังมีอีก 2 ปัจจัยที่สำคัญคือ ขนาดความยาวคลื่น (Wave length) และมุมตกกระทบ (angle) ของคลื่นบนพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งจะส่งผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการสะท้อนของคลื่น

เมื่อคลื่นเกิดการสะท้อนบนวัตถุที่มีพื้นผิวเรียบ จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนเฟส (Phase) ขึ้น ดังรูปที่ 2.5 แสดงการสะท้อนของคลื่นสองลูกบนพื้นผิวโลก โดยทั่วไปการเปลี่ยนเฟสของคลื่นจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมประมาณ 180 องศา แต่ปริมาณดังกล่าวก็จำเป็นต้องไม่คงที่เสมอไป เนื่องจากการเปลี่ยนเฟสของคลื่นนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของหน้าคลื่นและมุมตกกระทบบนพื้นผิวของวัตถุด้วย ซึ่งการสะท้อนของคลื่นมีความคล้ายคลึงกับการสะท้อนของแสงผ่านกระจก

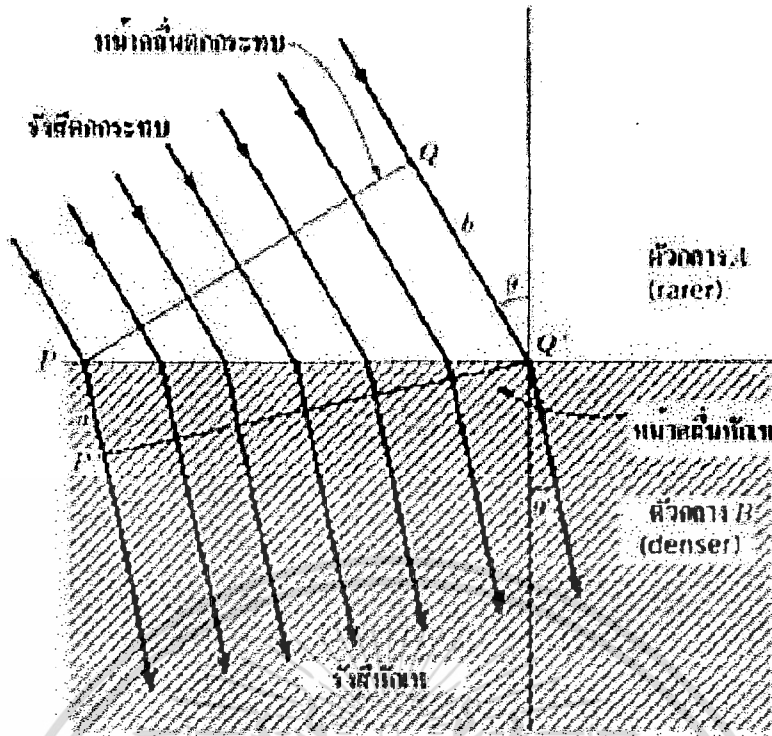
มาก ตัวอย่างเช่น หากเข้าไปในร้านตัดผมที่มีกระจกทั้งด้านหน้าและด้านหลัง จะส่งผลให้เห็นภาพซ้อนกันเป็นจำนวนมาก แต่ถ้าสังเกตให้ดีถ้ามองก็จะสามารถมองเห็นภาพเหล่านั้นได้ แต่ภาพดังกล่าวก็จะค่อยๆ ลดความสว่างลง เนื่องจากเกิดการดูดกลืนในการสะท้อนแต่ละครั้ง เช่นเดียวกันกับคลื่นวิทยุ ต่อมาจึงได้มีการกำหนดสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนขึ้น (ρ) เป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้าของคลื่นสะท้อนต่อคลื่นที่ตกกระทบ หากพื้นผิวตัวนำก่อให้เกิดการสะท้อนที่สมบูรณ์ ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับ 1 แต่โดยทั่วไปแล้วค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนจะมีค่าน้อยกว่า 1 ในทางปฏิบัติ อันเป็นผลมาจากการดูดกลืนพลังงานของคลื่น โดยตัวนำที่ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 2.5 แสดงการสะท้อนของคลื่นบนพื้นผิวโลก

2.1.2.3 การหักเหของคลื่น (Refraction)

การหักเหของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถือเป็นอีกหนึ่งปรากฏการณ์ที่พบมากที่สุดในการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นแพร่กระจายผ่านตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน และด้วยความเร็วของคลื่นจึงส่งผลทำให้หน้าคลื่นเกิดการเปลี่ยนแนวในตัวกลางใหม่ จากรูปที่ 2.6 กำหนดให้ตัวกลาง A มีความหนาแน่นน้อยกว่าตัวกลาง B เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง A ไปยังตัวกลาง B ด้วยมุมที่มีไซ้ 90 องศาตามหน้าคลื่น P-Q และเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง B จึงส่งผลให้คลื่นเปลี่ยนแนวเป็น P'-Q' นอกจากนั้นรังสี b ก็จะเดินทางด้วยความเร็วในตัวกลาง A ได้ระยะทาง Q-Q' ในขณะที่เดียวกันรังสี a ก็จะเดินทางด้วยความเร็วในตัวกลาง B ได้ระยะทาง P-P' ซึ่งจะเห็นได้ว่าระยะทาง P-P' จะสั้นกว่า Q-Q' เนื่องจากความเร็วคลื่นที่เกิดในตัวกลาง B นั้นช้ากว่าความเร็วคลื่นที่เกิดในตัวกลาง A



รูปที่ 2.6 แสดงการหักเหของคลื่น

ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบ (θ) กับมุมหักเห (θ') สามารถคำนวณได้ โดยอาศัยทฤษฎีทางตรีโกณมิติและเรขาคณิตเบื้องต้น โดยให้ทำการพิจารณาจากสามเหลี่ยมมุมฉาก PQQ' และ $PP'Q'$ จะได้เป็น

$$QPQ' = \theta \text{ และ } P'Q'P = \theta' \quad (2.10)$$

$$\frac{\sin \theta'}{\sin \theta} = \frac{PP'/P'Q'}{PQ'/PQ} = \frac{V_B}{V_A} \quad (2.11)$$

เมื่อ V_A คือ ความเร็วของคลื่นในตัวกลาง A = $\frac{V_c}{\sqrt{K}}$ และ V_B คือ ความเร็วของคลื่นในตัวกลาง B = $\frac{V_c}{\sqrt{K'}}$

$$\frac{\sin \theta'}{\sin \theta} = \sqrt{\frac{K}{K'}} = \frac{1}{\mu} \quad (2.12)$$

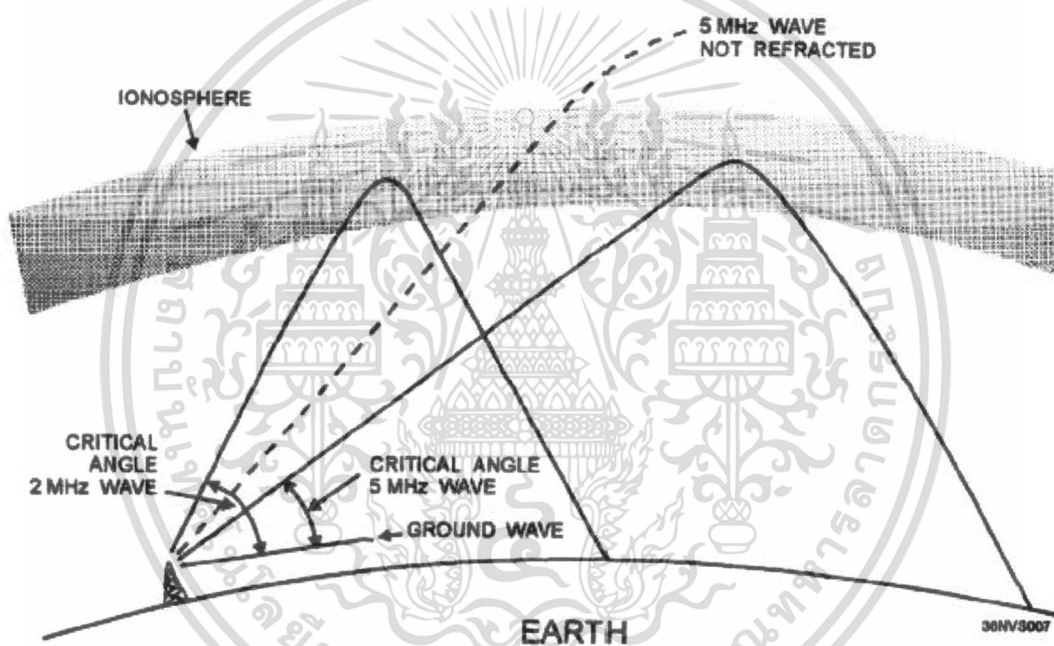
เมื่อ K คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในตัวกลาง A

K' คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในตัวกลาง B

μ คือ ดัชนีการหักเห

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric) ในสูญญากาศจะมีค่าเท่ากับ 1 แต่สำหรับอากาศโดยทั่วไปบนโลกจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับ 1 เท่านั้น โดยมีเงื่อนไขคือ รอยต่อระหว่างตัวกลางจะต้องมีความหนาแน่นที่แตกต่างกันทันที ดังรูปที่ 2.6 แต่ถ้าความหนาแน่นระหว่างรอยต่อของตัวกลางค่อยๆ เปลี่ยนแปลงไปและเป็นลักษณะเชิงเส้น การหักเหของคลื่นก็จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง และภายในชั้นบรรยากาศของโลกความหนาแน่นของตัวกลางก็จะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงไปแบบเชิงเส้น โดยที่ความหนาแน่นของชั้นบรรยากาศที่อยู่สูงกว่าจะมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าชั้นบรรยากาศด้านล่าง ส่งผลให้คลื่นที่อยู่ในชั้นบรรยากาศที่สูงกว่าสามารถเดินทางได้รวดเร็วกว่าชั้นบรรยากาศด้านล่าง และทำให้การหักเหของคลื่นมีลักษณะ โค้งลงแทนที่จะพุ่งออกไปเป็นเส้นตรงจากเหตุผลที่กล่าวมาในข้างต้น ทำให้การรับส่งคลื่นวิทยุในปัจจุบัน จึงนิยมส่งกันในรูปแบบแนวอนมากกว่าแนวตั้งนั่นเอง



รูปที่ 2.7 แสดงการหักเหของคลื่นภายในชั้นบรรยากาศโลก

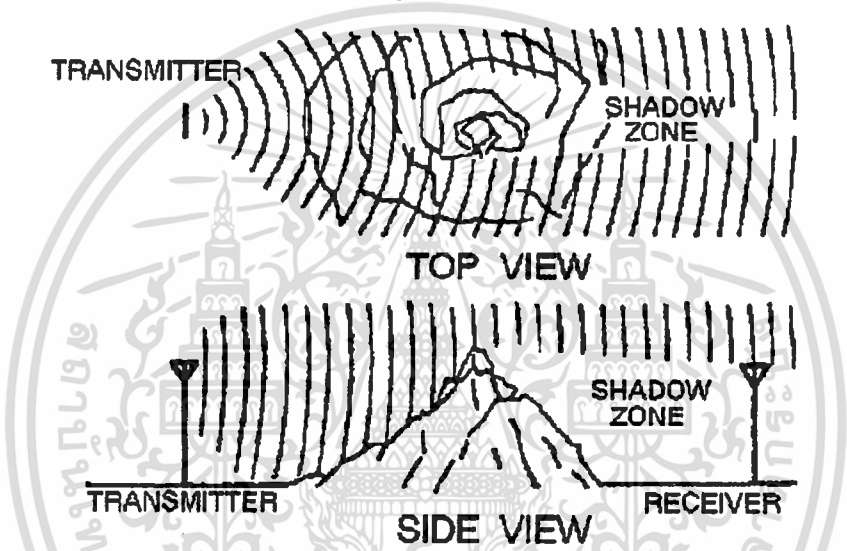
2.1.2.4 การเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction)

การเลี้ยวเบนของคลื่นถือเป็นคุณสมบัติหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมักเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่แคบบนระนาบของตัวนำหรือมุมของสิ่งกีดขวางวิถีคลื่น ซึ่งนาย Huygens ได้ค้นพบทฤษฎีการเลี้ยวเบนของคลื่นได้ในช่วงศตวรรษที่ 17 โดยเขากล่าวว่า ทุกๆ จุดบนหน้าคลื่นรูปทรงกลมถือเป็นแหล่งกำเนิดทุติยภูมิที่ทำให้คลื่นแพร่กระจายออกไปได้ไกล ซึ่งคลื่นที่แพร่กระจายออกจากแหล่งกำเนิดทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับผลรวมทางเวกเตอร์ของจุดกำเนิดทุติยภูมิ แม้ในกรณีที่หน้าคลื่นมีลักษณะเป็นแนวระนาบ แหล่งกำเนิดทุติยภูมิก็ยังคงมีอยู่เช่นเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่จะต้องมีการจำกัดระนาบของคลื่นที่แพร่กระจายออกไปจากแหล่งกำเนิด เพื่อไม่ให้เกิดการหักล้างกันของคลื่นหมดไปเสียทีเดียว และคงเหลือเฉพาะคลื่นในทิศทางเดิมอยู่เท่านั้น

สำหรับในกรณีที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวาง ดังรูปที่ 2.8 เมื่อหน้าคลื่นกระทบกับมุมของสิ่งกีดขวางจะก่อให้เกิดการเลี้ยวเบน ซึ่งปกติถ้าหากไม่มีสิ่งกีดขวางเวกเตอร์ของหน้าคลื่นอื่นก็จะทำการหักล้างกันกับคลื่นที่ส่งออกไป และสุดท้ายก็จะคงเหลือแต่หน้าคลื่นเดิมเท่านั้น การเลี้ยวเบนของคลื่นนั้นมีประโยชน์อย่างมากในทางปฏิบัติ 2 ประการ ได้แก่ ประการที่หนึ่ง ทำให้เครื่องรับซึ่งตั้งอยู่หลังสิ่งกีดขวาง เช่น ภูเขา ตึกสูงระฟ้า สามารถรับคลื่นอากาศ (Space wave) ที่เครื่องส่งส่งออกไปได้ และประการที่สอง ทฤษฎีการเลี้ยวเบนของคลื่นได้ถูกนำไปใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบสายอากาศไมโครเวฟ เพื่อลดพูข้าง (Side lobes) ที่ไม่ต้องการได้



รูปที่ 2.8 แสดงการเลี้ยวเบนของคลื่นเมื่อกระทบกับสิ่งกีดขวาง

2.1.2.5 การแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference)

การสูญเสียกำลังสัญญาณมิได้เกิดขึ้นจากปัจจัยด้านการแทรกสอดในการติดต่อสื่อสารเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลกระทบต่อ การสูญเสียกำลังสัญญาณร่วมด้วย คือ การแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference: EMI) ซึ่งการแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผลให้สัญญาณคลื่นวิทยุที่ส่งออกไปถูกรบกวนหรือทำให้สภาวะแวดล้อมในบริเวณนั้นไม่เหมาะสมต่อการรับส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ โดยแหล่งกำเนิดของการแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ การแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์สร้างขึ้น และการแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ

1. การแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์สร้างขึ้น

การแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์สร้างขึ้นสามารถเกิดขึ้นได้ในหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น เกิดขึ้นจากกลไกทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานบนหลักการของการแกว่งตัว (Oscillator) เกิดขึ้นจากการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง และเกิดขึ้นจาก

อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องรับและเครื่องส่ง ซึ่งมักเกิดจากความผิดพลาดในการออกแบบส่วนของกลไกการถ่ายทอดพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ โดยในเครื่องใช้ไฟฟ้าบางประเภทจะมีคุณสมบัติในการจะถ่ายทอดพลังงานคลื่นความถี่วิทยุออกมาได้ แม้ว่าอุปกรณ์ดังกล่าวจะไม่ได้ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อจุดประสงค์นี้ก็ตาม เช่น ระบบการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องถ่ายทอดสัญญาณไฟฟ้า สวิตซ์ไฟฟ้า และเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้า ซึ่งความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามักจะส่งผลกระทบอย่างมากสำหรับการติดต่อสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุในช่วงเวลากลางวัน แต่ก็มักจะค่อยๆ ลดความรุนแรงลงจนอยู่ในระดับที่ต่ำมากในช่วงเวลากลางคืน ในปัจจุบันการแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์สร้างขึ้นได้กลายเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมากสำหรับติดต่อสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เครื่องรับถูกติดตั้งอยู่ใกล้กับเขตอุตสาหกรรม

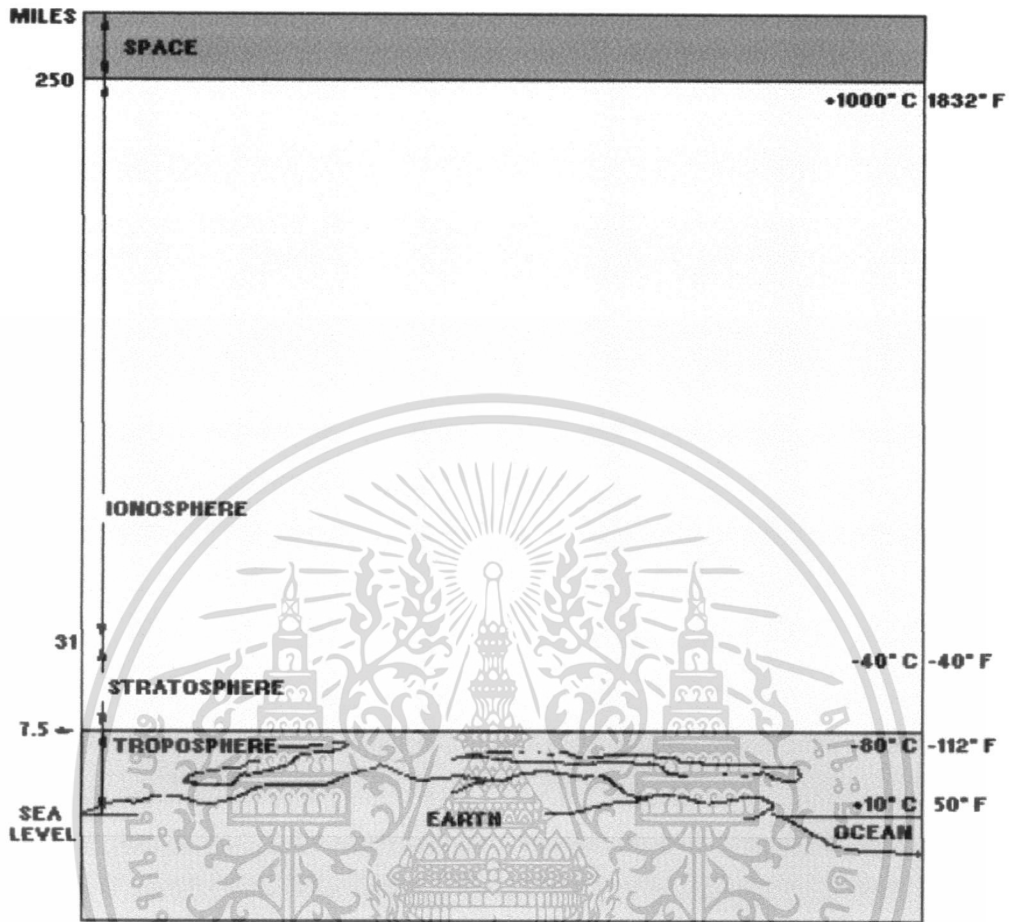
2. การแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ

การแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มักเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า พายุหิมะ การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ โดยการปลดปล่อยพลังงานจากแหล่งกำเนิดทางธรรมชาติแต่ละรูปแบบจะก่อให้เกิดปัญหาในการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุไปยังเครื่องรับเป็นอย่างมาก และด้วยเหตุที่สภาพของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความเหมาะสมกับการแพร่กระจายคลื่นวิทยุออกไปครอบคลุมพื้นที่ได้กว้างขวางแล้ว ก็ยังจะเหมาะสมกับการแพร่กระจายของการแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติอีกด้วย เนื่องจากคุณสมบัติของคลื่นทั้งสองแบบมีความคล้ายคลึงกันมากและสามารถที่จะแพร่กระจายได้คืบหน้าตัวกลางชนิดเดียวกัน การแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามธรรมชาตินั้นจะมีปริมาณที่ไม่แน่นอน โดยเฉพาะในย่านความถี่สูง แต่โดยทั่วไปแล้วอัตราการแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจะลดลงเมื่อย่านความถี่ (Frequency band) และความกว้างของช่องสัญญาณ (Bandwidth) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งการแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจะเริ่มเบาบางลงและไม่ส่งผลกระทบกับการรับส่งสัญญาณคลื่นวิทยุที่ต่อเนื่องเมื่อใช้ย่านความถี่ที่สูงกว่า 30 MHz ในการรับส่งสัญญาณระหว่างกัน

2.1.3 ผลกระทบของชั้นบรรยากาศบนโลกต่อคลื่นวิทยุ

ในส่วนนี้จะเป็นการพูดถึงผลกระทบของชั้นบรรยากาศต่อการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะมุ่งเน้นพิจารณาในส่วนของคุณสมบัติและผลกระทบจากตัวกลางที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง เพราะแม้ว่าคลื่นวิทยุถูกที่แพร่อยู่ในอวกาศว่างก็ยังมีโอกาสที่จะได้รับผลกระทบจากชั้นบรรยากาศ แม้มีโอกาที่จะเกิดขึ้นน้อยมากก็ตาม เมื่อลองพิจารณาในทางปฏิบัติจะพบว่าคลื่นวิทยุที่แพร่กระจายอยู่ในชั้นบรรยากาศโลก มักได้รับผลกระทบมาจากหลายปัจจัยด้วยกัน ซึ่งแต่ละปัจจัยต่างก็มีความซับซ้อนสูงและยากต่อการนำมาพิจารณาในรายละเอียด โดยสาเหตุหลักของความซับซ้อนนั้นเกิดขึ้นมาจากความแตกต่างกันของชั้นบรรยากาศ

โลก ซึ่งแปรผันตามระดับความสูง สภาพภูมิประเทศ และสภาพภูมิอากาศในระหว่างวัน จากเงื่อนไขดังกล่าวทำให้สามารถจำแนกชั้นบรรยากาศบนโลกออกเป็น 3 ระดับ ได้ดังนี้



รูปที่ 2.9 แสดงระดับชั้นบรรยากาศของโลก

1. โทรโปสเฟียร์ (Troposphere) เป็นชั้นบรรยากาศที่มีระยะห่างจากพื้นผิวโลกประมาณ 6 กิโลเมตร เมื่อนับจากขั้วโลกหรือขั้วโลกใต้ และมีระยะห่างจากเส้นศูนย์สูตรประมาณ 18 กิโลเมตร โดยปรากฏการณ์ทางอากาศ เช่น ฝนตก ฟ้าผ่า หิมะตก มักเกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศนี้ อีกทั้งอุณหภูมิภายในชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์จะลดลงอย่างรวดเร็วตามระดับความสูง รูปแบบการก่อตัวของกลุ่มเมฆ และการเคลื่อนตัวอย่างผิดปกติภายในชั้นบรรยากาศ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความหนาแน่น และความดันในชั้นบรรยากาศ ซึ่งปรากฏการณ์ต่างๆ ที่ได้กล่าวในข้างต้นล้วนมีผลกระทบต่อการแพร่กระจายสัญญาณคลื่นวิทยุในชั้นบรรยากาศอย่างมาก

2. สตราโทสเฟียร์ (Stratosphere) เป็นชั้นบรรยากาศที่อยู่ระหว่างโทรโปสเฟียร์และไอโอโนสเฟียร์ โดยอุณหภูมิภายในชั้นบรรยากาศนี้ค่อนข้างจะคงที่ รวมทั้งยังมีละอองไอน้ำบางๆ ปกคลุมชั้นบรรยากาศอยู่ด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าชั้นบรรยากาศสตราโทสเฟียร์ส่งผลกระทบต่อ การแพร่กระจายสัญญาณคลื่นวิทยุ น้อยมาก เนื่องจากคุณสมบัติของชั้นบรรยากาศที่ไม่ค่อยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างนัก

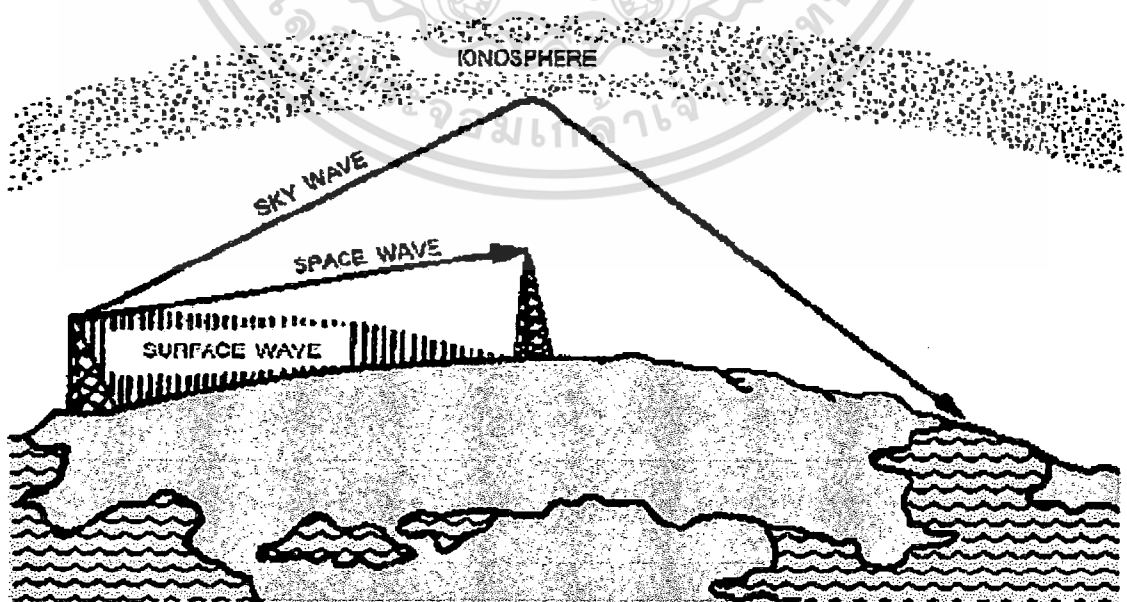
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) เป็นชั้นบรรยากาศที่มีระยะห่างจากพื้นผิวโลกประมาณ 50 ถึง 402 กิโลเมตร โดยภายในชั้นบรรยากาศจะประกอบไปด้วย 4 ระดับชั้นย่อยๆ ที่จะทำหน้าที่คอยกักเก็บประจุไฟฟ้า เพื่อให้สัญญาณคลื่นวิทยุสามารถแพร่กระจายออกไปได้ครอบคลุมทั่วทุกพื้นที่บนโลก ซึ่งชั้นบรรยากาศนี้ถือเป็นชั้นบรรยากาศที่มีความสำคัญที่สุดในการรับส่งสัญญาณคลื่นวิทยุและยังช่วยทำให้การสื่อสารแบบจุดต่อจุด (Point-to Point communication) สามารถรับส่งสัญญาณกันได้ในไกลมากยิ่งขึ้นอีกด้วย

2.1.4 การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

คลื่นวิทยุที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศนั้น จะมีการแพร่กระจายออกไปในทุกทิศทาง ซึ่งคลื่นวิทยุถือเป็นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเดินทางไปได้ด้วยความเร็วเทียบเท่ากับความเร็วแสง อย่างไรก็ตามคลื่นวิทยุในแต่ละย่านความถี่ก็จะมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่เท่ากัน โดยในพื้นที่ที่ห่างไกลออกไปจากสถานีส่งคลื่นวิทยุ กำลังสัญญาณในฝั่งรับที่รับได้จะอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกำลังของฝั่งส่ง และจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะห่างจากสถานีส่งคลื่นวิทยุเพิ่มมากขึ้น ฉะนั้นเครื่องรับที่อยู่ใกล้เครื่องส่งมากกว่า ย่อมได้รับสัญญาณที่แรงและคุณภาพดีกว่าเครื่องรับที่อยู่ห่างออกไปจากเครื่องส่ง โดยจะมีการแบ่งประเภทของคลื่นตามลักษณะการเดินทางออกได้เป็น 3 ประเภท คือ คลื่นดิน (Ground wave) คลื่นฟ้า (Sky wave) และคลื่นอวกาศ (Space wave) ซึ่งการเดินทางของคลื่นแต่ละประเภทนี้จะแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง และการจะนำคลื่นวิทยุดังกล่าวไปใช้ประโยชน์นั้น ผู้ใช้จำเป็นที่จะต้องเลือกย่านความถี่และรูปแบบการเดินทางของคลื่นให้เหมาะสมกับการใช้งาน เพื่อให้คลื่นวิทยุสามารถเดินทางจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับได้ โดยมีการลดทอนของกำลังสัญญาณน้อยที่สุด



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการเดินทางของคลื่นวิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้จัดทำเห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

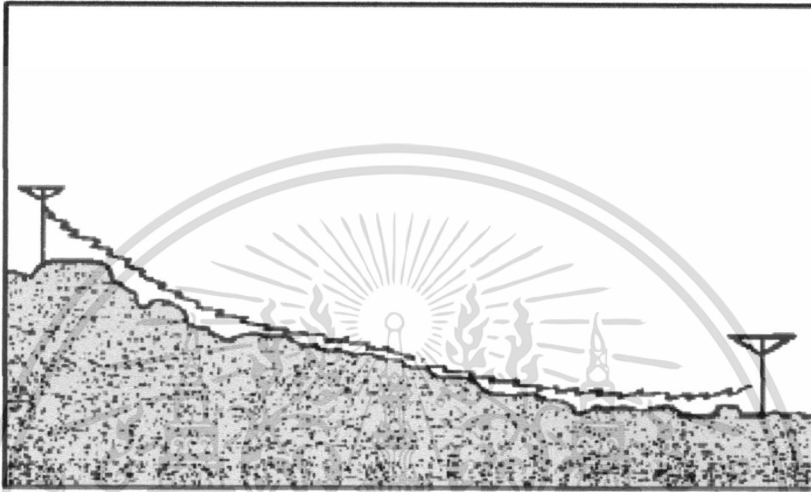
2.1.4.1 คลื่นดิน (Ground wave)

คลื่นดินเป็นคลื่นวิทยุที่จะเดินทางไปบนพื้นผิวของโลก ซึ่งบางครั้งก็มักจะเรียกว่าคลื่นพื้นผิว (Surface wave) โดยคลื่นดินมักจะถูกนำไปใช้ในการติดต่อสื่อสารเป็นส่วนใหญ่ และด้วยคุณสมบัติของคลื่นดินที่มีความยาวคลื่นมาก (ส่งสัญญาณออกไปในย่านความถี่ต่ำ) จึงส่งผลให้คลื่นประเภทนี้สามารถเดินทางไปได้ไกล แต่ถ้าหากเป็นคลื่นดินที่มีการส่งสัญญาณออกไปในย่านความถี่สูง การเดินทางของคลื่นอาจจะไปได้ไม่ไกลนักเมื่อเทียบกับการส่งสัญญาณออกไปในย่านความถี่ต่ำ เนื่องจากสัญญาณจะถูกลดทอนกำลังลงอย่างมากจากสภาวะแวดล้อมและสิ่งกีดขวางต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ โดยสาเหตุของการลดทอนกำลังสัญญาณนั้น เกิดขึ้นจากการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุออกไปในย่านความถี่สูง ซึ่งส่งผลให้ความยาวของคลื่นที่ส่งออกไปมีขนาดที่สั้นลง และเมื่อไปกระทบกับวัตถุหรือสิ่งกีดขวางที่มีขนาดใหญ่ เช่น ภูเขา กำแพง ตึก ก็จะทำให้ส่งผลกระทบต่อการแพร่กระจายคลื่นวิทยุได้ ยกตัวอย่างเช่น สมมติให้ย่านความถี่ 30 KHz มีความยาวคลื่นเท่ากับ 10 กิโลเมตร เมื่อเดินทางไปกระทบกับภูเขาที่มีความกว้างเฉลี่ยเท่ากับ 5 กิโลเมตร จึงส่งผลให้เกิดการลดทอนของคลื่นวิทยุ แต่จะส่งผลกระทบต่อขนาดน้อยมาก เนื่องจากความกว้างของภูเขามีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่น ทำให้คลื่นวิทยุสามารถเดินทางผ่านไปได้โดยปราศจากการถูกลดทอนกำลังสัญญาณ แต่ถ้าหากเปลี่ยนย่านความถี่ในการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุเป็น 3 MHz จะส่งผลให้ความยาวคลื่นมีขนาดที่สั้นลงเหลือ 100 เมตร และถ้าหากเดินทางไปกระทบกับภูเขาสูง เดียวกันหรือสิ่งกีดขวางชนิดอื่นที่มีความยาวคลื่นมากกว่า เช่น ต้นไม้ เนินเขา ตึกรามบ้านช่อง ส่งผลให้คลื่นดังกล่าวถูกลดทอนกำลังสัญญาณจนหมดก่อนจะเดินทางไปถึงเครื่องรับ และทำให้การติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ส่งและผู้รับไม่สมบูรณ์ในที่สุด จากตัวอย่างที่ได้กล่าวในข้างต้น จึงเป็นข้อสรุปที่ว่า การส่งสัญญาณคลื่นดินในย่านความถี่ต่ำ นอกจากจะช่วยให้สามารถส่งสัญญาณคลื่นวิทยุออกไปครอบคลุมพื้นที่ได้ไกลกว่าการส่งสัญญาณคลื่นดินออกไปในย่านความถี่สูงแล้ว ยังจะช่วยให้โอกาสที่จะถูกลดทอนกำลังสัญญาณจากสภาวะแวดล้อมหรือสิ่งกีดขวางที่เกิดขึ้นระหว่างทางจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับลดน้อยลงไปด้วย

จากข้อจำกัดของคลื่นดินสำหรับการส่งสัญญาณในย่านความถี่สูงที่ไม่สามารถแพร่กระจายออกไปครอบคลุมพื้นที่ได้กว้างขวางมากนัก จึงทำให้มีผู้คิดค้นวิธีการในการลดข้อจำกัดดังกล่าวขึ้น ซึ่งทำได้โดยให้ทำการแพร่กระจายคลื่นที่มีโพลาไรเซชันในแนวตั้ง (Vertical polarization) เพราะถ้าหากแพร่กระจายคลื่นที่มีโพลาไรเซชันในแนวราบออกไป (Horizontal polarization) จะส่งผลให้สนามไฟฟ้าเกิดขึ้นขนานกับผิวโลก และทำให้คลื่นที่ถูกแพร่กระจายออกไปเกิดปฏิกิริยาเสมือนถูกดูดกลืนด้วยความนำไฟฟ้า (Conductivity) ของพื้นผิวโลก อย่างไรก็ตามเรายังสามารถใช้ประโยชน์จากคลื่นดินได้ สำหรับการส่งสัญญาณในย่านความถี่ต่ำ (Low frequency) และในย่านความถี่ปานกลาง (Medium frequency) ด้วยสาเหตุนี้ ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของความยาวคลื่นในการรับส่งสัญญาณที่เกิดขึ้นมีสูงมาก และส่งผลให้สายอากาศที่ติดตั้งอยู่ที่เครื่องรับและเครื่องส่งก็จำเป็นที่จะต้องมีความถี่ใหญ่ตามไปด้วย (ขนาดของสายอากาศจะแปรผันตรงกับขนาดของความยาวคลื่น) จากเหตุผลดังกล่าว การสื่อสารในย่านความถี่ต่ำจึงไม่ค่อยได้รับความนิยมมากนัก แต่สำหรับในย่านความถี่ปานกลาง ยังคงมีการนำมาใช้ในการติดต่อสื่อสารผ่านคลื่นดินอยู่บ้าง เนื่องจากขนาดของสายอากาศในย่านความถี่นี้จะมีขนาดที่ไม่ใหญ่มากนักและสามารถที่นำไปติดตั้งบนอุปกรณ์เครื่องรับและเครื่องส่งได้



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะการเดินทางของคลื่นดิน

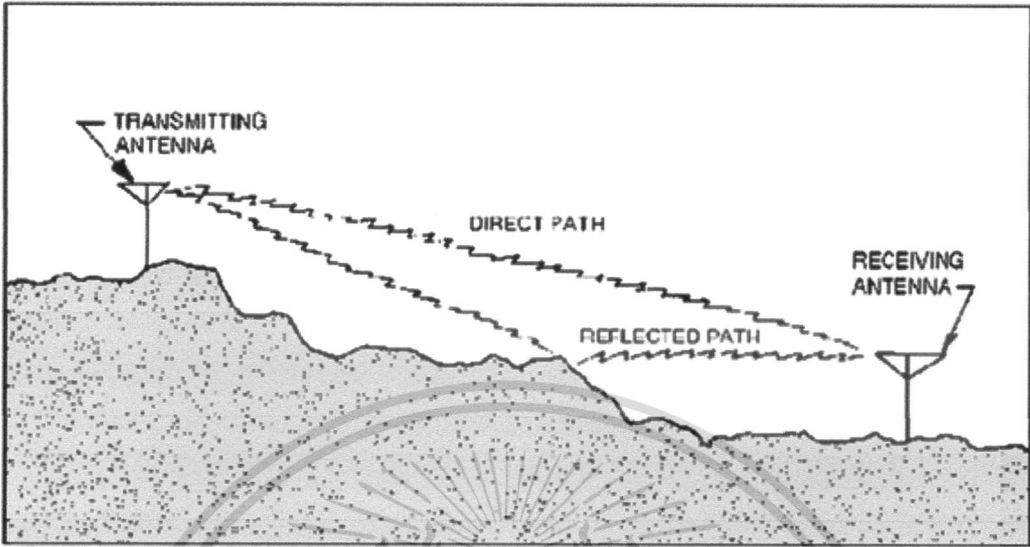
2.1.4.2 คลื่นอวกาศ (Space wave)

เมื่อย่านความถี่ของคลื่นวิทยุที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณเริ่มสูงกว่า 4.5 MHz ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของคลื่นดินก็จะค่อยๆ ลดลง จนสามารถเดินทางไปได้เพียงไม่กี่กิโลเมตรเท่านั้น และเมื่อความถี่สูงขึ้นจนถึงย่าน VHF (Very high frequency) และ UHF (Ultra-high frequency) คลื่นอวกาศจะมีความสามารถในการแพร่กระจายที่สูงกว่าคลื่นดินอย่างเห็นได้ชัด และทำให้การติดต่อสื่อสารในย่านความถี่นี้ สายอากาศของทั้งสถานีรับและสถานีส่งจะต้องอยู่ในระนาบเดียวกันหรืออยู่ในระดับสายตา (Line of sight: LOS) เท่านั้น เนื่องจากลักษณะการเดินทางของคลื่นอวกาศจะเป็นแนวเส้นตรง จนบางครั้งจะเราอาจเรียกคลื่นอวกาศว่าคลื่นโดยตรง (Direct wave) และจากข้อจำกัดของคลื่นอวกาศที่อนุญาตให้รัศมีการติดต่อสื่อสารอยู่ไม่เกินระดับสายตา ทำให้ประสบกับปัญหาในการแพร่กระจายคลื่นวิทยุให้ครอบคลุมพื้นที่ได้อย่างกว้างขวาง นักวิชาการจึงพยายามหาทวิวิธีในการลดข้อจำกัดดังกล่าว ซึ่งเขาพบว่าถ้าหากต้องการจะขยายการติดต่อสื่อสารให้ครอบคลุมพื้นที่ได้ไกลมากขึ้น วิธีการที่ง่ายที่สุด คือ ทำการเพิ่มความสูงของสถานีฐานหรือสายอากาศ โดยการติดต่อสื่อสารผ่านคลื่นอวกาศที่ได้รับความนิยมมากที่สุดรูปแบบหนึ่ง คือ การติดต่อสื่อสารผ่านดาวเทียมหรือเครื่องบิน ซึ่งวิธีการติดต่อสื่อสารในรูปแบบนี้จำเป็นต้องอาศัยความสูงของสถานีฐานและสายอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อให้รัศมีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดต่อสื่อสารสามารถครอบคลุมไปได้ไกลมากขึ้นในย่านความถี่ VHF UHF รวมทั้งย่านความถี่ที่สูงกว่า



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะการเดินทางของคลื่นอวกาศ

2.1.4.3 คลื่นฟ้า (Sky wave)



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะการเดินทางของคลื่นฟ้า

เหนือพื้นผิวโลกขึ้นไปประมาณ 50 ถึง 400 กิโลเมตร การแผ่กระจายของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet: UV) จากดวงอาทิตย์ จะส่งผลให้อนุภาคของก๊าซในชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลกเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) ทำให้ภายในชั้นบรรยากาศเกิดประจุบวก ประจุลบ รวมทั้งอิเล็กตรอนอิสระอยู่มากมาย ชั้นบรรยากาศที่ถูกรังสีอัลตราไวโอเล็ตแล้วก่อให้เกิดอนุภาคไอออนนี้ เรียกว่าชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางเข้าสู่ชั้นบรรยากาศนี้จะถูกหักเห (Refraction) เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งวนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการสื่อสารเท่านั้น เมื่อนุภาคเหล่านี้ไปเซประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติเช่นเดียวกับแสง คือ สามารถหักเห และสะท้อนได้ โดยการหักเหของคลื่นนั้นจะช่วยทำให้สามารถแพร่กระจายสัญญาณคลื่นวิทยุออกไปครอบคลุมพื้นที่ได้กว้างขวางมากขึ้น แต่จะครอบคลุมพื้นที่ได้มากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ความถี่ ความหนาแน่นของไอออนในชั้นบรรยากาศ มุมตกกระทบของคลื่น ซึ่งการใช้งานคลื่นฟ้าส่วนใหญ่จะถูกใช้ในย่านความถี่สูง (High frequency) แต่ถ้าหากเป็นช่วงเวลากลางคืนความถี่ย่านปานกลางก็สามารถนำมาใช้ในการติดต่อสื่อสารได้เช่นเดียวกัน

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศ (Antenna)

สายอากาศถือเป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้กับสัญญาณวิทยุ โดยในเครื่องส่งสายอากาศจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณที่รับมาให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และแพร่กระจายออกไปในอากาศ ส่วนทางด้านเครื่องรับ สายอากาศจะทำหน้าที่เหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และเปลี่ยนคลื่นดังกล่าวให้กลับมาเป็นความถี่เพื่อป้อนเข้าเครื่องรับต่อไป ซึ่งจะเห็นได้ว่าสายอากาศเปรียบเสมือนอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ โดยสายอากาศที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลากหลายชนิด เช่น สายอากาศขนาดเล็กที่ประกอบด้วยสายพันรอบแกนเฟอร์ไรท์เพียง 2 ถึง 3 รอบ หรือ สายอากาศแบบจานพาราโบลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เมตร หรือสายอากาศแบบแถวที่มักนำไปติดตั้งในพื้นที่ที่มีความกว้างระดับตารางกิโลเมตร ฯลฯ การติดตั้งสายอากาศสามารถติดตั้งบนพื้นที่ต่างๆ ได้ เช่น บนปีกหรือตัวเครื่องบิน บนดาวเทียม บนเรือ บนรถ บนยอดของภูเขาสูง ฯลฯ แต่ไม่ว่าสายอากาศจะมีขนาด รูปร่าง น้ำหนัก หรือตำแหน่งที่ติดตั้งต่างกันอย่างไร หลักการเบื้องต้นในการแพร่กระจายคลื่นและหน้าที่ของสายอากาศยังคงเหมือนเดิม โดยในส่วนนี้จะมีการกล่าวถึงประเภทของสายอากาศชนิดต่างๆ ที่ถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน คุณสมบัติของสายอากาศ กลไกการทำงานของสายอากาศ ตลอดจนตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

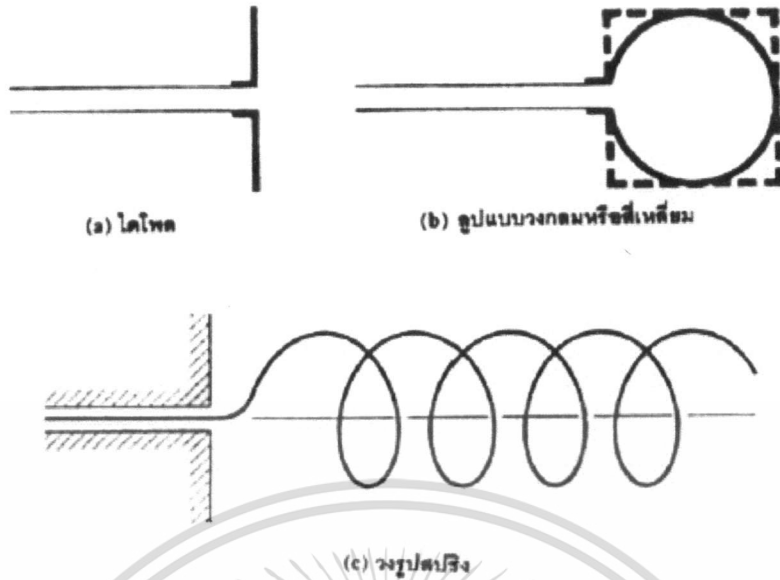
2.2.1 ประเภทของสายอากาศ

เนื้อหาที่อธิบายต่อไปนี้จะเป็นการกล่าวถึงประเภทและกลไกการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน

2.2.1.1 สายอากาศแบบลวดตัวนำ (Wire antenna)

สายอากาศประเภทนี้จัดเป็นสายอากาศที่พบบ่อยมากที่สุด และมีการนำไปใช้งานกันในหลายรูปแบบ เช่น บนรถยนต์ บนอาคารสูง บนเรือ บนเครื่องบิน บนยานอวกาศ โดยรูปร่างของสายอากาศแบบลวดตัวนำยังสามารถแยกย่อยออกไปได้อีกหลายชนิด เช่น แบบเส้นตรง (Dipole), แบบวนรอบ (Loop) และแบบวงก้นหอย ซึ่งรูปร่างคล้ายกับขดลวดสปริง ดังรูปที่ 2.14

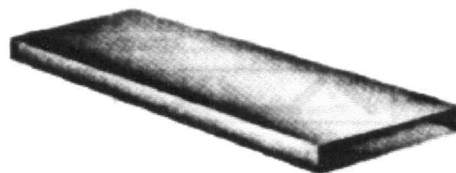
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงรูปร่างของสายอากาศชนิดลวดตัวนำแบบต่างๆ

สายอากาศแบบวนรอบ (Loop) ไม่จำเป็นที่จะต้องมียูปร่างเป็นวงกลมเสมอไป อาจมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า วงรี แต่ที่นิยมออกแบบสายอากาศแบบวนรอบให้มีลักษณะเป็นวงกลม เนื่องจากสะดวกในการสร้างและไม่จำเป็นต้องใช้พื้นที่มากนักในการติดตั้ง

2.2.1.2 สายอากาศแบบช่อง (Aperture antenna)



รูปที่ 2.15 แสดงรูปร่างของสายอากาศแบบช่องชนิดต่างๆ

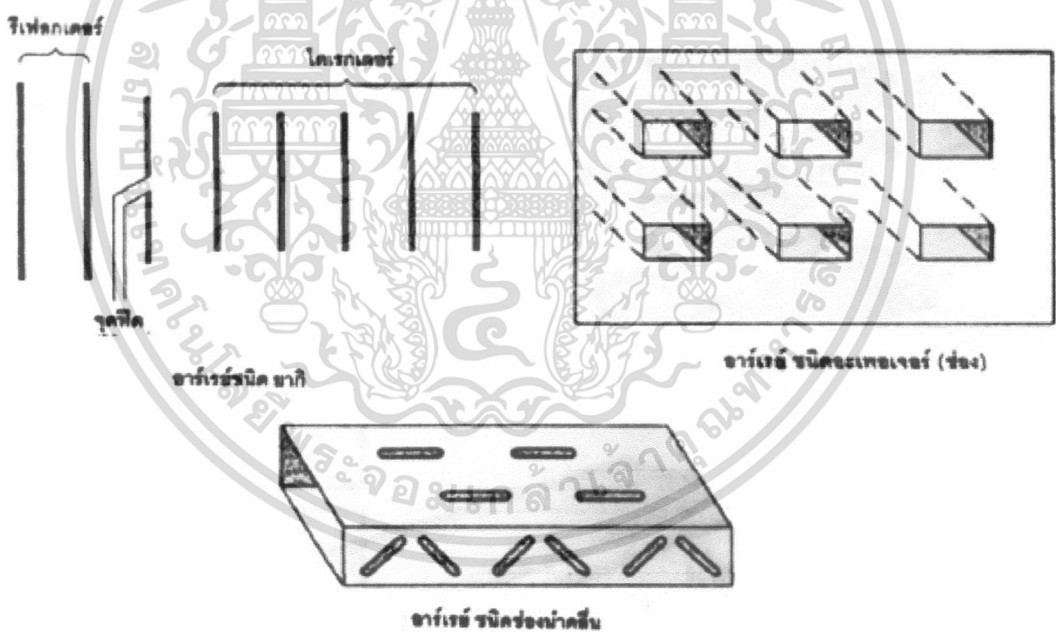
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศประเภทนี้ แม้จะถูกพัฒนาขึ้นเมื่อหลายสิบปีที่ผ่านมามากแล้ว แต่กำลังได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน โดยเฉพาะการนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ในการรับส่งสัญญาณคลื่นวิทยุในย่านความถี่สูง

สายอากาศแบบช่องนี้มักนำไปใช้กับเครื่องบินหรือยานอวกาศเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากสะดวกในการติดตั้ง และยังสามารถหุ้มฉนวนหรือวัสดุที่ไม่เป็นสื่อไฟฟ้าบนสายอากาศได้อีกด้วย ซึ่งการหุ้มฉนวนบนสายอากาศนั้นถือเป็นการทำเพื่อป้องกันสถานะแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่อระบบสื่อสารทั้งภายในและภายนอกชั้นบรรยากาศของโลก

2.2.1.3 สายอากาศแบบอาร์เรย์ (Array antenna)

สายอากาศชนิดนี้ถือเป็นการนำสายอากาศในรูปแบบเดิมมาทำการประยุกต์ให้มีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นที่แตกต่างออกไป เพื่อตอบสนองความต้องการในการใช้งานรูปแบบต่างๆ ซึ่งคุณสมบัติพิเศษของสายอากาศแบบอาร์เรย์คือ สามารถควบคุมทิศทางการแพร่กระจายคลื่นได้ตามต้องการ ซึ่งส่งผลให้อัตราขยายของคลื่นที่ถูกส่งออกไปจะเพิ่มมากขึ้น และทำให้คลื่นสามารถที่จะแพร่กระจายออกไปครอบคลุมพื้นที่ได้กว้างขวางมากขึ้นด้วย

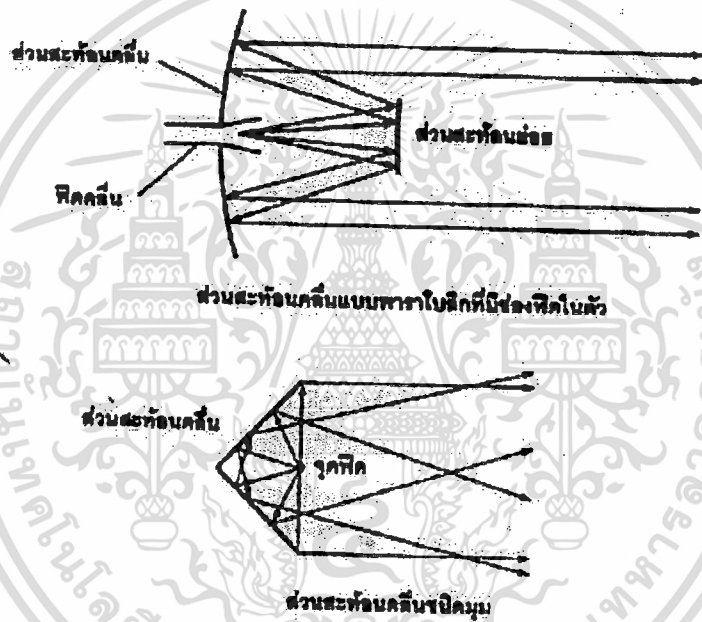
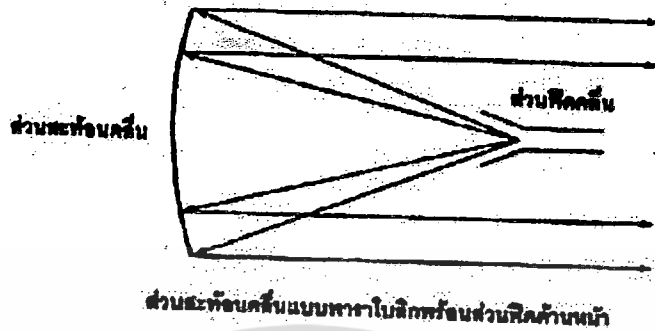


รูปที่ 2.16 แสดงรูปร่างของสายอากาศแบบอาร์เรย์ชนิดต่างๆ

2.2.1.4 สายอากาศแบบสะท้อนคลื่น (Reflector antenna)

ผลจากความสำเร็จในการสำรวจอวกาศ ทำให้ความต้องการในการสื่อสารระยะไกลเพิ่มมากขึ้น นักวิชาการและวิศวกรทางด้านโทรคมนาคมจึงได้ร่วมกันคิดค้นสายอากาศที่สามารถแพร่กระจายคลื่นออกไปครอบคลุมพื้นที่ได้นับล้านไมล์ และได้ร่วมกันบัญญัติชื่อของสายอากาศประเภทนี้ว่า สายอากาศแบบตัวสะท้อนพาราโบลิก (Parabolic reflector) โดยสายอากาศเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

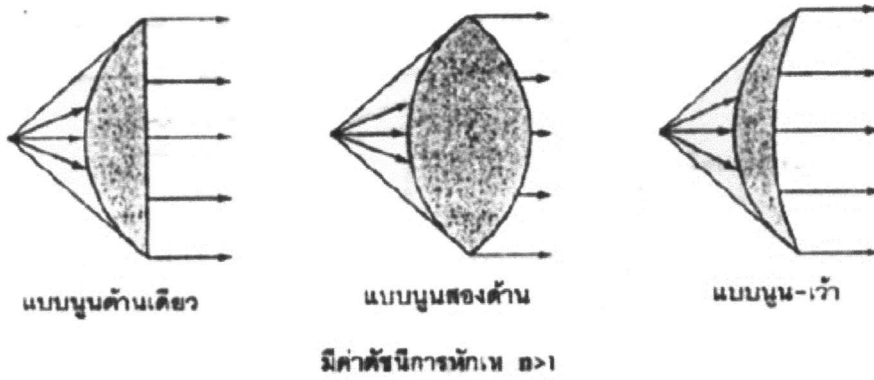
ชนิดนี้อัตราการขยายจะขึ้นอยู่กับขนาดของสายอากาศ หมายความว่า ถ้าหากสายอากาศมีขนาดใหญ่อัตราการขยายก็จะสูง แต่ถ้าสายอากาศมีขนาดเล็กอัตราการขยายก็จะต่ำ โดยอัตราการขยายนั้นจะส่งผลต่อระยะทางหรือพื้นที่ที่เคลื่อนจะแพร่กระจายออกไปครอบคลุมโดยตรง



รูปที่ 2.17 แสดงรูปร่างของสายอากาศชนิดสะท้อนคลื่นแบบต่างๆ

2.2.1.5 สายอากาศแบบเลนส์ (Lens antenna)

แต่เดิมเลนส์ถูกใช้ทำหน้าที่ในการรวมแสง เพื่อให้แสงสามารถเดินทางผ่านไปยังจุดที่ต้องการได้ แต่สำหรับในมุมมองของสายอากาศก็นำคุณสมบัติและหลักการทำงานของเลนส์มาพัฒนาเป็นสายอากาศรูปแบบใหม่ขึ้น ซึ่งเรียกว่าสายอากาศแบบเลนส์ โดยขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการสร้างสายชนิดนี้คือ ขั้นตอนของการเลือกวัสดุเพื่อมาทำเป็นเลนส์ โดยวัสดุที่เลือกใช้นั้นจะต้องเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการรวมคลื่นที่แพร่กระจายอยู่ในทิศทางต่างๆ กลับมาเป็นลำคลื่นเดี่ยว เพื่อส่งออกไปยังทิศทางตามที่ต้องการได้



รูปที่ 2.18 แสดงรูปร่างของสายอากาศแบบเลนส์ชนิดต่างๆ

2.2.1.6 สายอากาศแบบโมโนโพล (Monopole antenna)

การส่งคลื่นในย่านความถี่ต่ำมาก (Very low frequency) ความถี่ต่ำ (Low frequency) และความถี่ปานกลาง (Medium frequency) จะต้องให้ความสำคัญในส่วนของการติดตั้งและความสูงของสายอากาศเป็นสำคัญ เนื่องจากในย่านความถี่นี้ขนาดของความยาวคลื่นจะมีค่ามากและส่งผลให้สายอากาศที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณคลื่นวิทยุจำเป็นที่จะต้องมีย่านความถี่ที่ใหญ่มากตามไปด้วย จากปัญหาดังกล่าวนักวิชาการจึงได้คิดค้นสายอากาศรูปแบบใหม่ที่ก่อให้เกิดความยาวคลื่นเพียง $\frac{\lambda}{4}$ (ความยาวคลื่นลดลงจากเดิม 4 เท่า) ขึ้นมาแทน ส่งผลให้สายอากาศที่นำมาใช้ในการรับส่งสัญญาณคลื่นวิทยุมีขนาดที่เล็กลง

จากรูปที่ 2.19 เป็นภาพของสายอากาศขนาด $\frac{\lambda}{4}$ ที่ติดตั้งในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวโลก โดยมีจุดพีคอยู่ที่บริเวณด้านล่างระหว่างสายอากาศกับพื้นดิน ซึ่งเราเรียกสายอากาศชนิดนี้ว่า ยูนิโพล (Unipole) หรือ โมโนโพล (Monopole) โดยสายอากาศประเภทนี้จะมีคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นได้ทุกทิศทางในระนาบแนวนอน ส่วนในระนาบแนวตั้งจะมีพลังงานที่พุ่งออกจากสายอากาศทั้งหมด 2 แบบ คือ พุ่งขึ้นสู่ฟ้า และพุ่งลงสู่พื้นดิน

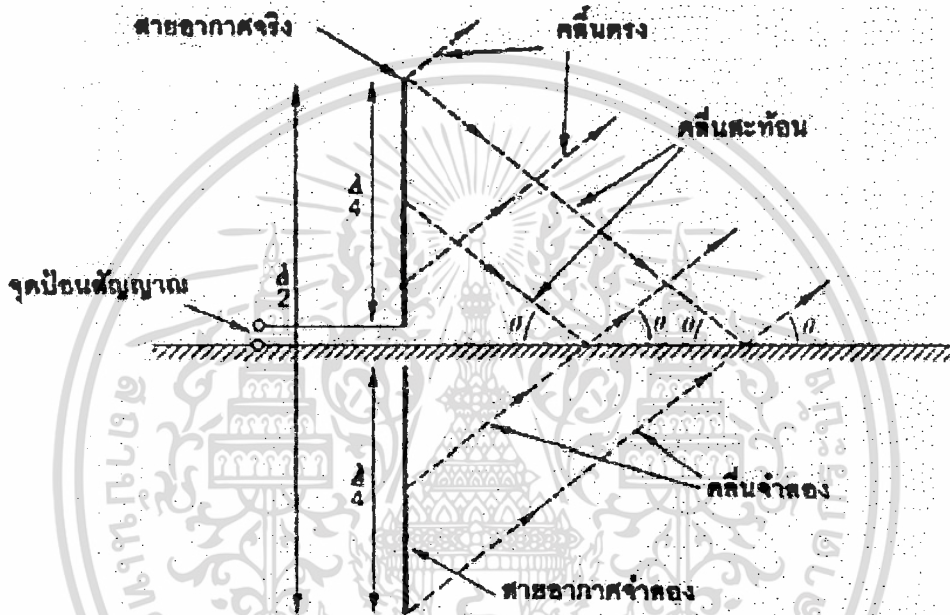
จากคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ที่สามารถแพร่กระจายคลื่นได้ทุกทิศทาง ทำให้มีคลื่นบางส่วนเคลื่อนที่กระทบกับพื้นดิน และสะท้อนกลับขึ้นมา โดยมีค่ามุมตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

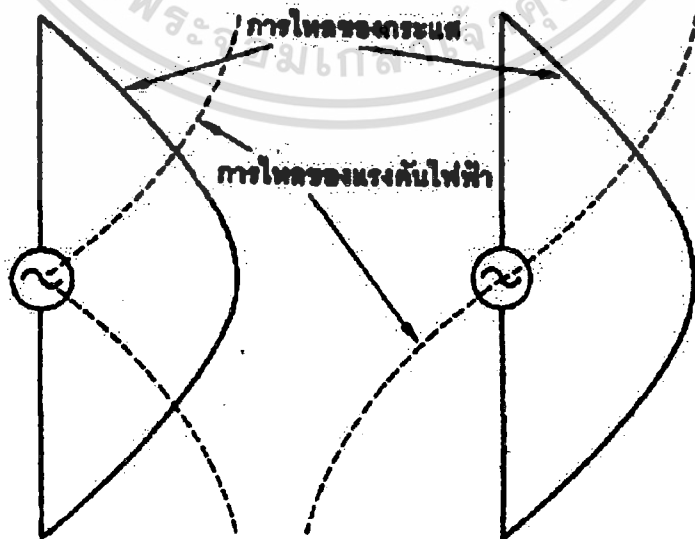
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับค่าของมุมสะท้อน จากรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่า ณ จุดหนึ่งที่ห่างจากสายอากาศ พลังงานคลื่นที่รับได้จะเกิดจากการผสมกันของคลื่นตรงและคลื่นที่สะท้อนกลับขึ้นมาจากพื้นดิน ทำให้ค่าความเข้มของสนามที่จุดนี้เกิดขึ้นจากผลรวมของความเข้มสนามในคลื่นแต่ละแบบ

จากรูปที่ 2.19 จะมีการแสดงสายอากาศในอุดมคติ ซึ่งก็คือ สายอากาศจำลอง (Imagine antenna) โดยสายอากาศประเภทนี้จะมีคุณสมบัติทั่วไปเหมือนกันกับสายอากาศแบบไดโพลทุกประการ แต่จะแตกต่างกันในส่วนของอัตราการใช้ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะเหมือนกันกับสายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$



รูปที่ 2.19 แสดงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบ โมโน โพล หรือ ยูนิ โพล



รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าบนสายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$

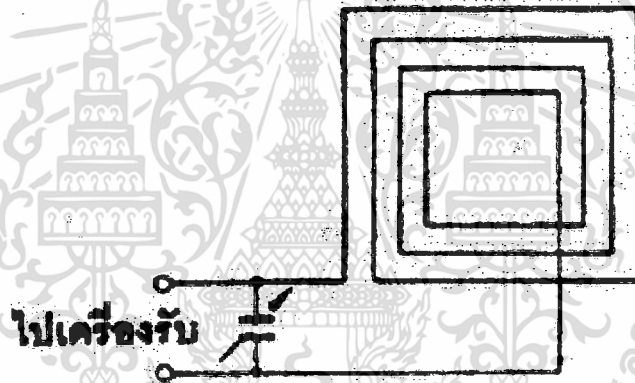
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.20 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าบนสายอากาศแบบโมโนโพล ซึ่งจะเห็นได้ว่าคลื่นนิ่ง (Standing wave) มีค่าของกระแสไฟฟ้ามากที่สุด และ ณ จุดปลายของสายอากาศอาจมีกระแสไฟฟ้าปริมาณมากไหลจากสายอากาศลงสู่พื้นดิน ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในการรับส่งสัญญาณได้ ซึ่งการแก้ไขให้สูญเสียพลังงานในส่วนนี้น้อยที่สุด มีแนวทางคือ ปรับสภาพของพื้นดินให้มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า โดยนำลวดทองแดงต่อออกจากฐานของสายอากาศเป็นระยะทางเท่ากับความสูงของสายอากาศ จากนั้นนำไปฝังลงดินด้วยความลึกประมาณ 0.33 เมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นลวดทองแดงจะทำหน้าที่คล้ายกับสายกราวด์ (Ground) ของสายอากาศ เพื่อให้คลื่นที่แพร่กระจายตกกระทบกับพื้นดินเกิดการสะท้อนที่สมบูรณ์

2.2.1.7 สายอากาศแบบวนรอบ (Loop antenna)

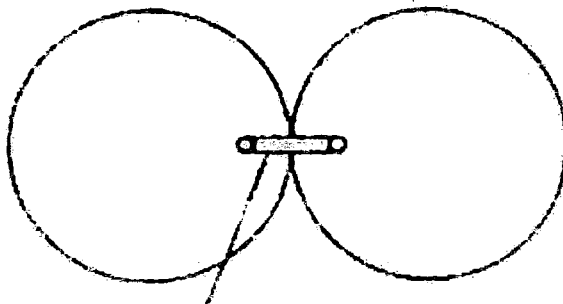
สายอากาศประเภทนี้จะประกอบด้วยลวดตัวนำที่พันเป็นรูปสี่เหลี่ยมหลายรอบ โดยขนาดของสายอากาศจะต้องมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่นของสัญญาณที่รับเข้ามา



รูปที่ 2.21 แสดงรูปร่างของสายอากาศแบบวนรอบ

จากรูปที่ 2.21 จะแสดงให้เห็นถึงสายอากาศแบบวนรอบที่มีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมและมีการวนรอบของลวดตัวนำเป็นจำนวน 4 รอบ รวมทั้งยังมีตัวจูน (Tune) ค่าความถี่ของสัญญาณ ไฟฟ้า โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้อีกด้วย

แรงดันไฟฟ้าที่ส่งจากสายอากาศของเครื่องส่ง ไปยังเครื่องรับจะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของสายอากาศ และจำนวนรอบของลวดตัวนำ



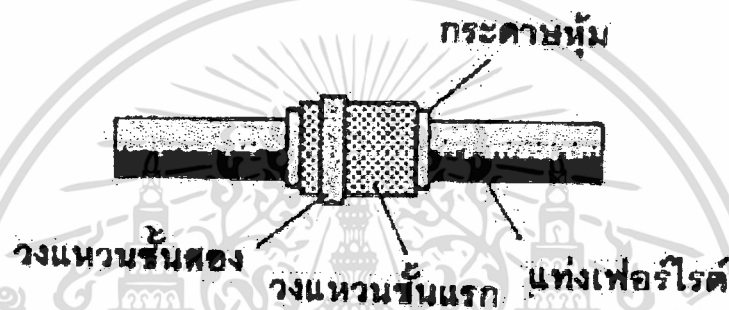
รูปที่ 2.22 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในแนวราบของสายอากาศแบบวนรอบ

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าสายอากาศประเภทนี้ไม่มีการรับสัญญาณคลื่นในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของลูป ซึ่งคุณสมบัตินี้เหมาะสมอย่างมากสำหรับการนำไปใช้ในงานหาทิศทาง (Direction finding)

ถ้าหากเปลี่ยนจากเดิมที่ใช้ลวดตัวนำมาเป็นวัสดุที่มีส่วนผสมของแม่เหล็กอยู่ภายใน เช่น เฟอร์ไรต์ (Ferrite) ซึ่งมีคุณสมบัติในการเพิ่มขนาดของลูป จะพบว่าสนามแม่เหล็กของคลื่นที่รับเข้ามาจะถูกนำมารวมกันอย่างหนาแน่นภายในพื้นที่ของลูป มีผลทำให้สนามไฟฟ้าที่จะถูกเหนี่ยวนำเข้าไปในลูปมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งข้อดีของสายอากาศที่ทำจากเฟอร์ไรต์ คือ มีขนาดเล็กและเหมาะที่จะนำมาติดตั้งบนแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้เป็นอย่างดี เช่น เครื่องเล่นวิทยุ โทรศัพทมือถือ



รูปที่ 2.23 แสดง โครงสร้างของแท่งเฟอร์ไรต์

สำหรับรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเฟอร์ไรต์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.24



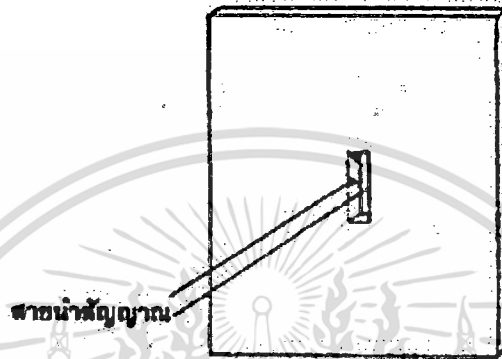
รูปที่ 2.24 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่งเฟอร์ไรต์

จะเห็นได้ว่า ถ้าหากต้องการให้การรับส่งสัญญาณคลื่นวิทยุเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงที่สุด ก็ควรที่จะติดตั้งสายอากาศให้มีทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของคลื่นที่รับเข้ามาเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.8 สายอากาศแบบช่อง (Slot antenna)

สายอากาศแบบช่องเกิดจากการเจาะแผ่นเหล็กเป็นช่องสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก และทำการป้อนคลื่นผ่านสายนำสัญญาณเข้าทั้งที่ด้านหน้าและด้านหลังของช่องสี่เหลี่ยมบนแผ่นเหล็ก ดังรูปที่ 2.25 โดยสายอากาศประเภทนี้จะไม่มีการแพร่กระจายคลื่นในระนาบเดียวกับแผ่นเหล็ก แต่สำหรับในระนาบที่ตั้งฉากกับแผ่นเหล็กจะมีรูปแบบของการแพร่กระจายคลื่นเหมือนกันกับการสายอากาศแบบ โมโนโพล (Monopole)



รูปที่ 2.25 แสดงรูปร่างของสายอากาศแบบช่อง

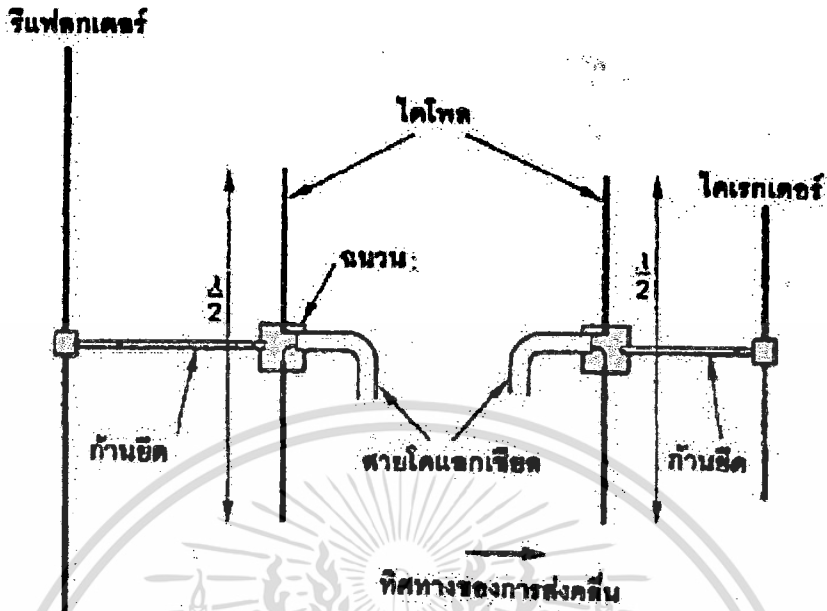
2.2.1.9 สายอากาศแบบยาคี (Yagi antenna)

สายอากาศแบบยาคีถือเป็นสายอากาศชนิดพิเศษที่ถูกดัดแปลงมาจากสายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$ และพาราซิติค อีลีเมนต์ (Parasitic element) โดยความหมายของพาราซิติค อีลีเมนต์ คือ ส่วนของสายอากาศที่ไม่ได้ต่ออยู่โดยตรงกับสายนำสัญญาณจากเครื่องรับหรือเครื่องส่ง แต่มีคุณสมบัติในการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าบนตัวเองได้ และสายอากาศที่มักนำมาใช้งานร่วมกับตัวพาราซิติค เรียกว่าพาราซิติคอาร์เรย์ (Parasitic array)

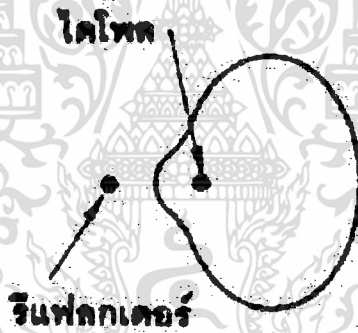
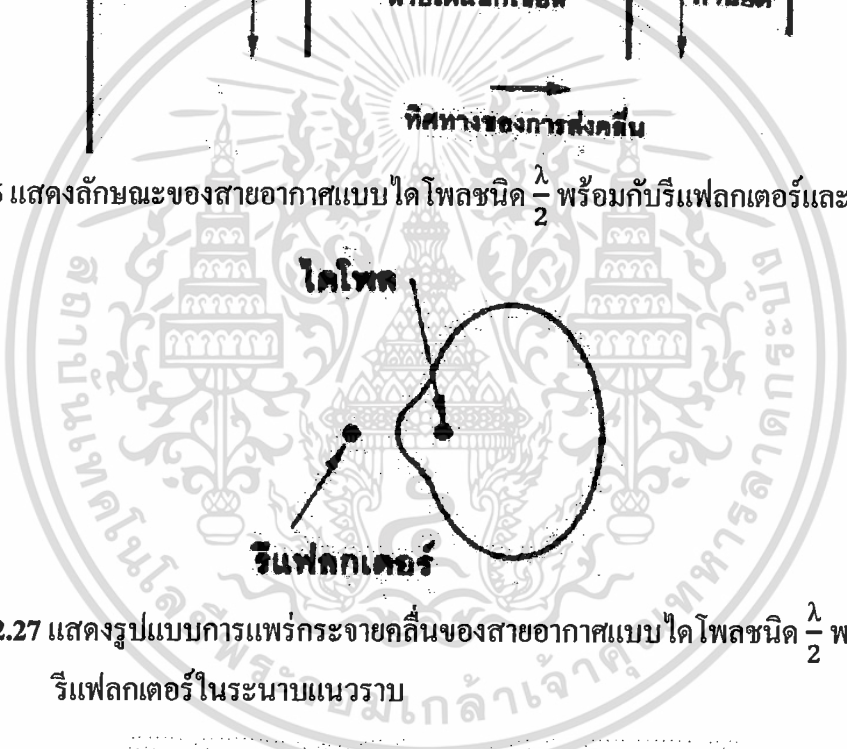
จากที่ได้อธิบายถึงคุณสมบัติของสายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$ ในหัวข้อ 2.2.1.6 จะเห็นได้ว่ารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในแนวระนาบของสายอากาศประเภทนี้ ถ้าหากวางในแนวตั้งจะมีลักษณะเป็นวงกลม แต่ในแนวระนาบอื่นจะไม่มีการแพร่กระจายหรือรับคลื่นเลย ซึ่งการสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุโดยทั่วไปต้องการประสิทธิภาพของสายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่น (Directivity) ได้มากกว่าหนึ่งทิศทางเสมอ ทำให้สายอากาศประเภทนี้อาจไม่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นตัวกลางในการรับส่งสัญญาณของคลื่นวิทยุมากนัก จากข้อจำกัดดังกล่าว จึงเป็นแรงบันดาลใจให้นักวิจัยและวิศวกรทางด้านโทรคมนาคมร่วมมือกันคิดค้นหาวิธีการเพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าวขึ้น โดยผลจากการวิจัยและทดลองทำให้พวกเขาพบว่าสามารถที่จะเพิ่มพลังงานในการแพร่กระจายคลื่นภายในสายอากาศได้ โดยใช้สายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$ ร่วมกับพาราซิติคอีลีเมนต์ที่เรียกว่า รีเฟลคเตอร์ (Reflector) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแท่งตัวนำที่มีขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

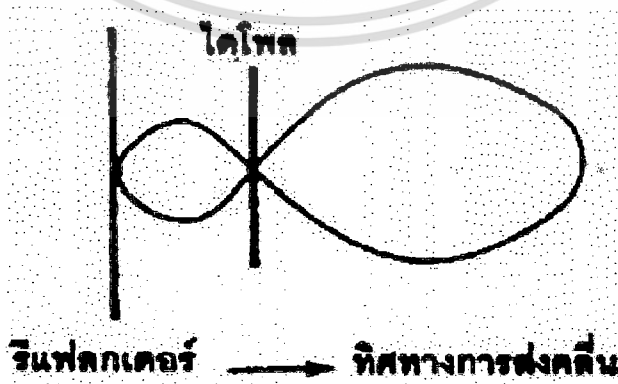
ยาวกว่า $\frac{\lambda}{2}$ อยู่ประมาณ 5% โดยจะต้องนำไปติดตั้งไว้ที่อกฝั่งของสายอากาศในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุด ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 แสดงลักษณะของสายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$ พร้อมกับรีเฟลกเตอร์และไดเรกเตอร์



รูปที่ 2.27 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$ พร้อมกับรีเฟลกเตอร์ในระนาบแนวราบ



รูปที่ 2.28 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$ พร้อมกับรีเฟลกเตอร์ในระนาบแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีฟเลกเตอร์ (Reflector) จะส่งผลกระทบต่อรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$ เป็นอย่างมาก เนื่องจาก เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าถูกเหนี่ยวนำจะส่งผลให้รีฟเลกเตอร์มีความสามารถในการแพร่กระจายคลื่นได้ด้วยตัวเอง

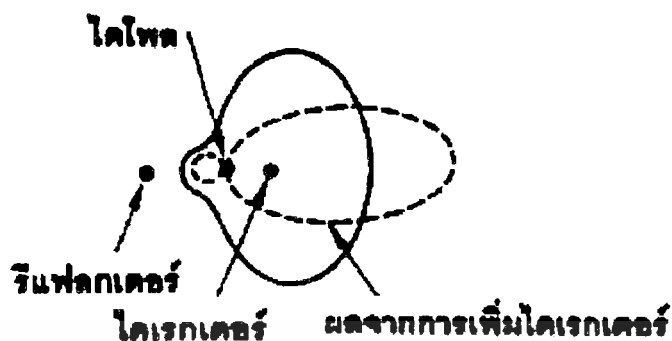
ปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นมีดังนี้

1. ความยาวของรีฟเลกเตอร์ (Reflector)
2. ระยะห่างจากไดโพล (Dipole)

จากรูปที่ 2.27 และ 2.28 จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่น (Directivity) ของสายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$ ที่ทำงานร่วมกับรีฟเลกเตอร์จะมีประสิทธิภาพดีกว่าสายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$ ที่ไม่ได้ทำงานร่วมกับรีฟเลกเตอร์อย่างเห็นได้ชัด โดยสาเหตุที่รีฟเลกเตอร์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อเราป้อนแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance) ให้กับสายอากาศแบบไดโพล จะส่งผลให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปในทุกทิศทางในแนวตั้งฉากกับไดโพล โดยจะมีพลังงานบางส่วนเดินทางมายังรีฟเลกเตอร์ และทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ซึ่งภายในรีฟเลกเตอร์จะต้องมีเฟส (Phase) ตามหลังแรงดันไฟฟ้าส่วนที่ป้อนให้สายอากาศแบบไดโพลอยู่ โดยการเปลี่ยนแปลงของเฟสในรีฟเลกเตอร์จะมากหรือน้อยนั้นจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอิลีเมนต์ หลังจากดำเนินการตามที่ได้กล่าวในข้างต้นแล้ว รีฟเลกเตอร์จะมีคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นได้ทุกทิศทางที่ตั้งฉากกับมัน ถ้าหากความยาวของรีฟเลกเตอร์และระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบไดโพลกับรีฟเลกเตอร์ได้ถูกพิจารณาอย่างเหมาะสมแล้ว อีกทั้งพลังงานที่แพร่มาจากรีฟเลกเตอร์จะถูกแปลงไปเป็นพลังงานเสริมสำหรับสายอากาศแบบไดโพล เพื่อใช้ในการแพร่กระจายคลื่น ไปยังทิศทางตามที่ต้องการได้อีกด้วย

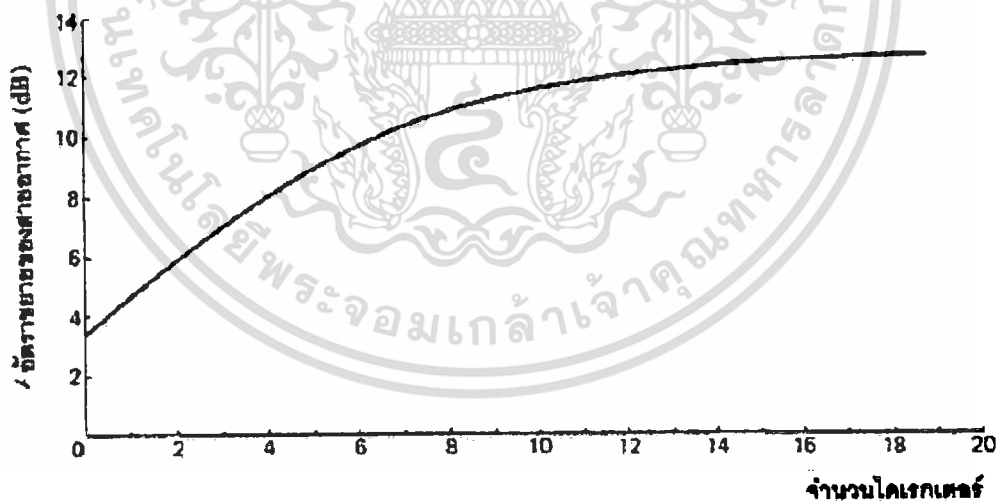
การเพิ่มประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยายของสายอากาศแบบไดโพล สามารถทำได้ในอีกรูปแบบหนึ่ง โดยการเพิ่มพาราซิติค อิลีเมนต์แบบใหม่ลงไปในสายอากาศแบบไดโพล โดยจะต้องวางในตำแหน่งที่ตรงกันข้ามกับรีฟเลกเตอร์ ซึ่งเราเรียกพาราซิติค อิลีเมนต์ชนิดนี้ว่า ไดเรกเตอร์ (Director) โดยไดเรกเตอร์จะต้องมีขนาดความยาวที่สั้นกว่าสายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$ อยู่ประมาณ 5% และในขณะที่สายอากาศแบบไดโพลมีการแพร่กระจายคลื่นก็อาจจะมีพลังงานบางส่วนเกิดการเหนี่ยวนำทำให้ไดเรกเตอร์เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและสามารถที่จะแพร่กระจายคลื่นได้เช่นเดียวกันกับสายอากาศแบบไดโพลหรือรีฟเลกเตอร์ โดยการพิจารณาเรื่องความยาวของไดเรกเตอร์ (Director) และระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบไดโพลกับไดเรกเตอร์ ถือเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะถ้าหากพิจารณาและกำหนดค่าต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม ก็จะช่วยให้พลังงานที่แพร่จากไดเรกเตอร์จะถูกแปลงไปเป็น

พลังงานเสริมสำหรับสายอากาศแบบไดโพล เพื่อใช้ในการแพร่กระจายคลื่นไปยังทิศทางตามที่ต้องการได้อีกด้วย



รูปที่ 2.29 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$ พร้อมกับรีเฟลคเตอร์และไดเรกเตอร์ในระนาบแนวนอน

ถ้าหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่นหรืออัตราขยายของสายอากาศให้มากกว่าเดิม ด้วยวิธีการเพิ่มปริมาณของรีเฟลคเตอร์ (Reflector) นั้นจะส่งผลให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมาจากรีเฟลคเตอร์แต่ละตัวเกิดการรบกวนกันจนทำให้มีพลังงานที่อ่อนมาก และไม่สามารถที่จะเหนี่ยวนำได้ในที่สุด แต่ถ้าหากทำการเพิ่มปริมาณของไดเรกเตอร์ (Director) ให้มากขึ้นนั้น จะช่วยส่งผลให้อัตราขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้นได้ ดังรูปที่ 2.30 และไม่เกิดการรบกวนกันระหว่างพาราซิติค อีลีเมนต์กันเองอีกด้วย



รูปที่ 2.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนไดเรกเตอร์กับอัตราขยายของสายอากาศยากิ

ในทางปฏิบัติการพิจารณาเลือกค่าระยะห่างระหว่างอีลีเมนต์จำเป็นต้องคำนึงถึง 2 สิ่งคือ

1. อัตราขยายของอาร์เรย์ที่ต้องการ
2. อัตราส่วนจากด้านหน้าไปยังด้านหลัง (Front to back) ที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้วระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบไดโพลกับรีเฟลคเตอร์ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.15λ ถึง 0.25λ และระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบไดโพลกับไดเรกเตอร์ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1λ ถึง 0.15λ

2.2.1.10 สายอากาศแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (Rhombic antenna)

ในระบบสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุแบบจุดต่อจุด (Point to point communication) ที่ย่านความถี่สูง (High frequency) จำเป็นที่จะต้องเตรียมความถี่ที่จะนำมาใช้ในการติดต่อสื่อสาร ตั้งแต่ 3.5 ความถี่ขึ้นไป เพื่อให้สามารถเลือกใช้ย่านความถี่ได้อย่างเหมาะสมในสภาพที่ชั้นบรรยากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงไป และเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการติดต่อสื่อสารขาดช่วงไปได้อีกด้วย

เครื่องส่งวิทยุในย่านความถี่สูง จำเป็นที่จะต้องมีความสัมพันธ์ในการสับเปลี่ยนช่องความถี่ได้อย่างรวดเร็ว และสายอากาศที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณควรจะเป็นสายอากาศเส้นเดี่ยว เนื่องจากความถี่ที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณในย่านความถี่สูงนั้น ไม่คงที่ ทำให้สายอากาศแบบยาก็ไม่สามารถนำมาใช้งานในสภาวะแวกต์อิมพีแดนซ์เช่นนี้ได้ นักวิจัยจึงได้คิดค้นและสร้างสายอากาศสำหรับการติดต่อสื่อสารในย่านความถี่สูงขึ้น โดยเรียกสายอากาศชนิดนี้ว่า สายอากาศสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (Rhombic antenna)



รูปที่ 2.31 แสดงตัวแพร่กระจายคลื่นแบบลวดตัวนำยาว (Long-wire radiator)

จากรูปที่ 2.31 แสดงตัวนำที่มีขนาดยาวหลายเท่าของความยาวคลื่นที่ถูกเชื่อมต่อเข้ากับสายนำสัญญาณที่ปลายทั้งสองด้าน และนำไปเชื่อมต่อลงดิน (Ground) โดยสายนำสัญญาณชนิดนี้จะคุณสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของสาย (Characteristic impedance) เท่ากับ Z_0 ซึ่งโดยทั่วไปคุณสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของสาย (Z_0) จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น ประเภทของโลหะที่นำมาใช้เป็นตัวนำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ ระยะห่างระหว่างตัวนำ โดยคุณสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของสายจะมีค่าเท่ากับตลอดความยาวของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากพิจารณารูปที่ 2.31 อย่างละเอียดจะพบว่า ที่ปลายของสายอากาศทางด้านซ้ายมีการเชื่อมต่อเข้ากับตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (E_s) ส่งผลให้คุณสมบัติทางอิมพีแดนซ์ที่ปลายทั้งสองด้านของสายอากาศชนิดนี้มีค่าเท่ากัน คือ Z_0 โอห์ม ดังนั้นการะไฟฟ้าที่จะถูกป้อนเข้าสู่สายอากาศจะต้องมีค่าเป็นไปตามสมการที่ 2.13

$$I = E_s / 2 \times Z_0 \quad (2.13)$$

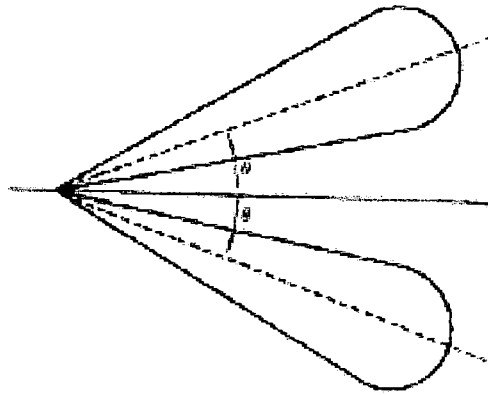
ผลจากการต่อโหลดขนาด Z_0 เข้าที่ปลายทั้งสองด้านของสาย ทำให้จะไม่มีการสะท้อนกลับของพลังงานไปยังแหล่งกำเนิด หมายความว่า สายส่งสามารถที่จะถ่ายทอดพลังงานออกไปได้ด้วยกำลังที่สูงที่สุดเท่าที่จะสร้างได้โดยไม่ก่อให้เกิดคลื่นสะท้อนและคลื่นนิ่งบนสาย โดยอัตราส่วนระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากันในทุกตำแหน่งตามความยาวของสายส่ง ดังนั้น ถ้าหากลวดตัวนำมีความยาวเท่ากับ 1 เมตร เราก็สามารถอนุมานได้ว่าลวดตัวนำเส้นนี้ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กที่มีขนาดเท่ากันจำนวนมากมาเรียงต่อกันตามความยาวของเส้นลวด โดยให้แต่ละส่วนมีความยาวเท่ากับ δ และกระแสไฟฟ้าที่ไหล (I) จะมีค่าเท่ากันตลอดความยาวของลวดตัวนำ เนื่องจากไม่มีการสะท้อนกลับของพลังงานไปยังแหล่งกำเนิด โดยเราจะเรียกกระแสไฟฟ้าในส่วนนี้ว่า กระแสอีลีเมนต์ (Current Element) ซึ่งสามารถเขียนแทนได้ด้วยสัญลักษณ์ ID

กระแสอีลีเมนต์ในแต่ละส่วนบนลวดตัวนำมีความสามารถในการแพร่กระจายพลังงานออกมาได้ โดยลักษณะของการแพร่กระจายคือ หน้าคลื่นที่ตกกระทบในทิศทางมุม 90° จะมีพลังงานสูงสุด และจะมีค่าพลังงานเป็นศูนย์ก็ต่อเมื่อหน้าคลื่นตกกระทบในทิศทางเดียวกับแกนของลวดตัวนำ ส่วนค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กนั้นจะขึ้นอยู่กับแต่ละจุดบนลวดตัวนำ

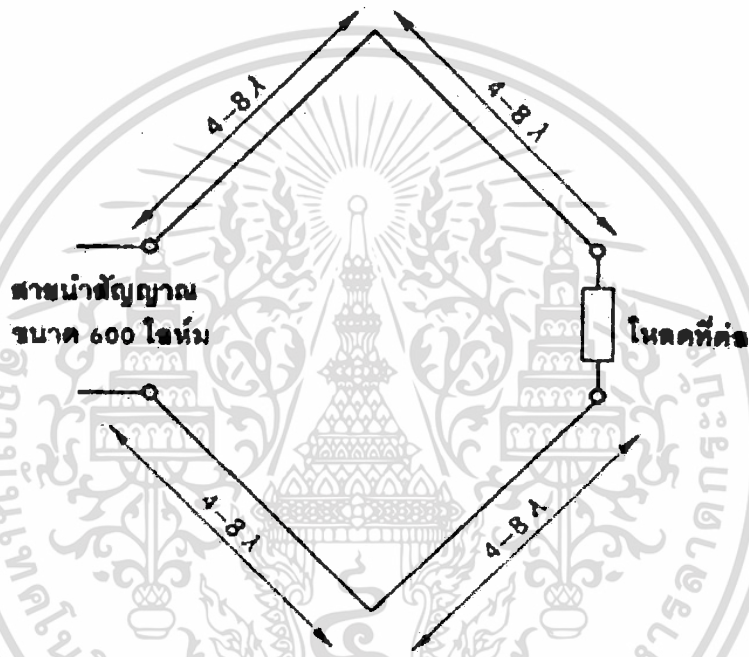
ค่าเฟส (Phase) ของกระแสไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวของลวดตัวนำ กล่าวคือ ในทุกๆ ครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($\frac{\lambda}{2}$) จะมีการเลื่อนเฟสไปทีละ 180° เสมอ ส่งผลให้ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นจากกระแสอีลีเมนต์ถูกหักล้างไปจนหมดในทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่มาตกกระทบทำมุมตั้งฉากกับลวดตัวนำ และทำให้เกิดนัลโลบ (Null lobe) ขึ้นในทิศทางดังกล่าว นอกจากนี้ในทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่มาตกกระทบในทิศทางเดียวกับแกนของลวดตัวนำจะส่งผลก่อให้เกิดนัลโลบขึ้นได้เช่นเดียวกัน

จากรูปที่ 2.32 จะเห็นว่ามุมที่โลบหลักทั้งสองกระทำกับแนวแกนของลวดตัวนำ (θ) จะมีค่าขึ้นอยู่กับความยาวของลวดตัวนำ และจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อความยาวของลวดตัวนำเพิ่มมากขึ้น เช่น ถ้าหากความยาวของลวดตัวนำเป็น 4λ และ 8λ ค่ามุมของโลบจะมีค่าเท่ากับ 24° และ 17° ตามลำดับ นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับความถี่ยังมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นอีกด้วย

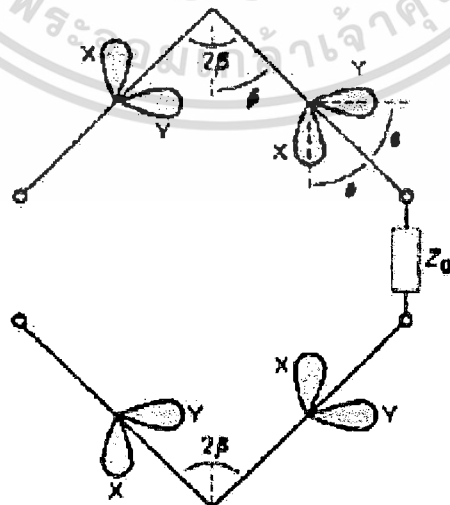
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.32 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของลวดตัวนำยาว



รูปที่ 2.33 แสดงรูปร่างของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน



รูปที่ 2.34 แสดงค่ามุมต่างๆ และรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในแต่ละส่วนของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.33 จะเห็นว่าสายอากาศประกอบด้วยลวดตัวนำยาวจำนวน 4 เส้นที่เชื่อมต่อกันในแนวราบเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน โดยลวดตัวนำยาวทั้ง 4 เส้นจะมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นออกไป ดังรูปที่ 2.32 โดยสาเหตุที่นำลวดตัวนำยาวทั้ง 4 มาเรียงต่อกันเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนเพราะต้องการบังคับ โลบที่เกิดขึ้นบนลวดตัวนำแต่ละเส้นให้เกิดการเสริมกันในทิศทางที่ต้องการได้และหักล้างกันในที่ทางที่ไม่ต้องการได้

การจะให้โอบหลักเสริมหรือหักล้างกันนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าการพิจารณาของมุม 2β เป็นสำคัญ โดยค่าของมุม β จะมีความสัมพันธ์กับโอบหลักตามสมการที่ 2.14

$$\theta = (90 - \beta)^\circ \quad (2.14)$$

ซึ่งถ้าหากเป็นไปตามสมการที่ 2.14 โอบหลักที่อยู่ในตำแหน่ง X ในรูปที่ 2.34 จะถูกหักล้างไปจนหมด ส่วนโอบหลักที่อยู่ในตำแหน่ง Y จะเกิดการเสริมกันในทิศทางที่ต้องการ

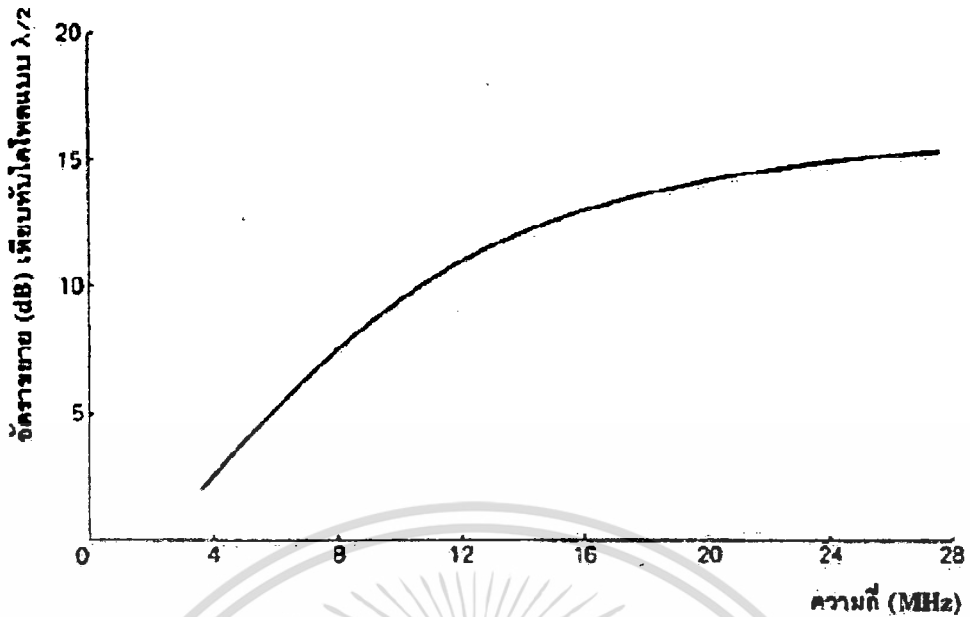
สำหรับค่าของมุมที่โอบหลักกระทำกับแนวแกนของลวดตัวนำ (θ) จะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ที่ใช้งานตลอด จึงส่งผลให้เป็นไปได้ยากที่จะกำหนดค่าที่แน่นอนของมุม β ลงไปในสมการที่ 2.14 ดังนั้นในการออกแบบสายอากาศในปัจจุบันจึงอาศัยการประมาณค่าจากค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิตของช่วงความถี่ที่ใช้งานมาพิจารณาแทน



รูปที่ 2.35 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน

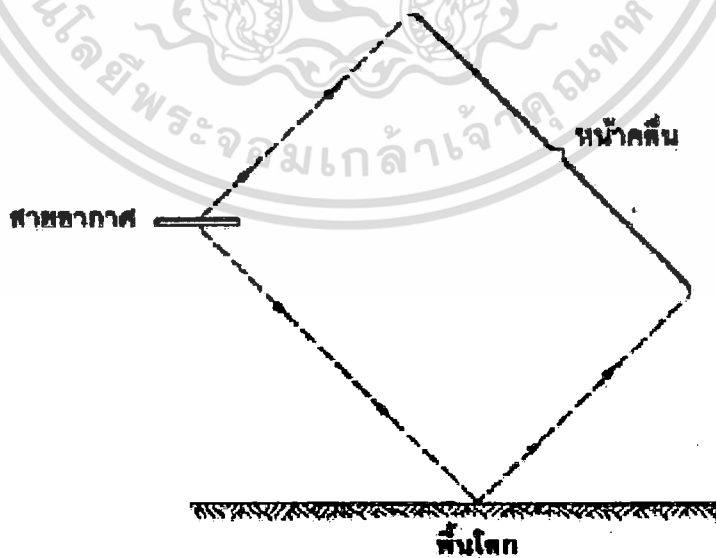
สำหรับสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนจะมีโพลาไรเซชัน (Polarization) ในแนวนอน ซึ่งจะเห็นว่ามีส่วนของโอบที่ไม่ต้องการคือ โอบด้านข้าง (Side lobe) ดังรูปที่ 2.35 ซึ่งเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นออกไปในย่านความถี่ใดๆ โดยปราศจากการคิดคำนวณและออกแบบอย่างเป็นระบบ จึงก่อให้เกิดโอบในทิศทางที่ไม่ต้องการขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าความกว้างของบีม (Beamwidth) หรือมุมยิงคลื่นเพิ่มขึ้น แต่อัตราขยายของสายอากาศในทิศทางที่ต้องการจะแพร่กระจายคลื่นออกไปลดลง

โดยความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับอัตราขยายของสายอากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับอัตราขยายของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน

เนื่องจากคุณสมบัติของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการรับส่งสัญญาณ ในย่านความถี่สูง ทำให้พลังงานบางส่วนที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศประเภทนี้มีการทะลุผ่านเข้าไปในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยค่ามุมที่ถูกต้องค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นประเด็นที่ต้องพิจารณาร่วมกับความสูงของลวดตัวนำทั้ง 4 เส้นเทียบกับพื้นผิวโลก นอกจากนี้ยังมีพลังงานบางส่วนที่ถูกแพร่กระจายลงสู่พื้นดิน และสะท้อนกลับขึ้นไปบนพื้นผิวโลกอีกด้วย



รูปที่ 2.37 แสดงแนวเดินทางของคลื่นจากสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน

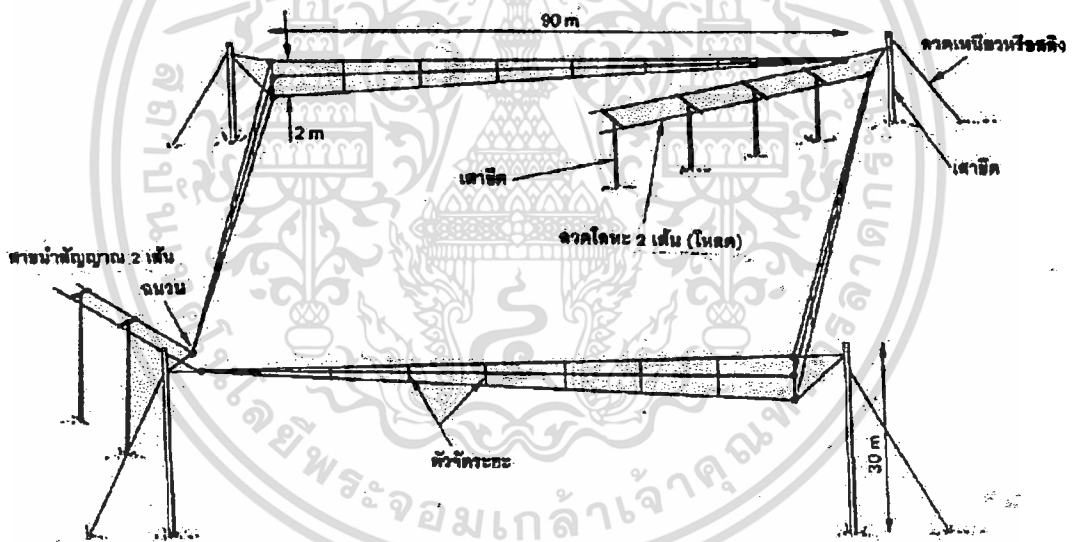
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนจะมีค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) อยู่ 2 ค่าที่มีความสำคัญอย่างมาก คือ

1. อินพุทอิมพีแดนซ์ (Input impedance) โดยจะคิดจากย่านความถี่ของคลื่นที่ใช้งานและเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำ ซึ่งค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ มักมีค่าอยู่ระหว่าง 600 โอห์ม ถึง 800 โอห์ม

2. อิมพีแดนซ์ของโหลดที่เชื่อมต่ออยู่กับสายอากาศ ซึ่งควรจะมีค่าที่ใกล้เคียงหรือเหมาะสมกับค่าคุณสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Z_0) เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของคลื่น ไปยังแหล่งกำเนิดที่ปลายสายอากาศ ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศลดลงถึง 50%

ในกรณีที่พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับสายอากาศมีค่าต่ำ เราสามารถใช้ตัวต้านทานคาร์บอนทำหน้าที่เป็นโหลดให้กับสายอากาศได้ แต่ถ้าหากพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับสายอากาศมีค่าสูง เราจะเปลี่ยนมาใช้ลวดตัวนำ 2 เส้นที่ทำจากโลหะมาทำหน้าที่เป็นโหลดให้กับสายอากาศแทน



รูปที่ 2.38 แสดงการนำสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนไปใช้งานจริง

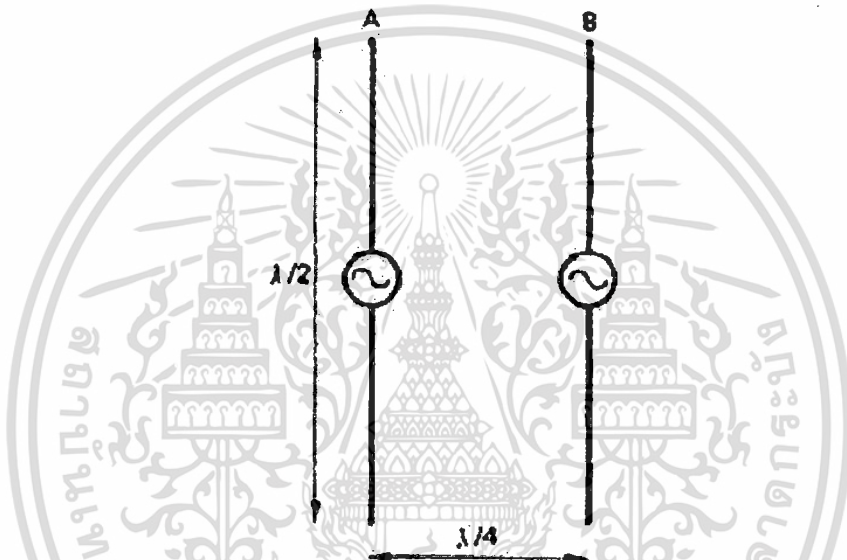
ข้อเสียเปรียบของสายอากาศประเภทนี้จะมียู่ 2 ประเด็น คือ

1. เมื่อมีการแพร่กระจายคลื่นจะก่อให้เกิด โลบด้านข้าง (Side lobe) ที่มีขนาดใหญ่พอสมควร ถ้าเป็นกรณีของสายอากาศส่งจะส่งผลให้มีพลังงานบางส่วนถูกแพร่กระจายออกไปในทิศทางที่ไม่ต้องการและก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานในการรับส่งสัญญาณไปโดยเปล่าประโยชน์ แต่ถ้าเป็นกรณีของสายอากาศรับจะส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) หรือเกิดการแทรกสอด (Interference) ของคลื่นเข้ามาในทิศทางที่ไม่ต้องการได้

2. ขนาดของสายอากาศชนิดนี้ถือว่ามีความใหญ่ และต้องการพื้นที่ในการติดตั้งค่อนข้างมาก ซึ่งคงไม่สะดวกนักที่จะหาพื้นที่ที่กว้างขวางเพียงพอกับการติดตั้งสายอากาศในชุมชนเมือง

2.2.1.11 สายอากาศแบบล็อกพริโอดิก (Log-Periodic antenna)

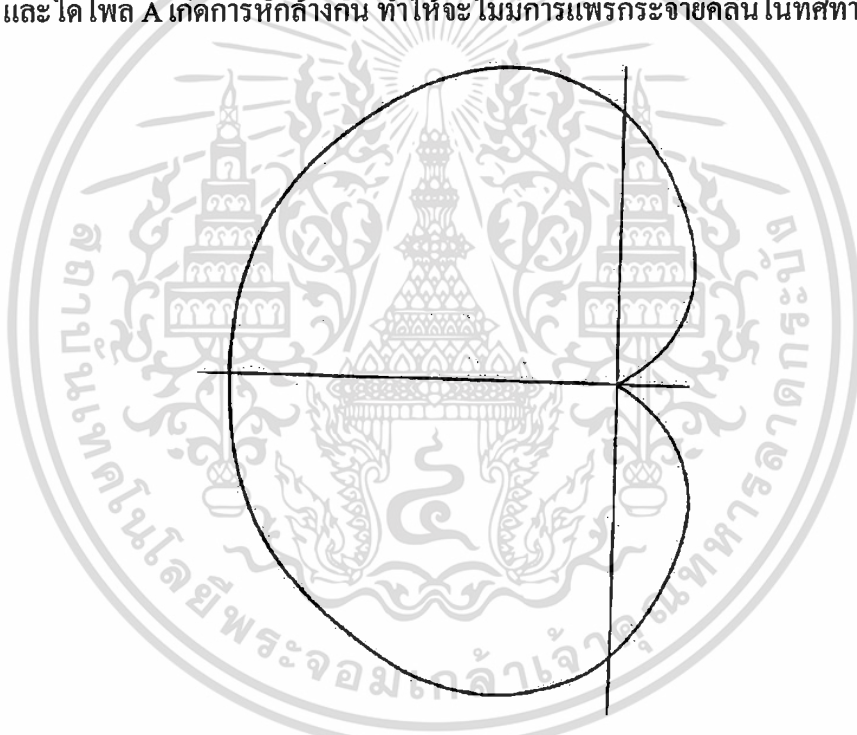
สายอากาศประเภทนี้สามารถใช้แทนสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนได้ในช่วงย่านความถี่สูง (High frequency) อีกทั้งยังใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยกว่า และข้อได้เปรียบอีกสิ่งหนึ่งของสายอากาศแบบล็อกพริโอดิก คือ สามารถรองรับช่วงของความถี่ได้กว้าง โดยก่อให้เกิดโลบด้านข้าง (Side lobe) หรือด้านหลัง (Back lobe) ในปริมาณที่น้อยมาก



รูปที่ 2.39 แสดงสายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$ สองเสาที่วางห่างกันในระยะ $\frac{\lambda}{4}$ ในแนวตั้ง

เพื่อให้เข้าใจถึงการทำงานของสายอากาศแบบล็อกพริโอดิกมากขึ้น จึงขออธิบายถึงคุณลักษณะเบื้องต้นของสายอากาศประเภทนี้ก่อนเป็นลำดับแรก จากรูปที่ 2.39 แสดงให้เห็นถึงสายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$ ทั้งเสาด้านซ้ายและด้านขวา โดยสมมติให้ชื่อของสายอากาศแต่ละเสา คือ A และ B ตามลำดับ จากนั้นนำสายอากาศทั้งสองมาวางห่างกันในระยะ $\frac{\lambda}{4}$ ที่ความถี่ค่าใดค่าหนึ่ง จะเห็นได้ว่า สายอากาศมีลักษณะเป็นอาร์เรย์แบบสองไดโพล ซึ่งสายอากาศทั้งสองถูกป้อนด้วยกระแสไฟฟ้าในขนาดที่เท่ากัน แต่จะแตกต่างกันตรงที่กระแสไฟฟ้าของสายอากาศแบบไดโพล A มีค่าของเฟส (Phase) นำหน้ากระแสไฟฟ้าของสายอากาศแบบไดโพล B อยู่ 90° จากจุดนี้ถ้าหากพิจารณาถึงรูปแบบการแพร่กระจายของคลื่นจะพบว่า แต่เดิมในระนาบแนวราบ สายอากาศแบบไดโพลจะสามารถแพร่กระจายคลื่นออกไปได้เท่ากันหมดในทุกทิศทาง ดังนั้นถ้าหากจำลองสถานการณ์การรับส่งสัญญาณกันระหว่างสายอากาศ A และสายอากาศ B โดยกำหนดให้สายอากาศ A คือสายอากาศในฝั่งของเครื่องส่ง และสายอากาศ B คือสายอากาศในฝั่งของเครื่องรับ

ถ้าหากพิจารณาทิศทางการติดต่อสื่อสารจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ จะพบว่าพลังงานที่แพร่กระจายจากสายอากาศแบบไดโพล A เดินทางออกจากแหล่งกำเนิดเป็นระยะทาง $\frac{\lambda}{4}$ โดยก่อนที่จะมาถึงสายอากาศแบบไดโพล B นั้นจะมีการกลับเฟสของพลังงานที่ส่งมาจากสายอากาศแบบไดโพล A ให้ตามหลังเฟสของกระแสไฟฟ้าในสายอากาศแบบไดโพล B อยู่ 90° ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากสายอากาศแบบไดโพล A และ B มีเฟสที่เสริมกันและกัน ในทางกลับกันถ้าหากพิจารณาทิศทางการติดต่อสื่อสารจากเครื่องรับไปยังเครื่องส่ง จะพบว่าพลังงานที่แพร่กระจายจากสายอากาศแบบไดโพล B เดินทางออกจากแหล่งกำเนิดเป็นระยะทาง $\frac{\lambda}{4}$ โดยก่อนที่จะมาถึงสายอากาศแบบไดโพล A นั้นจะมีการกลับเฟสของพลังงานที่ส่งมาจากสายอากาศแบบไดโพล B ให้มีความแตกต่างกับเฟสของกระแสไฟฟ้าในสายอากาศแบบไดโพล A อยู่ -180° ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากสายอากาศแบบไดโพล B และไดโพล A เกิดการหักล้างกัน ทำให้จะไม่มีการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางดังกล่าว

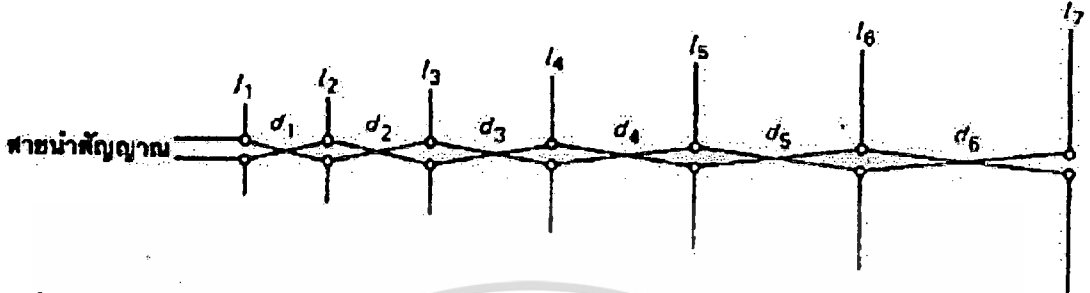


รูปที่ 2.40 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบแนวราบของสายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$ ทั้งสองเสาที่วางในแนวตั้ง และมีระยะห่างระหว่างกันที่ $\frac{\lambda}{4}$

โดยการเพิ่มประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายของสายอากาศประเภทนี้สามารถทำได้โดยการเพิ่มสายอากาศแบบไดโพลเสาที่ 3 โดยให้ชื่อว่า C และนำไปวางห่างจากสายอากาศแบบไดโพล B เป็นระยะทาง $\frac{\lambda}{4}$ จากนั้นทำการป้อนกระแสไฟฟ้าขนาดเดียวกันกับที่ป้อนให้กับสายอากาศแบบไดโพล A และ B ซึ่งจะให้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับที่กล่าวไปแล้วในข้างต้น ในทำนองเดียวกันถ้าหากเพิ่มสายอากาศแบบไดโพลเสาที่ 4 เสาที่ 5 หรือมากกว่านั้น ก็จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายของสายอากาศให้สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

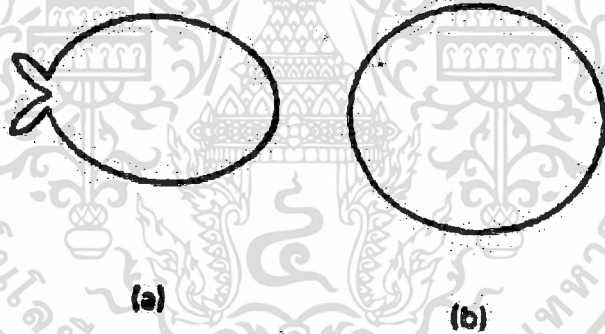
ด้วย แต่การใช้งานสายอากาศประเภทนี้จะมีข้อควรระวังที่สำคัญประการหนึ่ง คือ ต้องมีการคำนวณ และพิจารณาถึงระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบไดโพลแต่ละเสาอยู่เสมอ (มีหน่วยเป็น λ) ซึ่งจะเกิดความคลาดเคลื่อนไม่ได้เลยแม้แต่น้อย หมายความว่า สายอากาศประเภทนี้เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในงานที่มีการรับส่งสัญญาณในย่านความถี่เดียวกันเท่านั้น



รูปที่ 2.41 แสดงลักษณะของสายอากาศสี่กเพอริโอดิกแบบไดโพล (Log-periodic dipole antenna)

จากรูปที่ 2.41 จะเห็นได้ว่าความยาวของสายอากาศแบบไดโพล (I) จะมีขนาดที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากซ้ายไปขวา ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$I_2/I_1 = I_3/I_2 = I_4/I_3 = I_5/I_4 = I_6/I_5 = I_7/I_6 \tag{2.15}$$



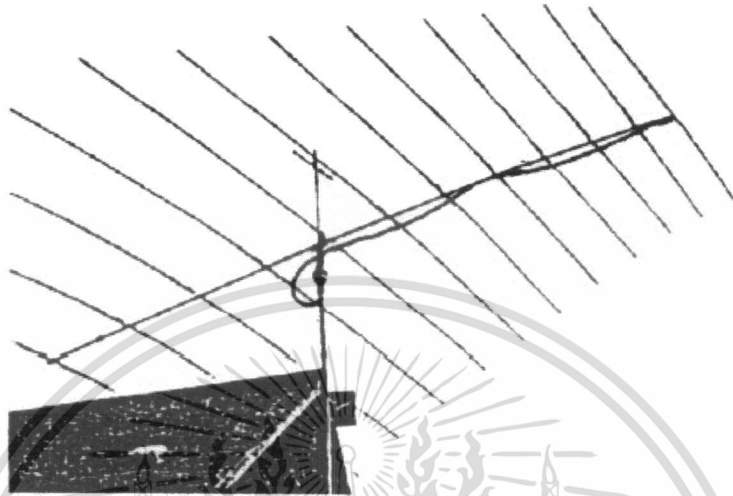
รูปที่ 2.42 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสี่กเพอริโอดิกแบบไดโพล

(a) ระนาบในแนวราบ (b) ระนาบในแนวตั้ง

จากสมการที่ 2.15 เราจะเรียกอัตราส่วนนี้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ในการออกแบบ และแทนด้วยสัญลักษณ์ T ส่วนระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบไดโพลแต่ละเสา (Distance: d) จะเห็นได้ว่ามีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จากซ้ายไปขวาเช่นกัน โดยการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศประเภทนี้จะมีเพียงสองหรือสามเสาเท่านั้นที่จะมีลักษณะเป็นรีโซแนนซ์ (Resonance) หรือมีความยาวของสายอากาศประมาณ $\frac{\lambda}{2}$ ซึ่งถ้าหากจุดใดมีลักษณะดังกล่าวจะส่งผลให้มีกระแสและแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุด รวมทั้งยังเป็นจุดที่มีอัตราการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดอีกด้วย เมื่อเทียบกับจุดอื่นๆ บนสายอากาศ ในทำนองเดียวกัน ถ้าหากย่านความถี่เปลี่ยนแปลงไป ขนาดความยาวของสายอากาศก็ย่อมเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยเช่นกัน เพื่อให้สายอากาศมีลักษณะเป็นรีโซแนนซ์และ

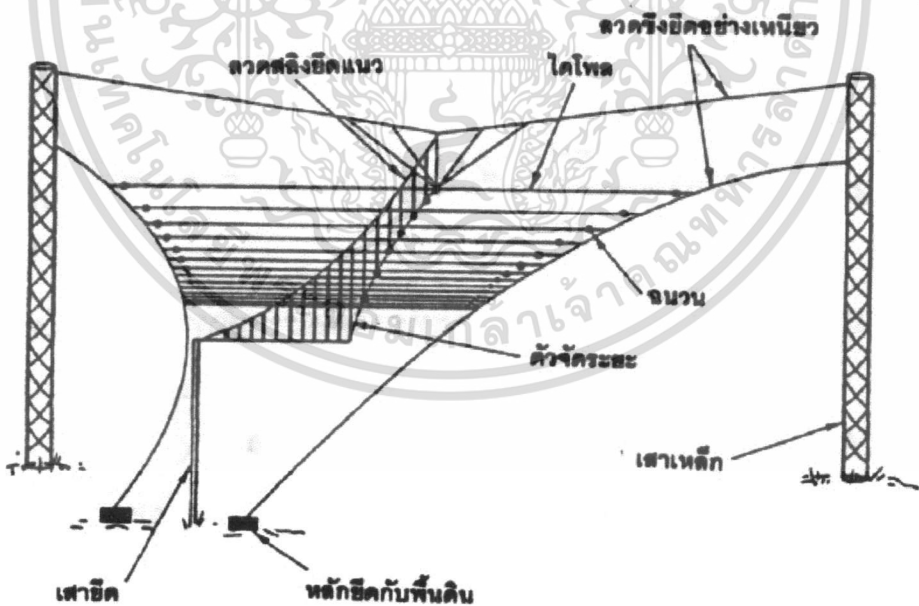
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถที่จะแพร่กระจายคลื่นออกไปได้ครอบคลุมพื้นที่ได้อย่างกว้างขวาง ส่วนสายอากาศแบบไดโพลที่ไม่ได้มีลักษณะเป็นรีโซแนนซ์ก็จะมีความสามารถในการแพร่กระจายคลื่นที่น้อยมาก จากคุณสมบัติที่ได้กล่าวในข้างต้น ส่งผลให้สายอากาศสี่อวกเพอริโอดิกแบบไดโพลสามารถรองรับการทำงานในช่วงความถี่ที่กว้างได้



รูปที่ 2.43 แสดงการนำสายอากาศสี่อวกเพอริโอดิกแบบไดโพลไปใช้งานจริง

สำหรับการนำสายอากาศสี่อวกเพอริโอดิกแบบไดโพลไปใช้งานในย่านความถี่สูงจำเป็นต้องมีการดัดแปลงสายอากาศขึ้นใหม่ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.44



รูปที่ 2.44 แสดงการนำสายอากาศสี่อวกเพอริโอดิกแบบไดโพลไปใช้งานในย่านความถี่สูง

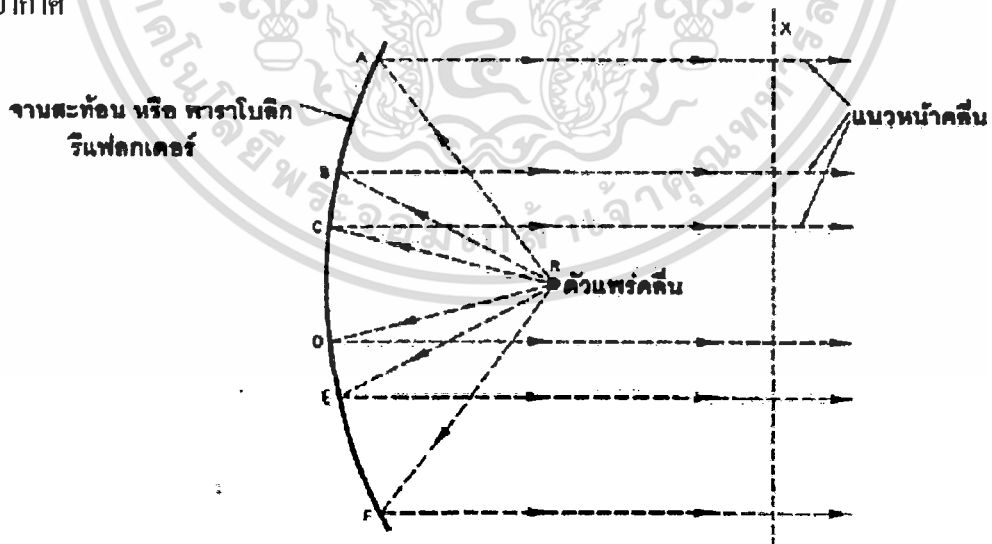
จะเห็นได้ว่า ถ้าหากติดตั้งสายอากาศใกล้กับพื้นโลก จะส่งผลให้การแพร่กระจายคลื่นในระนาบแนวตั้งเกิดการสะท้อนกับพื้นผิวโลก ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเป็นประโยชน์อย่างมากกับการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ ถ้าหากสามารถบังคับองศาในการแพร่กระจายคลื่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปได้เท่ากันตลอดในทุกย่านความถี่ และในปัจจุบันนักวิจัยทางด้านโทรคมนาคมได้คิดค้นวิธีการในการบังคับของเสาในการแพร่กระจายคลื่น ได้เรียบร้อยแล้ว ซึ่งสามารถทำได้โดยป้อนแรงดันและกระแสไฟฟ้าให้กับแต่ละพาราซิติค อีลีเมนต์ (Parasitic element) ในปริมาณที่เท่ากัน เมื่อเทียบกับพื้นดิน ซึ่งการกระทำดังกล่าวถือเป็นการแสดงถึงความสูงจริงของสายอากาศเมื่อเทียบกับพื้นผิวโลก โดยแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแต่ละพาราซิติค อีลีเมนต์จะเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวของสายอากาศที่นำมาใช้งาน

สายอากาศล๊อคเพอริโอดิกแบบไดโพลมักถูกนำไปใช้ในการรับส่งสัญญาณในย่านความถี่สูงที่มีช่วงของความถี่ตั้งแต่ 4.30 MHz ขึ้นไป ซึ่งอิมพีแดนซ์ของสายอากาศประเภทนี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 50 ถึง 300 โอห์ม และอัตราการขยายจะมีค่าประมาณ 10 dB แต่สามารถเพิ่มขึ้นได้สูงสุดถึง 14 dB ถ้าหากคลื่นเกิดการสะท้อนกับพื้นผิวโลก

2.2.1.12 สายอากาศแบบพาราโบลิก รีเฟลคเตอร์ (Parabolic Reflector antenna)

เนื่องจากค่าความถี่ในช่วงของบนของย่าน UHF (Ultra high frequency) และย่าน SHF (Super high frequency) จะมีความยาวคลื่นที่มีขนาดเล็กมากจนสายอากาศทั่วไปไม่สามารถใช้รับส่งสัญญาณระหว่างกันได้ ต่อมาภายหลังจึงได้มีการพัฒนาสายอากาศแบบพาราโบลิก รีเฟลคเตอร์ หรือสายอากาศรูปจานขึ้น ซึ่งสายอากาศชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่น รวมทั้งอัตราขยายของสายอากาศที่สูงมาก โดยส่วนประกอบของสายอากาศจะประกอบด้วยจานหลักขนาดใหญ่ ซึ่งทำหน้าที่ในการสะท้อนคลื่นวิทยุจากแหล่งกำเนิดขนาดเล็กไปสู่ชั้นบรรยากาศ



รูปที่ 2.45 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบพาราโบลิก รีเฟลคเตอร์

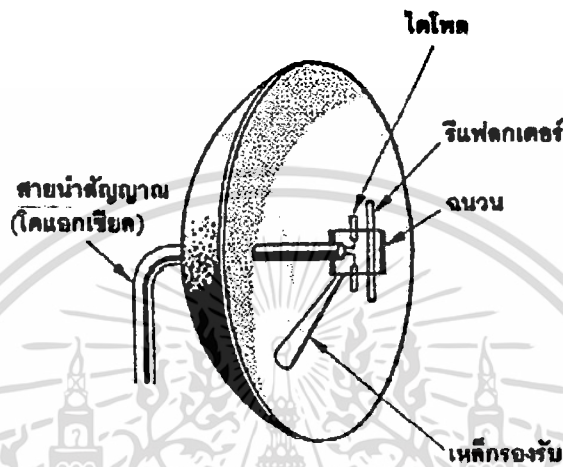
จากรูปที่ 2.45 คุณสมบัติประการหนึ่งของจานสะท้อนคือ ระยะทางที่ห่างจากจุดโฟกัส (จุด R) ไปยังจานและสะท้อนไป ณ จุดใดจุดหนึ่งในแนวหน้าคลื่นจะมีค่าคงที่เสมอ ดังนั้นจึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละจุดบนระนาบของจานสะท้อน ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของกรมการศึกษานอกโรงเรียน กระทรวงศึกษาธิการ ห้ามมิให้ผู้ใดนำเอกสารนี้ไปใช้หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$RAX = RBX = RCX = RDX = REX = RFX \quad (2.16)$$

จากคุณสมบัตินี้ทำให้แนวหน้าคลื่นที่สะท้อนกลับมามีความสมบูรณ์ ซึ่งถ้าหากใช้เป็นสายอากาศที่ติดอยู่กับเครื่องรับ กลไกการทำงานจะเริ่มจากคลื่นวิทยุเดินทางมากระทบกับจานรับและสะท้อนไปยังจุดโฟกัส ซึ่งมีสายอากาศรับขนาดเล็กที่เชื่อมต่อกับสายนำสัญญาณติดตั้งอยู่



รูปที่ 2.46 แสดงรูปร่างของสายอากาศแบบพาราโบลา รีเฟลคเตอร์

อัตราขยายของสายอากาศชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานสะท้อน ซึ่งมีหน่วยเป็นความยาวคลื่น (λ) ถ้าหากเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่ามากกว่าขนาดของความยาวคลื่นหลายๆ เท่า จะส่งผลให้อัตราขยายของสายอากาศก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายของสายอากาศกับเส้นผ่านศูนย์กลางของจานสะท้อนแสดงได้ดังนี้

$$\text{อัตราขยายของสายอากาศ} = 6 \times \left(\frac{D}{\lambda}\right)^2 \quad (2.17)$$

ส่วนความกว้างปีม (Beamwidth) ของสายอากาศหาได้จากสมการดังนี้

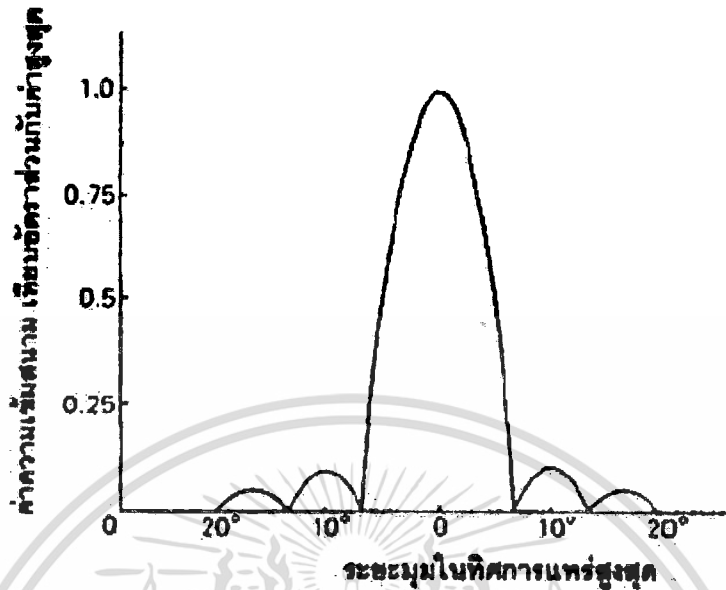
$$\text{ความกว้างปีม} = 70 \times \left(\frac{\lambda}{D}\right) \quad (2.18)$$

โดยที่ D คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง

สำหรับรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบพาราโบลา รีเฟลคเตอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.47

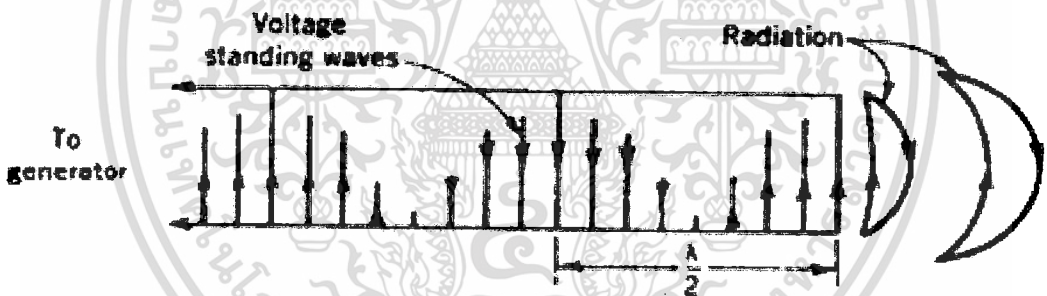
จากรูปที่ 2.47 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งประกอบด้วย โลบหลัก (Main lobe) หนึ่งโอบที่มีความกว้างปีม (Beamwidth) แคบมากและโอบด้านข้าง (Side lobe) ขนาดเล็กอีกจำนวนหนึ่ง โดยสาเหตุที่โอบหลักมีความกว้างปีมแคบก็เพื่อให้เกิดทิศทางในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายคลื่นไปได้ครอบคลุมพื้นที่ได้กว้างขวาง และเพื่อให้ได้อัตราการขยายของสายอากาศที่เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.47 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบพารา โบลิก รีเฟล็กเตอร์

2.2.2 กลไกการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ



รูปที่ 2.48 แสดงการแพร่กระจายคลื่นจากสายส่ง

เมื่อมีการป้อนสัญญาณเข้าไปในสายส่งวงจรรปิด สัญญาณจะเดินทางไปยังปลายของสายส่งและจะเกิดการสะท้อนกลับมายังแหล่งกำเนิด เนื่องจากผลรวมระหว่างสัญญาณที่เดินทางไปจนถึงปลายของสายส่งกับสัญญาณที่ถูกสะท้อนกลับมายังแหล่งกำเนิด จะก่อให้เกิด คลื่นนิ่ง (Standing wave) ดังรูปที่ 2.48 โดยสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังแหล่งกำเนิดจะมีค่าไม่เท่ากับปริมาณของสัญญาณที่ป้อนเข้าให้กับสายส่งทั้งหมด ทั้งนี้เพราะพลังงานคลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้าบางส่วนได้หลุดออกไปจากระบบ ขณะที่เดินทางไปถึงปลายของสายส่งและถูกแผ่กระจายออกไปในอากาศ แต่พลังงานที่หลุดออกไปจากระบบที่ปลายของสายส่งจะมีปริมาณน้อยมาก เนื่องจากการแผ่กระจายสัญญาณจากปลายด้านหนึ่งจะมีชี้ที่ตรงกันข้ามกับการแผ่กระจายสัญญาณจากปลายอีกด้านหนึ่งเสมอ และถ้าหากระยะห่างระหว่างปลายของสายส่งทั้งสองด้านมีปริมาณที่น้อยมาก จะส่งผลให้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับขนาดความยาวคลื่นจะก่อให้เกิดการหักล้างกันของสัญญาณ ซึ่งเป็นเหตุผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ว่าทำไมสายส่งแบบคู่ขนานที่ใช้สำหรับการรับส่งสัญญาณ ในย่านความถี่ต่ำจึงไม่สามารถแพร่กระจายคลื่นออกไปในอากาศได้

หากแยกปลายของสายส่งทั้งสองด้านออกจากกันเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 2.49 (ซ้าย) จะเห็นว่ามีการหักล้างกันของคลื่นที่ถูกแพร่กระจายออกไปในอากาศลดน้อยลง ซึ่งส่งผลให้การแพร่กระจายคลื่นจากสายส่งมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าหากแยกปลายของสายส่งทั้งสองด้านออกห่างจากกันมากจนเกินไป จะส่งผลให้คลื่นที่เดินทางมาถึงปลายของสายส่ง เกิดการสะท้อนกลับยังแหล่งกำเนิดได้ยากมากขึ้น โดยประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายส่งนั้นจะดีที่สุดก็ต่อเมื่อปลายของสายส่งทั้งสองด้านห่างออกจนอยู่ในระนาบเดียวกัน ดังรูปที่ 2.49 (ขวา)



รูปที่ 2.49 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจากสายส่ง

(ซ้าย) เมื่อแยกปลายของสายส่งทั้งสองด้านออกจากกันมากขึ้น

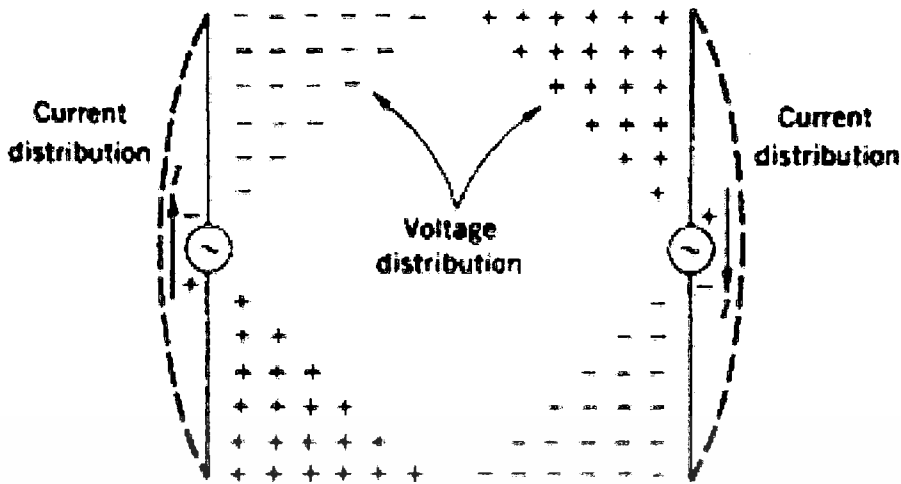
(ขวา) เมื่อแยกปลายของสายส่งทั้งสองด้านจนอยู่ในระนาบเดียวกัน

2.2.3 ตัวแพร่กระจายคลื่นในอากาศ

หลอดตัวนำถือเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด ในบรรดาตัวแพร่กระจายทั้งหมดที่ถูกคิดค้นขึ้น โดยหลอดตัวนำมักถูกเลือกนำไปใช้เป็นองค์ประกอบในการสร้างสายอากาศ เนื่องจากมีราคาถูก มีความทนทาน และมีความสามารถในการเหนี่ยวนำสัญญาณคลื่นวิทยุได้ดี โดยการพิจารณาหรือศึกษาการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในเบื้องต้น จะมีความคล้ายคลึงกับการพิจารณาการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือ จะทำการพิจารณาในสภาวะแวดล้อมแบบอวกาศว่าง (Free space environment)

2.2.3.1 การแพร่กระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในสายอากาศ

การแพร่กระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในสายอากาศจะมีความคล้ายคลึงกับการกระจายกระแสและแรงดันไฟฟ้าในสายส่ง ในทางปฏิบัติสายอากาศจะมีความยาวตามสัดส่วนของความยาวคลื่น แต่ในบางครั้งสายอากาศอาจมีการออกแบบให้มีความยาวเกินกว่าขนาดของความยาวคลื่น เพื่อให้สามารถรองรับการรับส่งสัญญาณในย่านความถี่ที่หลากหลายมากยิ่งขึ้นได้



รูปที่ 2.50 แสดงการแพร่กระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าบนสายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$

จากรูปที่ 2.50 แสดงการแพร่กระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติตลอดความยาวของสายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความคล้ายคลึงกับการแพร่กระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าบนสายส่งแบบปลายของสายส่งทั้งสองด้านแยกออกจากกัน ดังรูปที่ 2.49 (ซ้าย) โดยจุดที่ป้อนกระแสไฟฟ้าไปยังสายส่งนั้นจะมีแรงดันต่ำ แต่จะมีกระแสไฟฟ้าสูง ซึ่งแรงดันและกระแสไฟฟ้าจะมีการกลับขั้วอยู่เสมอ เมื่อคลื่นเดินทางครบทุกๆ ครั้งรอบ ส่วนในรูปที่ 2.51 จะแสดงการแพร่กระจายของกระแสไฟฟ้าบนสายอากาศที่มีความยาวเป็นสองเท่าของครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($\frac{\lambda}{2}$) ซึ่งสายอากาศประเภทนี้จะมีรูปแบบของการแพร่กระจายแรงดันไฟฟ้าเหมือนกันกับสายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$ ทุกประการ

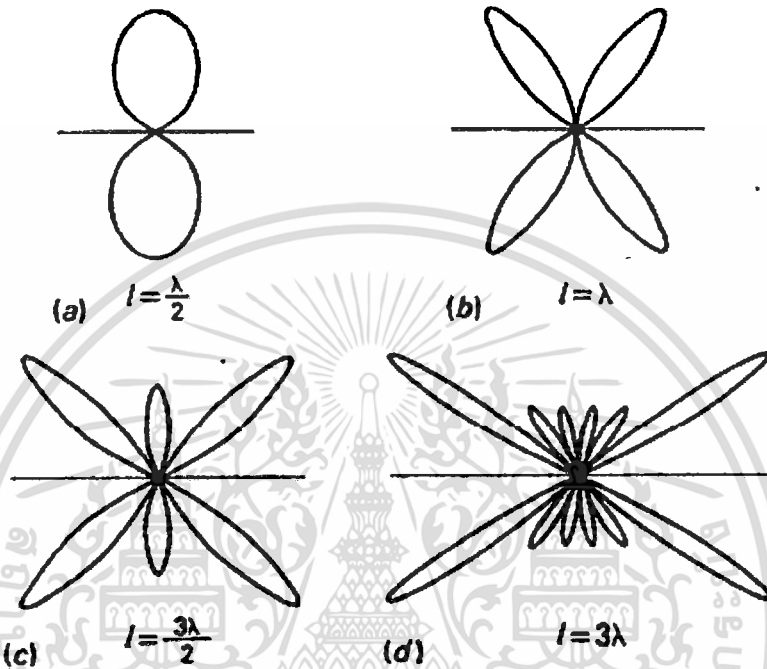


รูปที่ 2.51 แสดงการแพร่กระจายของกระแสไฟฟ้าบนสายอากาศแบบไดโพลชนิดต่างๆ

2.2.3.2 สายอากาศรีโซแนนซ์ (Resonant antenna)

สายอากาศรีโซแนนซ์จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับสายอากาศแบบไดโพล ทำให้สายอากาศชนิดนี้จึงมีลักษณะเหมือนสายส่งแบบปลายของสายส่งทั้งสองด้านแยกออกจากกัน โดยความยาวของสายส่งจะมีความยาวพอดีกับระยะที่ทำให้เกิดรีโซแนนซ์ได้ ซึ่งระยะที่ก่อให้เกิดรีโซแนนซ์นั้นจะเกิดขึ้นในทุกๆ ช่วงที่มีความยาวเท่ากับ $\frac{\lambda}{4}$ บนสายอากาศ ดังนั้นสายอากาศรีโซแนนซ์จึงมีความยาวเป็นสองเท่าของครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($\frac{\lambda}{2}$) โดยเหตุผลที่พิจารณาเลือกความยาวที่ก่อให้เกิดรีโซแนนซ์เป็นสายอากาศ เพราะเป็นตำแหน่งที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำ และโดยทั่วไปเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศ (Source) ก็จะมีเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ต่ำด้วย จึงส่งผลให้สามารถทำงานร่วมกันได้โดยไม่ก่อให้เกิดคลื่นนิ่ง (Standing wave) ซึ่งรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับความยาวของสายอากาศเป็นสำคัญ ส่วนสายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$ จะมีรูปแบบในการแพร่กระจายคลื่นที่คล้ายคลึงกันกับสายส่ง แต่จะมีลักษณะที่แบนราบกว่า



รูปที่ 2.52 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรีโซแนนซ์ไดโพลชนิดต่างๆ

รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรีโซแนนซ์จะลักษณะเป็นเส้นที่ลากต่อกัน โดยในแต่ละจุดจะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เท่ากัน ซึ่งเปรียบเทียบกับเส้นอุณหภูมิที่จะแสดงจุดที่มีอุณหภูมิเท่ากันบนแผนที่ทางอุตุนิยมวิทยา เมื่อความยาวของสายอากาศเท่ากับขนาดความยาวคลื่น ขั้วของกระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งในสายอากาศจะต้องตรงกันข้ามกับขั้วของกระแสไฟฟ้าอีกส่วนหนึ่งในสายอากาศเสมอ ดังรูปที่ 2.51 ซึ่งส่งผลให้คลื่นที่ถูกแพร่กระจายออกมาในทิศทางทำมุมตั้งฉากกับสายอากาศจะถูกหักล้างไปจนหมด โดยทิศทางที่เหมาะสมในการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดจะอยู่ที่มุม 45° และเมื่อกระแสไฟฟ้าเกิดการสลับเฟสจะก่อให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นออกไปจากแหล่งกำเนิดทั้งหมด 4 ทิศทางด้วยกัน ซึ่งเรียกว่า โลบ (Lobes) ดังรูปที่ 2.52

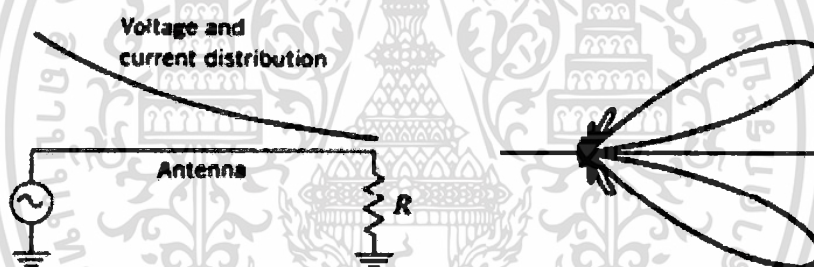
ถ้าหากความยาวของสายอากาศไดโพลเพิ่มขึ้นเป็น $\frac{3\lambda}{2}$ การแพร่กระจายของกระแสไฟฟ้าจะเป็นดังรูปที่ 2.51 ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลของการแพร่กระจายกระแสไฟฟ้าในทิศทางเดียวกันจะเกิดการเสริมกัน ส่วนการแพร่กระจายกระแสไฟฟ้าในทิศทางที่ตรงข้ามกันจะเกิดการหักล้างกันดังรูปที่ 2.52 จะเห็นว่ามุมที่ตั้งฉากกับสายอากาศจะมีการแพร่กระจายคลื่นออกไปเพียงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กน้อย (Minor lobes) เท่านั้น แต่ในทิศทางที่ทำมุมใกล้เคียงกับแนวของสายอากาศจะมีการแผ่กระจายคลื่นออกไปสูงสุด ซึ่งจะเรียกว่า โลบหลัก (Major lobes)

เมื่อสายอากาศไดโพลมีความยาวเป็นสามเท่าของความยาวคลื่น รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นจะเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 2.52 จะเห็นได้ว่าเมื่อความยาวของสายอากาศรีโซแนนซ์เพิ่มมากขึ้น จำนวนของโบลก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย รวมทั้งทิศทางการแผ่กระจายของโบลหลักก็จะยิ่งจะเข้าใกล้แนวเดียวกับทิศทางของสายอากาศมากขึ้นด้วย

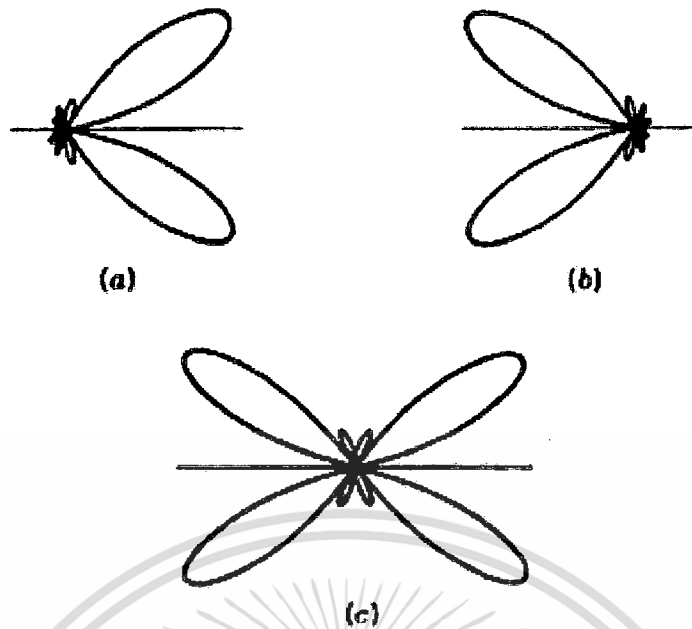
2.2.3.3 สายอากาศไม่รีโซแนนซ์ (Non-resonant antenna)

สายอากาศไม่รีโซแนนซ์จะมีลักษณะเหมือนกันกับสายส่งแบบไม่รีโซแนนซ์ ซึ่งสายอากาศประเภทนี้จะไม่ก่อให้เกิดคลื่นนิ่ง (Standing wave) เนื่องจากจะไม่มี การสะท้อนกลับของกระแสและแรงดันไฟฟ้ามายังแหล่งกำเนิด จะมีเพียงกระแสและแรงดันที่เคลื่อนที่ไปยังปลายทั้งสองข้างของสายส่งเท่านั้น โดยกำลังงานที่เคลื่อนที่ไปยังปลายทั้งสองข้างของสายส่งและถูกแผ่กระจายออกไปในอากาศจะคิดเป็น 67% ของกำลังงานทั้งหมด ส่วนกำลังงานที่เหลืออีก 33% จะถูกดูดกลืนจากสายอากาศทั้งหมด



รูปที่ 2.53 แสดงการแผ่กระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศไม่รีโซแนนซ์ (ซ้าย) และรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไม่รีโซแนนซ์ (ขวา)

จากรูปที่ 2.53 แสดงการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไม่รีโซแนนซ์ ซึ่งจะมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกันกับสายอากาศรีโซแนนซ์ แต่จะแตกต่างกันตรงที่สายอากาศไม่รีโซแนนซ์จะมีทิศทางในการแผ่กระจายคลื่นเพียงทิศทางเดียว (Unidirectional) ซึ่งเป็นผลมาจากการเดินทางของคลื่นที่จะมีการเดินทางไปยังปลายทั้งสองข้างของเสาส่งเพียงอย่างเดียว ดังนั้นถ้าหากทำการจำแนกรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การเดินทางของคลื่นไปยังปลายทั้งสองข้างของเสาส่งและการสะท้อนกลับของคลื่นมายังแหล่งกำเนิดภายในเสาส่ง จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.54 ซึ่งถ้าหากนำการเดินทางของคลื่นทั้งสองรูปแบบที่ได้กล่าวในข้างต้นมารวมกัน จะก่อให้เกิดการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศรีโซแนนซ์แบบสองทิศทางขึ้นทันที (Bidirectional)



รูปที่ 2.54 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรีโซแนนซ์

- (a) เมื่อคลื่นเดินทางไปยังปลายทั้งสองข้างของเสาส่ง
- (b) เมื่อคลื่นสะท้อนกลับมายังแหล่งกำเนิดภายในเสาส่ง
- (c) เมื่อคลื่นที่เดินทางไปยังปลายทั้งสองข้างของเสาส่งและคลื่นที่สะท้อนกลับมายังแหล่งกำเนิดภายในเสาส่งเกิดการรวมตัวกัน

2.2.4 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศ

เนื้อหาที่อธิบายต่อไปนี้จะเป็นการกล่าวถึงความหมายและความสำคัญของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของสายอากาศแต่ละชนิด

2.2.4.1 อัตราการขยาย (Gain)

อัตราการขยาย คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณกำลังในการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่กำหนดของสายอากาศเทียบกับปริมาณกำลังงานในการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางเดียวกัน ระยะทางที่เท่ากัน และปริมาณพลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศมีค่าเท่ากัน ซึ่งเราจะเรียกสายอากาศที่ประพุดิตตัวได้เช่นนี้ว่า สายอากาศไอโซโทรปิก (Isotropic antenna) สายอากาศไอโซโทรปิกถือเป็นสายอากาศในอุดมคติที่ไม่มีอยู่จริงในทางปฏิบัติ โดยอัตราส่วนของปริมาณกำลังงานในสายอากาศประเภทนี้จะเรียกว่า Directive gain ซึ่งการคำนวณค่า Directive gain สามารถทำได้ดังนี้

1. คำนวณหาปริมาณกำลังงานในระยะทางและทิศทางการแพร่กระจายคลื่นตามที่กำหนดของสายอากาศ

2. คำนวณหาปริมาณกำลังงานจากสายอากาศไอโซโทรปิกในระยะทางที่เท่ากัน ทิศทางเดียวกัน และปริมาณพลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศมีค่าเท่ากับขั้นตอนที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำผลที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 มาเปรียบเทียบตามอัตราส่วนซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะกลายเป็นค่า Directive gain ของสายอากาศ

โดยค่า Directive gain ในสายอากาศแบบไดโพลจะเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวของสายอากาศ เช่น สายอากาศแบบไดโพลชนิด $\frac{\lambda}{2}$ จะมีค่า Directive gain เป็น 1.64 หรือสายอากาศแบบไดโพลชนิด 8λ จะมีค่า Directive gain เป็น 7.1 โดยค่า Directive gain ทั้งสองได้ถูกวัดและคำนวณในสภาวะอวกาศว่าง แต่ถ้าหากนำไปเปรียบเทียบกับสายอากาศไมรีโซแนนซ์ที่ขนาดความยาวของสายอากาศเท่ากันจะพบว่าสายอากาศไมรีโซแนนซ์จะมีค่า Directive gain ที่สูงกว่า คือ 3.2 และ 17.4 ตามลำดับ โดยการวัดค่า Directive gain บนสายอากาศรีโซแนนซ์และไมรีโซแนนซ์สามารถวัดได้จากโลบหลัก (Major lobes) ในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งในจุดนี้จะมีค่า Directive gain ที่สูงที่สุด

2.2.4.2 อัตราการขยายกำลัง (Power gain)

ในการวัดอัตราการขยายกำลังของสายอากาศสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนกำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศที่ต้องการวัด เพื่อให้ได้ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางของโลบหลักที่มีค่าเท่ากับค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าบนสายอากาศมาตรฐาน จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับอัตราส่วนกำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศทั้งสอง โดยการคำนวณหาอัตราการขยายกำลังสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.19

$$\text{อัตราการขยายกำลัง} = 10 \log_{10} \frac{P_r}{P_t} \quad (2.19)$$

เมื่อกำหนดให้

P_t คือ กำลังงานของสายอากาศมาตรฐาน

P_r คือ กำลังงานของสายอากาศที่ต้องการทดสอบอัตราการขยายกำลัง

จะเห็นได้ว่าถ้าหากต้องการพิจารณาถึงค่า Directivity gain จะต้องคำนึงถึงกำลังงานในการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่สูงที่สุดเป็นสิ่งสำคัญ แต่สำหรับอัตราการขยายกำลังจะต้องพิจารณาจากกำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศเป็นหลัก ซึ่งทั้งสองค่าจะมีความคล้ายคลึงกันมาก แต่จะแตกต่างกันในส่วนของการขยายกำลังที่จะมีปัจจัยด้านการสูญเสียในสายอากาศร่วมด้วย ทำให้สามารถเขียนสมการในการคำนวณอัตราการขยายกำลังได้อีกรูปแบบหนึ่งดังนี้

$$AP = nD \quad (2.20)$$

เมื่อกำหนดให้

AP คือ อัตราการขยายกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D คือ สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ซึ่งมักได้มาจากการคำนวณทางทฤษฎี

n คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศ (หากไม่มีการสูญเสียในสายอากาศเกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ 1)

2.2.4.3 ความต้านทานในสายอากาศ

ความต้านทานในสายอากาศจะประกอบด้วยความต้านทาน 2 ส่วนคือ ความต้านทานในการแพร่กระจายคลื่น (R_r) ซึ่งเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสายอากาศ และความต้านทานที่เกิดจากการสูญเสียในสายอากาศ โดยความต้านทานในการแพร่กระจายคลื่นจะถูกกำหนดขึ้นจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณกำลังงานในการแพร่กระจายกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ถูกป้อนมาจากแหล่งกำเนิดภายในสายอากาศ มีหน่วยเป็น โอห์ม

$$R_r = P_r / I_r^2 \quad (2.21)$$

เมื่อกำหนดให้

R_r คือ ความต้านทานในการแพร่กระจายคลื่น

P_r คือ ปริมาณกำลังงานในการแพร่กระจาย

I_r คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ถูกป้อนมาจากแหล่งกำเนิดในสายอากาศ

ความต้านทานที่เกิดจากการสูญเสียในสายอากาศสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น การปลดปล่อยพลังงานจากตัวเก็บประจุ ฉนวนที่หุ้มสายอากาศไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ กระแสเอ็ดดี้ (Eddy current) การเหนี่ยวนำกับโลหะที่อยู่ใกล้กับสายอากาศ โดยความสูญเสียเหล่านี้ทำให้เหมือนกับมีตัวต้านทานต่ออยู่ระหว่างสายอากาศกับพื้นดิน (R_d) ตลอดเวลาดังนั้นความต้านทานในสายอากาศสามารถทั้งหมดสามารถนำมาอธิบายเป็นสมการได้ดังนี้

$$R_a = R_r + R_d \quad (2.22)$$

เมื่อกำหนดให้

R_a คือ ความต้านทานในสายอากาศ

R_r คือ ความต้านทานในการแพร่กระจายคลื่น

R_d คือ ความต้านทานที่เกิดจากการสูญเสียในสายอากาศ

ในทางปฏิบัติ ถ้าหากต้องการให้สายอากาศมีประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นสูงสามารถทำได้โดยลดค่าความต้านทานที่เกิดจากการสูญเสียในสายอากาศให้น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับความต้านทานในการแพร่กระจายคลื่น โดยประสิทธิภาพของสายอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = R_r / (R_r + R_d) \quad (2.23)$$

เมื่อกำหนดให้

n คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศ

R_r คือ ความต้านทานในการแพร่กระจายคลื่น

R_d คือ ความต้านทานที่เกิดจากการสูญเสียในสายอากาศ

2.2.4.4 แบนด์วิดท์สายอากาศ (Bandwidth)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศคือ ช่วงความถี่ที่สายอากาศจะมีคุณสมบัติในการทำงานได้ไม่ผิดเพี้ยนไปจากที่ได้ออกแบบไว้บนค่าความถี่กลาง โดยความผิดเพี้ยนในการทำงานของสายอากาศไปจากข้อกำหนดมาตรฐานอาจเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น อินพุทอิมพีแดนซ์ รูปแบบการแพร่กระจาย ความกว้างบีบ โพลาริเซชัน อัตราการขยาย และประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ด้วยเหตุที่คุณสมบัติของสายอากาศจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ทำให้ผู้ออกแบบและสร้างสายอากาศไม่สามารถกำหนดคุณสมบัติตามแบนด์วิดท์ช่วงใดช่วงหนึ่งได้ จากข้อจำกัดดังกล่าว ทำให้ผู้ออกแบบและสร้างสายอากาศจึงตัดสินใจให้คุณสมบัติของสายอากาศสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามการนำไปประยุกต์ใช้งานในแต่ละรูปแบบ ซึ่งโดยทั่วไปรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นและอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์จะเป็นตัวที่กำหนดค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศ รวมทั้งรูปทรงของแบนด์วิดท์ด้วย (Pattern bandwidth) โดยแบนด์วิดท์คือ ค่าความแตกต่างระหว่างความถี่ที่ทำให้กำลังงานที่รับได้ในเครื่องรับมีค่าลดลงครึ่งหนึ่ง เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกำลังงานที่เกิดขึ้นบนเครื่องส่ง ในทิศทางทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นออกไปสูงที่สุด เช่น สายอากาศแบบไดโพลหรือสายอากาศหุกระต่ายมีความสามารถในการรับสัญญาณจากย่านความถี่ VHF (Very high frequency) ได้ตั้งแต่ 54 MHz ถึง 216 MHz ซึ่งผลต่างของความถี่ตั้งต้นและความถี่สุดท้ายที่สายอากาศสามารถรับได้จะเรียกว่าเป็นแบนด์วิดท์ของสายอากาศก็ได้ แต่ในความเป็นจริงแล้ว สายอากาศแบบไดโพลถือเป็นสายอากาศที่มีประสิทธิภาพแย่มากที่สุด แต่สามารถที่จะรับสัญญาณได้เนื่องจากเครื่องรับมีความไวสูง (Receiver sensitivity) และสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากเครื่องส่งก็มีกำลังงานสูงอีกด้วย โดยการคำนวณหาค่าความถี่เฉลี่ยเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบสายอากาศสามารถทำได้ดังสมการที่ 2.24

$$f_m = \sqrt{f_L \times f_H} \quad (2.24)$$

เมื่อกำหนดให้

f_m คือ ค่าความถี่เฉลี่ยเชิงเรขาคณิต

f_L คือ ค่าต่ำสุดของแถบความถี่

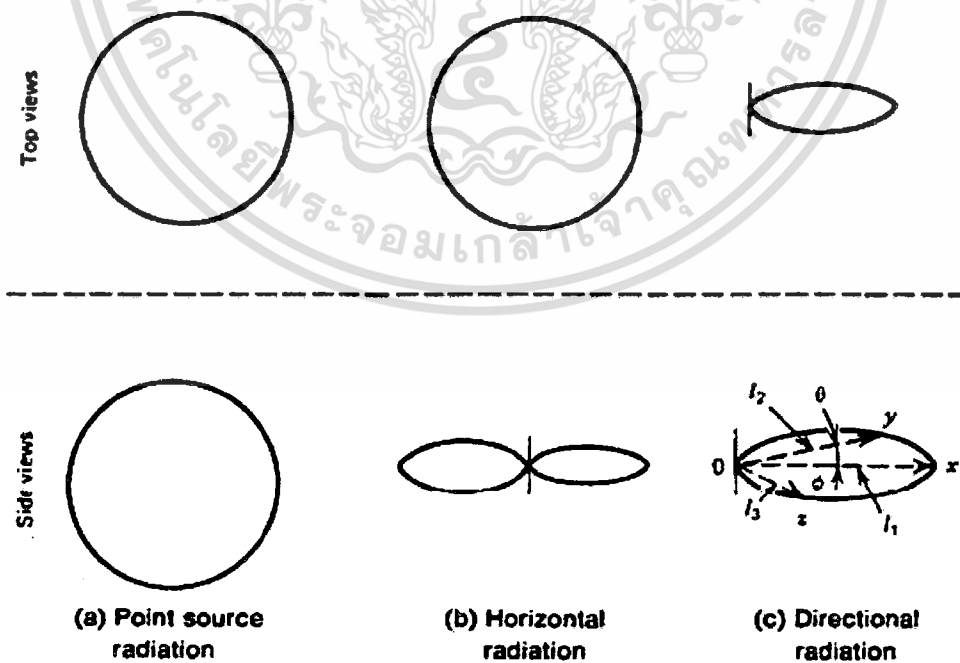
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

f_H คือ ค่าสูงสุดของแถบความถี่

2.2.4.5 รูปแบบการแพร่กระจายสัญญาณ (Radiation pattern)

รูปแบบการแพร่กระจายสัญญาณถือเป็นการแสดงถึงประสิทธิภาพของสัญญาณที่ถูกแพร่กระจายอยู่โดยรอบของสายอากาศในทุกทิศทาง โดยตัวแพร่กระจายสัญญาณในอุดมคติที่เรียกว่าจุดกำเนิด จะมีรูปแบบในการแพร่กระจายคลื่นเป็นรูปทรงกลม ซึ่งหมายความว่าค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากันหมดในทุกทิศทาง ดังรูปที่ 2.55(a) ส่วนสายอากาศที่มีรูปแบบในการแพร่กระจายคลื่นในระนาบแนวนอนจะมีรูปร่างเหมือนขนมโดนัท โดยมีสายอากาศเป็นแกนในแนวตั้ง ดังรูปที่ 2.55(b) ส่วนสายอากาศที่มีรูปแบบในการแพร่กระจายคลื่นแบบแคบๆ จะมีรูปร่างคล้ายวงรี ซึ่งเปรียบเสมือนลำคลื่นที่พุ่งตรงไปยังทิศทางใดทิศทางหนึ่ง โดยสายอากาศที่มีรูปแบบในการแพร่กระจายคลื่นเช่นนี้ มักเป็นสายอากาศที่ถูกออกแบบให้มีทิศทางในการแพร่กระจายคลื่นแบบเฉพาะเจาะจง (Directional) ดังรูปที่ 2.55(c)

รูปแบบในการแพร่กระจายคลื่นสามารถบ่งบอกได้ถึงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่วัดได้ในทิศทางต่างๆ จากรูปที่ 2.55(c) จะเห็นได้ว่าในตำแหน่ง X Y และ Z เป็นเวกเตอร์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวเท่ากับ I_1 , I_2 และ I_3 ตามลำดับ โดยค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตำแหน่ง X Y และ Z จะมีค่าเท่ากันหมด ทำให้สรุปได้ว่ารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นคือ เส้นขอบ (Locus) ของตำแหน่งทั้งหมดบนลำคลื่นที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากัน

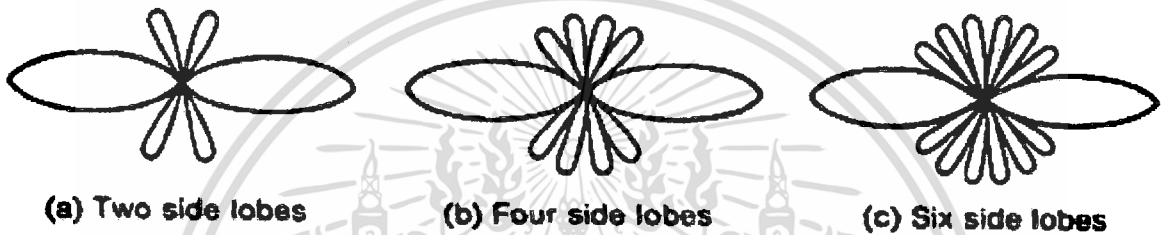


รูปที่ 2.55 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4.6 โลบข้าง (Side lobe)

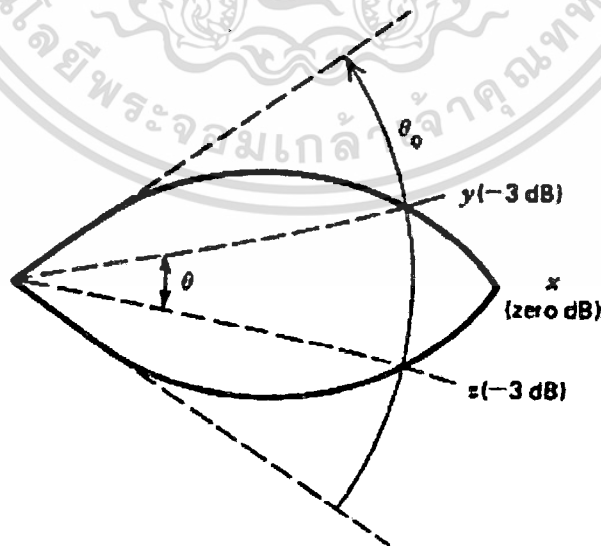
โอบข้างคือส่วนหนึ่งของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำ โดยจะเกิดขึ้นนอกเหนือจากรูปแบบการแพร่กระจายของโอบหลัก (Major lobes) ซึ่งมีความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสูง ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยากมากที่จะบังคับให้มีการแพร่กระจายคลื่นออกจากโอบหลักเพียงจุดเดียว โดยทั่วไปเมื่อมีการแพร่กระจายคลื่นออกจากโอบหลักมักจะก่อให้เกิดโอบข้างเสมอ ซึ่งโอบข้างจะมีการแพร่กระจายคลื่นออกไปยังทิศทางที่ไม่ต้องการและก่อให้เกิดการสูญเสียในสายอากาศอีกด้วย โดยโอบข้างจะส่งผลกระทบต่ออย่างเห็นได้ชัดบนเครื่องรับ เนื่องจากจะเป็นตัวที่คอยรับสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบและทำให้ประสิทธิภาพในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับลดลงได้



รูปที่ 2.56 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่มีโอบข้างแบบต่างๆ

- (a) การแพร่กระจายคลื่นที่ก่อให้เกิดโอบข้าง 2 โอบ
- (b) การแพร่กระจายคลื่นที่ก่อให้เกิดโอบข้าง 4 โอบ
- (c) การแพร่กระจายคลื่นที่ก่อให้เกิดโอบข้าง 6 โอบ

2.2.4.7 ความกว้างบีม (Beamwidth)



รูปที่ 2.57 แสดงความกว้างบีมของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดความกว้างบีมของสายอากาศจะมีอยู่ทั้งหมด 2 แบบคือ กำหนดจากมุมที่เกิดจากการลากเส้นที่จุดตัดของเส้น โค้งกับเส้นขอบทั้งสองด้านของการแพร่กระจายคลื่นมายังสายอากาศ ดังรูปที่ 2.57 โดยที่มุม θ จุดตัดคือตำแหน่ง y และ z ส่วนรัศมีของเส้น โค้งคือระยะกำลังงานที่ลดลงครึ่งหนึ่งในแนวที่มีกำลังงานสูงสุด ซึ่งในรูปที่ 2.57 คือแนว x โดยจะเรียกความกว้างบีมที่มีลักษณะเช่นนี้ว่า ความกว้างบีมครึ่งกำลัง (Half power point beamwidth) และอีกแนวทางหนึ่งในการกำหนดความกว้างบีมสามารถทำได้โดยลากเส้นไปในแนวที่ไม่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่เลยจนมาบรรจบกันที่สายอากาศ ซึ่งจะเรียกความกว้างบีมที่มีลักษณะเช่นนี้ว่า First-nulls beamwidth

2.2.4.8 โพลาริเซชัน (Polarization)

โพลาริเซชันของสายอากาศโดยทั่วไปจะมีทั้งหมด 2 แนวด้วยกันคือ แนวตั้ง (Vertical) และแนวนอน (Horizontal) โดยปกติการกำหนดแนวของสายอากาศจะอ้างอิงจากระนาบของสนามไฟฟ้า ซึ่งมักจะมีการวางตัวขนานกันกับสายอากาศเสมอ วิธีในการจำแนกโพลาริเซชันของสายอากาศที่ง่ายที่สุดสามารถทำได้โดยการสังเกตจากลักษณะการทำงานของสายอากาศ เนื่องจากสายอากาศที่ทำงานในย่านความถี่ต่ำมักเลือกโพลาริเซชันในแนวตั้งเพราะจะมีการรับส่งสัญญาณระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่งบนภาคพื้นดินเป็นหลัก ส่วนสายอากาศที่มีโพลาริเซชันแนวนอนมักพบในสายอากาศที่ทำงานในย่านความถี่สูงเท่านั้น

2.2.4.9 อัตราส่วนจากด้านหน้าถึงด้านหลัง (Front to back ratio)

สายอากาศชนิดทิศทางเดียวจะมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุดในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้น เพราะฉะนั้นค่าอัตราส่วนจากด้านหน้าถึงด้านหลังจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ซึ่งอัตราส่วนนี้สามารถหาได้จากการนำค่าในการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่สูงสุดมาเปรียบเทียบกับเป็นสัดส่วนกับค่าในการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ตรงข้ามกัน ในกรณีของสายอากาศที่ติดตั้งบนเครื่องรับ ถ้าหากสามารถรับสัญญาณในทิศทางที่ตรงกันข้าม ได้จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่งลดลงอย่างเห็นได้ชัด เช่น ความแรงของสัญญาณลดลง หรือเกิดเงาบนเครื่องรับ โทรทัศน์ที่ได้รับสัญญาณสะท้อนกลับมาจากด้านหลังของสายอากาศ

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการลดทอนตามระยะทาง (Path loss models)

การลดทอนตามระยะทาง (Path loss) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อสัญญาณที่ได้รับอ่อนลง เนื่องจากระยะห่างระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่งที่เพิ่มมากขึ้น โดยไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่งของสายอากาศทั้งสองฝ่าย สำหรับในกรณีที่เครื่องรับอยู่ไกลจากเครื่องส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่ถูกส่งออกไปจากเครื่องส่งจะมีการสูญเสียมากขึ้นตามกำลังสองของระยะทางที่เพิ่มขึ้น และกำลังสองของความถี่ที่ใช้ด้วย หมายความว่า ถ้าหากระยะทางระหว่างเครื่องรับอยู่ไกลจากเครื่องส่งมากเท่าใดและใช้ความถี่สูงขึ้นมากเท่าใด ก็จะเกิดการลดทอนตามระยะทางมากขึ้นเท่านั้น และถ้าหากเครื่องรับอยู่ห่างไกลจากเครื่องส่งเป็นระยะทางมากกว่า 2 กิโลเมตรขึ้นไป การลดทอนตามระยะทางของสัญญาณจะเพิ่มมากขึ้นตามกำลังสี่ของระยะห่างเครื่องรับและเครื่องส่ง

ในปัจจุบันการออกแบบและวางโครงสร้างเครือข่ายขนาดกลางและขนาดใหญ่จำเป็นต้องมีการสำรวจพื้นที่และสภาวะแวดล้อมโดยรอบก่อนเสมอ เพื่อที่จะนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเป็นส่วนหนึ่งในการพิจารณาและตัดสินใจเลือกโครงสร้างและอุปกรณ์เครือข่ายที่เหมาะสมที่สุดในสภาวะแวดล้อมนั้น จากความต้องการดังกล่าวทำให้นักวิจัยได้ทำการคิดค้นแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางขึ้นมากมาย เพื่อให้นำไปใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ และเห็นถึงผลกระทบของการลดทอนตามระยะทางที่เกิดขึ้นในสภาวะแวดล้อมนั้นๆ โดยในส่วนนี้จะอธิบายถึงแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางแบบต่างๆ ที่ถูกคิดค้นขึ้นตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งสามารถจำแนกตามความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ 4 ประเภท คือ สภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง (Free space) สภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง (Urban area) สภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง (Suburban area) และสภาวะแวดล้อมแบบชนบท (Rural area)

2.3.1 แบบจำลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง

แบบจำลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่งที่มีความแม่นยำสูงและถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่ทั้งหมด 3 แบบจำลองด้วยกันดังนี้

2.3.1.1 Simplified model

$$PL_{FS} = 32.45 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) \text{ [dB]} \quad (2.25)$$

เมื่อกำหนดให้

d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิรต์ซ์ (MHz)

2.3.1.2 Walfish model

แบบจำลองชนิดนี้สามารถแบ่งออกเป็นแบบจำลองย่อยได้ถึง 2 แบบจำลองตามสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันดังนี้

1. สภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง (Free space)

$$L_{fs} = 32.45 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + s \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้

L_{fs} คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในพื้นที่เปิดโล่ง

d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิร์ตซ์ (MHz)

2. สภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่งในหุบเขาลึก (Free space in deep valley)

$$L_{fs} = 42.6 + 26 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + s \quad (2.27)$$

เมื่อกำหนดให้

L_{fs} คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในพื้นที่เปิดโล่ง

d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิร์ตซ์ (MHz)

2.3.1.3 Lee model

$$PL = 96.92 + 20 \log_{10}(d) + 10 n \log_{10}(f/900) - \alpha_0 \quad (2.28)$$

เมื่อกำหนดให้

PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในพื้นที่เปิดโล่ง

d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิร์ตซ์ (MHz)

n คือ ค่าที่ได้จากการทดลอง

α คือ ค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้อง (Correction factor) ซึ่งมีสูตรในการคำนวณ ดังนี้

$$\alpha_0 = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 \quad (2.29)$$

$$\alpha_1 = (h_b/30.48)^2 \quad (2.30)$$

$$\alpha_2 = (h_m/3)^2 \quad (2.31)$$

$$\alpha_3 = (P_t/10)^2 \quad (2.32)$$

$$(2.33)$$

$$\alpha_4 = (G_b/4) \quad (2.34)$$

$$\alpha_5 = G_m$$

เมื่อกำหนดให้

h_b คือ ความสูงของสถานีฐาน

เอกสาร h_m คือ ความสูงของสถานีเคลื่อนที่ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_r คือ กำลังที่ใช้ในการรับ-ส่ง

G_b คือ อัตราการขยายของสายอากาศในสถานีส่ง

G_m คือ อัตราการขยายของสายอากาศในสถานีเคลื่อนที่

2.3.2 แบบจำลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

แบบจำลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองที่มีความแม่นยำสูงและถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่ทั้งหมด 7 แบบจำลองด้วยกันดังนี้

2.3.2.1 Ericsson model

$$PL = 36.2 + 30.2 \log_{10}(d) + 12 \log_{10}(h_b) + 0.1 \log_{10}(h_b) \quad (2.35)$$

$$* \log_{10}(d) - 3.2(\log_{10}(11.75 * h_m)^2) + g(f)$$

$$g(f) = 44.49 \log_{10}(f) - 4.78(\log_{10}(f))^2 \quad (2.36)$$

เมื่อกำหนดให้

PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิรตซ์ (MHz)

h_b คือ ความสูงของสถานีฐาน

h_m คือ ความสูงของสถานีเคลื่อนที่

2.3.2.2 Hata model

$$PL = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) + \quad (2.37)$$

$$(44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \log_{10}(d) + s - a(h_m)$$

โดยสมการในการคำนวณค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้องของเสารับ-ส่งสัญญาณของสถานีเคลื่อนที่ (Mobile Station antenna correction factor: $a(h_m)$) แสดงได้ดังสมการที่ 2.38

$$a(h_m) = (1.11 \log_{10}(f) - 0.7)h_m - (1.56 \log_{10}(f) - 0.8) \quad (2.38)$$

เมื่อกำหนดให้

PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิรตซ์ (MHz)
 d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)
 h_b คือ ความสูงของสถานีฐาน
 $a(h_m)$ คือ ค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้องของเสารับ-ส่งสัญญาณของสถานีเคลื่อนที่

2.3.2.3 Cost-231 model

$$PL = 43.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \log_{10}(d) + s - a(h_m) \quad (2.39)$$

โดยสมการในการคำนวณค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้องของเสารับ-ส่งสัญญาณของสถานีเคลื่อนที่ (Mobile Station antenna correction factor: $a(h_m)$) จะมีรูปแบบเหมือนกับสมการที่ 2.38

เมื่อกำหนดให้

- PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง
 f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิรตซ์ (MHz)
 d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)
 h_b คือ ความสูงของสถานีฐาน
 $a(h_m)$ คือ ค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้องของเสารับ-ส่งสัญญาณของสถานีเคลื่อนที่

2.3.2.4 Erceg model

$$PL = A + 10\alpha \log_{10}(d/d_0) + S + L_f + L_m \quad (2.40)$$

โดยสมการในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ A , α , L_f และ L_m สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.41, 2.42, 2.43 และ 2.44 ตามลำดับ

$$A = 20 * \log_{10}(4\pi d_0 f / C) \quad (2.41)$$

$$\alpha = (4.6 - 0.0075 * h_b + 12.6/h_b) \quad (2.42)$$

$$L_f = 6.0 \log_{10}(f/2000) \quad (2.43)$$

$$L_m = -10.8 \log_{10}(h_m/2000) \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้

PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

α คือ การสูญเสียกำลังสัญญาณที่ได้จากการทดลอง

d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

d_0 คือ ระยะทางอ้างอิงมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิรตซ์ (MHz)

L_f คือ ค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้องของความถี่

L_m คือ ค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้องของสถานีเคลื่อนที่

h_b คือ ความสูงของสถานีฐาน

h_m คือ ความสูงของสถานีเคลื่อนที่

2.3.2.5 ECC-33 model

$$PL = PL_{fs} + PL_{bm} - G_b - G_m \quad (2.45)$$

โดยสมการในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ PL_{fs} , PL_{bm} , G_b และ G_m สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.46 2.47 2.48 และ 2.49 ตามลำดับ

$$PL_{fs} = 92.4 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) \quad (2.46)$$

$$PL_{bm} = 20.41 + 9.83 \log_{10}(d) + 7.897 \log_{10}(f) + 9.56(\log_{10}(f))^2 \quad (2.47)$$

$$G_b = \log_{10}(h_b/200) \{13.98 + 5.8[\log_{10}(d)]^2\} \quad (2.48)$$

$$G_m = [42.57 + 13.7 \log_{10}(f)][\log_{10}(h_m) - 0.585] \quad (2.49)$$

เมื่อกำหนดให้

PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

PL_{fs} คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในพื้นที่เปิดโล่ง

PL_{bm} คือ การสูญเสียกำลังสัญญาณที่ได้จากการทดลอง

G_b คือ อัตราการขยายของสายอากาศในสถานีส่ง

G_m คือ อัตราการขยายของสายอากาศในสถานีเคลื่อนที่

d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิรตซ์ (MHz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

h_b คือ ความสูงของสถานีฐาน

h_m คือ ความสูงของสถานีเคลื่อนที่

2.3.2.6 Lee model

$$PL = 123.77 + 30.5 \log_{10}(d) + 10 n \log_{10}(f/900) - \alpha_0 \quad (2.50)$$

เมื่อกำหนดให้

PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิรต์ซ์ (MHz)

n คือ ค่าที่ได้จากการทดลอง

α คือ ค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้อง (Correction factor) ซึ่งมีสูตรในการคำนวณเช่นเดียวกับสมการที่ 2.29 2.30 2.31 2.32 2.33 และ 2.34

2.3.2.7 COST231 Walfish-Ikegami (WI) model

แบบจำลองชนิดนี้สามารถแบ่งออกเป็นแบบจำลองย่อยได้ถึง 2 แบบจำลองตามย่านความถี่ที่ใช้ในการรับ-ส่งสัญญาณและสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันดังนี้

1. รับส่งสัญญาณในย่านความถี่ตั้งแต่ 2 GHz – 10 GHz ที่สภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองขนาดเล็กและขนาดกลาง โดยพื้นที่ดังกล่าวประกอบไปด้วยสิ่งกีดขวางมากมาย (non-line of sight)

$$PL = 49.186 + 38 \log_{10}(d) + (25.3 + 0.7f/925) \log_{10}(f) + 6 \log_{10}(f/2000) \quad (2.51)$$

เมื่อกำหนดให้

PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิรต์ซ์ (MHz)

2. รับส่งสัญญาณในย่านความถี่ตั้งแต่ 10 GHz – 66 GHz ที่สภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองขนาดเล็ก ขนาดกลาง และสภาพพื้นที่โล่ง (Flat areas) โดยพื้นที่ดังกล่าวจะต้องปราศจากสิ่งกีดขวางทุกชนิด (line of sight)

$$PL = 42.6 + 26 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 6 \log_{10}(f/2000) + A_p \quad (2.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสมการในการคำนวณการสูญเสียกำลังสัญญาณอันเนื่องมาจากเม็ดฝน (Rain attenuation) แสดงได้ดังสมการที่ 2.53

$$A_p = \gamma_R \times L_s \times r_p \text{ [dB]} \quad (2.53)$$

เมื่อกำหนดให้

PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิรตซ์ (MHz)

A_p คือ การสูญเสียกำลังสัญญาณอันเนื่องมาจากเม็ดฝน

L_s คือ เส้นทางการเคลื่อนที่ของคลื่นที่ผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง

γ_R คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียกำลังสัญญาณอันเนื่องมาจากเม็ดฝน

r_p คือ เส้นทางการเดินทางของคลื่นที่สั้นที่สุด

2.3.3 แบบจำลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

แบบจำลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองที่มีความแม่นยำสูงและถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่ทั้งหมด 8 แบบจำลองด้วยกันดังนี้

2.3.3.1 Okumura model

$$PL = PL_{fs} + A_{mn}(f,d) - G(h_b) - G(h_m) - G_{AREA} \quad (2.54)$$

โดยสมการในการคำนวณกำลังของสัญญาณในระดับความสูงของสายอากาศที่แตกต่างกันทั้งที่สถานีรับและสถานีส่ง สามารถแยกออกได้เป็น 3 กลุ่มหลักๆ และแสดงดังสมการที่ 2.55 2.56 และ 2.57

1. สำหรับสายอากาศของสถานีส่งที่มีความสูงตั้งแต่ 10 เมตร จนถึง 1000 เมตร

$$G(h_b) = 20 \log_{10}(h_b/200) \quad (2.55)$$

2. สำหรับสายอากาศของสถานีรับที่มีความสูงน้อยกว่า 3 เมตร

$$G(h_m) = 10 \log_{10}(h_m/3) \quad (2.56)$$

3. สำหรับสายอากาศของสถานีรับที่มีความสูงตั้งแต่ 3 เมตร จนถึง 10 เมตร

$$G(h_m) = 20 \log_{10}(h_m/3) \quad (2.57)$$

เมื่อกำหนดให้

PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง

PL_{fs} คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในพื้นที่เปิดโล่ง

A_{mm}(f,d) คือ ค่าเฉลี่ยในการลดทอนของกำลังสัญญาณในพื้นที่เปิดโล่ง

d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิรตซ์ (MHz)

G_{AREA} คือ กำลังของสัญญาณในระดับความสูงของสายอากาศที่แตกต่างกัน

G(h_b) คือ อัตราการขยายของสายอากาศในสถานีส่ง

G(h_m) คือ อัตราการขยายของสายอากาศในสถานีเคลื่อนที่

h_b คือ ความสูงของสถานีฐาน

h_m คือ ความสูงของสถานีเคลื่อนที่

2.3.3.2 Ericsson model

$$PL = 43.20 + 68.93 \log_{10}(d) + 12 \log_{10}(h_b) + 0.1 \log_{10}(h_b) \quad (2.58)$$

$$* \log_{10}(d) - 3.2(\log_{10}(11.75 * h_m)^2) + g(f)$$

$$g(f) = 44.49 \log_{10}(f) - 4.78(\log_{10}(f))^2 \quad (2.59)$$

เมื่อกำหนดให้

PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง

d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิรตซ์ (MHz)

h_b คือ ความสูงของสถานีฐาน

h_m คือ ความสูงของสถานีเคลื่อนที่

2.3.3.3 Hata model

$$PL = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \quad (2.60) \\ * \log_{10}(d) + s - a(h_m) - 2(\log_{10}(f/28))^2 - 5.4$$

โดยสมการในการคำนวณค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้องของเสารับ-ส่งสัญญาณของสถานีเคลื่อนที่ (Mobile Station antenna correction factor: $a(h_m)$) จะมีรูปแบบเหมือนกับสมการที่ 2.38

เมื่อกำหนดให้

- PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง
 f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิร์ตซ์ (MHz)
 d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)
 h_b คือ ความสูงของสถานีฐาน
 h_m คือ ความสูงของสถานีเคลื่อนที่
 $a(h_m)$ คือ ค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้องของเสารับ-ส่งสัญญาณของสถานีเคลื่อนที่

2.3.3.4 COST-231 model

$$PL = 43.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \quad (2.61) \\ * \log_{10}(d) + s - a(h_m) - 2(\log_{10}(f/28))^2 - 5.4$$

โดยสมการในการคำนวณค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้องของเสารับ-ส่งสัญญาณของสถานีเคลื่อนที่ (Mobile Station antenna correction factor: $a(h_m)$) จะมีรูปแบบเหมือนกับสมการที่ 2.38

เมื่อกำหนดให้

- PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง
 f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิร์ตซ์ (MHz)
 d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)
 h_b คือ ความสูงของสถานีฐาน
 h_m คือ ความสูงของสถานีเคลื่อนที่
 $a(h_m)$ คือ ค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้องของเสารับ-ส่งสัญญาณของสถานีเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.5 Erceg model

$$PL = A + 10\alpha \log_{10}(d/d_0) + S + L_f + L_m \quad (2.62)$$

โดยสมการในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ A L_f และ L_m จะเหมือนกับสมการที่ 2.41 2.43 และ 2.44 ตามลำดับ แต่สำหรับสมการในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ α จะเป็นไปตามสมการที่ 2.63

$$\alpha = (4.0 - 0.0065 * h_b + 17.1/h_b) \quad (2.63)$$

เมื่อกำหนดให้

- PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง
- α คือ การสูญเสียกำลังสัญญาณที่ได้จากการทดลอง
- d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)
- d_0 คือ ระยะทางอ้างอิงมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)
- L_f คือ ค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้องของความถี่
- L_m คือ ค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้องของสถานีเคลื่อนที่
- h_b คือ ความสูงของสถานีฐาน

2.3.3.6 ECC-33 model

$$PL = PL_{fs} + PL_{bm} - G_b - G_m \quad (2.64)$$

โดยสมการในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ PL_{fs} PL_{bm} G_b และ G_m จะเหมือนกับสมการที่ 2.46 2.47 2.48 และ 2.49 ตามลำดับ

เมื่อกำหนดให้

- PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง
- PL_{fs} คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในพื้นที่เปิดโล่ง
- PL_{bm} คือ การสูญเสียกำลังสัญญาณที่ได้จากการทดลอง
- G_b คือ อัตราการขยายของสายอากาศในสถานีส่ง
- G_m คือ อัตราการขยายของสายอากาศในสถานีเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.7 Lee model

$$PL = 99.86 + 38.4 \log_{10}(d) + 10 n \log_{10}(f/900) - \alpha \quad (2.65)$$

เมื่อกำหนดให้

PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง

d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิรตซ์ (MHz)

n คือ ค่าที่ได้จากการทดลอง

α คือ ค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้อง (Correction factor) ซึ่งมีสูตรในการคำนวณเช่นเดียวกับสมการที่ 2.29 2.30 2.31 2.32 2.33 และ 2.34

2.3.3.8 Okumura-Hata model

แบบจำลองชนิดนี้สามารถแบ่งออกเป็นแบบจำลองย่อยได้ถึง 3 แบบจำลองตามย่านความถี่ที่ใช้ในการรับ-ส่งสัญญาณดังนี้

1. รับส่งสัญญาณในย่านความถี่ที่ไม่เกิน 2 GHz

$$PL = A + 10\gamma \log_{10}(d/d_0) + s, \quad d > d_0 \quad (2.66)$$

$$A = 20 \log_{10}(4\pi d_0 / \lambda) \quad (2.67)$$

เมื่อกำหนดให้

PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง

d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

d_0 คือ ระยะทางอ้างอิงมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

λ คือ ขนาดความยาวคลื่น

γ คือ ค่าตัวประกอบของการสูญเสียกำลังสัญญาณ (Path loss factor) ซึ่งสมการในการคำนวณสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\gamma = a - b * h_b + c/h_b \quad (2.68)$$

เมื่อกำหนดให้

a b และ c คือ ค่าคงที่ซึ่งจะขึ้นอยู่กับแต่ละสภาวะแวดล้อมที่ทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. รับส่งสัญญาณในย่านความถี่ตั้งแต่ 2 GHz จนถึง 10 GHz

$$PL = PL + \Delta PL_f + \Delta PL_h \quad (2.69)$$

เมื่อกำหนดให้

PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมแบบชานเมือง

ΔPL_f คือ ค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้อง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\Delta PL_f = 6 \log_{10}(f/2000) \quad (2.70)$$

เมื่อกำหนดให้

f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิรตซ์ (MHz)

ΔPL_h คือ ความสูงของสายอากาศบนเครื่องรับ ซึ่งสามารถจำแนกรูปแบบการคำนวณได้เป็น 2 ลักษณะตามแต่ละสถานะแวดล้อมดังนี้

1. สถานะแวดล้อมที่มีความหนาแน่นของสิ่งกีดขวางสูง

$$\Delta PL_h = -10.8 \log_{10}(h/2) \quad (2.71)$$

2. สถานะแวดล้อมที่มีความหนาแน่นของสิ่งกีดขวางต่ำ

$$\Delta PL_h = -20(h/2) \quad (2.72)$$

เมื่อกำหนดให้

h คือ ความสูงของสายอากาศในฝั่งรับมีหน่วยเป็นเมตร

3. รับส่งสัญญาณในย่านความถี่ตั้งแต่ 10 GHz จนถึง 66 GHz

เนื่องจากการรับ-ส่งสัญญาณในย่านความถี่สูงจึงมีโอกาสที่จะเกิดการสูญเสียกำลังสัญญาณอันเนื่องมาจากเม็ดฝน (Rain attenuation) ได้ ดังนั้นจึงต้องทำการเพิ่มสมการการสูญเสียกำลังอันเนื่องมาจากเม็ดฝนลงไปในสมการที่ใช้ในการคำนวณหาการสูญเสียกำลังสัญญาณด้วย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$PL = PL + \Delta PL_f + \Delta PL_h + A_p = 20 \log_{10}(4\pi d_0 / \lambda) + 10(a - bh_b + c/h_b) \quad (2.73)$$

$$* \log_{10}(d/d_0) + s + (\gamma_R \times L_s \times r_p), \quad d > d_0$$

เมื่อกำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของกรมการสื่อสารทหารอากาศประจําเมือง
 ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ΔPL_f คือ ค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้อง
- ΔPL_h คือ ความสูงของสายอากาศบนเครื่องรับ
- A_p คือ การสูญเสียกำลังสัญญาณอันเนื่องมาจากเม็ดฝน
- d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)
- d_0 คือ ระยะทางอ้างอิงมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)
- λ คือ ขนาดความยาวคลื่น
- a, b, c คือ ค่าคงที่ซึ่งจะขึ้นอยู่กับแต่ละสภาวะแวดล้อมที่ทำการทดลอง
- h_b คือ ความสูงของสถานีฐาน
- L_s คือ เส้นทางการเคลื่อนที่ของคลื่นที่ผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง
- γ_R คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียกำลังสัญญาณอันเนื่องมาจากเม็ดฝน
- r_p คือ เส้นทางการเดินทางของคลื่นที่สั้นที่สุด

2.3.4 แบบจำลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท

แบบจำลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชนบทที่มีความแม่นยำสูงและถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่ทั้งหมด 6 แบบจำลองด้วยกันดังนี้

2.3.4.1 Okumura model

$$PL = PL_{fs} + A_{mn}(f,d) - G(h_b) - G(h_m) - G_{AREA} \quad (2.74)$$

โดยสมการในการคำนวณกำลังของสัญญาณในระดับความสูงของสายอากาศที่แตกต่างกันทั้งที่สถานีรับและสถานีส่ง สามารถแยกออกได้เป็น 3 กลุ่มหลักๆ ซึ่งเหมือนกับสมการที่ 2.55 2.56 และ 2.57

เมื่อกำหนดให้

- PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท
- PL_{fs} คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในพื้นที่เปิดโล่ง
- $A_{mn}(f,d)$ คือ ค่าเฉลี่ยในการลดทอนของกำลังสัญญาณในพื้นที่เปิดโล่ง
- f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิรตซ์ (MHz)
- d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)
- $G(h_b)$ คือ อัตราการขยายของสายอากาศในสถานีส่ง
- $G(h_m)$ คือ อัตราการขยายของสายอากาศในสถานีเคลื่อนที่
- G_{AREA} คือ กำลังของสัญญาณในระดับความสูงของสายอากาศที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของกรมการสื่อสารแห่งประเทศไทย และอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าละเมิดใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4.2 Ericsson model

$$PL = 45.95 + 100.6 \log_{10}(d) + 12 \log_{10}(h_b) + 0.1 \log_{10}(h_b) \quad (2.75)$$

$$* \log_{10}(d) - 3.2(\log_{10}(11.75 * h_m)^2) + g(f)$$

$$g(f) = 44.49 \log_{10}(f) - 4.78(\log_{10}(f))^2 \quad (2.76)$$

เมื่อกำหนดให้

PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท

d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิรตซ์ (MHz)

h_b คือ ความสูงของสถานีฐาน

h_m คือ ความสูงของสถานีเคลื่อนที่

2.3.4.3 Hata model

$$PL = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \quad (2.77)$$

$$* \log_{10}(d) + s - a(h_m) - 4.78(\log_{10}(f))^2 + 18.33 \log_{10}(f) - 40.98$$

โดยสมการในการคำนวณค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้องของเสารับ-ส่งสัญญาณของสถานีเคลื่อนที่ (Mobile Station antenna correction factor: $a(h_m)$) จะมีรูปแบบเหมือนกับสมการที่ 2.38

เมื่อกำหนดให้

PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท

f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิรตซ์ (MHz)

d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

h_b คือ ความสูงของสถานีฐาน

h_m คือ ความสูงของสถานีเคลื่อนที่

$a(h_m)$ คือ ค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้องของเสารับ-ส่งสัญญาณของสถานีเคลื่อนที่

2.3.4.4 COST-231 model

$$PL = 43.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \quad (2.78)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสมการในการคำนวณค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้องของเสารับ-ส่งสัญญาณของสถานีเคลื่อนที่ (Mobile Station antenna correction factor: $a(h_m)$) จะมีรูปแบบเหมือนกับสมการที่ 2.38

เมื่อกำหนดให้

PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมแบบชนบท

f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิร์ตซ์ (MHz)

d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

h_b คือ ความสูงของสถานีฐาน

h_m คือ ความสูงของสถานีเคลื่อนที่

$a(h_m)$ คือ ค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้องของเสารับ-ส่งสัญญาณของสถานีเคลื่อนที่

2.3.4.5 Erceg model

$$PL = A + 10\alpha \log_{10}(d/d_0) + S + L_f + L_m \quad (2.79)$$

โดยสมการในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ A L_f และ L_m จะเหมือนกับสมการที่ 2.41 2.43 และ 2.44 ตามลำดับ แต่สำหรับสมการในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ α จะเป็นไปตามสมการที่ 2.80

$$\alpha = (3.6 - 0.005 * h_b + 20/h_b) \quad (2.80)$$

เมื่อกำหนดให้

PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมแบบชนบท

α คือ การสูญเสียกำลังสัญญาณที่ได้จากการทดลอง

d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

d_0 คือ ระยะทางอ้างอิงมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

L_f คือ ค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้องของความถี่

L_m คือ ค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้องของสถานีเคลื่อนที่

h_b คือ ความสูงของสถานีฐาน

2.3.4.6 Lee model

$$PL = 86.12 + 43.5 \log_{10}(d) + 10 n \log_{10}(f/900) - \alpha \quad (2.81)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้

PL คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท

d คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

f คือ ย่านความถี่ที่ใช้มีหน่วยเป็นเมกะเฮิรตซ์ (MHz)

n คือ ค่าที่ได้จากการทดลอง

α คือ ค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้อง (Correction factor) ซึ่งมีสูตรในการคำนวณเช่นเดียวกับสมการที่ 2.29 2.30 2.31 2.32 2.33 และ 2.34

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณ (Fading model)

การจางหายของกำลังสัญญาณ (Fading) หมายถึง การที่สัญญาณถูกลดทอนลงไป ทำให้มีความแรงของสัญญาณอ่อนลง โดยการจางหายของกำลังสัญญาณสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท ด้วยกันคือ แฟลตเฟดดิ้ง (Flat Fading) และเฟริควเอนซีซีเล็กเฟดดิ้งเฟดดิ้ง (Frequency Select Fading) ซึ่งการจางหายของกำลังสัญญาณทั้งสองประเภทนั้น ไม่สามารถที่จะพยากรณ์การจางหายของกำลังสัญญาณออกเป็นตัวเลขที่แน่นอนได้ เนื่องจากปริมาณการจางหายของกำลังสัญญาณนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของชั้นบรรยากาศ ณ ขณะนั้น สภาพอากาศและสภาพภูมิประเทศในแต่ละพื้นที่ ซึ่งจะก่อให้เกิดการจางหายของกำลังสัญญาณในปริมาณที่ไม่เท่ากัน จากปัญหาดังกล่าวทำให้นักวิชาการทางด้านการสื่อสารและโทรคมนาคมได้ทำการคิดค้นแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณที่มีความน่าเชื่อถือขึ้นหลายแบบจำลองด้วยกัน โดยในที่นี้จะขอนำแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณบางส่วนที่ได้รับความนิยมและมีความแม่นยำสูงมาอธิบายพอสังเขปได้ดังนี้

2.4.1 Ricean Distribution

การกระจายแบบ Ricean ถือเป็นแบบจำลองในสภาวะที่องค์ประกอบของสัญญาณไม่เกิดการจางหาย เช่น การสื่อสารแบบเป็นเส้นตรง (Line of Sight) โดยสมการในการคำนวณสามารถแยกออกได้เป็น 2 กลุ่มหลักๆ และแสดงดังสมการที่ 2.82 และ 2.83

1. เมื่อค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณที่รับได้และค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่รับได้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 ($A \geq 0, r \geq 0$)

$$P(r) = (r/\sigma) \exp[-(r^2 + A^2)/(2\sigma^2)] I_0 * (Ar/\sigma^2) \quad (2.82)$$

2. เมื่อค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่รับได้มีค่าน้อยกว่า 0 ($r < 0$)

$$P(r) = 0 \quad (2.83)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้

$P(r)$ คือ อัตราการกระจายแบบ Ricean

r คือ ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่รับได้

2σ คือ ค่าเฉลี่ยการพยากรณ์กำลังสัญญาณที่เดินทางมาจากหลายทิศทาง (Multipath signal)

A คือ ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณที่รับได้

I_0 คือ ฟังก์ชัน Bessel ในลำดับที่ 0

โดยการกระจายแบบ Ricean ส่วนใหญ่มักจะถูกแทนด้วยตัวแปร K ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณที่สามารถวัดได้กับความแปรปรวนของกำลังสัญญาณที่เดินทางมาจากหลายทิศทาง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.84

$$K = 10 \log_{10}(A^2/2\sigma^2) \quad (2.84)$$

เมื่อกำหนดให้

K คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณที่สามารถวัดได้กับความแปรปรวนของกำลังสัญญาณที่เดินทางมาจากหลายทิศทาง

2σ คือ ค่าเฉลี่ยการพยากรณ์กำลังสัญญาณที่เดินทางมาจากหลายทิศทาง (Multipath signal)

A คือ ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณที่รับได้

โดยสามารถประมาณค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณที่สามารถวัดได้กับความแปรปรวนของกำลังสัญญาณที่เดินทางมาจากหลายทิศทาง (K) ได้จากการวัดปริมาณสัญญาณที่รับได้เทียบกับเวลา ซึ่งการกระทำดังกล่าวมีแนวทางในการปฏิบัติทั้งหมด 2 แนวทางด้วยกันคือ แนวทางที่หนึ่ง เริ่มจากการคำนวณการกระจายของสัญญาณที่วัดได้ จากนั้นนำผลลัพธ์ไปเปรียบเทียบกับค่าการกระจายของสัญญาณที่ตั้งสมมติฐานเอาไว้ และแนวทางที่สองคือ ทำการคำนวณค่าประมาณการกระจายของสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุดจากอัลกอริทึม Expectation/Maximization (EM) ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งสองแนวทางอาจจะยุ่งยากในทางปฏิบัติและใช้เวลาในการดำเนินการค่อนข้างมาก ทำให้นักวิชาการได้คิดค้นแนวทางใหม่ที่มีความเรียบง่ายและสามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็วขึ้น โดยจะเริ่มจากการกำหนดช่วงเวลาที่จะใช้ในการคำนวณจากชุดข้อมูล ซึ่งถ้าหากเลือกช่วงเวลาได้อย่างเหมาะสม ผลลัพธ์จากการคำนวณก็จะมีค่าใกล้เคียงกับการกระจายของสัญญาณตามความเป็นจริงมากขึ้น

2.4.2 Rayleigh Distribution

สืบเนื่องจากกำลังสัญญาณที่วัดจากการกระจายแบบ Ricean มีค่าที่น้อยมาก ซึ่งอาจจะเกิดจากการเสริมกันของสัญญาณหลายรูปแบบจนก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลกระทบต่อปริมาณกำลังสัญญาณที่รับได้ โดยการกระจายแบบ Rayleigh นั้นถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการติดต่อสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุ และนำไปใช้เป็นเครื่องมือทางสถิติในการอธิบายความแปรปรวนของกำลังสัญญาณที่รับได้ตามช่วงเวลา โดยสมการในการคำนวณสามารถแยกออกได้เป็น 2 กลุ่มหลักๆ และแสดงดังสมการที่ 2.85 และ 2.86

1. เมื่อค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่รับได้อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึงอนันต์ ($0 \leq r \leq \infty$)

$$P(r) = (r/\sigma^2) \exp[-(r^2)/(2\sigma^2)] \quad (2.85)$$

2. เมื่อค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่รับได้มีค่าน้อยกว่า 0 ($r < 0$)

$$P(r) = 0 \quad (2.86)$$

เมื่อกำหนดให้

$P(r)$ คือ อัตราการกระจายแบบ Rayleigh

r คือ ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่รับได้

2σ คือ ค่าเฉลี่ยการพหุการณกำลังสัญญาณที่เดินทางมาจากหลายทิศทาง (Multipath signal)

ฟังก์ชันความสอดคล้องกันของการกระจายที่เพิ่มขึ้นที่ใช้ประกอบการคำนวณการจางหายของกำลังสัญญาณ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.87

$$P(R) = P_r(r < R) = (r/\sigma^2) \int_0^R p(r) dr = 1 - \exp[-(r^2)/(2\sigma^2)] \quad (2.87)$$

เมื่อกำหนดให้

r คือ ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่รับได้

R คือ ฟังก์ชันความสอดคล้องกันของการกระจายที่เพิ่มขึ้น

2σ คือ ค่าเฉลี่ยการพหุการณกำลังสัญญาณที่เดินทางมาจากหลายทิศทาง (Multipath signal)

2.4.3 Log-Normal Fading Model

แบบจำลองชนิดนี้มักนิยมใช้ในการคำนวณการแพร่กระจายคลื่นที่ได้รับผลกระทบจากการสะท้อนและการหักเหระหว่างการรับส่งสัญญาณจากต้นทางไปยังปลายทางในเชิงปริมาณ ซึ่งการคำนวณสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.88

$$P(r) = (1/r\sqrt{2\pi\sigma^2}) \exp[-(\ln(r) - m)^2/(2\sigma^2)] \quad (2.88)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้

$P(r)$ คือ อัตราการเกิดการจางหายของกำลังสัญญาณแบบ Log-Normal

m คือ ค่ามาตรฐานหรือค่ากลาง

R คือ ฟังก์ชันความสอดคล้องกันของการกระจายที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีรูปแบบดังสมการที่ 2.87

σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายในรูปแบบปกติที่มีความสอดคล้องกัน

2.4.4 Suzuki Model

แบบจำลอง Suzuki ถือเป็นแบบจำลองที่ได้รวมการแพร่กระจายทั้งสองแบบเข้าไว้ด้วยกัน คือ Log-normal และ Rayleigh ซึ่งส่งผลให้สามารถประมาณค่าผลรวมของการกระจายแบบ Log-normal ที่มีความซับซ้อนบนช่องสัญญาณที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น และโดยทั่วไปการกระจายแบบ Rayleigh มักเกิดจากกระบวนการคำนวณทางสถิติ 2 กระบวนการร่วมกัน ($\mu_1(t)$, $\mu_2(t)$) ซึ่งถ้าหากนำการกระจายทั้งสองมาเขียนแสดงความสัมพันธ์จะเป็นดังสมการที่ 2.89

$$\xi(t) = \sqrt{(\mu_1)^2 * (t) + (\mu_2)^2 * (t)} \quad (2.89)$$

เมื่อกำหนดให้

$\xi(t)$ คือ ค่าความซับซ้อนที่เกิดจากกระบวนการคำนวณทางสถิติ

$\lambda(t)$ คือ ค่าความอิสระทางสถิติระหว่าง $\mu_1(t)$ และ $\mu_2(t)$ ซึ่งเป็นค่าที่มีความสำคัญในการนำไปใช้ปรับกำลังสัญญาณระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่งได้

จากผลลัพธ์ของสมการที่ 2.89 สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการกระจายที่มีความหนาแน่นของแอมพลิจูดที่มีความเฉพาะเจาะจงได้ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.90

$$P(r) = \int_0^{\infty} (r/\sigma^2) \exp[-(r^2)/(2\sigma^2)] * (1/\sqrt{2\pi}\sigma) * \exp[-(\ln \sigma - m)^2/(2s^2)] d\sigma \quad (2.90)$$

เมื่อกำหนดให้

$P(r)$ คือ อัตราการเกิดการจางหายของกำลังสัญญาณแบบ Suzuki

σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

r คือ ค่าแอมพลิจูด

s^2 คือ ค่าความแปรปรวน

m คือ ค่ากลางหรือค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคาดการณ์ทางสถิติอาจมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงอยู่บ้าง โดยเฉพาะในกรณีที่การเดินทางของสัญญาณจากเครื่องส่งมายังเครื่องรับนั้นมาจากหลายทิศทาง (Multipath Wave propagation) ซึ่งมักเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเดินทางไปกระทบกับสัญญาณแทรกสอดหรือสิ่งกีดขวางต่างๆ

แบบจำลอง Suzuki มักถูกนำไปใช้ในการประมาณค่าทางสถิติสำหรับการรับส่งสัญญาณที่ไม่เป็นเส้นตรง (Non-Line of Sight) ของเซลล์ขนาดเล็กที่ติดตั้งอยู่ภายในโทรศัพท์มือถือ

2.4.5 Nakagami Model

แบบจำลอง Nakagami ได้ถูกคิดค้นขึ้นในช่วงทศวรรษที่ 1940 โดยศาสตราจารย์ Nakagami ซึ่งสามารถแสดงรูปแบบการคำนวณได้ดังสมการที่ 2.91

$$P(r) = (2m^m r^{2m-1} * \exp[-mr^2/\Omega]) / \gamma(m)\Omega^m \quad (2.91)$$

เมื่อกำหนดให้

$P(r)$ คือ อัตราการเกิดการจางหายของกำลังสัญญาณแบบ Nakagami

Ω คือ ค่าเฉลี่ยของกำลังสัญญาณเชิงเวลา (Time-averaged power) ในฝั่งเครื่องรับ

r คือ ค่าแอมพลิจูดที่ปรากฏในฝั่งเครื่องรับ

m คือ ส่วนกลับของความแปรปรวนบนค่ามาตรฐาน ซึ่งมีสูตรในการคำนวณดังสมการที่ 2.92

$$m = (r^2)^2 / [(r^2 - (r^2))]^2 \quad (2.92)$$

นอกจากนี้แบบจำลอง Nakagami ยังสามารถแสดงในรูปแบบฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบ Rayleigh ได้ด้วยการกำหนดค่า m ให้มีค่าเท่ากับ 1 และแบบจำลองชนิดนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าการแพร่กระจายแบบ Ricean และ Log-normal ได้ โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวให้เหมาะสมได้อีกด้วย

แบบจำลอง Nakagami โดยส่วนมากมักถูกนำไปใช้ในการคำนวณหรือประมาณค่าการเกิดปรากฏการณ์ที่คลื่นเดินทางมายังเครื่องรับหลายทิศทาง (Multipath propagation) ในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

2.4.6 Weibull Model

แบบจำลอง Weibull เกิดขึ้นมาจากการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดการแพร่กระจายของสัญญาณโทรศัพท์มือถือมาเขียนลงในกระดาษกราฟ และถ้าหากพิจารณาโดยละเอียดแล้ว จะเห็นว่าเส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีค่าความชันเท่ากับ -1 ซึ่งจากความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นดังกล่าวทำให้สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารทศวันวิชาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P(r) = (\alpha b/r_0) * (br/r_0)^{\alpha-1} * \exp[-(br/r_0)^\alpha] \quad (2.93)$$

เมื่อกำหนดให้

$P(r)$ คือ อัตราการเกิดการจางหายของกำลังสัญญาณแบบ Weibull

α คือ ตัวแปรที่เกี่ยวกับลักษณะของสัญญาณที่ถูกเลือกและนำมาใช้ในการวัดเพื่อหาผลลัพธ์

r_0 คือ ค่าความน่าเชื่อถือ ความสามารถในการบำรุงรักษา และความปลอดภัยของสัญญาณ คลื่นวิทยุ (Reliability, Maintainability, Safety : RMS)

b คือ ค่าตัวประกอบสำหรับปรับความถูกต้องและให้เป็นมาตรฐาน ซึ่งมีสูตรในการคำนวณดัง สมการที่ 2.94

$$b = [2/\alpha] \gamma(2/\alpha)]^{1/2} \quad (2.94)$$

การกระจายแบบ Weibull มีคุณสมบัติที่ยืดหยุ่นและสามารถรองรับลักษณะของ สัญญาณได้หลายรูปแบบ แต่ยังคงทฤษฎีที่ใช้สนับสนุนค่อนข้างมาก จึงทำให้การกระจายชนิดนี้ ไม่ถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายมากนัก

2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX technology)

เทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) หรือ Worldwide interoperability for Microwave Access มีวิวัฒนาการมาจากเทคโนโลยีการรับส่งข้อมูล โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุย่านไมโครเวฟ ซึ่งเดิมมี รูปแบบการสื่อสารแบบเป็นเส้นตรง (Line of Sight หรือ LOS) และเป็นการเชื่อมต่อเพื่อส่ง สัญญาณจากจุดหนึ่งไปสู่อีกจุดหนึ่ง (Point-to-point) โดยมีการพัฒนาเปลี่ยนแปลงให้ WiMAX มี รูปแบบการสื่อสารแบบแพร่กระจายคลื่นวิทยุรอบทิศทาง (Omni-direction) หรือเฉพาะทิศทาง (Directional) โดยขึ้นกับการเลือกใช้ระบบสายอากาศ ซึ่งถือเป็นการสื่อสารแบบไม่เป็นเส้นตรง (Non-Line of Sight หรือ NLOS) เช่นเดียวกับการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในกรณีของโครงข่าย โทรศัพท์เคลื่อนที่ทั่วไป WiMAX เป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้นมาบนมาตรฐาน IEEE 802.16 ซึ่ง ต่อมาก็ได้มีการพัฒนามาตรฐาน IEEE 802.16a ขึ้น และได้การอนุมัติเป็นมาตรฐานการ ติดต่อสื่อสารแบบไร้สายโดยสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ หรือ IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) โดยมาตรฐาน IEEE 802.16a หรือ WiMAX จะมีความสามารถในการแพร่กระจายสัญญาณในลักษณะจากจุดเดียวไปยังหลายจุด (Point-to-multipoint) ได้พร้อมๆ กัน สามารถรองรับการสื่อสารแบบไม่เป็นเส้นตรงได้ (Non-Line-of-Sight) สามารถทำงานได้แม้กระทั่งมีสิ่งกีดขวาง และยังสามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์มาตรฐานชนิดอื่นๆ ที่ออกมาก่อนหน้านี้ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ WiMAX หรือบรอดแบนด์ไร้สาย มาตรฐาน IEEE 802.16a ยังได้รับการปรับปรุงประสิทธิภาพของคุณภาพในการให้บริการ (QoS) ซึ่งทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ นครเชียงใหม่ โดยผู้จัดทำไม่รับผิดชอบต่อเนื้อหา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคโนโลยีไวแมกซ์สามารถรองรับการรับส่งข้อมูลประเภทภาพ (Video) และเสียง (Voice) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่จำเป็นต้องใช้ทรัพยากรของโครงข่ายมากอย่างเทคโนโลยีแบบเก่า (Low-latency network) อีกทั้งในเรื่องของความปลอดภัยเทคโนโลยีไวแมกซ์ยังได้เพิ่มคุณสมบัติของความเป็นส่วนตัว (Privacy) เข้าไปด้วย ซึ่งทำให้ผู้ใช้งานแต่ละรายจำเป็นต้องพิสูจน์ตัวตน (Authentication) ก่อนที่จะเข้าใช้งานโครงข่าย นอกจากนี้ข้อมูลต่างๆ ที่รับส่งกันระหว่างผู้รับและผู้ส่งก็จะได้รับการเข้ารหัส (Encryption) อีกด้วย ซึ่งส่งผลให้การรับส่งข้อมูลบนเทคโนโลยีไวแมกซ์มีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

2.5.1 มาตรฐานของเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) ที่ถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน

ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายถึงมาตรฐานของเทคโนโลยีไวแมกซ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 4 ยุคหลักๆ ได้ดังนี้

2.5.1.1 IEEE 802.16

เป็นมาตรฐานของเทคโนโลยีไวแมกซ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ 2001 โดยสามารถแพร่กระจายสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่ 1.6 ถึง 4.8 กิโลเมตร ซึ่งมาตรฐาน IEEE 802.16 ถือเป็นมาตรฐานแรกและมาตรฐานเดียวที่สนับสนุนการสื่อสารแบบเป็นเส้นตรง (Line of Sight) และจะมีการทำงานบนย่านความถี่ตั้งแต่ 10 ถึง 66 กิกะเฮิรตซ์ (GHz)

2.5.1.2 IEEE 802.16a

เป็นมาตรฐานที่ถูกแก้ไขและปรับปรุงมาจาก IEEE 802.16 โดยจะทำงานบนย่านความถี่ตั้งแต่ 2 ถึง 11 กิกะเฮิรตซ์ (GHz) ซึ่งคุณสมบัติเด่นที่ได้รับการแก้ไขจากมาตรฐาน IEEE 802.16 เดิม คือความสามารถในการรองรับการสื่อสารแบบไม่เป็นเส้นตรง (Non-Line-of-Sight) ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะช่วยทำให้สามารถแพร่กระจายสัญญาณออกไปยังปลายทางได้ แม้มีสิ่งกีดขวางเกิดขึ้นระหว่างทางจากเครื่องรับไปยังเครื่องส่ง เช่น ต้นไม้, อาคาร ฯลฯ นอกจากนี้ก็ยังช่วยให้สามารถขยายระบบโครงข่ายเชื่อมต่อไร้สายความเร็วสูงได้อย่างกว้างขวางด้วยรัศมีทำการที่ไกลถึง 30 ไมล์ หรือประมาณ 50 กิโลเมตร และมีอัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงสุดถึง 75 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้มาตรฐาน IEEE 802.16a มีความสามารถในการรองรับการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายที่ใช้สายประเภท ที1 (T1-type) ได้มากกว่า 60 ช่องสัญญาณ และการเชื่อมต่อแบบ DSL (Digital Subscriber Line) ตามบ้านเรือนที่พิกอาศัยได้หลายร้อยหลังคาเรือนพร้อมกัน โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาในการใช้งานแต่อย่างใด

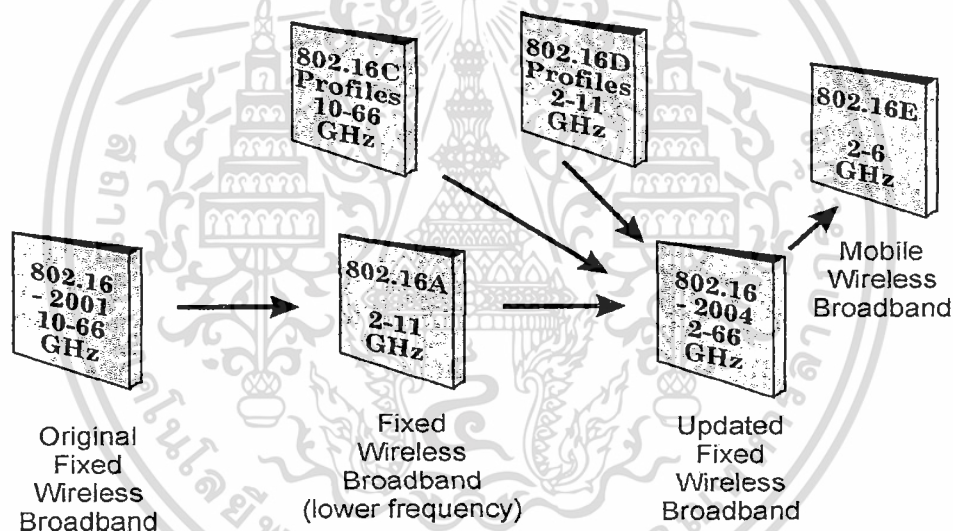
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.3 IEEE 802.16

เป็นมาตรฐานของเทคโนโลยีไวแมกซ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ 2004 โดยเป็นการนำคุณสมบัติเด่นของมาตรฐาน IEEE 802.16a, 802.16c, 802.16d มารวมกัน และจะทำงานบนย่านความถี่ตั้งแต่ 2 ถึง 66 กิกะเฮิร์ตซ์ (GHz) โดยสามารถแพร่กระจายสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ที่ได้ไกลสูงสุด 30 ไมล์ หรือประมาณ 50 กิโลเมตร

2.5.1.4 IEEE 802.16e

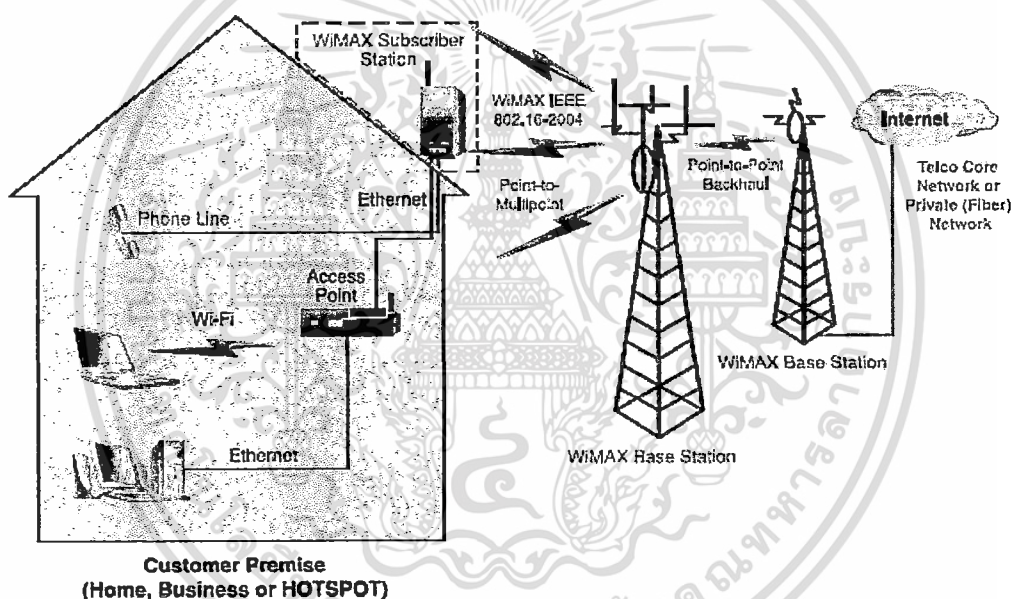
เป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาเพื่อให้สนับสนุนการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์พกพาประเภทต่างๆ เช่น อุปกรณ์พีดีเอ โน้ตบุ๊ก โดยจะทำงานบนย่านความถี่ตั้งแต่ 2 ถึง 6 กิกะเฮิร์ตซ์ (GHz) และสามารถแพร่กระจายสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่ 1.6 ถึง 4.8 กิโลเมตร นอกจากนี้ยังมีระบบที่ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถติดต่อสื่อสารกันได้โดยให้คุณภาพในการสื่อสารที่ดีและมีเสถียรภาพขณะใช้งาน แม้ว่าอุปกรณ์พกพาจะมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาก็ตาม



รูปที่ 2.58 แสดงวิวัฒนาการของมาตรฐานเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX)

รูปที่ 2.59 แสดงถึงรูปแบบการให้บริการสื่อสารไร้สายแบบสาธารณะ โดยใช้เทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) มาตรฐาน IEEE 802.16 ในยุคปี ค.ศ. 2004 ซึ่งจะเห็นว่านอกเหนือจากการสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับเครื่องลูกข่ายในลักษณะต่าง ๆ แล้ว ผู้ให้บริการโครงข่ายยังสามารถกำหนดให้สถานีฐานบางแห่งมีรูปแบบการส่งสัญญาณแบบเป็นเส้นตรงได้ (Line of Sight) เพื่อใช้เป็นวงจรสื่อสารสำหรับส่งผ่านและลำเลียงข้อมูลระหว่างสถานีฐานด้วยกันเอง ซึ่งถือเป็นการอำนวยความสะดวกแก่ผู้ให้บริการโครงข่าย โดยไม่จำเป็นต้องจัดเตรียมหรือจัดหาอุปกรณ์หรือแม้กระทั่งวงจรสื่อสารสัญญาณใด ๆ เพิ่มเติม นอกจากนี้เมื่อเทคโนโลยี IEEE 802.16e ได้รับการพัฒนาจนพร้อมให้บริการในเชิงพาณิชย์แล้ว ผู้ให้บริการโครงข่ายก็สามารถพัฒนาซอฟต์แวร์ภายในสถานีฐานเหล่านี้ให้รองรับมาตรฐานดังกล่าว เพื่อให้บริการการสื่อสารที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องรับมีการเคลื่อนที่ช้า ๆ อยู่ตลอดเวลาได้ อีกทั้งยังยอมให้ผู้ให้บริการสามารถนำอุปกรณ์เครื่องลูกข่ายไปใช้งานข้ามสถานีฐาน หรือข้ามพื้นที่ให้บริการได้อย่างเสรี ในแง่ของการจัดสรรย่านความถี่คลื่นวิทยุตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE 802.16 ในปี ค.ศ. 2004 ระบุให้สามารถใช้ความถี่คลื่นวิทยุได้ตั้งแต่ในย่าน 10 ถึง 66 กิกะเฮิรต์ซ์ (GHz) ซึ่งย่านความถี่ดังกล่าวจำเป็นต้องที่จะได้รับใบอนุญาตจัดสรรความถี่ (Licensed Band) ก่อนจึงจะสามารถใช้งานได้ นอกจากนี้มาตรฐานดังกล่าว ยังได้มีการกำหนดรายละเอียดทางเทคนิคโดยเฉพาะ โพรโทคอล (Protocol) ที่ใช้ในการส่งผ่านข้อมูลอย่าง MAC (Medium Access Control) เพื่อให้สามารถรองรับการส่งข้อมูลได้หลากหลายรูปแบบ นอกเหนือจากการรับส่งข้อมูลอินเทอร์เน็ตโดยทั่วไป เช่น VoIP (Voice over IP) รวมถึงการส่งสัญญาณเสียงพูดตามมาตรฐาน TDM (Time Division Multiplexing) ที่ใช้ในการสื่อสารโทรศัพท์แบบดั้งเดิม โดยข้อมูลในแต่ละแบบก็จะมีเงื่อนไขในการรับส่งที่แตกต่างกันออกไป



รูปที่ 2.59 แสดงรูปแบบการให้บริการสื่อสารไร้สายความเร็วสูงด้วยเทคโนโลยีไวแม็กซ์ (WiMAX)

2.5.2 องค์ประกอบของเทคโนโลยีไวแม็กซ์ (WiMAX)

ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายถึงองค์ประกอบของเทคโนโลยีไวแม็กซ์ ซึ่งจะมีอยู่ทั้งหมด 2 ส่วนหลักๆ ดังนี้

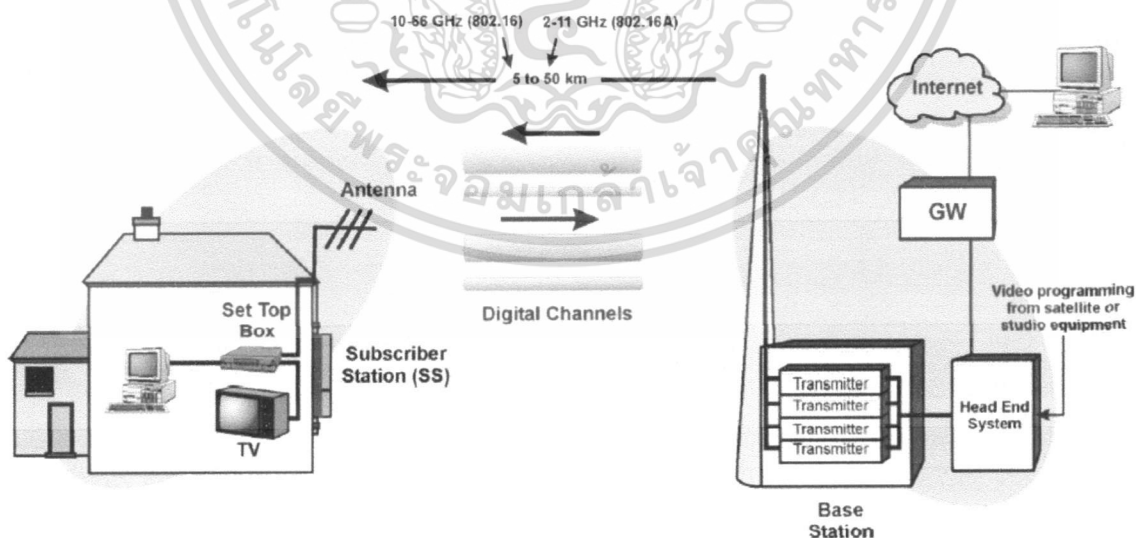
2.5.2.1 เครื่องลูกข่ายไวแม็กซ์ (Subscriber Station: SS)

เนื่องจากการให้บริการไวแม็กซ์ (WiMAX) ในระยะแรกด้วยมาตรฐาน IEEE 802.16d จะอยู่ในรูปการใช้งานประจำที่ โดยเครื่องลูกข่ายส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบของอุปกรณ์ CPE (Customer Premise Equipment) ที่สามารถรับส่งสัญญาณกับสถานีฐาน และเชื่อมต่อไปยังเสาอุปกรณ์คอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์สื่อสารภายในอาคารได้ โดยต่อมาภายหลังก็เริ่มมีผลิตภัณฑ์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภท Air Card ที่สามารถติดตั้งเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์แบบโน้ตบุ๊ก (Notebook) ออกวางจำหน่าย

2.5.2.2 สถานีฐานหรือสถานีทวนสัญญาณ (Base Station: BS)

สถานีฐานหรือสถานีทวนสัญญาณไวแมกซ์ (WiMAX) ถือเป็นจุดเชื่อมต่อและรับข้อมูลจากระบบภายนอก (Interconnection Gateways) เพื่อเชื่อมต่อไปยังโครงข่ายสาธารณะ เช่น โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ โครงข่ายอินเทอร์เน็ต หรือแม้กระทั่งโครงข่ายอินทราเน็ตของบริษัทหรือหน่วยงานที่เป็นลูกค้าประเภทองค์กรของผู้ให้บริการรายนั้น ๆ โดยจะทำหน้าที่ค้นหาเส้นทางเพื่อส่งต่อไปยังจุดหมายปลายทางของการสื่อสารข้อมูล ในกรณีที่ผู้ให้บริการโครงข่ายไวแมกซ์ (WiMAX) มีการให้บริการโครงข่ายประเภทอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ GPRS/EDGE หรือ W-CDMA อาจมีนโยบายการรวมฐานข้อมูลผู้ใช้บริการ และกำหนดมาตรฐานการคิดค่าบริการร่วมกันสำหรับทุกโครงข่ายที่ตนเปิดให้บริการ ซึ่งทำให้บางครั้งผู้ให้บริการอาจจะมีการออกแบบให้มีการเชื่อมต่อระบบฐานข้อมูลหรือโอนข้อมูลผู้ใช้งานผ่านอุปกรณ์บางส่วนที่เป็นของโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อเป็นการตรวจสอบและระบุตัวตนของผู้ใช้งานก่อนที่จะยอมให้ส่งต่อไปยังจุดหมายปลายทาง ซึ่งรายละเอียดของการเชื่อมต่อเหล่านี้ย่อมเปลี่ยนแปลงไปตามนโยบายของผู้ให้บริการแต่ละราย และเงื่อนไขในการให้บริการเป็นกรณีไป โดยการเชื่อมต่อจากโครงข่ายสถานีฐาน กลับมายังโครงข่ายหลักของผู้ให้บริการ (โดยทั่วไปเรียกว่าวงจร Backhaul) จึงมีทั้งที่ใช้การส่งจากสถานีทวนสัญญาณของผู้ให้บริการเอง หรือส่งผ่านโครงข่ายสื่อสารที่เช่าจากผู้ประกอบการรายอื่นๆ



รูปที่ 2.60 แสดงองค์ประกอบหลักของเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WIMAX)

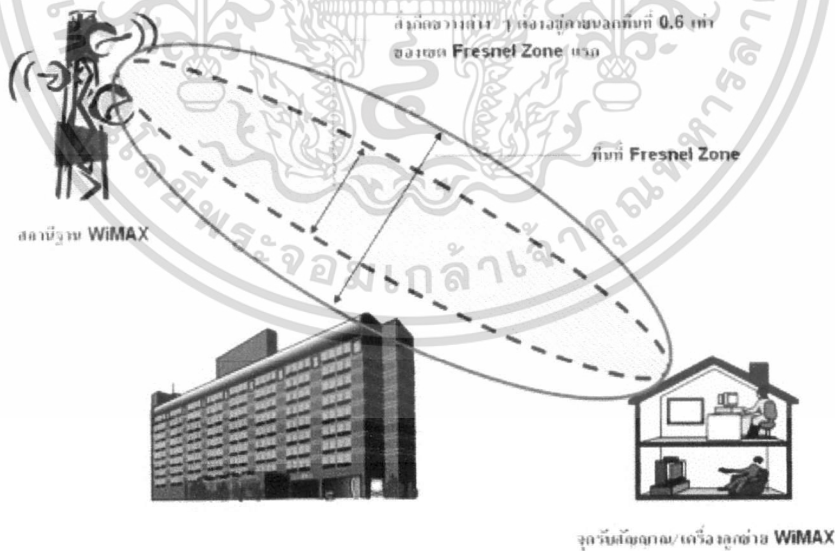
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารไร้สายความเร็วสูง (WiMAX)

การออกแบบมาตรฐานการสื่อสารไร้สายความเร็วสูง เพื่อสนับสนุนให้มาตรฐานการสื่อสารของเทคโนโลยีไวแม็กซ์ (WiMAX) สามารถทำงานได้ตามความคาดหวังของข้อกำหนด IEEE 802.16 นั้น จำเป็นจะต้องใช้เทคโนโลยีพิเศษหลายประการประกอบกัน ซึ่งมีดังต่อไปนี้

2.5.3.1 การสื่อสารแบบเป็นเส้นตรง (Line of sight) และการสื่อสารแบบไม่เป็นเส้นตรง (Non-Line of Sight)

โดยทั่วไปในการสื่อสารโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยีชนิดใด จำเป็นต้องมีการกำหนดให้ชัดเจนว่ามีรูปแบบการสื่อสารแบบเป็นเส้นตรงหรือแบบไม่เป็นเส้นตรง ในกรณีของการสื่อสารแบบเป็นเส้นตรง อุปกรณ์เครื่องส่งและเครื่องรับจะติดต่อกันได้ จำเป็นต้องมีการติดตั้งจานรับสัญญาณหรือสายอากาศให้อยู่ในแนวการสื่อสารที่ตรงกัน ไม่มีสิ่งกีดขวางมาบดบังการแพร่กระจายของคลื่นความถี่วิทยุ ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการสำรวจเส้นทาง การแพร่กระจายและลบลปัญหาที่เกิดจากสิ่งกีดขวางต่าง ๆ จึงมีการนิยามพื้นที่ที่มีการแพร่กระจายพลังงานส่วนใหญ่จากคลื่นความถี่วิทยุตลอดเส้นทางไปสู่เครื่องรับปลายทางว่า Fresnel Zone โดยขอบเขตของพื้นที่ Fresnel Zone จะกว้างขวางเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นวิทยุที่ใช้รับส่ง และระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ



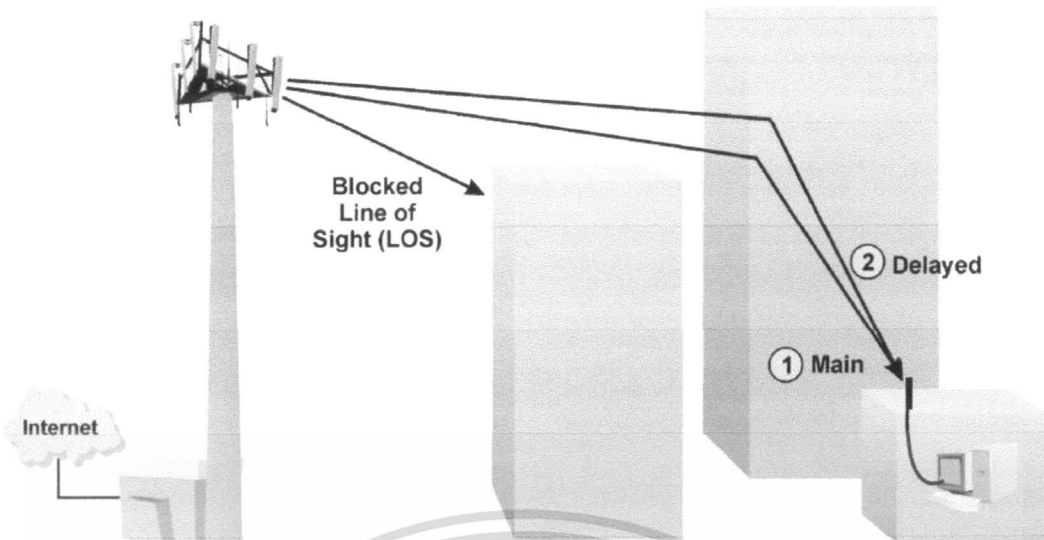
รูปที่ 2.61 แสดงการสื่อสารแบบเป็นเส้นตรง (Line of sight) และความเกี่ยวข้องกับ Fresnel Zone

ในทางทฤษฎีสำหรับการรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุแบบเป็นเส้นตรง พื้นที่ Fresnel Zone จะมีอยู่หลายชั้น แต่หากต้องการตรวจสอบเพียงแนวพื้นที่ เพื่อทำการหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางต่าง ๆ แล้ว ก็มักนิยมพิจารณาเฉพาะพื้นที่ Fresnel Zone แรกเท่านั้น โดยในขั้นต้นจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้พื้นที่ 60 เปอร์เซ็นต์แรก หรือ 0.6 เท่าของ Fresnel Zone แรกเป็นเขตปลอดภัยก็คขวางตั้ง แสดงในรูปที่ 2.61 ซึ่งวิธีในการตรวจสอบ Fresnel Zone สามารถทำได้โดยทดลองตั้งแนวยิง สัญญาณคลื่นวิทยุระหว่างจุดรับส่งต้นทางและปลายทาง หากมีสิ่งกีดขวางใดๆ บดบังภายในพื้นที่ 60 เปอร์เซ็นต์ของ Fresnel Zone แรก ก็จะทำการเปลี่ยนมุมยิงจนกว่าจะไม่พบสิ่งกีดขวางอื่นใดอีก

สำหรับการสื่อสารแบบไม่เป็นเส้นตรง มักพบในการติดต่อสื่อสารบน โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่เป็นส่วนใหญ่ โดยการสื่อสารในรูปแบบนี้ผู้ส่งแบบโครงข่ายไม่ จำเป็นต้องพิจารณาถึงปัญหาที่เกี่ยวข้องกับสิ่งกีดขวางแต่อย่างใด เนื่องจากคลื่นความถี่วิทยุจาก เครื่องส่งสามารถเดินทางมายังเครื่องรับได้ไม่ว่าจะเป็นการแพร่กระจายในแนวตรง หรือสะท้อน จากสิ่งกีดขวางใดๆ โดยผลจากการสะท้อนของสัญญาณต่างๆ จากหลายเส้นทาง ย่อมมีผลทำให้ ระดับความแรงของสัญญาณโดยรวมที่ปรากฏที่เครื่องรับมีค่าน้อยกว่าในกรณีของการสื่อสารแบบ เป็นเส้นตรง อีกทั้งยังมีผลทำให้รูปทรงของสัญญาณผิดเพี้ยนไป เนื่องจากการแทรกสอดของ สัญญาณที่มาจากหลายๆ ทิศทางและมีเวลาหน่วง (Delay) ที่แตกต่างกันไป ดังแสดงในรูปที่ 2.62 ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Multi-path Fading แม้การสื่อสารแบบไม่เป็นเส้นตรงจะก่อให้เกิดปัญหา กับการสื่อสารข้อมูลไม่ว่าจะทำให้เกิดความยุ่งยากในการปรับสภาพของสัญญาณ (Signal Conditioning) ทำให้พื้นที่ให้บริการแคบลงหรือมีระยะทางในการสื่อสารสั้นกว่าการสื่อสารแบบ เป็นเส้นตรงก็ตาม แต่สำหรับในกรณีของการสื่อสารด้วยเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) กลับพบ ข้อดีหลายประการของการสื่อสารแบบไม่เป็นเส้นตรง ประการแรกคือ เนื่องจากความต้องการใน การแยกย่อยพื้นที่ให้บริการออกเป็นเซลล์ (Cell) เพื่อปรับสมดุลระหว่างขนาดของพื้นที่ให้บริการ ความถี่วิทยุที่กำหนดให้ใช้ภายในพื้นที่นั้นๆ และปริมาณวงจรหรือความจุของช่องสัญญาณที่ใช้ รองรับการใช้งานในเซลล์นั้นๆ ทำให้สามารถนำความถี่ที่ใช้ภายในเซลล์นั้นๆ ย้อนกลับ ไปใช้ใหม่ได้ ในเซลล์อื่นๆ ที่อยู่ไกลออกไป (Frequency Reuse) ซึ่งถือเป็นกลวิธีที่ผู้ส่งแบบระบบ โครงข่าย สื่อสารไร้สายจำเป็นต้องใช้เพื่อบริหารจัดการทรัพยากรความถี่ที่ได้รับสัมปทานมาให้เกิด ประโยชน์สูงสุด ประการที่สองคือ การออกแบบเครื่องลูกข่าย ซึ่งมีหลากหลายรูปแบบ และ จำเป็นต้องคำนึงถึงความต้องการผู้ใช้งานเป็นสำคัญ โดยทั่วไปธรรมชาติของผู้บริโภคย่อมต้องการ ความสะดวกและคล่องตัว สามารถหยิบฉวยอุปกรณ์สื่อสารไปใช้งานที่ใดก็ได้ ซึ่งถ้าหากบังคับให้มี การสื่อสารได้เฉพาะแบบเป็นเส้นตรง ผู้ใช้บริการก็จำเป็นที่จะต้องอยู่กับที่ และยังคงคอย ระวังระวังไม่ให้อุปกรณ์เครื่องลูกข่ายของตนหลุดออกจากแนวยิงสัญญาณของสถานีฐานตลอด การติดต่อสื่อสารอีกด้วย ซึ่งจะเห็นได้เป็นเรื่องวุ่นวายสำหรับผู้ใช้งานที่จะต้องถูกบังคับให้อยู่กับที่ ตลอดการใช้คู่สายโทรศัพท์ และหากไม่มีความจำเป็นจริงๆ คงไม่มีผู้ให้บริการรายใดนิยมใช้การ ติดต่อสื่อสารแบบเป็นเส้นตรงอย่างแน่นอน จะมีก็เพียงแต่นำไปใช้เป็นในการส่งสัญญาณใน ลักษณะของสถานีทวนสัญญาณเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



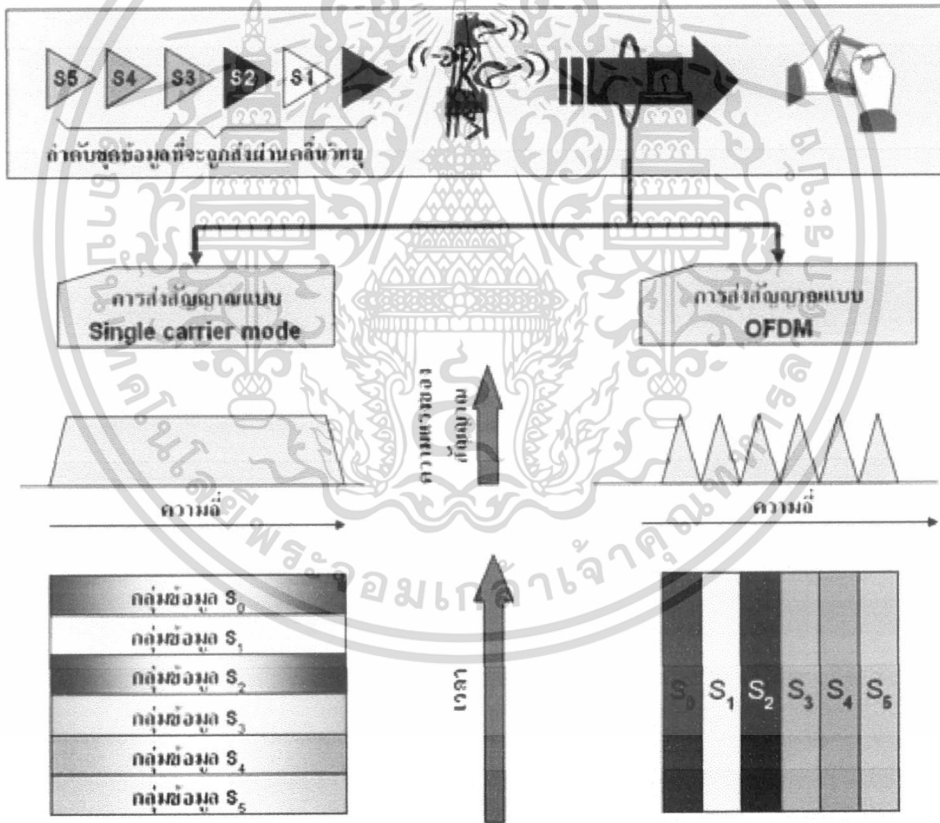
รูปที่ 2.62 แสดงการสื่อสารแบบไม่เป็นเส้นตรง และผลกระทบจากปรากฏการณ์ Multi-path Fading

2.5.3.2 เทคโนโลยี OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing)

เทคโนโลยี OFDM ถือเป็นหนึ่งในมาตรฐานทางเทคนิคที่แตกแขนงออกมาจากเทคโนโลยี Spread Spectrum แต่ก็ยังคงใช้เทคนิคการรับส่งข้อมูลแบบ Multiple Carrier Mode อยู่เช่นเดิม ซึ่งการรับส่งข้อมูลแบบ Multiple Carrier Mode หมายถึงการแบ่งย่อยแถบความถี่ออกเป็นแถบย่อย ๆ สำหรับการแยกส่งข้อมูลในหลายๆ ช่องสัญญาณ ซึ่งจะแตกต่างจากมาตรฐาน Spread Spectrum ทั่วไปที่ใช้แถบความถี่เดียวสำหรับการรับส่งข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณ โดยแนวคิดในการสื่อสารแบบ Spread Spectrum จะอยู่บนพื้นฐานที่ว่า นำข้อมูลที่ต้องการส่งทั้งหมดไม่ว่าจะมาจากที่ไหนก็ตาม มาทำการมอดูเลต (Modulate) เข้ากับสัญญาณรบกวนเสมือน (Pseudo Noise) แล้วทำการส่งออกไปแบบกระจายทั่วทุกแถบความถี่ที่ใช้สำหรับการรับส่งสัญญาณ เช่น ในกรณีของโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบ 3G บนมาตรฐาน W-CDMA จะมีการกำหนดขนาดของแถบความถี่อยู่ที่ 5 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) สำหรับวงจรมอดูเลตหนึ่งช่อง ทำให้ข้อมูลของผู้ใช้งานทั้งหมดจะถูกนำมามอดูเลตกับสัญญาณรบกวนเสมือนแล้วกระจายส่งไปตลอดแถบความถี่ทั้ง 5 เมกะเฮิร์ตซ์นั้น และเมื่อสัญญาณดังกล่าวเดินทางไปถึงฝั่งรับ เครื่องรับปลายทางก็จะทราบเองว่า จะต้องแยกรับสัญญาณรบกวนเสมือนรหัสใด โดยจะทำการพิจารณาจับสัญญาณที่ต้องการตลอดแถบความถี่ 5 เมกะเฮิร์ตซ์นั้น ดังแสดงในส่วนซ้ายของรูปที่ 2.63

สำหรับการรับส่งข้อมูลด้วยเทคโนโลยี OFDM จะมีข้อแตกต่างออกไป โดยก่อนส่งสัญญาณออกไปยังตัวกลาง จะต้องทำการแบ่งแยกแถบความถี่ออกเป็นแถบความถี่ย่อย ๆ ก่อน จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ต้องการจะส่งมาทำการเรียงลำดับเป็นกลุ่มรหัสข้อมูล (Symbol) โดยเนื้อหาข้อมูลที่อยู่ภายในแต่ละกลุ่มรหัสข้อมูลนั้น ไม่จำเป็นว่าจะต้องเป็นข้อมูลของผู้ใช้บริการรายเดียวกัน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวถือเป็นการเพิ่มเงื่อนไขในการทำงานให้เพิ่มมากขึ้นจากมาตรฐานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Spread Spectrum ในรูปแบบเดิม เพราะแทนที่จะส่งข้อมูลออกไปในแถบความถี่กว้างทันที ก็ให้นำข้อมูลมาจัดเป็นกลุ่มรหัสข้อมูลเสียก่อนแล้วจึงค่อยส่งออกไปนั่นเอง ซึ่งกลุ่มรหัสข้อมูลแต่ละกลุ่มจะถูกส่งออกไปผ่านสายอากาศโดยมีการกำหนดแบ่งแยกแถบความถี่ออกเป็นแถบย่อยๆ โดยจะมีจำนวนของแถบความถี่เท่ากันกับจำนวนของกลุ่มรหัสข้อมูล ซึ่งในส่วนของ การกำหนดจำนวนกลุ่มรหัสข้อมูลหรือแถบความถี่ย่อยนั้นจะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของแต่ละเทคโนโลยีนั้นๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการแบ่งย่อยแถบความถี่คล้ายกับการตัดทอนข้อมูลออกเป็นกลุ่มย่อยๆ แล้วให้แต่ละกลุ่มทำการส่งข้อมูลขนานกันไปในเวลาเดียวกัน ซึ่งจะผิดกับมาตรฐาน Spread Spectrum ที่หากคิดแบบเดียวกับเทคโนโลยี OFDM ว่ามีกลไกการจัดกลุ่มรหัสข้อมูลเหมือนกัน ก็จะเห็นราวกับว่ามีการส่งกลุ่มรหัสข้อมูลเรียงต่อกันไปตามเวลา จากเหตุผลที่กล่าวในข้างต้น ส่งผลให้เทคโนโลยี OFDM จึงคล้ายกับเป็นการคิดนอกกรอบออกจากมาตรฐาน Spread Spectrum โดยจะมีการส่งข้อมูลในแนวนานหรือส่งข้อมูลออกไปหลายๆ ช่องทางในเวลาเดียวกันแทนที่จะเป็นการส่งต่อแบบเป็นทอดๆ หรือที่เรียกกันว่าแบบอนุกรม



รูปที่ 2.63 แสดงความแตกต่างระหว่างการสื่อสารแบบ Spread Spectrum แบบ Single Carrier Mode กับการสื่อสารบนเทคโนโลยี OFDM

2.5.3.3 เทคโนโลยี Sub-channelization สำหรับความถี่ขึ้น

ปัญหาประการสำคัญของการสื่อสารไร้สายคือ ความไม่สัมพันธ์กันระหว่างกำลังส่งคลื่นวิทยุของสถานีฐานและเครื่องลูกข่าย ซึ่งโดยทั่วไปเครื่องลูกข่ายจะมีกำลังส่งที่ต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

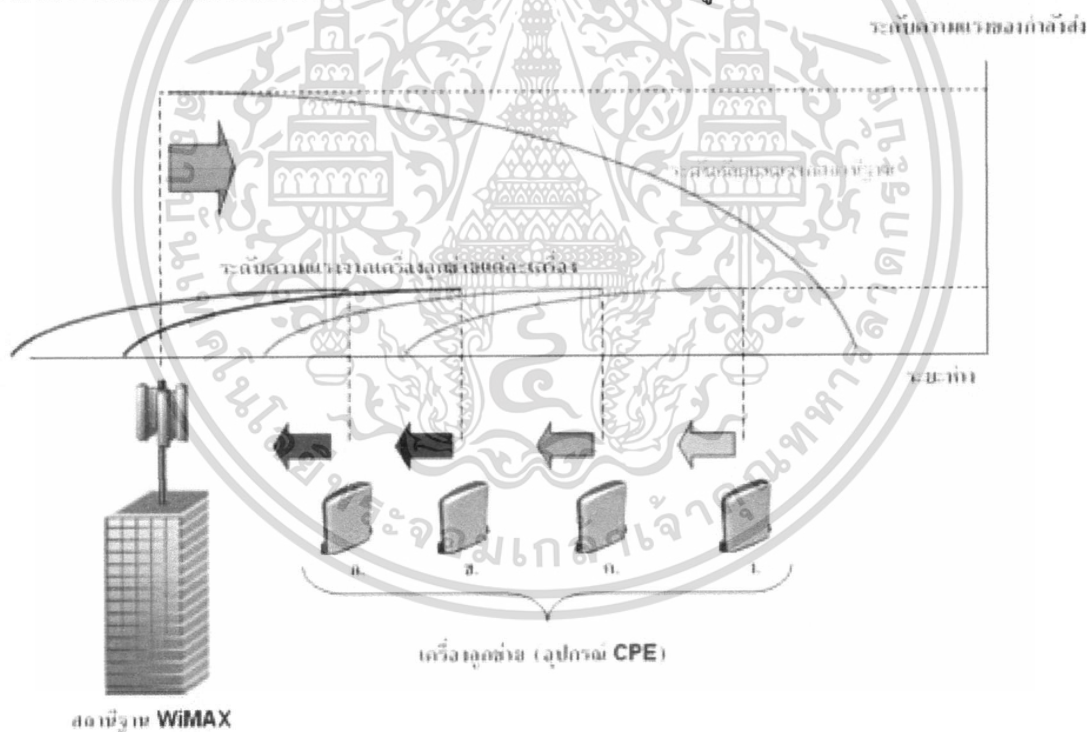
กำลังส่งของสถานีฐานมาก ดังนั้นในการวางแผนออกแบบโครงข่ายสถานีฐาน ไม่ว่าจะ เป็นเทคโนโลยีชนิดใด โอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดอันเนื่องมาจากผู้ออกแบบไม่ได้คำนวณว่ากำลังส่ง จากเครื่องลูกข่าย ซึ่งกระจายอยู่ในพื้นที่ให้บริการจะส่งมาไม่ถึงสถานีฐานย่อมเกิดขึ้นได้ ทางแก้ไข ที่ตรงไปตรงมาก็คือลดพื้นที่ให้บริการของสถานีฐานลง ซึ่งเท่ากับว่าเป็นการเพิ่มจำนวนสถานีฐาน เพื่อให้บริการมากขึ้น ซึ่งวิธีการนี้ไม่ใช่ทางออกที่ดี เนื่องจากการเพิ่มเงินลงทุนในการติดตั้ง สถานีฐานให้เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่รายได้จากการให้บริการของผู้บริโภคอาจไม่เพียงพอจะทำให้ เกิดจุดคุ้มทุนได้ในระยะเวลาที่กำหนด ในขณะที่เดียวกันตามมาตรฐานสากลของ WiMAX Forum ได้มีการกำหนดระดับกำลังส่งสูงสุดของเครื่องลูกข่ายไว้ให้เป็นค่ามาตรฐาน อันอาจจะทำให้เกิด การรบกวนกับอุปกรณ์สื่อสารหรือเครื่องใช้ไฟฟ้าที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงได้ การออกแบบให้เครื่อง ลูกข่ายเพิ่มกำลังส่งขึ้นจึงไม่สามารถทำได้ และทำให้ต้องมีการคิดค้นหาวิธีการปรับสมดุลระหว่าง ระยะแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุขาลง (Downlink) ที่ส่งออกมาจากสถานีฐานกับระยะ แพร่กระจายในทิศทางขาขึ้น (Uplink) ที่ส่งกลับออกไปจากเครื่องลูกข่ายให้เกิดความเหมาะสมมาก ที่สุด ซึ่งโดยทั่วไประยะทางในทิศทางขาลงจะมีค่ามากกว่าขาขึ้นถึง 4 เท่า เนื่องจากเครื่องลูกข่าย โดยทั่วไปจะถูกจำกัดกำลังส่งสูงสุดไว้ให้ต่ำกว่ากำลังส่งสูงสุดของสถานีฐานอยู่ประมาณ 4 เท่า ซึ่ง ในทางปฏิบัติสัดส่วนระยะทางการแพร่กระจายจะมีความแตกต่างกันหรือน้อยกว่านั้นขึ้นอยู่กับ กำลังส่งของสายอากาศที่แท้จริงของสถานีฐานเป็นสำคัญ

จากรูปที่ 2.64 แสดงให้เห็นถึงปัญหาที่เกิดจากความไม่สมดุลของระยะทางใน การส่งสัญญาณระหว่างสถานีฐานไปยังเครื่องลูกข่าย และจากเครื่องลูกข่ายกลับมายังสถานีฐาน ซึ่ง จะเห็นได้ว่าเครื่องลูกข่ายทั้ง 4 เครื่องได้รับสัญญาณจากสถานีฐาน แม้จะอยู่ห่างจากสถานีฐานใน ระยะที่แตกต่างกัน แต่ก็ถือว่าอยู่ในระยะที่สามารถรับสัญญาณได้ แต่การที่เครื่องลูกข่ายมีกำลังส่ง ต่ำกว่าสถานีฐานมากถึง 4 เท่า ทำให้ระยะทางในการแพร่กระจายสัญญาณย้อนกลับไปยังสถานีฐาน สั้นกว่ามาก แม้จะไม่ถึงกับสั้นกว่า 4 เท่าอันอาจจะมียังปัจจัยเสริมจากสภาพภูมิประเทศและ บรรยากาศของสภาวะแวดล้อม แต่เครื่องลูกข่ายบางเครื่องก็จะประสบปัญหาไม่สามารถส่ง สัญญาณไปถึงสถานีฐานได้ ซึ่งในทางปฏิบัติอาจแก้ปัญหานี้ได้โดยการเพิ่มความไวในวงจรรับ (Receive Sensitivity) ของอุปกรณ์สถานีฐาน แต่การกระทำดังกล่าวก็จะเป็นการเพิ่มความแรงของ สัญญาณรบกวนที่ปะปนมากับสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายแต่ละเครื่องให้มากขึ้น และในบางครั้ง อาจจะต้องประสบกับปัญหาสัญญาณรบกวนสูงจนไม่สามารถอ่านข้อมูลที่ถูกต้องจากเครื่องลูกข่าย ที่อยู่ห่างไกลได้เลย ซึ่งวิธีการแก้ไขสามารถทำได้โดยการเพิ่มกำลังส่งของเครื่องลูกข่ายให้เทียบเท่า กับสถานีฐาน แต่การเพิ่มกำลังส่งดังกล่าวก็มิได้กระทำในทุกย่านความถี่ที่เป็นความถี่ขาขึ้น หากแต่ เป็นการออกแบบจัดสรรย่านความถี่ออกเป็น 4 กลุ่มหรืออาจจะมากน้อยกว่านั้น ตามแต่การ ออกแบบของผู้ให้บริการ โครงข่าย เนื่องจากการให้บริการ เทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) นั้น ทั้งสถานีฐานและเครื่องลูกข่ายจะมีการใช้งานความถี่เป็นแถบกว้าง และต้องมีการแบ่งความถี่ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงพาณิชย์เท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นความถี่ย่อยตามข้อกำหนดของ OFDM ซึ่งการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยกำหนดให้แบ่งเครื่องลูกข่ายออกเป็นกลุ่ม โดยมีจำนวนกลุ่มเท่ากับจำนวนกลุ่มความถี่ที่ถูกจัดสรรไว้ ทั้งนี้เครื่องลูกข่ายทั้งหมดในแต่ละกลุ่มจะส่งสัญญาณออกมาด้วยกำลังส่งที่สูงมากเทียบเท่ากำลังส่งออกจากรังฐานเฉพาะในย่านความถี่ที่ตนได้รับการจัดสรรเท่านั้น ส่วนในย่านความถี่อื่นเครื่องลูกข่ายก็จะไม่ส่งสัญญาณใดๆ ออกมา ในภาพรวมจึงเป็นเสมือนกับว่าเครื่องลูกข่ายใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเท่าเดิม แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการใช้เทคนิค Sub-channelization ชีคความสามารถหรือแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ในการสื่อสารของเครื่องลูกข่ายก็จะลดลง เนื่องจากมีการจำกัดย่านความถี่ในการส่งสัญญาณจากที่เคยส่งได้ตลอดย่านความถี่ ผลก็คือจะทำให้อัตราเร็วในการสื่อสารในทิศทางขาขึ้นลดลงอย่างเห็นได้ชัด เทคนิคการแก้ปัญหาแบบ Sub-channelization เหมาะสำหรับการให้บริการเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) แบบประจำที่ โดยผู้ให้บริการสามารถเลือกกำหนดไม่ให้เครื่องลูกข่ายที่อยู่ใกล้กันอยู่ในกลุ่มที่ต้องส่งสัญญาณความถี่วิทยุกลุ่มเดียวกัน เพื่อป้องกันปัญหาสัญญาณขาขึ้นจากเครื่องลูกข่ายแต่ละเครื่องรบกวนกันเอง นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อให้รองรับการใช้งานแบบพกพาและการใช้งานขณะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ตามลำดับ



รูปที่ 2.64 แสดงผลกระทบที่เกิดจากความไม่สมดุลระหว่างระยะทางการแพร่กระจายของสถานีฐานกับเครื่องลูกข่ายในการสื่อสารบนเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX)

2.5.3.4 ระบบสายอากาศสำหรับการใช้งานไวแมกซ์ (WiMAX) แบบประจำที่

เพื่อเพิ่มอัตราขยายสัญญาณให้กับสถานีฐานและเครื่องลูกข่าย ในกรณีของการแพร่กระจายแบบไม่เป็นเส้นตรง (Non-line of sight) กับกลุ่มผู้ใช้งานแบบประจำที่ ผู้ให้บริการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงข่ายอาจทำการติดตั้งสายอากาศแบบกำหนดทิศทาง (Directional Antenna) ซึ่งในทางปฏิบัติจะเป็นสายอากาศที่สามารถแพร่กระจายสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการตามมุมการยิงสัญญาณ (Beamwidth) ที่กำหนดได้ โดยสายอากาศประเภทนี้จะข้อดีในเรื่องของอัตราขยาย (Gain) ที่ทำให้สามารถส่งสัญญาณออกไปได้ไกลมากขึ้น และมีความไวในการรับสัญญาณ (Receive Sensitivity) ที่ส่งย้อนกลับมาจากอุปกรณ์ปลายทางเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีสายอากาศบางรุ่นที่ช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณสะท้อนหลายทิศทาง (Multi-path Signal) ที่ตกกระทบเข้ามาในมุมอับสัญญาณของสายอากาศ โดยจะทำการกรอง (Filter) สัญญาณดังกล่าวนี้ทิ้งไปทันทีเมื่อตรวจพบ ซึ่งถือเป็นการช่วยลดความรุนแรงของปรากฏการณ์ Multi-path Fading ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

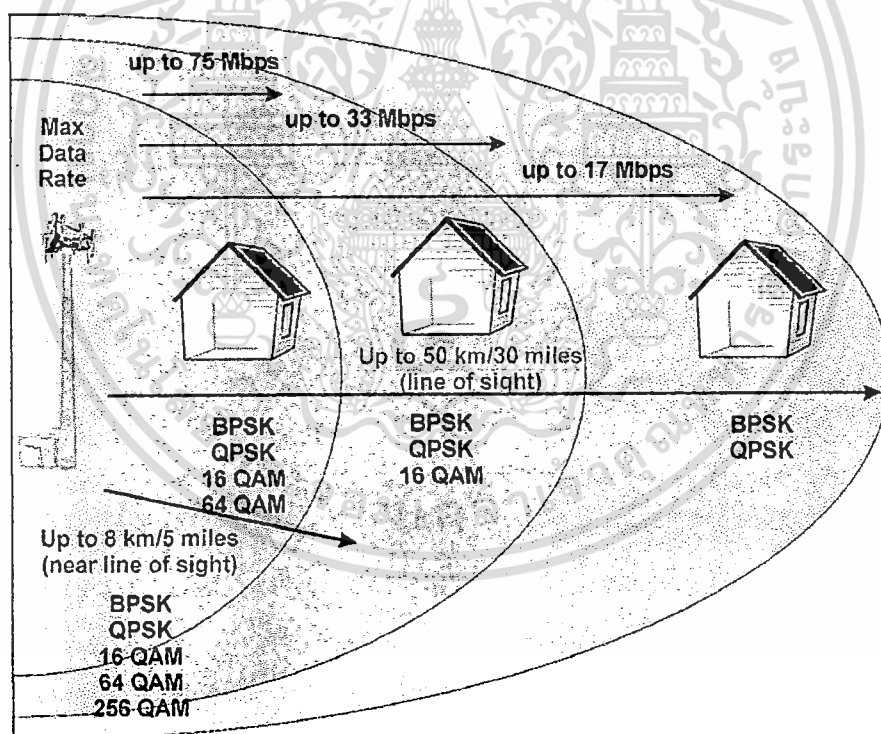
นอกจากนี้ในปัจจุบันยังได้มีการนำระบบสายอากาศอัจฉริยะที่มีชื่อเรียกทางเทคนิคว่า Adaptive Antenna System หรือ AAS เข้าเป็นส่วนหนึ่งของข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEEE 802.16 ซึ่งสายอากาศประเภทนี้ผู้ใช้งานสามารถโปรแกรมเพื่อปรับตำแหน่งโพกัสสำหรับให้สถานีฐานส่งสัญญาณไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งหรือหลายๆ ทิศทางได้ ซึ่งถือเป็นการจำกัดหรือเลือกกลุ่มเครื่องลูกข่ายตามตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ ในทางกลับกันก็สามารถโปรแกรมให้สายอากาศเลือกรับสัญญาณเฉพาะในทิศทางที่ต้องการได้เช่นเดียวกัน ซึ่งถือเป็นการลดระดับการรบกวนของสัญญาณที่เดินทางมาจากทิศทางอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการได้อีกด้วย

2.5.3.5 เทคโนโลยี Diversity

เทคโนโลยี Diversity ถือเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่ใช้ในการแก้ปัญหาการแทรกสอด (Interference) ของสัญญาณที่สะท้อนมาจากสิ่งกีดขวางหลายๆ ทิศทางหรือ Multi-path Fading แม้เทคโนโลยี Diversity จะเป็นเทคโนโลยีที่มักถูกใช้เมื่อมีความต้องการจะติดตั้งสายอากาศ 2 ชุดแยกจากกันในระยะห่างที่เหมาะสม (เช่น ห่างกันเป็นระยะทาง 10 เท่าของความยาวคลื่นที่ใช้ในการรับส่ง) ซึ่งมักพบในกรณีของโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ แต่สำหรับในกรณีของเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) นั้นได้มีการพัฒนาอัลกอริทึมหรือสมการทางคณิตศาสตร์แล้วโปรแกรมไว้ภายในอุปกรณ์สถานีฐานและเครื่องลูกข่ายทั้งในภาคส่งและภาครับสัญญาณ เพื่อให้สามารถส่งเคราะห์สัญญาณคลื่นวิทยุที่สามารถส่งออกไปยังอุปกรณ์ปลายทาง โดยมีความแตกต่างจากสัญญาณที่เกิดจากการสะท้อนกับสิ่งกีดขวางต่างๆ และเครื่องรับสามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างสัญญาณจริงที่เดินทางมาจากอุปกรณ์ต้นทางโดยตรง กับบรรดาสัญญาณที่เกิดจากการสะท้อนกับสิ่งกีดขวางต่างๆ ได้อย่างมีนัยสำคัญ

2.5.3.6 เทคโนโลยี Adaptive Modulation

มาตรฐานการสื่อสารโดยทั่วไป เช่น โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือ โครงข่ายไวไฟ (Wi-Fi) มักถูกกำหนดให้ใช้เทคโนโลยีการมอดูเลตสัญญาณทางคลื่นวิทยุแบบใดแบบหนึ่งตายตัว แต่สำหรับในเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) ซึ่งได้รับการออกแบบมาเพื่อรองรับกลุ่มผู้ใช้งานจำนวนมาก ความเปลี่ยนแปลงของปริมาณการใช้งาน ระดับคุณภาพของสัญญาณที่ปรากฏขึ้นในภาครับของสถานีฐานหรือภาครับของเครื่องลูกข่าย ระยะห่างระหว่างเครื่องลูกข่ายกับสถานีฐาน รวมถึงระดับความแรงของสัญญาณรบกวนในอากาศ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวล้วนมีผลต่อคุณภาพในการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จากประเด็นปัญหาดังกล่าวจึงส่งผลให้ WiMAX Forum ได้ทำการกำหนดให้โครงข่ายไวแมกซ์ (WiMAX) เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายเทคโนโลยีเดียวที่เปิดกว้างในการเลือกใช้เทคโนโลยีการมอดูเลตสัญญาณได้หลายรูปแบบ เช่น BPSK (Binary Phase Shift Keying), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 16QAM (16-Quadrature Amplitude Modulation) และ 64QAM (64-Quadrature Amplitude Modulation)



รูปที่ 2.65 แสดงการมอดูเลต (Modulate) สัญญาณแบบต่างๆ และผลกระทบต่อพื้นที่ให้บริการ

การมอดูเลต (Modulate) คือการแปลงสัญญาณเบสแบนด์ (Baseband) ซึ่งได้แก่ข้อมูลข่าวสารที่ผู้ใช้บริการต้องการใช้งาน มาผ่านกระบวนการแปลงให้อยู่ในรูปองค์ประกอบส่วนใดส่วนหนึ่งของสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่มีความถี่สูงขึ้น ซึ่งในทางเทคนิคเรียกว่า สัญญาณพาหะ (Carrier Frequency) โดยการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลสัญญาณต้นทาง จะเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

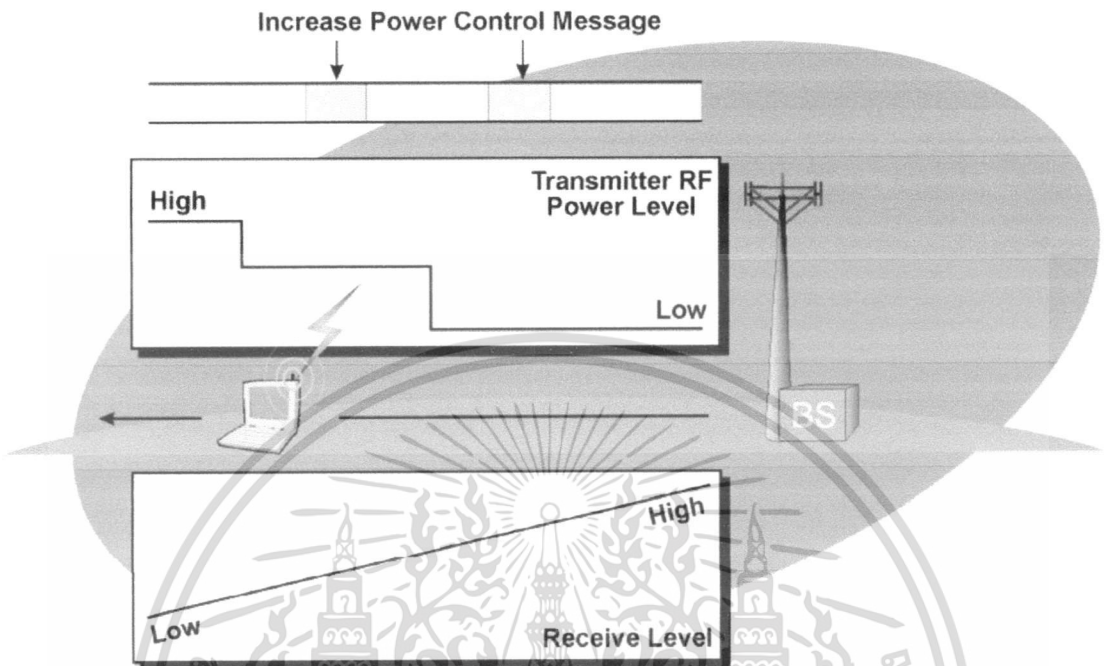
การเปลี่ยนแปลงทางคุณลักษณะอย่างใดอย่างหนึ่งของสัญญาณพาหะ เช่น เปลี่ยนขนาดความแรง เปลี่ยนความถี่ของสัญญาณ หรือเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณ การมอดูเลตสัญญาณแต่ละชนิดก็จะมี ความทนทานต่อสัญญาณรบกวนที่ไม่เท่ากัน กล่าวคือ การมอดูเลตในเชิงแอมพลิจูด (Amplitude) หรือการเปลี่ยนแปลงขนาดความแรงของสัญญาณพาหะ เช่น เทคนิคการมอดูเลตแบบ QAM มี โอกาสที่จะถูกรบกวนได้ง่ายกว่าการมอดูเลตในเชิงเฟส เช่น เทคนิคการมอดูเลตแบบ PSK ต่างๆ เป็นต้น

จากข้อกำหนดตามมาตรฐานของเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) ที่อนุญาตให้ ใช้เทคโนโลยีการมอดูเลตแบบปรับเปลี่ยนรูปแบบได้ (Adaptive Modulation) โดยอุปกรณ์ เครื่องรับและเครื่องส่งของทั้งเครื่องลูกข่ายและสถานีฐาน สามารถปรับเทคนิคการมอดูเลต สัญญาณได้ โดยพิจารณาจากระดับคุณภาพของการรับสัญญาณ ซึ่งโดยทั่วไปจะวัดจากระดับความ แรงของสัญญาณข้อมูลต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio) มีชื่อเรียกเป็นทางการว่า SN หรือ SNR เมื่อใดที่ระดับความแรงของสัญญาณรบกวนต่ำ (SN มีค่าสูง) โครข่ายก็จะปรับไปใช้ การมอดูเลตที่ให้อัตราเร็วในการสื่อสารสูง เช่น การมอดูเลตแบบ 64 QAM แต่หากสัญญาณรบกวน มีความแรงเพิ่มขึ้น เช่น สภาพอากาศเปลี่ยนแปลง หรือมีจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้ เครื่องลูกข่ายเริ่มส่งสัญญาณรบกวนกันเอง โครข่ายไวแมกซ์ (WiMAX) ก็จะปรับเปลี่ยนรูปแบบ การมอดูเลตให้เหมาะสมได้ เช่น หากสัญญาณรบกวนสูงมากๆ (SN มีค่าต่ำมากๆ) โครข่ายก็ อาจจะเปลี่ยนไปใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ BPSK ซึ่งเป็นการมอดูเลตสัญญาณที่ต่ำที่สุด อย่างไร ก็ตามในการปรับเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลต ย่อมส่งผลกระทบต่อพื้นที่ให้บริการ (Coverage area) ของ สถานีฐานด้วย เนื่องจากการมอดูเลตสัญญาณแบบที่ดีที่สุด ซึ่งรองรับการสื่อสารด้วยอัตราเร็วสูงสุด เช่น 64 QAM ย่อมได้รับผลกระทบจากระดับความแรงของสัญญาณได้ไวกว่าการมอดูเลตแบบที่ รับประกันอัตราเร็วในการสื่อสารต่ำที่สุด เช่น BPSK โดยการเลือกที่จะกำหนดให้โครข่ายไว แมกซ์ (WiMAX) มีการทำงานแบบ Adaptive Modulation หรือไม่นั้น จะต้องมีการพิจารณาถึง ผลกระทบต่อการให้บริการ และประสิทธิภาพในการแพร่กระจายสัญญาณของสถานีส่งเป็นสิ่งสำคัญ

2.5.3.7 เทคโนโลยีสนับสนุนอื่นๆ

นอกเหนือจากเทคโนโลยีต่างๆ ที่มีการผนวกเข้าไว้เป็นมาตรฐานทางเทคนิค ของเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ยังมีการนำเทคนิคพิเศษ ทางวิศวกรรมมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องลูกข่ายกับสถานีฐาน ไม่ว่าจะเป็นเทคนิคการแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูล (Error Correction) ที่มีการรับส่งผ่านทาง ความถี่คลื่นวิทยุ ทั้งนี้เพื่อช่วยเพิ่มระดับความถูกต้องของสัญญาณข่าวสารให้สูงกว่าระดับสัญญาณ รบกวน ซึ่งอาจเกิดจากตัวอุปกรณ์สื่อสารเอง หรือจากสถานะแวดล้อม ทั้งนี้ยังได้มีการนำมาตรฐาน การเข้ารหัสหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นมาตรฐาน Reed Solomon FEC, Convolution Coding รวมถึง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคโนโลยีสลับรหัสข้อมูลดิจิทัลแบบอินเทอร์ลีฟวิ่ง (Interleaving) ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในมาตรฐานรับส่งสัญญาณผ่านความถี่คลื่นวิทยุของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM มาเพื่อใช้ตรวจจับและแก้ไขความผิดพลาดของบิตข้อมูลที่มีการส่งผ่านความถี่คลื่นวิทยุ



รูปที่ 2.66 แสดงกลไกการควบคุมกำลังส่งของเครื่องลูกข่าย (Power Control)

นอกจากนั้นการเปิดให้บริการโครงข่ายไวแมกซ์ (WiMAX) โดยทั่วไป เครื่องลูกข่ายไม่ว่าจะเป็นเครื่องลูกข่ายแบบ CPE ในระยะแรกของการให้บริการ หรือเป็นเครื่องลูกข่ายชนิดพกพาและคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก จะพบว่าเครื่องลูกข่ายที่อยู่ในพื้นที่ให้บริการของสถานีสถานีสลับมีตำแหน่งที่กระจายและอยู่ห่างจากสถานีสถานีเป็นระยะทางแตกต่างกัน ซึ่งการที่เครื่องลูกข่ายแต่ละเครื่องจะทำการส่งสัญญาณขาขึ้นกลับมายังสถานีสถานีด้วยระดับความแรงของสัญญาณคงที่ ไม่ว่าจะมีการใช้เทคโนโลยี Sub-channelization หรือไม่ เมื่อพิจารณาในภาพรวมจะพบว่าสถานีสถานีสลับต้องได้รับสัญญาณขาขึ้นในระดับความแรงที่แตกต่างกัน และมีโอกาสที่จะได้รับสัญญาณที่มีความแรงสูงจากเครื่องลูกข่ายที่อยู่ใกล้ๆ โดยสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายที่อยู่ใกล้สถานีสถานีสลับอาจแพร่กระจายผ่านสถานีสถานีสลับๆ ไปสร้างการรบกวนต่อพื้นที่ให้บริการของสถานีสถานีสลับที่อยู่ใกล้เคียงได้ และกลายเป็นปัญหาสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่ข้างเคียง (Adjacent Channel Interference) กับสถานีสถานีสลับอื่นๆ ดังนั้นมาตรฐานของเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) นับตั้งแต่ IEEE 802.16d เป็นต้นไป จึงมีการเพิ่มกลไกการควบคุมกำลังส่ง (Power Control) โดยสถานีสถานีสลับจะแจ้งให้เครื่องลูกข่ายที่อยู่ในพื้นที่ให้บริการได้ทราบว่า สถานีสถานีสลับนี้มีการควบคุมกำลังส่งหรือไม่ ทั้งนี้สถานีสถานีสลับจะส่งสัญญาณนำร่องพร้อมกับระบุระดับความแรงขั้นต่ำที่สถานีสถานีสลับสามารถประมวลผลข้อมูลที่ส่งมาจากเครื่องลูกข่ายได้ เพื่อให้เครื่องลูกข่ายแต่ละเครื่องคำนวณหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่างตนเองกับสถานีฐาน เมื่อทราบระยะห่างแล้วก็จะสามารถคำนวณหาระดับความแรงของการส่งสัญญาณได้ เพื่อให้ข้อมูลที่ถูกลงไปถึงสถานีฐานมีระดับความแรงที่สามารถนำไปใช้งานได้ กระบวนการดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.66

จากรูปที่ 2.66 จะเห็นได้ว่าเครื่องลูกข่ายที่อยู่ใกล้สถานีฐานมากที่สุด จะมีการลดกำลังส่งของตนลงให้เหลือกำลังส่งออกที่ต่ำกว่าเครื่องลูกข่ายที่อยู่ไกลออกไป โดยระดับความแรงของสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายทั้งหมดภายในพื้นที่ให้บริการที่ไปปรากฏอยู่ ณ ตำแหน่งสายอากาศของสถานีฐานจึงมีระดับที่ใกล้เคียงกัน และลดโอกาสที่จะมีสัญญาณขาขึ้นจากเครื่องลูกข่ายเครื่องใดเครื่องหนึ่งแรงจนไปเกิดการรบกวนสถานีฐานอื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียง ทั้งนี้ในกรณีที่มีการใช้เทคนิค Sub-channelization ก็อาจมีผลทำให้เกิดการรบกวนเพิ่มขึ้นบ้างแต่ไม่มากนัก ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องลูกข่ายจะเร่งกำลังส่งขึ้นเพื่อชดเชยกับแถบความถี่ที่ถูกจำกัด ไปดังได้กล่าวถึงแล้วในหัวข้อที่ 2.5.3.3

2.5.4 คุณสมบัติเด่นของเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX)

ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายถึงคุณสมบัติเด่นของเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) ซึ่งมีทั้งหมด 5 ด้านดังนี้

2.5.4.1 อัตราเร็วในการรับส่งข้อมูล

สำหรับเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) นั้นอัตราความเร็วในการรับส่งสัญญาณข้อมูลจะสูงสุดถึง 75 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) อีกทั้งยังมีการใช้กลไกการเปลี่ยนคลื่นสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งจะช่วยให้สามารถส่งสัญญาณออกไปครอบคลุมระยะทางได้สูงสุดถึง 30 ไมล์ หรือประมาณ 50 กิโลเมตร ภายใต้คลื่นความถี่ระดับสูงที่มีประสิทธิภาพในการทำงาน โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องของสัญญาณสะท้อนอีกด้วย นอกจากนี้แล้วสถานีฐาน (Base Station) ยังสามารถพิจารณาความเหมาะสมระหว่างความเร็วและระยะทางได้อีกด้วย เช่น ถ้าหากการใช้เทคนิคในการมอดูเลตแบบ 64 QAM แล้วทำให้ไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่งได้ ก็จะทำการเปลี่ยนไปใช้การมอดูเลตแบบ 16 QAM หรือ QPSK ซึ่งจะช่วยให้ระยะทางการในการสื่อสารให้ไกลมากขึ้นได้

2.5.4.2 แพร่กระจายสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการได้กว้างขวาง

นอกจากเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) จะใช้เทคนิคของการแปลงสัญญาณที่ให้ความคล่องตัวในการใช้งานสูง และเปี่ยมไปด้วยประสิทธิภาพในการทำงานแล้ว มาตรฐาน IEEE 802.16a ยังสามารถรองรับการทำงานร่วมกับเทคโนโลยีที่ช่วยขยายพื้นที่การให้บริการให้กว้างขวางมากขึ้นได้ด้วย เช่น ระบบโครงข่ายที่ใช้สถาปัตยกรรมแบบผสมผสาน (Mesh Topology)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเทคนิคการใช้งานกับสายอากาศแบบอัจฉริยะ (Smart Antenna) ที่จะช่วยประหยัดต้นทุนและเพิ่มอัตราเร็วในการรับส่งสัญญาณให้มีความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น

2.5.4.3 สามารถต่อเติมและขยายระบบได้ง่าย

เทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) เป็นเทคโนโลยีที่มีความสามารถในการรองรับการใช้งานแบนด์วิดท์ของสัญญาณสำหรับการสื่อสารได้ด้วยความยืดหยุ่น โดยสามารถที่จะปรับให้สอดคล้องกับแผนการติดตั้งเซลล์ในย่านความถี่ที่ต้องจ่ายค่าลิขสิทธิ์ หรือ ย่านความถี่ที่ได้รับการยกเว้นค่าลิขสิทธิ์ได้ทั่วโลก เช่น ถ้าโอเปอเรเตอร์ (Operator) ที่ให้บริการนั้นได้รับคลื่นความถี่ 20 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) ก็สามารที่จะทำการแบ่งคลื่นความถี่นี้ออกเป็น 2 ส่วน โดยแต่ละส่วนนั้นจะมีความกว้างของย่านความถี่อยู่ที่ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) หรือจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน โดยแต่ละส่วนนั้นจะมีความกว้างของย่านความถี่อยู่ที่ 5 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) ก็ได้ ทำให้โอเปอเรเตอร์ (Operator) สามารถบริหารจัดการย่านความถี่แต่ละส่วน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และ ยังจะช่วยทำให้สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งานในแต่ละย่านความถี่เพิ่มมากขึ้นได้อีกด้วย

2.5.4.4 การจัดลำดับความสำคัญของงานบริการ

สำหรับระบบ โครงข่ายไร้สายที่ถูกสร้างขึ้นตามมาตรฐานของเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) นั้น จะมีคุณสมบัติในการจัดลำดับความสำคัญของการให้บริการ (Quality of Service: QoS) รวมอยู่ด้วย โดยคุณสมบัติดังกล่าวจะช่วยทำให้โครงข่ายสามารถรองรับการรับส่งข้อมูลประเภทสัญญาณเสียงและสัญญาณวิดีโอได้ ซึ่งสัญญาณทั้งสองรูปแบบต้องการระบบโครงข่ายที่สามารถรับส่งข้อมูลได้ด้วยอัตราเร็วสูง เพื่อจะได้ไม่ก่อให้เกิดความล่าช้าในการติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ส่งและผู้รับ โดยการรับส่งสัญญาณเสียงและสัญญาณวิดีโอบนเทคโนโลยีไวแมกซ์ อาจอยู่ในรูปแบบของ Time Division Multiplexed (TDM) หรืออยู่ในรูปแบบ Voice over IP (VoIP) ก็ได้ โดยโอเปอเรเตอร์ (Operator) สามารถที่จะกำหนดลำดับความสำคัญ (Priority) ของการใช้งานให้เหมาะสมกับรูปแบบการให้บริการและกลุ่มผู้ใช้งานได้ เช่น บริการให้กับองค์กรธุรกิจ บริการให้กับผู้ใช้งานตามบ้านเรือน

2.5.4.5 ระบบรักษาความปลอดภัย

นับเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับการติดต่อสื่อสารผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต (Internet) ในปัจจุบัน โดยคุณสมบัติในการรักษาความปลอดภัยและการเข้ารหัสข้อมูล จะถูกรวมอยู่ในมาตรฐานของเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวถือเป็นส่วนที่ช่วยทำให้การติดต่อสื่อสารมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น อีกทั้งเทคโนโลยีไวแมกซ์ยังมีระบบตรวจสอบสิทธิการใช้งานและมีระบบการเข้ารหัสข้อมูลในตัวเองอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การวิเคราะห์และออกแบบการทดลอง

ในการวิเคราะห์และออกแบบการทดลองนั้น ถือเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างมากสำหรับการจัดทำโครงการวิจัย เนื่องจากเป็นส่วนที่จะแสดงให้เห็นถึงปัญหาเกี่ยวกับการเลือกใช้แบบจำลองการลดทอนตามระยะทางและแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณ รวมทั้งข้อบกพร่องในการทดลองต่างๆ ที่พบในระบบงานเดิม นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงมุมมองในการปรับปรุงและขั้นตอนการทดลองของผู้จัดทำโครงการวิจัยอีกด้วย

3.1 ศึกษาระบบงานเดิม

ในงานวิจัยของ Mohammed Alshami, Tughrul Arslan, John Thompson และ Ahmet T. Erdogan เรื่อง Frequency Analysis of Path Loss Models on WiMAX ในปี ค.ศ. 2011 มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

- ข้อดี คือ 1. มีการแสดงจุดประสงค์และตั้งสมมติฐานในการทดลองได้อย่างชัดเจน
2. มีการรวบรวม จัดหมวดหมู่และแสดงสมการในการคำนวณของแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางแต่ละชนิดที่จะนำมาใช้ในการทดลองตามสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้อย่างชัดเจน
3. มีการแสดงผลการทดลองของแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมต่างๆ ในรูปแบบกราฟเส้น ทำให้ผู้อ่านเห็นถึงความแตกต่างของแต่ละแบบจำลองได้ชัดเจน
4. มีการวัดประสิทธิภาพในการทำงานของเทคโนโลยีไวแมกซ์เปรียบเทียบกับเกิดการลดทอนตามระยะทางในมุมมองต่างๆ อย่างชัดเจน เช่น ความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูล ความสามารถในการให้บริการครอบคลุมพื้นที่ได้กว้างขวาง และโอกาสที่อุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณไวแมกซ์จะไม่สามารถให้บริการได้

ข้อเสีย คือ 1. ขาดการอธิบายกระบวนการ อุปกรณ์ และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ประกอบการทดลอง

2. ขาดการอธิบายให้เห็นถึงความสำคัญและความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดการเกิดการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมจริงที่นำมาอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบกับการวัด โดยใช้แบบจำลองการลดทอนตามระยะทางในบทความวิจัย

3. การอธิบายในส่วนของการสรุปผลการทดลองขาดความเชื่อมโยงกับผลลัพธ์ที่ได้แสดงบนกราฟเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การเขียนสรุปผลการทดลองไม่ได้แสดงให้เห็นถึงสัดส่วนความคลาดเคลื่อนระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้แบบจำลองการลดทอนตามระยะทางกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงอย่างชัดเจน

ในงานวิจัยของ Liu Yarong, Yang Xiaofei, Shen Zhuojun และ Lu Qiu เรื่อง The Research of Path Loss Model Based on WiMAX Wireless Channel ในปี ค.ศ. 2010 มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี คือ 1. มีการอธิบายถึงที่มา จุดประสงค์ ความสำคัญของปัญหา รวมทั้งกลไกการทำงานของเทคโนโลยีไวแมกซ์ที่จะนำมาใช้ในการทดลองอย่างชัดเจน

2. มีการจัดหมวดหมู่และแสดงสมการในการคำนวณของแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางแต่ละชนิดที่จะนำมาใช้ในการทดลองตามสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้อย่างชัดเจน

3. มีการอธิบายถึงกระบวนการ อุปกรณ์ และ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดลองอย่างชัดเจน

4. มีการอธิบายรายละเอียดของภาพที่นำมาประกอบทั้งในส่วนของการออกแบบการทดลองและสรุปผลการทดลองที่ชัดเจน ทำให้ผู้อ่านเข้าใจถึงกระบวนการและความหมายของผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองมากยิ่งขึ้น

ข้อเสีย คือ 1. ขาดความหลากหลายของแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางที่นำมาใช้ในการทดลอง รวมทั้งไม่ได้บอกถึงเกณฑ์ในการตัดสินใจเลือกแบบจำลองแต่ละชนิดมาทำการทดลองอีกด้วย

2. มีข้อจำกัดในส่วนของสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งควรจะมีสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง และสภาวะแวดล้อมแบบชนบทรวมด้วย เพื่อให้ผู้อ่านได้นำไปพิจารณาถึงความเหมาะสมของแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางแต่ละชนิดที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ตามแต่ละสภาวะแวดล้อมได้อย่างถูกต้อง

3. การเขียนสรุปผลการทดลองไม่ได้มีความสอดคล้องหรือเชื่อมโยงกับผลลัพธ์ที่ได้จากการเขียนแบบ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มากเท่าที่ควร

ในงานวิจัยของ Mohamed Ali Aboul- Dahab และ Hossam Mohamed Kamel เรื่อง Methodology for Calculating Path Loss Upper and Lower Bounds for WiMAX ในปี ค.ศ. 2009 มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี คือ 1. มีการอธิบายถึงทฤษฎีที่เกี่ยวกับการประมาณค่าในการเกิดการลดทอนตามระยะทาง กระบวนการ อุปกรณ์ และ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดลองอย่างชัดเจน

2. มีการแสดงผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์เพื่อหาค่าต่ำสุดและสูงสุดในการเกิดการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมต่างๆ ในรูปแบบกราฟเส้นและตารางสรุป ซึ่ง

ทำให้ผู้อ่านเห็นถึงแนวโน้มของปริมาณการเกิดการลดทอนตามระยะทางเมื่อเทียบกับระยะทางที่เพิ่มมากขึ้นได้อย่างชัดเจน

3. มีการอธิบายรายละเอียดของกราฟเส้นและตารางสรุปที่นำมาประกอบผลการทดลองที่ชัดเจน ทำให้ผู้อ่านเข้าใจถึงความหมายของค่าต่างๆ บนกราฟเส้นว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร และสามารถนำไปประยุกต์ใช้หรืออ้างอิงภายในงานวิจัยของตนเองได้อย่างถูกต้อง

ข้อเสีย คือ 1. ขาดความหลากหลายในการทดลองที่สภาวะแวดล้อมอื่นๆ เช่น สภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง สภาวะแวดล้อมแบบชนบท ทำให้ผลการทดลองที่ได้ สามารถนำไปใช้ในการอ้างอิงได้กับเพียงบางสภาวะแวดล้อมเท่านั้น โดยในที่นี้คือ สภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

2. มีข้อจำกัดในการนำผลการทดลองไปใช้ในการอ้างอิง เนื่องจากผลการทดลองที่ปรากฏในบทความวิจัยฉบับนี้เป็นการทดลองเพื่อหาค่าต่ำสุดและสูงสุดในการเกิดการลดทอนตามระยะทางภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง ในช่วงระยะทางตั้งแต่ 1 ถึง 5 กิโลเมตรเท่านั้น

3. การเขียนสรุปผลการทดลองไม่ได้มีความสอดคล้องหรือเชื่อมโยงกับผลลัพธ์ที่ได้จากการเลียนแบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มากเท่าที่ควร

ในงานวิจัยของ Winton Afric, Branka Zovko-Cihlar, Sonja Grgic เรื่อง Methodology of Path Loss Calculation using Measurement Result ในปี ค.ศ. 2007 มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี คือ 1. มีการอธิบายถึงทฤษฎีที่เกี่ยวกับการคำนวณการเกิดการลดทอนตามระยะทาง กระบวนการ และ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดลองอย่างชัดเจน

2. มีการแสดงผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งในที่นี้คือ โปรแกรม MATLAB ในรูปแบบกราฟเส้น ทำให้ผู้อ่านเห็นถึงแนวโน้มของปริมาณการเกิดการลดทอนตามระยะทางเมื่อเทียบกับระยะทางที่เพิ่มมากขึ้นได้อย่างชัดเจน

3. มีการแสดงตัวอย่างประกอบ โดยนำวิธีการคำนวณการเกิดการลดทอนตามระยะทางที่นำเสนอในบทความวิจัยฉบับนี้ไปใช้ในการคำนวณในสภาวะแวดล้อมจริง ทำให้ผู้อ่านเข้าใจถึงกระบวนการและลำดับในการคำนวณที่ถูกต้องได้ง่ายมากยิ่งขึ้น

ข้อเสีย คือ 1. ขาดการอธิบายถึงความหมายของตัวแปรแต่ละชนิดในแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางที่ครบถ้วนและชัดเจน

2. ขาดการอธิบายรายละเอียดของกราฟและตารางสรุปที่นำมาประกอบในบทความวิจัย

3. มีข้อจำกัดในการนำผลการทดลองไปใช้ในการอ้างอิง เนื่องจากผลการทดลองที่ปรากฏในบทความวิจัยฉบับนี้เป็นการคำนวณการเกิดการลดทอนตามระยะทางบนระบบเครือข่ายไวแมกซ์ (WiMAX) ในย่านความถี่ 3.5 GHz. เท่านั้น

ในงานวิจัยของ Fabio Belloni เรื่อง Fading Model ในปี ค.ศ. 2004 มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดี คือ 1. มีการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและประเภทการจางหายของกำลังสัญญาณ เพื่อเป็นการสร้างความเข้าใจให้ผู้อ่านในเบื้องต้นก่อนจะลงรายละเอียดเชิงลึกในหัวข้อถัดไป

2. มีการจัดหมวดหมู่และแสดงสมการในการคำนวณของแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณแต่ละชนิดที่น่าเสนอในบทความวิจัยตามสภาวะแวดล้อมต่างๆ อย่างชัดเจน

3. มีการอธิบายถึงความหมายและการได้มาซึ่งค่าของตัวแปรแต่ละชนิดที่พบในแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณ ได้อย่างชัดเจน

4. มีการอธิบายรายละเอียดของภาพที่นำมาประกอบทั้งในส่วนของการกราฟเส้นและแบบจำลองต่างๆ ที่ชัดเจน ทำให้ผู้อ่านเข้าใจถึงประเด็นสำคัญและลักษณะการเกิดปรากฏการณ์การจางหายของกำลังสัญญาณภายในหัวข้อนั้นมากยิ่งขึ้น

5. มีการอธิบายเชื่อมโยงถึงปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการเกิดการจางหายของกำลังสัญญาณ เช่น ร่มเงา ทำให้ผู้อ่านเกิดมุมมองในการนำแบบจำลองชนิดต่างๆ ไปประยุกต์ใช้ในวิเคราะห์การเกิดการจางหายของกำลังสัญญาณตามแต่ละสภาวะแวดล้อมที่เกิดขึ้นในพื้นที่นั้นๆ ได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น

ข้อเสีย คือ 1. ขาดการแสดงตัวอย่างการนำแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณแต่ละชนิดไปใช้ในการวิเคราะห์และประเมินการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมจริง

2. การเขียนสรุปประเด็นสำคัญภายในบทความวิจัย ไม่ได้มีการเชื่อมโยงถึงเนื้อหาในแต่ละหัวข้อที่มีความครอบคลุม และครบถ้วนสมบูรณ์เท่าที่ควร อีกทั้งใจความในส่วนนี้กลับเป็นการอธิบายถึงเกณฑ์ที่ใช้ในการจัดกลุ่มของแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณตามสภาวะแวดล้อมต่างๆ ซึ่งไม่ได้ถือเป็นจุดประสงค์หลักของการจัดทำบทความวิจัยนี้ขึ้นมา

ในงานวิจัยของ Hamant kumar sharma, Sanjeev Sharma และ Krishna Pandey เรื่อง Survey of propagation Model in Wireless Network ในปี ค.ศ. 2011 มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี คือ 1. มีการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการรับส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ เพื่อเป็นการสร้างความเข้าใจให้ผู้อ่านในเบื้องต้นก่อนจะลงรายละเอียดเชิงลึกในหัวข้อถัดไป

2. มีการแสดงภาพประกอบการอธิบายทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการรับส่งสัญญาณคลื่นวิทยุและการจางหายของกำลังสัญญาณที่ชัดเจน ทำให้ผู้อ่านมีความเข้าใจในประเด็นหลักและมีความเข้าใจที่ตรงกันในหัวข้อนั้นมากยิ่งขึ้น

3. การเขียนเกริ่นนำและสรุปประเด็นต่างๆ ภายในบทความวิจัยมีความเชื่อมโยงครอบคลุม และครบถ้วนสมบูรณ์ ทำให้ผู้อ่านสามารถจับประเด็นสำคัญภายในบทความได้ง่ายมากขึ้น

ข้อเสีย คือ 1. ขาดการจัดหมวดหมู่และแสดงสมการในการคำนวณของแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางและแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณแต่ละชนิดที่จะนำมาใช้ในการทดลองตามสภาวะแวดล้อมต่างๆ อย่างชัดเจน

2. ขาดการแสดงตัวอย่างการนำแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางและแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณไปใช้งานจริง

3. ขาดความหลากหลายของแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณ อีกทั้งภายในบทความวิจัยยังไม่ได้ชี้แจงถึงความหมายของตัวแปรแต่ละชนิดที่พบในแบบจำลองอย่างชัดเจนอีกด้วย

4. ขาดการอธิบายรายละเอียดของภาพที่นำมาประกอบในบทความวิจัย

ในงานวิจัยของ Pablo Barsocchi เรื่อง Channel Models for Terrestrial Wireless Communications ในปี ค.ศ. 2006 มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี คือ 1. มีการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการรับส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ รวมทั้งสภาวะแวดล้อม ปัจจัย และสาเหตุที่ก่อให้เกิดการจางหายของกำลังสัญญาณ เพื่อเป็นการสร้างความเข้าใจให้ผู้อ่านในเบื้องต้นก่อนจะลงรายละเอียดเชิงลึกในหัวข้อถัดไป

2. มีการรวบรวม จัดหมวดหมู่และแสดงสมการในการคำนวณของแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางและแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณตามความเหมาะสมในการนำไปใช้ในการศึกษาและทดลองได้อย่างชัดเจน

3. มีการแสดงกรณีศึกษาการวัดการเกิดการลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง และมีการนำเสนอผลการทดลองทั้งในรูปแบบตาราง แผนภูมิและกราฟ 3 มิติ ทำให้ผู้อ่านเข้าใจถึงกระบวนการ ลำดับในการคำนวณและสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองไปประยุกต์ใช้กับงานของตนเองได้อย่างถูกต้องและสะดวกมากยิ่งขึ้น

4. มีการอธิบายรายละเอียดของภาพที่นำมาประกอบทั้งในส่วนของการกราฟ 3 มิติแบบจำลอง แผนภูมิ และตารางสรุปที่ชัดเจน ทำให้ผู้อ่านเข้าใจถึงประเด็นสำคัญภายในหัวข้อนั้นได้ดียิ่งขึ้น

5. มีการสรุป เปรียบเทียบและแสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับการรับส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ เมื่อเกิดการจางหายของกำลังสัญญาณแต่ละประเภท ได้อย่างอย่างชัดเจน

ข้อเสีย คือ 1. ขาดการอธิบายให้เห็นถึงความสำคัญและความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดการเกิดการลดทอนตามระยะทางและการเกิดการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมจริง

2. ขาดความหลากหลายของแบบจำลองในการวิเคราะห์และประมาณค่าการเกิดการลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณ เมื่อคลื่นมีการเดินทางแบบกระจัดกระจาย (Scattering) สะท้อน (Reflection) และเลี้ยวเบน (Diffraction)

ในงานวิจัยของ Tapan K. Sakar, Zhong Ji, Kyungjung Kim, Abdeltif Medouri และ Magdalena Salazar-Palma เรื่อง A Survey of Various Propagation Models for Mobile Communication ในปี ค.ศ. 2003 มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี คือ 1. การรวบรวม จัดหมวดหมู่และแสดงสมการในการคำนวณของแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางและแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณแต่ละชนิดได้อย่างชัดเจน

2. มีการอธิบายรายละเอียดของภาพที่นำมาประกอบทั้งในส่วนของการกราฟเส้น แบบจำลองวงจรการรับส่งสัญญาณ และตารางสรุปที่ชัดเจน ทำให้ผู้อ่านเข้าใจถึงประเด็นสำคัญภายในหัวข้อนั้นได้ดีมากยิ่งขึ้น

3. มีการสรุป เปรียบเทียบและแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสม ความแม่นยำ และความซับซ้อนในการนำแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางและแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณไปใช้ในการวิเคราะห์ในสภาวะแวดล้อมแบบต่างๆ ได้อย่างชัดเจน

ข้อเสีย คือ 1. ขาดการอธิบายถึงความหมายของตัวแปรแต่ละชนิดในแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางและแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณที่ครบถ้วนและชัดเจน

2. ขาดการแสดงตัวอย่างการนำแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางและแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณแต่ละชนิดไปใช้ในการวิเคราะห์และประเมินในสภาวะแวดล้อมจริง

3. การเขียนสรุปประเด็นสำคัญภายในบทความวิจัย ไม่ได้มีการเชื่อมโยงถึงเนื้อหาในแต่ละหัวข้อที่มีความครอบคลุม และครบถ้วนสมบูรณ์มากเท่าที่ควร

3.2 ปัญหาที่พบในปัจจุบัน

เนื่องจากแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางและแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณที่ถูกคิดค้นขึ้นตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันมีอยู่มากมาย รวมทั้งบางแบบจำลองก็ได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยการนำแบบจำลอง 2 ชนิดหรือมากกว่านั้นมารวมกัน และเกิดเป็นแบบจำลองชนิดใหม่ขึ้น ทำให้กลายเป็นปัญหาของนักวิเคราะห์และออกแบบระบบเครือข่ายไร้สาย เพราะนอกจากแบบจำลองแต่ละชนิดจะมีอยู่มากมายแล้ว ก็ยังไม่ได้มีการนำมาจำแนกตามความเหมาะสมในการนำไปใช้เพื่อการวิเคราะห์หรือวัดปริมาณการเกิดการลดทอนตามระยะทางหรือการจางหายของกำลังสัญญาณในแต่ละสภาวะแวดล้อมด้วย ซึ่งปัญหาดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและประสิทธิผลในการทำงานของนักวิเคราะห์และออกแบบระบบเครือข่าย เนื่องจากจะต้องทำการรวบรวมแบบจำลองตามประเด็นที่สนใจทั้งหมดให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อนำมาใช้ในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์หาผลลัพธ์จากหลายๆ แบบจำลองและนำมาทำการหาค่าเฉลี่ยในเชิงปริมาณสำหรับการเกิดการลดทอนตามระยะทางหรือการจางหายของกำลังสัญญาณ ซึ่งจะเห็นได้ว่าต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์และทดลองมากพอสมควร อีกทั้งนักวิเคราะห์และออกแบบระบบเครือข่ายไร้สายก็ไม่สามารถทราบได้โดยว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์นั้นถูกต้องและตรงกับเกิดการลดทอนตามระยะทางหรือการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมจริงมากน้อยเพียงใด เพราะผลลัพธ์สุทธินั้นมาจากการนำผลลัพธ์จากแบบจำลองแต่ละชนิดมาทำการหาค่าเฉลี่ยร่วมกันเท่านั้น ซึ่งแบบจำลองบางชนิดอาจให้ผลลัพธ์ที่มีคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงสูง และบางแบบจำลองอาจให้ผลลัพธ์ที่ต่ำไปจากความเป็นจริง โดยเหตุการณ์ดังกล่าวอาจจะเกิดจากสาเหตุที่แบบจำลองชนิดนั้นขาดปัจจัยที่ส่งผลกระทบหรือมีความสำคัญอย่างมากต่อการเกิดการลดทอนตามระยะทางหรือการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมนั้นๆ ไป เช่น ความหนาแน่นของสิ่งกีดขวาง การสูญเสียกำลังสัญญาณอันเนื่องมาจากเม็ดฝน จากปัญหาดังกล่าวทำให้นักวิเคราะห์และออกแบบระบบเครือข่ายไร้สายบางส่วนมีความคิดเห็นว่าการวิเคราะห์และประมาณค่าการเกิดการลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณ โดยใช้แบบจำลองอาจเป็นวิธีที่ไม่ค่อยน่าเชื่อถือมากเท่าที่ควร จึงตัดสินใจจัดซื้ออุปกรณ์ที่มีความน่าเชื่อถือและใช้สำหรับการวิเคราะห์และตรวจวัดการเกิดการลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณ โดยตรง ซึ่งอาจจะเป็นไปได้สำหรับองค์กรขนาดใหญ่ที่มีงบประมาณสูง แต่สำหรับองค์กรขนาดเล็กคงเป็นเรื่องยากที่จะจัดซื้อเครื่องมือดังกล่าวมาใช้งาน เนื่องจากมีราคาค่อนข้างสูงและอาจไม่สามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลาอันสั้น เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณงานที่เข้ามาในแต่ละเดือน ทำให้นักวิเคราะห์และออกแบบระบบเครือข่ายไร้สายจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้การวิเคราะห์และประมาณค่าการเกิดการลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณเช่นเดิม

จากปัญหาและความต้องการดังกล่าวทำให้นักจัดทำโครงการวิจัยมีความประสงค์ที่จะทำการทดลองเพื่อจัดกลุ่มแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางและแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณตามความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้วิเคราะห์ตามแต่ละสถานะแวดล้อม เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับการเกิดการลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมจริงมากที่สุด และยังถือเป็นการช่วยทำให้นักวิเคราะห์และออกแบบระบบเครือข่ายไร้สายสามารถดำเนินการวิเคราะห์และออกแบบระบบเครือข่ายไร้สายได้อย่างรวดเร็ว มีประสิทธิภาพและก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นกับองค์กรน้อยที่สุดอีกด้วย เนื่องจากไม่ต้องเสียเวลาไปกับการรวบรวมและทดลองทุกๆ แบบจำลองตามประเด็นที่สนใจทั้งหมด เพื่อนำเอาผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองแต่ละชนิดไปทำการหาค่าเฉลี่ยอีกต่อไป เพราะผลที่ได้จากการทดลองนี้จะช่วยทำให้นักวิเคราะห์และออกแบบระบบเครือข่ายไร้สายสามารถเลือกแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางหรือแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณที่มีความแม่นยำและเหมาะสมกับสถานะแวดล้อมที่พบเจอในพื้นที่นั้นๆ ไปใช้ในการวิเคราะห์ได้ทันที

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายถึงขั้นตอนการทดลอง โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

3.3.1 การทดลองโดยการเลียนแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในการทดลองโดยการเลียนแบบจาก โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในที่นี้ จะใช้โปรแกรม MATLAB ในการเลียนแบบการลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณ โดยจะแบ่งการทดลองออกตามสภาวะแวดล้อมต่างๆ ดังนี้

- การทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง
- การทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง
- การทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง
- การทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท

โดยแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางที่นำมาเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถจำแนกตามความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางกับสภาวะแวดล้อมต่างๆ

ชื่อแบบจำลอง	สภาวะแวดล้อม แบบพื้นที่เปิดโล่ง	สภาวะแวดล้อม แบบชุมชนเมือง	สภาวะแวดล้อม แบบชานเมือง	สภาวะแวดล้อม แบบชนบท
Simplified Model	✓			
Walfish Model	✓			
Lee Model	✓	✓	✓	✓
Ericsson Model		✓	✓	✓
Cost-231 Model		✓	✓	✓
COST231 Walfish-Ikegami Model		✓		
Okumura Model			✓	✓
Okumura-Hata Model			✓	

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

ชื่อแบบจำลอง	สภาวะแวดล้อม แบบพื้นที่เปิดโล่ง	สภาวะแวดล้อม แบบชุมชนเมือง	สภาวะแวดล้อม แบบชานเมือง	สภาวะแวดล้อม แบบชนบท
Hata Model		✓	✓	✓
Erceg Model		✓	✓	✓
ECC-33 Model		✓	✓	

- การทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง
- การทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง
- การทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง
- การทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท

โดยแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณที่นำมาเขียนแบบด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถจำแนกตามความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณกับสภาวะแวดล้อมแบบต่างๆ

ชื่อแบบจำลอง	สภาวะแวดล้อม แบบพื้นที่เปิดโล่ง	สภาวะแวดล้อม แบบชุมชนเมือง	สภาวะแวดล้อม แบบชานเมือง	สภาวะแวดล้อม แบบชนบท
Ricean Distribution	✓	✓	✓	✓
Rayleigh Distribution	✓	✓	✓	✓
Log-Normal Fading Model		✓	✓	
Suzuki Model		✓	✓	✓
Nakagami Model		✓	✓	✓
Weibull Model	✓	✓	✓	✓

ซึ่งขั้นตอนการทดลองในสภาวะแวดล้อมต่างๆ ประกอบด้วย

1. สร้างแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณใน

โปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการประมวลผลการเลียนแบบตามแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางและแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมต่างๆ บนโปรแกรม MATLAB ตามที่แจกแจงในตารางที่ 3.1 และ 3.2

3. บันทึกผลการทดลองและนำผลลัพธ์ดังกล่าวไปบันทึกลงบนกราฟ

4. สรุปผลการทดลอง

3.3.2 การทดลองในสถานะแวดล้อมจริง

การทดลองในสถานะแวดล้อมจริงในที่นี้ จะใช้อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณไวแมกซ์ (WiMAX signal generator) ในการทดลองการลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณ เพื่อยืนยันผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

1. กำหนดพื้นที่ในการทดลองจริงตามแต่ละสถานะแวดล้อม ซึ่งสามารถจำแนกตามรูปแบบการทดลองได้ดังนี้

- การทดลองการลดทอนตามระยะทาง ประกอบด้วย

การทดลองในสถานะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่งใช้พื้นที่บริเวณถนนเลียบริมสนามบินสุวรรณภูมิ เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร โดยมีระยะทางประมาณ 5 กิโลเมตร

การทดลองในสถานะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองใช้พื้นที่บริเวณแฟลตเคหะร่วมเกล้า เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร โดยมีระยะทางประมาณ 5 กิโลเมตร

การทดลองในสถานะแวดล้อมแบบชานเมืองใช้พื้นที่บริเวณหน้าโชว์รูมโตโยต้า (หัวตะเข้) เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร โดยมีระยะทางประมาณ 5 กิโลเมตร

การทดลองในสถานะแวดล้อมแบบชนบทใช้พื้นที่บริเวณชอยพัฒนาชนบท 3 เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร โดยมีระยะทางประมาณ 5 กิโลเมตร

- การทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ ประกอบด้วย

การทดลองในสถานะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่งใช้พื้นที่บริเวณถนนเลียบริมสนามบินสุวรรณภูมิ เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร โดยมีระยะทางประมาณ 5 กิโลเมตร

การทดลองในสถานะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองใช้พื้นที่บริเวณแฟลตเคหะร่วมเกล้า เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร โดยมีระยะทางประมาณ 5 กิโลเมตร

การทดลองในสถานะแวดล้อมแบบชานเมืองใช้พื้นที่บริเวณหน้าโชว์รูมโตโยต้า (หัวตะเข้) เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร โดยมีระยะทางประมาณ 5 กิโลเมตร

การทดลองในสถานะแวดล้อมแบบชนบทใช้พื้นที่บริเวณชอยพัฒนาชนบท 3 เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร โดยมีระยะทางประมาณ 5 กิโลเมตร

2. ติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณไวแมกซ์ (WiMAX) ตามจุดทดลองต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วัดระดับสัญญาณบนเครื่องรับที่รับได้ ตามระยะทางที่กำหนด
4. บันทึกผลการทดลองและนำผลลัพธ์ดังกล่าวไปบันทึกลงในกราฟ
5. สรุปผลและวิเคราะห์ผลการทดลองเทียบกับการทดลองโดยการเลียนแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในส่วนนี้จะเป็นการแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของอุปกรณ์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการทดลอง เหตุผลที่เลือกอุปกรณ์และซอฟต์แวร์ดังกล่าวมาเป็นส่วนหนึ่งของการทดลอง การดำเนินการทดลองตามกระบวนการที่ได้วิเคราะห์และออกแบบไว้ในข้างต้น ผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณตามแต่ละสภาวะแวดล้อมที่ได้จากการเลียนแบบ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริง รวมทั้งการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลอง

4.1 การทดลองโดยการเลียนแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การทดลองโดยการเลียนแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นทางผู้จัดทำโครงการวิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม MATLAB เป็นซอฟต์แวร์ในการทดลอง เนื่องจากซอฟต์แวร์ดังกล่าวมีคุณสมบัติ และฟังก์ชันการทำงานที่จำเป็นสำหรับการทดลองอย่างครบถ้วน เช่น ประมวลผลสมการ ประมวลผลสมการอนุพันธ์ สมการเชิงซ้อน เป็นต้น รวมทั้งยังสามารถแสดงผลการเลียนแบบการลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณตามแต่ละแบบจำลองเป็นกราฟเส้น ได้อีกด้วย ซึ่งคุณสมบัติการแสดงผลในรูปแบบกราฟถือเป็นคุณสมบัติเฉพาะของโปรแกรม MATLAB ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการทำโครงการวิจัยที่จำเป็นต้องมีการทดลองโดยการเลียนแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เนื่องจากจะช่วยให้ผู้ทดลองเห็นถึงแนวโน้มและความแตกต่างของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองแต่ละชนิดได้อย่างชัดเจน รวมทั้งยังช่วยให้สามารถนำเอาผลลัพธ์ที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไปใช้ในการวิเคราะห์ที่เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงได้ง่ายมากยิ่งขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 4.1 แสดงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองการลดทอนตามระยะทางโดยการเลียนแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ชื่อพารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ความถี่ (f) ในหน่วย MHz	2400
ระยะทาง (D) ในหน่วยกิโลเมตร	5
ระยะทางอ้างอิง (D_0) ในหน่วยเมตร	100
ขนาดความยาวคลื่น (λ)	0.125
ขอบเขตการเกิดรบกวน (S) ในหน่วย dB	10
ความสูงของสายอากาศฝั่งส่ง (H_t) ในหน่วยเมตร	5

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

ชื่อพารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ความสูงของสายอากาศฝั่งรับ (H_r) ในหน่วยเมตร	5
อัตราขยายของสายอากาศในฝั่งส่ง (G_t) ในหน่วย dB	10
อัตราขยายของสายอากาศในฝั่งรับ (G_r) ในหน่วย dB	10
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s) ในหน่วย dB	8.2-10.6

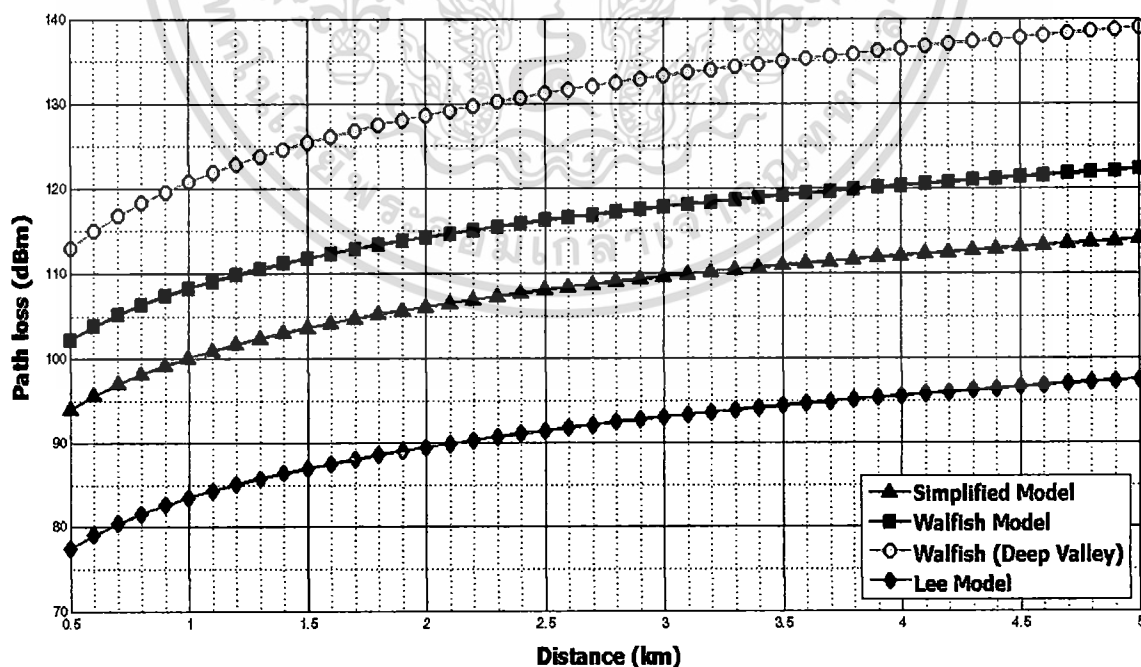
ตารางที่ 4.2 แสดงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ โดยการ
เลียนแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ชื่อพารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่รับได้ (r) ในหน่วยโวลต์	0 - 6
ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณที่รับได้ (A) ในหน่วยโวลต์	2

4.1.1 การทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง

สำหรับผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง สามารถจำแนกออกตามปัจจัยที่ให้ความสำคัญได้ 2 ลักษณะดังนี้

4.1.1.1 ผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง



รูปที่ 4.1 แสดงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง โดยแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางที่นำมาใช้ในการทดลองจะมีทั้งหมด 4 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ Simplified Model, Walfish Model, Walfish Model (Deep Valley), Lee Model ซึ่งจากกราฟแสดงผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแนวโน้มการเกิดการลดทอนตามระยะทาง (Path Loss) จะเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับที่เพิ่มมากขึ้น โดยอัตราการลดทอนตามระยะทางในแต่ละแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.3

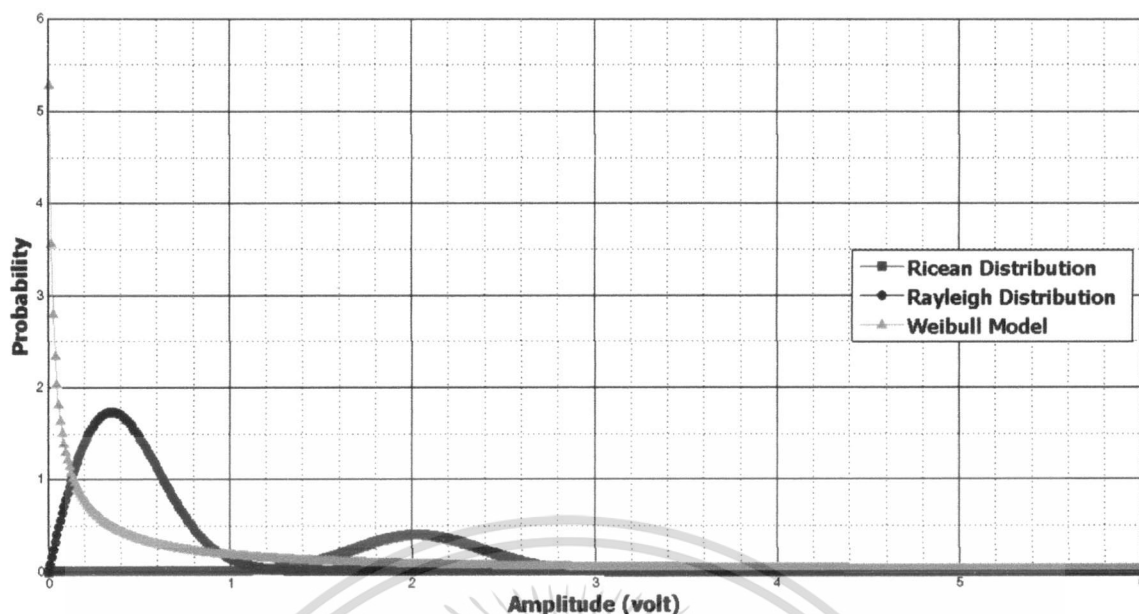
ตารางที่ 4.3 แสดงอัตราการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่งที่ได้จากการทดลองในแต่ละแบบจำลอง

ชื่อแบบจำลอง	อัตราการลดทอนตามระยะทาง (dBm)	
	ต่ำสุด	สูงสุด
Simplified Model	94.03	114
Walfish Model	102.2	122.2
Walfish Model (Deep Valley)	113	139
Lee Model	77.48	97.48

แต่ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3 ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปอัตราการลดทอนตามระยะทางและบอกได้ว่าแบบจำลองใดมีอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่งมากที่สุดได้ เนื่องจากอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากแต่ละแบบจำลองมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการลดทอนตามระยะทางจึงจำเป็นที่จะต้องนำอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากแต่ละแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงเสียก่อน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.1.1

4.1.1.2 ผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง โดยแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณที่นำมาใช้ในการทดลองจะมีทั้งหมด 3 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ Ricean Distribution, Reyleigh Distribution และ Weibull Model ซึ่งจากกราฟแสดงผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแนวโน้มการเกิดการจางหายของกำลังสัญญาณ (Fading) ในแต่ละแบบจำลองจะมีความแตกต่างกัน และมีโอกาสที่จะได้รับกำลังสัญญาณในปริมาณที่แตกต่างกันอีกด้วย โดยอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณในแต่ละแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.2 แสดงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง
ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่งที่ได้จากการทดลองในแต่ละแบบจำลอง (กำลังสัญญาณที่ออกจากฝั่งส่ง 6 โวลต์)

ชื่อแบบจำลอง	อัตราการจางหายของกำลังสัญญาณ (โอกาสที่จะรับได้)	
	กำลังสัญญาณที่มีโอกาสรับได้ต่ำที่สุด (โวลต์)	กำลังสัญญาณที่มีโอกาสรับได้สูงที่สุด (โวลต์)
Ricean Distribution	6 (<1%)	2.03 (40.20%)
Rayleigh Distribution	6 (<1%)	0.35 (100%)
Weibull Model	6 (1.32%)	0.14 (100%)

แต่ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.4 ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปและบอกได้ว่าแบบจำลองใดมีอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่งมากที่สุดได้ เนื่องจากอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่ได้จากแต่ละแบบจำลองมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการจางหายของกำลังสัญญาณจึงจำเป็นต้องนำอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่ได้จากแต่ละแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่ได้จากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงเสียก่อน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.1.2

4.1.2 การทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

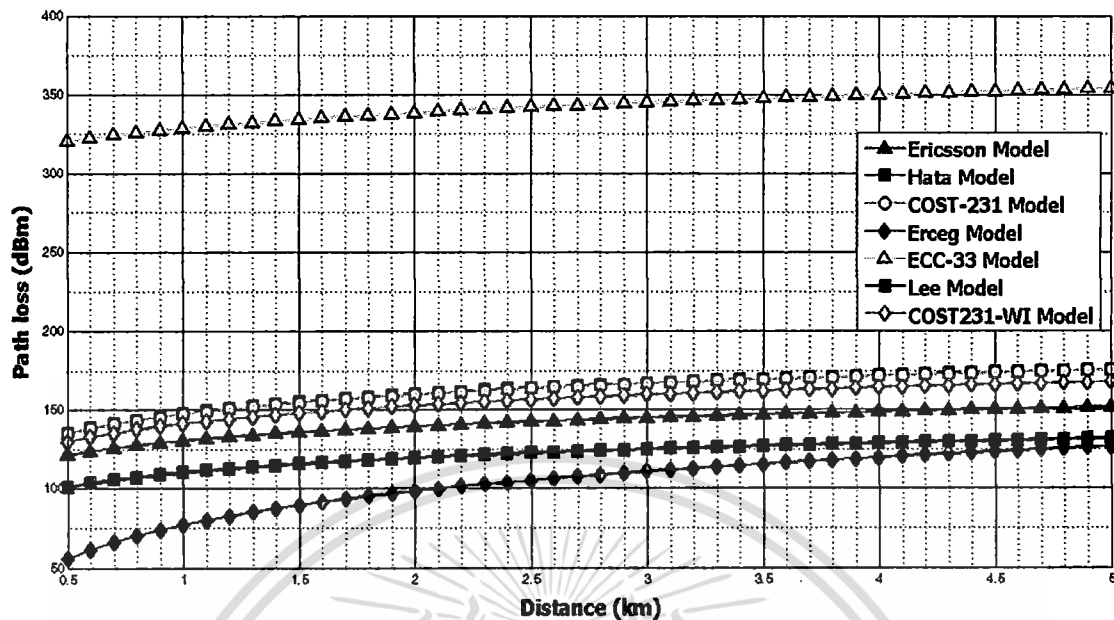
สำหรับผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง สามารถจำแนกออกตาม

ปัจจัยที่สำคัญได้ 2 ลักษณะดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.1 ผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง



รูปที่ 4.3 แสดงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง โดยแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางที่นำมาใช้ในการทดลองจะมีทั้งหมด 7 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ Ericsson Model, Hata Model, COST-231 Model, Erceg Model, ECC-33 Model, Lee Model, COST231-WI Model ซึ่งจากกราฟแสดงผลการทดลองจะเห็นว่าแนวโน้มการเกิดการลดทอนตามระยะทาง (Path Loss) จะเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับที่เพิ่มมากขึ้น โดยอัตราการลดทอนตามระยะทางในแต่ละแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.5

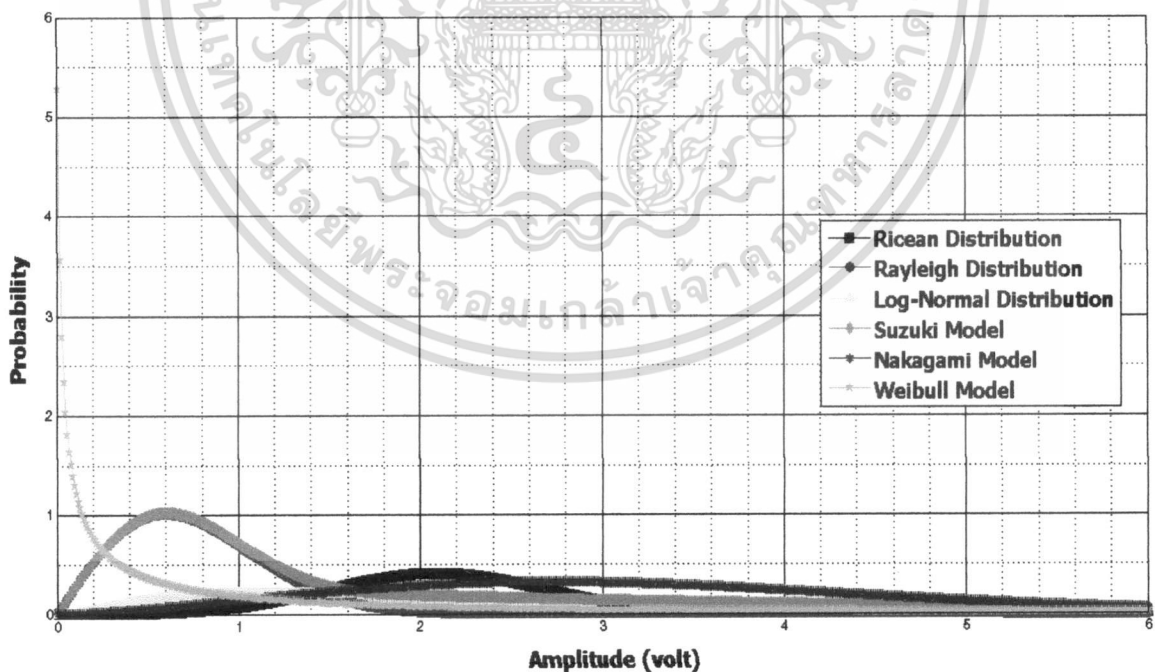
ตารางที่ 4.5 แสดงอัตราการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองที่ได้จากการทดลองในแต่ละแบบจำลอง

ชื่อแบบจำลอง	อัตราการลดทอนตามระยะทาง (dBm)	
	ต่ำสุด	สูงสุด
Ericsson Model	121.2	151.5
Hata Model	135.4	175.7
COST-231 Model	135.3	175.6
Erceg Model	55.73	126.6
ECC-33 Model	320.5	354
Lee Model	101.2	131.7
COST231-WI Model	129.9	167.9

แต่ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5 ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปอัตราการลดทอนตามระยะทางและบอกได้ว่าแบบจำลองใดมีอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองมากที่สุดได้ เนื่องจากอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากแต่ละแบบจำลองมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการลดทอนตามระยะทางจึงจำเป็นที่จะต้องนำอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากแต่ละแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงเสียก่อน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.2.1

4.1.2.2 ผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง โดยแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณที่นำมาใช้ในการทดลองจะมีทั้งหมด 6 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ Ricean Distribution, Rayleigh Distribution, Log-Normal Fading Model, Suzuki Model, Nakagami Model และ Weibull Model ซึ่งจากกราฟแสดงผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแนวโน้มการเกิดการจางหายของกำลังสัญญาณ (Fading) ในแต่ละแบบจำลองจะมีความแตกต่างกัน และมีโอกาสที่จะได้รับกำลังสัญญาณในปริมาณที่แตกต่างกันอีกด้วย โดยอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณในแต่ละแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.4 แสดงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองที่ได้จากการทดลองในแต่ละแบบจำลอง (กำลังสัญญาณที่ออกจากฝั่งส่ง 6 โวลต์)

ชื่อแบบจำลอง	อัตราการจางหายของกำลังสัญญาณ (โอกาสที่จะรับได้)	
	กำลังสัญญาณที่มีโอกาสรับได้ต่ำที่สุด (โวลต์)	กำลังสัญญาณที่มีโอกาสรับได้สูงที่สุด (โวลต์)
Ricean Distribution	6 (<1%)	2.085 (40.78%)
Rayleigh Distribution	6 (<1%)	0.6 (100%)
Log-Normal Fading Model	0.01 (<1%)	1.155 (21.9%)
Suzuki Model	6 (5.292%)	0.61 (100%)
Nakagami Model	0.01 (<1%)	2.69 (32.21%)
Weibull Model	6 (1.32%)	0.14 (100%)

แต่ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.6 ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปและบอกได้ว่าแบบจำลองใดมีอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองมากที่สุดได้ เนื่องจากอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่ได้จากแต่ละแบบจำลองมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการจางหายของกำลังสัญญาณจึงจำเป็นที่จะต้องนำอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่ได้จากแต่ละแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่ได้จากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงเสียก่อน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.2.2

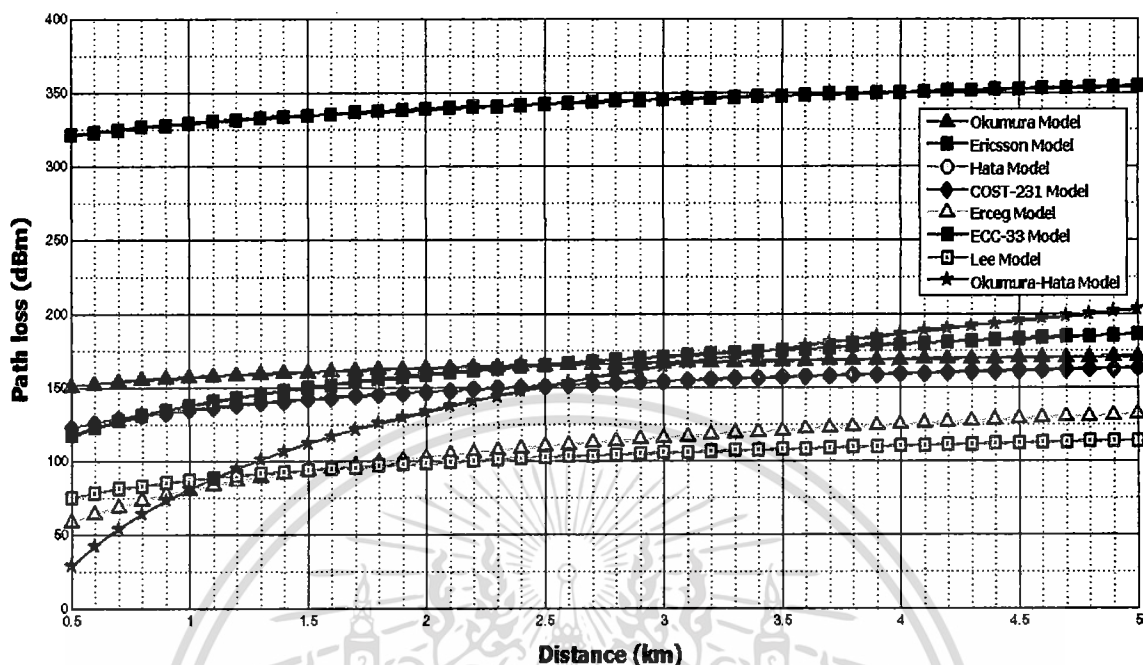
4.1.3 การทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

สำหรับผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง สามารถจำแนกออกตามปัจจัยที่ให้ความสำคัญได้ 2 ลักษณะดังนี้

4.1.3.1 ผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง โดยแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางที่นำมาใช้ในการทดลองจะมีทั้งหมด 8 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ Okumura Model, Ericsson Model, Hata Model, COST-231 Model, Erceg Model, ECC-33 Model, Lee Model, Okumura-Hata Model ซึ่งจากกราฟแสดงผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแนวโน้มการเกิดการลดทอนตามระยะทาง (Path Loss) จะเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่าง

ระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับที่เพิ่มมากขึ้น โดยอัตราการลดทอนตามระยะทางในแต่ละแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.5 แสดงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง

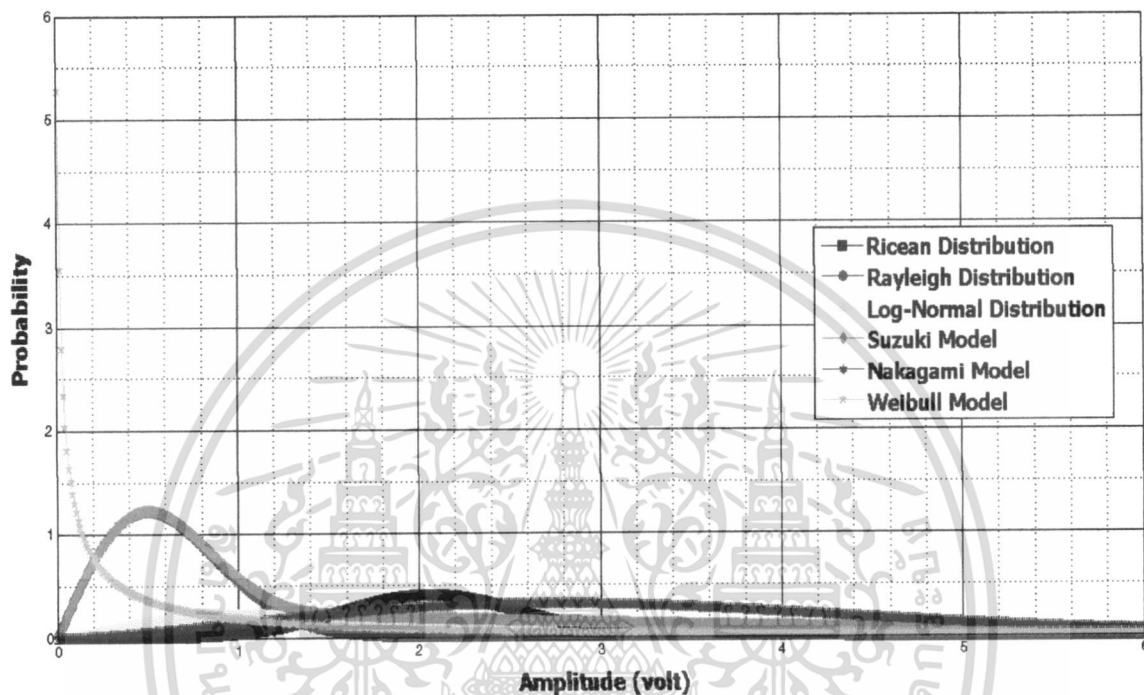
ตารางที่ 4.7 แสดงอัตราการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมืองที่ได้จากการทดลองในแต่ละแบบจำลอง

ชื่อแบบจำลอง	อัตราการลดทอนตามระยะทาง (dBm)	
	ต่ำสุด	สูงสุด
Okumura Model	150.6097	170.6097
Ericsson Model	116.5727	185.5726
Hata Model	122.5181	162.8398
COST-231 Model	122.4309	162.7527
Erceg Model	57.8640	131.7390
ECC-33 Model	320.4682	353.9959
Lee Model	74.8782	113.2782
Okumura-Hata Model	28.1383	202.5591

แต่ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.7 ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปอัตราการลดทอนตามระยะทางและบอกได้ว่าแบบจำลองใดมีอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมืองมากที่สุดได้ เนื่องจากอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากแต่ละ

แบบจำลองมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการลดทอนตามระยะทางจึงจำเป็นที่จะต้องนำอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากแต่ละแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงเสียก่อน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.3.1

4.1.3.2 ผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ



รูปที่ 4.6 แสดงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง

จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง โดยแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณที่นำมาใช้ในการทดลองจะมีทั้งหมด 6 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ Ricean Distribution, Rayleigh Distribution, Log-Normal Fading Model, Suzuki Model, Nakagami Model และ Weibull Model ซึ่งจากกราฟแสดงผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแนวโน้มการเกิดการจางหายของกำลังสัญญาณ (Fading) ในแต่ละแบบจำลองจะมีความแตกต่างกัน และมีโอกาสที่จะได้รับกำลังสัญญาณในปริมาณที่แตกต่างกันอีกด้วย โดยอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณในแต่ละแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.8

แต่ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.8 ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปและบอกได้ว่าแบบจำลองใดมีอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมืองมากที่สุดได้ เนื่องจากอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่ได้จากแต่ละแบบจำลองมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการจางหายของกำลังสัญญาณจึงจำเป็นที่จะต้องนำอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่ได้จากแต่ละแบบจำลองไปเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบกับอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่ได้จากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริง
 เสียก่อน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.3.2

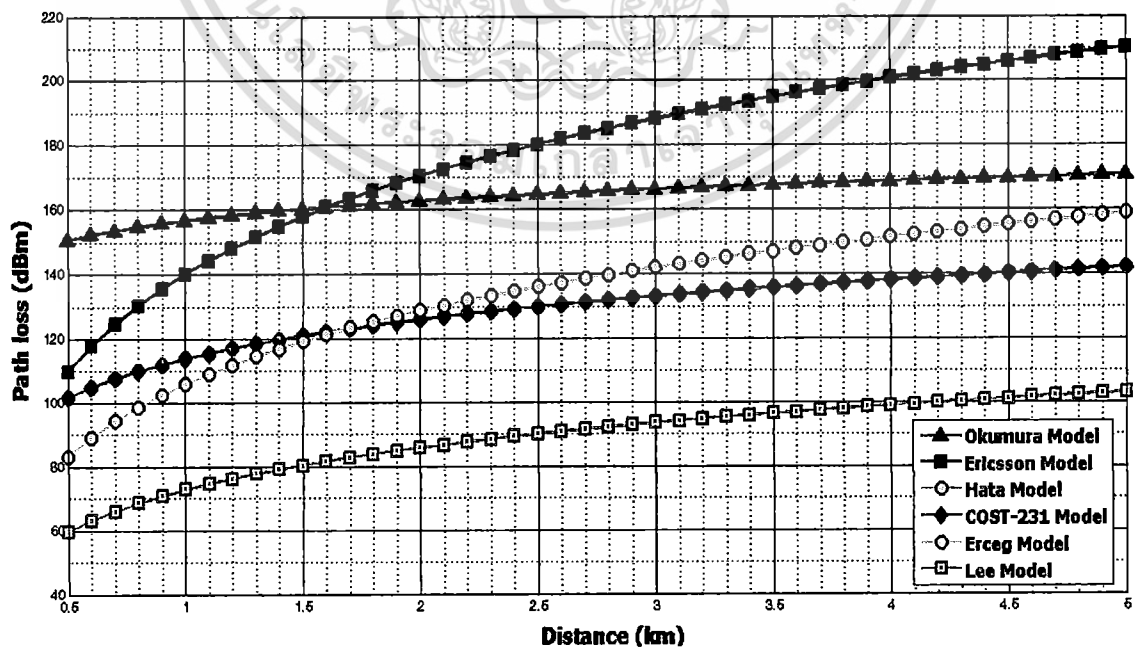
ตารางที่ 4.8 แสดงอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณ ในสภาวะแวดล้อมแบบชนเมืองที่ได้จาก
 การทดลองในแต่ละแบบจำลอง (กำลังสัญญาณที่ออกจากฝั่งส่ง 6 โวลต์)

ชื่อแบบจำลอง	อัตราการจางหายของกำลังสัญญาณ (โอกาสที่จะรับได้)	
	กำลังสัญญาณที่มีโอกาส รับได้ต่ำที่สุด (โวลต์)	กำลังสัญญาณที่มีโอกาส รับได้สูงที่สุด (โวลต์)
Ricean Distribution	6 (<1%)	2.055 (40.51%)
Rayleigh Distribution	6 (<1%)	0.5 (100%)
Log-Normal Fading Model	0.01 (<1%)	1.15 (21.9%)
Suzuki Model	6 (5.292%)	0.5 (100%)
Nakagami Model	0.01 (<1%)	2.69 (32.21%)
Weibull Model	6 (1.32%)	0.14 (100%)

4.1.4 การทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท

สำหรับผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท สามารถจำแนกออกตาม
 ปัจจัยที่ให้ความสำคัญได้ 2 ลักษณะดังนี้

4.1.4.1 ผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง



รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมแบบชนบท โดยแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางที่นำมาใช้ในการทดลองจะมีทั้งหมด 6 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ Okumura Model, Ericsson Model, Hata Model, COST-231 Model, Erceg Model, Lee Model ซึ่งจากกราฟแสดงผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแนวโน้มการเกิดการลดทอนตามระยะทาง (Path Loss) จะเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับที่เพิ่มมากขึ้น โดยอัตราการลดทอนตามระยะทางในแต่ละแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงอัตราการลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมแบบชนบทได้จากการทดลองในแต่ละแบบจำลอง

ชื่อแบบจำลอง	อัตราการลดทอนตามระยะทาง (dBm)	
	ต่ำสุด	สูงสุด
Okumura Model	150.6097	170.6097
Ericsson Model	109.7891	210.4590
Hata Model	101.7553	142.0770
COST-231 Model	101.6681	141.9899
Erceg Model	83.1135	158.8635
Lee Model	59.6030	103.1030

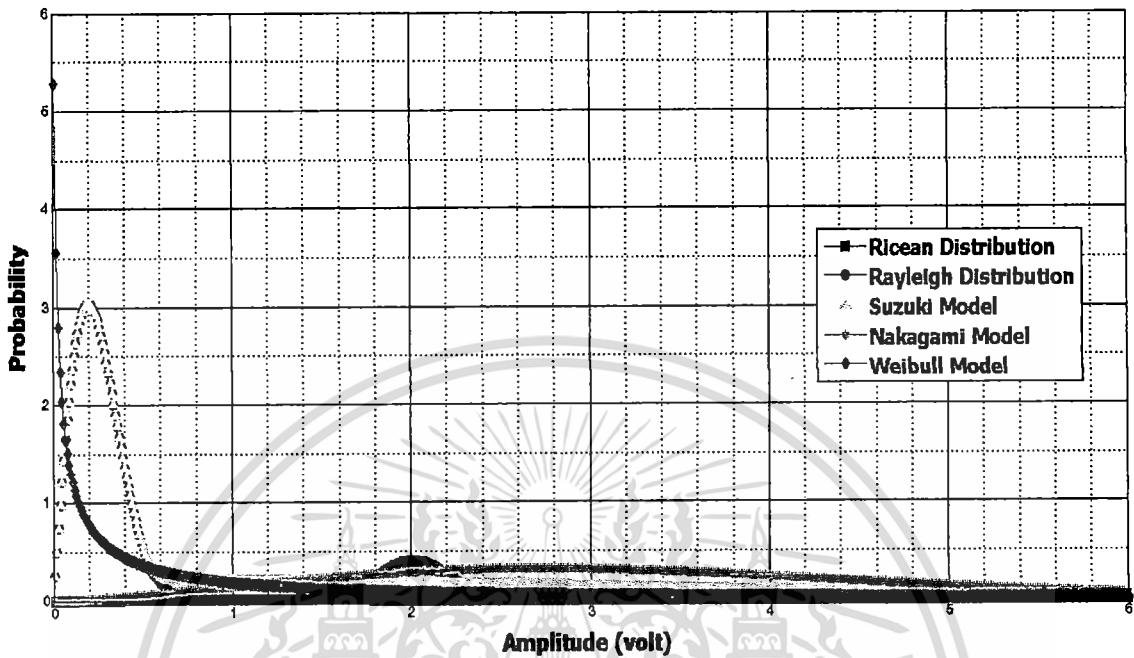
แต่ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.9 ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปอัตราการลดทอนตามระยะทางและบอกได้ว่าแบบจำลองใดมีอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมแบบชนบทมากที่สุดได้ เนื่องจากอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากแต่ละแบบจำลองมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการลดทอนตามระยะทางจึงจำเป็นต้องนำอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากแต่ละแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากการทดลองในสถานะแวดล้อมจริงเสียก่อน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.4.1

4.1.4.2 ผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมแบบชนบท โดยแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณที่นำมาใช้ในการทดลองจะมีทั้งหมด 5 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ Ricean Distribution, Reyleigh Distribution, Suzuki Model, Nakagami Model และ Weibull Model ซึ่งจากกราฟแสดงผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแนวโน้มการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการจางหายของกำลังสัญญาณ (Fading) ในแต่ละแบบจำลองจะมีความแตกต่างกัน และมีโอกาสที่จะได้รับกำลังสัญญาณในปริมาณที่ต่างกันอย่างอื่นด้วย โดยอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณในแต่ละแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ ในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท

ตารางที่ 4.10 แสดงอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชนบทที่ได้จากการทดลองในแต่ละแบบจำลอง (กำลังสัญญาณที่ออกจากฝั่งส่ง 6 โวลต์)

ชื่อแบบจำลอง	อัตราการจางหายของกำลังสัญญาณ (โอกาสที่จะรับได้)	
	กำลังสัญญาณที่มีโอกาสรับได้ต่ำที่สุด (โวลต์)	กำลังสัญญาณที่มีโอกาสรับได้สูงที่สุด (โวลต์)
Ricean Distribution	6 (<1%)	2.01 (39.99%)
Rayleigh Distribution	6 (<1%)	0.2 (100%)
Suzuki Model	6 (5.292%)	0.2 (100%)
Nakagami Model	0.01 (<1%)	2.69 (32.21%)
Weibull Model	6 (1.32%)	0.14 (100%)

แต่ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.10 ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปและบอกได้ว่าแบบจำลองใดมีอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชนบทมากที่สุดได้ เนื่องจากอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่ได้จากแต่ละแบบจำลองมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการจางหายของกำลังสัญญาณ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงจำเป็นที่จะต้องนำอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่ได้จากแต่ละแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่ได้จากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงเสียก่อน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.4.2

4.2 การทดลองในสภาวะแวดล้อมจริง

การทดลองในสภาวะแวดล้อมจริง เพื่อตรวจวัดอัตราการลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์ประกอบการทดลองดังนี้

- HP8560A Spectrum Analyzer



รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะของอุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณ HP8560A

HP8560A ถือเป็นอุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณวิทยุที่มีขนาดเล็กและสามารถพกพาไปใช้งานนอกสถานที่ได้ มีประสิทธิภาพสูงและถูกออกแบบให้รองรับการทำงานในย่านความถี่ตั้งแต่ 50 Hz ถึง 2.9 GHz ซึ่งทำให้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์การแพร่กระจายสัญญาณด้วยเทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) ในย่าน 2.4 GHz ได้ นอกจากนี้ยังได้มีการปรับปรุงแพคเกจการทำงานที่อยู่บนตัวอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น โดยได้ทำการเพิ่มเติมฟังก์ชันการทำงานที่ใช้เป็นประจำและเมนูลัดต่างๆ เพื่อให้มีความยืดหยุ่นและสะดวกต่อการใช้งานอีกด้วย อีกทั้งภายในอุปกรณ์รุ่นนี้ยังได้มีการเพิ่มเติมฟังก์ชันที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ความถี่ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการทดลองการลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณ เนื่องจากจะช่วยทำให้ผลการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นวิทยุที่ได้มีความถูกต้องและใกล้เคียงกับความเป็นจริงเพิ่มมากขึ้น และยังสามารถเพิ่มอุปกรณ์ดีมอดูเลเตอร์ (Demodulator) ที่สามารถรองรับการมอดูเลชัน (Modulation) ทั้งแบบ FM (Frequency Modulation) และ AM (Amplitude Modulation) ภายในอุปกรณ์ด้วย ซึ่งจะช่วยให้สามารถรองรับการนำไปใช้งานได้หลากหลายรูปแบบเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังได้มีการติดตั้งลำโพงภายในอุปกรณ์ เพื่อนำไปใช้แสดงสถานะการทำงานของอุปกรณ์ให้กับผู้ใช้งานได้ทราบด้วย แต่เนื่องจากอุปกรณ์ HP8560A จำเป็นที่จะต้องอาศัยพลังงานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าในปริมาณ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ สำหรับการทำงาน จึงส่งผลทำให้การนำไปใช้งานนอกสถานที่อาจไม่สะดวกมากเท่าที่ควร เนื่องจากจะต้องคอยค้นหาจุดเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้าหรือจำเป็นที่จะต้องพกพาเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าไปใช้งานร่วมด้วย

- IFR2025 Signal Generator



รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะของอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณ IFR2025

IFR2025 ถือเป็นอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณขนาดเล็กที่ถูกพัฒนาต่อยอดมาจาก IFR2023B โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้สามารถนำไปใช้จำลองการแพร่กระจายสัญญาณสำหรับโทรศัพท์บ้านไร้สาย (Cordless telephones), เพจเจอร์ (Pagers) และการติดต่อสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุทั่วไปในย่านความถี่ตั้งแต่ 9 kHz ถึง 2510 MHz ได้ ซึ่งส่งผลทำให้สามารถนำไปใช้จำลองการแพร่กระจายสัญญาณไวแมกซ์ (WiMAX) ในย่าน 2.4 GHz ได้อีกด้วย นอกจากนี้ HP8648B ยังสามารถรองรับการมอดูเลชัน (Modulation) ในรูปแบบดั้งเดิมทั้ง 3 รูปแบบ คือ การมอดูเลชันด้วยความถี่ (Frequency Modulation: FM) การมอดูเลชันด้วยแอมพลิจูด (Amplitude Modulation: AM) และการมอดูเลชันด้วยเฟส (Phase Modulation: PM) รวมทั้งการมอดูเลชันในรูปแบบใหม่ที่เรียกว่า Pulse modulation ได้อีกด้วย ซึ่งส่งผลทำให้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายรูปแบบเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งภายในอุปกรณ์รุ่นนี้ยังได้มีการปรับปรุงฟังก์ชันการปรับกำลังและกำหนดทิศทางในการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ รวมทั้งได้มีการเพิ่มเติมฟังก์ชันการเพิ่ม-ลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นบนภาคส่งอีกด้วย ซึ่งจะช่วยให้สามารถกำหนดปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การแพร่กระจายสัญญาณวิทยุและจำลองสภาวะแวดล้อมในการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุได้ใกล้เคียงกับสภาวะแวดล้อมจริงเพิ่มมากขึ้น แต่เนื่องจากอุปกรณ์ IFR2025 จำเป็นที่จะต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าในปริมาณ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ สำหรับการทำงาน จึงส่งผลทำให้การนำไปใช้งานนอกสถานที่อาจไม่สะดวกมากเท่าที่ควร เนื่องจากจะต้องคอยค้นหาจุดเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้าหรือจำเป็นที่จะต้องพกพาเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าไปใช้งานร่วมด้วย

4.2.1 การทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิดโล่ง

สำหรับการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิดโล่งในขั้นตอนแรกจำเป็นต้องบรรยายถึงสถานที่ที่ใช้ในการทดลองและดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตามจุดทดลองต่างๆ ให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียบร้อยเสียก่อน เพื่อให้ผลการทดลองที่ได้มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ซึ่งแสดงคั่งรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 แสดงสภาพแวดล้อมจริงที่ใช้สำหรับการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง

จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นถึงสภาพแวดล้อมจริงที่ใช้สำหรับการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง ซึ่งใช้พื้นที่บริเวณถนนเลียบสนามบิณสูวรรณภูมิ เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร เป็นระยะทาง 5 กิโลเมตร โดยเหตุผลที่เลือกใช้พื้นที่ดังกล่าวสำหรับการทดลอง เนื่องจากเป็นพื้นที่เปิดโล่ง ไม่มีความพลุกพล่าน และมีความหนาแน่นของสิ่งกีดขวางน้อย แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ดังกล่าวยังคงมีข้อจำกัดบางประการ เช่น พบสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุของหอบังคับการบิน พบสัญญาณรบกวนจากการแพร่กระจายสัญญาณไวไฟ (Wi-Fi) ภายในบริเวณสนามบิณสูวรรณภูมิ และพบการดูดกลืนพลังงาน (Absorption loss) ที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าและเครื่องจักรทั้งภายในสนามบิณสูวรรณภูมิและบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง

จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นถึงการติดตั้งอุปกรณ์ตามจุดทดลองต่างๆ ในสภาวะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิดโล่ง โดยการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงนั้นถือได้ว่าเป็นการทดสอบประสิทธิภาพในการติดต่อสื่อสารระหว่างฝั่งส่งและฝั่งรับในสภาวะแวดล้อมหนึ่งๆ ดังนั้นการทดลองนี้จึงได้ทำการจำลองกระบวนการและจำแนกหน้าที่ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ฝั่งส่งและฝั่งรับ โดยอุปกรณ์ภายในฝั่งส่งนั้นจะประกอบไปด้วย อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณรุ่น IFR2025 เครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้า Tiger รุ่น TG950MD และ สายอากาศ Wilson รุ่น 304411 ส่วนอุปกรณ์ภายในฝั่งรับจะประกอบไปด้วย อุปกรณ์วิเคราะห์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณรุ่น HP8560A เครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้า Tiger รุ่น TG950MD และสายอากาศ Wilson รุ่น 304411 โดยการทดลองจะทำการเคลื่อนอุปกรณ์ในฝั่งรับให้ห่างออกจากฝั่งส่งครั้งละ 100 เมตร จากนั้นทำการตรวจสอบระดับสัญญาณที่ปรากฏบนฝั่งรับและบันทึกผลการทดลอง ซึ่งจะทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนครบเป็นระยะทาง 5 กิโลเมตร



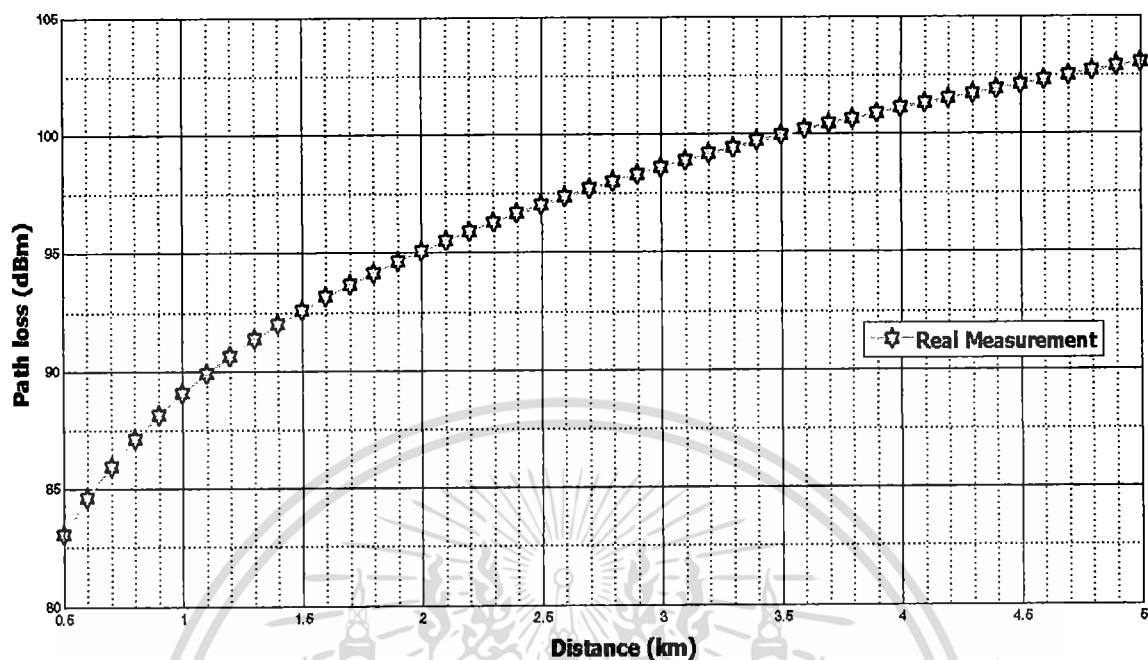
รูปที่ 4.12 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตามจุดทดลองต่างๆ ในสถานะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิดโล่ง โดยผลการทดลองในสถานะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิดโล่ง สามารถจำแนกออกตามปัจจัยที่ให้ความสำคัญได้ 2 ลักษณะดังนี้

4.2.1.1 ผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง

จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิดโล่ง ซึ่งจากกราฟแสดงผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแนวโน้มการเกิดการลดทอนตามระยะทาง (Path Loss) จะเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับที่เพิ่มมากขึ้น โดยผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิดโล่งที่ตรวจวัดได้นั้นจะมีค่าอยู่ระหว่าง 83 dBm - 103 dBm แต่ผลการทดลองที่ได้ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปและบอกได้ว่าผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองใดมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่งมากที่สุดได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการลดทอนตามระยะทางจึงจำเป็นต้องนำอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากการทดลองในสถานะแวดล้อมจริงไปเปรียบเทียบกับเพื่อหาค่าความ

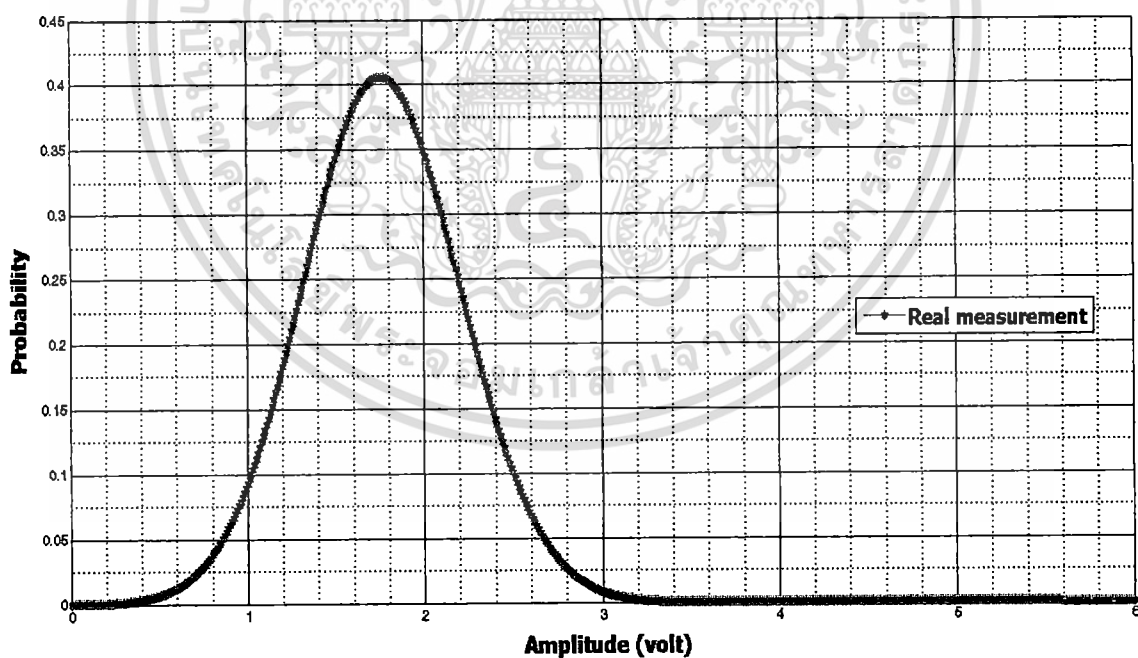
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปรปรวนกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง เสียก่อน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.1.1



รูปที่ 4.13 แสดงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิดโล่ง

4.2.1.2 ผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ



รูปที่ 4.14 แสดงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมจริงแบบเปิดโล่ง

จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง ซึ่งจากกราฟแสดงผลการทดลองจะเห็นว่าแนวโน้มของระดับกำลังสัญญาณที่ฝั่งรับนั้นมีโอกาสที่จะรับได้จะเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ระดับกำลังสัญญาณที่ 0.06 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลต์ จนถึงระดับกำลังสูงสุดที่รับได้ คือ 1.76 โวลต์ และหลังจากนั้นระดับกำลังสัญญาจะมีการลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าเข้าใกล้ 0 โวลต์ ในที่สุด อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปและบอกได้ว่าผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองใดมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การจางหายของกำลังสัญญาในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่งมากที่สุดได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการจางหายของกำลังสัญญาจึงจำเป็นที่จะต้องนำอัตราการจางหายของกำลังสัญญาที่ได้จากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงไปเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแปรปรวนกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลองเสียก่อน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.1.2

4.2.2 การทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมือง

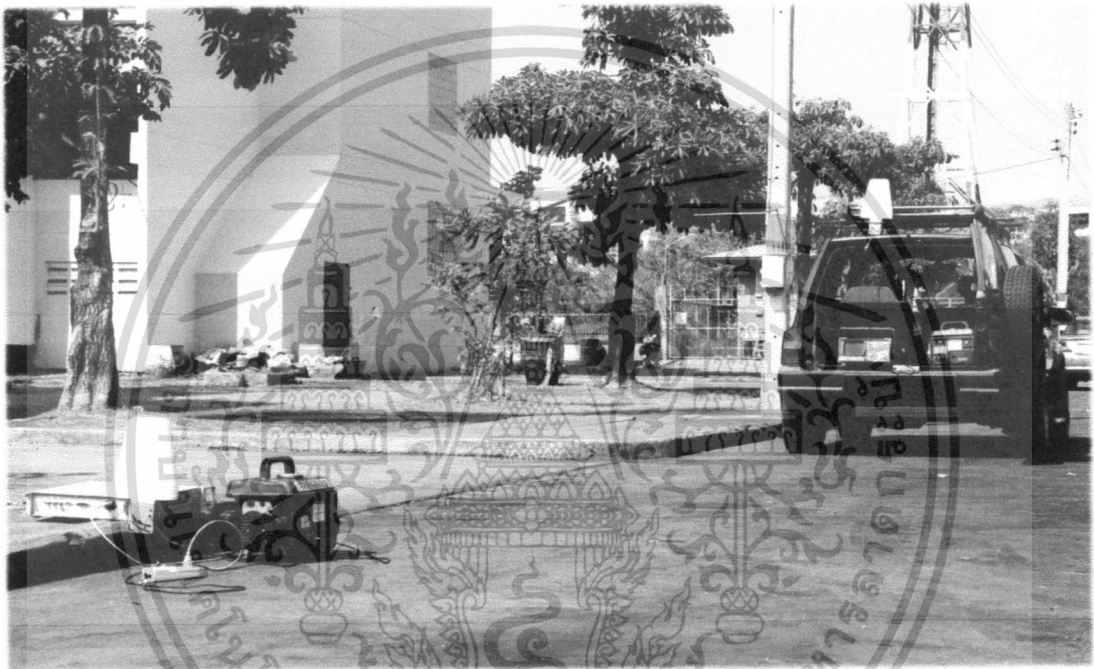
สำหรับการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมืองในขั้นตอนแรกจำเป็นที่จะต้องบรรยายถึงสถานที่ที่ใช้ในการทดลองและดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตามจุดทดลองต่างๆ ให้เรียบร้อยเสียก่อน เพื่อให้ผลการทดลองที่ได้มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ซึ่งแสดงผังรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 แสดงสภาพแวดล้อมจริงที่ใช้สำหรับการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

จากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นถึงสภาพแวดล้อมจริงที่ใช้สำหรับการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง ซึ่งใช้พื้นที่บริเวณแฟลตการเคหะร่มเกล้า เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร เป็นระยะทาง 5 กิโลเมตร โดยเหตุผลที่เลือกใช้พื้นที่ดังกล่าวสำหรับการทดลองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเป็นพื้นที่ในย่านชุมชนขนาดใหญ่ที่มีความพลุกพล่านของทั้งประชากรและยานพาหนะสูง รวมทั้งมีความหนาแน่นของสิ่งกีดขวางสูงอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ดังกล่าวยังคงมีข้อจำกัดบางประการ เช่น พบสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุของเสาโทรคมนาคมที่ใช้สำหรับการให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ของผู้ให้บริการแต่ละราย พบสัญญาณรบกวนจากการแพร่กระจายสัญญาณไวไฟ (Wi-Fi) เพื่อให้บริการอินเทอร์เน็ตภายในบริเวณแพลตฟอร์มเคหะร่มเกล้า และพบการดูดกลืนพลังงาน (Absorption loss) ที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเครื่องปั่นไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าที่ถูกติดตั้งภายในแต่ละอาคารของแพลตฟอร์มเคหะร่มเกล้าและบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง



รูปที่ 4.16 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตามจุดทดลองต่างๆ ในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมือง

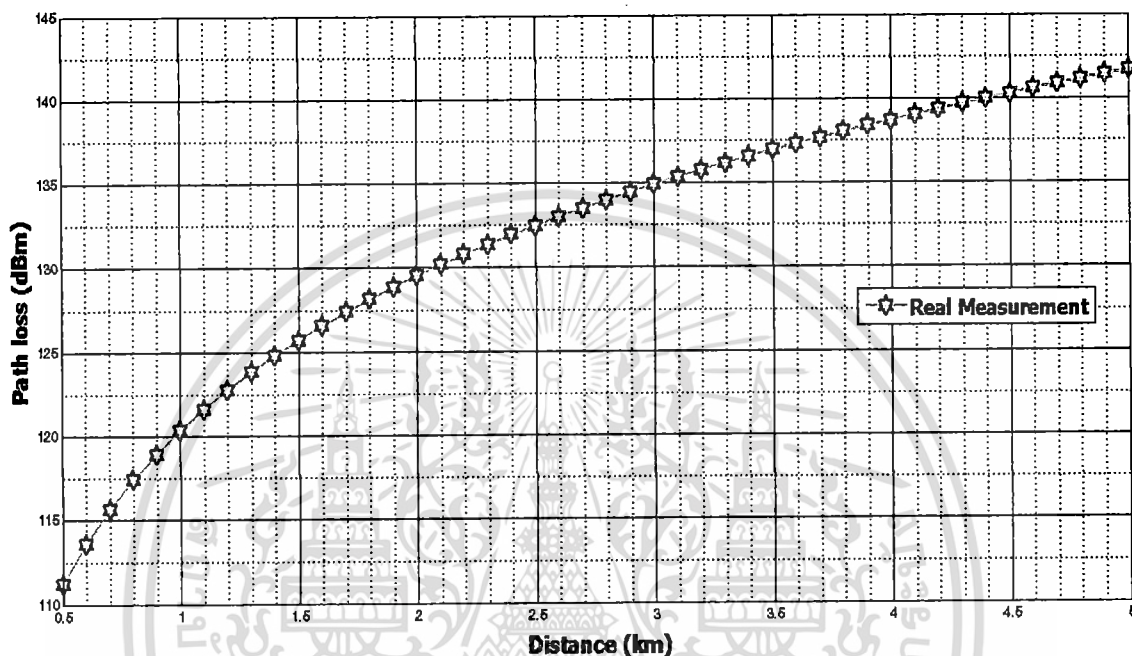
จากรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นถึงการติดตั้งอุปกรณ์ตามจุดทดลองต่างๆ ในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมือง โดยการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงนั้นถือได้ว่าเป็นการทดสอบประสิทธิภาพในการติดต่อสื่อสารระหว่างฝั่งส่งและฝั่งรับในสภาวะแวดล้อมหนึ่งๆ ดังนั้นการทดลองนี้จึงได้ทำการจำลองกระบวนการและจำแนกหน้าที่ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ฝั่งส่งและฝั่งรับ โดยอุปกรณ์ภายในฝั่งส่งนั้นจะประกอบไปด้วย อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณรุ่น IFR2025 เครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้า Tiger รุ่น TG950MD และสายอากาศ Wilson รุ่น 304411 ส่วนอุปกรณ์ภายในฝั่งรับจะประกอบไปด้วย อุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณรุ่น HP8560A เครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้า Tiger รุ่น TG950MD และสายอากาศ Wilson รุ่น 304411 โดยการทดลองจะทำการเคลื่อนอุปกรณ์ในฝั่งรับให้ห่างออกจากฝั่งส่งครั้งละ 100 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการตรวจสอบระดับสัญญาณที่ปรากฏบนฝั่งรับและบันทึกผลการทดลองซึ่งจะทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนครบเป็นระยะทาง 5 กิโลเมตร

โดยผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมือง สามารถจำแนกออกตามปัจจัยที่ให้ความสำคัญได้ 2 ลักษณะดังนี้

4.2.2.1 ผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง

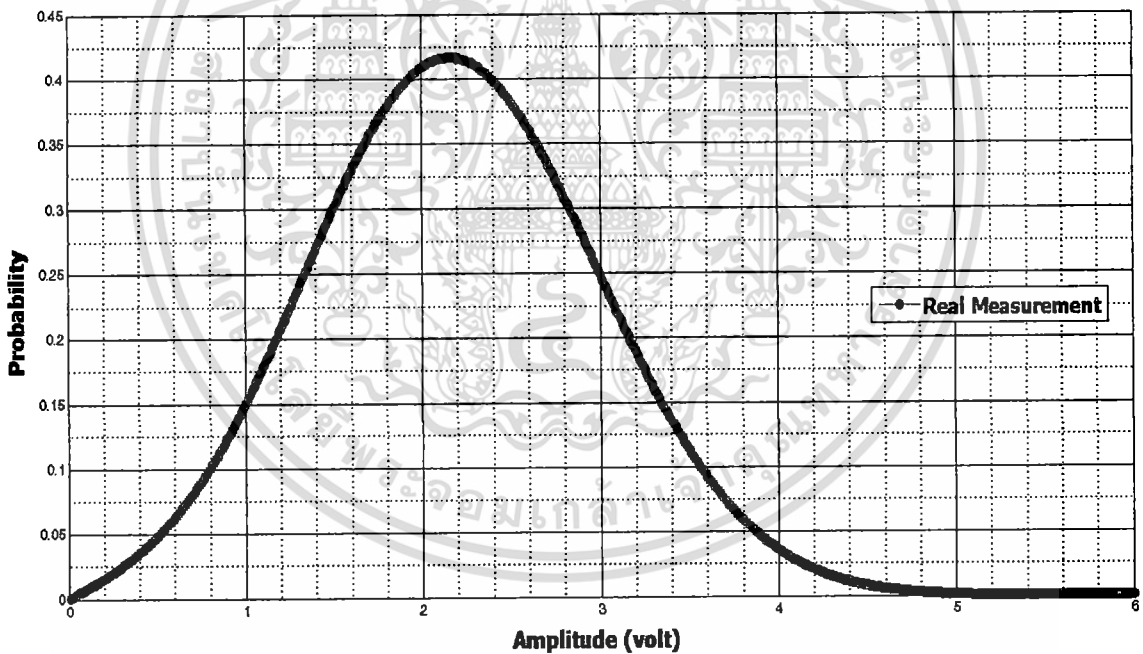


รูปที่ 4.17 แสดงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมือง

จากรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมือง ซึ่งจากกราฟแสดงผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแนวโน้มการเกิดการลดทอนตามระยะทาง (Path Loss) จะเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับที่เพิ่มมากขึ้น โดยผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมืองที่ตรวจวัดได้นั้นจะมีค่าอยู่ระหว่าง 111.2 dBm - 141.7 dBm แต่ผลการทดลองที่ได้ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปและบอกได้ว่าผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองใดมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองมากที่สุดได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการลดทอนตามระยะทางจึงจำเป็นที่จะต้องนำอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงไปเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแปรปรวนกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลองเสียก่อน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.2.1

4.2.2.2 ผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ

จากรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง ซึ่งจากกราฟแสดงผลการทดลองจะเห็นว่าแอมพลิจูดของระดับกำลังสัญญาณที่ส่งรับนั้นมีโอกาสที่จะรับได้จะเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ระดับกำลังสัญญาณที่ 0.02 โวลต์ จนถึงระดับกำลังสูงสุดที่รับได้ คือ 2.16 โวลต์ และหลังจากนั้นระดับกำลังสัญญาณจะมีการลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าเข้าใกล้ 0 โวลต์ ในที่สุด อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปและบอกได้ว่าผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองใดมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองมากที่สุดได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการจางหายของกำลังสัญญาณจึงจำเป็นที่จะต้องนำอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่ได้จากการทดลองในสถานะแวดล้อมจริงไปเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแปรปรวนกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลองเสียก่อน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.2.2



รูปที่ 4.18 แสดงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมจริงชุมชนเมือง

4.2.3 การทดลองในสถานะแวดล้อมจริงแบบชานเมือง

สำหรับการทดลองในสถานะแวดล้อมจริงแบบชานเมือง ในขั้นตอนแรกจำเป็นที่จะต้องบรรยายถึงสถานที่ที่ใช้ในการทดลองและดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตามจุดทดลองต่างๆ ให้เรียบร้อยเสียก่อน เพื่อให้ผลการทดลองที่ได้มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แสดงสภาพแวดล้อมจริงที่ใช้สำหรับการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง

จากรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นถึงสภาพแวดล้อมจริงที่ใช้สำหรับการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง ซึ่งใช้พื้นที่บริเวณถนนอ่อนนุช ตั้งแต่หน้าโชว์รูมโตโยต้า (หัวตะเข้) เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร เป็นระยะทาง 5 กิโลเมตร โดยเหตุผลที่เลือกใช้พื้นที่ดังกล่าวสำหรับการทดลอง เนื่องจากเป็นพื้นที่ในย่านชุมชนขนาดกลาง ที่มีความพลุกพล่านของทั้งประชากรและยานพาหนะไม่มากนัก รวมทั้งมีความหนาแน่นของสิ่งกีดขวาง เช่น อาคารพาณิชย์ อาคารสำนักงาน และบ้านพักอาศัย อยู่ในระดับปานกลาง แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ดังกล่าวยังคงมีข้อจำกัดบางประการ เช่น พบสัญญาณรบกวนจากการแพร่กระจายสัญญาณ Wi-Fi โดยรอบพื้นที่ทดลอง และพบการดูดกลืนพลังงาน (Absorption loss) ที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าและเครื่องจักรทั้งภายในโชว์รูมโตโยต้า อุโมงค์รถยนต์ และบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง

จากรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นถึงการติดตั้งอุปกรณ์ตามจุดทดลองต่างๆ ในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชานเมือง โดยการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงนั้นถือได้ว่าเป็นการทดสอบประสิทธิภาพในการติดต่อสื่อสารระหว่างฝั่งส่งและฝั่งรับในสภาวะแวดล้อมหนึ่งๆ ดังนั้นการทดลองนี้จึงได้ทำการจำลองกระบวนการและจำแนกหน้าที่ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ฝั่งส่งและฝั่งรับ โดยอุปกรณ์ภายในฝั่งส่งนั้นจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณรุ่น IFR2025 เครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้า Tiger รุ่น TG950MD และสายอากาศ Wilson รุ่น 304411 ส่วนอุปกรณ์ภายในฝั่งรับจะประกอบไปด้วย อุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณรุ่น HP8560A เครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้า Tiger รุ่น TG950MD และสายอากาศ Wilson รุ่น 304411 โดยการทดลองจะทำการเคลื่อนอุปกรณ์ในฝั่งรับให้ห่างออกจากฝั่งส่งครั้งละ 100 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาเบ้ขอประโชยณาดานการการค้า

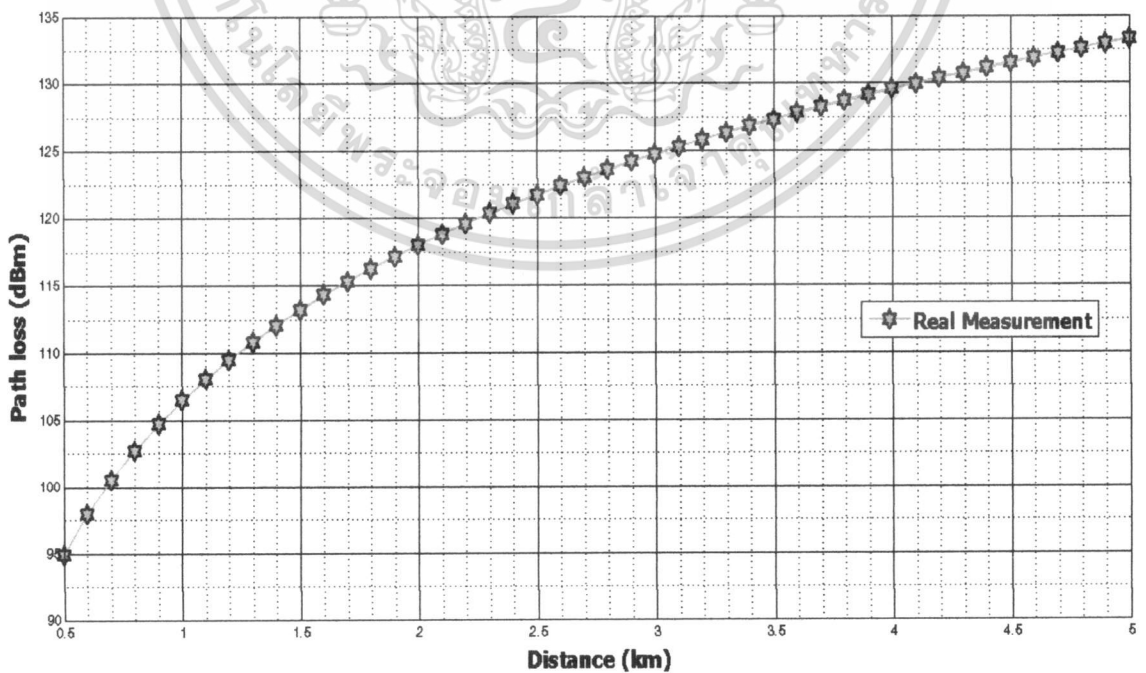
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการตรวจสอบระดับสัญญาณที่ปรากฏบนฝั่งรับและบันทึกผลการทดลอง ซึ่งจะทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนครบเป็นระยะทาง 5 กิโลเมตร



รูปที่ 4.20 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตามจุดทดลองต่างๆ ในสถานะแวดล้อมจริงแบบชานเมือง โดยผลการทดลองในสถานะแวดล้อมจริงแบบชานเมือง สามารถจำแนกออกตามปัจจัยที่ให้ความสำคัญได้ 2 ลักษณะดังนี้

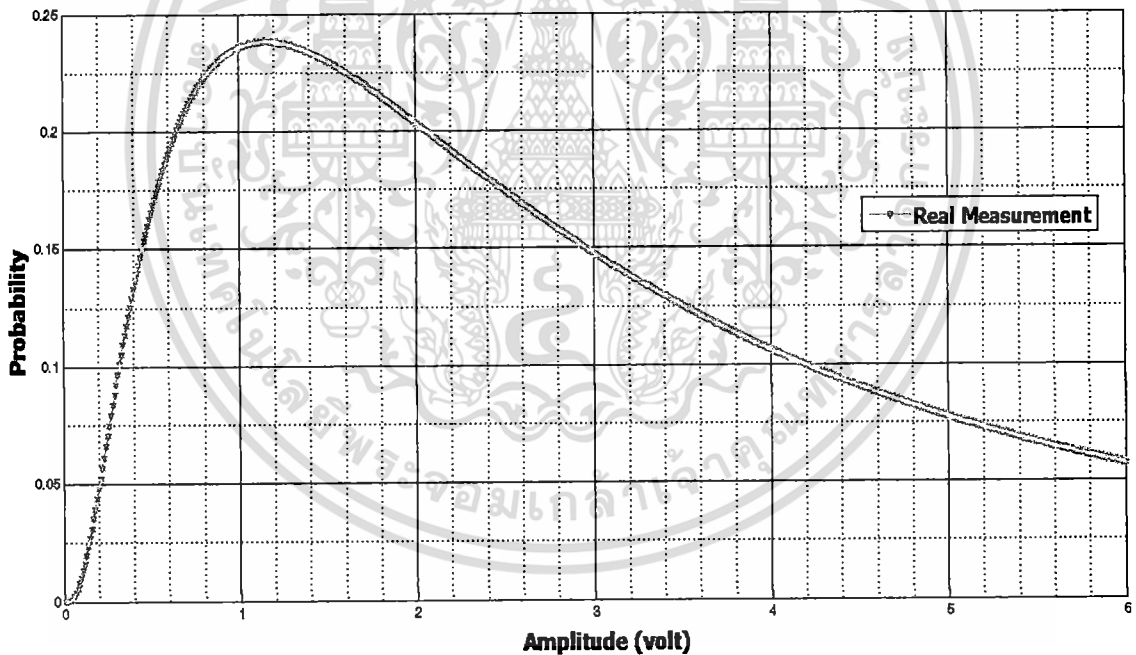
4.2.3.1 ผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง



รูปที่ 4.21 แสดงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมจริงแบบชานเมือง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมจริงแบบชานเมือง ซึ่งจากกราฟแสดงผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแนวโน้มการเกิดการลดทอนตามระยะทาง (Path Loss) จะเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับที่เพิ่มมากขึ้น โดยผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมจริงแบบชานเมืองที่ตรวจวัดได้นั้นจะมีค่าอยู่ระหว่าง 94.88 dBm - 133.3 dBm แต่ผลการทดลองที่ได้ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปและบอกได้ว่าผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองใดมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมแบบชานเมืองมากที่สุดได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการลดทอนตามระยะทางจึงจำเป็นที่จะต้องนำอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากการทดลองในสถานะแวดล้อมจริงไปเปรียบเทียบกับค่าความแปรปรวนกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลองเสียก่อน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.3.1

4.2.3.2 ผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ



รูปที่ 4.22 แสดงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมจริงแบบชานเมือง

จากรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมแบบชานเมือง ซึ่งจากกราฟแสดงผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแนวโน้มของระดับกำลังสัญญาณที่ฝั่งรับนั้นมีโอกาสที่จะรับได้จะเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ระดับกำลังสัญญาณที่ 0.03 โวลต์ จนถึงระดับกำลังสูงสุดที่รับได้ คือ 1.155 โวลต์ และหลังจากนั้นระดับกำลังสัญญาณจะมีการลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าเข้าใกล้ 0 โวลต์ ในที่สุด อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้ยังไม่สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปใช้สรุปและบอกได้ว่าผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองใดมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชนเมืองมากที่สุดได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการจางหายของกำลังสัญญาณจึงจำเป็นที่จะต้องนำอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่ได้จากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลองเสียก่อน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.3.2

4.2.4 การทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชนบท

สำหรับการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชนบท ในขั้นตอนแรกจำเป็นที่จะต้องบรรยายถึงสถานที่ที่ใช้ในการทดลองและดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตามจุดทดลองต่างๆ ให้เรียบร้อยเสียก่อน เพื่อให้ผลการทดลองที่ได้มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 แสดงสภาพแวดล้อมจริงที่ใช้สำหรับการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท

จากรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นถึงสภาพแวดล้อมจริงที่ใช้สำหรับการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท ซึ่งใช้พื้นที่บริเวณซอยพัฒนาชนบท 3 เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร เป็นระยะทาง 5 กิโลเมตร โดยเหตุผลที่เลือกใช้พื้นที่ดังกล่าวสำหรับการทดลองเนื่องจากเป็นพื้นที่ในย่านชุมชนที่มีขนาดเล็ก และส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ในการทำเกษตรกรรมที่ปราศจากความพลุกพล่านจากทั้งประชากรและยานพาหนะต่างๆ รวมทั้งมีความหนาแน่นของสิ่งกีดขวางต่ำอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ดังกล่าวยังคงมีข้อจำกัดบางประการ เช่น พบสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รบกวนจากการแพร่กระจายสัญญาณไวไฟ (Wi-Fi) จากบ้านพักอาศัยที่อยู่ใกล้เคียงพื้นที่ทดลอง และพบการดูดกลืนพลังงาน (Absorption loss) ที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเครื่องปั่นกระแสไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า และเครื่องจักรทางการเกษตร เช่น รถเกี่ยวข้าว รถไถนา และเครื่องสีข้าว ทั้งภายในพื้นที่ทดลองและบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง



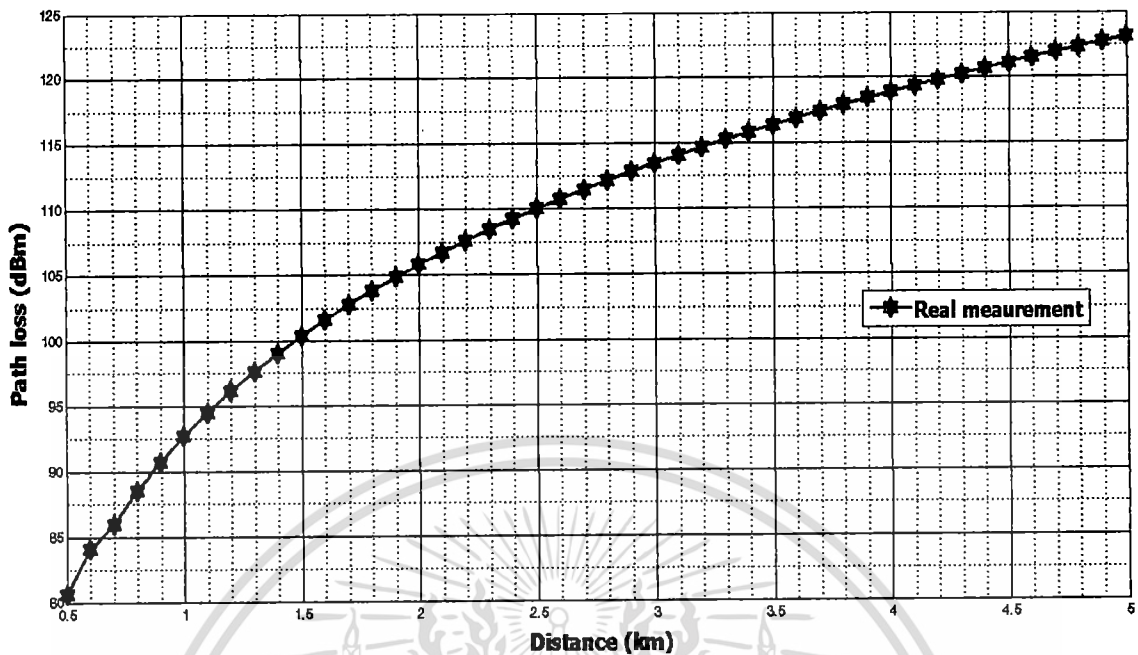
รูปที่ 4.24 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตามจุดทดลองต่างๆ ในสถานะแวดล้อมจริงแบบชนบท

จากรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นถึงการติดตั้งอุปกรณ์ตามจุดทดลองต่างๆ ในสถานะแวดล้อมจริงแบบชนบท โดยการทดลองในสถานะแวดล้อมจริงนั้นถือได้ว่าเป็นการทดสอบประสิทธิภาพในการติดต่อสื่อสารระหว่างฝั่งส่งและฝั่งรับในสถานะแวดล้อมหนึ่งๆ ดังนั้นการทดลองนี้จึงได้ทำการจำลองกระบวนการและจำแนกหน้าที่ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ฝั่งส่งและฝั่งรับ โดยอุปกรณ์ภายในฝั่งส่งนั้นจะประกอบไปด้วย อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณรุ่น IFR2025 เครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้า Tiger รุ่น TG950MD และสายอากาศ Wilson รุ่น 304411 ส่วนอุปกรณ์ภายในฝั่งรับจะประกอบไปด้วย อุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณรุ่น HP8560A เครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้า Tiger รุ่น TG950MD และสายอากาศ Wilson รุ่น 304411 โดยการทดลองจะทำการเคลื่อนอุปกรณ์ในฝั่งรับให้ห่างออกจากฝั่งส่งครั้งละ 100 เมตร จากนั้นทำการตรวจสอบระดับสัญญาณที่ปรากฏบนฝั่งรับและบันทึกผลการทดลอง ซึ่งจะทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนครบเป็นระยะทาง 5 กิโลเมตร

โดยผลการทดลองในสถานะแวดล้อมจริงแบบชนบท สามารถจำแนกออกตามปัจจัยที่ทำให้ความสำคัญได้ 2 ลักษณะดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4.1 ผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง



รูปที่ 4.25 แสดงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมจริงแบบชนบท

จากรูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมจริงแบบชนบท ซึ่งจากกราฟแสดงผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแนวโน้มการเกิดการลดทอนตามระยะทาง (Path Loss) จะเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับที่เพิ่มมากขึ้น โดยผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมจริงแบบชนบทที่ตรวจวัดได้นั้นจะมีค่าอยู่ระหว่าง 80.6 dBm - 123.1 dBm แต่ผลการทดลองที่ได้ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปและบอกได้ว่าผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองใดมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมแบบชนบทมากที่สุดได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการลดทอนตามระยะทางจึงจำเป็นที่จะต้องนำอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากการทดลองในสถานะแวดล้อมจริง ไปเปรียบเทียบกับหาค่าความแปรปรวนกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลองเสียก่อน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.4.1

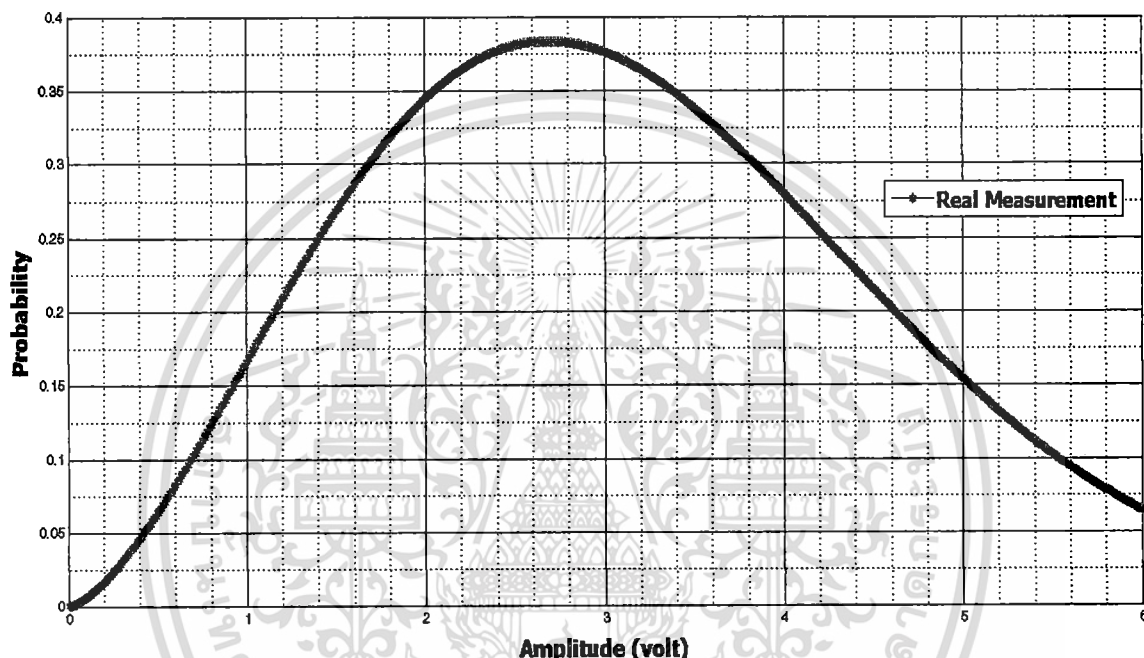
4.2.4.2 ผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ

จากรูปที่ 4.26 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมแบบชนบท ซึ่งจากกราฟแสดงผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแนวโน้มของระดับกำลังสัญญาณที่ฝั่งรับนั้นมีโอกาสที่จะรับได้จะเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ระดับกำลังสัญญาณที่ 0.05 โวลต์ จนถึงระดับกำลังสูงสุดที่รับได้ คือ 2.685 โวลต์ และหลังจากนั้นระดับกำลังสัญญาณจะมีการลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าเข้าใกล้ 0 โวลต์ ในที่สุด อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้ยังไม่สามารถนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปและบอกได้ว่าผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลอง ใดมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การจางหายของกำลัง สัญญาณในสถานะแวดล้อมแบบชนบทมากที่สุดได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์ อัตราการจางหายของกำลังสัญญาณจึงจำเป็นที่จะต้องนำอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่ได้ จากการทดลองในสถานะแวดล้อมจริงไปเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแปรปรวนกับผลการทดลองที่ ได้จากการเลียนแบบ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลองเสียก่อน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.4.2



รูปที่ 4.26 แสดงผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมจริงแบบชนบท

4.3 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลอง

เมื่อทราบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณจากการเลียนแบบ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดลองในสถานะแวดล้อมจริงเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนถัดไปจะเป็นการนำผลการทดลองทั้ง 2 รูปแบบดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบ เพื่อที่จะได้ทราบว่าแบบจำลองใดมีความแม่นยำและเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการคาดการณ์การลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณในแต่ละสถานะแวดล้อมมากที่สุด ซึ่งการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองจะมีทั้งหมด 6 ขั้นตอนดังนี้

1. จัดหมวดหมู่ของผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณ โดยจะจำแนกตามสถานะแวดล้อมที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งในที่นี้จะมีทั้งหมด 4 สถานะแวดล้อมด้วยกันคือ สถานะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง สถานะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง สถานะแวดล้อมแบบชนเมือง และสถานะแวดล้อมแบบชนบท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จำลองผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณที่ได้จากการทดลองทั้ง 2 รูปแบบลงบน โปรแกรม MATLAB

3. ทำการประมวลผลการจำลองผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่างๆ บนโปรแกรม MATLAB

4. บันทึกผลการจำลองผลการทดลองและนำผลลัพธ์ดังกล่าวไปบันทึกลงบนกราฟ

5. วิเคราะห์ เปรียบเทียบ และหาค่าความแปรปรวนของผลการทดลองจากกราฟ

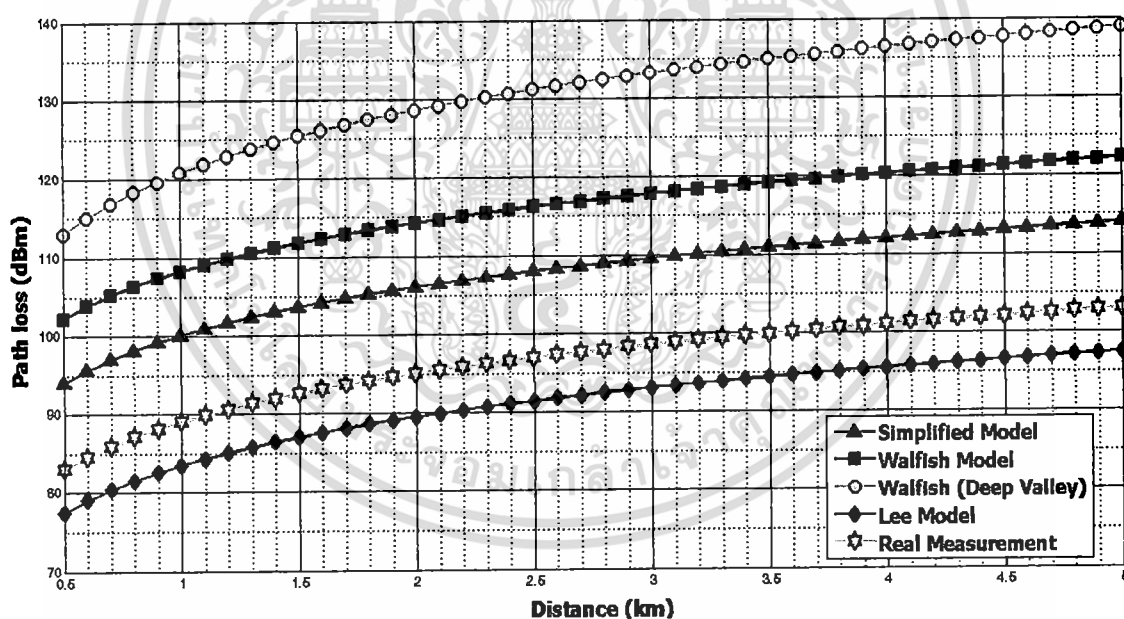
6. สรุปผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลอง

โดยการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองสามารถจำแนกตามสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการทดลองได้ดังนี้

4.3.1 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง

สำหรับการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่งสามารถจำแนกออกตามปัจจัยที่ให้ความสำคัญได้ 2 ลักษณะดังนี้

4.3.1.1 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง



รูปที่ 4.27 แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง

จากรูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นถึงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าการนำผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิดโล่งมาพิจารณาร่วมด้วย โดยหลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (Distance) และปริมาณของการลดทอนตามระยะทาง

เอกสาร (Path Loss) ที่แล้วพบว่าแนวโน้มการเกิดการลดทอนตามระยะทางจะเพิ่มมากขึ้นตามระยะทาง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับที่เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ที่ได้ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปและบอกได้ว่าผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองใดมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่งมากที่สุดได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการลดทอนตามระยะทางจึงจำเป็นที่จะต้องนำอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงไปเปรียบเทียบกับหาค่าความแปรปรวนกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลองเสียก่อน ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิดโล่งไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง

ชื่อแบบจำลอง	ค่าความแปรปรวน
Simplified Model	11.0374
Walfish Model	19.1765
Walfish Model (Deep Valley)	29.9774
Lee Model	5.5507

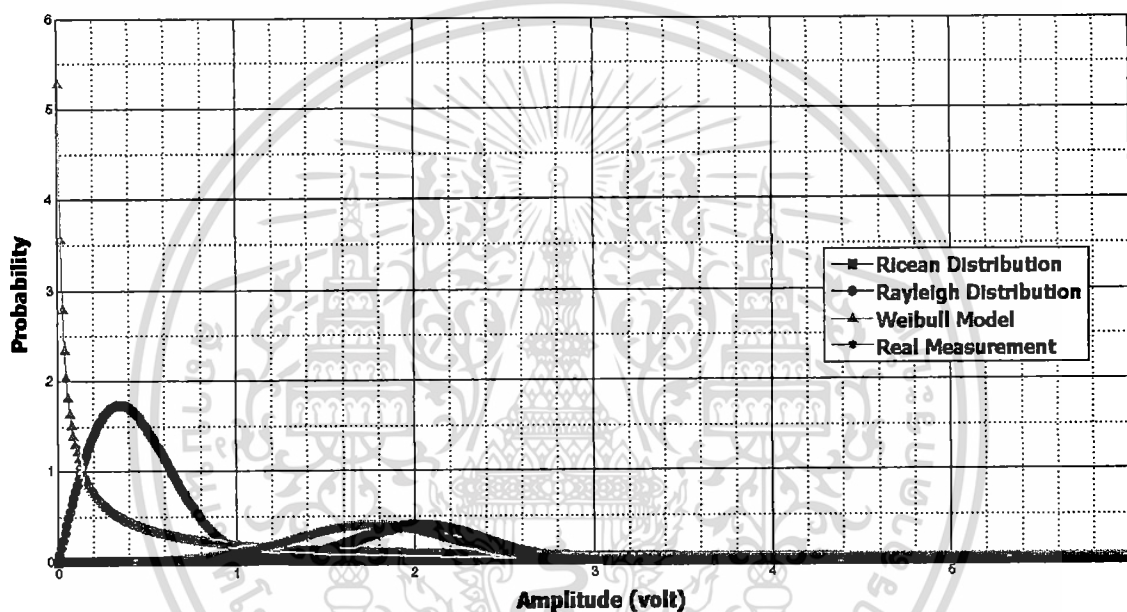
จากตารางที่ 4.11 แสดงให้เห็นถึงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิดโล่งไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง ซึ่งจะพบว่าค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากการนำผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิดโล่งไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลอง Lee Model มีค่าน้อยที่สุด ทำให้สามารถสรุปได้ว่าอัตราการลดทอนตามระยะทาง (Path Loss) ที่ได้จากแบบจำลอง Lee Model มีความใกล้เคียงกับอัตราการลดทอนตามระยะทางที่เกิดขึ้นจริงและเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่งภายในประเทศไทยมากที่สุด

4.3.1.2 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ

จากรูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นถึงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่ง ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าการนำผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิดโล่งมาพิจารณาร่วมด้วย โดยหลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับกำลังสัญญาณ (Amplitude) และโอกาสที่ฝั่งรับจะรับสัญญาณ (Probability) ดังกล่าวได้ พบว่าแนวโน้มของระดับกำลังสัญญาณที่ฝั่งรับนั้นมีโอกาสที่จะ

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำเอกสารฉบับนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยฯ ถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รับได้จะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับกำลังสูงสุด และหลังจากนั้นระดับกำลังสัญญาณจะมีการลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าเข้าใกล้ 0 โวลต์ ในที่สุด แต่อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ที่ได้ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปและบอกได้ว่าผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองใดมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิด โล่งมากที่สุดได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการจางหายของกำลังสัญญาณจึงจำเป็นที่จะต้องนำอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริง ไปเปรียบเทียบกับหาค่าความแปรปรวนกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลองเสียก่อน ซึ่งแสดงไว้ดังตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.28 แสดงผลการวิเคราะห์ที่เปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิด โล่ง

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิด โล่ง ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง

ชื่อแบบจำลอง	ค่าความแปรปรวน
Ricean Distribution	0.0355
Rayleigh Distribution	0.5191
Weibull Model	ไม่สามารถหาค่าได้

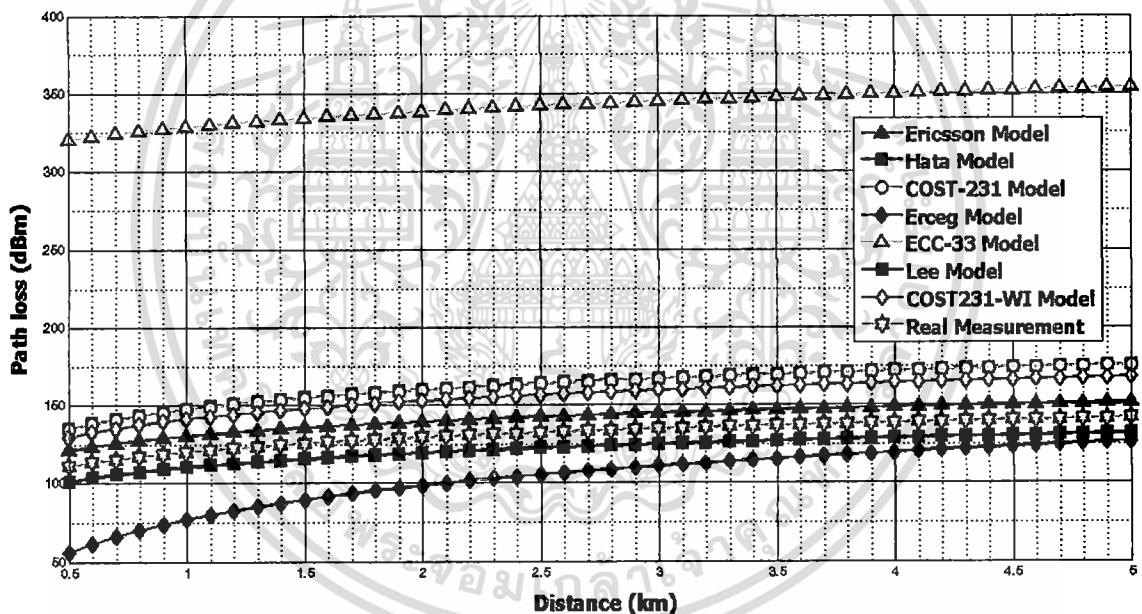
จากตารางที่ 4.12 แสดงให้เห็นถึงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิด โล่ง ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเอกรสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง ซึ่งจะพบว่าค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากการนำผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบพื้นที่เปิดโล่งไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลอง Ricean Distribution มีค่าน้อยที่สุด ทำให้สามารถสรุปได้ว่าอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณ (Fading) ที่ได้จากแบบจำลอง Ricean Distribution มีความใกล้เคียงกับอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงและเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การจางหายของกำลังสัญญาณ ในสภาวะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่งภายในประเทศไทยมากที่สุด

4.3.2 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

สำหรับการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองสามารถจำแนกออกตามปัจจัยที่ให้ความสำคัญได้ 2 ลักษณะดังนี้

4.3.2.1 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง



รูปที่ 4.29 แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

จากรูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นถึงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าการนำผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมืองมาพิจารณาร่วมด้วย โดยหลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (Distance) และปริมาณของการลดทอนตามระยะทาง (Path Loss) แล้วพบว่าแนวโน้มการเกิดการลดทอนตามระยะทางจะเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับที่เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ที่ได้ยังไม่สามารถ

เอกสนำไปใช้สรุปและบอกได้ว่าผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองใดมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองมากที่สุดได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการลดทอนตามระยะทางจึงจำเป็นที่จะต้องนำอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงไปเปรียบเทียบกับหาค่าความแปรปรวนกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลองเสียก่อน ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมืองไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง

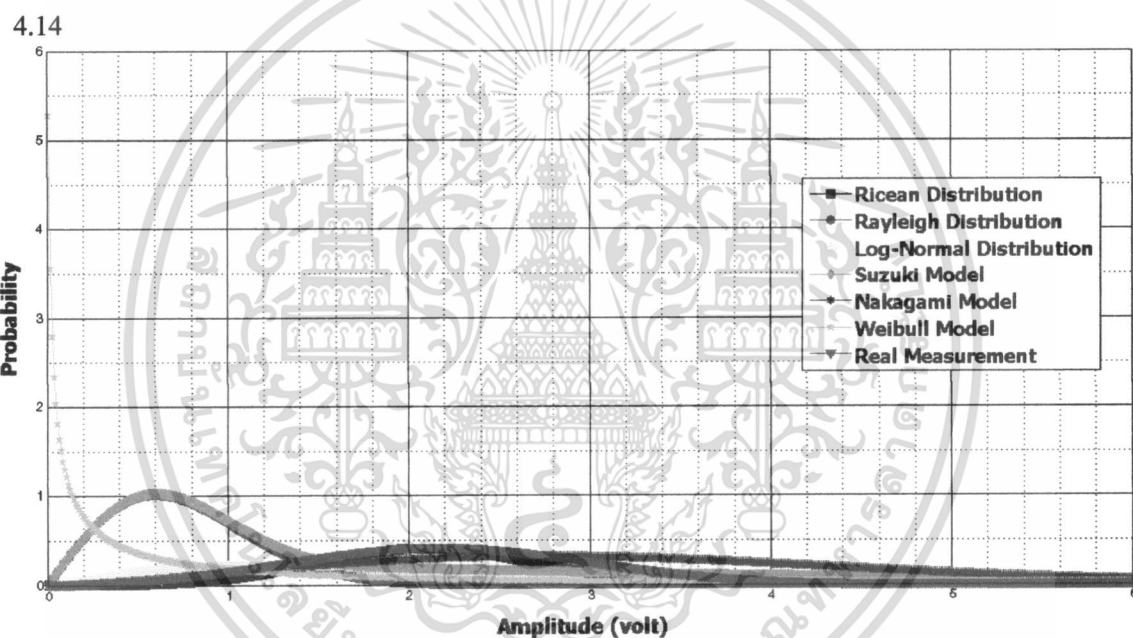
ชื่อแบบจำลอง	ค่าความแปรปรวน
Ericsson Model	10.4525
Hata Model	34.4233
COST-231 Model	34.4211
Erceg Model	35.2856
ECC-33 Model	219.3866
Lee Model	10.5820
COST231-WI Model	28.4825

จากตารางที่ 4.13 แสดงให้เห็นถึงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมืองไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง ซึ่งจะพบว่าค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากการนำผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมืองไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลอง Ericsson Model มีค่าน้อยที่สุด ทำให้สามารถสรุปได้ว่าอัตราการลดทอนตามระยะทาง (Path Loss) ที่ได้จากแบบจำลอง Ericsson Model มีความใกล้เคียงกับอัตราการลดทอนตามระยะทางที่เกิดขึ้นจริงและเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองภายในประเทศไทยมากที่สุด

4.3.2.2 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ

จากรูปที่ 4.30 แสดงให้เห็นถึงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าการนำผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมืองมาพิจารณาร่วมด้วย โดยหลังจากที่ได้ทำการไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับกำลังสัญญาณ (Amplitude) และโอกาสที่ฝั่งรับจะรับสัญญาณ (Probability) ดังกล่าวได้ พบว่าแนวโน้มของระดับกำลังสัญญาณที่ฝั่งรับนั้นมีโอกาสที่จะรับได้จะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับกำลังสูงสุด และหลังจากนั้นระดับกำลังสัญญาณจะมีการลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าเข้าใกล้ 0 โวลต์ ในที่สุด แต่อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ที่ได้ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปและบอกได้ว่าผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองใดมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองมากที่สุดได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการจางหายของกำลังสัญญาณจึงจำเป็นต้องนำอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงไปเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแปรปรวนกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลองเสียก่อน ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่



รูปที่ 4.30 แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมืองไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง

ชื่อแบบจำลอง	ค่าความแปรปรวน
Ricean Distribution	0.0073
Rayleigh Distribution	0.0075
Log-Normal Fading Model	0.0217
Suzuki Model	0.0158

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 (ต่อ)

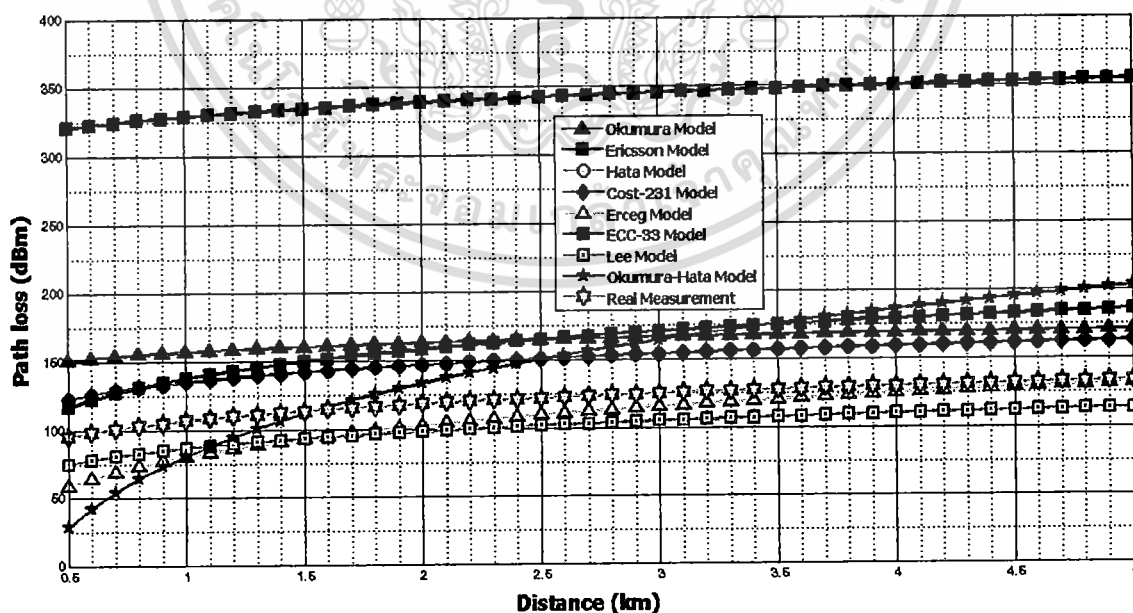
ชื่อแบบจำลอง	ค่าความแปรปรวน
Nakagami Model	0.0231
Weibull Model	0.0152

จากตารางที่ 4.14 แสดงให้เห็นถึงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมือง ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง ซึ่งจะพบว่าค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากการนำผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชุมชนเมือง ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลอง Ricean Distribution มีค่าน้อยที่สุด ทำให้สามารถสรุปได้ว่าอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณ (Fading) ที่ได้จากแบบจำลอง Ricean Distribution มีความใกล้เคียงกับอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงและเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองภายในประเทศไทยมากที่สุด

4.3.3 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

สำหรับการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองสามารถจำแนกออกตามปัจจัยที่ให้ความสำคัญได้ 2 ลักษณะดังนี้

4.3.3.1 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง



รูปที่ 4.31 แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชุมชนเมือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.31 แสดงให้เห็นถึงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าการนำผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชานเมืองมาพิจารณาร่วมด้วย โดยหลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (Distance) และปริมาณของการลดทอนตามระยะทาง (Path Loss) แล้วพบว่าแนวโน้มการเกิดการลดทอนตามระยะทางจะเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับที่เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ที่ได้ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปและบอกได้ว่าผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองใดมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมืองมากที่สุดได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการลดทอนตามระยะทางจึงจำเป็นต้องนำอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงไปเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแปรปรวนกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลองเสียก่อน ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.15

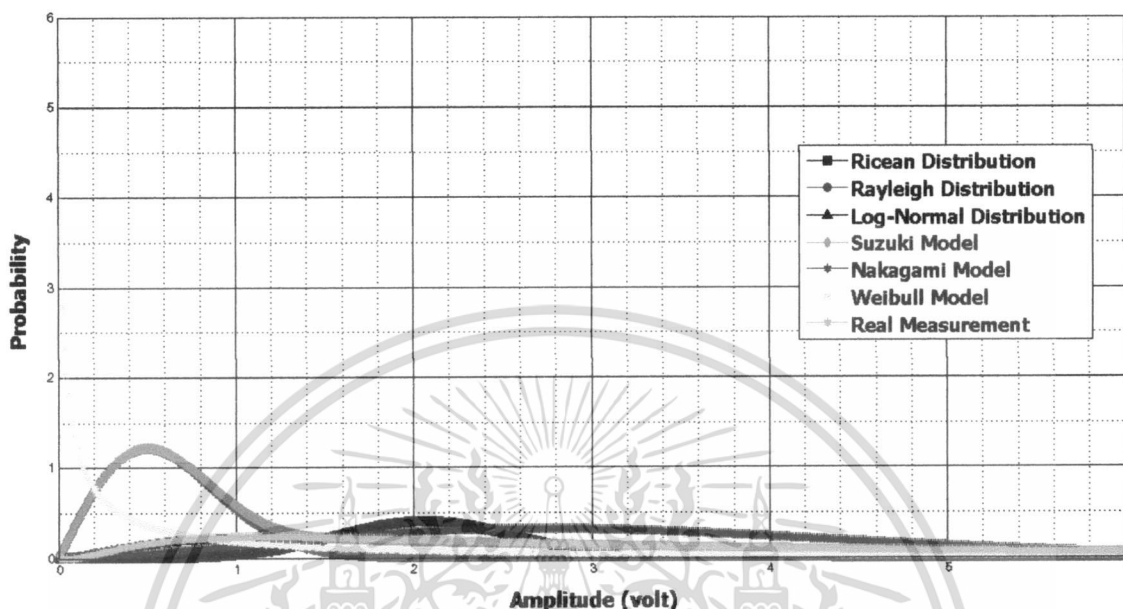
ตารางที่ 4.15 แสดงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชานเมืองไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง

ชื่อแบบจำลอง	ค่าความแปรปรวน
Okumura Model	55.7297
Ericsson Model	36.7853
Hata Model	27.6281
COST-231 Model	27.5209
Erceg Model	19.3140
ECC-33 Model	225.6284
Lee Model	20.0082
Okumura-Hata Model	68.0282

จากตารางที่ 4.15 แสดงให้เห็นถึงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชานเมืองไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง ซึ่งจะพบว่าค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากการนำผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชานเมืองไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลอง Erceg Model มีค่าน้อยที่สุด ทำให้สามารถสรุปได้ว่าอัตราการลดทอนตามระยะทาง (Path Loss) ที่ได้จากแบบจำลอง Erceg Model มี

ความใกล้เคียงกับอัตราการลดทอนตามระยะทางที่เกิดขึ้นจริงและเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมืองภายในประเทศไทยมากที่สุด

4.3.3.2 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ



รูปที่ 4.32 แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง

จากรูปที่ 4.32 แสดงให้เห็นถึงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าการนำผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชานเมืองมาพิจารณาพร้อมด้วย โดยหลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับกำลังสัญญาณ (Amplitude) และ โอกาสที่ฝั่งรับจะรับสัญญาณ (Probability) ดังกล่าวได้ พบว่าแนวโน้มของระดับกำลังสัญญาณที่ฝั่งรับนั้นมีโอกาสที่จะรับได้จะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับกำลังสูงสุด และหลังจากนั้นระดับกำลังสัญญาณจะมีการลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าเข้าใกล้ 0 โวลต์ ในที่สุด แต่อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ที่ได้ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปและบอกได้ว่าผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองใดมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมืองมากที่สุดได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการจางหายของกำลังสัญญาณจึงจำเป็นต้องนำอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงไปเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแปรปรวนกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลองเสียก่อน ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 แสดงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ ในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชานเมืองไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง

ชื่อแบบจำลอง	ค่าความแปรปรวน
Ricean Distribution	0.0064
Rayleigh Distribution	0.0044
Log-Normal Fading Model	0.0033
Suzuki Model	0.0039
Nakagami Model	0.0037
Weibull Model	0.0079

จากตารางที่ 4.16 แสดงให้เห็นถึงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองใน สภาวะแวดล้อมจริงแบบชานเมืองไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง ซึ่งจะพบว่าค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากการนำผล การทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชานเมืองไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการ เลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลอง Log-Normal Fading Model มีค่าน้อยที่สุด ทำให้สามารถสรุปได้ว่าอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณ (Fading) ที่ได้จากแบบจำลอง Log- Normal Fading Model มีความใกล้เคียงกับอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงและ เหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การจางหายของกำลังสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบชานเมือง ภายในประเทศไทยมากที่สุด

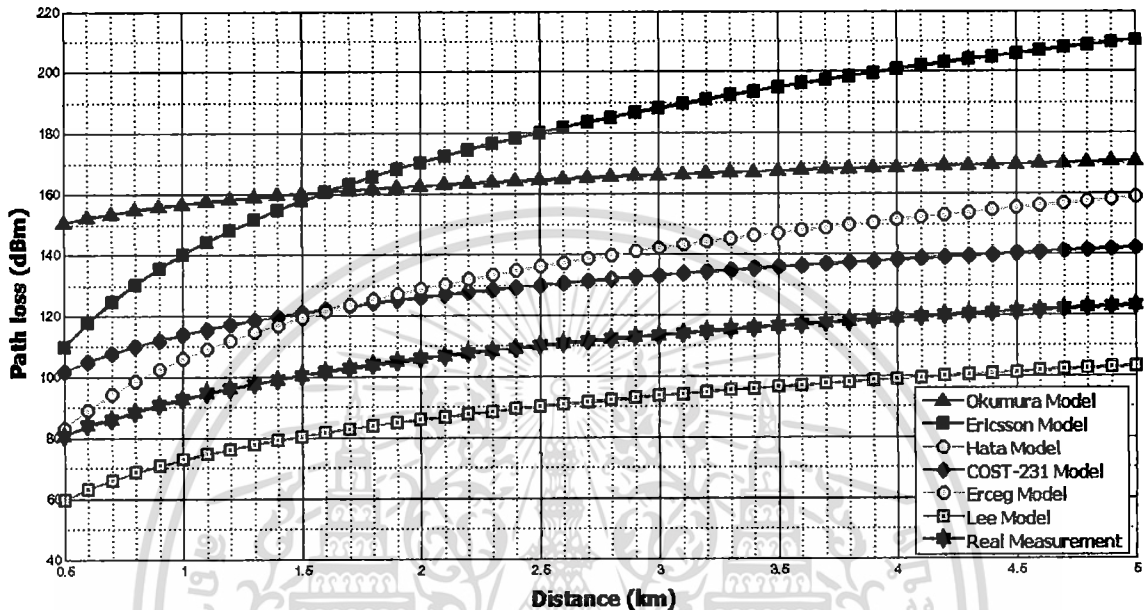
4.3.4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท

สำหรับการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท สามารถจำแนกออกตามปัจจัยที่ให้ความสำคัญได้ 2 ลักษณะดังนี้

4.3.4.1 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทาง

จากรูปที่ 4.33 แสดงให้เห็นถึงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการ ลดทอนตามระยะทางในสภาวะแวดล้อมแบบชนบท ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าการนำผลการ ทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงแบบชนบทมาพิจารณาพร้อมด้วย โดยหลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (Distance) และปริมาณของการลดทอนตามระยะทาง (Path Loss) แล้วพบว่าแนวโน้มการเกิดการลดทอนตามระยะทางจะเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างระหว่างเครื่องส่ง และเครื่องรับที่เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ที่ได้ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปและ บอกได้ว่าผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองใดมี

ความใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมแบบชนบทมากที่สุดได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการลดทอนตามระยะทางจึงจำเป็นที่จะต้องนำอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากการทดลองในสถานะแวดล้อมจริง ไปเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแปรปรวนกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลองเสียก่อน ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.17



รูปที่ 4.33 แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมแบบชนบท

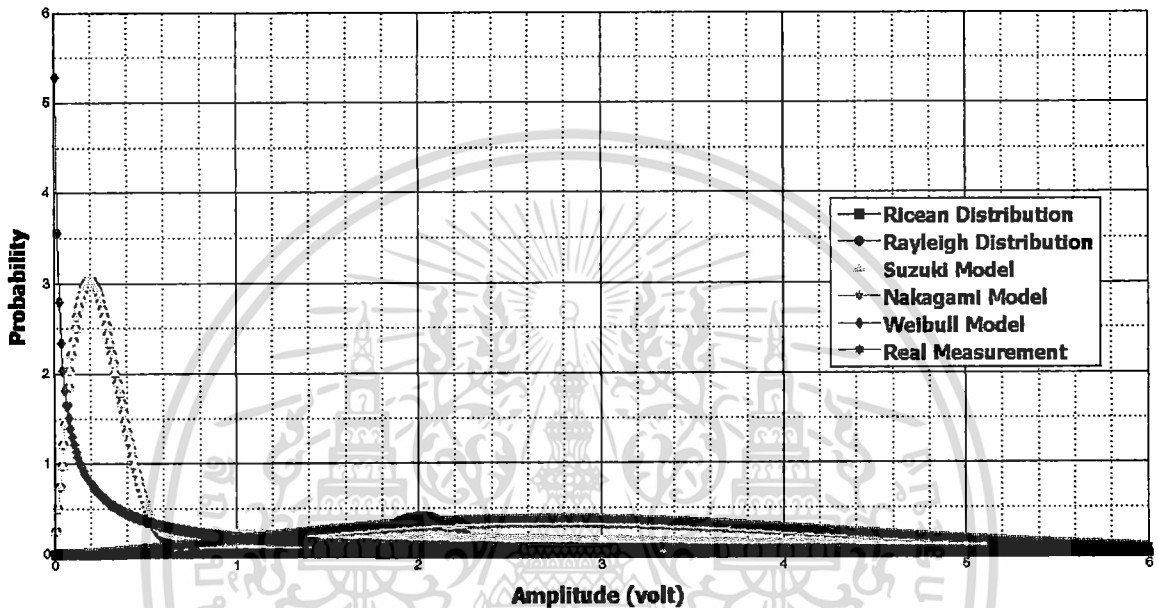
ตารางที่ 4.17 แสดงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมจริงแบบชนบทไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง

ชื่อแบบจำลอง	ค่าความแปรปรวน
Okumura Model	58.5097
Ericsson Model	29.2031
Hata Model	19.0053
COST-231 Model	18.9081
Erceg Model	35.8035
Lee Model	20.0348

จากตารางที่ 4.17 แสดงให้เห็นถึงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองในสถานะแวดล้อมจริงแบบชนบทไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง ซึ่งจะพบว่าค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากการนำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำมาปฏิบัติหรือนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองในสถานะแวดล้อมจริงแบบชนบทไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลอง COST-231 Model มีค่าน้อยที่สุด ทำให้สามารถสรุปได้ว่าอัตราการลดทอนตามระยะทาง (Path Loss) ที่ได้จากแบบจำลอง COST-231 Model มีความใกล้เคียงกับอัตราการลดทอนตามระยะทางที่เกิดขึ้นจริงและเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การลดทอนตามระยะทางในสถานะแวดล้อมแบบชนบทภายในประเทศไทยมากที่สุด

4.3.4.2 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณ



รูปที่ 4.34 แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมแบบชนบท

จากรูปที่ 4.34 แสดงให้เห็นถึงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมแบบชนบท ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าการนำผลการทดลองในสถานะแวดล้อมจริงแบบชนบทมาพิจารณาร่วมด้วย โดยหลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับกำลังสัญญาณ (Amplitude) และ โอกาสที่ฝั่งรับจะรับสัญญาณ (Probability) ดังกล่าวได้ พบว่าแนวโน้มของระดับกำลังสัญญาณที่ฝั่งรับนั้นมีโอกาสที่จะรับได้จะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับกำลังสูงสุด และหลังจากนั้นระดับกำลังสัญญาณจะมีการลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าเข้าใกล้ 0 โวลต์ ในที่สุด แต่อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ที่ได้ยังไม่สามารถนำไปใช้สรุปและบอกได้ว่าผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองใดมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมแบบชนบทมากที่สุดได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคาดการณ์อัตราการจางหายของกำลังสัญญาณจึงจำเป็นที่จะต้องนำอัตราการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากการทดลอง

ในสถานะแวดล้อมจริงไปเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแปรปรวนกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลองเสียก่อน ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 แสดงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมจริงแบบชนบทไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง

ชื่อแบบจำลอง	ค่าความแปรปรวน
Ricean Distribution	0.00052
Rayleigh Distribution	0.00035
Suzuki Model	0.0181
Nakagami Model	0.0085
Weibull Model	0.0157

จากตารางที่ 4.18 แสดงให้เห็นถึงค่าความแปรปรวนที่ได้จากการนำผลการทดลองในสถานะแวดล้อมจริงแบบชนบทไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง ซึ่งจะพบว่าค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากการนำผลการทดลองในสถานะแวดล้อมจริงแบบชนบทไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลอง Rayleigh Distribution มีค่าน้อยที่สุด ทำให้สามารถสรุปได้ว่าอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณ (Fading) ที่ได้จากแบบจำลอง Rayleigh Distribution มีความใกล้เคียงกับอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงและเหมาะสมที่จะนำไปใช้คาดการณ์การจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมแบบชนบทภายในประเทศไทยมากที่สุด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและแนวทางการวิจัยในอนาคต

ในส่วนนี้จะเป็นการนำผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการทดลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงมาทำการสังเคราะห์เพื่อให้เกิดเป็นองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาค้นคว้าและวิจัยทางด้านโทรคมนาคมรวมทั้งการติดต่อสื่อสารไร้สายในอนาคต นอกจากนั้นยังมีการนำเสนอถึงปัญหาและอุปสรรคที่พบระหว่างการดำเนินการวิจัย ตลอดจนแนวทางการวิจัยในอนาคตอีกด้วย

5.1 สรุปผลการวิจัย

สืบเนื่องจากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองการลดทอนตามระยะทางที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลอง Simplified model, Walfish model, Lee model, Ericsson model, Cost-231 model, COST231 Walfish-Ikegami model, Okumura model, Okumura-Hata model, Hata model, Erceg model และ ECC-33 model กับผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริง รวมทั้งการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองการจางหายของกำลังสัญญาณที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลอง Ricean Distribution, Rayleigh Distribution, Log-Normal Fading model, Suzuki model, Nakagami model และ Weibull model กับผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริง ส่งผลให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างการผลทดลองโดยการเลียนแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบจำลองกับผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงได้อย่างชัดเจน และสามารถนำมาสรุปเป็นผลการวิจัยรวมทั้งระบุแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางและแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณที่มีความแม่นยำและเหมาะสมที่จะนำไปใช้พยากรณ์การลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณในแต่ละสภาวะแวดล้อมได้ดังตารางที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับดังนี้

ตารางที่ 5.1 แสดงแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้พยากรณ์การลดทอนตามระยะทางในแต่ละสภาวะแวดล้อม

สภาวะแวดล้อม	แบบจำลองที่เหมาะสม
พื้นที่เปิดโล่ง	Lee model
ชุมชนเมือง	Ericsson model
ชานเมือง	Erceg model
ชนบท	COST-231 model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นถึงแบบจำลองที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้พยากรณ์การลดทอนตามระยะทางในแต่ละสถานะแวดล้อม ซึ่งจะเห็นได้ว่าในแต่ละสถานะแวดล้อมจะมีแบบจำลองที่มีความเหมาะสมแตกต่างกันออกไป อีกทั้งในบางสถานะแวดล้อมอาจมีแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางที่มีความเหมาะสมมากกว่า 1 แบบจำลองอีกด้วย โดยในสถานะแวดล้อมแบบพื้นที่เปิดโล่งแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางที่มีความเหมาะสมมากที่สุดคือ Lee model ส่วนสถานะแวดล้อมแบบชุมชนเมืองแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางที่มีความเหมาะสมมากที่สุดคือ Ericsson model ส่วนสถานะแวดล้อมแบบชานเมืองแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางที่มีความเหมาะสมมากที่สุดคือ Erceg model และในสถานะแวดล้อมแบบชนบทแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางที่มีความเหมาะสมมากที่สุดคือ COST-231 model โดยแบบจำลองทั้ง 4 ที่ได้กล่าวในข้างต้นถือเป็นแบบจำลองที่มีผลการทดลองจากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ใกล้เคียงกับผลการทดลองในสถานะแวดล้อมจริงมากที่สุด และก่อให้เกิดค่าความแปรปรวนน้อยที่สุดอีกด้วย อย่างไรก็ตามผลการวิจัยอัตราการลดทอนตามระยะทางและสรุปแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางที่เหมาะสมสำหรับแต่ละสถานะแวดล้อมในเอกสารฉบับนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนกับอัตราการลดทอนตามระยะทางที่เกิดขึ้นในสถานะแวดล้อมจริงตามแต่ละภูมิภาคภายในประเทศไทยได้ เนื่องจากปัจจัยแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการลดทอนตามระยะทาง เช่น ความหนาแน่นของสิ่งกีดขวาง อุณหภูมิ และความชื้น ในแต่ละภูมิภาคจะมีความแตกต่างกันออกไป ดังนั้นก่อนที่จะทำการทดลองโดยการเลียนแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงควรลงไปตรวจสอบพื้นที่ที่จะทำการทดลองและประเมินปัจจัยแวดล้อมต่างๆ ที่มีโอกาสส่งผลกระทบต่อการรับ-ส่งสัญญาณทั้งหมดเสียก่อน เพื่อที่จะได้กำหนดปริมาณของปัจจัยแวดล้อมแต่ละประเภทบนแบบจำลองที่จะใช้พยากรณ์อัตราการลดทอนตามระยะทางได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้ผลการทดลองที่ได้มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับอัตราการลดทอนตามระยะทางที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละสถานะแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 5.2 แสดงแบบจำลองที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้พยากรณ์การจางหายของกำลังสัญญาณในแต่ละสถานะแวดล้อม

สถานะแวดล้อม	แบบจำลองที่เหมาะสม
พื้นที่เปิดโล่ง	Ricean Distribution
ชุมชนเมือง	Ricean Distribution
ชานเมือง	Log-Normal Fading model
ชนบท	Rayleigh Distribution

จากตารางที่ 5.2 แสดงให้เห็นถึงแบบจำลองที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เอกสารพยากรณ์การจางหายของกำลังสัญญาณในแต่ละสถานะแวดล้อม ซึ่งจะเห็นได้ว่าในแต่ละสถานะคว่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แวกส์จะมีแบบจำลองที่มีความเหมาะสมแตกต่างกันออกไป อีกทั้งในบางสภาวะแวกส์อาจมีแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณที่มีความเหมาะสมมากกว่า 1 แบบจำลองอีกด้วย โดยในสภาวะแวกส์แบบพื้นที่เปิดโล่งแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณที่มีความเหมาะสมมากที่สุดคือ Ricean Distribution ส่วนสภาวะแวกส์แบบชุมชนเมืองแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณที่มีความเหมาะสมมากที่สุดคือ Ricean Distribution ส่วนสภาวะแวกส์แบบชานเมืองแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณที่มีความเหมาะสมมากที่สุดคือ Log-Normal Fading model และในสภาวะแวกส์แบบชนบทแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณที่มีความเหมาะสมมากที่สุดคือ Rayleigh Distribution โดยแบบจำลองทั้ง 4 ที่ได้กล่าวในข้างต้นถือเป็นแบบจำลองที่มีผลการทดลองจากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ใกล้เคียงกับผลการทดลองในสภาวะแวกส์จริงมากที่สุด และก่อให้เกิดค่าความแปรปรวนน้อยที่สุดอีกด้วย อย่างไรก็ตามผลการวิจัยอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณและสรุปแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับแต่ละสภาวะแวกส์ในเอกสารฉบับนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนกับอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่เกิดขึ้นในสภาวะแวกส์จริงตามแต่ละภูมิภาคภายในประเทศไทยได้ เนื่องจากปัจจัยแวกส์ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการจางหายของกำลังสัญญาณ เช่น ความหนาแน่นของสิ่งกีดขวาง อุดมภูมิ และความชื้น ในแต่ละภูมิภาคจะมีความแตกต่างกันออกไป ดังนั้นก่อนที่จะทำการทดลองโดยการเลียนแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงควรลงไปตรวจสอบพื้นที่ที่จะทำการทดลองและประเมินปัจจัยแวกส์ต่างๆ ที่มีโอกาสส่งผลกระทบต่อการรับ-ส่งสัญญาณทั้งหมดเสียก่อน เพื่อที่จะได้กำหนดปริมาณของปัจจัยแวกส์แต่ละประเภทบนแบบจำลองที่จะใช้พยากรณ์อัตราการจางหายของกำลังสัญญาณได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้ผลการทดลองที่ได้มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละสภาวะแวกส์เพิ่มมากขึ้น

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

จากการวิเคราะห์ ออกแบบ และดำเนินการทดลองในสภาวะแวกส์ต่างๆ ทำให้พบถึงปัญหาและอุปสรรคนานัปการ ซึ่งสามารถนำมาสรุปเป็นหัวข้อได้ดังนี้

1. ทฤษฎีแบบจำลองการลดทอนตามระยะทาง (Path loss model) และแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณ (Fading model) ที่ถูกคิดค้นขึ้นตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันมีอยู่มากมาย ทำให้จำเป็นต้องใช้เวลานานในการศึกษาบทความวิจัยต่างๆ ที่ได้รับการตีพิมพ์ลงเอกสารการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ เพื่อประเมินและคัดเลือกแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางและแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณที่มีความแม่นยำและเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดลอง โดยการเลียนแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดลองในสภาวะแวกส์จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การค้นหาและกำหนดสถานที่ที่จะใช้เป็นพื้นที่สำหรับการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงที่มีคุณสมบัติตรงตามความต้องการตามบทความวิจัยที่ได้ทำการศึกษามาก่อนหน้านั้นทำได้ยากเนื่องจากข้อจำกัดทางภูมิประเทศและภูมิอากาศภายในประเทศไทย จึงส่งผลให้สามารถทำได้เพียงกำหนดพื้นที่ที่มีสภาวะแวดล้อมใกล้เคียงกับคุณสมบัติที่ได้ระบุในบทความวิจัยมากที่สุดเท่านั้น

3. การกำหนดวันและเวลาในการทดลอง เนื่องจากวันและเวลาว่างของผู้ทดลองมักไม่ตรงกัน แต่การทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงจำเป็นที่จะต้องให้ผู้ทดลองอย่างน้อย 2 ราย โดยผู้ทดลองรายแรกจะประจำอยู่ที่ภาคส่ง เพื่อทำการควบคุมและตั้งค่าอุปกรณ์ให้สามารถแพร่กระจายสัญญาณวิทยุออกสู่อากาศได้ ส่วนผู้ทดลองอีกรายจะประจำอยู่ที่ภาครับ คอยทำหน้าที่ปรับความถี่ของเครื่องรับสัญญาณให้ตรงกับความถี่ที่แพร่กระจายออกมาจากภาคส่ง เพื่อให้อุปกรณ์สามารถรับสัญญาณที่ส่งออกมาจากภาคส่งได้ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่บันทึกผลการทดลองในแต่ละจุดทดลองตามระยะทางที่กำหนดด้วย

4. การอนุมัติเอกสารคำร้องเพื่อขออนุญาตที่จะนำไปใช้ทดลองจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังใช้เวลาก่อนข้างนาน (ประมาณ 1 เดือน)

5. อุปกรณ์กำเนิดและรับสัญญาณคลื่นวิทยุในย่าน 2.4 GHz ที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าในการทำงาน ดังนั้นการนำไปใช้งานภายนอกอาคารจึงจำเป็นที่จะต้องมีการกำเนิดพลังงานไฟฟ้า (Generator) คอยทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อให้อุปกรณ์นั้นสามารถทำงานได้ โดยการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงของโครงการวิจัยนี้จำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจำนวน 2 เครื่อง สำหรับจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณบนภาคส่งและอุปกรณ์รับสัญญาณคลื่นวิทยุบนภาครับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการจัดซื้อเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้ในการทดลองส่งผลทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินโครงการวิจัยเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และถือได้ว่าเป็นค่าใช้จ่ายที่สูงที่สุดอีกด้วย เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในด้านอื่นๆ ตลอดการทดลอง

6. การกำหนดระยะทางสำหรับการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงในช่วงแรกนั้นไม่สามารถระบุเป็นค่าที่แน่นอนได้ เนื่องจากไม่สามารถทราบได้ว่าระยะทางเท่าใดจึงเพียงพอที่จะแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเกิดการลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องนำผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาทำการประเมินเพื่อหาระยะทางที่เหมาะสมสำหรับการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริง ซึ่งหลักจากที่ทำการประเมินเรียบร้อยแล้ว พบว่าระยะทางที่เหมาะสมสำหรับการทดลองคือ 5 กิโลเมตร

7. สภาวะแวดล้อมโดยรอบและสิ่งกีดขวางในแต่ละพื้นที่ที่ได้เข้าไปทำการทดลองส่งผลกระทบต่อทำให้ระดับกำลังสัญญาณที่เกิดขึ้นบนเครื่องรับมีความผิดเพี้ยนไปจากผลการทดลองที่คาดหวังไว้ ส่งผลให้เมื่อนำผลการทดลองที่ได้จากการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงในแต่ละพื้นที่ไปบันทึกลงบนกราฟจึงจำเป็นที่จะต้องเพิ่มระดับกำลังสัญญาณที่รับได้เพื่อชดเชยสัญญาณรบกวน

ที่เกิดขึ้นและทำให้ผลการทดลองมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริง รวมทั้งเหลือเพียงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยที่ให้ความสนใจอยู่นั้น

8. การเดินทางเพื่อไปทดลองยังพื้นที่ที่ได้กำหนดเป็นไปด้วยความยากลำบาก โดยเฉพาะการทดลองบริเวณแพลตฟอร์มทะเลและบริเวณหน้าโซว์รูมโตโยต้า (หัวตะเข้) เนื่องจากไม่ได้รับความร่วมมือจากเจ้าของสถานที่และเจ้าหน้าที่ภายในบริเวณนั้น

9. การติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ทดลองไม่ค่อยสะดวกมากนัก เนื่องจากผู้ทดลองที่ประจำอยู่ที่ภาครับจะต้องทำการขยับตำแหน่งอุปกรณ์ที่ใช้วัดระดับสัญญาณให้ห่างจากภาคส่งออกไปตามระยะทางที่กำหนด และเมื่ออยู่ในจุดที่ห่างจากภาคส่งเป็นระยะทางตั้งแต่ 500 เมตรเป็นต้นไป การติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ทดลองที่ประจำอยู่ที่ภาครับและภาคส่งจำเป็นที่จะต้องใช้โทรศัพท์มือถือเท่านั้น ซึ่งก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายในการทดลองที่เพิ่มมากขึ้น

10. งบประมาณสนับสนุนโครงการวิจัยมีไม่เพียงพอ จึงส่งผลให้เกิดข้อจำกัดในการกำหนดสถานที่ที่ใช้สำหรับการทดลองในแต่ละสถานะแวดล้อม และขาดอุปกรณ์ประกอบการทดลองที่มีประสิทธิภาพและมีฟังก์ชันการทำงานที่สามารถตอบสนองต่อการทดลองการลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมจริงได้โดยตรง

5.3 แนวทางการวิจัยในอนาคต

สำหรับแนวทางการวิจัยในอนาคต สามารถนำมาสรุปเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ดังนี้

1. ทดลองในสถานะแวดล้อมที่มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น เช่น สถานะแวดล้อมแบบที่ราบสูง สถานะแวดล้อมแบบชายฝั่งทะเล สถานะแวดล้อมแบบนิคมอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เป็นต้น

2. ทดลองในย่านความถี่ที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น เช่น ย่านความถี่ 3.5GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ของไวแมกซ์ (WiMAX) ที่อนุญาตให้สามารถใช้ได้ในทวีปยุโรป หรือในย่านความถี่ 5 GHz เป็นต้น เพื่อให้เห็นถึงแนวโน้มการเกิดการลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณในแต่ละย่านความถี่เพิ่มมากขึ้น รวมทั้งแบบจำลองที่มีความเหมาะสมจะนำไปใช้พยากรณ์การลดทอนตามระยะทางและการจางหายของกำลังสัญญาณในแต่ละสถานะแวดล้อมด้วย

3. เพิ่มเติมแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางและแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณที่จะนำไปใช้ทดลองโดยการเลียนแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้เพิ่มมากขึ้น เพื่อให้เห็นถึงแนวโน้มของผลการทดลองและความแม่นยำในการพยากรณ์อัตราการลดทอนตามระยะทางและอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณที่ได้จากแต่ละแบบจำลองในมุมมองที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น

4. นำปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ ที่ส่งผลกระทบต่อการรับ-ส่งสัญญาณคลื่นวิทยุมาพิจารณาร่วมกับแต่ละแบบจำลองเพิ่มมากขึ้น เช่น การสูญเสียกำลังงานจากสายอากาศ การถูกดูดกลืนพลังงานจากสิ่งกีดขวางที่อยู่ระหว่างภาครับ-ภาคส่ง และการสูญเสียกำลังสัญญาณจากสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รบกวนที่เกิดขึ้นในขณะที่เครื่องใช้ไฟฟ้าและเครื่องจักรกำลังทำงาน เนื่องจากในช่วงเวลาที่เครื่องใช้ไฟฟ้าและเครื่องจักรกำลังจะมีการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกสู่อากาศ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการรบกวนต่อการติดต่อสื่อสารไร้สายได้ เป็นต้น เพื่อให้ผลการทดลองที่ได้จากแต่ละแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับอัตราการลดทอนตามระยะทางและอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณในสถานะแวดล้อมจริงเพิ่มมากขึ้น

5. พัฒนาแบบจำลองการลดทอนตามระยะทางและแบบจำลองการจางหายของกำลังสัญญาณรูปแบบใหม่ที่มีความแม่นยำและเหมาะสมสำหรับการนำไปพยากรณ์อัตราการลดทอนตามระยะทางและอัตราการจางหายของกำลังสัญญาณในทุกสถานะแวดล้อมภายในประเทศไทย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- Artem Saakian, P. 2011. **Radio Wave Propagation Fundamentals**. Boston: Artech House.
- Constantine A. Balanis, P. 2005. **Antenna theory: Analysis and Design**. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Curt Levis, Joel T. Johnson, Fernando L. Teixeira, P. 2010. **Radio Propagation: Physics and Applications**. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Fabio Belloni, P. 2004. **Fading Model**. Bulgaria: Helsinki University of Technology Press.
- Hamant Kumar Sharma, Sanjeev Sharma, Krishna Pandey, P. 2011. **Survey of propagation Model in Wireless Network**. Republic of Mauritius: IJSCI Publication.
- Henry L. Bertoni, P. 2000. **Radio Propagation for Modern Wireless System**. New Jersey: Prentice Hall.
- Hubregt J. Visser, P.2012. **Antenna Theory and Applications**. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Jeffery G. Andrews, Arunabha Ghosh, Rias Muhamed, P. 2007. **Fundamental of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking**. New Jersey: Prentice Hall.
- Lawrence Harte, P. 2006. **Introduction to 802.16 WiMax, Wireless Broadband Technology, Operation and Services**. North Carolina: Althos Publishing.
- Liu Yarong, Yang Xiaofei, Shen Zhoujun, Lu Qiu, P. 2010. **The Research of Path Loss Model Based on WiMAX Wireless Channel**. New York: McGraw-Hill/TAB Electronics.
- Mohammed Ali Aboul-Dahab, Hossam Mohammed Kamel, P. 2009. **Methodology of Path Loss Calculating Path Loss Upper and Lower Bounds for WiMAX**. Egypt: Arab academy Press.
- Mohammed Alshami, Tughrul Arslan, John Thompson, Ahmet T. Erdogan, P. 2011. **Frequency Analysis of Path Loss Models on WiMAX**. London: CEEC press.
- Pablo Barsocchi, P. 2006. **Channel Models for Terrestrial Wireless Communications**. Washington DC: ISTI Press.
- Tapan K. Sakar, Zhong Ji, Kyungjung Kim, Abdeltif Medouri, Magdalena Salazar-Palma, P.2003. **A Survey of Various Propagation for Mobile Communication**. New York: IEEE Press.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล นายสุรพล ไกรจักร์
 วัน เดือน ปีเกิด 17 มกราคม 2533
 ที่อยู่ 41 ถนนร่มเกล้า 1 แขวงคลองสองต้นนุ่น เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ
 10520
 โทรศัพท์ 081-306-3079
 อีเมล Macro_biggy@hotmail.com
 ประวัติการศึกษา 2554

วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะเทคโนโลยี
 สารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้