

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

สายอากาศตัวสะท้อนทรงกระบอกที่แผ่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์วงกลม

**A Cylindrical Reflector Antenna Radiating Circular Polarization**



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศตัวสะท้อนทรงกระบอกที่แผ่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์วงกลม  
A Cylindrical Reflector Antenna Radiating Circular Polarization



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ประจำปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง **สายอากาศตัวสะท้อนทรงกระบอกที่แพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์วงกลม**

**A Cylindrical Reflector Antenna Radiating Circular Polarization**

ผู้จัดทำ

1. นายโชนิตซ์ ทักษารักษ์ 48015004

2. นายนายศรชัย พรหมสิงห์ 48015035

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ.ดร.สมพล โกศลวิตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศตัวสะท้อนทรงกระบอกที่แพร่กระจายคลื่น  
แบบโพลาไรซ์วงกลม

**A Cylindrical Reflector Antenna Radiating Circular  
Polarization**

ผู้จัดทำ นายโมนิตซ์ ทิมชรักษ์ 48015004

นายนายศรัชชัย พรหมสิงห์ 48015035

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สมผล โกศลวิตร

ผศ.ดร.ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

**บทคัดย่อ**

โครงการนี้เป็นงานนำการศึกษา คำนวณ วิเคราะห์ ออกแบบ สร้างและทดสอบสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก โดยจะศึกษารูปร่างและมุมของตัวป้อนไดโพลแบบไขว้กับตัวสะท้อนทรงกระบอก เพื่อให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นแบบแบบทิศทางเดียวและมีการโพลาไรซ์แบบวงกลม และวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศอันได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อิมพีแดนซ์ โพลาไรซ์และแบนด์วิดท์ โดยสายอากาศที่นำเสนอนี้มีประโยชน์ในการใช้เป็นสายอากาศสำหรับการสื่อสารข้อมูลคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย

**Abstract**

This project is concerned about the study, calculation, analysis, design, fabrication and measurement of cylindrical reflector antenna. The influences from various structure and angle of feeding system of crossed dipole inside cylindrical reflector are studied to obtain the most suitable feeding configuration. The analysis of antenna characteristics such as radiation pattern, impedance, polarization and bandwidth is also carried out. The proposed antenna is very useful for the application of wireless LAN communications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สมผล โกศลวิตร ซึ่งให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือในโครงการนี้มาโดยตลอดนอกจากนี้ ยังได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจาก ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ในด้านอุปกรณ์และให้ความกรุณาห้องเพื่อ ดำเนินการทดลองอย่างเป็นผลสำเร็จโดยที่สุด

ขอขอบคุณ คุณ กิตติศักดิ์ แพบัว ในการแนะนำเทคนิคและวิธีใช้โปรแกรม CST เพื่อใช้ในการ คำนวณค่าต่างๆ และ สมาชิกโครงการสายอากาศทุกท่าน ให้คำปรึกษาและข้อคิดที่ดีในการทำโครงการนี้ พร้อมทั้งยังให้ความช่วยเหลือในการทดสอบชิ้นงาน นอกจากนี้ทุกคนที่ยังไม่ได้กล่าวถึงในห้องปฏิบัติการ ไร่ สายที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือในโครงการนี้ ให้ลุล่วงไปได้ด้วยดีเสมอมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา	2
1.5 เนื้อหาของโครงการ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการ</b>	
2.1 ทฤษฎีพื้นฐาน	4
2.1.1 บทนำ	4
2.1.2 ธรรมชาติการทำงานของสายอากาศ	4
2.1.3 การวิเคราะห์ด้วยสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation)	5
2.2 พารามิเตอร์ของสายอากาศ	7
2.2.1 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)	7
2.2.2 ความหนาแน่นของกำลังงานที่แพร่กระจาย	13
2.2.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น 4 (Radiation Intensity)	14
2.2.4 ค่าการชี้ทิศทางสูงสุด (Directivity)	15
2.2.5 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง (Directional Patterns)	15
2.2.6 อัตราการขยายของจานรับสัญญาณ (Gain)	17
2.2.7 ประสิทธิภาพของสายอากาศ	19
2.2.8 ประสิทธิภาพของลำคลื่น	19
2.2.9 การโพลาไรซ์ (Polarization)	20
2.2.10 อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)	25
2.2.11 ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	29
2.3 สายส่งทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบของวงจร	30
2.3.1 เมื่อปลายสายส่งต่อลัดวงจร	30
2.3.2 เมื่อปลายสายต่อแบบเปิดวงจร	31
<b>บทที่ 3 การคำนวณการสร้าง และการวัดคุณสมบัติสายอากาศ</b>	
3.1 การออกแบบสายอากาศ	33
3.1.1 Semi Rigid, Coaxial	33
3.1.2 Cross Dipole	34
3.1.3 Phase Shifter	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.4 Cylindrical Reflector	36
3.2 ผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรม CST- Microwave Studio	36
3.2.1 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	36
3.2.2 โพลาริซชันของสายอากาศ	38
3.2.3 ค่า Return Loss ของสายอากาศ	38
3.2.4 Impedance ของสายอากาศ	40
3.3 การวัดคุณสมบัติของสายอากาศ	40
3.3.1 การวัด VSWR Impedance และ Return Loss ของสายอากาศ	41
3.3.2 การวัดแพทเทิร์นสายอากาศ	44
3.3.3 การหาอัตราขยายของสายอากาศ	49
<b>บทที่ 4 การประเมินประสิทธิภาพโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE</b>	
4.1 บทนำ	50
4.2 มาตรฐานเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11	50
4.3 อุปกรณ์ที่ใช้กับเครือข่ายไร้สาย	52
4.4 คุณสมบัติของอุปกรณ์ในเครือข่ายไร้สาย	53
4.5 พื้นฐานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11	56
4.5.1 โทโปโลยี (Topology)	56
4.5.2 การควบคุมการเข้าถึงสื่อ (Medium Access Control)	56
4.5.3 รูปแบบเฟรม	57
4.5.4 ชั้นสื่อสารกายภาพ	58
4.5.5 ค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุด	59
4.6 ระยะเวลาบริการสูงสุด	59
4.7 สรุป	61
<b>บทที่ 5 การประเมินประสิทธิภาพ และผลการทดสอบ</b>	
5.1 บทนำ	62
5.2 การทดสอบประสิทธิภาพ	62
5.2.1 การวัดกำลังงาน	63
5.2.2 การทดสอบวิสัยสามารถ	63
5.3 ระยะเวลาบริการ	65
5.4 ค่าวิสัยสามารถ	66
5.5 สรุป	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

- |                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 6.1 บทนำ                         | 69 |
| 6.2 สรุปเนื้อหาโดยรวม            | 69 |
| 6.3 ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา | 70 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	การแผ่พลังงานจากสายอากาศ	5
รูปที่ 2.2	ระบบ โคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	8
รูปที่ 2.3	รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบทิสทรงรอบตัว	9
รูปที่ 2.4	แพทเทอร์นหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร	10
รูปที่ 2.5	แพทเทอร์นการแพร่กระจายในแบบลิเนียร์	11
รูปที่ 2.6	การแบ่งบริเวณสนามจากสายอากาศ	12
รูปที่ 2.7	มุมตันของลำคลื่นซึ่งมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่สมมาตรกันและสมมาตรกัน	16
รูปที่ 2.8	การหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระนาบและวงรีโพลาริเซชัน	20
รูปที่ 2.9	การโพลาริเซชันเชิงเส้นแนวนอนและแนวตั้ง	21
รูปที่ 2.10	การโพลาริเซชันแบบวงกลม	22
รูปที่ 2.11	การโพลาไรเซชันแบบวงรี	23
รูปที่ 2.12	หน่วยเวกเตอร์โกลาไรเซชันของคลื่นและสายอากาศ	24
รูปที่ 2.13	สายอากาศส่งและวงจรสมมูลย์	25
รูปที่ 2.14	สายอากาศรับและวงจรสมมูลย์	28
รูปที่ 2.15	การเปลี่ยนแปลงของรีแอกแตนซ์ตามสายส่ง	31
รูปที่ 2.16	การเปลี่ยนแปลงของรีแอกแตนซ์ตามสายส่งซึ่งปลายสายต่อแบบเปิดวงจร	32
รูปที่ 2.17	อิมพีแดนซ์ของสตับทั้งแบบปลายลัดวงจรและแบบปลายเปิด	32
รูปที่ 3.1	ลักษณะของ Semi Rigid Coaxial	34
รูปที่ 3.2	รูปแบบ Cross Dipole และ Phase Shifter	34
รูปที่ 3.3	โครงสร้างสายอากาศตัวสะท้อนทรงกระบอกที่แพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริเซชันวงกลม	36
รูปที่ 3.4	การแพร่กระจายคลื่นและอัตราการขยายสายอากาศโดยรวม	36
รูปที่ 3.5	การแพร่กระจายคลื่นและอัตราการขยายสายอากาศโดยพิจารณาเฉพาะด้านซ้าย	37
รูปที่ 3.6	การแพร่กระจายคลื่นและอัตราการขยายสายอากาศโดยพิจารณาเฉพาะด้านขวา	37
รูปที่ 3.7	ค่า Axial Ratio ที่บริเวณด้านหน้าของสายอากาศ	38
รูปที่ 3.8	ค่า Return Loss ที่ความถี่ต่าง ๆ	39
รูปที่ 3.9	Impedance ของสายอากาศ	40
รูปที่ 3.10	VSWR ของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอกที่มีการโพลาริเซชันแบบวงกลม	42
รูปที่ 3.11	Impedance ของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอกที่มีการโพลาริเซชันแบบวงกลม	43
รูปที่ 3.12	การสะท้อนกลับของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอกที่มีการโพลาริเซชันแบบวงกลม	43
รูปที่ 3.13	การวัดแพทเทอร์นของสายอากาศ	44
รูปที่ 3.14	รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 2.45 GHz	46
รูปที่ 3.15	แสดงผลการวัดค่า Axial Ratio ที่ความถี่ 2.45 GHz	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 มาตรฐาน IEEE 802.11 ในมาตรฐาน IEEE 802	56
รูปที่ 4.2 เฟรมชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อ	57
รูปที่ 4.3 กลุ่มบริการพื้นฐาน (BBS) กลุ่มบริการขยาย (ESS) และระบบกระจาย (DS)	57
รูปที่ 4.4 ปรากฏการณ์การซ่อนตัวในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย	58
รูปที่ 4.5 พร็อบเบิล PLCP ส่วนหัว PLCP และ MPDU	58
รูปที่ 4.6 แผนผังเวลาการส่งข้อมูล IEEE 802.11	59
รูปที่ 4.7 การทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก ในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย	60
รูปที่ 5.1 สถานที่ทดสอบ และอุปกรณ์ทดสอบ	62
รูปที่ 5.2 การทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศ	63
รูปที่ 5.3 กำลังที่รับได้ที่ระยะ 100 เมตร	64
รูปที่ 5.4 ค่าวิสัยสามารถที่ระยะ 100 เมตร	64
รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบค่าวิสัยสามารถระหว่างสายอากาศไดโพล และสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก	65
รูปที่ 5.6 การตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อโดยใช้คำสั่ง Ping	66
รูปที่ 5.7 ผลทดสอบค่าวิสัยสามารถกรณีสายอากาศสถานีฐานคือ สายอากาศไดโพล และตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก	67
รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบระดับสัญญาณสายอากาศขั้วคลื่นวงกลมแบบวางตั้งและวางนอน	67
รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบค่าวิสัยสามารถสายอากาศขั้วคลื่นวงกลมแบบวางตั้งและวางนอน	68

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างโหมคการเดินทางของคลื่นกับความถี่ cut-off	35
ตารางที่ 3.2 ค่า Power ที่วัดได้จากการทดลองเมื่อวางสายอากาศในระนาบ E-plane	45
ตารางที่ 3.3 ค่า Power ที่วัดได้จากการทดลองเมื่อทำการวัดค่า Axial Ratio	47
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณระยะบริการสูงสุด	60
ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบ	63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การใช้งานโครงข่ายไร้สายแบบจุดต่อจุดมีแนวโน้มมากขึ้นเช่น การเชื่อมโยงโครงข่ายท้องถิ่น (LAN) ระหว่างอาคารเข้าด้วยกันโดยใช้โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) หรือการให้บริการโครงข่ายเฉพาะที่ การใช้งานดังกล่าวต้องการสายอากาศที่สามารถชี้ทิศทางไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้ เช่น สายอากาศที่มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของสายอากาศมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพนี้ แสดงถึงประสิทธิภาพของสายอากาศ ดังนั้น สามารถทำการประเมินประสิทธิภาพสายอากาศในพจน์ของระยะบริการสูงสุด (Maximum Link Distance) และค่าวิสัยสามารถ (Throughput) ได้ การประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศเพื่อหาผลกระทบต่อประสิทธิภาพโครงข่ายก่อนนำไปใช้งานนั้นมีความจำเป็นต่อการออกแบบ ทั้งนี้เพราะ สามารถนำไปใช้ในการทำนายคุณภาพการให้บริการ (Quality of Service) ของโครงข่ายได้ การประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายในโครงการนี้ได้ นำเสนอสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก ที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลม และใช้สายอากาศแบบไดโพลเป็นสายอากาศอ้างอิง สายอากาศนี้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบจุดต่อจุด เพราะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว อีกทั้งมีการ โพลาริซแบบวงกลม และมีอัตราการขยายสูง สายอากาศสร้างง่าย โครงสร้างไม่ซับซ้อน การหาระยะบริการสูงสุดทำได้โดยใช้วิธีแปลงค่าอัตราการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นสูงสุด ที่ระบบยอมรับได้ ให้มีหน่วยเป็นระยะทาง ซึ่งความแม่นยำของการทำนายขึ้นอยู่กับทางเลือกแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น สำหรับค่าวิสัยสามารถนั้น แสดงถึงคุณภาพการให้บริการของโครงข่าย ซึ่งมีผลต่อการออกแบบโปรแกรมประยุกต์ที่ใช้ในโครงข่ายไร้สาย

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

โครงการนี้นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพสายอากาศในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ซึ่งสายอากาศที่ใช้ในการทดสอบคือสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก ที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลม การประเมินประสิทธิภาพ พิจารณาจากผลการคำนวณและผลการทดสอบค่าระยะบริการสูงสุด และค่าวิสัยสามารถของโครงข่ายที่ได้จากสายอากาศ โดยนำผลการคำนวณและทดสอบนี้ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากสายอากาศไดโพล ซึ่งผลการศึกษาศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการออกแบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

### 1.3 ขอบเขตของโครงการงาน

โครงการนี้ได้เสนอการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก ที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลม ในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบจุดต่อจุด ภายนอกอาคารที่มีเส้นในแนวระดับสายตา (Line of Sight) ระหว่างสถานีฐานและลูกข่าย ในการวิเคราะห์ระยะบริการสูงสุดของโครงข่ายนั้น ใช้แบบจำลองหลายแบบได้แก่ แบบจำลองอากาศว่าง แบบจำลองสองรังสี แบบจำลองฮาดะ และแบบจำลองความชันคู่เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำ ของระยะบริการสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองแต่ละแบบ และค่าวิสัยสามารถของโครงข่ายที่ได้จากสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก และสายอากาศไดโพล การทดสอบกำหนดให้โครงข่ายใช้อัตราบิตที่ 54 Mbps ความสูงสายอากาศที่สถานีฐานและลูกข่ายมีค่าเท่ากับ 1.5 m จากนั้นทำการประเมินประสิทธิภาพสายอากาศจากผลที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบ โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก ที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลม กับผลที่ได้กับสายอากาศไดโพล

### 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาเริ่มจากการศึกษาและการออกแบบสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก ที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลม เริ่มจากการหาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ ที่ให้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น ค่าสภาพเงาเงจทิศทาง ค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสม การเปรียบเทียบการคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio จากนั้นศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเดินทางผ่านช่องสื่อสาร เช่น การทำนายการสูญเสียการแพร่กระจายด้วยแบบจำลองต่าง ๆ เพื่อใช้คำนวณหาระยะบริการสูงสุด การอธิบายการเกิดการจางหาย ได้แก่ การแจกแจงแบบเรย์ลี (Rayleigh Distribution) การแจกแจงแบบไรซ์ (Rice Distribution) และค่าวิสัยสามารถ แล้วทำการทดสอบหาระยะบริการและค่าวิสัยสามารถเพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณเพื่อยืนยันการทำนายทางทฤษฎี และใช้สรุปการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศที่ใช้ในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบจุดต่อจุด

### 1.5 เนื้อหาของโครงการงาน

โครงการนี้นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอกที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลม ที่ประยุกต์ใช้ในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย มีเนื้อหาทั้งหมด 6 บท ซึ่งแต่ละบทมีรายละเอียดดังนี้

**บทที่ 1** กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของโครงการขอบเขตการวิจัย ขั้นตอนการศึกษาและบทสรุปเนื้อหาของโครงการในแต่ละบท

**บทที่ 2** เป็นการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศอันได้แก่ การวิเคราะห์ด้วยสมการแมกเวลล์ และพารามิเตอร์ต่างเกี่ยวกับสายอากาศ เช่น แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่น อัตราขยายสายอากาศ ค่าสภาพเงาเงจทิศทาง การโพลาริซของคลื่น เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศ

**บทที่ 3** กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก ที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์วงกลม โดยเริ่มจากทฤษฎีและการออกแบบโดย Software ( CST Microwave Studio) จากนั้นทำการสร้างและทดสอบ เพื่อวัดค่าคุณสมบัติต่าง ๆ และทำการปรับปรุงสายอากาศดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพที่ดี และเหมาะสำหรับการสื่อสารไร้สายแบบจุดต่อจุด

**บทที่ 4** แสดงการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยเริ่มจากพื้นฐานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โทโปโลยี ( Topology) การควบคุมการเข้าถึงสื่อ (Medium Access Control) รูปแบบเฟรม (Frame Format) ชั้นสื่อสารกายภาพ ( Physical Layer) ค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุด การหาระยะบริการสูงสุดและการคำนวณ ค่าวิสัยสามารถ

**บทที่ 5** แสดงการทดสอบค่าระยะบริการสูงสุดและค่าวิสัยสามารถของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยใช้สายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก ที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์วงกลม และสายอากาศไดโพล เป็นสายอากาศสถานีฐาน วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณ และผลที่ได้จากการทดสอบ

**บทที่ 6** สรุปผลการศึกษาทั้งหมด และข้อเสนอแนะ แนวทางการพัฒนา การประเมินประสิทธิภาพสายอากาศในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย



## บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการ

### 2.1 ทฤษฎีพื้นฐาน

#### 2.1.1 บทนำ

การออกแบบสายอากาศจำเป็นต้องพิจารณาโครงสร้างซึ่งมักจะถูกสร้างจากวัสดุที่เป็นตัวนำที่ดี ที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้มีรูปร่างและขนาดที่จะแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตามทฤษฎีกระแสซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นสายอากาศจึงเป็นโครงสร้างซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปมักจะใช้สายส่งกำลังหรือท่อนำคลื่น ซึ่งอาจมีรูปร่างแตกต่างกันมากมาย อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติโครงสร้างซึ่งมีรูปร่างที่ทำได้ง่ายและประหยัด และมีประสิทธิภาพดีในการใช้งาน จะได้รับความนิยมมากกว่า ในการพิจารณาถึงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศอย่างน้อยที่สุดสายอากาศจะต้องมีขนาดเปรียบเทียบได้กับความยาวคลื่นที่จะแพร่กระจาย สายอากาศที่นิยมใช้กันอย่างทั่วไปได้แก่ สายอากาศไดโพล ซึ่งมีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ซึ่งประกอบด้วยท่อนตัวนำสองท่อน แต่ละท่อนยาวเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น ต่อเข้ากับสายส่ง

โดยปกติแล้วการที่ คลื่นจะสามารถแพร่กระจายผ่านตัวนำจำเป็นต้องอาศัยตัวแปรหลายอย่าง แต่ถ้าเรารู้ความหนาแน่นของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศเราจะสามารถคำนวณหาสนามที่ แพร่กระจายได้แต่การหาค่าดังกล่าวไม่ใช่เรื่องง่าย เราจำเป็นต้องศึกษาถึงทฤษฎีที่ได้ค้นพบจากนักวิทยาศาสตร์ในอดีต เช่น จากสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations) เพื่อจะหาสนามที่แพร่กระจาย จากกระแสที่ได้มีการแจกแจงรูปร่างใด ๆ ได้โดยรวมสนามที่ถูกสร้างจากแต่ละเอเลเมนต์ของกระแสเข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไปในการคำนวณหาสนามที่แพร่กระจายจากสายอากาศ

#### 2.1.2 ธรรมชาติการทำงานของสายอากาศ

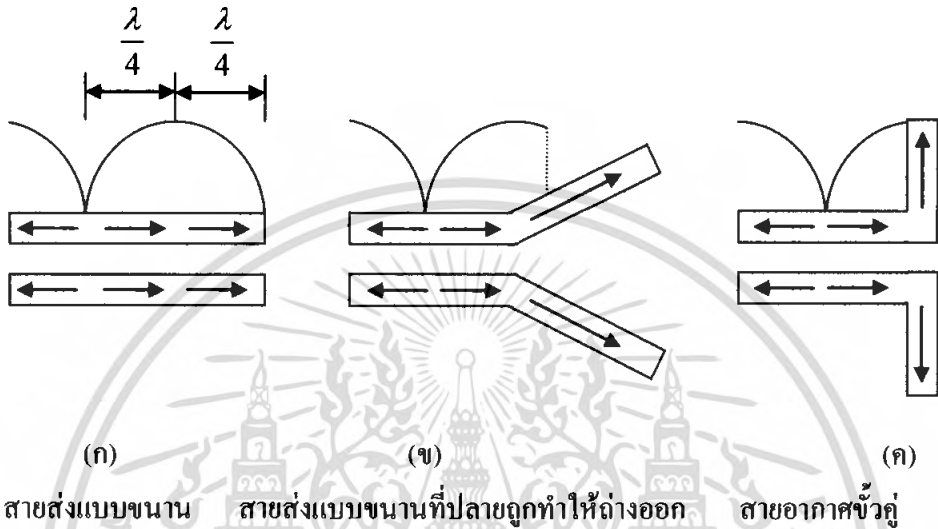
เมื่อสายอากาศทำงานในภาครับนั้น กลไกการทำงานเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปพลังงานจากลักษณะของคลื่นในปริภูมิเสรีให้เป็นคลื่นบังคับวิธีสามารถเข้าใจได้โดยง่าย ด้วยการพิจารณาว่าคลื่นในปริภูมิเสรีที่ตกกระทบบนสายอากาศเหนี่ยวนำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศอันเป็นผลสืบเนื่องให้มีการไหลของสัญญาณเมื่อมีการต่อขั้วดังกล่าวเข้ากับอุปกรณ์รับสัญญาณ

ในกรณีที่สายอากาศทำงานในภาคส่ง สิ่งที่เกิดขึ้นคือ พลังงานในลักษณะของคลื่นบังคับวิธีได้รับการแปลงรูปไปเป็นพลังงานในลักษณะของคลื่นในปริภูมิเสรี การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นในลักษณะที่มีการเคลื่อนย้ายของพลังงานจากสายอากาศเข้าสู่บริเวณปริภูมิเสรี โดยปราศจากการนำหรือการพา และมีใช้การแพร่เนื่องจากมีการเปลี่ยนรูปพลังงาน ดังนั้นจึงเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวที่เกิดขึ้นว่าการแผ่พลังงาน

สิ่งที่น่าสนใจเกี่ยวกับการแผ่พลังงานก็คือ กลไกการเกิดขึ้นของปรากฏการณ์ เมื่อพิจารณาการทำงานของสายอากาศเส้นลวด จะพบว่าเมื่อเริ่มต้นด้วยการป้อนกำลังงานคลื่นให้ที่ขั้วของสายอากาศ ในจังหวะนี้เท่ากับการกระตุ้นให้อนุภาคมีประจุเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง เมื่ออนุภาคดังกล่าวเคลื่อนที่ไปถึงปลายทางของเส้นลวดก็จะถูกหน่วงให้หยุดและกระดอนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงที่อนุภาคมีประจุถูกเร่งและหน่วงนี้เองจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงาน ซึ่งผลลัพธ์ก็คือการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การถูกเร่งนั้นเกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วยแหล่งพลังงานที่ต่ออยู่ที่หัวของสายอากาศ ส่วนการหน่วงเป็นผลจากแรงต้านภายในเนื่องจากการสะสมตัวของประจุที่ปลายสายอากาศ ดังนั้นถ้าหากสามารถทำให้อนุภาคมีประจุถูกเร่งและหน่วง ไม่ว่าจะด้วยการทำให้มีอิมพีแดนซ์ที่ไม่ต่อเนื่องหรือการคัทหรือการหักลดให้เอง ก็จะส่งผลให้เกิดการแผ่พลังงานในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า รูปที่ 2.2 แสดงกรณีต่างๆของการเกิดขึ้นของการแผ่พลังงานจากสายอากาศเส้นลวด



รูปที่ 2.1 การแผ่พลังงานจากสายอากาศ

2.1.3 การวิเคราะห์ด้วยสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation)

โดยพื้นฐานสนามที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นแบบไซน์ซอยคอลล (Sinusoidal) ดังนั้นจะวิเคราะห์ตามแบบเฟเซอร์ทั่ว ๆ ไปซึ่งไม่แสดงเฟคเตอร์ที่แสดงการแปรผันกับเวลา  $e^{j\omega t}$  จะแสดงกระแสและสนามเป็นเวกเตอร์ฟังก์ชันของตำแหน่งโคออดิเนท และโดยทั่วไปแล้วแต่ละส่วนประกอบจะเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนซึ่งประกอบด้วยส่วนของค่าจริงและส่วนของค่าจินตภาพ เช่นรูปแบบต่อไปนี้

$$\vec{E}(\vec{r}) = E_x(\vec{r})\vec{a}_x + E_y(\vec{r})\vec{a}_y + E_z(\vec{r})\vec{a}_z \tag{2.1}$$

ในโคออดิเนทวงรีเหลี่ยม แต่ละส่วนประกอบ เช่น  $E_x$  เป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนอยู่รูป  $E_{xr} + jE_{xi}$  ซึ่ง  $E_{xr}$  เป็นค่าจริง และ  $E_{xi}$  เป็นค่าจินตภาพ ถ้าต้องการรู้สนามไฟฟ้าในทางกายภาพจริง ๆ จะหาได้โดยคูณ  $\vec{E}(\vec{r})$  ด้วย  $e^{j\omega t}$  แล้วหาค่าจริงของผลคูณนี้ออกมา นั่นคือ

$$E(\vec{r}, t) = \text{Re } \vec{E}(\vec{r})e^{j\omega t}$$

จะได้

$$E_x(\vec{r}, t) = E_{xr}(\vec{r}) \cos \omega t - E_{xi} \sin \omega t \tag{2.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับส่วนประกอบของ  $x$  ของสนามในทางกายภาพ

ปริมาณสนามที่ปริมาณที่เราสนใจได้แก่ ความเข้มสนามไฟฟ้า  $\vec{E}(\vec{r})$  ความเข้าสนามแม่เหล็ก  $\vec{H}(\vec{r})$  ความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้า  $\vec{D}(\vec{r})$  และความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก  $\vec{B}(\vec{r})$  สนามเหล่านี้ตลอดจนต้นกำเนิดของสนาม คือ ความหนาแน่นของกระแส  $\vec{J}(\vec{r})$  และความหนาแน่นประจุ  $\rho(\vec{r})$  สัมพันธ์กันด้วยสมการแมกซ์เวลล์ ตามสมการ

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \vec{B} \quad (\text{กฎของฟาราเดย์}) \quad (2.3 \text{ ก})$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \vec{D} + \vec{J} \quad (\text{กฎทั่วไปของแอมแปร์}) \quad (2.3 \text{ ข})$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{กฎของเกาส์}) \quad (2.3 \text{ ค})$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{ความต่อเนื่องของเส้นแรงแม่เหล็ก}) \quad (2.3 \text{ ง})$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = -j\omega \rho \quad (\text{กฎความต่อเนื่อง}) \quad (2.3 \text{ จ})$$

ในฟรีสเปซ (free space) มีความสัมพันธ์ว่า

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.4)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  ฟารัดต่อเมตร เป็นค่าเพอร์มิตติวิตี (Permittivity) ของ free space และ  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  เฮนรีต่อเมตร เป็นค่าเพอร์มิอับิลิตี (Permeability) ของ free space ในตัวกลางไดอิเล็กตริกมีการสูญเสียพลังงานซึ่งมีค่าเพอร์มิตติวิตี  $\epsilon$  และค่าความนำ  $\sigma$  จะมีกระแส (Conduction current)  $\vec{J}_c$  ไหลมีค่าเท่ากับ  $\sigma \vec{E}$  ถ้ารวมกระแสนำ  $\vec{J}_c$  นี้เข้ากับกระแสที่เราป้อนเข้าไป  $\vec{J}$  จะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= (j\omega\epsilon + \sigma) \vec{E} + \vec{J} \\ &= j\omega\left(\epsilon + \frac{\sigma}{j\omega}\right) \vec{E} + \vec{J} \end{aligned} \quad (2.6)$$

อาจเรียกเทอม  $\epsilon + \frac{\sigma}{j\omega}$  ว่าเป็นค่าเพอร์มิตติวิตีเชิงซ้อน โดยทั่วไปสารไดอิเล็กตริกจะมีค่าการสูญเสียพลังงานรวมอยู่นอกเหนือไปจากค่าความนำ ดังนั้นแม้ว่า  $\sigma$  จะเป็นศูนย์ แต่ก็ยังเป็นค่าเชิงซ้อนอยู่ในรูป  $\epsilon' - j\epsilon''$  เมื่อไรก็ตามที่เราต้องเกี่ยวข้องกับสารไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียพลังงาน เราจะใช้ค่าเพอร์มิตติวิตีเชิงซ้อน และคิดการสูญเสียจากการนำกระแสว่าเป็นส่วนของค่าจินตภาพ  $\epsilon''$

คำตอบของสมการแมกซ์เวลล์ จะยังไม่สมบูรณ์ จนกว่าจะได้ใส่เงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมเข้าไปสำหรับในกรณีสนามที่มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลา เงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมได้แก่

$$\tilde{n}x(\tilde{H}_2 - \tilde{H}_1) = \tilde{J}_s \quad (2.7)$$

$$(\tilde{E}_2 - \tilde{E}_1)x\tilde{n} = \tilde{M}_s \quad (2.8)$$

เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ผิว  $J_s$  และกระแสแม่เหล็กที่ผิว  $M_s$  ไหลอยู่ในบริเวณรอยต่อของตัวกลางที่เป็นแบบโฮโมจีเนียส (Homogeneous) 2 ชนิด ซึ่งมีพารามิเตอร์เป็น  $\epsilon_1, \mu_1, \sigma_1$  และ  $\epsilon_2, \mu_2, \sigma_2$  ตามลำดับ  $M_s$  จะเป็นศูนย์ นอกเสียจากจะใช้แผ่นกระแสแม่เหล็กสมบูรณ์ และหน่วยตั้งฉากที่ผิว  $\tilde{n}$  จะชี้จากตัวกลาง 1 ไปยังตัวกลางที่ 2 การคูณแบบครอส (Cross product) ของเวกเตอร์กับหน่วยตั้งฉาก จะทำให้เกิดเป็นส่วนประกอบของสนามในแนวสัมผัสกับรอยต่อและสมการข้างบนสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$H_{\tan 2} = H_{\tan 1} + J_s \quad (2.9)$$

$$E_{\tan 2} = E_{\tan 1} + M_s \quad (2.10)$$

ถ้าด้านหนึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ เงื่อนไขขอบเขตจะกลายเป็นดังต่อไปนี้

$$H_{\tan} = J_s \quad (2.11)$$

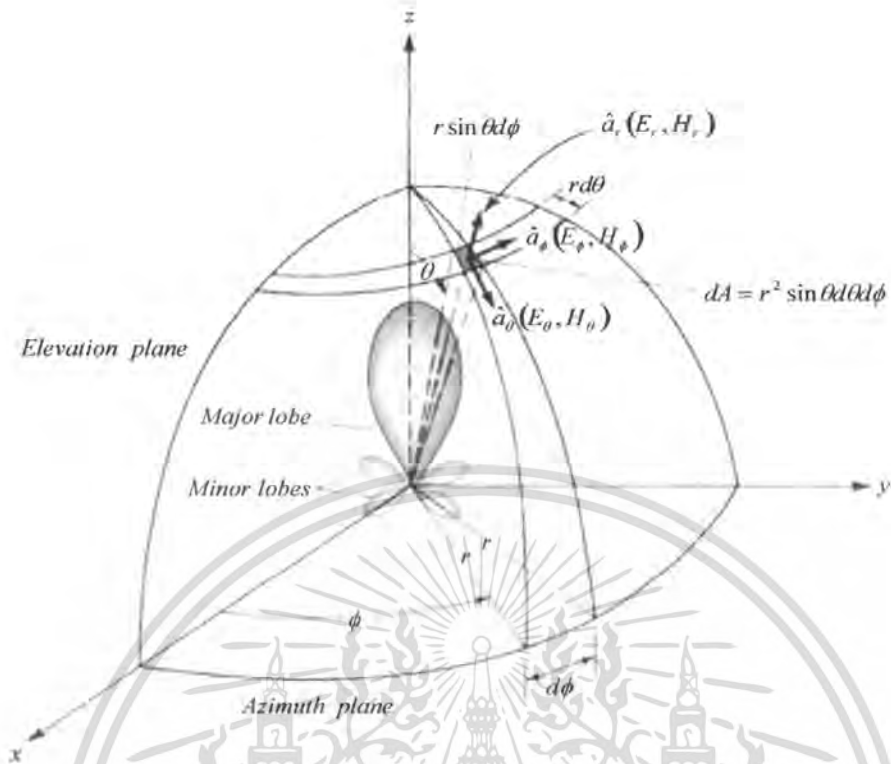
$$E_{\tan} = 0 \quad (2.12)$$

เงื่อนไขขอบเขตของสนามแม่เหล็กในแนวสัมผัส สำหรับกรณีทั่วไปแสดงไว้ในรูปสำหรับในกรณีที่ตัวนำข้างหนึ่งเป็นตัวนำสมบูรณ์ได้แสดงไว้ในรูป ฟังสังเกตว่าสนามทั้งหมดในสมการของเงื่อนไขขอบเขต ถูกคำนวณที่รอยต่อ และสมการนี้ใช้ได้ตลอดทุกจุดตลอดแนวรอยต่อ

## 2.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้งานสายอากาศ

### 2.2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศ (Radiation Pattern) หรือรูปแบบสายอากาศ มีความหมายคือ ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ หรือ แสดงโดยเส้นที่สามารถแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติการแพร่กระจายของสายอากาศตามฟังก์ชันของสเปซโคออร์ดิเนต (Space Coordinates) ส่วนมากในกรณีของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนี้จะกำหนดการคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far-Field) และแสดงให้เห็นเช่นเดียวกับฟังก์ชันตามทิศทางของ โคออร์ดิเนต คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วยกำลังความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็ก (Flux), ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity), ความเข้มของสนาม (Field Strength), เฟส (Phase), หรือ โพลาริเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่



รูปที่ 2.2 ระบบโคออร์ดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

จากรูปจะเป็นการแสดงระบบโคออร์ดิเนตที่ใช้ในการแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นสำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่า แบบรูปกำลังงาน (Power Pattern) ของสายอากาศและกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆที่มีรัศมีคงที่เรียกว่า สนามการแพร่กระจายคลื่น (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น

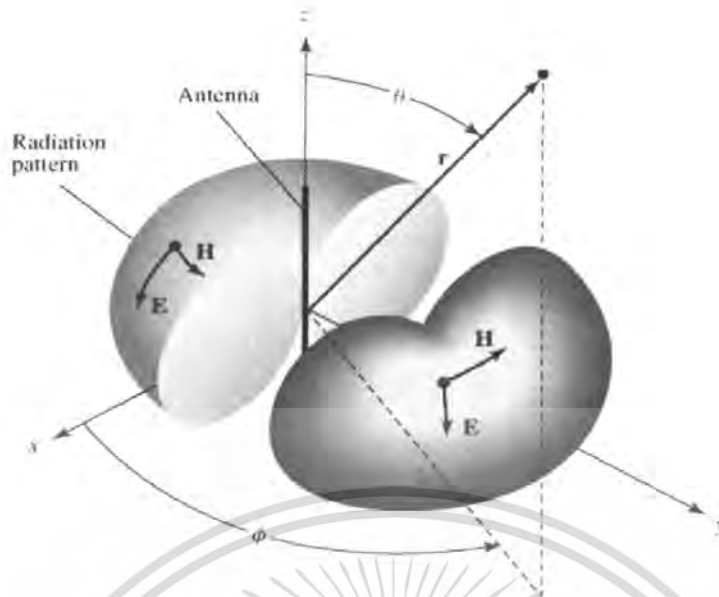
#### 2.2.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายแบบไอโซทรอปิกแบบทิศทางและแบบทิศทางรอบตัว

(Isotropic, Directional, and Omnidirectional Pattern)

ตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก (Isotropic Radiation) คือ สายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้นให้มีการแพร่กระจายคลื่นเท่าๆกันในทุกทิศทาง แม้ว่ามันจะเป็นแค่แนวความคิดและสามารถที่จะเป็นจริงได้ในทางกายภาพ แต่ก็มักจะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติและทิศทางของสายอากาศ

สายอากาศทิศทาง (Directional Antenna) คือสายอากาศที่มีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นหรือรองรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างของสายอากาศที่มีคุณสมบัตินี้คือ สายอากาศแบบทิศทางรอบตัว (Omnidirectional Antenna) คุณสมบัติของสายอากาศแบบนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

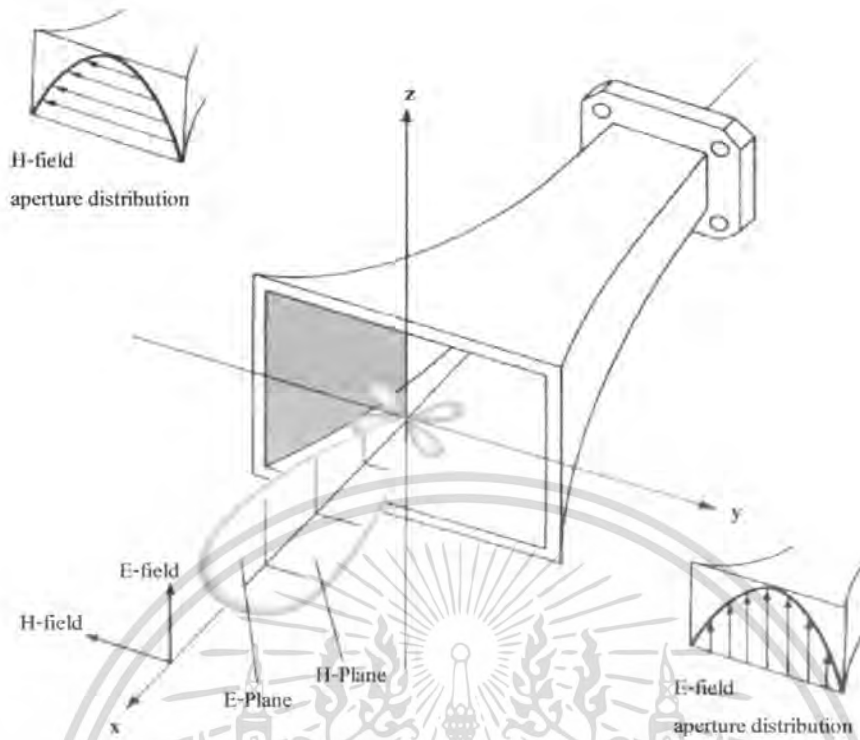


รูปที่ 2.3 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบทิศทางรอบตัว

จากรูปจะเห็นได้ว่ารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบนี้ ไม่มีทิศทางในระนาบอาซิมุทหรือระนาบมุมกวาด (Azimuth Plane) [ $f(\phi), \theta = \pi/2$ ] แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบเอเลเวชันหรือมุมยก (Elevation Plane) [ $g(\theta), \phi = \text{ค่าคงที่}$ ] รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวนี้เป็นกรณีพิเศษของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบชี้ทิศทาง

#### 2.2.1.2 รูปแบบการกระจายคลื่นหลัก (Principal Pattern)

เรามักจะอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศ ในทอมของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นหลัก (Principal Pattern) ของสนามไฟฟ้า  $E$  และสนามแม่เหล็ก  $H$  สำหรับสายอากาศโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $E$  จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $H$  จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด



รูปที่ 2.4 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร

จากรูปเป็นการแสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นหลัก โดยมีระนาบ XZ (ระนาบเอเลเมนต์;  $\phi = 0$ ) เป็นระนาบ E หลักและมีระนาบ XY (ระนาบเอซิมุต;  $\theta = \pi/2$ ) เป็นระนาบ H หลัก

### 2.2.1.3 ลำคลื่นของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)

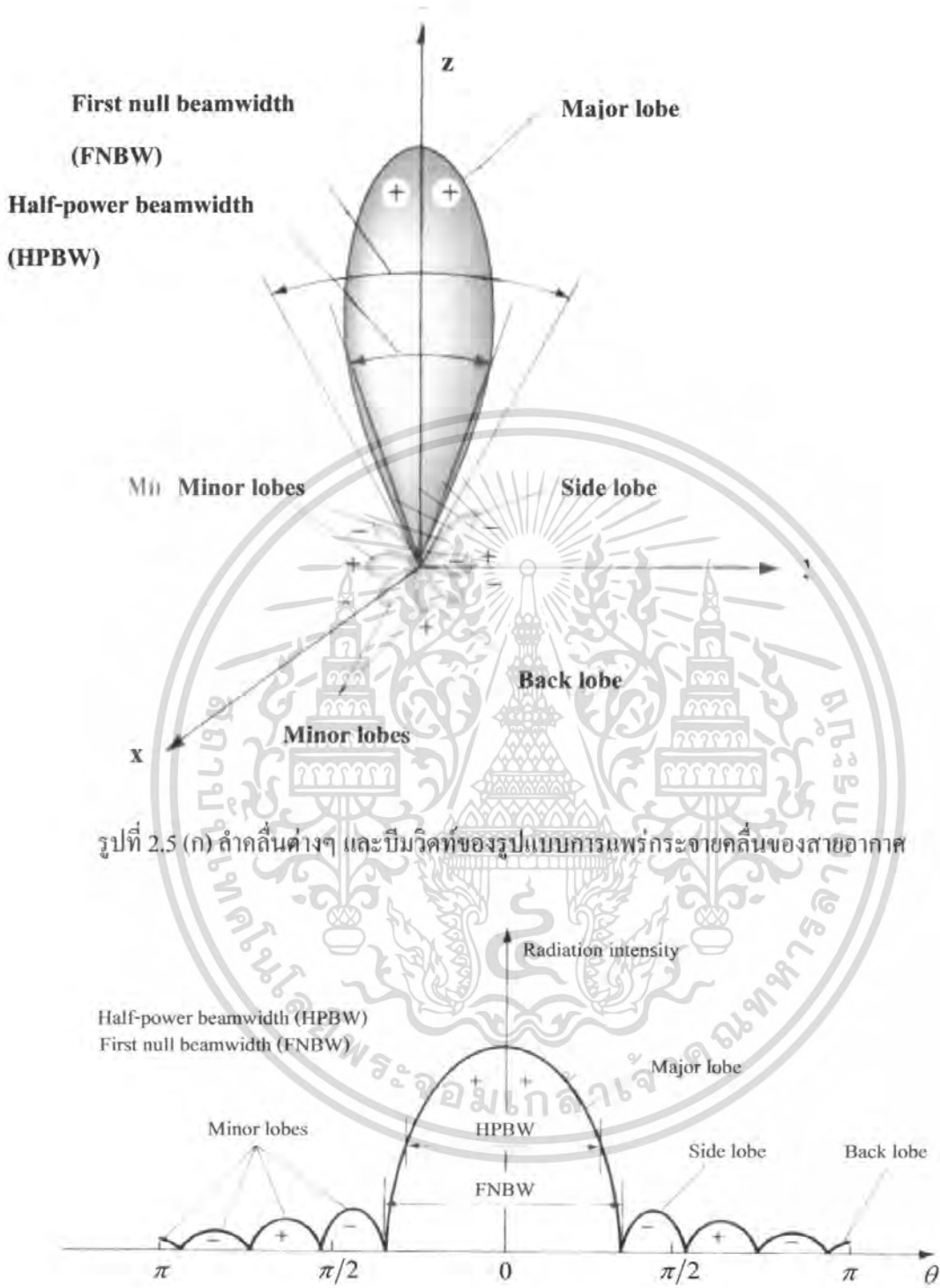
ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe) เป็นส่วนหนึ่งของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำรูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบสามมิติ ซึ่งสามารถแบ่งลำคลื่นเป็นแบบต่างๆดังนี้

ลำคลื่นหลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นที่อยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุดตามรูปที่ 2.4 มีลำคลื่นหลักอยู่ในทิศทาง  $\theta = 0$  สำหรับสายอากาศบางชนิดอาจมีลำคลื่นหลักมากกว่าหนึ่งลำคลื่น เช่นสายอากาศแยกลำคลื่น (Split-beam Antenna)

ลำคลื่นย่อย (Minor Lobe) คือลำคลื่นอื่นที่นอกเหนือจากลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นข้าง (Side Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่ติดอยู่กับลำคลื่นหลักและอยู่ในทิศทางของครึ่งวงกลมซีกเดียวกับลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นหลัง (Back Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับลำคลื่นหลัก ปกติแล้วลำคลื่นย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสายอากาศที่ดีจึงต้องกำจัดลำคลื่นเหล่านี้ ให้เหลือน้อยที่สุด ระดับของลำคลื่นย่อยมักจะแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นพลังงานในลำคลื่นที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นพลังงานในลำคลื่นหลัก ซึ่งเรียกว่าอัตราส่วนของไซด์โลบ (Side Lobe Level: SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของไซด์โลบน้อยกว่า  $-20$  dB ไม่วาทกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 (ก) ลำคลื่นต่างๆ และมีทิศทางของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

รูปที่ 2.5 (ข) รูปแบบการแพร่กระจายในแบบลิเนียร์

2.2.1.4 บริเวณต่างๆของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไปมักจะเป็นบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือสนามรีแอคทีฟ ระยะใกล้ (Reactive-Near Field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating - Near Field) และสนามกระจายระยะไกล (Far Field) ดังแสดงในรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บริเวณสนามแพร่กระจายระยะใกล้



$$R_1 = 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$$

$$R_2 = 2D^2/\lambda$$

รูปที่ 2.6 การแบ่งบริเวณสนามจากสายอากาศ

บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด และมีสนามเป็นชนิดแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่บริเวณนี้จะมีระยะทาง  $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$  จากผิวของสายอากาศเมื่อ  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่นและ  $D$  เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ

บริเวณสนามกระจายระยะใกล้เป็นบริเวณของสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกล โดยมีสนามที่แพร่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่

การกระจายของสนามตามมุมต่างๆนั้นแปรผันตามระยะทางจากสายอากาศ เมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้น ในบริเวณนี้จะมีระยะทาง  $0.62\sqrt{D^3/\lambda} \leq R \leq 2D^2/\lambda$

บริเวณสนามระยะไกลเป็นบริเวณสนามของสายอากาศ ซึ่งการแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่างๆไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศถ้าสายอากาศมีมิติที่ใหญ่ที่สุดเท่ากับ  $D$  บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง  $R$  มากกว่า  $2D^2/\lambda$  จากสายอากาศ

ในบริเวณนี้สามารถมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse Field) และการแพร่กระจายของสนามตามมุมต่างๆไม่ขึ้นกับระยะทาง ขอบในบริเวณดังกล่าวมีค่า  $R$  เท่ากับ  $2D^2/\lambda$  และขอบนอกมีค่าเป็นอนันต์

### 2.2.2 ความหนาแน่นกำลังงานการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Power Density)

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการส่งข่าวสารผ่านตัวกลางถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับพลังงานและกำลังงานไฟฟ้า โดยใช้ตัวความสัมพันธ์ดังกล่าวได้แก่ พอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น (Instantaneous Poynting Vector) ซึ่งมีสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\vec{W} = \vec{\xi} \times \vec{H} \quad 2.13$$

เมื่อ  $\vec{W}$  = พอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น ( $\text{W/m}^2$ )  
 $\vec{\xi}$  = ความเข้มของสนามไฟฟ้าชั่วขณะเวลานั้น ( $\text{V/m}$ )  
 $\vec{H}$  = ความเข้มสนามแม่เหล็กชั่วขณะ ( $\text{A/m}$ )

เนื่องจากพอยดิงเวกเตอร์มีความหมายแสดงถึงความหนาแน่นของกำลังงาน ดังนั้นกำลังงานทั้งหมดที่พุ่งตัดผ่านพื้นผิวปิดจะสามารถหาได้โดยการอินทิเกรตส่วนของพอยดิงเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิวทั้งหมดซึ่งเมื่อเขียนเป็นสมการจะได้

$$P = \iint_S \vec{W} \cdot d\vec{s} = \iint_S \vec{W} \cdot \vec{n} da \quad (2.14)$$

เมื่อ  $P$  = กำลังงานทั้งหมดชั่วขณะเวลานั้น ( $\text{W}$ )  
 $da$  = พื้นที่จวบวนพื้นที่ปิด ( $\text{m}^2$ )

ในกรณีของสนามที่แปรผันกับเวลามักจะหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นกำลังงานได้โดยการอินทิเกรตค่าพอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้นตลอดหนึ่งคาบ แล้วหารด้วยคาบเวลานั้นสำหรับสนามที่แปรผันกับเวลา ซึ่งกระจายเป็นฮาร์โมนิกในรูป  $e^{j\omega t}$  เมื่อกำหนดสนาม  $\vec{E}$  และ  $\vec{H}$  เป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเชิงซ้อนแล้วจะหาความสัมพันธ์กับค่า  $\vec{\xi}$  และ  $\vec{H}$  ชั่วขณะเวลาใดๆได้จาก

$$\vec{\xi}(x, y, z; t) = \text{Re}[\vec{E}(x, y, z)e^{j\omega t}] \quad (2.15)$$

$$\vec{H}(x, y, z; t) = \text{Re}[\vec{H}(x, y, z)e^{j\omega t}] \quad (2.16)$$

จากสมการ(2.15), (2.16) โดยอาศัย  $\text{Re}[\vec{E}e^{j\omega t}] = \frac{1}{2}[\vec{E}e^{j\omega t} + \vec{E}^*e^{-j\omega t}]$  และสมการ (2.13)

จะสามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\vec{W} = \vec{\xi} \times \vec{H} = \frac{1}{2}\text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}^*] + \frac{1}{2}[\vec{E} \times \vec{H}e^{2j\omega t}] \quad (2.17)$$

เทอมแรกของสมการที่ (2.17) ไม่เป็นฟังก์ชันของเวลาและเทอมที่สองมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นสองเท่าของความถี่ที่กำหนดให้ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของพอยดิงเวกเตอร์จึงสามารถที่จะหาได้เป็น

$$\vec{W}_{AV}(x, y, z) = [\vec{W}(x, y, z; t)]_{AV} = \frac{1}{2}\text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}^*] \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวประกอบ  $\frac{1}{2}$  ในสมการที่ (2.17) และ (2.18) เกิดขึ้นเพราะสนาม E และ H เป็นค่าสูงสุด จากสมการที่ (2.18) กำลังงานเฉลี่ยที่แพร่กระจายในอากาศ จะเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} P_{rad} &= P_{AV} \\ &= \oint_S \overline{W}_{rad} \cdot d\mathbf{s} \\ &= \frac{1}{2} \oint_S \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] \cdot d\mathbf{s} \end{aligned} \quad (2.19)$$

### 2.2.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)

คำจำกัดความของค่าว่าความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่กำหนดให้คือ กำลังงานที่แพร่ออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศเกี่ยวกับสนามระยะไกลความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นสามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่นและผลจากการยกกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.20)$$

เมื่อ  $U$  = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

$W_{rad}$  = ความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น ( $W/m^2$ )

ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้คือ

$$\begin{aligned} U(\theta, \phi) &= \frac{r^2}{2\eta} |E(r, \theta, \phi)|^2 \\ &= \frac{r^2}{2\eta} \left[ |E_\theta(r, \theta, \phi)|^2 + |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2 \right] \\ &= \frac{1}{2\eta} \left[ |E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right] \end{aligned}$$

เมื่อ  $E$  = ความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

$E_\theta, E_\phi$  = ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

$\eta$  = อินทริเนติกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้นในรูปแบบของการแพร่กระจายคลื่นของกำลังงานก็จะใช้เพื่อแสดงถึงความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นตลอดมุมตัน  $4\pi$  ทั้งหมดซึ่งจะได้

$$P_{rad} = \oint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.4 ค่าการชี้ทิศทางสูงสุด (Directivity)

ค่าการชี้ทิศทางในทิศทางที่กำหนดคือ อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งใช้สำหรับอ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศสำหรับใช้อ้างอิงนี้จะใช้ไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์ส (Isotropic Point Source)

ค่าการชี้ทิศทางสูงสุดคือ ค่าการชี้ทิศทางในทิศทางที่มีค่ามากที่สุดหรือค่าการชี้ทิศทางสูงสุดของต้นกำเนิดที่ไม่เป็นไอโซทรอปิกคือ อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_g = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.22)$$

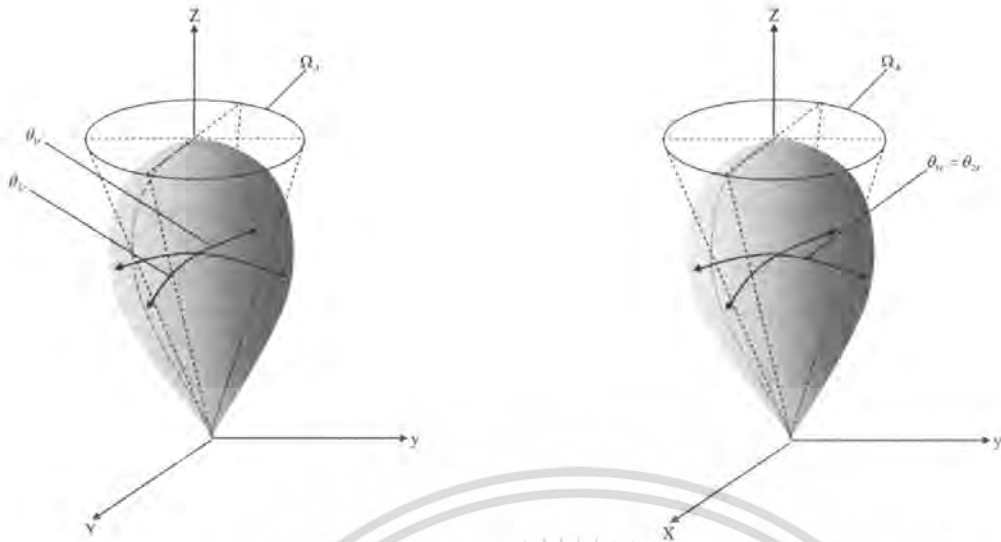
$$D_{max} = D_g = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $D_g$  = ค่าการชี้ทิศทาง (ไม่มีหน่วย)  
 $D_0$  = ค่าการชี้ทิศทางสูงสุด (ไม่มีหน่วย)  
 $U$  = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)  
 $U_{max}$  = ค่าสูงสุดของความเข้มของการแผ่กระจาย (W/หน่วยมุมตัน)  
 $U_0$  = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์ส (W/หน่วยมุมตัน)  
 $P_{rad}$  = กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด (W)

จากสมการที่ (2.22) และ (2.23) จะทราบ ค่าการชี้ทิศทางและค่าการชี้ทิศทางสูงสุดของไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สที่มีค่าเป็นหนึ่งเพราะว่ามันมีการแผ่กระจายกำลังงานออกไปทุกทิศทางด้วยค่าที่เท่ากันคือ  $U, U_{max}$  และ  $U_0$  ต่างมีค่าเท่ากัน แต่สำหรับต้นกำเนิด (สายอากาศ) แบบอื่น ๆ นั้นย่อมมีค่าการชี้ทิศทางมากกว่าหนึ่งเสมอ และค่าของการชี้ทิศทางจะมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์และน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าการชี้ทิศทางสูงสุด ( $0 \leq D_g \leq D_0$ )

### 2.2.5 รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง (Directional Patterns)

สายอากาศที่มีลำคลื่นหลักแคบๆเพียงลำคลื่นเดียวและมีลำคลื่นย่อยที่มีขนาดเล็กจนสามารถตัดทิ้งได้ มุมตันของลำคลื่น จะมีค่าประมาณเท่ากับผลคูณของ HPBW ใน 2 ระนาบ ซึ่งตั้งฉากกันดังแสดงในรูปที่ 2.7(ก) สำหรับแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่หมุนแล้วสมมาตรกัน โดยรอบ HPBW ในระนาบใดๆจะเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7(ข)



(ก) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นไม่สมมาตร

(ข) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสมมาตร

รูปที่ 2.7 มุมตันของลำคลื่นซึ่งมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่สมมาตรกันและสมมาตรกัน

$$D_0 = \frac{4\pi}{\Omega_A} = \frac{4\pi}{\Theta_{1r}\Theta_{2r}} \quad (2.24)$$

มุมตันของลำคลื่น  $\Omega_A$  ประมาณได้จาก

$$\Omega_A \approx \Theta_{1r}\Theta_{2r} \quad (2.25)$$

$\Theta_{1r}$  = HPBW ในระนาบใดๆ (องศา)

$\Theta_{2r}$  = HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (องศา)

เมื่อรู้ความกว้างของลำคลื่นเป็นองศา สมการ (2.24) จะสามารถคิดแปลงให้เหมาะสมที่จะแทนค่าความกว้างของลำคลื่นนั้นโดยตรงได้เป็น

$$D_0 \approx \frac{4\pi(180/\pi)^2}{\Theta_{1d}\Theta_{2d}} = \frac{41253}{\Theta_{1d}\Theta_{2d}} \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6 อัตราขยายของงานรับสัญญาณ (Gain)

อัตราขยายเป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าสภาพเจาะจงทิศทางโดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศ เข้ามาด้วยในขณะที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางอธิบายคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

อัตราการขยายกำลัง (Power Gain) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้ นั้นมีค่าเท่ากับ  $4\pi$  คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ในทิศทางนั้นต่อทิศทางกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่ง เมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้โดยเฉพาะ โดยทั่วไปแล้วจะคิดค่ากำลังขยายในทิศทางที่มีการแผ่กระจายคลื่นแรงที่สุด คำนึง

$$\text{อัตราขยาย} = 4\pi (\text{ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น}) / (\text{กำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ})$$

$$= 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \tag{2.27}$$

โดยทั่วไปแล้วมักจะพูดถึงอัตราขยายสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของอัตราการขยายกำลังในทิศทางที่กำหนดให้ต่ออัตราการขยายกำลังของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศนั้นต้องเท่ากับสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบอาจจะเป็นสายอากาศไดโพล สายอากาศปากแตร แต่โดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็น ไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสียคั่น

$$G_g = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \tag{2.28}$$

กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด  $P_{rad}$  สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ  $P_{in}$  คำนึง

$$P_{rad} = e_i P_{in} \tag{2.17}$$

เมื่อ  $e_i$  เป็นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย) ทำให้จะได้

$$G_g(\theta, \phi) = e_i \left[ \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \tag{2.29}$$

ซึ่งสัมพันธ์กับการชี้ทิศทางดังนี้

$$G_g(\theta, \phi) = e_i D_g(\theta, \phi) \tag{2.30}$$

ในการทำงานเดียวกัน ค่าสูงสุดของอัตราขยายจะสัมพันธ์กับค่าการชี้ทิศทางสูงสุดโดย

$$G_0 = D_g(\theta, \phi)_{\max} = e_r D_g(\theta, \phi)_{\max} \quad (2.31)$$

ดังนั้นค่าประมาณของอัตราขยายจะได้

$$G_0 = \frac{30000}{\Theta_{1r} \Theta_{2r}} \quad (2.32)$$

$\Theta_{1r} = \text{HPBW}$  ในระนาบใดๆ (องศา)

$\Theta_{2r} = \text{HPBW}$  ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (องศา)

สายอากาศที่มีรูปร่างคล้ายจานจะมีค่าแสดงอัตราค่าต่างๆ เหมือนกับสายอากาศแบบอื่นเช่นกัน สิ่งหนึ่งที่กล่าวก็คือ ค่าอัตราการขยาย หรือที่มักเรียกทับศัพท์ภาษาอังกฤษกันเสมอว่า เกน (Gain) นั่นเอง

อัตราการขยายของจานสายอากาศก็คือ การวัดความสามารถของจานสายอากาศที่รับหรือส่งพลังงานออกไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งสิ่งที่กล่าวต่อไปนี้มีผลกระทบต่ออัตราการขยายของจานรับสัญญาณ ซึ่งถือว่าเป็นสายอากาศทั้งสิ้น ได้แก่

1. พื้นที่หน้าตัดของจานรับสัญญาณ (ไม่ใช่พื้นที่ผิวของจาน บางตำราใช้ว่าพื้นที่ช่องเปิด)
2. ช่องเปิดของ LNB หรือขนาดของรีเฟล็กเตอร์ย่อย (Sub-reflector)
3. ผิวของจานรับสัญญาณ
4. รีเฟล็กเตอร์ย่อยไม่อยู่ในตำแหน่งโฟกัสที่ดีที่สุด
5. ความโค้งของผิวจานที่ไม่เป็นไปตามลักษณะพาราโบลิก

หากเกิดสิ่งผิดปกติ หรือข้อผิดพลาดจากปัจจัยทั้ง 5 จะเป็นสาเหตุทำให้อัตราการขยายลดลง โดยจานรับสัญญาณแบบพาราโบลิกจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของประสิทธิภาพ ( $\eta$ ) กำหนดไว้เช่นเดียวกับสายอากาศแบบอื่นเช่นกัน ซึ่งค่า  $\eta$  ของสายอากาศแบบพาราโบลิกจะมีประมาณ 60-75% ในการออกแบบจานรับสัญญาณแบบพาราโบลิกนั้น ผู้ออกแบบสามารถคำนวณอัตราการขยายกำลังของจานรับสัญญาณแบบนี้ได้โดยใช้สูตร

$$G = 10 \log \left[ \pi^2 \eta \left( \frac{D}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (2.33)$$

โดยที่  $D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของจานรับสัญญาณ หน่วยเมตร

$\lambda$  = ความยาวคลื่น (V/f) หน่วยเป็นเมตร

$\eta$  = ค่าประสิทธิภาพของจาน (Efficiency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.7 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency)

ประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ  $e_t$  จะใช้ได้เมื่อเราคำนึงถึงการสูญเสียต่างๆ ที่ขั้วและภายใน โครงสร้างของสายอากาศด้วย การสูญเสียต่างๆนั้นอาจเนื่องมาจาก

- การสะท้อนกลับเนื่องมาจากความเข้ากันไม่ได้ (Mismatch) กันระหว่างสายส่งกับสายอากาศ
- การสูญเสียทั้งในตัวนำและฉนวน ( $I^2R$ )

โดยทั่วไปแล้ว ประสิทธิภาพทั้งหมด คำนวณได้จาก

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (2.34)$$

เมื่อ  $e_t$  = ค่าประสิทธิภาพทั้งหมด (ไม่มีหน่วย)

$e_r$  = ค่าประสิทธิภาพที่เกี่ยวกับการสะท้อนกลับ ( $1 - |\Gamma|^2$ ) (ไม่มีหน่วย)

$e_c$  = ค่าประสิทธิภาพของตัวนำ (ไม่มีหน่วย)

$e_d$  = ค่าประสิทธิภาพของฉนวน (ไม่มีหน่วย)

$\Gamma$  = ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของศักดาไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศ

โดยที่

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (2.35)$$

เมื่อ  $Z_{in}$  = ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

$Z_0$  = ค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติ (Characteristic Impedance) ของสายส่ง

ปกติ  $e_c$  และ  $e_d$  คำนวณหาได้ลำบาก ส่วนมากมักหาได้จากการทดลอง แต่ถึงกระนั้นก็แยก  $e_c$  จาก  $e_d$  ไม่ออก ดังนั้นเพื่อความสะดวก มักจะเขียนสมการ (2.34) ใหม่เป็น

$$e_t = e_r e_{cd} = (1 - |\Gamma|^2) \quad (2.36)$$

เมื่อ  $e_{cd} = e_c e_d$  คือประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

### 2.2.8 ประสิทธิภาพของลำคลื่น (Beam Efficiency)

เป็นพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่ง ที่จะใช้ในการตัดสินใจว่าสายอากาศมีคุณภาพของการส่งหรือรับคลื่นดีเพียงใด ได้แก่ ประสิทธิภาพของลำคลื่น สำหรับสายอากาศ ซึ่งมีลำคลื่นหลักอยู่ในทิศทางแกน  $Z(\theta = 0)$  ประสิทธิภาพของลำคลื่นจะกำหนดได้ดังนี้คือ

$$BE = \frac{\text{Power transmitted (received) within cone angle } \theta_1}{\text{Power transmitted (received) by the antenna}} \quad (2.37)$$

เมื่อ  $\theta_1$  เป็นมุมที่มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของมุมของกรวย ที่เราต้องการจะหาเปอร์เซ็นต์ของกำลังงานทั้งหมดในนั้น ดังนั้น จะเขียนสมการได้ดังนี้

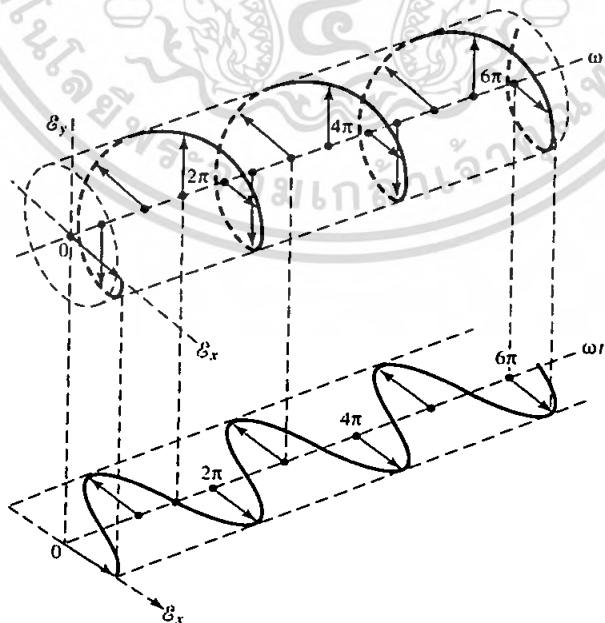
$$BE = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_1} U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2.38)$$

เมื่อให้  $\theta_1$  เป็นมุมที่เกิดมินัล (Null) คือ จุดตำแหน่งที่กำลังมีค่าเป็นศูนย์คู่แรก ดังนั้น ประสิทธิภาพของลำคลื่นจะเป็นปริมาณที่แสดงถึงอัตราส่วนของจำนวนกำลังงานในคลื่นหลัก ต่อ กำลังงานที่มีทั้งหมด

### 2.2.9 โพลาริเซชัน (Polarization)

ก่อนที่จะกล่าวถึงความหมายของโพลาริเซชันของสายอากาศ จะกล่าวถึงความหมายของโพลาริเซชันของคลื่นเสียก่อน

โพลาริเซชันของลำคลื่นที่แพร่กระจายนั้น เป็นรูปแสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไป ทิศขั้วทิศทางและขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลา โพลาริเซชันจะแสดงการกวาดของยอดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ ณ ตำแหน่งที่ทำการสังเกตซึ่งคงที่และการสังเกตนี้จะทำโดยมองตามหลังคลื่นที่เดินทางไป แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.8 การหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระนาบและวงรีโพลาริเซชัน

ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในระนาบ  $Z=0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับโพลาไรเซชันของสายอากาศ ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง จะเป็นโพลาไรเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้นจากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังที่หัวของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาจะให้หมายถึง ทิศทางที่สายอากาศมีค่าการขยายมากที่สุด ดังนั้นโพลาไรเซชันของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกัน จะต่างกัน การแบ่งชนิดของโพลาไรเซชันอาจแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ

- โพลาไรเซชันเชิงเส้น (Linear Polarization)
- โพลาไรเซชันวงกลม (Circular Polarization)
- โพลาไรเซชันแบบวงรี (Elliptical Polarization)

ถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจะเรียกว่า โพลาไรเซชันมือขวา ในขณะที่หากสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจะเป็นโพลาไรเซชันมือซ้าย ซึ่งจะเขียนสนามชั่วขณะเวลานั้นของคลื่นระนาบ ที่เดินทางในทิศทาง  $-Z$  ได้ว่า

$$\vec{E}(z;t) = \hat{a}_x E_x(z;t) + \hat{a}_y E_y(z;t) \quad (2.39)$$

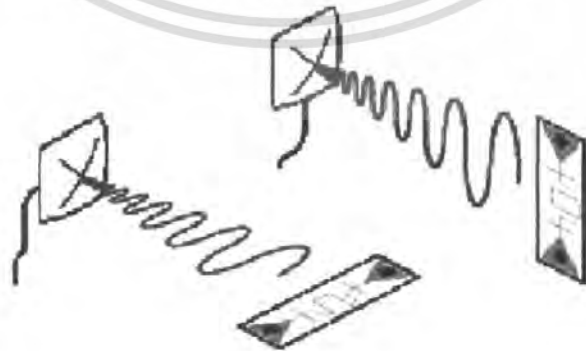
เมื่อส่วนประกอบของสนามชั่วขณะเวลานั้น สัมพันธ์กับค่าเชิงซ้อนของสนามนั้นดังนี้

$$\begin{aligned} E_x(z;t) &= E_x \cos(\omega t + kz + \phi_x) \\ E_y(z;t) &= E_y \cos(\omega t + kz + \phi_y) \end{aligned} \quad (2.40)$$

เมื่อ  $E_x$  และ  $E_y$  เป็นขนาดของสนามค่าสูงสุด ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ

### 2.2.9.1 โพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น (Linear Polarization)

การโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear Polarization) คือ เมื่อคลื่นเดินทาง สนามไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอด มี 2 ประเภทคือ การโพลาไรซ์แนวตั้ง (vertical polarization) และการโพลาไรซ์แนวนอน (horizontal polarization)



รูปที่ 2.9 การโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวนอนและแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นซึ่งเป็นโพลาริเซชันเชิงเส้น ความแตกต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบทั้งสองของสนาม จะมีค่าดังนี้

$$\Delta\phi = \phi_y + \phi_x = n\pi \quad ; \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.41)$$

### 2.2.9.2 โพลาริเซชันวงกลม (Circular Polarization)

การโพลาริเซชันแบบวงกลม (Circular polarization) คือเมื่อคลื่นเดินทาง สนามไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะวงกลมตลอดการเคลื่อนที่ของคลื่น แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ วงกลมหมุนขวา (Right hand polarization) และ วงกลมหมุนซ้าย (Left hand polarization) ถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา (คือ เมื่อมองตามหลังคลื่นแล้ว จะเห็นมีการหมุนตามเข็มนาฬิกา) จะเรียกว่าเป็น โพลาริเซชันมือขวา ในขณะที่หากสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา จะเป็น โพลาริเซชันมือซ้าย



รูปที่ 2.10 การโพลาริเซชันแบบวงกลม

การที่จะสามารถเกิดการโพลาริเซชันแบบวงกลมได้ ก็ต่อเมื่อนำค่าของส่วนประกอบของสนามทั้งสองมีค่าเท่ากัน และความต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง เป็นจำนวนคี่เท่าของ  $\frac{\pi}{2}$  นั่นคือ

$$|E_x| = |E_y| \longrightarrow E_x = E_y \quad (2.42)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \Delta\phi = \phi_y - \phi_x &= +\frac{(1+4n)\pi}{2} \quad ; \quad n = 0, 1, 2, \dots \text{cw} \\ &= -\frac{(1+4n)\pi}{2} \quad ; \quad n = 0, 1, 2, \dots \text{ccw} \end{aligned} \quad (2.43)$$

เมื่อ CW (Clockwise) คือ สนามหมุนตามเข็มนาฬิกา

CCW (Counter Clockwise) คือ สนามหมุนทวนเข็มนาฬิกา

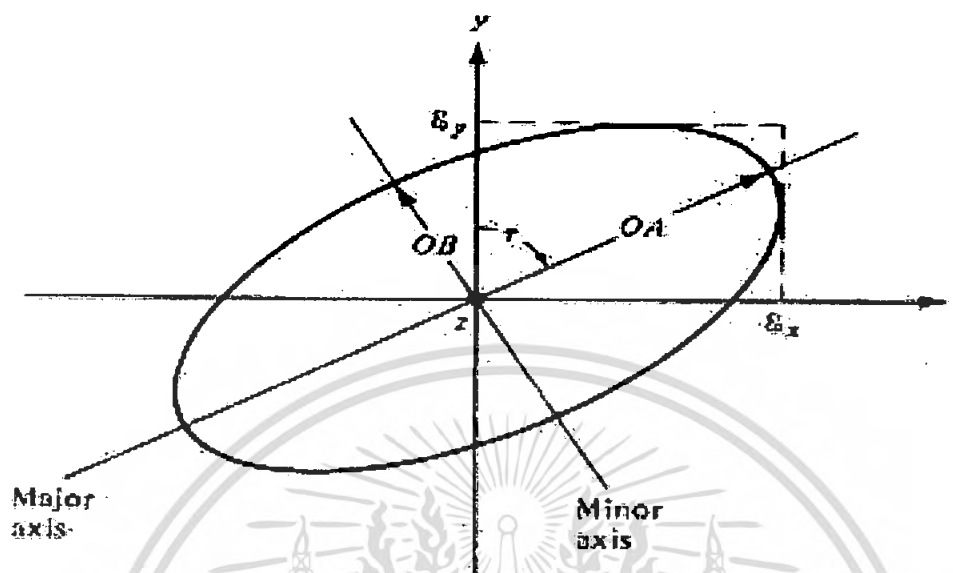
ถ้าคลื่นเดินทางในทิศตรงกันข้าม (คือทิศทาง +Z) เฟสในสมการ (2.43) ที่ทำให้

เกิด CW (Clockwise) และ CCW (Counter Clockwise) จะต้องสลับกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.9.3 โพลาริเซชันแบบวงรี (Elliptical Polarization)

การโพลาไรซ์แบบวงรี (Elliptical polarization) เมื่อกลื่นเดินทางสนามไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะวงรี



รูปที่ 2.11 การโพลาไรซ์แบบวงรี

โพลาริเซชันแบบวงรี จะเกิดขึ้นเมื่อความต่างเฟสเป็นจำนวนคี่เท่าของ  $\frac{\pi}{2}$  แต่ขนาด

ของสนามไฟฟ้าจะไม่เท่ากัน หรือความต่างเฟสเป็นจำนวนคี่ของ  $\frac{\pi}{2}$  นั่นคือ

$$|E_x| \neq |E_y| \longrightarrow E_x \neq E_y$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\frac{(1+4n)\pi}{2}; n=0,1,2,\dots \text{cw}$$

$$= -\frac{(1+4n)\pi}{2}; n=0,1,2,\dots \text{ccw} \quad (2.44)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm \frac{n\pi}{2} > 0 \longrightarrow \text{cw} \quad (2.45)$$

$$< 0 \longrightarrow \text{ccw} \quad (2.46)$$

โดยที่  $n=0,1,2,\dots$

ในกรณีของโพลาริเซชันแบบวงรีนั้น การกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ จะเป็นวงรีเอียง อัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนย่อย จะเรียกว่าเป็นอัตราส่วนของแกน (Axial Ratio: AR) ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

$$AR = \frac{OA}{OB} \quad \text{โดยที่ } 1 \leq AR \leq \infty \quad (2.47)$$

เมื่อ  $OA =$  แกนหลัก และ  $OB =$  แกนย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเอียงของวงรีเทียบแกน  $y$  สามารถแสดงได้ด้วยมุมเอียงดังนี้คือ

$$\tau = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[ \frac{2E_x E_y}{E_x^2 + E_y^2} \cos(\Delta\phi) \right] \quad (2.48)$$

เมื่อวงรีวางตามแนวแกนหลัก  $\tau = \frac{n\pi}{2}$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$  แกนหลัก (ย่อย) เท่ากับ  $E_x (E_y)$  หรือ  $E_y (E_x)$

หรืออัตราส่วนของแกนมีค่าเท่ากับ  $\frac{E_x}{E_y}$  หรือ  $\frac{E_y}{E_x}$

#### 2.9.2.4 โพลาริเซชันลอสแฟกเตอร์ (Polarization Loss Factor : PLF)

โดยทั่วไปแล้วโพลาริเซชันของสายอากาศจะไม่เหมือนกับโพลาริเซชันของคลื่นที่เดินทางมายังสายอากาศ ซึ่งเรียกว่า เกิดโพลาริเซชันมิสมแมตช์ (Polarization Mismatch) ทำให้สายอากาศไม่สามารถดึงเอากำลังงานออกจากคลื่นได้สูงสุด เนื่องจากเกิดการสูญเสียจากโพลาริเซชัน (Polarization Loss) สมมติว่า สนามไฟฟ้าของคลื่นที่เดินทางเข้ามายังสายอากาศนั้นเขียนได้ดังนี้

$$\vec{E}_i = \hat{\rho}_w E_i \quad (2.49)$$

เมื่อ  $\hat{\rho}_w$  เป็นหน่วยเวกเตอร์ของคลื่น และโพลาริเซชันของสนามไฟฟ้าของสายอากาศรับ มีค่าดังนี้

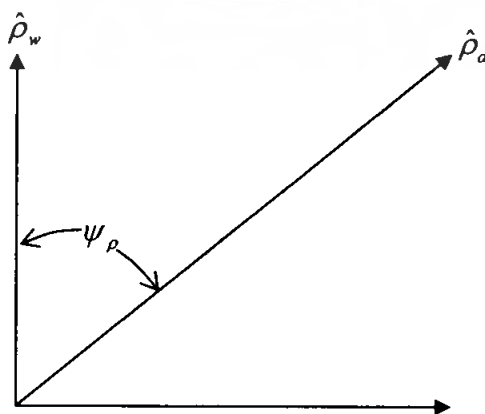
$$\vec{E}_a = \hat{\rho}_a E_a \quad (2.50)$$

เมื่อ  $\hat{\rho}_a$  เป็นหน่วยเวกเตอร์ของสายอากาศ

จะสามารถกำหนดให้โพลาริเซชันลอสแฟกเตอร์ (Polarization Loss Factor: PLF) มีค่าดังนี้

$$PLF = |\hat{\rho}_w \cdot \hat{\rho}_a|^2 = |\cos \psi_p|^2 \quad (2.51)$$

เมื่อ  $\psi_p$  เป็นมุมระหว่างหน่วยเวกเตอร์ทั้งสอง ดังแสดงในรูป 2.9



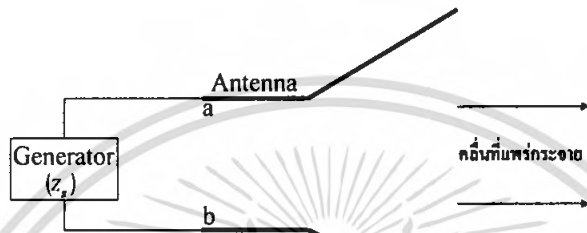
รูปที่ 2.12 หน่วยเวกเตอร์โพลาริเซชันของคลื่นและสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

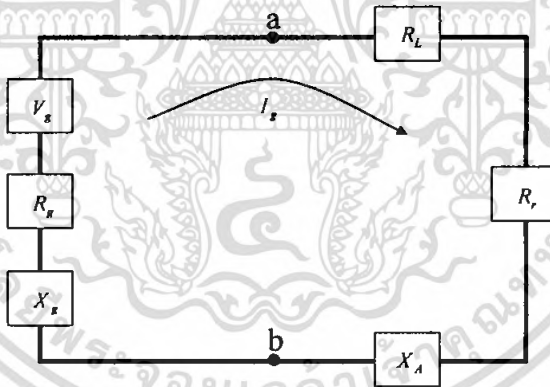
2.2.10 อินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)

อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่ขั้วของสายอากาศนั้น อาจเป็นอัตราส่วนระหว่างศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศนั้นหรือเป็นอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่จุดใดๆ ในรูปที่ 2.13 (ก) ที่ขั้ว a และ b เป็นขั้วของสายอากาศ อัตราส่วนของศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วนี้ เมื่อไม่ได้ต่อโหลด จะเป็นอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งมีค่า

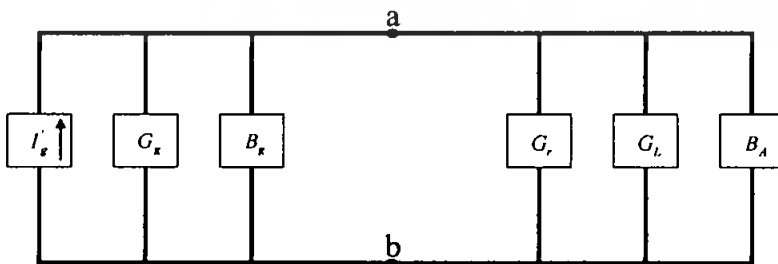
$$Z_A = R_A + jX_A \tag{2.52}$$



(ก) สายอากาศในโหมดการส่ง



(ข) วงจรสมมูลย์เทวินิน



(ค) วงจรสมมูลย์นอร์ตัน

รูปที่ 2.13 สายอากาศส่งและวงจรสมมูลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $Z_A =$  อิมพีแดนซ์ที่ขั้ว  $a-b$  ของสายอากาศ (โอห์ม)

$R_A =$  ความต้านทานที่ขั้ว  $a-b$  ของสายอากาศ (โอห์ม)

$X_A =$  รีแอกแตนซ์ที่ขั้ว  $a-b$  ของสายอากาศ (โอห์ม)

โดยทั่วไปความต้านทานในสมการ (2.53) จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

$$R_A = R_r + R_L \quad (2.53)$$

เมื่อ  $R_r$  คือ ความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ

$R_L$  คือ ความต้านทานการสูญเสียของสายอากาศ

สายอากาศทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง จะแสดงวงจรสมมูลย์ได้ดังรูปที่ 2.13(ข) และ 2.13(ค) ในการหาปริมาณกำลังงานที่ถูกนำมาสู่ความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นเพื่อแผ่กระจายออก กับกำลังงานที่สูญเสียในความต้านทานการสูญเสีย ที่กลายเป็นความร้อน  $\left(\frac{I^2 R_L}{2}\right)$  นั้น เราจะหากระแสที่ไหลภายในลูป (Loop) ได้ว่ามีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} I_g &= \frac{V_g}{Z_t} = \frac{V_g}{Z_A + Z_g} \\ &= \frac{V_g}{(R_r + R_L + R_g) + j(X_A + X_g)} \end{aligned} \quad (2.54)$$

เมื่อ  $R_g$  คือ ความต้านทานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ (โอห์ม)

$X_g$  คือ รีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ (โอห์ม)

และขนาดของกระแสจะมีค่าดังนี้

$$|I_g| = \frac{|V_g|}{\left[ (R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2 \right]^{1/2}} \quad (2.55)$$

เมื่อ  $V_g$  เป็นค่าศักดาไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดสัญญาณ กำลังงานที่ถูกนำมาขังสายอากาศเพื่อการแผ่กระจายคลื่น จะมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} P_r &= \frac{1}{2} |I_g|^2 R_r \\ &= \frac{|V_g|^2}{2} \left[ \frac{R_r}{(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \right] \end{aligned} \quad (2.56)$$

และกำลังงานที่สูญเสียกลายเป็นความร้อน จะค่าดังนี้

$$\begin{aligned}
 P_L &= \frac{1}{2} |I_g|^2 R_L \\
 &= \frac{|V_g|^2}{2} \left[ \frac{R_L}{[(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2]} \right]
 \end{aligned} \tag{2.57}$$

กำลังงานส่วนที่เหลือ จะเป็นส่วนที่สูญเสียเป็นความร้อนในความต้านทานที่ขั้ว  $R_g$  ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ ซึ่งมีค่า

$$P_g = \frac{|V_g|^2}{2} \left[ \frac{R_g}{[(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2]} \right] \tag{2.58}$$

กำลังงานที่ถูกนำมายังสายอากาศจะมีค่ามากที่สุด เมื่อเกิดการคอนจูเกตแมทช์ (Conjugate Match) นั่นคือจะเกิดเมื่อ

$$R_g = R_r + R_L \tag{2.59}$$

และ  $X_A = -X_g$  (2.60)

ในกรณีนี้ สมการ (2.57), (2.58) และ (2.59) จะกลายเป็นสมการดังนี้

$$P_r = \frac{|V_g|^2}{2} \left[ \frac{R_r}{4(R_r + R_L)^2} \right] = \frac{|V_g|^2}{8} \left[ \frac{R_r}{(R_r + R_L)^2} \right] \tag{2.61}$$

$$P_L = \frac{|V_g|^2}{8} \left[ \frac{R_L}{(R_r + R_L)^2} \right] \tag{2.62}$$

$$P_g = \frac{|V_g|^2}{8} \left[ \frac{R_g}{(R_r + R_L)^2} \right] = \frac{|V_g|^2}{8} \left[ \frac{1}{(R_r + R_L)} \right] \tag{2.63}$$

จากสมการ (2.61) ถึง (2.62) จะพบว่า

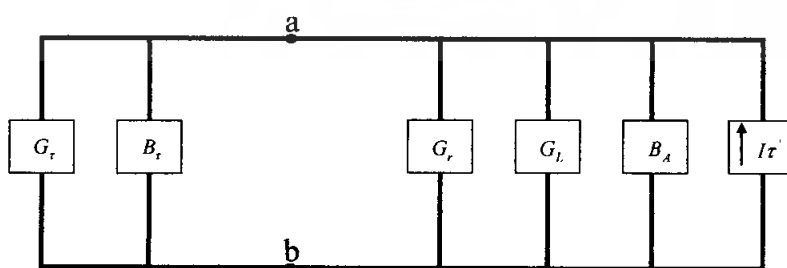
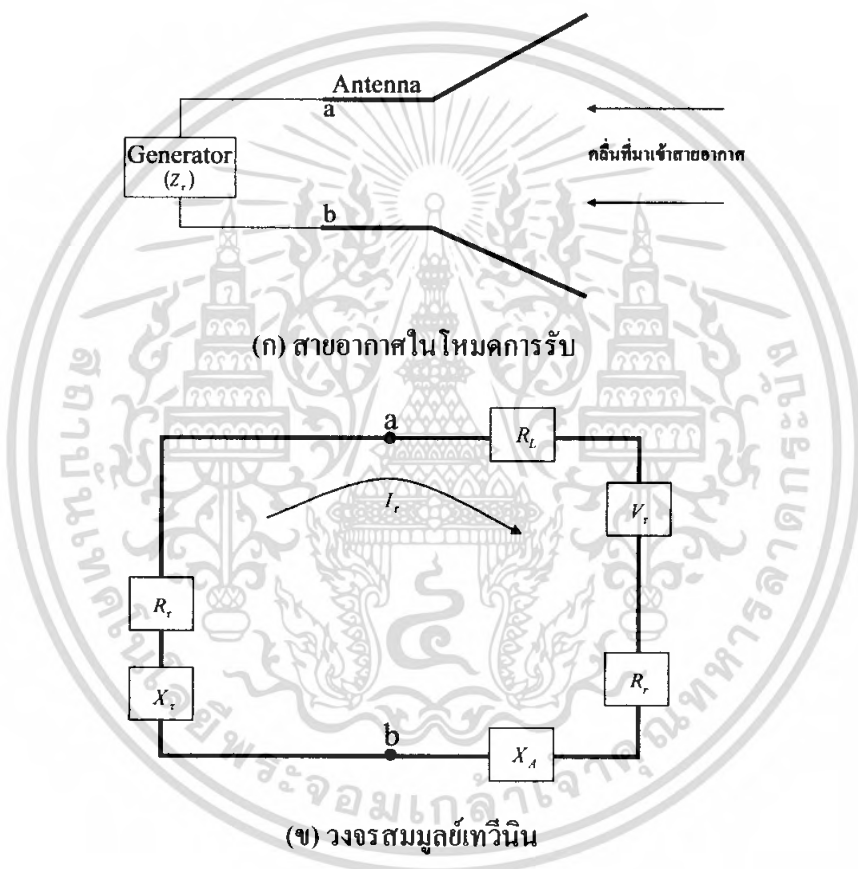
$$\begin{aligned}
 P_g &= P_r + P_L = \frac{|V_g|^2}{8} \left[ \frac{R_g}{(R_r + R_L)^2} \right] \\
 &= \frac{|V_g|^2}{8} \left[ \frac{R_r + R_L}{(R_r + R_L)^2} \right]
 \end{aligned} \tag{2.64}$$

ดังนั้น กำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณ จะต้องจ่ายเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทช์ จะมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned}
 P_S &= \frac{1}{2} V_g I_g^* = \frac{1}{2} V_g \left[ \frac{V_g^*}{2(R_r + R_L)} \right] \\
 &= \frac{|V_g|^2}{4} \left[ \frac{1}{(R_r + R_L)} \right]
 \end{aligned} \tag{2.65}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในจำนวนกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่ายทั้งหมด ครึ่งหนึ่งจะสูญเสียเป็นความร้อนภายในความต้านทานภายใน ( $R_g$ ) ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ และอีกครึ่งหนึ่งจะถูกนำมายังสายอากาศซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทช์เท่านั้น ในส่วนของกำลังงานที่ยังสายอากาศส่วนหนึ่งจะแพร่กระจายออกไป โดยผ่านกำลังงานที่เกิดจากความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น อีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียเป็นความร้อนซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ ซึ่งถ้าสายอากาศไม่มีการสูญเสีย ( $e_{cd} = 1$ ) ครึ่งหนึ่งของกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่าย จะแพร่กระจายออกไปเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทช์ ถ้าสมมุติว่าเป็นการแมทช์ที่สมบูรณ์ระหว่างสายอากาศกับสายส่ง ( $e_r = 1$ ) ถ้ามีการสูญเสียเนื่องจากไม่แมทช์กันแล้ว จะทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศลดลง สำหรับการใส่สายอากาศเป็นสายอากาศรับ ดังรูปที่ 2.14 ถ้าที่คลื่นตกกระทบเข้ามายังสายอากาศ จะเหนี่ยวนำให้เกิดศักดาไฟฟ้า  $V_r$  ซึ่งเทียบได้กับ  $V_g$  ในโหมดการส่ง



(ก) วงจรสมมูลย์เทวินิน  
รูปที่ 2.14 สายอากาศรับและวงจรสมมูลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความถี่ และจะเหมาะสมกับสายส่งเฉพาะในช่วงความถี่หนึ่งๆเท่านั้น นอกจากนี้ อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศยังขึ้นกับแฟคเตอร์ต่างๆอีก ได้แก่ รูปทรง วิธีการป้อนสัญญาณ และสิ่งแวดล้อมข้างเคียง เนื่องจากคำนวณได้ยากจึงมักจะหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ได้จากการทดลอง

### 2.2.11 ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Antenna Radiation Efficiency)

ประสิทธิภาพของตัวนำและฉนวน  $e_{cd}$  เป็นอัตราส่วนของกำลังงานที่ถูกนำมายังความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น  $R_r$  และความต้านทานการสูญเสีย  $R_L$

จากสมการ (2.57)

$$P_r = \frac{1}{2} |I_g|^2 R_r$$

$$= \frac{|V_g|^2}{2} \left[ \frac{R_r}{(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \right]$$

และจากสมการ (2.58)

$$P_L = \frac{1}{2} |I_g|^2 R_L$$

$$= \frac{|V_g|^2}{2} \left[ \frac{R_L}{(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \right]$$

จะได้ว่า

$$e_{cd} = \left[ \frac{R_r}{R_r + R_L} \right] \quad (2.66)$$

ในกรณีของท่อโลหะซึ่งยาว  $\ell$  และมีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ มีค่าเท่ากับ  $A$  ความต้านทานกระแสตรงมีค่า  $R_{dc}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$R_{dc} = \left[ \frac{\ell}{\sigma A} \right] \quad (2.67)$$

ถ้าสกินเดปท์ (Skin Depth)  $\delta$  มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเส้นทแยงมุมที่สั้นที่สุดของพื้นที่หน้าตัดนั้นกระแสจะไหลอยู่เฉพาะในบริเวณชั้นบางๆ ที่ผิวตัวนำเท่านั้น ดังนั้นค่าความต้านทานที่สูง จะมีค่าดังนี้คือ

$$R_{hf} = \frac{\ell R_s}{P} = \frac{\ell}{P} \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} \quad (2.68)$$

เมื่อ  $P$  เป็นเส้นรอบวงของพื้นที่หน้าตัดท่อโลหะ ( $P = C = 2\pi b$  สำหรับลวดวงกลมรัศมี  $b$ )  $R_s$  คือความต้านทานที่ผิวของตัวนำ  $\omega$  เป็นความถี่เชิงมุม  $\mu_0$  เป็นสภาพซึมซาบแม่เหล็กของอากาศและ  $\sigma$  เป็นความนำของโลหะ

### 2.2.12 ช่วงกว้างแถบความถี่ (Bandwidth)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศ ถูกกำหนดให้เป็นช่วงความถี่ ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้ อาจเป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่างๆ เช่น อินพุทอิมพีแดนซ์ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างของลำคลื่น โพลาริเซชัน ระดับของไซด์โลบ ค่าอัตราขยาย ประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่น ฯลฯ อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ คือ ไม่ต่างจากคุณสมบัติที่วัดที่ความถี่ตรงกลางที่ออกแบบจนทำให้คุณสมบัติเหล่านี้เสียไปจากข้อกำหนดหรือมาตรฐาน สำหรับสายอากาศแบนด์กว้างมักจะคิดเป็นอัตราส่วนของความถี่ที่ใช้งานได้ด้านสูงต่อความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำ ยกตัวอย่าง เช่น แบนด์วิดท์ 10 : 1 แสดงว่าความถี่ที่ใช้งานได้ด้านสูง มีค่ามากกว่าความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำอยู่ 10 เท่า สำหรับสายอากาศแบนด์แคบ แบนด์วิดท์จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของความถี่ (ความถี่ด้านสูงลบด้วยความถี่ด้านต่ำ) แล้วหารด้วยความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น เช่น แบนด์วิดท์ 5 % แสดงว่าผลต่างของความถี่ของช่วงการทำงานของสายอากาศ เป็น 5% ของความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น

เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆของสายอากาศที่กล่าวมา จะไม่เปลี่ยนแปลง ตามความถี่ในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่สามารถกำหนดแบนด์วิดท์ตามคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่ง จึงต้องมีการกำหนดข้อบังคับให้เป็นไปตามการประยุกต์ใช้งานแต่ละอย่าง ปกติแล้วคุณสมบัติของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นกับอินพุทอิมพีแดนซ์ มักจะถูกใช้เป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ของสายอากาศ

### 2.3 สายส่งทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบของวงจร

ที่ความถี่สูง (150 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 3 จิกะเฮิร์ตซ์) สายส่งสามารถใช้เป็นองค์ประกอบของวงจรได้ สำหรับสายที่มีความสูญเสียน้อย อิมพีแดนซ์ที่ต้นสายสามารถหาได้ดังนี้

$$Z_s = Z_0 \left( \frac{Z_T + jZ_0 \tan \beta d}{Z_0 + jZ_T \tan \beta d} \right) \quad (2.69)$$

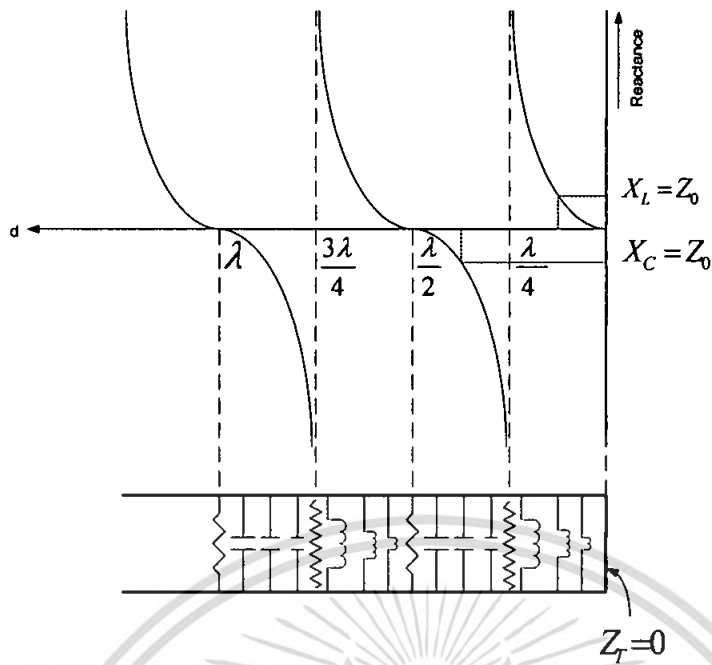
พิจารณากรณีพิเศษดังนี้

#### 2.3.1 เมื่อปลายสายส่งต่อัดวงจร

จะได้  $Z_T = 0$  ดังนั้น

$$Z_s = jZ_0 \tan \beta d \quad (2.70)$$

อิมพีแดนซ์ที่ต้นสายเป็นรีแอคแตนซ์บริสุทธิ์ (Pure Reactance) และเปลี่ยนแปลงกับระยะทาง  $Z$  ดังแสดงไว้ในรูปดังนี้



รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงของรีแอกแตนซ์ตามสายส่ง

เมื่อ  $d < \lambda/4$  อิมพีแดนซ์เชิงเหนี่ยวนำ (Inductive Reactance)

เมื่อ  $\lambda/4 < d < \lambda/2$  อิมพีแดนซ์รีแอกแตนซ์เชิงความจุ (Capacitive Reactance) เมื่อ  $d = n\lambda/2$

โดยที่  $n = 1, 2, 3, \dots$  จะพบว่า  $Z_s = 0$  แต่ความจริงแล้วสายจะมีการสูญเสียอยู่บ้าง การสูญเสียทำให้  $Z_s$  มีค่าน้อยมาก สายที่มีความยาว  $n\lambda/2$  มีสภาพเรโซแนนซ์ (Resonant) และสามารถเปรียบเทียบกับได้กับวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม LC

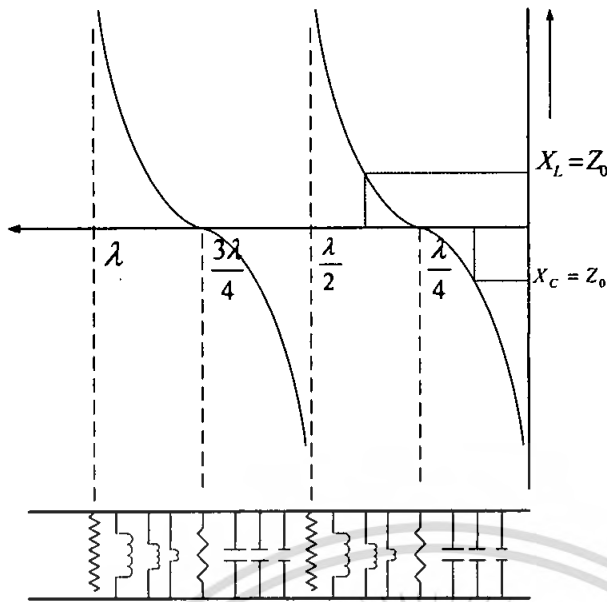
เมื่อ  $d = n\lambda/4$  โดยที่  $n = 1, 2, 3, \dots$  จะพบว่า  $Z_s = \infty$  ซึ่งตามความเป็นจริงแล้ว  $Z_s$  เป็นความต้านทานที่สูงมากเพราะว่าสายมีการสูญเสียอยู่บ้าง สายที่มีความยาวขนาดเหล่านี้ มีสภาพแอนติเรโซแนนซ์ (Antiresonant) และสามารถเปรียบเทียบกับได้กับวงจรเรโซแนนซ์ขนาน LC

### 2.3.2 เมื่อปลายสายต่อแบบเปิดวงจร

จะได้  $Z_T = \infty$  ดังนี้

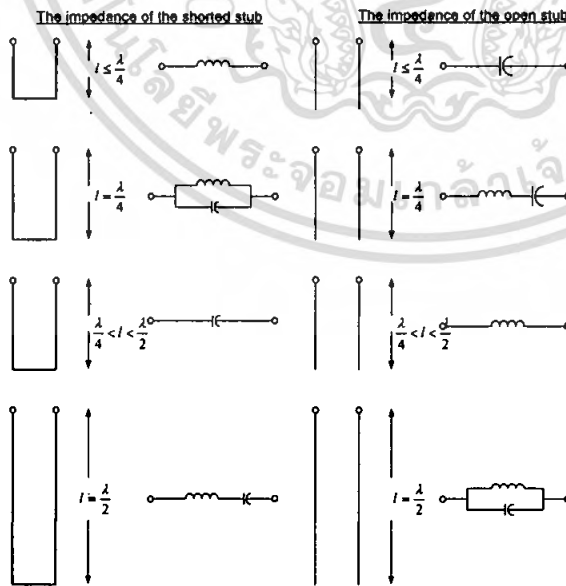
$$Z_s = -jZ_0 \cot \beta d \quad (2.71)$$

ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 2.16 ดังนี้



รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงของรีแอกแตนซ์ตามสายส่งซึ่งปลายสายต่อแบบเปิดวงจร

อิมพีแดนซ์  $Z_L$  จะมีค่าน้อยมากที่สุดที่  $d = n\lambda/4$  เมื่อ  $n = 1, 3, 5, \dots$  (สภาพเรโซแนนต์) และจะมีค่าสูงมากที่สุดที่  $d = n\lambda/2$  เมื่อ  $n = 1, 2, 3, \dots$  (สภาพแอนติเรโซแนนต์) อิมพีแดนซ์จะเป็นรีแอกแตนซ์เชิงความจุเมื่อ  $d = \lambda/4$  และเป็นรีแอกแตนซ์เชิงเหนี่ยวนำเมื่อ  $\lambda/4 < d < \lambda/2$  เป็นอย่างนี้ทุกครั้งเมื่อครบรอบ สายสั้นๆ ที่ปลายสายต่อแบบลัดวงจรและแบบเปิดวงจรเหล่านี้บางที่เรียกกันว่าสตับ (Stub) สายเหล่านี้นิยมใช้กันในแมตซ์อิมพีแดนซ์ พฤติกรรมของสตับทั้งสองแบบสรุปไว้ดัง รูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 อิมพีแดนซ์ของสตับทั้งแบบปลายลัดวงจรและแบบปลายเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การคำนวณการสร้าง และการวัดคุณสมบัติสายอากาศ

##### 3.1 การออกแบบสายอากาศ

ในการออกแบบสายอากาศ เราจำเป็นต้องพิจารณาถึงความถี่ที่จะนำไปใช้งาน เพราะเมื่อเราพิจารณาจากสมการ  $\lambda = \frac{c}{f}$  ทำให้ทราบความสัมพันธ์คือ ความยาวคลื่นจะแปรผกผันกับความถี่ใช้งานสำหรับสายอากาศนี้ จะนำไปประยุกต์ใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz โดยสายอากาศมีส่วนประกอบดังนี้

##### 3.1.1 Semi Rigid, Coaxial

เราทราบว่าที่ Free Space จะมีค่า ค่าสภาพยอมไฟฟ้า  $\epsilon_r = 1$  และ ค่าซึมซาบแม่เหล็ก  $\mu_r = 1$  จึงได้ความสัมพันธ์ ความเร็วคลื่น  $V_c = 3 \times 10^8$  แต่สำหรับ Semi Rigid, Coaxial ส่วนที่ใช้นำคลื่นป้อนเข้าสู่สายอากาศโดยซึ่งมีเทฟลอน (Teflon) เป็นไดอิเล็กทริก ซึ่งมีค่า  $\epsilon_r = 2.08$  และ  $\mu_r = 1$  ทำให้ความเร็วคลื่นและความยาวคลื่น ( $\lambda_c$ ) ลดลง ดังจะหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} V_c &= \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2.08 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 4\pi \times 10^{-7}}} \\ &= 208,012,573.60 \text{ เมตรต่อวินาที} \\ V_c &= 2.08 \times 10^8 \\ \text{ความถี่ของสายอากาศ} &= 2.45 \text{ GHz} \\ \lambda_c &= \frac{V_c}{f} \\ &= \frac{208,012,573.6}{2.45 \times 10^9} \\ &= 84.90 \text{ มิลลิเมตร} \\ \text{ความยาวคลื่น} / 4 &= 21.22 \text{ มิลลิเมตร} \\ \text{ความยาวคลื่น} / 2 &= 42.44 \text{ มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

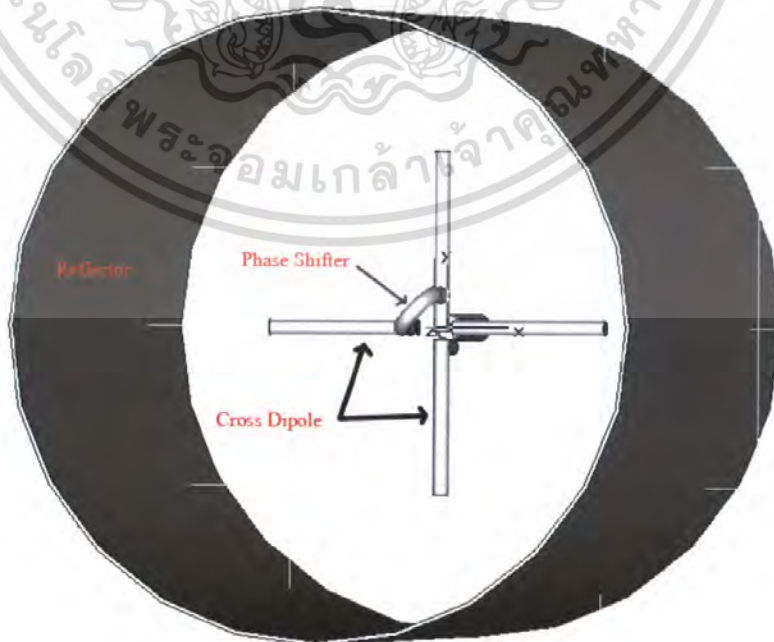


รูปที่ 3.1 ลักษณะของ Semi Rigid Coaxial

จากคุณสมบัติของสายส่งที่มีความยาว  $\lambda/4$  หรือ  $\lambda/2$  จะให้ค่า ความต้านทานของและความต่อเนื่องของการแพร่กระจายสัญญาณของสายอากาศที่ใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดมากที่สุด เนื่องจากสายอากาศชุดนี้ใช้ซอฟต์แวร์ CST-Microwave Studio ช่วยในการคำนวณ เมื่อใช้ความยาวเท่ากับ  $\lambda/4$  ผลการคำนวณให้ค่า Axial Ratio ที่ไม่ดีพอ ดังนั้นความยาวของ Semi Rigid Coaxial จึงคิดที่  $\lambda/2$  หรือเท่ากับ 42.5 มิลลิเมตร ซึ่งให้ค่า Axial Ratio ที่ดีกว่า

3.1.2 Cross Dipole

ที่แขนของครอสไดโพลแต่ละข้างนั้นเราจะคิดที่ความยาว  $\lambda/4$  แต่เนื่องจากเราไม่ทราบค่า Velocity Factor ของคลื่นที่เคลื่อนที่ภายในตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก จึงอาศัยการคำนวณจากซอฟต์แวร์ซึ่งจะได้ค่าความยาวของครอสไดโพลเท่ากับ 19.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 รูปแบบ Cross Dipole และ Phase Shifter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 Phase Shifter

เฟสชิฟเตอร์เราใช้เพื่อที่จะเลื่อนเฟสของครอสไดโพลอีกแกนให้ช้าลงเพื่อให้เกิดโพลาลายซ์ คลื่นแบบวงกลมเมื่อต่อเฟสชิฟเตอร์เข้าไปแล้วจะทำให้ไดโพลทั้งสองด้านเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นชุดเดียวกัน โดยที่อีกด้านจะมีเฟสที่เลื่อนไป 90 องศา จากการคำนวณโดยซอฟต์แวร์จะทำให้ได้ความยาวของเฟสชิฟเตอร์เท่ากับ 16.88 มิลลิเมตร ดังจะแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ในรูปที่ 3.2

### 3.1.4 Cylindrical Reflector

จากการประมวลผลโดยใช้ซอฟต์แวร์ CST-Microwave Studio ทำให้ทราบว่า ตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอกเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลมากสำหรับรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น คือการเปลี่ยนแปลงรัศมีหรือความยาวของทรงกระบอกเพียงเล็กน้อย จะทำให้รูปแบบของการแพร่กระจายคลื่นเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นจึงใช้ค่าการประมวลผลที่ทำให้ได้ผลดีที่สุดคือ ทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 77 มม. และความยาวของตัวสะท้อนคลื่นหาพิจารณาได้ดังนี้

Mode	$\lambda_c$
TE <sub>1,1</sub>	1.706d
TM <sub>0,1</sub>	1.306d
TE <sub>2,1</sub>	1.028d
TE <sub>0,1</sub>	0.820d
TM <sub>1,1</sub>	0.820d

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างโหมดการเดินทางของคลื่นกับความถี่ cut-off

- เลือกใช้เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกระบอก (d) = 77 mm
- จากตารางที่ 3.1 เลือกส่งในโหมด TE<sub>1,1</sub> Cut-Off Wavelength

$$\begin{aligned}(\lambda_c) &= 1.706d \\ &= 1.706 \times 77 \\ &= 131 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Free Space Wavelength = 122 mm
- ให้ Guide Wavelength ( $\lambda_g$ ) มีค่า

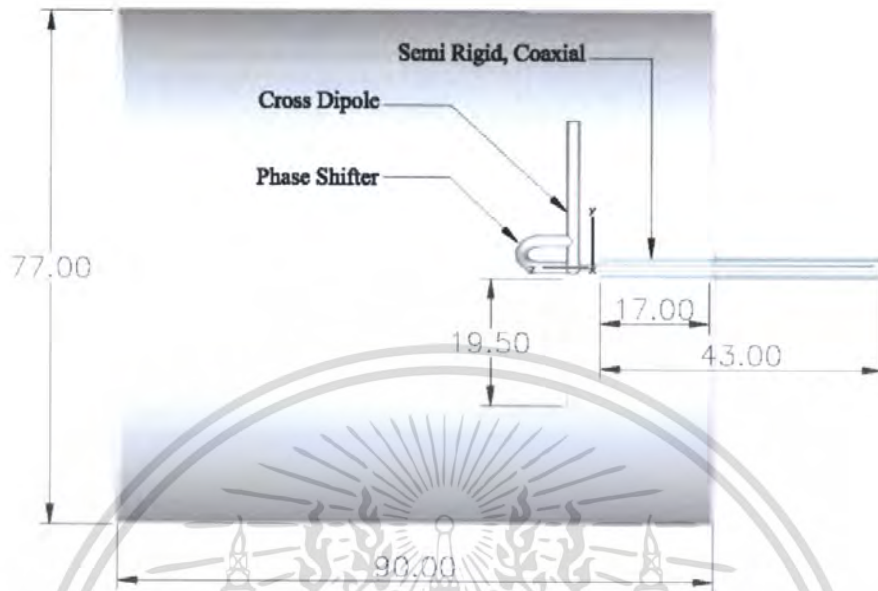
$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}}$$

$$= 330 \text{ mm}$$

$$3\lambda_g / 11 = 90 \text{ mm}$$

ดังนั้น ได้ความยาวของ Cylindrical Reflector มีความยาวเท่ากับ 90 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

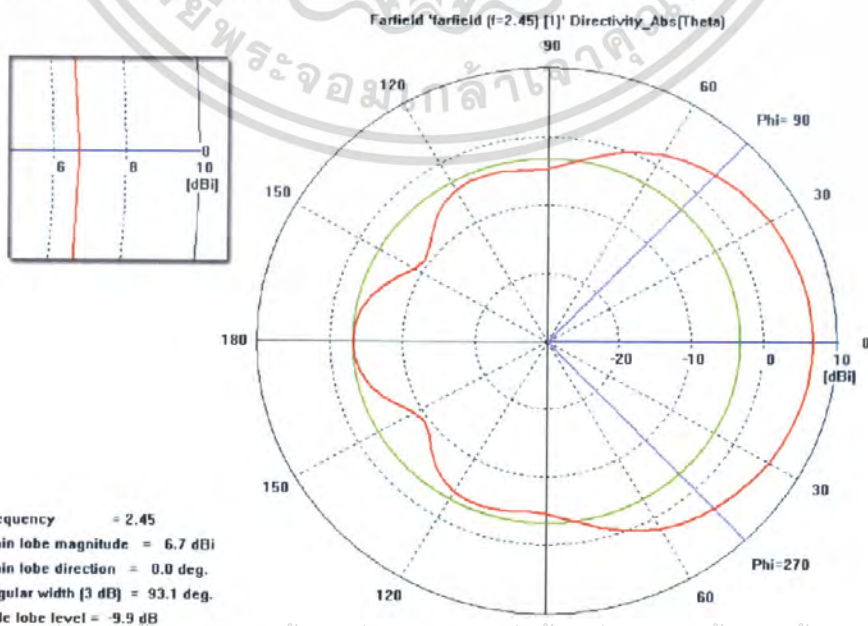


รูปที่ 3.3 โครงสร้างสายอากาศตัวสะท้อนทรงกระบอกที่แพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์วงกลม

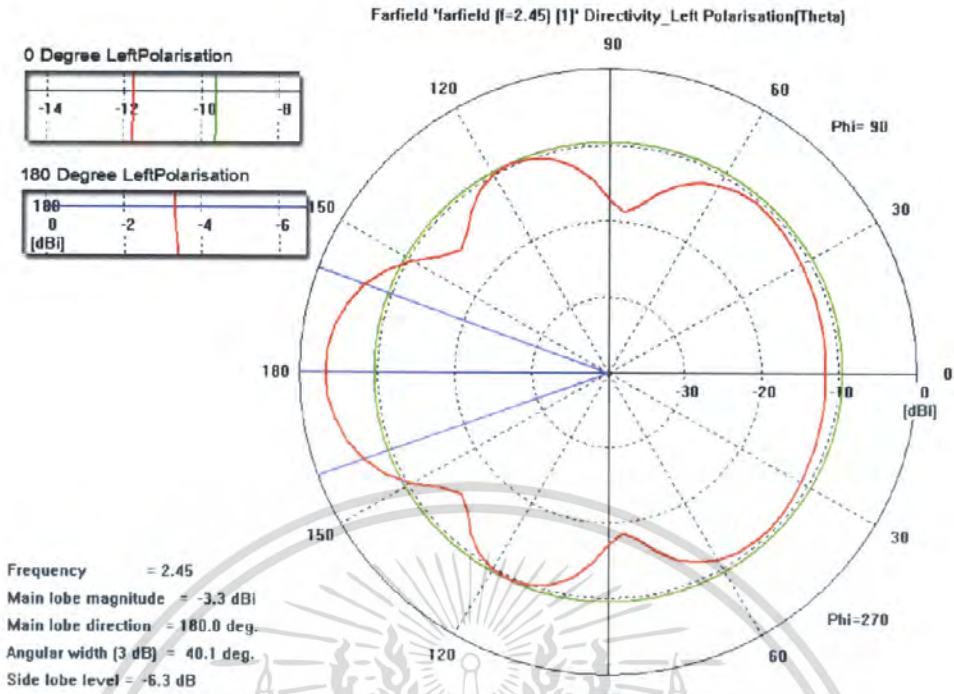
### 3.2 ผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรม CST- Microwave Studio

#### 3.2.1 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

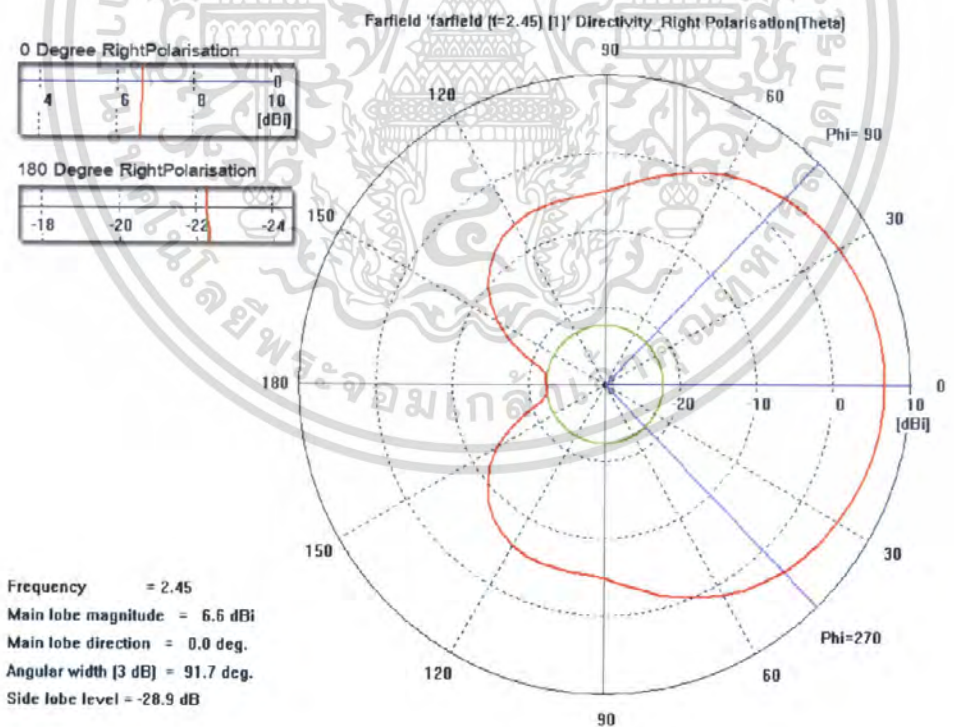
จากโครงสร้างที่มีตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก ตามรูปที่ 3.3 ทำให้มีผลต่อรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น ดังรูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นว่าสายอากาศจะมีการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ซึ่งจะเห็นว่าทิศทางของเมนโลบ (Main Lobe) นั้นชี้ไปที่ 0 องศา ให้ค่าอัตราขยาย (Gain) เท่ากับ 6.7 dBi และที่ 180 องศา ให้ค่าอัตราขยายเพียง -3 dBi เท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 3.4 การแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายสายอากาศโดยรวม  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การแพร่กระจายคลื่นและอัตราการขยายสายอากาศโดยพิจารณาเฉพาะด้านซ้าย

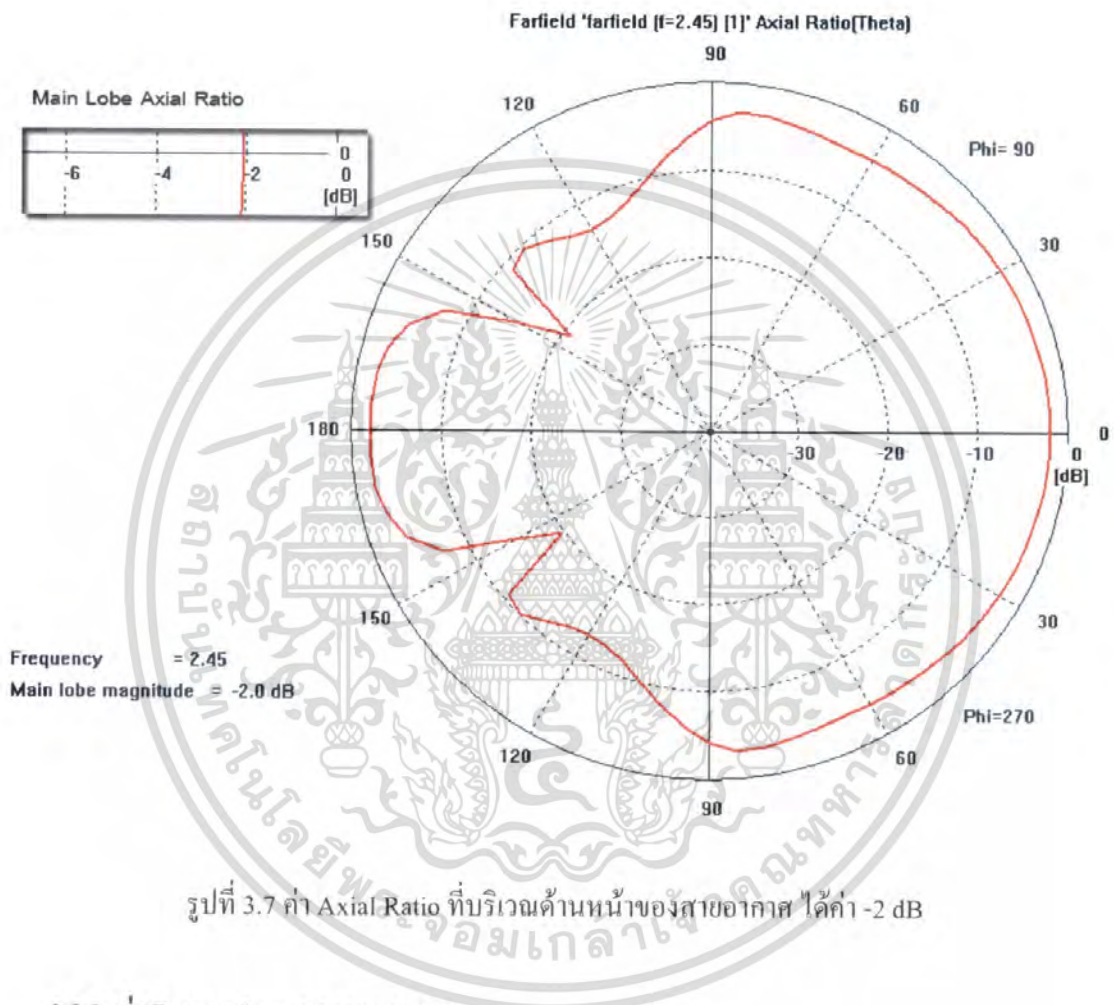


รูปที่ 3.6 การแพร่กระจายคลื่นและอัตราการขยายสายอากาศโดยพิจารณาเฉพาะด้านขวา

จากรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ชัดว่าการแพร่กระจายคลื่นด้านซ้าย (ด้านหลัง) จะให้ค่าอัตราขยายที่ต่ำ และรูปที่ 3.6 แสดงการแพร่กระจายคลื่นทางด้านขวา (ด้านหน้า) จะให้ค่าอัตราขยายที่สูงกว่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 โพลาริซชันของสายอากาศ

ซึ่งเราจะพิจารณาจากค่า Axial Ratio (AR) ซึ่งผลการคำนวณจากโปรแกรม เราจะได้ค่า Axial Ratio หรือขนาดของแกนหลักเทียบกับแกนรอง ที่ด้านหน้าของสายอากาศมีค่าเท่ากับ -2 dB ดังแสดงในรูปที่ 3.5

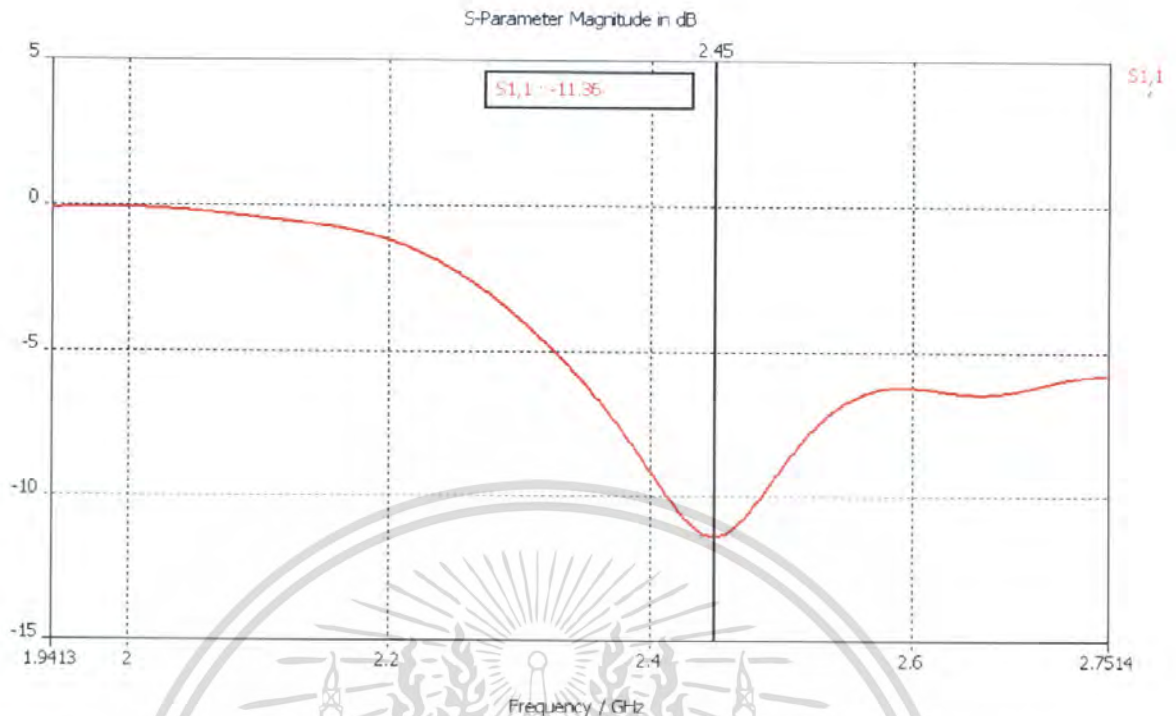


รูปที่ 3.7 ค่า Axial Ratio ที่บริเวณด้านหน้าของสายอากาศ ได้ค่า -2 dB

### 3.2.3 ค่า Return Loss ของสายอากาศ

โดยค่า Return Loss จะเป็นค่าที่บอกถึงอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณที่สะท้อนกลับมา (Reflected Wave) เมื่อเทียบกับกำลังของสัญญาณที่ส่งออกไป (Incident Wave) ซึ่งค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมจะแสดงในรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงค่า Return Loss ที่ความถี่ต่าง ๆ

จะเห็นว่าค่า Return Loss ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าที่ต่ำที่สุดคือ -11.36 dB หรือเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณที่สะท้อนกลับมา (Reflected Wave) เมื่อเทียบกับกำลังของสัญญาณที่ส่งออกไป (Incident Wave) ได้ดังนี้

$$\text{Return Loss} = 20 \log |\Gamma|$$

$$|\Gamma|^2 = \frac{P_{ref}}{P_{inc}}$$

$$-11.36 \text{ dB} = 20 \log |\Gamma|$$

$$|\Gamma| = 0.27$$

$$|\Gamma|^2 = 0.073$$

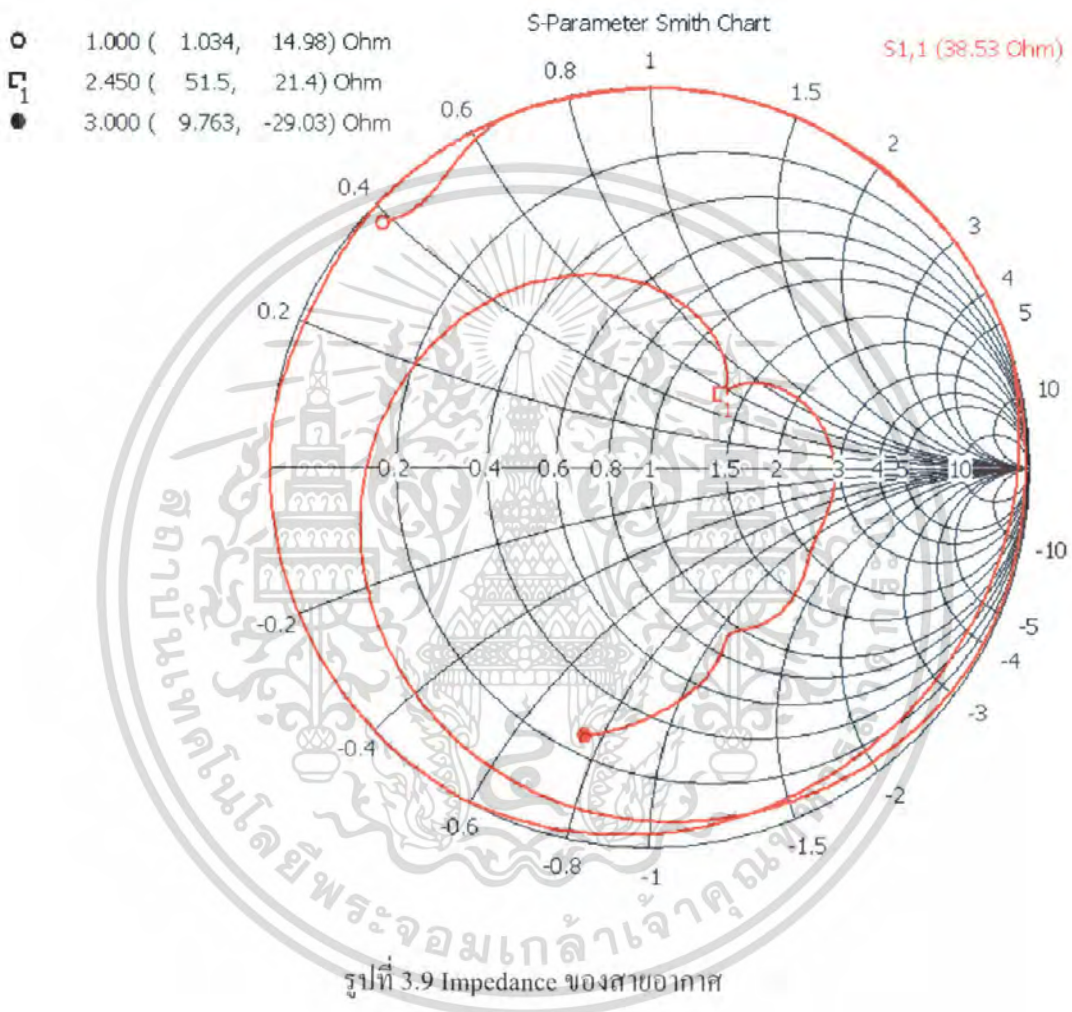
$$P_{ref} = 0.073 P_{inc}$$

จากการคำนวณข้างต้นเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณที่สะท้อนกลับมามีเพียง 7.3 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4 Impedance ของสายอากาศ

จากสมิทชาร์ท (Smith Chart) ในรูปที่ 3.9 ค่าความต้านทานของสายอากาศที่คำนวณได้คือ 38.53 โอห์ม ซึ่งจะไม่แมทช์กับความต้านทานของสายโคแอกเชียลซึ่งมีความต้านทาน 50 โอห์ม ส่งผลให้ไม่สามารถถ่ายทอดพลังงานจากเครื่องส่งไปยังสายอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ



### 3.3 การวัดคุณสมบัติของสายอากาศ

การทดลองในโครงการนี้ จะทำการทดลองการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอกที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม โดยจะทำการวัดค่าและทดสอบคุณสมบัติของพารามิเตอร์ต่างๆ คือ VSWR, อิมพีแดนซ์, ไรเรคตีวิตี และอัตราขยายของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1 การวัด VSWR อิมพีแดนซ์ และค่า Return Loss ของสายอากาศ

VSWR ( Voltage Standing Wave Ratio) เนื่องจากในทางปฏิบัติจริงนั้น สายอากาศของเราจะไม่สามารถที่จะปรับค่าอิมพีแดนซ์ (ค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดที่ขั้วของสายอากาศ) ได้เท่ากับอิมพีแดนซ์ของเครื่องรับหรือเครื่องส่งได้ ดังนั้นเมื่อมีการต่อสายอากาศเข้ากับเครื่องรับหรือเครื่องส่ง ผลก็จะทำให้กำลังงานส่วนหนึ่งเกิดการสะท้อนกลับที่จุดอินพุทของสายอากาศ ดังนั้นเพื่อเป็นการบ่งบอกแก่ผู้นำสายอากาศไปใช้งาน ว่าสายอากาศตัวนี้หากนำไปใช้งานแล้วจะสามารถรับกำลังงานที่ส่งมาจากเครื่องส่งได้มากน้อยเพียงใดนั้น จะพิจารณาที่ค่า VSWR

#### 3.3.1.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

- เครื่องวัด Network Analyzer พร้อมชุดปรับค่าเริ่มต้นการใช้งาน (Calibrate)
- เครื่อง Printer
- สายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอกที่มีการโพลาริซแบบวงกลม ทางด้านรับ และด้านส่ง

#### 3.3.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

- ทำการปรับสถานะเครื่อง Network Analyzer แบบ one port
- กดปุ่ม ป้อนความถี่เริ่มต้นด้วยหน่วยของความถี่
- กดปุ่ม START ป้อนความถี่เริ่มต้นตามด้วยหน่วยของความถี่
- กดปุ่ม STOP ป้อนความถี่ที่ทำการทดสอบ
- กดปุ่ม MRK เมื่อกดปุ่มนี้ก็จะปรากฏเมนูต่าง ๆ ทางด้านขวาของหน้าจอ
- กดปุ่มที่ตรงกับ Calibrate Menu
- กดปุ่มที่ตรงกับเมนู S11-1-port หรือ S22-1-port ซึ่งจะแสดงข้อความ OPEN, SHORT, LOAD
- นำตัว Calibrator แบบ Open มาต่อเข้ากับสายนำสัญญาณแล้วกดปุ่ม Open แล้วถอดตัว Calibrator ออก
- นำตัว Calibrator แบบ Short มาต่อเข้ากับสายนำสัญญาณแล้วกดปุ่ม Short แล้วถอดตัว Calibrator ออก
- นำตัว Calibrator แบบ Broadband Load มาต่อเข้ากับสายนำสัญญาณแล้ว กดปุ่ม Load กดปุ่ม Broadband กดปุ่ม Done Load สองครั้ง แล้วจะแสดงข้อความ Cor ปรากฏที่ด้านซ้ายของหน้าจอ แล้วถอดตัว Broadband Load ออก
- นำสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอกทางด้านส่งมาต่อเข้ากับเครื่อง Network Analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กดปุ่ม FORMAT เครื่องจะแสดงค่า LOGMAG, SMITHCHART, SWR, PHASE และ DELAY

- เลือก SWR เครื่องจะแสดงค่า SWR ที่วัดได้ออกหน้าจอ ถ้าค่าที่วัดได้ยังไม่เข้าใกล้ค่า 1.00 จะทำการปรับแต่งความยาวของโพรบสายอากาศจนกว่าจะได้ค่า SWR ที่เข้าใกล้ 1.00 มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ หลังจากนั้นกดปุ่ม COPY เพื่อพิมพ์รูปออกมา

- เมื่อเสร็จขั้นตอนนี้ ให้กดปุ่ม SMITHCHART เพื่อดูค่า Impedance แล้วกดปุ่ม COPY เพื่อพิมพ์รูปออกมา

- เมื่อเสร็จขั้นตอนนี้แล้วให้ถอดสายอากาศออก

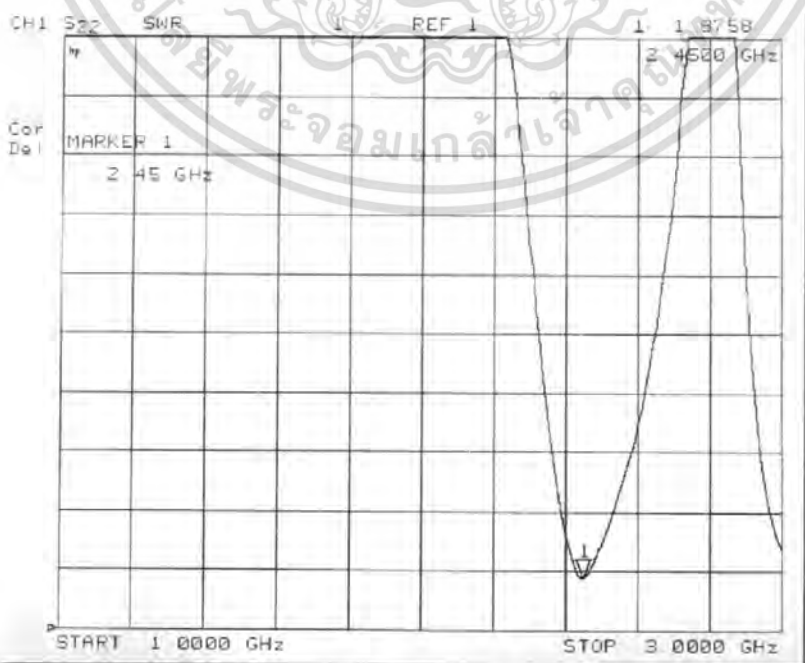
- นำสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอกทางด้านรับมาต่อเข้ากับเครื่อง Network Analyzer แล้วทำการวัดตามขั้นตอนที่ 12-15 ให้ได้ค่าใกล้เคียงกับสายอากาศด้านส่ง

โดยทั่วไปแล้วค่า VSWR ถ้าเรานำไปใช้งานจริง จะต้องไม่เกิน 1.5 และค่าอิมพีแดนซ์จะต้องมีค่าเข้าใกล้ 50 โอห์ม ซึ่งเราอาจจะทำการปรับที่ค่าความยาวของโพรบ หรือทำการปรับขนาดของตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก เพื่อให้สามารถให้ได้ค่า VSWR และอิมพีแดนซ์ ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุด

### 3.3.1.3 ผลการทดลอง

สามารถวัดค่า VSWR ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอกที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม ได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

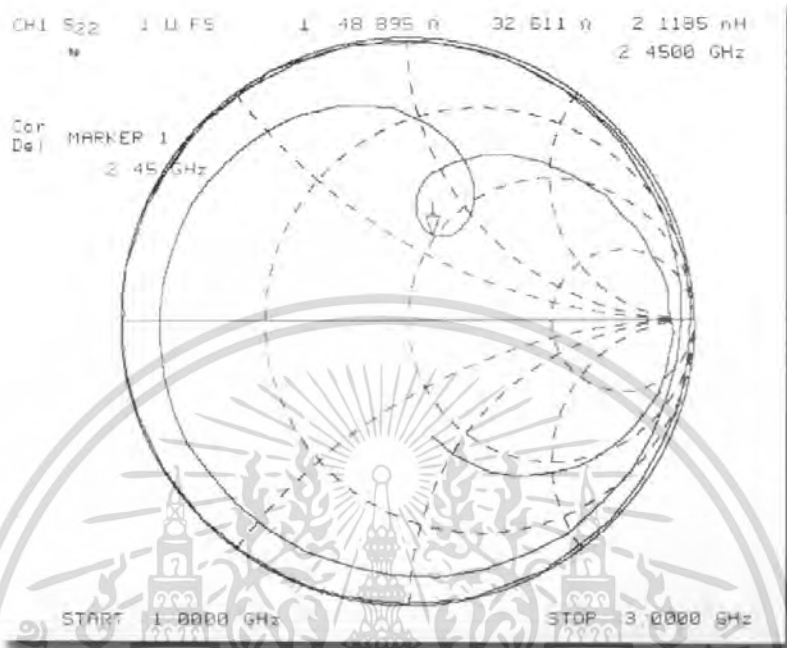
- ค่า VSWR ของสายอากาศ  
ที่ความถี่ 2.45 GHz  $VSWR = 1:1.87$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
รูปที่ 3.10 VSWR ของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอกที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Impedance ของสายอากาศ

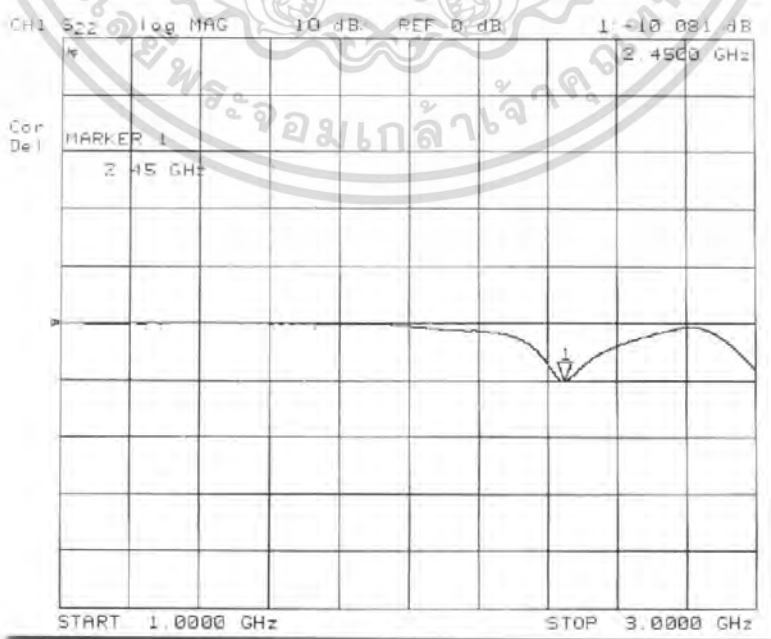
ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าอิมพีแดนซ์ เท่ากับ  $48.895 - j32.611$  โอห์ม



รูปที่ 3.11 Impedance ของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอกที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม

- ค่าการสะท้อนกลับ (Return Loss) ของสายอากาศ

ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า มีค่า Return Loss เท่ากับ -10.081 dB

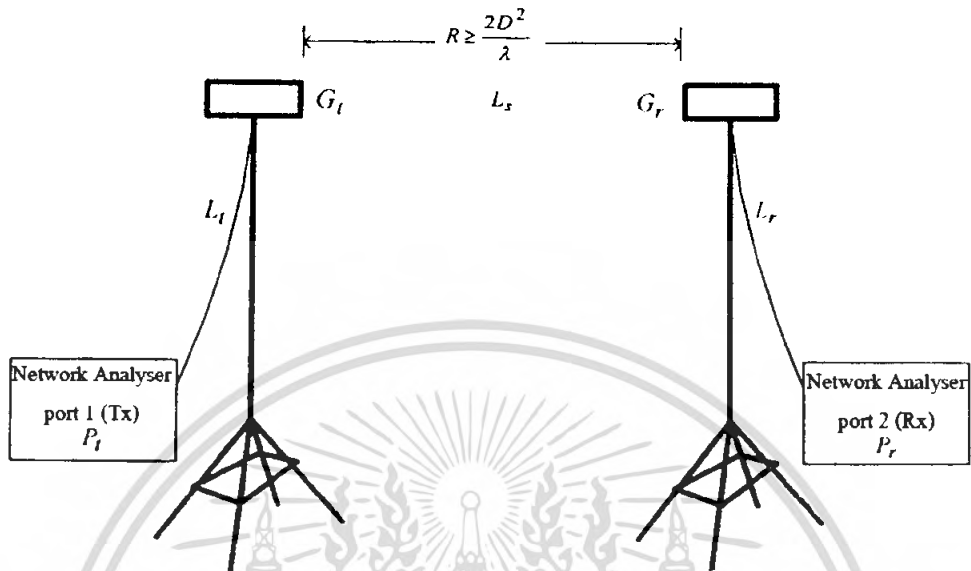


รูปที่ 3.12 การสะท้อนกลับของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอกที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การคัดลอกหรือการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การวัดแพทเทิร์นสายอากาศ

เมื่อทำการวัดค่า VSWR และ อิมพีแดนซ์เรียบร้อยแล้ว ต่อไปจะนำสายอากาศดังกล่าวมาวัดเพื่อหาแพทเทิร์นการกระจายคลื่นในระนาบ E-plane



รูปที่ 3.13 การวัดแพทเทิร์นของสายอากาศ

#### 3.3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- สายอากาศคว่ำสะท้อนคลื่นทรงกระบอกที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม ทั้งทางด้านส่ง และด้านรับ

- ขาดังและเสาติดตั้งสายอากาศ
- สายโคแอกเชียล จำนวน 2 เส้น

- เครื่องวัด Spectrum Analyzer (ก่อนใช้งานต้องเปิดเครื่องวอร์มประมาณ 10 นาที) หลังจากนั้นกดปุ่ม START ใส่งานความถี่เริ่มต้น กดปุ่ม STOP ใส่งานความถี่สุดท้าย และกดปุ่ม MARKER ใส่งานความถี่ที่ใช้งาน

#### 3.3.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

- ติดตั้งสายอากาศตัวส่งและตัวรับ และวางห่างกันเป็นระยะไม่ต่ำกว่าระยะ

Far-Field โดยสามารถคำนวณได้จาก  $R = \frac{2D^2}{\lambda}$  การวัดค่า E-plane ให้โพรบสายอากาศทั้งสองตัวอยู่ในแนวเดียวกัน และขนานกับพื้น และสำหรับการวัดค่า H-plane จะให้โพรบของสายอากาศตัวส่งและตัวรับอยู่ในแนวตั้ง

โดยกำหนดให้  $D$  คือ Diameter ของตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นที่ความถี่ที่ใช้งาน

$R$  คือ ระยะจากการคำนวณ Far-Field

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ต่อสายอากาศตัวรับเข้ากับเครื่อง Spectrum Analyzer  
 - หมุนสายอากาศตัวรับไปตามเข็มนาฬิกา ครั้งละ 10 องศา จนครบ 360 องศา  
 ในระนาบ E-plane บันทึกผลการทดลองนำค่าที่ได้มาออร์มอลไลซ์จากค่าสูงสุดนำมาพล็อตกราฟใน  
 Polar plot เปรียบเทียบการคำนวณและผลการทดลอง

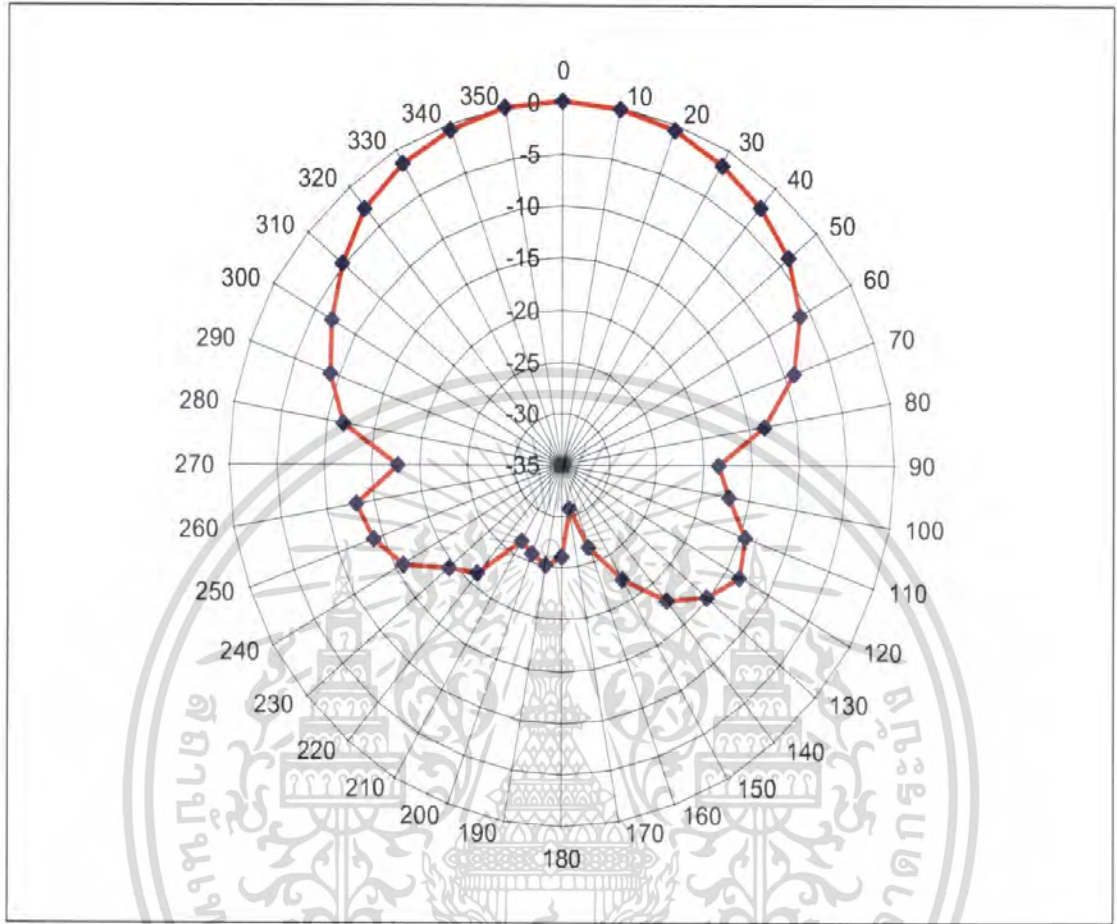
### 3.3.3.3 ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่วัดได้ในระนาบ E-plane นำมาบันทึกลงในตารางที่ 3.1 แล้วนำ  
 ค่าที่ได้จากผลการทดลองไปนอร์มอลไลซ์จากค่าสูงสุดและนำมาพล็อตใน Polar plot

มุม (องศา)	Power ที่รับได้ (dBm)	ค่า Power ที่ทำ การนอร์มอลไลซ์ (dB)	มุม (องศา)	Power ที่รับได้ (dBm)	ค่า Power ที่ทำ การนอร์มอลไลซ์ (dB)
0	-28.52	0	180	-54.75	-26.23
10	-28.77	-0.25	190	-53.79	-25.27
20	-29.31	-0.79	200	-54.52	-26
30	-30.17	-1.65	210	-55.17	-26.65
40	-31.21	-2.69	220	-49.83	-21.31
50	-32.59	-4.07	230	-48.24	-19.72
60	-34.74	-6.22	240	-44.29	-15.77
70	-37.62	-9.1	250	-42.57	-14.05
80	-41.95	-13.43	260	-41.73	-13.21
90	-47.04	-18.52	270	-41.26	-12.74
100	-45.65	-17.13	280	-40.23	-11.71
110	-43.15	-14.63	290	-37.68	-9.16
120	-42.07	-13.55	300	-35.57	-7.05
130	-43.62	-15.1	310	-33.41	-4.89
140	-46.54	-18.02	320	-31.25	-2.73
150	-50.83	-22.31	330	-30.07	-1.55
160	-55.17	-26.65	340	-29.26	-0.74
170	-59.27	-30.75	350	-28.75	-0.23

ตารางที่ 3.2 ค่า Power ที่วัดได้จากการทดลองเมื่อวางสายอากาศในระนาบ E-plane  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่าที่ได้จากการ Normalize จากค่าสูงสุดมา Plot ลงใน Polar plot



รูปที่ 3.14 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

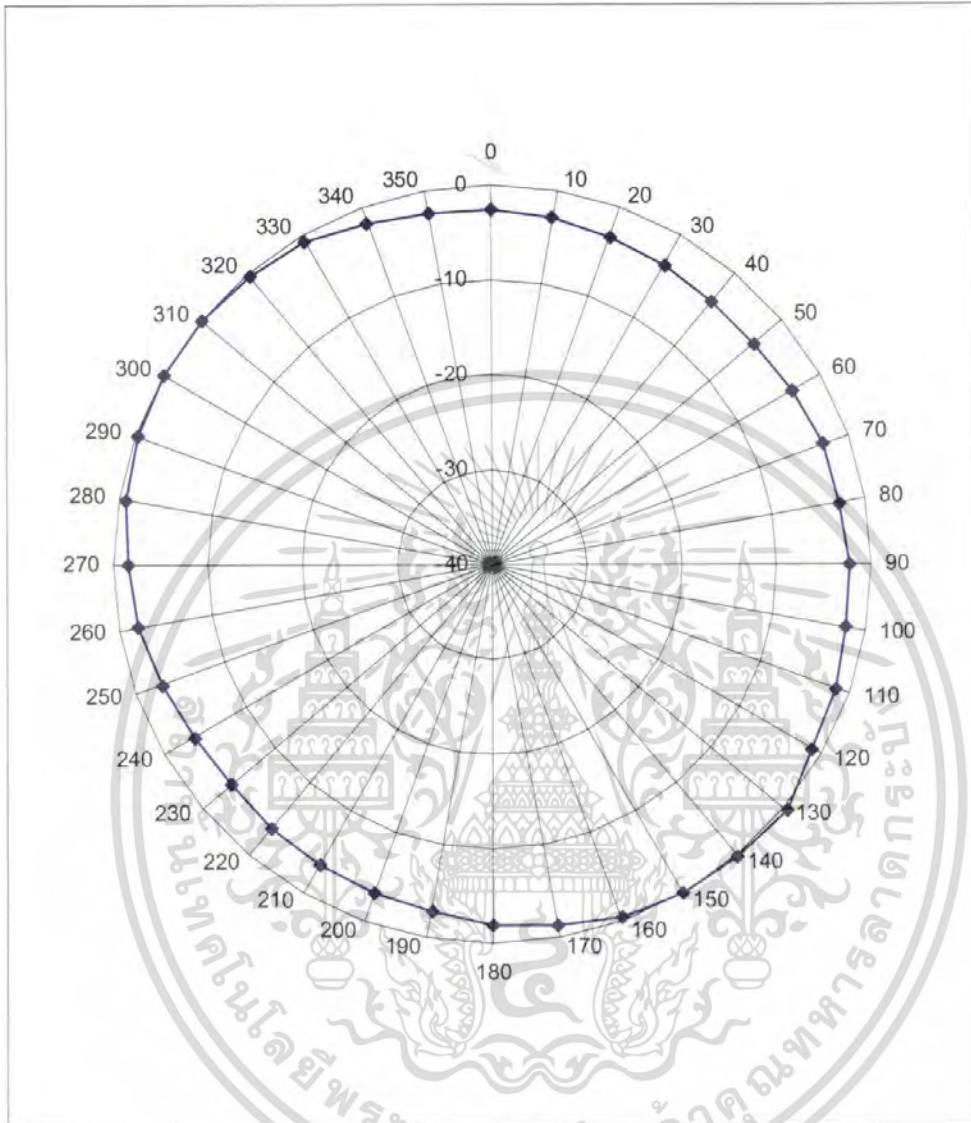
ผลการทดลองวัดค่า Axial Ratio นำมาบันทึกลงในตารางที่ 3.1 แล้วนำค่าที่ได้จากผลการทดลองไปนอร์มอลไลซ์จากค่าสูงสุดและนำมาพล็อตใน Polar plot

มุม (องศา)	Power ที่รับได้ (dBm)	มุม (องศา)	Power ที่รับได้ (dBm)
0	-32.4	180	-31.7
10	-32.5	190	-32.5
20	-33.2	200	-32.9
30	-33.5	210	-33.2
40	-33.7	220	-33.5
50	-33.6	230	-33.7
60	-33.2	240	-33.4
70	-32.7	250	-32.7
80	-32.6	260	-31.8
90	-32.1	270	-31.3
100	-31.9	280	-30.5
110	-31.2	290	-30
120	-30.9	300	-29.8
130	-29.4	310	-29.8
140	-29.5	320	-30
150	-29.8	330	-30.5
160	-30.2	340	-31.4
170	-31.1	350	-32.1

ตารางที่ 3.3 ค่า Power ที่วัดได้จากการทดลองเมื่อทำการวัดค่า Axial Ratio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่าที่ได้มา Plot ลงใน Polar plot ได้ความต่างระหว่างแกนหลักและแกนรอง เท่ากับ  $-3.9$  dB



รูปที่ 3.15 แสดงผลการวัดค่า Axial Ratio ที่ความถี่ 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การหาอัตราขยายของสายอากาศ

จากการทดลองในหัวข้อที่ 3.3 จะได้ค่าการสูญเสียของสายนำสัญญาณของทั้งทางด้านตัวส่งและตัวรับได้ค่าดังนี้

จะหาอัตราขยายของสายอากาศได้จากสมการต่อไปนี้

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_t - L_r - L_s$$

โดยที่

- $P_r$  คือ กำลังงานที่อ่านได้จากเครื่อง Spectrum Analyzer (dBm)
- $P_t$  คือ กำลังงานที่ส่งออกจากตัว Signal Generator (dBm)
- $G_t$  คือ อัตราการขยายของสายอากาศทางด้านส่ง (dB)
- $G_r$  คือ อัตราการขยายของสายอากาศทางด้านรับ (dB)
- $L_t$  คือ ค่าการสูญเสียที่เกิดจากสายนำสัญญาณทางด้านภาคส่ง (dB)
- $L_r$  คือ ค่าการสูญเสียที่เกิดจากสายนำสัญญาณทางด้านภาครับ (dB)
- $L_s$  คือ ค่าการสูญเสียในที่ว่าง (Free space loss) มีค่าเท่ากับ
- $\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่นที่ใช้ในการทดสอบ (m)

องค์ประกอบที่ใช้ในการหาอัตราการขยายของสายอากาศในทางปฏิบัติ จะต้องมีปัจจัยดังต่อไปนี้

1. ต้องสร้างสายอากาศแบบเดียวกันทั้ง 2 ตัว
  - 1.1 มีรูปร่างที่เหมือนกัน
  - 1.2 วัสดุที่ใช้ในการทำต้องเหมือนกัน
  - 1.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าทั้ง VSWR และ Impedance ต้องเหมือนกัน
2. ต้องทำการวัดที่สนามระยะไกล (Far field) คือ

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \text{ ในการทดลองใช้ค่า 1 เมตร}$$

ดังนั้น การหาอัตราการขยายของสายอากาศจึงหาได้จากสมการ

$$G_{(dBi)} = \frac{P_{r(dBm)} - P_{t(dBm)} + L_t + L_r + L_s}{2}$$

เพราะฉะนั้นจะได้อัตราการขยายของสายอากาศทางภาครับและภาคส่งมีค่าเท่ากับ

$$P_r = -28.52 \text{ dBm}$$

$$P_t = 0 \text{ dBm}$$

$$L_s = 20 \log \left( \frac{4\pi(1)}{0.1224} \right) = 40.22 \text{ dBm}$$

$$G_{(dBi)} = \frac{-28.52 - 0 + 0 + 0 + 40.22}{2} = 5.85 \text{ dBi}$$

## บทที่ 4

### การประเมินประสิทธิภาพโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE

#### 4.1 บทนำ

เนื้อหา هنا นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 ซึ่งมีความจำเป็นต่อการออกแบบและการใช้งานโครงข่าย เริ่มจากการศึกษาพื้นฐานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ซึ่งประกอบด้วย โทโปโลยี การควบคุมการเข้าถึงสื่อ รูปแบบเฟรม ชั้นสื่อสารกายภาพ และค่าวิสัย สามารถอุดมคติสูงสุด แล้ววิเคราะห์การหาค่าระยะบริการสูงสุด อัตราผิดพลาดบิต อัตราผิดพลาดแพ็กเก็ต และค่าวิสัยสามารถโดยเน้นผลกระทบเนื่องจากประสิทธิภาพสายอากาศต่อประสิทธิภาพโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายเพื่อนำผลคำนวณไปใช้ในการออกแบบสายอากาศเพื่อให้ได้คุณภาพบริการ QoS (Quality of Service) ตามที่กำหนดไว้

#### 4.2 มาตรฐานเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11

เครือข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11 ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2540 โดยสถาบัน IEEE (The Institute of Electronics and Electrical Engineers) ซึ่งมีข้อกำหนดระบุไว้ว่า ผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สายในส่วนของ PHY Layer นั้นมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลที่ความเร็ว 1, 2, 5.5, 11 และ 54 เมกะบิตต่อวินาที โดยมีสื่อนำสัญญาณ 3 ประเภทให้เลือกใช้งานอันได้แก่ คลื่นวิทยุย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์, 2.5 กิกะเฮิรตซ์ และคลื่นอินฟราเรด ส่วนในระดับชั้น MAC Layer นั้นได้กำหนดกลไกของการทำงานแบบ CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับ CSMA/CD (Collision Detection) ของมาตรฐาน IEEE 802.3 Ethernet ซึ่งนิยมใช้งานบนระบบเครือข่ายแลนไร้สาย โดยมีกลไกในการเข้ารหัสข้อมูลก่อนแพร่กระจายสัญญาณไปบนอากาศ พร้อมทั้งมีการตรวจสอบผู้ใช้งานอีกด้วย มาตรฐาน IEEE 802.11 ในยุคเริ่มแรกนั้นให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ค่อนข้างต่ำ ทั้งไม่มีการรับรองคุณภาพของการให้บริการที่เรียกว่า QoS ซึ่งมีความสำคัญในสภาพแวดล้อมที่มีแอปพลิเคชันหลากหลายประเภทให้ใช้งาน นอกจากนั้นกลไกในเรื่องการรักษาความปลอดภัยที่นำมาใช้ก็ยังมีช่องโหว่จำนวนมาก IEEE จึงได้จัดตั้งคณะทำงานขึ้นมาหลายชุดด้วยกัน เพื่อทำการพัฒนาและปรับปรุงมาตรฐานให้มีศักยภาพเพิ่มสูงขึ้น

- IEEE 802.11a เป็นมาตรฐานที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่เมื่อปี พ.ศ. 2542 โดยใช้เทคโนโลยี OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) เพื่อพัฒนาให้ผลิตภัณฑ์ไร้สายมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็วสูงสุด 54 เมกะบิตต่อวินาที โดยใช้คลื่นวิทยุย่านความถี่ 5 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาตให้ใช้งานโดยทั่วไปในประเทศไทย เนื่องจากสงวนไว้สำหรับกิจการทางด้านการแพทย์ ข้อเสียของผลิตภัณฑ์มาตรฐาน IEEE 802.11a ก็คือมีรัศมีการใช้งานในระยะสั้นและมีราคาแพง ดังนั้นผลิตภัณฑ์ไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11a จึงได้รับความนิยมน้อย

- **IEEE 802.11b** เป็นมาตรฐานที่ถูกตีพิมพ์และเผยแพร่ออกมาพร้อมกับมาตรฐาน IEEE 802.11a เมื่อปี พ.ศ. 2542 ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีและได้รับความนิยมในการใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด ผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบมาให้รองรับมาตรฐาน IEEE 802.11b ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า CCK (Complimentary Code Keying) ร่วมกับเทคโนโลยี DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) เพื่อให้สามารถรับส่งข้อมูลได้ด้วยอัตราความเร็วสูงสุดที่ 11 เมกะบิตต่อวินาที โดยใช้คลื่นสัญญาณวิทยุย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่อนุญาตให้ใช้งานในแบบสาธารณะทางด้านวิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรม และการแพทย์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ใช้ความถี่ย่านนี้มีชนิด ทั้งผลิตภัณฑ์ที่รองรับเทคโนโลยี Bluetooth, โทรศัพท์ไร้สายและ เตาไมโครเวฟ จึงทำให้การใช้งานนั้นมีปัญหาในเรื่องของสัญญาณรบกวนของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ข้อดีของมาตรฐาน IEEE 802.11b ก็คือ สนับสนุนการใช้งานเป็นบริเวณกว้างกว่ามาตรฐาน IEEE 802.11a ผลิตภัณฑ์มาตรฐาน IEEE 802.11b เป็นที่รู้จักในเครื่องหมายการค้า Wi-Fi ซึ่งกำหนดขึ้นโดย WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้รับเครื่องหมาย Wi-Fi ได้ผ่านการตรวจสอบและรับรองว่าเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE 802.11b ซึ่งสามารถใช้งานร่วมกันกับผลิตภัณฑ์ของผู้ผลิตรายอื่นๆ ได้

- **IEEE 802.11g** เป็นมาตรฐานที่นิยมใช้งานกันมากในปัจจุบันและได้เข้ามาทดแทนผลิตภัณฑ์ที่รองรับมาตรฐาน IEEE 802.11b เนื่องจากสนับสนุนอัตราความเร็วของการรับส่งข้อมูลในระดับ 54 เมกะบิตต่อวินาที โดยใช้เทคโนโลยี OFDM บนคลื่นสัญญาณวิทยุย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และให้รัศมีการทำงานที่มากกว่า IEEE 802.11a พร้อมความสามารถในการใช้งานร่วมกับมาตรฐาน IEEE 802.11b ได้ (Backward-Compatible)

- **IEEE 802.11e** เป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาสำหรับการใช้งานแอปพลิเคชันทางด้านมัลติมีเดียอย่าง VoIP (Voice over IP) เพื่อควบคุมและรับประกันคุณภาพของการใช้งานตามหลักการ QoS โดยการปรับปรุง MAC Layer ให้มีคุณสมบัติในการรับรองการใช้งานให้มีประสิทธิภาพ

- **IEEE 802.11f** มาตรฐานนี้เป็นที่รู้จักกันในนาม IAPP (Inter Access Point Protocol) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาสำหรับจัดการกับผู้ใช้งานที่เคลื่อนที่ข้ามเขตการให้บริการของ Access Point ตัวหนึ่งไปยัง Access Point เพื่อให้บริการในแบบโรมมิ่งสัญญาณระหว่างกัน

- **IEEE 802.11h** มาตรฐานที่ออกแบบมาสำหรับผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สายที่ใช้งานย่านความถี่ 5 กิกะเฮิรตซ์ ให้ทำงานถูกต้องตามข้อกำหนดการใช้ความถี่ของประเทศในทวีปยุโรป

- **IEEE 802.11i** เป็นมาตรฐานในด้านการรักษาความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สาย โดยการปรับปรุง MAC Layer เนื่องจากระบบเครือข่ายไร้สายมีช่องโหว่มากมายในการใช้งาน โดยเฉพาะฟังก์ชันการเข้ารหัสแบบ WEP 64/128-bit ซึ่งใช้คีย์ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับสภาพการใช้งานที่ต้องการความมั่นใจในการรักษาความปลอดภัยของการสื่อสารระดับสูง มาตรฐาน IEEE

802.11i จึงกำหนดเทคนิคการเข้ารหัสที่ใช้คีย์ชั่วคราวด้วย WPA, WPA2 และการเข้ารหัสในแบบ AES (Advanced Encryption Standard) ซึ่งมีความน่าเชื่อถือสูง

- **IEEE 802.11k** เป็นมาตรฐานที่ใช้จัดการการทำงานของระบบเครือข่ายไร้สาย ทั้งจัดการการใช้งานคลื่นวิทยุให้มีประสิทธิภาพ มีฟังก์ชันการเลือกช่องสัญญาณ, การโรมมิงและการควบคุมกำลังส่ง นอกจากนี้ก็ยังมีกรร้องขอและ ปรับแต่งค่าให้เหมาะสมกับการทำงาน การหารัศมีการใช้งานสำหรับเครื่องโคลนที่ดีที่สุดเพื่อให้ระบบจัดการสามารถทำงานจากศูนย์กลางได้

- **IEEE 802.11n** เป็นมาตรฐานของผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สายที่คาดหมายกันว่า จะเข้ามาแทนที่มาตรฐาน IEEE 802.11a, IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน โดยให้อัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลในระดับ 100 เมกะบิตต่อวินาที

- **IEEE 802.1x** เป็นมาตรฐานที่ใช้งานกับระบบรักษาความปลอดภัย ซึ่งก่อนเข้าใช้งานระบบเครือข่ายไร้สายจะต้องตรวจสอบสิทธิ์ในการใช้งานก่อน โดย IEEE 802.1x จะใช้โพรโทคอลอย่าง LEAP, PEAP, EAP-TLS, EAP-FAST ซึ่งรองรับการตรวจสอบผ่านเซิร์ฟเวอร์ เช่น RADIUS, Kerberos เป็นต้น

#### 4.3 อุปกรณ์ที่ใช้งานกับเครือข่ายไร้สาย

เครือข่ายไร้สายที่จะนำมาใช้งานประกอบขึ้นด้วยอุปกรณ์ประเภทต่างๆ มากมาย ซึ่งมีทั้งออกแบบมาสำหรับใช้งานกับผู้ใช้งานภายในบ้านและผู้ใช้งานภายในองค์กรต่างๆ

- **PCI Card** ในเมนบอร์ดรุ่นใหม่ๆ หลายๆ รุ่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมนบอร์ดในระดับไฮเอนด์ จะมีคุณสมบัติไร้สายแบบ Built-in ให้มาด้วย แต่ถ้าท่านต้องการให้เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพีซีที่มีอยู่ต้องการใช้งานร่วมกับระบบไร้สาย ได้ก็สามารถเลือกติดตั้ง PCI Card ได้ ด้วยการถอดฝาครอบเครื่องของเราออกแล้วติดตั้งเข้าไปได้ทันที การเคอ์เน็ตไร้สายแบบนี้จะมีเสาส่งสัญญาณแบบ Dipole ให้มาด้วย 1 เสา ถอดเปลี่ยนได้มาให้พร้อมกันด้วย ซึ่งผู้ใช้งานนั้นสามารถที่จะปรับองศาให้หันไปทิศทางที่ Access Point ตั้งอยู่เพื่อให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนสัญญาณระหว่างกันนั้นดีขึ้นได้

- **PCMCIA Card** เครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กที่มีจำหน่ายในปัจจุบันนี้นิยมผนวกรวมความสามารถในการใช้งานเครือข่ายไร้สายเข้าไว้ด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โน้ตบุ๊กที่ใช้งานเทคโนโลยี Intel Centrino ของทาง Intel แต่ถ้าเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กของท่านไม่สามารถใช้งานเครือข่ายไร้สาย ก็สามารหหาซื้อการ์ดแบบ PCMCIA CardBus Adapter มาติดตั้งได้ โดยลักษณะของตัวการ์ดจะมีขนาดเล็กเท่าบัตรเครดิต บางเบาและน้ำหนักน้อยจึงสามารถติดตั้งเข้ากับสล็อตแบบ PCMCIA ของเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กได้โดยง่ายทีเดียว

- **USB Adapter** เป็นการ์ดที่ออกแบบมาให้ใช้งานได้ทั้งเครื่องคอมพิวเตอร์พีซีและโน้ตบุ๊ก โดยมีให้เลือกใช้ทั้งแบบที่เชื่อมต่อผ่านสายนำสัญญาณและในแบบที่ต่อเข้ากับพอร์ต USB โดยตรง การ์ดเครือข่ายไร้สายแบบ USB นับว่าได้ให้ความคุ้มค่าสำหรับการใช้ทีเดียว

- **Access Point** เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวกลางในการรับและส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งการ์ดเครือข่ายไร้สายให้สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ ลักษณะการทำงานจะเป็นเช่นเดียวกับ Hub ที่ใช้กับระบบเครือข่ายใช้สาย โดย Access Point จะมีพอร์ต RJ-45 สำหรับใช้เพื่อเชื่อมโยงเข้ากับเครือข่ายไร้สายที่ใช้งานกันอยู่

- **Wireless Broadband Router** อุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงระดับ ADSL ซึ่งออกแบบมาสำหรับจุดประสงค์การใช้งานอย่างหลากหลายเป็นทั้ง Router, Switch และ Access Point ปกติผู้ผลิตจะออกแบบมาให้มีพอร์ตเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์แบบใช้สายจำนวน 4 พอร์ต แต่ผู้ผลิตหลายรายก็ออกอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กขนาดพ็อกเก็ตที่มีปุ่มสลับโหมดการทำงานมาให้ใช้ซึ่งเหมาะสำหรับการเคลื่อนย้ายบ่อยครั้ง

- **Wireless Signal Booster** เป็นอุปกรณ์เครือข่ายไร้สายที่ใช้เพิ่มระยะทางและประสิทธิภาพการทำงานของ Access Point โดยการเพิ่มกำลังส่งของสัญญาณเพื่อให้ได้รัศมีการใช้งานที่มากขึ้นกว่าเดิม

- **Wireless Bridge** เป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาสำหรับใช้เชื่อมต่อเครือข่าย 2 เครือข่าย ให้สื่อสารกันได้ มีให้เลือกใช้งานทั้งแบบติดตั้งภายนอกซึ่งใช้เชื่อมต่อเครือข่ายระหว่างอาคาร และแบบที่ติดตั้งภายในอาคาร โดย Wireless Bridge มี 2 ลักษณะให้เลือกใช้ คือ แบบที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างจุดต่อจุด (Point-to-Point) และแบบจุดต่อหลายจุด (Point-To-Multipoint)

- **Wireless Print Server** สำหรับเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องพิมพ์เพื่อให้มีความสามารถในการไร้สาย มีทั้งรุ่นที่ออกแบบมาสำหรับใช้งานกับเครื่องพิมพ์ที่มีพอร์ต Parallel, USB หรือทั้งสองพอร์ตรวมกันด้วย

- **PoE (Power over Ethernet) Adapter** เป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาสำหรับแก้ไขข้อยุ่งยากในการเดินสายไฟฟ้าเพื่อใช้งานกับอุปกรณ์ไร้สาย โดยหันมาใช้วิธีการจ่ายไฟผ่านสายนำสัญญาณ UTP ที่ยังมีคู่สายที่ยังไม่ถูกนำมาใช้งานมาทำหน้าที่แทน ซึ่งอุปกรณ์ PoE Adapter จะมี 2 ส่วน คือ Power Injector เป็นอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าและนำสัญญาณข้อมูลจาก Switch Hub เข้าไปสายนำสัญญาณสู่อุปกรณ์ไร้สายอย่าง Access Point และอีกอุปกรณ์เป็น Splitter ที่ใช้แยกสัญญาณข้อมูลและไฟฟ้าให้กับ Access Point ผู้ผลิตหลายรายในปัจจุบันออกแบบให้ Switch สนับสนุนมาตรฐาน IEEE 802.3af (PoE) มาพร้อมด้วย

#### 4.4 คุณสมบัติของอุปกรณ์ในเครือข่ายไร้สาย

- **มาตรฐานเหมาะสมสำหรับการใช้งาน** ในปัจจุบันมาตรฐานที่นิยมใช้กันงานกันอยู่จะเป็นมาตรฐาน IEEE 802.11g ซึ่งรองรับอัตราความเร็วสูงสุดในระดับ 54 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) ซึ่งเพียงพอสำหรับการใช้งานโดยทั่วๆ ไปในปัจจุบันได้อย่างดี พร้อมกันนั้นก็ยังสนับสนุนการทำงานร่วมกันกับมาตรฐานเดิมอย่าง IEEE 802.11b ได้อย่างไร้ปัญหา แต่ในขณะนี้ก็เริ่มที่จะเห็นผู้ผลิตหลายๆ รายต่างส่งผลิตภัณฑ์ที่สนับสนุนเทคโนโลยี MIMO ออกมามากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเป็นที่คาดหมายกันว่า ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันใกล้นี้ เครือข่ายไร้สายที่ให้แบนด์วิดท์, ให้ประสิทธิภาพการใช้งานที่มากกว่าและมีรัศมีการทำงานที่ ดีกว่านั้นจะเข้ามาทดแทนมาตรฐาน IEEE 802.1g เดิม แต่ผลิตภัณฑ์ที่จะใช้งานคุณสมบัติเหล่านี้ได้อย่าง เต็มพิกัดจะต้องเป็นอุปกรณ์จากซีรีส์เดียวกัน ซึ่งตอนนี้ยังมีราคาแพงอยู่มาก การเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับ มาตรฐาน IEEE 802.11g จึงยังคงเป็นคำตอบที่คุ้มค่ามากที่สุดอยู่

- ระบบอินเทอร์เน็ตไร้สายแบบไร้สายสำหรับคุณ การ์ดอีเทอร์เน็ตไร้สายก็มีหลายแบบหลายชนิดให้เราๆ ได้เลือกใช้เช่นเดียวกัน สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์แบบโน้ตบุ๊กคุณสมบัติแบบไร้สายจะถูกผนวกรวมมา พร้อมกับตัวเครื่องแล้ว แต่สำหรับท่านที่ยังต้องการการ์ดไร้สายสำหรับโน้ตบุ๊กตัวโปรดอยู่ Wireless PCMCIA Card ก็คือคำตอบสุดท้าย หรือถ้าอยากจะได้ใช้งานร่วมกับเครื่องพีซีอย่างคุ้มค่าก็ควรเลือกการ์ดแบบ USB Adapter ที่ราคาอาจจะแพงขึ้นมาหน่อยแต่ก็แลกมากับความคุ้มค่าใช้งานได้หลากหลายกว่า สำหรับ ท่านที่มีเครื่องพีซีที่มีอินเทอร์เน็ตไร้สายแบบ PCI Card มาเป็นตัวเลือกเช่นเดียวกัน ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมาพร้อม สายสัญญาณและเสาอากาศที่ตั้งบนที่สูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสารได้

- ผลิตภัณฑ์เชื่อมโยงสัญญาณระหว่างกัน นอกจากจะสนับสนุนการทำงานในแบบ Ad-Hoc หรือ Peer-to-Peer แล้ว ระบบเครือข่ายไร้สายก็ยังสามารถใช้ Access Point เป็นจุดเชื่อมต่อสัญญาณกับ เครือข่ายไร้สายเพื่อการแชร์การใช้ทรัพยากรร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพและตอบสนองความต้องการ ได้ยืดหยุ่นกว่า ในแบบ Infrastructure โดยถ้ายังไม่มีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตหรือติดตั้งระบบเครือข่ายมา ก่อน ก็ควรที่จะเลือกใช้อุปกรณ์อย่าง Wireless Router ที่มีคุณสมบัติในแบบ All-in-One จะให้ความคุ้มค่า ได้มากกว่า หรือถ้ามีการใช้งานเครือข่ายไร้สายและไร้สายอยู่ก่อนแต่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของการ ใช้งาน การเลือกใช้ Access Point ที่สนับสนุนโหมดการทำงานแบบ Bridge และ Repeater ร่วมด้วย จะเป็น การลงทุนที่คุ้มค่ากว่า

- ปกป้องการใช้งานด้วยระบบรักษาความปลอดภัย สิ่งที่ต้องใส่ใจเป็นพิเศษในการจัดซื้อ ผลิตภัณฑ์ระบบเครือข่ายไร้สายก็คือ การสื่อสารไร้สายนั้นเป็นการติดต่อสื่อสารด้วยการใช้คลื่นวิทยุที่ แพร่ไปตามบรรยากาศ จึงต้องให้ความสนใจในการเข้ารหัสข้อมูล ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันการดักจับสัญญาณ จากผู้ไม่ประสงค์ดี การเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ไร้สายจึงต้องคำนึงถึงฟังก์ชันการเข้ารหัสที่ใช้ ซึ่งเทคนิคที่ใช้ งานโดยทั่วไป สำหรับผู้ใช้ตามบ้าน Wired Equivalent Privacy หรือ WEP ขนาด 64/128-bit ร่วมกับ MAC Address Filtering ก็ดูจะเพียงพอ แต่สำหรับการใช้งานภายในองค์กรนั้นเทคนิคการตรวจสอบและ กำหนดสิทธิ์การใช้งานต้องดูแข็งแกร่งกว่าโดยเลือกใช้ WPA (Wi-Fi Protected Privacy) ซึ่งใช้หลักการ เข้ารหัสที่น่าเชื่อถือร่วมกันกับเทคนิคการตรวจสอบและการกำหนดสิทธิ์ในแบบ 2 ฟังก์ชันแบบอื่นๆ อย่าง RADIUS ร่วมด้วยจึงเป็นคำตอบที่เหมาะสม

- เสาร์บ่งสัญญาณของผลิตภัณฑ์ สำหรับเสาอากาศของการ์ดไร้สายนั้น ถ้าเป็นการ์ดแบบ PCMCIA และแบบ USB จะเป็นเสาอากาศ Built-in มาพร้อมตัวการ์ด ส่วนการ์ดแบบ PCI นั้นจะเป็นเสาอากาศแบบ Reverse-SMA Connector ซึ่งสามารถถอดออกได้ โดยที่พบเห็นจะเป็นทั้งในแบบเสาเดี่ยวๆ ที่หมุนเข้ากับตัวการ์ด และอีกแบบจะเป็นแบบที่มีสายนำสัญญาณต่อเชื่อมกับเสาที่ตั้งบนพื้นหรือยึดติดกับผนังได้ ซึ่งการเลือกซื้อนั้นควรเลือกซื้อเสาอากาศแบบหลัง เนื่องจากให้ความยืดหยุ่นในการติดตั้งมากกว่า เพราะสามารถติดตั้งบนที่สูงๆ ได้ สำหรับอุปกรณ์อย่าง Access Point หรือ Wireless Router นั้นจะมีเสานำสัญญาณทั้งในแบบเสาเดี่ยวและ 2 เสา โดยการเลือกซื้อนั้นควรเลือกซื้อแบบ 2 เสา เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณที่ดีกว่า โดยลักษณะของเสานั้นจะมีทั้งในแบบที่ยึดติดกับเข้ากับตัวอุปกรณ์ ซึ่งส่วนใหญ่จะพบเห็นในรุ่นที่ออกแบบมาสำหรับใช้งานตามบ้าน และอีกแบบเป็นเสาที่สามารถถอดเปลี่ยนได้ ซึ่งหัวเชื่อมต่อนั้นจะเป็นทั้งแบบ Reverse-SMA Connector, SMA Connector และแบบ T-Connector ซึ่งถ้าจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนเสาอากาศควรที่จะเลือกซื้อจากทางผู้ผลิตรายเดียวกันเพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่ซื้อหัวเชื่อมต่อผิดประเภท สำหรับชนิดของเสาอากาศที่มีจำหน่ายจะมี 2 ชนิดหลักๆ ก็คือแบบ Omni-Direction Antenna ซึ่งเป็นเสาที่ทุกผู้ผลิตให้มากับตัวผลิตภัณฑ์แล้ว โดยคุณสมบัติของเสาประเภทนี้ก็คือ การรับและส่งสัญญาณในแบบรอบทิศทางในลักษณะเป็นวงกลม ทำให้การกระจายสัญญาณนั้นมีรัศมีโดยรอบ ครอบคลุมพื้นที่ แต่ถ้าต้องการใช้งานที่มีลักษณะรับส่งสัญญาณเป็นเส้นตรงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการรับส่งและระยะทางตามต้องการก็มีเสาอีกชนิดหนึ่ง คือ Direction Antenna ซึ่งนิยมใช้งานกับผลิตภัณฑ์ประเภท Wireless Bridge สำหรับการสื่อสารในแบบ Point-to-Point สำหรับท่านที่ต้องการเพิ่มระยะทางการเชื่อมต่อให้ได้ไกลมากยิ่งขึ้น ก็สามารถเลือกซื้อเสาอากาศ High Gain ที่มีการขยายสัญญาณสูงกว่าเสาอากาศที่ทางผู้ผลิตให้มากับตัวอุปกรณ์ โดยมีให้เลือกใช้หลายแบบทั้งในแบบที่มีค่า Gain 5, 8, 12, 14 หรือสูงกว่าได้

- กำลังส่งที่ปรับได้ สำหรับการใช้งานผลิตภัณฑ์ไร้สายนั้น การปรับกำลังส่งสัญญาณได้นับว่าเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของตัวผลิตภัณฑ์ โดยกำลังส่งสูงสุดจะไม่เกิน 100mW หรือ 20dBm ซึ่งผู้ผลิตรายจะมีผลิตภัณฑ์ที่สนับสนุนกำลังสูงชนิดนี้ที่เดียว โดยค่ากำลังส่งที่มากก็แสดงว่า สามารถที่จะแพร่สัญญาณไปในระยะทางที่ไกล หรือให้รัศมีที่มากขึ้น แต่ก็สามารถปรับกำลังส่งให้ลดต่ำลงเพื่อให้เหมาะสมกับความต้องการได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานภายในองค์กรที่จะต้องใช้กำลังส่งให้เหมาะสมกับพื้นที่ เนื่องจากกำลังส่งสูงๆ อาจจะไปรบกวนสำนักงานข้างเคียงและอาจถูกลักลอบใช้งานระบบเครือข่ายไร้สายก็เป็นไปได้

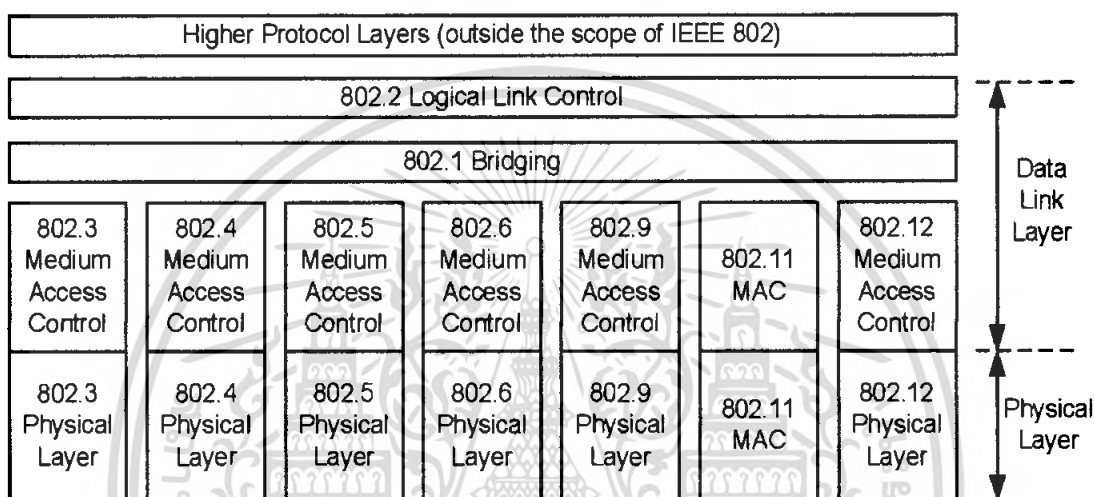
- การอัปเดตเฟิร์มแวร์เพื่อเพิ่มเติมคุณสมบัติใหม่ๆ อุปกรณ์สำหรับระบบเครือข่ายไร้สาย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Access Point, Wireless Router หรือผลิตภัณฑ์ไร้สายประเภทอื่นๆ ทางผู้ผลิตก็อาจจะเพิ่มเติมคุณสมบัติใหม่ๆ ในภายหลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของฟังก์ชันการเข้ารหัส ซึ่งอุปกรณ์ที่ผลิตออกมาก่อนหน้าจะสนับสนุน WEP, WPA ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับระบบรักษาความปลอดภัยที่ต้องการความน่าเชื่อถือสูงมากกว่า ทำให้ผู้ผลิตรายต่างๆ มีการออกเฟิร์มแวร์รุ่นใหม่ๆ ที่สนับสนุนการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มเติมอย่างทำให้รองรับ WPA2 ซึ่งเป็นฟังก์ชันการเข้ารหัสรุ่นใหม่ล่าสุดของอุปกรณ์ไร้สายออกมา ซึ่งผู้ผลิตจะมีเมนูเชื่อมโยงเว็บไซต์เพื่อให้ผู้ใช้งานได้ดาวน์โหลดเฟิร์มแวร์รุ่นใหม่มาใช้งานได้

#### 4.5 พื้นฐานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11

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



รูปที่ 4.1 มาตรฐาน IEEE 802.11 ในมาตรฐาน IEEE 802

##### 4.5.1 โทโปโลยี (Topology)

มาตรฐาน IEEE 802.11 ประกอบด้วยกลุ่มสื่อสารได้แก่ สถานีฐาน (Access Point) และลูกข่าย Client โดยที่กลุ่มสื่อสารนี้เรียกว่า กลุ่มบริการพื้นฐาน (Basic Service Set: BSS) ไปตลอดชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ การรวมตัวแบบแอดฮอค (Ad-Hoc) หมายถึงการติดต่อสื่อสารระหว่างลูกข่ายโดยไม่ต้องใช้สถานีฐานและการรวมตัวแบบโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) คือการติดต่อสื่อสารโดยใช้สถานีฐานเป็นศูนย์กลางการควบคุม กลุ่มอำนวยความสะดวกเมื่อลูกข่ายเคลื่อนย้ายไปยังสถานีฐานอื่นซึ่งเรียก กลุ่มบริการขยาย (Extended Service Set : ESS) ถ้าสถานีฐานหนึ่งสื่อสารกับสถานีอื่นเพื่อส่งต่อเฟรมข้อมูลให้กับข้อมูลผ่านทางเครือข่ายใช้สารซึ่งเรียกกลไกนี้ว่า ระบบกระจาย (Distribution System : DS) แสดงดังรูปที่ 4.2

##### 4.5.2 การควบคุมการเข้าถึงสื่อ (Medium Access Control)

เครือข่ายไร้สายใช้อากาศเป็นสื่อสัญญาณทำให้เกิดปัญหาการรบกวนตัวของลูกข่ายซึ่งปัญหานี้ไม่เกิดขึ้นกับเครือข่ายใช้สาย การรบกวนตัวเกิดจากระยะทำงานที่จำกัดทำให้ลูกข่ายไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้อย่างทั่วถึงทั้งกลุ่ม ตัวอย่างเช่น ลูกข่าย A และ C จะไม่สามารถติดต่อกันได้เนื่องจากเกินระยะทำการแล้ว ถ้า A และ C ส่งเฟรม B พร้อม ๆ กันทำให้เกิดการชนกัน การส่งเฟรมข้อมูลพร้อม ๆ กันของ A และ C ไม่

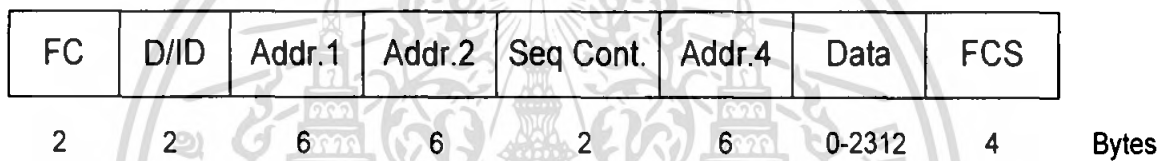
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทราบว่าบีบีซี ติดต่อกับสถานีอื่น ๆ ด้วยแสดงดังรูปที่ 4.3 IEEE 802.11 ซึ่งสามารถแก้ปัญหาโดยใช้กลไก RTS/CTS

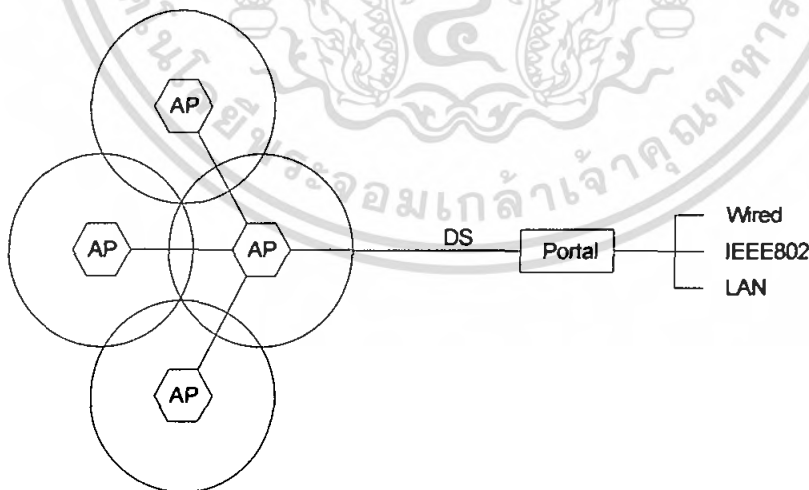
การควบคุมการเข้าถึงสื่อใช้กลไกซึ่งเรียกว่า CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidances) ใช้หลักการตรวจสอบสื่อก่อนส่งข้อมูล ถ้าสื่อว่างแล้วจะทำการส่งข้อมูลเมื่อส่งแล้วฝ่ายรับได้รับข้อมูลถูกต้องจะส่งเฟรมตอบรับกลับมา ถ้าไม่มีเฟรมตอบรับกลับมาให้ถือว่าการส่งนั้นเกิดการชนกัน จากนั้นฝ่ายส่งจะทำการส่งใหม่โดยหน่วงเวลาดำเนินการ การหน่วงเวลาเป็นแบบสุ่ม และถ้ายังมีการชนกันเวลาที่ใช้หน่วง ก็จะเพิ่มขึ้น

#### 4.5.3 รูปแบบเฟรม

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

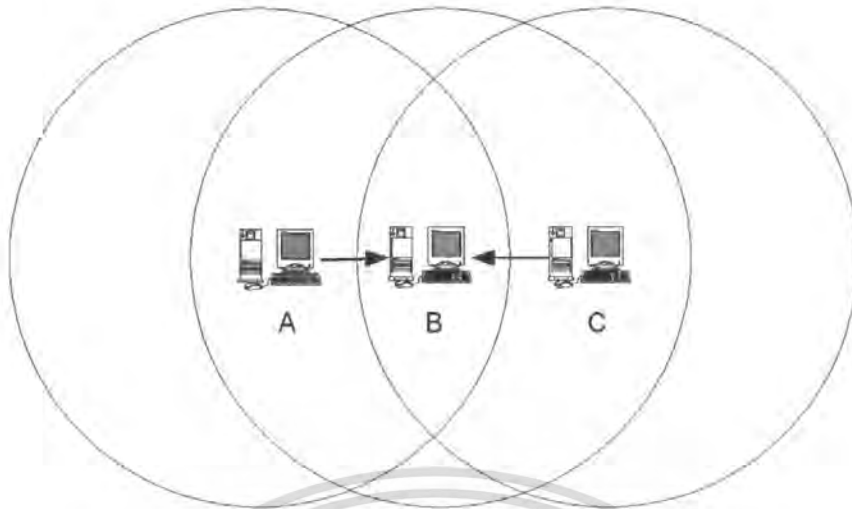


รูปที่ 4.2 เฟรมชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อ



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

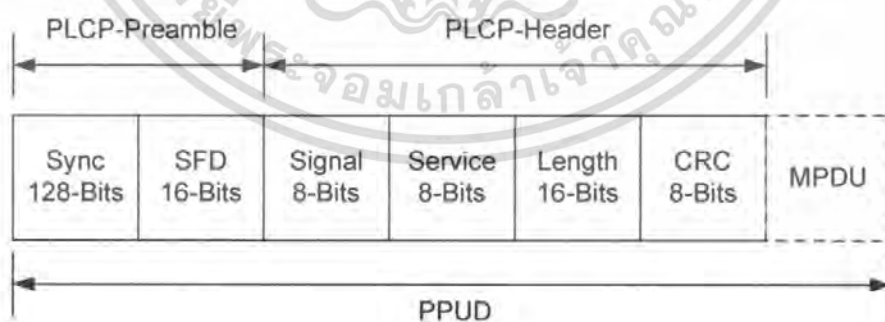
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ปรากฏการณ์การซ้อนตัวในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

#### 4.5.4 ชั้นสื่อสารกายภาพ

IEEE 802.11 กำหนดให้ก่อนส่งเฟรมข้อมูลจากชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อจะต้องเติมข้อมูลที่เรียกว่า ฟร็อมแอมเบิล - PCLP และส่วนหัว - PLCP ดังรูปที่ 4.5 ฟร็อมแอมเบิล - PLCP ประกอบด้วยฟิลด์ Sync และ SFD เพื่อบรรจุข้อมูลใช้สำหรับการซิงโครไนส์และบอกจุดเริ่มต้นเฟรม ตามลำดับ ส่วนหัว PLCP ประกอบด้วยฟิลด์ Signal ซึ่งแสดงการมอดูเลตที่ใช้ฟิลด์ Service คือฟิลด์ที่สงวนไว้ ฟิลด์ Length แสดงค่าที่ใช้คำนวณจุดสิ้นสุดของเฟรม ฟิลด์ CRC คือฟิลด์ที่บรรจุข้อมูลการตรวจสอบความถูกต้องของเฟรม



รูปที่ 4.5 ฟร็อมแอมเบิล PLCP ส่วนหัว PLCP และ MPDU

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

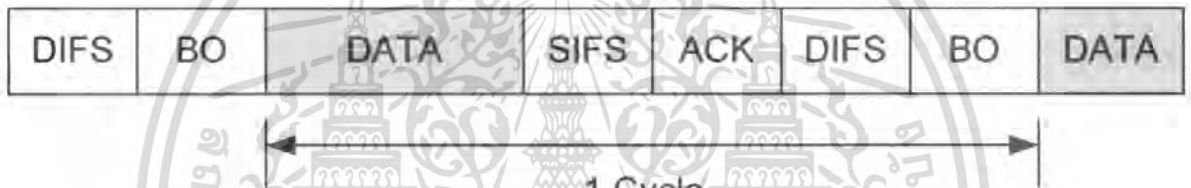
#### 4.5.5 ค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุด

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

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

โดยที่ MSDU คือขนาดข้อมูลจากชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อ ส่วน  $T_{MSDU}$  คือเวลารวมจากการส่งข้อมูล 1 รอบ แสดงดังรูป ที่ 4.6 เขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

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



รูปที่ 4.6 แผนผังเวลาการส่งข้อมูล IEEE 802.11

#### 4.6 ระยะบริการสูงสุด

จุดประสงค์หลักของแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นที่กล่าวถึงในบทที่ 4 คือการทำนายค่าความสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายให้มีความแม่นยำที่สุดเพื่อหาระยะทำงานของระบบสื่อสารก่อนการติดตั้ง ระยะทำงานไกลสุดของระบบเกิดขึ้นเมื่อระดับกำลังงานรับเท่ากับระดับที่ให้อัตราการสูญเสียการแพร่กระจายที่กำหนดไว้ซึ่งระดับนี้เรียกว่า ความไวเครื่องรับ (Receiver Sensitivity) อัตราการสูญเสียการแพร่กระจายที่ให้กำลังงานรับเท่ากับความไวเครื่องรับเรียกว่า ค่าอัตราสูญเสียการแพร่กระจายสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Acceptable Path Loss) แสดงเป็นหน่วยเดซิเบล ได้ดังนี้

$$L_{\max} = P_t - L_r + G_t - L_r + G_r - S \quad (4.3)$$

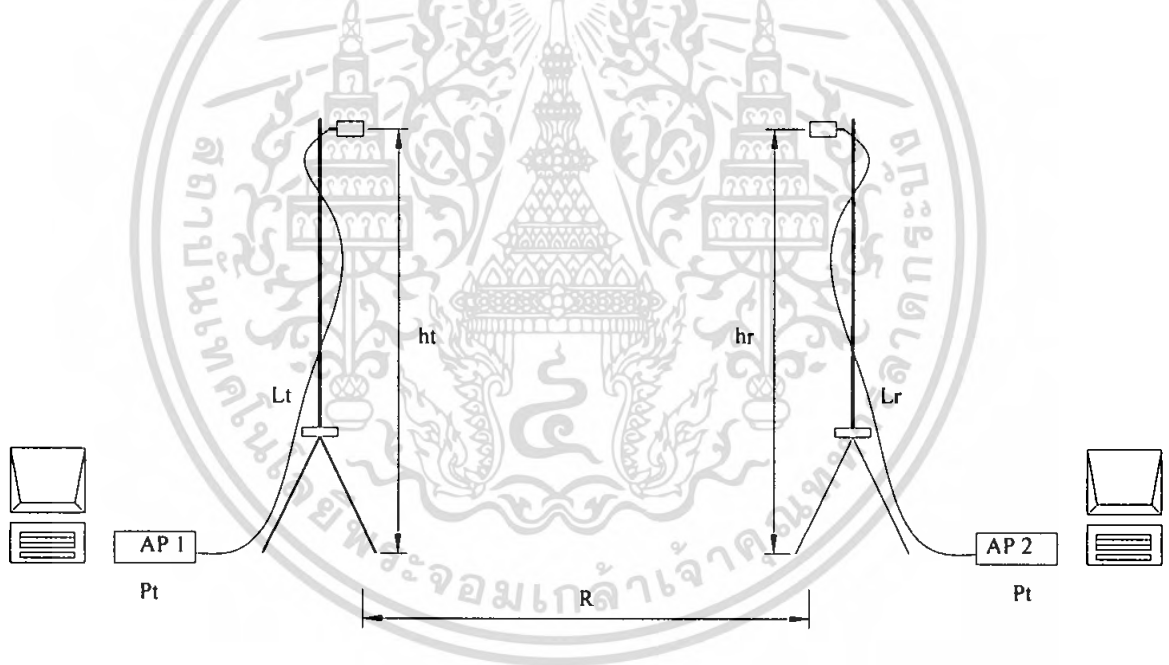
เมื่อ  $P_t$  คือกำลังงานส่ง  $G_t$  และ  $G_r$  คืออัตราการขยายของสายอากาศส่งและรับ ตามลำดับ  $L_r$  และ  $L_r$  คืออัตราการสูญเสียจากสายนำสัญญาณด้านส่งและรับ  $S$  คือค่าความไวเครื่องรับ ซึ่งตัวแปรทั้งหมดมีหน่วยเป็น dB ซึ่งจากทฤษฎีย้อนกลับ (Reciprocity Theorem) ได้นิยามว่า ความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นจะไม่เกิด การเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการสลับหน้าที่รับ

แอกและที่สายอากาศที่ส่งและรับ แต่อย่างไรก็ตาม อัตราการสูญเสีย การแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่ยอมรับได้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างสองทิศทางอาจมีความแตกต่างกันเนื่องจากความไว เครื่องรับ ด้านรับและด้านส่งต่างกัน ตัวอย่างเช่น เครื่องรับที่สถานีฐานถูกออกแบบให้มีความไว เครื่องรับมากกว่าลูกข่ายเพื่อลด กำลังงานส่งจากลูกข่าย

พารามิเตอร์	สถานีฐาน	ด้านลูกข่าย
กำลังงานส่ง (Pt)	15 dBm	-
การสูญเสียเนื่องจากสายนำสัญญาณ	0.6 dB (CFD-200)	0.6 dB (CFD-200)
อัตราขยายสายอากาศ	5.85dBi	5.85dBi
ความสูงสายอากาศ	ht=1.5 m.	hr = 1.5 m
เครื่องรับส่ง		
ระยะห่างระหว่างสถานีกับลูกข่าย	10-400 m.	

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณระยะบริการสูงสุด



รูปที่ 4.7 การทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก  
ในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 สรุป

เนื้อหาบทนี้กล่าวถึงการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยการพิจารณาจากระยะบริการสูงสุดและค่าวิสัยสามารถซึ่งเริ่มจากการศึกษาพื้นฐานของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11 โทโปโลยีการความคุมการเข้าถึงสื่อรูปแบบเฟรมชั้นสื่อสาร ภายภาคค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุดและการทำนาระยะบริการสูงสุดของสายอากาศโคโพล และสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอกแบบโคที่ให้ระยะบริการที่คิดว่าเนื่องจาก ระยะบริการสูงสุดและค่าวิสัยสามารถที่อัตราการขยายของสายอากาศค่าต่าง ๆ ซึ่งจะสามารถนำไปใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพสายอากาศและออกแบบสายอากาศเพื่อให้โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย มีคุณภาพการบริการตามที่กำหนดได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

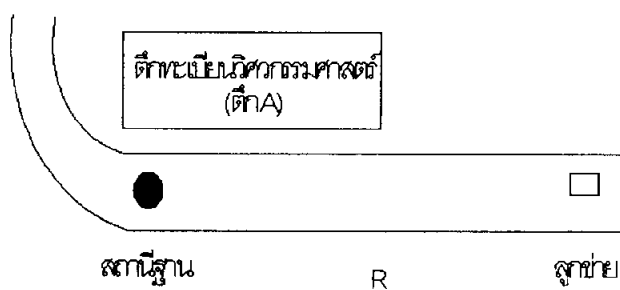
### การประเมินประสิทธิภาพและผลการทดสอบ

#### 5.1 บทนำ

ในบทที่ 5 ได้แสดงถึงผลกระทบเนื่องจากประสิทธิภาพสายอากาศต่อระบบบริการและค่าวิสัยสามารถแต่เพื่อเป็นการยืนยันและความถูกต้องของการคำนวณ จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลดังกล่าว โดยการทดสอบจะต้องอยู่ในเงื่อนไขการสื่อสารแบบจุดต่อจุดภายนอกอาคาร เนื้อหาบทนี้ประกอบด้วย การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ วิธีการทดสอบ ผลการทดสอบ ประกอบด้วยกำลังงานรับที่ลูกข่าย ระยะเวลาบริการสูงสุด ค่าวิสัยความสามารถ จากนั้นนำผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ การศึกษาผลการทดสอบและการคำนวณมีประโยชน์ต่อการออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของโครงข่ายไร้สาย

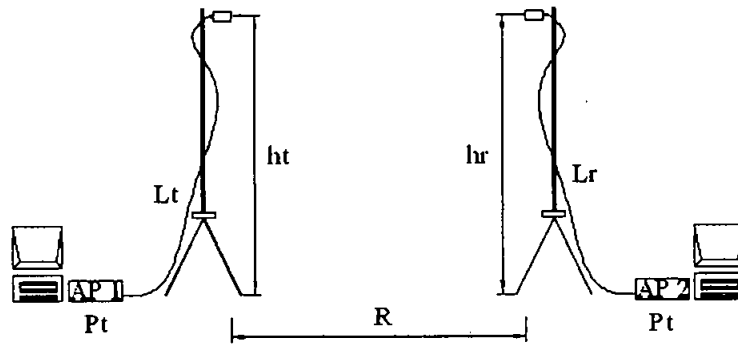
#### 5.2 การทดสอบประสิทธิภาพ

การสื่อสารแบบจุดต่อจุดสำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ซึ่งโดยทั่วไปใช้เชื่อมต่อสองเครือข่ายที่อยู่ระหว่างอาคารเข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐานกับสถานีฐานการทดสอบด้วยเงื่อนไขทำได้ยาก เนื่องจากมีระยะเวลาบริการสูงสุด ไกลมาก และการวัดกำลังงานรับที่สถานีฐานทำได้ยาก ดังนั้นจึงสมมติให้ลูกข่ายทำหน้าที่แทนสถานีฐานด้านรับเพื่อให้การทดสอบทำได้ง่ายและลดความผิดพลาดลง ซึ่งการสื่อสารแบบจุดต่อจุดส่วนมากแล้วมีช่องสื่อสารแบบไร้สาย คือ แนวเส้นระดับสายตาระหว่างเครื่องรับและส่ง ดังนั้นเลือกสถานที่ทดสอบคือริมถนนหน้าอาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ (สำนักทะเบียน และภาควิศวกรรมโทรคมนาคม) ตลอดแนวจนถึงอาคารเรียนรวมคณะวิศวกรรมศาสตร์ (E-12) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นถนนคอนกรีต โดยที่สถานีฐานติดตั้งบริเวณหน้าสำนักทะเบียนวิศวกรรมศาสตร์ซึ่งเป็นช่วงต้นถนน การวัดเริ่มต้นจากต้นถนนจนถึงระยะสูงสุดที่สามารถวัดได้แสดงดังรูปที่ 6.1 ด้านสถานีฐานประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ซึ่งติดตั้งโปรแกรมทดสอบและเชื่อมต่อกับสถานีฐานด้วยโครงข่ายท้องถิ่น (LAN) สถานีฐานเชื่อมต่อกับสายอากาศทดสอบด้วยสายนำสัญญาณยาว 0.5 เมตร สายอากาศทดสอบติดตั้งบนขาตั้งมีความสูงจากพื้น 1.5 เมตร ด้านลูกข่ายประกอบด้วยคอมพิวเตอร์พกพาติดตั้งอุปกรณ์โครงข่ายท้องถิ่นไร้สายมีความสูงจากพื้น 1.5 เมตร ดังรูปที่ 5.2 ในการทดสอบเป็นจุดไม่ต่อเนื่อง โดยแต่ละจุดห่างกัน 10 เมตร ตามความยาวถนน การทดสอบแบ่งออกเป็นสองแบบ คือ การวัดกำลังงานรับ และการวัดค่าวิสัยสามารถมีรายละเอียด ดังนี้



รูปที่ 5.1 สถานที่ทดสอบ และอุปกรณ์ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 การทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศ

พารามิเตอร์	สถานีฐาน	ด้านลูกข่าย
กำลังงานส่ง (Pt)	15 dBm	-
การสูญเสียเนื่องจากสายนำสัญญาณ	0.6 dB (CFD-200)	0.6 dB (CFD-200)
อัตราขยายสายอากาศ	5.85dBi	5.85dBi
ความสูงสายอากาศ	ht=1.5 m.	hr = 1.5 m
เครื่องรับส่ง		
ระยะห่างระหว่างสถานีกับลูกข่าย	10-400 m.	

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบ

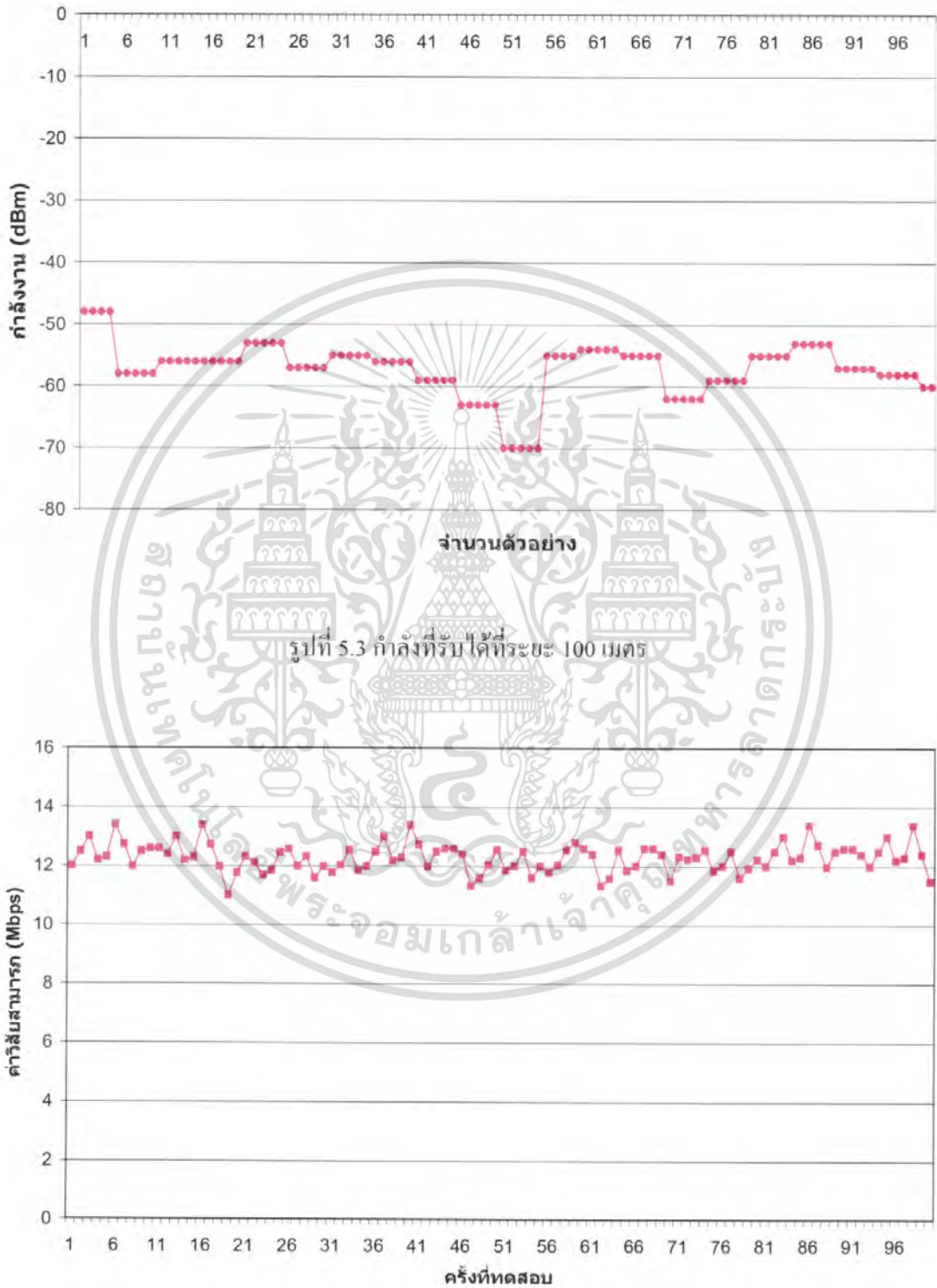
### 5.2.1 การวัดกำลังงาน

กำลังงานรับทดสอบจากค่า RSSI (Received Signal Strength Intensity) จากการ์ดด้านแม่ข่าย ซึ่งมาตรฐาน IEEE 802.11 กำหนดให้กำลังงานรับจากการ์ดแทนด้วยตัวเลข 0 – 255 ซึ่งผู้ผลิตแต่ละราย กำหนดค่าไม่เหมือนกัน โปรแกรมทดสอบกำลังงานรับมีชื่อว่า NetStumber ค่าที่ได้จากโปรแกรมแสดง ค่ากำลังงานรับในหน่วย dBm ซึ่งได้จากเปลี่ยนค่า RSSI เป็นกำลังงานรับค่าที่ทดสอบได้ที่ระยะ 100 เมตร แสดงดังรูปที่ 5.3 โปรแกรมทำการบันทึกค่ากำลังงานรับไม่ต่ำกว่า 100 ครั้ง ซึ่งบันทึกระยะเวลาห่างกัน 1 วินาที จากรูปที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่าค่ากำลังงานรับที่วัดได้ มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้น ๆ ลง ๆ เนื่องจากการ รวมกันของคลื่นที่มาจากหลายทิศทางซึ่งมีแอมพลิจูดและเฟสที่แตกต่างกัน

### 5.2.2 การทดสอบค่าวิสัยสามารถ

การทดสอบค่าวิสัยสามารถทำได้โดยใช้โปรแกรม Chariot ซึ่งขั้นตอนการทำการทดสอบเริ่ม จากลูกข่ายส่งไฟล์คำสั่ง (Script) ไปยังคอมพิวเตอร์ด้านสถานีฐานเพื่อเตรียมความพร้อมของโปรแกรมทั้ง ด้านรับและส่ง จากนั้นคอมพิวเตอร์ด้านส่งทำการส่งไฟล์ขนาด 100,000 ไบต์ผ่านสถานีฐานไปยังลูกข่าย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วทำการคำนวณค่าวิสัยสามารถ ในการทดสอบแต่ละครั้งทำการวัดไม่ต่ำกว่า 100 ครั้งและทำการวัดที่ระยะ 100 เมตร ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.4

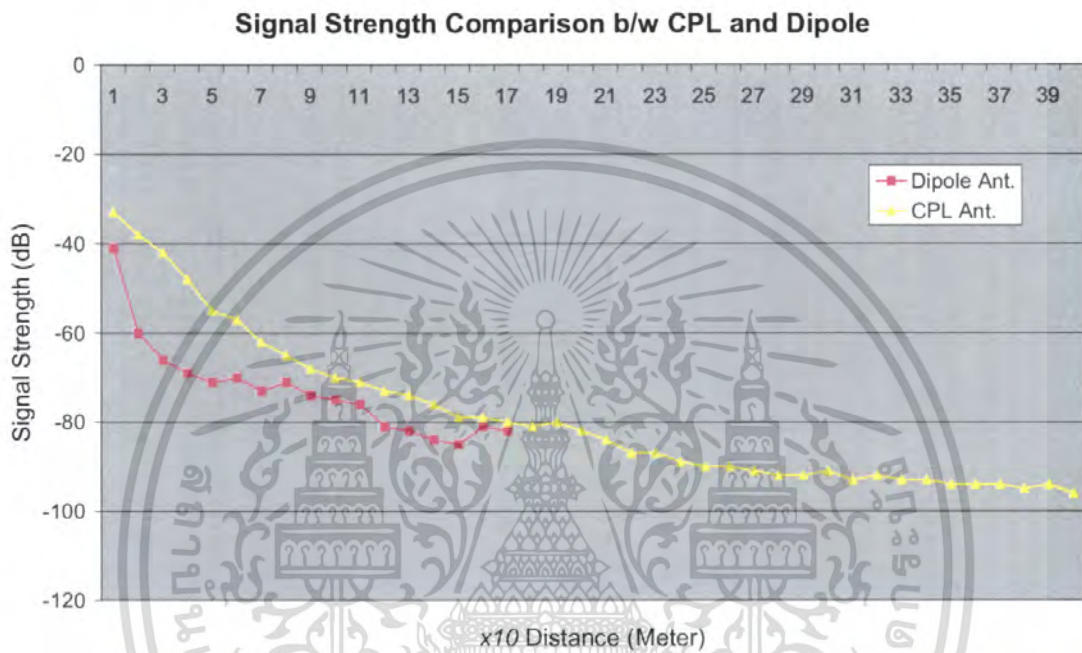


รูปที่ 5.4 ค่าวิสัยสามารถที่ระยะ 100 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 ระยะเวลาบริการ

ผลการทดสอบระยะเวลาบริการสูงสุดแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 พบว่าสายอากาศไดโพลและสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอกมีระยะเวลาบริการสูงสุดเท่ากับ 170 และ 400 เมตร ตามลำดับ หรือ สายอากาศสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอกมีระยะเวลาบริการสูงสุดไกลกว่าสายอากาศไดโพลเท่ากับ 42.5 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบค่าวิสัยสามารถระหว่างสายอากาศไดโพล และสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก

การทดสอบกำลังของสัญญาณ โดยใช้โปรแกรม Netstumbler ให้ผลดังรูปที่ 5.8 ในการทดสอบสายอากาศไดโพลนั้นเกิดการสะท้อนของคลื่นจากตึกในบางช่วงของการทดสอบ ทำให้มีผลเกิดการเสริมกันของคลื่นที่ระยะ 70 ถึง 120 เมตร เมื่อทำการทดสอบเลขระยะดังกล่าวออกไประดับสัญญาณจึงจางหายไปจนระดับต่ำมากจนไม่สามารถรับส่งข้อมูลได้ที่ระยะ 170 เมตร โดยระหว่างทำการวัดระดับสัญญาณ ได้ตรวจสอบสถานะการรับส่งข้อมูลโดยใช้คำสั่ง Ping 192.168.0.52 -t ไปยังเครื่องแม่ข่าย เมื่อระดับความเข้มของสัญญาณลดลงมากจนไม่มีการตอบกลับจากเครื่องแม่ข่าย จะถือว่าเป็นจุดไกลที่สุดของการรับส่งข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 5.7

```

C:\WINDOWS\system32\ping.exe
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=2ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=2ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=2ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=32ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=2ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=2ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=2ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=2ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=2ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=2ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=2ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=2ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=2ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=2ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=2ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=3ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=3ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=4ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=11ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=7ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=3ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=7ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=180ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=189ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=111ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=538ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=162ms TTL=128
Request timed out.
Request timed out.
Request timed out.
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=221ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=247ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=302ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=292ms TTL=128
Request timed out.
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=211ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=125ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=6ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=41ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=91ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=43ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=157ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=111ms TTL=128
Request timed out.
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=398ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=258ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=257ms TTL=128
Request timed out.
Request timed out.
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=403ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=444ms TTL=128
Request timed out.
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=366ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=114ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=125ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=142ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=96ms TTL=128
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=98ms TTL=128
Request timed out.
Reply from 192.168.0.52: bytes=32 time=293ms TTL=128

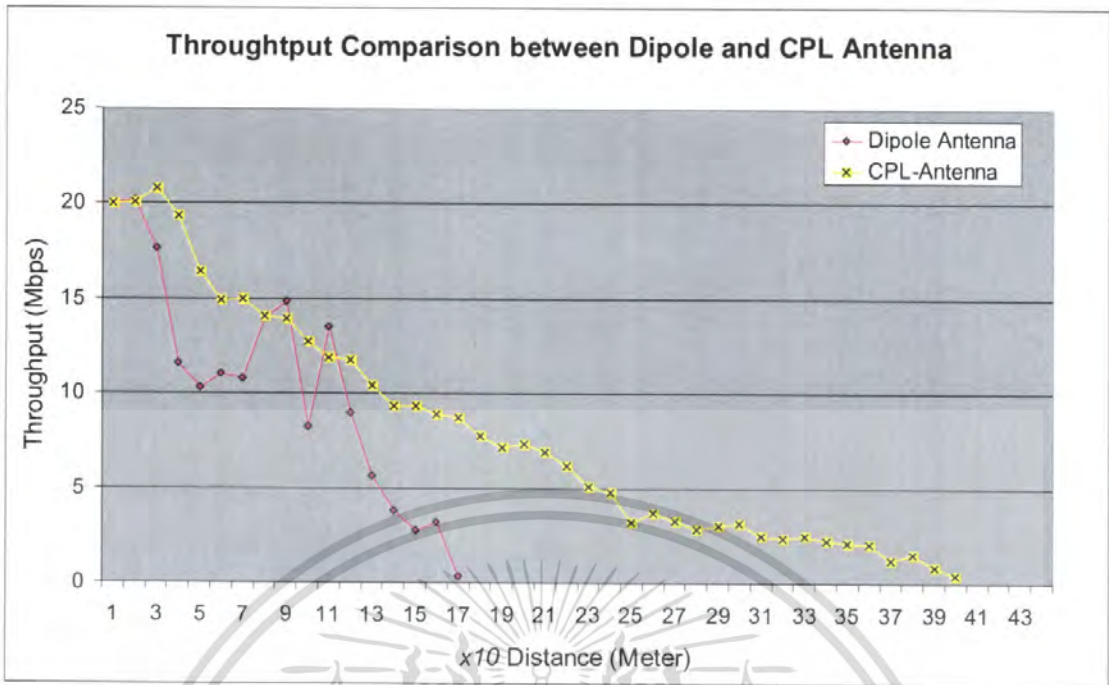
```

รูปที่ 5.6 การตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อโดยใช้คำสั่ง Ping

#### 5.4 คำวิสัยสามารถ

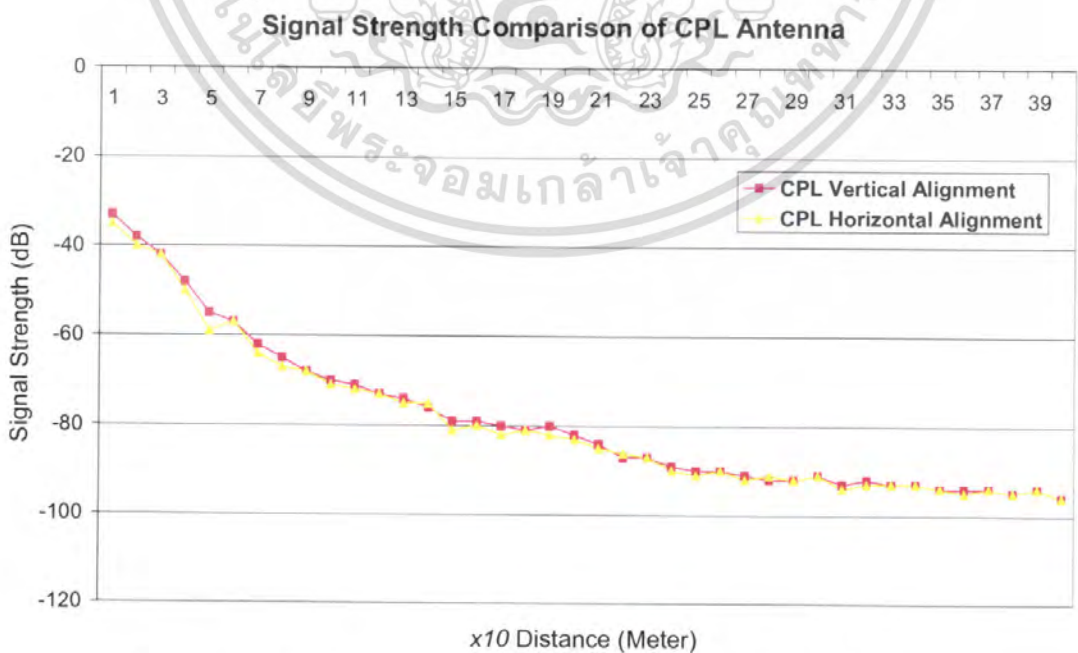
ผลการทดสอบคำวิสัยสามารถของสายอากาศไดโพล และสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก ดังรูปที่ 6.7 โดยคำวิสัยสามารถสูงสุดที่สายอากาศทั้งสองทำได้มีค่าประมาณ 20 Mbps ซึ่งต่างจากคำวิสัยสามารถสูงสุด 54Mbps เนื่องจากข้อจำกัดของซอฟต์แวร์และตัวโปรโตคอลเอง จากผลการทดสอบสายอากาศตัวสะท้อนทรงกระบอกที่แพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมให้คำวิสัยสามารถเฉลี่ยสูงกว่าสายอากาศไดโพลตลอดระยะทางทดสอบ ดังรูปที่ 5.7 เนื่องจากอัตราสูงกว่า และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแคบกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



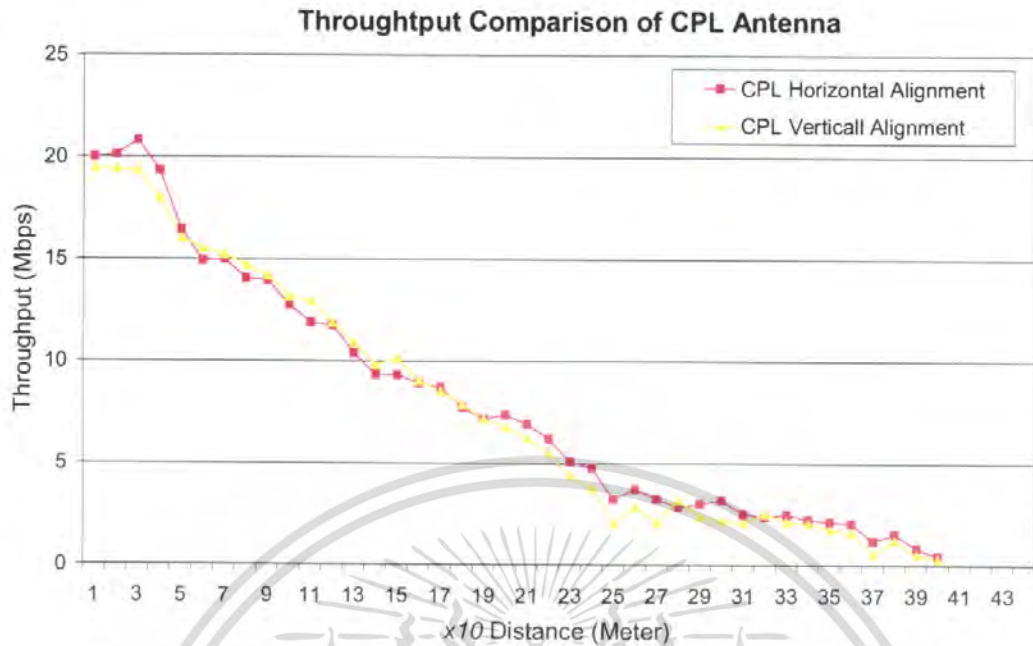
รูปที่ 5.7 ผลทดสอบค่าวิสัยสามารถกรณีสายอากาศสถานีฐานคือ สายอากาศไดโพล และตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก

เนื่องจากสายอากาศที่ทำการออกแบบมีขั้วคลื่นแบบวงกลม ดังนั้นการติดตั้งสายอากาศแบบวางตั้งหรือวางนอนจึงไม่มีผลต่อระดับสัญญาณและค่าวิสัยสามารถดังแสดงในรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 โดยในการทดสอบสายอากาศนั้น จะทำการติดตั้งสายอากาศให้วางในมุมที่ต่างกัน 90 องศา



รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบระดับสัญญาณสายอากาศขั้วคลื่นวงกลมแบบวางตั้งและวางนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบค่าวิสัยสามารถสายอากาศขั้วคลื่นวงกลมแบบวางตั้งและวางนอน

## 5.5 สรุป

ผลการประเมินประสิทธิภาพสายอากาศจากระยะบริการสูงสุด และค่าวิสัยสามารถคือ สายอากาศตัวสะท้อนทรงกระบอก ให้ระยะบริการสูงสุดของโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายเท่ากับ 400 เมตร และค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยเท่ากับ 20 Mbps ซึ่งให้ผลที่ดีกว่าสายอากาศไดโพลทุกระยะของการทดสอบ การประเมินประสิทธิภาพสายอากาศในบ้นนี้แสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีกว่าของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอก ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการสื่อสารไร้สายแบบจุดต่อจุด

## บทที่ 6

### สรุปผล และข้อเสนอแนะ

#### 6.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงการสรุปเนื้อหาโดยรวม ข้อเสนอแนะ และแนวทางการประเมินประสิทธิภาพสายอากาศ ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษา วิเคราะห์ และทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศตัวสะท้อนทรงกระบอกที่แพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยการวิจัยเริ่มจาก การศึกษาคุณลักษณะสายอากาศ แบบจะลองการสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายคลื่น คุณสมบัติของช่องสื่อสาร โครงข่ายท้องถิ่นไร้สายเบื้องต้น การทดสอบเพื่อหาค่าระยะบริการสูงสุดและการหาค่าวิสัยสามารถของสายอากาศตัวสะท้อนทรงกระบอกที่แพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมและทำการเปรียบเทียบกับสายอากาศไดโพล พบว่าผลการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศตัวสะท้อนทรงกระบอกที่แพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลม ในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายนั้นให้ระยะบริการสูงสุดดีกว่าสายอากาศไดโพลเท่ากับ 42.5 %

#### 6.2 สรุปเนื้อหาโดยรวม

เนื้อหาทั้งหมดจะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ขอวิทยานิพนธ์ ขอบเขตการวิจัย ขั้นตอนการศึกษาและเนื้อหาวิทยานิพนธ์ ศึกษาโครงสร้างสายอากาศตัวสะท้อนทรงกระบอกที่แพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลม การวิเคราะห์และการออกแบบสายอากาศ ผลการคำนวณและทดสอบคุณลักษณะสายอากาศได้แก่ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง อัตราส่วนคลื่นนิ่งและอิมพีแดนซ์ ศึกษาวิเคราะห์แบบจำลองการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นได้แก่ แบบจำลองอากาศว่าง แบบจำลองสองรังสี แบบจำลองฮาดะ และแบบจำลองความชันคู่ การเกิดการจางหายของช่องสื่อสาร การอธิบายการเกิดการจางหาย การประเมินประสิทธิภาพสายอากาศในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย เริ่มจากพื้นฐานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โทโปโลยี การควบคุมการเข้าถึงสื่อ รูปแบบเฟรม ชั้นสื่อสารกายภาพ ค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุด การหาระยะบริการสูงสุดและการแสดงการทดสอบค่า โดยใช้สายอากาศตัวสะท้อนทรงกระบอกที่แพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบไดโพล วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลคำนวณกับผลทดสอบจากการทดสอบพบว่าสายอากาศตัวสะท้อนทรงกระบอกที่แพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมมีระยะบริการสูงสุดเท่ากับ 350 เมตร และค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยเท่ากับ 12.29 Mbps ที่ระยะ 100 เมตร

### 6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

ผลการวิเคราะห์และการทดสอบที่ได้แสดงในบทที่ผ่านมา พบว่าการทดสอบสายอากาศโดยใช้ อุปกรณ์เชื่อมต่อโครงข่ายท้องถิ่น ไร้สายนั้นตัวอุปกรณ์จะมีหลายช่องสัญญาณในการเชื่อมต่อ เพื่อให้การทดสอบมีผลลัพธ์แบบเชิงเส้นควรกำหนดช่องสัญญาณคงที่ความแม่นยำของการทดสอบบางส่วนขึ้นอยู่กับความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์ทดสอบ แนวทางการพัฒนาต่อไปอาจจะเปลี่ยนตัวสะท้อนคลื่นทรงกระบอกที่ทำด้วยทองแดงหนา เป็นตาข่ายทองแดงเพื่อลดน้ำหนักของสายอากาศโดยที่ยังคงคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าเหมือนเดิม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

1. บัณฑิต โรจน์อารยานนท์, “วิศวกรรมสายอากาศ”, พิมพ์ครั้งที่ 4, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537
2. โมไนย ไกรฤกษ์ม, “ทฤษฎีสายอากาศ”, คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หกจ.สำนักพิมพ์ ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2537
3. Balanis, Constantine A., “Antennas Theory Analysis and Design”, Network, John Wiley & Sons, 1982
4. John D.Kraus, “Antennas”, 2<sup>nd</sup> ed, McGraw-Hill, 1992
5. Thomas A. Milligan, “Modern Antenna Design”, McGraw-Hill, 1985



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

DWL-2100AP > High Speed 2.4GHz (802.11g) Wireless 108Mbps<sup>1</sup> Access Point

Specifications

<b>Standards</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IEEE 802.11g</li> <li>• IEEE 802.11b</li> <li>• IEEE 802.11</li> <li>• IEEE 802.3</li> <li>• IEEE 802.3u</li> </ul>
<b>Device Management</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Web-Based – Internet Explorer v6 or later; Netscape Navigator v6 or later; or other Java- enabled browsers.</li> <li>• SNMP v.3</li> </ul>
<b>Wireless Distribution System</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AP Client</li> <li>• PtP Bridge</li> <li>• PtMP Bridge</li> <li>• Repeater</li> </ul>
<b>Security</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 64, 128, 152-bit WEP</li> <li>• 802.1X (EAP-MD5, EAP-TLS, EAP-TTLS and EAP-PEAP)</li> <li>• WPA –Wi-Fi Protected Access</li> <li>• MAC Address Access Control (WPA-TKIP and WPA-AES)</li> </ul>
<b>Media Access Control</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CSMA/CA with ACK</li> </ul>
<b>Wireless Frequency Range</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2.4GHz to 2.4835GHz</li> </ul>
<b>Wireless Signal Range*</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Indoors: Up to 328 ft (100 meters)</li> <li>• Outdoors: Up to 1312 ft (400 meters)</li> </ul>
<b>Modulation Technology</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)</li> <li>• Complementary Code Keying (CCK)</li> <li>• DQPSK</li> <li>• DBPSK</li> </ul>
<b>Wireless Transmit Power</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 15dBm (32mW) ๓ 2dB (Control TX power level from full, 50%, 25%, 125% and min.)</li> </ul>
<b>Receiver Sensitivity*</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 54Mbps OFDM, 10% PER, -66dBm)</li> <li>• 48Mbps OFDM, 10% PER, -71dBm</li> <li>• 36Mbps OFDM, 10% PER, -76dBm</li> <li>• 24Mbps OFDM, 10% PER, -80dBm</li> <li>• 18Mbps OFDM, 10% PER, -83dBm</li> <li>• 12Mbps OFDM, 10% PER, -85dBm</li> <li>• 11Mbps CCK, 8% PER, -83dBm</li> <li>• 9Mbps OFDM, 10% PER, -86dBm</li> <li>• 6Mbps OFDM, 10% PER, -87dBm</li> <li>• 2Mbps QPSK, 8% PER, -89dBm</li> </ul>
<b>External Antenna Type</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1.0dB Dipole with reverse SMA connector</li> </ul>
<b>LEDs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Power</li> <li>• LAN (10/100)</li> <li>• WLAN (Wireless Connection)</li> </ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Temperature</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operating: 32°F to 140°F (0°C to 40°C)</li> <li>• Storing: 4°F to 149°F (-20°C to 65°C)</li> </ul>
<b>Humidity</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 95% maximum (non-condensing)</li> </ul>
<b>Power Input</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ext. Power Supply DC 5V, 2.0A</li> </ul>
<b>Safety &amp; Emissions</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FCC</li> <li>• UL</li> <li>• VCCI</li> <li>• CSA</li> <li>• EN</li> </ul>
<b>Dimensions</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L = 5.6 inches (142mm)</li> <li>• W = 4.3 inches (109mm)</li> <li>• H = 1.2 inches (31mm)</li> </ul>
<b>Weight</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0.44 lbs (200g)</li> </ul>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้