



ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อ สายอากาศแบบทิศทางสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

Wireless LAN Directional Antenna

ชื่อนักศึกษา 1. นายณัฐพงษ์ มุกทา รหัสประจำตัว 47035322
2. นายรุ่งตะวัน แก่นภักดี รหัสประจำตัว 47035633

หลักสูตร ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.สมชาย หมื่นสายญาติ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.สุรสิทธิ์ รัตวี

คณะกรรมการสอบปริญญาโท	ลายมือชื่อ
1. อ.พิชญ์สินี มะโน	
2. อ.สมชาย หมื่นสายญาติ	
3. อ.สุระชัย พิมพ์สวัสดิ์	
4. ผศ.พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์	
5. อ.สุชิน อาจหาญ	

วัน/เดือน/ปีที่สอบ วันพุธที่ 10 เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2549 เวลา 15.00 น.

สถานที่สอบ ห้อง ค.310 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล.

ภาควิชารับรองแล้ว

ลงนาม.....

(ผศ.สุรสิทธิ์ รัตวี)

หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม
วันที่.....1.....เดือน.....พ.ค.....พ.ศ.....๒๕๔๙



<BT482492>

สายอากาศแบบทิศทางสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปริญญาบัตร

สายอากาศแบบทิศทางใช้ในงานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย 2.45 GHz

WIRELESS LAN DIRECTIONAL ANTENNA



เลขที่.....
เลขทะเบียน.....
รับคณะ.....

66688

3 - 8 พ.ย. 2549

1166021x

ปริญญาบัตรฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์

เรื่อง สายอากาศแบบทิศทางใช้ในงานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย 2.45 GHz
Wireless LAN Directional Antenna

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาโปรแกรม NEC2 เข้าช่วยในการออกแบบของสายอากาศ
2. เพื่อคำนวณและออกแบบสร้างสายอากาศแบบทิศทางสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย
3. เพื่อสร้างสายอากาศแบบทิศทางสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย
4. เพื่อทดลองส่งสัญญาณทิศทางสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย
5. เพื่อนำสายอากาศแบบทิศทางไปใช้งานสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายความถี่ 2.45 GHz ได้จริง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความรู้เรื่องการใช้โปรแกรม NEC2 เพื่อใช้ในการออกแบบสายอากาศ
2. ได้ความรู้เกี่ยวกับการคำนวณและออกแบบสายอากาศแบบทิศทาง
3. ได้สายอากาศแบบทิศทางสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย
4. ได้ผลการทดลองของสายอากาศแบบทิศทางสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย
5. สามารถนำสายอากาศแบบทิศทางสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายไปใช้งานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อหัวข้อ	สายอากาศแบบทิศทางใช้ในงานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย 2.45 GHz
นักศึกษา	นายณัฐพงษ์ มุกทา นายรุ่งตะวัน แก่นักดี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สมชาย หมื่นสายญาติ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรสิทธิ์ รัตริ
หลักสูตร	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
ปีการศึกษา	2548

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็น การนำเสนอสายอากาศแบบทิศทางสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย สายอากาศที่ ออกแบบจะมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนสร้างได้ง่ายและเหมาะสมสำหรับระบบสื่อสารไร้สายที่มีการเจาะจงทิศทางใน การใช้งาน โดยในโครงการนี้จะทำการวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศอื่น ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างของลำคลื่นและค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ค่าการสูญเสียย้อนกลับ มีค่า เท่ากับ -18.678 dB และอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่าเท่ากับ 1.2635 เพื่อยืนยันว่าสายอากาศมีคุณสมบัติที่ดี สามารถนำไปใช้งานได้และสายอากาศนี้เหมาะสำหรับใช้ในระบบการสื่อสารโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายและการ วัดระดับความแรงของสัญญาณจะวัดทุกๆ 50 เมตร ไปเรื่อยๆ โดยที่ระยะทาง 200 เมตร ระดับความแรงของ สัญญาณจะดีมากและที่ระดับ 400 เมตร สัญญาณจะเริ่มลดลงแต่ยังสามารถใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

II

Thesis Title	Wireless LAN Directional Antenna	
Students	Mr.Nuttapong	Mukta
	Mr.Rungtawan	Kanpukdee
Advisor	Dr.Somchai	Maunsaiyat
Co-Advisor	Assist.Prof.Dr.Surasit	Ratree
Education Level	Bachelor of Science in Industrial Education	
Program in	Telecommunication Engineering	
Academic Year	2005	

ABSTRACT

This project Wireless LAN Directional Antenna. The proposed antenna structure is simple and easy to fabricate. This antenna is suitable to receive the signal in case of the This project will Network analyzer the radiation characteristics such as radiation pattern, beamwidth and directivity; return loss = -18.678 dB and standing wave ratio = 1.2635; Then, compare the results from the oretical calculations and measured results to confirm that this antenna is efficient to apply in the actual applications. The applications of the antenna can be used for Wireless LAN system. When operation outdoor the devices can transmit and receive good to 200 meters with the devices can transmit and receive to 400 meters signal decrease and auxiliary verb to be serviceable.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องมาจากความร่วมมือร่วมใจของสมาชิก ภายในกลุ่มทุกท่าน คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ ดร. สมชาย ห่มเงินสายญาติ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรสิทธิ์ ราษฎร์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และอาจารย์ประจำภาควิชาครุศาสตร์ศึกษาศาสตร์ทุกท่านเป็นอย่างมากที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนถึงข้อมูลและอุปกรณ์ที่เป็นประโยชน์ต่อการทดลองโครงงานและในการจัดทำปริญญาโทฉบับนี้ ขอขอบคุณห้องสมุดคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์และสำนักหอสมุดกลางที่ช่วยอำนวยความสะดวกและเอื้อเฟื้อสถานที่ในการค้นคว้าข้อมูล

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้มีพระคุณที่ได้ให้การสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่างทางด้านการศึกษาและเป็นผู้ให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันและสุดท้ายต้องขอขอบคุณเพื่อนๆ และน้องๆ ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้เสมอมา

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	VI
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 จุดมุ่งหมายของโครงการ	2
1.3 สมมุติฐานของการจัดทำโครงการ	2
1.4 ขีดความสามารถของโครงการ	2
1.5 ขั้นตอนการทำโครงการ	2
1.6 เนื้อหาโดยสังเขป	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 แบบรูปการกระจายคลื่น (Radiation Pattern)	3
2.1.1 แบบรูปการกระจายคลื่นไอโซโทรปิกแบบชี้ทิศทางและแบบทิศทางรอบตัว	4
2.1.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก (Principle Pattern)	4
2.1.3 ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)	5
2.1.4 บริเวณต่างๆ ของสนามจากสายอากาศ	7
2.2 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิทซ์	8
2.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น	8
2.4 ค่าการชี้ทิศทางสูงสุด (Directivity)	9
2.5 ค่าการขยาย (Gain)	13
2.6 ประสิทธิภาพของสายอากาศ	14
2.7 ประสิทธิภาพของลำคลื่น (Beam Efficiency: BE)	16
2.8 โพลาริเซชัน (Polarization)	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.8.1 โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น	18
2.8.2 โพลาริเซชันแบบวงกลม	18
2.8.3 โพลาริเซชันแบบวงรี	19
2.8.4 โพลาริเซชันลอสแฟคเตอร์ (Polarization Loss Factor: PLF)	20
2.9 อินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)	29
2.10 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)	26
2.11 ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	26
2.12 สายอากาศแบบยาคี (Yagi Antenna)	27
2.12.1 โครงสร้างสายอากาศยาคี	27
2.12.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศแบบยาคีไดโพล	29
2.12.3 การออกแบบสายอากาศแบบยาคีไดโพล	31
2.13 โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ 2 หรือ NEC2	39
2.13.1 วิธีการจำลองโครงสร้างออกแบบด้วย NEC2	39
2.13.2 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์	40
2.14 มาตรฐานของระบบไวร์เลสแลน (Wireless LAN)	40
บทที่ 3 การออกแบบ การสร้าง และการทำงาน	
3.1 กล่าวนำ	42
3.2 หลักในการออกแบบสายอากาศยาคี	42
3.3 การออกแบบสายอากาศยาคี	44
3.4 การสร้างสายอากาศยาคี	48
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	
4.1 กล่าวนำ	49
4.2 การวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR)	50
4.2.1 ผลการทดสอบค่า SWR	50
4.2.2 การวัดค่าอิมพีแดนซ์	51
4.2.3 การวัดค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Retrun Loss)	51
4.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 5 บทสรุป	
5.1 สรุป	57
5.2 ปัญหาและวิธีการแก้ไข	58
5.3 แนวทางการพัฒนา	58
บรรณานุกรม	59
ภาคผนวก ก	60
ภาคผนวก ข	65
ประวัติ	76



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	3
2.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสี่ทิศทางรอบตัว	4
2.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร	5
2.4 ลำคลื่นต่างๆ บีบวิตซ์ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเชิงเส้นของสายอากาศ	6
2.5 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ	7
2.6 มุมตันของลำคลื่นซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่สมมาตรและสมมาตรกัน	12
2.7 ขั้วอ้างอิงและการสูญเสียของสายอากาศ	15
2.8 โพลาริเซชัน	17
2.9 หน่วยเวกเตอร์โพลาริเซชันของคลื่นและสายอากาศ	20
2.10 สายอากาศส่งและวงจรมูลุ่ย	22
2.11 สายอากาศรับและวงจรมูลุ่ย	25
2.12 โครงสร้างของสายอากาศยาภิไดโพล	28
2.13 อัตราขยายของสายอากาศแบบยาภิไดโพลที่มี 2 ตัว	33
2.14 เฟลเซอร์สนามไฟฟ้าที่เกิดจากตัวประกอบในแต่ละตัวในสายอากาศแบบยาภิไดโพล	34
2.15 การเพิ่มขึ้นของอัตราขยายเมื่อจำนวนตัวประกอบมากขึ้น	34
2.16 ตัวอย่างโครงสร้างของสายอากาศแบบยาภิไดโพลที่มีอินพุตอิมพีแดนซ์เป็น 50Ω	35
2.17 สายอากาศไดโพลแบบ $\lambda/2$ พร้อมกับ (ก) รีเฟลกเตอร์ (ข) ไดเรกเตอร์	36
2.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของไดโพล $\lambda/2$ และรีเฟลกเตอร์ในระนาบแนวราบ	37
2.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของไดโพล $\lambda/2$ และรีเฟลกเตอร์ในระนาบแนวตั้ง	37
2.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของไดโพล $\lambda/2$ รีเฟลกเตอร์ในระนาบแนวนอน	38
3.1 ส่วนประกอบต่างๆ ของสายอากาศยาภิ	42
3.2 แบบรูปสายอากาศที่ออกแบบด้วยโปรแกรม NEC	44
3.3 ขั้นตอนการ Generate แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	45
3.4 (ก) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแนวตั้ง	45
3.4 (ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแนวนอน	46
3.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น Directivity ที่ความถี่ 2.45 GHz	46
3.6 ความกว้างของลำคลื่น (HPBW) ที่ความถี่ 2.45 GHz	47
3.7 Smith chart ที่ความถี่ 2.45 GHz	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 ระยะห่างแต่ละองค์ประกอบเทียบกับตัวสะท้อนคลื่น	48
4.1 รูปแบบของสายอากาศยาก็ที่จะนำไปทดสอบ	49
4.2 ค่า SWR จากเครื่อง Network Analyzer	50
4.3 ค่าอิมพีแดนซ์จากเครื่อง Network Analyzer	51
4.4 ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับจากเครื่อง Network Analyzer	52
4.5 การต่อสายอากาศเข้ากับ Network Analyzer ทาค่า SWR, อิมพีแดนซ์ และค่าการสูญเสีย	53
4.6 แสดงรูปการต่อสายอากาศวัดค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับ	53
4.7 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด	54
4.8 สายอากาศด้านส่ง	54
4.9 ผลการทดสอบการแพร่พลังงานของสายอากาศ	55
ก.1 แสดงรูปด้านบนของสายอากาศยาก็	61
ก.2 แสดงรูปด้านหลังของสายอากาศยาก็	61
ก.3 แสดงรูปสายอากาศยาก็ที่ใช้ในการทดลอง	62
ก.4 แสดงรูปสายอากาศยาก็ในการทดลอง	62
ก.5 แสดงรูป Access Point Wireless ด้านหลัง	63
ก.6 แสดงรูป Access Point Wireless ด้านบน	63
ก.7 แสดงรูปปุ่มต่างๆ ของ Access Point Wireless	64
ก.8 แสดงรูปขาตั้งที่ใช้ในงาน	65
ข.1 แสดงปุ่มต่างๆ ของเครื่อง Access Point	68
ข.2 แสดงสถานะของระบบ Wireless Network	69
ข.3 แสดงการเลือก Properties	69
ข.4 แสดงการเลือก Internet Protocol	70
ข.5 การเลือก Internet Protocol (TCP/IP) แบบอัตโนมัติ	71
ข.6 แสดงการเลือกเครือข่าย	71
ข.7 แสดงหน้าต่าง Advanced	72
ข.8 แสดงการเลือก View Available Wireless Networks	72
ข.9 แสดงการเลือก Connect เพื่อติดต่อเครือข่าย	73
ข.10 แสดงการติดต่อเครือข่าย	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.11 แสดงการ Disconnect ใช้งานกับเครือข่าย	74
ข.12 การดูสถานะ Connect ของ Wireless LAN	74



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้า
4.1 ตารางแสดงระดับของความแรงสัญญาณที่ระยะทางต่างๆ	56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

โลกในปัจจุบันนี้ได้พัฒนาเข้าสู่ยุคการติดต่อสื่อสารซึ่งทำให้นานาประเทศใน แต่ละทวีปทั่วโลก สามารถติดต่อเชื่อมโยงข้อมูลข่าวสารระหว่างกันและกันได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว มีความถูกต้องของข้อมูล สูงขึ้น โดยการติดต่อสื่อสารที่สำคัญในยุคปัจจุบันนี้ก็คือ การติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless communication) เพราะการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายมีความสะดวกในการใช้งานมีความคล่องตัวในการใช้ งาน ทุกวันนี้หลายๆ สำนักงานรวมถึงบ้านพักอาศัยได้มีการนำเอาเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลแบบไร้สายหรือที่ เรียกว่า ไวร์เลสแลน (Wireless LAN) มาสร้างเป็นเครือข่ายเชื่อมโยงเครื่องคอมพิวเตอร์แทนการใช้ระบบ แลนมากขึ้น เนื่องจากจุดเด่นของเทคโนโลยีที่อุปกรณ์บนเครือข่ายไร้สายสื่อสารข้อมูลถึงกันโดยไม่ต้องใช้สาย นำสัญญาณ แต่ในการใช้งานจะมีพื้นที่ ที่ใช้งานระยะทางไม่ไกล ดังนั้นคณะผู้จัดทำจึงเกิดแนวความคิดที่จะ ออกแบบสร้างสายอากาศแบบทิศทางขึ้นมาใช้ในพื้นที่ ที่ต้องการใช้งานเพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหา พื้นที่ ที่ใช้งานได้ไม่ไกลที่กล่าวมาข้างต้น

1.2 จุดมุ่งหมายของโครงการ

1. เพื่อศึกษาโปรแกรม NEC2 เข้าช่วยในการออกแบบของสายอากาศ
2. เพื่อออกแบบสร้างสายอากาศแบบทิศทางสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย
3. เพื่อสร้างสายอากาศแบบทิศทางสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย
4. เพื่อทดลองส่งสัญญาณทิศทางสำหรับเครือข่ายไร้สาย
5. เพื่อนำสายอากาศแบบทิศทางไปใช้งานสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายความถี่ 2.45 GHz

1.3 สมมติฐานของการจัดทำโครงการ

1. ได้ความรู้เรื่องการใช้โปรแกรม NEC2 เข้าช่วยในการออกแบบสายอากาศ
2. ได้สายอากาศแบบทิศทางสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย
3. ได้ผลการทดลองของสายอากาศแบบทิศทางสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย
4. สามารถนำสายอากาศแบบทิศทางสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายไปใช้งานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขีดความสามารถของโครงการ

1. เป็นสายอากาศทิศทางสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายความถี่ 2.4 GHz แบบ IEEE 802.11g
2. อัตราขยายของสายอากาศแบบทิศทางจะอยู่ที่ประมาณ 6 - 21 dBi
3. สามารถส่งสัญญาณได้ในระยะทาง 450 เมตร
4. นำไปใช้ภายนอกอาคาร

1.5 ขั้นตอนการทำโครงการ

โครงการนี้จัดทำสายอากาศแบบทิศทางสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ในระยะแรกจะศึกษาการทำงานเกี่ยวกับสายอากาศยาก็และออกแบบสายอากาศโดยใช้โปรแกรม NEC2 ช่วยในการออกแบบดูแพทเทินของสายอากาศและโพลาริเซชันของคลื่นระนาบ เสร็จแล้วจึงจะสามารถนำไปสร้างสายอากาศเพื่อที่จะนำไปทดลองส่งสัญญาณ

1.6 เนื้อหาโดยสังเขป

เนื้อหาภายในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็นบทต่างๆ เพื่อสะดวกต่อการศึกษาและทำความเข้าใจในแต่ละบทประกอบด้วยเนื้อหาต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปฏิญานิพนธ์ ขีดความสามารถของโครงการและเนื้อหาในบทต่างๆ โดยสังเขป

บทที่ 2 ประกอบด้วยทฤษฎีต่างๆ เกี่ยวกับเรื่องแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ค่าอัตราการขยาย ประสิทธิภาพของสายอากาศ ประสิทธิภาพของลำคลื่น โพลาริเซชัน อินพุตอิมพีแดนซ์ เบนด์วิดท์ และสายอากาศยาก็

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการคำนวณและการออกแบบสร้างสายอากาศยาก็ ที่ใช้สำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

บทที่ 4 ประกอบด้วยการทดลองและผลการทดลองของสายอากาศที่ใช้งาน การทดลองการส่งสัญญาณและผลการทดลองที่ได้จากการทดลองจริง

บทที่ 5 เป็นการสรุปผลการจัดทำโครงการ ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางในการแก้ไข

ภาคผนวก ก แสดงภาพเครื่องต้นแบบ การติดตั้ง การเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นๆ ขณะใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

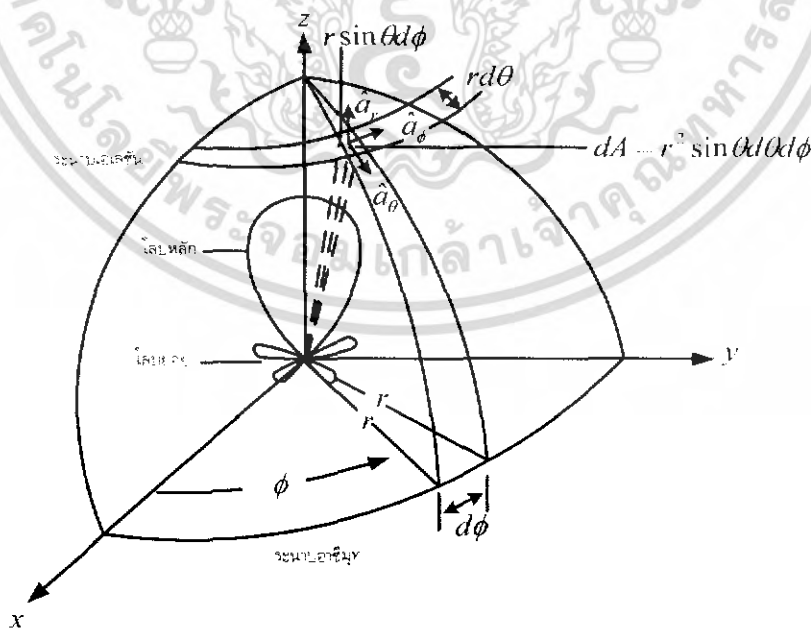
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 แบบรูปการกระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการกระจายคลื่น คือ รูปภาพที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสเปซโคออดิเนต (Space Coordinate) ส่วนใหญ่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนี้มักคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far Field)

การอธิบายคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity), ความเข้มของสนาม (Field Strength), เฟส (Phase) และโพลาไรเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่

รูปที่ 2.1 แสดงระบบโคออดิเนตที่ใช้คุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น สำหรับการวิเคราะห์สายอากาศกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่มีชื่อเรียกว่า "แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเชิงกำลังงาน" (Power Pattern) ของสายอากาศและกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆ ที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่า "แบบรูปการกระจายคลื่นเชิงสนาม" (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น



รูปที่ 2.1 ระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 แบบรูปการกระจายคลื่นแบบไอโซทรอปิกแบบชี้ทิศทางและแบบทิศทางรอบตัว

ตัวแพร่กระจายคลื่นแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Radiator) คือ สายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้นโดยมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นเท่ากันในทุกทิศทาง เช่น พอยท์ซอร์ส (Point Source) เป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างได้จริง แต่มักจะใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติและทิศทางของสายอากาศ

สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional Antenna) เป็นสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้นตัวอย่างของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าว คือ สายอากาศแบบทิศทางรอบตัว (Omni Directional Antenna) คุณลักษณะของสายอากาศแบบนี้มีดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบชี้ทิศทางรอบตัว

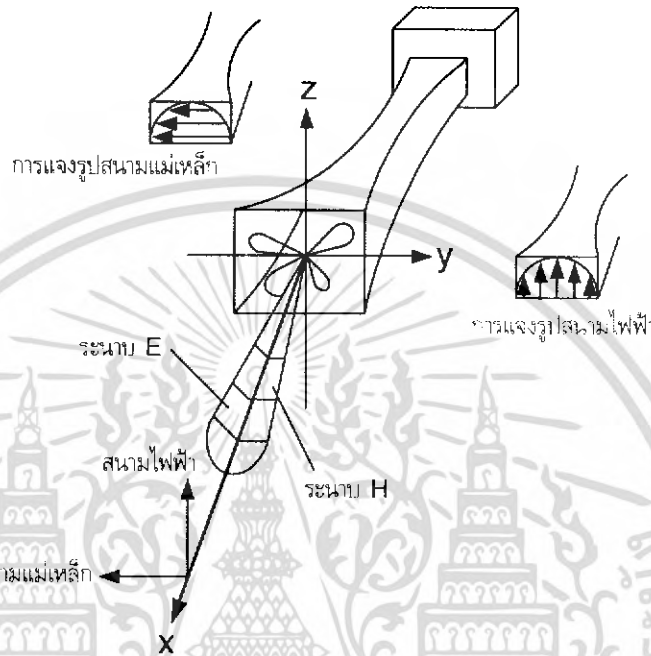
ตามรูป จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนี้ ไม่มีทิศทางในระนาบอาซิมุทหรือระนาบมุมกวาด (Azimuth Plane) แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบอิลิเวชันหรือระนาบมุมแยก (Elevation Plan) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวนี้เป็นกรณีพิเศษของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบชี้ทิศทาง

2.1.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก (Principle Pattern)

เรามักอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศ ในเทอมของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลักของสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก H สำหรับสายอากาศที่มีโพลไรเซชันแบบเชิงเส้น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ (H- Plane) จะเป็นระนาบที่บรรจุ เวกเตอร์สนามแม่เหล็กและทิศทางการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ตัวอย่างการแสดงผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลักมีดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยมีระนาบ xz เป็นระนาบ (E- Plane) หลักและมีระนาบ xy เป็นระนาบ (H- Plane) หลัก



รูปที่ 2.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร

2.1.3 ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)

ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นเป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ รูป 2.4 แสดงลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นแบบสามมิติ ซึ่งแบ่งลำคลื่นเป็นแบบต่างๆ ได้ดังนี้

ลำคลื่นหลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ตามรูปที่ 2.4 มีลำคลื่นอยู่ในทิศทาง θ เท่ากับศูนย์ สำหรับสายอากาศทรงชนิด อาจมีลำคลื่นหลักมากกว่าหนึ่งลำคลื่น เช่น สายอากาศแยกลำคลื่น (Split-Beam Antenna)

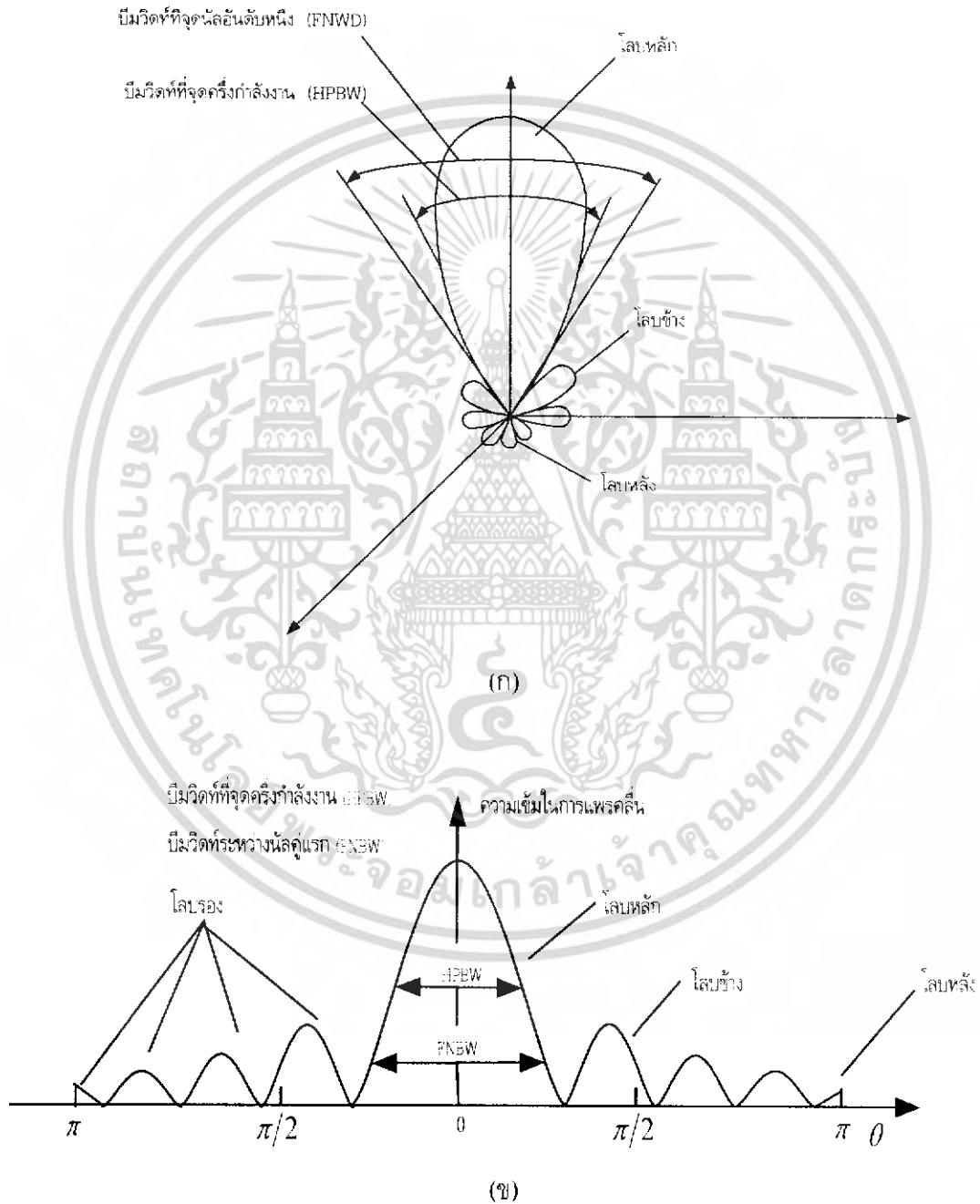
ลำคลื่นย่อย (Minor Lobe) ได้แก่ ลำคลื่นอื่นๆ นอกเหนือไปจากลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นด้านข้าง (Side Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ติดกับลำคลื่นหลักและอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับคลื่นหลัก

ลำคลื่นด้านหลัง (Back Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับลำคลื่นหลัก ปกติแล้วลำคลื่นย่อยจะเกิดการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ดีจะต้องกำจัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำคลื่นเหล่านี้ให้เหลือน้อยที่สุด ระดับของลำคลื่นย่อยมักแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในลำคลื่นที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นของพลังงานในลำคลื่นหลัก ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนของลำคลื่นย่อย (Side Lobe Ratio) หรือระดับของไซด์โลบ (Side Lobe Level : SLL) ในทางปฏิบัติ โดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของไซด์โลบน้อยกว่า -20 dB

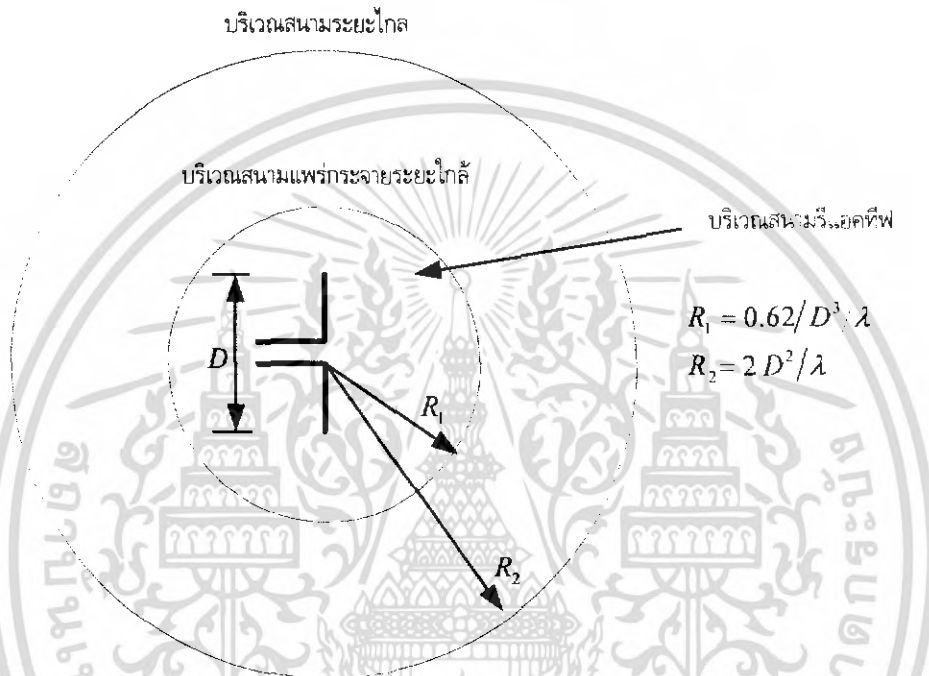


รูปที่ 2.4 ลำคลื่นต่างๆ บีมวิดท์และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเชิงเส้นของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 บริเวณต่างๆ ของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไป มักจะแบ่งบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือ สนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive - Near Field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating - Near Field) และสนามระยะไกล (Far Field) ดังที่แสดงในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ

บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุดและมีสนามเป็นชนิดรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ บริเวณนี้จะมีระยะทาง $R < 0.62 \sqrt{D^3 / \lambda}$ จากผิวของสายอากาศเมื่อ λ เป็นความยาวคลื่นและ D เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสาย

บริเวณสนามกระจายระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่บริเวณของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับสนามระยะไกล โดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่และการกระจายของสนามตามมุมต่างๆ นั้น แปรผันตามระยะทางของสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นสนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้น ในบริเวณนี้จะมีระยะทาง $0.62 \sqrt{D^3 / \lambda} \leq R \leq 2 D^2 / \lambda$

บริเวณสนามระยะไกล เป็นบริเวณสนามของสายอากาศซึ่งแพร่ของสายอากาศตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางของสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติที่ใหญ่ที่สุดเท่ากับ D บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง $R > 2 D^2 / \lambda$ จากสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบริเวณนี้ สนามมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse Field) และการแพร่กระจายของสนามตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทาง ขอบในของบริเวณดังกล่าวมีค่า R เท่ากับ $2D^2/2$ และขอบนอกมีค่าเป็นอนันต์

2.2 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิทซ์

ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิทซ์ (Half - Power Beam Width : HPBW) เป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลัก มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดสองจุด ดังแสดงในรูปที่ 2.4

2.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น

คำจำกัดความของคำว่า ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ในทิศทางที่กำหนดให้ คือ กำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เกี่ยวกับสนามระยะไกล ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นสามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่นและผลของการยกกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$U = r^2 w_{rad} \quad (2.1)$$

เมื่อ U คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W / หน่วยมุมตัน)

w_{rad} คือ ความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น (W/M^2)

ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศใน ระยะไกลได้คือ

$$\begin{aligned} U(\theta/\phi) &= \frac{r^2}{2\eta} [\bar{E}(r, \theta, \phi)]^2 \\ &= \frac{r^2}{2\eta} [[E(r, \theta, \phi)]^2 + [E(r, \theta, \phi)]^2] \\ &= \frac{1}{2\eta} [[E(\theta, \phi)]^2 + [E(\theta, \phi)]^2] \end{aligned} \quad (2.2a)$$

เมื่อ \bar{E} คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

E_θ, E_ϕ คือ ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

η คือ อินทรินสิคอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึงความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นได้เช่นกัน

กำลังงานทั้งหมดนี้ หาได้โดยการอินทิเกรตความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นตามสมการ (2.3) ตลอดมุมตัน 4π ทั้งหมด ซึ่งจะได้

$$P_{rad} = \iint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.3)$$

2.4 ค่าการชี้ทิศทางสูงสุด (Directivity)

ค่าการชี้ทิศทางที่กำหนด คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้น ต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งใช้สำหรับอ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศสำหรับใช้อ้างอิงนี้จะใช้ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (Isotropic Point Source)

ส่วนค่าการชี้ทิศทางสูงสุด คือ ค่าการชี้ทิศทางในทิศทางที่มีค่ามากที่สุดหรือกลางๆ ว่าค่าการชี้ทิศทางสูงสุดของต้นกำเนิด (สายอากาศ) ที่ไม่มีไอโซโทรปิก คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นมากที่สุดต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_r = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.4)$$

$$D_r = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{U_{rad}} \quad (2.5)$$

เมื่อ D_r คือ ค่าการชี้ทิศทาง (ไม่มีหน่วย)

D_0 คือ ค่าการชี้ทิศทางสูงสุด

U คือ ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W / หน่วยมุมตัน)

U_{max} คือ ค่าสูงสุดของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W / หน่วยมุมตัน)

U_0 คือ ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (W / หน่วยมุมตัน)

P_{rad} คือ กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด (W)

จากสมการ (2.4) และ (2.5) เราจะทราบว่าค่าการชี้ทิศทางและค่าการชี้ทิศทางสูงสุดของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สมีค่าเป็นหนึ่ง ทั้งนี้เพราะว่า U , U_{max} และ U_0 ต่างมีค่าเท่ากัน

ค่าการชี้ทิศทางสูงสุดของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส มีค่าเท่ากับหนึ่ง เพราะว่ามันแพร่กระจายกำลังออกไปใน ทุกทิศทางด้วยค่าที่เท่ากัน แต่สำหรับต้นกำเนิด (สายอากาศ) แบบอื่นๆ นั้นย่อมมีค่าการชี้ทิศทางเท่ากับค่าการชี้ทิศทางสูงสุดมากกว่าหนึ่งเสมอ

ข้อสรุปอีกอย่างหนึ่งในที่นี้ก็คือ ค่าของการชี้ทิศทางจะมากกว่าเท่ากับศูนย์และน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าการชี้ทิศทางสูงสุด ($0 \leq D_x \leq D_0$)

โดยทั่วไปสูตรของค่าการชี้ทิศทางและค่าการชี้ทิศทางสูงสุดอาจจะเป็นฟังก์ชันของทั้งมุม θ และ ϕ ด้วยต่อไปลองสมมติให้ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นอยู่ในลักษณะดังต่อไปนี้คือ

$$U = B_0 F(\theta, \phi) \approx \frac{1}{2\eta} [E(\theta, \phi)]^2 + [E(\theta, \phi)]^2 \quad (2.6)$$

เมื่อ B เป็นค่าคงที่และ E_θ และ E_ϕ เป็นส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าที่ระยะไกล ค่าสูงสุดของสมการ (2.6) หาได้คือ

$$U_{\max} = B_0 F(\theta, \phi)_{\max} = B_0 F_{\max}(\theta, \phi) \quad (2.7)$$

กำลังงานที่แพร่กระจายคลื่นทั้งหมด หาได้จาก

$$\begin{aligned} P_{\text{rad}} &= \iint_{\Omega} U(\theta, \phi) \\ &= B_0 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \end{aligned} \quad (2.8)$$

ดังนั้น จะได้สูตรทั่วไปของค่าการชี้ทิศทางและค่าการชี้ทิศทางสูงสุดเป็นดังนี้คือ

$$D_x(\theta, \phi) = \frac{4\pi F(\theta, \phi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2.9)$$

$$D_0(\theta, \phi) = \frac{4\pi F(\theta, \phi)_{\max}}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือเขียนสมการ (2.10) ใหม่ได้เป็น

$$D_0(\theta, \phi) = \frac{4\pi}{\left[\int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \right]} F(\theta, \phi)_{\max}$$

$$= \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad (2.11)$$

เมื่อ Ω_A เป็นมุมตันของลำคลื่น ซึ่งหาได้จาก

$$\Omega_A = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}{F(\theta, \phi)_{\max}}$$

$$= \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} F_n(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.12)$$

$$F_n(\theta, \phi) = \frac{F(\theta, \phi)}{F(\theta, \phi)_{\max}} \quad (2.13)$$

$F(\theta, \phi)_{\max}$ นำมาหารในสมการ (2.13) เพื่อ نرمอไลซ์ (Normalize) ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น $F(\theta, \phi)$ ให้มีค่าสูงสุดเป็นหนึ่ง

มุมตันของลำคลื่น Ω_A มีค่าจำกัดความว่า คือ มุมตันซึ่งกำลังงานทั้งหมดของสายอากาศ จะไหลผ่านเมื่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นมีค่าคงที่ (มีค่าเท่ากับค่าสูงสุดของ U) ที่ทุกมุมภายใน Ω_A

สายอากาศซึ่งมีลำคลื่นหลักแคบๆ เพียงลำคลื่นเดียวและมีลำคลื่นย่อยที่มีขนาดเล็กจนสามารถตัดทิ้งได้ มุมตันของลำคลื่น จะมีค่าประมาณเท่ากับผล HPBW ใน 2 ระนาบ ซึ่งตั้งฉากกัน ดังแสดงในรูป 2.6 (ก) สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่หมุนแล้วสมมาตรกันโดย HPBW ในระนาบใดๆ จะเท่ากัน ดังแสดงในรูป 2.6 (ข)

โดยอาศัยการประมาณนี้ สมการ (2.11) จะเขียนใหม่ได้ดังต่อไปนี้

$$D_0 = \frac{4\pi}{\Omega_A} \approx \frac{4\pi}{\theta_1 \theta_2} \quad (2.14)$$

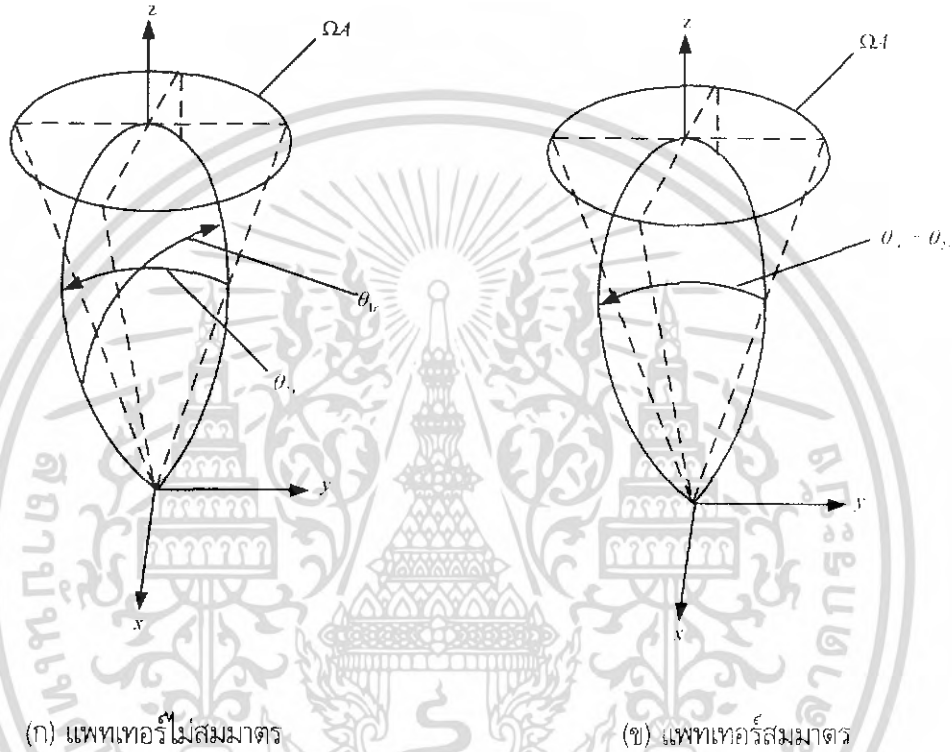
มุมตันของลำคลื่น Ω_A ประมาณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Omega_A = \theta_{1r} \theta_{2r} \quad (2.15)$$

เมื่อ θ_{1r} คือ HPBW ในระนาบใดๆ (เรเดียน)

θ_{2r} คือ HPBW ในระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบแรก (เรเดียน)



รูปที่ 2.6 มุมตันของลำคลื่นซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่สมมาตรและสมมาตรกัน

เมื่อรู้ความกว้างของลำคลื่นเป็นองศาสมการ (2.14) จะดัดแปลงให้เหมาะสมที่จะแทนค่าความกว้างของลำคลื่นนั้นโดยตรง ได้เป็น

$$D_0 \approx \frac{4\pi(180\pi)^2}{\theta_{1d}\theta_{2d}} = \frac{41253}{\theta_{1d}\theta_{2d}} \quad (2.16)$$

เมื่อ θ_{1d} คือ HPBW ในระนาบใดๆ (องศา)

θ_{2d} คือ HPBW ในระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบแรก (องศา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_0 \approx \frac{32400}{\Omega_A^2 (\text{degree})} = \frac{32400}{\theta_{1d}\theta_{2d}} \quad (2.16\text{ก})$$

สมการ (2.14) และ (2.16) จะใช้ได้ผลดี เมื่อรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นมีเพียงลำคลื่นหลักเพียงลำคลื่นเดียวและลำคลื่นย่อยจะต้องมีขนาดเล็กมากๆ เท่านั้น สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นซึ่งมีสองลำคลื่นหลักที่เหมือนกัน ค่าของการชี้ทิศทางสูงสุดที่หาจากสมการ (2.14) หรือ (2.16) จะเป็น 2 เท่าของค่าจริง ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีลำคลื่นย่อยที่มีระดับสูง การหาค่าการชี้ทิศทางโดยใช้สมการ (2.14) หรือ (2.16) ซึ่งตัดลำคลื่นย่อยทิ้ง จะมีค่าสูงเกินความจริง

2.5 ค่าการขยาย (Gain)

ค่าการขยาย เป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากการชี้ทิศทาง โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่ค่าการชี้ทิศทาง จะอธิบายคุณสมบัติ ในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

ค่าการขยายกำลัง (Power Gain) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้ นั้น มีค่าเท่ากับ 4π คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้น ต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากหัวต่อของเครื่องส่ง เมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้เฉพาะ โดยทั่วไปแล้ว เราจะคิดค่าการขยายกำลังในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ดังนั้น

$$\text{Gain} \approx \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_m} \quad (2.17)$$

โดยทั่วไปแล้ว เรามักจะพูดถึงค่าการขยายสัมพันธ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าการขยายกำลังในทิศทางที่กำหนดให้ ต่อค่าการขยายกำลังของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศทั้งสองนั้นต้องเท่ากัน สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบอาจจะเป็นสายอากาศไดโพลสายอากาศปากแตร หรือสายอากาศอื่นๆ ซึ่งคำนวณค่าการขยายได้ง่ายหรือรู้ค่าอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตาม โดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็นไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้น

$$Gg = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_m (\text{Lossless isotropic source})} \quad (2.18)$$

จากรูปที่ 2.7 (ก) เราสามารถเขียนได้ว่า กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (P_{rad}) สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ (P_m) ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{rad} = e_r P_m \quad (2.19)$$

เมื่อ e_r เป็นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย) ใช้สมการ (2.20) จะทำให้สมการ (2.19) มีความสัมพันธ์ง่ายขึ้นเป็น

$$G_r(\theta, \phi) = e_r \left[\frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (2.20)$$

ซึ่งสัมพันธ์กับค่าการชี้ทิศทางในสมการ (2.10) คือ

$$G_r(\theta, \phi) = e_r D_r(\theta, \phi) \quad (2.21)$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าสูงสุดของค่าการกระจายจะสัมพันธ์กับค่าการชี้ทิศทางสูงสุด โดย

$$G_0 = G_r(\theta, \phi)_{\max} = e_r D_r(\theta, \phi)_{\max} = e_r D_r \quad (2.22)$$

ดังนั้น ค่าประมาณของค่าการขยาย จะมีค่าเป็น

$$G_0 \approx \frac{3000}{\theta_{1d} \theta_{2d}} \quad (2.22ก)$$

ในทางปฏิบัติ เมื่อกล่าวถึงค่าการขยายมักจะหมายถึง ค่าการขยายกำลังมีค่าสูงสุด ดังแสดงในสมการ (2.23)

$$G_0(dB) = 10 \log_{10} [e_r D_0] \quad (2.23)$$

2.6 ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ e_r จะใช้เมื่อเรากำลังพิจารณาถึงการสูญเสียต่างๆ ที่ซับซ้อนภายในโครงสร้างของสายอากาศด้วย การสูญเสียต่างๆ เมื่ออ้างอิงตามรูปที่ 2.7 (ก) อาจเนื่องมาจาก

- 1) การสะท้อนกลับ เนื่องจากความไม่สมพ้อง (Mismatch) กันระหว่างสายส่งกับสายอากาศ
- 2) การสูญเสียทั้งในตัวนำและฉนวน ($I^2 R$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้ว ประสิทธิภาพทั้งหมด คำนวณได้จาก

$$e_t = e_r e_c e_d \tag{2.24}$$

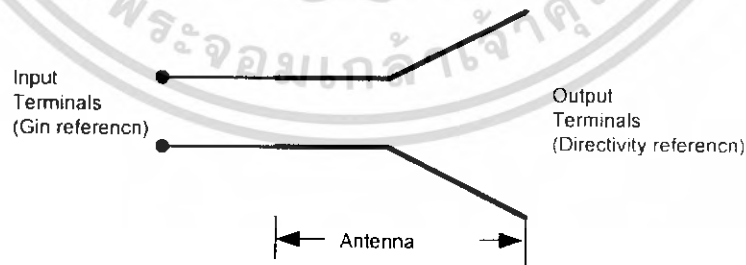
- เมื่อ e_t คือประสิทธิภาพทั้งหมด (ไม่มีหน่วย)
- e_r คือประสิทธิภาพที่เกี่ยวกับการสะท้อนกลับ มีค่าเท่ากับ (ไม่มีหน่วย)
- e_c คือประสิทธิภาพของตัวนำ (ไม่มีหน่วย)
- e_d คือประสิทธิภาพของฉนวน (ไม่มีหน่วย)
- Γ คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนของศักย์ไฟฟ้าที่หัวของสายอากาศ

โดยที่
$$\Gamma = \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0}$$

- เมื่อ Z_m คืออินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ
- Z_0 คืออิมพีแดนซ์คุณสมบัติ (Characteristic Impedance) ของสายส่ง
- ปกติ e_c และ e_d คำนวณหาได้ลำบาก ส่วนมากหาได้จากการทดลอง แต่ถึงกระนั้นก็แยก e_c จาก e_r ไม่ออก ดังนั้นเพื่อความสะดวก มักเขียนสมการ (2.24) ใหม่เป็น

$$e_t = e_r e_{cd} = (1 - |\Gamma|^2) \tag{2.25}$$

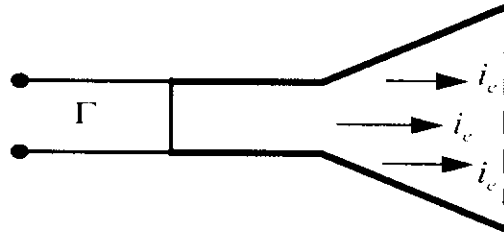
- เมื่อ $e_{cd} = e_c e_d$ คือประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ



(ก) Antenna Reference terminals

รูปที่ 2.7 ขั้วอ้างอิงและการสูญเสียของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) Reflection, conduction, and dielectric losses

รูปที่ 2.7(ต่อ) ขั้วอ้างอิงและการสูญเสียของสายอากาศ

2.7 ประสิทธิภาพของลำคลื่น (Beam Efficiency : BE)

พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่ง ที่จะใช้ในการตัดสินว่าสายอากาศมีคุณภาพการส่งหรือรับคลื่นดีเพียงใดนั้น ได้แก่ ประสิทธิภาพของลำคลื่น สำหรับสายอากาศ ซึ่งมีลำคลื่นหลักอยู่ในทิศทางแกน $z(z=0)$ ดังแสดงดังรูปที่ 2.4 (ก) ประสิทธิภาพของลำคลื่นจะกำหนดได้ดังนี้คือ

เมื่อ θ_1 เป็นมุมที่มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของมุมของกรวย ที่เราต้องการจะหาเปอร์เซ็นต์ของกำลังงานทั้งหมดในนั้น ดังนั้น จะเขียนสมการ (2.27) ได้เป็นดังนี้

$$BE = \frac{\text{Power transmitted (received) with in cone angle } \theta_1}{\text{Power transmitted (received) by the antenna}} \quad (2.26)$$

$$BE = \frac{\int_0^{\theta_1} \int_0^{2\pi} U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2.27)$$

ซึ่งจะเขียนสนามชั่วขณะเวลานั้นของคลื่นระนาบ ที่เดินทางในทิศทาง z ได้ว่า

$$E(z;t) = \hat{a}_x E_x(z;t) + \hat{a}_y E_y(z;t) \quad (2.28)$$

เมื่อ θ_1 เป็นมุมที่เกิดมีนัล (Null) คือจุดตำแหน่งที่ก่าล้งมีค่าเป็นศูนย์เป็นคู่แรกดังนั้น ประสิทธิภาพของลำคลื่นจะเป็นปริมาณที่แสดงถึงอัตราส่วนของจำนวนกำลังงาน ในลำคลื่นหลักต่อกำลังงานที่มีทั้งหมด

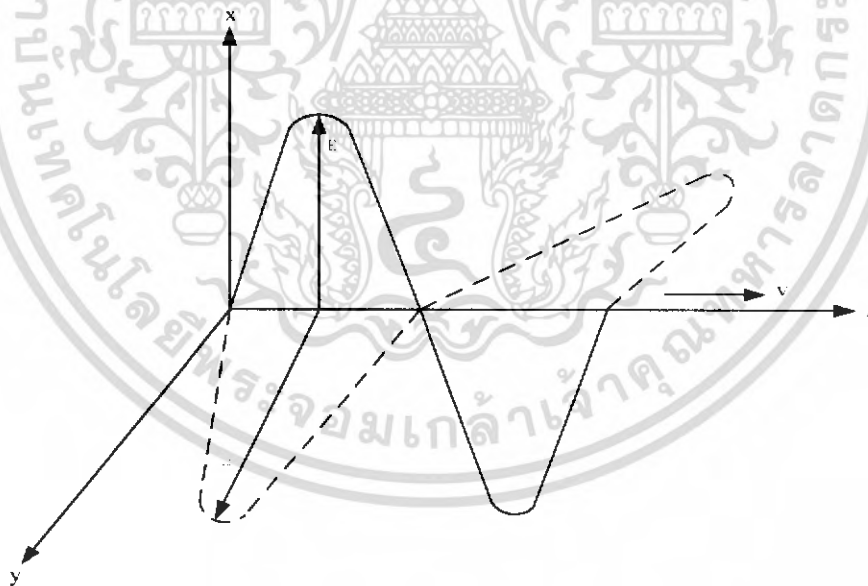
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 โพลาริเซชัน (Polarization)

ก่อนที่จะกล่าวถึงความหมายของโพลาริเซชันของสายอากาศจะกล่าวถึงความหมายของโพลาริเซชันของคลื่นเสียก่อน โพลาริเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายนั้นเป็นรูปแสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไปที่อธิบายทิศทาง ขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลารูปแสดงโพลาริเซชันจะแสดงการกวาดของยอดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ ณ ตำแหน่งที่ทำการสังเกตซึ่งคงที่และการสังเกตนี้จะทำโดยมองตามหลักคลื่นที่เดินทางไป

สำหรับโพลาริเซชันของสายอากาศ ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง จะเป็นโพลาริเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศเท่านั้นจากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังงานที่หัวของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาให้จะหมายถึง ทิศทางที่สายอากาศมีค่าการขยายมากที่สุด ดังนั้นโพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกัน จะต่างกัน การแบ่งชนิดของโพลาริเซชันอาจแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ

- 1) โพลาริเซชันเชิงเส้น (Linearly Polarization)
- 2) โพลาริเซชันวงกลม (Circularly Polarization)
- 3) โพลาริเซชันวงรี (Elliptically Polarization)



รูปที่ 2.8 โพลาริเซชัน

เมื่อส่วนประกอบของสนามชั่วขณะเวลานั้น สัมพันธ์กับค่าเชิงซ้อนของสนามนั้นดังนี้

$$E_x(z;t) = E_x \cos(\omega t + kz + \phi_x) \quad (2.29)$$

$$E_y(z;t) = E_y \cos(\omega t + kz + \phi_y) \quad (2.30)$$

เมื่อ E_x และ E_y เป็น ขนาดของสนามค่าสูงสุด ในทิศทาง x และ y ตามลำดับ

2.8.1 โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น

คลื่นซึ่งเป็นโพลาริเซชันเชิงเส้น ความแตกต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบทั้งสองของสนาม จะมีค่า ดังนี้

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi; n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.31)$$

2.8.2 โพลาริเซชันแบบวงกลม

จะเกิดโพลาริเซชันแบบวงกลมได้ ก็ต่อเมื่อขนาดของส่วนประกอบของสนามทั้งสองมีค่าเท่ากันและความต่างเฟส ระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง เป็นจำนวนคี่เท่าของ $\frac{\pi}{2}$ นั่นคือ

$$|E_x| = |E_y| \rightarrow E_x = E_y \quad (2.32)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \Delta\phi = \phi_y - \phi_x &= +\frac{(1+2n)}{2}\pi; n = 0, 1, 2, \dots \text{CW} \\ &= -\frac{(1+2n)}{2}\pi; n = 0, 1, 2, \dots \text{CCW} \end{aligned} \quad (2.33)$$

เมื่อ CW (Clockwise) คือ สนามหมุนตามเข็มนาฬิกา

CCW (Counter Clockwise) คือ สนามหมุนทวนเข็มนาฬิกา

ถ้าคลื่นเดินทางในทิศทางตรงกันข้าม (คือทิศทาง +Z) เฟสในสมการ (2.33) และ (2.34) ที่ทำให้เกิด

CW และ CCW จะต้องสลับกัน

2.8.3 โพลาริเซชันแบบวงรี

จะเกิดขึ้นเมื่อความต่างเฟสเป็นจำนวนคี่ของ $\frac{\pi}{2}$ แต่ขนาดของสนามไฟฟ้าไม่เท่ากันหรือความแตกต่างของเฟส เป็นจำนวนคี่ของ $\frac{\pi}{2}$ นั่นคือ

$$|E_x| \neq |E_y| \rightarrow E_x \neq E_y$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\frac{(1+2n)}{2}\pi; n = 0,1,2 \dots cw \quad (2.35a)$$

$$= -\frac{(1+2n)}{2}\pi; n = 0,1,2 \dots cw \quad (2.35b)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \pm \frac{n}{2}\pi \rightarrow cw \quad (2.36)$$

แต่ถ้า $\langle 0 \rightarrow cw \quad (2.37)$

โดยที่ $n = 0,1,2 \dots$

ในกรณีของโพลาริเซชันแบบวงรีนั้นรูปแสดงการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ จะเป็นวงรีเอียง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ข อัตรารส่วนของแกนหลักต่อแกนย่อย จะเรียกรวมเป็นอัตราส่วนของแกน (Axial Ratio : AR) ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

$$AR = \frac{OA}{OB} \quad \text{โดยที่ } 1 \leq AR \leq \infty \quad (2.38)$$

OA : แกนย่อย, OB : แกนย่อย

$$\tau = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2E_x E_y}{E_x^2 - E_y^2} \cos(\Delta\phi) \right] \quad (2.39)$$

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

$E_y (E_x)$ และอัตราส่วนของแกน มีค่าเท่ากับ $\frac{E_x}{E_y}$ หรือ $\frac{E_y}{E_x}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.4 โพลาริเซชันลอสแฟกเตอร์ (Polarization Loss Factor : PLF)

โดยทั่วไปแล้วโพลาริเซชันของสายอากาศจะไม่เหมือนกับโพลาริเซชันของคลื่นที่เดินทางมายังสายอากาศ ซึ่งเรียกว่า เกิดโพลาริเซชันมิสแมทช์ (Polarization Mismatch) ทำให้สายอากาศไม่สามารถดึงเอาพลังงานจากคลื่นได้สูงสุด เนื่องจากเกิดการสูญเสียจากโพลาริเซชัน (Polarization Loss) สมมติว่าสนามไฟฟ้าของคลื่นที่เดินทางเข้ามายังสายอากาศ เขียนได้ดังนี้

$$\vec{E}_i = \hat{P}_u E_i \quad (2.40)$$

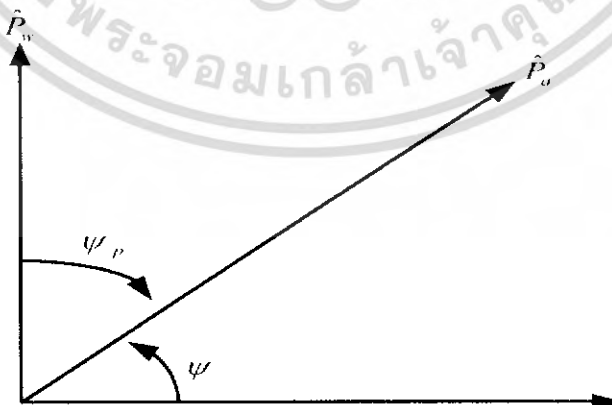
เมื่อ \hat{P}_u เป็นหน่วยเวกเตอร์ของคลื่นและโพลาริเซชันของสนามไฟฟ้าของสายอากาศ มีค่าดังนี้

$$\vec{E}_a = \hat{P}_a E_a \quad (2.41)$$

เมื่อ \hat{P}_a เป็นหน่วยเวกเตอร์ของสายอากาศ จะกำหนดให้โพลาริเซชันลอสแฟกเตอร์ มีค่าดังนี้

$$PLF = |\hat{P}_u \hat{P}_a|^2 = |\cos \psi_p|^2 \quad (2.42)$$

เมื่อ ψ_p เป็นมุมระหว่างหน่วยเวกเตอร์ทั้งสอง ดังรูปที่ 2.9 ถ้าเกิดโพลาริเซชันมิสแมทช์ ค่า PLF จะเป็นหนึ่งและสายอากาศจะรับกำลังงานได้มากที่สุด ดังนั้นถ้าสายอากาศกับคลื่นที่มาตกกระทบบนสายอากาศตั้งฉากซึ่งกันและกันแล้ว สายอากาศนั้นจะรับคลื่นไม่ได้เลย



รูปที่ 2.9 หน่วยเวกเตอร์โพลาริเซชันของคลื่นและสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 อินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)

อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่หัวของสายอากาศนั้น อาจเป็นอัตราส่วนระหว่างศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่หัวของสายอากาศนั้นหรือเป็นอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กที่จุดใดๆ ในรูปที่ 2.10 (ก) (ก) - (ข) เป็นหัวของสายอากาศ อัตราส่วนของศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่หัวนี้ เมื่อไม่ได้ต่อโหลด จะเป็นอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งมีค่า

$$Z_{i1} = R_{i1} + jX_{i1} \quad (2.43)$$

เมื่อ Z_{i1} คือ อิมพีแดนซ์ที่หัว a - b ของสายอากาศ (โอห์ม)

R_{i1} คือ ความต้านทานที่หัวสายอากาศ (โอห์ม)

X_{i1} คือ รีแอกแตนซ์ที่หัวสายอากาศ

โดยทั่วไป ความต้านทานในสมการ (2.43) จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

$$R_{i1} = R_r + R_l \quad (2.44)$$

เมื่อ R_r คือ ความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ

R_l คือ ความต้านทานการสูญเสียของสายอากาศ

ถ้าสมมติว่า สายอากาศต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดสัญญาณที่มี อิมพีแดนซ์ภายใน เป็นดังนี้

$$Z_g = R_g + jX_g \quad (2.45)$$

เมื่อ R_g คือ ความต้านทานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ (โอห์ม)

X_g คือ รีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ (โอห์ม)

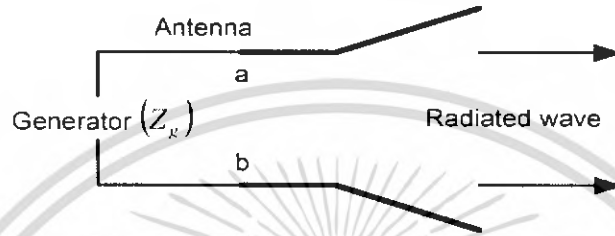
และสายอากาศทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง จะแสดงวงจรสมมูลย์ได้ดังรูปที่ 2.10 ในการหาปริมาณกำลังงานที่ถูกนำมาสู่ความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นเพื่อแผ่กระจายออก กับกำลังงานที่สูญเสียในความต้านทานการสูญเสีย ที่กลายเป็นความร้อน ($I^2 R_l / 2$) นั้น เราจะหากระแสที่ไหลภายในลูปได้ดังนี้

$$\begin{aligned} I_g &= \frac{V_g}{Z_1} = \frac{V_g}{Z_{i1} + Z_g} \\ &= \frac{V_g}{(R_r + R_l + R_g) + j(X_{i1} + X_g)} \end{aligned} \quad (2.46)$$

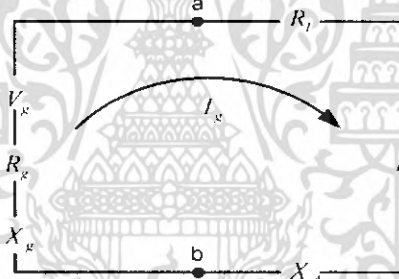
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และขนาดของกระแส จะมีค่าดังนี้

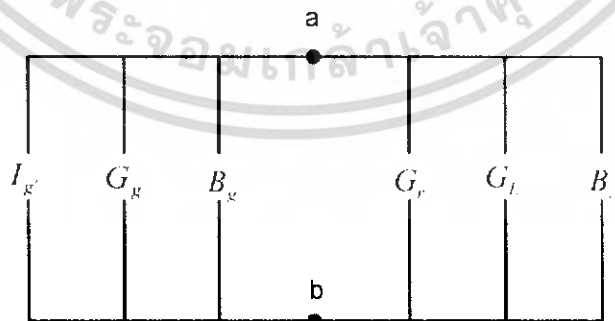
$$|I_x| = \frac{|V_x|}{[(R_r + R_l + R_x) + j(X_l + X_x)]} \quad (2.46ก)$$



(ก) Antenna in transmitting mode



(ข) Thevenin equivalent



(ค) Norton equivalent

รูปที่ 2.10 สายอากาศส่งและวงจรสมมูลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ V_g เป็นศักดาไฟฟ้าค่าสูงสุดของเครื่องกำเนิดสัญญาณ กำลังงานที่ถูกนำมายังสายอากาศเพื่อ
การแพร่กระจายคลื่น จะมีค่าดังนี้

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

$$= \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_r}{(R_r + R_l + R_g)^2 + (X_l + X_g)^2} \right] \quad (2.47)$$

และกำลังงานที่สูญเสียกลายเป็นความร้อน จะมีค่าดังนี้

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

$$= \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_l}{(R_r + R_l + R_g)^2 + (X_l + X_g)^2} \right] \quad (2.48)$$

กำลังงานส่วนหนึ่งที่เหลือ จะเป็นส่วนที่สูญเสียเป็นความร้อนในความต้านทานที่ชื่อ R_g ของเครื่อง
กำเนิดสัญญาณ ซึ่งมีค่า

$$P_g = \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_g}{(R_r + R_l + R_g)^2 + (X_l + X_g)^2} \right] \quad (2.49)$$

กำลังงานที่ถูกนำมายังสายอากาศจะมีค่ามากที่สุด เมื่อเกิดการคอนจูเกตแมทซ์ (Conjugate
Match) นั่นคือ จะเกิดเมื่อ

$$R_r + R_l = R_g \quad (2.50)$$

และ

$$X_g = -X_g \quad (2.51)$$

ในกรณีนี้ สมการ (2.48), (2.49) และ (2.50) จะกลายเป็นดังต่อไปนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_r = \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_r}{4(R_r + R_l)^2} \right] = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_r}{(R_r + R_l)^2} \right] \quad (2.52)$$

$$P_l = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_l}{(R_r + R_l)^2} \right] \quad (2.53)$$

$$P_g = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_g}{(R_r + R_l)^2} \right] = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{1}{(R_r + R_l)} \right] \quad (2.54)$$

จากสมการ (2.52) ถึง (2.54) พบว่า

$$\begin{aligned} P_g &= P_r + P_l = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_g}{(R_r + R_l)^2} \right] \\ &= \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_r + R_l}{(R_r + R_l)^2} \right] \end{aligned} \quad (2.55)$$

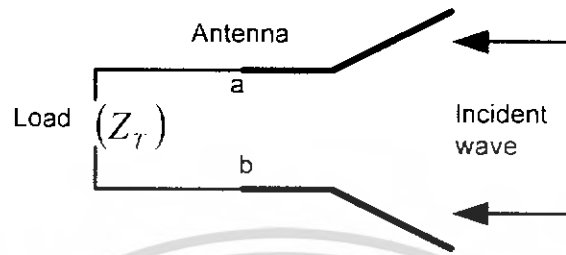
ดังนั้น กำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณ จะต้องจ่ายเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทช์ จะมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} P_g &= \frac{1}{2} V_g I_g = \frac{1}{2} V_g \left[\frac{V_g}{2(R_r + R_l)} \right] \\ &= \frac{|V_g|^2}{4} \left[\frac{1}{(R_r + R_l)} \right] \end{aligned} \quad (2.56)$$

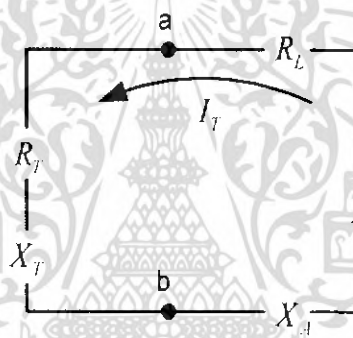
ในจำนวนกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่ายทั้งหมดครึ่งหนึ่งจะสูญเสียเป็นความร้อนภายในความต้านทานภายใน (R_g) ของเครื่องกำเนิดสัญญาณและอีกครึ่งหนึ่งจะถูกนำมายังสายอากาศซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทช์เท่านั้น ในส่วนของกำลังงานที่มายังสายอากาศส่วนหนึ่งจะแพร่กระจายออกไป โดยผ่านกำลังงานที่เกิดจากความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น อีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียเป็นความร้อนซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ ซึ่งถ้าสายอากาศไม่มีการสูญเสีย ($e_{rad} = 1$) ครึ่งหนึ่ง ของกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่าย จะแพร่กระจายออกเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทช์ ถ้าสมมติว่าเป็นการแมทช์ที่สมบูรณ์ระหว่างสายอากาศกับสายส่ง ($e_r = 1$) ถ้ามีการสูญเสียเนื่องจากไม่สมพงษ์หรือไม่แมทช์กันแล้ว จะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

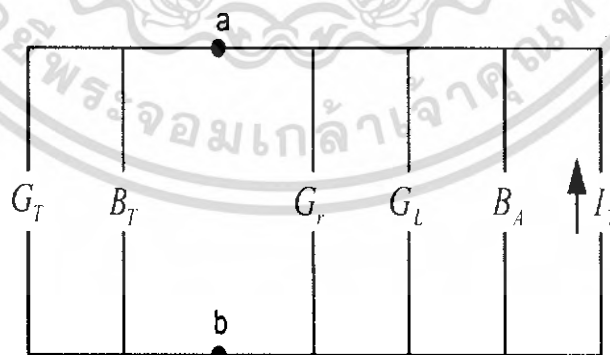
ประสิทธิภาพของสายอากาศลดลง สำหรับการใส่สายอากาศเป็นสายอากาศรับ ดังรูปที่ 2.12 ถ้าที่คลื่นตกกระทบเข้ามายังสายอากาศ จะเหนี่ยวนำให้เกิดศักดาไฟฟ้า V_r ซึ่งเทียบได้กับ V_g ในโหมดการส่ง



(ก) Antenna in receiving mode



(ข) Thevenin equivalent



(ค) Norton equivalent

รูปที่ 2.11 สายอากาศรับและวงจรสมมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติอินพุตอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความถี่และจะเหมาะสมกับสายส่งเฉพาะในช่วงความถี่หนึ่งๆ เท่านั้น นอกจากนี้ อินพุตอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศยังขึ้นกับแฟคเตอร์ต่างๆ อีก ได้แก่ รูปทรง วิธีการป้อนสัญญาณและสิ่งแวดล้อมข้างเคียง เนื่องจากคำนวณได้ยากจึงมักจะหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ ได้จากการทดลองวัด

2.10 แบนด์วิดท์ (Band width)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศ ถูกกำหนดให้เป็นช่วงความถี่ ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้ อาจเป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่างๆ เช่น อินพุตอิมพีแดนซ์, แบบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น, ความกว้างของลำคลื่น, โพลารไรเซชัน, ระดับของไซด์โลบ, ค่าการขยาย, ประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่น ฯลฯ อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ คือ ไม่ต่างจากคุณสมบัติที่วัดที่ความถี่ตรงกลางที่ออกแบบจนทำให้คุณสมบัติเหล่านี้เสียไปจากข้อกำหนดหรือมาตรฐาน สำหรับสายอากาศแบนด์กว้างมักจะคิดเป็นอัตราส่วนของความถี่ที่ใช้งานได้ด้านสูงต่อความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำ ยกตัวอย่าง เช่น แบนด์วิดท์ 10 : 1 แสดงว่าความถี่ที่ใช้งานได้ด้านสูง มีค่ามากกว่าความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำอยู่ 10 เท่า สำหรับสายอากาศแบนด์แคบ แบนด์วิดท์จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของความถี่ (ความถี่ด้านสูงลบด้วยความถี่ด้านต่ำ)หารด้วยความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น

เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศที่กล่าวมา จะไม่เปลี่ยนแปลง ตามความถี่ในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ดังนั้น จึงไม่สามารถกำหนดแบนด์วิดท์ตามคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งได้ จำต้องมีการกำหนดขอบบังคับให้เป็นไปตามการประยุกต์ใช้งานแต่ละอย่างปกติแล้วคุณสมบัติของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นกับอินพุตอิมพีแดนซ์ จะมักถูกใช้เป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ของสายอากาศ

2.11 ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ประสิทธิภาพของตัวนำและฉนวน e_{eff} เป็นอัตราส่วนของกำลังงานที่ถูกนำมายังตัวต้านทานการแพร่กระจายคลื่น R_r ต่อกำลังงานที่ถูกนำมาสู่ R_i และความต้านทานการสูญเสีย R_l ,

จากสมการ (2.57)

$$P_r = \frac{1}{2} |I_s|^2 R_r = \frac{|V_s|^2}{2} \left[\frac{R_r}{(R_r + R_l + R_i)^2 + (X_l + X_s)^2} \right]$$

และสมการ (2.48)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จะหาได้ว่า

$$e_{cd} = \left[\frac{R_r}{R_r + R_L} \right] \quad (2.5/7)$$

ในกรณีของท่อโลหะซึ่งยาว l และมีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ มีค่าเท่ากับ A ความต้านทานกระแสดรรมมีค่าเท่ากับ R_{dc} ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$R_{dc} = \left[\frac{l}{\sigma A} \right] \quad (2.5/8)$$

ถ้าสกินเดปท์ (Skin Depth) δ มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเส้นทแยงมุมที่สั้นที่สุดของพื้นที่หน้าตัดนั้น กระแสจะไหลอยู่เฉพาะในบริเวณชั้นบางๆ ที่ผิวของตัวนำเท่านั้น ดังนั้นความต้านทานที่ความถี่สูง จะมีค่าดังนี้คือ

$$R_{dc} = \frac{l R_{dc}}{P} = \frac{l}{P} \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} \quad (2.5/9)$$

เมื่อ P เป็นเส้นรอบวงของพื้นที่หน้าตัดของท่อโลหะ ($P = C = 2\pi b$) สำหรับลวดวงกลมรัศมี b , R_{dc} คือ ความต้านทานที่ผิวหน้าของตัวนำ ω เป็นความถี่เชิงมุม μ_0 เป็นค่าสภาพซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ และ σ เป็นความนำของโลหะ

2.12 สายอากาศแบบยาเกิ (Yagi Antenna)

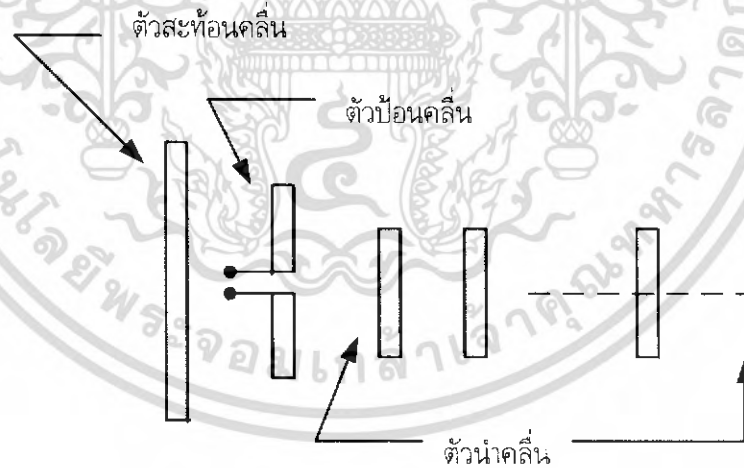
เป็นสายอากาศที่มีที่ใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เพราะสายอากาศที่มีโครงสร้างที่ค่อนข้างง่ายและมีอัตราขยายสูง

2.12.1 โครงสร้างสายอากาศยาเกิ

สายอากาศแบบยาเกิเป็นสายอากาศที่เสนอโดย ศาสตราจารย์ ยาเกิและศาสตราจารย์ อุตะ (Professor H. Yagi and Professor S.Uda) ซึ่งเป็นชาวญี่ปุ่น แรงจูงใจในการเสนอสายอากาศแบบนี้ขึ้นมานั้นเนื่องเพราะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการปรับปรุงคุณสมบัติของสายอากาศไดโพลให้ดีขึ้น ทั้งนี้เพราะสายอากาศไดโพลมีข้อจำกัดเกี่ยวกับอัตราขยายและรูปร่างแพทเทินกล่าวคือ อัตราขยายค่อนข้างต่ำและแพทเทินออกไปทิศที่กว้าง วิธีเพิ่มอัตราขยายและสร้างแพทเทินให้กับสายอากาศนั้นโดยทั่วไปจะทำได้โดยนำสายอากาศนั้นมาวางเรียงกันในรูปของสายอากาศอะเรย์หรือใช้แผ่นสะท้อนเข้าช่วย การใช้แผ่นสะท้อนเข้าช่วยเป็นวิธีการที่ง่ายแต่ก็มีข้อจำกัดตรงที่อัตราขยายที่ได้จะสูงขึ้นไม่เกิน 6 dB การใช้หลักการของสายอากาศอะเรย์นั้น ถึงแม้จะสามารถเพิ่มอัตราขยายให้สูงขึ้นเรื่อยๆ โดยการเพิ่มจำนวนของสายอากาศก็ยังมีปัญหาเรื่องการป้อนสายอากาศ กล่าวคือจะต้องมีการแยกเฟสเวอริจจากเครื่องส่งไปป้อนให้กับสายอากาศทุกๆ ตัวประกอบโดยที่จะต้องควบคุมทั้งขนาดของกระแสและเฟสของกระแสให้ได้ตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งจะมีความยุ่งยากพอสมควร ศาสตราจารย์ทั้งสองท่านจึงได้นำสายอากาศไดโพลที่ไม่ทำการป้อน (Parasitic Element) มาวางใกล้ๆ สายอากาศไดโพลที่ป้อนเฟสเวอริจอยู่ ซึ่งปรากฏว่าถ้าเลือกใช้ความยาวของสายอากาศไดโพลที่ไม่ทำการป้อนอย่างเหมาะสมแล้ว คือยาวกว่าสายอากาศไดโพลเล็กน้อย สายอากาศนั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่นทำให้คลื่นกระจายออกไปในทิศที่จำกัดขึ้นและในลักษณะเดียวกัน ถ้าเลือกความยาวให้สั้นลงกว่าสายอากาศไดโพลก็จะทำหน้าที่เป็นตัวนำคลื่น ให้คลื่นกระจายออกไปในทิศที่จำกัดขึ้นตั้งนั้นเมื่อใช้สายอากาศที่ไม่ป้อนนี้แทนทั้งตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่นจะมีความสามารถในการชี้ทิศทางที่ขึ้นอยู่กับ โครงสร้างของสายอากาศแบบยากก็ทั่วไปดังแสดงไว้ในรูป 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของสายอากาศยาก็ไดโพล

จากโครงสร้างสายอากาศแบบยากี้จะเห็นได้ว่ามีการป้อนเฟสเวอริจที่เพียงตำแหน่งเดียว จึงนับว่าเป็นโครงสร้างที่ง่ายและใช้งานได้สะดวกมากอย่างไรก็ตามคุณสมบัติต่างๆ เช่น อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพล อาจจะเปลี่ยนไปได้มาก จึงต้องออกแบบอย่างเหมาะสมเพื่อให้ใช้งานได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศแบบยาก็ได้โพล

การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศแบบยาก็ได้โพลนั้น เนื่องจากโดยทั่วไปตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่นจะวางอยู่ใกล้ๆ ตัวกับป้อนและตัวประกอบที่วางห่างกันมากที่สุดก็จะวางห่างกันไม่มากนักเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงอิมพีแดนซ์ระหว่างตัวประกอบทุกตัว การวิเคราะห์สายอากาศโครงสร้างนี้ก็จะทำได้โดยใช้วิธี EMF ร่วมกับหลักการของวงจรกล่าวคือ ถ้าให้สายอากาศแบบยาก็ได้โพลที่จะทำการวิเคราะห์นี้ประกอบด้วย N ตัวประกอบและกระแสที่ไหลบนตัวประกอบอันดับที่ i เขียนได้เป็น

$$I_i(Z_i) = I_i \sin k(\ell_i - |Z_i|) \quad (2.58)$$

โดยที่ $2\ell_i$ เป็นความยาวของสายอากาศอันดับที่ i ซึ่งจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_i กับแรงดันที่ป้อนให้กับสายอากาศในรูปต่อไปนี้คือ

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2N} \\ Z_{31} & Z_{32} & \dots & Z_{3N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

โดยที่ Z_{ii} และ Z_{ij} เป็นอิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศเองและอิมพีแดนซ์ระหว่างตัวสายอากาศตามลำดับและ V_i เป็นแรงดันของหัวสายอากาศอันดับที่ i ในการป้อนสายอากาศแบบยาก็ได้โพลนั้น เนื่องจากมีเพียงสายอากาศอันดับที่ 2 เท่านั้น ที่มีแรงดันที่หัวไม่เป็นศูนย์ สำหรับตัวอื่นจะเป็นศูนย์หมดเนื่องจากปิดวงจรอยู่ดังสมการที่ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2N} \\ Z_{31} & Z_{32} & \dots & Z_{3N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_2 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

ค่า Z_{ii} และ Z_{ij} จะสามารถคำนวณได้ เมื่อโครงสร้างของสายอากาศและความถี่ใช้งานถูกกำหนดขึ้น ดังนั้นจะสามารถคำนวณค่า ได้โดยคูณ $[Z]^{-1}$ เข้าทั้งสองข้างของสมการ (2.60) ซึ่งจะแสดงผลดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[I] = [Z]^{-1}[V] \quad (2.61)$$

โดยที่ $[Z]^{-1}$ เป็นเมตริกส่วนกลับ (Inverse Matrix) ของ $[Z]$ ในสมการ (2.62) ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูปต่อไปนี้

$$[Z]^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & \dots & \Delta_{1N} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} & \dots & \Delta_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta_{N1} & \Delta_{N2} & \dots & \Delta_{NN} \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

โดยที่ Δ เป็นค่าดีเทอร์มิแนนซ์ (Determinant) ของ $[Z]$ และ Δ_{ij} เป็นค่าดีเทอร์มิแนนซ์ของค่าเมตริกซ์ที่เกิดจากการตัดแถวที่ i และหลักที่ j ออกจาก $[Z]$ จากสมการที่ (2.60) ถึงสมการที่ (2.62) จะสามารถเขียนค่ากระแส I_i ได้ดังนี้คือ

$$I_i = \frac{\Delta_{2i} V_2}{\Delta} \quad (2.63)$$

ดังนั้นเราสามารถหาอินพุตอิมพีแดนซ์ได้ดังนี้

$$Z_m = \frac{V_2}{I_2} = \frac{\Delta}{\Delta_{22}} \quad (2.64)$$

สำหรับการหาค่าสนามแม่เหล็กที่กระจายออกไปนั้นเนื่องจากสายอากาศยาก็แบบไดโพลโดยทั่วไป ความยาวของตัวประกอบจะไม่เท่ากัน ดังนั้นการคำนวณหาสนามไฟฟ้าก็จะต้องนำความยาวของสายอากาศแต่ละตัวมาคิดด้วย จากสมการ (2.60) ถ้าให้จุดอ้างอิงเป็นจุดกึ่งกลางของความยาวจะได้ว่าสายอากาศที่มีกระแสไหลผ่านในรูปสมการ (2.58) และมีความยาวเป็น $2L$ จะให้สนามไฟฟ้าที่จุดห่างไกลเป็น

$$E_\theta(r, \theta, \phi) = j60I_0 \frac{e^{jkr} \cos(kl, \cos \theta) - \cos kl}{r \sin \theta} \quad (2.65)$$

ดังนั้นเมื่อใช้จุดกลางของสายอากาศอันดับที่ 1 เป็นจุดอ้างอิงตั้งในรูปโครงสร้างของสายอากาศยาก็ไดโพล ก็จะหาสนามไฟฟ้ารวมได้ในรูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E\theta(r, \theta, \phi) = j60 \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \sum_{i=1}^N I_i \frac{\cos(k\ell_i \cos\theta) - \cos k\ell_i}{\sin\theta} e^{jk\ell_i \sin\theta \sin\phi} \quad (2.66)$$

โดยที่ d_i เป็นระยะห่างของตัวประกอบอันดับที่ i จากจุดอ้างอิงและ $d_i = 0$ เมื่อสามารถคำนวณสนามไฟฟ้าที่จุดห่างไกลได้และสามารถคำนวณค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้ ก็จะสามารถคำนวณค่าอัตราขยายกระแสในทิศ θ, ϕ ได้ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned} G(\theta, \phi) &= \frac{|E_\theta(r, \theta, \phi)|^2 Z_0}{\text{Re}[Z_{in}] |I_2|^2 4\pi r^2} \\ &= \frac{4\pi}{Z_0 \text{Re}[Z_{in}] |I_2|^2} \cdot \left| 60 \sum_{i=1}^N I_i \frac{\cos(k\ell_i \cos\theta) - \cos k\ell_i}{\sin\theta} e^{jk\ell_i \sin\theta \sin\phi} \right|^2 \end{aligned} \quad (2.67)$$

และอัตราขยายในทิศแอนตี้ไฟร์ คือ $\theta = 90^\circ \dots \phi = 90^\circ \dots$

$$G = \frac{4\pi}{\text{Re}[Z_{in}] |I_2|^2} \cdot \left| 60 \sum_{i=1}^N I_i (1 - \cos k\ell_i) \cdot e^{jk\ell_i} \right|^2 \quad (2.68)$$

2.12.3 การออกแบบสายอากาศแบบยากิไดโพล

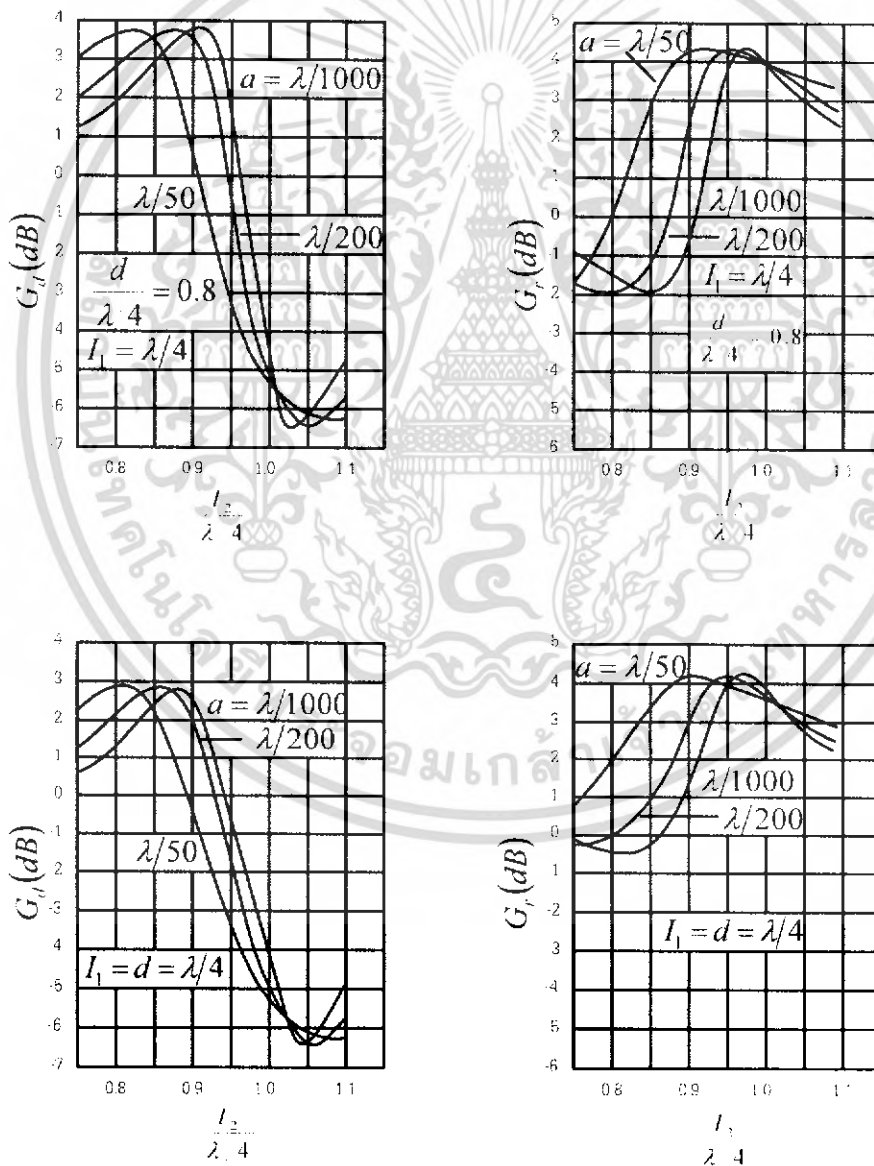
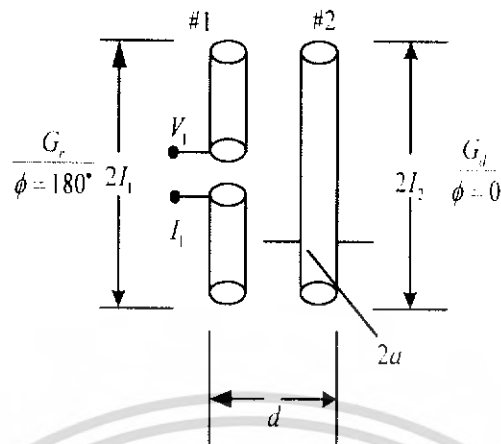
สายอากาศแบบยากิไดโพลนั้นโดยทั่วไปจะมีตัวบ่อนยาวครึ่งความยาวคลื่น ส่วนตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่นนั้นจะมีความยาวแตกต่างกันไป การเลือกขนาดของตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่นจะทำได้ โดยพิจารณาผลของความยาวและระยะห่างของตัวประกอบอื่นที่มีผลต่อการกระจายคลื่น รูปที่ 2.60 แสดงผลดังกล่าวนี้ในรูปอัตราขยายของสายอากาศยากิไดโพลที่มี 2 ตัวประกอบ จากรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าเมื่อสายอากาศอันดับที่ 2 มีครึ่งหนึ่งของความยาว คือ ℓ_2 น้อยกว่า $0.9\lambda/4$ ค่า G_0 จะสูงขึ้น G_1 จะต่ำลง นั่นคือสายอากาศอันดับที่สองนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวนำคลื่น ในทำนองเดียวกัน ในขณะที่ ℓ_2 มากกว่า $\lambda/4$ ขึ้นไปค่า G_0 จะสูงขึ้นและค่า G_1 จะต่ำลง ซึ่งแสดงว่าในเงื่อนไขเช่นนั้นสายอากาศอันดับที่ 2 จะทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่นสำหรับช่วงที่ ℓ_2 อยู่ระหว่าง $0.9\lambda/4$ ถึง $\lambda/4$ นั้น เป็นช่วงของการเปลี่ยนแปลงจากตัวนำคลื่นเป็นตัวสะท้อนคลื่นซึ่งในทางปฏิบัติมักจะไม่ใช้ จากรูปคลื่นที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าที่ ℓ_2 เป็น $0.9\lambda/4$ และ $\lambda/4$ สายอากาศอันดับที่ 2 นี้จะทำหน้าที่เป็นตัวนำคลื่นและตัวสะท้อนคลื่นที่ดีตามลำดับ ทั้งนี้เพราะให้อัตราการขยายสูง แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติกำหนดความยาวของตัวสะท้อนคลื่น จะต้องพิจารณาจากเงื่อนไขประกอบด้วยเช่น แบนด์วิดท์ที่ต้องการใช้งาน เพราะแบนด์วิดท์ที่กว้างเราจะต้องเลือกความยาวของตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่นให้สามารถทำงานได้ดีตลอดย่านความถี่นั้น นั่นคือ ความยาวของ

ตัวนำคลื่นไม่ควรเกิน 0.45 เท่าของความยาวคลื่นที่สั้นที่สุดที่ใช้งานและความยาวของตัวสะท้อนคลื่นก็ไม่ควร จะสั้นกว่า 0.5 เท่าของความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดที่ใช้งานไม่เช่นนั้นแล้วอาจจะไม่ได้แบนด์วิดท์ตามที่ต้องการได้

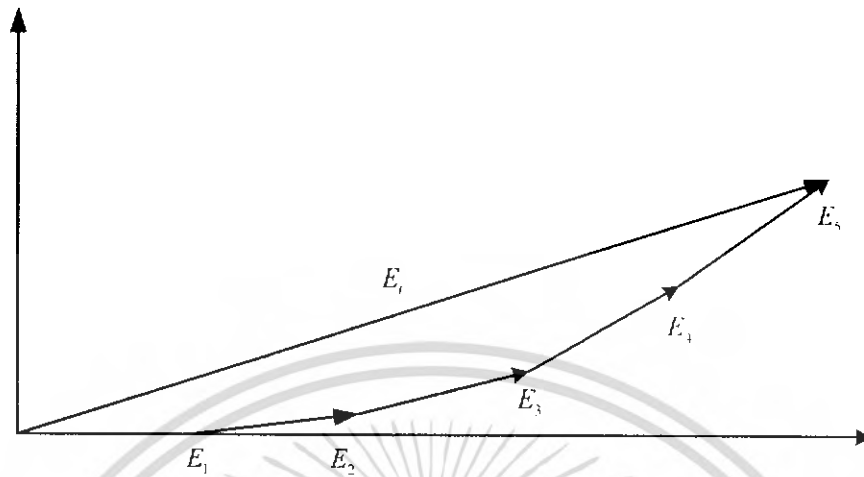
เมื่อพิจารณารูปที่ 2.14 แล้วจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้สายอากาศที่ไม่ป้อนเป็นตัวสะท้อนคลื่น จะทำให้ สามารถเพิ่มอัตราขยายทางด้านหน้าได้ประมาณ 3 dB ถึง 4 dB และถ้าเป็นตัวนำคลื่นก็จะเพิ่มอัตราขยายได้ ประมาณ 2 dB และ 3 dB อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีทั้งตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่นนั้น อัตราขยายที่เพิ่มขึ้น จะไม่ใช่ผลบวกโดยตรงของค่าที่ได้ในแต่ละกรณี ทั้งนี้อาจจะพิจารณาได้จากเฟสเซอร์ของสนามไฟฟ้าที่เกิด จากตัวประกอบแต่ละตัวประกอบแต่ละตัว ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเป็นดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.15 กล่าวคือ เฟสเซอร์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากตัวประกอบแต่ละตัวจะมีเฟสไม่ตรงกัน ดังนั้นถึงแม้ขนาดของสนามไฟฟ้า รวมจะใหญ่ขึ้นแต่ก็จะต่ำกว่ากรณีที่เฟสตรงกันเสมอ ดังนั้นเมื่อมีจำนวนตัวประกอบมากขึ้น คือตัวนำคลื่น มากขึ้นขนาดของสนามไฟฟ้ามักจะใหญ่ขึ้นตามไปด้วยแต่อัตราที่เพิ่มขึ้นจะค่อยๆ เล็กลงเมื่อจำนวนตัวนำ คลื่นมากขึ้นและเนื่องจากอัตราขยายของสายอากาศเชื่อมโยงโดยตรงกันของขนาดสนามไฟฟ้านี้ ดังนั้นผลที่ได้ คือ อัตราขยายของสายอากาศจะสูงขึ้นตาม จำนวนตัวองค์ประกอบก็จริง แต่อัตราการสูงขึ้นนี้จะค่อยๆ ต่ำลง เมื่อตัวประกอบมากขึ้น รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างของอัตราขยายที่เพิ่มขึ้น จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนตัว ประกอบมากกว่า 15 ขึ้นไป การเพิ่มขึ้นของอัตราขยายก็จะน้อยมากจนอาจจะไม่คุ้มค่าที่จะใช้วิธีเพิ่มตัวนำ คลื่นในการเพิ่มอัตราขยายอีกต่อไปที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการเลือกความยาวของตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำ คลื่น เกี่ยวกับระยะทางที่ใช้ในส่วนใหญ่อะจะอยู่ระหว่าง 0.15λ ถึง 0.25λ เพราะเป็นช่วงห่างที่มีการค้ำปลีง ที่เหมาะสม ทำให้สายอากาศทำงานได้ดี อันที่จริงอัตราขยายของสายอากาศไม่ได้ขึ้นกับจำนวนตัวประกอบ เพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างตัวประกอบด้วยหรือพูดอีกนัยหนึ่ง คือ อัตราขยายจะขึ้นอยู่กับ ความยาวของแผงสายอากาศเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น (Electrical Length) นั่นเอง

การกำหนดความยาวและระยะห่างของตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่นนั้น โดยทั่วไปนอกจากจะ พิจารณาจากค่าอัตราขยายที่ได้แล้วจะต้องพิจารณาถึงค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย กล่าวคือ อินพุตอิมพีแดนซ์ที่ได้จะต้องเข้ากับสายนำสัญญาณที่ใช้ เช่น ถ้าใช้สายโคแอกเชียล 50 Ω ตลอดย่านความถี่ที่ ใช้งานอย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์มักจะมีค่ารีแอคแตนซ์อยู่ด้วย ในการออกแบบ สายอากาศจึงต้องใช้ผลการคำนวณเป็นตัวแปรในการคำนวณต่างๆ ในขั้นต้นก่อนแล้วจึงทำการปรับแต่งโดย ใช้การทดลองซึ่งจะทำให้โครงสร้างที่ดีในขั้นสุดท้ายสามารถนำไปใช้งานได้ดี รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่าง โครงสร้างของสายอากาศที่มีอินพุตอิมพีแดนซ์ประมาณ 50 Ω ในรูปได้แสดงส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวแมตซ์ซึ่งไว้ ด้วยหน้าที่ของตัวแมตซ์ก็คือ การหักล้างค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศให้ใกล้เคียงกับศูนย์มากที่สุดที่ความถี่ ใช้งาน ในขณะที่เดียวกันก็ทำให้อิมพีแดนซ์ของสายอากาศใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณมากที่สุด

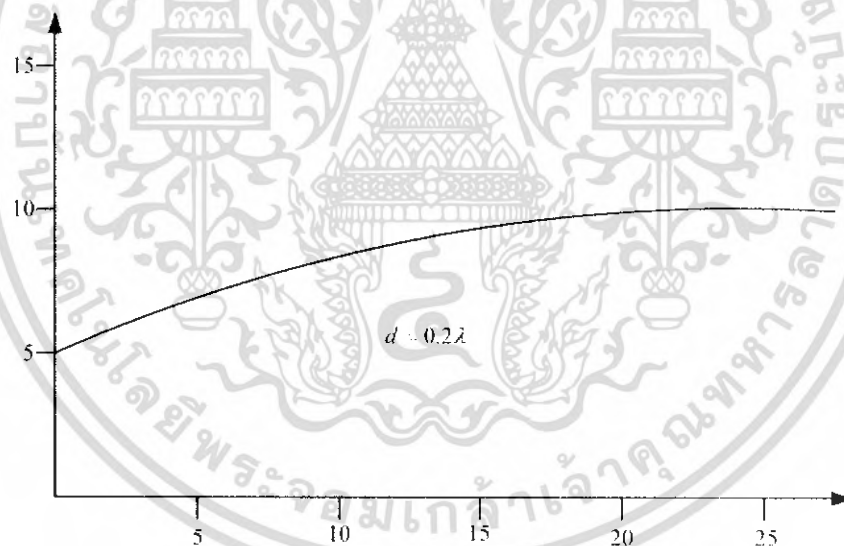
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 อัตราขยายของสายอากาศแบบยาคีโดโพลที่มี 2 ตัวประกอบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



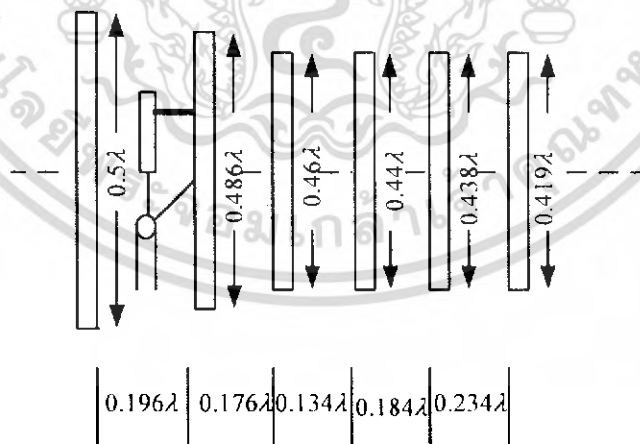
รูปที่ 2.14 เฟสเซอร์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากตัวประกอบในแต่ละตัวในสายอากาศอากาศแบบยาก็ได้โพล



รูปที่ 2.15 การเพิ่มขึ้นของอัตราขยายเมื่อจำนวนตัวประกอบมากขึ้น

สำหรับสายอากาศแบบยาก็ได้โพลที่ใช้ในการรับคลื่นโทรทัศน์นั้น เนื่องจากสายนำสัญญาณในระบบรับโทรทัศน์นั้นเดิมที่ใช้เป็นสายคู่ขนานอิมพีแดนซ์ $300\ \Omega$ และปัจจุบันส่วนใหญ่จะใช้สายโคแอกเชียลอิมพีแดนซ์ $75\ \Omega$ อย่างไรก็ตามการออกแบบสายอากาศนี้ยังคงออกแบบให้สายอากาศมีอิมพีแดนซ์ $300\ \Omega$ เพราะจะต่อโดยตรงกับสายคู่ขนานได้และเมื่อต้องการต่อกับสายโคแอกเชียล $75\ \Omega$ ก็จะทำได้โดยใช้วงจรแมตชิ่งที่ทำหน้าที่เป็นบาลันด้วย (Balun ย่อมาจาก Balanced to Unbalanced Converter) ซึ่งจะสามารถเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลงอิมพีแดนซ์ 300 Ω แบบบาลานซ์เป็นอิมพีแดนซ์ 75 Ω แบบบาลานซ์ได้ในการออกแบบให้อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเป็น 300 Ω โดยทั่วไปจะไม่สามารถทำได้โดยใช้ไดโพลแบบธรรมดาเป็นตัวป้อน เพราะอิมพีแดนซ์ที่ได้จะมีค่าต่ำกว่า 100 Ω ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ตัวป้อนที่จะทำให้อิมพีแดนซ์สูงขึ้นตัวป้อนที่ใช้ได้ผลตัวหนึ่งก็คือไดโพลแบบหึ่งซึ่งสามารถแปลงอิมพีแดนซ์ให้สูงขึ้นได้ถึง 4 เท่าตัว แต่การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศแบบยาก็ไดโพลที่มีตัวป้อนเป็นแบบไดโพลแบบหึ่งนั้นจะทำได้ลำบากมาก ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมักจะใช้ผลการคำนวณของกรณีที่ใช้ตัวป้อนแบบไดโพลธรรมดาเป็นแนวทางกล่าวคือเลือกโครงสร้างของสายอากาศยาก็ให้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ใกล้เคียง 75 Ω โดยมีค่ารีแอกแตนซ์ต่ำเสร็จแล้วจึงทำการลวดอินพุตอิมพีแดนซ์ โดยให้ตัวป้อนเป็นแบบไดโพลแบบหึ่งแล้วทำการปรับความยาวระยะห่างของตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่นให้เหมาะสมเพื่อให้ได้อินพุตอิมพีแดนซ์ที่ใกล้เคียงกับ 300 Ω มากที่สุด เนื่องจากสายอากาศแบบยาก็ไดโพลที่ใช้รับคลื่นโทรทัศน์นั้นโดยทั่วไปต้องการแบนด์วิดท์กว้างกว่าแบบที่ใช้ในการสื่อสารทั่วไป เพราะถึงแม้ว่าจะใช้ในการรับคลื่นเพียงสถานีเดียวก็ต้องการแบนด์วิดท์ประมาณ 5 % ถึง 10 % ขึ้นอยู่กับความถี่พาห์ (ในระบบ VHF มาตรฐานยุโรป ความถี่คลื่นพาห์จะอยู่ระหว่าง 57 MHz ถึง 68 MHz และ 174 MHz ถึง 230 MHz แบนด์วิดท์ที่ต้องการคือ 7 MHz) และถ้าจะให้ใช้รับได้หลายๆ สถานีก็อาจต้องการแบนด์วิดท์ถึง 20 % ในเงื่อนไขของแบนด์วิดท์ที่ค่อนข้างกว้างเช่นนี้ การออกแบบสายอากาศให้มีอินพุตอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับ 300 Ω ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการนั้นเป็นไปได้ยากมาก สำหรับสายอากาศรับโทรทัศน์จึงมักอนุโลมให้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์คลาดเคลื่อนไปได้บ้าง โดยมีลิมิตที่รับค่า VSWR แล้วให้ต่ำกว่า 2.0 : 1 หรือ 2.5 : 1 แล้วแต่จะกำหนด



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างโครงสร้างของสายอากาศแบบยาก็ไดโพลที่มีอินพุตอิมพีแดนซ์เป็น 50 Ω

การสร้างสายอากาศยาก็จากไดโพล $\lambda/2$ และพาราซิติก (Parasitic Element) คุณสมบัติของไดโพลแบบ $\lambda/2$ ที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบของไดโพลที่วางตั้งเป็นวงกลมและในระนาบเอกสารถีนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวตั้งพบว่าไม่มีการแพร่คลื่นหรือรับคลื่นซึ่งงานสื่อสารวิทยุทั่วไปจะต้องการประสิทธิภาพของสายอากาศที่มีไดเรกทิวิตีมากกว่าหนึ่ง การเพิ่มพลังงานในไดเรกทิวิตีทำได้โดยการใช้ไดโพลแบบ $\lambda/2$ ร่วมกับพาราซิติกอีลีเมนต์ ที่เรียกว่ารีเฟลกเตอร์ ซึ่งเป็นแท่งตัวนำที่มีขนาดยาวกว่า $\lambda/2$ อยู่ประมาณ 5% โดยติดตั้งไว้ใกล้ด้านของสายอากาศในทิศทางตรงข้ามกับทิศที่มีการแพร่คลื่นมากที่สุด ดังรูปที่ 2.17 (ก)

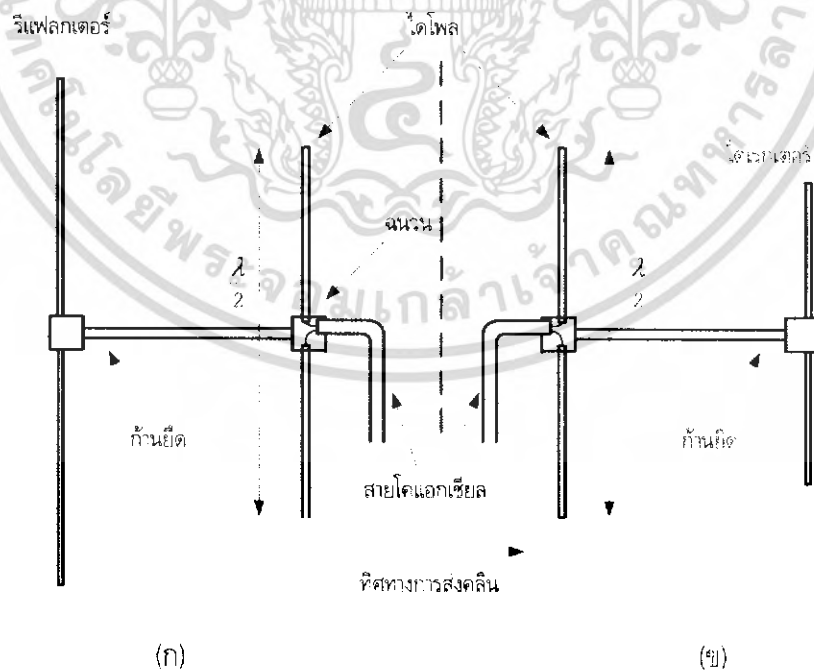
รีเฟลกเตอร์มีผลต่อรูปแบบการแพร่คลื่นของไดโพลแบบ $\lambda/2$ เนื่องจากมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าถูกเหนี่ยวนำที่มันมีผลให้ตัวรีเฟลกเตอร์สามารถแพร่คลื่นเองได้

ตัวแปรที่มีผลต่อแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น มี

1. ความยาวของรีเฟลกเตอร์
2. ระยะห่างจากไดโพล

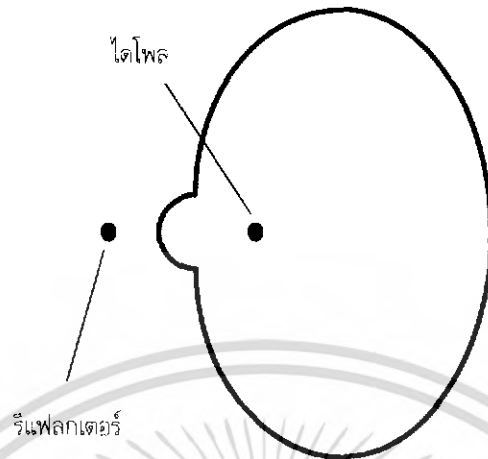
พิจารณาในรูปที่ 2.18 และ 2.19 ตามลำดับ

จากรูปที่ 2.18 และ 2.19 เห็นได้ชัดว่าไดเรกทิวิตีของอาร์เรย์แบบนี้ดีกว่าไดโพลอย่างเดี่ยวเหตุที่รีเฟลกเตอร์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคือ เมื่อเราป้อนแรงดันไฟฟ้า (ที่ความถี่รีโซแนนซ์) และกระแสให้กับไดโพลจะมีการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปทุกทิศในแนวตั้งฉากกับไดโพล พลังงานบางส่วนเดินทางมาที่รีเฟลกเตอร์และเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเกิดขึ้น ซึ่งมีเฟสตามหลังแรงดันไฟฟ้าส่วนที่ป้อนให้ไดโพลอยู่โดยคิดจากระยะห่างของอีลีเมนต์ อย่างเช่น ถ้าระยะห่างเท่ากับ 0.5λ ทำให้ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่รีเฟลกเตอร์มีเฟสตามหลังส่วนที่ป้อนให้ไดโพลอยู่ 180 องศา สิ่งนี้มีผลต่อกระแสในท่อนองเดียวกัน

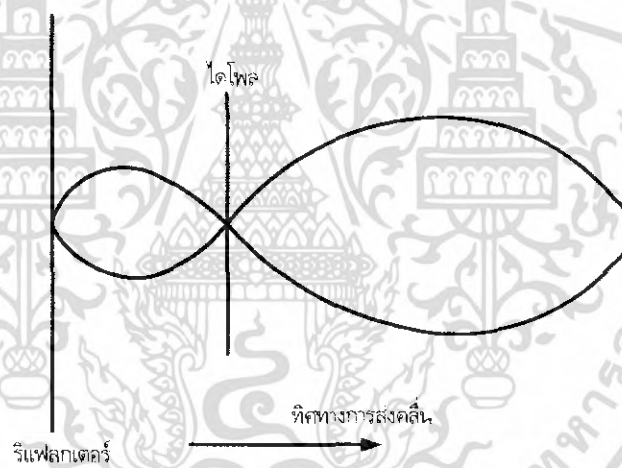


รูปที่ 2.17 สายอากาศไดโพลแบบ $\lambda/2$ พร้อมกับ (ก) รีเฟลกเตอร์ (ข) ไดเรกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของไดโพล $\lambda/2$ และรีเฟลคเตอร์ในระนาบแนวราบ



รูปที่ 2.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของไดโพล $\lambda/2$ และรีเฟลคเตอร์ในระนาบแนวตั้ง

ตอนนี้รีเฟลคเตอร์สามารถแพร่คลื่นได้ในทุกทิศทางที่ตั้งฉากกับมันเช่นกันถ้าความยาวของรีเฟลคเตอร์และระยะห่างระหว่างไดโพลกับรีเฟลคเตอร์ถูกพิจารณาเลือกมาอย่างเหมาะสมแล้ว พลังงานส่วนที่แพร่มาจากรีเฟลคเตอร์จะไปเสริมในส่วนของไดโพลในทิศทางที่ต้องการ ไม่เช่นนั้นทุกอย่างตรงข้ามกัน คือ มีการหักล้างของพลังงานเกิดขึ้นการเพิ่มค่าไดเรกทิวิตี้อัตราการขยายของไดโพล สามารถทำได้อีกโดยเพิ่มพาราซีติกอีลีเมนต์อันใหม่ลงไป โดยวางในตำแหน่งตรงข้ามกับรีเฟลคเตอร์ เราเรียกอีลีเมนต์ใหม่นี้ว่าไดเรกเตอร์ (Director) ที่มีขนาดสั้นกว่า $\lambda/2$ อยู่ประมาณ 5% ขณะที่ไดโพลแพร่คลื่นจะมีบางส่วนเหนี่ยวนำให้ไดเรกเตอร์สามารถแพร่คลื่นได้ เช่นเดียวกับรีเฟลคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพิจารณาเลือกความยาวของไดเร็กเตอร์และระยะห่างระหว่างไดโพลกับไดเร็กเตอร์นับว่าสำคัญมาก เพราะถ้าเลือกค่าถูกต้องพลังงานที่แพร่จากไดเร็กเตอร์จะไปเสริมกับส่วนของไดโพลเกิดการเพิ่มค่าไดเรคตีวิตีและอัตราขยายมากขึ้นพิจารณาผลที่มีต่อแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของไดเร็กเตอร์ ไดโพล และรีเฟล็กเตอร์ได้ในรูปที่ 2.20

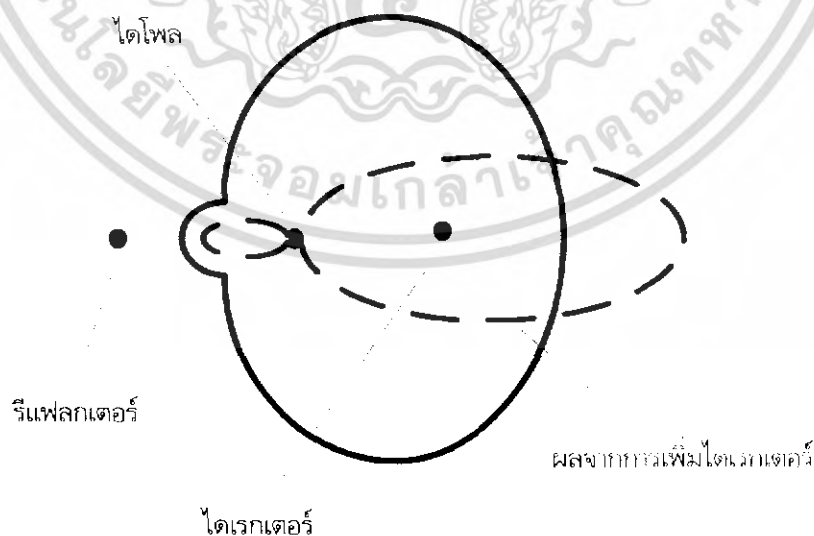
การเพิ่มค่าไดเรคตีวิตีหรืออัตราขยายของสายอากาศให้มากกว่านี้ไม่อาจทำได้ โดยเพิ่มรีเฟล็กเตอร์ตัวที่สองลงไป เพราะว่าสนามแม่เหล็กหลังรีเฟล็กเตอร์ตัวแรกมีค่าอ่อนมากจนน่าจะเห็นว่าไม่น่าไม่ได้ แต่การเพิ่มไดเร็กเตอร์ให้มากจำนวนขึ้นมีผลให้ค่าอัตราขยายของสายอากาศเพิ่มได้จริง

ในทางปฏิบัติ การพิจารณาเลือกค่าระยะห่างระหว่างอีลีเมนต์ต้องคำนึงถึง 2 ประการ คือ

1. อัตราขยายที่ต้องการของอาร์เรย์
2. อัตราส่วนพรอนด์ทุแบคที่ต้องการ

ทั่วไปแล้ว ระยะห่างระหว่างไดโพลกับรีเฟล็กเตอร์ มีค่าระหว่าง $0.15\lambda - 0.25\lambda$ และระยะห่างระหว่างไดโพลกับไดเร็กเตอร์ มีค่าระหว่าง $0.1\lambda - 0.15\lambda$

สายอากาศแบบยาก็มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเหมือนกับสายอากาศไดโพล แต่จะมีอินพุตอิมพีแดนซ์มากกว่าอยู่ 4 เท่า การใส่ตัวสะท้อนคลื่น (Reflector) และตัวบังคับทิศทาง (Director) ให้กับสายอากาศโพลเต็ดไดโพล เพื่อให้สายอากาศมีทิศทางและกำลังขยายดีขึ้นตามแนวความคิดของดอกเตอร์ยากิ (Dr. Yagi) ทำให้สายอากาศนี้มีชื่อว่า สายอากาศยากิ แต่อย่างไรก็ตาม จำนวนของตัวสะท้อนคลื่นที่มากกว่าหนึ่งตัวนั้นมีผลต่อทิศทางของสายอากาศน้อยมาก ดังนั้น จึงนิยมใช้ตัวสะท้อนคลื่นกับสายอากาศชนิดนี้เพียงตัวเดียว



รูปที่ 2.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของไดโพล $\lambda/2$ รีเฟล็กเตอร์และไดเร็กเตอร์ในระนาบแนวขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ 2 หรือ NEC2

โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ 2 หรือ NEC2 เป็นโปรแกรมที่นำมาใช้ในการคำนวณการตอบสนองทางแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศและโครงสร้างที่เป็นโลหะใดๆ ที่มีรูปทรงไม่เจาะจง การสร้างโครงสร้างของสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยเส้นลวดโปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้า ในการหากระแสเหนี่ยวนำ บนโครงสร้างนั้น ซึ่งจะเกิดจากแหล่งกำเนิดหรือสนามตกกระทบและในกรณีนี้โครงสร้างถูกแทนด้วยพื้นผิว โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็ก ในการหาค่ากระแสเหนี่ยวนำที่ต้องการ นอกจากนี้ยังมีการคำนวณโดยฟังก์ชันของกรีนสำหรับการแก้ปัญหาในส่วนของเมตริกซ์และกราวด์ที่มีการสูญเสียเพื่อความถูกต้องใกล้เคียงกับพื้นผิวกราวด์สำหรับสายอากาศสำหรับกระตุ่นสามารถที่จะเป็นไปได้ทั้งแหล่งกำเนิดแรงดันที่ป้อนเข้าไปหรือคลื่นระนาบที่ตกกระทบ NEC2 สามารถใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสเหนี่ยวนำ ประจุสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกระยะไกลและใกล้ อิมพีแดนซ์ แอ็ดมิตแตนซ์ อัตราขยาย และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง การใช้กำลังงานและการเชื่อมต่อรวมสายอากาศ

2.13.1 วิธีการจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ 2

อุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างด้วยรหัส NEC2 คือ เซ็กเมนต์ที่มีลักษณะตรงและเส้นการกำหนดเซ็กเมนต์สำหรับการออกแบบเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะจะมีผลต่อความถูกต้องของผลลัพธ์ จำนวนของเซ็กเมนต์ควรมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่ต้องการสำหรับความถูกต้อง เพราะต้องใช้เวลาในการคำนวณเมื่อจำนวนของเซ็กเมนต์เพิ่มขึ้น

เซ็กเมนต์ของเส้นลวดจะถูกกำหนดโดยพิกัดของจุดปลายทั้งสองของเซ็กเมนต์จะสัมพันธ์กับค่าความยาวคลื่นโดยปกติควรมีค่าน้อยกว่าที่ความถี่ที่ต้องการ ขนาดของเซ็กเมนต์จะเป็นตัวกำหนดการแก้ปัญหาสำหรับการหากระแสบนแบบจำลอง เนื่องจากการกระจายจะถูกคำนวณที่ตรงกึ่งกลางของแต่ละเซ็กเมนต์ เซ็กเมนต์ที่มีขนาดสั้นมากๆ เช่นน้อยกว่าจะทำให้ค่าประกอบคงที่และฟังก์ชันไซน์ของการกระจายกระแสไม่แม่นยำ

การเชื่อมต่อเซ็กเมนต์ด้วยวิธีการกำหนดระบบพิกัดที่เหมือนกัน

1. เซ็กเมนต์จะต้องจำลองไม่ทับซ้อนทับกัน เนื่องจากการแบ่งกระแสระหว่างสองเซ็กเมนต์ที่ซ้อนทับกัน อาจมีผลในสมการเมตริกซ์เอกฐาน (Singular Matrix Equation)
2. การเปลี่ยนแปลงรัศมีที่มีความแตกต่างกันมากของเซ็กเมนต์ที่มีการเชื่อมต่อ อาจมีผลทำให้ความแม่นยำมีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ ค่า Δ/α มีค่าน้อย ปัญหาที่แก้ไขได้โดยการให้รัศมีลดลงตามลำดับตลอดเซ็กเมนต์
3. จำเป็นต้องมีเซ็กเมนต์ตรงจุดที่มีการเชื่อมต่อกับโครงข่ายหรือแหล่งกำเนิดแรงดันสำหรับช่องว่างการกระตุ่น ก็จำเป็นต้องมีเส้นลวดต่อเนื่องลากข้ามช่องว่าง ดังนั้นแรงดันตกคร่อมที่ต้องการที่สามารถระบุให้เป็นเงื่อนไขขอบเขตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. จำนวนเส้นลวดที่นำมาต่อกับจุดเชื่อมต่อใดๆ นั้นไม่สามารถมีค่าเกิน 30 เส้นได้ เนื่องจากข้อจำกัดของมิติในรหัส NEC2

NEC2 ได้รับการยอมรับว่าเป็นโปรแกรมที่สามารถคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้ถูกต้องและแม่นยำ แต่สำหรับการหาค่าอิมพีแดนซ์ต้านเข้าของสายอากาศ ยังมีความผิดพลาดอยู่บ้าง เนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรม NEC2 จึงต้องศึกษาแก้ไขปัญหาการคำนวณอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ผิดพลาดนี้

2.13.2 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์

สำหรับคุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศเป็นการบ่งบอกถึงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสามารถจะอธิบายได้โดยการพิจารณาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยสังเกตที่ตำแหน่งใดๆ โดยทั่วไปจะทำการพิจารณาขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ซึ่งแบ่งเป็น 3 ลักษณะได้แก่

1. การกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นวงกลมเรียกว่าลักษณะแบบนี้ว่า สนามไฟฟ้ามี การโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular Polarization) แบ่ง ได้ 2 ลักษณะคือ การกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าทางขวามือหรือการหมุนตามเข็มนาฬิกาและการกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าไปทางซ้ายมือหรือการหมุนทวนเข็มนาฬิกา
2. การกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นวงรีจะเรียกว่าสนามไฟฟ้ามีลักษณะการโพลาไรซ์แบบวงรี (Elliptical Polarization) แบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ การกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าไปทางขวามือ หรือการหมุนตามเข็มนาฬิกา และการกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าไปทางซ้ายมือหรือการหมุนทวนเข็มนาฬิกา
3. การกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นแนวเส้นตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นก็จะเรียกว่าสนามไฟฟ้ามีลักษณะการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น แบ่งเป็นการโพลาไรซ์แนวตั้งและการโพลาไรซ์แนวนอน

การบ่งบอกถึงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ สามารถแสดงได้จากส่วนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแกนหลักต่อแกนรอง เรียกว่า ค่าอัตราส่วนแกน (Axial Ratio) ความต่างเฟสระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแกนตั้งกับแกนนอน (Phase Difference) หรือลักษณะการเลี้ยวของการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า เปรียบเทียบกับ แกนอ้างอิง (แกนตั้งเป็นแกนอ้างอิง) เรียกว่ามุมเอียง (Tilt Angle)

2.14 มาตรฐานของระบบไวร์เลสแลน (Wireless LAN)

ในปี ค.ศ. 1997 ถือว่าเป็นจุดกำเนิดมาตรฐานเครือข่ายไวร์เลสแลน (Wireless LAN) ทาง IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) หรือชื่อภาษาไทยเรียกว่า สถาบันวิศวกรณไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอิเล็กทรอนิกส์ ได้กำหนดมาตรฐานแรกของเครือข่ายไร้สายแลน (Wireless LAN) ขึ้นโดยใช้ชื่อ IEEE 802.11 จากนั้นได้มีการพัฒนามาตรฐานต่อยอดขึ้นไปในด้านประสิทธิภาพการทำงาน กลไกการส่งสัญญาณ ความเร็วสื่อสารข้อมูล ฯลฯ จนแตกแขนงออกมาเป็น 3 มาตรฐาน ได้แก่ IEEE 802.11b, IEEE 802.11a, IEEE 802.11g

มาตรฐานเครือข่ายไร้สายแลน (Wireless LAN) ที่ออกมาล่าสุดก็คือ IEEE 802.11g มาตรฐานนี้พัฒนามาขึ้นเพื่อให้อุปกรณ์ไร้สายแลน (Wireless LAN) สามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 54 Mbps โดยใช้ความถี่ส่งสัญญาณในช่วง 2.4 GHz มีกลไกการส่งสัญญาณแบบ DSSS และ OFDM ความพิเศษของอุปกรณ์ด้านที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.11g คือ สามารถใช้ร่วมกับอุปกรณ์ ไร้สายแลน (Wireless LAN) มาตรฐาน IEEE 802.11b ที่มีความเร็ว 11 Mbps อยู่แล้วโดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนฮาร์ดแวร์ใหม่ ทั้งสิ้น

อุปกรณ์ไร้สายแลน (Wireless LAN) มาตรฐาน IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g ไม่สามารถใช้ร่วมกับอุปกรณ์ไร้สายแลนมาตรฐาน IEEE 802.11a ได้ เนื่องจากความถี่และกลไกการส่งสัญญาณแตกต่างกันแต่ก็มีผู้ผลิตอุปกรณ์ไร้สายแลน (Wireless LAN) บางรายสร้างฮาร์ดแวร์ที่สามารถสนับสนุนทั้งสองมาตรฐานออกมาจำหน่ายในรูปแบบ Wireless LAN $a+b$ และ $a+g$ อย่างไรก็ดีตามอุปกรณ์มาตรฐาน IEEE 802.11a ขณะนี้ยังไม่สามารถนำเข้ามาจำหน่ายในเมืองไทยได้ เนื่องจากความถี่ย่าน b GHz สงวนไว้สำหรับหน่วยงานราชการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

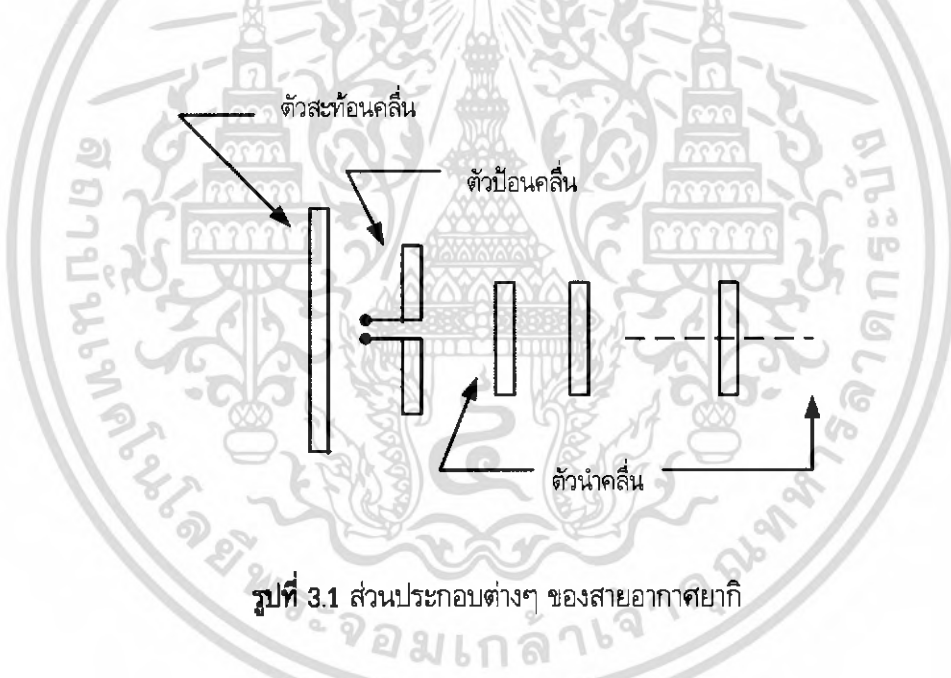
บทที่ 3

การออกแบบ การสร้าง และการทำงาน

3.1 กล่าวนำ

ในโครงการนี้ต้องการสายอากาศที่นำไปใช้งานแบบทิศทาง ใช้ในงานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย 2.45 GHz โดยมีทิศทางการใช้งานที่เจาะจงพื้นที่ในการใช้งานจึงได้มีการออกแบบสร้างสายอากาศยาภิโดยคุณสมบัติของสายอากาศแบบยาภินี้ โดยสายอากาศยาภิจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไปในทิศทาง (Directional) โดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น (Reflector)

3.2 หลักในการออกแบบสายอากาศแบบยาภิ



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบต่างๆ ของสายอากาศยาภิ

สายอากาศแบบยาภิจะมีส่วนประกอบที่สำคัญด้วยกัน 3 ส่วนคือ

1. ตัวสะท้อนคลื่น (Reflector)
2. ตัวป้อนคลื่น (Feeder)
3. ตัวนำคลื่น (Director)

โดยหลักการที่ว่าความยาวของสายอากาศไดโพลที่ไม่ได้ทำการป้อนคลื่น ยาวกว่าสายอากาศไดโพลที่เป็นตัวป้อนคลื่นเล็กน้อย สายอากาศนั้นจะทำการเป็นตัวสะท้อนคลื่น ทำให้คลื่นกระจายคลื่นออกไปในทิศทางที่จำกัดขึ้นและในลักษณะเดียวกัน ถ้าความยาวของสายอากาศไดโพลที่ไม่ได้ทำการป้อนคลื่นสั้นลงกว่าสายอากาศไดโพลที่เป็นตัวป้อนคลื่น สายอากาศนั้นก็จะทำหน้าที่เป็นตัวนำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดความยาวของตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่น โดยพิจารณาจากเงื่อนไขแบนด์วิดท์ที่ต้องการใช้งาน โดยเลือกความยาวของตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่นให้สามารถทำงานได้ในย่านความถี่ของไวร์เลสแลน (Wireless LAN) ที่ 2.45 GHz

โดยผลจากหลักการทดลองที่กล่าวว่าความยาวของตัวนำคลื่นไม่ควรเกิน 0.45 เท่าของความยาวคลื่นที่สั้นที่สุดที่ใช้งานและความยาวของตัวสะท้อนคลื่นก็ไม่ควรจะสั้นกว่า 0.5 เท่าของความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดที่ใช้งาน จะทำให้สายอากาศสามารถทำงานได้ดีตลอดย่านความถี่

ค่าความยาวคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz

$$\lambda = \frac{c}{f_{\max}} \quad (3.1)$$

เมื่อ λ คือ ค่าความยาวคลื่น (m)

c คือ ค่าความเร็วของแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/sec

f_{\max} คือ ค่าความถี่สูงสุด (Hz)

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น } \lambda &= \frac{3 \times 10^8}{2.45 \times 10^9} \\ &= 0.122 \text{ m} \end{aligned}$$

ดังนั้นความยาวของตัวนำคลื่นไม่ควรยาวเกิน

$$0.45 \lambda = 0.055 \text{ m}$$

ความยาวของตัวสะท้อนคลื่นไม่ควรจะสั้นกว่า

$$0.5 \lambda = 0.061 \text{ m}$$

เมื่อได้ความยาวของตัวนำคลื่นและตัวสะท้อนคลื่นแล้วต้องหาค่าระยะห่างระหว่าง ตัวสะท้อนคลื่น ตัวป้อนและตัวนำคลื่น โดยช่วงที่มีการคับปลิงที่เหมาะสมที่ทำให้สายอากาศทำงานได้ดี ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1λ ถึง 0.15λ คือ ระยะห่างของตัวป้อนคลื่นต่อตัวสะท้อนคลื่นและระยะห่างตัวป้อนคลื่นต่อตัวนำคลื่นจะอยู่ระหว่าง 0.15λ ถึง 0.25λ

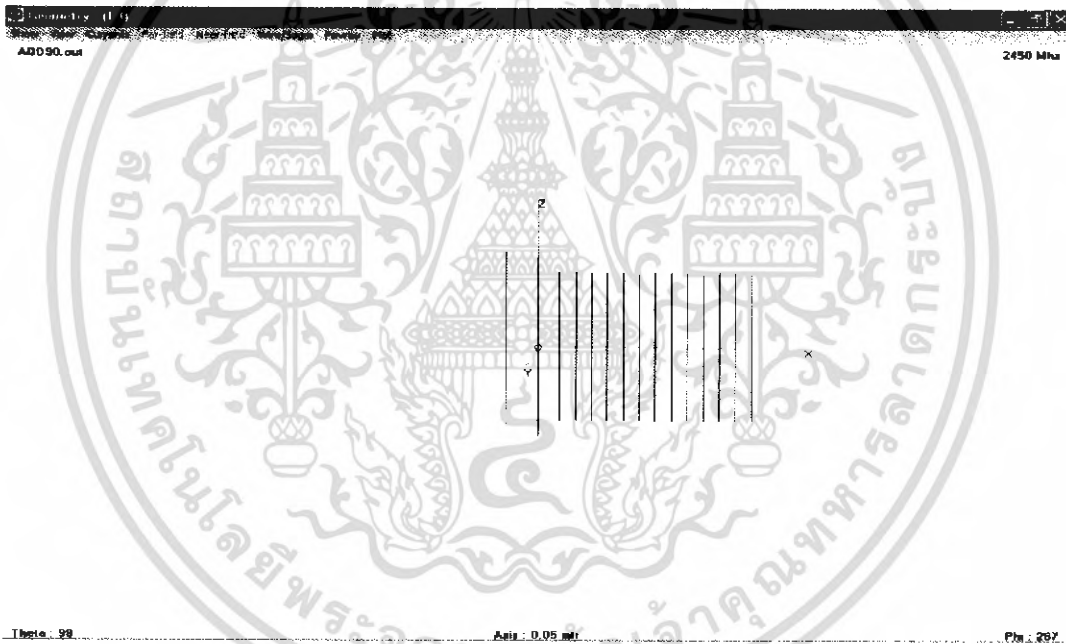
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบสายอากาศยาก็

จากนั้นทำการเลือกองค์ประกอบต่างๆ ภายในช่วงตามที่ทำการออกแบบไว้ โดยเลือกใช้ค่าแต่ละองค์ประกอบดังนี้

1. ความยาวของตัวสะท้อนคลื่น 0.061 m
2. ความยาวของตัวนำคลื่น 0.055 m
3. ความยาวของตัวป้อนคลื่น 0.061 m
4. ระยะห่างขององค์ประกอบเท่ากัน 0.024 m

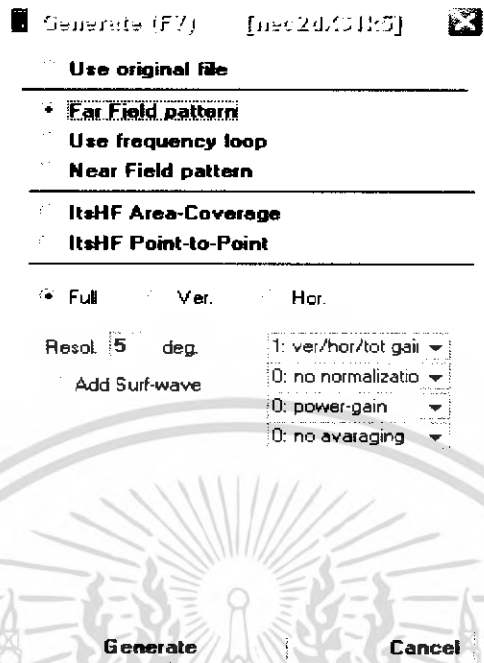
เมื่อได้องค์ประกอบต่างๆ ที่เป็นส่วนสำคัญในการออกแบบสายอากาศแบบยาก็แล้วจึงนำไปทำการ Simulate ออกแบบสายอากาศแบบยาก็ โดยใช้โปรแกรม Numerical Electromagnetic Code (NEC) ช่วยในการออกแบบ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบรูปสายอากาศที่ออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2

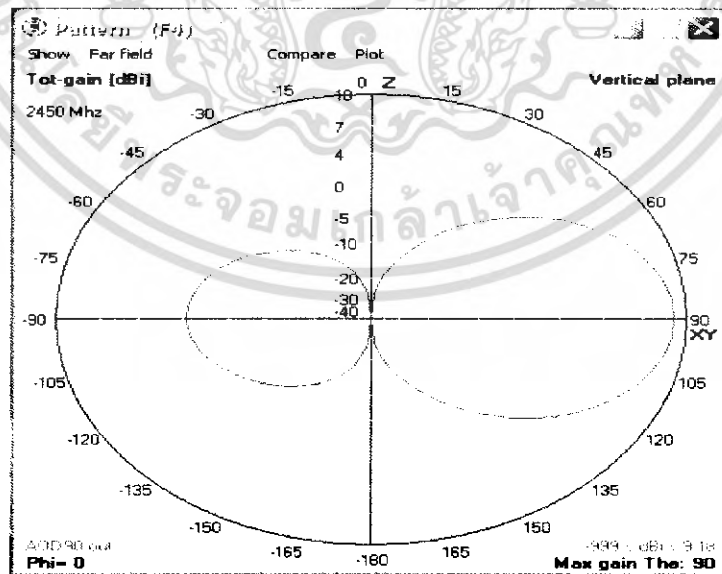
กำหนดความถี่ใช้งานที่ 2.45 GHz ให้กับตัวป้อนคลื่นและให้โปรแกรม NEC2 ทำการ Generate หาค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ในระยะ Far Field ดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



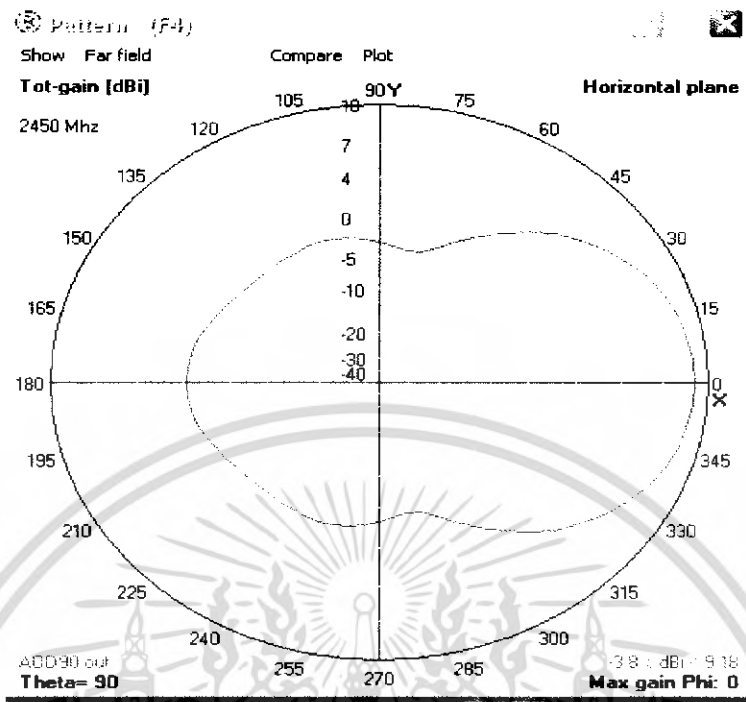
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการ Generate แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

เมื่อทำการป้อนความถี่ที่ต้องการนำใช้งาน คือความถี่ 2.45 GHz ซึ่งจะได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Pattern), ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width), ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) และ Smith chart ดังนี้



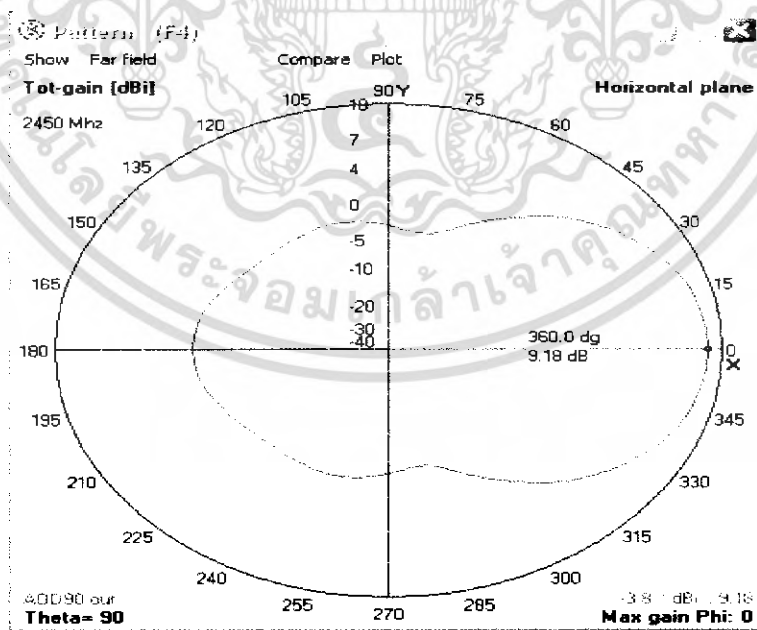
รูป 3.4 (ก) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



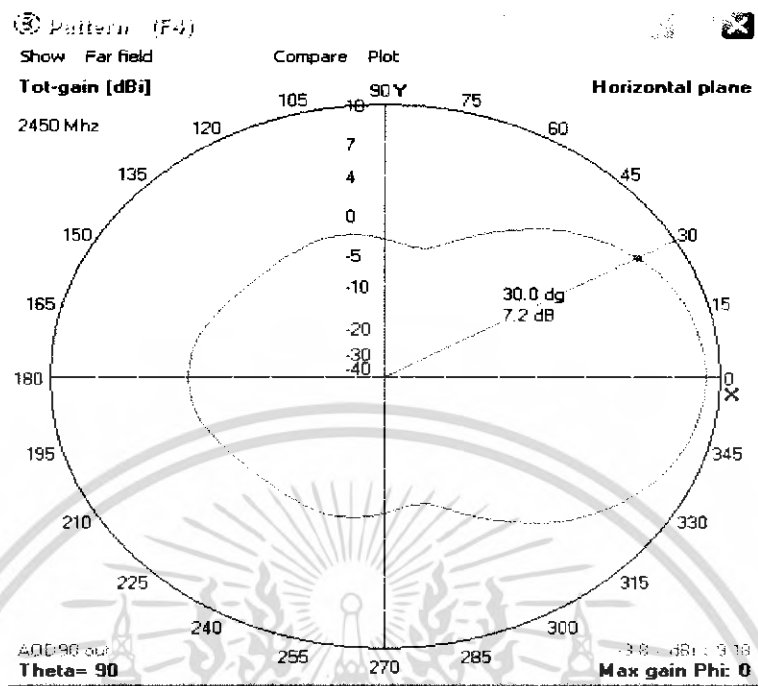
รูป 3.4 (ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแนวนอน

รูปที่ 3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการ Generate ด้วยโปรแกรม NEC2

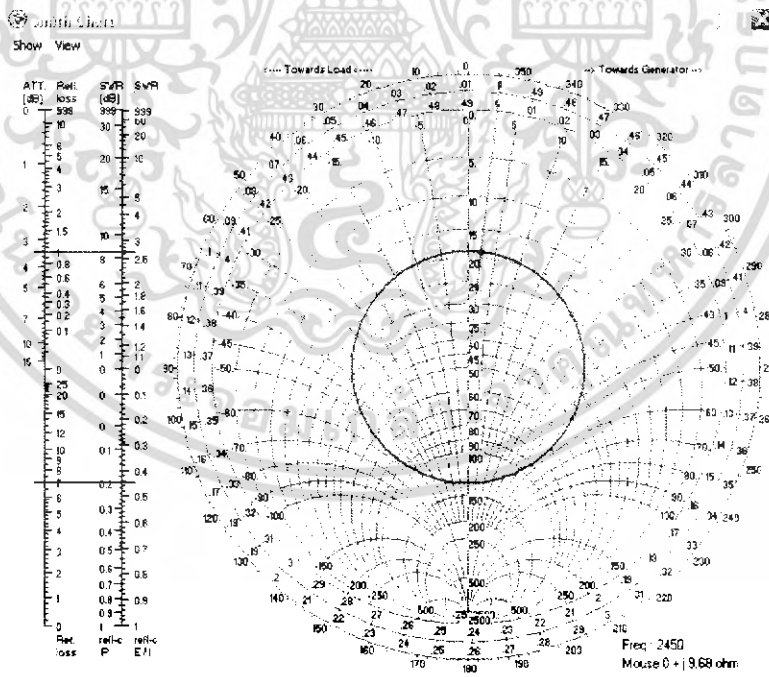


รูปที่ 3.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น Directivity ที่ความถี่ 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ความกว้างของลำคลื่น (HPBW) ที่ความถี่ 2.45 GHz



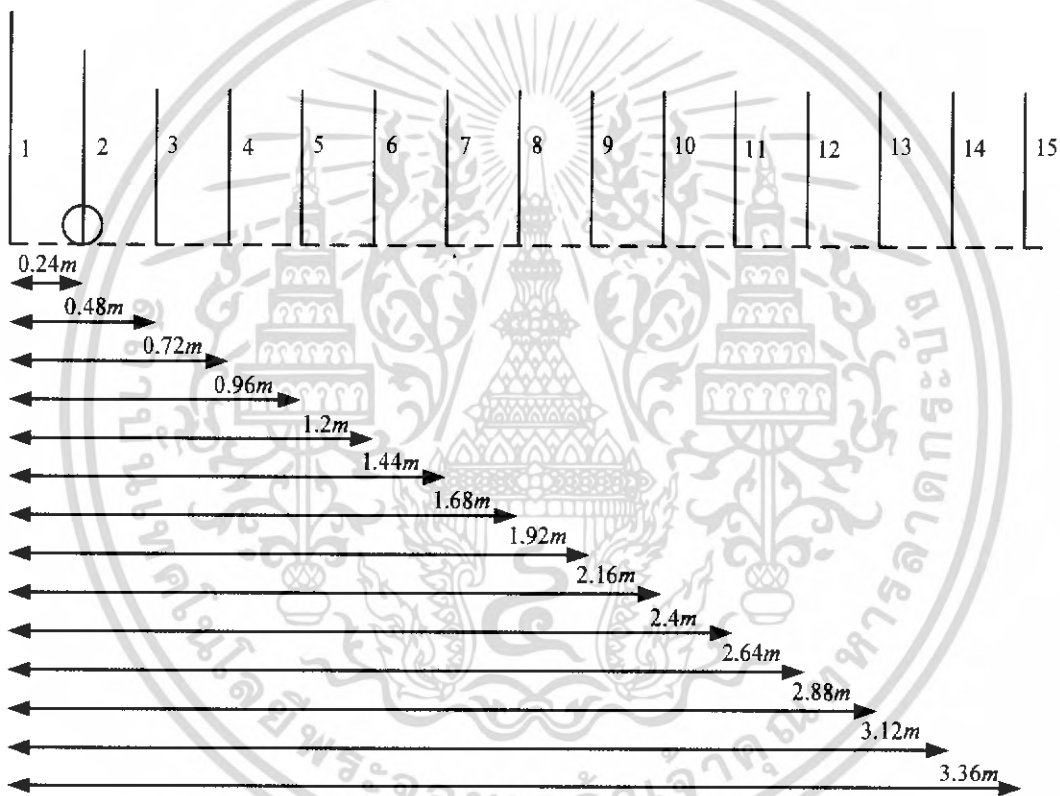
รูปที่ 3.7 Smith chart ที่ความถี่ 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การสร้างสายอากาศยาก็

โดยมีจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศทั้งหมด 15 องค์ประกอบ ตัวนำคลื่นจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 cm

1. ความยาวของตัวสะท้อนคลื่น 0.122 m
2. ความยาวของตัวนำคลื่น 0.055 m
3. ความยาวของตัวป้อนคลื่น 0.061 m
4. ระยะห่างขององค์ประกอบเท่ากัน 0.024 m



รูปที่ 3.8 ระยะห่างแต่ละองค์ประกอบเทียบกับตัวสะท้อนคลื่น

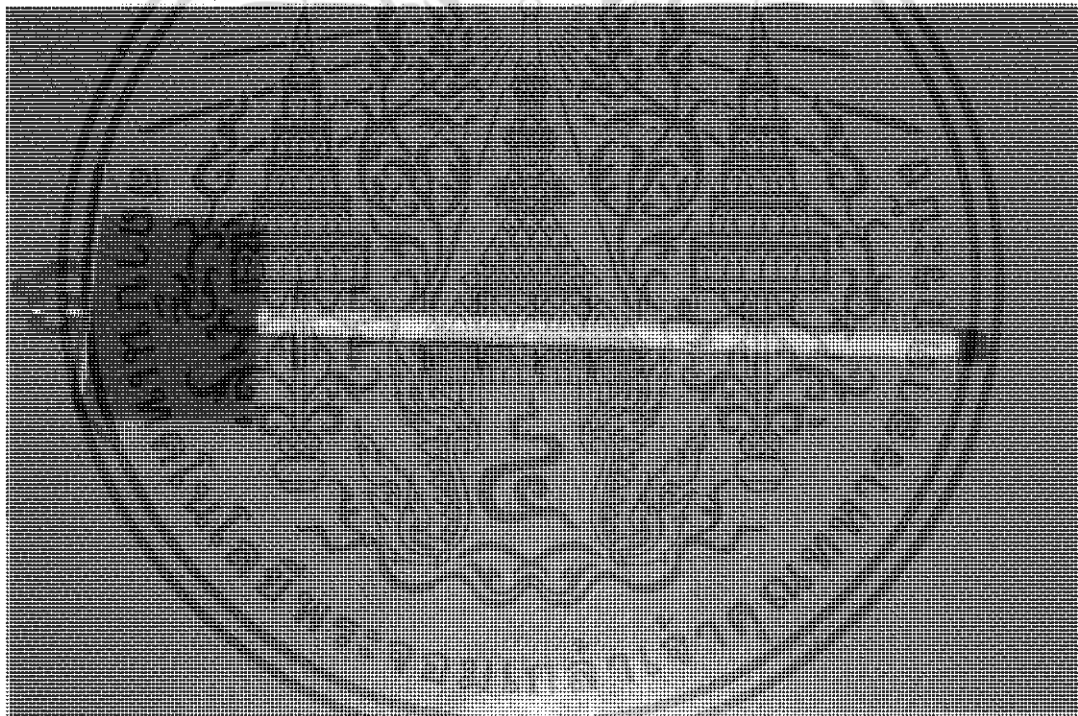
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 กล่าวนำ

เมื่อทำการออกแบบและสร้างสายอากาศยาก็ที่มีองค์ประกอบต่างๆ ของสายอากาศที่สามารถใช้งานในช่วงความถี่ 2.45 GHz โดยโครงสร้างของสายอากาศ ที่มีแบบรูปการแพร่กระจาย (Pattern), Half Power Beam width (HPBW), Directivity, SWR ที่เหมาะสมในการใช้งาน



รูปที่ 4.1 รูปแบบของสายอากาศยาก็ที่จะนำไปทดสอบ

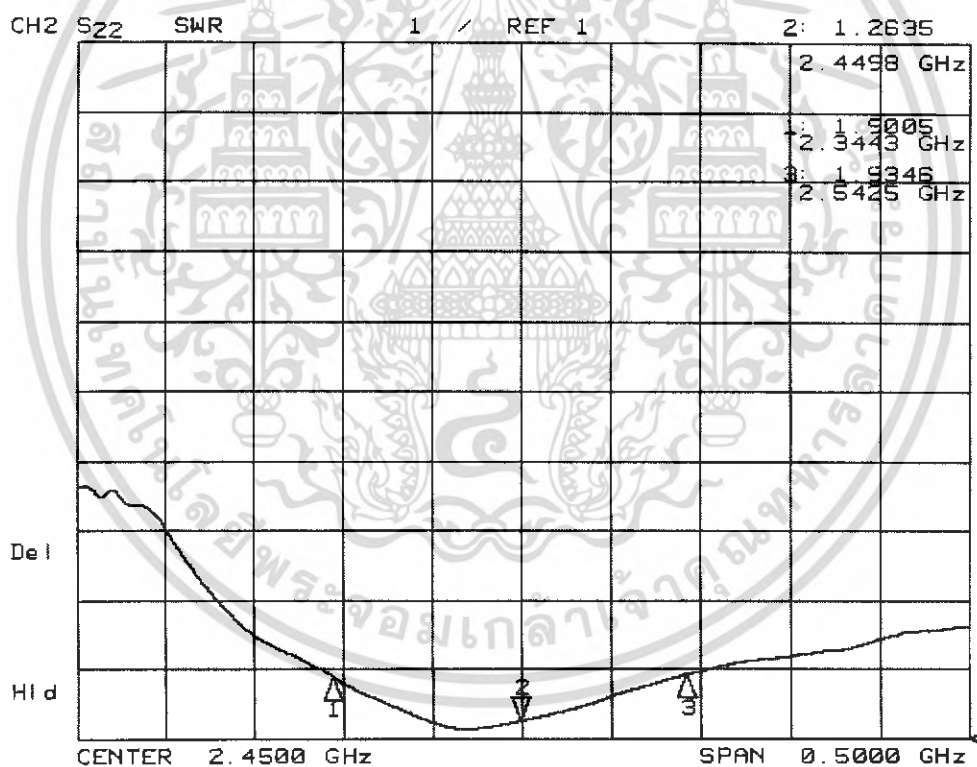
จากนั้นนำสายอากาศจากรูปที่ 4.1 มาต่อเข้ากับเครื่อง Network analyzer เพื่อวัดค่า อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR, Standing Wave Ratio), อิมพีแดนซ์, ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Pattern) ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR)

อัตราส่วนคลื่นนิ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่ง ที่ใช้พิจารณาว่าสายอากาศที่นำมาทดสอบมีประสิทธิภาพดีเพียงพอต่อการนำสายอากาศไปใช้งานได้หรือไม่ โดยค่า SWR นี้จะแสดงถึงความแรงของการแทรกสอดของคลื่นส่งผ่านและคลื่นที่สะท้อนกลับ นั่นคือถ้า SWR มีค่ามาก แสดงถึงการแทรกสอดเกิดขึ้นสูง ดังนั้นค่า SWR ที่ดีที่สุดคือ SWR มีค่า 1:1 ในการใช้งานโดยทั่วไปแล้ว ค่า SWR ตามมาตรฐานจะยอมให้เกิดขึ้นได้ จะต้องมีย่านไม่เกิน 2:1

4.2.1 ผลการทดสอบค่า SWR



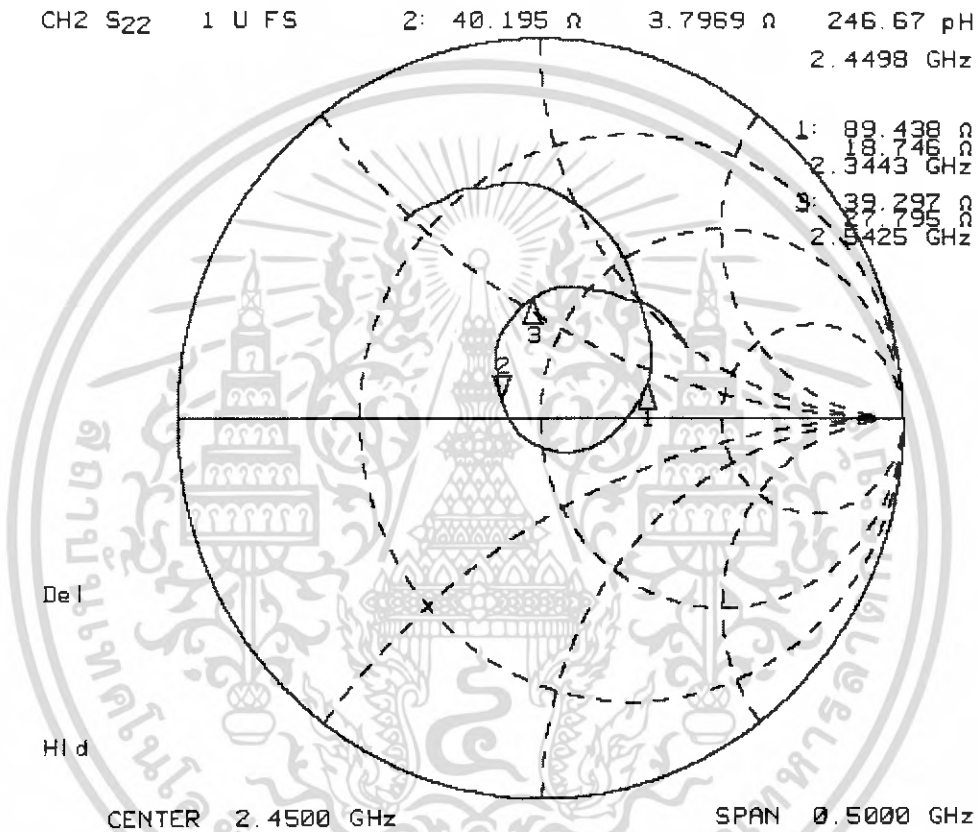
รูปที่ 4.2 ค่า SWR จากเครื่อง Network Analyzer

สรุปผลการทดสอบได้ค่า SWR ที่ความถี่ 2.4498 GHz มีค่า SWR = 1.2635:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การวัดค่าอิมพีแดนซ์

การทดสอบวัดค่าอิมพีแดนซ์ เพื่อที่จะนำมาใช้ในการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ให้แม่นยำซึ่งกับอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ มีค่าเท่ากับ 50Ω



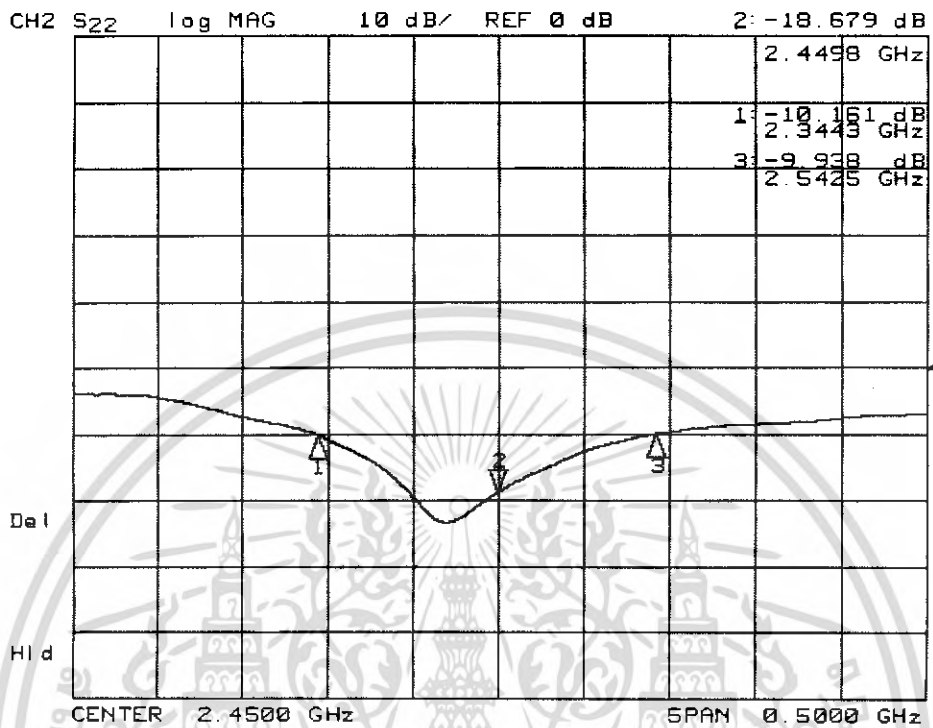
รูปที่ 4.3 ค่าอิมพีแดนซ์จากเครื่อง Network Analyzer

สรุปผลการทดสอบได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 2.4498 GHz มีค่าอิมพีแดนซ์ = $40.195 + j3.7969 \Omega$

4.2.3 การวัดค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss)

โดยทั่วไปค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ยอมรับได้ ควรมีค่าน้อยกว่า -10 dB เมื่อมีกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าไหลบนสายนำสัญญาณ จะพบว่ามี การสูญเสียการลดทอน เนื่องมาจากเกิดการสูญเสียในสายนำสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับจากเครื่อง Network Analyzer

สรุปผลการทดสอบได้ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ที่ความถี่ 2.4498 GHz มีค่าเท่ากับ -18.679 dB

4.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

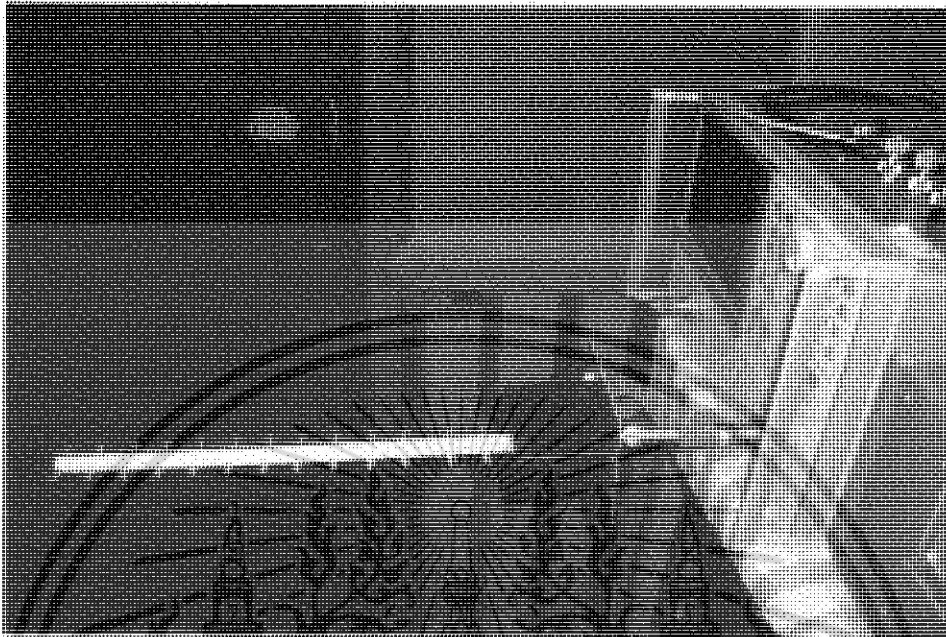
ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในโครงการนี้ กำหนดให้สายอากาศยาก็เป็นสายอากาศด้านรับและใช้สายอากาศแบบโมโนโพลเป็นสายอากาศด้านส่ง ทำการทดสอบในห้องทดสอบการสะท้อนต่ำ เพื่อป้องกันจากสภาพแวดล้อม โดยทำการหมุนสายอากาศด้านรับครั้งละ 5 องศาจนครบ 360 องศา

ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ระยะห่างของสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีค่าเท่ากับ 1.67 เมตร โดยพิจารณาจากระยะของสนามระยะไกล (Far Field) ซึ่งคำนวณได้จาก

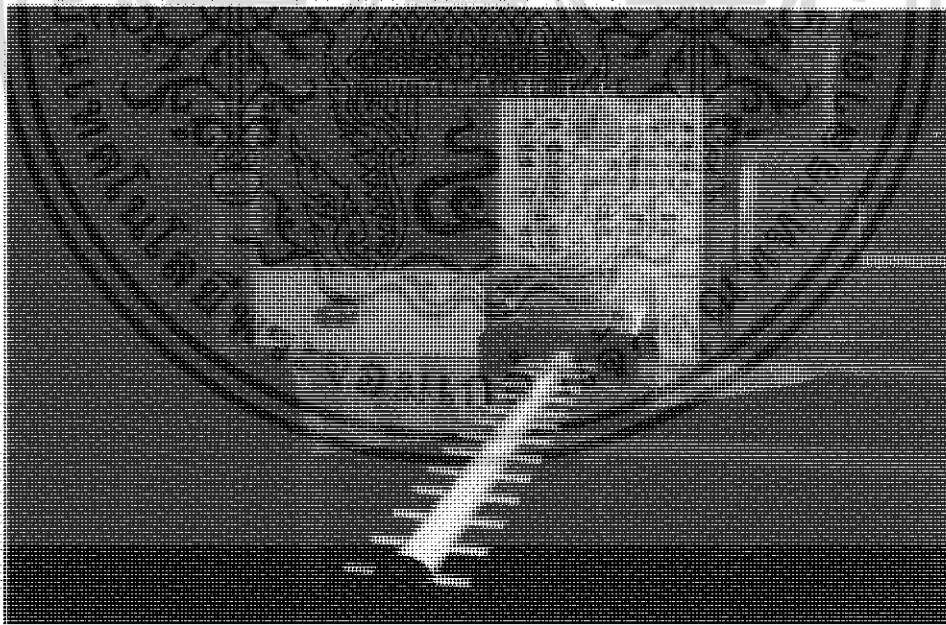
$$R \geq 2D^2 / \lambda \quad (4.1)$$

โดยที่ D คือ มิติที่กว้างที่สุดของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

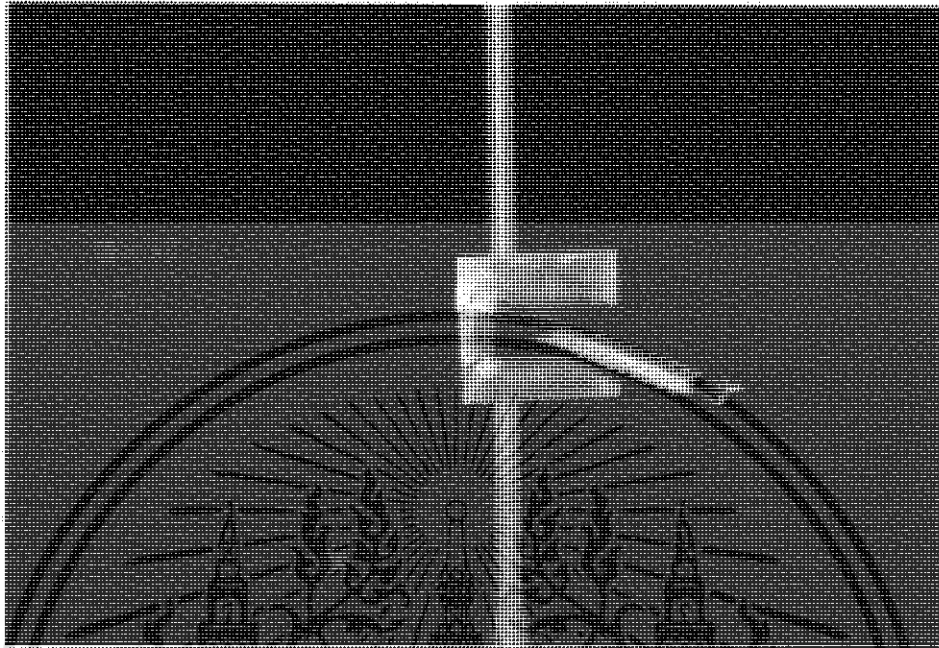


รูปที่ 4.5 การต่อสายอากาศเข้ากับ Network Analyzer ทาค่า SWR, อิมพีแดนซ์ และค่าการสูญเสีย



รูปที่ 4.6 แสดงรูปการต่อสายอากาศวัดหาค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



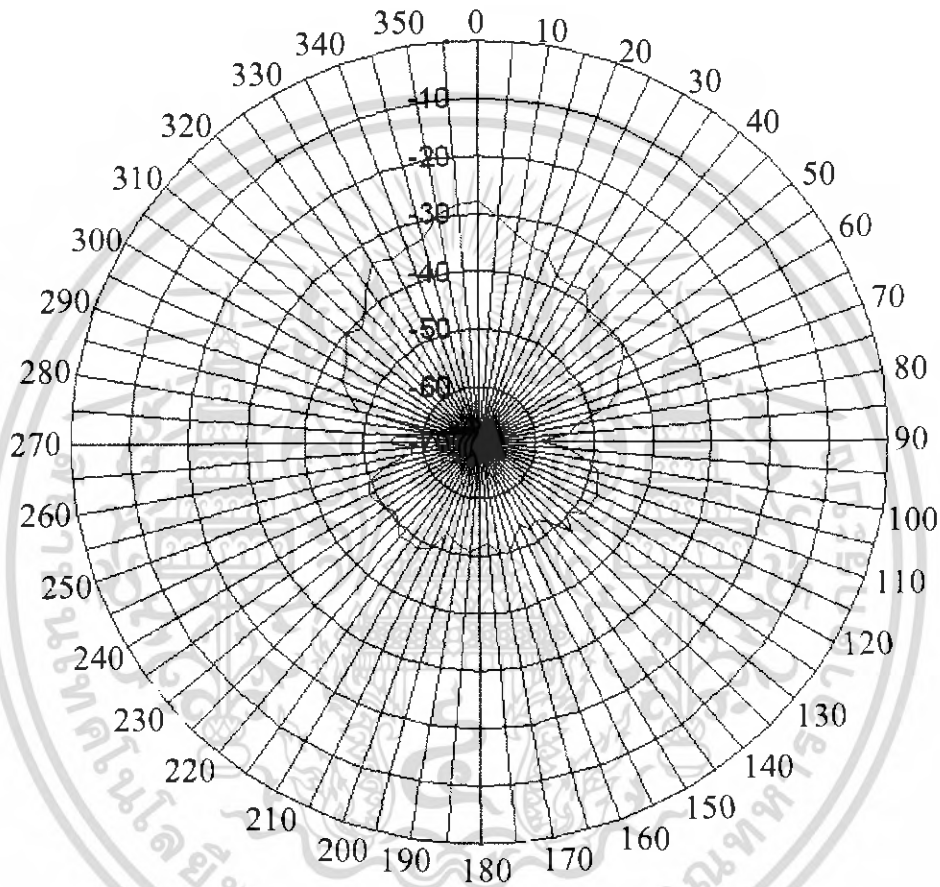
รูปที่ 4.7 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบวงกวาด



รูปที่ 4.8 สายอากาศด้านส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำข้อมูลจากการทดสอบ มาทำการพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยาก็โดยผลการทดลองที่ได้นี้ทำการหมุนสายอากาศที่ละ 5 องศาจนครบ 360 องศา



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบการแพร่พลังงานของสายอากาศ

สรุปผลการทดลองที่ได้ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับ ค่าอิมพีแดนซ์ และค่า SWR ที่ความถี่ 2.45 GHz

$$\text{ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับ} = -18.678 \text{ dB}$$

$$\text{ค่าอิมพีแดนซ์} = 40.195 + j3.7969 \ \Omega$$

$$\text{ค่า SWR} = 1.2635$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงระดับของความแรงสัญญาณที่ระยะทางต่างๆ

ระยะทาง(เมตร)	ระดับความแรงของสัญญาณ
50	5 ระดับ
100	5 ระดับ
150	5 ระดับ
200	5 ระดับ
250	4 ระดับ
300	3 ระดับ
350	3 ระดับ
400	2 ระดับ
450	1 ระดับ
500	ไม่สามารถใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุป

โครงการนี้ เป็นการวิเคราะห์ การออกแบบ การสร้างและทดสอบสายอากาศยาก็ ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางและการโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น ในโครงการนี้ได้แบ่งการออกแบบและสร้างสายอากาศ เป็น 2 วิธี คือวิธีการเลือกค่าองค์ประกอบแต่ละตัวและวิธีการ Optimizer โดยส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์ออกแบบโดยใช้โปรแกรม NEC2 (Numerical Electromagnetic Code2) ช่วยในการออกแบบสายอากาศให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางและสามารถใช้งานได้ในความถี่ 2.45 GHz

โดยในปฏิญญาพันธ์จะประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 5 บท โดยบทที่ 1 จะกล่าวถึงจุดมุ่งหมายของโครงการสมมุติฐานของการจัดทำโครงการและขีดความสามารถของโครงการและในบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของสายอากาศ โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2, มาตรฐานของระบบไวร์เลสแลน (Wireless LAN) ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงการออกแบบ การสร้าง และการทำงาน ในบทที่ 4 จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลอง โดยในการทดลองจะวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง, อิมพีแดนซ์, ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ในบทที่ 5 จะกล่าวถึงปัญหาและวิธีการแก้ไขในการทำโครงการและสรุป

โดยโครงการนี้จะเป็นสายอากาศที่ใช้ภายนอกอาคารและจะต้องติดตั้งในที่สูงเพื่อที่จะทำให้ในการส่งสัญญาณได้ดีเนื่องจากไม่มีสิ่งกีดขวางและข้อดีของสายอากาศยาก็นี้จะเจาะจงผู้ใช้งาน

การเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวป้อนของสายอากาศมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง โดยปรับความยาวของตัวป้อนคลื่นของสายอากาศใกล้เคียงกับความยาวของตัวสะท้อนคลื่นหรือตัวนำคลื่น จะทำให้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่าเพิ่มขึ้น

จำนวนองค์ประกอบของตัวนำคลื่นจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพเจาะจงทิศทางและค่า HPBW โดยถ้ามีจำนวนองค์ประกอบของตัวนำคลื่นมากขึ้นค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะมีค่ามากขึ้น แต่ค่า HPBW จะมีค่าน้อยลง

จากการทดลองวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง, อิมพีแดนซ์, ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับจะได้ค่าดังนี้

$$\text{ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับ} = -18.678 \text{ dB}$$

$$\text{ค่าอิมพีแดนซ์} = 40.195 + j3.7969 \ \Omega$$

$$\text{ค่า SWR} = 1.2635$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบระยะทางในการใช้งานนั้นจะทดสอบที่บริเวณกว้าง โดยจะทดสอบการใช้ที่ระยะทาง 50 เมตร ไปเรื่อยๆ โดยจะดูระดับความแรงของสัญญาณว่าสามารถส่งและรับสัญญาณได้ระยะทางเท่าไร ในการทดลองนี้ โดยการทดลองนั้นที่ระยะทาง 200 เมตร จะรับสัญญาณได้ดีที่สุดและที่ระยะทาง 450 เมตร สัญญาณจะเริ่มต่ำมากจนไม่สามารถที่จะรับสัญญาณได้

5.2 ปัญหาและวิธีการแก้ไข

จากการดำเนินการสร้างและการทดลองโครงการพบว่ามีปัญหาเกิดขึ้นหลายประการ

1. ความล่าช้าในการศึกษาเรื่องสายอากาศและการศึกษาการใช้โปรแกรม NEC2 เข้าช่วยในการทดลองและออกแบบสายอากาศ

วิธีการแก้ไข แบ่งกันศึกษาเรื่องสายอากาศยากิและศึกษาการใช้โปรแกรม NEC2

2. การทดลองหาค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าและค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก เมื่อสายอากาศมีการหมุนไปที่ 5 องศา สายอากาศจะไม่นิ่งและทำให้ผลการทดลองมีการคาดเคลื่อนเล็กน้อย

วิธีการแก้ไข ทำการเปลี่ยนเสาที่ใช้ยึดกับสายอากาศให้มีความแข็งแรง

3. การทดลองจะมีความล่าช้าเนื่องจากอุปกรณ์บางตัวไม่มี

วิธีการแก้ไข จัดทำอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพิ่มขึ้น

4. ผลการทดลองในการดูแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะได้รูปที่ไม่ตรงกับทางทฤษฎี

วิธีการแก้ไข ทำการทดลองเพิ่มเติมอีกครั้ง

5. ในการทดลองดูแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดยใช้เครื่อง Network analyzer เครื่องจะเป็นรุ่นเก่าจึงไม่สามารถแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้

วิธีการแก้ไข ทำการบันทึกค่าที่ได้ในแต่ละองศา นำผลการทดสอบที่ได้มาทำการพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม (Microsoft Excel)

5.3 แนวทางการพัฒนา

1. จัดทำสายอากาศในลักษณะต่างๆ โดยเลือกสายอากาศที่มี Gain การขยายที่ดี เช่น สายอากาศแบบลูป สายอากาศแบบวงรูปสปริง เป็นต้น
2. เนื่องจากภาคส่งสัญญาณของ Access Point จะอยู่ราวๆ 30 -50 mW (มิลลิวัตต์) ระยะการส่งและรับสัญญาณอาจจะไม่ไกลนัก ดังนั้นอาจจะทำการต่ออุปกรณ์เพิ่มเติมที่ Access Point โดย Wireless Signal Booster จะทำหน้าที่เป็นตัวขยายสัญญาณที่ส่งออกมาจาก Access Point ให้มีกำลังสูงขึ้นถึง 100 mW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

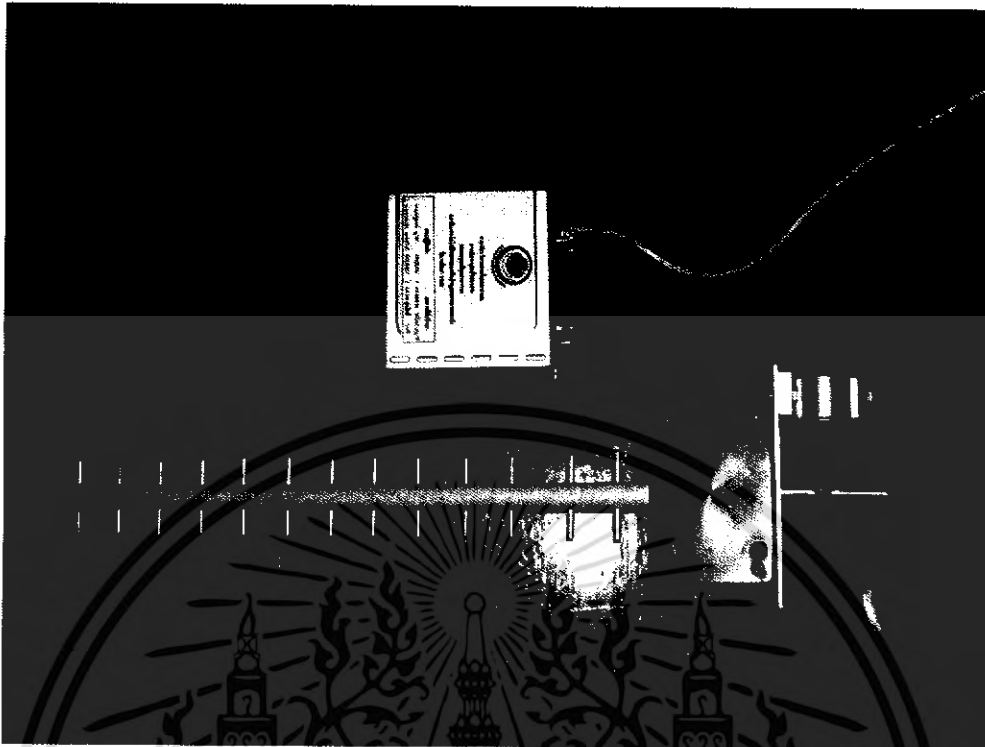
1. ไม่น้อย ไกรฤกษ์ และวิวัฒน์ กิรานนท์ "ทฤษฎีสายอากาศ", วศ.สจล.123, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. บัณฑิต ไรจน์อารยานนท์.2530. "วิศวกรรมสายอากาศ", สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. วิสันต์ อาชาติโซพล และ Advanced Engineering Group มปป. "สายอากาศและเทคนิคการติดตั้ง", ฟิสิกส์เซ็นเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

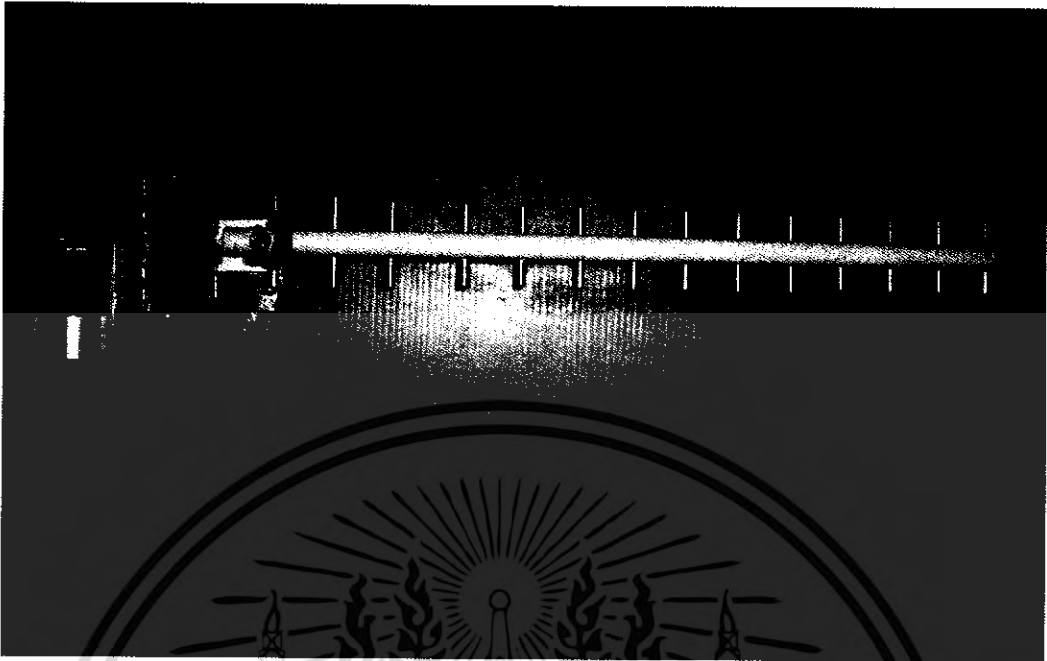


รูปที่ ก.1 แสดงรูปด้านบนของสายอากาศยาภิ

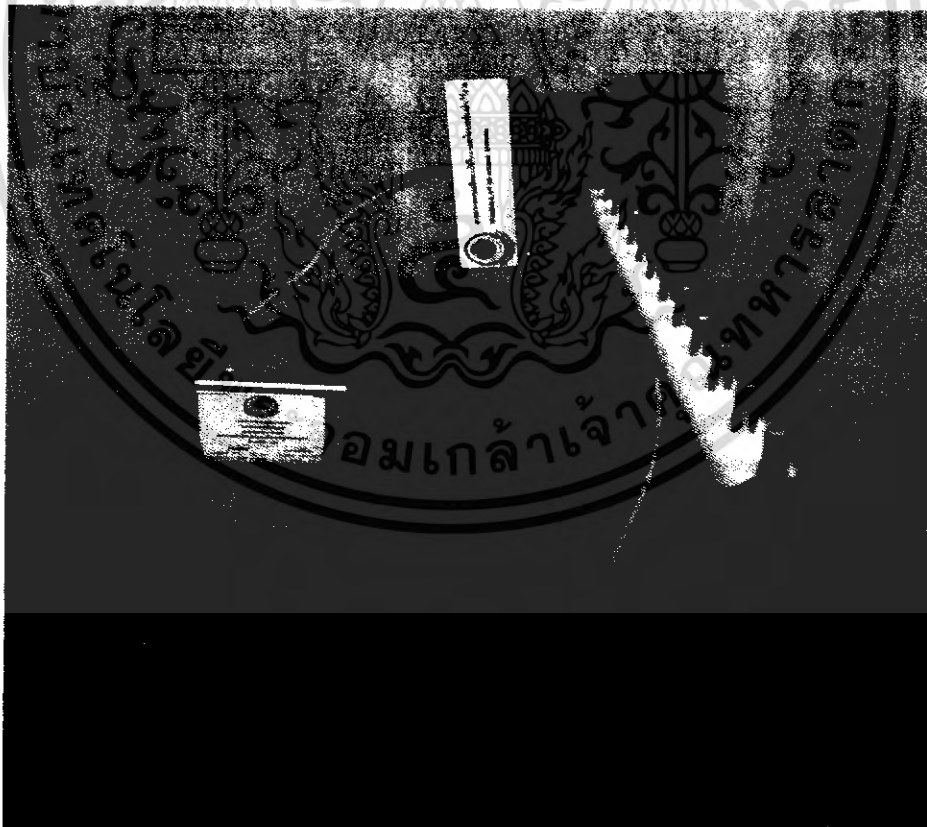


รูปที่ ก.2 แสดงรูปด้านหลังของสายอากาศยาภิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

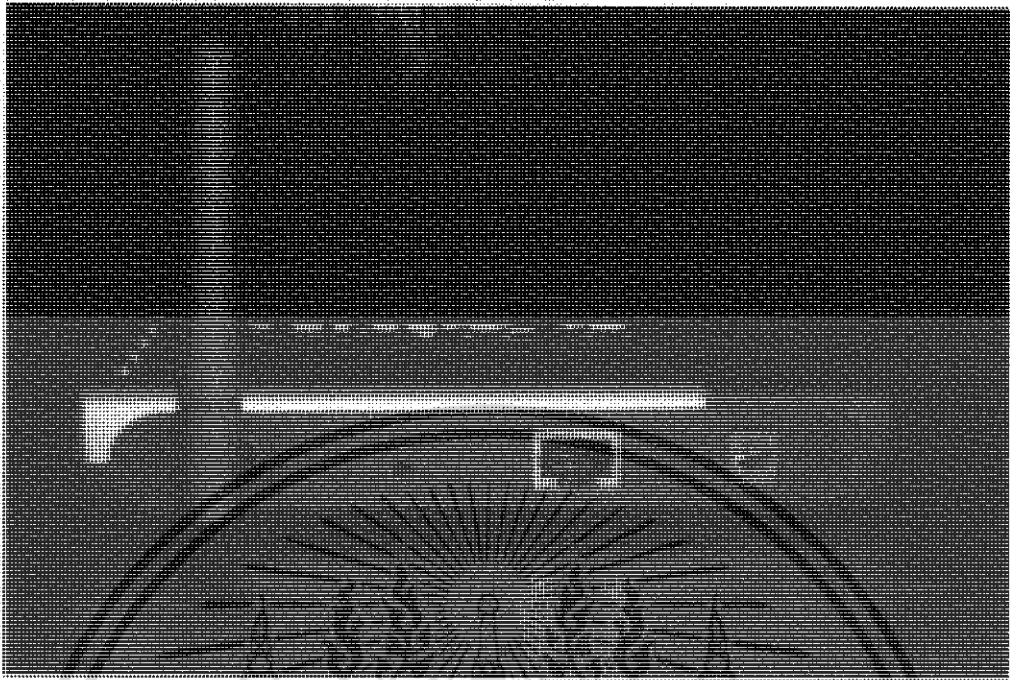


รูปที่ ก.3 แสดงรูปสายอากาศวิทยุที่ใช้ในการทดลอง

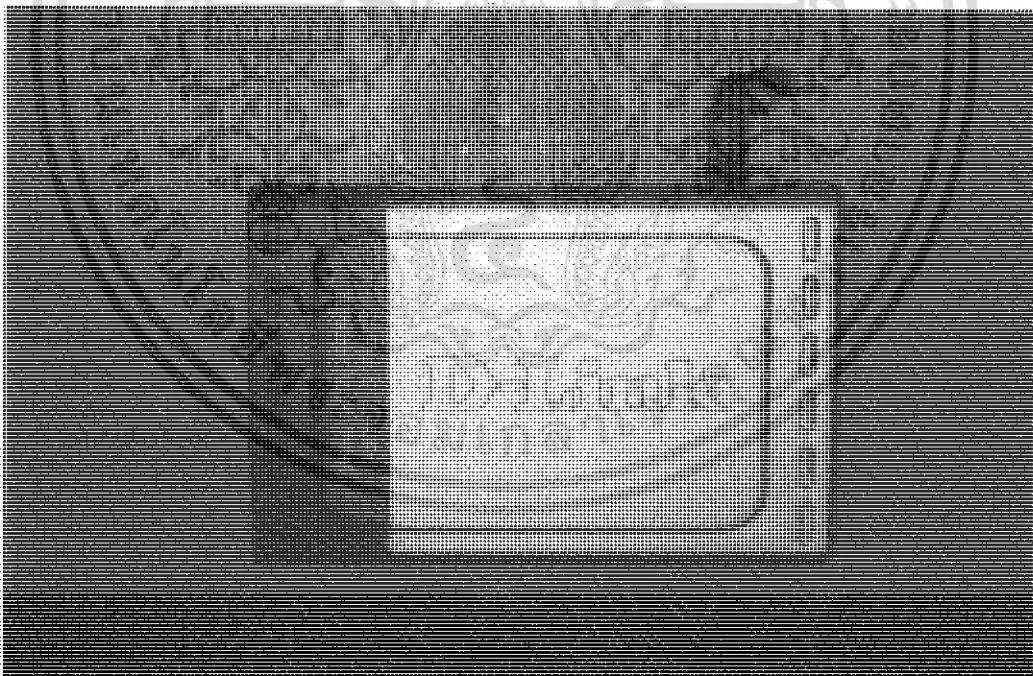


รูปที่ ก.4 แสดงรูปสายอากาศวิทยุในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.5 แสดงรูป Access Point Wireless ด้านหลัง



รูปที่ ก.6 แสดงรูป Access Point Wireless ด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Antenna Used to wirelessly
connect to 802.11b/g adapters.



Power Button

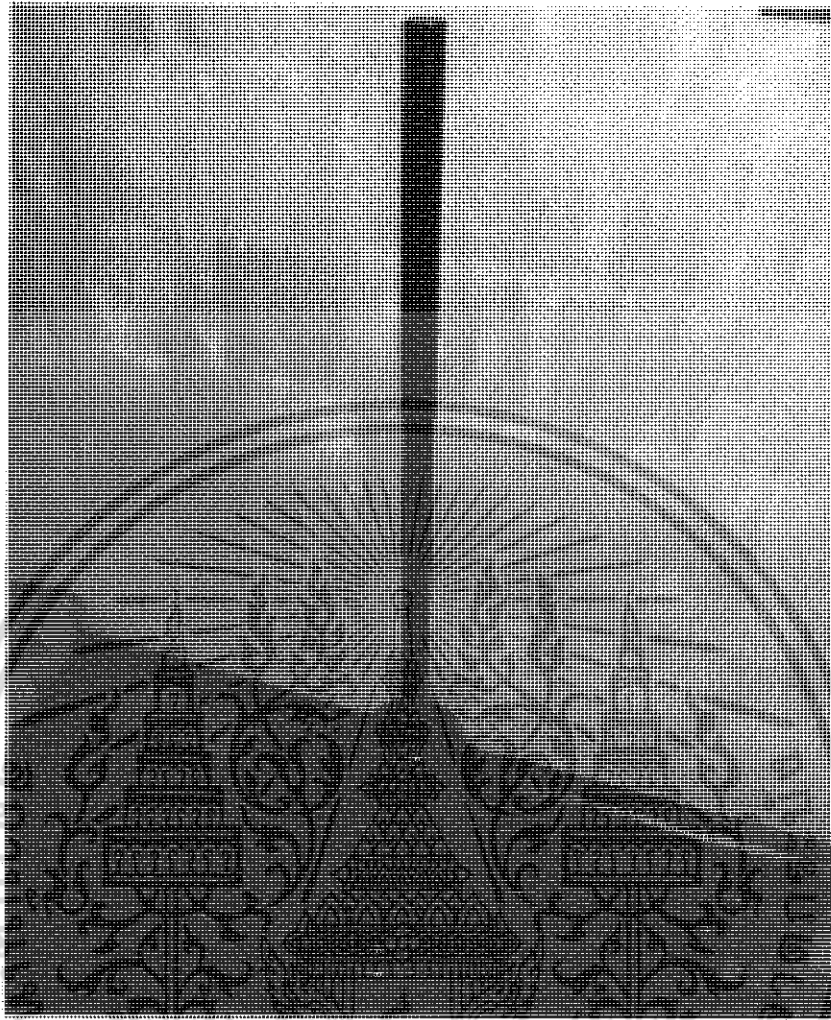
Receptor for Power Adapter.

Pressing this button returns the
Access Point to its original factory
default setting

LAN PORT for connecting the
access point to a switch on the
local network with an ethernet
cable.

รูปที่ ก.7 แสดงรูปปุ่มต่างๆ ของ Access Point Wireless

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.8 แสดงรูปขางตั้งที่ใช้งาน

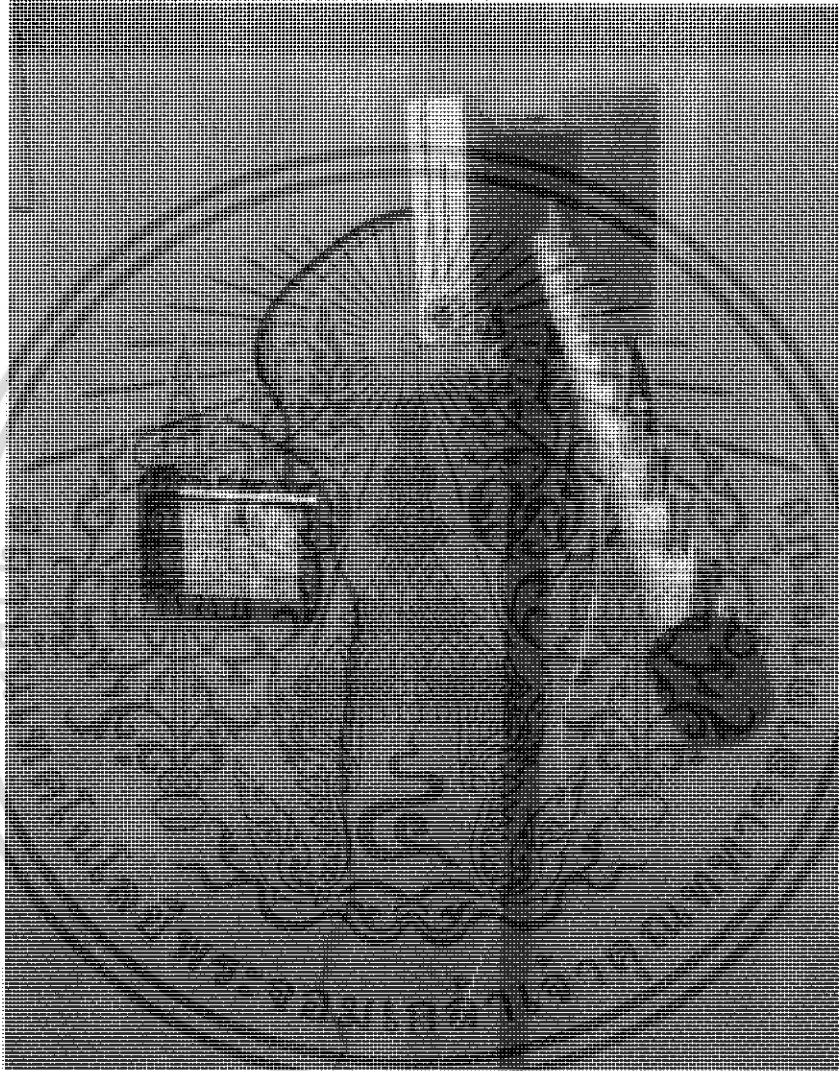
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
คู่มือการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่มือการใช้งาน
สายอากาศแบบทิศทางใช้ในงานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย 2.45 GHz



ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. คำแนะนำเบื้องต้น

ก่อนที่จะลงมือใช้งาน Access Point กับสายอากาศควรทำความเข้าใจเกี่ยวกับ Access Point ก่อน ควรทำการศึกษาการใช้งานจากคู่มือให้เข้าใจ เพื่อการใช้งานที่ถูกต้องและเป็นการป้องกันการเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับ Access Point

ในการใช้งาน Access Point นั้น สิ่งที่เราควรรู้อีกคือ ปุ่มต่างๆ ของ Access Point โดยหลักๆ จะมีอยู่ 4 ปุ่ม

1. ช่องต่อสายอากาศ
2. ปุ่ม Reset
3. ช่องต่อสาย RJ 45
4. ช่องเสียบไฟเลี้ยง Access Point



รูปที่ ข.1 แสดงปุ่มต่างๆ ของเครื่อง Access Point

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

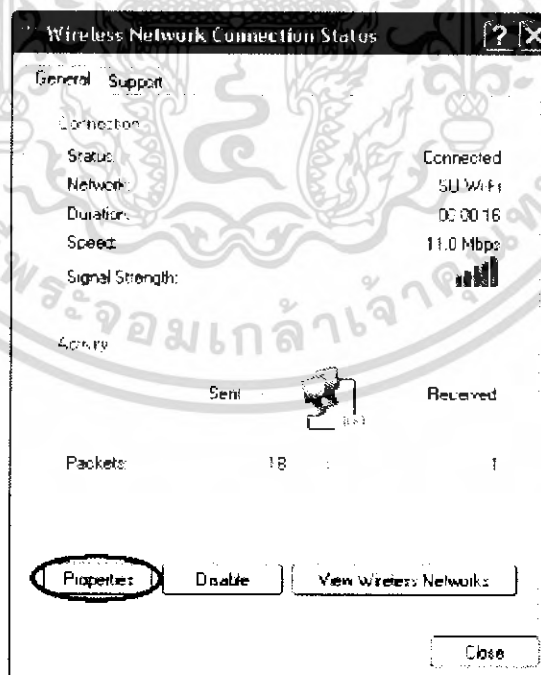
ขั้นตอนการเชื่อมต่อระบบ Wireless LAN

ขั้นตอนที่ 1 คลิก Mouse ขวาที่ Icon รูปคอมพิวเตอร์จาก Task Bar ด้านล่างขวามือของจอภาพ และเลือกรูปคอมพิวเตอร์ที่เป็นสัญลักษณ์ของ Wireless LAN แล้วเลือก status ดังรูป



รูปที่ ข.2 แสดงสถานะของระบบ Wireless Network

ขั้นตอนที่ 2 จะปรากฏหน้าต่าง Wireless Network Connection Status ดังรูป คลิก Mouse ที่เมนู General คลิกเลือก Properties



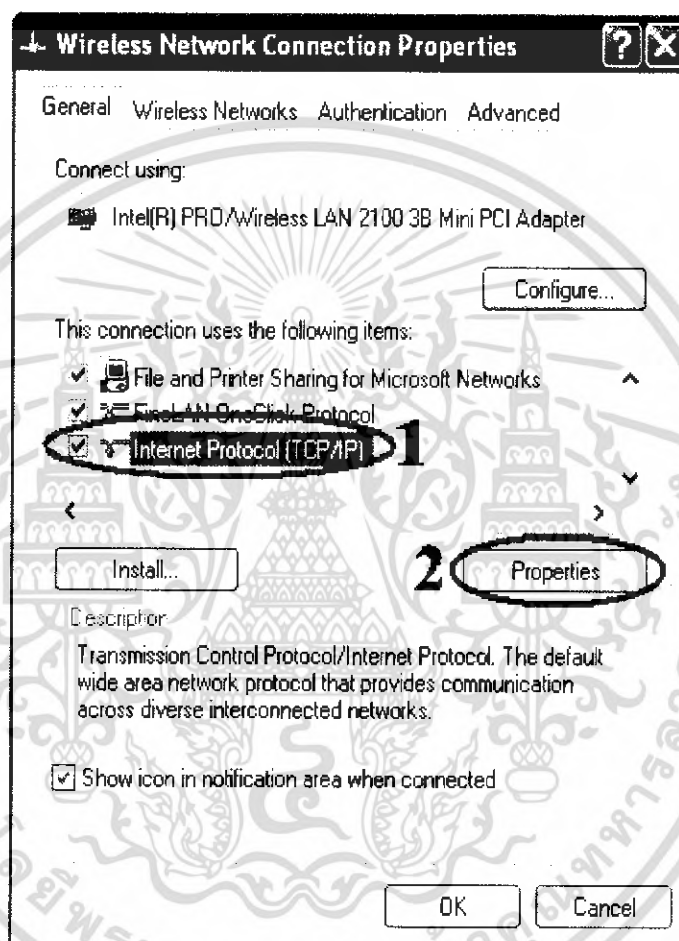
รูปที่ ข.3 แสดงการเลือก Properties

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 3 จะปรากฏหน้าต่าง Wireless Network Connection Properties คลิก Mouse ที่ Internet Protocol (TCP/IP)

3.1 คลิกเลือก Internet Protocol (TCP/IP)

3.2 คลิกเลือก Properties



รูปที่ ข.4 แสดงการเลือก Internet Protocol

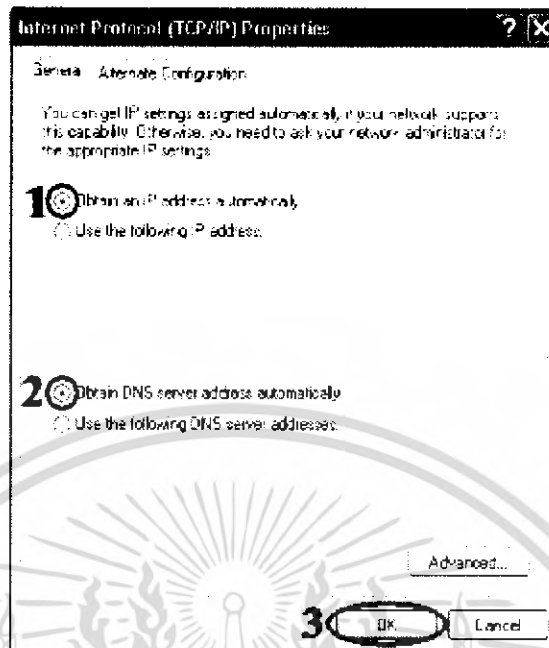
ขั้นตอนที่ 4 จะปรากฏหน้าต่าง Internet Protocol (TCP/IP) Properties และใช้ Mouse คลิกที่

4.1 Obtain IP address automatically

4.2 Obtain DNS server address automatically

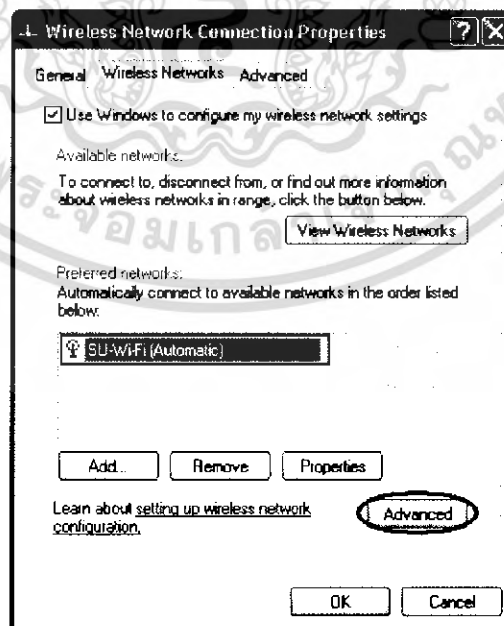
4.3 คลิก OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.5 การเลือก Internet Protocol (TCP/IP) แบบอัตโนมัติ

ขั้นตอนที่ 5 ไปที่หน้าต่าง Wireless Network Connection Properties คลิก Mouse ที่เมนู Wireless Networks ในส่วนของ Preferred networks จะเห็นเครือข่ายของ SU-Wi-Fi (Automatically) โดยอัตโนมัติและคลิกเลือก Advanced



รูปที่ ข.6 แสดงการเลือกเครือข่าย

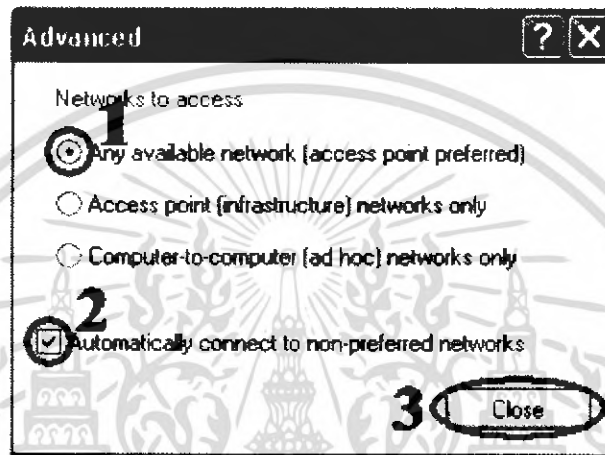
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 6 จะปรากฏหน้าต่าง Advanced ให้คลิก Mouse ที่

6.1 Any available network (Access Point Preferred)

6.2 Automatically connect to non-preferred networks เพื่อกำหนดให้ Connect โดยอัตโนมัติ

6.3 คลิก Close



รูปที่ ข.7 แสดงหน้าต่าง Advanced

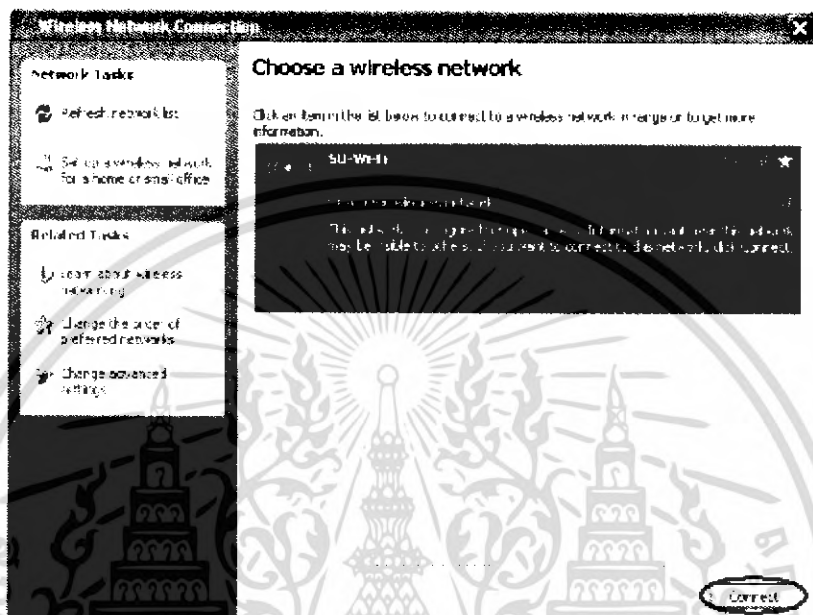
ขั้นตอนที่ 7 คลิก Mouse ขวาที่ Icon รูปคอมพิวเตอร์จาก Task Bar ด้านล่างขวามือของจอภาพ และเลือกรูปคอมพิวเตอร์ที่เป็นสัญลักษณ์ของ Wireless LAN เลือก View Available Wireless Networks ดังรูป



รูปที่ ข.8 แสดงการเลือก View Available Wireless Networks

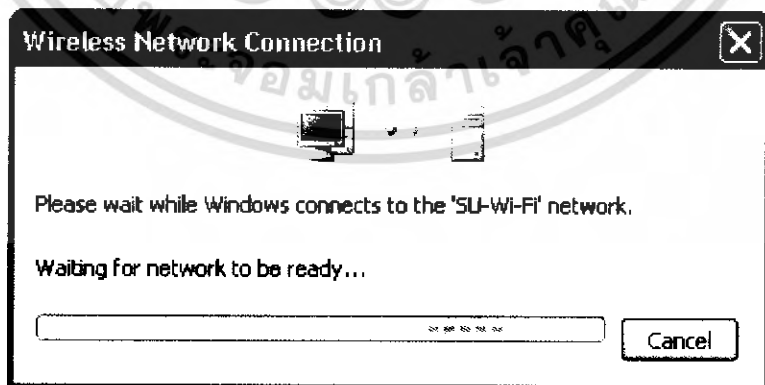
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 8 จะปรากฏหน้าต่าง Wireless Network Connection และจะแสดงชื่อเครือข่ายของ SU-Wi-Fi ที่เครื่องคอมพิวเตอร์รับสัญญาณได้ใช้ Mouse คลิกที่ปุ่ม Connect เพื่อทำการติดต่อกับเครือข่าย SU-Wi-Fi



รูปที่ ข.9 แสดงการเลือก Connect เพื่อติดต่อเครือข่าย

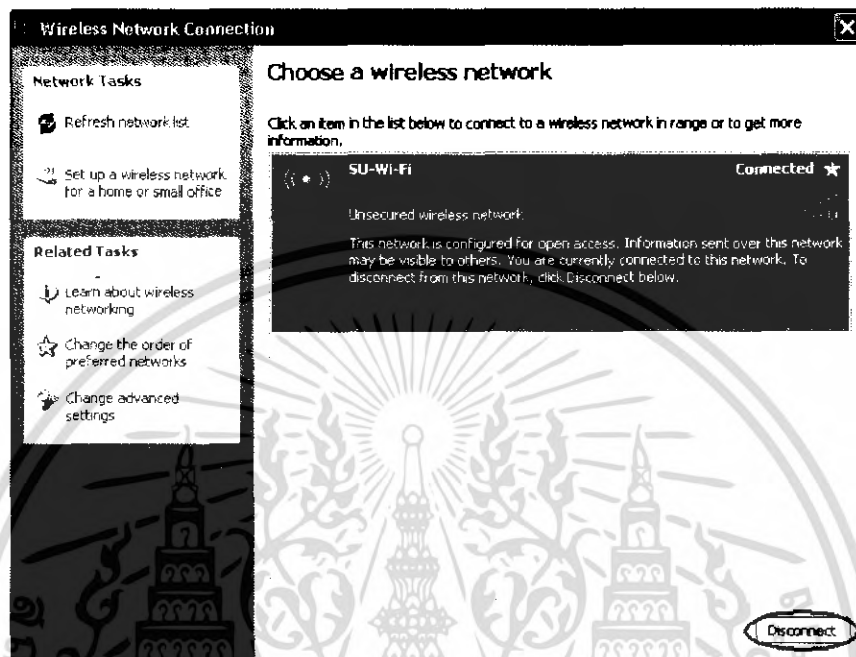
ขั้นตอนที่ 9 จะปรากฏหน้าต่าง Wireless Network Connection จะแสดงการติดต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับเครือข่าย Su-Wi-Fi ดังรูป



รูปที่ ข.10 แสดงการติดต่อเครือข่าย

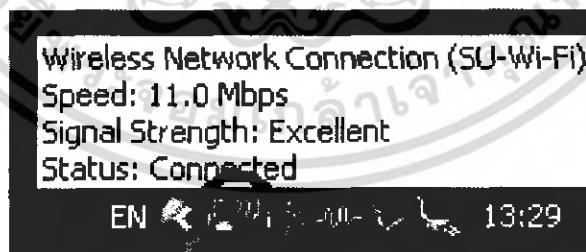
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 10 เมื่อทำการ Connect ได้แล้ว สังเกตได้ว่าที่ปุ่ม Connect จะกลายเป็น Disconnect แสดงว่าสามารถ Connect ได้แล้วท่านสามารถใช้บริการเครือข่าย SU-Wi-Fi ได้



รูปที่ ข.11 แสดงการ Disconnect ใช้งานกับเครือข่าย

วิธีการดูสถานะ Connect ของ Wireless โดยที่ Mouse ค้างไว้ที่ Icon รูปคอมพิวเตอร์รูปที่เป็น สัญลักษณ์ของ Wireless LAN ก็จะแสดงรายละเอียด ดังรูป



รูปที่ ข.12 การดูสถานะ Connect ของ Wireless LAN

1. Status : แสดงสถานะว่าอยู่ในสถานะ Connected Wireless LAN
2. Network : แสดงชื่อของเครือข่าย Wireless LAN
3. Duration : แสดงเวลาที่ใช้ในการ Connect Wireless LAN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Speed : ความเร็วที่ใช้ในการในการ Connect Wireless LAN
- 4.1 ถ้าเป็นอุปกรณ์ Wireless ที่เป็นมาตรฐาน 802.11b จะได้ความเร็วสูงสุด 11 Mbps
 - 4.2 ถ้าเป็นอุปกรณ์ Wireless ที่เป็นมาตรฐาน 802.11g จะได้ความเร็วสูงสุด 54 Mbps
5. Signal Strength : ระดับความแรงของสัญญาณที่อุปกรณ์ Wireless สามารถ Connect ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อ-สกุล	นาย ธีรพงษ์ มุกทา
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 2 มกราคม พ.ศ. 2527
ภูมิลำเนา	18/1 หมู่ 7 ตำบล บ้านดง อำเภอ อุบลรัตน์ จังหวัดขอนแก่น 40250
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนห้วยทรายศึกษา
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนอุบลรัตน์พิทยาคม
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยเทคนิคขอนแก่น
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตขอนแก่น
ปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม สจล.
ความสนใจพิเศษ	เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ และเทคโนโลยีงานวิศวกรรม
คติพจน์	ตนเป็นที่พึ่งแห่งตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อ-สกุล	นาย รุ่งตะวัน แก่นแก้วดี
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2525
ภูมิลำเนา	201/4 ถนน พโลรังฤทธิ ตำบล ในเมือง ลำปาง เมือง จังหวัดอุบลราชธานี 34000
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนอนุบาลวิทยาคม จังหวัดอุบลราชธานี
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนศรีบุรินทร์พิทยาคาร
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยเทคนิคอุบลราชธานี
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตขอนแก่น
ปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล.
ความสนใจพิเศษ	สนใจเทคโนโลยีใหม่ๆ
คติพจน์	ความสำเร็จไม่ใช่แค่คำพูดแต่คือการทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้