

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศช่องเปิดสำหรับแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง
An Omnidirectional Aperture Antenna



ฉ.พ.
๘๗๖๗๘
๘๕๕๑

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 871116
วัน,เดือน,ปี... 3 0 ส.ค. 2552

b. 12038908
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

An Omnidirectional Aperture Antenna



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2008

KMITL-2008-EN-M-010-202

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2008

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศช่องเปิดสำหรับแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง
นักศึกษา	นายอิทธิพล รัตน โชติ
รหัสนักศึกษา	47061079
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2551
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. สมพล โกศลวิตร
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอสายอากาศช่องเปิดที่แพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางสำหรับการสื่อสารระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 ช่วงความถี่ 2.412-2.484 กิกะเฮิรตซ์ การวิเคราะห์สายอากาศได้จำลองด้วยโปรแกรมออกแบบสายอากาศ CST MICROWAVE STUDIO พารามิเตอร์โพรับใช้ปรับอินพุตอิมพีแดนซ์ให้ใกล้เคียง 50 โอห์ม และค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ส่วนตัวโครงสร้างแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้านสามารถปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional) และปรับมุมค่าความกว้างลำคลื่นที่มีกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้าให้แคบลง ผลการทดสอบสายอากาศครอบคลุมช่วงความถี่ 2.2-2.6 กิกะเฮิรตซ์ ทิศเป็นแบนด์วิดธ์ 400 เมกะเฮิรตซ์ หรือ 16.32 % ได้ค่าอัตราขยายของสายอากาศอยู่ในช่วง 4-5 dBi ค่าการกระเพื่อมในระนาบมุมกวาดน้อยกว่า 3 dB และระดับการโพลาไรซ์ไขว้ของสายอากาศมากกว่า 20 dB

Thesis Title	An Omnidirectional Aperture Antenna
Student	Mr. Itthiphol Rattanachote
Student ID.	47061079
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Sompol Kosulvit
Thesis Co-advisor	Asst.Prof.Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

ABSTRACT

This thesis presents an aperture antenna radiating omnidirectional pattern for wireless LAN communication system following IEEE 802.11 with operating frequency of 2.412-2.484 GHz. The antenna analysis is carried out by using CST MICROWAVE STUDIO simulation. The feeding probe is used to achieve input impedance nearly to 50 Ohm and return loss less than -10 dB. The parallel-plate with four apertures antenna structure will realize the radiation pattern in H-plane to be omni-directional beam and narrow half-power beamwidth (HPBW) in E-plane. From the measurement results, the bandwidth (return loss < -10 dB) of 2.2-2.6 GHz (400 MHz or 16.32 %), antenna gain of 4-5 dBi, azimuth ripple less than 3 dB and cross polarization greater than 20 dB, is obtained.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเพราะคำสั่งสอน ด้านงานวิจัย รวมถึงวิชาการตั้งแต่สมัยเรียนปริญญาตรีที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครจาก รองศาสตราจารย์ ดร. สมพล โกศลวิตร ซึ่ง เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลักในงานวิจัยนี้ และข้าพเจ้าได้รับคำชี้แนะที่เป็นประโยชน์ในทุกด้าน ได้ความช่วยเหลือตรวจทานเอกสารต่างๆ จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ เป็นอาจารย์ที่ ปรึกษาพร้อม ทั้งในเวลา และนอกเวลาราชการ ข้าพเจ้าเองรู้สึกซาบซึ้ง และขอกราบขอบพระคุณเป็น อย่างสูงสำหรับความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสองนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ ในความอนุเคราะห์เป็นอย่างสูงใน การใช้งานห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายอย่างสะดวกทุกช่วงเวลาการทำงานที่ต้องการได้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร และจากสถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ จากห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายทุกท่าน สำหรับความช่วยเหลือด้าน การใช้งาน โปรแกรมจำลองสายอากาศ การใช้เครื่องมือวัดทดสอบ และข้อคิดเห็นติชมต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณ พ่ออมร รัตน โชติ และแม่สุนันทา ศรีจรรยา ที่เป็นแรงบันดาลใจให้ ข้าพเจ้าเพียรพยายามจนสำเร็จ และขอขอบคุณ คุณนภัสวรรณ วงศ์ศักดิ์ภักดิ์ ผู้เป็นกำลังใจให้เสมอ

สุดท้ายนี้หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีคุณค่า และเป็นประโยชน์ต่อวิชาการใดๆ ข้าพเจ้าขอให้ ความดีทั้งหลายเหล่านั้นจงปรากฏแก่ผู้มีพระคุณทุกท่านด้วยเทอญ

นายอิทธิพล รัตน โชติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 งานวิจัยของสายอากาศที่เกี่ยวข้อง.....	3
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา และขอบเขตการวิจัย.....	9
1.4 เนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการ.....	12
2.1 บทนำ.....	12
2.2 หลักการพื้นฐานของระบบ โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย(Wireless LAN).....	12
2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศปากแตร (Horn Antenna).....	16
2.3.1 หลักการกระจายคลื่นจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมตัดปลาย.....	18
2.3.2 หลักการสายอากาศปากแตรในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane Sectoral Horn).....	24
2.3.3 หลักการของแผ่นตัวนำแบบขนาน (Parallel Plate).....	27
2.3.4 แนวคิดการประยุกต์จำลองออกแบบสายอากาศ.....	29
2.4 วิวัฒนาการ โครงสร้างสายอากาศ (Antenna Evolution).....	30
2.4.1 โพรบบนแผ่นกราวนด์ (Probe on the Ground Plate).....	32
2.4.2 โพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนาน (Probe with Parallel-Plate).....	35
2.4.3 โพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมช่องเปิด 2 ด้าน (Probe with Parallel-Plate and Two Apertures).....	40
2.4.4 โพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมช่องเปิด 4 ด้าน (Probe with Parallel-Plate and Four Apertures).....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2.5 บทสรุป.....

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การวิเคราะห์ และผลการวิเคราะห์.....	50
3.1 บทนำ.....	50
3.2 โครงสร้างสายอากาศ (Antenna Structure).....	50
3.2.1 พารามิเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โพรบ.....	51
3.2.2 พารามิเตอร์ความสูงของตัวซัพพอร์ต.....	53
3.2.3 พารามิเตอร์ขนาดแผ่นกราวด์.....	55
3.2.4 พารามิเตอร์ขนาดแผ่นปากแตร.....	58
3.2.5 พารามิเตอร์มุมของแผ่นปากแตร.....	60
3.2.6 พารามิเตอร์ความยาว โพรบ.....	63
3.3 การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ (Parametric Study).....	65
3.3.1 การจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าแบนด์วิดท์ และค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ที่ VSWR 2:1.....	66
3.3.2 การจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงาน ครึ่งหนึ่ง.....	68
3.3.3 การจำลองค่าอัตราขยาย และค่าการกระเพื่อมในระนาบมุมกวาด.....	71
3.4 บทสรุป.....	72
บทที่ 4 การทดสอบ และผลการทดสอบ.....	74
4.1 บทนำ.....	74
4.2 การสร้างสายอากาศต้นแบบ (Prototype Antenna).....	74
4.3 การทดสอบ และผลการทดสอบ (Antenna Measurements).....	76
4.3.1 การทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ.....	76
4.3.2 การทดสอบค่าอัตราขยายของสายอากาศ.....	77
4.3.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงาน ครึ่งหนึ่ง และระดับการ โพลาริไซซ์ของสายอากาศ.....	79
4.4 บทสรุป.....	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การประเมินสายอากาศในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย.....	88
5.1 บทนำ.....	88
5.2 การประเมินการทำงานแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-Multipoint).....	88
5.2.1 การคำนวณเมื่อเปลี่ยนอัตราขยายของสายอากาศ.....	89
5.2.2 การทดสอบเมื่อเปลี่ยนอัตราขยายของสายอากาศ.....	90
5.3 บทสรุป.....	92
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	93
6.1 บทนำ.....	93
6.2 สรุปผลการวิจัย.....	93
6.3 ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา.....	94
บรรณานุกรม.....	98
ประวัติผู้วิจัย.....	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่	
2.1 ค่า K ทั่วไป และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ในโหมดหลัก TE_{10} ต้องการ $0.5\lambda < a < \lambda$	23
3.1 ค่าการจำลองความกว้างลำคลื่นที่มีกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane เมื่อเปลี่ยนขนาดของแผ่นปากแตร (c) ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์.....	59
3.2 ค่าการจำลองความกว้างลำคลื่นที่มีกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane เมื่อเปลี่ยนค่ามุมของแผ่นปากแตร(α) ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์.....	62
3.3 ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างจำลองของสายอากาศ.....	65
4.1 ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างสายอากาศค้นแบบสำหรับการทดสอบ.....	75
5.1 ผลการคำนวณค่าวิสัยสามารถสูงสุด ด้วยสมการ Friis Transmission.....	90
5.2 ผลการทดสอบระยะทางด้วยซอฟต์แวร์เครื่องมือวัด IxChariot.....	90
6.1 ข้อมูลทางเทคนิคของสายอากาศ.....	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่

1.1	การทำงานแบบจุดต่อหลายจุด ระหว่างตัวอุปกรณ์สถานีฐานกับเครื่องลูกข่ายไร้สาย.....	2
1.2	การทำงานแบบจุดต่อหลายจุดระหว่างสถานีฐานด้วยกัน.....	2
1.3	สายอากาศจำลองโมโนโพลพร้อมแผ่นระนาบ (Planar Patch).....	4
1.4	การทดสอบ และการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ที่ VSWR 1.5:1.....	4
1.5	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และระดัับการโพลาริไซซ์ของสายอากาศ.....	5
1.6	ค่าอัตราการขยายของสายอากาศสำหรับย่านความถี่ 2.4-2.6 กิกะเฮิรตซ์.....	5
1.7	สายอากาศต้นแบบ โครงสร้างแบบแผ่นตัวนำขนาน.....	7
1.8	ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศสำหรับย่านความถี่ 20.5-25.5 กิกะเฮิรตซ์.....	7
1.9	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 23 กิกะเฮิรตซ์.....	8
1.10	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 23 กิกะเฮิรตซ์.....	8
2.1	มาตรฐาน IEEE 802.11 และความเร็วในการรับส่งข้อมูล.....	13
2.2	ระยะทาง และค่าวิสัยสามารถสูงสุด (Max. Throughput) สำหรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ สถานีฐานกับเครื่องลูกข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11.....	14
2.3	ช่องสัญญาณความถี่สำหรับมาตรฐาน IEEE 802.11.....	14
2.4	กำลังส่งสำหรับอุปกรณ์สถานีฐาน และเครื่องลูกข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11.....	15
2.5	โทโปโลยีทางกายภาพของสายอากาศที่ใช้งานส่วนใหญ่กับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย.....	15
2.6	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโมโนโพลที่ใช้งานส่วนใหญ่กับโครงข่ายท้องถิ่น ไร้สาย.....	15
2.7	โครงสร้างของสายอากาศปากแตร (Horn Antenna) แบบต่างๆ.....	16
2.8	โหมดหลัก TE_{10} ของสายอากาศปากแตรแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular Horn).....	17
2.9	สายอากาศปากแตรแบบสี่เหลี่ยม.....	17
2.10	โครงสร้างทั่วไปของท่อนำคลื่น.....	18
2.11	การกระจายของสนามไฟฟ้าบนปลายตัดของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม.....	18
2.12	สายอากาศปากแตรในระนาบสนามไฟฟ้า.....	24
2.13	รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตรในระนาบสนามไฟฟ้า.....	26
2.14	ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศปากแตรในระนาบสนามไฟฟ้า.....	26
2.15	สายนำสัญญาณประเภทแผ่นตัวนำแบบขนาน.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.16 แนวคิดการประยุกต์จำลองออกแบบสายอากาศ.....	29
2.17 ตัวอย่างโครงสร้างจำลองสายอากาศแบบ 3 มิติ สำหรับงานวิจัยนี้.....	31
2.18 โครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นกราวด์.....	32
2.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XY-plane ของสายอากาศโพรบบนแผ่นกราวด์ที่ความถี่ 1, 2, 2.45, 3 และ 4 กิกะเฮิรตซ์ เท่ากับ 360 องศา.....	32
2.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane ของสายอากาศโพรบบนแผ่นกราวด์ที่ความถี่ 1, 2, 2.45, 3 และ 4 กิกะเฮิรตซ์.....	33
2.21 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศโพรบบนแผ่นกราวด์.....	34
2.22 ค่าอัตราการขยายของสายอากาศโพรบบนแผ่นกราวด์.....	34
2.23 โครงสร้างจำลองสายอากาศ โดยให้ a เท่ากับแท่งตัวนำ (Conducting Supporter) และ a เท่ากับแท่งฉนวน (Dielectric Supporter).....	35
2.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane ของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำโดยให้ a เท่ากับแท่งตัวนำ (Conducting Supporter).....	36
2.25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane ของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำโดยให้ a เท่ากับแท่งฉนวน (Dielectric Supporter) ที่ความถี่ 1, 2, 2.45, 3 และ 4 กิกะเฮิรตซ์ เท่ากับ 360 องศา พร้อมแสดงการไหลของกระแสไฟฟ้าบนผิววัสดุ.....	37
2.26 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane ของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานที่ความถี่ 1, 2, 2.45, 3 และ 4 กิกะเฮิรตซ์.....	38
2.27 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนาน.....	39
2.28 ค่าอัตราการขยายของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนาน.....	39
2.29 โครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแคร์ 2 ด้าน.....	40
2.30 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane ของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแคร์ 2 ด้าน.....	41
2.31 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane ของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแคร์ 2 ด้าน.....	42
2.32 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแคร์ 2 ด้าน.....	43
2.33 ค่าอัตราการขยายของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแคร์ 2 ด้าน.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่

2.34	โครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแคร์ 4 ด้าน.....	44
2.35	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane ของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแคร์ 4 ด้าน.....	45
2.36	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane ของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแคร์ 4 ด้าน.....	46
2.37	ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแคร์ 4 ด้าน....	47
2.38	ค่าอัตราขยายของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแคร์ 4 ด้าน.....	47
3.1	ภาพตัดขวางสายอากาศจำลองเพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบ (I_d)	51
3.2	ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเมื่อเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบ (I_d).....	51
3.3	ค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane เมื่อเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบ (I_d) เท่ากับ 4 มิลลิเมตร.....	52
3.4	ภาพตัดขวางสายอากาศจำลองเพื่อหาความสูงของตัวซัพพอร์ต (a).....	53
3.5	ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเมื่อเปลี่ยนความสูงของตัวซัพพอร์ต (a).....	53
3.6	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane เมื่อเปลี่ยนความสูงของตัวซัพพอร์ต (a) เท่ากับ 45 มิลลิเมตร.....	54
3.7	ภาพมุมมองด้านบนสายอากาศจำลองเพื่อหาขนาดของแผ่นกราวนด์ (b).....	55
3.8	ค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane เมื่อเปลี่ยนขนาดของแผ่นกราวนด์ (b) ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์.....	56
3.9	ค่าอัตราขยายสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของแผ่นกราวนด์ (b).....	57
3.10	ภาพมุมมองสายอากาศจำลองเพื่อหาขนาดของแผ่นปากแคร์ (c).....	58
3.11	ค่าอัตราขยายสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของแผ่นปากแคร์ (c).....	58
3.12	ค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane เมื่อเปลี่ยนขนาดของแผ่นปากแคร์ (c) ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์.....	59
3.13	ภาพตัดขวางสายอากาศจำลอง เพื่อหาค่ามุมของแผ่นปากแคร์ (α).....	60
3.14	ค่าอัตราขยายสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนค่ามุมของแผ่นปากแคร์ (α).....	61
3.15	ค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane เมื่อเปลี่ยนค่ามุมของแผ่นปากแคร์ (α) ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 ภาพตัดขวางสายอากาศจำลองเพื่อหาความยาวของ โพรบ (I).....	63
3.17 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเมื่อเปลี่ยนความยาวของ โพรบ (I).....	63
3.18 ค่าการสูญเสียส่วนย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนความยาวของ โพรบ (I).....	64
3.19 ภาพมุมมองทั่วไป และภาพตัดขวาง โครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำ แบบขนานพร้อมปากแคร์ 4 ด้าน.....	65
3.20 การจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ และค่าเบนควิควิธ	66
3.21 การจำลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง.....	66
3.22 การจำลองค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า.....	67
3.23 การจำลองค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane.....	68
3.24 การจำลองค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane.....	69
3.25 การจำลองค่าอัตราขยายของสายอากาศ.....	71
3.26 การจำลองค่าอัตราขยาย และค่าการกระเพื่อมในระนาบมุมกวาดของสายอากาศ.....	71
4.1 ภาพด้านหน้าสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแคร์ 4 ด้าน.....	74
4.2 ภาพมุมมองทั่วไปสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแคร์ 4 ด้าน.....	75
4.3 การทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ.....	76
4.4 ผลการทดสอบ และการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ.....	76
4.5 การทดสอบค่าอัตราขยายของสายอากาศ.....	77
4.6 ผลการทดสอบ และการจำลองค่าอัตราขยายของสายอากาศ.....	78
4.7 ผลการทดสอบ และการจำลองค่าอัตราขยายของสายอากาศ ความถี่ 2.2 กิกะเฮิรตซ์.....	78
4.8 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....	80
4.9 ผลการทดสอบ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane ความถี่ 2.2 กิกะเฮิรตซ์.....	81
4.10 ผลการทดสอบ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane ความถี่ 2.2 กิกะเฮิรตซ์.....	81
4.11 ผลการทดสอบ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane ความถี่ 2.412 กิกะเฮิรตซ์.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ผลการทดสอบ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane ความถี่ 2.412 กิกะเฮิรตซ์.....	82
4.13 ผลการทดสอบ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์.....	83
4.14 ผลการทดสอบ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์.....	83
4.15 ผลการทดสอบ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane ความถี่ 2.484 กิกะเฮิรตซ์.....	84
4.16 ผลการทดสอบ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane ความถี่ 2.484 กิกะเฮิรตซ์.....	84
4.17 ผลการทดสอบ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane ความถี่ 2.6 กิกะเฮิรตซ์.....	85
4.18 ผลการทดสอบ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane ความถี่ 2.6 กิกะเฮิรตซ์.....	85
4.19 การจำลองค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ สำหรับสายอากาศโพรบบนแผ่น ตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน.....	86
5.1 ไดอะแกรมการทดสอบสายอากาศ.....	89
5.2 ไดอะแกรมการเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐานด้วยกัน.....	90
5.3 สายอากาศอ้างอิงที่อัตราขยาย 5 dBi สำหรับระยะทาง 150 เมตร.....	91
5.4 สายอากาศต้นแบบที่อัตราขยาย 5.12 dBi สำหรับระยะทาง 150 เมตร.....	91
5.5 สายอากาศอ้างอิงที่อัตราขยาย 5 dBi สำหรับระยะทาง 800 เมตร.....	92
5.6 สายอากาศต้นแบบที่อัตราขยาย 5.12 dBi สำหรับระยะทาง 800 เมตร.....	92
6.1 มุมมองด้านหน้า.....	97
6.2 มุมมองทั่วไป.....	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

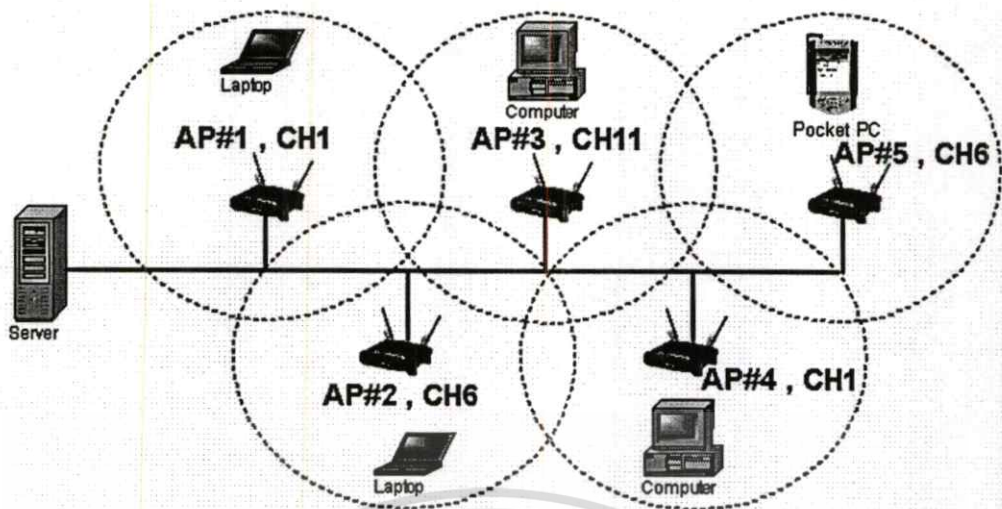
ระบบการสื่อสารไร้สายสมัยใหม่จะใช้คุณสมบัติการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แทนที่สายนำสัญญาณ แบ่งกลุ่มการใช้งานได้ 3 กลุ่ม [13] คือ IEEE 802.15 PAN (Personal Area Network) เป็นการใช้งานแบบไร้สายด้วยพื้นที่จำกัดได้แก่เทคโนโลยี อินฟราเรด (IrDA) บลูทูธ (Bluetooth) Home RF และ UWB (Ultra Wide band) ถัดไปคือ IEEE 802.11 WLAN (Wireless Local Area Network) เป็นระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายได้แก่เทคโนโลยี WiFi และ HiperLAN กลุ่มสุดท้าย IEEE 802.16 BWAN (Broadband Wide Area Network) เป็นโครงข่ายไร้สายขนาดใหญ่ที่มีพื้นที่ใช้งานกว้างที่สุดได้แก่เทคโนโลยี Cellular Microwave WiMax Broadcast Radio & TV และ Satellite

ระบบการสื่อสาร โครงข่ายท้องถิ่นไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 WLAN เป็นระบบที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน โดยโหนดการทำงาน [13] ที่ใช้โหนดแรกคือการทำงานแบบกระจายสัญญาณ (Access Point Mode) จะทำงานแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-Multipoint) สายอากาศต้องมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง (Omni-directional Pattern) เพื่อครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ สายอากาศที่ใช้เป็นสายอากาศเส้นลวด เช่น สายอากาศโมโนโพล และสายอากาศไดโพล โหนดที่สองคือการทำงานแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point) ได้แก่ การทำงานแบบสะพานเชื่อม (Bridging Mode) และการทำงานแบบทวนสัญญาณ (Repeater Mode) สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว (Uni-directional Pattern) เพื่อเชื่อมต่อสัญญาณหากันโดยตรงเท่านั้น สายอากาศที่ใช้ เช่น สายอากาศสายกึ่งอิสระ สายอากาศเซกเตอร์ สายอากาศช่องเปิด และสายอากาศแบบสะท้อนคลื่น

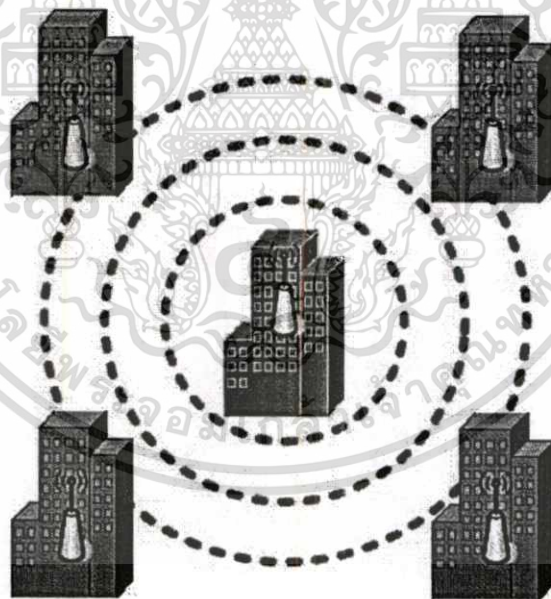
ระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11 WLAN ที่ใช้ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ได้ถูกพัฒนาความเร็วการรับส่งข้อมูลตามมาตรฐานที่เปลี่ยนไปคือ IEEE 802.11b สูงสุด 11 Mbps IEEE 802.11g สูงสุด 54 Mbps และ IEEE 802.11n draft 2.0 สูงมากกว่า 100 Mbps ทำให้ราคาอุปกรณ์ถูกลง และใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้นในปัจจุบัน โดยการใช้งานส่วนใหญ่คือรูปที่ 1.1 เป็นการทำงานแบบจุดต่อหลายจุดระหว่างตัวอุปกรณ์สถานีฐาน (Access Point) กับเครื่องลูกข่ายไร้สาย (Wireless Client) ซึ่งสถานีฐานแต่ละตัวจะเชื่อมต่อกันแบบรังผึ้งคล้ายระบบเซลลูลาร์ (Cellular) เพื่อให้ข้อมูลรับส่งกันได้ผ่านโครงข่ายเหมาะกับการใช้งานภายในอาคาร ส่วนรูปที่ 1.2 แสดงการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างสถานีฐานด้วยกันเหมาะสำหรับการใช้งานภายนอกอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 การทำงานแบบจุดต่อหลายจุด ระหว่างตัวอุปกรณ์สถานีฐาน (Access Point) กับเครื่องลูกข่ายไร้สาย (Wireless Client)



รูปที่ 1.2 การทำงานแบบจุดต่อหลายจุดระหว่างสถานีฐาน (Access Point) ด้วยกัน

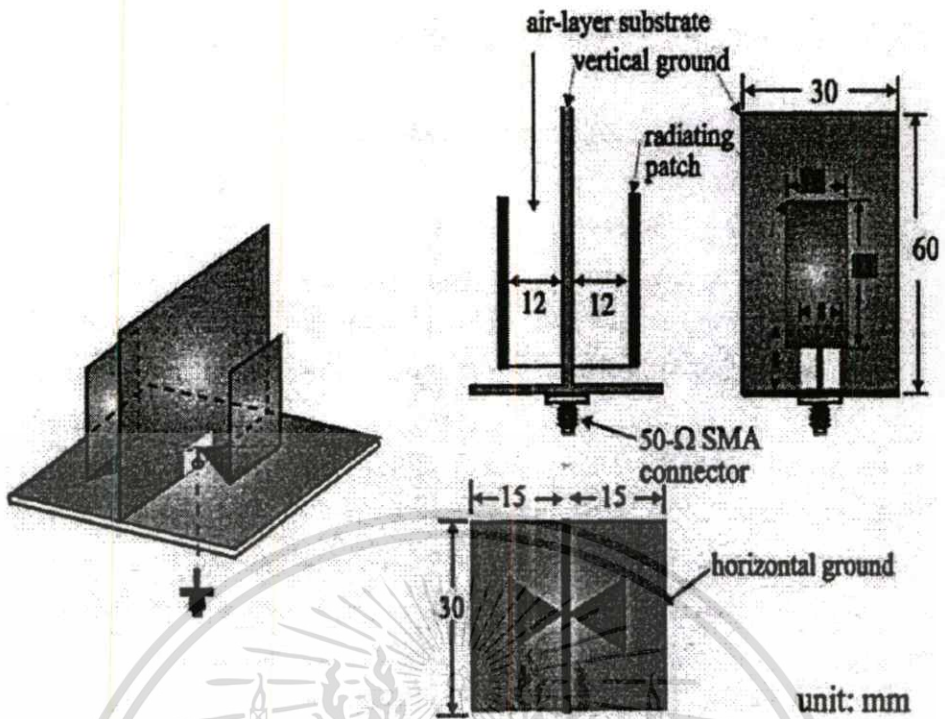
จากที่กล่าวมาแล้วเบื้องต้นสรุปได้ว่า ปัญหาหลักของการวิจัยคือการใช้งานจริงของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายในปัจจุบันมีความต้องการสื่อสารรับส่งข้อมูลแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-Multipoint) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบสายอากาศสำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11 WLAN ที่ใช้ย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ โดยมีวัตถุประสงค์ให้มีแบบรูปการเอกลักษณะเป็นเอกลักษณะที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง (Omni-directional Pattern) เพื่อใช้ภายในอาคาร (Indoor Area) สำหรับการสื่อสารระหว่างตัวอุปกรณ์สถานีฐาน (Access Point) กับเครื่องลูกข่ายไร้สาย (Wireless Client) และเพื่อใช้ภายนอกอาคาร (Outdoor Area) สำหรับการสื่อสารระหว่างสถานีฐานด้วยกันให้สอดคล้องกับความต้องการของระบบได้จริง

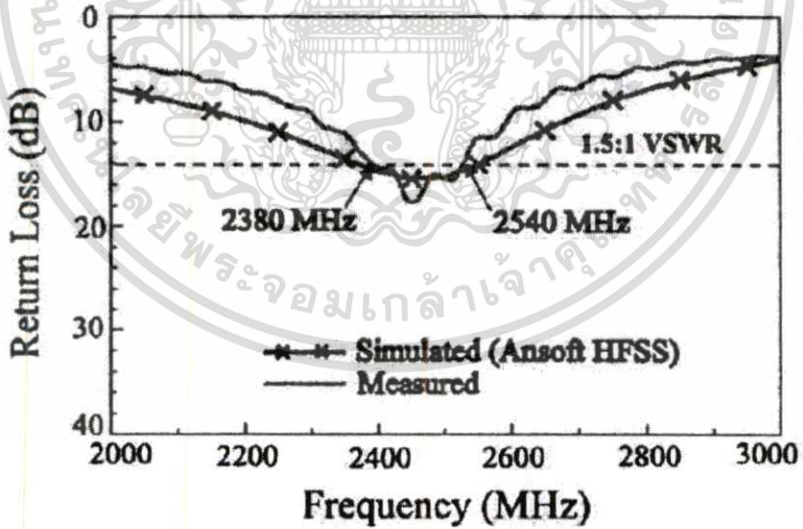
1.2 งานวิจัยของสายอากาศที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยตั้งแต่ปี ค.ศ. 1997-2008 [3-10] ที่อ้างอิงจากบรรณานุกรมท้ายเล่มนี้จะเป็นแนวทางในการวิจัยศึกษา แต่จะขอแสดงเฉพาะงานวิจัยหลักที่นำมาเป็นแนวทางการพัฒนาวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

งานวิจัยที่หนึ่ง เรื่อง “A Novel monopole antenna for WLAN Access Point Application” [1] ผู้วิจัยชาวไต้หวัน คือ Fa-Shian Chang, Hong-Twu Chen, Kuo-Chien Chao และ Wen-Shyang Chen งานวิจัยมีความต้องการคุณลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional Pattern) และค่าอัตราการขยายที่สูงเพื่อใช้กับอุปกรณ์สถานีฐาน (Wireless Access Point) ซึ่งได้นำเสนอสายอากาศโมโนโพลพร้อมแผ่นระนาบ (Planar Patch) สำหรับโครงข่ายท้องถิ่น ไร้สายย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ดังรูปที่ 1.3 โดยมีโครงสร้างเป็นแผ่นระนาบ (Planar patch) สองแผ่นที่วางสมมาตรกันด้านหน้ากับด้านหลังทำหน้าที่สร้างแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางบนแผ่นกราวนด์แบบ Inverted-T ที่ประกอบด้วยแผ่นกราวนด์แนวตั้ง (Vertical Ground) ทำหน้าที่ปรับค่าอัตราการขยาย แล้วป้อนสัญญาณด้วยโพรบเดี่ยวเข้าได้ล่างของแผ่นกราวนด์แนวนอน (Horizontal Ground) จากนั้นปรับแต่งระยะห่างโพรบไปยังแผ่นระนาบเพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าแมตชิงใกล้เคียงกับสายนำสัญญาณ 50 โอห์ม

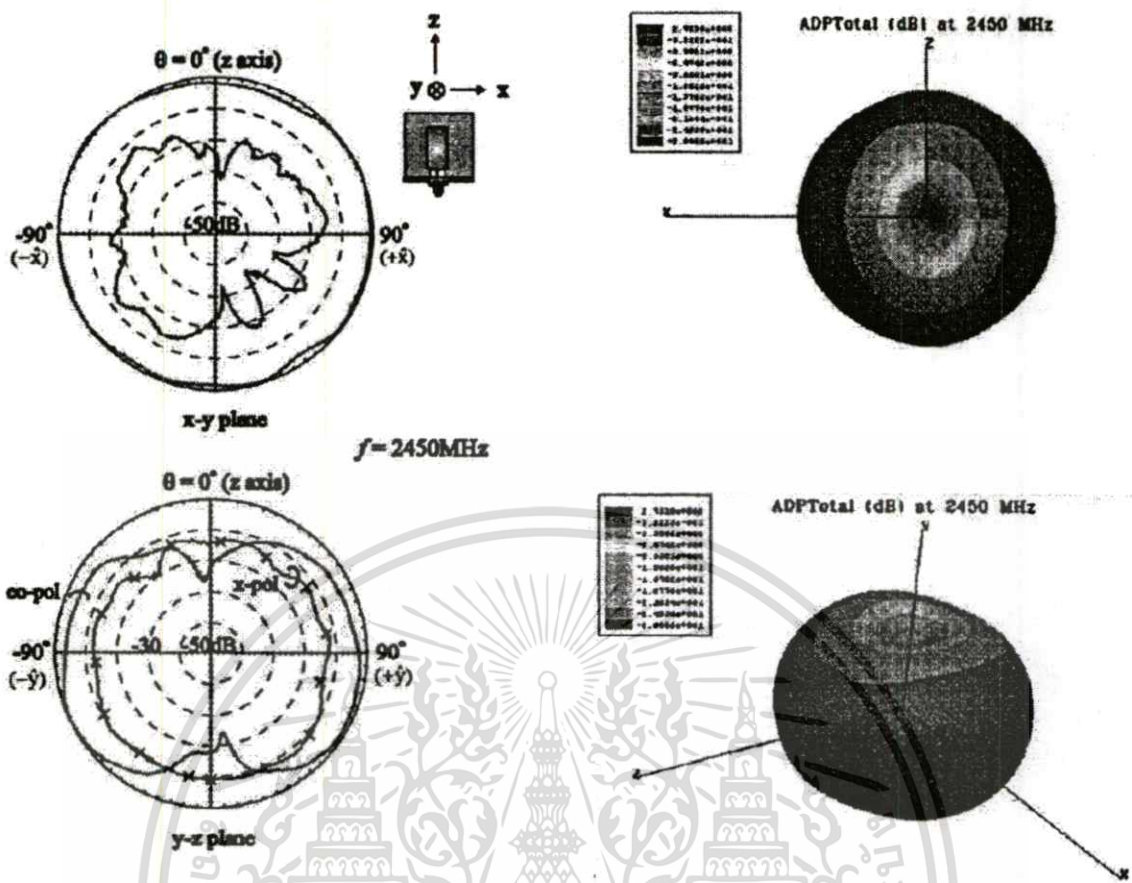


รูปที่ 1.3 สายอากาศจำลอง โมโน โพลพร้อมแผ่นระนาบ (Planar Patch)

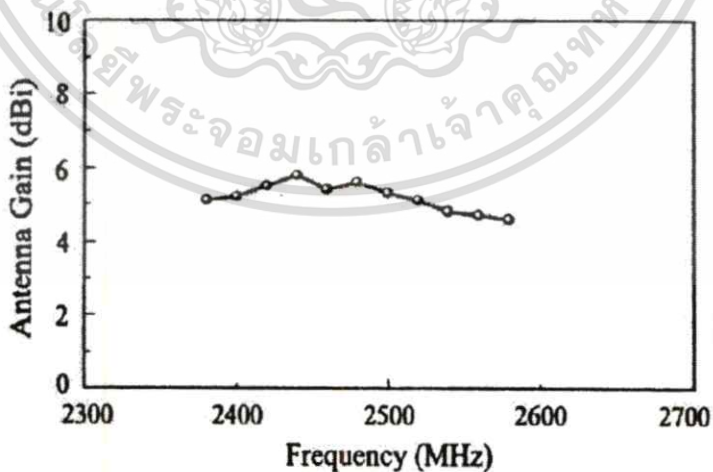


รูปที่ 1.4 การทดสอบ และการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ที่ VSWR 1.5:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และระดับการโพลาไรซ์ไขว้ของสายอากาศ



รูปที่ 1.6 ค่าอัตราการขยายของสายอากาศสำหรับย่านความถี่ 2.4-2.6 กิกะเฮิรตซ์

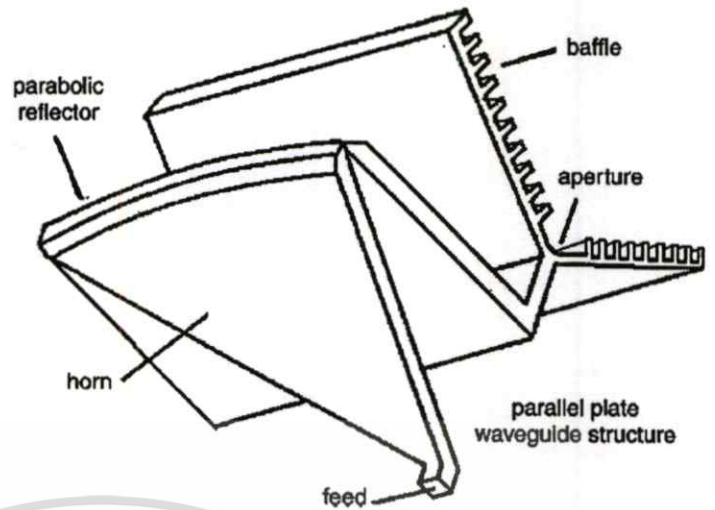
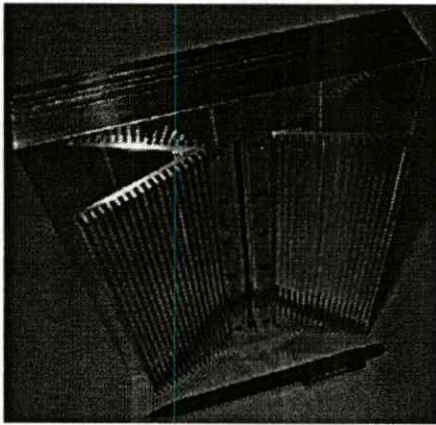
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ชื่อ Ansoft HFSS ทำการจำลองแล้วสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นมาทดสอบดังรูปที่ 1.3 คือสายอากาศจำลอง โมโนโพลพร้อมแผ่นระนาบ (Planar Patch) จากนั้นรูปที่ 1.4 แสดงผลการทดสอบ และจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อคิด VSWR 1.5:1 ถัดไปรูปที่ 1.5 คือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และระดับการโพลาริไซซ์ไขว้ของสายอากาศ ท้ายสุดรูปที่ 1.6 คือค่าอัตราการขยายของสายอากาศสำหรับย่านความถี่ 2.4-2.6 กิกะเฮิรตซ์

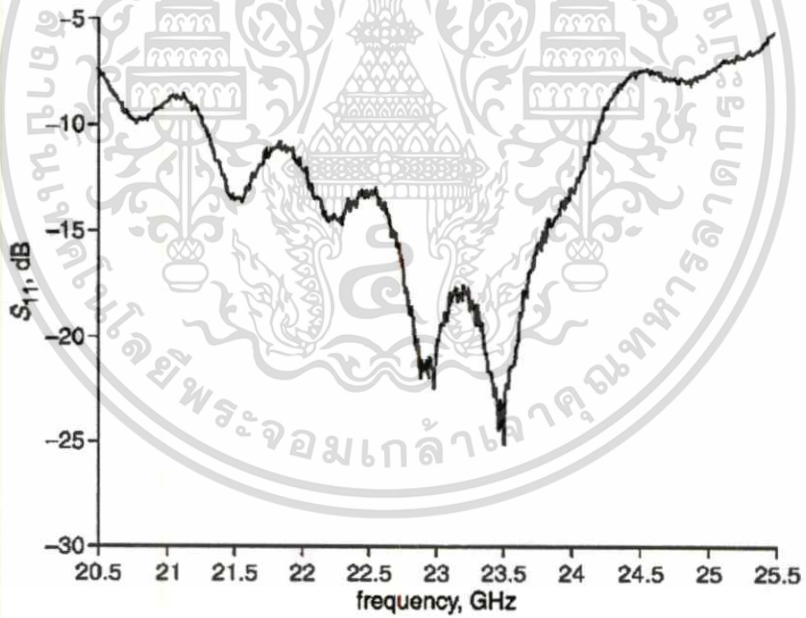
เมื่อวิเคราะห์งานวิจัยที่หนึ่งพบว่า ข้อดีคือมีโครงสร้างง่ายต่อการสร้าง มีเทคนิคการปรับแต่งค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าแมตซ์ซึ่งใกล้เคียงกับสายนำสัญญาณ 50 โอห์ม และมีค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแบบรอบทิศทาง (Omni-directional) สอดคล้องกับวัตถุประสงค์การใช้งานระบบโครงข่ายท้องถิ่น ไร้สายที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ส่วนข้อด้อยคือเมื่อพิจารณาผลการทดสอบจะเห็นว่าค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ VSWR 1.5:1 มีค่าไม่ต่ำมาก (ค่ายิ่งต่ำยิ่งดีเพราะจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าแมตซ์ซึ่งใกล้เคียงกับสายนำสัญญาณ 50 โอห์ม มากขึ้น) มีแบนด์วิดท์ที่แคบเกินไปแค่ 2.4-2.6 กิกะเฮิรตซ์ (แบนด์วิดท์ยิ่งกว้างยิ่งดีเพื่อรองรับการแพร่กระจายสัญญาณ ได้มากขึ้น) มีค่าอัตราการขยายไม่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศโมโนโพล และไม่แสดงค่าการกระเพื่อมในระนาบมุมกวาดให้ทราบ (ค่าการกระเพื่อมในระนาบมุมกวาดมีความสัมพันธ์กับค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กแบบรอบทิศทาง)

งานวิจัยที่สอง คือเรื่อง "Parallel plate waveguide antenna for point-to-multipoint communication at millimetre-wave frequencies" [2] ผู้วิจัยชาวสวีเดน คือ M.A. Enlund, M.L. Sadrai, A. Demeryd, U. Engström, M. Johansson และ B. Svensson, งานวิจัยมีความต้องการศึกษาออกแบบสายอากาศโครงสร้างตัวนำแบบแผ่นขนานให้ใช้เป็นสถานีฐานลูกข่ายเพื่อสื่อสารกับสถานีแม่ข่ายย่านความถี่มิลลิเมตร (Millimetre Wave Frequency) ช่วงความถี่ 21-25 กิกะเฮิรตซ์ ตัวสายอากาศประกอบด้วยตัวนำที่ทำหน้าที่ป้อนสัญญาณ มีโครงสร้างช่องเปิดระนาบแนวนอน (H-plane Horn) มีตัวสะท้อนแบบพาราโบลา มีตัวช่องเปิดที่เป็นแบบฟันหยัก (Corrugated Baffles) ทำหน้าที่ควบคุมแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามไฟฟ้า ประกอบรวมกันหมด ทั้งนี้ใช้โครงสร้างแบบแผ่นตัวนำขนานสำหรับควบคุมการโพลาริเซชันแนวตั้ง และค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้า สายอากาศต้นแบบดังรูปที่ 1.7 ผลการทดสอบจะได้อัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 17-20 dBi ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้า (HPBW) เท่ากับ 5 ถึง 6 องศา มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามแม่เหล็กเท่ากับ 60-80 องศา ค่าการสูญเสียย้อนกลับน้อยกว่า -20 dB ที่ VSWR 2:1 แบนด์วิดท์ 13 % และระดับการโพลาริไซซ์ไขว้ของสายอากาศมากกว่า 40 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

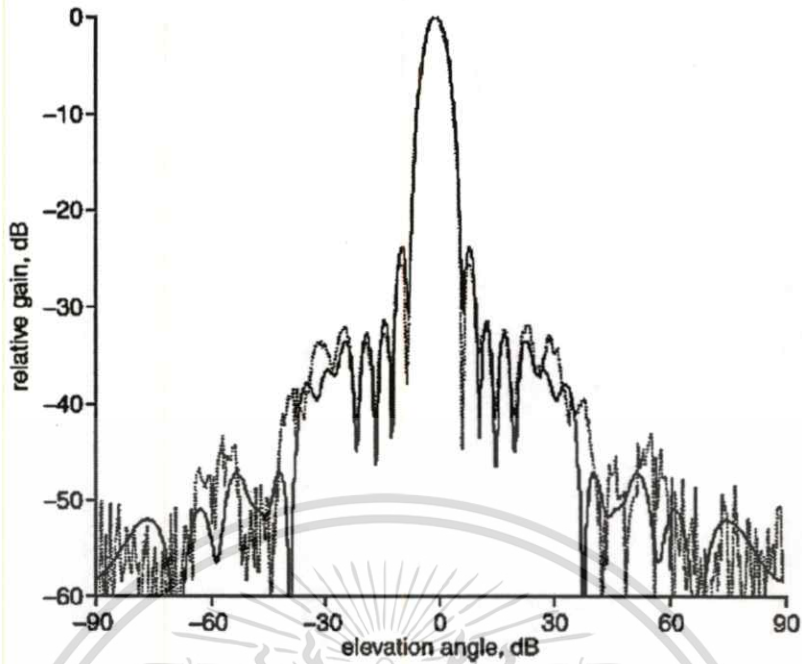


รูปที่ 1.7 สายอากาศต้นแบบ โครงสร้างแบบตัวนำแผ่นขนาน

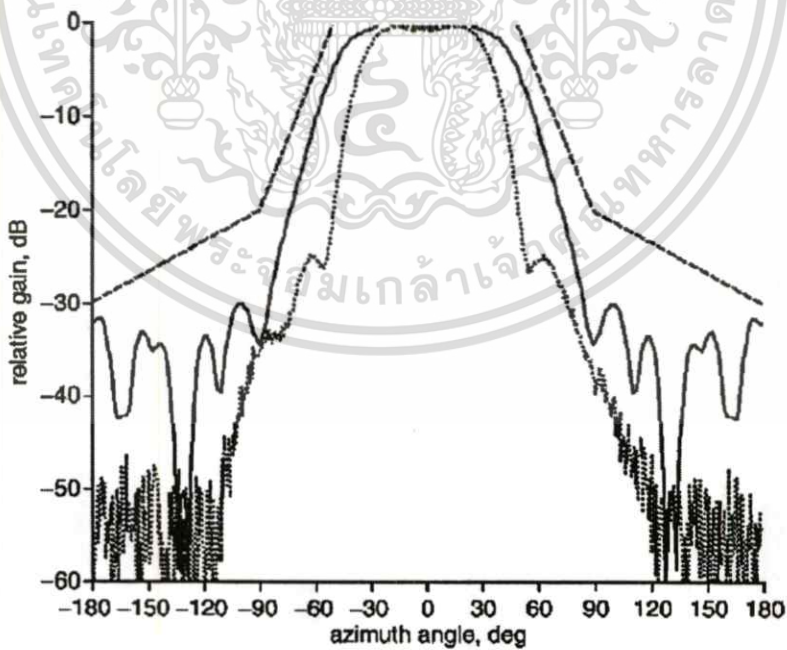


รูปที่ 1.8 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศสำหรับย่านความถี่ 20.5-25.5 กิกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 23 กิกะเฮิรตซ์



รูปที่ 1.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 23 กิกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อวิเคราะห์งานวิจัยที่สองพบว่า ข้อดีคือมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนมากนักต่อการสร้าง ตัวโครงสร้างแผ่นตัวนำแบบขนานสามารถควบคุมค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น มีอัตราขยายของสายอากาศสูงมากเหมาะสำหรับใช้งานแบบภายนอกอาคาร มีค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำค่อนข้างมาก (ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าแมตซ์ใกล้เคียงกับสายนำสัญญาณ 50 โอห์ม มากยิ่งขึ้น) และมีแบนด์วิดท์ที่กว้างดี ส่วนข้อคือคือออกแบบใช้งานสำหรับย่านความถี่ 20.5-25.5 กิกะเฮิรตซ์ เท่านั้น ไม่รองรับการใช้งานจริงสำหรับระบบโครงข่ายไร้สายในปัจจุบันที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ระบบ WLAN ที่ 2.4 หรือ 5 กิกะเฮิรตซ์ ระบบ WiMax ที่ 3-5 กิกะเฮิรตซ์ และระบบ Cellular ที่ 800-900 เมกะเฮิรตซ์ หรือ 1.8-1.9 กิกะเฮิรตซ์ เป็นต้น

งานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมด มีพารามิเตอร์ และเทคนิคที่น่าสนใจสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับงานวิจัยนี้ได้ ได้แก่ ตัวโพรบบนแผ่นกราวด์ที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก การปรับจูนระยะห่างระหว่างโพรบเพื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าแมตซ์ใกล้เคียงกับสายนำสัญญาณ 50 โอห์ม ถัดไปคือโครงสร้างแบบแผ่นขนานสำหรับควบคุมการโปลาไรเซชัน แนวตั้งรวมทั้งค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้า และ โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดที่สามารถควบคุมอัตราขยายของสายอากาศได้ดี เทคนิคทั้งหมดนี้จะนำมาออกแบบปรับปรุงจำลองโครงสร้างสายอากาศสำหรับงานวิจัยนี้ต่อไป

1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา และขอบเขตการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการศึกษา คือการออกแบบสายอากาศย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทางโดยพิจารณาถึงขณะ โครงสร้างสายอากาศแบบปากแตร ที่มีโครงสร้างออกแบบง่าย แข็งแรง ไม่ซับซ้อน สามารถติดตั้งภายในหรือภายนอกอาคารได้ และวัสดุที่ใช้สร้างมีราคาถูกมาประยุกต์ปรับปรุงเพื่อใช้กับงานวิจัยนี้

ขอบเขตการวิจัย คือนำเสนอสายอากาศช่องเปิดที่แพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางสำหรับการสื่อสารระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 ช่วงความถี่ 2.412 ถึง 2.484 กิกะเฮิรตซ์ การวิเคราะห์สายอากาศได้จำลองด้วย โปรแกรมออกแบบสายอากาศ CST MICROWAVE STUDIO พารามิเตอร์โพรบจะควบคุมอินพุตอิมพีแดนซ์ให้ใกล้เคียง 50 โอห์ม และควบคุมค่าการสูญเสียย้อนกลับ ส่วนโครงสร้างแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน จะบังคับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแบบรอบทิศทาง (Omni-directional) และบีบมุมค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้าให้แคบลงได้ จากการทดสอบสายอากาศเมื่อค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB จะครอบคลุมช่วงความถี่ 2.2-2.6 กิกะเฮิรตซ์ คิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า โดยอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เป็นแบนด์วิดท์ประมาณ 400 เมกะเฮิรตซ์ หรือ 16.2 % ได้ค่าอัตราขยายอยู่ในช่วง 4-5 dBi ค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระเพื่อมในระนาบมุมกวาดน้อยกว่า 3 dB และระดับการโพลาริไซซ์ไขว้ของสายอากาศมากกว่า 20 dB ทำให้ได้สายอากาศที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานแบบจุดต่อหลายจุดระหว่างตัวอุปกรณ์สถานีฐาน (Access Point) กับเครื่องลูกข่ายไร้สาย (Wireless Client) เพื่อใช้งานภายในอาคาร และเพื่อใช้เชื่อมต่อสัญญาณระหว่างสถานีฐานที่อยู่ภายนอกอาคารด้วยกันได้

1.4 เนื้อหาวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา งานวิจัยของสายอากาศที่เกี่ยวข้อง วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตการวิจัย และเนื้อหาวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 อธิบายหลักการพื้นฐานระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) และทฤษฎีสายอากาศปากแตร (Horn Antenna) และวิวัฒนาการโครงสร้างของสายอากาศ ซึ่งจำลองด้วยโปรแกรมออกแบบสายอากาศ CST MICROWAVE STUDIO เพื่อศึกษาคุณลักษณะเบื้องต้นที่สำคัญ

- ด้านเอทัพุดของสายอากาศ ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น
- ด้านอินพุตของสายอากาศ ได้แก่ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ
- ด้านประสิทธิภาพของสายอากาศ ได้แก่ ค่าอัตราขยาย

วิวัฒนาการแรกๆของโครงสร้างสายอากาศคือ การจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นกราวนด์ (Probe on the Ground Plane) แล้วประยุกต์เป็น โครงสร้างสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนาน (Probe with Parallel-Plate) จากนั้นปรับแต่งเป็น โครงสร้างสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 2 ด้าน (Probe with Parallel-Plate and Two Apertures) และจำลองโครงสร้างสายอากาศตัวสุดท้ายโดยการปรับแต่งเพิ่มปากแตรเป็น 4 ด้าน (Probe with Parallel-Plate and Four Apertures)

บทที่ 3 จะแสดงการวิเคราะห์ และผลการวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดสำหรับแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง โดยเลือกโครงสร้างสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน (Probe with Parallel-Plate and Four Apertures) จำลองด้วยโปรแกรมออกแบบสายอากาศ CST MICROWAVE STUDIO โดยพิจารณาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ประกอบกันเป็นตัวโครงสร้างสายอากาศขึ้นมาได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบ (I_p) ความสูงของตัวซัพพอร์ต (a) ขนาดของแผ่นกราวนด์ (b) ขนาดของแผ่นปากแตร (c) ค่ามุมองศาของแผ่นปากแตร (α) และความยาวของโพรบ (l) จากนั้นจะทำการวิเคราะห์ผลกระทบจากค่าพารามิเตอร์ตลอดช่วงแบนด์วิดท์เพื่อตรวจวิเคราะห์ว่าย่านความถี่ช่วงใดที่ทำงานได้ตามความต้องการของงานวิจัยมากที่สุด

บทที่ 4 นำโครงสร้างสายอากาศเริ่มต้นที่ปรับปรุงแก้ไขค่าพารามิเตอร์เรียบร้อยแล้ว มาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ (Prototype Antenna) ขึ้นจริงเพื่อทำการทดสอบ และหาผลการทดสอบคุณลักษณะที่สำคัญ ได้แก่ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ค่าอัตราการขยาย (Gain) และระดับการโพลาไรซ์ไขว้ของสายอากาศ (Cross Polarization)

บทที่ 5 จะนำสายอากาศต้นแบบ (Prototype Antenna) ของจริง ทำการทดสอบประเมินสายอากาศในระบบโครงข่ายท้องถิ่น ไร้สายว่าสามารถใช้งานได้จริง โดยจะทดสอบการทำงานแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-Multipoint) ประเภทการใช้งานแบบการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างสถานีฐานด้วยกัน ซึ่งกำหนดเงื่อนไขระยะทาง และค่าวิสัยสามารถเป็นตัวประเมินสายอากาศ

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะสำหรับการออกแบบสายอากาศย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ ให้มีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง และแนวทางพัฒนาประยุกต์ต่อไป



บทที่ 2

ทฤษฎี และหลักการ

2.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงหลักการของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) และทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศปากแตร และวิวัฒนาการของสายอากาศที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้เพื่อนำไปใช้ออกแบบสายอากาศที่ต้องการได้

2.2 หลักการพื้นฐานของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN)

โครงข่ายท้องถิ่นไร้สายคือการสื่อสารแบบไร้สายโดยอาศัยคลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟเป็นพาหะในการรับส่งข้อมูล จะต้องทำงานตามมาตรฐาน IEEE 802.11 Wireless Local Area Network (WLAN) [13], [18] ที่มีหน่วยงาน Wireless Fidelity Alliance (Wi-Fi) เป็นผู้ทดสอบความเข้ากันได้ของตัวผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้สนใจมาตรฐาน IEEE 802.11b IEEE 802.11g และ IEEE 802.11n draft (GI=400 ns) โดยทุกมาตรฐานทำงานความถี่ย่าน 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ตามข้อกำหนดองค์กร Industrial Scientific and Medical (ISM) สำหรับ IEEE 802.11b ใช้เทคโนโลยีการแพร่กระจายคลื่นแบบ Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) ทำให้มีความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่ 11 Mbps สูงสุด สำหรับ IEEE 802.11g และ IEEE 802.11n draft (GI=400 ns) ใช้เทคโนโลยีการแพร่กระจายคลื่นทั้ง 2 แบบคือ DSSS เพื่อรับส่งข้อมูลที่ 11 Mbps และแบบ Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) เพื่อรับส่งข้อมูลให้สูงมากกว่า 100 Mbps โดยรูปที่ 2.1 แสดงมาตรฐาน IEEE 802.11 และความเร็วในการรับส่งข้อมูลให้ทราบ ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวมีระยะทางของพื้นที่การให้บริการระหว่างตัวอุปกรณ์สถานีฐานกับเครื่องลูกข่ายไร้สายในบริเวณพื้นที่ภายนอกอาคารสูงสุดไม่เกิน 300 ฟุต หรือ 90 เมตร และพื้นที่ภายในอาคารสูงสุดไม่เกิน 100 ฟุต หรือ 30 เมตร ขึ้นอยู่กับเทคนิคการปรับแต่งการรับส่งข้อมูล และสภาพแวดล้อมนั้นๆ ดังรูปที่ 2.2 แสดงระยะทาง และค่าวิสัยสามารถสูงสุด (Max. Throughput) สำหรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์สถานีฐานกับเครื่องลูกข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11

การทำงานในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายสำหรับตัวอุปกรณ์สถานีฐาน และเครื่องลูกข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11 จะใช้ช่องสัญญาณความถี่ตามรูปที่ 2.3 ซึ่งพารามิเตอร์หลักที่มีผลกระทบต่อความเร็วในการรับส่งข้อมูล และระยะทางของพื้นที่ที่ให้บริการเมื่อมีการใช้งานจริงคือ พารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการฝ่าฝืน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังส่ง (Transmitting Power มีหน่วยเป็น mW หรือ dBm) โดยจากรูปที่ 2.4 แสดงค่ากำลังส่งสำหรับ อุปกรณ์สถานีฐาน และเครื่องลูกข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11 ถ้าค่ากำลังสูงจะทำให้ได้ระยะทางของพื้นที่ให้บริการเพิ่มขึ้น แต่ในทางปฏิบัติตัวอุปกรณ์สถานีฐานจะปรับแต่งกำลังส่งได้ฝ่ายเดียว ส่วนเครื่องลูกข่ายไร้สายจะปรับแต่งได้น้อยมาก ถัดไปคือค่าอัตราขยายของสายอากาศ (Gain of Antenna มีหน่วยเป็น dBi หรือ dBd) ซึ่งตามปกติแล้วอุปกรณ์สถานีฐาน และตัวเชื่อมต่อโครงข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย (Wireless LAN Card) สำหรับเครื่องลูกข่าย จะถูกเซตค่ากำลังส่ง และค่าอัตราขยายของสายอากาศตลอดจนพารามิเตอร์อื่นๆ จากโรงงานผู้ผลิตมาให้เรียบร้อยแล้ว แต่ก็มีอุปกรณ์เสริมสำหรับปรับเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น ตัวขยายสัญญาณ (Booster Amplifier) เพื่อเพิ่มกำลังส่งให้กับสถานีฐาน หรือสายอากาศอัตราขยายสูง (High Gain antenna) เพื่อเพิ่มอัตราขยายให้สายอากาศของสถานีฐานหรือใช้กับตัวเชื่อมต่อโครงข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายได้ ทั้งนี้สายอากาศที่ใช้งานทั่วไปส่วนใหญ่กับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายคือ สายอากาศโมโนโพล และไดโพล ที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว (Omni-directional Pattern) ดังรูปที่ 2.5 แสดงโทโปโลยีสายอากาศทางกายภาพที่ใช้งานส่วนใหญ่กับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายในปัจจุบัน และรูปที่ 2.6 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโมโนโพลที่ใช้งานส่วนใหญ่กับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

	20 MHz Channel		40 MHz Channel	
	1 stream	2 streams	1 stream	2 streams
Data Rate, in Mbps				
802.11b 2.4 GHz	1, 2, 5.5, 11			
802.11a 5 GHz	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54			
802.11g 2.4 GHz	1, 2, 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54			
802.11n GI=800ns 2.4 GHz	6.5, 13, 19.5, 26, 39, 52, 58.5, 65	13, 26, 39, 52, 78, 104, 117, 130		
802.11n GI=800ns 5 GHz	6.5, 13, 19.5, 26, 39, 52, 58.5, 65	13, 26, 39, 52, 78, 104, 117, 130	13.5, 27, 40.5, 54, 81, 108, 121.5, 135	27, 54, 81, 108, 162, 216, 243, 270
802.11n, GI=400ns 2.4 and 5 GHz	7.2, 14.4, 21.7, 28.9, 43.3, 57.8, 65, 72.2	14.4, 28.9, 43.3, 57.8, 86.7, 115.6, 130, 144.4	15, 30, 45, 60, 90, 120, 135, 150	30, 60, 90, 120, 180, 240, 270, 300

รูปที่ 2.1 มาตรฐาน IEEE 802.11 และความเร็วในการรับส่งข้อมูล [15], [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Distance (Feet)	802.11b (Mbps)	802.11a (Mbps)	802.11g-only (Mbps)	802.11g Mixed Environment with CTS-to-self (Mbps)	802.11g Mixed Environment with RTS/CTS (Mbps)
10	5.8	24.7	24.7	14.7	11.8
50	5.8	19.8	24.7	14.7	11.8
100	5.8	12.4	19.8	12.7	10.6
150	5.8	4.9	12.4	9.1	8.0
200	3.7	0	4.9	4.2	4.1
250	1.6	0	1.6	1.6	1.6
300	0.9	0	0.9	0.9	0.9

รูปที่ 2.2 ระยะทาง และค่าวิสัยสามารถสูงสุด (Max. Throughput) สำหรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ สถานีฐานกับเครื่องลูกข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11 [15], [18]

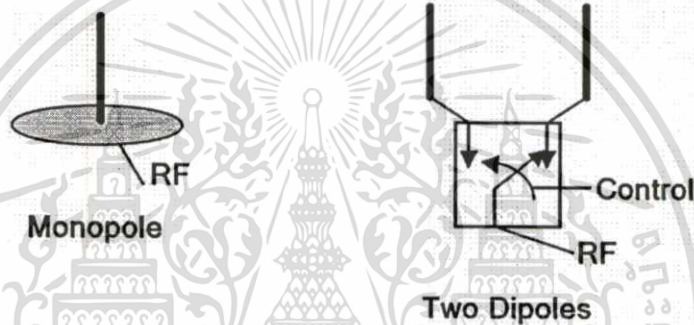
CHNL_ID	Frequency (MHz)	Regulatory domains					
		X'10' FCC	X'20' IC	X'30' ETSI	X'31' Spain	X'32' France	X'40' MKK
1	2412	X	X	X	—	—	—
2	2417	X	X	X	—	—	—
3	2422	X	X	X	—	—	—
4	2427	X	X	X	—	—	—
5	2432	X	X	X	—	—	—
6	2437	X	X	X	—	—	—
7	2442	X	X	X	—	—	—
8	2447	X	X	X	—	—	—
9	2452	X	X	X	—	—	—
10	2457	X	X	X	X	X	—
11	2462	X	X	X	X	X	—
12	2467	—	—	X	—	X	—
13	2472	—	—	X	—	X	—
14	2484	—	—	—	—	—	X

รูปที่ 2.3 ช่องสัญญาณความถี่สำหรับมาตรฐาน IEEE 802.11 [15], [18]

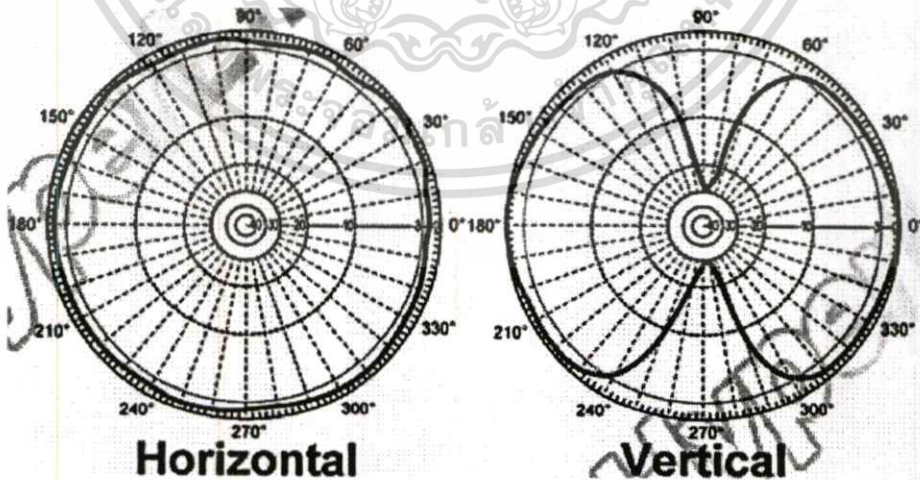
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Maximum output power	Geographic location	Compliance document
1000 mW	USA	FCC 15.247
100 mW (EIRP)	Europe	ETS 300-328
10 mW/MHz	Japan	MPT ordinance for Regulating Radio Equipment, Article 49-20

รูปที่ 2.4 กำลังส่งสำหรับอุปกรณ์สถานีฐานและเครื่องลูกข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11 [15], [18]



รูปที่ 2.5 โทโพโลยีสายอากาศทางกายภาพที่ใช้กันส่วนใหญ่กับ โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย [13]

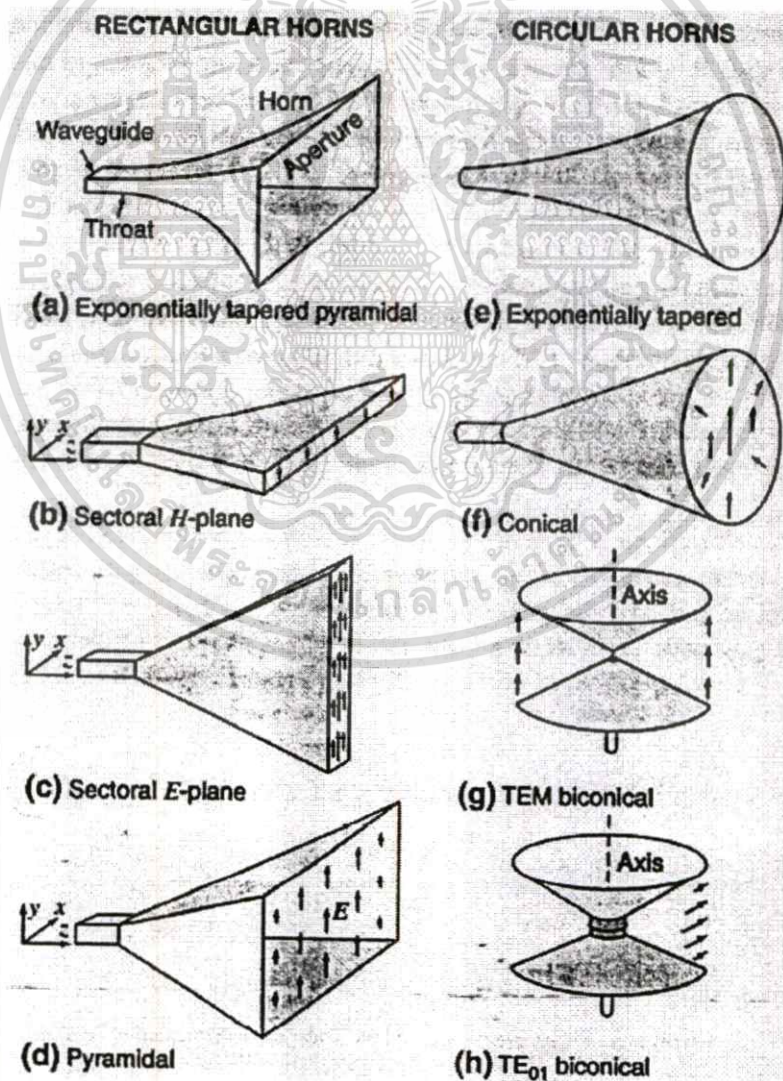


รูปที่ 2.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโมโนโพลที่ใช้กันส่วนใหญ่กับ โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย [13]

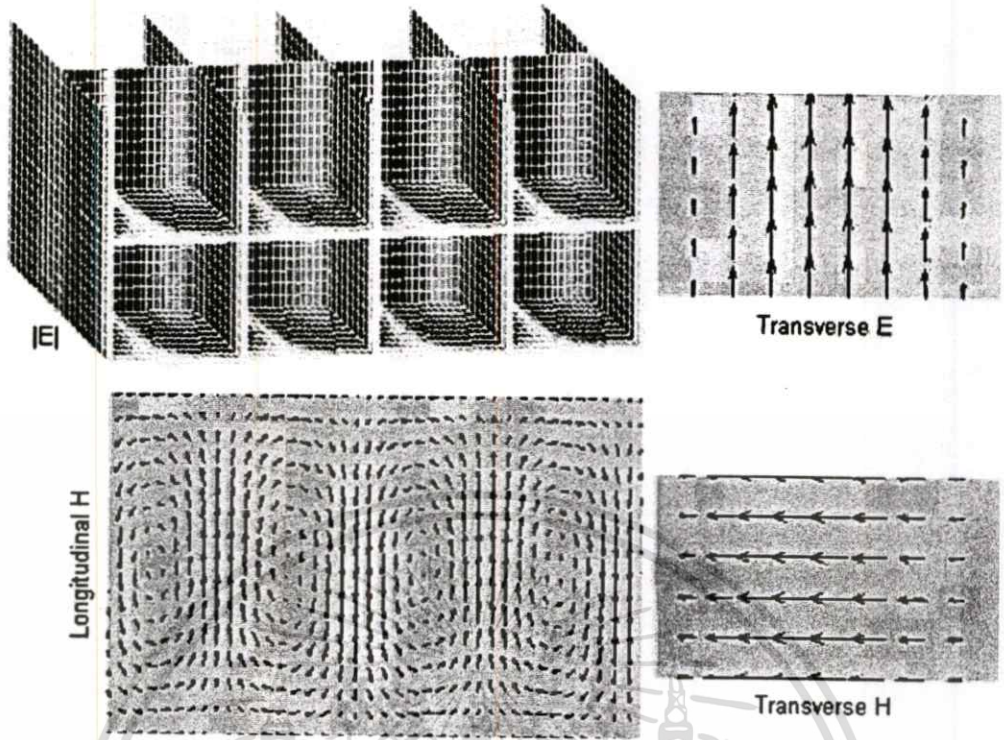
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศปากแตร (Horn Antenna)

สายอากาศปากแตร [20] คือ สายอากาศที่ขยายปลายช่องเปิดของท่อนำคลื่นออกไปทางด้านใดด้านหนึ่ง (Flared-Out หรือ Open-Ended) ซึ่งกล่าวได้ว่าอาจจะลู่ออกทางด้านแกน x หรือแกน y ก็ได้โดยมีอีกด้านหนึ่งคงที่ จากรูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของสายอากาศปากแตรแบบต่างๆ ทั้งนี้แบ่งเป็น 2 ประเภทหลักได้แก่ โครงสร้างของสายอากาศปากแตรแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular Horn) และแบบวงกลม (Circular Horn) ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจสายอากาศปากแตรแบบสี่เหลี่ยมประเภทที่มีการลู่ออกในระนาบ yz -plane ดังรูปที่ 2.7 (c) มีปลายลู่ออกทางแกน y ในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane Sectoral Horn) เนื่องจากว่าอุปกรณ์สถานีฐาน (Access Point) ที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้มีการเดินทางของคลื่นแบบโพลาไรเซชันแนวตั้ง (Linear vertical Polarization) [13, 19]

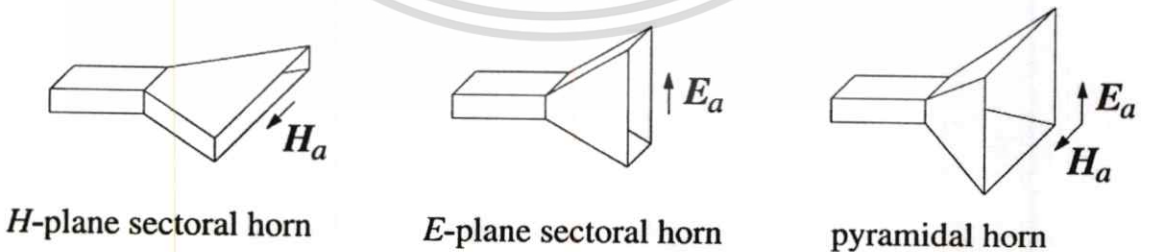


เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 2.7 โครงสร้างของสายอากาศปากแตร (Horn Antenna) แบบต่างๆ โยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 โหมดหลัก TE_{10} ของสายอากาศปากแตรแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular Horn)

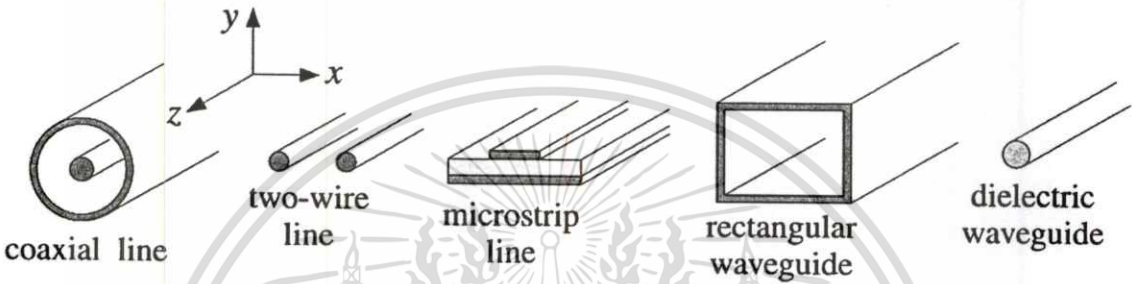
จากรูปที่ 2.8 แสดงโหมดหลัก TE_{10} ของสายอากาศปากแตรแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular Horn) โดยสายอากาศปากแตรแบบสี่เหลี่ยมมีโหมดการเดินทางของคลื่นที่สนามแนวขวาง (Transverse Electromagnetic fields) ในทอมของคลื่น TE (Transverse Electric waves) ประกอบด้วยคลื่น $E_z = 0$ แต่ $H_z \neq 0$ และยังเป็นโหมดหลัก TE_{10} ที่มีค่าอันดับต่ำที่สุด สอดคล้องกับการเดินทางของคลื่นที่แพร่กระจายสนามไฟฟ้าทิศทางแนวตั้งในระนาบสนามไฟฟ้า



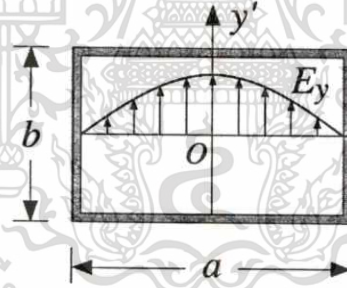
รูปที่ 2.9 สายอากาศปากแตรแบบสี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 2.9 ทางปฏิบัติสำหรับสายอากาศปากแตรแบบสี่เหลี่ยมวิธีที่จะเพิ่มอัตราขยาย และค่าสภาพ
เจาะจงทิศทางของช่องเปิด ถ้าให้ท่อนำคลื่นเพิ่มความยาวด้านข้าง (a-side) เรียกว่า H-plane Sectoral
Horn ถ้าลดขนาดของช่องเปิดเรียกว่า E-plane Sectoral Horn และถ้าต้องการทั้งสองแบบเรียกว่า
Pyramidal Horn

2.3.1 หลักการกระจายคลื่นจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมตัดปลาย



รูปที่ 2.10 โครงสร้างทั่วไปของท่อนำคลื่น



รูปที่ 2.11 การกระจายของสนามไฟฟ้าบนปลายตัดของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular Waveguide)

รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างทั่วไปของท่อนำคลื่นที่ใช้งานร่วมกับสายอากาศ [21] และรูปที่
2.11 แสดงการกระจายคลื่นออกจากสายอากาศของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมที่ตัดปลายไว้ [21] เช่น
สายอากาศปากแตร จะใช้ทฤษฎีการเหนี่ยวนำมาอธิบายคือ

$$E_y(x') = E_0 \cos\left(\frac{\pi x'}{a}\right)$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_x(x') = -\frac{1}{\eta TE} E_0 \cos\left(\frac{\pi x'}{a}\right) \quad (2.1)$$

เมื่อ $\eta TE = \eta / K$ โดยที่ $K = \sqrt{1 - \omega^2 / \omega_c^2} = \sqrt{1 - (\lambda / 2a)^2}$

เกิดที่บริเวณขอบเขต $x' = \pm a/2$

โดยกรณีที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ (Larger Apertures) เช่น $a > 2\lambda$ เราจะให้ $K \approx 1$ และถ้ากรณีที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก (Smaller Apertures) เช่น $0.5\lambda \leq a \leq 2\lambda$ เราจะใช้เงื่อนไขที่ว่า

เมื่อ $f_x = 0$ ได้

และ

$$E_\theta(jk) = \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} c_\theta f_y(\theta, \phi) \sin\phi$$

$$E_\phi(jk) = \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} c_\phi f_y(\theta, \phi) \cos\phi \quad (2.2)$$

เมื่อ $f_y(\theta, \phi)$ ทำการแปลงฟูเรียร์ของ $E_y(x')$ คือ

$$f_y(\theta, \phi) = \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} E_y(x') e^{jk_x x' + jk_y y'} dx' dy'$$

$$= E_0 \int_{-a/2}^{a/2} \cos\left(\frac{\pi x'}{a}\right) e^{jk_x x'} dx' \int_{-b/2}^{b/2} e^{jk_y y'} dy'$$

เมื่อนำ y' มาอินทิเกรตแบบเดียวกัน โดยที่นำ x' มาอินทิเกรตจะได้เป็น

$$\int_{-a/2}^{a/2} \cos\left(\frac{\pi x'}{a}\right) e^{jk_x x'} dx' = \frac{2a \cos\left(\frac{k_x a}{2}\right)}{\pi \left[1 - \left(\frac{k_x a}{\pi}\right)^2\right]}$$

$$f_y(\theta, \phi) = E_0 \frac{2ab \cos\left(\frac{\pi v_x}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi v_y}{2}\right)}{\pi \left[1 - 4v_x^2\right] \pi v_y} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $v_x = k_x a/2\pi$ และ $v_y = k_y b/2\pi$ หรือ

$$v_x = \frac{a}{\lambda} \sin\theta \cos\phi \quad \text{และ} \quad v_y = \frac{b}{\lambda} \sin\theta \sin\phi \quad (2.4)$$

มีพารามิเตอร์ที่สามารถเลือกใช้งานได้ 3 แบบ คือ

- PEC ถ้าช่องเปิดถูกต่อลงกราวนด์
- จุดกำเนิดจากสมการไฮเกนส์ (Huygens source) เพื่อแพร่กระจายลงพื้นที่ว่าง
- การปรับแต่งจุดกำเนิดจากสมการไฮเกนส์ (Huygens source)

$$\begin{bmatrix} c\theta \\ c\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos\theta \end{bmatrix}, \quad \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \cos\theta \\ 1 + \cos\theta \end{bmatrix}, \quad \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + K \cos\theta \\ K + \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

จากการทำนอร์มัลไลซ์ทั้ง 3 แบบ จะกำหนดที่ $\theta = 0^\circ$ เราจะรวมเข้าด้วยกันดังนี้

$$c_E(\theta) = \frac{1 + K \cos\theta}{1 + K}, \quad c_H(\theta) = \frac{K + \cos\theta}{1 + K} \quad (2.6)$$

เมื่อ K กำหนดสามารถเป็นค่าได้ดังนี้

$$K=0, \quad K=1, \quad K = \frac{\eta}{\eta_{TE}} = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \quad (2.7)$$

อัตราขยายการทำนอร์มัลไลซ์จะทำเป็น 2 หัวข้อคือระนาบ xz หรือ H-plane เรากำหนดให้ $\phi = 0^\circ$ เพื่อให้ $E_\theta = 0$ จะได้

$$g_E(\theta) = \frac{|E_\phi(\theta)|^2}{|E_\phi|_{max}^2} = |c_H(\theta)|^2 \left| \frac{\cos(\pi v_x)}{1 - 4v_x^2} \right|^2, \quad v_x = \frac{a}{\lambda} \sin\theta \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และระนาบ yz หรือ E-plane เรากำหนดให้ $\phi = 90^\circ$ เพื่อให้ $E_\phi = 0$ จะได้

$$g_E(\theta) = \frac{|E_\theta(\theta)|^2}{|E_\theta|_{\max}^2} = |c_E(\theta)|^2 \left| \frac{\sin(\pi v_y)}{\pi v_y} \right|^2, \quad v_y = \frac{b}{\lambda} \sin\theta \quad (2.9)$$

จากฟังก์ชัน $\cos(\pi v_x) / (1 - 4v_x^2)$ เป็นคุณลักษณะของ H-plane ซึ่งใช้ฟังก์ชัน sinc ยกกำลังสอง คือ

$$\frac{\cos(\pi v_x)}{1 - 4v_x^2} = \frac{\pi}{4} \left[\frac{\sin\left(\pi\left(v_x + \frac{1}{2}\right)\right)}{\pi\left(v_x + \frac{1}{2}\right)} + \frac{\sin\left(\pi\left(v_x - \frac{1}{2}\right)\right)}{\pi\left(v_x - \frac{1}{2}\right)} \right] \quad (2.10)$$

เราสามารถใส่โปรแกรม Matlab จากฟังก์ชันดังนี้

$$y = d \sin(x); \quad \% \text{the double-sinc function } \frac{\cos(\pi x)}{1 - 4x^2} = \frac{\pi}{4} [\text{sinc}(x + 0.5) + \text{sinc}(x - 0.5)]$$

เมื่อเราคิดที่มุมกว้าง 3 db ของ E-plane จะได้ขนาดช่องเปิดเป็น $\Delta\theta_y = 0.886\lambda/b$ ได้ฟังก์ชัน dsinc มีค่า $\pi/4$ ที่ $v_x = 1/2$ ซึ่งที่ตำแหน่ง 3 dB คือ $v_x = 0.5945$ มีค่ามุม first null ที่ค่า $v_x = 1.5$ มีมุมลำคลื่นย่อยแรก (first side lobe) ที่ $v_x = 1.8894$ และสูง 0.0708 หรือ 23 dB จากลำคลื่นหลัก (Main Lobe) ทั้งนี้ทำตามตำแหน่ง $v_x = a \sin\theta / \lambda$ ที่มุมกว้าง 3 db ซึ่งพื้นที่จะเป็นค่า $\Delta\theta_x = 2 \times 0.5945 \lambda / a = 1.189 \lambda / a$ ดังนั้นหามุมกว้าง 3 dB ในหน่วยของเรเดียน และองศา ดังนี้

$$\Delta\theta_x = 1.189 \frac{\lambda}{a} = 68.12^\circ \frac{\lambda}{a}, \quad \Delta\theta_y = 0.886 \frac{\lambda}{b} = 50.76^\circ \frac{\lambda}{b} \quad (2.11)$$

ถัดมาเราจะหาค่าอัตราขยาย (Gain) และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ของท่อนำคลื่น โดยค่าความเข้มสูงสุดคือ $\theta = 0^\circ$ เพราะว่า $c_\theta(0) = c_\phi(0)$ มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_{max} = \frac{1}{2\eta} |E(0, \phi)|^2 = \frac{1}{2\lambda^2 \eta} c_{\theta}^2(0) |f_y(0, \phi)|^2 = \frac{1}{2\lambda^2 \eta} c_{\theta}^2(0) |E_0|^2 \frac{4(ab)^2}{\pi^2}$$

กำลังงานการส่งทั้งหมดจะผ่านช่องเปิด และแพร่กระจายออกไป ดังนี้

$$P_{rad} = \frac{1}{4\eta_{TE}} |E_0|^2 ab \quad (2.12)$$

ค่าอัตราขยาย และค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศช่องเปิดจะได้

$$G = 4\pi \frac{U_{max}}{P_{max}} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \frac{8}{\pi^2} (ab) \frac{\eta_{TE}}{\eta} c_{\theta}^2(0)$$

เมื่อพิจารณา PEC และกรณีของจุดกำเนิดจากสมการไฮเกนส์ที่ $c_{\theta}(0) = 1$ สมมติว่า $\eta_{TE} \cong \eta$ จะได้

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} \frac{8}{\pi^2} (ab) = 0.81 \frac{4\pi}{\lambda^2} (ab) \quad (2.13)$$

ได้พื้นที่ของท่อนำคลื่นบริเวณช่องเปิดคือ $A_{eff} = 0.81(ab)$ และได้ที่ค่าประสิทธิภาพ $e = 0.81$ โดยถ้าประยุกต์กับสมการไฮเกนส์ เราจะได้ตัวประกอบคือ $c_{\theta}(0) = (K+1)/2$ เมื่อ $K = \eta/\eta_{TE}$ ได้ดังนี้

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} \frac{8}{\pi^2} (ab) \frac{(K+1)^2}{4K} \quad (2.14)$$

ถ้าท่อนำคลื่นมีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่น จะได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง $(K+1)^2/4K$ สำหรับทางปฏิบัติ ซึ่งจากตารางแสดงค่า K ทั่วไป และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (ในโหมดหลัก TE_{10} ต้องการ $0.5\lambda < a < \lambda$)

ตารางที่ 2.1 ค่า K ทั้งหมด และค่าสภาพเจาะงทิสทางในโหมดหลัก TE_{10} ต้องการ $0.5\lambda < a < \lambda$

a/λ	K	$(K+1)^2/4K$
0.6	0.5528	1.0905
0.8	0.7806	1.0154
1.0	0.8660	1.0052
1.5	0.9428	1.0009
2.0	0.9682	1.0003

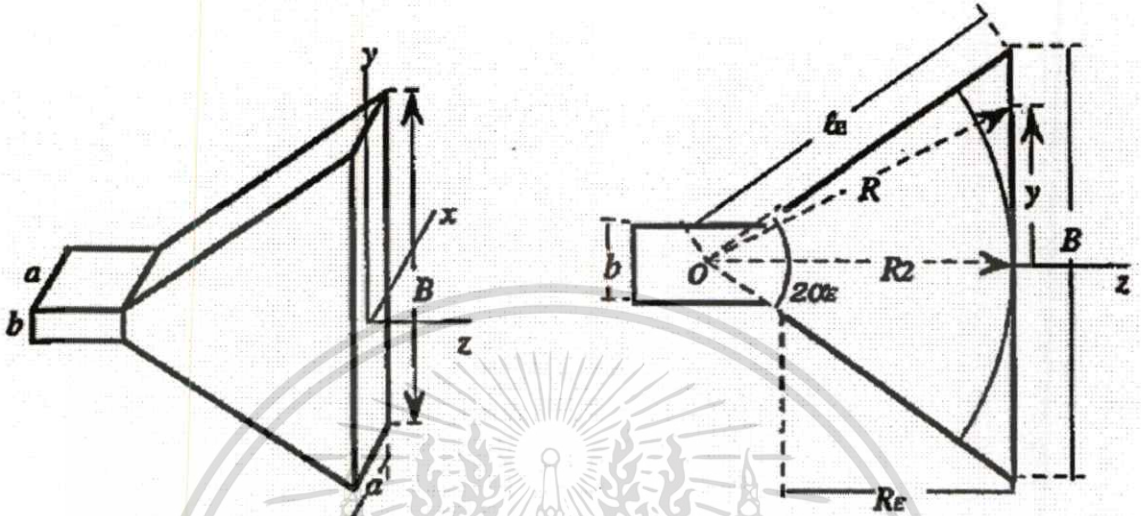
ค่าอัตราขยายจากสมการที่ 2.11 และ 2.13 คือ

$$p = G \Delta\theta_x \Delta\theta_y = 4\pi(0.81)(0.886)(1.189) = 10.723 \text{ rad}^2 = 35.202 \text{ degree}^2$$

แล้วจะหาค่ามุมในหน่วยเรเดียน และองศาได้ดังนี้

$$G = \frac{10.723}{\Delta\theta_x \Delta\theta_y} = \frac{35.202}{\Delta\theta_x^\circ \Delta\theta_y^\circ} \quad (2.15)$$

2.3.2 หลักการสายอากาศปากแตรในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane Sectoral Horn)



รูปที่ 2.12 สายอากาศปากแตรในระนาบสนามไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.12 แสดงสายอากาศปากแตรในระนาบสนามไฟฟ้า โดยมีขนาดมิติ ดังนี้

- a คือความกว้างของท่อนำคลื่นปลายปิด และความกว้างของช่องปากเปิด
- b คือความสูงของท่อนำคลื่นปลายปิด
- B คือความสูงของช่องปากเปิด
- O คือตำแหน่งศูนย์กลางอ้างอิงทางเรขาคณิต
- l_E คือความยาวตั้งแต่ O ถึงช่องปากเปิดที่มุมแคบสุด
- α_E คือมุมจากแกน z ทำมุมกับ l_E
- R_E คือความยาวตั้งแต่ α_E ถึงช่องปากเปิดที่มุมแคบสุด
- R_2 คือความยาวตั้งแต่ O ถึง ช่องปากเปิดตามแกน z
- y คือตำแหน่งจากแกน z ตั้งฉากกับแกน y ไปที่ตำแหน่ง 3 dB ของช่องปากเปิด
- R คือความยาวตั้งแต่ O ถึง y

ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$l_E^2 = R_2^2 + \frac{B^2}{4}, \quad \tan \alpha_E = \frac{B^2}{2R_2^2}, \quad R_E = (B-b) \sqrt{\frac{l_E^2}{B^2} - \frac{1}{4}} \quad (2.16)$$

วิธีนี้ใช้สำหรับการคำนวณในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane Sectoral Horn) โดยช่องเปิดจะคู่ทางแกน y ดังนั้นส่วนประกอบ E_y จะได้

$$E_y = E_0 \cos \frac{\pi x}{a} \exp \left(-j \frac{k}{2R_2} y^2 \right) \quad (2.17)$$

ค่ามุมสเปคตรัมของ $F_y(\alpha, \beta)$ ได้นำมาหาผลรวมบนพื้นที่ช่องเปิด (a, B) ได้ดังนี้

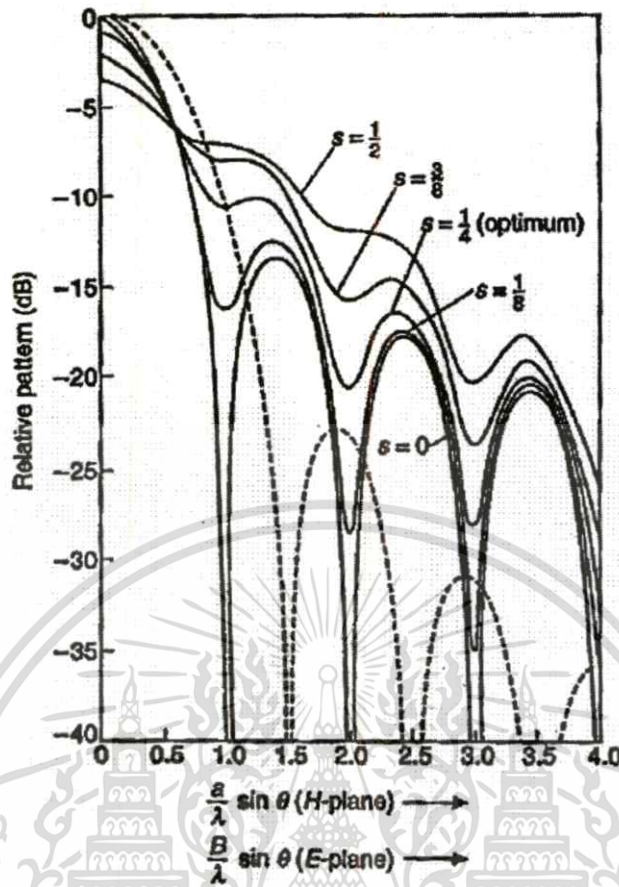
$$F_y(\alpha, \beta) = \frac{E_0}{\lambda^2} \iint \cos \frac{\pi x}{a} \exp \left(-j \frac{k}{2R_2} y^2 \right) \exp[jk(\alpha x + \beta y)] dx dy \quad (2.18)$$

ซึ่งค่ามุมสเปคตรัมอาจหาได้แบบวิธีตัดจากสองเทอม $g_H(\alpha) \cdot g_E(\beta)$ ดังนี้

- เทอมของ $g_H(\alpha) = \frac{\cos \pi(\alpha a / \lambda)}{1 - [\pi \alpha a / \lambda]^2}$ ได้จากผลรวมแกน x ที่อธิบายรูปแบบการแพร่กระจายในระนาบสนามแม่เหล็ก (ระนาบ xOz กับค่า $\beta = 0$, $\alpha = \sin \theta$)
- เทอมของ $g_E(\beta)$ ได้จากผลรวมกับแกน y ที่อธิบายรูปแบบการแพร่กระจายในระนาบสนามไฟฟ้า (ระนาบ yOz กับค่า $\alpha = 0$, $\beta = \sin \theta$) ในเทอมนี้อาจหมายถึงผลรวมทางมุมสูงสุด โดยผลที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 2.11 ได้อธิบายผลจากค่า S ที่ต่างกัน

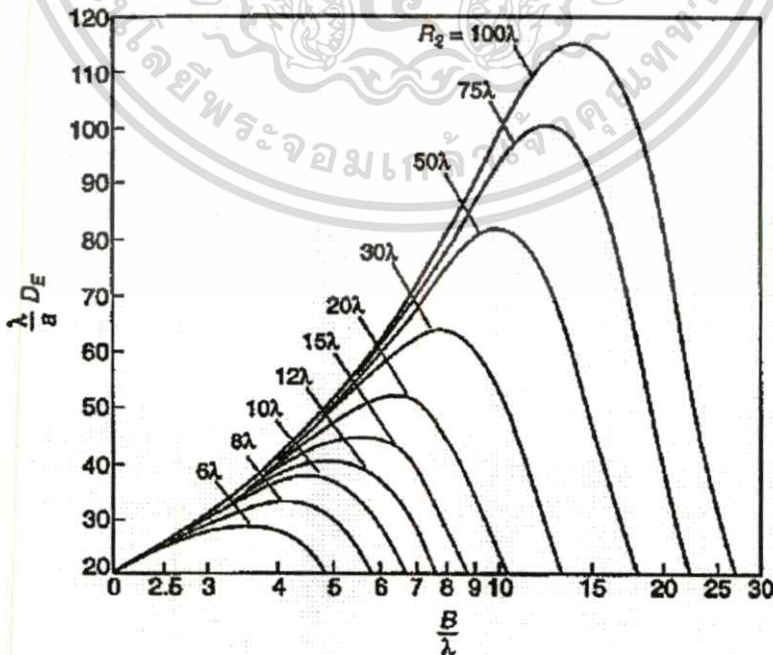
$$S = \frac{B^2}{8\lambda R_2} = \frac{1(B/\lambda)^2}{8 R_2 / \lambda} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแคบในระนาบสนามไฟฟ้า

E-plane = ——— และ H-plane = - - - - -



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 2.14 ค่าสภาพเจาะงทศทางของสายอากาศปากแคบในระนาบสนามไฟฟ้า โยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และได้คุณลักษณะด้านอิมพีแดนซ์คือ

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{-E_y h}{H_x w} = \eta \frac{h}{w} \quad (2.20)$$

เมื่อใช้ $E_y = -\eta H_x$ กำลังส่งจะได้คือ

$$P_T = \frac{I}{2\eta} |E_y|^2 (wh) = \frac{I V^2}{2\eta h^2} wh = \frac{I w}{2\eta h} V^2 = \frac{I}{2Z} V^2 = \frac{1}{2} Z I^2 \quad (2.21)$$

ค่าขดลวดเหนี่ยวนำ และค่าเก็บประจุต่อความยาวหาจาก

$$L' = \mu \frac{h}{w}, \quad C' = \epsilon \frac{w}{h} \quad (2.22)$$

การไหลของกระแสบนพื้นผิวบนสุดของแผ่นตัวนำคือ $J_s = \hat{n} \times H = (-\hat{y}) \times H = \hat{z} H_x$ และพื้น

ผิวล่างสุดของแผ่นตัวนำคือ $J_s = -\hat{z} H_x$ ดังนั้นกำลังงานที่สูญเสียต่อหน่วยในแกน z คือ

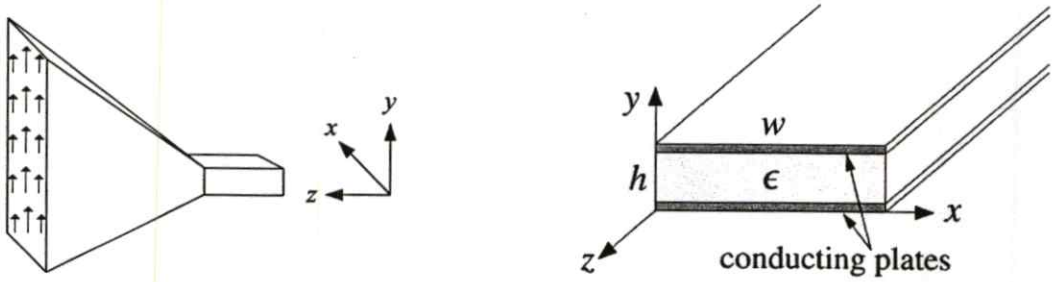
$$P'_{loss} = \frac{1}{2} R_s |H_x|^2 w = \frac{1}{w} R_s I^2 \quad (2.23)$$

ได้ค่าความต้านทานต่อหน่วยจะได้ $R' = 2R_s / w$ แล้วค่าการสูญเสียจากตัวนำจะเป็น

$$\alpha_c = \frac{P'_{loss}}{2P_T} = \frac{R'}{2Z} = \frac{R_s}{wZ} = \frac{R_s}{h\eta} \quad (2.24)$$

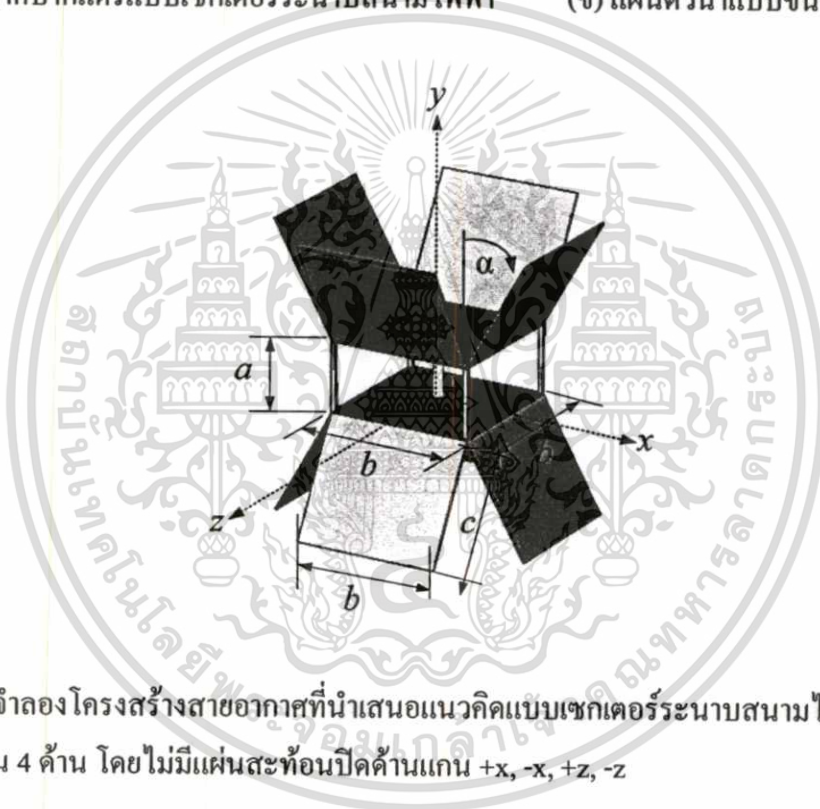
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 แนวคิดการประยุกต์จำลองออกแบบสายอากาศ



(ก) สายอากาศปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) แผ่นตัวนำแบบขนาน



(ค) แบบจำลองโครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอแนวคิดแบบเซกเตอร์ระนาบสนามไฟฟ้าวางเรียงต่อกัน 4 ด้าน โดยไม่มีแผ่นสะท้อนปิดด้านแกน $+x, -x, +z, -z$

รูปที่ 2.16 แนวคิดการประยุกต์จำลองออกแบบสายอากาศ

จากรูปที่ 2.16 (ก) เราจะอาศัยลักษณะการเดินทางของคลื่นแบบโพราไรเซชันแนวตั้งจากสายอากาศปากแตรแบบเซกเตอร์ในระนาบสนามไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ รูปที่ 2.16 (ข) นำโครงสร้างแผ่นตัวนำแบบขนานศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะด้านอิมพีแดนซ์ และรูป 2.16 (ค) คือแนวคิดการประยุกต์จำลองออกแบบสายอากาศสำหรับงานวิจัยนี้ โดยสังเกตว่าโครงสร้างจะไม่มีแผ่นช่องเปิดด้านข้างเลย เพราะเราต้องการแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว จากนั้นจะเริ่มทำการจำลองโครงสร้างสายอากาศเพื่อวิเคราะห์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วิวัฒนาการโครงสร้างสายอากาศ (Antenna Evolution)

กำหนดเงื่อนไขจำลองสายอากาศให้ทำงานครอบคลุมย่านความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ สำหรับโครงข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11b/g/n ซึ่งการวิเคราะห์จะจำลองเลือกช่วงความถี่ตั้งแต่ 1-4 กิกะเฮิรตซ์ (ค่าเริ่มต้น) จากนั้นจำลองโครงสร้างด้วยวัสดุทองเหลือง (ความนำไฟฟ้ามีค่า $\sigma = 1.57 \times 10^7$ S/m) [19] เนื่องจากเป็นวัสดุที่ราคาถูก และแข็งแรงเหมาะที่จะใช้สร้างโครงสร้างสายอากาศได้จริง โดยกำหนดใช้ขนาดของวัสดุทองเหลืองที่มีทั่วไปในท้องตลาดจำลองเป็นโครงสร้างสายอากาศสำหรับการวิเคราะห์ ทั้งนี้จะกำหนดค่าเริ่มต้นดังนี้ แผ่นกราวด์ b แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 80×80 ตารางมิลลิเมตรหนา 1 มิลลิเมตร เพราะต้องการโครงสร้างที่น้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรง กำหนดให้โพรบ l มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ส่วนความยาวโพรบหาจากสมการดังต่อไปนี้

$$\Delta f (\text{MHz}) = f_H - f_L \quad (2.25)$$

$$\Delta f (\%) = \frac{f_H - f_L}{f_c} \quad (2.26)$$

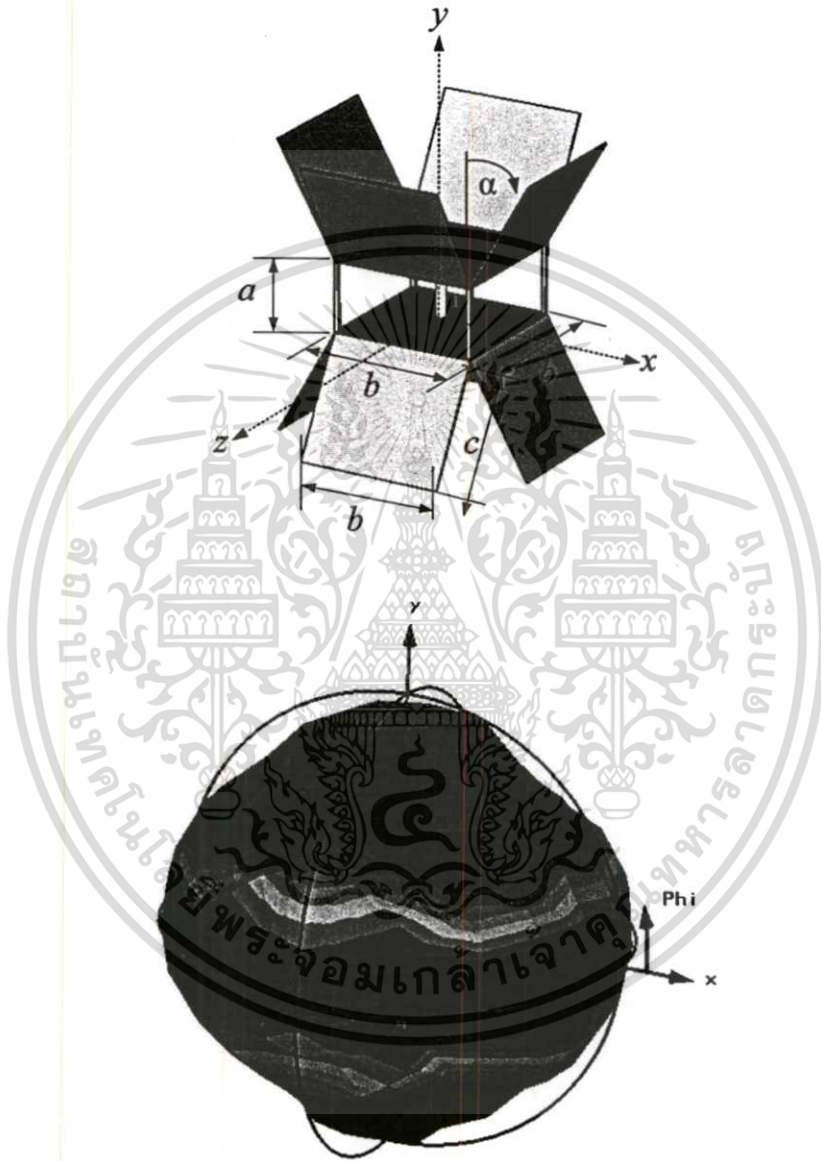
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.27)$$

$$l (\text{mm}) = \frac{\lambda}{4} \quad (2.28)$$

พิจารณารูปที่ 2.3 แสดงช่องสัญญาณความถี่สำหรับมาตรฐาน IEEE 802.11 ดังนั้นจากสมการที่ (2.25) กับ (2.26) ถ้ากำหนดความถี่ f_L เท่ากับ 2.410 กิกะเฮิรตซ์ ความถี่ f_H เท่ากับ 2.484 กิกะเฮิรตซ์ ความถี่ f_c เท่ากับ 2.450 กิกะเฮิรตซ์ จะได้แบนด์วิดธ์ประมาณ 74 MHz หรือประมาณ 3% ของย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 และสามารถหาความยาวคลื่นได้จากสมการที่ (2.27) จากนั้นถ้าเลือกช่วงความถี่กลางเท่ากับ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ จะได้ความยาวโพรบจากสมการที่ (2.28) ค่า 30.6 มิลลิเมตร ดังนั้นใช้ความยาวโพรบที่ 30.6 มิลลิเมตร สำหรับทุกวิวัฒนาการของสายอากาศ ซึ่งงานวิจัยนี้จำลองสายอากาศขึ้นมา 4 แบบ ได้แก่ สายอากาศโพรบบนแผ่นกราวด์ สายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนาน สายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมช่องเปิด 2 ด้าน และสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมช่องเปิด 4 ด้าน โดยจะจำลองช่วงความถี่ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1, 2, 3, 4 กิกะเฮิร์ตซ์ เพราะต้องการวิเคราะห์แบบหยาบเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะของสายอากาศ และจำลองช่วงความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ เพราะเป็นย่านความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งทุกวิวัฒนาการของสายอากาศการจำลองจะศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศเบื้องต้น ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าการสูญเสียย้อนกลับ และค่าอัตราขยายของสายอากาศ



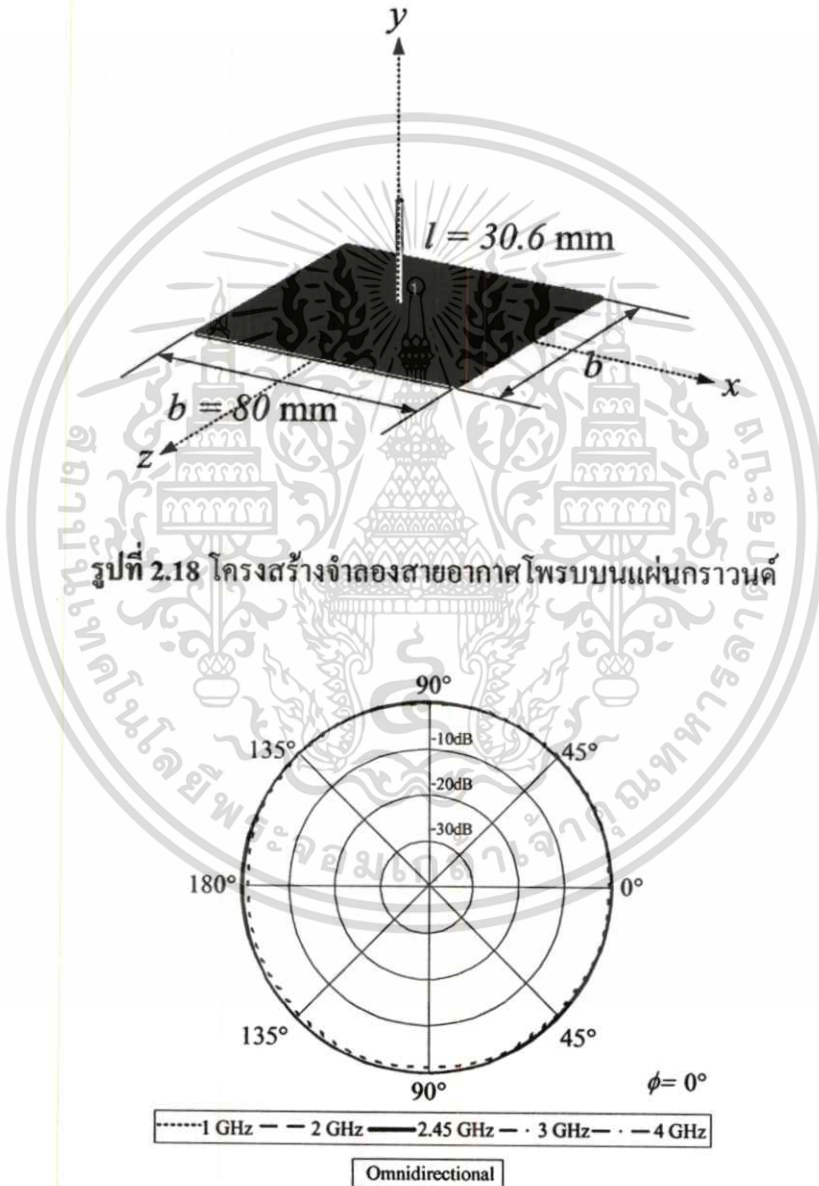
รูปที่ 2.17 ตัวอย่าง โครงสร้างจำลองสายอากาศแบบ 3มิติ สำหรับงานวิจัยนี้

จากรูปที่ 2.17 เมื่ออ้างอิงแกนจากทฤษฎีสายอากาศปากแตรแบบเซกเตอร์ในระนาบสนามไฟฟ้า เราสามารถกำหนดเงื่อนไขเพื่อจำลองสายอากาศให้ทำงานด้วยโครงสร้างแกนดังนี้ คือ จำลองให้โพรบวางตั้งฉากกับแกน x ซึ่งไปทิศทางแกน y กำหนดให้ทิศทางที่แพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กคือแกน XZ -plane โดยให้ $\phi=0$ องศา และกำหนดทิศทางที่แพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าคือแกน YZ -plane โดยให้ $\phi=90$ องศา เพื่อใช้สำหรับงานวิจัยนี้ต่อไป

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 โพรบบนแผ่นกราวนด์ (Probe on the Ground Plate)

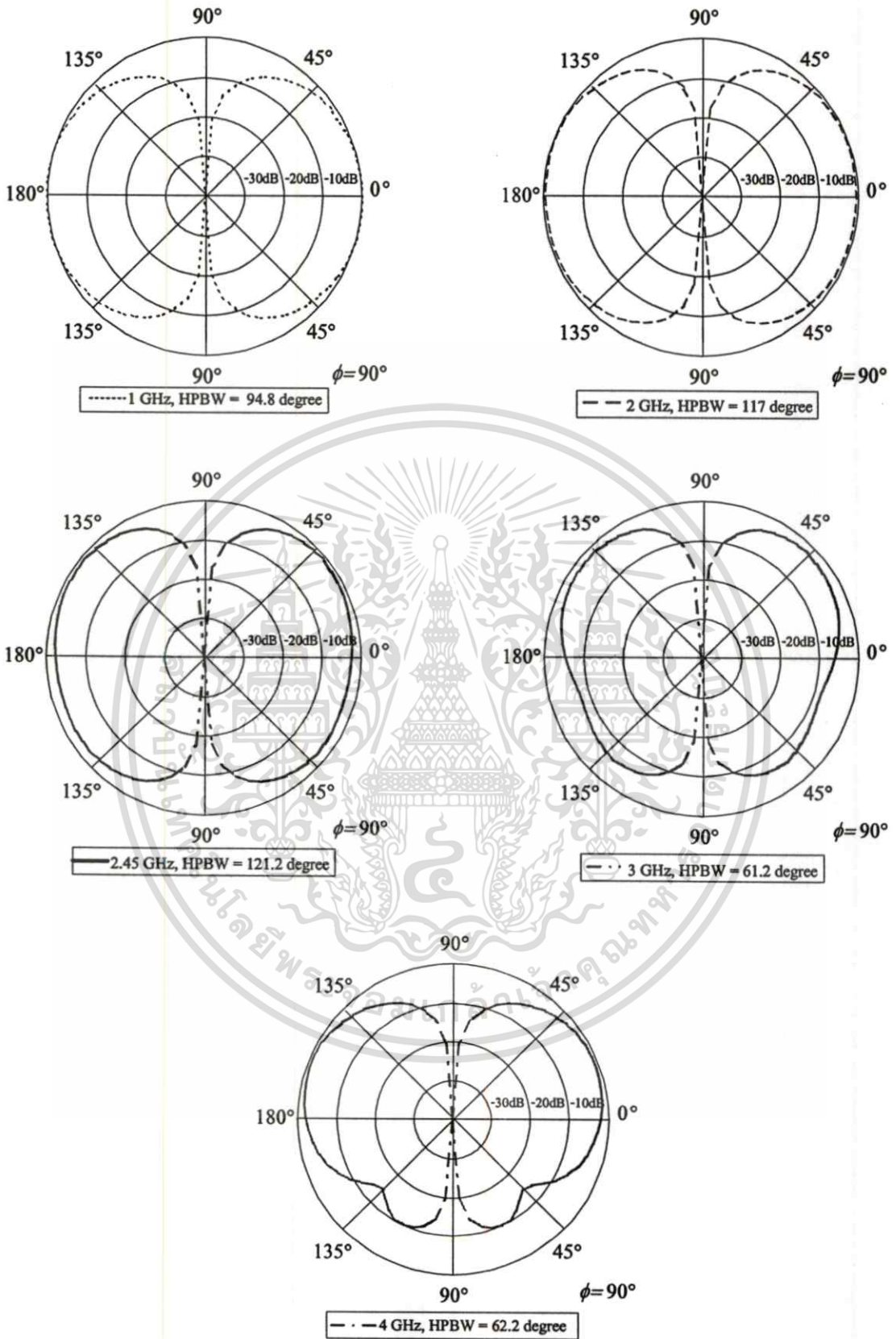
เริ่มจากการจำลองนำตัวโพรบมาวางบนแผ่นกราวนด์ที่มีขนาดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส เพราะต้องการให้แพร่กระจายคลื่นออกไปทุกทิศทางอย่างสมมาตรกัน แล้วทำการศึกษาค่าคุณลักษณะสายอากาศจากอิทธิพลของโครงสร้างสายอากาศระหว่างตัวโพรบกับแผ่นกราวนด์



รูปที่ 2.18 โครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นกราวนด์

รูปที่ 2.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ -plane ของสายอากาศโพรบบนแผ่นกราวนด์ที่ความถี่ 1, 2, 2.45, 3 และ 4 กิกะเฮิร์ตซ์ เท่ากับ 360 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane ของสายอากาศโพรบ

บนแผ่นกราวด์ที่ความถี่ 1, 2, 2.45, 3 และ 4 กิกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการศึกษาและการวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ใดได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

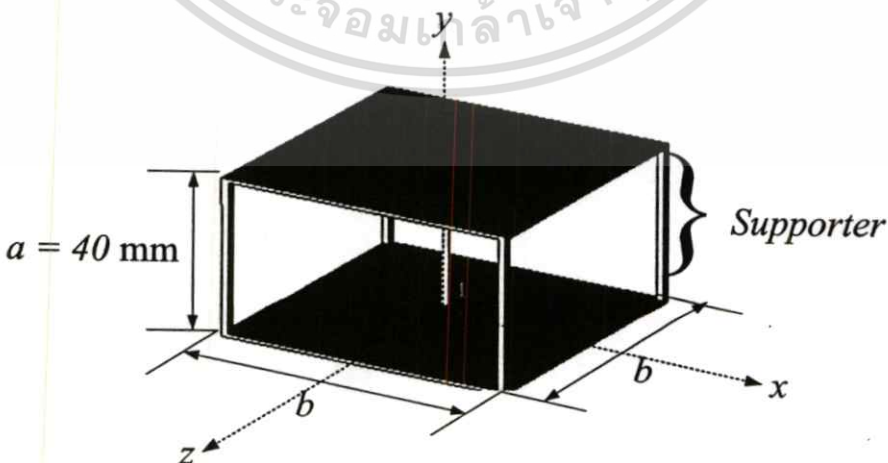
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศา ที่ความถี่ 3, 4 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ได้ประมาณ 120 องศา ถัดไปเมื่อพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับได้ต่ำสุดประมาณ -10 dB ที่ความถี่ 2.1 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ได้ประมาณ -6 dB และค่าอัตราขยายได้สูงสุดประมาณ 3.3 dBi ที่ความถี่ 3-3.5 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ได้ประมาณ 1.7 dBi

เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างสายอากาศโพรบบนแผ่นกราวด์ คือตัวโพรบทำหน้าที่ควบคุมแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแบบรอบตัวอย่างสมมาตรกัน และมีอิทธิพลต่ออัตราขยายของสายอากาศ ส่วนแผ่นกราวด์ก็มีอิทธิพลต่อแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า

2.4.2 โพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนาน (Probe with Parallel-Plate)

จากโครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นกราวด์ในหัวข้อที่ผ่านมา และจากทฤษฎีของสายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออกทางระนาบสนามไฟฟ้า (Sectoral E-Plane) เราจะใช้เป็นต้นแบบทดสอบ โดยเลือกจำลองนำแผ่นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสเท่ากับแผ่นกราวด์อีกแผ่นมาวางซ้อนด้านบนตัวโพรบซึ่งจะคล้ายลักษณะที่อนำคลื่น แต่จะไม่จำลองแผ่นผาผนังทุกด้านสำหรับแกน X, -X, Z, -Z เพราะงานวิจัยนี้ต้องการแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane และทางปฏิบัติโครงสร้างของสายอากาศต้องมีตัวซัพพอร์ต (Supporter) ไว้ค้ำระหว่างแผ่นวัสดุ ดังนั้นจะทำการจำลองตัวซัพพอร์ตเป็นค่าพารามิเตอร์ a โดยกำหนดให้เป็นแท่งตัวนำ (Conducting Supporter) และเป็นแท่งฉนวนหรือไดอิเล็กตริก (Dielectric Supporter) เพื่อศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างต่อค่าคุณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งการจำลองค่าพารามิเตอร์ a เป็นดังนี้

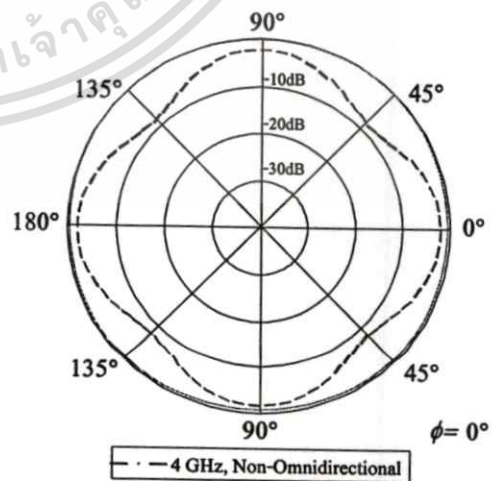
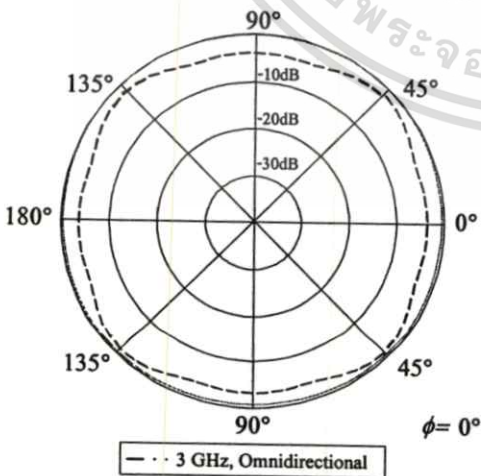
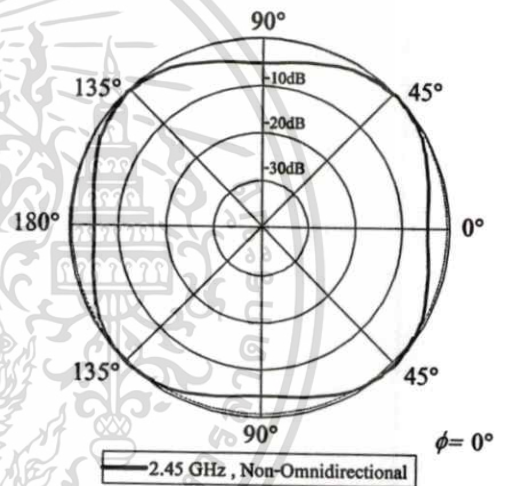
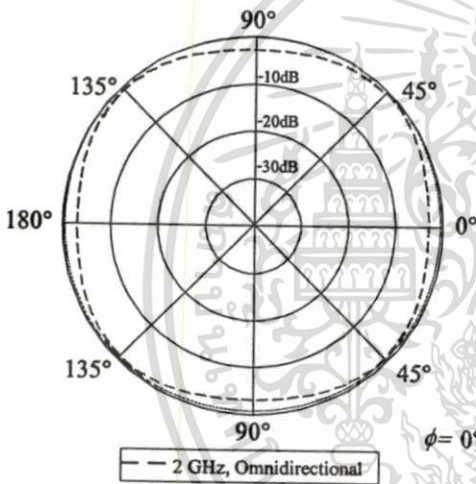
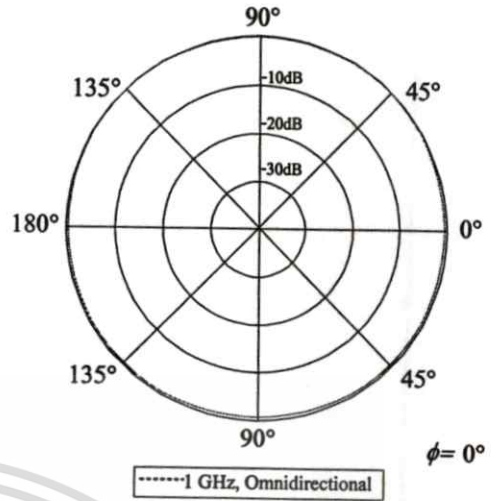
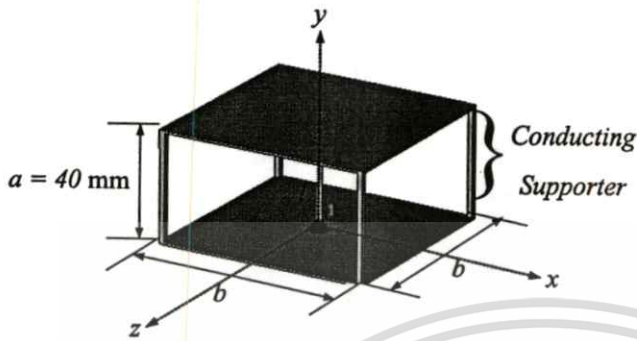


รูปที่ 2.23 โครงสร้างจำลองสายอากาศโดยให้ a เท่ากับแท่งตัวนำ (Conducting Supporter) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

a เท่ากับแท่งฉนวน (Dielectric Supporter)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

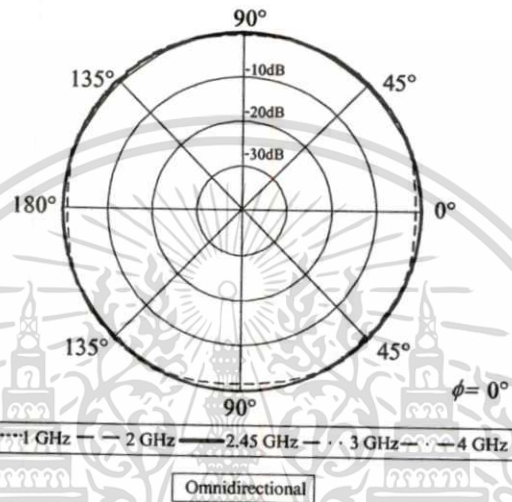
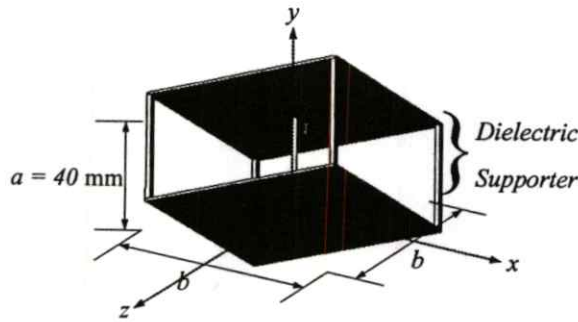


รูปที่ 2.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane ของสายอากาศโพรม

บนแผ่นตัวนำโดยให้ a เท่ากับแท่งตัวนำ (Conducting Supporter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

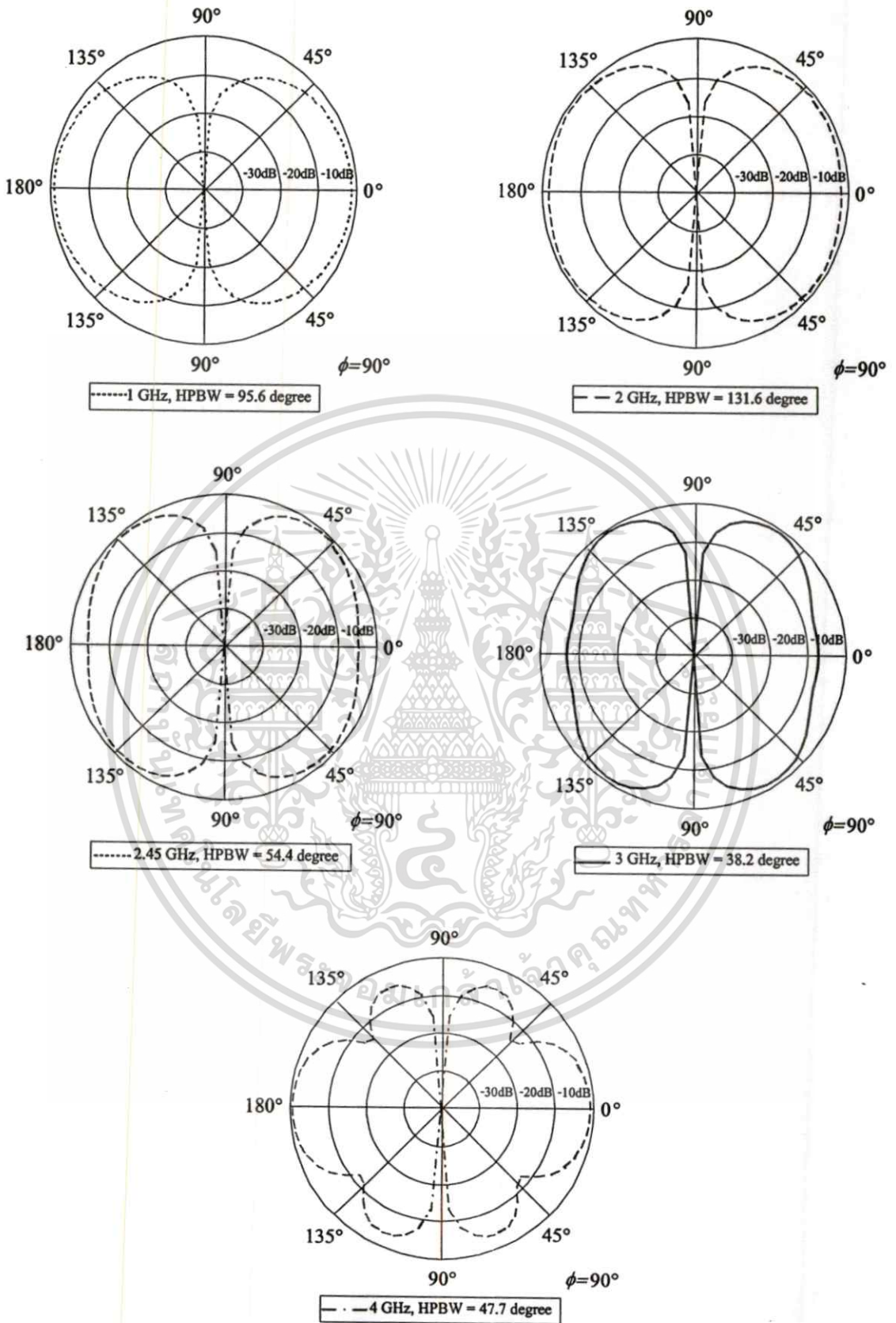


รูปที่ 2.25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane ของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำโดยให้ a เท่ากับแท่งฉนวน (Dielectric Supporter) ที่ความถี่ 1, 2, 2.45, 3 และ 4 กิกะเฮิรตซ์ เท่ากับ 360 องศา

จากรูปที่ 2.23 คือโครงสร้างจำลองสายอากาศโดยให้ a เท่ากับแท่งตัวนำ (Conducting Supporter) และ a เท่ากับแท่งฉนวน (Dielectric Supporter) ส่วนรูปที่ 2.24 คือผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane ของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำโดยให้ a เท่ากับแท่งตัวนำ (Conducting Supporter) ซึ่งพบว่าช่วงความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าประมาณ 50 องศา (แบบ Non-Omnidirectional Beam) ซึ่งไม่ตรงกับวัตถุประสงค์ในการวิจัยที่ต้องการใช้งานย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแบบรอบตัว (แบบ Omnidirectional Beam)

จากรูปที่ 2.25 คือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane ของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำโดยให้ a เท่ากับแท่งฉนวน (Dielectric Supporter) ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ เท่ากับ 360 องศา (แบบ Omnidirectional Beam) สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการวิจัย ดังนั้นในการวิเคราะห์ต่อไปจะจำลองโครงสร้างสายอากาศโดยให้ a เท่ากับแท่งฉนวน (Dielectric Supporter) ซึ่งเราสามารถเรียกได้ว่าเป็นโครงสร้างสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนาน (Probe with Parallel-Plate)

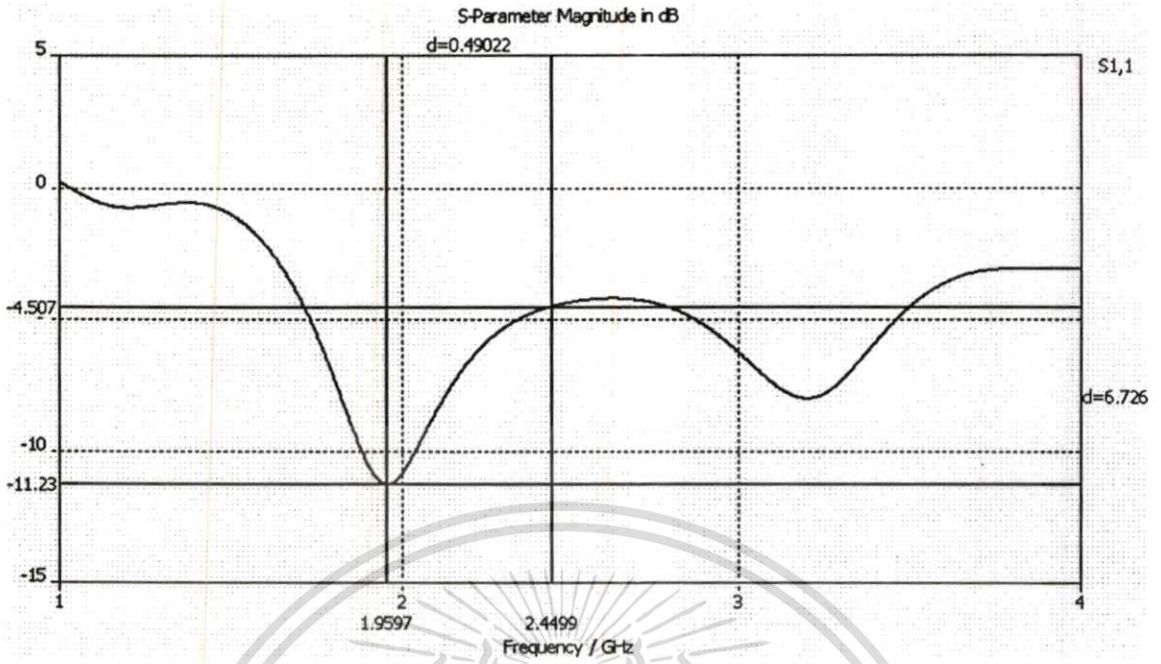
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



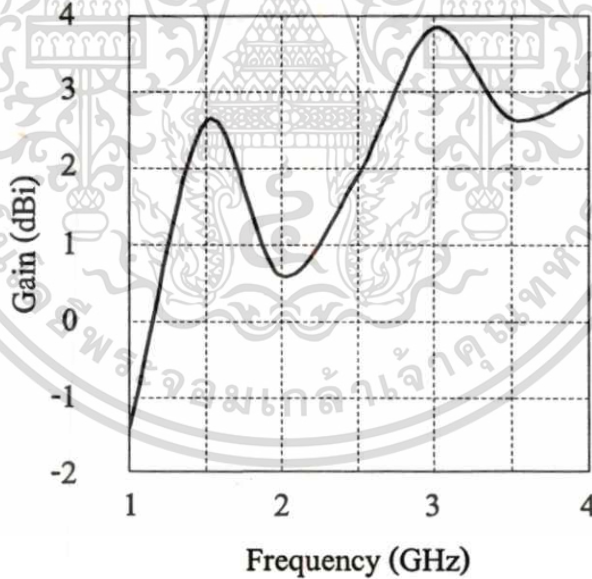
รูปที่ 2.26 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane ของสายอากาศโพรบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อใช้ในการเรียนการสอนและวิจัย ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนาน



รูปที่ 2.28 ค่าอัตราการขยายของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนาน

จากรูปที่ 2.25 คือโครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนาน โดยรูปที่ 2.25-2.28 แสดงผลการจำลองดังนี้ ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแบบรอบตัวทุกช่วงความถี่ (1, 2, 2.45, 3, 4 กิกะเฮิรตซ์) ส่วนในระนาบสนามไฟฟ้ามีค่าคลื่นแคบสุด

ประมาณ 40 องศา ที่ความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ได้ประมาณ 50 องศา ถัดไป

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

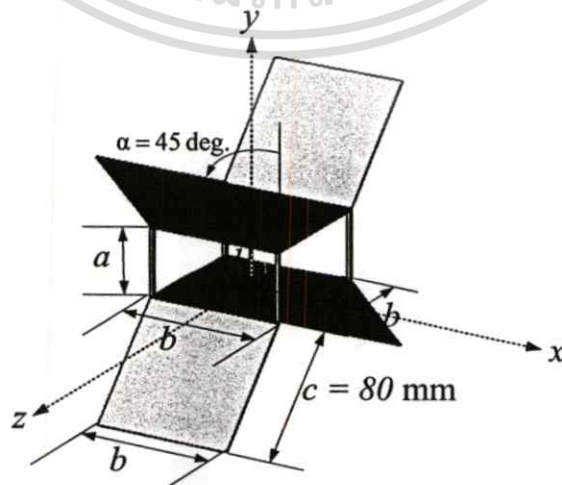
เมื่อพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับได้ต่ำสุดประมาณ -11 dB ที่ความถี่ 1.9 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ได้ประมาณ -4.5 dB และค่าอัตราขยายได้สูงสุดประมาณ 3.9 dBi ที่ความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ได้ประมาณ 1.9 dBi ทั้งนี้รูปที่ 2.25 คือ สายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำโดยให้ a เท่ากับแท่งฉนวน (Dielectric Supporter) ซึ่งเป็น โครงสร้างที่ใช้แผ่นตัวนำวางขนานกันโดยขนาดกว้างของยาวเท่ากันทั้งสองแผ่น แล้วจำลองใช้วัสดุเทฟลอน (Teflon PTFE Lossy) ที่เป็นฉนวนทำหน้าที่เป็นตัวซัพพอร์ต (a) หรือไดอิเล็กตริก 4 ชั้น สูงชั้นละ 40 มิลลิเมตร (ค่าเริ่มต้น) ค่าไว้

เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำ คือตัวโพรบทำหน้าที่ควบคุมแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแบบรอบตัวอย่างสมมาตรกัน และมีอิทธิพลต่ออัตราขยายของสายอากาศ ส่วนแผ่นวัสดุทั้งสองแผ่นทำหน้าที่เป็นแผ่นตัวนำแบบขนานซึ่งมีอิทธิพลต่อแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าให้ทำมุมแคบลงส่งผลให้ได้ค่าอัตราขยายของสายอากาศสูงขึ้น และจะใช้กับวิวัฒนาการของโครงสร้างสายอากาศถัดไป

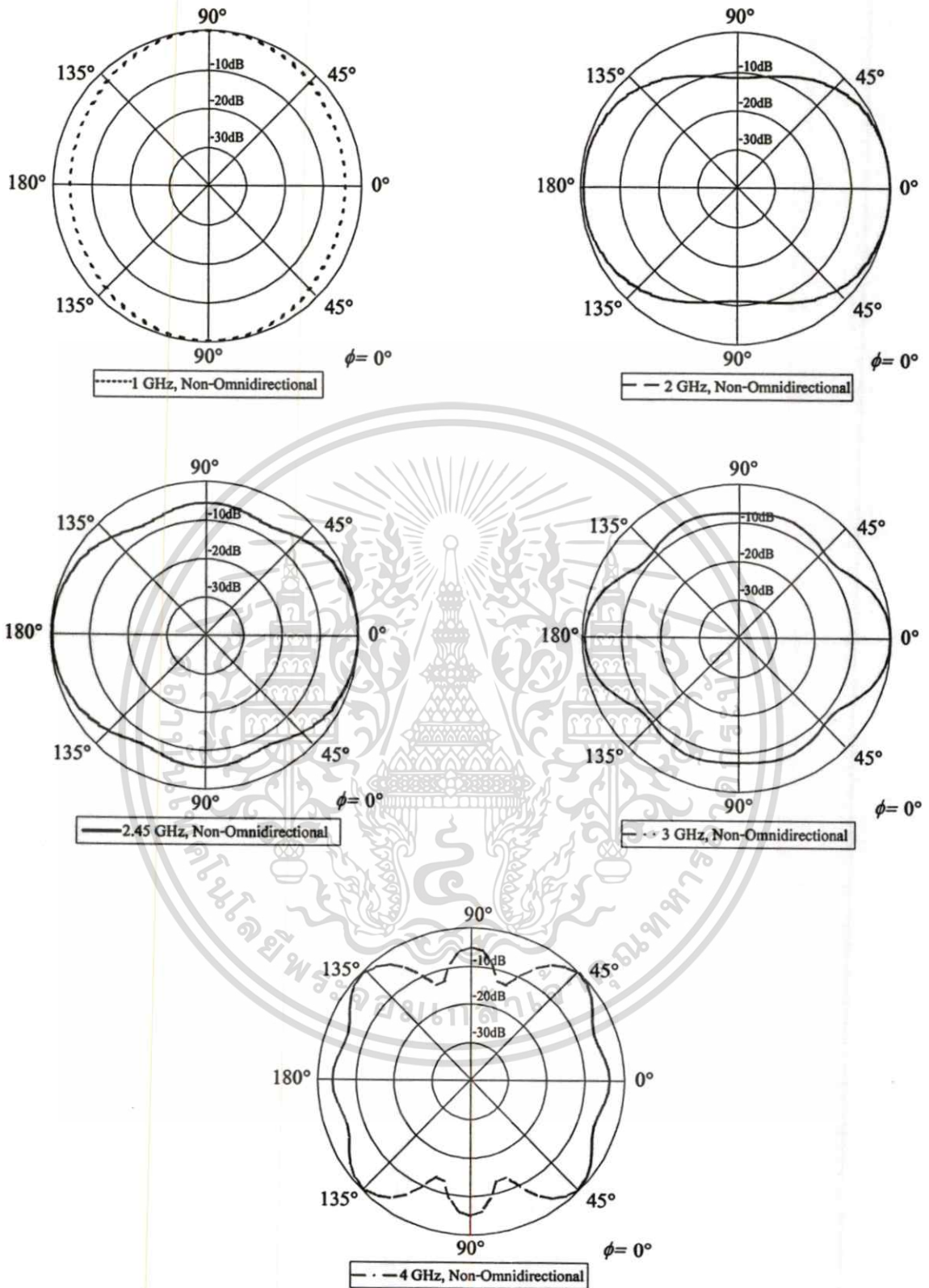
2.4.3 โพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 2 ด้าน

(Probe with Parallel-Plate and Two Apertures)

ทำการจำลองต่อโดยนำโครงสร้างสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานมาปรับแต่งโครงสร้าง โดยการเพิ่มแผ่นตัวนำทำมุม α ค่า 45 องศา (ค่าเริ่มต้น) กับแผ่นตัวนำแบบขนาน ทั้งด้านบนและด้านล่าง กำหนดเป็นขนาด c ค่า 80×80 ตารางมิลลิเมตร (ค่าเริ่มต้น) หนา 1 มิลลิเมตร (ค่าเริ่มต้น) ซึ่งจะคล้ายช่องปากแตร ทั้งนี้ได้จำลองใส่เพิ่มเป็นสองช่องดังรูปที่ 2.29 เพราะต้องการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่น เพื่อศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างต่อค่าคุณลักษณะของสายอากาศ ดังนี้

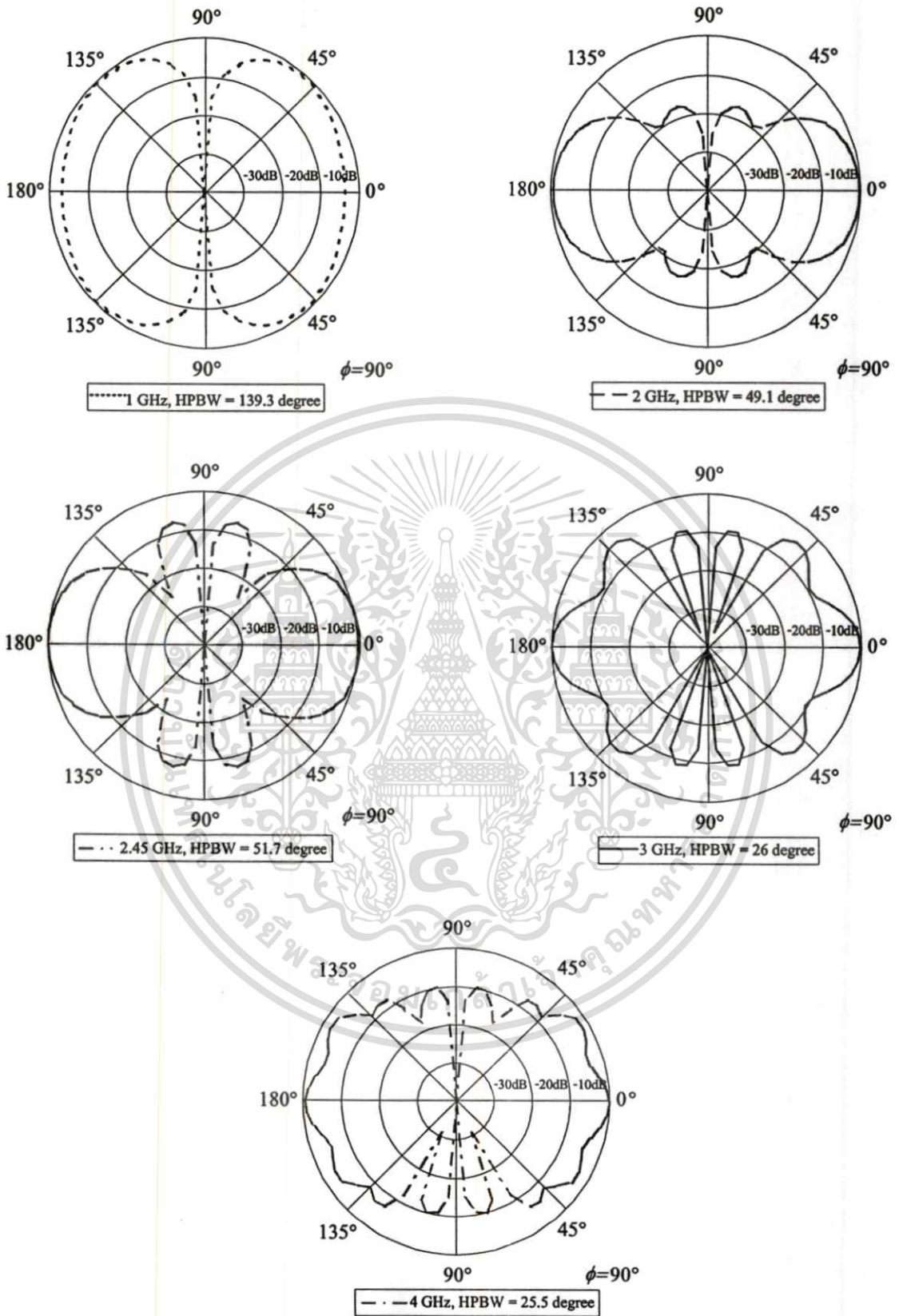


เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane ของสายอากาศโพรมบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแคต 2 ด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

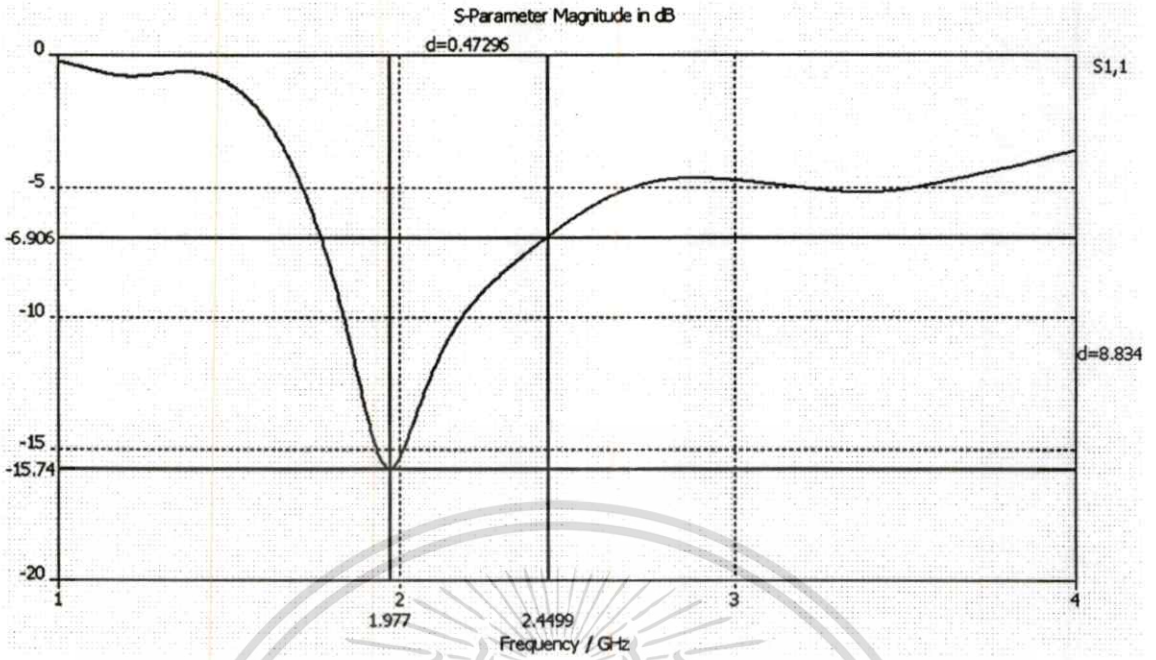


รูปที่ 2.31 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane ของสายอากาศโพรบ

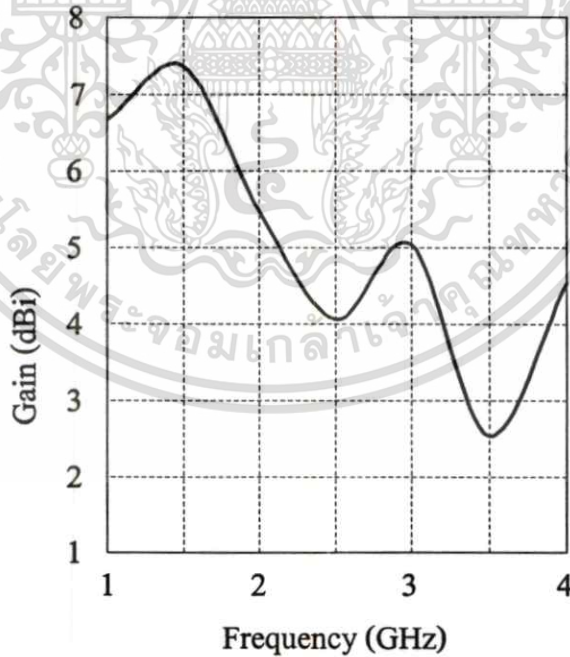
บนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 2 ด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.32 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนาน พร้อมปากแตร 2 ด้าน



รูปที่ 2.33 ค่าอัตราการขยายของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนาน พร้อมปากแตร 2 ด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

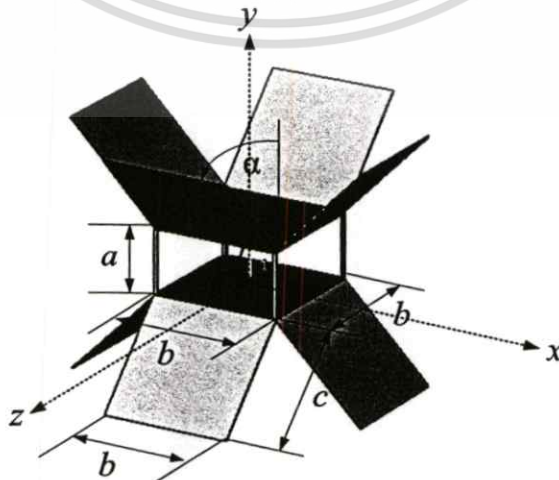
จากรูปที่ 2.29 คือ โครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 2 ด้าน โดยรูปที่ 2.30-2.33 แสดงผลการจำลองดังนี้ ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กทำมุมประมาณ 25-100 องศา หรือแบบไม่รอบตัว (แบบ Non-Omnidirectional Beam) ทุกช่วงความถี่ (1, 2, 2.45, 3, 4 กิกะเฮิรตซ์) ส่วนในระนาบสนามไฟฟ้ามีลวดคลื่นแคบสุดประมาณ 25 องศา ที่ความถี่ 4 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ได้ประมาณ 50 องศา ถัดไปเมื่อพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับได้ต่ำสุดประมาณ -16 dB ที่ความถี่ 1.98 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ได้ประมาณ -7 dB และค่าอัตราขยายได้สูงสุดประมาณ 7.3 dBi ที่ความถี่ 1.4 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ได้ประมาณ 4.1 dBi

เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 2 ด้าน คือ ตัวโพรบทำหน้าที่ควบคุมแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแบบรอบตัวอย่างสมมาตรกัน แต่ถูกโครงสร้างแผ่นปากแตรทั้ง 2 ด้าน บีบให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กกลายเป็นแบบไม่รอบตัวซึ่งไม่ตรงกับวัตถุประสงค์ในการวิจัย ส่วนโครงสร้างแผ่นปากแตรที่จำลองเพิ่มขึ้นมา 2 ด้าน นั้นจะมีอิทธิพลต่อแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าให้ทำมุมแคบลงยิ่งขึ้นส่งผลให้ได้ค่าอัตราขยายของสายอากาศสูงมากขึ้น

2.4.4 โพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน

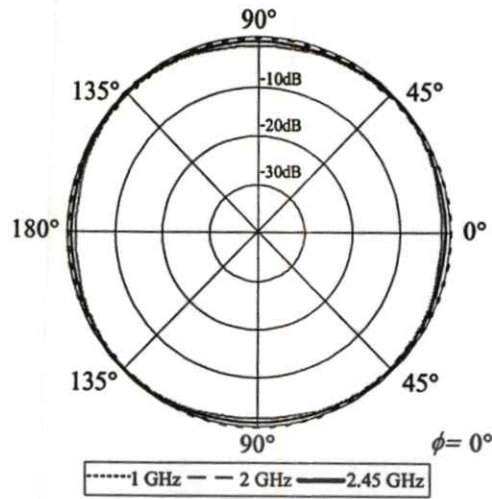
(Probe with Parallel-Plate and Four Apertures)

วิวัฒนาการสุดท้ายสำหรับการจำลองสายอากาศ คือนำโครงสร้างสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานมาปรับแต่ง โดยการเพิ่มแผ่นตัวนำเป็นสี่ช่องดังรูปที่ 2.34 เพื่อศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างต่อค่าคุณลักษณะของสายอากาศ ดังนี้

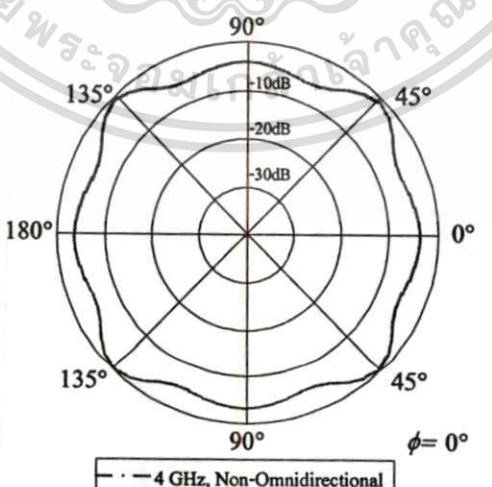
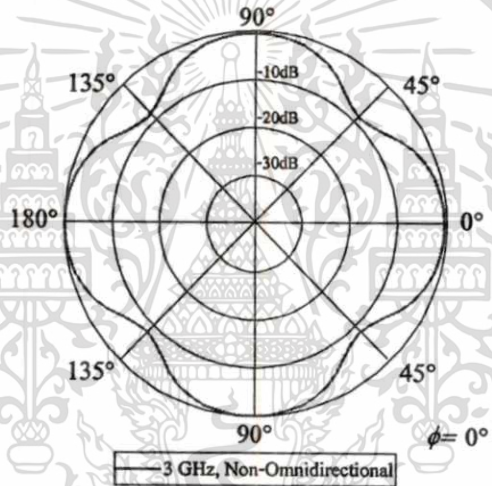


รูปที่ 2.34 โครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



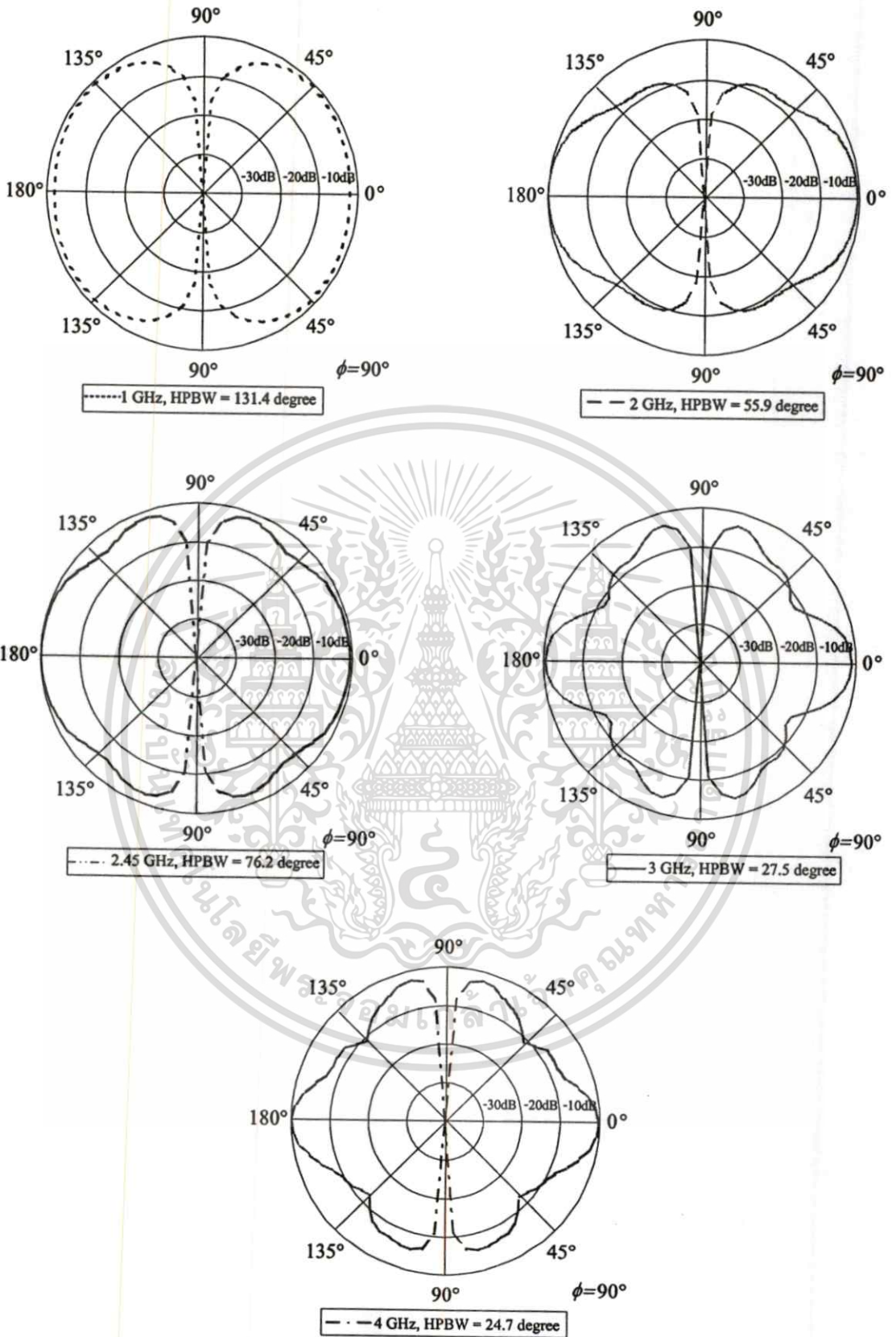
Omni-directional



รูปที่ 2.35 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane ของสายอากาศโพรบ

บนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในท้องถิ่นเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

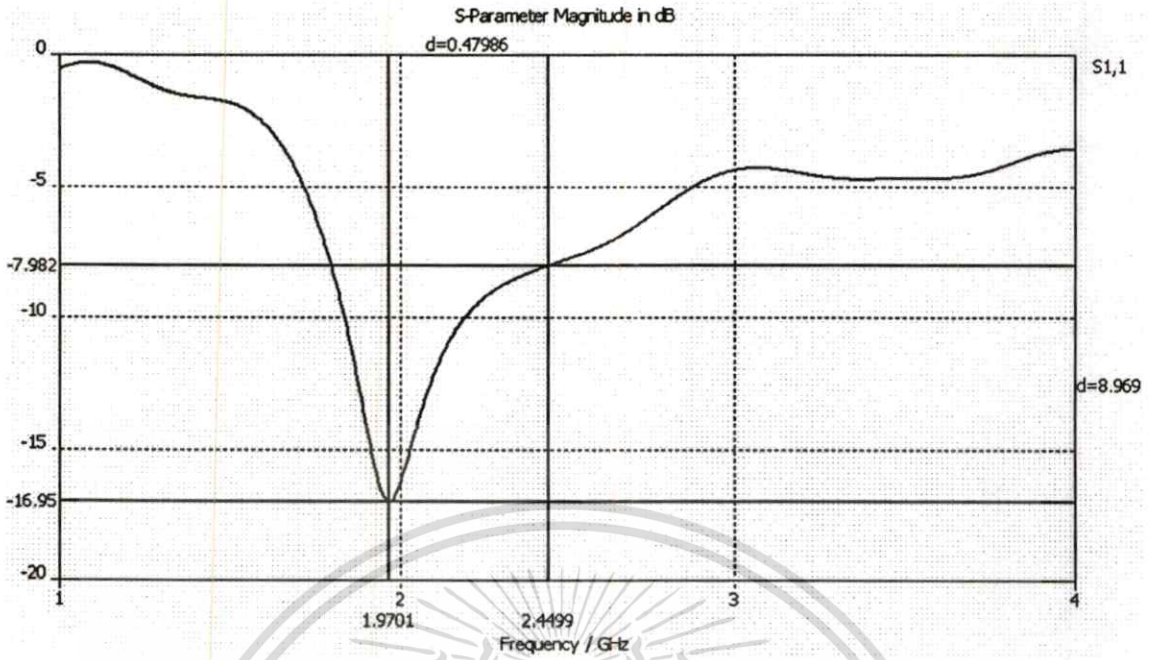


รูปที่ 2.36 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane ของสายอากาศโพรบ

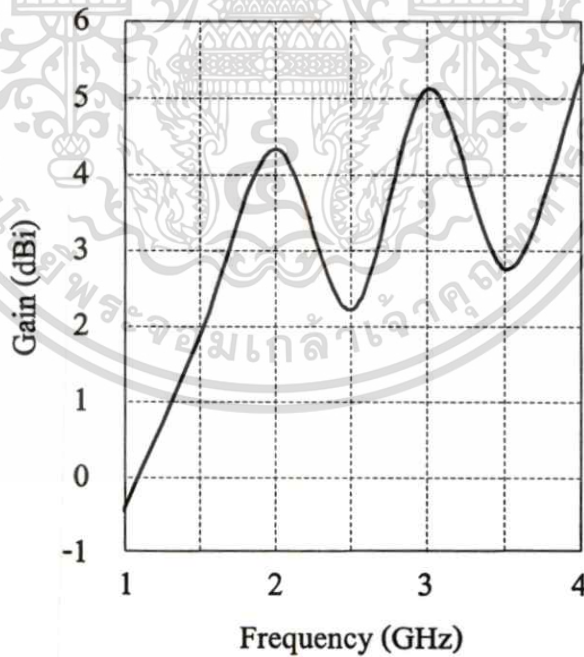
บนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแคบ 4 ด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.37 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนาน พร้อมปากแตร 4 ด้าน



รูปที่ 2.38 ค่าอัตราขยายของสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนาน พร้อมปากแตร 4 ด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.34 คือ โครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน โดยรูปที่ 2.35-2.38 แสดงผลการจำลองดังนี้ ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กทำมุมประมาณ 360 องศา หรือแบบรอบตัว (แบบ Omnidirectional Beam) ช่วงความถี่ (1, 2, 2.45 กิกะเฮิรตซ์) ส่วนในระนาบสนามไฟฟ้ามีลาคคลื่นแคบสุดประมาณ 25 องศา ที่ความถี่ 4 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ได้ประมาณ 75 องศา ถัดไปเมื่อพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับได้ต่ำสุดประมาณ -17 dB ที่ความถี่ 1.97 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ได้ประมาณ -8 dB และค่าอัตราขยายได้สูงสุดประมาณ 5.3 dBi ที่ความถี่ 4 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ได้ประมาณ 2.2 dBi

เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน คือ ตัวโพรบทำหน้าที่ควบคุมแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแบบรอบตัวอย่างสมมาตรกัน ซึ่งโครงสร้างแผ่นปากแตรทั้ง 4 ด้าน ช่วยบีบให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กกลายเป็นแบบรอบตัวซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการวิจัย ทั้งนี้โครงสร้างแผ่นปากแตรที่จำลองเพิ่มขึ้นมา 4 ด้าน ยังมีอิทธิพลต่อแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าให้มีลาคคลื่นแคบลง แต่ส่งผลให้ค่าอัตราขยายของสายอากาศลดลงบ้าง เพราะเกิดจากการแพร่กระจายของคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นแทน

2.5 บทสรุป

ในบทนี้มีวัตถุประสงค์ของการศึกษา คือการออกแบบสายอากาศย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางเพื่อใช้งานแบบจุดต่อหลายจุดซึ่งจะสอดคล้องกับระยะทาง และค่าวิสัยสามารถ สำหรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์สถานีฐานกับเครื่องลูกข่ายไร้สาย ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 โดยทำการพิจารณาวิวัฒนาการของสายอากาศจำลองทั้งสี่แบบได้แก่ โครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นกราวด์ โครงสร้างสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนาน โครงสร้างสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 2 ด้าน และโครงสร้างสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน โดยผลการจำลองทั้งสี่แบบทำให้ทราบว่าพารามิเตอร์โพรบทำหน้าที่ควบคุมแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก ส่วนพารามิเตอร์แผ่นตัวนำแบบขนานทำหน้าที่ควบคุมแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า และอัตราขยายของสายอากาศได้

ต่อมาเมื่อสังเกตผลการจำลองจากค่าคุณลักษณะของสายอากาศเบื้องต้น ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าการสูญเสียย้อนกลับ และค่าอัตราขยายของสายอากาศ จะพบว่าโครงสร้างสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ สามารถให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแบบรอบตัว (แบบ

Omnidirectional Beam) มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ให้ลำคลื่นแคบยอมรับได้ แต่ค่าการสูญเสียย้อนกลับ และค่าอัตราการขยายของสายอากาศ ยังไม่ผ่านเกณฑ์ของค่าคุณลักษณะของสายอากาศที่ใช้ในทางปฏิบัติได้ (ค่าการสูญเสียย้อนกลับยิ่งต่ำยิ่งดี เพราะจะทำให้เกิดค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าแมตซ์ซึ่งมีค่าใกล้เคียงสายนำสัญญาณ 50 โอห์ม ส่วนค่าอัตราการขยายของสายอากาศยิ่งสูงยิ่งดี เพราะจะทำให้สามารถแพร่กระจายคลื่นเพื่อรับส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลมากขึ้น) ดังนั้นในบทความนี้จะทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศให้ดียิ่งขึ้นเพื่อให้ผ่านเกณฑ์ของค่าคุณลักษณะของสายอากาศเพื่อใช้ในทางปฏิบัติได้



บทที่ 3

การวิเคราะห์ และผลการวิเคราะห์

3.1 บทนำ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ และผลการวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดสำหรับแพร์กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง โดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO [14] จำลองโครงสร้างสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน จากบทที่ 2 ที่กล่าวไปแล้ว ซึ่งบทนี้จะพิจารณาคูณลักษณะเบื้องต้นที่สำคัญ ดังนี้

- ด้านเอาต์พุตของสายอากาศ ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น
- ด้านอินพุตของสายอากาศ ได้แก่ ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า และค่าการสูญเสียย้อนกลับ
- ด้านประสิทธิภาพของสายอากาศ ได้แก่ ค่าอัตราขยาย

3.2 โครงสร้างสายอากาศ (Antenna Structure)

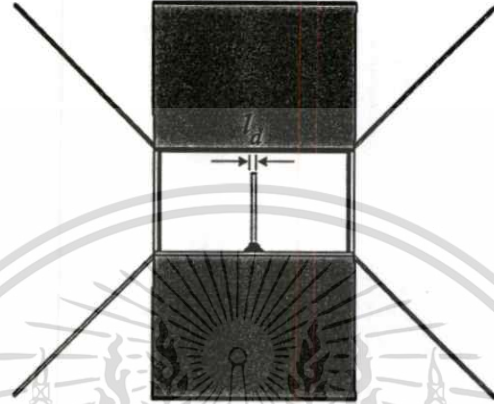
จากการพิจารณาวิวัฒนาการ โครงสร้างสายอากาศเริ่มต้นทำให้ทราบว่าโครงสร้างแต่ละแบบสามารถช่วยกำหนดคุณลักษณะของสายอากาศได้ คือ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าการสูญเสียย้อนกลับ และค่าอัตราขยาย แต่จากผลการจำลองทำให้ทราบว่าคุณลักษณะค่าการสูญเสียย้อนกลับของความถี่เรโซแนนซ์ ยังไม่ผ่านเกณฑ์ VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) ที่ต้องน้อยกว่า 2:1 (ค่าการสูญเสียย้อนกลับต้องต่ำกว่า -10 dB) ส่งผลกระทบให้ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าไม่แมตชิง หรือไม่มีค่าใกล้เคียงกับสายนำสัญญาณ 50 โอห์ม ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงขนาดพารามิเตอร์ต่างๆ ของโครงสร้างสายอากาศเพื่อหาค่าคุณลักษณะที่ผ่านเกณฑ์ และเหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ ซึ่งเรานำสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน มาจำลองช่วงความถี่ที่ 1, 2, 3, 4 กิกะเฮิรตซ์ เพราะต้องการวิเคราะห์แบบขยายเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะของสายอากาศ และศึกษาจำลองเพิ่มช่วงความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ เพราะเป็นย่านความถี่เรโซแนนซ์

จากรูปที่ 2.23 ทำการปรับปรุงโครงสร้างสายอากาศจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยเริ่มปรับแต่งพารามิเตอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบ (I_d) ความสูงของตัวซัพพอร์ต (a) ขนาดของแผ่นกราวด์ (b) ขนาดของแผ่นปากแตร (c) ค่ามุมองศาของแผ่นปากแตร (α) และความยาวของโพรบ (l) ดังต่อไปนี้

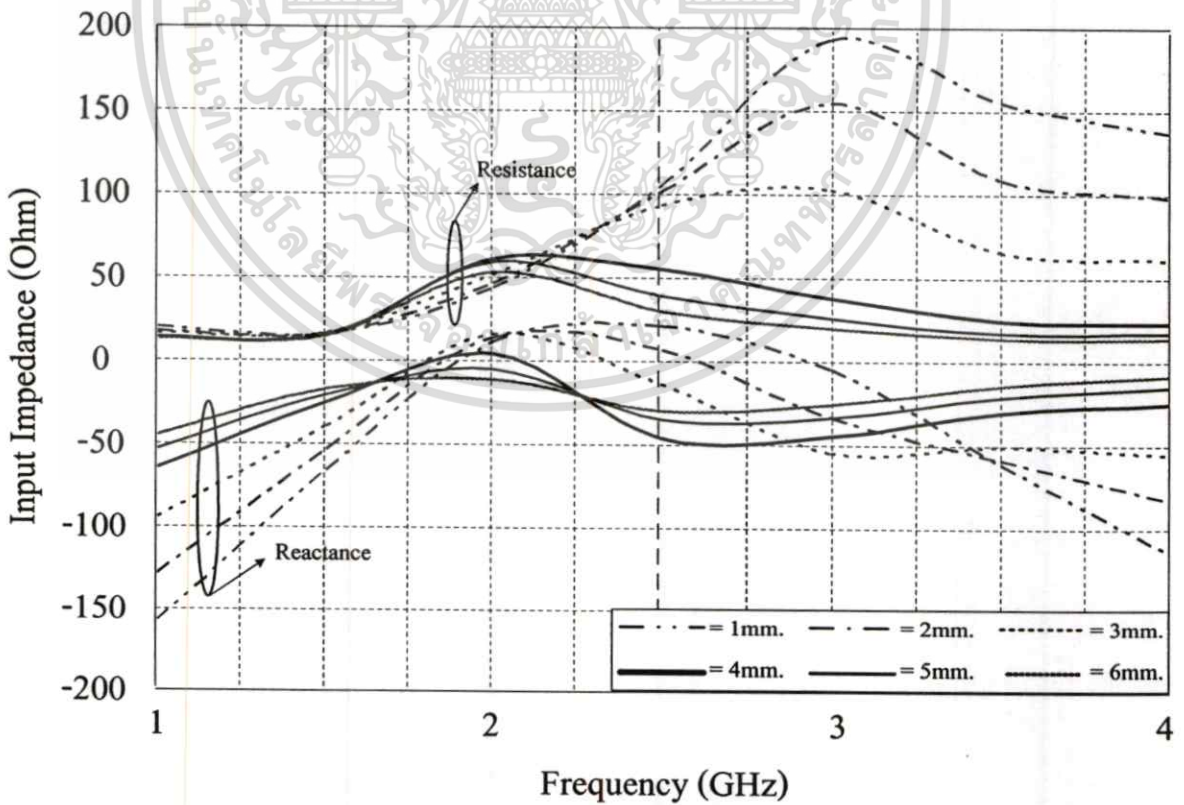
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 พารามิเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโพรบ (Diameter of Probe)

หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโพรบจากโครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน ดังรูปที่ 3.1

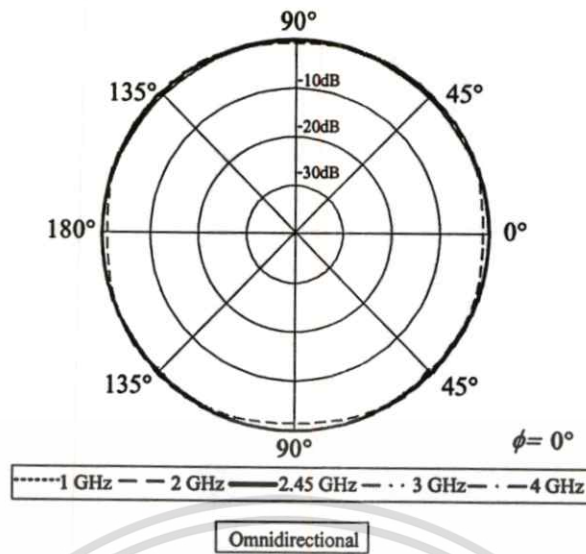


รูปที่ 3.1 ภาพตัดขวางสายอากาศจำลองเพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบ (l_d)



รูปที่ 3.2 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเมื่อเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบ (l_d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ได้โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane เมื่อเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบ (I_d) เท่ากับ 4 มิลลิเมตร

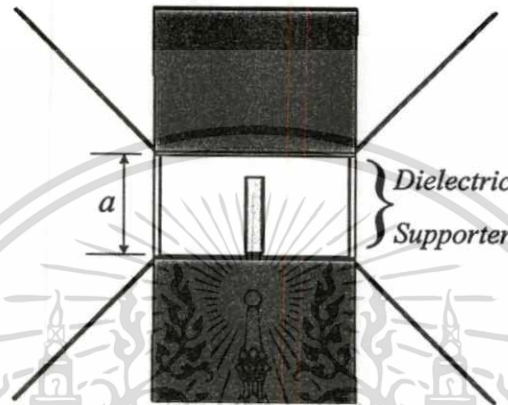
จากรูปที่ 3.1 แสดงภาพตัดขวางสายอากาศจำลองเพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบ (I_d) ซึ่งการจำลองนี้จะพิจารณาคูณลักษณะค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศต้องแมตซึ่งใกล้เคียงกับสายนำสัญญาณ 50 โอห์ม และค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก เพราะต้องการศึกษาอิทธิพลของตัวโพรบ

จากรูปที่ 3.2 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเมื่อเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบ (I_d) ซึ่งจำลองปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบตั้งแต่ขนาด 1-6 มิลลิเมตร เพราะเป็นขนาดที่ยังทำให้โพรบมีความแข็งแรงอยู่ถ้าเลือกใช้วัสดุอลูมิเนียม หรือทองเหลืองในทางปฏิบัติ โดยผลการจำลองเมื่อพิจารณาค่ารีซิสแตนซ์กับค่ารีแอกแตนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ จะพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบเท่ากับ 4 มิลลิเมตร (เส้นทึบเข้ม) และ 5 มิลลิเมตร (เส้นทึบจาง) มีความแมตซึ่งกับสายนำสัญญาณทั้งคู่ แต่ที่ขนาดเท่ากับ 4 มิลลิเมตร กราฟมีลักษณะคงที่ใกล้เคียงค่า 50 โอห์มมากกว่าขนาดอื่นๆ

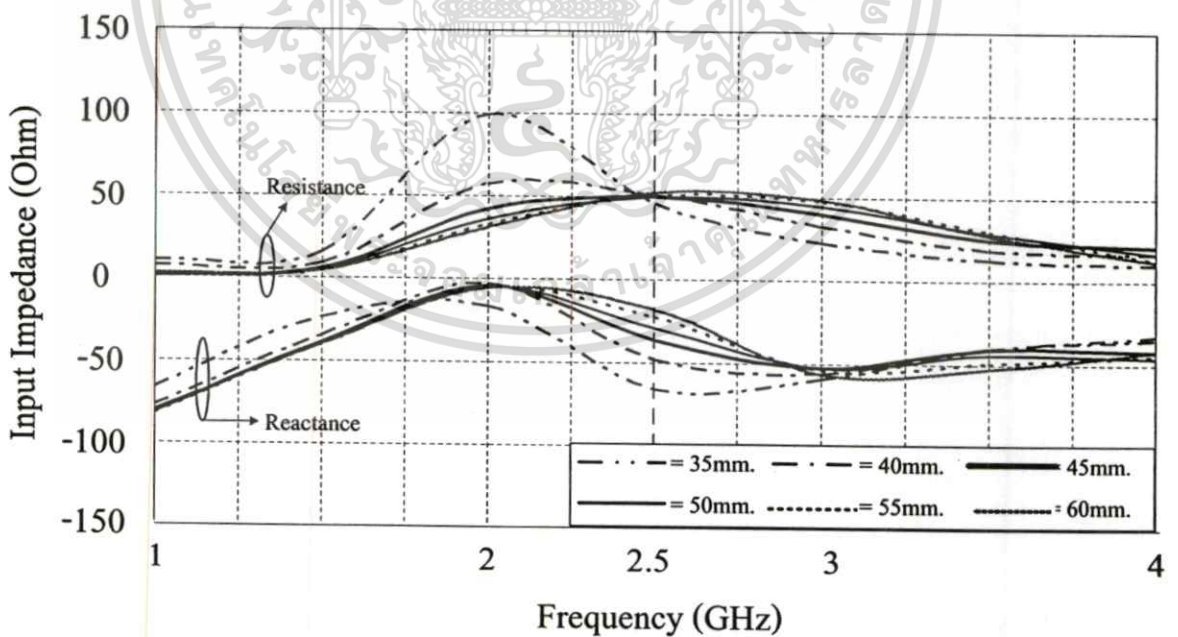
จากรูปที่ 3.3 แสดงค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane เมื่อเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบ (I_d) เท่ากับ 4 มิลลิเมตร โดยผลการจำลองเมื่อพิจารณาที่ความถี่เรโซแนนซ์จะได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแบบรอบตัว ดังนั้นตัดสินใจเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบ (I_d) เท่ากับ 4 มิลลิเมตร สำหรับโครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน เพื่อใช้วิเคราะห์การจำลองถัดไป

3.2.2 พารามิเตอร์ความสูงของตัวซัพพอร์ต (Height of Supporter)

หาระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำหรือความสูงของตัวซัพพอร์ตจากโครงสร้างจำลองสายอากาศ โพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน โดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบ (I_d) เท่ากับ 4 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.4

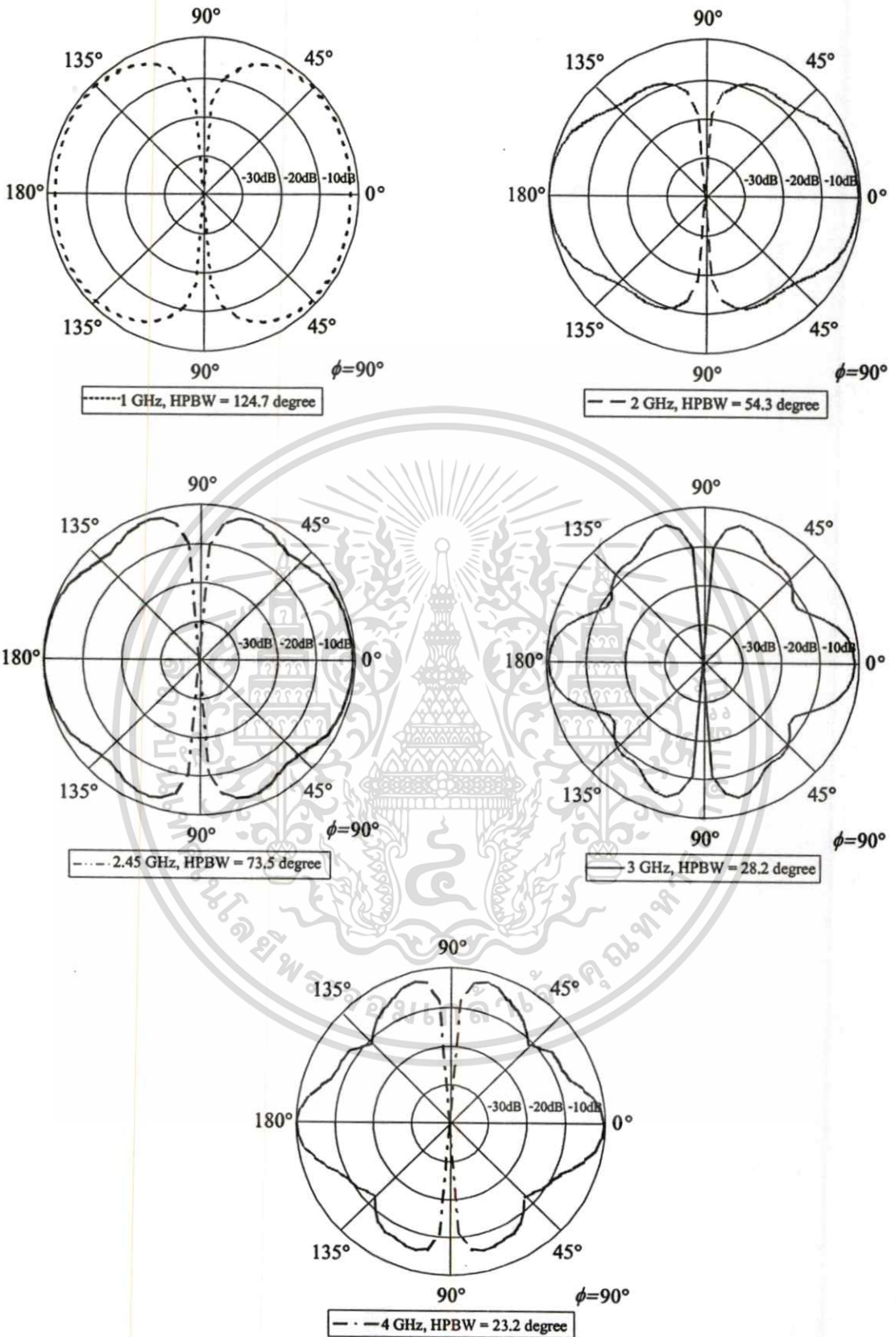


รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางสายอากาศจำลองเพื่อหาความสูงของตัวซัพพอร์ต (a)



รูปที่ 3.5 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเมื่อเปลี่ยนความสูงของตัวซัพพอร์ต (a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane เมื่อเปลี่ยนความสูงของ

ตัวขั้วพอร์ต (a) เท่ากับ 45 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเชิงพาณิชย์ที่ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

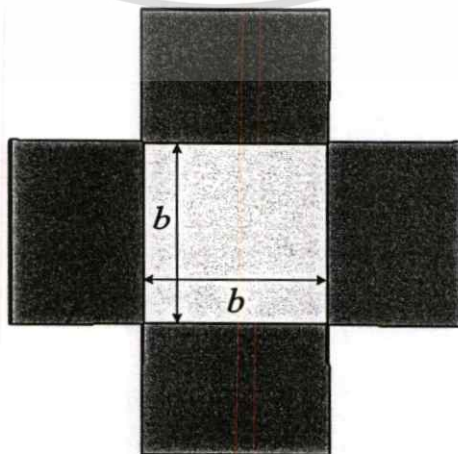
จากรูปที่ 3.4 แสดงภาพตัดขวางสายอากาศจำลอง เพื่อหาความสูงของตัวซัพพอร์ต (a) ซึ่งการจำลองนี้จะพิจารณาคูณลักษณะค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศต้องแมตชิงใกล้เคียงกับสายนำสัญญาณ 50 โอห์ม และค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า เพราะต้องการศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำจากทฤษฎีของสายอากาศปากแตร

จากรูปที่ 3.5 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า เมื่อเปลี่ยนความสูงของตัวซัพพอร์ต (a) ซึ่งจำลองปรับเปลี่ยนความสูงของตัวซัพพอร์ตตั้งแต่ความสูง 35-60 มิลลิเมตร (กำหนดความสูงน้อยกว่า 35 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 30 มิลลิเมตร ไม่ได้เพราะจะชนกับโพรบทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศไม่แมตชิงห่างไกลกับสายนำสัญญาณ และค่าการสูญเสียย้อนกลับไม่ผ่านเกณฑ์ VSWR 2:1) โดยผลการจำลองเมื่อพิจารณาค่าความต้านทานกับค่ารีแอกแตนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ จะพบว่าความสูงของตัวซัพพอร์ตเท่ากับ 45 มิลลิเมตร (เส้นทึบเข้ม) และ 50 มิลลิเมตร (เส้นทึบจาง) แมตชิงกับสายนำสัญญาณทั้งคู่ แต่ที่ขนาด 45 มิลลิเมตร กราฟมีลักษณะคงที่ใกล้เคียง 50 โอห์ม มากกว่า

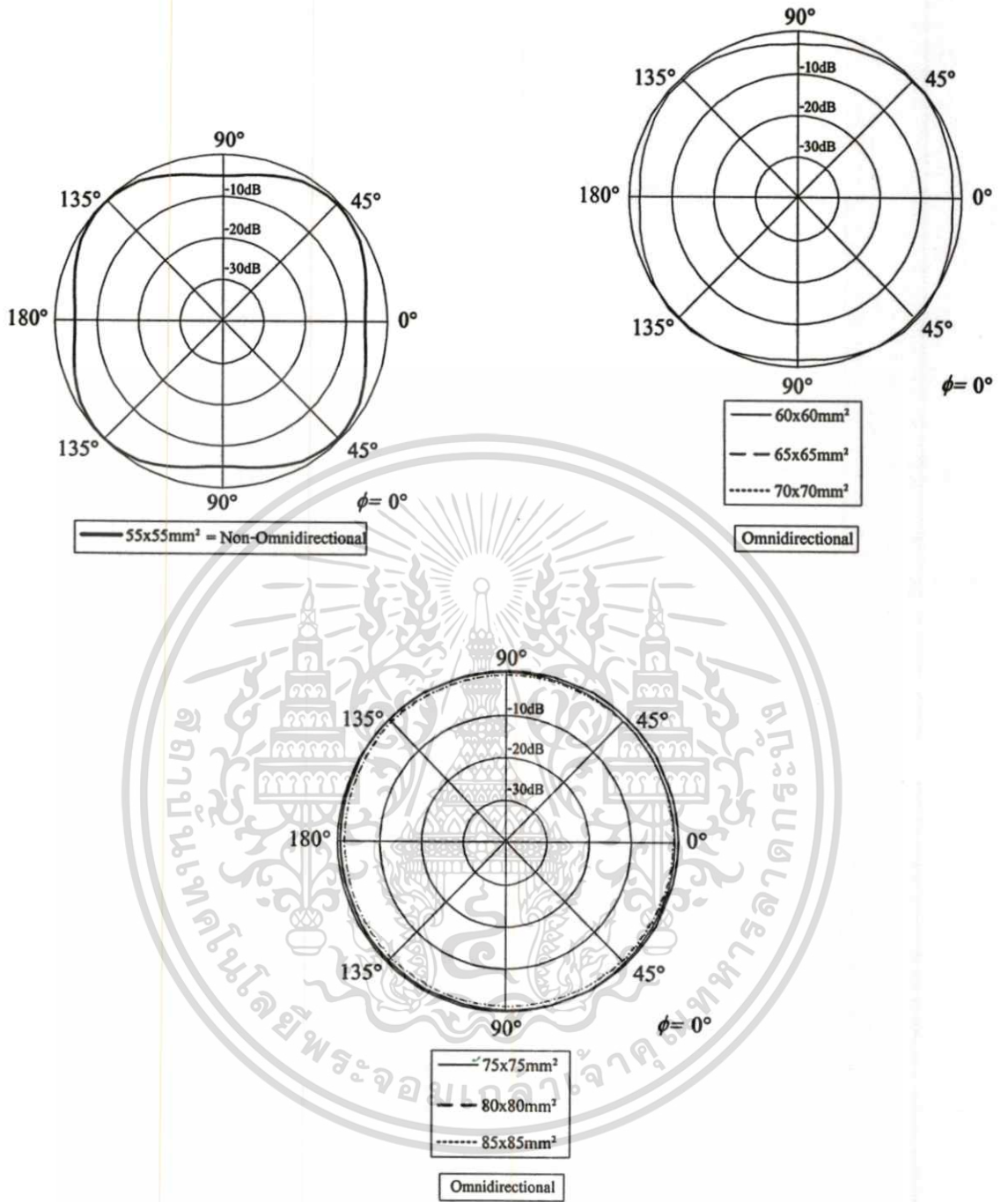
จากรูปที่ 3.6 แสดงค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane เมื่อเปลี่ยนความสูงของตัวซัพพอร์ต (a) เท่ากับ 45 มิลลิเมตร โดยผลการจำลองเมื่อพิจารณาที่ความถี่เรโซแนนซ์จะได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้ามีลำคลื่นแคบประมาณ 70 องศายอมรับได้ ดังนั้นตัดสินใจเลือกความสูงของตัวซัพพอร์ต (a) เท่ากับ 45 มิลลิเมตร สำหรับโครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน เพื่อใช้วิเคราะห์ต่อไป

3.2.3 พารามิเตอร์ขนาดแผ่นกราวนด์ (Dimension of Parallel Plates)

หาขนาดแผ่นกราวนด์จากโครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน โดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบ (I_d) เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และความสูงของตัวซัพพอร์ต (a) เท่ากับ 45 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.7

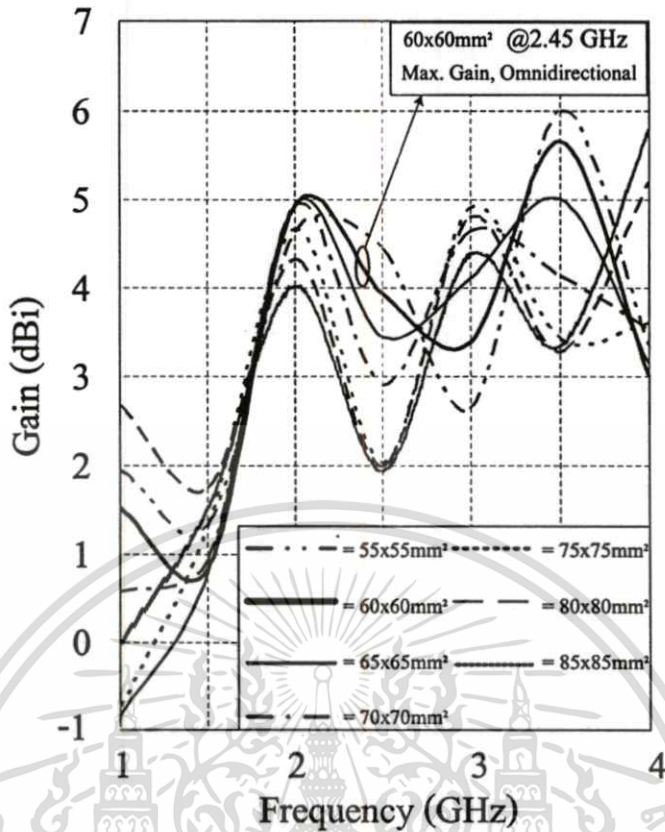


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.7 ภาพมุมมองด้านบนสายอากาศจำลองเพื่อหาขนาดของแผ่นกราวนด์ (b)
 ไม่ว่าจะตีพิมพ์ที่ไหน อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane เมื่อเปลี่ยนขนาดของแผ่นกราวด์ (b) ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ค่าอัตราขยายสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของแผ่นกราวนด์ (b)

จากรูปที่ 3.7 แสดงภาพมุมมองด้านบนบนสายอากาศจำลองเพื่อหาขนาดของแผ่นกราวนด์ (b) ซึ่งการจำลองนี้จะพิจารณาคุณลักษณะค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก และค่าอัตราขยายสายอากาศ เพราะต้องการศึกษาอิทธิพลของแผ่นตัวนำจากทฤษฎีของสายอากาศปากแตร

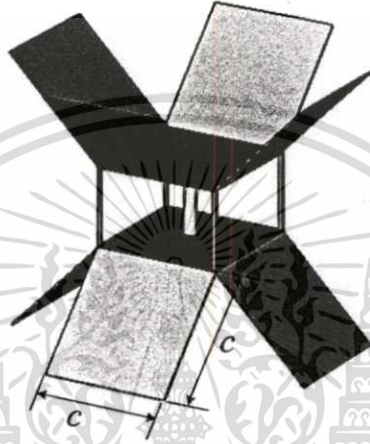
จากรูปที่ 3.8 แสดงค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane เมื่อเปลี่ยนขนาดแผ่นกราวนด์ (b) ด้วยขนาด 55×55, 60×60, 65×65, 70×70, 75×75, 80×80 และ 85×85 ตารางมิลลิเมตร โดยผลการจำลองเมื่อพิจารณาที่ความถี่เรโซแนนซ์จะได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแบบรอบตัวตั้งแต่ขนาด 60×60 ถึงขนาด 85×85 ตารางมิลลิเมตร สามารถใช้ได้ทุกขนาดยกเว้น 55×55 ตารางมิลลิเมตร (ไม่เป็นแบบรอบตัว)

จากรูปที่ 3.9 แสดงค่าอัตราขยายสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนขนาดของแผ่นกราวนด์ (b) ซึ่งจำลองปรับเปลี่ยนขนาดแผ่นกราวนด์ด้วยขนาด 55×55, 60×60, 65×65, 70×70, 75×75, 80×80 และ 85×85 ตารางมิลลิเมตร โดยผลการจำลองเมื่อพิจารณาที่ความถี่เรโซแนนซ์จะได้ขนาด 55×55 ตารางมิลลิเมตร ที่ได้ค่าอัตราขยายสายอากาศสูงสุดประมาณ 4.8 dBi มากกว่าขนาดอื่นๆ แต่เนื่องจากขนาด 55×55 ตารางมิลลิเมตร (เส้นขีดสั้นกับสองจุด) ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กไม่เป็นแบบรอบตัว (Non-Omnidirectional Beam) ดังนั้นตัดสินใจเลือกขนาดของแผ่นกราวนด์ (b) เท่ากับ 60×60 ตารางมิลลิเมตร (เส้นทึบเข้ม) ค่า 4.2 dBi สำหรับโครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน เพื่อใช้วิเคราะห์ต่อไป

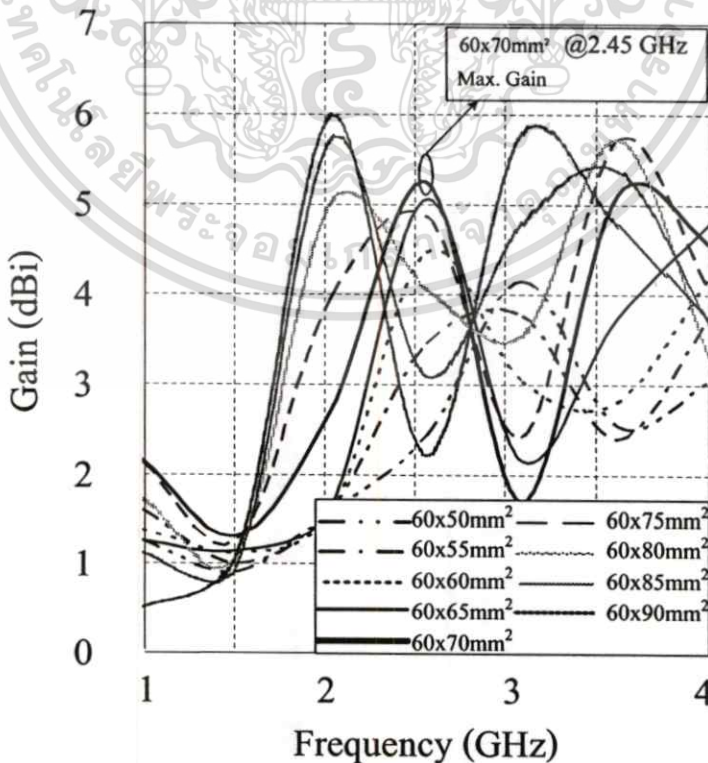
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 พารามิเตอร์ขนาดแผ่นปากแตร (Dimension of Flare Plates)

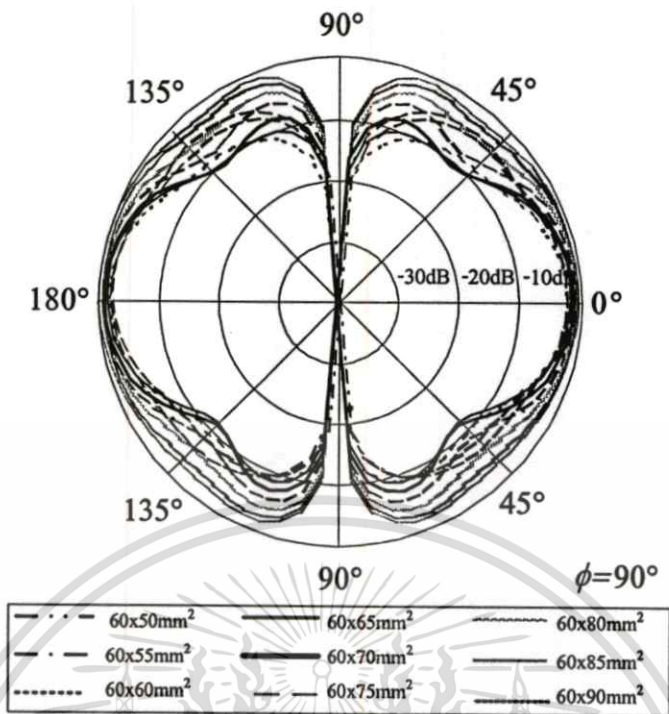
หาขนาดแผ่นปากแตรจากโครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน โดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบ (I_d) เท่ากับ 4 มิลลิเมตร ความสูงของตัวซัพพอร์ต (a) เท่ากับ 45 มิลลิเมตร และขนาดแผ่นกราวด์ (b) เท่ากับ 60×60 ตารางมิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ภาพมุมมองสายอากาศจำลองเพื่อหาขนาดของแผ่นปากแตร (c)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่นอนญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.11 ค่าอัตราขยายสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของแผ่นปากแตร (c)
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane เมื่อเปลี่ยนขนาดของแผ่นปากแตร (c) ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์

ตารางที่ 3.1 ค่าการจำลองความกว้างลำคลื่นที่มีกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane เมื่อเปลี่ยนขนาดของแผ่นปากแตร (c) ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์

ขนาดของแผ่นปากแตร (ตารางมิลลิเมตร)	ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (องศา)
60 × 50	85
60 × 55	49.5
60 × 60	46
60 × 65	46.7
60 × 70	49.8
60 × 75	57
60 × 80	70.4
60 × 85	118.4
60 × 90	152.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

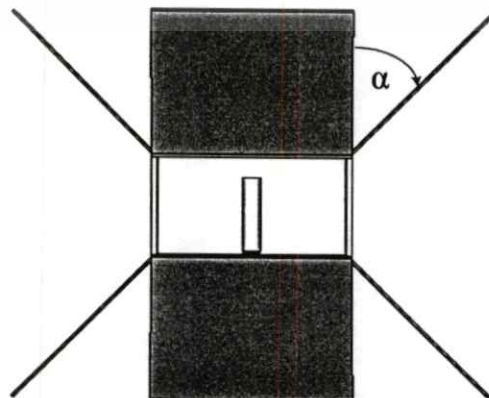
จากรูปที่ 3.10 แสดงภาพมุมมองสายอากาศจำลองเพื่อหาขนาดของแผ่นปากแตร (c) ซึ่งการจำลองนี้จะพิจารณาคุณลักษณะค่าอัตราขยายสายอากาศ เพราะต้องการศึกษาอิทธิพลของแผ่นตัวนำจากทฤษฎีของสายอากาศปากแตร และค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.11 แสดงค่าอัตราขยายสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนขนาดของแผ่นปากแตร (c) ซึ่งจำลองปรับเปลี่ยนขนาดแผ่นปากแตรด้วยขนาด 60×50 , 60×55 , 60×60 , 60×65 , 60×70 , 60×75 , 60×80 , 60×85 และ 60×90 ตารางมิลลิเมตร โดยผลการจำลองเมื่อพิจารณาที่ความถี่เรโซแนนซ์จะได้ขนาด 60×70 ตารางมิลลิเมตร (เส้นทึบเข้ม) ที่ได้ค่าอัตราขยายสายอากาศสูงสุดประมาณ 5.1 dBi มากกว่าขนาดอื่นๆ

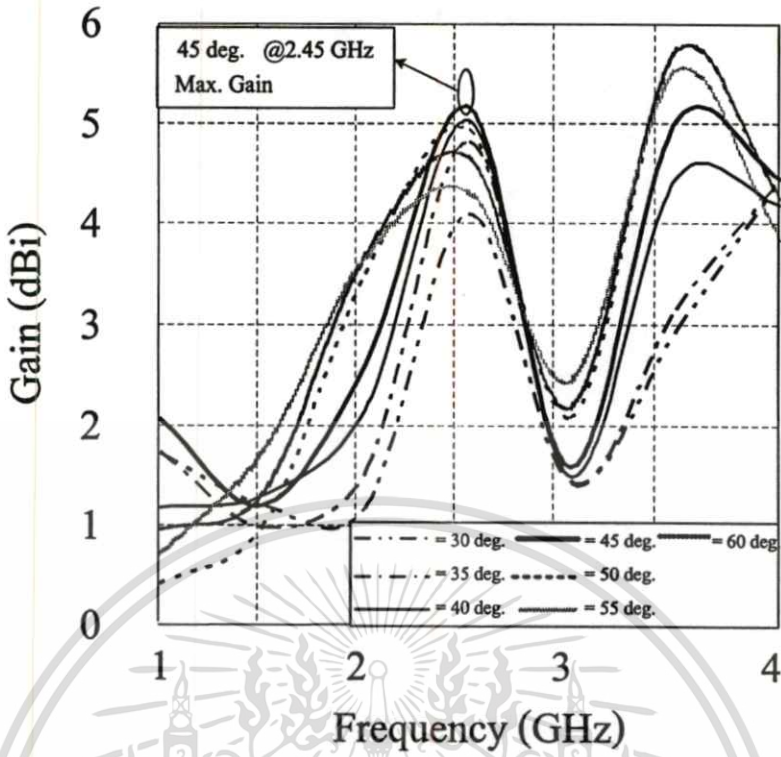
จากรูปที่ 3.12 และตารางที่ 3.1 แสดงค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane เมื่อเปลี่ยนขนาดแผ่นปากแตร (c) ด้วยขนาด 60×50 , 60×55 , 60×60 , 60×65 , 60×70 , 60×75 , 60×80 , 60×85 และ 60×90 ตารางมิลลิเมตร โดยผลการจำลองเมื่อพิจารณาที่ความถี่เรโซแนนซ์ และเลือกขนาดแผ่นปากแตร 60×70 ตารางมิลลิเมตร จะได้ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้ามีค่าคลื่นแคบประมาณ 50 องศา ขอมรับได้ ดังนั้นตัดสินใจเลือกขนาดแผ่นปากแตร (c) เท่ากับ 60×70 ตารางมิลลิเมตร สำหรับโครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน เพื่อใช้วิเคราะห์ต่อไป

3.2.5 พารามิเตอร์มุมของแผ่นปากแตร (Angle of Flare Plates)

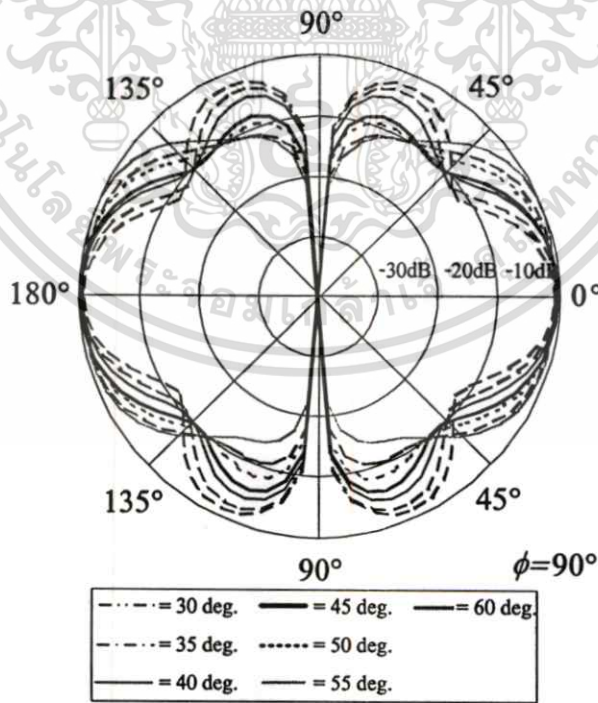
หามุมของแผ่นปากแตร จากโครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน โดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบ (I_d) เท่ากับ 4 มิลลิเมตร ความสูงของตัวซัพพอร์ต (a) เท่ากับ 45 มิลลิเมตร ขนาดแผ่นกรววด์ (b) เท่ากับ 60×60 ตารางมิลลิเมตร และขนาดแผ่นปากแตร (c) เท่ากับ 60×70 ตารางมิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.13 ภาพตัดขวางสายอากาศจำลองเพื่อหาค่ามุมของแผ่นปากแตร (α)
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 ค่าอัตราขยายสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่ามุมของแผ่นปากแตร (α)



รูปที่ 3.15 ค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane เมื่อเปลี่ยนค่า

มุมของแผ่นปากแตร (α) ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ค่าการจำลองความกว้างลำคลื่นที่มีกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane เมื่อเปลี่ยนค่ามุมของแผ่นปากแตร (α) ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์

ค่ามุมของแผ่นปากแตร (องศา)	ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (องศา)
30	31.4
35	35.9
40	43
45	49.8
50	60.5
55	70.3
60	76.5

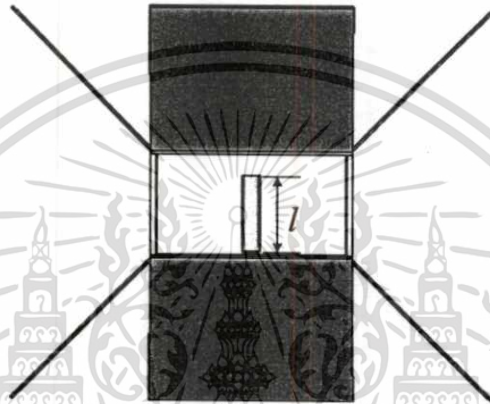
จากรูปที่ 3.13 แสดงภาพตัดขวางสายอากาศจำลองเพื่อหาค่ามุมของแผ่นปากแตร (α) ซึ่งการจำลองนี้จะพิจารณาคุณลักษณะค่าอัตราขยายสายอากาศ เพราะต้องการศึกษาอิทธิพลของแผ่นตัวนำจากทฤษฎีของสายอากาศปากแตร และค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.14 แสดงค่าอัตราขยายสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่ามุมของแผ่นปากแตร (α) ซึ่งจำลองปรับเปลี่ยนค่ามุมของแผ่นปากแตรด้วยมุม 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 องศา โดยผลการจำลองเมื่อพิจารณาที่ความถี่เรโซแนนซ์จะได้มุม 45 องศา (เส้นที่บวม) ที่ได้ค่าอัตราขยายสายอากาศสูงสุดประมาณ 5 dBi มากกว่ามุมอื่นๆ

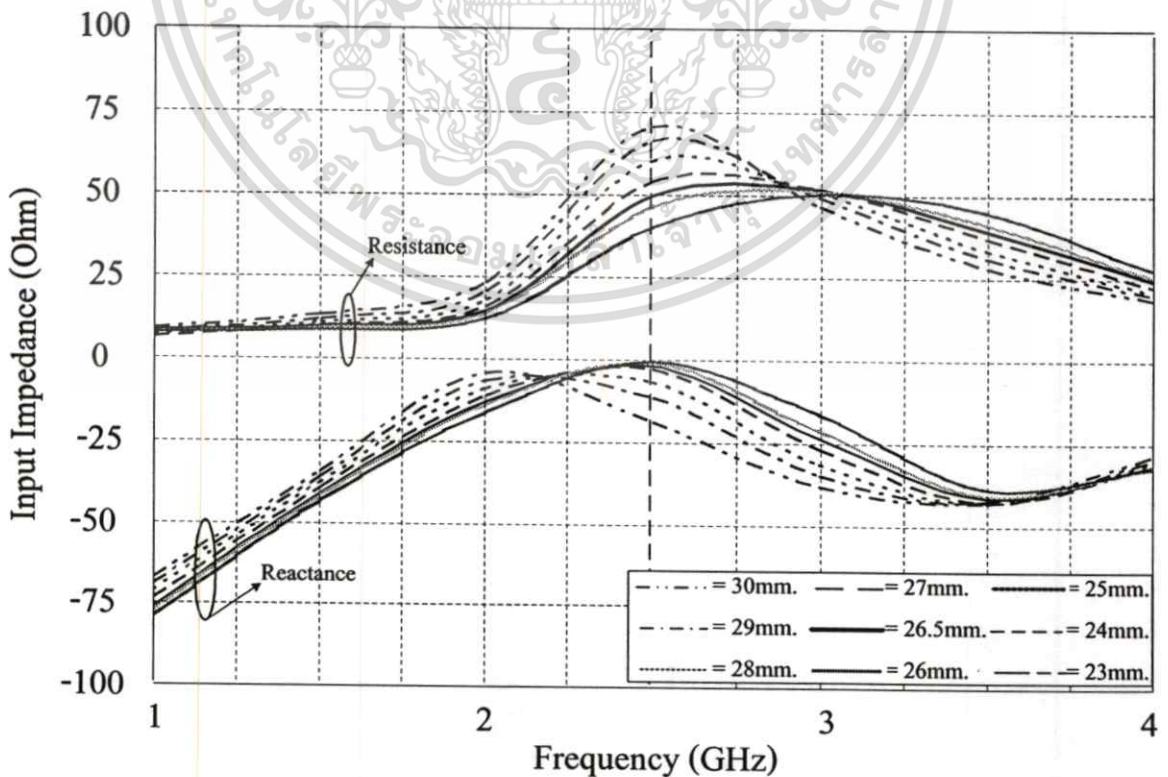
จากรูปที่ 3.15 และตารางที่ 3.1 แสดงค่าการจำลองระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนค่ามุมของแผ่นปากแตรที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ด้วยมุม 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 องศา โดยผลการจำลองเมื่อพิจารณาที่ความถี่เรโซแนนซ์ และเลือกมุม 45 องศา จะได้ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้ามีลำคลื่นแคบประมาณ 50 องศา ขอมรับได้ ดังนั้นตัดสินใจเลือกค่ามุมของแผ่นปากแตร (α) เท่ากับ 45 องศา สำหรับโครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน เพื่อใช้วิเคราะห์ต่อไป

3.2.6 พารามิเตอร์ความยาวโพรบ (Length of Probe)

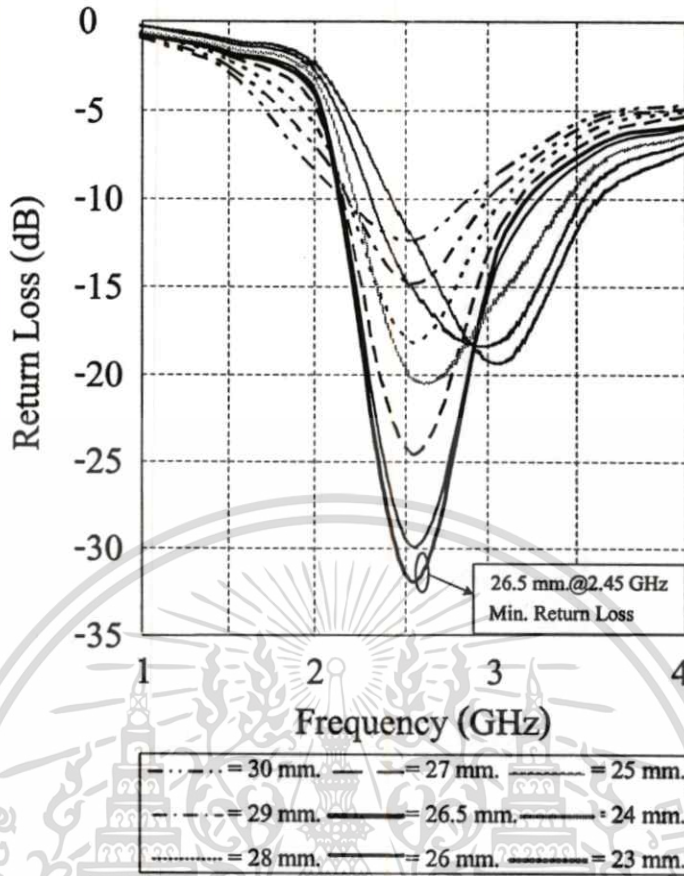
หาความยาวโพรบ จากโครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน โดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบ (I_d) เท่ากับ 4 มิลลิเมตร ความสูงของตัวซัพพอร์ต (a) เท่ากับ 45 มิลลิเมตร ขนาดแผ่นกราวด์ (b) เท่ากับ 60×60 ตารางมิลลิเมตร ขนาดแผ่นปากแตร (c) เท่ากับ 60×70 ตารางมิลลิเมตร และค่ามุมของแผ่นปากแตร (α) เท่ากับ 45 องศา ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ภาพตัดขวางสายอากาศจำลองเพื่อหาความยาวของโพรบ (l)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.17 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเมื่อเปลี่ยนความยาวของ โพรบ (l)
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 ค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนความยาวของ โพรบ (l)

จากรูปที่ 3.16 แสดงภาพตัดขวางสายอากาศจำลองเพื่อหาความยาวของ โพรบ (l) ซึ่งการจำลองนี้จะพิจารณาคุณลักษณะค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศต้องเมตซึ่งใกล้เคียงกับสายนำสัญญาณ 50 โอห์ม และค่าการสูญเสียย้อนกลับ เพราะต้อง การศึกษาอิทธิพลของตัวโพรบ

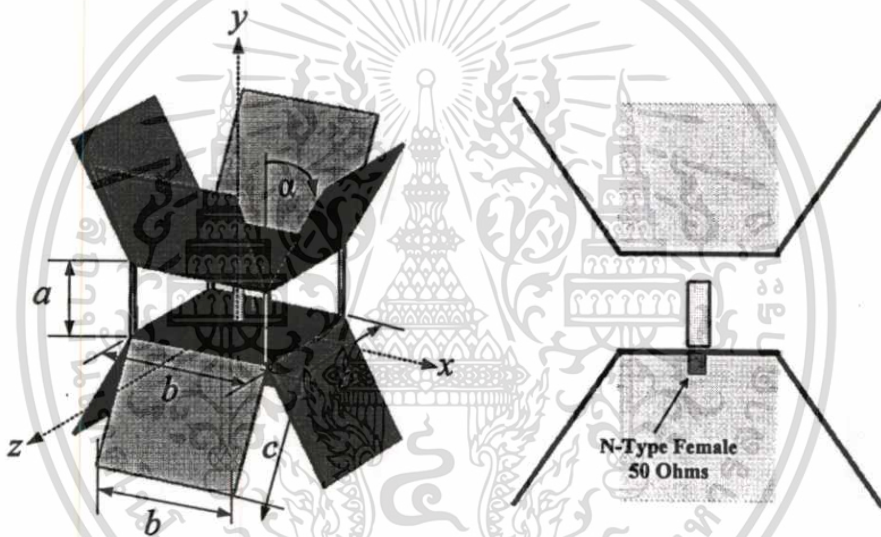
จากรูปที่ 3.17 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเมื่อเปลี่ยนความยาวของ โพรบ (l) ซึ่งจำลองปรับเปลี่ยนความยาวของ โพรบตั้งแต่ความยาว 23-30 มิลลิเมตร โดยผลการจำลองเมื่อพิจารณาค่ารีซิสแตนซ์กับค่ารีแอกแตนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ จะพบว่าความยาวของ โพรบเท่ากับ 26.5 มิลลิเมตร (เส้นทึบเข้ม) มีความเมตซึ่งกับสายนำสัญญาณ ซึ่งกราฟมีลักษณะคงที่ใกล้เคียงค่า 50 โอห์ม มากกว่าความยาวของ โพรบอื่นๆ (ความยาวอื่นทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศไม่เมตซึ่ง หรือไม่มีค่าใกล้เคียงกับสายนำสัญญาณ 50 โอห์ม)

จากรูปที่ 3.18 แสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนความยาวของ โพรบ (l) ซึ่งจำลองปรับเปลี่ยนความยาวของ โพรบตั้งแต่ความยาว 23-30 มิลลิเมตร โดยผลการจำลองเมื่อพิจารณาเลือกความยาว 26.5 มิลลิเมตร จะได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -32 dB (ผ่านเกณฑ์ VSWR 2:1) ดังนั้นตัดสินใจเลือกความยาวของ โพรบ (l) เท่ากับ 26.5 มิลลิเมตร เป็นพารามิเตอร์ท้ายสุดในการปรับปรุงโครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน ซึ่งทำให้ได้ค่าคุณลักษณะของสายอากาศที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์สำหรับงานวิจัยนี้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่แนะนำให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ (Parametric Study)

จากการปรับปรุงโครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน ทำให้ได้สายอากาศจำลองที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ ซึ่งต่อไปจะทำการวิเคราะห์ผลกระทบ และประสิทธิภาพของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ (l, a, b, c, α) ตลอดช่วงกว้างความถี่ตั้งแต่ 1 กิกะเฮิรตซ์ ขึ้นไป เพื่อตรวจเช็คคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ ดังนี้ ด้านเอาต์พุตของสายอากาศ ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานครึ่งหนึ่ง ด้านอินพุตของสายอากาศ ได้แก่ ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าแบนด์วิดท์ และค่า VSWR ด้านประสิทธิภาพของสายอากาศ ได้แก่ ค่าอัตราขยาย และค่าการกระเพื่อมในระนาบมุมกวาด ดังนี้



รูปที่ 3.19 ภาพมุมมองทั่วไป และภาพตัดขวางโครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน

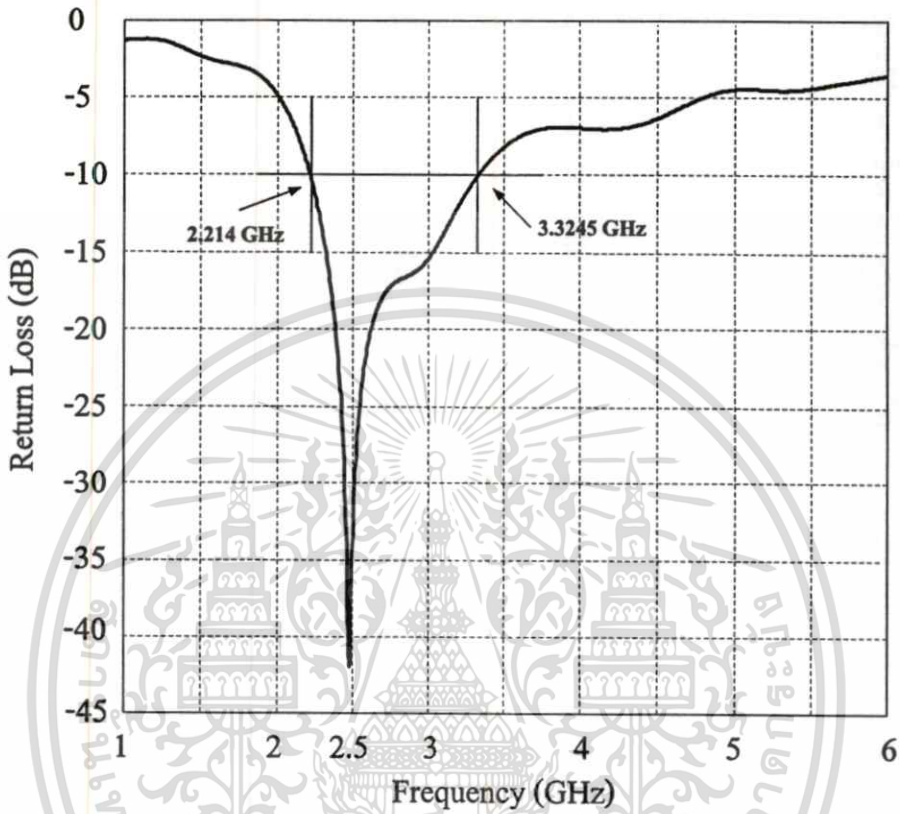
ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ โครงสร้างจำลองของสายอากาศ

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด
l	เส้นผ่านศูนย์กลางโพรบ	4 มิลลิเมตร
	ความยาวโพรบ	26.5 มิลลิเมตร
a	ความสูงตัวซัพพอร์ต	45 มิลลิเมตร
b	ขนาดแผ่นกราวด์	60×60 ตารางมิลลิเมตร
c	ขนาดแผ่นปากแตร	60×70 ตารางมิลลิเมตร
α	มุมของแผ่นปากแตร	45 องศา

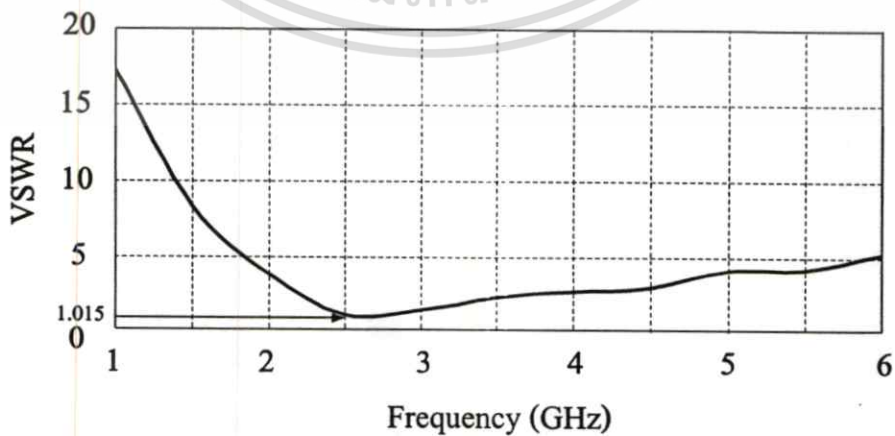
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าแบนด์วิดท์ และค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Return Loss, Bandwidth and Input Impedance) ที่ VSWR 2:1

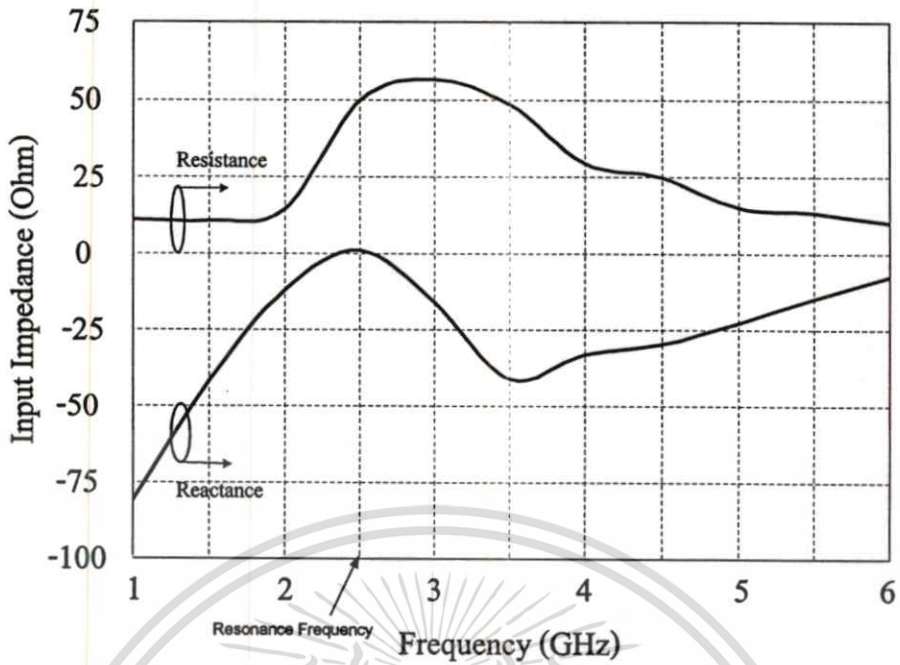


รูปที่ 3.20 การจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ และค่าแบนด์วิดท์



รูปที่ 3.21 การจำลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

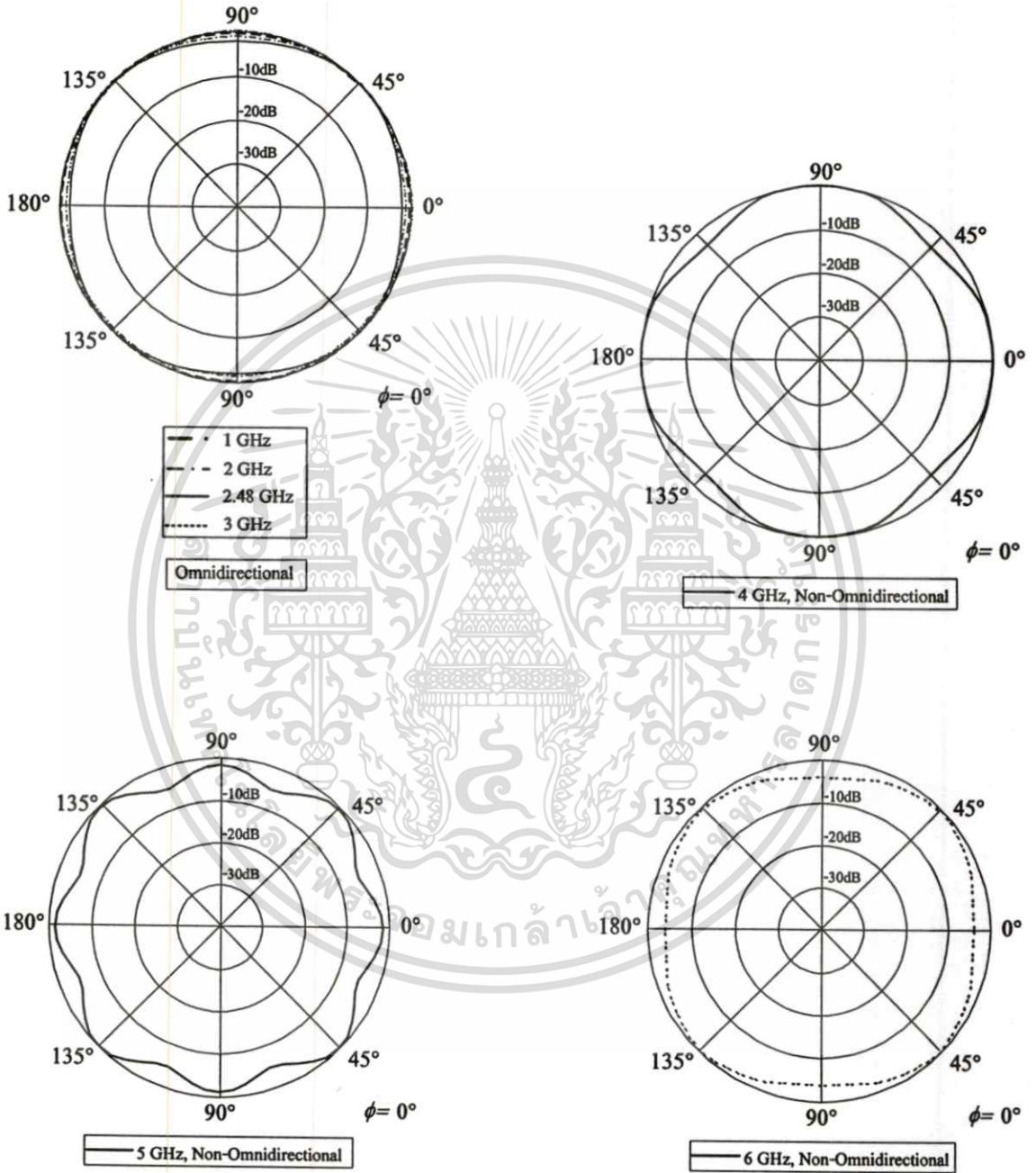


รูปที่ 3.22 การจำลองค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า

จากรูปที่ 3.20 แสดงการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ และค่าแบนด์วิดท์ ที่ VSWR 2:1 หรือคิดที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ต่ำกว่า -10 dB โดยผลการจำลองจากช่วงความถี่ตั้งแต่ 1-6 กิกะเฮิรตซ์ คือ ได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำสุดประมาณ -43 dB ที่ความถี่ 2.48 กิกะเฮิรตซ์ ได้ค่าแบนด์วิดท์ ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2.214 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 3.324 กิกะเฮิรตซ์ หรือคิดเป็นแบนด์วิดท์กว้างเท่ากับ 1.11 กิกะเฮิรตซ์ (111%) จากรูปที่ 3.21 แสดงการจำลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) ที่น้อยกว่า 1.015:1 ที่ความถี่ 2.48 กิกะเฮิรตซ์ และจากรูปที่ 3.22 แสดงการจำลองค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเท่ากับ 50.43, 0.575 โอห์ม ที่ความถี่ 2.48 กิกะเฮิรตซ์

วิเคราะห์เบื้องต้นได้ว่า โครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน ที่ได้ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์โครงสร้างจำลองของสายอากาศจากตารางที่ 3.2 ทำให้ได้ผลค่าคุณลักษณะอินพุตของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ผ่านเกณฑ์ คือ ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำ แบนด์วิดท์แถบกว้าง และอิมพีแดนซ์ด้านเข้าแมตชิงใกล้เคียงกับสายนำสัญญาณ 50 โอห์ม

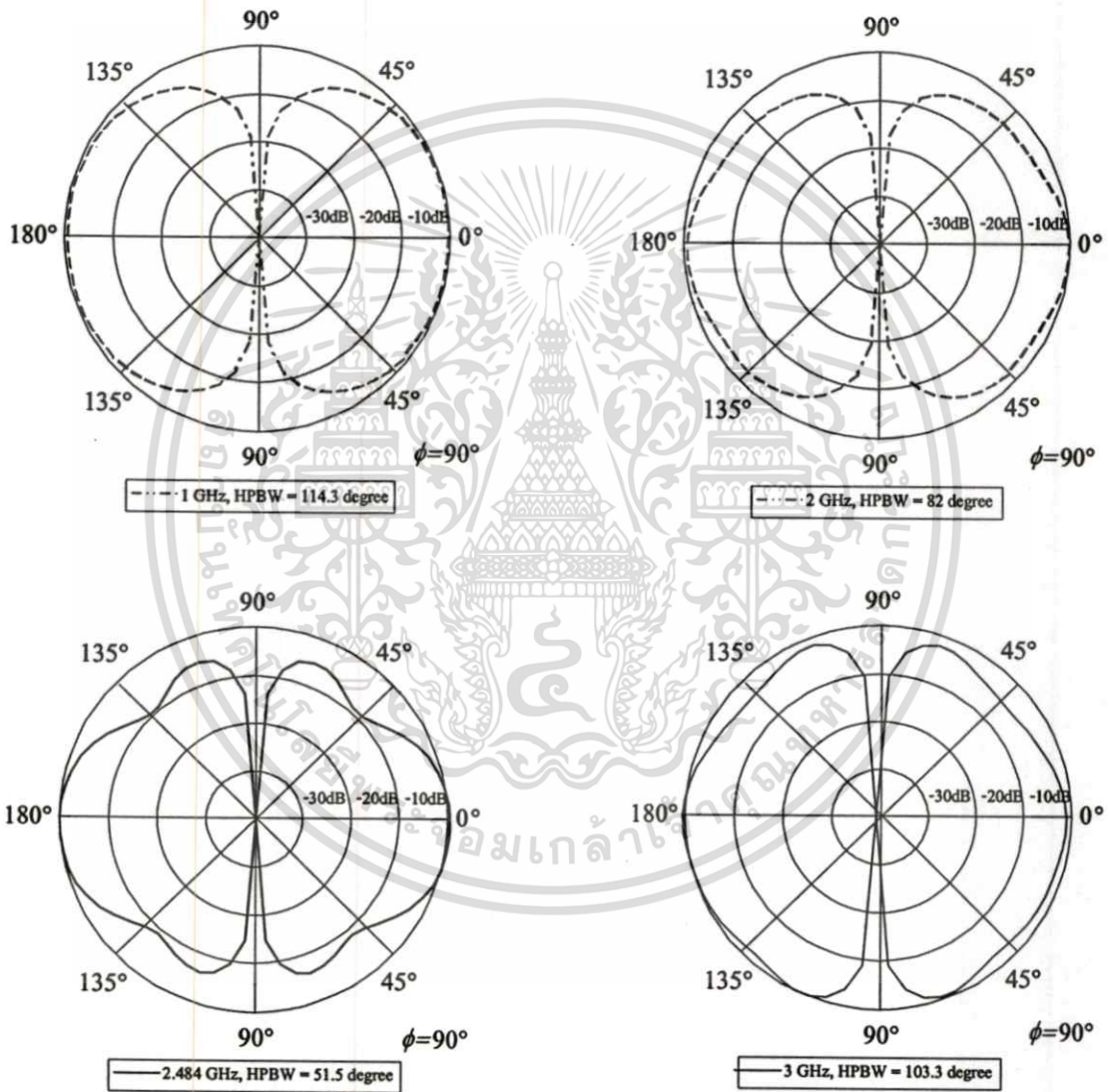
3.3.2 การจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานครึ่งหนึ่ง (Radiation Pattern and HPBW)



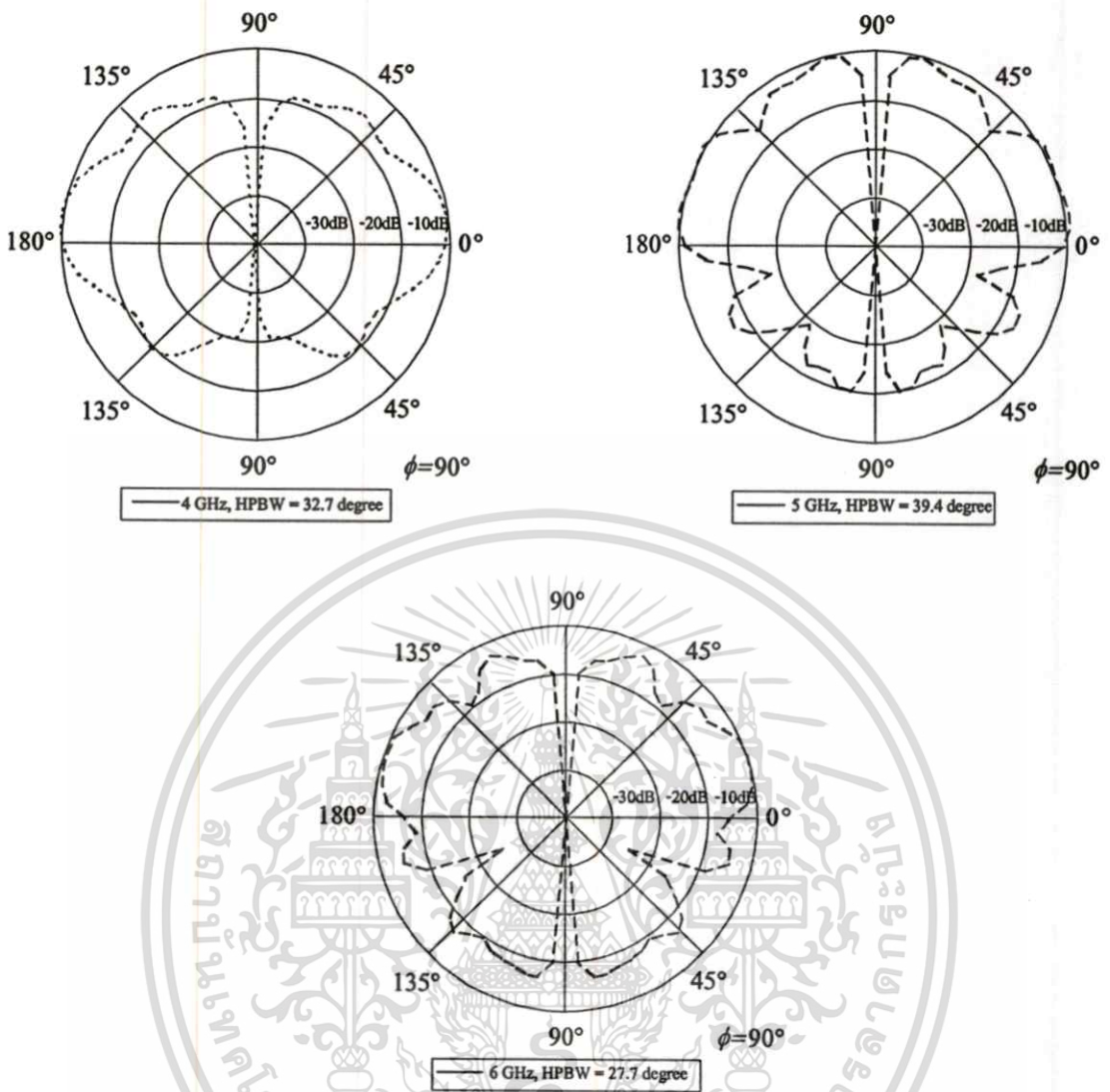
รูปที่ 3.23 การจำลองค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.23 แสดงการจำลองค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane โดยผลการจำลองจากช่วงความถี่ตั้งแต่ 1-6 กิกะเฮิรตซ์ คือ ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแบบรอบตัว (Omnidirectional Beam) ช่วงความถี่ 1-3 กิกะเฮิรตซ์ สามารถใช้งานวิจัยนี้ได้ ยกเว้นช่วงความถี่ 4-6 กิกะเฮิรตซ์ จะไม่เป็นแบบรอบตัว (Non-Omnidirectional Beam) ทั้งนี้ประเมินจำลองที่ 2.48 กิกะเฮิรตซ์ ด้วยเพราะเป็นความถี่ที่ได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำสุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



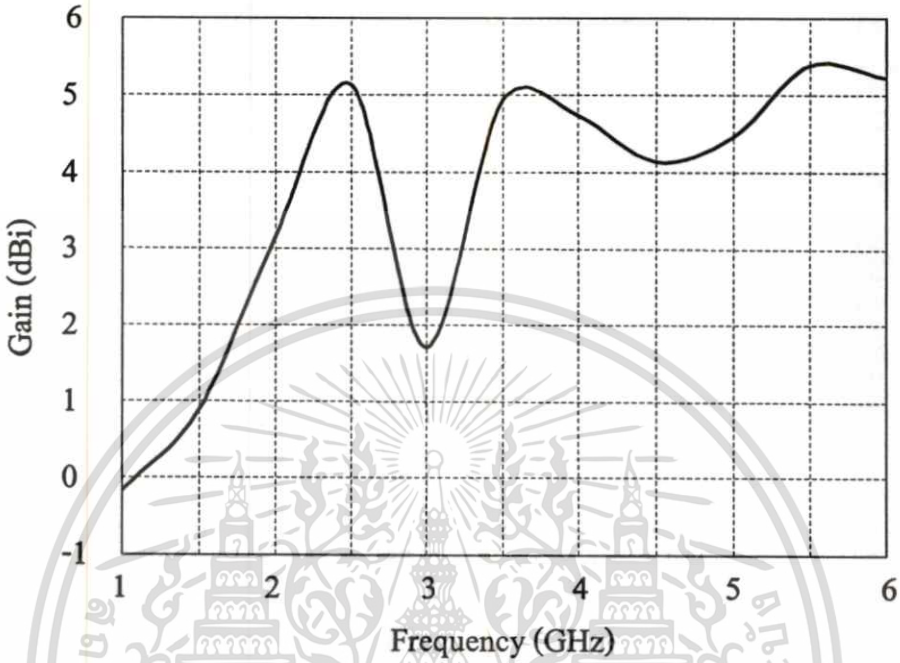
รูปที่ 3.24 การจำลองค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane

จากรูปที่ 3.24 แสดงการจำลองค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane โดยผลการจำลองจากช่วงความถี่ตั้งแต่ 1-6 กิกะเฮิร์ตซ์ คือ ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้ามีความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานครึ่งหนึ่งประมาณ 30 องศา ที่ช่วงความถี่ 5-6 กิกะเฮิร์ตซ์ ส่วนที่ความถี่เรโซแนนซ์มีความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานครึ่งหนึ่งประมาณ 50-60 องศา

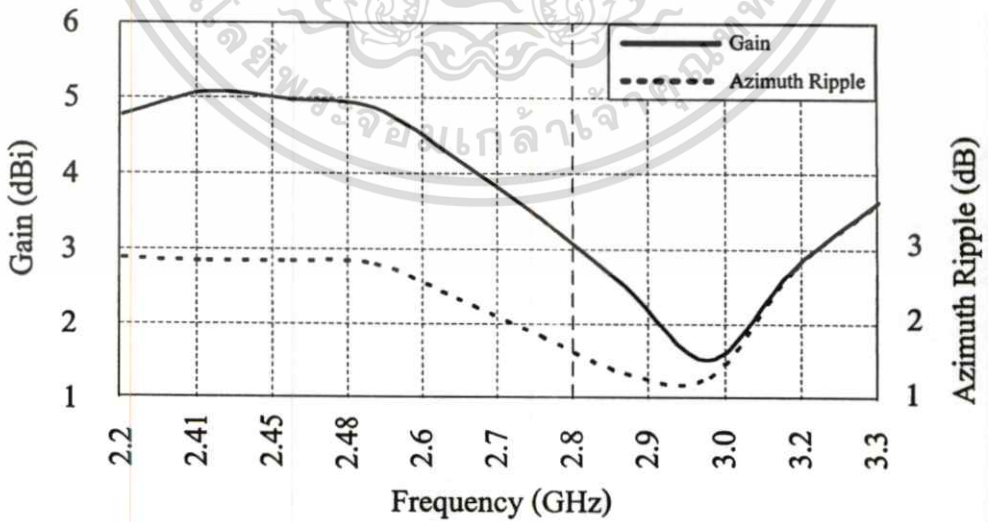
วิเคราะห์เบื้องต้นได้ว่า โครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน ที่ได้ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์โครงสร้างจำลองของสายอากาศจากตารางที่ 3.2 ทำให้ได้ผลค่าคุณลักษณะด้านแอมพลิจูดของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ผ่านเกณฑ์ คือ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแบบรอบตัว และมีค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานครึ่งหนึ่งแคบยอมรับได้ที่ทำงานย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การจำลองค่าอัตราขยาย และค่าการกระเพื่อมในระนาบมุมกวาด (Gain and Azimuth Ripple)



รูปที่ 3.25 การจำลองค่าอัตราขยายของสายอากาศ



รูปที่ 3.26 การจำลองค่าอัตราขยาย และค่าการกระเพื่อมในระนาบมุมกวาดของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.25 แสดงการจำลองค่าอัตราขยายของสายอากาศ โดยผลการจำลองจากช่วงความถี่ตั้งแต่ 1-6 กิกะเฮิรตซ์ คือ ได้ค่าอัตราขยายของสายอากาศสูงสุดประมาณ 5 dBi ที่ความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.26 การจำลองค่าอัตราขยาย และค่าการกระเพื่อมในระนาบมุมกวาดของสายอากาศ จะได้ค่าอัตราขยายของสายอากาศสูงสุดประมาณ 4-5 dBi ที่ความถี่ 2.2-2.6 กิกะเฮิรตซ์ โดยสัมพันธ์กับค่าการกระเพื่อม หรือการสวิงของคลื่นในระนาบมุมกวาดของสายอากาศต้องมีค่าไม่เกิน 3 dB ใ้ได้อยู่

วิเคราะห์เบื้องต้นได้ว่าโครงสร้างจำลองสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน ที่ได้ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์โครงสร้างจำลองของสายอากาศจากตารางที่ 3.2 ทำให้ได้ผลค่าคุณลักษณะด้านประสิทธิภาพของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ผ่านเกณฑ์ คือ ได้ค่าอัตราขยายของสายอากาศสูง และค่าการกระเพื่อมในระนาบมุมกวาดต่ำกว่า 3 dB สามารถยอมรับได้

3.4 บทสรุป

การวิเคราะห์ และผลการวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดสำหรับแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (An Omnidirectional Aperture Antenna) ได้จำลองโครงสร้างสายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO แล้วพิจารณาคูณลักษณะเบื้องต้นที่สำคัญได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ค่าการสูญเสียย้อนกลับ และค่าอัตราขยายของสายอากาศ ซึ่งขั้นตอนการจำลองประกอบด้วยสองหัวข้อหลัก คือ การปรับปรุงโครงสร้างสายอากาศ (Antenna Structure) และการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ (Parametric Study)

หัวข้อแรกการปรับปรุงโครงสร้างสายอากาศ เนื่องจากมีคุณลักษณะเบื้องต้นที่สำคัญซึ่งยังไม่ผ่านเกณฑ์ของสายอากาศ ได้แก่ค่าการสูญเสียย้อนกลับ เป็นต้น และเราต้องการปรับแต่งสายอากาศจำลองให้มีประสิทธิภาพในการทำงานให้ดียิ่งขึ้น จึงต้องศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางโพรบ ความสูงของตัวซัพพอร์ต ขนาดแผ่นกราวด์ ขนาดแผ่นปากแตร มุมองศาของแผ่นปากแตร และความยาวโพรบ โดยพิจารณาเลือกสายอากาศโครงสร้างจำลองโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน มาวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะให้สามารถทำงานได้ตามกฎเกณฑ์ของสายอากาศ และสอดคล้องกับการทำงานแบบจุดต่อหลายจุดสำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE 802.11 WLAN ในงานวิจัยนี้

หัวข้อที่สอง การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ เพราะต้องการให้ครอบคลุมความถี่ใช้งานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11 b/g/n ที่ย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และวิเคราะห์ค่าแบนด์วิดท์ที่ได้ช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.2-3.3 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งผลการจำลองทั้งหมดสรุปได้ว่าความถี่ตั้งแต่ 2.2-2.6 กิกะเฮิรตซ์ เหมาะสำหรับสายอากาศจำลองแบบโครงสร้างโพรบบนแผ่นตัวนำแบบ

ขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน เพื่อให้แบบรูปการแพร่ กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กแบบ
 รอบตัว ให้ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานครึ่งหนึ่งที่แอมบระหว่าง 50-60 องศา ได้ค่าการสูญเสีย
 ย้อนกลับน้อยสุดประมาณ 40 dB ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้ามีความแมตซ์ซึ่งใกล้เคียงกับสายนำสัญญาณ 50
 โอห์ม และได้ค่าอัตราการขยายของสายอากาศสูงสุดประมาณ 4 ถึง 5 dBi

สุดท้ายการวิเคราะห์ในบทที่ 3 นี้จะทำให้ได้โครงสร้างสายอากาศจำลองที่พร้อมจะทำการ
 สายอากาศต้นแบบเพื่อทำการทดสอบต่อไปได้



บทที่ 4

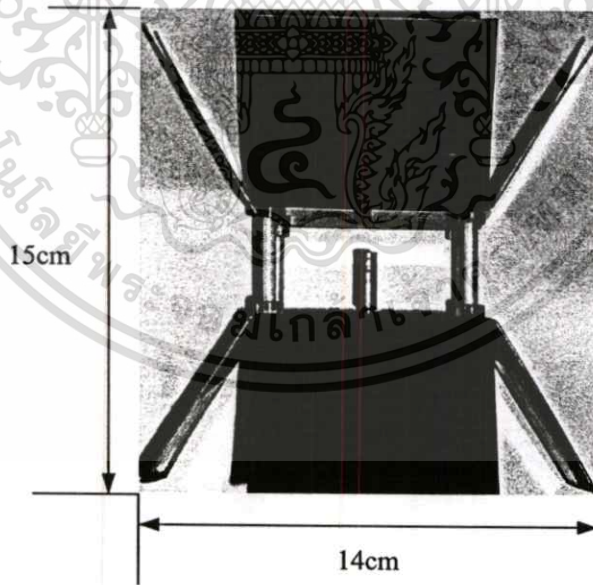
การทดสอบ และผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

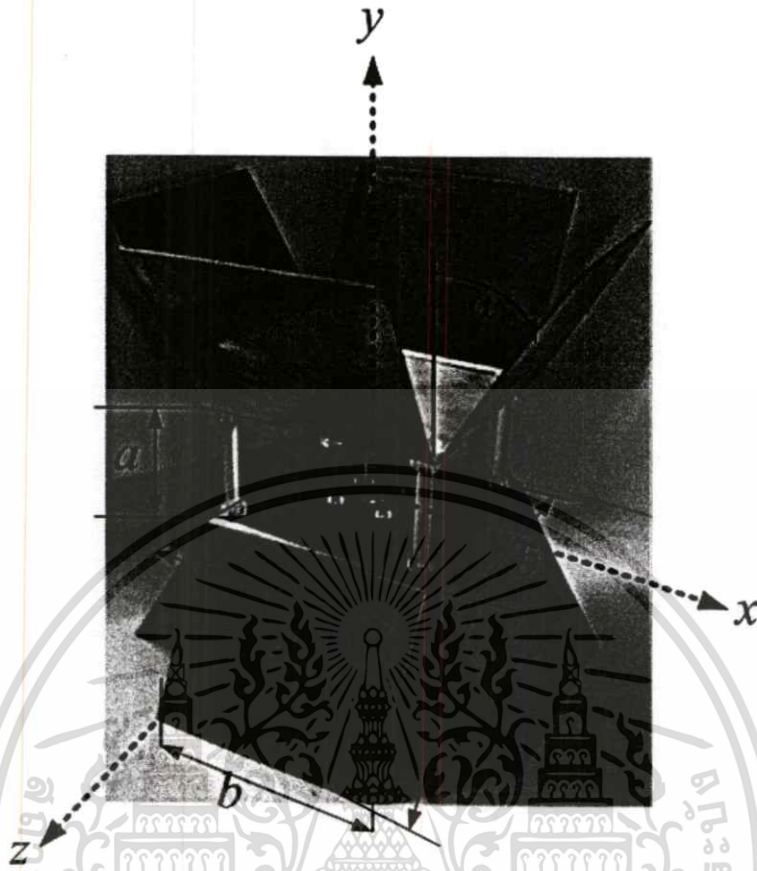
หัวข้อนี้จะนำสายอากาศจำลองจากบทที่ 3 มาสร้างสายอากาศต้นแบบ (Prototype Antenna) แล้วทดสอบด้วยเครื่องมือวัดเพื่อเปรียบเทียบผลจากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO

4.2 การสร้างสายอากาศต้นแบบ (Prototype Antenna)

โครงสร้างสายอากาศต้นแบบทำจากแผ่นวัสดุทองเหลืองหนา 1 มิลลิเมตร 2 ชั้น วางขนานกัน โดยใช้เนื้อพลาสติกยึดค้ำไว้เป็นตัวซัพพอร์ต เลือกน็อตอลูมิเนียมทำเป็นตัวโพรบแล้วใช้คอนเน็คเตอร์แบบ N-Type Female 50 โอห์ม เชื่อมได้โพรบ โดยมีขนาดมิติดังรูปที่ 4.1-4.2 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพด้านหน้าสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน



รูปที่ 4.2 ภาพมุมมองทั่วไปสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างสายอากาศต้นแบบสำหรับการทดสอบ

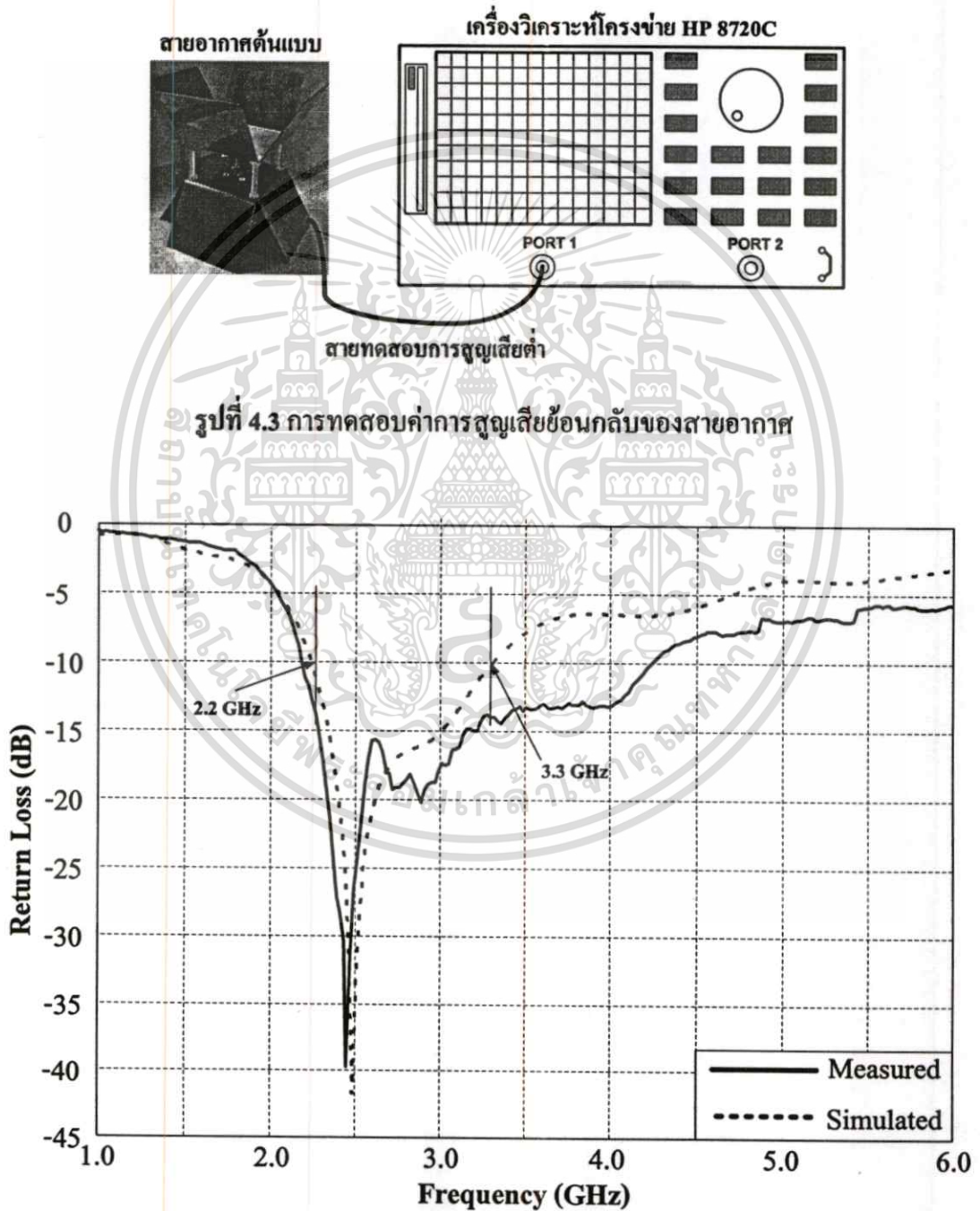
สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์	ขนาดทางไฟฟ้า ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์
l	เส้นผ่านศูนย์กลางโพรบ	4 มิลลิเมตร	0.0326λ
	ความยาวโพรบ	26.5 มิลลิเมตร	0.216λ
a	ความสูงตัวซัพพอร์ต	45 มิลลิเมตร	0.367λ
b	แผ่นกราวด์	60×60 ตารางมิลลิเมตร	$0.49\lambda \times 0.49\lambda$
c	ขนาดแผ่นปากแตร	60×70 ตารางมิลลิเมตร	$0.49\lambda \times 0.571\lambda$
α	มุมมองของ แผ่นปากแตร	45 องศา	45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบ และผลการทดสอบ (Antenna Measurements)

4.3.1 การทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศจะทดสอบตลอดช่วงกว้างความถี่ตั้งแต่ 1-6 กิกะเฮิร์ตซ์ ให้ครอบคลุมย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP 8720C



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบ และการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ

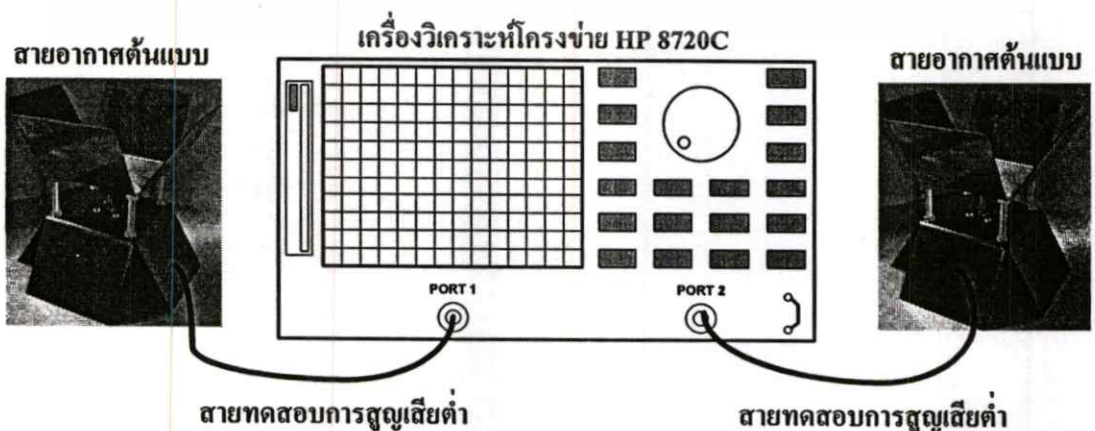
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบการทดสอบ และการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศตลอดช่วงกว้างความถี่ตั้งแต่ 1-6 กิกะเฮิร์ตซ์ เมื่อกำหนด VSWR น้อยกว่า 2:1 ผลปรากฏว่าการทดสอบจะได้ค่าแบนด์วิดท์เริ่มต้นตั้งแต่ 2.2-3.3 กิกะเฮิร์ตซ์ (ตำแหน่งที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB) ซึ่งจากการทดสอบจะได้ช่วงความถี่ของค่าการสูญเสียย้อนกลับเลื่อนไปทางย่านความถี่สูงเล็กน้อย ทำให้ได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับสำหรับมาตรฐาน IEEE 802.11 b/g/n ที่ช่วงความถี่ 2.412 กิกะเฮิร์ตซ์ เท่ากับ -21.73 dB ความถี่ 2.450 กิกะเฮิร์ตซ์ เท่ากับ -26.15 dB และความถี่ 2.484 กิกะเฮิร์ตซ์ เท่ากับ -40.10 dB ซึ่งเป็นค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่ต่ำสุดด้วย ส่งผลให้เกิดค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้ามีความแม่นยำใกล้เคียงกับสายนำสัญญาณ 50 โอห์ม ส่วนผลการจำลองจะได้ค่าต่ำสุดที่ความถี่ 2.484 กิกะเฮิร์ตซ์ เท่ากับ -42.08 dB

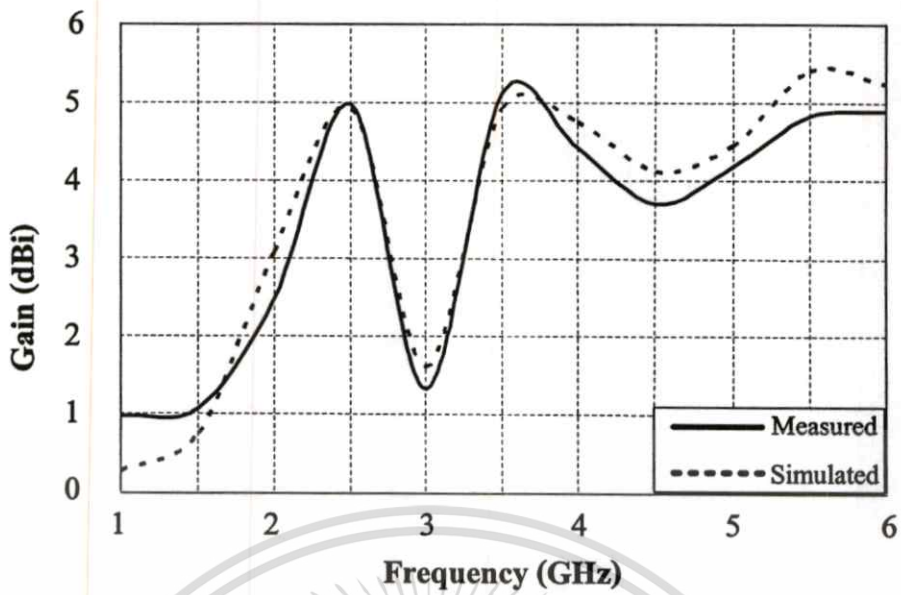
4.3.2 การทดสอบค่าอัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการใช้งานร่วมกับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) ย่านความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ และเราได้ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำสุดที่ความถี่ 2.48 กิกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้นจึงทำการจำลองเพิ่มสำหรับค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเพื่อศึกษาว่าความถี่ช่วงใดบ้างที่สอดคล้องกับมาตรฐาน โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

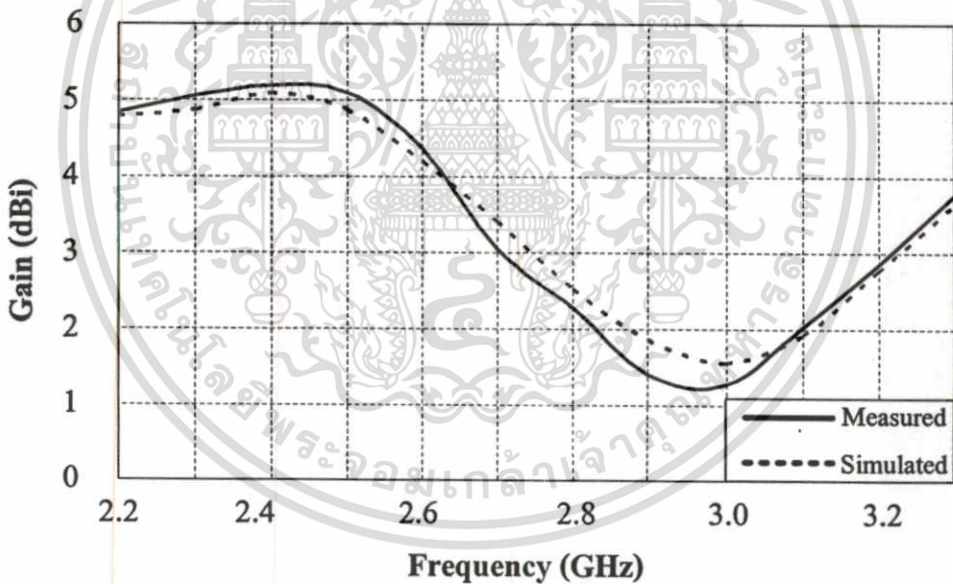
ค่าอัตราขยายของสายอากาศจะทดสอบตลอดช่วงกว้างความถี่ตั้งแต่ 1-6 กิกะเฮิร์ตซ์ ให้ครอบคลุมย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP 8720C ดังรูปที่ 4.5 นำสายอากาศดินแบบตัวที่ 1 ต่อด้วยสายทดสอบการสูญเสียต่ำ หรือสาย Low Loss แบบ RG 223/U-01 50 Ohm 0.8 dB/m เข้าพอร์ตที่ 1 และนำสายอากาศดินแบบตัวที่ 2 ต่อด้วยสายทดสอบการสูญเสียต่ำ เข้าพอร์ตที่ 2 จากนั้นใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP 8720C หาอัตราขยายของสายอากาศ แล้วนำข้อมูลที่ได้ออกไปพล็อตกราฟดังรูปที่ 4.6-4.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.5 การทดสอบค่าอัตราขยายของสายอากาศ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบ และการจำลองค่าอัตราขยายของสายอากาศ



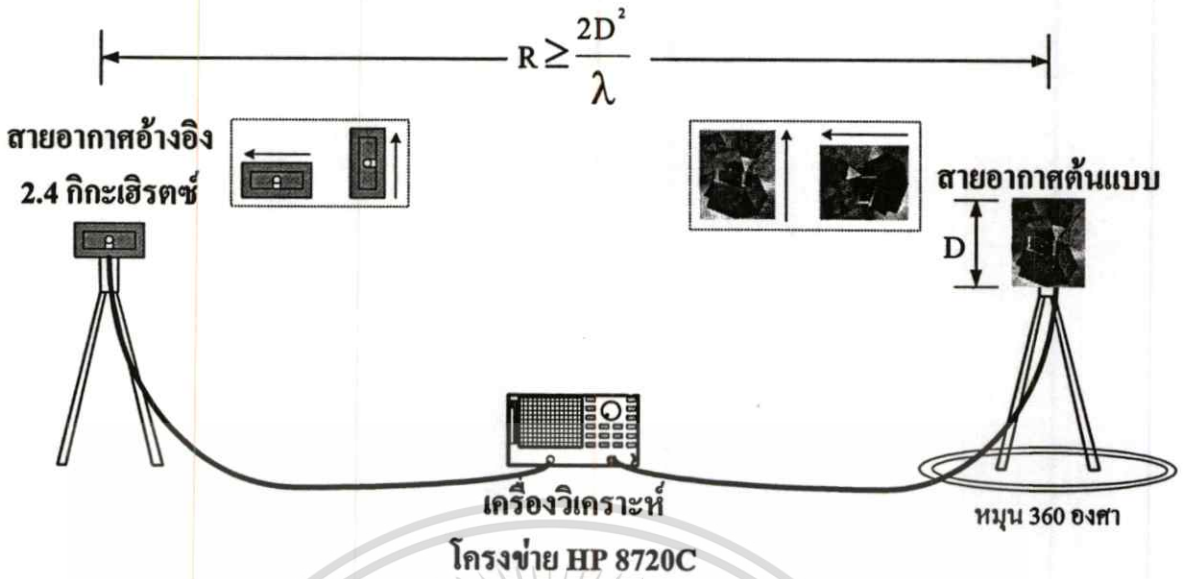
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบ และการจำลองค่าอัตราขยายของสายอากาศ ความถี่ 2.2 กิกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบการทดสอบ และการจำลองค่าอัตราขยายของสายอากาศตลอดช่วงกว้างความถี่ตั้งแต่ 1-6 กิกะเฮิร์ตซ์ จะได้ผลการทดสอบคือ ค่าอัตราขยายสูงสุดที่ช่วงความถี่ 2.5 กิกะเฮิร์ตซ์ 3.5 กิกะเฮิร์ตซ์ และ 5.5-6 กิกะเฮิร์ตซ์ประมาณ 5 dBi ส่วนผลการจำลองก็จะให้ผลที่ใกล้เคียงกันที่ช่วงความถี่เดียวกัน และจากรูปที่ 4.7 แสดงการทดสอบช่วงความถี่ 2.3-3.3 กิกะเฮิร์ตซ์ เพราะเป็นช่วงความถี่ที่ผ่านการทดสอบหาค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อกำหนด VSWR น้อยกว่า 2:1 ซึ่งงานวิจัยนี้ต้องการอัตราขยายของสายอากาศสูงกว่า 2 dBi ขึ้นไป ดังนั้นได้ผลการทดสอบค่าอัตราขยายสูงสุดที่ช่วงความถี่ 2.2-2.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ประมาณ 4-5 dBi ส่วนผลการจำลองให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

4.3.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าความกว้างลำคลื่นที่ก้ำกึ่งงานครึ่งหนึ่ง และระดับการโพลาไรซ์ไขว้ของสายอากาศ (Radiation Pattern Half Power Beamwidth and Cross Polarization)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ค่าความกว้างลำคลื่นที่ก้ำกึ่งงานครึ่งหนึ่ง และระดับการโพลาไรซ์ไขว้ของสายอากาศ จะถูกทดสอบตลอดช่วงกว้างความถี่ตั้งแต่ 1-6 กิกะเฮิร์ตซ์ ให้ครอบคลุมย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์โครงข่ายต่อกับสายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้นมา และสายอากาศอ้างอิงความถี่ย่าน 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ สำหรับใช้งานจริงช่วงความถี่ 2.12, 2.45 และ 2.484 กิกะเฮิร์ตซ์ สำหรับการทดสอบจะใช้วิธีแบบสนามระยะทางไกล (Far Field) ดังรูปที่ 4.8 โดยเมื่อพิจารณาผลการทดสอบคุณลักษณะในหัวข้อการทดสอบที่ผ่านมาจะได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับช่วงความถี่ 2.2-3.3 กิกะเฮิร์ตซ์ และค่าอัตราขยายสูงสุดช่วงความถี่ 2.2-2.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเลือกทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.2, 2.412, 2.45, 2.484 และ 2.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ดังต่อไปนี้

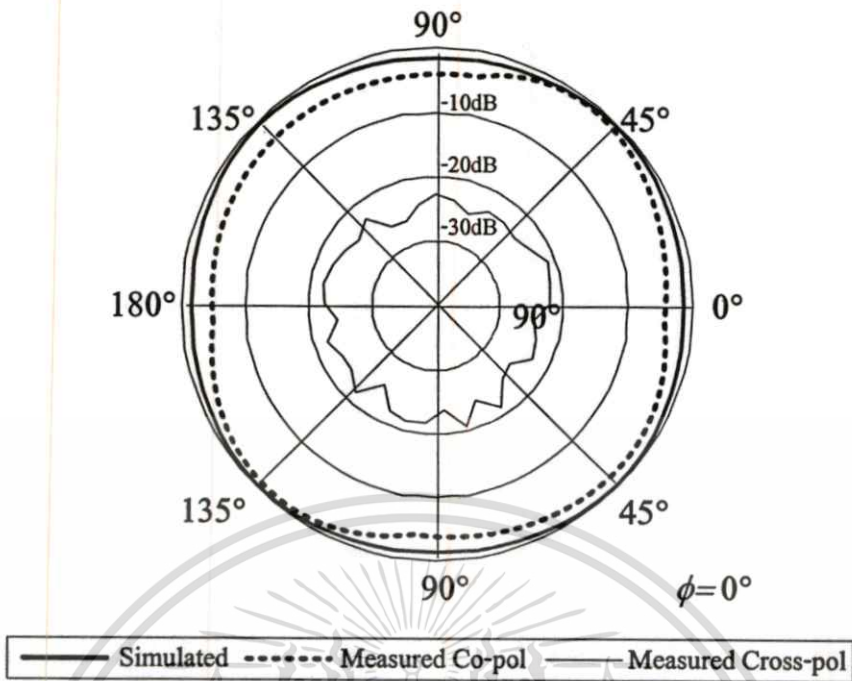


รูปที่ 4.8 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

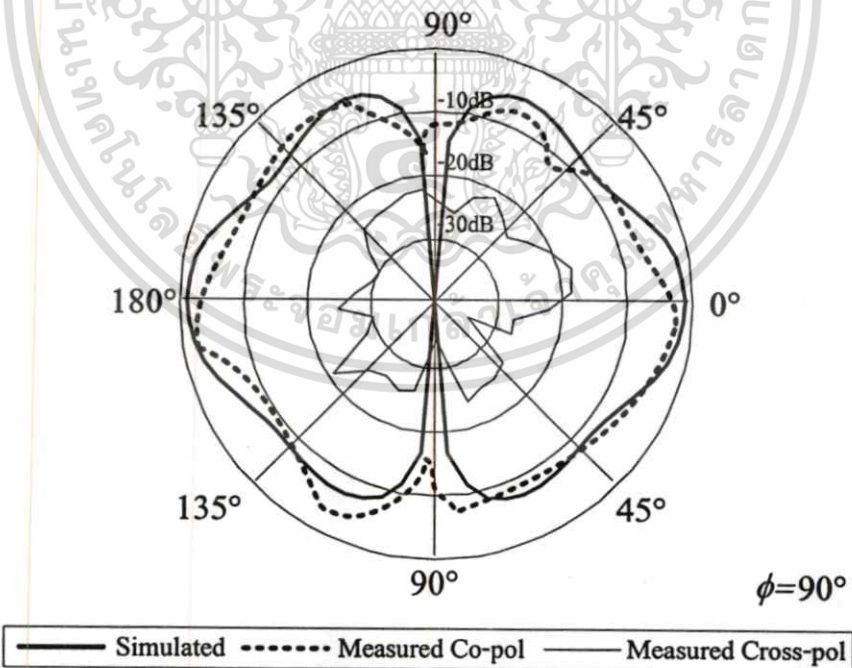
เมื่อ R คือระยะทางระหว่างสายอากาศอ้างอิงกับสายอากาศค้นแบบที่สร้างขึ้น ส่วน D คือมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศค้นแบบเท่ากับ 15 เซนติเมตร และ λ คือค่าความยาวคลื่น ซึ่งงานวิจัยนี้กำหนดความถี่โรเซนซ์ที่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ดังนั้นจะได้ R เท่ากับ 3.7 เมตร เป็นอย่างน้อย โดยการทดสอบจะจัดวางสายอากาศสี่แบบคือ

- 1) สายอากาศอ้างอิงวางแนวนอน และสายอากาศค้นแบบวางแนวตั้ง
- 2) สายอากาศอ้างอิงวางแนวนอน และสายอากาศค้นแบบวางแนวนอน
- 3) สายอากาศอ้างอิงวางแนวตั้ง และสายอากาศค้นแบบวางแนวตั้ง
- 4) สายอากาศอ้างอิงวางแนวตั้ง และสายอากาศค้นแบบวางแนวนอน

ซึ่งแต่ละแบบที่จัดวางจะกำหนดให้สายอากาศอ้างอิงจัดวางตำแหน่งอยู่กับที่เท่านั้น (Fixed position) แต่จะทำการหมุนชุดฐานของสายอากาศค้นแบบรอบตนเอง 360 องศา (Rotate 360 degree) แล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อตรูป ดังรูปที่ 4.9-4.18

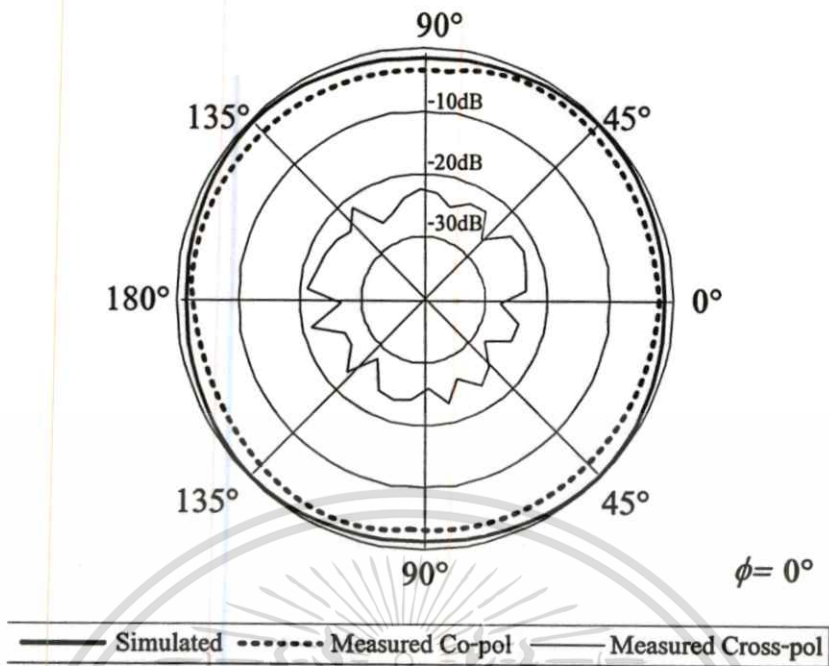


รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane ความถี่ 2.2 กิกะเฮิรตซ์

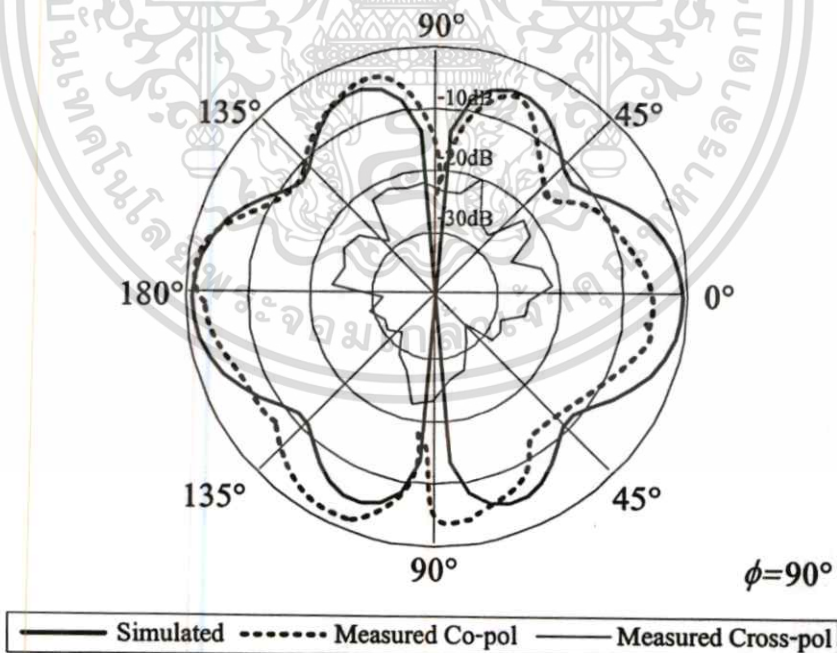


รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane ความถี่ 2.2 กิกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

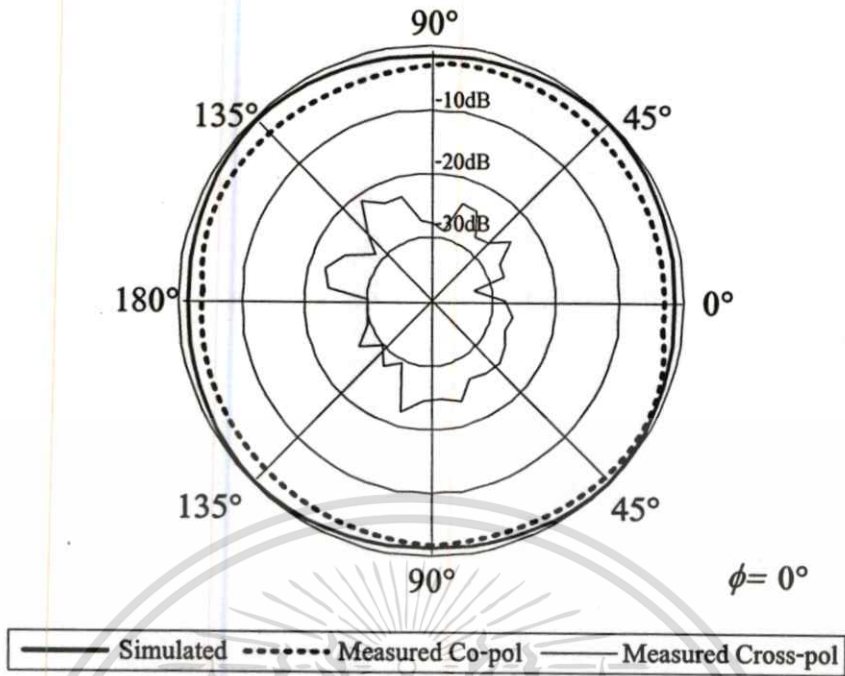


รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane ความถี่ 2.412 กิกะเฮิรตซ์

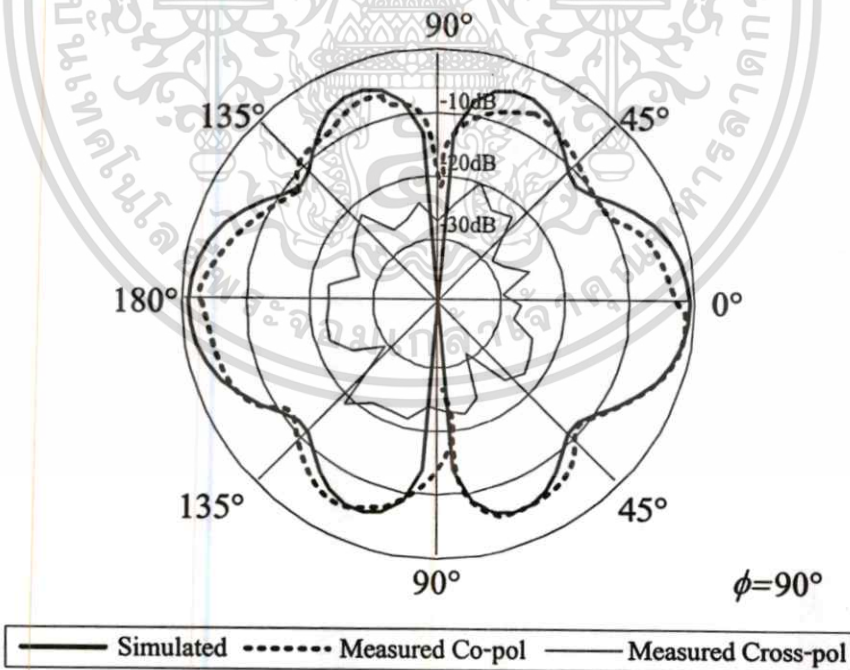


รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane ความถี่ 2.412 กิกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

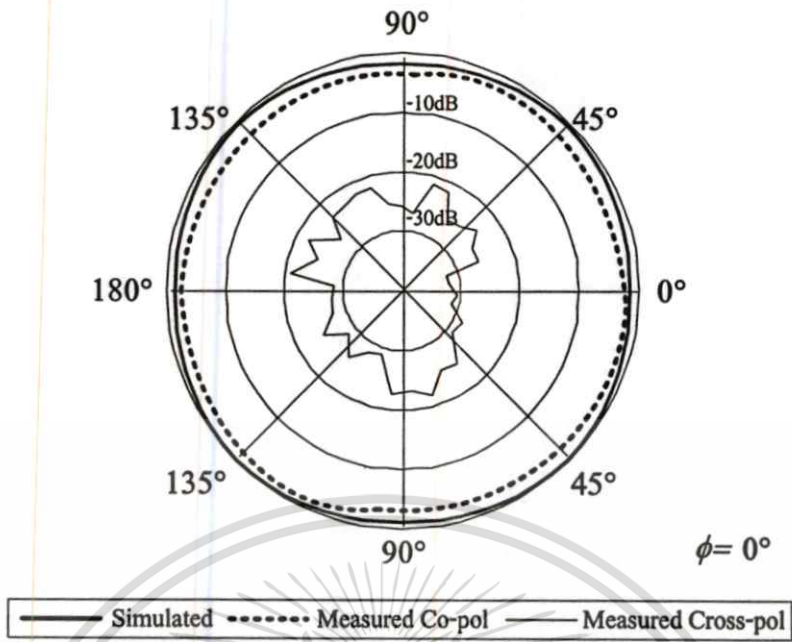


รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์

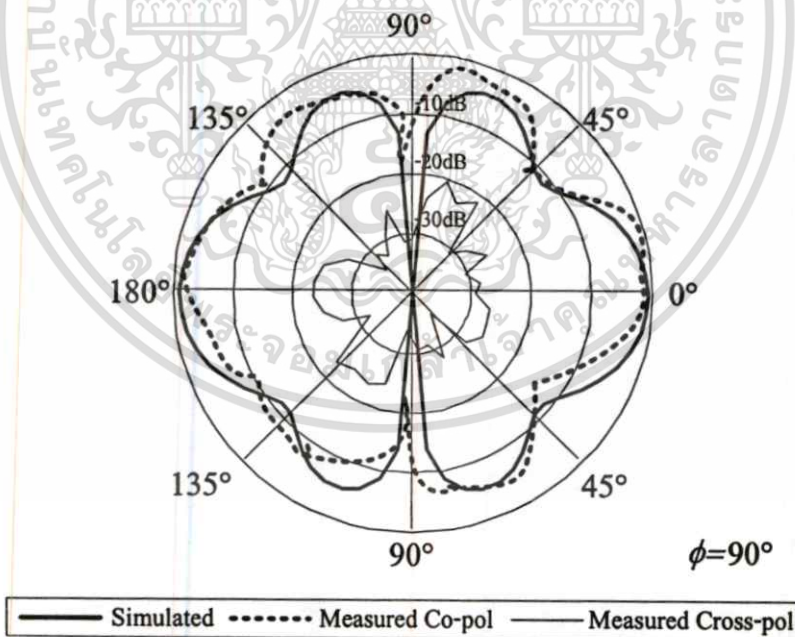


รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

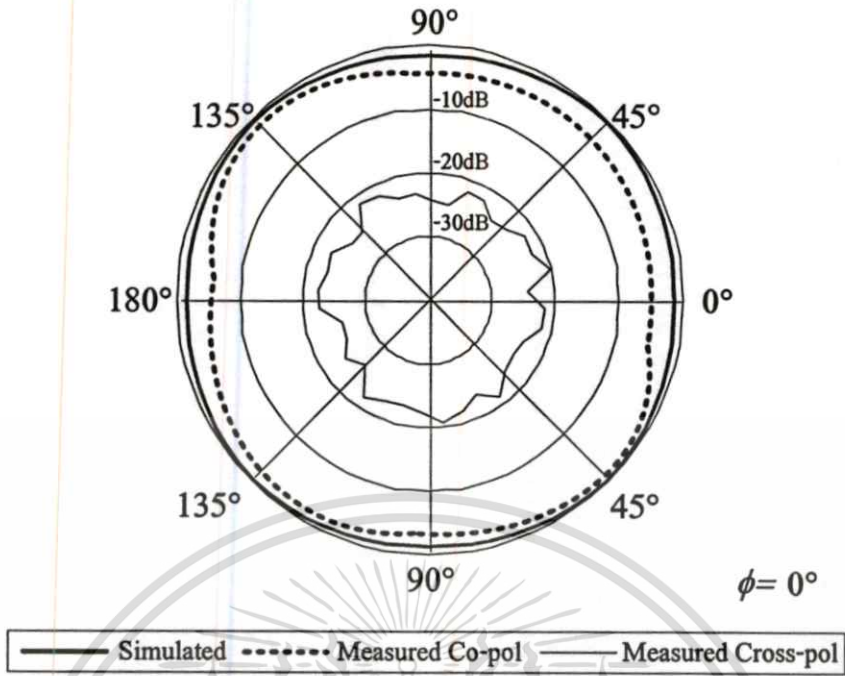


รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane ความถี่ 2.484 กิกะเฮิรตซ์

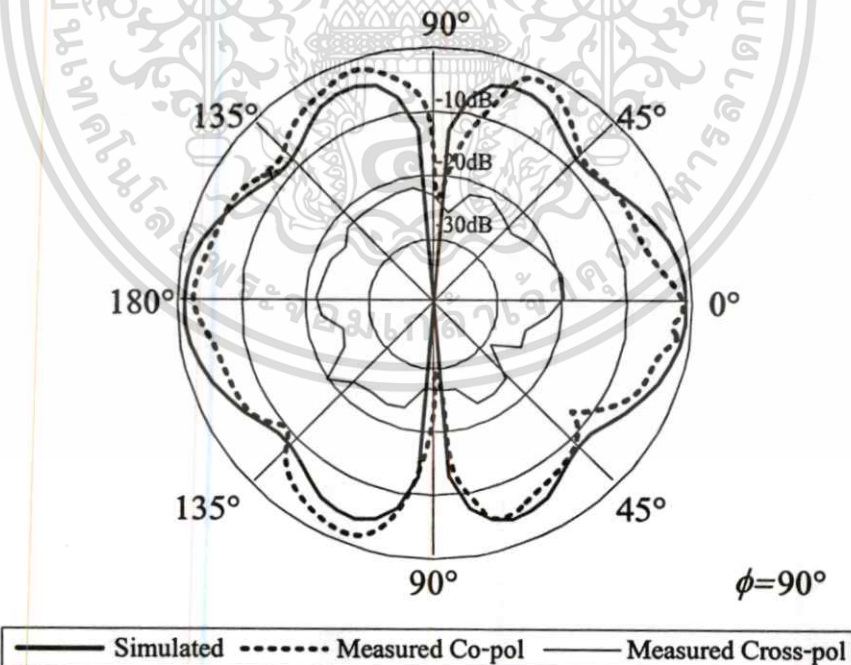


รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane ความถี่ 2.484 กิกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

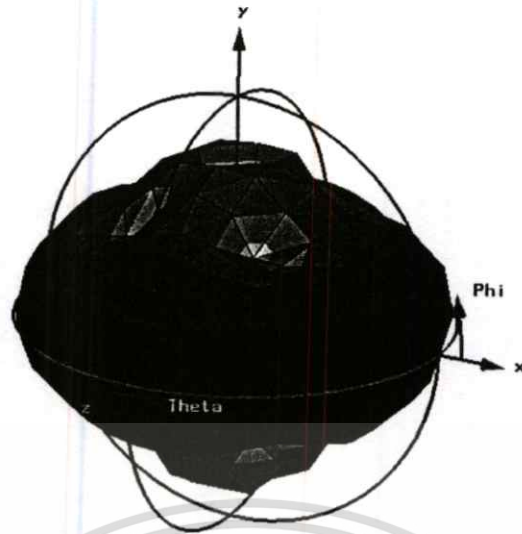


รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก XZ-plane ความถี่ 2.6 กิกะเฮิรตซ์

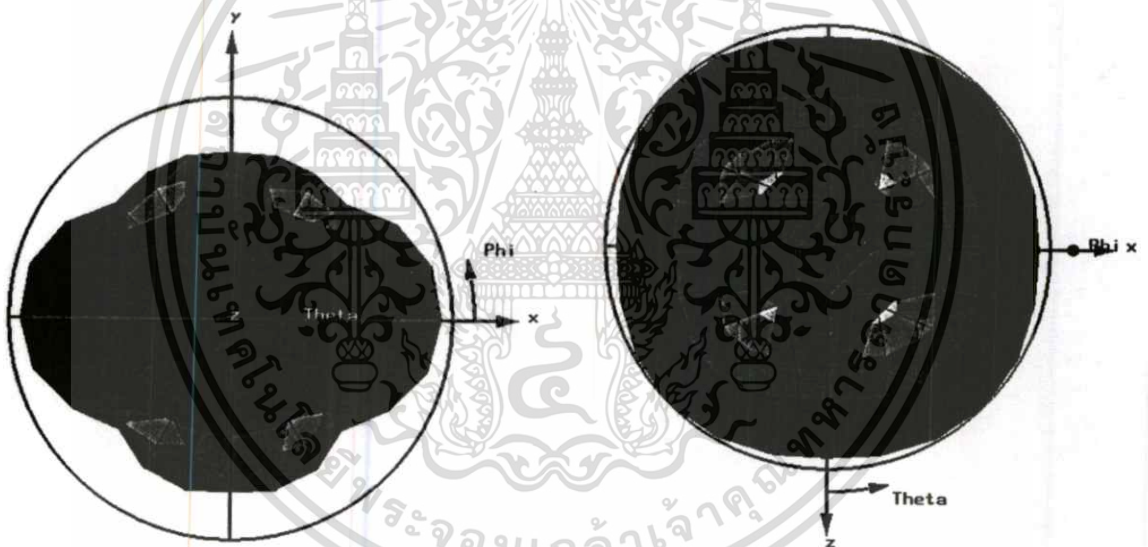


รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า YZ-plane ความถี่ 2.6 กิกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) ภาพมุมมองทั่วไป



(b) ภาพมุมมองด้านหน้า ด้านหลัง และด้านข้าง

(c) ภาพมุมมองด้านบน และด้านล่าง

รูปที่ 4.19 การจำลองค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ สำหรับสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแคบ 4 ด้าน

จากรูปที่ 4.9-4.18 คือผลการทดสอบ และการจำลองค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก ค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า และระดับการโพลาไรซ์ไขว้ของสายอากาศ โดยที่งานวิจัยนี้ต้องการแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแบบรอบตัว ต้องการความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้าที่แคบ และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยูทิตเห็นใบเซบระเขชนทานการคำไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นทางแนวตั้ง (Linear Vertical Polarization) เพราะอุปกรณ์สถานีฐานที่ใช้งานตามมาตรฐาน IEEE 802.11 WLAN ส่วนใหญ่ทำงานด้วยโพลาไรซ์ของคลื่นทางแนวตั้ง [9], [13] จึงต้องทดสอบทิศทางการเดินทางของคลื่นเมื่อสายอากาศภาคส่งกับภาครับวางตำแหน่งต่างกัน โดยถ้าสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์ของคลื่นที่คิดควรจะต้องสื่อสารรับส่งสัญญาณเมื่อวางตำแหน่งตรงกันได้ (วางแนวตั้งทั้งภาคส่ง และภาครับ) เท่านั้น ซึ่งดูจากค่าการโพลาไรซ์แบบไขว้ของคลื่นยิ่งถ้ามีค่ามากยิ่งดี ทั้งนี้สายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้นมามีลักษณะคล้ายสายอากาศปากแตรแบบที่มีปลายลู่ออกทางระนาบสนามไฟฟ้า (Sectoral E-plane) ที่จัดเรียงวาง 4 ดัน ดังนั้นจึงมีพฤติกรรมการเดินทางของคลื่นเป็นโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นทางแนวตั้ง และแพร่กระจายแบบรอบตัวได้ ดังรูปที่ 4.19

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าที่ความถี่ 2.2-2.6 GHz เกิกระยะสามารถให้ค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กได้รอบทิศเป็นมุม 360 องศา สามารถให้ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้าที่แคบประมาณ 50-60 องศา ซึ่งถือว่ายอมรับได้ และมีระดับการโพลาไรซ์ไขว้ของสายอากาศมากกว่า 20 dB ผ่านเกณฑ์ตรงตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

4.4 บทสรุป

การทดสอบสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมปากแตร 4 ด้าน หรือจะเรียกว่าสายอากาศช่องเปิดสำหรับแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง ถูกสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบโดยอาศัยมิติขนาดที่ได้จากบทที่ 3 แล้วพิจารณาคุณลักษณะเบื้องต้นที่สำคัญ ทั้งนี้ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรมสร้างสายอากาศ เมื่อคิดที่ VSWR น้อยกว่า 2:1 จะได้

- 1) ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำสุดประมาณ -40 dB ที่ความถี่เรโซแนนซ์
- 2) ค่าแบนด์วิดท์กว้างเท่ากับ 400 เมกะเฮิร์ตซ์ คิดเป็น 16.32 % ของมาตรฐาน WLAN
- 3) สายอากาศมีอิมพีแดนซ์ด้านเข้าแมตซ์กับสายนำสัญญาณ 50 โอห์ม
- 4) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสอดคล้องกับการทำงานแบบจุดต่อหลายจุด
- 5) มีอัตราขยายของสายอากาศสูงประมาณ 4-5 dBi

บทที่ 5

การประเมินสายอากาศในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

5.1 บทนำ

หัวข้อนี้จะนำสายอากาศต้นแบบ (Prototype Antenna) ทดสอบหาค่าวิสัยสามารถ (Throughput) [10] ที่แปรผันกับระยะทางที่ให้บริการ (Distance) เพื่อประเมินสมรรถนะของสายอากาศในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยเลือกการทำงานแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-Multipoint) ประเภทการใช้งานแบบการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างสถานีฐานด้วยกัน เพราะสามารถวิเคราะห์การใช้งานจริงได้

5.2 การประเมินการทำงานแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-Multipoint)

กำหนดเงื่อนไขการทดสอบ คือค่าวิสัยสามารถที่แปรผันกับระยะทางที่ให้บริการซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบคือ สถานีฐานตามมาตรฐาน IEEE 802.11g ยี่ห้อ Linksys รุ่น WAP54G พร้อมสายอากาศ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ อ่างอิง (Factory Default) คือ โมโนโพล 5 dBi และสายอากาศต้นแบบที่ได้จากการวิจัย 5.12 dBi และซอฟต์แวร์เครื่องมือวัดสำหรับตรวจวัดค่าวิสัยสามารถยี่ห้อ Ixia รุ่น IxChariot เวอร์ชัน 5.40 [17]

อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสถานีฐานจะเซตเป็นค่าพารามิเตอร์ดั้งเดิมจากโรงงานผู้ผลิต ได้แก่ คลื่นความถี่ช่องที่ 6 (2.437 กิกะเฮิรตซ์) ซึ่งเป็นความถี่ช่องกลางจาก 11 ช่อง เซ็ตอัตราการรับส่งข้อมูลแบบอัตโนมัติเพราะต้องการให้มอดูเลตทุกความเร็วในการใช้งานจริง เซ็ตโหมดการกระจายสัญญาณ (Access Point mode) สำหรับสถานีฐานแม่ และโหมดเชื่อมต่อแบบสะพาน (Bridge mode) สำหรับสถานีฐานลูก จากนั้นการทดสอบจะใช้คำสั่ง Ping IP [16] จากระบบปฏิบัติการไมโครซอฟท์ดอส (MS-DOS) เพื่อเช็คสถานะการเชื่อมต่อของสัญญาณ โดยต้องมีข้อความว่า Reply from ตอบกลับจึงจะถือว่าโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายสามารถสื่อสารกันได้อยู่ แล้วตรวจเช็คความเสถียรของการรับส่งข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์เครื่องมือวัดสำหรับตรวจวัดค่าวิสัยสามารถ โดยจะเปลี่ยนขนาดแพ็คเก็ตให้มากที่สุดเป็น 200 kbytes เพื่อจำลองการใช้แบนด์วิดท์สูง กำหนดช่วงเวลาทดสอบที่ 1 นาที เพื่อดูความเสถียรขณะรับส่งแพ็คเก็ตตลอดเวลา และวัดค่าวิสัยสามารถจากเครื่องลูกข่ายไร้สายไปยังสถานีฐานเพียงสถานะเดียว เพราะทางปฏิบัติจะใช้งานความถี่ของข้อมูลมากกว่า ทั้งนี้จะเปลี่ยนสายอากาศที่กำหนดทดสอบทีละแบบ (สายอากาศอ่างอิงกับสายอากาศอ่างอิง และสายอากาศต้นแบบกับสายอากาศต้นแบบ)

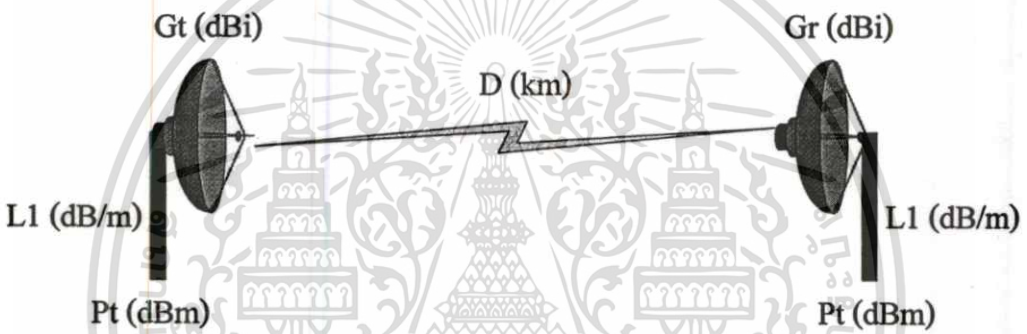
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพแวดล้อมที่ใช้ทดสอบ คือสนามกีฬาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง บริเวณแถวที่นั่งอัฒจันทร์สูงประมาณ 6 เมตร และอาคารสำนักงานอธิการบดี บริเวณชั้นคาเฟ่สูงประมาณ 30 เมตร โดยมีระยะทางแนวตรง (Line of Sight) ประมาณ 800 เมตร มีสภาพของอากาศโปร่งใส มีทัศนวิสัยดีต่อการทดสอบ

5.2.1 การคำนวณเมื่อเปลี่ยนอัตราขยายของสายอากาศ

จากรูปแสดงโคจรแกรมเพื่อใช้คำนวณหาระยะทางแนวตรงระหว่างสายอากาศโดยใช้สมการที่ 5.1 Friis Transmission [12] เพื่อหาระยะทางไกลที่สุดแบบ Free Space Loss ในทางปฏิบัติ ซึ่งผลจากการคำนวณจะเป็นระยะทางสูงสุดที่ให้บริการค่าวิสัยสามารถที่ไกลที่สุด



รูปที่ 5.1 โคจรแกรมการทดสอบสายอากาศ

$$Pr \text{ (dBm)} = Pt \text{ (dBm)} + Gt \text{ (dBi)} - L1 \text{ (dB)} - 32.4 - 20 \log F \text{ (MHz)} - 20 \log D \text{ (km)} + Gr \text{ (dBi)} - L2 \text{ (dB)} \quad (5.1)$$

เมื่อกำหนดให้

- F คือค่าความถี่กลาง 2450 MHz
- Pr คือค่า Received Power ของภาครับ ซึ่งสถานี่ฐานที่ใช้ทดสอบมีค่า -90 dBm แต่ทางปฏิบัติคิดค่า Fade Margin 30 dBm จึงใช้เป็น -60 dBm
- Pt คือค่า Transmit power ของภาคส่ง ซึ่งสถานี่ฐานที่ใช้ทดสอบมีค่า 15 dBm
- L1 คือค่า Loss ของสายนำสัญญาณภาคส่ง (RG 223/U-01 50 Ohm ยาว 1 เมตร) มีค่า 0.8 dB/m
- L2 คือค่า Loss ของสายนำสัญญาณภาครับ (RG 223/U-01 50 Ohm ยาว 1 เมตร) มีค่า 0.8 dB/m
- Gt คือค่าอัตราขยายของสายอากาศส่ง และ Gr คือค่าอัตราขยายของสายอากาศรับ
- D คือระยะทางแนวตรงระหว่างสถานี่ฐานด้วยกัน

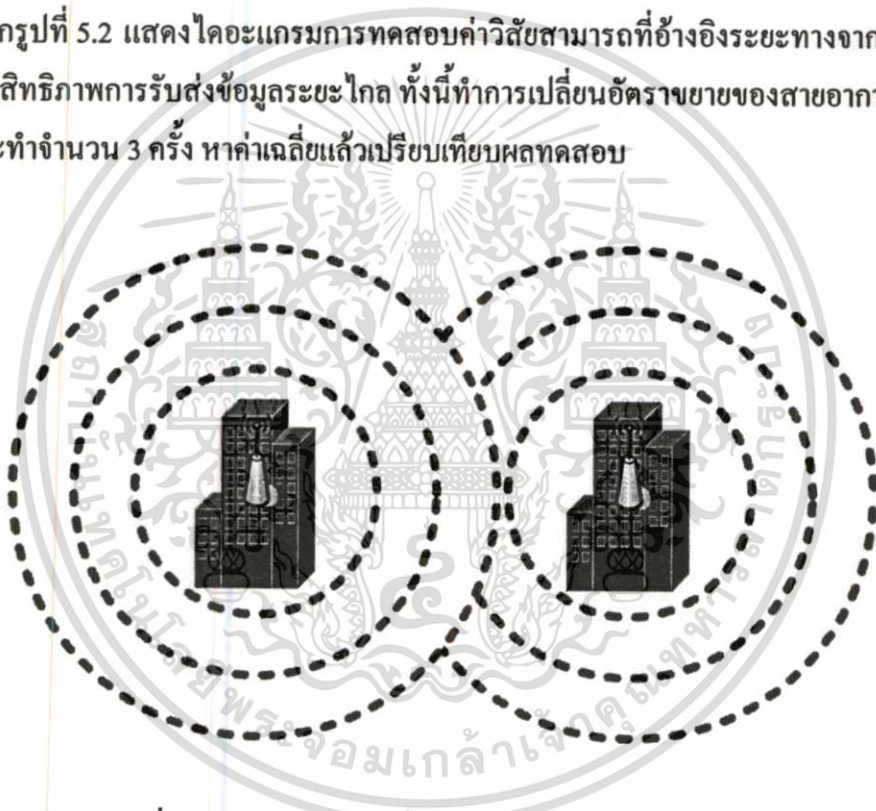
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ผลการคำนวณค่าวิสัยสามารถสูงสุด ด้วยสมการ Friis Transmission

	สายอากาศอ้างอิง อัตราขยาย 5 dBi	สายอากาศต้นแบบ อัตราขยาย 5.12 dBi
ค่าวิสัยสามารถสูงสุด (Max. Throughput)	146 m	150 m

5.2.2 การทดสอบเมื่อเปลี่ยนอัตราขยายของสายอากาศ

จากรูปที่ 5.2 แสดงไดอะแกรมการทดสอบค่าวิสัยสามารถที่อ้างอิงระยะทางจากการคำนวณ เพื่อวัดประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลระยะไกล ทั้งนี้ทำการเปลี่ยนอัตราขยายของสายอากาศโดยแต่ละแบบจะกระทำจำนวน 3 ครั้ง หากค่าเฉลี่ยแล้วเปรียบเทียบผลทดสอบ



รูปที่ 5.2 ไดอะแกรมการเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐานด้วยกัน

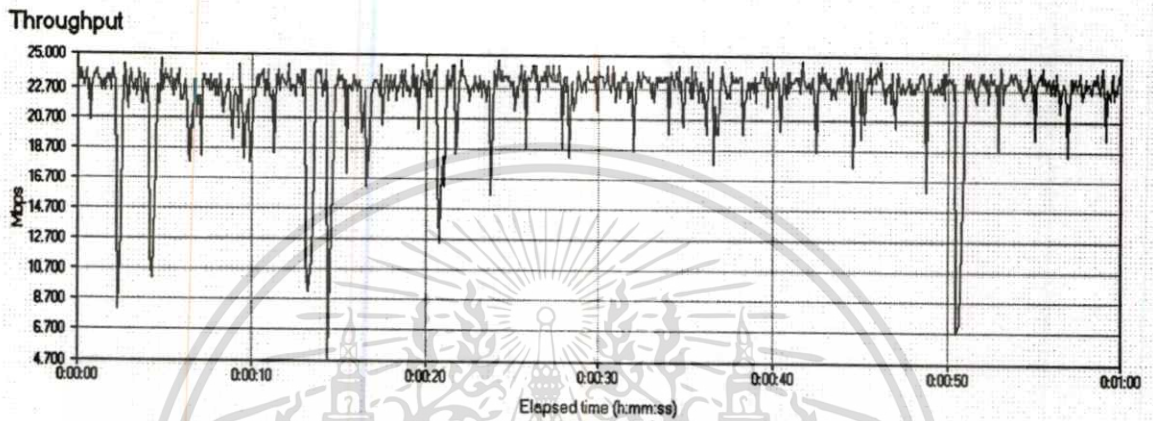
ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบระยะทางด้วยซอฟต์แวร์เครื่องมือวัด IxChariot

เงื่อนไข	สายอากาศอ้างอิง อัตราขยาย 5 dBi	สายอากาศต้นแบบ อัตราขยาย 5.12 dBi
ระยะทาง 10m	23 Mbps	23 Mbps
ระยะทาง 80m	23 Mbps	23 Mbps
ระยะทาง 150m	22.7 Mbps	22.9 Mbps
ระยะทาง 800m	1.2 Mbps	1.3 Mbps

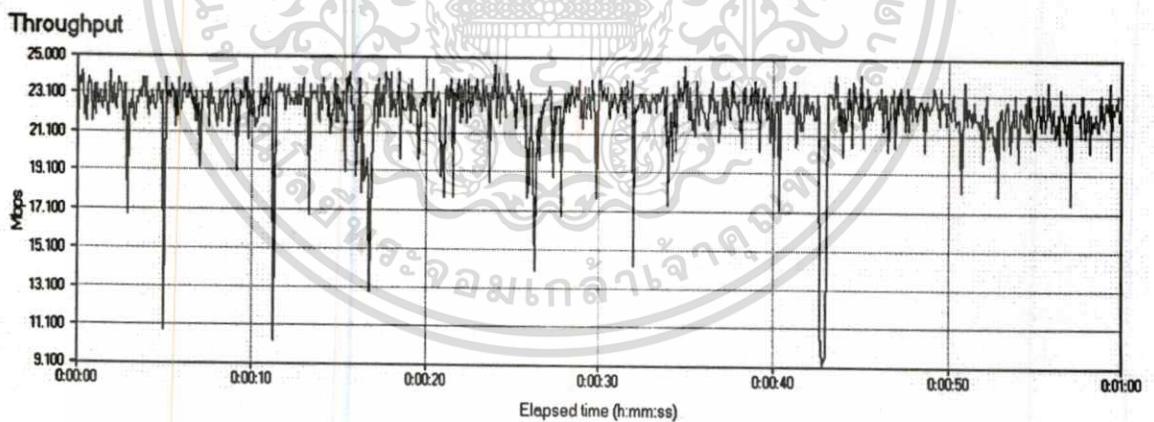
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.2 นำสายอากาศอ้างอิงค่าอัตราขยาย 5 dBi มาร่วมทดสอบเพราะต้องการเปรียบเทียบความสามารถในการทำงานจริง แล้วเริ่มทดสอบที่ระยะทาง 10 เมตร เพื่อตรวจเช็คสายอากาศต้นแบบสามารถทำงานได้ตั้งแต่ระยะทางใกล้ๆ ไปถึงระยะทางไกลได้จริง ทั้งนี้ได้อธิบายวิธีการทดสอบไว้ในหัวข้อ 5.2 แล้ว โดยซอฟต์แวร์เครื่องมือวัด IxChariot จะแสดงรูปภาพหลังจากการทดสอบแต่ละครั้งให้ทราบ และผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 5.3-5.6

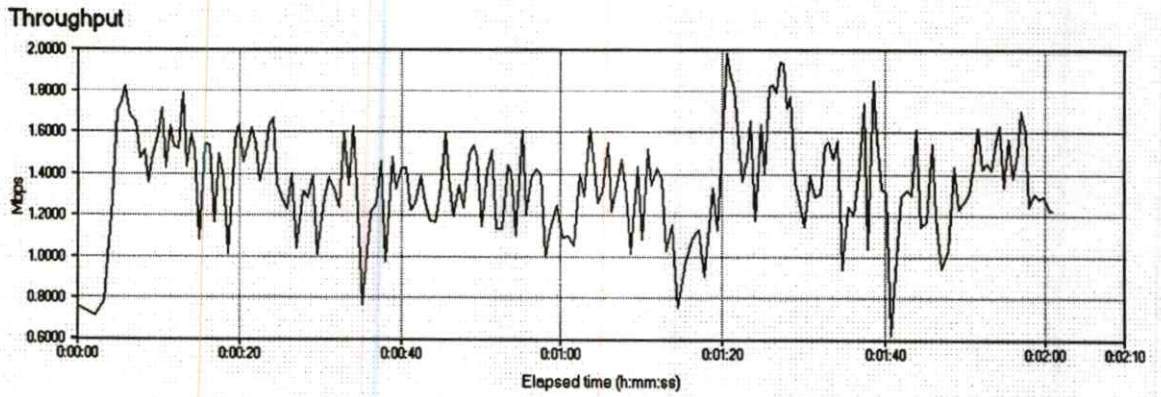


รูปที่ 5.3 สายอากาศอ้างอิงที่อัตราขยาย 5 dBi สำหรับระยะทาง 150 เมตร

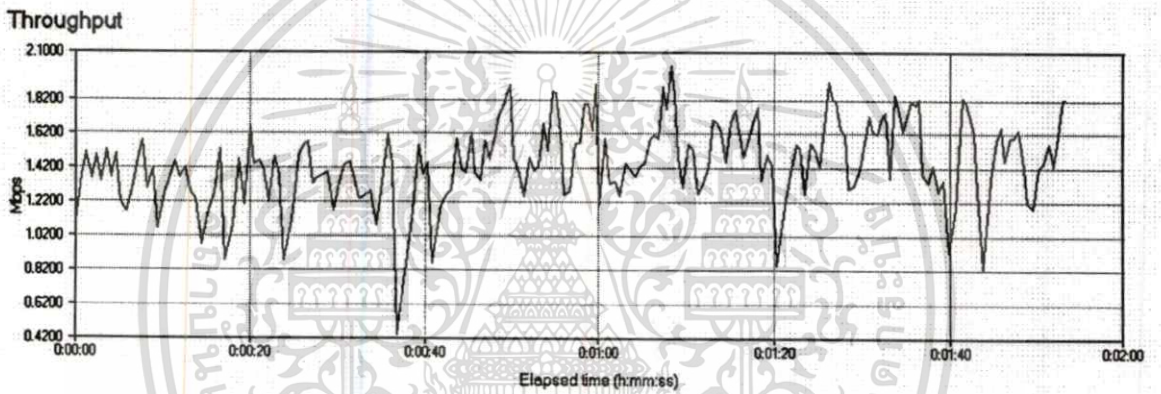


รูปที่ 5.4 สายอากาศต้นแบบที่อัตราขยาย 5.12 dBi สำหรับระยะทาง 150 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 สายอากาศอ้างอิงที่อัตราขยาย 5 dBi สำหรับระยะทาง 800 เมตร



รูปที่ 5.6 สายอากาศต้นแบบที่อัตราขยาย 5.12 dBi สำหรับระยะทาง 800 เมตร

5.3 บทสรุป

เมื่อพิจารณาจากสูตรการคำนวณ และการทดสอบด้วยซอฟต์แวร์เครื่องมือวัดจะพบว่า สายอากาศต้นแบบที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถรับส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุดคงที่ตลอดระยะทางที่ไม่เกิน 150 เมตร และสามารถตอบสนองการทำงานไกลสุดที่ระยะทางไม่เกิน 800 เมตร

สายอากาศต้นแบบที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถทดสอบหาค่าวิสัยที่สามารถที่แปรผันกับระยะทางที่ให้บริการเพื่อประเมินสมรรถนะของสายอากาศในระบบ โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยเลือกการทำงานแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-Multipoint) ประเภทการใช้งานแบบการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างสถานีฐานด้วยกัน สามารถนำไปใช้งานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงการสรุปเนื้อหาโดยรวม ข้อเสนอแนะ และแนวทางในการจำลองออกแบบ การจัดสร้าง การทดสอบสายอากาศ และการประเมินสายอากาศ ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาวิเคราะห์ และทดสอบสายอากาศโพรบบนแผ่นตัวนำแบบขนานพร้อมช่องเปิด 4 ด้าน โดยการวิจัยเริ่มจากการศึกษาทฤษฎีของสายอากาศในบทที่ 2 การจำลองสายอากาศจะใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ผลที่ได้จากการจำลองในบทที่ 3 จะนำมาสร้างสายอากาศต้นแบบ เพื่อทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ

6.2 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ออกแบบสายอากาศสำหรับระบบ โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย มาตรฐาน IEEE 802.11 WLAN ที่ใช้ย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เป็นแบบรอบทิศทาง สำหรับการทำงานแบบจุดต่อหลายจุดให้สามารถใช้งานภายใน และภายนอกอาคารได้โดยอ้างอิงงานวิจัยจากบทที่ 1 แล้วอาศัยทฤษฎีของสายอากาศในบทที่ 2 ทำการจำลองสายอากาศ พิจารณาคุณลักษณะเบื้องต้นที่สำคัญได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าอิมพีแดนซ์ ด้านเข้า ค่าการสูญเสียย้อนกลับ และค่าอัตราการขยายของสายอากาศ ซึ่งขั้นตอนการจำลองประกอบด้วยสามหัวข้อหลัก คือวิวัฒนาการ โครงสร้างสายอากาศ การปรับปรุงโครงสร้างสายอากาศ และการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ตลอดช่วงกว้างความถี่ จากนั้นทำการทดสอบสายอากาศตามบทที่ 4 ซึ่งโครงสร้างสายอากาศต้นแบบทำจากแผ่นวัสดุทองเหลืองหนา 1 มิลลิเมตร 2 ชั้น วางขนานกันโดยใช้เนื้อพลาสติกยึดค้ำไว้เป็นตัวซัพพอร์ต เลื่อนี้อตอลูมิเนียมทำเป็นตัวโพรบแล้วใช้คอนเน็คเตอร์แบบ N-Type Female 50 โอห์ม เชื่อมต่อได้โพรบ โดยมีขนาดมิติดังรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.1

ผลการทดสอบคือ เมื่อกำหนดค่า VSWR น้อยกว่า 2:1 จะได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่าค่า -10 dB ที่ครอบคลุมช่วงความถี่ 2.2-2.6 กิกะเฮิรตซ์ คิดเป็นแบนด์วิดธ์ประมาณ 400 เมกะเฮิรตซ์ หรือ 16.32 % ได้ค่าอัตราการขยายอยู่ในช่วง 4-5 dBi ได้ค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแบบรอบทิศทาง (Omni-directional) และสามารถบีบค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้าให้แคบลงประมาณ 50-60 องศา ได้ค่าการกระเพื่อมในระนาบมุมกวาดที่น้อยกว่า 3 dB และระดับการโพลาริไซซ์ของสายอากาศมากกว่า 20 dB สอดคล้องกับการ

ประเมินสายอากาศบทที่ 5 ซึ่งพิสูจน์แล้วว่าสายอากาศสามารถทำงานตรงวัตถุประสงค์การใช้งานจริง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปข้อดีของสายอากาศจากการออกแบบ และสร้างทดสอบ

- 1) สายอากาศรองรับย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 WLAN b/g/n
- 2) มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง เหมาะสำหรับการใช้งานแบบจุดต่อหลายจุด
- 3) โครงสร้างสายอากาศออกแบบง่ายต่อการสร้าง วัสดุแข็งแรง น้ำหนักเบา และราคาถูก

6.3 ข้อเสนอแนะ และแนวทางพัฒนา

- 1) ในงานวิจัยนี้จำลองพารามิเตอร์โพรบชี้แกน Y แล้วให้ระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแกน XZ และให้ระนาบสนามไฟฟ้าเป็นแกน YZ เพราะอ้างอิงจากสายอากาศปากแตรในระนาบสนามไฟฟ้า แต่ถ้าต้องการอ้างอิงกับสายอากาศทางอุดมคติก็สามารถเปลี่ยนโพรบไปชี้แกน Z และให้ระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแกน XY ระนาบสนามไฟฟ้าเป็นแกน YZ ได้เช่นเดียวกัน
- 2) การออกแบบพารามิเตอร์โพรบสำคัญมากเพราะสามารถควบคุมอินพุตอิมพีแดนซ์ให้ใกล้เคียง 50 โอห์ม และค่าการสูญเสียย้อนกลับได้ ดังนั้นตัวโพรบอาจเลือกใช้ชนิดตัวเมียที่เป็นอลูมิเนียม หรือทองเหลืองแล้วใช้น็อตตัวผู้ขันลงไปชั่วคราว เพื่อปรับแต่งค่าการสูญเสียย้อนกลับจากการมอนิเตอร์เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP 8720C ได้
- 3) การออกแบบพารามิเตอร์ตัวซัพพอร์ต ได้เลือกใช้ชนิดพลาสติกยึค้ำแผ่นวัสดุทองเหลืองไว้ เพราะสามารถลอกประกอบโครงสร้างได้ แต่ต้องคิดแปลงตัวเนื้อพลาสติกเพราะความยาวที่ใช้ไม่มีขายตามท้องตลาดโดยตรง ดังนั้นอาจประยุกต์ใช้แกนพลาสติกกับเนื้อพลาสติกร่วมกันได้ เพื่อความแข็งแรงสำหรับใช้ในทางปฏิบัติได้จริง รวมทั้งอาจต้องมี Radome มาครอบเพื่อป้องกันปัญหาเรื่อง ฝุ่น ผ่น นก เป็นต้น ซึ่งต้องทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศอีกครั้งด้วย
- 4) การออกแบบพารามิเตอร์โครงสร้างแผ่นตัวนำจะใช้วัสดุทองเหลือง เพราะเป็นตัวนำสมบูรณ์ (ตัวนำสมบูรณ์ค่า $\sigma = 1.57 \times 10^7 \text{ S/m}$) ที่ยอมรับได้ และมีขายทั่วไปในท้องตลาด ราคาถูก แข็งแรง ไม่เป็นสนิม
- 5) การจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO คือจุดเริ่มต้นในการทำวิจัย ดังนั้นควรกำหนดช่วงความถี่แบบหยาบ เช่น 1-4 กิกะเฮิรตซ์ และถ้าได้ค่าคุณลักษณะที่ต้องการก็ค่อยปรับช่วงความถี่ให้ละเอียดขึ้นเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำ เช่น 2-3 กิกะเฮิรตซ์ สำหรับมาตรฐาน IEEE 802.11 WLAN ที่ใช้ย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์

- 6) จากการจำลองความหนาของแผ่นวัสดุ พบว่าแทบไม่มีผลกระทบต่อค่าคุณลักษณะ หรือการไหลของกระแสบนพื้นผิว ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงเลือกความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร ที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด เพราะต้องการ โครงสร้างน้ำหนักเบา
- 7) จากการจำลองมุมของแผ่นปากแคร์ จะมีผลต่อแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าให้มีค่าคลื่นแคบ ดังนั้นทางปฏิบัติไม่ควรให้มุมผิดพลาดเกิน ± 5 องศา
- 8) การประเมินสายอากาศต้องจัดหาสายนำสัญญาณแบบสายทดสอบสูญเสียต่ำ (Low Loss cable) เช่น RG 223/U-01 50 Ohm และควรใช้สายนำสัญญาณที่สั้น เพราะมีผลกระทบต่อค่าอัตราขยายของสายอากาศจะมีค่าลดลงเมื่อต้องเชื่อมต่อแบบระยะทางไกล
- 9) โครงสร้างสายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้ออกแบบให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง แต่สามารถพัฒนาประยุกต์ออกแบบเป็นแบบสองทิศทาง หรือแบบสี่ทิศทางได้ โดยการจำลองแก้ไขที่พารามิเตอร์แผ่นตัวนำ
- 10) โครงสร้างสายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้ออกแบบให้รองรับย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 WLAN แต่สามารถพัฒนาประยุกต์ออกแบบให้รองรับย่านความถี่กว้างยิ่งยวด (Ultra wideband) หรือย่านความถี่ Wi-Max ได้ โดยปรับแต่งพารามิเตอร์ตัวโพรบ

วิทยานิพนธ์นี้เน้นการวิเคราะห์จำลองสายอากาศในแต่ละขั้นตอนอย่างละเอียด และได้ทำการทดสอบสายอากาศเพื่อเป็นแนวทางให้ผู้สนใจทั่วไปสามารถนำไปพัฒนาสายอากาศ และปรับปรุง โครงสร้างให้มีรูปแบบที่หลากหลายประยุกต์ใช้งานได้จริงต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 6.1 ข้อมูลทางเทคนิคของสายอากาศ

ขนาดทางไฟฟ้า

ITEM	SPECIFICATION
Description	Probe with Parallel-Plate and Four Aperture
Application	Point to Multipoint
Frequency Rang	2.2 to 2.6 GHz
Gain	4-5 dBi
3 dB Beamwidth	H-Plane 360 degree E-Plane 50-60 degree
VSWR (max.)	1.5: 1
Impedance	50 Ohms
Approximate Range*	150 meters (Max. speed) 800 meters (Min. speed)
Polarization	Linear Vertical Polarization
Cable length**	Default 1 m.
Material	Brass (Main Structure) Plastic (Supporter)

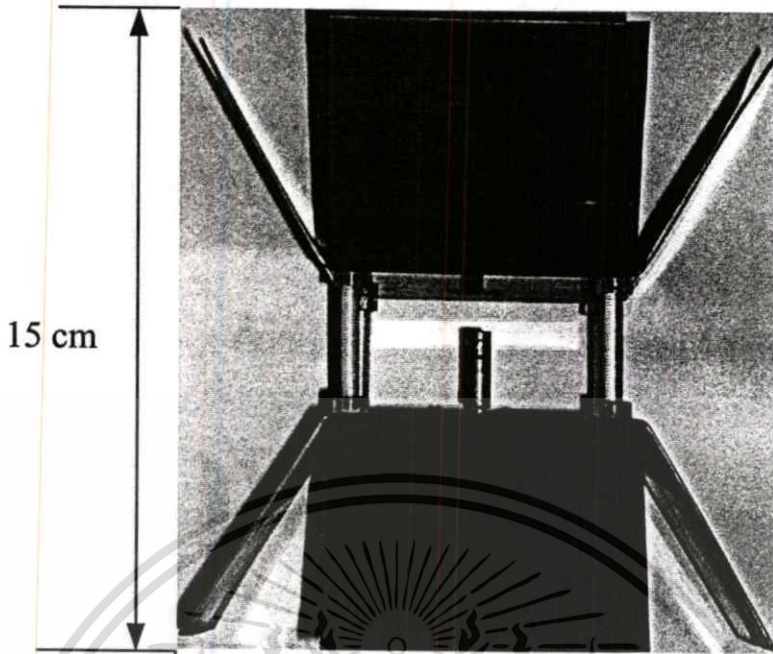
* Approximate Range depend on Transmitting Power and Envelopment.

**Option support extend the cable to 3 m. but has effect decrease rang area.

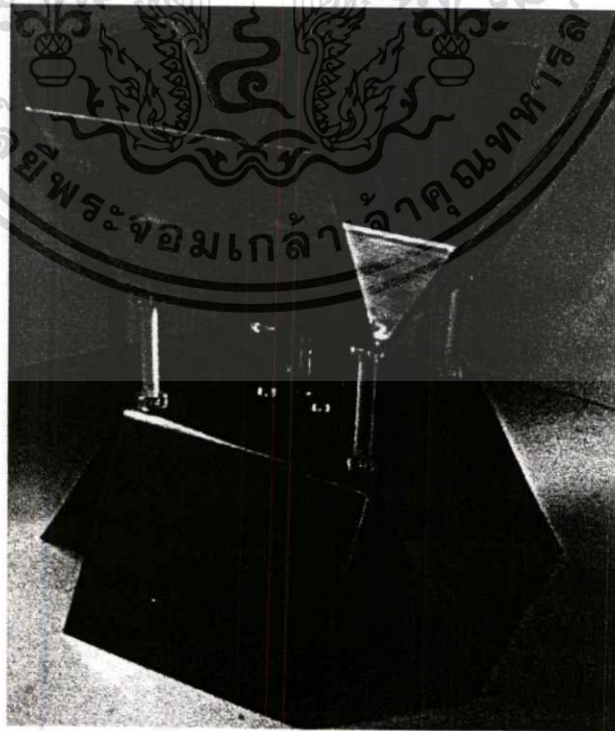
ขนาดทางกล

ITEM	SPECIFICATION
Dimensions	Diameter 14 cm. High 15 cm. Width 14 cm.
Weight	< 500 g.
Connector Type	N Type Female
Cable	Low Loss cable model RG 223/U-01 50 Ohm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.1 มุมมองด้านหน้า



รูปที่ 6.2 มุมมองทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] F.S. Chang, H.T. Chen, K.C. Chao, and W.S. Chen, "A novel monopole antenna for WLAN access point applications," *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE.*, vol. 2A, pp. 438-441, Jul. 2005.
- [2] M.A. Enlund, M.L. Sadrai, A. Derneryd, U. Engstrom, M. Johansson, and B. Svensso, "Parallel Plate waveguide antenna for point-to-multipoint communication millimetre-wave frequencies," *Electronics Letters.*, vol. 41, pp. 626-627, May. 2005.
- [3] A.V. Shishkova, N.N. Gorobets, and E.E. Ovsyannikova, "Near-field radiation from sectoral horns," *Antenna Theory and Techniques, 2007 6th International Conference.*, pp. 134-136, Sep. 2007.
- [4] L.E.G. Castillo, D.P. Zubiaur, and L.F. Demkowicz, "Fully Automatic hp Adaptivity for Electromagnetics, Application to the Analysis of H-Plane and E-Plane Rectangular Waveguide Discontinuities," *Microwave Symposium, 2007. IEEE/MTT-S International.*, pp. 285-288, Jun. 2007.
- [5] A.L. Teplyuk, and G.I. Khlopov, "Power pattern expansion of sectorial horn-parabolic antenna for wireless communications," *Antenna Theory and Techniques, 2005 5th International Conference.*, pp. 307-3102, May. 2005.
- [6] D.E. Lawrence, "Modified radiation pattern prediction for small aperture horn antennas," *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE.*, vol. 3A, pp. 749-752, Jul. 2005.
- [7] G.K. Palikaras, A.P. Feresidis, and J.C. Vardaxoglou, "Cylindrical EBG surface for omnidirectional wireless LAN antennas," *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE.*, vol. 4B, pp. 339-342, Jul. 2005.
- [8] J. Geng, R. Jin, Z. Wang, Z. Yuan, J. Dong, J. Li, W. Wang, W. He and M. Ding, "A new omnidirectional vertical polarization antenna with low profile and high gain," *Microwave Conference Proceedings, 2005. APMC 2005. Asia-Pacific Conference Proceedings.*, vol. 4, pp. 2, Dec. 2005.
- [9] D. Wu, Y. Fan, and Y. Zhang, "A 2.4-GHz Low Un-Roundness of E-Plane Omnidirectional Radiation Pattern Antenna with Patch Inductance," *Microwave and Millimeter Wave Technology, 2007. ICMMT '07. International Conference.*, pp. 1-2, Apr. 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่สงวนลิขสิทธิ์ของโครงการความร่วมมือด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] A. Kamerman, and G. Aben, "Throughput Performance of Wireless LANs Operating at 2.4 and 5 GHz," *Proc. PIMRC 2000.*, pp. 190-195, Aug. 2000.
- [11] L.C. Shen, and J.A. Kong, "*Application Electromagnetism*", PWS publishers, 1987.
- [12] C.A. Balanis, "*Antenna Theory Analysis and Design*", Wiley, 2005.
- [13] R. Flickenger, "*Building Wireless Community Networks*", O'Reilly, 2002.
- [14] D.M. Pozar., "Microwave engineering", Wiley, 2005.
- [15] "CST Microwave Studio, User's Manual," 2005.
- [16] "The New Mainstream WLAN Technology, White Papers," Broadcom Corporation, 2007.
- [17] "RFC792," <http://tools.ietf.org/html/rfc792>
- [18] "IXchariot, Product Performance Testing," Ixia, 2007.
- [19] <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11b-1999.pdf>
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11g-2003.pdf>
http://www.wi-fi.org/files/kc/WFA_802_11n_Industry_June07.pdf
- [20] S.J. Orfanidis, "*Electromagnetic Waves and Antennas*", www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa, Rutgers University, 2008.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล	นายอิทธิพล รัตน โขติ
วันเดือนปีเกิด	3 ธันวาคม พ.ศ. 2519 จังหวัดชุมพร
ที่อยู่	279/12 หมู่ 4 ซอยสุขสวัสดิ์ 62 ถนนสุขสวัสดิ์ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2540	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตนนทบุรี
พ.ศ. 2543	ปริญญาตรี (วศ.บ) สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2544-2546	ตำแหน่ง Service Engineer บริษัท Linksys (Thailand) Co., Ltd. www.linksys.com
พ.ศ. 2546-2549	ตำแหน่ง Network Engineer บริษัท Ingram Micro (Thailand) Ltd. www.ingrammicro.com
พ.ศ. 2549-ปัจจุบัน	ตำแหน่ง Senior Consult Engineer บริษัท Samart Communication Services Co., Ltd www.samtel.com
ความชำนาญเฉพาะด้าน	Design Data & Voice Network

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้