

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์โพลาไรซ์ของสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่  
Polarization Analysis of Antenna using Two Probes Excited Ring



โดย

นายอนุพันธ์ ม่วงแพร

นายพงษ์ศักดิ์ ทองเสริม

วพ.  
น. ๖๖๔๓  
๖๕๖๕

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน **62791**

วันเดือนปี **22 ส.ค. 2549**

b. **11130802**

ปฏิญานีพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว

(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว

(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์

การวิเคราะห์โพลาไรซ์ของสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่  
**Polarization Analysis of Antenna using Two Probes Excited Ring**



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

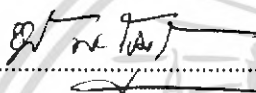
เรื่อง การวิเคราะห์โพลาไรซ์ของสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่

**POLARIZATION ANALYSIS OF ANTENNA USING TWO PROBES EXCITED RING**

ผู้จัดทำ

1. นายนฤพนธ์ ม่วงแพร 46015015

2. นายพงษ์ศักดิ์ ทองเสริม 46015019

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์โพลาไรซ์ของสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่  
Polarization Analysis of Antenna using Two Probes Excited Ring

โดย 1.นายณฤพนธ์ ม่วงแพร 46015015  
2.นายพงษ์ศักดิ์ ทองเสริม 46015019

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นกรนำเสนองการวิเคราะห์การโพลาไรซ์ของสายอากาศที่ใช้โพรบคู่ป้อนวงแหวนโดยการพิจารณาเงื่อนไขการป้อนสัญญาณ และความต่างเฟสสายอากาศที่ออกแบบจะมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนสร้างได้ง่าย และเหมาะสำหรับระบบสื่อสารไร้สายที่มีการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์ระหว่างการเดินทางของคลื่น โดยในโครงการนี้จะทำการวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศอันได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างของลำคลื่น และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์คืออิมพีแดนซ์ด้านเข้า ค่าการสูญเสียย้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และคุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ ซึ่งประกอบด้วย อัตราส่วนแกนและมุมเอียงของทิศทางสนามไฟฟ้า จากนั้นจะได้ทำการสร้างและทดสอบสายอากาศเพื่อยืนยันว่าสามารถมีคุณสมบัติที่ดี สามารถนำไปใช้งานจริงได้

Abstract

This project presents the polarization analysis of an antenna using two probes excited ring. The magnitude and phase excitation will be determined. The proposed antenna structure is simple and easy to fabricate. This antenna is suitable to receive the signal in case of the polarization is changed during the wave is propagated. This project will analyze the radiation characteristics such as radiation pattern, Beamwidth and directivity; impedance characteristics such as input impedance, return loss and standing

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และรองศาสตราจารย์ ดร.สมผล โกศลวิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ให้คำปรึกษาของพวกข้าพเจ้าโดยเป็นผู้ให้ความช่วยเหลือแนะนำแนวทางการศึกษาและอบรมสั่งสอน นอกจากนี้คำชี้แนะความรู้ จากคุณสุธาสิณี ละมุลตรี ที่ให้ความรู้ทางทฤษฎี คุณยุกติทัศน์ ชวานนท์พิทักษ์ และ คุณกฤตยา ชวานนท์พิทักษ์ ที่ให้ความรู้แนะแนวทางการทดสอบและให้ความสะดวกในด้านอุปกรณ์การทดสอบซึ่งเกี่ยวกับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายภายนอกอาคาร และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่างๆ ให้แก่ผู้จัดทำ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ให้ความสำคัญกับการศึกษาแก่ผู้จัดทำและให้การสนับสนุนเอาใจใส่ดูแลด้วยดีเสมอมา รวมทั้งให้กำลังใจอันยิ่งใหญ่อย่างหาที่เปรียบมิได้

นายณัฐพนธ์ ม่วงแพร  
นายพงษ์ศักดิ์ ทองเสริม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
สารบัญ.....	III
สารบัญตาราง.....	IV
สารบัญรูปภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการของสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ .....	3
2.1 บทนำ .....	3
2.2 โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ .....	3
2.3 หลักการพิจารณาค่าความกว้างและความสูงของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส .....	4
2.3.1 การพิจารณาโหมดที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส .....	4
2.4 ความยาวคลื่นตัดสำหรับโหมดแบบกลม .....	5
2.5 โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ .....	7
2.6 โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 หรือ NEC 2 .....	10
2.7 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้งานสายอากาศ .....	12
2.7.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น .....	12
2.7.2 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง .....	13
2.7.3 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรก .....	13
2.7.4 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น .....	13
2.7.5 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง .....	13
2.7.6 อัตรายกขา .....	13
2.7.7 ช่วงกว้างความถี่ที่ใช้งาน .....	13
2.8 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ .....	14
2.9 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า .....	16
2.10 บทสรุป .....	17
บทที่ 3 ผลวิเคราะห์สายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่.....	18
3.1 บทนำ.....	18
3.2 คุณลักษณะของสายอากาศองค์ประกอบวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่.....	18
3.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....	18
3.2.2 ค่ามุมขกที่สนามสูงสุด.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.3 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง.....	23
3.2.4 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์คู่แรก.....	25
3.2.5 ค่าสภาพเงาเงงทิศทางของสายอากาศ.....	28
3.2.6 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซซ์.....	35
3.2.7 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์.....	49
3.3 บทสรุป.....	60
<b>บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบ.....</b>	<b>62</b>
4.1 การออกแบบและการสร้างสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่.....	62
4.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....	63
4.3 ค่าอัตราขยายของสายอากาศ.....	70
4.4 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซซ์ของสายอากาศ.....	73
4.5 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ.....	77
4.6 สรุป.....	81
<b>บทที่ 5 มาตรฐาน IEEE 802.11 การประเมินประสิทธิภาพและผลการทดสอบ.....</b>	<b>83</b>
5.1 บทนำ.....	83
5.2 มาตรฐาน IEEE 802.11.....	83
5.2.1 มาตรฐาน IEEE 802.11b.....	83
5.2.2 มาตรฐาน IEEE 802.11a.....	83
5.2.3 มาตรฐาน IEEE 802.11g.....	83
5.3 การทดสอบประสิทธิภาพ.....	85
5.4 ผลการทดสอบระยะบริการและค่าวิสัยสมารถที่ Transmission Data Rate 54 Mbps.....	86
5.5 การทดสอบประสิทธิภาพ.....	87
5.6 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio).....	89
5.7 ผลการทดสอบระยะบริการและค่าวิสัยสมารถที่ Transmission Data Rate 11 Mbps.....	90
5.8 สรุป.....	92
<b>บทที่ 6 วิจัยและบทสรุป.....</b>	<b>93</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>95</b>
ภาคผนวก ก โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์.....	96
ภาคผนวก ข วิธีการทดสอบค่าพารามิเตอร์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยายของสายอากาศ.....	99

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์แบบจำลองอากาศว่าง และแบบจำลองสองรังสี .....	102
ภาคผนวก จ .....	117
ภาคผนวก ฉ วิธีการติดตั้งระบบเครือข่าย ท้องถิ่น ไร้สาย .....	118
กิตติกรรมประกาศ.....	126
เอกสารอ้างอิง .....	127



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส ป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ .....	3
รูปที่ 2.2 โครงสร้างสายอากาศวงแหวนวงกลมโพรบคู่ป้อนสัญญาณ .....	7
รูปที่ 2.3 การโพลารไรซ์ที่มีลักษณะเอียงจากแกนอ้างอิง.....	14
รูปที่ 2.4 สายอากาศส่งและวงจรสมมูลย์.....	16
รูปที่ 3.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของ สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วย โพรบคู่ความต่างเฟสเท่ากับ 0 องศา.....	19
รูปที่ 3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วย โพรบคู่ความต่าง เฟสเท่ากับ 135 องศา.....	19
รูปที่ 3.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วย โพรบคู่ความต่างเฟสเท่ากับ 0 องศาที่มีค่ารัศมี (r) เท่ากับ 0.45λ .....	20
รูปที่ 3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ความต่างเฟสเท่ากับ 145 องศาที่มีค่ารัศมี (r) เท่ากับ 0.45λ .....	20
รูปที่ 3.5 ค่ามุมขกที่สนามสูงสุด เมื่อเปลี่ยนความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	21
รูปที่ 3.6 ค่ามุมขกที่สนามสูงสุด เมื่อเปลี่ยนความยาววงแหวนวงกลม.....	22
รูปที่ 3.7 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง เมื่อเปลี่ยนความยาววงแหวน สี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	23
รูปที่ 3.8 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง เมื่อเปลี่ยนความยาววงแหวนวงกลม.....	24
รูปที่ 3.9 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์คู่แรก เมื่อเปลี่ยนความยาววงแหวน สี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	26
รูปที่ 3.10 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์คู่แรก เมื่อเปลี่ยนความยาววงแหวน วงกลม.....	27
รูปที่ 3.11 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่เมื่อเปลี่ยน ความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	28
รูปที่ 3.12 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ เมื่อเปลี่ยน ความยาววงแหวนวงกลม.....	28
รูปที่ 3.13 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วย โพรบคู่ ที่เป็นฟังก์ชันของความยาวโพรบ เมื่อพิจารณาความยาวค่าต่าง ๆ.....	30
รูปที่ 3.14 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่เป็น ฟังก์ชันของความยาวโพรบ เมื่อพิจารณาความยาวค่าต่าง ๆ.....	31
รูปที่ 3.15 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบ คู่ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ เมื่อพิจารณาความยาวค่าต่าง ๆ.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.16 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ เมื่อพิจารณาความยาว ค่าต่าง .....	33
รูปที่ 3.17 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซซ์ของสายอากาศวงกลมสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 0 องศาระนาบสนามไฟฟ้า.....	35
รูปที่ 3.18 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซซ์ของสายอากาศวงกลมสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 0 องศาระนาบสนามแม่เหล็ก.....	36
รูปที่ 3.19 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซซ์ของสายอากาศวงกลมสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความต่างเฟส 135 องศาระนาบ XZ.....	37
รูปที่ 3.20 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซซ์ของสายอากาศวงกลมสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 135 องศาระนาบ YZ.....	38
รูปที่ 3.21 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซซ์ของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 0 องศาระนาบสนามไฟฟ้า.....	39
รูปที่ 3.22 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซซ์ของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 0 องศาระนาบสนามแม่เหล็ก.....	40
รูปที่ 3.23 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซซ์ของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วย โพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 145 องศาระนาบ XZ.....	41
รูปที่ 3.24 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซซ์ของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 145 องศาระนาบ YZ.....	42
รูปที่ 3.25 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซซ์ของสายอากาศวงกลมสี่เหลี่ยมจัตุรัส ป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความต่างเฟส 0 องศาที่เป็นฟังก์ชันของความถี่.....	44
รูปที่ 3.26 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซซ์ของสายอากาศวงกลมสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความต่างเฟส 135 องศาที่เป็นฟังก์ชันของความถี่.....	45
รูปที่ 3.27 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซซ์ของสายอากาศโพรบคู่กระตุ้นวงกลม ที่ความต่างเฟส 0 องศาที่เป็นฟังก์ชันของความถี่.....	46
รูปที่ 3.28 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซซ์ของสายอากาศวงกลม ป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 145 องศา ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่.....	47
รูปที่ 3.29 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงกลมสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความต่างเฟส0 องศาที่เป็นฟังก์ชันของความยาว โพรบ.....	49
รูปที่3.30 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงกลมสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความต่างเฟส135องศาที่เป็นฟังก์ชันของความยาว โพรบ.....	50

รูปที่ 3.31 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงกลม ป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความต่างเฟส 0 องศาที่เป็นฟังก์ชันของความยาวโพรบ.....	51
รูปที่ 3.32 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงกลม ป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความต่างเฟส 145 องศาที่เป็นฟังก์ชันของความยาวโพรบ.....	52
รูปที่ 3.33 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงกลมสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 0 องศาที่เป็นฟังก์ชันของความถี่.....	54
รูปที่ 3.34 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงกลมสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความต่างเฟส 135 องศาที่เป็นฟังก์ชันของความถี่.....	55
รูปที่ 3.35 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 0 องศาที่เป็นฟังก์ชันของความถี่.....	56
รูปที่ 3.36 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความต่างเฟส 145 องศาที่เป็นฟังก์ชันของความถี่.....	57
รูปที่ 4.1 สายอากาศวงกลมสี่เหลี่ยมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ และ วงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่.....	59
รูปที่ 4.2 การจัดเตรียมเครื่องมือในการทดสอบสายอากาศ.....	60
รูปที่ 4.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงกลมสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟส 0 องศา.....	61
รูปที่ 4.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงกลมสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟส 135 องศา.....	62
รูปที่ 4.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟส 0 องศา.....	63
รูปที่ 4.6 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟส 145 องศา.....	64
รูปที่ 4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟสเท่ากับ 0 องศาที่ได้จากการวัดโดยใช้เครื่อง Network Analyzer.....	65
รูปที่ 4.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสโพรบคู่ความต่างเฟสเท่ากับ 135 องศาที่ได้จากการวัดโดยใช้เครื่อง Network Analyzer.....	65
รูปที่ 4.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟสเท่ากับ 0 องศาที่ได้จากการวัด โดยใช้เครื่อง Network Analyzer.....	66
รูปที่ 4.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟสเท่ากับ 145 องศาที่ได้จากการวัด โดยใช้เครื่อง Network Analyzer.....	67

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.11 แสดงการทดสอบการวัดแกนสายอากาศวงแหวน.....	68
รูปที่ 4.12 ค่าอัตราขยายของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ โดยใช้ เครื่อง Network Analyzer.....	69
รูปที่ 4.13 ค่าอัตราขยายของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่โดยใช้ เครื่อง Network Analyzer.....	69
รูปที่ 4.14 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่วัดได้โดยใช้สายอากาศที่มีโพลาริเซชันแบบเส้นตรงในกรณีที่มี โพลาริเซชันของคลื่นเป็นแบบวงรีที่ทำมุมกับพื้นโลก.....	71
รูปที่ 4.15 ส่วนประกอบของโพลาริเซชันแบบวงกลมหมุนขวาและหมุนซ้ายของคลื่นที่มี โพลาริเซชันแบบต่างๆ .....	72
รูปที่ 4.16 ผลที่ได้จากการทดสอบการวัดโพลาริเซชันของวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสและวงแหวนวงกลม ป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่.....	73
รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณ ด้วยโพรบคู่ค่าความต่างเฟส 0 องศา.....	74
รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วย โพรบคู่สี่เหลี่ยมจัตุรัสค่าความต่างเฟส 135 องศา.....	75
รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วย โพรบคู่วงกลมค่าความต่างเฟส 0 องศา.....	76
รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วย โพรบคู่วงกลมค่าความต่างเฟส 145 องศา.....	76
รูปที่ 5.1 การทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศ.....	83
รูปที่ 5.2 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบด้านสถานีฐาน และด้านลูกข่าย.....	83
รูปที่ 5.4 ผลการทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศที่ Transmission Data Rate 54 Mbps.....	85
รูปที่ 5.4 ผลการทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศที่ Transmission Data Rate 54 Mbps .....	85
รูปที่ ค.1 การสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นของแบบจำลองอากาศวงที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5 GHz.....	98
รูปที่ ค.2 แบบจำลองสองรังสี.....	99
รูปที่ ค.3 ตัวอย่างแบบจำลองสองรังสี .....	101
รูปที่ ค.4 อัตราขยายเมื่อเปรียบเทียบกับความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่น.....	101
รูปที่ ค.5 การสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นของแบบจำลองสองรังสี.....	103
รูปที่ ค.6 เชนเฟสเนล.....	104
รูปที่ ง.1 เฟรมชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อ.....	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ง.2 กลุ่มบริการพื้นฐาน (BSS) กลุ่มบริการขยาย (ESS) และระบบกระจาย (DS).....	106
รูปที่ ง.3 ปรากฏการณ์การซ้อนตัวในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย.....	106
รูปที่ ง.4 ฝั่งเวลาการส่งข้อมูล IEEE 802.11.....	107
รูปที่ ง.5 ค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันของขนาด MSDU ที่อัตราบิต 1, 2, 5.5 และ 11 Mbps.....	108
รูปที่ ง.6 การทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศวงแหวนเหนือระนาบสะท้อนวงกลมในระบบ โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย .....	109
รูปที่ ฉ.1 การ Setup IP address และ Subnet mask .....	112
รูปที่ ฉ.2 การติดตั้งตัว Wireless Access Point.....	113
รูปที่ ฉ.3 การตั้งค่าตัว Wireless Access Point.....	113
รูปที่ ฉ.4 การ Setup Wireless ของ Wireless Access Point.....	114
รูปที่ ฉ.5 แสดงขั้นตอนในการ Setup ของ Wireless Access Point.....	114
รูปที่ ฉ.6 แสดงขั้นตอนในการ Setup LAN ของ Wireless Access Point.....	115
รูปที่ ฉ.7 แสดงขั้นตอนในการ Setup DHCP ของ Wireless Access Point.....	115
รูปที่ ง.8 แสดงหน้าจอของตัวเครื่องลูกข่ายโดยใช้เครื่อง Notebook ระบบเชื่อมต่อสมบูรณ.....	116
รูปที่ ฉ.9 แสดงขั้นตอนในการ Setup LAN ของ Wireless Access Point.....	116
รูปที่ ฉ.10 แสดงหน้าต่างใช้งานโปรแกรม Chariot.....	116
รูปที่ ฉ.11 แสดงหน้าต่างใช้งานโปรแกรม Chariot.....	117
รูปที่ ฉ.12 แสดงหน้าต่างใช้งานโปรแกรม Chariot การ set Endpoint.....	117
รูปที่ ฉ.13 แสดงหน้าต่างใช้งานโปรแกรม Chariot ของ <input type="checkbox"/> Throughput .....	118
รูปที่ ฉ.14 แสดงหน้าต่าง แสดงค่าของ Throughput.....	118
รูปที่ ฉ.15 การ Save ที่ Export To HTML.....	119

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1(ก) ค่าเบสเซล .....	6
ตารางที่ 2.1(ข) ค่าเบสเซล .....	6
ตารางที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนในแต่ละโหมคคลื่น ( $TE_{mn}$ ).....	9
ตารางที่ 4.1 อัตราขยายของสายอากาศชนิดต่างๆ.....	73
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส ป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ค่าความต่างเฟส 0 องศา.....	80
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส ป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ค่าความต่างเฟส 135 องศา.....	80
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณ ด้วยโพรบคู่ค่าความต่างเฟส 0 องศา.....	81
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณ ด้วยโพรบคู่ค่าความต่างเฟส 145 องศา.....	81
ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของเครือข่าย ไวร์เลสแลน มาตรฐานต่างๆ.....	84
ตารางที่ 5.2 ค่า Throughput โดยประมาณของเครือข่าย ไวร์เลสแลน.....	85
ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบ.....	88
ตารางที่ ง.1 ค่าเวลาต่างๆที่ใช้ในการส่งข้อมูล.....	114
ตารางที่ จ.1 คุณสมบัติสถานีฐาน D-Link DWL – 2000AP + [6].....	117
ตารางที่ จ.2 คุณสมบัติการ์ดโครงข่ายไร้สาย Cisco Aironet 350 Series Client Adapter [5].....	117

## บทที่ 1

### บทนำ

ในปัจจุบันนี้การสื่อสารแบบไร้สาย(Wireless Communication)ได้รับการพัฒนาให้เจริญเติบโตขึ้นสายอากาศก็ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่, ระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย, เรดาร์ ฯลฯ สายอากาศนับว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการรับ-ส่งสัญญาณ ในการสื่อสารไร้สายแต่ละแบบก็จะมีความต้องการใช้สายอากาศต่างชนิดกันไปทุกวันนี้ระบบการสื่อสารโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันเพราะฉะนั้นการพัฒนาสายอากาศที่มีราคาถูกเพื่อใช้เป็นสายสำหรับสถานีฐานจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งโดยทั่วไปสายอากาศที่ใช้เป็นสายอากาศแบบรอบตัวที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการรูปแบบวงกลมแต่ในการใช้งานบางพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นพื้นที่ยาวและแคบ เช่น บนทางด่วน ในอุโมงค์ และทางเดินระหว่างตึก เป็นต้น จะนิยมใช้สายอากาศแบบสองทิศทาง ทั้งนี้เพราะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศชนิดนี้ถูกจำกัดให้แพร่กระจายคลื่นเฉพาะทิศทางเท่านั้น เป็นผลให้ความสามารถของสายอากาศครอบคลุมพื้นที่ให้บริการตามแนวยาวและแคบได้มากขึ้น การพัฒนาสายอากาศแบบสองทิศทางให้มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานเฉพาะบางประเภทเท่านั้นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งโดยเฉพาะด้านต้นทุนการผลิตที่ต่ำ สายอากาศโดยทั่วไปในแต่ละองค์ประกอบ(Element)จะมีคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น(Radiation Characteristics)ที่ต่างกันเพื่อเป็นการตอบสนองต่อความต้องการแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศ จำเป็นต้องพัฒนาเพื่อจุดประสงค์ให้มีคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นเป็นไปตามความต้องการของการประยุกต์ใช้งานคุณลักษณะดังกล่าว ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)ในลักษณะเป็นแบบสองทิศทางมีความกว้างของลำบีม(Beamwidth)แคบ มีคุณสมบัติการชี้ทิศทาง(Directivity)สูง และคุณลักษณะที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือ คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศซึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญที่สุดอีกอย่างหนึ่งในการรับส่งสัญญาณในระบบการสื่อสารไร้สาย ในการสื่อสารแบบไร้สายนั้นค่าคุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศส่งและสายอากาศรับจะต้องตรงกันจึงจะทำให้สัญญาณที่รับได้นั้นมีความแรงที่สุดซึ่งคุณลักษณะเชิงโพลาไรซ์แบ่งออกได้เป็นดังนี้ได้แก่ การโพลาไรซ์แบบวงกลม(Circular Polarization) การโพลาไรซ์แบบวงรี(Elliptical Polarization) การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น (Linear Polarization) ซึ่งแต่ละแบบมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป

สำหรับปริญญาโทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการวิเคราะห์โพลาไรซ์ของสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ โดยการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่ทำให้เกิดการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นและการโพลาไรซ์แบบวงกลมโดยลำดับแรกจะกล่าวถึงการหาขนาดของท่อนำคลื่นทั้งในแบบวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสและวงแหวนวงกลมเพื่อให้เกิดเฉพาะโหมด  $TE_{10}$  หรือโหมดเป็นใหญ่ (Dominant mode) โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้งานสายอากาศ (Essential Antenna Parameters) ทฤษฎีในการวิเคราะห์คุณลักษณะเชิงโพลาไรซ์และอิมพีแดนซ์ด้านเข้าซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมา จะแสดงไว้ในบทที่ 2 ส่วนในบทที่ 3 จะกล่าวถึงการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะต่างๆ ได้แก่คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศอันได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างของลำคลื่นและค่าสภาพเจาะจงทิศทาง คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์คือ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า ค่าการสูญเสียย้อนกลับและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และคุณลักษณะเชิงการ โพลาริซ์ ซึ่งประกอบด้วย อัตราส่วนแกนและมุมเอียงของ ทิศทางสนามไฟฟ้า

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 2 และบทที่ 3 จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการนำไปใช้เป็น แนวทางในการออกแบบสร้างและทดสอบสายอากาศสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ในบท ที่ 4 ส่วนในบทที่ 5 เป็นการนำสายอากาศที่ได้ออกแบบและสร้างไปทดสอบสายอากาศเพื่อยืนยันว่า สามารถมีคุณสมบัติที่ดี สามารถนำไปใช้งานจริงได้สำหรับใช้ในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายหรือ WLAN ( Wireless LAN) ทั้งภายในและนอกอาคาร ส่วนในบทที่ 6 วิจารณ์และบทสรุป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

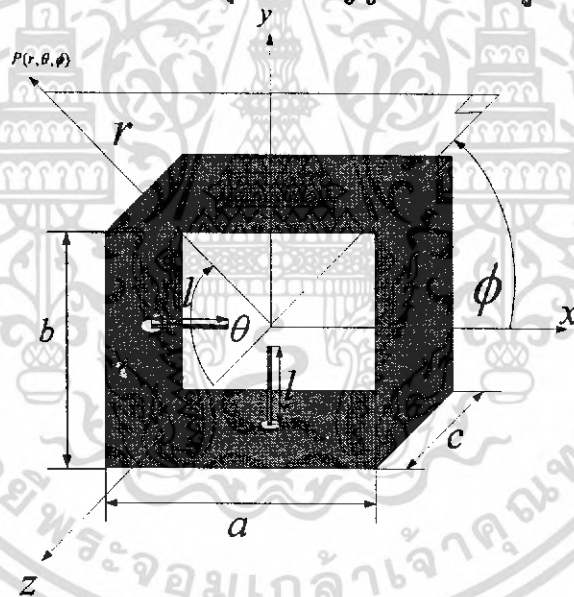
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการของสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่

#### 2.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการแสดงถึงทฤษฎีและหลักการของสายอากาศป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ซึ่งจะแสดงโครงสร้างและองค์ประกอบต่างๆ ของสายอากาศ นอกจากนี้จะกล่าวถึงโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 หรือ NEC 2 ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่จะใช้ในการคำนวณ อีกทั้งจะกล่าวถึงการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้งานสายอากาศ คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างของลำคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง อัตราขยายและช่วงกว้างความถี่ที่ใช้งาน คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์คือ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า ค่าการสูญเสียย้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และคุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ ซึ่งประกอบไปด้วย อัตราส่วนแกนและมุมเอียงของทิศทางสนามไฟฟ้า จากนั้นจะทำการทดสอบสายอากาศเพื่อยืนยันว่าสายอากาศมีคุณสมบัติที่ดี สามารถใช้งานได้จริง

#### 2.2 โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่

สายอากาศแบบสองทิศทางโดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ โครงสร้างของสายอากาศมีลักษณะเป็นส่วนหนึ่งของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากช่องเปิดทั้งสองด้าน ประกอบด้วยโพรบไฟฟ้ากระตุ้นมีความยาว  $l$  วางตามแนวแกน  $y$  และ  $x$  และยื่นเข้าไปด้านในของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีความกว้าง  $a$  ความสูง  $b$  และความยาว  $c$  จากโครงสร้างนี้พบว่าพารามิเตอร์  $a$  และ  $b$  เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อกำหนดให้  $a$  และ  $b$  มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง พบว่าคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเปลี่ยนแปลงตามพารามิเตอร์  $c$  ดังนั้นจะพิจารณาค่า  $c$  ที่ให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ส่วนพารามิเตอร์  $l$  จะมีผลต่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ดูแลเห็นประโยชน์ในการนำมาใช้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศและจะมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งจะมีการพิจารณาว่าที่ความยาวที่ทำให้คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าที่ยอมรับได้และมีการแมตซ์กับสายนำสัญญาณดีที่สุด

## 2.3 หลักการพิจารณาค่าความกว้างและความสูงของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

### 2.3.1 การพิจารณาโหมดที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

การส่งคลื่นไปตามสัญญาณซึ่งส่วนใหญ่จะมีเงื่อนไขขอบเขตที่เกิดจากโครงสร้างของสายนำสัญญาณจึงทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นมีรูปแบบเฉพาะ จากโครงสร้างท่อนำคลื่นในรูปที่ 2.1 คือ  $E_z$  และ  $H_z$  ซึ่งเรียกว่าสนามในแนวแกน (Axial components) และ  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$  และ  $H_y$  เรียกว่า สนามในแนวขวาง (Transverse electromagnetic fields) จะมีการกระจายในระบบตั้งฉากในรูปฟังก์ชันของ  $x$  และ  $y$  แต่ในแนวแกน  $z$  การเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของ  $e^{-\gamma z}$  เท่านั้น คลื่นที่เดินทางในทิศ  $z$  สภาพที่คลื่นไฟฟ้าในรูปแบบเฉพาะเรียกว่า “โหมด” (mode) ในทางปฏิบัติโหมดที่ส่งผ่านไปตามสายนำสัญญาณไม่จำเป็นต้องมีส่วนประกอบของสนามทุกองค์ประกอบ ดังนั้นจึงแบ่งรูปแบบของคลื่นออกเป็นแบบหลักๆ 3 แบบ ดังนี้

1. คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (Transverse electromagnetic Wave : TEM) คือคลื่นที่มี  $E_z = H_z = 0$  และมีเฉพาะส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบตั้งฉากกับการส่งผ่านหรือในแนวขวางเท่านั้น
2. คลื่นสนามไฟฟ้าในแนวขวาง (Transverse electric Waves : TE) คลื่นนี้จะมีเฉพาะองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวขวางเท่านั้นคือ  $E_z = 0$  แต่  $H_z \neq 0$  และองค์ประกอบในแนวขวาง
3. คลื่นสนามแม่เหล็กตามขวาง (Transverse magnetic Waves : TM) คลื่นนี้จะมีเฉพาะองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในระบบตั้งฉากเท่านั้น คือ  $E_z \neq 0$  และ  $H_z = 0$  และองค์ประกอบในแนวขวาง

ต่อไปจะเป็นการอธิบายเกี่ยวกับการเลือกค่าความกว้างและความสูงของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก เพื่อให้เกิดเฉพาะโหมด  $TE_{10}$  หรือโหมดเป็นใหญ่ (Dominant mode) ในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งการเกิดโหมดเป็นใหญ่ในท่อนำคลื่นนี้จะมีคุณสมบัติดังนี้

- ช่วงระหว่างความถี่ตัด ( $f_c$ ) ของโหมดเป็นใหญ่ ( $TE_{10}$ ) และโหมดอันดับสูงที่อยู่ถัดไปมีความกว้างมาก การกระตุ้นให้เกิดโหมดเป็นใหญ่นี้จะเกิดขึ้นได้กว้างขึ้นด้วย และทำให้การกระตุ้นเพื่อให้เกิดโหมดในอันดับที่สูงกว่าอย่างไม่ต่อเนื่อง
- การโพลาไรซ์ของสนามไม่เปลี่ยนแปลง คือสนามไฟฟ้าจะผ่านจากท่อนำคลื่นด้านบนลงล่าง ซึ่งการโพลาไรซ์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงนี้ อาจเป็นลักษณะการโพลาไรซ์ที่ต้องการสำหรับระบบที่ต้องการการโพลาไรซ์ที่คงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

- การสูญเสียอันเนื่องมาจากตัวนำ (Conducting loss) ที่ความถี่ที่ออกแบบนั้นมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับโหมดอื่นๆ

สำหรับการพิจารณาขนาดของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากที่กว้าง  $a$  และ  $b$

$$\lambda_c = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad (2.1)$$

(ซึ่งในการ ครงงานนี้จะใช้ ค่า  $a=b$ )

โดยที่  $\lambda_c$  คือความยาวคลื่นตัด (Cut off frequency) ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่มากที่สุดที่คลื่นสามารถเดินทางผ่านท่อนำคลื่นได้ โดยที่  $m=0,1,2,\dots$  และ  $n=0,1,2,\dots$  เมื่อพิจารณาในกรณีที่ค่าความกว้างของท่อนำคลื่นเท่ากับความสูงของท่อนำคลื่น ( $a=b$ ) จะสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ตัดของโหมดใดๆต่อโหมด  $TE_{10}$  ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ตัดของโหมดใดๆต่อโหมด  $TE_{10}$  ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก

การพิจารณาให้เกิดโหมด  $TE_{10}$  นั้น จะพบว่าขนาดความกว้างท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากที่คลื่นสามารถเดินทางผ่านได้ต้องมากกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่ความถี่ปฏิบัติการ  $a > \lambda/2$  แต่ถ้าขนาดของท่อนำคลื่นขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้เกิดคลื่นในโหมดสูง (Higher mode) ขึ้น โดยจะพิจารณาโหมดที่จะเกิดขึ้นถัดจากโหมดเป็นใหญ่ ซึ่งจะเป็น  $TE_{10}$  เกิดขึ้นพร้อมกันกับ  $TE_{10}$  ซึ่งจะมีขนาด  $a > \lambda/\sqrt{2}$  และถัดไปเป็น  $TM_{11}$  เกิดขึ้นพร้อมกับ  $TE_{11}$  ได้ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าขนาดของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดโหมดเป็นใหญ่ขึ้นควรมีขนาด  $\lambda/2 < a < \lambda/\sqrt{2}$  เท่านั้น

#### 2.4 ความยาวคลื่นตัดสำหรับโหนดแบบกลม

ในเวฟไกด์แบบกลม ความถี่ต่ำสุดที่สามารถส่งผ่านเวฟไกด์ได้ คือ โหมด  $TE_{1,1}$  ซึ่งถือว่าเป็นโหมดหลักในการส่งคลื่น (Principal mode) โหมดหลัก  $TE_{1,1}$  ของโหนดแบบกลมเทียบได้กับโหมด  $TE_{1,0}$  ของเวฟไกด์สี่เหลี่ยม

การหาความยาวคลื่นตัดของเวฟไกด์แบบกลม ต้องใช้ค่ารากหรือกรณีของเบสเซลฟังก์ชัน (Roots of Bessel functions) โดยที่ความยาวคลื่นตัดของโหมด  $TE_{m,n}$  มีค่าเท่ากับ

$$\lambda_{\text{cutoff}} = \frac{2\pi r}{\mu'_{m,n}} \quad (2.2)$$

โดยที่

$\lambda_{\text{cutoff}}$  = ค่าความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดในเวฟไกด์สำหรับโหมดที่กำหนด ,cm

$r$  = รัศมีด้านในของเวฟไกด์แบบกลม

$\mu'_{m,n}$  = ค่ารากหรือกรณีของสมการเบสเซล

$$\mu'_{mn} = \left(m + 2n - \frac{3}{2}\right) \frac{\pi}{2} - \frac{4m^2 + 3}{4\pi \left(m + 2n - \frac{3}{2}\right)} - \frac{112m^4 + 328m^2 - 9}{48m^3 \left(m + 2n - \frac{3}{2}\right)^3} \dots, m > 0 \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1(ก) ค่าเบสเซล

m \ n	0	1	2	3	4	5	6	7
1	3.832	1.841	3.154	4.201	5.317	6.416	7.501	8.578
2	7.016	5.331	6.706	8.015	9.282	10.520	11.735	12.932
3	10.173	8.536	9.969	11.346	12.682	13.987		
4	13.324	11.706	13.170					

ส่วนความยาวคลื่นตัดของโหมด  $TM_{m,n}$  มีค่าเท่ากับ

$$\lambda_{\text{cutoff}} = \frac{2\pi r}{u_{m,n}} \quad (2.4)$$

โดยที่

$\lambda_{\text{cutoff}}$  = ค่าความยาวที่ยาวที่สุดในเวฟไกด์สำหรับโหมดที่กำหนด ,cm

$r$  = รัศมีในของเวฟไกด์แบบกลม

$u_{m,n}$  = ค่ารากหรือกรณีของสมการเบสเซล

$$\mu_{mn} = \left(m + 2n - \frac{1}{2}\right) \frac{\pi}{2} \frac{4m^2 - 1}{4\pi \left(m + 2n - \frac{1}{2}\right)} \frac{(4m^2 - 1)(28m^2 - 31)}{48m^3 \left(m + 2n - \frac{1}{2}\right)} \dots, m > 0 \quad (2.5)$$

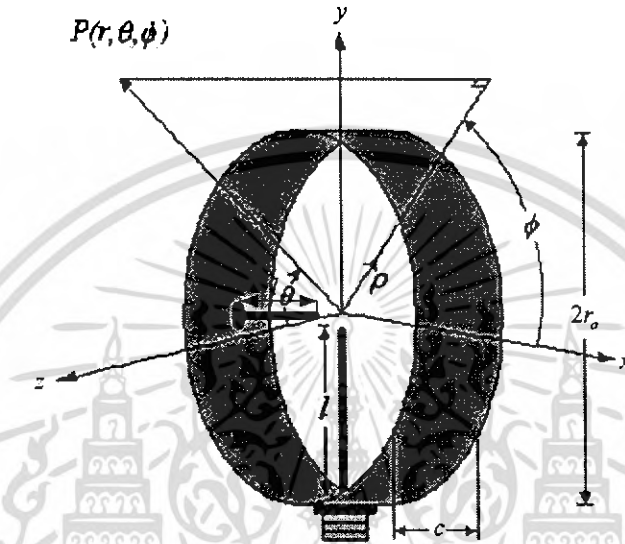
ตารางที่ 2.1(ข) ค่าเบสเซล

m \ n	0	1	2	3	4	5	6	7
1	2.405	3.832	5.136	6.380	7.588	8.771	9.936	11.086
2	5.520	7.016	8.417	9.761	11.065	12.339	13.589	14.821
3	8.654	10.173	11.602	13.015	14.372			
4	11.792	13.323	14.796					

จากตารางที่ 2.1 (ก) จะพบว่า  $u'_{1,1}$  มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งถ้านำไปแทนลงในสมการที่ 2.1(ข) และทราบค่า  $r$  ก็จะได้ความยาวคลื่นที่ยาวที่สุด แต่พิจารณาในทางกลับกันถ้าใช้  $u'_{0,1}$  จากตาราง ก็จะได้ค่า  $r$  มากกว่าใช้ค่า  $u'_{1,1}$  หมายความว่าต้องใช้เวฟไกด์แบบกลมขนาดใหญ่ขึ้น ด้วยเหตุนี้โหมด  $TE_{0,1}$  จึงถือว่าเป็นโหมดหลัก และเช่นเดียวกันในตารางที่ 2.1ข โหมด  $TM_{0,1}$  จะเป็นโหมดหลักสำหรับคลื่น  $TM$  เนื่องจากเวฟไกด์แบบกลมนั้นจะมีความสมมาตรในทุกด้านทุกมุม การหมุนไกด์ไปในลักษณะใดจึงไม่มีผลต่อการส่งคลื่น ผิดกับเวฟไกด์แบบสี่เหลี่ยม เมื่อทำการหมุนจะเกิดเสียความสมมาตรและส่งผลต่อคลื่นที่ส่งผ่านไกด์

## 2.5 โครงสร้างของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่

สายอากาศที่วิเคราะห์ประกอบด้วยโพรบไฟฟ้าเชิงเส้นความยาว  $l$  และโพรบไฟฟ้าเชิงเส้นความยาว  $l$  อีกตัวถูกต้องกับสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโดยทำการเลื่อนเฟส ของสาย แล้วทำการต่อโพรบไฟฟ้าเชิงเส้นกับสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมเข้าด้วยกันโดยผ่านตัวต่อแบบ N - type และถูกล้อมรอบด้วยวงแหวนที่มีโครงสร้างคล้ายรูปทรงกระบอกโดยมีรัศมีและความยาวของวงแหวนเป็น  $r$  และ  $c$  ตามลำดับ ซึ่งโพรบจะวางตัวตามแนวแกน  $y$  และแกน  $x$  ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลม

ให้พิจารณาว่า วงแหวนเป็นส่วนหนึ่งของท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอกซึ่งมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายในทิศทาง  $z$  และ  $-z$  และจะแพร่กระจายออกจากขอบของวงแหวนที่ช่องเปิดทั้ง 2 ด้าน สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกมาจากช่องเปิดทั้ง 2 ด้านนี้จะสอดคล้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยโหมดคลื่นต่างๆมากมายที่อยู่ภายในท่อนำคลื่นทรงกระบอก ดังนั้น ความยาวของวงแหวนและรัศมีจึงถูกออกแบบให้มีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อที่จะทำให้โหมดอื่นๆถูกตัดออกไปให้เหลือเพียงโหมดคลื่นหลัก (dominant mode :  $TE_{11}$ ) เพียงโหมดเดียว แต่อย่างไรก็ตามบริเวณที่ใกล้กับโพรบก็ยังคงมีโหมดคลื่นอื่นรวมอยู่ด้วย

โดยทั่วไปแล้ว โหมดคลื่นอื่นๆที่ไม่ใช่โหมดคลื่นหลักจะเป็นรูปแบบของคลื่นที่เรียกว่า คลื่นจางหายและโหมดคลื่นเหล่านี้จะมีขนาดลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะทางที่คลื่นเดินทางออกจากโพรบมีค่ามากขึ้น ด้วยเหตุนี้จะต้องเลือกระยะทางที่ห่างจากโพรบที่ทำให้ขนาดของโหมดคลื่นอื่นๆมีค่าน้อยมากจึงสามารถละเลยได้ เพื่อที่ว่าบริเวณขอบของวงแหวนที่ช่องเปิดทั้งสองด้านซึ่งเป็นจุดที่คลื่นจะเดินทางออกไปนั้นจะมีแค่รูปแบบเพียงรูปแบบเดียว ซึ่งก็คือการกำหนดค่าความยาวของวงแหวนนั่นเอง ส่วนการกำหนดค่ารัศมีจะต้องทำให้มีค่าความถี่ตัดที่ต่ำที่สุด เพื่อให้มีเพียงโหมดคลื่นหลักแพร่กระจายออกจาก

ช่องเปิดทั้ง 2 ด้านของวงแหวน และโหมดคลื่นอื่นๆ ที่อยู่ติดกับโหมดคลื่นหลัก คือ  $TE_{21}$  จะต้องถูกตัดออกไป

ดังนั้นค่ารัศมีของวงแหวนแบบวงกลมที่เหมาะสมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$0.293\lambda < r_a < 0.486\lambda \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นที่ความถี่ที่ใช้งาน (โดยค่าความถี่ที่ใช้งานคือ 2.45 GHz)

ให้พิจารณารูปที่ 2.2 โพรบไฟฟ้าเชิงเส้นภายในวงแหวนจะขนานกับรัศมีของวงแหวนเป็นผลให้คลื่นที่ประกอบไปด้วยโหมดคลื่นต่างๆ ( $TE_{mn}$ ) ถูกปล่อยออกมาในบริเวณใกล้เคียงกับโพรบ โดยคลื่นที่ออกมานั้นจะมีความซับซ้อนมาก นั้นหมายความว่า ความถี่ใช้งานค่าหนึ่งเป็นไปได้ว่าคลื่นจะประกอบไปด้วยโหมดคลื่นต่างๆมากมาย แต่ที่มีความสำคัญต่อการเดินทางของคลื่นสำหรับสายอากาศที่ ได้ออกแบบไว้ คือ โหมดคลื่นของ  $TE_{11}$ ,  $TE_{21}$  และ  $TE_{01}$

ขณะที่คลื่นเดินทางออกจากช่องเปิดทั้ง 2 ด้านของวงแหวนแบบวงกลม คลื่นจะเกิดการสทอนซึ่ง ค่าคงที่ของการสทอนสำหรับโหมดคลื่นหลัก แสดงได้ดังนี้

$$\alpha_{11} = \frac{R_s}{r_a \eta} \frac{8.686}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{c11}}\right)^2}} \left[ \left(\frac{\lambda}{\lambda_{c11}}\right)^2 + 0.420 \right] \quad (\text{dB/m}) \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\lambda_{c11}$  คือ ความยาวคลื่นตัด (cut off wavelength) ของโหมดคลื่นหลัก ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $3.412r_a$  โดยที่  $r_a$  คือ ค่ารัศมีของวงแหวน

$\eta$  คือ ค่าอินทรีนสิคิมพีแดนซ์ ของตัวกลาง

$R_s$  คือ ค่าความต้านทานคุณลักษณะอิสระที่ไม่ขึ้นกับความถี่ของผนังโลหะ (frequency – dependent characteristic resistance of metal walls)

$$\text{โดยที่} \quad R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม (rad/sec) และ  $\omega = 2\pi f$

$\mu$  คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (permeability) ของวัสดุ (H/m)

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

$\mu_0$  คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7}$  (H/m)

$\mu_r$  คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของวัสดุ

$\sigma$  คือ ค่าความนำจําเพาะของวัสดุ (conductivity) (S/m)

ในส่วน of คลื่นจางหายนั้น จะมีค่าความยาวคลื่นในอากาศ (free space) มีค่ามากกว่า ค่าความยาวคลื่นตัดของตัวเอง ซึ่งโหมดของคลื่นจางหายที่มีความสำคัญต่อการเดินทางของคลื่นสำหรับ

สายอากาศที่ได้ออกแบบไว้ ได้แก่  $TE_{21}$  และ  $TE_{01}$  โดยค่าการลดทอนของคลื่นจางหายอันเนื่องมาจากระยะทางนั้น จะสอดคล้องกับตัวประกอบ (factor) ของ  $e^{-\alpha x}$

ซึ่งค่าคงที่ของการลดทอนสำหรับโหมดคลื่นของ  $TE_{21}$  แสดงได้ดังนี้

$$\alpha_{21} = \frac{17.372\pi}{\lambda_{c21}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{c21}}{\lambda}\right)^2} \quad (\text{dB/m}) \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\lambda_{c21}$  คือ ค่าความยาวคลื่นตัด (cut off wavelength) ของโหมดคลื่น  $TE_{21}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $2.057r_d$  โดยที่  $r_d$  คือ ค่ารัศมีของวงแหวน

และค่าคงที่ของการลดทอนสำหรับโหมดคลื่นของ  $TE_{01}$  แสดงได้ดังนี้

$$\alpha_{01} = \frac{17.372\pi}{\lambda_{c01}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{c01}}{\lambda}\right)^2} \quad (\text{dB/m}) \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\lambda_{c01}$  คือ ค่าความยาวคลื่นตัด (cut off wavelength) ของโหมดคลื่น  $TE_{01}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.6396r_d$  โดยที่  $r_d$  คือ ค่ารัศมีของวงแหวน

กำลังงานที่แพร่กระจาย (power flow) ในแต่ละโหมดคลื่น ( $TE_{mn}$ ) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$P = |A|^2 \omega \mu \beta r_d^4 A_{mn} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $A_{mn}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอนในแต่ละโหมดคลื่น ( $TE_{mn}$ ) แสดงค่าได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนในแต่ละโหมดคลื่น ( $TE_{mn}$ )

		$A_{mn} \times 10^{-3}$		
n \ m	m	0	1	2
1	1	17.4	55.3	11.4
2	2	2.67	3.19	1.55
3	3	0.349	0.794	0.492

เมื่อ

$\beta$  คือ ค่าคงที่เฟส (phase constant) (rad/m) ;  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$

$r_d$  คือ ค่ารัศมีของวงแหวน (m)

$\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม (rad/sec) ;  $\omega = 2\pi f$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\mu$  คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก ของวัสดุ (H/m) ;

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

$\mu_0$  คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7}$  (H/m)

$\mu_r$  คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของวัสดุ

$A$  คือ ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ โดยปกติจะนอร์มัลไลซ์ (normalize) ให้เท่ากับ 1

## 2.6 โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 หรือ NEC 2

สำหรับการจำลองโครงสร้างด้วยเส้นลวดลายนั้น อุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างด้วยรหัส NEC2 คือ เซกเมนต์ที่มีลักษณะตรงและสั้น การกำหนดเซกเมนต์สำหรับการออกแบบเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากเพราะจะมีผลต่อความถูกต้องของผลลัพธ์ จำนวนของเซกเมนต์ควรจะมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะต้องการสำหรับความถูกต้อง เพราะ โปรแกรมจะใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อจำนวนเซกเมนต์เพิ่มขึ้น

เซกเมนต์เส้นลวดลวดจะถูกกำหนดโดยระบบพิกัด (Co-ordinate) ของจุดปลายทั้งสองของเซกเมนต์ และขนาดของรัศมี การกำหนดความยาวเซกเมนต์ (Segment Length :  $\Delta$ ) จะสัมพันธ์กับค่าของความยาวคลื่น  $\lambda$  โดยปกติ  $\Delta$  ควรจะมีค่าน้อยกว่า  $0.1\lambda$  ที่ความถี่ที่ต้องการ ในบางครั้งอาจมีการใช้เซกเมนต์ที่ยาวมากกว่านั้นบนเส้นลวดลวดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ในขณะที่เซกเมนต์ที่สั้นกว่า เช่น  $0.05\lambda$  หรือน้อยกว่านี้ อาจจะต้องใช้ในการจำลองบริเวณที่มีความสำคัญของสายอากาศ ขนาดของเซกเมนต์จะเป็นตัวกำหนดการแก้ปัญหาสำหรับการหากระแสบนแบบจำลอง เนื่องจากกระแสจะถูกคำนวณที่ตรงกลางของแต่ละเซกเมนต์ เซกเมนต์ที่มีขนาดสั้นมาก ๆ เช่น น้อยกว่า  $10^{-3}\lambda$  ไม่ควรนำมาใช้ เพราะความเหมือนกันขององค์ประกอบค่าคงที่และโคไซน์ของการกระจายกระแสจะทำให้ผลจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขไม่แม่นยำ

รัศมีของเส้นลวด (Wire Radius :  $a$ ) ซึ่งสัมพันธ์กับ  $\lambda$  จะถูกจำกัดโดยการประมาณที่ใช้ในการเคอร์เนล (Kernel) ของสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้า ซึ่งมีการประมาณ 2 แบบด้วยกันที่ใช้ในการ NEC2 คือ เคอร์เนลแบบเส้นลวดบาง และเคอร์เนลแบบขยายออกของเส้นลวดบาง ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2.1 สำหรับเคอร์เนลแบบเส้นลวดบางนั้น กระแสบนพื้นผิวของแต่ละเซกเมนต์จะถูกลดกลายเป็นเส้นลวดนำไฟฟ้าเล็ก ๆ ของกระแสบนแกนเซกเมนต์ ส่วนในเคอร์เนลแบบขยายออกของเส้นลวดบาง กระแสจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอรอบพื้นผิวของเซกเมนต์นั้น

การกระจายกระแสที่ใช้ใน NEC2 จะบังคับเงื่อนไขกระแสและความหนาแน่นประจุตามแนวเส้นลวด ที่จุดเชื่อมต่อ และที่ปลายเส้นลวด จากเงื่อนไขเหล่านี้ทำให้เซกเมนต์จะต้องต่อกันทางไฟฟ้าที่จุดปลาย ถ้าเซกเมนต์มีการซ้อนทับกันเกิดขึ้นที่ปลายของแต่ละอัน NEC2 จะไม่ยอมให้กระแสไหลจากเซกเมนต์หนึ่งไปยังเซกเมนต์อื่น ๆ เซกเมนต์จะเหมือนกับต่อกันเมื่อระยะห่างของจุดหลายของแต่ละด้านมีค่าน้อยกว่า  $10^{-3}$  เท่าของความยาวเซกเมนต์ที่สั้นที่สุด ดังนั้น ถ้าเป็นไปได้ควรเชื่อมต่อเซกเมนต์ด้วยวิธีการกำหนดระบบพิกัดที่เหมือนกัน

ข้อจำกัดของการจำลองโครงสร้างด้วยตาข่ายเส้นลวด (Wire-grid) มีดังต่อไปนี้

(1) เซกเมนต์จะต้องไม่ซ้อนทับกัน เนื่องจากการแบ่งกระแสมระหว่างสองเซกเมนต์ที่ซ้อนทับกันนั้น ไม่สามารถสรุปได้ เซกเมนต์ที่ซ้อนทับกันอาจจะมีผลในสมการเมทริกซ์เอกฐาน (Singular Matrix Equation)

(2) การเปลี่ยนแปลงรัศมีที่มีความแตกต่างกันมากของเซกเมนต์ที่เชื่อมต่อกัน อาจจะมีผลทำให้ความแม่นยำลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ ค่า  $\Delta/a$  มีค่าน้อย ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการให้รัศมีลดลงตามลำดับตลอดหลายเซกเมนต์

(3) จำเป็นที่จะต้องมีการมีเซกเมนต์ที่จุดซึ่งมีการเชื่อมต่อกับโครงข่าย (Network) หรือ แหล่งกำเนิดแรงดัน (Voltage Source) สำหรับช่องว่างการกระตุ้น (Excitation Gap) ก็จำเป็นต้องมีเส้นลวดต่อเนื่องลากข้ามช่องว่าง ดังนั้น แรงดันตกคร่อมที่ต้องการสามารถระบุให้เป็นเงื่อนไขขอบเขตได้

(4) จำนวนเส้นลวดที่จะนำมาต่อที่จุดเชื่อมต่อใด ๆ นั้น ไม่สามารถมีค่าเกิน 30 เส้นได้ เนื่องจากข้อจำกัดของมิติในรหัส NEC2

ข้อมูลที่ใช้อธิบายสายอากาศและสภาพแวดล้อม และคุณสมบัติของสายอากาศที่ต้องการจะคำนวณ จะเป็นอินพุตที่จะใส่เข้าไป คล้ายกับบัตรเจาะรูที่เป็นข้อมูลใส่ให้กับคอมพิวเตอร์เมนเฟรมในสมัยก่อน กลุ่มของรหัสข้อมูลในการทำงานครั้งหนึ่งจะประกอบไปด้วย รหัสข้อมูล 3 ประเภท ด้วยกัน ส่วนแรกเริ่มต้นด้วยรหัสหนึ่งจุดหรือมากกว่านั้นซึ่งบรรยายรายละเอียดของการทำงาน ซึ่งพิมพ์เป็นคัมภีร์ที่จุดเริ่มต้นของไฟล์เอาต์พุต ต่อมาจะตามด้วยรหัสข้อมูลระบุรูปแบบทางเรขาคณิต ซึ่งจะระบุรูปทรงของสายอากาศ และสุดท้ายจะเป็นส่วนของรหัสควบคุมโปรแกรมซึ่งจะระบุตัวแปรทางไฟฟ้า เช่น ความถี่ การโหลด (Loading) และการกระตุ้น (Excitation) รวมทั้งความต้องการให้คำนวณกระแสและสนามของสายอากาศ

รหัสข้อมูลทุก ๆ รหัส จะมีตัวอักษร 2 ตัว ในคอลัมน์ที่หนึ่งและสอง เพื่อเป็นการระบุรหัสให้กับโปรแกรม ตัวอย่างเช่น รหัสข้อมูลระบุเส้นลวด (Wire Specification : GW) ซึ่งจะเป็นรหัสที่ใช้ในการกำหนดเส้นลวดขึ้นมาระหว่างจุดสองจุด ซึ่งมีลักษณะของข้อมูลที่จะต้องใส่ลงไป ดังนี้

GW	I1	I2	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
	ITG	NS	XW1	YW1	ZW1	XW2	YW2	ZW2	RAD

ความหมายของตัวแปรแต่ละตัวที่จะต้องใส่ลงไป คือ

ITG (I1) คือ ป้ายแสดงหมายเลข (Tag) ที่จะกำหนดให้เส้นลวดมีหมายเลขประจำเส้นลวดเป็นค่าใด รวมทั้งเซกเมนต์ทุกเซกเมนต์ของเส้นลวดก็จะมีหมายเลขตามหมายเลขเส้นลวดนั้นด้วย

NS (I2) คือ จำนวนเซกเมนต์ที่จะแบ่งให้กับเส้นลวด

XW1 (F1) คือ พิกัด x ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

YW1 (F2) คือ พิกัด y ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

ZW1 (F3) คือ พิกัด z ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

XW2 (F4) คือ พิกัด x ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

YW2 (F5) คือ พิกัด y ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ZW2 (F6) คือ พิกัด  $z$  ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

RAD (F7) คือ รัศมีของเส้นลวด

การกำหนดรัศมีของเส้นลวดนั้นจะต้องเลือกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดที่ทำให้พื้นที่ผิวรวมของเส้นลวดทั้งหมดมีค่าเท่ากับพื้นที่ผิวของตัวนำของสายอากาศ

จากรหัสตัวอย่างข้างต้น เมื่อทำการใส่ตัวแปรต่าง ๆ ลงไปแล้ว จะสั่งให้โปรแกรมทำงาน NEC2 จะสร้างเส้นลวดให้ 1 เส้น ซึ่งเส้นลวดนี้จะถูกแบ่งเป็นเซกเมนต์เล็ก ๆ จำนวน NS เซกเมนต์ การสร้างแบบจำลองของสายอากาศสามารถทำได้โดยการใส่รหัสที่มีลักษณะคล้ายกับตัวอย่างข้างบนนี้ไปเรื่อย ๆ ก็จะทำให้สามารถสร้างโครงสร้างสายอากาศและหาคุณสมบัติของสายอากาศที่ต้องการได้ นอกจากนี้โครงสร้างที่สร้างขึ้นโดย NEC2 ยังสามารถกำหนดสภาพนำ (Conductivity) ให้เท่ากับสภาพนำของโลหะที่จะใช้ทำสายอากาศได้ เช่น ในกรณีนี้สายอากาศต้นแบบจะสร้างขึ้นโดยใช้ทองเหลือง ดังนั้นในการคำนวณโดยใช้ NEC2 ก็จะทำให้การกำหนดสภาพของโครงสร้างด้วยค่าสภาพนำของทองเหลือง คือ  $2.56 \times 10^{-7} \text{ S/m}$  โดยการใช้คำสั่งโหลด (Load)

ในการตรวจสอบโครงสร้างของสายอากาศว่าได้สร้างถูกต้องเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่นั้นสามารถดูได้โดยใช้โปรแกรม Necview ซึ่งจะแสดงโครงสร้างของสายอากาศที่ได้ใส่รหัสใน NEC2 ออกมาเป็นตาข่ายเส้นลวด ตามที่กำหนดในระบบพิกัด  $x$ ,  $y$  และ  $z$  นอกจากนี้โปรแกรม Necview ยังใช้ในการแสดงผลแบบรูปการแผ่พลังงาน ในระบบพิกัด  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ของสายอากาศที่ NEC2 คำนวณออกมาได้ด้วย สำหรับไฟล์เอาต์พุตที่ได้ออกมาจากการรันโปรแกรม NEC2 นั้น จะเป็นไปตามรูปแบบของข้อมูลที่ใส่เข้าไป เริ่มต้นด้วยการอธิบาย ตามมาด้วยข้อมูลทางเรขาคณิต และจากนั้นเป็นผลของตัวแปรที่ต้องการจะคำนวณ

สำหรับสายอากาศที่นำเสนอในปริภูมิตวินพจน์ฉบับนี้ ได้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศ โดยการแทนโครงสร้างของสายอากาศด้วยเส้นลวดขนาดเล็ก นอกจากนี้ในการคำนวณด้วย NEC2 นั้น ผลที่ได้จะมีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากทฤษฎีเพราะฉะนั้นจึงใช้โปรแกรม NEC2 เป็น โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์หาคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศในปริภูมิตวินพจน์เล่มนี้

## 2.7 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้งานสายอากาศ (Essential Antenna Parameters)

### 2.7.1 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น คือ รูปกราฟหรือฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แสดงความเข้มของสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันของทิศทางหรือมุม โดยรูปกราฟนี้แบ่งเป็น กราฟเชิงเส้นมุมฉาก (Linear Plot) และ กราฟวงกลม (Polar Plot) ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แอมพลิจูด (Amplitude) ของกำลังงาน (Power) หรือ สนาม (Field) กับทิศทาง (Direction) ของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของมุมในหน่วยองศา (degree) หรือเรเดียน (radian)

**2.7.2 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (Half Power Beamwidth: HPBW)**  
คือมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลัก มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด โดยจะวัดในหน่วยองศา

**2.7.3 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรก (First Null Beamwidth: FNBW)**

คือมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลัก มีค่าลดลงเป็นศูนย์ โดยจะวัดในหน่วยองศา

**2.7. ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)**

คือกำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน (ตลอดพื้นผิวทรงกลม) แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มการแพร่กระจายคลื่นกับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระนาบ ไคล ได้ดังนี้

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2 \cdot \eta} \cdot \left[ |E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right] \quad (2.11)$$

เมื่อ  $E_\theta, E_\phi$  คือ ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าในระนาบ ไคล

$\eta$  คือ อินทริเนสิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง มีค่าประมาณ  $120\pi \Omega$

**2.7.5 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)**

ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในทิศทางต่างๆ เทียบกับสายอากาศไอโซทรอปิก ซึ่งวัดในหน่วยของ dBi เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_0(\text{dBi}) = 10 \cdot \log \left( \frac{4\pi U_{\max}}{P_{\text{rad}}} \right) \quad (2.12)$$

เมื่อ  $U_{\max}$  คือ ค่าสูงสุดของความเข้มการแพร่กระจายคลื่น

$P_{\text{rad}}$  คือ กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด

$$P_{\text{rad}} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin(\theta) d\theta d\phi$$

**2.7.6 อัตราย้าย (Gain)**

คือความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าสภาพเจาะจงทิศทาง โดยคูณประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ประสิทธิภาพของสายอากาศจะประกอบไปด้วย ประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนกลับ ประสิทธิภาพของตัวนำและประสิทธิภาพของฉนวน

$$\text{Gain} = \text{Efficiency of antenna} \times \text{Directivity} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.13)$$

$$(\text{Gain}(\text{dBi}) = \text{Efficiency}(\text{dB}) + \text{Directivity}(\text{dBi}))$$

**2.7.7 ช่วงกว้างความถี่ที่ใช้งาน (Bandwidth :  $\Delta f$ )**

คือ ช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด หรือช่วงความถี่ที่สายอากาศยังคงมีคุณสมบัติต่างๆ อยู่ในช่วงที่ใช้งาน ได้เหมือนกับที่ออกแบบไว้ที่ความถี่กลาง

$$\Delta f(\text{Hz}) = f_H(\text{Hz}) - f_L(\text{Hz})$$

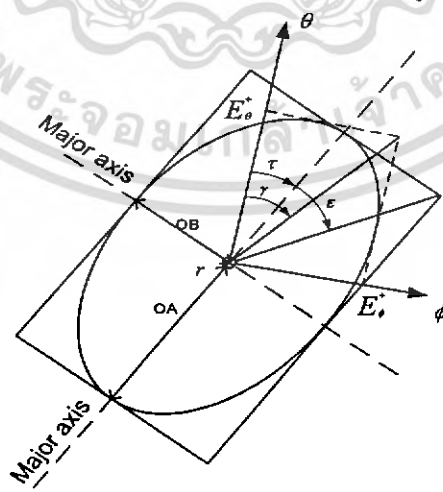
$$\Delta f(\%) = \frac{f_H - f_L}{f_c} \times 100 \quad (2.14)$$

## 2.8 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์

คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศเป็นการบ่งบอก ถึงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสามารถจะอธิบายได้โดยการพิจารณาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยสังเกตที่ตำแหน่งใดๆ โดยทั่วไปจะทำการพิจารณาขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ซึ่งแบ่งเป็น 3 ลักษณะได้แก่

1. การกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นวงกลมเรียกลักษณะแบบนี้ว่าสนามไฟฟ้ามีการโพลาไรซ์แบบวงกลม(Circular Polarization) แบ่ง ได้ 2 ลักษณะคือ การกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าทางขวามือหรือ การหมุนตามเข็มนาฬิกา และการกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าไปทางซ้ายมือ หรือการหมุนทวนเข็มนาฬิกา
2. การกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า ที่มีลักษณะเป็นวงรี ก็จะเรียกว่าสนามไฟฟ้ามีลักษณะการโพลาไรซ์แบบวงรี(Elliptical Polarization) แบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ การกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าไปทางขวามือ หรือการหมุนตามเข็มนาฬิกา และการกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าไปทางซ้ายมือหรือการหมุนทวนเข็มนาฬิกา
3. การกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า ที่มีลักษณะเป็นแนวเส้นตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นก็จะเรียกว่า สนามไฟฟ้ามีลักษณะการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น (Linear Polarization) แบ่งเป็นการโพลาไรซ์แนวตั้ง (Vertical polarization) การโพลาไรซ์แนวนอน (Horizontal Polarization) และการโพลาไรซ์แนวเอียง (Slant Polarization)

การบ่งบอกถึงการ โพลาไรซ์ของสายอากาศ สามารถแสดงได้จากส่วนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแกนหลักต่อแกนรอง เรียกว่า ค่าอัตราส่วนแกน(Axial ratio)ความต่างเฟสระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแกนตั้งกับแกนนอน(Phase difference)หรือลักษณะการเอียงของการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบกับแกนอ้างอิง(แกนตั้งเป็นแกนอ้างอิง)เรียกว่ามุมเอียง(Tilt angle ) ดังแสดงในรูปที่2.3



รูปที่ 2.3 การโพลาไรซ์ที่มีลักษณะเอียงจากแกนอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีนี้จะสามารถหาค่าอัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนรองได้จาก

$$AR = \pm \frac{\text{majoraxis}}{\text{minoraxis}} = \pm \frac{OA}{OB} \quad (2.14)$$

โดยที่  $AR = 1$  เป็นการโพลาไรซ์แบบวงกลม

$1 \leq |AR| < \infty$  จะเป็นการโพลาไรซ์แบบวงรี

$AR = \infty$  จะเป็นการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น

เมื่อ

$$OA = \left[ \frac{1}{2} \left\{ (E_{\theta 0}^+)^2 + (E_{\phi 0}^+)^2 + \left[ (E_{\theta 0}^+)^4 + (E_{\phi 0}^+)^4 + 2(E_{\theta 0}^+)^2 (E_{\phi 0}^+)^2 \cos(2\Delta\beta) \right]^{1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad (2.15)$$

$$OB = \left[ \frac{1}{2} \left\{ (E_{\theta 0}^+)^2 + (E_{\phi 0}^+)^2 - \left[ (E_{\theta 0}^+)^4 + (E_{\phi 0}^+)^4 + 2(E_{\theta 0}^+)^2 (E_{\phi 0}^+)^2 \cos(2\Delta\beta) \right]^{1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad (2.16)$$

โดยที่

$$E_{\theta 0}^+ = E_R + E_L$$

$$E_{\phi 0}^+ = E_R - E_L$$

$$\Delta\beta = \beta_\theta - \beta_\phi$$

โดยที่ความต่างเฟสจะพิจารณาอยู่ที่  $-180^\circ < \Delta\beta < 180^\circ$  ซึ่ง  $\Delta\beta$  คือค่าความต่างเฟส เมื่อ  $\Delta\beta$  มีค่าเป็นค่าลบแสดงว่าเป็นการโพลาไรซ์แบบหมุนซ้าย เมื่อค่าเป็นบวกแสดงว่าเป็นการโพลาไรซ์แบบหมุนขวา และเมื่อ  $\Delta\beta = 0$  องศา และ  $\pm 180$  องศา จะแสดงว่าเป็นการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น

มุมเอียงของวงรีเมื่อเทียบกับแกนขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวตั้ง ซึ่งใช้เป็นแกนอ้างอิงตั้งนั้นมุมของการเอียงจะกำหนดได้โดย

$$\tau = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[ -\frac{2E_{\theta 0}^+ E_{\phi 0}^+}{(E_{\theta 0}^+)^2 - (E_{\phi 0}^+)^2} \cos(\beta_\theta - \beta_\phi) \right] \quad \text{เมื่อ } E_{\theta 0}^+ \geq E_{\phi 0}^+ \quad (2.17)$$

$$\tau = -\frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[ \frac{2E_{\theta 0}^+ E_{\phi 0}^+}{(E_{\theta 0}^+)^2 - (E_{\phi 0}^+)^2} \cos(\beta_\theta - \beta_\phi) \right] \quad \text{เมื่อ } E_{\theta 0}^+ < E_{\phi 0}^+ \quad (2.18)$$

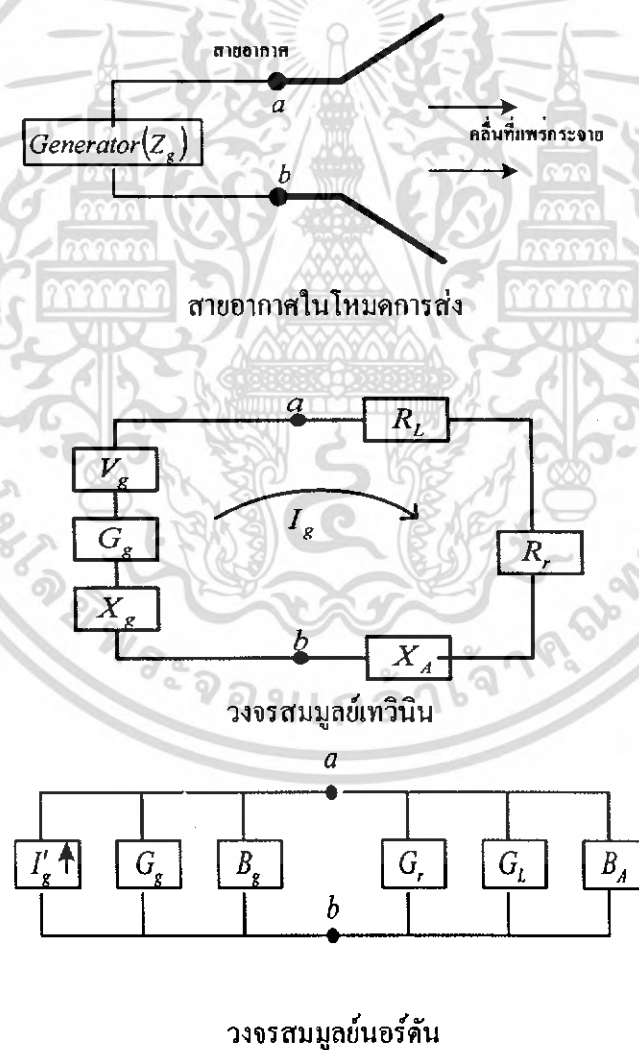
โดยที่  $-90^\circ \leq \tau \leq 90^\circ$  และถ้า  $\tau$  เท่ากับ  $0^\circ$  นั้นคือเป็นการโพลาไรซ์แบบแนวตั้ง และถ้าเท่ากับ  $\pm 90^\circ$  ก็คือเป็นการโพลาไรซ์แนวนอนนั่นเอง

## 2.9 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance)

ในการพิจารณาคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศนั้นถือว่ามีความสำคัญมาก เป็นตัวบ่งบอกว่าสายอากาศชนิดนั้นๆ เมื่อนำไปใช้ต่อกับसानนำสัญญาณจะมีความเข้ากันได้มากน้อยเพียงใด อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศใดๆจะเป็นอิมพีแดนซ์ที่ขั้วของสายอากาศนั้นๆ อาจเป็นอัตราส่วนของศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศนั้น หรือเป็นอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อแม่เหล็กที่จุดใดๆในรูปที่ 2.4 เป็นขั้วของสายอากาศ อัตราส่วนของศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วนี้ เมื่อไม่ได้ต่อโลก (Load) จะเป็นอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งมีค่า

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.19)$$

- เมื่อ  $Z_A$  = อิมพีแดนซ์ที่ขั้ว  $a-b$  ของสายอากาศ (โอห์ม)  
 $R_A$  = ความต้านทานที่ขั้ว  $a-b$  ของสายอากาศ (โอห์ม)  
 $X_A$  = รีแอกแตนซ์ที่ขั้ว  $a-b$  ของสายอากาศ (โอห์ม)



รูปที่ 2.4 สายอากาศส่งและวงจรสมมูลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปค่าความต้านทานในสมการที่ 2.19 จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ดังนี้คือ

$$R_A = R_r + R_L \tag{2.20}$$

เมื่อ  $R_r$  = ความต้านทานแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

$R_L$  = ความต้านทานการสูญเสียของสายอากาศ

### 2.10 บทสรุป

บทนี้ได้อธิบายเกี่ยวกับหลักการ และทฤษฎีที่สำคัญสำหรับสายอากาศวงแหวนเหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ และ สายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ โดยได้แสดงโครงสร้างของสายอากาศ ตลอดจนการวิเคราะห์หาคุณลักษณะที่ดีที่สุดของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และ ท่อนำคลื่นวงกลมคือขนาดของท่อนำคลื่นที่ยอมให้เฉพาะโหมดเป็นใหญ่ (Dominant mode) เท่านั้นที่สามารถเดินทาง ผ่านท่อนำคลื่นไปได้โดยในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดของท่อนำคลื่นโหมดเป็นใหญ่ (Dominant mode) หรือโหมด  $TE_{10}$  และโหมด  $TE_{01}$  อยู่ในช่วง  $\lambda/2 < a < \lambda/\sqrt{2}$  เท่านั้นส่วนในส่วนของท่อนำคลื่นวงกลมขนาดของท่อนำคลื่นโหมดเป็นใหญ่ (Dominant mode) หรือโหมด  $TE_{11}$  อยู่ในช่วง  $0.293\lambda < r_0 < 0.486\lambda$  เท่านั้นนอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงคุณสมบัติของโปรแกรมในการวิเคราะห์ หาคุณลักษณะของสายอากาศคือโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 หรือ NEC 2 และได้กล่าวถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้งานสายอากาศ (Essential Antenna Parameters) อีกทั้งได้แสดงวิธีการหาค่าคุณลักษณะ คุณลักษณะการโกลาไรซ์ของสายอากาศ หลักการพิจารณา อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศที่เป็นประโยชน์ในการนำไปออกแบบสร้างสายอากาศให้มีคุณสมบัติที่ดีต่อไป

62791

## บทที่ 3

### ผลวิเคราะห์สายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่

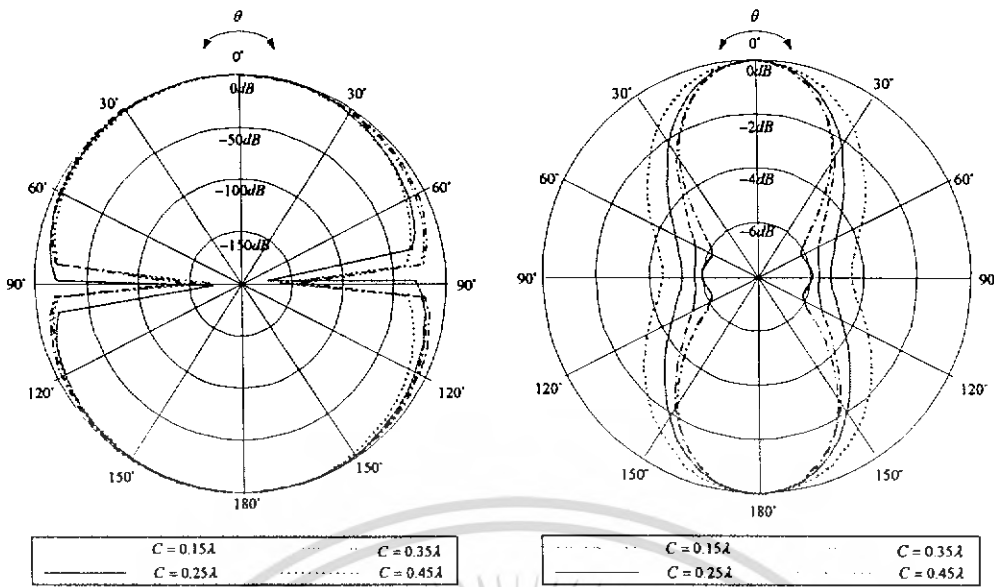
#### 3.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการแสดงผลการวิเคราะห์ โดยเริ่มจากคุณลักษณะของสายอากาศที่ทำกรวิเคราะห์ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ค่าความกว้างลำคลื่น และค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มากที่สุดของสายอากาศ การวิเคราะห์คุณลักษณะเชิงการโพลาริซชันของสายอากาศ และ คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ โดยในการวิเคราะห์จะได้พิจารณาคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศด้วยโปรแกรม NEC2 เพื่อช่วยในการพิจารณาคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศ

#### 3.2 คุณลักษณะของสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่

##### 3.2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation pattern)

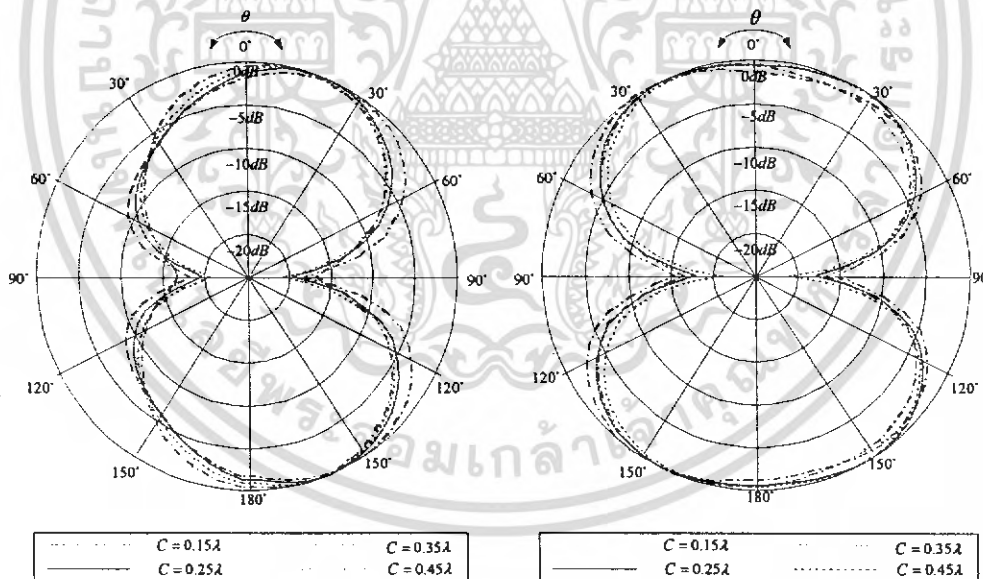
แบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อเป็นตัวบ่งบอกลักษณะการแพร่กระจายคลื่นที่ทิศทางต่างๆ ของสายอากาศ ซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูด(Amplitude)ของสนาม หรือกำลังงาน(Power) กับทิศทาง(Directivity) ของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่แสดงในรูปของมุมในหน่วยองศาหรือเรเดียน การวิเคราะห์สายอากาศที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง โดยสายอากาศป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่นี้สามารถตอบสนองความต้องการนั้นได้ เนื่องจากโครงสร้างสายอากาศ พบว่าเงื่อนไขที่เกิดแบบรูปการแพร่กระจายนั้นคือ ค่ามุมที่สนามสูงสุดทั้งระนาบสนามไฟฟ้า(E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก(H-plane) หรือระนาบที่ตั้งฉากกับการเดินทางของคลื่นในแนวตั้งและแนวนอนคือระนาบ xz และระนาบ yz ซึ่งที่มุม 0 ด้านหน้าและ 180 ในทิศด้านตรงข้ามโดยรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟสความต่างเฟส ของแรงดันเท่ากับ 0 องศาและความต่างเฟสของแรงดันเท่ากับ 135 องศา ในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความ ความต่างเฟสของแรงดันเท่ากับ 0 องศาและความต่างเฟสของแรงดันเท่ากับ 145 องศา ตามลำดับ โดยในการพิจารณาจะทำการเปรียบเทียบค่าความยาววงแหวนค่าต่างในส่วนของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่และสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของ สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบ คู่ความต่างเฟสเท่ากับ 0 องศาที่มีค่าความยาวด้าน (a) เท่ากับ  $0.694\lambda$  มีค่าความยาวของวงแหวน เท่ากับ  $0.15\lambda$   $0.25\lambda$   $0.35\lambda$  และ  $0.45\lambda$

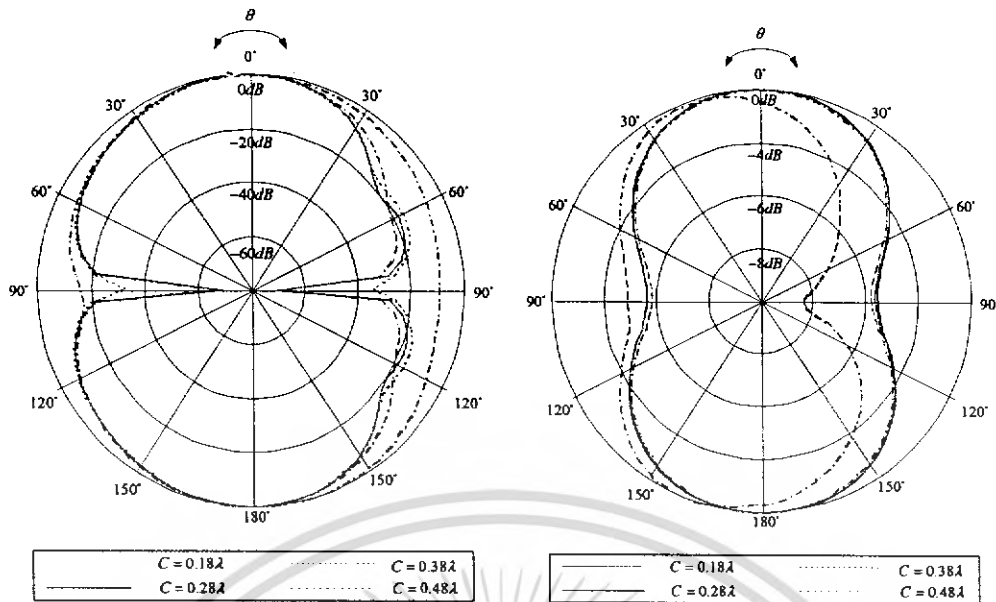


(ก) ระนาบ XZ

(ข) ระนาบ YZ

รูปที่ 3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบ คู่ความต่างเฟสเท่ากับ 135 องศาที่มีค่าความยาวด้าน (a) เท่ากับ  $0.694\lambda$  มีค่าความยาวของวงแหวน เท่ากับ  $0.15\lambda$   $0.25\lambda$   $0.35\lambda$  และ  $0.45\lambda$

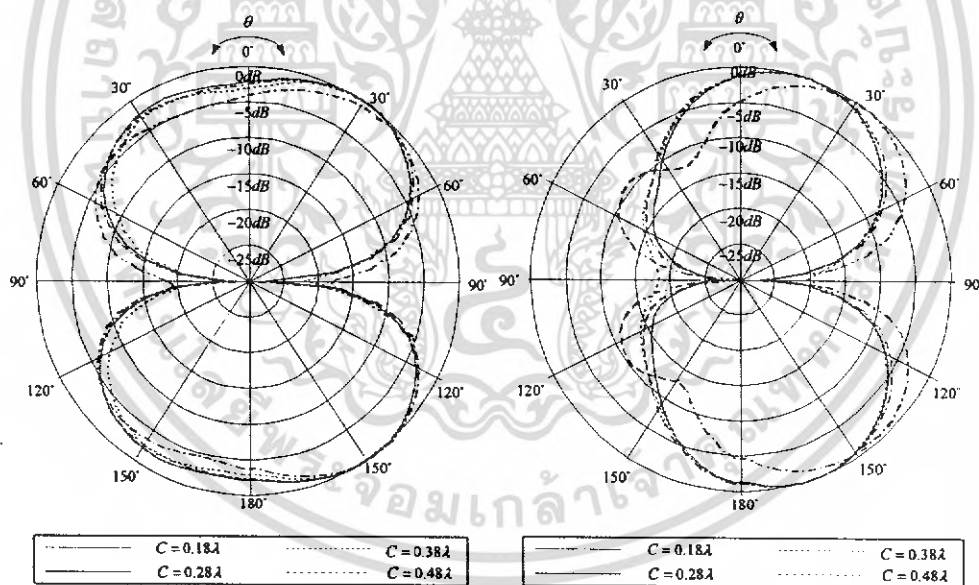
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟสเท่ากับ 0 องศาที่มีค่ารัศมี (r) เท่ากับ  $0.45\lambda$  มีค่าความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.18\lambda$   $0.28\lambda$   $0.38\lambda$  และ  $0.48\lambda$



(ก) ระนาบ XZ

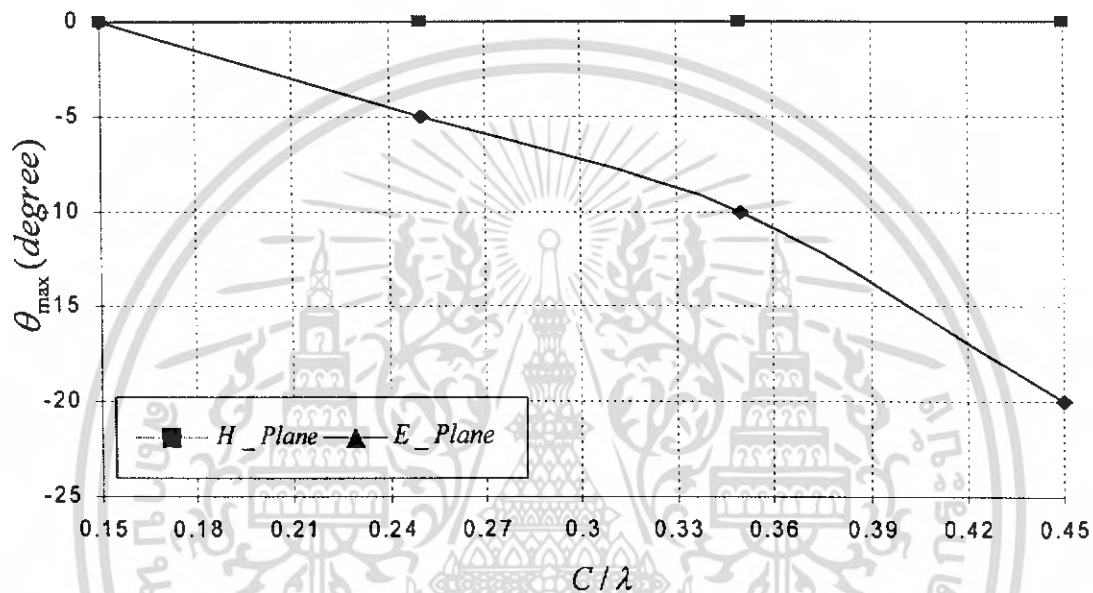
(ข) ระนาบ YZ

รูปที่ 3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟสเท่ากับ 145 องศาที่มีค่ารัศมี (r) เท่ากับ  $0.45\lambda$  มีค่าความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.18\lambda$   $0.28\lambda$   $0.38\lambda$  และ  $0.48\lambda$

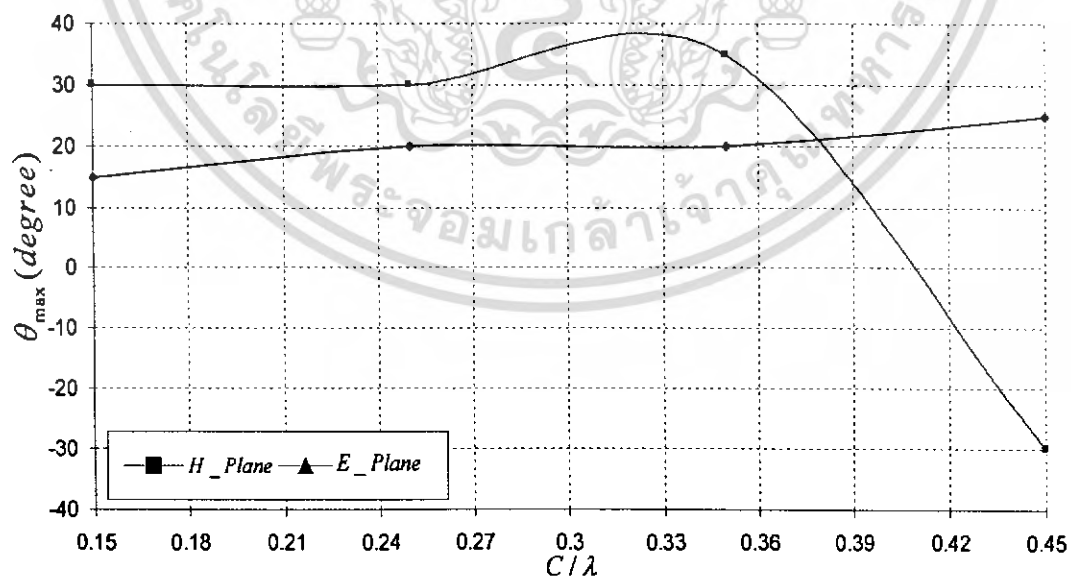
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 ค่ามุมยกที่สนามสูงสุด

การออกแบบสายอากาศให้มีคุณลักษณะตามที่ต้องการนั้น การพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศหลายๆ อย่างร่วมกัน สิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณาคือ ทิศทางการแพร่กระจายสนามที่แรงที่สุดของสายอากาศ โดยที่ทิศทางที่จะพิจารณาคือ ทิศทางในระนาบมุมต่างๆ  $(\theta, \phi)$  ที่อ้างอิง ในทิศทางตามแนวแกน Z ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของสนามในระนาบต่างๆ ที่พิจารณาคือ ระนาบ xz และระนาบ yz นั่นคือ จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสนามในระนาบมุมขงกันเอง ทั้งนี้เนื่องจากต้องการสายอากาศที่สามารถแพร่กระจายคลื่นไปในทิศด้านหน้าและด้านหลังทั้งสองด้าน เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีความแรงของสนามในทิศดังกล่าวจึงต้องพิจารณาร่วมด้วย



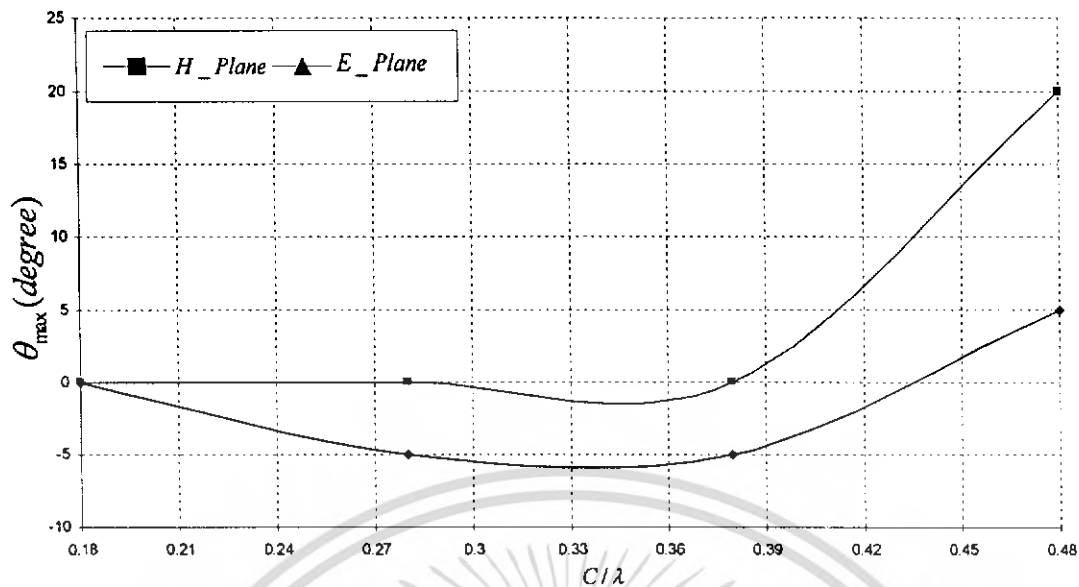
(ก) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 0 องศา



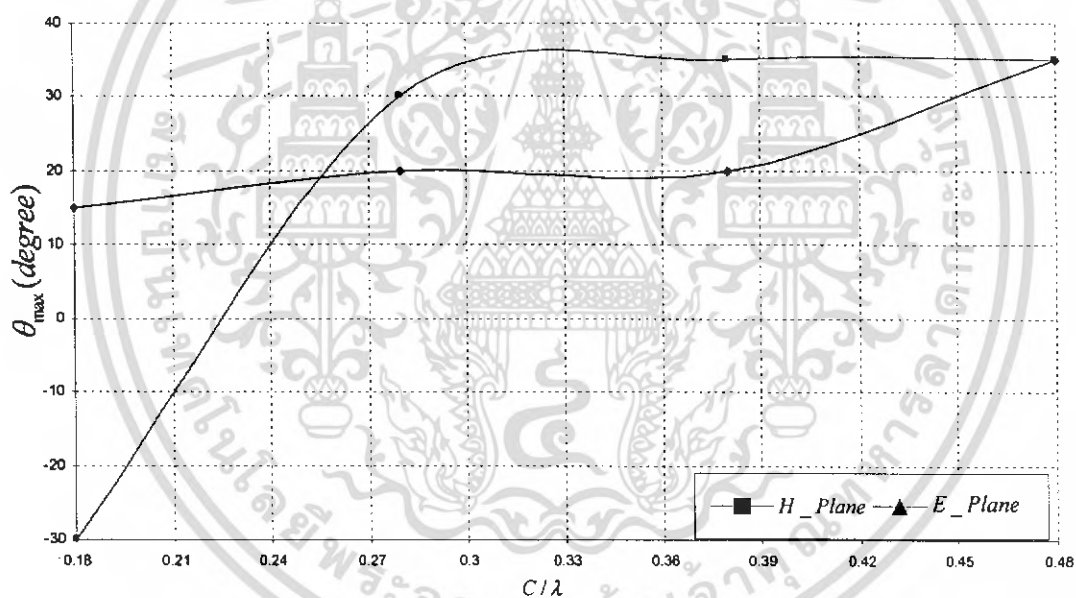
(ข) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 135 องศา

### รูปที่ 3.5 ค่ามุมยกที่สนามสูงสุด เมื่อเปลี่ยนความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 0 องศา



(ข) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 145 องศา

รูปที่ 3.6 ค่ามุมยกที่สนามสูงสุด เมื่อเปลี่ยนความยาววงแหวนวงกลม

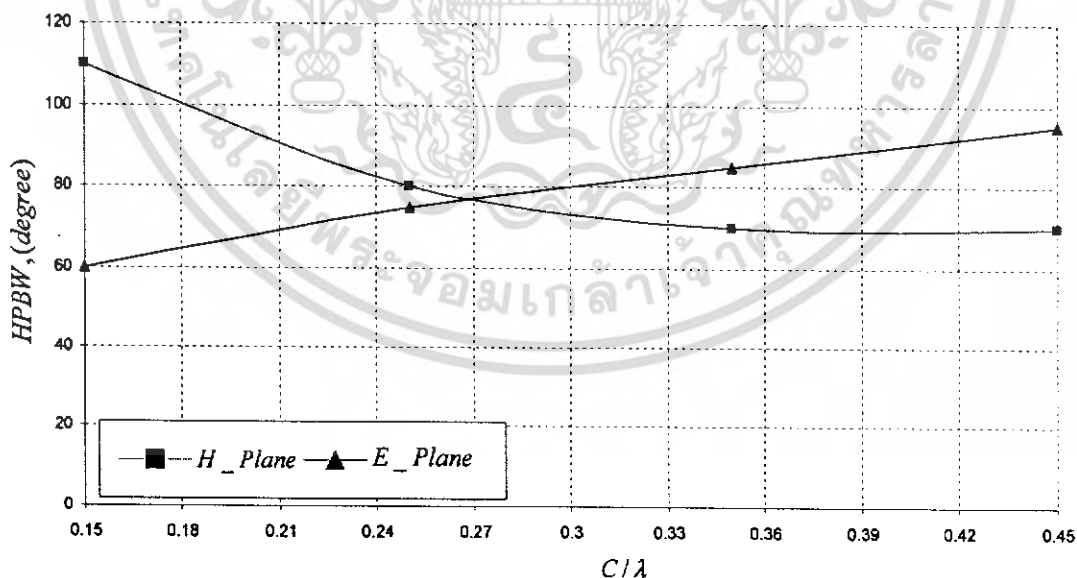
ในรูปที่ 3.5 และ รูปที่ 3.6 เมื่อเปลี่ยนค่าความยาววงแหวนเป็นค่าต่างๆ ซึ่งผลที่ได้พบว่า การแพร่กระจายคลื่นแบบสองทางของสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ให้ค่าความต่างเฟสเท่ากับ 0 องศา 135 องศา และ 145 องศา โดยเราจะทำการพิจารณาค่ามุมยกที่สนามสูงสุดที่เกิดขึ้นทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก หรือ ระนาบที่ตั้งฉากกับการเดินทางของคลื่นในแนวตั้ง และแนวนอนคือระนาบ  $xz$  และระนาบ  $yz$  ในส่วนของสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟสเท่ากับ 135 องศา และ 145 องศา ค่ามุมยกในทิศทางที่สูงที่สุดนี้หมายถึง ทิศทางที่ค่าสนาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

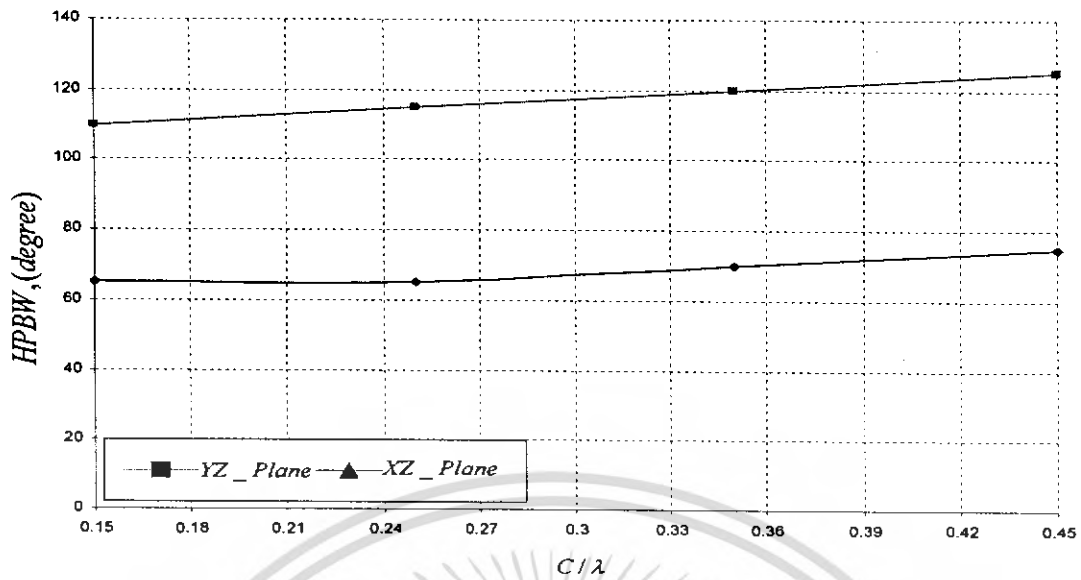
มีความแรงที่สุดที่มุม  $\theta$  ใด ของระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กหรือระนาบที่ตั้งฉากกับการเดินทางของคลื่นในแนวตั้งและแนวนอนคือระนาบ  $xz$  และระนาบ  $yz$  เพื่อหาค่ามุมที่สนามแรงที่สุดในทิศที่ต้องการคือชี้ที่มุม  $0$  ด้านหน้าและ  $180$  ในทิศด้านตรงข้าม โดยในการวิเคราะห์ห่อองค์ประกอบที่มีผลต่อค่ามุมยกสูงสุดคือความยาวของวงแหวน โดยในการเลือกค่าความยาววงแหวนนั้นจะทำการพิจารณาค่าความยาววงแหวนที่ค่ามุมยกสูงสุดมีค่าใกล้  $0$  องศา ด้านหน้าและ  $180$  องศา ในทิศด้านตรงข้าม จากการวิเคราะห์พบว่าค่ามุมยกที่มีค่าใกล้เคียง  $0$  องศา มากที่สุดจะอยู่ในช่วงความยาววงแหวน ( $c$ ) เท่ากับ  $0.15 \lambda$  ถึง  $0.35 \lambda$  สำหรับสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่เฟสของแรงดัน  $0$  องศาหรือ  $135$  องศา ในส่วนของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ พบว่าค่ามุมยกที่มีค่าใกล้เคียง  $0$  องศา มากที่สุดจะอยู่ในช่วงความยาววงแหวน ( $c$ ) เท่ากับ  $0.18 \lambda$  ถึง  $0.38 \lambda$  สำหรับสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ไม่ว่าจะเป็นที่ความต่างเฟสของแรงดัน  $0$  องศาหรือ  $145$  องศา

### 3.2.3 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง

ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศอย่างหนึ่ง เพราะค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งเป็นสิ่งที่ใช้บ่งบอกถึงคุณสมบัติของสายอากาศ โดยค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่ต้องการคือต้องมีค่าความกว้างแคบๆ เพื่อให้สายอากาศแพร่กระจายคลื่นไปยังทิศทางที่ต้องการแม่นยำขึ้นและมีการสูญเสียกำลังงานน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และ รูปที่ 3.8

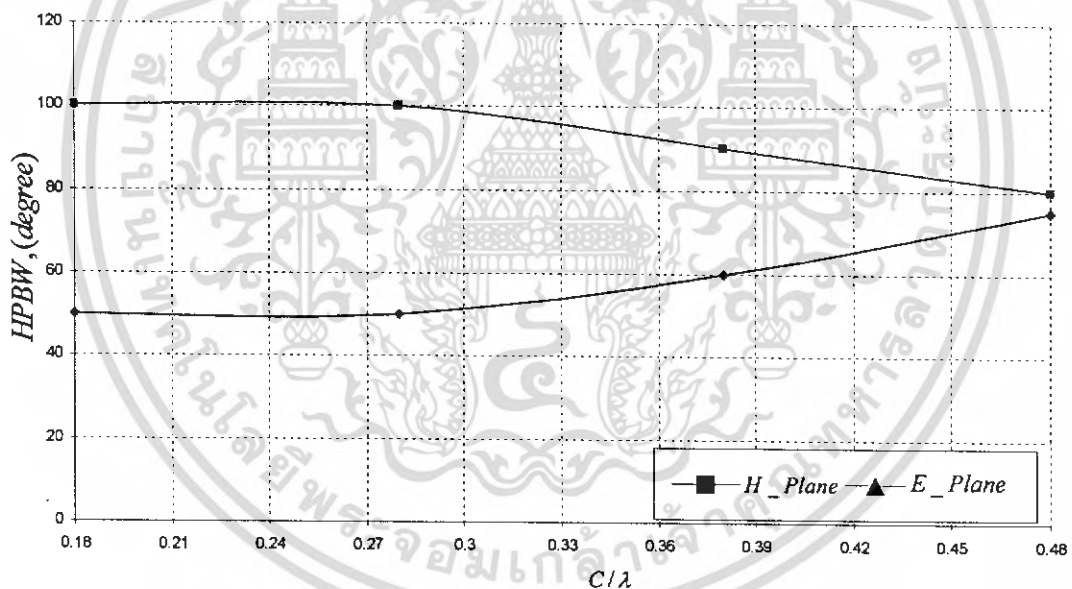


(ก) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ  $0$  องศา



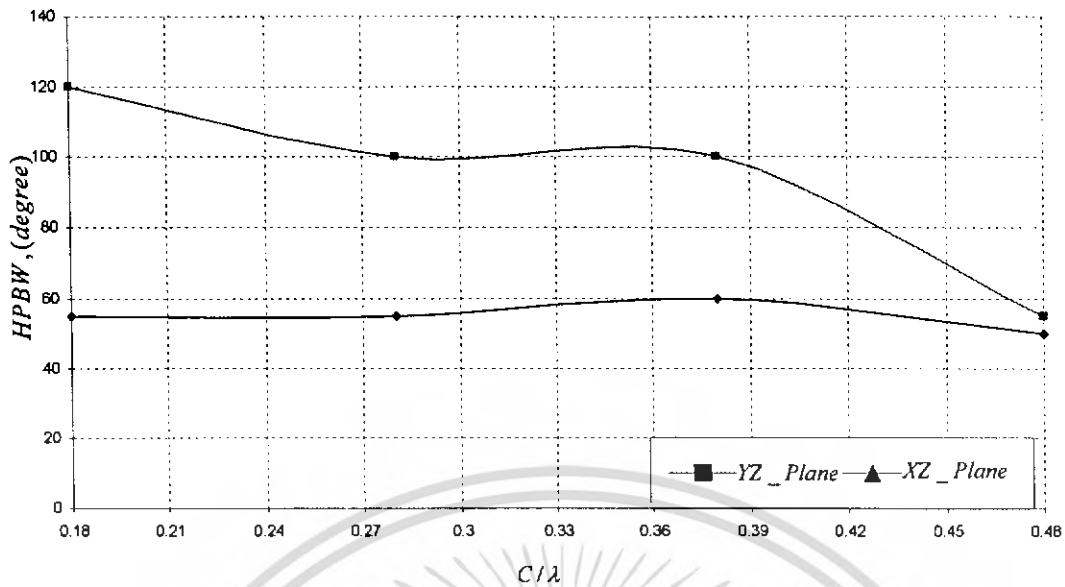
(ข) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 135 องศา

รูปที่ 3.7 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง เมื่อเปลี่ยนความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส



(ก) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 145 องศา

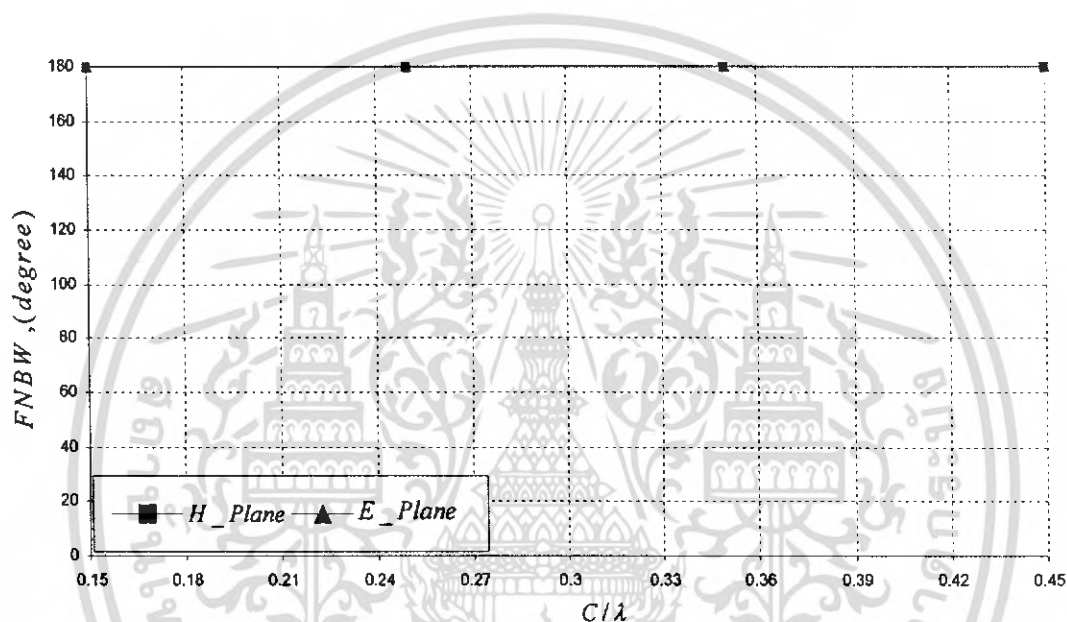
รูปที่ 3.8 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง เมื่อเปลี่ยนความยาววงแหวนวงกลม

พบว่าค่าความกว้างลำคลื่นลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อเปลี่ยนค่าความยาววงแหวนเป็นค่าต่างๆ ซึ่งผลที่ได้พบว่าค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ให้ค่าความต่างเฟสเท่ากับ 0 องศา 135 องศา และ 145 องศา โดยเราจะทำการพิจารณาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง ที่เกิดขึ้นทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก หรือ ระนาบที่ตั้งฉากกับการเดินทางของคลื่นในแนวตั้งและแนวนอนคือระนาบ xz และระนาบ yz ในส่วนของสายอากาศโพรบคู่กระตุ้นวงแหวนความต่างเฟสเท่ากับ 135 องศา และ 145 องศา โดยในการเลือกค่าความยาววงแหวนนั้น จะทำการพิจารณาค่าความยาววงแหวนที่ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งต้องมีค่าความกว้างแคบๆ เพื่อให้สายอากาศแพร่กระจายคลื่นไปยังทิศทางที่ต้องการแม่นยำขึ้น และมีการสูญเสียกำลังงานน้อย จากการวิเคราะห์พบว่าค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง มีค่าน้อยและเหมาะสมที่สุดที่ค่าความยาววงแหวนเท่ากับ  $0.25 \lambda$  สำหรับสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่เฟสของแรงดัน 0 องศาหรือ 135 องศา ในส่วนของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ พบว่าค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง มีค่าน้อยและเหมาะสมที่สุดที่ค่าความยาววงแหวนเท่ากับ  $0.28 \lambda$  สำหรับสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ไม่ว่าจะเป็นที่ความต่างเฟสของแรงดัน 0 องศาหรือ 145 องศา

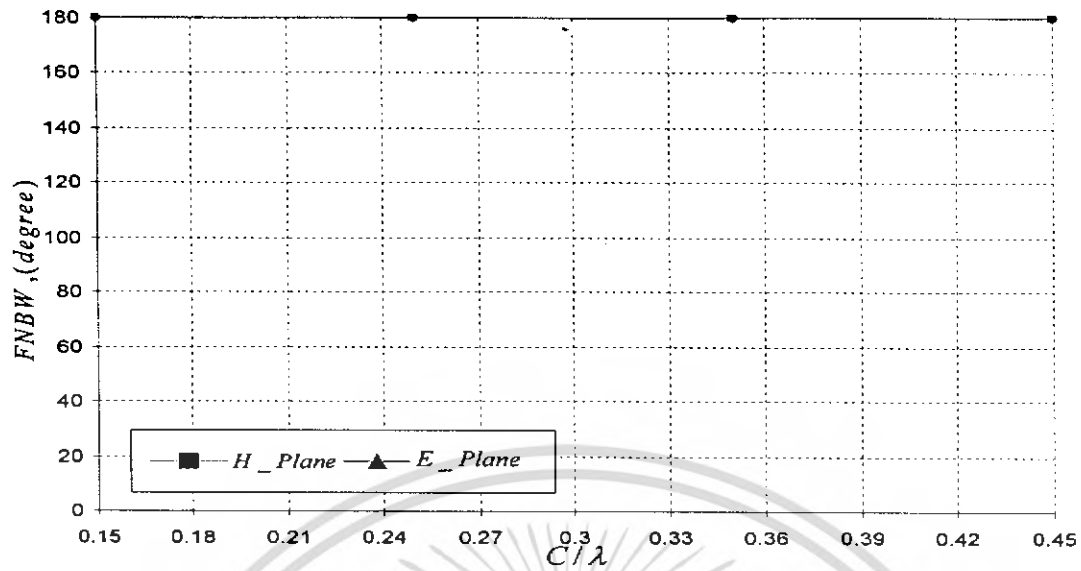
### 3.2.4 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลาง

ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางคือช่วงกว้างของมุมที่ความเข้มการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลักมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ ดังในรูปที่ 3.9 และ รูปที่ 3.10 สังเกตพบว่า ค่าความกว้างลำคลื่นที่เป็นศูนย์กลางแรกจะมีค่าคงที่ที่ 180 องศา ตลอดทุกความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ให้ค่าความต่างเฟส 0 องศา และค่าความต่างเฟส 135 องศา และเมื่อพิจารณาค่าความกว้างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางแรกของวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ให้ค่าความต่างเฟสเท่ากับ 0 องศา ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางของสนามแม่เหล็กจะคงที่ที่ 180 องศา ส่วนสนามไฟฟ้าค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางแรกมีค่าคงที่ค่าหนึ่งคือ 140 องศา และจะเพิ่มขึ้นจนเริ่มคงที่ที่ 180 องศา ที่ความยาวของวงแหวนวงกลม 0.38  $\lambda$  เมื่อพิจารณาค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางแรกของวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ให้ค่าความต่างเฟสเท่ากับ 145 องศา ค่าของสนามระนาบ yz จะมีค่าคงที่ตลอด ส่วนค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางแรกของสนามระนาบ xz มีการเปลี่ยนแปลงที่ค่าความยาวของวงแหวนวงกลม 0.38  $\lambda$  ถึง 0.48  $\lambda$  เมื่อค่า c มากขึ้นค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางแรกจะมีค่าลดลง

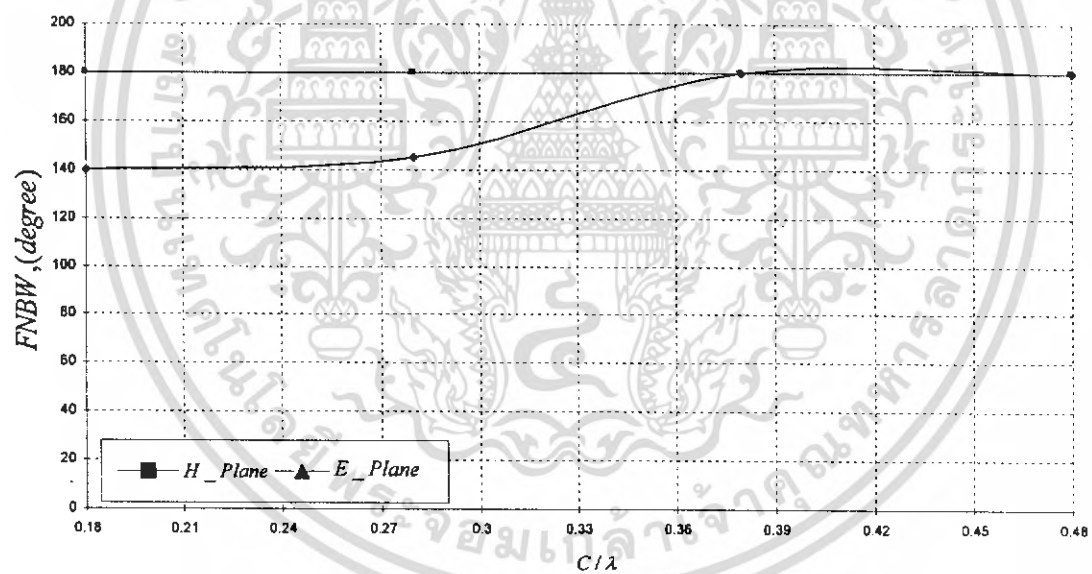


(ก) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 0 องศา



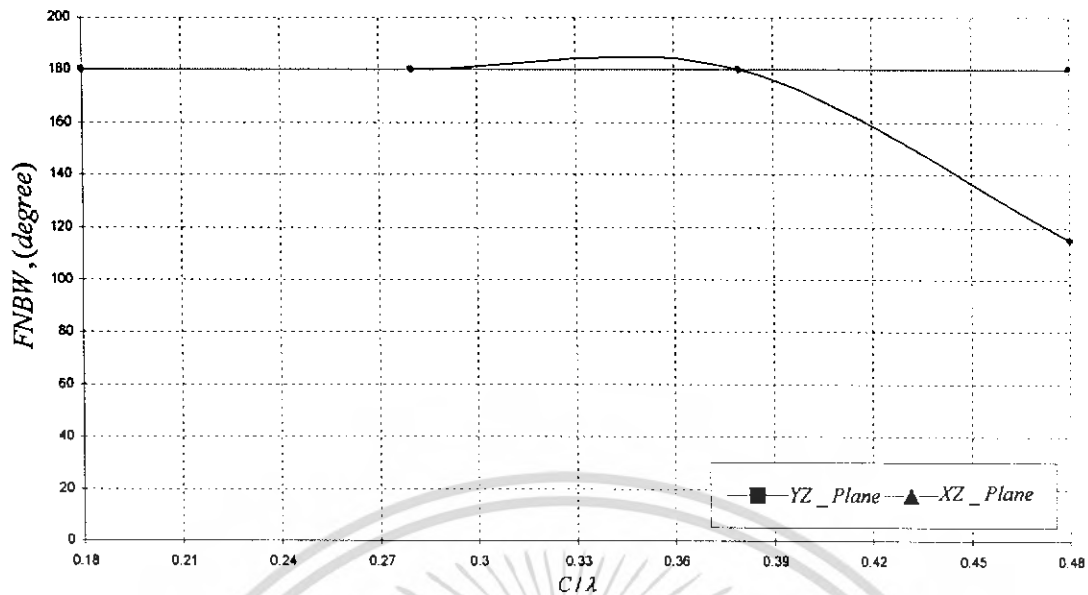
(ข) ความต่างเฟสของโพรมเท่ากับ 135 องศา

รูปที่ 3.9 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่สำคัญสามเป็นศูนย์คู่แรก เมื่อเปลี่ยนความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส



(ค) ความต่างเฟสของโพรมเท่ากับ 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

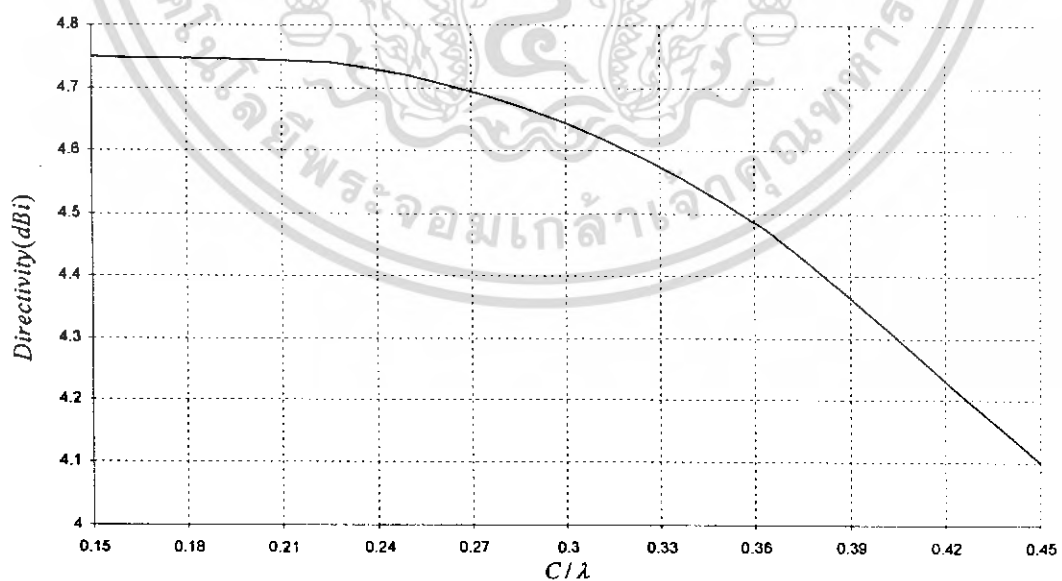


(ข) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 145 องศา

รูปที่ 3.10 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์ครั้งแรก เมื่อเปลี่ยนความยาววงแหวนวงกลม

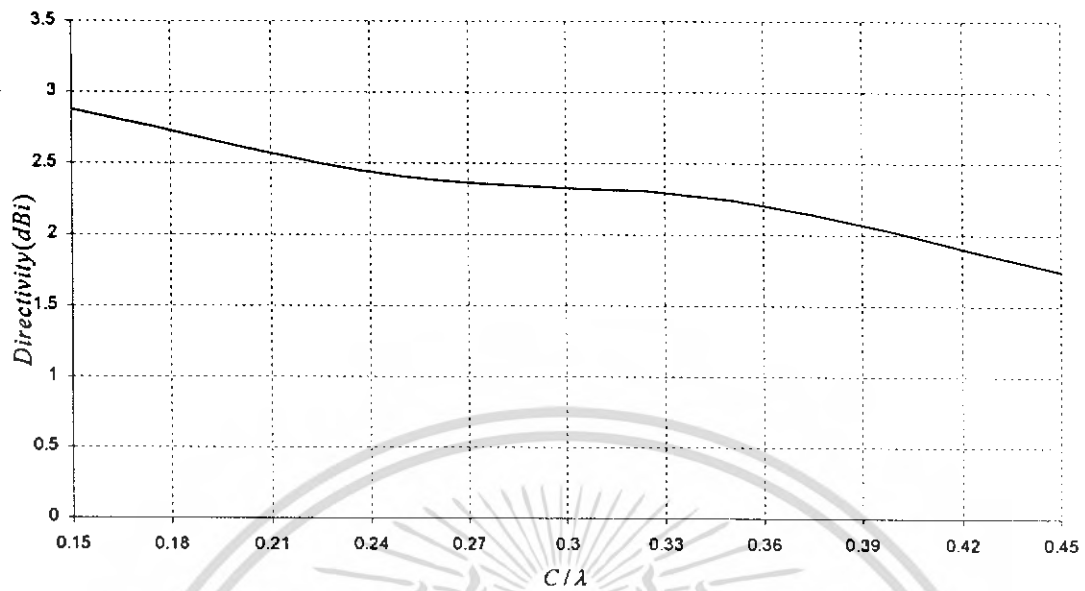
### 3.2.5 ค่าสภาพเจาะงทศทางของสายอากาศ

ค่าสภาพเจาะงทศทางของสายอากาศ คือค่าที่แสดงว่าสายอากาศมีความแรงที่ทิศทางต่างๆ มากน้อยเพียงใดเทียบกับตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซโทรปิกหน่วยเป็น dBi ในการพิจารณาจะใช้ค่าสภาพเจาะงทศทางในทิศทางที่ต้องการคือค่าสภาพเจาะงทศทางของสายอากาศในทิศตามแนวแกน z หรือ -z คือในทิศที่ ( $\theta = 0^\circ$ ) องศา หรือ ( $\theta = 180^\circ$ ) องศา ดังในรูปที่ 3.11 ถึง รูปที่ 3.16



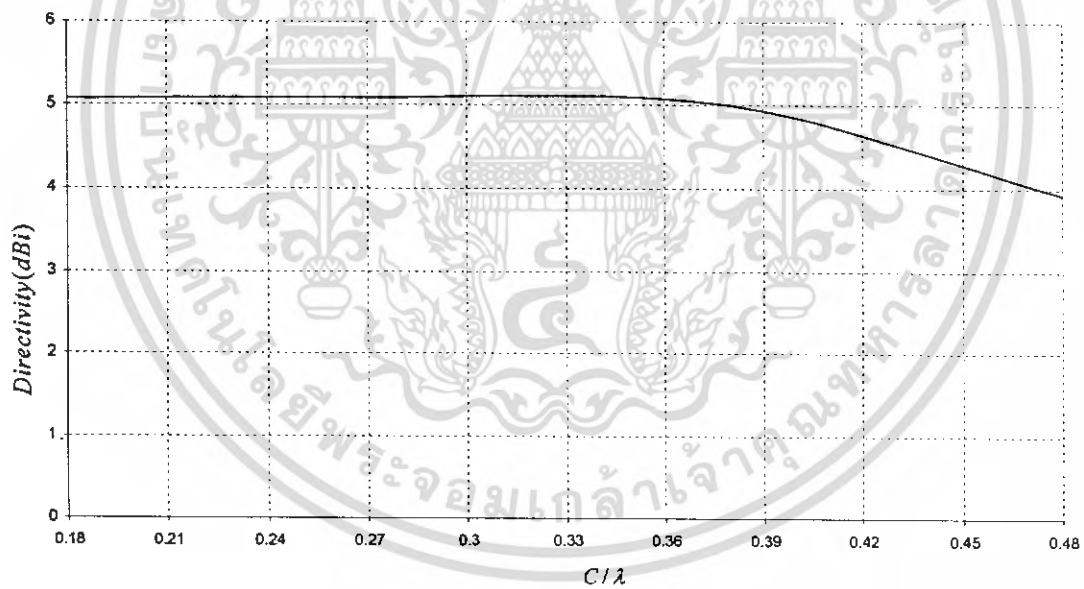
(ก) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



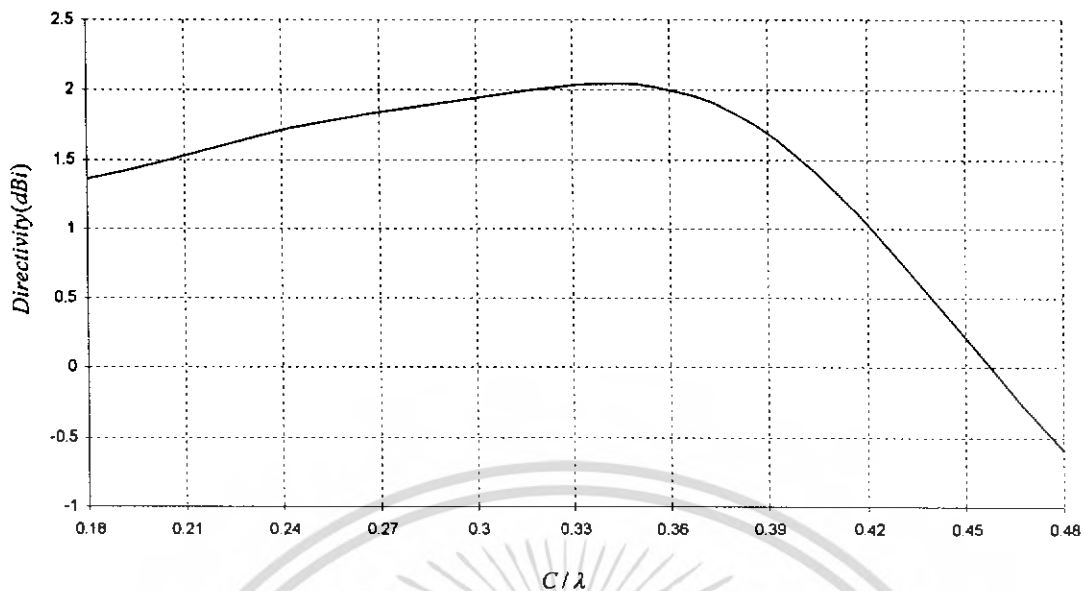
(ข) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 135 องศา

รูปที่ 3.11 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่เมื่อเปลี่ยนความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส



(ก) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 0 องศา

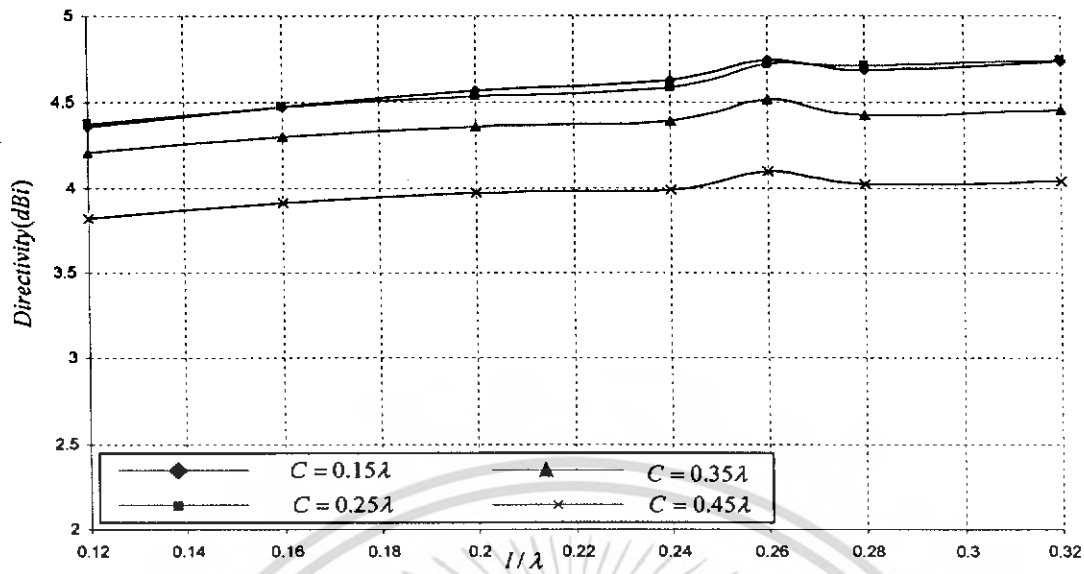
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



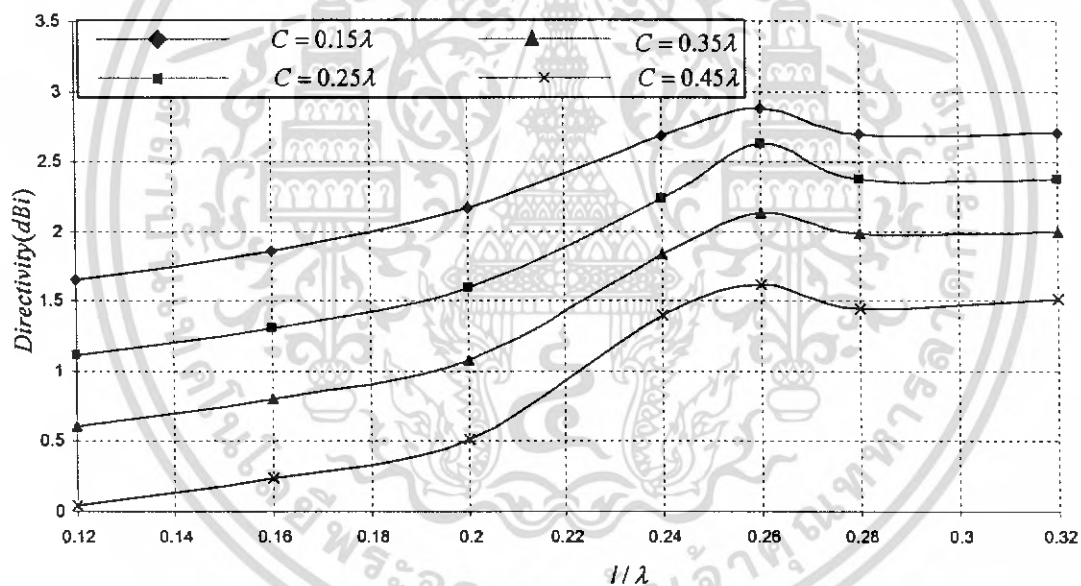
(ข) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 145 องศา

รูปที่ 3.12 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ เมื่อเปลี่ยนความยาววงแหวนวงกลม

โดยในรูปที่ 3.11 ถึง รูปที่ 3.12 จะเป็นการพิจารณาค่าความยาววงแหวนที่มีผลต่อค่าสภาพเจาะจงทิศทาง จะพบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ และค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ เมื่อพิจารณาค่าความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ให้ค่าความต่างเฟส 0 องศา ค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีค่าสูงกว่าวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ให้ค่าความต่างเฟส 135 องศา และจะมีค่าลดลงเมื่อความยาววงแหวนมีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับในส่วนของสายอากาศป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่วงแหวนวงกลมที่ค่าความต่างเฟสของแรงดัน 0 องศา ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศจะมีค่าคงที่จนถึงค่าความยาวคลื่นประมาณ 0.38  $\lambda$  ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศจะมีแนวโน้มลดลงในส่วนของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ค่าความต่างเฟสของแรงดัน 145 องศา ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศจะมีค่าคงที่เพิ่มขึ้นและมีค่ามากที่สุดที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ 0.35  $\lambda$  และที่ค่าความยาววงแหวนเพิ่มขึ้นค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศจะมีแนวโน้มลดลง

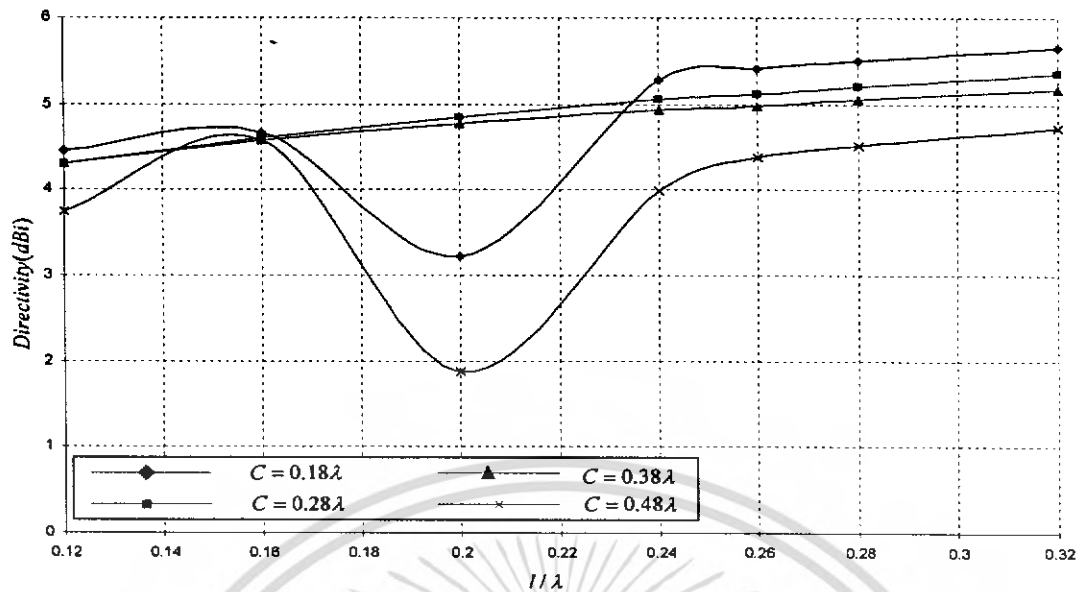


(ก) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 0 องศา

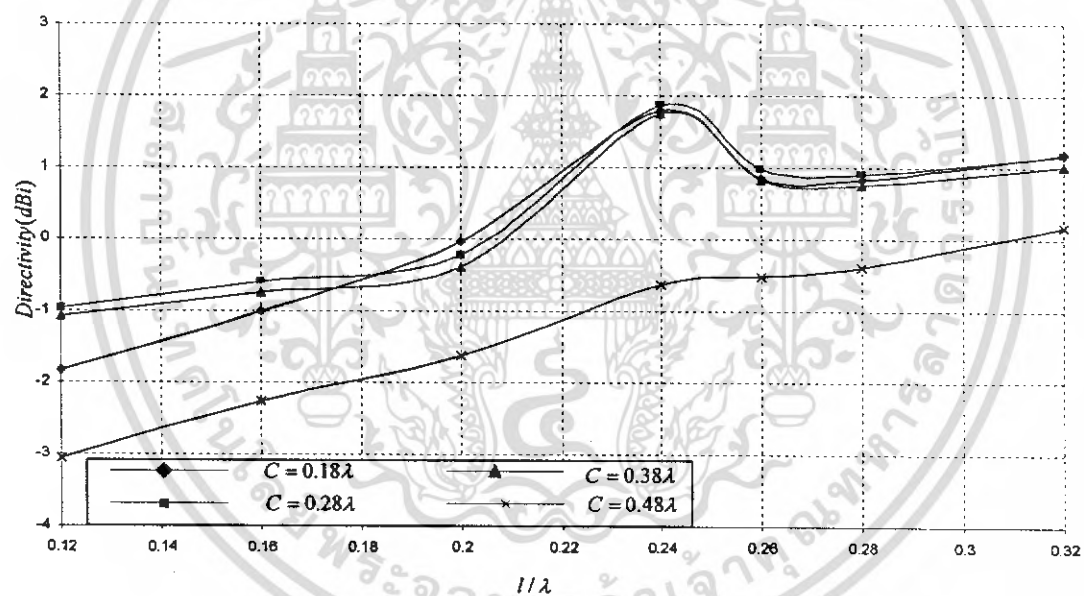


(ข) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 135 องศา

รูปที่ 3.13 ค่าสภาพจะจกทิศทางของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่เป็นฟังก์ชันของความยาวโพรบ เมื่อพิจารณาความยาวค่าต่าง ๆ



(ก) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 0 องศา



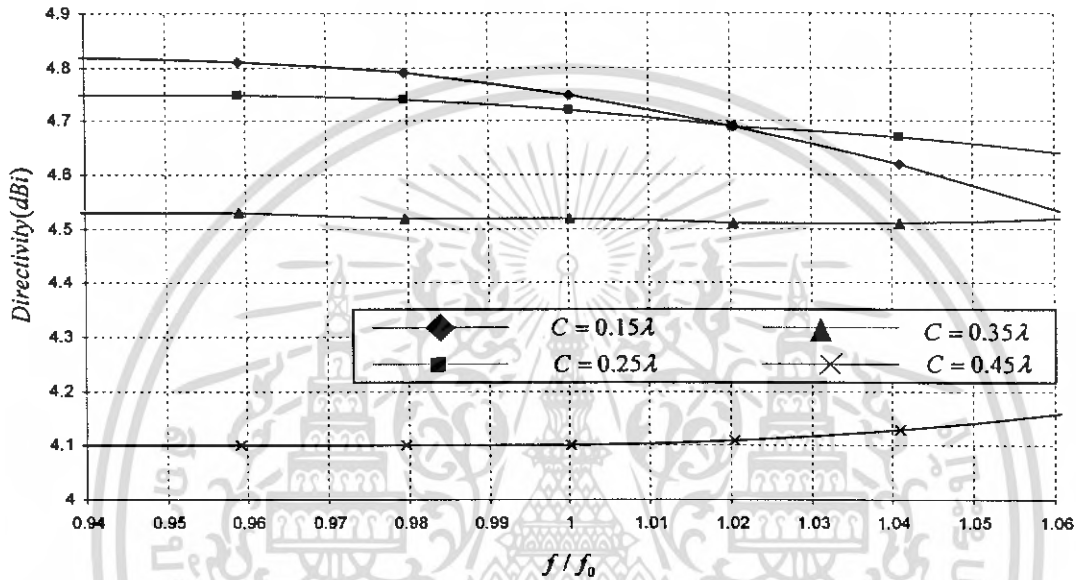
(ข) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 145 องศา

รูปที่ 3.14 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่เป็นฟังก์ชันของความยาวโพรบ เมื่อพิจารณาความยาวค่าต่างๆ

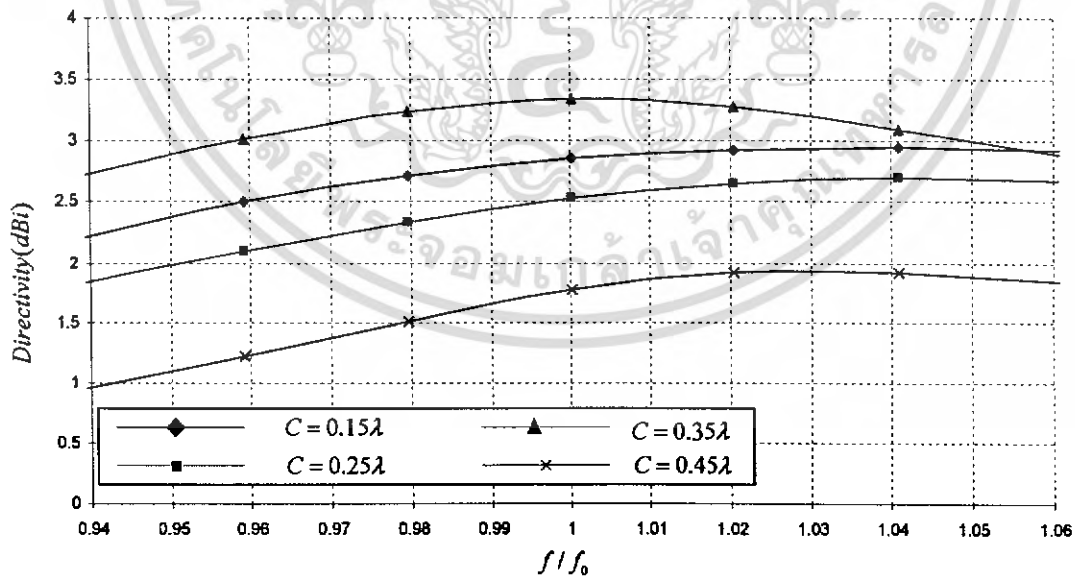
นอกจากนี้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ เมื่อเปลี่ยนความยาวโพรบป้อนสัญญาณเป็นค่าต่างๆ โดยในการพิจารณาจะทำการพิจารณาค่าความยาววงแหวนค่า  $0.15\lambda$   $0.25\lambda$   $0.35\lambda$  และ  $0.45\lambda$  เปรียบเทียบกันเพื่อหาค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีที่สุดของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ เมื่อทำการเปลี่ยนความยาวโพรบค่าต่างๆโดยจากการวิเคราะห์ พบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีที่สุดของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพรบคู่ จะมีค่าความยาววงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$  และ  $0.25\lambda$  โดยค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวโพรบเพิ่มขึ้นในส่วนของสายอากาศวงแหวนวงกลม โดยในการพิจารณาจะทำการพิจารณาค่าความยาววงแหวนค่า  $0.18\lambda$   $0.28\lambda$   $0.38\lambda$  และ  $0.48\lambda$  เปรียบเทียบกันเพื่อหาค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีที่สุดของสายอากาศป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่วงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อทำการเปลี่ยนความยาวโพรบค่าต่างๆ โดยจากการวิเคราะห์พบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีที่สุดของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่จะมีค่าความยาววงแหวนเท่ากับ  $0.28\lambda$  และ  $0.38\lambda$  โดยค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวโพรบเพิ่มขึ้น

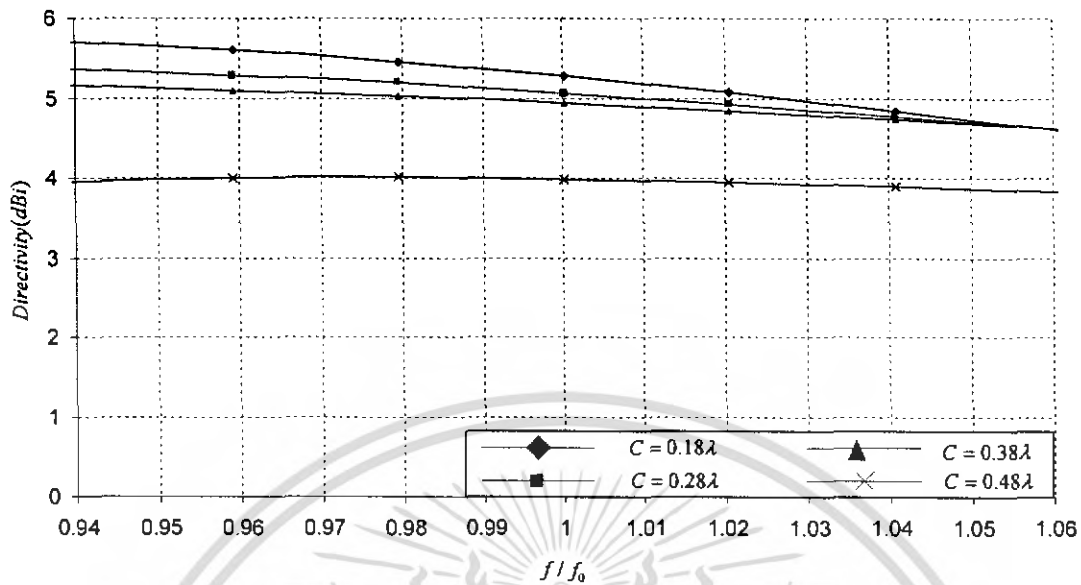


(ก) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 0 องศา

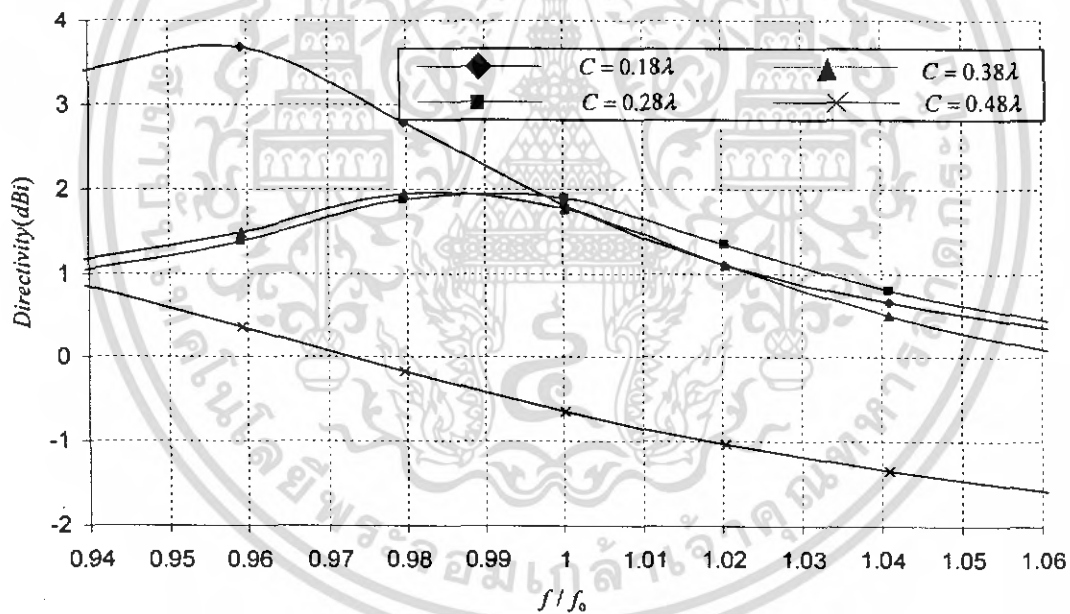


(ข) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 135 องศา

รูปที่ 3.15 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ เมื่อพิจารณาความยาวค่าต่างๆ



(ก) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 0 องศา



(ข) ความต่างเฟสของโพรบเท่ากับ 145 องศา

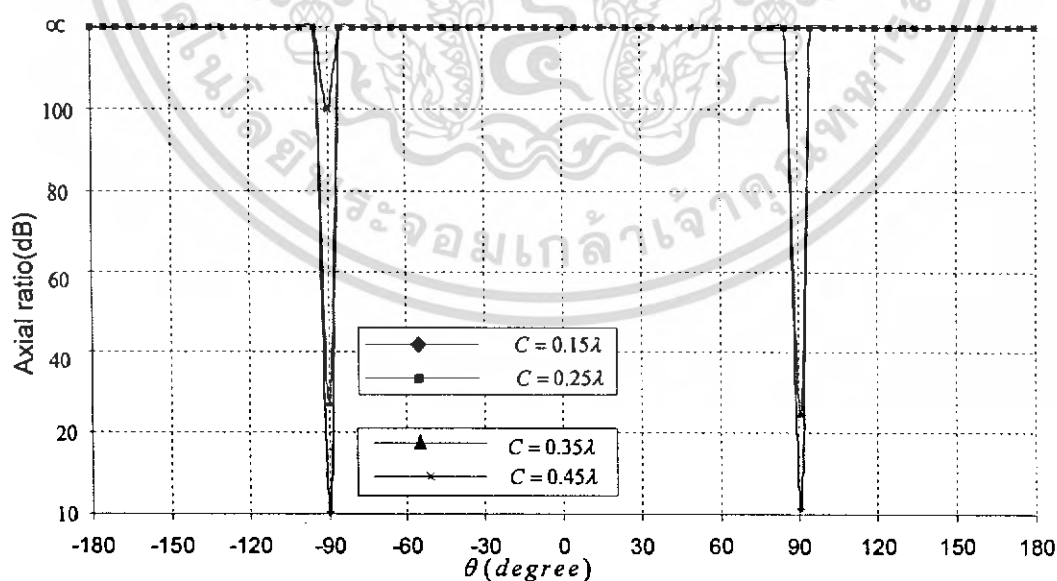
รูปที่ 3.16 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อพิจารณาความยาว ค่าต่าง ๆ

สำหรับการพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ เมื่อเปลี่ยนความถี่ค่าต่าง ๆ โดยในการพิจารณาจะทำการพิจารณาค่าความยาววงแหวนค่า  $0.15\lambda$ ,  $0.25\lambda$ ,  $0.35\lambda$  และ  $0.45\lambda$  เปรียบเทียบกันเพื่อหาค่าสภาพเจาะจง

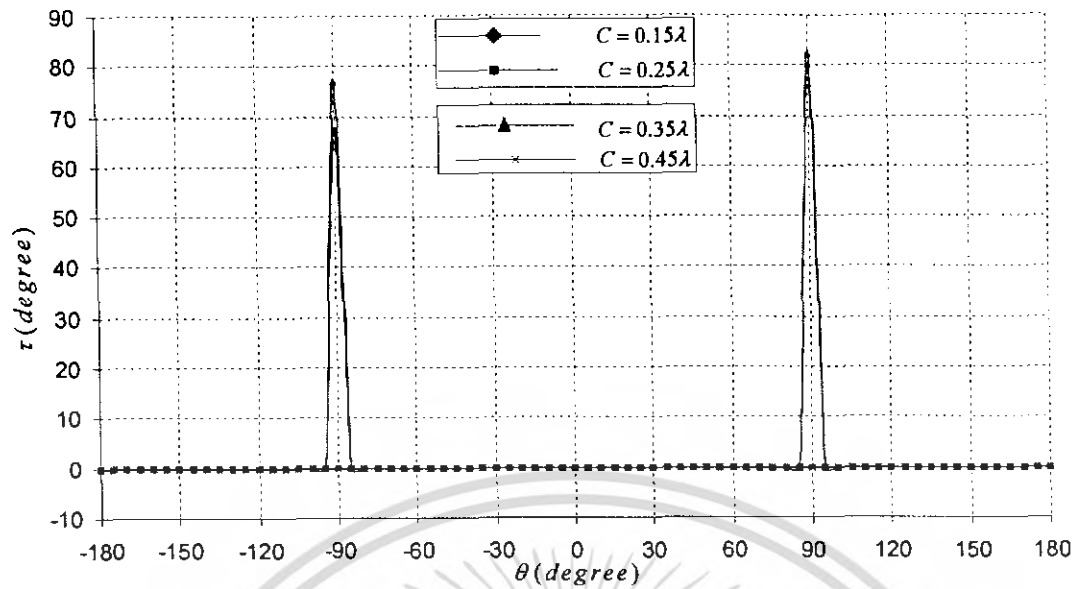
ทิศทางที่ดีที่สุดของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อทำการเปลี่ยนความถี่ค่าต่างๆ โดยจากการวิเคราะห์ พบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีที่สุดของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ เมื่อเฟสของแรงดันเท่ากับ 0 องศาในรูปที่ 3.15 (ก) จะมีค่าความยาววงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$  โดยค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีที่สุดของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่เมื่อเฟสของแรงดันเท่ากับ 135 องศา รูปที่ 3.15 (ข) จะมีค่าความยาววงแหวนเท่ากับ  $0.35\lambda$  ในส่วนของการพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ เมื่อเปลี่ยนความถี่ค่าต่างๆ โดยในการพิจารณาจะทำการพิจารณาค่าความยาววงแหวนค่า  $0.18\lambda$   $0.28\lambda$   $0.38\lambda$  และ  $0.48\lambda$  เปรียบเทียบกันเพื่อหาค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีที่สุดของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ เมื่อทำการเปลี่ยนความถี่ค่าต่างๆ โดยจากการวิเคราะห์พบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีที่สุดของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ เมื่อเฟสของแรงดันเท่ากับ 0 องศา จะมีค่าความยาววงแหวนเท่ากับ  $0.18\lambda$  โดยค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีที่สุดของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ เมื่อเฟสของแรงดันเท่ากับ 135 องศา จะมีค่าความยาววงแหวนเท่ากับ  $0.28\lambda$

### 3.2.6 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์

คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ โดยพิจารณาค่าอัตราส่วนแกนและค่ามุมเอียงของสายอากาศซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ลักษณะการโพลาไรซ์ เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งด้านหน้าของสายอากาศ ( $\theta = 0^\circ$ ) และด้านตรงข้าม ( $\theta = 180^\circ$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ถึงรูปที่ 3.28

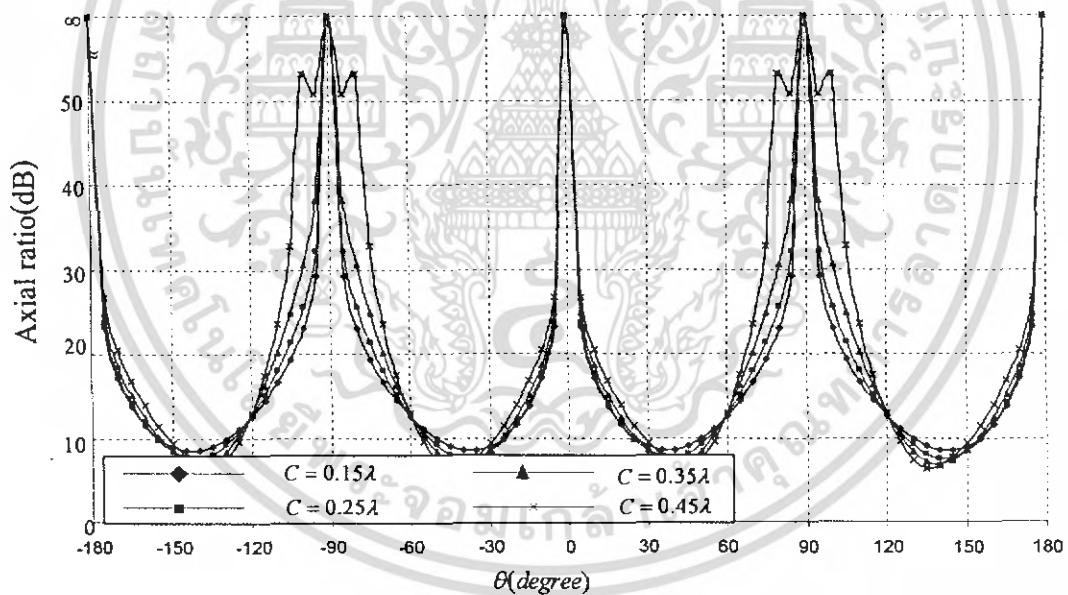


(ก) ค่าอัตราส่วนแกน



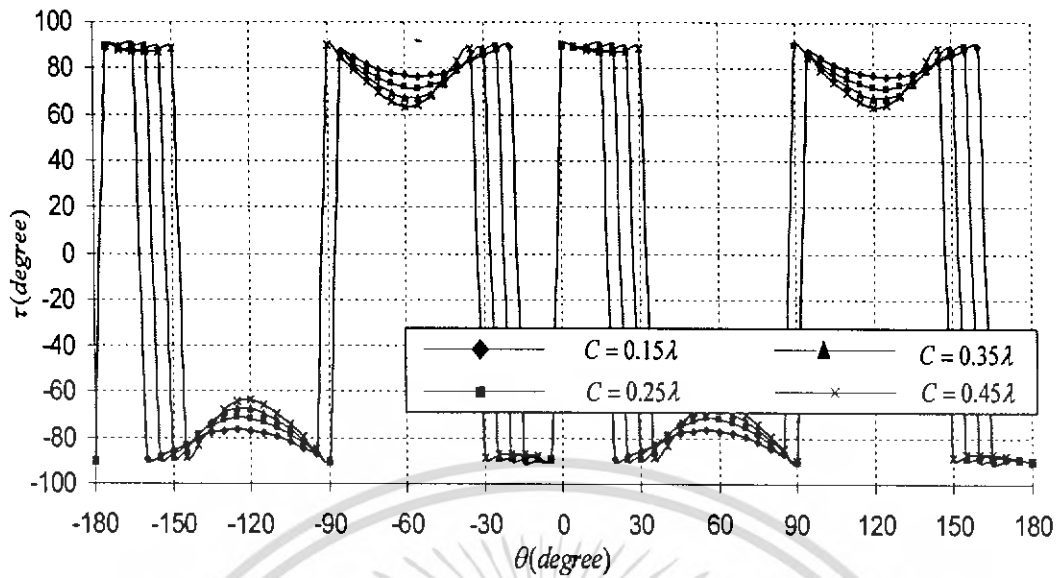
(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 3.17 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่โอนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความต่างเฟส 0 องศา ราบสนามไฟฟ้า



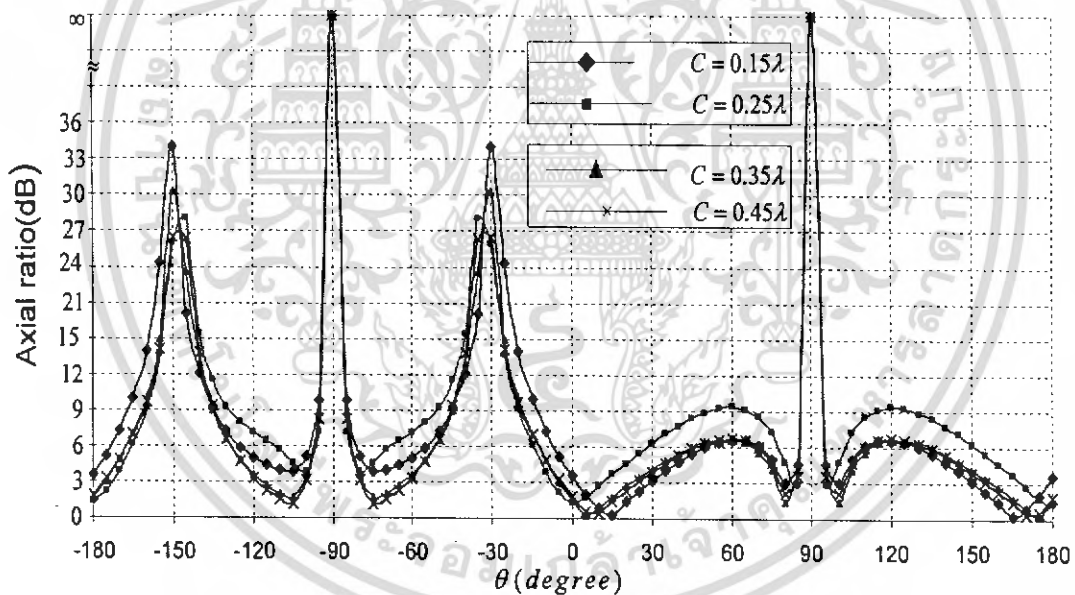
(ค) ค่าอัตราส่วนแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



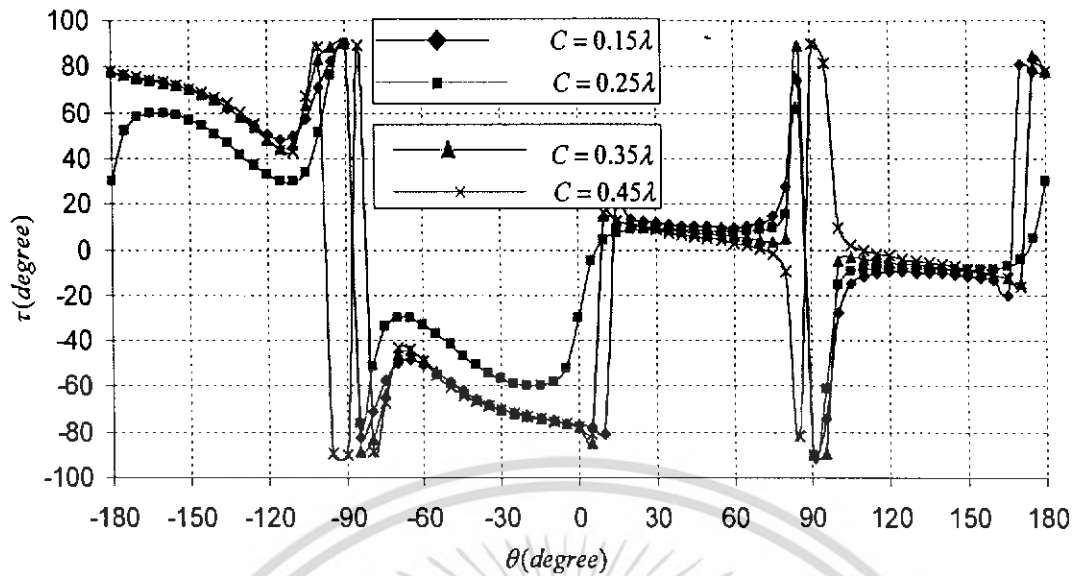
(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 3.18 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 0 องศา ระนาบสนามแม่เหล็ก



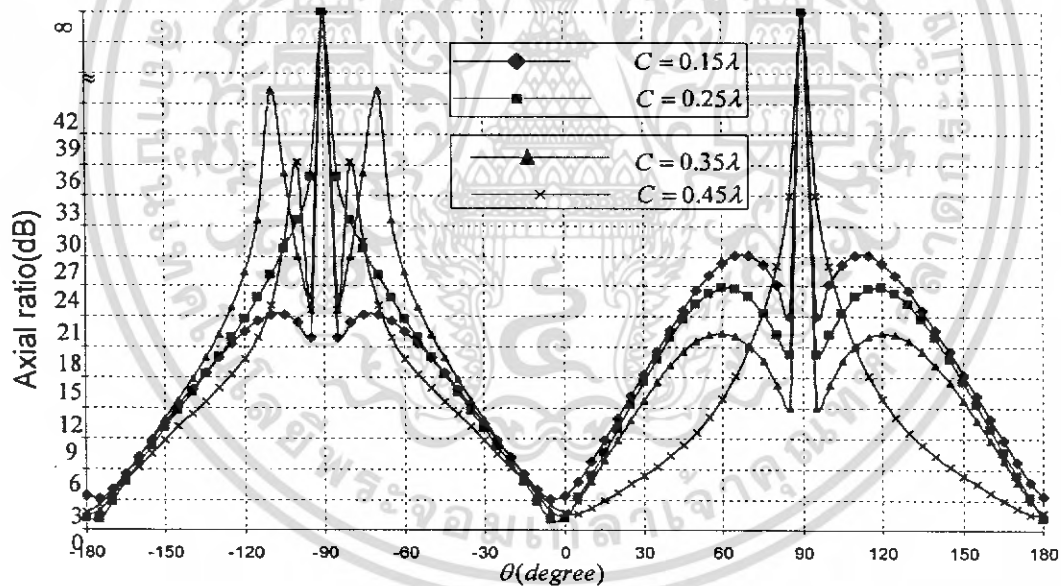
(ค) ค่าอัตราส่วนแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



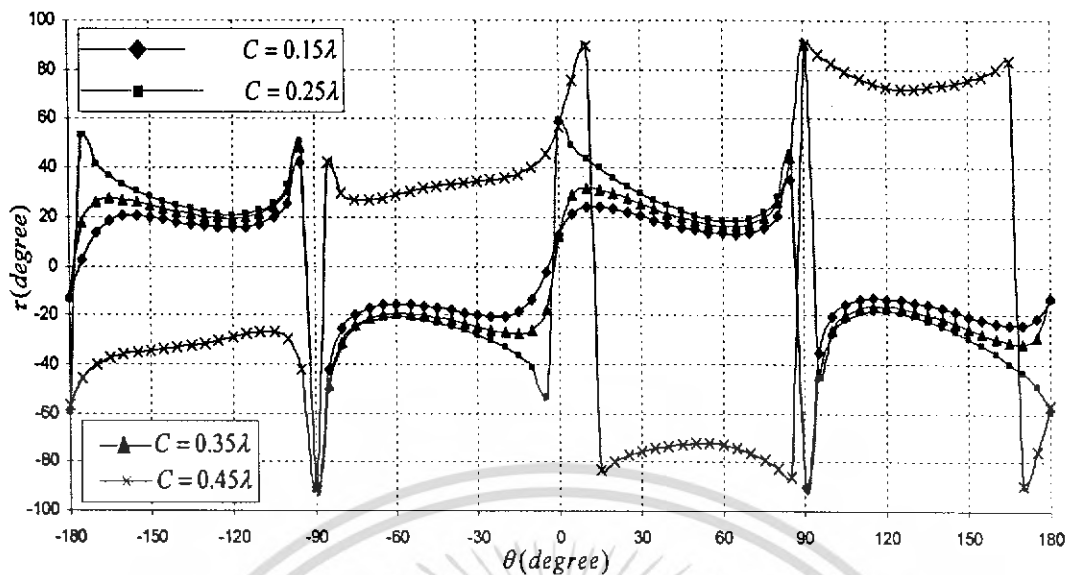
(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 3.19 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 135 องศา ระนาบ XZ



(ค) ค่าอัตราส่วนแกน

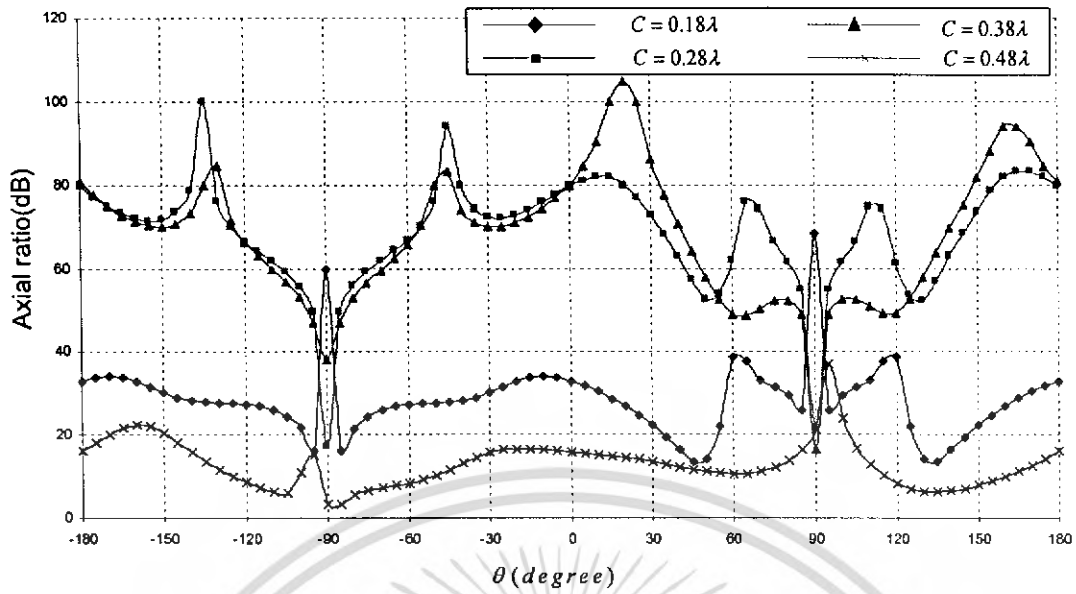
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



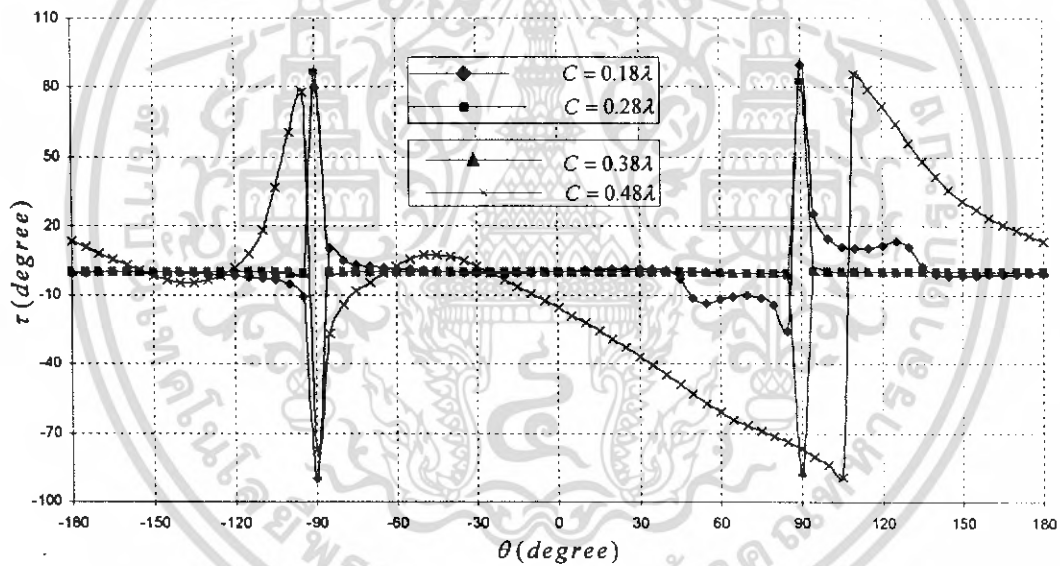
(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 3.20 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 135 องศา ระนาบ YZ

โดยในรูปที่ 3.17 ถึง รูปที่ 3.20 เป็นการวิเคราะห์คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ โดยทำการวิเคราะห์คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก หรือ ระนาบที่ตั้งฉากกับการเดินทางของคลื่นในแนวตั้งและแนวนอนคือระนาบ xz และระนาบ yz โดย ทำการเปรียบเทียบความยาวของวงแหวนค่าต่างๆ ที่ความต่างเฟสของแรงดันเท่ากับ 0 องศา และ 135 องศา โดยทำการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนแกนในทิศทางที่ต้องการคือด้านหน้าของสายอากาศ ( $\theta = 0^\circ$ ) และด้านตรงข้าม ( $\theta = 180^\circ$ ) จากการวิเคราะห์พบว่าสายอากาศป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่วงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ความต่างเฟสของแรงดันเท่ากับ 0 องศา จะได้อัตราส่วนแกนเป็นอนันต์และมุมเอียงเท่ากับ 45 องศาทุกค่าของความยาววงแหวน ในส่วนของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วย โพรบคู่ที่ความต่างเฟสของแรงดันเท่ากับ 135 องศา พบว่าที่ค่าความยาววงแหวนเท่ากับ  $0.25\lambda$  จะได้อัตราส่วนแกนที่ต่ำที่สุดคือ จะได้อัตราส่วนแกนเท่ากับ 1.165dB และมุมเอียงเท่ากับ -22.18 องศา เพราะฉะนั้นจากการวิเคราะห์จึงสรุปได้ว่าสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟสของแรงดันเท่ากับ 0 องศา ให้การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวเอียงมุมเท่ากับ 45 องศา ส่วนของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟสของแรงดันเท่ากับ 135 องศา ให้การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมโดยเป็นแบบโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมหมุนขวาด้านหน้าของสายอากาศ ( $\theta = 0^\circ$ ) และ เป็นแบบโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมหมุนซ้ายด้านตรงข้าม ( $\theta = 180^\circ$ )



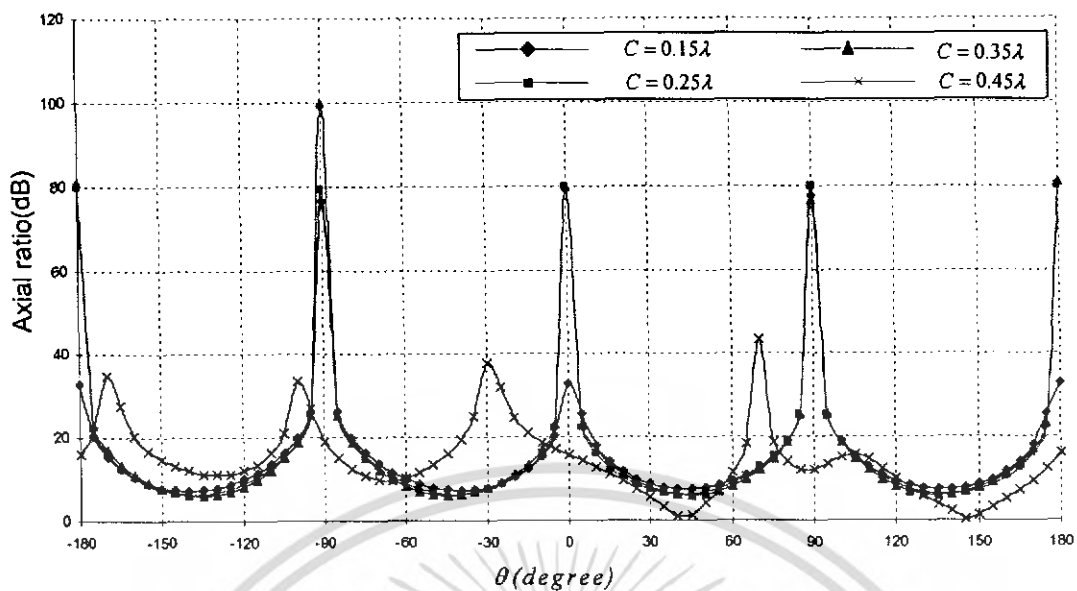
(ก) ค่าอัตราส่วนแกน



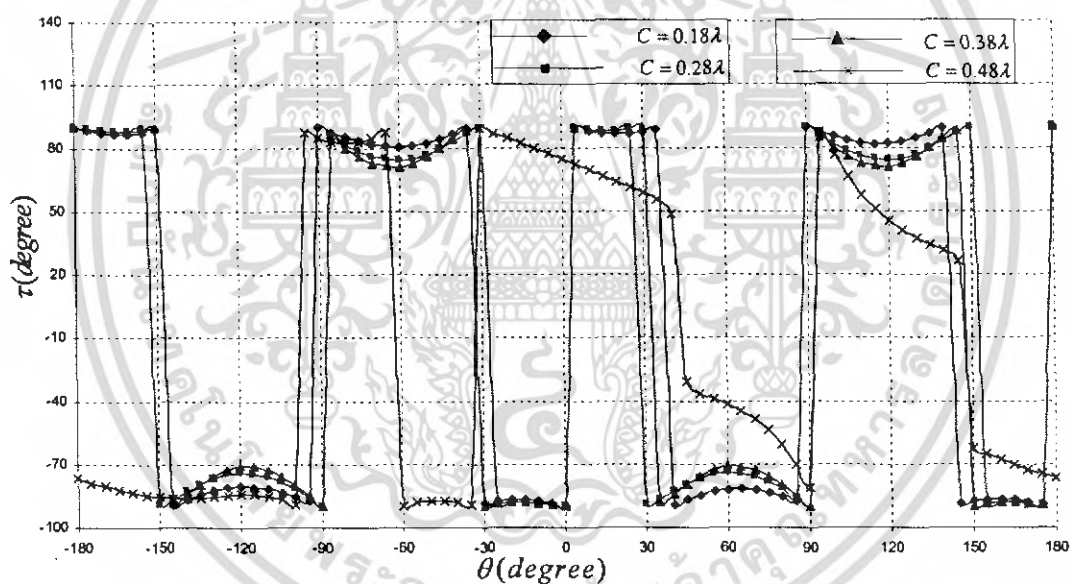
(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 3.21 คุณสมบัติเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบู่ ที่ความถี่ 0 องศาบนสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



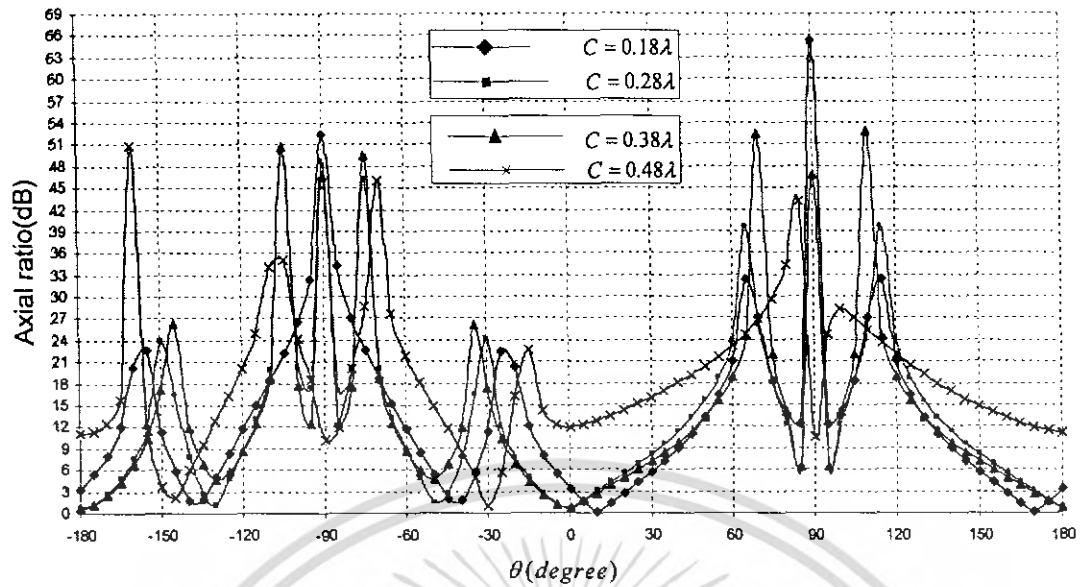
(ก) ค่าอัตราส่วนแกน



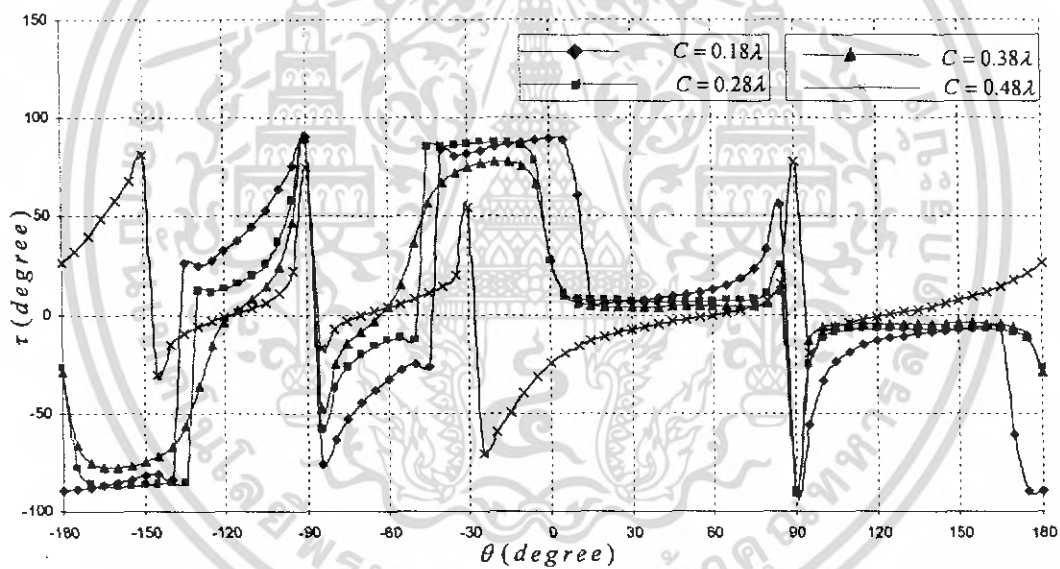
(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 3.22 คุณสมบัติเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความถี่ต่างเฟส 0 องศา ระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



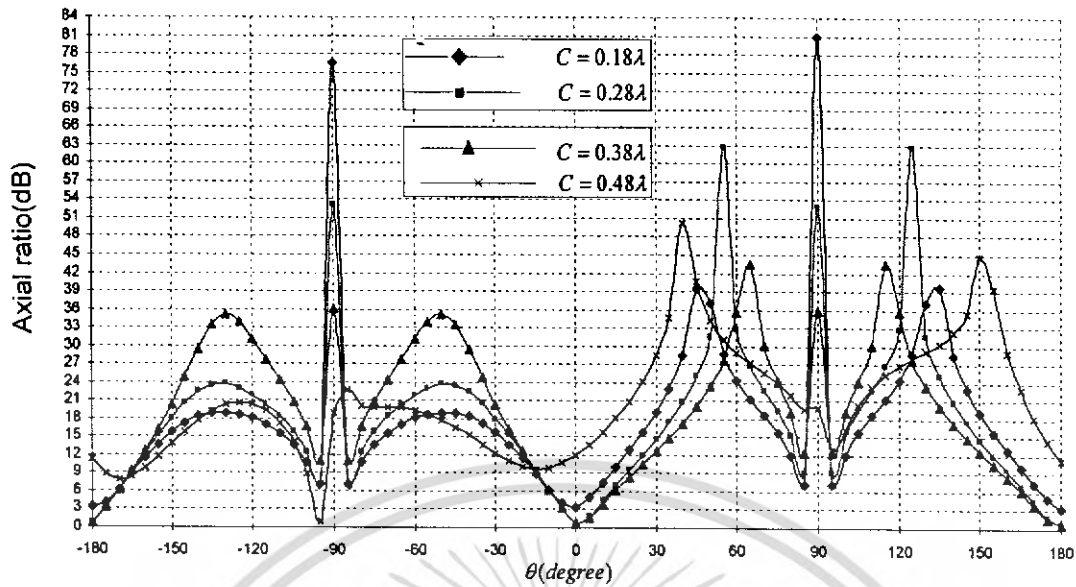
(ก) ค่าอัตราส่วนแกน



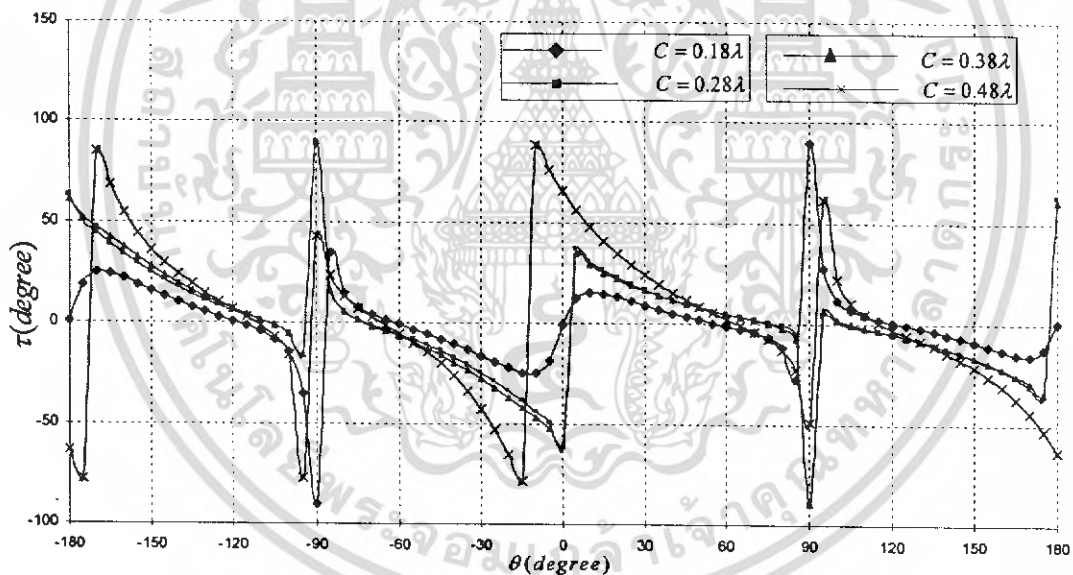
(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 3.23 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความถี่ 145 องศาเรนาบ XZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ค่าอัตราส่วนแกน



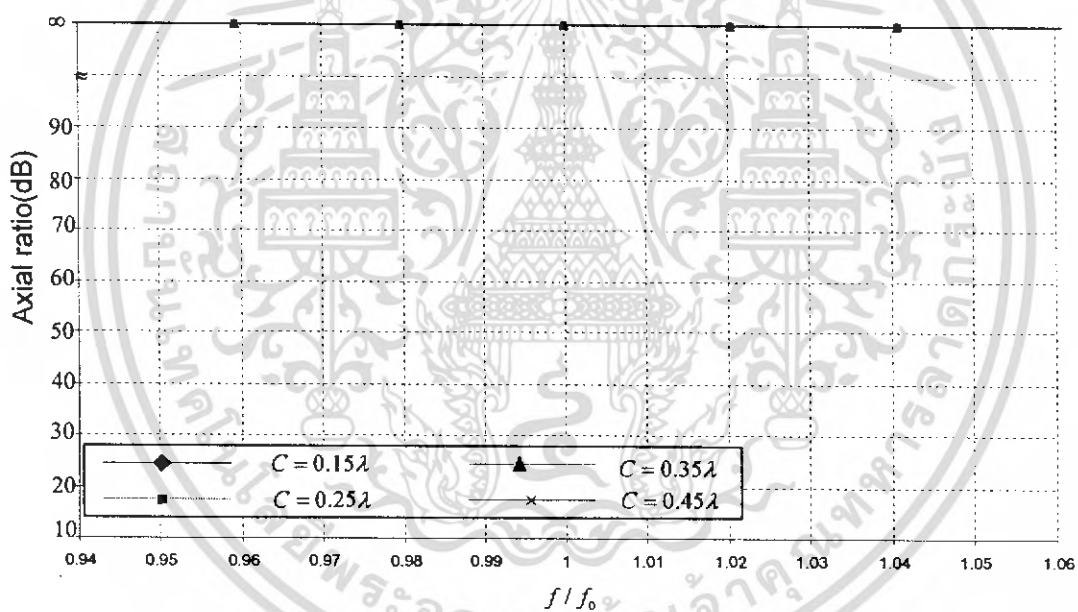
(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 3.24 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความถี่ 145 องค์กรนาบ YZ

โดยในรูปที่ 3.17 ถึง รูปที่ 3.20 เป็นการวิเคราะห์คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ โดยทำการวิเคราะห์คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก หรือ ระนาบที่ตั้งฉากกับการเดินทางของคลื่นในแนวตั้งและแนวนอนคือระนาบ xz และระนาบ yz โดย ทำการเปรียบเทียบความยาวของวงแหวนค่าต่างๆ ที่ความถี่ของ

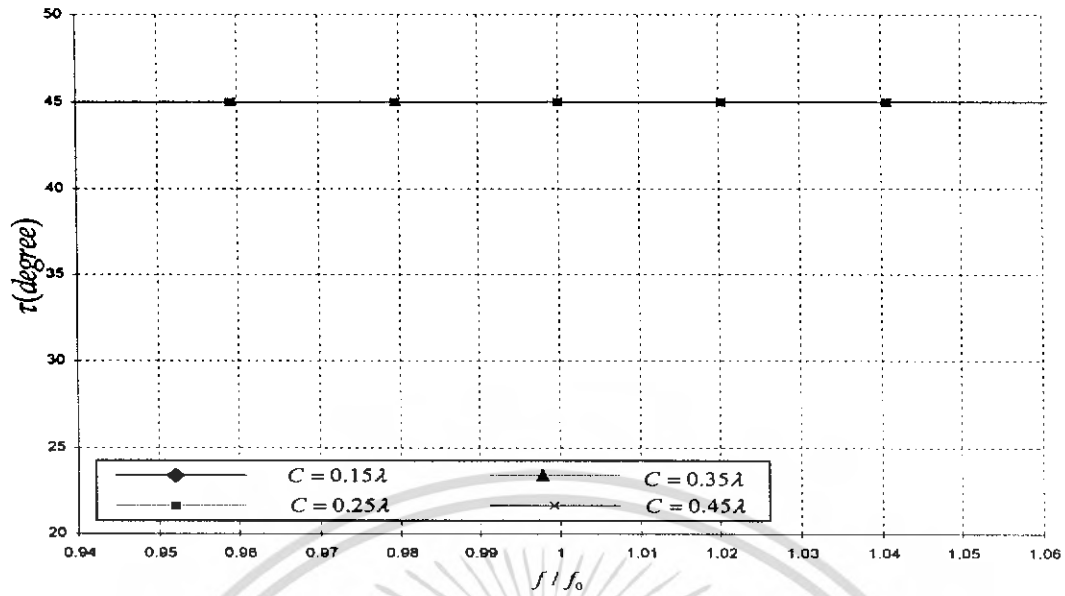
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเท่ากับ 0 องศา และ 145 องศา โดยทำการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนแกนในทิศทางที่ต้องการคือ ด้านหน้าของสายอากาศ ( $\theta = 0^\circ$ ) และด้านตรงข้าม ( $\theta = 180^\circ$ ) จากการวิเคราะห์พบว่าสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบู่ที่ความต่างเฟสของแรงดันเท่ากับ 0 องศา จะได้ค่าอัตราส่วนแกนเท่ากับ 80 dB ที่ความยาววงแหวนเท่ากับ 0.28 $\lambda$  และ 0.38 $\lambda$  มุมเอียงเท่ากับ 45 องศา ในส่วนของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบู่ที่ความต่างเฟสของแรงดันเท่ากับ 145 องศา พบว่าที่ค่าความยาววงแหวนเท่ากับ 0.28 $\lambda$  จะได้ค่าอัตราส่วนแกนที่ต่ำที่สุดคือ จะได้ค่าอัตราส่วนแกนเท่ากับ 0.676 dB และมุมเอียงเท่ากับ 27.13 องศา เพราะฉะนั้นจากการวิเคราะห์จึงสรุปได้ว่าสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบู่ที่ความต่างเฟสของแรงดันเท่ากับ 0 องศา ให้การโพลาริซ์แบบเชิงเส้นแนวเอียงมุมเท่ากับ 45 องศา ส่วนของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบู่ที่ความต่างเฟสของแรงดันเท่ากับ 145 องศา ให้การโพลาริซ์แบบเชิงวงกลมโดยเป็นแบบโพลาริซ์แบบเชิงวงกลมหมุนขวาด้านหน้าของสายอากาศ ( $\theta = 0^\circ$ ) และ เป็นแบบโพลาริซ์แบบเชิงวงกลมหมุนซ้ายด้านตรงข้าม ( $\theta = 180^\circ$ )



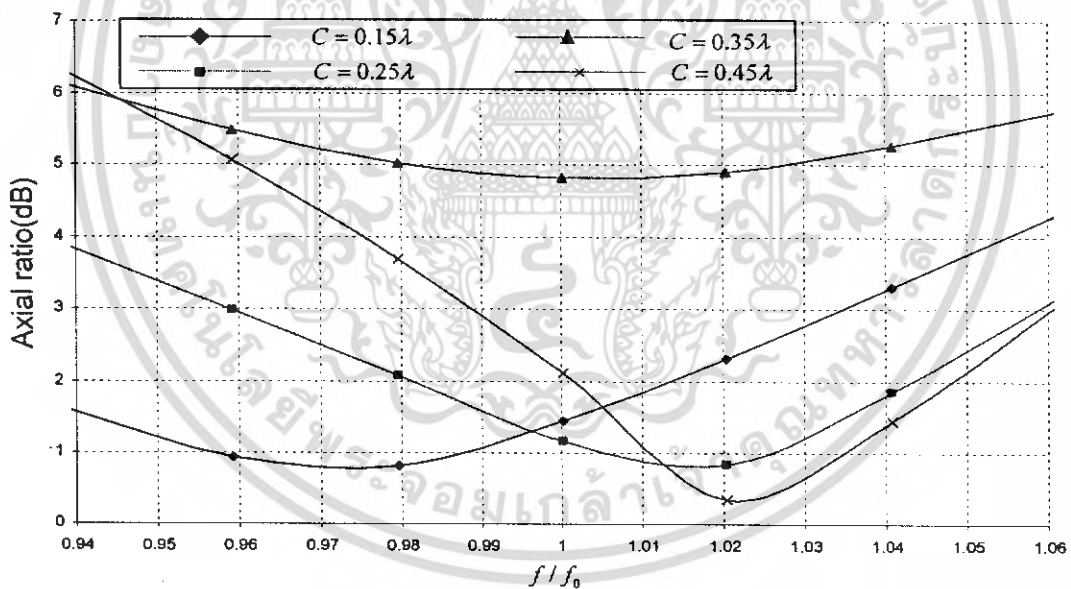
(ก) ค่าอัตราส่วนแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



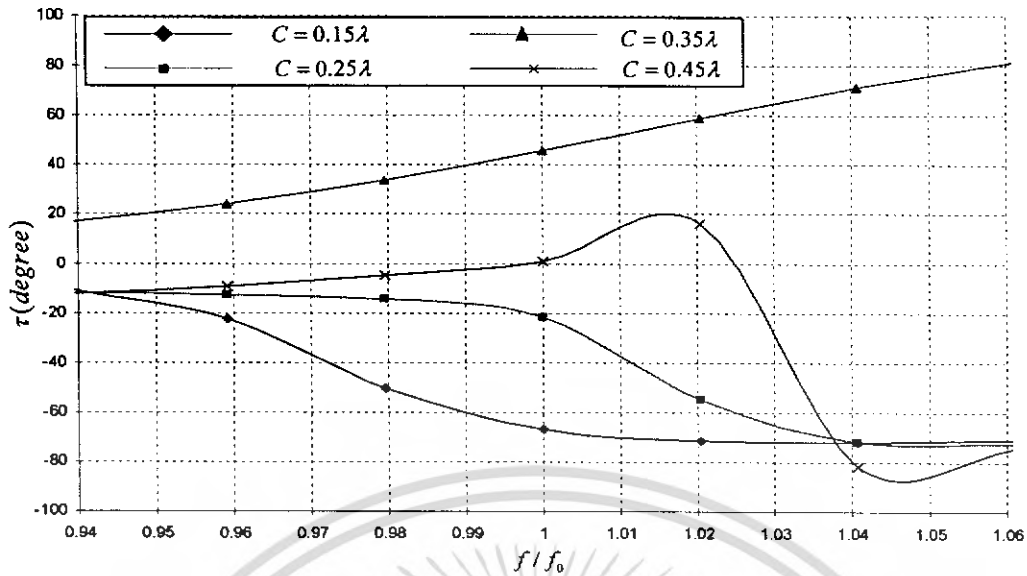
(ข) ค่ามุมเฟส

รูปที่ 3.25 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 0 องศาที่เป็นฟังก์ชันของความถี่



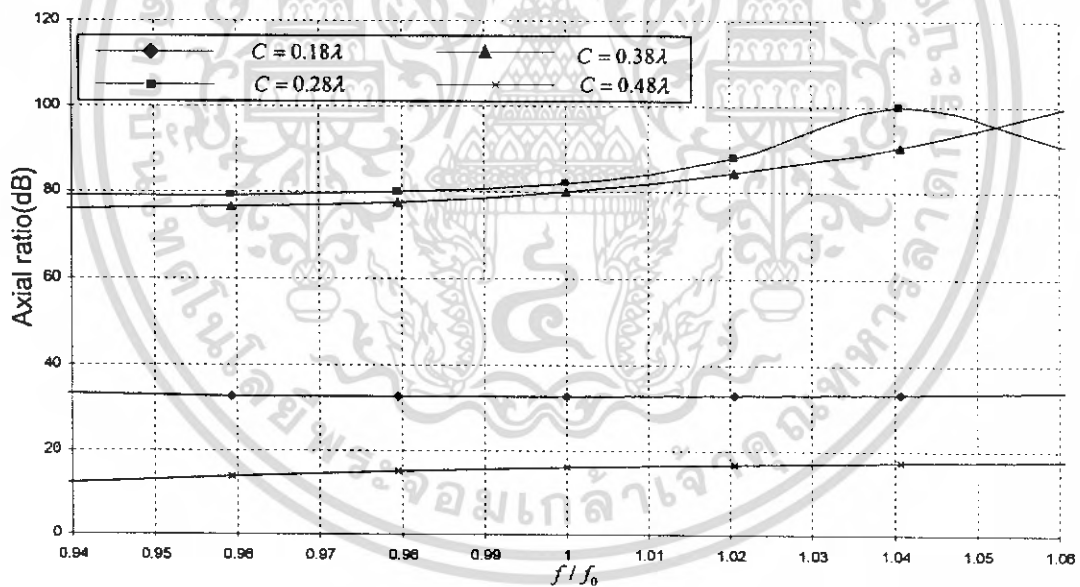
(ค) ค่าอัตราส่วนแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



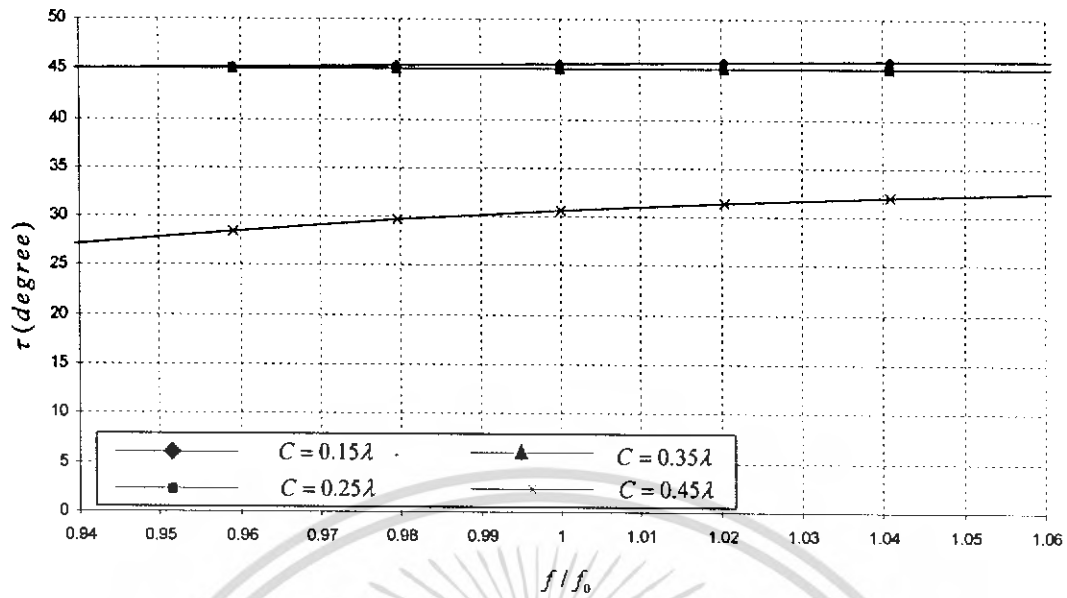
(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 3.26 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่มีความต่างเฟส 135 องศาที่เป็นฟังก์ชันของความถี่



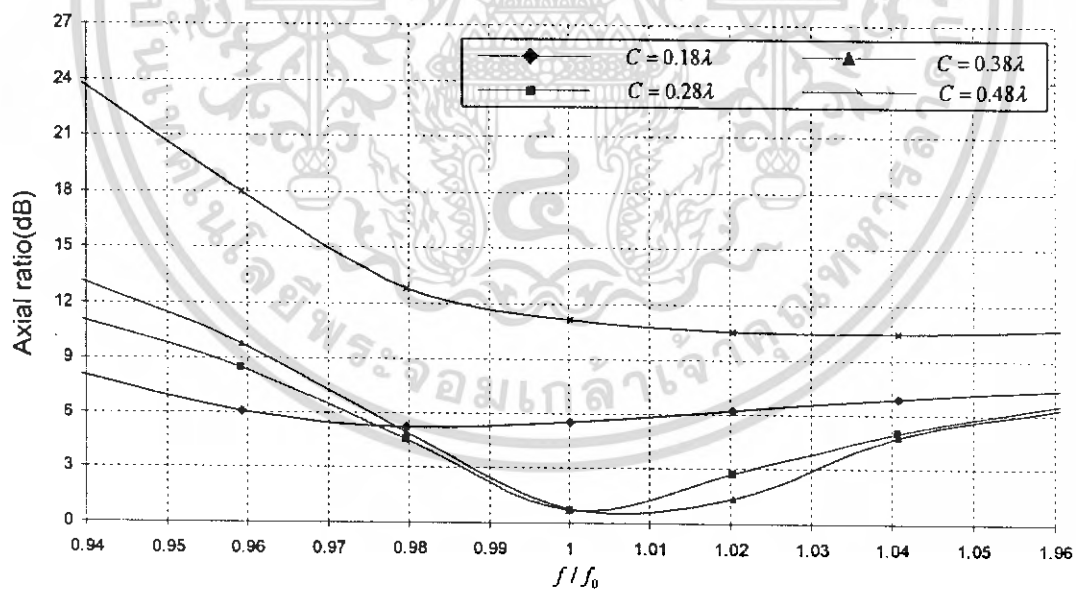
(ค) ค่าอัตราส่วนแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



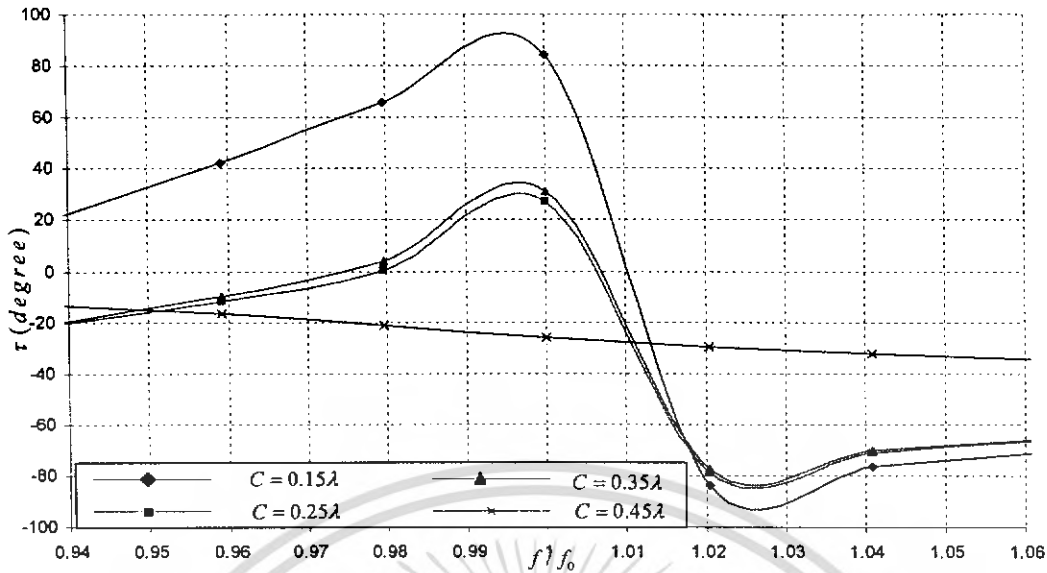
(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 3.27 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 0 องศาที่เป็นฟังก์ชันของความถี่



(ก) ค่าอัตราส่วนแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 3.28 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความถี่ 145 องศา ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาค่าคุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ โดยในการพิจารณาจะทำการพิจารณาที่หน้าคลื่น คือด้านหน้าของสายอากาศ ( $\theta = 0^\circ$ ) และ ที่ด้านตรงข้าม ( $180^\circ$ ) โดยในการพิจารณาจะทำการพิจารณาที่ความถี่ปฏิบัติการความถี่  $f_0$  คือ ความถี่ 2.45 GHz โดยการพิจารณาเป็นการพิจารณาผลกระทบของความถี่ที่มีผลต่อค่าคุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ โดยในการพิจารณาจะเริ่มต้นจากความถี่เท่ากับ  $0.94f_0$  ถึง  $1.06f_0$  เพราะเป็นย่านความถี่ที่ใช้งานในระบบโครงข่ายท้องถิ่น ไร้สาย โดยจากการพิจารณาพบว่าค่าความยาววงแหวนของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความถี่ของแรงดันเท่ากับ 0 องศา พบว่าค่าความถี่ไม่มีผลต่อค่าอัตราส่วนแกนและค่ามุมเอียงของสายอากาศ คือ ค่าอัตราส่วนแกนมีค่าเท่ากับอนันต์และค่ามุมเอียงเท่ากับ 45 องศา ในส่วนของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความถี่ของแรงดันเท่ากับ 135 องศา พบว่าค่าอัตราส่วนแกนที่ต่ำที่สุดที่ความถี่ปฏิบัติการ คือค่าความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสเท่ากับ  $0.25\lambda$  ในส่วนของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความถี่ของแรงดันมีค่าเท่ากับ 0 องศา พบว่าค่าอัตราส่วนแกนที่ให้ค่าสูงที่สุดที่ความถี่ปฏิบัติการคือ ค่าความยาววงแหวนเท่ากับ  $0.28\lambda$  และให้ค่าอัตราส่วนแกนเท่ากับ 80dB ส่วนของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความถี่ของแรงดัน 145 องศา พบว่าค่าความยาววงแหวนที่ให้ค่าอัตราส่วนแกนต่ำที่สุดที่ความถี่ปฏิบัติการคือค่าความยาววงแหวนเท่ากับ  $0.28\lambda$  และทำการพิจารณาค่าคุณลักษณะของสายอากาศค่าอื่นต่อไป

### 3.2.7 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์

คุณลักษณะสุดท้ายที่จะพิจารณาสำหรับสายอากาศนี้ที่แพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางคือ ค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งเป็นการพิจารณาเป็นสิ่งที่บ่งชี้ว่าคลื่นที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดนั้นสามารถส่งผ่านสายนำสัญญาณไปยังสายอากาศได้มากน้อยเท่าใด ในการพิจารณาที่ผ่านมาพบว่าความยาวของโพรบมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของสายอากาศน้อยมาก โดยการพิจารณาคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง(SWR) ดังสมการที่ (3.1)

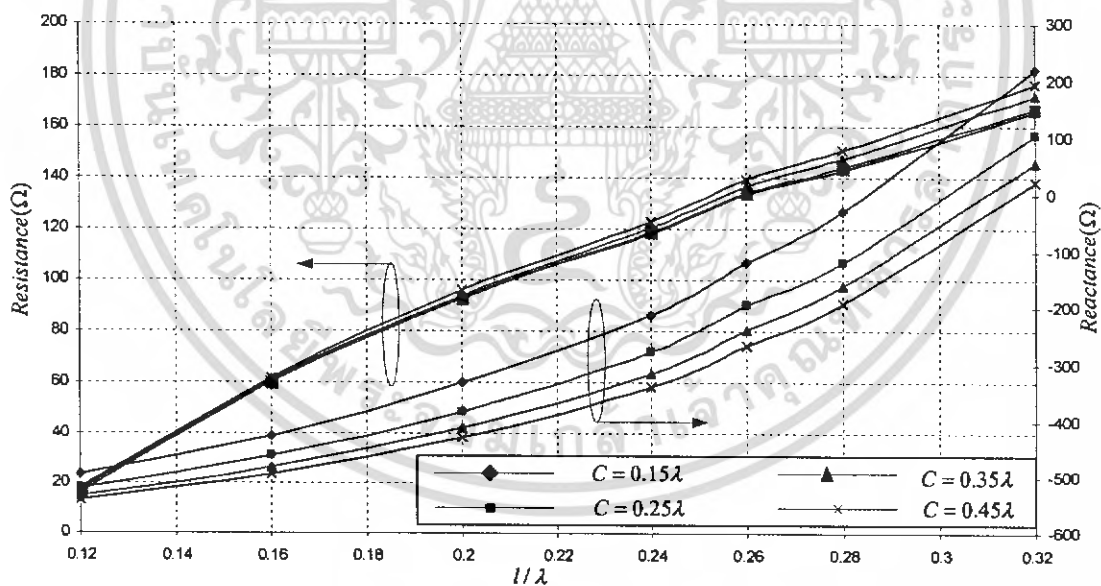
$$\text{สมการ } SWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (3.1)$$

โดยที่  $\Gamma$  คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ซึ่งหาได้จาก

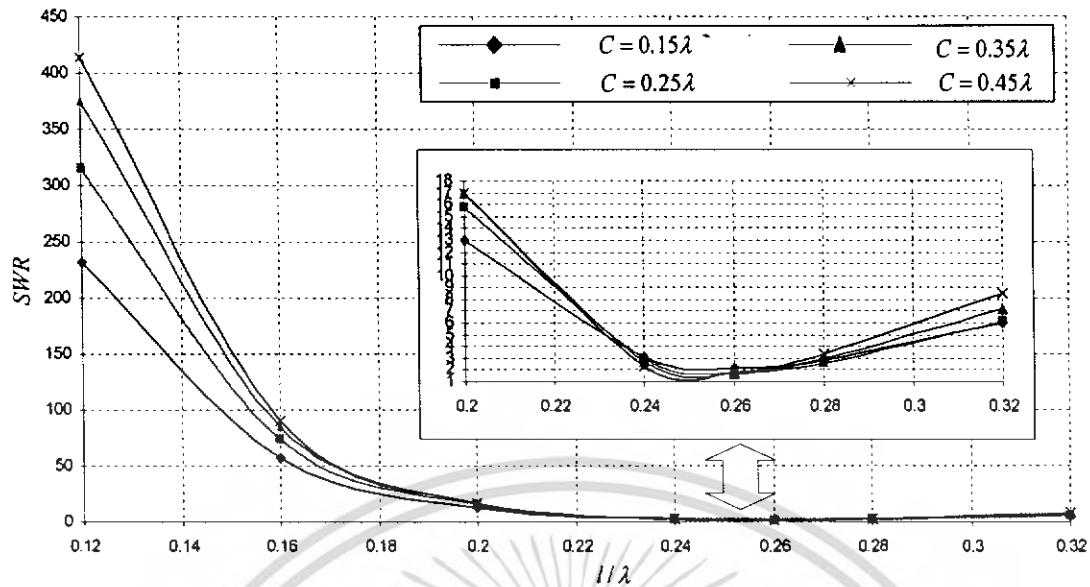
$$\text{สมการ } \Gamma = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (3.2)$$

สำหรับ  $Z_A$  คือค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และ  $Z_0$  คือค่าความต้านทานคุณลักษณะ (Characteristic Impedance) ของสายนำสัญญาณ

โดยการพิจารณาค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จะทำการพิจารณาองค์ประกอบที่มีผลต่อค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศคือ ค่าของความยาวโพรบและองค์ประกอบของความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 3.29 ถึงรูปที่ 3.36

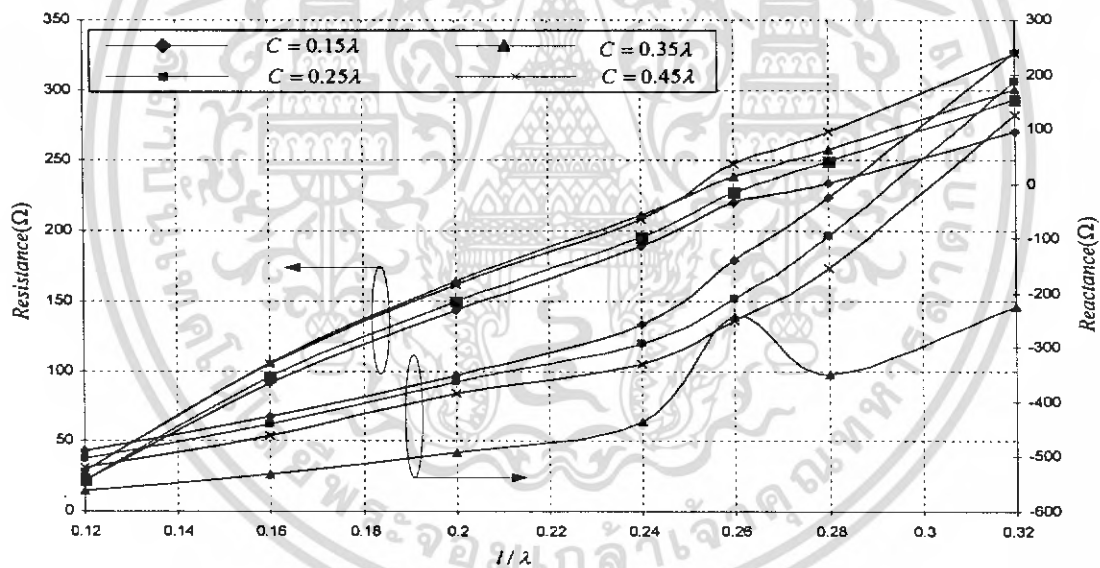


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์



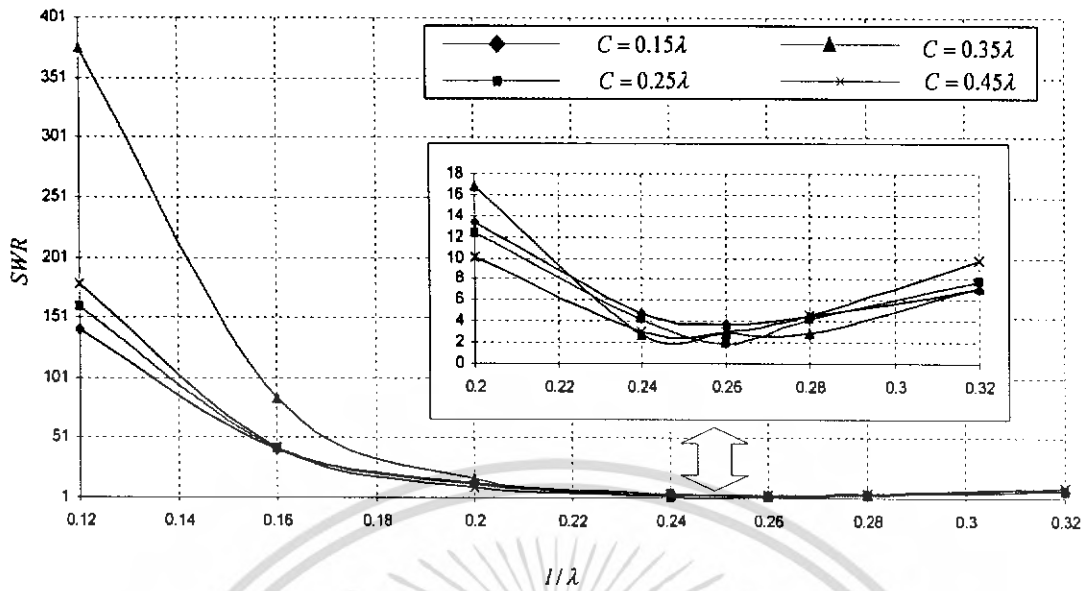
(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 3.29 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 0 องศาที่เป็นฟังก์ชันของความยาวโพรบ



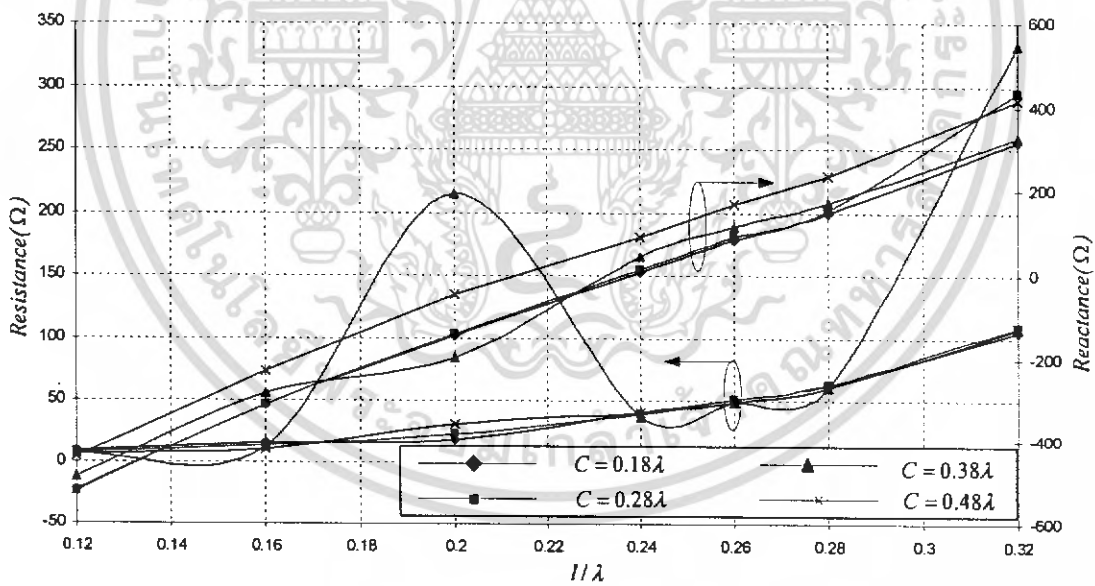
(ค) ค่าอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



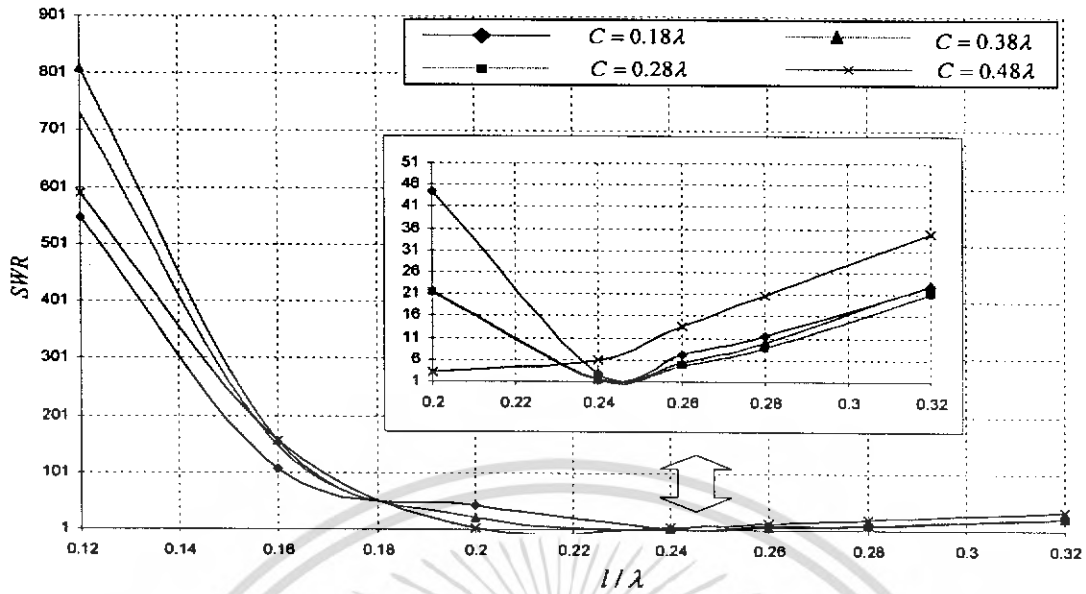
(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 3.30 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความถี่ 135 องศาที่เป็นฟังก์ชันของความยาวโพรบ



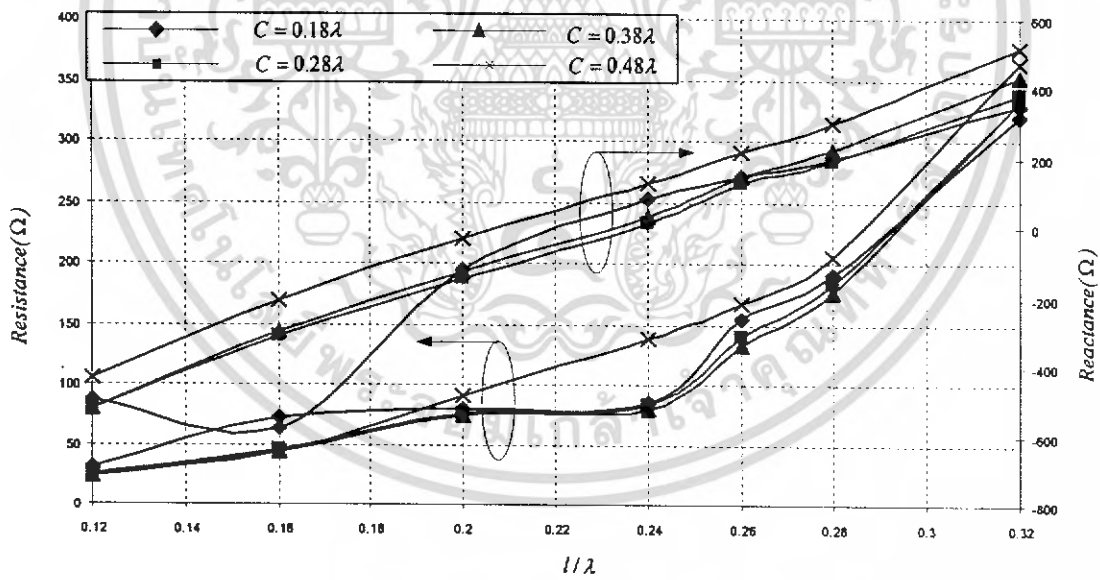
(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



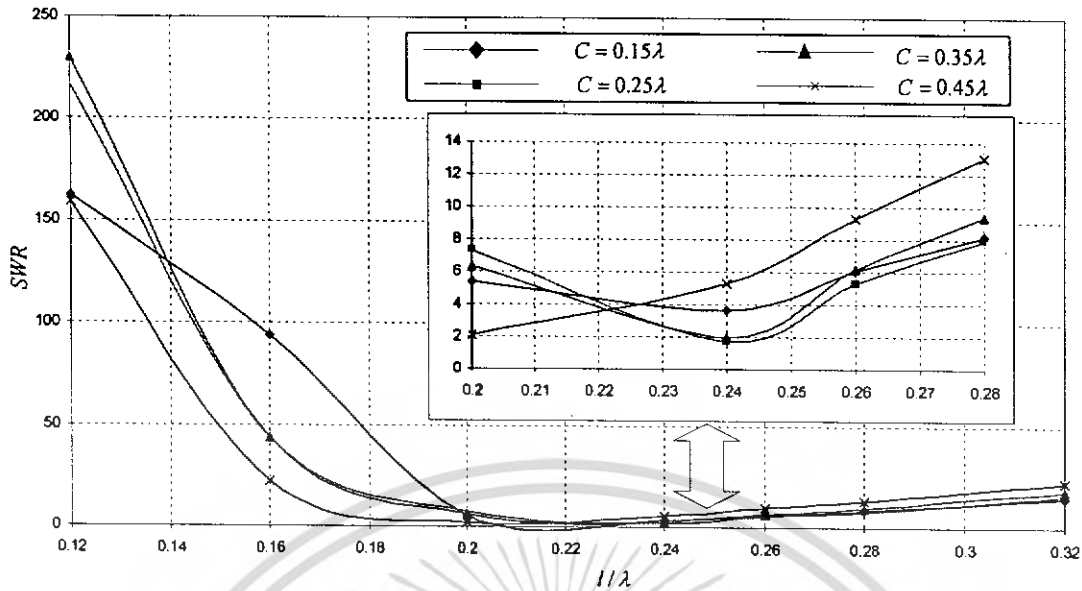
(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 3.31 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วย  
โพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 0 องศาที่เป็นฟังก์ชันของความยาวโพรบ



(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

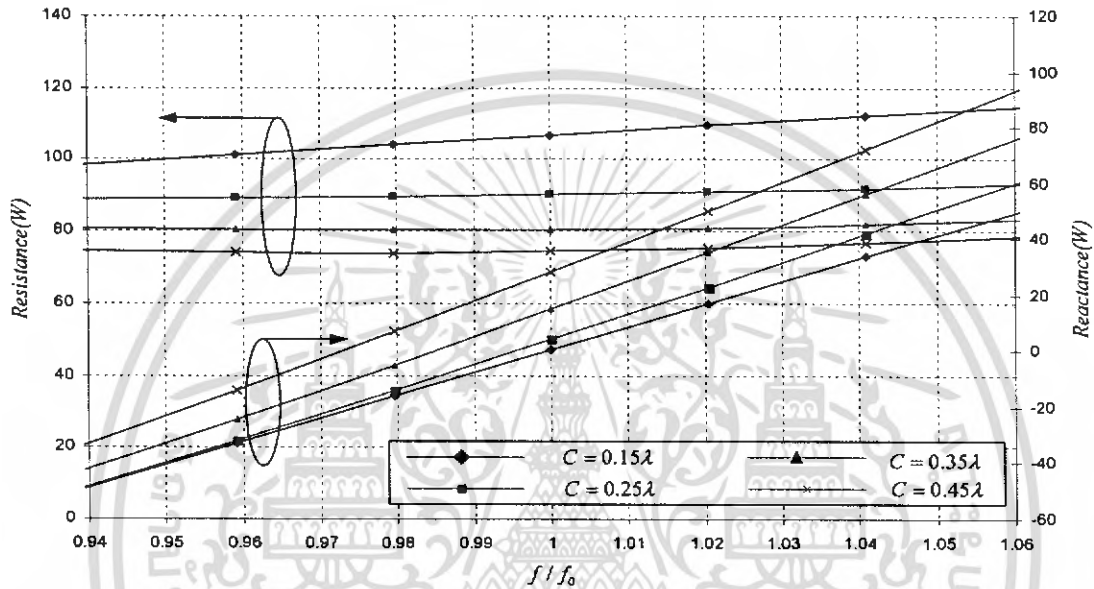
รูปที่ 3.32 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนวงกลมโพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 145 องศาที่เป็นฟังก์ชันของความยาวโพรบ

ในรูปที่ 3.29 ถึง รูปที่ 3.32 เป็นการพิจารณาค่าความยาวโพรบที่มีผลต่อค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ โดยในการพิจารณาจะทำการพิจารณาค่าความยาวของวงแหวนค่าต่างๆ เปรียบเทียบกันเมื่อทำการเปลี่ยนค่าความยาวโพรบ ในที่นี้ทำการวิเคราะห์ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ เทียบกับค่าความต้านทานคุณลักษณะ (Characteristic Impedance) ของสายนำสัญญาณ ที่ค่า  $50\Omega$  จากการวิเคราะห์พบว่าสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความต่างเฟสของแรงดันมีค่าเท่ากับ 0 องศา ที่ความยาวสั้นพบว่าค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่าสูงมากและเมื่อเพิ่มความยาวโพรบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งจะมีค่าลดลงและจะลดลงต่ำสุดที่ค่าความยาวโพรบค่าหนึ่งเท่านั้น และเมื่อเพิ่มความยาวโพรบขึ้นอีกค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น เราจะทำการพิจารณาค่าความยาวโพรบที่ทำให้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุดและจะส่งผลให้ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าเข้าใกล้ค่าความต้านทานคุณลักษณะ (Characteristic Impedance) ของสายนำสัญญาณ คือ ความยาวโพรบมีค่าเท่า  $0.26\lambda$  และค่าความยาววงแหวนมีค่าเท่ากับ  $0.25\lambda$  ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่าเท่ากับ 1.812 และค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ มีค่าเท่ากับ  $90.31 + j4.245\Omega$  ส่วน สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความต่างเฟสของแรงดันมีค่าเท่ากับ 135 องศา นั้นพบว่าค่าความยาวโพรบที่ทำให้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุดคือ 1.898 ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ มีค่าเท่ากับ  $98.26 + j6.24\Omega$  และค่าความยาวโพรบมีค่าเท่ากับสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความต่างเฟสของแรงดันมีค่าเท่ากับ 0 องศา ในส่วนของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความต่างเฟสของแรงดันมีค่าเท่ากับ 0 องศา นั้นพบว่าค่าความยาวโพรบที่ทำให้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุดคือ ค่าความยาวโพรบมีค่าเท่า  $0.24\lambda$  และค่าความยาววง

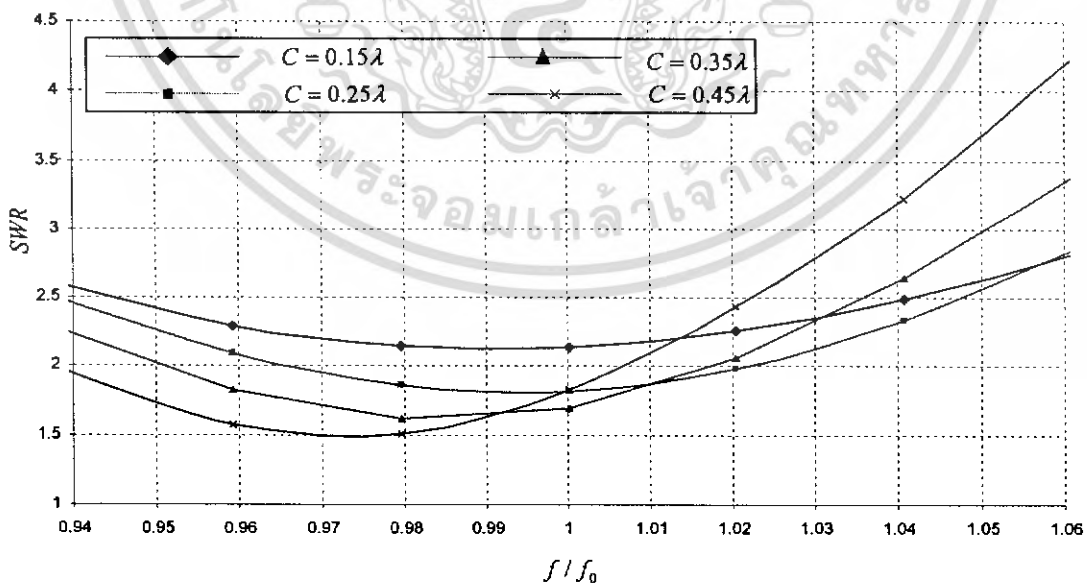
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหวนมีค่าเท่ากับ  $0.28\lambda$  ที่ทำให้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่าเท่ากับ 1.362 ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าเท่ากับ  $38.97 + j8.083\Omega$  สายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความต่างเฟสของแรงดันมีค่าเท่ากัน 145 องศา นั้นพบว่าค่าความยาวโพรบที่ทำให้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุดคือ ค่าความยาวโพรบมีค่าเท่า  $0.241\lambda$  และค่าความยาววงแหวนมีค่าเท่ากับ  $0.28\lambda$  ที่ทำให้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่าเท่ากับ 1.76 ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ มีค่าเท่ากับ  $82.83 + j16.78\Omega$

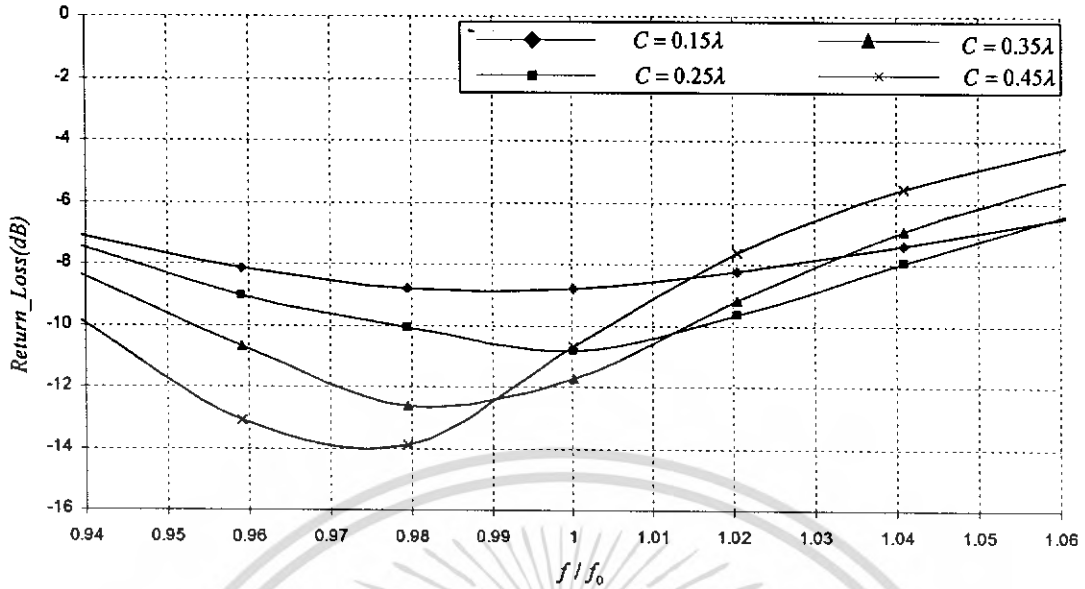


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์



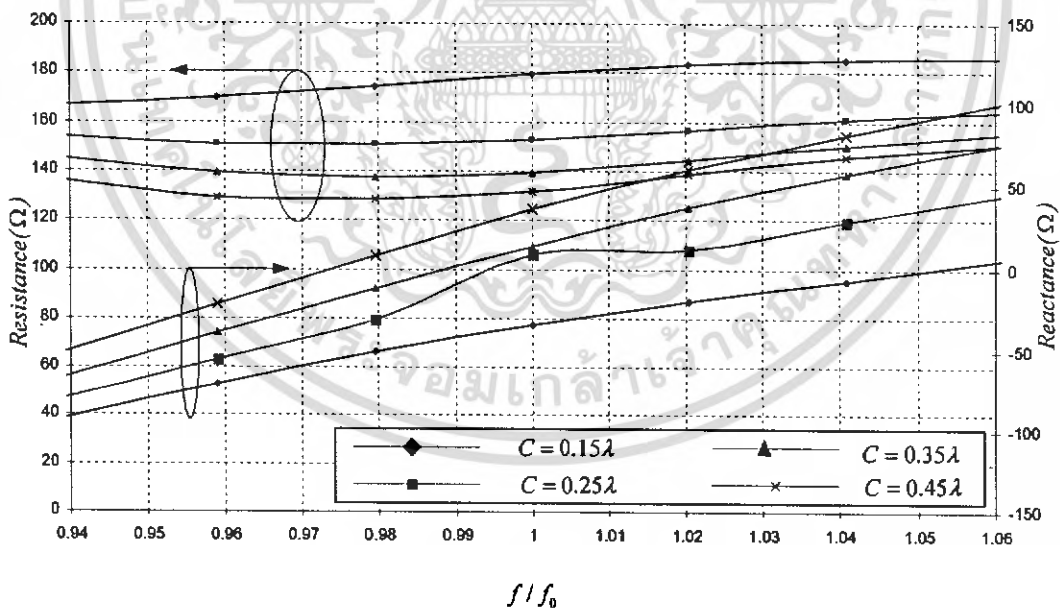
(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



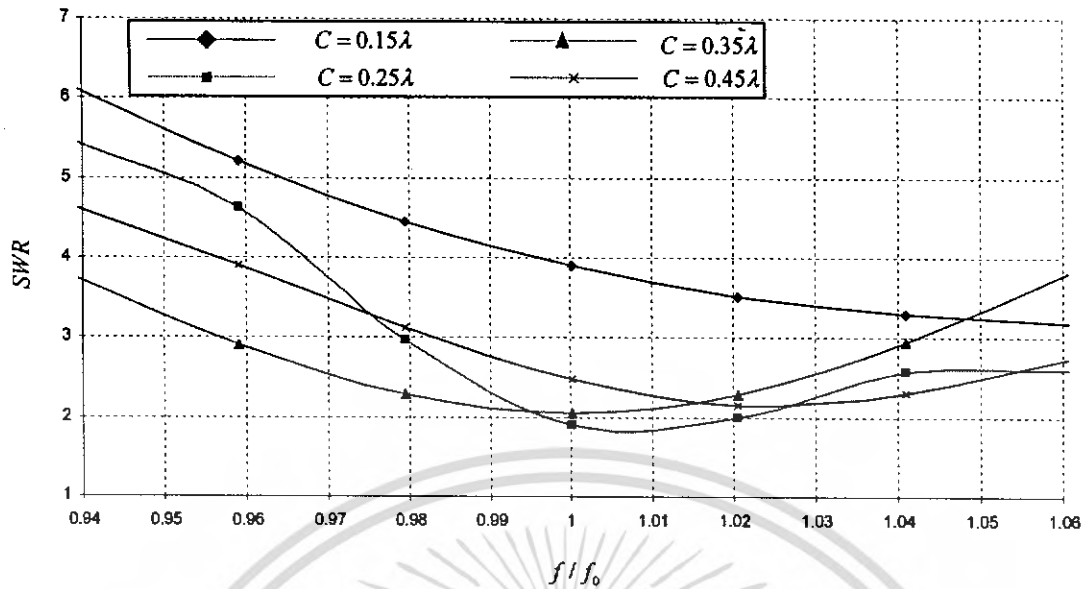
(ค) ค่าการสูญเสียย้อนกลับ

รูปที่ 3.33 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 0 องศาที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

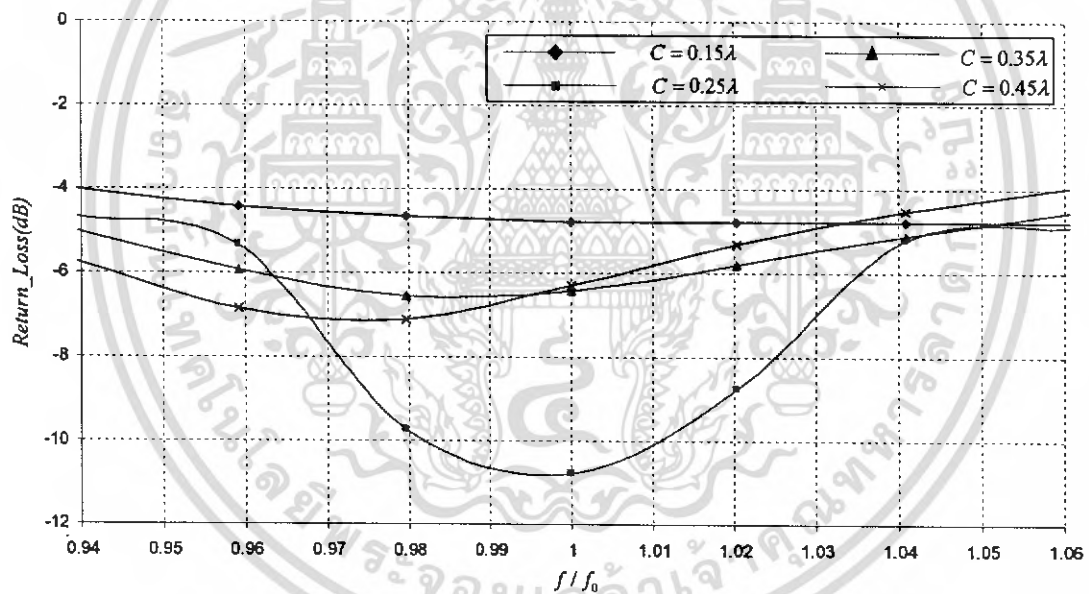


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



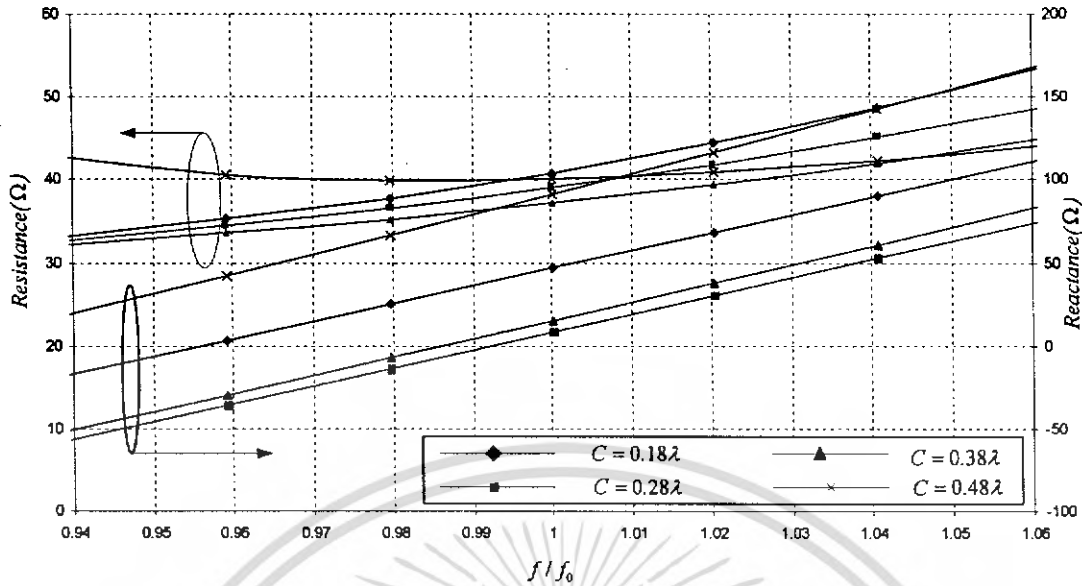
(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง



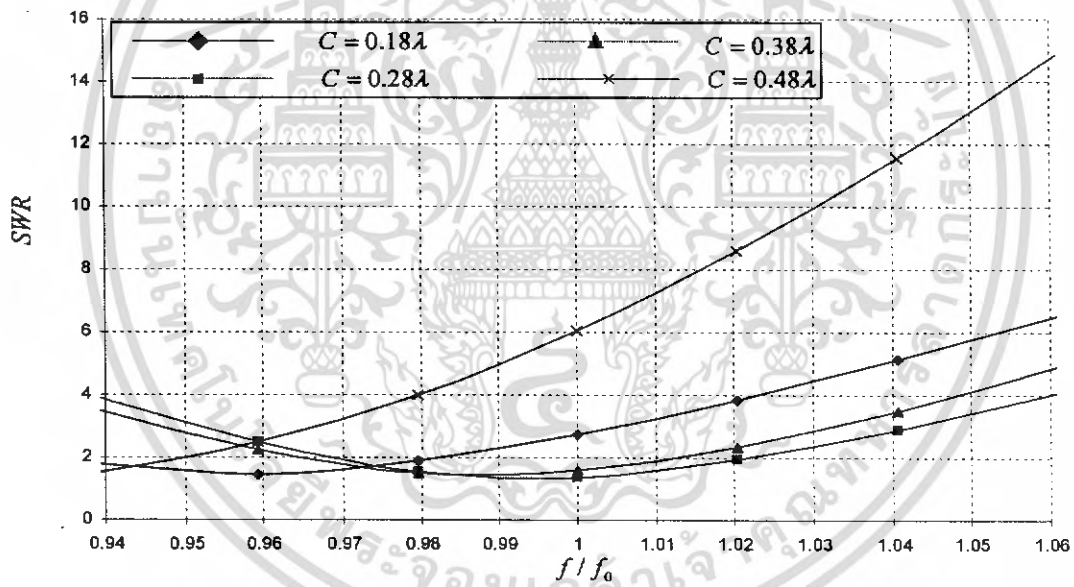
(ค) ค่าการสูญเสียย้อนกลับ

รูปที่ 3.34 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมป้อนสัญญาณด้วย  
โพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 135 องศาที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

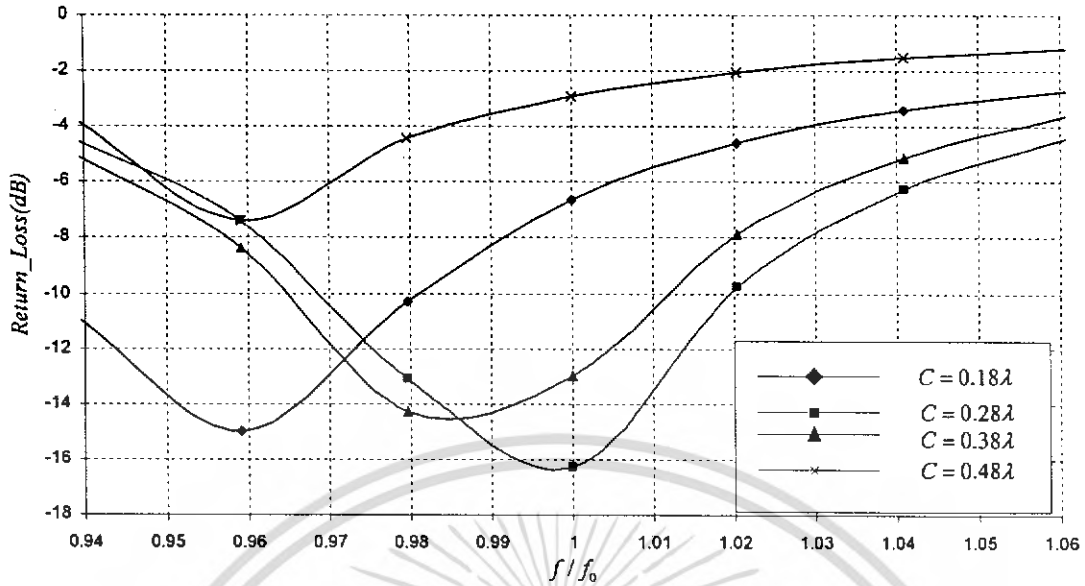


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์



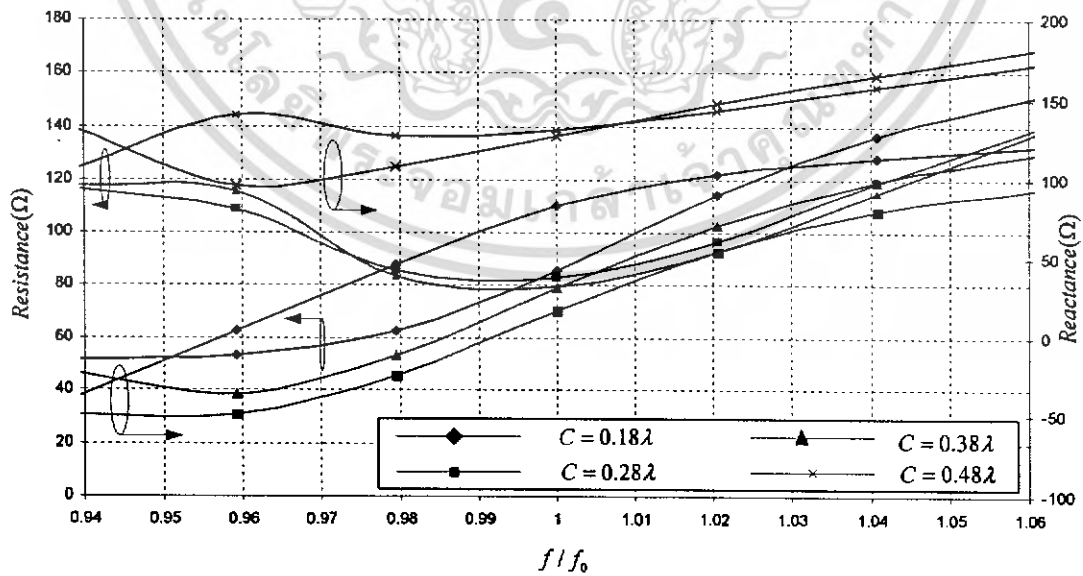
(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



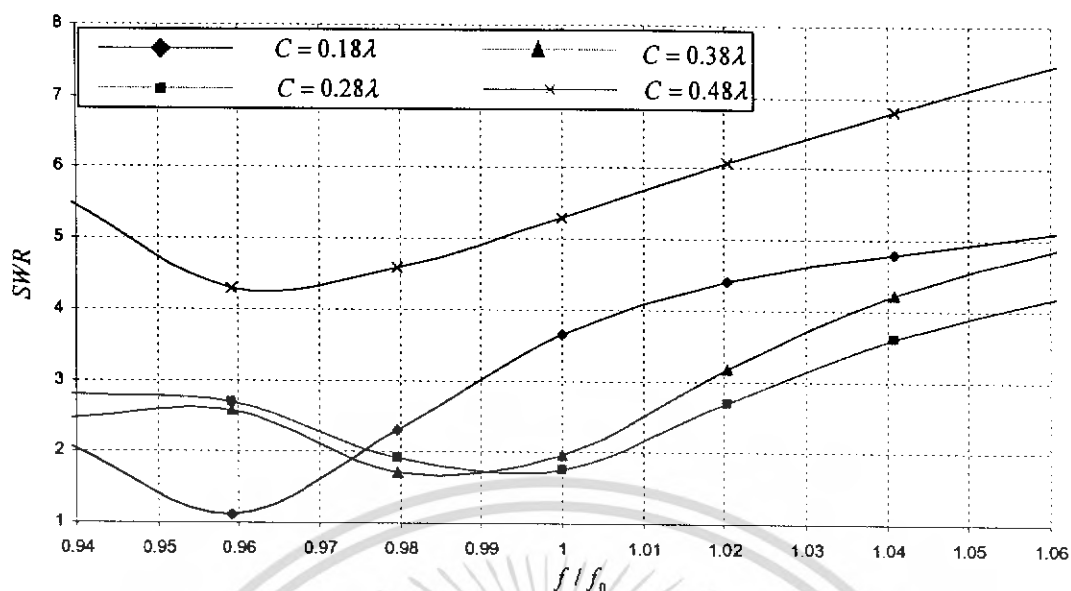
(ค) ค่าการสูญเสียย้อนกลับ

รูปที่ 3.35 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วย  
โพรบคู่ ที่ความต่างเฟส 0 องศาที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

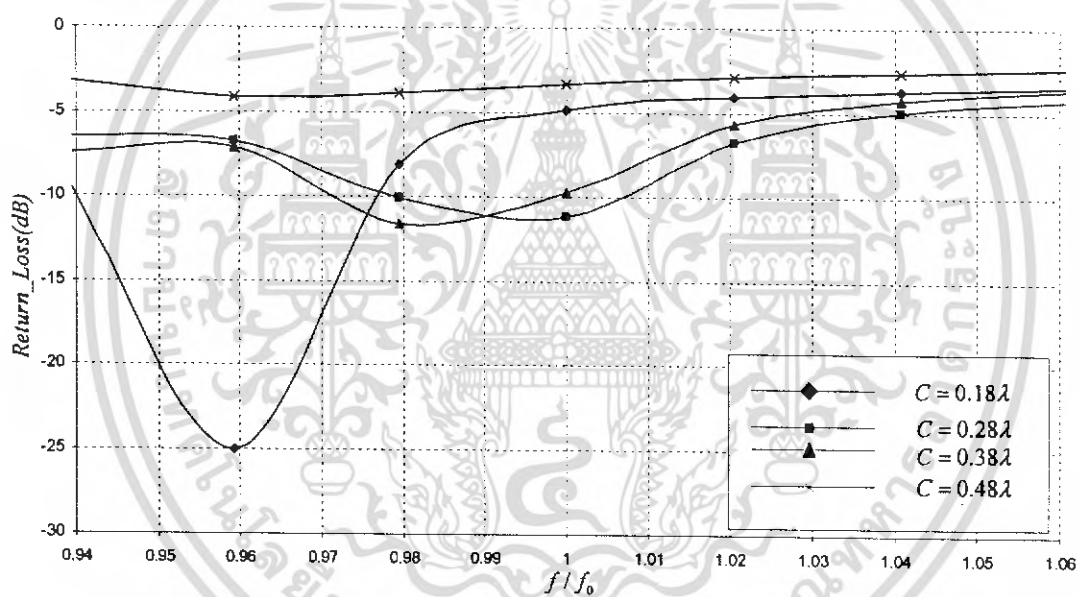


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง



(ค) ค่าการสูญเสียย้อนกลับ

รูปที่ 3.36 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วย  
โพรบคู่ ที่ความถี่ 145 MHz ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่

นอกจากนี้เรายังจะทำการพิจารณาค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงกลมป้อน  
สัญญาณด้วยโพรบคู่ โดยทำการพิจารณาค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ในการ  
พิจารณาจะทำการพิจารณาค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ที่มีผลต่อย่านความถี่ที่ใช้งานในการพิจารณาการ  
สร้างสายอากาศนั้นจะทำการพิจารณาที่ความถี่ปฏิบัติการคือความถี่ 2.45 GHz ที่ทำให้ค่าอัตราส่วนคลื่น  
นิ่งมีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด และค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าน้อยที่สุดจะทำให้ไม่เกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะท้อนกลับตลอดย่านความถี่ในระบบโครงข่ายห้องคลื่นไร้สายแต่ในการสร้างสายอากาศนั้นจะทำการพิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ความถี่ปฏิบัติการมีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุดและจะส่งผลให้ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าเข้าใกล้ค่าความต้านทานคุณลักษณะ (Characteristic Impedance) ของสายนำสัญญาณใน ที่นี้ได้ทำการหาค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ปฏิบัติการนั้นไว้แล้ว ในส่วนของการเปลี่ยนความยาวโพรบในหัวข้อก่อนหน้านี้

### 3.3 บทสรุป

ในบทนี้เป็นการอธิบายผลจากการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ซึ่งสายอากาศสายอากาศวงแหวนในที่นี้คือสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ และ สายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ซึ่งสายอากาศชนิดนี้จะแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง โดยจุดประสงค์ในการพิจารณาในบทนี้เป็นการพิจารณาหาค่าคุณลักษณะต่างๆที่ดีที่สุดที่ทำให้การ โพลาริซของสายอากาศเป็นแบบเชิงเส้น และการโพลาริซของสายอากาศเป็นแบบวงกลมโดยในการพิจารณาจะทำการพิจารณาสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ เปรียบเทียบกับสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่โดยในการพิจารณาจะทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทางที่มีอัตราการขยายที่สูง มีค่าคุณลักษณะเชิงการ โพลาริซเป็นไปตามที่ต้องการ และ ค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศดีที่สุดเพื่อให้การส่งผ่านกำลังงานผ่านสายอากาศมากที่สุดโดยในการวิเคราะห์ได้ค่าขนาดของความกว้างและความสูงของสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีค่าเท่ากันคือ 0.694λ โดยเป็นค่าที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ยอมให้เฉพาะ โหมด TE<sub>10</sub> เท่านั้นที่สามารถเดินทางผ่านท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสได้ สำหรับความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีค่าเท่ากับ 0.25λ และ ค่าความยาวโพรมมีค่าเท่ากับ 0.26λ ทั้งในส่วนของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วย โพรบคู่ที่ความต่างเฟสของแรงดันมีค่าเท่ากับ 0 องศา และ สายอากาศโพรบคู่กระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ความต่างเฟสของแรงดันมีค่าเท่ากับ 135 องศา และ พบว่าการ โพลาริซเป็นแบบเชิงเส้นแนวเอียงสำหรับสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความต่างเฟสของแรงดันมีค่าเท่ากับ 0 องศา และพบว่าการ โพลาริซเป็นแบบวงกลมสำหรับสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความต่างเฟสของแรงดันมีค่าเท่ากับ 135 องศา ในส่วนของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วย โพรบคู่ก็ทำการพิจารณาเช่นเดียวกัน คือ ทำการวิเคราะห์ได้ค่าขนาดของท่อนำคลื่นคือคาร์ซีมิของท่อนำคลื่นวงกลมมีค่ารัศมีเท่ากับ 0.449λ โดยเป็นค่าที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ยอมให้เฉพาะ โหมด TE<sub>11</sub> เท่านั้น ที่สามารถเดินทางผ่านท่อนำคลื่นวงกลมได้ สำหรับความยาวของวงแหวนวงกลมมีค่าเท่ากับ 0.28λ และ ค่าความยาวโพรมมีค่าเท่ากับ 0.241λ ทั้งในส่วนของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความต่างเฟสของแรงดันมีค่าเท่ากับ 0 องศา และ สายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความต่างเฟสของแรงดันมีค่าเท่ากับ 145 องศา และ พบว่าการ โพลาริซเป็นแบบเชิงเส้นแนวเอียงสำหรับสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความต่างเฟสของแรงดันมีค่าเท่ากับ 0 องศา และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่ากร โพลาริซ์เป็นแบบวงกลมสำหรับสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่ความ  
ต่างเฟสของแรงดันมีค่าเท่ากัน 135 องศา



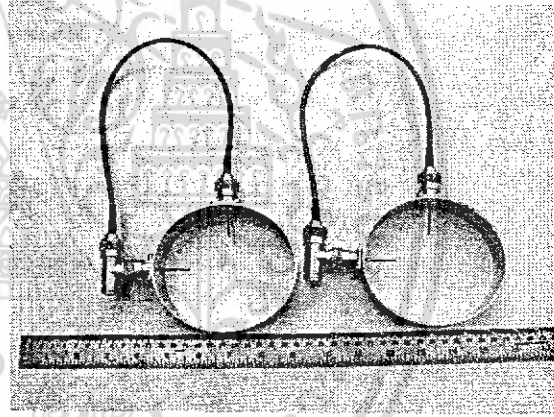
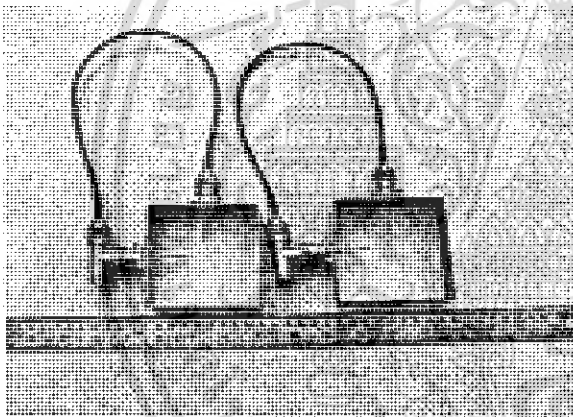
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบ

#### 4.1 การออกแบบและการสร้างสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่

การสร้างสายอากาศได้ออกแบบที่ความถี่ 2.45 GHz เป็นย่านความถี่ของระบบสื่อสารไร้สาย เมื่อกำหนดขนาดความกว้างและความสูงของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากและวงแหวนวงกลมไว้ที่ค่าหนึ่ง ก็อวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากมีความกว้าง  $a$  เท่ากับ  $0.625\lambda$  มีความสูง  $b$  เท่ากับ  $0.625\lambda$  ส่วนวงแหวนวงกลมมีรัศมี  $r$  เท่ากับ  $0.3125\lambda$  จะพบว่าคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเปลี่ยนแปลงตามความยาวของ  $c$  ในการคำนวณได้เลือกค่าความยาวของ  $c$  ของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากเท่ากับ  $0.25\lambda$  และของวงแหวนวงกลมเท่ากับ  $0.28\lambda$  เมื่อพิจารณาจากโปรแกรม NEC 2 พบว่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะแมตซ์กับสายนำสัญญาณที่สุด ที่ความยาวโพรบของวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสประมาณ  $0.25\lambda$  และความยาวโพรบของวงแหวนวงกลมประมาณ  $0.18\lambda$



(ก) สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ความต่างเฟส 0 และ 135 องศา

(ข) สายอากาศวงแหวนวงกลม

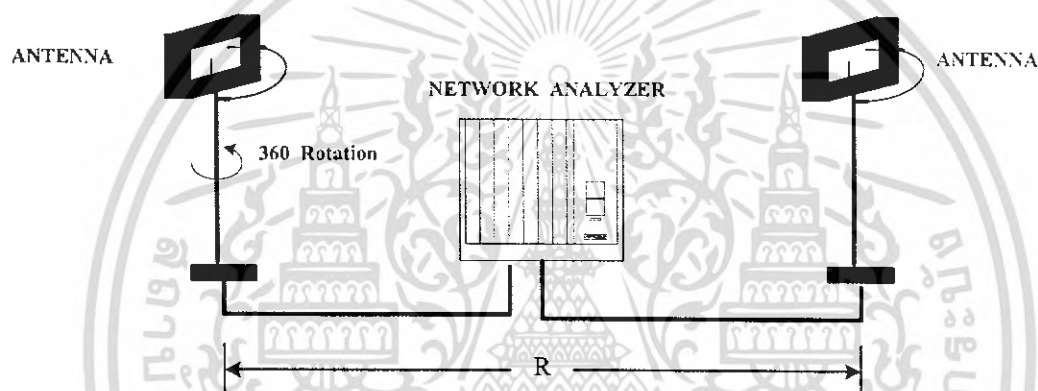
ความต่างเฟส 0 และ 145 องศา

รูปที่ 4.1 สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ และ วงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่

สำหรับการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศจะป้อนผ่านตัวเชื่อมต่อชนิด N (N-type connector) และผ่านตัวแบ่งกำลังงานแบบตัวเชื่อมต่อที (T connector power divider) และทำเชื่อมต่อระหว่างโพรบคู่ด้วยสายเคเบิลแกนร่วม (Coaxial) ที่ความยาว เท่า  $\lambda$  ความยาว เท่า  $0.375\lambda$  และ ความยาว เท่า  $0.403\lambda$  ที่ความต่างเฟสของวงแหวนมีค่าเท่ากับ 0 องศา 135 องศา และ 145 องศา ตามลำดับ

#### 4.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศคือ รูปภาพที่ใช้เพื่อเป็นตัวบ่งบอกลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของทิศทาง ซึ่งทำการทดสอบสนามระยะไกลหรือระยะห่างระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับจะต้องห่างกันมากกว่า  $2D^2/\lambda$  โดยที่  $D$  คือขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศ ในการทดสอบจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยทดสอบในห้องที่ไม่มีกระแสสะท้อน ซึ่งแสดงการติดตั้งดังรูปที่ 4.2 สายอากาศที่จะทำการทดสอบจะเป็นสายอากาศตัวรับ ซึ่งต้องหมุนรอบตัวเอง ส่วนสายอากาศส่งจะออกแบบให้ส่งที่ความถี่เดียวเท่านั้นและซึ่งจะเป็นความถี่เดียวกับสายอากาศตัวรับและมีการโพลาไรซ์ที่เหมือนกัน และระดับความสูงของสายอากาศทั้งตัวรับและตัวส่งจะต้องสูงเท่ากัน ลักษณะการวางตัวสายอากาศเหมือนกันซึ่งจะมีการทดสอบสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่และวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่

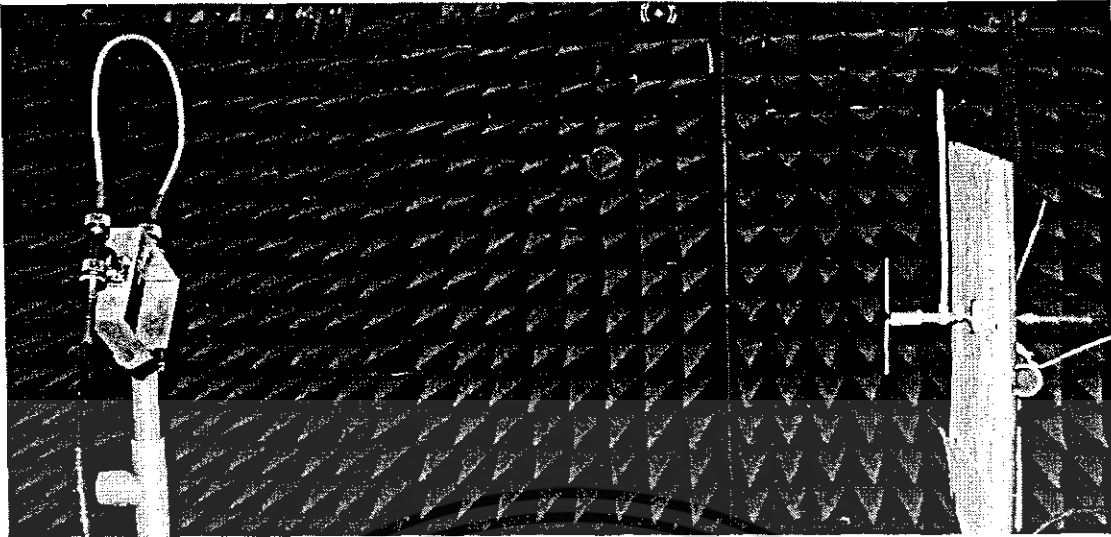


รูปที่ 4.2 การจัดเตรียมเครื่องมือในการทดสอบสายอากาศ



(ก) ทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

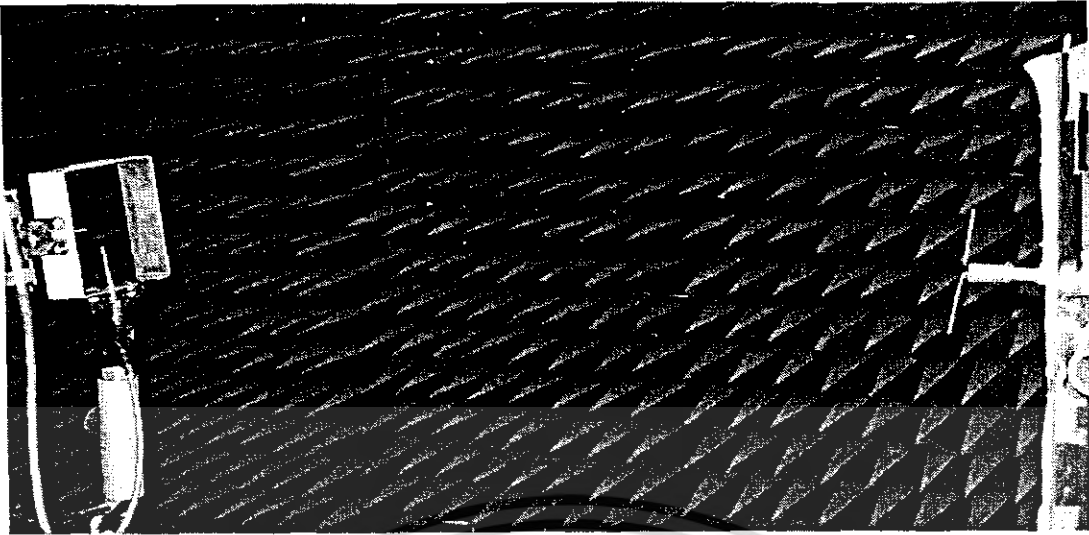


(ข) ทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก  
รูปที่ 4.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสปีอนสัญญาณ  
ด้วยโพรบคู่ความต่างเฟส 0 องศา



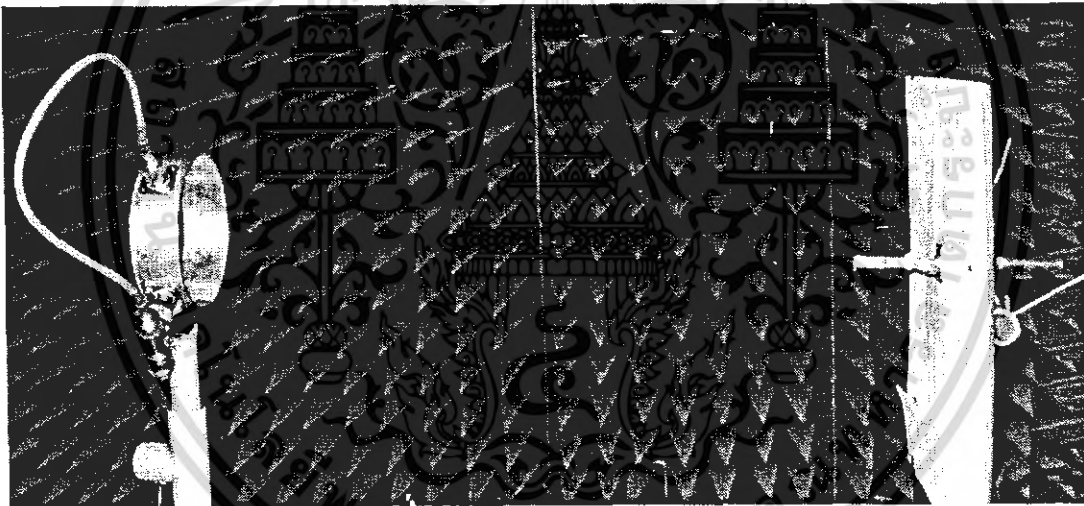
(ก) ทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ XZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



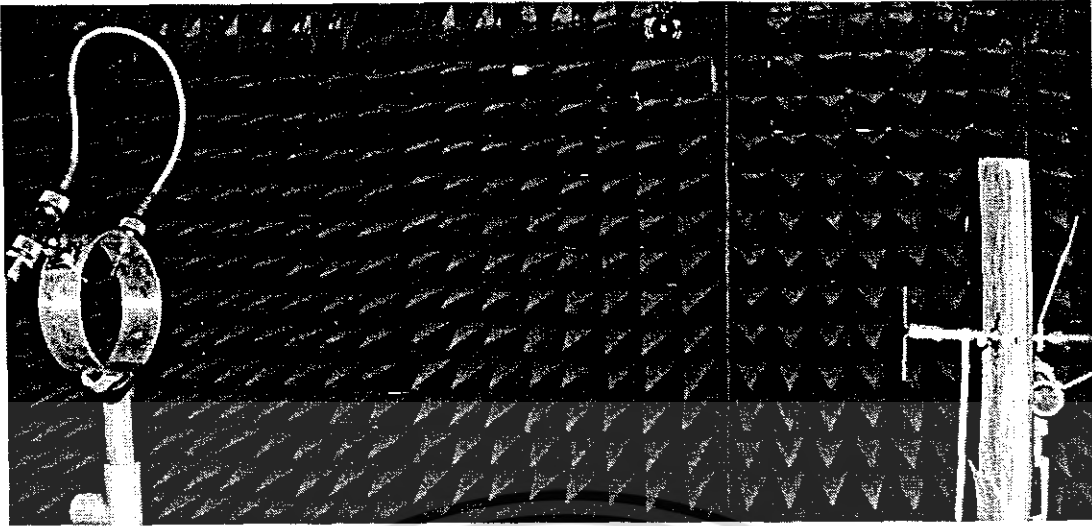
(ข) ทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบYZ

รูปที่ 4.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟส 135 องศา



(ก) ทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

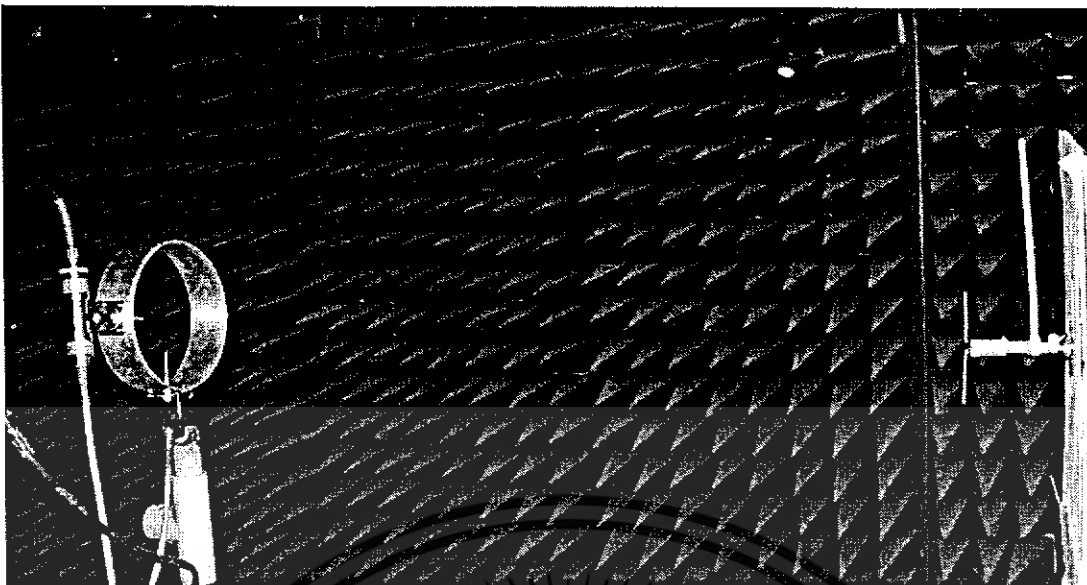


(ข) ทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก  
รูปที่ 4.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรม  
คู่ความต่างเฟส 0 องศา



(ค) ทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบXZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

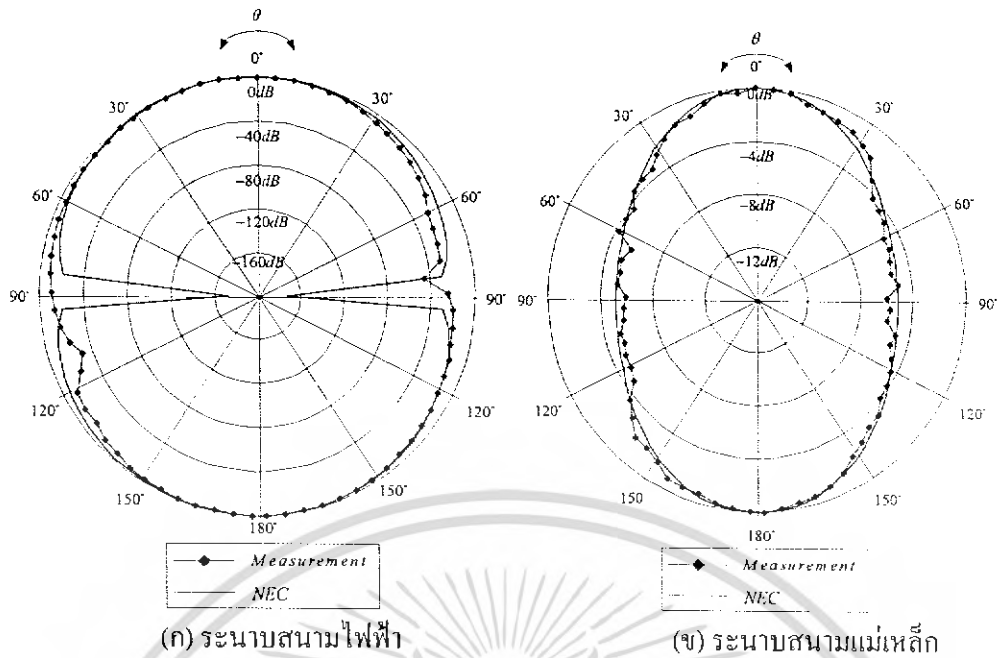


(ข) ทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบYZ

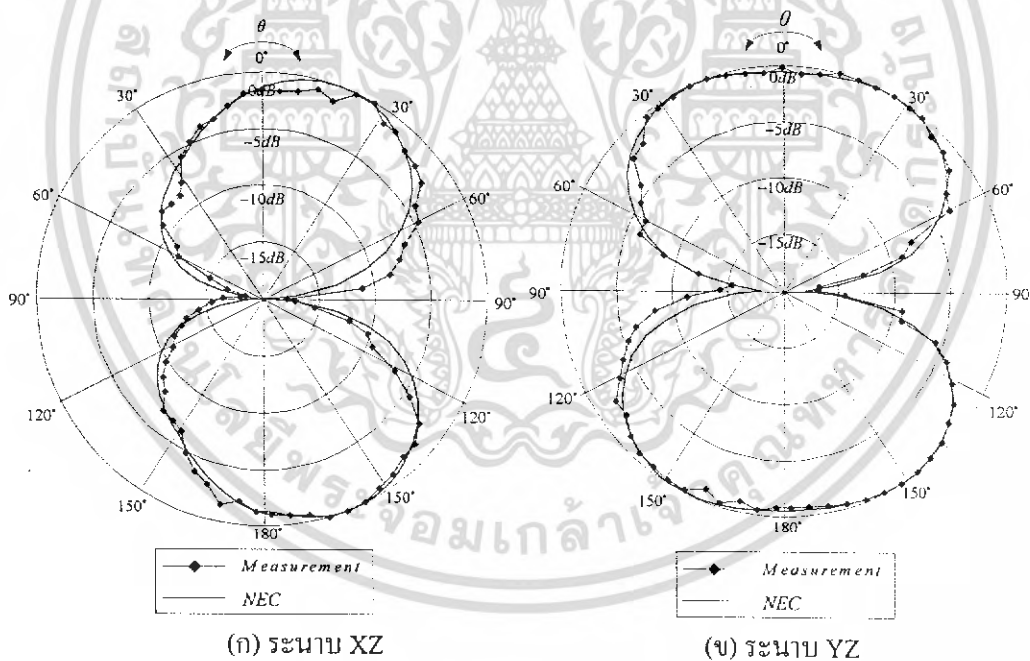
รูปที่ 4.6 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟส 145 องศา

สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟส 0 องศาและสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสค่าความต่างเฟส 135 องศา ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบจากการวัดโดยใช้เครื่อง Network Analyzer และการคำนวณจากโปรแกรม NEC2 พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่แบบสองทิศทาง และพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบมีความสอดคล้องกัน คือในระนาบสนามไฟฟ้าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้เกือบเท่ากัน ส่วนในรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น จากการทดสอบสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสสัญญาณป้อนด้วยโพรบคู่ความต่างเฟส 0 องศาและ ค่าความต่างเฟส 135 องศา นั้นลักษณะของลำคลื่นจะไม่สมมาตรกันอาจเกิดเป็นผลมาจากโพรบป้อนสัญญาณและตัวเชื่อมต่อ (Connector) ที่ป้อน และลักษณะการวางตัวสายอากาศที่ไม่ตรงกันโดยสิ้นเชิง สำหรับระนาบแม่เหล็กพบว่าลักษณะลำคลื่นด้านหน้า และด้านหลังมีความสอดคล้องกัน สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายลำคลื่นของสายอากาศจากการทดลองค่าความกว้างของลำคลื่นจะแคบกว่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม NEC 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ความต่างเฟสเท่ากับ 0 องศาที่ได้จากการวัดโดยใช้เครื่อง Network Analyzer



รูปที่ 4.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ ความต่างเฟสเท่ากับ 135 องศา ที่ได้จากการวัดโดยใช้เครื่อง Network Analyzer

สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่มีค่าความต่างเฟสเท่ากับ 0 องศาและค่าความต่างเฟส 145 องศา ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบจากการวัดโดยใช้เครื่อง วิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) และการวิเคราะห์จากโปรแกรม NEC2 พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

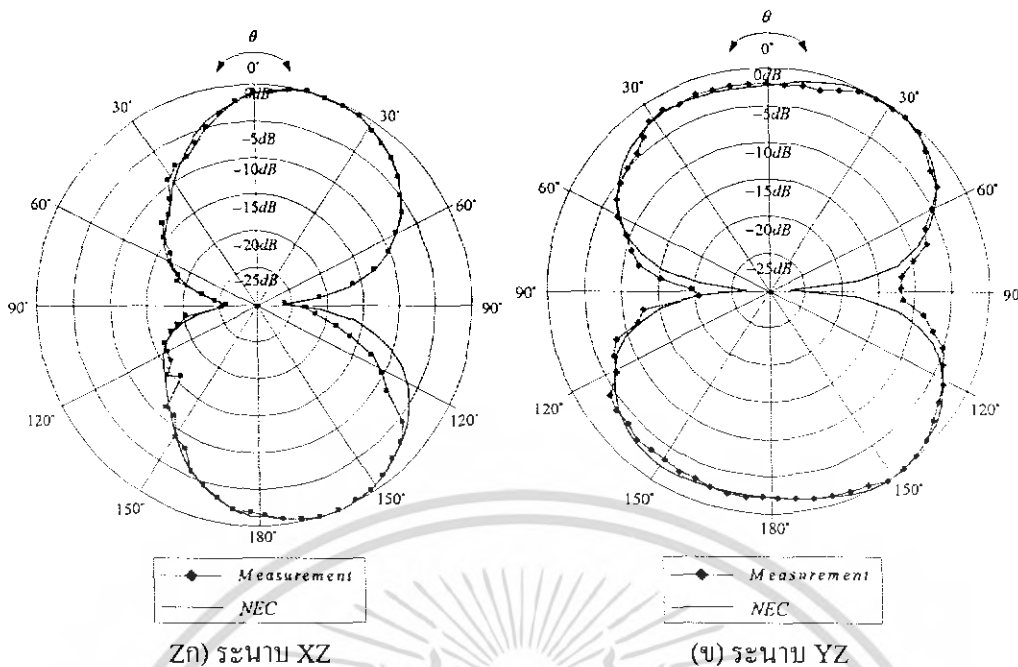
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรับคู่ความต่าง เฟส 0 องศา แบบสองทิศทาง ผลที่ได้จากการวิเคราะห์และการทดสอบมีความสอดคล้องกัน คือ ในระนาบสนามไฟฟ้า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้เกือบเท่ากัน แต่ที่มุม  $\theta = 90$  องศาที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม NEC 2 จะมีค่าเป็นลบมากกว่า และในระนาบสนามแม่เหล็กนั้นผลที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกันส่วนในแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการทดสอบสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรับคู่ทั้งค่าความต่าง 0 องศา และ ค่าความต่างเฟส 145 องศา นั้นลักษณะของลำคลื่นจะสมมาตรกัน และมีความกว้างของลำคลื่นใกล้เคียงกันกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม NEC 2 แต่อาจมีบางค่าที่ผลการทดสอบคลาดเคลื่อนไป



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรับคู่ความต่างเฟสเท่ากับ 0 องศาที่ได้จากการวัดโดยใช้เครื่อง Network Analyzer



รูปที่ 4.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟสเท่ากับ 145 องศาที่ได้จากการวัดโดยใช้เครื่อง Network Analyzer

#### 4.3 ค่าอัตราการขยายของสายอากาศ

สิ่งที่ใช้ในการบ่งชี้ประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ อัตราการขยายของสายอากาศ ซึ่งสามารถทดสอบโดยให้ระบบในการทดสอบสายอากาศทั้งสองจัดตั้งห่างกันระยะ  $R$  ซึ่งต้องวางห่างกันอย่างน้อยมากกว่าระยะสนามระยะไกล และสายอากาศทั้งตัวรับและตัวส่งต้องมีการโพลาไรซ์ที่เหมือนกัน และมีคุณลักษณะของสายอากาศที่เหมือนกัน สำหรับการเตรียมการทดสอบได้แสดงโดยรูปที่... โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer) ข่ายสัญญาณที่มีความถี่ 2.45 GHz ให้กับสายอากาศทั้งสองตัว ซึ่งกำลังที่รับได้นี้จะนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าอัตราการขยายของสายอากาศ นั้น ซึ่งหาได้จากสมการของฟรีส (Friis Transmission Equation) ดังนี้

$$G(t)_{dBi} + G(R)_{dBi} = P(r)_{dBm} - P(t)_{dBm} + l(t)_{dB} + l(r)_{dB} + l(s)_{dB} \quad (4.1)$$

$$2G_{dBi} = G(t)_{dBi} + G(R)_{dBi}$$

โดย  $G(t)_{dBi}$  คือ ค่าอัตราการขยายของสายอากาศส่งมีหน่วยเป็น dBi

$G(R)_{dBi}$  คือ ค่าอัตราการขยายของสายอากาศรับมีหน่วยเป็น dBi

$P(t)_{dBm}$  คือ กำลังงานที่ส่งจากเครื่องส่งมีหน่วยเป็น dBm

$P(r)_{dBm}$  คือ กำลังงานที่ส่งจากเครื่องรับมีหน่วยเป็น dBm

$l(t)_{dB}$  คือ การสูญเสียจากสายนำสัญญาณที่ภาคส่งสัญญาณมีหน่วยเป็น dB

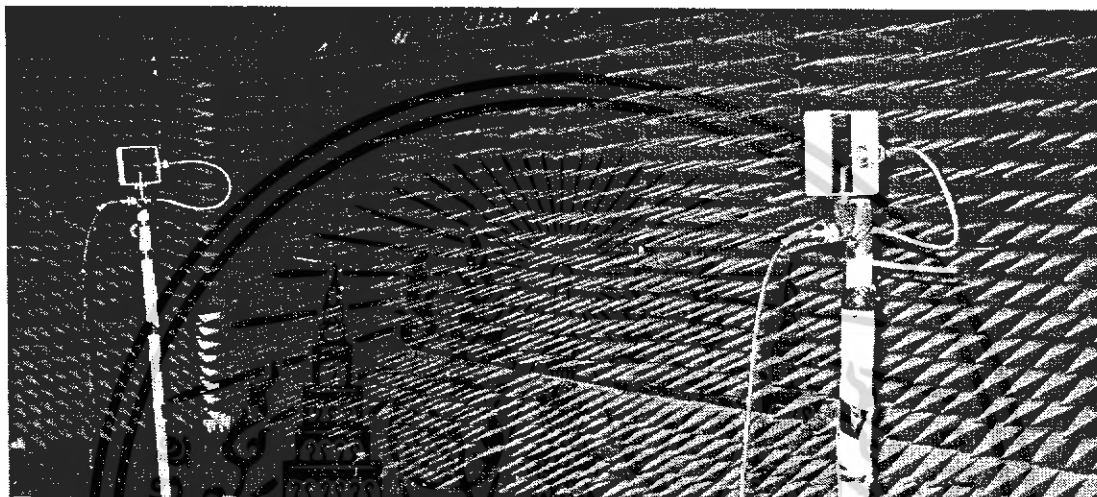
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$l(r)_{dB}$  คือ การสูญเสียจากสายนำสัญญาณที่ภาครับสัญญาณมีหน่วยเป็น dB

$l(s)_{dB}$  คือ การสูญเสียในช่องว่างอิสระ (Free space) จากระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและ

สายอากาศรับมีหน่วยเป็น dB มีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$l(s)_{dB} = 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (4.2)$$



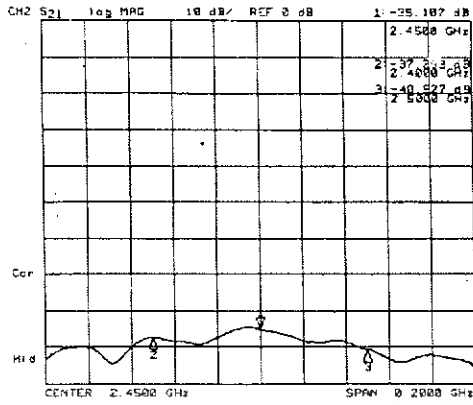
รูปที่ 4.11 แสดงการทดสอบการวัดเกนสายอากาศวงแหวน

สำหรับการทดสอบทำการ calibrate สายนำสัญญาณที่ปลายของสายนำสัญญาณไว้ 0 dB เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียในสายนำสัญญาณและสายอากาศทั้งตัวรับและตัวส่งต้องมีการ โฟลว ไรซ์ ที่เหมือนกัน และมีคุณลักษณะของสายอากาศที่เหมือนกันเพราะฉะนั้นอัตราขยายของสายอากาศส่งกับอัตราขยายของสายอากาศรับจะมีค่าเท่ากันเนื่องจากสายอากาศทั้งสองตัวมีคุณลักษณะที่เหมือนกันทำให้อัตราขยายเป็น 2 เท่า ระยะ R เท่ากับ 2 เมตรและการสูญเสียของระบบจะมีเฉพาะการสูญเสียจากในช่องว่างอิสระ (Free space) เท่านั้นเพราะฉะนั้นสมการของฟรีส (Friis Transmission Equation) จะกลายเป็นดังนี้

$$2G_{dB_i} = l(s)_{dB} + (\text{ค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย})_{dB} \quad (4.3)$$

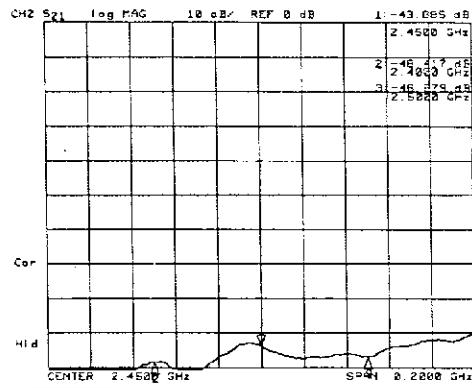
$$\text{เมื่อ } 2G_{dB_i} = G(t)_{dB_i} + G(R)_{dB_i}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมความ

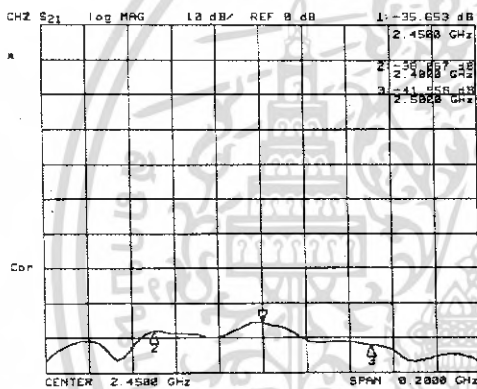
ต่างเฟส 0 องศา



(ข) สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมความ

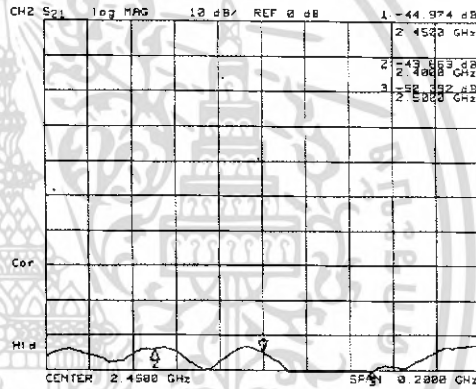
ต่างเฟส 135

รูปที่ 4.9 ค่าอัตราขยายของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่โดยใช้  
เครื่อง Network Analyzer



(ก) สายอากาศวงแหวนวงกลมความ

ต่างเฟส 0 องศา



(ข) สายอากาศวงแหวนวงกลมความ

ต่างเฟส 145

รูปที่ 4.10 ค่าอัตราขยายของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่โดยใช้  
เครื่อง Network Analyzer

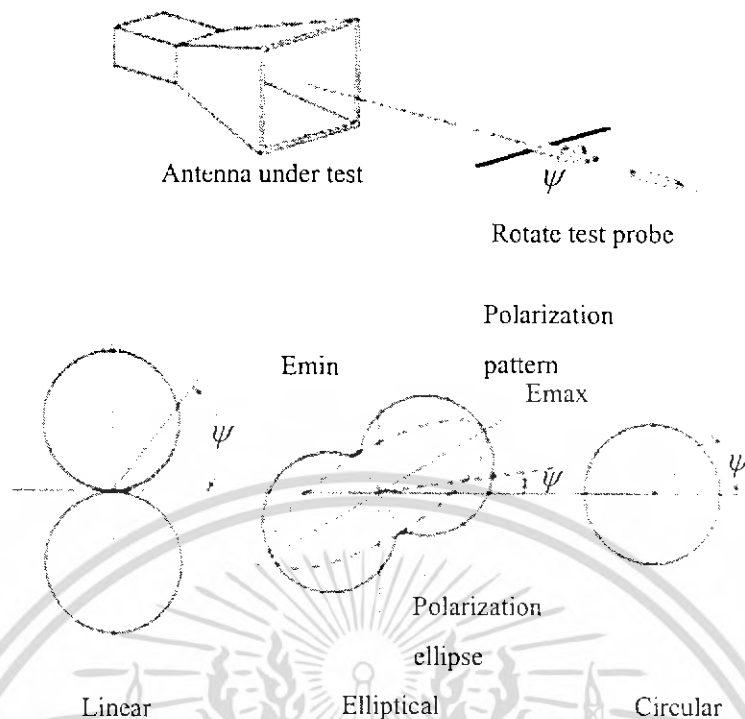
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 อัตราขยายของสายอากาศชนิดต่างๆ

	ค่าที่วัดได้จาก เครื่องวิเคราะห์ โครงข่าย	อัตราขยาย ผลการวิเคราะห์	อัตราขยาย ผลการทดสอบ
สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส เฟส 0 องศา	-35.107dB	4.72dBi	5.57dBi
สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส เฟส 135 องศา	-43.885dB	2.59dBi	2.36dBi
สายอากาศวงแหวนวงกลมเฟส 0 องศา	-35.653dB	5.06dBi	5.297dBi
สายอากาศวงแหวนวงกลมเฟส 145 องศา	-44.974dB	1.88dBi	1.727dBi

#### 4.4 คุณลักษณะเชิงการโพลาริซชันของสายอากาศ

การวัดโพลาริเซชันของสายอากาศเป็นสิ่งจำเป็นในกรณีที่ต้องการส่งคลื่นที่มีการโพลาริเซชันอย่างใดอย่างหนึ่งออกสายอากาศ แล้วทำการตรวจสอบจากการวัดว่าได้คลื่นที่มีโพลาริเซชันตามที่ต้องการหรือไม่ นอกจากนั้นการวัดโพลาริเซชันของคลื่นก็ทำให้รู้สภาพของคลื่นที่บริเวณที่สนใจว่ามีโพลาริเซชันอยู่ในรูปใด วิธีการวัดโพลาริเซชันของคลื่นนี้จะทำได้โดยใช้สายอากาศที่รับคลื่นที่มีโพลาริเซชันแบบเส้นตรงเช่น สายอากาศแบบไดโพล และสายอากาศแบบฮอร์นรูปพีระมิด การวัดโพลาริเซชันก็จะทำโดยนำสายอากาศดังกล่าวรับคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ามา แล้วหมุนสายอากาศนั้นรอบตัวเองดังแสดงในรูปที่ 4.2. ขนาดของสนามไฟฟ้าที่วัดได้ที่มุมต่างๆ จะขึ้นอยู่กับโพลาริเซชันของคลื่นนั้น. แสดงสนามไฟฟ้าที่วัดได้ในกรณีที่โพลาริเซชันของคลื่นที่เป็นแนววงรีที่ทำมุมกับพื้นโลก อัตราส่วนของแกนหลักของวงรี AR จะได้เป็น



รูปที่ 4.11 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่วัดได้โดยใช้สายอากาศที่มีโพลาไรเซชันแบบเส้นตรงในกรณีที่โพลาไรเซชันของคลื่นเป็นแบบวงรีที่ทำมุมกับพื้นโลก

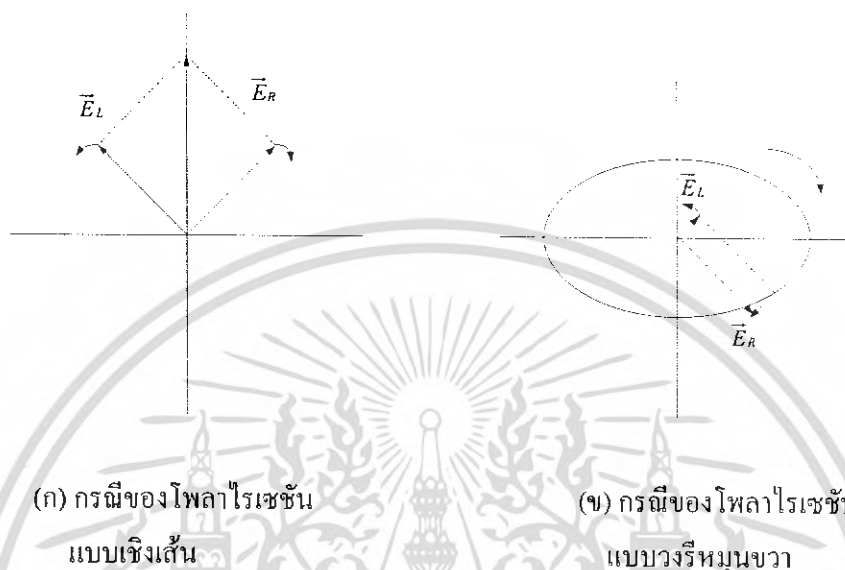
ถ้าโพลาไรเซชันของคลื่นเป็นแบบวงกลม AR จะเท่ากับ 1 และถ้าโพลาไรเซชันเป็นแบบเชิงเส้น AR จะเท่ากับ  $\infty$  และ โพลาไรเซชันเป็นแบบวงรี AR จะอยู่ระหว่าง 1 กับ  $\infty$  การวัดที่ได้ผลตามรูปที่ 4.11 นั้นเพียงแค่บอกรูปร่างของโพลาไรเซชันเท่านั้น ยังไม่ได้บอกว่าเป็นแบบหมุนซ้ายหรือหมุนขวาซึ่งจะต้องทำการวัดเฟสของคลื่นในทิศทางตั้งฉากกันด้วยจึงจะระบุออกมาได้ว่าเป็นแบบไหน การวัดทิศทางของการหมุนนี้ทำได้โดยอาศัยหลักการที่ว่าคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบใดก็ตาม จะสามารถแยกออกเป็น ส่วนประกอบของคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบวงกลมหมุนขวาและแบบวงกลมหมุนซ้าย ดังนั้นการวัดนั้นจะทำได้โดยใช้สายอากาศแบบโพลาไรเซชันวงกลม เช่น สายอากาศแบบครอสดีไดโพล แบบเฮลิคซ์ โดยใช้แบบที่รับคลื่นวงกลมหมุนขวา และรับคลื่นวงกลมหมุนซ้ายมาวัดทั้งคู่ แล้วพิจารณาจากค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ ถ้าให้  $|E_R|$  และ  $|E_L|$  เป็นขนาดของสนามไฟฟ้าที่วัดได้สำหรับหมุนขวาและแบบหมุนซ้ายตามลำดับ อัตราส่วนของแกนของวงรี AR จะคำนวณได้ดังนี้

$$AR = \frac{|E_R| + |E_L|}{|E_R| - |E_L|} \quad (4.4)$$

ถ้า  $|E_R|$  ใหญ่กว่า  $|E_L|$  คือค่า AR เป็นบวกคลื่นนั้นจะเป็นแบบหมุนขวา และถ้า  $|E_R|$  เล็กกว่า  $|E_L|$  คลื่นนั้นจะเป็นแบบหมุนซ้าย ในกรณีพิเศษที่คลื่นนั้นมีโพลาไรเซชันแบบวงกลมก็จะมีเฉพาะ  $|E_R|$  หรือ  $|E_L|$

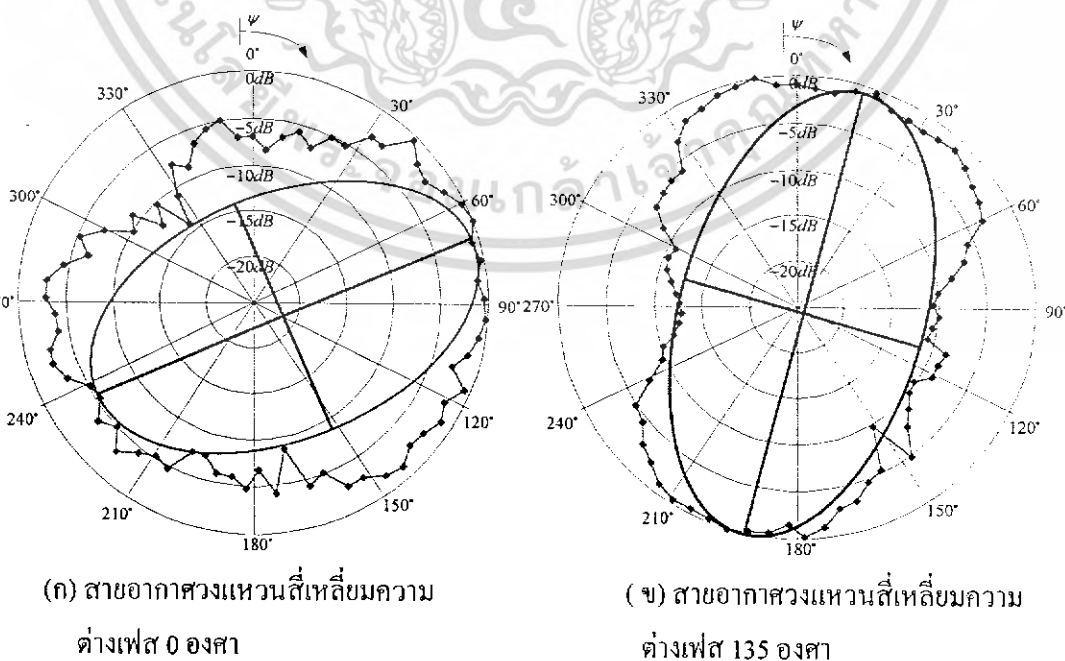
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่านั้นและ AR จะมีค่าเป็น 1 สำหรับกรณีที่เป็นโพลาไรเซชันแบบเส้นตรง  $|E_R|=|E_L|$  ดังนั้น AR จะเป็น  $\infty$  และคลื่นนั้นไม่มีการหมุน จะมีแต่การแกว่งในแนวเส้นตรงเท่านั้น รูปที่ 4.12 แสดงการแยกส่วนประกอบของการโพลาไรเซชันแบบวงกลมหมุนขวาและหมุนซ้ายในคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบต่างๆ

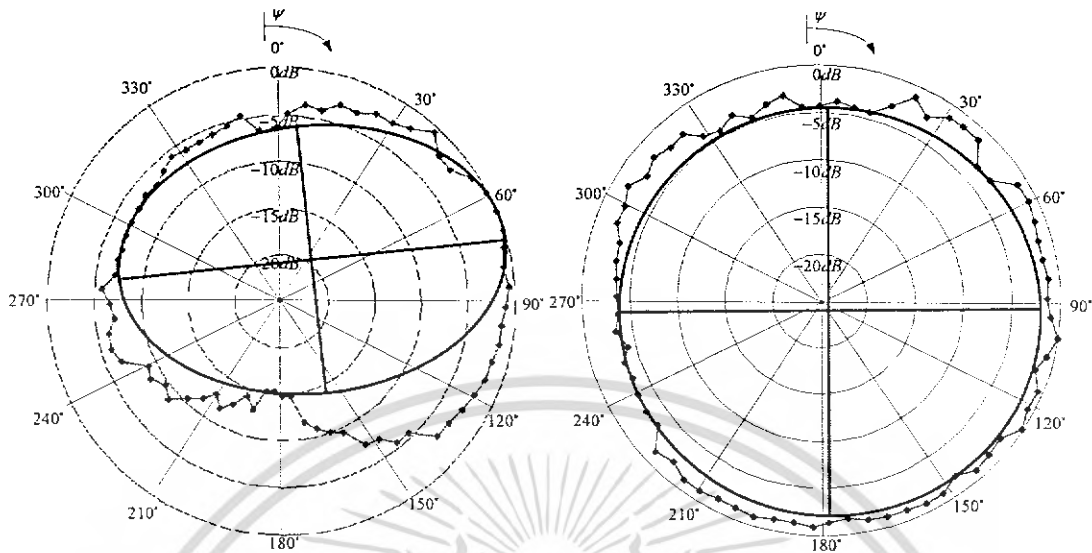


รูปที่ 4.15 ส่วนประกอบของโพลาไรเซชันแบบวงกลมหมุนขวาและหมุนซ้ายของคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบต่างๆ

ในการทดสอบใช้ไดโพลที่ออกแบบที่ความถี่ 2.45 GHz เป็นสายอากาศรับ และวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่และวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่เป็นสายอากาศส่ง สายอากาศรับต้อง พิจารณาที่ตำแหน่ง  $\theta = 0^\circ$  หรือตามแนวแกน z ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สายอากาศวงแหวนวงกลมความ  
ต่างเฟส 0 องศา

(ข) สายอากาศวงแหวนวงกลมความ  
ต่างเฟส 145 องศา

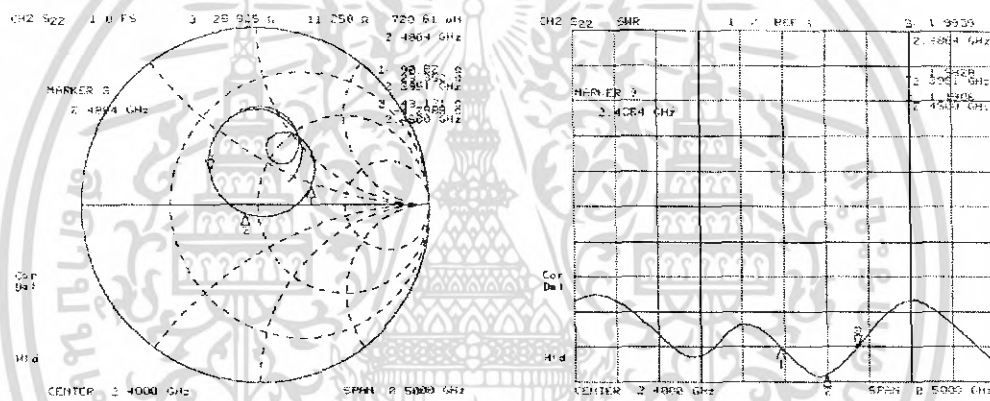
รูปที่ 4.16 ผลที่ได้จากการทดสอบการวัดโพลารไรซ์ของวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ และวงแหวนวงกลมป้อนโพรบคู่

จากรูปพบว่า การโพลารไรซ์จากการทดสอบ หาค่าอัตราส่วนแกนซึ่งได้มาจากค่าแกนหลัก  $E_{Max}(dB)$  และค่าแกนรอง  $E_{Min}(dB)$  ของสายอากาศโพรบคู่กระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสความต่างเฟสของแรงดัน 0 องศาและความต่างเฟส 135 องศา มีค่าเท่ากับ 16.7368 dB และ 23.346 dB ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้นี้ในทางปฏิบัติถือว่าเป็นค่าที่มาก เพราะฉะนั้น จึงสรุปได้ว่าสายอากาศทั้งสองมีการโพลารไรซ์แบบเชิงเส้นมุมเอียงประมาณ 60 องศาและ 15 องศาซึ่งจะเห็นได้ว่าสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟสของแรงดัน 0 องศา ผลการทดสอบที่ได้เป็นไปตามทฤษฎี ที่ได้ทำการวิเคราะห์ไว้ ส่วนสายอากาศโพรบคู่กระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสความต่างเฟสของแรงดัน 135 องศา ผลที่ได้จากการทดสอบที่มีค่าไม่ตรงตามทฤษฎีนั้น อาจมีผลมาจากความยาวของโพรบที่เกิดจากการแมตช์สายอากาศกับสายนำสัญญาณในส่วนของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟสของแรงดัน 0 องศาและ 145 องศา ค่าอัตราส่วนแกนที่ได้มีค่าประมาณ 12.319 dB และ 0.707 dB จากการทดสอบพบว่าสายอากาศโพรบคู่กระตุ้นวงกลมความต่างเฟส 0 องศาและ 145 องศา มีการโพลารไรซ์แบบวงรีและวงกลมตามลำดับซึ่งค่าที่ได้นั้นเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้ทำการวิเคราะห์

4.5 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

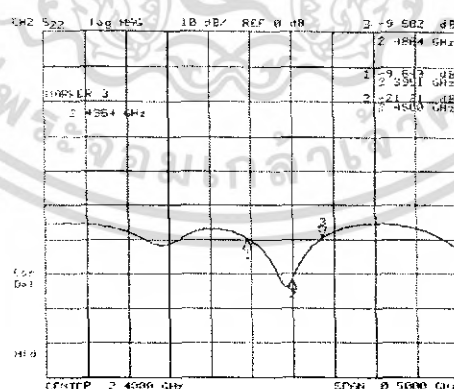
การพิจารณาคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเป็นอีกสิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่ง เพราะเป็นสิ่งบ่งชี้ถึงความเข้ากันได้ของสายอากาศและสายนำสัญญาณ โดยพิจารณา ค่าอิมพีแดนซ์ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้องมีค่าเท่ากับ 50 โอห์มหรือมีค่าใกล้เคียง ส่วนในการพิจารณาอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ของสายอากาศต้องมีค่าไม่เกิน 2 : 1 และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับควรมีค่าเป็น  $-\infty dB$  ซึ่งเป็นค่าในทางทฤษฎีส่วนในทางปฏิบัติค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจะต้องมีค่าเป็นลบมากกว่า  $-10dB$  ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

สายอากาศที่สร้างขึ้นต้องมีการทดสอบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศทุกครั้ง ซึ่งสามารถแสดงแต่ละกรณีในรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่.4.17.ซึ่งแสดงคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ โพรบกระตุ้นวงแหวนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ เพื่อพิจารณาย่านความถี่ที่สายอากาศสามารถปฏิบัติการได้ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์เข้าใกล้ 50 โอห์มและค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศมีค่าต่ำกว่า 2 : 1



(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

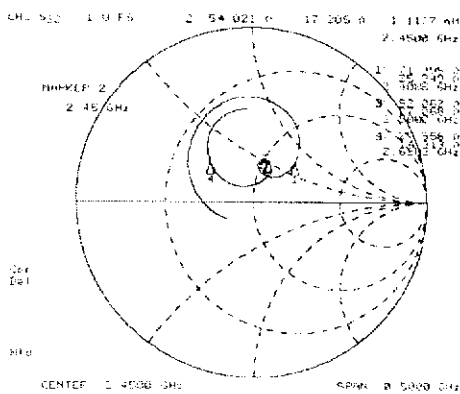
(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง



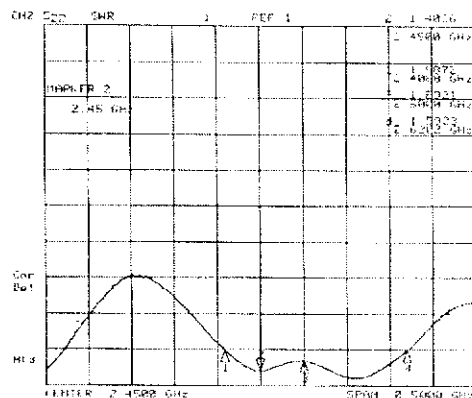
(ค) ค่าการสูญเสียย้อนกลับ

รูปที่4.17 ผลการทดสอบค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ค่าความต่างเฟส 0 องศา

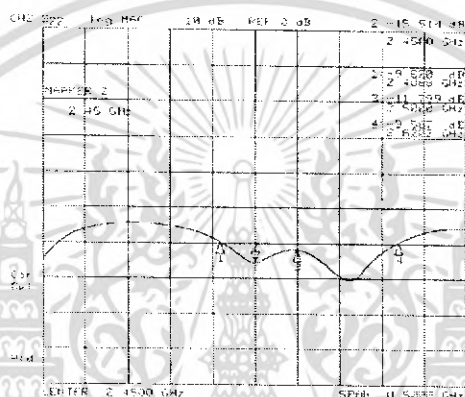
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

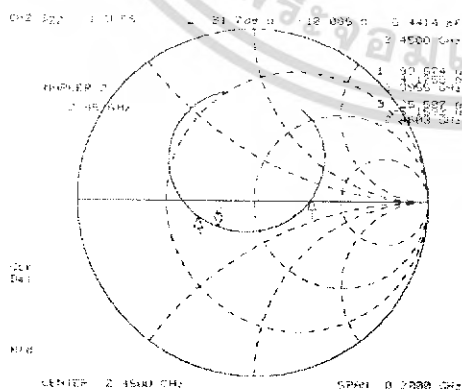


(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

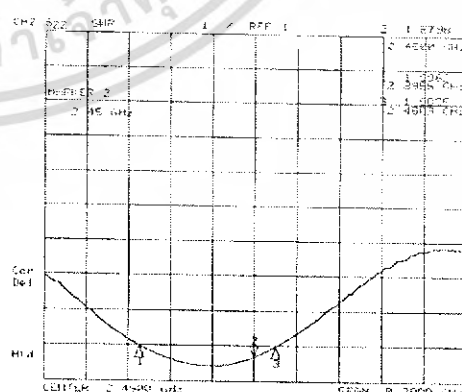


(ค) ค่าการสูญเสียย้อนกลับ

รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรงคู่ค่าความต่างเฟส 135 องศา

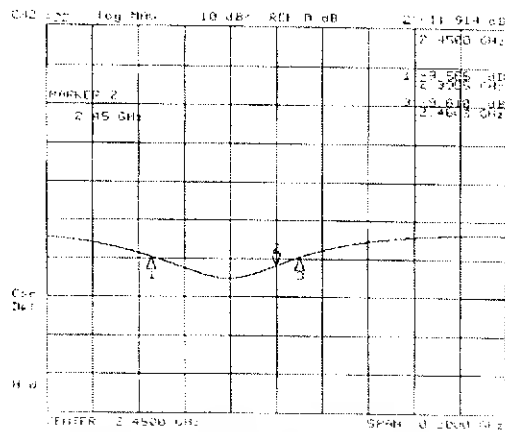


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์



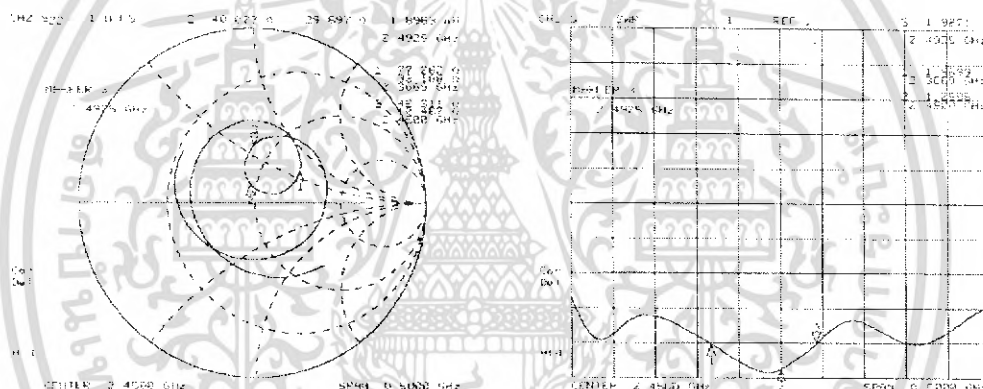
(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



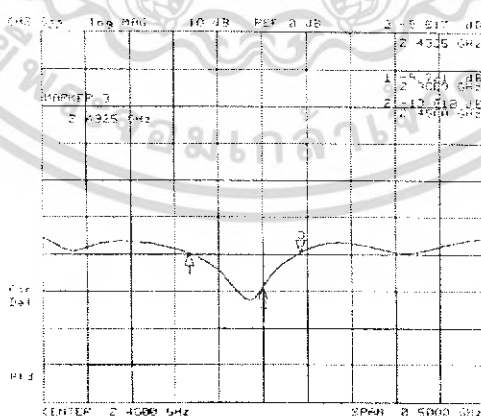
(ค) ค่าการสูญเสียย้อนกลับ

รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ค่าความต่างเฟส 0 องศา



(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง



(ค) ค่าการสูญเสียย้อนกลับ

รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ค่าความต่างเฟส 145 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ที่ยอมรับได้ที่มีความถี่ปฏิบัติการ ที่สามารถใช้ปฏิบัติการในช่วงความถี่ต่างๆ โดยพิจารณาช่วงกว้างความถี่สามารถหาได้จาก

$$\Delta f (\%) = \frac{f_H - f_L}{f_C} \times 100 \quad (4.5)$$

โดยที่  $f_H$  คือ ค่าความถี่สูงสุดที่สามารถทำงานได้

$f_L$  คือ ค่าความถี่ต่ำสุดที่สามารถทำงานได้

$f_C$  คือ ค่าความถี่ที่ออกแบบ

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณ ด้วยโพรับคู่ความต่างเฟส 0 องศา

สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมป้อนสัญญาณด้วยโพรับคู่ที่มีความต่างเฟสเท่ากับ 0 องศา			
ผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์	VSWR	Impedance	Band Width (%)
ผลการทดสอบ	1.1906	43.121 - j4.2988 $\Omega$	3.73
ผลการวิเคราะห์	1.812	90.32 + j4.245 $\Omega$	4.08

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณ ด้วยโพรับคู่ความต่างเฟส 135 องศา

สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมป้อนสัญญาณด้วยโพรับคู่ที่มีความต่างเฟสเท่ากับ 135 องศา			
ผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์	VSWR	Impedance	Band Width (%)
ผลการทดสอบ	1.4026	54.021 + j17.205 $\Omega$	8.63
ผลการวิเคราะห์	1.898	98.26 - j63.2 $\Omega$	2.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4.เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบ  
คู่ความต่างเฟส 0 องศา

สายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่มีความต่างเฟสเท่ากับ 0 องศา			
ผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์	VSWR	Impedance ( $\Omega$ )	Band Width (%)
ผลการทดสอบ	1.6798	$31.709 - j10.085\Omega$	2.645
ผลการวิเคราะห์	1.362	$38.97 - j8.083 \Omega$	4.898

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบ  
คู่ความต่างเฟส 145 องศา

สายอากาศวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ที่มีความต่างเฟสเท่ากับ 145 องศา			
ผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์	VSWR	Impedance ( $\Omega$ )	Band Width (%)
ผลการทดสอบ	1.2588	$46.311 + j10.467\Omega$	5.27
ผลการวิเคราะห์	1.76	$82.83 + j16.78 \Omega$	3.265

#### 4.6 สรุป

ในบทนี้เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์และการทดสอบว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศต่างๆ ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ค่าอัตราขยายของสายอากาศ คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ และคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งพบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการวิเคราะห์นั้นมีความสอดคล้องกัน กับโปรแกรม NEC 2 ซึ่งเป็นวิธีจำลองสายอากาศให้มีสภาพเหมือนจริง ผลที่ได้จากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะมีความใกล้เคียงกับการทดสอบ และโปรแกรม NEC 2 สามารถคำนวณคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแต่จะมีข้อจำกัดในเรื่องของจำนวนเซ็กเมนต์ที่ใช้ในการจำลอง ดังนั้น การใช้โปรแกรม NEC 2 จึงไม่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่มีความละเอียดและมีขนาดใหญ่หลายๆ เพราะจะใช้เวลาในการประมวลผลค่อนข้างมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### มาตรฐาน IEEE 802.11 การประเมินประสิทธิภาพและผลการทดสอบ

#### 5.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอเกี่ยวกับมาตรฐาน IEEE 802.11 การประเมินประสิทธิภาพและผลการทดสอบ สาเหตุที่มาตรฐานนี้ถูกใช้กันมาก ก็เนื่องจากการใช้คลื่นวิทยุที่มีกำลังส่งสูง สามารถใช้งานในที่ร่มได้ไกลถึง 100 เมตร และกลางแจ้งถึง 400 เมตรและมีความเร็วในการทำงานสูงถึง 11-54 เมกะบิตต่อวินาที ซึ่งเร็วพอที่จะนำมาใช้แทนระบบเครือข่ายแลนตัวเดิมได้ แต่เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย หรือ WLAN (Wireless LAN) นี้มีด้วยกัน 3 มาตรฐานคือ a, b, g, ซึ่งแต่ละตัวมีวิธีการโมดูเลชันสัญญาณต่างกัน และใช้ความถี่ต่างกัน จึงมีประสิทธิภาพต่างกันด้วย

#### 5.2 มาตรฐาน IEEE 802.11

ในปี ค.ศ. 1997 ถือว่าเป็นจุดกำเนิดมาตรฐานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย หรือ เครือข่ายไวร์เลสแลน ทาง IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) หรือภาษาไทยเรียกว่า สถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ได้กำหนดมาตรฐานแรกของเครือข่ายไวร์เลสแลนขึ้นโดยใช้ชื่อ IEEE802.11 จากนั้นได้มีการพัฒนามาตรฐานต่อยอดขึ้นไปในด้านประสิทธิภาพการทำงาน กลไกการส่งสัญญาณ ความเร็วสื่อสารข้อมูล ฯลฯ จนแตกแขนงออกมาเป็น 3 มาตรฐาน ได้แก่ IEEE802.11b, IEEE802.11a และ IEEE802.11g

##### 5.2.1 มาตรฐาน IEEE 802.11b

ไวไฟ (Wi-Fi) เป็นมาตรฐานของสถาบัน Wireless Ethernet Compatibility Alliance (WECA) เป็นเครือข่ายไวร์เลสแลนมาตรฐาน IEEE 802.11b ซึ่งอุปกรณ์ต่างๆบนระบบใช้ความถี่ส่งสัญญาณในช่วง 2.4 GHz (ความถี่ย่าน ISM Band ย่อมาจาก Industrial Scientific and Medical Band) และกลไกการส่งสัญญาณเป็นแบบ Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) มีความเร็วสื่อสารข้อมูลตั้งแต่ 1 Mbps, 2 Mbps, 5.5 Mbps, 5.5 Mbps สูงสุดที่ 11 Mbps (11 ล้านบิตต่อวินาที)

##### 5.2.2 มาตรฐาน IEEE 802.11a

IEEE802.11a เป็นมาตรฐานของเครือข่ายไวร์เลสแลนที่มีความเร็วในการสื่อสารข้อมูลที่สูงสุดอยู่ที่ 54 Mbps สูงกว่าเครือข่ายไวร์เลสแลนมาตรฐาน IEEE802.11b ประมาณ 5 เท่า ดังนั้น จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Wi-Fi ความเร็วสื่อสารข้อมูลของอุปกรณ์บนระบบเริ่มตั้งแต่ 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 และ 54 Mbps (54 ล้านบิตต่อวินาที) ใช้ความถี่ส่งสัญญาณในช่วง 5GHz โดยมีกลไกการส่งสัญญาณแบบ Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) ซึ่งเป็นวิธีที่ดีกว่า IEEE802.11b สามารถส่งได้เร็วกว่าโดยใช้แบนด์วิธเท่าเดิม

##### 5.2.3 มาตรฐาน IEEE 802.11g

IEEE802.11g เป็นมาตรฐานเครือข่ายไวร์เลสแลนที่ออกมาใหม่ล่าสุด มาตรฐานนี้พัฒนาขึ้นเพื่อให้อุปกรณ์ไวร์เลสแลนสามารถส่งข้อมูลที่ความเร็ว 54 Mbps โดยใช้ความถี่ส่งสัญญาณในช่วง 2.4 GHz มีกลไกการส่งสัญญาณแบบ DSSS และ OFDM ความพิเศษของอุปกรณ์ไวร์เลสแลนที่ใช้มาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IEEE802.11g ก็สามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ไร้สายมาตรฐาน IEEE802.11b ที่มีความเร็ว 11 Mbps อยู่แล้วโดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนฮาร์ดแวร์ใดๆทั้งสิ้น (Backward Compatibility)

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของเครือข่ายไร้สายมาตรฐานต่างๆ

คุณสมบัติ	IEEE802.11b	IEEE802.11a	IEEE802.11g
ความเร็วสื่อสารข้อมูลสูงสุด	11 Mbps	54 Mbps	55 Mbps
กลไกการส่งสัญญาณ	DSSS	OFDM	DSSS และ OFDM
ความเร็วสื่อสาร	1,2,5.5, 11 Mbps	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps	DSSS:1, 2, 5.5, 11,Mbps OFDM:6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps
ช่วงความถี่ที่ทำงาน	2.4-2.4835 GHz	5.15-5.35 GHz 5.425-5.675 GHz 5.725-5.875 GHz	2.4-2.4835 GHz
การ โมดูเลทสัญญาณ	DBPSK:1 Mbps DQPSK:2 Mbps CCK:5.5,11 Mbps	BPSK:6, 9 Mbps QPSK:12, 18 Mbps 16-QAM:24, 36 Mbps 64-QAM:48, 54 Mbps	DBPSK:1 Mbps DQPSK:2 Mbps CCK:5.5,11 Mbps OFDM:6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps
กลไกควบคุมการเข้าถึงตัวกลางสื่อสารข้อมูล (Media Access Control)	CSMA/CA	CSMA/CA	CSMA/CA
สามารถทำงานร่วมกับมาตรฐาน (Compatibility)	IEEE802.11b IEEE802.11g	IEEE802.11a	IEEE802.11b IEEE802.11g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

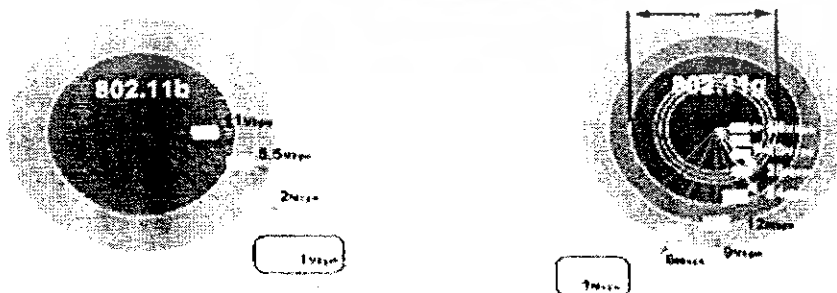
ตารางที่ 5.2 ค่า Throughput โดยประมาณของเครือข่ายไร้สาย

ระยะทาง(ฟุต)	IEEE802.11b	IEEE802.11a	IEEE802.11g
10	5.8 Mbps	24.7 Mbps	24.7 Mbps
50	5.8 Mbps	19.8 Mbps	24.7 Mbps
100	5.8 Mbps	12.4 Mbps	19.8 Mbps
150	5.8 Mbps	4.9 Mbps	12.4 Mbps
200	3.7 Mbps	0	4.9 Mbps
250	1.6 Mbps	0	1.6 Mbps
300	0.9 Mbps	0	0.9 Mbps

### 5.3 ความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลกับความแรงของสัญญาณ

ความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลของเครือข่ายไร้สายนั้นจะแปรผันกับความแรงของสัญญาณวิทยุ นั่นหมายความว่าเมื่อสัญญาณวิทยุมีความแรงก็จะส่งข้อมูลได้เร็ว แต่เมื่อสัญญาณวิทยุอ่อนแรงลง ก็จะส่งข้อมูลได้ช้าลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะระบบไร้สายจะเลือกวิธีการ โมดูเลทให้เหมาะสมกับความแรงของสัญญาณ ตามมาตรฐาน 802.11 b จะมีความเร็วในการทำงาน 4 ระดับ 11, 5.5, 2 และ 1 เมกะบิต ต่อวินาที และ 802.11 g จะมีความเร็วในการทำงาน 8 ระดับ คือ 54, 48, 36, 24, 11, 5.5, 2 และ 1 เมกะบิตต่อวินาที

ตัวอย่างเช่น ในมาตรฐาน 802.11 b เมื่อเราอยู่ใกล้แอ็กเซสพอยท์ ก็จะมีสัญญาณวิทยุแรง ระบบก็จะใช้การโมดูเลทแบบ CCK ทำให้มีความเร็วที่ 5.5-11 เมกะบิตต่อวินาที ต่อมาเราอยู่ห่างออกไปทำให้สัญญาณวิทยุอ่อนแรงลง ระบบก็จะเปลี่ยนการโมดูเลทไปเป็นแบบ QPSK ซึ่งเป็นวิธีที่ทนทานต่อสัญญาณรบกวนมากกว่าแต่ความเร็วก็จะลดลงเหลือ 2 เมกะบิตต่อวินาที จนในที่สุดเมื่อเราอยู่ห่างออกไปอีก ก็จะเปลี่ยนวิธีโมดูเลทเป็นแบบ BPSK ซึ่งเป็นวิธีสุดท้ายที่มีความเร็วเพียง 1 เมกะบิตต่อวินาทีเท่านั้น



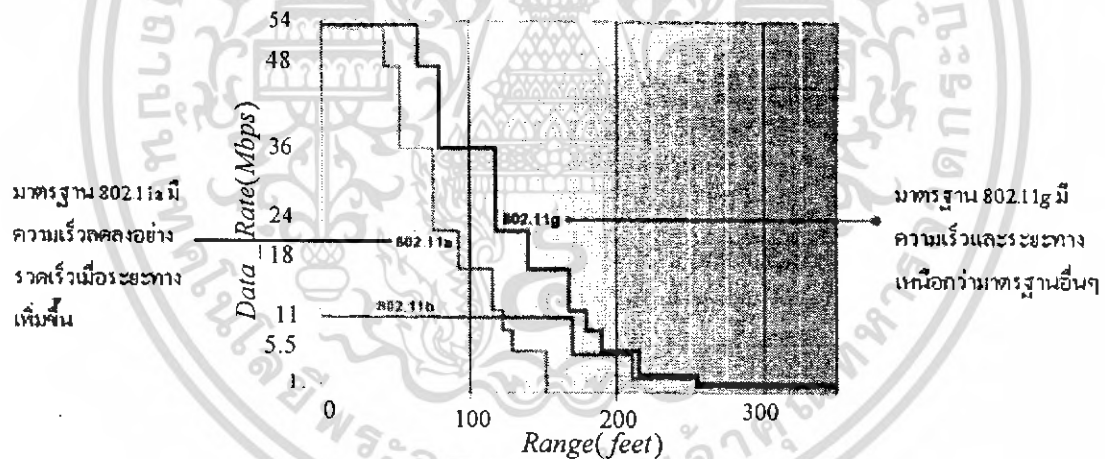
รูปที่ 5.1 ระยะทางที่มีผลกระทบต่อความเร็วในระบบไร้สาย 802.11b และ 802.11g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปข้างต้นจะเห็นว่าเมื่ออยู่ห่างจากแอ็กเซสพอยน์ไม่มาก มาตรฐาน 802.11 g จะมีความเร็วสูงมากแต่เมื่อห่างออกไปก็จะมีความเร็วลดลงใกล้เคียงกับมาตรฐาน 802.11b ที่เป็นเช่นนี้เพราะมาตรฐาน 802.11 g ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้ทำงานร่วมกับอุปกรณ์มาตรฐาน 802.11b มาตรฐานตัวใหม่นี้จึงสามารถใช้การโมดูเลทวิธีเดียวกับของ 802.11b โดยเมื่อไวร์เลสแลนการ์ดอยู่ใกล้กับแอ็กเซสพอยน์ก็จะใช้การโมดูเลทแบบ OFDM แบบใหม่ แต่เมื่อห่างออกไปก็จะเป็นการใช้การโมดูเลทแบบเดิมตามมาตรฐาน 802.11b นั่นก็เป็นสาเหตุว่าทำไมมาตรฐานทั้งสองถึงมีระยะเวลาการทำงานและความเร็วที่ใกล้เคียงกันแม้มีระยะห่างออกไป

#### 5.4 ความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลกับระยะทางของระบบไวร์เลสแลนมาตรฐานต่างๆ

การปรับค่าความเร็วในการรับ-ส่งจะเป็นไปโดยอัตโนมัติ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตัวแอ็กเซสพอยน์และไวร์เลสแลนการ์ดที่จะตกลงกันตามค่าความแรงของสัญญาณ ซึ่งคุณสามารถสังเกตได้จากเมื่ออุปกรณ์ไวร์เลสอยู่ห่างจากแอ็กเซสพอยน์ออกไปก็จะมีวิธีการโมดูเลททำให้ความเร็วลดลง ทำให้ความเร็วในการทำงานกับระยะทางมีรูปร่างเป็นขั้นบันได

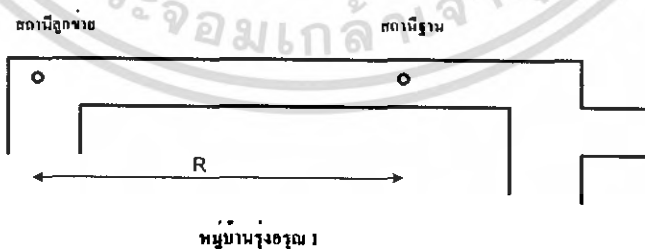


รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลกับระยะทางของระบบไวร์เลสแลนตามมาตรฐานต่างๆ

จากรูปข้างต้นจะเป็นกราฟที่แสดงความเร็วกับระยะทางในสภาพการทำงานในออฟฟิศ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเครือข่ายตามมาตรฐาน 802.11 a จะมีความเร็วลดลงอย่างมากเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะมาตรฐานนี้ใช้กำลังส่งที่ต่ำมาก และมีปัญหาเรื่องการลดทอนสัญญาณจากสิ่งกีดขวาง ต่างจากมาตรฐาน 802.11g ที่มีความเร็วลดลงแต่ก็สามารถใช้งานได้ระยะไกลกว่า ซึ่งถ้าหากเทียบกันระหว่างมาตรฐาน 802.11g และ 802.11b ทั้งสองจะมีความเร็วสุดท้ายที่ระยะทางใช้งานสูงสุดที่เท่ากัน

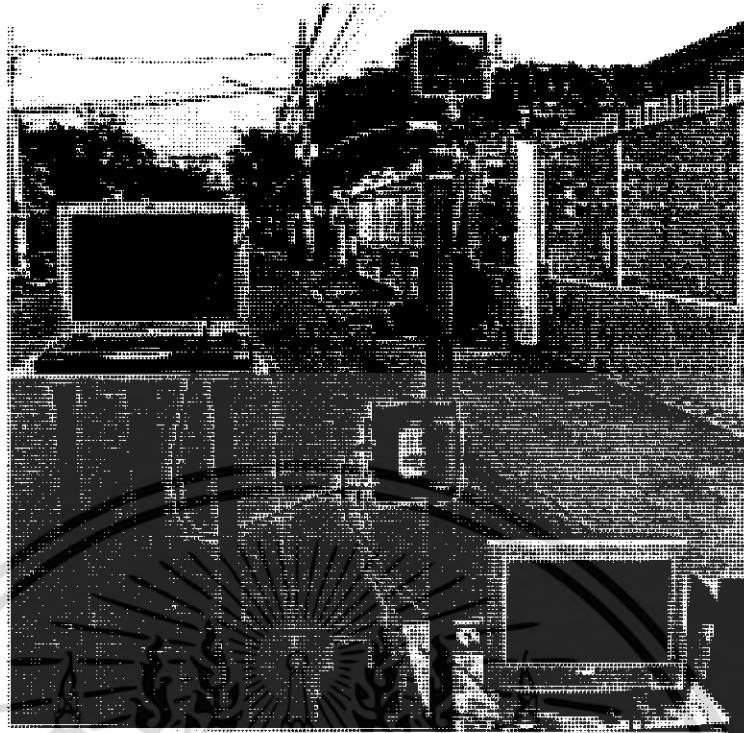
### 5.5 การทดสอบประสิทธิภาพ

ในการทดสอบสมมติให้ลูกข่ายทำหน้าที่แทนสถานีฐานด้านรับเพื่อให้การทดสอบ ซึ่งการสื่อสารแบบจุดต่อหลายจุดในลักษณะการใช้งานกับคอมพิวเตอร์พกพาตามถนนหรือแนวทางเดินที่แคบตามแนวยาว คือแนวเส้นระดับสายตาระหว่าง เครื่องรับและเครื่องส่ง ดังนั้นจึงเลือกสถานที่ทดสอบที่มีการรบกวนน้อยเช่น การรบกวนจากยานพาหนะ การรบกวนจากเครือข่ายไร้สายอื่น และสถานที่สะดวกที่สุดในการใช้อุปกรณ์ จึงเลือกถนนในหมู่บ้านเนื่องจากการรบกวนจากยานพาหนะน้อยและไม่มีการรบกวนจากระบบไร้สาย ระบบอื่น และถนน มีลักษณะเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 5.1 (ข) ซึ่งระยะทางที่ยาว 500 เมตร อุปกรณ์ทดสอบทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 5.1 (ก) ด้านสถานีฐานประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ ส่วนบุคคลซึ่งติดตั้งโปรแกรมทดสอบ และเชื่อมต่อกับสถานีฐานด้วยโครงข่ายท้องถิ่น (LAN) สถานีฐานเชื่อมต่อกับสายอากาศทดสอบด้วยสายนำสัญญาณยาว 1 เมตร สายอากาศทดสอบติดตั้งบนขาตั้งมีความสูงจากพื้น 2 เมตร ทางด้านลูกข่ายประกอบด้วยคอมพิวเตอร์พกพาคิดตั้งการ์ดโครงข่ายท้องถิ่น ไร้สายวางอยู่บนรถเข็นมีความสูงจากพื้น 1.5 เมตร ในการทดสอบเป็นแบบจุดต่อเนื่อง โดยแต่ละจุดห่างกัน 50 เมตรตามความยาวถนน ในการทดสอบจะทำการทดสอบค่าวิสัยสามารถมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 5.3 การทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบด้านสถานีฐาน และด้านลูกข่าย

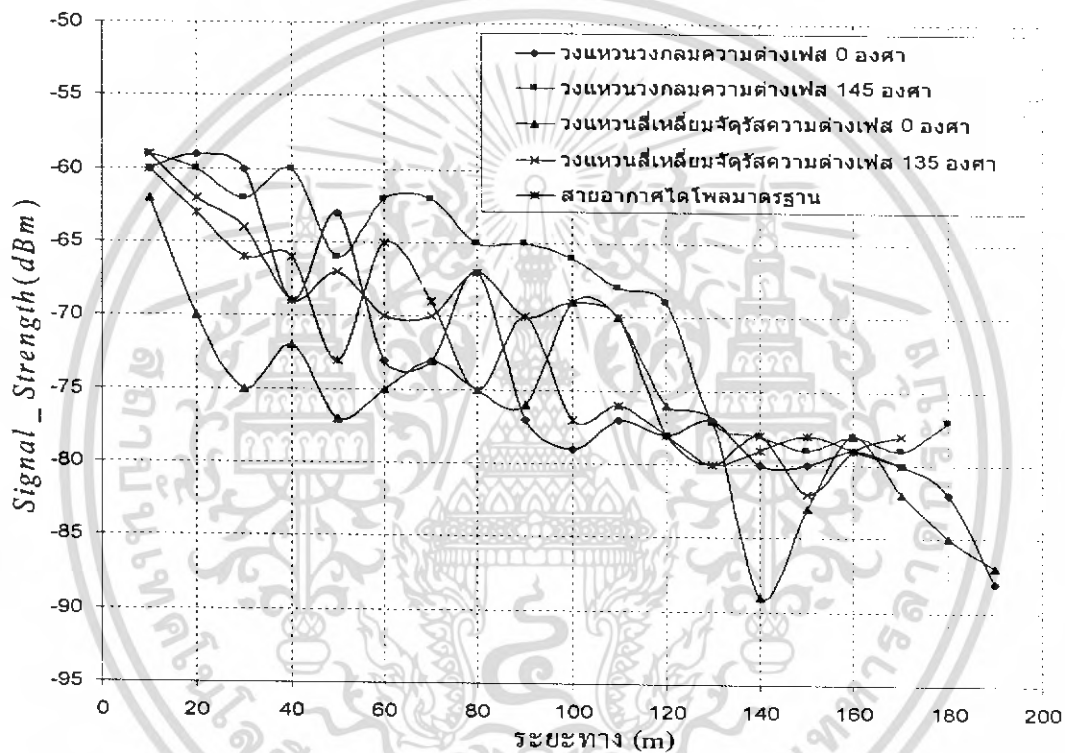
ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบ

พารามิเตอร์	ด้านสถานีฐาน	ด้านลูกข่าย
กำลังงานส่ง ( $P_t$ )	15 dBm	-
การสูญเสียเนื่องจากสายนำสัญญาณ ( $L_f$ )	0.6 dB (LRM-195)	0 dB
อัตราขยายสายอากาศ ( $G_f$ )	วงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส ( $0^\circ$ ) = 5.57dBi วงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส ( $135^\circ$ ) = 2.36dBi วงแหวนวงกลม ( $0^\circ$ ) = 5.297dBi วงแหวนวงกลม ( $145^\circ$ ) = 1.272dBi	0 dBi
ความสูงสายอากาศ	$h_t = 2$ m	$h_r = 1.5$ m
เครื่องรับส่ง	D-Link DWL-2000 AP+	Cisco Aironet 350 Series Client Adapter
ระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับลูกข่าย ( $R$ )	2 – 450 m	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

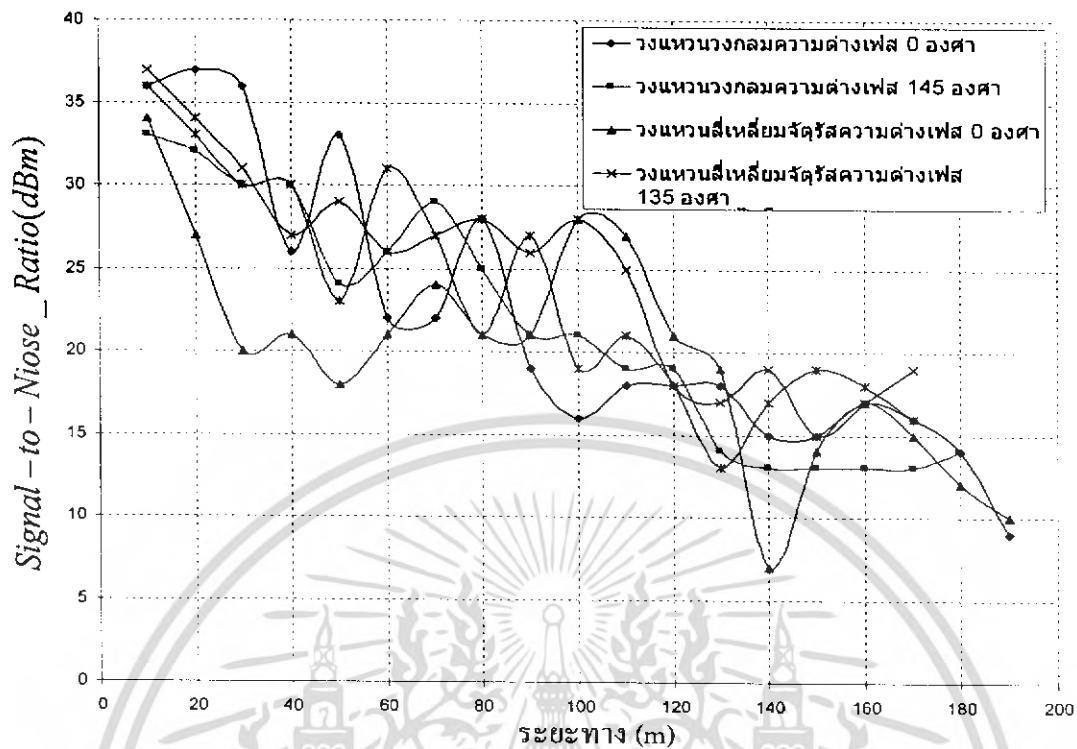
### 5.6 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio)

อัตราความแรงของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนนั้นเป็นส่วนที่มีความสำคัญมากเพราะเป็นตัวบอถึงคุณภาพของสัญญาณในระบบสื่อสารว่าดีเพียงใด เรื่องสำคัญที่ควรพิจารณาเมื่อทำการปฏิบัติการเกี่ยวกับสัญญาณที่มีกำลังอยู่ในระดับที่ต่ำคือเราจะพบว่าสัญญาณรบกวนมักจะเข้ามามีอิทธิพลครอบงำสัญญาณนั้น การที่จะบอกว่าสัญญาณนั้นถูกรบกวนโดยสัญญาณรบกวนมากน้อยเท่าใดนั้นสิ่งที่บอกได้อย่างหนึ่งก็คือ ใช้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเป็นตัวช่วยบอถึงความแตกต่างระหว่างค่ากำลังของสัญญาณทั้งสองจากรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นความแรงของสัญญาณมีค่าลดลงเช่นเดียวกับค่าอัตราความแรงของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.5 แสดงค่าความแรงของสัญญาณเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น

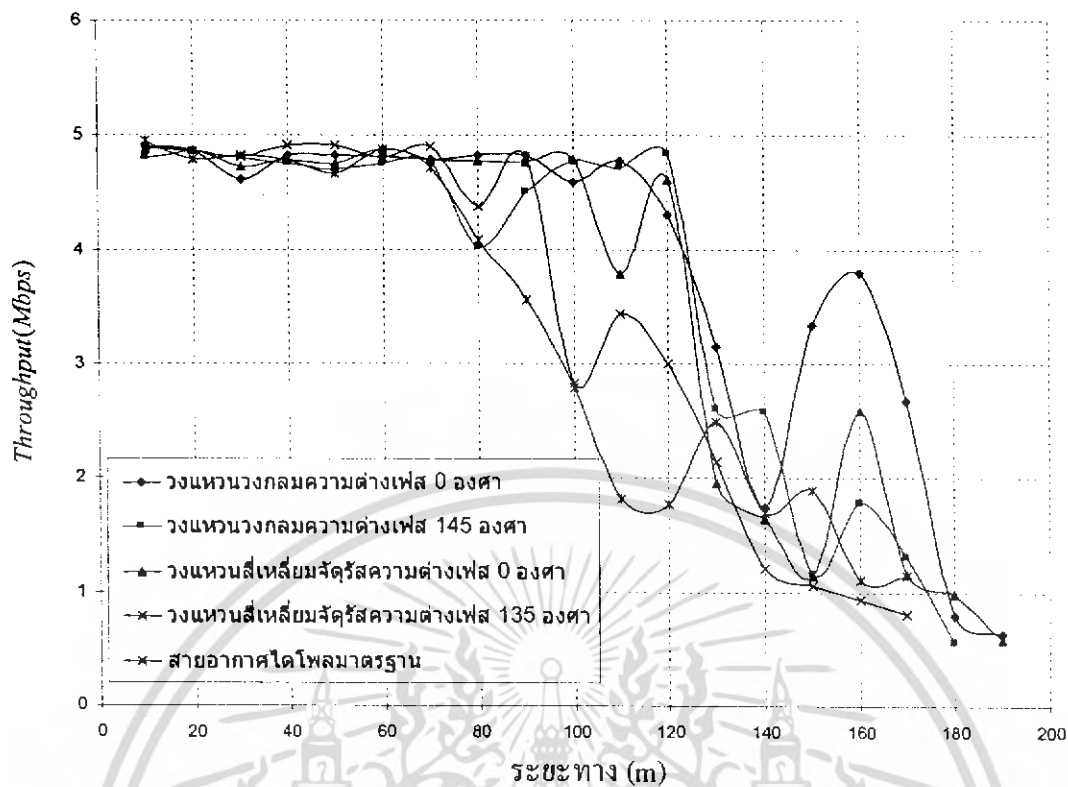
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 แสดงค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น

### 5.7 ผลการทดสอบระยะบริการและค่าวิสัยสมารถที่ Transmission Data Rate 11 Mbps

การทดสอบค่าวิสัยสมารถทำได้โดยใช้โปรแกรม Chariot ซึ่งขั้นตอนการทำทดสอบเริ่มจากลูกข่ายส่งไฟล์คำสั่ง (Scrip) ไปยังคอมพิวเตอร์ด้านสถานีฐาน เพื่อเตรียมความพร้อมของโปรแกรมทั้งด้านรับและด้านส่ง จากนั้นคอมพิวเตอร์ด้านส่งทำการส่งไฟล์ขนาด 100ไบต์ผ่านสถานีฐานไปยังลูกข่าย แล้วทำการคำนวณค่าวิสัยสมารถ ในการทดสอบแต่ละครั้งทำการวัดและบันทึกผลที่ได้เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง ในการทดสอบระยะบริการและค่าวิสัยสมารถที่ Transmission Data Rate 11 Mbps ของมาตรฐาน IEEE 802.11b ซึ่งเป็นการพัฒนามาตรฐานต่อเนื่องจากมาตรฐานกลาง IEEE 802.11 DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) ซึ่งสามารถส่งข้อมูลได้สูงถึง 11 Mbps ในคลื่นความถี่ 2.4 GHz โดยใช้ เทคโนโลยี CCK (Complementary Code Keying) โดยได้รับการยอมรับให้เป็นมาตรฐานกลางของเครือข่ายไร้สายซึ่งรับรองมาตรฐานโดย Wi-Fi Alliance แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 5.7 ผลการทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศที่ Transmission Data Rate 11Mbps

ผลจากการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศเมื่อพิจารณาจากค่าวิสัยสามารถ(throughput) พบว่าสายอากาศโพรบคู่กระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสความต่างเฟส 0 องศา 135 องศา และ สายอากาศโพรบคู่กระตุ้นวงแหวนวงกลมความต่างเฟส 0 องศา 145 องศาจะรับสัญญาณได้ และ ระยะทางที่ดีกว่า และ ทำการเปรียบเทียบค่าวิสัยสามารถที่มากกว่า 4 Mbps ขึ้นไปพบว่าสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบทุกตัวให้ค่าวิสัยสามารถที่มากกว่าสายอากาศไดโพลที่ติดมากับแอ็กเซสพอยน์(access point) และ ระยะทางสูงสุดที่ให้ค่าอัตราหลุดที่มากกว่า 4 Mbps ของสายอากาศต่างๆ มีค่าดังนี้ สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสความต่างเฟส 0 องศา, 135 องศา ได้ระยะทาง 120 เมตร และ 90 เมตร สายอากาศวงกลมความต่างเฟส 0 องศา, 145 องศา ได้ระยะทางเท่ากับ 120 เมตร เท่ากัน สำหรับสายอากาศไดโพลที่ติดมากับแอ็กเซสพอยน์ได้ระยะทางเท่ากับ 80 เมตร

## 5.8 สรุป

เนื้อหาบทนี้กล่าวถึงมาตรฐาน IEEE 802.11 และ การทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศต่างที่ได้ทำการสร้างขึ้นและเปรียบเทียบกับสายอากาศไดโพลที่ติดมากับแอ็กเซสพอยน์ พบว่าสายอากาศที่ให้เกนสูง และการโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวเอียง 45 องศา จะส่งผล ดีกว่าในเรื่องของการรับสัญญาณได้ไกลกว่าแต่ส่วนของสายอากาศที่ให้การโพลาไรซ์แบบวงกลม ในส่วนของสายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟส 145 องศา ส่งผลดีกว่าในเรื่องของการรับคลื่นคือทำการหมุนสายอากาศส่งไปในทิศทางต่างๆ ผลที่ได้สายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟส 145 องศา จะรับสัญญาณดีกว่า และทำการเปรียบเทียบกับสายอากาศไดโพล จะเห็นว่าสายอากาศที่สร้างขึ้นจะรับสัญญาณดีกว่าสายอากาศไดโพลที่ติดมากับแอ็กเซสพอยน์ ซึ่งผลการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศจากระยะบริการสูงสุดและค่าวิสัยสามารถซึ่งจะมีความเหมาะสม และ นำไปประยุกต์ใช้กับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบจุดต่อจุดหรือจุดต่อหลายจุดในพื้นที่แคบตามแนวยาวซึ่งสายอากาศที่สร้างขึ้นให้ค่าระยะทางที่มากกว่า เมื่อค่าวิสัยสามารถที่มากกว่า 4 Mbps

## บทที่ 6

### วิจารณ์และบทสรุป

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์โพลาริซของสายอากาศวงแหวนป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่สายอากาศชนิดนี้ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางซึ่งมีประโยชน์อย่างมากที่จะนำไปใช้งานเป็นสายอากาศสำหรับการสื่อสารแบบจุดต่อจุดหรือจุดต่อหลายจุดซึ่งสายอากาศชนิดนี้มีลักษณะโครงสร้างไม่ซับซ้อนและมีความแข็งแรง วัสดุที่ใช้สร้างหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด ดังนั้นการประยุกต์ใช้งานของสายอากาศชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับการสื่อสารบริเวณพื้นที่ที่แคบตามแนวยาว เช่น ทางด่วนและรถไฟใต้ดิน เป็นต้น

สำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่และวงแหวนวงกลมนั้นในการพิจารณาขั้นแรกจะทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ คือ ค่าความกว้างของวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส(a) ค่ารัศมีของวงแหวนวงกลม ( $r_0$ ) ค่าความยาวของวงแหวน(c) โดยจะพิจารณาให้เกิดโหมด  $TE_{10}$  หรือ  $TE_{01}$  ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสและโหมด  $TE_{11}$  สำหรับท่อนำคลื่นวงกลม ดังนั้นขนาดของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะอยู่ในช่วง  $\lambda/2 < a < \lambda/\sqrt{2}$  และค่ารัศมีของท่อนำคลื่นวงกลมจะอยู่ในช่วง  $0.293\lambda < r_0 < 0.486\lambda$

สำหรับการพิจารณาหาขนาด รัศมีของท่อนำคลื่น และความยาวโพรบนั้นจะใช้โปรแกรม NEC 2 ในการวิเคราะห์หาค่าที่จะทำให้การโพลาริซของสายอากาศเป็นแบบเชิงเส้นและแบบวงกลมและในขณะเดียวกันก็ต้องมีค่า คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เพราะฉะนั้นจะได้ค่าพารามิเตอร์ที่ให้ค่าการ โพลาริซเป็นแบบเชิงเส้นสำหรับสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส ค่าขนาดของท่อนำคลื่น (a) มีค่าเท่ากับ 0.694 $\lambda$  ค่าความยาวของท่อนำคลื่นมีค่าเท่ากับ(c)0.25 $\lambda$  และความยาวโพรบมีค่าเท่ากับ (l) มีค่าเท่ากับ 0.26 $\lambda$  สำหรับรัศมีของสายอากาศวงแหวนวงกลมมีค่าเท่ากับ 0.449 $\lambda$  ค่าความยาวของท่อนำคลื่นมีค่าเท่ากับ (c)0.28 $\lambda$  และความยาวโพรบมีค่าเท่ากับ (l) มีค่าเท่ากับ 0.241 $\lambda$  การใช้โปรแกรม NEC 2 มีข้อจำกัดในเรื่องของจำนวนเซกเมนต์ที่ใช้ในการจำลองจึงไม่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่มีความละเอียดและมีขนาดใหญ่มากๆ เพราะจะใช้เวลาในการประมวลผลค่อนข้างมาก

ส่วนในบทที่ 4 จะกล่าวถึงการทดสอบสายอากาศในส่วนของทดสอบสายอากาศจะทำการทดสอบ ได้ทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราขยายของสายอากาศ การโพลาริซของสายอากาศ และคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์และ ในบทที่ 5 จะกล่าวถึงมาตรฐานและการประยุกต์ใช้งาน คือ มาตรฐานของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย หรือ WLAN (Wireless LAN) คือ มาตรฐาน IEEE802.11 สำหรับการประยุกต์ใช้งาน จะทำ การทดสอบค่าความแรงของสัญญาณ ระยะบริการ สูงสุดและค่าวิสัยสามารถของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยใช้สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟส 0 องศา และ ความต่างเฟส 135 องศา และ สายอากาศวงแหวนวงกลมป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟส 0 องศา และความต่างเฟส 145 องศา เป็นสายอากาศของสถานีฐาน และ วิเคราะห์ผลการทดสอบ เปรียบเทียบ กับสายอากาศไดโพลที่ติดมากับแท่งเซสพอยน์

การประเมินประสิทธิภาพสายอากาศในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า สายอากาศที่ให้เกนสูงและ การโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวเอียง 45 องศา จะส่งผล ดีกว่าในเรื่องของการรับได้ไกลกว่าแต่ส่วนของสายอากาศที่ให้การ โพลาไรซ์แบบวงกลมในส่วนของเสาอากาศวงแหวนวงกลม ป้อนสัญญาณด้วยโพรบคู่ความต่างเฟส 145 องศา พบว่าสายอากาศที่ให้การโพลาไรซ์แบบวงกลม ส่งผล ดีกว่าในเรื่องทิศของการรับคลื่น ก็มีความยืดหยุ่นในการใช้งานมากกว่า การวิเคราะห์และการทดสอบนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการออกแบบสายอากาศสำหรับ โครงข่ายท้องถิ่นไร้สายภายนอกอาคาร ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] S.Kosulvit, "A Bidirectional Antenna using a Probe Excited Ring," Doctoral Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2001.
- [2] N.Marcuritz, "Waveguide Handbook", London : Mc Graw -Hill, 1951
- [3] Constantire A. Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics", John Wiley & Sons, Inc., 1998
- [4] Constantire A. Bulanis, "Antenna Theory Analysis and Design", 2<sup>nd</sup> ed., John eiley & Son ; Inc., 1997
- [5] Product Data Sheet for CISCO (Aironet) Series 340 Adapters, Cisco Systems of San Jose, CA, 2001, [http://www.cisco.com/warp/public/cc/pd/witc/ao340ap/prodlit/airoi\\_ds.pdf](http://www.cisco.com/warp/public/cc/pd/witc/ao340ap/prodlit/airoi_ds.pdf).
- [6] Product Data Sheet D-Link DWL-2000AP+, D-Link Co., Ltd., 2004.
- [7] G.J.Burke and A.J. Poggio. Numerical Eletromagnetics Code (NEC). Lawrence Livermore Nat. Lab., Livermore, CA, 1981
- [8] พิชัย ภัคดีพานิชเจริญ, "ทฤษฎีและการใช้งานความถี่ย่านไมโครเวฟ", สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซนเตอร์, 2536
- [9] อำนาจ มีมงคล, อรรณพ ชันชีกุล "ออกแบบและติดตั้งเครือข่าย Wireless LAN", พิมพ์ครั้งที่ 1 ด้านสุทธการพิมพ์, 2547
- [10] บัณฑิต โรจน์อารยานนท์, "วิศวกรรมสายอากาศ", พิมพ์ครั้งที่ 4 สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537
- [11] กมลลดา สุโกศล, จรูญ ตะเกาทอง, จิรายุทธ มาลาวงษ์, "สายอากาศอัตรการขยายสูงทิศทางเดียว สำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายภายนอกอาคาร", สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์

โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ จะใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 (Numerical Electromagnetic Code : NEC2) ซึ่งเป็นที่ถูกพัฒนาโดยห้องปฏิบัติการแห่งชาติลอเรนซ์ ลีเวอร์มอร์ (Lawrence Livermore National Laboratory) ประเทศสหรัฐอเมริกา และเป็นโปรแกรมประเภท ฟรีแวร์ (Freeware) ซึ่งผู้ใช้สามารถดาวน์โหลด (Download) มาใช้ได้โดยง่าย การจะสั่งให้โปรแกรมทำงานนั้น ผู้ใช้จะต้องจัดเรียงรหัสทางคอมพิวเตอร์ (User - Oriented Computer Code) ให้กับโปรแกรมเพื่อให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์การตอบสนองของทางแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศ และโครงสร้างที่เป็นโลหะ ใดๆ ที่มีรูปทรงไม่เจาะจง รหัสทางคอมพิวเตอร์ของโปรแกรมที่ผู้ใช้จะต้องใส่เข้าไปนั้น ก็คือ การสร้างโครงสร้างของสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยเส้นลวดเล็ก ๆ (Wire) หรือ พื้นผิว (Surface) จำนวนมาก ซึ่งในกรณีที่โครงสร้างถูกแทนด้วยเส้นลวด โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้า (Electric Field Integral Equation : EFIE) ในการหากระแสเหนี่ยวนำ (Induced Current) บนโครงสร้างนั้น ซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิด (Source) หรือ สนามที่ตกกระทบ (Incident Field) และในกรณีที่โครงสร้างถูกแทนด้วยพื้นผิว โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Integral Equation : MFIE) ในการหาค่าของกระแสเหนี่ยวนำที่ต้องการ การกระตุ้นสามารถที่จะเป็นได้ทั้งแหล่งที่กำเนิดแรงดันที่ ป้อน เข้าไป (Applied Voltage Source) หรือ คลื่นระนาบที่ตกกระทบ (Incident Plane Wave) NEC2 สามารถใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสเหนี่ยวนำและประจุ สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กระยะใกล้และไกล ภาค ตัดขวางเรดาร์ (Radar Cross Section : RCS) อิมพีแดนซ์ แอดมิตแตนซ์ (Admittance) อัตราขยาย (Gain) และสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) การใช้กำลังงาน (Power Budget) และการเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศ (Mutual Coupling)

สำหรับสายอากาศที่นำเสนอในปฏิญญาฉบับนี้ ได้ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของสายอากาศ โดยการแทนโครงสร้างของสายอากาศเส้นลวดขนาดเล็ก ดังนั้น สมการที่ใช้จึงเป็นสมการอินทิกรัล เชิงสนามไฟฟ้า ซึ่งสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้านี้เหมาะที่จะนำมาใช้แก้ปัญหาโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก มีพื้นผิวที่มีความหนาไม่มาก และไม่มีลักษณะเป็นตัวนำปิดที่บดได้ดีกว่า การใช้สมการอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็ก รูปแบบของสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าที่ใช้ใน NEC2 มีรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

### สมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าในอากาศว่าง

รูปแบบของสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าที่ใช้ใน NEC2 สำหรับสนามไฟฟ้าของการกระจายกระแส  $J$  คือ

$$\bar{E}(\bar{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int \bar{J}(\bar{r}') \cdot \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') dV' \quad (ก.1)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') &= (k^2 \bar{I} + \nabla \nabla) g(\bar{r}, \bar{r}') \\ g(\bar{r}, \bar{r}') &= \exp(-jk|\bar{r} - \bar{r}'|) / |\bar{r} - \bar{r}'| \\ k &= \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \\ \eta &= \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} \end{aligned}$$

และ แบบแผนทางเวลา (Time Convention) คือ  $\exp(j\omega t)$   $\bar{I}$  คือ เอกลักษณ์คู่ (Identity Dyad)  $\hat{x}\hat{x} + \hat{y}\hat{y} + \hat{z}\hat{z}$  เมื่อการกระจายกระแสถูกจำกัดให้อยู่บนพื้นผิวของตัวนำที่มีค่าความนำสมบูรณ์สมการ (ก.1) จะกลายเป็น

$$\bar{E}(\bar{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_S \bar{J}_s(\bar{r}') \cdot \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') dA' \quad (ก.2)$$

เมื่อ  $\bar{J}_s$  เป็นความหนาแน่นกระแสพื้นผิว จุดสังเกต  $\bar{r}$  จะถูกกำหนดให้อยู่บนพื้นผิว S ดังนั้น  $\bar{r} = \bar{r}'$  ถ้า  $\bar{r}$  เข้าใกล้ S ในลักษณะก้ำกัยลิมิต สมการ (ก.2) จะเป็น

$$\bar{E}(\bar{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_S \bar{J}_s(\bar{r}') \cdot \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') dA' \quad (ก.3)$$

เมื่ออินทิกรัลค่าหลัก  $\int$  ถูกใช้ เพราะว่า  $g(\bar{r}, \bar{r}')$  ไม่จำกัดขอบเขต

สมการอินทิกรัลของกระแสเหนี่ยวนำ S โดยสนามคกกระทบ  $\bar{E}'$  สามารถหาได้จากสมการ (ก.3) และ เงื่อนไขขอบเขต สำหรับ  $\bar{r}$  ที่แปรผันตาม S

$$\hat{n}\bar{r} \times [\bar{E}^s(\bar{r}) + \bar{E}'(\bar{r})] = 0 \quad (ก.4)$$

เมื่อ  $\hat{n}\bar{r}$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับพื้นผิวที่  $\bar{r}$  และ  $\bar{E}^s$  เป็นสนามเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำ  $\bar{J}_s$  เมื่อแทนค่า  $\bar{E}^s$  ในสมการ (ก.4) ด้วยสมการ (ก.3) สามารถเขียนสมการ (ก.4) ได้เป็น

$$-\hat{n}(\bar{r}) \times \bar{E}'(\bar{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \hat{n}(\bar{r}) \int_S \bar{J}_s(\bar{r}') \cdot (k^2 \bar{I} + \nabla \nabla) g(\bar{r}, \bar{r}') dA' \quad (ก.5)$$

สมการอินทิกรัลเวกเตอร์ในสมการ (ก.5) สามารถถูกลดให้กลายเป็นสมการอินทิกรัลเชิงสเกลาร์ เมื่อพื้นผิว ตัวนำ S ถูกแทนที่ด้วยเส้นลวดทรงกระบอกบาง ๆ ซึ่งจะทำให้วิธีการแก้ปัญหาทางง่ายขึ้นมาก การสมมติที่ประยุกต์ใช้กับเส้นลวดบาง เรียกว่า วิธีการประมาณเส้นลวดบาง (Thin-Wire Approximation) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (1) กระแสตามขวางที่สัมพันธ์กับกระแสตามแกน ไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา
- (2) การเปลี่ยนแปลงโดยรอบในกระแสตามแกน ไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา
- (3) กระแสสามารถแทนได้ด้วยกระแสเชิงเส้น (Filament) บนแกนเส้นลวด
- (4) เงื่อนไขขอบเขตของสนามไฟฟ้าจะถูกบังคับให้มีเฉพาะในทิศทางตามแนวแกนเท่านั้น

การประมาณนี้สามารถนำมาใช้ได้เมื่อ รัศมีของเส้นลวดมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่น และความยาวเส้นลวดมีค่ามาก ๆ นอกจากนี้ สมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป ในกรณีที่รัศมีของเส้นลวดมีขนาดใหญ่มาก จนไม่สามารถใช้วิธีการประมาณเส้นลวดบางได้นั้น ก็ได้ถูกรวมไว้ใน NEC2 ด้วย ซึ่งการประมาณแบบนี้ มีชื่อเรียกว่า การขยายออกของการประมาณเส้นลวดบาง (Extended Thin Wire Approximation)

จากการสมมติในข้อ (1) (2) และ (3) กระแสพื้นผิว  $\bar{J}_s(\bar{r})$  บนเส้นลวดที่มีรัศมี  $a$  สามารถแทนด้วยกระแสของเชิงเส้น (Filament Current)  $I$  เมื่อ

$$I(s)\hat{s} = 2\pi a \bar{J}_s(\bar{r})$$

$s$  = ระยะทางตามแกนเส้นลวดที่  $\bar{r}$  และ

$\hat{s}$  = เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่สัมผัสกับแกนเส้นลวดที่  $\bar{r}$

สมการ (ก.5) จะกลายเป็น

$$-\hat{s}(\bar{r}) \times \bar{E}'(\bar{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \hat{s}(\bar{r}) \int_L \bar{I}(s') \cdot \left( k^2 \hat{s}' + \nabla \frac{\partial}{\partial s'} \right) g(\bar{r}, \bar{r}') ds' \quad (ก.6)$$

เมื่อการอินทิเกรตกระทำตามความยาวของเส้นลวด การบังคับเงื่อนไขขอบเขตให้มีเฉพาะทิศทางในแนวแกน ทำให้สมการ (ก.6) ลดรูปลงเป็นสมการสเกลาร์

$$-\hat{s}(\bar{r}) \times \bar{E}'(\bar{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_L \bar{I}(s') \cdot \left( k^2 \hat{s}' \cdot \hat{s}' - \frac{\partial^2}{\partial s \partial s'} \right) g(\bar{r}, \bar{r}') ds' \quad (ก.7)$$

$\bar{r}$  เป็นจุดที่  $s'$  บนแกนเส้นลวด ในขณะที่  $\bar{r}$  เป็นจุดที่  $s$  บนพื้นผิวเส้นลวด  $|\bar{r} - \bar{r}'| \geq a$  และการอินทิเกรตก็จะมีขอบเขต

## ภาคผนวก ข

วิธีการทดสอบค่าพารามิเตอร์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยายของสายอากาศ  
การทดสอบค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ

## - อุปกรณ์การทดสอบ

1. Network Analyzer
2. สายอากาศที่ออกแบบ
3. N-Type 50  $\Omega$  Calibration Kit
4. เครื่อง Plotter

## - ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการปรับสถานะเครื่อง Network Analyzer เป็นแบบ Two Port (S22)
2. กดปุ่ม Center ป้อนความถี่กลางที่ 2.45GHz
3. กดปุ่ม Span ป้อนความถี่ที่ต้องการห่างระหว่างช่องมากที่สุดเท่าไรเลือก 200MHz
4. กดปุ่ม MRK (marker)
  - ให้ Marker 1 อยู่ที่ความถี่เริ่มต้น (2.4GHz)
  - ให้ Marker 2 อยู่ที่ความถี่ใช้งาน (2.45GHz)
  - ให้ Marker 3 อยู่ที่ความถี่สิ้นสุด (2.5 GHz)
5. กดปุ่ม CAL (Calibration) เลือกที่ S22 เป็นการทำการ calibrate เครื่องโดยจะขึ้นข้อความ OPEN, SHORT, LOAD
6. นำตัว Calibrator แบบ OPEN มาต่อกับสายนำสัญญาณแล้วกดปุ่ม OPEN แล้วทำการถอดตัว Calibrator
7. นำตัว Calibrator แบบ SHORT มาต่อกับสายนำสัญญาณแล้วกดปุ่ม SHORT แล้วทำการถอดตัว Calibrator
8. นำตัว Calibrator แบบ Broadband Load มาต่อกับสายนำสัญญาณแล้วกดปุ่ม Broadband แล้วกด Done Load 2 ครั้งทางจอภาพจะแสดงตัวหนังสือ " Cor " (Calibration) แล้วทำการถอดตัว Load ออก
9. ทำการกดปุ่ม Format จะมีเมนูให้เลือกทำการเลือกที่ Smith Chart
10. นำตัว Calibrator แบบ SHORT มาต่อกับสายนำสัญญาณอีกครั้งหนึ่งเพื่อทำการปรับสเกลอ้างอิงโดยทำการปรับที่ Electrical Delay เลื่อนไปที่ตำแหน่งของลูกศรไปที่ตำแหน่งขวามือสุดของ Smith Chart
11. ขั้นตอนที่ 1-10 เป็นขั้นตอนการ Calibration เครื่อง
12. นำคลื่นปลายเปิดหนึ่งด้านมาทำการต่อเครื่อง Network Analyzer
13. กดปุ่ม Format เครื่องจะแสดงค่า LOG MAG, Smith Chart , SWR, PHASE และ DELAY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. เลือกที่ SWR เครื่องจะแสดงค่า SWR ของท่อนำคลื่นที่วัดออกมาได้ค่าที่วัดต้องมีค่าน้อยกว่า 2 เข้าใกล้ 1 ให้โดยหากค่าที่ได้ยังมีค่ามากกว่า 2 ให้ทำการปรับแต่งค่า ความยาวของ โพรบ สายอากาศตัวกระตุ้นจนกว่าจะได้ค่า SWR เข้าใกล้ 1 มากที่สุด เท่าที่จะสามารถทำได้หลังจากนั้นทำการกดปุ่มcopy เพื่อทำการพิมพ์รูปออกมา
15. ทำการเลือกที่ LOG MAG และ Smith Chart ทำการกดปุ่มcopy เพื่อทำการพิมพ์รูปออกมา

#### การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

##### - อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

1. เครื่อง Network Analyzer
2. สายนำสัญญาณ
3. Connector แบบ N-Type และ แบบ SMA
4. ขาดังสำหรับการติดตั้งสายอากาศ
5. เครื่อง TURN TABLE ที่ใช้ในการหมุนสายอากาศตัวรับ
6. สายอากาศที่ทำการออกแบบ

##### - วิธีการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

1. เครื่อง Network Analyzer ตั้งไว้ที่ความถี่ Center 2.45GHz
2. ต่อสายนำสัญญาณกับสายอากาศตัวส่งเข้ากับ Signal Generator Channel :Port 1 เพื่อเป็นตัวส่งสัญญาณ
3. ต่อสายนำสัญญาณกับสายอากาศตัวรับเข้ากับ Signal Generator Channel :Port 2 เพื่อเป็นตัวรับสัญญาณ
4. ซึ่งระยะห่างของสายอากาศตัวส่งและตัวรับต้องมีระยะห่างไม่น้อยกว่า

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad \text{เมตร}$$

โดยที่ R คือระยะห่างระหว่างสายอากาศรับกับสายอากาศส่ง

D คือมิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศรับ + มิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศส่ง

5. ทำการหมุนสายอากาศตัวรับที่ติดตั้งบนเครื่อง TURN TABLE มาที่ 0 องศา ปรับเครื่อง TURN TABLE ให้หมุนทีละ 5 องศา จนครบ 360 องศาพร้อมทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Network Analyzer
6. ทำการเปลี่ยนระนาบการวัด
7. นำค่าที่วัดได้จากการทดสอบสายอากาศแต่ละค่ามาทำการ Normalize แล้วนำไปทำการ Plot กราฟ ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม NEC กับผลการทดลองที่ได้จากการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าอัตราขยายของสายอากาศ

1. เครื่อง Network Analyzer
2. สายนำสัญญาณ
3. Connector แบบ N-Type และ แบบ SMA
4. ขาดังสำหรับการติดตั้งสายอากาศ

- วิธีการทดสอบหาค่าอัตราขยายของสายอากาศ

1. เครื่อง Network Analyzer ตั้งไว้ที่ความถี่ Center 2.45GHz
2. ต่อสายนำสัญญาณกับสายอากาศตัวส่งเข้ากับ Signal Generator Channel :Port 1 เพื่อเป็นตัวส่งสัญญาณ
3. ต่อสายนำสัญญาณกับสายอากาศตัวรับเข้ากับ Signal Generator Channel :Port 2 เพื่อเป็นตัวรับสัญญาณ
4. ซึ่งระยะห่างของสายอากาศตัวส่งและตัวรับต้องมีระยะห่างไม่น้อยกว่า
 
$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda}$$
 เมตร
5. ทำการ Shot ปลายสาย จากนั้นกดปุ่ม MEAS (Measurement) เลือกที่ S12
6. กดปุ่ม CAL (Calibration) เลือกที่ Resposec แล้วเลือกที่ Thu เป็นการทำการ calibrate เครื่อง
7. ทำการอ่านค่าแล้วนำมาคำนวณหาค่าอัตราขยายตามสมการฟรีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## การวิเคราะห์แบบจำลองอากาศว่าง และแบบจำลองสองรังสี

## แบบจำลองอากาศว่าง

แบบจำลองนี้ใช้ทำนายความเข้มของสัญญาณในกรณีที่ไม่มีวัตถุใด ๆ ขวางกั้นการเดินทางของคลื่น โดยพิจารณาสัญญาณไซน์ซอซอด์ที่ปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดแบบจุดซึ่งแพร่กระจายคลื่นในสุญญากาศ (อากาศว่าง) แหล่งกำเนิดนี้เรียกว่า “ตัวแพร่กระจายแบบไอโซทรอปิก (Isotropic radiator)” ถ้ากำหนดให้กำลังงานที่แพร่กระจายออกมาและระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแทนด้วย  $P_{rad}$  มีหน่วยเป็นวัตต์และ  $R$  มีหน่วยเป็นเมตร ตามลำดับ ดังนั้นขนาดของพอยน์ติงเวกเตอร์ของคลื่น (กำลังงานต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย) เขียนได้ดังนี้

$$P_{fs} = \frac{P_{rad}}{4\pi R^2} \quad W/m^2 \quad (ก.1)$$

กรณีสายอากาศไม่ใช่ตัวแพร่กระจายแบบไอโซทรอปิกและระยะห่างมีค่ามากกว่าขนาดของสายอากาศ ดังนั้นสามารถแทน  $P_{rad}$  ด้วย  $P_i G_i$  โดยที่

$$\begin{aligned} P_{rad} & \text{ คือ กำลังงานที่เข้าต่อสายอากาศ} \\ G_i & \text{ คือ อัตรายายสายอากาศส่ง} \end{aligned} \quad (ก.2)$$

ความเข้มสนามไฟฟ้าเขียนได้ดังนี้

$$E_{fs} = \sqrt{Z_{fs} P_{fs}} \quad (ก.3)$$

โดยที่  $Z_{fs}$  คืออิมพีแดนซ์อากาศว่างซึ่ง

$$Z_{fs} = \sqrt{\mu_{fs} / \epsilon_{fs}} \approx 120\pi = 377\Omega \quad (ก.4)$$

เมื่อ  $\mu_{fs}$  และ  $\epsilon_{fs}$  คือค่าความซึมซาบแม่เหล็กและค่าสภาพยอมไฟฟ้า ตามลำดับในกรณีอากาศว่าง

$$\mu_{fs} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ v-s/A.m} \quad (ก.5)$$

$$\epsilon_{fs} \approx (10^{-9} / 36\pi) \text{ F/m} = (10^{-9} / 36\pi) \text{ A-S/V.m} \quad (ก.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มสนามไฟฟ้าในอากาศว่างสำหรับกรณีที่ไม่ใช่ตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E_{fs} = \sqrt{120\pi \frac{P_r G_r}{4\pi R^2}} = \frac{\sqrt{30P_r G_r}}{R} \quad \text{V/m} \quad (\text{ก.7})$$

การแพร่กระจายคลื่นในสภาวะแวดล้อมใดๆ เมื่อ  $E_{rec}$  คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า  $P_{rec}$  และ  $G_r$  คือ กำลังงานรับที่สายอากาศ และ อัตราขยายสายอากาศรับ ตามลำดับ ดังนั้นค่ากำลังงานสูงสุดที่รับจากเครื่องรับโดยใช้ตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก คือ

$$E_{fs} = \frac{\lambda^2}{4\pi} P_{rec} G_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{E_{rec}}{Z_{fs}} G_r = \left( \frac{E_{rec} \lambda}{2\pi} \right)^2 \frac{G_r}{120} \quad (\text{ก.8})$$

อัตราส่วนระหว่างกำลังงานรับและส่ง คือ

$$\begin{aligned} \frac{P_r}{P_t} &= \left( \frac{E_{rec} \lambda}{2\pi} \right)^2 \frac{G_r}{120} \frac{(E_{fs} R)^2}{30G_t} & (\text{ก.9}) \\ &= \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_r G_t \left( \frac{E_{rec}}{E_{fs}} \right)^2 & (\text{กรณีทั่วไป}) \\ &= \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_r G_t & (\text{กรณีอากาศว่าง}) \end{aligned}$$

จากสมการที่ (ก.9) แสดงความสัมพันธ์และความแตกต่างความเข้มสนามไฟฟ้ารับ ระหว่างกรณีทั่วไปและแบบอากาศว่าง โดยสมการความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นคือ

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

$$= 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 20 \log_{10} \left( \frac{E_{fs}}{E_{rec}} \right) \quad (\text{ก.11})$$

$$= L_{fs} + L_{nfs} \quad (\text{ก.12})$$

โดยที่  $L_{nfs}$  คือ ความสูญเสียในสภาวะที่ไม่ใช่อากาศว่าง ซึ่งความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นในกรณีอากาศว่างสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

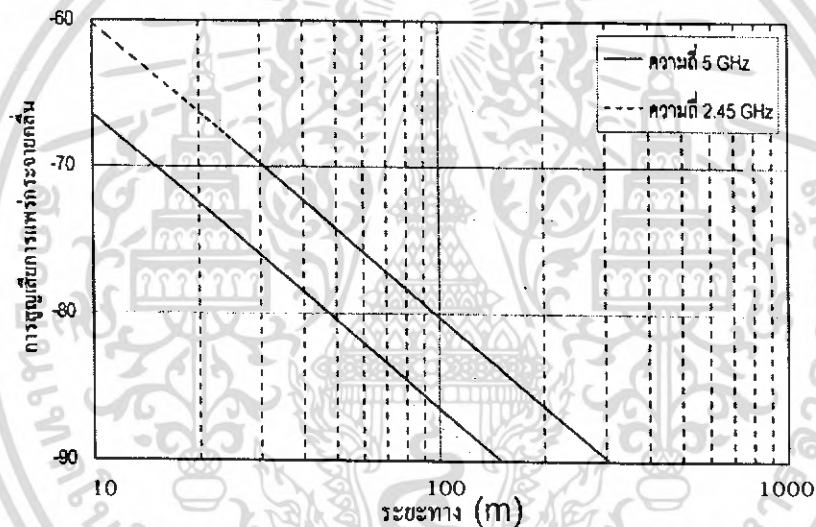
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_{fs} = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi 1,000 R_{km}}{299.8 / f_{MHz}} \right) \quad (ค.13)$$

$$= 32.45 dB + 20 \log_{10} (R_{km} f_{MHz}) \quad (ค.14)$$

$$= 36.58 dB + 20 \log_{10} (R_{km} f_{MHz}) \quad (ค.15)$$

ความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นจากสมการที่ (ค.13) ความถี่ใช้งานมีค่าเท่ากับ 2.45 GHz และ 5 GHz แสดงดังรูปที่ ค.1 ซึ่งพบว่าเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นสิบเท่าแล้วความสูญเสียการแพร่กระจายจะเพิ่มขึ้น 20 dB ถ้าระยะทางเท่ากันแต่ความถี่ใช้งานมีค่าต่างกันแล้ว ความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นจะไม่เท่ากัน โดยความถี่สูงกว่าจะมีความสูญเสียมากกว่า



รูปที่ ค.1 การสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นของแบบจำลองอากาศว่างที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5 GHz

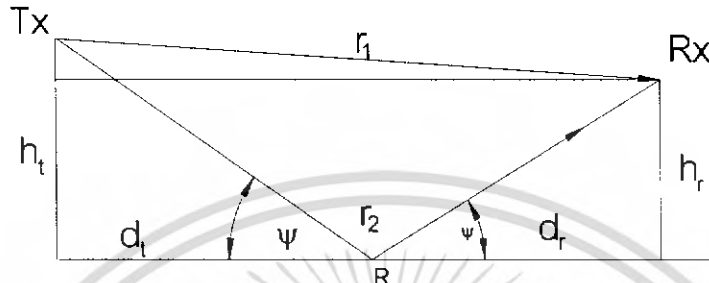
#### แบบจำลองสองรังสี

การสื่อสารแบบจุดต่อจุดในสภาวะแวดล้อมมีเส้นทางการมองเห็นระดับสายตา (LOS) ดังรูปที่ ค.2 คลื่นเดินทางตามเส้นทางตรง ( $r_1$ ) และเส้นทางสะท้อน ( $r_2$ ) จากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับ ความแตกต่างระหว่าง  $r_1$  และ  $r_2$  เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} r_2 - r_1 &= \sqrt{(h_t + h_r)^2 + R^2} - \sqrt{(h_t - h_r)^2 + R^2} \\ &\approx R \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{h_t + h_r}{R} \right)^2 \right] - R \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{h_t - h_r}{R} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (ค.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{2h_t h_r}{R}$$



รูปที่ ค.2 แบบจำลองสองรังสี

ความแตกต่างของเส้นทางเดินคลื่นทำให้เกิดความต่างเฟส เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda R} = 1.3343 \times 10^{-5} \frac{f_{MHz} h_t h_r}{R_{km}} \quad (\text{ค.17})$$

โดยที่ความสูงของสายอากาศมีหน่วยเป็นเมตร มุมสะท้อน  $\psi$  มีค่าเท่ากับ

$$\tan \psi = \frac{h_t}{R_t} = h_t \div \frac{h_t R}{h_t + h_r} = \frac{h_t + h_r}{R} \quad (\text{ค.18})$$

ในการสื่อสารย่าน VHF และ UHF สามารถยกเว้นบางสัญญาณที่สะท้อนแล้วมีผลกระทบน้อย ดังนั้นขนาดสนามไฟฟ้าที่สายอากาศรับสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$E_{rec} = E_{direct} + E_{reflection} = E_{direct} [1 + \eta e^{j\Delta}] \quad (\text{ค.19})$$

อัตราส่วนกำลังสองของสนามไฟฟ้ารับและส่ง คือ

$$\left| \frac{E_{rec}}{E_{direct}} \right|^2 \approx |1 + \eta e^{j\Delta}|^2 = 1 + |\eta|^2 + 2|\eta| \cos(\Delta + \xi) \quad (\text{ค.20})$$

โดยที่  $\eta$  คือ สัมประสิทธิ์เชิงซ้อนการสะท้อนและมีความสัมพันธ์กับมุมสะท้อน  $\psi$  คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta = \frac{\sin \psi - Z}{\sin \psi + Z} = |\eta| e^{j\epsilon} \quad (\text{ก.21})$$

อิมพีแดนซ์พื้นดินมีความสัมพันธ์กับค่า  $\epsilon_g$  ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกพื้นดิน มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Z = \sqrt{\epsilon_g - \cos^2 \psi} \approx \sqrt{\epsilon_g - 1} \quad (\text{สำหรับการโพลาริซแนวตั้ง}) \quad (\text{ก.22})$$

$$Z = \sqrt{\epsilon_g - \cos^2 \psi} / \epsilon_g \approx \sqrt{\epsilon_g - 1} / \epsilon_g \quad (\text{สำหรับการโพลาริซแนวนอน}) \quad (\text{ก.23})$$

ค่าของ  $\epsilon_g$  มีความสัมพันธ์กับค่าสภาพยอมไฟฟ้าของอากาศสว่าง ( $\epsilon_{fs}$ ) ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ ( $\epsilon$ ) และค่าความนำของพื้นดิน ( $\sigma$ ) ดังนี้

$$\epsilon_g = \epsilon - j \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_{fs}} = \epsilon - 1.796 \times 10^4 \frac{j\sigma}{f_{MHz}} \quad (\text{ก.24})$$

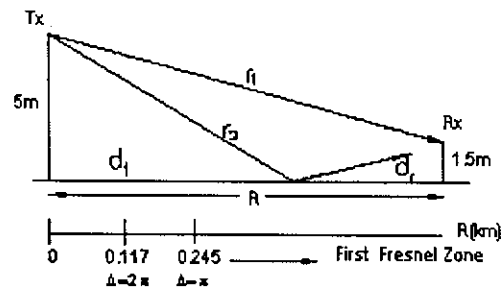
เนื่องจากผิวโลกมีค่า  $\sigma = 0.005 \text{ S/m}$  และ  $\epsilon = 15$  ได้

$$\epsilon_g = 15 - j90 / f_{MHz} \quad (\text{ก.25})$$

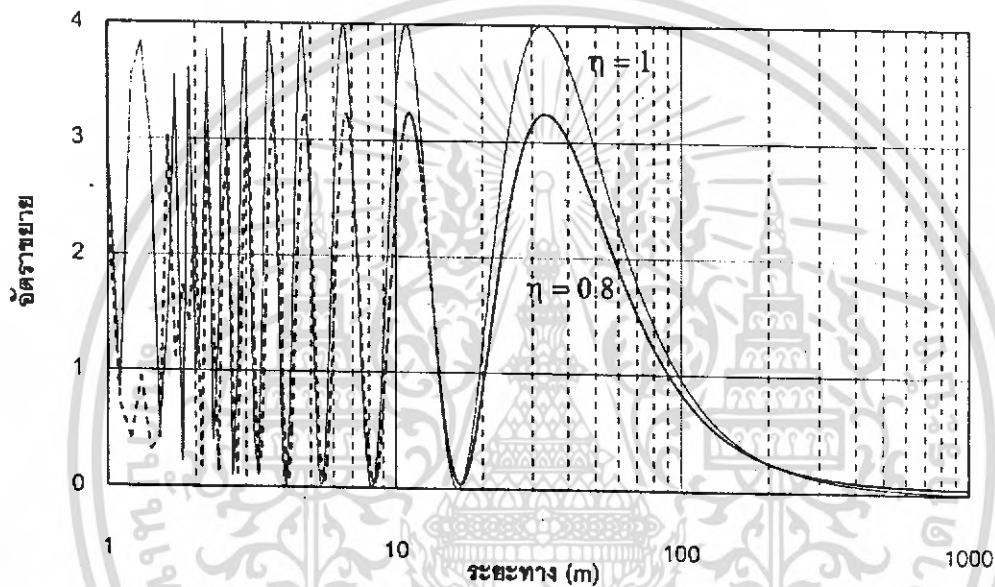
ที่ความถี่ 2.45 GHz ค่า  $Z$  เท่ากับ  $3.42 \angle -0.075$  และ  $0.25 \angle -0.065$  กรณีที่เป็นการโพลาริซแนวตั้งและการโพลาริซแนวนอน ตามลำดับ ดังนั้นมุมสะท้อนจะมีค่าน้อยมาก  $\eta \approx -1$  ดังนั้นเขียนสมการที่ (ก.20) ใหม่ได้ดังนี้

$$\left| \frac{E_{rec}}{E_{fs}} \right|^2 \approx 2(1 - \cos \Delta) = 4 \sin^2 \left( \frac{\Delta}{2} \right) = 4 \sin^2 \left( \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda R} \right) \quad (\text{ก.26})$$

จากสมการที่ (ก.25) แสดงว่าการแพร่กระจายคลื่นในสภาวะแวดล้อมมีเส้นทางการเดินแนวสายตาและพื้นมีลักษณะราบเรียบจะมีกำลังงานเพิ่มขึ้น 6 dB เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอากาศสว่าง โดยที่  $\Delta/2$  มีค่าเท่ากับ  $\pi/2$  คูณกับจำนวนเต็มคือแล้ว  $\sin(\Delta/2) = \pm 1$  ถ้า  $\Delta/2$  มีค่าเท่ากับ  $\pi$  คูณกับจำนวนเต็มแล้วคู่แล้ว  $\sin(\Delta/2) = 0$  การเปลี่ยนแปลงของมุมขึ้นอยู่กับความสูงของสายอากาศและระยะห่าง



รูปที่ ๓.3 ตัวอย่างแบบจำลองสองรังสี เมื่อ  $f = 2.45$  GHz



รูปที่ ๓.4 อัตราขยายเมื่อเปรียบเทียบกับความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นในอากาศว่างเมื่อ  $h_t = 5$  m  $h_r = 1.5$  m  $f = 2.45$  GHz

ถ้าสายอากาศสถานีฐานสูง 5 m สายอากาศลูกข่ายสูง 1.5 m และความถี่ 2.45 GHz จากสมการที่ 3.17 จะได้  $\Delta = 245\pi / R_{km}$  ถ้า  $R < 0.245$  km แล้ว ดังนั้นสมการที่ ๓.25  $\Delta/2$  มีค่ามากกว่า  $\pi/2$  ทำให้เกิดอัตราขยายออกสซิลเลต ขณะที่ระยะห่างระหว่างลูกข่ายและสถานีฐานเพิ่มมากขึ้น ถ้า  $R > 0.245$  km แล้วมุม  $\Delta/2$  มีค่าน้อยกว่า  $\pi/2$  เสมอ ทำให้อัตราสูญเสียไม่เกิดการออกสซิลเลตเมื่อระยะห่างระหว่างลูกข่ายและสถานีฐานเพิ่มขึ้น จากรูปที่ ๓.4 การเกิดออกสซิลเลตน้อยลงถ้าขนาดของ  $\eta$  มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง ระยะห่างที่ทำให้  $\Delta = n\pi$  หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_n = 4h_t h_r / n\lambda \quad (๓.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า  $R > d_1 = 4h_t h_r / \lambda$  แล้ว  $\Delta/2 < \pi/2$  และไม่เกิดการออสซิลเลตในสมการที่ (ค.25) ดังนั้นกำลังงานรับลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างลูกข่ายและสถานีฐานเพิ่มขึ้นเสมอ สำหรับค่าแห่งที่ทำให้  $\Delta < n\pi$  มีความสัมพันธ์กับลำดับ  $n$  ของเขตเฟรสเนล (Fresnel Zone) เมื่อ  $R > d_1$  ทำให้เกิดเขตเฟรสเนลลำดับแรกกรณีที่  $R > d' \approx 12h_t h_r / \lambda$  ทำให้  $\Delta/2 < \pi/6$  และ  $\sin(\Delta/2) < 0.5$  กำลังงานรับในสภาวะมีเส้นทางเดินแนวสายตาจะน้อยกว่าสภาวะอากาศว่างเสมอ ดังนั้นฟังก์ชันไซน์ในสมการที่ (ค.26) สามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้

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

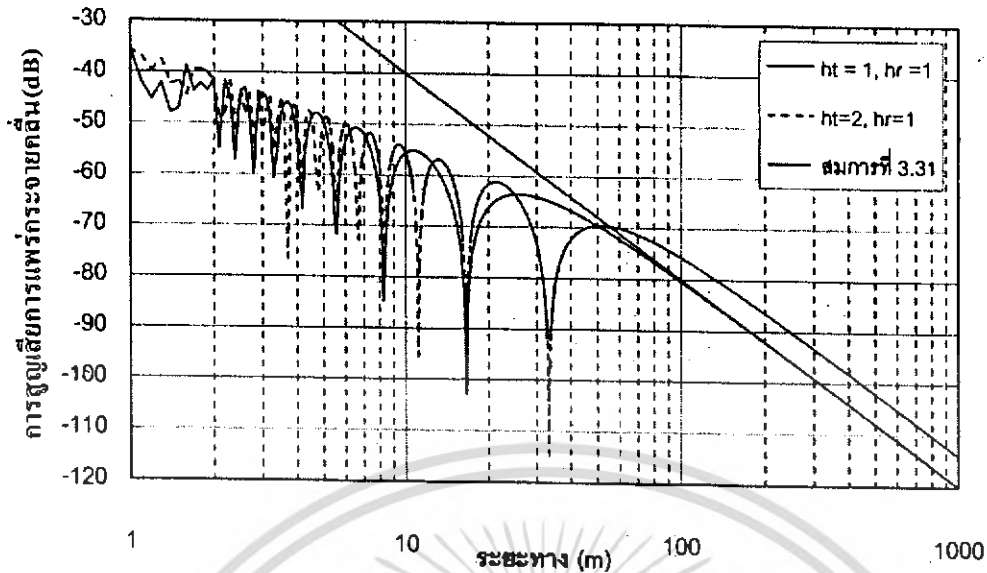
อัตราขยายสำหรับเส้นทางเดินในสมการที่ (ค.26) คูณด้วยอัตราการสูญเสียอากาศว่าง

$$\begin{aligned} \frac{P_r}{P_t} &= 4 \sin^2 \left( \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda R} \right) \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \\ &\approx 4 \left( \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda R} \right)^2 \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 = \frac{(h_t h_r)^2}{R^4}, R > d' \end{aligned} \quad (\text{ค.29})$$

จากสมการที่ (ค.30) แสดงให้เห็นว่ากำลังงานลดลงด้วยอัตราขยายกำลังสี่ เมื่อระยะ  $R > d'$  ความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นในภาวะมีเส้นทางเดินแนวสายตา สามารถเขียนในหน่วย dB ได้ดังนี้

$$L_{los} = 10 \log_{10} \left[ \frac{(h_t h_r)^2}{R^4} \right] = 120 + 40 \log_{10} R_{km} - 20 \log_{10} (h_m h_{rm}) \quad (\text{ค.30})$$

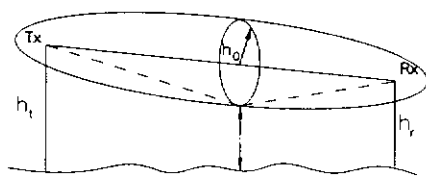
โดยที่  $R_{km}$  คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร  $h_m$  และ  $h_{rm}$  คือความสูงสายอากาศด้านส่งและด้านรับมีหน่วยเป็นเมตร ถ้าพิจารณาค่าพารามิเตอร์เดียวกับรูปที่ ก.2 อัตราขยายในสมการที่ ก.29 เขียนกราฟได้ดังรูปที่ ก.5 ภายในรูปแสดงเขตเฟรสเนลลำดับที่ 1 และที่ 2 รวมถึงผลกระทบเมื่อค่า  $\eta$  เปลี่ยนแปลง



รูปที่ ค.5 การสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นของแบบจำลองสองรังสี โดยปกติเขตเฟรสเนลลำดับที่ 1 กำหนดโดยปริมาณวงรีซึ่งมีจุดสะท้อนที่ทำให้เส้นทางเดินตรงและเส้นทางสะท้อนมีค่าแตกต่างกันน้อยกว่าครึ่งของความยาวคลื่น ซึ่งแสดงในรูปที่ (ค.6) รัศมีของ  $h_0$  ของเขตเฟรสเนลลำดับที่ 1 ที่ตำแหน่งเส้นทางเดิน  $R$  ที่ตำแหน่ง  $d_i$  และ  $d_r$  คือระยะห่างของเครื่องส่งและเครื่องรับ ตามลำดับ เขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \lambda/2 &= \text{เส้นทางสะท้อน} - R \\
 &= \text{ระยะห่างจากจุดสะท้อนถึงเครื่องส่ง} + \text{ระยะห่างจากจุดสะท้อนถึงเครื่องรับ} - R \\
 &= \sqrt{d_i^2 + h_0^2} + \sqrt{d_r^2 + h_0^2} - R \\
 &= d_i \left[ 1 + \frac{h_0^2}{2d_i^2} + \dots \right] + d_r \left[ 1 + \frac{h_0^2}{2d_r^2} + \dots \right] - (d_i + d_r) \\
 &\approx \frac{h_0^2}{2} \frac{d_i + d_r}{d_i d_r} \Rightarrow h_0 (m) = \sqrt{\frac{\lambda d_i d_r}{d}} = 548 \sqrt{\frac{d_{ikm} d_{rkm}}{d_{km} f_{MHz}}} \quad (\text{ค.31})
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.6 เขตเฟรสเนล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

## การประเมินประสิทธิภาพโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE 802.11

## พื้นฐานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11

พื้นฐานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 ประกาศครั้งแรกในปี 1997 สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นที่ใช้สายอากาศเป็นช่องสื่อสาร IEEE 802.11 เป็นส่วนหนึ่งของมาตรฐานโครงข่ายท้องถิ่นและเมืองโดยแสดงดังรูปที่ ง.1 สำหรับชั้นสื่อสาร IEEE 802.11 แบ่งออกเป็นสองชั้นคือ ชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อ (Medium Access Control : MAC) และชั้นกายภาพ (Physical Layer)

## โทโปโลยี (Topology)

มาตรฐาน IEEE 802.11 ประกอบด้วยกลุ่มสื่อสารได้แก่ สถานีฐาน (Access Point) และลูกข่าย (Client) โดยที่กลุ่มสื่อสารนี้เรียกว่า กลุ่มบริการพื้นฐาน (Basic Service Set : BSS) โปโตคอลชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ การรวมตัวแบบแอดฮอค (Ad-Hoc) หมายถึงการติดต่อสื่อสารระหว่างลูกข่ายโดยไม่ต้องใช้สถานีฐานและการรวมตัวแบบโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) ก็คือการติดต่อสื่อสารโดยใช้สถานีฐานเป็นศูนย์กลางการควบคุม กลุ่มสถานีฐานที่สื่อสารกันโดยการส่งต่อเฟรมข้อมูลจากกลุ่มบริการพื้นฐานหนึ่งไปยังกลุ่มอื่นเพื่ออำนวยความสะดวกเมื่อลูกข่ายเคลื่อนย้ายไปยังสถานีฐานอื่นซึ่งเรียกกลุ่มบริการขยาย(Extended Service Set : ESS) ถ้าสถานีฐานหนึ่งสื่อสารกับสถานีอื่นเพื่อส่งต่อเฟรมข้อมูลให้กับสถานีฐานอื่น เพื่อให้ลูกข่ายสามารถเคลื่อนที่จากสถานีหนึ่งไปยังสถานีอื่นและแลกเปลี่ยนเฟรมข้อมูลผ่านทางเครือข่ายไร้สายซึ่งเรียกกลไกนี้ว่า ระบบกระจาย(Distribution System :DS) แสดงดังรูปที่ ง.2

## การควบคุมการเข้าถึงสื่อ (Medium Access Control)

เครือข่ายไร้สายใช้อากาศเป็นสื่อส่งสัญญาณทำให้เกิดปัญหาการชนตัวของลูกข่ายซึ่งปัญหานี้ไม่เกิดขึ้นกับเครือข่ายใช้สาย การชนตัวเกิดจากระยะทำงานที่จำกัดทำให้ลูกข่ายไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้อย่างทั่วถึงทั้งกลุ่ม ตัวอย่างเช่น ลูกข่าย A และ C จะไม่สามารถติดต่อกันได้เนื่องจากเกินระยะทำการแล้ว ถ้า A และ C ส่งเฟรมไปยัง B พร้อมกันทำให้เกิดการชนกัน การส่งเฟรมข้อมูลพร้อมๆกันของ A และ C เนื่องจาก A และ C ไม่ทราบว่า B ติดต่อกับสถานีอื่นๆด้วยแสดงดังรูปที่ ง.3 IEEE 802.11 ซึ่งสามารถแก้ปัญหานี้โดยใช้กลไก RTS/CTS

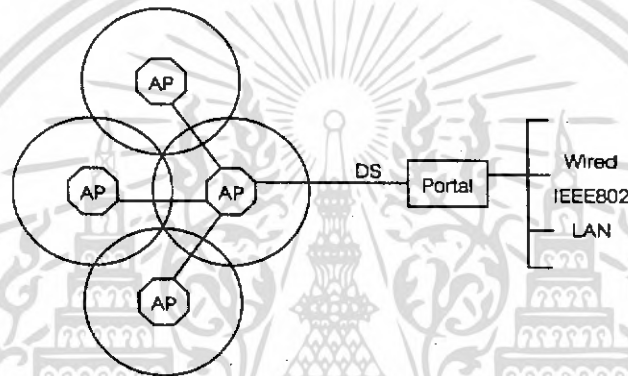
การควบคุมการเข้าถึงสื่อใช้กลไกซึ่งเรียกว่า CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance) ใช้หลักการตรวจสอบสื่อการส่งข้อมูล ถ้าสื่อว่างแล้วจะทำการส่งข้อมูล เมื่อส่งแล้วฝ่ายรับได้รับข้อมูลถูกต้องจะส่งเฟรมตอบรับกลับมา ถ้าไม่มีเฟรมตอบกลับให้ถือว่าการส่งนั้นเกิดการชนกัน จากนั้นฝ่ายส่งจะทำการส่งใหม่โดยหน่วงเวลาก่อนส่ง การหน่วงเวลาเป็นแบบสุ่มและถ้ายังมีการชนกันเวลาที่ให้หน่วงจะเพิ่มขึ้น

### รูปแบบเฟรม

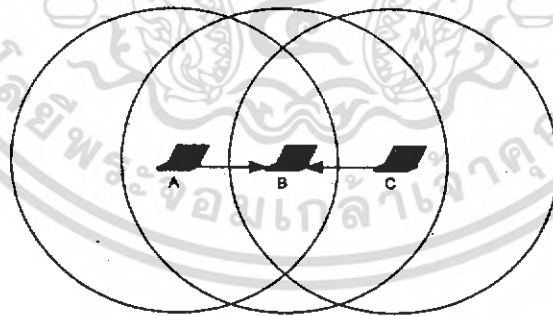
รูปแบบเฟรมในชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อ (MSDU) IEEE 802.11 แสดงดังรูปที่ ง.4 ข้อมูลเฟรมประกอบด้วย ข้อมูลที่อยู่ ข้อมูลโปรโตคอล IEEE 802.11 ข้อมูล NAV (Network Allocation Vector) และข้อมูลการจัดลำดับเพื่อความถูกต้องของเฟรม

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

รูปที่ ง.1 เฟรมชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อ



รูปที่ ง.2 กลุ่มบริการพื้นฐาน (BSS) กลุ่มบริการขยาย (ESS) และระบบกระจาย (DS)



รูปที่ ง.3 ปรัชญาการช้อนตัวในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

### ชั้นสื่อสารกายภาพ

IEEE 802.11 กำหนดให้ก่อนส่งเฟรมข้อมูลจากชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อจะต้องเติมข้อมูลที่เรียกว่า ฟร็อมเบิล-PLCP และส่วนหัว-PLCP ฟร็อมเบิล-PLCP ประกอบด้วยฟิลด์ Sync และ SFD เพื่อบรรจุข้อมูลเพื่อการซิงโครไนส์และบอกจุดเริ่มต้นเฟรม ตามลำดับส่วนหัว-PLCP ประกอบด้วยฟิลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Signal ซึ่งแสดงการมอดูเลตที่ใช้ฟิลด์ Service คือฟิลด์ที่สงวนไว้ฟิลด์ Length แสดงค่าที่ใช้คำนวณจุดสิ้นสุดของเฟรม ฟิลด์ CRC คือฟิลด์ที่บรรจุข้อมูลการตรวจสอบความถูกต้องของเฟรม

การมอดูเลตสำหรับมาตรฐาน IEEE 802.11 เป็นแบบโคเร็กซ์ที่ความเร็ว 1 Mbps และ 2 Mbps ซึ่งอัตราชีพเท่ากับ 11 MHz และใช้การเข้ารหัสแบบเบเคอร์ (Baker) แสดงได้ดังนี้

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

#### ค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุด

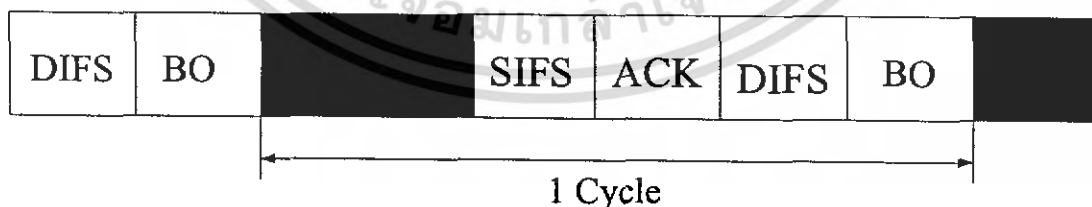
ค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุด (Theoretical Maximum Throughput) สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 คืออัตราส่วนข้อมูล MSDU กับเวลาที่ใช้ส่งทั้งหมดเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$TMT = \frac{MSDU}{T_{MSDU}} \quad (จ.2)$$

โดยที่ MSDU คือขนาดข้อมูลจากชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อส่วน  $T_{MSDU}$  คือเวลารวมจากการส่งข้อมูล 1 รอบแสดงดังรูปที่ ๓.6 เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$T_{MSDU} = (T_{DIFS} + T_{SIFS} + T_{BO} + T_{RTS} + T_{CTS} + T_{ACK} + T_{Data}) \times 10^{-6} \quad (จ.3)$$

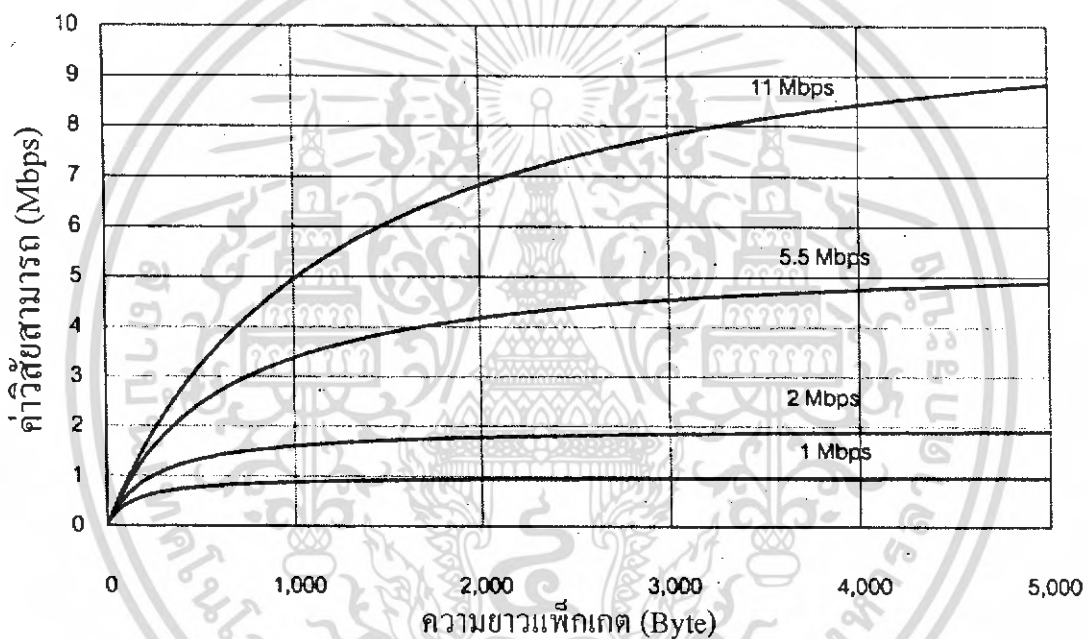
โดยที่ค่าในสมการที่ (จ.3) ได้จากตารางที่ ๓.1 รูปที่ ๓.7 แสดงค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุดเปรียบเทียบกับขนาด MSDU ที่ อัตราบิต 1 2 5.5 และ 11 Mbps ซึ่งพบว่าเมื่อขนาด MSDU เพิ่มขึ้นค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามถ้าขนาด MSDU มากเกินไปทำให้ค่าความผิดพลาดแพ็กเก็ตเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง ปกติแล้วขนาดของ MSDU มีค่าประมาณไม่เกิน 1500 ไบต์



รูปที่ ๓.4 ฝั่งเวลาการส่งข้อมูล IEEE 802.11

ตารางที่ ง.1 ค่าเวลาต่างๆที่ใช้ในการส่งข้อมูล

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



รูปที่ ง.5 ค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันของขนาด MSDU ที่อัตราบิต 1, 2, 5.5 และ 11 Mbps

### ระบบบริการสูงสุด

จุดประสงค์หลักของแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นที่กล่าวมาถึงในบทที่ 3 คือการทำนายค่าความสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายให้มีความแม่นยำที่สุดเพื่อหาระยะทำงานของระบบสื่อสารก่อนการติดตั้งระยะทำงานไกลสุดของระบบเกิดขึ้นเมื่อระดับกำลังงานรับเท่ากับระดับที่ให้คุณภาพการสื่อสารตามที่กำหนดไว้ ซึ่งระดับนี้เรียกว่า ความไวเครื่องรับ (Receiver Sensitivity) อัตราการสูญเสียการแพร่กระจายที่ให้กำลังงานรับเท่ากับความไวเครื่องรับเรียกว่า ค่าอัตราการสูญเสียการแพร่กระจายสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Acceptable Path Loss) แสดงเป็นหน่วยเดซิเบลได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_{\max} = P_t - L_t + G_t - L_r + G_r - S \quad (3.4)$$

เมื่อ  $P_t$  คือ กำลังงานส่ง  $G_t$  และ  $G_r$  คืออัตราขยายของสายอากาศส่งและรับ ตามลำดับ  $L_t$  และ  $L_r$  คือ อัตราการสูญเสียจากสายนำสัญญาณด้านส่งและรับ  $S$  คือ ความไวของเครื่องรับซึ่งตัวแปรทั้งหมดมีหน่วยเป็นเดซิเบล ซึ่งจากทฤษฎีย้อนกลับ(Reciprocity Theorem) ได้นิยามว่าความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการสลับหน้าที่รับส่งระหว่างสายอากาศส่งและรับ แต่อย่างไรก็ตาม การสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่ยอมรับได้ระหว่างสองทิศทางอาจมีความแตกต่างกันเนื่องจากความไวของเครื่องรับด้านรับและด้านส่งต่างกัน เช่นเครื่องรับที่สถานีฐานถูกออกแบบให้มีความไวเครื่องรับมากกว่าลูกข่ายเพื่อลดกำลังงานส่งจากลูกข่าย

การหาระยะบริการสูงสุดระหว่างสถานีฐานและลูกข่ายที่มีคุณสมบัติตามภาคผนวก ง นั้นใช้ค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ ง.2



รูปที่ ง.6 การทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศวงแหวนเหนือระนาบสะท้อนวงกลมในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

#### อัตราผิดพลาดแพ็คเก็ตและคำวิสัยสามารถ

การสื่อสารข้อมูลแบบแพ็คเก็ตคือ การแบ่งข้อมูลสื่อสารออกเป็นกลุ่มๆ โดยแต่ละกลุ่มบิตเรียกว่าแพ็คเก็ต ถ้าหนึ่งแพ็คเก็ตมีจำนวนบิต  $N$  ตัวให้พิจารณาเป็นข้อมูลหนึ่งเดียว เมื่อเกิดบิตผิดพลาดอย่างน้อยหนึ่งบิตแล้วข้อมูลทั้งแพ็คเก็ตให้ถือว่าผิดพลาดทั้งหมด คุณภาพการให้บริการของระบบโทรคมนาคมสามารถแสดงได้โดยอัตราความผิดพลาดบิตหรืออัตราความผิดพลาดแพ็คเก็ต ความน่าจะเป็นที่มีอย่างน้อยหนึ่งบิตผิดพลาดเขียนได้ดังนี้

$$P(\text{อย่างน้อยหนึ่งบิตผิดพลาด}) = 1 - P(\text{ทุกบิตถูกต้อง}) \quad (3.5)$$

เมื่อสมมุติให้ความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตแต่ละบิตเป็นอิสระต่อกันแล้ว

$$P(\text{อย่างน้อยหนึ่งบิตผิดพลาด}) = 1 - P(\text{บิตลำดับที่หนึ่งผิดพลาด})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

.  $P$  (บิตลำดับที่สองผิดพลาด,...)

.  $P$  (บิตลำดับที่  $N$  ผิดพลาด)

$$P(\text{อย่างน้อยหนึ่งบิตผิดพลาด}) = 1 - P(\text{บิตไม่ผิดพลาด}) \quad (ง.6)$$

ความน่าจะเป็นที่บิตไม่ผิดพลาดเขียนได้ดังนี้

$$P(\text{บิตไม่ผิดพลาด}) = 1 - BER \quad (ง.7)$$

แทนสมการที่ (ง.7) ในสมการที่ (ง.6) ดังนั้นจะได้

$$P(\text{อย่างน้อยหนึ่งบิตผิดพลาด}) = 1 - (1 - BER)^N \quad (ง.8)$$

เมื่อ  $N$  คือจำนวนบิตของแพ็คเกจ

ค่าวิสัยสามารถคือ อัตราเฉลี่ยข้อมูลต่อเวลาที่สามารถส่งหรือรับได้จริง ปกติแล้วมีหน่วยเป็น Kbps หรือ Mbps ค่าวิสัยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{Throughput} = R(1 - PER) \quad (ง.9)$$

เมื่อ  $R$  คืออัตราบิตซึ่งเป็นอัตราเร็วส่งข้อมูลทั้งหมดซึ่งรวมข้อมูลอื่นนอกเหนือจากข้อมูลจริง ตัวอย่างเช่น ข้อมูลส่วนหัวที่บรรจุข้อมูลที่อยู่ ฯลฯ ดังนั้นข้อมูลที่ส่งหรือรับได้จริงไม่ตรงกับค่าอัตราบิต สามารถแทนอัตราบิตด้วยค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุดเพื่อใช้ทำนายค่าวิสัยสามารถที่ระบบรับหรือส่งได้จริงดังนี้

$$\text{Throughput}_{\text{real}} = TMT(1 - PER) \quad (ง.10)$$

โดยที่  $TMT$  คือค่าวิสัยสามารถตามอุดมคติสูงสุด ถ้าให้ค่า  $TMT$  เท่ากับ 1 ดังนั้นการออกแบบให้ระบบมีค่าวิสัยสามารถสูงสุดนั้นควรเลือกติดตั้งให้กำลังงานการแพร่กระจายคลื่นอยู่ในระดับแนวสายตามีมากที่สุด

## ภาคผนวก จ

ตารางที่ จ.1 คุณสมบัติสถานีฐาน D-Link DWL – 2000AP + [6]

มาตรฐาน	IEEE 802. 11, 802.11b,802.11G
อัตราบิต	1,2,5.5,11,12,18,24,36,48,54 Mbps
ความถี่ใช้งาน	2.4 – 2.4897 GHZ
กำลังงานส่ง	15 bBm
ความไวเครื่องรับ	54 Mbps OFDM, 10% PER, -68 dBm 48 Mbps OFDM, 10% PER, -68 dBm 36 Mbps OFDM, 10% PER, -75 dBm 24 Mbps OFDM, 10% PER, -79 dBm 18 Mbps OFDM, 10% PER, -82 dBm 12 Mbps OFDM, 10% PER, -84 dBm 11 Mbps CCK, 8% PER, -82 dBm 9 Mbps OFDM, 10% PER, -87 dBm 6 Mbps OFDM, 10% PER, -88 dBm 5.5 Mbps CCK, 8% PER, -85 dBm 2 Mbps QPSK, 8% PER, -86 dBm 1 Mbps BPSK, 8% PER, -89 dBm

ตารางที่ จ.2 คุณสมบัติการ์ดโครงข่ายไร้สาย Cisco Aironet 350 Series Client Adapter [5]

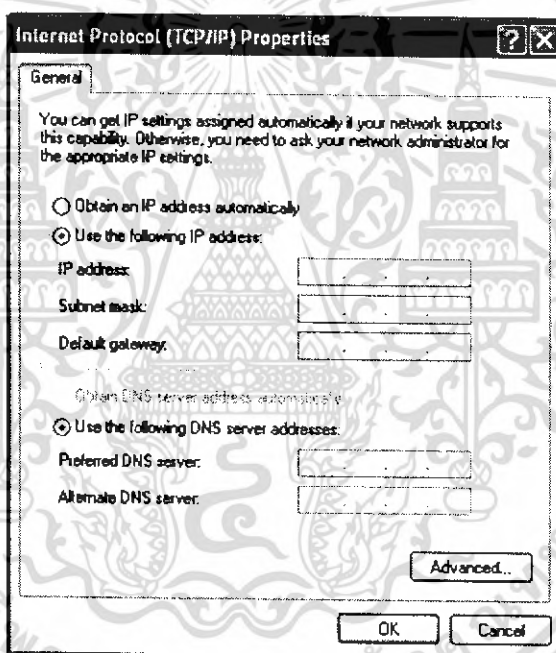
มาตรฐาน	IEEE 802.11, 802.11b
อัตราบิต	1,2,5.5,11 Mbps
ความถี่ใช้งาน	2.4 – 2.4897 GHz
กำลังงานส่ง	15 dBm
ความไวเครื่องรับ	1 Mbps BPSK , -94 dBm 2 Mbps QPSK , -91 dBm 5.5 Mbps CCK , -89 dBm 11 Mbps CCK , -85 dBm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

### วิธีการติดตั้งระบบ Wireless

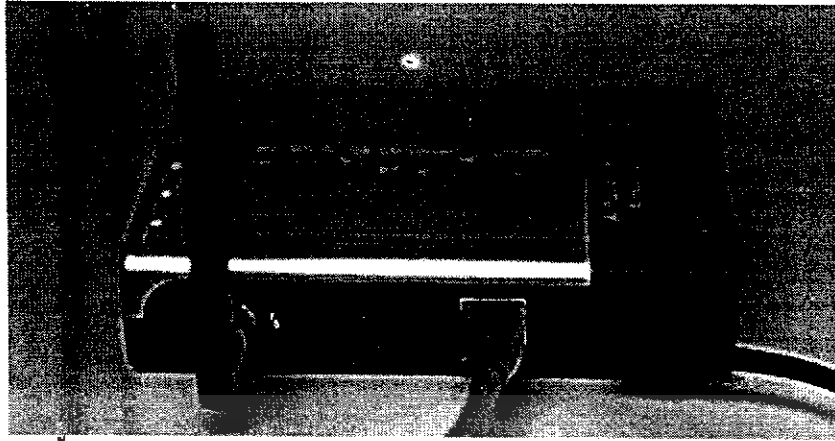
การ setup เพื่อการเชื่อมต่อเข้าระบบ Wireless ซึ่งระบบที่นำไปใช้ในการทดสอบใช้งาน เป็นการสร้างระบบของ Wireless ไว้ซึ่งต้องทำการ Setup IP address และ Subnet mask ทั้งเครื่องของตัวรับและตัวส่งซึ่งทั้งสองจะต้อง Setup IP address และ Subnet mask ที่เป็นค่าเดียวกับตัว Access Point (ซึ่งค่าทั่วไปของ Access Point ของ D-Link DWL-2000AP+ ที่ใช้ IP address คือ 192.168.0.50 ) IP address เมื่อใช้ค่าที่ Setup ใหม่ 161.246.18.111 Subnet mask :255.255.255.0 เพื่อจะทำให้คอมพิวเตอร์ทั้งตัวส่งและตัวรับสามารถเชื่อมต่อผ่านระบบ Wireless ได้



รูปที่ ฉ.1 การ Setup IP address และ Subnet mask

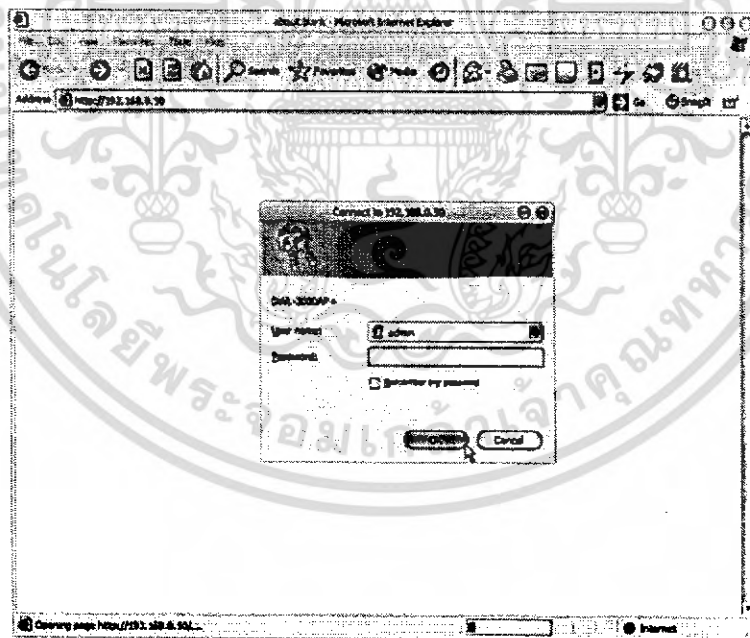
ซึ่งต่อไปจะเป็นการ setup เพื่อการเชื่อมต่อ ระหว่างอุปกรณ์ชิ้นต่างๆ โดยการใช้ Setup Wizard ของ D-Link DWL-2000AP+ เป็นอีกทางหนึ่งที่ไม่ต้องลง software ซึ่งจะเป็นการ setup ที่เครื่องตัวส่งที่ติดต่อกับตัว Access Point ด้วยสาย LAN สำหรับการ setup มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการเสียบสาย Power เข้ากับตัว Wireless Access Point พร้อมทั้งเสียบสาย LAN เพื่อการเชื่อมต่อระหว่าง Wireless Access Point กับเครื่องคอมพิวเตอร์



รูปที่ ๓.2 การติดตั้งตัว Wireless Access Point

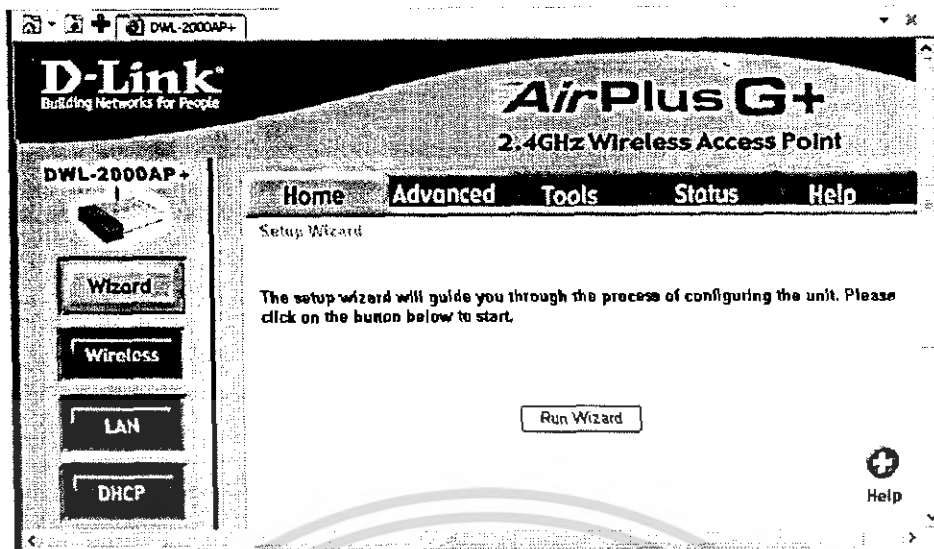
2. เมื่อติดตั้งเรียบร้อยแล้ว จึงทำการตั้งค่าตัว Wireless Access Point ขั้นแรกให้เปิด Web Browser ขึ้นมา ไปที่ Microsoft Internet Explorer จากนั้นก็พิมพ์ 192.168.0.50 (IP Address ของ Wireless Access Point) ไปที่ช่อง Address ตามรูปแล้วก็กด Enter หลังจากนั้นก็มี Windows เล็กๆ โผล่ขึ้นมา ถาม User name และ password สำหรับ Wireless Access Point ของ D-Link ที่เพิ่งแกะกล่องออกมา จะตั้งค่า User name เป็น admin แต่ไม่มี password ที่นี้ก็ป้อน admin ไปในช่อง User name แล้วก็คลิกปุ่ม OK



รูปที่ ๓.3 การตั้งค่าตัว Wireless Access Point

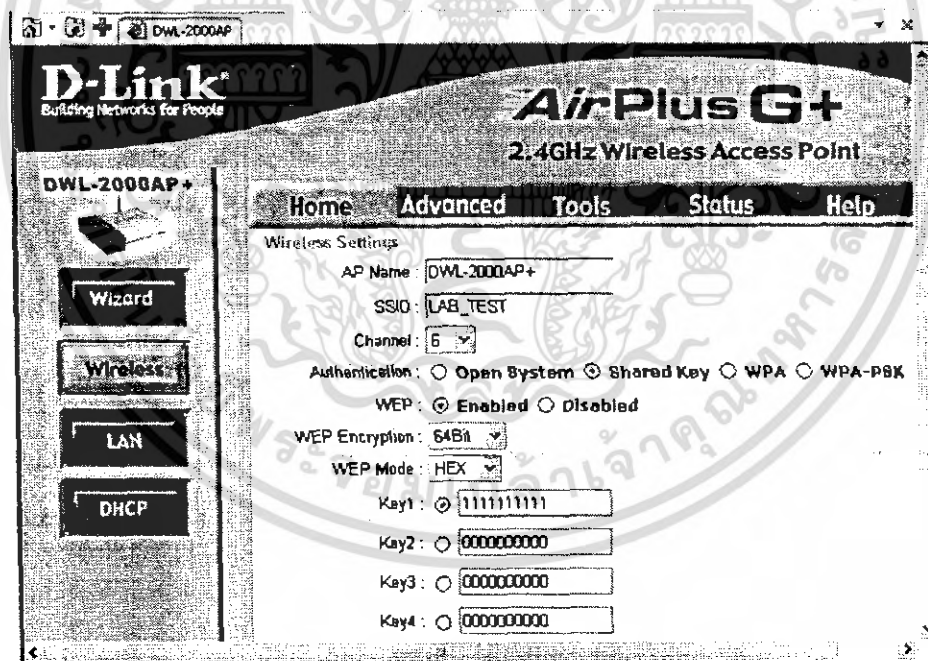
3. เริ่มทำการ Setup ขั้นแรกให้คลิกที่ Setup Wireless

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.4 การ Setup Wireless ของ Wireless Access Point

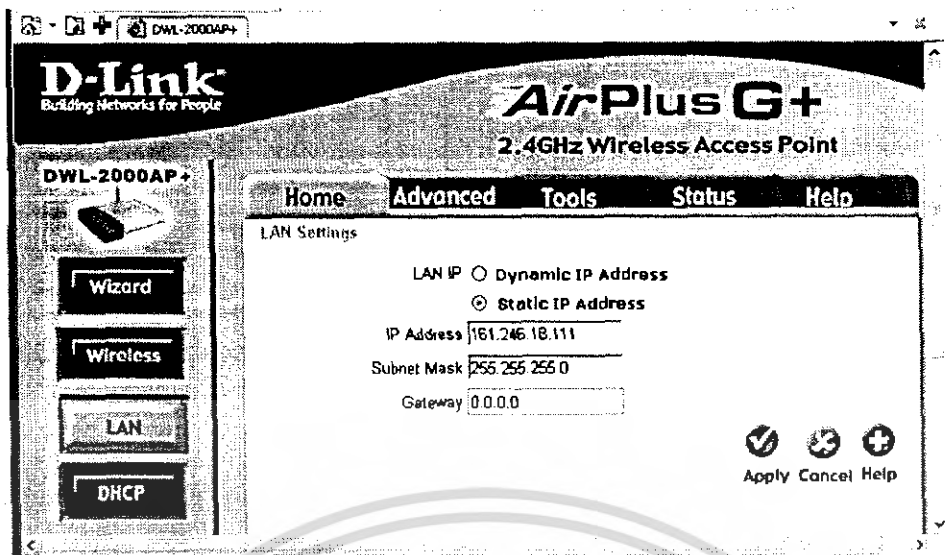
4. หน้าจอ Setup Wireless จะบอกว่า อย่างน้อยควรที่จะผ่าน 4 ขั้นตอนในการ Setup คือ เปลี่ยนการตั้งชื่อ SSID (ซึ่งจะเป็นชื่อของระบบ Wireless) และ Channel, Authentication (setup ตามรูปเพื่อป้องกันเครื่องอื่นเข้ามาใช้ในระบบเดียวกัน), ตั้งการเข้ารหัสข้อมูล, Password หลังจากนั้นก็ กด Apply



รูปที่ ๓.5 แสดงขั้นตอนในการ Setup ของ Wireless Access Point

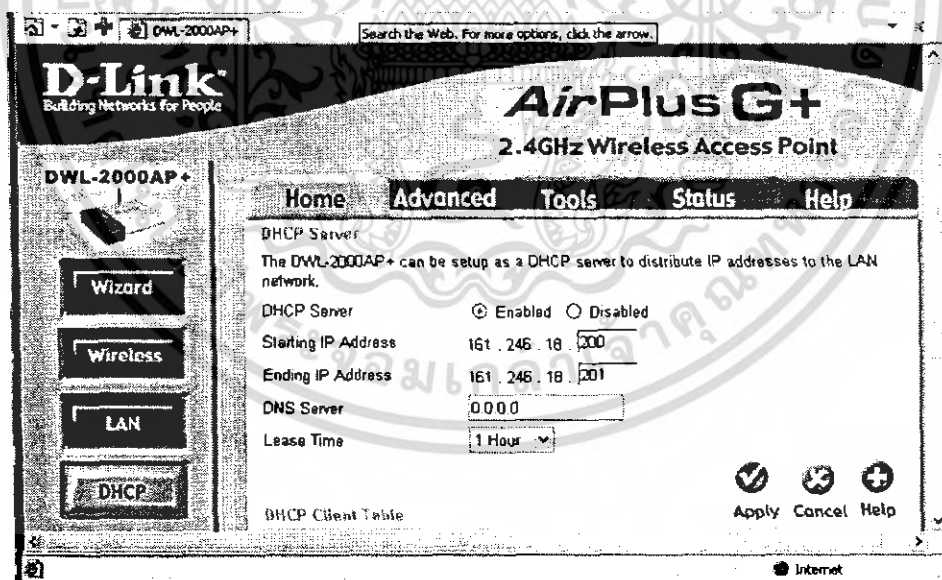
5. หน้าจอ LAN จะเป็นการ Setup เพื่อเปลี่ยนค่าของ IP address และ Subnet mask ของ Wireless Access Point หลังจากนั้นก็ กด Apply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑.๖ แสดงขั้นตอนในการ Setup LAN ของ Wireless Access Point

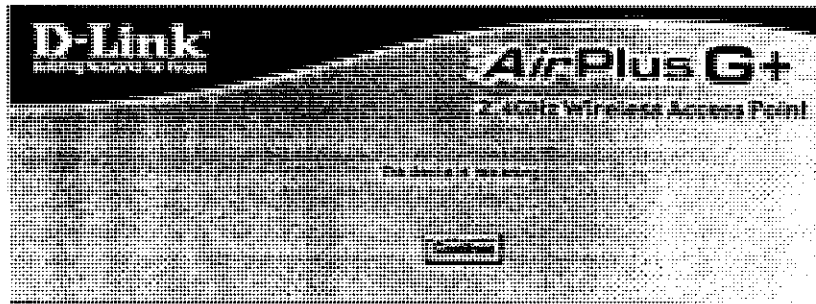
6. หน้าจอ DHCP จะเป็นส่วนที่ใช้ในการ Setup เพื่อให้ในการขอใช้งานระบบ Wireless ว่ามีจำนวนเครื่องในการใช้งานในระบบเท่าไร (ถ้าไม่มีระบบ Wireless ระบบอื่นอยู่ก็ไม่ต้อง Setup) เพื่อเป็นการป้องกันเครื่องอื่นเข้ามาในระบบ หลังจากนั้นก็ กด Apply



รูปที่ ๑.๗ แสดงขั้นตอนในการ Setup DHCP ของ Wireless Access Point

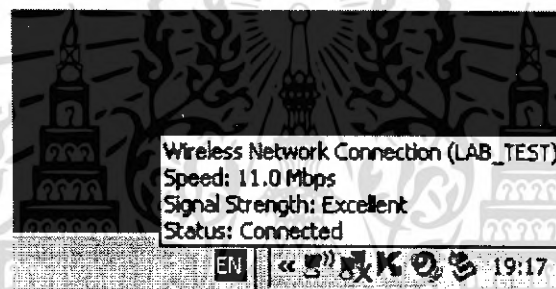
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7.กค Continue



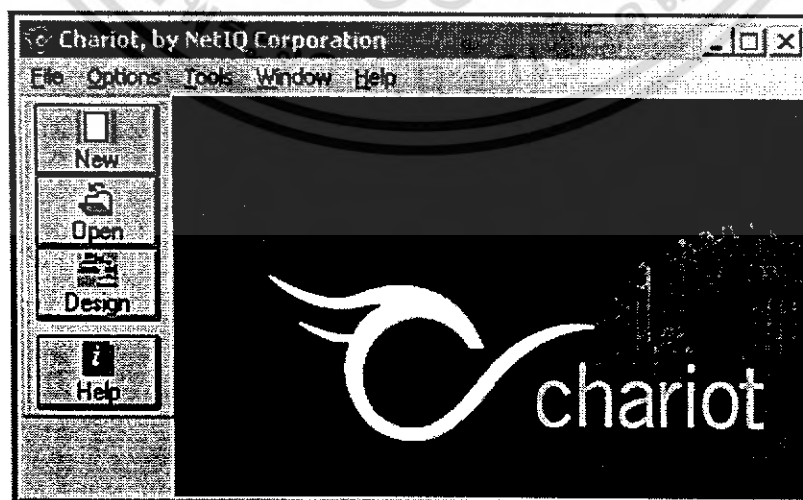
รูปที่ ๘.8 แสดงขั้นตอนในการ Setup ของ Wireless Access Point

8. การ setup ตัวเครื่องลูกข่าย โดยใช้เครื่อง Notebook เป็นตัวทดลองในการรับสัญญาณข้อมูล โดยต่อเข้ากับอุปกรณ์ Wireless LAN จากรูป ๘.9 พบว่าทางมุมขวาล่างของหน้าจอจะเห็นรูปจอซ้อนกันสองจอ ซึ่งเป็น icon ของ Wireless LAN และของ LAN แบบมีสาย ซึ่งจะแสดง Wireless Network connection สามารถใช้งานได้แล้ว




รูปที่ ๘.9 แสดงหน้าจอของตัวเครื่องลูกข่ายโดยใช้เครื่อง Notebook ระบบเชื่อมต่อสมบูรณ์

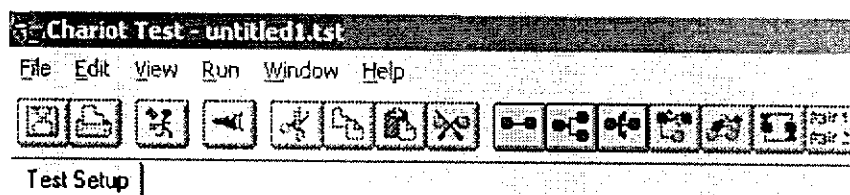
9. การใช้งานโปรแกรม Chariot จะเป็นโปรแกรมที่จำลองการรับ-ส่งข้อมูล เมื่อทำการลงโปรแกรม NetIQ จะสามารถเรียกใช้งานโปรแกรม Chariot ได้ กดที่ NEW จะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ ๘.10



รูปที่ ๘.10 แสดงหน้าต่างใช้งานโปรแกรม Chariot

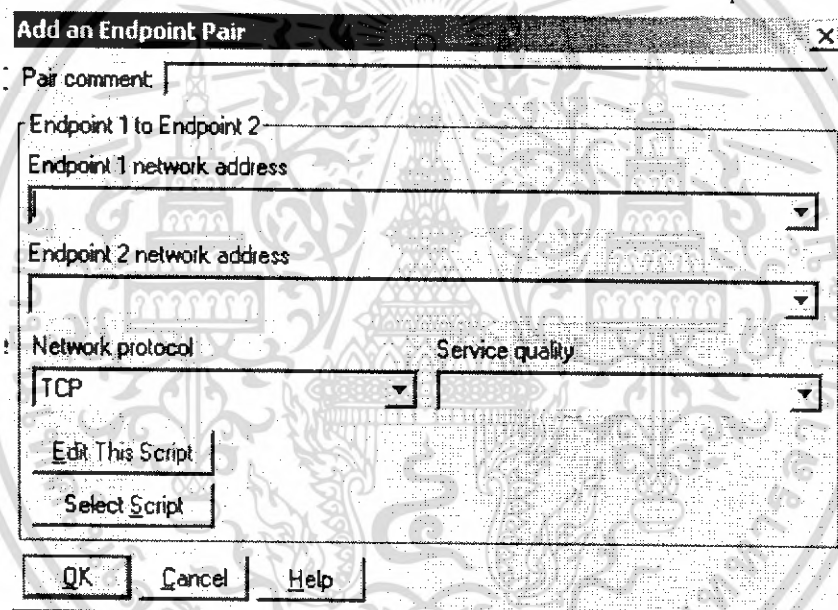
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. กด  จะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ ๑.12.




รูปที่ ๑.11 แสดงหน้าต่างใช้งานโปรแกรม Chariot

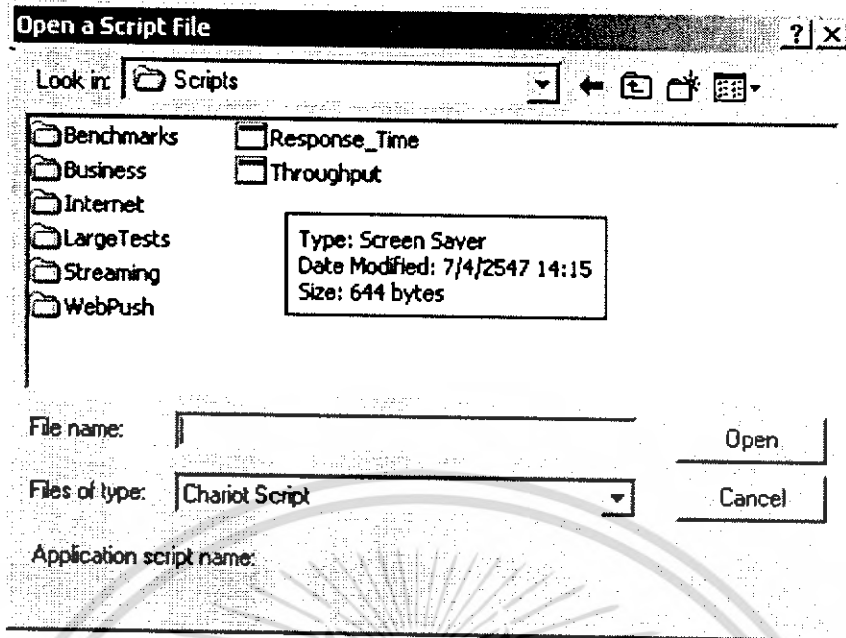
11. การ set Endpoint 1 ซึ่งจะเป็นค่า IP Address ของเครื่องคอมพิวเตอร์ตัวรับและ set Endpoint 2 ซึ่งจะเป็นค่า IP Address ของเครื่องคอมพิวเตอร์ตัวส่ง หลังจากนั้นกด select script



รูปที่ ๑.12 แสดงหน้าต่างใช้งานโปรแกรม Chariot การ set Endpoint

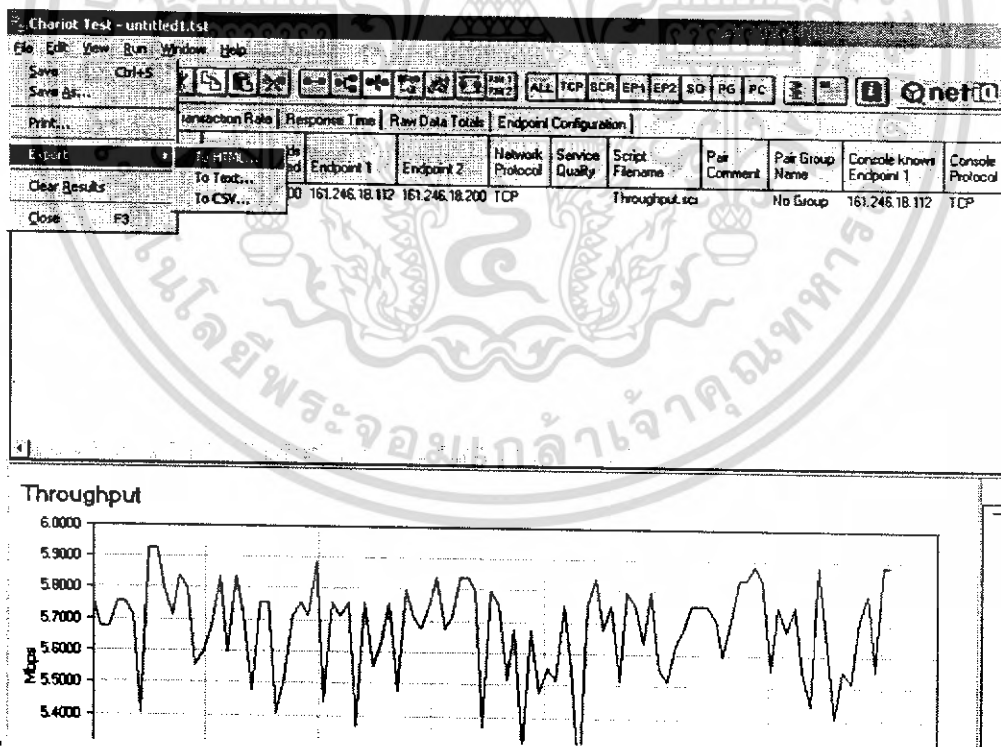
12. เมื่อกด select script จะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ ๑.12จากนั้นกดที่  Throughput จะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ ๑.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑.13 แสดงหน้าต่างใช้งาน โปรแกรม Chariot ของ  Throughput

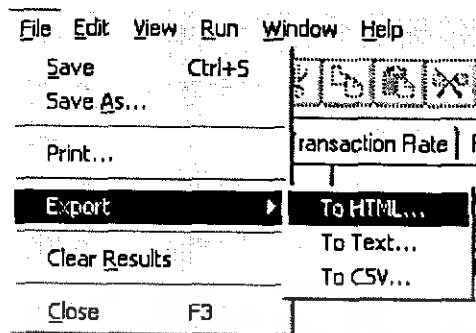
13. เมื่อกด selects script อีกครั้ง แล้วกด RUN จะแสดงค่าของ Throughput



รูปที่ ๑.14 แสดงหน้าต่าง แสดงค่าของ Throughput

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 14. จะทำการ save โดยไปที่ Export To HTML



รูปที่ ๑.15 การ save ที่ Export To HTML

#### 15. การดูค่า Throughput จะต้องไปที่ Program Files ไปที่ NetIQ ไปที่ Chariot ดูค่าที่ icon Internet Explorer



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้