

สายอากาศอัตราขยายสูงจากตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวน

A High Gain Antenna using Conical Reflector Fed by Ring



โดย  
นายศุภรัตน์ แยมกราวญ  
นายอาคม อาระยะหัยชาญ

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... **62715**  
วัน,เดือน,ปี..... 21 ส.ค. 2549

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัดค้าน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง

ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว  
(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ  
ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว  
(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

สายอากาศอัตรการขยายสูงจากตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวน

**A High Gain Antenna using Conical Reflector Fed by Ring**

โดย

นายศุภรัตน์ แยมกรวณ 46015032

นายอาคม อาระยะชัยชาญ 46015040

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.สมผล โกศลวิตร

ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง **สายอากาศอัตรการขยายสูงจากตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวน**

**A High Gain Antenna using Conical Reflector Fed by Ring**

ผู้จัดทำ

นาย สุภรัตน์ แยมกรวญ 46015032

นาย อาคม อาระยะชัยชาญ 46015040

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผศ.ดร. ชวงศ์ หงศ์เจริญพาณิชย์)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศอัตรารายสูงจากตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวน

## A High Gain Antenna using Conical Reflector Fed by Ring

โดย นายสุภรณ์ แยมครวญ 46015032

นายอาคม อาระยะชัยชาญ 46015040

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สมพล โกศลวิตร

ผศ.ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการนำเสนอการคำนวณสายอากาศที่ใช้วงแหวนวงกลมล้อมรอบโพรวางในตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวย โดยคุณสมบัติของสายอากาศวงแหวนที่ใช้ป้อนสัญญาณมีการกระจายคลื่นสองทิศทาง และเมื่อรวมโครงสร้างดังกล่าวกับตัวสะท้อนคลื่นของสายอากาศ จะมีการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางเดียว โดยในโครงการนี้ได้วิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น อันได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างลำคลื่น ระดับลำคลื่นย่อย และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง จากนั้นนำผลที่ได้ไปออกแบบสายอากาศที่มีคุณลักษณะที่เหมาะสมและนำไปทำการทดสอบสำหรับประยุกต์ใช้งานต่อไป

### Abstract

This project presents the calculation of a conical reflector antenna fed by circular ring. The pattern of circular ring is bidirectional radiation. When it is placed in front of the conical reflector, the unidirectional beam will be achieved. In this project, we will analyze the radiation characteristics such as radiation pattern, beamwidth, side lobe ratio and directivity of antenna. From the analysis results, the antenna will be designed to accomplish the suitable characteristics to apply in the practical applications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 กล่าวนำ	1
1.2 เนื้อหาของปริญญานิพนธ์	1
บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการ	3
2.1 บทนำ	3
2.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	3
2.2.1 แบบรูปหลัก	4
2.2.2 โลบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	5
2.2.3 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง	6
2.2.4 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรก	6
2.2.5 อัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง	6
2.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น	6
2.4 ค่าสภาพเงาเชิงทิศทาง	7
2.5 ประสิทธิภาพของสายอากาศ	7
2.6 อัตราขยาย	7
2.7 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	8
2.8 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง	8
2.9 โพลาริเซชัน	9
2.9.1 ลิเนียร์โพลาริเซชัน, โพลาริเซชันแบบวงกลมและ โพลาริเซชันแบบวงรี	10
2.9.2 โพลาริเซชันลอสเฟคเตอร์	12
2.10 ท่อนำคลื่นแบบกลม	12
2.10.1 รูปแบบของคลื่นที่ส่งในท่อนำคลื่นแบบกลม	13
2.10.2 ความยาวคลื่นตัดทอพอ สำหรับท่อนำคลื่นแบบกลม	14
2.11 โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนวงกลม	16
2.12 โครงสร้างของตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม 90 องศา	17
2.13 การวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่น โดยอาศัยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า	17
2.13.1 สมการอินทิกรัลเชิงสนามในอากาศว่าง	18
2.13.2 วิธีการจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมคำนวณทางไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบ และ ผลการวิเคราะห์	23
3.1 การวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศที่จะนำไปใช้ในการออกแบบ	23
3.1.1 การออกแบบค่ารัศมีและความยาวของตัวสายอากาศวงแหวนแบบวงกลม	23
3.1.2 การออกแบบค่าความยาวโพรบ	24
3.1.3 การออกแบบค่าขนาดของตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม	25
3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	25
3.2.1 ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	26
3.2.2 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง	27
3.2.3 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรก	29
3.2.4 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลัง	30
3.2.5 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง	32
3.2.6 ค่าสภาพเจาะงทศทางของสายอากาศ	32
บทที่ 4 การออกแบบสร้าง และทดสอบ	34
4.1 การออกแบบสร้าง	34
4.2 การทดสอบและผลการทดสอบ	35
4.2.1 การทดสอบค่าอิมพีแดนซ์	35
4.2.2 การทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง	36
4.2.3 การทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ	37
4.2.4 การทดสอบหาช่วงความถี่ที่ใช้งาน	37
4.2.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	38
4.2.6 การวัดโพลาไรเซชันของสายอากาศ	41
4.2.7 การทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศ	42
4.2.8 การทดสอบส่งสัญญาณของสายอากาศในการใช้งานจริง	44
บทที่ 5 วิจารณ์และสรุป	46

## สารบัญญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงระบบ โคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	3
รูปที่ 2.2 แสดงแบบรูปหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร	4
รูปที่ 2.3 โลบต่างๆและบีมวิคท์ของแบบรูปสายอากาศ	5
รูปที่ 2.4 แบบรูปในแบบเชิงเส้น	5
รูปที่ 2.5 สายอากาศในโหมดการส่ง	8
รูปที่ 2.6 การหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระนาบ และวงรีโพลาไรเซชัน ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในระนาบ $Z = 0$	
(ก) การหมุนของคลื่น	9
(ข) วงรีโพลาไรเซชัน	9
รูปที่ 2.7 หน่วยเวกเตอร์โพลาไรเซชันของคลื่นและของสายอากาศ	12
รูปที่ 2.8 ความหมายของ $m$ และ $n$ ในท่อนำคลื่นแบบกลม	13
รูปที่ 2.9 แสดงโหมด TE และ TM ของท่อนำคลื่น	14
รูปที่ 2.10 สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลม	16
รูปที่ 2.11 ตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมที่ป้อนสัญญาณด้วยเส้นลวดตรง	17
รูปที่ 2.12 โปรแกรม NEC2 ( Numerical Electromagnetic Code)	17
รูปที่ 3.1 สายอากาศวงแหวนแบบวงกลมที่ออกแบบโดยโปรแกรม NEC2	23
รูปที่ 3.2 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวน รัศมี 0.347λ และ 0.311λ	24
รูปที่ 3.3 ตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมที่มีมุม 90° ที่ออกแบบโดยโปรแกรม NEC2	25
รูปที่ 3.4 ค่ามุมที่สนามสูงสุดของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม 90° ที่ป้อนสัญญาณ ด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี 0.347λ และ 0.311λ	
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า	26
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก	27
รูปที่ 3.5 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่น แบบกรวยกลม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี 0.347λ และ 0.311λ	
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า	28
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก	28
รูปที่ 3.6 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรกของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่น แบบกรวยกลม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี 0.347λ และ 0.311λ	
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า	29
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.7 ค่าอัตราส่วนถ่วงน้ำหนักต่อถ่วงน้ำหนักย่อยด้านหลังของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม $90^\circ$ ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี 0.347λ และ 0.311λ	
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า	31
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก	31
รูปที่ 3.8 ค่าอัตราส่วนถ่วงน้ำหนักต่อถ่วงน้ำหนักย่อยด้านข้างของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม $90^\circ$ ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี 0.347λ และ 0.311λ	32
รูปที่ 3.9 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม $90^\circ$ ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี 0.347λ และ 0.311λ	33
รูปที่ 4.1 ตัวป้อนสัญญาณแบบวงแหวนรัศมี 0.347λ	34
รูปที่ 4.2 สายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม $90^\circ$ ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี 0.347λ	34
รูปที่ 4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ ของ สายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม $90^\circ$ ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี 0.347λ ที่ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมกับตัวป้อนสัญญาณด้วยวงแหวน เท่ากับ 0.63λ	35
รูปที่ 4.4 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม $90^\circ$ ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี 0.347λ ที่ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมกับตัวป้อนสัญญาณด้วยวงแหวน เท่ากับ 0.63λ	36
รูปที่ 4.5 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม $90^\circ$ ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี 0.347λ ที่ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมกับตัวป้อนสัญญาณด้วยวงแหวน เท่ากับ 0.63λ	37
รูปที่ 4.6 วิธีการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	38
รูปที่ 4.7 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม $90^\circ$ ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี 0.347λ	
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า	39
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก	39
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม $90^\circ$ ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี 0.347λ เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม NEC	40
รูปที่ 4.9 วิธีการทดสอบการวัด โพลาริเซชันของสายอากาศ	41
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบการวัด โพลาริเซชันของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม $90^\circ$ ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี 0.347λ	42

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม $90^\circ$ ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี $0.347\lambda$ เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม NEC	40
รูปที่ 4.9 วิธีการทดสอบการวัดโพลาไรเซชันของสายอากาศ	41
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบการวัดโพลาไรเซชันของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม $90^\circ$ ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี $0.347\lambda$	42
รูปที่ 4.11 วิธีการทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศ	43
รูปที่ 4.12 สัญญาณที่รับได้จากเครื่องเน็ทเวิร์คอะนาไลเซอร์	43
รูปที่ 4.13 วิธีการทดสอบส่งสัญญาณของสายอากาศ	44
รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบรับสัญญาณจากสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม $90^\circ$ ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี $0.347\lambda$ เปรียบเทียบกับสายอากาศไดโพลมาตรฐาน	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 คำนำ

ในระบบการสื่อสาร(Communication system)สายอากาศมีความสำคัญอย่างยิ่งในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย(Wireless Communication system) เนื่องจากสายอากาศมีหน้าที่ รับ-ส่ง สัญญาณที่ถูกผสม(Modulation)ด้วยกรรมวิธีต่างๆ โดยส่วนมากจะเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้อยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า(Electromagnetic Wave)โดยวิธีการเหนี่ยวนำกระแสกลายเป็นคลื่นวิทยุ(Radio Wave)ส่งผ่านตัวกลางคือ สายอากาศไปยังเครื่องรับแล้วสายอากาศที่เครื่องรับก็จะรับสัญญาณที่เข้ามาเปลี่ยนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วก็นำส่งไปยังระบบอื่น เพื่อการสื่อสารต่อไปตามระบบที่ทำงานและเพื่อให้สัญญาณรับและส่งมีความผิดพลาดน้อยที่สุด จึงควรสร้างอุปกรณ์รับส่งสัญญาณให้มีประสิทธิภาพและลักษณะของสายอากาศที่จะนำมาสร้างต้องพิจารณาส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้เช่นลักษณะการใช้งานย่านความถี่ ที่ใช้งาน คุณภาพของสัญญาณที่ต้องการนำไปใช้งานทิศทางการแพร่กระจายไปของคลื่นตามแนวต่างๆ ที่ส่ง ระยะทางระหว่างตัวส่งและรับทิศทางการรับคลื่นของสายอากาศรับตามแนวต่างๆ เป็นต้นสำหรับสายอากาศอัตราขยายสูงจากตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวน(A High Gain Antenna Using Conical Reflector Fed by Ring)ซึ่งทำการสร้างขึ้นมาเพื่อจะตรวจสอบว่าลักษณะการแพร่กระจายคลื่นที่ส่งออกไปทั้งระนาบสนามไฟฟ้า และ สนามแม่เหล็กและลักษณะการรับคลื่นในทิศทางต่างๆรวมทั้งค่าการชี้ทิศทาง(Directivity)อัตราค่าการขยาย(Gain)ลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) เพื่อตรวจสอบว่าสอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้ศึกษามาเพื่อนำไปใช้สร้างสายอากาศ และสามารถพัฒนาสายอากาศให้มีคุณสมบัติเพื่อการตอบสนองความต้องการที่ตีมากยิ่งขึ้น

#### 1.2 เนื้อหาของปริญญาานิพนธ์

บทที่ 1 จะกล่าวถึงความเป็นมาและวัตถุประสงค์ ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์นี้ ซึ่งเป็นเนื้อหาโดยรวมที่ได้รวบรวมไว้ในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 อธิบายทฤษฎีและหลักการของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมล้อมรอบ โพรบไฟฟ้าเชิงเส้นซึ่งได้อธิบายถึง โครงสร้างของสายอากาศ โครงสร้างของตัวป้อนสัญญาณ ตลอดจนวิธีการหาสนามการแพร่กระจายคลื่นอีกด้วย

บทที่ 3 แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ การคำนวณ และการออกแบบสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยด้วยวงแหวนวงกลมล้อมรอบ โพรบไฟฟ้าเชิงเส้นซึ่งอาศัยทฤษฎีที่ได้จากบทที่ 2 เป็นการแสดงกระบวนการที่สำคัญในการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศให้ได้ตามความต้องการ โดยได้ทำการวิเคราะห์หาขนาดของวงแหวนวงกลมและขนาดของตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยโดยพิจารณาร่วมกับระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกับตัวป้อนสัญญาณแบบวงแหวน

บทที่ 4 เป็นขั้นตอนการสร้าง การทดสอบ และแสดงผลที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

บทที่ 5 เป็นการสรุปผลทั้งหมด ตลอดจนวิจารณ์ และเสนอแนะแนวทางสำหรับการพัฒนา  
สายอากาศต่อไป

สุดท้ายเป็นภาคผนวกที่รวบรวม โปรแกรมต่างๆที่เกี่ยวข้องในปริิณญาณิพนธ์นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการ

### 2.1 บทนำ

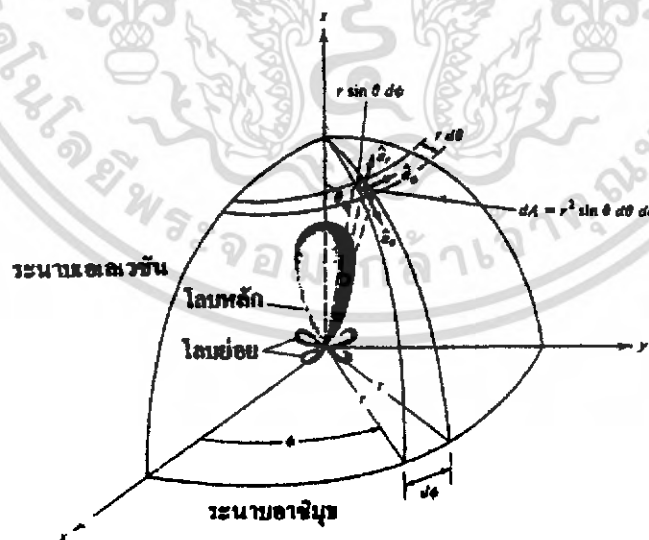
ในการที่จะวิเคราะห์สายอากาศ นั้นจำเป็นจะต้องทราบ ทฤษฎี หลักการ และ ศัพท์ต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศ รวมทั้งความหมายของศัพท์ต่างๆ ซึ่งจะกล่าวในบทนี้

### 2.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสเปซโคออดิเนท (Space Coordinate) ส่วนใหญ่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนี้มักจะคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far Field)

การอธิบายคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่างๆดังต่อไปนี้ คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity) ความเข้มของสนาม (Field Strength) เฟส (Phase) หรือ โพลาไรเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่

รูปที่ 2.1 แสดงระบบ โคออดิเนทที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น เพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่า แบบรูปกำลังงาน (Power Pattern) ของสายอากาศ และกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆ ที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่า แบบรูปสนาม (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น

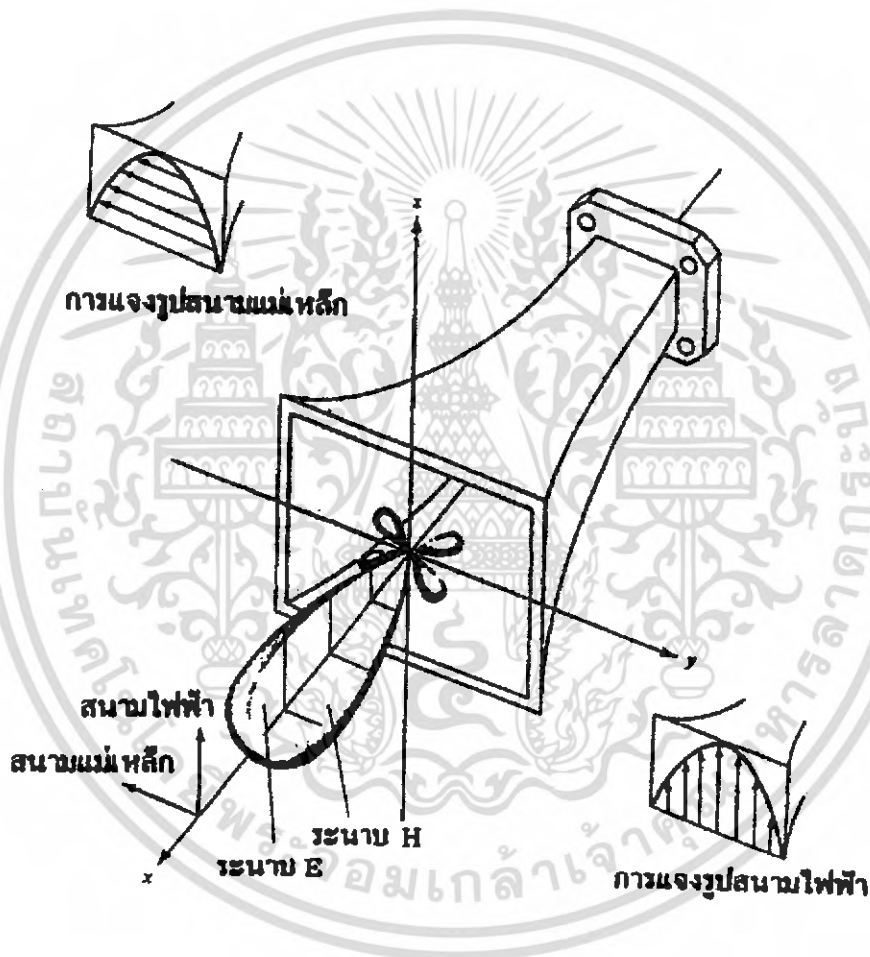


รูปที่ 2.1 แสดงระบบ โคออดิเนทสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

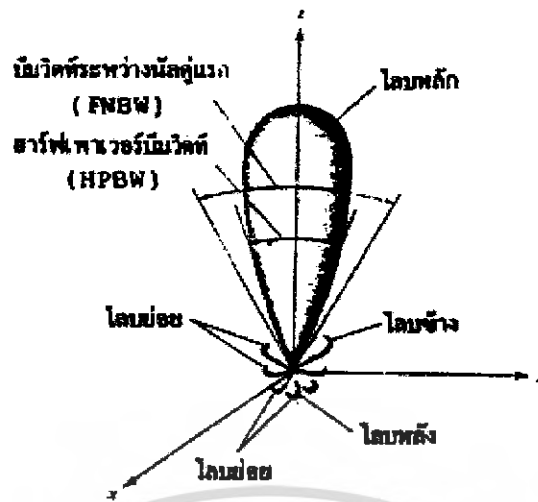
### 2.2.1 แบบรูปหลัก (Principal Pattern)

เรามักจะอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศในเทอมของแบบรูปหลัก (Principal Pattern) ของสนามไฟฟ้า ( E ) และสนามแม่เหล็ก ( H ) สำหรับสายอากาศลิเนียร์โพลาไรเซชัน (Linearly Polarization) แบบรูปในระนาบสนามไฟฟ้า จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปในระนาบสนามแม่เหล็ก จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ตัวอย่างการแสดงผลแบบรูปหลักมีดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยมีระนาบ XZ (ระนาบเอเลเวชัน ;  $\phi = 0$ ) เป็นระนาบสนามไฟฟ้าหลัก และมีระนาบ XY (ระนาบอาซิมุท ;  $\theta = \frac{\pi}{2}$ ) เป็นระนาบสนามแม่เหล็กหลัก

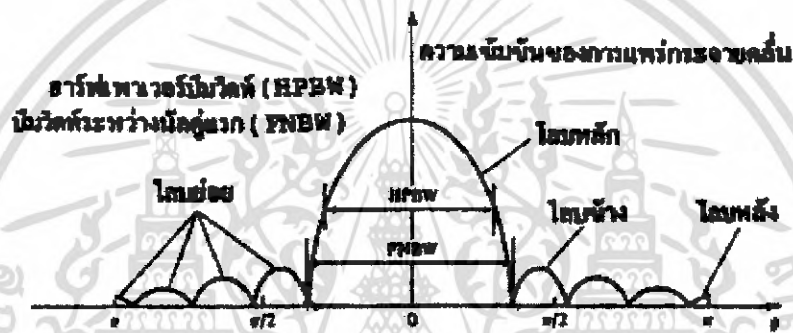


รูปที่ 2.2 แสดงแบบรูปหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 โลบต่างๆและบีมวิดท์ของแบบรูปสายอากาศ



รูปที่ 2.4 แบบรูปในแบบเชิงเส้น

### 2.2.2 โลบของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)

lobes of the radiation pattern (Radiation Lobe) เป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นต่ำ รูป 2.3 แสดงแบบรูปแบบโพลาร์ (Polar Pattern) แบบสามมิติ ซึ่งแบ่งเป็นlobesต่างๆ ดังนี้

lobes หลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นlobesของการแผ่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแผ่กระจายคลื่นแรงที่สุด ตามรูป 2.4 มีlobesหลักอยู่ในทิศทาง  $\theta=0$  สำหรับสายอากาศบางชนิด อาจมีlobesหลักมากกว่าหนึ่งlobes เช่น สายอากาศแยกบีม (Split Beam Antenna)

lobes ย่อย (Minor Lobe) ได้แก่lobesอื่นๆนอกเหนือไปจากlobesหลัก

lobes ข้างหรือไซด์lobes (Side Lobe) เป็นlobesย่อยที่อยู่ติดกับlobesหลัก และอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับlobesหลัก

lobes หลัง (Back Lobe) เป็นlobesย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับlobesหลัก ปกติแล้วlobesย่อยจะเกิดจากการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ

ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ดีจะต้องกำจัดlobesเหล่านี้ให้น้อยที่สุด ระดับของlobesย่อยมักแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในlobesที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นของพลังงานในlobesหลัก

ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนของไซด์โลบ (Side Lobe Ratio) หรือระดับของไซด์โลบ (Side Lobe Level : SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของไซด์โลบน้อยกว่า  $-20$  dB

### 2.2.3 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (Half Power Beamwidth : HPBW)

คือมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลัก มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด โดยจะวัดในหน่วยขององศา

### 2.2.4 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรก (First Null Beamwidth : FNBW)

คือมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลัก มีค่าลดลงเป็นศูนย์ โดยจะวัดในหน่วยขององศา

### 2.2.5 อัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio : SLR)

คือ อัตราส่วนของลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง

$$SLR = \text{Main lobe level (dB)} - \text{Side lobe level (dB)} \quad (2.1)$$

## 2.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)

คำจำกัดความของคำว่าความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่กำหนดให้คือ กำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เกี่ยวกับสนามระยะไกล ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น และผลจากการกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $U$  = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ( $W$  / หน่วยมุมตัน)

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

ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้คือ

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2 \cdot \eta} \cdot [ |E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 ] \quad (2.3)$$

เมื่อ  $E_\theta, E_\phi$  = ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

$N$  = อินทริเนสิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้นแบบรูปของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึง ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นได้เช่นกัน กำลังงานทั้งหมดนี้ หาได้โดยอินทิเกรตความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นตาม (2.2) และ (2.3) ตลอดมุมตัน  $4\pi$  ทั้งหมดซึ่งจะได้

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในทิศทางต่างๆ เทียบกับสายอากาศไอโซทรอปิก ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_0 = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $U_{\max}$  = ค่าสูงสุดของความเข้มการแผ่กระจายคลื่น  
 $P_{rad}$  = กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด

## 2.5 ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ  $e_t$  จะใช้เมื่อเรานำค่านี้มาคูณกับการสูญเสียต่างๆ ที่ขั้วและภายในโครงสร้างของสายอากาศด้วย

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (2.6)$$

เมื่อ  $e_t$  = ประสิทธิภาพทั้งหมด (ไม่มีหน่วย)  
 $e_r$  = ประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนกลับ =  $(1 - |\Gamma|^2)$  (ไม่มีหน่วย)  
 $e_c$  = ประสิทธิภาพของตัวนำ (ไม่มีหน่วย)  
 $e_d$  = ประสิทธิภาพของฉนวน (ไม่มีหน่วย)  
 $\Gamma$  = สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของศักดาไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศ  
 $[\Gamma = (Z_m - Z_0) / (Z_m + Z_0)]$  เมื่อ  $Z_m$  = อิมพีแดนซ์ที่แค้นซ์ของสายอากาศ,  
 $Z_0$  = อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายส่ง]

## 2.6 อัตราขยาย (Gain)

คือความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าสภาพเจาะจงทิศทาง โดยคูณประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วยประสิทธิภาพของสายอากาศจะประกอบไปด้วย ประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนกลับ ประสิทธิภาพของตัวนำและประสิทธิภาพของฉนวน

$$G_0 = e_t D_0 \quad (2.7)$$

ในทางปฏิบัติเมื่อกกล่าวถึงอัตราขยายมักจะหมายถึง เพาเวอร์ของอัตราขยายสูงสุดดังแสดงใน (2.7)

$$G_0 (dBi) = 10 \log_{10} [e_t D_0] \quad (2.8)$$

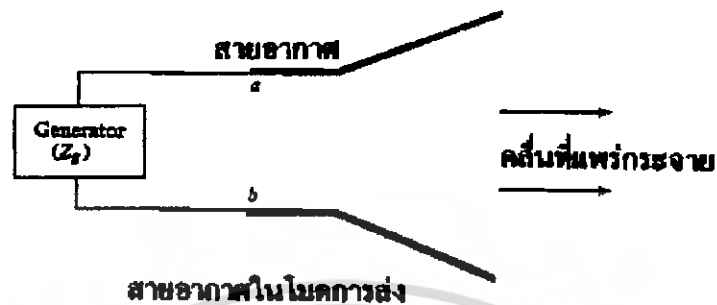
## 2.7 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

อิมพีแดนซ์ที่แค้นซ์ (Input Impedance) ของสายอากาศใด ๆ จะเป็นอิมพีแดนซ์ที่ขั้วสายอากาศนั้น ๆ อาจเป็นอัตราส่วนของศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศนั้น หรือเป็นอัตราส่วนสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่จุดใดๆ ในรูปที่ 2.5 เป็นขั้วของสายอากาศ อัตราส่วนของศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วนี้ เมื่อไม่ได้ต่อโหลดจะเป็นอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งมีค่า

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.5 สายอากาศในโหมดการส่ง

โดยทั่วไปค่าความต้านทานใน (2.9) จะถูกแบ่งออกเป็น สองส่วน ดังนี้คือ

$$R_A = R_r + R_L \quad (2.10)$$

เมื่อ  $R_r$  = ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

$R_L$  = ความต้านทานการสูญเสียของสายอากาศ

## 2.8 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง

อัตราส่วนคลื่นนิ่งเป็นอัตราส่วนของ ค่าแรงดันสูงสุด  $V_{\max}$  ของคลื่นนิ่ง ที่ได้มาจากการบวกกันของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนกลับที่มีเฟสตรงกัน ต่อ ค่าแรงดันต่ำสุด  $V_{\min}$  ของคลื่นนิ่ง ที่ได้มาจากการบวกกันของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนกลับที่มีเฟสตรงข้ามกัน

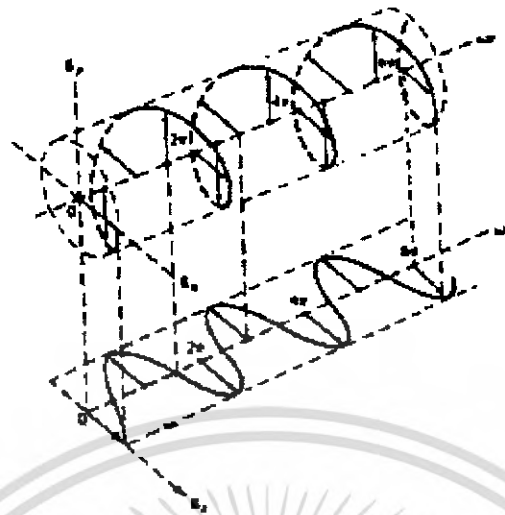
$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (2.11)$$

อัตราส่วนคลื่นนิ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์กับ สัมประสิทธิ์การสะท้อนได้ดังนี้

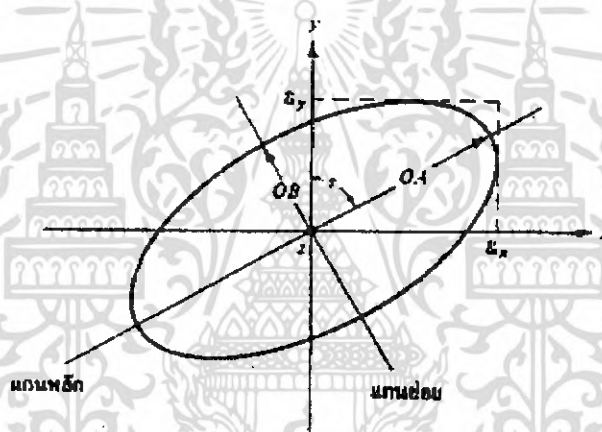
$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (2.12)$$

เมื่อ  $\Gamma$  = สัมประสิทธิ์การสะท้อน =  $\frac{V_r}{V_i}$  [  $V_r$  = คลื่นสะท้อนกลับ ,  $V_i$  = คลื่นตกกระทบ ]

## 2.9 โพลาริเซชัน



(ก) การหมุนของคลื่น



(ข) วงรีโพลาริเซชัน

รูปที่ 2.6 การหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระนาบ และวงรีโพลาริเซชัน

ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในระนาบ  $Z = 0$

ก่อนที่จะกล่าวถึงความหมายของโพลาริเซชัน (Polarization) ของสายอากาศ จะกล่าวถึงความหมายของ โพลาริเซชันของคลื่นเสียก่อน

โพลาริเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายนั้น เป็นรูปแสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไป ที่อธิบายทิศทางและขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลา รูปแสดงโพลาริเซชันจะแสดงการกวาดของยอดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ ณ ตำแหน่งที่ทำการสังเกตซึ่งคงที่ และการสังเกตนี้จะทำโดยมองตามหลังคลื่นที่เดินทางไป รูปที่ 2.6 ประกอบ

สำหรับโพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางหนึ่งทิศทางใด จะเป็นโพลาริเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศนั้น (เมื่อเป็นสายอากาศส่ง) หรือเป็นโพลาริเซชันของคลื่นที่มากกระทบสายอากาศนั้น จากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังงานที่ชี้ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาให้จะหมายถึงทิศทางที่สายอากาศมีแกนมากที่สุด ดังนั้น โพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกัน จะแตกต่างกัน

การแบ่งชนิดของโพลาริเซชัน อาจแบ่งเป็นแบบลิเนียร์โพลาริเซชัน (Linearly Polarization) โพลาริเซชันแบบวงกลม (Circularly Polarization) และ โพลาริเซชันแบบวงรี (Elliptically Polarization) ขึ้นอยู่กับลักษณะของการหมุนของยอดของเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า ถ้าเวกเตอร์ที่แสดงสนามไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา ณ จุดใดๆ ในสเปซเป็นเส้นตรงเสมอ จะเรียกว่าเป็นโพลาริเซชันแบบเส้นตรง หรือ ลิเนียร์โพลาริเซชัน แต่ถ้าสนามไฟฟ้ามีการหมุนรูปวงรี จะเรียกสนามแบบนี้ว่าเป็นโพลาริเซชันแบบวงรี ทั้งลิเนียร์โพลาริเซชันและโพลาริเซชันแบบวงกลมต่างก็เป็นกรณีพิเศษของโพลาริเซชันแบบวงรี

ถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (คือเมื่อมองตามหลังคลื่นแล้วจะเห็นมีการหมุนตามเข็มนาฬิกา) จะเรียกว่าเป็นโพลาริเซชันมือขวา ในขณะที่หากสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจะเป็นโพลาริเซชันมือซ้าย

### 2.9.1 ลิเนียร์โพลาริเซชัน, โพลาริเซชันแบบวงกลม และโพลาริเซชันแบบวงรี

จะเขียนสนามชั่วขณะเวลานั้นของคลื่นระนาบ ที่เดินทางในทิศทาง  $-Z$  ได้ว่า

$$\vec{E}(z;t) = \hat{a}_x \dot{E}_x(z;t) + \hat{a}_y \dot{E}_y(z;t) \quad (2.13)$$

จาก  $\dot{E}(x, y, z; t) = \text{Re} \left[ E(x, y, z) e^{j\omega t} \right]$

ส่วนประกอบของสนามชั่วขณะเวลานั้น สัมพันธ์กับค่าเชิงซ้อนของสนามนั้นดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{E}_x(z;t) &= \text{Re} \left[ E_x^- e^{j(\omega t + kz)} \right] = \text{Re} \left[ E_x e^{j(\omega t + kz + \phi_x)} \right] \\ &= E_x \cos(\omega t + kz + \phi_x) \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_y(z;t) &= \text{Re} \left[ E_y^- e^{j(\omega t + kz)} \right] = \text{Re} \left[ E_y e^{j(\omega t + kz + \phi_y)} \right] \\ &= E_y \cos(\omega t + kz + \phi_y) \end{aligned} \quad (2.15)$$

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

#### ก. ลิเนียร์โพลาริเซชัน

คลื่นซึ่งเป็นลิเนียร์โพลาริเซชัน ความต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบทั้งสองของสนาม จะมีค่าดังนี้

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi \quad ; \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.16)$$

#### ข. โพลาริเซชันแบบวงกลม

จะเกิดโพลาริเซชันแบบวงกลมได้ก็ต่อเมื่อขนาดของส่วนประกอบของสนามทั้งสองมีค่าเท่ากัน และความต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบทั้งสองเป็นจำนวนคี่เท่าของ  $\pi/2$  นั่นคือ

$$|\dot{E}_x| = |\dot{E}_y| \Rightarrow E_x = E_y \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= \phi_y - \phi_x \\ &= +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, n = 0, 1, 2, \dots \quad \text{for CW}\end{aligned}\quad (2.18)$$

$$\text{กับ} \quad = -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, n = 0, 1, 2, \dots \quad \text{for CCW}\quad (2.19)$$

ถ้าคลื่นเดินทางในทิศทางตรงกันข้าม (คือทิศทาง +z) เฟสใน (2.19) และ (2.20) ที่ทำให้เกิด CW (Clockwise) และ CCW (Counter Clockwise) จะต้องสลับกัน

### ค. โพลาริเซชันแบบวงรี

โพลาริเซชันแบบวงรีจะเกิดขึ้นเมื่อ ความต่างเฟสเป็นจำนวนคี่ของ  $\pi/2$  แต่ขนาดของสนามไฟฟ้าไม่เท่ากัน หรือความต่างเฟสไม่เป็นจำนวนคี่ของ  $\pi/2$  นั่นคือ

$$\left| \dot{E}_x \right| \neq \left| \dot{E}_y \right| \Rightarrow E_x \neq E_y$$

$$\begin{aligned}\text{เมื่อ} \quad \Delta\phi &= \phi_y - \phi_x \\ &= +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, n = 0, 1, 2, \dots \quad \text{for CW}\end{aligned}\quad (2.20)$$

$$\text{กับ} \quad = -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, n = 0, 1, 2, \dots \quad \text{for CCW}\quad (2.21)$$

$$\begin{aligned}\text{หรือ} \quad \Delta\phi &= \phi_y - \phi_x \neq \pm \frac{n}{2}\pi \\ &\Rightarrow > 0, n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad \text{for CW}\end{aligned}\quad (2.22)$$

$$\text{กับ} \quad = < 0, n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad \text{for CCW}\quad (2.23)$$

ในกรณีของโพลาริเซชันแบบวงรี รูปแสดงการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ จะเป็นวงรีเอียง ดังแสดงในรูป 2.5 (ข). อัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนย่อย จะเรียกว่าเป็นอัตราส่วนของแกน (Axial Ratio : AR) ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

$$AR = \frac{\text{major axis}}{\text{minor axis}} = \frac{OA}{OB}, \quad 1 \leq AR \leq \infty \quad (2.24)$$

$$OA = \left[ \frac{1}{2} \{ E_x^2 + E_y^2 + [E_x^4 + E_y^4 + 2E_x^2 E_y^2 \cos(2\Delta\phi)]^{1/2} \} \right]^{1/2} \quad (2.25)$$

$$OB = \left[ \frac{1}{2} \{ E_x^2 + E_y^2 - [E_x^4 + E_y^4 + 2E_x^2 E_y^2 \cos(2\Delta\phi)]^{1/2} \} \right]^{1/2} \quad (2.26)$$

การเอียงของวงรีเทียบกับแกน y สามารถแสดงด้วยมุมเอียง ดังนี้ คือ

$$\tau = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[ \frac{2E_x E_y \cos(\Delta\phi)}{E_x^2 - E_y^2} \right] \quad (2.27)$$

เมื่อวงรีวางตามแนวแกนหลัก [ $\tau = n\pi/2, n = 0, 1, 2, \dots$ ] แกนหลัก (ย่อย) เท่ากับ  $E_x(E_y)$  หรือ  $E_y(E_x)$  และอัตราส่วนของแกนมีค่าเท่ากับ  $E_x/E_y$  หรือ  $E_y/E_x$

### 2.9.2 โพลาริเซชันลอสแฟกเตอร์

โดยทั่วไปแล้วโพลาริเซชันของสายอากาศอาจไม่เหมือนกับโพลาริเซชันของคลื่นที่เดินทางมายังสายอากาศ ซึ่งเรียกว่าเกิดโพลาริเซชันมิสแมทช์ (Polarization Mismatch) ทำให้สายอากาศไม่สามารถดึงเอาพลังงานออกมาจากคลื่นได้สูงสุด เนื่องจากเกิดการสูญเสียจากโพลาริเซชัน (Polarization Loss) สมมติว่าสนามไฟฟ้าของคลื่นที่เดินทางเข้ามายังสายอากาศเขียนได้ดังนี้

$$\vec{E}_i = \hat{\rho}_w E_i \quad (2.28)$$

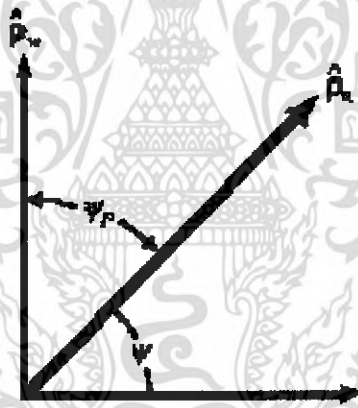
เมื่อ  $\hat{\rho}_w$  เป็นหน่วยเวกเตอร์ของคลื่น และโพลาริเซชันของสนามไฟฟ้าของสายอากาศรับมีค่าดังนี้ คือ

$$\vec{E}_a = \hat{\rho}_a E_a \quad (2.29)$$

เมื่อ  $\hat{\rho}_a$  เป็นหน่วยเวกเตอร์ของสายอากาศ จะกำหนดให้โพลาริเซชันลอสแฟกเตอร์ (Polarization Loss Factor : PLF) มีค่าดังนี้

$$PLF = |\hat{\rho}_w \cdot \hat{\rho}_a|^2 = |\cos \psi_p|^2 \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.30)$$

เมื่อ  $\psi_p$  เป็นมุมระหว่างหน่วยเวกเตอร์ทั้งสอง ดังแสดงในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 หน่วยเวกเตอร์โพลาริเซชันของคลื่นและของสายอากาศ

ถ้าเกิดโพลาริเซชันมิสแมทช์ ค่า PLF จะเป็นหนึ่งและสายอากาศจะรับกำลังงานได้มากที่สุด

### 2.10 ท่อนำคลื่นแบบกลม (Circular Waveguide)

ท่อนำคลื่นแบบกลมเป็นท่อนำคลื่นอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กัน ท่อนำคลื่นนั้นจะใช้เป็นรูปทรงลักษณะใดก็ได้ แต่ที่เลือกใช้เป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือกลม เพราะการคำนวณวิเคราะห์เกี่ยวกับโหมดการส่งคลื่นและรูปแบบของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กทำได้ง่ายกว่า ท่อนำคลื่นรูปทรงอื่นจึงไม่เป็นที่นิยมกัน

### 2.10.1 รูปแบบของคลื่นที่ส่งในท่อนำคลื่นแบบกลม

เนื่องจากท่อนำคลื่นเป็นรูปแบบทรงกลม จึงทำให้มีความสลับซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในการวิเคราะห์คำนวณ แก้ปัญหาต่างๆ จึงต้องใช้เบสเซลฟังก์ชัน (Bessel Function) มาช่วยคำนวณแทนที่จะใช้ฟังก์ชันตรีโกณมิติธรรมดาที่ใช้กัน การคำนวณทางคณิตศาสตร์ในการหาสูตรหารูปแบบสนาม E และ H ในท่อนำคลื่นต่างๆ เหล่านี้เป็นเรื่องยุ่งยากอยู่ จะนำสูตรหรือผลจากการวิเคราะห์มาใช้งานเลย

โหมดการส่งคลื่นในท่อนำคลื่นแบบวงกลม จะเหมือนกับโหมดของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า เส้นขอบเขตที่รอยต่อก็เหมือนกันสามารถนำมาใช้ได้ โหมดการส่งคลื่นที่ใช้ก็มีโหมด  $TE_{mn}$  และ  $TM_{mn}$  โดยที่  $m$  จะแสดงถึงจำนวนเต็มของความยาวคลื่นวนรอบท่อนำคลื่นแบบกลม (เวกเตอร์ย่อยในแนวรัศมีของสนามไฟฟ้า)  $n$  จะแสดงถึง จำนวนเท่าของครึ่งความยาว คลื่นที่เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำคลื่นแบบกลม

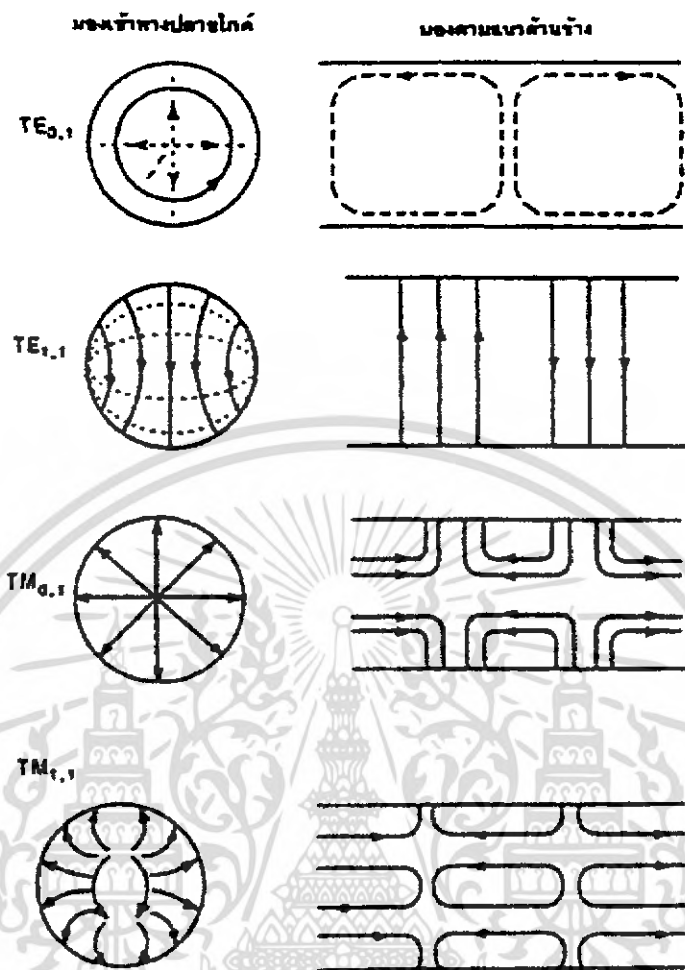
$m$  = จำนวนเต็มของความยาวคลื่นวนรอบด้าน ในของท่อนำคลื่นแบบกลม

$n$  = จำนวนเต็มของครึ่งความยาวคลื่นบนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำคลื่นแบบกลม



รูปที่ 2.8 ความหมายของ  $m$  และ  $n$  ในท่อนำคลื่นแบบกลม

ความสัมพันธ์ของ  $m$  และ  $n$  แสดงไว้ในภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบกลมดังรูปที่ 2.8 รูปแบบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (Electric and Magnetic Pattern) ที่ใช้งานกันในโหมด  $TE_{mn}$  และ  $TM_{mn}$  ของท่อนำคลื่นแบบกลมแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดง โหมด TE และ TM ของท่อนำคลื่น

### 2.10.2 ความยาวคลื่นคัตออฟ สำหรับท่อนำคลื่นแบบกลม

ในท่อนำคลื่นแบบกลม ความถี่ต่ำสุดที่สามารถส่งผ่านท่อนำคลื่นได้ คือ โหมด  $TE_{11}$  ซึ่งถือว่าเป็นโหมดหลักในการส่งคลื่น (Principle Mode) โหมดหลัก  $TE_{11}$  ของท่อนำคลื่นแบบวงกลมเทียบได้กับโหมด  $TE_{01}$  ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ถ้าเปรียบเทียบรูปแบบของสนาม (Field Pattern) จากโหมด  $TE_{01}$  กับโหมด  $TE_{11}$  ในรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าไม่มีความคล้ายคลึงกันเลย แต่เมื่อท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าถูกส่งด้วยคลื่นในโหมด และท่อนำคลื่นนี้นำไปต่อเข้ากับท่อนำคลื่นแบบกลมด้วยการเชื่อมต่อที่ดีไม่เกิดการมิสมแมทซ์คลื่นที่ผ่านเข้าไปในท่อนำคลื่นแบบกลมจะได้เป็น mode  $TE_{11}$  เนื่องจากทั้งคู่เป็นโหมดหลักนั่นเอง

การหาความยาวคลื่นตัดต่อของท่อนำคลื่นแบบกลม โดยต้องใช้ค่ารากของเบสเซลฟังก์ชัน (Roots of Bessel Functions) ซึ่งที่ความยาวคลื่นตัดต่อของโหมด  $TE_{mn}$  มีค่าเท่ากับ

$$\lambda_{cutoff} = \frac{2\pi r}{u'_{mn}} \quad (2.31)$$

โดยที่  $\lambda_{cutoff}$  = ค่าความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดในท่อนำคลื่นในโหมดที่กำหนด (cm)  
 $r$  = รัศมีด้านในของท่อนำคลื่นแบบกลม  
 $u'_{mn}$  = ค่ารากของสมการเบสเซล (มาจากตารางที่ 2.1 (ก.))

ส่วนความยาวคลื่นตัดต่อของโหมด  $TM_{mn}$  มีค่าเท่ากับ

$$\lambda_{cutoff} = \frac{2\pi r}{u_{mn}} \quad (2.32)$$

โดยที่  $\lambda_{cutoff}$  = ค่าความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดในท่อนำคลื่นในโหมดที่กำหนด (cm)  
 $r$  = รัศมีด้านในของท่อนำคลื่นแบบกลม  
 $u_{mn}$  = ค่ารากของสมการเบสเซล (มาจากตารางที่ 2.1 (ข.))

ตารางที่ 2.1 ค่ารากของเบสเซล

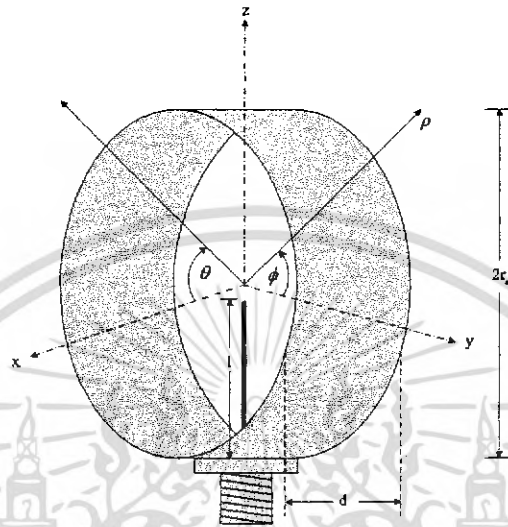
ค่ารากเบสเซลสำหรับโหมด TE		
$u'_{01} = 3.8321$		$u'_{02} = 7.016$
$u'_{11} = 1.841$		$u'_{12} = 5.332$
$u'_{21} = 3.054$		$u'_{22} = 6.706$
$u'_{31} = 4.201$		$u'_{32} = 8.031$
(ก)		
ค่ารากเบสเซลสำหรับโหมด TM		
$u_{01} = 2.405$	$u_{02} = 5.520$	$u_{03} = 8.654$
$u_{11} = 3.832$	$u_{12} = 7.016$	
$u_{22} = 5.136$		
(ข)		

จากตารางที่ 2.1 (ก.) จะพบว่า  $u'_{mn}$  มีค่าน้อยที่สุดซึ่งถ้านำไปแทนลงในสมการที่ 2.31 และทราบ ค่า  $r$  มากกว่าใช้ค่า  $u'_{mn}$  หมายความว่าต้องใช้ท่อนำคลื่นแบบกลมขนาดใหญ่ขึ้น ด้วยเหตุนี้ โหมด  $TE_{11}$  จึงถือว่าเป็นโหมดหลัก และเช่นเดียวกันในตารางที่ 2.1 (ข) โหมด  $TM_{01}$  จะเป็นโหมดหลักสำหรับคลื่น  $TM$  เนื่องจากท่อนำคลื่นแบบกลมนั้นจะมีความสมมาตรในทุกด้านทุกมุม การหมุนท่อนำคลื่นไปในลักษณะใดจึงไม่มีผลต่อการส่งคลื่น ผิดกับท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งเมื่อทำการหมุนจะเสียความสมมาตรและส่งผลกระทบต่อคลื่นที่ส่งผ่านท่อนำคลื่นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนวงกลม

สายอากาศที่นำมาใช้จะประกอบด้วยโพรบไฟฟ้าเชิงเส้นด้วยความยาว  $l$  ที่ต่อกับสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโดยผ่านตัวต่อแบบ N Type และถูกล้อมรอบด้วยวงแหวนที่มีโครงสร้างคล้ายรูปทรงกระบอกโดยมีรัศมีและความยาวของวงแหวนเป็น  $r_0$  และ  $d$  ตามลำดับซึ่งโพรบจะวางตัวตามแนวแกน  $z$  ดังรูปที่ 2.10

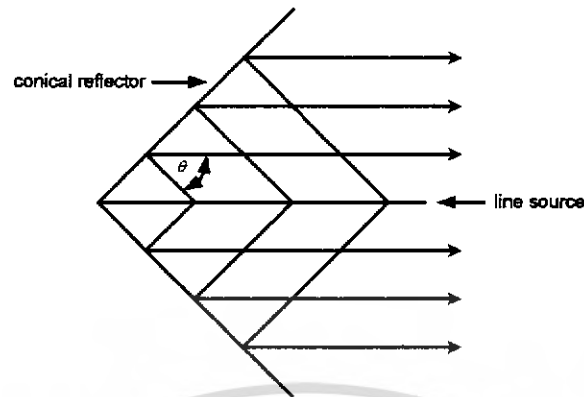


รูปที่ 2.10 สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลม

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

โดยทั่วไปแล้ว โหมดคลื่นอื่นๆที่ไม่ใช่โหมดคลื่นหลักจะเป็นรูปแบบของคลื่นที่เรียกว่า คลื่นจางหายและ โหมดคลื่นเหล่านี้จะมีขนาดลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะทางที่คลื่นเดินทางออกจากโพรบมีค่ามากขึ้น ด้วยเหตุนี้จะต้องเลือกระยะทางที่ห่างจากโพรบที่ทำให้ขนาดของโหมดคลื่นอื่น ๆ มีค่าน้อยมากจึงสามารถเพิกเฉยได้ เพื่อที่ว่าบริเวณขอบของวงแหวนที่ช่องเปิดทั้งสองด้านซึ่งเป็นจุดที่คลื่นจะเดินทางออกปะนั้นจะมีแต่รูปแบบเพียงรูปแบบเดียว ซึ่งก็คือการกำหนดค่าความยาวของวงแหวนนั่นเอง ส่วนการกำหนดค่ารัศมีจะต้องทำให้มีค่าความถี่ตัดออกที่ต่ำที่สุด เพื่อให้มีเพียงโหมดคลื่นหลักแพร่กระจายออกจากช่องเปิดทั้ง 2 ด้านของวงแหวน และโหมดคลื่นอื่นๆ ที่อยู่ติดกับโหมดคลื่นหลัก คือ  $TE_{21}$  จะต้องถูกตัดออกไป

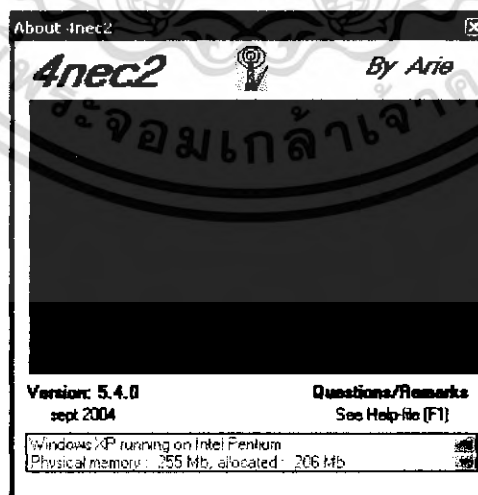
## 2.12 โครงสร้างของตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม 90 องศา



รูปที่ 2.11 ตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมที่ป้อนสัญญาณด้วยเส้นลวดตรง  
จากรูป แสดงตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยที่ป้อนสัญญาณด้วยแหล่งจ่ายที่มีลักษณะเป็นเส้นลวดตรงจะ  
เห็นได้ว่ารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่สะท้อนและปล่อยออกมาจากตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยนั้นจะมี  
มุม  $\theta$  คงที่ถ้าป้อนสัญญาณแบบเส้นตรงจะได้รูปแบบของค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นที่มีค่าคงที่แสดงคัง  
สมการ

$$\beta = k \cdot \cos \theta \quad (2.33)$$

รูปร่างของตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมนั้นมีรูปร่างได้เปรียบในเรื่องของขนาดที่เล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ  
กับสายอากาศแบบเรียงแถวซึ่งมีขนาดใหญ่ ข้อเสียของตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมนั้นมีช่วงความถี่ที่  
ใช้งานนั้นที่จำกัดเพราะความถี่นั้นจะขึ้นอยู่กับมุม  $\theta$  ที่ทำการแพร่กระจายคลื่น

2.13 การวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นโดยอาศัยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า  
(Numerical Electromagnetic Code)

รูปที่ 2.12 โปรแกรม NEC2 (Numerical Electromagnetic Code)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้ารุ่นที่ 2 หรือ NEC 2 เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาโดยห้องปฏิบัติการแห่งชาติลอเรนซ์ลิเวอร์มอร์ (Lawrence Livermore National Laboratory) ประเทศสหรัฐอเมริกา และเป็นโปรแกรมประเภทฟรีแวร์ซึ่งผู้ใช้สามารถดาวน์โหลดมาใช้ได้โดยง่าย การจะสั่งให้โปรแกรมทำงานนั้น ผู้ใช้จะต้องจัดเรียงรหัสทางคอมพิวเตอร์ให้กับโปรแกรมเพื่อให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์การตอบสนองทางแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศและโครงสร้างที่เป็นโลหะใดๆ ที่มีรูปทรงไม่เจาะจง รหัสทางคอมพิวเตอร์ของโปรแกรมที่ผู้ใช้จะต้องใส่เข้าไปนั้น คือ การสร้างโครงสร้างของสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยเส้นลวดเล็กๆ หรือ พื้นผิวจำนวนมากซึ่งในกรณีที่โครงสร้างถูกแทนด้วยเส้นลวด โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้า (Electric Field Integral Equation: EFIE) ในการหากระแสเหนี่ยวนำ (Induce Current) บนโครงสร้างนั้น ซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิด (Source) หรือสนามที่ตกกระทบ (Incident Field) และในกรณีที่โครงสร้างถูกแทนด้วยพื้นผิว โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Integral Equation: MFIE) ในการหาค่าของกระแสเหนี่ยวนำที่ต้องการ การกระตุ้นสามารถที่จะเป็นไปได้ทั้งแหล่งกำเนิดแรงดันที่ป้อนเข้าไป (Applied Voltage Source) หรือคลื่นระนาบที่ตกกระทบ (Incident Plane Wave) NEC2 สามารถใช้คำนวณหาค่ากระแสเหนี่ยวนำและประจุ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กระยะใกล้และไกลภาคตัดขวางเป็นเรดาร์ (Radar Cross Section: RCS) อิมพีแดนซ์ แอดมิทแตนซ์ (Admittance) อัตราขยาย (Gain) และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) การใช้พลังงาน (Power Budget) และการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ (Mutual Coupling)

สำหรับสายอากาศที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ ได้ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของสายอากาศ โดยการแทนโครงสร้างของสายอากาศด้วยเส้นลวดขนาดเล็ก ดังนั้น สมการที่ใช้จึงเป็นสมการเชิงอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้า ซึ่งสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้แก้ปัญหาโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวที่มีความหนาไม่มาก และไม่มีลักษณะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ปิดทับได้ คืว่าการใช้สมการอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็ก รูปแบบของสมการไฟฟ้าที่ใช้ใน NEC2 มีรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

### 2.13.1 สมการอินทิกรัลเชิงสนามในอากาศว่าง

รูปแบบของสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าที่ใช้ใน NEC2 สำหรับสนามไฟฟ้าของการกระจายกระแส  $\bar{J}$  คือ

$$\bar{E}(\bar{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_V \bar{j}_v(\bar{r}') \cdot \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') dV' \quad (2.34)$$

เมื่อ 
$$\bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') = (k^2 \bar{I} + \nabla \nabla) g(\bar{r}, \bar{r}')$$

$$g(\bar{r}, \bar{r}') = \exp(-jk|\bar{r} - \bar{r}'|) / |\bar{r} - \bar{r}'|$$

$$k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$$

$$\eta = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$$

และแบบแผนทางเวลา (Time convention) คือ  $\exp^{j\omega t}$   $\bar{\bar{I}}$  คือเอกลักษณ์คู่ (Identity Dyad)  
 $\hat{a}_x \hat{a}_x + \hat{a}_y \hat{a}_y + \hat{a}_z \hat{a}_z$  เมื่อการกระจายกระแสจำกัดให้อยู่บนพื้นผิวของตัวนำที่มีค่าความนำสมบูรณ์  
 สมการ(2.34) จะกลายเป็น

$$\bar{E}(\bar{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_s \bar{J}_s(\bar{r}') \cdot \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') dA' \quad (2.35)$$

เมื่อ  $\bar{J}_s$  เป็นความหนาแน่นกระแสพื้นผิว จุดสังเกต  $\bar{r}$  จะถูกกำหนดให้อยู่บนพื้นผิว  $s$  ดังนั้น  $\bar{r} \neq \bar{r}'$  ถ้า  
 $\bar{r}$  เข้าใกล้  $s$  ลักษณะคล้ายลิมิต สมการ(2.35)จะเป็น

$$\bar{E}(\bar{R}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_s \bar{J}_s(\bar{r}') \cdot \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') dA' \quad (2.36)$$

เมื่อค่าอินทิกรัลค่าหลัก  $\int_s$  ถูกใช้เพราะว่า  $g(\bar{r}, \bar{r}')$  ไม่จำกัดขอบเขต  
 สมการอินทิกรัลของกระแสเหนี่ยวนำบน  $s$  โดยสนามตกกระทบ  $\bar{E}^i$  สามารถหาได้จากสมการ  
 (2.36) และเงื่อนไขขอบเขตสำหรับ  $\bar{r}$  ที่แปรผันตาม  $s$

$$\hat{n}(\bar{r}) \times [\bar{E}^i(\bar{r}) + \bar{E}^s(\bar{r})] = 0 \quad (2.37)$$

เมื่อ  $\hat{n}(\bar{r})$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับพื้นผิวที่  $\bar{r}$  และ  $\bar{E}^s$  เป็นสนามเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำ  $\bar{J}_s$   
 เมื่อแทนค่า  $\bar{E}^s$  ในสมการ(2.262) ด้วยสมการ(2.261) สามารถเขียนสมการ(2.37) ได้เป็น

$$-\hat{n}(\bar{r}) \times \bar{E}^i(\bar{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \hat{n}(\bar{r}) \cdot \int_s \bar{J}_s(\bar{r}') \cdot (k^2 \bar{\bar{I}} + \nabla \nabla) g(\bar{r} - \bar{r}') dA' \quad (2.38)$$

สมการอินทิกรัลเวกเตอร์ในสมการ (2.38) สามารถถูกลดให้กลายเป็นสมการอินทิกรัลเชิงสเกลาร์เมื่อ  
 พื้นผิวตัวนำ  $s$  ถูกแทนที่ด้วยเส้นลวดทรงกระบอกบางๆ ซึ่งจะทำให้วิธีการแก้ปัญหาข้างขึ้นมากการสมมุติ  
 ที่ประยุกต์ใช้กับเส้นลวดบาง เรียกว่า วิธีการประมาณเส้นลวดบาง (Thin-wire Approximation) ซึ่งมี  
 รายละเอียดดังนี้

- (1) กระแสตามขวางที่สัมพันธ์กับกระแสตามแกนไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา
- (2) การเปลี่ยนแปลงโดยรอบในกระแสตามแกน ไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา
- (3) กระแสสามารถแทนได้ด้วยกระแสเชิงเส้น (Filament) บนแกนลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) กระแสสามารถแทนได้ด้วยกระแสเชิงเส้น (Filament) บนแกนลวด

(4) เงื่อนไขขอบเขตของสนามไฟฟ้าจะถูกบังคับให้มีเฉพาะในทิศทางตามแนวแกนเท่านั้น

การประมาณนี้สามารถนำมาใช้ได้เมื่อ รัศมีของเส้นลวดมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่นและความยาวเส้นลวดมีค่ามากๆ นอกจากนี้ สมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปในกรณีที่รัศมีของเส้นลวดมีขนาดใหญ่่มาก จนไม่สามารถใช้วิธีการประมาณเส้นลวดบางได้นั้น ก็ได้ถูกรวมไว้ใน NEC2 ด้วยซึ่งการประมาณนี้มีชื่อเรียกว่า การขยายออกของการประมาณเส้นลวดบาง(Extended Thin Wire Approximation)

จากคุณสมบัติในข้อ (1) (2) และ (3) กระแสพื้นผิว  $\bar{J}_s(\bar{r})$  บนเส้นลวดที่รัศมี  $a$  สามารถแทนกระแสของเชิงเส้น (Filament current)  $I$  เมื่อ

$$I(s)\hat{s} = 2\pi a \bar{J}_s(\bar{r}) \quad (2.39)$$

เมื่อ

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

$\bar{s}$  = เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่สัมผัสแกนเส้นลวดที่  $\bar{r}$  สมการ(2.39)จะกลายเป็น

$$-\hat{n}(\bar{r}) \times \bar{E}'(\bar{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \hat{n}(\bar{r}') \int_L \bar{I}(s') \cdot \left( k^2 \hat{s}' + \nabla \frac{\partial}{\partial s'} \right) g(\bar{r} - \bar{r}') ds' \quad (2.40)$$

เมื่อ การอินทิกรัลกระทำตามความยาวของเส้นลวด การบังคับเงื่อนไขขอบเขตให้มีเฉพาะทิศทางในแนวแกนทำให้สมการ(2.40)ลดรูปลงเป็นสมการ สเกลาร์

$$-\hat{s}(\bar{r}) \times \bar{E}'(\bar{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_L \bar{I}(s') \left( k^2 \hat{s} \cdot \hat{s}' - \frac{\partial^2}{\partial s \partial s'} \right) g(\bar{r} - \bar{r}') ds' \quad (2.41)$$

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

### 2.13.2 วิธี การจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมคำนวณทางไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

สำหรับการจำลอง โครงสร้างด้วยเส้นลวดนั้น อุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการจำลอง โครงสร้างด้วยรหัส NEC2 คือ เซกเมนต์ที่มีลักษณะตรงและสั้น การกำหนดเซกเมนต์สำหรับการออกแบบเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากเพราะจะมีผลต่อความถูกต้องของผลลัพธ์ จำนวนของเซกเมนต์ควรมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะต้องการสำหรับความถูกต้อง เพราะ โปรแกรมจะใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อจำนวนเซกเมนต์เพิ่มขึ้น

เซกเมนต์เส้นลวดจะถูก กำหนดโดยระบบพิกัด (Co-ordinate) ของจุดปลายทั้งสองข้างของเซกเมนต์ และขนาดของรัศมี การกำหนดความยาวเซกเมนต์ (Segment:  $\Delta$ ) จะสัมพันธ์กับค่าของความยาวคลื่น  $\lambda$  โดยปกติ  $\Delta$  ควรมีค่าน้อยกว่า  $0.1\lambda$  ที่ความถี่ที่ต้องการ ในบางครั้งอาจมีการใช้เซกเมนต์ที่ยาวมากกว่านี้บนเส้นลวดยาวที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ในขณะที่เซกเมนต์ที่สั้นกว่า เช่น  $0.05\lambda$  หรือน้อยกว่านี้ อาจจะต้องใช้ในการจำลองบริเวณที่มีความสำคัญของสายอากาศ ขนาดของเซกเมนต์จะเป็นตัวกำหนดการแก้ปัญหาสำหรับการหากระแสบนแบบจำลอง เนื่องจากกระแสจะถูกคำนวณที่ตรงกลางของแต่ละเซกเมนต์ เซกเมนต์ที่มีขนาดสั้นมากๆ เช่น น้อยกว่า  $10^{-3}\lambda$  ไม่ควรนำมาใช้ เพราะความเหมือนกันขององค์ประกอบค่าคงที่และโค ไซน์ของการกระจายกระแสจะทำให้ผลจากการเปรียบเทียบวิธีเชิงเลขไม่แม่นยำ

รัศมีของเส้นลวด (Wire Radius:  $a$ ) ซึ่งสัมพันธ์กับ  $\lambda$  จำถูกจำกัดโดยการประมาณที่ใช้ในคอร์เนล (Kemel) ของสมการอินทิกรัลเชิงสนาม ไฟฟ้า ซึ่งมีการประมาณ 2 แบบด้วยกันที่ใช้ใน NEC2 คือ เคอร์เนล แบบเส้นลวดบาง และเคอร์เนล แบบขยายออกของเส้นลวดบาง ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.13.1 สำหรับ เคอร์เนล แบบเส้นลวดบางนั้นกระแสบนพื้นผิวของแต่ละเซกเมนต์จะถูกลดกลายเป็นเส้นลวดนำไฟฟ้าเล็กๆของกระแสบนแกนเซกเมนต์ ส่วนในเคอร์เนล แบบขยายออกของเส้นลวดบาง กระแสจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิวของเซกเมนต์นั้น

การกระจายกระแสที่ใช้ใน NEC2 จะบังคับเงื่อนไขเหล่านี้ทำให้เซกเตอร์จะต้องต่อกันทางไฟฟ้าที่จุดปลายถ้าเซกเมนต์มีการทับซ้อนทับกันเกิดขึ้นที่ปลายของแต่ละอัน NEC2 จะไม่ยอมให้กระแสไหลจากเซกเมนต์หนึ่ง ไปยังเซกเมนต์อื่นๆ เซกเมนต์จะเหมือนกับต่อกันเมื่อระยะห่างของจุดปลายของแต่ละด้านมีค่าน้อยกว่า  $10^{-3}$  เท่าของความยาวเซกเมนต์ที่สั้นที่สุดดังนั้นถ้าเป็น ไปได้ควรเชื่อมต่อเซกเมนต์ด้วยวิธีการกำหนดระบบพิกัดที่เหมือนกัน

ข้อกำหนดของการจำลองโครงสร้างด้วยตาข่ายเส้นลวด(Wire-grid) มีดังต่อไปนี้

(1) เซกเมนต์จะต้องไม่ซ้อนทับกัน เนื่องจากการแบ่งกระแสระหว่างสองเซกเมนต์ที่ซ้อนทับกันนั้นไม่สามารถสรุปได้ เซกเมนต์ที่ซ้อนทับกันอาจจะมีผลในสมการเมตริกซ์เอกฐาน (Singular Matrix equation)

(2) การเปลี่ยนแปลงรัศมีที่มีความแตกต่างกันมากของเซกเมนต์ที่ เชื่อมกคอกันอาจจะมีผลทำให้ความหนาแน่นขาลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ ค่า  $\Delta/a$  มีค่าน้อย ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการให้รัศมีลดลงตามลำดับตลอดหลายเซกเมนต์

(3) จำเป็นที่จะต้องมิเชกเมนต์ที่จุดซึ่งมีการเชื่อมต่อกับโครงข่าย (Network) หรือ แหล่งกำเนิดแรงดัน (Voltage Source) สำหรับช่องว่างการกระตุ้น (Excitation Gap) ก็จะต้องมีเส้นลวดต่อเนื่องลากข้ามช่องว่าง ดังนั้น แรงดันตกคร่อมที่ต้องการสามารถระบุให้เป็นเงื่อนไขขอบเขตได้

(4) จำนวนเส้นลวดที่จะนำมาต่อที่จุดเชื่อมต่อใดๆ นั้น ไม่สามารถมีค่าเกิน 30 เส้นได้เนื่องจากข้อจำกัดของมิติในรหัส NEC2

ข้อมูลที่ใช้อธิบายสายอากาศและคุณสมบัติของสายอากาศที่ต้องการจะคำนวณจะเป็นอินพุตที่ใส่เข้าไป กลุ่มของรหัสข้อมูลในการทำงาน หนึ่งครั้งจะประกอบไปด้วยรหัสข้อมูล 3 ประเภท เริ่มต้นด้วยรหัสบรรยายรายละเอียดของตัวสายอากาศ ( CM : Comment Card) ต่อมาจะตามด้วยรหัส ข้อมูลระบุรูปแบบเส้นลวดทางเรขาคณิต ซึ่งจะระบุรูปทรงสายอากาศ (GW : Wire Specidication ) รหัสระบุรูปแบบเส้นลวด เป็นรหัสที่ใช้ในการกำหนดเส้นลวดขึ้นระหว่างจุดสองจุด ซึ่งมีลักษณะข้อมูลดังนี้

GW	11	12	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
ITG	NS	XW1	YW1	ZW1	XW2	YW2	ZW2	RAD	

ความหมายของตัวแปรแต่ละตัวที่จะต้องใส่ลงไป คือ

ITG(11) คือป้ายแสดงหมายเลข(Tag) ที่จะกำหนดให้เส้นลวดมีหมายเลขประจำเส้นลวดเป็นค่าใดๆ รวมทั้งเชกเมนต์ทุกเชกเมนต์ของเส้นลวดก็จะมีหมายเลขเส้นลวดนั้นด้วย

NS(12) คือจำนวนเชกเมนต์ที่จะแบ่งให้กับเส้นลวด

XW1(F1) คือพิกัด X ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

YW1(F2) คือพิกัด Y ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

ZW1(F3) คือพิกัด Z ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

XW2(F4) คือพิกัด X ของจุดปลายที่สองของเส้นลวด

YW2(F5) คือพิกัด Y ของจุดปลายที่สองของเส้นลวด

ZW2(F6) คือพิกัด Z ของจุดปลายที่สองของเส้นลวด

RAD(F7) คือรัศมีของเส้นลวด

สุดท้าย ของรหัสควบคุมโปรแกรม ซึ่งจะระบุตัวแปรทางไฟฟ้า เช่น ความถี่ (FR : Frequency ) การกระตุ้น (EX : Excitation) และกราวด์ (GN : Ground Parameter)

## บทที่ 3

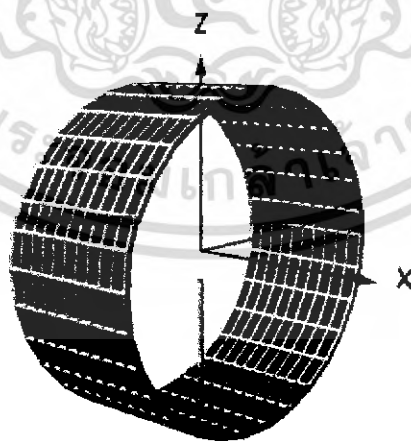
### การออกแบบ และ ผลการวิเคราะห์

#### 3.1 การวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศที่จะนำไปใช้ในการออกแบบ

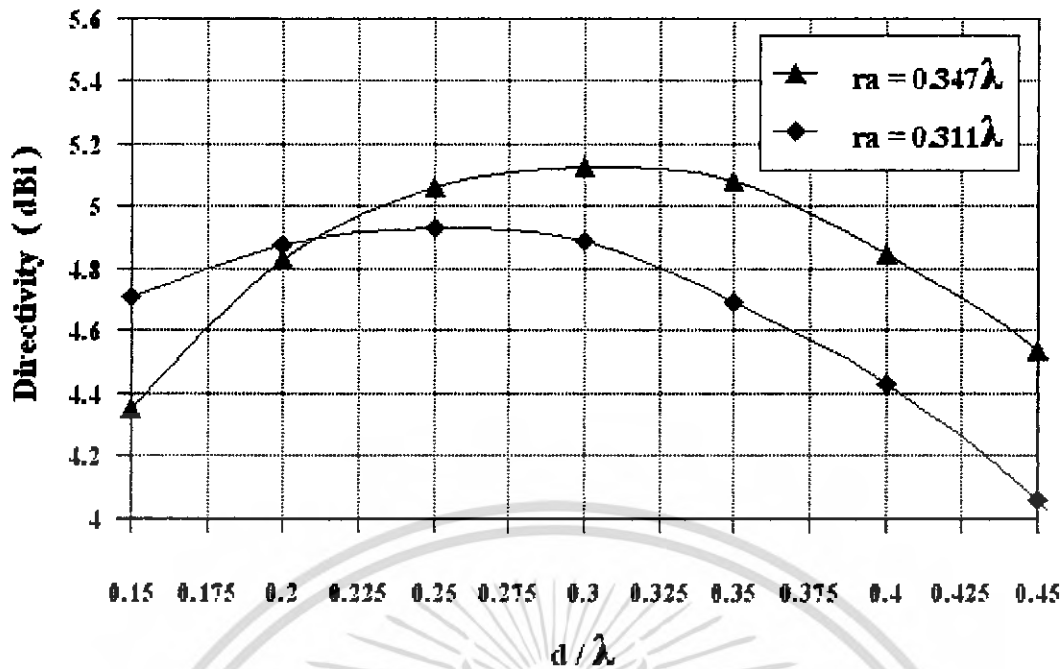
ในการวิเคราะห์รูปแบบ ของสายอากาศนั้นจะสนใจในส่วนของ ค่าขนาดของตัวสะท้อนคลื่นแบบวงกลม ค่ารีซีที และ ความยาวของตัวป้อนสัญญาณวงแหวนแบบวงกลม โดยค่าดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดรูปแบบของคลื่นที่ออกมาจากสายอากาศ และค่าสภาพเจาะจงทิศทางของตัวสายอากาศ ซึ่งถือเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่จะต้องพิจารณาก่อนเป็นอันดับแรกสิ่งต่อไปนี้จะต้องพิจารณาคือ ความยาวของโพรบที่ใช้กับตัวสายอากาศ โดยจะเป็นตัวกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ (Impedance) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio) ค่าการสูญเสียเนื่องมาจากการย้อนกลับ (Return loss) และค่าความกว้างของความถี่ที่ใช้งาน (Bandwidth) ของสายอากาศ การวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศที่จะนำไปใช้ในการออกแบบนั้นจะทำโดยโปรแกรม NEC2 ( Numerical Electromagnetic Code)

##### 3.1.1 การออกแบบค่ารีซีทีและความยาวของตัวสายอากาศวงแหวนแบบวงกลม

ในการพิจารณาถึงค่ารีซีทีของสายอากาศวงแหวนแบบวงกลมนั้น จะพิจารณาถึงค่ารีซีทีของตัวสายอากาศที่ทำให้คลื่นที่ออกจากตัวสายอากาศมีเพียงรูปแบบของคลื่นหลักเท่านั้น ในกรณีของสายอากาศวงแหวนแบบวงกลมมีรูปแบบของคลื่นหลักคือ  $TE_{11}$  จากค่าความถี่ 2.45GHz และทฤษฎีที่นำคลื่นแบบกลม (Circular Waveguide) ในบทที่ 2 ใช้สมการที่ 2.31 และสมการที่ 2.32 จะได้ว่าค่ารีซีทีที่เหมาะสมควรมีค่าอยู่ระหว่าง  $0.293\lambda < r_s < 0.486\lambda$  จากนั้นจะใช้โปรแกรม NEC2 ในการวิเคราะห์ หาค่ารีซีทีและความยาวของสายอากาศวงแหวนแบบวงกลมที่ให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงสุด



รูปที่ 3.1 สายอากาศวงแหวนแบบวงกลมที่ออกแบบโดยโปรแกรม NEC2



รูปที่ 3.2 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนรัศมี 0.347λ และ 0.311λ

ซึ่งค่ารัศมีเหล่านี้ ก็จะเหมาะสมกับความยาวของวงแหวนที่ไม่เหมือนกัน โดยแต่ละค่ารัศมี จะมีค่าที่เหมาะสมกับค่าความยาวเพียงค่าเดียวเท่านั้น ที่จะทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีค่าสูงสุด

จากรูปที่ 3.2 จะพบว่าที่ค่ารัศมี เท่ากับ 0.347λ ค่าความยาวที่เหมาะสมที่สุดที่จะให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีค่าสูงสุด และทำให้คลื่นที่ออกจากสายอากาศเป็นรูปแบบคลื่นหลัก  $TE_{11}$  นั้นมีค่าเท่ากับ 0.3λ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเรารู้ค่ารัศมีก็จะหาค่าความยาวที่เหมาะสมที่สุด ที่จะให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีค่าสูงสุดได้ ส่วนการออกแบบที่ค่าอื่นๆ นอกเหนือจากนี้ก็สามารถทำได้เช่นเดียวกัน เช่น ถ้าเรารู้ค่ารัศมีและค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ต้องการก็สามารถหาค่าความยาวที่เหมาะสมได้

ตัวสายอากาศวงแหวนแบบวงกลมที่ได้ทำการออกแบบไว้สำหรับปริภูมิพอร์ซัน คือ ค่ารัศมีเท่ากับ 0.347λ ความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.3λ โดยมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ 5.13 dBi

### 3.1.2 การออกแบบค่าความยาวโพรบ

ค่าความยาวของโพรบที่ได้ทำการวิเคราะห์กับเครื่องเน็ตเวิร์คอะนาไลเซอร์ (Network Analyzer) จะพบว่าในกรณีของตัวป้อนสัญญาณวงแหวนแบบวงกลมมีค่าความยาวโพรบที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 0.261λ ซึ่งการพิจารณาค่าความยาวโพรบนั้น จะต้องทำให้เข้าใกล้การเกิดรีโซแนนซ์ (resonance) ให้มากที่สุดเพื่อให้คลื่นที่ส่งออกไปมีพลังงานมากที่สุดก็จะทำให้สามารถส่งไปได้ไกลโดยค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการสำหรับการออกแบบสายอากาศนั้นมีค่าเท่ากับ 50 Ω เพื่อให้คลื่นที่ออกมาจากสายนำสัญญาณซึ่งมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 Ω สามารถส่งผ่านสายอากาศออกไปได้อย่างสมบูรณ์จากนั้นก็จะต้องทำให้สายอากาศมีค่า VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) ไม่ควรมีค่ามากกว่า 1.5 : 1 และค่าการสูญเสียย้อนกลับ (return loss) จะต้องมีค่ามากกว่า -14 dB ขึ้นไป ดังนั้นค่าความยาวโพรบที่ได้มานั้นก็ได้มาจากข้อกำหนดที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 การออกแบบค่าขนาดของตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม

ในการออกแบบตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม จะพิจารณาจากตำแหน่งที่คลื่นออกจากตัวสายอากาศไปตกกระทบกับตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมแล้วทำให้คลื่นที่สะท้อนขนานกับแกน ซึ่งจะพิจารณาตัวสะท้อนคลื่นที่มุม  $90^\circ$  โดยเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม ได้ออกแบบให้มีขนาด 2.1 ประมาณ 25 cm ซึ่งมีขนาดครอบคลุมสายอากาศวงแหวนแบบวงกลมและมีขนาดเหมาะสมกับการใช้งาน ในกรณีเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมมีขนาด  $1\lambda$  นั้นจะเกิดการถ่วงออกของคลื่นเนื่องจากขนาดของตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมไม่ครอบคลุมสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนแบบวงกลม



รูปที่ 3.3 ตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมที่มีมุม  $90^\circ$  ที่ออกแบบโดยโปรแกรม NEC2

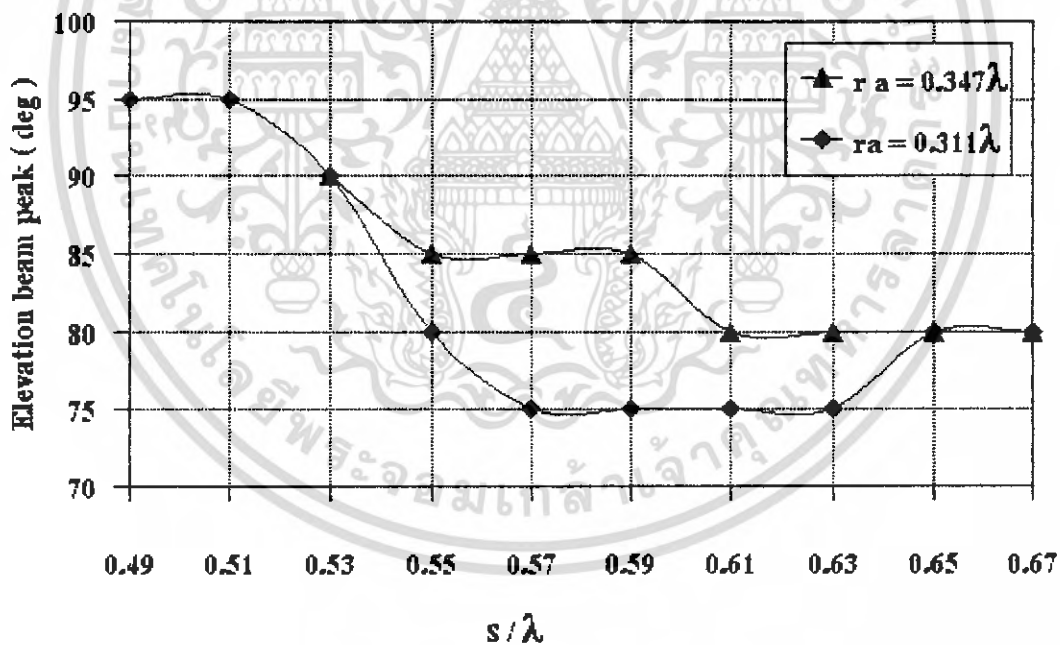
### 3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม NEC2 ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามแม่เหล็ก ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์กลางครั้งแรก ค่าอัตราส่วนระหว่างลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง ค่าอัตราส่วนระหว่างลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลัง และค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดของสายอากาศ เมื่อทำการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างโพรบกระตุ้นวงแหวนในตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม ซึ่งในการพิจารณาคุณลักษณะทั้งหมดนี้ระยะห่างระหว่างโพรบกระตุ้นวงแหวนกับตัวสะท้อนนั้นจะมีค่าไม่เท่ากัน โดยจะขึ้นอยู่กับค่ารัศมีของวงแหวนและความยาวของวงแหวน

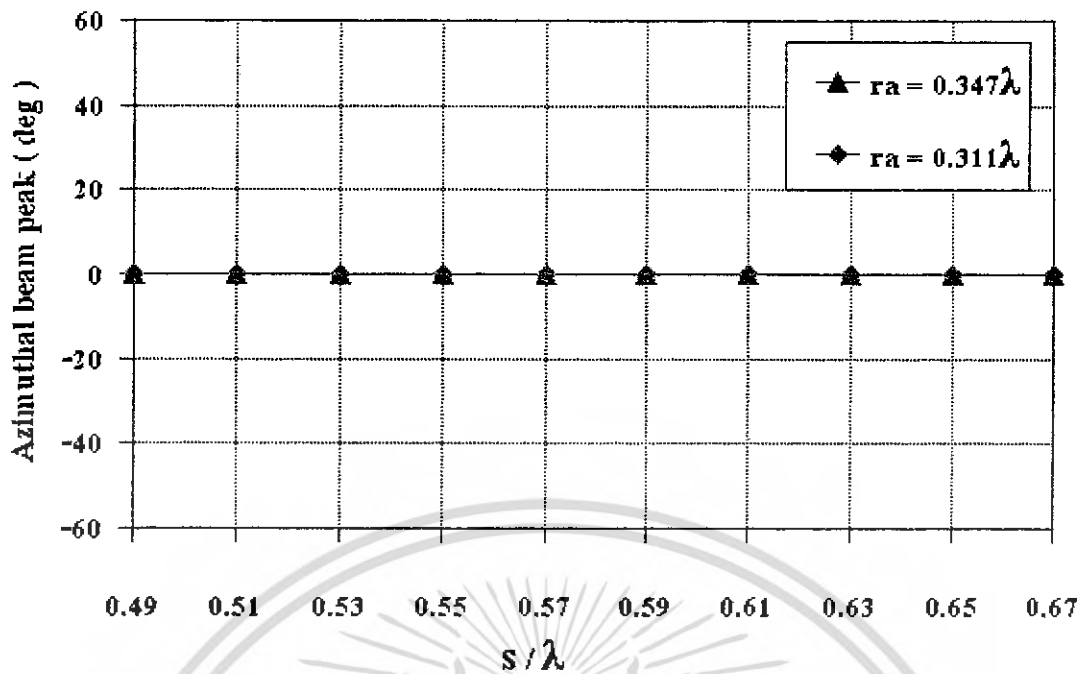
### 3.2.1 ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

ในการออกแบบสายอากาศแบบทิศทางเดียวนี้ ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบมุมยก และระนาบมุมกวาด เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง ที่จำเป็นต้องพิจารณาแยกตัวอย่าง เช่น หากต้องการให้การแพร่กระจายสนามแรงไปทางด้านหน้าของสายอากาศ ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าต้องมีค่าเท่ากับ  $90^\circ$  ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามแม่เหล็กต้องเท่ากับ  $0^\circ$  และเงื่อนไขนี้ต้องเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งสองระนาบด้วย

จากรูปที่ 3.4 (ก) และ (ข) แสดงค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้า และค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  ที่มีความยาวของตัวป้อนสัญญาณวงแหวนเท่ากับ  $0.3\lambda$  และตัวป้อนสัญญาณวงแหวนแบบวงกลมรัศมี  $0.311\lambda$  ที่มีความยาวของตัวป้อนสัญญาณวงแหวนเท่ากับ  $0.25\lambda$  เมื่อพิจารณาร่วมกับระยะที่น้อยที่สุดที่ใช้ได้นั้น ในกรณีตัวป้อนสัญญาณวงแหวนรัศมี  $0.347\lambda$  เมื่อพิจารณาระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  กับตัวป้อนสัญญาณที่มีระยะที่น้อยที่สุดเท่ากับ  $0.53\lambda$  ถึง  $0.67\lambda$  จะเกิดการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ในกรณีตัวป้อนสัญญาณวงแหวนรัศมี  $0.311\lambda$  พิจารณาระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  กับตัวป้อนสัญญาณ ที่มีระยะที่น้อยที่สุดเท่ากับ  $0.49\lambda$  ถึง  $0.67\lambda$  จะเกิดการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



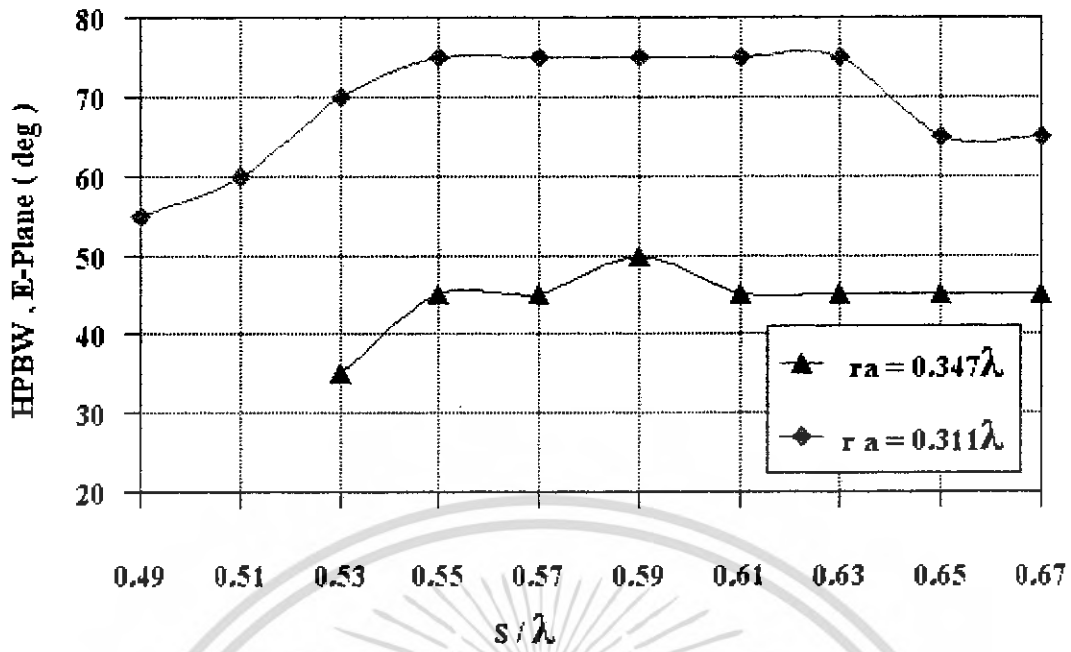
(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.4 ค่ามุมที่สนามสูงสุดของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแหวนวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  และ  $0.311\lambda$

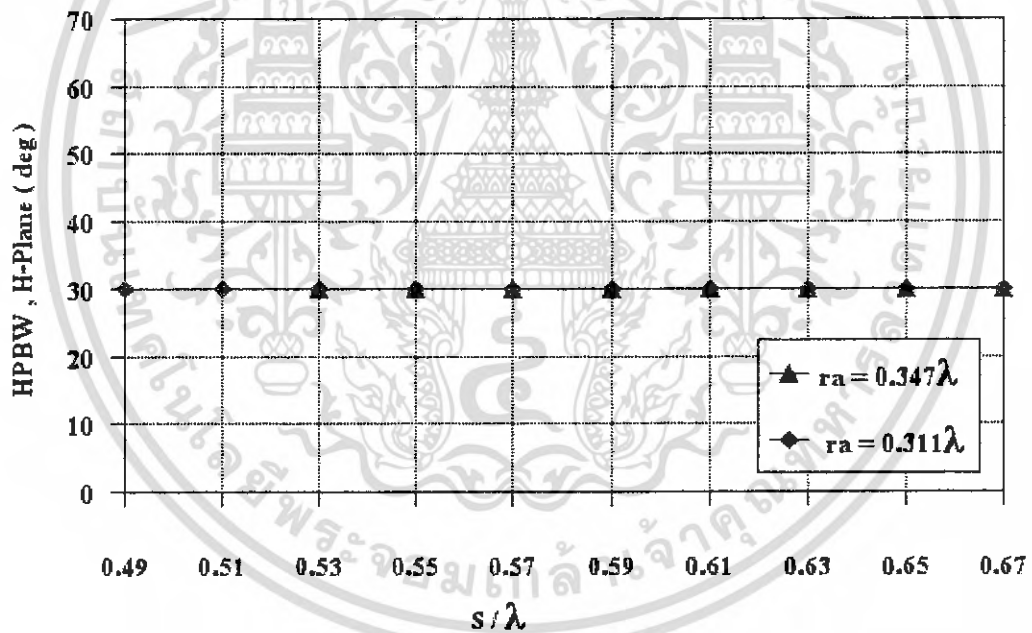
### 3.2.2 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง

ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ โดยค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ต้องการคือ มีลักษณะแคบๆ ทั้งนี้เพื่อให้สายอากาศสามารถแพร่กระจายคลื่น ไปยังทิศทางที่ต้องการ ได้แม่นยำยิ่งขึ้นและมีการสูญเสียกำลังงานในทิศทางอื่นน้อยๆ ด้วย

จากรูปที่ 3.5 (ก) และ(ข) แสดงค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศที่พิจารณาจากระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  กับโพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  และ  $0.311\lambda$  กรณีโพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  ในระนาบสนามไฟฟ้าค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.53\lambda - 0.59\lambda$  จากนั้นจะค่อนข้างคงที่ในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.61\lambda - 0.67\lambda$  ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็กค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งจะคงที่ในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.53\lambda - 0.67\lambda$  กรณีโพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมรัศมี  $0.311\lambda$  ในระนาบสนามไฟฟ้าค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.49\lambda - 0.55\lambda$  จากนั้นจะค่อนข้างคงที่ในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.57\lambda - 0.63\lambda$  ก่อนที่จะลดลงในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.65\lambda - 0.67\lambda$  ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็กค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งจะคงที่ในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.49\lambda - 0.67\lambda$



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



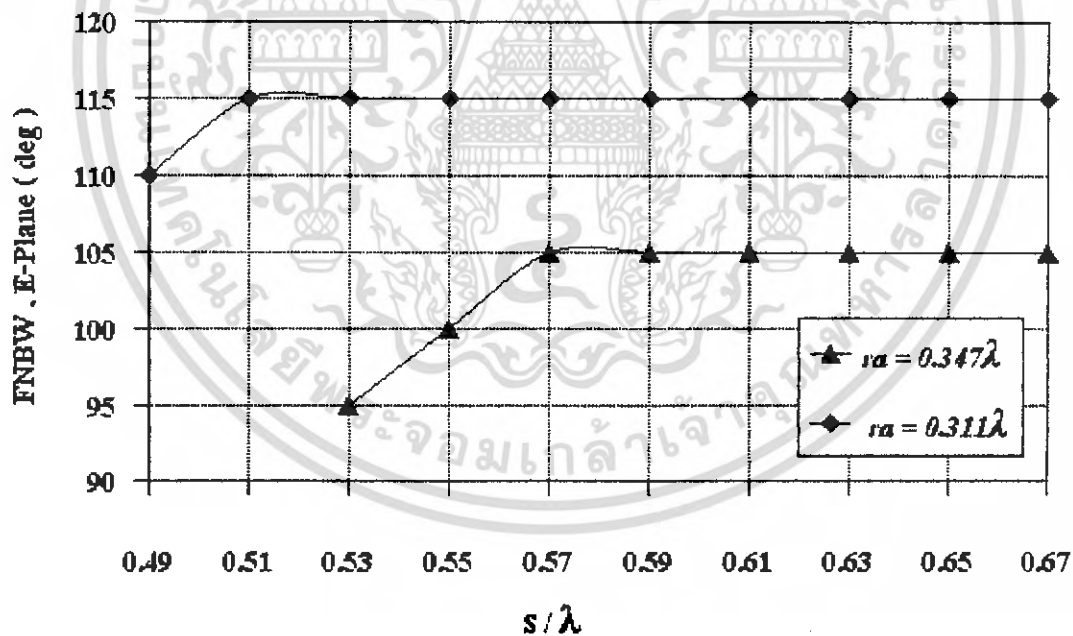
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.5 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  และ  $0.311\lambda$

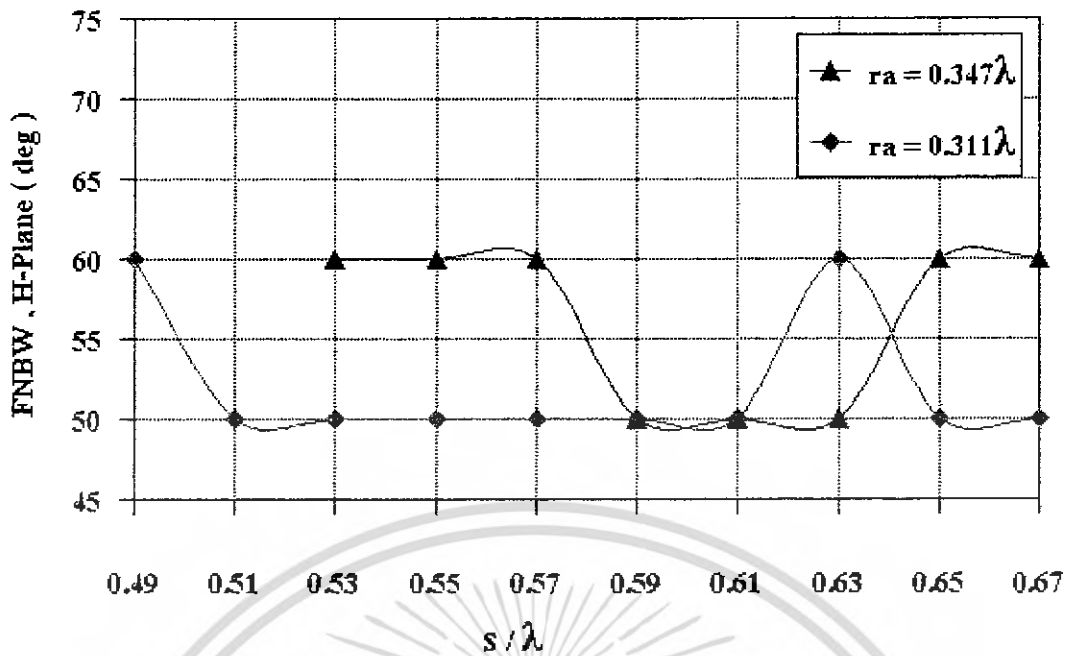
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรก

จากรูปที่ 3.6 (ก) และ(ข) แสดงค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรกของสายอากาศที่พิจารณาจากระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  กับโพรบกระดุนวงแหวน วงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  และ  $0.311\lambda$  กรณีโพรบกระดุนวงแหวนวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  ในระนาบสนามไฟฟ้าค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรกของสายอากาศจะเพิ่มขึ้นในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.53\lambda - 0.57\lambda$  จากนั้นจะคงที่ในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.57\lambda - 0.67\lambda$  ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็ก ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรกจะมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.53\lambda - 0.57\lambda$  จากนั้นจะลดลงในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.59\lambda - 0.63\lambda$  ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.63\lambda - 0.67\lambda$  กรณีโพรบกระดุนวงแหวนวงกลมรัศมี  $0.311\lambda$  ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรกของสายอากาศจะเพิ่มขึ้นในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.49\lambda - 0.51\lambda$  จากนั้นจะคงที่ในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.51\lambda - 0.67\lambda$  ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็ก ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรกจะลดลงในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.49\lambda - 0.53\lambda$  จากนั้นจะคงที่ในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.53\lambda - 0.59\lambda$  หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นจนถึงระยะ  $0.63\lambda$  ก่อนที่จะลดลงอีกครั้ง



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

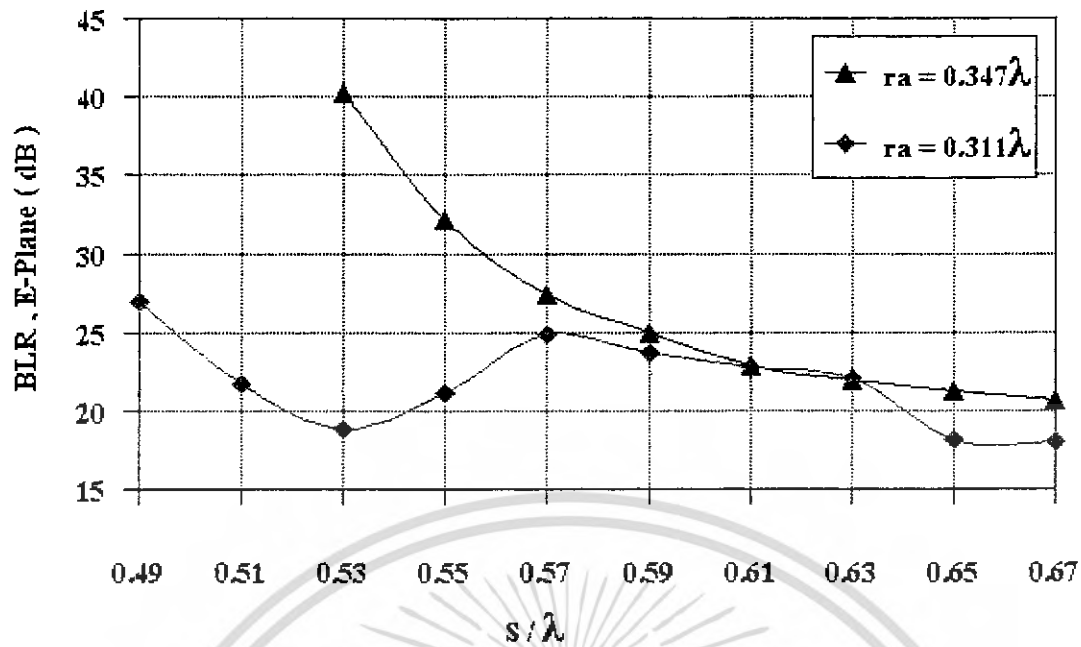


(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

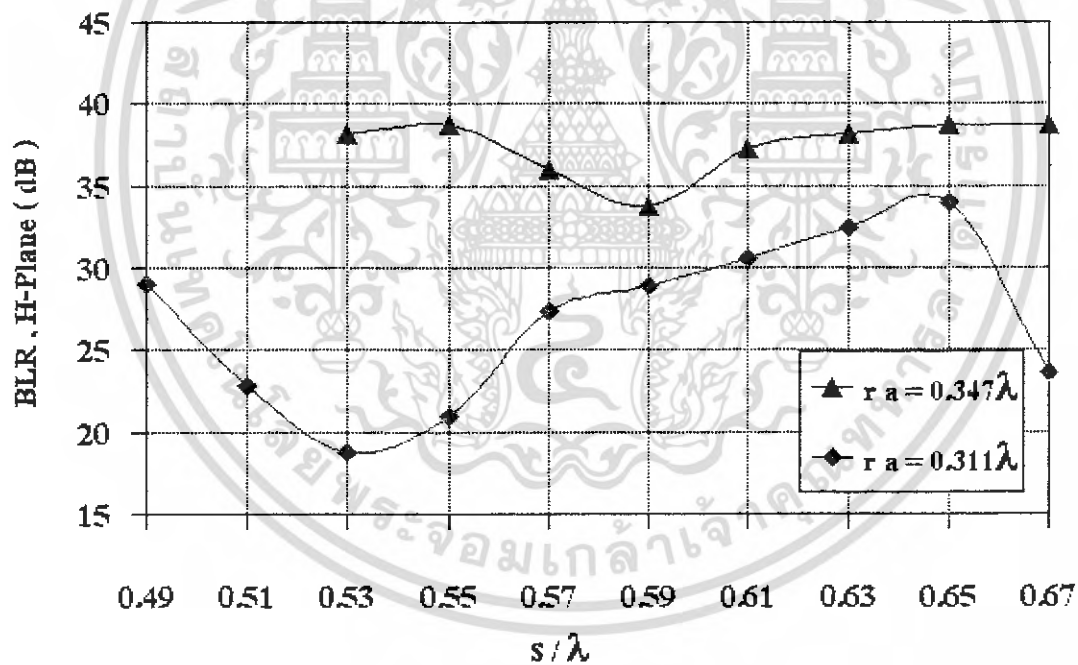
รูปที่ 3.6 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรกของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  และ  $0.311\lambda$

### 3.2.4 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลัง

จากรูป 3.7 (ก) และ (ข) แสดงค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลังของสายอากาศที่พิจารณาจากระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  กับโพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  และ  $0.311\lambda$  กรณีโพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  ในระนาบสนามไฟฟ้าค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลังจะมีแนวโน้มที่ลดลงในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.53\lambda - 0.67\lambda$  ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็ก ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลังจะค่อนข้างคงที่ในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.53\lambda - 0.67\lambda$  กรณีโพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมรัศมี  $0.311\lambda$  ในระนาบสนามไฟฟ้าค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลังจะมีแนวโน้มที่ลดลงในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.49\lambda - 0.53\lambda$  จากนั้นจะเพิ่มและลดลงอีกครั้งในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.55\lambda - 0.67\lambda$  ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็ก ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลังจะมีแนวโน้มที่ลดลงในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.49\lambda - 0.53\lambda$  จากนั้นจะเพิ่มและลดลงอีกครั้งในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.55\lambda - 0.67\lambda$



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

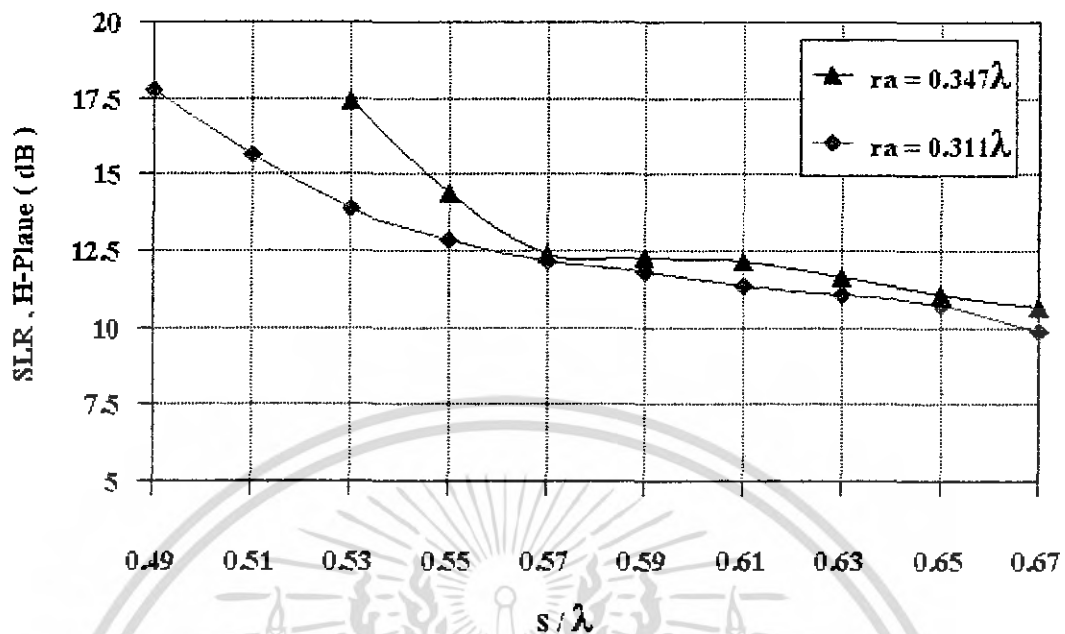


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.7 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลังของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่น แบบกรวยกลม  $90^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  และ  $0.311\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.5 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง

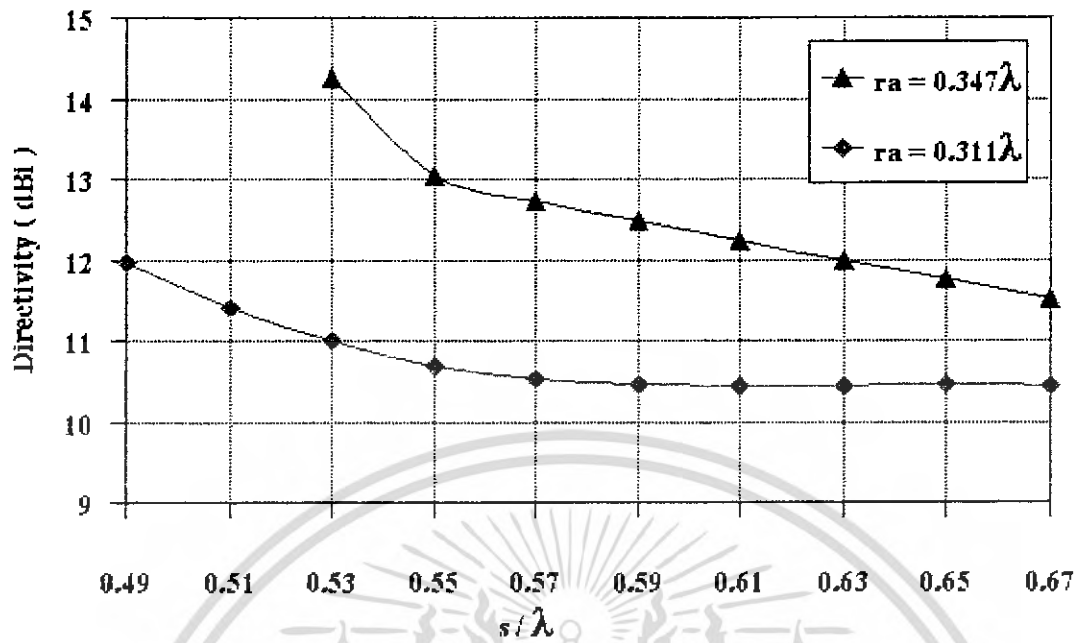


รูปที่ 3.8 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง ของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่น แบบกรวยกลม  $90^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  และ  $0.311\lambda$

จากรูป 3.8 แสดงค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างของสายอากาศที่พิจารณาจากระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  กับ โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  และ  $0.311\lambda$  กรณีโพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  ในระนาบสนามไฟฟ้าจะไม่มีลำคลื่นย่อยด้านข้าง ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็ก ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างจะมีแนวโน้มที่ลดลงในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.53\lambda - 0.67\lambda$  กรณีโพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมรัศมี  $0.311\lambda$  ในระนาบสนามไฟฟ้าจะไม่มีลำคลื่นย่อยด้านข้าง ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็ก ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างจะมีแนวโน้มที่ลดลงในช่วงระยะห่างระหว่าง  $0.49\lambda - 0.67\lambda$

### 3.2.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ

จากรูป 3.9 แสดงค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่พิจารณาจากระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  กับ โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  และ  $0.311\lambda$  เมื่อทำการพิจารณาจะพบว่าในกรณีโพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  นั้นจะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางมากกว่าในกรณีโพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมรัศมี  $0.311\lambda$  เมื่อทำการเปรียบเทียบในทุกช่วงระยะห่างตั้งแต่  $0.53\lambda - 0.67\lambda$  ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของโพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $14.26\text{dB}$  ที่ระยะ  $0.53\lambda$  ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงที่สุดระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  กับ โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  และเมื่อทำการเลื่อนระยะโพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  และ  $0.311\lambda$  ให้ห่างจากตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  ตามระยะห่างระหว่าง  $0.49\lambda - 0.67\lambda$  จะเห็นได้ว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศนั้นจะมีค่าลดลง



รูปที่ 3.9 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  และ  $0.311\lambda$

ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งหมดที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าสายอากาศตัวสะท้อนคลื่น แบบกรวยกลม  $90^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  มีคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น โดยรวมที่ค่อนข้างดีกว่าสายอากาศตัวสะท้อนคลื่น แบบกรวยกลม  $90^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี  $0.311\lambda$  การวิเคราะห์นี้จะนำไปสู่การออกแบบและการสร้างต่อไป

## บทที่ 4

### การออกแบบสร้าง และทดสอบ

#### 4.1 การออกแบบสร้าง

จากการวิเคราะห์ในบทที่ 3 ทำให้ทราบถึงขนาด และส่วนประกอบต่างๆ ที่เหมาะสมสำหรับที่จะใช้ในการออกแบบสร้างสายอากาศ โดยให้ทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งมีขนาดของ ตัวป้อนสัญญาณวงแหวนวงกลม ล้อมรอบ โพรบเชิงเส้นไฟฟ้า มีค่ารัศมีของวงแหวน เท่ากับ 0.347 $\lambda$  ประมาณ 4.25 cm ค่าความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.3 $\lambda$  หรือ ประมาณ 3.67 cm และมีค่าความยาวโพรบประมาณ 3.2 cm และขนาดของ ตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม 90° มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2 $\lambda$  ประมาณ 25 cm



รูปที่ 4.1 ตัวป้อนสัญญาณแบบวงแหวนรัศมี 0.347 $\lambda$



รูปที่ 4.2 สายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี 0.347 $\lambda$

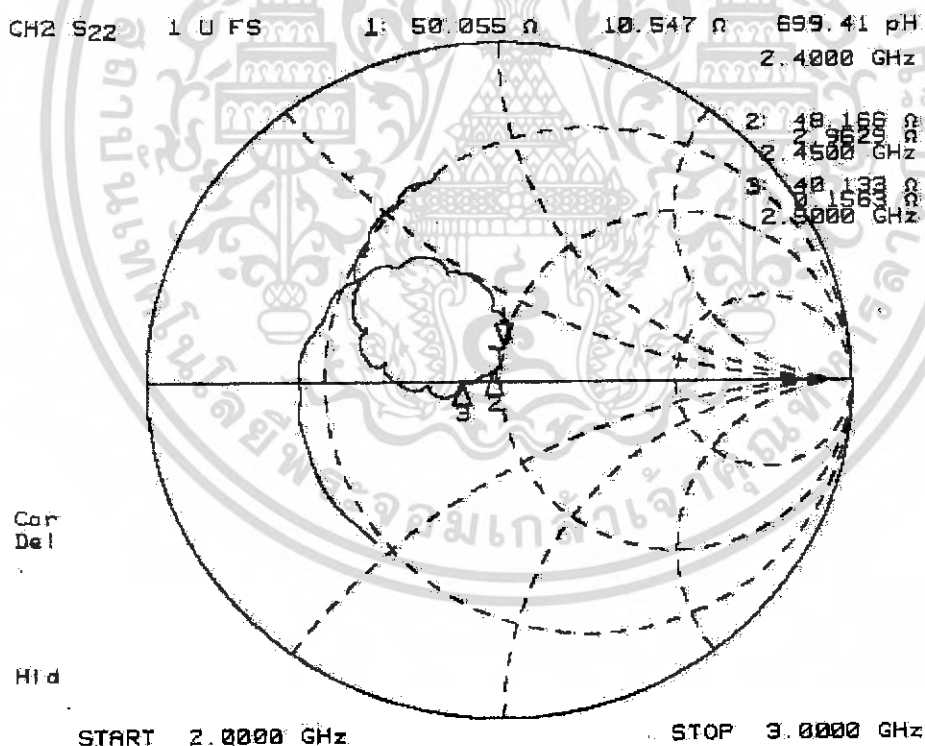
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 การทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบเพื่อวัดคุณสมบัติของสายอากาศนับว่าเป็นเรื่องสำคัญมากเพราะการทดสอบนั้นทำให้แน่ใจได้ว่าสายอากาศที่สร้างขึ้นนั้นมีคุณสมบัติตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ นอกจากนี้ในสายอากาศที่มีโครงสร้างไม่เอื้ออำนวยในการออกแบบทางทฤษฎีได้อย่างละเอียดถูกต้อง ก็จำเป็นต้องใช้การออกแบบโดยใช้การทดสอบคุณสมบัติเข้ามาช่วย ในการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศจะทำโดยเครื่องเน็ตเวิร์คอะนาไลเซอร์ (Network Analyzer) ในส่วนคุณสมบัติของสายอากาศที่ต้องคำนึงถึง เช่น ค่าอิมพีแดนซ์ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าการสูญเสียย้อนกลับ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น การโพลาไรซ์ และ อัตราการขยาย

ในการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ ตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  โดยการเลื่อนระยะตัวป้อนสัญญาณให้ห่างจากตัวสะท้อนคลื่นเพื่อจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าการสูญเสียย้อนกลับ ที่ดีที่สุด

##### 4.2.1 การทดสอบค่าอิมพีแดนซ์



รูปที่ 4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ ของ สายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  ที่ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมกับตัวป้อนสัญญาณ ด้วยวงแหวน เท่ากับ  $0.63\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

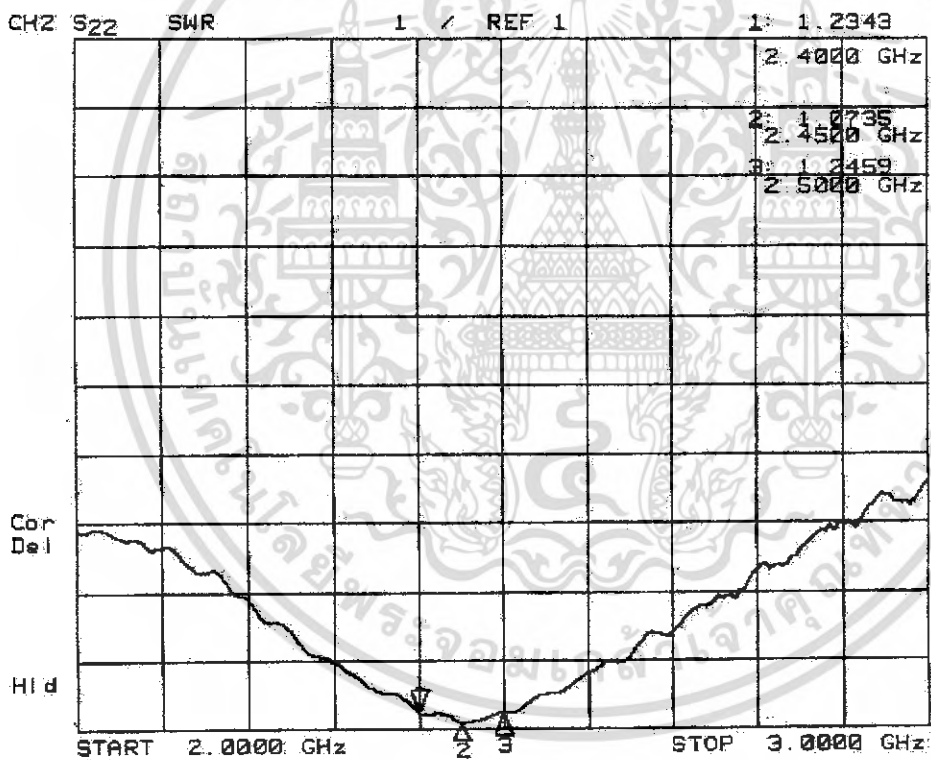
ในการทดสอบ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการในการใช้งานคือ  $50 \Omega$  โดยทั่วไปนั้นอิมพีแดนซ์ของสายอากาศนั้นจะมีส่วนที่เป็นค่าความต้านทานและส่วนที่เป็นค่ารีแอกแตนซ์ในการทดสอบจะต้องทำให้ค่าความต้านทานมีค่าใกล้เคียง  $50 \Omega$  มากที่สุดและจะต้องพยายามกำจัดค่ารีแอกแตนซ์ให้เหลือน้อยที่สุดเพื่อจะเกิดการแมตซ์ทางอิมพีแดนซ์มากที่สุด

ผลจากการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมกับตัวป้อนสัญญาณด้วยวงแหวน เท่ากับ  $0.63\lambda$  จะได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $48.16 + j2.96 \Omega$

#### 4.2.2 การทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

ในการทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่ง อัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ไม่เกิดคลื่นสะท้อนกลับคือ  $1 : 1$  ดังนั้นค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ต้องการนั้นจะต้องมีค่าใกล้เคียง  $1 : 1$  มากที่สุดเพื่อที่จะทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับน้อยที่สุด โดยทั่วไป ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่สามารถจะนำมาใช้งานจริงไม่ควรเกิน  $1.5 : 1$



รูปที่ 4.4 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของ สายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  ที่ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมกับตัวป้อนสัญญาณด้วยวงแหวน เท่ากับ  $0.63\lambda$

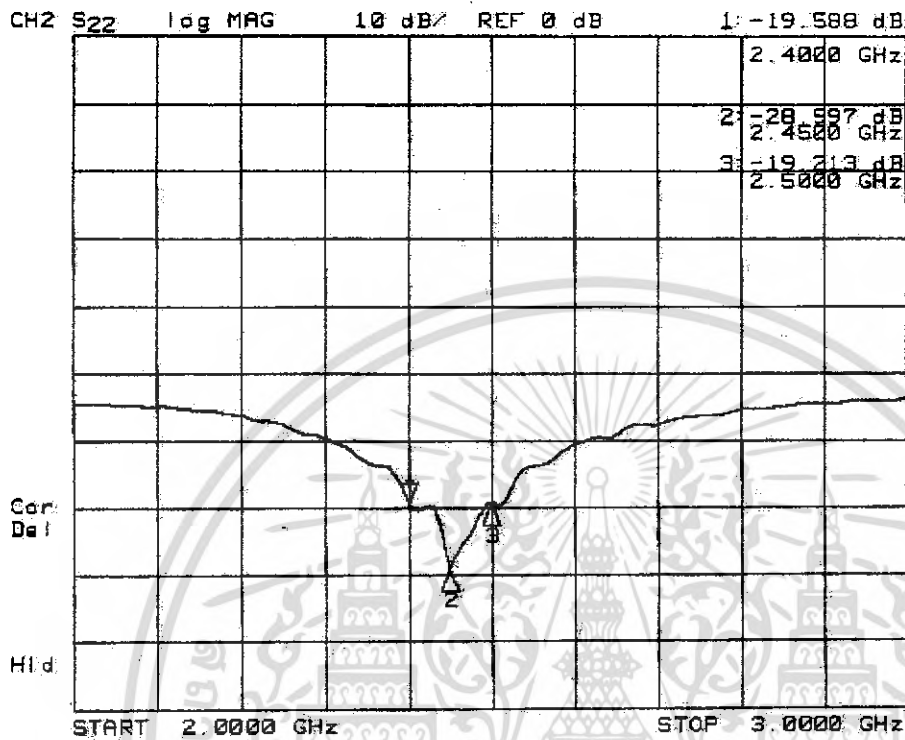
ผลจากการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ

ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมกับตัวป้อนสัญญาณด้วยวงแหวน เท่ากับ  $0.63\lambda$  จะได้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศเท่ากับ  $1:1.07$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 การทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ

ในการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ เป็นการทดสอบกำลังงานที่สะท้อนกลับจากสายอากาศ โดยคิดจากค่า สัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $\Gamma$ ) มีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB) โดยทั่วไปแล้ว ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ที่ใช้งานได้จริงไม่ควรมากกว่า -14 dB



รูปที่ 4.5 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี 0.347 $\lambda$  ที่ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมกับตัวป้อนสัญญาณด้วยวงแหวน เท่ากับ 0.63 $\lambda$

ผลจากการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ

ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมกับตัวป้อนสัญญาณด้วยวงแหวน เท่ากับ 0.63 $\lambda$

จะ ได้ค่า การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศเท่ากับ - 28.99 dB

#### 4.2.4 การทดสอบหาช่วงความถี่ที่ใช้งาน

จากการทดสอบ ค่าอิมพีแดนซ์ และ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ของ สายอากาศ จะพบว่าช่วงความถี่ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ ประมาณ 50  $\Omega$  และ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่าไม่เกิน 1.5:1 นั้นมีช่วงความถี่ประมาณ 2.4GHz ถึง 2.5GHz

#### 4.2.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ การทดสอบนั้นจะทำในห้องที่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมน้อยที่สุด สามารถทำได้ในห้องไร้คลื่นสะท้อนซึ่งเป็นห้องที่สร้างขึ้นเพื่อไม่ให้มีคลื่นสะท้อนกลับออกจากผนังทุกด้านของห้อง ส่วนของระยะที่ใช้ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะใช้บริเวณสนามระยะไกลซึ่งเป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่การแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ บริเวณสนามระยะไกล

$$\text{Far Field Distance}(R) = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.1)$$

โดยที่ R = ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับ กับสายอากาศส่ง (เมตร)

D = มิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศ (เมตร)

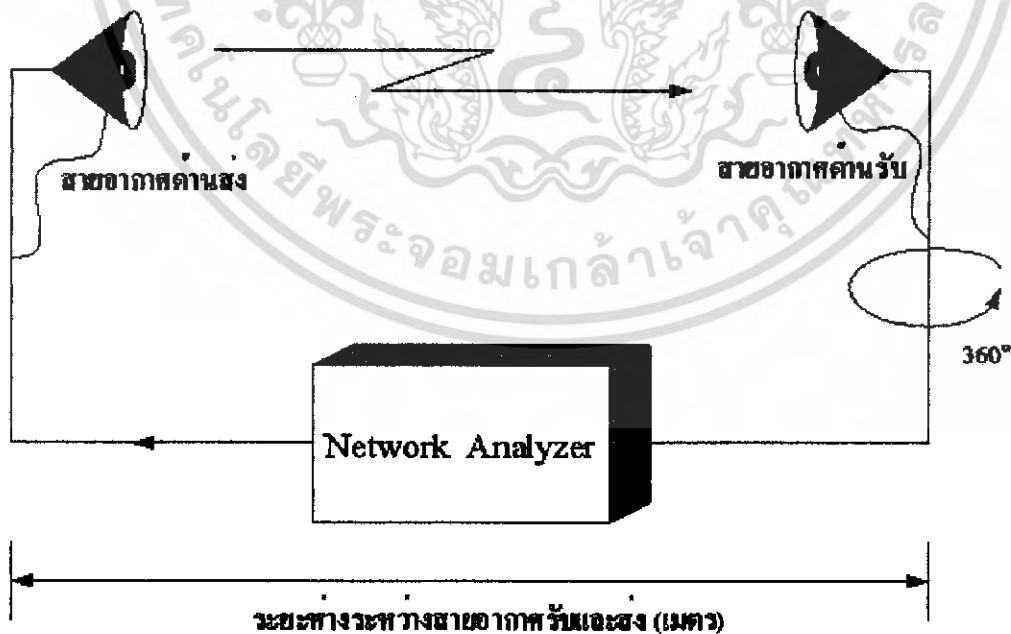
ระยะที่ใช้ในการทดสอบ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

โดยที่ D = 0.25 เมตร

$\lambda = 0.12245$  เมตร

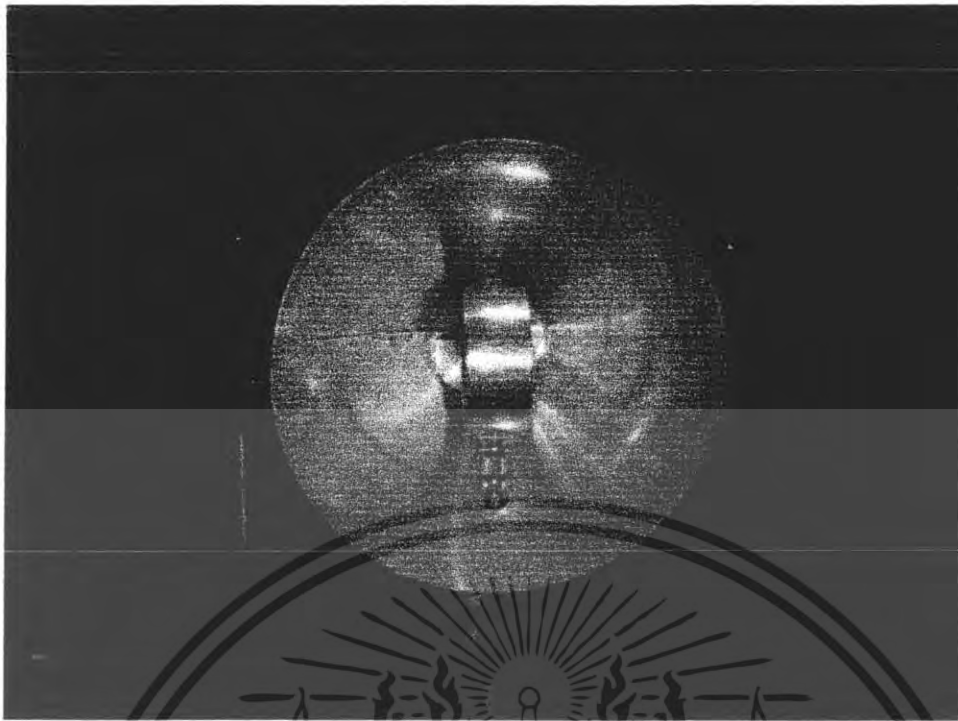
$$\text{Far Field Distance}(R) = \frac{2(0.25)^2}{0.12245} = 1.02 \text{ m.}$$

ในการทดสอบนี้จะใช้ระยะ far field ที่มากกว่า 1.02 m. ในระนาบ E - Plane โดยติดตั้งสายอากาศที่ใช้รับและส่ง ให้โพรบตั้งฉากกับพื้นระนาบ โดยนำสายอากาศ ไปติดตั้งที่แท่นหมุนซึ่งจะหมุนด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ ครึ่งละ 5 องศา แล้ววัดค่ากำลังสนามที่องศาต่างๆ จนครบ 360 องศา โดยใช้เครื่องเน็ตเวิร์กอะนาไลเซอร์ (Network Analyzer) เป็นตัวส่งและรับ ส่วนการวัดค่ากำลังสนามในระนาบ H-Plane นั้น ต้องติดตั้งสายอากาศที่ใช้รับและส่ง ให้โพรบขนานกับพื้นระนาบ แล้วทำการทดลองเช่นเดียวกันกับ E - Plane



รูปที่ 4.6 วิธีการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

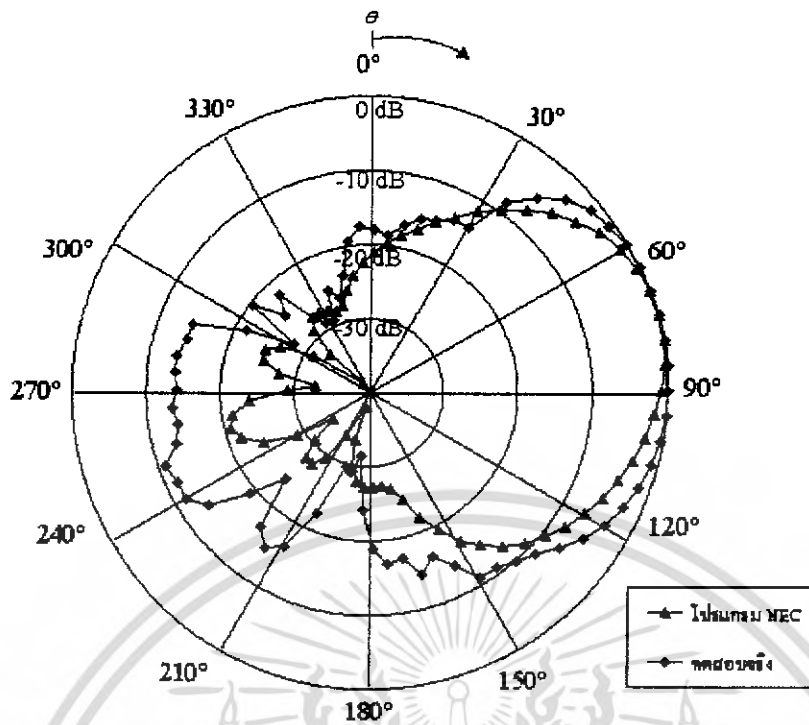


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

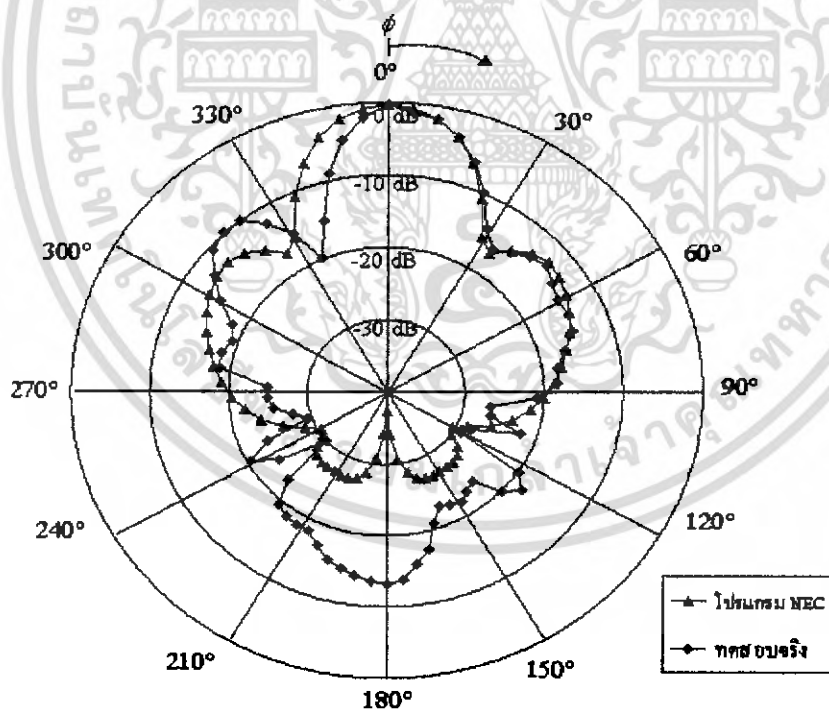
รูปที่ 4.7 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$

ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี 0.347λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม NEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

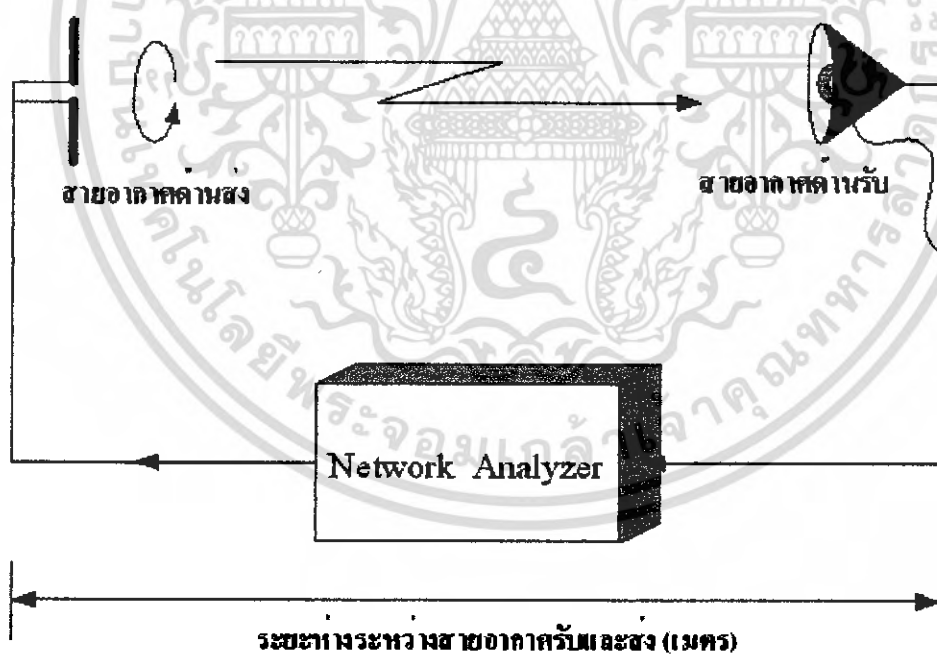
ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ในระนาบสนามไฟฟ้า มีค่าความกว้างของลำคลื่นที่ กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งเท่ากับ 70 deg และค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลังมีค่าเท่ากับ 13.713 dB ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็ก มีค่าความกว้างของลำคลื่นที่ กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งเท่ากับ 30 deg และค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลังมีค่าเท่ากับ 14.8 dB

#### 4.2.6 การวัดโพลาริเซชันของสายอากาศ

การวัดโพลาริเซชันนั้นนับว่าเป็นสิ่งจำเป็นในกรณีที่เราต้องการส่งคลื่นที่มีโพลาริเซชัน อย่างใดอย่างหนึ่งออกจากสายอากาศ แล้วทำการตรวจสอบจากการวัดว่าได้คลื่นที่มีโพลาริเซชันตามที่ต้องการหรือไม่ การวัดโพลาริเซชันของคลื่นส่วนใหญ่จะเป็นการตรวจสอบอัตราส่วนของการโพลาริเซชันนี้ ซึ่งจะเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่บ่งบอกคุณสมบัติของสายอากาศในเชิงการสร้างโพลาริเซชัน

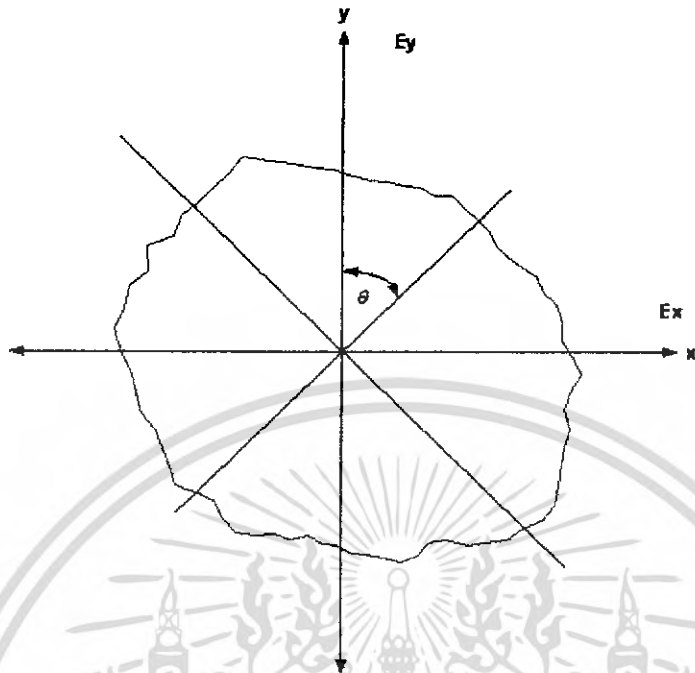
วิธีการวัดโพลาริเซชันของคลื่นนี้จะได้โดยใช้สายอากาศที่รับคลื่นที่มีโพลาริเซชันแบบ เส้นตรง เช่น สายอากาศแบบไดโพล และสายอากาศแบบฮอร์นรูปพีรามิด การวัดโพลาริเซชันก็จะทำได้ โดยนำสายอากาศดังกล่าวรับคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ามา แล้วหมุนสายอากาศนั้นรอบตัวเอง ขนาดของ สนามไฟฟ้าที่วัดได้ที่มีมุมต่างๆจะขึ้นอยู่กับโพลาริเซชันของคลื่น



รูปที่ 4.9 วิธีการทดสอบการวัดโพลาริเซชันของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบการวัดโพลาริเซชันของสายอากาศ จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าโพลาริเซชันของสายอากาศ นั้นมีรูปแบบโพลาริเซชัน เป็นวงรี และมีค่าอัตราส่วนแกนหลักต่อแกนรองประมาณ 1.657



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบการวัดโพลาริเซชันของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$

#### 4.2.7 การทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศ

การทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศจะใช้สายอากาศทั้งตัวส่งและตัวรับที่มีโครงสร้างและคุณลักษณะเหมือนกันวางห่างกันด้วยระยะทางที่มากกว่าหรือเท่ากับบริเวณสนามระยะไกลและใช้เครื่องเน็ตเวิร์คอะนาไลเซอร์ (Network Analyzer) เป็นตัวส่งและรับ สัญญาณที่รับได้จากเครื่องเน็ตเวิร์คอะนาไลเซอร์จะมีค่าเท่ากับ  $10\log(P_r/P_t)$  เมื่อนำไปแทนในสมการ (4.2) ซึ่งเป็นสมการการส่งคลื่นของ ฟรีส จะได้ค่าอัตราขยายของสายอากาศ

$$10\log\left(\frac{P_r}{P_t}\right) = G_t(\text{dB}) + G_r(\text{dB}) - 20\log\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) \quad (4.2)$$

$G_t$  = เกนของสายอากาศส่ง (dB)

$G_r$  = เกนของสายอากาศรับ (dB)

$P_t$  = กำลังงานด้านส่ง (W)

$P_r$  = กำลังงานด้านรับ (W)

$R$  = ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่ง และรับที่มากกว่าหรือเท่ากับบริเวณสนามระยะไกล (เมตร)

โดยเทอมของ  $20\log\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)$  เป็นการสูญเสียในอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ในกรณีที่สายอากาศทางด้านส่งและด้านรับมีโครงสร้างและคุณลักษณะเหมือนกันรูปแบบสมการจะเป็นดังสมการด้านล่าง

$$G_t(dB) = G_r(dB) = \frac{1}{2} \left[ 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log \left( \frac{P_r}{P_t} \right) \right] \quad (4.3)$$

ในการทดสอบใช้ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่ง และรับเท่ากับ 2.5 เมตร จะได้การสูญเสียในอากาศมีค่าเท่ากับ 48.18 dB

ผลจากการทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศ

จากการทดสอบที่ความถี่ 2.45 GHz สัญญาณที่รับได้จากเครื่องเน็ตเวิร์คอะนาไลเซอร์มีค่าเท่ากับ -27.38 dB เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (4.3) ทำให้ได้อัตราขยายของสายอากาศกับ 10.4 dBi

#### 4.2.8 การทดสอบส่งสัญญาณของสายอากาศในการใช้งานจริง

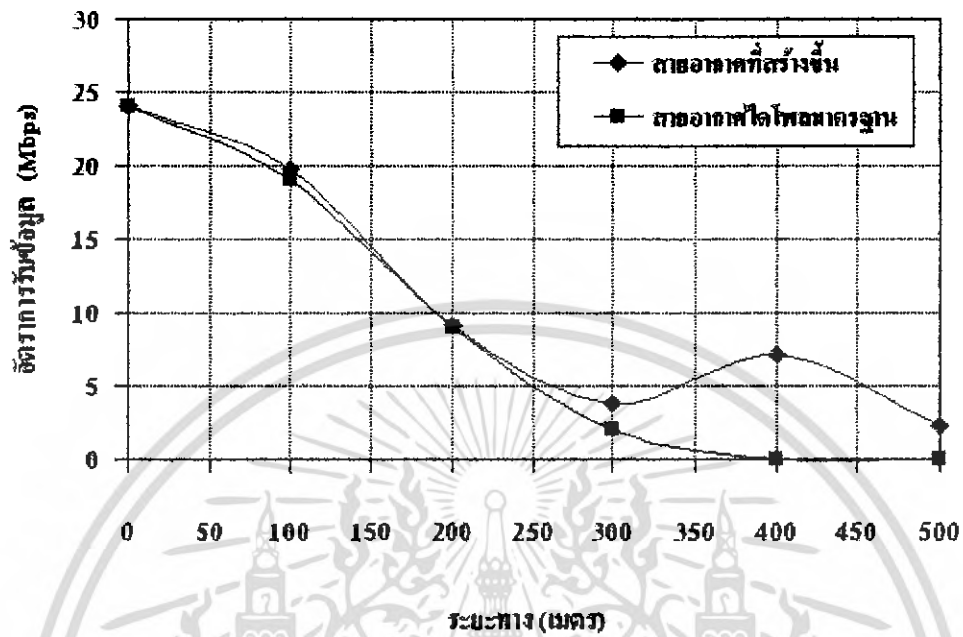
เนื่องจากช่วงความถี่ที่ใช้งานประมาณ 2.4 GHz ถึง 2.5 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ในการใช้งานในระบบ wireless lan ดังนั้น การทดสอบการรับและส่งสัญญาณของสายอากาศ จะทำโดยทำการต่อสายอากาศเข้ากับ access point ในระบบ wireless lan และใช้คอมพิวเตอร์แบบพกพาทำการหาระยะที่สายอากาศสามารถรับสัญญาณได้ ในการทดสอบนี้จะใช้โปรแกรม chariot ซึ่งเป็น โปรแกรมวัดค่าช่องสัญญาณที่ส่งได้ (Throughput) ในการทดสอบนี้จะกำหนดค่าช่องสัญญาณที่ส่งได้ (Throughput) อยู่ที่ 1 เมกะบิตต่อวินาที



รูปที่ 4.13 วิธีการทดสอบส่งสัญญาณของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบรับสัญญาณจากสายอากาศ จากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  สามารถส่งสัญญาณได้ไกล กว่า 500 เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไดโพล มาตรฐานที่ส่งสัญญาณ ได้ 400 เมตร



รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบรับสัญญาณจากสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม  $90^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมรัศมี  $0.347\lambda$  เปรียบเทียบกับสายอากาศไดโพลมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5 วิจารณ์และสรุป

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการออกแบบ และ สร้างสายอากาศที่ใช้วงแหวนวงกลมล้อมรอบ โพรบวางในตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม โดยคุณสมบัติของสายอากาศวงแหวนที่ใช้ป้อนสัญญาณมีการกระจายคลื่นสองทิศทาง และเมื่อรวม โครงสร้างดังกล่าวกับตัวสะท้อนคลื่นของสายอากาศ จะมีการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางเดียว และอัตราขยายที่สูง ใช้งานในย่านความถี่ 2.45 GHz ในการวิเคราะห์ ออกแบบจากโปรแกรม NEC2 พบว่าสายอากาศวงแหวนแบบวงกลมล้อมรอบโพรบที่เหมาะสมที่จะนำมาเป็น ตัวป้อนสัญญาณมีขนาดของรัศมีเท่ากับ  $0.347\lambda$  หรือ ประมาณ 4.25 cm ความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.3\lambda$  หรือ ประมาณ 3.67 cm และมีค่าความยาวโพรบประมาณ 3.2 cm ในส่วนของตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม ที่มีมุม  $90^\circ$  ได้ทำการออกแบบให้มีขนาดที่ครอบคลุมตัวป้อนสัญญาณวงแหวนแบบวงกลมล้อมรอบโพรบ โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมเท่ากับ  $2\lambda$  หรือประมาณ 25 cm

เมื่อทำการทดสอบ ค่าอิมพีแดนซ์ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าการสูญเสียย้อนกลับ และช่วงความถี่ ที่ใช้งาน จะพบว่า ระยะห่าง  $0.63\lambda$  ระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมกับตัวป้อนสัญญาณด้วยวงแหวน วงกลมนั้นเหมาะสมกับการใช้งาน โดยมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $48.16 + j2.96 \Omega$  ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของ สายอากาศเท่ากับ 1:1.07 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศเท่ากับ -28.99 dB และมีช่วงความถี่ที่ใช้งาน ประมาณ 2.4 GHz ถึง 2.5GHz ส่วนของการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ของสายอากาศ พบว่า ในระนาบสนามไฟฟ้า มีค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งเท่ากับ 70 deg และค่าอัตราส่วนลำ คลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลังมีค่าเท่ากับ 13.713 dB ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็ก มีค่าความกว้างของลำ คลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งเท่ากับ 30 deg และค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลังมีค่าเท่ากับ 14.8 dB ค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ทำการทดสอบมีค่าเท่ากับ 10.4 dBi

ส่วนการทดสอบใช้งานจริงจากสายอากาศที่ทำการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้มีช่วง ความถี่ที่ใช้งานอยู่ในช่วง wireless lan ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g ผลการทดสอบ สายอากาศในระบบ wireless lan สามารถส่งสัญญาณ ได้ไกลถึง 500 เมตร จากคุณสมบัติในการรับส่ง สัญญาณในระยะทางไกล จึงมีความเหมาะสมในการใช้งานแบบ จุดต่อจุด ในระบบ wireless lan

## หนังสืออ้างอิง

1. ไม่นอย ไกรฤกษ์ “ทฤษฎีสายอากาศ”, สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์ , พ.ศ.2541
2. บัณฑิต วิจารณ์อรยานนท์ “วิศวกรรมสายอากาศ”, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , พ.ศ.2536
3. ฉัตรชัย ไวยาพัฒนากร “การวิเคราะห์สายอากาศ” สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , พ.ศ.2547
- 4 . C.A. Balanis, “ Antenna Theory Analysis and Design,” 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons, Inc., 1997
- 5 . A.W.Love (ed.) ” Reflector Antennas” IEEE Press, New York, 1978.

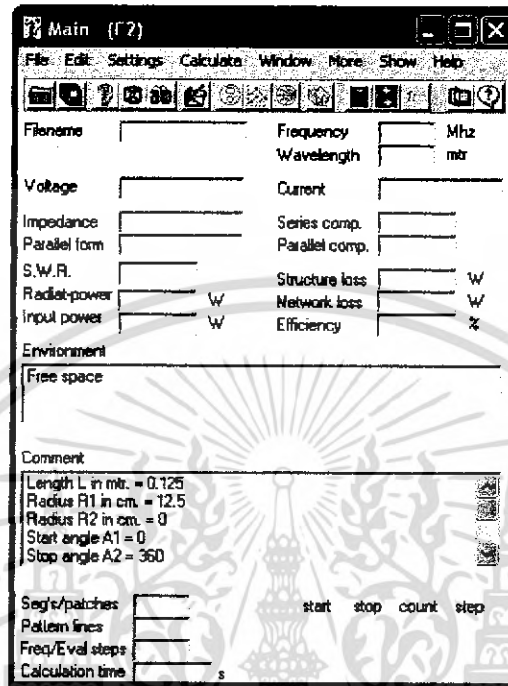


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

### โปรแกรม NEC

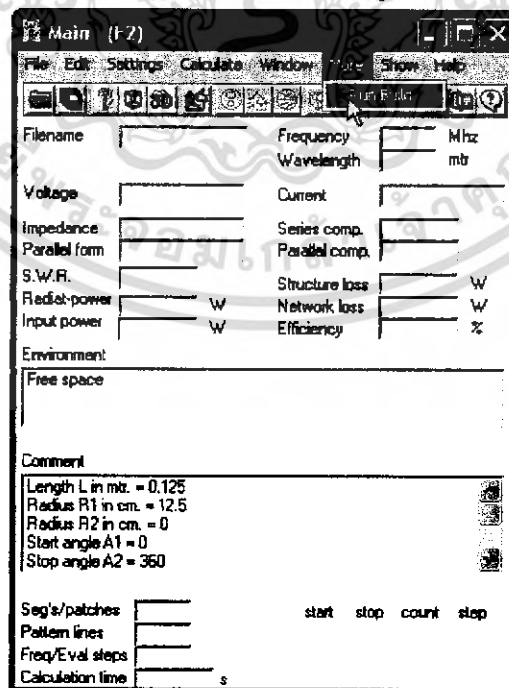
โปรแกรม NEC เป็น โปรแกรมที่ใช้การจำลองและวิเคราะห์โครงสร้างสายอากาศ



รูปที่ 1 หน้าหลักโปรแกรม NEC

### 1. วิธีการจำลองสายอากาศจากโปรแกรม NEC

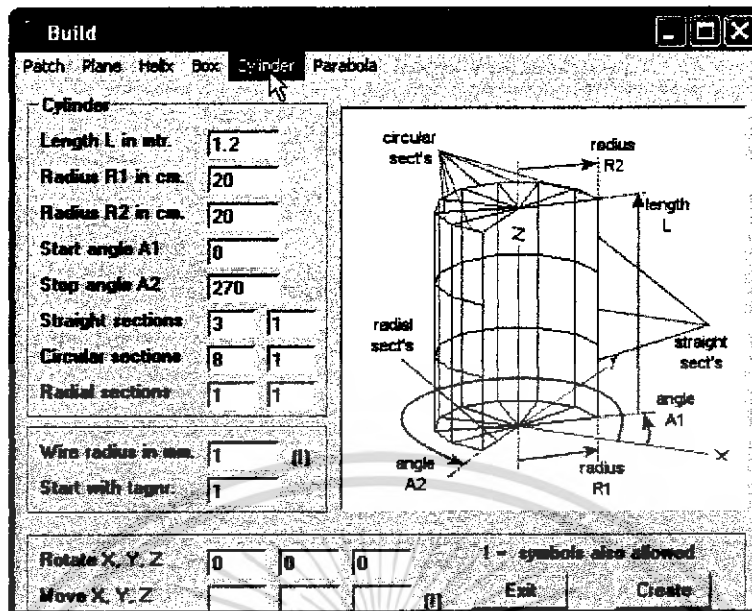
#### 1.1 เริ่มต้นทำการกดที่ปุ่ม More แล้วไปที่ Run Build แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วิธีเริ่มต้นการจำลองสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 จากนั้นโปรแกรม NEC จะแสดงรูปแบบการจำลองสายอากาศแบบต่างๆ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 รูปแบบการจำลองสายอากาศแบบท่ทรงกลม

1.3 ในการสร้างแบบจำลองสายอากาศ ยกตัวอย่างเช่นการออกแบบสายอากาศแบบวงแหวนวงกลม รัศมี

4.25 เซนติเมตร ความยาว 3.6 เซนติเมตร ต้องทำการกำหนดค่าดังนี้

ช่อง Length L in mtr. ใส่ค่าความยาว = 0.036 เมตร

ช่อง Radius R1 in cm. ใส่ค่ารัศมี = 4.25 เซนติเมตร

ช่อง Radius R2 in cm. ใส่ค่ารัศมี = 4.25 เซนติเมตร

ช่อง Start angle A1 ใส่ค่าเริ่มต้นของมุม = 0

ช่อง Start angle A2 ใส่ค่าเริ่มต้นของมุม = 360

ช่อง Straight sections ใส่จำนวนเส้นที่จำลองสายอากาศตามแนวความยาว = 10 (ใส่ในช่องแรก)

ช่อง Circular sections ใส่จำนวนเส้นที่จำลองสายอากาศตามแนวรัศมี = 30 (ใส่ในช่องแรก)

ช่อง Radial sections ใส่จำนวนรอบของเส้นที่จำลองสายอากาศ = 1

ช่อง Wire radius in mm. ใส่ขนาดของเส้นที่จำลองสายอากาศ = 1 มิลลิเมตร

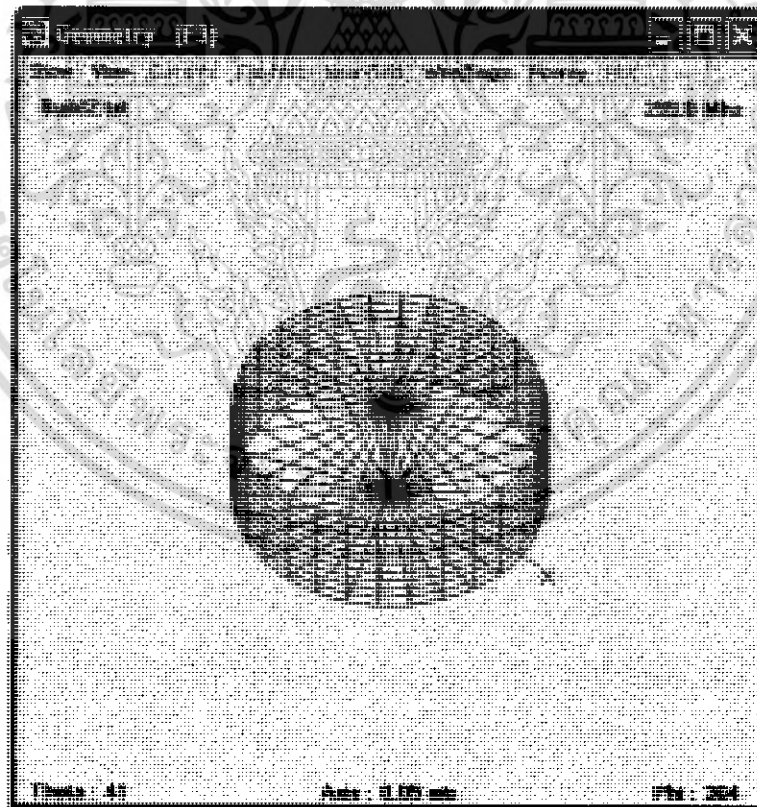
1.4 เมื่อใส่ค่าที่ต้องการกำหนดครบแล้วก็ทำการสร้างแบบจำลองสายอากาศโดยคลิกปุ่ม Create แล้วจะให้ทำการบันทึกแบบจำลองสายอากาศในแบบไฟล์ Notepad แสดงดังรูปที่ 4

```

Build.exe - Notepad
File Edit Format View Help
CM Length L in mtr. = 0.36
CM Radius R1 in cm. = 4.25
CM Radius R2 in cm. = 4.25
CM Start angle A1 = 0
CM Stop angle A2 = 360
CM Straight sections = 10
CM Circular sections = 30
CM Radial sections = 1
CM Rotate X, Y, Z = 0, 0, 0
CM Move X, Y, Z = 0, 0, 0
CE
GW      1      1      .0425      .0      .0
GW      2      1      .0425      .0      .036
GW      3      1      .0425      .0      .072
GW      4      1      .0425      .0      .108
GW      5      1      .0425      .0      .144
GW      6      1      .0425      .0      .18
GW      7      1      .0425      .0      .216
    
```

รูปที่ 4 แบบไฟล์ Notepad

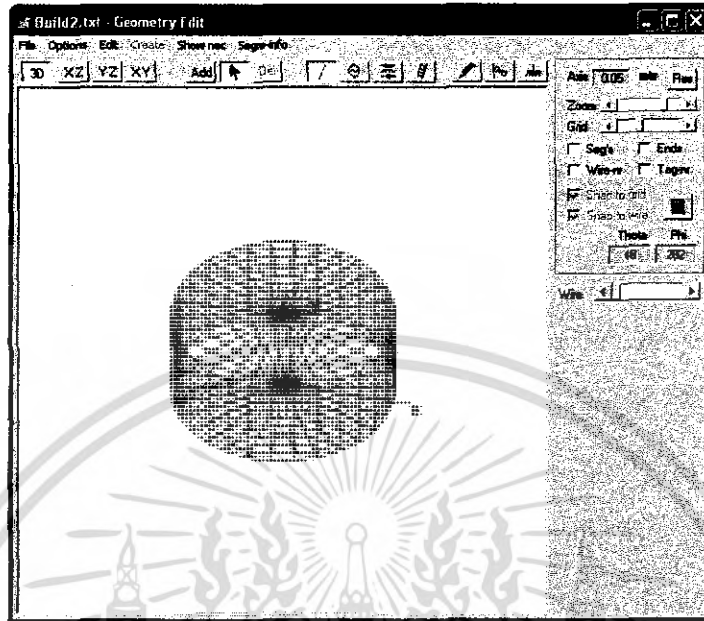
1.5 เมื่อทำการบันทึกแล้วก็ทำการเปิดไฟล์ที่บันทึกไว้จาก Main เริ่มจาก File แล้วต่อด้วย open เพื่อทำการเปิดไฟล์ ผลที่ได้คือรูปแบบจำลองสายอากาศแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 รูปแบบจำลองสายอากาศแบบวงแหวนวงกลม

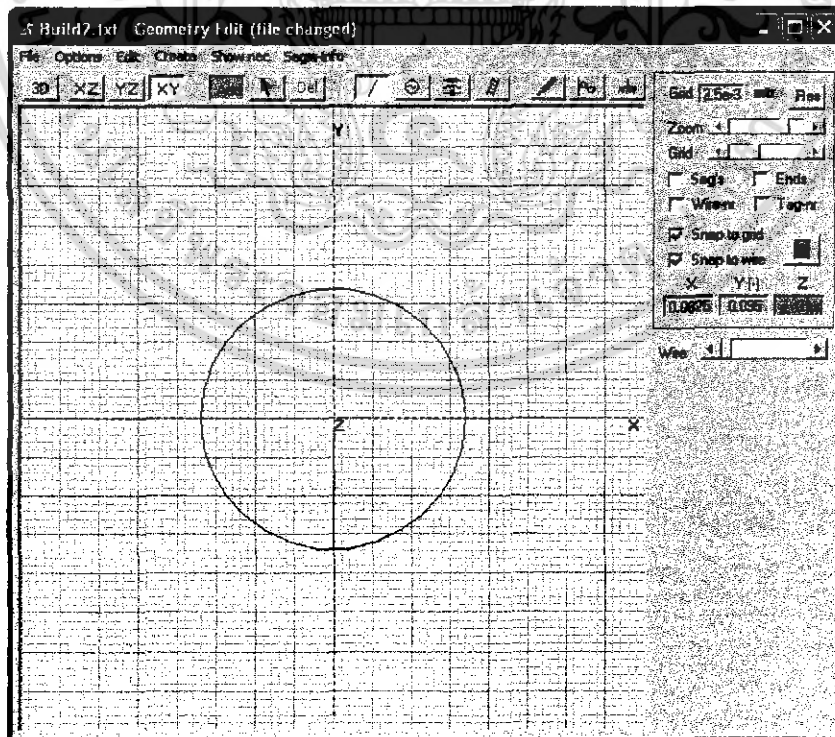
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.5 จากแบบจำลองสายอากาศยังต้องมีส่วนที่ทำการลอบอกคือส่วนเส้นรัศมี วิธีการลบสามารถทำได้โดยไปที่ Main แล้วไปที่ Edit ค่อยด้วย input (.nec) file หรือกด F6 ผลที่ได้แสดงดัง รูปที่ 6 จากนั้นทำการลบที่ละเส้น โดยเลือกเส้นที่ต้องการลบแล้วกด Delete จาก คีย์บอร์ด




รูปที่ 6 วิธีการแก้ไขแบบจำลองสายอากาศ

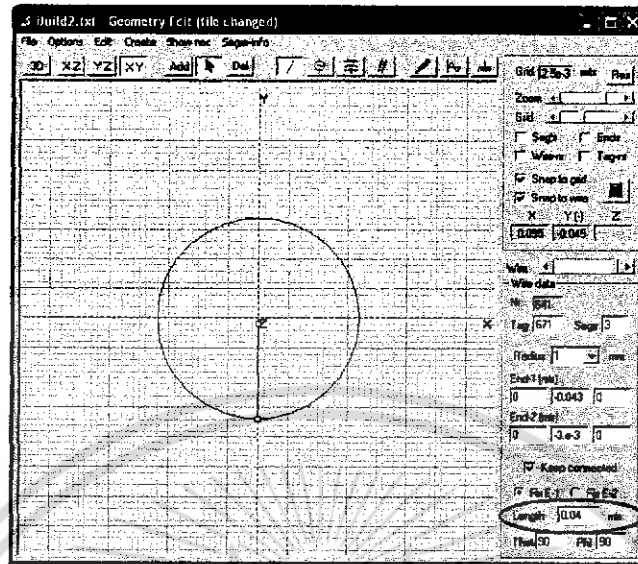
- 1.6 เมื่อทำการลบเส้นรัศมีหมดแล้วก็จะทำการใส่ โพรบในวิธีการใส่ โพรบเพื่อให้อยู่จุดกึ่งกลางทำได้โดยกดปุ่ม XZ แล้วทำการเลื่อนแบบจำลองให้อยู่กึ่งกลางของระนาบจากนั้นกดปุ่ม XY และกดที่ปุ่ม Add และทำการใส่ โพรบตามรูปที่ 7






รูปที่ 7 วิธีการวางโพรบในสายอากาศแบบวงแหวนวงกลม

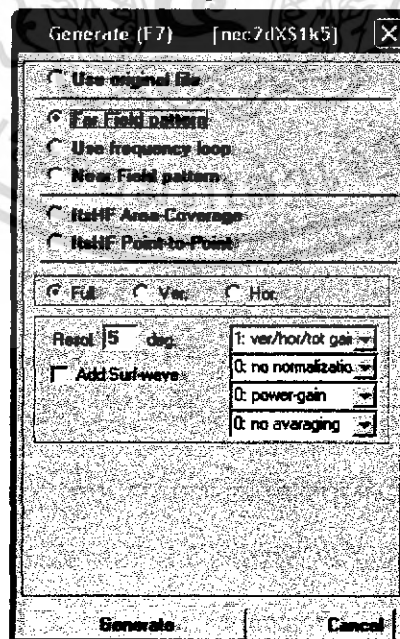
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 ความยาวของโพรบสามารถกำหนดได้คลิกปุ่ม  แล้วทำการเลือกเส้นที่โพรบแล้วสามารถเปลี่ยนความยาวของโพรบได้ที่ Length ซึ่งอยู่ที่ทางขวามือด้านล่าง แสดง ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 วิธีกำหนดความยาวของโพรบ

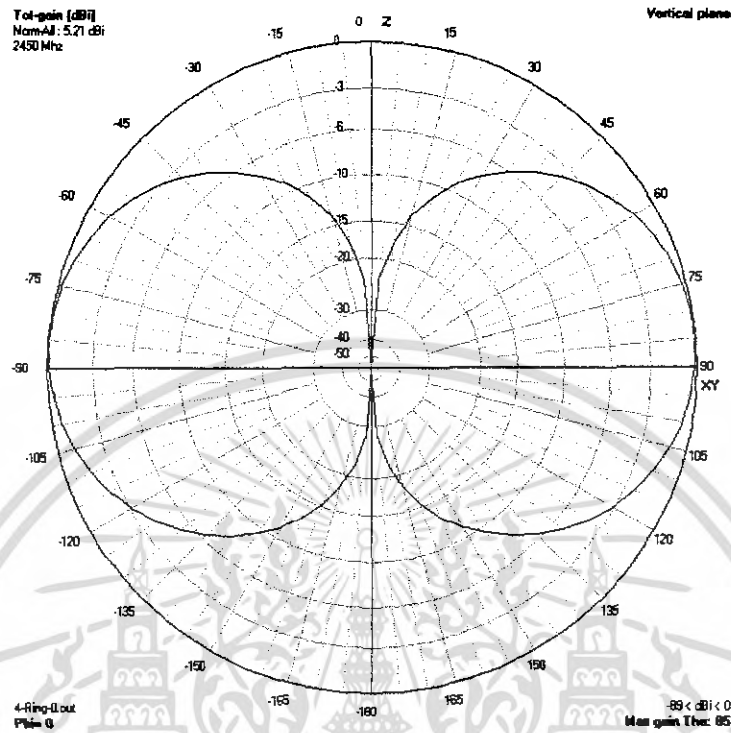
- 1.7 การใส่แหล่งจ่ายให้กับ โพรบทำได้โดยเริ่มจากทำการแบ่ง Seg ของโพรบ โดยทำการใส่เครื่องหมายหน้า Seg's และสามารถกำหนด segs โดยทำการใส่ค่าในช่อง segs จากนั้นทำการคลิกปุ่ม Add และคลิกปุ่ม  การใส่แหล่งจ่ายทำได้โดยเลือก วงแหล่งจ่ายไว้ในโพรบ
- 1.8 การกำหนดความถี่ให้กับแบบจำลองสายอากาศ ทำได้โดยคลิกปุ่ม  และไปทำการเปลี่ยนที่ ช่อง Frequency
- 1.9 การควบคุมรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสามารถทำได้โดยคลิกปุ่ม  และทำการเลือกที่ Far Field pattern และคลิกปุ่ม Generate แสดงดังรูปที่ 9



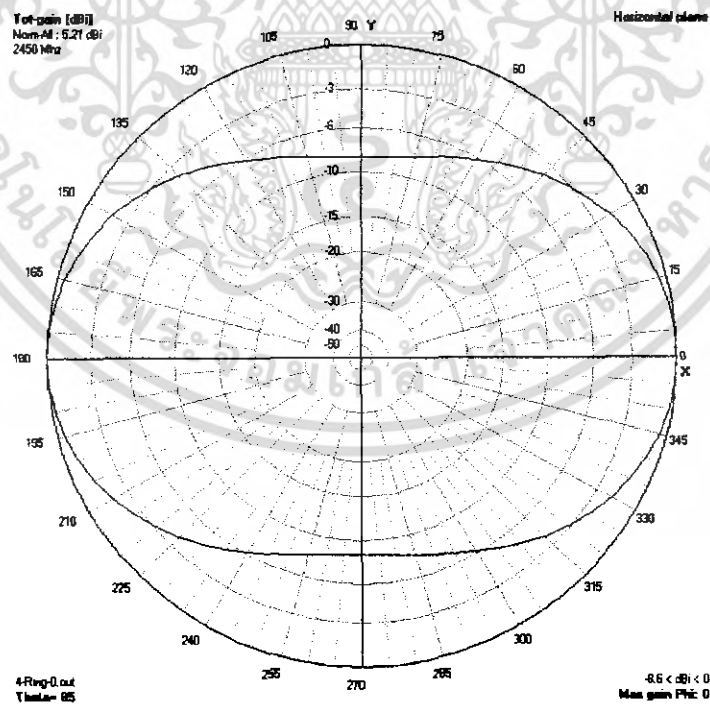
รูปที่ 9 วิธีควบคุมรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.10 หลังจากทำการ Generate แล้วจะได้ผลเป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ แสดงดังรูปที่10



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

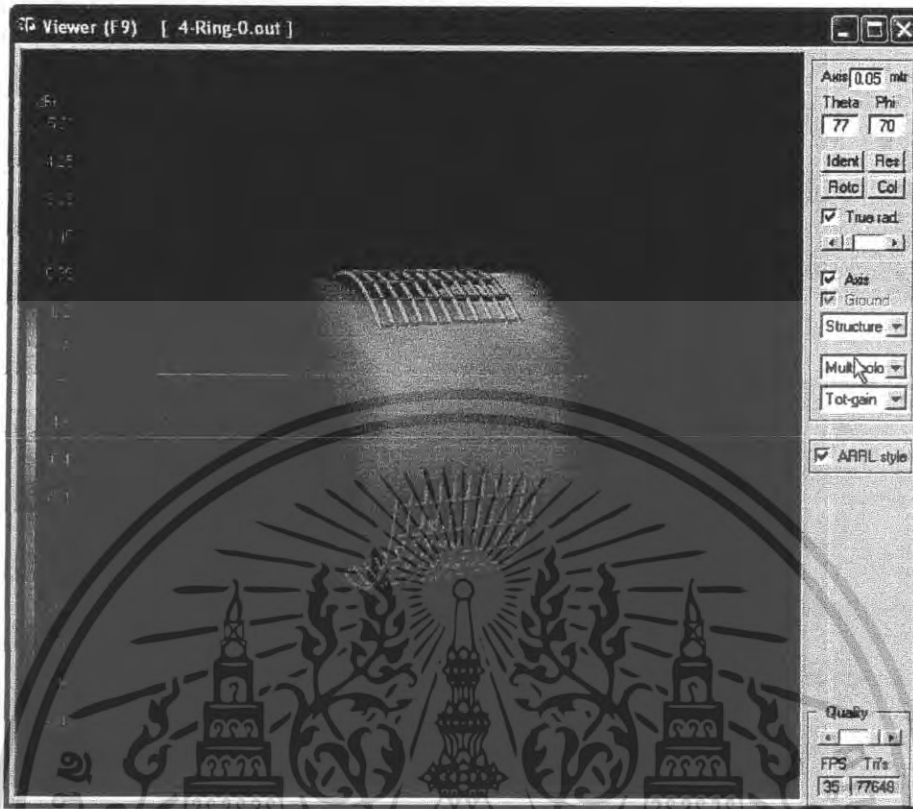


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

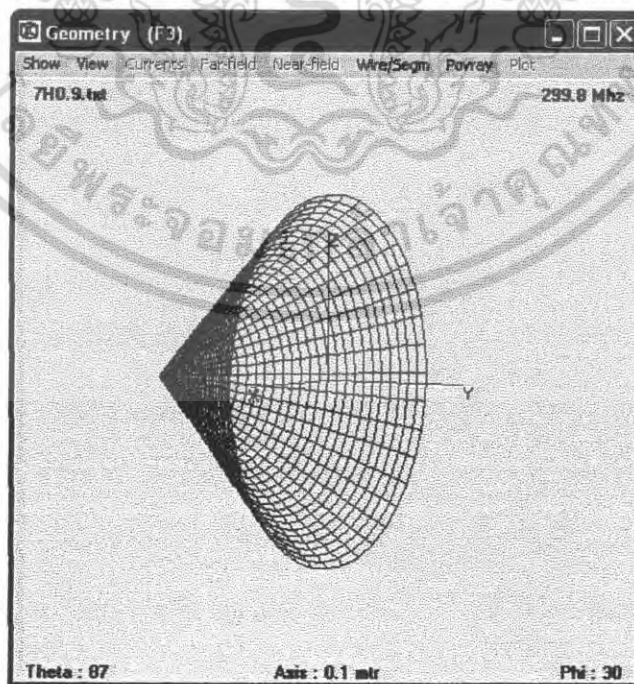
1.11 การดูแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสามมิติ สามารถทำได้โดยเริ่มจาก Main จากนั้นกดปุ่ม **จ** หรือ กดปุ่ม F9 ที่คีย์บอร์ด ผลจะแสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสามมิติ

2 วิธีการประกอบสองแบบจำลองเข้าด้วยกัน

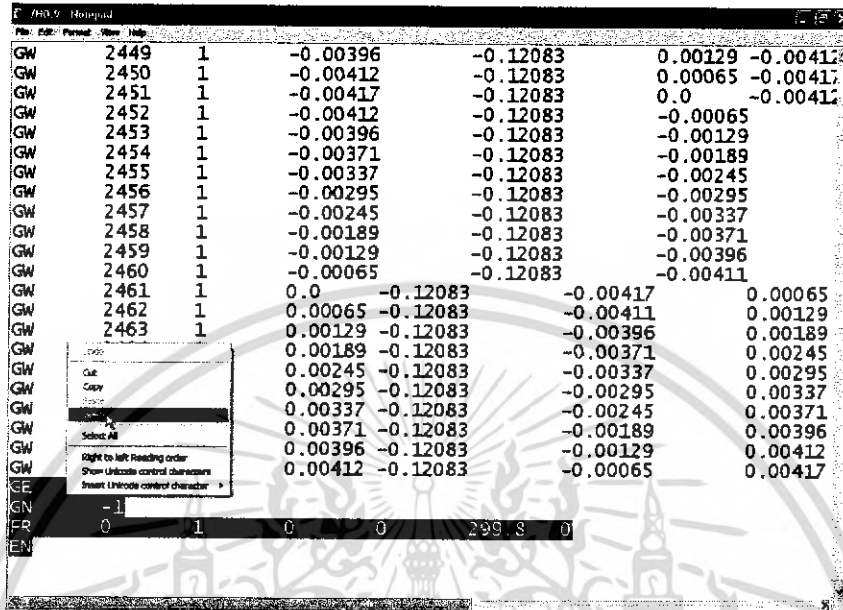
ยกตัวอย่างการประกอบตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมเข้ากับสายอากาศวงแหวนวงกลม



รูปที่ 12 ตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม

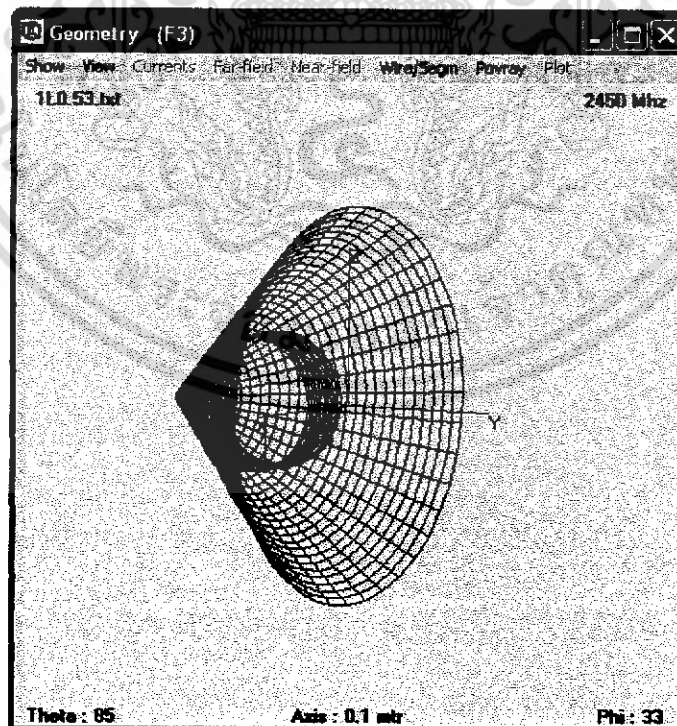
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 จากหัวข้อ 1.4 จะเห็นได้ว่าการเก็บรหัสข้อมูลจะอยู่ในไฟล์ Notepad วิธีการประกอบสองแบบจำลองเข้าด้วยกันจะทำการคัดลอกรหัสของสายอากาศวงกลมตั้งแต่รหัส GW ถึง EN แล้วนำไปวางต่อในรหัส GW ของไฟล์ Notepad ของตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม โดยไฟล์ Notepad นี้จะต้องทำการลบ 4 บรรทัดสุดท้ายออก



รูปที่ 13 การลบ 4 บรรทัดสุดท้ายในไฟล์ Notepad ของตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม

2.2 ทำการแก้ไขเส้นสายอากาศวงกลม และ ตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลมตามหัวข้อที่ 1.5 เพื่อให้ได้ดังรูปแบบที่ต้องการ



รูปที่ 14 การประกอบสายอากาศวงกลมเข้ากับตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โปรแกรม Chariot

โปรแกรม Chariot เป็นโปรแกรมที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพ ของระบบ wireless LANs โดยการทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรม Chariot จะใช้ ค่าช่องสัญญาณที่ส่งได้ (Throughput) เป็นตัวกำหนดเกณฑ์มาตรฐานในการทดสอบ วิธีการทดสอบ จะทำการต่อสายอากาศที่จะทำการทดสอบเข้ากับ access point และใช้คอมพิวเตอร์แบบพกพาที่มี โปรแกรม Chariot เป็นตัวรับสัญญาณ โดยทดสอบในระยะทางที่มีระยะห่างที่แตกต่างกัน



รูปที่ 15 โปรแกรม Chariot

1. ค่าช่องสัญญาณที่ส่งได้ (Throughput) และ ค่าที่ควรคำนึงถึงในการทดสอบ
  - 1.1 ค่าช่องสัญญาณที่ส่งได้ (Throughput) หมายถึงการรับส่งข้อมูลจากปลายหนึ่งไปยังอีกปลายหนึ่งได้ด้วยอัตราเท่าไรในจำนวนบิตต่อวินาที ค่านี้มีได้หมายถึงค่าสูงสุดของช่องสัญญาณที่จะรับส่งได้ ค่า Throughput นี้อาจใช้ค่าที่ ผู้ให้บริการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต (Internet Service Provider: ISP) รับประกันช่องสัญญาณน้อยที่สุด เช่น เราเช่าสายวงจรเช่าขนาด 64 กิโลบิตต่อวินาที แต่มีการรับประกันว่าเราจะใช้ได้ไม่ต่ำกว่า 32 กิโลบิตต่อวินาที ค่า 32 จึงเป็นค่า Throughput แต่เมื่อใช้กับงานบริการเฉพาะบางอย่างจำเป็นต้องมีการประกันช่องสัญญาณเช่น การส่งสัญญาณเสียงสัญญาณวิดีโอ เป็นต้น
  - 1.2 มาตรฐานของ wireless LAN IEEE 802.11
    - 1.2.1 IEEE 802.11b  
คณะทำงานชุด IEEE 802.11b ได้ตีพิมพ์มาตรฐานเพิ่มเติมเมื่อปี พ.ศ. 2542 ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีและใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด มาตรฐาน IEEE 802.11b ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า CCK (Complimentary Code Keying) ผนวกกับ DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 11 Mbps ผ่านคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.2.2 IEEE 802.11a

คณะทำงานชุด IEEE 802.11a ได้ตีพิมพ์มาตรฐานเพิ่มเติมนี้เมื่อปี พ.ศ. 2542 มาตรฐาน IEEE 802.11a ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 54 Mbps แต่จะใช้คลื่นวิทยุที่ความถี่ 5 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่สาธารณะสำหรับใช้งานในประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์อื่นน้อยกว่าในย่านความถี่ 2.4 GHz อย่างไรก็ตามข้อเสียหนึ่งของมาตรฐาน IEEE 802.11a ที่ใช้คลื่นวิทยุที่ความถี่ 5 GHz

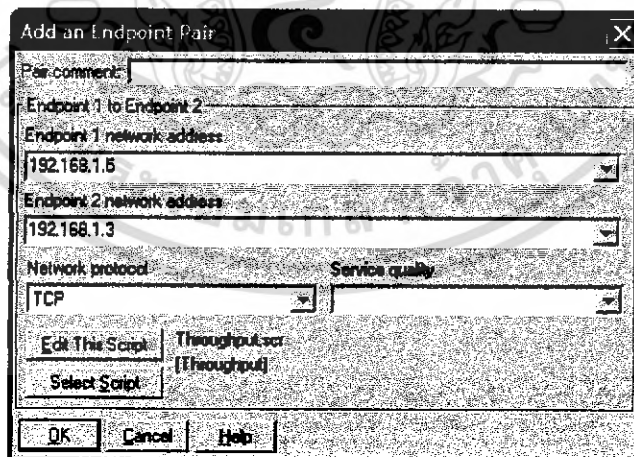
### 1.2.3 IEEE 802.11g

คณะทำงานชุด IEEE 802.11g ได้ใช้นาเทคโนโลยี OFDM มาประยุกต์ใช้ในช่องสัญญาณวิทยุความถี่ 2.4 GHz ซึ่งอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุดที่ 54 Mbps ส่วนรัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN จะอยู่ระหว่างรัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11a และ IEEE 802.11b เนื่องจากความถี่ 2.4 GHz เป็นย่านความถี่สาธารณะสากล อีกทั้งอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ IEEE 802.11b WLAN ได้

1.3 สถานะแวดล้อมในการทดสอบ สถานะแวดล้อมในการทดสอบควรทดสอบในที่โล่งไม่มีสิ่งกีดขวาง เช่น ต้นไม้ รั้วยนต์ และไม่ควรมีการรบกวนจากการใช้งานความถี่เดียวกัน



## 2. การกำหนดส่วนการทดสอบของโปรแกรม Charlot

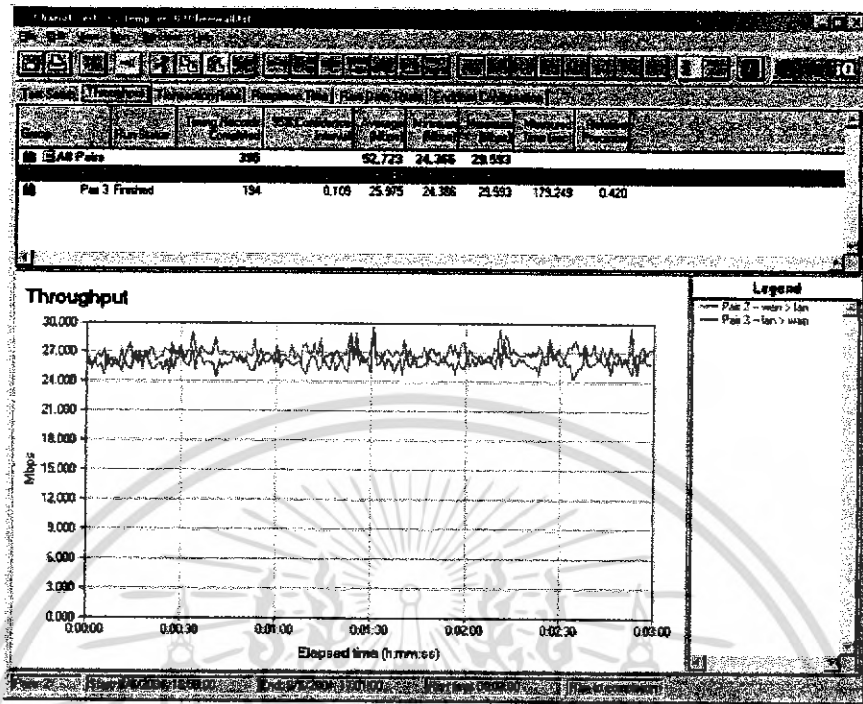
### 2.1 การกำหนด End point 1 network address และ End point 5 network address



รูปที่ 16 การกำหนด End point network address

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ทำการเชื่อมต่อ โดยกดปุ่ม  และทำการสั่ง โปรแกรมทำงาน โดยกดปุ่ม  จากนั้นทำการรอก  
จนกว่าโปรแกรมทำงานเสร็จจะแสดงผลดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 การทดสอบ โปรแกรม Chariot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้