

สายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน

AN OPENED SINGLE-ENDED RECTANGULAR WAVEGUIDE ANTENNA



โดย  
นายจักรกฤษณ์ กันทะอุโมงค์  
นายอานนท์ จำปาโพธิ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เลขหม.....  
เลขทะเบียน..... 37140  
วัน, เดือน, ปี..... 4 ก.ย. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน

AN OPENED SINGLE-ENDED RECTANGULAR WAVEGUIDE ANTENNA

โดย

นายจักรกฤษณ์ กันทะอุโมงค์ 40013041

นายอานนท์ จำปาโพธิ์ 40013077

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.สมพล โกศลวิตร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน

AN OPENED SINGLE-ENDED RECTANGULAR WAVEGUIDE ANTENNA

โดย

นายจักรกฤษณ์ กันทะอุโมงค์ 40013041

นายอานนท์ จำปาโพธิ์ 40013077

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.สมผล โภคสวัสดิ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน

## AN OPENED SINGLE-ENDED RECTANGULAR WAVEGUIDE ANTENNA

โดย นายจักรกฤษณ์ กันทะอุโมงค์ 40013041

นายอานนท์ จำปาโพธิ์ 40013077

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.สมผล โกศลวิตร

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบ และการสร้างสายอากาศแบบท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน (an opened single-ended rectangular waveguide) ซึ่งเป็นสายอากาศแบบชี้ทิศทาง (directional antenna) โดยมีการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยสายอากาศนี้จะใช้ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามาเจาะรูตรงตำแหน่งที่ทำการออกแบบเพื่อใส่ โพรบเพื่อทำการศึกษา และทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ ของสายอากาศ เช่น อัตราขยาย (gain) ของสายอากาศ, โดเรคตีวิตี (directivity), ค่าฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิทซ์ (half-power beamwidth) เป็นต้น ต่อจากนั้นก็จะนำเอาสายอากาศที่ออกแบบได้มาต่ออาร์เรย์ (array) กัน เพื่อทำการศึกษา และทดลอง เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการอาร์เรย์กับสายอากาศแต่ละตัวที่ออกแบบไว้

### ABSTRACT

This paper presents an opened single-end waveguide antenna designed and structure, which is directional antenna. It is a unidirectional antenna, in this case by taking rectangular waveguide to drill hole on designed position for taking a probe in it. In order to study and test parameters of antenna such as gain, directivity, half power beamwidth. Then takes the designed antenna to array in order to compare parameters which take from array to individual antenna to examine how is difference of both.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2542

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน

AN OPENED SINGLE-ENDED RECTANGULAR WAVEGUIDE ANTENNA

ผู้จัดทำ

1. นายจักรกฤษณ์ กันทะอุโมงค์ 40013041
2. นายอานนท์ จำปาโพธิ์ 40013077



(ผศ.สมผล โกศลวิตร)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ   | I    |
| ABSTRACT   | I    |
| สารบัญ   | III  |
| สารบัญรูป  | V    |
| สารบัญตาราง  | VIII |
| บทที่ 1 บทนำ   | 1    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่นำมาใช้ในโครงการ   | 3    |
| 2.1 ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า  | 3    |
| 2.2 โหมดของคลื่น   | 4    |
| 2.2.1 โหมดหลักในการส่งผ่าน   | 4    |
| 2.2.2 โหมดจางหาย   | 5    |
| 2.3 การป้อนพลังงานคลื่นเข้าสู่ท่อนำคลื่นโดยใช้โพรบ                               | 5    |
| 2.4 สมการการแพร่กระจายคลื่น  | 6    |
| 2.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น   | 7    |
| 2.5.1 แบบรูปแบบไอโซโทรปิก ไครเรชันแนลและออมนีไครเรชันแนล                         | 8    |
| 2.5.2 แบบรูปหลัก   | 9    |
| 2.5.3 โลกของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น   | 10   |
| 2.5.4 บริเวณต่าง ๆ ของสนามจากสายอากาศ  | 11   |
| 2.5.5 เรเดียนและสเตอเรเดียน  | 12   |
| 2.6 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดซ์  | 13   |
| 2.7 ความหนาแน่นของกำลังงานที่แพร่กระจาย  | 13   |
| 2.8 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น  | 14   |
| 2.9 ไครเรคทีวิตี   | 15   |
| 2.10 หลักการอาร์เรย์   | 17   |
| บทที่ 3 การออกแบบสายอากาศ  | 21   |
| 3.1 การออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน              | 21   |
| 3.2 การอาร์เรย์ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้านสององค์ประกอบ    | 23   |
| ตามแนวแกน $x$  | 23   |
| บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง  | 24   |
| 4.1 การวัด $VSWR$ และอิมพีแดนซ์ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน | 24   |
| 4.1.1 อุปกรณ์การทดลอง  | 24   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 4.1.2 ลำดับขั้นตอนการทดลอง   | 24   |
| 4.2 การวัดสนามไฟฟ้าระนาบสนามไฟฟ้า และ ระนาบสนามแม่เหล็ก  | 28   |
| 4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น  | 30   |
| 4.2.2 วิธีการวัด   | 30   |
| 4.2.3 ผลการทดลอง   | 31   |
| 4.3 การหาอัตราขยายของสายอากาศ  | 35   |
| 4.4 การหาค่าบีบอัดจังก์จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น   | 37   |
| 4.5 การหาค่าไดเรคตีวิตีของสายอากาศ   | 40   |
| 4.6 การอาร์เรย์สายอากาศที่นำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน 2 องค์ประกอบ<br>วางไปตามแนวแกน $x$ | 42   |
| 4.6.1 การแมทซิง (matching) อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่นำมาอาร์เรย์กัน                                       | 42   |
| 4.6.1.1 อุปกรณ์การทดลอง  | 42   |
| 4.6.1.2 การคำนวณ   | 42   |
| 4.6.1.3 ผลการทดลอง   | 43   |
| 4.6.2 การวัดระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก   | 45   |
| 4.6.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง  | 46   |
| 4.6.2.2 วิธีการวัด   | 46   |
| 4.6.2.3 ผลการทดลอง   | 48   |
| 4.6.3 การหาอัตราขยายของสายอากาศที่ทำอาร์เรย์กัน 2 องค์ประกอบ   | 51   |
| 4.6.4 การหาค่าไดเรคตีวิตีของสายอากาศที่ทำการอาร์เรย์กัน 2 องค์ประกอบ                                     | 52   |
| บทที่ 5 บทสรุปและวิจารณ์   | 53   |
| ภาคผนวก ก. แสดงขนาดของท่อนำคลื่นและความถี่ที่นำไปใช้งาน  | 55   |
| ภาคผนวก ข. ตารางแสดงกำลังงานที่รับได้ของสายอากาศที่นำมาทำการอาร์เรย์กันในการทดลอง                        | 57   |
| ภาคผนวก ค. แสดงโปรแกรม MathCAD ที่ใช้โครงการงาน  | 61   |
| กิตติกรรมประกาศ  | 67   |
| หนังสืออ้างอิง   | 68   |

## สารบัญรูป

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 1.1 กรอบโลหะหรือท่อนำคลื่นขณะนำมาประกอบรวมกันกับสายอากาศแบบโมนโพล<br>ที่มีความยาว $\frac{\lambda}{4}$                                     | 2    |
| รูปที่ 2.1 (a) ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน<br>(b) การแพร่กระจายคลื่นในทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก                       | 3    |
| รูปที่ 2.2 แสดงตำแหน่งการวางโพรบ   | 5    |
| รูปที่ 2.3 แสดงการแพร่กระจายคลื่นของระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็กที่ออกจาก<br>ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิด 1 ด้าน                 | 7    |
| รูปที่ 2.4 แสดงระบบโคออดิเนต สำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ  | 8    |
| รูปที่ 2.5 แบบรูปของสายอากาศชี้ทิศทาง (ออมมิไดเรกชันแนล)   | 8    |
| รูปที่ 2.6 แบบรูปหลักสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร  | 9    |
| รูปที่ 2.7 (a) โลบต่าง ๆ และบีบวิดธ์ของแบบรูปสายอากาศ<br>(b) แบบรูปในแบบลิเนียร์   | 10   |
| รูปที่ 2.8 แสดงการแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ   | 11   |
| รูปที่ 2.9 แสดงค่าจำกัดความของเรเดียนและสเตอเรเดียน  | 12   |
| รูปที่ 2.10 แสดงแบบรูปไดเรกตีวีตีที่เป็น 2 มิติและ 3 มิติของสายอากาศไดโพลความยาว $\frac{\lambda}{2}$   | 17   |
| รูปที่ 2.11 การจัดวางอาร์เรย์ของสององค์ประกอบในแนวแกน x  | 18   |
| รูปที่ 2.12 แสดงการสังเกตที่สนามระยะไกล  | 19   |
| รูปที่ 3.1 (a) แสดงท่อนำคลื่นที่ออกแบบที่ใช้ในการทดลอง<br>(b) แสดงลักษณะการต่อคอนเน็คเตอร์กับโพรบเข้ากับท่อนำคลื่น                               | 22   |
| รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะการจัดวางอาร์เรย์ของสายอากาศ 2 องค์ประกอบ   | 23   |
| รูปที่ 4.1 แสดง $VSWR$ และอิมพีแดนซ์ของท่อปลายเปิด 1 ด้านตัวที่ 1  | 26   |
| รูปที่ 4.2 แสดง $VSWR$ และอิมพีแดนซ์ของท่อปลายเปิด 1 ด้านตัวที่ 2  | 27   |
| รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการวัดค่าระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก  | 28   |
| รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะการติดตั้งสายอากาศเพื่อทำการวัดค่าระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบ<br>สนามแม่เหล็ก โดยจะติดตั้งเหมือนกันทั้งสองด้านในการวัดแต่ละครั้ง | 28   |
| รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายของสายอากาศตัวรับขณะทำการวัดค่าของระนาบสนามแม่เหล็ก  | 29   |
| รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายของสายอากาศตัวส่งขณะทำการวัดค่าของระนาบสนามไฟฟ้า   | 29   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

|  |    |
|--|----|
| รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายลักษณะการติดตั้งการวัดค่าระนาบสนามแม่เหล็กและระนาบสนามไฟฟ้า  | 30 |
| รูปที่ 4.8 แสดงแบบรูปของระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม MathCAD   | 31 |
| รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่าระนาบสนามไฟฟ้าแบบโพลาร์   | 32 |
| รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดลองที่ได้จากวัดค่าของระนาบสนามไฟฟ้าแบบลิเนียร์  | 33 |
| รูปที่ 4.11 แสดงแบบรูปของระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรม MathCAD   | 33 |
| รูปที่ 4.12 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่าของระนาบสนามแม่เหล็กแบบโพลาร์  | 34 |
| รูปที่ 4.13 แสดงผลการทดลองที่ได้จากวัดค่าของระนาบสนามแม่เหล็กแบบลิเนียร์   | 35 |
| รูปที่ 4.14 แสดงการหาค่าฮาร์ฟเพาเวอร์บีมิวคิรซ์ของระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม MathCAD   | 37 |
| รูปที่ 4.15 แสดงฮาร์ฟเพาเวอร์บีมิวคิรซ์ของระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง  | 38 |
| รูปที่ 4.16 แสดงการหาค่าฮาร์ฟเพาเวอร์บีมิวคิรซ์ของระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรม MathCAD  | 38 |
| รูปที่ 4.17 แสดงฮาร์ฟเพาเวอร์บีมิวคิรซ์ของระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดลอง   | 39 |
| รูปที่ 4.18 แสดงลักษณะของระบบการป้อนสัญญาณ (feed) แบบสองทาง  | 42 |
| รูปที่ 4.19 แสดงค่า $VSWR$ และค่าอิมพีแดนซ์ $Z_1$ ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน<br>ที่ต่ออาร์เรย์กันอยู่ตามแนวแกน $x$ จำนวน 2 องค์ประกอบ ตามรูปที่ 4.18    | 44 |
| รูปที่ 4.20 แสดงค่า $VSWR$ และค่าอิมพีแดนซ์ $Z_2$ ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน<br>ที่ต่ออาร์เรย์กันอยู่ตามแนวแกน $x$ จำนวน 2 องค์ประกอบ ตามรูปที่ 4.18    | 44 |
| รูปที่ 4.21 แสดงค่า $VSWR$ และค่าอิมพีแดนซ์ $Z_{in}$ ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน<br>ที่ต่ออาร์เรย์กันอยู่ตามแนวแกน $x$ จำนวน 2 องค์ประกอบ ตามรูปที่ 4.18 | 45 |
| รูปที่ 4.22 แสดงรูปถ่ายสายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้านจริงที่ทำการต่ออาร์เรย์<br>กันไปตามแนวแกน $x$   | 46 |
| รูปที่ 4.23 แสดงแบบรูปของระนาบสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่ได้จากโปรแกรม<br>MathCAD  | 47 |
| รูปที่ 4.24 แสดงแบบรูปของระนาบสนามแม่เหล็กที่ระยะห่างขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่ได้จากโปรแกรม<br>MathCAD   | 47 |
| รูปที่ 4.25 แสดงระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม MathCAD และได้จากการทดลองที่ระยะห่าง<br>ระหว่างองค์ประกอบที่ 0.8 $\lambda$  | 48 |
| รูปที่ 4.26 แสดงระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรม MathCAD และได้จากการทดลองที่ระยะห่าง<br>ระหว่างองค์ประกอบที่ 0.8 $\lambda$   | 49 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 4.27 แสดงระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม MathCAD และได้จากการทดลองที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่ 0.9λ    | 49 |
| รูปที่ 4.28 แสดงระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรม MathCAD และได้จากการทดลองที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่ 0.9λ | 50 |
| รูปที่ 4.29 แสดงระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม MathCAD และได้จากการทดลองที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่ λ       | 50 |
| รูปที่ 4.30 แสดงระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรม MathCAD และได้จากการทดลองที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่ λ    | 51 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

หน้า

|   |    |
|---|----|
| ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากทฤษฎี, การคำนวณ และที่ได้จากการทดลอง<br>ที่จุดต่าง ๆ ตามรูปที่ 4.18  | 45 |
| ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ทำการอาร์เรย์กันที่ได้จากการทดลอง<br>ที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็น $0.8\lambda, 0.9\lambda$ และ $\lambda$ ตามลำดับกับสายอากาศตัวเดียว | 52 |
| ตารางที่ 4.3 แสดงโคเรคทีวิตีของสายอากาศที่ต่ออาร์เรย์กันตามแนวแกน $x$ ที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ<br>ค่าต่าง ๆ กับสายอากาศเดี่ยว   | 52 |

## ภาคผนวก ก.

|   |    |
|---|----|
| ตาราง ก. แสดงขนาดของท่อนำคลื่นและความถี่ที่นำไปใช้งาน | 56 |
|---|----|

## ภาคผนวก ข.

|  |    |
|--|----|
| ตารางที่ ข-1 แสดงค่ากำลังงานที่สายอากาศรับได้ในระนาบสนามไฟฟ้าที่ค่ามุมต่าง ๆ ที่ ระยะห่างระหว่าง<br>องค์ประกอบเป็น $0.8\lambda$    | 58 |
| ตารางที่ ข-2 แสดงค่ากำลังงานที่สายอากาศรับได้ในระนาบสนามแม่เหล็กที่ค่ามุมต่าง ๆ ที่ระยะห่าง<br>ระหว่างองค์ประกอบเป็น $0.8\lambda$  | 58 |
| ตารางที่ ข-3 แสดงค่ากำลังงานที่สายอากาศรับได้ในระนาบสนามไฟฟ้าที่ค่ามุมต่าง ๆ ที่ ระยะห่างระหว่าง<br>องค์ประกอบเป็น $0.9\lambda$    | 59 |
| ตารางที่ ข-4 แสดงค่ากำลังงานที่สายอากาศรับได้ในระนาบสนามแม่เหล็กที่ค่ามุมต่าง ๆ ที่ ระยะห่าง<br>ระหว่างองค์ประกอบเป็น $0.9\lambda$ | 59 |
| ตารางที่ ข-5 แสดงค่ากำลังงานที่สายอากาศรับได้ในระนาบสนามไฟฟ้าที่ค่ามุมต่าง ๆ ที่ ระยะห่างระหว่าง<br>องค์ประกอบเป็น $\lambda$       | 60 |
| ตารางที่ ข-6 แสดงค่ากำลังงานที่สายอากาศรับได้ในระนาบสนามแม่เหล็กที่ค่ามุมต่าง ๆ ที่ ระยะห่าง<br>ระหว่างองค์ประกอบเป็น $\lambda$    | 60 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

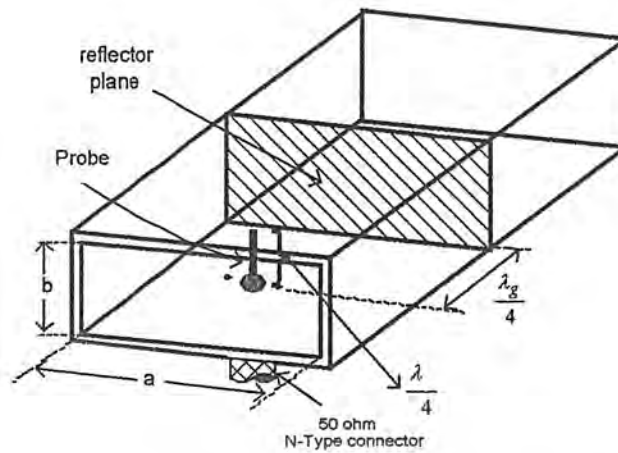
ในระบบการสื่อสารแบบเคลื่อนที่ (cellular mobile system) นั้นจะทำการแบ่งพื้นที่ให้บริการออกเป็น เซลล์ (cell) เล็ก ๆ โดยทั่วไปพื้นที่ที่แบ่งจะมีลักษณะเป็นวงกลม หรือหกเหลี่ยม โดยที่สายอากาศที่ใช้นั้นมักจะเป็นสายอากาศแบบที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (omnidirectional antenna)

แต่สำหรับการให้บริการในบางพื้นที่ของระบบสื่อสารแบบเคลื่อนที่นั้น หากพื้นที่ที่ให้บริการมีลักษณะเป็นพื้นที่ที่แคบตามแนวขาว เช่น บนทางด่วน ถนน หรือ อุโมงค์ เป็นต้นนั้น สายอากาศรอบทิศทางนั้นไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานลักษณะดังกล่าว จึงได้มีการนำสายอากาศแบบชี้ทิศทาง (directional antenna) มาใช้ และถ้าต้องการให้ได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้มีค่าที่ดียิ่งขึ้น เช่น ให้ได้ค่าโคเรคทีวิตีที่มีค่าสูงมากขึ้นก็ทำได้ โดยการนำเอาสายอากาศแต่ละตัวที่ออกแบบไว้แล้วมาต่ออาร์เรย์กันไว้

หากเดิมเรามีสายอากาศแบบรอบทิศทาง ซึ่งมีคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทางอยู่แล้วนั้น เราจะพบว่าเมื่อคลื่นเดินทางออกจากสายอากาศแล้วไปกระทบวัตถุหรือโลหะที่มีลักษณะเรียบแล้วนั้น คลื่นจะเกิดการหักเห และเบี่ยงเบนออกจากแนวเดิม

จากคุณสมบัติดังกล่าวหากเรานำเอาแผ่น โลหะที่มีลักษณะเป็นรูปกรอบสี่เหลี่ยมมาครอบสายอากาศแบบรอบทิศทางไว้ตรงตามระนาบเอเลเวชัน (elevation plane) หรือระนาบ  $(x, y)$  จากเดิม คลื่นที่เคบสามารถแพร่กระจายรอบทิศทางอยู่นั้น จะไม่สามารถแพร่กระจายคลื่นผ่านกรอบโลหะออกไปได้ แต่จะเกิดการสะท้อน และหักเหทิศทาง การเดินทางของคลื่นจะออกไปได้เฉพาะบริเวณช่องที่เป็นปากเปิดของกรอบสี่เหลี่ยมเท่านั้น โดยถ้าหากเราสามารถหาขนาด และระยะห่างของกรอบสี่เหลี่ยมโลหะที่เหมาะสมได้แล้วนั้น จะส่งผลให้คลื่นที่แพร่กระจายออกมาจากช่องของปากเปิดของกรอบสี่เหลี่ยมโลหะมีขนาดบีมวิดธ์ (beam width) ที่แคบ มีอัตราขยายของสายอากาศ (gain) และโคเรคทีวิตี (directivity) ที่ดีขึ้น

ในการพิจารณาเลือกใช้งานขนาดของกรอบสี่เหลี่ยม โลหะนั้นจะต้องคำนึงถึงขนาดของกรอบสี่เหลี่ยมโลหะ และย่านความถี่ที่จะใช้งาน ซึ่งเราจะพบว่าการเลือกขนาดของกรอบสี่เหลี่ยมโลหะ และย่านความถี่นั้นจะต้องสัมพันธ์กัน ดังนั้นท่อนำคลื่นสัญญาณ หรือท่อเวฟไกด์ (wave guide) นั้นเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาใช้งานทำเป็นกรอบสี่เหลี่ยมโลหะ เพราะสามารถเลือกขนาดของท่อนำคลื่นให้สัมพันธ์กันกับความถี่ที่จะนำมาใช้งานได้อย่างถูกต้องแน่นอน และท่อนำคลื่นนี้มีขนาดที่เล็กจึงส่งผลให้ส่วนของสายอากาศแบบรอบทิศทางที่เรานำมาใช้เป็นตัวแพร่กระจายคลื่น (radiator) แบบรอบทิศทางนั้นมีขนาดเล็กลงตามไปด้วย โดยความยาวของสายอากาศแบบรอบทิศทางจะมีขนาดความยาวไม่เกินความสูงของท่อนำคลื่น ดังนั้นเราจึงเลือกใช้สายอากาศแบบโมโนโพล (mono pole) ที่มีความยาว  $\frac{\lambda}{4}$  มาใช้ในการทดลอง และทำการศึกษาในครั้งนี้



รูปที่ 1.1 กรอบโลหะหรือท่อนำคลื่นขณะนำมาประกอบร่วมกับสายอากาศแบบโมโนโพล  
ที่มีความยาว  $\frac{\lambda}{4}$

ดังนั้นเพื่อเป็นการง่ายต่อการศึกษาและการออกแบบ เราจะทำการศึกษาในลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นออกจากท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีสายอากาศแบบโมโนโพลที่มีความยาว  $\frac{\lambda}{4}$  เป็นตัวป้อนกำลังงานกระตุ้นให้เกิดคลื่นสัญญาณขึ้นในท่อนำคลื่น และเกิดการแพร่กระจายคลื่นออกไปแล้วทำให้เกิดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศขึ้นอย่างเหมาะสม

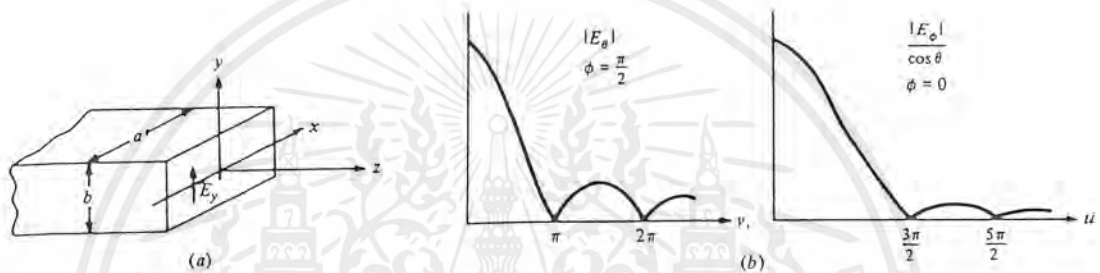
ในบางครั้งเราก็มีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มพื้นที่ของสายอากาศ เพื่อที่จะให้เกนของสายอากาศ หรือค่าไดเรกทิวิตีมีค่าสูงมากขึ้น ซึ่งบางกรณีก็ไม่สามารถที่จะทำการเพิ่มพื้นที่ของสายอากาศได้ โดยอาจจะขึ้นอยู่กับข้อจำกัดหลายอย่าง แต่เราสามารถที่จะทำการเพิ่มคุณสมบัติต่าง ๆ ที่กล่าวมาได้ด้วยโดยการนำเอาสายอากาศแต่ละตัวมาต่ออาร์เรย์ (array) กัน

## บทที่ 2

## ทฤษฎีที่นำมาใช้ในโครงการงาน

## 2.1 ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular waveguide)

ท่อนำคลื่นที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าการพิจารณาจะใช้พิกัดมุมฉาก  $(x, y, z)$  มาพิจารณาโดยจะมีพื้นที่หน้าตัด  $a \times b$  ซึ่ง  $a$  จะเป็นขนาดความกว้างและ  $b$  จะเป็นขนาดด้านสูง โดยจะมีพื้นที่หน้าตัดอยู่บนระนาบ  $z = 0$



รูปที่ 2.1 (a) ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน

(b) การแพร่กระจายคลื่นในทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

คุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นท่อนำสัญญาณในย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยคุณสมบัติทั่วไปของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะประพฤติตัวเหมือนตัวกรองความถี่สูง (high-pass filter) โดยที่ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะยอมให้ความถี่สูงกว่าความถี่คัทออฟ (cut-off frequency:  $f_c$ ) ผ่านได้เท่านั้น ซึ่งความถี่คัทออฟนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของท่อในแต่ละเบอร์ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$f_c = \frac{c}{\lambda_c} \quad \dots(2.1)$$

$$\lambda_c = 2a \quad \dots(2.2)$$

$f_c$  คือ ความถี่คัทออฟ (Hz)

$\lambda_c$  คือ ความยาวคลื่นคัทออฟ (cm.)

$c$  คือ ความเร็วของการเดินทางของคลื่นในอากาศ (cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $a$  คือ ขนาดด้านกว้างภายในท่อนำคลื่น (cm.)
- $b$  คือ ขนาดด้านสูงภายในท่อนำคลื่น (cm.)
- $d$  คือ ขนาดความยาวของท่อนำคลื่น (cm.)

## 2.2 โหมดของคลื่น

โหมด (mode) คือแบบแผนของคลื่นเป็นลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ในทิศทางใดๆ ตามโครงสร้างของสายนำสัญญาณซึ่งส่วนใหญ่จะมีเงื่อนไขขอบเขตที่เกิดจากโครงสร้างของสายนำสัญญาณนั้นๆ บังคับอยู่จึงทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นมีรูปแบบเพียงเฉพาะเท่านั้น

### 2.2.1 โหมดหลักในการส่งผ่าน

ในการออกแบบสายอากาศแบบท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน เราจะเลือกใช้โหมด  $TE$  (transverse electric wave) เป็นโหมดหลักในการส่งผ่านคลื่นสัญญาณภายในท่อนำคลื่น

โดยทั่วไปจะระบุในรูป  $TE_{mn}$  ซึ่งหมายถึงอันดับโหมดที่  $m$  และ  $n$  โดยเราจะเลือกใช้ในการส่งผ่านคลื่นในโหมด  $TE_{10}$  ซึ่งสามารถพิจารณาการส่งผ่านได้จากเงื่อนไขของท่อนำคลื่นและความถี่ที่กำหนดให้มา

$K_{cmn}$  = ค่าคัทออฟเฟรมั้มเบอร์

$\lambda_{cmn}$  = ความยาวของคลื่นคัทออฟ ของโหมดอันดับต่างๆ (m)

$f_{cmn}$  = ความถี่คัทออฟของโหมดอันดับต่างๆ (Hz)

$$K_{cmn} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad \dots(2.3)$$

$$\lambda_{cmn} = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}} \quad \dots(2.4)$$

$$f_{cmn} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad \dots(2.5)$$

เมื่อพิจารณาโหมดที่เราเลือกนำมาใช้ได้แก่โหมด  $TE_{10}$  ดังนั้นอันดับ  $m$  และ  $n$  คือ 1,0 เมื่อเรานำค่า  $m, n$  แทนในสมการที่ (2.3), (2.4), (2.5) จะได้ว่า

$$f_{cmn} = \frac{c}{\lambda_{cmn}} \quad \dots(2.6)$$

$$K_{cmn} = \frac{\pi}{a} \quad \dots(2.7)$$

$$\lambda_{cmn} = 2a \quad \dots(2.8)$$

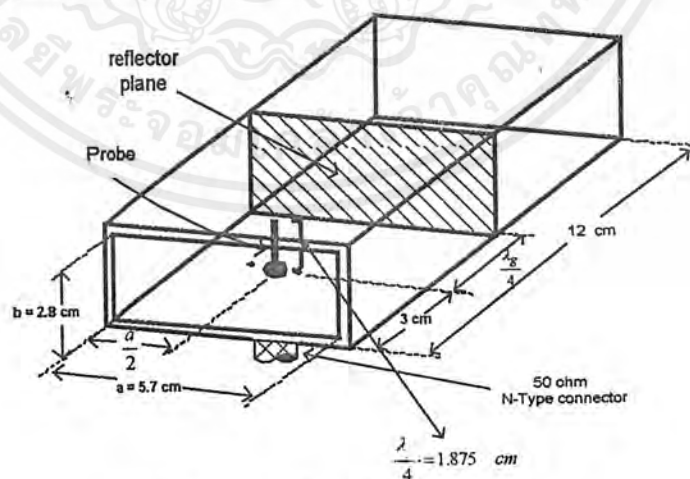
ซึ่งจะพบว่าโหมด  $TE_{10}$  สามารถส่งผ่านไปในท่อนำคลื่นนี้ได้ โดยโหมด  $TE_{10}$  นี้ยังจัดว่าเป็นโหมดพื้นฐาน (fundamental mode) ของคลื่นที่ส่งผ่านไปในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในการออกแบบการใช้งานท่อนำคลื่นทั่วไปนั้นจะให้ความสัมพันธ์ตามสมการและเงื่อนไขข้างต้น

### 2.2.2 โหมดจางหาย

โหมดของคลื่นที่เกิดขึ้นบริเวณโพรงในท่อนำคลื่นนั้นไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะโหมดหลักเพียงโหมดเดียว แต่จะเกิดขึ้นได้หลายโหมด โดยโหมดอื่นที่เกิดขึ้นนั้นจะมีขนาดลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งเรียกว่าโหมดจางหาย (evanescent mode) โหมดจางหายนี้ถึงแม้จะไม่สามารถส่งผ่านได้แต่จะเกิดขึ้นเสมอตรงบริเวณที่มีความไม่สม่ำเสมอในท่อนำคลื่น เช่นตำแหน่งที่มีฉากโลหะ เสาโลหะ หรือบริเวณโพรงในท่อนำคลื่น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยค่าการลดทอนโดยสนามที่แพร่กระจายจากปากท่อนำคลื่น

### 2.3 การป้อนพลังงานคลื่นเข้าสู่ท่อนำคลื่นโดยใช้โพรง

ในการป้อนพลังงานคลื่นเข้าสู่ท่อนำคลื่นนั้นเราจะต้องคำนึงถึงโหมดที่เราต้องการกระตุ้นให้เกิดขึ้น ซึ่งในกรณีของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า เราจะให้เป็น  $TE_{10}$  นั้นเราจะทำการใส่โพรงเข้าไปที่ผนังปากท่อดังรูปที่ 2.2 จะทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะมีค่าสูงสุดตรงตำแหน่งกึ่งกลางของด้าน  $a$  และวางโพรงไว้ตรงกึ่งกลางระยะ  $d$  ด้วย



รูปที่ 2.2 แสดงตำแหน่งการวางโพรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sin(\theta)} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad \dots(2.9)$$

$\lambda_g$  คือ ความยาวกลุ่มคลื่นที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่น

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นที่ตกกระทบเข้ามาในท่อนำคลื่น หรือความยาวคลื่นที่ป้อนออกจากโพรม

#### 2.4 สมการการแพร่กระจายคลื่น

การแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน ท่อนำคลื่นมีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า การพิจารณาจะใช้วงพิกัดตามแกน  $(x, y, z)$  มาพิจารณาโดยจะมีพื้นที่หน้าตัด  $axb$  ซึ่ง  $a$  จะเป็นความยาวในด้านกว้างและ  $b$  จะเป็นความยาวในด้านสูง ส่วน  $d$  จะเป็นความยาวของท่อ ซึ่งสมการการแพร่กระจายคลื่นที่หลุดจากปากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน สมการหาได้จาก

$E_\theta$  คือ สมการการแพร่กระจายคลื่นของระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane)

$E_\phi$  คือ สมการการแพร่กระจายคลื่นของระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane)

$$\text{เมื่อ } k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

ในโครงการนี้เราจะทำการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน ที่ความถี่  $4 \text{ GHz}$  ท่อที่นำมาออกแบบใช้ที่ขนาดด้าน  $a$  มีขนาด  $5.7 \text{ cm}$ . และด้าน  $b$  มีขนาด  $2.8 \text{ cm}$ . เนื่องจากคลื่นอยู่ในแนวระนาบ  $z = 0$  เราสามารถแสดงแบบรูปของระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

สมการการแพร่กระจายคลื่นจากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน

$$E_\theta = \frac{jkabE_0e^{-jkr}}{2\pi} \circ \frac{\sin\left(\frac{kb}{2}\sin(\theta)\right)}{\frac{kb}{2}\sin(\theta)} \quad \dots (2.10)$$

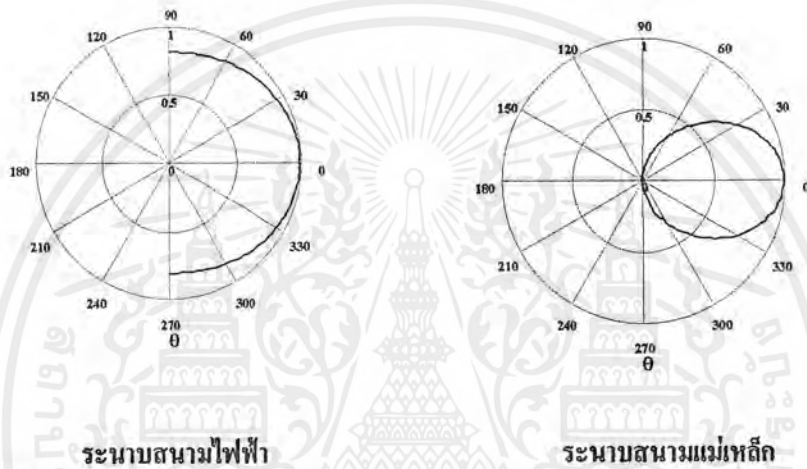
$$E_\phi = \frac{jkabE_0e^{-jkr}}{2\pi} \circ \frac{\cos(\theta)\left(\cos\left(\frac{ka}{2}\sin(\theta)\right)\right)}{\pi^2 - (ka\sin(\theta))^2} \quad \dots (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการนอร์มอลไลซ์ (normalize) สนามได้ค่าดังนี้

$$E_\theta = \left(\frac{2}{\pi}\right) abE_0 \frac{\sin\left(k\left(\frac{b}{2}\right)\sin(\theta)\right)}{k\left(\frac{b}{2}\right)\sin(\theta)} \quad \dots(2.12)$$

$$E_\phi = \frac{\cos k\left(\frac{a}{2}\right)\sin(\theta)}{\pi^2 - (ka\sin(\theta))^2} \cos(\theta) \quad \dots(2.13)$$



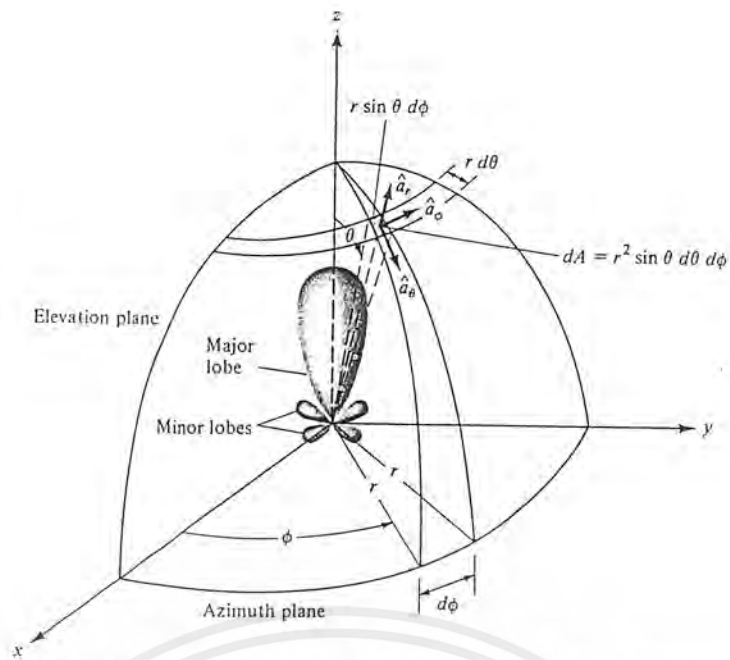
รูปที่ 2.3 แสดงการแพร่กระจายคลื่นของระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็กที่ออกจากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิด 1 ด้าน

## 2.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (radiation pattern) คือรูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสเปซ โคออดิเนต (space coordinate) ส่วนใหญ่แบบรูปของการแพร่กระจายคลื่นนี้มักจะคิดในบริเวณที่เป็นบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (far field)

การอธิบายคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ คือความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (radiation intensity) เฟส (phase) หรือ โพลาไรเซชัน (polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงของพลังงานเป็นฟังก์ชัน ของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่

รูปที่ 2.4 แสดงระบบโคออดิเนตที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นสำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่าแบบรูปกำลังงาน (power pattern) ของสายอากาศ และกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่าง ๆ ที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่าแบบรูปของสนาม (field pattern) ของสายอากาศนั้น

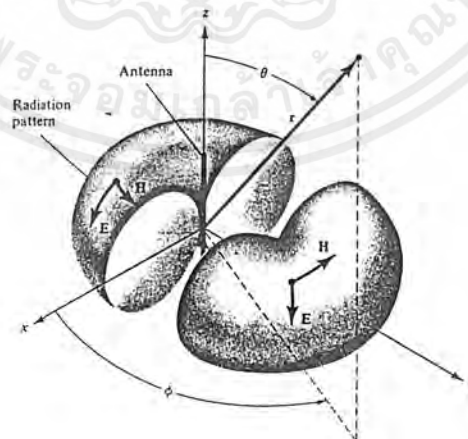


รูปที่ 2.4 แสดงระบบ โคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

### 2.5.1 แบบรูปแบบไอโซโทรปิก ไดเรกชันแนล และออมนิไดเรกชันแนล

ตัวแพร่คลื่นไอโซโทรปิก (isotropic radiator) คือสายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นเท่ากันทุกทิศทาง ยกตัวอย่างเช่น พอยท์ซอร์ส (point source) เป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้าง ได้จริง แต่มักจะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติ แสดงทิศทางของสายอากาศ

สายอากาศชี้ทิศทาง เป็นสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างหนึ่งของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ สายอากาศแบบออมนิไดเรกชันแนล คุณสมบัติของสายอากาศแบบนี้มีดังแสดงในรูป 2.5



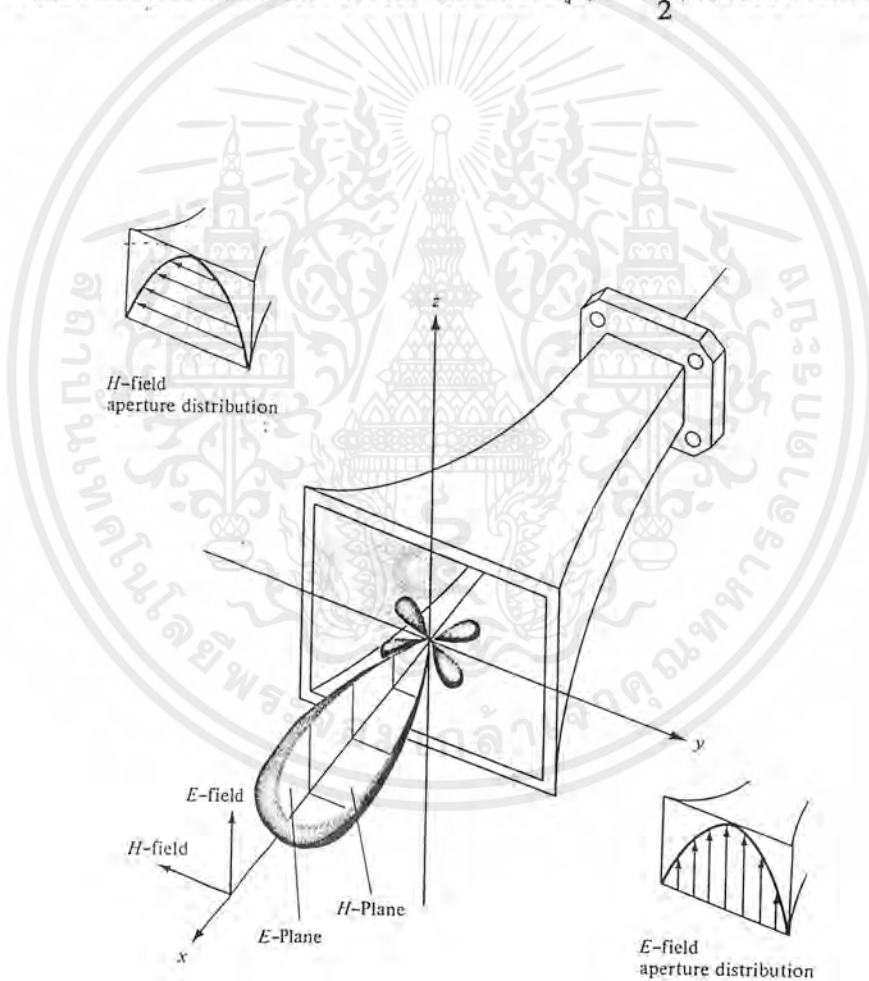
รูปที่ 2.5 แบบรูปของสายอากาศชี้ทิศทาง (ออมนิไดเรกชันแนล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามรูปจะเห็นว่าแบบรูปแบบนี้ ไม่มีทิศทางในระนาบอาซิมุท (azimuth plane) [ $f(\phi)$ ,  $\theta =$  ค่าคงที่] แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบเอเลเวชัน (elevation plane) [ $g(\theta)$ ,  $\phi =$  ค่าคงที่] แบบรูปแบบอสมิโดเรคชันแนลนี้เป็นกรณีพิเศษของแบบรูปของสายอากาศชี้ทิศทาง

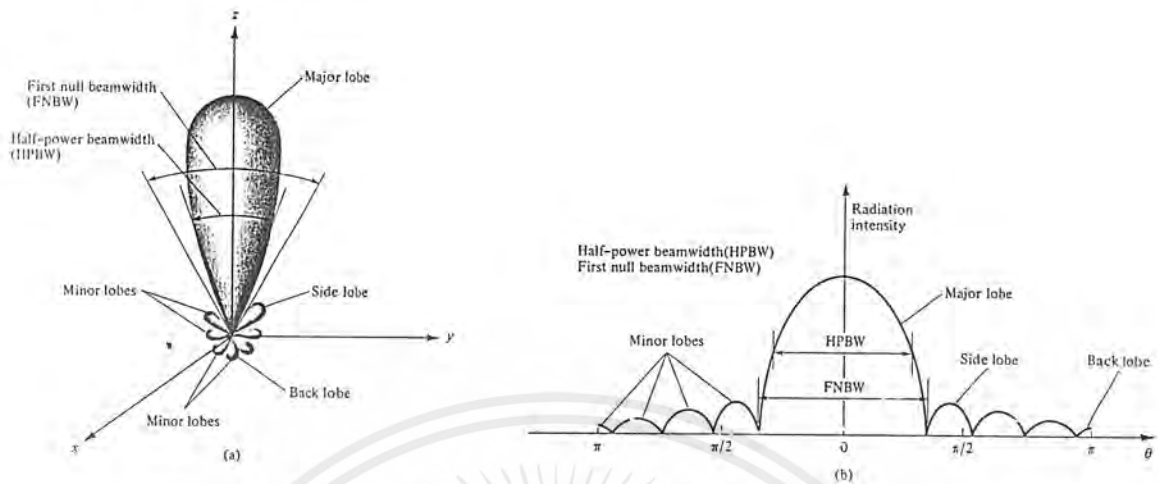
### 2.5.2 แบบรูปหลัก

เราอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศในทอมของแบบรูปหลัก (principal pattern) ของสนามไฟฟ้า  $E$  และสนามแม่เหล็ก  $H$  สำหรับสายอากาศลิเนียร์โพลาไรเซชัน (linearly polarization) แบบรูปในระนาบ  $E$  จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปในระนาบ  $H$  จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ตัวอย่างการแสดงผลแบบรูปหลักมีดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยมีระนาบ  $XZ$  (ระนาบเอเลเวชัน;  $\phi = 0$ ) เป็นระนาบ  $E$  หลัก และมีระนาบ  $XY$  (ระนาบอาซิมุท,  $\theta = \frac{\pi}{2}$ ) เป็นระนาบ  $H$  หลัก



รูปที่ 2.6 แบบรูปหลักสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 a) โลบ (Lobe) ต่าง ๆ และมีมิติของแบบรูปสายอากาศ

b) แบบรูปในแบบลิเนียร์

### 2.5.3 โลบของการแพร่กระจายคลื่น

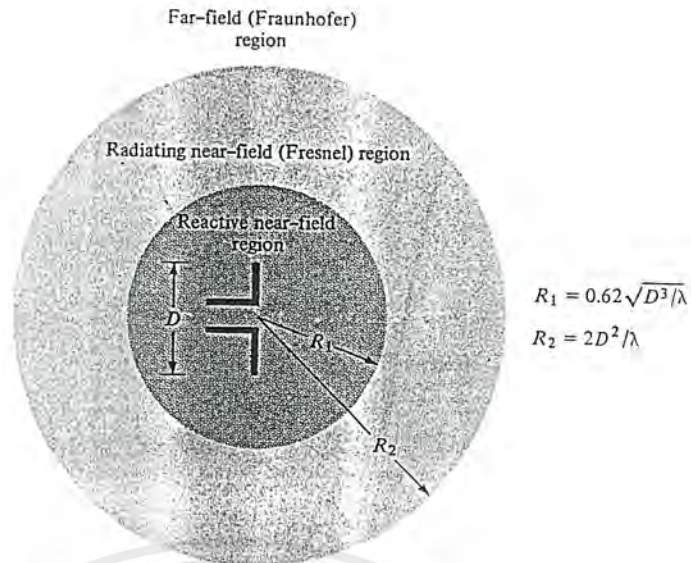
โอบของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe) เป็นส่วนหนึ่งของการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ รูปที่ 2.7 แสดงแบบรูปเชิงขั้ว (polar pattern) แบบสามมิติ ซึ่งแบ่งเป็น โอบแบบต่าง ๆ ดังนี้

โอบหลัก (major lobe หรือ main lobe) เป็นโอบของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ตามรูป 2.4 มีโอบหลักอยู่ในทิศทาง  $\theta = 0$  สำหรับสายอากาศบางชนิด อาจมีโอบหลักมากกว่าหนึ่งโอบ เช่น สายอากาศแยก빔 (split beam antenna)

โอบย่อย (minor lobe) ได้แก่โอบอื่น ๆ นอกเหนือไปจากโอบหลัก

โอบข้างหรือไซด์โอบ (side lobe) เป็นโอบย่อยที่อยู่ติดกับโอบหลัก และอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับโอบหลัก

โอบหลัง (back lobe) เป็นโอบย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับโอบหลัก ปกติแล้วโอบย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ดีจะต้องกำจัดโอบเหล่านี้ให้น้อยที่สุด ระดับของโอบย่อยมักแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในโอบที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นของพลังงานในโอบหลัก ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนของไซด์โอบ (side lobe ratio) หรือระดับของไซด์โอบ (Side Lobe Level : SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของไซด์โอบน้อยกว่า  $-20$  dB



รูปที่ 2.8 แสดงการแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ

#### 2.5.4 บริเวณต่างๆ ของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไปมักจะแบ่งบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (reactive –near field) สนามกระจายระยะใกล้ (radiating – near field) และสนามระยะไกล (far field) ดังแสดงในรูปที่ 2.8

บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด และมีสนามเป็นชนิดรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ บริเวณนี้จะมีระยะทาง  $R < 0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$  จากผิวของสายอากาศ เมื่อ  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่น และ  $D$  เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ

บริเวณสนามกระจายระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกล โดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่ และการกระจายของสนามตามมุมต่างๆ นั้นแปรผันตามระยะทางจากสายอากาศเมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้น ในบริเวณนี้จะมีระยะทาง  $0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq R \leq \frac{2D^2}{\lambda}$

บริเวณสนามระยะไกล เป็นบริเวณสนามของสายอากาศซึ่งการแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติใหญ่ที่สุดเท่ากับ  $D$  บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง  $R$  มากกว่า  $\frac{2D^2}{\lambda}$  จากสายอากาศ

ในบริเวณนี้สนามมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse Field) และการแพร่กระจายของสนามตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทาง ขอบในของบริเวณดังกล่าวมีค่า  $R$  เท่ากับ  $\frac{2D^2}{\lambda}$  และขอบนอกเป็นอนันต์

### 2.5.5 เรเดียนและสเตอเรเดียน

การวัดมุมบนระนาบจะมีหน่วยเป็นเรเดียน หนึ่งเรเดียนเป็นมุมระนาบ ซึ่งยอดของมันอยู่ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมรัศมีที่มีรัศมี  $r$  และถูกปิดด้วยส่วนของเส้นรอบวง ซึ่งยาว  $r$  ดังแสดงในรูปที่ 2.9(a) เนื่องจากเส้นรอบวงที่มีรัศมี  $r$  มีความยาว  $c = 2\pi r$  ดังนั้นบนหนึ่งรอบของวงกลม จะมี  $2\pi$  เรเดียน  $\left(\frac{2\pi r}{r}\right)$

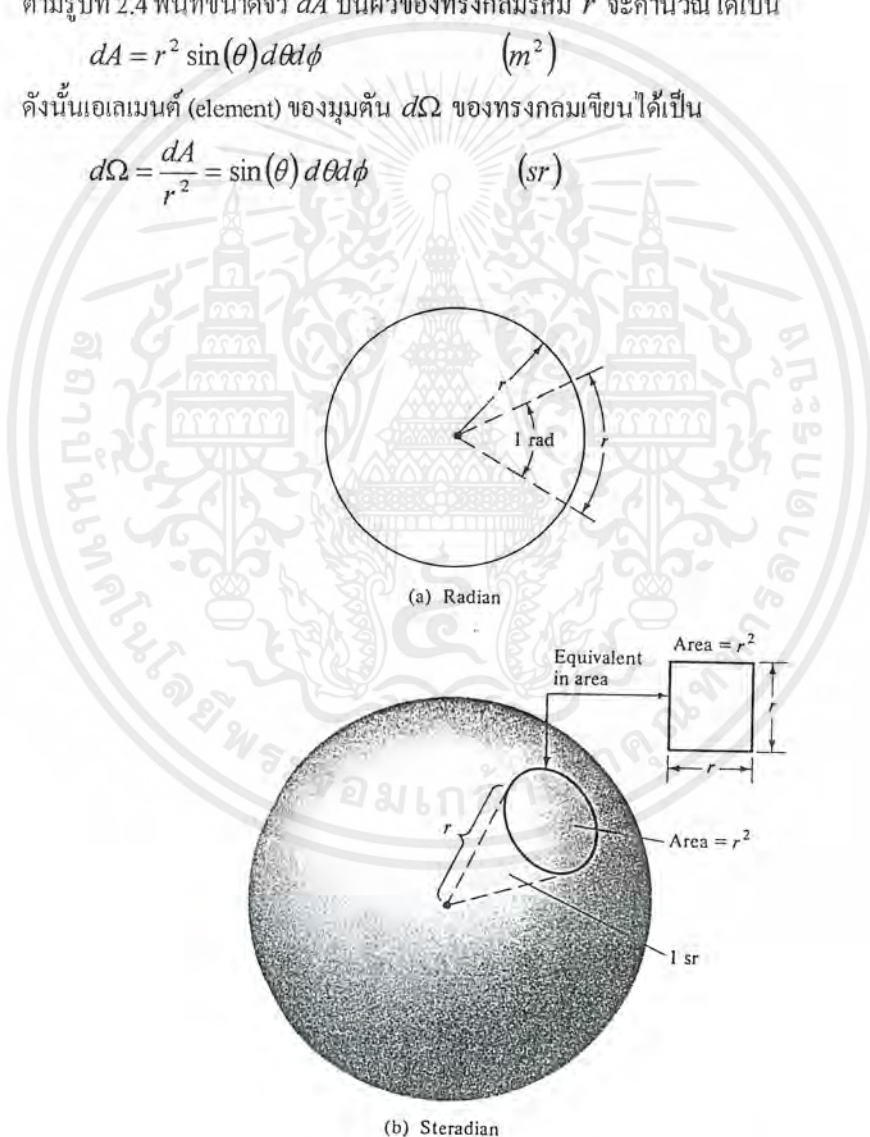
การวัดมุมตันมีหน่วยเป็นสเตอเรเดียน (sr) หนึ่งสเตอเรเดียนเป็นมุมตันที่มียอดอยู่ที่จุดศูนย์กลางของทรงกลมที่มีรัศมี  $r$  ดังแสดงในรูปที่ 2.9(b) เนื่องจากพื้นที่ของทรงกลมรัศมี  $r$  มีค่าเท่ากับ  $4\pi r^2$  ดังนั้นตลอดทรงกลมจะมี  $4\pi sr$   $\left(\frac{4\pi r^2}{r^2}\right)$

ตามรูปที่ 2.4 พื้นที่ขนาดจิ๋ว  $dA$  บนผิวของทรงกลมรัศมี  $r$  จะคำนวณได้เป็น

$$dA = r^2 \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (m^2) \quad \dots(2.14)$$

ดังนั้นเอลเมนต์ (element) ของมุมตัน  $d\Omega$  ของทรงกลมเขียนได้เป็น

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (sr) \quad \dots(2.15)$$



รูปที่ 2.9 รูปแสดงคำจำกัดความของเรเดียนและสเตอเรเดียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดธ์

ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดธ์ (half-power beamwidth :  $HPBW$ ) เป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในโลบหลัก มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดสองจุด หรือที่ตำแหน่งที่  $-3dB$  ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เพื่อความสะดวกต่อไปจะใช้คำย่อ  $HPBW$  แทน

## 2.7 ความหนาแน่นของกำลังงานที่แพร่กระจาย

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการส่งข่าวสารผ่านตัวกลางถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับพลังงานและกำลังงานไฟฟ้า โดยใช้ตัวความสัมพันธ์ดังกล่าวได้แก่ พอยติงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น (instantaneous poyniting vector) ซึ่งมีสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\mathcal{W} = \mathcal{E} \times \mathcal{H} \quad \dots(2.16)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \mathcal{W} &= \text{พอยติงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น} \quad (W/m^2) \\ \mathcal{E} &= \text{ความเข้มสนามไฟฟ้าชั่วขณะเวลานั้น} \quad (V/m) \\ \mathcal{H} &= \text{ความเข้มสนามแม่เหล็กชั่วขณะเวลานั้น} \quad (A/m) \end{aligned}$$

เนื่องจากพอยติงเวกเตอร์มีความหมายแสดงถึงความหนาแน่นของกำลังงาน ดังนั้นกำลังงานทั้งหมดที่พุ่งตัดผ่านพื้นผิวปิดจะสามารถหาได้โดยอินทิเกรตส่วนของพอยติงเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิวทั้งหมด ซึ่งเมื่อเขียนเป็นสมการจะได้

$$\mathcal{P} = \iint_s \mathcal{W} \cdot d\mathbf{S} = \iint_s \mathcal{W} \cdot \mathbf{n} \, da \quad \dots(2.17)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \mathcal{P} &= \text{กำลังงานทั้งหมดซึ่งขณะเวลานั้น} \quad (W) \\ da &= \text{พื้นที่จุ่มบนพื้นที่ปิด} \quad (m^2) \end{aligned}$$

ในกรณีของสนามที่แปรผันกับเวลา มักจะหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของกำลังงานได้โดยการอินทิเกรตค่าพอยติงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น ตลอด 1 คาบ แล้วหารด้วยคาบเวลานั้นสำหรับสนามที่แปรผันกับเวลา ซึ่งกระจายฮาร์โมนิกในรูป  $e^{j\omega t}$  เมื่อกำหนดสนาม  $E$  และ  $H$  เป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเชิงซ้อน แล้วจะหาความสัมพันธ์กับค่า และ ชั่วขณะเวลาใดๆ ได้จาก

$$\mathcal{E}(x, y, z, t) = \text{Re}[\mathbf{E}(x, y, z)e^{j\omega t}] \quad \dots(2.18)$$

$$\mathcal{H}(x, y, z, t) = \text{Re}[\mathbf{H}(x, y, z)e^{j\omega t}] \quad \dots(2.19)$$

จาก (2.18), (2.19) และโดยอาศัย  $\text{Re}[\mathbf{E}e^{j\omega t}] = \frac{1}{2}[\mathbf{E}e^{j\omega t} + \mathbf{E}^*e^{-j\omega t}]$  (2.16) จะเขียนได้

ใหม่เป็น

$$\mathcal{W} = \mathcal{E} \times \mathcal{H} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] + \frac{1}{2} \operatorname{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H} e^{j2\omega t}] \quad \dots(2.20)$$

เทอมแรกของ (2.20) ไม่เป็นฟังก์ชันของเวลา และเทอมที่สองมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นสองเท่าของความถี่ที่กำหนดให้ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของพอยดิงเวกเตอร์จึงสามารถที่จะหาได้เป็น

$$\mathbf{W}_{av}(x, y, z) = [\mathbf{W}(x, y, z; t)]_{L_v} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] \quad (W/m^2) \quad \dots(2.21)$$

ตัวประกอบ  $\frac{1}{2}$  ในเทอม (2.20) และ (2.21) เกิดขึ้น เพราะสนาม  $E$  และ  $H$  เป็นค่าสูงสุด ไม่ใช่ค่า *rms* จาก (2.21) กำลังงานเฉลี่ยที่แพร่กระจายจากสายอากาศ จะเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} P_{rad} = P_{av} &= \iint_s \mathbf{W}_{rad} \cdot d\mathbf{S} \\ &= \iint_s \mathbf{W}_{av} \cdot d\mathbf{S} \\ &= \frac{1}{2} \iint_s \operatorname{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot d\mathbf{S} \end{aligned} \quad \dots(2.22)$$

## 2.8 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น

คำจำกัดความของคำว่าความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ในทิศทางที่กำหนดให้คือ กำลังงานที่แพร่กระจายออกจากตัวสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เกี่ยวกับสนามระยะไกล ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น และผลจากการกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$U = r^2 W_{rad} \quad \dots(2.23)$$

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

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

ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้คือ

$$\begin{aligned} U(\theta, \phi) &= \frac{r^2}{2\eta} |\mathbf{E}(r, \theta, \phi)|^2 \\ &\cong \frac{r^2}{2\eta} [E_\theta(r, \theta, \phi)^2 + E_\phi(r, \theta, \phi)^2] \\ &\cong \frac{1}{2\eta} [E_\theta^\circ(\theta, \phi)^2 + E_\phi^\circ(\theta, \phi)^2] \end{aligned} \quad \dots(2.24)$$

เมื่อ  $E =$  ความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

$E_\theta, E_\phi =$  ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศระยะไกล

$\eta =$  อินทรินซิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้นแบบรูปของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึงความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นได้เช่นกัน

กำลังงานทั้งหมดนี้หาได้โดยอินทิเกรตความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นตาม (2.23) ตลอด

มุมตัน  $4\pi$  ทั้งหมด ซึ่งจะได้

$$P_{rad} = \iiint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U \sin(\theta) d\theta d\phi \quad \dots(2.25)$$

## 2.9 ไครเรคทีวิตี

เพื่อที่จะเข้าใจถึงคำว่าไครเรคทีวิตี เราจำเป็นต้องจะทำความรู้จักไครเรคทีฟเกน (directive gain) ไว้ก่อน

ไครเรคทีฟเกนในทิศทางที่กำหนด คืออัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งใช้สำหรับอ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศสำหรับใช้อ้างอิงนี้จะใช้ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส

ไครเรคทีวิตีคือค่าของไครเรคทีฟเกน ในทิศทางที่มีค่ามากที่สุด หรือกล่าวง่าย ๆ ว่าไครเรคทีวิตีของต้นกำเนิด (สายอากาศ) ที่ไม่เป็นไอโซโทรปิก คืออัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุด ต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_g = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad \dots(2.26)$$

$$D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad \dots(2.27)$$

$D_g =$  ไครเรคทีฟเกน (ไม่มีหน่วย)

$D_0 =$  ไครเรคทีวิตี (ไม่มีหน่วย)

$U =$  ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ( $W /$  ต่อหน่วยมุมตัน)

$U_{max} =$  ค่าสูงสุดของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ( $W /$  ต่อหน่วยมุมตัน)

$U_0 =$  ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส ( $W /$  หน่วยมุมตัน)

$P_{rad} =$  กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด ( $W$ )

จากสมการ (2.26) และ (2.27) เราจะทราบว่า ไครเรคทีฟเกน และไครเรคทีวิตีของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สมีค่าเป็นหนึ่ง ทั้งนี้เพราะว่า  $U, U_{max}$  และ  $U_0$  ต่างมีค่าเท่ากัน

ไครเรคทีวิตีของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สมีค่าเท่ากับหนึ่ง เพราะว่ามันแพร่กระจายกำลังงานออกไปทุกทิศทุกทางด้วยค่าที่เท่ากัน แต่สำหรับต้นกำเนิด(สายอากาศ) แบบอื่น ๆ นั้นย่อมมีไครเรคทีวิตีมากกว่าหนึ่งเสมอ

ข้อสรุปอีกอย่างหนึ่งในที่นี้ก็คือ ค่าของไดเรกทิฟเนนจะมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์และน้อยกว่า หรือเท่ากับไดเรกทิวิตี ( $0 \leq D_g \leq D_0$ )

โดยทั่วไปสูตรของไดเรกทิฟเนนและไดเรกทิวิตี อาจจะเป็นฟังก์ชันของทั้งมุม  $\theta$  และ  $\phi$  ด้วย ไดเรกทิวิตีรวมสูงสุดจะสามารถแสดงได้เป็น

$$D_0 = D_\theta + D_\phi \quad \dots(2.28)$$

โดยไดเรกทิวิตีของแต่ละส่วนของ  $D_\theta$  และ  $D_\phi$  แสดงได้เป็น

$$D_\theta = \frac{4\pi U_\theta}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi} \quad \dots(2.29)$$

$$D_\phi = \frac{4\pi U_\phi}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi} \quad \dots(2.30)$$

โดยที่

$U_\theta$  = ส่วนประกอบของความเข้มของการแผ่กระจายที่มีทิศทางในสนาม  $\theta$

$U_\phi$  = ส่วนประกอบของความเข้มของการแผ่กระจายที่มีทิศทางในสนาม  $\phi$

$(P_{rad})_\theta$  = ส่วนประกอบของกำลังงานของการแผ่กระจายที่มีทิศทางในสนาม  $\theta$

$(P_{rad})_\phi$  = ส่วนประกอบของกำลังงานของการแผ่กระจายที่มีทิศทางในสนาม  $\phi$

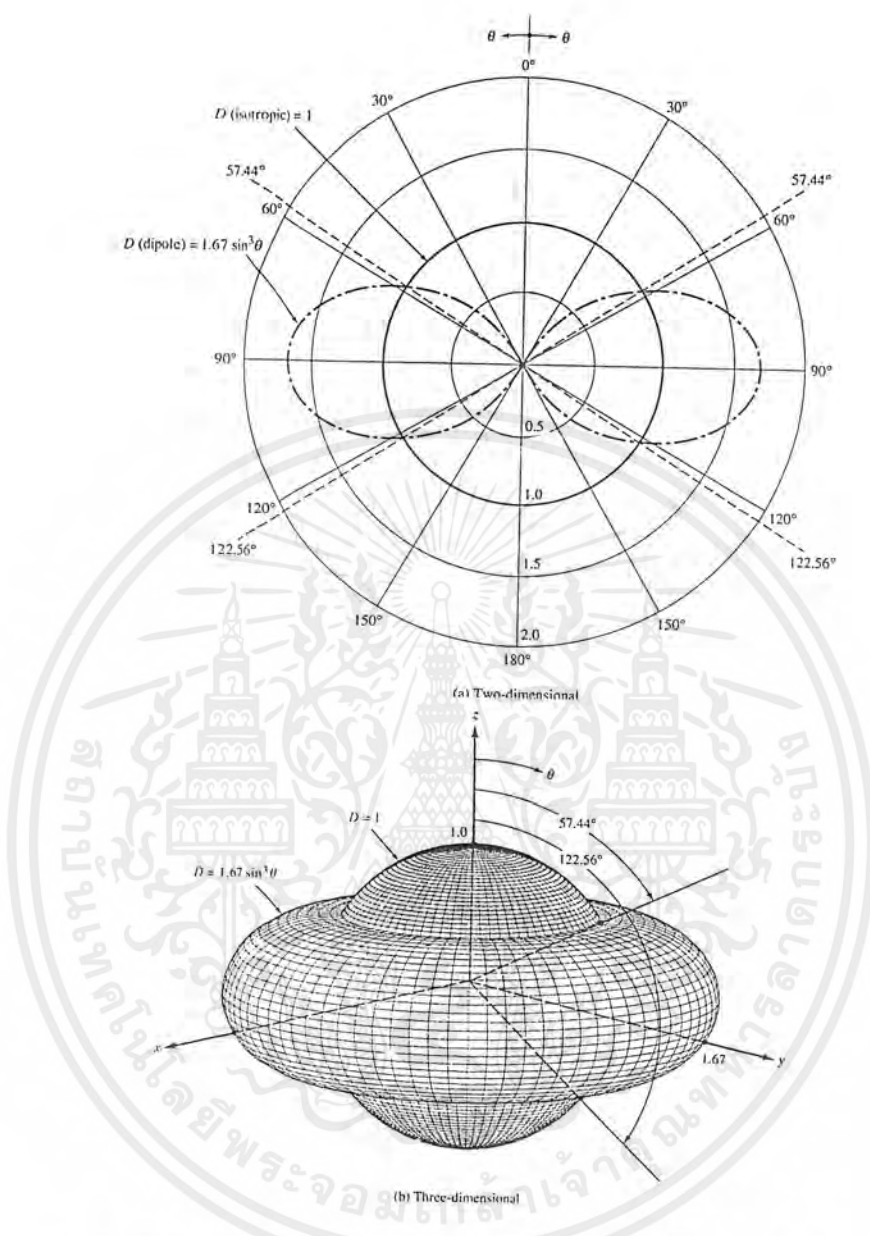
ในกรณีที่สายอากาศที่มีโอบหลักเพียงโอบเดียวหรือมีโอบย่อยขนาดน้อยมากจนสามารถตัดออกได้เราสามารถหาค่าไดเรกทิวิตีได้โดยใช้วิธีหาค่ามุมตันของบีมแล้วใช้สูตรของเกาส์ (Kraus Equation)

$$D_0 \approx \frac{4\pi \left(\frac{180}{\pi}\right)^2}{\theta_H X \theta_V} = \frac{41,253}{\theta_H X \theta_V} \quad \dots(2.31)$$

โดยที่

$\theta_H$  คือ ค่ามุมที่ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดธ์ของระนาบสนามแม่เหล็ก

$\theta_V$  คือ ค่ามุมที่ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดธ์ของระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.10 แสดงแบบรูปของไดเรกทิวิตีที่เป็น 2 มิติ และ 3 มิติของเสาอากาศไดโพลความยาว  $\frac{\lambda}{2}$

### 2.10 หลักการอาร์เรย์

แม้ว่าการเพิ่มขนาดของเสาอากาศเดี่ยวจะทำให้คุณสมบัติในการชี้ทิศทางดีขึ้นก็ตาม แต่ก็มีวิธีอื่นที่จะเพิ่มขนาดของเสาอากาศ โดยไม่ต้องเพิ่มขนาดของเสาอากาศที่นำมาทำเป็นองค์ประกอบ (element) ซึ่งทำได้โดยการจัดองค์ประกอบที่แพร่กระจายคลื่นให้เหมาะสมทั้งทางไฟฟ้า และรูปทรง ซึ่งเรียกว่า อาร์เรย์ ปกติแล้วจะเลือกใช้องค์ประกอบของการอาร์เรย์ที่เหมือนกัน

การทำอาร์เรย์มีอยู่ 5 วิธี คำนึงตามลักษณะต่าง ๆ ดังนี้คือ

1. แบ่งตามลักษณะการจัดเรียงองค์ประกอบในการทำอาร์เรย์

- 1.1 อาร์เรย์เชิงเส้น (linear array)
- 1.2 อาร์เรย์เชิงระนาบ (planar array)
- 1.3 อาร์เรย์เชิงวงกลม (circular array)
- 1.4 อาร์เรย์เชิงทรงกลม (spherical array)
- 1.5 อาร์เรย์เชิงปริมาตร (cubical array)

2. แบ่งตามระยะห่างของการจัดเรียงอาร์เรย์ (spacing)

- 2.1 การจัดเรียงองค์ประกอบที่มีระยะห่างเท่ากันหมด (uniform spacing array)
- 2.2 การจัดเรียงองค์ประกอบที่มีระยะห่างไม่เท่ากัน (non-uniform spacing array)

3. แบ่งตามลักษณะการป้อนกระแสให้แต่ละองค์ประกอบ (Excitation current distribution)

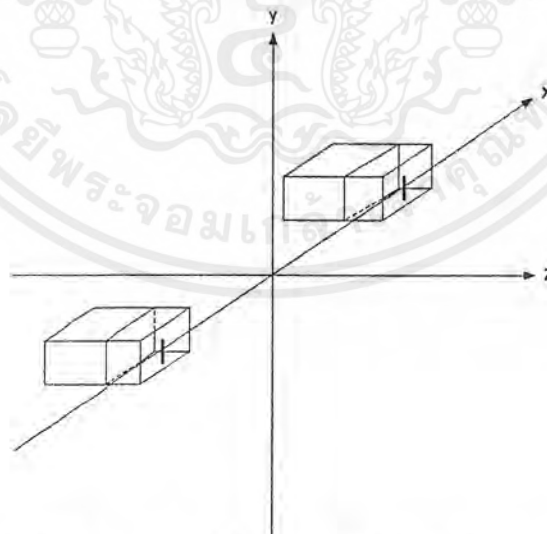
- 3.1 อาร์เรย์แบบสม่ำเสมอ (uniform array)
- 3.2 อาร์เรย์แบบเชบชีเชฟ (Chebyshev array)
- 3.3 อาร์เรย์แบบทวินาม (binomial array)

4. แบ่งตามลักษณะการป้อนเฟสให้แต่ละองค์ประกอบ

- 4.1 อาร์เรย์แบบบรอดไซด์ (broadside array)
- 4.2 อาร์เรย์แบบเอ็นไฟร์ (end-fire array)

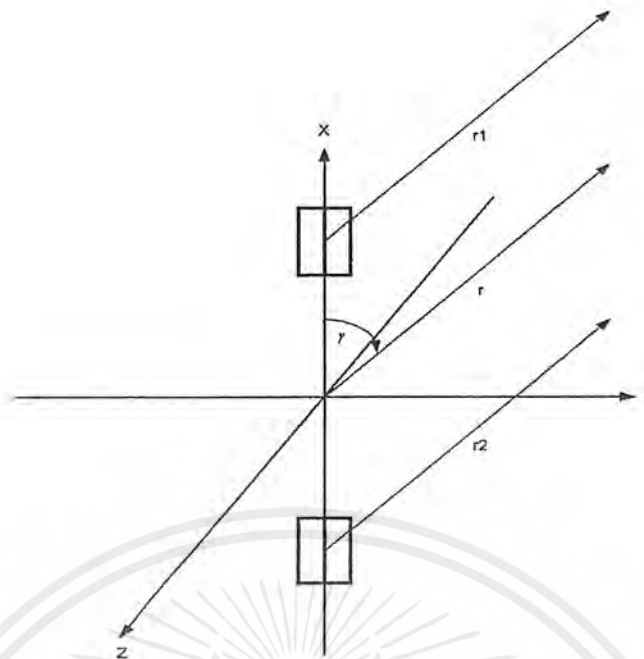
5. แบ่งตามชนิดขององค์ประกอบ

- 5.1 อาร์เรย์ของไดโพล (array of dipole)
- 5.2 อาร์เรย์ของร่อง (array of slot)
- 5.3 อาร์เรย์ของไมโครสตริป (array of microstrip)



รูปที่ 2.11 การจัดวางอาร์เรย์ของสององค์ประกอบในแนวแกน  $x$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงการสังเกตที่สนามระยะไกล

จาก

$$\begin{aligned} \bar{E} \text{ (ลิฟท์)} &= [\bar{E} \text{ (องค์ประกอบเดียวที่อยู่ตำแหน่งอ้างอิง)}] \times [\text{อาร์เรย์เฟคเตอร์}] \\ &= [\bar{E} \text{ (องค์ประกอบเดียวที่อยู่ตำแหน่งอ้างอิง)}] \times AF \end{aligned} \quad \dots(2.32)$$

โดย

$$AF = \left[ \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad \dots(2.33)$$

$$\psi = kd \cos(\gamma) + \beta \quad \dots(2.34)$$

$N$  คือจำนวนองค์ประกอบ

เมื่อทำการนอร์มอลไลซ์แล้วจะได้ค่าอาร์เรย์เฟคเตอร์เป็น

$$(AF)_n = \frac{1}{N} \left[ \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad \dots(2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการจัดวางอาร์เรย์ของแต่ละองค์ประกอบไปตามแนวแกน  $x$  ตามรูปที่ 3.2 เราจะได้ว่า

$$\begin{aligned}\cos(\gamma) &= \overline{a_x} \circ \overline{a_r} \\ &= \overline{a_x} \circ (\sin(\theta)\cos(\phi)\overline{a_x} + \sin(\theta)\sin(\phi)\overline{a_y} + \cos(\theta)\overline{a_z}) \\ &= \sin(\theta)\cos(\phi)\end{aligned}\quad \dots(2.36)$$

เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (2.10), (2.11), (2.32), (2.33), (2.34), (2.35), และ (2.36) เราจะได้ว่า

$$N = 2 \quad \beta = 0$$

$$E_\theta = j \frac{kabE_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[ \frac{\sin\left(\frac{kb}{2}\sin(\theta)\right)}{\frac{kb}{2}\sin(\theta)} \right] \frac{\sin(kd \cos(\phi)\sin(\theta))}{\frac{1}{2}\sin\left(\frac{1}{2}kd \cos(\phi)\sin(\theta)\right)} \quad \dots(2.37)$$

$$E_\phi = j \frac{kabE_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[ \cos(\theta) \frac{\cos\left(\frac{ka}{2}\sin(\theta)\right)}{\pi^2 - (ka \sin(\theta))^2} \right] \frac{\sin(kd \cos(\phi)\sin(\theta))}{\frac{1}{2}\sin\left(\frac{1}{2}kd \cos(\phi)\sin(\theta)\right)} \quad \dots(2.38)$$

ถ้าวางแต่ละองค์ประกอบไปตามแนวแกน  $y$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\cos(\gamma) &= \overline{a_y} \circ \overline{a_r} \\ &= \sin(\theta)\sin(\phi)\end{aligned}\quad \dots(2.39)$$

## บทที่ 3

## การออกแบบสายอากาศ

## 3.1 การออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน

ในการออกแบบจะต้องทราบขนาดของท่อนำคลื่น และความถี่ที่ออฟ เพื่อที่จะเลือกใช้ความถี่ในการทดลองอย่างเหมาะสมมีขั้นตอนดังนี้

1. การเลือกใช้ขนาดของท่อให้เหมาะสมกับย่านความถี่ใช้งานสามารถพิจารณาได้จากตาราง ก. (ภาคผนวก) เราจะเลือกใช้ท่อนำคลื่นสัญญาณ WR229 มีคุณสมบัติดังนี้

1.1 ความกว้างของท่อด้านใน  $(a) = 5.317 \text{ cm}$ .

1.2 ความสูงของท่อด้านใน  $(b) = 2.903 \text{ cm}$ .

1.3 ความถี่ของท่ออยู่ในย่าน  $3.22 - 4.90 \text{ GHz}$

1.4 ความกว้างแบนด์วิดธ์ของท่อที่ออกแบบ  $1.68 \text{ GHz}$

1.5 ความถี่ที่ออฟ  $(f_c) = 2.579 \text{ GHz}$

1.6 ความกว้างของท่อด้านในของการออกแบบ  $(a) = 5.7 \text{ cm}$ .

1.7 ความสูงของท่อด้านในของการออกแบบ  $(b) = 2.8 \text{ cm}$ .

1.8 ความถี่ที่ใช้ในการออกแบบมีค่า  $4 \text{ GHz}$

1.9 ความถี่ที่ใช้ในการออกแบบอยู่ในย่าน  $3.0 - 5.0 \text{ GHz}$

1.10 ความกว้างของแบนด์วิดธ์ที่ออกแบบ  $2 \text{ GHz}$

2. เจารูใส่โพรบภายในท่อนำคลื่นจะใส่ไว้บริเวณกึ่งกลางท่อเพราะจะมีสนามไฟฟ้าในโหมด  $TE_{10}$  จะมีค่ามากที่สุดตรงกลางท่อนำคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยจะทำการสร้างสายอากาศ ให้มีคุณสมบัติดังที่กล่าวมาทั้งหมด 2 ตัว โดยใช้เป็นตัวส่ง และตัวรับ

3. ความยาวของโพรบมีค่าเท่ากับ  $\frac{\lambda}{4}$

จากสมการ (2.9) และ (3.1) จะได้

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sin(\theta)} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad \text{และ} \quad \lambda = \frac{c}{f_0}$$

$$\lambda_g = 9.959 \text{ cm.}$$

$$\frac{\lambda_g}{4} = 2.489 \text{ cm.}$$

4. จากตำแหน่งของโพรบไปหาแผ่นสะท้อนมีค่าเท่ากับ  $\frac{\lambda_g}{4}$

5. หาความยาวของคลื่นที่ใช้ในการทดลอง  $(\lambda)$  เท่ากับ

$$\lambda = \frac{c}{f_0} \quad \dots(3.1)$$

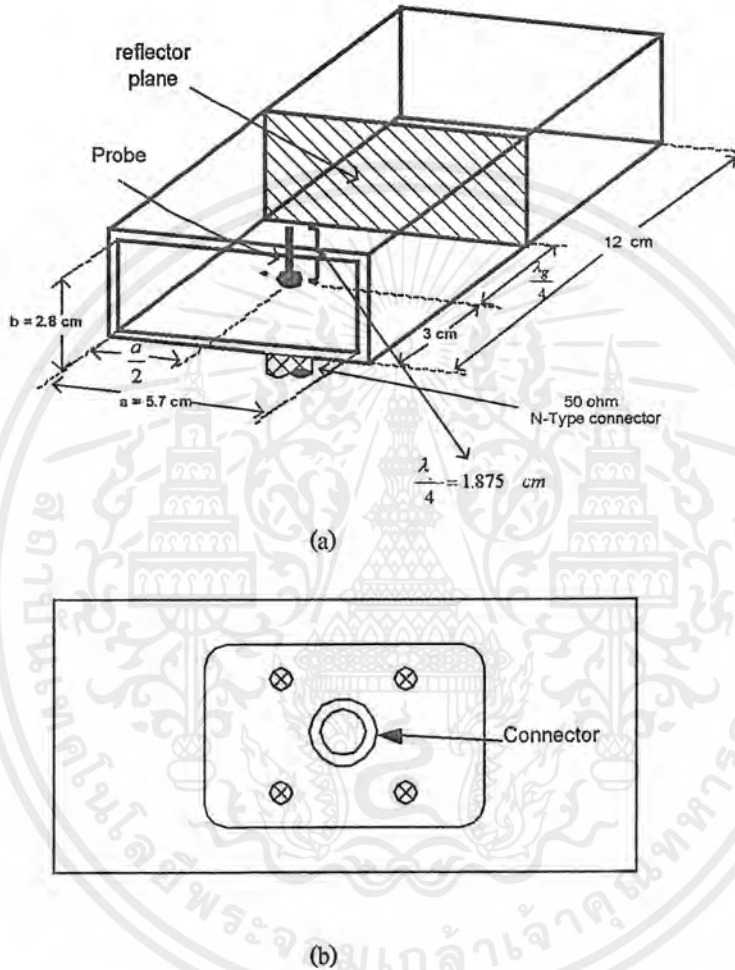
โดยที่  $c$  คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8 \text{ (m/s)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$f_0$  คือ ค่าความถี่ที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 4 GHz

โดย  $\lambda = 7.5 \text{ cm}$ ,  $\frac{\lambda}{4} = 1.875 \text{ cm}$ .

การทดลองนี้จะทำการศึกษาลักษณะของแบบรูปของการแพร่กระจายคลื่นที่กระจายออกจากปากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ทั้งระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก

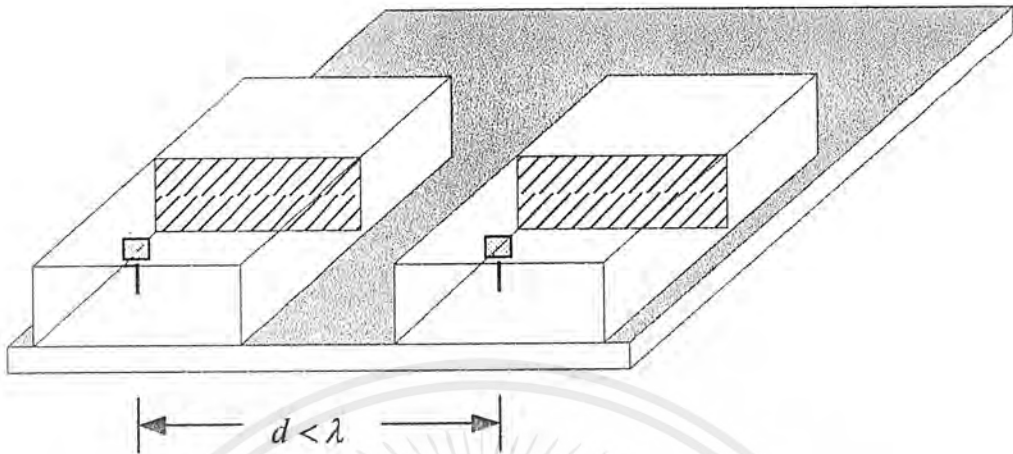


รูปที่ 3.1 (a) แสดงท่อนำคลื่นที่ออกแบบที่ใช้ในการทดลอง

(b) แสดงลักษณะของการต่อคอนเน็คเตอร์กับ โพรบเข้ากับท่อนำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การอาร์เรย์ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้านสององค์ประกอบตามแนวแกน $x$



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะการจัดวางอาร์เรย์ของสายอากาศ 2 องค์ประกอบ

จากรูปที่ 2.11 และรูปที่ 2.12 แสดงการจัดวางองค์ประกอบของการอาร์เรย์ไปตามแนวแกน  $x$  และการสังเกตสนามของแบบรูปที่จุดสังเกตที่สนามระยะไกล

เนื่องจากการทดลองเป็นการทดลองป้อนอาร์เรย์แบบสม่ำเสมอ หรือป้อนกระแส และเฟสให้กับทุกองค์ประกอบเท่ากันหมดจึงต้องทำการแมทชิงสายด้วย รูปแสดงการแมทชิงสายแสดงดังรูปที่ 4.18 เพื่อให้ได้อินพุทอิมพีแดนซ์มีค่าใกล้เคียงกับ  $50\Omega$  มากที่สุด

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองในโครงการนี้ จะทำการทดลองการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน โดยจะทำการวัดค่าและทดสอบคุณสมบัติของพารามิเตอร์ต่างๆ คือ  $VSWR$ , อิมพีแดนซ์, โดเรคทีวิตี และอัตรายายของสายอากาศ

#### 4.1 การวัด $VSWR$ และอิมพีแดนซ์ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน

$VSWR$  (voltage standing wave ratio) เนื่องจากในทางปฏิบัติจริง ๆ นั้น สายอากาศของเราจะไม่สามารถที่จะปรับให้มีค่าอิมพีแดนซ์ (ค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จากขั้วของสายอากาศ) ได้เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องรับหรือเครื่องส่งได้ ดังนั้นเมื่อมีการต่อสายอากาศเข้ากับเครื่องรับหรือเครื่องส่ง ผลก็จะทำให้กำลังงานส่วนหนึ่งเกิดการสะท้อนกลับที่จุดอินพุตของสายอากาศ ดังนั้นเพื่อเป็นการบ่งบอกแก่ผู้นำสายอากาศไปใช้งานว่าสายอากาศตัวนี้หากนำไปใช้งานแล้วจะสามารถรับกำลังงานที่ส่งมาจากเครื่องส่งได้มากน้อยเพียงใดจะสามารถบอกได้ด้วยค่า  $VSWR$

##### 4.1.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. Network Analyzer
2. ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน จำนวน 2 ตัว
3. N-type 50 $\Omega$  Calibration Kit
4. เครื่อง Plotter

##### 4.1.2 ลำดับขั้นตอนการวัด

1. ทำการปรับสถานะเครื่อง Network Analyzer เป็นแบบ one port (S 11)
2. กดปุ่ม START ป้อนความถี่เริ่มต้น ตามด้วยหน่วยของความถี่
3. กดปุ่ม STOP ป้อนความถี่สิ้นสุด ตามด้วยหน่วยของความถี่
4. กดปุ่ม MKR (marker)
  - 4.1 ให้ MARKER 1 อยู่ที่ความถี่เริ่มต้น (3 GHz)
  - 4.2 ให้ MARKER 2 อยู่ที่ความถี่ที่ใช้งาน (4 GHz)
  - 4.3 ให้ MARKER 3 อยู่ที่ความถี่สิ้นสุด (5 GHz)
5. กดปุ่ม CAL (calibration) เลือกที่ S 11 เป็นการทำการ Calibrate เครื่องโดยจะขึ้นข้อความ OPEN, SHORT, LOAD
6. นำตัว calibrator แบบ open มาต่อกับสายนำสัญญาณแล้วกดปุ่ม OPEN แล้วทำการถอดตัว calibrator ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. นำตัว calibrator (111) short มาต่อกับสายนำสัญญาณแล้วกดปุ่ม SHORT แล้วทำการถอดตัว calibrator ออก
8. นำตัว calibrator (111) Broadband Load มาต่อเข้ากับสายนำสัญญาณแล้วกดปุ่ม Broadband และ กด DONE LOAD สองครั้ง ทางจอภาพจะแสดงตัวหนังสือ "Cor" (correction) แล้วทำการถอดตัว LOAD ออก
9. ทำการกดปุ่ม FORMAT จะมีเมนูให้เลือก ทำการเลือกที่ Smith Chart
10. นำตัว calibrator แบบ short มาต่อเข้ากับสายนำสัญญาณอีกครั้งหนึ่งเพื่อทำการปรับสเกลอ้างอิง โดยทำการปรับที่ electrical delay เลื่อนไปที่ตำแหน่งของลูกศรไปที่ตำแหน่งขวามือสุดของ Smith Chart แล้วทำการปลดตัว calibrator ออก
11. ขั้นตอนที่ 1-10 เป็นขั้นตอนการ calibration เครื่อง
12. นำท่อนำคลื่นปลายเปิด 1 ด้านมาทำการต่อเข้ากับเครื่อง Network Analyzer
13. กด ปุ่ม FORMAT เครื่องจะแสดงค่า LOG MAG, SMITH CHART, SWR, PHASE และ DELAY
14. เลือกที่ SWR เครื่องจะแสดงค่า SWR ของท่อนำคลื่นที่วัดออกมาได้ ถ้าค่าที่วัดได้ ยังไม่เข้าใกล้ 1.00 ให้ทำการปรับแต่งความยาวของโพรบสายอากาศตัวกระตุ้น จนกว่าจะได้ค่า SWR ที่เข้าใกล้ 1.00 มากที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ หลังจากนั้นทำการกดปุ่ม COPY เพื่อทำการพิมพ์รูปออกมา
15. ทำการเลือกที่ LOG MAG, และ SMITH CHART แล้วทำการกดปุ่ม COPY เพื่อทำการพิมพ์รูปออกมา
16. ท่อนำคลื่นอีกอันทำตามขั้นตอนที่ 12-15

โดยทั่วไปแล้วค่า  $VSWR$  ที่จะสามารถนำมาใช้งานได้ต้องไม่เกิน 2:1 แต่ถ้าเราจะนำไปใช้งานจริง ๆ ต้องมีค่าไม่เกิน 1.5:1 และค่าอิมพีแดนซ์จะต้องมีค่าใกล้เคียงกับ 50 โอห์ม ซึ่งเราอาจจะทำการปรับที่ค่าความยาวของโพรบ หรือทำการปรับตำแหน่งของแผ่นสะท้อนคลื่นเพื่อให้ได้ค่า  $VSWR$  และอิมพีแดนซ์ ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุด

ผลการวัดค่า  $VSWR$  และค่าอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศแบบท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมปลายเปิด 1 ด้าน ได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

สายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมปลายเปิด 1 ด้านตัวที่ 1 มีค่า ความยาวของโพรบ  $1.725\text{cm}$ .

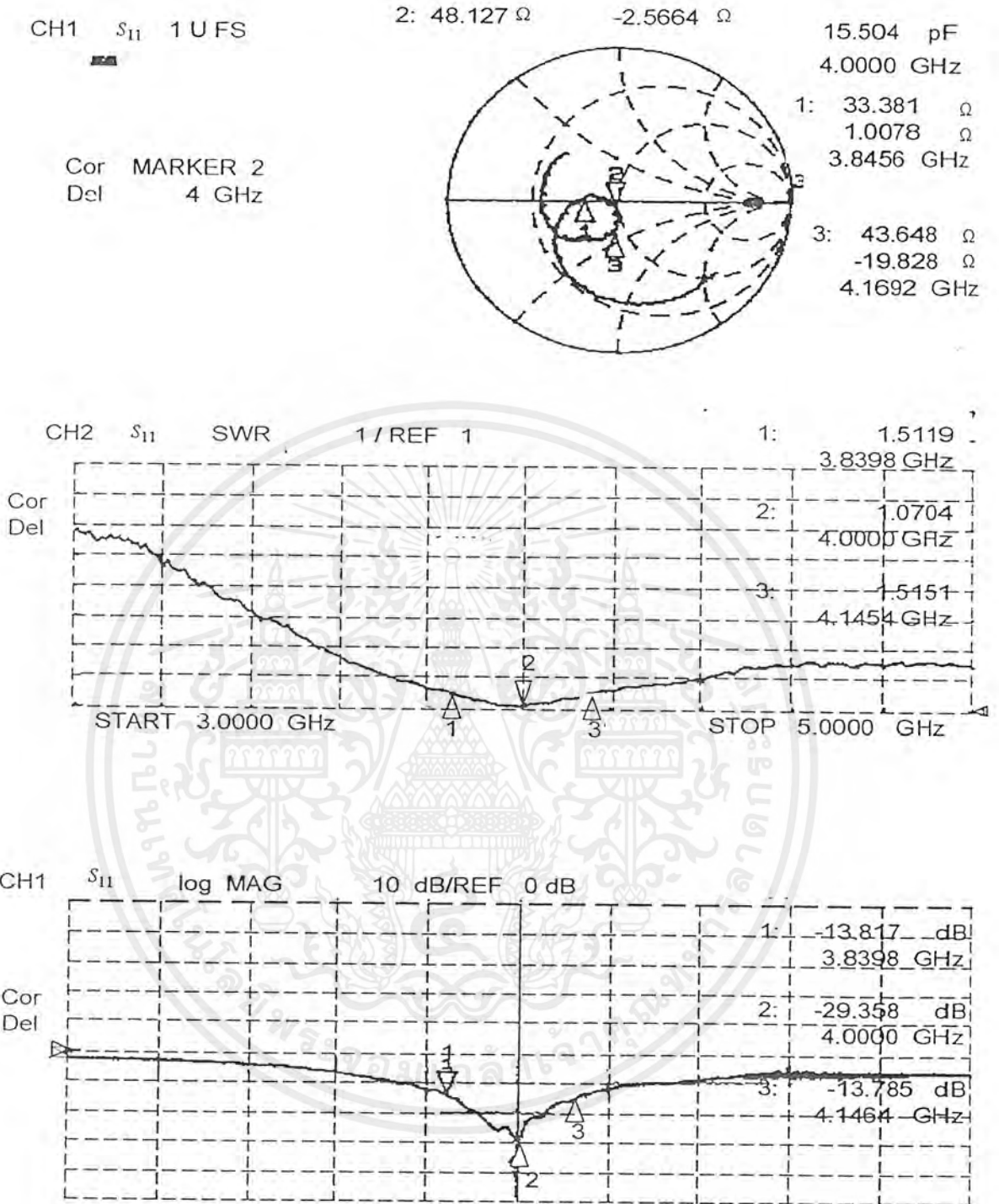
$$VSWR = 1.5119:1 \quad \text{ที่ความถี่ } f_L = 3.8398\text{ GHz}$$

$$VSWR = 1.5151:1 \quad \text{ที่ความถี่ } f_H = 4.1454\text{ GHz}$$

สายอากาศตัวนี้มีแบนด์วิดท์  $BW = 305.6\text{ MHz}$

อิมพีแดนซ์มีค่า =  $48.127\Omega - j2.5664\Omega$  ประกอบด้วยค่าคาปาซิแตนซ์ =  $15.504\text{ pF}$

ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงค่า  $V_{SWR}$  และอิมพีแดนซ์ของท่อนำคลื่นปลายเปิด 1 ด้านตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมปลายเปิด 1 ด้านตัวที่ 2 มีค่า

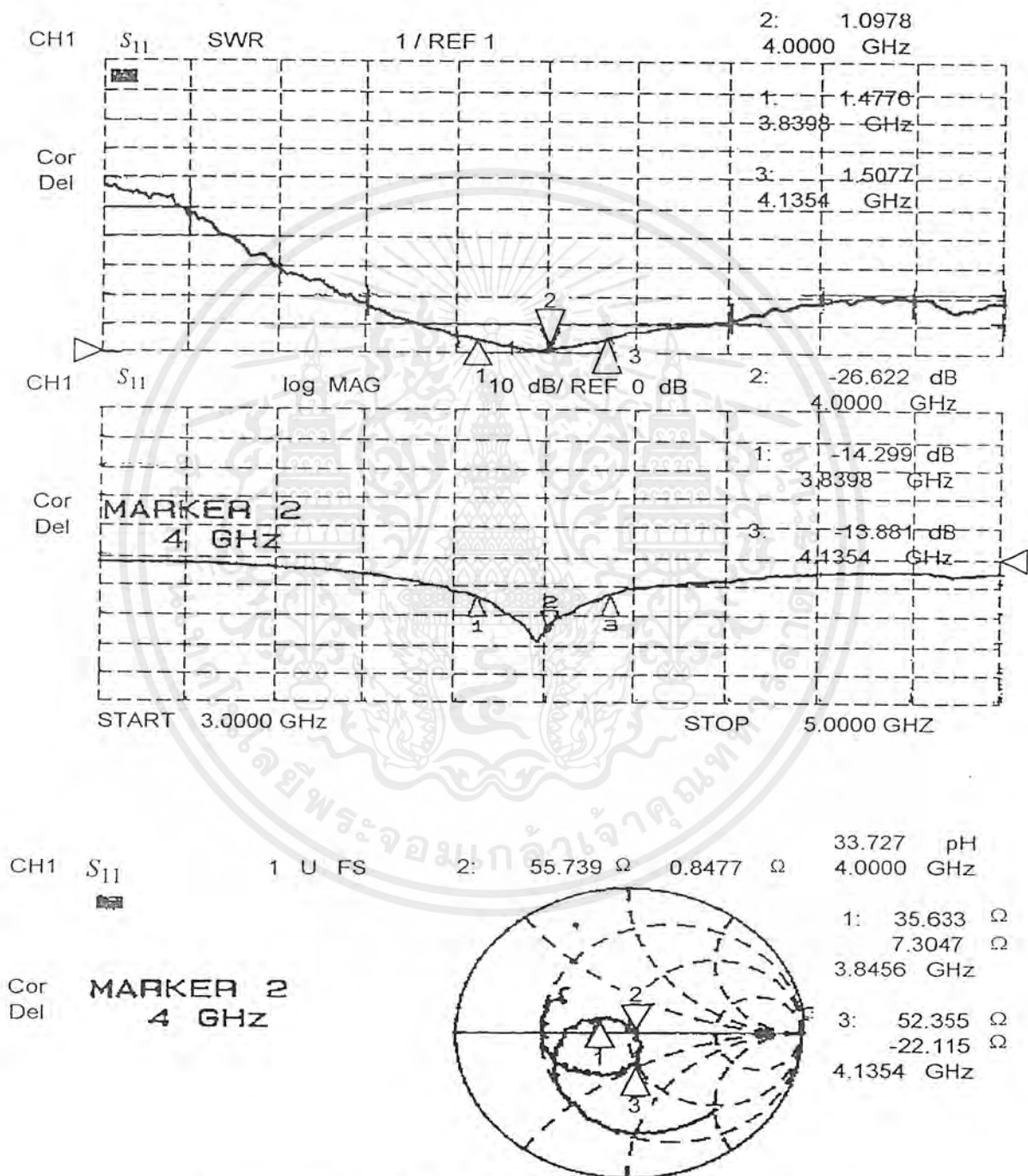
$$VSWR = 1.4776 : 1 \text{ ที่ความถี่ } f_L = 3.8398 \text{ GHz}$$

$$VSWR = 1.5077 : 1 \text{ ที่ความถี่ } f_H = 4.1354 \text{ GHz}$$

สายอากาศตัวนี้มีแบนด์วิดท์  $BW = 295.6 \text{ MHz}$

อิมพีแดนซ์มีค่า =  $55.793\Omega + j0.8477\Omega$  ประกอบด้วยค่าอินดักแตนซ์ =  $33.727 \text{ pH}$

ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.2

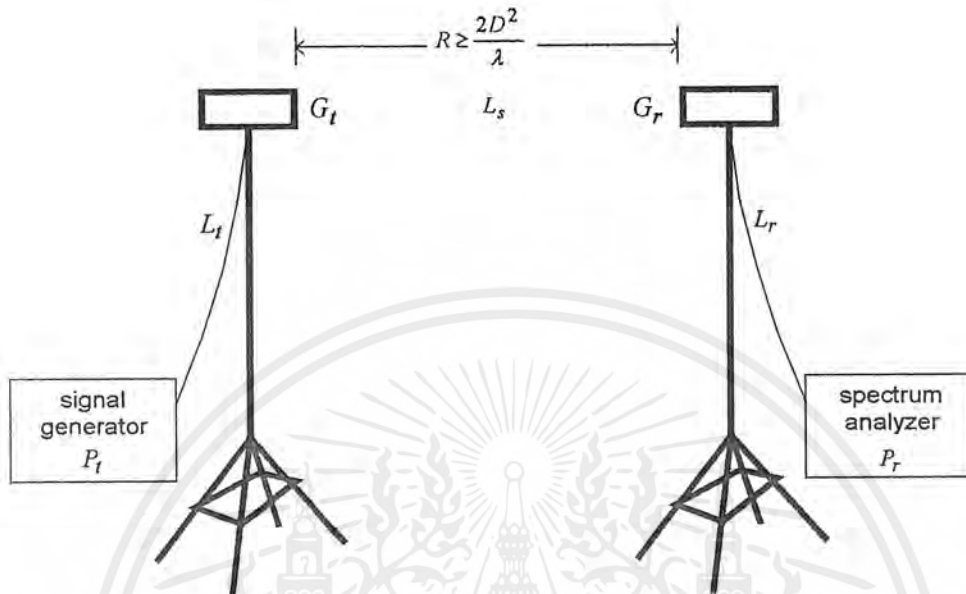


รูปที่ 4.2 แสดงค่า  $VSWR$  และอิมพีแดนซ์ของท่อนำคลื่นปลายเปิด 1 ด้านตัวที่ 2

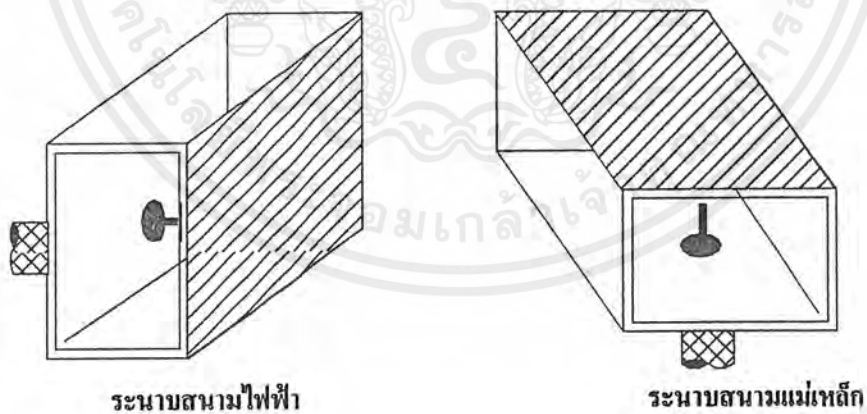
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 การวัดระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก

เมื่อทำการวัดค่า  $VSWR$  และอิมพีแดนซ์ เรียบร้อยแล้วจึงนำสายอากาศมาวัดหาค่าระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการวัดหาค่าระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก

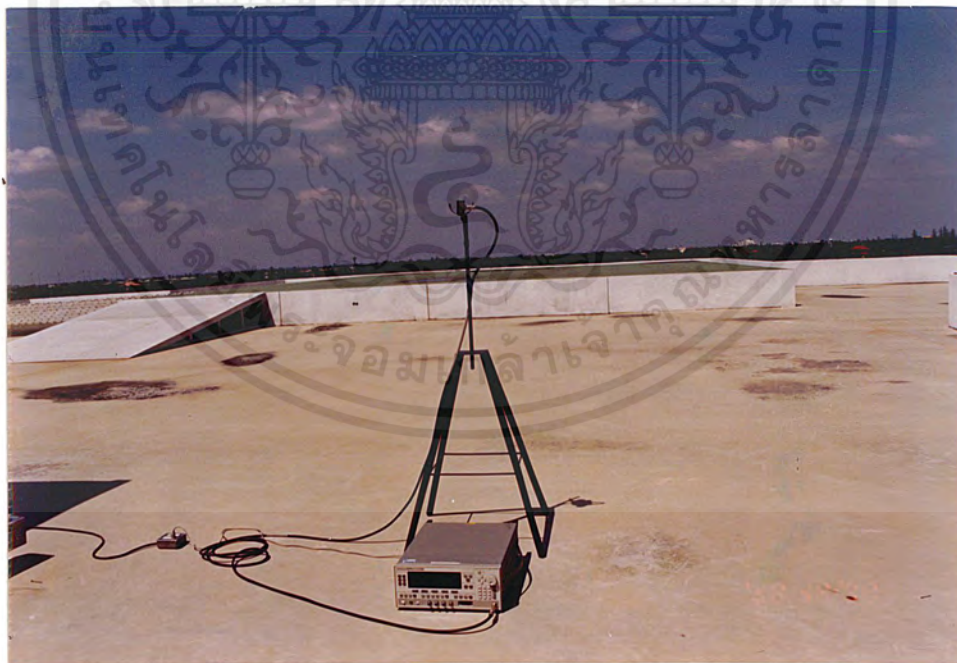


รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะการติดตั้งสายอากาศเพื่อทำการวัดหาค่าระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก โดยจะติดตั้งเหมือนกันทั้งสองด้านในการวัดแต่ละครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายของสายอากาศตัวรับขณะทำการวัดค่าของระนาบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายของสายอากาศตัวส่งขณะทำการวัดค่าของระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายลักษณะการติดตั้งการวัดค่าระนาบสนามแม่เหล็กและระนาบสนามไฟฟ้า

#### 4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

1. เครื่อง Spectrum Analyzer
2. เครื่อง Signal Generator
3. สายนำสัญญาณ
4. ขาตั้งสำหรับการติดตั้งสายอากาศ จำนวน 2 ตัว
5. เครื่อง Turn table ที่ใช้ในการหมุนสายอากาศรับ
6. สายอากาศแบบท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิด 1 ด้าน จำนวน 2 ตัว

#### 4.2.2 วิธีการวัด

1. ตั้งความถี่ให้กับ Signal Generator ด้วยความถี่กลาง 4 GHz ให้กำลังงานเท่ากับ 10 dBm
2. เครื่อง Analyzer Spectrum ตั้งไว้ที่ความถี่กลาง 4 GHz
3. ต่อสายนำสัญญาณกับสายอากาศเข้ากับ Signal Generator เพื่อเป็นตัวส่งสัญญาณ
4. ต่อสายนำสัญญาณกับสายอากาศเข้ากับ Analyzer Spectrum เพื่อเป็นตัวรับสัญญาณ ซึ่งสายอากาศทั้งสองที่ใช้ในการทดลองต้องมีระยะห่างไม่น้อยกว่า

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad \dots(4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R$  คือระยะห่างของสายอากาศตัวส่ง และตัวรับ

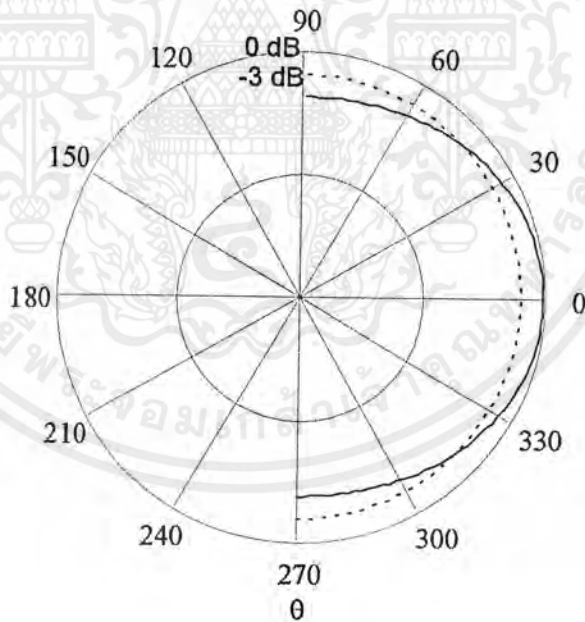
$D$  คือมิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศ ( $\sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{5.7^2 + 2.8^2} = 6.35\text{cm.}$ )

ในที่นี้ ใช้ความถี่ที่  $4\text{ GHz}$  และด้าน ( $D$ ) มีค่าเท่ากับ  $6.35\text{cm.}$  ดังนั้น  $R \geq 10.755\text{cm.}$  ในการทดลองใช้ระยะห่างเท่ากับ  $100\text{cm.}$

5. ทำการหมุนสายอากาศตัวรับที่ติดตั้งบนเครื่อง Turn Table ไปจาก 0 องศา ไปจนครบ 360 องศา แล้วบันทึกค่าที่ได้จนครบ 360 องศา
6. ทำการเปลี่ยนระนาบการวัด
7. ทำการวัดการสูญเสียที่เกิดในสายนำสัญญาณทั้งด้านรับและด้านส่ง และบันทึกค่าไว้ ( $L_1, L_2$ )
8. นำค่าที่วัดได้ของสายอากาศแต่ละค่ามาทำการนอร์มอลไลซ์ แล้วทำการพล็อตค่าลงในกราฟ Polar Plot

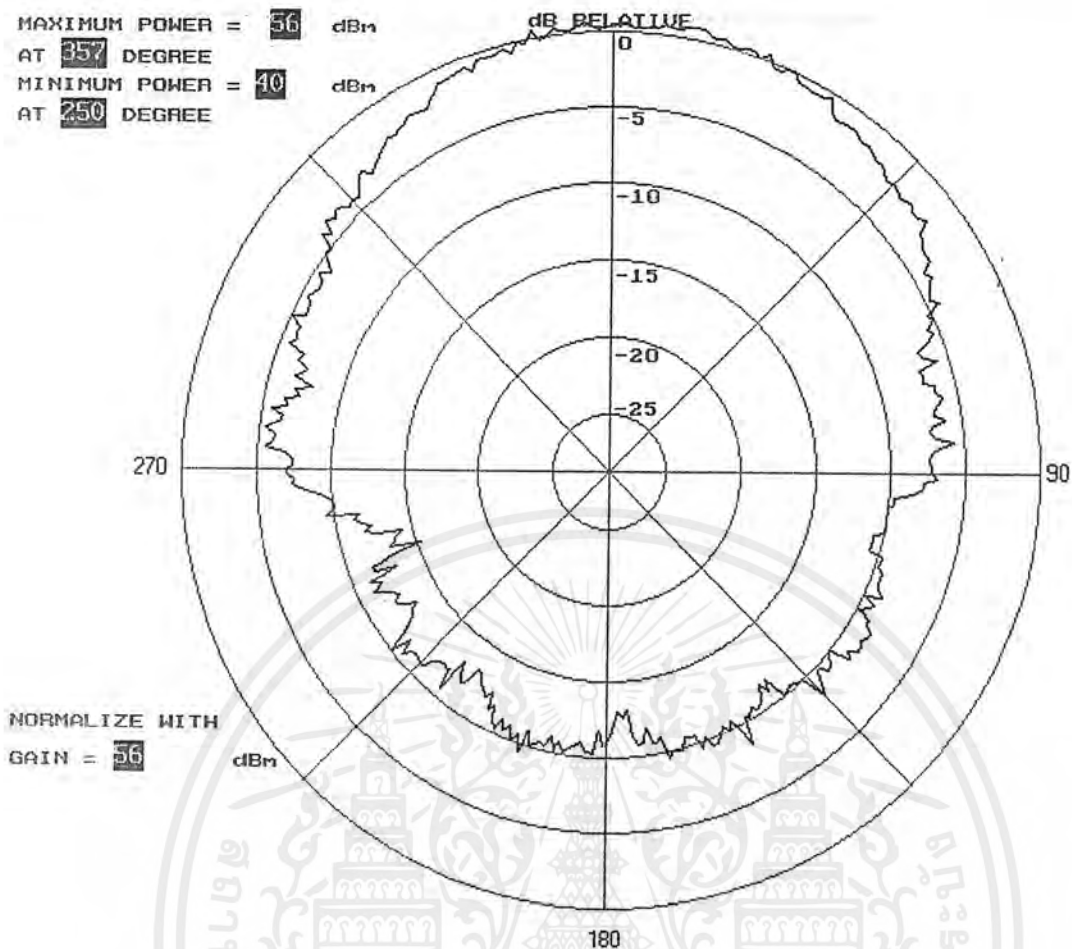
#### 4.2.3 ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8 แสดงแบบรูประนาบสนามไฟฟ้าที่ทดลองได้จากโปรแกรม Mathcad , รูปที่ 4.9 แสดงแบบรูประนาบสนามไฟฟ้า (โพลาไรซ์) ที่ได้จากการทดลอง, และรูปที่ 4.10 แบบรูปของสนามไฟฟ้า (ลิเนียร์) ที่ได้จากการทดลอง



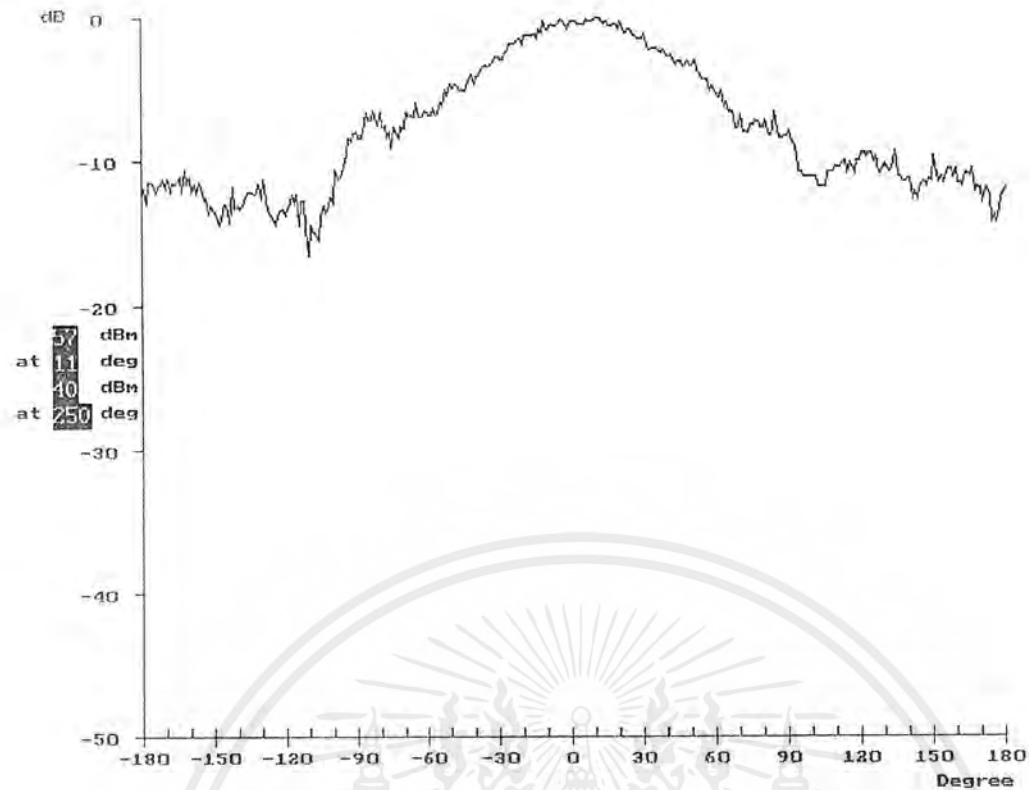
รูปที่ 4.8 แสดงแบบรูปของระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม Mathcad

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

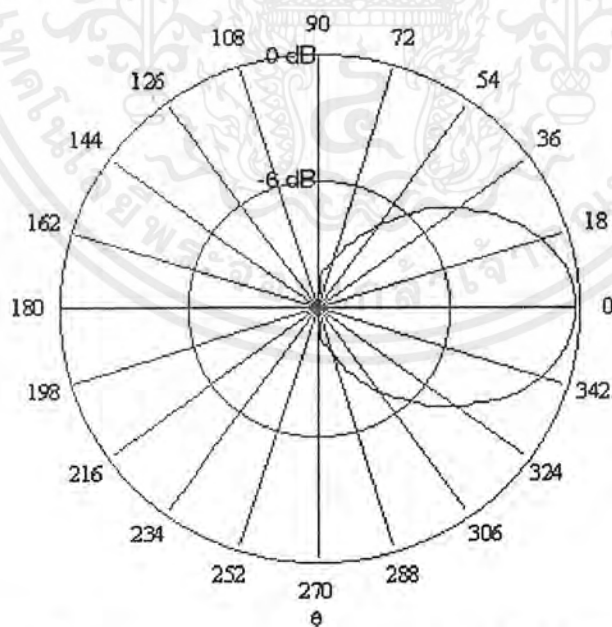


รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่าระนาบสนามไฟฟ้าแบบโพลาไรซ์

จากผลการทดลองพบว่าสายอากาศรับกำลังงานได้สูงสุดที่มุม 357 องศา และมีค่ากำลังงานที่รับได้สูงสุด  $-40\text{dBm}$  และรับกำลังงานต่ำสุดที่มุม 250 องศา ได้ค่ากำลังงานต่ำสุด  $-56\text{dBm}$  โดยรูปกราฟที่ได้เป็นการทำการนอร์มอลไลซ์แล้ว การนอร์มอลไลซ์ก็คือการนำเอาค่าสูงสุดไปลบออกจากค่ากำลังงานที่รับได้ทุก ๆ องศา ในที่นี้การนอร์มอลไลซ์คือการนำเอาค่า  $-40\text{dBm}$  ไปลบออกจากกำลังงานที่รับได้ทุก ๆ องศา

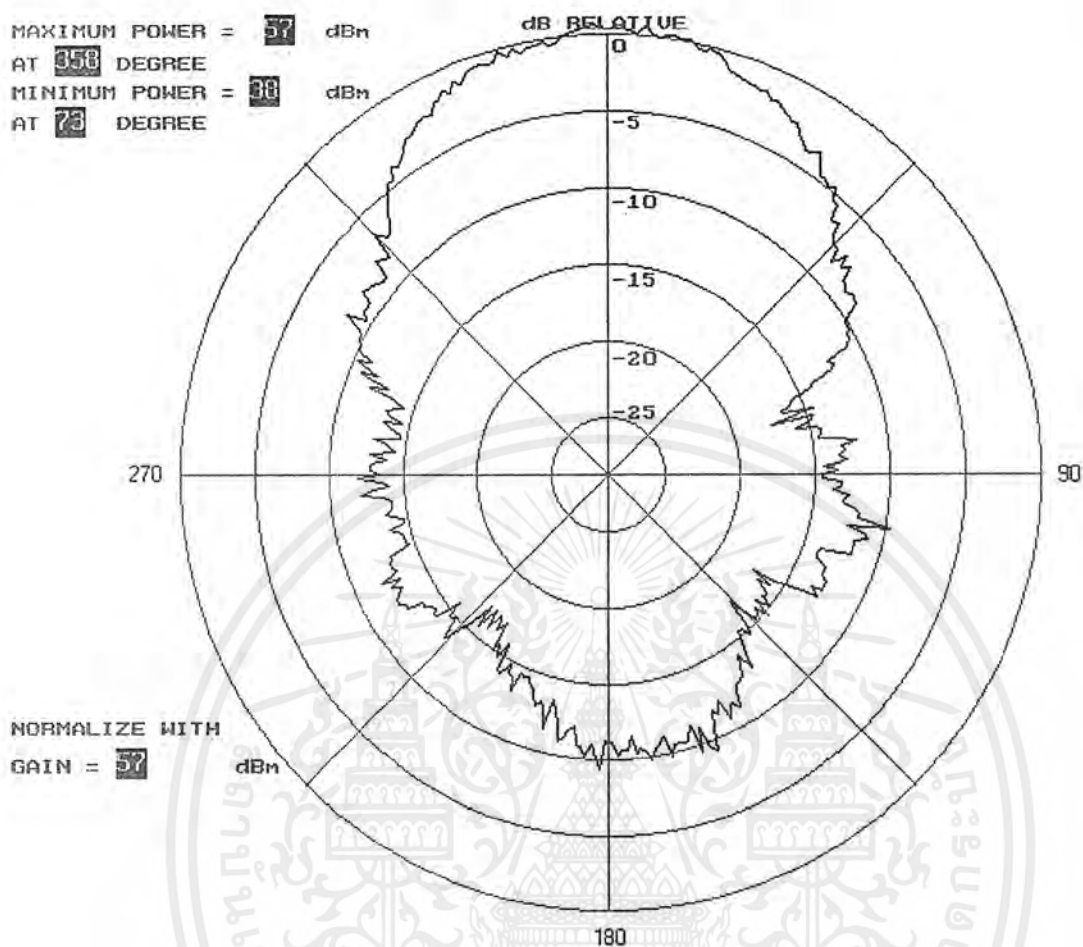


รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดลองที่ได้จากวัดค่าของระนาบสนามไฟฟ้าแบบลิเนียร์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.11 แสดงแบบรูปของระนาบสนามแม่เหล็กที่ทดลองได้จากโปรแกรม Mathcad, รูปที่ 4.12 แสดงแบบรูปของระนาบสนามแม่เหล็ก (โพลาไรซ์) ที่ได้จากการทดลอง, และรูปที่ 4.13 แสดงแบบรูปของระนาบสนามแม่เหล็ก (ลิเนียร์)ที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.11 แสดงแบบรูปของระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรม Mathcad

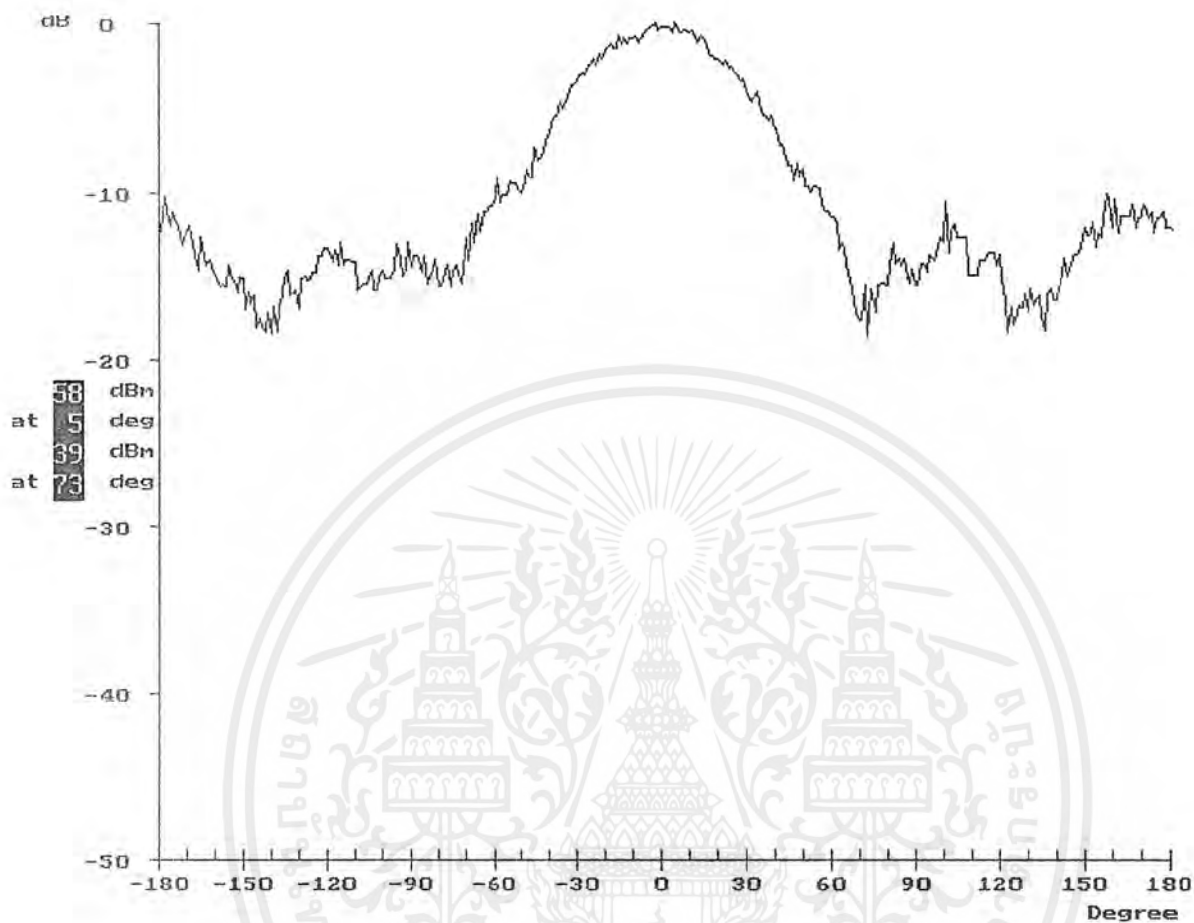
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่าของระนาบสนามแม่เหล็กแบบโพลาไรซ์

จากผลการทดลองพบว่าสายอากาศรับกำลังงานได้สูงสุดที่มุม 358 องศา และมีค่ากำลังงานที่รับได้สูงสุด  $-38\text{dBm}$  และรับกำลังงานต่ำสุดที่มุม 73 องศา ได้ค่ากำลังงานต่ำสุด  $-57\text{dBm}$  โดยรูปกราฟที่ได้เป็นการทำการนอร์มอลไลซ์แล้ว การนอร์มอลไลซ์ก็คือการนำเอาค่าสูงสุดไปลบออกจากค่ากำลังงานที่รับได้ทุก ๆ องศา ในที่นี้การนอร์มอลไลซ์คือการนำเอาค่า  $-38\text{dBm}$  ไปลบออกจากกำลังงานที่รับได้ทุก ๆ องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดงผลการทดลองที่ได้จากรีดิคค่าของระนาบสนามแม่เหล็กแบบลิเนียร์

#### 4.3 การหาอัตราขยายของสายอากาศ

จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 จะได้ค่าการสูญเสียของสายนำสัญญาณของทั้งทางด้านตัวส่ง และตัวรับได้ค่าดังนี้

$$L_t = 8.83 \text{ dBm}$$

$$L_r = 12.0 \text{ dBm}$$

จะหาอัตราขยายของสายอากาศได้จากสมการต่อไปนี้

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_t - L_r - L_s \quad \dots(4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่  $P_r$  คือ กำลังงานที่อ่านได้จากเครื่อง Spectrum Analyzer (dBm)  
 $P_t$  คือ กำลังงานที่ส่งออกจากตัว Signal Generator (dBm)  
 $G_t$  คือ เกนของสายอากาศทางด้านส่ง (dB)  
 $G_r$  คือ เกนของสายอากาศทางด้านรับ (dB)  
 $L_t$  คือ ค่าการสูญเสียที่เกิดจากสายนำสัญญาณทางด้านภาคส่ง (dB)  
 $L_r$  คือ ค่าการสูญเสียที่เกิดจากสายนำสัญญาณทางด้านภาครับ (dB)  
 $L_s$  คือ ค่าการสูญเสียในที่ว่าง (free space loss) มีค่าเท่ากับ  $10\log\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2$

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

$\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่นที่ใช้ในการทดสอบ (m)

องค์ประกอบที่ใช้ในการหาอัตราขยายของสายอากาศในทางปฏิบัติ จะต้องมีปัจจัยดังต่อไปนี้

1. ต้องสร้างสายอากาศแบบเดียวกันทั้ง 2 ตัว
  - 1.1 มีรูปร่างที่เหมือนกัน
  - 1.2 วัสดุที่ใช้ในการทำต้องเหมือนกัน
  - 1.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าทั้ง *VSWR* และอิมพีแดนซ์ ต้องเหมือนกัน
2. ต้องทำการวัดที่สนามระยะไกลคือ

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \text{ ในการทดลองใช้ที่ค่า } 1m.$$

ดังนั้นการหาอัตราขยายของสายอากาศจึงหาได้จากสมการ

$$G(dBi) = \frac{P_r(dBm) - P_t(dBm) + L_t + L_r + L_s}{2} \quad \dots(4.3)$$

เพราะฉะนั้นจะได้อัตราขยายของสายอากาศทางภาครับและภาคส่งมีค่าเท่ากับ

$$P_r = -38dBm$$

$$P_t = 10dBm$$

$$L_s = 20\log\left(\frac{4\pi(1)}{0.075}\right) = 44.48dB$$

$$G(dBi) = \frac{-38 - 10 + 8.83 + 12 + 44.48}{2} = 8.655dBi$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

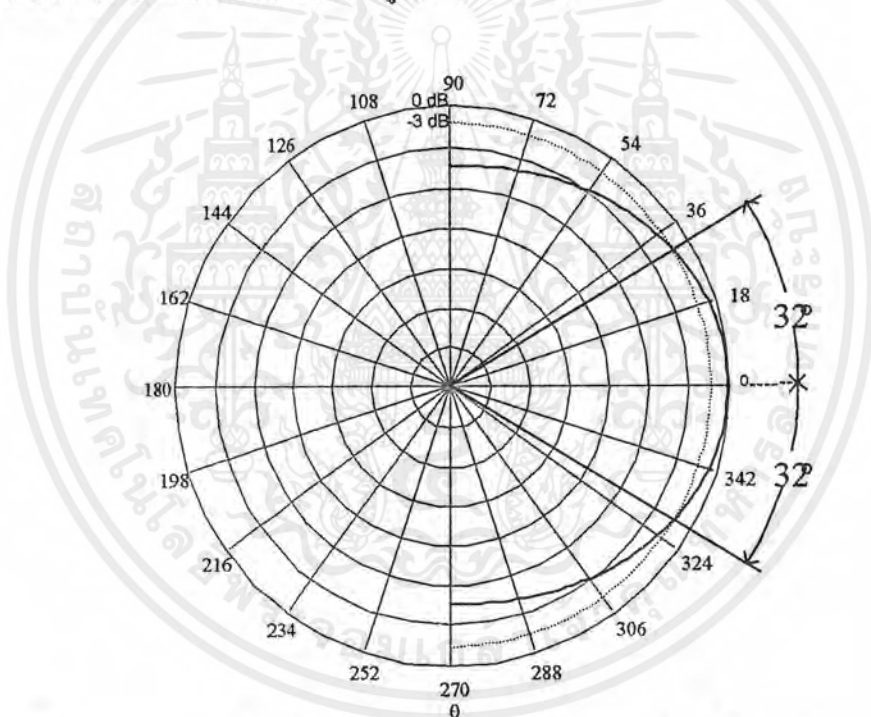
4.4 การหาค่าบีมวิดธ์จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ค่าฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดธ์เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้บอกถึงความกว้างของโลบหลัก จะเป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในโลบหลักมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด 0.5 หรือ  $-3dB$  ซึ่งจากการวัดแบบรูปของสายอากาศ เพื่อดูลักษณะรูปแบบในการแพร่กระจายคลื่น แล้วนำค่าที่ได้มาพล็อตลงในกราฟที่แสดงการแพร่กระจายคลื่นแล้ว สามารถนำมาหาบีมวิดธ์ของสายอากาศได้เนื่องจากการทดลองเป็นแบบรูปการแพร่กระจายของกำลังงาน ดังนั้นจึงหาค่าบีมวิดธ์ที่  $-3dB$  วิธีการหาความกว้างของบีมวิดธ์

1. การหาบีมวิดธ์ของระนาบสนามแม่เหล็ก จากรูปแบบรูปของ ระนาบสนามแม่เหล็กหาได้จากจุดตัดที่เกิดจากการตัดกันของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นตัดกับวงกลม  $-3dB$  จะได้จุดตัดสองจุด นำเอาค่ามุมที่ได้ทั้งสองมารวมกันจะได้ค่าความกว้างของบีมวิดธ์ของระนาบสนามแม่เหล็ก

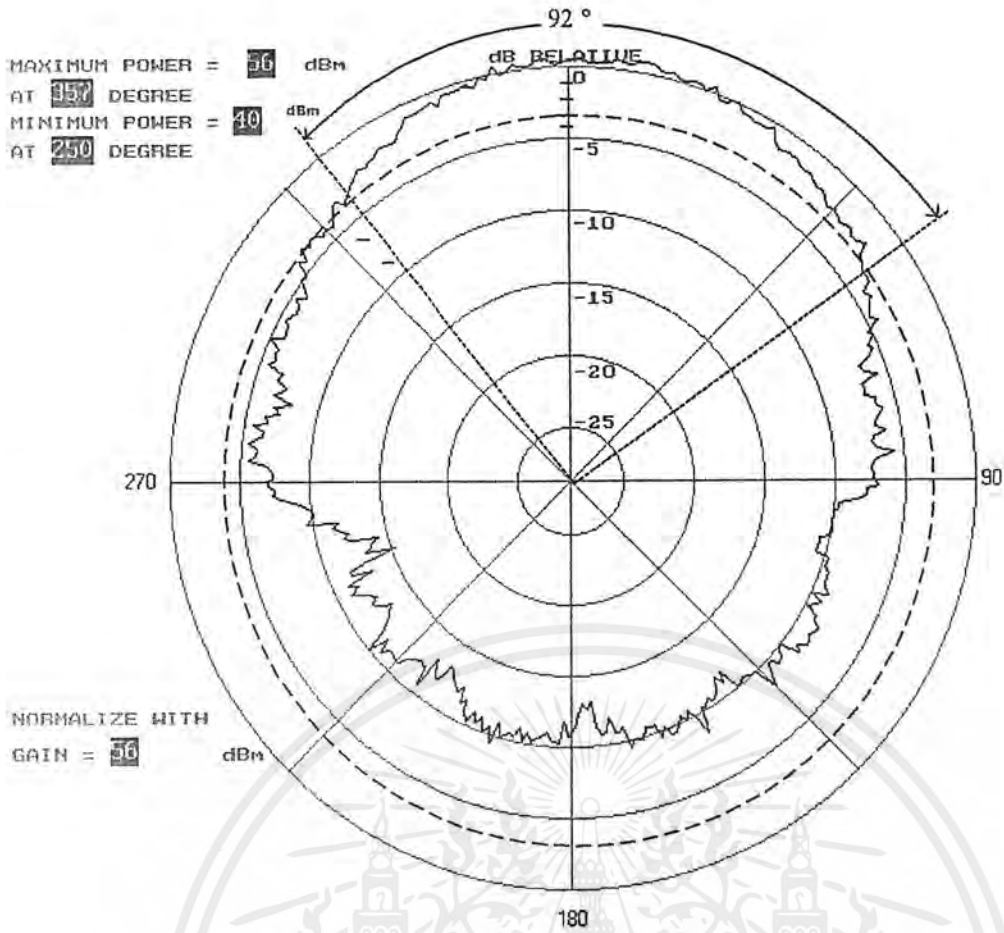
2. การหาบีมวิดธ์ของระนาบสนามไฟฟ้าจากรูปแบบรูปของระนาบสนามไฟฟ้าหาได้จากจุดตัดที่เกิดจากการตัดกันของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นตัดกับวงกลม  $-3dB$  จะได้จุดตัดสองจุด นำเอาค่ามุมที่ได้ทั้งสองมารวมกันจะได้ค่าความกว้างของบีมวิดธ์ของระนาบสนามไฟฟ้า

3. ค่าบีมวิดธ์ที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.15 และ 4.17

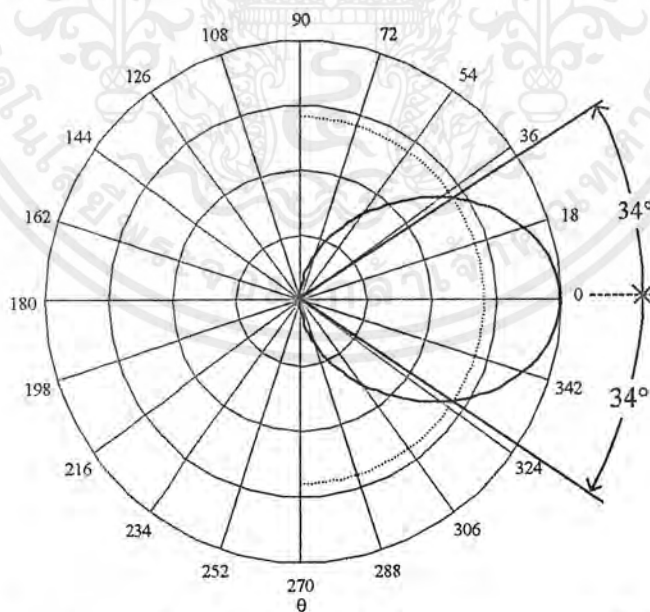


รูปที่ 4.14 แสดงการหาค่าฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดธ์ของระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม Mathcad

จากการใช้โปรแกรม Mathcad จะได้ว่าสายอากาศมีบีมวิดธ์ที่ 64 องศาโดยอาศัยจากการตัดกันของแบบรูปของสนามไฟฟ้ากับวงกลม  $-3dB$  ที่มุม 32 องศา และ 328 องศา



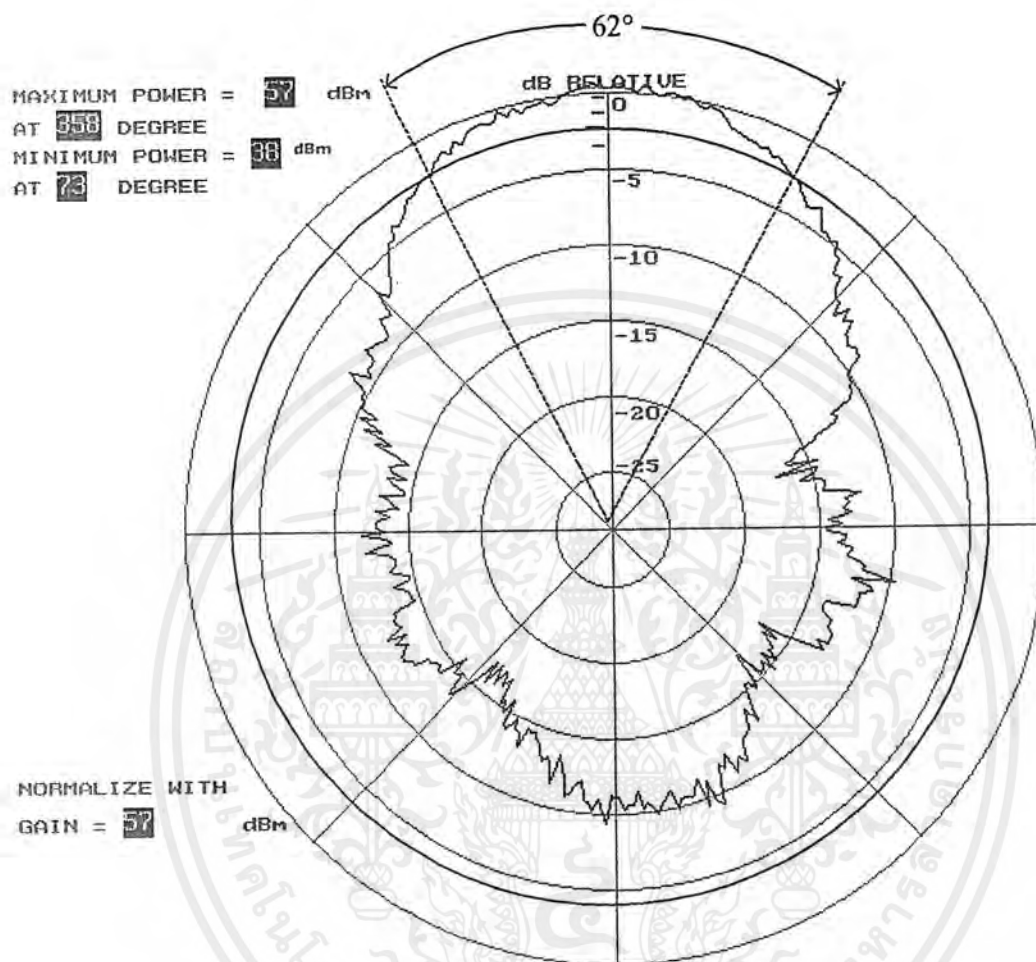
รูปที่ 4.15 แสดงฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิคซ์ของระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง จากการทดลองจะพบว่าแบบรูปของสนามไฟฟ้าตัดกับวงกลม  $-3\text{ dB}$  ที่มุม 54 องศา และ 322 องศา รวมเป็นมุมบีมวิคซ์เท่ากับ 92 องศา



รูปที่ 4.16 แสดงการหาค่าฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิคซ์ของระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรม Mathcad

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการใช้โปรแกรม Mathcad จะได้ว่าสายอากาศมีบีมวิดธ์ที่ 68 องศาโดยอาศัยจากการตัดกันของแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้ากับวงกลม  $-3\text{ dB}$  ที่มุม 34 องศาและมุม 326 องศา



รูปที่ 4.17 แสดงฮาร์ฟพาวเวอร์บีมวิดธ์ของระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดลอง

จากการทดลองจะพบว่าแบบรูปของสนามแม่เหล็กตัดกับวงกลม  $-3\text{ dB}$  ที่มุม 29 องศาและ 327 องศา รวมเป็นมุมบีมวิดธ์เท่ากับ 62 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การหาค่าไครเรคตีวีตีของสายอากาศ

ค่าไครเรคตีวีตีจะถือว่าเป็นค่าที่แสดงทิศทางของสายอากาศโดยปกติจะถือเอาตามทิศทางของโกลบหลักเป็นหลัก โดยค่าไครเรคตีวีตี ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกซ์พอยท์ซอส โดยถ้าค่าไครเรคตีวีตียิ่งมีค่ามากจะมีคุณสมบัติในการชี้ทิศทางดีกว่าค่าไครเรคตีวีตีที่มีค่าน้อย การหาค่าไครเรคตีวีตีทางทฤษฎีจะหาได้จากสมการที่ (2.28) ส่วนการคำนวณหาค่าไครเรคตีวีตีของสายอากาศจะหาได้จากค่าฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดธ์ที่ได้จากแพทเทอร์น โดยนำมาคำนวณตามสมการที่ (2.31) และค่าไครเรคตีวีตีที่คิดเป็นหน่วยของดีบีหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$D(\text{dBi}) = 10 \log(D_0) \quad \dots(4.4)$$

การคำนวณหาค่าไครเรคตีวีตีทางทฤษฎี ใช้สมการ (2.23)-(2.30) และสมการ(4.4) จะได้

$$a = 0.057 \text{ m.} \quad b = 0.028 \text{ m.} \quad f = 4 \text{ GHz} \quad c = 3 \times 10^8$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \lambda = 0.075 \text{ m.} \quad k_0 = 83.776$$

$$(P_{\text{rad}})_{\theta} = \int_0^{\pi} 2\pi ab \frac{\sin\left[\left(\frac{k_0 b}{2}\right) \sin(\theta)\right]}{\left[\left(\frac{k_0 b}{2}\right) \sin(\theta)\right]} \sin(\theta) d\theta \times \int_0^{2\pi} 1 d\phi = 0.108$$

$$(P_{\text{rad}})_{\phi} = \int_0^{\pi} \frac{\cos\left[k_0\left(\frac{a}{2}\right) \sin(\theta)\right]}{\pi^2 - (k_0 a \sin(\theta))^2} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta \times \int_0^{2\pi} 1 d\phi = 0$$

$$D_{\theta(\text{max})} \text{ when } \theta = \frac{\pi}{2}$$

$$D_{\theta} = \frac{4\pi \left\{ 2\pi ab \frac{\sin\left[\left(\frac{k_0 b}{2}\right) \sin(\theta)\right]}{\left(\frac{k_0 b}{2}\right) \sin(\theta)} \right\}}{(P_{\text{rad}})_{\theta} + (P_{\text{rad}})_{\phi}} = 0.919$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$D_{\phi(\max)}$  when  $\theta = 0$

$$D_{\phi} = \frac{4\pi \left\{ \frac{\cos \left[ k_0 \left( \frac{a}{2} \right) \sin(\theta) \right]}{\pi^2 - (k_0 a \sin(\theta))^2} \cos(\theta) \right\}}{(P_{rad})_{\theta} + (P_{rad})_{\phi}} = 11.813$$

$$D_0 = D_{\theta} + D_{\phi} = 12.732$$

$$D(dBi) = 10 \log(D_0) = 11.049$$

การคำนวณหาค่าโคเรคทีฟทางปฏิบัติ ใช้สมการ (2.31) และสมการ (4.4) จะได้

$$D_0 \approx \frac{4\pi \left( \frac{180}{\pi} \right)^2}{\theta_H X \theta_V} = \frac{41,253}{\theta_H X \theta_V}$$

โดย

$$\theta_H = 62^\circ$$

$$\theta_V = 92^\circ$$

$$D_0 \approx \frac{41,253}{(62 \times 92)} = 7.2323$$

$$D(dBi) = 10 \log(D_0) = 8.593$$

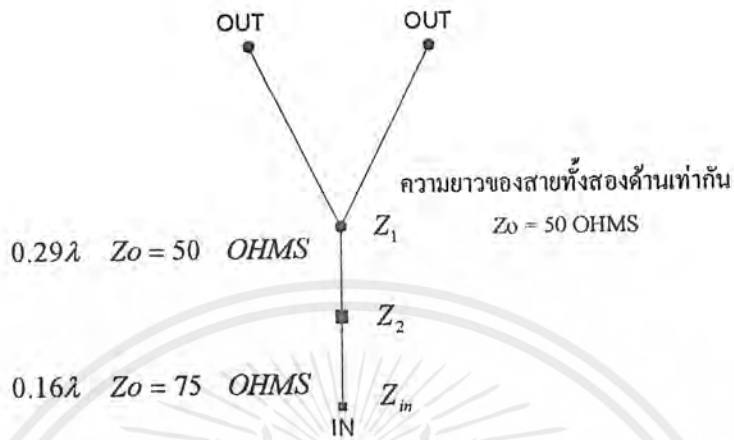
เพราะฉะนั้นจะได้

ค่าโคเรคทีฟทางทฤษฎีเท่ากับ 11.049 dBi

ค่าโคเรคทีฟทางปฏิบัติเท่ากับ 8.593 dBi

#### 4.6 การอาร์เรย์สายอากาศที่นำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน 2 องค์ประกอบวางไปตามแนวแกน x

##### 4.6.1 การแมต칭 (matching) อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่นำมาอาร์เรย์กัน



รูปที่ 4.18 แสดงลักษณะของระบบการป้อนสัญญาณ (feed) แบบสองทาง

##### 4.6.1.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่อง network analyzer
2. สายอากาศที่นำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน 2 ตัว
3. 50 Ω N-type calibration kit
4. 50 Ω N-type T-connector 1 ตัว
5. 50 Ω N-type (male) connector 4 ตัว
6. 50 Ω N-type (female) connector 2 ตัว
7. สายโคแอกเชียล RG8/U
8. สายโคแอกเชียล RG11/U

##### 4.6.1.2 การคำนวณ

จาก

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta l)}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta l)} \quad \dots(4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

$Z_{in}$  คือ อินพุตอิมพีแดนซ์ที่มองไปยังโหลด ( $\Omega$ )

$Z_L$  คือ อิมพีแดนซ์ของโหลด ( $\Omega$ )

$Z_o$  คือ คาเรกเตอร์ริสติกอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ ( $\Omega$ )

$l$  คือ ความยาวของสายนำสัญญาณ ( $m$ )

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

สมมติว่าสายอากาศทั้งสองมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $50\Omega$  และจากสมการที่ (4.5) จะได้ว่า

$$Z_1 = \frac{50}{2} = 25\Omega$$

$$Z_2 = 50 \left( \frac{25 + j50 \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda} 0.29\lambda\right)}{50 + j25 \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda} 0.29\lambda\right)} \right) = 84.35 - j30.48\Omega$$

$$Z_{in} = 75 \left( \frac{(84.35 - j30.48) + 75 \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda} 0.16\lambda\right)}{75 + j(84.35 - j30.48) \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda} 0.16\lambda\right)} \right) = 50.28 - j1\Omega$$

จากการทดลองที่ 4.1 เราจะได้ว่า

อิมพีแดนซ์ของสายอากาศตัวที่ 1 ( $Z_{11}$ ) มีค่าเท่ากับ  $48.127 - j2.5614\Omega$

อิมพีแดนซ์ของสายอากาศตัวที่ 2 ( $Z_{22}$ ) มีค่าเท่ากับ  $55.793 + j0.8477\Omega$

ดังนั้น จากสมการที่ (4.5) เราจะได้ว่า

$$Z_1 = \frac{Z_{11}Z_{22}}{Z_{11} + Z_{22}} = \frac{(48.127 - j2.5664)(55.793 + j0.8477)}{(48.127 - j2.5664) + (55.793 + j0.8477)} = 25.87 - j0.56\Omega$$

$$Z_2 = 50 \left( \frac{(25.87 - j0.56) + j50 \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda} 0.29\lambda\right)}{50 + j(25.87 - j0.56) \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda} 0.29\lambda\right)} \right) = 83.62 - j26.86\Omega$$

$$Z_{in} = 75 \left( \frac{(83.62 - j26.86) + j75 \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda} 0.16\lambda\right)}{75 + j(83.62 - j26.86) \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda} 0.16\lambda\right)} \right) = 52.64 - j0.73\Omega$$

#### 4.6.1.3 ผลการทดลอง

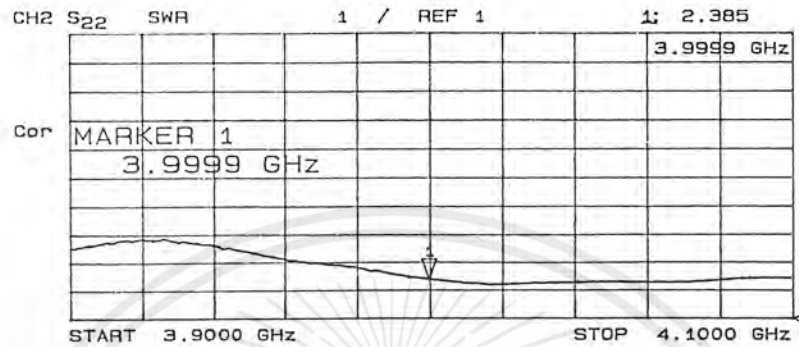
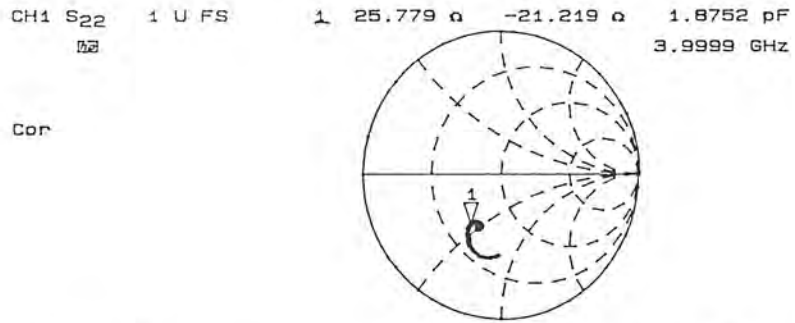
เมื่อทำการวัดด้วยเครื่อง network analyzer จะได้

$$Z_1 = 25.779 - j21.219\Omega \quad \text{และได้ค่า } VSWR = 2.3850 : 1 \text{ ตามรูปที่ 4.19}$$

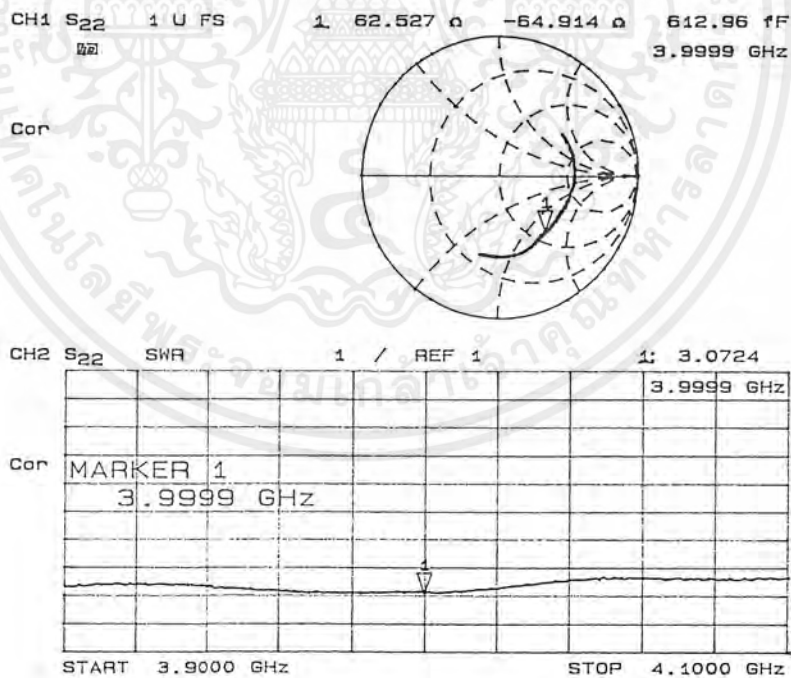
$$Z_2 = 62.527 - j64.914\Omega \quad \text{และได้ค่า } VSWR = 3.0725 : 1 \text{ ตามรูปที่ 4.20}$$

$$Z_{in} = 50.521 - j40.523\Omega \quad \text{และได้ค่า } VSWR = 2.1945 : 1 \text{ ตามรูปที่ 4.21}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

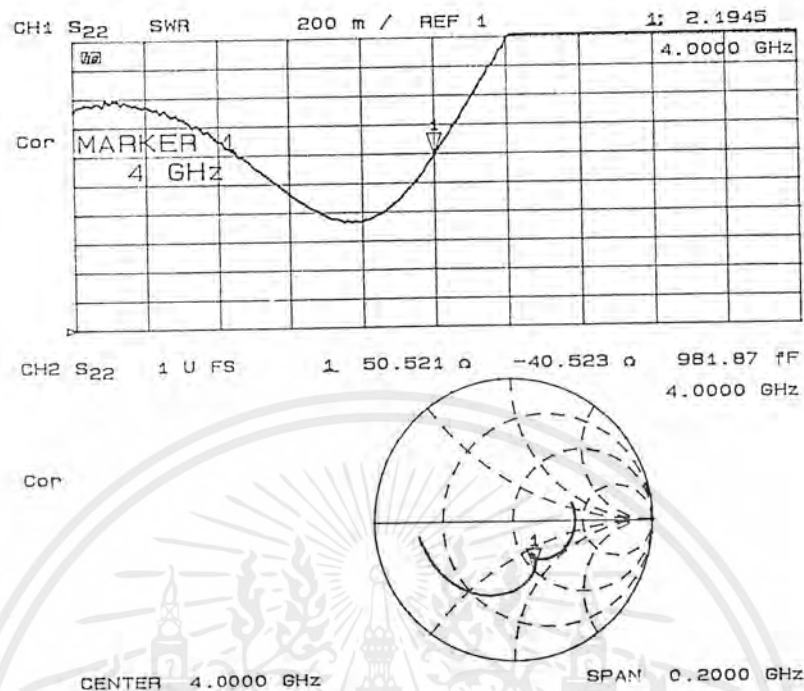


รูปที่ 4.19 แสดงค่า *VSWR* และค่าอิมพีแดนซ์  $Z_1$  ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้านที่ต่ออาร์เรย์กันอยู่ตามแนวแกน  $x$  จำนวน 2 องค์ประกอบ ตามรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.20 แสดงค่า *VSWR* และค่าอิมพีแดนซ์  $Z_2$  ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้านที่ต่ออาร์เรย์กันอยู่ตามแนวแกน  $x$  จำนวน 2 องค์ประกอบ ตามรูปที่ 4.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แสดงค่า  $VSWR$  และค่าอิมพีแดนซ์  $Z_{in}$  ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้านที่ต่ออาร์เรย์กันอยู่ตามแนวแกน  $x$  จำนวน 2 องค์ประกอบ ตามรูปที่ 4.18

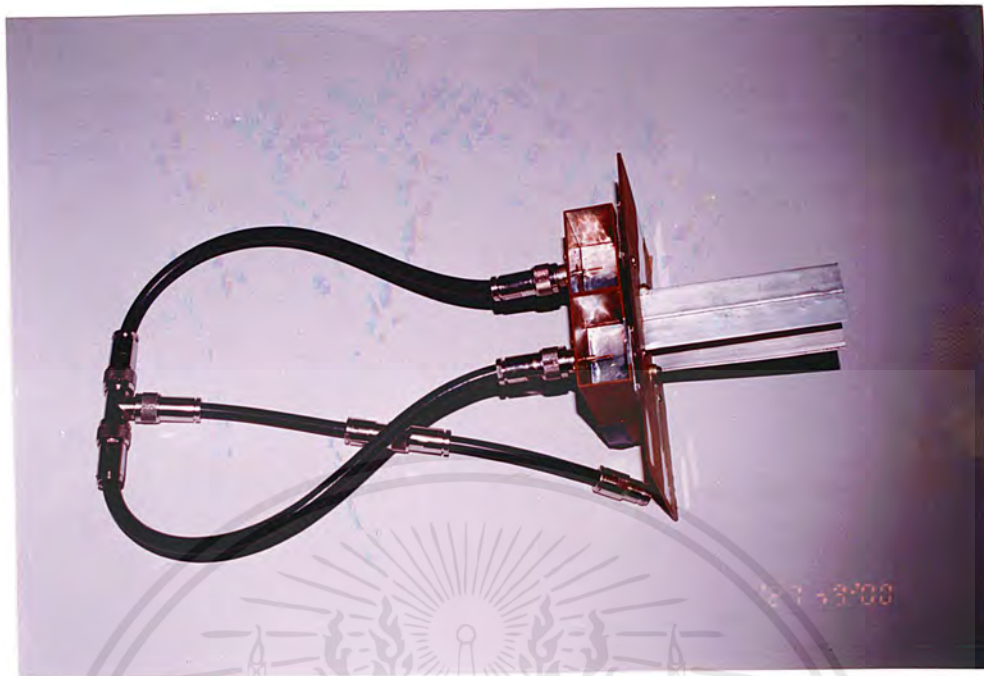
|          | ทฤษฎี ( $\Omega$ ) | คำนวณ ( $\Omega$ ) | ปฏิบัติ ( $\Omega$ ) |
|----------|--------------------|--------------------|----------------------|
| $Z_1$    | 25                 | $25.87 - j0.56$    | $25.779 - j21.219$   |
| $Z_2$    | $84.35 - j30.48$   | $83.62 - j26.86$   | $62.527 - j64.914$   |
| $Z_{in}$ | $50.28 - j1$       | $52.64 - j0.73$    | $50.521 - j40.523$   |

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากทฤษฎี, การคำนวณ และที่ได้จากการทดลอง ที่จุดต่าง ๆ ตามรูปที่ 4.18

#### 4.6.2 การวัดระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

จากการทดลองที่ 4.6.1 เมื่อเราสามารถแมทซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่เราอาร์เรย์กันได้แล้ว เราจะนำเอาสายอากาศที่ต่ออาร์เรย์กันแล้วไปวัดแบบรูปเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ โดยวิธีการวัดจะทำในลักษณะเช่นเดียวกับการวัดสายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 แสดงรูปถ่ายสายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้านจริงที่ทำการต่ออาร์เรย์กันไปตามแนวแกน  $x$

#### 4.6.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

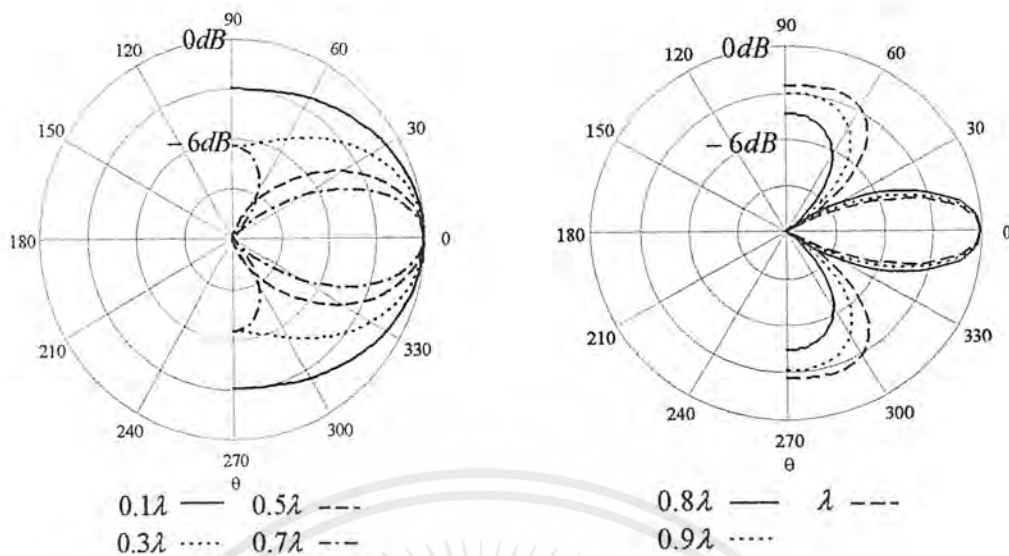
1. เครื่อง spectrum analyzer
2. เครื่องกำเนิดสัญญาณ (signal generator)
3. สายนำสัญญาณ
4. ขาดตั้งสำหรับการติดตั้งสายอากาศตัวรับและตัวส่ง
5. สายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดสองด้านความถี่ 4GHz
6. สายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้านที่ต่ออาร์เรย์กัน 2 องค์ประกอบ

#### 4.6.2.2 วิธีการวัด

ใช้วิธีการวัดเช่นเดียวกับการทดลองที่ 4.2.2 โดยเปลี่ยนระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็น  $0.8\lambda$ ,  $0.9\lambda$ , และ  $\lambda$  แต่ไม่ควรเกิน  $\lambda$  เพราะจะทำให้เกิดโลบที่ไม่ต้องการ (grating lobe) ขึ้นมาโดยใช้

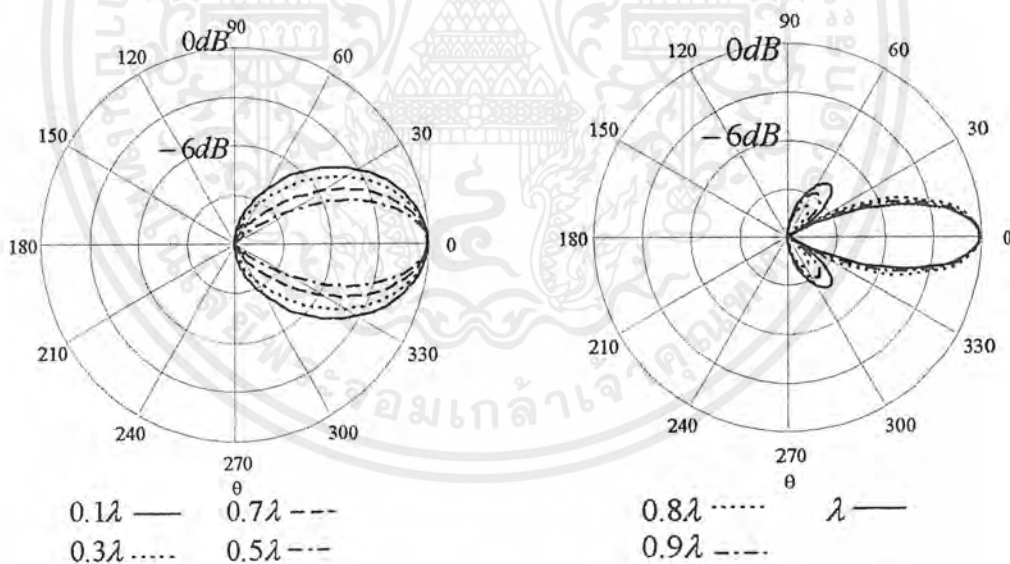
$$P_t = 3dBm. \quad R = 80cm.$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แสดงแบบรูปของระนาบสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่ได้จากโปรแกรม

MathCAD



รูปที่ 4.24 แสดงแบบรูปของระนาบสนามแม่เหล็กที่ระยะห่างขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่ได้จาก

โปรแกรม MathCAD

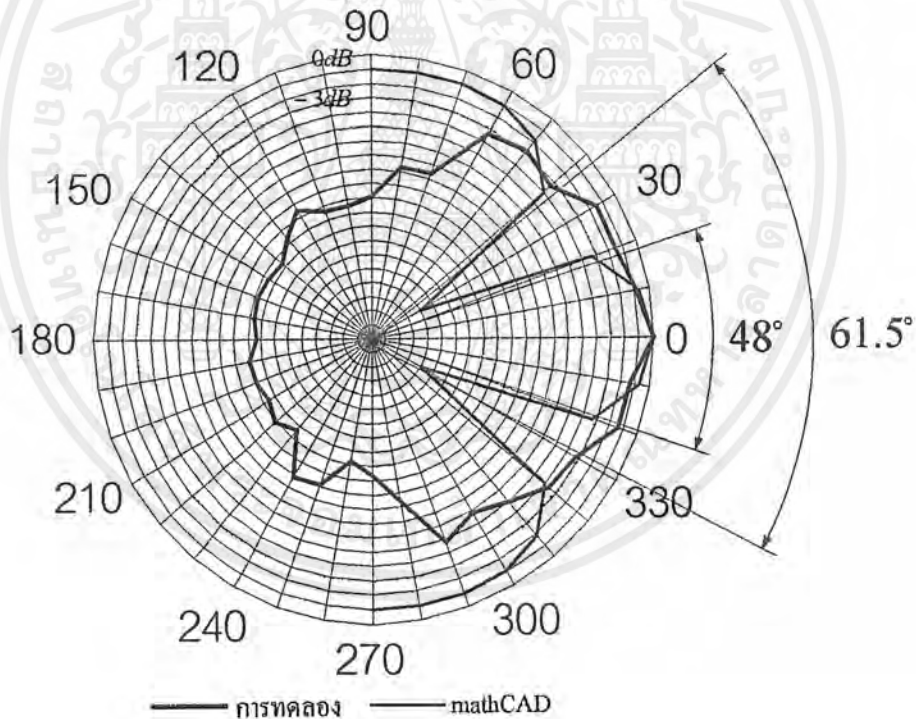
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการต่อให้ระยะห่างขององค์ประกอบที่ได้โบลท์ที่ตีที่สุดโดยไม่เกิดโบลท์ที่ไม่ต้องการ นั้นจากรูปที่ 4.23 จะพบว่าจะได้ระยะที่  $0.1\lambda$  หรือ  $0.75\text{cm}$ . นั้นไม่สามารถทำได้จริงทางปฏิบัติเนื่องจากข้อจำกัดทางด้านขนาดของท่อนำคลื่น ซึ่งท่อนำคลื่นที่ใช้นั้นจะมีค่าด้านกว้างเท่ากับ  $5.7\text{cm}$ . หรือ  $0.76\lambda$  ดังนั้นจึงใช้ค่าเริ่มต้นของระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่  $0.8\lambda$ ,  $0.9\lambda$ , และ  $\lambda$

#### 4.6.2.3 ผลการทดลอง

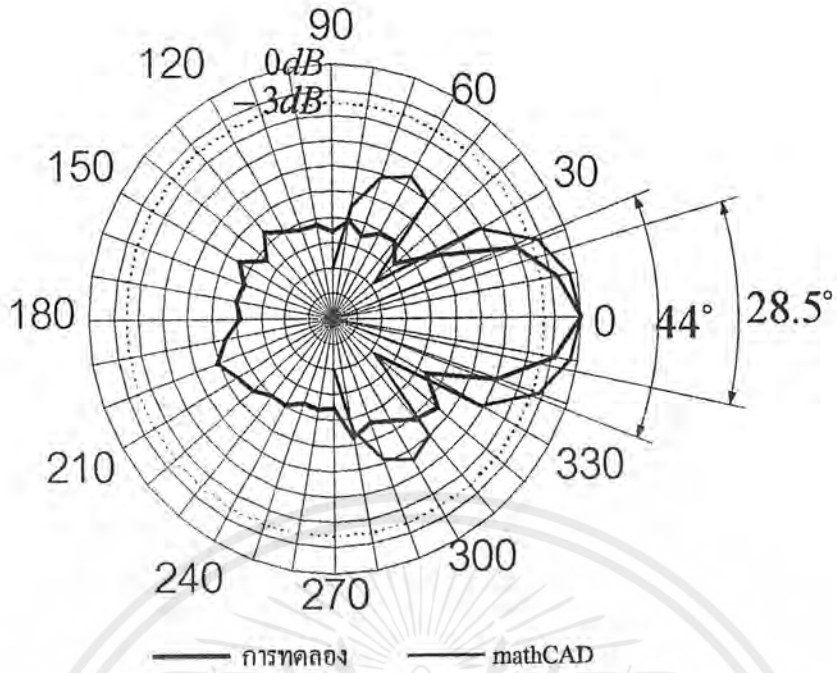
รูปที่ 4.25, 4.27, 4.29 แสดงแบบรูปของระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม MathCAD และที่ได้จากการทดลองที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็น  $0.8\lambda$ ,  $0.9\lambda$ , และ  $\lambda$  ของสายอากาศที่ต่ออาร์เรย์กันตามแนวแกน  $x$  ตามลำดับ โดยค่าที่วัดได้แสดงไว้ดังตารางในภาคผนวก ข.

รูปที่ 4.26, 4.28, 4.30 แสดงแบบรูปของระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรม MathCAD และที่ได้จากการทดลองที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็น  $0.8\lambda$ ,  $0.9\lambda$ , และ  $\lambda$  ของสายอากาศที่ต่ออาร์เรย์กันตามแนวแกน  $x$  ตามลำดับ โดยค่าที่วัดได้แสดงไว้ดังตารางในภาคผนวก ข.

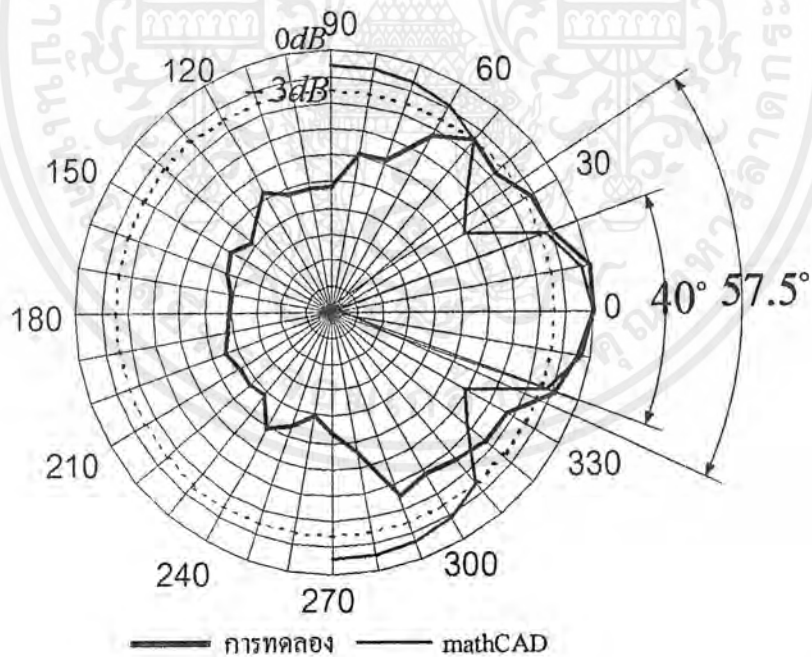


รูปที่ 4.25 แสดงระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม MathCAD และที่ได้จากการทดลองที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่  $0.8\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

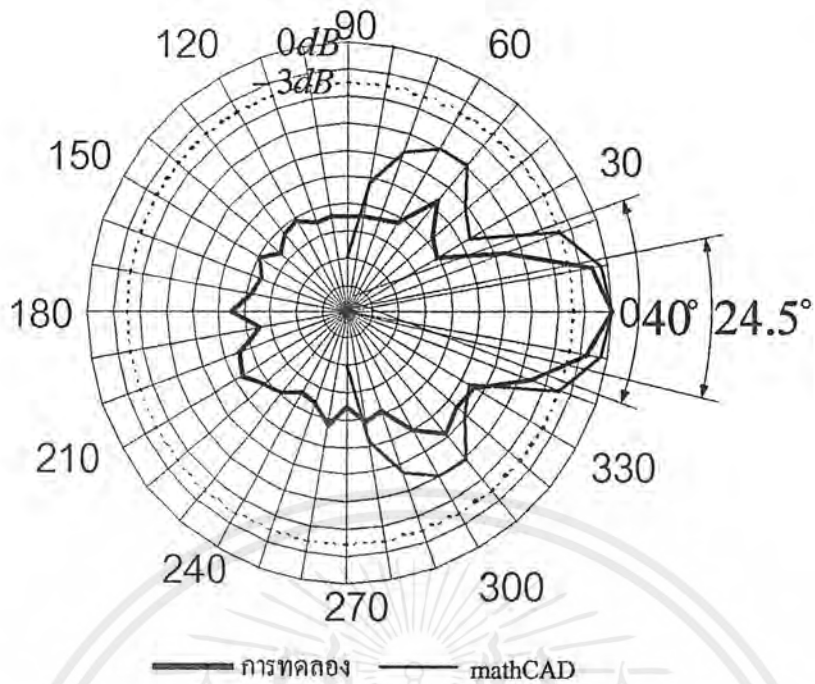


รูปที่ 4.26 แสดงระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรม MathCAD และได้จากการทดลองที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่  $0.8\lambda$

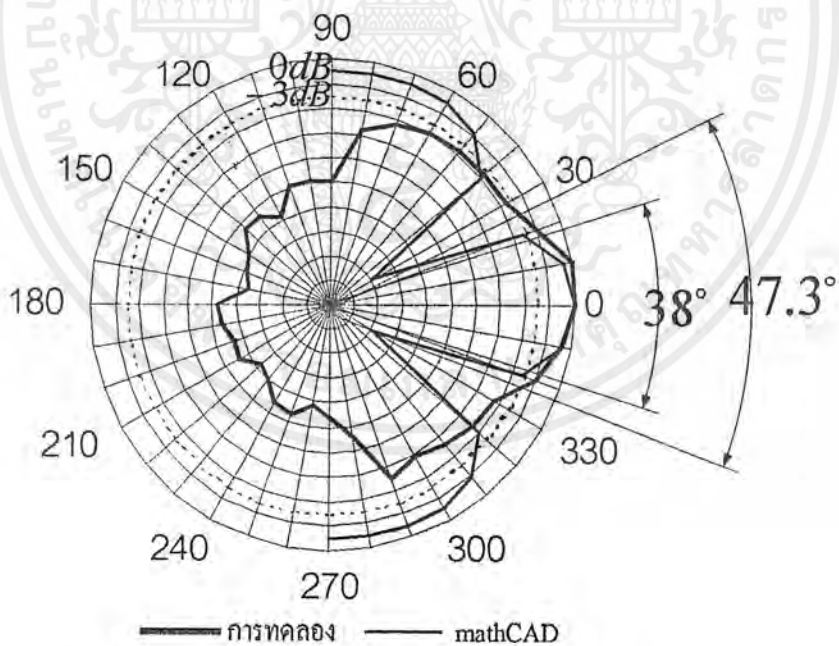


รูปที่ 4.27 แสดงระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม MathCAD และได้จากการทดลองที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่  $0.9\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

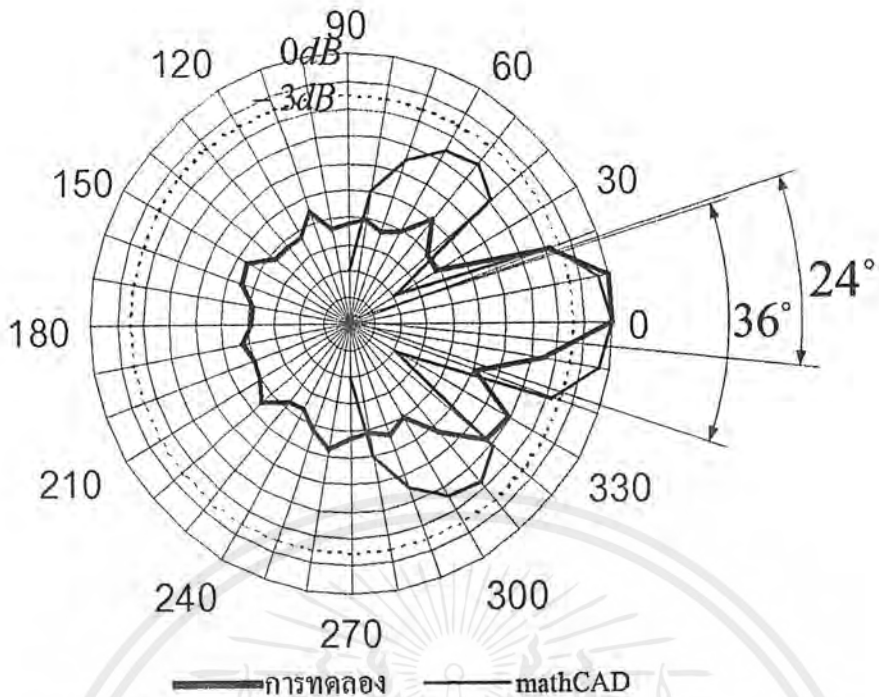


รูปที่ 4.28 แสดงระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรม MathCAD และได้จากการทดลองที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่  $0.9\lambda$



รูปที่ 4.29 แสดงระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม MathCAD และได้จากการทดลองที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่  $\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 แสดงระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรม MathCAD และได้จากการทดลองที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่  $\lambda$

#### 4.6.3 การหาอัตราขยายของสายอากาศที่ทำอาร์เรย์กัน 2 องค์ประกอบ

ในการทดลองที่ 4.6.2 จะได้

$$L_t + L_r = 58.87 \text{ dBm}. \quad P_t = 3 \text{ dBm}. \quad R = 80 \text{ cm}.$$

กำลังงานทางดำนรับที่รับได้โดยสายอากาศตัวเดียว ( $P_{r(s)}$ ) มีค่าเท่ากับ  $-87.5 \text{ dbm}$ . และจากการทดลองที่ 4.3 เราจะได้ค่าอัตราขยายของสายอากาศตัวเดียว ( $G_{r(s)}$ ) เป็น  $8.655 \text{ dBi}$

เนื่องจากเราไม่ทราบอัตราขยายของสายอากาศตัวส่ง เราจึงต้องคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศตัวส่งก่อน โดยใช้สมการที่ (4.2) จะได้ว่า

$$L_s = 20 \log \left( \frac{4\pi(80)}{7.5} \right) = 42.54 \text{ dB}$$

$$\begin{aligned} G_t &= P_{r(s)} - P_t + (L_t + L_r) + L_s - G_{r(s)} \\ &= -87.5 - 3 + 58.87 + 42.54 - 8.655 \\ &= 2.255 \text{ dBi} \end{aligned}$$

เมื่อทราบอัตราขยายของสายอากาศตัวเดียวแล้ว เราก็สามารถที่จะหาอัตราขยายของสายอากาศที่ทำอาร์เรย์ ( $G_{r(A)}$ ) กันได้ดังนี้

$$\begin{aligned} G_{r(A)} &= P_{r(A)} - P_t + L_t + L_r + L_s - G_t \\ &= P_{r(A)} + 89.755 \end{aligned} \quad \dots(4.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ ข-1,2 ในภาคผนวก ข. และสมการที่ (4.6) ที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่  $0.8\lambda$  จะได้

$$P_{r(max,0.8\lambda)} = -81.6dBm.$$

$$G_{rA(0.8\lambda)} = 14.555dBi$$

จากตารางที่ ข-3,4 ในภาคผนวก ข. และสมการที่ (4.6) ที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่  $0.9\lambda$  จะได้

$$P_{r(max,0.9\lambda)} = -81.4dBm.$$

$$G_{rA(0.9\lambda)} = 14.755dBi$$

จากตารางที่ ข-5,6 ในภาคผนวก ข. และสมการที่ (4.6) ที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่  $\lambda$  จะได้

$$P_{r(max,\lambda)} = -82.25dBm.$$

$$G_{rA(\lambda)} = 13.905dBi$$

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ทำการอาร์เรย์กันที่ได้จากการทดลองที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็น  $0.8\lambda, 0.9\lambda$  และ  $\lambda$  ตามลำดับกับสายอากาศเดี่ยว

| ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ ( $d$ ) | อัตราขยายของสายอากาศที่ทำการอาร์เรย์กัน ( $dBi$ ) | อัตราขยายของสายอากาศเดี่ยว ( $dBi$ ) |
|-----------------------------------|---|--------------------------------------|
| $0.8\lambda$                      | 14.555  | 8.655                                |
| $0.9\lambda$                      | 14.755  |                                      |
| $\lambda$                         | 13.905  |                                      |

#### 4.6.4 การหาค่าไดเรกทิวิตีของสายอากาศที่ทำการอาร์เรย์กัน 2 องค์ประกอบ

จากการทดลองที่ 4.6.2 เราจะได้ค่ามุม  $\theta_v$  และค่ามุม  $\theta_H$  ทั้งในทางปฏิบัติ และในทางทฤษฎี ที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่ค่าต่าง ๆ และจากสมการที่ (2.31) จะสามารถคำนวณหาค่าไดเรกทิวิตีของสายอากาศที่ทำการต่ออาร์เรย์กันได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงไดเรกทิวิตีของสายอากาศที่ต่ออาร์เรย์กันตามแนวแกน  $x$  ที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบค่าต่าง ๆ กับสายอากาศเดี่ยว

| ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ ( $d$ ) | มุมของระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (องศา) |            |            |            | ไดเรกทิวิตีของสายอากาศ/อาร์เรย์ ( $dBi$ ) |       | ไดเรกทิวิตีของสายอากาศเดี่ยว ( $dBi$ ) |       |
|-----------------------------------|--|------------|------------|------------|---|-------|--|-------|
|                                   | MathCAD                                    |            | ทดลอง      |            | MathCAD                                   | ทดลอง | MathCAD                                | ทดลอง |
|                                   | $\theta_v$                                 | $\theta_H$ | $\theta_v$ | $\theta_H$ |   |       |  |       |
| $0.8\lambda$                      | 48   | 44         | 61.5       | 28.5       | 12.91                                     | 13.72 | 11.05                                  | 8.59  |
| $0.9\lambda$                      | 40   | 40         | 57.5       | 24.5       | 14.11                                     | 14.67 |  |       |
| $\lambda$                         | 38   | 36         | 47.3       | 24         | 14.79                                     | 15.60 |  |       |

## บทที่ 5

## บทวิจารณ์และสรุป

จากการทดลองทำการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองระหว่างแบบรูปที่ได้จากโปรแกรม MathCAD และที่ได้จากการทดลอง พบว่าแบบรูปที่ได้จากการใช้โปรแกรม MathCAD นั้นจะไม่เกิดโลบหลังขึ้นมาเลย เนื่องจากเป็นสายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน แต่ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าจะเกิดโลบหลังขึ้นมาด้วย เนื่องจากในทางปฏิบัตินั้น อาจจะมีการสะท้อนของคลื่นจากตัวท่อนำคลื่นเอง หรือจากตัวตู้ก็อาคาร เพราะเราไม่สามารถที่จะหาที่ที่โลบแข็งได้อย่างแท้จริงในการวัดแบบรูป แต่ค่าระดับกำลังงานของโลบหลังที่รับได้จะมีค่าต่ำกว่า  $-3dB$  มาก จึงสามารถประมาณได้ว่ากำลังงานของโลบหลังที่รับได้นั้นไม่ก่อนมีผลกระทบต่อการแพร่กระจายคลื่นของโลบหลักมากนัก

จากการทดลอง ในทางทฤษฎีโดยใช้โปรแกรม MathCAD ทดลองพล็อตค่าแบบรูปของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้านที่นำมาทำการต่ออาร์เรย์กันตามแนวแกน  $x$  นั้น จะเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ ซึ่งคิดที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศ หรือที่ตำแหน่งการวางโพรบนั้น จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของบีบวิดธ์ อย่างชัดเจน นั่นคือ เมื่อระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเพิ่มขึ้นตั้งแต่  $0.1\lambda$  จนถึง  $0.5\lambda$  บีบวิดธ์จะมีขนาดที่แคบลงตามขนาดของระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ โดยที่ระยะ  $0.5\lambda$  นั้นเป็นระยะที่มีขนาดบีบวิดธ์แคบที่สุด โดยไม่ทำให้เกิดไซด์โลบ แต่ที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบมีค่ามากกว่า หรือเท่ากับ  $0.6\lambda$  นั้น ถึงแม้ว่าบีบวิดธ์จะมีขนาดแคบกว่าระยะห่าง  $0.5\lambda$  แต่เนื่องจากจะมีไซด์โลบเกิดขึ้นมา และยิ่งระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเพิ่มมากขึ้นเท่าใด ก็จะทำให้ขนาดของไซด์โลบมีขนาดเพิ่มขึ้นตาม แต่ขนาดของบีบวิดธ์ของโลบหลักก็ยังแคบลง ดังนั้นการออกแบบจะต้องพิจารณาถึงระดับของสัญญาณไซด์โลบ กับขนาดของบีบวิดธ์ของโลบหลักกว่าจะให้ความสำคัญกับสิ่งใดมากกว่ากัน เพราะการนำไปใช้งานแต่ละอย่างก็มีความต้องการคุณสมบัติของสายอากาศที่แตกต่างกัน

จากการใช้โปรแกรม MathCAD ระยะที่ดีที่สุดที่ไม่เกิดไซด์โลบเกิดขึ้นคือที่ระยะ  $0.5\lambda$  เรายังจะนำเอาระยะนี้ใช้ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ แต่เนื่องจากคุณสมบัติทางด้านกายภาพของขนาดของตัวท่อนำคลื่นเอง ซึ่งมีระยะด้าน  $a = 5.7$  ซม. แต่ที่ระยะ  $0.5\lambda$  นั้นมีความยาวเท่ากับ  $3.75$  ซม. จึงไม่สามารถทำการจัดวางองค์ประกอบที่ระยะห่างระยะนี้ได้ จากการทดลองระยะห่างที่ดีที่สุดที่ใช้คือ  $0.8\lambda$  ซึ่งมีค่าระยะห่างเท่ากับ  $6$  ซม. ซึ่งยอมให้เกิดไซด์โลบขึ้นได้แต่ต้องมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้

จากการทดลองที่ 4.6.1 นั้น เป็นการทำเมทริกซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จะเห็นได้ว่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการทดลอง และที่ได้จากการคำนวณ หรือทางทฤษฎีนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน คือ  $50.521 - j40.523$  โอห์ม แต่ค่าของ  $VSWR$  จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นกว่าการทดลองของสายอากาศเดี่ยว ซึ่งจะได้ค่า  $VSWR = 2.1945 : 1$  นั้น อาจเนื่องมาจากตัวต่อลักษณะตัวที (T-connector) ที่ใช้นั้นเป็นตัวสะท้อนสัญญาณเอง ซึ่งตัวต่อลักษณะตัวทีที่ใช้อยู่ใช้กับความถี่ประมาณ  $1GHz$  แต่จากการทดลองใช้ที่ความถี่  $4GHz$  ซึ่งผู้ทดลองไม่สามารถจัดหาตัวต่อตัวทีที่มีค่าความถี่ที่ใช้ในการปฏิบัติงานได้ แต่ที่ค่า  $VSWR = 2.1945 : 1$  นี้ก็ยังสามารถที่จะทำการรับส่งได้อยู่ จึงสามารถใช้ได้

จากการทดลองวัดแบบรูปของสายอากาศที่นำมาต่ออาร์เรย์กันตามแนวแกน  $x$  นั้น จะพบว่าค่าบีมวิคต์ที่ได้ของระนาบสนามแม่เหล็กนั้นจะมีค่าขนาดที่แคบมากกว่าสายอากาศตัวเดี่ยว และจะมีขนาดบีมวิคต์แคบมากกว่าขนาดบีมวิคต์ในระนาบสนามไฟฟ้าทั้งใช้โปรแกรม MathCAD และที่ได้จากการทดลอง เนื่องจากการวางองค์ประกอบนั้นวางไปตามแนวแกน  $x$  ซึ่งเป็นระนาบเดียวกันกับระนาบของสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นไปตามหลักทฤษฎีที่ว่า บีมวิคต์ในระนาบการจั่ววางอาร์เรย์นั้นจะมีขนาดแคบมากขึ้น ซึ่งจากผลของบีมวิคต์ที่ขนาดเล็กแคบลงนั้น จะส่งผลให้ค่าไดเรคทิวิตีมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ดังสามารถดูได้จากรูปที่ได้จากการทดลองและจากโปรแกรม MathCAD ตามการทดลองที่ 4.6.2 ซึ่งค่าไดเรคทิวิตีจะแปรผันตามระยะห่างระหว่างองค์ประกอบด้วยเช่นเดียวกัน และค่าไดเรคทิวิตีที่ได้จากการนำเอาสายอากาศมาต่ออาร์เรย์กันนั้นจะมีค่าสูงกว่าสายอากาศเดี่ยวด้วย

ส่วนการจั่ววางองค์ประกอบไปตามระนาบแกน  $y$  นั้น ผู้ทดลองไม่สามารถที่จะทำได้เนื่องจากขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางด้านกายภาพของขนาดของท่อ ตัวคอนเน็คเตอร์ ซึ่งจุดที่สามารถทำการทดลองนั้นจะมีค่ามากกว่า  $\lambda$  ซึ่งเคยกล่าวไว้แล้วว่า ถ้าระยะห่างระหว่างองค์ประกอบมีค่ามากกว่า  $\lambda$  แล้วก็จะเกิดระดับสัญญาณไชต์โลบมาก จึงไม่สามารถทำการปฏิบัติได้





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก. แสดงขนาดของท่อนำคลื่นและความถี่ที่นำไปใช้งาน

| EIA<br>designation<br>WR( )* | Physical dimensions [cm (in.)] |                    |                    |                    | Cutoff frequency<br>for air-filled<br>waveguide in<br>(GHz) | Recommended<br>frequency range<br>for TE <sub>10</sub> mode<br>in (GHz) |
|------------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---|---|
|                              | Inside                         |                    | Outside            |                    |   |   |
|                              | width <i>a</i>                 | height <i>b</i>    | width <i>a</i>     | height <i>b</i>    |   |   |
| 2300                         | 58.420<br>(23.000)             | 29.210<br>(11.500) | 59.055<br>(23.250) | 29.845<br>(11.750) | 0.257   | 0.32–0.49   |
| 2100                         | 53.340<br>(21.000)             | 26.670<br>(10.500) | 53.973<br>(21.250) | 27.305<br>(10.750) | 0.281   | 0.35–0.53   |
| 1800                         | 45.720<br>(18.000)             | 22.860<br>(9.000)  | 46.350<br>(18.250) | 23.495<br>(9.250)  | 0.328   | 0.41–0.62   |
| 1500                         | 38.100<br>(15.000)             | 19.050<br>(7.500)  | 38.735<br>(15.250) | 19.685<br>(7.750)  | 0.394   | 0.49–0.75   |
| 1150                         | 29.210<br>(11.500)             | 14.605<br>(5.750)  | 29.845<br>(11.750) | 15.240<br>(6.000)  | 0.514   | 0.64–0.98   |
| 975                          | 24.765<br>(9.750)              | 12.383<br>(4.875)  | 25.400<br>(10.000) | 13.018<br>(5.125)  | 0.606   | 0.76–1.15   |
| 770                          | 19.550<br>(7.700)              | 9.779<br>(3.850)   | 20.244<br>(7.970)  | 10.414<br>(4.100)  | 0.767   | 0.96–1.46   |
| 650                          | 16.510<br>(6.500)              | 8.255<br>(3.250)   | 16.916<br>(6.660)  | 8.661<br>(3.410)   | 0.909   | 1.14–1.73   |
| 510                          | 12.954<br>(5.100)              | 6.477<br>(2.500)   | 13.360<br>(5.260)  | 6.883<br>(2.710)   | 1.158   | 1.45–2.20   |
| 430                          | 10.922<br>(4.300)              | 5.461<br>(2.150)   | 11.328<br>(4.460)  | 5.867<br>(2.310)   | 1.373   | 1.72–2.61   |
| 340                          | 8.636<br>(3.400)               | 4.318<br>(1.700)   | 9.042<br>(3.560)   | 4.724<br>(1.860)   | 1.737   | 2.17–3.30   |
| 284                          | 7.214<br>(2.840)               | 3.404<br>(1.340)   | 7.620<br>(3.000)   | 3.810<br>(1.500)   | 2.079   | 2.60–3.95   |
| 229                          | 5.817<br>(2.290)               | 2.908<br>(1.145)   | 6.142<br>(2.418)   | 3.233<br>(1.273)   | 2.579   | 3.22–4.90   |
| 187                          | 4.755<br>(1.872)               | 2.215<br>(0.872)   | 5.080<br>(2.000)   | 2.540<br>(1.000)   | 3.155   | 3.94–5.99   |
| 159                          | 4.039<br>(1.590)               | 2.019<br>(0.795)   | 4.364<br>(1.718)   | 2.344<br>(0.923)   | 3.714   | 4.64–7.05   |
| 137                          | 3.485<br>(1.372)               | 1.580<br>(0.622)   | 3.810<br>(1.500)   | 1.905<br>(0.750)   | 4.304   | 5.38–8.17   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 แสดงค่ากำลังงานที่สายอากาศรับได้ในระนาบสนามไฟฟ้าที่ค่ามุมต่าง ๆ ที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็น  $0.8\lambda$ ,  $f = 4\text{GHz}$ ,  $d = 0.8\lambda$ ,  $P_r(\text{max}) = -81.6\text{dBm}$

| มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) | มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) | มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) | มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) |
|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0          | 0                                | 100        | -10.5                            | 200        | -11.2                            | 300        | -5.9                             |
| 10         | -0.9                             | 110        | -10.4                            | 210        | -11.5                            | 310        | -5                               |
| 20         | -1.6                             | 120        | -9.5                             | 220        | -11                              | 320        | -3.7                             |
| 30         | -1.5                             | 130        | -10.7                            | 230        | -11.7                            | 330        | -3.3                             |
| 40         | -3.4                             | 140        | -11.7                            | 240        | -8.9                             | 340        | -1.8                             |
| 50         | -2.8                             | 150        | -11.5                            | 250        | -9.1                             | 350        | -1.4                             |
| 60         | -3.5                             | 160        | -11.3                            | 260        | -11.3                            |            |                                  |
| 70         | -7.6                             | 170        | -11.4                            | 270        | -10.4                            |            |                                  |
| 80         | -7.7                             | 180        | -11.7                            | 280        | -8.4                             |            |                                  |
| 90         | -10                              | 190        | -11                              | 290        | -4.8                             |            |                                  |

ตารางที่ ข-2 แสดงค่ากำลังงานที่สายอากาศรับได้ในระนาบสนามแม่เหล็กที่ค่ามุมต่าง ๆ ที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็น  $0.8\lambda$ ,  $f = 4\text{GHz}$ ,  $d = 0.8\lambda$ ,  $P_r(\text{max}) = -81.6\text{dBm}$

| มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) | มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) | มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) | มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) |
|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0          | 0                                | 100        | -12.55                           | 200        | -9.85                            | 300        | -10.75                           |
| 10         | -1.55                            | 110        | -12.55                           | 210        | -10.95                           | 310        | -9.75                            |
| 20         | -4.2                             | 120        | -12.10                           | 220        | -11.15                           | 320        | -9.05                            |
| 30         | -10.4                            | 130        | -11.15                           | 230        | -12.1                            | 330        | -11.25                           |
| 40         | -13.35                           | 140        | -12.9                            | 240        | -12.2                            | 340        | -5.9                             |
| 50         | -12.15                           | 150        | -11.15                           | 250        | -12.95                           | 350        | -1.85                            |
| 60         | -12.35                           | 160        | -12.15                           | 260        | -12.75                           |            |                                  |
| 70         | -13.2                            | 170        | -11.95                           | 270        | -12.95                           |            |                                  |
| 80         | -12.25                           | 180        | -12.4                            | 280        | -10.6                            |            |                                  |
| 90         | -13.15                           | 190        | -10.95                           | 290        | -11.4                            |            |                                  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 แสดงค่ากำลังงานที่สายอากาศรับได้ ในระนาบสนามไฟฟ้าที่ค่ามุมต่าง ๆ ที่ ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็น  $0.9\lambda$ ,  $f = 4GHz$ ,  $d = 0.9\lambda$ ,  $P_r(\max) = -81.4dBm$

| มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) | มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) | มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) | มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) |
|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0          | 0                                | 100        | -10.5                            | 200        | -11.2                            | 300        | -5.9                             |
| 10         | -0.05                            | 110        | -10.4                            | 210        | -11.5                            | 310        | -5.26                            |
| 20         | -2.1                             | 120        | -9.5                             | 220        | -11.5                            | 320        | -4.7                             |
| 30         | -2.5                             | 130        | -10.7                            | 230        | -10.9                            | 330        | -4.5                             |
| 40         | -3.7                             | 140        | -11.7                            | 240        | -9.8                             | 340        | -2.03                            |
| 50         | -3.01                            | 150        | -10.9                            | 250        | -11.8                            | 350        | -0.89                            |
| 60         | -4.5                             | 160        | -11.3                            | 260        | -11.9                            |            |                                  |
| 70         | -7.8                             | 170        | -11.9                            | 270        | -10.7                            |            |                                  |
| 80         | -7.9                             | 180        | -11.9                            | 280        | -9.2                             |            |                                  |
| 90         | -10.5                            | 190        | -11.7                            | 290        | -5.1                             |            |                                  |

ตารางที่ ข-4 แสดงค่ากำลังงานที่สายอากาศรับได้ ในระนาบสนามแม่เหล็กที่ค่ามุมต่าง ๆ ที่ ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็น  $0.9\lambda$ ,  $f = 4GHz$ ,  $d = 0.9\lambda$ ,  $P_r(\max) = -81.4dBm$

| มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) | มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) | มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) | มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) |
|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0          | 0                                | 100        | -12.9                            | 200        | -11.25                           | 300        | -10.05                           |
| 10         | -1.3                             | 110        | -12.95                           | 210        | -10.65                           | 310        | -8.35                            |
| 20         | -7.4                             | 120        | -12.25                           | 220        | -11.7                            | 320        | -9.05                            |
| 30         | -12.15                           | 130        | -12.55                           | 230        | -12.3                            | 330        | -8.9                             |
| 40         | -11.55                           | 140        | -13.35                           | 240        | -13.05                           | 340        | -5.2                             |
| 50         | -9.35                            | 150        | -12.1                            | 250        | -12.9                            | 350        | -1.65                            |
| 60         | -12.5                            | 160        | -12.85                           | 260        | -11.6                            |            |                                  |
| 70         | -12.7                            | 170        | -12.4                            | 270        | -12.95                           |            |                                  |
| 80         | -12.85                           | 180        | -11.05                           | 280        | -11.75                           |            |                                  |
| 90         | -13                              | 190        | -13.05                           | 290        | -12.25                           |            |                                  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 แสดงค่ากำลังงานที่สายอากาศรับได้ ในระนาบสนามไฟฟ้าที่ค่ามุมต่าง ๆ ที่ ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็น  $\lambda$ ,  $f = 4GHz$ ,  $d = \lambda$ ,  $P_r(\max) = -82.25dBm$

| มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) | มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) | มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) | มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) |
|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0          | 0                                | 100        | -9.8                             | 200        | -11.4                            | 300        | -5.9                             |
| 10         | -0.04                            | 110        | -9.92                            | 210        | -11.2                            | 310        | -5.26                            |
| 20         | -2.02                            | 120        | -11.8                            | 220        | -12.56                           | 320        | -4.7                             |
| 30         | -3.44                            | 130        | -10.7                            | 230        | -11.93                           | 330        | -4.5                             |
| 40         | -3.64                            | 140        | -10.55                           | 240        | -10.89                           | 340        | -2.03                            |
| 50         | -3.74                            | 150        | -11.9                            | 250        | -10.58                           | 350        | -0.83                            |
| 60         | -3.9                             | 160        | -12.47                           | 260        | -11.73                           |            |                                  |
| 70         | -4.5                             | 170        | -12.88                           | 270        | -10.81                           |            |                                  |
| 80         | -5.5                             | 180        | -10.56                           | 280        | -9.2                             |            |                                  |
| 90         | -10.01                           | 190        | -10.8                            | 290        | -5.1                             |            |                                  |

ตารางที่ ข-6 แสดงค่ากำลังงานที่สายอากาศรับได้ ในระนาบสนามแม่เหล็กที่ค่ามุมต่าง ๆ ที่ ระยะห่าง ระหว่างองค์ประกอบเป็น  $\lambda$ ,  $f = 4GHz$ ,  $d = \lambda$ ,  $P_r(\max) = -82.25dBm$

| มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) | มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) | มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) | มุม (องศา) | กำลังงานรับที่ นอร์มอลไลซ์ (dBm) |
|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0          | 0                                | 100        | -12.85                           | 200        | -12                              | 300        | -12.05                           |
| 10         | -0.05                            | 110        | -11.05                           | 210        | -11.85                           | 310        | -9.4                             |
| 20         | -3.8                             | 120        | -12.55                           | 220        | -11                              | 320        | -6.6                             |
| 30         | -12.35                           | 130        | -12.45                           | 230        | -12.4                            | 330        | -6.1                             |
| 40         | -12.2                            | 140        | -12.6                            | 240        | -12.85                           | 340        | -9.75                            |
| 50         | -9.95                            | 150        | -10.85                           | 250        | -11.65                           | 350        | -4.95                            |
| 60         | -12.1                            | 160        | -11.15                           | 260        | -10.6                            |            |                                  |
| 70         | -12.85                           | 170        | -12.25                           | 270        | -11.55                           |            |                                  |
| 80         | -12.1                            | 180        | -12.3                            | 280        | -11.7                            |            |                                  |
| 90         | -12.6                            | 190        | -11.55                           | 290        | -11.2                            |            |                                  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



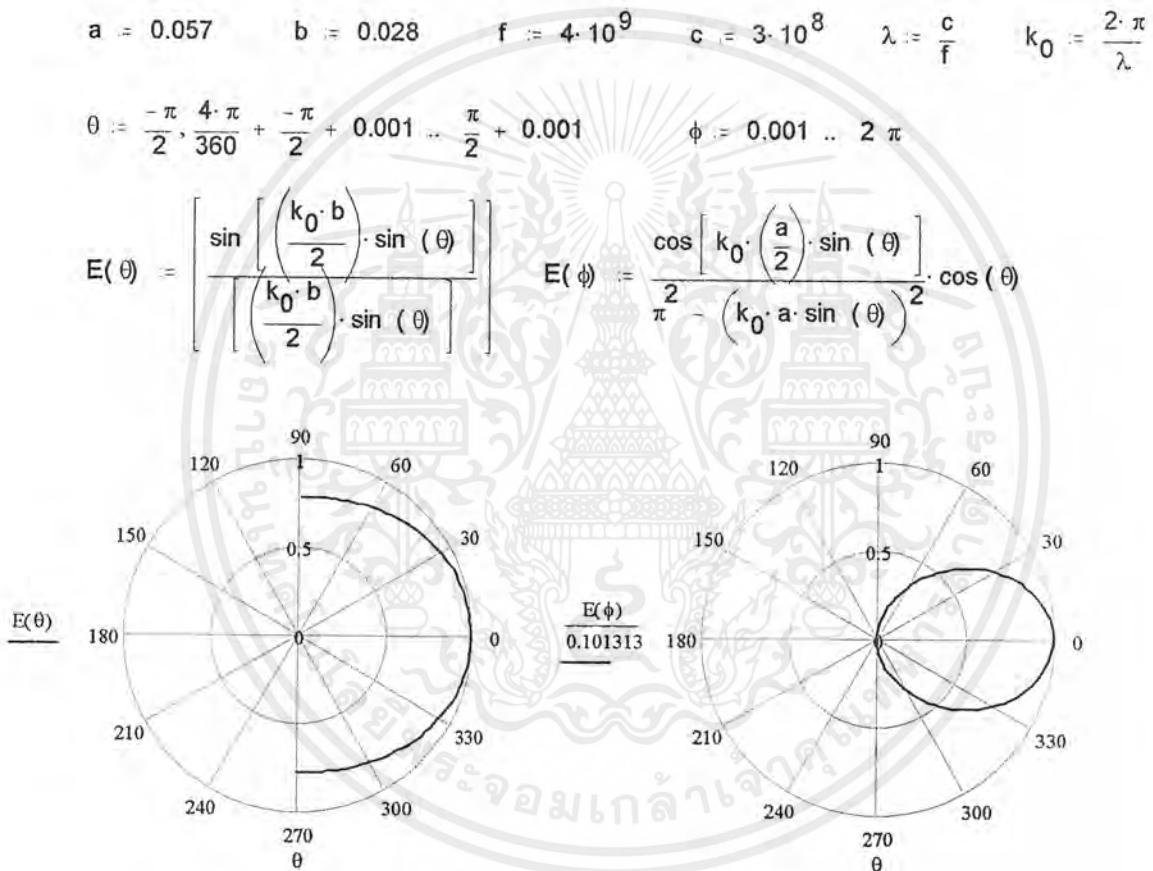
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### แสดงโปรแกรม MathCAD ที่ใช้ในการทดลอง

โปรแกรม MathCAD เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีหน้าต่างสำหรับเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ และแสดงผลในรูปแบบต่างๆ โดยมีหลักการเขียนคือ โปรแกรมจะคิดจากซ้ายไปขวา จากบนลงล่าง

โปรแกรม MathCAD ที่แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทอสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน

(ค-1) แสดง โปรแกรมที่ใช้ในการพล็อตระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศตัวเดียว ดังแสดงในหน้าที่ 7 รูปที่ 2.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค-2) แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการพล็อตระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศที่นำมาต่ออาร์เรย์กันตามแนวแกน  $x$  ที่ระยะห่างขององค์ประกอบเป็น  $0.1\lambda$ ,  $0.3\lambda$ ,  $0.5\lambda$  และ  $0.7\lambda$  ดังแสดงในหน้าที่ 47 รูปที่ 4.23

$$a := 0.057 \quad b := 0.028 \quad f = 4 \cdot 10^9 \quad c := 3 \cdot 10^8$$

$$\lambda := \frac{c}{f} \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \theta := \frac{-\pi}{2}, \frac{4\pi}{360} + \frac{-\pi}{2}, \frac{\pi}{2}$$

$$\beta := 0 \quad \phi := \pi$$

$$d := 0.1 \lambda$$

$$E1(\theta) := \left| \left| \frac{\sin\left[\left(\frac{k_0 \cdot b}{2}\right) \cdot \sin(\theta)\right]}{\left(\frac{k_0 \cdot b}{2}\right) \cdot \sin(\theta)} \right| \cdot \left| \frac{\sin(k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)}{2 \cdot \sin\left[\frac{1}{2} \cdot (k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)\right]} \right| \right|$$

$$d := 0.3 \lambda$$

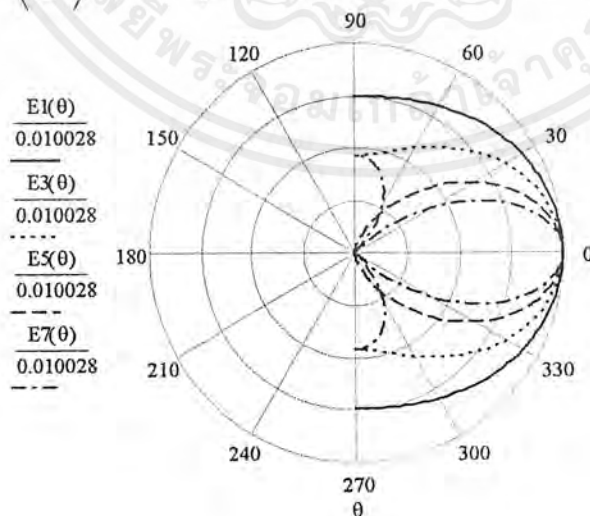
$$E3(\theta) := \left| \left| \frac{\sin\left[\left(\frac{k_0 \cdot b}{2}\right) \cdot \sin(\theta)\right]}{\left(\frac{k_0 \cdot b}{2}\right) \cdot \sin(\theta)} \right| \cdot \left| \frac{\sin(k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)}{2 \cdot \sin\left[\frac{1}{2} \cdot (k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)\right]} \right| \right|$$

$$d := 0.5 \lambda$$

$$E5(\theta) := \left| \left| \frac{\sin\left[\left(\frac{k_0 \cdot b}{2}\right) \cdot \sin(\theta)\right]}{\left(\frac{k_0 \cdot b}{2}\right) \cdot \sin(\theta)} \right| \cdot \left| \frac{\sin(k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)}{2 \cdot \sin\left[\frac{1}{2} \cdot (k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)\right]} \right| \right|$$

$$d := 0.7 \lambda$$

$$E7(\theta) := \left| \left| \frac{\sin\left[\left(\frac{k_0 \cdot b}{2}\right) \cdot \sin(\theta)\right]}{\left(\frac{k_0 \cdot b}{2}\right) \cdot \sin(\theta)} \right| \cdot \left| \frac{\sin(k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)}{2 \cdot \sin\left[\frac{1}{2} \cdot (k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)\right]} \right| \right|$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค-3) แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการพล็อตระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศที่นำมาต่ออาร์เรย์กันตามแนวแกน  $x$  ที่ระยะห่างขององค์ประกอบเป็น  $0.8\lambda$ ,  $0.9\lambda$  และ  $\lambda$  ดังแสดงในหน้าที่ 47 รูปที่ 4.23

$$a := 0.057 \quad b := 0.028 \quad f := 4 \cdot 10^9 \quad c := 3 \cdot 10^8$$

$$\lambda := \frac{c}{f} \quad k_0 := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad \theta := \frac{-\pi}{2}, \frac{4 \cdot \pi}{360} + \frac{-\pi}{2}, \frac{\pi}{2}$$

$$\beta := 0 \quad \phi := \pi$$

$$d := 0.8 \lambda$$

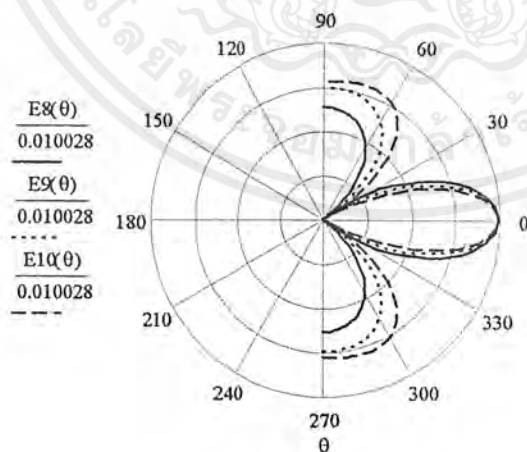
$$E8(\theta) := \left| \left| \frac{\sin\left[\frac{k_0 \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta)\right]}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot \left(\frac{k_0 \cdot b}{2}\right) \cdot \sin(\theta)} \cdot \left[ \frac{\sin(k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)}{2 \cdot \sin\left[\frac{1}{2} \cdot (k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)\right]} \right] \right| \right|$$

$$d := 0.9 \lambda$$

$$E9(\theta) := \left| \left| \frac{\sin\left[\frac{k_0 \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta)\right]}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot \left(\frac{k_0 \cdot b}{2}\right) \cdot \sin(\theta)} \cdot \left[ \frac{\sin(k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)}{2 \cdot \sin\left[\frac{1}{2} \cdot (k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)\right]} \right] \right| \right|$$

$$d := \lambda$$

$$E10(\theta) := \left| \left| \frac{\sin\left[\frac{k_0 \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta)\right]}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot \left(\frac{k_0 \cdot b}{2}\right) \cdot \sin(\theta)} \cdot \left[ \frac{\sin(k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)}{2 \cdot \sin\left[\frac{1}{2} \cdot (k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)\right]} \right] \right| \right|$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค-4) แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการพล็อตระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศที่นำมาต่ออาร์เรย์กันตามแนวแกน  $x$  ที่ระยะห่างขององค์ประกอบเป็น  $0.1\lambda$ ,  $0.3\lambda$ ,  $0.5\lambda$  และ  $0.7\lambda$  ดังแสดงในหน้าที่ 47 รูปที่ 4.24

$$a := 0.057 \quad b := 0.028 \quad f := 4 \cdot 10^9 \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad \phi := \pi$$

$$\lambda := \frac{c}{f} \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \theta := \frac{-\pi}{2}, \frac{4\pi}{360} + \frac{-\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \quad \beta := 0$$

$$d := 0.1 \lambda$$

$$E1(\phi) = \frac{\cos\left[\frac{k_0 \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta)\right]}{\pi - \left(k_0 \cdot a \cdot \sin(\theta)\right)^2} \cdot \cos(\theta) \left| \left| \frac{\sin(k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)}{2 \cdot \sin\left[\frac{1}{2} \cdot (k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)\right]} \right| \right|$$

$$d = 0.3 \lambda$$

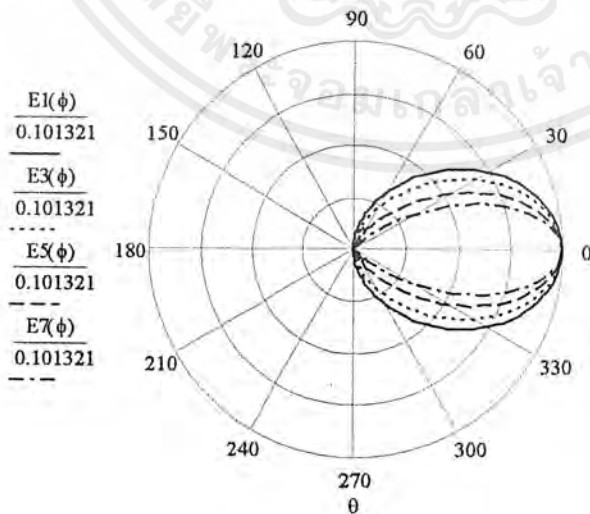
$$E3(\phi) = \frac{\cos\left[\frac{k_0 \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta)\right]}{\pi - \left(k_0 \cdot a \cdot \sin(\theta)\right)^2} \cdot \cos(\theta) \left| \left| \frac{\sin(k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)}{2 \cdot \sin\left[\frac{1}{2} \cdot (k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)\right]} \right| \right|$$

$$d = 0.5 \lambda$$

$$E5(\phi) = \frac{\cos\left[\frac{k_0 \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta)\right]}{\pi - \left(k_0 \cdot a \cdot \sin(\theta)\right)^2} \cdot \cos(\theta) \left| \left| \frac{\sin(k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)}{2 \cdot \sin\left[\frac{1}{2} \cdot (k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)\right]} \right| \right|$$

$$d = 0.7 \lambda$$

$$E7(\phi) = \frac{\cos\left[\frac{k_0 \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta)\right]}{\pi - \left(k_0 \cdot a \cdot \sin(\theta)\right)^2} \cdot \cos(\theta) \left| \left| \frac{\sin(k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)}{2 \cdot \sin\left[\frac{1}{2} \cdot (k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)\right]} \right| \right|$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค-5) แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการพล็อตระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศที่นำมาต่ออาร์เรย์กันตามแนวแกน  $x$  ที่ระยะห่างขององค์ประกอบเป็น  $0.8\lambda$ ,  $0.9\lambda$  และ  $\lambda$  ดังแสดงในหน้าที่ 47 รูปที่ 4.24

$$\begin{aligned}
 a &:= 0.057 & b &:= 0.028 & f &:= 4 \cdot 10^9 & c &:= 3 \cdot 10^8 & \phi &:= \pi \\
 \lambda &= \frac{c}{f} & k_0 &= \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} & \theta &= \frac{-\pi}{2}, \frac{4 \cdot \pi}{360} + \frac{-\pi}{2}, \frac{\pi}{2} & \beta &= 0 \\
 d &= 0.8 \lambda
 \end{aligned}$$

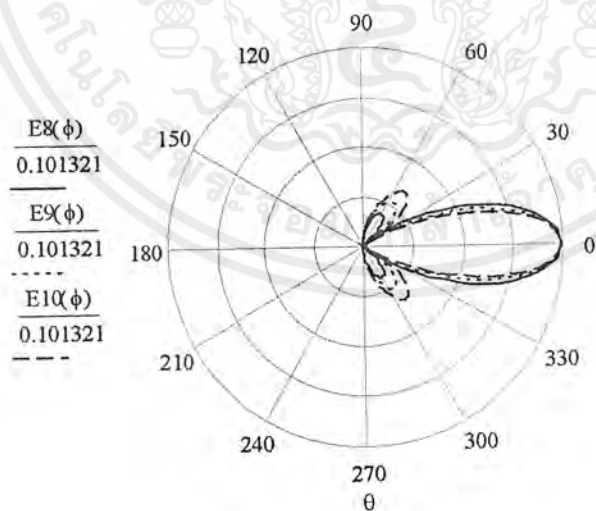
$$E8(\phi) = \left| \frac{\cos\left[\left(\frac{k_0 \cdot a}{2}\right) \cdot \sin(\theta)\right]}{\frac{2}{\pi} - \left(k_0 \cdot a \cdot \sin(\theta)\right)^2} \cdot \cos(\theta) \right| \left| \left[ \frac{\sin(k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)}{2 \cdot \sin\left[\frac{1}{2} \cdot (k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)\right]} \right] \right|$$

$$d = 0.9 \lambda$$

$$E9(\phi) = \left| \frac{\cos\left[\left(\frac{k_0 \cdot a}{2}\right) \cdot \sin(\theta)\right]}{\frac{2}{\pi} - \left(k_0 \cdot a \cdot \sin(\theta)\right)^2} \cdot \cos(\theta) \right| \left| \left[ \frac{\sin(k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)}{2 \cdot \sin\left[\frac{1}{2} \cdot (k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)\right]} \right] \right|$$

$$d = \lambda$$

$$E10(\phi) = \left| \frac{\cos\left[\left(\frac{k_0 \cdot a}{2}\right) \cdot \sin(\theta)\right]}{\frac{2}{\pi} - \left(k_0 \cdot a \cdot \sin(\theta)\right)^2} \cdot \cos(\theta) \right| \left| \left[ \frac{\sin(k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)}{2 \cdot \sin\left[\frac{1}{2} \cdot (k_0 \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta)\right]} \right] \right|$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การทำปริญญาโทครั้งนี้ สามารถดำเนินการมาได้ตั้งแต่การค้นคว้าข้อมูล การออกแบบไปตลอดจนถึงการทดลอง ต้องขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุก ๆ ท่านที่ให้คำปรึกษา และชี้แนะแนวทางในการทำโครงการวิศวกรรม โดยเฉพาะท่านอาจารย์ ศศ.สมผล โกศลวิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และเจ้าหน้าที่ศูนย์ทดสอบอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์(EMI/EMC) ทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำต่าง ๆ ในการทำงานเป็นอย่างดี

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

- [1] โมไนย ไกรฤกษ์, "ทฤษฎีสายอากาศ", สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, กทม.
- [2] A. Balanis, "Antenna theory and Design", Harper & Row Publishers, New York, 1997.
- [3] R. E. Collin, "Antenna and Radiowave Propagation", McGraw-Hill, 1988.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้