

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การขยายช่วงความถี่ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยม

โดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่น

**BANDWIDTH ENHANCEMENT OF A RECTANGULAR RING ANTENNA  
BY USING PLANAR MONOPOLE EXCITATION**



ฉพ.  
ธ 411 ก  
2549

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี...15 S.A. 2549

b. 11671221  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2803-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**BANDWIDTH ENHANCEMENT OF A RECTANGULAR RING ANTENNA  
BY USING PLANAR MONOPOLE EXCITATION**



**PARKORN CHUMTONG**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF**

**MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATION ENGINEERING SCHOOL  
OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2006**

**ISBN 974-15-2803-5**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2006**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การขยายช่วงความถี่ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการ ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่น
นักศึกษา	นาย ภากร ชุมทอง
รหัสนักศึกษา	44611214
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. สมพล โกศลวิตร
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

### บทคัดย่อ

ระบบการสื่อสารไร้สายนั้น การประยุกต์ใช้งานระบบต่างกันจะใช้ความถี่ต่างกัน ดังนั้นสายอากาศจึงมักออกแบบให้สามารถใช้ได้หลายระบบในตัวเดียวกัน เพื่อเพิ่มสมรรถนะการให้บริการให้คุ้มค่าที่สุด เช่น ระบบการระบุตำแหน่งโดยใช้ดาวเทียม ระบบการสื่อสารเคลื่อนที่แบบรวงผึ้ง และระบบการสื่อสารโครงข่ายท้องถิ่น ไร้สาย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการขยายช่วงความถี่ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่น ซึ่งจะทำได้สามารถนำไปใช้งานในระบบข้างต้นได้อย่างกว้างขวาง ซึ่งในที่นี้จะนำไปใช้ในงานเป็นสายอากาศช่วงความถี่กว้าง กล่าวคือ ตั้งแต่ 3.1 – 10.6 GHz สายอากาศชนิดนี้เป็นสายอากาศชนิดสองทิศทางสามารถสร้างได้ง่าย ราคาถูก และโครงสร้างมีลักษณะไม่ซับซ้อน กล่าวคือ เป็นโพรบชนิดแผ่นที่ถูกล้อมรอบด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยม โดยตัวโพรบชนิดแผ่นสามารถเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์เพื่อให้มีคุณสมบัติได้ตามต้องการ เช่น รูปร่างแผ่นกระตุ้นแบบหนึ่งก้าน รูปร่างแผ่นกระตุ้นแบบสองก้าน และรูปร่างแผ่นกระตุ้นแบบสามก้าน รวมทั้งความกว้าง ความสูง ระยะห่างจากตัววงแหวนกับโมโนโพลชนิดแผ่น ความสูงของตัวป้อนสัญญาณ และระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณ A และ C ของโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้านนี้ จากนั้นได้สร้างต้นแบบสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่น เพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก อัตราขยาย ช่วงกว้างความถี่ใช้งาน อิมพีแดนซ์ด้านเข้า และอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศเพื่อยืนยันกับผลการจำลองแบบ เพื่อนำไปใช้ในระบบสื่อสารไร้สายให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Bandwidth Enhancement of a Rectangular Ring Antenna by Using Planar Monopole Excitation
<b>Student</b>	Mr. Parkorn Chumtong
<b>Student ID.</b>	44611214
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Telecommunication Engineering
<b>Year</b>	2006
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof.Dr. Sompol Kosulvit
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Asst. Prof.Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

### ABSTRACT

In wireless communication, various applications occupied different frequencies. Therefore, a single antenna that can be applied for several applications is desired to reduce the cost. The versatile applications are global positioning system using the satellite, cellular mobile communication system and wireless local area network system. This thesis presents the bandwidth enhancement of a rectangular ring antenna by using the planar monopole excitation to cover wide range applications and this antenna cover ultra wideband frequencies from 3.1 GHz to 10.6 GHz. This antenna has bidirectional pattern with easy fabrication, low cost and simple structure. The antenna is made up of planar monopole surrounded by rectangular ring. The antenna parameters can be adjusted to find the optimum condition such as probe configuration i.e., simple feeding strip , two-branch feeding strip , trident feeding strip , width , height , spacing between ring and planar monopole , height of trident feeding and spacing between point A and point C of planar monopole. The antenna prototype will be fabricated to measure the radiation pattern in E-plane and H-plane, gain, bandwidth, input impedance and standing wave ratio to confirm the simulation result. Thus antenna is very useful for modern wireless communication with wide band applications.

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ ภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อ ภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 วิวัฒนาการของสายอากาศ.....	5
2.1.1สายอากาศสองทิศทางโดยใช้โพรบป้อนวงแหวนสี่เหลี่ยม.....	5
2.1.2สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	15
2.2 สายอากาศที่น่าเสนอ.....	30
บทที่ 3 การวิเคราะห์สายอากาศ.....	33
3.1 วิธีโมเมนต์.....	33
3.2 โปรแกรม IE3D: โปรแกรมจำลองแบบทางแม่เหล็กไฟฟ้าบนพื้นฐานวิธีโมเมนต์.....	36
3.3 ขั้นตอนการสร้างสายอากาศโดยใช้โปรแกรม IE3D .....	44
3.4 หลักการการจำลองแบบสายอากาศโดยใช้โปรแกรม IE3D.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การศึกษาพารามิเตอร์และการออกแบบ.....	65
4.1 ขนาดของตัวป้อนสัญญาณ.....	65
4.2 ขนาดของวงแหวนวงกลม.....	68
4.3 พารามิเตอร์ที่เหมาะสม.....	69
4.3.1 การเปลี่ยนแปลงความกว้างของโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน.....	73
4.3.2 การเปลี่ยนแปลงความสูงของโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน.....	74
4.3.3 การเปลี่ยนแปลงระยะห่างจากตัววงแหวนกับโมโนโพล แผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน.....	75
4.3.4 การเปลี่ยนแปลงระยะห่างจากตัววงแหวนกับโมโนโพล แผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน.....	76
4.3.5 การเปลี่ยนแปลงระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณ A และ C ของโมโนโพล แผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน.....	77
4.4 บทสรุป.....	82
บทที่ 5 การสร้าง และผลการทดสอบ.....	84
5.1 การสร้างสายอากาศ.....	84
5.2 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยม ที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน.....	86
5.3 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ.....	87
5.4 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ.....	89
5.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ สนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก.....	90
5.6 สรุป.....	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์.....	100
6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	100
6.2 วิจารณ์ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางในการพัฒนา .....	101
เอกสารอ้างอิง.....	102
ประวัติผู้เขียน.....	104



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความกว้างแถบอิมพีแดนซ์สำหรับองค์ประกอบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์.....	16
2.2 ความกว้างแถบอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการทดสอบสำหรับองค์ประกอบ สี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบต่างๆ.....	19
2.3 ผลการทดสอบสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบต่างๆ ที่ความถี่ 2.5 GHz.....	25
4.1 พารามิเตอร์ต่างๆของวงแหวนสี่เหลี่ยม.....	70
4.2 พารามิเตอร์ของโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน ที่กำหนดขึ้นก่อนการจำลอง.....	73
4.3 ค่ากว้างลำคลื่นที่ความถี่ 3.1, 5, 7, 9, 10.6 GHz.....	82
5.1 พารามิเตอร์ของโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้านที่เหมาะสมที่สุด ที่ได้จากการจำลอง.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การประยุกต์ใช้งานของสายอากาศแบบสองทิศทาง.....	2
1.2 โครงสร้างสายอากาศสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยม โดยการป้อนด้วยโมโนโพล	
ชนิดแผ่นแบบสามก้าน.....	2
2.1 สายอากาศที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม.....	6
2.2 จุดสังเกตระยะไกลของช่องเปิดทั้งสอง.....	8
2.3 การกระจายสนามที่บริเวณช่องเปิดสำหรับความยาววงแหวนที่มีค่าต่างๆ.....	10
2.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสำหรับวงแหวนที่มีความยาวขนาดต่างๆ.....	11
2.5 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ความยาวของวงแหวนค่าต่างๆ.....	12
2.6 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์สำหรับ โพรบที่มีความยาวค่าต่างๆ.....	13
2.7 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ที่สัมพันธ์กับความถี่.....	14
2.8 รูปทางเรขาคณิตของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	16
2.9 ค่าการสูญเสียย้อนเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า $L$ สำหรับโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส..	17
2.10 สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบต่างๆ.....	18
2.11 ค่าการสูญเสียย้อนกลับสำหรับรูปทรงเรขาคณิตแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีค่ามุมเอียง $\alpha = 0^\circ$ (เส้นประ) $10^\circ$ (เส้นทึบ) $20^\circ$ (เส้นจุดประ) และ $30^\circ$ (เส้นประ-ประ).....	19
2.12 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด $25 \text{ mm}^2$ ที่ใช้แผ่นลวดวงจร (เส้นประ) และไม่ใช่แผ่นลวดวงจร (เส้นทึบ) เปรียบเทียบกัน.....	20
2.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.750 GHz .....	21
2.14 โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบต่างๆ.....	23
2.15 ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบและจำลองแบบของ โมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยม จัตุรัสที่ใช้แผ่นกระตุ้นแบบสามก้าน.....	24
2.16 คุณลักษณะของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบต่างๆที่ความถี่ 2.5 GHz..	25
2.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่น กระตุ้นแบบสามก้านที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 2 GHz.....	26
2.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่น กระตุ้นแบบสามก้านที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 6 GHz.....	26
2.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่น กระตุ้นแบบสามก้านที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 10 GHz.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 อัตราขยายที่ได้จากการทดสอบและการจำลองแบบของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่น สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่นกระตุ้นแบบสามก้าน.....	27
2.21 ค่าการสูญเสียย้อนเมื่อทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ $d$ .....	28
2.22 ค่าการสูญเสียย้อนเมื่อทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ $t$ .....	28
2.23 ค่าการสูญเสียย้อนเมื่อทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ $h$ .....	28
2.24 ค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของโมโนโพล ( $L$ ).....	29
2.25 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของโมโนโพลที่มีลักษณะต่างๆ 3 แบบ.....	30
2.26 วิวัฒนาการของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่น.....	32
3.1 การจำลองแบบ โครงสร้างแบบสามมิติโดยใช้โปรแกรม IE3D.....	37
3.2 ลักษณะการกำหนดเซลล์ที่ขอบอย่างอัตโนมัติ.....	38
3.3 โครงสร้างของ stripline ที่จำลองแบบด้วยโปรแกรม IE3D.....	39
3.4 การประยุกต์ใช้ของตัวปรับค่าให้เหมาะสมแบบ geneticEM.....	40
3.5 การกระจายกระแสบนแถวลำดับ patch ขนาด 8x8.....	41
3.6 การแยกวงจรเสมือน SPICE เป็น RLC.....	42
3.7 ไฟล์ที่มีชื่อว่า Zeland.....	44
3.8 ไฟล์ที่มีชื่อว่า Zeland Program Manager 9.0.....	45
3.9 ไฟล์ที่มีชื่อว่า Mgrid.....	45
3.10 แถบเครื่องมือต่างๆ ในการสร้างสายอากาศ.....	46
3.11 การสร้างแผ่นสี่เหลี่ยมจากแถบเครื่องมือและกำหนดพิกัดของความกว้างและความยาวของ แผ่นสี่เหลี่ยมเป็นฐานของวงแหวนสี่เหลี่ยม.....	47
3.12 การสร้างแผ่นสี่เหลี่ยมจากแถบด้านขวามือบนสุดและกำหนดพิกัดของความกว้างและความ ยาวของแผ่นสี่เหลี่ยมเป็นแผ่นปิดด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยม.....	47
3.13 การสร้างแผ่นสี่เหลี่ยมประกบด้านข้างทั้งสองด้านเพื่อประกอบกันเป็นวงแหวนสี่เหลี่ยม.....	48
3.14 กำหนดค่าตัวป้อนสัญญาณที่ต้องการจำลองค่าลงในกล่องข้อความ.....	49
3.15 ตัวป้อนสัญญาณ.....	49
3.16 การสร้างโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้านบนตัวป้อนสัญญาณ.....	50
3.17 กล่องข้อความ Simulation Setup.....	51
3.18 กำหนดค่าที่ต้องการจำลองค่าช่วงกว้างความถี่ลงในกล่องข้อความ.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.19 เริ่มต้นการจำลองค่าช่วงกว้างความถี่.....	52
3.20 ช่วงกว้างความถี่ซึ่งอยู่ในรูปของค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง.....	53
3.21 กำหนดค่าที่ต้องการจำลองค่าการกระจายกระแสในกล่องข้อความ.....	53
3.22 เริ่มต้นการจำลองค่าการกระจายกระแส.....	54
3.23 การกระจายกระแสในรูปของขนาดและเวกเตอร์.....	54
3.24 กำหนดค่าที่ต้องการจำลองค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นลงในกล่องข้อความ.....	55
3.25 เริ่มต้นการจำลองค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	55
3.26 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสามมิติ.....	56
3.27 แผ่นตัวนำและโครงสร้างบนแผ่นระนาบ S .....	57
3.28 ตัวอย่างการแบ่งเซลล์ 3 เซลล์ ต่อ ความยาวคลื่น ที่ความถี่ 3.1 GHz .....	58
3.29 โหนดที่ 1 ของจำนวนเซลล์ทั้งหมด.....	59
3.30 โหนดที่ 2 ของจำนวนเซลล์ทั้งหมด.....	60
3.31 โหนดที่ 3 ของจำนวนเซลล์ทั้งหมด.....	60
3.32 โหนดที่ 4 ของจำนวนเซลล์ทั้งหมด.....	61
3.33 ขนาดของกระแสในแต่ละโหนดของจำนวนเซลล์ทั้งหมด.....	62
3.34 ตัวอย่างเซลล์ลำดับที่ 1034 และพิกัดทั้ง 4 โหนด.....	62
3.35 ตัวอย่างเซลล์ลำดับที่ 1035 และพิกัดทั้ง 4 โหนด.....	63
3.36 ตัวอย่างเซลล์ลำดับที่ 1036 และพิกัดทั้ง 3 โหนด.....	63
3.37 กระแสลัพท์ที่ไหลบนเซลล์แต่ละเซลล์แสดงค่ากระแสเป็นสเกลาร์และเวกเตอร์.....	64
4.1 โมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนแบบหนึ่งจุด.....	66
4.2 โมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนแบบสองจุด.....	66
4.3 โมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนแบบสามจุด.....	67
4.4 โครงสร้างของวงแหวนสี่เหลี่ยม.....	69
4.5 โครงสร้างของโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน.....	71
4.6 สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบ 3 ก้าน.....	72
4.7 ค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของ โมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน ( $\Gamma$ ).....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของโมโนโพลแผ่นระนาบ สี่เหลี่ยมแบบสามก้าน ( $w$ ).....	74
4.9 ค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างจากตัววงแหวนกับตัวโมโนโพล แผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน ( $d$ ).....	75
4.10 ค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างจากตัววงแหวนกับตัวโมโนโพล แผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน ( $h$ ).....	76
4.11 ค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณ A และ C ของ ตัวโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน ( $t$ ).....	77
4.12 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มุมสูงสุด.....	78
4.13 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มุมศูนย์.....	79
4.14 อัตราการขยายที่มุมสูงสุด.....	79
4.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า.....	80
4.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	81
5.1 สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน.....	84
5.2 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพล แผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน.....	86
5.3 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลแผ่น ระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้านที่ทำการทดลอง.....	87
5.4 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลแผ่น ระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน.....	87
5.5 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลแผ่น ระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้านที่ทำการทดลอง.....	88
5.6 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพล แผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้านที่ทำการทดลอง.....	89
5.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของ สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน ที่ความถี่ 3.1 GHz.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของ สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน ที่ความถี่ 4 GHz.....	92
5.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของ สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน ที่ความถี่ 5 GHz.....	93
5.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของ สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน ที่ความถี่ 6 GHz.....	94
5.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของ สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน ที่ความถี่ 7 GHz.....	95
5.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของ สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน ที่ความถี่ 8 GHz.....	96
5.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของ สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน ที่ความถี่ 9 GHz.....	97
5.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของ สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน ที่ความถี่ 10.6 GHz.....	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

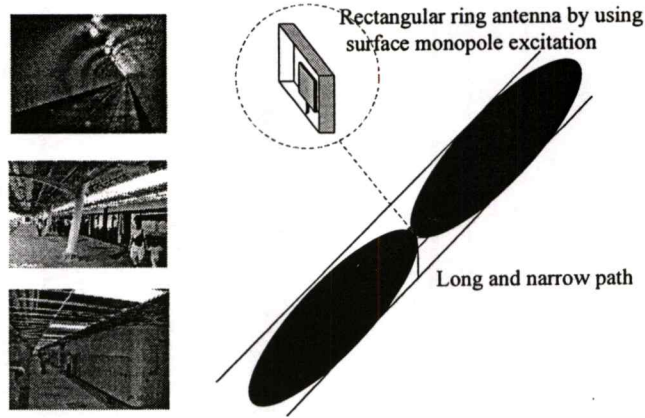
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

สำหรับระบบการสื่อสารไร้สายสมัยใหม่รวมถึงในอนาคต การออกแบบและสร้างสายอากาศถือว่าเป็นสิ่งสำคัญเพื่อระบบนั้นมีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้ให้มากที่สุด ในขณะที่มีระบบจำนวนมากที่ทำงานในสองย่านความถี่หรือมากกว่าซึ่งต้องการสายอากาศย่านความถี่แคบ (Narrowband antenna) ที่ทำงานสองช่วงความถี่ (Dual-band) หรือสามช่วงความถี่ (Triple-band) มาใช้งาน [1-3] ตัวอย่างเช่น ระบบดาวเทียมระบุตำแหน่ง ระบบการสื่อสารเคลื่อนที่แบบเซลลูลาร์ ระบบการสื่อสารโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย รวมถึงการใช้งานร่วมกันของระบบเหล่านั้น เพื่อให้ตอบสนองความต้องการของระบบที่เหนือกว่า ดังนั้นจำเป็นต้องออกแบบสายอากาศที่สามารถทำงานครอบคลุมช่วงความถี่กว้างหรือแบบหลายช่วงความถี่ เพื่อให้สามารถทำงานได้ในหลายๆความถี่ หรือเรียกว่า สายอากาศช่วงความถี่กว้าง (Wideband Antenna)

โดยทั่วไปสายอากาศที่นิยมใช้ในระบบสื่อสารแบบไร้สายจะเป็นสายอากาศแบบรอบทิศทาง เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ เช่นสายอากาศโมโนโพล (Monopole) ที่ถูกป้อนที่เหมาะสม ซึ่งอาจมีข้อจำกัดทางความกว้างของย่านความถี่ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาสายอากาศดังกล่าวเพื่อให้ทำงานครอบคลุมย่านความถี่กว้าง ตัวอย่าง สายอากาศโมโนโพลย่านความถี่กว้างสำหรับระบบสื่อสารไร้สายหลายย่านความถี่ [4] ซึ่งเป็นสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นบนแผ่นสะท้อน โดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อนำโมโนโพลเชิงพื้นผิวมาป้อนแทนโมโนโพลแบบเชิงเส้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลบนพื้นผิวของโมโนโพลชนิดแผ่นนั้นจะมีจำนวนมากกว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลบนพื้นผิวของโมโนโพลเชิงเส้น ก่อให้เกิดช่วงความถี่ที่กว้างขึ้น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยในลักษณะเดียวกัน [5] ที่สนับสนุนหลักการดังกล่าว แต่สำหรับบางพื้นที่ที่มีลักษณะยาวและแคบ เช่น บนทางด่วน ทางเดินภายในตึก รวมถึงในอุโมงค์ นิยมใช้สายอากาศแบบสองทิศทางมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ก็จัดเป็นสายอากาศประเภทดังกล่าว ถ้านำโมโนโพลเชิงเส้นมาเป็นตัวป้อนสัญญาณ จะได้ช่วงความถี่ที่แคบ

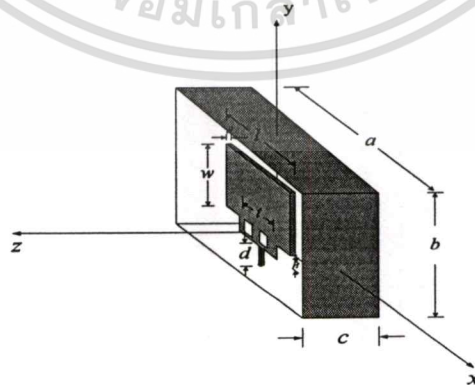


รูปที่ 1.1 การประยุกต์ใช้งานของสายอากาศแบบสองทิศทาง

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอการขยายช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยม โดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้าน ด้วยอาศัยหลักการของกระแสที่ไหลบน โมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้านและความสัมพันธ์ของรูปทรงของโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้านกับวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่เหมาะสมก่อให้เกิดช่วงความถี่ที่กว้างขึ้น ซึ่งยังคงเป็นสายอากาศแบบสองทิศทางที่มีคุณลักษณะที่โดดเด่นคือมีช่วงความถี่กว้างที่เหมาะสมแก่การใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สายในปัจจุบัน

## 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือทำการขยายช่วงความถี่ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้าน โดยมีโครงสร้างของสายอากาศในรูปที่ 1.2 นั้นประกอบด้วยสองส่วนคือ สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยม และโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้านที่เป็นตัวป้อนสัญญาณ



รูปที่ 1.2 โครงสร้างสายอากาศสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยม โดยการป้อนด้วย โมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนแรกคือสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยม[6] จะประกอบด้วยพารามิเตอร์หลักคือ ความกว้าง (a) ความสูง (b) และความยาว (c) ซึ่งเดิมทีจะใช้ทฤษฎีของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมในการออกแบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม แต่ สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะนำหลักการของแผ่นตัวสะท้อนมาใช้แทน เนื่องจากผลที่ทฤษฎีท่อนำคลื่นจะไม่สอดคล้องกับความต้องการ สำหรับในส่วนที่สอง คือ โมโนโพลชนิดแผ่นที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์หลักคือ ความสูง (l) ความกว้าง (w) ระยะห่างจากตัววงแหวนกับตัวป้อนสัญญาณ(d) ความสูงของตัวป้อนที่มีรูปทรงแบบสามก้าน (h) และระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณ A และ C ส่วนความหนา (t) จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.1 cm ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไปและในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการออกแบบรูปทรงและพารามิเตอร์ของ โมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้านนี้ให้เหมาะสมที่สุดที่สามารถทำให้เกิดช่วงความถี่กว้างมากที่สุด จะเริ่มที่รูปทรงที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อให้ได้โครงสร้างสายอากาศแบบสองทิศทางที่มีช่วงทำงานที่ความถี่กว้าง ซึ่งการออกแบบสายอากาศให้ทั้งสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมกับตัวป้อนโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้านนี้มีความสัมพันธ์กันนั้นจะต้องอาศัยการคำนวณและการจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าความถี่ตอบสนอง แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราการขยาย ค่าการสูญเสียย้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่งและอิมพีแดนซ์ด้านเข้า สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การจำลองเชิงทฤษฎีด้วยโปรแกรม IE3D ของบริษัท Zeland Corp ซึ่งจะดำเนินการจำลองแบบโดยอยู่บนหลักการของวิธี โมเมนต์มาใช้งานเพื่อสังเกตช่วงความถี่กว้างที่กว้างที่สุด เพื่อใช้ในการออกแบบสายอากาศและนำไปใช้งานจริง และเมื่อสามารถออกแบบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและสร้างสายอากาศชนิดนี้ได้จะทำให้ลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับปริมาณของตัวสายอากาศที่ใช้ติดตั้งในองค์กรและสายนำสัญญาณได้ และเป็นการเพิ่มสมรรถนะการใช้ทรัพยากรในองค์กรให้คุ้มค่าที่สุด

### 1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาของปัญหา วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย ตลอดจนแนวความคิดและวิธีการที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 เป็นนำเสนอทฤษฎีและหลักการต่างๆที่นำมาใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งจะกล่าวถึงวิวัฒนาการของสายอากาศต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศที่นำเสนอ ในที่นี้ก็คือ วงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้าน

บทที่ 3 เป็นวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศด้วยวิธี โมเมนต์ ซึ่งจะกล่าวถึง โครงสร้างสายอากาศ การกระจายกระแส คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น รวมถึงคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้าน

บทที่ 4 เป็นการศึกษาพารามิเตอร์และการออกแบบสายอากาศโดยใช้โปรแกรม IE3D ในการจำลองแบบ เพื่อหาขนาดของตัวป้อนสัญญาณ ขนาดของวงแหวน รวมถึงพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสม เพื่อให้สายอากาศสามารถทำงานครอบคลุมช่วงความถี่กว้าง

บทที่ 5 เป็นการสร้าง ทดสอบ และผลการทดสอบของสายอากาศที่มีพารามิเตอร์ที่ได้รับการออกแบบจากบทที่ 4 เพื่อยืนยันความถูกต้องของการคำนวณของการจำลองแบบ

บทที่ 6 เป็นการสรุปเนื้อหาทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการวิจารณ์ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนะนำแนวทางในการนำผลการวิเคราะห์ไปประยุกต์ใช้ ในการออกแบบและสร้างสายอากาศที่นำเสนอไปใช้งานในช่วงความถี่กว้างต่อไป



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยม โดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นที่มีช่วงกว้างความถี่ที่กว้าง โดยจะนำเสนอในรูปแบบวิวัฒนาการของสายอากาศต่างๆที่เกี่ยวกับสายอากาศที่นำเสนอ ตั้งแต่ สายอากาศสองทิศทางโดยใช้โพรบป้อนวงแหวนสี่เหลี่ยม สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสุดท้ายจะกล่าวถึงสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยม โดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้านที่จะนำเสนอ

#### 2.1 วิวัฒนาการของสายอากาศ

ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่เน้นการพัฒนาตัวสายอากาศเป็นจำนวนมากเพื่อให้ระบบการสื่อสารไร้สายนั้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้มากที่สุด ซึ่งสายอากาศแต่ละตัวที่ก็มีข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างและการนำไปประยุกต์ใช้งาน การศึกษาและค้นคว้าถึงข้อดีข้อเสียของสายอากาศแต่ละชนิดและนำมาข้อมูลดังกล่าวมาปรับปรุงเพื่อให้ได้ผลที่ดีขึ้นนั้นเป็นสิ่งที่มีความประโยชน์ในออกแบบ และสร้างสายอากาศชนิดใหม่ๆขึ้นมาเพื่อนำไปใช้ประยุกต์กับงานที่ต้องการได้อย่างเหมาะสม ดังนั้นจึงมีการคิดค้นสายอากาศเป็นจำนวนมาก สำหรับสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยม โดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นเองก็ได้มีการพัฒนามาสายอากาศชนิดอื่นๆในอดีต ซึ่งสามารถสรุปลำดับวิวัฒนาการดังนี้

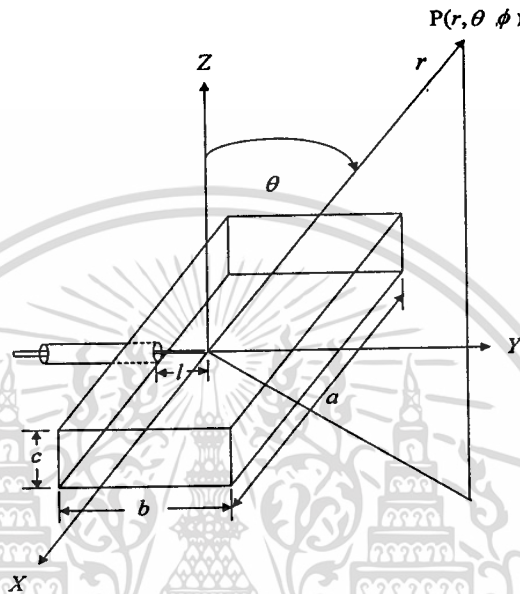
##### 2.1.1 สายอากาศสองทิศทางโดยใช้โพรบป้อนวงแหวนสี่เหลี่ยม

ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบเซลลูลาร์ พื้นที่ให้บริการจะถูกแบ่งเป็นเซลล์ย่อยๆ โดยทั่วไปพื้นที่ดังกล่าวมักประมาณเป็นวงกลมโดยใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางเป็นสายอากาศที่สถานีฐาน สำหรับระบบสื่อสาร โทรศัพท์เคลื่อนที่แบบไมโครเซลลูลาร์จะมีการสื่อสารในทิศทางที่เป็นไปตามถนน โดยปกติจะเรียกว่า Street cell ถ้าใช้สายอากาศแบบสองทิศทางจะช่วยประสิทธิภาพในการใช้งานดีขึ้นซึ่งสายอากาศจะมีแพร่กระจายคลื่นเป็นไปตามเส้นทางของถนน ด้วยเหตุนี้สายอากาศแบบสองทิศทางจึงมาแทนที่สายอากาศแบบรอบทิศทางในพื้นที่ให้บริการที่เป็นถนน อุโมงค์ ทางเดินระหว่างตึก และมีการพัฒนาสายอากาศสองทิศทางเป็นจำนวนมากเพื่อให้เหมาะสมกับระบบที่มีการเติบโตอย่างรวดเร็ว สายอากาศที่ใช้โพรบป้อนวงแหวนสี่เหลี่ยม[6] ก็เป็นสายอากาศแบบสองทิศทางที่มีออกแบบและสร้างเพื่อรองรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีพื้นที่ให้บริการเป็นลักษณะของถนน อุโมงค์ ซึ่งมีโครงสร้าง การวิเคราะห์ของสายอากาศ ตลอดจนการออกแบบและการสร้างสายอากาศดังนี้

เอกสารนี้เป็นของสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โครงสร้างของสายอากาศ

โครงสร้างของสายอากาศแบบสองทิศทางที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมจะประกอบด้วย โพรบไฟฟ้าเชิงเส้นยาว  $l$  ซึ่งไปตามแนวแกน  $y$  และล้อมรอบวงแหวนสี่เหลี่ยมที่กว้าง  $a$  และสูง  $b$  ส่วนปลายทั้งสองของวงแหวนจะมีช่องเปิดสี่เหลี่ยมบนระนาบ  $z = -c/2$  และ  $z = c/2$  ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สายอากาศที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม

### การวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น

ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศจะต้องคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในวงแหวนก่อน โดยใช้ฟังก์ชันกรีนซึ่งเป็นผลตอบสนองที่จุดสังเกตจากแหล่งกำเนิดหนึ่งจุด สำหรับฟังก์ชันกรีนของสายอากาศที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 ได้อธิบายไว้อย่างละเอียดใน [7] ซึ่งฟังก์ชันกรีนจะถูกจำกัดด้วยเงื่อนไขขอบเขตและจะหายไปในพื้นที่ผิวตัวนำของวงแหวน ในการวิเคราะห์จะไม่สนใจการสะท้อนที่ขอบของวงแหวน ดังนั้นจะมีเฉพาะสนามทั้งหมดที่แพร่กระจายจากช่องเปิดทั้งสองของวงแหวนที่ทำกรวิเคราะห์ สนามไฟฟ้าภายในโครงสร้างของสายอากาศสามารถหาได้จากการอินทิเกรตกระแสที่ถูกป้อนโพรบที่อธิบายใน [8] กับฟังก์ชันกรีนใน [7] ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สามารถเขียนได้เป็น

$$E_y(x, y, z) = A(l) \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{mk_z} \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cos(k_z z) \times \left( e^{-j\frac{k_z c}{2}} - 1 \right) \left[ Sa\left(\frac{kb + n\pi}{2}\right) + Sa\left(\frac{kb - n\pi}{2}\right) \right] \quad (2.1)$$

โดยที่  $k$  คือ เลขคลื่นในสนามว่างที่ความถี่ที่ใช้งาน  $k_z^2 = k^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2$

$A(l) = j \frac{4\omega\mu}{\pi} \sin(kl)$   $\omega$  และ  $\mu$  เป็นความถี่เชิงมุมและค่าสภาพยอมของตัวกลางตามลำดับ

$$\text{และ } Sa(x) = \frac{\sin(x)}{x}$$

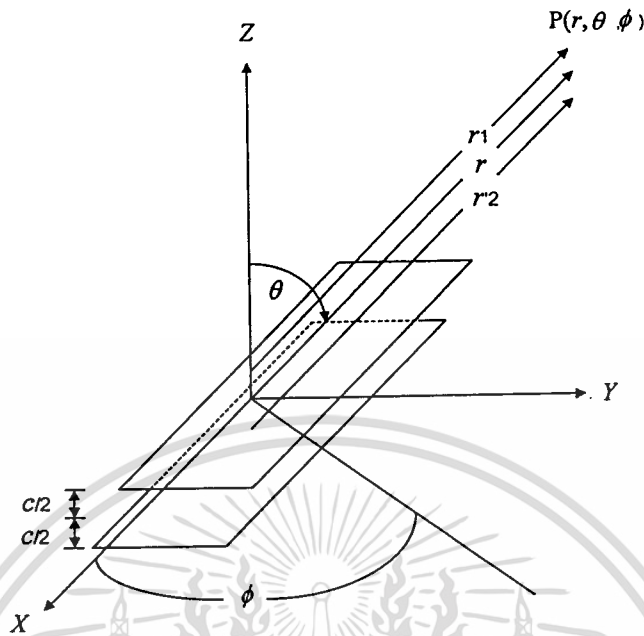
เมื่อสนามภายในวงแหวนถูกคำนวณมาได้แล้ว จากนั้นจะทำการความหนาแน่นของกระแสที่บริเวณช่องเปิดโดยใช้หลักการของ Huygen [9] และใช้การแปลงฟูเรียร์เพื่อทำการหาสนามที่แพร่กระจายจากช่องเปิดบนระนาบ  $z = 0$  ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\vec{E}(r, \theta, \phi) = jk \frac{e^{-jkz}}{2\pi} \left[ \hat{a}_\theta f_y \sin\phi + \hat{a}_\phi f_y \cos\phi \right] \quad (2.2)$$

โดยที่

$$f_y = \frac{abA(l)}{4} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{mk} \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right) \left( e^{-j\frac{k_z c}{2}} - 1 \right) \left[ Sa\left(\frac{kb + n\pi}{2}\right) + Sa\left(\frac{kb - n\pi}{2}\right) \right] \times \left[ Sa\left(\frac{ka \sin\theta \sin\phi + m\pi}{2}\right) + Sa\left(\frac{ka \sin\theta \sin\phi - m\pi}{2}\right) \right]$$

สนามที่แพร่กระจายในสมการที่ 2.2 จะเป็นสนามที่แพร่กระจายจากช่องเปิดที่อยู่ในระนาบ  $z = 0$  เมื่อย้ายตำแหน่งช่องเปิดจากระนาบ  $z = 0$  มาไว้ที่ระนาบ  $z = \pm c/2$  รัศมี  $r$  จะถูกแทนด้วย  $r_1$  และ  $r_2$  ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยที่รัศมี  $r_1$  และ  $r_2$  สามารถประมาณค่าได้ดังนี้  $r_1 \approx r - \frac{c}{2} \cos\theta$  และ  $r_2 \approx r + \frac{c}{2} \cos\theta$  สำหรับการเปลี่ยนแปลงทางเฟส และ  $r_1 \approx r_2 \approx r$  สำหรับการเปลี่ยนแปลงทางขนาด



รูปที่ 2.2 จุดสังเกตระยะไกลของช่องเปิดทั้งสอง

ในการหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระยะไกลของสายอากาศจะไม่คิดผลจากการเชื่อมต่อยุบรวมของสนามจากช่องเปิดทั้งสอง และเนื่องจากสนามที่แพร่กระจายจากช่องเปิดทั้งสองจะมีเฟสที่เหมือนกันแต่มีทิศทางที่ตรงกันข้าม ดังนั้นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระยะไกลสามารถเขียนได้เป็น

$$\bar{E}_i(r, \theta, \phi) = \bar{E}(r, \theta, \phi) \cdot 2 \sin \left[ \frac{1}{2} (kc \cos \theta) + k_z c \right] \quad (2.3)$$

### คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์

เพื่อให้ส่งผ่านกำลังจากตัวส่งไปตัวสายอากาศหรือจากตัวสายอากาศไปยังตัวรับเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพนั้นจะต้องทราบอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเพื่อให้เกิดการแมตช์ที่เหมาะสม ดังนั้น ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศแบบสองทิศทางที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมจะถูกพิจารณาเป็นทั้งแอดมิแดนซ์รวมแบบขนาน ที่ประกอบด้วยแอดมิแดนซ์ของโพรบกับการสะท้อนจากช่องเปิดทั้งสองและแอดมิแดนซ์ของช่องเปิดทั้งสอง สำหรับแอดมิแดนซ์ของโพรบสามารถหาได้โดยใช้วิธี EMF แบบเหนี่ยวนำ [10] จากความสัมพันธ์

$$Y_p = [Z_p]^{-1} = \left[ \frac{1}{I_m^2} \int \bar{E} \cdot \bar{J} dy' \right]^{-1} \quad (4)$$

โดยที่  $\bar{E}$  เป็นสนามที่คำนวณบนพื้นผิวโพรบและ  $\bar{J}$  เป็นการกระจายกระแสคั่งแสดงใน[7] ดังนั้นหลังจากแทนค่าสนามและกระแส จะได้อิมพีแดนซ์โพรบซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$Z_p = -j \frac{4\omega\mu \sin(kl)}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{mk_z} \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right) \left( e^{-j\frac{k_z c}{2}} - 1 \right) \times \left[ Sa\left(\frac{kb+n\pi}{2}\right) Sa\left(\frac{kb-n\pi}{2}\right) \right] \times \left[ \frac{1}{2} \sin(kl) \left\{ Sa\left(\left(\frac{kb+n\pi}{b}\right)l\right) + Sa\left(\left(\frac{kb-n\pi}{b}\right)l\right) \right\} + \frac{1}{2} \cos(kl) \left\{ Ca\left(\left(\frac{kb+n\pi}{b}\right)l\right) + Ca\left(\left(\frac{kb-n\pi}{b}\right)l\right) \right\} \right] \quad (2.5)$$

โดยที่  $Ca(x) = \frac{\cos(x)}{x}$  นอกจากนี้ ค่าแอดมิตแดนซ์ช่องเปิด  $Y_a$  สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$Y_a = \frac{1}{V^2} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} (E_t^a \cdot H_t^a) dy dx \quad (2.6)$$

โดยที่  $E_t^a$  เป็นสนามไฟฟ้าเชิงสัมผัส (tangential electric field) กับช่องเปิด ซึ่งพิจารณาจากสมการที่ 2.1 ในขณะที่  $H_t^a$  เป็นสนามแม่เหล็กเชิงสัมผัส (tangential magnetic field) สามารถหาได้จากการแทนค่า  $E_y$  จากสมการที่ 2.1 ลงไปในสมการแมกซ์เวลล์ (กฎของแอมแปร์) ส่วน  $V$  เป็นแรงดันที่คร่อมช่องเปิด ดังนั้น  $Y_a$  สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$Y_a = \frac{1}{V^2} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} j \frac{k_z}{\omega\mu} \left\{ A(l) \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{mk_z} \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \right\} \times \left( e^{-j\frac{k_z c}{2}} - 1 \right) \left[ Sa\left(\frac{kb+n\pi}{2}\right) + Sa\left(\frac{kb-n\pi}{2}\right) \right]^2 \cos(k_z z) \sin(k_z z) dy dx \quad (2.7)$$

โดยแปลงค่าแอดมิตแดนซ์เหล่านี้จากจุดปลายของทั้งสองช่องเปิด ( $z = \pm c/2$ ) และ ตามท่อนำคลื่นไปยังตำแหน่งของโพรบ ( $z = 0$ ) การรวมกันของค่าแอดมิตแดนซ์ช่องเปิดทั้งสองและแอดมิตแดนซ์ของโพรบ จะได้อิมพีแดนซ์โพรบที่ต้องการ

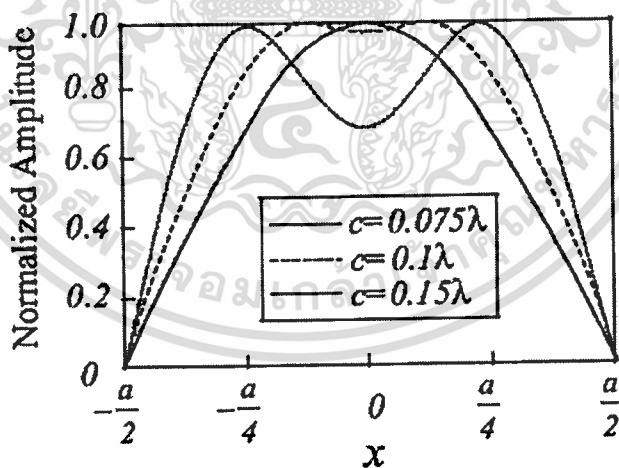
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แดนซ์ของโพรบจะให้แอดมิตแดนซ์ด้านเข้าของโพรบที่นำไปกระตุ้นวงแหวน จากนั้น ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศแบบนี้สามารถหาได้โดยการหาส่วนกลับของค่าแอดมิตแดนซ์ การแปลงในครั้งนี้อาจใช้ได้เฉพาะกรณีของความยาวของวงแหวนที่เหมาะสมซึ่งให้กระจายโหมดแบบเดียว

### คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

เมื่อพิจารณาสนามลัพท์ที่แพร่กระจายจากสายอากาศที่แสดงในสมการที่ 2.3 พบว่าคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความยาวโพรบ ( $l$ ) ความกว้างวงแหวน ( $a$ ) ความสูงวงแหวน ( $b$ ) และความยาววงแหวน ( $c$ ) และเนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศที่เหมือนกับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ดังนั้นค่าความกว้างและความสูงของวงแหวนจะถูกเลือกให้เป็นขนาดของท่อนำคลื่นมาตรฐานที่ทำในโหมดหลัก  $TE_{10}$  อย่างไรก็ตาม ถ้าความยาวของวงแหวนสั้นจะทำให้สนามที่ช่องเปิดซึ่งใกล้กับโพรบจะประกอบด้วยโหมดต่างๆ หลายโหมดและคลื่นจางหายของโหมดลำดับสูงที่บริเวณใกล้ตำแหน่งโพรบยังคงมีระดับความแรงที่สูงอยู่ ดังนั้นจึงส่งผลกระทบต่อสนามที่บริเวณช่องเปิดและการแพร่กระจายคลื่นของสนามจากช่องเปิด

สำหรับรูปที่ 2.3 จะแสดงการกระจายสนามที่ช่องเปิดสำหรับขนาดของท่อนำคลื่นที่มีขนาดเป็นฟังก์ชันของความยาววงแหวน ส่วนพารามิเตอร์  $a = 0.69\lambda$   $b = 0.35\lambda$  และ  $l = 0.28\lambda$



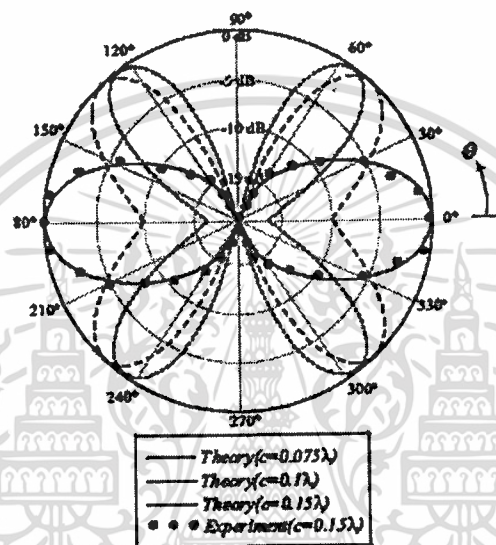
รูปที่ 2.3 การกระจายสนามที่บริเวณช่องเปิดสำหรับความยาววงแหวนที่มีค่าต่างๆ

$$(a = 0.69\lambda \quad b = 0.35\lambda \quad \text{และ} \quad l = 0.28\lambda)$$

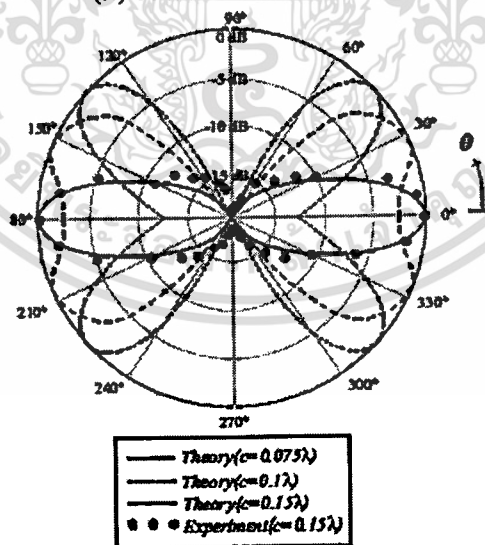
จากรูปพบว่าเมื่อ  $c = 0.075\lambda$  ซึ่งวงแหวนจะสั้นมากๆ การกระจายสนามที่บริเวณช่องเปิดจะซับซ้อนเนื่องจากมีโหมดอันดับสูงเกิดขึ้น ขณะที่ความยาว  $c$  เพิ่มขึ้นจนถึง  $0.1\lambda$  โหมดลำดับสูงจะลดลงอย่างรวดเร็วและการกระจายสนามที่บริเวณช่องเปิดจะเรียบกว่าวงแหวนที่สั้นๆ เมื่อวงแหวน

มีความยาวเพิ่มขึ้นจนถึง  $0.15\lambda$  โหมดลำดับสูงๆจะหายไป และเนื่องจากสายอากาศทำงานเสมือน  
แฉวลำดับของช่องเปิดสองช่อง ดังนั้นระยะทางระหว่างช่องเปิดทั้งสองจะมีผลต่อแบบรูปการ  
แพร่กระจายคลื่น

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีความยาวของวงแหวนขนาดต่างๆจะนำมา  
เปรียบเทียบกันในรูปแบบที่ 2.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า ( $\phi = \pi/2$ ) และ  
สนามแม่เหล็ก ( $\phi = 0$ ) จะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.4 ก และ 2.4 ข ตามลำดับ



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

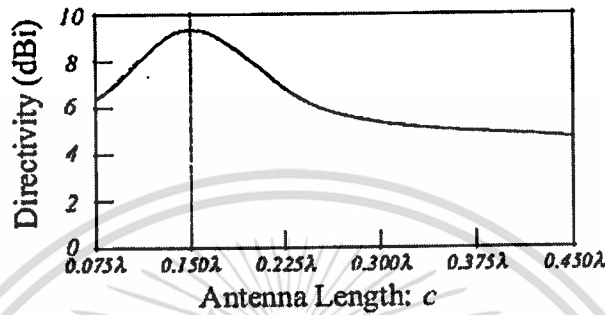


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 2.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสำหรับวงแหวนที่มีความยาวขนาดต่างๆ ( $a = 0.69\lambda$   
 $b = 0.35\lambda$  และ  $l = 0.28\lambda$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.4 พบว่าสายอากาศวงแหวนที่มีความยาวที่สั้น เช่น  $c = 0.075\lambda$  และ  $0.1\lambda$  จะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีลำคลื่นแตกออกเป็นสองส่วนซึ่งเป็นไปตามสนามที่ช่องเปิดที่มีโหนดอันดับสูงๆเกิดขึ้น จึงทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางลดลง ส่วนความยาวที่เหมาะสมที่ให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มีค่าสูงๆ สามารถหาได้จากรูปที่ 2.5

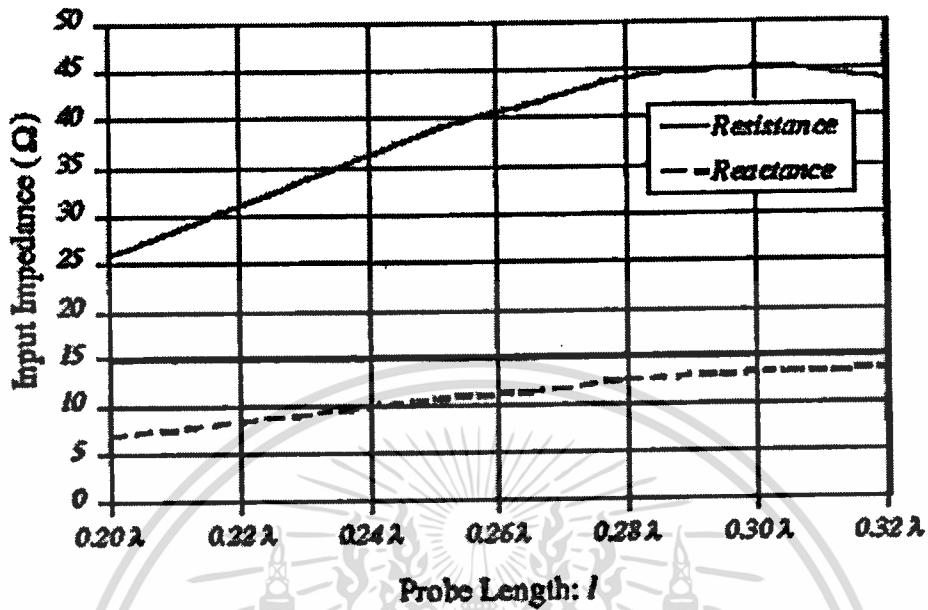


รูปที่ 2.5 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ความยาวของวงแหวนค่าต่างๆ ( $a = 0.69\lambda$   $b = 0.35\lambda$  และ  $l = 0.28\lambda$ )

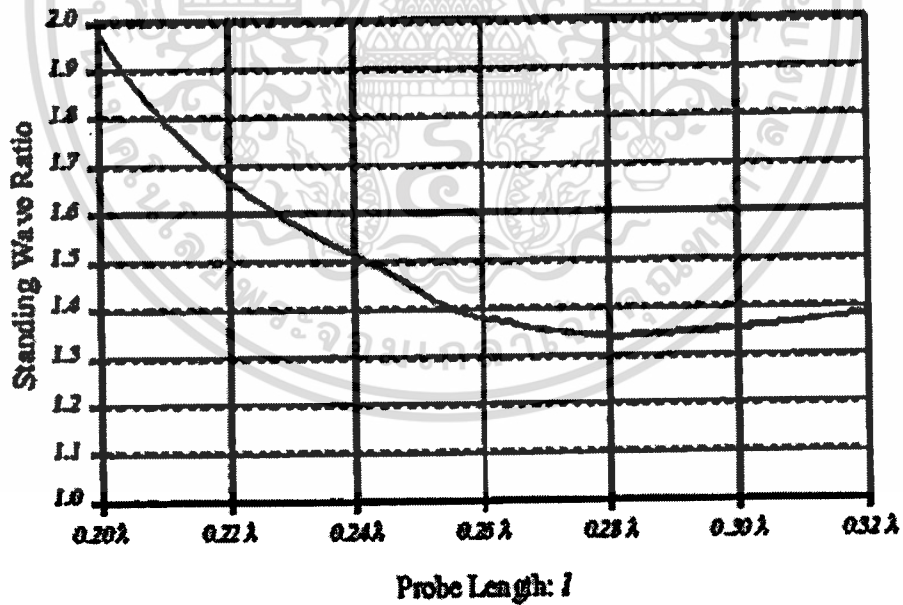
จากรูปที่ 2.5 พบว่าที่ความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$  จะให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงที่สุดซึ่งเท่ากับ 9.3 dBi สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสำหรับสายอากาศวงแหวนที่มีความยาวเท่ากับ  $0.15\lambda$  ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กโดยมีความกว้างลำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเท่ากับ 54 องศา และระนาบสนามแม่เหล็กเท่ากับ 36 องศา

#### คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์

ในการศึกษาคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จะทำการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆของวงแหวนที่ให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงที่สุด โดยมี  $a = 0.69\lambda$   $b = 0.35\lambda$  และ  $c = 0.15\lambda$  จากนั้นทำการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าโดยใช้สมการที่ 2.7 และนำมาพล็อตกราฟสำหรับความยาวโพรบต่างๆในรูปที่ 2.6 ก ซึ่งพบว่าเมื่อความยาวของโพรบสั้นหรือเท่ากับ  $0.2\lambda$  จะทำให้สายอากาศประพฤติตัวเป็นอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำที่มีค่าความต้านทานและรีแอกแตนซ์ต่ำแต่เมื่อโพรบมีความยาวเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานและรีแอกแตนซ์ต่ำเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนรูปที่ 2.6 ข จะแสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ซึ่งพบว่าค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งจะต่ำที่สุดที่ความยาวของโพรบประมาณ  $0.28\lambda$



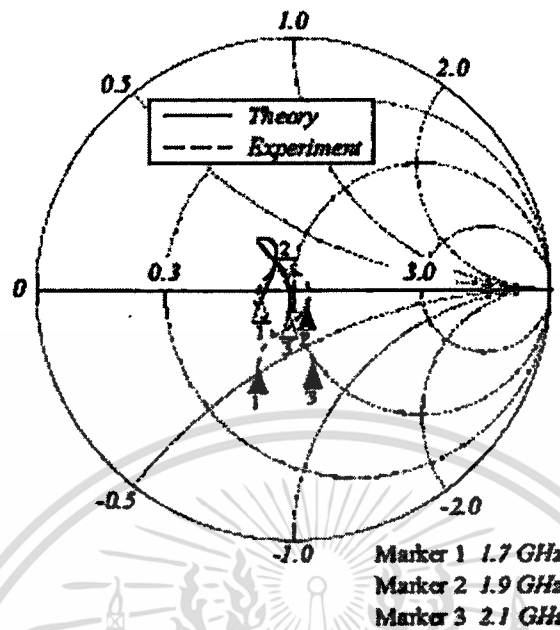
(ก) อิมพีแดนซ์ด้านเข้า



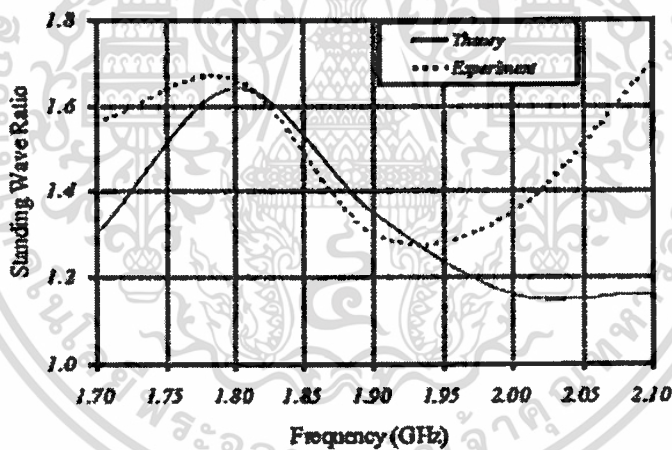
(ข) อัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 2.6 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์สำหรับโพรบที่มีความยาวค่าต่างๆ  
( $a = 0.69\lambda$   $b = 0.35\lambda$  และ  $l = 0.28\lambda$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) อิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่เป็นฟังก์ชันของความถี่



(ข) อัตราส่วนคลื่นนิ่งที่สัมพันธ์กับความถี่

### รูปที่ 2.7 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ที่สัมพันธ์กับความถี่

( $a = 10.92$  cm  $b = 5.46$  cm และ  $c = 2.37$  cm และ  $l = 4.41$  cm)

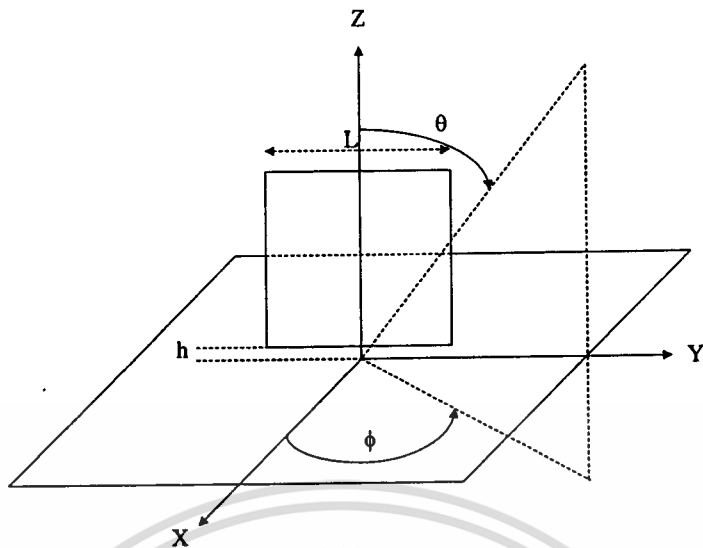
เมื่อสายอากาศถูกออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ 1.9 GHz จะได้อิมพีแดนซ์และอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่างๆซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่ที่แสดงในรูปที่ 2.7 จะพบว่าสายอากาศจะให้ช่วงความถี่ที่กว้างจะมีช่วงความถี่ 8% โดยที่ SWR น้อยกว่า 1.5 จากผลลัพธ์จากรูปที่ 2.5 และ 2.7 จะสรุปได้ว่าสายอากาศแบบสองทิศทางที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมจะให้ช่วงความถี่กว้าง 8% และค่าสภาพเงาเชิงทิศทางมากกว่า 8 dBi และ SWR น้อยกว่า 1.5 ซึ่งจะนำไปประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารเอกสารเป็นเอกสารทส่งวนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โทรศัพท์เคลื่อนที่บนถนนทางหลวง อุโมงค์ ทางเดินระหว่างตึก เนื่องจากโครงสร้างที่สร้างง่ายและใช้วัสดุที่มีราคาที่ไม่แพงจึงทำให้สายอากาศที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมเป็นสายอากาศที่เหมาะสมนำมาใช้งานอย่างยิ่ง

### 2.1.1. สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

หนึ่งในสายอากาศที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่และการสื่อสารไร้สายก็คือสายอากาศโมโนโพลประเภทต่างๆ โดยทั่วไปสายอากาศเหล่านั้นจะแมตซ์กับ  $50 \Omega$  และไม่สมดุล ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องกำจัดความไม่สมดุลออกไปอาจจะทำให้ช่วงความถี่ถูกจำกัด สายอากาศโมโนโพลที่ง่ายที่สุดก็คือ โมโนโพลยาว  $\lambda/4$  บนแผ่นสะท้อน ความกว้างแถบอิมพีแดนซ์ที่ได้จากสายอากาศโมโนโพลยาว  $\lambda/4$  จะขึ้นอยู่กับรัศมีของ stub ทรงกระบอกโดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นถ้ารัศมีเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เพิ่มภาระในเรื่องค่าใช้จ่าย แต่ก็มียุวิธีง่ายกว่าที่มาแทนการใช้stub ทรงกระบอกของโมโนโพลและมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่านั้นก็คือ การใช้อ็องก์ประกอบที่เป็นแผ่นระนาบ ซึ่งจะเรียกสายอากาศแบบนี้ว่า สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบ (planar monopole) หลังจากนั้น สายอากาศชนิดแผ่นระนาบที่มีรูปร่างวงกลมได้ถูกศึกษาในปี ค.ศ.1991 โดย Honda [11] เพื่อนำไปใช้ในย่านความถี่ของระบบโทรศัพท์ในประเทศญี่ปุ่น (90-770 MHz) ในปี ค.ศ.1992 เขาได้นำเสนอสายอากาศที่มีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า 10 dB และอัตราส่วนความกว้างแถบอิมพีแดนซ์ในอัตราส่วน 10:1 [12] จากนั้นแบบจำลองสำหรับใช้หาค่าของอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นแบบจานได้ถูกนำเสนอในปี ค.ศ.1993 โดย Hammoud [13] ด้วยอาศัยหลักการของวิธีโมเมนต์ (Method of Moment : MoM) และสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นวงรีและวงกลมได้ถูกศึกษาในปี ค.ศ.1998 โดย Agrawal [14]

สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบอาจจะถูกนำมาใช้โดยการเปลี่ยนองค์ประกอบเชิงเส้นของสายอากาศโมโนโพลเป็นองค์ประกอบเชิงระนาบ สำหรับสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบที่มีตัวแพร่กระจายคลื่นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส[4] แสดงได้ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งมีองค์ประกอบเชิงระนาบวางอยู่ที่ระยะทาง  $h$  เหนือแผ่นสะท้อนและใช้ข้อเชื่อมแบบ SMA เพื่อการกระตุ้น โพรบที่มีเส้นทแยงมุมเท่ากับ 1.2 มิลลิเมตร

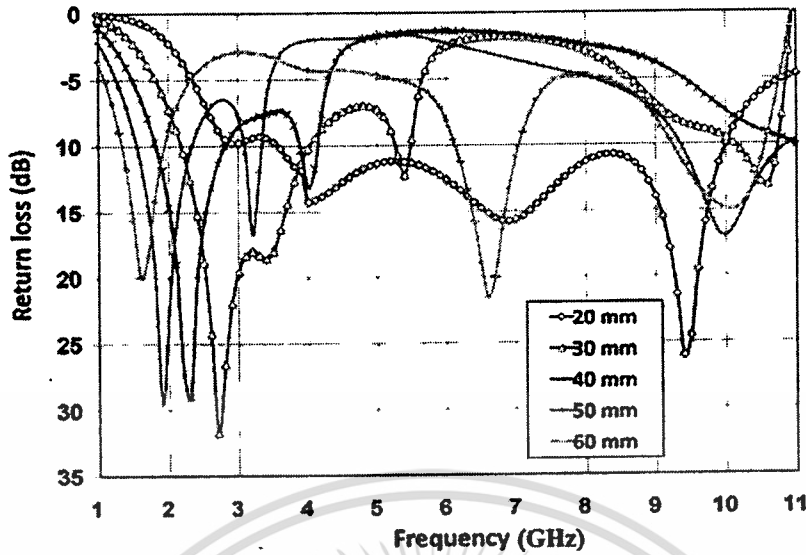


รูปที่ 2.8 รูปทางเรขาคณิตของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ในการทดสอบการสูญเสียย้อนกลับของโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด  $L$  โดยการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 60 มิลลิเมตร ลดลงทีละ 5 มิลลิเมตร จนถึง 20 มิลลิเมตร โดยมีองค์ประกอบวางบนแผ่นสะท้อนทองแดงขนาด  $100 \times 100$  ตารางมิลลิเมตร ส่วนองค์ประกอบเชิงระนาบจะตัดมาจากแผ่นทองเหลืองหนา 0.5 มิลลิเมตร ความจำกัดทางด้านความถี่จะสอดคล้องกับขอบบนและขอบล่างของความกว้างแถบของค่าการสูญเสียย้อนกลับที่เท่ากับ  $-10$  dB ค่าความถี่ขอบบนและขอบล่าง ความกว้างแถบ และระยะการกระตุ้นที่เหมาะสม ได้แสดงในตารางที่ 2.1 สำหรับรูปที่ 2.9 ได้แสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า  $L$  ของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

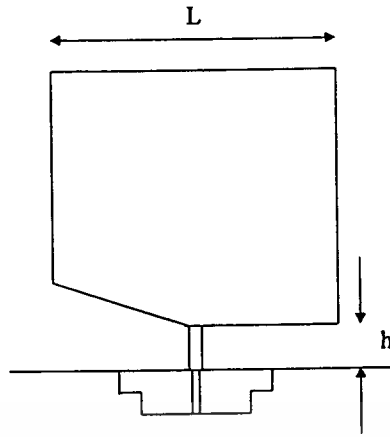
ตารางที่ 2.1 ช่วงกว้างความถี่สำหรับองค์ประกอบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์

Square size $L$ (mm)	Frequency Limits (GHz)	Bandwidth (MHz)	Optimum Feed gap (mm)
60	1.16-2.08	920	3.0
55	1.23-2.19	960	3.0
50	1.34-2.35	1010	3.0
45	1.44-2.59	1150	2.5
40	1.59-2.96	1370	2.5
35	1.86-3.53	1670	2.5
30	1.98-4.05	2090	2.5
25	2.38-5.20	2820	2.5
20	2.68-6.50	3820	2.2

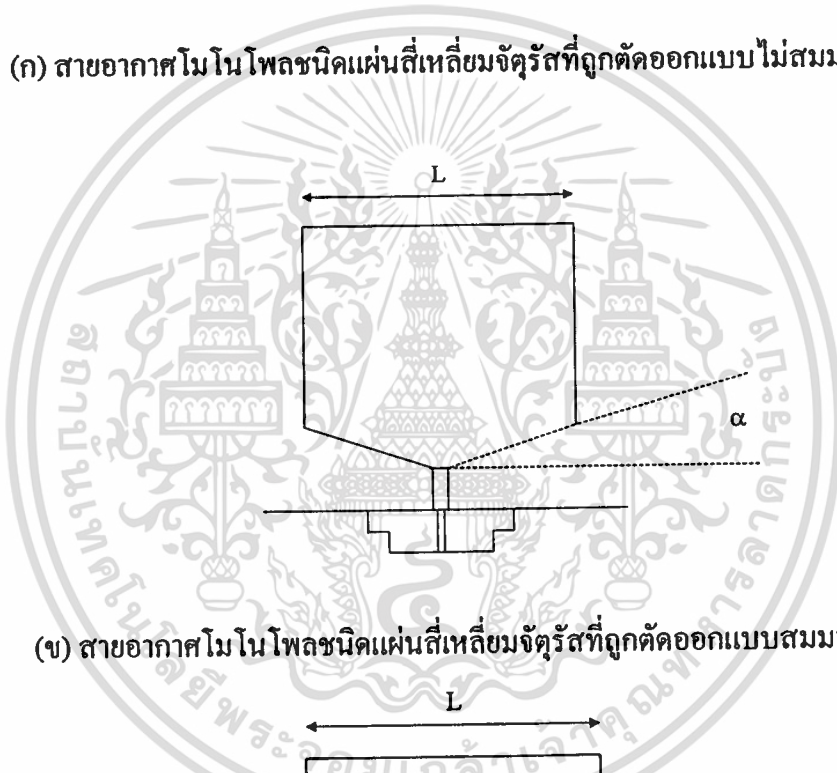


รูปที่ 2.9 ค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า  $L$  สำหรับโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

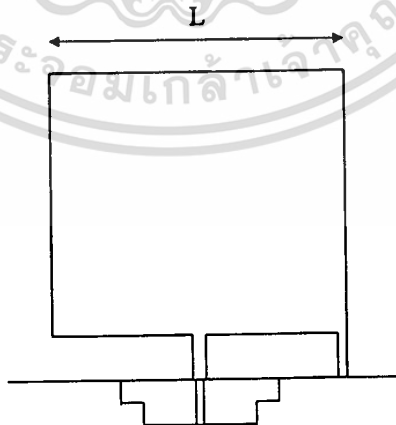
การวิเคราะห์สายอากาศ โมโนโพลเชิงแผ่นระนาบจะใช้เทคนิคของ MoM ในการจำลองแบบที่ถูกต้อง แต่ก็มีเทคนิคที่ง่ายซึ่งสามารถนำมาใช้หาความถี่ขบถล่างสำหรับโครงสร้างที่ง่ายแบบนี้ได้เช่นกัน สำหรับการเพิ่มของค่าความกว้างแถบอิมพีแดนซ์สามารถทำได้โดยการตัดบางส่วนของแผ่นสะท้อนของขอบแผ่นโมโนโพลออกไป อาจจะทำให้แผ่นโมโนโพลมีรูปร่างห้าเหลี่ยมที่สมมาตรหรือไม่สมมาตรก็ได้ อย่างไรก็ตามอย่างหนึ่ง องค์ประกอบเหล่านั้นจะถูกเปลี่ยนรูปแบบโดยตัดแผ่นโพรบสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้านให้เอียงดังในรูปที่ 2.10 ก และ 2.10 ข ซึ่งการควบคุมความกว้างแถบอิมพีแดนซ์ที่ดีสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงที่ตัดออกไปพบว่าอัตราส่วนความกว้างแถบอิมพีแดนซ์จะเปลี่ยนแปลงจาก 2.4:1 สำหรับองค์ประกอบสี่เหลี่ยมจัตุรัสธรรมดา จนมากกว่า 6.6:1 สำหรับองค์ประกอบที่มีรูปทรงเรขาคณิตแบบห้าเหลี่ยมที่เหมาะสม ค่าที่วัดได้ของความถี่ขบถบนและขบถล่างของโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$  โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงค่ามุมที่ถูกทำให้เอียง  $\alpha$  ทางด้านเดียวหรือทั้งสองด้านของโพรบจะแสดงได้ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งจะแสดงการควบคุมความถี่ขบถบนได้เป็นอย่างดี ส่วนความถี่ขบถล่างจะให้ค่าที่ประมาณ 2.10-2.35 GHz แต่ความถี่ขบถบนจะเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 4.95 GHz ถึง 12.5 GHz ขึ้นอยู่กับค่ามุมที่ถูกตัดออกไป



(ก) สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกตัดออกแบบไม่สมมาตร



(ข) สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกตัดออกแบบสมมาตร



(ค) สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่แผ่นลึควงจร

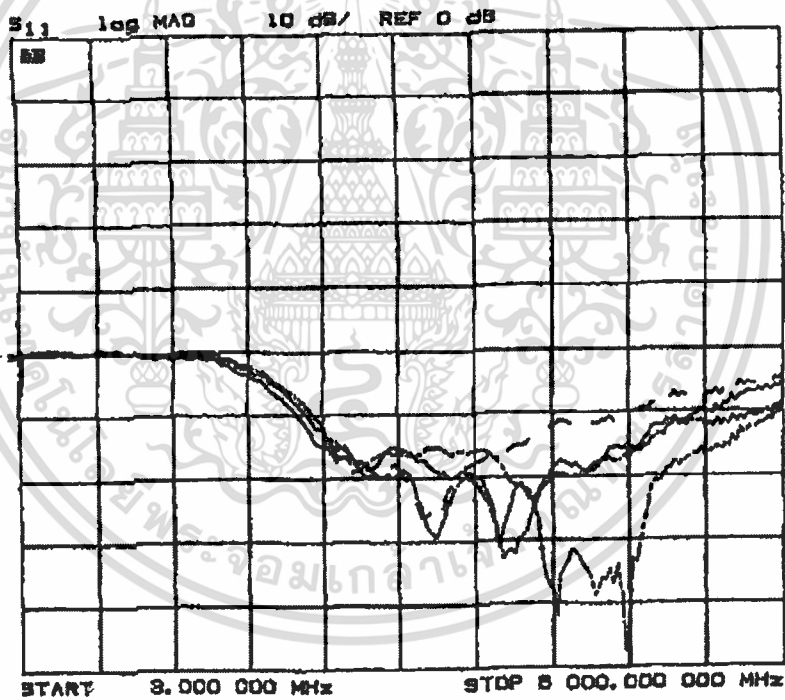
### รูปที่ 2.10 สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ความกว้างแถบอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการทดสอบสำหรับองค์ประกอบสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบต่างๆ

Trim Angle $\alpha$ (degrees)	2:1 VSWR Bandwidth (GHz) Asymmetrically Trimmed	2:1 VSWR Bandwidth (GHz) symmetrically Trimmed
No trimming	2.35-4.95	2.35-4.95
10	2.20-5.30	2.12-5.95
20	2.19-5.75	2.11-6.75
30	2.17-5.97	2.10-7.25
40	2.17-6.00	2.10-12.50

ส่วนค่าการสูญเสียย้อนกลับจะแสดงไว้ดังรูปที่ 2.11 สำหรับรูปทรงเรขาคณิตแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีค่ามุมเอียง  $\alpha$  มีค่าตั้งแต่  $0^\circ$  ถึง  $30^\circ$  ทีละ  $10^\circ$

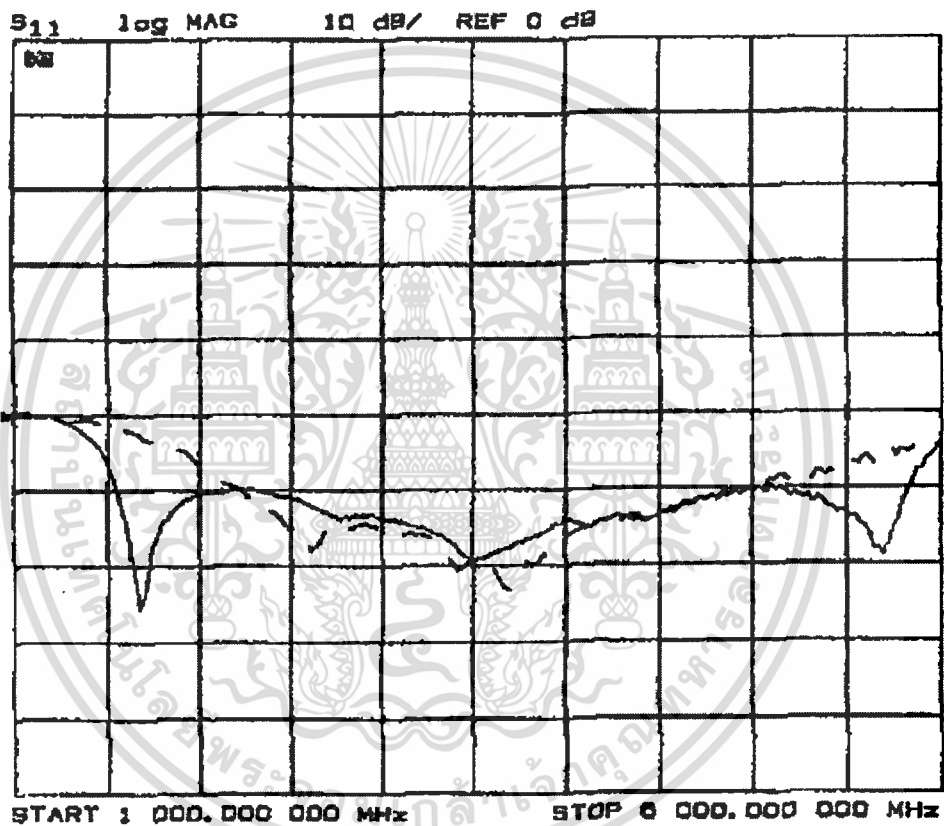


รูปที่ 2.11 ค่าการสูญเสียย้อนกลับสำหรับรูปทรงเรขาคณิตแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีค่ามุมเอียง  $\alpha = 0^\circ$  (เส้นประ)  $10^\circ$  (เส้นทึบ)  $20^\circ$  (เส้นจุดประ) และ  $30^\circ$  (เส้นประ-ประ)

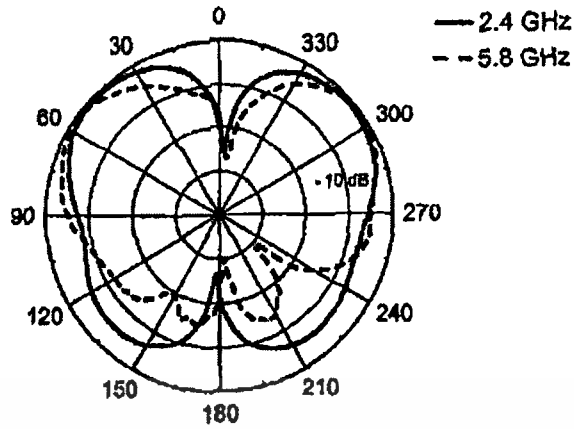
ส่วนการใช้แท่งลัดวงจร (shorting post) สามารถทำให้ลดความถี่ขอบล่างลงได้โดยการเกิดของโหมดพิเศษ และทำให้ตัวสายอากาศ มีขนาดความสูงที่สั้นกว่า โดยที่แผ่นลัดวงจรจะถูกวางที่มุมด้านหนึ่งขององค์ประกอบเชิงระนาบ ซึ่งแผ่นลัดวงจรนั้นมีเส้นทแยงมุม 1 mm หรือแผ่นมีความกว้าง 2 mm ซึ่งสายอากาศดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 ค โดยต้องการให้ระยะห่างช่องว่างกับตัวป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่สู่สาธารณะไว้เพื่อการศึกษานับเป็นเอกสารของสำนักงานวิจัยแห่งชาติ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

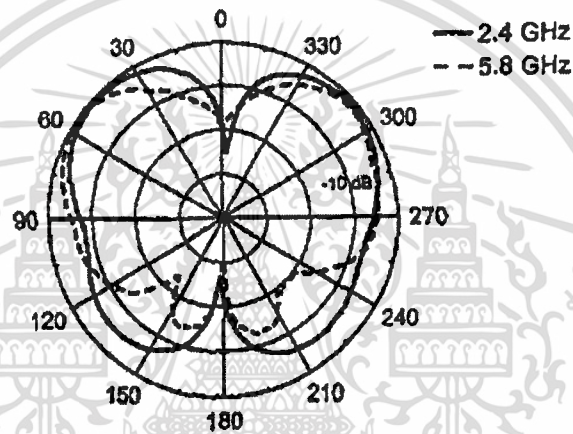
ส่วนโค้งเกิดขึ้นที่ตรงกลางของช่วงความถี่ ส่วนความไม่สมมาตรจะทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นผิดเพี้ยนไป โดยเฉพาะที่ความถี่สูงๆ สำหรับรูปที่ 2.12 จะแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของโมนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 25 mm×25 mm ที่ใช้และไม่ใช้แผ่นลัดวงจรเปรียบเทียบกัน ซึ่งผลที่ได้คือ ค่าความกว้างแถบอิมพีแดนซ์เท่ากับ 114% สำหรับโมนโพลที่ใช้แผ่นลัดวงจร และเท่ากับ 76 % สำหรับโมนโพลที่ไม่ใช้แผ่นลัดวงจร ส่วนโมนโพลที่ใช้แผ่นลัดวงจรและมีการตัดมุมให้เอียงร่วมกันจะทำให้ได้ความกว้างแถบอิมพีแดนซ์ตั้งแต่ 800 MHz ถึง 11 GHz ซึ่งเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ในระบบเซลลูลาร์และ UWB [15]



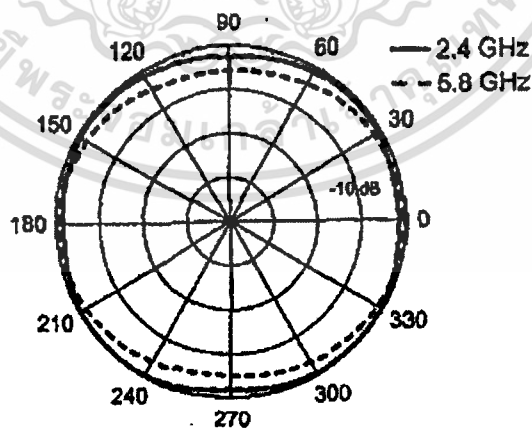
รูปที่ 2.12 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของโมนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 25 mm<sup>2</sup> ที่ใช้แผ่นลัดวงจร (เส้นประ) และไม่ใช้แผ่นลัดวงจร (เส้นทึบ) เปรียบเทียบกัน



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า  $E_\theta(\theta, \phi = 90^\circ)$



(ข) ระนาบสนามไฟฟ้า  $E_\theta(\theta, \phi = 0^\circ)$



(ค) ระนาบสนามแม่เหล็ก  $E_\theta(\theta = 90^\circ, \phi)$

รูปที่ 2.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.75 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

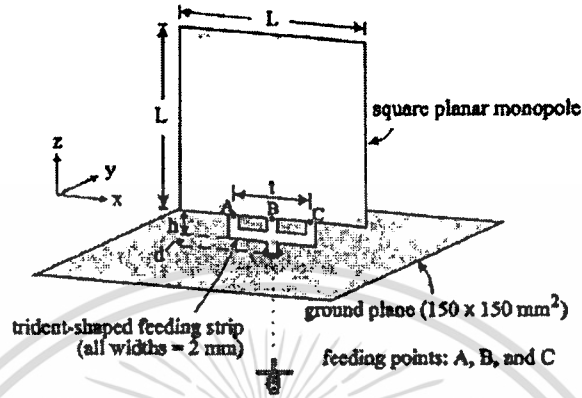
สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเหล่านี้ก็จะคล้ายกับสายอากาศโมโนโพลทั่วไปและแต่ละจะมีความถี่ตลอดช่วงความกว้างแถบอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันบ้าง สำหรับโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสธรรมดา ค่าความกว้างแถบอิมพีแดนซ์โดยทั่วไปเท่ากับ 80% อย่างไรก็ตามขณะที่ค่าความกว้างแถบอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นประมาณ 100% จะทำให้อัตราการขยายสูงสุดและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีเปลี่ยนแปลงที่น่าสนใจเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ สำหรับโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบที่ถูกทำให้เฉียงที่มีความกว้างแถบอิมพีแดนซ์ตั้งแต่ 2.10GHz ถึง 7.25 GHz (ขนาด 25 mm×25 mm  $\alpha = 30^\circ$  แบบสมมาตร) จะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแสดงในรูปที่ 2.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนี้ได้ทำการทดสอบที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.75 GHz ซึ่งพบว่ามียัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 4.0 dBi และ 5.1 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.75 GHz ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาและพัฒนาสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมด้วยเทคนิคและวิธีการต่าง ๆ มากมาย เพื่อให้ความกว้างแถบความถี่เพิ่มขึ้นและเหมาะสมกับการใช้งานในปัจจุบันและอนาคต เช่น จุดป้อนแบบเลื่อนออกจากตรงกลาง (offset feeding point)[16] ฐานแบบครึ่งวงกลม (semi-circle base)[17] และตัวป้อนสองจุด (double feed) [18] จากศึกษาเหล่านั้นแสดงให้เห็นว่า ถ้าใช้ตัวป้อนสองจุดทำให้เกิดการกระจายกระแสในแนวตั้งอย่างหนาแน่นภายในโมโนโพลเชิงระนาบแต่การกระจายกระแสในแนวนอนถูกขจัดไปซึ่งทำให้คุณสมบัติการโพลาไรซ์และความกว้างแถบอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในการออกแบบตัวป้อนสองจุดจะมีการป้อนข้างได้แผ่นสะท้อนของสายอากาศโมโนโพลเชิงระนาบและมีตำแหน่งการกระตุ้น 2 ตำแหน่ง โครงสร้างของสายอากาศจึงมีความซับซ้อนและต้องใช้มูลค่าในการสร้างสายอากาศที่สูงขึ้น

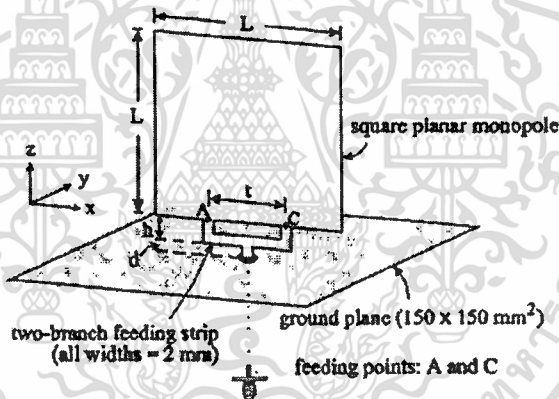
ดังนั้นจึงมีการนำเสนอเทคนิคที่ใช้แผ่นกระตุ้นแบบสามก้าน (trident-shaped feeding strip)[5] ที่ทำให้แถบความถี่ของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้างขึ้น ในการสร้างตัวสายอากาศก็ไม่ซับซ้อนเนื่องจากวัสดุที่ใช้เป็นแผ่น โมโนโพลเชิงระนาบกับแผ่นกระตุ้นแบบสามก้านเป็นชนิดเดียวและไม่ต้องการวางจรที่ใช้กระตุ้นจากภายนอก ดังนั้นสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่นกระตุ้นแบบสามก้านยังคงมีโครงสร้างที่ง่ายและสามารถใช้ คอนเนคเตอร์ชนิด SMA  $50\Omega$  ได้ง่ายโดยติดตั้งไว้ข้างได้แผ่นสะท้อนของสายอากาศซึ่งก็เหมือนกับสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้จุดป้อนจุดเดียว (single feed) ยิ่งไปกว่านั้นเนื่องจากแผ่นกระตุ้นแบบสามก้านมีจุดกระตุ้น 3 จุดที่สมมาตรกันและเชื่อมต่อกับขอบล่างของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส จึงทำให้เกิดการกระจายกระแสในแผ่นโมโนโพลสี่เหลี่ยมที่สม่ำเสมอว่าเมื่อเทียบกับเทคนิคจุดป้อนจุดเดียวและจุดป้อนสองจุด ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ช่วงความกว้างแถบอิมพีแดนซ์สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสเพิ่มขึ้นอย่างมาก สำหรับโครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่นกระตุ้นแบบสามก้าน

แสดงดังรูปที่ 2.14 ในการออกแบบสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสและแผ่นกระตุ้น  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

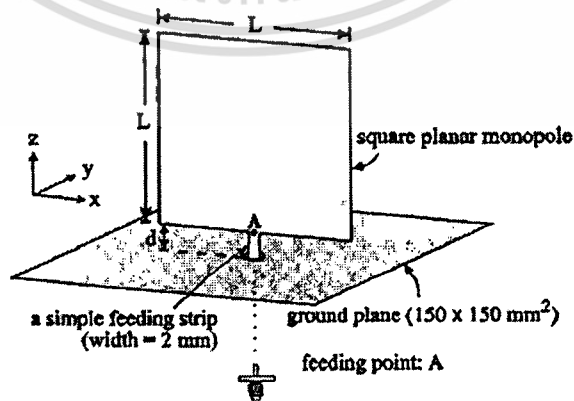
แบบสามก้านถูกรวมเป็นตัวเดียวกันและสร้างจากแผ่นวัสดุชนิดเดียวกัน แผ่นโมโนโพลชนิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดเท่ากับ  $L$  และถูกกระตุ้นที่จุดป้อน 3 จุดคือ A B และ C หรือที่โมโนโพลเชิงระนาบเชื่อมต่อกับแผ่นกระตุ้นสามก้านนั่นเอง



(ก) แบบแผ่นกระตุ้นสามก้าน



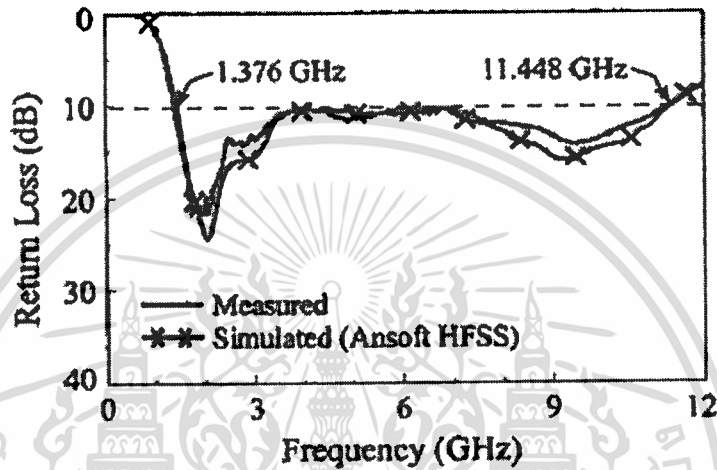
(ข) แบบแผ่นกระตุ้นสองก้าน



(ค)แบบแผ่นกระตุ้นก้านเดียว

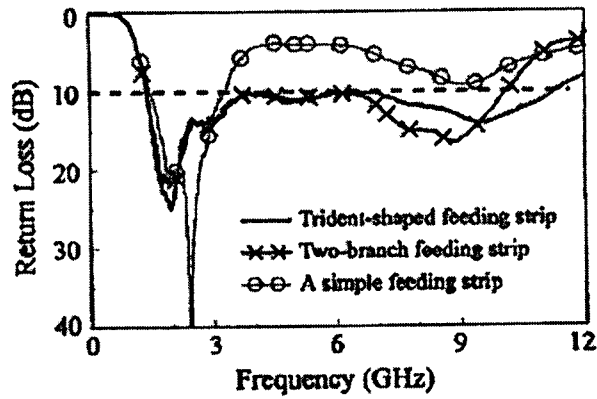
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 2.14 โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบต่างๆ[5] การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบและจำลองแบบของ โมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่นกระตุ้นแบบสามก้านจะแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 พบว่าช่วงกว้างความถี่ (ค่าการสูญเสียย้อนกลับ  $-10$  dB) มีความถี่ขอบล่าง  $f_L$  น้อยกว่า  $2$  GHz ส่วนความถี่ขอบบน  $f_U$  ของช่วงความถี่แถบอิมพีแดนซ์จะมากกว่า  $11$  GHz จากการทดสอบพบว่าช่วงความถี่แถบอิมพีแดนซ์จะกว้างประมาณ  $10$  GHz ( $1.376$ - $11.448$  GHz)

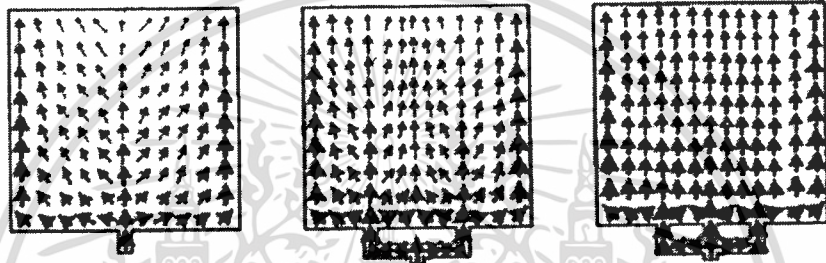


รูปที่ 2.15 ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบและจำลองแบบของ โมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่นกระตุ้นแบบสามก้าน ( $L = 40$  mm,  $t = 15$  mm,  $h = 3.5$  mm,  $d = 1.0$  mm)

สำหรับรูปที่ 2.16 ก จะแสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบของค่าการสูญเสียย้อนกลับของ โมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่นกระตุ้นแบบสามก้าน ( $t = 15$  mm,  $h = 3.5$  mm,  $d = 1.0$  mm) แบบสองก้าน ( $t = 15$  mm,  $h = 3.5$  mm,  $d = 1.0$  mm) และแบบจุดป้อนเดี่ยว ( $d = 2.5$  mm) ซึ่งสามารถสรุปผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 2.2 ซึ่งพบว่าในกรณีที่ใช้แผ่นกระตุ้นแบบสามก้าน จะให้อัตราส่วนระหว่างความถี่  $f_U / f_L$  เท่ากับ  $8.32$  ซึ่งมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้แผ่นกระตุ้นแบบสองก้านและกรณีที่ใช้แผ่นกระตุ้นแบบจุดป้อนเดี่ยวที่เท่ากับ  $7.52$  และ  $2.26$  ตามลำดับ ที่เป็นอย่างนี้มีสาเหตุมาจากการกระจายกระแสในแผ่น โมโนโพลสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่สม่ำเสมอมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ข



(ก) การเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ



(ข) การกระจายกระแสเชิงผิว

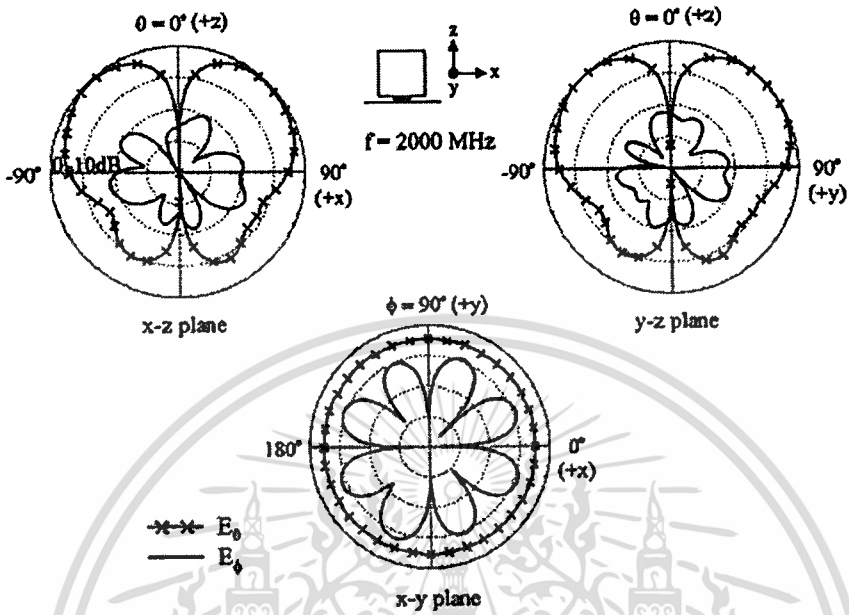
รูปที่ 2.16 คุณลักษณะของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบต่างๆ ที่ความถี่ 2.5 GHz

ตารางที่ 2.3 ผลการทดสอบสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบต่างๆ ที่ความถี่ 2.5 GHz

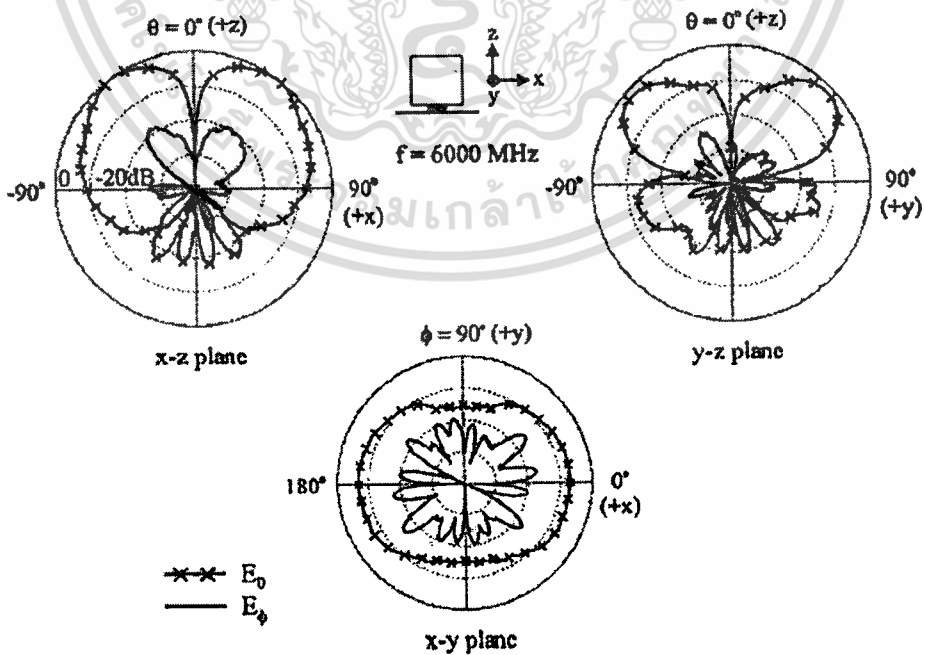
Type of feeding strip	$t, h, d$ (mm)	Bandwidth $f_L-f_U$ (GHz)	Frequency ratio $f_L-f_U$
Trident shaped feeding strip	15,3.5,1.0	10.072 , (1.376-11.448)	8.32
Two branch feeding strip	15,3.5,1.0	8.828 , (1.354-10.182)	7.52
Simple feeding strip	---,---,2.5	1.831 , (1.455-3.286)	2.26

สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่นกระตุ้นแบบสามก้านจะแสดงในรูปที่ 2.17-2.19 ที่ความถี่ 2 GHz 6 GHz และ 10 GHz ตามลำดับ สำหรับรูปที่ 2.20 จะแสดงอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบและการจำลองแบบของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่นกระดุนแบบสามก้านสำหรับความถี่ที่อยู่ในช่วงความกว้างแถบอิมพีแดนซ์

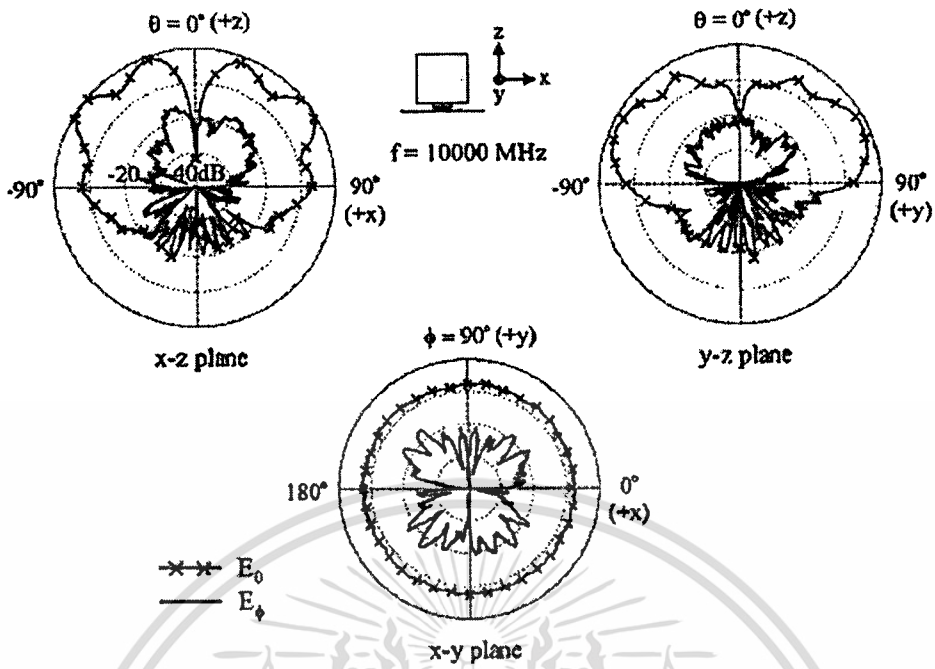


รูปที่ 2.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่นกระดุนแบบสามก้านที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 2 GHz

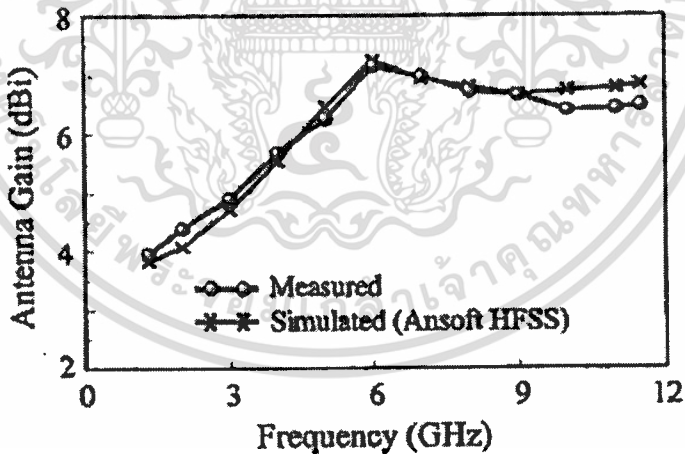


รูปที่ 2.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่นกระดุนแบบสามก้านที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 6 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



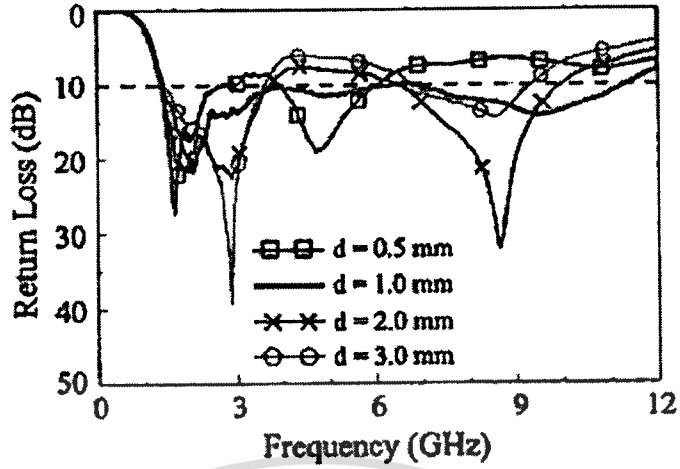
รูปที่ 2.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่นกระตุ้นแบบสามก้านที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 10 GHz



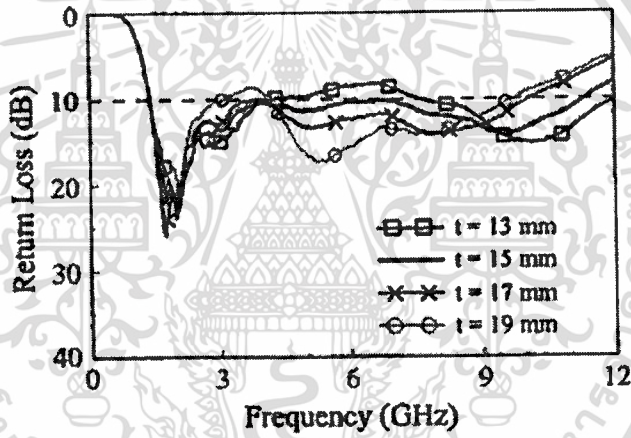
รูปที่ 2.20 อัตราขยายที่ได้จากการทดสอบและการจำลองแบบของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่นกระตุ้นแบบสามก้าน

ส่วนการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์  $d$   $t$  และ  $h$  ของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่นกระตุ้นแบบสามก้านที่มีต่อความกว้างแถบอิมพีแดนซ์จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.21 -2.23 ตามลำดับ

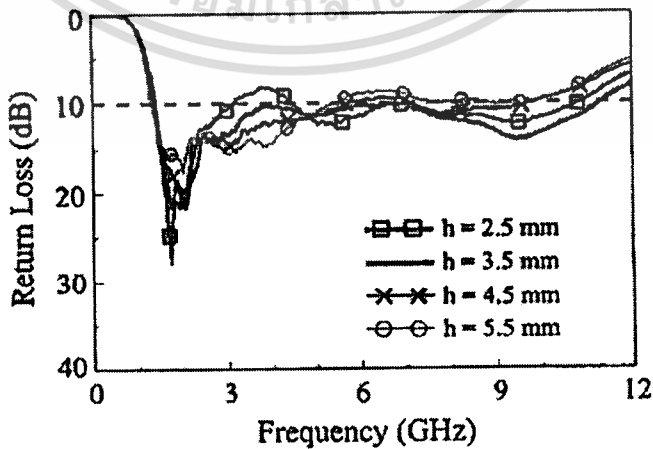
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 ค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์  $d$   
 ( $L = 40$  mm,  $t = 15$  mm,  $h = 3.5$  mm)

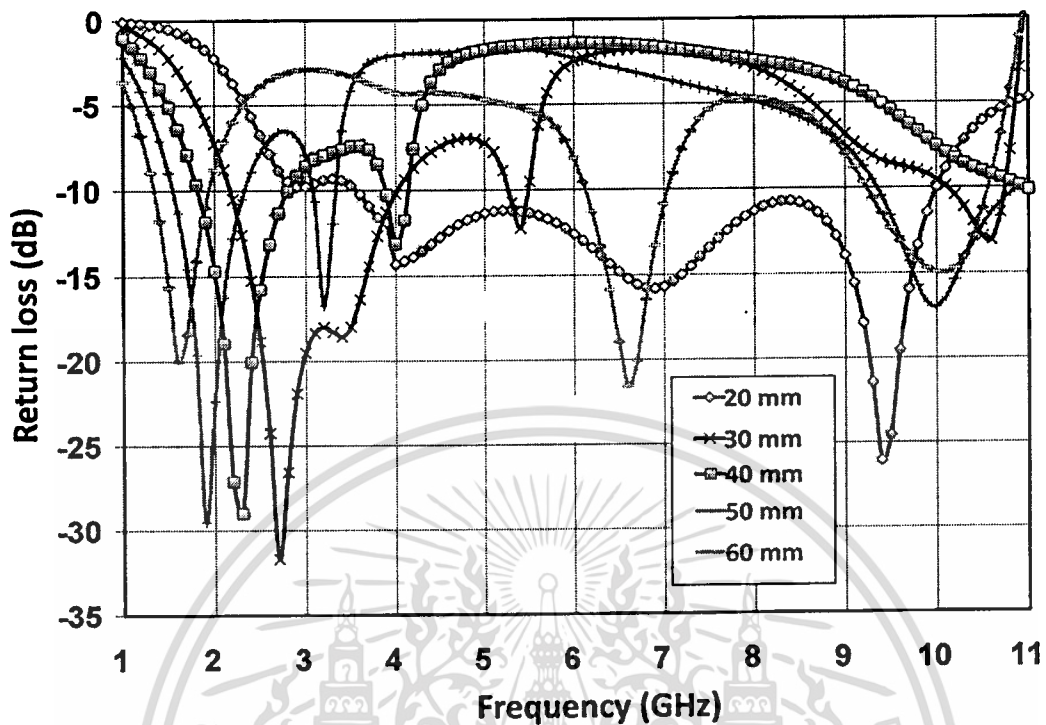


รูปที่ 2.22 ค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์  $t$   
 ( $L = 40$  mm,  $h = 3.5$  mm,  $d = 1.0$  mm)



รูปที่ 2.23 ค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์  $h$   
 ( $L = 40$  mm,  $t = 35$  mm,  $d = 1.0$  mm)

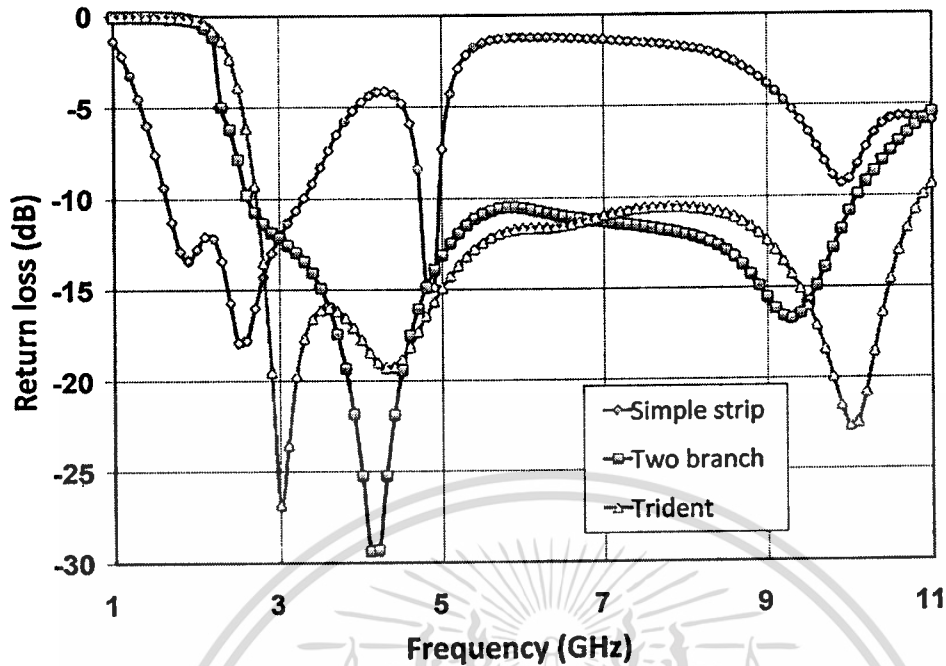
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 ค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของโมโนโพล ( $L$ )

สำหรับรูปที่ 2.4 พบว่าเมื่อขนาดของ โมโนโพลมีขนาดลดลง ค่าช่วงกว้างความถี่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และค่าของระยะห่างระหว่าง โมโนโพลและแผ่นสะท้อนมีค่าลดลงด้วย กล่าวคือ เมื่อขนาดของโมโนโพลมีขนาดเท่ากับ 60 mm ช่วงกว้างความถี่จะมีค่าตั้งแต่ 1.4 - 1.9 GHz ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 500 MHz และเมื่อขนาดโมโนโพลลดลงเท่ากับ 50 mm ช่วงกว้างความถี่จะมีค่าตั้งแต่ 1.6 - 2.4 GHz ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 800 MHz และเมื่อลดขนาดของโมโนโพลลงเท่ากับ 40 mm ช่วงกว้างความถี่จะมีค่าตั้งแต่ 1.8 - 2.75 GHz ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 950 MHz ต่อไปเมื่อลดขนาดของโมโนโพลลงเท่ากับ 30 mm ช่วงกว้างความถี่จะมีค่าตั้งแต่ 2.2 - 4.0 GHz ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1.8 GHz สุดท้ายเมื่อลดขนาดของโมโนโพลลงเหลือเท่ากับ 20 mm ช่วงกว้างความถี่จะมีค่าตั้งแต่ 3.5 - 10 GHz ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 6.5 GHz ซึ่งขนาดของโมโนโพลที่มีขนาดเท่ากับ 20 mm จะได้ช่วงกว้างความถี่มากที่สุด ส่วนรูปที่ 2.5 จะเป็นการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับของโมโนโพลที่มีลักษณะต่างๆ 3 แบบคือ แบบแผ่นกระตุ้นก้านเดี่ยว แบบแผ่นกระตุ้นสองก้าน และแบบแผ่นกระตุ้นสามก้าน พบว่า แบบแผ่นกระตุ้นสามก้านจะมีช่วงกว้างความถี่ที่กว้างที่สุด ตั้งแต่ 2.8-10.9 GHz ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 8.1 GHz รองลงมาจะเป็นแบบแผ่นกระตุ้นสองก้านมีช่วงกว้างความถี่ตั้งแต่ 2.6-10.1 GHz ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 7.5 GHz และแบบแผ่นกระตุ้นก้านเดี่ยวจะมีช่วงกว้างความถี่ที่แคบที่สุดในบรรดาทั้งสามแบบกล่าวคือ มีค่าตั้งแต่ 1.6-3.3 GHz ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1.7 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของโมโนโพลที่มีลักษณะต่างๆ 3 แบบ

จากผลการทดสอบและการจำลองที่ได้ทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่นกระตุ้นสามก้านให้ช่วงความถี่แถบอิมพีแดนซ์ที่กว้างมากๆ ประมาณ 10 GHz (1.376-11.448 GHz) ซึ่งเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในระบบโครงข่ายไร้สายบรอดแบนด์ในพื้นที่เมืองแบบใหม่ที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.16a (2-11 GHz) [19]

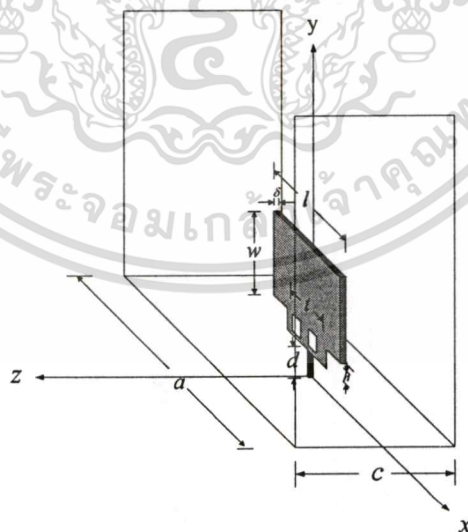
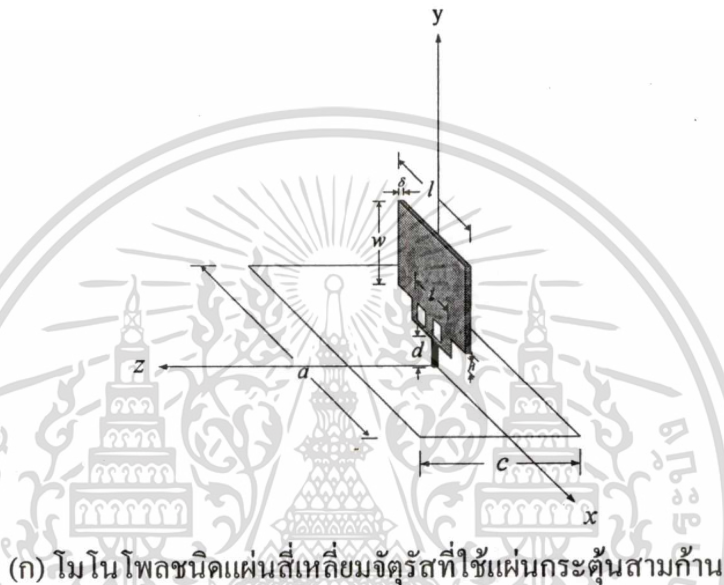
## 2.2. สายอากาศที่นำเสนอ

จากวิวัฒนาการของสายอากาศที่ได้นำเสนอในหัวข้อข้างต้น ถ้าทำการเปลี่ยนตัวกระตุ้นของสายอากาศสองทิศทางโดยใช้โพรบป้อนวงแหวนสี่เหลี่ยม โพรบเชิงเส้นมาเป็นโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่นกระตุ้นสามก้านน่าจะทำให้สายอากาศใช้งานในช่วงความถี่ที่กว้างได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยม โดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นกระตุ้นสามก้าน ที่อาศัยหลักการของกระแสที่ไหลบนโมโนโพลชนิดแผ่นและความสัมพันธ์ของรูปทรงของโมโนโพลชนิดแผ่นและวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่เหมาะสมก่อให้เกิดช่วงความถี่ที่กว้างขึ้น ซึ่งยังคงเป็นสายอากาศแบบสองทิศทางที่มีคุณลักษณะที่โดดเด่นคือมีช่วงความถี่ที่กว้างเหมาะแก่การใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สายในปัจจุบัน

จากหัวข้อข้างต้น สายอากาศวงแหวนวงกลมล้อมรอบโพรบเชิงเส้นจะใช้ทฤษฎีของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมในการออกแบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม แต่เนื่องจากผลที่ทฤษฎีท่อนำคลื่นจะไม่สอดคล้องกับความต้องการที่จะให้ตอบสนองในช่วงความถี่ที่กว้าง ดังนั้นถ้าแผ่นสะท้อนสี่เหลี่ยม

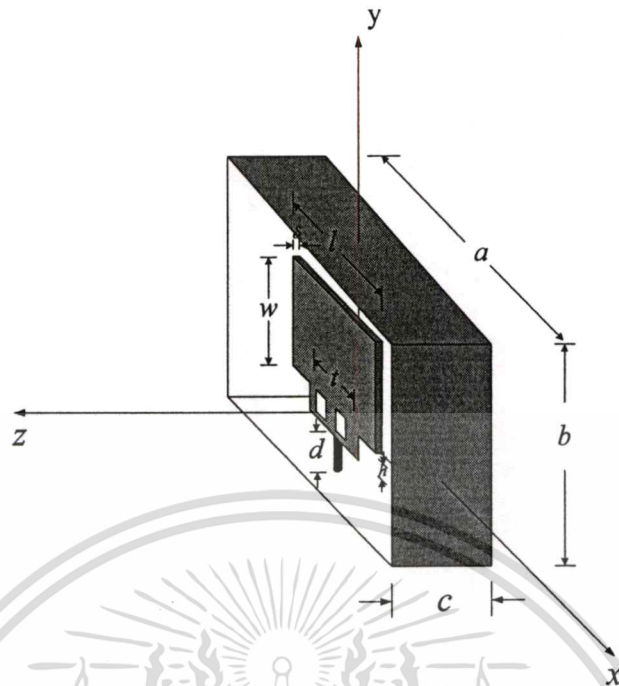
มาปิดล้อมข้างของตัวสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่นกระตุ้นสามก้าน ดังรูป  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 2.26 (ข) และสุดท้ายนำแผ่นสี่เหลี่ยมอีกแผ่นมาปิดด้านบนของโครงสร้างในรูปที่ 2.26 (ข) ดังนั้นจะได้สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นที่ต้องการในรูปที่ 2.26 (ค) จากนั้นจะทำการออกแบบพารามิเตอร์ของโมโนโพลชนิดแผ่นให้เหมาะสมที่สุดที่สามารถทำให้เกิดช่วงความถี่กว้างมากที่สุด ซึ่งจะอาศัยการคำนวณและการจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าความถี่ตอบสนอง แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราการขยาย ค่าการสูญเสียย้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่งและอิมพีแดนซ์ด้านเข้า



(ข) โมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่นกระตุ้นสามก้านที่ล้อมรอบด้านข้างด้วยแผ่นสะท้อนสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน

**รูปที่ 2.26** วิศวกรรมของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การจำลองเชิงทฤษฎีด้วยโปรแกรม ซึ่งจะดำเนินการจำลองแบบโดยอยู่บนหลักการของวิธีโมเมนต์มาใช้งานเพื่อสังเกตช่วงความถี่กว้างที่กว้างที่สุด เพื่อใช้ในการออกแบบสายอากาศและนำไปใช้งานจริง และเมื่อสามารถออกแบบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและสร้างสายอากาศชนิดนี้ได้จะทำให้ลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับปริมาณของตัวสายอากาศที่ใช้ติดตั้งในองค์กรและสายนำสัญญาณได้ และเป็นการเพิ่มสมรรถนะการใช้ทรัพยากรในองค์กรให้คุ้มค่าที่สุด

## บทที่ 3

### การวิเคราะห์สายอากาศ

ในอดีตต้องใช้ความพยายามอย่างมากในการที่จะลดรูปของสมการที่มีความยุ่งยากให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายที่สุดเพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการหาคำตอบของสมการนั้นๆ ในปัจจุบันเพื่อแบ่งเบาภาระของกระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลขได้มีการนำคอมพิวเตอร์ที่มีความเร็วในการประมวลผลสูงมาใช้ในขั้นตอนการวิเคราะห์ ทำให้สามารถคำนวณระบบที่มีความซับซ้อนได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดเวลาและความยุ่งยากที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยมืออีกด้วย ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงโปรแกรม IE3D: โปรแกรมจำลองแบบทางแม่เหล็กไฟฟ้าบนพื้นฐานวิธีโมเมนต์ จะกล่าววิธี โมเมนต์เป็นหัวข้อแรกและตามด้วยลักษณะโปรแกรม IE3D

#### 3.1 วิธีโมเมนต์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสำหรับการแก้ปัญหาสนามที่เป็นเชิงเส้นซึ่งนำมาประยุกต์ใช้หาสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าในสมการเชิงอินทิกรัล เราเรียกกระบวนการนี้ว่าวิธีเมตริกซ์ (matrix method) เนื่องจากวิธีจะลดรูปของระบบสมการดั้งเดิมให้อยู่ในรูปของระบบสมการเมตริกซ์ และเราเรียกวิธีทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้มาซึ่งระบบสมการเมตริกซ์นี้ว่า วิธีโมเมนต์ (Method of Moments: MOM)

พิจารณาสมการต่อไปนี้

$$L(f) = g \quad (3.1)$$

เมื่อ  $L$  คือตัวดำเนินการเชิงเส้น (Linear operator)

$g$  คือฟังก์ชันกระตุ้นหรือแหล่งกำเนิด (excitation function or source) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่รู้ค่า

$f$  คือผลตอบสนอง (response) หรือ สนาม (field) ซึ่งเป็นฟังก์ชันไม่รู้ค่าที่ต้องการหา

ให้  $f$  ซึ่งแสดงด้วยอนุกรมของฟังก์ชัน  $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$  ในโดเมนของ  $L$  นั่นคือ

$$f = \sum_{n=1}^N \alpha_n f_n \quad ; \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3.2)$$

โดยที่  $\alpha_n$  คือค่าสัมประสิทธิ์คงที่ที่ไม่ทราบค่า (unknown coefficient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
คือฟังก์ชันการแผ่ขยาย (expansion function) หรือ ฟังก์ชันฐาน (basis function)  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการ(3.2) สำหรับผลเฉลยที่แม่นยำ (exact solution) จะได้จากผลรวมของอนุกรมจำนวนอนันต์เทอม โดยทั่วไปจำนวนเทอมของอนุกรมจะเป็นจำนวนจำกัดค่าหนึ่งเท่านั้นและผลรวมที่ได้เราจะเรียกผลเฉลยประมาณ (approximate solution) โดยการแทนสมการ (3.2) ลงในสมการ (3.1) และใช้ความเป็นเชิงเส้นของ  $L$  จะได้ว่า

$$\sum_n \alpha_n L(f_n) = g \quad (3.3)$$

โดยที่ผลคูณภายใน(inner product) ที่เหมาะสมกับเงื่อนไขของปัญหา  $\langle f, g \rangle$  มีค่าจริง เรานิยามฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก(weighting function) หรือฟังก์ชันทดสอบ(testing function)  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_m$  ซึ่งอยู่ในช่วงของ  $L$  และคูณภายในของสมการ(3.3) ด้วยแต่ละ  $w_m$  แสดงได้ดังนี้

$$\sum_n \alpha_n \langle w_m, Lf_n \rangle = \langle w_m, g \rangle \quad (3.4)$$

ซึ่ง  $m=1, 2, 3, \dots$  และชุดของสมการเหล่านี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้เป็น

$$[l_{mn}][\alpha_n] = [g_m] \quad (3.5)$$

โดยที่

$$[l_{mn}] = \begin{bmatrix} \langle w_1, Lf_1 \rangle & \langle w_1, Lf_2 \rangle & \cdots & \langle w_1, Lf_N \rangle \\ \langle w_2, Lf_1 \rangle & \langle w_2, Lf_2 \rangle & \cdots & \langle w_2, Lf_N \rangle \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle w_M, Lf_1 \rangle & \langle w_M, Lf_2 \rangle & \cdots & \langle w_M, Lf_N \rangle \end{bmatrix}$$

$$[\alpha_n] = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_N \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad [g_m] = \begin{bmatrix} \langle w_1, g \rangle \\ \langle w_2, g \rangle \\ \vdots \\ \langle w_M, g \rangle \end{bmatrix}$$

ถ้าเมตริกซ์  $[L_{mn}]$  ไม่เป็นเมตริกซ์เอกฐาน จะได้เมตริกซ์ผกผัน  $[L_{mn}]^{-1}$  ดังนี้

$$[\alpha_n] = [L_{mn}]^{-1} [g_m] \quad (3.6)$$

และผลเฉลยสำหรับ  $f$  จะมีค่าตามสมการ(3.2) ซึ่งสามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบที่กะทัดรัดเข้าใจง่าย โดยจะนิยามเมตริกซ์ของฟังก์ชัน

$$[f'_n] = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ \dots \ f_N] \quad (3.7)$$

และจะได้ว่า

$$f = [f'_n] [\alpha_n] = [f'_n] [L_{mn}]^{-1} [g_m] \quad (3.8)$$

วิธีการลดรูปสมการเชิงเส้นที่ซับซ้อนมาเป็นสมการเมตริกซ์และการทำเมตริกซ์ผกผันเพื่อหาผลเฉลยจะเหมาะสมอย่างยิ่งกับการคำนวณ โดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือ และยิ่งกว่านั้นเมตริกซ์ผกผันนี้ยังสามารถใช้เป็นตัวแทนของระบบได้อีกด้วย นั่นคือเราสามารถหาทุกๆ ผลตอบสนองที่เกิดจากการกระตุ้นแบบใดๆ ได้ โดยใช้เมตริกซ์ผกผันเดิมซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแทนของระบบนั้น

ถ้าเมตริกซ์  $[L]$  มีขนาดอนันต์ ดังนั้นเมตริกซ์ผกผัน  $[L]^{-1}$  จะมีค่าได้ในบางกรณีเท่านั้นเช่นเมตริกซ์นั้นเป็นเมตริกซ์ทแยง (diagonal matrix) ในกรณีทั่วไปที่ชุดของ  $f_n$  และ  $w_m$  มีค่าจำกัดทำให้เมตริกซ์  $[L]$  มีขนาดจำกัดด้วย ดังนั้นสามารถหาเมตริกซ์ผกผัน  $[L]^{-1}$  ได้ด้วยรูปแบบเชิงตัวเลขต่างๆ ไปได้ ผลเฉลยที่ได้ี้จะมีความถูกต้องแม่นยำอย่างไรนั้น ปัจจัยหนึ่งขึ้นอยู่กับทางเลือก  $f_n$  และ  $w_m$  ได้เหมาะสม

### ฟังก์ชันฐานและฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก

ขั้นตอนสำคัญของวิธีโมเมนต์นั้นก็คือการเลือก  $f_n$  และ  $w_m$  ให้เหมาะสมกับปัญหาซึ่ง  $f_n$  ควรจะเป็นเชิงเส้น (Linearly independent) และจำนวนเทอมที่ใช้ในการประมาณสมการ(3.2) ควรเป็นไปอย่างสมเหตุสมผล ส่วน  $w_m$  ก็ควรเป็นฟังก์ชันอิสระเชิงเส้นด้วยเช่นกัน และการคูณภายใน  $\langle w_m, g \rangle$  ต้องสัมพันธ์อย่างอิสระกับฟังก์ชัน  $g$

นอกจากนี้ยังมีบางปัจจัยที่ส่งผลต่อการเลือก  $f_n$  และ  $w_m$  ได้แก่

- ก) ระดับความแม่นยำของผลเฉลยที่ต้องการ
- ข) ความง่ายของการประเมินค่า (evaluation) ขององค์ประกอบในเมตริกซ์
- ค) ขนาดของเมตริกซ์ที่สามารถหาเมตริกซ์ผกผัน
- ง) การพิจารณาเงื่อนไขที่เหมาะสม (well-condition) ของเมตริกซ์ [1]

ในการเลือกฟังก์ชันฐาน โดยทั่วไปแล้วจะต้องคำนึงว่าฟังก์ชันฐานนั้นจะต้องสามารถไปใช้เป็นตัวแทนของฟังก์ชันคาดหวังที่เรายังไม่ทราบค่าและให้ความแม่นยำและความง่ายในการคำนวณที่อยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการซึ่งมีความสัมพันธ์กับจำนวนเทอมของฟังก์ชันฐานที่ใช้ในสมการ(3.2)

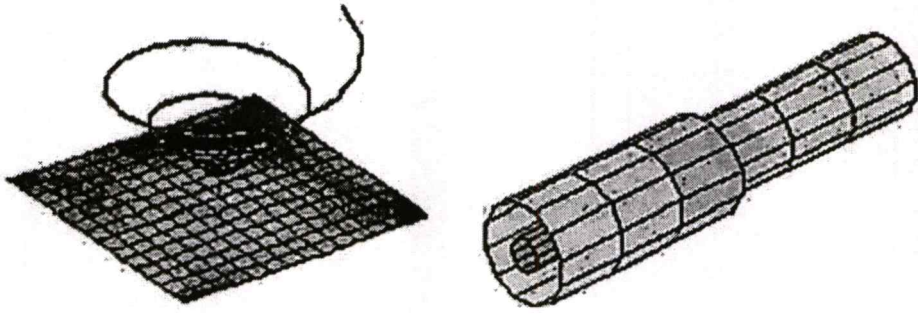
ฟังก์ชันฐานที่เป็นจำนวนจำกัดเท่านั้นที่จะสามารถเป็นจริงได้ในทางปฏิบัติ โดยทั่วไปแบ่งออกเป็นสองแบบ คือแบบแรกจะประกอบด้วยฟังก์ชันที่แบ่งเป็นขอบเขตย่อยๆ (subdomain functions) ซึ่งจะมีค่าเฉพาะบริเวณของส่วนย่อยนั้นๆ ที่พิจารณา และ ฟังก์ชันแบบนี้จะพิจารณบนผิวของโครงสร้างเท่านั้น

### 3.2 โปรแกรม IE3D: โปรแกรมจำลองแบบทางแม่เหล็กไฟฟ้าบนพื้นฐานวิธีโมเมนต์

โปรแกรม IE3D เป็นแบบจำลองแบบทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นที่อาศัยหลักการวิธีโมเมนต์ที่ใช้ในแก้ปัญหาคาร์กระจายกระแสบนโครงสร้างรูปร่างทั่วไปแบบหลายชั้นหรือแบบสามมิติ ซึ่งจะนำไปใช้อย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นในการออกแบบวงจร MMIC RFIC LTCC ไมโครเวฟและคลื่นมิลลิเมตร การเชื่อมต่อภายใน IC วงจร HTS สายอากาศแบบแผ่นตัวนำ สายอากาศเชิงเส้นและสายอากาศในระบบ RF/wireless เป็นต้น

#### ลักษณะต่างๆของโปรแกรม IE3D

- สามารถจำลองแบบโครงสร้างโลหะในชั้นของไดอิเล็กตริกแบบหลายชั้นแบบสามมิติได้อย่างสมจริง ไม่ว่าจะเป็นขอบเขตแบบเปิด แบบปิดหรือแบบเป็นรายคาบ และไม่มีข้อจำกัดในเรื่องรูปร่างและการกำหนดทิศทางและตำแหน่งของโครงสร้างโลหะ
- โปรแกรม IE3D สามารถจำลองโครงสร้างแบบสามมิติ อย่างเช่น สายอากาศแบบเกลียวเชิงกรวย (conical helix antenna) โซ่เชิงเส้น และ โครงสร้างแบบสามมิติที่มีรูปร่างแบบต่างๆ นอกจากนี้ โปรแกรม IE3D ยังสามารถสร้างและจำลองแบบระยะของระนาบที่ยาวๆและ โครงสร้างแบบสามมิติทางด้านไมโครเวฟและความถี่วิทยุได้

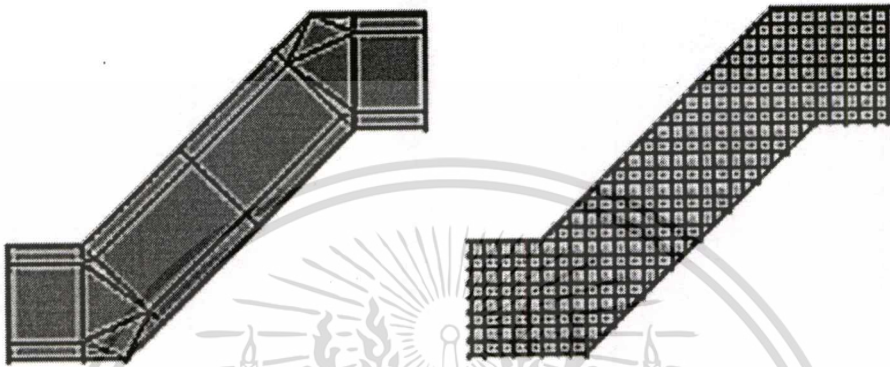


รูปที่ 3.1 การจำลองแบบโครงสร้างแบบสามมิติโดยใช้โปรแกรม IE3D

- เป็นเครื่องมือจำลองแบบทางแม่เหล็กไฟฟ้าบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่มีราคาไม่แพงและให้ผลที่มีความถูกต้องสูงและมีประสิทธิภาพที่ดี และสามารถรับข้อมูลและแสดงผลในระบบ Window ซึ่งสามารถจำลองแบบได้อย่างรวดเร็ว
- มีเมนูให้เลือกคำสั่งใช้ต่างๆ ในการสร้างแบบของโครงสร้างสามมิติโลหะแบบหลายชั้นให้เป็นชุดของรูปหลายเหลี่ยม และยังสามารถแก้ไขหลายอย่างสำหรับการสร้างรวมถึงจัดการรูปหลายเหลี่ยม และการเชื่อมต่อแต่ละรูปหลายเหลี่ยม เข้าด้วย
- มีการรวบรวมชุดของโครงสร้างมาตรฐานของโครงสร้างต่างๆ อย่างเช่น วงกลม วงแหวน ทรงกลม รูปก้นหอยวงกลมและสี่เหลี่ยม ขดลวดทรงกรวยและทรงกระบอก เป็นต้น จึงทำให้สามารถสร้างโครงสร้างแบบสามมิติหลายชั้นที่ซับซ้อนได้เพียงไม่กี่วินาทีหรือนาที
- มีการสร้างโครงร่างแหที่ไม่มีรูปแบบอย่างอัตโนมัติโดยใช้เซลล์แบบสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม ในการจำลองแบบเชิงเลขต้องการการแบ่งย่อยวงจรลงไปในเซลล์ที่เล็กๆ เซลล์แบบสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมจะถูกนำมาใช้โปรแกรม IE3D เซลล์แบบสี่เหลี่ยมจะนำไปใช้ในขอบเขตต่างๆ ไปเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด เนื่องจากเซลล์สี่เหลี่ยมแต่ละเซลล์ก็เสมือนเซลล์แบบสามเหลี่ยมอย่างน้อยสองเซลล์ สำหรับเซลล์แบบสามเหลี่ยมจะนำมาใช้ประโยชน์เพื่อแก้ไขในบริเวณพิเศษ ซึ่งเป็นการรวมประสิทธิภาพของเซลล์สี่เหลี่ยมและความยืดหยุ่นของเซลล์สามเหลี่ยมเข้าด้วยกันเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ลงตัวและดีที่สุด
- มีลักษณะเซลล์ที่ขอบอัตโนมัติทำให้โปรแกรม IE3D ให้ผลลัพธ์ที่เหนือกว่าสำหรับผู้ผู้ใช้ที่เริ่มใช้โปรแกรมนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นที่รู้กันดีว่า กระแสจะรวมตัวบริเวณขอบของแผ่นโลหะ การจำลองกระแสที่บริเวณขอบที่ถูกต้องจำเป็นจะต้องทำให้ได้ผลการจำลองแบบที่แม่นยำ ดังนั้นในโปรแกรม IE3D จะทำการเพิ่มเซลล์เล็กๆตามขอบของโครงสร้างเพื่อให้รับรองผลจำลองแบบที่ถูกต้อง โดยมีตัวเลือกให้เลือกสำหรับการสร้างเซลล์เล็กตามขอบของโครงสร้างอย่างอัตโนมัติ เพื่อให้ผู้ใช้ที่มีความรู้ในการจำลองแบบเล็กน้อยสามารถได้รับผลลัพธ์ที่ถูกต้องอย่างง่าย ๆ โดยใช้ลักษณะเซลล์ขอบอัตโนมัติ

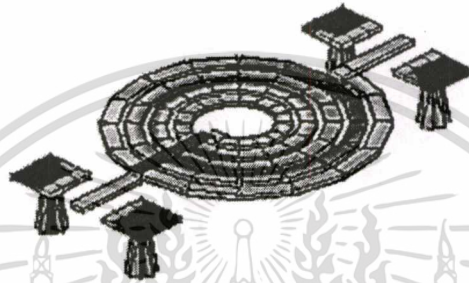


รูปที่ 3.2 ลักษณะการกำหนดเซลล์ที่ขอบอย่างอัตโนมัติ

- โปรแกรม IE3D จะมีรูปแบบการถอด (de-embedding) พารามิเตอร์ในวงจรเพื่อให้ได้การแยกพารามิเตอร์ออกที่ยืดหยุ่นและถูกต้อง ไม่มีข้อจำกัดว่าพอร์ตนั้นถูกนิยามที่ใด รูปแบบการถอดที่เพิ่มเติมเข้ามาจะทำให้มีการแยกพารามิเตอร์ออกอย่างรวดเร็วและถูกต้อง รูปแบบการถอดพารามิเตอร์ของคลื่นจะใช้แนวคิดเรื่องคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างเดียวและทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องที่สุด
- มีการจำลองโครงสร้างที่ใช้แผ่นสะท้อนที่ขนาดจำกัดและ โครงสร้างของการป้อนที่หลากหลาย โดยส่วนใหญ่จะสมมุติให้แผ่นสะท้อนมีขนาดอนันต์ในการแก้ปัญหาทางด้านสายอากาศและวงจร แต่ในการประยุกต์ใช้ทางด้าน ไมโครเวฟและความถี่วิทยุ อาจจะไม่สามารถหาแผ่นสะท้อนที่มีขนาดใหญ่ที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ได้ ดังนั้นการสมมุติแผ่นสะท้อนให้มีขนาดอนันต์จะไม่นำมาใช้ ซึ่งโปรแกรม IE3D มีความสามารถที่จะจำลองแบบโครงสร้างที่มีแผ่นสะท้อนขนาดจำกัด หัวใจสำคัญของการจำลองแผ่นสะท้อนที่มีขนาดอนันต์ก็คือการป้อนที่หลากหลาย รูปแบบการถอดในโปรแกรม IE3D สามารถถูกนำมาใช้สำหรับการป้อนที่หลากหลาย
- ทำให้การจำลองแบบของโครงสร้างโลหะสามมิติและความหนาของโลหะที่ถูกต้อง โดยวิธีโมเมนต์ส่วนมากจะอาศัยตัวจำลองแบบที่สมมุติโครงสร้างโลหะที่ไม่มีความหนาในการจำลองแบบ ซึ่งจะไม่สามารถจำลองแบบผลกระทบทางโครงสร้างของความหนาโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แต่โปรแกรม IE3D สามารถทำการจำลองแบบความหนาได้อย่างถูกต้อง ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

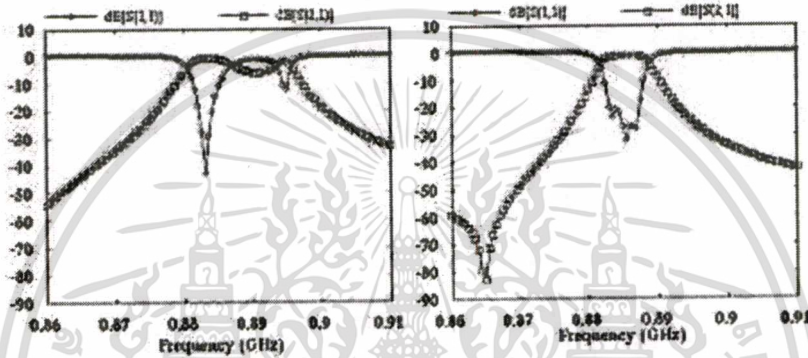
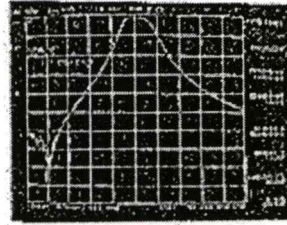
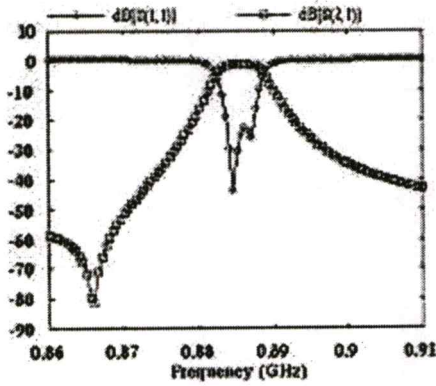
สำหรับโครงสร้างไมโครสตริปแบบกว้าง จะมีกระแสกระจายอยู่อย่างหนาแน่นบริเวณพื้นผิว ส่วนล่างของแผ่นโลหะ ผลลัพธ์ที่ดีควรได้จากโครงสร้างไมโครสตริปแบบกว้างที่ไม่มีการจำลองแบบผลของความหนา สำหรับโครงสร้างของ stripline และ stripline ที่ลอยอยู่จะมีกระแสกระจายอยู่อย่างหนาแน่นบริเวณพื้นผิวทั้งส่วนล่างและส่วนบนของแผ่นโลหะ ถ้ามีการจำลองแบบที่ไม่คำนึงถึงผลของความหนา ผลการจำลองที่ได้จะแตกต่างกับผลลัพธ์จริงอย่างมาก ซึ่งโปรแกรม IE3D สามารถจำลองแบบกระแสทั้ง 4 ด้านของแผ่นโลหะอย่างแท้จริง



รูปที่ 3.3 โครงสร้าง ที่จำลองแบบด้วยโปรแกรม IE3D

- การหาค่าที่เหมาะสมทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า

โปรแกรม IE3D จะยอมให้ผู้ใช้สามารถกำหนดรูปทรงของวงจรถายเป็นตัวแปรที่มีค่าที่เหมาะสม ตัวปรับค่าให้เหมาะสมที่จะติดตั้งเข้ามาเพื่อทำให้รูปทรงของโครงสร้างมีค่าที่เหมาะสมเพื่อสมรรถภาพที่ดีที่สุด ความสามารถของตัวปรับค่าให้เหมาะสมแบบ geneticEM จะยอมให้การหาค่าที่เหมาะสมทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพและสมบูรณ์สำหรับตัวแปรและเป้าหมายที่เหมาะสมจำนวนมาก ตัวอย่างจากรูปที่ 3.4 (ก) และ (ข) จะแสดงการประยุกต์ใช้ของตัวปรับค่าให้เหมาะสมแบบ geneticEM แบบจำลองจากโปรแกรม IE3D และผลการทดสอบของตัวกรองแบบ hairpin ที่ถูกปรับได้ด้วยมือ ซึ่งจะให้ผลที่สอดคล้องกัน เมื่อปรับตัวกรองให้สมรรถนะที่แสดงในรูปที่ 3.4 (ค) ตัวปรับค่าให้เหมาะสมแบบ geneticEM จะทำการปรับหาค่าที่เหมาะสมอย่างอัตโนมัติ ดังรูปที่ 3.4 (ง)



รูปที่ 3.4 การประยุกต์ใช้ของตัวปรับค่าที่เหมาะสมแบบ geneticEM

- สามารถจำลองแบบความบาง ความสูญเสีย และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฐานรองฐานรองชนิดไดอิเล็กตริกแบบบางถูกนำมาใช้ในวงจร MMIC บ่อยๆ เช่น ตัวเก็บประจุแบบ MIM และตัวเหนี่ยวนำรูปก้นหอย โปรแกรม IE3D สามารถหาสูตรสำหรับการจำลองแบบชั้นไดอิเล็กตริกที่มีความบางเท่ากับ 0.1 ไมครอน

ฐานรองที่มีไดอิเล็กตริกคงที่ จะนำไปใช้ในวงจร HTS โปรแกรม IE3D จะให้การจำลองแบบที่ถูกต้องสำหรับวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงๆ นอกจากนี้โปรแกรม IE3D ยังให้การจำลองแบบที่ถูกต้องสำหรับแผ่นวงจรพิมพ์ HTS และแผ่นสะท้อนอีกด้วย

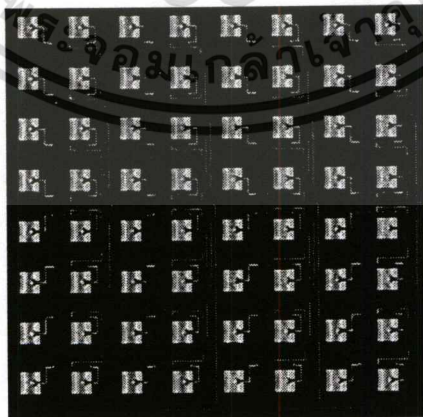
การ Doping ถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิตสารกึ่งตัวนำเพื่อควบคุมความนำไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กตริก โปรแกรม IE3D สามารถคำนวณหาค่าสภาพยอม ความซบเซมได้และความนำไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน และยังสามารถทำให้การจำลองแบบของวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียที่ถูกต้อง

- การวิเคราะห์ทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้าแบบผสม

จากความสามารถที่จะถอดพารามิเตอร์ของวงจรโดยทั่วไป โปรแกรม IE3D สามารถที่จะจำลองแบบวงจรที่ถูกห่อหุ้มชั้นสูงด้วยองค์ประกอบแบบ lumped สำหรับวงจรที่ถูกห่อหุ้มชั้นสูง โปรแกรม IE3D จะสามารถใส่ค่า s-parameter ขององค์ประกอบแบบ lump ลงไปการจำลองแบบเต็มคลื่น

- ตัวแก้ระบบเมตริกซ์ที่มีประสิทธิภาพ

เวลาของผลเฉลยสำหรับตัวแก้ระบบเมตริกซ์แบบเต็ม (full matrix solver :FMA) ตั้งฉากกับ  $N^3$  ส่วนตัวแก้ระบบเมตริกซ์แบบสมมาตร (Symmetrical matrix solvers :SMS และ SMSi) จะลดความต้องการของหน่วยความจำลงครึ่งหนึ่ง ตัวแก้ระบบเมตริกซ์เชิงข้อย่อย (Partial matrix solver :PMS) จะพิจารณาเฉพาะการเชื่อมร่วมที่มีความแรงเท่านั้นและลดความต้องการของหน่วยความจำลงและเวลาของผลเฉลยลงอย่างมาก ส่วนตัวแก้ระบบเมตริกซ์แบบ Iterative (IMS) จะมีเวลาของผลเฉลยตั้งฉากกับ  $N^2$  เช่นเดียวกับ PMS ซึ่งจะประหยัดเวลาและให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง สำหรับตัวแก้แบบใหม่ AIMS II และ AIMS III สามารถแก้ปัญหาของโครงสร้างเชิงระนาบที่มีขนาดใหญ่ได้ โดยใช้เวลาและความต้องการของหน่วยความจำที่น้อยกว่า ตัวอย่างเช่น การจำลองแบบสายอากาศแถวลำดับแบบ patch  $8 \times 8$  ที่โครงข่ายการป้อนอาจจะต้องใช้ความต้องการของหน่วยความจำ 2 GB และใช้เวลามากกว่า 10 ชั่วโมงสำหรับตัวแก้ระบบเมตริกซ์ SMSi ซึ่งเป็นตัวแก้ระบบเมตริกซ์พื้นฐานของโปรแกรม IE3D อย่างไรก็ตาม ตัวแก้ระบบเมตริกซ์ AIMS III สามารถแก้ปัญหาเดียวกันนั้นให้ผลที่ถูกต้องเหมือนกันในเวลา 1 ชั่วโมงและใช้หน่วยความจำน้อยกว่า 120 MB



รูปที่ 3.5 การกระจายกระแสบนแถวลำดับแผ่นตัวนำ ขนาด  $8 \times 8$

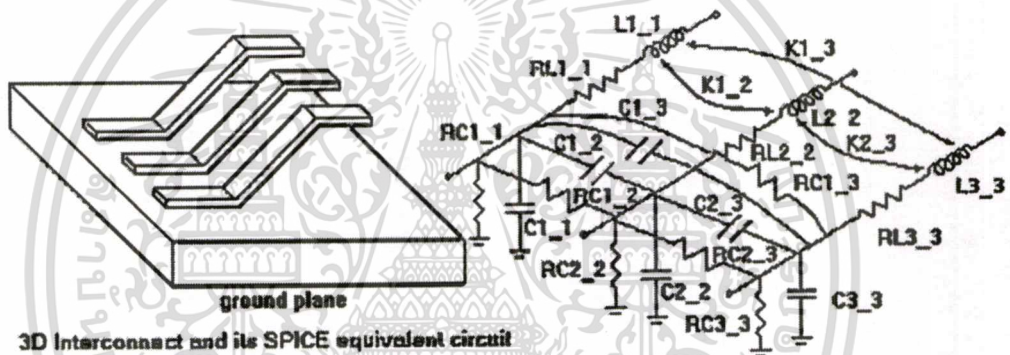
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แสดงผลของพารามิเตอร์ S Y และ Z

โปรแกรม IE3D มากับตัวประมวลผลแบบ MODUA สำหรับการแสดงผลของพารามิเตอร์ S Y และ Z ในข้อมูลในรายการ กราฟสี่เหลี่ยม และแผนภูมิสมิต นอกจากนี้ MODUA ยังเป็นตัวจำลองแบบวงกลม ซึ่งผู้ใช้สามารถเชื่อมต่อโมดูลของพารามิเตอร์ S ค่าต่างๆและองค์ประกอบแบบ lumped เข้าด้วยกันโดยใช้รูปกราฟฟิกในการเชื่อมต่อ

- สามารถแยกวงจรเสมือน SPICE หรือ RLC

ผลลัพธ์จำลองแบบเบื้องต้นของการโปรแกรม IE3D คือ พารามิเตอร์ S ซึ่งพารามิเตอร์ S สามารถเลือกแปลงไปเป็นวงจร SPICE และ วงจร SPICE สามารถนำมาจากตัวจำลองแบบ SPICE สำหรับการจำลองแบบในโดเมนทางเวลา



รูปที่ 3.6 การแยกวงจรเสมือน SPICE เป็น RLC

- แสดงผลของการกระจายกระแส แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและสนามระยะใกล้แบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ตัวประมวลผล CURVIEW ของ โปรแกรม IE3D จะให้แสดงผลของการกระจายกระแส และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 มิติ และ 3 มิติที่มีสีสั่น และยังให้ข้อมูลที่สมบูรณ์ของค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ค่าการสูญเสีย ประสิทธิภาพ และอัตราส่วนเชิงแกน ความกว้างลำคลื่น 3 dB และ RCS ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้สามารถระบุการกระจัดและโหลดเพื่อศึกษาการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ รูปที่มีสีสั่นสามารถที่จะเก็บเป็นไฟล์สำหรับข้อมูลในการออกแบบ และตัวประมวลผลยังให้การแสดงผลแบบรูปการโพลาริซเซชันและเชิงกลมและอัตราส่วนเชิงแกน

- สามารถจำลองแบบกระแสแม่เหล็กของโครงสร้างที่ช่องสล็อต สำหรับโครงสร้างที่เป็นช่องสล็อต โปรแกรม IE3D สามารถจำลองแบบการกระจายสนามไฟฟ้าบนสล็อตได้ ซึ่งจะประหยัดเวลาของผลลัพธ์และหน่วยความจำ
- "Simulate and Find Excitation" เป็นคำสั่งที่ใช้ในการติดตามการกระจายกำลังบนโครงข่าย

"Simulate and Find Excitation" เป็นคำสั่งพิเศษสำหรับการออกแบบสายอากาศแถวลำดับและโครงสร้างที่มีองค์ประกอบแบบ lump ที่ซับซ้อน โดยจะให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงการกระจายกำลังแรงดันและกระแสที่แต่ละพอร์ตของโครงสร้างที่ทำการจำลองแบบ ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากสำหรับการออกแบบสายอากาศแถวลำดับเพราะว่าโปรแกรมสามารถบอกว่าการออกแบบนั้นดีหรือไม่อย่างไร และเหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีองค์ประกอบแบบ lump เช่น โปรแกรมจะช่วยหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีองค์ประกอบแบบ lump ที่ซับซ้อน

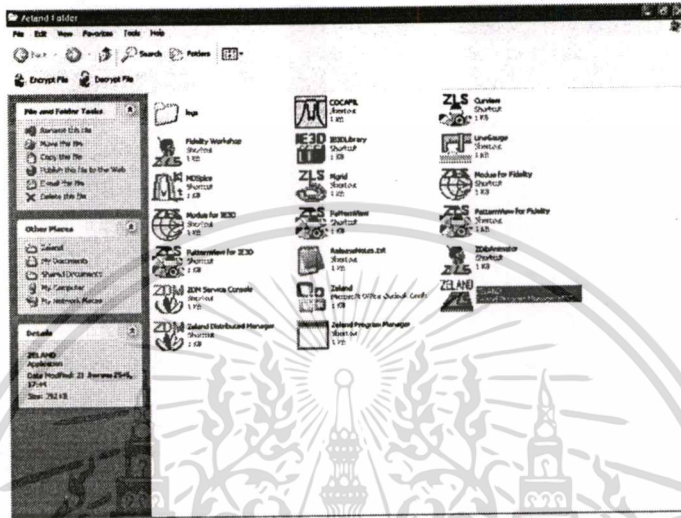
- มีลักษณะการใช้งานที่ยืดหยุ่นและมีตัวจำลองแบบวงจรมาให้
- โปรแกรม IE3D มาพร้อมกับตัวจำลองแบบวงจรที่ผู้ใช้งานคุ้นเคยและง่าย ซึ่งประกอบด้วยสิ่งที่เป็นประโยชน์ เช่น การหาคุณสมบัติอิมพีแดนซ์ของสายส่ง การคิดออกแบบพารามิเตอร์ S ของสายส่งในอุดมคติและการจำลองแบบย้อนกลับเพื่อจะแยกพารามิเตอร์ของส่วนหนึ่งของวงจรจากวงจรทั้งหมด
- มีรูปแบบ Intelli-Fit แบบปรับได้ เพื่อจะให้ผลการจำลองแบบที่ถูกต้องและรวดเร็ว สำหรับโครงสร้างแบบบรอดแบนด์ Intelli-Fit เป็นมีลักษณะแบบ curve-fitting ที่ใช้หลักการทั้งทางด้านคณิตศาสตร์และ ฟิสิกส์ ซึ่งสามารถแยกผลตอบสนองความถี่อย่างละเอียดของโครงสร้างที่ซับซ้อนที่มีหลายเรโซแนนซ์โดยการใช้ผลการจำลองแบบที่จุดความถี่แรกๆ นอกจากนี้ยังติดตั้งรูปแบบ Intelli-Fit แบบปรับได้ เข้าไปในเครื่องการจำลองแบบ สำหรับการจำลองแบบเฉพาะทาง ตัวจำลองแบบสามารถจุดความถี่ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้สำหรับการจำลองแบบของสนามจริง ผลตอบสนองความถี่อย่างละเอียดที่ซับซ้อนที่มีหลายเรโซแนนซ์สามารถที่จะถูกแยกออก ซึ่งรูปแบบนี้จะสมบูรณ์ มีประสิทธิภาพและความถูกต้องและง่ายที่จะใช้งาน โดยไม่มีข้อจำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ขั้นตอนการสร้างสายอากาศโดยใช้โปรแกรม IE3D

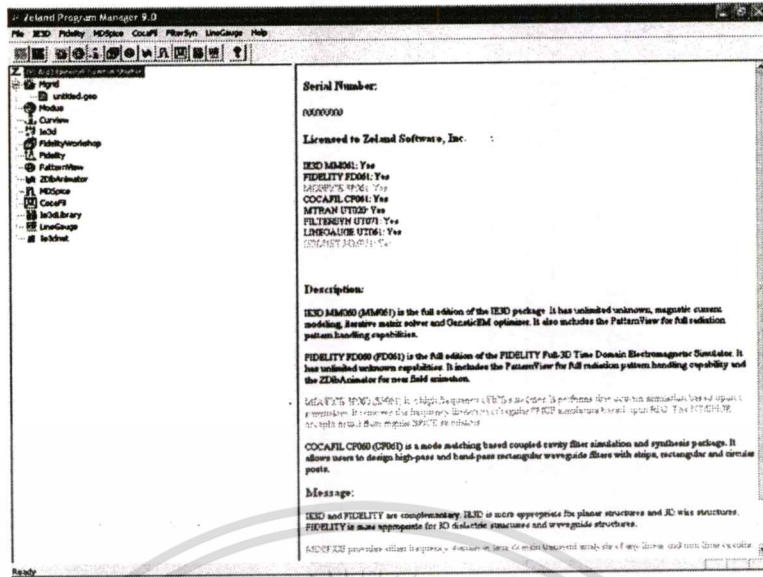
สำหรับขั้นตอนในการสร้างสายอากาศโดยใช้โปรแกรม IE3D เพื่อศึกษาจำลองแบบคุณลักษณะของสายอากาศ มีดังต่อไปนี้

- 1) เปิดโปรแกรม IE3D ซึ่งอยู่ในไฟล์ที่มีชื่อว่า Zeland คังรูปที่ 3.7

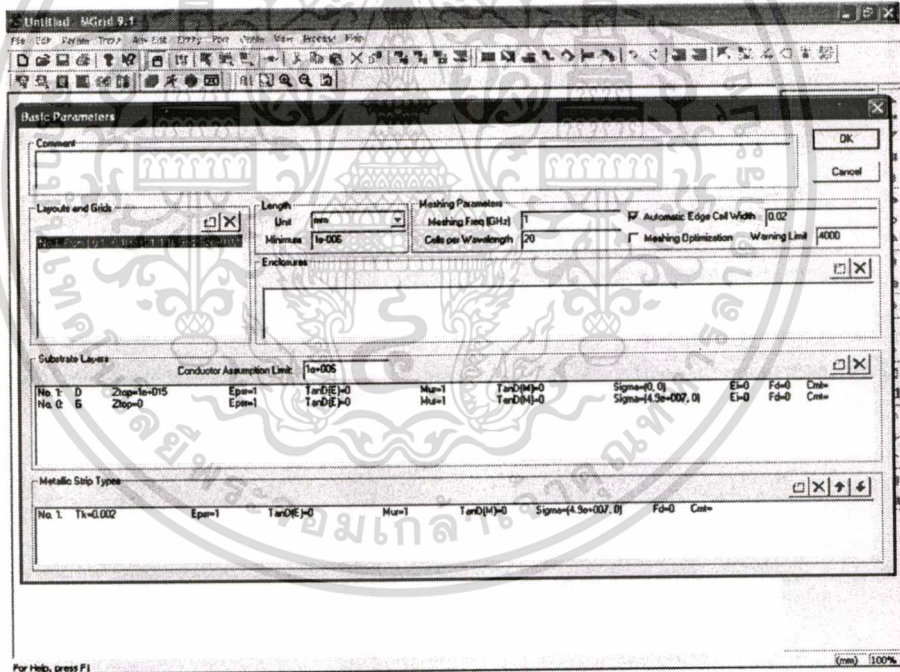


รูปที่ 3.7 ไฟล์ที่มีชื่อว่า Zeland

- 2) เข้าไปในไฟล์ของ Zeland จะพบไฟล์ต่างๆจำนวนมากภายในไฟล์ของ Zeland นี้ เลือกไฟล์ที่มีชื่อว่า Zeland Program Manager ซึ่งเป็น โปรแกรมจัดการไฟล์ต่างๆภายใน โปรแกรมนี้ หากไม่ได้เปิดไฟล์ Zeland นี้ก่อน จะไม่สามารถจัดการกับ โปรแกรมต่างๆที่อยู่ในไฟล์ของ Zeland นี้ได้ คังรูปที่ 3.8
- 3) จากนั้นทำการเลือกไฟล์ที่มีชื่อว่า Mgrid ซึ่งเป็น โปรแกรมสำหรับการสร้างและออกแบบสายอากาศ เมื่อเลือกไฟล์นี้แล้วจะสามารถสร้างและออกแบบรูปร่างของสายอากาศที่เราต้องการที่จะออกแบบได้ และเมื่อได้เข้าไปใน โปรแกรม Mgrid แล้ว จากนั้นเลือกไฟล์ที่มีชื่อว่า Parameter และตั้งค่า Basic Parameters ที่ต้องการเลือก เช่น หน่วยของมิติ กล่าวคือเป็นหน่วยของความกว้าง ความยาว และความสูง การสมมุติค่าของตัวนำที่เราต้องการค่าคงที่ไดอิเล็กตริก แทนเจนต์การสูญเสียของวัสดุไดอิเล็กตริก ค่าความซึมซาบได้ และค่าความนำของวัสดุ เป็นต้น คังรูปที่ 3.9



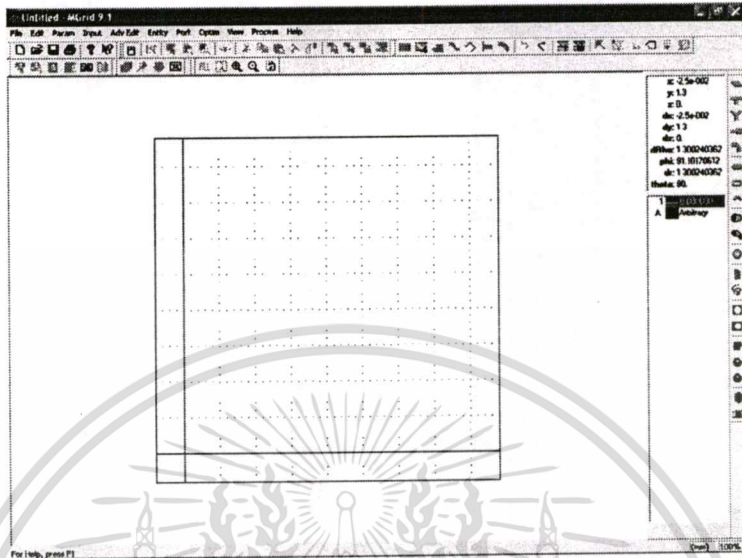
รูปที่ 3.8 ไฟล์ที่มีชื่อว่า Zeland Program Manager 9.0



รูปที่ 3.9 ไฟล์ที่มีชื่อว่า Mgrid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) เมื่อทำการกำหนดค่าต่างๆแล้วกดปุ่ม ok จากนั้นแถบเครื่องมือต่างๆที่จำเป็นต่อการสร้างสายอากาศก็จะขึ้นมาในแถบด้านขวามือดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แถบเครื่องมือต่างๆในการสร้างสายอากาศ

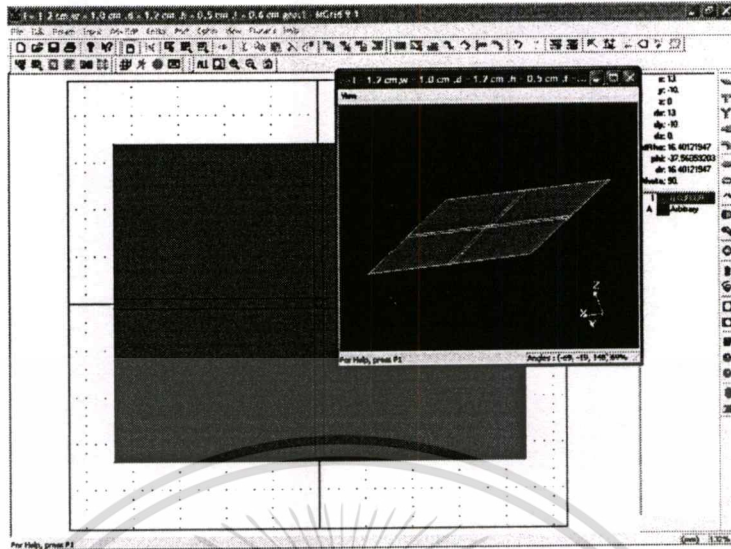
- 5) จากนั้นทำการสร้างสายอากาศที่ต้องการออกแบบ เพื่อเป็นการง่ายต่อการเข้าใจ การสร้างนี้จะแบ่งการสร้างออกเป็นสามส่วน อันดับแรกคือสร้างวงแหวนสี่เหลี่ยมที่ล้อมรอบ โมโนโพลชนิดแผ่น อันดับสองสร้างตัวป้อนสัญญาณที่จะป้อนให้แก่โมโนโพลชนิดแผ่น อันดับสุดท้ายสร้างรูปทรงของโมโนโพลชนิดแผ่น

- 6) ในที่นี้จะเริ่มจากการสร้างวงแหวนสี่เหลี่ยมก่อนเป็นอันดับแรก ซึ่งวงแหวนสี่เหลี่ยมนี้จะประกอบด้วยแผ่นสี่เหลี่ยมสี่แผ่นมาประกอบกัน โดยพิกัดที่อยู่ในโปรแกรม IE3D นี้ในแนวแกนตั้งคือแกน z และในแนวแกนนอนคือแกน x และแกน y ตามลำดับ โดยเลือกการสร้างแผ่นสี่เหลี่ยมจากแถบด้านขวามือบนสุดและกำหนดพิกัดของความกว้างและความยาวของแผ่นสี่เหลี่ยมนี้ในแนวแกนนอนคือแกน x และแกน y เพื่อกำหนดเป็นฐานของวงแหวนนี้ และจากนั้นเลือกการสร้างแผ่นสี่เหลี่ยมจากแถบด้านขวามือบนสุดและกำหนดพิกัดของความกว้างและความยาวของแผ่นสี่เหลี่ยมนี้อีกแผ่นหนึ่งเพื่อเป็นแผ่นปิดด้านบนของวงแหวนซึ่งมีขนาดเท่ากันกับแผ่นสี่เหลี่ยมที่เป็นฐานวงแหวนเดิมแต่กำหนดระยะห่างระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมปิดด้านบนและฐานสี่เหลี่ยมด้านล่างเป็นระยะ  $b$  เท่ากับ 22 mm ในที่นี้จะกำหนดให้ความกว้างและความยาวเท่ากับ 30 mm , 44 mm ซึ่งเป็นค่า A และ C ตามลำดับ จากนั้นสร้างแผ่นปิด

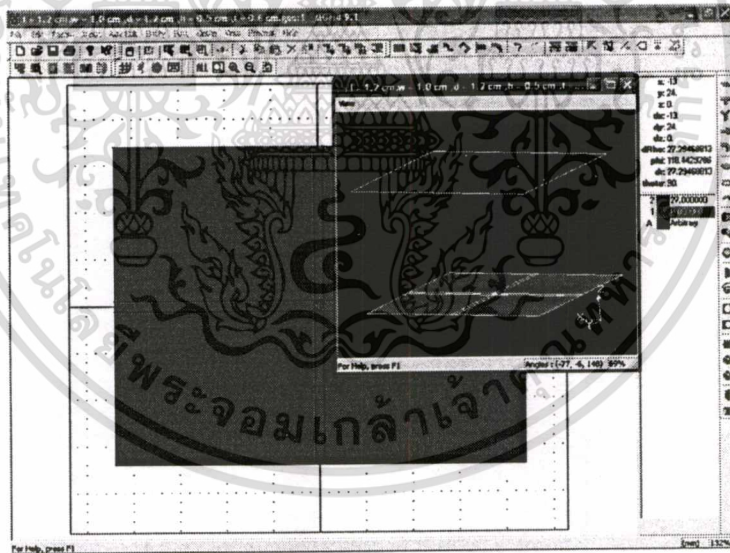
ด้านข้างเพื่อประกอบกันให้เป็นวงแหวนสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3.11 , 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

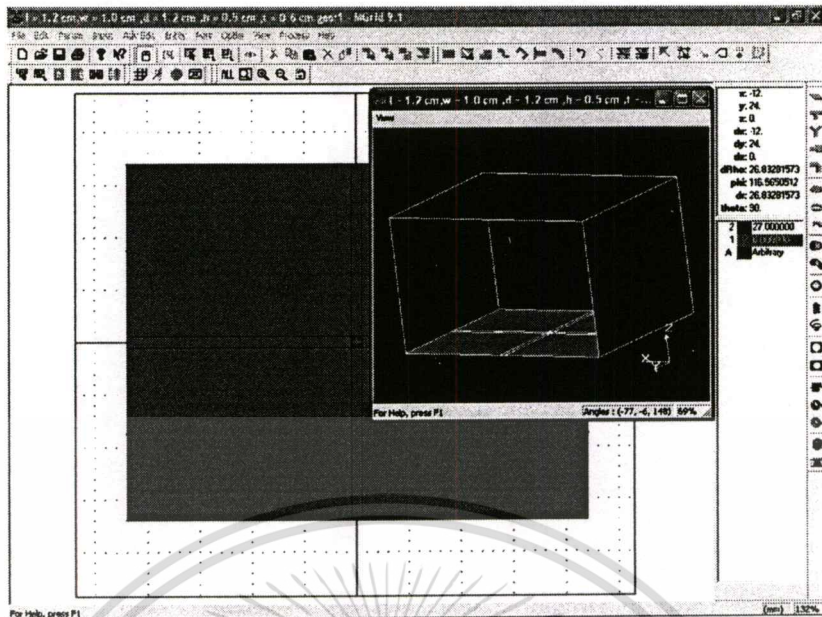


รูปที่ 3.11 การสร้างแผ่นสี่เหลี่ยมจากแถบเครื่องมือและกำหนดพิกัดของความกว้างและความยาวของแผ่นสี่เหลี่ยมเป็นฐานของวงแหวนสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.12 การสร้างแผ่นสี่เหลี่ยมจากแถบด้านขวามือบนสุดและกำหนดพิกัดของความกว้างและความยาวของแผ่นสี่เหลี่ยมเป็นแผ่นปิดด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

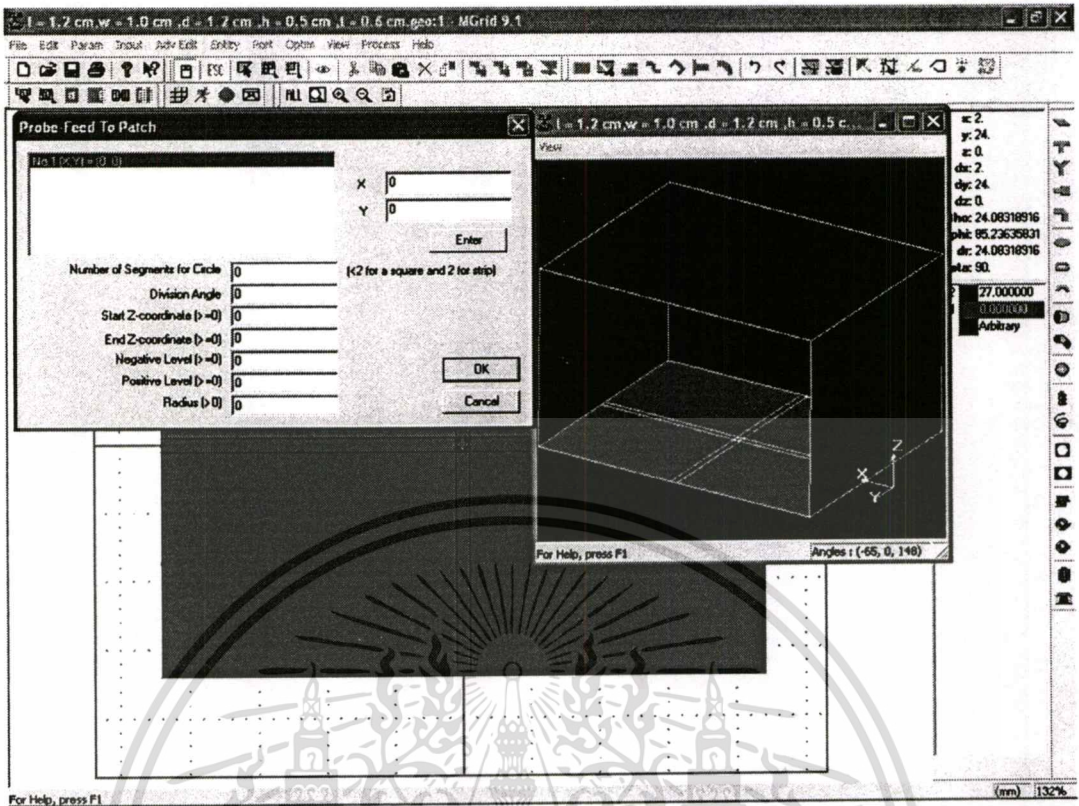


รูปที่ 3.13 การสร้างแผ่นสี่เหลี่ยมประกบด้านข้างทั้งสองด้านเพื่อประกบกันเป็นวงแหวนสี่เหลี่ยม

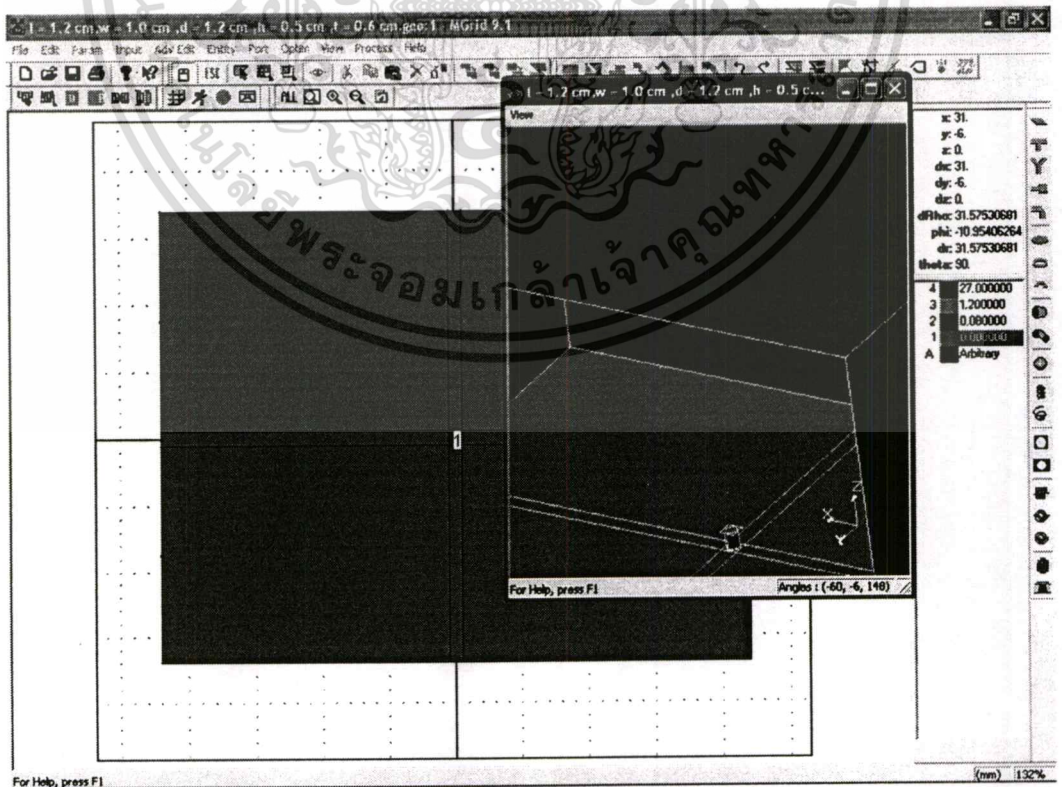
7) จากนั้นทำการสร้างตัวป้อนสัญญาณ โดยเลือกจากแถบด้านบนขวา ซึ่งเป็นรูปของการป้อนสัญญาณ เมื่อทำการเลือกรูปของการป้อนสัญญาณแล้ว จะมีกล่องข้อความขึ้นว่า Probe-Feed To Patch และมีพารามิเตอร์ที่ให้กำหนดค่าต่างๆขึ้นมา เช่น

- **Number of Segments for Circle** คือ จำนวนมุมที่ประกบกันเป็นตัวป้อนสัญญาณ
- **Division Angle** คือ ค่าของมุมแต่ละมุมที่ประกบกันเป็นตัวป้อนสัญญาณ
- **Start Z-coordinate** คือ จุดที่ตัวป้อนสัญญาณเริ่มต้น
- **End Z-coordinate** คือ จุดที่ตัวป้อนสัญญาณสิ้นสุดลง
- **Negative level** คือ จุดเริ่มต้นของระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบกับจุดป้อนสัญญาณ
- **Positive level** คือ จุดสิ้นสุดของระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบกับจุดป้อนสัญญาณ
- **Radius** คือ รัศมีของตัวป้อนสัญญาณ

จากนั้นพิมพ์พารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบลงไป ตัวป้อนสัญญาณก็จะปรากฏบนจุดกึ่งกลางบนฐานของวงแหวนสี่เหลี่ยมและจะมีพารามิเตอร์ตามค่าที่ออกแบบไป ดังรูปที่ 3.14 และ 3.15

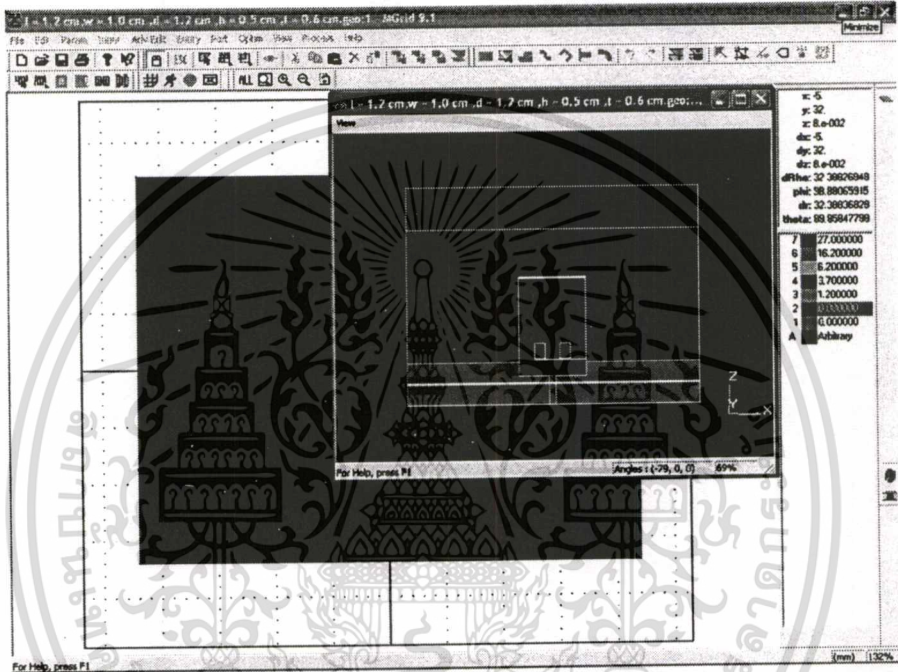


รูปที่ 3.14 กำหนดค่าตัวป้อนสัญญาณที่ต้องการจำลองค่าลงในกล่องข้อความ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาร่วมกัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 3.15 ตัวป้อนสัญญาณ**  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8) อันดับต่อมาเป็นการออกแบบรูปทรงโมโนโพลชนิดแผ่น ซึ่งเป็นการสร้างต่อจากตัวป้อนสัญญาณ โดยใช้วิธีการสร้างแบบเดียวกันกับแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่ใช้สร้างวงแหวน โดยสร้างเป็นรูปทรงแบบสามก้านที่ได้ออกแบบดังรูปที่ 3.16 จะเห็นว่ามีแถบสีต่างๆปรากฏที่มุมขวาของรูปที่ 3.16 ซึ่งแถบสีที่ปรากฏนี้เป็นการบ่งบอกถึงระยะต่างๆจากฐานของสายอากาศจนถึงจุดสูงสุดของสายอากาศในแนวแกน z จากนั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 3.16 การสร้างโมโน โพลชนิดแผ่นแบบสามก้านบนตัวป้อนสัญญาณ

9) สุดท้ายเป็นการจำลองค่าที่ได้ทำการสร้างมาตั้งแต่ต้น โดยทำการเลือกเมนูไปที่ Process และเลือกหัวข้อ Simulate ตัวกล่องข้อความ Simulation Setup จะปรากฏขึ้นมา เพื่อทำการกำหนดค่าต่างๆที่ต้องการเข้าไป โดยค่าที่ให้กำหนดลงไปดังรูปที่ 3.17 นี้ประกอบด้วย

**Highest Frequency (GHz)** คือ ความถี่สูงสุดที่ต้องการจำลองค่า

**Cell / Wavelength** คือ จำนวนเซลล์ต่อความยาวคลื่นที่ต้องการจำลองค่า

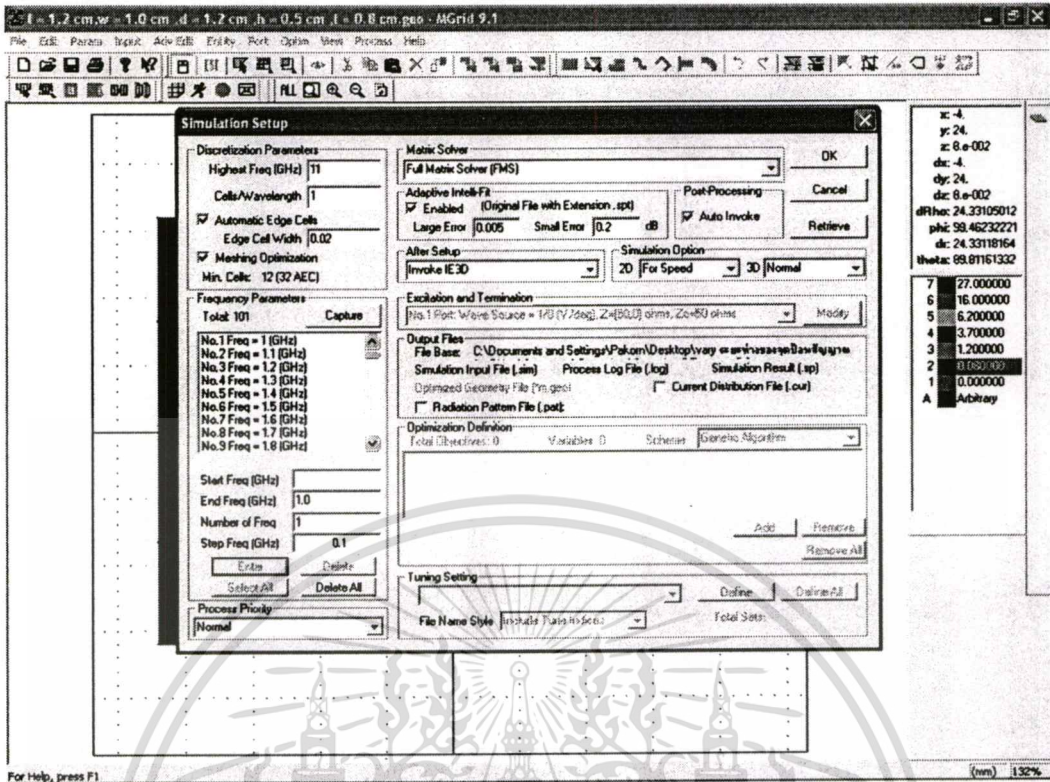
**Start Freq (GHz)** คือ ความถี่เริ่มต้นที่ต้องการจำลองค่า

**Number of Freq (GHz)** คือ จำนวนความถี่ที่ต้องการทำการจำลองค่า

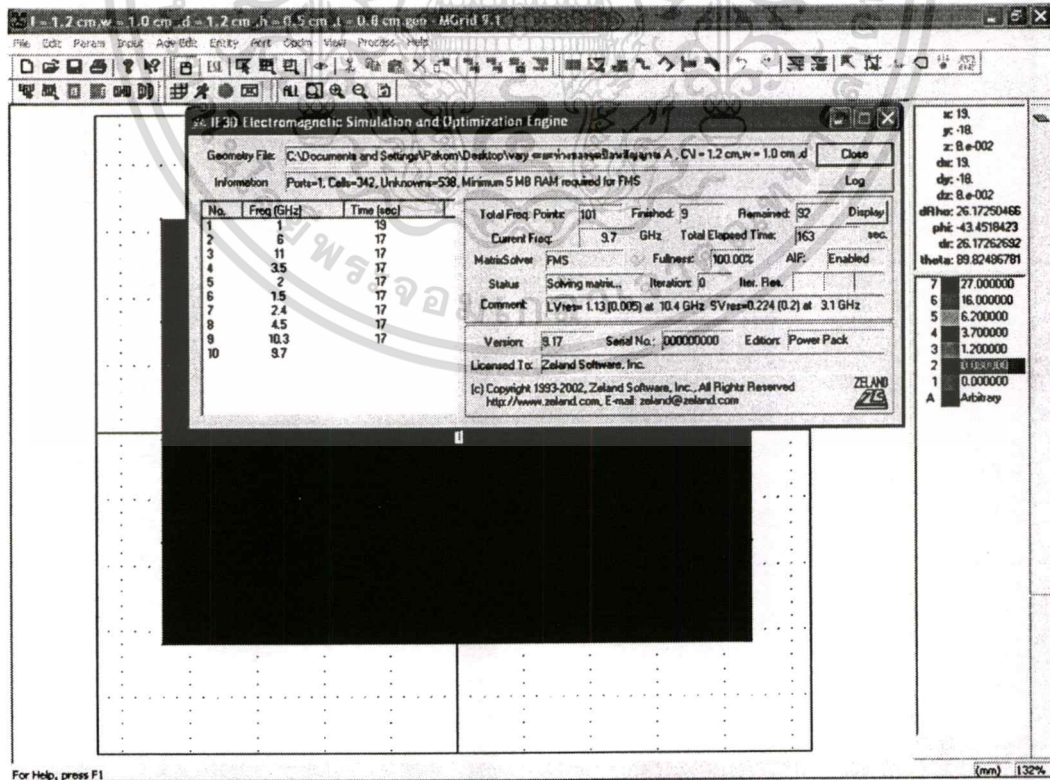
**Step Freq (GHz)** คือ ช่วงความถี่ที่ต้องการจำลองค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

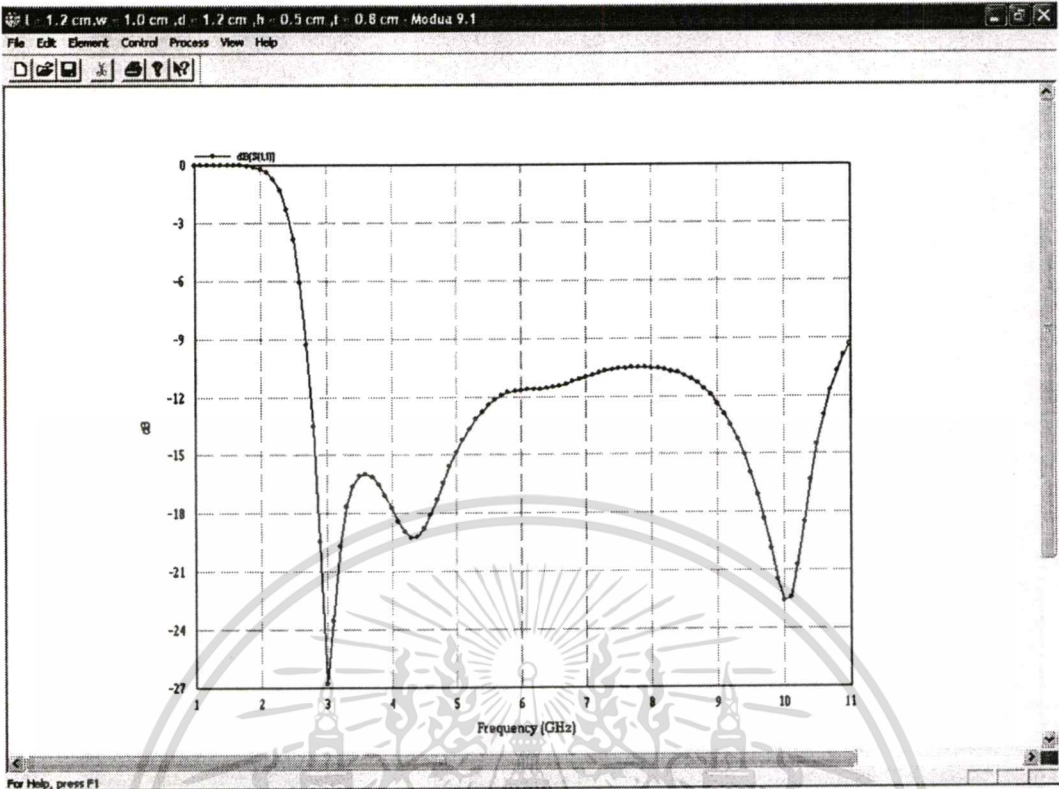




รูปที่ 3.18 กำหนดค่าที่ต้องการจำลองค่าช่วงกว้างความถี่ลงในกล่องข้อความ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.19 เริ่มต้นการจำลองค่าช่วงกว้างความถี่ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



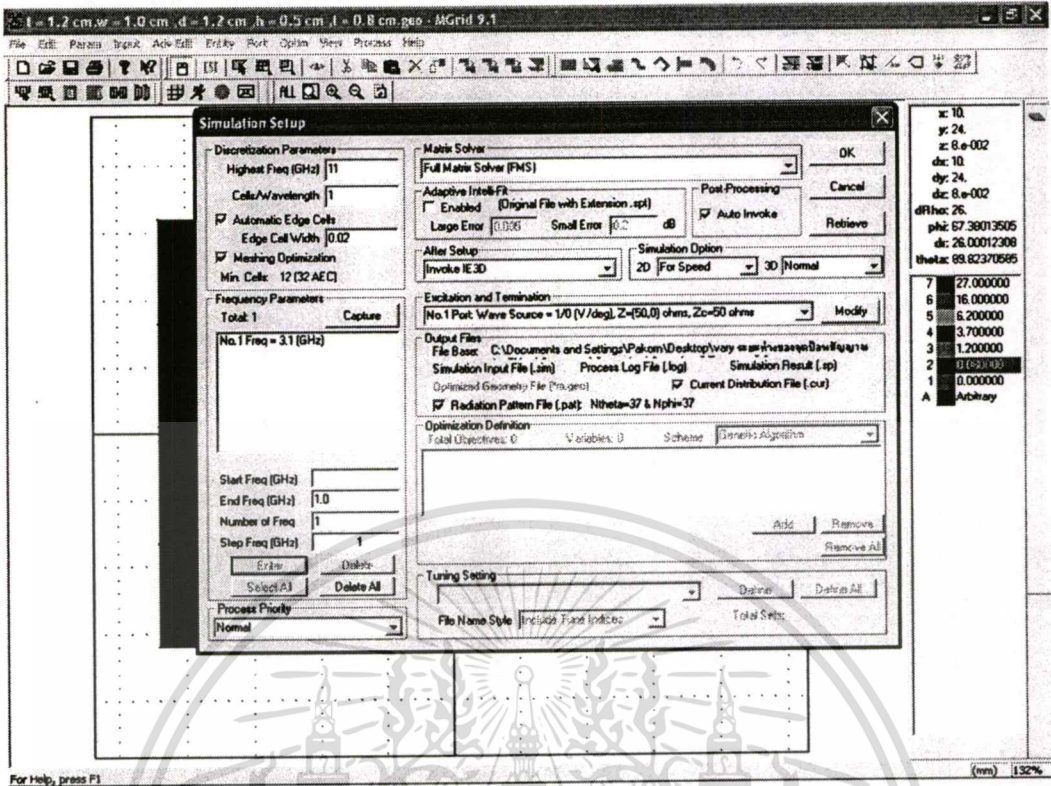
รูปที่ 3.20 ช่วงกว้างความถี่ซึ่งอยู่ในรูปของค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

x:	5
y:	24
z:	8.9-002
dx:	5
dy:	24
dz:	8.9-002
dtheta:	24.91530134
phi:	101.7682983
dir:	24.91543187
theta:	98.81302918
7	27.000000
6	16.000000
5	6.200000
4	3.700000
3	1.200000
2	0.000000
1	0.000000
A	Arbitrary

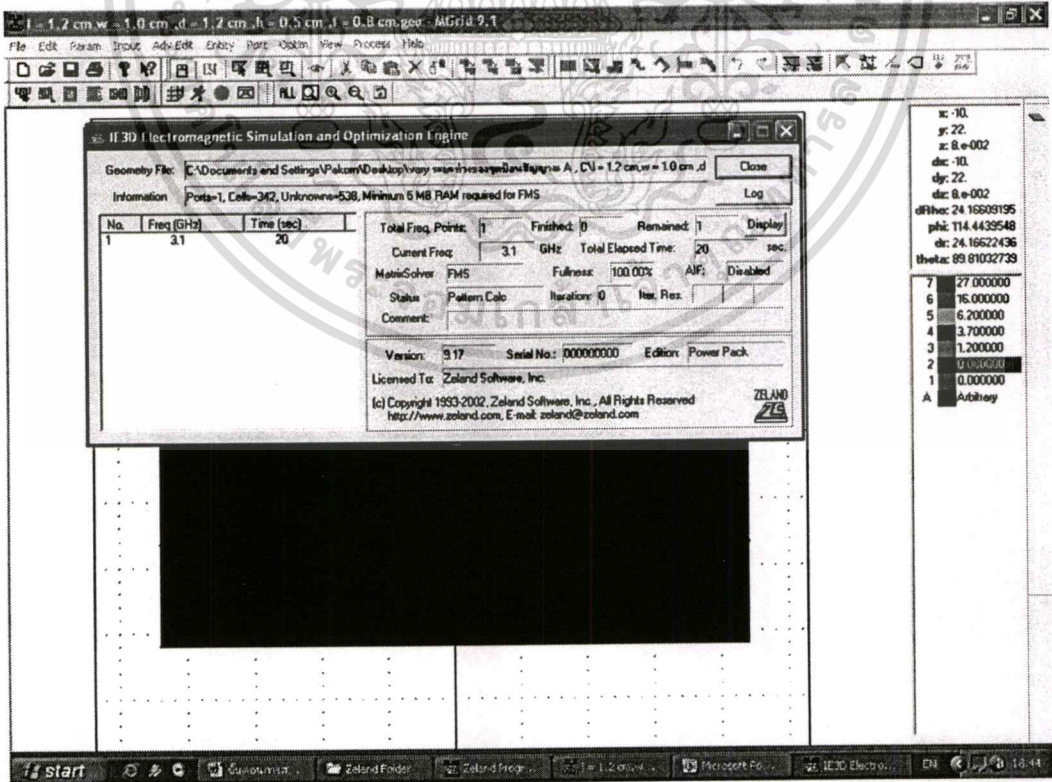
รูปที่ 3.21 กำหนดค่าที่ต้องการจำลองค่าการกระจายกระแสในกล่องข้อความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

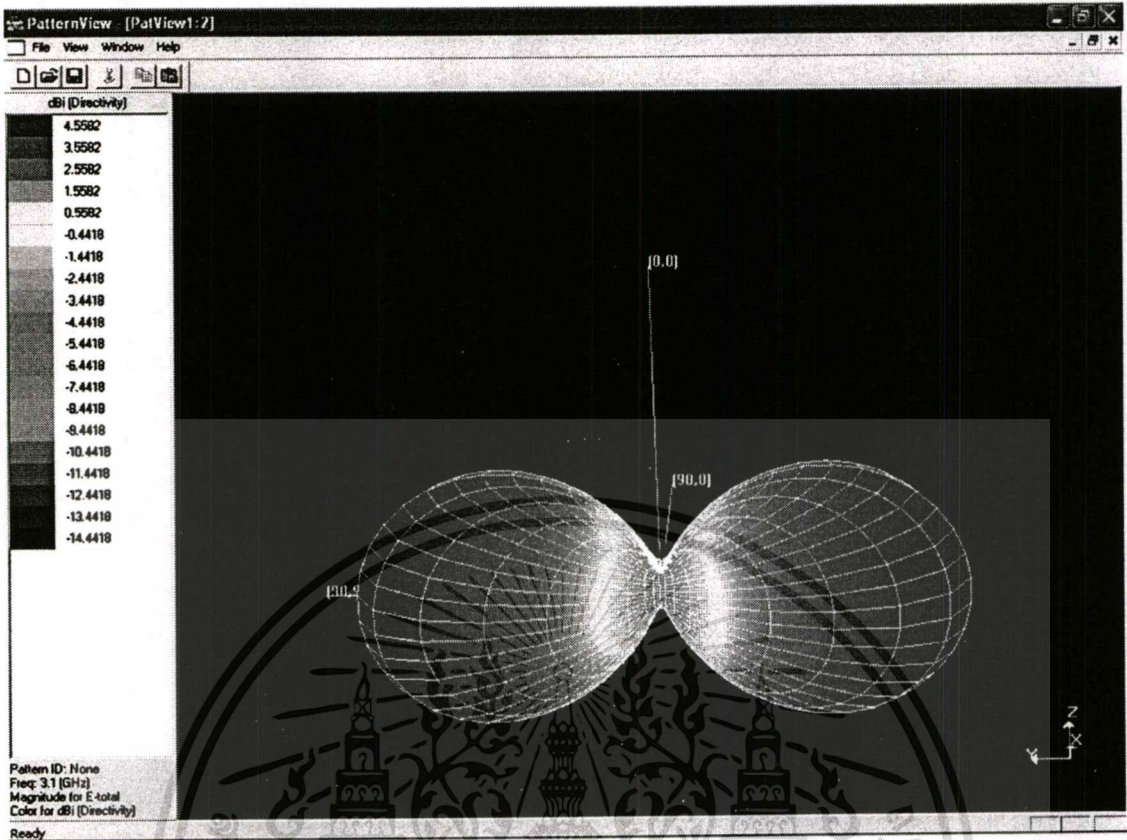




รูปที่ 3.24 กำหนดค่าที่ต้องการจำลองค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นลงในกล่องข้อความ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 3.25 เริ่มต้นการจำลองค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



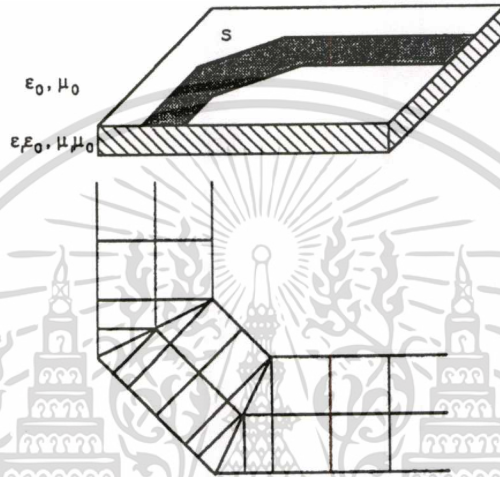
รูปที่ 3.26 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสามมิติ

#### 3.4 หลักการจำลองสายอากาศโดยใช้โปรแกรม IE3D

ในการจำลองสายอากาศโดยใช้โปรแกรม IE3D ในที่นี้จะใช้วิธี Mixed Potential Integral Equation (MPIE) สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างสายอากาศที่ไม่สม่ำเสมอ และรูปทรงของสายอากาศหลากหลายรูปทรง ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎี Roof-top basis functions บนรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมที่ถูกนำมาประกอบกันเป็นสายอากาศ ซึ่งทฤษฎีที่ใช้มีความแม่นยำ มีประสิทธิภาพ และตอบสนองกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ รวมทั้งผลลัพธ์เชิงตัวเลขของการวัดที่ได้มีความถูกต้อง ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยการนำไปใช้งานกับโครงสร้างของสายอากาศรูปทรงต่างๆ และวิธีนี้ไม่เพียงแต่มีประสิทธิภาพในการคำนวณเท่านั้น แต่ช่วยในการตีความหมาย สนามทางกายภาพกับรูปทรงทางกายภาพที่เหมือนกัน เพื่อที่จะให้รู้ว่าการเสาะงปฏิบัติตัวอย่างไรบนโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้ โดยเฉพาะกระแสที่ไหลใกล้กับขอบเขตรอยต่อ

และอัลกอริทึมนี้ได้พัฒนาและได้เรียกว่า P(pseudo)-mesh หรือ P-mesh ได้ถูกนำมาได้จากการประยุกต์ของวิธี โมเมนต์ คือ MPIE (Mixed Potential Integral Equation) เป็นโคเมนที่เกี่ยวกับระยะทางสำหรับการหาการกระจายกระแสและการกระจายประจุทั้งอยู่บนพื้นผิวของโครงสร้าง การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ฟังก์ชันกรีนไดโอดิกในการแก้ปัญหาในชุดสมการของ MPIE ซึ่งเป็นฟังก์ชันสเกลาร์ทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็ก โดยเป็นจำนวนหนึ่งในฟังก์ชันกรีนไดโอดิกของ  $\frac{1}{R'}$  ที่ซึ่ง  $R = |\vec{r} - \vec{r}'|$  ซึ่งเป็นระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดและจุดสังเกต โมเมนต์เชิงอินทิกรัลนี้มีส่วนร่วมอยู่ด้วยกับเทอมนี้ ซึ่งในความเป็นจริงการวิเคราะห์นี้จะวิเคราะห์ในรูปแบบปิดสำหรับโครงสร้างบนแผ่นระนาบ S ถูกแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 แผ่นตัวนำและโครงสร้างบนแผ่นระนาบ S

ที่ซึ่งการประยุกต์ใช้งานของวิธี โมเมนต์นี้คือ MPIE สามารถเขียนได้เป็นสมการดังข้างล่างนี้

$$\begin{aligned} MPIE &= \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \int_s \int_s [G_m(\vec{r}, \vec{r}') \vec{T}(\vec{r}') \cdot \vec{J}(\vec{r}') - \frac{1}{k_0^2} G_e(\vec{r}, \vec{r}') \nabla \cdot \vec{T}(\vec{r}') \nabla' \cdot \vec{J}(\vec{r}')] \\ &= \int_s ds \vec{E}_i(\vec{r}) \cdot \vec{T}(\vec{r}) \end{aligned} \quad (3.9)$$

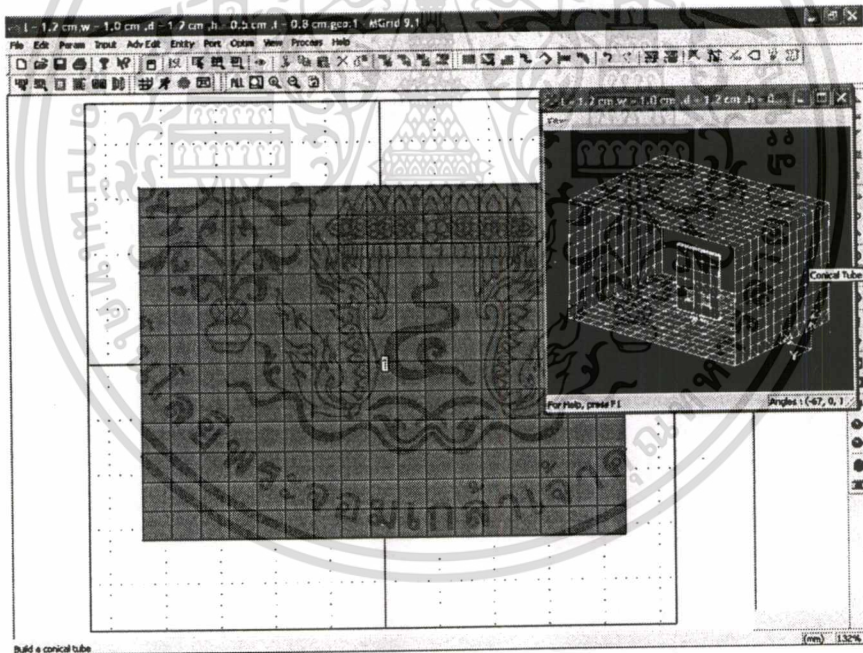
ที่ซึ่ง  $G_e$  และ  $G_m$  เป็นฟังก์ชันกรีนไดโอดิกชนิดไฟฟ้าและชนิดแม่เหล็ก  $\vec{J}(\vec{r}')$  และ  $\vec{T}(\vec{r}')$  เป็นฟังก์ชันการกระจายกระแสและฟังก์ชันทดสอบตามลำดับ ที่ซึ่งระบุนุ่มเงื่อนไขขอบเขตบนโครงสร้าง;  $k_0$  และ  $\mu_0$  เป็นเลขคลื่นและค่าความซึมซาบได้ในอากาศว่างตามลำดับ

$\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม; และ  $\vec{E}_i$  คือ ทบบนพื้นผิวของสนามไฟฟ้าที่ถูกกระทบบนโครงสร้างเมื่อจุดแหล่งกำเนิดเป็น  $(x', y', z')$  และจุดสนามคือ  $(x, y, z)$  อยู่ในระนาบเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในความเป็นจริงโดยธรรมชาติการแบ่งภายในให้เป็นเซลล์แบบสี่เหลี่ยม โดยเซลล์ของขนาดมีค่าที่เหมาะสม คือ ประมาณ 20 เซลล์ ต่อ ความยาวคลื่น จึงไม่สามารถที่จะจัดให้เหมาะสมกับขอบเขตของโครงสร้าง ในรูปแบบอื่นๆ แต่โดยความช่วยเหลือของทฤษฎี Roof-top basis function สำหรับเซลล์ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมถูกนำเสนอเมื่อไม่นานมานี้ การกระจายกระแสในเซลล์ที่กำหนดไว้ถูกหาค่าในเทอมของกระแสของขั้วที่ตั้งฉากกัน เงื่อนไขขอบเขตนั้นที่มุมของโครงสร้างแบบไมโครสตรียาอกที่จะใช้ในกรณีนี้โดยเฉพาะเมื่อมุมที่ไม่ได้เป็นมุมฉากที่ประกบกัน

อัลกอริทึมแบบใหม่นี้จึงถูกนำเสนอสำหรับการรวมกันของเซลล์สี่เหลี่ยมและเซลล์สามเหลี่ยม ในที่นี้จะคำนวณโครงสร้างสายอากาศในขณะที่ยังคงรูปแบบที่สามารถโค้งได้ ผลของการรวมเซลล์สี่เหลี่ยมและเซลล์สามเหลี่ยม เป็นการวิเคราะห์ในส่วนจำกัด ในการหาค่าของสมการเชิงอินทิกรัลหรือสมการเชิงอนุพันธ์ การพิจารณาแบบพิเศษนี้สามารถนำมาหาค่าของการกระจายเวกเตอร์กระแสบนขอบเขตเซลล์ที่ต่อเนื่องกันบนโครงสร้างของสายอากาศ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ตัวอย่างการแบ่งเซลล์ 3 เซลล์ ต่อ ความยาวคลื่น ที่ความถี่ 3.1 GHz

ในรูปที่ 3.28 เป็นการจำลองค่าสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้าน เมื่อได้กำหนดค่าให้สายอากาศมีการแบ่งเซลล์ 3 เซลล์ต่อ ความยาวคลื่น ทั้งแบบสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม เมื่อเริ่มทำการจำลองค่า โปรแกรม IE3D จะกำหนดการแบ่งเซลล์โดยอัตโนมัติโดยเริ่มการแบ่งเซลล์เป็นแบบสี่เหลี่ยมก่อน จากนั้นในพื้นที่ที่ยากต่อการแบ่งโปรแกรมจะมีการแบ่งเซลล์แบบสามเหลี่ยมเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของสายอากาศ ซึ่งเซลล์ทั้งหมดที่ทำไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแบ่งออกมาจะประกอบด้วยเซลล์เล็กๆทั้งสิ้นสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมประกอบกันจากเซลล์แรกจนถึงเซลล์สุดท้าย

ตัวอย่างในกรณีที่แบ่งเซลล์เป็น 3 เซลล์ต่อความยาวคลื่น สายอากาศจะถูกแบ่งเซลล์ย่อยๆ ออกเป็น 403 เซลล์ เป็นเซลล์สี่เหลี่ยมจำนวน 217 เซลล์ และเป็นเซลล์สามเหลี่ยมจำนวน 186 เซลล์ ซึ่งเซลล์สี่เหลี่ยมจะประกอบด้วยโหนดจำนวน 4 โหนดและเซลล์สามเหลี่ยมจะประกอบด้วยโหนดจำนวน 3 โหนดตามลำดับ ดังรูปที่ 3.29 - 3.32

No.	Sel	Nv	V1	X	Y	Z	ReJx	ImJx	ReJy	ImJy	ReJz	ImJz	V2
14	1	0	4	1	-1.93E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-6.39E+00	-2.09E+01	9.70E-15	2.93E-14	0.00E+00	0.00E+00
15	2	0	4	1	-1.66E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-2.14E-01	-7.80E-01	3.68E-03	4.99E-03	0.00E+00	0.00E+00
16	3	0	4	1	-1.66E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-6.15E+00	-2.00E+01	6.15E-15	2.67E-14	0.00E+00	0.00E+00
17	4	0	4	1	-1.39E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-1.62E-01	-7.11E-01	6.87E-03	6.53E-03	0.00E+00	0.00E+00
18	5	0	4	1	-1.39E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-4.07E+00	-1.86E+01	4.60E-15	2.43E-14	0.00E+00	0.00E+00
19	6	0	4	1	-1.13E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-1.18E-01	-6.15E-01	6.83E-03	2.62E-03	0.00E+00	0.00E+00
20	7	0	4	1	-1.13E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-2.99E+00	-1.62E+01	-7.37E-16	2.07E-14	0.00E+00	0.00E+00
21	8	0	4	1	-8.56E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-8.18E-02	-4.94E-01	8.24E-03	1.14E-03	0.00E+00	0.00E+00
22	9	0	4	1	-8.56E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-1.99E+00	-1.30E+01	1.47E-16	1.73E-14	0.00E+00	0.00E+00
23	10	0	4	1	-5.88E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-4.94E-02	-3.52E-01	1.09E-02	-1.85E-04	0.00E+00	0.00E+00
24	11	0	4	1	-5.88E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-1.27E+00	-9.31E+00	3.09E-15	1.22E-14	0.00E+00	0.00E+00
25	12	0	4	1	-3.19E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-2.29E-02	-1.96E-01	1.24E-02	-1.07E-03	0.00E+00	0.00E+00
26	13	0	4	1	-3.19E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-6.97E-01	-5.17E+00	-3.20E-15	7.37E-15	0.00E+00	0.00E+00
27	14	0	4	1	-5.00E-01	-1.60E+01	0.00E+00	-4.49E-03	-3.19E-02	1.21E-02	-1.56E-03	0.00E+00	0.00E+00
28	15	0	4	1	-1.93E+01	-1.34E+01	0.00E+00	-1.43E-01	-4.84E-01	1.11E-02	2.58E-02	0.00E+00	0.00E+00
29	16	0	4	1	-1.66E+01	-1.34E+01	0.00E+00	-1.03E-01	-4.41E-01	1.90E-02	1.60E-02	0.00E+00	0.00E+00
30	17	0	4	1	-1.39E+01	-1.34E+01	0.00E+00	-7.37E-02	-3.96E-01	3.22E-02	7.15E-03	0.00E+00	0.00E+00
31	18	0	4	1	-1.13E+01	-1.34E+01	0.00E+00	-4.85E-02	-3.40E-01	4.48E-02	-3.88E-04	0.00E+00	0.00E+00
32	19	0	4	1	-8.56E+00	-1.34E+01	0.00E+00	-2.46E-02	-2.71E-01	5.45E-02	-7.47E-03	0.00E+00	0.00E+00
33	20	0	4	1	-8.56E+00	-1.34E+01	0.00E+00	-1.03E-02	-1.93E-01	6.38E-02	-1.17E-02	0.00E+00	0.00E+00
34	21	0	4	1	-3.19E+00	-1.34E+01	0.00E+00	-3.93E-03	-1.07E-01	7.20E-02	-1.42E-02	0.00E+00	0.00E+00
35	22	0	4	1	-1.93E+01	-1.09E+01	0.00E+00	-1.04E-01	-4.55E-01	-1.48E-03	7.60E-03	0.00E+00	0.00E+00

รูปที่ 3.29 โหนดที่ 1 ของจำนวนเซลล์ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Microsoft Excel - 3.1 GHz 10 cells per wavelength

File Edit View Insert Format Tools Data Window Help Adobe PDF

Type a question for help

100%

Arial

A11038 -5.48

	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB
9																
10																
11																
12																
13	ImJz	V2 X	Y	Z	ReJx	ImJx	ReJy	ImJy	ReJz	ImJz	V3 X	Y	Z	ReJx		
14	0.00E+00	2	-1.66E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-5.15E+00	-2.00E+01	-5.56E-15	-2.47E-14	0.00E+00	0.00E+00	3	-1.66E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-5.15E+00
15	0.00E+00	2	-1.66E+01	-1.34E+01	0.00E+00	-2.14E-01	-7.80E-01	1.11E-02	2.58E-02	0.00E+00	0.00E+00	3	-1.93E+01	-1.34E+01	0.00E+00	-2.65E-01
16	0.00E+00	2	-1.39E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-4.07E+00	-1.86E+01	-6.71E-15	-2.61E-14	0.00E+00	0.00E+00	3	-1.39E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-4.07E+00
17	0.00E+00	2	-1.39E+01	-1.34E+01	0.00E+00	-1.62E-01	-7.11E-01	1.90E-02	1.50E-02	0.00E+00	0.00E+00	3	-1.66E+01	-1.34E+01	0.00E+00	-2.14E-01
18	0.00E+00	2	-1.13E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-2.99E+00	-1.62E+01	3.95E-15	-2.14E-14	0.00E+00	0.00E+00	3	-1.13E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-2.99E+00
19	0.00E+00	2	-1.13E+01	-1.34E+01	0.00E+00	-1.18E-01	-6.15E-01	3.22E-02	7.15E-03	0.00E+00	0.00E+00	3	-1.39E+01	-1.34E+01	0.00E+00	-1.62E-01
20	0.00E+00	2	-8.56E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-1.99E+00	-1.30E+01	-7.31E-15	-1.79E-14	0.00E+00	0.00E+00	3	-8.56E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-1.99E+00
21	0.00E+00	2	-8.56E+00	-1.34E+01	0.00E+00	-8.18E-02	-4.94E-01	4.48E-02	-3.88E-04	0.00E+00	0.00E+00	3	-1.13E+01	-1.34E+01	0.00E+00	-1.18E-01
22	0.00E+00	2	-5.88E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-1.27E+00	-9.31E+00	-5.40E-15	-1.22E-14	0.00E+00	0.00E+00	3	-5.88E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-1.27E+00
23	0.00E+00	2	-5.88E+00	-1.34E+01	0.00E+00	-4.94E-02	-3.62E-01	5.45E-02	-7.47E-03	0.00E+00	0.00E+00	3	-8.56E+00	-1.34E+01	0.00E+00	-8.18E-02
24	0.00E+00	2	-3.19E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-6.97E-01	-5.17E+00	4.92E-16	-6.96E-15	0.00E+00	0.00E+00	3	-3.19E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-6.97E-01
25	0.00E+00	2	-3.19E+00	-1.34E+01	0.00E+00	-2.29E-02	-1.96E-01	6.38E-02	-1.17E-02	0.00E+00	0.00E+00	3	-5.88E+00	-1.34E+01	0.00E+00	-4.94E-02
26	0.00E+00	2	-5.00E-01	-1.60E+01	0.00E+00	-5.39E-02	-8.19E-01	-2.82E-15	-7.29E-16	0.00E+00	0.00E+00	3	-5.00E-01	-1.60E+01	0.00E+00	-5.39E-02
27	0.00E+00	2	-5.00E-01	-1.34E+01	0.00E+00	-4.49E-03	-3.19E-02	7.20E-02	-1.42E-02	0.00E+00	0.00E+00	3	-3.19E+00	-1.34E+01	0.00E+00	-2.29E-02
28	0.00E+00	2	-1.66E+01	-1.34E+01	0.00E+00	-1.03E-01	-4.41E-01	1.11E-02	2.58E-02	0.00E+00	0.00E+00	3	-1.66E+01	-1.08E+01	0.00E+00	-1.03E-01
29	0.00E+00	2	-1.39E+01	-1.34E+01	0.00E+00	-7.37E-02	-3.96E-01	1.90E-02	1.50E-02	0.00E+00	0.00E+00	3	-1.39E+01	-1.08E+01	0.00E+00	-7.37E-02
30	0.00E+00	2	-1.13E+01	-1.34E+01	0.00E+00	-4.85E-02	-3.40E-01	3.22E-02	7.15E-03	0.00E+00	0.00E+00	3	-1.13E+01	-1.08E+01	0.00E+00	-4.85E-02
31	0.00E+00	2	-8.56E+00	-1.34E+01	0.00E+00	-2.46E-02	-2.71E-01	4.48E-02	-3.88E-04	0.00E+00	0.00E+00	3	-8.56E+00	-1.08E+01	0.00E+00	-2.46E-02
32	0.00E+00	2	-5.88E+00	-1.34E+01	0.00E+00	-1.03E-02	-1.93E-01	5.45E-02	-7.47E-03	0.00E+00	0.00E+00	3	-5.88E+00	-1.08E+01	0.00E+00	-1.03E-02
33	0.00E+00	2	-3.19E+00	-1.34E+01	0.00E+00	-3.93E-03	-1.07E-01	6.38E-02	-1.17E-02	0.00E+00	0.00E+00	3	-3.19E+00	-1.08E+01	0.00E+00	-3.93E-03
34	0.00E+00	2	-5.00E-01	-1.34E+01	0.00E+00	-5.65E-04	-1.71E-02	7.20E-02	-1.42E-02	0.00E+00	0.00E+00	3	-5.00E-01	-1.08E+01	0.00E+00	-5.65E-04
35	0.00E+00	2	-1.66E+01	-1.08E+01	0.00E+00	-8.14E-02	-4.29E-01	-1.48E-03	7.60E-03	0.00E+00	0.00E+00	3	-1.66E+01	-8.25E+00	0.00E+00	-8.14E-02
36	0.00E+00	2	-1.39E+01	-1.08E+01	0.00E+00	-5.39E-02	-3.87E-01	2.04E-02	8.13E-03	0.00E+00	0.00E+00	3	-1.39E+01	-8.25E+00	0.00E+00	-5.39E-02
37	0.00E+00	2	-1.13E+01	-1.08E+01	0.00E+00	-2.35E-02	-3.33E-01	4.06E-02	1.15E-03	0.00E+00	0.00E+00	3	-1.13E+01	-8.25E+00	0.00E+00	-2.35E-02
38	0.00E+00	2	-8.56E+00	-1.08E+01	0.00E+00	-2.58E-03	-2.68E-01	5.71E-02	-7.76E-03	0.00E+00	0.00E+00	3	-8.56E+00	-8.25E+00	0.00E+00	-2.58E-03
39	0.00E+00	2	-5.88E+00	-1.08E+01	0.00E+00	-1.00E-02	-1.90E-01	7.80E-02	-1.54E-02	0.00E+00	0.00E+00	3	-5.88E+00	-8.25E+00	0.00E+00	-1.00E-02
40	0.00E+00	2	-3.19E+00	-1.08E+01	0.00E+00	-1.13E-02	-1.05E-01	9.64E-02	-2.19E-02	0.00E+00	0.00E+00	3	-3.19E+00	-8.25E+00	0.00E+00	-1.13E-02
41	0.00E+00	2	-5.00E-01	-1.08E+01	0.00E+00	-9.39E-04	-1.72E-02	1.07E-01	-2.47E-02	0.00E+00	0.00E+00	3	-5.00E-01	-8.25E+00	0.00E+00	-9.39E-04
42	0.00E+00	2	-1.66E+01	-8.25E+00	0.00E+00	-5.42E-02	-4.08E-01	5.51E-04	2.79E-03	0.00E+00	0.00E+00	3	-1.66E+01	-5.67E+00	0.00E+00	-5.42E-02
43	0.00E+00	2	-1.39E+01	-8.25E+00	0.00E+00	-2.50E-02	-3.72E-01	2.11E-02	1.24E-03	0.00E+00	0.00E+00	3	-1.39E+01	-5.67E+00	0.00E+00	-2.50E-02

Ready

Sum=1.11E+02

รูปที่ 2.30 โหนดที่ 2 ของจำนวนเซลล์ทั้งหมด

Microsoft Excel - 3.1 GHz 10 cells per wavelength

File Edit View Insert Format Tools Data Window Help Adobe PDF

Type a question for help

100%

Arial

A11038 -5.48

	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL
9																
10																
11																
12																
13	ImJz	V3 X	Y	Z	ReJx	ImJx	ReJy	ImJy	ReJz	ImJz	V4 X	Y	Z	ReJx		
14	0.00E+00	3	-1.66E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-5.15E+00	-2.00E+01	3.86E-03	4.99E-03	0.00E+00	0.00E+00	4	-1.93E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-6.39E+00
15	0.00E+00	3	-1.93E+01	-1.34E+01	0.00E+00	-2.65E-01	-8.13E-01	1.11E-02	2.58E-02	0.00E+00	0.00E+00	4	-1.93E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-2.65E-01
16	0.00E+00	3	-1.39E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-4.07E+00	-1.86E+01	5.87E-03	6.53E-03	0.00E+00	0.00E+00	4	-1.66E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-5.15E+00
17	0.00E+00	3	-1.66E+01	-1.34E+01	0.00E+00	-2.14E-01	-7.80E-01	1.90E-02	1.50E-02	0.00E+00	0.00E+00	4	-1.66E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-2.14E-01
18	0.00E+00	3	-1.13E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-2.99E+00	-1.62E+01	6.83E-03	2.62E-03	0.00E+00	0.00E+00	4	-1.39E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-4.07E+00
19	0.00E+00	3	-1.39E+01	-1.34E+01	0.00E+00	-1.62E-01	-7.11E-01	3.22E-02	7.15E-03	0.00E+00	0.00E+00	4	-1.39E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-1.62E-01
20	0.00E+00	3	-8.56E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-1.99E+00	-1.30E+01	8.24E-03	1.14E-03	0.00E+00	0.00E+00	4	-1.13E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-2.99E+00
21	0.00E+00	3	-1.13E+01	-1.34E+01	0.00E+00	-1.18E-01	-6.15E-01	4.48E-02	3.88E-04	0.00E+00	0.00E+00	4	-1.13E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-1.18E-01
22	0.00E+00	3	-5.88E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-1.27E+00	-9.31E+00	1.09E-02	-1.85E-04	0.00E+00	0.00E+00	4	-8.56E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-1.99E+00
23	0.00E+00	3	-5.88E+00	-1.34E+01	0.00E+00	-4.94E-02	-3.62E-01	5.45E-02	-7.47E-03	0.00E+00	0.00E+00	4	-8.56E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-8.18E-02
24	0.00E+00	3	-3.19E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-6.97E-01	-5.17E+00	1.24E-02	-1.07E-03	0.00E+00	0.00E+00	4	-5.88E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-1.27E+00
25	0.00E+00	3	-5.88E+00	-1.34E+01	0.00E+00	-4.94E-02	-3.62E-01	5.45E-02	-1.17E-02	0.00E+00	0.00E+00	4	-5.88E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-4.94E-02
26	0.00E+00	3	-5.00E-01	-1.60E+01	0.00E+00	-5.39E-02	-8.19E-01	1.21E-02	-1.56E-03	0.00E+00	0.00E+00	4	-3.19E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-6.97E-01
27	0.00E+00	3	-3.19E+00	-1.34E+01	0.00E+00	-2.29E-02	-1.96E-01	7.20E-02	-1.42E-02	0.00E+00	0.00E+00	4	-3.19E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-2.29E-02
28	0.00E+00	3	-1.66E+01	-1.08E+01	0.00E+00	-1.03E-01	-4.41E-01	-1.48E-03	7.60E-03	0.00E+00	0.00E+00	4	-1.66E+01	-1.08E+01	0.00E+00	-1.43E-01
29	0.00E+00	3	-1.39E+01	-1.08E+01	0.00E+00	-7.37E-02	-3.96E-01	2.04E-02	8.13E-03	0.00E+00	0.00E+00	4	-1.66E+01	-1.08E+01	0.00E+00	-1.03E-01
30	0.00E+00	3	-1.13E+01	-1.08E+01	0.00E+00	-4.85E-02	-3.40E-01	4.06E-02	1.15E-03	0.00E+00	0.00E+00	4	-1.39E+01	-1.08E+01	0.00E+00	-7.37E-02
31	0.00E+00	3	-8.56E+00	-1.08E+01	0.00E+00	-2.46E-02	-2.71E-01	5.71E-02	-7.76E-03	0.00E+00	0.00E+00	4	-1.13E+01	-1.08E+01	0.00E+00	-4.85E-02
32	0.00E+00	3	-5.88E+00	-1.08E+01	0.00E+00	-1.03E-02	-1.93E-01	7.80E-02	-1.54E-02	0.00E+00	0.00E+00	4	-5.88E+00	-1.08E+01	0.00E+00	-1.03E-02
33	0.00E+00	3	-3.19E+00	-1.08E+01	0.00E+00	-3.93E-03	-1.07E-01	9.64E-02	-2.19E-02	0.00E+00	0.00E+00	4	-3.19E+00	-1.08E+01	0.00E+00	-3.93E-03
34	0.00E+00	3	-5.00E-01	-1.08E+01	0.00E+00	-5.65E-04	-1.71E-02	1.07E-01	-2.47E-02	0.00E+00	0.00E+00	4	-5.00E-01	-1.08E+01	0.00E+00	-5.65E-04
35	0.00E+00	3	-1.66E+01	-8.25E+00	0.00E+00	-8.14E-02	-4.29E-01	5.51E-04	2.79E-03	0.00E+00	0.00E+00	4	-1.93E+01	-8.25E+00	0.00E+00	-1.08E-01
36	0.00E+00	3	-1.39E+01	-8.25E+00	0.00E+00	-5.39E-02	-3.87E-01	2.11E-02	1.24E-							

Microsoft Excel - 3.1 GHz 10 cells per wavelength

File Edit View Insert Format Tools Data Window Help Addge PDF Type a question for help

100% Arial

AI1039 5.48

	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT
9															
10															
11															NODE4
12															
13	ReJz	ImJz	V4 X	Y	Z	ReJx	ImJx	ReJy	ImJy	ReJz	ImJz	Jmr	Jmi	SQRT	
14	0.00E+00	0.00E+00	4.193E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-6.39E+00	-2.09E+01	3.66E-03	4.99E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.265177	20.86932	2	
15	0.00E+00	0.00E+00	4.193E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-2.65E-01	-8.13E-01	3.66E-03	4.99E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.265177	0.812798	0	
16	0.00E+00	0.00E+00	4.166E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-5.15E+00	-2.00E+01	5.87E-03	6.53E-03	0.00E+00	0.00E+00	5.153463	19.96529	2	
17	0.00E+00	0.00E+00	4.166E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-2.14E-01	-7.80E-01	5.87E-03	6.53E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.21409	0.780147	0	
18	0.00E+00	0.00E+00	4.139E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-4.07E+00	-1.66E+01	6.83E-03	2.62E-03	0.00E+00	0.00E+00	4.06949	18.62473	15	
19	0.00E+00	0.00E+00	4.139E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-1.62E-01	-7.11E-01	6.83E-03	2.62E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.162472	0.710552	0	
20	0.00E+00	0.00E+00	4.113E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-2.99E+00	-1.62E+01	8.24E-03	1.14E-03	0.00E+00	0.00E+00	2.986548	16.18173	16	
21	0.00E+00	0.00E+00	4.113E+01	-1.60E+01	0.00E+00	-1.18E-01	-6.15E-01	8.24E-03	1.14E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.118598	0.615016	0	
22	0.00E+00	0.00E+00	4.856E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-1.99E+00	-1.30E+01	1.09E-02	-1.85E-04	0.00E+00	0.00E+00	1.987939	13.03752	13	
23	0.00E+00	0.00E+00	4.856E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-8.18E-02	-4.94E-01	1.09E-02	-1.85E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.08254	0.494217	0	
24	0.00E+00	0.00E+00	4.588E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-1.27E+00	-9.31E+00	1.24E-02	-1.07E-03	0.00E+00	0.00E+00	1.267789	9.309341	9	
25	0.00E+00	0.00E+00	4.588E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-4.94E-02	-3.52E-01	1.24E-02	-1.07E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.050938	0.362197	0	
26	0.00E+00	0.00E+00	4.319E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-6.97E-01	-5.17E+00	1.21E-02	-1.56E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.698832	5.171548	5	
27	0.00E+00	0.00E+00	4.319E+00	-1.60E+01	0.00E+00	-2.29E-02	-1.96E-01	1.21E-02	-1.56E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.025935	0.19576	0	
28	0.00E+00	0.00E+00	4.193E+01	-1.08E+01	0.00E+00	-1.43E-01	-4.84E-01	-1.48E-03	7.60E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.142998	0.48454	0	
29	0.00E+00	0.00E+00	4.166E+01	-1.08E+01	0.00E+00	-1.03E-01	-4.41E-01	2.04E-02	8.13E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.105339	0.411398	0	
30	0.00E+00	0.00E+00	4.139E+01	-1.08E+01	0.00E+00	-7.37E-02	-3.96E-01	4.06E-02	1.15E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.084155	0.396244	0	
31	0.00E+00	0.00E+00	4.113E+01	-1.08E+01	0.00E+00	-4.86E-02	-3.40E-01	5.71E-02	-7.76E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.07493	0.339731	0	
32	0.00E+00	0.00E+00	4.856E+00	-1.08E+01	0.00E+00	-2.46E-02	-2.71E-01	7.80E-02	-1.54E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.081738	0.27154	0	
33	0.00E+00	0.00E+00	4.588E+00	-1.08E+01	0.00E+00	-1.03E-02	-1.93E-01	9.64E-02	-2.19E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.096974	0.194545	0	
34	0.00E+00	0.00E+00	4.319E+00	-1.08E+01	0.00E+00	-3.93E-03	-1.07E-01	1.07E-01	-2.47E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.107241	0.109743	0	
35	0.00E+00	0.00E+00	4.193E+01	-8.25E+00	0.00E+00	-1.04E-01	-4.55E-01	5.51E-04	2.79E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.103629	0.454931	0	
36	0.00E+00	0.00E+00	4.166E+01	-8.25E+00	0.00E+00	-8.14E-02	-4.29E-01	2.11E-02	1.24E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.084146	0.426529	0	
37	0.00E+00	0.00E+00	4.139E+01	-8.25E+00	0.00E+00	-5.39E-02	-3.87E-01	4.13E-02	-5.38E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.067955	0.386627	0	
38	0.00E+00	0.00E+00	4.113E+01	-8.25E+00	0.00E+00	-2.36E-02	-3.33E-01	6.96E-02	-1.50E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.073639	0.333209	0	
39	0.00E+00	0.00E+00	4.856E+00	-8.25E+00	0.00E+00	-2.58E-03	-2.88E-01	1.01E-01	-2.58E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.101066	0.268602	0	
40	0.00E+00	0.00E+00	4.588E+00	-8.25E+00	0.00E+00	1.00E-02	-1.90E-01	1.32E-01	-3.29E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.132498	0.192615	0	
41	0.00E+00	0.00E+00	4.319E+00	-8.25E+00	0.00E+00	1.13E-02	-1.05E-01	1.55E-01	-3.45E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.15562	0.11016	0	
42	0.00E+00	0.00E+00	4.193E+01	-5.67E+00	0.00E+00	-7.66E-02	-4.30E-01	5.39E-04	2.07E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.076612	0.429583	0	
43	0.00E+00	0.00E+00	4.166E+01	-5.67E+00	0.00E+00	-5.42E-02	-4.08E-01	1.79E-02	-2.62E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.057058	0.407858	0	

Chart1 (NODE2) (NODE3) (Chart1) Sheet1 Sheet2 Sheet3

Redy Sum=L.11E+02

รูปที่ 2.32 โหนดที่ 4 ของจำนวนเซลล์ทั้งหมด

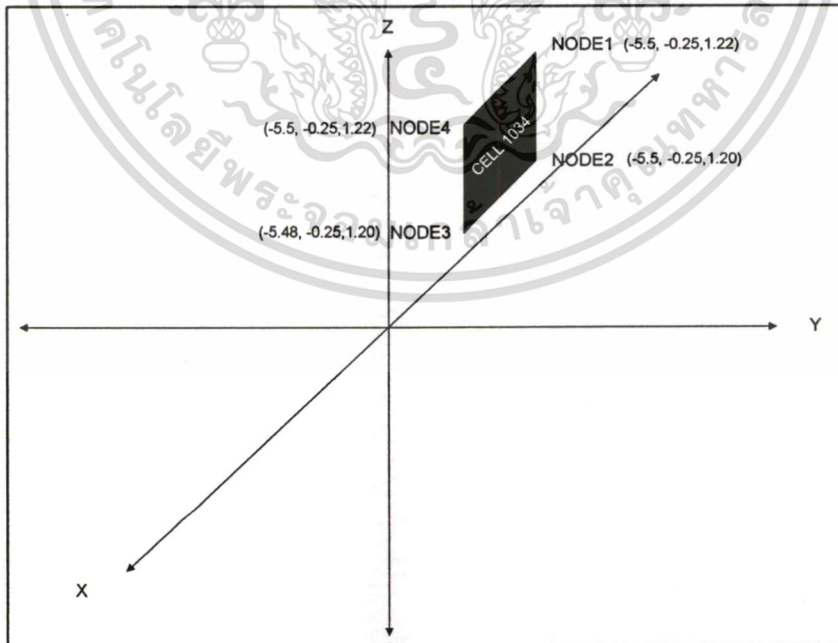
ในเซลล์ที่เหลี่ยมจำนวนโหนดทั้งสี่จะเป็นตัวกำหนดพิกัดของเซลล์แต่ละเซลล์กรณีที่เป็นเซลล์ที่เหลี่ยมจะมีพิกัด 4 พิกัดรวมกันเป็นเซลล์ที่เหลี่ยม ในทำนองเดียวกันเซลล์สามเหลี่ยมจะมีจำนวนโหนดทั้ง 3 โหนดและมีพิกัด 3 พิกัดรวมกันเป็นเซลล์สามเหลี่ยม องค์ประกอบทั้งสองชนิดนี้จะประกอบกัน ไปจนครบ 403 เซลล์ดังรูปที่ 3.33

ซึ่งในแต่ละโหนดทั้ง 4 และ 3 โหนดจะมีกระแสไหลในทิศทางต่างๆกัน ตามทิศทาง x, y และ z ขึ้นอยู่กับการจัดวางตำแหน่งของเซลล์แต่ละเซลล์ที่ถูกกำหนดขึ้นมาตามพิกัดของเซลล์แต่ละเซลล์นั้น จากนั้นแต่ละเซลล์จะทำการคำนวณหาขนาดของกระแสลัพท์ที่ไหลบนเซลล์นั้นออกมาเป็นขนาดของกระแสแต่ละเซลล์นั้น และในโปรแกรม IE3D จะแสดงขนาดและทิศทางการไหลของกระแสเป็นสเกลาร์และเวกเตอร์ตามลำดับดังรูปที่ 3.34 – 3.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

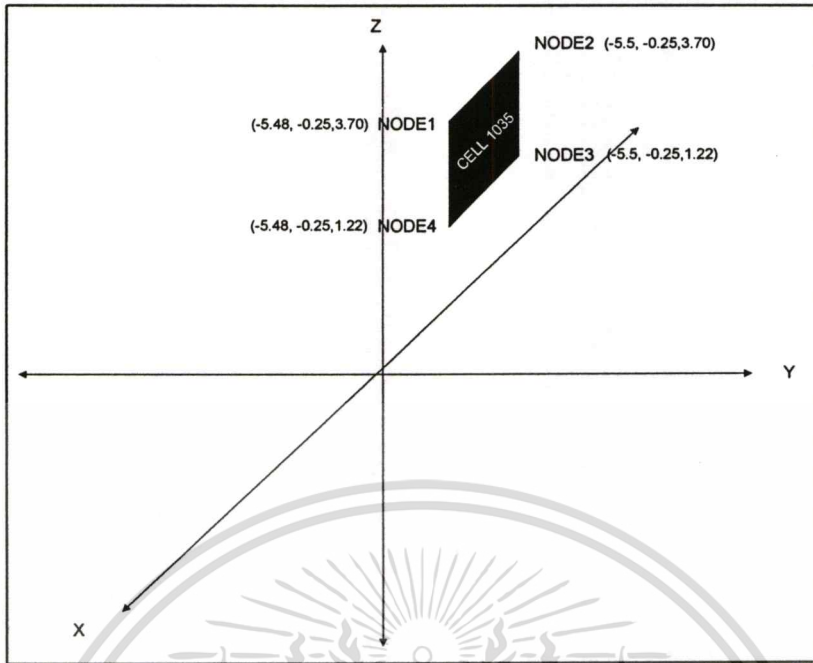
Microsoft Excel - 3.1 GHz 10 cells per wavelength																
File Edit View Insert Format Tools Data Window Help Adobe PDF																
Type a question for help																
100%																
Arial 10																
AW9 X ✓ A																
AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG		
9																
10																
11		NODE4					NODE1			NODE2					NODE3	
12																
13	Jmr	Jmi														
14	0.265177	20.88932	20.89100366		6.390669	20.88932	21.84501		5.15346	19.96529	20.61967		5.153461	19.96529		
15	0.265177	0.812798	0.954961977		0.21404	0.780136	0.808965		0.214295	0.780548	0.80943		0.265363	0.8131		
16	5.153463	19.96529	20.61967584		5.15346	19.96529	20.61967		4.069484	18.62473	19.06414		4.069488	18.624		
17	0.21409	0.780147	0.808989348		0.162434	0.710577	0.728907		0.163439	0.710706	0.729257		0.214853	0.7802		
18	4.06949	18.62473	19.06413704		4.069484	18.62473	19.06414		2.986537	16.18173	16.45502		2.986545	16.181		
19	0.162472	0.710552	0.728890347		0.118509	0.61502	0.626334		0.122613	0.615056	0.627159		0.16549	0.7102		
20	2.986548	16.18173	16.45502532		2.986537	16.18173	16.45502		1.987909	13.03752	13.1882		1.987926	13.037		
21	0.118598	0.615016	0.626346311		0.08223	0.494218	0.501013		0.093285	0.494217	0.502944		0.126515	0.6152		
22	1.987939	13.03752	13.18820796		1.987909	13.03752	13.1882		1.267728	9.309341	9.395263		1.267775	9.3095		
23	0.08254	0.494217	0.501062312		0.050589	0.352195	0.35681		0.073531	0.352274	0.359867		0.082827	0.4942		
24	1.267789	9.309341	9.395271143		1.267728	9.309341	9.395263		0.696728	5.171548	5.21827		0.696839	5.1715		
25	0.050938	0.352197	0.35981366		0.0261	0.195757	0.197489		0.06783	0.196105	0.207504		0.080712	0.352		
26	0.696832	5.171548	5.218283875		0.696728	5.171548	5.21827		0.053801	0.819325	0.82109		0.055141	0.8193		
27	0.025935	0.19576	0.197470605		0.012888	0.031915	0.034419		0.072171	0.03488	0.080158		0.075689	0.1962		
28	0.142998	0.48454	0.505200743		0.143418	0.48517	0.505823		0.103942	0.442079	0.454134		0.103362	0.4413		
29	0.105339	0.441398	0.453793127		0.105098	0.441578	0.453911		0.07612	0.396527	0.403767		0.076467	0.3963		
30	0.084155	0.396244	0.405011961		0.080428	0.396307	0.404366		0.058197	0.399718	0.404666		0.053247	0.3996		
31	0.07493	0.339731	0.347895805		0.066021	0.339642	0.346		0.05112	0.271102	0.275879		0.0622	0.2712		
32	0.081738	0.27154	0.283575044		0.058762	0.271204	0.277711		0.055431	0.193454	0.201238		0.078627	0.1939		
33	0.096974	0.194545	0.217374659		0.064655	0.193665	0.204172		0.063951	0.107572	0.125146		0.096506	0.1091		
34	0.107241	0.109743	0.153440803		0.072138	0.107864	0.129754		0.072034	0.022201	0.075377		0.10717	0.0303		
35	0.103829	0.454931	0.466629262		0.103838	0.454966	0.466685		0.081461	0.426594	0.436267		0.08145	0.4289		
36	0.084146	0.429529	0.436712051		0.083956	0.428604	0.436749		0.057659	0.386675	0.390995		0.057935	0.3866		
37	0.067955	0.386627	0.392563507		0.067523	0.386691	0.392444		0.046904	0.332874	0.336162		0.047523	0.3325		
38	0.073638	0.333209	0.341249383		0.061758	0.332962	0.338641		0.057189	0.267872	0.273713		0.06985	0.2675		
39	0.101065	0.268802	0.287172963		0.077893	0.268003	0.279121		0.078588	0.190409	0.205989		0.101525	0.1915		
40	0.132498	0.192615	0.233786673		0.096942	0.191042	0.214231		0.097081	0.10688	0.144396		0.132607	0.1098		
41	0.15552	0.11016	0.190582465		0.107768	0.107486	0.152208		0.107173	0.03009	0.111317		0.155108	0.0309		
42	0.076612	0.429583	0.436361067		0.076613	0.429592	0.43637		0.054191	0.40786	0.411444		0.05419	0.4087		
43	0.057068	0.407858	0.411831296		0.058165	0.407852	0.411979		0.032759	0.372194	0.373633		0.030771	0.37		

รูปที่ 3.33 ขนาดของกระแสในแต่ละโหนดของจำนวนเซลล์ทั้งหมด

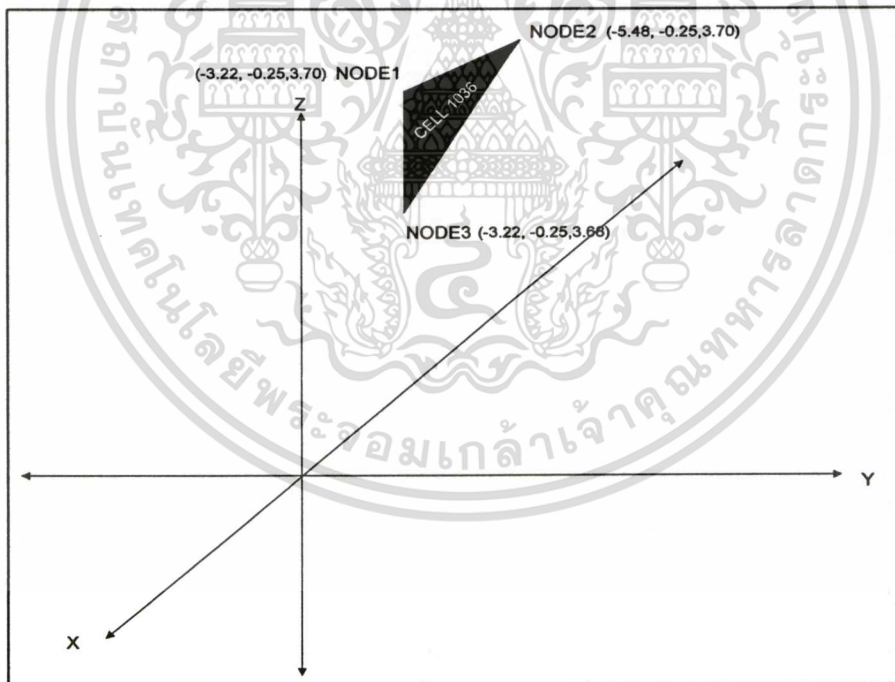


รูปที่ 3.34 ตัวอย่างเซลล์ลำดับที่ 1034 และพิกัดทั้ง 4 โหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

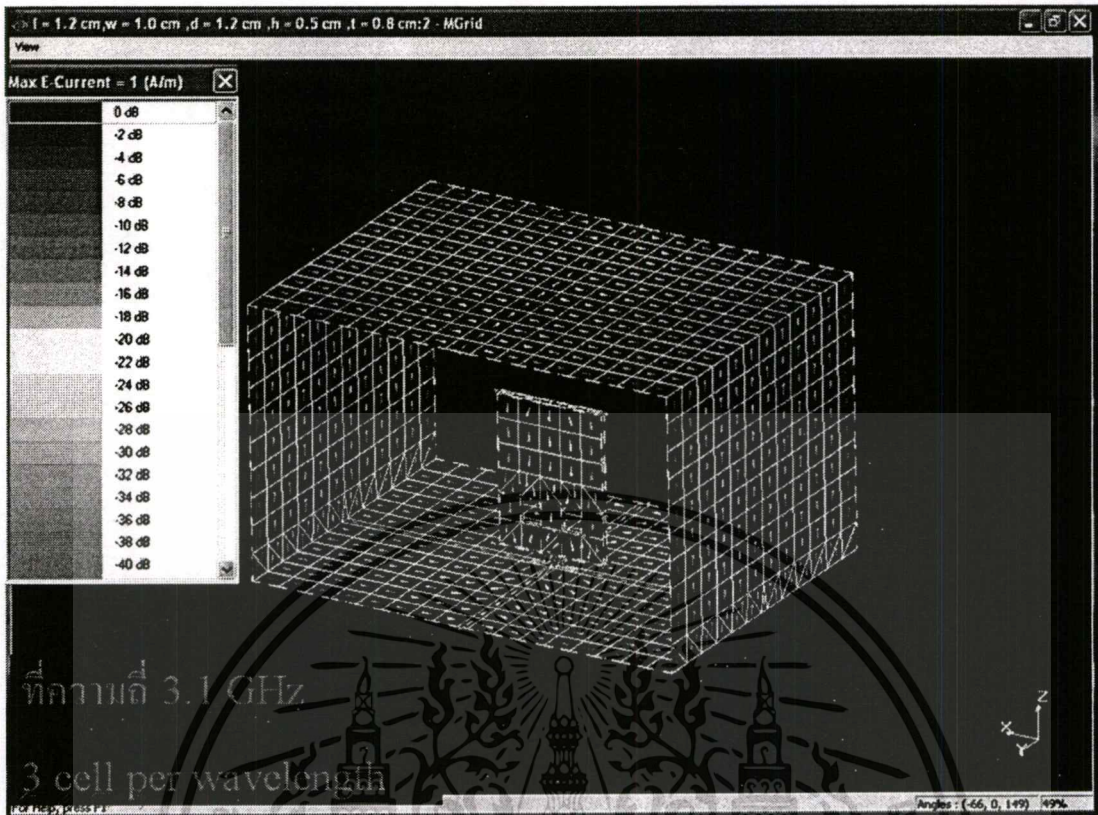


รูปที่ 3.35 ตัวอย่างเซลล์ลำดับที่ 1035 และพิกัดทั้ง 4 โหนด



รูปที่ 3.36 ตัวอย่างเซลล์ลำดับที่ 1036 และพิกัดทั้ง 3 โหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.37 กระแสไฟฟ้าที่ไหลบนเซลล์แต่ละเซลล์แสดงค่ากระแสเป็นสเกลาร์และเวกเตอร์

จากหัวข้อที่ผ่านมา ได้ศึกษาคุณลักษณะของโปรแกรม IE3D ซึ่งเป็นโปรแกรมแบบจำลองแบบทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นที่อาศัยหลักการวิธีโมเมนต์ที่ใช้ในแก้ปัญหาการกระจายกระแสบนโครงสร้างรูปร่างทั่วไปแบบสองมิติและสามมิติ รวมถึงหลักการที่ใช้ในการจำลองแบบและการทำงานในการสร้างสายอากาศเบื้องต้น สำหรับบทต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยม โดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นเพื่อทำการการขยายช่วงความถี่ของสายอากาศให้เหมาะสมตามความต้องการ

## บทที่ 4

### การศึกษาพารามิเตอร์และการออกแบบ

ในบรรดาสาขาอากาศโมโนโพลแผ่นระนาบโลหะหลายรูปทรง สาขาอากาศโมโนโพลมีรูปทรงทางเรขาคณิตที่ง่ายที่สุด แต่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นภายในช่วงความถี่ที่ใช้งานที่ไม่ค่อยจะดีนัก ลักษณะที่โดดเด่นเช่นนี้ของสาขาอากาศโมโนโพลชนิดแผ่น ทำให้มีการศึกษาและวิจัยส่วนสำคัญที่ทำการศึกษาและวิจัยคือ การขยายช่วงความถี่ใช้งาน ซึ่งเกิดจากเทคนิคต่างๆ เช่น การกำหนดระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณ การออกแบบฐานของตัวโมโนโพลเป็นรูปครึ่งวงกลม เทคนิคการบากเป็นมุม การป้อนสัญญาณแบบสองจุดและเทคนิคต่างๆ ดังบทที่ 2

การศึกษาเทคนิคเหล่านี้ถูกแสดงให้เห็นว่าการใช้เทคนิคการป้อนแบบสองจุด การกระจายกระแสในแนวตั้งจะเพิ่มขึ้นบนโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม และการกระจายกระแสในแนวนอนจะถูกทำให้น้อยลง ที่ซึ่งสามารถสามารถพิสูจน์ได้จากคุณสมบัติการโพลาไรซ์และช่วงกว้างความถี่ใช้งานของสาขาอากาศโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมนั้น อย่างไรก็ตามการออกแบบการป้อนสัญญาณแบบสองจุดนี้ได้ถูกนำเสนอ นอกจากนี้การป้อนสัญญาณแบบสองจุดภายใต้แผ่นระนาบของสาขาอากาศโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมต้องการการกระตุ้นที่ตำแหน่งการป้อนซึ่งแยกออกเป็นสองทาง สำหรับสาขาอากาศโมโนโพลแบบแผ่นสี่เหลี่ยมชนิดนี้

ในวิทยานิพนธ์นี้แนะนำให้เสนอ จุดป้อนสัญญาณที่มีจุดป้อนเป็นแผ่นบางสามด้านต่อเข้าด้วยกัน ซึ่งมีโครงสร้างที่ง่าย โดยการใช้แผ่นโลหะทองแดงในการป้อนสัญญาณและนอกจากนี้จะไม่มีการป้อนสัญญาณจากภายนอก คุณสมบัติของการป้อนสัญญาณแบบสามจุดนี้ทำให้มีค่าความถี่ใช้งานที่กว้างขึ้น รวมทั้งมีอัตราการขยายและค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่เพิ่มมากขึ้นกว่าตัวสาขาอากาศที่พัฒนาจากเดิม

และในบทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงขนาดของตัวป้อนสัญญาณซึ่งเป็นโมโนโพลชนิดแผ่นที่มีจุดป้อนสัญญาณดังที่กล่าวมาแล้วและขนาดของวงแหวนซึ่งพัฒนามาจากแผ่นระนาบกรวดเปลนกับแผ่นสะท้อนทั้งสองข้างรวมทั้งแผ่นระนาบปิดด้านบนรวมกันเป็นวงแหวนสี่เหลี่ยม สุดท้ายเป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของทั้งสององค์ประกอบ

#### 4.1 ขนาดของตัวป้อนสัญญาณ

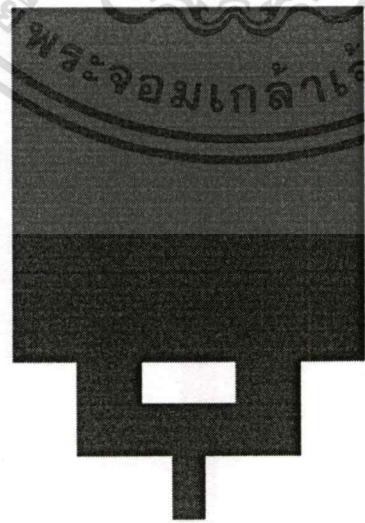
สาขาอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นที่ถูกนำเสนอในยังคงรักษาโครงสร้างที่ง่ายไว้อยู่และสามารถป้อนได้ง่าย โดยการใช้อินเนคเตอร์แบบ SMA ในการต่อเข้ากับโมโนโพลชนิดแผ่นนี้ อย่างไรก็ตามการป้อนแบบสามจุดที่สมมาตรกันนี้ถูกต่อเข้ากับขอบล่างของสาขาอากาศโมโนโพลชนิด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นผ่านคอนเนคเตอร์ SMA นี้ รูปแบบการกระจายที่มากขึ้นบนโมโนโพลชนิดแผ่นนี้สามารถ  
 คาดหมายได้ ถูกนำไปเปรียบเทียบกับกรุป้อนแบบสองจุด และการป้อนแบบจุดเดียว คุณสมบัติ  
 เหล่านี้สามารถก่อให้เกิดช่วงกว้างความถี่ใช้งานที่เพิ่มขึ้น จากรูปทรงของสายอากาศโมโนโพลชนิด  
 แผ่นนี้ การป้อนสัญญาณด้วยจุดป้อนแผ่นบางสามจุด ถูกสร้างและศึกษาผลกระทบของการ  
 เปลี่ยนแปลงขนาดของจุดป้อนสัญญาณนี้ และจากโครงสร้างของโมโนโพลชนิดแผ่นแบบเดิมจะ  
 เป็นการป้อนสัญญาณแบบหนึ่งจุดและสองจุดดังแสดงในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 โมโนโพลชนิดแผ่นที่มีการป้อนแบบหนึ่งจุด



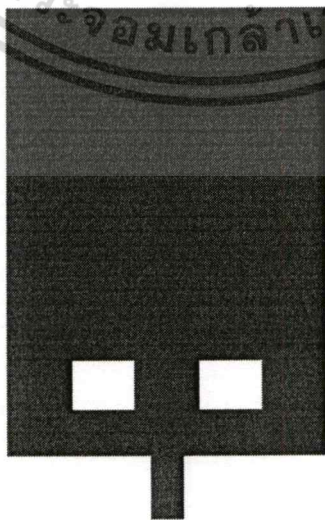
รูปที่ 4.2 โมโนโพลชนิดแผ่นที่มีการป้อนแบบสองจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นเป็นการพัฒนาจากสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นป้อนอยู่บนระนาบกราวน์เพลน มีแผ่นสะท้อนสองข้าง และมีแผ่นระนาบปิดอยู่ด้านบน เพื่อเป็นการบังคับลำคลื่นให้ออกสองทิศทาง ซึ่งในวงแหวนสี่เหลี่ยมนั้นจะถูกป้อนด้วยโมโนโพลชนิดที่มีรูปทรงสามก้าน ที่ซึ่งโมโนโพลชนิดแผ่นที่มีรูปทรงแบบสามก้านนี้ จะถูกมองเป็นส่วนประกอบย่อยๆสองส่วนคือส่วนที่อยู่ด้านบน และอยู่ด้านล่าง ส่วนที่อยู่ด้านบนถูกมองเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ส่วนที่อยู่ด้านล่างถูกมองเป็นแผ่นที่มีรูปทรงแบบสามก้าน ที่ซึ่งรูปทรงแบบสามก้านที่แยกออกมาเป็นทางสามทางนี้เปรียบเสมือนตัวป้อนสัญญาณสามจุดให้กับสายอากาศชนิดนี้

ในโครงสร้างที่ได้กล่าวไปแล้วนั้นส่วนที่อยู่ด้านบนจะถูกมองเป็นแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้างและความสูง ( $l$ ) และ ( $w$ ) ตามลำดับ และส่วนด้านล่างที่ต่ออยู่กับแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมด้านบนคือแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่มีรูปทรงแบบสามก้านซึ่งจะถูกมองเสมือนจุดป้อนสัญญาณแบบ 3 จุด คือ A, B และ C ที่ซึ่งจุด B เป็นจุดกึ่งกลางของรูปทรงแบบสามก้านนี้ และมีจุด A และ C เป็นจุดป้อนสัญญาณที่อยู่ทั้งสองข้างที่สมมาตรกัน มีระยะห่างจากจุด B เท่ากัน โดยให้ระยะห่างจากตัววงแหวนกับตัวป้อนที่มีรูปทรงแบบสามก้านเป็นระยะ ( $d$ ) และให้ความสูงของตัวป้อนที่มีรูปทรงแบบสามก้านเป็นระยะ ( $h$ ) จากนั้นจะถูกต่อเข้ากับจุด B ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางของการป้อนสัญญาณผ่านรูของคอนเนคเตอร์แบบ SMA 50 โอห์ม โดยที่ก้านทั้งสองข้างต้องถูกทำให้สมมาตรกันเป็นระยะ ( $t/2$ ) จากจุดกึ่งกลาง ดังแสดงในรูปที่ 4.3

จากนั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์แต่ละค่าทั้งหมดของตัวโมโนโพลชนิดแผ่นนี้เพื่อดูค่าการขยายช่วงกว้างความถี่ที่ต้องการออกแบบในที่นี้จะออกแบบให้ใช้งานในช่วงความถี่ (3.1 – 10.6 GHz) ซึ่งเป็นช่วงความถี่ใช้งานของสายอากาศช่วงความถี่กว้าง (wideband antenna)



รูปที่ 4.3 โมโนโพลชนิดแผ่นที่มีการป้อนแบบสามจุด

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญนี้ ในขั้นแรกจะกำหนดขนาดของวงแหวนที่ระบุขนาดไว้อย่างชัดเจน และความหนาของตัวโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้าน ( $d$ ) ในที่นี้จะกำหนดให้มีความหนาเท่ากับ 0.5 cm ซึ่งเป็นการสะดวกในการทดลองจริงเนื่องจากแผ่นโลหะตัวนำที่ใช้มีความหนาเท่ากับ 0.5 cm นั้นสามารถหาได้ง่าย และสะดวกในการสร้างจากนั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้านทีละค่า เริ่มจากค่าความกว้างของโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม ( $l$ ), ค่าความสูงของโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม ( $w$ ), ระยะห่างจากตัววงแหวนสี่เหลี่ยมกับตัวป้อนที่มีรูปทรงแบบสามก้าน ( $d$ ), ความสูงของตัวป้อนที่มีรูปทรงแบบสามก้าน ( $h$ ), และระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณ A และ C ( $t$ ) ตามลำดับ

#### 4.2 ขนาดของวงแหวน

จากการวิวัฒนาการของสายอากาศที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น วงแหวนสี่เหลี่ยมที่นำเสนอจะประกอบด้วย พื้นที่ด้านล่างสุดซึ่งเปรียบเสมือนแผ่นระนาบสะท้อน พื้นที่ด้านข้างทั้งสองข้างเป็นแผ่นสะท้อน และปิดด้วยพื้นที่สี่เหลี่ยมด้านบนสุด ซึ่งทั้งสามองค์ประกอบนี้รวมกันเป็นวงแหวนสี่เหลี่ยมซึ่งล้อมรอบโมโนโพลชนิดแผ่น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการทดสอบ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของค่าช่วงกว้างความถี่ใช้งาน, ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง และอัตราขยาย ของสายอากาศดั้งเดิมและสายอากาศที่นำเสนอใหม่ ซึ่งค่าที่ได้ใหม่จะถูกเปรียบเทียบกับค่าที่มีอยู่เดิม ซึ่งจะทำให้เกิดการพัฒนาเป็นสายอากาศชนิดใหม่

พารามิเตอร์ตัวแรกที่น่ามาคิดคือ แผ่นระนาบกราวด์ ซึ่งจะกำหนดให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดที่เหมาะสม แบบรูปการกระจายคลื่นที่ได้ เมื่อป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นจะเป็นแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional)

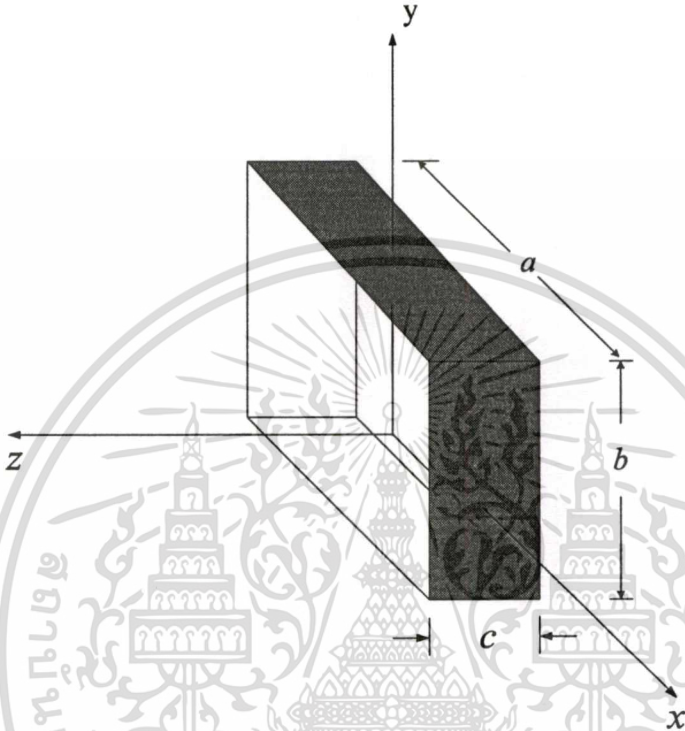
พารามิเตอร์ตัวถัดมาคือ แผ่นสะท้อนทั้งสองข้างของสายอากาศ จะมีขนาดความกว้างเท่ากับขนาดของแผ่นระนาบกราวด์ และมีความสูงที่สูงกว่าขนาดความสูงของโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม เพื่อให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีทิศทางแบบสองทิศทาง (Bidirectional)

พารามิเตอร์ตัวสุดท้าย คือแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมด้านบนสุดนำมาปิดด้านบนของโครงสร้างของสายอากาศ เพื่อประกอบกันเป็นวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อเป็นตัวบังคับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นให้เป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง ที่มีค่าอัตราขยายและค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงที่สุดและมากกว่าโครงสร้างของสายอากาศเดิม ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้านด้วย

แผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่เพิ่มขึ้นมาและเหมาะสมกับขนาดของวงแหวนสี่เหลี่ยมที่กำหนดในครั้งแรก ประกอบกันเป็นวิวัฒนาการของสายอากาศชนิดใหม่ ซึ่งมีข้อดีคือ มีช่วงกว้างความถี่ใช้งานสูง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง เพื่อนำไปใช้งานในงานที่ต้องการแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดนี้

พารามิเตอร์ของวงแหวนสี่เหลี่ยมนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 5 โครงสร้างจะประกอบด้วย ความกว้าง ( $a$ ), ความสูง ( $b$ ) และความหนา ( $c$ ) ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 โครงสร้างของวงแหวนสี่เหลี่ยม

จากโครงสร้างวงแหวนสี่เหลี่ยมการกำหนดค่าความกว้างและความสูงของวงแหวนสี่เหลี่ยมจะต้องรองรับกับความถี่หลายๆความถี่เพื่อใช้เป็นสายอากาศที่ทำงานในช่วงความถี่กว้างกล่าวคือการใช้งานในช่วงความถี่กว้างจะต้องใช้งานได้ตั้งแต่ความถี่ต่ำที่ความถี่ 3.1 GHz จนถึงความถี่สูงที่ความถี่ 10.6 GHz เพราะฉะนั้น โครงสร้างที่รองรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางและทำงานได้ตั้งแต่ความถี่ต่ำไปจนถึงความถี่สูงจะต้องมีขนาดที่ค่อนข้างเล็กและเหมาะสมกับช่วงความถี่ที่ต้องการออกแบบ เพื่อที่จะได้ค่าช่วงกว้างความถี่ที่ต้องการและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง ส่วนการกำหนดค่าความหนาของวงแหวน ( $c$ ) ใช้เงื่อนไขค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ให้ค่ามากที่สุด

### 4.3 พารามิเตอร์ที่เหมาะสม

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า โครงสร้างรวมของสายอากาศชนิดนี้จะประกอบด้วย โครงสร้างแรกคือวงแหวนสี่เหลี่ยม และโครงสร้างที่สองคือ โมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน โดยโมโนโพลชนิดแผ่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามก้าน จะเป็นตัวป้อนสัญญาณ ตามแนวแกน  $y$  และถูกล้อมรอบด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมมีช่องเปิดตามแนวแกน  $z$  สายอากาศแบบสองทิศทางโดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นที่มีรูปทรงแบบสามก้าน โดยมีวงแหวนสี่เหลี่ยมเป็นช่องเปิดวงแหวนนี้มีขอบเขตดังนี้

$$(-a/2 \leq x \leq a/2, y = -b/2, -c/2 \leq z \leq c/2), (-a/2 \leq x \leq a/2, y = b/2, -c/2 \leq z \leq c/2),$$

$$(x = -a/2, -b/2 \leq y \leq b/2, -c/2 \leq z \leq c/2), (x = a/2, -b/2 \leq y \leq b/2, -c/2 \leq z \leq c/2)$$

และในแนวแกน  $Z$  วงแหวนสี่เหลี่ยมมีขอบเขต  $z = -c/2$  และ  $z = c/2$  ตามลำดับ จากนั้นจะคำนวณหาค่าความกว้างและความสูงของวงแหวนจากสมการข้างล่างนี้ เป็นการหาค่าความถี่ตัด เพราะความถี่ตัดเป็นตัวกำหนดว่าจะให้สายอากาศชนิดนี้เริ่มทำงานที่ความถี่ใด และเป็นการออกแบบเบื้องต้นเพื่อใช้ในการออกแบบขนาดโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้านต่อไป

$$\lambda = 2a \quad (4.1)$$

$$a = 2b \quad (4.2)$$

โดยที่  $\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่นของค่าความถี่ตัดที่ต้องการออกแบบ

$a$  คือ ความกว้างของวงแหวน

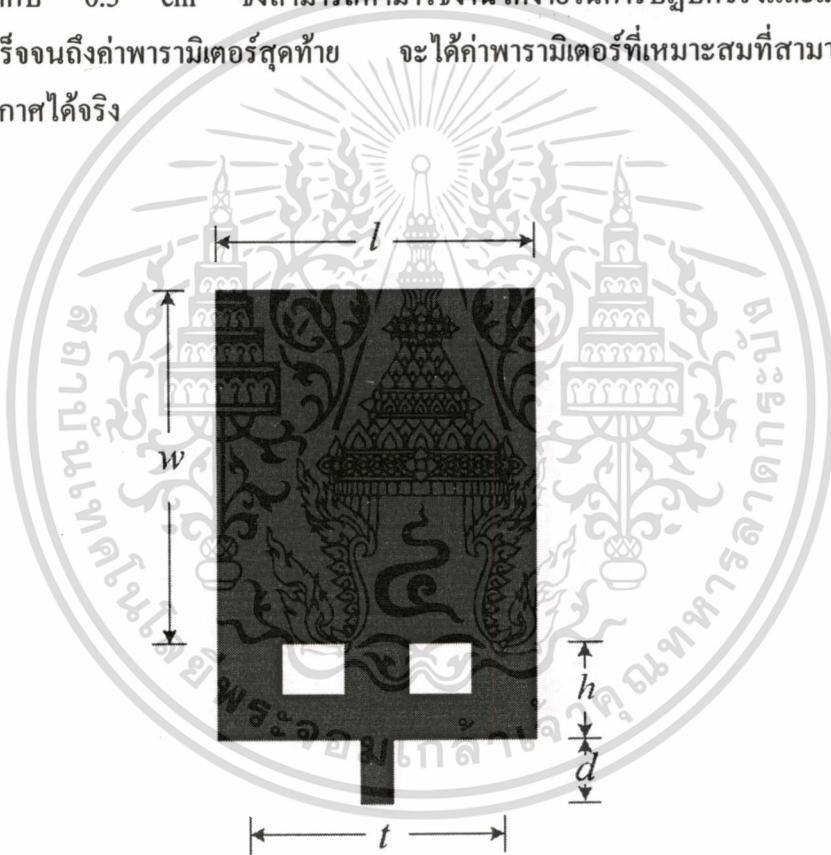
$b$  คือ ความสูงของวงแหวน

และจากการคำนวณได้ทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดคือใช้ความกว้างของวงแหวนเท่ากับ 4.4 cm ความสูงของวงแหวนเท่ากับ 2.2 cm และความยาวของวงแหวนเท่ากับ 3.0 cm และจากการพัฒนาสายอากาศแบบดั้งเดิมจะได้ขนาดของวงแหวนสี่เหลี่ยมที่เหมาะสม แสดงดังตารางที่ 4.1

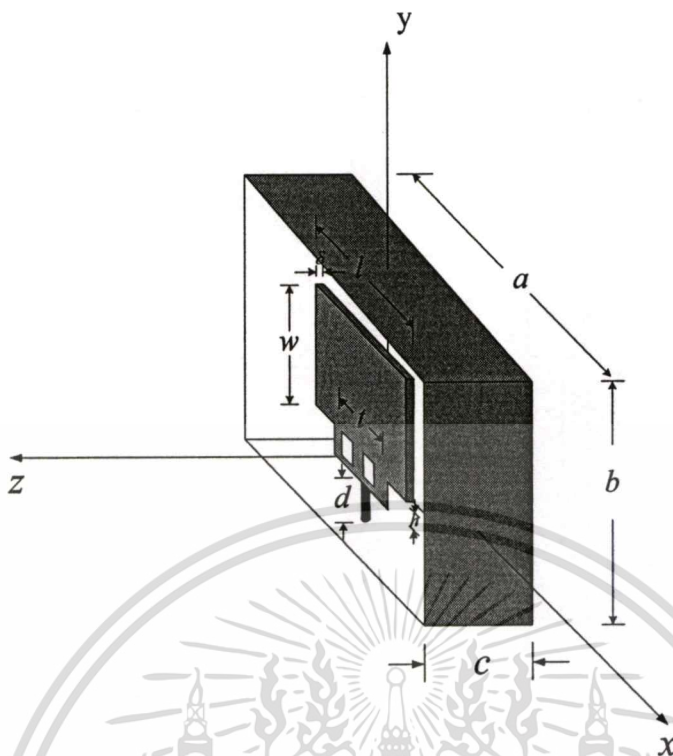
พารามิเตอร์	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพ
$a$	$0.359\lambda$	4.4 cm
$b$	$0.180\lambda$	2.2 cm
$c$	$0.245\lambda$	3.0 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากขนาดของวงแหวนสี่เหลี่ยมที่ได้ในตารางที่ 4.1 เราจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงของขนาดโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมสามก้านเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของช่วงกว้างความถี่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง อัตราการขยาย พารามิเตอร์ที่ทำให้เปลี่ยนแปลง เริ่มจากความกว้างของแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมสามก้าน ( $l$ ) ความสูงของแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมสามก้าน ( $w$ ) ระยะห่างจากตัววงแหวนกับตัวป้อนที่มีรูปทรงสามก้านเป็นระยะ ( $d$ ) ความสูงของตัวป้อนที่มีรูปทรงสามก้านเป็นระยะ ( $h$ ) และพารามิเตอร์สุดท้ายคือ ระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณ A และ C ( $t$ ) กล่าวคือ จุด A และ จุด C คือ ก้านของตัวป้อนสัญญาณจุดแรก และก้านของตัวป้อนสัญญาณจุดที่สาม โดยที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นว่า ความหนาของโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมสามก้าน จะกำหนดให้เท่ากับ 0.5 cm ซึ่งสามารถหาใช้งานได้ง่ายในการปฏิบัติจริงและเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงสำเร็จจนถึงค่าพารามิเตอร์สุดท้าย จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สามารถนำไปออกแบบสายอากาศได้จริง



รูปที่ 4.5 โครงสร้างของโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน



รูปที่ 4.6 สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยม โดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน

จากการคำนวณหาขนาดความกว้างและความสูงของโมโนโพลสี่เหลี่ยมจัตุรัสของสายอากาศ โมโนโพลสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ป้อนบนแผ่นระนาบกรวดจะได้นขนาดกว้างและความสูงเบื้องต้นที่จะนำไปทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์สำหรับสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านต่อไป

จากพารามิเตอร์ของโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านเราจะสมมติค่าต่างๆทั้งห้าค่าขึ้นมาก่อนเป็นอันดับแรกดังตารางที่ 4.2 คือ ความกว้างของโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมสามก้าน ( $l$ ) เท่ากับ 1.4 cm ความสูงของโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน ( $w$ ) เท่ากับ 1.4 cm ระยะห่างจากตัววงแหวนกับตัวป้อนที่มีรูปทรงสามก้านเป็นระยะ ( $d$ ) เท่ากับ 0.15 cm ความสูงของตัวป้อนที่มีรูปทรงสามก้านเป็นระยะ ( $h$ ) เท่ากับ 0.6 cm และระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณ A และ C ( $l/2$ ) เท่ากับ 1.0 cm

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านที่กำหนดขึ้นก่อนการจำลอง

พารามิเตอร์	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพ
$l$	$0.114\lambda$	1.4 cm
$w$	$0.114\lambda$	1.4cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของ โมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านที่กำหนดขึ้นก่อนการจำลอง

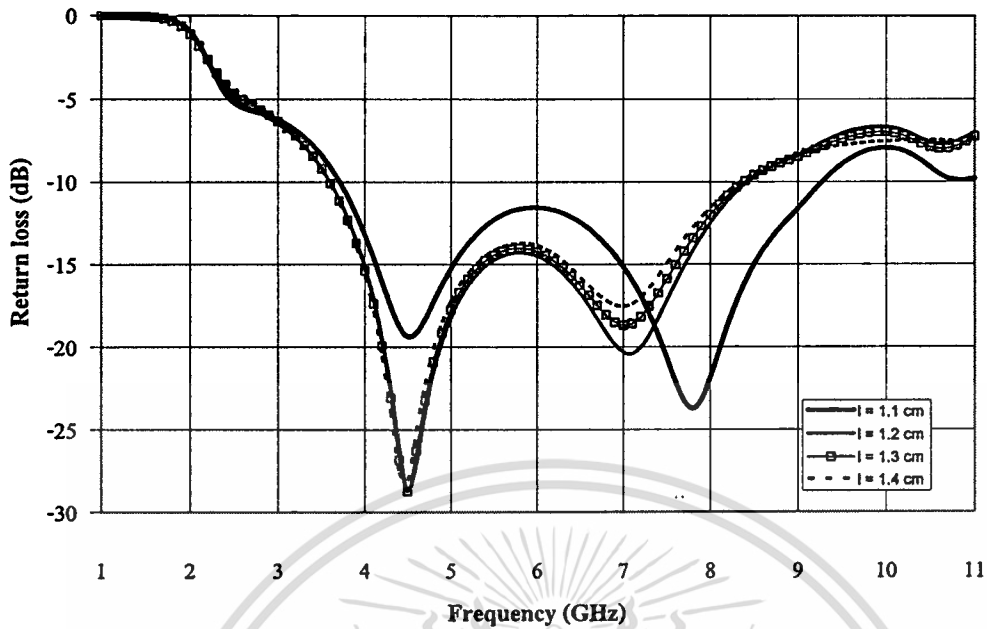
พารามิเตอร์	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพ
$l$	$0.114\lambda$	1.4 cm
$w$	$0.114\lambda$	1.4cm
$d$	$0.012\lambda$	0.15 cm
$h$	$0.049\lambda$	0.6cm
$t$	$0.082\lambda$	1.0 cm

#### 4.3.1 การเปลี่ยนแปลงความกว้างของโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน ( $l$ )

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นว่า โมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านจะให้ค่าช่วงกว้างความถี่ที่กว้างที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ โมโนโพลชนิดแผ่นก้านเดียวและ โมโนโพลชนิดแผ่นสองก้าน

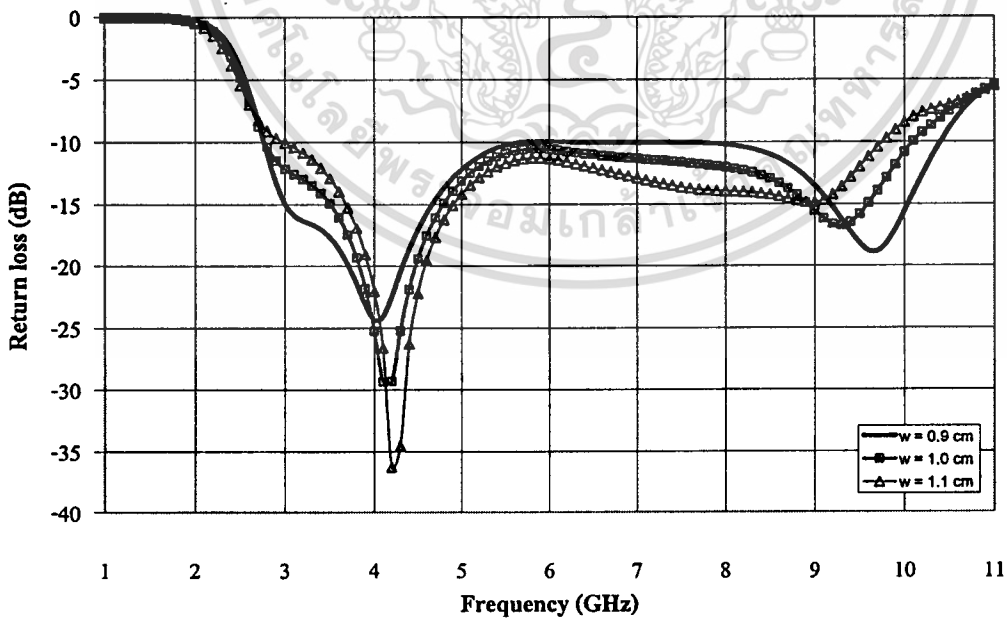
จากพารามิเตอร์ตั้งต้นของโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านดังตารางที่ 4.2 ซึ่งจะนำมาป้อนภายในวงแหวนสี่เหลี่ยม จะเริ่มต้นการเปลี่ยนแปลงจากค่าความกว้างของ โมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน จากกราฟค่าการสูญเสียย้อนกลับในรูปที่ 4.7

จะพบว่า ค่า  $l$  เท่ากับ 1.2 cm จะให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับกว้างที่สุด และจากกราฟเมื่อเพิ่มค่า  $l$  กว้างขึ้นเป็น 1.3 cm และ 1.4 cm จะพบว่าช่วงกว้างความถี่ที่อยู่ในรูปของค่าการสูญเสียย้อนกลับจะลดลงตามลำดับ และในการจำลองค่าความกว้างของโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้านที่ขนาดความกว้างที่ลดลงจะมีช่วงกว้างความถี่กว้างขึ้น แต่ในทางปฏิบัติหากลดค่าความกว้างของโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านอีก จะมีผลต่อการสร้างจริงเนื่องจากจะทำให้มีขนาดเล็กเกินไปยากต่อการสร้าง ขนาด  $l$  เท่ากับ 1.2 cm จึงมีค่าที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นเราจะพิจารณาค่าความสูงของโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านต่อไป



รูปที่ 4.7 ค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน ( $l$ )

#### 4.3.2 การเปลี่ยนแปลงความสูงของโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้าน ( $w$ )



รูปที่ 4.8 ค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน ( $w$ )

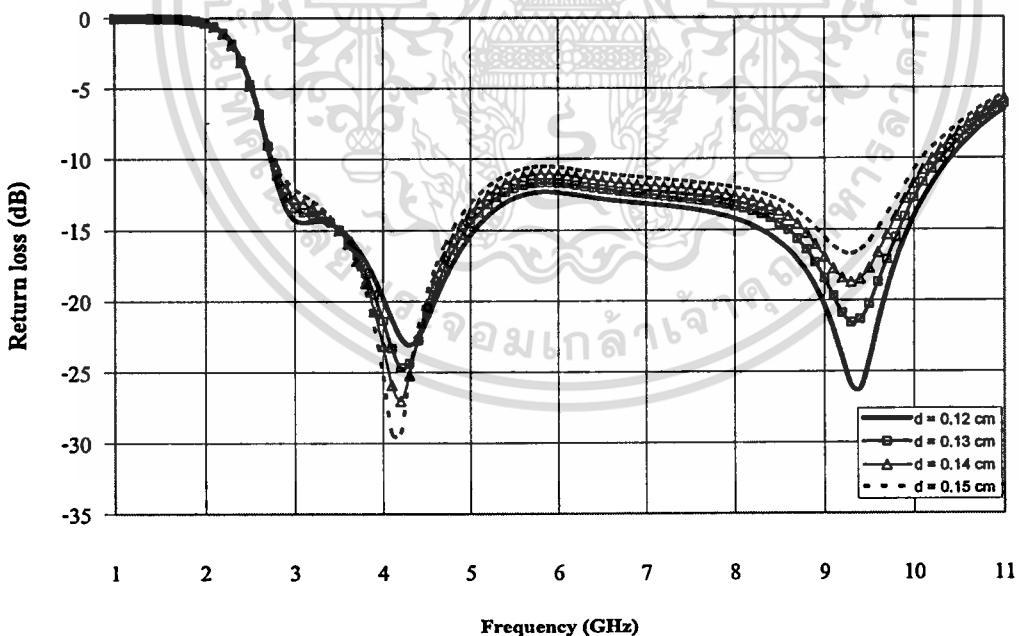
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้าน ( $w$ ) จะพบว่าที่ความสูง ( $w$ ) เท่ากับ 0.9 cm จะมีช่วงกว้างความถี่ที่ดีที่สุด กล่าวคือค่าของการสูญเสียย้อนกลับจะเลขค่า -10 dB ไปเล็กน้อยที่ความถี่ 5.5 GHz และที่ความสูงเท่ากับ 1.1 cm จะมีช่วงกว้างตั้งแต่ 3 – 9.75 GHz ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.75 GHz แต่ที่ความสูงเท่ากับ 1.0 cm จะมีช่วงกว้างตั้งแต่ 2.75 – 10.1 GHz จะมีค่าเท่ากับ 7.35 GHz ซึ่งเป็นค่าความสูงที่ให้ค่าความกว้างที่กว้างที่สุด

ดังนั้นเราจะ ได้ค่าที่เหมาะสม 2 ค่าแล้วคือค่าความกว้างและความสูงของโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านเท่ากับ 1.2 และ 1.0 cm ตามลำดับ จากนั้นจึงหาค่าพารามิเตอร์อื่นต่อไป

#### 4.3.3 การเปลี่ยนแปลงระยะห่างจากตัววงแหวนกับโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน ( $d$ )

จากรูปที่ 4.9 เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างจากตัววงแหวนกับตัวโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน ( $d$ ) เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าทั้งหมด 4 ค่า ตั้งแต่ค่า  $d$  เท่ากับ 0.12 cm จนถึงค่า  $d$  เท่ากับ 0.15 cm จะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าระยะห่างจากตัววงแหวนกับตัวโมโนโพลมากขึ้นช่วงกว้างความถี่จะแนวโน้มลดลงตามลำดับ และที่ค่าระยะห่างจากตัววงแหวนกับตัวโมโนโพลเท่ากับ 0.12 cm จะมีค่าช่วงกว้างมากที่สุด กล่าวคือจะมีค่าช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.75 จนถึง 10.3 GHz



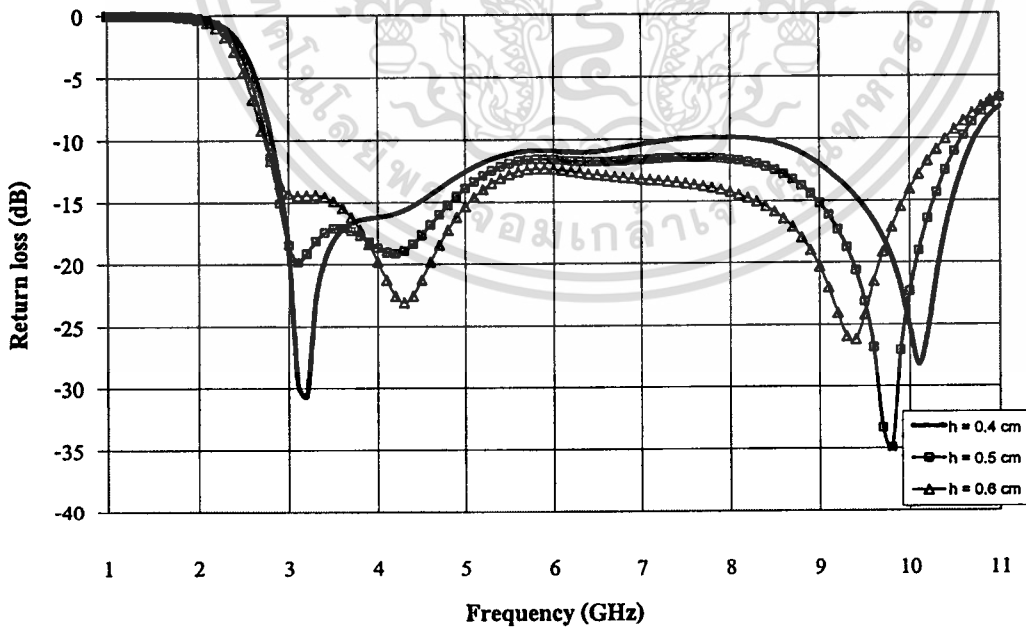
รูปที่ 4.9 ค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างจากตัววงแหวนกับตัวโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน ( $d$ )

ค่าที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงระยะห่างจากตัววงแหวนกับตัวโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านนี้ จะมีค่าช่วงกว้างความถี่เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงค่าในหัวข้อที่ 4.4.1 และ 4.4.2 อีก 200 MHz ที่ช่วงความถี่สูงจาก 10.1 GHz เป็น 10.3 GHz และจากนั้นจึงทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ค่าอื่นๆต่อไป

#### 4.3.4 การเปลี่ยนแปลงระยะห่างจากตัววงแหวนกับโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน (h)

พารามิเตอร์ตัวที่สี่ที่ทำการเปลี่ยนแปลงค่าคือค่าระยะห่างจากตัววงแหวนกับโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน ( $h$ ) โดยจากรูปที่ 4.10 ค่าระยะห่างจากตัววงแหวนกับโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านจะถูกเปลี่ยนแปลงจากค่า  $h$  เท่ากับ 0.4, 0.5 และ 0.6 cm ตามลำดับ

โดยที่ค่าของ  $h$  เท่ากับ 0.4 cm ค่าความกว้างของช่วงความถี่จะแคบที่สุดคือ ที่ความถี่ 7.5 ค่าการสูญเสียย้อนกลับจะมีค่ามากกว่า -10 dB และที่ความถี่ 0.6 cm จะมีช่วงความถี่แคบกว่าที่ค่าของ  $h$  เท่ากับ 0.5 cm ซึ่งมีค่าช่วงความถี่จาก 2.75 – 10.55 GHz และที่ค่า  $h$  เท่ากับ 0.5 cm นี้จะเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด รวมทั้งมีค่าการสูญเสียย้อนกลับน้อยที่สุดและจาก โครงสร้างของ  $h$  ซึ่งเป็นก้านสามก้านในการป้อนสัญญาณนี้ ค่า  $h$  จะต้องถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนเท่าๆกันส่วนแรกเป็นแกนในแนวนอน และส่วนที่สองเป็นแกนในแนวตั้งประกอบกันเป็นก้านแบบรูปสามง่ามเพื่อเป็นพื้นที่สำหรับให้กระแสไหลได้ตามต้องการตามที่ได้ออกแบบไว้



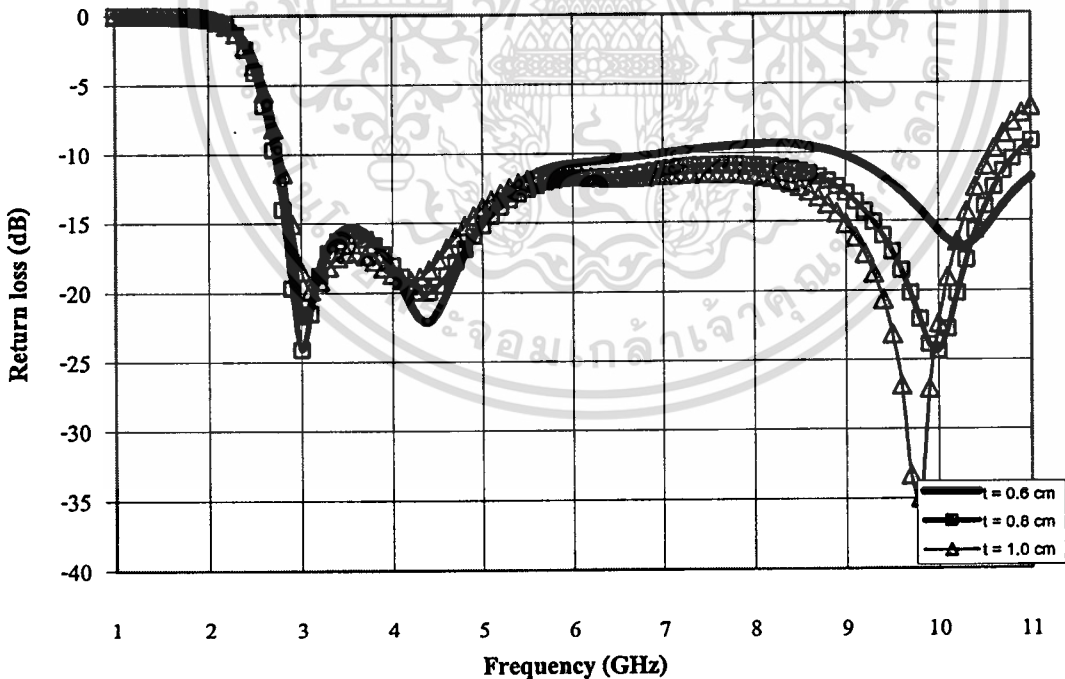
รูปที่ 4.10 ค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างจากตัววงแหวนกับตัวโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน ( $h$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.5 การเปลี่ยนแปลงระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณ A และ C ของโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน ( $t$ )

พารามิเตอร์ตัวสุดท้ายที่ทำการเปลี่ยนแปลงคือระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณ A และ C ของโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน ( $t$ ) กล่าวคือหากมีค่า  $t$  มากหมายถึงตัวป้อนสัญญาณที่เป็นรูปสามก้านจะมีความกว้างมาก ฉะนั้นค่าของ  $t$  คือความกว้างของ โมโนโพลจะต้องมีค่าเท่ากันหรืออาจจะมีค่ามากกว่าค่า  $t$  ตามไปด้วย

ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการเปลี่ยนแปลงนี้จะถูกกำหนดมา 3 ค่าคือ 0.6, 0.8 และ 1.0 cm ตามลำดับ จะพบว่าค่า  $t$  เท่ากับ 0.6 cm ค่าช่วงกว้างความถี่จะมีค่าน้อยที่สุด และที่  $t$  เท่ากับ 1.0 cm ถึงแม้ว่าจะมีค่าการสูญเสียย้อนกลับน้อยที่สุด ซึ่งเป็นข้อดี แต่ยังมีค่าช่วงกว้างความถี่น้อยกว่าค่า  $t$  ที่เท่ากับ 0.8 cm ซึ่งมีช่วงกว้างความถี่ตั้งแต่ 2.75 ถึง 10.9 GHz มีค่าเท่ากับ 8.15 GHz จะสังเกตได้ว่าตั้งแต่การเปลี่ยนแปลงค่าของความสูงของ โมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านจนถึงการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณ A และ C ความถี่เรโซแนนซ์ในช่วงความถี่ต่ำจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงก็จะมีค่าอยู่ที่ค่า 2.75 GHz แต่ค่าที่เปลี่ยนแปลงไปคือค่าของช่วงความถี่สูงที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม คือที่ความถี่ 10.1, 10.3 และ 10.55 GHz ตามลำดับ



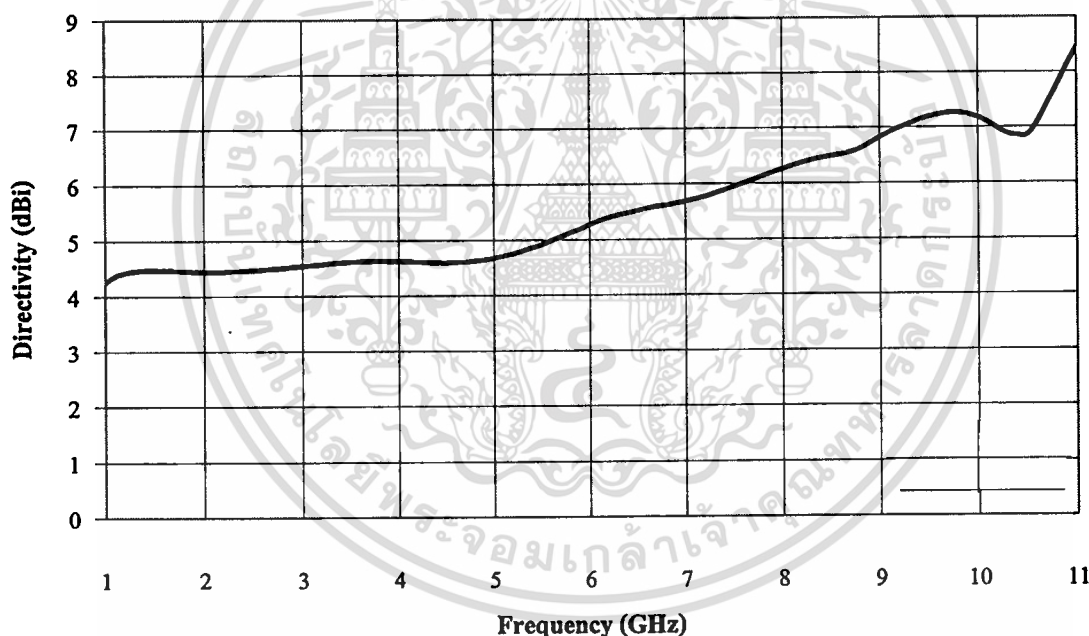
รูปที่ 4.11 ค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณ A และ C ของตัวโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน ( $t$ )

## อัตราการขยายและสภาพเจาะจงทิศทาง (Gain and Directivity)

ในรูปที่ 4.12 เป็นกราฟการแสดงค่าสภาพทิศทางที่มุมสูงสุด ตั้งแต่ที่ความถี่ 1 GHz ถึง 11 GHz แต่เนื่องจากสายอากาศที่ออกแบบนี้ต้องการใช้ใน ช่วงความถี่ 3.1 ถึง 10.6 ซึ่งอยู่ในช่วงของสายอากาศช่วงความถี่กว้าง

ที่ความถี่ 3.1 GHz ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มุมสูงสุดมีค่าเท่ากับ 4.5 dBi เรื่อยไปจนถึงที่ความถี่ 5 GHz จากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงความถี่ที่ 9 GHz จากนั้นที่ความถี่ 9.8 GHz จะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มุมสูงสุด เท่ากับ 7.3 dBi ซึ่งเป็นค่าที่สูงสุด และจะมีค่าประมาณ 7 dBi ที่ช่วงความถี่สูง

ซึ่งค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มุมสูงสุดนี้ ได้มีการจำลองมาจากสายอากาศช่วงความถี่กว้างที่ซึ่งมีโครงสร้างที่ได้มาจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆจนได้ค่าที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังได้แสดงค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มุมศูนย์ดังรูปที่ 4.13

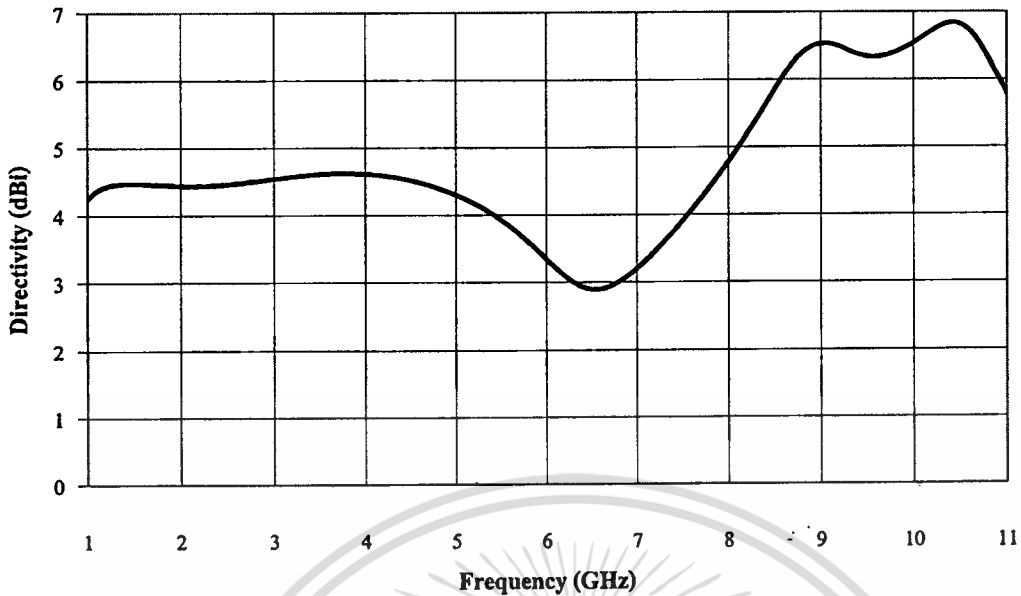


รูปที่ 4.12 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มุมสูงสุด

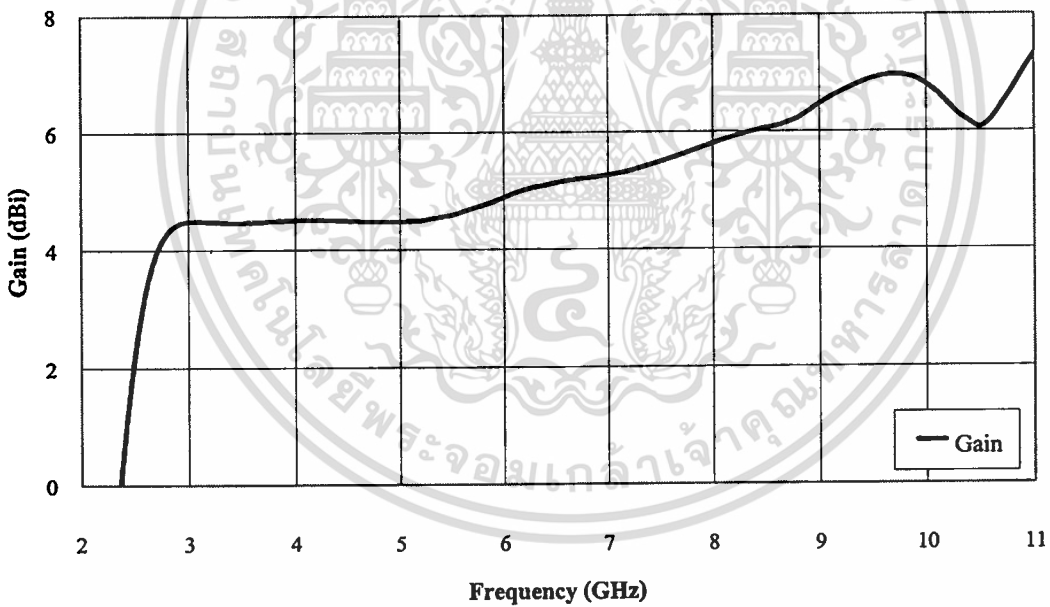
ในรูปที่ 4.13 เป็นกราฟการแสดงค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มุมศูนย์ กล่าวคือ เนื่องจากสายอากาศชนิดนี้เมื่อความถี่สูงขึ้น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าจะพุ่งขึ้นแต่ในทิศทางที่มุมศูนย์ ถ้าคลื่นก็จะยังคงชี้ทิศทางอยู่ ในรูปที่ 4.13 แสดงค่าที่ได้ของสภาพเจาะจงทิศทางที่มุมศูนย์จะสังเกตว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะมีค่าเท่ากับ 4.5 dBi ที่ความถี่ 1 GHz จนถึงความถี่ 4 GHz จากนั้นจะลดลงเท่ากับ 3 dBi ที่ความถี่ 6.5 GHz และจะเริ่มเพิ่มขึ้นเท่ากับ 6.5 dBi ที่ความถี่ 9 GHz จนมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดเท่ากับ 6.8 dBi ที่ความถี่ 10.5 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มุมศูนย์



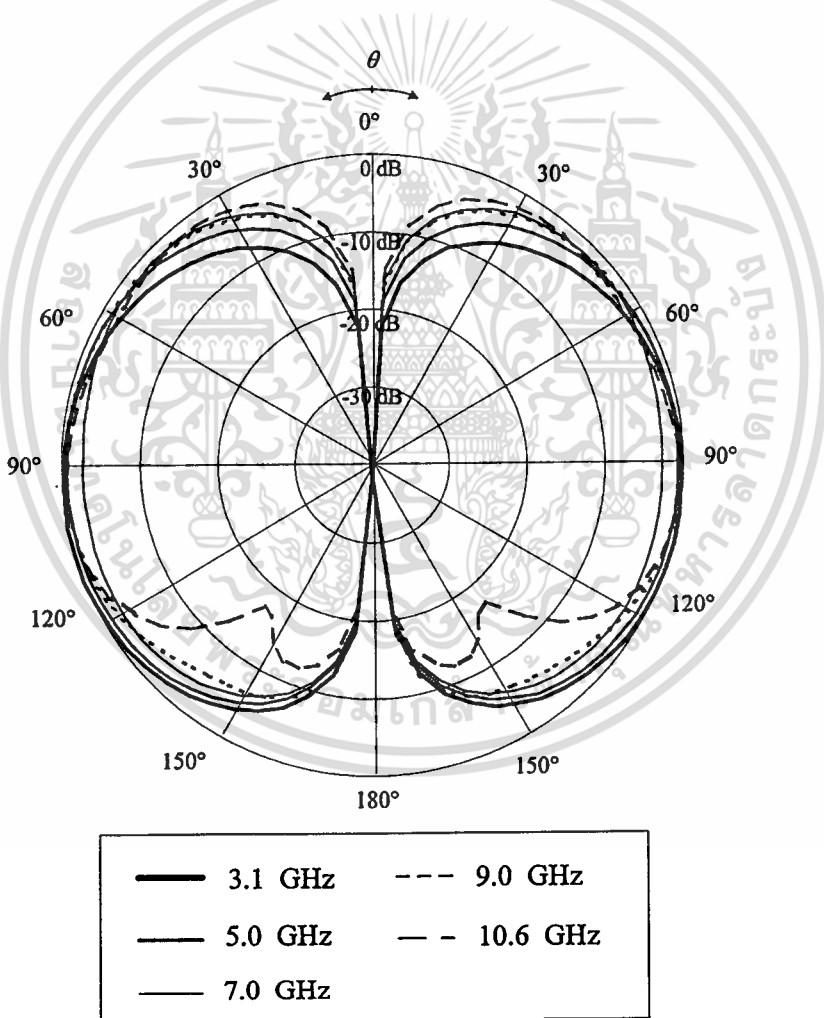
รูปที่ 4.14 อัตราการขยายที่มุมสูงสุด

ในรูปที่ 4.14 แสดงค่าอัตราการขยายของสายอากาศช่วงความถี่กว้าง ใช้งานตั้งแต่ความถี่ 3 GHz - 10.6 GHz ซึ่งจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น โดยจะมีค่าเท่ากับ 4.5 dBi ที่ความถี่ตั้งแต่ 3 GHz จนถึงความถี่ 5GHz จากนั้นจะมีค่าสูงขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ความถี่ 9.7 GHz ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7 dBi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

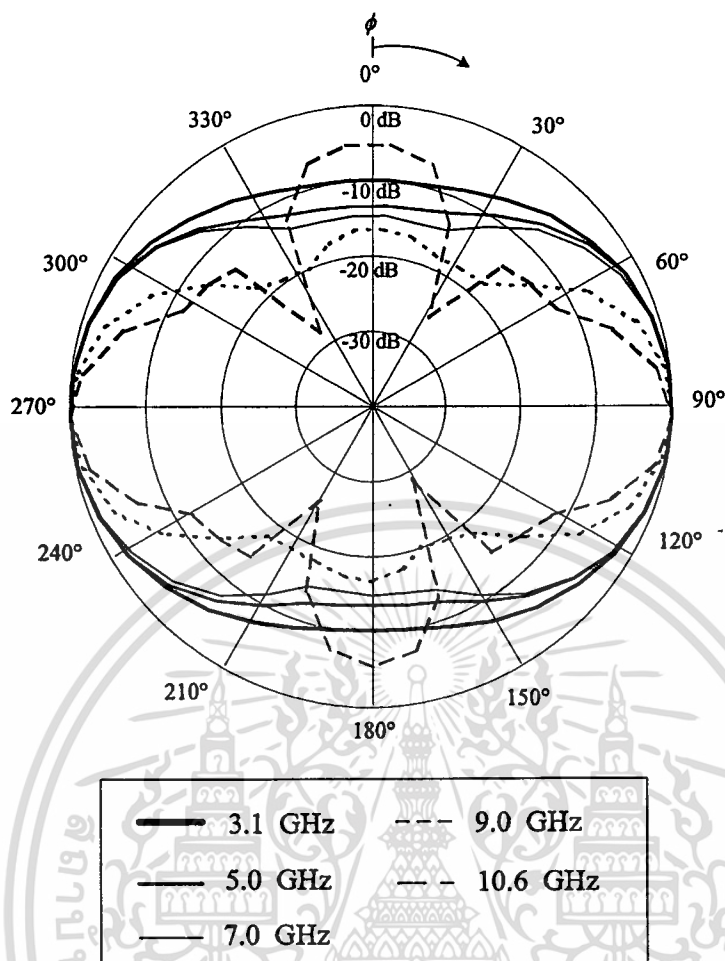
## แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่แสดงในบทที่ 4 นี้เป็นการแสดงที่ความถี่ต่ำที่ 3.1 GHz จนถึงความถี่สูงที่ 10.6 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศนี้ถูกนำไปใช้งาน โดยในรูปที่ 4.14 นี้เป็นการแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 3.1, 5, 7, 9, 10.6 GHz ซึ่งครอบคลุมการทำงานของสายอากาศช่วงความถี่กว้างนี้ จะพบว่าที่ความถี่ 10.6 GHz จะมีลำคลื่นด้านข้างออกมาเล็กน้อย และจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้นค่าของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าจะยกขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 4.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กจะมีความสมมาตรกันทุกๆความถี่ ซึ่งในรูปที่ 4.15 จะแสดงที่ความถี่ตั้งแต่ 3.1 ถึง 10.6 GHz พบว่าความถี่ตั้งแต่ 3.1 จนถึงความถี่ 7 GHz จะมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่มีทิศทางที่แน่นอน และเมื่อความถี่ 10.6 GHz แบบรูปการกระจายคลื่นจะเริ่มมีลำคลื่นด้านข้างแต่ค่านี้ยังยอมรับได้

ซึ่งค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบทั้งสองนี้ ในระนาบสนามไฟฟ้าจะเกิดการยกขึ้นของลำคลื่นซึ่งเกิดจากความถี่ที่เพิ่มขึ้นแต่ยังคงมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางอยู่

และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กจะเริ่มเกิดลำคลื่นด้านข้างเมื่อความถี่เท่ากับ 9 GHz ไปจนถึง 10.6 GHz ที่ 9 GHz จะมีค่าลำคลื่นด้านข้างเล็กน้อย และที่ความถี่ 10.6 GHz จะมีลำคลื่นด้านข้างสูงกว่าแต่ยังยอมรับได้

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบทั้งสองได้แสดงความสามารถในการทำงานครอบคลุมทุกๆความถี่ใช้งานไว้นั้น รวมทั้งแสดงคุณสมบัติของการเป็นสายอากาศช่วงความถี่กว้าง และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้งานจริงได้

### ค่ากว้างลำคลื่นครึ่งกลาง ( Half Power Beamwidth)

จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าในรูปที่ 4.14 จากการจำลองพารามิเตอร์ต้นแบบ จะคำนวณค่ากว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half power beamwidth) จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนี้ที่มีค่าลำคลื่นมากกว่า -3 dB ดังตารางที่ 4.3 ที่แสดงค่ากว้างลำคลื่นที่ความถี่ 3.1, 5, 7, 9 และ 10.6 GHz

จะพบว่าที่ความถี่ 3.1 GHz และ 7 GHz จะมีค่ากว้างลำคลื่นเท่ากับ 95 องศาเท่ากัน ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดของค่าความถี่ทั้งหมด ที่ความถี่ 9 GHz และ 10.6 GHz จะมีค่ากว้างลำคลื่นสูงกว่าเดิมเท่ากับ 97.5 องศา และที่ความถี่ 5 GHz จะมีค่ากว้างลำคลื่นเท่ากับ 105 องศา ถึงแม้ว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นลำคลื่นก็จะขยขึ้น แต่ยังคงมีค่ากว้างลำคลื่นที่ใกล้เคียงกัน และมีค่าน้อยซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของสายอากาศ

ตารางที่ 4.3 ค่ากว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง ที่ความถี่ 3.1, 5, 7, 9, 10.6 GHz

ความถี่ (GHz)	ค่ากว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (องศา)	
3.1	40 – 135	95
5	45 – 150	105
7	65 – 160	95
9	60 – 157.5	97.5
10.6	65 – 162.5	97.5

### 4.4 บทสรุป

ในบทนี้ได้นำผลของการจำลองค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อค่าช่วงกว้างความถี่ ซึ่งอยู่ในรูปของค่าการสูญเสียย้อนกลับมาแสดงโดยการใช้โปรแกรม IE3D โดยวิธีโมเมนต์ในการหาค่าทั้ง 5 ค่า เพื่อมาประกอบกันเป็น โมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นตัวป้อนสัญญาณให้กับวงแหวนสี่เหลี่ยม โดยตัวโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านนี้ ได้แนวคิดมาจากการพัฒนางานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วจากบทที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ของโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านนั้นได้ทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

- ความกว้างของโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน ( $l$ )
- ความสูงของโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน ( $w$ )
- ระยะห่างจากตัววงแหวนกับโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน ( $d$ )
- ความสูงของตัวป้อนสัญญาณที่มีรูปทรงสามก้าน ( $h$ )
- ระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณ A และ C ของโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน ( $s$ )

จากโครงสร้างโมโนโพลชนิดแผ่นที่ได้นี้จะมีค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้กล่าวไปแล้วในบทนี้ จะพบว่าจะมีค่าแตกต่างกันออกไปตามค่าของความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดช่วงความถี่ ตามเงื่อนไขและกฎเกณฑ์ของโครงสร้างของสายอากาศที่ได้กำหนดไว้ ดังนั้นเพื่อยืนยันความถูกต้องของการจำลองค่าที่ได้ จะทำการทดสอบสายอากาศช่วงความถี่กว้างดังกล่าวนี้ในบทที่ 5 เพื่อให้ได้สายอากาศช่วงความถี่กว้างที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง เพื่อนำไปใช้งานในระบบที่ต้องการสายอากาศที่ทำงานครอบคลุมช่วงความถี่กว้าง

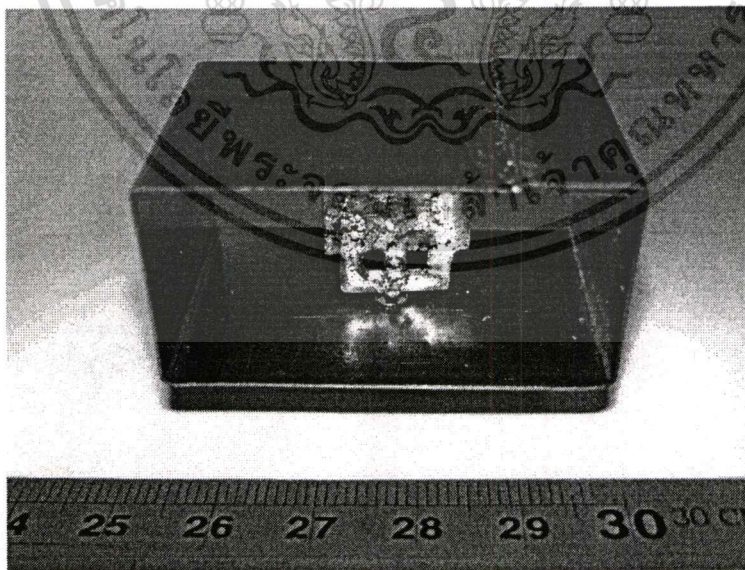
## บทที่ 5

### การทดลองและผลการทดลอง

จากบทที่ 4 เป็นการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างสายอากาศจริง ซึ่งได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม IE3D ซึ่งเป็นการวิเคราะห์คุณลักษณะของโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านซึ่งนำไปป้อนในสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยม ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลที่ได้จากการคำนวณว่ามีความแม่นยำ และถูกต้องมากน้อยเพียงใด ซึ่งการทดสอบสายอากาศได้ออกแบบการสร้างที่ความถี่ในช่วงความถี่กว้าง ตั้งแต่ความถี่ 3.1 GHz จนถึง 10.6 GHz ซึ่งเป็นความถี่ใช้งานของสายอากาศที่ใช้ในช่วงความถี่กว้าง (wideband antenna) ซึ่งสายอากาศชนิดนี้จะมีช่วงแถบความถี่เท่ากับ 7.5 GHz หรือเท่ากับ 1:3.42

#### 5.1 การสร้างสายอากาศ

สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมสามก้านถูกสร้างขึ้นเป็นสายอากาศต้นแบบเพื่อทำการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 5.1 โดยสายอากาศจะมีค่าพารามิเตอร์ดังที่ได้จำลองมาแล้วในบทที่ 4



รูปที่ 5.1 สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมสามก้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้านที่มีค่าพารามิเตอร์เหมาะสมที่สุดซึ่งได้จากการจำลองจากโปรแกรม IE3D ดังแสดงไว้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของ โมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมสามก้านที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการจำลอง

พารามิเตอร์	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพ
$a$	$0.359\lambda$	4.4 cm
$b$	$0.180\lambda$	2.2 cm
$c$	$0.245\lambda$	3.0 cm
$\delta$	$0.002\lambda$	0.1 cm
$l$	$0.012\lambda$	1.2 cm
$w$	$0.010\lambda$	1.0 cm
$d$	$0.0012\lambda$	0.12 cm
$h$	$0.005\lambda$	0.5 cm
$t$	$0.008\lambda$	0.8 cm

โดยวัสดุที่นำมาสร้างสายอากาศช่วงความถี่กว้างนี้เป็นทองเหลือง ซึ่งวัสดุทองเหลืองนี้เมื่อนำมาสร้างสายอากาศ โครงสร้างจะมีความแข็งแรง ไม่บิดเบี้ยวง่าย ทนต่อการสึกหรอและราคาไม่แพง

โดยเริ่มจากการสร้างวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยใช้วิธีพับแผ่นทองเหลืองขนาดกว้าง 3 cm ยาว 14.2 cm จากนั้นแบ่งความยาว 14.2 cm ให้เป็นค่าความกว้างและความสูงของวงแหวนที่ค่า 4.4 cm และ 2.2 cm ตามลำดับเพื่อที่จะทำการพับให้กลายเป็นสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมและเหลือความยาวของแผ่นทองเหลืองเท่ากับ 1 cm เพื่อใช้ในการบัดกรีวงแหวนให้ติดกันโดยพับความยาวของแผ่นทองเหลืองที่เหลือ 1 cm นั้นไว้ข้างในแล้วบัดกรี จากนั้นทำการเจาะรูเพื่อที่จะใช้เป็นทางผ่านของคอนเนคเตอร์ชนิด SMA เพื่อที่จะนำไปบัดกรีติดกับตัวโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้าน ในส่วนของโมโนโพลนั้นให้ตัดแผ่นทองเหลืองที่มีความหนาเท่ากับ 0.1 cm มีความกว้างเท่ากับ 1.2 cm , ความสูงเท่ากับ 1.0 cm, ความสูงของตัวก้านเท่ากับ 0.5 cm โดยทำการแบ่งออกเป็นสองส่วนเท่าๆกันคือเท่ากับ 0.25 cm เป็นก้านในแนวแกนนอนและก้านในแนวแกนตั้งเพื่อเป็นเส้นทางให้กระแสไหลและค่าระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณ A และ C เป็นระยะห่างเท่ากับ 0.8 cm จากนั้นนำ

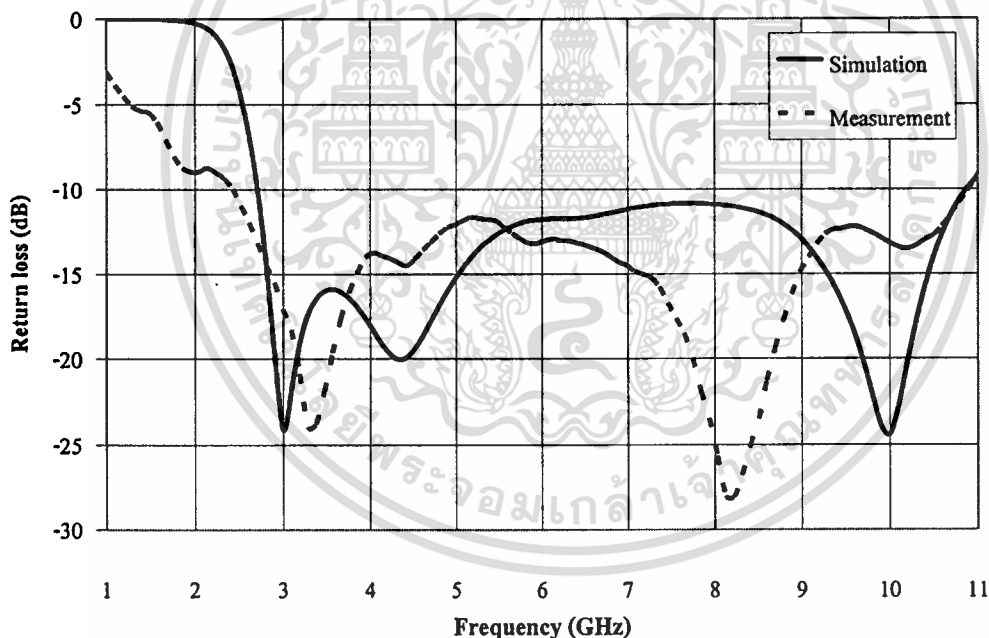
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่น โม โน โพลแบบสามก้านมาบังคับครีติกกับจั่วคอนเนคเตอร์ SMA ภายในวงแหวนสี่เหลี่ยม จะได้ เป็นสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยโม โน โพลชนิดแผ่นแบบสามก้านดังรูปที่ 5.1

## 5.2 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพล ชนิดแผ่นสามก้าน

จากกราฟในรูปที่ 5.2 เป็นกราฟการเปรียบเทียบค่าช่วงกว้างความถี่ที่ได้จากการจำลองและจากการทดลองกราฟที่ได้จากการทดลองจะมีค่าความถี่เรโซแนนซ์เริ่มต้นที่ความถี่ 2.75 GHz แต่กราฟที่ได้จากการทดลองจะมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ต่ำกว่าคือที่ 2.45 GHz

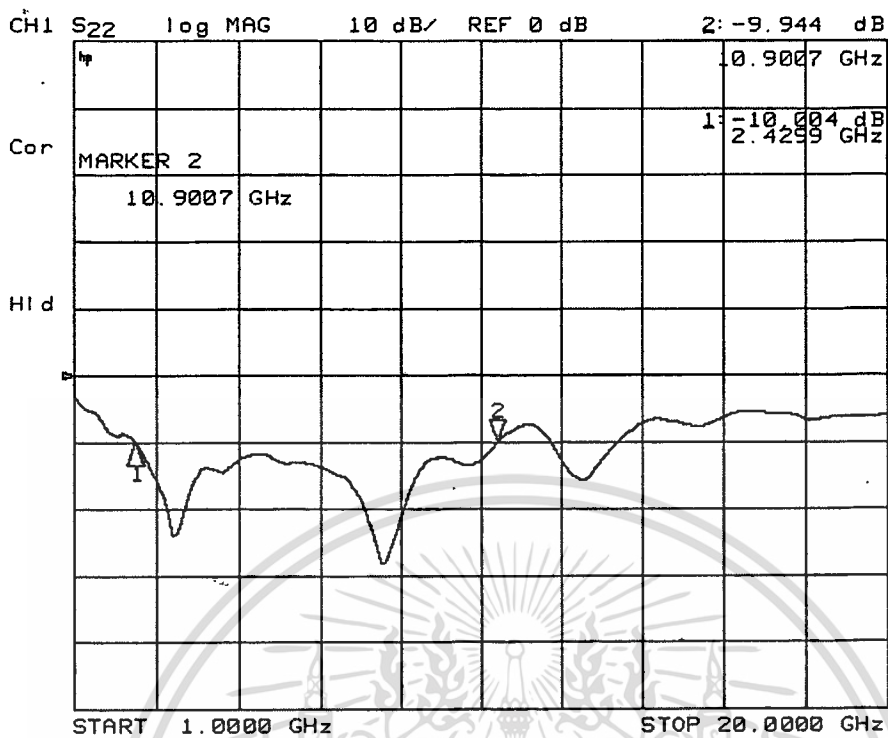
ผลที่ได้ทั้งสองจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยค่าที่ได้จากการจำลองจะมีค่าช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 8.15 GHz และค่าที่ได้จากการทดลองจะมีค่าช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 8.5 GHz รวมทั้งมีค่าการสูญเสียย้อนกลับที่น้อยกว่าจากการจำลองดังนั้นค่าช่วงกว้างที่ได้จากการทดลองจะมีค่ากว้างกว่าการจำลอง



รูปที่ 5.2 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโม โน โพลชนิดแผ่นสามก้าน

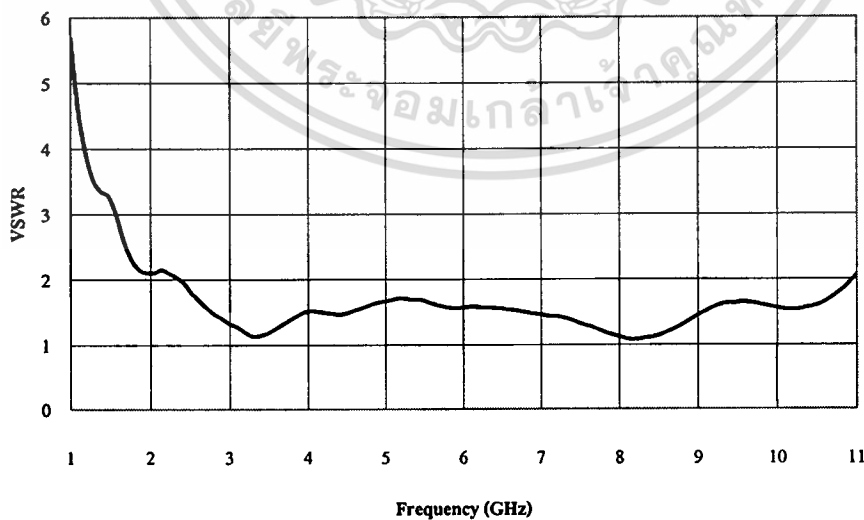
รวมทั้งในรูปที่ 5.3 เป็นรูปค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้าน โดยได้จากการทดลองด้วยเครื่อง NETWORK ANALYZER MODEL 8720C

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



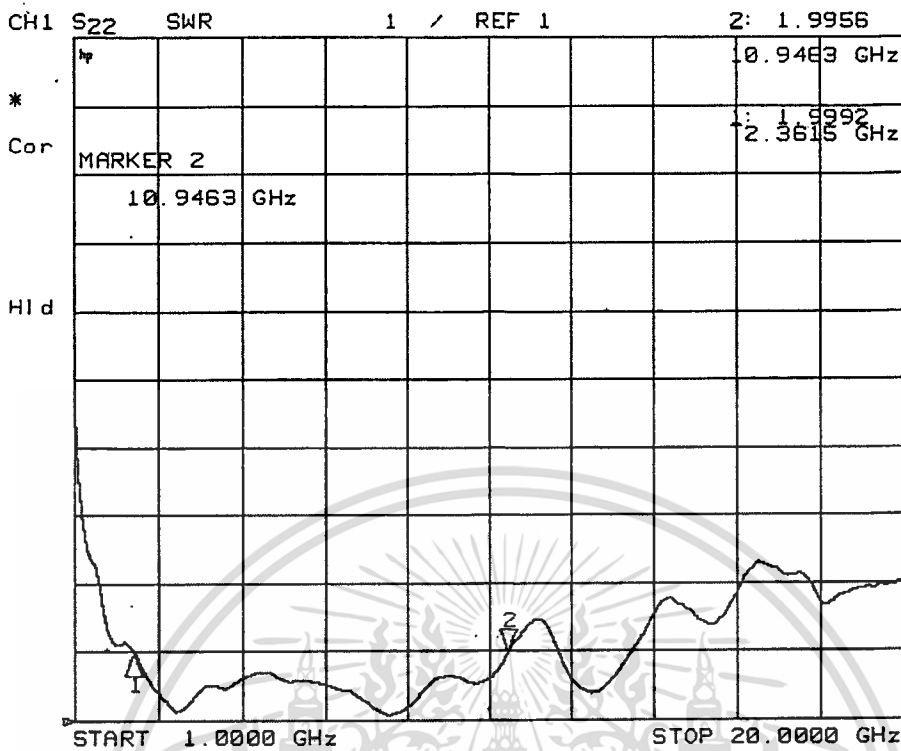
รูปที่ 5.3 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านที่ทำกรทดลอง

### 5.3 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ



รูปที่ 5.4 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านที่ทำกรทดลอง

ในรูปที่ 5.4 และ 5.5 เป็นค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศชนิดนี้ที่ได้จากการทดลองซึ่งอัตราส่วนคลื่นนิ่งนี้เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการออกแบบสายอากาศให้ใช้งานได้ดีในระบบที่ต้องการซึ่งจะรวมไปถึงสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราส่วนคลื่นนิ่งในช่วงความถี่ที่พิจารณาซึ่งในที่นี้คือช่วงความถี่กว้างซึ่งสามารถหาได้จากสมการข้างล่างนี้

$$\Gamma = \frac{Z_0 - Z_{in}}{Z_0 + Z_{in}} \quad (5.1)$$

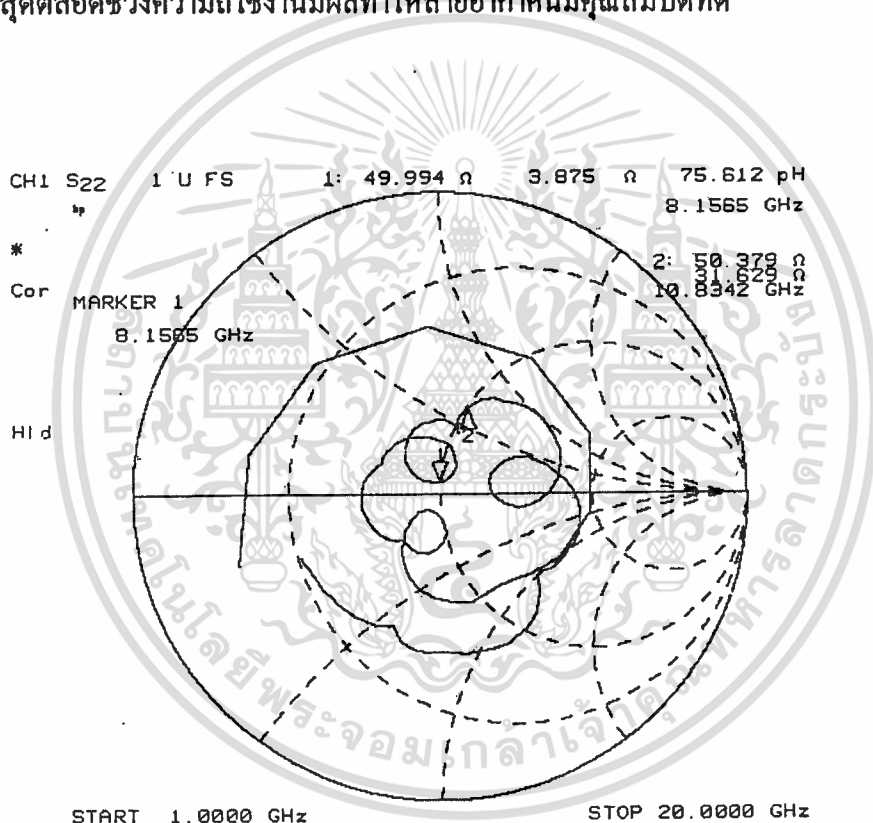
และ

$$SWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (5.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

ในรูปที่ 5.6 เป็นการทดลองตั้งแต่ความถี่ 1 GHz จนถึงความถี่ 20 GHz จากรูปที่หมายเลข 1 จะสังเกตได้ว่า ที่ความถี่ 8.15 GHz จะมีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศใกล้เคียงเท่ากับ 50 โอห์มมากที่สุด ซึ่งเป็นจุดที่ดีที่สุดในการทดลอง และที่หมายเลข 2 ที่ความถี่ 10.83 GHz ค่าอิมพีแดนซ์จะเท่ากับ 50.379 โอห์ม ซึ่งหากค่าอิมพีแดนซ์มีค่าใกล้เคียง 50 โอห์มแล้ว จะมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนใกล้เคียงศูนย์ และเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนใกล้เคียงศูนย์ จะมีผลทำให้อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่มีค่าเท่ากับ 1 นั้น เป็นการบ่งบอกคุณสมบัติที่ดีของสายอากาศ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือหากค่าอิมพีแดนซ์มีค่าใกล้เคียง 50 โอห์มมากที่สุดตลอดช่วงความถี่ใช้งานมีผลทำให้สายอากาศนี้มีคุณสมบัติที่ดี

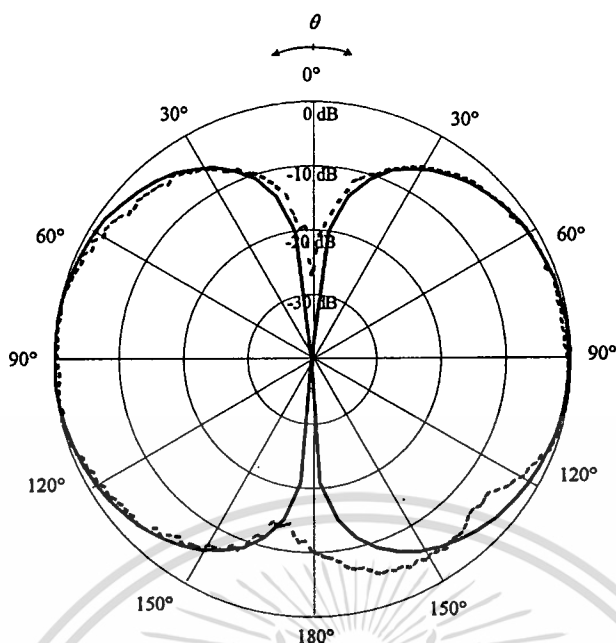


รูปที่ 5.6 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านที่ทำกรทดลอง

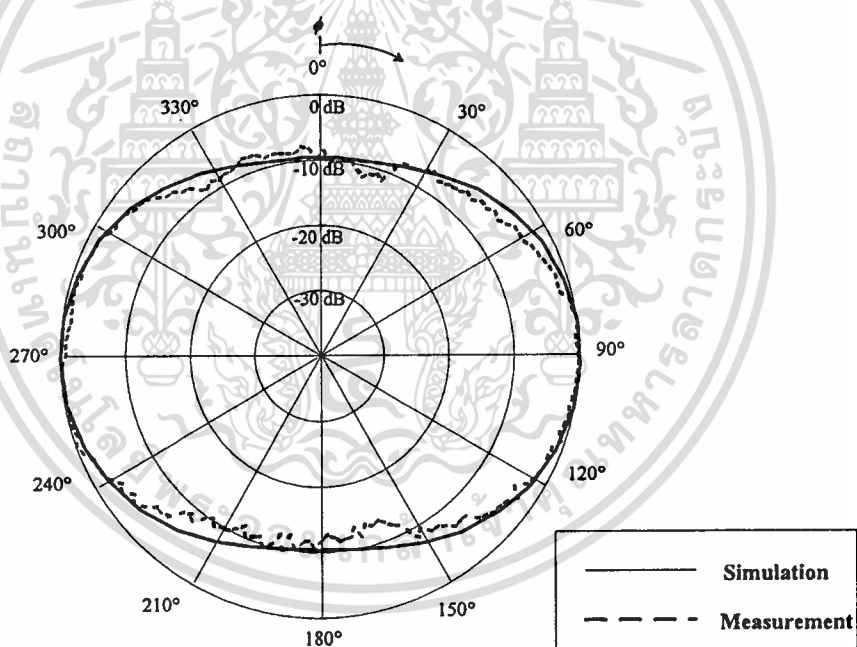
## 5.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

การทดสอบสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านที่สนามระยะไกลที่ความถี่ต่างๆที่ทำการทดสอบคือที่ความถี่ 3.1 GHz 4 GHz 5 GHz 6 GHz 7 GHz 8 GHz 9 GHz และ 10.6 GHz และนำมาเปรียบเทียบกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการจำลองเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งสองระนาบจะมีแนวโน้มอย่างไร ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.7-5.14 ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.7 จนถึงรูปที่ 5.11 หรือที่ความถี่ 3.1- 7 GHz พบว่าผลจากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม IE3D มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทั้งสองระนาบ อย่างไรก็ตามผลการทดสอบที่ได้ยังมีความคลาดเคลื่อนกันระหว่างผลการทดสอบและผลการจำลองแบบดังการเปรียบเทียบในรูปที่ 5.12 -5.14 กล่าวคือ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 8-10.6 GHz จะเริ่มมีความแตกต่างกันระหว่างการจำลองแบบและการทดสอบ เนื่องจากการทดสอบที่ความถี่สูง ดังนั้นจะมีสัญญาณรบกวนเข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งเกิดจากตัวกลางคือสายนำสัญญาณ ซึ่งที่ความถี่สูง จะมีสัญญาณรบกวนรวมเข้ามาด้วยกับสัญญาณจริง ประกอบกับความยาวของสายสัญญาณจะมีผลทำให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณภายในสายนำสัญญาณ จึงทำให้เกิดความแตกต่างกันระหว่างการจำลองแบบกับการทดสอบ

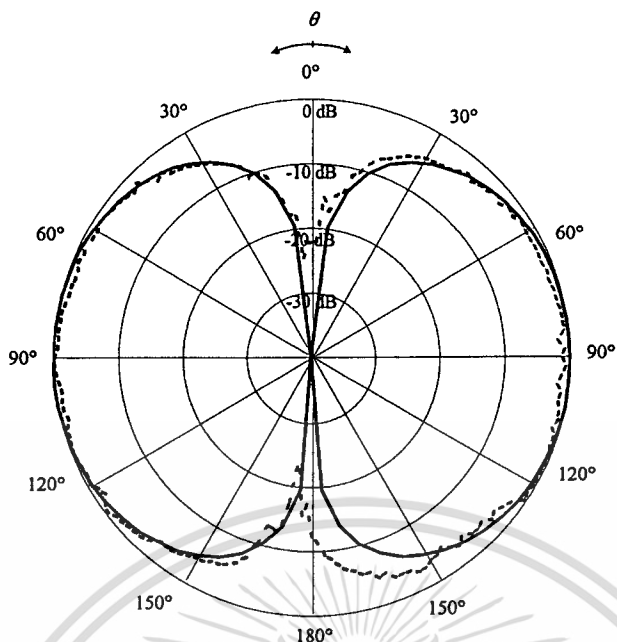


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

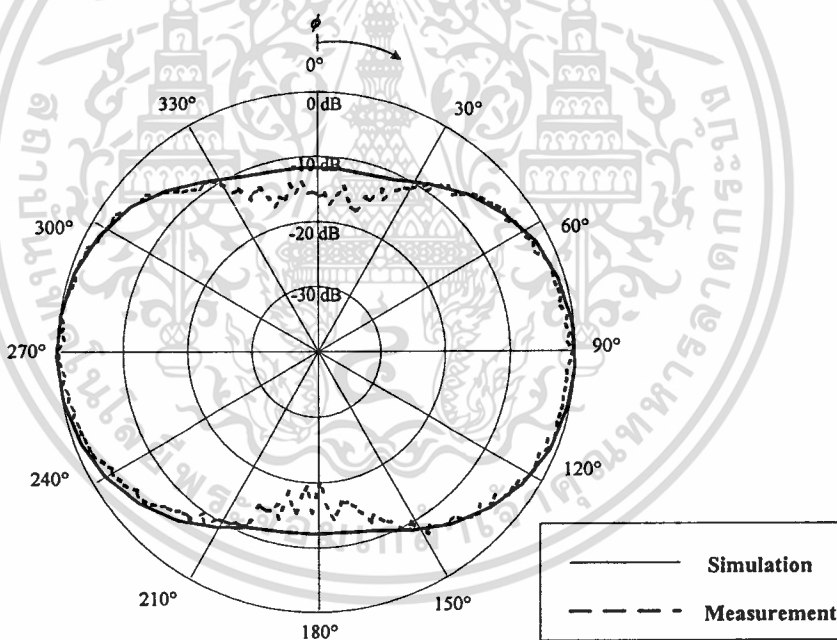


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

**รูปที่ 5.7** แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของ  
สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้าน  
ที่ความ 3.1 GHz



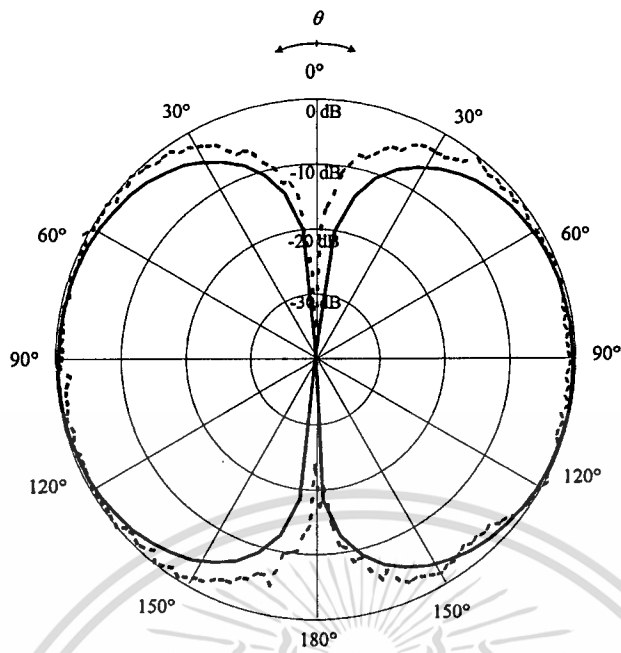
(ก) ระบายสนามไฟฟ้า



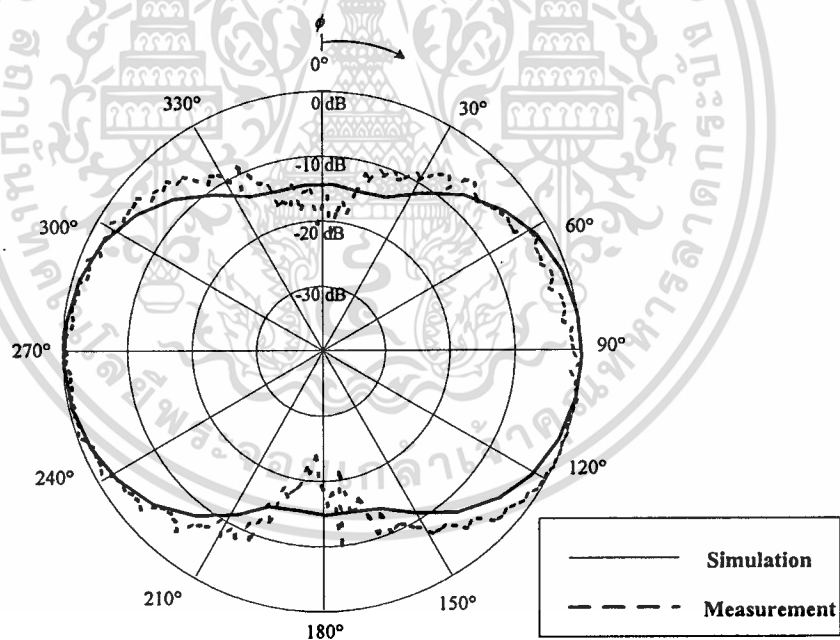
(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระบายสนามไฟฟ้าและระบายสนามแม่เหล็กของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านที่ความถี่ 4 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



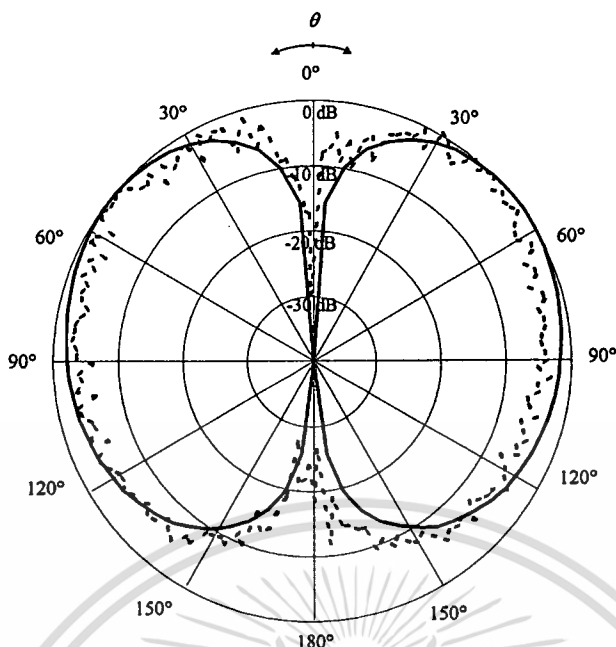
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



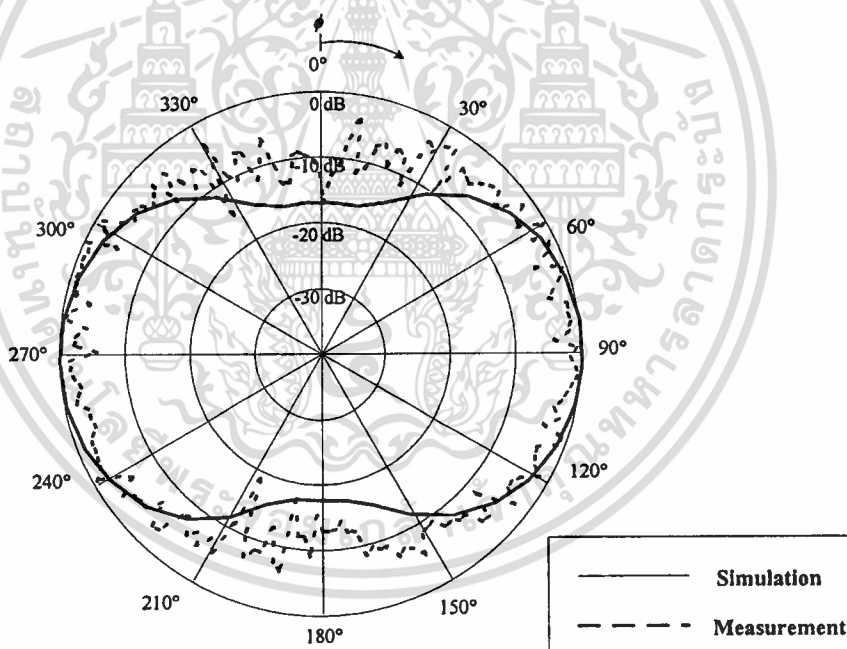
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านที่มีความถี่ 5 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



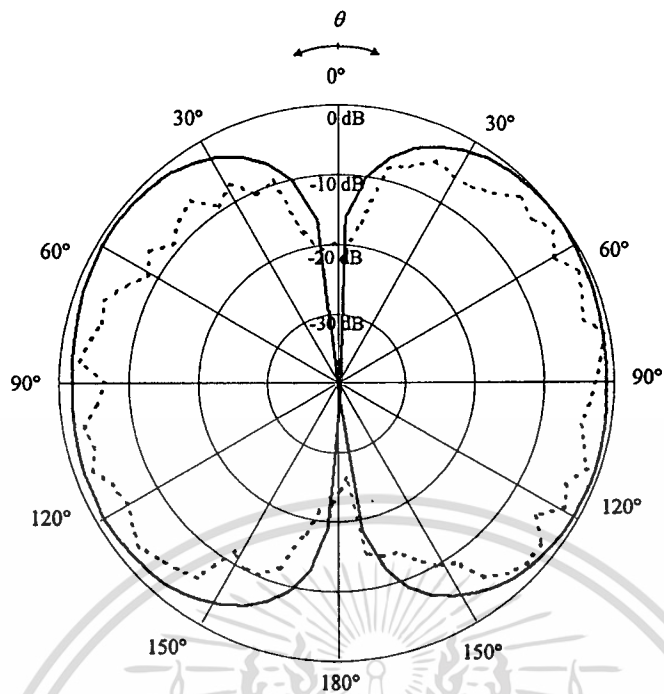
(ก) ระบายสนามไฟฟ้า



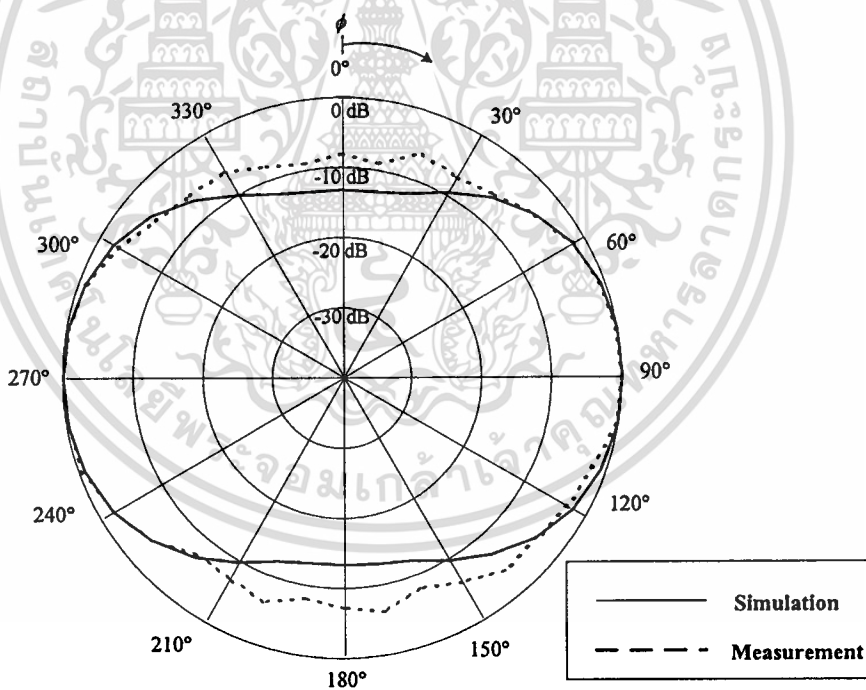
(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านที่มีความถี่ 6 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



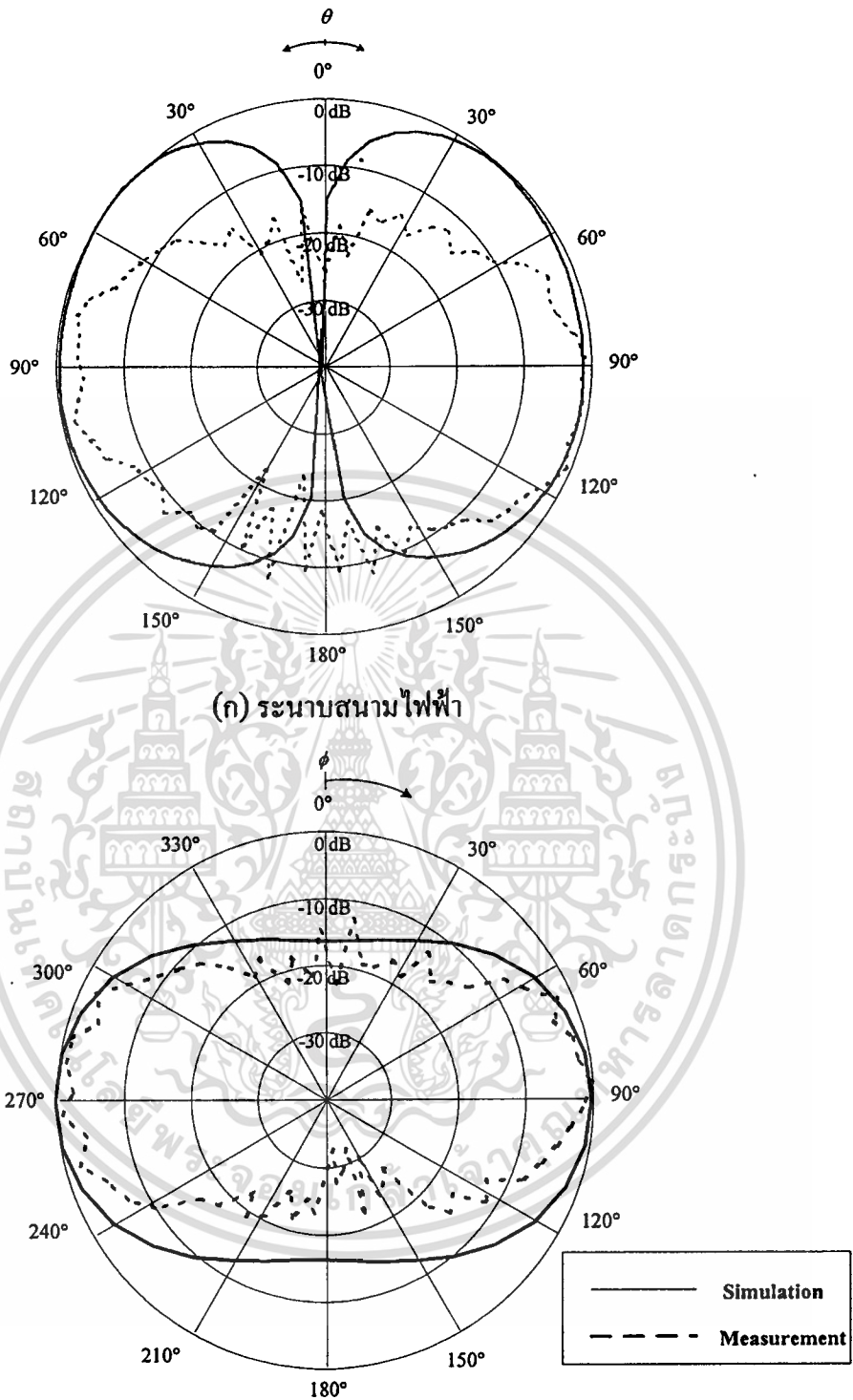
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

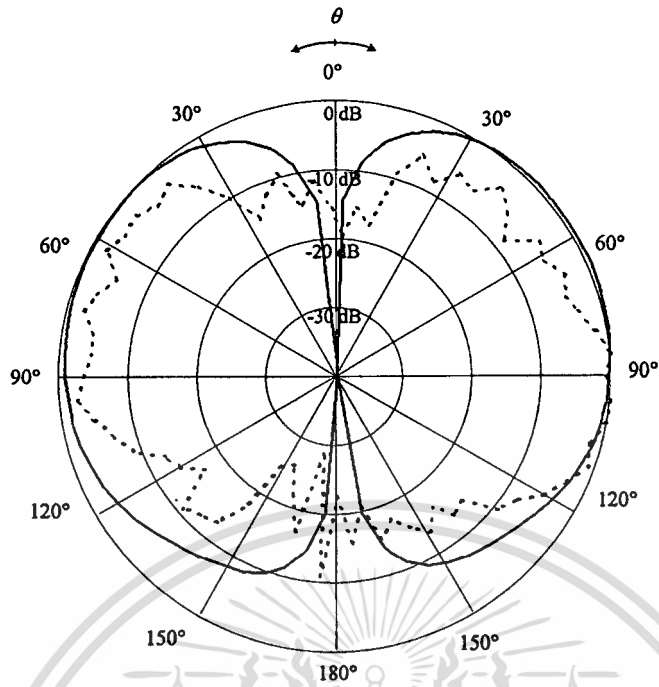
รูปที่ 5.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านที่มีความถี่ 7 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

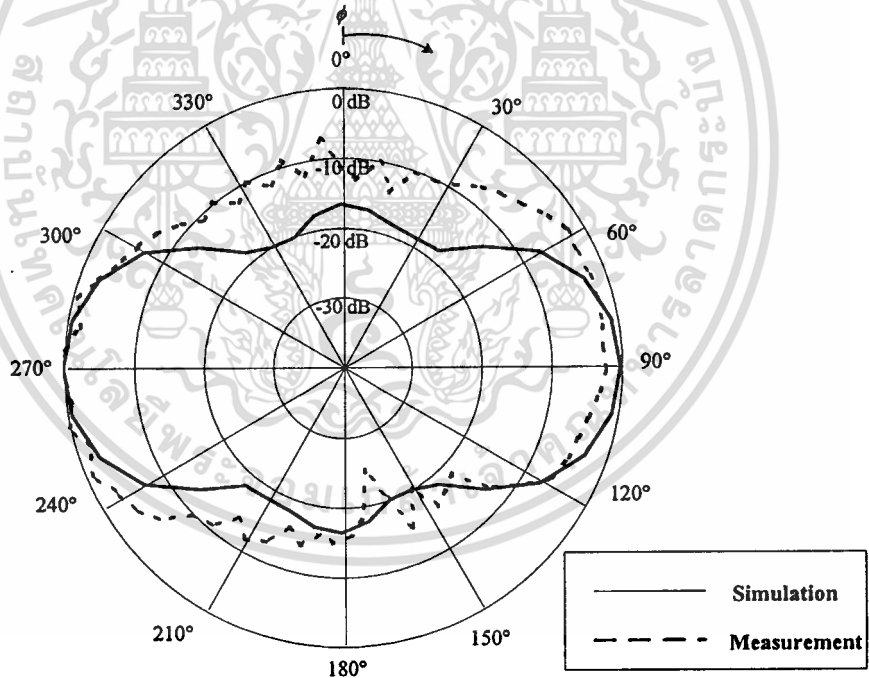


รูปที่ 5.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วย โม โน โพลชนิดแผ่นสามก้านที่ความถี่ 8 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



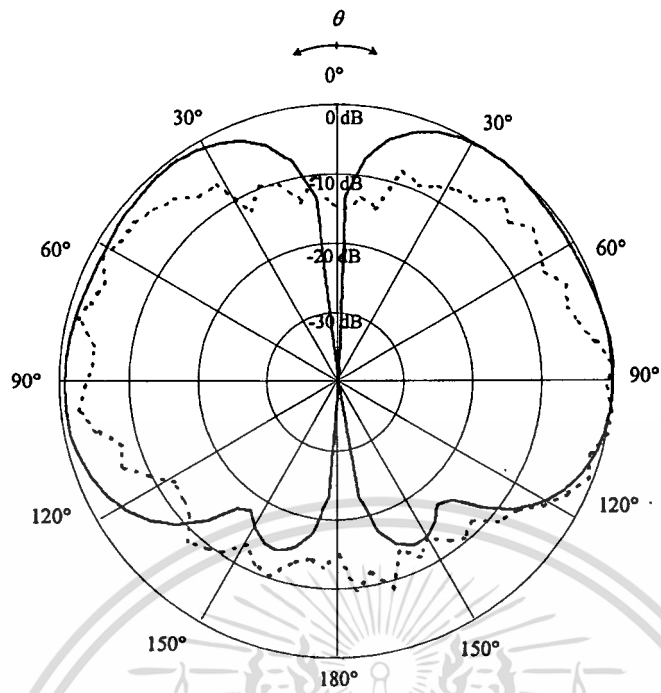
(ก) ระบายสนามไฟฟ้า



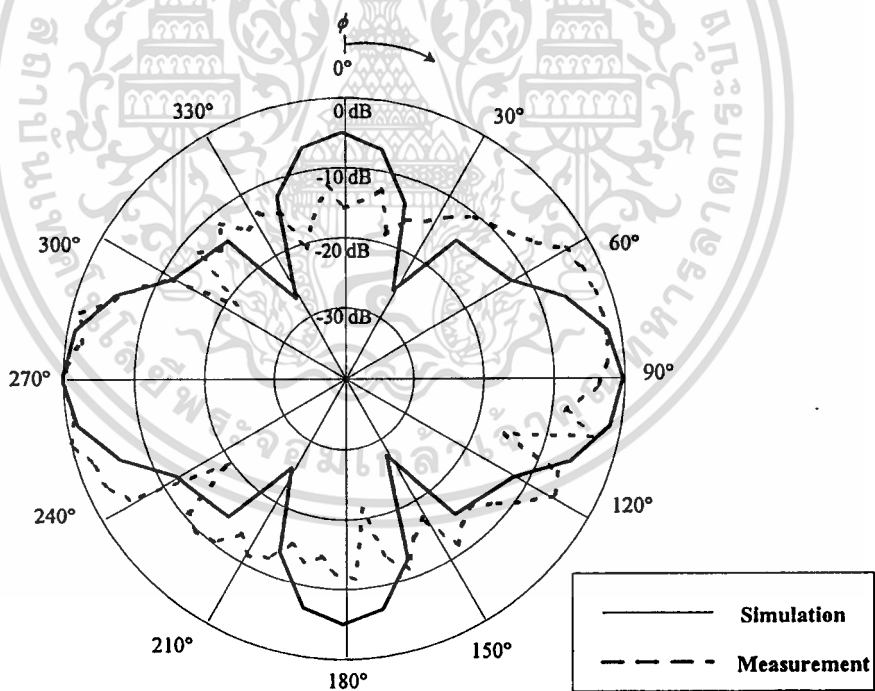
(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านที่ความถี่ 9 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า



(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้านที่มีความถี่ 10.6 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.6 สรุป

ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการสร้างและทดสอบของโครงสร้างสายอากาศช่วงความถี่กว้างนี้มีผลต่อคุณลักษณะของค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น รวมทั้งสภาพเจาะจงทิศทางและอัตราการขยาย โดยรายละเอียดได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 ซึ่งพารามิเตอร์ที่เราได้พิจารณามีดังนี้คือ ขนาดของวงแหวนสี่เหลี่ยม ขนาดของโมโนโพลชนิดแผ่นสามก้าน ซึ่งสามารถแบ่งพารามิเตอร์ที่ศึกษาออกเป็นพารามิเตอร์ย่อยๆ อีก 5 ค่า ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น

จากการศึกษาที่ได้กล่าวไปแล้วทำให้เรารู้แนวทางในการนำไปใช้งาน โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศต่างๆ เพื่อให้ได้ช่วงกว้างความถี่ที่ต้องการใช้งาน ซึ่งอยู่ในรูปของการสูญเสียย้อนกลับ และอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ และค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆที่สายอากาศนี้สามารถใช้งานได้

และหลังจากการปรับเปลี่ยนค่าให้เหมาะสมที่สุดแล้ว ได้ทำการสร้างสายอากาศเพื่อทำการทดสอบและเปรียบเทียบผลกับการจำลองโดยใช้โปรแกรม IE3D ซึ่งให้เห็นว่าการจำลองค่าพารามิเตอร์ การออกแบบ และการสร้างสายอากาศมีความถูกต้องและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามผลการทดสอบที่ได้ยังมีความคลาดเคลื่อนกันระหว่างผลการทดลองและผลจากการจำลอง เนื่องจากมีข้อจำกัดบางอย่าง ในทางปฏิบัติและการทดลองซึ่งสมควรจะมีการพัฒนาเพื่อแก้ไขต่อไป

## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์

#### 6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นซึ่งรูปทรงของโมโนโพลชนิดแผ่นจะออกแบบให้มีรูปทรงเป็นสามก้าน โดยโครงสร้างที่เป็นสามก้านนี้จะสามารถขยายช่วงความถี่ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมให้มีช่วงความถี่ที่กว้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม IE3D ด้วยวิธีโมเมนต์ สายอากาศนี้จะมีลักษณะที่ประกอบไปด้วย องค์ประกอบสององค์ประกอบคือองค์ประกอบในส่วนของวงแหวนสี่เหลี่ยม ซึ่งทำหน้าที่เป็นแผ่นสะท้อนบีบถาคัดให้แยกเป็นสองทิศทางและองค์ประกอบในส่วนที่สองคือโมโนโพลชนิดแผ่นจากการที่ได้กล่าวมาแล้วที่ได้ออกแบบให้มีรูปทรงเป็นแบบสามก้าน และมีค่าที่เหมาะสมกับวงแหวนสี่เหลี่ยมทำให้สามารถออกแบบช่วงความถี่ของสายอากาศนี้ โดยสายอากาศนี้ได้ออกแบบให้สามารถทำงานได้ครอบคลุมช่วงความถี่กว้างหรือหลายช่วงความถี่(Wideband antenna) ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบสายอากาศให้ใช้งานตั้งแต่ช่วงความถี่ 3.1 ถึง 10.6 GHz สิ่งที่สำคัญและสนใจคือคุณลักษณะของสายอากาศประกอบด้วย

- ช่วงความถี่ใช้งาน
- แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก
- ค่าอัตราขยายและค่าสภาพเจาะจงทิศทาง
- ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกลาง(HPBW)

โดยจะทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ของวงแหวนสี่เหลี่ยมและโมโนโพลชนิดแผ่นที่ออกแบบ

- ขนาดความกว้างและความสูงของวงแหวน ( $a, b$ )
- ความยาวของวงแหวน( $c$ )
- ความหนาของโมโนโพลชนิดแผ่น ( $d$ )
- ความกว้างของโมโนโพลชนิดแผ่น ( $l$ )
- ความสูงของโมโนโพลชนิดแผ่น ( $w$ )
- ระยะห่างจากตัววงแหวนกับโมโนโพลชนิดแผ่น ( $d$ )
- ความสูงของตัวป้อนสัญญาณที่ออกแบบเป็นรูปทรงสามก้าน ( $h$ )
- ระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณ A และ C ของโมโนโพลชนิดแผ่น ( $t$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสุดท้ายจะเป็นการทดสอบสายอากาศเพื่อยืนยันความถูกต้องของการจำลองและออกแบบสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นดังกล่าว คดมีความเป็นมาของปัญหา วัตถุประสงค์ และขอบเขตของงานวิจัยที่ได้เสนอไว้ในบทที่ 1

สำหรับบทที่ 2 จะเป็นทฤษฎีและหลักการวิวัฒนาการของสายอากาศจนเป็นสายอากาศชนิดนี้ โดยเริ่มจากการพัฒนาจากสายอากาศโมโนโพลเชิงเส้นบนแผ่นระนาบกราวน์เพลนและเปลี่ยนจากโมโนโพลเชิงเส้นมาเป็นโมโนโพลชนิดแผ่นเพื่อเพิ่มช่วงความถี่ใช้งาน โดยที่มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง จากนั้นจะออกแบบให้สายอากาศนี้มีแบบรูปการแพร่กระจายแบบสองทิศทาง โดยเพิ่มแผ่นสะท้อนทั้งสอง และแผ่นระนาบปิดด้านบนเข้าไป เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางเพื่อการประยุกต์การใช้งานในระบบการสื่อสารในปัจจุบัน

บทที่ 3 จะกล่าวถึงโปรแกรม IE3D ในการจำลองและคำนวณ โครงสร้างสายอากาศที่ได้ ออกแบบไว้ในบทที่ 4 โดยใช้หลักการของวิธีโมเมนต์

บทที่ 4 จะกล่าวถึงการออกแบบพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการขยายช่วงความถี่ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 รวมทั้งการกล่าวถึง คุณสมบัติของสายอากาศที่ได้ออกแบบ เช่น ช่วงความถี่ที่อยู่ในรูปของค่าการสูญเสียย้อนกลับ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก อัตราการขยายและค่าสภาพเจาะจงทิศทาง และค่าความกว้างลำคลื่นครั้งกำลังซึ่งทั้งหมดนี้เป็นการจำลองโดยใช้โปรแกรม IE3D

บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง ซึ่งได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมมาแล้วจากการจำลอง โครงสร้างสายอากาศ จะกล่าวถึงการสร้างสายอากาศจริงของพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้แล้วทั้ง 9 ค่า และสุดท้ายจะเป็นการแสดงผลของการทดสอบสายอากาศ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกันของการทดลองกับการจำลองซึ่งประกอบด้วย แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและช่วงความถี่ที่ถูกขยาย

## 6.2 วิจารณ์ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางในการพัฒนา

สำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดสอบสายอากาศที่ความถี่ที่สูงกว่า 6 GHz จะเกิดการสูญเสียในสายนำสัญญาณ ทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณที่รับและส่งมีค่าน้อยลงจากเดิม ทำให้ค่าที่วัดได้จะมีสัญญาณรบกวนปนเข้ามาด้วยทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสังเกตได้ยาก

แนวทางในการแก้ปัญหาคือ ต้องทำการลดความยาวของสายนำสัญญาณให้สั้นลงเพื่อลดการลดทอนที่เกิดจากความยาวของสายนำสัญญาณ และออกแบบห้องทดสอบสายอากาศให้มีขนาดลดลง เพื่อนำมารองรับกับความยาวของสายที่สั้นลง เพื่อจะสามารถสังเกตแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่สูงได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] D. M. Pozar and S. M. Duffy, "A Dual Band Circularly Polarized Aperture-Coupled Stacked Microstrip Antenna for Global Positioning Satellite," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-45, 11, pp. 1618-1625, 1997.
- [2] L. Economou and R. J. Langley, "Dual Band Hybrid Vehicular Telephone Antenna," *IEE Proceedings on Microwaves, Antennas and Propagation*, 149, 1, pp. 41-44, 2000.
- [3] S. C. -Ming, H. T. Chen, and K. L. Wong, "Printed Dual-Band Dipole with U-slotted Arms for 2.415.2 GHz WLAN Operations," *Electronics Letters*, 38, 22, pp. 1308-1309, 2002.
- [4] M. J. Ammann and Z. N. Chen, "Wideband Monopole Antennas for Multi-Band Wireless Systems," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 45, no. 2, Apr. 2003.
- [5] K. L. Wong, C. H. Wu, and S. W. Su, "Ultrawide-Band Square Planar Metal-Plate Monopole Antenna with a Trident-Shaped Feeding Strip," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 4, April 2005.
- [6] S.Kosulvit, C.Phongcharoenpanich, M.Krairiksh and T.Wakabayashi, "Radiation characteristics of a bidirectional antenna using a linear probe in a rectangular ring," *Proceedings of International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology 1998*, pp. 337-340, Beijing, Aug. 1998.
- [7] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, 1989.
- [8] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Desigs*, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, 1997.
- [9] R. E. Collin, *Field Theory of Guided Wave*, 2<sup>nd</sup> ed., Piscataway, New Jersey, IEEE Press, 1992.
- [10] R. F. Harrington (1967) *Microwave networks In : Time-Harmonic Electromagnetic Field*, pp 381-446. McGrawHill, Inc, New York.
- [11] S. Honda, M. Ito, H. Seki, and Y. Jinbo, "A Disk Monopole Antenna with 1:8 Impedance Bandwidth and Omnidirectional Radiation Pattern," *International Symposium on Antennas and Propagation*, Sapporo, Japan, pp. 1145-1 148, 1992.
- [12] S. Honda, M. Ito, H. Seki, and Y. Jinbo, "On a Broadband Disk Monopole Antenna," *Technical Report of Television Society Japan ROFT91-55 (1991.10)*, 1991.
- [13] M. Hammoud, P. Poey, and F. Colombd, "Matching the Input Impedance of a Broadband Disc Monopole," *Electronics Letters*, 29,4, pp. 406-407 , 1993.

- [14] N. P. Agrawall, G. Kumar, and K. P. Ray, "Wide-Band Planar Monopole Antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-46, 2, 1998, pp. 294-295.
- [15] M. I. Ammann and Z. N. Chen, "A Wideband Shorted Planar Monopole with Bevel," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-S1,3, March 2003.
- [16] P. V. Anob, K. P. Ray, and G. Kumar, "Wideband orthogonal square monopole antennas with semi-circular base," *IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. Dig.*, Boston, MA, pp. 294-297, 2001.
- [17] P. V. Anob, K. P. Ray, and G. Kumar, "Wideband orthogonal square monopole antennas with semi-circular base," *IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. Dig.*, Boston, MA, 2001, pp. 294-297.
- [18] E. Antonino-Daviu, M. Cabedo-Fabres, M. Ferrando-Bataller, and A. Valero-Nogueira, "Wideband double-fed planar monopole antennas," *Electron. Letter*, vol. 39, pp. 1635-1636, Nov. 2003.
- [19] The IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless Access Standards. [Online]. <http://grouper.ieee.org/groups/802/16/index.html>

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย ภากร ชุมทอง
วัน เดือน ปีเกิด	26 พฤศจิกายน 2519 ที่จังหวัดตรัง
ประวัติการศึกษา	2541 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์ กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	9/3 หมู่ 4 ถ.สุขาภิบาล 5 แขวง ออเงิน เขต สายไหม กรุงเทพมหานคร
ที่ทำงาน	2425/2 บ.เมเซอร์ โทรนิคส์ จำกัด ถ.ลาดพร้าว แขวง วังทองหลาง เขต วังทองหลาง กรุงเทพมหานคร 10310



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้