



การวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศสำหรับรับสัญญาณจากระบบจีพีเอส  
Analysis and Design of the Antenna for Global Positioning System

โดย  
นาย ชีรพล แสงแห่งรัตนะ 45015055  
นาย อภिरายุทธ สมนกะเณ 45015085

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 61433  
วัน,เดือน,ปี 17 ก.ค. 2549

b..... 11 กรกฎาคม  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศสำหรับรับสัญญาณจากระบบจีพีเอส  
Analysis and Design of the Antenna for Global Positioning System

ได้ส่งเอกสารโครงงาน  
ฉบับที่ ๑๖๖๖



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา

วิศวกรรมโทรคมนาคม

IBM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

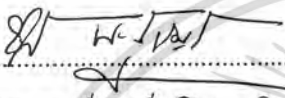
เรื่อง การวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศสำหรับรับสัญญาณจากระบบจีพีเอส

**Analysis and Design of the Antenna for Global Positioning System**

ผู้จัดทำ

1. นาย ชีรพล แสงแห่งรัตนะ 45015055

2. นาย อภิราษฎร์ สมคะเณ 45015085

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศสำหรับรับสัญญาณจากระบบจีพีเอส  
Analysis and Design of the Antenna for Global Positioning System

ผู้จัดทำ นายธีรพล แสงแห่งรัตนะ 45015055

นายอภิราษุทธ สมกะเณ 45015085

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชวรงค์ พงษ์เจริญพาณิชย์

**บทคัดย่อ**

โครงการนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศสำหรับรับสัญญาณจากระบบนำร่องโดยดาวเทียมที่เรียกว่า จีพีเอส โดยสายอากาศที่นำเสนอในโครงการนี้มีข้อดีคือมีความกะทัดรัด น้ำหนักเบา ราคาถูกและสามารถสร้างได้ง่าย โดยจะทำการออกแบบให้สามารถติดตั้งบนยานพาหนะได้ และสามารถรับสัญญาณ ได้จากการแพร่กระจายคลื่นในทุกทิศทาง และมีค่าสภาพเจาะงทิศทางที่สูงพอ และมีการสะท้อนกลับที่ขั้วของสายนำสัญญาณต่ำพอสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริง

**Abstract**

The project proposes the analysis and design of the antenna for the navigation aids system using the satellite with is referred to as the Global Positioning System (GPS). The merit of the antenna is that it possesses the compact structure, lightweight, low cost and easy fabrication. The antenna is designed in order to install on the vehicle to receive the signal from all directions. The antenna is expected to yield the high gain efficiently with well matching condition for the application.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์	1
1.2 เนื้อหาของปริญญาานิพนธ์	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป	3
2.2 รูปแบบการป้อนสัญญาณแบบต่าง ๆ	5
2.3 แบบจำลองสายอากาศไมโครสตริป ( Microstrip Model )	6
2.4 การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปที่มีแผ่นตัวนำบนเป็นรูปสี่เหลี่ยม	11
2.5 การโพลาริซ์	15
บทที่ 3 การคำนวณและการออกแบบ	20
3.1 การทดลองหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ ) ของแผ่นปริ้นท์	20
3.2 การคำนวณและออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก	23
3.3 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	26
3.4 การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ	27
บทที่ 4 การออกแบบสร้างและทดสอบ	38
4.1 การทดสอบหาอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ	39
4.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	43
4.3 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ	49
4.4 การทดสอบแกนของสายอากาศ	50
4.5 การทดสอบการใช้งานสายอากาศไมโครสตริปและสายอากาศที่ใช้กับ เครื่องรับ GPS ทั่วไปกับเครื่องรับ GPS เทียบกับเครื่องรับ GPS มาตรฐาน	57
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์	60
ภาคผนวก	62
กิตติกรรมประกาศ	66
เอกสารอ้างอิง	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	ระบบนำร่องโดยดาวเทียม GPS	1
รูปที่ 1.2	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ของสายอากาศรับสัญญาณ GPS	2
รูปที่ 2.1	มาตรฐานของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมพร้อมพารามิเตอร์แสดงขนาด	3
รูปที่ 2.2	แผ่นตัวนำรูปแบบต่าง ๆ	4
รูปที่ 2.3	โครงสร้างและวงจรสมมูลของสายส่งไมโครสตริป	5
รูปที่ 2.4	โครงสร้างและวงจรสมมูลของสายเคเบิลแกนร่วม	6
รูปที่ 2.5	โครงสร้างและวงจรสมมูลของสายส่งแบบผ่านช่องว่าง	6
รูปที่ 2.6	สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม และวงจรสมมูล	7
รูปที่ 2.7	ความหนาแน่นกระแสที่บริเวณด้านทั้งสี่	10
รูปที่ 2.8	ลักษณะของไมโครสตริปชนิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก	11
รูปที่ 2.9	การโพลาไรซ์ในแบบต่างๆ	15
รูปที่ 2.10	การโพลาไรซ์แบบวงกลมที่เวกเตอร์สนามไฟฟ้าหมุนไปทางขวามือ	17
รูปที่ 2.11	การโพลาไรซ์แบบวงกลมที่เวกเตอร์สนามไฟฟ้าหมุนไปทางซ้ายมือ	18
รูปที่ 3.1	กราฟค่าการสูญเสียย้อนกลับของแผ่นปรี้นท์ขนาด $58 \times 58 \text{ mm}^2$	20
รูปที่ 3.2	ตัวอย่างการทดลองหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์	22
รูปที่ 3.3	รูปแบบแผ่นตัวนำแบบใกล้เคียงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (nearly square patch)	24
รูปที่ 3.4	ค่า VSWR ค่าต่างๆ ที่มีตำแหน่งป้อนสัญญาณระยะต่างๆ โดยใช้ค่า $\epsilon_r = 4.2$	25
รูปที่ 3.5	ค่า VSWR ค่าต่างๆ ที่มีตำแหน่งป้อนสัญญาณระยะต่างๆ โดยใช้ค่า $\epsilon_r = 4.46$	26
รูปที่ 3.6	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ	26
รูปที่ 3.7	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณ	27
รูปที่ 3.8	การหาค่าตำแหน่งป้อนสัญญาณที่ระยะห่างจากตำแหน่งศูนย์กลางที่เหมาะสมที่สุด	34
รูปที่ 3.9	ผลตอบสนองของ VSWR เมื่อเปลี่ยนความถี่ในการใช้งาน	35
รูปที่ 3.10	ทิศทางการไหลของกระแสบนสายอากาศไมโครสตริป	35
รูปที่ 3.11	อัตราส่วนแกนที่ความถี่ 1.575 GHz	36
รูปที่ 4.1	สายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมที่ออกแบบและสร้างขึ้น	38
รูปที่ 4.2	สายอากาศแบบเกลียวหมุนซ้ายและหมุนขวา	38
รูปที่ 4.3	เครื่องรับ GPS พร้อมชุดสายอากาศรับสัญญาณ	39
รูปที่ 4.4	การเชื่อมต่อในการทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่ง อิมพีแดนซ์และ	

## สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่4.5 กราฟค่า VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยม	40
รูปที่4.6 กราฟค่า VSWR ของสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไป	40
รูปที่4.7 กราฟอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยม	41
รูปที่4.8 กราฟอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไป	41
รูปที่4.9 กราฟค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยม	42
รูปที่4.10 กราฟค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไป	42
รูปที่4.11 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปที่ส่งด้วยสายอากาศแบบเกลียว	43
รูปที่4.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับในระนาบสนามไฟฟ้าที่ทดสอบได้เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่ความถี่ 1.565 GHz	44
รูปที่4.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับในระนาบสนามแม่เหล็กที่ทดสอบได้เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่ความถี่ 1.565 GHz	44
รูปที่4.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับในระนาบสนามไฟฟ้าที่ทดสอบได้เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่ความถี่ 1.575 GHz	45
รูปที่4.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับในระนาบสนามแม่เหล็กที่ทดสอบได้เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่ความถี่ 1.575 GHz	45
รูปที่4.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับในระนาบสนามไฟฟ้าที่ทดสอบได้เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่ความถี่ 1.585 GHz	46
รูปที่4.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับในระนาบสนามแม่เหล็กที่ทดสอบได้เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่ความถี่ 1.585 GHz	46
รูปที่4.18 การกำหนดระนาบให้กับสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไป	47
รูปที่4.19 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไปที่ส่งด้วยสายอากาศแบบเกลียว	48
รูปที่4.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไปสำหรับในระนาบ yz	48
รูปที่4.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไปสำหรับในระนาบ xy	49
รูปที่4.22 การทดสอบแกนของสายอากาศโดยใช้สายอากาศที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทั้ง 2 ตัว	50
รูปที่4.23 อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปในพิกัดคาร์ทีเซียน ที่ความถี่ 1.55GHz	51
รูปที่4.24 อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปในพิกัดคาร์ทีเซียน ที่ความถี่ 1.565 GHz	51
รูปที่4.25 อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปในพิกัดคาร์ทีเซียน ที่ความถี่ 1.575 GHz	52

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่4.26 อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปในพิกัดคาร์ทีเซียน ที่ความถี่ 1.585 GHz	52
รูปที่4.27 อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปในพิกัดคาร์ทีเซียน ที่ความถี่ 1.6 GHz	53
รูปที่4.28 อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปมุม 0 องศา ที่ $fff_0$	53
รูปที่4.29 อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปมุม $\pm 90$ องศา ที่ $fff_0$	54
รูปที่4.30 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่รวมผลอัตราส่วนแกน ของสายอากาศไมโครสตริป ที่ความถี่ 1.565 GHz	55
รูปที่4.31 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่รวมผลอัตราส่วนแกน ของสายอากาศไมโครสตริป ที่ความถี่ 1.575 GHz	55
รูปที่4.32 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่รวมผลอัตราส่วนแกน ของสายอากาศไมโครสตริป ที่ความถี่ 1.585 GHz	56
รูปที่4.33 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่รวมผลอัตราส่วนแกน ของสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไปที่ความถี่ 1.575 GHz	56
รูปที่4.34 การระบุตำแหน่งของเครื่องรับ GPS ของ Garmin เทียบกับของ Magellan	57
รูปที่4.35 การทดสอบการใช้งานสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไป กับเครื่องรับสัญญาณ GPS	57
รูปที่4.36 การทดสอบการใช้งานสายอากาศไมโครสตริปกับเครื่องรับสัญญาณ GPS	58
รูปที่4.37 การทดสอบการใช้งานเครื่องรับสัญญาณ GPS ที่เป็นมาตรฐาน	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่3.1 การหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ในโหมดคลื่นต่างๆ ของแผ่นปริ้นท์หนา 0.55 mm.	21
ตารางที่3.2 การหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ในโหมดคลื่นต่างๆ ของแผ่นปริ้นท์หนา 1.45 mm.	21
ตารางที่3.3 Major capabilities of the IE3D Electromagnetic Simulator	29



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์

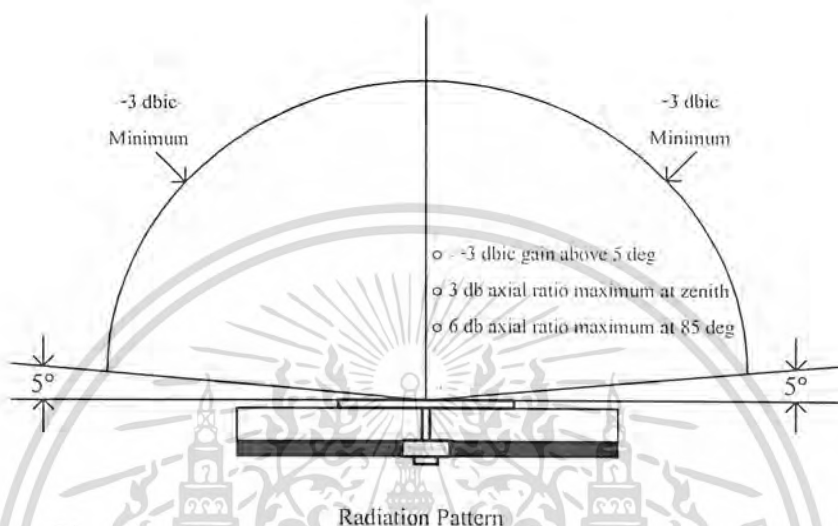
ระบบนำร่องโดยดาวเทียมที่เรียกว่า GPS (Global Positioning System) เป็นระบบที่ใช้ดาวเทียม 24 ดวง ที่โคจรในอวกาศครอบคลุมทั่วโลกทั้งหมด 6 ระนาบแต่ละระนาบทำมุม 60 องศากับเส้นศูนย์สูตร ดาวเทียมแต่ละดวงโคจรอยู่สูงจากพื้นโลกประมาณ 11,000 ไมล์ และเคลื่อนที่ผ่านรอบโลก 2 รอบในแต่ละวัน ในดาวเทียมแต่ละดวงจะมีส่วนประกอบหลักคล้ายคลึงกับดาวเทียมสื่อสารทั่วไปคือ ภาครับสัญญาณ ภาครส่งสัญญาณ ภาควงควบคุม และระบบสายอากาศวิทยุ ส่วนพิเศษที่มีเฉพาะในดาวเทียม GPS คือ ภาครักษาเนตสัญญาณเวลาความแม่นยำสูง เป็นนาฬิกาอะตอมซีเซียมแบบซีเซียม (Very High Precision Cesium Atomic Clock) โดยดาวเทียมจะส่งรหัส (Code) และข้อมูล Carrier Phase ไปกับคลื่นวิทยุลงมายังพื้นโลก ซึ่งส่งสัญญาณผ่านสายอากาศแพร่กระจายคลื่นลักษณะการ โพลารไรซ์แบบวงกลมหมุนขวา 2 ความถี่คือ  $1575.42 \pm 10.23$  MHz และ  $1227.6 \pm 10.23$  MHz ลงมาที่พื้นโลกซึ่งจะครอบคลุมพื้นโลกทั้งหมดจากดาวเทียม 24 ดวง ที่หมุนโคจรสลับตำแหน่งกันไปตลอดเวลา ในการรับสัญญาณจากดาวเทียมเพื่อที่จะบอกตำแหน่งของเครื่องรับจะต้องรับสัญญาณได้อย่างน้อย 4 ดวงขึ้นไปจึงจะสามารถบอกตำแหน่งได้ถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นรูปแบบการกระจายคลื่น (Radiation Pattern) ของสายอากาศเครื่องรับ GPS ควรจะเป็นแบบ Hemispherical เพื่อที่จะสามารถรับสัญญาณได้ครอบคลุม โดยทำมุมประมาณ 170 องศาในแกนแนวนอน ซึ่งจะครอบคลุมดาวเทียมได้ไม่น้อยกว่า 4 ดวงขึ้นไป จึงทำให้เครื่องรับ GPS บอกตำแหน่งได้แม่นยำขึ้น [5]



รูปที่ 1.1 ระบบนำร่องโดยดาวเทียม GPS

จากความต้องการของระบบ GPS ที่ได้กล่าวมา สามารถนำมาวิเคราะห์และออกแบบเป็นสายอากาศไมโครสตริปได้เพราะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางไฟฟ้าที่คล้ายๆกัน เช่น เป็นแผ่นแบน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ในงานการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียบ ขนาดเล็กกะทัดรัด น้ำหนักเบา ราคาถูก ง่ายต่อการปรับแมตซึ่ง สามารถดัดแปลงโพลาไรซ์ได้ง่าย และสร้างได้ง่ายโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ เนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปมีขนาดเล็กจึงมีข้อจำกัด ที่สามารถรับกำลังงานได้ต่ำ ช่วงกว้างความถี่ใช้งานแคบ ซึ่งคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปที่กล่าว มาเพียงพอสำหรับการนำมาสร้างเป็นสายอากาศรับสัญญาณจากระบบ GPS



รูปที่ 1.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ของสายอากาศรับสัญญาณ GPS [4]

สายอากาศไมโครสตริป ที่สร้างขึ้นมาเป็นแบบองค์ประกอบเดี่ยว (Single Element) การป้อน สัญญาณแบบ (Single Feed) เพื่อทำการศึกษาถึงคุณสมบัติของแบบรูปการกระจายคลื่น (Radiation Pattern) อัตราการขยาย (Gain) อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) คุณลักษณะเชิงโพลาไรซ์ (Polarizations) คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ (Impedance) อัตราส่วนของแกน (Axial Ratio)

### 1.2 เนื้อหาของปริญญาานิพนธ์

บทที่ 1 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์

บทที่ 2 อธิบายทฤษฎีและหลักการของสายอากาศ คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริป วิธีการหาสนามของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ความกว้างของลำคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง อัตราส่วนคลื่นนิ่ง อัตราส่วนของแกน การโพลาไรซ์

บทที่ 3 แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ คำนวณออกแบบสายอากาศซึ่งอาศัยทฤษฎีที่ได้จากบทที่ 2 เป็นการแสดงกระบวนการที่สำคัญในการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศให้ได้ตามต้องการ

บทที่ 4 เป็นขั้นตอนการสร้าง การทดสอบ การแสดงผลที่ได้จากการทดสอบและเปรียบเทียบผล จากการศึกษาที่ได้จากการวิเคราะห์

บทที่ 5 สรุปผลทั้งหมดตลอดจนวิจารณ์และเสนอแนวทางสำหรับการพัฒนาสายอากาศต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

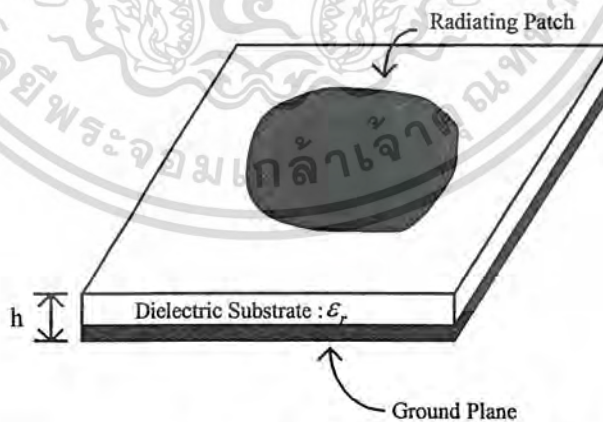
สายอากาศรับสัญญาณจากระบบนำร่องโดยดาวเทียม GPS นั้นสามารถสร้างได้หลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบก็จะมีเหมาะสมในการนำไปใช้งานแต่ละด้าน สำหรับโครงการนี้ได้นำสายอากาศแบบไมโครสตริปมาสร้างเพื่อรับสัญญาณจากระบบนำร่องโดยดาวเทียม GPS โดยในบทที่ 2 นี้จะอธิบายโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปและทฤษฎีในการคำนวณหาค่าต่างๆ

### 2.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปมีอยู่หลายรูปแบบ แต่ลักษณะโดยทั่วไปจะประกอบด้วย 4 ส่วนคือ

1. แผ่นโลหะตัวนำที่บางมากเรียกว่า แพทช์ (Patch)
2. วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก
3. กราวด์ซึ่งกว้างกว่าแพทช์มาก
4. สายป้อนสัญญาณ (Feed) ซึ่งเป็นตัวป้อนกำลังให้กับสายอากาศ

ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปจะประกอบด้วย แผ่นตัวนำสองแผ่นวางขนานกัน อยู่ที่ยึดกันบนซึ่งจะมีรูปร่างต่าง ๆ เช่น รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular) รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square) วงกลม (Circle) วงรี (Ellipse) ฯลฯ เรียกว่า ตัวแพร่กระจายคลื่น (Radiating Patch) โดยทั่วไปมักจะเป็นแผ่นทองแดงหรือทองคำ แผ่นตัวนำที่อยู่ด้านล่างจะเป็นลักษณะแผ่นตัวนำทั้งแผ่น โดยอุดมคติจะต้องมีขนาดใหญ่กว่าตัวแพร่กระจายคลื่นอย่างมาก เรียกว่า แผ่นกราวด์ (Ground Plane) และมีวัสดุที่ไม่เป็น [2]



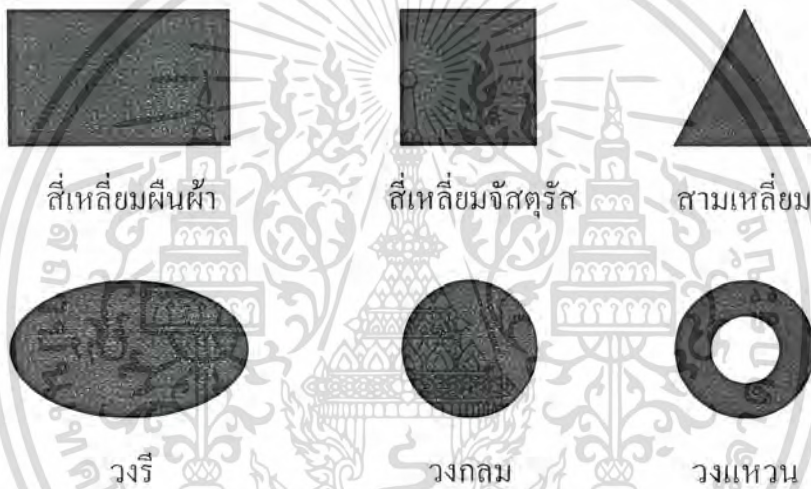
รูปที่ 2.1 มาตรฐานของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมพร้อมพารามิเตอร์แสดงขนาด

สื่อกลางทางไฟฟ้า (Dielectric Substrate) กั้นกลางระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง ขนาดของตัวแพร่กระจายคลื่นจะมีขนาดตามความต้องการ แผ่นกราวด์ตามทฤษฎีจะต้องมีขนาดที่ไม่จำกัด แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถที่จะให้แผ่นกราวด์มีขนาดจนถึงอนันต์ได้ ดังนั้น ในการออกแบบจึงไม่มีข้อจำกัดของแผ่นกราวด์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าควรมีขนาดเท่าใด เพียงแต่ต้องมีขนาดใหญ่กว่าตัวแพร่กระจายคลื่นลักษณะ โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1

### 2.1.1. แผ่นตัวนำ

เป็นแผ่นโลหะที่บางมากโดยปกติแล้วความหนาจะมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่นที่อยู่ในอากาศมาก (ความยาวคลื่นของความถี่ที่ออกแบบ) ซึ่งการออกแบบรูปร่างและขนาดของแผ่นตัวนำ จะทำให้ได้แบบรูปการกระจายคลื่นที่ต้องการและรูปร่างของแผ่นตัวนำก็มีด้วยกันหลายอย่าง เช่น รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปสามเหลี่ยม วงกลม วงรี หรือรูปวงแหวนดังรูปที่ 2.2 สำหรับรูปแบบตัวนำแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัสและวงกลมจะเป็นรูปแบบที่พบได้บ่อยเพราะเป็นรูปแบบที่สามารถสร้างและคำนวณได้ง่ายกว่ารูปแบบอื่น



รูปที่ 2.2 แผ่นตัวนำรูปแบบต่างๆ

### 2.1.2. สารตัวกลาง (Medium)

ลักษณะเป็นสารไดอิเล็กตริกมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 2.2 ถึง 12 ซึ่งสารที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ต่ำ ให้ช่วงความถี่ใช้งานมากกว่าและให้ประสิทธิภาพมากกว่า แต่จะทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนสารที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงจะมีความหนาน้อยแต่จะมีค่าความสูญเสียมากกว่า ทำให้ประสิทธิภาพด้อยกว่าและให้ช่วงความถี่ใช้งานน้อยกว่า แต่จะเหมาะกับอุปกรณ์ที่เกี่ยวกับคลื่นความถี่ไมโครเวฟ

สารตัวกลางที่ใช้กันโดยทั่วไปคือ PTEF ซึ่งถูกสร้างด้วยโครงสร้างเสริมไฟเบอร์กลาสจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประมาณ 2.5 บางครั้งอาจใช้สารคล้ายรวงผึ้งที่มีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งจะมีค่าเข้าใกล้ 1 และทำให้ได้ประสิทธิภาพดีกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 แผ่นระนาบตัวนำ (Ground Plane)

แผ่นระนาบตัวนำจะต้องมีความกว้างมากกว่าแผ่นตัวนำมาก โดยจะอยู่อีกด้านหนึ่งของสารตัวกลาง ( คั่นด้านกับแผ่นตัวนำ ) และทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น

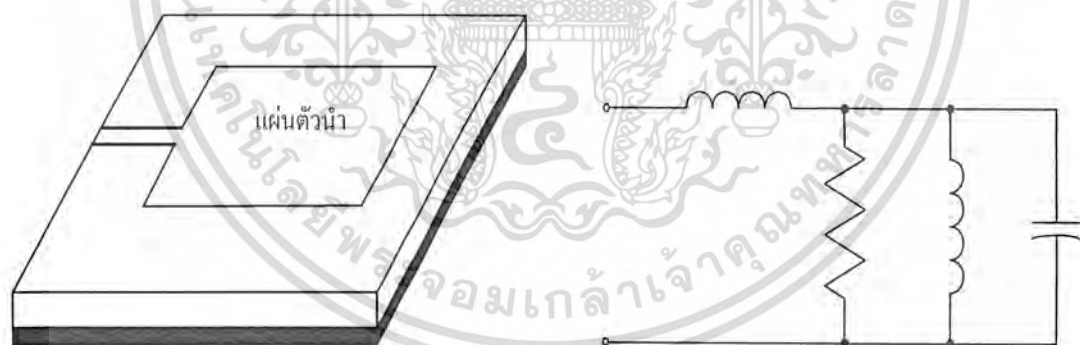
### 2.1.4 ส่วนป้อนสัญญาณ (Feeder)

จะใช้สายส่งสัญญาณชนิดต่างๆ เป็นตัวป้อนสัญญาณแก่สายอากาศ และสามารถปรับค่าแมตซิ่ง (Matching) เพื่อให้สายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม นอกจากนี้ยังใช้ปรับการโพลาไรซ์ได้อีกด้วย โดยตำแหน่งและความยาวของส่วนป้อนสัญญาณจะมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่น

## 2.2 รูปแบบการป้อนสัญญาณแบบต่าง ๆ

### 2.2.1 สายส่งไมโครสตริป (Microstrip Line Feed)

วิธีที่ง่ายที่สุดในการป้อนสัญญาณคือ การใช้แผ่นไมโครสตริปและสายส่งไมโครสตริปต่อกับตัวกลางโดยตรงแต่วิธีนี้จะได้กับสายอากาศที่มีคุณสมบัติไม่ค่อยดีนัก เนื่องจากมีผิวโลหะที่ไม่ต่อเนื่องกัน ทำให้ระดับของคลื่นในทิศทางหลัก ( Side Lobe Level ) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะไปลดคุณภาพของสายอากาศ นอกจากนี้ ช่วงความถี่ที่ใช้จะกว้างขึ้นด้วย เนื่องจากที่พลังงานจำนวนมากสะสมอยู่ ภายใต้อันตัวนำ ( Cavity Effect ) แต่สายส่งชนิดนี้สามารถปรับแมตซิ่งในตัวเองได้และยังสามารถสร้างได้ง่าย โดยทำการสร้างไปพร้อมกับแผ่นตัวนำที่ใช้ในการส่งคลื่น ได้เลย

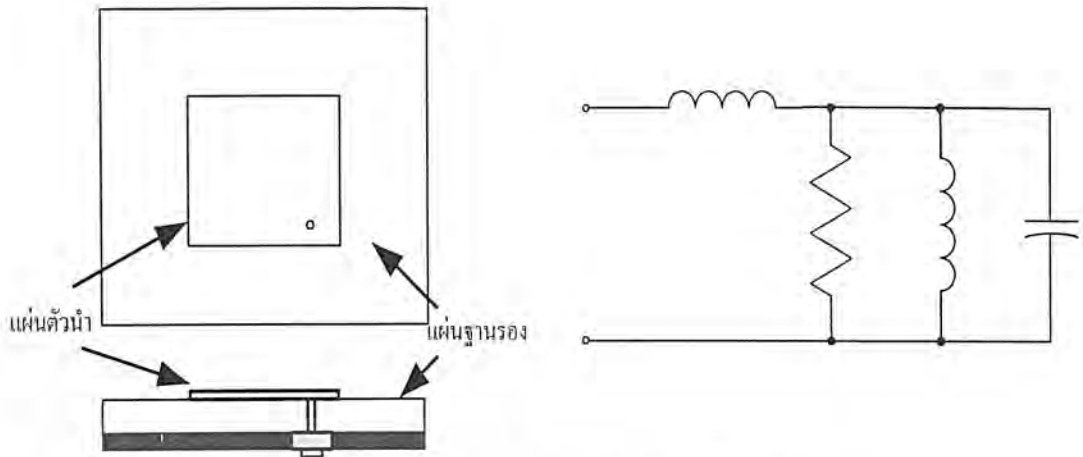


รูปที่ 2.3 โครงสร้างและวงจรสมมูลของสายส่งไมโครสตริป

### 2.2.2. สายเคเบิลแกนร่วม (Coaxial Feed)

ในการใช้สายเคเบิลแกนร่วมเป็นตัวป้อนสัญญาณจะต้องต่อสายนำสัญญาณให้ตั้งฉากกับแผ่นตัวนำโดยตัวนำด้านในจะต่ออยู่กับตัวนำด้านบนและตัวนำด้านนอกจะต่อกับแผ่นระนาบตัวนำ ซึ่งจากการศึกษาจะพบว่าเมื่อใช้ตัวกลางที่มีขนาดบาง แต่จะมีการแพร่กระจายคลื่นมากขึ้นถ้าต่อตัวกลางที่หนาขึ้น นอกจากนี้สายสัญญาณแกนคู่ยังสามารถต่อกับสายนำสัญญาณชนิดอื่นได้อีกด้วย

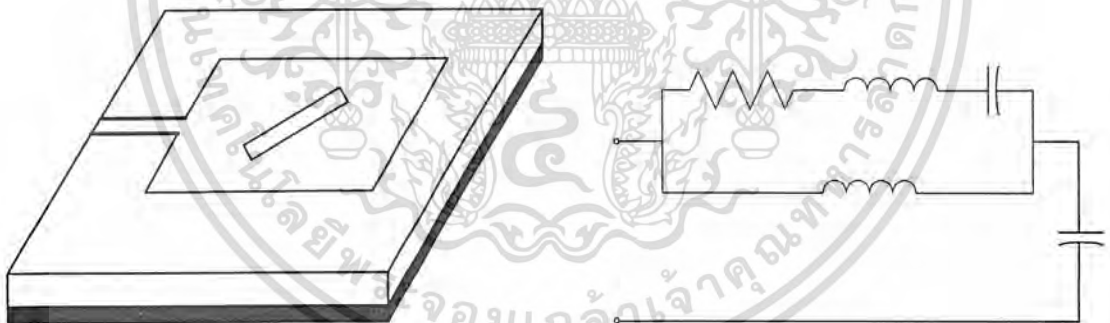
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างและวงจรสมมูลของสายเคเบิลไมครอสทริป

### 2.2.3 สายส่งแบบผ่านช่องว่าง (Slot Feed)

เป็นวิธีป้อนสัญญาณที่สามารถแพร่กระจายคลื่นของสายส่ง กับแผ่นตัวนำ ไม่ให้กวนกันได้โดยสิ้นเชิง โดยการใช้แผ่นระบายตัวนำเป็นตัวป้องกันคลื่นจากสายส่งที่จะมารบกวนคลื่นที่ต้องการส่งจากแผ่นตัวนำและทำการเชื่อมต่อระหว่างแผ่นระบายตัวนำกับสารตัวกลางโดยใช้ช่องว่างเพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวน นอกจากนี้ขนาดของช่องว่างจะต้องไม่มีความถี่ตรงกับความถี่ที่ใช้งานและวางอยู่ไกลจากแผ่นตัวนำ



รูปที่ 2.5 โครงสร้างและวงจรสมมูลของสายส่งแบบผ่านช่องว่าง

### 2.3 แบบจำลองสายอากาศไมโครสทริป (Microstrip Model)

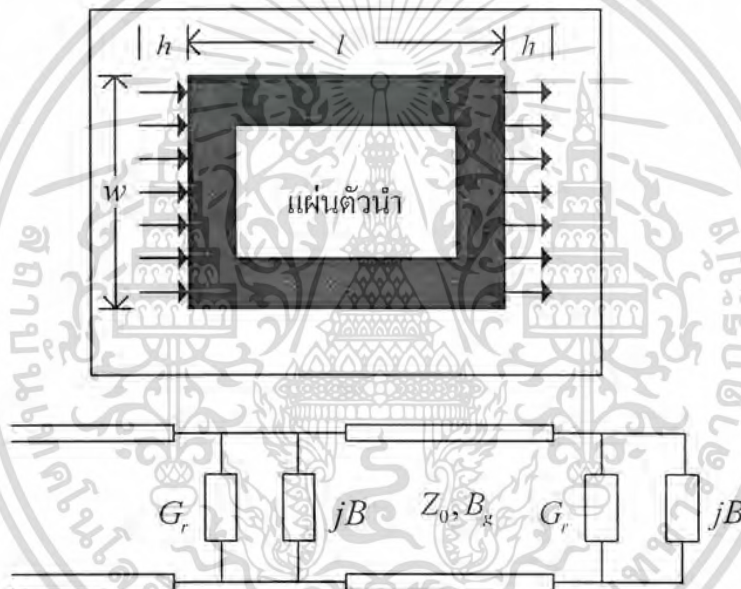
ในการคำนวณเพื่อหาคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศไมโครสทริปสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมได้แก่ วิธีแบบจำลองสายส่ง (Transmission Line Model) และวิธีแบบจำลองคาวิตี (Cavity Model) สำหรับแบบจำลองสายส่งนั้นมีข้อดี คือในขั้นตอนการคำนวณจะสามารถทำได้ง่ายเพราะไม่ต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ยากนักและได้ผลที่น่าพอใจ แต่เป็นแบบจำลองที่ไม่ยืดหยุ่นนัก คือ สามารถใช้คำนวณเฉพาะสายอากาศที่มีแผ่นตัวนำด้านบนเป็นรูปสี่เหลี่ยมเท่านั้น (อาจจะเปลี่ยนจตุรัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือไม่ก็ได้) ส่วนวิธีแบบจำลองควิตีจะมีความถูกต้องมากกว่าแบบจำลองสายส่งและสามารถใช้งานได้ยืดหยุ่นกว่าแต่ต้องใช้สมการคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยากกว่า

### 2.3.1 แบบจำลองสายส่ง

จากรูปที่ 2.6 แสดงวงจรสมมูลของแบบจำลองสายส่ง กับสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาว  $l$  ความกว้าง  $w$  และความหนา  $h$  โดยจะแพร่กระจายคลื่นออกมาจากขอบด้านข้างทั้งสองข้างของแผ่นตัวนำ ซึ่งเปรียบเสมือนว่าเป็นช่องว่างที่มีความยาวเท่ากับ  $w$  และความหนา  $h$  ดังนั้น จึงให้ช่องว่างทั้งสองมีความต้านทานเท่ากับ  $G + jB$  เท่ากันทั้งสองช่อง ส่วนความต้านทานของแผ่นตัวนำจะมีค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ (Characteristic) เป็น  $Z_0$  และค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น (Propagation) เท่ากับ  $\beta_g$  ดังนั้นจะหา อินพุตแอดมิตแดนซ์ได้ว่า



รูปที่ 2.6 สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม และวงจรสมมูล

$$Y_m = G_r + jB + Y_0 \frac{(G + jB) + jY \tan(\beta_g l)}{Y_0 + j(G + jB) \tan(\beta_g l)} \quad (2.1)$$

ดังนั้นเพื่อให้มีแต่ค่าจำนวนจริง ไม่มีจำนวนจินตภาพเพื่อจะได้ปรับแมตชิงได้ง่ายจึงต้องให้

$$\text{Im}(Y_m) = 0 \quad (2.2)$$

นั่นคือ

$$\tan(\beta_g l) = \frac{2Y_0 B}{G_r^2 + B^2 - Y_0^2} \quad (2.3)$$

หรือ

$$\tan(\beta_g l) = \frac{Y_0}{B} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$\tan(\beta_g l) = \frac{2Y_0 B}{G_r^2 + B^2 - Y_0^2} \quad (2.5)$$

แทนในสมการ  $Y_m$  จะได้  
ส่วนเมื่อ

$$Y_m = 2G$$

$$Y_m = G_r + \frac{Y_0}{B} + \frac{B^2}{G_r} + \frac{Y^2}{G_r} \quad (2.6)$$

### 2.3.2 แบบจำลองคาวิตี (Cavity Model)

ในการจำลองคาวิตีจะมองสายอากาศไมโครสตริปมีลักษณะเหมือนโพรงที่มีสารไดอิเล็กตริกอยู่ภายในซึ่งการมอดในลักษณะนี้จะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์อันดับสูงขึ้นไป (High Order Resonance) แต่เพื่อให้สามารถเข้าใจสนามพลังงาน (สนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า) ภายในสารไดอิเล็กตริกจึงคิดเสมือนว่าโพรงไดอิเล็กตริกนี้ถูกปิดล้อมด้วยแผ่นตัวนำไฟฟ้า (ด้านบน และด้านล่าง) และกำแพงสนามแม่เหล็ก (คิดเสมือนว่าเสี้ยวจรอยู่) ที่อยู่ตามขอบของแผ่นตัวนำแต่แบบจำลองลักษณะนี้จะทำให้ไม่มีการส่งคลื่นออกไป อย่างไรก็ตามการสมมติให้แบบจำลองอย่างนี้ทำให้สามารถคำนวณ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อินพุตอิมพีแดนซ์ และความถี่ตอบสนอง ได้ใกล้เคียงค่าที่เกิดขึ้นจากการวัดซึ่งแบบจำลองลักษณะนี้คล้ายกับวิธีเพอร์เทอร์เบชัน (Perturbation Method) ที่นิยมกันในการคำนวณท่อนำคลื่น (Waveguide)

สำหรับการสร้างสนามพลังงานภายในโพรงไดอิเล็กตริกและการแพร่กระจายคลื่นผ่านสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นได้ดังนี้

เมื่อป้อนพลังงานเข้าไปยังแผ่นตัวนำไมโครสตริป จะเกิดการกระจายของประจุบนผิวทั้งด้านบนและด้านล่างของแผ่นตัวนำรวมไปจนถึงเกิดการกระจายของประจุบนกรวด์เพลนด้วยซึ่งการกระจายของประจุเหล่านี้เกิดจากกระบวนการสองชนิด คือ

1. จากแรงดึงดูดระหว่างประจุต่างชนิดกัน ของประจุบนพื้นผิว ด้านล่างแผ่นตัวนำกับประจุบนกรวด์เพลน ซึ่งจะทำให้เกิดมีจำนวนประจุหนาแน่นขึ้นบริเวณแผ่นตัวนำด้านล่าง
2. เกิดจากแรงผลักระหว่างประจุชนิดเดียวกัน ของประจุบนผิวด้านล่างแผ่นตัวนำ ซึ่งจากแรงผลักระหว่างประจุชนิดเดียวกันนี้ทำให้ที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำ มีประจุบางส่วนขึ้นไปอยู่ที่พื้นผิวด้านบนของแผ่นตัวนำ กระบวนการทั้งสองชนิดนี้ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส  $J_b$  และ  $J_t$  (b ย่อมาจาก bottom และ t ย่อมาจาก top)

สำหรับสายอากาศที่ทำจากวัสดุบาง ๆ แรงผลักระหว่างประจุชนิดแรกจะมีมากกว่าชนิดหลัง ทำให้ประจุส่วนใหญ่ไปอยู่ที่ผิวด้านล่างของแผ่นตัวนำ เป็นผลให้กระแสส่วนใหญ่ไหลอยู่ที่ผิวใต้แผ่นตัวนำจะมีกระแสปริมาณเล็กน้อยเท่านั้นที่ไหลรอบ ๆ ขอบด้านบนของแผ่นตัวนำ และปริมาณของกระแสที่วอานี้ จะมีค่าลดลงถ้าวัสดุมีขนาดเล็กลงด้วยสำหรับในทางอุดมคติแล้ว กระแสที่ไหลอยู่ด้านบนของแผ่นตัวนำจะมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นศูนย์เป็นผลให้สนามแม่เหล็ก (ที่เกิดจากกระแสอันนี้) ที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ด้วย จึงสมมติได้ว่า มีพื้นที่ผิวที่เป็นตัวนำในอุดมคติปิดอยู่ที่บริเวณขอบทั้งสี่ด้านของแผ่นตัวนำ (ทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์) แต่ในทางปฏิบัติแล้วที่บริเวณของขอบแผ่นตัวนำจะมีสนามแม่เหล็กเหลืออยู่เล็กน้อยเสมอ ดังนั้นข้อสมมตินี้อาจไม่ถูกต้องนัก แต่การสมมติอย่างนี้จะทำให้ง่ายต่อการหาโหมดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่อยู่ใต้แผ่นตัวนำ

ผลจากการให้สายอากาศแบบไมโครสตริปมีขนาดบางมาก (น้อยกว่าความยาวคลื่นมาก ๆ)

1. พลังงานที่อยู่ใต้แผ่นตัวนำและอยู่ในสารไดอิเล็กตริก จะเกิดการสะท้อนกลับขึ้นที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำ และมีแค่ส่วนน้อยเท่านั้นที่หลุดออกไปเป็นพลังงานแพร่กระจายคลื่น ดังนั้นสายอากาศแบบไมโครสตริปจึงมีประสิทธิภาพที่ไม่สูงนัก

2. พลังงานที่อยู่ใต้แผ่นตัวนำจะทำให้เกิดคลื่นนิ่ง ซึ่งอยู่ในรูปฟังก์ชันไซน์

3. การเปลี่ยนแปลงของสนามตามความสูงของสาร ไดอิเล็กตริกจะเป็นค่าคงที่

4. ปรากฏการณ์ฟรินกิงที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำจะมีค่าน้อยมาก

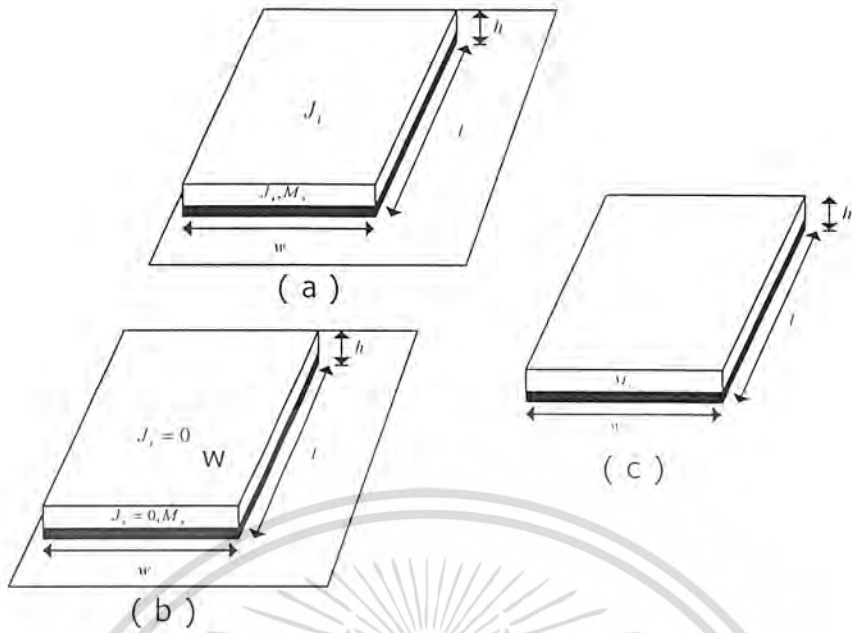
ดังนั้นจึงมีแต่สนาม  $TM_z$  เท่านั้นที่อยู่ในโพรงไดอิเล็กตริก

นอกจากนี้ต้องสมมติให้สิ่งที่เป็นตัวนำทุกด้านของโพรงไดอิเล็กตริก (แผ่นตัวนำและกำแพงสนามแม่เหล็ก) ไม่มีการสูญเสียพลังงาน โพรงไดอิเล็กตริกไม่สามารถแพร่กระจายคลื่นได้ และอิมพีแดนซ์มีแต่ส่วนจริงเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแล้วค่าอิมพีแดนซ์จะต้องมีส่วนจินตภาพด้วยเสมอ เช่น เกิดจากความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น ( $R_r$ ) ความต้านทานทางการสูญเสีย ( $R_l$ ) และการสูญเสียเนื่องจากสารไดอิเล็กตริก ซึ่งความสูญเสียทั้งหมดนี้จะอยู่ในรูป  $\delta_{eff}$  และสำหรับสายอากาศแล้วจะได้ว่า  $(1/Q) = \delta_{eff}$

### 2.3.3 ความหนาแน่นกระแสสมมูล (Equivalent Current Densities)

ในแบบจำลองควาวิดิจะมองสายอากาศแบบไมโครสตริปว่าเป็น สารไดอิเล็กตริกที่มีกำแพงสนามไฟฟ้าที่สมบูรณ์แบบปิดอยู่ที่ด้านบนและล่าง ส่วน 4 ด้านที่เหลือซึ่งอยู่ด้านข้างจะถูกปิดล้อมด้วยกำแพงสนามแม่เหล็ก ซึ่งบริเวณนี้เองที่เป็นตัวทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่น ดังนั้นการจะหาความหนาแน่นกระแส จะต้องคิดเสมือนว่าสารตัวกลางที่มีอยู่แต่เฉพาะภายใต้แผ่นตัวนำเสมอจากการใช้ ทฤษฎีฮอยเกนส์ (Huygen's Theory) จะสามารถแทนแผ่นตัวนำที่อยู่ด้านความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $J_s$  ที่ผิวด้านบนของแผ่นตัวนำ (โดยปกติความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $J_n$  อยู่ข้างใต้แผ่นตัวนำด้วย แต่ในที่นี้จะไม่กล่าวถึง) และที่ด้านข้างทั้งสี่จะแสดงได้ด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $J_s$  และความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก  $M_s$  ดังรูปที่ 2.7 (a) โดยที่  $J_s = \hat{n} \times H_n$  และ  $M_s = -\hat{n} \times E_n$  เมื่อ  $E_n, H_n$  เป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่บริเวณด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ความหนาแน่นกระแสที่บริเวณด้านทั้งสี่

เนื่องจากสายอากาศแบบไมโครสตริปจะมีอัตราส่วนของความสูงต่อความกว้างน้อย ดังนั้น  $J_z$  ที่อยู่ด้านบน จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ  $J_x$  ที่อยู่ด้านล่าง จึงสามารถสมมติได้ว่า  $J_z$  มีค่าเป็นศูนย์และจะไม่นำมาคิด จึงทำให้สนามแม่เหล็กที่บริเวณขอบซึ่งเกิดจาก  $J_x$  นี้มีค่าเป็นศูนย์ด้วย ส่งผลให้  $J_z$  ที่บริเวณด้านข้างซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กอันนี้มีค่าเป็นศูนย์อีก ดังนั้นจะเหลือเฉพาะ  $M_x$  ที่อยู่ด้านข้างโดยรอบของแบบจำลองช่องว่างเท่านั้นที่ไม่เป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.7 (b) จากการใช้ทฤษฎีเงา (Image Theory) จะได้ว่า  $M_x = -2\hat{n} \times E_z$  ดังรูปที่ 2.7 (c)

ในแบบจำลองควาดีโพลจะมองสายอากาศแบบไมโครสตริป ว่าเปรียบเสมือนมีช่องว่างอยู่ด้านข้างโดยรอบทั้งสี่ด้านของโพรง โดยที่ช่องว่างเหล่านี้จะเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นออกไป แต่ช่องว่างทั้งสิ้นนี้ไม่ได้แพร่กระจายคลื่นทั้งสิ้นช่องจะมีเพียงสองช่องเท่านั้นที่สามารถแพร่กระจายคลื่นได้ ส่วนอีกสองช่องจะเกิดการหักล้างกันเอง โดยสองช่องที่เกิดการหักล้างคือช่องที่อยู่ห่างกันเป็นระยะ  $w$  ส่วนอีกสองช่องที่สามารถแพร่กระจายคลื่นได้จะอยู่ห่างกัน  $l$  ซึ่งเรียกสองช่องนี้ว่า ร่องแพร่กระจายคลื่น (Radiating Slot) โดยที่ระหว่างสองช่องนี้จะมีแผ่นตัวนำคู่ขนานซึ่งแสดงตัวเหมือนเป็น หม้อแปลง (Transformer) ที่มีความต้านทานต่ำ ความยาวของ  $l$  ประมาณได้ว่าเท่ากับ  $\lambda_c / 2$  เมื่อ  $\lambda_c$  หมายถึง ความยาวคลื่นที่เดินทางในสารตัวกลาง เพื่อให้สนามของช่องว่างทั้งสอง มีทิศทางตรงข้ามกันดังแสดงในรูปที่ 2.7 (a) จากช่องว่างทั้งสองที่เป็นตัวแพร่กระจายคลื่นจะทำตัวเสมือนเป็นแถวลำดับ 2 องค์ประกอบ ที่มีระยะห่างกันเป็น  $\lambda_c / 2$  สมมติให้โหมดพื้นฐาน (Dominant Mode) เป็น  $TM_{010}^-$  จะได้สมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 E_x &= E_0 \cos\left(\frac{\pi y'}{l}\right) \\
 H_z &= H_0 \sin\left(\frac{\pi y'}{l}\right) \\
 E_y &= E_x = H_x = H_y = 0
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

เมื่อ  $E_0 = -j\omega A_{010}$  และ  $H_0 = \left(\frac{\pi}{\mu l}\right) A_{010}$  จากรูปที่ 2.7 (a) จะเห็นว่าคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาว  $l$  แต่จะไม่มีเปลี่ยนแปลงตามความกว้าง  $w$  ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเฟสนี้จะมีผลอย่างมากในการออกแบบสายอากาศแบบบรอดไซด์ (Broadside)

## 2.4 การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปที่มีแผ่นตัวนำบนเป็นรูปสี่เหลี่ยม

การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปที่มีแผ่นตัวนำบนเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากนั้นสามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองควาวิที ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 2.8 ลักษณะของไมโครสตริปชนิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก

### 2.4.1 การหาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

การหาสนามภายในควาวิทีสำหรับ  $TM_z$  อันดับแรกเราต้องหาฟังก์ชันศักย์ช่วยแม่เหล็ก  $A_z$  ที่มีสมการคลื่นดังนี้

$$\nabla^2 A_z + k^2 A_z = 0 \tag{2.8}$$

$$A_z = [A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x)][A_2 \cos(k_y y) + B_2 \sin(k_y y)][A_3 e^{-jk_z z} + B_3 e^{jk_z z}] \tag{2.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $k_x, k_y, k_z$  คือ จำนวนเท่าของคลื่น (Wave number) ที่อยู่กันตามแกน  $x, y, z$  ตามลำดับซึ่งสามารถหาได้จากเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) หลังจากนั้นจะได้ค่าว่า สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่อยู่ในรูปของ  $A_z$  เป็นดังนี้

$$E_x = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x \partial z} \quad (2.10)$$

$$E_y = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_z}{\partial y \partial z} \quad (2.11)$$

$$E_z = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) A_z \quad (2.12)$$

$$H_x = \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \quad (2.13)$$

$$H_y = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \quad (2.14)$$

$$H_z = 0 \quad (2.15)$$

นำมาใช้กับเงื่อนไขขอบเขตที่ว่า

$$E_x = (0 \leq x' \leq l, 0 \leq y' \leq w, z' = 0) = E_x = (0 \leq x' \leq l, 0 \leq y' \leq w, z' = h) = 0 \quad (2.16)$$

$$H_x = (0 \leq x' \leq l, y' = 0, 0 \leq z' \leq h) = H_x = (0 \leq x' \leq l, y' = w, 0 \leq z' \leq h) = 0 \quad (2.17)$$

$$H_y = (x' = 0, 0 \leq y' \leq w, 0 \leq z' \leq h) = H_y = (x' = l, 0 \leq y' \leq w, 0 \leq z' \leq h) = 0 \quad (2.18)$$

สัญลักษณ์ (') เช่น  $x', y', z'$  เพื่อแสดงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ภายในช่องโคอีเลคตริกจากสมการเงื่อนไขที่ว่า

$$E_x = (0 \leq x' \leq l, 0 \leq y' \leq w, z' = 0) = E_x = (0 \leq x' \leq l, 0 \leq y' \leq w, z' = h) = 0 \text{ จะได้ว่า } B_z = 0$$

$$k_z = \frac{m\pi}{h} \quad m = 0, 1, 2 \quad (2.19)$$

จากสมการเงื่อนไขที่ว่า

$$H_x = (0 \leq x' \leq l, y' = 0, 0 \leq z' \leq h) = H_x = (0 \leq x' \leq l, y' = w, 0 \leq z' \leq h) = 0 \text{ จะได้ว่า } B_y = 0$$

$$k_y = \frac{p\pi}{w} \quad p = 0, 1, 2 \quad (2.20)$$

จากสมการเงื่อนไขที่ว่า

$$H_y = (x' = 0, 0 \leq y' \leq w, 0 \leq z' \leq h) = H_y = (x' = l, 0 \leq y' \leq w, 0 \leq z' \leq h) = 0 \text{ จะได้ว่า } B_x = 0$$

$$k_x = \frac{n\pi}{l} \quad n = 0, 1, 2 \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่สุดจะได้ว่า  $A_z$  ที่อยู่ในช่องโคอีเล็กตริกเท่ากับ

$$A_z = A_{mnp} \cos(k_x x') \cos(k_y y') \cos(k_z z') \quad (2.22)$$

เมื่อ  $A_{mnp}$  เท่ากับสัมประสิทธิ์ของแอมป์ริจูดในแต่ละโหมด  $mnp$  และ  $m, n, p$  เป็นตัวเลขที่แสดงความกว้าง ความยาว และความสูงในแนวแกน  $y, x, z$  มีค่าเป็นจำนวนเท่าของ  $\frac{\lambda}{2}$

#### 2.4.2 ความถี่เรโซแนนท์

$$(f_r)_{mnp}^{TM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{l}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{w}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2} \quad (2.23)$$

โดยที่  $m = 0, 1, 2, \dots$   $n = 0, 1, 2, \dots$   $p = 0, 1, 2, \dots$  และ  $m = n = p \neq 0$

โดยพิจารณาให้  $l > w > h$  เพื่อให้เกิดโหมดพื้นฐาน (Dominant Mode) ที่  $TM_{100}$  และมีความถี่เรโซแนนท์เท่ากับ

$$(f_r)_{100} = \frac{1}{2l\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{c}{2l\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.24)$$

โดยที่  $l$  คือ ความยาวของสายอากาศ (เมตร)

$\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของตัวกลาง

$c$  คือ ค่าความเร็วแสง ( $3 \times 10^8$  m/s)

#### 2.4.3 การแพร่กระจายคลื่นและค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

จากแบบจำลองควิวิตีสามารถหาค่าพลังงานการแพร่กระจายคลื่นได้จาก

$$P_{rad} = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\pi} U_{max} \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.25)$$

และสามารถหาค่าสภาพเจาะจงทิศทางได้จาก

$$D_{max} = 4\pi \frac{(U)_{max}}{P_{rad}} \quad (2.26)$$

$$U_{max} = \frac{1}{2\eta} \left[ |E_{r(\theta, \phi, r)}|^2 \right] \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{r(\theta,\phi,r)} = -j \frac{4V_0 e^{jk_0 r}}{\pi r} \left[ \frac{\sin\left(\frac{k_0 w}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right] \cos\left(\frac{k_0 l}{2} \sin\theta \sin\phi\right) \quad (2.28)$$

โดยที่ ระบายสนามไฟฟ้า ( $\theta = 90^\circ, 0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$  and  $270^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$ )

ระบายสนามแม่เหล็ก ( $\phi = 0^\circ, 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ )

$E_{r(\theta,\phi,r)}$  = ส่วนประกอบค่าความหนาแน่นสนามไฟฟ้ารวมที่สนามระยะไกลของสายอากาศ

$\eta$  = Intrinsic impedance of the medium ( $120\pi$ )  $\Omega$

$w$  = ความกว้างของแผ่นตัวนำ (เมตร)

$l$  = ความยาวของแผ่นตัวนำ (เมตร)

$k_0$  = ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น (Propagation constant =  $\frac{2\pi}{\lambda}$ ) (เรเดียนต่อเมตร)

#### 2.4.4. อัตราการขยายของสายอากาศ

อัตราการขยายของสายอากาศหาได้จากสมการ[1][3]

$$G_e = \eta D_{rr}$$

(2.29)

เมื่อ  $\eta$  คือประสิทธิภาพของสายอากาศ

$D_{rr}$  คือไดเรกทิวิตี

#### 2.4.5. บีมวิทท์ (Beam width)

บีมวิทท์ คือ ความกว้างของมุมซึ่งจะเท่ากับมุมระหว่างทิศทางการแผ่ซึ่งอัตราขยายมีค่าลดลง -3 dB

ดังสมการ

$$\theta_{BH} = 2 \cos^{-1} \left( \frac{1}{2\left(1 + \frac{k_0 w}{2}\right)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.30)$$

$$\theta_{BE} = 2 \cos^{-1} \left( \frac{7.03}{(3k_0^2 l^2 + k_0 h^2)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.31)$$

เมื่อ  $\theta_{BE}$  คือมุมที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของบีมหลักในแนวระนาบของสนามไฟฟ้า

$\theta_{BH}$  คือมุมที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของบีมหลักในแนวระนาบของสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

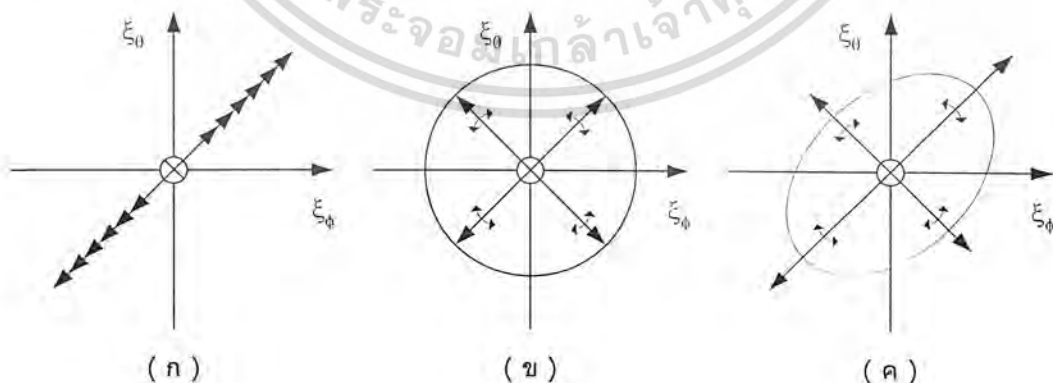
## 2.4.6 แบนด์วิดท์

แบนด์วิดท์ของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับสายนำสัญญาณที่  $VSWR < s$  สามารถที่จะหาได้จากสมการ

$$BW = \frac{s-1}{Q_r \sqrt{s}} \quad (2.32)$$

## 2.5 การโพลาไรซ์

พิจารณาจาก IEEE Standard Definition for Antennas ให้ค่านิยามการโพลาไรซ์ของการแพร่กระจายคลื่นดังนี้คือ คุณสมบัติการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งสามารถจะอธิบายได้โดยการพิจารณาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยสังเกตที่ ณ ตำแหน่งใดๆ ซึ่งโดยทั่วไปจะทำการพิจารณาขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ถ้าลักษณะการกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้ามีลักษณะเป็นอย่างไรแล้วก็จะกล่าวได้ว่าสนามไฟฟ้านั้นมีการโพลาไรซ์แบบนั้น ซึ่งการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าอาจแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะซึ่งได้แก่ การกวาดเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นวงกลมดังนั้นจึงเรียกการโพลาไรซ์ลักษณะแบบนี้ว่าสนามไฟฟ้ามีการโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular Polarization) การกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นวงรีก็จะเรียกว่าสนามไฟฟ้ามีลักษณะการโพลาไรซ์แบบวงรี (Elliptical Polarization) และการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นแนวเส้นตรงตั้งฉากกับทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่นจะเรียกว่าสนามไฟฟ้ามีลักษณะการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น (Linear Polarization) ในกรณีของการโพลาไรซ์แบบวงกลม และแบบวงรีนั้นการกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะคือ การกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าไปทางขวามือหรือเรียกว่าเป็นการหมุนตามเข็มนาฬิกา (clockwise polarization) การกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าไปทางซ้ายมือหรือที่เรียกว่าเป็นการหมุนทวนเข็มนาฬิกา (counter clockwise polarization) ซึ่งลักษณะของการโพลาไรซ์แบบต่างๆแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การโพลาไรซ์ในแบบต่างๆ

(ก) การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น (ข) การโพลาไรซ์แบบวงกลม (ค) การโพลาไรซ์แบบวงรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 การโพลาริซ์แบบวงกลม

พิจารณาเฉพาะการ โพลาริซ์แบบวงกลมเพราะสายอากาศรับ-ส่งสัญญาณจากระบบนำร่องโดยดาวเทียม GPS เป็นโพลาริซ์แบบวงกลมหมุนขวา

คลื่นที่ถูกเรียกว่ามีการ โพลาริซ์แบบวงกลม จะเกิดเมื่อการเคลื่อนที่ของเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าซึ่งมีลักษณะเป็นวงกลมในสเปซซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปขนาดของความเข้มของสนามไฟฟ้าจะยังคงมีค่าคงที่ดังนั้นลักษณะของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีลักษณะการกวาดที่เปลี่ยนไปตามเวลาซึ่งอธิบายได้โดยการเคลื่อนที่ที่เป็นวงกลม

#### 2.5.1.1 การโพลาริซ์แบบวงกลมที่มีทิศทางการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าทางขวามือ

คลื่นหรือสนามไฟฟ้าจะถูกเรียกว่ามีการ โพลาริซ์แบบวงกลมโดยเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าหมุนไปทางขวามือ ถ้าคลื่นเคลื่อนที่ไปตามทิศทางการเคลื่อนที่แล้ว เวกเตอร์สนามไฟฟ้านั้นมีการหมุนตามเข็มนาฬิกา (Clockwise) และการเคลื่อนที่ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าก็จะมีลักษณะเป็นวงกลมด้วยจึงเรียกว่าสนามไฟฟ้านั้นมีการ โพลาริซ์แบบวงกลม

พิจารณาการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าชั่วขณะ ( $\xi$ ) ที่ระนาบ  $r = 0$  ซึ่งสำหรับตัวอย่างนี้จะกำหนดให้

$$\begin{aligned}\beta_\theta &= 0 \\ \beta_\phi &= -\frac{\pi}{2} \\ E_{\theta 0}^+ &= E_{\phi 0}^+ = E_R\end{aligned}\quad (2.33)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned}\xi_\theta &= E_R \cos(\omega t) \\ \xi_\phi &= E_R \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = E_R \sin(\omega t)\end{aligned}\quad (2.34)$$

$$\xi(r, \theta, \phi; t) = \hat{a}_\theta E_R \cos(\omega t) + \hat{a}_\phi E_R \sin(\omega t)\quad (2.35)$$

ขนาดเวกเตอร์สนามไฟฟ้าสามารถกำหนดโดย

$$\xi = \sqrt{\xi_\theta^2 + \xi_\phi^2} = \sqrt{E_R^2(\cos^2(\omega t) + \sin^2(\omega t))} = E_R\quad (2.36)$$

ซึ่งการ โพลาริซ์จะมีลักษณะเป็นแนวเส้นตรงโดยที่แนวเส้นตรงนั้นจะเป็นมุมไปตามเวลาโดยมุมที่เบี่ยงเบนเทียบกับแกน  $\theta$  การเบี่ยงเบนนี้จะทำมุม  $\gamma$  กับแกนอ้างอิง โดยที่มุม  $\gamma$  สามารถหาได้จาก

$$\gamma = \tan^{-1}\left[\frac{\xi_\phi}{\xi_\theta}\right] = \tan^{-1}\left[\frac{E_R \sin(\omega t)}{E_R \cos(\omega t)}\right] = \tan^{-1}[\tan(\omega t)] = \omega t\quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการแสดงการเคลื่อนที่ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งกำหนดให้ระนาบ  $r = 0$  จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ  $E_R$  และมีการหมุนตามเข็มนาฬิกา ตามความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.10

เราสามารถที่จะเขียนเวกเตอร์สนามไฟฟ้าชั่วขณะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \vec{\xi}(r, \theta, \phi; t) &= \text{Re}[\hat{a}_\theta E_R e^{j(\omega t - kr)} + \hat{a}_\phi E_R e^{j(\omega t - kr - \frac{\pi}{2})}] \\ &= E_R \text{Re}\{[\hat{a}_\theta - j\hat{a}_\phi] e^{j(\omega t - kr)}\} \end{aligned} \quad (2.38)$$



รูปที่ 2.10 การโพลาไรซ์แบบวงกลมที่เวกเตอร์สนามไฟฟ้าหมุนไปทางซ้ายมือ

2.5.1.2 การโพลาไรซ์แบบวงกลมที่มีทิศทางการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าทางซ้ายมือ

คลื่นหรือสนามไฟฟ้าจะถูกเรียกว่ามีการโพลาไรซ์แบบวงกลมโดยเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าหมุนไปทางซ้ายมือ ถ้าคลื่นเคลื่อนที่ไปตามทิศทางการเคลื่อนที่แล้ว เวกเตอร์สนามไฟฟ้านั้นมีการหมุนทวนเข็มนาฬิกา (Counter Clockwise) และการเคลื่อนที่ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าก็จะมีลักษณะเป็นวงกลมด้วย จึงเรียกว่าสนามไฟฟ้านั้นมีการโพลาไรซ์แบบวงกลม

พิจารณาการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าชั่วขณะ ( $\vec{\xi}$ ) ที่ระนาบ  $r = 0$  ซึ่งสำหรับตัวอย่างนี้จะกำหนดให้

$$\begin{aligned} \beta_\theta &= 0 \\ \beta_\phi &= \frac{\pi}{2} \\ E_{\theta 0}^+ &= E_{\phi 0}^+ = E_t \end{aligned} \quad (2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\xi_\theta = E_L \cos(\omega t)$$

$$\xi_\phi = E_L \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) = E_L \sin(\omega t) \quad (2.40)$$

$$\bar{\xi}(r, \theta, \phi; t) = \hat{a}_\theta E_L \cos(\omega t) + \hat{a}_\phi E_L \sin(\omega t) \quad (2.41)$$

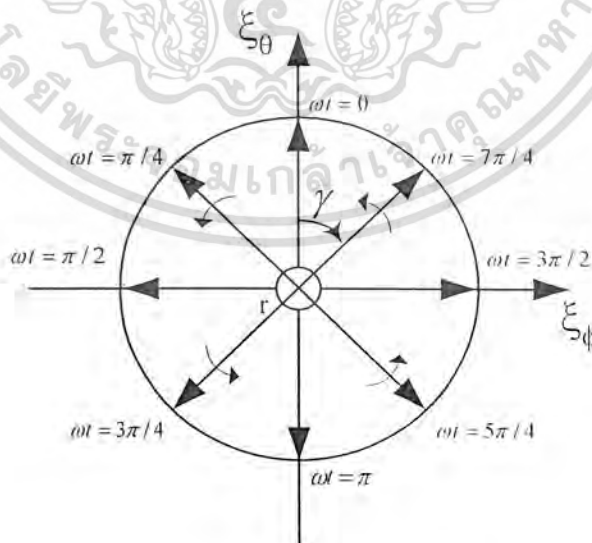
ขนาดเวกเตอร์สนามไฟฟ้าสามารถกำหนดโดย

$$\xi = \sqrt{\xi_\theta^2 + \xi_\phi^2} = \sqrt{E_L^2 (\cos^2(\omega t) + \sin^2(\omega t))} = E_L \quad (2.42)$$

ซึ่งการ โพลาริซจะมีลักษณะเป็นแนวเส้นตรง โดยที่แนวเส้นตรงนั้นจะเป็นมุมไปตามเวลา โดยมุมที่เบี่ยงเบนเทียบกับแกน  $\theta$  การเบี่ยงเบนนี้จะทำมุม  $\gamma$  กับแกนอ้างอิง โดยที่มุม  $\gamma$  สามารถหาได้จาก

$$\gamma = \tan^{-1} \left[ \frac{\xi_\phi}{\xi_\theta} \right] = \tan^{-1} \left[ \frac{-E_L \sin(\omega t)}{E_L \cos(\omega t)} \right] = \tan^{-1} [\tan(\omega t)] = -\omega t \quad (2.43)$$

เมื่อทำการแสดงการเคลื่อนที่ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งกำหนดให้ระนาบ  $r = 0$  จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นวงกลมมีรัศมีเท่ากับ  $E_L$  และมีการหมุนทวนเข็มนาฬิกา ตามความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การโพลาริซแบบวงกลมที่เวกเตอร์สนามไฟฟ้าหมุนไปทางซ้ายมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถที่จะเขียนเวกเตอร์สนามไฟฟ้าชั่วขณะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\bar{\xi}(r, \theta, \phi; t) &= \text{Re}[\hat{a}_\theta E_t e^{i(\omega t - kr)} + \hat{a}_\phi E_t e^{i(\omega t - kr + \frac{\pi}{2})}] \\ &= E_t \text{Re}\{[\hat{a}_\theta - j\hat{a}_\phi] e^{i(\omega t - kr)}\}\end{aligned}\quad (2.44)$$

หมายเหตุ - ขนาดของเฟสระหว่างองค์ประกอบของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าในแนว  $\theta, \phi$  จะทำมุม 90 องศา  
กันเสมอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

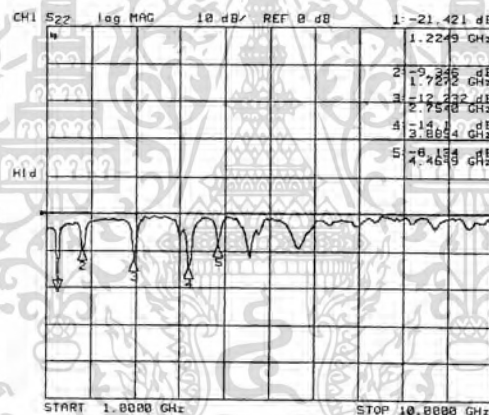
### บทที่ 3

#### การคำนวณและการออกแบบ

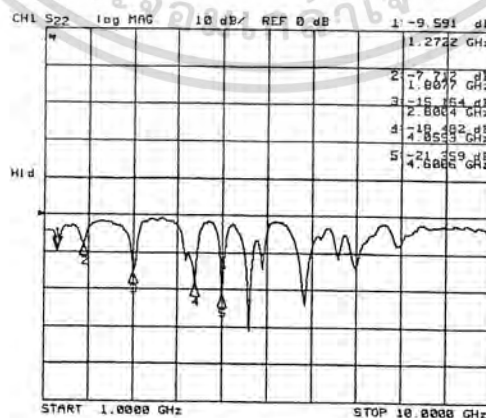
การคำนวณและออกแบบสายอากาศไมโครสตริป จะทำการคำนวณและออกแบบแผ่นตัวนำแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่ความถี่ 1.575 GHz โดยจะคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุที่ใช้สารไดอิเล็กตริกแบบอีพ็อกซีมาทำวัสดุฐานรอง ซึ่งใช้ความหนาของสารไดอิเล็กตริกที่ 1.45 mm. และ 0.55 mm. มาออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

#### 3.1 การทดสอบหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ ) ของแผ่นปริ้นท์

วัสดุฐานรองที่ใช้เป็นอีพ็อกซีที่มีความหนาประมาณ 0.55 mm. และ 1.45 mm. นำแผ่นปริ้นท์ที่จะทำสายอากาศนี้มาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด  $58 \times 58 \text{ mm}^2$  แล้วทำการหุ้ม (Shield) ขอบทั้งสองด้านที่ขนานกัน จากนั้นจึงเชื่อมต่อ SMA – Connector เข้ากับแผ่นปริ้นท์แล้วทำการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{22}$ )



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 กราฟค่าการสูญเสียย้อนกลับของแผ่นปริ้นท์ขนาด  $58 \times 58 \text{ mm}^2$  (ก) ความหนา 0.55 mm. (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดยได้รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกค่าความถี่เรโซแนนท์ ( $f_r$ ) ที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งได้จากกราฟค่าการสูญเสียย้อนกลับมาหาค่าจากสมการแสดงโหมดคลื่นของแผ่นไมโครสตริป

$$(f_r)_{mnp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu_0\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2} \quad (3.1)$$

ลดรูปสมการเป็น

$$(f_r)_{mn} = \frac{c}{2l\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{n^2 + p^2} \quad ; l = W \quad (3.2)$$

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{2l(f_r)_{mn}}\right)^2 \sqrt{n^2 + p^2} \quad (3.3)$$

สมการที่ (3.3) ใช้สำหรับหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ จากรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ในโหมดคลื่นต่างๆ ของแผ่นปริ้นท์หนา 0.55 mm

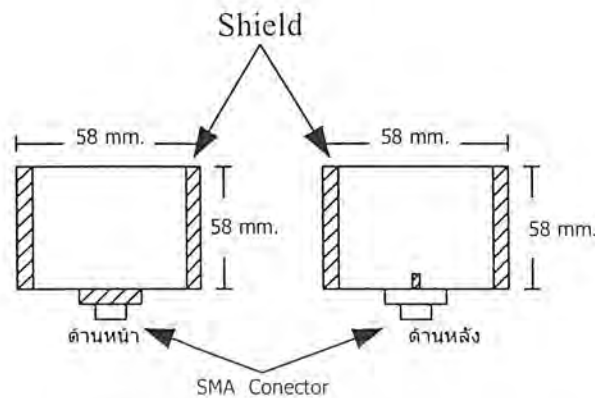
ตำแหน่ง	$f(\text{GHz})$	$MODE_{(m,n,p)}$	$\epsilon_r$
1	1.2249	0,1,0	4.4578
2	1.7272	0,1,1	4.484
3	2.754	0,1,2	4.4093
4	3.8894	0,1,3	4.4214
5	4.4649	0,2,3	4.3616
6	5.0952	0,3,3	4.6374

จากตารางที่ 3.1 จะหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 4.462 ซึ่งจะนำค่านี้ไปใช้ในการออกแบบ

ตารางที่ 3.2 การหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ในโหมดคลื่นต่างๆ ของแผ่นปริ้นท์หนา 1.45 mm

ตำแหน่ง	$f(\text{GHz})$	$MODE_{(m,n,p)}$	$\epsilon_r$
1	1.2722	0,1,0	4.1325
2	1.8077	0,1,1	4.0935
3	2.8004	0,1,2	4.2643
4	4.0593	0,1,3	4.059
5	4.6006	0,2,3	4.1081
6	5.14	0,3,3	4.5569

จากตารางที่ 3.2 จะหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 4.202 ซึ่งจะนำค่านี้ไปใช้ในการออกแบบการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการทดสอบหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์

### 3.1.1 การเลือกวัสดุฐานรอง

ข้อควรพิจารณาในการเลือกวัสดุฐานรอง

(ก) ผลของดิสเพอซัน

ผลของดิสเพอซันเกิดจากการที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ และ ค่าลอสแทนเจนต์ของวัสดุฐานรองขึ้นกับความถี่ โดยปกติค่าลอสแทนเจนต์จะเพิ่มขึ้นตามความถี่ และค่าลอสแทนเจนต์ที่เปลี่ยนไปนี้จะสังเกตได้ง่ายกว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางค่านไฟฟาตามความถี่เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอย่างมากในการออกแบบสายอากาศที่ทำงานที่แถบความถี่กว้าง เราต้องดูว่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสายอากาศอยู่ภายใต้ขอบเขตการทำงานที่เรายอมรับได้หรือไม่ เช่น

$$\frac{\Delta f_r}{f_r} = \frac{\Delta \epsilon_r}{2\epsilon_r} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $\Delta f_r$  คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของความถี่เรโซแนนท์ (Hz)

$\Delta \epsilon_r$  คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์

$f_r$  คือ ความถี่เรโซแนนท์ (Hz)

$\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์

(ข) ข้อพิจารณาทางสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ

สิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ และค่าลอสแทนเจนต์ คือ อุณหภูมิ ความชื้น อายุการใช้งานและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุฐานรอง สิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อสายอากาศมากที่สุดคือ อุณหภูมิ ดังนั้นผู้ออกแบบจึงต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ต้องเลือกวัสดุฐานรองที่สามารถทนต่อช่วงอุณหภูมิที่จะใช้งานได้ โดยไม่ทำให้สายอากาศบิดงอ หรือผิดรูปไป

2. วัสดุฐานรองที่ใช้ต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนค่าตามอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์และลอสแทนเจนท์ต่ำ

3 ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนและค่าความนำความร้อนต่ำ

(ค) ข้อพิจารณาทางด้านคุณสมบัติเชิงกล

ด้านคุณสมบัติเชิงกลเราต้องพิจารณาถึง คุณสมบัติการเข้ารูปได้และคุณสมบัติด้านการ (machinability) ได้ นอกจากนั้นจะต้องดูคุณสมบัติการบัดกรีได้ ความมีเสถียรภาพของขนาด และความสามารถในการทนแรงสั่นสะเทือนได้

(ง) ข้อแนะนำในการเลือกวัสดุฐานรอง

1 เลือกวัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์น้อย และค่าลอสแทนเจนท์ต่ำ และต้องดูว่าเรามีข้อมูลที่ถูกต้องของวัสดุฐานรองตัวนั้นอยู่หรือไม่

2 ผลของดิสเพนชันและค่าความแตกต่างระหว่างชั้นตัวอย่างต้องมีค่าน้อย

3 คุณสมบัติที่ไม่ใช่ทางไฟฟ้า เช่น สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางอุณหภูมิ ความมีเสถียรภาพของขนาดค่าความนำความร้อน ต้องมีค่าเหมาะสม

4 ตรวจสอบดูลักษณะแอนไอโทรปีของสาร ไม่ควรมีมาก

5 ควรเลือกวัสดุฐานรองให้มีความหนาดังนี้

$$h \leq \frac{c}{4f_u(\epsilon_r - 1)} \quad (3.5)$$

เมื่อ  $h$  คือ ความหนาของวัสดุฐานรอง (m)

$c$  คือ ความเร็วแสง (m/s)

$f_u$  คือ ความถี่สูงสุดที่ต้องการให้สายอากาศทำงาน (Hz)

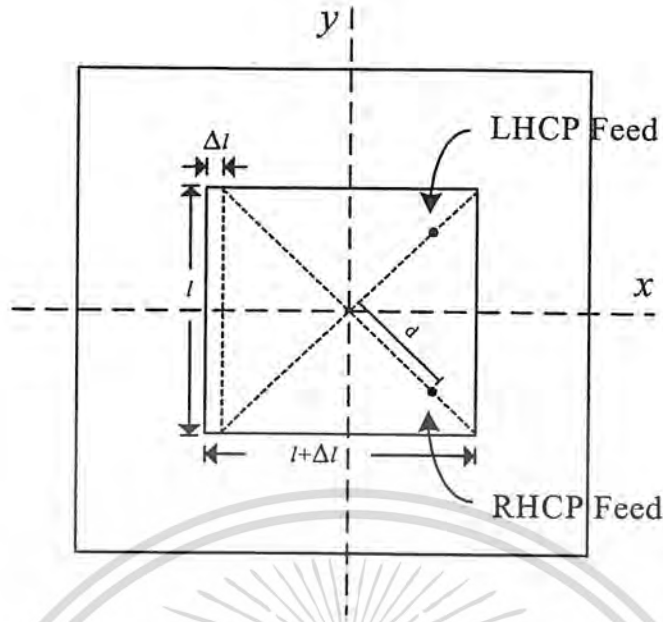
$\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์

### 3.2 การคำนวณและออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก

#### 3.2.1 การออกแบบหาความยาวและความกว้างของแพทช์

จากการหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ในข้อ 3.1 ก็จะนำมาวิเคราะห์ที่คำนวณและออกแบบสายอากาศไมโครสตริป แบบแพทช์ที่มีลักษณะใกล้เคียงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งมีตำแหน่งป้อนสัญญาณตำแหน่งเดียวตามแนวเส้นทแยงมุมที่ความถี่ 1.575 GHz [2][3][4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 รูปแบบแผ่นตัวนำแบบใกล้เคียงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (nearly square patch)

จากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ทั้ง 2 แบบที่นำมาหาค่าความยาวและความกว้างของแพทช์  
 ที่ความหนา (h) ของสารไดอิเล็กตริก = 0.145 cm.  $\epsilon_r = 4.2$   
 ที่ความหนา (h) ของสารไดอิเล็กตริก = 0.055 cm.  $\epsilon_r = 4.46$   
 สามารถนำมาหาค่าความยาว (l) ของแพทช์จากสมการที่ (3.6)

$$l = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{m.}) \quad (3.6)$$

โดยที่  $\epsilon_r$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์

$\lambda$  คือของความยาวคลื่น

$$\lambda = \frac{c}{f_r} \quad (\text{m.}) \quad (3.7)$$

$c$  คือค่าความเร็วแสง =  $3 \times 10^8$  m/s

$f_r$  คือค่าความถี่ใช้งาน =  $1.575 \times 10^9$  Hz

แทนค่า  $\epsilon_r = 4.2$  และ  $f_r = 1.575$  GHz ลงในสมการ (3.6)

$$l = 4.647 \text{ cm.} = 0.2439 \lambda$$

แทนค่า  $\epsilon_r = 4.46$  และ  $f_r = 1.575$  GHz ลงในสมการ (3.6)

$$l = 4.5096 \text{ cm.} = 0.23675 \lambda$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การออกแบบหาตำแหน่งป้อนสัญญาณด้วยโพรบ

การออกแบบเพื่อหาตำแหน่งป้อนสัญญาณสามารถคำนวณ โดยใช้โปรแกรม CAD Microstrip มาคำนวณตำแหน่งป้อนสัญญาณที่เหมาะสมเพื่อที่จะให้มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับระบบที่ใช้งาน โดยในการออกแบบจะออกแบบให้สายอากาศไมโครสตริปมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่งใช้การเลื่อนตำแหน่งป้อนสัญญาณตามแนวเส้นทแยงมุมดังรูป (3.3) เพื่อจะให้เกิดการโพลาไรซ์เชิงวงกลมหมุนขวา และตำแหน่งตำแหน่งป้อนสัญญาณจะเป็นตัวบ่งบอกถึงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งใช้โปรแกรม CAD Microstrip คำนวณค่าอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งป้อนสัญญาณตำแหน่งต่างๆ และนำไปหาค่า VSWR โดยใช้โปรแกรม Mathcad 2001 คำนวณ [3][5][7][8][9]

จากโปรแกรม CAD Microstrip จะคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ได้ดังนี้

$$Z = R + jX \quad (3.8)$$

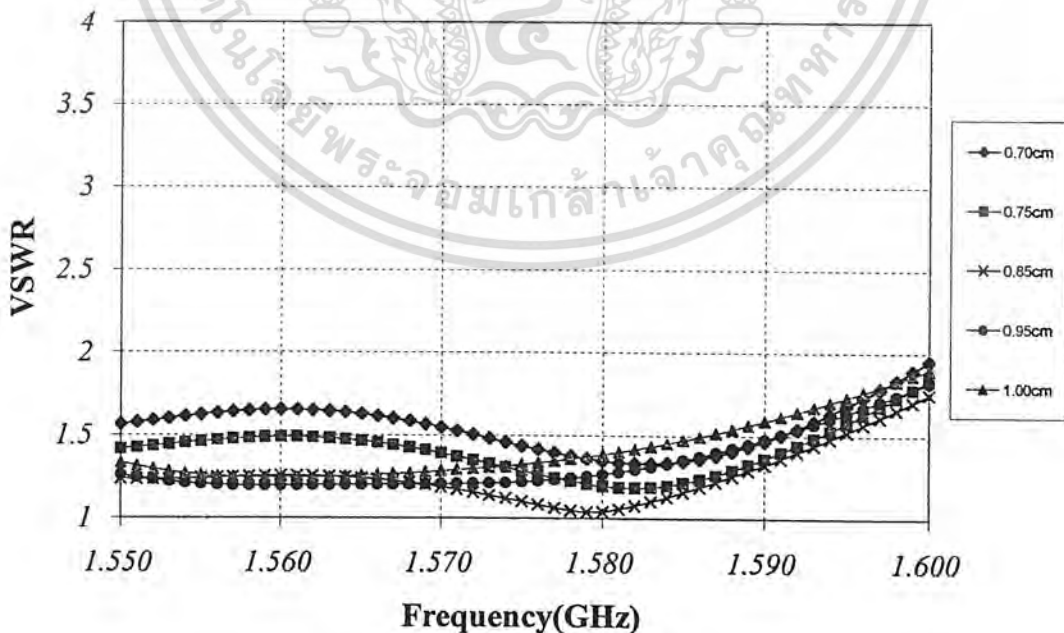
นำค่า  $Z$  มาแทนในสมการที่ (3.9) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $\Gamma$ )

$$\Gamma = \frac{(Z - 50)}{(Z + 50)} \quad (3.9)$$

นำค่า  $\Gamma$  แทนลงใน (3.10) เพื่อหาอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR)

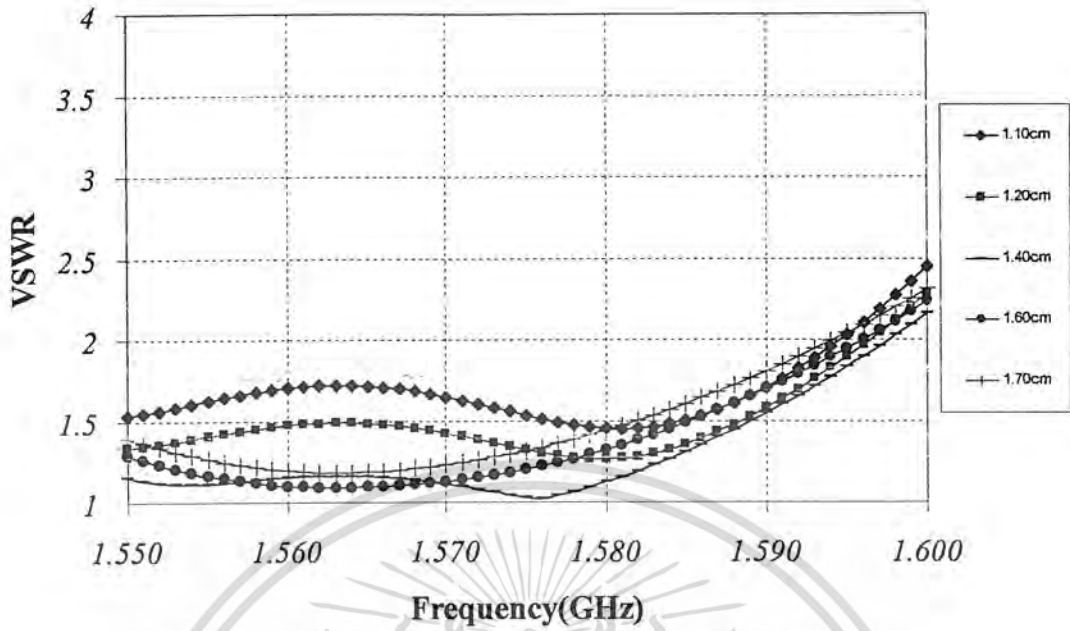
$$VSWR = \frac{(1 + |\Gamma|)}{(1 - |\Gamma|)} \quad (3.10)$$

จากการออกแบบสามารถพิจารณาจากรูปที่ (3.4) ซึ่งจะแสดงค่า VSWR ในช่วงแถบความถี่แบบควิควิต์ที่ต้องการและพิจารณาค่าตำแหน่งป้อนสัญญาณตำแหน่งอื่นเปรียบเทียบเพื่อบ่งบอกถึงแนวทางการแมตชิ่งที่ดีขึ้นของสายอากาศ



รูปที่ 3.4 ค่า VSWR ที่มีตำแหน่งป้อนสัญญาณระยะต่างๆ โดยใช้ค่า  $\epsilon_r = 4.2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ค่า VSWR ที่มีตำแหน่งป้อนสัญญาณระยะต่างๆ โดยใช้ค่า  $\epsilon_r = 4.46$

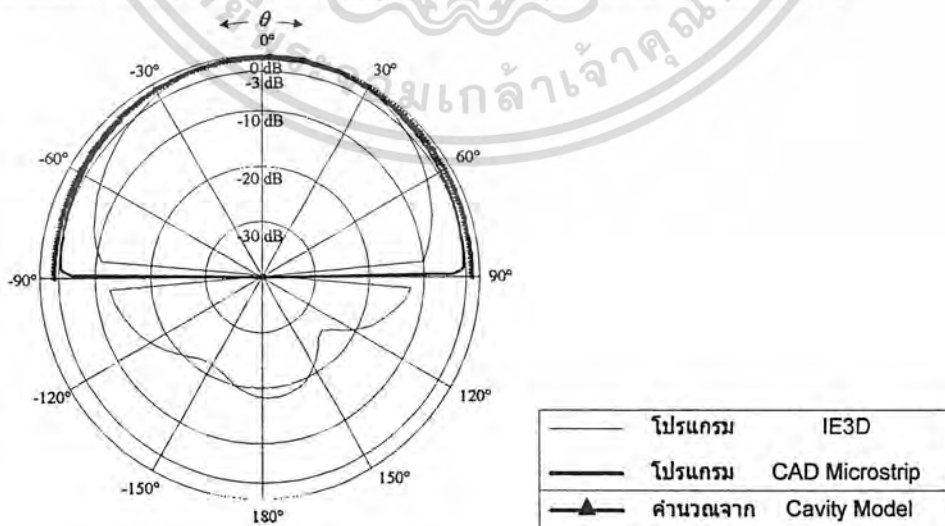
ซึ่งจากรูปที่ 3.4 และ 3.5 เมื่อพิจารณาและนำค่าที่ได้มาออกแบบดังนี้

ที่  $\epsilon_r = 4.2$  ใช้ตำแหน่งป้อนสัญญาณที่ระยะห่างจากตำแหน่งศูนย์กลาง  $d = 0.85\text{cm}$

ที่  $\epsilon_r = 4.46$  ใช้ตำแหน่งป้อนสัญญาณที่ระยะห่างจากตำแหน่งศูนย์กลาง  $d = 1.40\text{cm}$

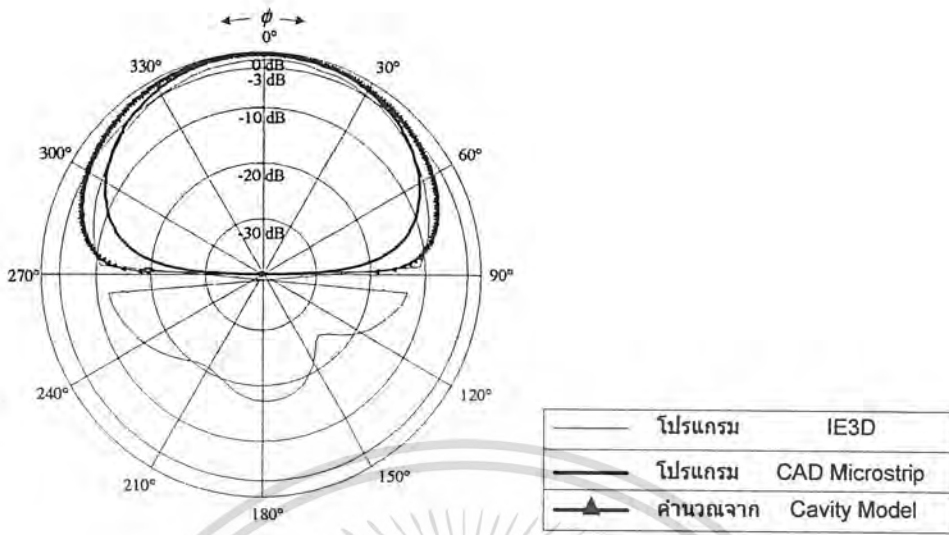
### 3.3 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ที่มีลักษณะใกล้เคียงสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะเป็นแบบทิศทางเดียวซึ่งคำนวณได้จากควาวิตีโมเดลและโปรแกรม CAD Microstrip [4]



รูปที่ 3.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณ

### 3.4 การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

โปรแกรม IE3D เป็นโปรแกรมที่มีความแม่นยำในการวิเคราะห์และออกแบบวงจรบน PCB สูง โดยอาศัยหลักการคำนวณหากระที่ไหลจากวิธี โมเมนต์ แล้วนำกระแสที่ได้นี้มาคำนวณหาสนามด้วยสมการฟังก์ชันกรีน (Green's Function) ซึ่งวิธีทั้งสองมีความซับซ้อนในการคำนวณ แต่ก็ได้มาซึ่งผลที่มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมาก ดังนั้นโปรแกรม IE3D จึงเป็นที่ยอมรับในการใช้การจำลอง [8][10]

การแผ่กระจายของสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้า เราสมมติให้โครงสร้างของตัวนำอยู่ในชั้นของฉนวนสนามที่ตกกระทบลงบนโครงสร้างจะถูกเหนี่ยวนำไปเป็นกระแสที่กระจายอยู่ที่ตัวนำ กระแสที่ถูกเหนี่ยวนำจะกลายเป็นสนามอีกครั้งตามชั้นต่างๆ ที่มีโครงสร้างเป็นโลหะ โครงสร้างที่เป็นตัวนำจะมีความหนาแน่นของกระแสอยู่บนผิวด้วยเงื่อนไขขอบเขตเป็น[11]

$$E(r) = Z_S(r)J(r), r \in S \tag{3.11}$$

- โดยที่  $S$  คือ พื้นที่ผิวตัวนำ
- $E(r)$  คือ สนามรวมที่ผิวสัมผัส
- $J(r)$  คือ ความหนาแน่นกระแสบนผิว
- $Z_S(r)$  คือ ความต้านทานบนผิวตัวนำ

เมื่อโครงสร้างอยู่ในชั้นของฉนวน เราสามารถหาสนามรวมได้เป็น

$$E(r) = E_i(r) + \int_S G(r|r') \cdot J(r') ds' \tag{3.12}$$

- โดยที่  $G(r|r')$  คือ Green's function สำหรับโครงสร้างที่ล้อมรอบด้วยฉนวนที่มีขอบเขตไม่รวมกับขอบเขตของตัวนำ  $S$

$E_i(r)$  คือ สนามตกกระทบบนผิวตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทน (3.12) ใน (3.11) จะได้

$$Z_S(r)J(r) = E_i(r) + \int_S G(r|r') \cdot J(r') ds' \quad (3.13)$$

สนามตกกระทบและความต้านทานของพื้นผิวสามารถหาได้จาก Green's function และตัวที่ยังไม่ทราบค่าคือ  $J(r)$  สามารถหาได้โดยการสมมติให้ความหนาแน่นกระแสอยู่ในรูปของเซตพื้นฐาน

$$J(r) = \sum_n I_n B_n(r), n=1, 2, 3, \dots \quad (3.14)$$

จะได้

$$Z_S(r) \sum_n I_n B_n(r) = E_i(r) + \sum_n I_n \int_S G(r|r') \cdot B_n(r') ds' \quad (3.15)$$

เราสามารถเปลี่ยนสมการที่ (3.15) ให้อยู่ในรูปของสมการเมตริกได้โดยใช้วิธีของ Galerkin

$$S_m \int_S ds E_i(r) \cdot B_n(r) = S_m S_n I_n \left\{ \int_S ds Z_S(r) B_m(r) \cdot B_n(r) + \int_S \int_S ds' B_m(r) \cdot G(r|r') \cdot B_n(r') \right\} \quad (3.16)$$

ในสมการ (3.15) เซตพื้นฐานจะมีจำนวนพจน์เป็นอนันต์ เราสามารถหาจำนวนพจน์ที่เหมาะสมได้โดยวิธีการ Numerical ฉะนั้นในสมการ (3.16) จะได้อยู่ในรูปเมตริก N

$$[Z_{mm}][I_m] = [V_m] \quad (3.17)$$

โดยที่

$$Z_{mm} = \int_S ds Z_S(r) B_m(r) \cdot B_n(r) + \int_S \int_S ds' B_m(r) \cdot G(r|r') \cdot B_n(r') \quad (3.18)$$

$$V_m = \int_S ds E_i(r) \cdot B_n(r) \quad (3.19)$$

คำตอบที่ได้จากสมการ (3.17) ถึง (3.19) จะเป็นสัมประสิทธิ์ความหนาแน่นกระแส หลังจากได้ค่าความหนาแน่นกระแส เราสามารถนำไปคำนวณหา S-parameter แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างที่เป็นวงจรสมมูล RLC และอื่น ๆ ตามต้องการ ความสามารถในการคำนวณหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโปรแกรม IE3D จะมีขอบเขตดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3.3 Major capabilities of the IE3D Electromagnetic Simulator

FUNCTIONALITY AND CAPABILITY	GENERAL	SPECIAL CAPABILITY OR EXPLANATION
Microstrip Circuits	Yes	Multiple dielectrics, lossy and finite ground plane
Stripline Circuits	Yes	Accurate modeling of finite strip thickness
Co-planar Waveguide (CPW)	Yes	Finite thickness, lossy ground, finite or infinite ground plane
Slot-line Structures	Yes	Magnetic current modeling for infinite ground plane and electric current modeling for finite ground plane.
Suspended Stripline and Other Multi-layer Planar Circuits	Yes	No limit on the number of dielectric and metallic layers
High Speed Digital Packaging and Signal Integrity	Yes	RLCG equivalent circuit extraction in SPICE format, simulation of SPICE file in frequency domain for verification and confirmation
Printed Circuits on Lossy Silicon Substrate	Yes	IE3D's Green's functions include all the losses in the dielectrics and metals.
HTS Superconductor Circuits	Yes	Modeling of skin effect and high dielectric permittivity
Coaxial Circuits and Shielded Strip-line Circuits	Yes	modeling of any multiple conductor transmission line systems of arbitrary cross-section shape
Microstrip Antennas	Yes	Edge fed, probe-fed, proximity coupled fed and aperture coupled fed, no limitation on number of feeds and vertical pins
Wire Antennas	Yes	Dipoles, loop antennas, cylindrical helix and conical helix antennas, quadrifilar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		antennas. It provides more accurate modeling than the typical wire antenna algorithms.
RF Antennas	Yes	Inverted antennas, spiral antennas and any other antennas with planar and 3D metallic structures
Plane-wave Incident and RCS Problems	Yes	Calculate monostatic and bistatic radar cross-section (RCS)
3D Capability	Yes	Vertical and conical via holes, airbridges, 3D interconnect, no limitation on the shape and configuration of a 3D structure
Arbitrarily Shaped Structures	Yes	No limitation on the shape and orientation of planar and 3D structures, meshing structure efficiently without limited by uniform grids
Open Structures	Yes	Capture all the radiation and coupling effects
Closed Structures	Yes	Electric and magnetic walls emulating enclosures. Exact boxed Green's functions are implemented in the IE3D 8.0 for precise modeling of enclosed structures.
Periodic Structures	Yes	Periodical walls to emulating periodical structures such as infinite array. Exact periodic Green's functions are implemented into the IE3D 8.0 for precise modeling of periodic structures.
Number of Ports and Port Location	No limit	Offer different de-embedding schemes for different situation: extension schemes for high accuracy, localized for highly packed circuits, differential feed for structure without an infinite ground plane. no limitation on port location and orientation.
Lumped Elements and Layout Level Simulation	Yes	Lumped elements defined in both the layout and schematic editors, s-parameter

		files incorporated for mixed EM and nodal simulation
Electromagnetic Optimization	Yes	Automatic adjusting the location of polygon vertices to fine tune structures
Mixed Electromagnetic and Network Optimization	Yes	The MGRID+MODUA+IE3D allows mixed electromagnetic and network simulation and optimization.
Back Simulation	Yes	Users are allowed to extract the effect of a geometry portion out of a simulation to yield the simulation result of the major part of interest
Number of Conductor Layers	No limit	A user can define as many conductor layers as he likes
Different Conductor Property in a Circuit	Yes	A user can define the conductor as normal conductor, HTS superconductor, or thin film resistor
Metallic Thickness Modeling	Yes	The actual geometry of a thick metallic structure can be modeled, taking into consideration of the skin effect
Number of Dielectric Layers	No limit	General formulation and implementation of Green's functions for unlimited number of dielectric layers
Complex Dielectric Constant ( $\epsilon_r$ ), Permeability ( $\mu_r$ ) and Conductivity ( $\sigma$ )	Yes	Complex $\epsilon_r$ , $\mu_r$ , and $\sigma$ available for both the dielectric layers and the metallic strips.
Thin Dielectric Layers	Yes	Tested for thin dielectric layers down to 0.1 microns in MMICs.
High Dielectric Constant Material	Yes	Tested for dielectric constant up to 1000 in HTS circuits
MIM Capacitors	Yes	Optionally meshing the coupling plates into small cells for accurate modeling; aligning the meshing on both plates; automatic creation of meshed MIM capacitor with or without vias.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

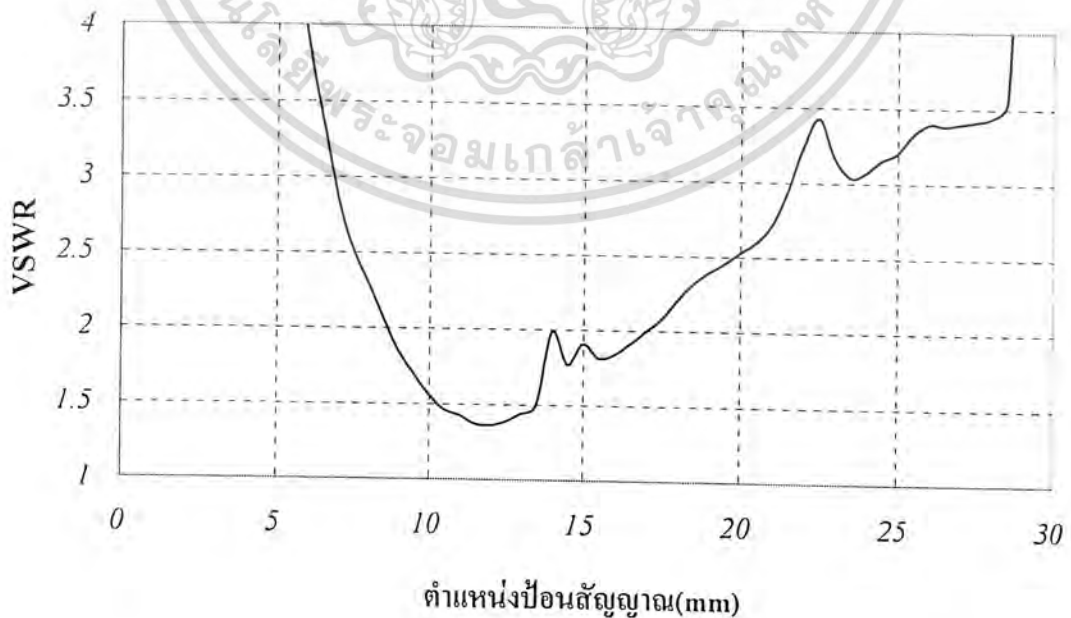
Spiral Inductors	Yes	Easy one-step construction of rectangular and circular spiral inductor, modeling of finite thick metal traces, modeling of air-bridges, modeling of lossy ground plane
Interactive Graphic Input of Geometry	Yes	Flexible mouse input and keyboard input of polygon vertices, strong 2D and 3D geometry checking
Convenient Geometry Editing	Yes	Copy, move, polygon and vertex elevation, automatic cutting of overlapped polygons, digging holes in geometry, polygon connectivity checking, etc.
3D Structure Display in Geometry Editing	Yes	3D display is a great help to 3D geometry editing
Automatic Generation of Geometry	Yes	One step iconized constructions of vias, wire-bonds, circles, rings, curve-structures, spheres, fans, conical and cylindrical helix antennas, cylindrical tubes, probe-feed proximity, slots, etc.
Parameter Display	Yes	Data list, linear graph and Smith Chart display of S, Y, Z-parameters and VSWR
Comparison of Results	Yes	Display multiple simulation and measurement results simultaneously
Curve-fitting and Interpolation	Yes	Curve-fitting simulation data to yield smooth result
Nodal Circuit Simulation	Yes	Connect two or more s-parameter modules or lumped elements together using idealized connection
Calculation of Port Information with Loading	Yes	The MODUA allows a user to calculate the voltage, current and waves at all the ports under different excitation and load conditions.
Equivalent Circuit Extraction	Yes	Calculate RLCG equivalent circuit for transmission line model, find the parameter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

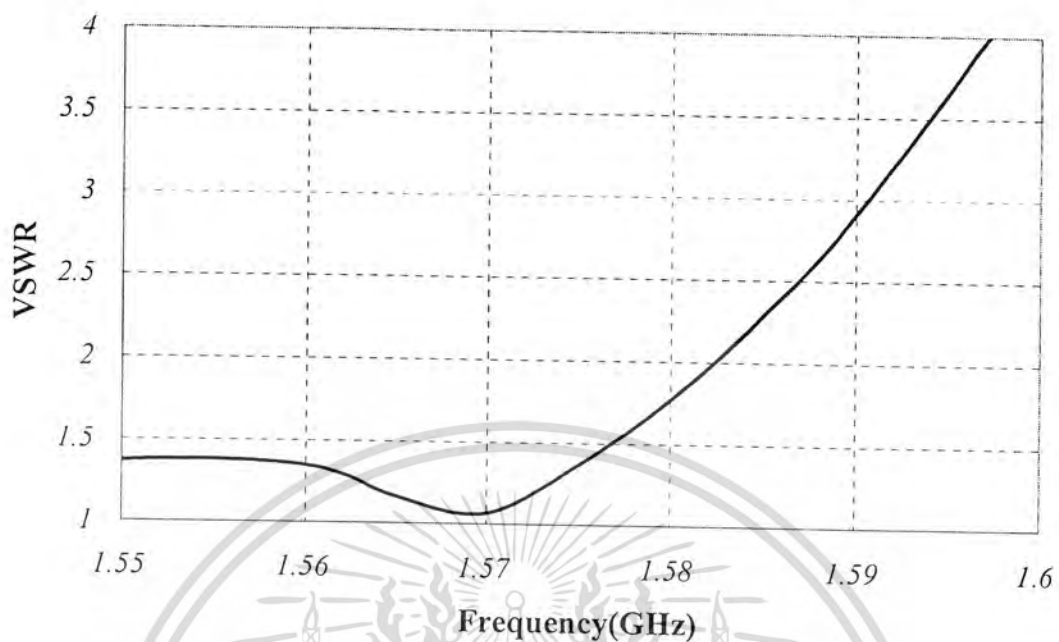
		values for equivalent circuit created by users
Frequency Dependent Equivalent Circuit Extraction	Yes	The MODUA allows extraction of frequency dependent equivalent circuit extraction.
3D Current Distribution Display	Yes	Display 2D vector current, 3D current density animation, 3D average current density display
3D radiation pattern display	yes	3D pattern, 3D mapped pattern, 2D pattern and 2D polar pattern for both linear and circular polarized antennas, axial ratio display, display of radiation parameters such as directivity, radiated power
Radiation Parameter Frequency Response Display	Yes	The PATTERVIEW allows display of frequency response display of radiation parameters
Radiation Pattern Phase Display	Yes	The PATTERVIEW allows displaying the phase of a pattern.
Radiation Pattern Comparison	Yes	The PATTERVIEW allows comparison of radiation patterns at different frequencies and from different structures.
Radiation Patterns of Loaded Antennas	Yes	The IE3D allows users to calculate the radiation patterns of antennas with lumped elements.
Pattern Optimization	Yes	The IE3D 7.0 allows optimization of radiation patterns and parameters.
Pattern Rotation	Yes	You can rotate the patterns from CURVIEW or PATTERVIEW. This feature is very important for wireless applications because rotation of antennas are frequently encountered.
Real Ground Effect on Pattern	Yes	The CURVIEW and PATTERVIEW allow the users to add the effects of the real

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

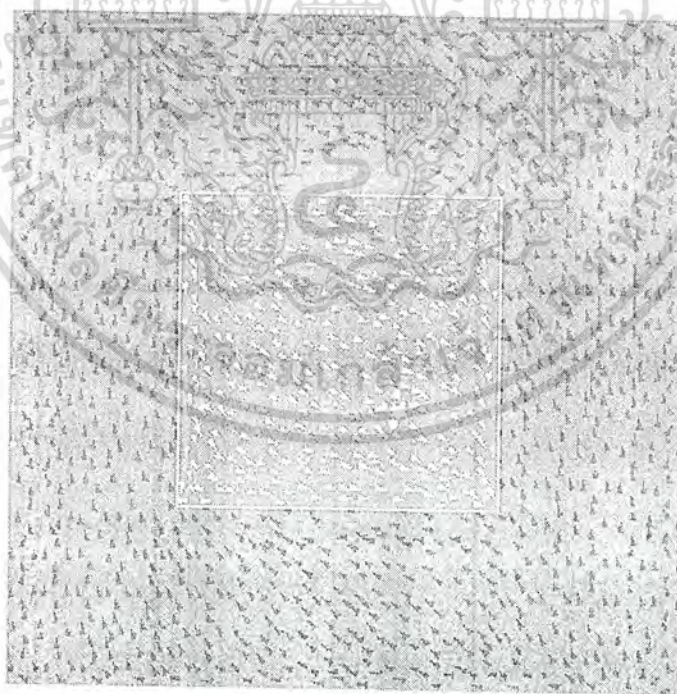
		ground to the pattern.
Pattern Merging	Yes	The PATTERNVIEW allows merging of radiation patterns from individual radiators. This feature allows calculation of radiation pattern from a very large structures divided into smaller sub-structures for field simulation.
3D Near Field Display	Yes	Display Ex, Ey and Ez or any combination of the components
Save High Quality Bitmap File	Yes	Save colorful current distribution, radiation pattern or near field pictures in bitmap files.
Display Current and Field with Different Excitation and Load Conditions	Yes	Easy investigation of circular polarization, antenna with integrated source.
S-parameter HP/EEsof <sup>®</sup> Compatible	Yes	
RLCG Equivalent Circuit SPICE Compatible	Yes	
GDSII, DXF, GERBER and CIF Bi-direction Conversion	Yes*	CIF and GDSII built-in, DXF, GERBER optional
Time-Domain Simulation	Yes*	Use together with the MDSPICE simulator from Zeland Software, Inc.



รูปที่ 3.8 การหาตำแหน่งป้อนสัญญาณที่ระยะห่างจากตำแหน่งศูนย์กลางที่เหมาะสมที่สุด  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ได้เห็นมาใช้หรือเผยแพร่ข้อมูลด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ผลตอบสนองของค่า VSWR เมื่อเปลี่ยนความถี่ในการใช้งาน



รูปที่ 3.10 ทิศทางการไหลของกระแสบนสายอากาศไมโครสตริป

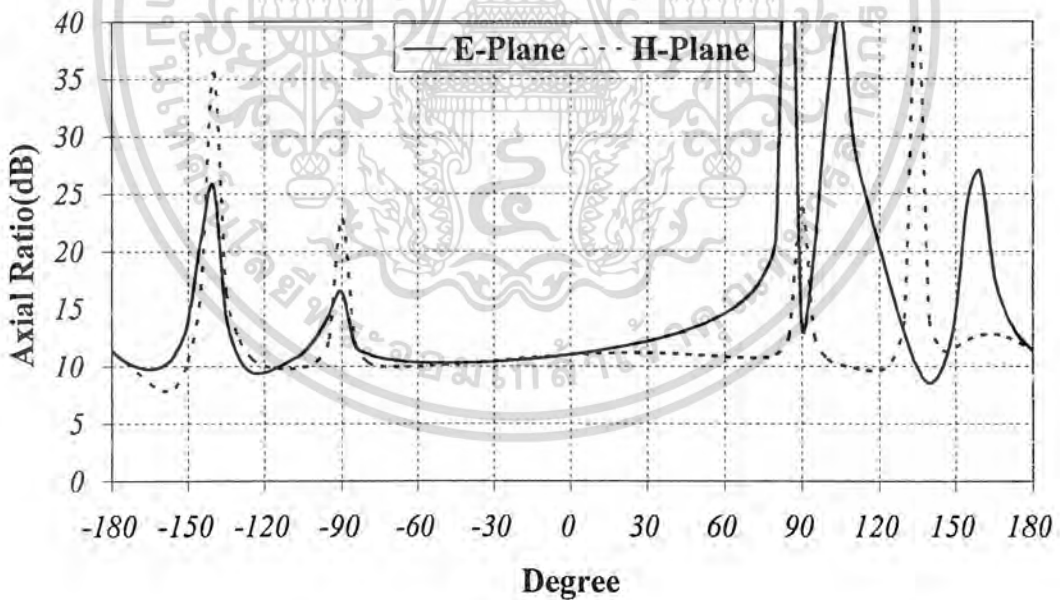
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองสายอากาศไมโครสตริปขึ้นในโปรแกรม IE3D เราจะกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ ความหนาของแผ่นทองแดงทั้ง 2 ด้าน เท่ากับ 0.002 mm. ความหนาของสารไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.45 mm. Loss tangent ของสารไดอิเล็กตริก เท่ากับ 0.01 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ เท่ากับ 4.2 ขนาดของแพทช์ เท่ากับ  $46.45 \times 47.65$  mm ขนาดของกราวด์ เท่ากับ  $130 \times 130$  mm.

จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากโปรแกรม IE3D จะเกิดความผิดพลาดที่มุม  $\pm 90$  องศา ในระนาบสนามไฟฟ้า และมุม 90 องศา กับ 270 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เพราะเมื่อทำการคำนวณค่าต่าง ๆ จากมุมเหล่านี้จะทำให้คำตอบที่ได้เป็นศูนย์และเมื่อใช้กับลอการิทึมจะได้ค่าเป็น  $-\infty$  ดังรูป

จากรูปที่ 3.8 จะพบว่าตำแหน่งที่ใช้ป้อนสัญญาณเพื่อให้ได้ VSWR ต่ำกว่า 2 จะอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของสายอากาศไปตามแนวเส้นแรงแม่เหล็กระยะ 8.5 ถึง 17 mm. และระยะห่างที่ทำให้ค่า VSWR ต่ำที่สุดอยู่ที่ตำแหน่ง 11.5 mm. ซึ่งจะได้ค่า VSWR เท่ากับ 1.35 : 1

เมื่อทำการหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการป้อนสัญญาณได้แล้ว เราก็จะทำจำลองดูว่าที่ตำแหน่งนี้สายอากาศจะสามารถตอบสนองความถี่ในช่วงใดบ้าง โดยเราจะกำหนดเฉพาะช่วงความถี่ที่เราใช้งานคือ 1.565 GHz ถึง 1.585 GHz ซึ่งจะเห็นว่า VSWR ที่มีค่าต่ำกว่า 2 จะครอบคลุมช่วงกว้างความถี่ที่เราใช้งานอยู่ตามรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.11 อัตราส่วนแกนที่ความถี่ 1.575 GHz

ทิศทางการไหลของกระแสบนสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งได้มาจากการจำลองสายอากาศ จะพบว่ามีการแผ่ไหลอยู่บนแพทช์ โดยทิศทางการไหลของกระแสจะไหลตามเข็มนาฬิการอบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพทช์ ซึ่งกระแสนี้เป็นกระแสส่วนมากที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นด้านหน้านั้นเอง และกระแสอีกเล็กน้อยที่ไหลอยู่บนกราวด์ของสายอากาศโดยจะกลายเป็นการแพร่กระจายคลื่นด้านหลัง

อัตราส่วนแกนที่ได้จากการจำลองตามรูปที่ 3.11 จะพบว่ามีค่าต่ำสุดที่ประมาณ -30 องศา ซึ่งจะส่งผลให้การโพลาริซชันที่ได้ไม่กลม จะเอียงไปมีความแรงสูงสุดที่มุม -30 องศา

และจากการจำลองโปรแกรม IE3D ยังสามารถแสดงพารามิเตอร์อื่น ๆ ได้อีกดังนี้

Frequency : 1.575 (GHz)

Incident Power : 0.01 (W)

Input Power : 0.00976246 (W)

Radiated Power : 0.00435735 (W)

Average Radiated Power : 0.000346747 (W/s)

Radiation Efficiency : 44.6337%

Antenna Efficiency : 43.5735%

RH Circular Properties :

Circular Gain : 2.25909 dBi

Circular Directivity : 5.86687 dBi

Circular Maximum : at (5, 230) deg.

3dB Beam Width : (48.9611, 95.291) deg.

No. 1 Port : Inc=1/0 (V), Zs=(50,0) Ohms, Zc=(50,0) Ohm

V=0.980505/-8.85507 (V), I=0.0208434/8.32729 (A)

Inc=1/-3.97569e-015 (V), Ref=0.154122/-101.672 (V)

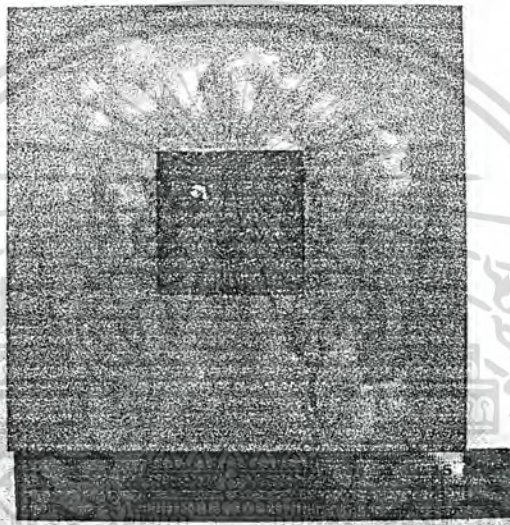
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

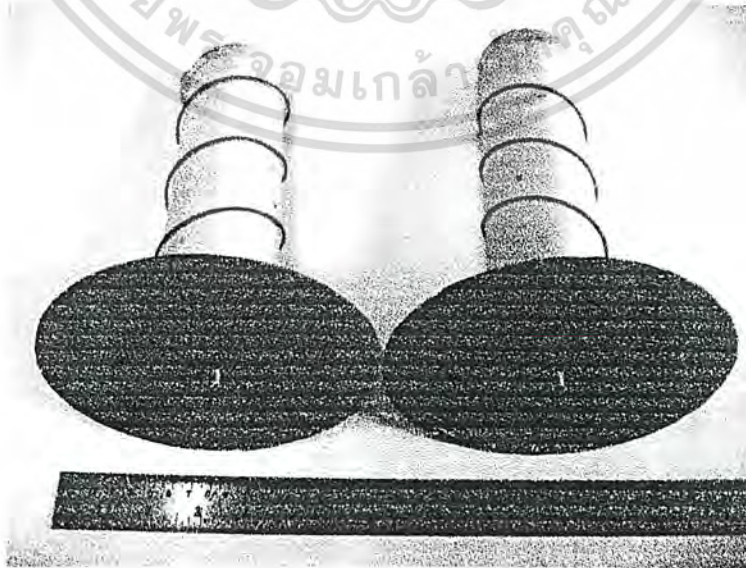
### การออกแบบสร้างและทดสอบ

อุปกรณ์ที่ออกแบบสร้างและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสายอากาศประกอบด้วย

- สายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยม องค์กรประกอบเดียว
- สายอากาศแบบเกลียวหุนซ้ายและหุนขวาที่ใช้ส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
- เครื่องรับ GPS พร้อมชุดสายอากาศรับสัญญาณ
- เครื่อง Network Analyzer

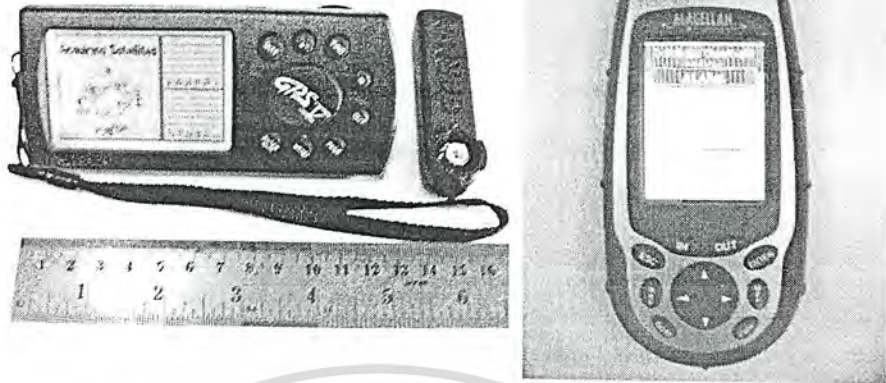


รูปที่ 4.1 สายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมที่ออกแบบและสร้างขึ้น



รูปที่ 4.2 สายอากาศแบบเกลียวหุนซ้ายและหุนขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

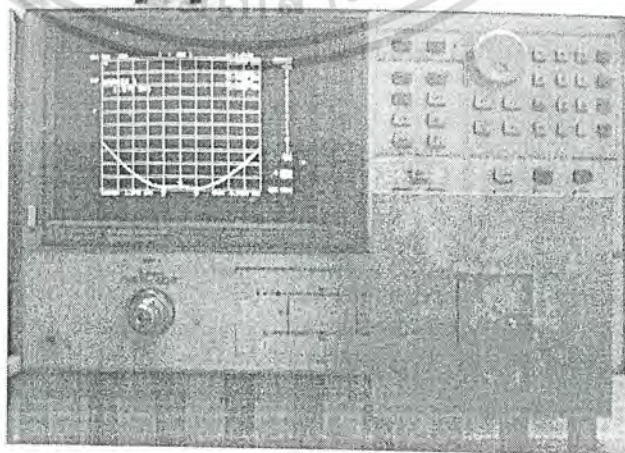


(ก) เครื่องรับ GPS ของ Garmin (ข) เครื่องรับ GPS ของ Magellan ที่ยอมรับเป็นมาตรฐาน  
รูปที่ 4.3 เครื่องรับ GPS พร้อมชุดสายอากาศรับสัญญาณ

การทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมที่ออกแบบและชุดสายอากาศติดตั้งเครื่องรับ GPS ที่จะทำการทดสอบในโครงการนี้ได้แก่อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) อินพุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_{in}$ ) ค่าการสูญเสียย้อนกลับ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราส่วนของแกนและอัตราขยายของสายอากาศ

#### 4.1 การทดสอบหาอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ

การทดสอบโดยใช้เครื่อง Network Analyzer ทดสอบหาอัตราส่วนคลื่นนิ่ง อินพุตอิมพีแดนซ์ ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมและชุดสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไป

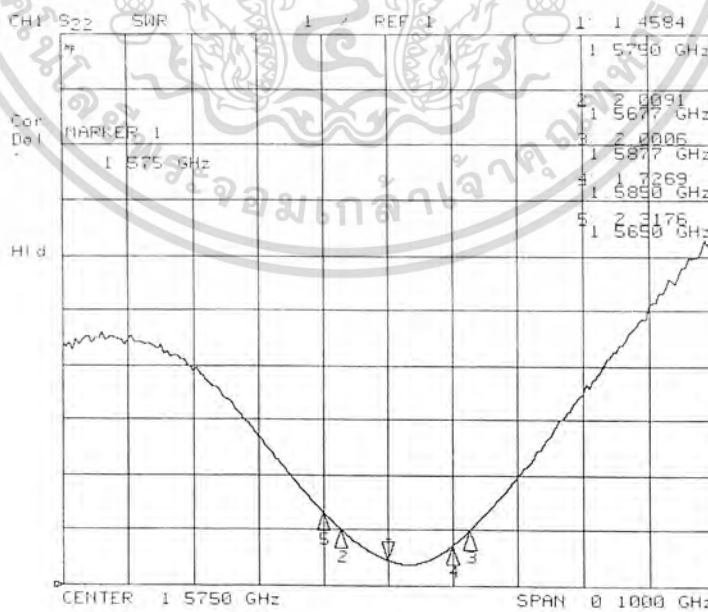


รูปที่ 4.4 การเชื่อมต่อในการทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่ง อินพุตอิมพีแดนซ์และค่าการสูญเสียย้อนกลับ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้นคว้าด้วยเครื่อง Network Analyzer  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.1.1 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง



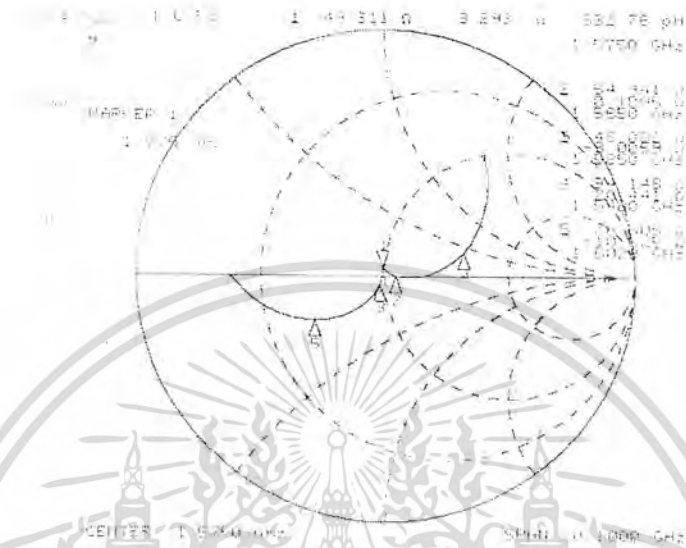
รูปที่ 4.5 กราฟค่า VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยม



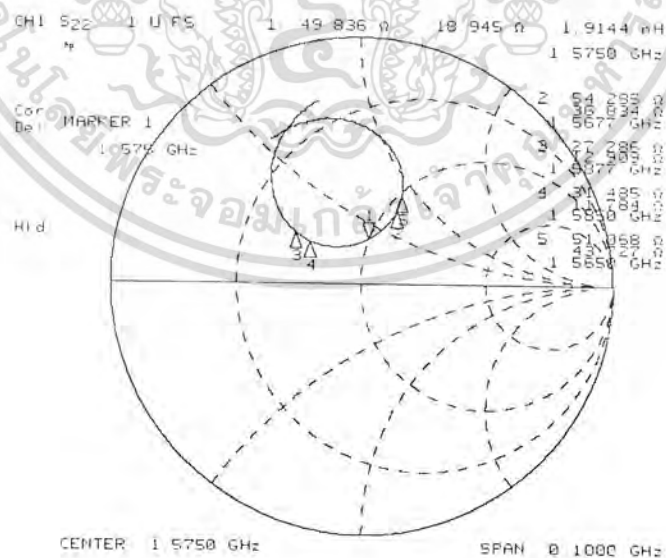
รูปที่ 4.6 กราฟค่า VSWR ของสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 การทดสอบทดสอบหาอิมพีแดนซ์



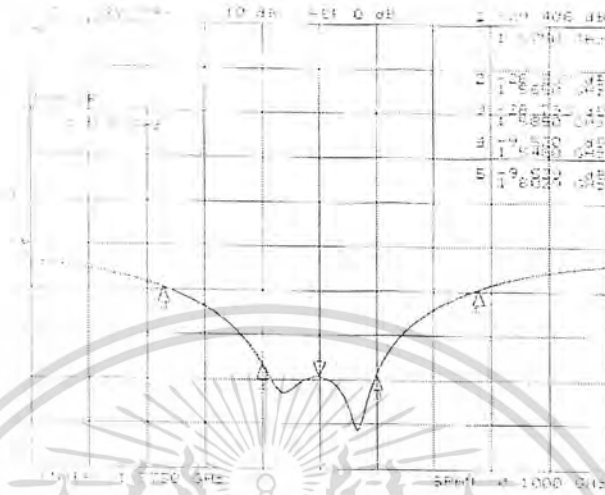
รูปที่ 4.7 กราฟอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปลี่เหลี่ยม



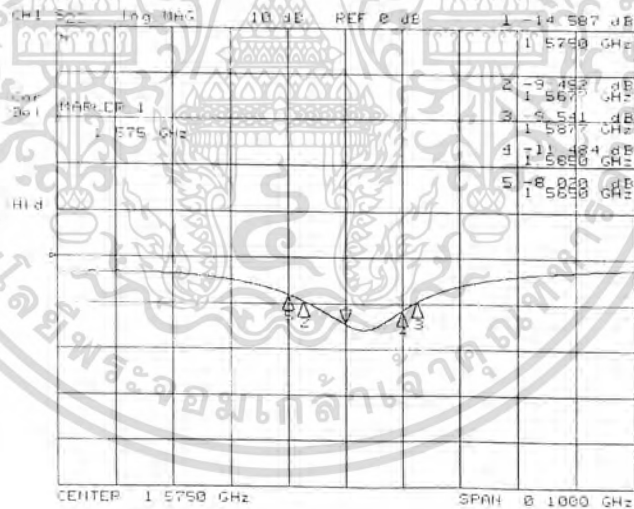
รูปที่ 4.8 กราฟอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การทดสอบทดสอบหาค่าการสูญเสียย้อนกลับ



รูปที่ 4.9 กราฟค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.10 กราฟค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไป

ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปมีค่าเท่ากับ 1.07:1 และสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไปมีค่าเท่ากับ 1.45:1 ซึ่งถือว่าสายอากาศทั้ง 2 ตัวที่ทำการทดสอบมีค่า VSWR ที่มีค่าต่ำกว่า 1.5:1

จากกราฟแสดงค่า VSWR ทั้งสองของสายอากาศ เมื่อหาค่าความกว้างของแบนด์วิดท์ซึ่งจะเห็นว่าระบบ GPS ต้องการแบนด์วิดท์  $\pm 10.23$  MHz คิดเป็น 1.27% ของความถี่กลางการทดสอบ สายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไปมีค่าความกว้างแบนด์วิดท์เท่ากับ 1.27% และสายอากาศไมโครสตริปมีค่าความกว้างแบนด์วิดท์เท่ากับ 3.49% ซึ่งตรงตามความต้องการของระบบ GPS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายประชาสัมพันธ์ โทร. 02-25543000

จากกราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $49.311 + j3.293$  โอห์ม และสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไปมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $49.836 + j18.945$  โอห์ม ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 50 โอห์มมาก เมื่อเปรียบเทียบกันจะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปมีค่า inductance ต่ำกว่าสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไปแสดงให้เห็นว่าสายอากาศไมโครสตริปมีคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์ดีกว่า

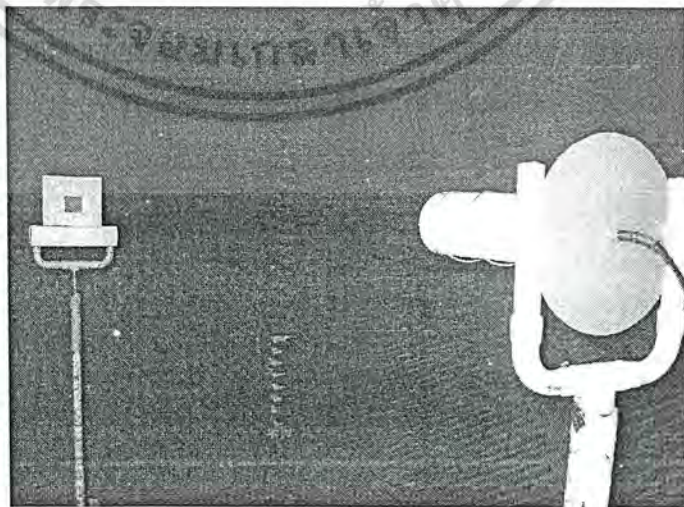
จากกราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปมีค่าเท่ากับ 29.408 dB และสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไปมีค่าเท่ากับ 14.58 dB จะเห็นว่าสายอากาศไมโครสตริปมีค่าการสูญเสียย้อนกลับที่สูงกว่าสายอากาศติดเครื่องรับ GPS

#### 4.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในโครงการนี้จะทำการทดสอบในห้องทดสอบการสะท้อนต่ำเพื่อป้องกันผลกระทบจากสภาพแวดล้อม ในการทดสอบจะทำการหมุนสายอากาศด้านรับรอบตัวเองด้วยมอเตอร์ที่มีการหมุนครั้งละ 5 องศา ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระยะของสนามระยะไกล  $R = 2D^2 / \lambda$  โดย  $D$  คือมิติที่กว้างที่สุดของสายอากาศด้านส่งกับด้านรับรวมกัน

##### 4.2.1 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยม องค์กรประกอบด้วย

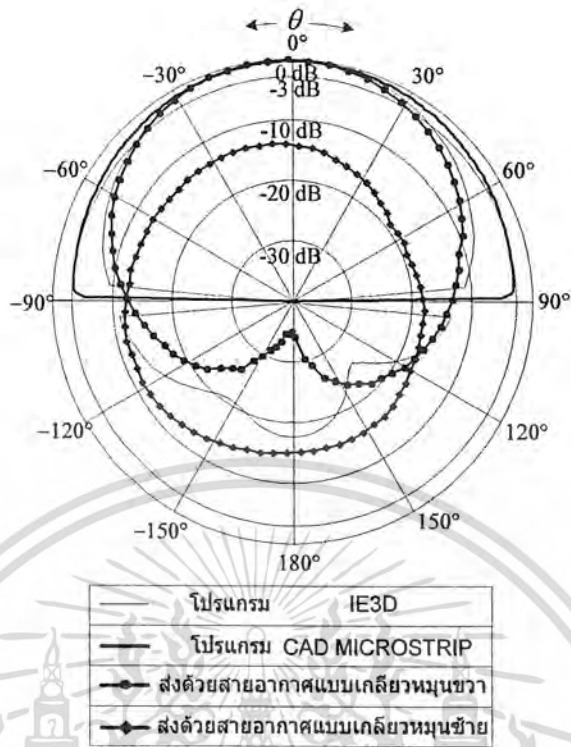
ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะใช้สายอากาศแบบเกลียวหมุนซ้ายและหมุนขวาเป็นสายอากาศส่งและสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมเป็นสายอากาศรับ ขนาด  $D$  ของสายอากาศแบบเกลียวเท่ากับ 30 cm. และ  $D$  ของสายอากาศไมโครสตริป เท่ากับ 22 cm. และ  $D$  ของสายอากาศติดเครื่องรับ GPS เท่ากับ 7.5 cm. จึงได้ระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้ง 2 เท่ากับ 280 cm. เป็นอย่างน้อย



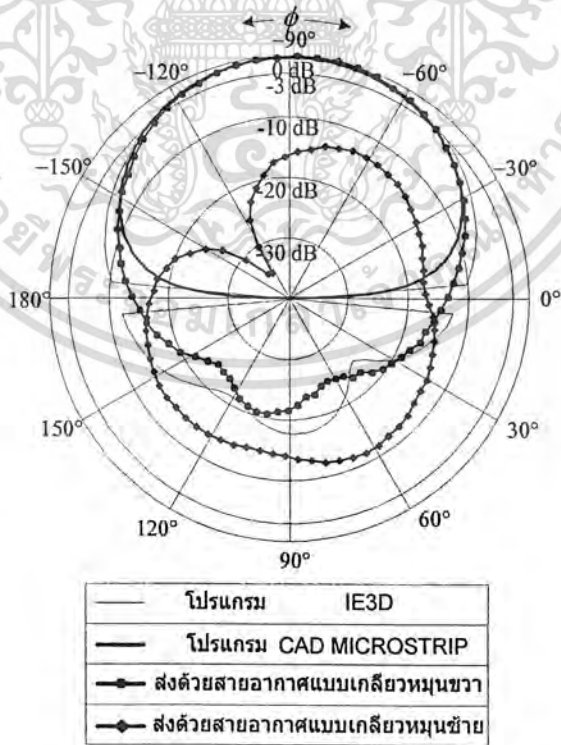
รูปที่ 4.11 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปที่ส่งด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ในงานอื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาต  
สายอากาศแบบเกลียว

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

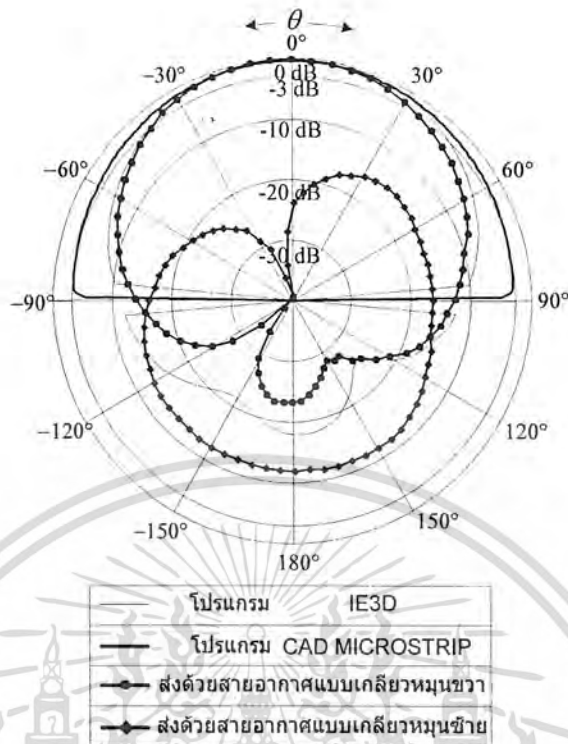


รูปที่ 4.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ทดสอบได้เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่ความถี่ 1.565 GHz

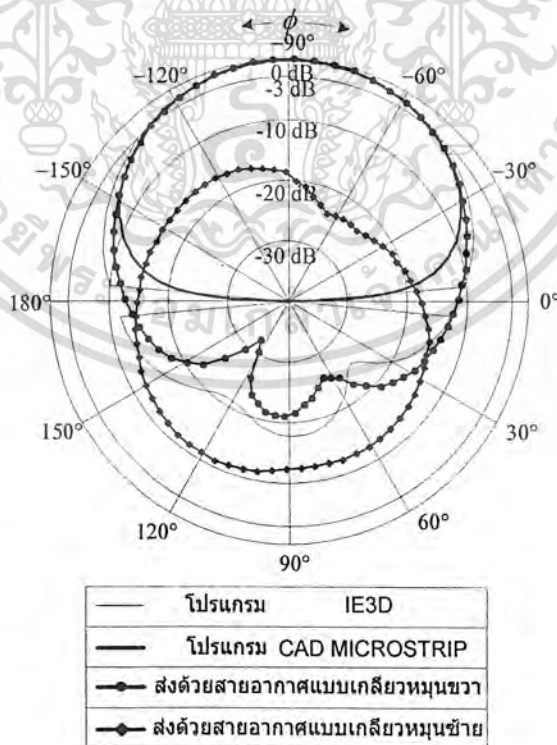


รูปที่ 4.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

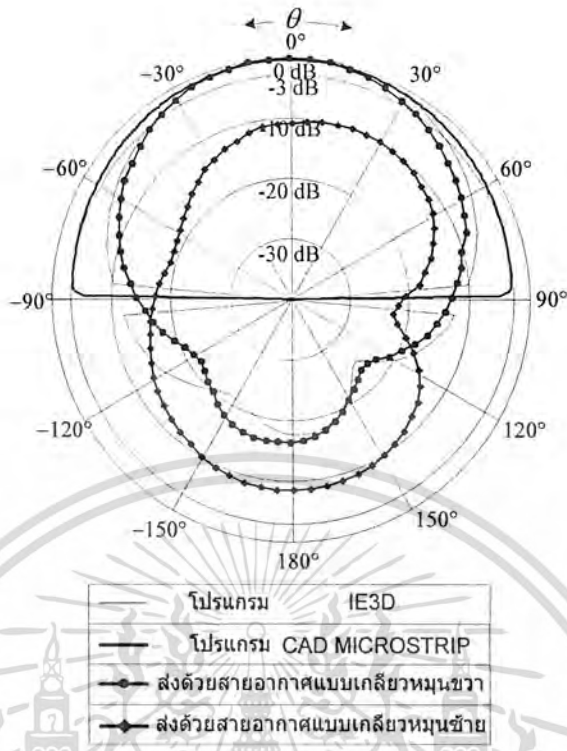


รูปที่ 4.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ทดสอบได้เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่ความถี่ 1.575 GHz

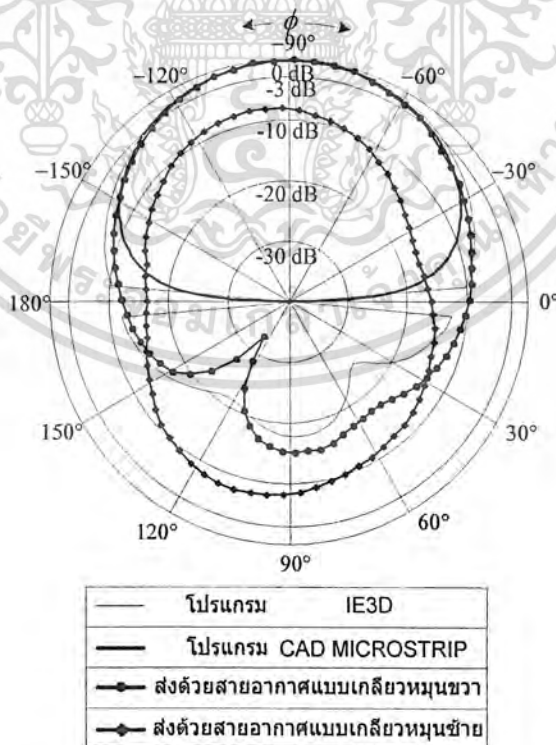


รูปที่ 4.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์และใช้เฉพาะในกรณีศึกษาเท่านั้น ใ้ป้อนญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ทดสอบได้เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่ความถี่ 1.585 GHz



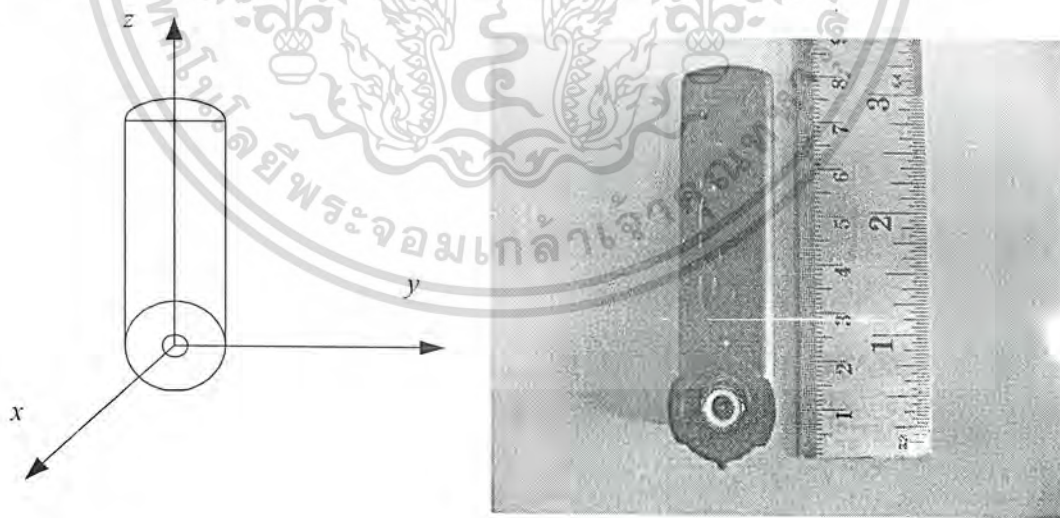
รูปที่ 4.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับในระนาบสนามแม่เหล็ก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป ในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1.565 GHz 1.575 GHz และ 1.585 GHz เปรียบเทียบกับทฤษฎีและโปรแกรม IE3D โปรแกรม CAD Micro พบว่าเมื่อส่งด้วยสายอากาศแบบเกลียวหมุนขวา จะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นคล้ายกับโปรแกรม IE3D โดยจะมีลำคลื่นด้านหลังเล็กน้อยทั้ง 3 ความถี่ ตลอดแบนด์วิดท์ของสายอากาศ เมื่อส่งด้วยสายอากาศแบบเกลียวหมุนซ้ายจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไม่เป็นรูปทรงแต่มีขนาดที่ลดลงมาก เมื่อเทียบกับการส่งด้วยสายอากาศแบบเกลียวหมุนขวา ซึ่งพอจะบอกได้ว่า สายอากาศไมโครสตริปมีการโพลาไรซ์แบบวงกลมหมุนขวามากกว่าการโพลาไรซ์แบบหมุนซ้าย

จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป ในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1.565 GHz, 1.575 GHz, และ 1.585 GHz เปรียบเทียบกับทฤษฎีและโปรแกรม IE3D, โปรแกรม CAD Micro จะเห็นว่าเมื่อส่งด้วยสายอากาศแบบเกลียวหมุนขวา จะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นคล้ายกับโปรแกรม IE3D โดยจะมีลำคลื่นด้านหลังเล็กน้อยทั้ง 3 ความถี่ ตลอดแบนด์วิดท์ของสายอากาศ เมื่อส่งด้วยสายอากาศแบบเกลียวหมุนซ้ายจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไม่เป็นรูปทรงแต่มีขนาดที่ลดลงมาก เมื่อเทียบกับการส่งด้วยสายอากาศแบบเกลียวหมุนขวา

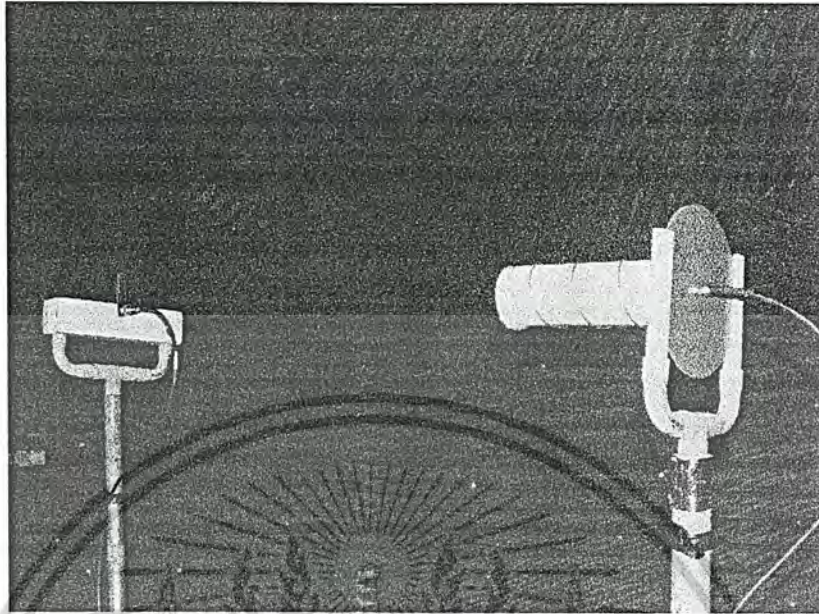
เมื่อนำมาวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กจะเห็นว่าทั้งในทฤษฎีและการทดลอง ก็พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นใกล้เคียงกันมาก เพียงแต่บีมวิดท์ของระนาบสนามแม่เหล็กแคบกว่าระนาบสนามไฟฟ้า

#### 4.2.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไป

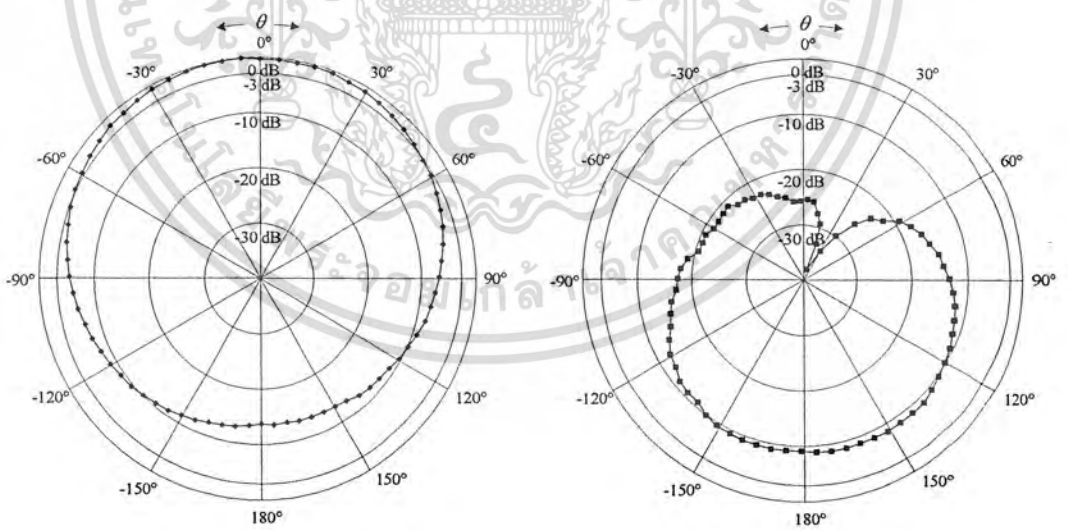


รูปที่ 4.18 การกำหนดระนาบให้กับสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไป

เนื่องจากสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไปที่เรานำมาทดสอบนี้ถูกหุ้มด้วยกรอบทั้งหมดจึงไม่สามารถบ่งบอกว่าเป็นสายอากาศชนิดใด เพื่อให้เป็นการง่ายในการทดสอบต้องมีการกำหนดระนาบเอกสารนี้ให้แก่สายอากาศ การกำหนดระนาบของสายอากาศในการทดสอบเป็นดังรูปที่ 4.18 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั้งหมดที่ส่งด้วยสายอากาศแบบเกลียว



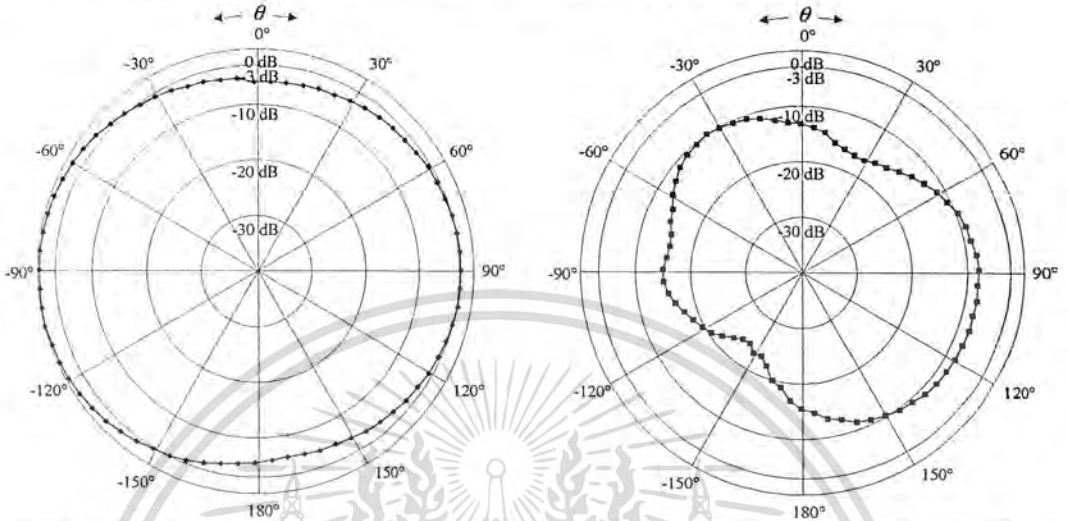
(ก) ส่งด้วยสายอากาศแบบเกลียวหมุนขวา

(ข) ส่งด้วยสายอากาศแบบเกลียวหมุนซ้าย

รูปที่ 4.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั้งหมดสำหรับในระนาบ yz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไปสำหรับในระนาบ yz จะ ได้ความแรงของสัญญาณสูงสุดที่มุม  $\theta$  เท่ากับ 0 องศา เมื่อส่งด้วยสายอากาศแบบเกลิยวหมุนขวา แต่ เมื่อส่งด้วยสายอากาศแบบเกลิยวหมุนซ้ายจะ ได้ความแรงของสัญญาณต่ำมาก



(ก) ส่งด้วยสายอากาศแบบเกลิยวหมุนขวา

(ข) ส่งด้วยสายอากาศแบบเกลิยวหมุนซ้าย

รูปที่ 4.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไปสำหรับในระนาบ xy

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไปสำหรับในระนาบ xy ได้ความแรงเกือบรอบทิศทางเมื่อส่งด้วยสายอากาศแบบเกลิยวหมุนขวา แต่เมื่อส่งด้วยสายอากาศแบบเกลิยวหมุนซ้าย จะ ได้ความแรงของสัญญาณแบบไม่เป็นรูปเป็นร่าง

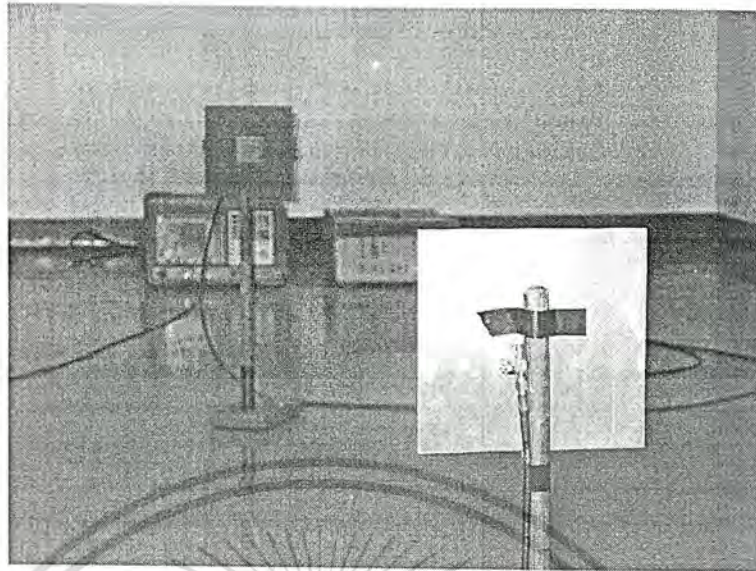
### 4.3 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ

เลือกใช้วิธีการนำสายอากาศ 2 ตัวที่มีรูปร่างและคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ที่เหมือนกันมาเป็นสายอากาศส่งและรับแล้วนำค่ากำลังงานที่รับได้มาคำนวณในสมการ

$$G = \frac{1}{2} \left[ 20 \log\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) - 10 \log\left(\frac{P_r}{P_t}\right) - L_{fr} - L_{ft} \right] \tag{4.1}$$

- เมื่อ  $P_r$  คือ กำลังงานที่รับได้
- $P_t$  คือ กำลังงานที่ใช้ส่ง
- $L_{fr}$  คือ ค่าลดทอนของสายนำสัญญาณที่ภาคส่ง
- $L_{ft}$  คือ ค่าลดทอนของสายนำสัญญาณที่ภาครับ
- $R$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้ง 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ  $L_g$  ก็คือ FreeSpace Loss เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 การทดสอบอัตรากายของสายอากาศโดยใช้สายอากาศที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทั้ง 2 ตัว

เมื่อเริ่มทำการส่งสัญญาณด้วย Function Generator ด้วยกำลังงาน 0 dBm ส่งเข้าไปในสายอากาศไมโครสตริปตัวที่ 1 ที่วางห่างจากสายอากาศรับไมโครสตริปตัวที่ 2 เป็นระยะทาง 2 m. โดยสายอากาศไมโครสตริปตัวรับจะต่อกับ Spectrum Analyzer เพื่อรับความแรงของสัญญาณที่ส่ง แล้วนำสายนำสัญญาณทั้งด้านส่งและด้านรับมาต่อจาก Function Generator เข้ากับ Spectrum Analyzer เพื่อทดสอบค่าลดทอนของสายนำสัญญาณ เพื่อนำมาคำนวณในสมการ (4.1) จะได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

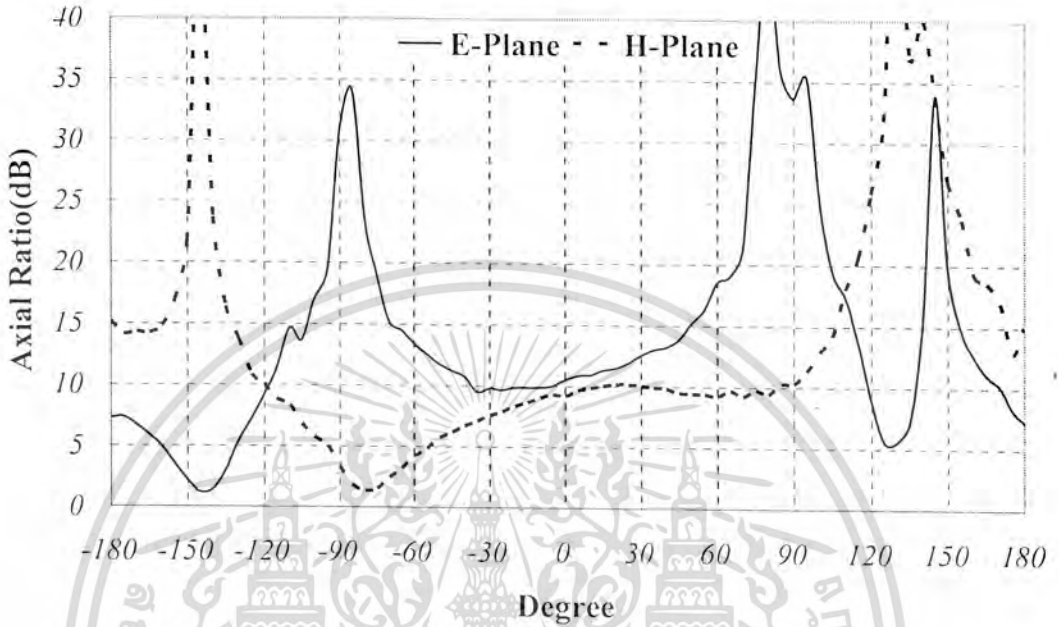
$$\begin{aligned}
 P_t &= 35.76 \text{ dB} & P_r &= 0 \text{ dBm} & R &= 2 \text{ m.} \\
 \lambda &= 0.19 \text{ m.} & L_{\mu} &= 3.4 \text{ dB} & L_{rr} &= 3.47 \text{ dB} \\
 L_v &= 42.411 \text{ dB} & G &= 6.76 \text{ dBi}
 \end{aligned}$$

#### 4.4 การทดสอบอัตราส่วนแกน

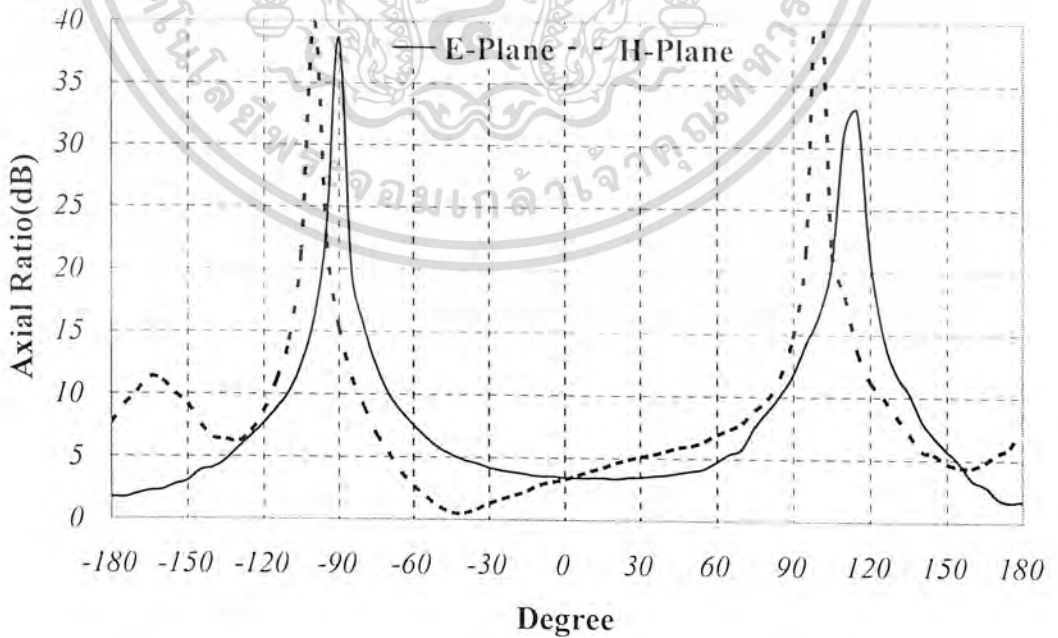
การหาอัตราส่วนแกน จะสามารถคำนวณได้จากกรนำผลที่ได้จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ส่งด้วยสายอากาศแบบเกลียวหมุนซ้ายมาคำนวณเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีการส่งด้วยสายอากาศแบบเกลียวหมุนขวา

จากกราฟ อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปตั้งแต่ความถี่ 1.55 GHz ถึง 1.6 GHz จะเห็นได้ว่าเมื่อเปลี่ยนมุมตั้งแต่ -180 องศา ถึง 180 องศา ทำให้รู้ว่าที่มุม -85 องศา ถึง 85 องศา เป็นช่วงที่พิจารณาว่าค่า อัตราส่วนแกนที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 3 dB ที่มุม 0 องศาหรือไม่ และเพิ่มขึ้นไม่เกิน 6 dB ที่มุม  $\pm 85$  องศา ซึ่งจะแสดงว่ามีกรโพลาริซัแบบวงกลมหมุนขวาหรือไม่และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นแบบ Hemispherical หรือไม่ จึงพบว่าสายอากาศแบบไมโครสตริปที่สร้างขึ้นที่ความถี่ 1.575 GHz มีค่า อัตราส่วนแกนที่ต่ำที่สุดซึ่งแสดงถึงการโพลาไรซ์แบบวงกลมหมุนขวา

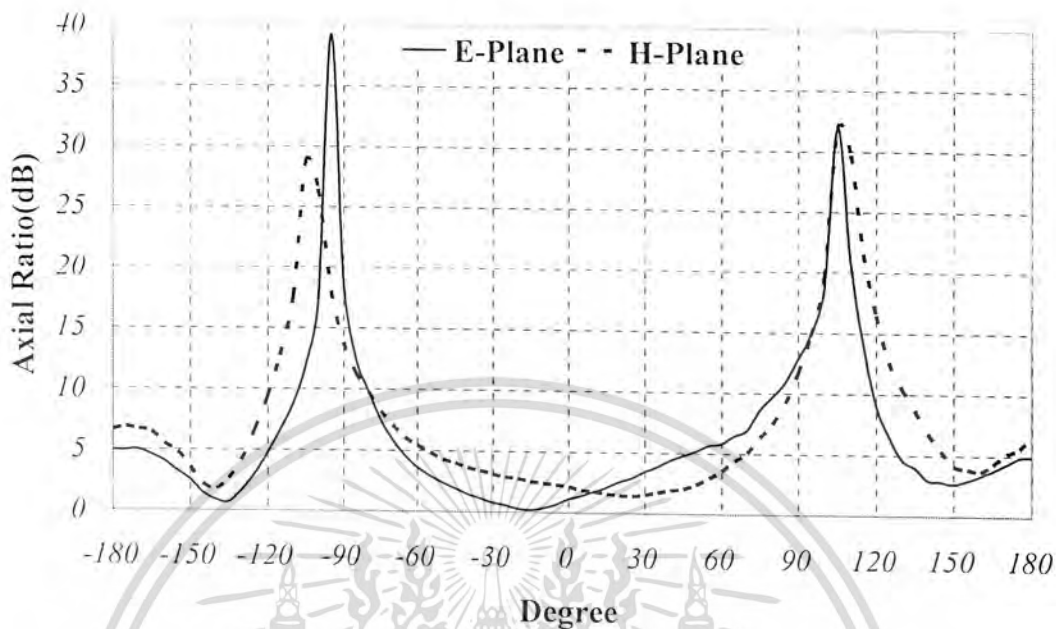


รูปที่ 4.23 อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปในทิศทางที่เขียนที่ความถี่ 1.55GHz

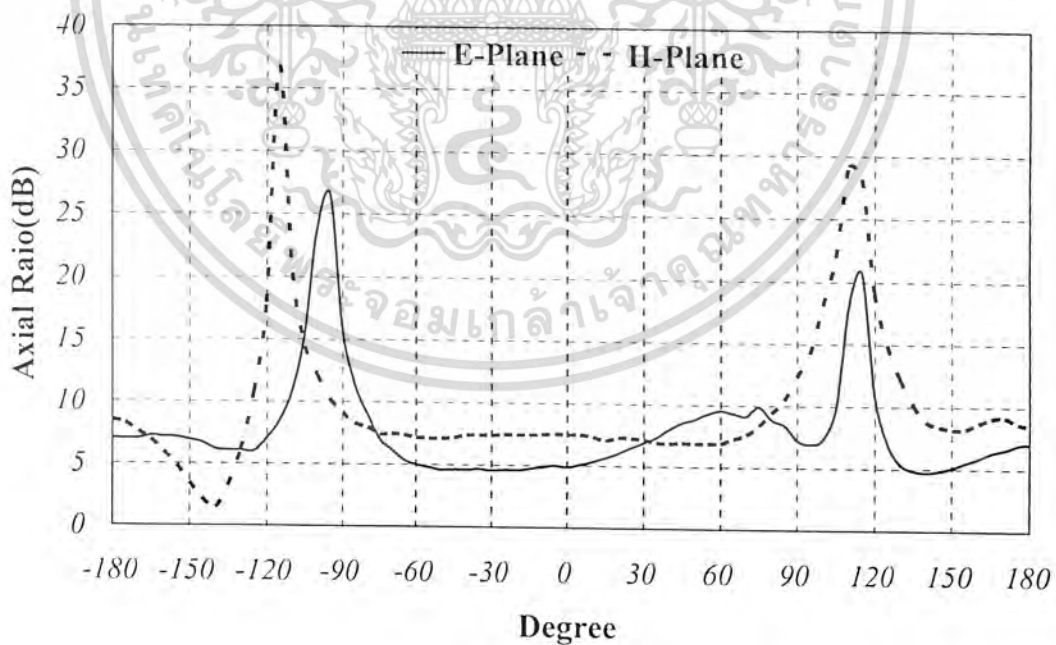


รูปที่ 4.24 อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปในทิศทางที่เขียนที่ความถี่ 1.565 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ถือว่าผิดกฎหมาย

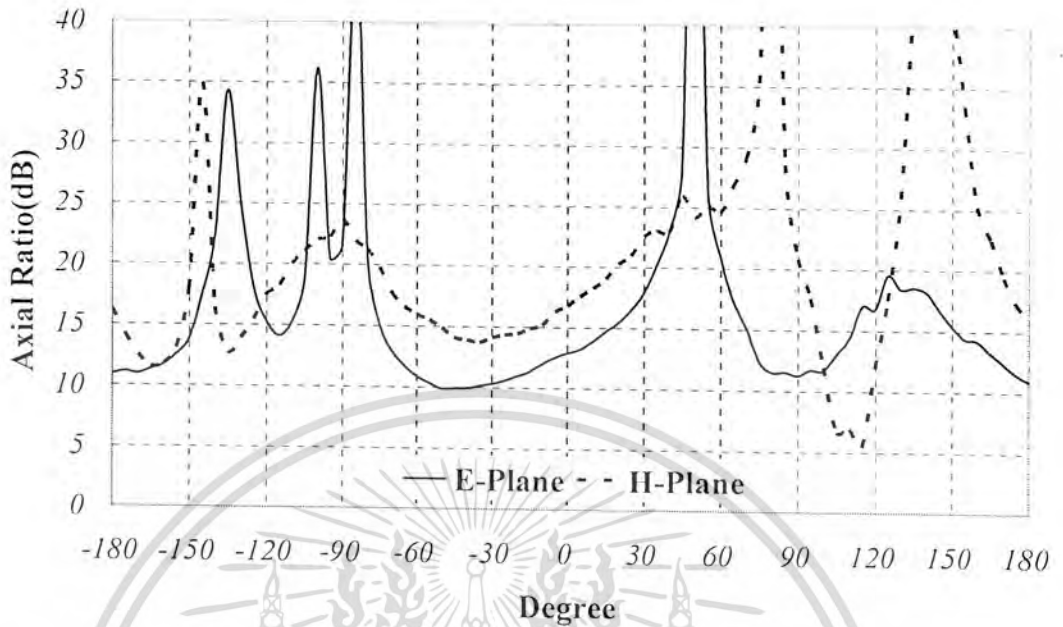


รูปที่ 4.25 อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปในพิกัดคาร์ทีเซียนที่ความถี่ 1.575 GHz

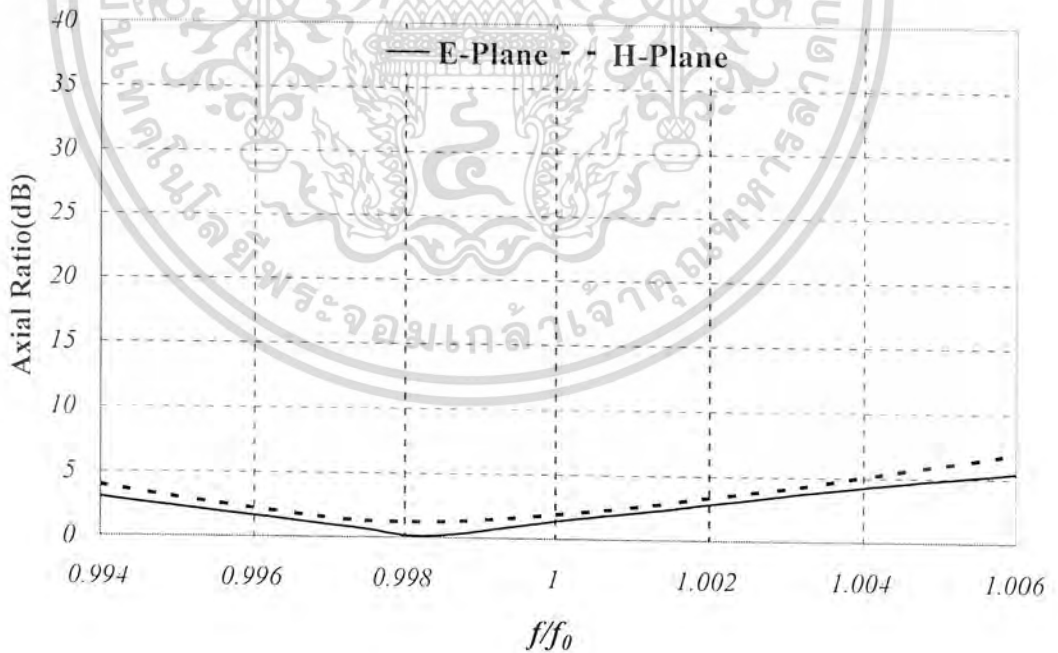


รูปที่ 4.26 อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปในพิกัดคาร์ทีเซียนที่ความถี่ 1.585 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

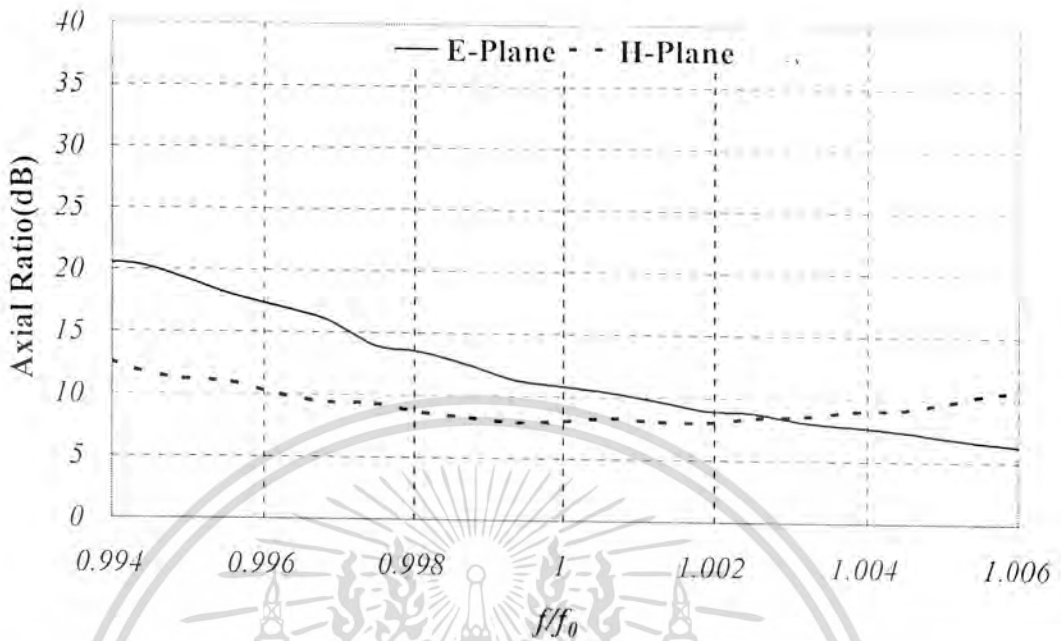


รูปที่ 4.27 อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปในพิกัดการที่เขียนที่ความถี่ 1.6 GHz



รูปที่ 4.28 อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปมุม 0 องศา ที่  $f/f_0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



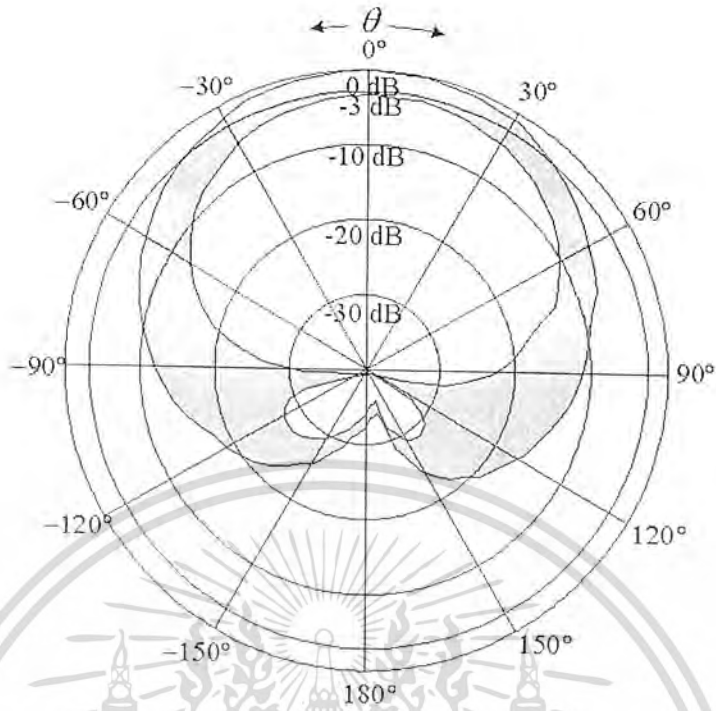
รูปที่ 4.29 อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปมุม  $\pm 90$  องศา ที่  $f/f_0$

ซึ่งตรงตามต้องการของระบบ GPS ส่วนที่ความถี่ 1.565 GHz ถึง 1.585 GHz ซึ่งเป็นช่วงแบนด์วิดท์ที่ระบบ GPS ต้องการ จากกราฟก็แสดงให้เห็นว่ามีค่า อัตราส่วนแกนที่ต่ำพอที่จะยอมรับได้ และที่ความถี่ 1.55 GHz ถึง 1.6 GHz จะเป็นช่วงที่ทดสอบเพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ อัตราส่วนแกนว่าต่างจากช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานมากน้อยแค่ไหน จึงพบว่า มีค่า อัตราส่วนแกนสูงขึ้นมา

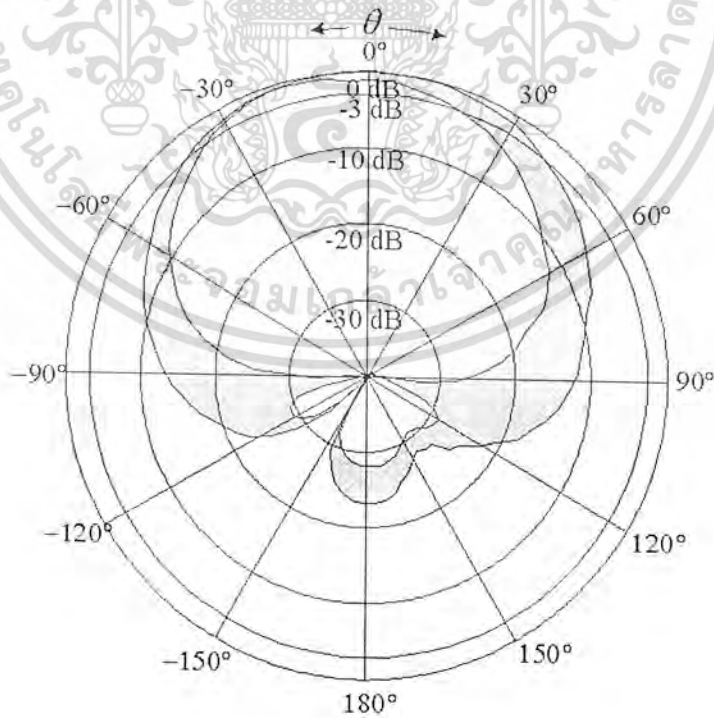
จากกราฟ อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปที่มุม 0 องศา โดยเปลี่ยนความถี่  $f/f_0$  จะเห็นว่า มีค่าต่ำกว่า 3 dB ตลอดแบนด์วิดท์ แสดงให้เห็นว่ามีการ โพลาริซั่มแบบวงกลมหมุนขวา และที่มุม  $\pm 90$  องศา มีค่าประมาณ 8 dB ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้คือมีค่าใกล้เคียง 6 dB ที่มุม  $\pm 85$  ดังนั้นจึงเป็นสายอากาศที่สามารถนำมาใช้งานได้จริงเพราะมีคุณสมบัติตรงตามที่ระบบ GPS ต้องการ

จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่รวมผลของ อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโคร สตริปที่ความถี่ทั้ง 3 ซึ่งเป็นแบนด์วิดท์ที่เราพิจารณาอยู่ จะเห็นว่า ช่วงที่รวมผลของ อัตราส่วนแกนมีค่าประมาณ -3 dB ที่มุม 0 องศาและลดลงไม่เกิน -6 dB ซึ่งยังอยู่ในช่วงที่เรากำหนดไว้ในตอนแรกว่าต้องเป็นสายอากาศที่มีการ โพลาริซั่มแบบวงกลมหมุนขวาโดยจะทำให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นออกมาเป็นแบบ Hemispherical นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

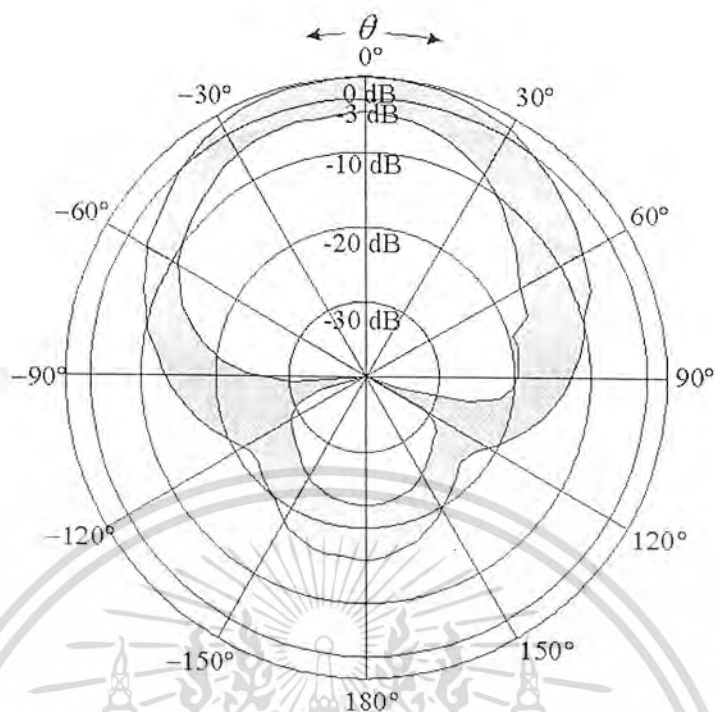


รูปที่ 4.30 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่รวมผลของ อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริป ที่ ความถี่ 1.565 GHz

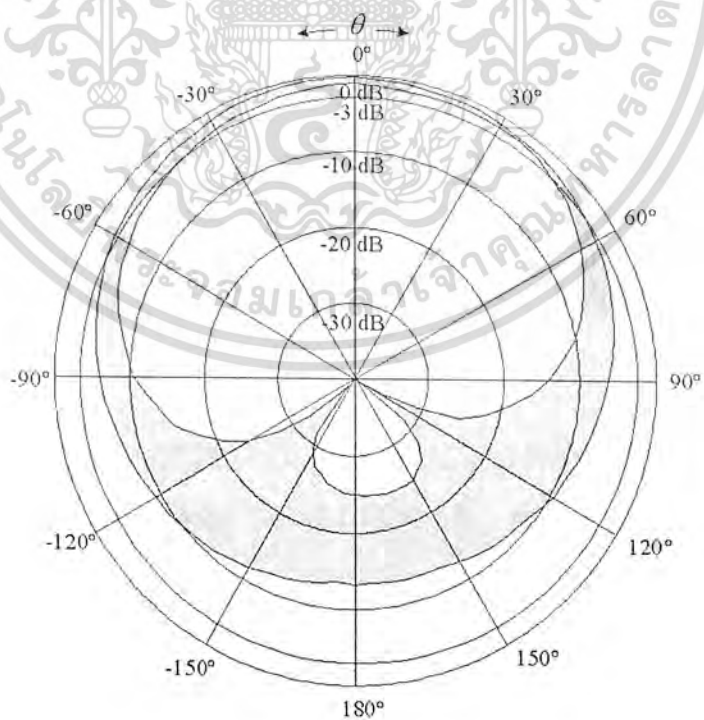


รูปที่ 4.31 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่รวมผลของ อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริป ที่ เอกสารที่อ้างถึง 1.575 GHz

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อสนับสนุนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



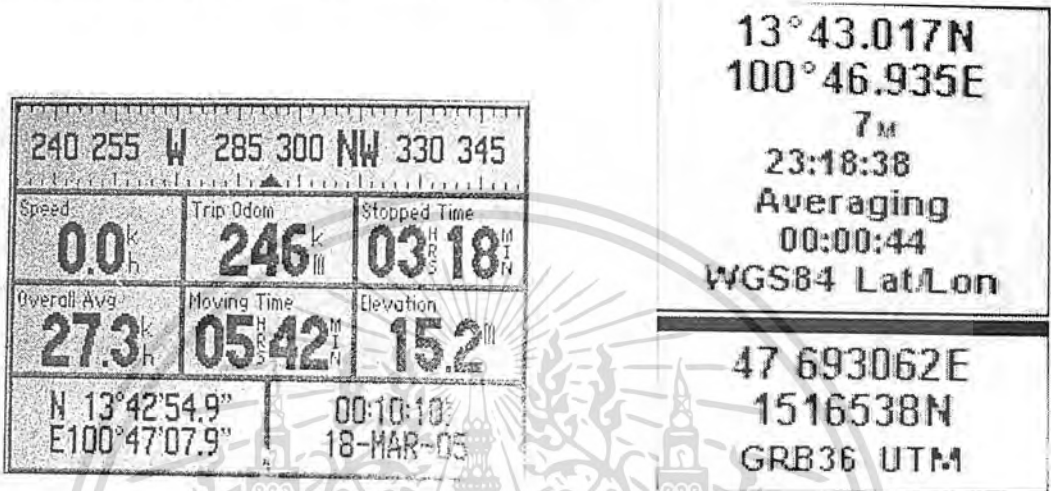
รูปที่ 4.32 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่รวมผลของ อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริป ที่ ความถี่ 1.585 GHz



รูปที่ 4.33 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่รวมผลของ อัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนวิศวกรรมเพื่อการศึกษานานาชาติ ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การทดสอบการใช้งานสายอากาศไมโครสตริปและสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไปกับเครื่องรับ GPS เทียบกับเครื่องรับ GPS มาตรฐาน

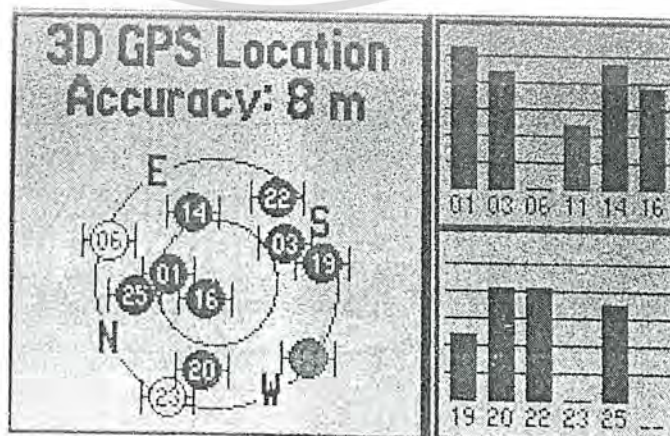
เพื่อเป็นการตรวจสอบดูว่าเครื่องรับ GPS รุ่น V ของ Garmin สามารถระบุตำแหน่งบนพื้นโลกได้ถูกต้องเราจึงนำเครื่องรับ GPS ของ Magellan ที่เป็นมาตรฐานมาทำการตรวจสอบการระบุตำแหน่ง (เครื่องรับ GPS ของ Magellan ไม่สามารถถอดสายอากาศได้)



(ก) การระบุตำแหน่งของเครื่องรับ GPS ของ Garmin (ข) การระบุตำแหน่งของเครื่องรับ GPS Magellan รูปที่ 4.34 การระบุตำแหน่งของเครื่องรับ GPS ของ Garmin เทียบกับของ Magellan

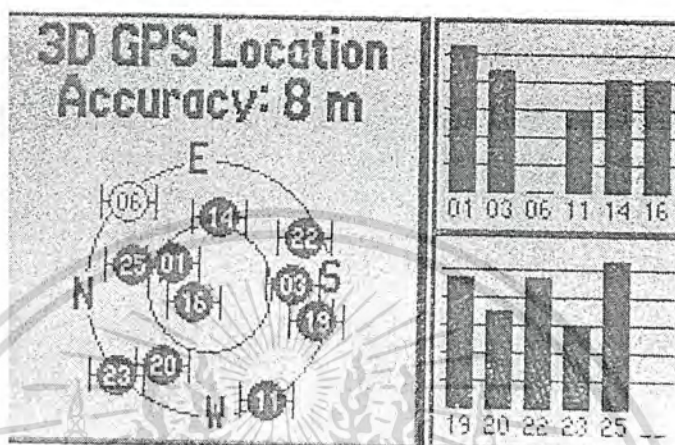
จะพบว่าการระบุตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณ GPS ทั้งใกล้เคียงกัน คือ เครื่องรับ GPS ของ Garmin ได้ 13°42'54.9"N, 100°47'08"E และเครื่องรับ GPS ของ Magellan ได้ 13°43N, 100°46.93E

เครื่องรับ GPS รุ่น V ของ Garmin จะมีฟังก์ชันการวัดความแรงในการรับสัญญาณจากดาวเทียม และจำนวนดาวเทียมที่รับสัญญาณได้ เราจึงใช้ฟังก์ชันนี้มาทดสอบความสามารถของสายอากาศที่ออกแบบสร้างขึ้นมาในการรับสัญญาณจากดาวเทียม



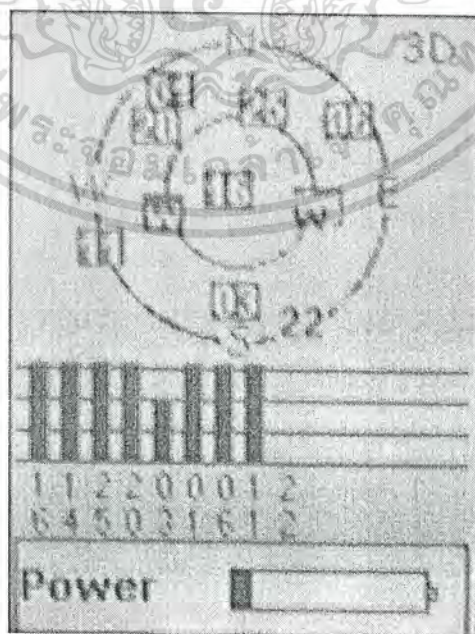
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า รูปที่ 4.35 การทดสอบการใช้งานสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับ GPS ทั่วไปกับเครื่องรับสัญญาณ GPS ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปการทดสอบใช้งานสายอากาศที่ใช้กับเครื่องรับสัญญาณ GPS ทัวไปจะรับสัญญาณจากดาวเทียม GPS ได้ทั้งหมด 9 ดวง ซึ่งถือได้ว่าเพียงพอต่อการหาตำแหน่งบนพื้นโลกได้ถูกต้อง โดยจะได้ระยะความแม่นยำอยู่ที่ 8 m.



รูปที่ 4.36 การทดสอบการใช้งานสายอากาศไมโครสตริปกับเครื่องรับสัญญาณ GPS

จากรูปการทดสอบใช้งานสายอากาศไมโครสตริปกับเครื่องรับสัญญาณ GPS จะรับสัญญาณจากดาวเทียม GPS ได้ทั้งหมด 10 ดวง ซึ่งถือได้ว่าเพียงพอต่อการหาตำแหน่งบนพื้นโลกได้ถูกต้อง โดยจะได้ระยะความแม่นยำอยู่ที่ 8 m.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การทดสอบการใช้งานเครื่องรับสัญญาณ GPS ที่เป็นมาตรฐานโดยชนด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปการทดสอบใช้งานเครื่องรับสัญญาณ GPS ที่เป็นมาตรฐานจะรับสัญญาณจากดาวเทียม GPS ได้ทั้งหมด 8 ดวง ซึ่งถือได้ว่าเพียงพอต่อการหาตำแหน่งบนพื้นโลกได้ถูกต้อง

ฟังก์ชันที่บ่งบอกถึงความแม่นยำในการบอกตำแหน่งของเครื่องรับ GPS เมื่อตัวเลขที่บอกระยะความแม่นยำน้อย ๆ เครื่องรับสัญญาณ GPS จะสามารถระบุตำแหน่งได้แม่นยำมากขึ้นเพราะ ระยะในการคลาดเคลื่อนน้อยลงจึงสามารถบอกได้ว่าสายอากาศไมโครสตริปที่สร้างขึ้นใช้กับเครื่องรับสัญญาณ GPS สามารถช่วยให้เครื่องรับสัญญาณ GPS มีความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การสร้างสายอากาศไมโครสตริปที่มีแพทช์ใกล้เคียงสี่เหลี่ยมจัตุรัส เพื่อรับสัญญาณ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz มีการโพลาริซแบบวงกลมหมุนขวา และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Hemispherical สามารถคำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีโมเดล โปรแกรม CAD microstrip เมื่อได้ขนาดของสายอากาศเราสามารถนำมาจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรม IE3D โดยโปรแกรมจะสามารถบอกค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบ เพื่อหาความเหมาะสมที่สุดในการนำไปสร้างเป็นสายอากาศใช้งานจริง

จากทฤษฎีโมเดล และ โปรแกรม CAD micro ได้ขนาดของแพทช์เท่ากับ  $46.45 \times 47.65$  mm. นำขนาดที่ได้นี้ไปจำลองเป็นสายอากาศไมโครสตริปในโปรแกรม IE3D เพื่อหาจุดป้อนสัญญาณที่ทำให้ VSWR ต่ำที่สุด และมีการโพลาริซแบบวงกลมหมุนขวา โดยตำแหน่งที่ใช้ป้อนสัญญาณนี้อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางออกมาตามแนวเส้นทแยงมุม เท่ากับ 11.5 mm. ได้ VSWR เท่ากับ 1.35:1 มีแบนด์วิดท์มากกว่า 20 MHz จะพบว่าผลที่ได้จากการจำลองสายอากาศเป็นที่น่าพอใจสามารถนำไปสร้างเป็นสายอากาศใช้งานจริงได้

เมื่อนำมาสร้างเป็นสายอากาศใช้งานจริง จะได้ VSWR เท่ากับ 1.07:1 และมีแบนด์วิดท์มากกว่า 20 MHz เช่นกัน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการส่งด้วยสายอากาศแบบเกลียวหมุนขวาในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 1.575 GHz มีรูปร่างคล้ายกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม IE3D การส่งด้วยสายอากาศแบบเกลียวหมุนซ้ายในระนาบสนามไฟฟ้าจะมีความแรงต่ำสุดที่มุม  $\theta$  เท่ากับ 0 องศา และในระนาบสนามแม่เหล็ก จะรับได้เบากว่าเมื่อเทียบกับการส่งด้วยสายอากาศแบบเกลียวหมุนขวา ด้วยเหตุนี้สายอากาศไมโครสตริปที่สร้างขึ้นจึงมีการโพลาริซแบบวงกลมหมุนขวา ที่มีอัตราขยายเท่ากับ 6.76 dBi

การทดสอบใช้งานสายอากาศไมโครสตริปเทียบกับสายอากาศที่ติดมากับเครื่องรับ GPS จะพบว่าสายอากาศที่ติดมากับเครื่องรับ GPS มีค่าความแม่นยำในการระบุตำแหน่งน้อยกว่าสายอากาศไมโครสตริปที่ได้สร้างขึ้น 1 m.

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริปที่สร้างขึ้นนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎีพบว่าสายอากาศที่สร้างขึ้นมีลักษณะด้านหลัง อันเนื่องมาจากข้อผิดพลาดในทางปฏิบัติและทางทฤษฎี เช่น

- การสร้างสายอากาศไม่สามารถทำให้มีขนาดตรงตามทฤษฎีที่ต้องการได้ เช่น กราฟเฟิลไม่สามารถทำให้เป็นแผ่นตัวนำที่สมบูรณ์และมีขนาดที่ไม่จำกัดได้

- ผลการวัดค่า  $\epsilon_r$  ที่ได้อาจเกิดการผิดพลาดได้เนื่องจากสาเหตุดังนี้ การใช้วัสดุมาหุ้มขอบข้างอาจเป็นเป็นผลให้การอ่านค่าความถี่ของการสะท้อนผิดพลาดได้

- ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ที่ใช้ทำสายอากาศ ซึ่งในการทดลองได้ใช้สารไดอิเล็กตริกที่เป็น อีพ็อกซี่โดยหาค่าเฉลี่ยโดยประมาณได้ 4.2 แต่ในการทดลองเราไม่สามารถที่จะทราบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ที่แท้จริงได้เนื่องจากข้อจำกัดด้านเครื่องมือวัด

- ค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนได้อาจเป็นเพราะว่าค่าที่คลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมาจากการสร้างและวัสดุที่ใช้ทำสายอากาศมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆไม่เป็นไปตามที่ต้องการเช่น ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์จุดทศนิยมมีค่ามากกว่าสามตำแหน่งแต่เครื่องมือที่เราใช้นั้นมีความละเอียดไม่มากพอ ซึ่งในทางปฏิบัติค่าที่เกินทศนิยมสองตำแหน่งก็จะตัดทิ้งไปซึ่งอาจทำให้ค่าเหล่านี้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้
- การป้อนสัญญาณให้กับตัวสายอากาศนั้นจะใช้การป้อนแบบโพรบ ซึ่งจากตำแหน่งที่คำนวณได้แล้วป้อนให้สายอากาศนั้นปรากฏว่าค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไม่ใกล้เคียงกับ  $50 \pm j0$  โอห์ม VSWR ก็มากกว่า 2:1 เพราะฉะนั้นจึงทำการเลื่อนจุดป้อนสัญญาณตามเส้นทแยงมุมให้ออกห่างไปจากเดิมจึงได้ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ
- ในการวัดหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งพบว่าการแพร่คลื่นของสายอากาศที่สร้างขึ้นคล้ายแบบ Hemispherical เนื่องจากเงื่อนไขที่ได้กล่าวมาข้างต้นหรือข้อจำกัดของสถานที่และเครื่องมือทดลอง ซึ่งอาจทำให้มีการสะท้อนกลับของคลื่นขณะวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศได้
- ในทางปฏิบัตินั้นยังมีข้อผิดพลาดอีกหลายประการที่จะต้องนำมาพิจารณา ซึ่งถ้าสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดที่กล่าวถึงในเบื้องต้นให้ดีขึ้นก็อาจจะได้สายอากาศที่มีประสิทธิภาพและคุณสมบัติที่ดีต่อการนำไปใช้งาน

จากกรณีศึกษาที่ผ่านมาทำให้ทราบถึงข้อจำกัดในทางปฏิบัติหลายประการซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้สายอากาศมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนไป ดังนั้นข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจึงเป็นแนวทางที่จะต้องปรับปรุงสายอากาศให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น

แนวทางในการปรับปรุงสายอากาศไมโครสตริป

1. วัสดุในการสร้างฉนวนควรให้เกิดการสูญเสียที่เกิดจากส่วนของไมโครสตริปน้อยลงอาจทำได้โดยการเปลี่ยนแผ่นวงจรมีพิกัดสารอีพ็อกซีเป็น Duroid หรือ Teflon ที่มีค่าการสูญเสียของสารไดอิเล็กตริกต่ำในย่านความถี่สูงแต่ด้านของราคาก็จะสูงตามไปด้วย

2. เนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปที่สร้างขึ้นมีลำคลื่นด้านหลัง ค่อนข้างสูง เพราะฉะนั้นจะแก้ไขโดยการใส่กราวด์เพลนที่ใหญ่ขึ้นก็จะสามารถคลำคลื่นด้านหลังลงได้ ซึ่งผลที่ตามมาก็จะทำให้ได้อัตราขยายที่เพิ่มขึ้นด้วย

3. การที่จะทำให้สายอากาศไมโครสตริปมีประสิทธิภาพมากกว่านี้ก็อาจใช้การต่อแบบแถวลำดับ (Array) เข้ามาช่วยได้ซึ่งจะทำให้ได้คุณสมบัติและประสิทธิภาพดีขึ้นแต่อาจทำให้ขนาดของสายอากาศเพิ่มขึ้น

## ภาคผนวก

## Specifications of Magellan Meridian GPS receiver

## Performance:

Receiver 12 Parallel-channel technology, tracks up to 12 satellites to compute and update information with quadrifilar antenna

## Acquisition Times (under optimal condition):

Warm approximately 15 seconds

Cold approximately 1 minute

Update Rate 1 second continuous

## Accuracy

Position 7 meters, 95% 2D RMS  
w/WAAS <3 meters, 95% 2D RMS

Velocity 0.1 knot RMS steady state

## Limits:

Speed 951 mph

Altitude 17,500 meters

## Physical:

Size 6.5" × 2.9" × 1.2" [h] × [w] × [d]  
16.5 cm × 7.4 cm × 3.05 cm

Weight 8 ounces (227 grams) with 2AA batteries installed

Display 2.2" × 1.75" [h] × [w]  
5.59 cm × 4.44 cm

high contrast LCD with EL backlit display

Housing Weatherproof construction, wraparound rubber armor

## Temp. Range

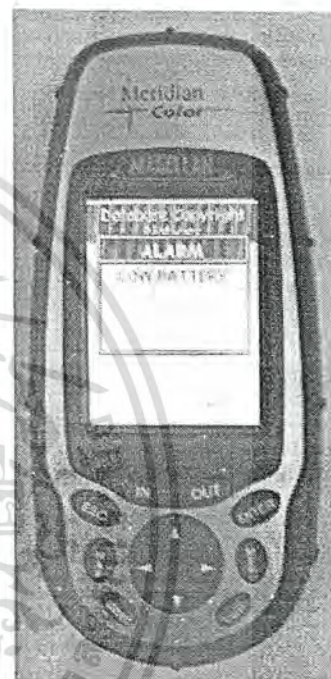
Operating 14° F to 140° F to (-10° C to 60° C)

Storage -4° F to 158° F (-20° C to 70° C)

## Power:

Source 2 AA alkaline batteries or 9-35 VDC with power cable

Battery Life Up to 14 hours



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Specifications of Garmin GPS V

### Performance:

Receiver: Differential-ready 12 parallel channel

### Acquisition Time:

Warm: approximately 15 seconds

Cold: approximately 45 seconds

AutoLocate™ Approximately 2 minutes

Update Rate: Once per second, continuous

### GPS Accuracy

Position: <15 meters (49 feet), 95% typical

Velocity: 0.05 meter/sec steady state

### DGPS Accuracy

Position: 3-5 meters (10-16 feet), 95% typical

Velocity: 0.05 meter/sec steady state

Dynamics: Performs to specifications to 6 g's

Interfaces: NMEA 0183 version 2.3, RTCM SC-104 (for DGPS corrections) and RS-232 for PC interface

Data Storage Life: Indefinite; no memory battery required

Map Storage: Internal; approximately 19 MB

### Physical:

Case: Rugged; fully gasketed

Size: 2.3"H × 2.2"W × 1.6"D (5.9 × 12.7 × 4.1 cm)

Weight: Approx. 9 ounces (255 g) w/batteries

Display: 1.5"H × 2.2"W (3.8 × 5.6 cm), (256 × 160 pixels), High-contrast, 4-gray-level backlit LCD

Antenna: Detachable with BNC-type connector

Temp. Range: 5° to 158° F (-15° to 70° C)

### Power:

Source: Four 1.5-Volt AA batteries or 12 V Adapter Cable  
Or up to 35 VDC external power

Battery Life: up to 25 hours based on backlight setting



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง

Dielectric Constance of Some Composite Material Substrates ( $f = 10 \text{ GHz}$ )		
Material	$\epsilon_r$	$\tan \delta$
RT/Duroid 5870	$2.33 \pm 0.02$	0.0012
RT/Duroid 5880	2.2	0.0009
RT/Duroid 6002	2.94	0.0012
RT/Duroid 6006	$6.0 \pm 0.15$	0.0019
RT/Duroid 6010.5	$10.5 \pm 0.025$	0.0024
Ultralam 2000	$2.5 \pm 0.05$	0.0022
RO 3003	$2.33 \pm 0.02$	0.0013
TMM-3	3.25	0.0016
TMM-4	4.5	0.0017
TMM-6	6.5	0.0018
TMM-10	9.8	0.0017
Trans-Tech D-MAT	8.9 - 1.4	< 0.0002
Trans-Tech S-145	10	< 0.0002
Arlon DiClad 527	$2.5 \pm 0.04$	0.0019
Arlon DiClad 870	$2.33 \pm 0.04$	0.0012
Arlon DiClad 880	$2.20 \pm 0.04$	0.0009
Arlon DiClad 810	$10.5 \pm 0.25$	0.0015
Arlon Epsilam -10	$10.2 \pm 0.25$	0.002
Arlon CuClad 250	2.4-2.6	0.0018
Arlon CuClad 233	$2.33 \pm 0.02$	0.0014
Arlon CuClad 217	$2.17 \pm 0.07$	0.0008
Arlon IsoClad 917	$2.17 \pm 0.07$	0.0011
Arlon IsoClad 933	$2.33 \pm 0.02$	0.0014
Epoxy FR4 GE313	4.4	0.01
Trans-Tech D-450	4.5	< 0.0004
Trans-Tech S8400	10.5	< 0.0001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรองที่ใช้ในสายอากาศไมโครสริป

New Low-Cost Substrates for Microstrip Antenna at Low Frequencies			
Material	Dielectric Constance at 10 GHz	Loss Tangentat 10 GHz	Manufacturer
R03003	3	0.0013	Rogers Corp
R03006	6.15	0.0013	Rogers Corp
R03010	10.2	0.0013	Rogers Corp
R04003	3.38	0.0022	Rogers Corp
TLC-32	3.2	0.003	Taconic Plastics
HT-2	4.3	0.0033	Hewlett-Packard
Polyguide	2.32	0.0005	Shawinigan Research
Eproxy(FR4)	4.4	0.01	---

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ความดีอันบังเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้แก่ บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่านของ  
ข้าพเจ้า

พร้อมกันนี้ขอขอบคุณ รศ.ดร.สมพล โกศลวิตร ที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำตลอดจนให้คำปรึกษา  
ในเรื่องต่างๆ มาโดยตลอดรวมทั้งคณาจารย์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ คุณไพโรจน์ วุ่นชุม คุณดวงอาทิตย์ ศรีมูล คุณสุธาสิณี ละมุลตรี และพี่ๆ ในห้อง  
สายอากาศทุกคนที่ช่วยเหลือในการสอนการใช้เครื่องมือการทดสอบต่างๆ ตลอดจนให้คำแนะนำในทุกๆ  
ด้าน

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ของข้าพเจ้าที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จน  
สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ



ธีรพล แสงแห่งรัตนะ  
อภิรายุทธ สมคะเณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] โมไนย ไกรฤกษ์, “ทฤษฎีสายอากาศ,” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หจก. สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2537
- [2] C. A. Balanis, *Antennas Theory Analysis and Design*, Newyork, John Wiley&Sons, 1982.
- [3] C. Y. Huang, C. M. Chang, and K. L. Wong “Design of GPS Microstrip Antenna Using Nearly Square Patch.” *IEEE Asia Pacific Microwave Conference*, vol 17 , pp 237-240 , 1997.
- [4] D. Kitching and F. Lalezari, “Low Profile Helmet Mount GPS Antenna”, *IEEE TH0258-4/90/0000-0663\$10*, pp. 661-702,1990.
- [5] *GLOBAL POSITIONING SYSTEM*, [http://www.thaitechnics.com/nav/gps\\_t.html](http://www.thaitechnics.com/nav/gps_t.html).
- [6] M. Haneishi and Y. Suzuki, *Handbook of Microstrip Antennas Volume 1*, pp.219-232.
- [7] P. C. Sharma and K.C. Gupta, “Analysis and Optimized Design of single feed circularly polarized microstrip antenna.” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.31 , pp.949-955 , 1983.
- [8] R. A. Sainati, *CAD of Microstrip Antennas for Wireless Application*, Artech House, 1996.
- [9] R. Garg, P. Bharitua, I. Bahl, and A. Ittipiboon, *Microstrip Antenna Design Handbook*, Artech House, pp 505-513 , 2001.
- [10] W. L. Langston and D. R. Jackson, “Impedance, Axial-Ratio, and Receive-Power Bandwidths of Microstrip Antennas,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.52 , pp.2769-2773 , 2004.
- [11] Zeland Software Inc, *IE3D User 's Manual Release 9*, Zeland, 2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้