

สายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป  
เหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง

CIRCULAR MICROSTRIP ANTENNA FED BY MICROSTRIP LINE  
ABOVE WIDE-SLOT GROUND PLANE

ยุกติทัศน์ ชวานนท์พิทักษ์  
YUKTITATH CHAWANONPHITHAK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทสาขารัฐศาสตร์มหาวิทยาลัยมหิดล

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย

ศูนย์เทคโนโลยีพระปกเกล้าเพื่อคุณธรรมวิชาการ

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-EN-M-010-010

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป  
เหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง

CIRCULAR MICROSTRIP ANTENNA FED BY MICROSTRIP LINE  
ABOVE WIDE-SLOT GROUND PLANE



ยุกติทัศน์ ชวานนท์พิทักษ์

YUKTITATH CHAWANONPHITHAK

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 76705  
วัน,เดือน,ปี..... 6 S.ค. 2550

b. 1185002A  
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMTIL-2007-EN-M-010-010

**CIRCULAR MICROSTRIP ANTENNA FED BY MICROSTRIP LINE  
ABOVE WIDE-SLOT GROUND PLANE**

**YUKTITATH CHAWANONPHITHAK**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2007**

**KMTIL-2007-EN-M-010-010**

**COPYRIGHT 2007**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

**บัณฑิตวิทยาลัย**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

---

หัวข้อวิทยานิพนธ์      สายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์  
ที่เป็นร่องกว้าง  
Circular Microstrip Antenna Fed by Microstrip Line Above Wide-Slot  
Ground Plane

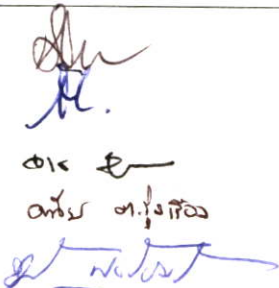
นักศึกษา                      นายยุกติทัศน์      ชวานนท์พิทักษ์

รหัสประจำตัว              48060904

ปริญญา                      วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา                    วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์      ผศ.ดร.ชวงค์      พงศ์เจริญพาณิชย์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ศ.ดร. โมไนย	ไกรฤกษ์	
รศ.ดร. สมผล	โกศลวิตร	
รศ.ดร. จเร	สุรวัดน์ปัญญา	
ผศ.ดร. คณัช	ต.รุ่งเรือง	
ผศ.ดร. ชวงค์	พงศ์เจริญพาณิชย์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 23 กรกฎาคม 2550 เวลา 11.30-13.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-402)

  
บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว  
  
(รศ.ดร.จาวุวัตร เจริญสุข)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....10.....เดือน.....กุมภาพันธ์.....พ.ศ.....๒๕๕๐.....

<b>หัวข้อวิทยานิพนธ์</b>	สายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป เหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง
<b>นักศึกษา</b>	นายชูกิต์ทัศน์ ชวานนท์พิทักษ์
<b>รหัสนักศึกษา</b>	48060904
<b>ปริญญา</b>	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
<b>สาขาวิชา</b>	วิศวกรรมโทรคมนาคม
<b>พ.ศ.</b>	2550
<b>อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์</b>	ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและการสร้างสายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้างสำหรับครอบคลุมย่านความถี่กว้างยิ่งยวด (Ultra-Wideband) ตามมาตรฐาน Federal Communications Commission (FCC) ที่มีการรองรับช่วงความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งได้ทำการจำลองแบบการทำงานด้วยโปรแกรมออกแบบสายอากาศย่านความถี่ไมโครเวฟ Computer Simulation Technology (CST MICROWAVE STUDIO<sup>®</sup>) โครงสร้างสายอากาศด้านบนเป็นแผ่นไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเพื่อให้มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ส่วนระนาบกราวด์เป็นร่องกว้างใช้สำหรับขยายช่วงกว้างความถี่และบังคับทิศทางแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศให้เป็นลำคลื่นสองทิศทาง (Bi-directional pattern) และจากการจำลองผลสายอากาศหาค่าความถี่ที่  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB พบว่าสายอากาศสามารถครอบคลุมความถี่ได้ตั้งแต่ 2.8-15.3 กิกะเฮิรตซ์ คิดเป็นแบนด์วิดท์กว้างได้ประมาณ 5.46:1 และอัตราขยายอยู่ในช่วง 4-7 dBi

<b>Thesis Title</b>	Circular Microstrip Antenna Fed by Microstrip Line above Wide-Slot Ground Plane
<b>Student</b>	Mr. Yuktithath Chawanonphithak
<b>Student ID.</b>	48060904
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Telecommunications Engineering
<b>Year</b>	2007
<b>Thesis Advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

### **ABSTRACT**

This thesis presents the design and fabrication of circular microstrip antenna fed by microstrip line above wide-slot ground plane. This antenna is desired to cover ultra wideband of FCC standard from 3.1 to 10.6 GHz. This antenna and its characteristics is simulated by CST program. The circular microstrip is excited by microstrip line to match with a  $50\ \Omega$  transmission line. This structure is located above the wide-slot ground plane to obtain bandwidth enhancement and bidirectional radiation. From the simulated results, the bandwidth ( $|S_{11}| < -10\ \text{dB}$ ) of 2.8-15.3 GHz (5.46:1) is obtained. The antenna gain is around 4-7 dBi.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์เป็นผู้ช่วยเหลือ ดูแลให้คำแนะนำ ในด้านการศึกษาและงานวิจัยทั้งในเวลาและนอกเวลาราชการ ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สมผล โกศลวิตร และศาสตราจารย์ ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และคำแนะนำที่มีประโยชน์ในการวิจัย ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสาม ท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ใ้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณกฤตยา ชวานนท์พิทักษ์ ที่คอยเป็นผู้ตรวจทานแก้ไขและเป็นที่ปรึกษาให้ กำลังใจในการทำงานวิจัยและในการทำงานอย่างสม่ำเสมอตลอดมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ สมาชิกห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายทุกท่านสำหรับ คำแนะนำและข้อคิดดีๆ ระหว่างการอภิปรายตลอดช่วงเวลาที่ผ่านไป

ขอขอบคุณทุนพัฒนาอาจารย์มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ซึ่งให้การสนับสนุนทุนด้าน การศึกษาตลอดหลักสูตร

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็น กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง ด้วยดีคุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ยุกติทัศน์ ชวานนท์พิทักษ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและขอบเขตการวิจัย.....	7
1.3 เนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	8
บทที่ 2 สายอากาศไมโครสตริป.....	10
2.1 บทนำ.....	10
2.2 สายอากาศไมโครสตริป.....	10
2.3 การออกแบบเส้นไมโครสตริปและสายอากาศไมโครสตริป.....	11
2.3.1 อิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะ (Characteristic Impedance, $Z_0$ ) ของเส้น ไมโครสตริป.....	12
2.3.2 ทฤษฎีแบบจำลองควาวิตี้ (Cavity Model) ของสายอากาศไมโครสตริป แผ่นกลม.....	12
2.4 บทสรุป.....	16
บทที่ 3 การวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อน ด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง.....	17
3.1 บทนำ.....	17
3.2 โครงสร้างสายอากาศ.....	17
3.3 การปรับอิมพีแดนซ์และค่า $ S_{11} $ .....	18
3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....	31

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 บทสรุป.....	35
บทที่ 4 การปรับปรุงสมรรถนะของสายอากาศ.....	36
4.1 บทนำ.....	36
4.2 การปรับปรุงสมรรถนะสายอากาศ.....	36
4.2.1 สายอากาศตัดความถี่ (Band-Notched).....	36
4.2.2 การใส่สตัด (Stub) ในสายอากาศไมโครสตริปวงกลม .....	44
4.2.3 สายอากาศตัดความถี่ใส่สตัด .....	53
4.3 บทสรุป.....	61
บทที่ 5 การทดสอบและผลการทดสอบ.....	62
5.1 บทนำ.....	62
5.2 การสร้างสายอากาศและการทดสอบ.....	62
5.3 บทสรุป.....	85
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	86
6.1 บทนำ.....	86
6.2 สรุปผลการวิจัย.....	86
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	90
บรรณานุกรม.....	91
ประวัติผู้เขียน.....	93

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงค่าประสิทธิภาพของสายอากาศเมื่อกำหนดค่าความยาวของ $l_s = 24.5$ mm $\epsilon_r = 4.4$ , $h = 1.6$ mm, $L = 40$ mm, ระบายกราวด์ = $70 \times 70$ mm <sup>2</sup> [2].....	4
1.2 คุณสมบัติของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าจูนสตัป เมื่อกำหนดค่า $S = 0.5$ mm, $l = 22.5$ mm, $L = 44$ mm, $G = 72$ mm, $\epsilon_r = 4.4$ , $h = 1.6$ mm, $w_f = 6.37$ mm, $g = 0.5$ mm [3].....	7
3.1 ค่าความกว้างและความยาวของช่องเปิดสี่เหลี่ยม.....	28
3.2 ค่าความกว้างและความยาวของแผ่นวงจรพิมพ์.....	30
3.3 ค่าลำคลื่นสูงสุดและความกว้างลำคลื่น.....	35
4.1 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของร่องรูปตัวยู.....	37
4.2 ค่าพารามิเตอร์ของร่องรูปตัวยู.....	39
4.3 ค่ามุมที่ลำคลื่นสูงสุดและความกว้างลำคลื่น.....	44
4.4 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อมีการใส่สตัป.....	48
4.5 ค่ามุมที่ลำคลื่นสูงสุดและความกว้างลำคลื่น.....	53
4.6 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศตัดความถี่เมื่อมีการใส่สตัป.....	56
4.7 ค่ามุมที่ลำคลื่นสูงสุดและความกว้างลำคลื่น.....	60
5.1 ค่ามุมที่ลำคลื่นสูงสุดและความกว้างลำคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วย เส้นไมโครสตริปเหนือระบายกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง.....	83
5.2 ค่ามุมที่ลำคลื่นสูงสุดและความกว้างลำคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูป ตัวยูป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระบายกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง.....	83
5.3 ค่ามุมที่ลำคลื่นสูงสุดและความกว้างลำคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมใส่สตัปป้อน ด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระบายกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง.....	84
5.4 ค่ามุมที่ลำคลื่นสูงสุดและความกว้างลำคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยู ใส่สตัปป้อนด้วย เส้นไมโครสตริปเหนือระบายกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง.....	84
6.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป เหนือระบายกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง.....	87

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยูป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป เหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง.....	87
6.3 ค่าพารามิเตอร์สายอากาศไมโครสตริปวงกลมใส่สตัปป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป เหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง.....	88
6.4 ค่าพารามิเตอร์สายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยูใส่สตัปป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป เหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง.....	88

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ระบบสื่อสารที่มีการใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟ [1].....	1
1.2 ย่านความถี่กว้างยิ่งยวด (Ultra-Wideband) [1].....	2
1.3 ความเร็วในการใช้งานของย่านความถี่กว้างยิ่งยวด [1].....	2
1.4 โครงสร้างสายอากาศร่องจตุรัสที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วม และใช้สตริปเป็นโหลดแบบแถบความถี่กว้าง [2].....	3
1.5 ผลการวัดค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศร่องจตุรัสที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมและใช้ สตริปเป็นโหลดแบบแถบความถี่กว้างเมื่อกำหนดค่าความยาวของ $l_s = 24.5$ mm [2].....	4
1.6 โครงสร้างสายอากาศร่องจตุรัสที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วม ที่มีสัดตั้งมุมสี่เหลี่ยมแบบแถบความถี่กว้าง [3].....	5
1.7 การทดสอบค่า $ S_{11} $ เมื่อเปลี่ยนค่า $S$ โดยกำหนดค่า $L = 44$ mm, $G = 72$ mm, $l = 22.5$ mm, $w = 32$ mm, $\epsilon_r = 4.4$ , $h = 1.6$ mm, $w_f = 6.37$ mm และ $g = 0.5$ mm [3].....	6
1.8 การทดสอบค่า $ S_{11} $ เมื่อเปลี่ยนแปลงมุมสัดตั้ง $w$ โดยกำหนดค่า $S = 0.5$ mm, $l = 22.5$ mm, $L = 44$ mm, $G = 72$ mm, $\epsilon_r = 4.4$ , $h = 1.6$ mm, $w_f = 6.37$ mm และ $g = 0.5$ mm [3].....	6
2.1 ลักษณะการป้อนของเส้นไมโครสตริป [18].....	10
2.2 โครงสร้างของไมโครสตริป [19].....	11
2.3 แบบจำลองควาวิตีของสายอากาศไมโครสตริปแผ่นกลม [20].....	13
3.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบ กราวด์ที่เป็นร่องกว้าง.....	17
3.2 โครงสร้างของสายอากาศเริ่มต้น.....	21
3.3 การออกแบบรัศมี ( $r$ ) ที่ให้ความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 6.8 กิกะเฮิรตซ์.....	21
3.4 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นโมโนโพลวงกลม.....	22
3.5 เปรียบเทียบค่าแบนด์วิดท์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า $W_f$ และ $L_s$ เมื่อความกว้างเส้น ไมโครสตริป $W_f$ เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร.....	22
3.6 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมในการปรับความสูง $h_f$ .....	23

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 เปรียบเทียบค่าแบนด์วิดท์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า $W_s, L_s$ และ $h_s$ เมื่อความกว้างเส้น ไมโครสตริป $W_f$ เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร.....	23
3.8 เปรียบเทียบค่าแบนด์วิดท์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า $W_s, L_s$ และ $h_s$ เมื่อความกว้างเส้น ไมโคร สตริป $W_f$ เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร.....	24
3.9 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมในการปรับความยาวเส้น ไมโครสตริป $L_f$ มีความยาวจำกัด.....	25
3.10 เปรียบเทียบค่าแบนด์วิดท์เมื่อปรับค่าความยาวเส้นไมโครสตริป $L_f$ เมื่อความกว้างเส้น ไมโครสตริป $W_f$ เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร.....	25
3.11 เปรียบเทียบค่าแบนด์วิดท์เมื่อปรับค่าความยาวเส้นไมโครสตริป $L_f$ เมื่อความกว้างเส้น ไมโครสตริป $W_f$ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร.....	26
3.12 เปรียบเทียบค่าแบนด์วิดท์เมื่อปรับค่าความยาวเส้นไมโครสตริป $L_f$ เมื่อความกว้างเส้น ไมโครสตริป $W_f$ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร.....	26
3.13 เปรียบเทียบค่าแบนด์วิดท์เมื่อปรับค่าความยาวเส้นไมโครสตริป $L_f$ เมื่อความกว้างเส้น ไมโครสตริป $W_f$ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร.....	27
3.14 เปรียบเทียบค่าแบนด์วิดท์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า $W_s$ และ $L_s$ เมื่อความกว้างเส้น ไมโครสตริปเท่ากับ 1 มิลลิเมตร.....	28
3.15 ค่าพารามิเตอร์ในการปรับขนาดแผ่นวงจรพิมพ์.....	29
3.16 แสดงค่า $ S_{11} $ ต่ำกว่า -10 dB ได้ช่วงความถี่ 2.34-14.70 กิกะเฮิรตซ์ของสายอากาศ ขนาด 60×60 ตารางมิลลิเมตร.....	30
3.17 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ.....	31
3.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	32
3.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	32
3.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	33
3.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	33
3.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	34

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	34
4.1 โครงสร้างส่วนของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีร่องรูปตัวยู.....	36
4.2 โครงสร้างสายอากาศตัดความถี่.....	37
4.3 ผลการจำลองค่า $ S_{11} $ เมื่อเปลี่ยนค่า $S_1$ .....	38
4.4 ผลการจำลองค่า $ S_{11} $ เมื่อเปลี่ยนค่า $S_3$ .....	39
4.5 ผลการจำลองอัตราขยาย.....	40
4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	41
4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	41
4.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	42
4.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	42
4.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	43
4.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	43
4.12 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปวงกลมใส่สัดับ.....	44
4.13 ค่า $ S_{11} $ เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า $h_1$ .....	45
4.14 ค่า $ S_{11} $ เมื่อเปลี่ยนแปลงค่ารัศมี ( $r$ ) โดยมีสัดับ.....	46
4.15 ค่า $ S_{11} $ เมื่อเปลี่ยนความกว้างช่องเปิดสี่เหลี่ยม.....	47
4.16 ค่า $ S_{11} $ เมื่อเปลี่ยนความยาวช่องเปิดสี่เหลี่ยม.....	47
4.17 ค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศไมโครสตริปเมื่อใส่สัดับ.....	48
4.18 อัตราขยายของสายอากาศ.....	49
4.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	50
4.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	50
4.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	51
4.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	51
4.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	52
4.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	52

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 โครงสร้างสายอากาศตัดความถี่ใส่สตัด์.....	54
4.26 ผลการจำลองค่า $ S_{11} $ เมื่อเปลี่ยนค่า $S_1$ .....	54
4.27 ผลการจำลองค่า $ S_{11} $ เมื่อเปลี่ยนค่า $S_3$ .....	55
4.28 ผลการจำลองอัตราขยาย.....	56
4.29 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	57
4.30 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	58
4.31 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	58
4.32 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	59
4.33 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	59
4.34 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	60
5.1 สายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ ที่เป็นร่องกว้าง (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง.....	62
5.2 สายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยูป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ ที่เป็นร่องกว้าง (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง.....	63
5.3 สายอากาศไมโครสตริปวงกลมใส่สตัด์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ ที่เป็นร่องกว้าง (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง.....	63
5.4 สายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยูใส่สตัด์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป เหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง.....	64
5.5 การทดสอบหาค่า $ S_{11} $ .....	64
5.6 ผลการทดสอบและการจำลองหาค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง.....	65
5.7 ผลการทดสอบและการจำลองหาค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม ร่องรูปตัวยูป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง.....	65
5.8 ผลการทดสอบและการจำลองหาค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม ใส่สตัด์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง.....	66

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 ผลการทดสอบและการจำลองหาค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม ร่องรูปตัวยูใส่สตัปป้อนด้วยเส้น ไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง.....	66
5.10 การทดสอบอัตรายาย.....	67
5.11 ผลการทดสอบและการจำลองหาอัตรายายของสายอากาศไมโครสตริป วงกลมป้อนด้วยเส้น ไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง.....	68
5.12 ผลการทดสอบและการจำลองหาอัตรายายของสายอากาศไมโครสตริป วงกลมร่องรูปตัวยูใส่สตัปป้อนด้วยเส้น ไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง.....	68
5.13 ผลการทดสอบและการจำลองหาอัตรายายของสายอากาศไมโครสตริป วงกลมใส่สตัป ป้อนด้วยเส้น ไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง.....	69
5.14 ผลการทดสอบและการจำลองหาอัตรายายของสายอากาศไมโครสตริป วงกลมร่องรูปตัวยูใส่สตัปป้อนด้วยเส้น ไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง.....	69
5.15 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	70
5.16 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	71
5.17 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	71
5.18 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	72
5.19 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	72
5.20 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	73
5.21 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	73

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.22 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 3.1 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	74
5.23 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 6.8 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	74
5.24 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	75
5.25 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 3.1 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	75
5.26 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 6.8 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	76
5.27 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	76
5.28 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 3.1 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	77
5.29 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 6.8 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	77
5.30 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	78
5.31 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 3.1 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	78
5.32 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 6.8 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	79
5.33 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	79

## สารบัญรูป (ต่อ)

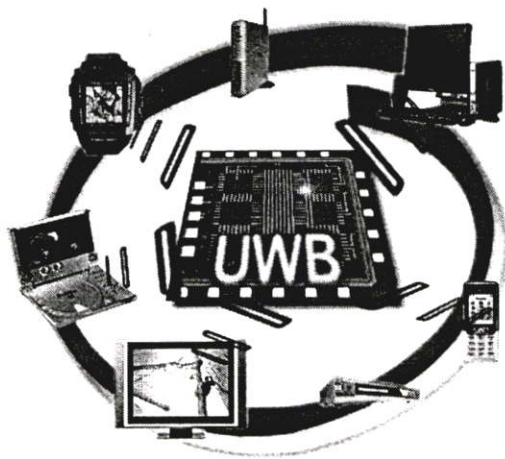
รูปที่	หน้า
5.34 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 3.1 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	80
5.35 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 6.8 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	80
5.36 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	81
5.37 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 3.1 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	81
5.38 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 6.8 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	82
5.39 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	82

# บทที่ 1

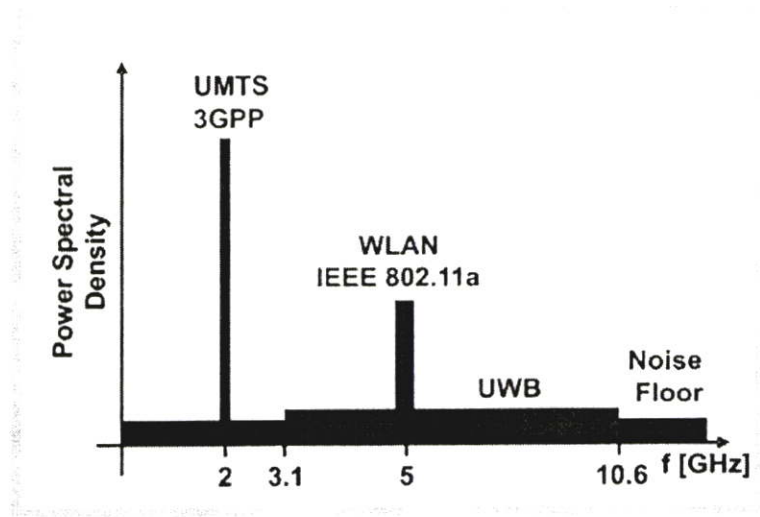
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

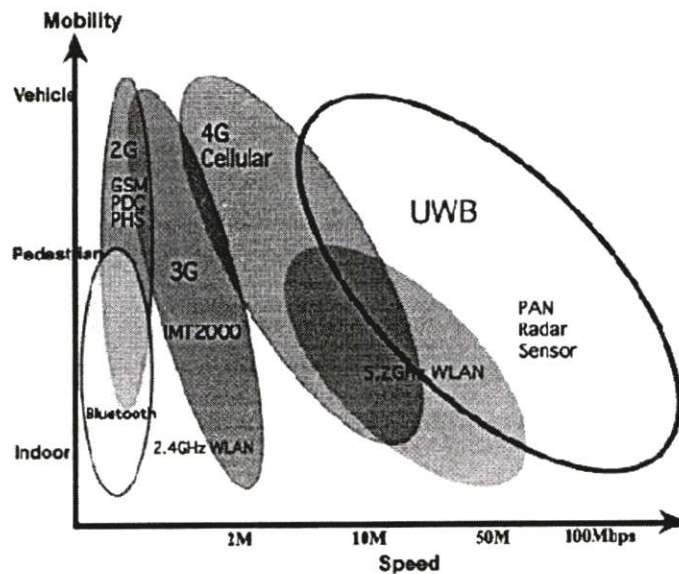
ปัจจุบันเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารทางด้านโทรคมนาคมมีความสำคัญในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะย่านความถี่ไมโครเวฟมีการใช้งานในระบบสื่อสารมากมาย เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบสื่อสารดาวเทียม ระบบวิทยุสื่อสาร ระบบเรดาร์และระบบตรวจจับ ซึ่งมีการพัฒนาระบบให้รองรับกับความก้าวหน้าของเทคโนโลยีที่ทันสมัยเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นย่านความถี่ไมโครเวฟที่จะนำมาใช้กับการพัฒนาระบบจึงต้องเลือกใช้ย่านความถี่ที่ไม่ทับซ้อนกับระบบที่มีอยู่เดิมเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนกันในการใช้งาน ซึ่งย่านความถี่ไมโครเวฟที่น่าสนใจที่ถูกกำหนดมาตรฐานขึ้นมาในปี ค.ศ. 2002 โดย Federal Communications Commission (FCC) ที่มีการรองรับช่วงความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ เรียกว่า ย่านความถี่กว้างยิ่งยวด (Ultra-Wideband) [1] นั้นมีแนวโน้มต่อการพัฒนาอุปกรณ์และรองรับกับเทคโนโลยีปัจจุบันเพิ่มมากขึ้น ส่วนประกอบของสายอากาศเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่ต้องมีในระบบสื่อสารไร้สายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงช่วงความถี่ใช้งานของระบบหรืออุปกรณ์จำเป็นต้องออกแบบสายอากาศให้รองรับกับความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศที่ครอบคลุมย่านความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ จะมีประโยชน์ในการรองรับเทคโนโลยีของระบบต่างๆ ที่จะพัฒนาในปัจจุบันและอนาคตดังรูปที่ 1.1 และรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.1 ระบบสื่อสารที่มีการใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟ [1]



รูปที่ 1.2 ย่านความถี่กว้างยิ่งยวด (Ultra-Wideband) [1]



รูปที่ 1.3 ความเร็วในการใช้งานของย่านความถี่กว้างยิ่งยวด [1]

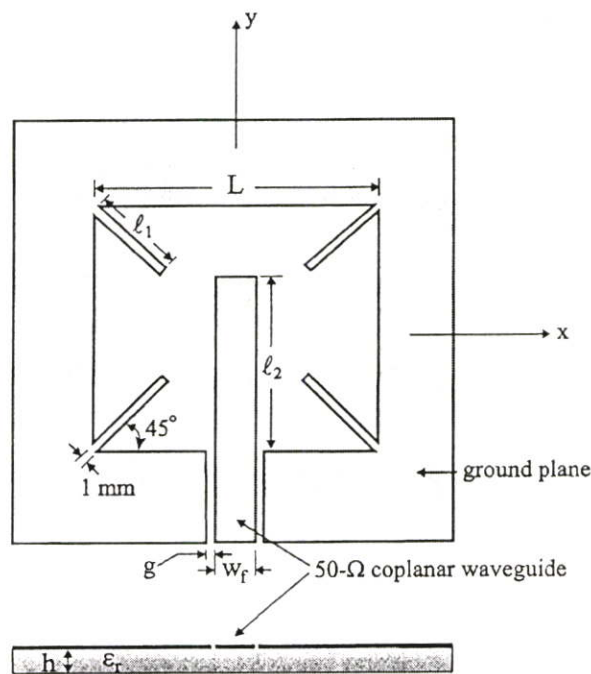
รูปที่ 1.1 ย่านความถี่กว้างยิ่งยวดสามารถนำไปใช้ในระบบด้านการสื่อสาร เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบสื่อสารดาวเทียม ระบบวิทยุสื่อสาร ระบบเรดาร์และระบบตรวจจับ

รูปที่ 1.2 แสดงช่วงความถี่ที่รองรับในย่านความถี่กว้างยิ่งยวดซึ่งสามารถครอบคลุมช่วงความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ มีความถี่ซ้อนทับกับระบบ HIPERLAN ความถี่ 5.150-5.350 กิกะเฮิรตซ์ และระบบ Wireless LAN (WLAN) ความถี่ 5.725-5.825 กิกะเฮิรตซ์

รูปที่ 1.3 แสดงช่วงความเร็วในย่านความถี่กว้างยิ่งยวดซึ่งมีความเร็วสูงถึง 100 Mbps เมื่อเปรียบเทียบกับระบบ 2G, 3G และ 4G ที่มีช่วงความเร็วที่ต่ำกว่า

งานวิจัยตั้งแต่ปี ค.ศ. 2003 ถึงปี ค.ศ. 2006 [2]-[18] ที่นำมาเป็นแนวทางในการวิจัยได้ ซึ่งขอแสดงงานวิจัยที่นำมาเป็นแนวทางเพื่อมาพัฒนาในวิทยานิพนธ์ดังนี้

กลุ่มแรกเป็นกลุ่มวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการขยายแบนด์วิดธ์ของสายอากาศไมโครสตริป คือ นักวิจัยชาว Taiwan คือ J. Y. Chiou, J. Y. Sze และ K. L. Wong ในปี ค.ศ. 2003 [2] งานวิจัยนี้เป็น การนำเสนอการออกแบบสายอากาศสี่เหลี่ยมที่มีร่องจตุรัสแบบแถบความถี่กว้างที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมและใช้สตริปเป็นโหลด ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบได้แก่ ความกว้างของสายนำสัญญาณ ระยะห่างของช่องว่าง ระหว่างสายป้อนสัญญาณและระนาบกราวด์ของระนาบร่วม เป็นการกระตุ้นค่าความจุไฟฟ้าระหว่างช่องว่างเพื่อให้เกิดการแมตซ์อิมพีแดนซ์ (Impedance Matching) และปรับค่าแบนด์วิดธ์ มีการใช้สตริปเป็นโหลดต่อภายในมุมทั้งสี่ของสายอากาศเพื่อเพิ่มแบนด์วิดธ์ให้มากขึ้นแสดงดังรูปที่ 1.4



**รูปที่ 1.4** โครงสร้างสายอากาศร่องจตุรัสที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมและใช้สตริปเป็น โหลดแบบแถบความถี่กว้าง [2]

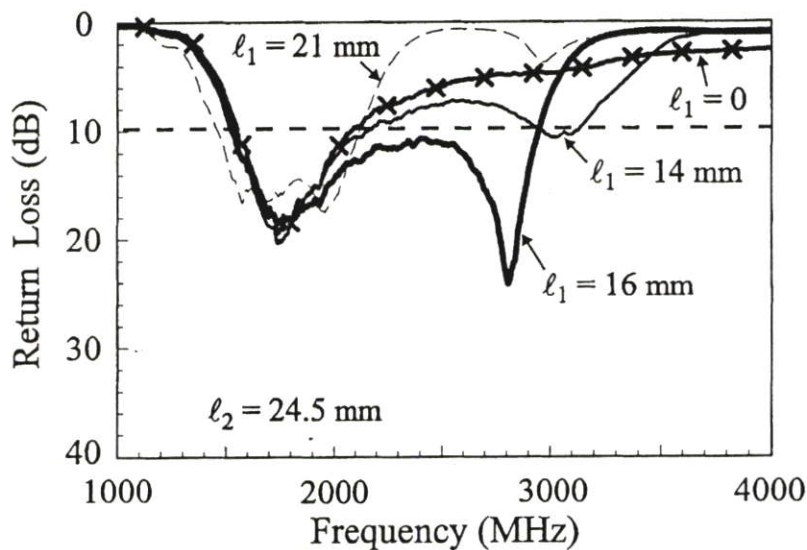
จากรูปที่ 1.4 เป็นงานวิจัยที่นำเสนอการออกแบบสายอากาศสี่เหลี่ยมที่มีร่องจตุรัสแบบ แถบความถี่กว้างที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมและใช้สตริปเป็นโหลด ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ ที่สำคัญในการออกแบบได้แก่ ความกว้างของสายนำสัญญาณ  $W_f$  ระยะห่างของช่องว่าง  $g$  ระหว่าง สายป้อนสัญญาณและระนาบกราวด์ของระนาบร่วม เป็นการกระตุ้นค่าความจุไฟฟ้าระหว่าง ช่องว่างเพื่อให้เกิดการแมตซ์อิมพีแดนซ์ (Impedance Matching) โดยการใช้สตริป  $l_2$  ทำหน้าที่ปรับ

ค่าแบนด์วิดท์ให้ได้ค่ามากและเหมาะสมค่าหนึ่ง จากนั้นจึงนำสตริป  $l_1$  ต่อภายในมุมเป็นโหนดทั้งสี่ของสายอากาศเพื่อเป็นการขยายแบนด์วิดท์ให้กว้างขึ้น จากงานวิจัยพบว่าเมื่อกำหนดค่า  $l_2$  คงที่เท่ากับ 24.5 มิลลิเมตร และทำการเปลี่ยนค่า  $l_1$  คุณสมบัติสูงสุดได้เมื่ออยู่ในช่วงอัตราส่วนของค่า  $l_1/l_2$  จาก 0.6 ถึง 0.8 ซึ่งค่าอัตราส่วน 0.65 ทำให้สายอากาศได้ค่าแบนด์วิดท์กว้างที่สุดเท่ากับ 1.41 กิกะเฮิรตซ์หรือ 62% ได้รับความถี่กลางประมาณ 2.2 กิกะเฮิรตซ์ ดังแสดงในตารางที่ 1.1 และรูปที่ 1.5

**ตารางที่ 1.1** แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อกำหนดค่าความยาวของ  $l_2 = 24.5$  mm  $\epsilon_r = 4.4$ ,

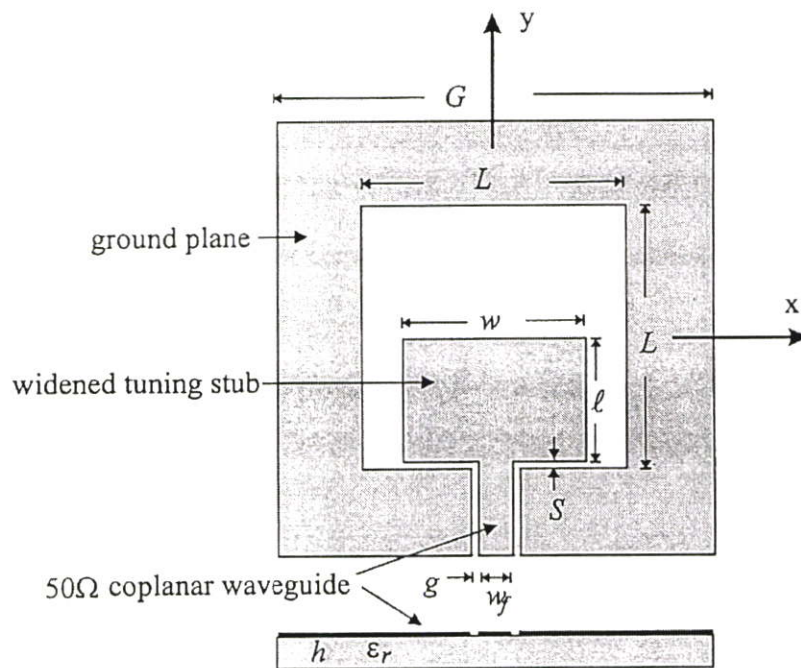
$h = 1.6$  mm,  $L = 40$  mm, ระบายกราวด์ =  $70 \times 70$  mm<sup>2</sup> [2]

$l_1$ mm	$l_2$ mm	$l_1/l_2$	$f_c$ MHz	Bandwidth MHz, %
0	24.5	0.00	1857	527, 28.4
14	24.5	0.57	1849	618, 33.4
16	24.5	0.65	2241	1410, 62.9
18	24.5	0.73	2050	1101, 53.7
19	24.5	0.78	1960	952, 48.6
21	24.5	0.86	1801	641, 35.6



**รูปที่ 1.5** ผลการทดสอบค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศร่องจตุรัสที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วม และใช้สตริปเป็นโหนดแบบแถบความถี่กว้าง กำหนดค่าความยาวของ  $l_2 = 24.5$  mm [2]

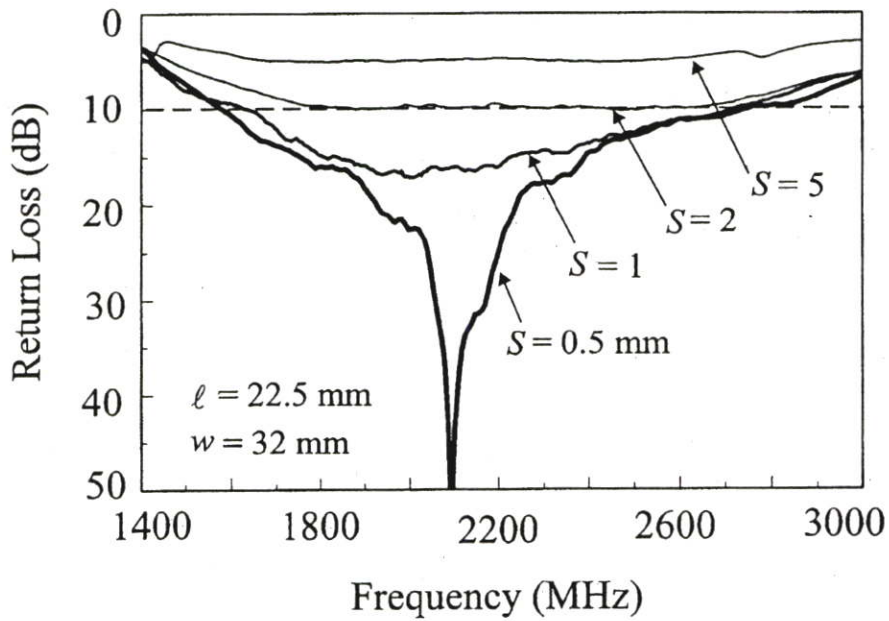
ผู้วิจัยกลุ่มที่สองศึกษาเกี่ยวกับการขยายแบนด์วิดธ์ของสายอากาศไมโครสตริป คือ นักวิจัยชาว Taiwan คือ H.D. Chen ในปี ค.ศ. 2003 [3] งานวิจัยนี้ใช้วิธีการป้อนสายนำสัญญาณด้วยโครงสร้างระนาบร่วม (CPW-Fed) และจูนสตัป (Widened Tuning Stub) ร่วมกัน ซึ่งได้สายอากาศร่องจตุรัสที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วม (CPW-Fed Square Slot Antenna) สำหรับให้ทำงานในย่านความถี่กว้าง (Broadband) สายอากาศมีขนาด 72 x72 ตารางมิลลิเมตร โดยเทคนิคการปรับการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศขึ้นอยู่กับระยะห่างของการจูนสตัปในช่องสี่เหลี่ยม และการเพิ่มค่าแบนด์วิดธ์ของสายอากาศขึ้นอยู่กับขนาดของความกว้างและความยาวของตัวจูนสตัปในช่องเปิดสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 1.6



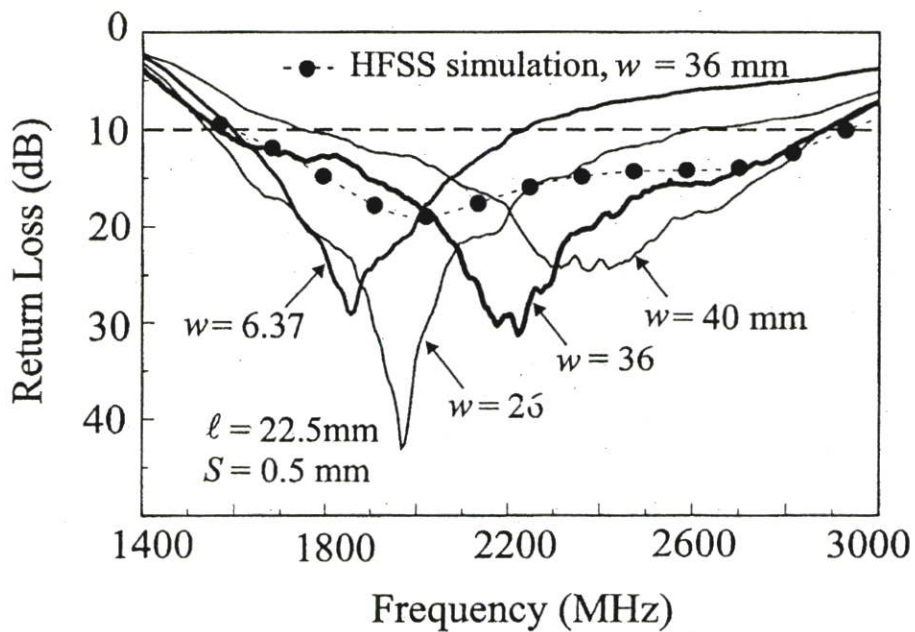
**รูปที่ 1.6** โครงสร้างสายอากาศร่องจตุรัสที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมที่มีสตัปจูนสี่เหลี่ยมแบบแถบความถี่กว้าง [3]

จากรูปที่ 1.6 งานวิจัยนี้ใช้วิธีการป้อนสายนำสัญญาณด้วยโครงสร้างระนาบร่วมและจูนสตัปร่วมกัน ซึ่งได้สายอากาศร่องจตุรัสที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วม สำหรับให้ทำงานในย่านความถี่กว้างสายอากาศมีขนาด 72 x72 ตารางมิลลิเมตรโดยเทคนิคการปรับค่าการแมตซ์อิมพีแดนซ์ (Impedance Matching) ของสายอากาศขึ้นอยู่กับระยะห่างของ  $S$  ในการจูนสตัปในช่องสี่เหลี่ยมแสดงในรูปที่ 1.7 และการเพิ่มค่าแบนด์วิดธ์ของสายอากาศขึ้นอยู่กับขนาดของ  $w$  และ  $l$  ในการจูนสตัปแสดงในรูปที่ 1.8 ซึ่งผลจากการวิจัยพบว่าสายอากาศจะมีคุณสมบัติที่ดีที่สุดเมื่อค่า

$l = 0.5L$  (22.5 mm) และ  $w = 0.81L$  (36 mm) ซึ่งทำให้สายอากาศสามารถทำงานในย่านความถี่ประมาณ 1.6-2.8 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งจะได้อัตราแอมพลิจูดประมาณ 60% ดังแสดงในตารางที่ 1.2



**รูปที่ 1.7** การทดสอบค่า  $|S_{11}|$  เมื่อเปลี่ยนค่า  $S$  โดยกำหนดค่า  $L = 44$  mm,  $G = 72$  mm,  $l = 22.5$  mm,  $w = 32$  mm,  $\epsilon_r = 4.4$ ,  $h = 1.6$  mm,  $w_f = 6.37$  mm และ  $g = 0.5$  mm [3]



**รูปที่ 1.8** การทดสอบค่า  $|S_{11}|$  เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาด  $w$  โดยกำหนดค่า  $S = 0.5$  mm,  $l = 22.5$  mm,  $L = 44$  mm,  $G = 72$  mm,  $\epsilon_r = 4.4$ ,  $h = 1.6$  mm,  $w_f = 6.37$  mm และ  $g = 0.5$  mm [3]

**ตารางที่ 1.2** คุณสมบัติของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าจูนสลับ เมื่อกำหนดค่า  $S = 0.5$  mm,  $l = 22.5$  mm,  $L = 44$  mm,  $G = 72$  mm,  $\epsilon_r = 4.4$ ,  $h = 1.6$  mm,  $w_f = 6.37$  mm,  $g = 0.5$  mm [3]

	$w$ (mm)	$S$ (mm)	$f_c$ (MHz)	BW (% , MHz)
Reference	6.37	----	1895	32, 1589~2200
Antenna 1	26	0.5	2070	51, 1540~2600
Antenna 2	32	0.5	2163	54, 1580~2747
Antenna 3	36	0.5	2220	60, 1560~2880
Antenna 4	40	0.5	2299	50, 1725~2873

ผลการวิจัยทั้งสองนี้เป็นการออกแบบสายอากาศโดยใช้การป้อนสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม สามารถเพิ่มแบนด์วิดท์ได้โดยการปรับร่องเปิดสี่เหลี่ยมและมีเทคนิคการปรับอิมพีแดนซ์ที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างของร่องเปิดสี่เหลี่ยมกับแผ่นสลับ ข้อดีของการวิจัยนี้คือการออกแบบโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์หน้าเดียว แต่ข้อเสียของโครงสร้างของสายอากาศแบบนี้จะได้สายอากาศมีขนาดใหญ่เพราะต้องใช้การเหนี่ยวนำบนพื้นที่เดียวกัน จึงต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ซึ่งจะทำให้การแมตซ์อิมพีแดนซ์มีความยากและซับซ้อนของโครงสร้าง และการใช้แผ่นวงจรพิมพ์หน้าเดียวไม่สามารถทำสายอากาศแบบทิศทางเดียว (Unidirectional beam) ได้เพราะไม่มีระนาบกราวด์

จากงานวิจัยที่ยกตัวอย่างมาทั้งหมดก็จะเห็นได้ว่ามีเทคนิคการเพิ่มค่าแบนด์วิดท์ที่น่าสนใจแต่ยังไม่สามารถขยายแบนด์วิดท์ให้รองรับความถี่ในช่วง 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ได้ ดังนั้นสายอากาศที่ผู้วิจัยนำเสนอนี้เป็นสายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง ข้อดีคือสามารถแยกการออกแบบได้สองส่วนคือส่วนของสายนำสัญญาณและส่วนของระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง ซึ่งสายอากาศนี้ให้แบนด์วิดท์ที่กว้างและสามารถใช้งานสำหรับความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ได้ โครงสร้างสายอากาศไม่ซับซ้อน สร้างได้ง่าย น้ำหนักเบา สามารถออกแบบให้สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้หลายรูปแบบ ซึ่งจะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของสายอากาศไมโครสตริปในบทถัดไป

## 1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษา ออกแบบ สร้างและทดสอบสายอากาศแบบใหม่ที่ใช้แบนด์วิดท์กว้างครอบคลุมช่วงความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ โดยใช้แผ่นวัสดุที่มีความบาง น้ำหนัก

เบา ขนาดกะทัดรัดและราคาถูก การออกแบบโครงสร้างสายอากาศเน้นความไม่ซับซ้อน สร้างได้ง่าย และมีขนาดเล็ก สายอากาศสามารถติดตั้งกับอุปกรณ์ขนาดเล็กได้

การสร้างสายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้างสำหรับครอบคลุมย่านความถี่กว้างยิ่งยวด ตามมาตรฐาน Federal Communications Commission ที่มีการรองรับช่วงความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งได้ทำการจำลองแบบการทำงานด้วยโปรแกรมออกแบบสายอากาศย่านความถี่ไมโครเวฟ Computer Simulation Technology (CST MICROWAVE STUDIO®) [19] โครงสร้างสายอากาศด้านบนเป็นแผ่นไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเพื่อให้มีอิมพีแดนซ์ที่ 50 โอห์มและป้อนสัญญาณแบบตรงกลาง (Center Feed) เพื่อให้โครงสร้างสมมาตรกัน ส่วนระนาบกราวด์เป็นร่องกว้างสำหรับขยายช่วงกว้างความถี่และบังคับทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศให้เป็นลำคลื่นสองทิศทาง (Bi-directional beam) และจากการจำลองผลและทดสอบสายอากาศที่ค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB ให้ครอบคลุมย่านความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ มีอัตราขยายเพียงพอต่อการประยุกต์ใช้งานแต่ละประเภท

### 1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตงานวิจัย และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณก่อนทำการจำลองแบบเพื่อให้ได้ค่าเริ่มต้นของโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป การคำนวณของสายนำสัญญาณ การออกแบบและคำนวณแบบจำลองควาวิตี ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้จำเป็นสำหรับการศึกษาและออกแบบสายอากาศความถี่กว้างยิ่งยวด

บทที่ 3 ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์ เริ่มด้วยการกำหนดรูปแบบของสายอากาศโดยอาศัยทฤษฎีและสมการในการคำนวณในบทที่ 2 จากนั้นจึงจำลองแบบสายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® และปรับโครงสร้างของสายอากาศในการปรับค่าอิมพีแดนซ์ ค่า  $|S_{11}|$  และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เพื่อให้ได้สายอากาศการใช้งานมีคุณลักษณะเหมาะสมกับความต้องการในระบบย่านความถี่ยิ่งยวด

บทที่ 4 กล่าวถึงการปรับปรุงสมรรถนะของสายอากาศ โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาปรับปรุงโครงสร้างและนำมาจำลองแบบเพื่อดูผลกระทบกับค่า  $|S_{11}|$  และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งสามารถทำให้ได้โครงสร้างของสายอากาศหลากหลายแบบ และมี

คุณสมบัติที่มีความแตกต่างกัน บทนี้จะนำเสนอให้ทราบถึงข้อดีและข้อเสียของการปรับปรุงโครงสร้างสายอากาศเพื่อนำไปสร้างและทดสอบ

บทที่ 5 นำเสนอการทดสอบสายอากาศเพื่อหาค่า  $|S_{11}|$  อัตราขยายและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จากนั้นนำผลทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองเพื่อยืนยันความแม่นยำของการจำลองแบบ

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปเนื้อหาโดยรวมพร้อมทั้ง ข้อเสนอแนะ และแนวทางในการจำลองแบบ สรุปค่าพารามิเตอร์ การจัดสร้างและผลการทดสอบสายอากาศทั้งหมด สรุปข้อดีและข้อเสียของสายอากาศข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในการออกแบบสายอากาศ

## บทที่ 2

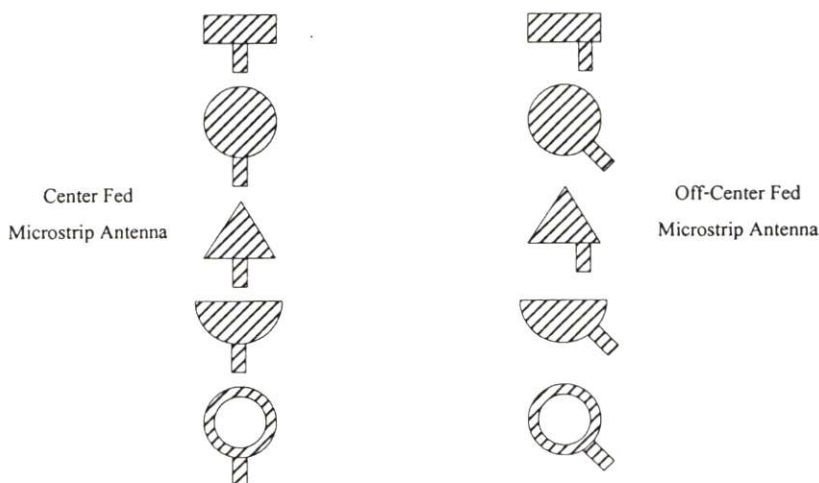
# สายอากาศไมโครสตริป

### 2.1 บทนำ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริปต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป และการคำนวณของสายนำสัญญาณ การออกแบบและคำนวณแบบจำลองควิซี ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้จำเป็นสำหรับการศึกษาและออกแบบสายอากาศความกว้างยิ่งยวด

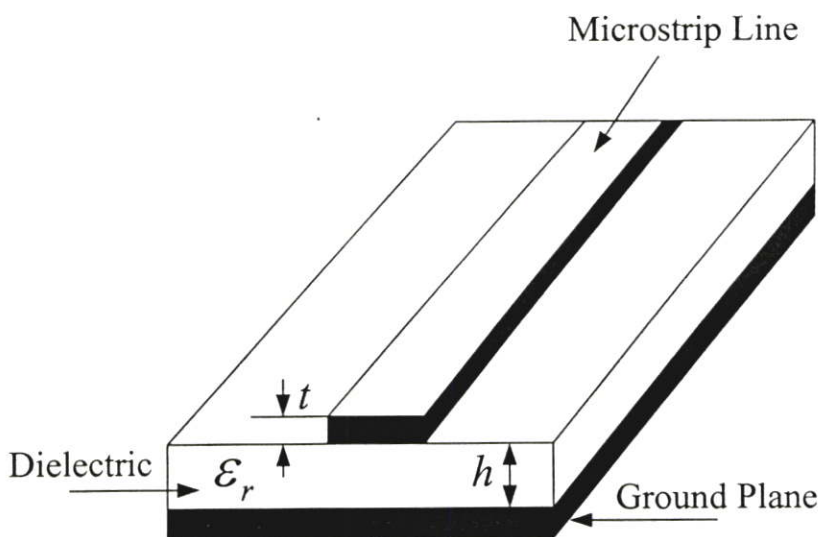
### 2.2 สายอากาศไมโครสตริป

โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปนั้นมีอยู่หลายแบบด้วยกันซึ่งแบ่งตามลักษณะของแผ่นไมโครสตริปและลักษณะการป้อนสัญญาณ สายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น (Patch) และระนาบกราวด์แบบร่องเปิดมีหลายลักษณะ เช่น แผ่นวงกลม (Disk) แผ่นวงรี (Ellipse) แผ่นสี่เหลี่ยม (Rectangle) แผ่นสามเหลี่ยมด้านเท่า (Equilateral Triangle) แผ่นวงแหวน (Ring) [18] เป็นต้น ส่วนการป้อนสัญญาณแบบเส้นไมโครสตริปแบ่งได้เป็น 2 แบบคือการป้อนสัญญาณแบบตรงกลาง (Center Feed) และการป้อนสัญญาณแบบเอียงจากตรงกลาง (Off-Center Feed) [18] ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะการป้อนของเส้นไมโครสตริป [18]

ส่วนโครงสร้างของไมโครสตริปจะประกอบด้วยตัวนำอยู่สองด้าน ด้านหนึ่งเรียกว่า แผ่นระนาบกราวด์ (Ground Plane) และด้านที่สองใช้สำหรับการสร้างตัวป้อนสัญญาณ [19] ลายวงจรหรือสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นลงไป โดยมีไดอิเล็กตริก (Dielectric) ที่มีการสูญเสียต่ำ ซึ่งเรียกว่า วัสดุฐานรองที่เป็นสารไดอิเล็กตริก (Dielectric Substrate) อยู่ตรงกลาง ตัวนำส่วนใหญ่จะเป็นทองแดงซึ่งความหนาของทองแดง ( $t$ ) ประมาณ 0.01778 มิลลิเมตร ถึง 0.03556 มิลลิเมตร ส่วนความหนาของวัสดุฐานรอง ( $h$ ) มีหลายขนาดแต่ที่นิยมนำมาออกแบบ เช่น 0.8 มิลลิเมตร และ 1.6 มิลลิเมตร เป็นต้น ส่วนคุณสมบัติทางไฟฟ้าวัสดุฐานรองแสดงด้วยสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant),  $\epsilon_r$  และค่าของ Loss Tangent,  $\delta$  ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของไมโครสตริป [19]

## 2.3 การออกแบบเส้นไมโครสตริปและสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปมีโครงสร้างอยู่หลายแบบ ซึ่งมีชื่อเรียกที่แตกต่างกันไปตามโครงสร้างในการออกแบบ เช่น โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม (Coplanar Waveguide) โครงสร้างสายนำสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip Line) เป็นต้น ซึ่งการออกแบบ การวิเคราะห์ และสมการในการคำนวณมีความแตกต่างกัน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำสมการพื้นฐานที่มีความเกี่ยวข้องและสำคัญที่จะใช้ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแสดงได้ดังต่อไปนี้

### 2.3.1 อิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะ (Characteristic Impedance, $Z_0$ ) ของเส้นไมโครสตริป

วิธีการป้อนสัญญาณแบบเส้นไมโครสตริป มีสมการในการออกแบบซึ่งจะต้องให้อิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะ [20] ตามที่ต้องการ สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{เมื่อ } \frac{W}{H} \leq 1$$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln\left(\frac{8H}{W} + \frac{W}{4H}\right) \quad \text{โอห์ม} \quad (2.1)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{H}{W}}} + 0.4 \left(1 - \frac{W}{H}\right)^2 \right] \quad (2.2)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{W}{H} \geq 1$$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \left\{ \frac{W}{H} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{W}{H} + 1.444\right) \right\}^{-1} \quad \text{โอห์ม} \quad (2.3)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2 \sqrt{1 + 12 \frac{H}{W}}} \quad (2.4)$$

เมื่อหาค่า  $W$  และ  $H$  จาก

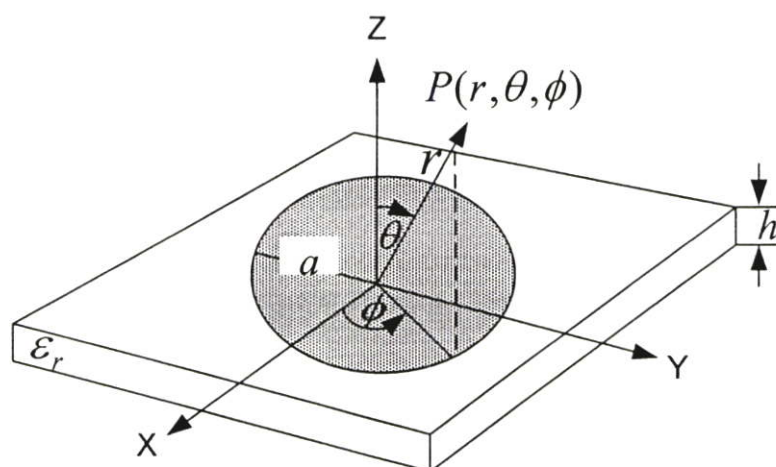
$$W = w + \frac{t}{\pi} \left[ \ln\left(\frac{2h}{t}\right) + 1 \right] \quad (2.5)$$

$$H = h - 2t \quad (2.6)$$

### 2.3.2 ทฤษฎีแบบจำลองคาวิตี (Cavity Model) ของสายอากาศไมโครสตริปแผ่นกลม

สายอากาศไมโครสตริปแผ่นกลมสามารถใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองคาวิตี [20] โดยใช้ระบบแกนพิกัดเป็นทรงกระบอก (Cylindrical Coordinates) ซึ่งแบบจำลองคาวิตีประกอบด้วยส่วนตัวนำไฟฟ้าที่สมบูรณ์ 2 ส่วน คือ ส่วนบน และส่วนล่าง ซึ่งเป็นส่วนของแผ่นไมโครสตริปและ

ระนาบกราวด์และตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ทรงกระบอกรอบๆ เส้นรอบวงของควิตี โดยจะไม่นำค่าวัสดุฐานรองที่เป็นสารไดอิเล็กตริกมารวมในการคำนวณ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองควิตีของสายอากาศไมโครสตริปแผ่นกลม [20]

การหาสนามในควิตีสามารถใช้วิธีของฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ (Vector Potential) สำหรับโหมด  $TM^z$  ต้องหาศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก  $A_z$  ก่อน จะได้สมการแบบคลื่นเอกพันธ์ (Homogeneous Wave Equation) ในระบบพิกัดทรงกระบอกดังสมการ

$$\nabla^2 A_z(\rho, \phi, z) + k^2 A_z(\rho, \phi, z) = 0 \quad (2.7)$$

สามารถแสดงโหมด  $TM^z$  ของสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าโดยขึ้นกับฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์  $A_z$  ดังสมการ

$$E_\rho = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \rho \partial z} \quad H_\rho = \frac{1}{\mu} \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_z}{\partial \phi} \quad (2.8)$$

$$E_\phi = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \phi \partial z} \quad H_\phi = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial \rho} \quad (2.9)$$

$$E_z = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) A_z \quad H_z = 0 \quad (2.10)$$

มีเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) เป็น

$$E_\rho(0 \leq \rho' \leq a, 0 \leq \phi' \leq 2\pi, z' = 0) = 0 \quad (2.11)$$

$$E_\rho(0 \leq \rho' \leq a, 0 \leq \phi' \leq 2\pi, z' = h) = 0 \quad (2.12)$$

$$H_\phi(\rho' = a, 0 \leq \phi' \leq 2\pi, z' \leq h) = 0 \quad (2.13)$$

ฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กถูกลดรูปเป็น

$$A_z = B_{mnp} J_m(k_\rho \rho') [A_2 \cos(m\phi') + B_2 \sin(m\phi')] \cos(k_z z') \quad (2.14)$$

เมื่อ  $(k_\rho)^2 + (k_z)^2 = k_r^2 = \omega_r^2 \mu \epsilon \quad (2.15)$

ค่าของระบบพิกัดหลัก (Prime Coordinate)  $\rho', \phi', z'$  เป็นค่าสนามที่อยู่ในคาวิตี้ โดยที่  $J_m(X)$  เป็นฟังก์ชันเบสเซล (Bessel Function) ของอนุพันธ์อันดับที่  $m$  โดยมีสมการ

$$k_\rho = \frac{\chi'_{mn}}{a} \quad (2.16)$$

$$k_z = \frac{p\pi}{h} \quad (2.17)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots \quad (2.18)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.19)$$

$$p = 0, 1, 2, \dots \quad (2.20)$$

ค่า  $\chi'_{mn}$  จะแสดงค่าศูนย์ของอนุพันธ์ของฟังก์ชันเบสเซล  $J_m(X)$  และลำดับของความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Frequency) สี่ค่าแรกของ  $\chi'_{mn}$  ในลำดับสูงขึ้นไปจะเป็น

$$\chi'_{11} = 1.8412 \quad (2.21)$$

$$\chi'_{22} = 3.0542 \quad (2.22)$$

$$\chi'_{01} = 3.8318 \quad (2.23)$$

$$\chi'_{31} = 4.2012 \quad (2.24)$$

ในแต่ละโหมดสามารถหาความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งทำให้อนุพันธ์ของฟังก์ชันเบสเซลเป็นศูนย์และได้รูปแบบสนามและกระแสพื้นผิวในโหมดต่างๆ ค่า  $n$  เป็นตัวแสดงลำดับของฟังก์ชันเบสเซล และค่า  $m$  เป็นลำดับศูนย์ของอนุพันธ์ของฟังก์ชันเบสเซล สำหรับความถี่ใดๆ เมื่อค่า  $n = m = 1$  จะได้รับค่าที่ต่ำที่สุดเรียกว่า โหมดหลัก (Dominant mode)

ความถี่เรโซแนนซ์ของควิตีหรือของสายอากาศไมโครสตริปที่มีความหนาของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก ( $h$ ) ที่น้อยมาก ( $h \leq 0.005\lambda_0$ ) ทำให้ค่าสนามตามทิศทางแกน  $z$  จะมีค่าคงที่และเมื่อ  $p=0$  ทำให้  $k_z = 0$  ดังนั้นความถี่เรโซแนนซ์สำหรับโหมด  $TM^z_{mn0}$  สามารถใช้สมการที่ 2.15 เขียนสมการเป็น

$$(f_r)_{mn0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \left( \frac{\chi'_{mn}}{a} \right) \quad (2.25)$$

โดยขึ้นอยู่กับค่าของ  $\chi'_{mn}$  ในสมการที่ (2.25) โดยสี่โหมดแรกเรียงตามลำดับที่สูงขึ้นเป็น  $TM^z_{110}, TM^z_{210}, TM^z_{010}, TM^z_{310}$  มีโหมดหลักเป็น  $TM^z_{110}$  จะได้ความถี่เรโซแนนซ์ดังสมการ

$$(f_r)_{110} = \frac{1.8412}{2\pi a\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{1.8412v_0}{2\pi a\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.26)$$

เมื่อค่า  $v_0$  เป็นความเร็วของแสงในอากาศว่าง (Free space)

ความถี่เรโซแนนซ์ในสมการที่ (2.26) ไม่รวมการคิดสนามที่ขอบ (Fringing Field) ซึ่งเกิดขึ้นที่ขอบของเรโซแนนซ์ซึ่งจะทำให้ความยาวทางไฟฟ้ามากกว่าความยาวทางกายภาพ ซึ่งจะต้องนำไปคำนวณหาค่าชดเชย ในกรณีของแผ่นสตริปกกลมค่าชดเชยจะเป็นการหาค่ารัศมีประสิทธิผล ซึ่งจะใช้แทนที่รัศมีจริงได้ในสมการ (2.27) [20]

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[ \ln \left( \frac{\pi a}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{เซนติเมตร} \quad (2.27)$$

ดังนั้นแทนค่าสมการ (2.27) ลงในสมการ (2.26) สมการเขียนใหม่ได้เป็น

$$(f_r)_{110} = \frac{1.8412v_o}{2\pi a_e \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.28)$$

สมการที่ (2.28) จะสามารถคำนวณหารัศมีได้ใกล้เคียงและเกิดอัตราการผิดพลาด 2.5 เปอร์เซ็นต์เมื่อค่าของ  $\frac{a}{h} \gg 1$

ส่วนค่า ใน Logarithmic Function  $a$  ได้สมการเป็น

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \left( \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \right) \left[ \ln \left( \frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad \text{เซนติเมตร} \quad (2.29)$$

เมื่อ 
$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.30)$$

ดังนั้นเมื่อได้ค่า  $a$  ในสมการที่ (2.29) แล้วจึงนำค่ากลับมาแทนลงในสมการที่ (2.27) อีกครั้งจึงได้รัศมีที่มีการชดเชยแล้ว

ดังนั้นจากสมการที่ (2.29) และ (2.30) สามารถคำนวณหารัศมีของสายอากาศไมโครสตริปแผ่นกลมโดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณคือ ค่าความถี่เรโซแนนซ์ ค่าวัสดุฐานรองและความหนาของวัสดุ ซึ่งจะมีผลต่อค่าของรัศมีของสายอากาศที่ออกแบบ

## 2.4 บทสรุป

สายอากาศไมโครสตริปมีหลายประเภทและชื่อเรียกที่แตกต่างกันไปตามโครงสร้างและลักษณะของการป้อนสัญญาณและมีสมการในการคำนวณที่ไม่เหมือนกัน แต่มีแนวทางในการออกแบบที่มีจุดเริ่มต้นคล้ายๆ กัน ซึ่งจะต้องกำหนดคิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะที่ต้องการในตอนเริ่มต้นโดยได้จากการคำนวณ ส่วนสายอากาศไมโครสตริปแผ่นวงกลมใช้วิธีแบบจำลองควาวิตีในการคำนวณหารัศมีเพื่อออกแบบให้ได้สายอากาศที่มีความถี่ตามต้องการ จึงสามารถประยุกต์แนวทางและทฤษฎีที่มีอยู่นำไปออกแบบสายอากาศรูปทรงต่างๆ ต่อไป ในบทที่ 3

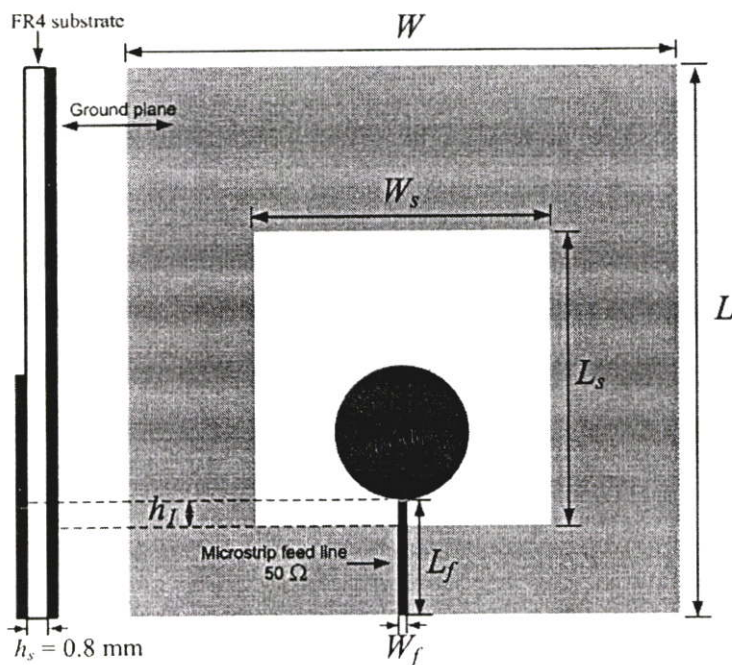
บทที่ 3

การวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปวงกลม  
ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง

3.1 บทนำ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง เริ่มด้วยการกำหนดรูปแบบของสายอากาศโดยอาศัยทฤษฎีและสมการในการคำนวณในบทที่ 2 จากนั้นจึงจำลองผลตัวสายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® และปรับโครงสร้างของสายอากาศให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ค่า  $|S_{11}|$  และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณลักษณะเหมาะสมกับความต้องการในระบบย่านความถี่ยิ่งยวด

3.2 โครงสร้างของสายอากาศ



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง

โครงสร้างสายอากาศที่ออกแบบดังแสดงในรูปที่ 3.1 ใช้วัสดุฐานรองเป็นสารอีพ็อกซี่ซึ่งเป็นแผ่นวงจรพิมพ์ที่สามารถหาได้ง่าย ราคาถูก โดยในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 โดยมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.4 และมีความสูง ( $h_s$ ) เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร มีความกว้างเท่ากับ  $W$  และความยาว  $L$  ซึ่งการออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ใช้ส่วนประกอบทั้งสองด้านในการออกแบบ แผ่นวงจรพิมพ์ด้านหนึ่งใช้สำหรับโครงสร้างสายอากาศและสายนำสัญญาณ ส่วนอีกด้านหนึ่งใช้สำหรับการออกแบบเพื่อเพิ่มช่วงกว้างความถี่ โดยการใช้ร่องเปิดสี่เหลี่ยม เพื่อให้ได้สายอากาศรองรับความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นตามต้องการ

ส่วนของโครงสร้างสายอากาศประกอบด้วยสายอากาศไมโครสตริปวงกลมมีรัศมีเท่ากับ  $r$  และมีการป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริปตรงกลางมีค่าความกว้างเท่ากับ  $W_f$  และความยาวเท่ากับ  $L_f$  โดยใช้หลักการออกแบบตามทฤษฎีการจำลองแบบสายอากาศไมโครสตริปแผ่นกลมและอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะของเส้นไมโครสตริปที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ในส่วนระนาบกราวด์ ออกแบบเป็นร่องกว้างสี่เหลี่ยมซึ่งมีความกว้างเท่ากับ  $W_s$  และความยาว  $L_s$  และมีระยะห่างระหว่างร่องกว้างสี่เหลี่ยมกับสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเท่ากับ  $h_s$  จากเทคนิคในงานวิจัยที่มีมาก่อนที่กล่าวไว้ในบทที่ 1 มีข้อดีในการเพิ่มช่วงกว้างความถี่และให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง ซึ่งการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

### 3.3 การปรับอิมพีแดนซ์และค่า $|S_{11}|$

ก่อนจะทำการปรับอิมพีแดนซ์และค่า  $|S_{11}|$  ต้องหาค่าเริ่มต้นของสายอากาศเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO<sup>®</sup> ซึ่งจะต้องคำนวณหาค่ารัศมีของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมและอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะของเส้นไมโครสตริปจากทฤษฎีในบทที่ 2 ส่วนการคำนวณหาค่ารัศมี  $r$  ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมจากสมการที่ (2.29) และ (2.30) เมื่อความสูงของวัสดุฐานรอง  $h$  เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตรและค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง  $\epsilon_r = 4.4$  และต้องการความถี่เรโซแนนซ์ ( $f_r$ ) เท่ากับ 6.8 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นความถี่กลางของช่วงความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ แทนค่าลงไปในสมการที่ (2.29) และ (2.30) โดยไม่คิดค่าชดเชย

$$a = r = \frac{F}{\left\{ 1 + \left( \frac{2h}{\pi\epsilon_r F} \right) \left[ \ln \left( \frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad \text{เซนติเมตร}$$

เมื่อ

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}}$$

หาค่า  $F$  จากสมการ (2.30) โดยแทนค่า  $\epsilon_r$  เท่ากับ 4.4 และความถี่เรโซแนนซ์ ( $f_r$ ) เท่ากับ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ ดังนี้

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{6.8 \times 10^9 \sqrt{4.4}} = 0.616$$

นำค่า  $F$  และค่า  $h$  เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร แทนค่าในสมการ (2.29) เพื่อหาค่ารัศมี  $r$  ดังนี้

$$a = r = \frac{0.616}{\left\{ 1 + \left( \frac{2 \times 0.8}{\pi \times 4.4 \times 0.616} \right) \left[ \ln \left( \frac{\pi \times 0.616}{2 \times 0.8} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} = 0.593 \quad \text{เซนติเมตร}$$

ดังนั้นจากการคำนวณจึงได้ค่ารัศมี ( $r$ ) ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเท่ากับ 0.593 เซนติเมตร

เนื่องจากสายอากาศนี้ใช้วิธีการป้อนสัญญาณแบบเส้นไมโครสตริป ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะ เริ่มต้นให้เท่ากับ 50 โอห์ม จากทฤษฎีดังนี้

การคำนวณหาอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะ ซึ่งมีความยาวเป็นอนันต์จากสมการ (2.1) ถึง (2.6) ซึ่งไม่คิดความหนาของตัวนำ ( $t$ ) ซึ่งมีผลกระทบต่อโครงสร้างน้อยมากทำให้ได้สมการที่ (2.5) และ (2.6) มีสมการดังนี้

$$W = w + \frac{t}{\pi} \left[ \ln \left( \frac{2h}{t} \right) + 1 \right]$$

$$H = h - 2t$$

เมื่อไม่คิดค่าความหนา  $t$  ทำให้ได้

$$W = w$$

$$H = h = h_s$$

ดังนั้นเมื่อต้องการอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะ  $Z_0 = 50$  โอห์ม โดยมีความสูงของวัสดุฐานรอง  $H = h_s = 0.8$  มิลลิเมตรและมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง  $\epsilon_r = 4.4$  แทนค่าลงในสมการที่ (2.1) ถึง (2.4) แล้วทำการเปลี่ยนค่าความกว้างของเส้นไมโครสตริป  $W_f$  ซึ่งค่า  $W_f = W$  เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร ทำให้ได้ค่า  $Z_0 = 50$  โอห์ม ดังนี้

เมื่อทำการแทนค่า  $W_f = W = 1.5$  มิลลิเมตร จะได้  $\frac{W}{H} = \frac{1.5}{0.8} = 1.875 \geq 1$  ซึ่งต้องเลือกใช้สมการที่ (2.3) และ (2.4) ในการคำนวณดังนี้

$$\text{เมื่อ } \frac{W}{H} \geq 1 \quad Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \left\{ \frac{W}{H} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{W}{H} + 1.444\right) \right\}^{-1}$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 12\frac{H}{W}}}$$

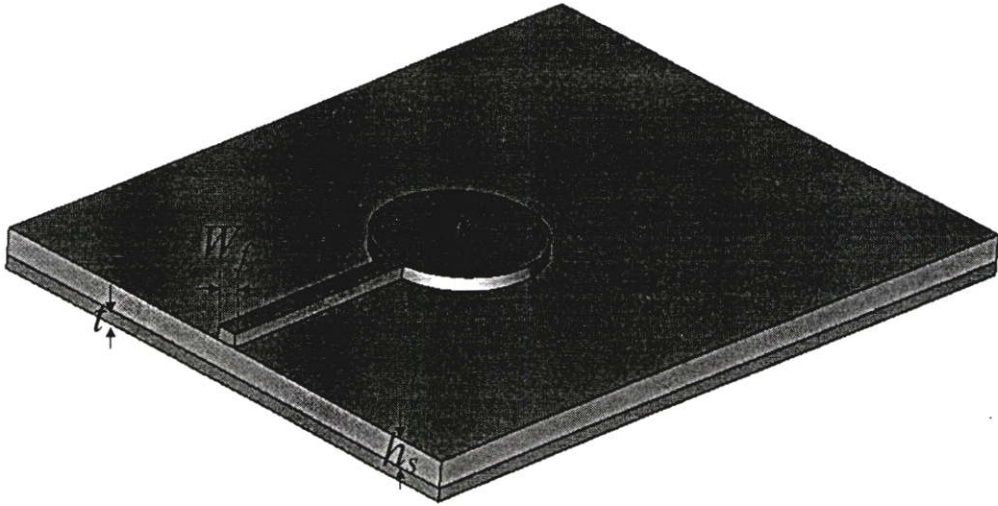
คำนวณหาค่า  $\epsilon_{eff}$  โดยการแทนค่า  $\epsilon_r = 4.4$ ,  $H = h_s = 0.8$  มิลลิเมตรและ  $W_f = W = 1.5$  มิลลิเมตรในสมการที่ (2.4)

$$\epsilon_{eff} = \frac{4.4 + 1}{2} + \frac{4.4 - 1}{2\sqrt{1 + 12\frac{0.8}{1.5}}} = 3.32$$

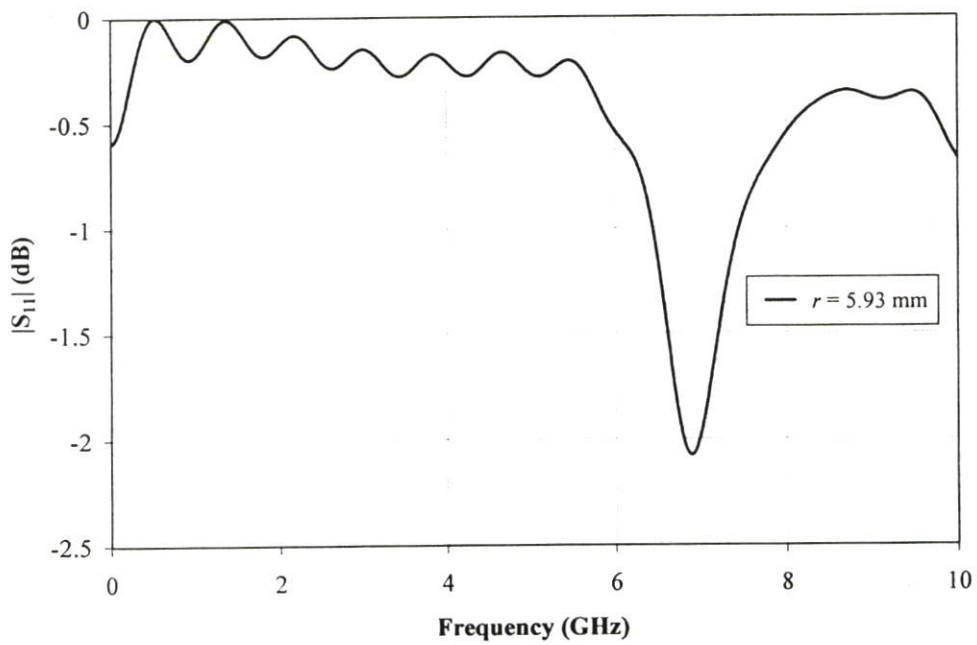
นำค่า  $\epsilon_{eff} = 3.32$ ,  $H = h_s = 0.8$  มิลลิเมตรและ  $W_f = W = 1.5$  มิลลิเมตรแทนลงในสมการที่ (2.3) ดังนี้

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{3.32}} \left\{ \frac{1.5}{0.8} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{1.5}{0.8} + 1.444\right) \right\}^{-1} = 50 \quad \text{โอห์ม}$$

ดังนั้นค่าของการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริปโดยมีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นรัศมี ( $r$ ) เท่ากับ 5.93 มิลลิเมตรและความกว้างเส้นไมโครสตริป ( $W_f$ ) เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร ความสูงของชั้นสเตรท ( $h_s$ ) เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร อยู่บนระนาบกราวด์ที่มีขนาดคอนันต์ ดังแสดงได้ดังรูป 3.2 และ 3.3



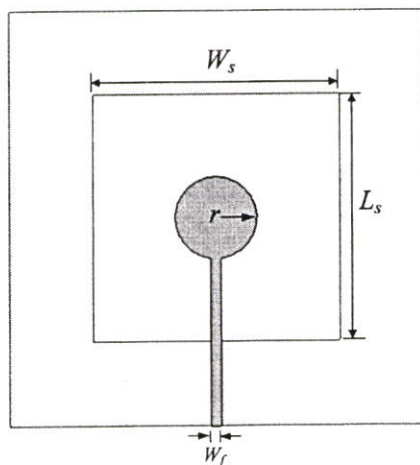
**รูปที่ 3.2** โครงสร้างของสายอากาศเริ่มต้น



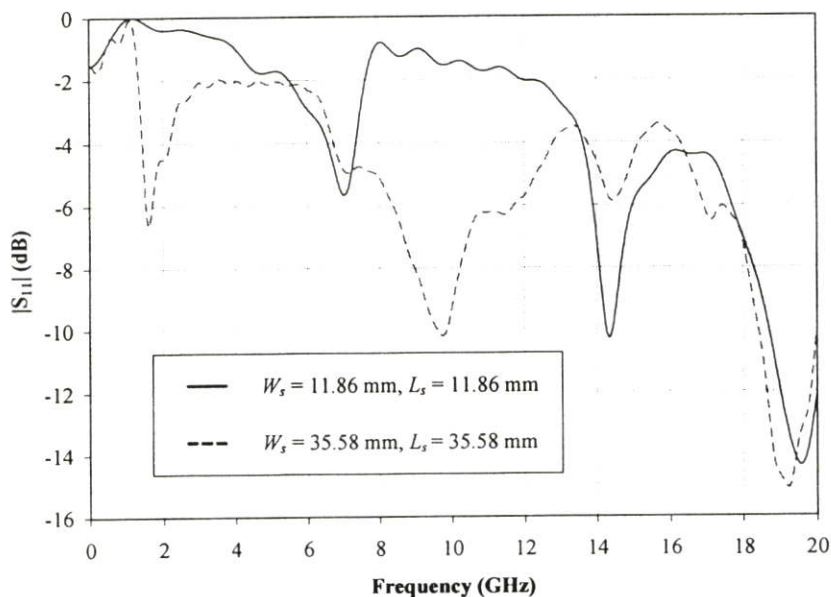
**รูปที่ 3.3** การออกแบบริศมี ( $r$ ) ที่ให้ความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 6.8 กิกะเฮิรตซ์

จากรูปที่ 3.3 นำค่าจากการคำนวณมาจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® เพื่อหาค่า  $|S_{11}|$  ซึ่งจากผลการจำลองแบบทำให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี

ขั้นตอนต่อไปใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® ทำการจำลองแบบจากโครงสร้างสายอากาศเริ่มต้นความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ เพื่อขยายช่วงกว้างความถี่ให้รองรับความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ โดยการเจาะระนาบกราวด์ให้เป็นช่องเปิดสี่เหลี่ยมเพื่อดูผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์เบนคัวิตซ์ โดยความกว้างเส้นไมโครสตริป  $W_f$  เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร และรัศมีวงกลม ( $r$ ) เท่ากับ 5.93 มิลลิเมตร ใช้การกำหนดค่าช่องเปิดสี่เหลี่ยมมีความกว้างเท่ากับ  $W_s$  และความยาวเท่ากับ  $L_s$  เป็นจำนวนเท่าของรัศมีวงกลม ( $r$ ) ดังรูปที่ 3.4

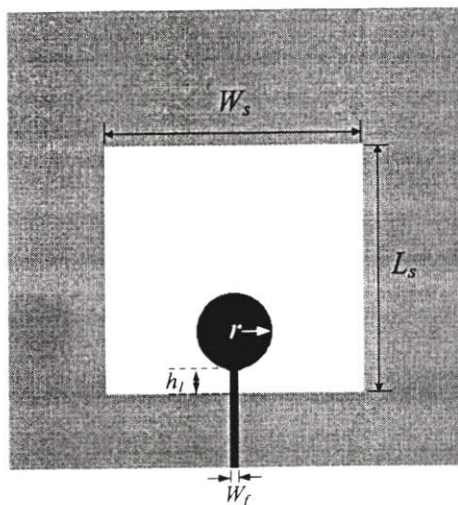


รูปที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่น ไม โน โทลวงกลม

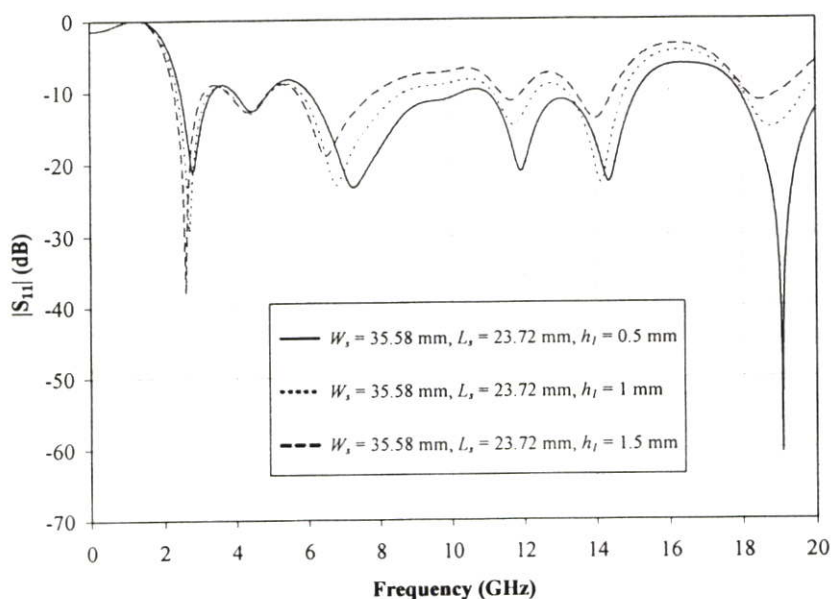


รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบค่าเบนคัวิตซ์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า  $W_s$  และ  $L_s$  เมื่อความกว้างเส้นไมโครสตริป  $W_f$  เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร

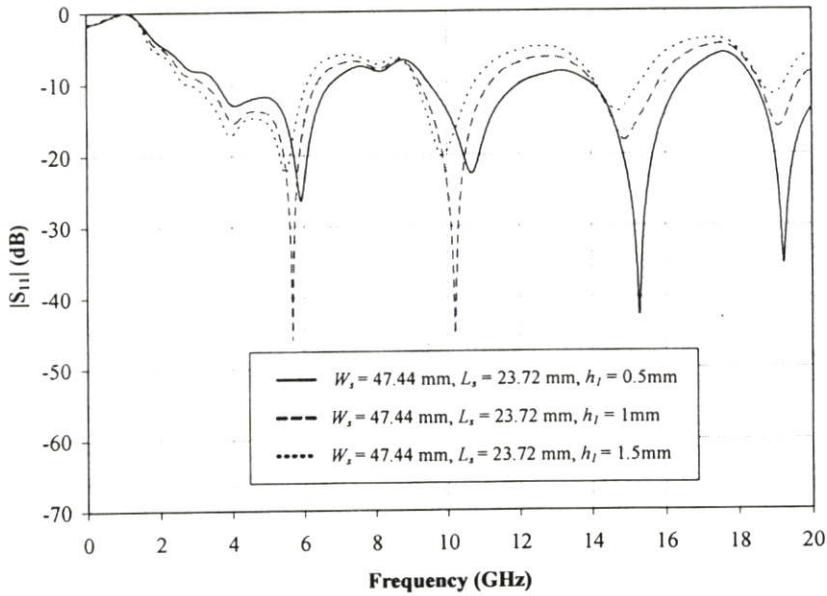
จากรูปที่ 3.5 ผลการจำลองแบบเมื่อเจาะช่องเปิดสี่เหลี่ยมในตำแหน่งกึ่งกลางของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมยังไม่สามารถเพิ่มอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ได้และค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB อยู่ในช่วงความถี่ 18-19 GHz เกกะเฮิร์ตซ์ซึ่งไม่อยู่ในช่วงความถี่ที่ต้องการ ดังนั้นขั้นตอนต่อไปจึงทำการปรับเลื่อนขอบช่องเปิดสี่เหลี่ยมชิดด้านล่างของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมและใช้การปรับระยะความสูง  $h$ , เพื่อดูผลกระทบต่ออิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมในการปรับความสูง  $h$ ,



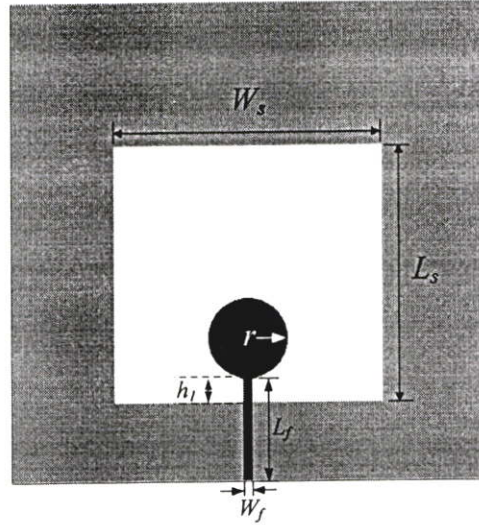
รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบค่าแบนด์วิดท์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า  $W_s$ ,  $L_s$  และ  $h$ , เมื่อความกว้างเส้นไมโครสตริป  $W_f$  เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร



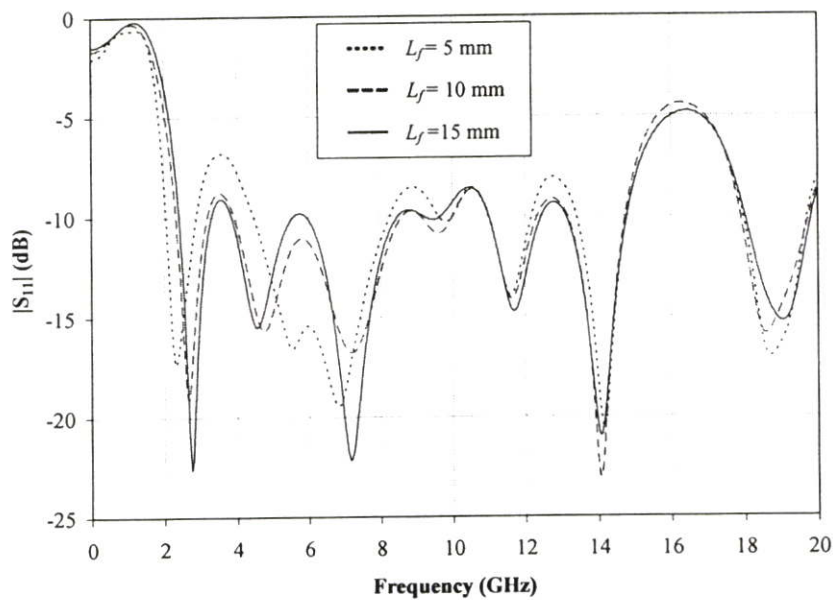
**รูปที่ 3.8** เปรียบเทียบค่าแบนด์วิดท์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า  $W_s$ ,  $L_s$  และ  $h_1$  เมื่อความกว้างเส้นไมโครสตริป  $W_f$  เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8 เมื่อทำการปรับค่าความกว้าง ( $W_s$ ) ความยาว ( $L_s$ ) และระยะ  $h_1$  ทำให้มีแนวโน้มของการปรับอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่กว้างขึ้น โดยจากรูปที่ 3.7 จากผลการจำลองแบบขนาดความกว้าง ความยาวและระยะห่างเท่ากับ 35.58 มิลลิเมตร, 23.72 มิลลิเมตรมีการปรับระยะห่างจาก 0.5 ถึง 1.5 มิลลิเมตรตามลำดับ ซึ่งระยะห่าง 1 มิลลิเมตรได้ให้ช่วงกว้างอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ในช่วง 5.8 ถึง 8.8 กิกะเฮิร์ตซ์และมีแนวโน้มของช่วงความถี่อื่นๆ มีค่าใกล้เคียงกับค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB ซึ่งจะสามารถปรับให้ความถี่ให้อยู่ในช่วงความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ได้ ส่วนรูปที่ 3.8 มีการปรับความกว้างให้เพิ่มมากขึ้นเท่ากับ 47.44 มิลลิเมตรโดยมีความยาวเท่าเดิม เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบรูปที่ 3.7 โดยเปรียบเทียบกับค่าการปรับระยะห่างค่าต่างๆ ผลการจำลองแบบในรูปที่ 3.8 มีแนวโน้มของความถี่ที่ห่างจากค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB ไม่ใกล้เคียงกว่าผลการจำลองแบบในรูปที่ 3.7

ดังนั้นในขั้นตอนต่อไปยังมีพารามิเตอร์ของความยาวเส้นไมโครสตริป ( $L_f$ ) ซึ่งตอนนี้มีขนาดเป็นอนันต์ จึงต้องหาค่าความยาวเส้นไมโครสตริป ( $L_f$ ) ให้มีความยาวจำกัด โดยประมาณค่าเริ่มต้นค่าความยาวเส้นไมโครสตริป จากจำนวนเท่าของรัศมีวงกลมและดูผลกระทบต่ออิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ และเลือกค่าขนาดช่องเปิดที่เหลื่อม  $W_s = 35.58$  มิลลิเมตร,  $L_s = 23.72$  มิลลิเมตรและความสูง  $h_1 = 1$  มิลลิเมตร จากผลการจำลองแบบในรูปที่ 3.7 ซึ่งมีแนวโน้มในการแมตซ์อิมพีแดนซ์ ต่ำกว่าขนาดช่องเปิดที่เหลื่อมและระยะความสูงค่าอื่นๆ ซึ่งการหาค่าความยาวเส้นไมโครสตริปดังรูปที่ 3.9



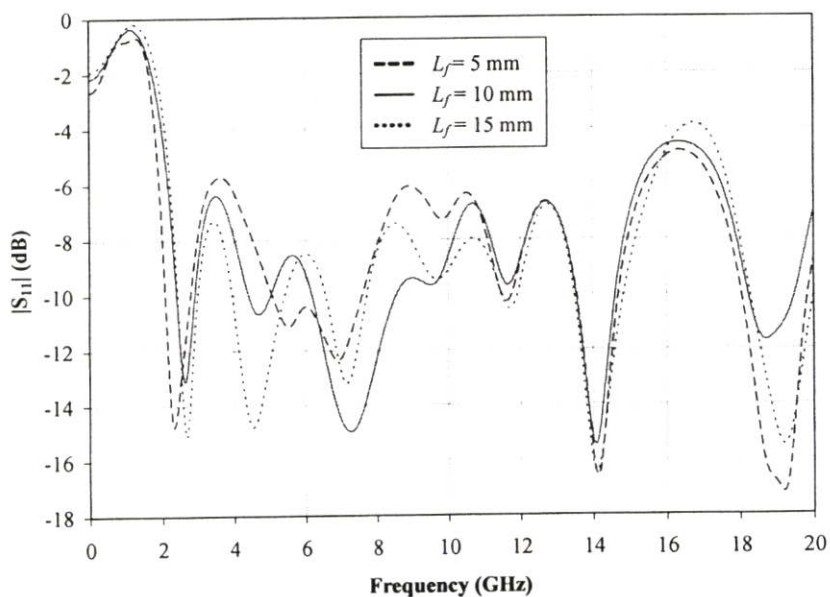
**รูปที่ 3.9** ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมในการปรับความยาวเส้นไมโครสตริป  $L_f$  มีความยาวจำกัด



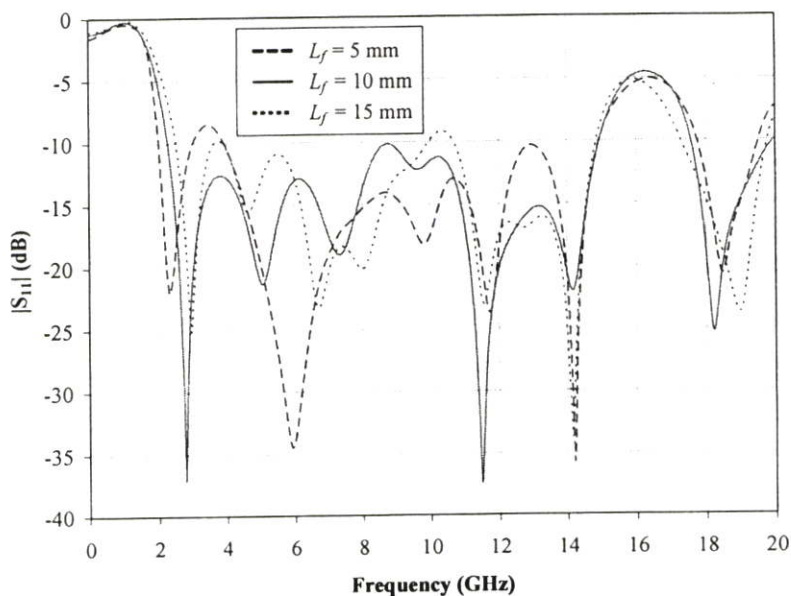
**รูปที่ 3.10** เปรียบเทียบค่าแบนด์วิดท์เมื่อปรับค่าความยาวเส้นไมโครสตริป  $L_f$  เมื่อความกว้างเส้นไมโครสตริป  $W_f$  เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 3.10 เมื่อปรับค่าความยาวเส้นไมโครสตริป  $L_f$  จากความยาว 5 ถึง 15 มิลลิเมตร จากผลการจำลองแบบมีการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกันในความยาวระยะต่างๆ และเมื่อนำค่ามาเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบที่ความยาวเส้นไมโครสตริปขนาดยาวเป็นอนันต์มีแนวโน้มของ

การแมตซ์อิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์มีความคล้ายคลึงกัน แต่มีค่าพารามิเตอร์ของเส้นไมโครสตริปที่สามารถทำการปรับได้คือค่าความกว้าง ( $W_f$ ) ที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร ทำการปรับค่าตั้งแต่ 0.5 มิลลิเมตรถึง 1.5 มิลลิเมตร กำหนดให้ค่าขนาดช่องเปิดสี่เหลี่ยมและความสูงไว้คงที่



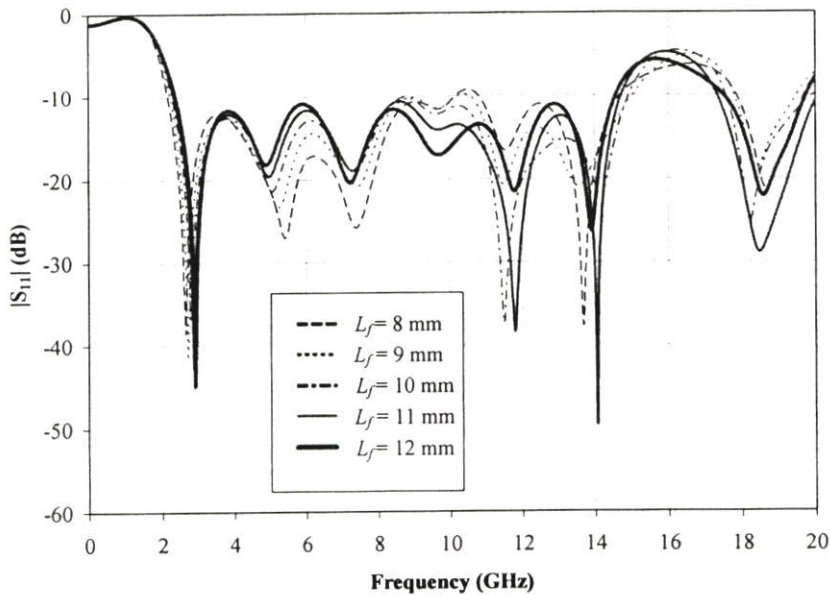
**รูปที่ 3.11** เปรียบเทียบค่าแบนด์วิดธ์เมื่อปรับค่าความยาวเส้นไมโครสตริป  $L_f$  เมื่อความกว้างเส้นไมโครสตริป  $W_f$  เท่ากับ 2 มิลลิเมตร



**รูปที่ 3.12** เปรียบเทียบค่าแบนด์วิดธ์เมื่อปรับค่าความยาวเส้นไมโครสตริป  $L_f$  เมื่อความกว้างเส้นไมโครสตริป  $W_f$  เท่ากับ 1 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12 การปรับความกว้างเส้นไมโครสตริป  $W_f$  เท่ากับ 1 มิลลิเมตร และ 2 มิลลิเมตรตามลำดับ จากผลการจำลองแบบการเพิ่มความกว้างของเส้นไมโครสตริปเป็น 2 มิลลิเมตรไม่สามารถให้ค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ที่ต้องการได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบค่าความกว้างเส้นไมโครสตริป  $W_f$  เท่ากับ 1 มิลลิเมตร สามารถแมตซ์อิมพีแดนซ์และขยายอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ทำให้ค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB ได้ตลอดช่วง 3.1-10.6 GHz แสดงว่าช่องเปิดสี่เหลี่ยมมีผลกระทบอย่างมากต่ออิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ทำให้เปลี่ยนแปลงไปจากผลการคำนวณทางทฤษฎีและมีผลต่อการเพิ่มแบนด์วิดท์ได้เมื่อมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้มีความเหมาะสม

เมื่อได้ความกว้างเส้นไมโครสตริป  $W_f$  เท่ากับ 1 มิลลิเมตร นำค่าที่ได้มาปรับค่าความยาวเส้นไมโครสตริป  $L_f$  โดยละเอียดอีกครั้ง เพื่อดูผลกระทบการแมตซ์อิมพีแดนซ์และช่วงความกว้างแบนด์วิดท์ที่เหมาะสม



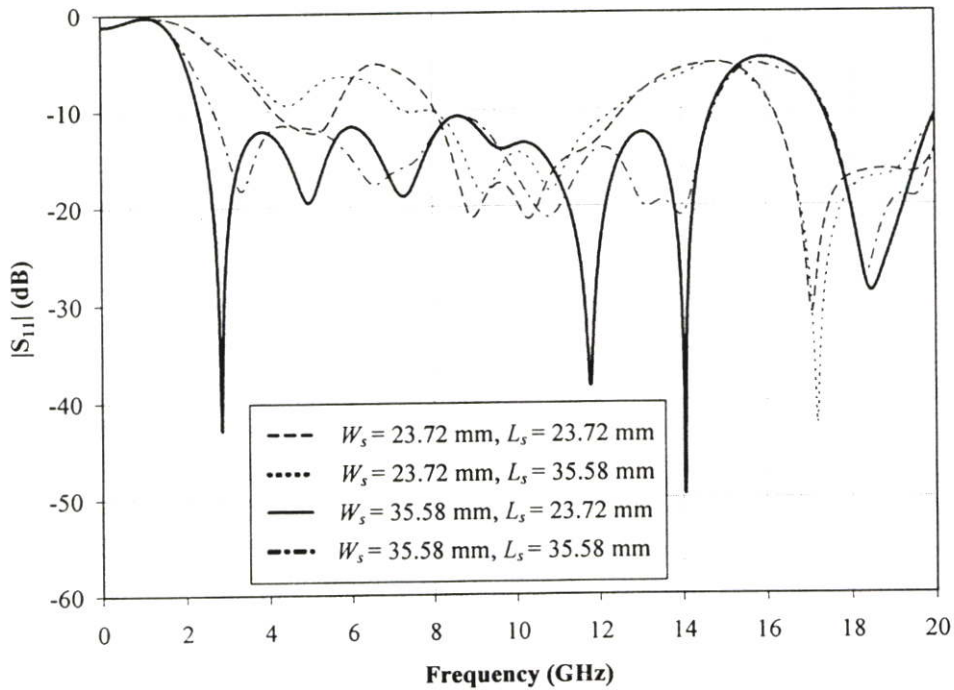
**รูปที่ 3.13** เปรียบเทียบค่าแบนด์วิดท์เมื่อปรับค่าความยาวเส้นไมโครสตริป  $L_f$  เมื่อความกว้างเส้นไมโครสตริป  $W_f$  เท่ากับ 1 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 3.13 เมื่อปรับค่าความยาวเส้นไมโครสตริป  $L_f$  จาก 8 ถึง 12 มิลลิเมตรและที่ความกว้างเส้นไมโครสตริป  $W_f$  เท่ากับ 1 มิลลิเมตร สามารถได้ค่าความยาวเส้นไมโครสตริป  $L_f$  ในการแมตซ์อิมพีแดนซ์ได้ 2 ค่า คือ 11 และ 12 มิลลิเมตร แต่เลือกความยาวเส้นไมโครสตริป  $L_f$  ที่สั้นเพื่อทำให้อากาศมีขนาดเล็ก ดังนั้นจึงเลือกความยาวเส้นไมโครสตริปที่ 11 มิลลิเมตร

จากนั้นจึงหาความสัมพันธ์ของช่องเปิดสี่เหลี่ยมต่อรัศมีวงกลม ( $r$ ) โดยเพิ่มขนาดช่องเปิดสี่เหลี่ยมเป็นจำนวนเท่าของรัศมีวงกลมเมื่อ  $h_f = 1$  mm และความยาวเส้นไมโครสตริป  $L_f = 11$  mm ดังตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.14

**ตารางที่ 3.1** ค่าความกว้างและความยาวของช่องเปิดสี่เหลี่ยม

ความกว้างเส้นไมโครสตริป ( $W_f$ ) (mm)	ความกว้าง ( $W_s$ ) (mm)	ความยาว ( $L_s$ ) (mm)	ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)	แบนด์วิดท์จากการจำลอง (GHz)
1	23.72	23.72	4.14	4.14-5.61
1	23.72	35.58	7.27	7.27-12.45
1	35.58	23.72	2.32	2.32-14.70
1	35.58	35.58	2.69	2.69-14.75



**รูปที่ 3.14** เปรียบเทียบค่าแบนด์วิดท์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า  $W_s$  และ  $L_s$  เมื่อความกว้างเส้นไมโครสตริปเท่ากับ 1 มิลลิเมตร

จากตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.14 ความกว้างเส้นไมโครสตริปมีความกว้างเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ให้ช่วงอิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์อยู่ในช่วง 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ได้นั้น โดยช่องเปิดสี่เหลี่ยมมีขนาดความกว้าง ( $W_s$ ) = 35.58 มิลลิเมตร และความยาว  $L_s$  = 23.72 มิลลิเมตร ซึ่งความสัมพันธ์ช่องเปิดสี่เหลี่ยมขนาดความกว้างและความยาวเป็นจำนวนเท่าของรัศมีวงกลม ( $r$ ) แสดงได้สมการดังนี้

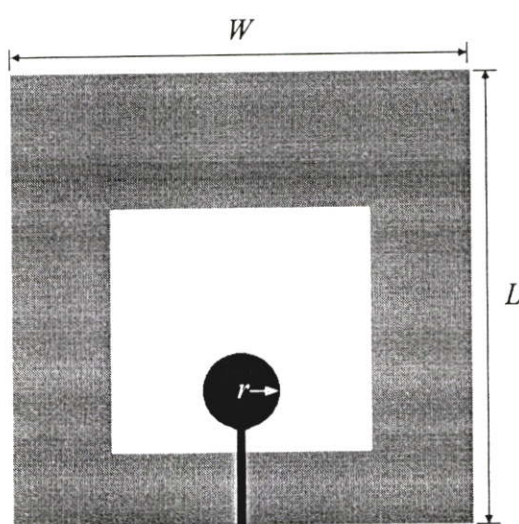
$$W_s = N_w \times r \quad \text{เมื่อ } N_w \text{ เป็นจำนวนนับ} \quad (3.1)$$

$$L_s = N_L \times r \quad \text{เมื่อ } N_L \text{ เป็นจำนวนนับ} \quad (3.2)$$

จากตารางที่ 3.1 หากความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าง และความยาวที่ทำให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์สูงสุดได้ ดังต่อไปนี้

$$\frac{W_s}{L_s} = 1.5 \quad \text{เท่า} \quad \text{เมื่อ } N_w < 12 \quad \text{และ } N_L < 12 \quad \text{ที่รัศมี } (r) = 5.93 \text{ มิลลิเมตร}$$

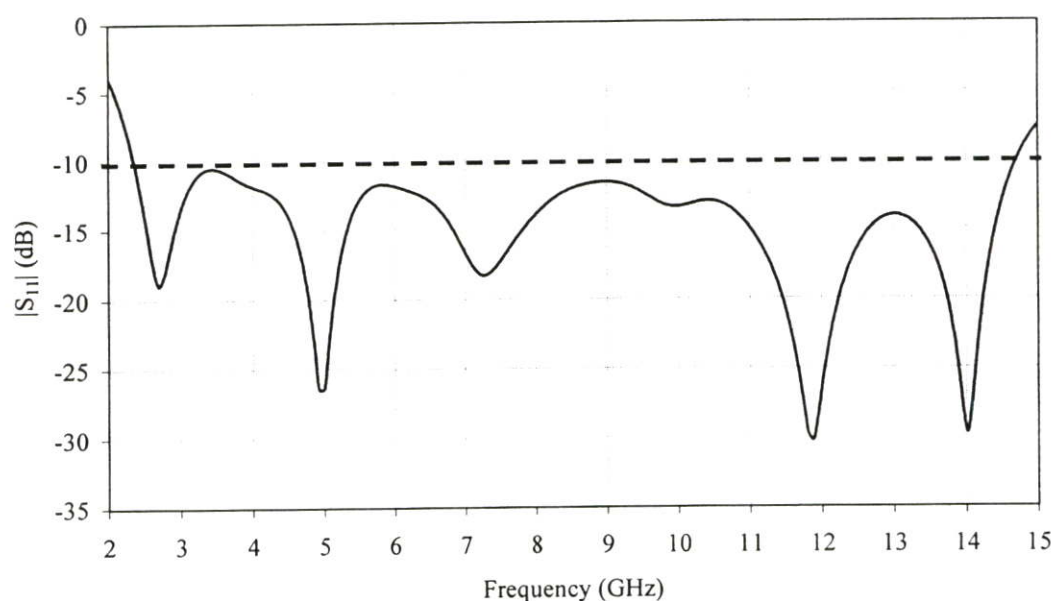
ส่วนค่าความสัมพันธ์ของค่าความกว้าง ( $W$ ) และความยาว ( $L$ ) ของขนาดแผ่นวงจรพิมพ์นั้น ในทางทฤษฎีมีขนาดอนันต์ ซึ่งไม่มีในทางปฏิบัติจริง ดังนั้นในการจำลองแบบจะใช้แผ่นวงจรพิมพ์ขนาดใหญ่จาก  $150 \times 150$  ตารางมิลลิเมตร และทำการลดขนาดเพื่อดูผลกระทบของอิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์ เพื่อหาค่าขนาดแผ่นวงจรพิมพ์ที่เล็กและให้คุณสมบัติอัตราขยายและทิศทางการแพร่กระจายคลื่นที่ตรงตามวัตถุประสงค์และเป้าหมายที่ต้องการ โดยเลือกค่าจากตารางที่ 3.1 ความกว้าง ( $W_s$ ) และความยาว ( $L_s$ ) เท่ากับ 35.58 มิลลิเมตร และ 23.72 มิลลิเมตรตามลำดับ



รูปที่ 3.15 ค่าพารามิเตอร์ในการปรับขนาดแผ่นวงจรพิมพ์

**ตารางที่ 3.2** ค่าความกว้างและความยาวของแผ่นวงจรพิมพ์

ความกว้าง ( $W$ ) (mm)	ความยาว ( $L$ ) (mm)	ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)	แบนด์วิดท์จากผลการจำลอง (GHz)
150	150	2.25	2.25-14.70
120	120	2.25	2.25-14.70
80	80	2.34	2.34-14.70
70	70	2.34	2.34-14.70
60	60	2.34	2.34-14.70
50	50	2.16	2.16-14.70
40	40	1.86	1.86-2.11



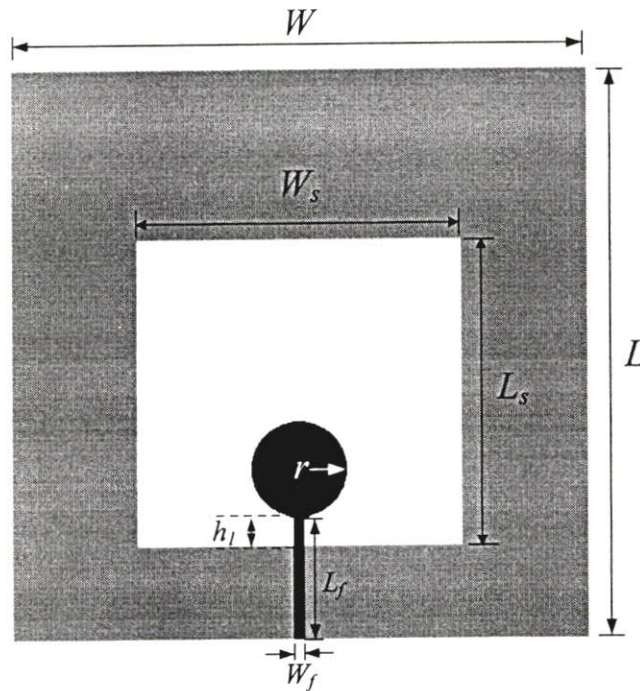
**รูปที่ 3.16** แสดงค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB ได้ช่วงความถี่ 2.34-14.70 กิกะเฮิรตซ์ของสายอากาศขนาด  $60 \times 60$  ตารางมิลลิเมตร

จากรูปที่ 3.15 แสดงค่าพารามิเตอร์ในการปรับค่าความกว้าง ( $W$ ) และความยาว ( $L$ ) ของแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งตารางที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าขนาดของแผ่นวงจรพิมพ์มีค่าความกว้างและความยาวในช่วงที่มีขนาดแผ่นที่ใหญ่จากขนาด 150 มิลลิเมตรลดลงถึง 50 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ใกล้เคียงกันและยังได้ช่วงความถี่อยู่ในช่วง 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ แต่เมื่อแผ่นวงจรพิมพ์มีขนาดลดลงถึง 40 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กและเข้าไปใกล้กับช่องเปิดสี่เหลี่ยมมาก ทำให้ความถี่เกิดการเปลี่ยนแปลงและไม่ได้ช่วงความถี่ตามที่ต้องการและรูปที่ 3.16 แสดงค่า  $|S_{11}|$

ของสายอากาศขนาด  $60 \times 60$  ตารางมิลลิเมตร จากตารางที่ 3.2 สามารถรองรับความถี่ 2.34-14.70 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งในหัวข้อถัดไปจะนำค่าพารามิเตอร์ไปจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในหัวข้อถัดไป

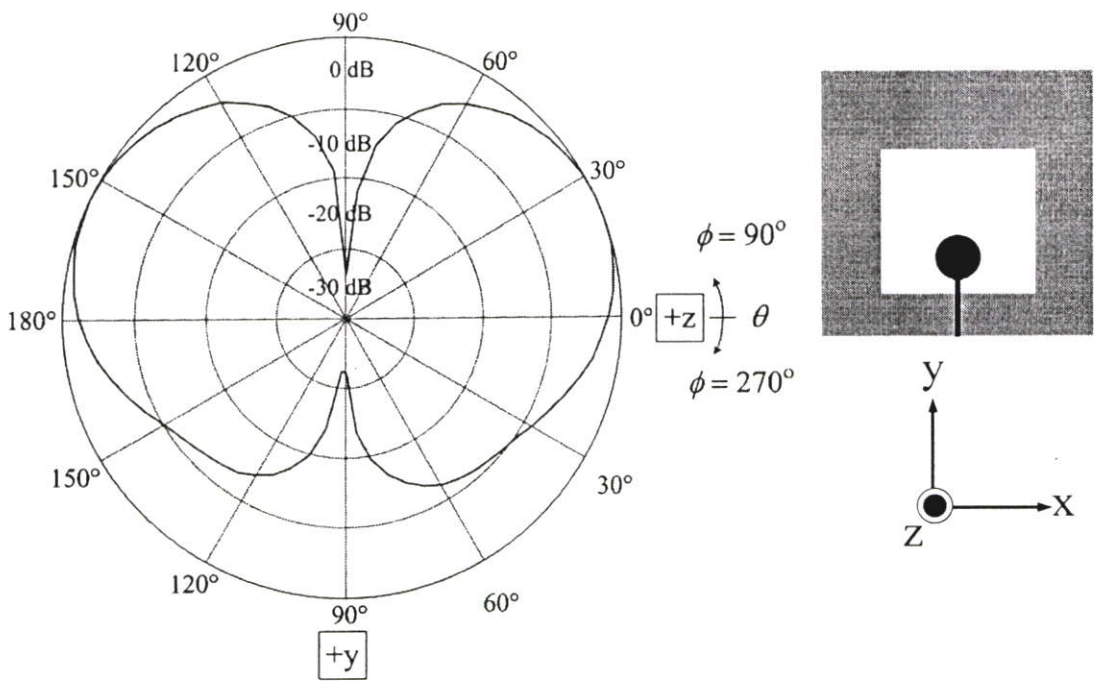
### 3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

จากการจำลองแบบในหัวข้อที่ 3.3 ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศโดยมีความกว้าง  $W$  และความยาว  $L$  ของแผ่นวัสดุเท่ากับ  $60 \times 60$  ตารางมิลลิเมตร ค่ารัศมี  $r$  เท่ากับ 5.93 มิลลิเมตร ความยาวเส้นไมโครสตริป  $L_f$  เท่ากับ 11 มิลลิเมตร ความสูง  $h_f$  เท่ากับ 1 มิลลิเมตร มีความกว้าง  $W_s$  และความยาว  $L_s$  ของช่องเปิดสี่เหลี่ยมเท่ากับ 35.58 มิลลิเมตร และ 23.72 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.17

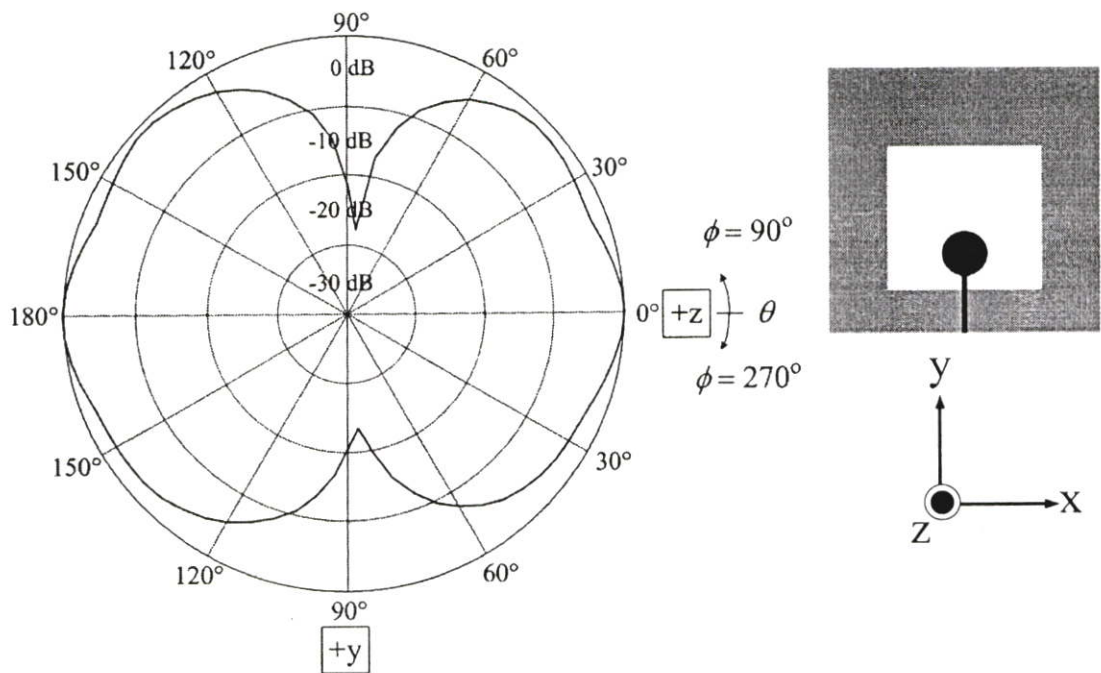


รูปที่ 3.17 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ

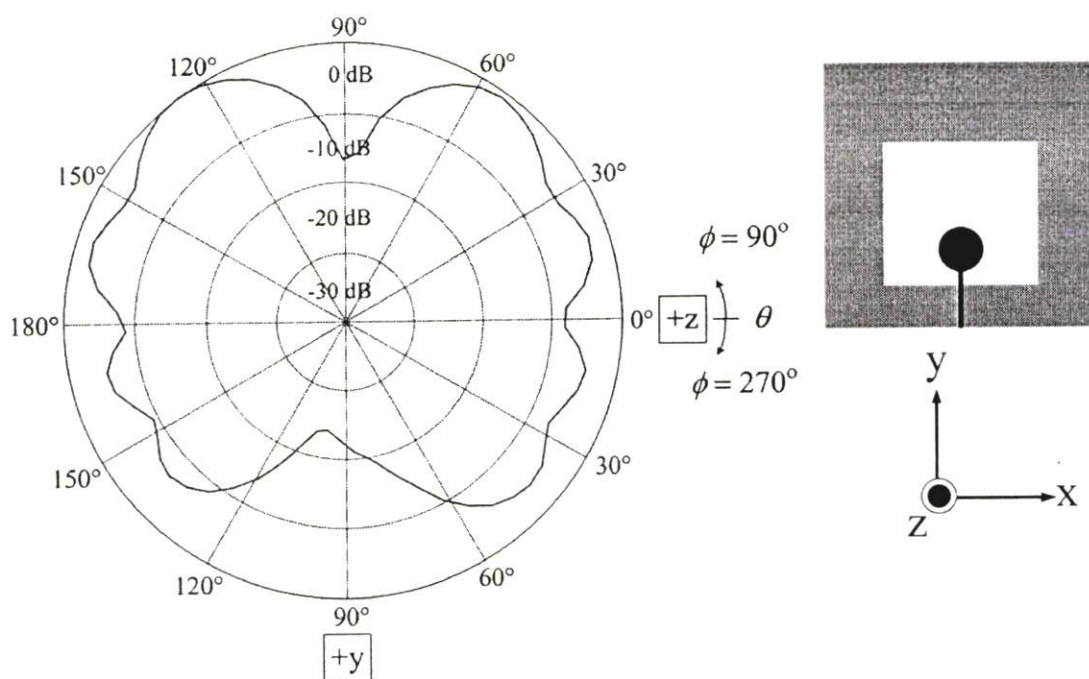
นำค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดไปจำลองหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) เนื่องจากช่วงความถี่มีช่วงกว้างมากซึ่งครอบคลุมช่วง 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ ดังนั้นในการจำลองแบบจึงพิจารณาช่วงความถี่เริ่มต้นความถี่กลางและความถี่สุดท้าย คือความถี่ 3.1, 6.8 และ 10.6 กิกะเฮิรตซ์



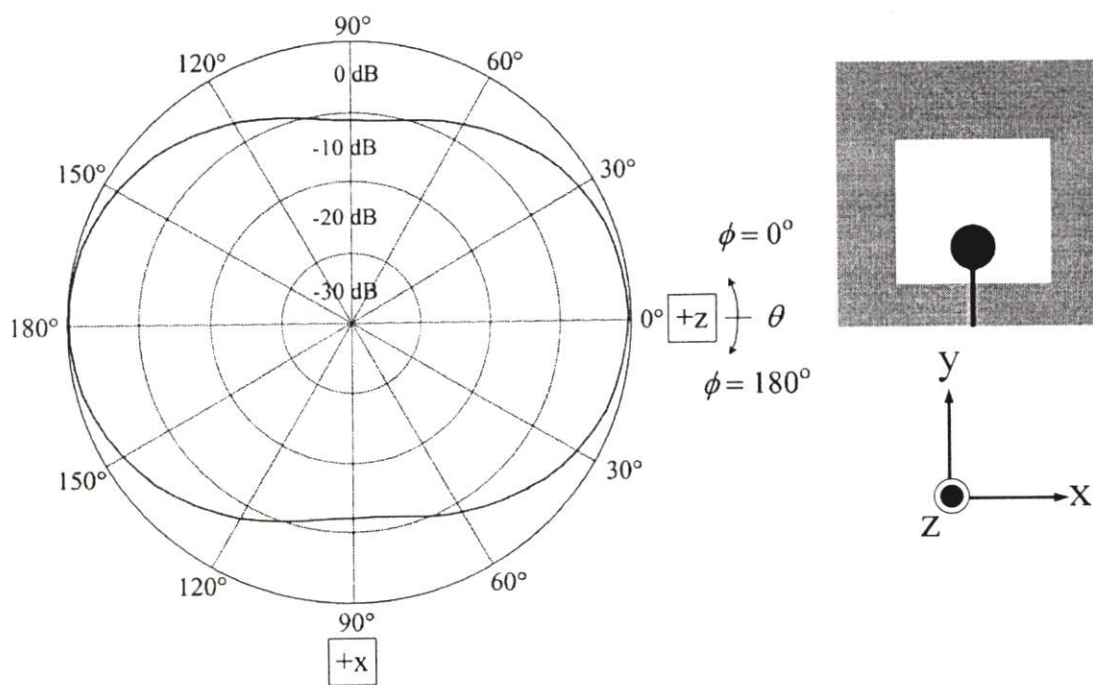
รูปที่ 3.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



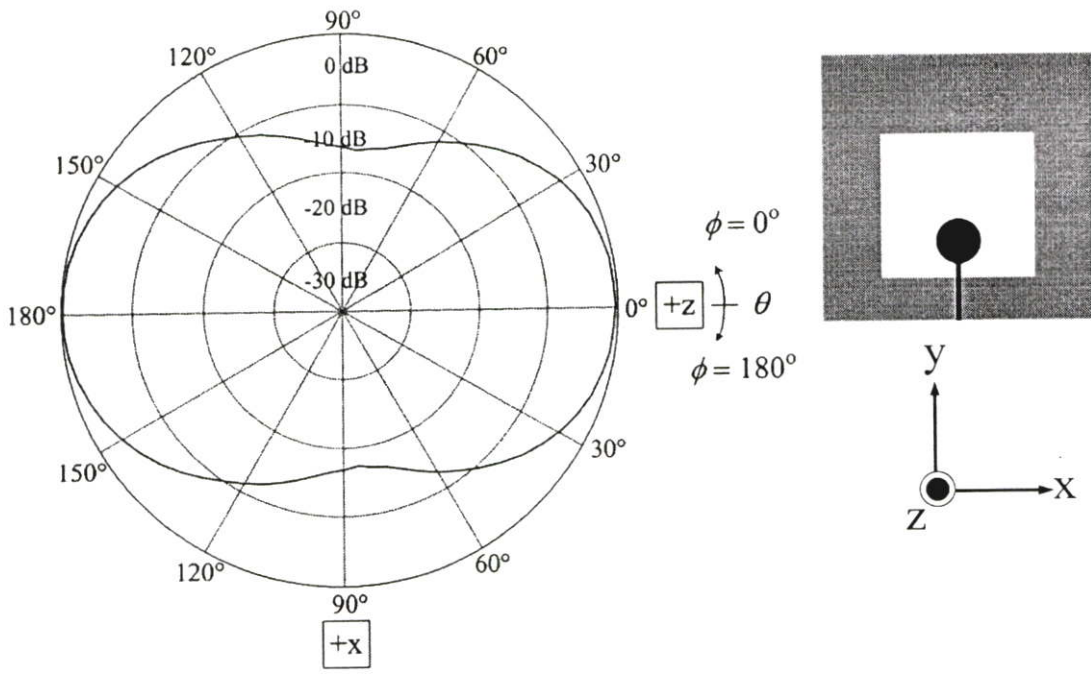
รูปที่ 3.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



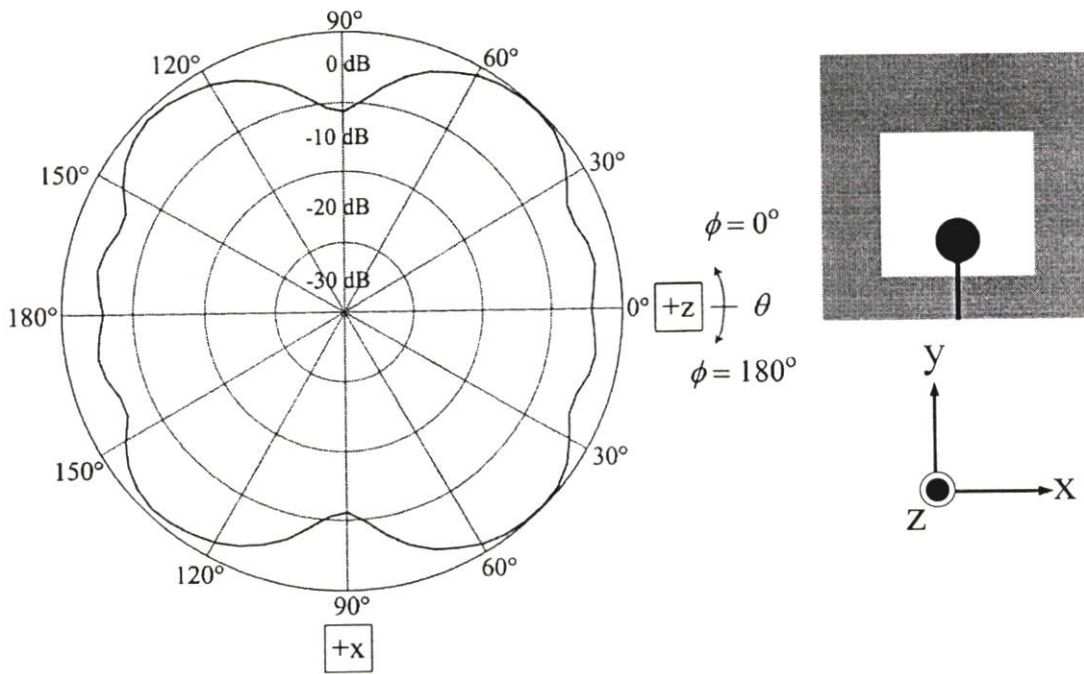
รูปที่ 3.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก

วิเคราะห์ผลจากรูปที่ 3.18 รูปที่ 3.19 และรูปที่ 3.20 พิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า โดยที่ความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์และ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสองทิศทาง ส่วนในช่วงความถี่สูง 10.6 กิกะเฮิรตซ์ไม่ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง และรูปที่ 3.21 รูปที่ 3.22 และรูปที่ 3.23 พิจารณาการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางที่ความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์และ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ ส่วนช่วงความถี่สูง 10.6 กิกะเฮิรตซ์ยังไม่ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง ซึ่งจะทำให้การปรับปรุงสมรรถนะของสายอากาศในบดัดไป และสามารถสรุปค่าลำคลื่นสูงสุด (Beampeak) และความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) ดังตารางที่ 3.3

**ตารางที่ 3.3** ค่ามุมที่ลำคลื่นสูงสุดและความกว้างลำคลื่น

ความถี่	ระนาบสนามไฟฟ้า		ระนาบสนามแม่เหล็ก	
	มุมที่ลำคลื่นสูงสุด (องศา)	ความกว้างลำคลื่น (องศา)	มุมที่ลำคลื่นสูงสุด (องศา)	ความกว้างลำคลื่น (องศา)
3.1 GHz	160	58	180	71
6.8 GHz	180	103	180	59
10.6 GHz	125	31	45	38

### 3.5 บทสรุป

ก่อนการจำลองแบบต้องคำนวณหาค่าเริ่มต้นของสายอากาศโดยทำการคำนวณหาค่ารัศมีของสายอากาศและค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะของการป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริป แล้วจึงนำมาจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® ในการปรับค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์โดยใช้เทคนิคการปรับความกว้างและความยาวของช่องเปิดสี่เหลี่ยมในระนาบกราวด์ และมีการปรับค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม ซึ่งสามารถทำให้ได้ความถี่อยู่ในช่วง 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ได้ คือ ความกว้าง  $W$  และความยาว  $L$  ของแผ่นวัสดุเท่ากับ  $60 \times 60$  มิลลิเมตร ค่ารัศมี  $r$  เท่ากับ 5.93 มิลลิเมตร ความยาวเส้นไมโครสตริป  $L_f$  เท่ากับ 11 มิลลิเมตร ความสูง  $h_f$  เท่ากับ 1 มิลลิเมตร มีความกว้าง  $W_f$  และความยาว  $L_f$  ของช่องเปิดสี่เหลี่ยมเท่ากับ 35.58 มิลลิเมตร และ 23.72 มิลลิเมตร และนำค่าดังกล่าวมาจำลองผลเพื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นซึ่งมีทิศทางการแพร่กระจายแบบสองทิศทางในช่วงความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ถึงความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ แต่ยังไม่ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในช่วงความถี่สูงที่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

## บทที่ 4

# การปรับปรุงสมรรถนะของสายอากาศ

### 4.1 บทนำ

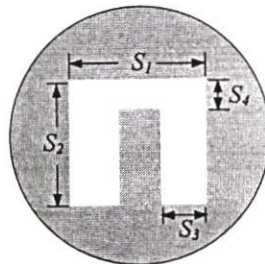
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการปรับปรุงโครงสร้างสายอากาศ โดยนำค่าพารามิเตอร์ในบทที่ 3 มาปรับเปลี่ยน โครงสร้าง ซึ่งสามารถทำให้สายอากาศมีคุณสมบัติให้มีข้อดีและลดข้อเสียของสายอากาศให้ลดลง และมีความเหมาะสมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานแต่ละประเภทต่างๆ ได้ดีขึ้น

### 4.2 การปรับปรุงสมรรถนะของสายอากาศ

การออกแบบในบทที่ 3 จากผลการวิเคราะห์ทำให้ทราบถึงข้อดีและข้อเสียของสายอากาศ เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการแก้ไขจุดบกพร่องและพัฒนาสายอากาศให้มีสมรรถนะให้ดีขึ้น ซึ่งสามารถปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศให้ได้ช่วงความถี่ที่ต้องการ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไม่ให้เกิดพื้นในในช่วงความถี่สูง ซึ่งสามารถปรับปรุงโครงสร้างสายอากาศได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

#### 4.2.1 สายอากาศตัดความถี่ (Band-Notched)

เนื่องจากย่านความถี่กว้างยิ่งยวดมีการรองรับความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีช่วงความถี่ที่ไปซ้อนทับ ในระบบ HIPERLAN ความถี่ 5.150-5.350 กิกะเฮิร์ตซ์ และระบบ Wireless LAN ความถี่ 5.725-5.825 กิกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดความถี่รบกวนกันจึงออกแบบสายอากาศไม่ให้งานในช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการ เรียกว่า ตัดความถี่ (Band-Notched) หรือ กำจัดความถี่ (Band-Rejection) ซึ่งการออกแบบยังคง โครงสร้างเดิมไว้เหมือนในบทที่ 3 แต่มีการปรับปรุงและออกแบบโดยเจาะร่องรูปตัวยูลงบนสายอากาศไมโครสตริปวงกลมดังรูปที่ 4.1

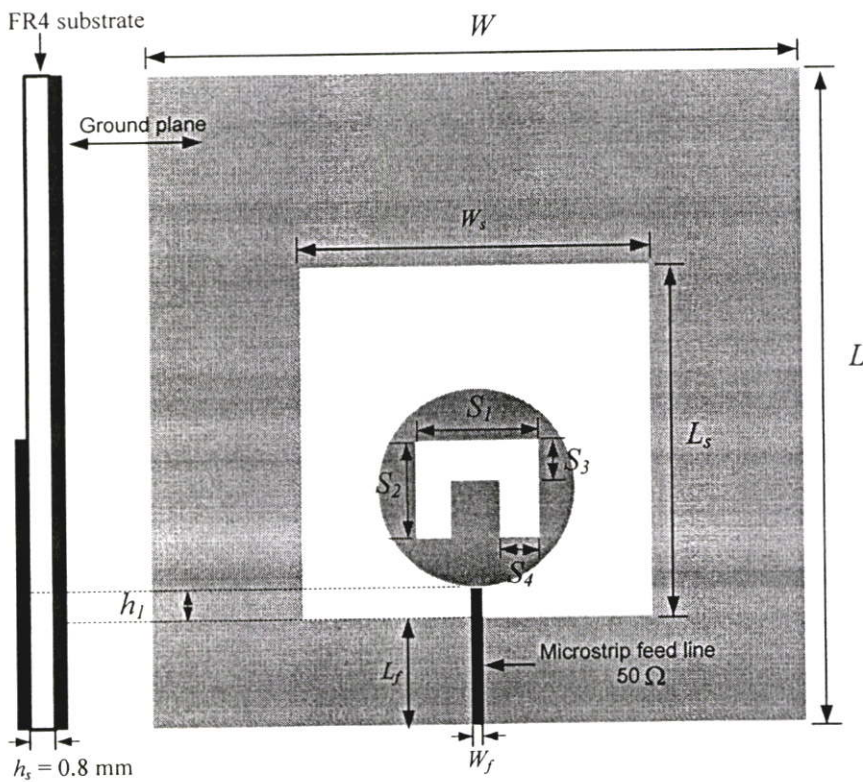


รูปที่ 4.1 โครงสร้างส่วนของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีร่องรูปตัวยู

โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่ออกแบบดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยมีค่าพารามิเตอร์  $S_1$  เท่ากับความกว้างร่องรูปตัวยู,  $S_2$  เท่ากับความยาวร่องรูปตัวยู,  $S_3$  เท่ากับความกว้างแขนรูปตัวยูและ  $S_4$  เท่ากับความกว้างฐานของร่องรูปตัวยู กำหนดค่าเริ่มต้นดังตารางที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1** ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของร่องรูปตัวยู

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
$S_1$	4
$S_2$	6
$S_3$	1
$S_4$	1

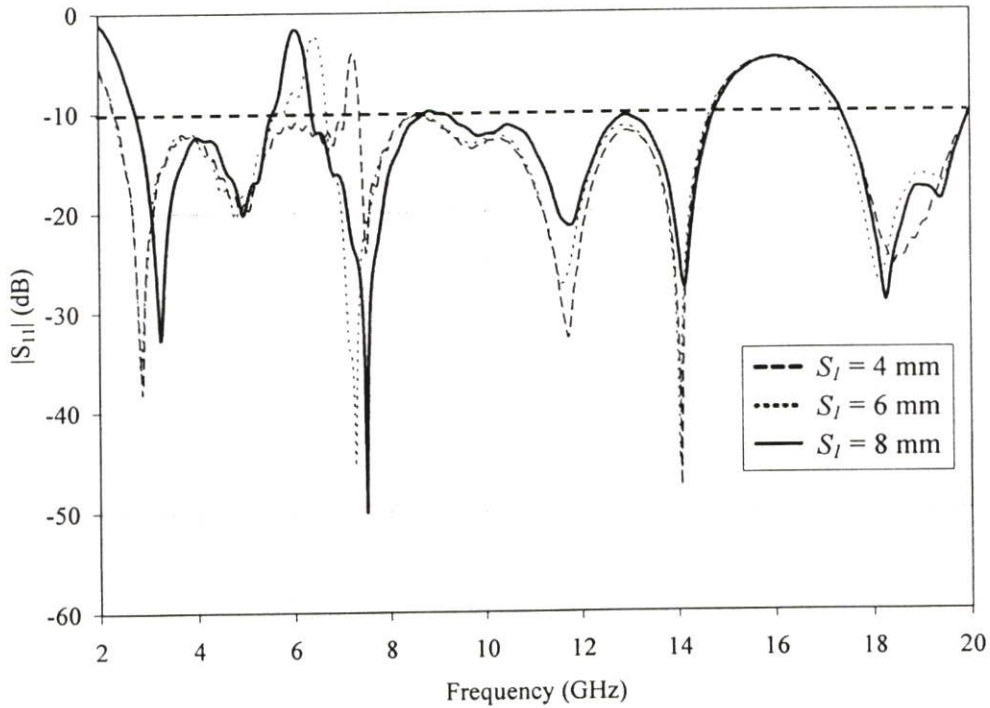


**รูปที่ 4.2** โครงสร้างสายอากาศตัดความถี่

จากรูป 4.2 โครงสร้างของสายอากาศ Band-Notched ยังคงใช้ค่าที่คำนวณได้ในบทที่ 3 คือ ค่าความกว้าง  $W_s$  และความยาว  $L_s$  ของช่องเปิดสี่เหลี่ยมเท่ากับ 35.58 มิลลิเมตรและ 23.72 มิลลิเมตร ความกว้าง  $W$  และความยาว  $L$  ของแผ่นไดอิเล็กทริกเท่ากับ  $60 \times 60$  ตารางมิลลิเมตร ค่ารัศมี  $r$  เท่ากับ 5.93 มิลลิเมตร ความยาวเส้นไมโครสตริป  $L_f$  เท่ากับ 11 มิลลิเมตรและความสูง

$h_1$  เท่ากับ 1 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์ที่เพิ่มเข้ามานั้นคือค่า  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  และ  $S_4$  ซึ่งต้องทำการจำลองแบบเพื่อวิเคราะห์ต่อไป

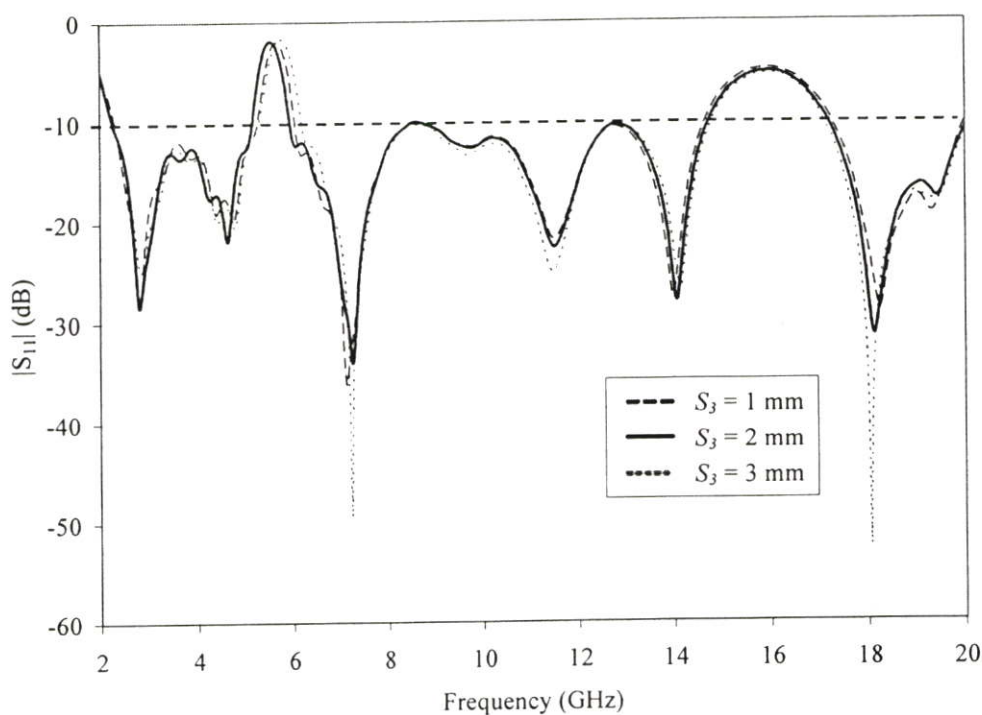
เริ่มต้นโดยทำการจำลองแบบโดยปรับค่าความกว้างรวมร่องรูปตัวยู ( $S_1$ ) โดยปรับเพิ่มขึ้นครั้งละ 2 มิลลิเมตร โดยเริ่มต้นจาก 4 มิลลิเมตรถึง 8 มิลลิเมตร ส่วนค่าความยาวรวมร่องรูปตัวยู ( $S_2$ ), ความกว้างแขนรูปตัวยู ( $S_3$ ) และความกว้างฐานของร่องรูปตัวยู ( $S_4$ ) มีค่าตามตารางที่ 4.1 ซึ่งได้ผลการจำลองดังรูปที่ 4.3



**รูปที่ 4.3** ผลการจำลองค่า  $|S_{11}|$  เมื่อเปลี่ยนค่า  $S_1$

จากรูปที่ 4.3 เมื่อมีการปรับค่าความกว้างรวมร่องรูปตัวยูทำให้ค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB เมื่อพิจารณาผลจากการจำลองแบบค่าความกว้างรวมร่องรูปตัวยูมีความยาวเพิ่มมากขึ้นจาก 4 มิลลิเมตร ถึง 8 มิลลิเมตร ทำให้สายอากาศตัดความถี่ช่วงต่ำลง โดยค่าความกว้างรวมร่องรูปตัวยูเท่ากับ 8 มิลลิเมตร ทำให้สายอากาศตัดความถี่อยู่ในช่วง 5.22-6.05 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งยังไม่สามารถครอบคลุมความถี่ช่วง 5.15-5.82 กิกะเฮิรตซ์

ดังนั้นจึงทำการปรับค่าพารามิเตอร์และผลการจำลองค่าโดยปรับความกว้างแขนรูปตัวยู ( $S_3$ ) และดูผลกระทบของค่า  $|S_{11}|$  กับความถี่ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.4



**รูปที่ 4.4** ผลการจำลองค่า  $|S_{11}|$  เมื่อเปลี่ยนค่า  $S_3$

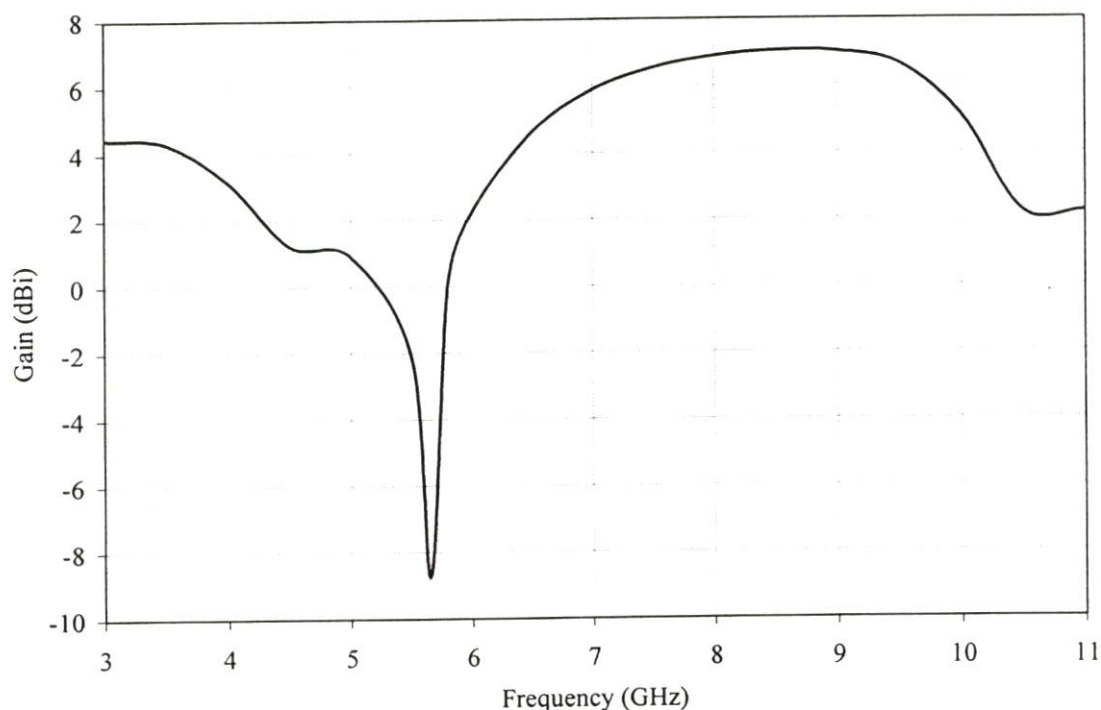
จากรูปที่ 4.4 เมื่อมีการปรับค่าความกว้างแขนรูปตัวยู เมื่อพิจารณาผลจากการจำลองแบบค่าความกว้างแขนรูปตัวยู ที่มีความกว้างเพิ่มมากขึ้นจาก 1 มิลลิเมตรถึง 3 มิลลิเมตร ทำให้ช่วงความถี่ได้ค่าสายอากาศตัดความถี่ช่วงความถี่ที่ต่ำลง โดยค่าความกว้างแขนรูปตัวยูเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ทำให้ได้ค่าสายอากาศตัดความถี่อยู่ในช่วงความถี่ 5.13-5.96 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งครอบคลุมความถี่ช่วง 5.15-5.82 กิกะเฮิรตซ์ได้

ดังนั้นจากการจำลองทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์  $S_1, S_2, S_3$  และ  $S_4$  มีค่าตามตารางที่ 4.2

**ตารางที่ 4.2** ค่าพารามิเตอร์ของร่องรูปตัวยู

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
$S_1$	8
$S_2$	6
$S_3$	2
$S_4$	1

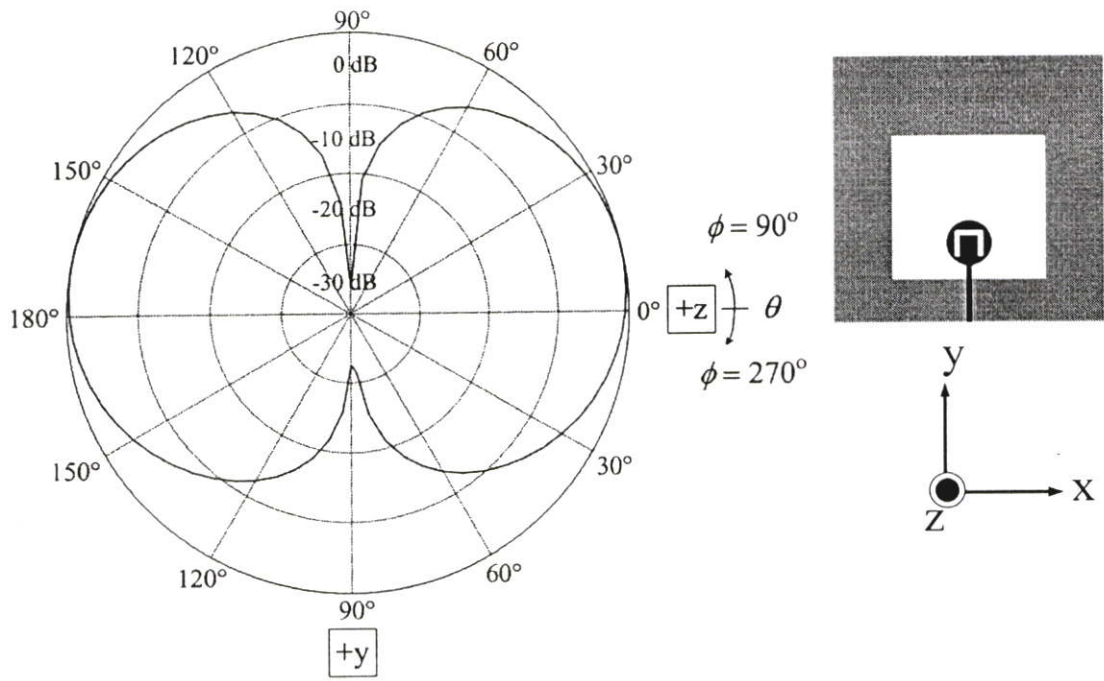
นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาจำลองแบบเพื่อวิเคราะห์อัตราขยาย (Gain) ในสายอากาศตัดความถี่ ช่วง 5.13-5.96 กิกะเฮิร์ตซ์ ดังรูปที่ 4.5



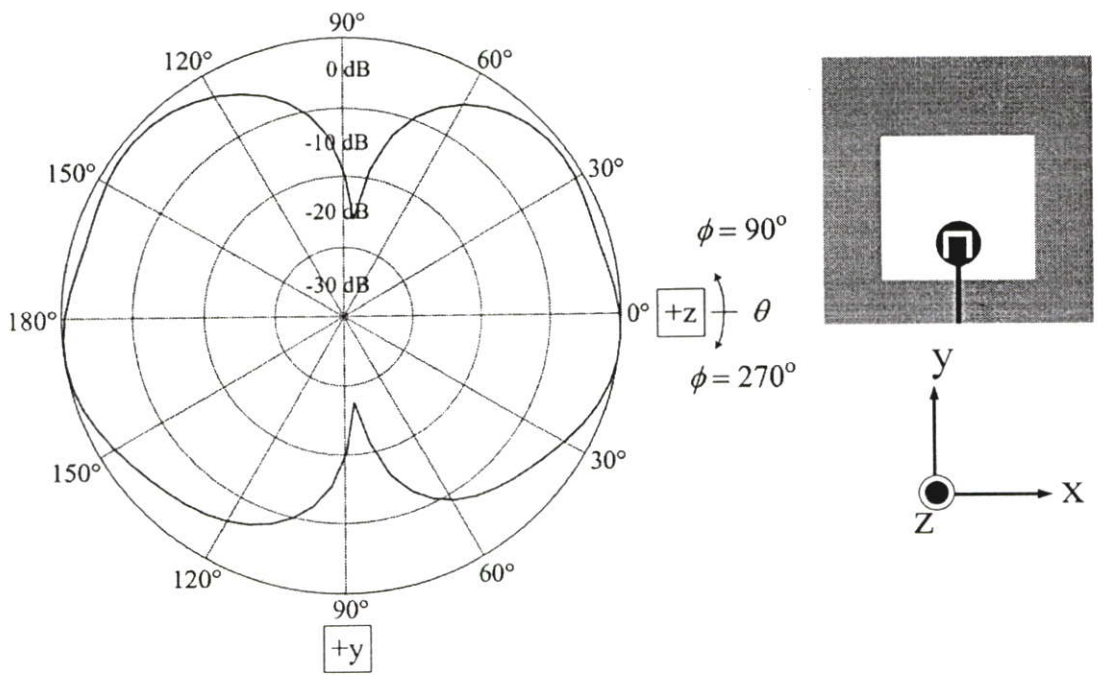
**รูปที่ 4.5** ผลการจำลองอัตราขยาย

จากรูปที่ 4.5 อัตราขยายของสายอากาศตัดความถี่ช่วง 5.13-5.96 กิกะเฮิร์ตซ์ มีค่าอัตราขยายติดลบ ส่วนในช่วงความถี่อื่นๆ มีอัตราขยายเป็นบวก ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วเกิดจากการไม่แมตช์ (Mismatch) หรือเป็นการทำให้สายอากาศไม่ทำงานในช่วงความถี่ 5.13-5.96 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งเกิดผลคือ ไม่ไปรบกวนกับสายอากาศที่ทำงานในระบบ HIPERLAN ที่ความถี่ 5.15-5.35 กิกะเฮิร์ตซ์ และระบบ Wireless LAN ความถี่ 5.725-5.825 กิกะเฮิร์ตซ์

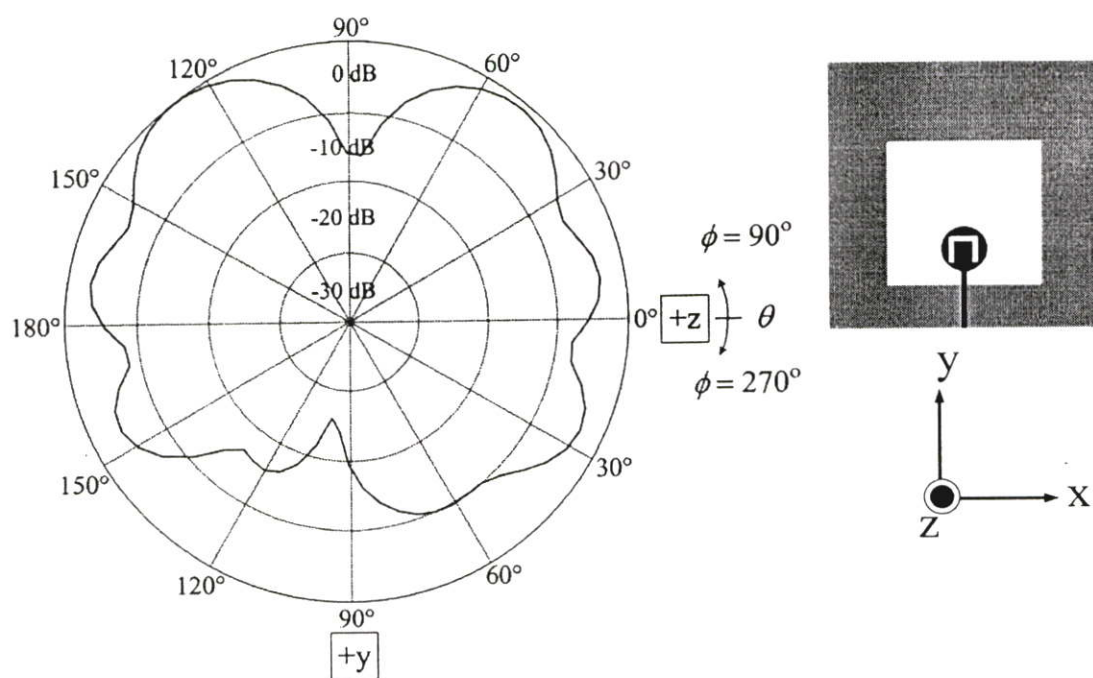
จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดของสายอากาศ ไปจำลองหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ซึ่งความถี่ที่พิจารณา คือ 3.1, 6.8 และ 10.6 กิกะเฮิร์ตซ์



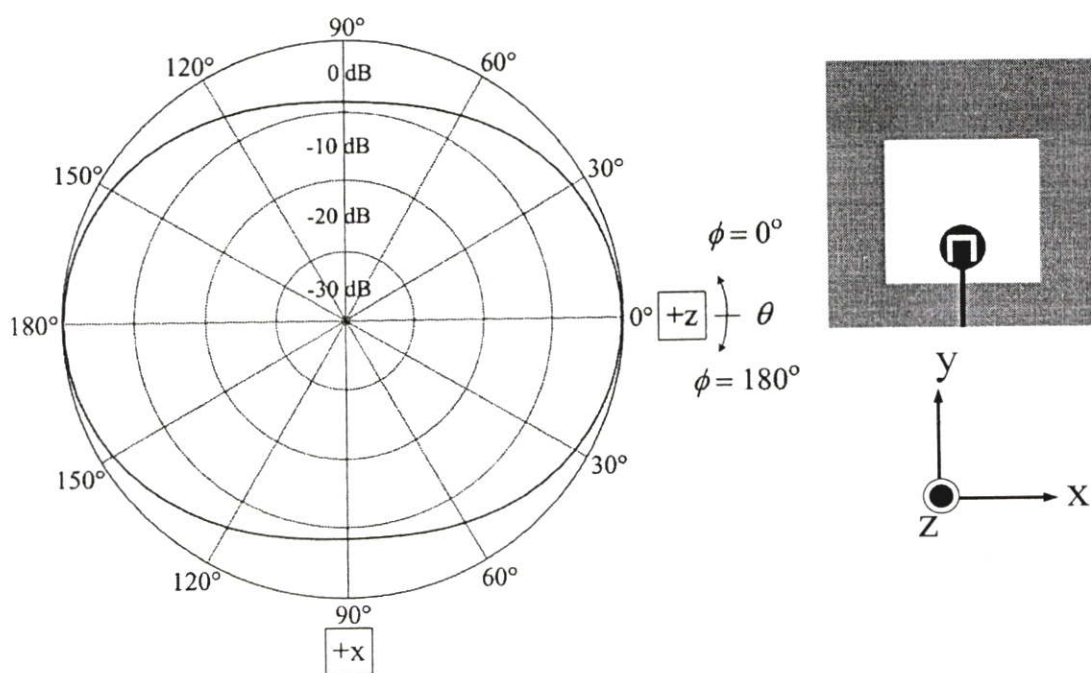
รูปที่ 4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



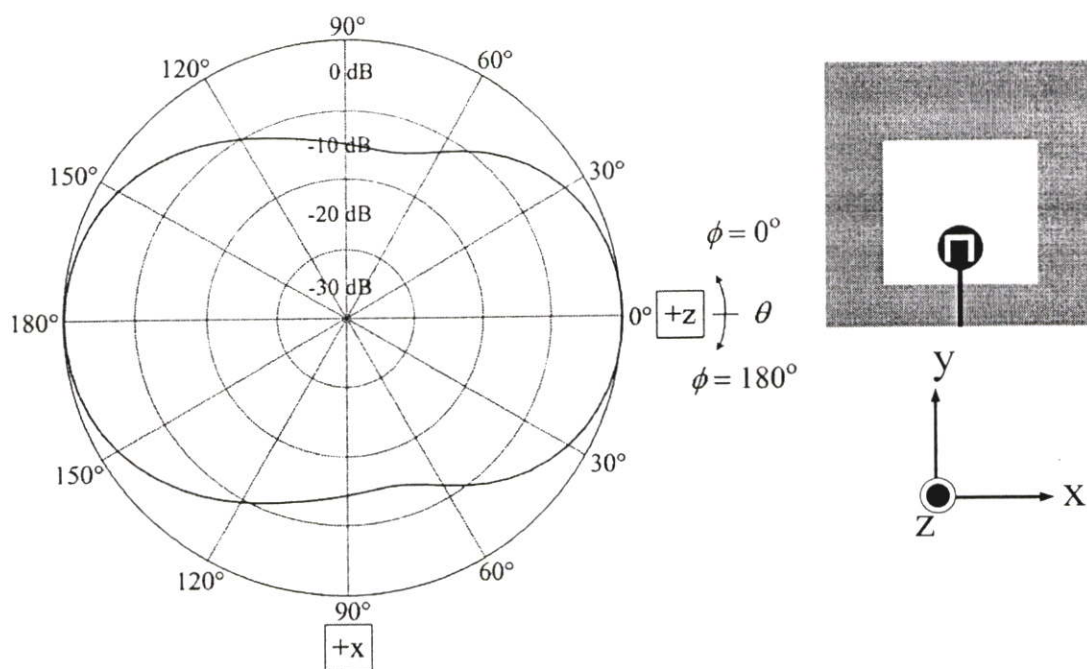
รูปที่ 4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



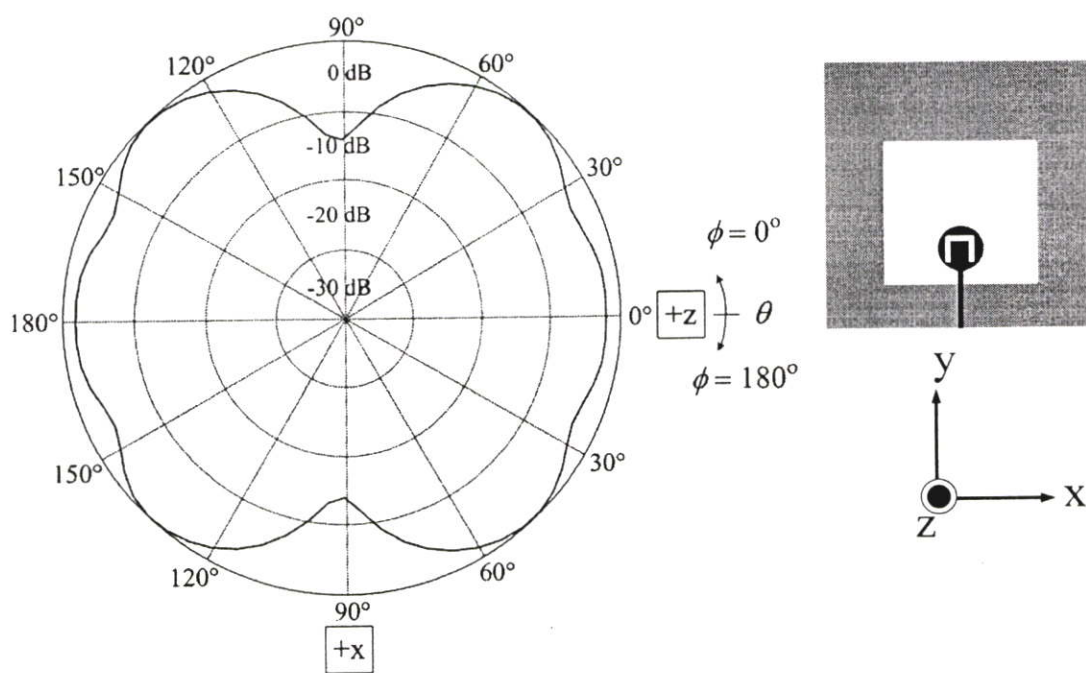
รูปที่ 4.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 4.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก



**รูปที่ 4.10** แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก



**รูปที่ 4.11** แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก

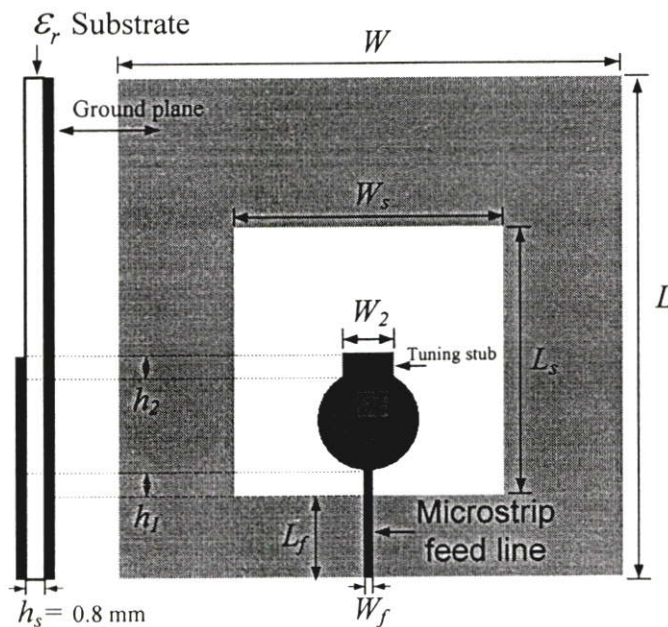
จากรูปที่ 4.6 ถึง รูปที่ 4.11 เมื่อพิจารณาการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทางในช่วงความถี่ 3.1 และ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ ส่วนที่ความถี่สูง 10.6 กิกะเฮิรตซ์ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไม่เป็นแบบสองทิศทาง และสามารถสรุปค่ามุมที่ลาคัลล์สูงสุดและความกว้างลาคัลล์ดังตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.3** ค่ามุมที่ลาคัลล์สูงสุดและความกว้างลาคัลล์

ความถี่	ระนาบสนามไฟฟ้า		ระนาบสนามแม่เหล็ก	
	ค่ามุมที่ลาคัลล์สูงสุด (องศา)	ความกว้างลาคัลล์ (องศา)	ค่ามุมที่ลาคัลล์สูงสุด (องศา)	ความกว้างลาคัลล์ (องศา)
3.1 GHz	170	66	180	80
6.8 GHz	170	89	180	62
10.6 GHz	125	34	45	38

#### 4.2.2 การใส่สตัป (Stub) ในสายอากาศไมโครสตริปวงกลม

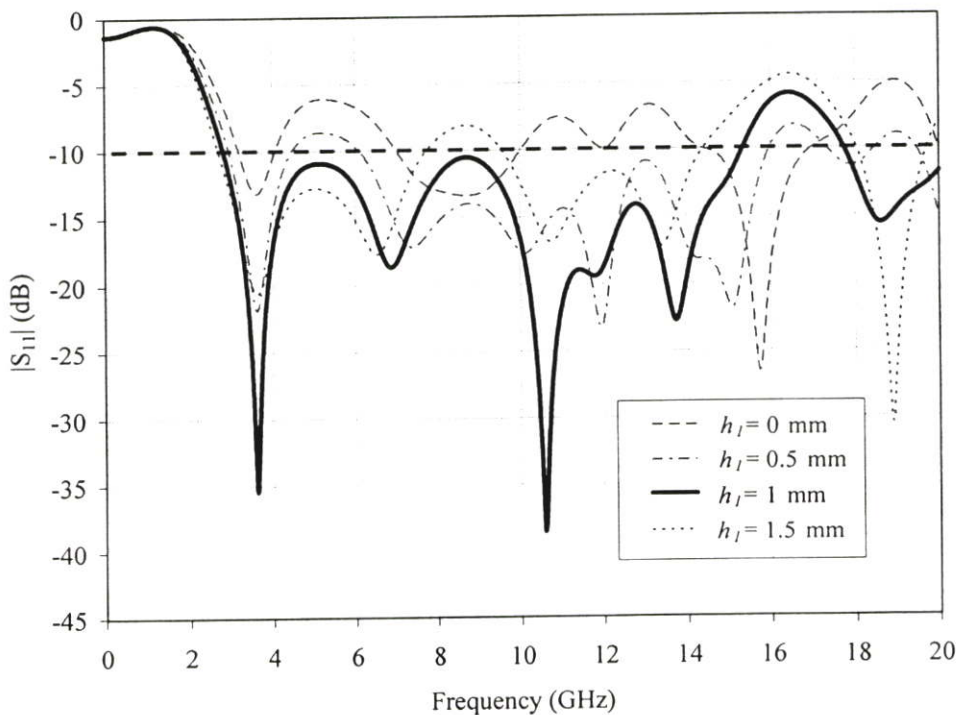
มีการปรับปรุงโครงสร้างสายอากาศจากบทที่ 3 โดยการเพิ่มสตัป  $W_2$  และ  $h_2$  ในสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแสดงค่าพารามิเตอร์ได้ดังรูปที่ 4.12



**รูปที่ 4.12** โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปวงกลมใส่สตัป

จากรูปที่ 4.12 มีการปรับปรุงโครงสร้างสายอากาศจากบทที่ 3 โดยการเพิ่มสัดบเนื่องจากโครงสร้างสายอากาศในหัวข้อที่ 4.2.1 มีการใช้ร่องรูปตัวยูเพื่อทำสายอากาศตัดความถี่ ทำให้ไม่เกิดการรบกวนความถี่ในระบบ HIPERLAN ความถี่ 5.150-5.350 กิกะเฮิร์ตซ์ และระบบ Wireless LAN ความถี่ 5.725-5.825 กิกะเฮิร์ตซ์ แต่ช่วงความถี่ในระบบ Wireless LAN ยังมีความถี่ใช้งานในช่วง 2.410-2.483 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งความถี่ยังซ้อนทับกับสายอากาศในหัวข้อที่ 4.2.1 ซึ่งได้ค่า  $|S_{11}|$  มีช่วงกว้างครอบคลุมความถี่ 2.3-14.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้นในหัวข้อนี้ จึงมีการปรับปรุงโครงสร้างสายอากาศเพื่อให้สมรรถนะของสายอากาศไม่ให้ไปรบกวนย่านความถี่ 2.410-2.483 กิกะเฮิร์ตซ์ ของระบบ Wireless LAN โดยมีการใช้เทคนิคการใส่สัดบ ทำให้รัศมีวงกลมของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเกิดการเปลี่ยนแปลง จึงต้องวิเคราะห์ผลกระทบของช่องเปิดสี่เหลี่ยมใหม่ เพื่อให้ได้ค่า  $|S_{11}|$  มีความถี่ครอบคลุมย่านความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิร์ตซ์

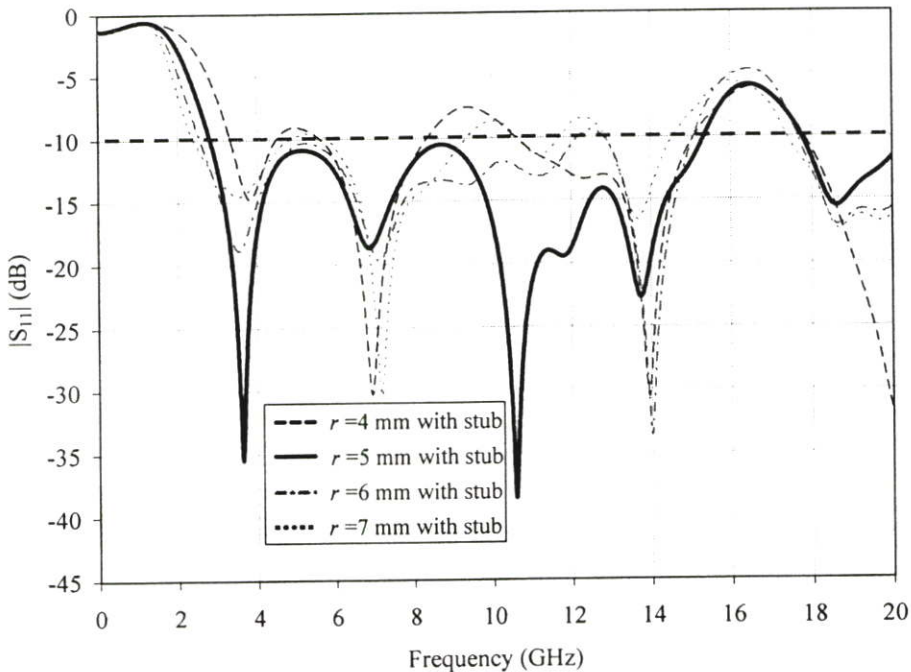
โดยคงใช้ค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์สายอากาศแบบเดิม โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์บางตัวเป็นจำนวนเต็มเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ จึงต้องทำการวิเคราะห์ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับค่า  $|S_{11}|$  และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จึงต้องทำการเริ่มต้นวิเคราะห์ผลกระทบของการใส่สัดบซึ่งมีการกำหนดค่าเริ่มต้น ให้ค่าความกว้างช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $W_s$ ) เท่ากับ 34 มิลลิเมตร ความยาว ( $L_s$ ) เท่ากับ 32 มิลลิเมตร รัศมีของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ค่า  $|S_{11}|$  ที่ได้จากการจำลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ค่า  $|S_{11}|$  เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า  $h_1$

จากรูปที่ 4.13 เพื่อดูผลกระทบของระยะห่างตัวป้อน  $h_1$  กับช่องเปิดสี่เหลี่ยม  $L$ , เมื่อใส่สลับ ( $W_2 \times h_2$ ) แสดงการวิเคราะห์ค่า  $|S_{11}|$  เมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงเท่ากับ 0 มิลลิเมตร, 0.5 มิลลิเมตร, 1 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร โดยค่าความสูงเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ให้ช่วงกว้างความถี่อยู่ในช่วง 2.8-15.3 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ที่กำหนดไว้ ส่วนค่า  $|S_{11}|$  ค่าอื่นๆ ในการจำลองแบบไม่สามารถให้ค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB ตลอดช่วงความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ได้ จากการสังเกตพบว่าค่า  $h_1$  มีความสำคัญในการเปลี่ยนแปลงค่า  $|S_{11}|$  เพราะเมื่อทำการเปลี่ยนค่าเพียง 0.5 มิลลิเมตร จะส่งผลต่อค่า  $|S_{11}|$  ส่วนการเพิ่มสลับไม่มีผลกระทบกับความสูง  $h_1$  ซึ่งยังใช้ค่า 1 มิลลิเมตรเป็นค่าเดียวกันกับบทที่ 3

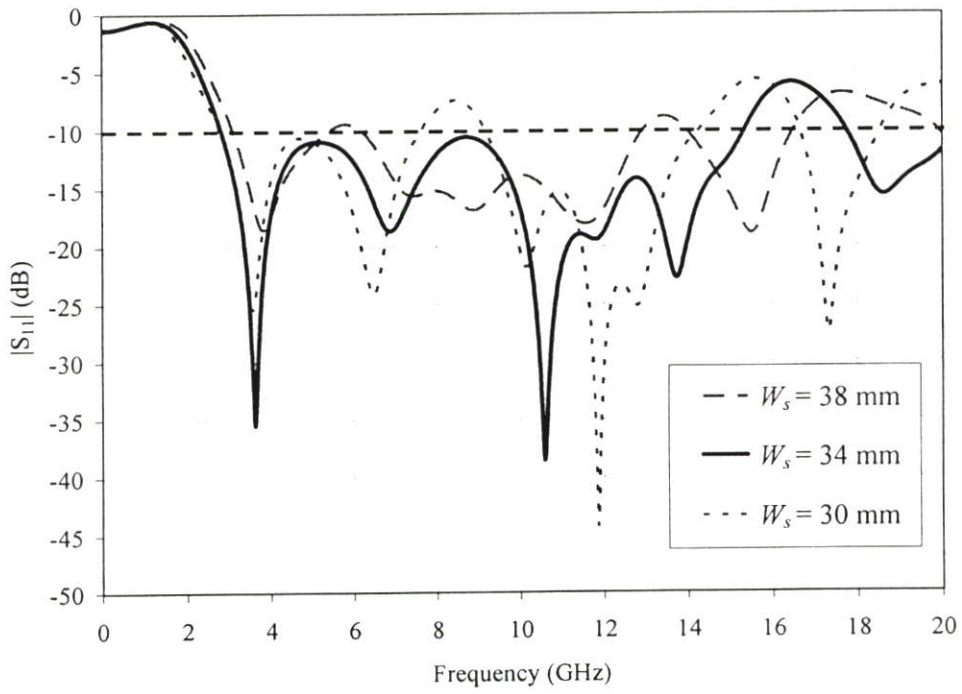
ต่อไปวิเคราะห์ผลกระทบค่ารัศมีของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม โดยมีการเปลี่ยนค่าขนาดของรัศมีวงกลมโดยมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 4 มิลลิเมตร, 5 มิลลิเมตร, 6 มิลลิเมตร และ 7 มิลลิเมตร โดยผลการจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.14



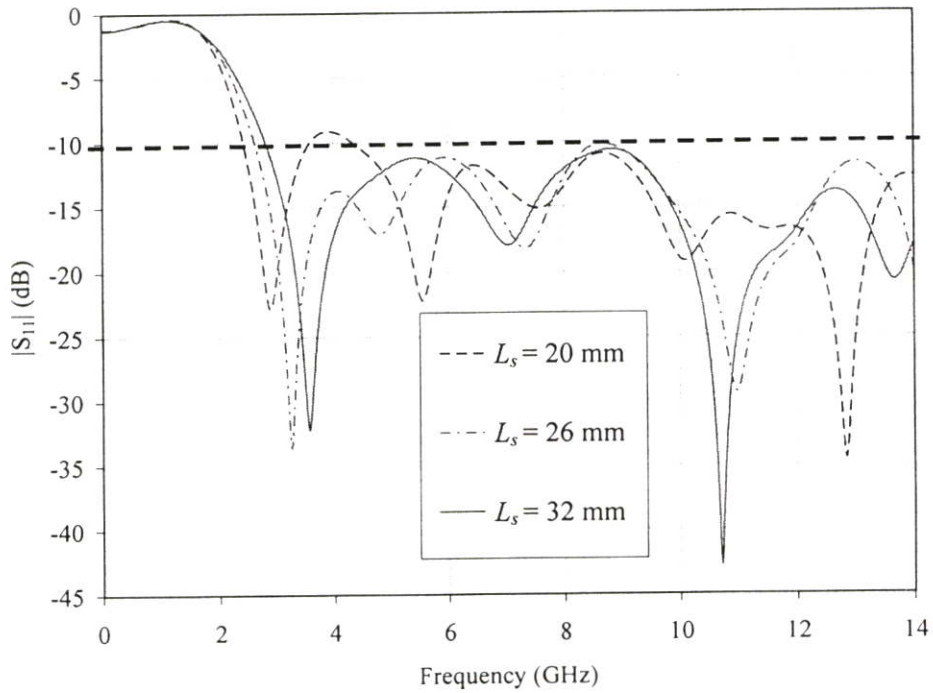
**รูปที่ 4.14** ค่า  $|S_{11}|$  เมื่อเปลี่ยนแปลงค่ารัศมี ( $r$ ) โดยมีสลับ

จากรูปที่ 4.14 จากผลการจำลองค่ารัศมีเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ได้ช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 2.8-15.3 กิกะเฮิรตซ์ ส่วนรัศมีวงกลมค่าอื่นๆ ไม่สามารถทำให้ค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB ตลอดช่วงความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ได้ ดังนั้นการใส่สลับทำให้ค่ารัศมีวงกลมมีขนาดเล็กลงจากรัศมี 5.93 มิลลิเมตร

ต่อไปวิเคราะห์ผลกระทบของความกว้าง ( $W_s$ ) และความยาว ( $L_s$ ) ของช่องเปิดสี่เหลี่ยม เมื่อมีการใส่สลับเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่า  $|S_{11}|$  ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 ค่า  $|S_{11}|$  เมื่อเปลี่ยนความกว้างช่องเปิดสี่เหลี่ยม

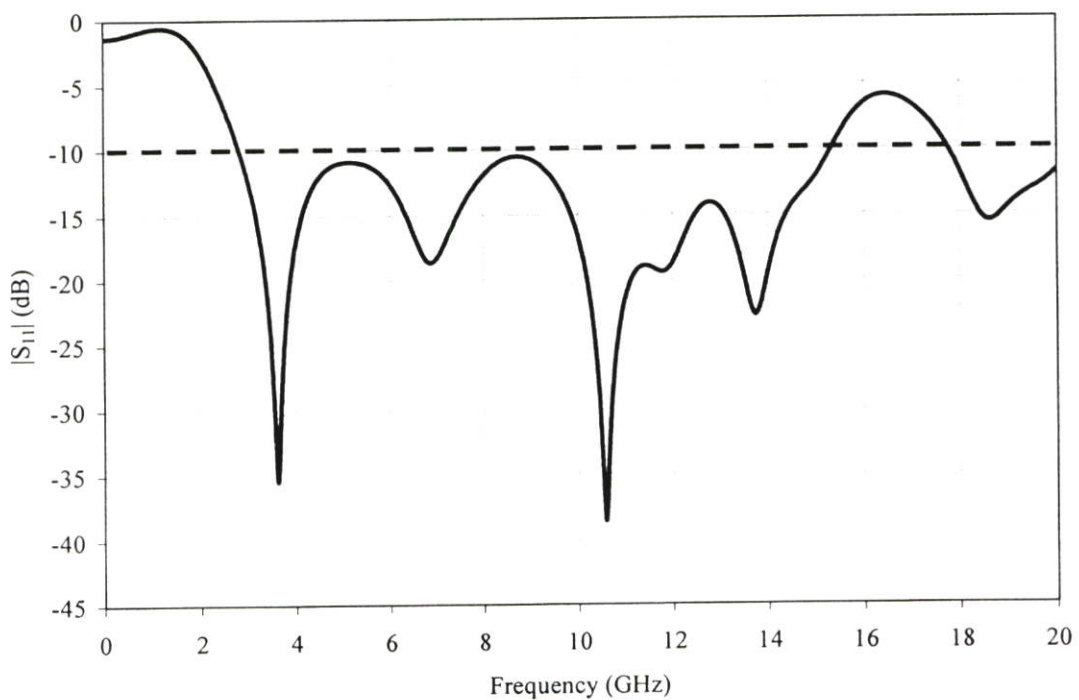


รูปที่ 4.16 ค่า  $|S_{11}|$  เมื่อเปลี่ยนความยาวช่องเปิดสี่เหลี่ยม

รูปที่ 4.15 และ 4.16 เป็นผลการจำลองค่าความกว้างและความยาวของช่องเปิดสี่เหลี่ยม ซึ่งจากรูปที่ 4.15 และ 4.16 ทำให้ได้ค่ากว้างและความยาวเท่ากับ 34 มิลลิเมตรและ 32 มิลลิเมตรที่ทำให้ได้ช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 2.8-15.3 กิกะเฮิรตซ์ จึงสรุปค่าพารามิเตอร์ได้ดังตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.4** ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อมีการใส่สตัป

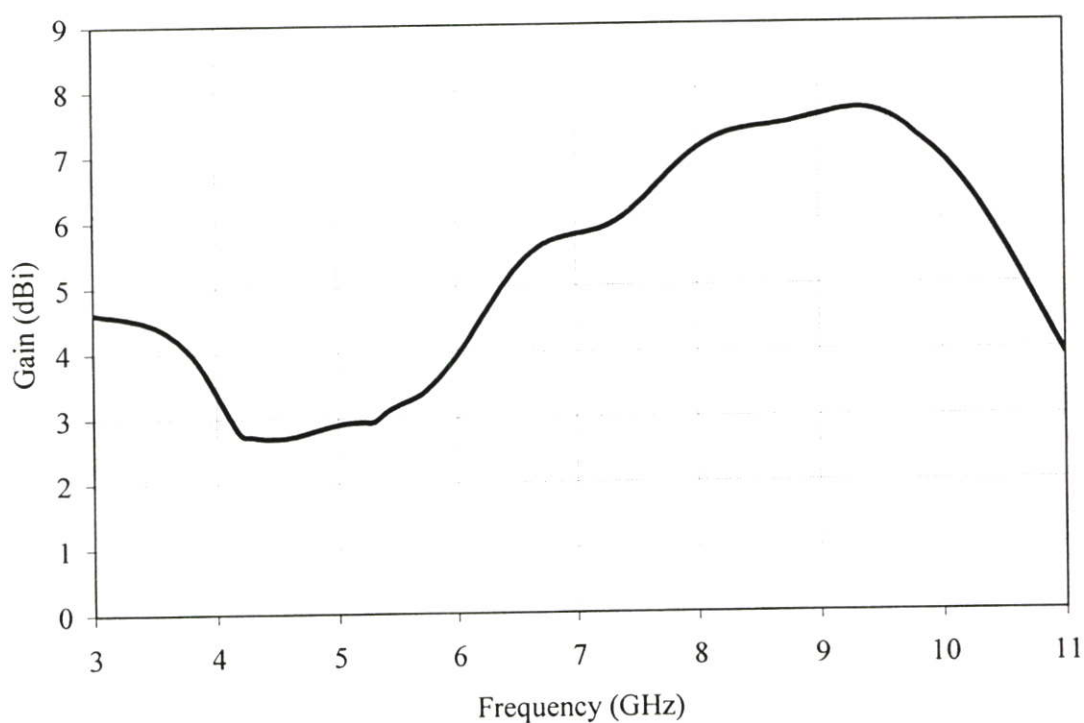
พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
$W$	60
$L$	60
$h_1$	1
$r$	5
$W_s$	34
$L_s$	32
$L_f$	10
$W_f$	1
$h_2$	2
$W_2$	6



**รูปที่ 4.17** ค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศไมโครสตริปเมื่อใส่สตัป

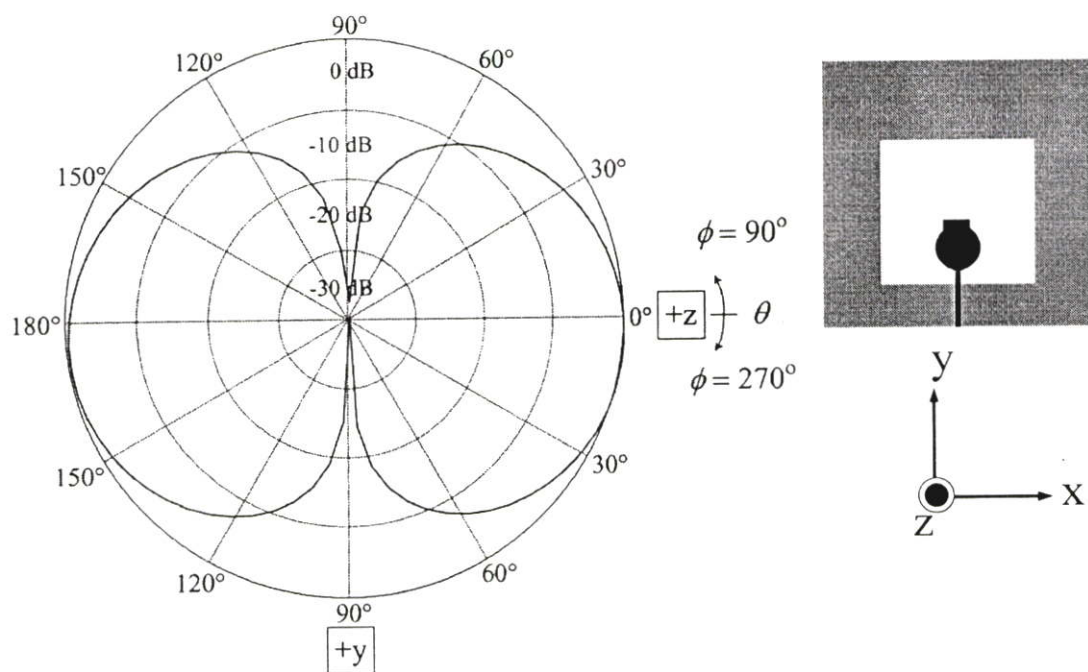
รูปที่ 4.17 เป็นผลการจำลอง เมื่อใส่สตั๊ปเพิ่มเข้าไปในสายอากาศไมโครสตริปวงกลมมีผลทำให้ได้ค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า 10 dB ซึ่งสามารถรองรับความถี่ 2.8-15.3 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งสามารถเลื่อนความถี่จาก 2.34-14.70 กิกะเฮิรตซ์ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมในบทที่ 3 เพื่อไม่ให้ไปรบกวนการทำงานของระบบ Wireless LAN ความถี่ 2.410-2.483 กิกะเฮิรตซ์ได้ เพราะเมื่อใส่สตั๊ปเข้าไปทำให้รัศมีของสายอากาศมีขนาดเล็กลงและเมื่อใส่สตั๊ปเข้าไปทำให้ความสูงของรัศมีวงกลมเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลกระทบต่อความยาวของช่องเปิดสี่เหลี่ยมให้มีความยาวเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อค่า  $|S_{11}|$  ทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงไป

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาจำลองแบบเพื่อวิเคราะห์ห้อัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใส่สตั๊ป แสดงดังรูปที่ 4.18

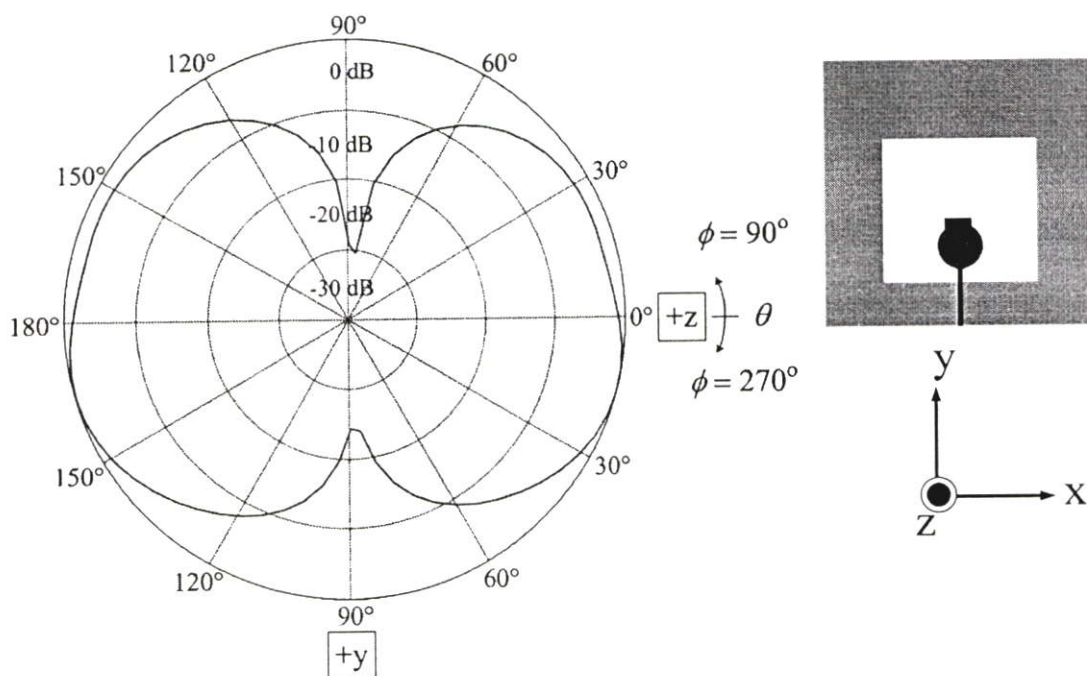


**รูปที่ 4.18** อัตราขยายของสายอากาศ

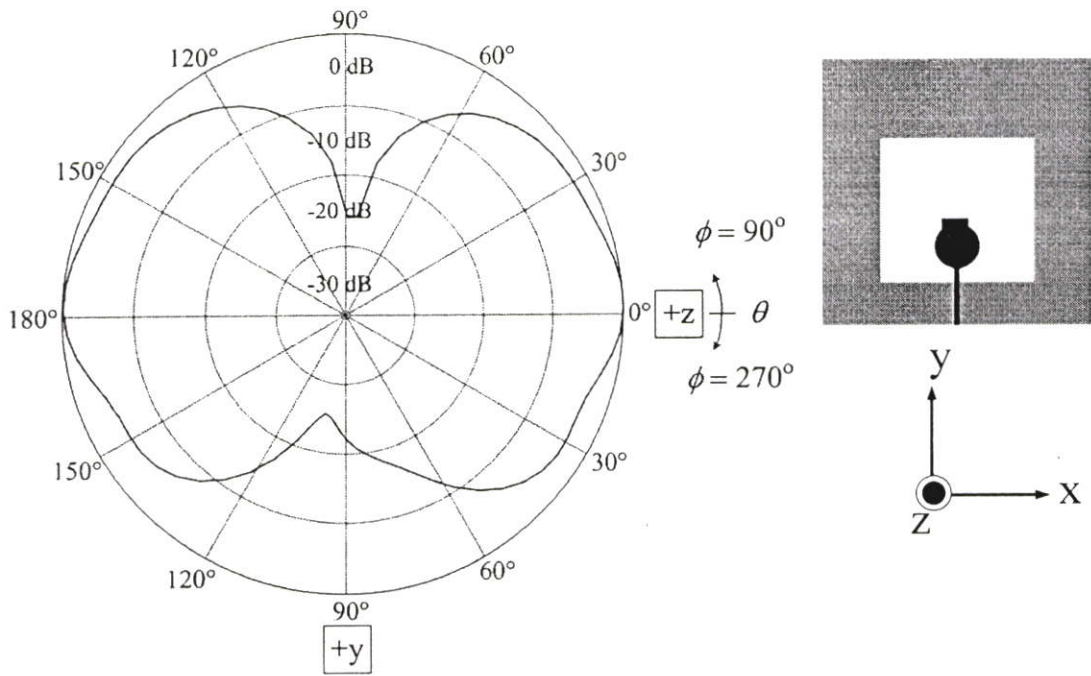
ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใส่สตั๊ปในรูปที่ 4.18 มีอัตราขยายอยู่ในช่วง 2.6-7.6 dBi โดยอัตราขยายต่ำสุดอยู่ที่ความถี่ 4.2 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าเท่ากับ 2.6 dBi และอัตราขยายสูงสุดที่ความถี่ 9.3 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าเท่ากับ 7.6 dBi จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ไปวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อมีการใส่สตั๊ป ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.24



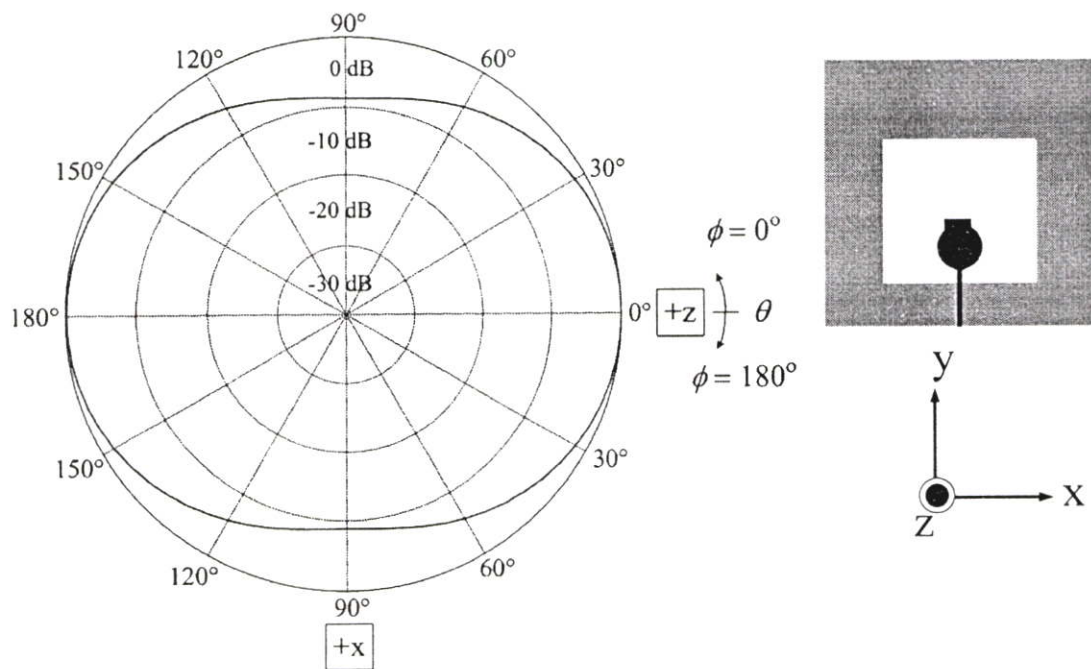
**รูปที่ 4.19** แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



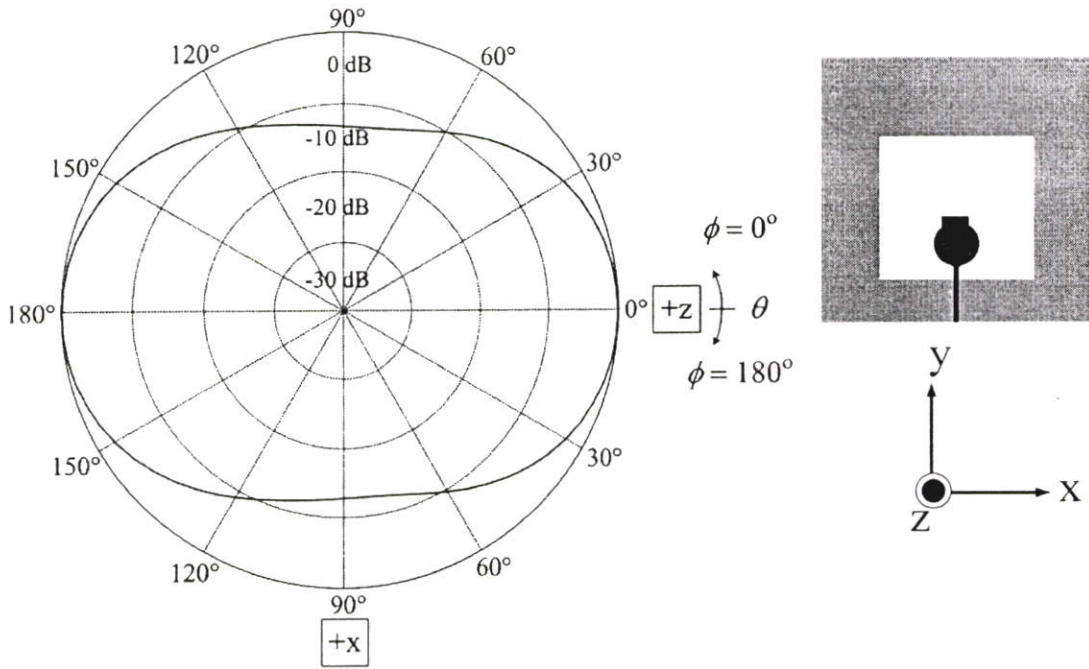
**รูปที่ 4.20** แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



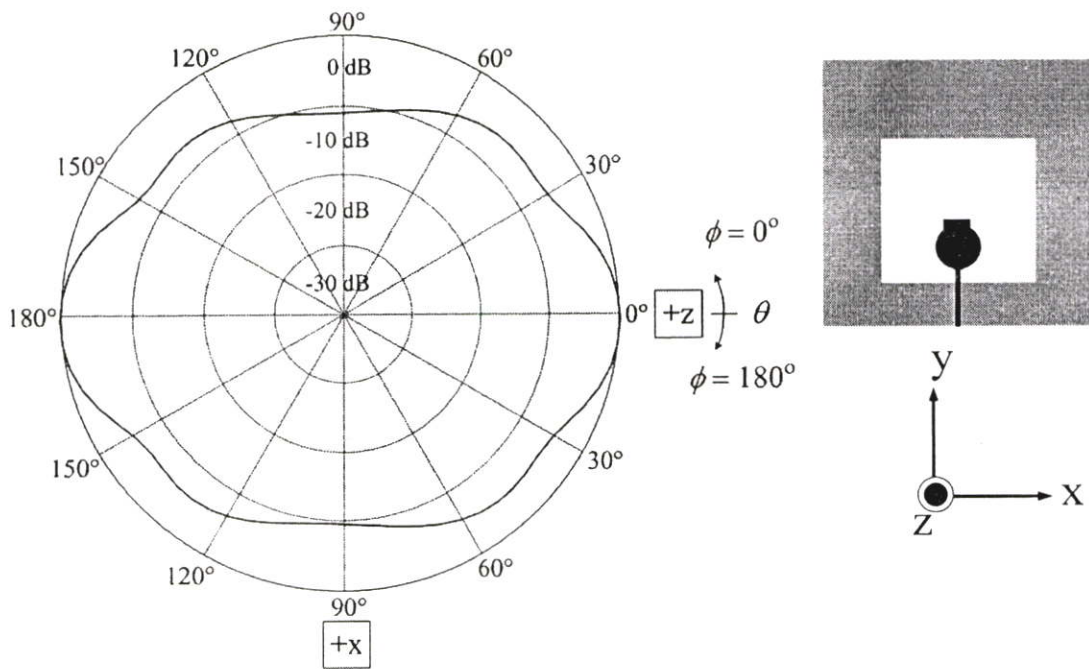
รูปที่ 4.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 4.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก



**รูปที่ 4.23** แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก



**รูปที่ 4.24** แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 4.19 ถึง รูปที่ 4.24 พิจารณาการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางได้ตลอดช่วง 3.1-10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ และสามารถสรุปค่ามุมที่ล้าคลื่นสูงสุดและความกว้างล้าคลื่นดังตารางที่ 4.5

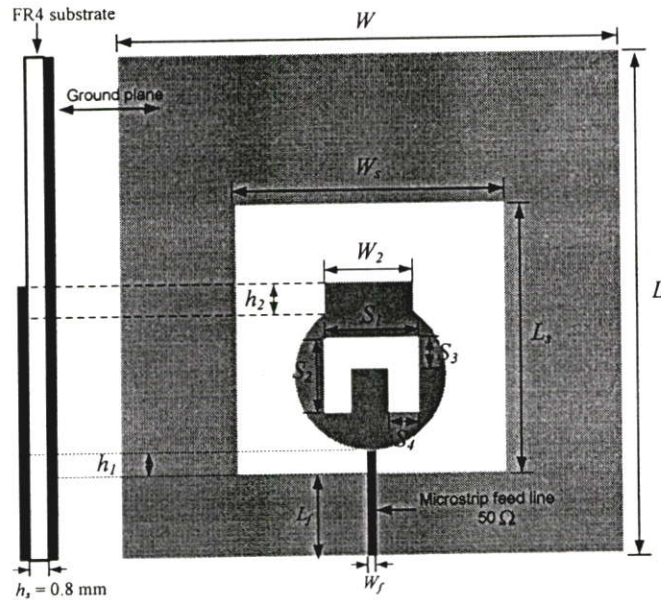
**ตารางที่ 4.5** ค่ามุมที่ล้าคลื่นสูงสุดและความกว้างล้าคลื่น

ความถี่	ระนาบสนามไฟฟ้า		ระนาบสนามแม่เหล็ก	
	ค่ามุมที่ล้าคลื่นสูงสุด (องศา)	ความกว้างล้าคลื่น (องศา)	ค่ามุมที่ล้าคลื่นสูงสุด (องศา)	ความกว้างล้าคลื่น (องศา)
3.1 GHz	170	68	180	84
6.8 GHz	165	83	180	63
10.6 GHz	170	67	180	38

#### 4.2.3 สายอากาศตัดความถี่ไต่ระดับ

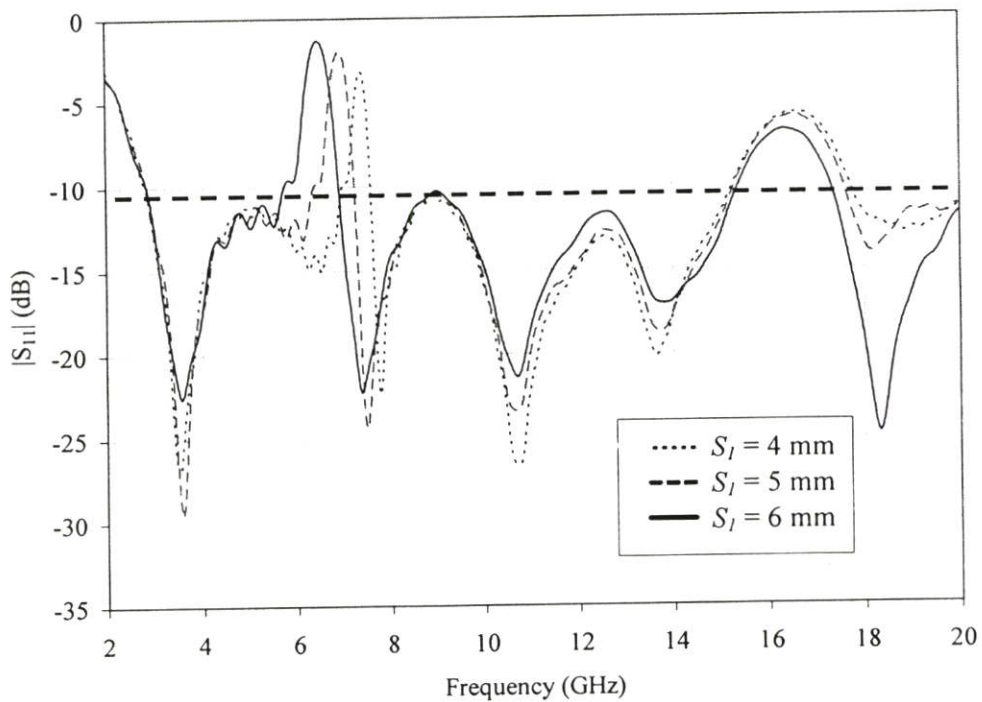
จากการปรับปรุงสมรรถนะของสายอากาศในหัวข้อ 4.2.1 และหัวข้อ 4.2.2 ทำให้สายอากาศแต่ละแบบมีข้อดีและข้อเสีย ซึ่งสายอากาศในหัวข้อ 4.2.1 มีข้อดีคือสามารถทำให้สายอากาศไม่ไปรบกวนระบบ HIPERLAN ความถี่ 5.150-5.350 กิกะเฮิร์ตซ์ และระบบ Wireless LAN ความถี่ 5.725-5.825 กิกะเฮิร์ตซ์ได้ แต่มีข้อเสียคือมีความถี่การทำงานไปซ้อนทับซึ่งไปรบกวนในระบบ Wireless LAN ความถี่ 2.410-2.483 กิกะเฮิร์ตซ์ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในช่วงความถี่สูงยังมีความผิดเพี้ยน ส่วนสายอากาศในหัวข้อ 4.2.2 มีข้อดีคือสามารถทำให้สายอากาศไม่ไปรบกวนระบบ Wireless LAN ความถี่ 2.410-2.483 กิกะเฮิร์ตซ์และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในช่วงความถี่สูงไม่เกิดการผิดเพี้ยน แต่มีข้อเสียคือมีความถี่การทำงานไปรบกวนระบบ HIPERLAN ความถี่ 5.150-5.350 กิกะเฮิร์ตซ์และระบบ Wireless LAN ความถี่ 5.725-5.825 กิกะเฮิร์ตซ์

ซึ่งจากโครงสร้างของสายอากาศ ในหัวข้อนี้จะนำข้อดีและข้อเสียของสายอากาศทั้งในหัวข้อ 4.2.1 และ 4.2.2 นำมาปรับปรุงสมรรถนะของสายอากาศเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีความถี่ไม่ไปรบกวนระบบ HIPERLAN ความถี่ 5.150-5.350 กิกะเฮิร์ตซ์ ระบบ Wireless LAN ความถี่ 5.725-5.825 กิกะเฮิร์ตซ์และความถี่ 2.410-2.483 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งจะนำโครงสร้างของหัวข้อ 4.2.2 โดยใช้ช่องเปิดสี่เหลี่ยม ขนาดสายอากาศและรัศมีวงกลมยังคงค่าไว้เหมือนเดิม แต่มีการปรับปรุงเพิ่มเติมโดยใส่ร่องรูปตัวยูซึ่งจะมีวิธีการวิเคราะห์เหมือนในหัวข้อที่ 4.2.1 ซึ่งแสดงการปรับปรุงโครงสร้างสายอากาศตัดความถี่ไต่ระดับ ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 โครงสร้างสายอากาศตัดความถี่ใส่สลับ

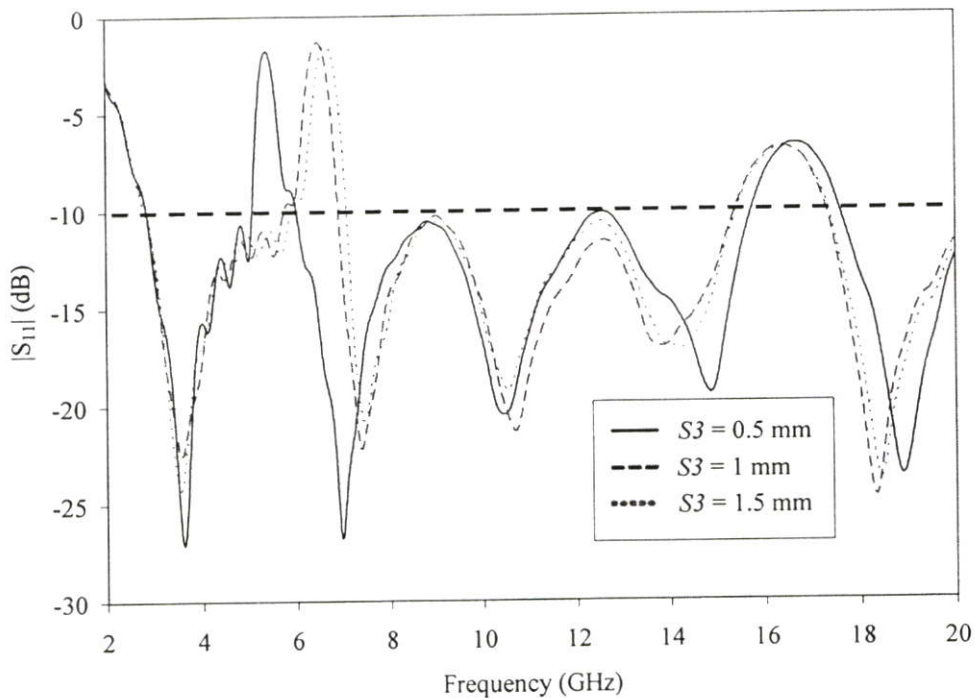
การวิเคราะห์ใช้ค่าของสายอากาศตามตารางที่ 4.3 ในหัวข้อที่ 4.2.1 และค่าร่องรูปด้วยโดยใช้ค่าเริ่มต้นตามตารางที่ 4.2 ในหัวข้อที่ 4.2.1 ซึ่งการวิเคราะห์เริ่มจากการปรับขนาดค่าร่องรูปด้วยเพื่อค่า  $|S_{11}|$  เพื่อให้รองรับความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ผลการจำลองค่า  $|S_{11}|$  เมื่อเปลี่ยนค่า  $S_1$

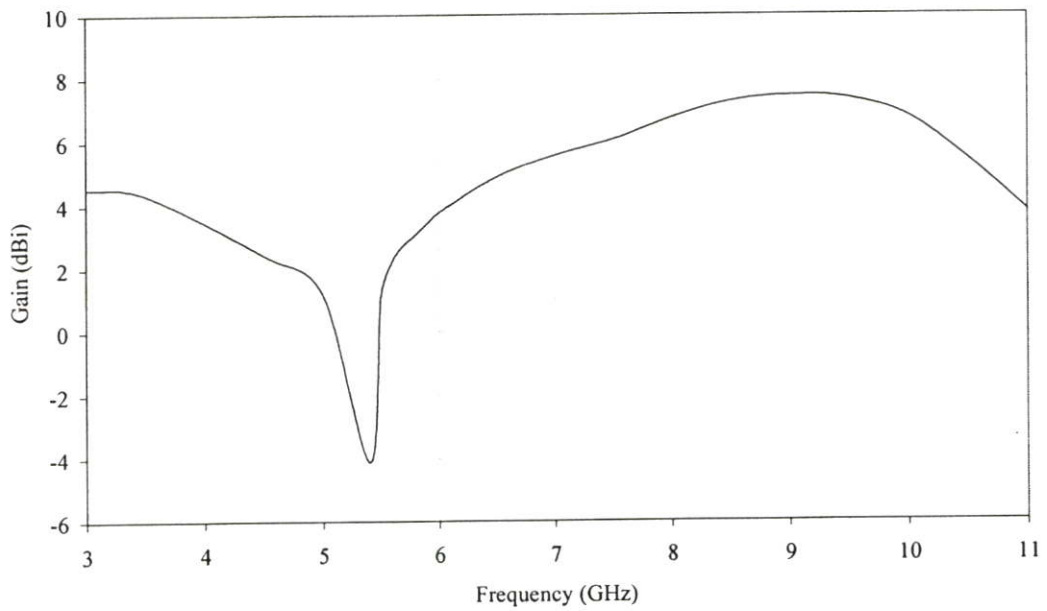
จากรูปที่ 4.26 เมื่อมีการปรับค่าความกว้างรวมร่องรูปตัวยู  $S_1$  ทำให้ค่า  $|S_{11}|$  มีค่าต่ำกว่า -10 dB เมื่อพิจารณาผลจากการจำลองแบบค่าความกว้างรวมร่องรูปตัวยูมีความยาวเพิ่มมากขึ้นจาก 4 มิลลิเมตรถึง 6 มิลลิเมตร เมื่อมีความกว้างรวมร่องรูปตัวยูมีค่ามากขึ้นทำให้ช่วงความถี่ที่มีค่าต่ำลง โดยค่าความกว้างรวมร่องรูปตัวยูเท่ากับ 6 มิลลิเมตร ทำให้ได้ค่าสายอากาศตัดความถี่อยู่ในช่วงความถี่ 5.52-6.52 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งยังไม่สามารถครอบคลุมความถี่ช่วง 5.15-5.82 กิกะเฮิรตซ์

ดังนั้นจึงทำการปรับค่าพารามิเตอร์ความกว้างฐานของร่องรูปตัวยู ( $S_3$ ) และนำไปจำลองแบบและดูผลกระทบของค่า  $|S_{11}|$  กับความถี่ผลที่ได้ในรูปที่ 4.27



**รูปที่ 4.27** ผลการจำลองค่า  $|S_{11}|$  เมื่อเปลี่ยนค่า  $S_3$

จากรูปที่ 4.27 เมื่อความกว้างฐานของร่องรูปตัวยู ( $S_3$ ) มีความกว้างเพิ่มมากขึ้นจาก 0.5 มิลลิเมตรถึง 1.5 มิลลิเมตร ทำให้ช่วงความถี่ Band-notch มีค่าความถี่เพิ่มขึ้น โดยค่าความกว้างฐานของร่องรูปตัวยู ( $S_3$ ) เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร ทำให้ได้ค่าสายอากาศตัดความถี่อยู่ในช่วงความถี่ 5.08-5.96 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งสามารถครอบคลุมความถี่ช่วง 5.15-5.82 กิกะเฮิรตซ์ได้ และครอบคลุมช่วงกว้างความถี่ 2.82-15.78 กิกะเฮิรตซ์ ดังนั้นสายอากาศตัดความถี่ใ้ส่ระดับ ทำให้ไม่มีความถี่ซ้อนทับในระบบ HIPERLAN ความถี่ 5.150-5.350 กิกะเฮิรตซ์ ระบบ Wireless LAN ความถี่ 5.725-5.825 กิกะเฮิรตซ์และความถี่ 2.41-2.483 กิกะเฮิรตซ์นำค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 4.6 มาจำลองแบบเพื่อวิเคราะห์อัตราขยายของสายอากาศ ตัดความถี่ใ้ส่ระดับ ดังรูปที่ 4.28



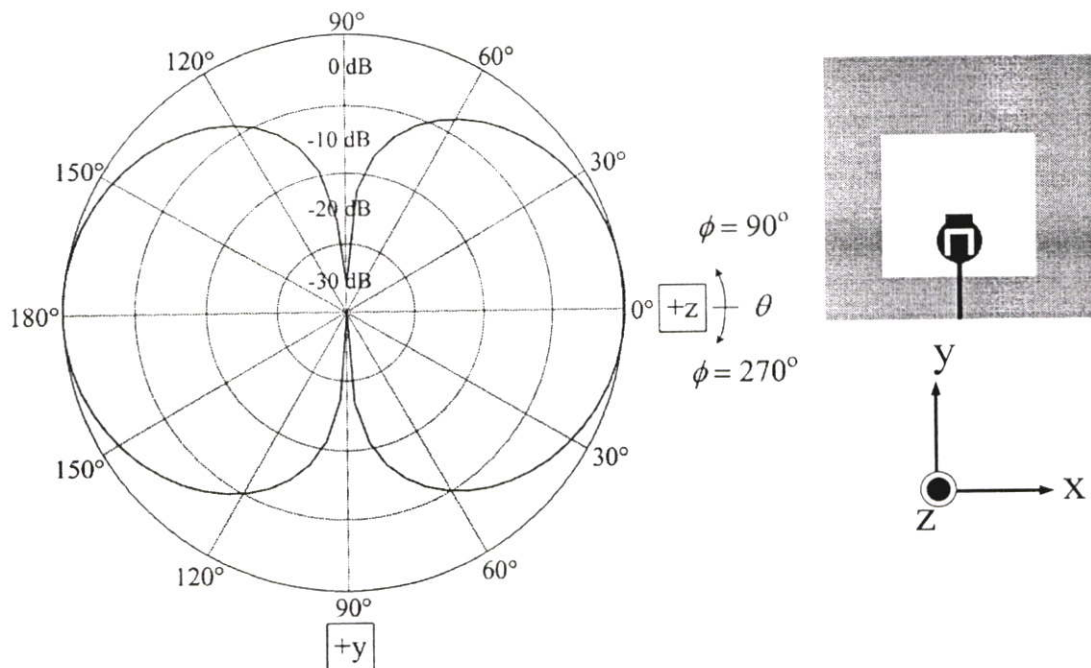
รูปที่ 4.28 ผลการจำลองอัตราขยาย

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศตัดความถี่เมื่อมีการใส่สลับ

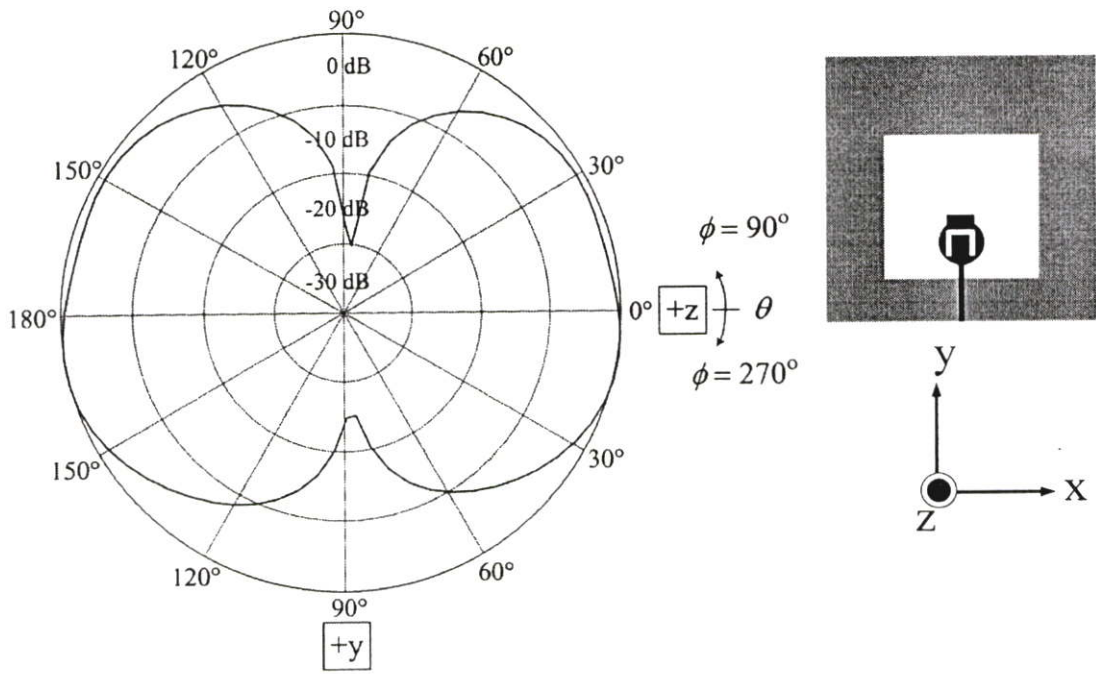
พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
$W$	60
$L$	60
$h_1$	1
$r$	5
$W_s$	34
$L_s$	32
$L_f$	10
$W_f$	1
$h_2$	2
$W_2$	6
$S_1$	6
$S_2$	6
$S_3$	0.5
$S_4$	1

จากรูปที่ 4.28 อัตราขยายของสายอากาศตัดความถี่ช่วงความถี่ 5.08-5.96 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าอัตราขยายติดลบ ส่วนในช่วงความถี่อื่นๆ มีอัตราขยายเป็นบวก สายอากาศมีอัตราขยายอยู่ในช่วง 4.7-7.6 dBi โดยอัตราขยายต่ำสุดอยู่ที่ความถี่ 5.5 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าเท่ากับ -4.12 dBi และอัตราขยายสูงสุดที่ความถี่ 9.3 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าเท่ากับ 7.6 dBi ซึ่งทำให้สายอากาศไม่ทำงานไปรบกวนความถี่ในระบบ HIPERLAN ช่วงความถี่ 5.15-5.35 กิกะเฮิรตซ์ และระบบ Wireless LAN ความถี่ 5.725-5.825 กิกะเฮิรตซ์ และ 2.41-2.483 กิกะเฮิรตซ์

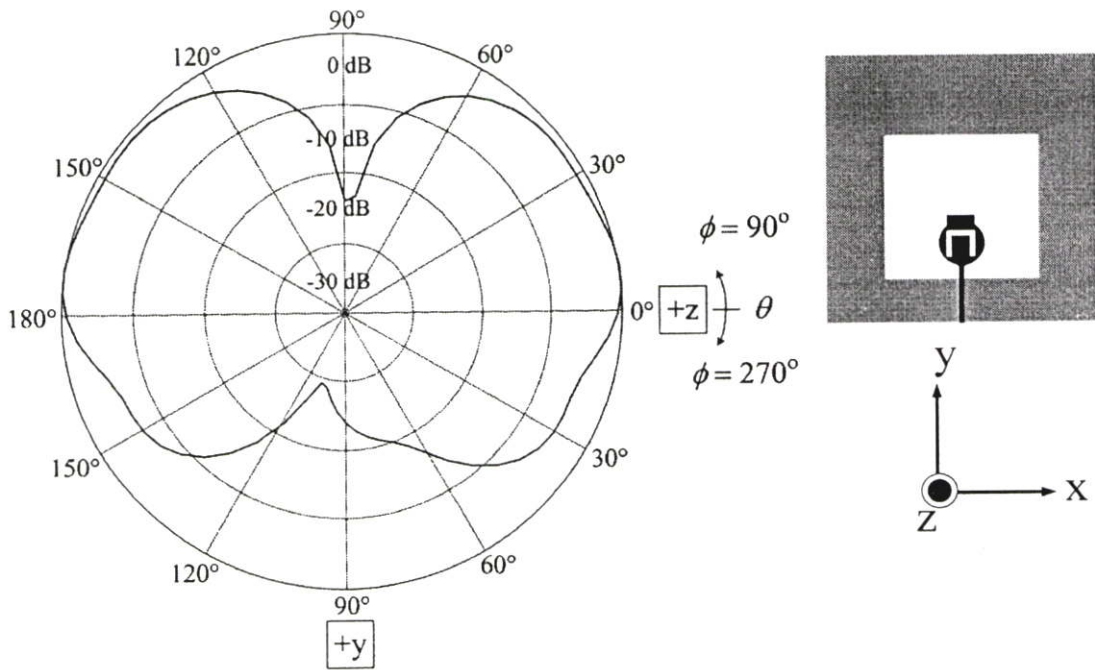
นำค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.6 มาจำลองแบบเพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กพบว่าผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.29 ถึงรูปที่ 4.34



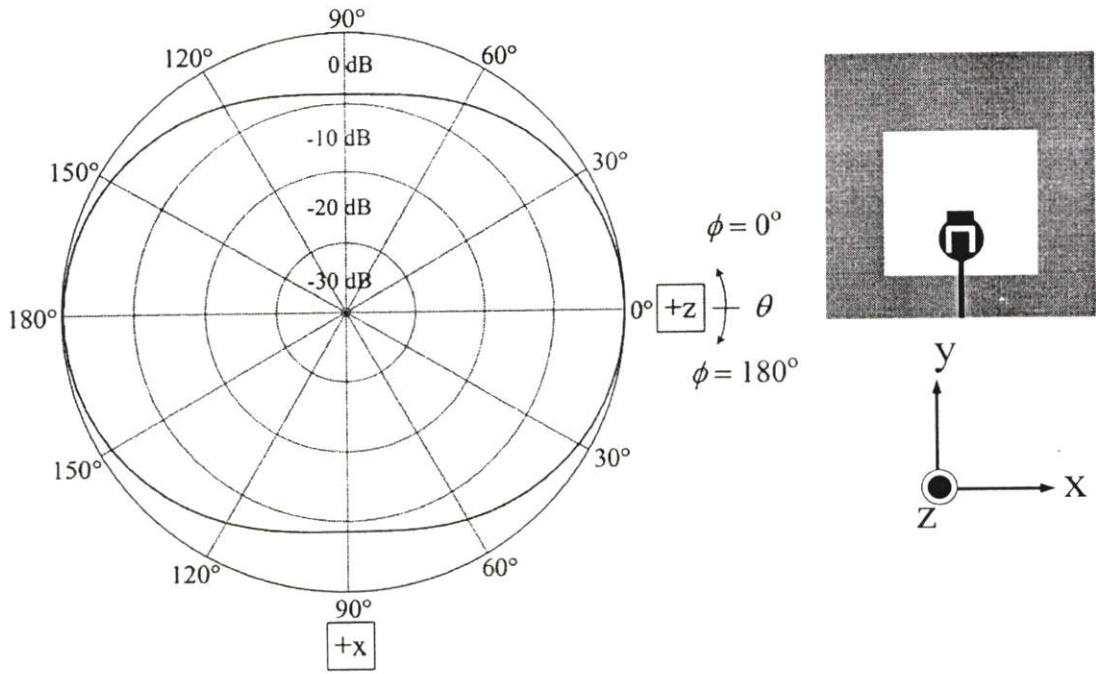
**รูปที่ 4.29** แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



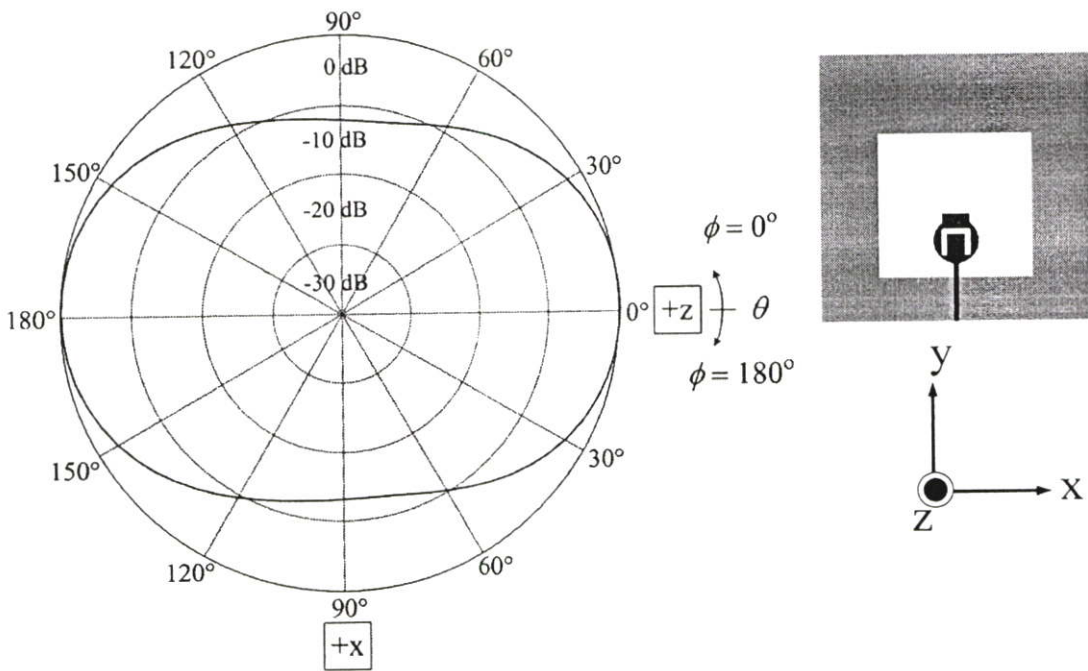
รูปที่ 4.30 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



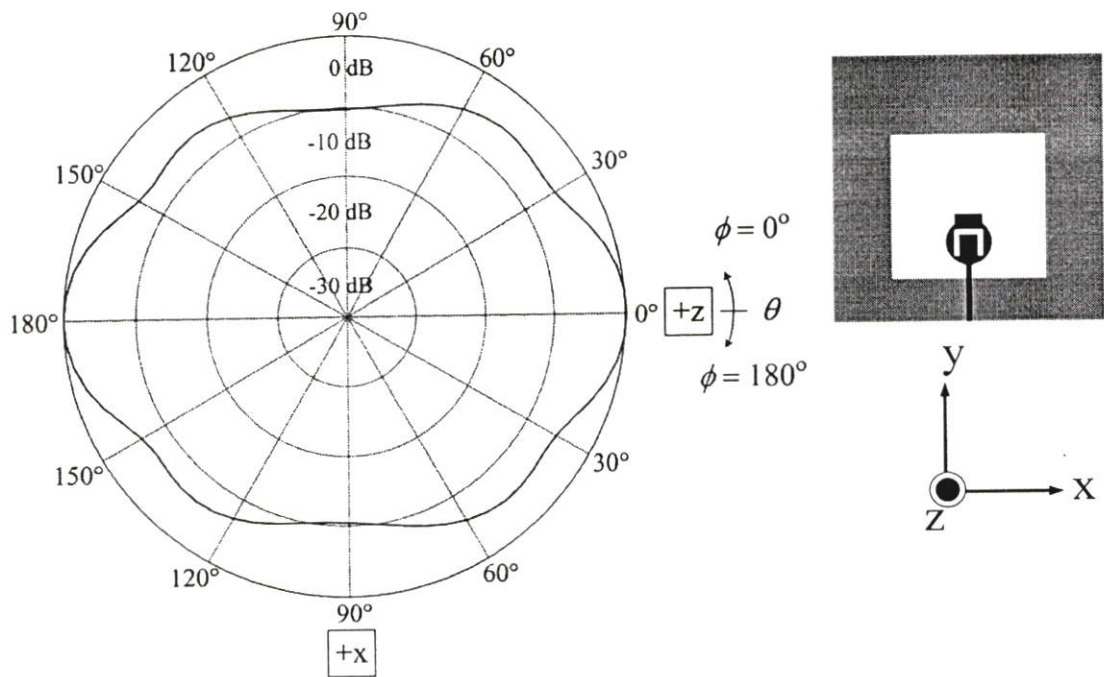
รูปที่ 4.31 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 4.32 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิร์ตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.33 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิร์ตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก



**รูปที่ 4.34** แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 4.29 ถึง รูปที่ 4.34 พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นแบบสองทิศทางในความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ และสามารถสรุปค่ามุมที่ลำคลื่นสูงสุดและความกว้างลำคลื่นดังตารางที่ 4.7

**ตารางที่ 4.7** ค่ามุมที่ลำคลื่นสูงสุดและความกว้างลำคลื่น

ความถี่ (GHz)	ระนาบสนามไฟฟ้า		ระนาบสนามแม่เหล็ก	
	ค่ามุมที่ลำคลื่น สูงสุด (องศา)	ความกว้างลำคลื่น (องศา)	ค่ามุมที่ลำคลื่น สูงสุด (องศา)	ความกว้างลำคลื่น (องศา)
3.1	170	68	180	85
6.8	165	83	180	63
10.6	170	67	180	37

### 4.3 บทสรุป

การปรับปรุงสมรรถนะของสายอากาศในหัวข้อ 4.2.1 ใช้การออกแบบร่องรูปตัวยูบนสายอากาศไมโครสตริปวงกลมซึ่งสามารถปรับปรุงไม่ให้ช่วงความถี่ไปซ้อนทับในระบบ HIPERLAN ช่วงความถี่ 5.150-5.350 กิกะเฮิร์ตซ์ และระบบ Wireless LAN ช่วงความถี่ 5.725-5.825 กิกะเฮิร์ตซ์ เรียกว่า สายอากาศตัดความถี่เพราะทำให้ในช่วงความถี่ 5.13-5.96 กิกะเฮิร์ตซ์ได้อัตราขยายติดลบและได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางในความถี่ 3.1-6.8 กิกะเฮิร์ตซ์ แต่ที่ความถี่ 10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ยังไม่ได้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง ส่วนในหัวข้อที่ 4.2.2 มีการใส่สัดับเข้าไปในสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเพื่อปรับปรุงสายอากาศไม่ให้ไปรบกวนความถี่ในระบบ Wireless LAN ช่วงความถี่ 2.41-2.483 กิกะเฮิร์ตซ์และทำและในหัวข้อที่ 4.2.3 ได้รวมการปรับปรุงทั้งสองหัวข้อที่กล่าวมา โดยใช้สายอากาศตัดความถี่และการใส่สัดับซึ่งสามารถทำให้สายอากาศไม่ไปรบกวนระบบ HIPERLAN และ Wireless LAN ทั้งความถี่ 5.150-5.350, 5.725-5.825, 2.41-2.483 กิกะเฮิร์ตซ์และได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทางในช่วงความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิร์ตซ์

## บทที่ 5

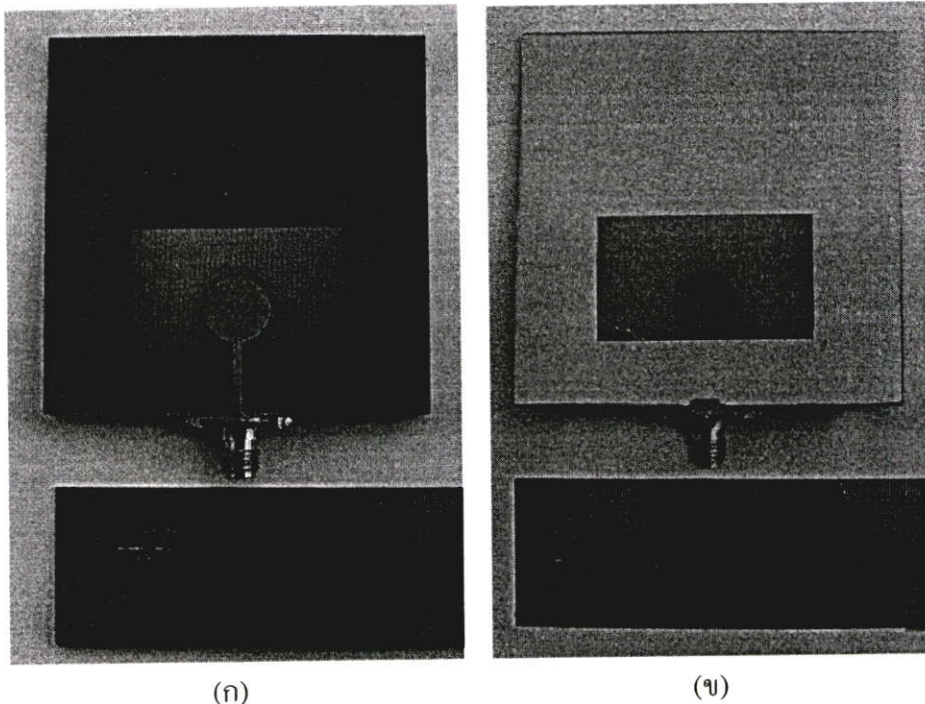
### การทดสอบและผลการทดสอบ

#### 5.1 บทนำ

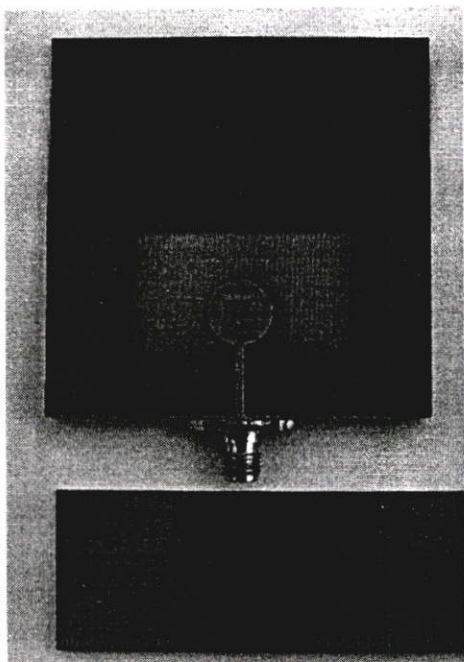
หลังจากทำการวิเคราะห์ในบทที่ 3 และปรับปรุงสมรรถนะของสายอากาศในบทที่ 4 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์เพื่อที่จะนำมาสร้างและทดสอบสายอากาศ จำเป็นต้องมีการทดสอบสายอากาศที่สร้างขึ้นจริงเพื่อหาค่า  $|S_{11}|$  อัตราขยายและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จากนั้นนำผลทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

#### 5.2 การสร้างสายอากาศและผลการทดสอบ

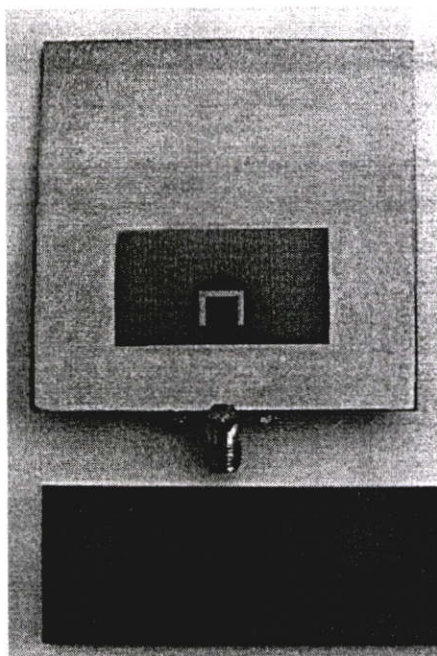
ก่อนการทดสอบได้ทำการสร้างสายอากาศ 4 แบบ เพื่อนำสายอากาศมาทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง ดังแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 ถึงรูป 5.4



**รูปที่ 5.1** สายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

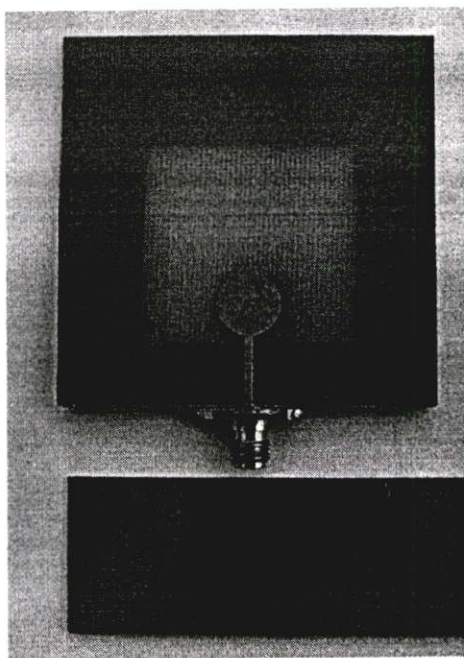


(ก)

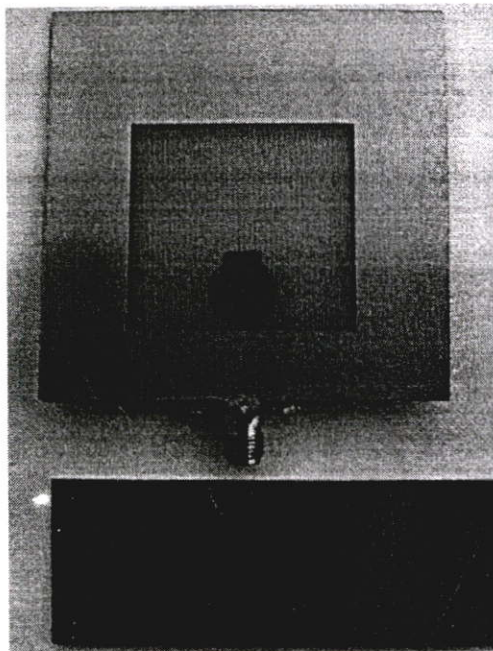


(ข)

**รูปที่ 5.2** สายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยูป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

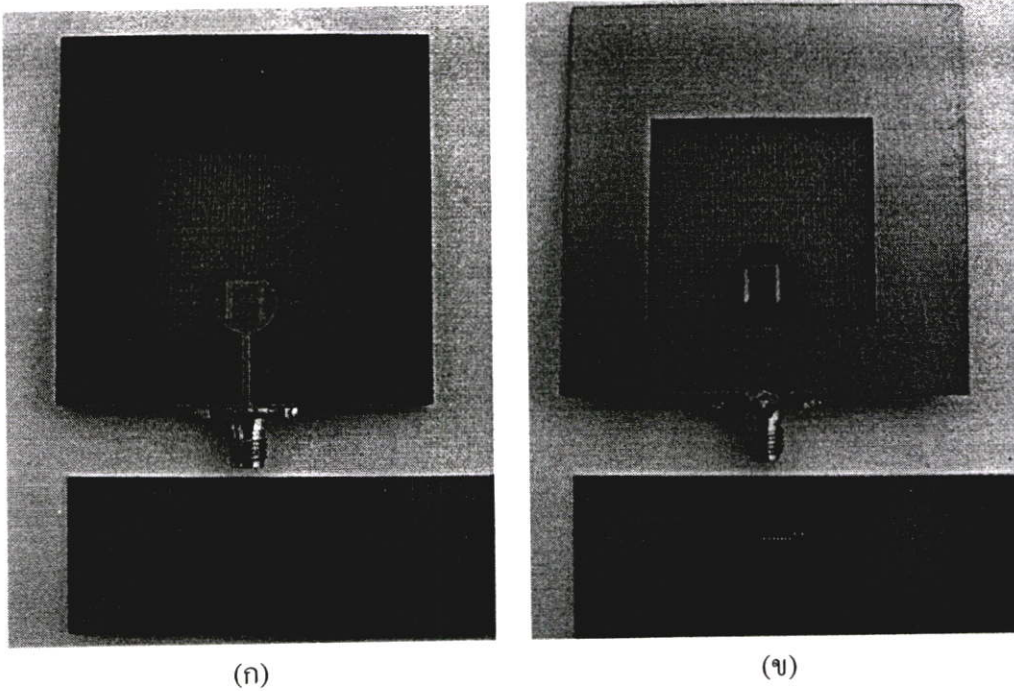


(ก)



(ข)

**รูปที่ 5.3** สายอากาศไมโครสตริปวงกลมใส่สตัปป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

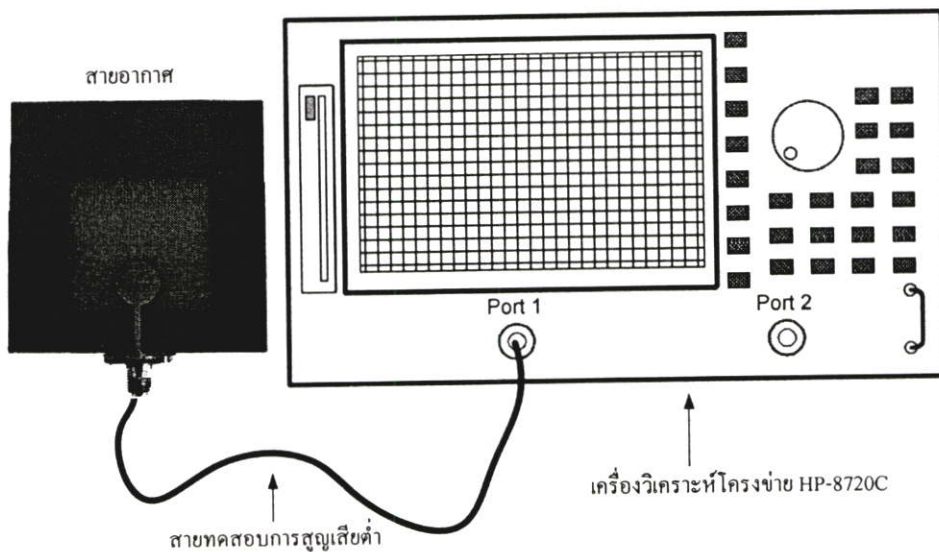


(ก)

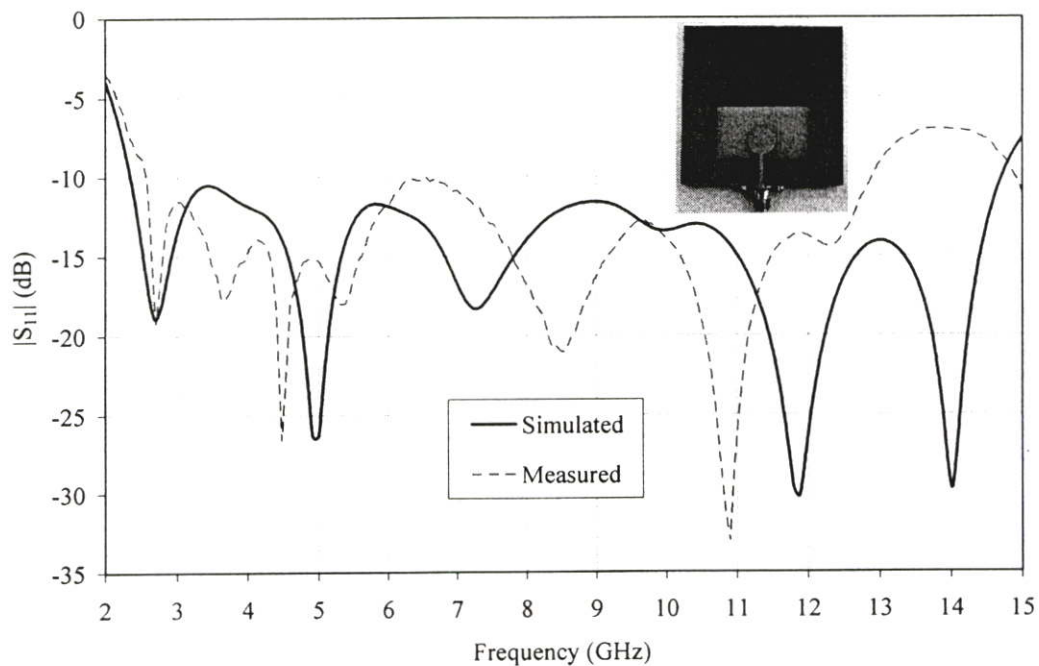
(ข)

**รูปที่ 5.4** สายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยูใส่สตัปป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

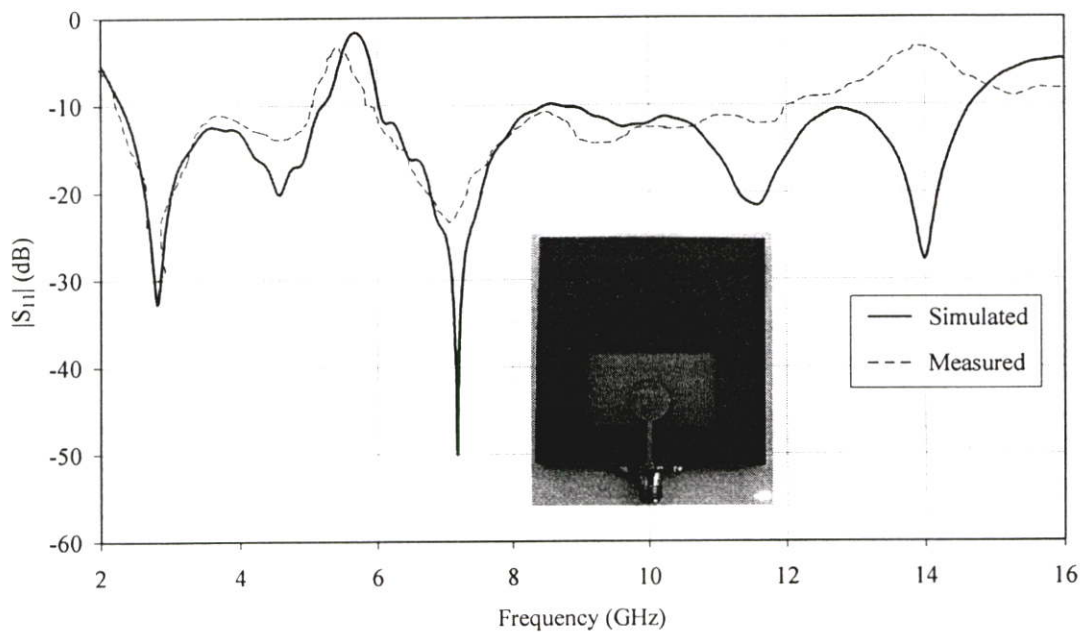
นำสายอากาศมาทดสอบเพื่อหาค่า  $|S_{11}|$  เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองในบทที่ 3 และบทที่ 4 โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP 8720C ดังรูปที่ 5.5



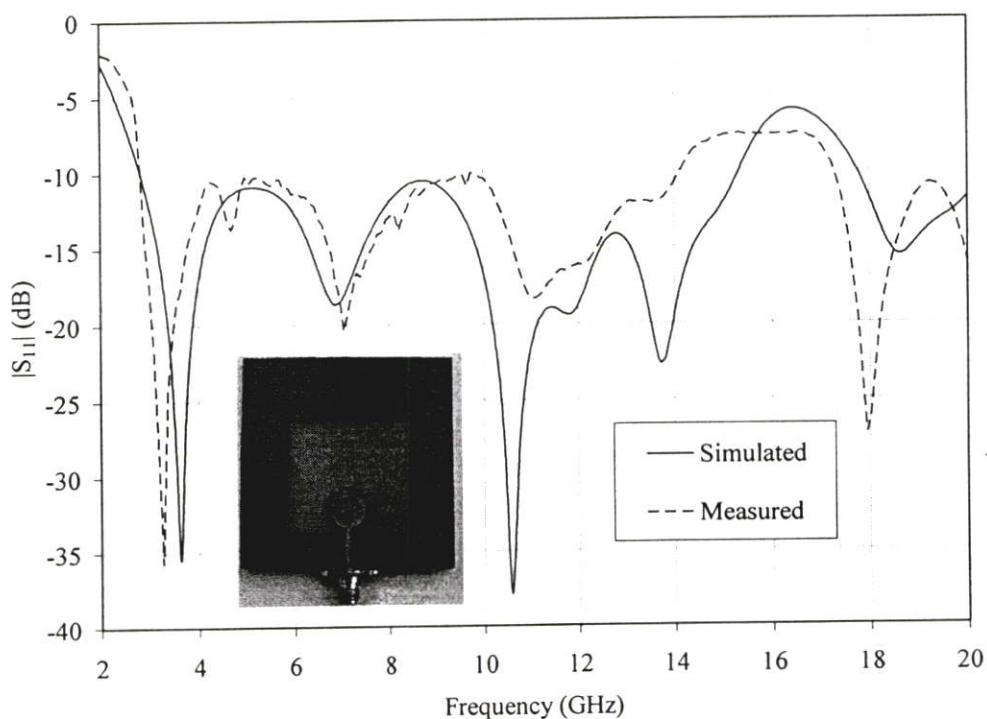
**รูปที่ 5.5** การทดสอบหาค่า  $|S_{11}|$



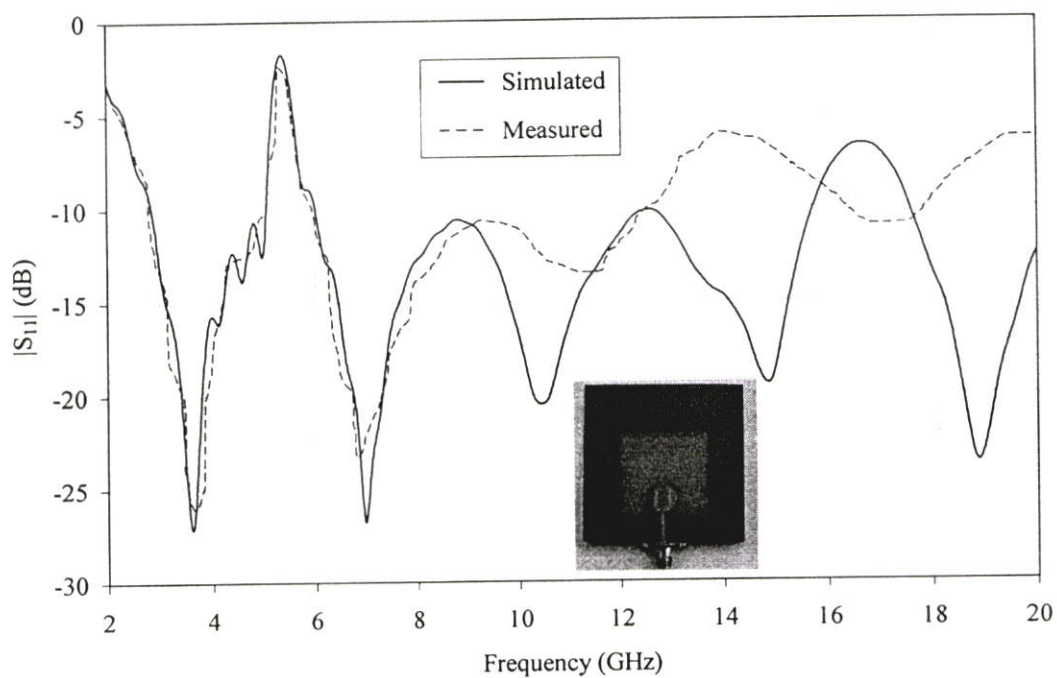
**รูปที่ 5.6** ผลการทดสอบและการจำลองหาค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง



**รูปที่ 5.7** ผลการทดสอบและการจำลองหาค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยู ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง



**รูปที่ 5.8** ผลการทดสอบและการจำลองหาค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมใส่สตับ ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง

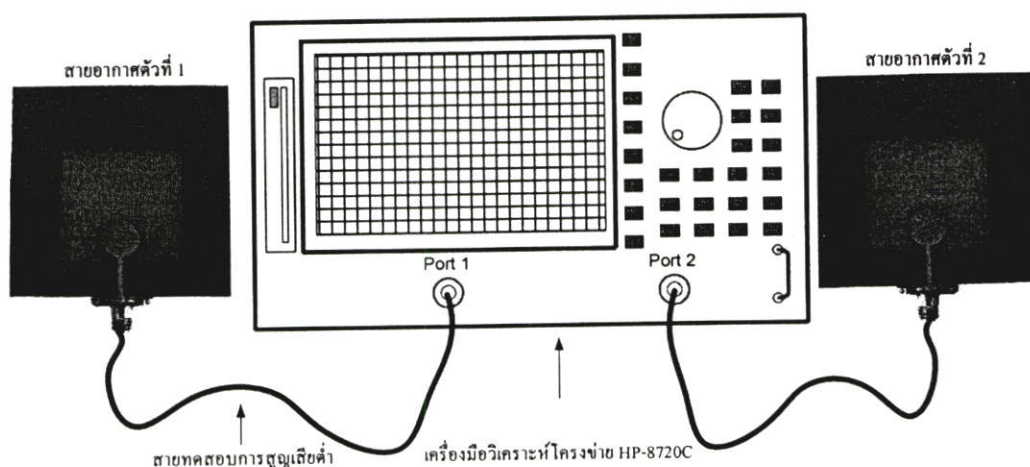


**รูปที่ 5.9** ผลการทดสอบและการจำลองหาค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยู ใส่สตับป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง

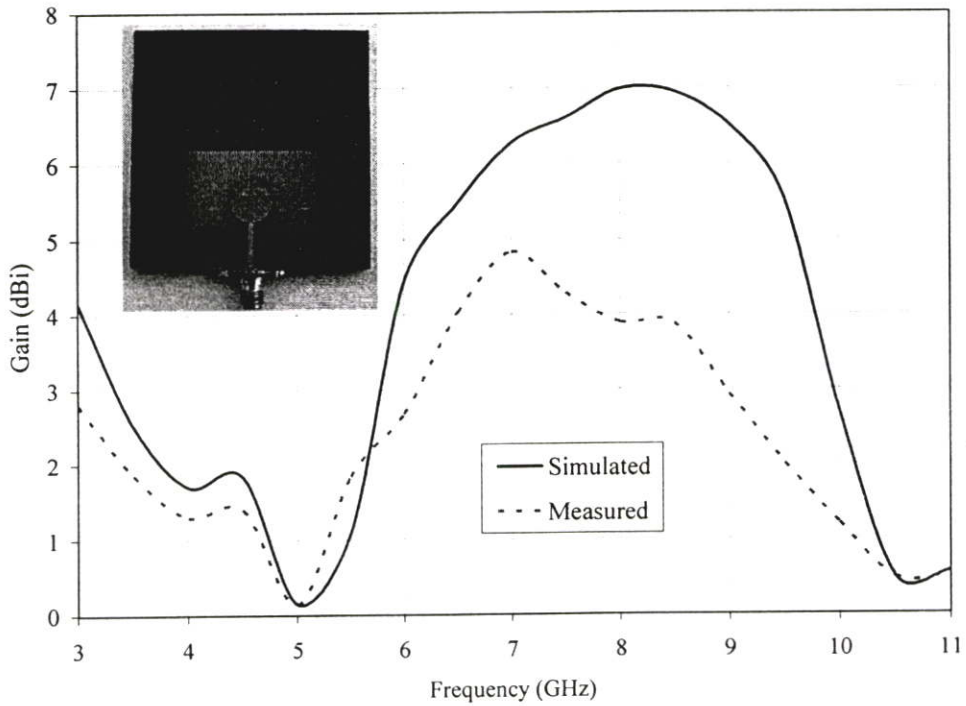
จากรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.8 เป็นผลการทดสอบและผลจำลองค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศไมโคร สตรีปวงกลมป้อนด้วยเส้น ไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้างและสายอากาศไมโคร สตรีปวงกลมใส่สตัปป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง ซึ่งผลการทดสอบและผลการจำลองได้ค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศทั้งสองแบบ ได้ผลการทดสอบจากรูปที่ 5.6 ได้ช่วงความถี่ 2.5-12.8 กิกะเฮิร์ตซ์และจากรูปที่ 5.8 ช่วงความถี่ 2.8-14.1 กิกะเฮิร์ตซ์ และผลการจำลองจากรูปที่ 5.6 ช่วงความถี่ 2.3-14.6 กิกะเฮิร์ตซ์และจากรูปที่ 5.8 ช่วงความถี่ 2.8-15.3 กิกะเฮิร์ตซ์ตามลำดับ ซึ่งค่าจากการทดสอบมีความสอดคล้องกันกับผลการจำลองซึ่งให้ช่วงกว้างความถี่ต่ำและความถี่สูงมีค่าใกล้เคียงกันและสามารถครอบคลุมความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ได้

จากรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.9 เป็นผลการทดสอบและจำลองผลค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศไมโคร สตรีปวงกลมร่องรูปตัวยูป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง และสายอากาศไมโคร สตรีปวงกลมร่องรูปตัวยูใส่สตัปป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง โดยผลการทดสอบสายอากาศไมโคร สตรีปวงกลมร่องรูปตัวยูป้อนด้วยเส้นไมโคร สตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้างได้ช่วงความถี่ 4.93-5.94 กิกะเฮิร์ตซ์และผลการจำลองได้ช่วงความถี่ 5.13-5.96 กิกะเฮิร์ตซ์ ส่วนผลการทดสอบสายอากาศไมโคร สตรีปวงกลมร่องรูปตัวยูใส่สตัปป้อนด้วยเส้นไมโคร สตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้างได้ช่วงความถี่ 4.99-5.96 กิกะเฮิร์ตซ์ และผลการจำลองได้ช่วงความถี่ 5.06-5.96 กิกะเฮิร์ตซ์ตามลำดับ ซึ่งค่าจากการทดสอบมีค่าสอดคล้องกันกับผลการจำลองในช่วงกว้างความถี่ต่ำและความถี่สูงและสามารถครอบคลุมความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ได้

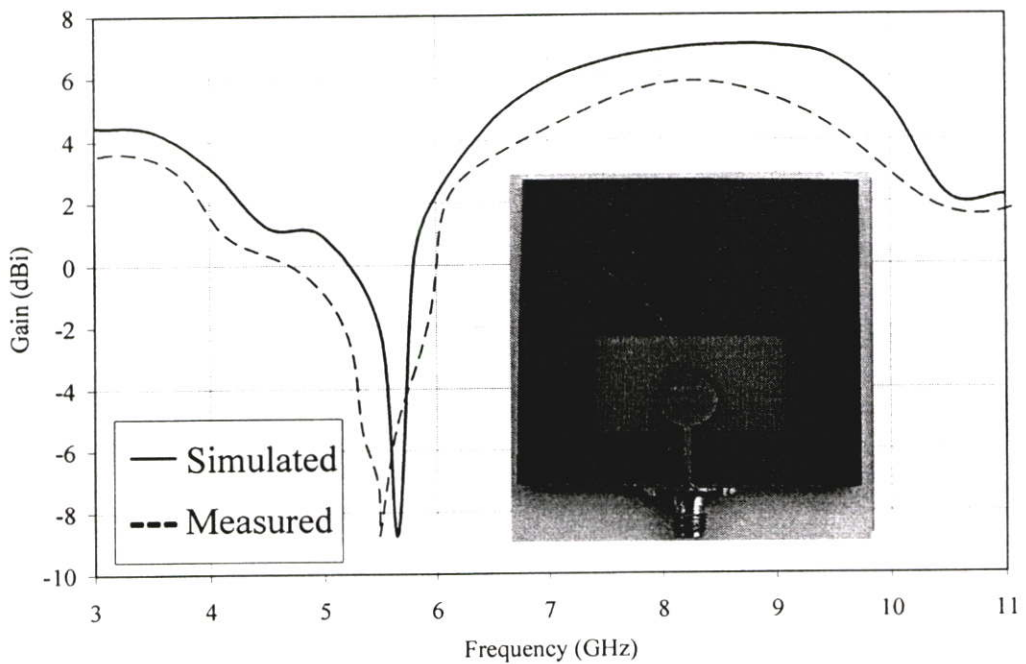
จากนั้นจึงนำสายอากาศมาทดสอบเพื่อหาอัตราขยายโดยนำโครงสร้างสายอากาศที่มีค่าเหมือนกันสองตัว ดังรูปที่ 5.10



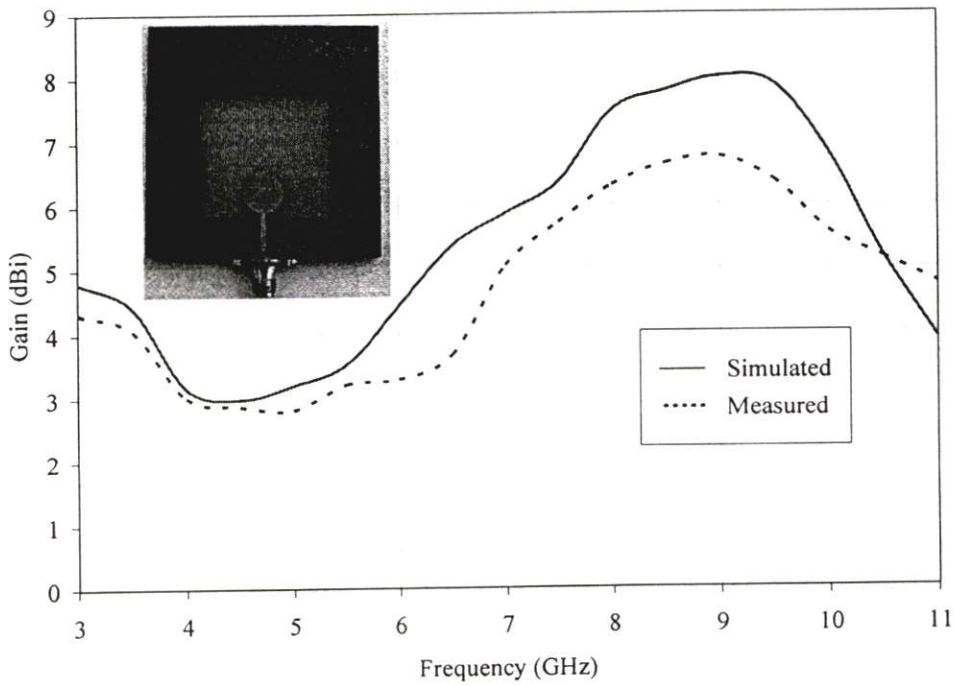
รูปที่ 5.10 การทดสอบอัตราขยาย



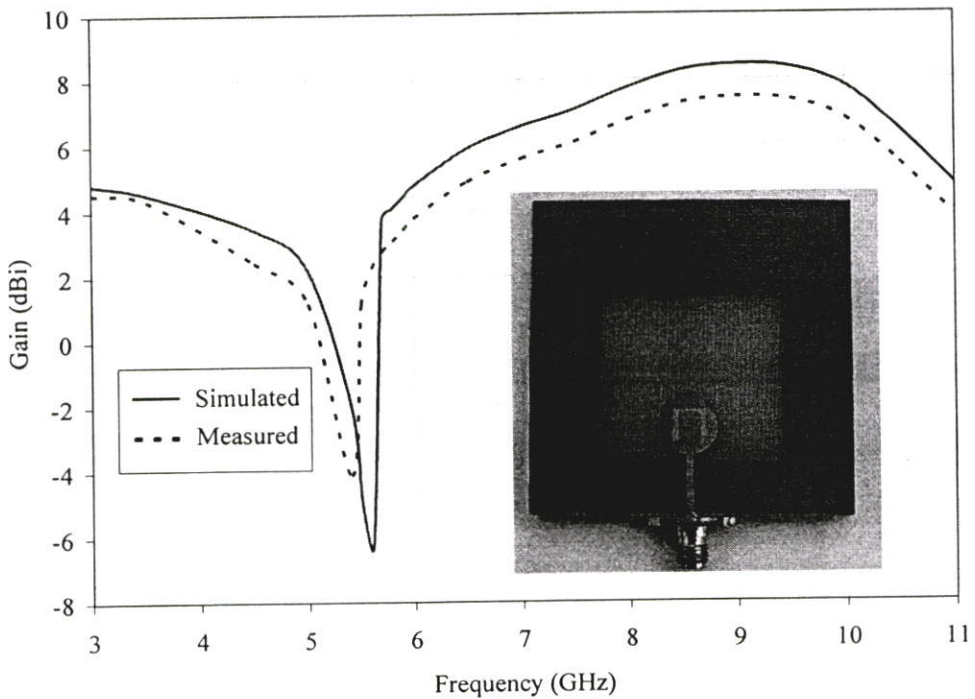
**รูปที่ 5.11** ผลการทดสอบและการจำลองหาอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง



**รูปที่ 5.12** ผลการทดสอบและการจำลองหาอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยูป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง



**รูปที่ 5.13** ผลการทดสอบและการจำลองหาอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมใส่สตัปป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง



**รูปที่ 5.14** ผลการทดสอบและการจำลองหาอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยูใส่สตัปป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง

จากรูปที่ 5.11 เป็นผลการทดสอบและผลจำลองอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง จากผลการทดสอบมีอัตราขยายต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 0.14 dBi และ 4.8 dBi ที่ความถี่ 5 กิกะเฮิรตซ์และความถี่ 7 กิกะเฮิรตซ์และผลจำลองแบบเท่ากับ 0.14 dBi และ 7.1 dBi ที่ความถี่ 5 กิกะเฮิรตซ์และความถี่ 8.2 กิกะเฮิรตซ์

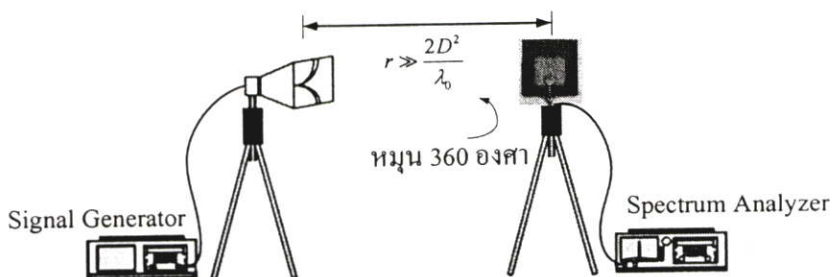
จากรูปที่ 5.12 สายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยูป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง จากผลการทดสอบมีอัตราขยายต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ -8.4 dBi และ 5.9 dBi ที่ความถี่ 5.5 กิกะเฮิรตซ์และความถี่ 8.1 กิกะเฮิรตซ์และผลจำลองแบบเท่ากับ -8.4 dBi และ 7 dBi ที่ความถี่ 5.7 กิกะเฮิรตซ์และความถี่ 9 กิกะเฮิรตซ์ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.13 สายอากาศไมโครสตริปวงกลมใส่สตัดป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง จากผลการทดสอบมีอัตราขยายต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 2.8 dBi และ 6.8 dBi ที่ความถี่ 5 กิกะเฮิรตซ์และความถี่ 9 กิกะเฮิรตซ์และผลจำลองแบบเท่ากับ 3 dBi และ 8 dBi ที่ความถี่ 4.4 กิกะเฮิรตซ์และความถี่ 9 กิกะเฮิรตซ์ตามลำดับ

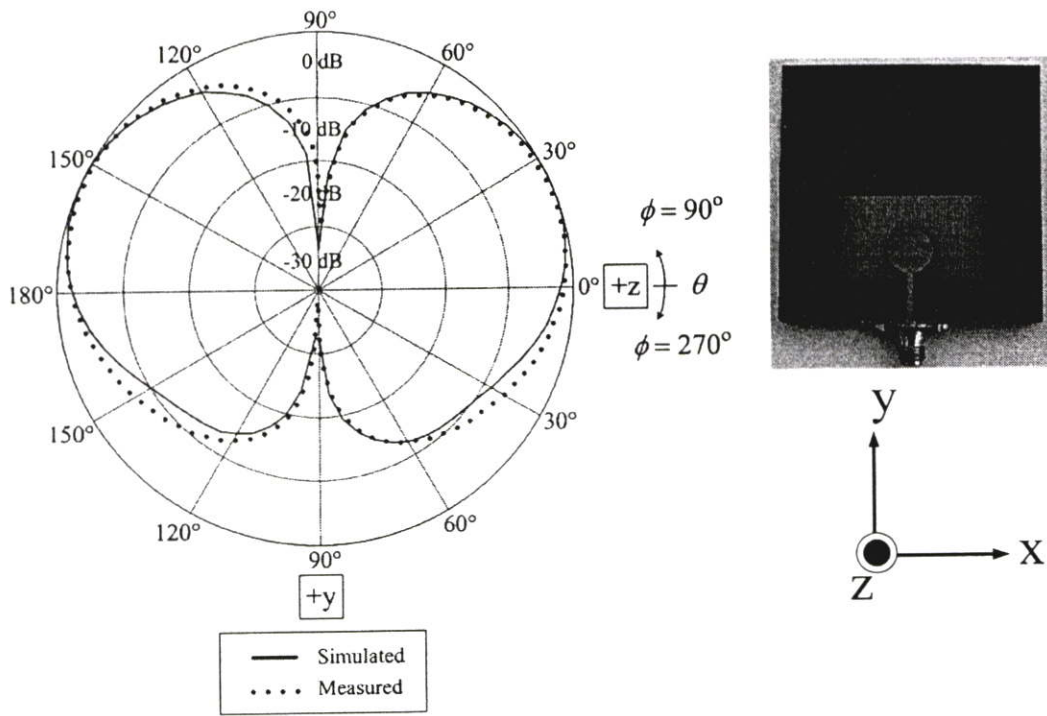
จากรูปที่ 5.14 สายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยูใส่สตัดป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง ผลการทดสอบมีอัตราขยายต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ -4.1 dBi และ 7 dBi ที่ความถี่ 5.4 กิกะเฮิรตซ์และความถี่ 9 กิกะเฮิรตซ์และผลจำลองแบบเท่ากับ -6.2 dBi และ 8.2 dBi ที่ความถี่ 5.5 กิกะเฮิรตซ์และความถี่ 9 กิกะเฮิรตซ์ตามลำดับ

จากผลการทดสอบที่กล่าวมาจากรูปที่ 5.11-5.14 สามารถแบ่งสายอากาศได้ 2 กลุ่มคือ สายอากาศที่ใส่ร่องรูปตัวยูหรือสายอากาศตัดความถี่และสายอากาศที่ไม่ใส่ร่องรูปตัวยู ซึ่งมีผลทำให้มีความแตกต่างในเรื่องของอัตราขยายของสายอากาศ โดยสายอากาศตัดความถี่จะมีอัตราขยายในช่วงติดลบในช่วงความถี่ที่ตัดความถี่ส่วนสายอากาศที่ไม่ใส่ร่องรูปตัวยูจะมีอัตราขยายเป็นบวกตลอดช่วง 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์

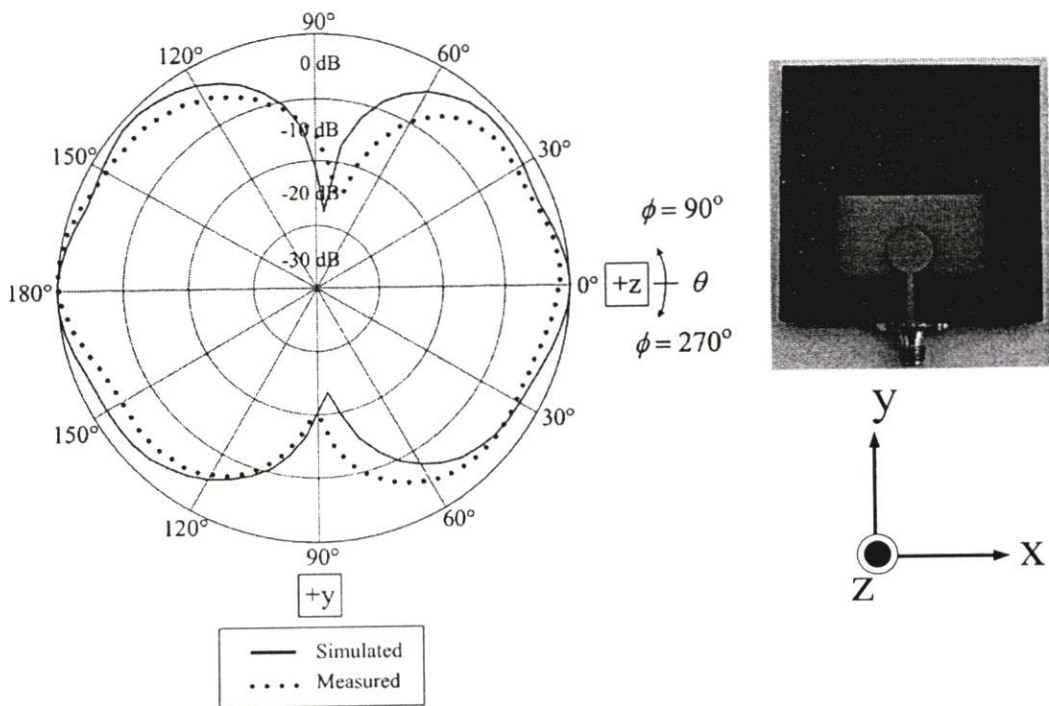
จากนั้นทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระยะทางจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับมีระยะทางเท่ากับ  $r \gg \frac{2D^2}{\lambda_0}$  เมื่อ  $D$  เป็นความยาวส่วนที่ยาวที่สุดของสายอากาศสองตัวรวมกัน และ  $\lambda_0$  เป็นความยาวคลื่นในอากาศ



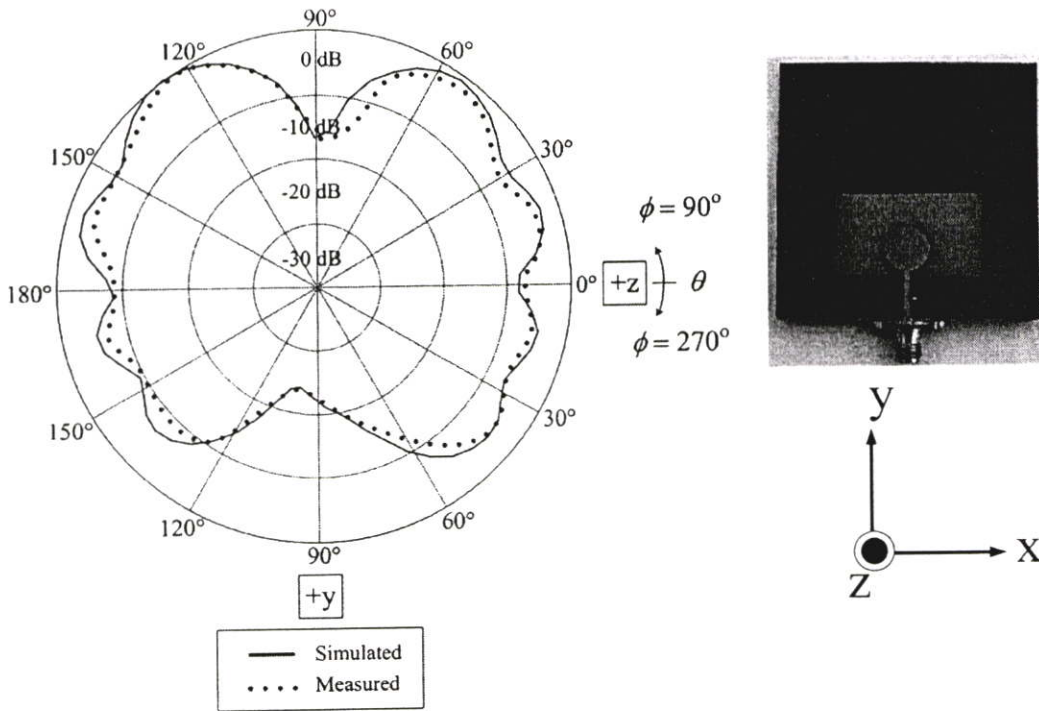
รูปที่ 5.15 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น



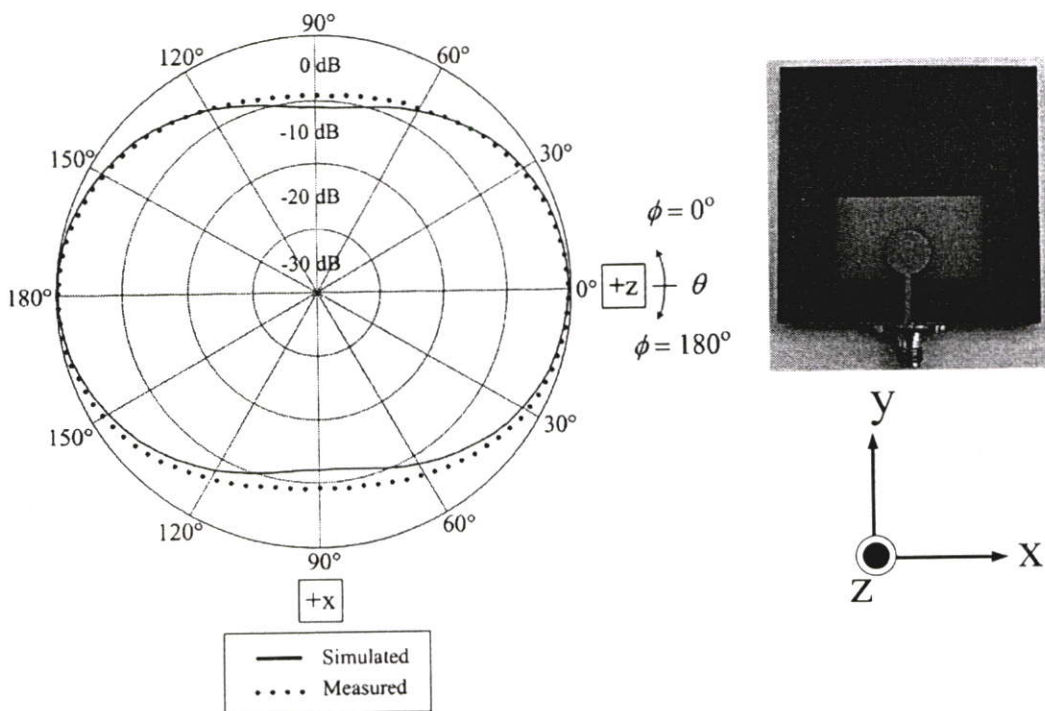
**รูปที่ 5.16** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



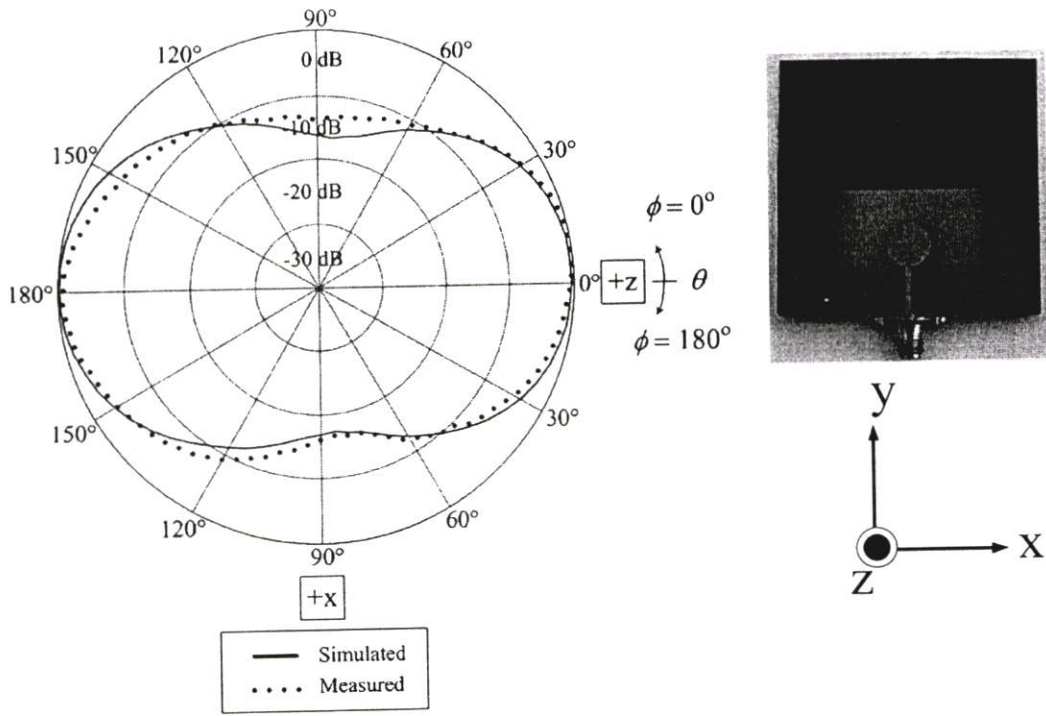
**รูปที่ 5.17** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



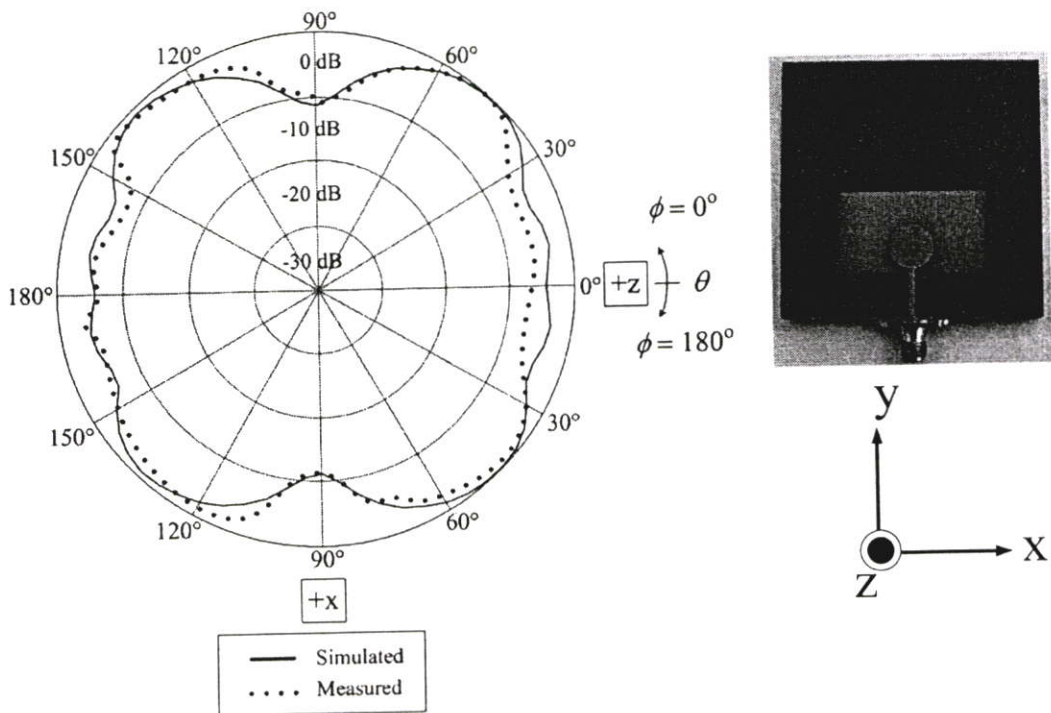
**รูปที่ 5.18** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



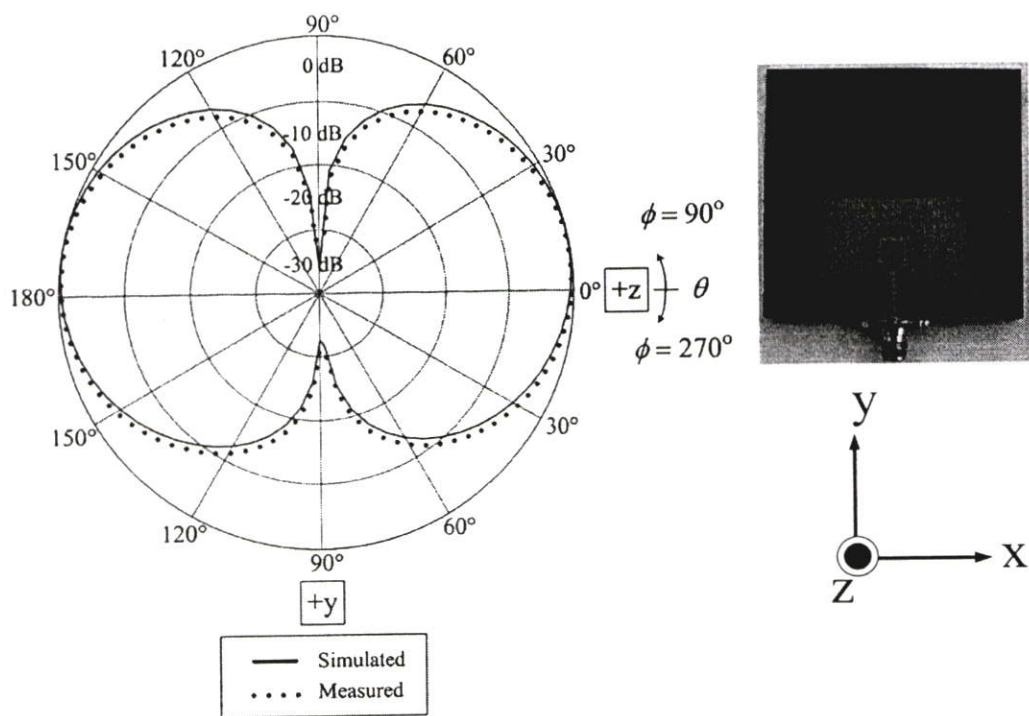
**รูปที่ 5.19** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก



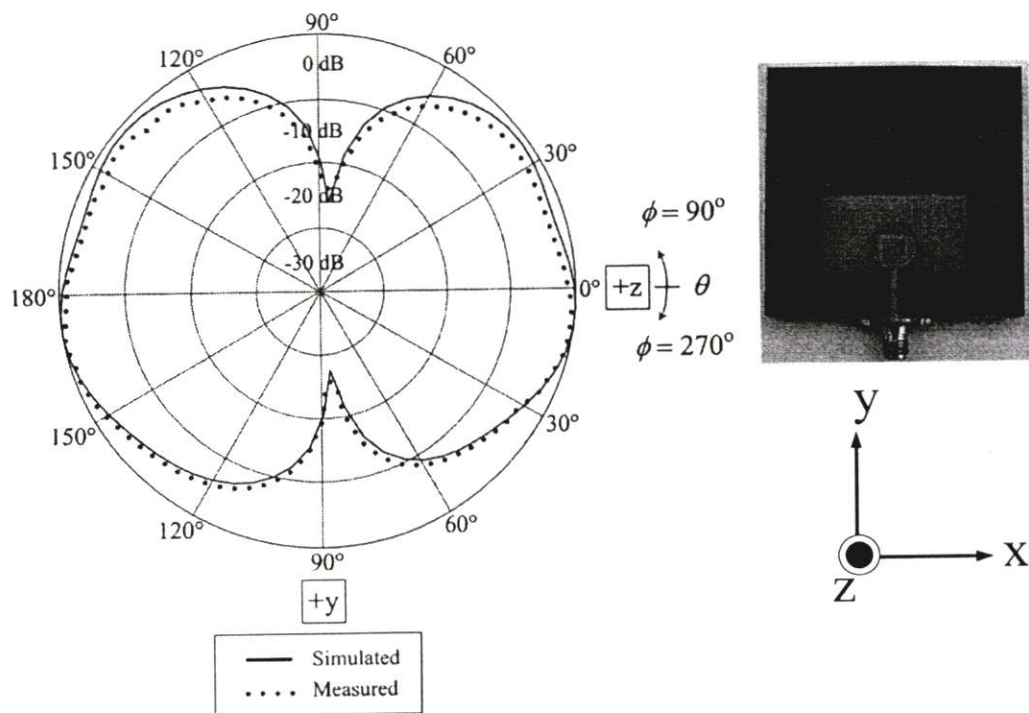
**รูปที่ 5.20** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก



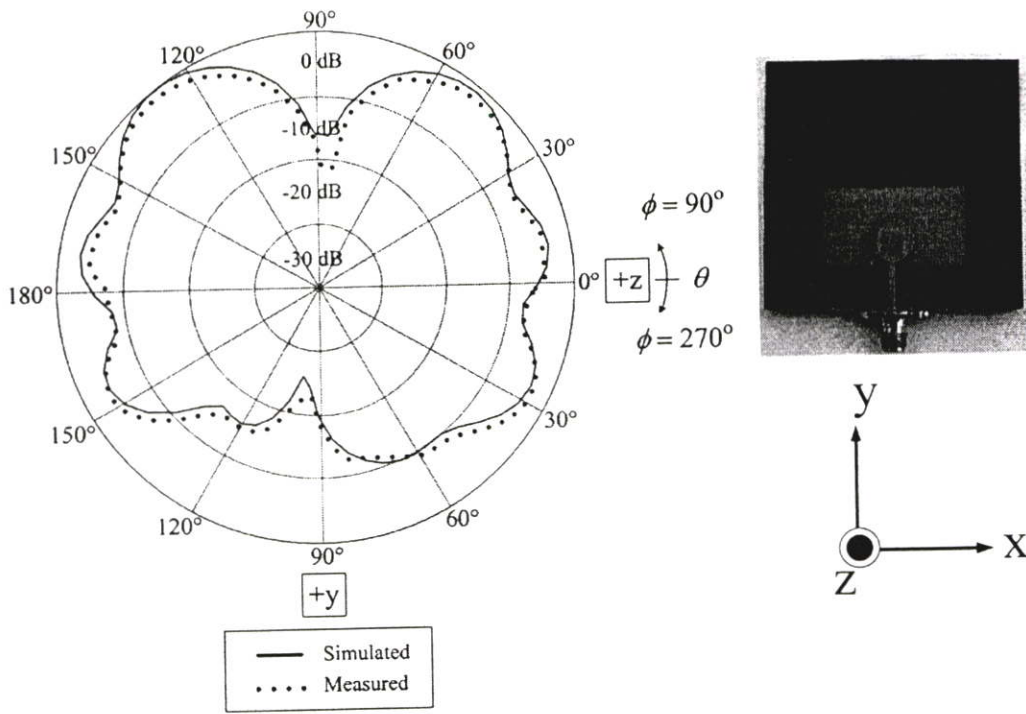
**รูปที่ 5.21** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก



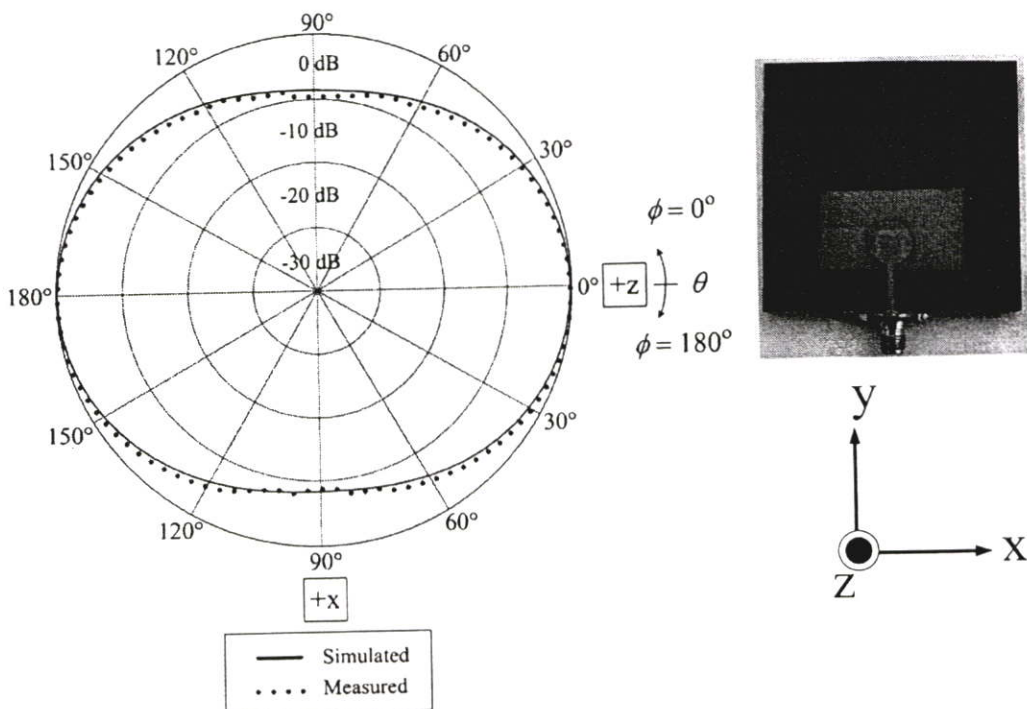
**รูปที่ 5.22** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



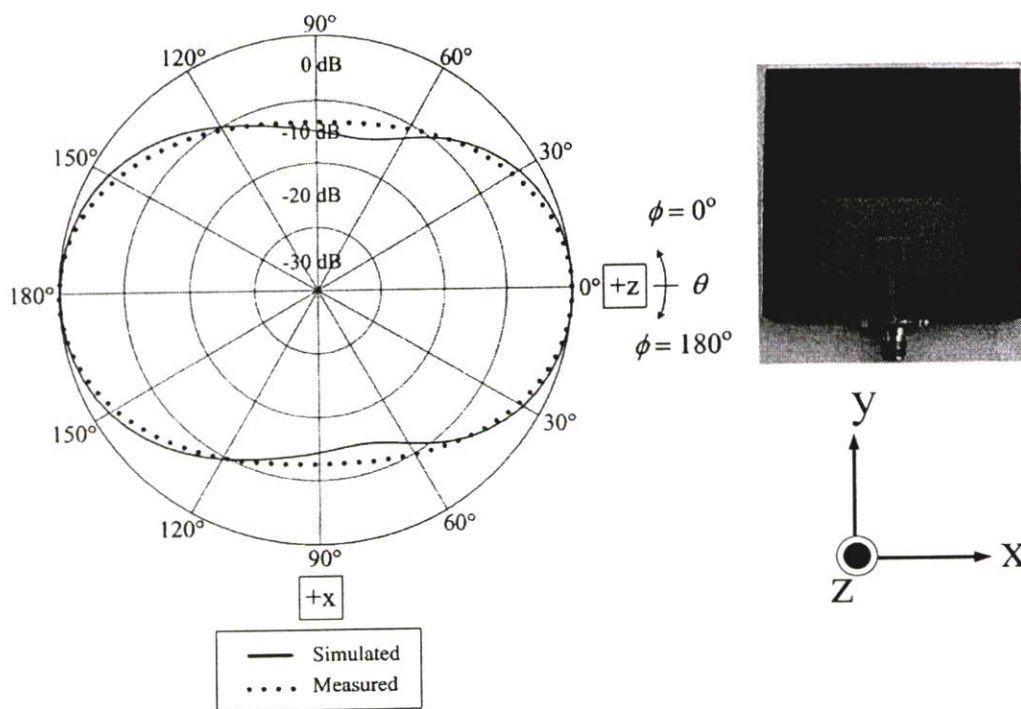
**รูปที่ 5.23** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



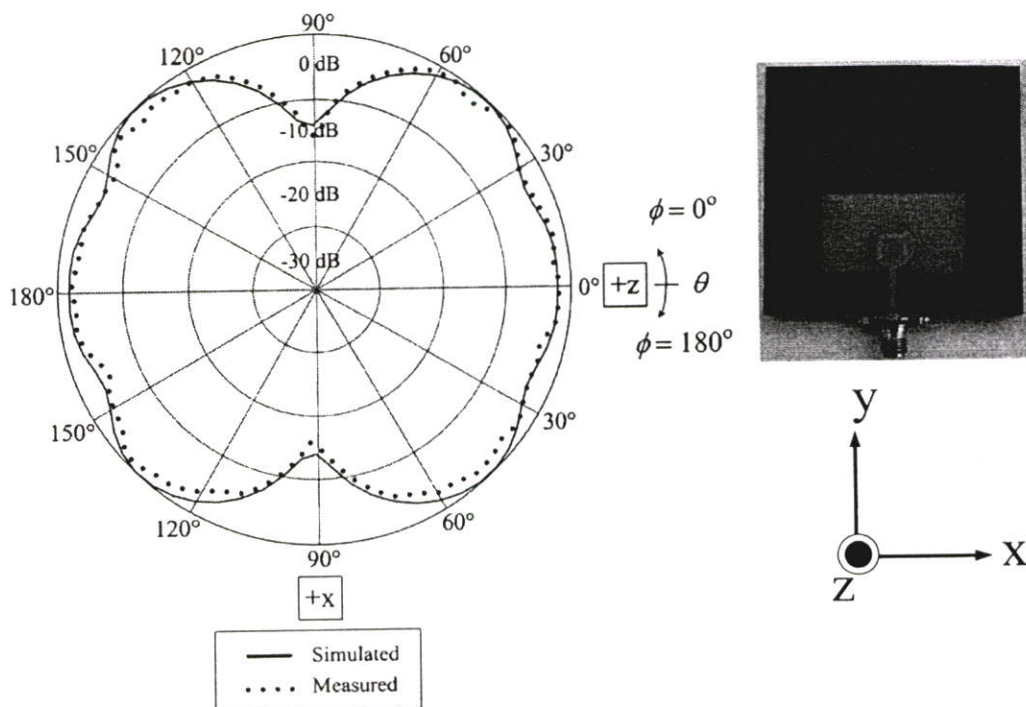
**รูปที่ 5.24** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



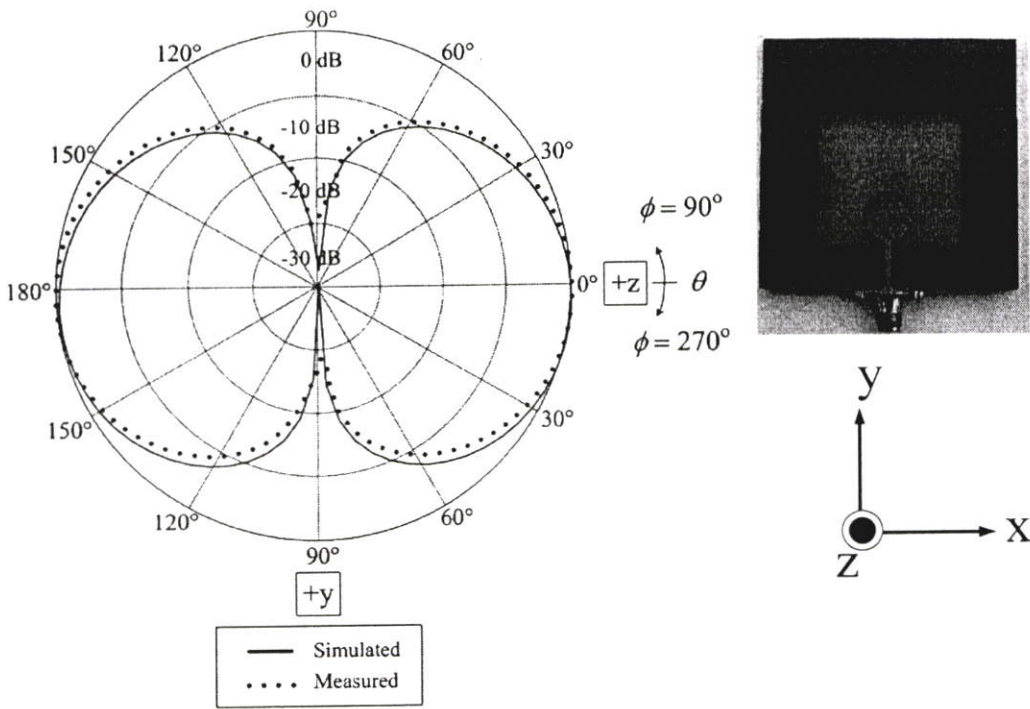
**รูปที่ 5.25** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก



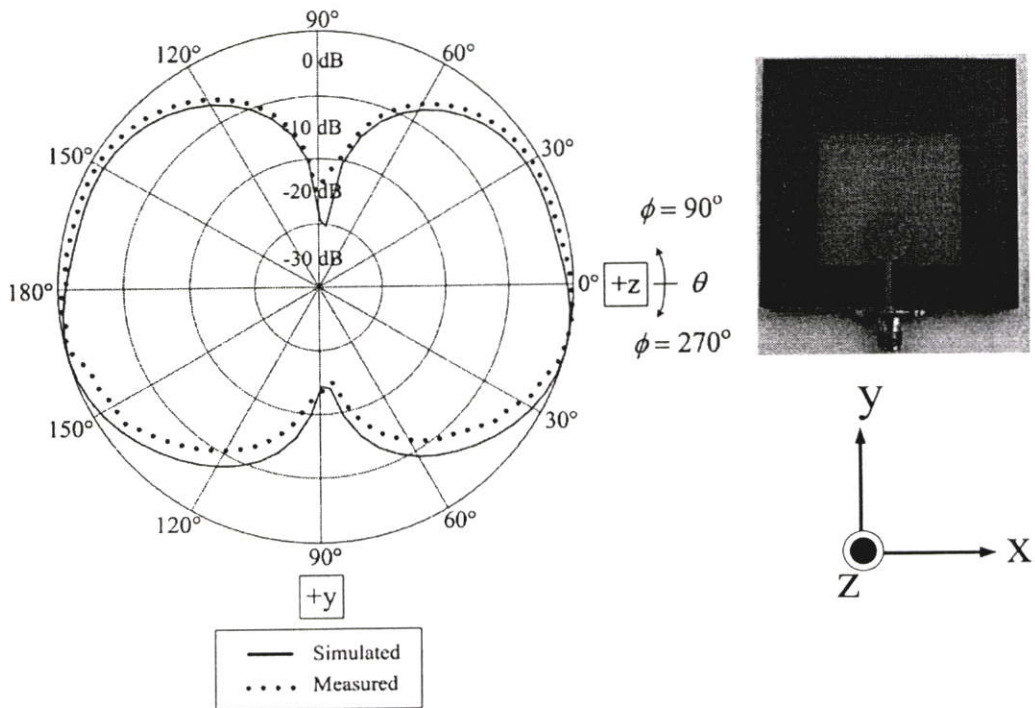
**รูปที่ 5.26** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก



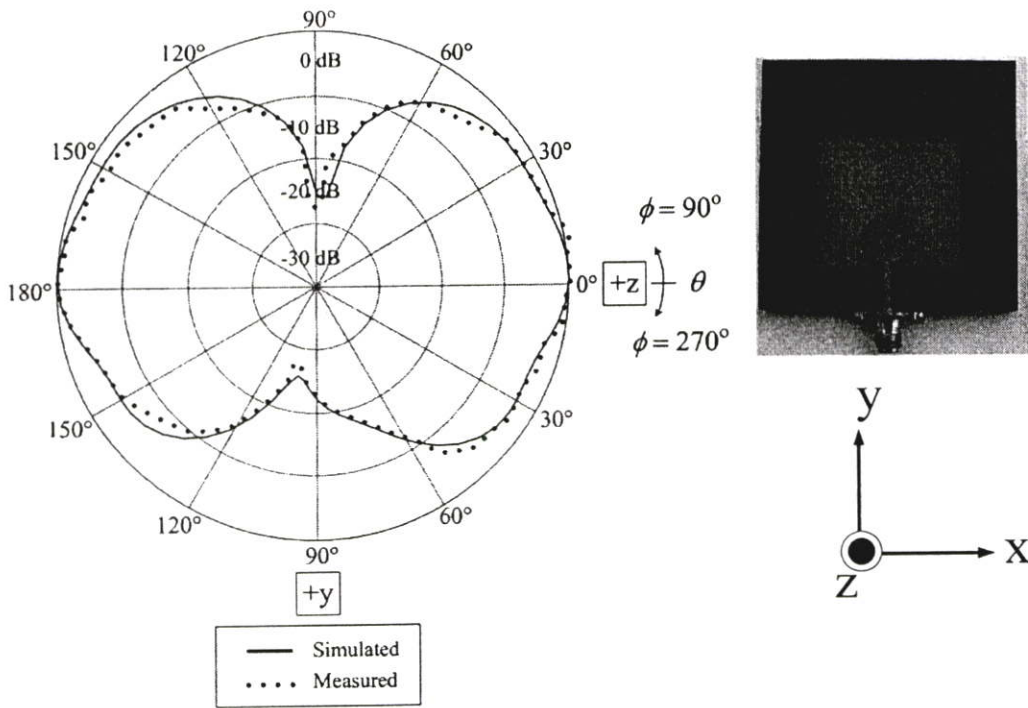
**รูปที่ 5.27** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก



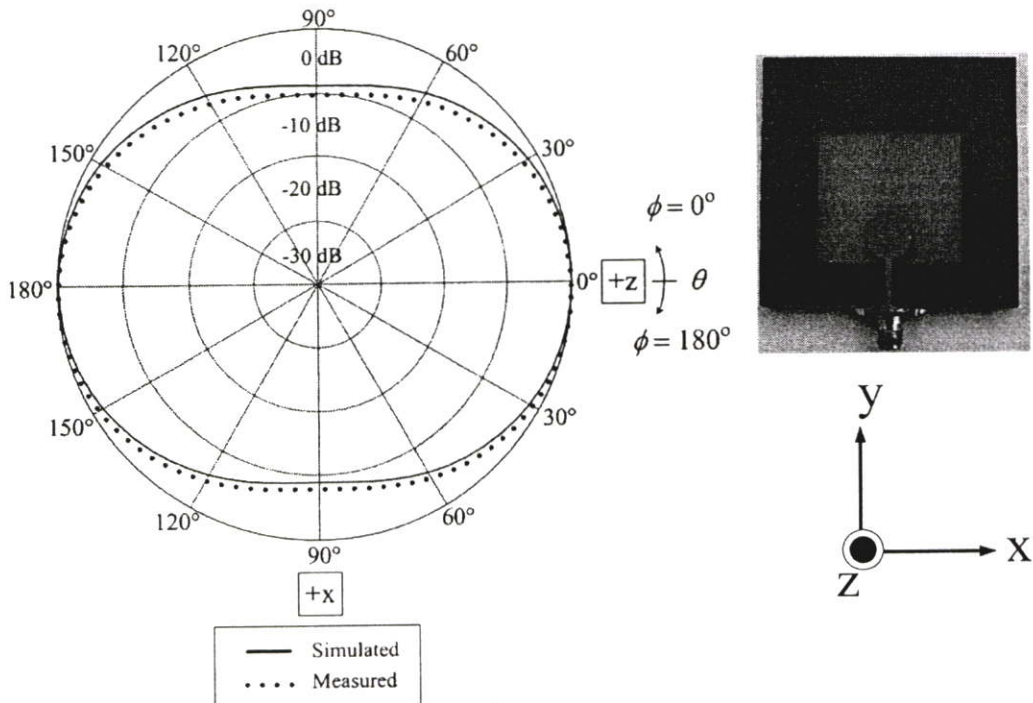
**รูปที่ 5.28** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



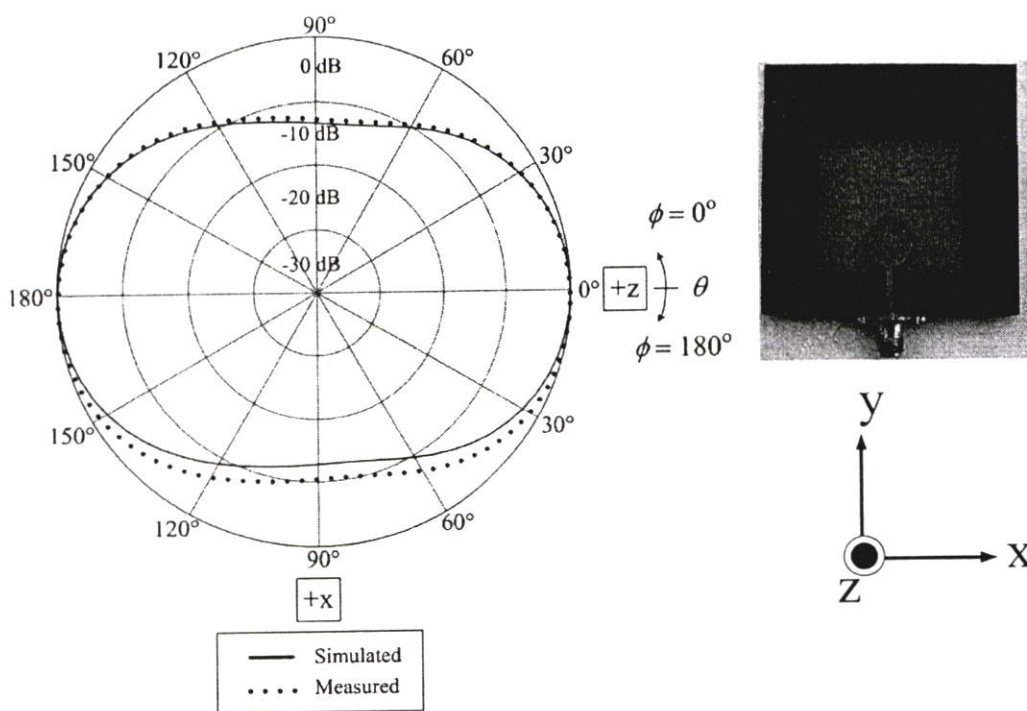
**รูปที่ 5.29** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



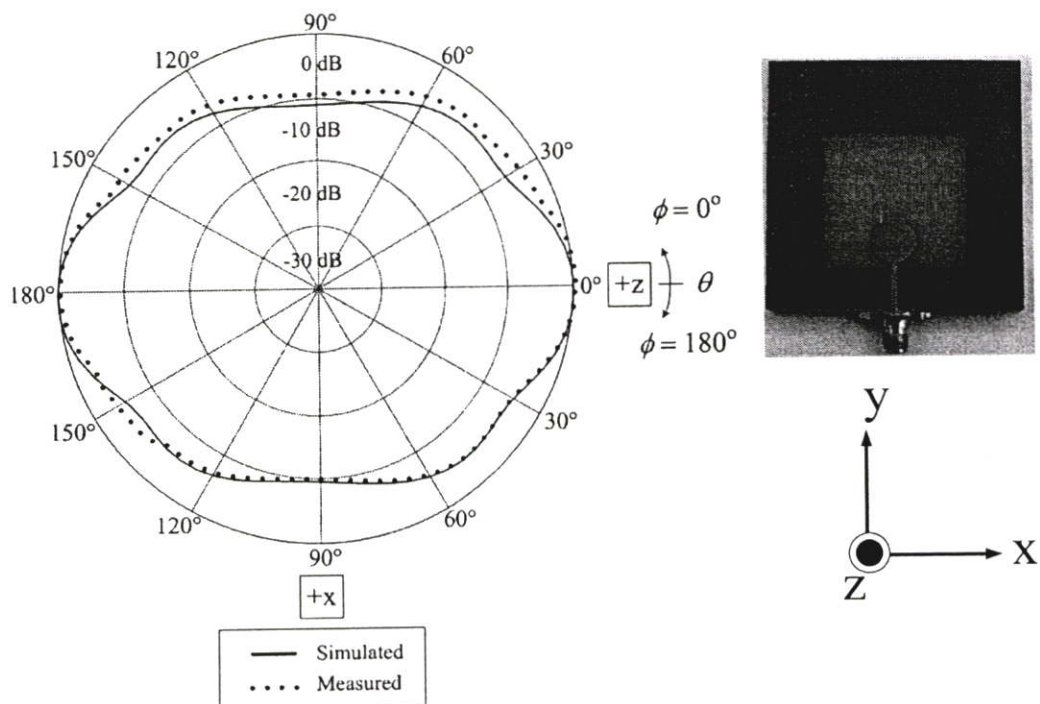
**รูปที่ 5.30** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า



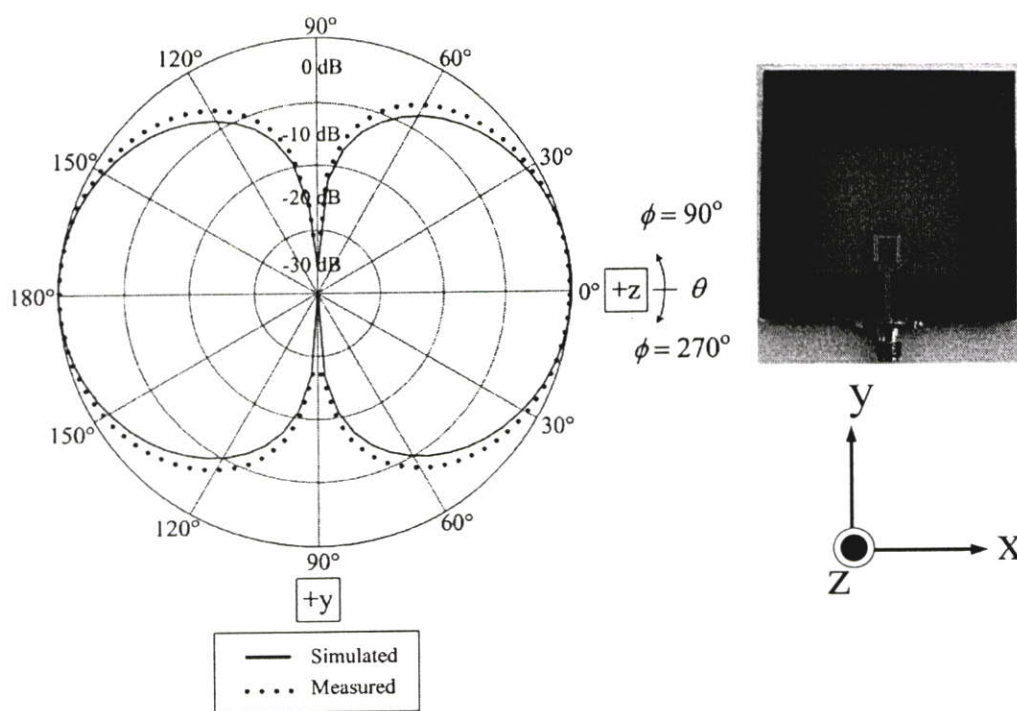
**รูปที่ 5.31** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก



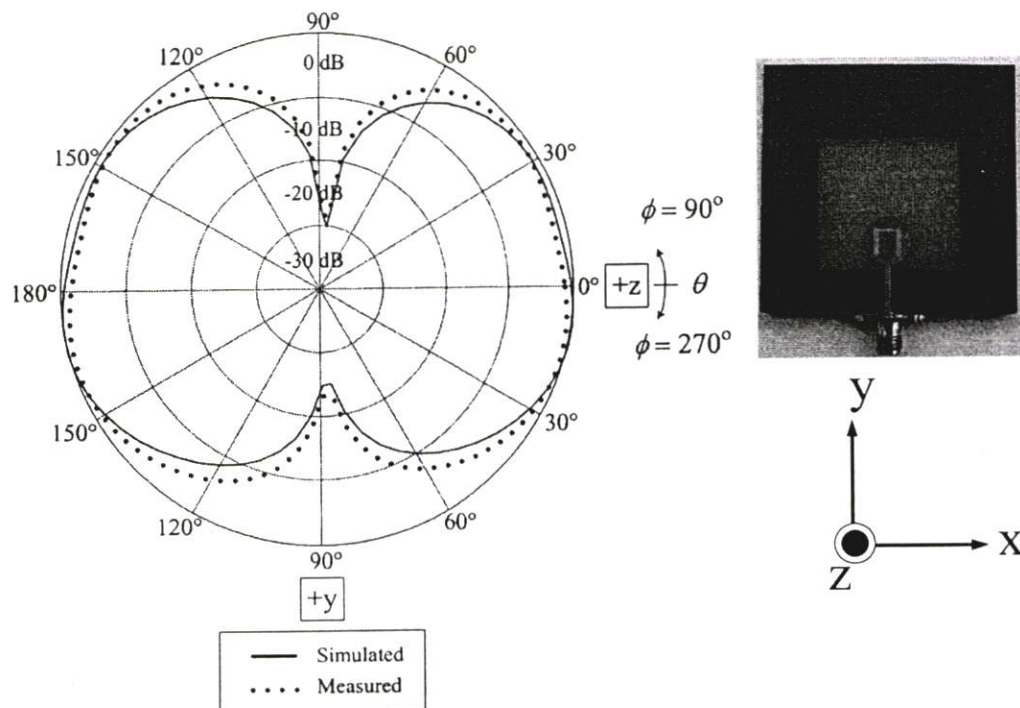
**รูปที่ 5.32** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก



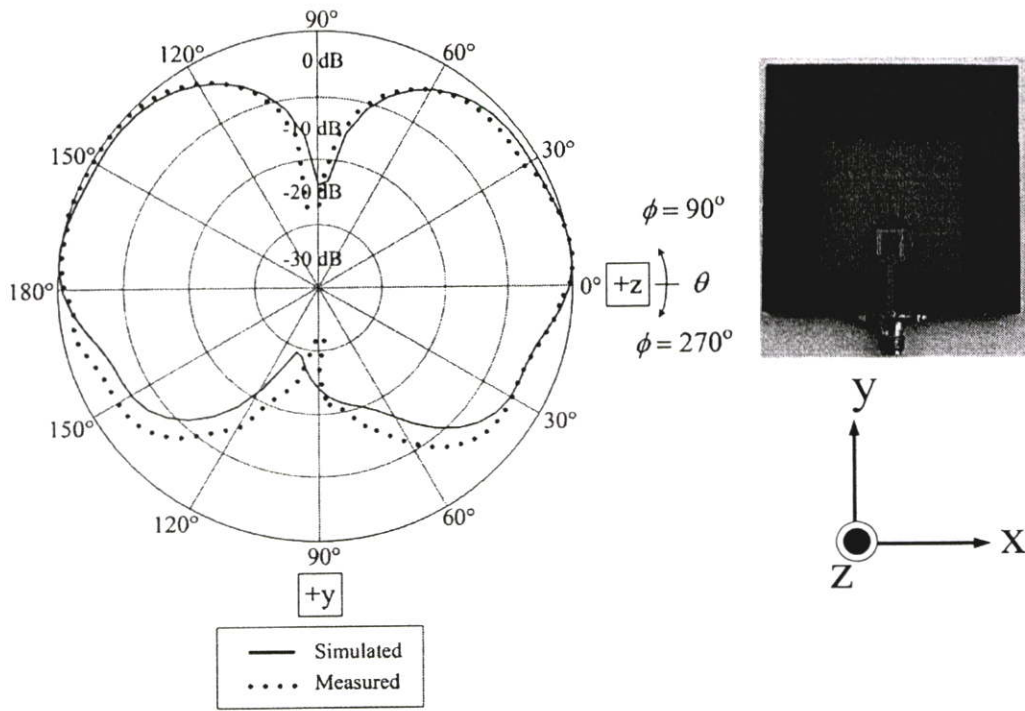
**รูปที่ 5.33** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก



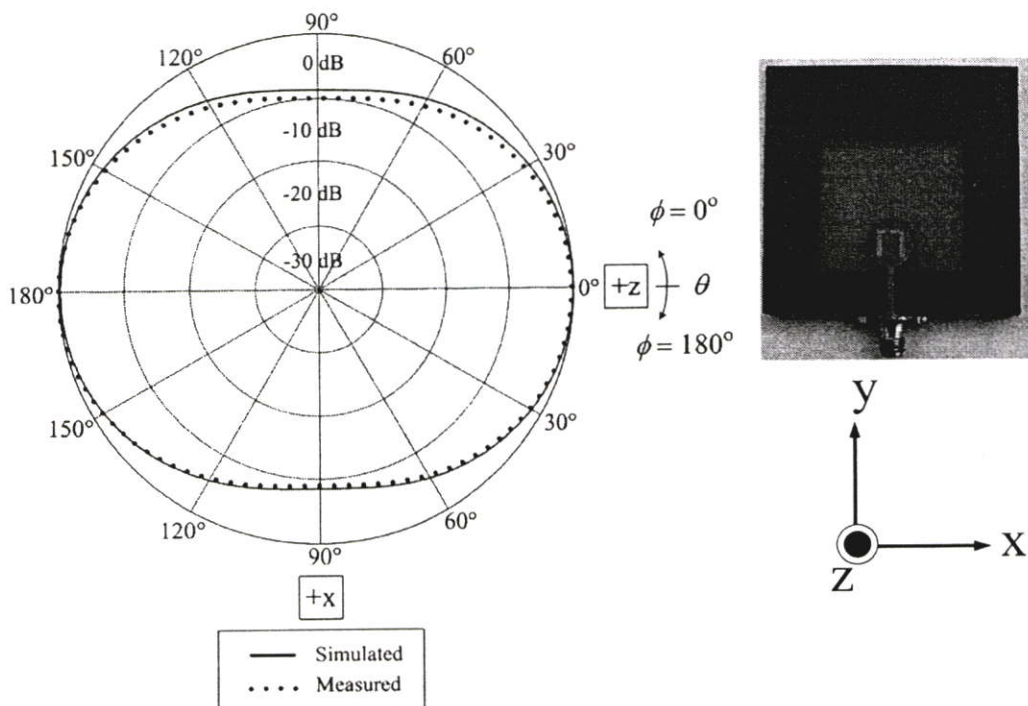
**รูปที่ 5.34** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ใน  
ระนาบสนามไฟฟ้า



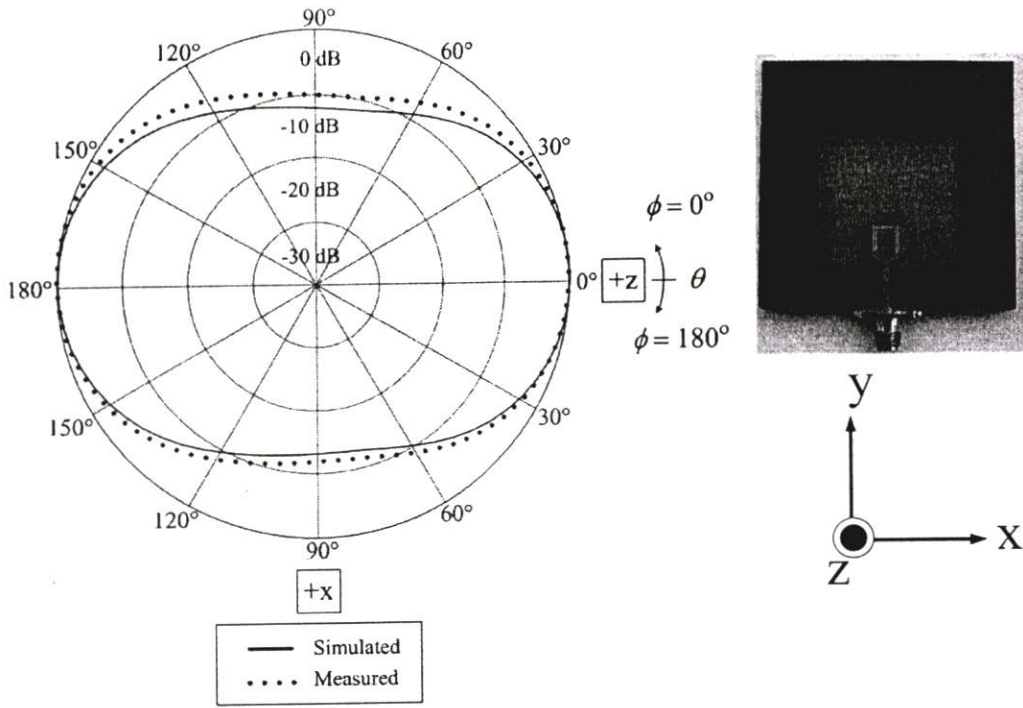
**รูปที่ 5.35** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ใน  
ระนาบสนามไฟฟ้า



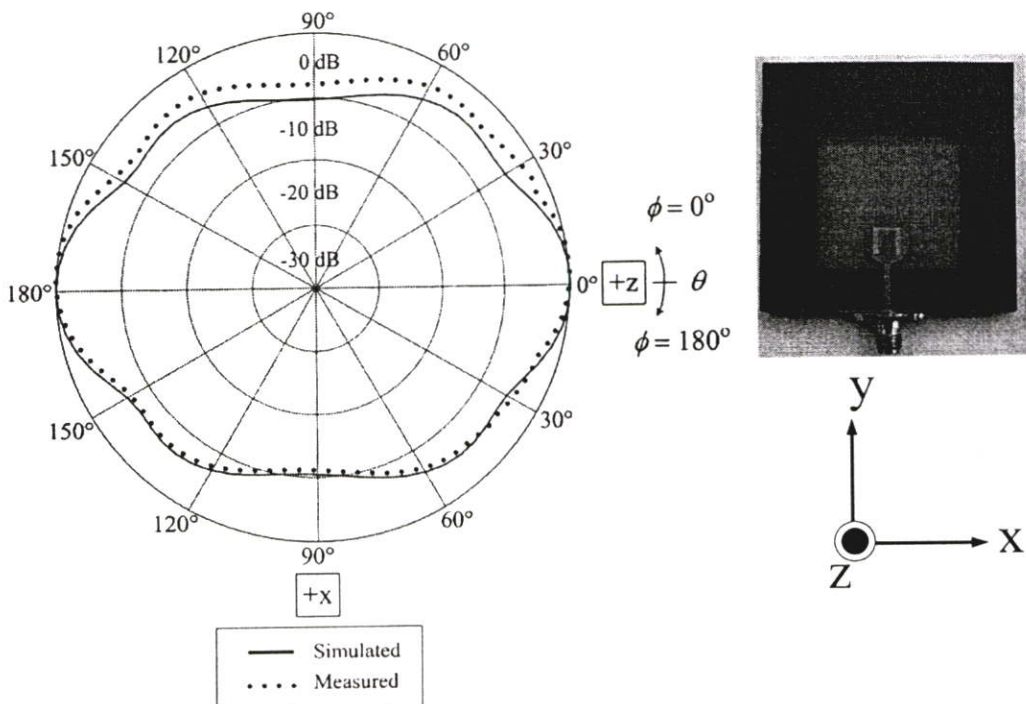
**รูปที่ 5.36** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ใน  
ระนาบสนามไฟฟ้า



**รูปที่ 5.37** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ใน  
ระนาบสนามแม่เหล็ก



**รูปที่ 5.38** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ใน  
ระนาบสนามแม่เหล็ก



**รูปที่ 5.39** ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ใน  
ระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 5.16 ถึงรูปที่ 5.27 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้างและสายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยูป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้างในช่วงความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์และ 6.8 กิกะเฮิรตซ์ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง ส่วนช่วงความถี่สูงคือ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ไม่ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง ซึ่งมีความสอดคล้องกันทั้งผลการทดสอบและผลการจำลองและสามารถสรุปค่ามุมที่ลาค่คลื่นสูงสุดและความกว้างลาค่คลื่นดังตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 ดังนี้

**ตารางที่ 5.1** ค่ามุมที่ลาค่คลื่นสูงสุดและความกว้างลาค่คลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง

ความถี่ (GHz)	ระนาบสนามไฟฟ้า				ระนาบสนามแม่เหล็ก			
	ค่ามุมที่ลาค่คลื่น สูงสุด (องศา)		ความกว้างลาค่คลื่น (องศา)		ค่ามุมที่ลาค่คลื่น สูงสุด (องศา)		ความกว้างลาค่คลื่น (องศา)	
	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ
3.1	160	162	58	60	180	180	71	72
6.8	180	180	103	100	180	180	59	56
10.6	125	122	31	28	45	45	38	36

**ตารางที่ 5.2** ค่ามุมที่ลาค่คลื่นสูงสุดและความกว้างลาค่คลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยูป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง

ความถี่ (GHz)	ระนาบสนามไฟฟ้า				ระนาบสนามแม่เหล็ก			
	ค่ามุมที่ลาค่คลื่น สูงสุด (องศา)		ความกว้างลาค่คลื่น (องศา)		ค่ามุมที่ลาค่คลื่น สูงสุด (องศา)		ความกว้างลาค่คลื่น (องศา)	
	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ
3.1	170	170	66	68	180	180	80	81
6.8	170	170	89	86	180	180	62	60
10.6	125	125	34	32	45	40	38	32

จากรูปที่ 5.28 ถึงรูปที่ 5.39 แสดงการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมใส่สตัปป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้างและสายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยูใส่สตัปป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง ในช่วงความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ 6.8 กิกะเฮิรตซ์และ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง ซึ่งในช่วงความถี่สูงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นดีกว่าสายอากาศสองแบบที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งมีความสอดคล้องกันทั้งผลการทดสอบและผลการจำลองและสามารถสรุปค่ามุมที่ลาคี่นสูงสุดและความกว้างลาคี่นดังตารางที่ 5.3 และตารางที่ 5.4 ดังนี้

**ตารางที่ 5.3** ค่ามุมที่ลาคี่นสูงสุดและความกว้างลาคี่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมใส่สตัปป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง

ความถี่ (GHz)	ระนาบสนามไฟฟ้า				ระนาบสนามแม่เหล็ก			
	ค่ามุมที่ลาคี่น สูงสุด (องศา)		ความกว้างลาคี่น (องศา)		ค่ามุมที่ลาคี่น สูงสุด (องศา)		ความกว้างลาคี่น (องศา)	
	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ
3.1	170	170	68	70	180	180	84	82
6.8	165	165	83	86	180	180	63	66
10.6	170	170	67	68	180	180	38	40

**ตารางที่ 5.4** ค่ามุมที่ลาคี่นสูงสุดและความกว้างลาคี่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยูใส่สตัปป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง

ความถี่ (GHz)	ระนาบสนามไฟฟ้า				ระนาบสนามแม่เหล็ก			
	ค่ามุมที่ลาคี่น สูงสุด (องศา)		ความกว้างลาคี่น (องศา)		ค่ามุมที่ลาคี่น สูงสุด (องศา)		ความกว้างลาคี่น (องศา)	
	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ
3.1	170	170	68	70	180	180	85	84
6.8	165	165	83	84	180	180	63	64
10.6	170	170	67	66	180	180	37	38

### 5.3 บทสรุป

เนื้อหาบทนี้กล่าวถึง โครงสร้างสายอากาศและการทดสอบ มีลักษณะของสายอากาศ 4 แบบ ได้แก่ 1) สายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง 2) สายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยูป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง 3) สายอากาศไมโครสตริปวงกลมใส่สตัดป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้างและ 4) สายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยูใส่สตัดป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง การทดสอบสายอากาศเพื่อให้ทราบค่า  $|S_{11}|$  อัตราขยายและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและนำผลทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองพบว่าผลทั้งสองมีความสอดคล้องกัน ผลการทดสอบค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศทั้ง 4 แบบ สรุปได้ว่าสายอากาศสามารถรองรับความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ แต่เมื่อเพิ่มคุณลักษณะสายอากาศเป็นสายอากาศตัดความถี่ โดยการเจาะร่องรูปตัวยูบนไมโครสตริปวงกลมสามารถออกแบบไม่ให้ไปรบกวนกับความถี่ที่ไม่ต้องการของระบบ HIPERLAN ความถี่ 5.150-5.350 กิกะเฮิร์ตซ์ และระบบ Wireless LAN ความถี่ 5.725-5.825 กิกะเฮิร์ตซ์และความถี่ 2.410-2.483 กิกะเฮิร์ตซ์ และทำให้อัตราขยายช่วงนั้นดีกลับ ส่วนการใส่สตัดบนไมโครสตริปวงกลมสามารถปรับปรุงค่า  $|S_{11}|$  ให้มีความถี่เรโซแนนซ์แรกสูงขึ้นได้และให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางในความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิร์ตซ์

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงการสรุปเนื้อหาโดยรวม ข้อเสนอแนะ และแนวทางในการจำลองแบบ การจัดสร้าง และทดสอบสายอากาศ ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษา วิเคราะห์และทดสอบสายอากาศที่มีโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง โดยการวิจัยเริ่มจากการศึกษาทฤษฎีของสายอากาศไมโครสตริป การจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® ผลที่ได้จากการจำลองจะนำมาใช้ปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศเพื่อให้มีสมรรถนะตามจุดมุ่งหมาย หลังจากนั้นจะทำการสร้างสายอากาศเพื่อนำมาทดสอบว่าสายอากาศที่สร้างขึ้นนั้นจะมีคุณลักษณะของสายอากาศได้ตามต้องการ

### 6.2 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการคำนวณโดยใช้หลักการทางทฤษฎีไมโครสตริปและนำมาจำลองแบบเพื่อปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศให้สามารถรองรับช่วงความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิร์ตซ์ และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสองทิศทาง ซึ่งลักษณะของสายอากาศเป็นโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อการเริ่มต้นในการคำนวณและออกแบบ จากนั้นวิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียเพื่อนำมาปรับปรุงสมรรถนะและประสิทธิภาพของสายอากาศให้ดีขึ้น ทำให้ได้โครงสร้างสายอากาศรวมทั้งหมดสี่แบบ ซึ่งได้ตั้งชื่อเรียกตามการเพิ่มเติมส่วนเข้าไปในโครงสร้างหลักซึ่งมีชื่อเรียกดังต่อไปนี้ (1) สายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง (2) สายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยูป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง (3) สายอากาศไมโครสตริปวงกลมใส่สตัดป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง (4) สายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยูใส่สตัดป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง โดยสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ที่นำไปจัดสร้างสายอากาศทั้งสี่แบบ โดยสายอากาศทุกแบบจัดสร้างลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ซึ่งมีค่าค่าสภาพยอมสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.4 และความหนาของแผ่นวัสดุฐานรอง ( $h_r$ ) เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร ซึ่งพารามิเตอร์ของสายอากาศทั้ง 4 แบบแสดงได้ดังตารางที่ 6.1 ถึงตารางที่ 6.4

**ตารางที่ 6.1** ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
ความกว้างสายอากาศ ( $W$ )	60
ความยาวสายอากาศ ( $L$ )	60
ระยะความสูง ( $h_1$ )	1
รัศมีวงกลม ( $r$ )	5.93
ความกว้างช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $W_s$ )	35.58
ความยาวช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $L_s$ )	23.72
ความยาวเส้นไมโครสตริป ( $L_f$ )	11
ความกว้างเส้นไมโครสตริป ( $W_f$ )	1

**ตารางที่ 6.2** ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยูป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
ความกว้างสายอากาศ ( $W$ )	60
ความยาวสายอากาศ ( $L$ )	60
ระยะความสูง ( $h_1$ )	1
รัศมีวงกลม ( $r$ )	5.93
ความกว้างช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $W_s$ )	35.58
ความยาวช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $L_s$ )	23.72
ความยาวเส้นไมโครสตริป ( $L_f$ )	11
ความกว้างเส้นไมโครสตริป ( $W_f$ )	1
ความกว้างรวมร่องรูปตัวยู ( $S_1$ )	8
ความยาวรวมร่องรูปตัวยู ( $S_2$ )	6
ความกว้างแขนรูปตัวยู ( $S_3$ )	2
ความกว้างฐานของร่องรูปตัวยู ( $S_4$ )	1

**ตารางที่ 6.3** ค่าพารามิเตอร์สายอากาศไมโครสตริปวงกลมใส่สตั๊ปป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
ความกว้างสายอากาศ ( $W$ )	60
ความยาวสายอากาศ ( $L$ )	60
ระยะความสูง ( $h_1$ )	1
รัศมีวงกลม ( $r$ )	5
ความกว้างช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $W_s$ )	34
ความยาวช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $L_s$ )	32
ความยาวเส้นไมโครสตริป ( $L_f$ )	10
ความกว้างเส้นไมโครสตริป ( $W_f$ )	1
ความสูงสตั๊ป ( $h_2$ )	2
ความกว้างสตั๊ป ( $W_2$ )	6

**ตารางที่ 6.4** ค่าพารามิเตอร์สายอากาศไมโครสตริปวงกลมร่องรูปตัวยูใส่สตั๊ปป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือระนาบกราวด์ที่เป็นร่องกว้าง

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
ความกว้างสายอากาศ ( $W$ )	60
ความยาวสายอากาศ ( $L$ )	60
ระยะความสูง ( $h_1$ )	1
รัศมีวงกลม ( $r$ )	5
ความกว้างช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $W_s$ )	34
ความยาวช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $L_s$ )	32
ความยาวเส้นไมโครสตริป ( $L_f$ )	10
ความกว้างเส้นไมโครสตริป ( $W_f$ )	1
ความสูงสตั๊ป ( $h_2$ )	2
ความกว้างสตั๊ป ( $W_2$ )	6
ความกว้างรวมร่องรูปตัวยู ( $S_1$ )	6
ความยาวรวมร่องรูปตัวยู ( $S_2$ )	6
ความกว้างแขนรูปตัวยู ( $S_3$ )	0.5
ความกว้างฐานของร่องรูปตัวยู ( $S_4$ )	1

จากตารางที่ 6.1 ถึงตารางที่ 6.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่นำมาจัดสร้างและทดสอบ ซึ่งสายอากาศในตารางที่ 6.1 จากการทดสอบและผลการจำลองค่า  $|S_{11}|$  ได้ช่วงความถี่ 2.5-12.8 กิกะเฮิรตซ์และ 2.3-14.6 กิกะเฮิรตซ์ตามลำดับ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทางในช่วงความถี่ 3.1 และ 6.8 กิกะเฮิรตซ์แต่ช่วงความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไม่เป็นแบบสองทิศทาง ผลการทดสอบมีอัตราขยายต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 0.14 dBi และ 4.8 dBi ที่ความถี่ 5 กิกะเฮิรตซ์และความถี่ 7 กิกะเฮิรตซ์ และผลจำลองแบบเท่ากับ 0.14 dBi และ 7.1 dBi ที่ความถี่ 5 กิกะเฮิรตซ์และความถี่ 8.2 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ มีขนาดของสายอากาศเท่ากับ  $60 \times 60$  ตารางมิลลิเมตร

สายอากาศในตารางที่ 6.2 จากการทดสอบและผลการจำลองค่า  $|S_{11}|$  ได้ช่วงความถี่ Band-notched ช่วงความถี่ 4.93-5.94 กิกะเฮิรตซ์และ 5.13-5.96 กิกะเฮิรตซ์ตามลำดับ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทางในช่วงความถี่ 3.1 และ 6.8 กิกะเฮิรตซ์แต่ช่วงความถี่ 10.6 กิกะเฮิรตซ์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไม่เป็นแบบสองทิศทาง จากผลการทดสอบมีอัตราขยายต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ -8.4 dBi และ 5.9 dBi ที่ความถี่ 5.5 กิกะเฮิรตซ์และความถี่ 8.1 กิกะเฮิรตซ์ และผลจำลองแบบเท่ากับ -8.4 dBi และ 7 dBi ที่ความถี่ 5.7 กิกะเฮิรตซ์และความถี่ 9 กิกะเฮิรตซ์ตามลำดับ มีขนาดของสายอากาศเท่ากับ  $60 \times 60$  ตารางมิลลิเมตร

ตารางที่ 6.3 จากการทดสอบและผลการจำลองค่า  $|S_{11}|$  ได้ช่วงความถี่ 2.8-14.1 กิกะเฮิรตซ์และ 2.8-15.3 กิกะเฮิรตซ์ตามลำดับ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทางในช่วงความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ จากผลการทดสอบมีอัตราขยายต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 2.8 dBi และ 6.8 dBi ที่ความถี่ 5 กิกะเฮิรตซ์และความถี่ 9 กิกะเฮิรตซ์และผลจำลองแบบเท่ากับ 3 dBi และ 8 dBi ที่ความถี่ 4.4 กิกะเฮิรตซ์และความถี่ 9 กิกะเฮิรตซ์ตามลำดับ มีขนาดของสายอากาศเท่ากับ  $60 \times 60$  ตารางมิลลิเมตร

สายอากาศในตารางที่ 6.4 จากการทดสอบและผลการจำลองค่า  $|S_{11}|$  ได้ช่วงความถี่ Band-notched ช่วงความถี่ 4.99-5.96 กิกะเฮิรตซ์และความถี่ 5.06-5.96 กิกะเฮิรตซ์ตามลำดับ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทางในช่วงความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ จากผลการทดสอบมีอัตราขยายต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ -4.1 dBi และ 7 dBi ที่ความถี่ 5.4 กิกะเฮิรตซ์และความถี่ 9 กิกะเฮิรตซ์และผลจำลองแบบเท่ากับ -6.2 dBi และ 8.2 dBi ที่ความถี่ 5.5 กิกะเฮิรตซ์และความถี่ 9 กิกะเฮิรตซ์ตามลำดับ มีขนาดของสายอากาศเท่ากับ  $60 \times 60$  ตารางมิลลิเมตร

จากการออกแบบและจัดสร้างสายอากาศทั้งสี่แบบทำให้สามารถสรุปข้อดีของสายอากาศได้ดังนี้

#### ข้อดี

- 1) สายอากาศสามารถทำงานรองรับช่วงความถี่ 3.1-10.6 กิกะเฮิรตซ์ในย่านความถี่กว้างยิ่งยวด
- 2) การออกแบบโครงสร้างสายอากาศเน้นความไม่ซับซ้อน สร้างได้ง่าย มีความแบนและบางขนาด

กะทัดรัด น้ำหนักเบาและราคาถูก

3) มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทาง

### 6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

- 1) การออกแบบส่วนของรัศมีไมโครสตริปวงกลม เพื่อที่จะสามารถขยายความถี่ให้ได้ช่วงความถี่ที่กว้างทั้งด้านความถี่ต่ำและความถี่สูงได้ง่าย ควรออกแบบโดยเริ่มจากย่านความถี่ตรงกลาง
- 2) เพื่อให้ง่ายและรวดเร็วในการออกแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยม การเริ่มต้นควรวางไว้ในตำแหน่งกึ่งกลางของรัศมีไมโครสตริปวงกลม จากนั้นจึงเลื่อนช่องเปิดสี่เหลี่ยมเพื่อคูนวโน้มการขยายช่วงกว้างความถี่
- 3) ในการสร้างสายอากาศเนื่องจากใช้แผ่นวงจรพิมพ์สองหน้าจึงต้องระมัดระวังการผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์ซึ่งอาจจะทำให้คุณลักษณะของสายอากาศไม่เป็นไปตามทฤษฎี
- 4) แผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้ถ้าต้องการให้เกิดความสูญเสียต่ำอาจจะเปลี่ยนแผ่นวงจรพิมพ์จากสารอีพ็อกซี่เป็น Duroid หรือ Teflon ที่มีการสูญเสียของไดอิเล็กตริกต่ำในย่านความถี่สูงแต่จะมีราคาแพง
- 5) ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นควรเลือกใช้สายนำสัญญาณในการวัดให้มีค่าการสูญเสียของสายให้มิต่ำน้อยที่สุด เพราะจะมีผลกระทบทำให้ผลทดสอบมีค่าไม่เที่ยงตรง

วิทยานิพนธ์นี้เน้นการออกแบบแต่ละขั้นตอนอย่างละเอียดพร้อมทฤษฎีที่ใช้สำหรับการออกแบบสายอากาศและได้ทำการทดสอบสายอากาศเพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ที่สนใจสามารถนำไปพัฒนาสายอากาศและปรับปรุงโครงสร้างให้มีรูปแบบที่หลากหลายเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานได้ต่อไปในอนาคต

## บรรณานุกรม

- [1] FCC Report and Order for Part 15 Acceptance of Ultra Wideband (UWB) Systems from 3.1-10.6 GHz, FCC, Washington, DC, 2002.
- [2] J. Y. Chiou, J. Y. Sze, and K. L. Wong, "A broad-band CPW-fed strip loaded square slot antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 51, no. 4, pp. 719-721, Apr. 2003.
- [3] H.-D. Chen, "Broadband CPW-fed square slot antennas with a widened tuning stub," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 51, no.8, pp. 1982-1986, Aug. 2003.
- [4] D. Porcino and W. Hirt, "Ultra-wideband radio technology: potential and challenges ahead," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 4, pp. 66-74, July 2003.
- [5] A. F. Molisch, J. R. Foerster, and M. Pendergrass, "The evolution of wireless LANs and PANs-channel models for ultrawideband personal area networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 6, pp. 14-21, Dec. 2003.
- [6] M. Hammoud, P. Poey, and F. Colombel, "Matching the input impedance of a broadband disc monopole," *Electron. Lett.*, vol. 29, pp. 406-407, Feb. 1993.
- [7] N. P. Agrawal, G. Kumar, and K. P. Ray, "Wide-band planar monopole antennas," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 46, no. 2, pp. 294-295, Feb. 1998.
- [8] S. Y. Suh, W. L. Stutzman, and W. A. Davis, "A new ultrawideband printed monopole antenna: the planar inverted cone antenna (PICA)," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 52, no. 5, pp. 1361-1365, May 2004.
- [9] Y. Kim and D. H. Kwon, "CPW-fed right-angled dual tapered notch antenna for ultra-wideband communication," *Electron. Lett.*, vol. 41, no. 12, pp. 674-675, June 2005.
- [10] J. Liang, L. Gua, C. C. Chiau, X. Chen, and C. G. Parini, "Study of CPW-fed circular disc monopole antenna for ultra wideband applications," *IEE Proc.-Microw. Antennas Propag.*, vol. 152, no. 6, pp. 520-526, Dec. 2005.
- [11] T. G. Ma and C. H. Tseng, "An ultrawideband coplanar waveguide-fed tapered ring slot antenna," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 54, no. 4, pp. 1105-1110, Apr. 2006.
- [12] Y. J. Ren and K. Chang, "An annual ring antenna for UWB communications," *IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett.*, vol. 5, pp. 274-276, 2006.

- [13] C. C. Lin, Y. C. Kan, L. C. Kuo, and H. R. Chuang, "A planar triangular monopole antenna for UWB communication," *IEEE Microw. Wireless Components. Lett.*, vol. 15, no. 10, pp. 624-626, Oct. 2005.
- [14] H. D. Chen, J.S. Chen, and J.N. Li, "Ultra-wideband square slot antenna," *Microwave Opt Technol Lett.*, vol. 48 no. 3, pp. 500-502, Mar. 2006.
- [15] H.D. Chen, J.S. Chen, and J.N. Li, "Band-notched ultra-wideband square slot," *Microwave Opt Technol Lett.*, vol. 48 no. 12, pp. 2427-2429, Dec. 2006.
- [16] P. Li, J. Liang, and X. Chen, "Study of printed elliptical/circular slot antennas for ultrawideband applications," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 54, no. 6, pp. 1670-1675, June 2006.
- [17] "CST-Microwave Studio, User's Manual," 2005.
- [18] I. J. Bahl and P. Bhartia, "Microstrip Antenna", Artech House, 1980.
- [19] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl and A. Ittipiboon, "Microstrip Antenna Design Handbook", Imprint Boston : Artech House, 2001.
- [20] C. A. Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics", New York: John Wiley and Sons Inc., 1989.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายชุกติทัศน์ ชวานนท์พิทักษ์
วัน เดือน ปีเกิด	3 ธันวาคม 2518 ที่จังหวัดนครราชสีมา
ที่อยู่	147 ถนนพิบูลละเอียด ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษา พ.ศ.2543 หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ความชำนาญเฉพาะด้าน	ระบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless LAN), สายอากาศไมโครสตริป
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ.2544-2547	ตำแหน่งอาจารย์มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา สังกัดโปรแกรมวิชาอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
พ.ศ.2547-ปัจจุบัน	ตำแหน่งนักวิชาการคอมพิวเตอร์ สังกัดสำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง