

การศึกษาสายอากาศชนิดช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าร่วมกับเส้นตัวนำ  
สำหรับสองแถบความถี่

**STUDY ON CONDUCTOR STRIP DUAL BAND RECTANGULAR  
SLOT ANTENNA**

กัลยกร ขุนเอียด

GUNYAKORN KHUNEAD

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2553

การศึกษาสายอากาศชนิดช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าร่วมกับเส้นตัวนำ  
สำหรับสองแถบความถี่

กัลยกร ชุนเอียด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2553

**STUDY ON CONDUCTOR STRIP DUAL BAND RECTANGULAR  
SLOT ANTENNA**

**GUNYAKORN KHUNEAD**

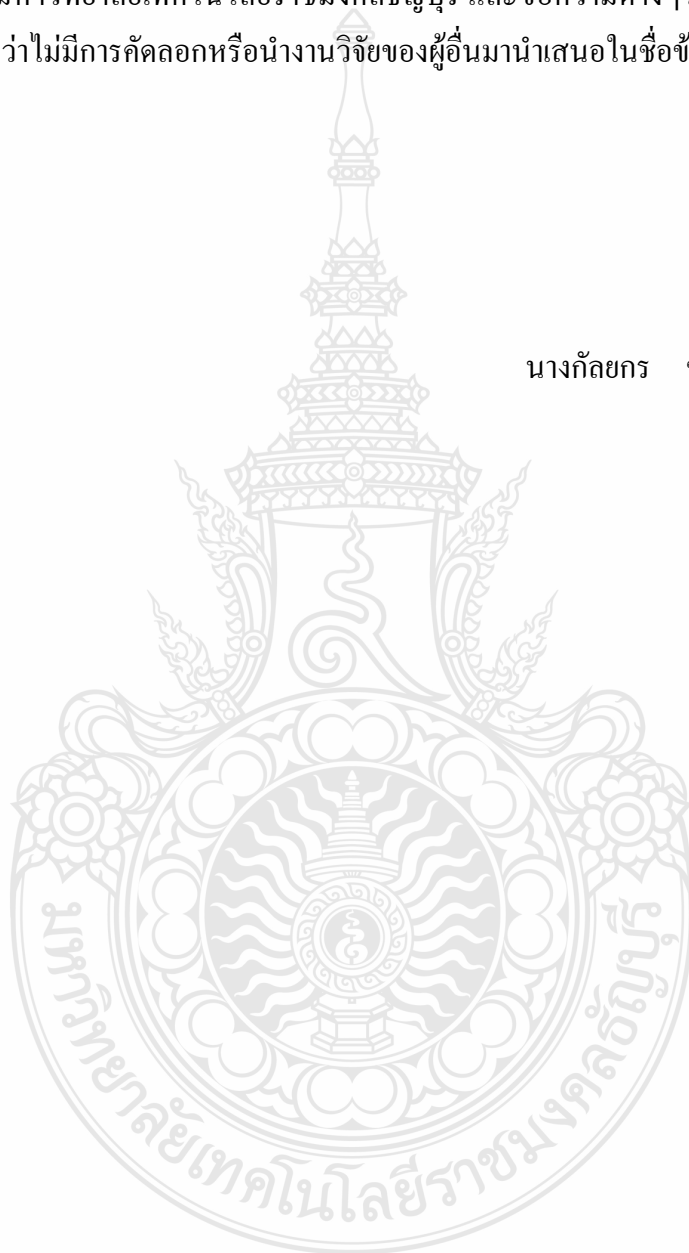
A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENTS FOR  
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING  
IN ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

2010

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าอยู่ในคณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือ  
เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อข้าพเจ้า

นางกัลยกร ชุนเอียด



COPYRIGHT©2010

FACULTY OF ENGINEERING

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์



# ใบรับรองวิทยานิพนธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาสายอากาศชนิดช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าร่วมกับ  
เส้นตัวนำสำหรับสองแถบความถี่

STUDY ON CONDUCTOR STRIP DUAL BAND RECTANGULAR  
SLOT ANTENNA

ชื่อนักศึกษา

นางกัลยกร ขุนเอียด

รหัสประจำตัว

114870402010-2

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. นำยุทธ สงค์ธนาพิทักษ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รองศาสตราจารย์ นภพินท์ อนันตรศิริชัย

วัน เดือน ปี ที่สอบ

19 กันยายน 2553

สถานที่สอบ

ห้องลำควนดิน ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร. กนก เชนจิระพงศ์เวช)

กรรมการ

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร. นำยุทธ สงค์ธนาพิทักษ์)

กรรมการ

.....  
(รองศาสตราจารย์ นภพินท์ อนันตรศิริชัย)

กรรมการ

.....  
(ดร.อำนาจ เรืองวารี)

กรรมการ

.....  
(ดร.ฉัตรชัย สุภพิทักษ์สกุล)

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชัย หิรัญวโรดม)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสายอากาศชนิดช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าร่วมกับเส้นตัวนำสำหรับสองแถบความถี่
ชื่อนักศึกษา	นางกัลยกร ขุนเอียด
รหัสประจำตัว	114870402010-2
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม)
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.นำยุทธ สงค์ธนาพิทักษ์ รองศาสตราจารย์ นภพินท์ อนันตรศิริชัย

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นการนำเสนอการศึกษาสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ โดยมีเส้นตัวนำที่ทำให้เกิด 2 แถบความถี่ในการจำลองผลจะใช้โปรแกรม IE3D บนวัสดุฐานรอง RT Duroid 5880 ที่มีค่าคงตัว 2.2 มีความหนา 1.575 มิลลิเมตร และค่าแทนเจนต์การสูญเสีย 0.0009 สายอากาศพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าถูกออกแบบขึ้นมาทำให้ได้แถบความถี่เดี่ยว และจากนั้นได้ทำการแทรกเส้นตัวนำรูปอักษรแอลที่ช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อให้ได้รับสองแถบความถี่ที่ครอบคลุมมาตรฐาน IEEE 802.11b/g (2.4-2.4835 GHz), IEEE 802.11a (5.15-5.35 GHz), IEEE 802.11h (5.725-5.825 GHz) และ IEEE 802.11n (2.4-2.4835 GHz, 5.15-5.35 GHz, 5.725-5.825 GHz) ผลจากการจำลองการสูญเสียย้อนกลับที่ -10 dB แสดงให้เห็นได้ว่า สายอากาศนี้สามารถทำให้เกิดสองแถบความถี่ในย่านความถี่ 2.34-2.69 GHz และ 4.99-7.83 GHz ซึ่งครอบคลุมแถบความถี่ที่ต้องการ โดยมีผลการจำลองอัตราขยายเฉลี่ยที่แถบความถี่เท่ากับ 4 dBi และที่แถบความถี่สูงเท่ากับ 6 dBi สายอากาศที่ผ่านการจำลองบน RT/Duroid 5880 นี้จะถูกนำไปสร้างจริงและวัดผลเพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง

ผลการวัดแบนด์วิดธ์ของสายอากาศที่นำเสนอ ได้เป็นสองแถบความถี่ในย่านความถี่ 2.37-2.58 GHz และ 5.2-8.02 GHz ซึ่งสามารถครอบคลุมมาตรฐาน IEEE 802.11 b/g และ IEEE 802.11 h แต่ไม่สามารถครอบคลุมมาตรฐาน IEEE 802.11a และ IEEE 802.11n

คำสำคัญ: สายอากาศช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เส้นตัวนำ เส้นตัวนำรูปอักษรแอล สองแถบความถี่

**Thesis Title :** STUDY ON CONDUCTOR STRIP DUAL BAND  
RECTANGULAR SLOT ANTENNA

**Student Name :** Mrs. Gunyakorn Khunead

**Student ID :** 114870402010-2

**Study Program :** Electric Engineering  
(Electronic and Telecommunication Engineering)

**Academic Year :** 2010

**Thesis Advisors :** Associate Professor Dr. Numyoot Songthanapitak  
Associate Professor Noppin Anantrasirichai

### ABSTRACT

This thesis presents a study on conductor strip dual band rectangular slot antenna fed by microstrip line. The IE3D software is used to simulated design and analyzed this antenna on the RT/Duroid 5880 substrate of dielectric constant 2.2, thickness of 1.575 mm, and loss tangent 0.0009. The principal rectangular slot antenna is designed to achieved single band, and L-shaped conductor strip is introduced by insert into rectangular slot to achieve dual band coverage standard of IEEE 802.11b/g (2.4-2.4835 GHz), IEEE 802.11a (5.15-5.35 GHz), IEEE 802.11h (5.725-5.825 GHz) and IEEE 802.11n (2.4-2.4835 GHz, 5.15-5.35 GHz, 5.725-5.825 GHz). Simulation result of return loss at -10 dB demonstrates that this antenna can achieve dual band from frequency range 2.34-2.69 GHz and 4.99-7.83 GHz coverage desirable band. Simulation average gain of lower band is 4 dBi and higher band is 6.0 dBi. The final simulation design is fabricate on RT/Duroid 5880, the measurement is compared with simulation result.

The measured bandwidths of the proposed antenna show dual band at frequency range 2.37-2.58 GHz and 5.2-8.02 GHz which able to coverage standard of IEEE 802.11b/g, IEEE 802.11h but unable to coverage standard of IEEE 802.11a and IEEE 802.11n.

**Keywords :** Rectangular Slot Antenna, Conductor Strip, L-Shaped Strip, Dual Band

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความกรุณาอย่างสูง จาก รองศาสตราจารย์ ดร.นำยุทธ สงค์ธนาพิทักษ์ และรองศาสตราจารย์ นภพินท์ อนันตรศิริชัย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนให้คำปรึกษาและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเมตตาต่อศิษย์โดยมิได้ย่อท้อ อันเป็นผลให้ศิษย์มีความมานะบากบั่น มุ่งมั่นในการทำวิจัยนี้ จนสำเร็จลุล่วงเป็น อย่างดี ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ ทุก ๆ ท่าน ที่มีส่วนช่วยเหลือ และให้กำลังใจ ในการทำวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านเสมอมา

ประโยชน์ ไใด ๆ อันจะเกิดขึ้นจากงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบความดีให้ท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และทุก ๆ ท่านที่มีส่วนร่วมให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอระลึกถึง คุณแม่สมพิศ จันทร์กุล ผู้ล่วงลับไปแล้ว ด้วยความอาลัยรักสุดหัวใจ

กัลยากร ชุนเอียด

19 กันยายน 2553



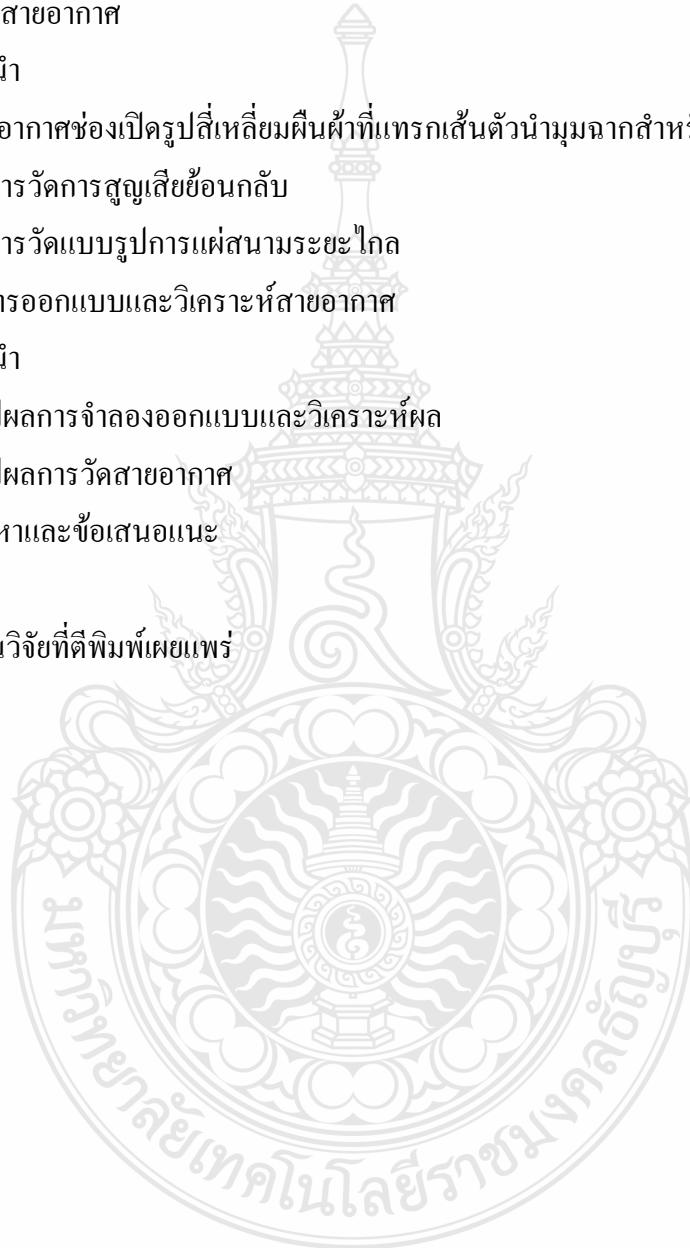


## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย	2
1.5 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา	3
1.7 ข้อจำกัดของการศึกษา	3
บทที่ 2 ทฤษฎีสายอากาศและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 มาตรฐาน และย่านความถี่ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	4
2.3 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ	6
2.4 คุณลักษณะพื้นฐานสายอากาศไมโครสตริป	7
2.5 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	9
2.6 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศ	12
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
บทที่ 3 การศึกษาสายอากาศช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าร่วมกับเส้นตัวนำสำหรับสองแถบความถี่	20
3.1 บทนำ	20
3.2 พารามิเตอร์สำหรับการออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดและไมโครสตริปไลน์	21
3.3 การศึกษาและวิเคราะห์สายอากาศแบบช่องเปิดรูปร่างพื้นฐานบน RT Duroid 5880	23
3.4 การออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับสองแถบความถี่	34

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 ผลการจำลองคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศที่ผ่านการวิเคราะห์	42
3.5 สรุปผลการศึกษาสายอากาศช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าร่วมกับเส้นตัวนำ	46
บทที่ 4 ผลการวัดสายอากาศ	49
4.1 บทนำ	49
4.2 สายอากาศช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่แทรกเส้นตัวนำมุมฉากสำหรับสองแถบความถี่	49
4.2 ผลการวัดการสูญเสียย้อนกลับ	50
4.3 ผลการวัดแบบรูปการแผ่สนามระยะไกล	51
บทที่ 5 สรุปผลการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศ	54
5.1 บทนำ	54
5.2 สรุปผลการจำลองออกแบบและวิเคราะห์ผล	54
5.3 สรุปผลการวัดสายอากาศ	57
5.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	57
เอกสารอ้างอิง	58
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่	59
ประวัติผู้เขียน	71



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ย่านความถี่ต่างๆที่เกี่ยวข้องเฉพาะในส่วนที่เป็นการเข้าถึง ไร้สาย	5
2.2 ข้อดีและข้อด้อยของสายอากาศไมโครสตริป	9
3.1 คุณสมบัติของวัสดุฐานรองชนิด RT/Duroid 5880	21
3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากวัสดุฐานชนิด RT/Duroid 5880	23
3.3 คุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของกราวด์	25
3.4 คุณลักษณะสายอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะกราวด์บน ( $G_2=1,5,9$ มม.)	26
3.5 คุณลักษณะสายอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะกราวด์ด้านข้าง ( $G_3=5,10,15$ มม.)	27
3.6 คุณลักษณะสายอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะกราวด์ด้านล่าง ( $G_1=16.2,21.2,26.2$ มม.)	28
3.7 คุณลักษณะสายอากาศ เมื่อ $G_2=1$ มม. และเปลี่ยนแปลงระยะกราวด์ด้านข้าง	29
3.8 คุณลักษณะสายอากาศช่องเปิด เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะ $G_3$ โดยให้ $G_2=1$ มม. และ 5 มม.	29
3.9 คุณลักษณะสายอากาศแบบช่องเปิดแคบ เมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างช่องเปิด	31
3.10 คุณลักษณะสายอากาศแบบช่องเปิดกว้าง เมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างช่องเปิด	32
3.11 สรุปลักษณะช่องเปิดและแบนด์วิดท์ ที่ความถี่ 2.44 GHz	33
3.12 ค่าพารามิเตอร์ทางขนาดของสายอากาศที่ได้ปรับขยายความยาว $L$ : หน่วย มม.	37
3.13 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลง $G_3$ โดย $L=37.5$ มม. $G_1=21.2$ มม. $G_2=5$ มม.	39
3.14 คุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดแบบไม่ตัดมุมและตัดมุมไมโครสตริปไลน์	41
3.15 คุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศช่องเปิดแบบตัดมุมไมโครสตริปไลน์	43
3.16 สรุปลค่าพารามิเตอร์ทางขนาดของสายอากาศที่จะนำไปสร้างจริง : หน่วย มม.	48
4.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะสายอากาศระหว่างการจำลองแบบกับการวัดจริง	51
5.1 สรุปลขั้นตอนการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	54

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบการให้บริการเทคโนโลยีการเข้าถึงข้อมูลเฉพาะในส่วนที่เป็นการเข้าถึงไร้สาย	5
2.2 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป	8
2.3 กระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแพทช์	8
2.4 รูปร่างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	10
2.5 โครงสร้างของไมโครสตริป	11
2.6 การป้อนแบบ Microstrip line	12
2.7 การป้อนแบบ Probe feed	13
2.8 การป้อนแบบ Aperture coupling	13
2.9 การป้อนแบบ Proximity coupling	14
2.10 โครงสร้างของสายอากาศและ Return loss	14
2.11 Configuration of an L-shaped slot antenna	15
2.12 Return loss characteristics	15
2.13 รูปร่างสายอากาศจากงานวิจัย และค่า Return loss จากผลการจำลอง	16
2.14 โครงสร้างของสายอากาศแบบ rectangular slot loop antenna	17
2.15 คุณสมบัติของค่า Return loss ของสายอากาศที่ได้	17
2.16 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปที่ทำงานสองความถี่	18
2.17 ผลการจำลอง ของสายอากาศไมโครสตริปที่ทำงานสองความถี่โดยวิธี MOM	18
3.1 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดกว้างรูปร่างพื้นฐาน ที่ใช้เป็นต้นแบบศึกษาเรขาคณิต	24
3.2 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อพารามิเตอร์มีค่าตามที่กำหนดข้างต้น	24
3.3 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อกำหนดให้ $G_2$ มีค่าเป็น 1, 5, 9 มม.	25
3.4 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อกำหนดให้ $G_3$ มีค่าเป็น 5, 10, 15 มม.	26
3.5 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อกำหนดให้ $G_1$ มีค่าเป็น 16.2, 21.2, 26.2 มม.	27
3.6 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อกำหนดให้ $G_3=5, 10, 15$ มม. โดยที่ $G_2=1$ มม.	28
3.7 การสูญเสียย้อนกลับของช่องเปิดแบบแถบเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างช่องเปิด (W)	30
3.8 การสูญเสียย้อนกลับของช่องเปิดแบบกว้างเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างช่องเปิด (W)	31
3.9 ความยาวช่องเปิด (L) และแบนด์วิดท์ที่เปลี่ยนแปลงตามความกว้างช่องเปิด (W)	32
3.10 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดพร้อมเส้นตัวนำแนวนอน	34
3.11 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อแทรกเส้นตัวนำแนวนอนในช่องเปิดที่ขนาดและระยะแตกต่างกัน	35
3.12 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดพร้อมเส้นตัวนำรูปมุมฉาก	35

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อแทรกเส้นตัวนำมุมฉากจากกราวด์ลงในช่องเปิด	36
3.14 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดพร้อมสองตัวนำรูปมุมฉาก	36
3.15 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเพิ่มการแทรกสองตัวนำรูปมุมฉากลงในช่องเปิด	37
3.16 การสูญเสียย้อนกลับ เมื่อ $L=37.5$ มม. $G_1=21.2$ มม. $G_2=5$ มม. $G_3=10$ มม.	38
3.17 การสูญเสียย้อนกลับ เมื่อ $L=37.5$ มม. $G_1=21.2$ มม. $G_2=5$ มม. $G_3=14.5$ มม.	38
3.18 โครงสร้างสายอากาศที่ลดระยะกราวด์ด้านบน	39
3.19 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อ $L=37.5$ มม. $G_1=21.2$ มม. $G_2=0.5$ มม. $G_3=14.5$ มม.	40
3.20 โครงสร้างด้านหลังสายอากาศที่มีการตัดมุมไมโครสตริปไลน์	40
3.21 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อ $G_2=0.5$ มม. $G_3=14.5$ มม. และตัดมุมไมโครสตริปไลน์	41
3.22 อินพุทอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการจำลอง	42
3.23 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งที่ได้จากการจำลอง	42
3.24 เกนของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง	43
3.25 แบบรูปการแผ่สนามระยะไกลที่ความถี่ 2.45 GHz	44
3.26 แบบรูปการแผ่สนามระยะไกลที่ความถี่ 5.25 GHz	45
3.27 แบบรูปการแผ่สนามระยะไกลที่ความถี่ 5.8 GHz	46
4.1 รูปแบบสายอากาศที่ออกแบบสำหรับสองแถบความถี่	49
4.2 สายอากาศที่สร้างบนวัสดุฐานรอง RT/Duroid 5880	50
4.3 การสูญเสียย้อนกลับจากการวัดและการจำลอง	50
4.4 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz	52
4.5 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามของสายอากาศที่ความถี่ 5.8 GHz	53

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$B$	SUSCEPTANCE
$BW$	BANDWIDTH
$c$	ความเร็วแสง (SPEED OF LIGHT)
$D$	สภาพความนำทิศ (DIRECTIVITY)
$E$	สนามไฟฟ้า (ELECTRIC FIELD)
$f_r, f_o$	ความถี่เรโซแนนซ์ (RESONANCE FREQUENCY)
$h$	ความหนาของซับสเตรต (THICKNESS OF SUBSTRATE)
$l$	ความยาวของสายส่งไมโครสตริป
$L$	ความยาวของสายอากาศ (LENGTH OF ANTENNA)
$t$	ความหนาของตัวนำ
$\tan \delta$	แทนเจนต์การสูญเสียของวัสดุ (LOSS TANGENT)
$V_o$	แรงดันตกคร่อมระหว่างแพทช์และแผ่นกราวด์
VSWR	อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VOLTAGE STANDING WAVE RATIO)
$W$	ความกว้างของสายอากาศ
$\epsilon$	สภาพยอม (PERMITTIVITY)
$\epsilon_r$	สภาพยอมสัมพัทธ์ (RELATIVE PERMITTIVITY)
$\epsilon_{eff}$	EFFECTIVE RELATIVE PERMITTIVITY
$\epsilon_0$	สภาพยอมในอากาศ
$Z_o$	อิมพีแดนซ์ของอากาศ
$\lambda_g$	ความยาวคลื่นในวัสดุ
$\lambda_0$	ความยาวคลื่นในอากาศ
$\mu$	ความซึมซับ (PERMITTIVITY)
$\mu_r$	ความซึมซับสัมพัทธ์ (RELATIVE PERMITTIVITY)
$\mu_0$	ความซึมซับในอากาศ
$\sigma$	ค่าความนำ (CONDUCTIVITY)

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

การสื่อสารข้อมูลโทรคมนาคมพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว การติดต่อสื่อสารจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง มีการใช้เทคโนโลยีที่สูงขึ้น เช่น การสื่อสารผ่านดาวเทียม โทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น ซึ่งการสื่อสารเหล่านี้ จะใช้คลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟในการรับส่งข้อมูล ในระบบสื่อสารที่มีการรับและส่งสัญญาณในอากาศจะใช้สายอากาศทำหน้าที่ในการรับและส่งสัญญาณ สายอากาศที่นิยมใช้ย่านความถี่ไมโครเวฟมีหลายรูปแบบ สำหรับสายอากาศไมโครสตริป เป็นสายอากาศที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ คือ ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูก รวมทั้งง่ายต่อการออกแบบและการสร้าง สายอากาศไมโครสตริปจะมีโครงสร้างพื้นฐานที่ได้รับความนิยมอยู่ 3 รูปแบบ คือ สายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น (Microstrip Patch Antenna) สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด (Microstrip Slot Antenna) และสายอากาศไมโครสตริปไดโพล (Microstrip Dipole Antenna) ปัจจุบันสายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่ได้รับความนิยมอย่างมาก โดยได้มีการทำวิจัยกันอย่างกว้างขวางถึงลักษณะโครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งก็คือ สายอากาศที่ถูกเชื่อมต่อโดยใช้สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป (Microstrip Line) เนื่องจากลักษณะโครงสร้างแบบนี้ จะมีหลักในการออกแบบ และวิธีการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ (Matching Impedance) ที่ไม่ซับซ้อน

ปัจจุบันระบบสื่อสารได้เข้ามามีบทบาทกับชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการรับส่งสัญญาณในโทรศัพท์มือถือ และระบบการส่งสัญญาณไร้สาย จึงทำให้มีการกำหนดมาตรฐานความถี่ต่าง ๆ ขึ้นมารองรับให้แต่ละประเทศหรือแต่ละพื้นที่ใช้มาตรฐานความถี่ที่ต่างกันออกไป ทำให้การรับส่งข้อมูลต่างพื้นที่หรือข้ามระบบไม่สามารถกระทำได้ สายอากาศที่ใช้นั้นได้ออกแบบให้ใช้ได้กับเฉพาะระบบใดระบบหนึ่งหรือมาตรฐานใดมาตรฐานหนึ่ง ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นสายอากาศที่สามารถใช้งานได้ 2 ความถี่ หรือ 2 ย่านการใช้งาน ซึ่งจะเป็นการช่วยให้สะดวกต่อการนำไปใช้งาน อีกทั้งยังประหยัดค่าใช้จ่ายอันเกิดจากการเพิ่มอุปกรณ์รับส่งสัญญาณให้มีจำนวนเท่ากับย่านความถี่มาตรฐาน

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จากเหตุผลดังกล่าว วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอและทำการวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่แทรกเส้นตัวนำ ที่สามารถใช้งานได้สองแถบความถี่ โดยออกแบบสายอากาศให้มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน และป้อนสัญญาณด้วยสายส่งแบบไมโครสตริปไลน์ (Microstrip Line) สำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศแบบช่องเปิดที่แทรกเส้นตัวนำโดย

การใช้สมการแมกเวลล์โดยตรงนั้นจะยุ่งยาก จึงได้มีการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณและในการวิเคราะห์นั้นจะใช้หลักการคิดคำนวณแบบโมเมนต์ (MOM) ด้วยการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ IE3D ของบริษัท Zeland [1]

ดังนั้นการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้จึงมีจุดประสงค์ ดังต่อไปนี้

- 1.2.1 ศึกษาคุณสมบัติของสายอากาศช่องเปิดรูปลี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบพื้นฐาน
- 1.2.2 ศึกษาวิธีการออกแบบช่องเปิดเพื่อให้ได้ความถี่ที่ต้องการ
- 1.2.3 ศึกษาผลกระทบของพื้นที่กรวดรอบ ๆ ช่องเปิดที่เป็นสายอากาศ
- 1.2.4 ศึกษาการแทรกเส้นตัวนำในช่องเปิดเพื่อให้ได้สองแถบความถี่มาตรฐานที่ต้องการ

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการศึกษาและวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่มีการแทรกเส้นตัวนำเพื่อให้ได้สองแถบความถี่ (Dual Band) สำหรับนำไปใช้งานในระบบไร้สายที่สามารถรองรับและครอบคลุมการใช้งานในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) ตามมาตรฐานของ IEEE ซึ่งเป็นมาตรฐานในการจัดสรรความถี่ที่ได้รับการยอมรับทั่วโลก สายอากาศแบบสองแถบความถี่ (Dual Band) จึงมีความน่าสนใจในการศึกษาและวิเคราะห์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการออกแบบสายอากาศที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อน ที่สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายความถี่ ซึ่งแนวคิดในการทำวิจัยนี้จะเป็นการออกแบบและวิเคราะห์ผลสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปร่างพื้นฐานจากนั้นจะทำการแทรกเส้นตัวนำแบบมุลาก เป็นรูปแบบใหม่ที่ยังมิได้มีผู้ใดเคยเผยแพร่มาก่อน

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ด้านสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ป้อนสัญญาณด้วยไมโครสตริปไลน์ พบว่าเริ่มแรกได้มีงานวิจัยสายอากาศที่เป็นช่องเปิดรูปตัวแอลทำงานได้ทีความถี่เดียว ต่อมาได้ปรับลักษณะของช่องเปิดรูปตัวแอลให้สามารถทำงานได้สองแถบความถี่ ที่ให้ความถี่รีโซแนนซ์ 2.43 GHz และ 4.97 GHz และเมื่อมีการเพิ่มช่องเปิดแอลกลับด้านขึ้นมามากอีกตัวหนึ่งก็จะทำให้แถบความถี่สูงขยับสูงขึ้นไป คือ ช่วงความถี่รีโซแนนซ์ 2.4 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ โดยส่วนใหญ่รูปร่างช่องเปิดที่เป็นสายอากาศจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ดังนั้นแนวคิดในการทำวิจัยนี้ จึงต้องการที่จะออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งเป็นรูปร่างพื้นฐาน จากนั้นวิเคราะห์ผลกระทบของขนาดสายอากาศ พื้นที่กรวด และการแทรกเส้นตัวนำรูปมุลาก โดยจะทำการปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อให้ได้สองแถบความถี่ ย่าน WLAN ตามมาตรฐานของ IEEE 802.11 b/g/a/h สำหรับวัตถุประสงค์ที่จะนำมาใช้ในการออกแบบและสร้างจริง คือ RT/Duroid 5880 ซึ่งเป็นวัสดุฐานรองที่มีประสิทธิภาพสูง เป็นที่ยอมรับในหมู่นักวิจัย



ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย จะประกอบด้วย ทฤษฎีพารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ ทฤษฎีการคิดคำนวณด้วยหลักการของโมเมนต์ โดยใช้โปรแกรม IE3D ซึ่งโปรแกรม IE3D เป็นโปรแกรมที่มีความเที่ยงตรงเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ดังนั้นสายอากาศที่ผ่านการออกแบบและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม IE3D จะถูกนำไปสร้างจริงบนวัสดุฐานรองชนิด RT/Duroid 5880

## 1.5 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.5.1 ออกแบบสายอากาศช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ความถี่ 2.44 GHz หรือ 2.45 GHz
- 1.5.2 กำหนดขนาดของพื้นที่กราวด์รอบสายอากาศช่องเปิด
- 1.5.3 ออกแบบเส้นตัวนำมุมฉากจากกราวด์แทรก (ยื่น) เข้ามาในช่องเปิด
- 1.5.4 ออกแบบเส้นตัวนำมุมฉากที่สอง ให้อยู่ภายในช่องเปิด เพื่อให้ได้สองแถบความถี่
- 1.5.5 สร้างและวัดสายอากาศที่ออกแบบไว้ แล้วทำการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการจำลองและการวัด

## 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.6.1 ศึกษาทฤษฎีและการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปแบบต่าง ๆ
- 1.6.2 ศึกษาทฤษฎีและการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่แทรกเส้นตัวนำให้ใช้งานได้สองแถบความถี่ ด้วยการคำนวณและใช้โปรแกรมจำลองผล
- 1.6.3 สร้างและวัดสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่แทรกเส้นตัวนำที่ใช้งานได้สองแถบความถี่
- 1.6.4 สรุปผลการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่แทรกเส้นตัวนำที่ใช้งานได้สองแถบความถี่ ตามที่กำหนด

## 1.7 ข้อจำกัดของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ มุ่งเน้นการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ป้อนด้วยไมโครสตริปไลน์ และใช้วัสดุ RT/Duroid 5880 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) 2.2 มีความหนา 0.7875 มิลลิเมตร(mm) ซึ่งเป็นวัสดุฐานรองที่มีราคาสูงมีความเที่ยงตรงมาก

## บทที่ 2

# ทฤษฎีสายอากาศและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึง หลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศ และการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศ และเพื่อให้เข้าใจงานวิจัยนี้ได้โดยง่ายผู้วิจัยจึงขอกล่าวนำถึง มาตรฐานและย่านความถี่ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศที่จะใช้ แสดงผลการจำลองและผลจากการวัดของงานวิจัย จากนั้นจึงจะนำเสนอ คุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า การออกแบบไมโครสตริปไลน์ และรูปแบบการป้อนสัญญาณที่ใช้กับสายอากาศไมโครสตริป

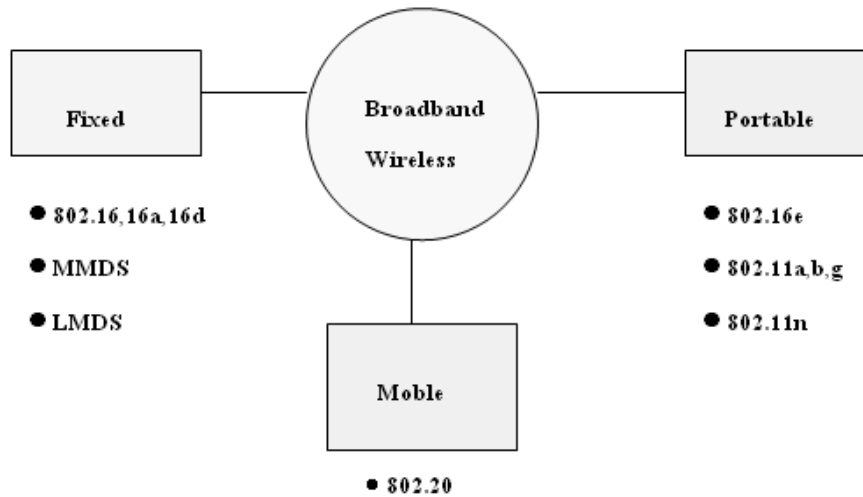
### 2.2 มาตรฐาน และย่านความถี่ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

เทคโนโลยีการเข้าถึงข้อมูลความเร็วสูงหรือ การเข้าถึงบรอดแบนด์ (Broadband Access) มีหลายประเภท ทั้งบรอดแบนด์ผ่านสาย (สายทองแดง สายเคเบิล และสายใยแก้วนำแสง) และบรอดแบนด์ไร้สายผ่านทางคลื่นวิทยุ [2] ซึ่งปัจจุบันสามารถส่งผ่านข้อมูลด้วยความเร็วสูงยิ่งขึ้น โดยรูปแบบการให้บริการเทคโนโลยีการเข้าถึงข้อมูลเฉพาะในส่วนที่เป็น การเข้าถึงไร้สาย (Broadband Wireless Access: BWA) ดังรูปที่ 2.1 แบ่งออกเป็น 3 แบบ ดังนี้

1. การใช้งานแบบประจำที่ (Fixed) ซึ่งผู้ใช้บริการไม่สามารถเคลื่อนที่ในขณะที่รับส่งข้อมูลได้ ซึ่งถ้าให้ผู้ใช้บริการอยู่ประจำที่ ก็จะทำให้เทคโนโลยีที่รองรับการใช้งานแบบนี้ทำการรับส่งข้อมูลได้ด้วยอัตราเร็วสูงสุด เทคโนโลยีในกลุ่มนี้ได้แก่ MMDS, LMDS, การสื่อสารดาวเทียม โดยใช้มาตรฐาน IEEE 802.16, 16a และ 16d

2. การใช้งานแบบเคลื่อนที่ช้า ๆ (Portable) หมายถึง การใช้งานอุปกรณ์การสื่อสารในขณะที่มีการเคลื่อนที่ แต่การเคลื่อนที่ดังกล่าวเป็นเพียงการขยับเปลี่ยนตำแหน่งการใช้งานเล็กน้อย หากมีการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องก็ต้องเป็นการเคลื่อนที่ช้าๆ เทคโนโลยีในกลุ่มนี้ต้องชดเชยความสามารถในการรองรับการใช้งานขณะเคลื่อนที่กับพื้นที่ให้บริการที่แคบลง และอัตราเร็วในการสื่อสารที่อาจจะต่ำกว่าการใช้งานแบบประจำที่ โดยในกลุ่มนี้ประกอบด้วยมาตรฐาน IEEE 802.16e และมาตรฐาน IEEE

3. การใช้งานขณะเคลื่อนที่ (Mobility) หมายถึง หมายถึง การรับส่งข้อมูลในขณะที่กำลังเดินด้วยความเร็ว เช่น โดยรถยนต์พาหนะ เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ชัดจากเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่นั่นเอง



รูปที่ 2.1 รูปแบบการให้บริการเทคโนโลยีการเข้าถึงข้อมูลเฉพาะในส่วนที่เป็นการเข้าถึงไร้สาย

ตารางที่ 2.1 ย่านความถี่ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเฉพาะในส่วนที่เป็นการเข้าถึงไร้สาย

เทคโนโลยี	ความถี่กลาง Center Freq (GHz)	Standard/Applications	ย่านความถี่ (GHz)
WIFI	4.945	Public Safety Frequency	4.940-4.990
	4.9955	IEEE 802.11j	4.90-5.091
	5.25	UNIT IEEE 802.11a	5.15-5.35
	5.5975	NEW	5.47-5.725
	5.775	ISM; UNII	5.725-5.825
WiMAX	5.8	IEEE 802.16d	5.7-5.9
WiMAX	2.35		2.3-2.4
	2.6		2.5-2.7
	3.5		3.4-3.6
	5.8		5.7-5.9
	2.44175	IEEE 802.11b/g	2.4-2.4835

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่ารูปแบบการให้บริการเทคโนโลยีการเข้าถึงข้อมูลเฉพาะ ในส่วนที่เป็นการเข้าถึงไร้สายให้บริการการสื่อสารไร้สาย จะถูกกำหนดมาตรฐานแตกต่างกันตามการใช้งาน ซึ่งแต่ละมาตรฐานจะถูกกำหนดให้ใช้งานในย่านความถี่ที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงให้เห็นเทคโนโลยีที่สำคัญ คือ เทคโนโลยี WIFI และ WiMAX ซึ่งมีความสัมพันธ์กับมาตรฐานรูปแบบการ

สื่อสารไร้สาย(Standard/Applications) และจากตารางยังแสดงย่านความถี่ใช้งาน และความถี่กลาง ซึ่งผู้วิจัยจะได้นำมากำหนดเป็นกรอบการวิจัยในลำดับต่อไป

## 2.3 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ

พารามิเตอร์ที่จะได้กล่าวถึงในส่วนนี้ จะเป็นพารามิเตอร์ของสายอากาศ ที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ ซึ่งได้จากการคำนวณ การจำลองผล และการวัดผลจากชิ้นงาน ในงานวิจัยนี้

### 2.3.1 อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance: $Z_{in}$ )

อินพุตอิมพีแดนซ์ คือ ความต้านทานทางด้านขาเข้าของสายอากาศ ซึ่งแสดงถึงค่าอัตราส่วนของแรงดันต่อกระแสที่ขั้วต่อทั้งสอง หรืออัตราส่วนขององค์ประกอบสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กในจุดที่กำหนด [3]

### 2.3.2 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR)

อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง คือ อัตราส่วนของแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุดของรูปคลื่นนิ่งบนสายนำสัญญาณ อัตราส่วนนี้เป็นค่าวัดปริมาณแรงดันที่ไหลกลับจากสภาวะที่ไหลหมดแม่ทซ์มากน้อยเท่าไร ตัวอย่าง เช่น  $VSWR = 1$  หมายความว่าคลื่นสม่ำเสมอตลอดสาย ซึ่งเป็นสภาวะที่ไหลหมดแม่ทซ์พอดี  $VSWR = \infty$  เมื่อโหลด ( $R_L$ ) เปิดวงจร หรือลัดวงจรถ้าโหลดที่ต่อมีค่าความต้านทานเท่ากับ  $R_L$  และสายนำสัญญาณมีอิมพีแดนซ์ของสายเท่ากับ  $Z_0$  ก็จะสามารถคำนวณค่า VSWR ได้จากสูตร  $VSWR = Z_0/R_L$  หรือ  $R_L/Z_0$  แล้วแต่ว่าตัวใดค่ามากกว่า ค่า VSWR จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งเสมอไม่ว่า  $R_L$  และ  $Z_0$  จะมีค่าเท่าไรก็ตาม

### 2.3.3 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

เกนของสายอากาศหรืออัตราการขยายของสายอากาศ เป็นความสามารถของสายอากาศในการรับส่งคลื่นวิทยุ สายอากาศแต่ละแบบมีอัตราขยายแตกต่างกัน สายอากาศแบบทิศทางเดียวจะมีอัตราการขยายมากกว่าสายอากาศแบบกึ่งรอบตัว และแบบรอบตัวโดยลำดับ ลักษณะการใช้งานจึงแตกต่างกันไป สายอากาศที่มีอัตราขยายสูง จะสามารถรับ-ส่งคลื่นวิทยุ ได้ดีมาก

### 2.3.4 แบบรูปการแผ่สนามระยะไกล (Far Field)

แบบรูปการแผ่สนามระยะไกล คือ คุณสมบัติในการแผ่กระจายกำลังงานคลื่นสนามของสายอากาศที่แสดงออกมาในรูปสองมิติและสามมิติ ซึ่งสามารถใช้ในการบอกถึงทิศทางที่มีการแผ่กระจายคลื่นออกไป

### 2.3.5 การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss: $S_{11}$ )

การสูญเสียของสายอากาศเป็นขนาด (Magnitude) ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่บอกถึงสภาวะการสะท้อนกลับของคลื่นที่ส่งจากสายนำสัญญาณเข้าไปในสายอากาศที่เป็น ฟังก์ชันของความถี่ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance) ของสายอากาศ และอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศ เมื่อพิจารณาช่วงความถี่ที่ใช้งานสายอากาศนั้น

สายอากาศจะต้องมีค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับหรือต่ำกว่า -10 dB ซึ่งแสดงถึงค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณที่ยอมรับได้มีค่าไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังงานคลื่นที่ส่งเข้ามายังสายอากาศ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสายอากาศสามารถแปลงกำลังงานจากสายนำสัญญาณเป็นกำลังงานคลื่นมากหรือน้อย ค่าการสูญเสียย้อนกลับนี้ยังมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศด้วย ในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศนั้น สามารถที่จะแสดงด้วยค่าใดค่าหนึ่งระหว่างค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งหรือค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ

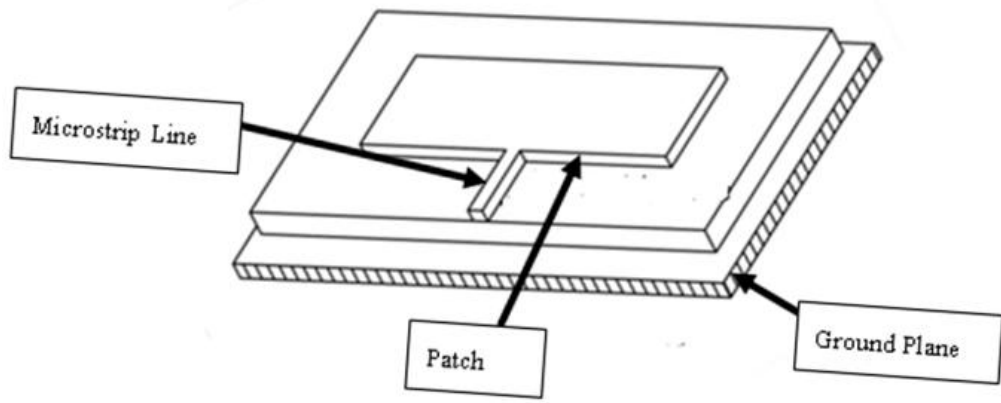
### 2.3.6 แบนด์วิธ (Bandwidth)

แบนด์วิธของสายอากาศจะถูกกำหนดอย่างกว้างขวางโดยย่านของความถี่ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสายอากาศนั้น ๆ โดยทั่วไปแบนด์วิธจะเป็นอัตราส่วนระหว่างความถี่ด้านสูงกับความถี่ด้านต่ำหรือเปอร์เซ็นต์ของความถี่กลาง (Center Frequency) เนื่องจากคุณสมบัติของสายอากาศแต่ละตัวที่ไม่เหมือนกัน จึงเป็นการยากที่จะพิจารณาค่าของแบนด์วิธ สองวิธีที่นิยมที่สุดในการพิจารณาค่าของแบนด์วิธ คือ Pattern Bandwidth และ Impedance Bandwidth

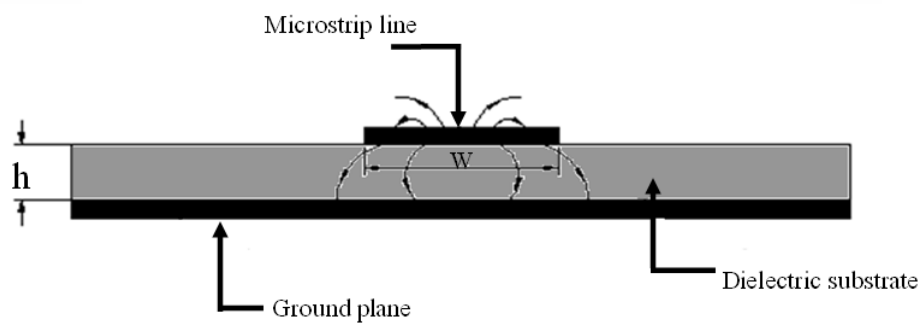
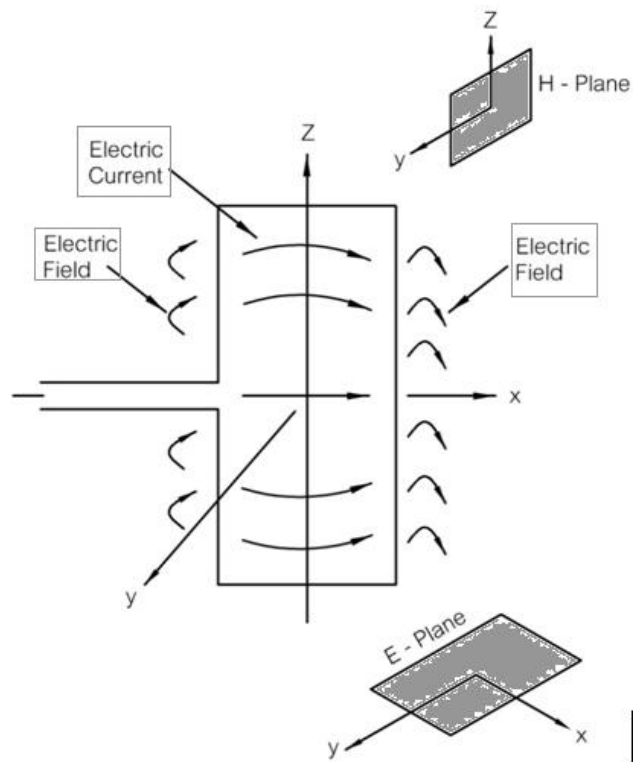
## 2.4 คุณลักษณะพื้นฐานสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศแบบไมโครสตริปเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญ ในการรองรับการสื่อสารข้อมูลข่าวสารในปัจจุบันเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งรูปแบบพื้นฐานต่าง ๆ ของสายอากาศไมโครสตริป แบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ คือ สายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น (Microstrip Patch Antenna) สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด (Microstrip Slot Antenna) และสายอากาศไมโครสตริปไดโพล (Microstrip Dipole Antenna) สายอากาศแบบช่องเปิด (Microstrip Slot-Antenna) เป็นสายอากาศชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยม เนื่องจากเป็นสายอากาศที่ออกแบบได้ง่าย แบบรูปการแผ่สนามระยะไกลสามารถกำหนดได้ทั้งแบบทิศทางเดียว (Uni-Direction) และสองทิศทาง (Bi-Direction) ขึ้นอยู่กับความต้องการใช้งาน และสายอากาศช่องเปิดนั้นสามารถใช้รูปแบบการป้อนสัญญาณได้หลายรูปแบบ

สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna) จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นแผ่นตัวนำหรือที่เรียกว่าแพทช์ (Patch) ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยทั่วไปจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือวงกลม ซึ่งถูกแยกออกจากแผ่นระนาบกราวด์ที่มีความบาง (เป็นเศษส่วนของความยาวคลื่น) ด้วยวัสดุฐานรอง (Substrate) ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ดังรูป 2.2 [3]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป



รูปที่ 2.3 กระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแพทช์

สำหรับการแพร่กระจายคลื่นในสายอากาศไมโครสตริป แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 เป็นการแสดงกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงของสนามไฟฟ้าภายในและบริเวณรอบ ๆ แพทช์ โดยปกติสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบของแพทช์ที่ถูกต่อด้วยสายนำสัญญาณและด้านตรงข้ามขอบ จะมีผลต่อคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ คลื่นที่แผ่กระจายจากสายอากาศ ในรูปที่ 2.3 จะมีการโพลาริเซชันในแนวนอน ซึ่งระนาบของสนามไฟฟ้า (ระนาบ x-y) จะมีทิศทางในแนวนอน และระนาบของสนามแม่เหล็ก (ระนาบ y-z) จะมีทิศทางในแนวตั้ง [3],[4]

สายอากาศไมโครสตริปมีทั้งข้อดีและข้อด้อยหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศที่ใช้ในย่านไมโครเวฟแบบอื่น ๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ในตารางที่ 2.2 ข้อดีของสายอากาศไมโครสตริปนี้สามารถจะกำจัดให้ลดน้อยลงได้ ถ้าได้รับการออกแบบให้ถูกต้องและเลือกใช้วัสดุที่มีการสูญเสียต่ำ

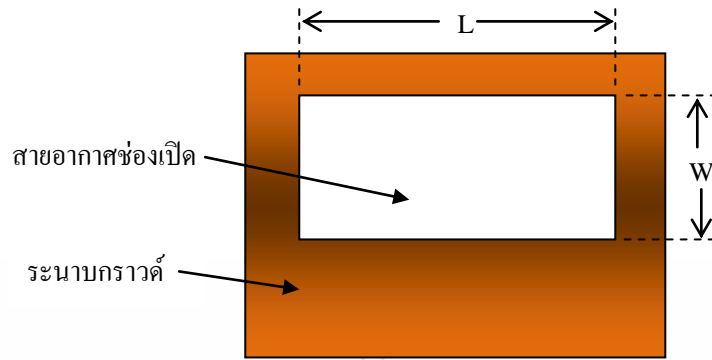
ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อด้อยของสายอากาศไมโครสตริป

ข้อดี	ข้อด้อย
<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีขนาดเล็ก ปริมาณน้อย จึงไม่ด้านลม</li> <li>- น้ำหนักเบา แข็งแรงทนทาน</li> <li>- สร้างได้ง่าย</li> <li>- ต่อเข้ากับวงจรได้ง่าย</li> <li>- สามารถกำหนดลักษณะการเดินทางของคลื่นได้ทั้งแบบลิเนียร์ และแบบวงกลมโดยการเลื่อนตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณ และรูปร่างของแผ่นแผ่พลังงานที่ใช้</li> <li>- ราคาถูก</li> <li>- สามารถป้อนสัญญาณและปรับอิมพีแดนซ์ได้พร้อม ๆ กับการสร้างสายอากาศ</li> <li>- สามารถสร้างเป็นสายอากาศแถวลำดับ (Array) ได้ง่าย</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีประสิทธิภาพต่ำ</li> <li>- มีแถบความถี่ (Bandwidth) แคบมาก</li> <li>- มีกำลังในการแผ่พลังงานต่ำ</li> <li>- มีการสูญเสีย (Loss) มาก โดยมักเกิดจากการสูญเสียที่จุดต่อ และจุดป้อนสัญญาณ จึงทำให้มีอัตราขยาย (Gain) ต่ำ</li> <li>- การแพร่กระจายได้ไม่กว้างไกล และไม่สมบูรณ์ คือมีการแผ่พลังงานได้เพียงครึ่งระบบ</li> <li>- สายอากาศอาจเกิดออกไซด์บริเวณผิว ทำให้มีการสูญเสียมากขึ้น</li> <li>- ต้องเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อรักษาคุณสมบัติของสารที่ใช้ทำสายอากาศ</li> </ul>

## 2.5 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

### 2.5.1 การออกแบบขนาดของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ขนาดของช่องเปิดซึ่งเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นจะใช้หลักในการกำหนดขนาดเช่นเดียวกับสายอากาศแบบแพทช์ เพียงแต่ต้องให้ความกว้างรวมกับความยาว (W+L) มากกว่าความยาวคลื่นในวัสดุฐานรอง ( $\lambda_g$ ) เล็กน้อย



รูปที่ 2.4 รูปร่างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

รูปที่ 2.4 เป็นรูปร่างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งจะต้องมีขั้นตอนในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่จะใช้ในการกำหนดขนาดของช่องเปิด ดังต่อไปนี้

กำหนดค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของซัพสเตรต ( $\epsilon_r$ ) ความถี่ที่ต้องการออกแบบ ( $f$ ) และความสูงของซัพสเตรต  $h$  ดังนี้ [3]

คำนวณหาความยาวคลื่นในวัสดุฐานรอง ( $\lambda_g$ ) โดยทำตามขั้นตอนดังนี้

1) หาความยาวคลื่นในอากาศ ดังสมการ

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

2) หาค่าคงที่ประสิทธิผลของวัสดุฐานรอง จากสมการ ดังนี้

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad \text{เมื่อ } \frac{w}{h} > 1 \quad (2.2)$$

3) คำนวณหาค่าความยาวคลื่นในวัสดุฐานรองโดยประมาณ

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.3)$$

4) ค่าที่ได้ในข้อ 3 จะถูกนำไปกำหนดความยาวและความกว้างของช่องเปิดที่สัมพันธ์กัน

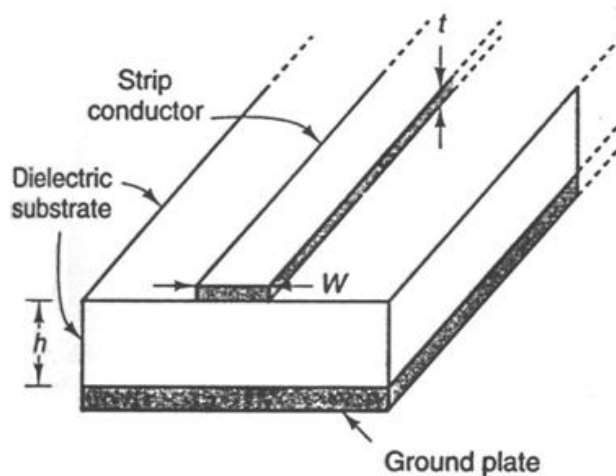
$$W+L > \lambda_g \quad (2.4)$$



โดยที่	$c$	คือ ความเร็วแสง (ประมาณ $3 \times 10^8$ m/s)
	$f$	คือ ความถี่ที่ต้องการออกแบบ
	$\epsilon_{eff}$	คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล
	$\epsilon_r$	คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง
	$\lambda_0$	คือ ความยาวคลื่นในอากาศ
	$\lambda_g$	คือ ความยาวคลื่นในวัสดุฐานรอง

### 2.5.2 การออกแบบไมโครสตริปไลน์

ไมโครสตริปไลน์ คือสายนำสัญญาณ (Transmission Line) ที่ประกอบด้วยเส้นตัวนำวางอยู่คนละระนาบกับระนาบกราวด์ โดยมีความกว้างของไมโครสตริปไลน์เป็นตัวกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการออกแบบให้แมตช์กับสายนำสัญญาณแบบโคแอกเซียล



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของไมโครสตริป

จากรูปที่ 2.5  $W$  คือ ความกว้างของตัวนำสตริป  $h$  คือความหนาของตัวนำสตริป และค่า  $h$  คือความหนาของวัสดุฐานรอง (Dielectric Substrate) ในการออกแบบสตริปไลน์ จะเริ่มจากการกำหนดค่า  $Z_0$  ซึ่งเป็นอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณแบบโคแอกเซียล และ  $\epsilon_r$  ของฉนวนที่เลือกเป็นค่าโรงงานผู้ผลิตแผ่น PCB เป็นผู้กำหนด นำค่าที่ได้มาใช้กำหนดหาค่าอัตราส่วน  $W/h$  โดยประมาณ จากนั้นก็ทำการคำนวณหาค่า  $W/h$  อย่างละเอียดได้ (โดยพิจารณาให้ชั้นความหนาของสตริปไลน์มีความบางมาก ๆ) [5]

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\}$$

โดยที่

$$A = \frac{Z_o}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)$$

และ

$$B = \frac{377\pi}{2Z_o\sqrt{\epsilon_r}}$$

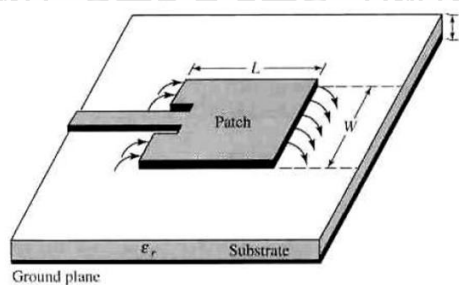
ค่า  $\epsilon_r$  ของวัสดุฐานรองจะเป็นตัวแปรที่สำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดโครงสร้างไมโครสตริปไลน์ โดยค่า  $\epsilon_r$  จะมีค่าอยู่ในช่วง 2 จนถึง 10 เมื่อทราบถึงค่า  $\epsilon_r$  และความหนาของชั้นไดอิเล็กตริก (Dielectric Thickness ; h) และค่า  $Z_o$  ที่ต้องการแล้ว ก็จะสามารถคำนวณหาความกว้างของสตริปไลน์ได้

## 2.6 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศ

การป้อนสัญญาณที่ใช้กับสายอากาศไมโครสตริป มีรูปแบบที่นิยมใช้มีอยู่ 4 ชนิด [3] ดังนี้

### 2.6.1 ไมโครสตริปไลน์ (Microstrip Line Feed)

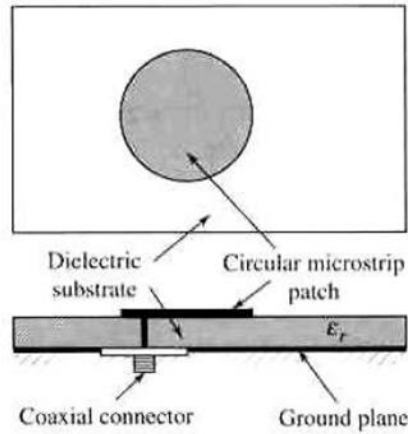
สายป้อนแบบไมโครสตริปเป็นสายป้อนที่เล็กกว่าแพทช์ การป้อนแบบไมโครสตริปนั้นสร้างง่ายและแมตซิ่งได้ง่าย โดยการควบคุมตำแหน่งการป้อน อย่างไรก็ตามการใช้ฐานรองที่หนาขึ้น ทำให้คลื่นที่ผิวและการแพร่กระจายคลื่นจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งในทางปฏิบัติการออกแบบจะมีแบนด์วิดท์ที่จำกัด(ปกติที่ 2 - 5 %)



รูปที่ 2.6 การป้อนแบบ Microstrip Line

### 2.6.2 การป้อนแบบสายโพรบ (Probe Feed)

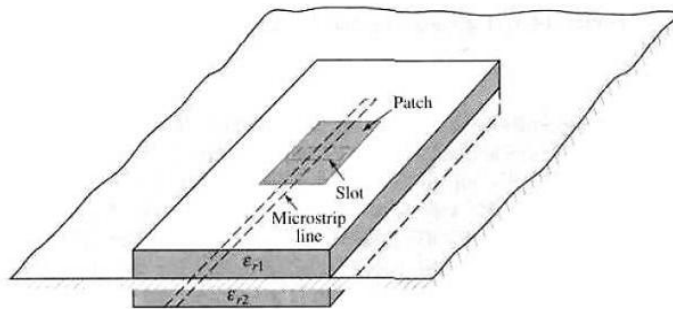
การป้อนด้วยสายโพรบ จะทำให้ตัวนำด้านในของสายเชื่อมต่อกับแพทช์ และตัวนำด้านนอกต่อกับระนาบกราวด์ การป้อนแบบนี้เป็นวิธีที่ง่ายทั้งการสร้างและการทำแมตซิ่ง และมีการแพร่กระจายคลื่นแปลกลบลดน้อย แต่อย่างไรก็ตามมันจะให้แบนด์วิดท์ที่แคบเมื่อมีฐานรองที่หนาขึ้น ( $h > 0.02\lambda_0$ )



รูปที่ 2.7 การป้อนแบบ Probe Feed

### 2.6.3 การป้อนแบบช่องเปิด (Aperture Coupling)

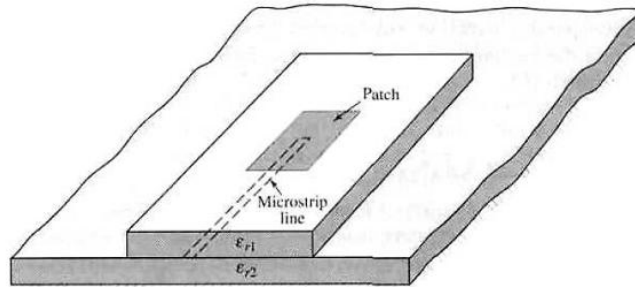
การป้อนทั้งสองแบบข้างต้นมีคุณลักษณะที่ไม่สมมาตร ที่ก่อให้เกิดโหมดที่สูงขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงใช้การป้อนที่ไม่สัมผัสกับแพทช์ นั่นก็คือการใช้การป้อนแบบช่องเปิด การป้อนแบบนี้จะสร้างยากที่สุดและมีแบนด์วิดท์ที่แคบ แต่ไม่ยากในการจำลองแบบ และมีการแพร่กระจายคลื่นแปลกปลอม การป้อนนี้ประกอบด้วยวัสดุฐานรองสองชั้นที่คั่นกลางด้วยแผ่นตัวนำกราวด์ ที่ผิวด้านล่างของแผ่นวัสดุฐานรองอันล่าง จะเป็นสายส่งไมโครสตริป ที่ใช้สำหรับการส่งผ่านพลังงานไปยังแพทช์ผ่านช่องเปิดบนระนาบกราวด์ ลักษณะนี้จะทำให้การปรับแต่งเป็นไปได้ อย่างอิสระต่อกันทั้งสายส่งและแพทช์ โดยปกติแล้ววัสดุฐานรองอันล่างที่เป็นส่วนของสายส่งและระนาบกราวด์จะกำหนดให้มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกฐานรองที่สูง ส่วนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองของแพทช์จะต่ำกว่าและมีความหนาที่มากกว่า การที่มีระนาบกราวด์คั่นตรงกลางทำให้ผลของการรบกวนที่เกิดจากการแพร่กระจายคลื่นแปลกปลอมมีน้อย และไม่รบกวนต่อโพลาริเซชัน



รูปที่ 2.8 การป้อนแบบ Aperture Coupling

### 2.6.4 การป้อนแบบประกบ (Proximity Coupling)

การป้อนแบบนี้จะมีแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุด (มากกว่า 13%) รูปแบบจำลองบางอย่างไม่ซับซ้อนและมีการแพร่กระจายคลื่นแปลกลดลง แต่การสร้างจะมีความยุ่งยาก การควบคุมการทำแพทช์ซึ่งทำได้โดยการควบคุมความยาวของสแต็บ และอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของแพทช์

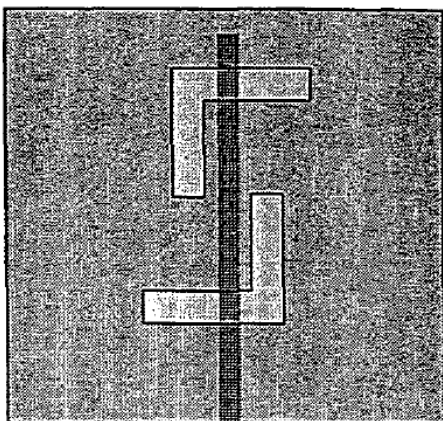


รูปที่ 2.9 การป้อนแบบ Proximity Coupling

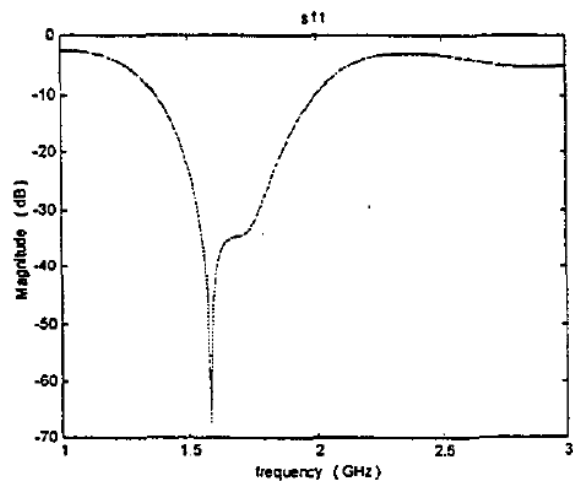
นอกเหนือจากที่กล่าวมาข้างต้นนี้ ยังมีการป้อนด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม (Coplanar Waveguide: CPW) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับไมโครสตริปไลน์ แต่ระนาบกราวด์จะอยู่ด้านเดียวกับสายนำสัญญาณ ในการออกแบบสายอากาศให้ได้คุณสมบัติตามต้องการนั้น ต้องอาศัยหลักการอื่น ๆ อีกหลายประการ

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.7.1 งานวิจัยเรื่อง An L-Shaped Circularly Polarized Slot Antenna



ก) โครงสร้างของสายอากาศ

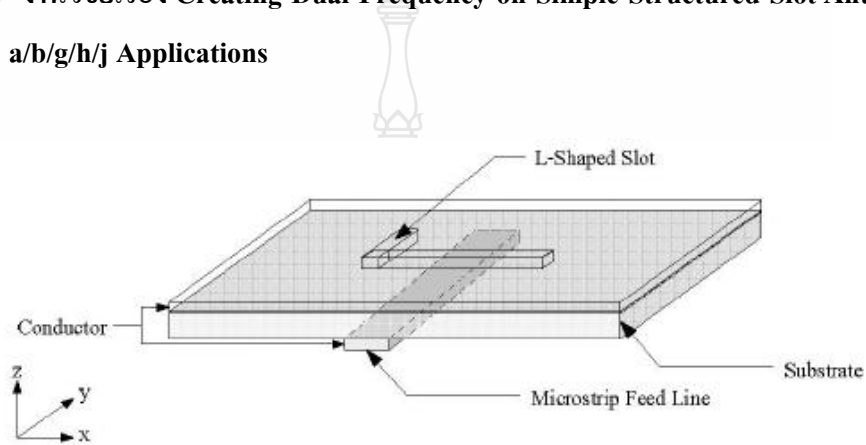


ข) Return loss ที่ความถี่ต่างๆของสายอากาศ

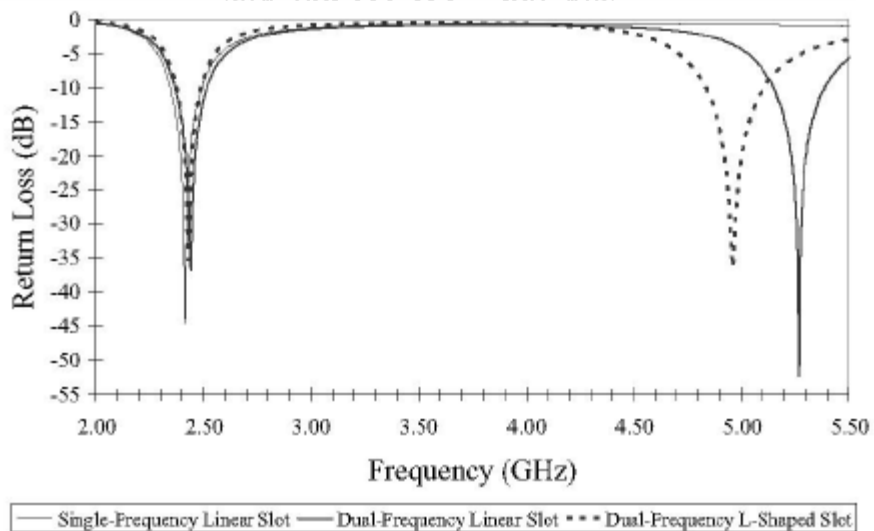
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของสายอากาศและ Return Loss

จากงานวิจัย [6] จะเห็นได้ว่าเป็นสายอากาศแบบช่องเปิดรูปตัวแอลมี โครงสร้างไม่ซับซ้อน โดยมีส่วนป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ จากงานวิจัยนี้พบว่า สายอากาศนี้สามารถให้ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดต่อแอมพลิจูดของการแพร่กระจายรอบแกน (Axial Ratio) เท่ากับ 2 dB โดยมีแบนด์วิดท์เป็น 10% ส่วนค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าเท่ากับ -67 dB ที่ความถี่ 1.58 GHz ซึ่งที่ตำแหน่ง -10 dB นี้จะให้แบนด์วิดท์ดีกว่า 40 % โดยไม่ต้องมีการปรับแต่งใดๆ

**2.7.2 งานวิจัยเรื่อง Creating Dual-Frequency on Simple-Structured Slot Antennas for IEEE 802.11 a/b/g/h/j Applications**



รูปที่ 2.11 Configuration of an L-Shaped Slot Antenna



รูปที่ 2.12 Return Loss Characteristics

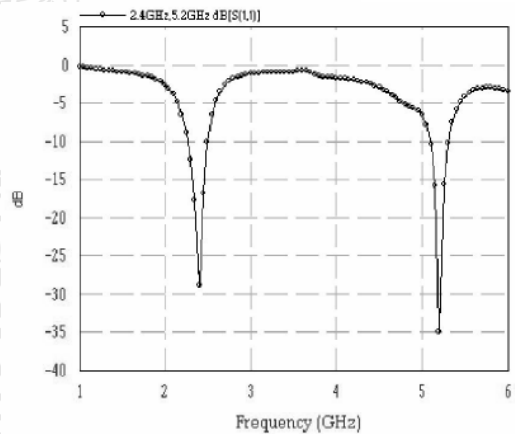
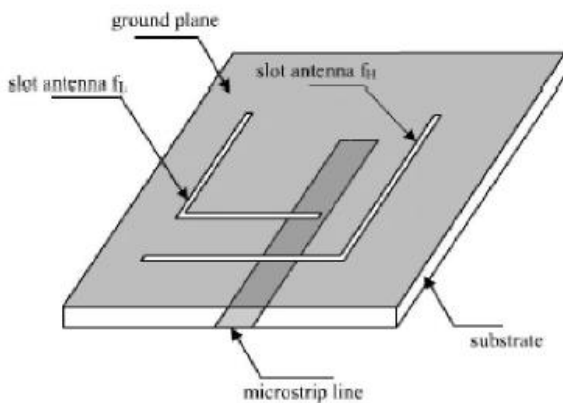
งานวิจัยนี้ [7] เป็นการนำเสนอการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบเส้นตรงและรูปอักษรแอล แบบง่าย ๆ ที่ส่งสัญญาณผ่านไมโครสตริปไลน์ ที่ทำให้เกิดสองแถบความถี่ ในย่าน 2.40 - 2.4835 GHz และ 4.9 - 5.0 GHz, 5.0 - 5.019 GHz หรือ 5.15 - 5.35 GHz ซึ่งสนับสนุนการ

สื่อสารแบบ WLAN ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 โครงสร้างสายอากาศสองความถี่ถูกนำเสนอใน 2 ลักษณะ โดยลักษณะแรกช่องเปิดสายอากาศจะเป็นแบบเส้นตรง ที่ถูกทำให้แคบลง ส่งผลให้แถบความถี่ใช้งานมีค่าตั้งแต่ 2.40–2.435 GHz และ 5.15 – 5.35 GHz โดยการใช้เทคนิควิธีชดเชยความสูญเสีย (Off – Setting) ของการส่งสัญญาณผ่านไมโครสตริปไลน์

ลักษณะที่สอง ช่องเปิดสายอากาศจะเป็นรูปอักษรแอล ทำให้การใช้งานในย่านความถี่ในย่าน 2.40 – 2.4835 GHz, 4.9 – 5.0 GHz และ 5.0 – 5.019 GHz ซึ่งพัฒนามาจากช่องเปิดสายอากาศแบบเชิงเส้นที่ให้ผลการตอบสนองความถี่เดียว

การวิเคราะห์สายอากาศ จะใช้โปรแกรม IE3D ผลการจำลองสายอากาศ แสดงให้เห็นกราฟแสดงคุณลักษณะของสายอากาศประกอบด้วยความถี่หลักสองความถี่และความถี่ข้างเคียง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนตำแหน่งจุดเชื่อมต่อสัญญาณที่ไมโครสตริป งานวิจัยนี้จึงเป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของสายอากาศช่องเปิดแบบเส้นตรงไปเป็นสายอากาศแบบอักษรแอล ที่ทำให้คุณลักษณะที่นำเสนอสามารถตอบสนองความต้องการได้

### 2.7.3 งานวิจัยเรื่อง A Dual Band Right Angle Microstrip Slot Antenna



ก) รูปร่างสายอากาศจากงานวิจัย

ข) ค่า Return Loss จากผลการจำลอง

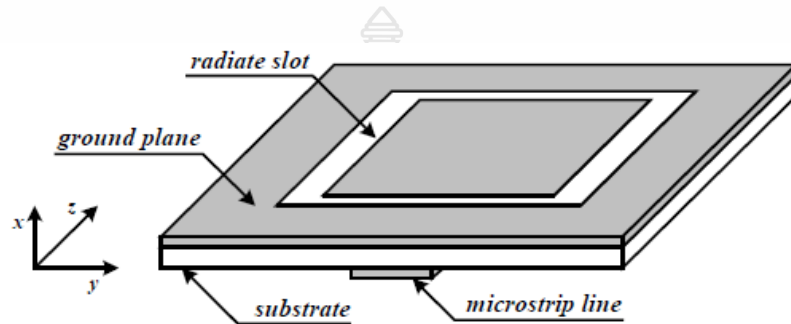
รูปที่ 2.13 รูปร่างสายอากาศจากงานวิจัย และค่า Return Loss จากผลการจำลอง

งานวิจัยนี้ [8] นำเสนอสายอากาศไมโครสตริปรูปอักษรแอลสำหรับสองความถี่ โดยช่องเปิดประกอบด้วย รูปอักษรแอลวางสลับกันบนระนาบกราวด์ โดยมีไมโครสตริปไลน์เป็นส่วนป้อนสัญญาณ

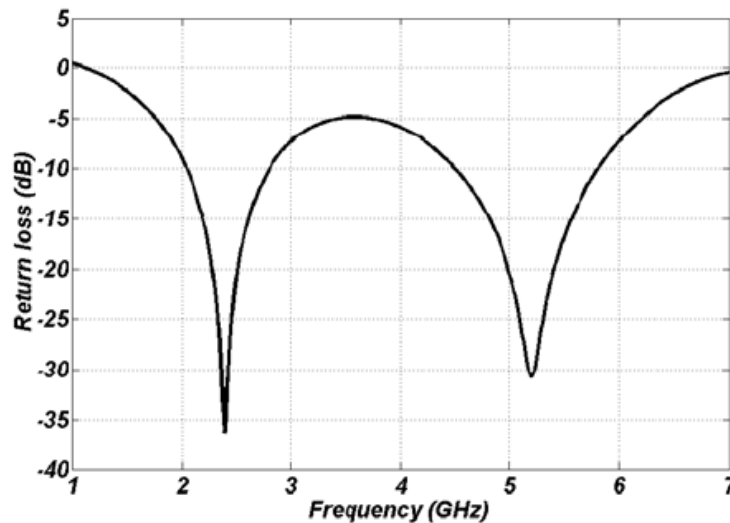
แนวคิดของการต่อสายอากาศรูปตัวแอลสองตัวก็เพื่อให้แต่ละตัวรองรับความถี่ที่แตกต่างกัน และการวางสลับกัน ก็จะต้องให้มีระยะห่างที่เหมาะสมเพื่อควบคุมไม่ให้มีการเหนี่ยวนำข้ามถึงกันซึ่งเกิดขึ้นระหว่างช่องเปิด ในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบสายอากาศสำหรับการใช้งานที่ความถี่

2.4 GHz และ 5.2 GHz ในย่าน WLAN สำหรับความถี่ 2.4 GHz วัตต์ความกว้างของแถบความถี่ (แบนด์วิดท์) ได้ 322 MHz และความถี่ 5.2 GHz วัตต์ความกว้างของแถบความถี่ได้ 250 MHz ซึ่งเพียงพอครอบคลุมความถี่ที่ต้องการตามมาตรฐาน WLAN ผลการวัดนี้นำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม IE3D

#### 2.7.4 งานวิจัยเรื่อง Designing Rectangular Slot Loop Antenna for WLAN Application



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของสายอากาศแบบ Rectangular Slot Loop Antenna

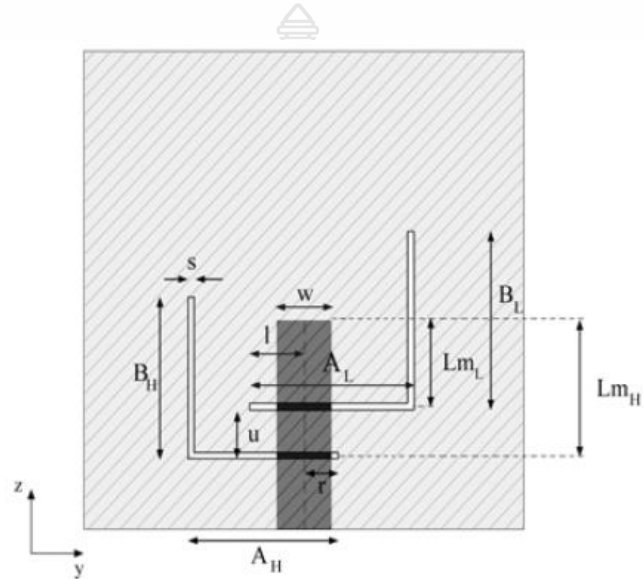


รูปที่ 2.15 คุณสมบัติของค่า Return Loss ของสายอากาศที่ได้

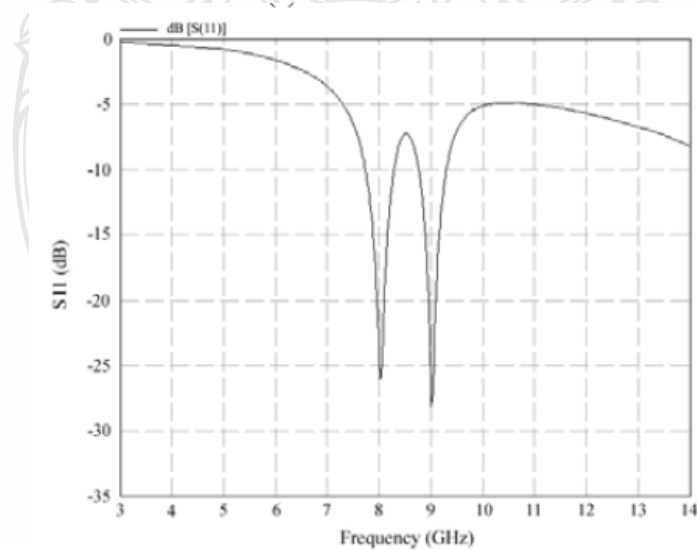
งานวิจัยนี้ [9] เป็นการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดวงรอบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งเหมาะสมกับการทำงานในสองย่านความถี่ โดยป้อนสัญญาณผ่านสายไมโครสตริป สายอากาศที่ออกแบบกำหนดความถี่รีโซแนนท์ที่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz โดยมีค่าแถบความถี่อยู่ระหว่าง 2.4 – 2.4836 GHz และ 5.15-5.35 GHz ซึ่งความถี่ที่ใช้งานอยู่ในย่านของการสื่อสารเครือข่ายไร้สาย (WLAN)

คุณลักษณะของสายอากาศจะพิจารณาจากค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า ( $Z_{in}$ ) การสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) และแบบรูปการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า หลักที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศจะใช้เทคนิควิธี FDTD (Finite Difference Time Domain) ซึ่งใช้วิเคราะห์การตอบสนองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับปัญหาที่ซับซ้อน

### 2.7.5 งานวิจัยเรื่อง Analysis of Right Angle Microstrip Slot Antenna



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปที่ทำงานสองความถี่



รูปที่ 2.17 ผลการจำลอง ของสายอากาศไมโครสตริปที่ทำงานสองความถี่โดยวิธี MOM



งานวิจัยนี้ [10] ได้นำเสนอการวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดรูปอักษรแอล ที่ให้ความถี่เดียว และการเพิ่มช่องเปิดรูปอักษรแอลอีกหนึ่งช่องเปิดที่ให้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต่างกันเพียง 1 GHz การวิเคราะห์นี้ จะพิจารณาระยะเวลาการจัดวางช่องเปิดทั้งสองตัวในตำแหน่งที่เหมาะสมกัน เพื่อให้สายอากาศนี้เป็นสายอากาศไมโครสตริบแบบช่องเปิดที่ใช้สำหรับความถี่เดียวและความถี่คู่

การทำงานของสายอากาศรูปตัวแอลในสองความถี่นี้ จะให้ช่องเปิดรูปอักษรแอลทั้งสองวางสลับด้านกันบนระนาบกราวด์ ซึ่งจะให้คุณสมบัติของสายอากาศตามข้อกำหนดที่ประกอบด้วยค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) และแบบรูปการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้เทคนิควิธี FDTD

สรุปได้ว่า ช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และช่องเปิดรูปอักษรแอล สามารถทำให้สายอากาศทำงานได้ในสองแถบความถี่ดังกล่าว

จากการศึกษางานวิจัยดังที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ จึงเป็นแรงบันดาลใจที่จะทำการวิจัยสายอากาศช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการแทรกเส้นตัวนำรูปอักษรแอล เพื่อให้ได้สองแถบความถี่ที่สามารถครอบคลุมทุกมาตรฐานความถี่ของการใช้งานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN)



## บทที่ 3

# การศึกษาสายอากาศช่องเปิดรูปลี่เหลี่ยมผืนผ้า ร่วมกับเส้นตัวนำสำหรับสองแถบความถี่

### 3.1 บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีไร้สายได้เข้ามามีบทบาทที่สำคัญยิ่งต่อการสื่อสาร อาจกล่าวได้ว่าเป็นยุคแห่งเทคโนโลยีไร้สาย โดยได้มีการนำเทคโนโลยีไร้สายมาใช้ในระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ที่ต้องการติดต่อรับ-ส่งข้อมูลโดยปราศจากสายส่งสัญญาณ ใช้เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์หลายเครื่องเข้าด้วยกัน ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้จึงเป็นการศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปลี่เหลี่ยมผืนผ้าที่แทรกเส้นตัวนำเพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความถี่ในย่านการใช้งานในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) ครอบคลุมมาตรฐานของ IEEE 802.11b/g (2.4-2.4835 GHz), IEEE 802.11a (5.15-5.35 GHz), IEEE 802.11h (5.47-5.725 GHz, 5.725-5.825 GHz) และ IEEE 802.11n (2.4-2.4835 GHz, 5.15-5.35 GHz, 5.725-5.825 GHz) โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปที่ทำการศึกษาและวิเคราะห์ เริ่มจากรูปร่างพื้นฐานแคบจนถึงกว้างเป็นรูปลี่เหลี่ยมผืนผ้า จากนั้นจะเลือกขนาดรูปร่างที่ให้ผลดีและเหมาะสมเพื่อแทรกเส้นตัวนำรูปมุมฉากที่ต่อยื่นจากระนาบกราวด์เข้าไปในช่องเปิด สุดท้ายเพิ่มเส้นตัวนำมุมฉากที่สองให้อยู่ภายในช่องเปิด ลักษณะดังกล่าวจะทำให้ได้สายอากาศที่มีย่านความถี่ใช้งานตามมาตรฐานดังที่กล่าวไว้แล้ว จากคุณลักษณะของสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์ พบว่าสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปลี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง จะสามารถปรับแต่งให้มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss:  $S_{11}$ ) ให้น้อยที่สุดได้ไม่ยากนัก ขณะเดียวกันจะให้แบนด์วิดท์ที่กว้าง และการเพิ่มเส้นตัวนำก็จะทำให้ง่ายต่อการปรับให้ได้สองย่านความถี่ตามที่ต้องการ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเป็นการศึกษาวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปลี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อให้ได้มาซึ่งความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ และจะทำการแมทซ์อิมพีแดนซ์เพื่อให้ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับ  $S_{11}$  น้อยที่สุด นอกจากนี้จะทำการปรับให้สายอากาศที่ออกแบบให้แบนด์วิดท์ที่แถบความถี่สูงกว้างมากเพียงพอต่อการนำไปใช้งานในโครงข่ายไร้สาย (WLAN) ได้หลายความถี่มาตรฐานที่ต้องการ ซึ่งสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่นำเสนอนี้ จะทำการวิเคราะห์และจำลองผลโดยใช้วัสดุฐานรองชนิด RT/Duroid 5880 ด้วยโปรแกรม IE3D โครงสร้างของสายอากาศที่มีผลการจำลองที่ดีตามความต้องการจะถูกนำไปสร้างจริงและวัดผล ผลการวัดจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองเพื่อเป็นการพิสูจน์ว่า การจำลองและวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม IE3D เป็นที่น่าเชื่อถือได้

### 3.2 พารามิเตอร์สำหรับการออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดและไมโครสตริปไลน์

ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดเพื่อการใช้งานในโครงข่ายไร้สาย โดยใช้วัสดุฐานรองแบบ RT/Duroid 5880 ซึ่งเป็นวัสดุฐานรองที่มีประสิทธิภาพสูงเหมาะสมกับการนำไปใช้ในการสร้างสายอากาศ รูปแบบสายอากาศที่ผ่านการจำลองจะถูกนำไปสร้างจริงบนวัสดุฐานรองแบบ RT/Duroid 5880 ที่มีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 3.1 คุณสมบัติดังกล่าวจะถูกนำไปคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับโครงสร้างของสายอากาศที่ออกแบบ ซึ่งจะมีการนำไปใช้ในวิเคราะห์สายอากาศตามลำดับขั้นตอน

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุฐานรองชนิด RT/Duroid 5880

วัสดุฐานรอง	$\epsilon_r$	$h$ (มม)	$\sigma$ (s/m)	$t$ (มม)	$\tan \delta$
RT/Duroid 5880	2.2	1.575	$5.8 \times 10^{-7}$	0.017	0.0009

โดยที่  $\epsilon_r$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก  
 $h$  คือ ความหนาวัสดุฐานรอง  
 $\sigma$  คือ ค่าความนำของวัสดุตัวนำ (ทองแดง)  
 $t$  คือ ความหนาของวัสดุตัวนำ  
 $\tan \delta$  คือค่า Loss tangent ( $\tan \delta$ )

สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้างนั้น จะใช้การส่งผ่านสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปซึ่งเรียกว่าไมโครสตริปไลน์ ที่ถูกต่อแบบปลายเปิด (open-end) ลำดับแรกของการออกแบบสายอากาศ คือ การออกแบบไมโครสตริปไลน์ให้มีอิมพีแดนซ์แมทซ์กับอิมพีแดนซ์ของสายส่งสัญญาณแบบโคแอกเซียล 50 โอห์ม ( $Z_0$ ) อิมพีแดนซ์ของไมโครสตริปไลน์ถูกกำหนดด้วยความกว้างของไมโครสตริปไลน์ ( $W_m$ ) ที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1) โดยจะขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) และความหนาของวัสดุฐานรอง ( $h$ ) จากนั้นจะใช้สมการที่ (3.2) – (3.5) คำนวณหาความยาวคลื่นสัมพันธ์ ( $\lambda_g$ ) ซึ่งเป็นความยาวคลื่นภายในวัสดุฐานรองที่จะนำไปสู่การกำหนดขนาดของสายอากาศได้ โดยที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) จะสัมพันธ์กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล  $\epsilon_{eff}$

$$\frac{W_m}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} [\ln(B - 1)] + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \quad (3.1)$$

และ 
$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}}$$

โดยที่	$\epsilon_r$	คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง
	$W_m$	คือ ความกว้างไมโครสตริปไลน์
	$h$	คือ ความหนาของวัสดุฐานรอง

ความยาวคลื่นในอากาศ ( $\lambda_0$ ) คำนวณได้จาก

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (3.2)$$

ความยาวคลื่นสัมพันธ์ ( $\lambda_g$ ) ในวัสดุฐานรอง หาได้จาก

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.3)$$

$$\lambda_g = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.4)$$

ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ประสิทธิผล ( $\epsilon_{eff}$ ) สามารถหาได้จาก

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \sqrt{1 + \frac{12h}{W_m}} \quad ; \frac{W_m}{h} > 1 \quad (3.5)$$

โดยที่	$c$	คือ ความเร็วแสง (ประมาณ $3 \times 10^8$ m/s)
	$f$	คือ ความถี่ที่ต้องการออกแบบ
	$\epsilon_{eff}$	คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ประสิทธิผล

ขนาดของสายอากาศแบบช่องเปิดมักจะเทียบกับความยาวคลื่นสัมพันธ์ (ความยาวคลื่นในวัสดุฐานรอง:  $\lambda_g$ ) ในที่นี้จะทำการออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดที่เป็นความถี่กึ่งกลางของแถบความถี่ WLAN มาตรฐาน IEEE 802.11b/g (2.4-2.4835 GHz) นั่นคือ 2.44-2.45 GHz เมื่อเป็นสายอากาศแบบช่องเปิดแคบ ความยาวของช่องเปิดจะประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นสัมพันธ์ ( $\lambda_g/2$ ) แต่ถ้าช่องเปิดนั้นมีความกว้างมากขึ้นคือเป็นรูปสี่เหลี่ยม ก็ต้องนำเอาความกว้างของช่องเปิดมาชดเชยกับความยาวของด้านที่แพร่กระจายคลื่น นั่นคือความยาวรวมความกว้างช่องเปิดจะอยู่ในช่วงระหว่าง  $0.55\lambda_g - 0.7\lambda_g$  ขึ้นอยู่กับความกว้างของช่องเปิดเป็นหลักหรือถ้าคิดจากเส้นรอบรูปของช่องเปิดก็จะมากกว่าหนึ่งความยาวคลื่นสัมพันธ์ ( $\lambda_g$ ) แต่จะไม่เกินกว่า  $1.4\lambda_g$  ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการปรับแต่งขนาดความกว้างและความยาวของช่องเปิดที่สัมพันธ์กับความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ แต่การ

กำหนดความยาวเส้นรอบรูปที่กล่าวมานี้อาจจะไม่สามารถใช้กับรูปร่างช่องเปิดที่ซับซ้อนหรือเป็นแบบวงรอบได้ สำหรับการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการใช้วัสดุฐานรองชนิด RT/Duroid 5880 จะถูกนำไปใช้ในการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรม IE3D ต่อไป ผลจากการคำนวณด้วยสมการข้างต้น โดยกำหนดค่าความถี่และคุณสมบัติของวัสดุฐานรองที่ใช้ จะถูกแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากวัสดุฐานรองชนิด RT/Duroid 5880

วัสดุฐานรอง	$f$ (GHz)	$\epsilon_{eff}$	$\lambda_0$ (มม.)	$\lambda_g$ (มม.)	$W_m$ (มม.)
RT/Duroid 5880	2.45	2.94449	122.45	71.359	4.7

ค่าความยาวคลื่นสัมพัทธ์ ( $\lambda_g$ ) และความกว้างของไมโครสตริปไลน์ ( $W_m$ ) จะถูกนำไปใช้ในศึกษาวิเคราะห์เพื่อออกแบบสายอากาศช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าต่อไป

### 3.3 การศึกษาและวิเคราะห์สายอากาศแบบช่องเปิดรูปร่างพื้นฐานบน RT Duroid 5880

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดรูปร่างพื้นฐาน โดยจะเริ่มศึกษาตั้งแต่ขนาดของระนาบกราวด์ สายอากาศแบบเส้นช่องเปิดแคบ และสายอากาศช่องเปิดกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจนถึงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยใช้วัสดุฐานรองชนิด RT/Duroid 5880 ผลการวิเคราะห์จะนำไปสู่การออกแบบขนาดของช่องเปิดที่เหมาะสมกับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ นอกจากนี้ในการจำลองแต่ละครั้งจะต้องปรับระยะระหว่างปลายขอบไมโครสตริปไลน์กับขอบล่างช่องเปิด ( $L_m$ ) เพื่อให้มีการแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ให้ผลดีที่สุด

#### 3.3.1 การวิเคราะห์ผลกระทบของระนาบกราวด์ที่เจาะช่องเปิดกว้าง

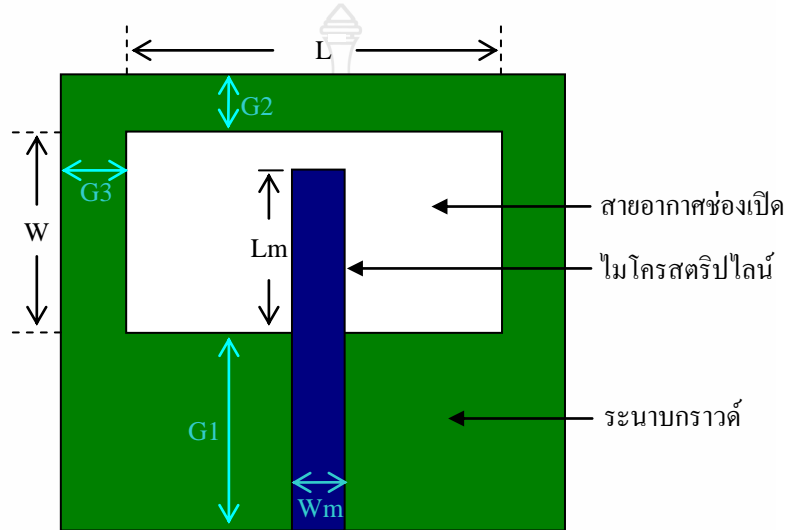
ก่อนที่จะกำหนดขนาดของช่องเปิดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ ( $F_r$ ) ตรงตามความถี่ที่ออกแบบ คือ 2.44-2.45 GHz จะต้องพิจารณาขนาดของระนาบกราวด์ที่เหมาะสมก่อน สายอากาศช่องเปิดจะถูกเจาะอยู่บนระนาบกราวด์ ระยะกราวด์ที่ต้องนำมาพิจารณาได้แก่ ระยะความกว้างของกราวด์ที่อยู่เหนือช่องเปิด ( $G_2$ ) และระยะกว้างของกราวด์ด้านซ้ายและขวาของช่องเปิดซึ่งเท่ากัน ( $G_3$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ส่วนระยะกราวด์ล่างจะกำหนดประมาณ  $0.3\lambda_g$  หรือ 21.2 มม.

เนื่องจากความกว้างและความยาวของช่องเปิดเป็นส่วนที่จะกำหนดความถี่เรโซแนนซ์ ( $F_r$ ) แต่ในการวิเคราะห์นี้จะไม่เจาะจงความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นความกว้างและความยาวของช่องเปิดที่จะนำมาทำเป็นต้นแบบสำหรับการวิเคราะห์ด้านผลกระทบของกราวด์ พร้อมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศจะกำหนดให้มีค่าเบื้องต้นเป็นดังนี้

- ความยาวช่องเปิด ( $L$ ) = 37.5 มม.
- ความกว้างช่องเปิด ( $W$ ) = 20.0 มม.
- ความกว้างไมโครสตริปไลน์ ( $W_m$ ) = 4.7 มม.

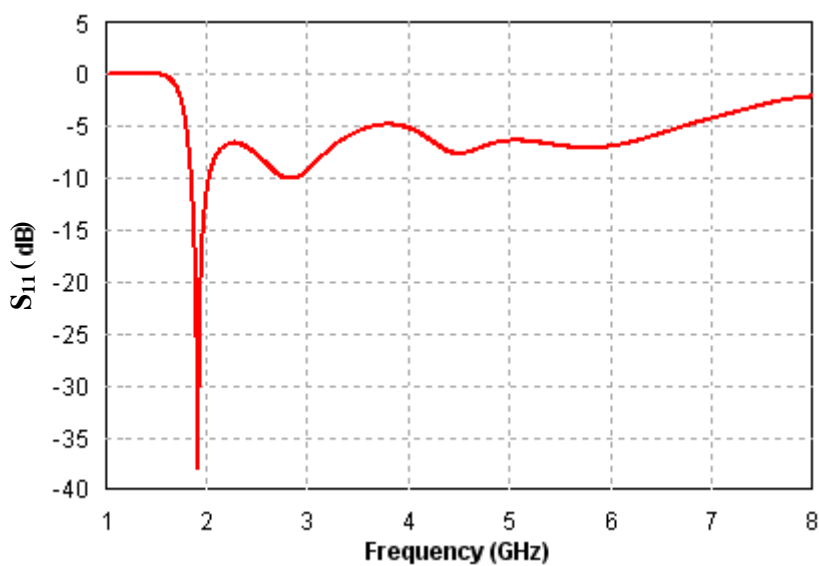
- ระยะกราวด์จากขอบล่างสุดถึงขอบช่องเปิด ( $G1$ ) = 21.2 มม.
- ระยะกราวด์ที่อยู่เหนือช่องเปิด ( $G2$ ) = 5 มม.
- ระยะกราวด์ด้านข้างทั้งซ้ายและขวา ( $G3$ ) = 5 มม.

โดยให้  $L_m$  เป็นระยะระหว่างปลายขอบไมโครสตริปไลน์กับขอบล่างช่องเปิด ซึ่ง  $L_m$  จะถูกปรับทุกครั้งเพื่อให้มีการแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีที่สุด



รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดกว้างรูปร่างพื้นฐาน ที่ใช้เป็นต้นแบบศึกษากระบวนการ

ผลการจำลองจะแสดงอยู่ในรูปของการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss:  $S_{11}$ ) ดังที่แสดงในรูปที่ 3.2 โดยมีโครงสร้างตามที่แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.2 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อพารามิเตอร์มีค่าตามที่กำหนดข้างต้น

ผลการจำลองคุณลักษณะของสายอากาศตามขนาดที่ใช้เป็นต้นแบบ แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของกราวด์

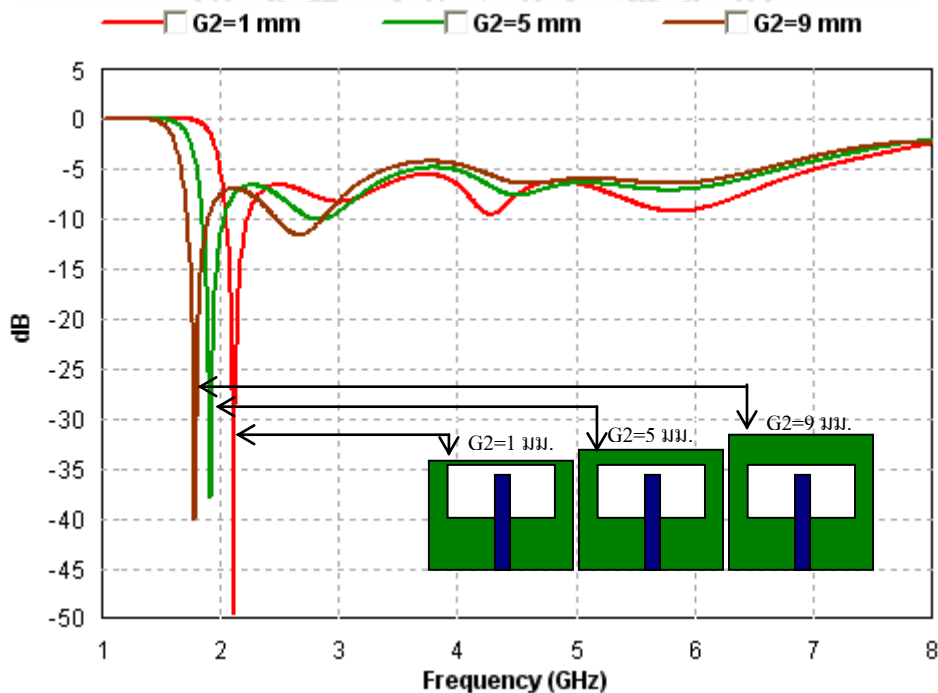
กราวด์	Fr (GHz)	S <sub>11</sub> (dB)	BW (GHz)
G2=G3=5 มม.	1.92	-37.95	0.17 (1.86-2.03 GHz)

จากคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 1.9 GHz และมีแบนด์วิดท์กว้างเพียง 0.17 GHz จะถูกนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับคุณลักษณะของสายอากาศที่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ของกราวด์ (G1, G2, และ G3) ซึ่งจะทำตามลำดับขั้นตอนดังนี้

- เพิ่มและลดระยะ G2 ให้ต่างจากค่าในต้นแบบ
- เพิ่มและลดระยะ G3 ให้ต่างจากค่าในต้นแบบ
- เพิ่มและลดระยะ G1 ให้ต่างจากค่าในต้นแบบ
- เพิ่มระยะ G3 และลดระยะ G2 ให้ต่างจากค่าในต้นแบบ

1) การวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะกราวด์ด้านบน

เนื่องจาก G2 เป็นระยะกราวด์ด้านบนเหนือช่องเปิด ในที่นี้จะทดลองปรับให้ระยะ G2 เปลี่ยนแปลงไป 3 ค่า โดยให้มีค่าเป็น 1 มม., 5 มม. และ 9 มม. ตามลำดับ ผลการจำลองด้านการสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปรียบเทียบกับต้นแบบแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อกำหนดให้ G2 มีค่าเป็น 1, 5, 9 มม.

ผลการเปรียบเทียบการจำลองทางคุณลักษณะของสายอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงระยะกราวด์ด้านบน จะแสดงในตารางที่ 3.4

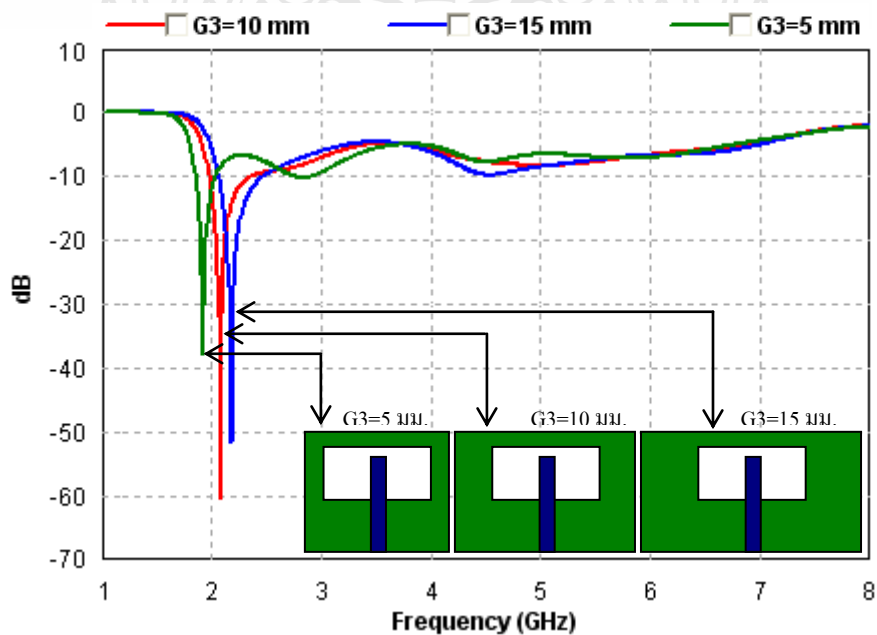
ตารางที่ 3.4 คุณลักษณะสายอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะกราวด์บน ( $G_2=1, 5, 9$  มม.)

ระยะกราวด์บน	Fr (GHz)	$S_{11}$ (dB)	BW (GHz)
$G_2 = 1$ มม.	2.12	-49.42	0.17 (2.06-2.23 GHz)
$G_2 = 5$ มม.	1.92	-37.95	0.17 (1.86-2.03 GHz)
$G_2 = 9$ มม.	1.79	-40.06	0.17 (1.73-1.90 GHz)

จากผลการจำลองสรุปได้ว่าถ้าระยะกราวด์บนมีค่าน้อยลงจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์สูงขึ้น พร้อมทั้งทำให้ช่วงแถบความถี่ขยับสูงขึ้นด้วย ขณะเดียวกันถ้าระยะกราวด์มากขึ้นก็จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ลดต่ำลงและช่วงแถบความถี่ก็ลดลงด้วย นอกจากนี้พบว่า การเปลี่ยนแปลงของระยะกราวด์บนจะไม่มีผลต่อแบนด์วิดท์เลย ดังนั้นการกำหนดกราวด์บน ( $G_2$ ) ให้เล็กจะใช้ประโยชน์สำหรับปรับแต่งให้ความถี่เรโซแนนซ์ขยับสูงขึ้นตามต้องการได้

## 2) การวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะกราวด์ด้านข้าง

ระยะกราวด์ด้านข้างซ้ายและขวา ( $G_3$ ) จะถูกกำหนดให้เท่ากัน ในการจำลองนี้จะจำลองผลด้วยการปรับค่า  $G_3$  ให้แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 5, 10, และ 15 มม. ตามลำดับ โดยคงค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ตามที่ได้กำหนดไว้ตอนต้น ผลการสูญเสียย้อนกลับที่นำมาเปรียบเทียบกันแสดงดังรูปที่ 3.4 และการเปรียบเทียบคุณลักษณะสายอากาศแสดงในตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.4 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อกำหนดให้  $G_3$  มีค่าเป็น 5, 10, 15 มม.



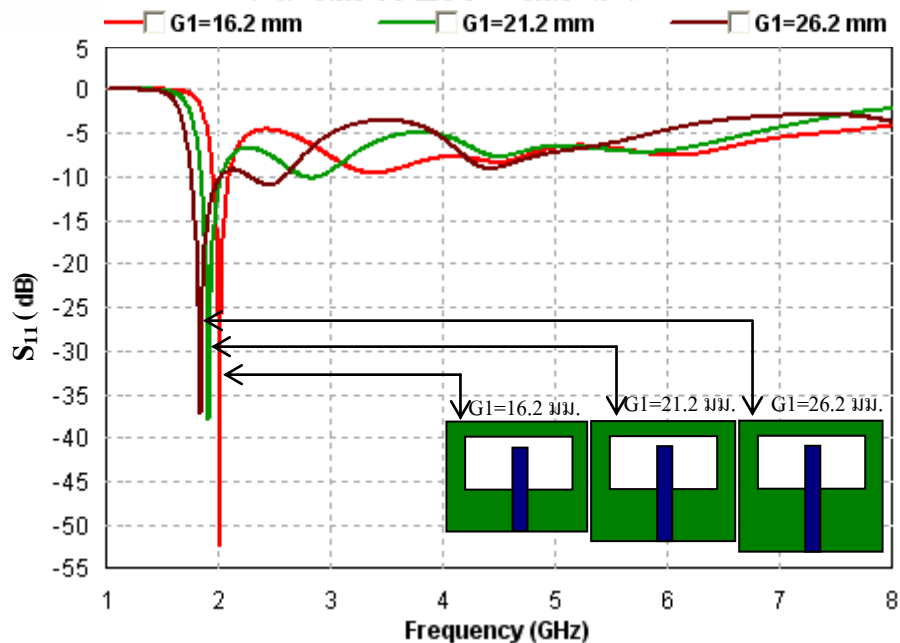
ตารางที่ 3.5 คุณลักษณะสายอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะกราวด์ด้านข้าง ( $G_3=5, 10, 15$  มม.)

ระยะกราวด์ด้านข้าง	Fr (GHz)	$S_{11}$ (dB)	BW (GHz)
$G_3 = 5$ มม.	1.92	-37.95	0.17 (1.86-2.03 GHz)
$G_3 = 10$ มม.	2.08	-60.39	0.36 (1.99-2.35 GHz)
$G_3 = 15$ มม.	2.18	-51.69	0.39 (2.07-2.46 GHz)

ผลการวิเคราะห์พบว่า การเพิ่มระยะกราวด์ด้านข้างจะทำให้ช่วงแถบความถี่ขยับสูงขึ้นและแบนด์วิดท์กว้างขึ้นด้วย ในทางกลับกันการลดระยะกราวด์ด้านข้างจะทำให้แถบความถี่ลดต่ำลงพร้อมทั้งแบนด์วิดท์แคบลงด้วย

### 3. การวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะกราวด์ด้านล่าง

ระยะกราวด์ด้านล่างเป็นระยะระหว่างขอบล่างของระนาบกราวด์ถึงขอบช่องเปิด โดยมีด้านตรงข้ามเป็นไมโครสตริปไลน์ที่ถูกจัดวางอย่างสมมาตรกันทั้งซ้ายและขวา จากเบื้องต้นระยะกราวด์ด้านล่างคือ  $G_1$  มีระยะเท่ากับ 21.2 มม. หรือประมาณ  $0.3\lambda_g$  ซึ่งเป็นต้นแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ ในการเปลี่ยนแปลงนี้จะทดลองเปลี่ยนให้ระยะ  $G_1$  เป็น 16.2 มม. และ 26.2 มม. ซึ่งเป็นค่าที่น้อยกว่าและมากกว่าต้นแบบ 5 มม. ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อกำหนดให้  $G_1$  มีค่าเป็น 16.2, 21.2, 26.2 มม.

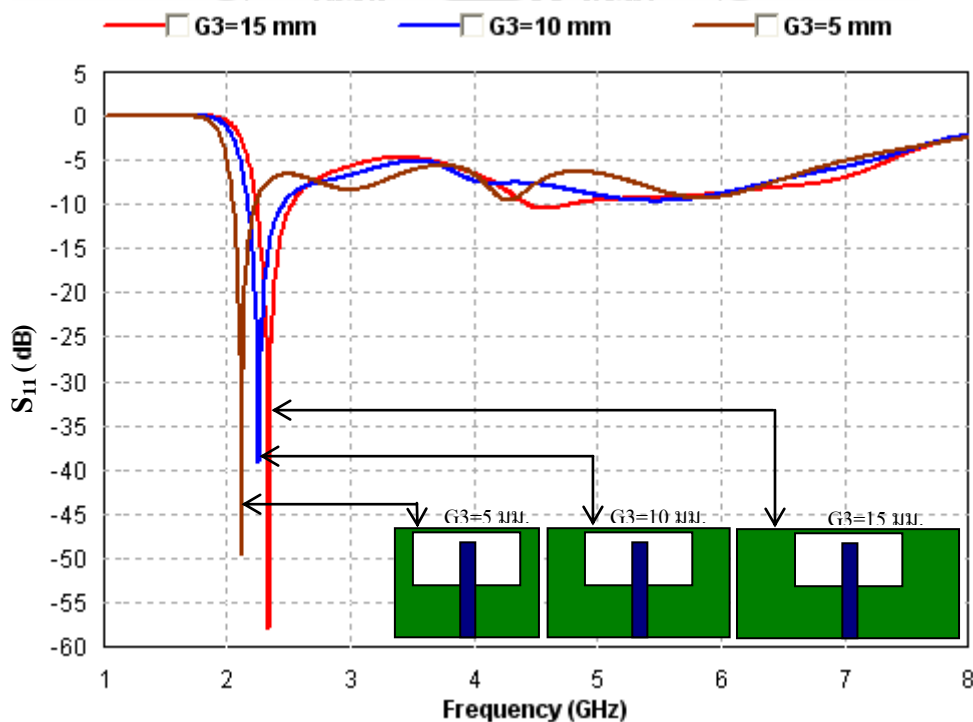
ตารางที่ 3.6 คุณลักษณะสายอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะกราวด์ด้านล่าง ( $G1=16.2, 21.2, 26.2$  มม.)

ระยะกราวด์ด้านข้าง	Fr (GHz)	$S_{11}$ (dB)	BW (GHz)
$G1 = 16.2$ มม.	2.02	-52.28	0.13 (1.97-2.1 GHz)
$G1 = 21.2$ มม.	1.92	-37.95	0.17 (1.86-2.03 GHz)
$G1 = 26.2$ มม.	1.85	-37.20	0.25 (1.77-2.02 GHz)

จากการเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดกว้างที่มีการเปลี่ยนแปลงระยะกราวด์ด้านล่างดังที่แสดงในตารางที่ 3.6 พบว่าถ้าระยะกราวด์ด้านล่างมีค่าน้อยจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์และช่วงแถบความถี่ขยับสูงขึ้น โดยมีแบนด์วิดท์ที่แคบลง ขณะที่ถ้าระยะกราวด์ด้านล่างมีค่ามากกว่าจะทำให้ได้แบนด์วิดท์ที่กว้างขึ้น

#### 4. การวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดเมื่อลดระยะ $G2$ และเพิ่มระยะ $G3$

จากการวิเคราะห์ทั้ง 3 แบบที่ผ่านมา เมื่อนำผลรวมทั้งหมดมาวิเคราะห์ร่วมกันอีกครั้ง พบว่าระยะกราวด์ด้านข้างและด้านล่างจะมีความสำคัญมาก ควรกำหนดให้เหมาะสม ส่วนระยะกราวด์ด้านบนจะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์เท่านั้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทดลองลดระยะกราวด์บน ( $G2$ ) เป็น 1 มม. และให้ระยะกราวด์ด้านข้าง ( $G3$ ) เป็น 5 มม., 10 มม. และ 15 มม. โดยระยะกราวด์ด้านล่าง ( $G1$ ) ยังคงเป็น 21.2 มม. ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อกำหนดให้  $G3=5, 10, 15$  มม. โดยที่  $G2=1$  มม.

ตารางที่ 3.7 คุณลักษณะสายอากาศ เมื่อ  $G_2 = 1$  มม. และเปลี่ยนแปลงระยะกราวด์ด้านข้าง

ระยะกราวด์	Fr (GHz)	$S_{11}$ (dB)	BW (GHz)
$G_3 = 5$ มม.	2.12	-49.42	0.17 (2.06-2.23 GHz)
$G_3 = 10$ มม.	2.26	-39.23	0.27 (2.18-2.45 GHz)
$G_3 = 15$ มม.	2.34	-57.77	0.27 (2.25-2.52 GHz)

จากการนำคุณลักษณะของสายอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงระยะกราวด์ด้านข้างและลดระยะกราวด์ด้านบนเป็น 1 มม. มาเปรียบเทียบกับกัน ผลแสดงในตารางที่ 3.7 ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า ถ้า  $G_3$  มีค่าน้อยจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ลดต่ำลงพร้อมกับความกว้างของแบนด์วิดท์น้อยลงด้วย และขณะเดียวกัน ถ้า  $G_3$  มีค่ามากขึ้นก็จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์สูงขึ้นและแบนด์วิดท์ก็จะกว้างขึ้นด้วย แต่แบนด์วิดท์จะไม่สามารถกว้างได้มากขึ้นไปเรื่อย ๆ ตามค่า  $G_3$  ที่เพิ่มมากขึ้นได้ กล่าวคือขอบเขตแบนด์วิดท์จะอยู่ที่ประมาณ 0.27 GHz เท่านั้น

จากการจำลองที่ผ่านมาที่กำหนดให้  $G_1$  คงที่ที่ระยะ 21.2 มม. จากนั้นเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่า  $G_3$  โดยให้  $G_2$  คงที่ที่ 5 มม. และ 1 มม. ตามผลที่แสดงในตารางที่ 3.5 และตารางที่ 3.7 ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อนำผลจากตารางที่ 3.5 และตารางที่ 3.7 มารวมกัน โดยแสดงในตารางที่ 3.8 พบว่า ระยะ  $G_2$  ควรมากกว่า 1 มม. และระยะ  $G_3$  ควรอยู่ในช่วงระหว่าง 5-10 มม. จะให้แบนด์วิดท์ที่กว้างเพียงพอ

ตารางที่ 3.8 คุณลักษณะสายอากาศช่องเปิด เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะ  $G_3$  โดยให้  $G_2 = 1$  มม. และ 5 มม.

ระยะกราวด์ (มม.)		Fr (GHz)	$S_{11}$ (dB)	BW (GHz)
$G_3$	$G_2$			
5	5	1.92	-37.95	0.17 (1.86-2.03 GHz)
	1	2.12	-49.42	0.17 (2.06-2.23 GHz)
10	5	2.08	-60.39	0.36 (1.99-2.35 GHz)
	1	2.26	-39.23	0.27 (2.18-2.45 GHz)
15	5	2.18	-51.69	0.39 (2.07-2.46 GHz)
	1	2.34	-57.77	0.27 (2.25-2.52 GHz)

ผลที่แสดงในตารางที่ 3.8 จะถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกันอีกครั้ง พบว่าในการออกแบบสายอากาศควรกำหนดขอบเขตของระนาบกราวด์ ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้แบนด์วิดท์ที่กว้างเพียงพอ โดยมีขนาดสายอากาศไม่ใหญ่มากนัก ดังนั้นขนาดที่กำหนดเบื้องต้น จะเป็นดังนี้

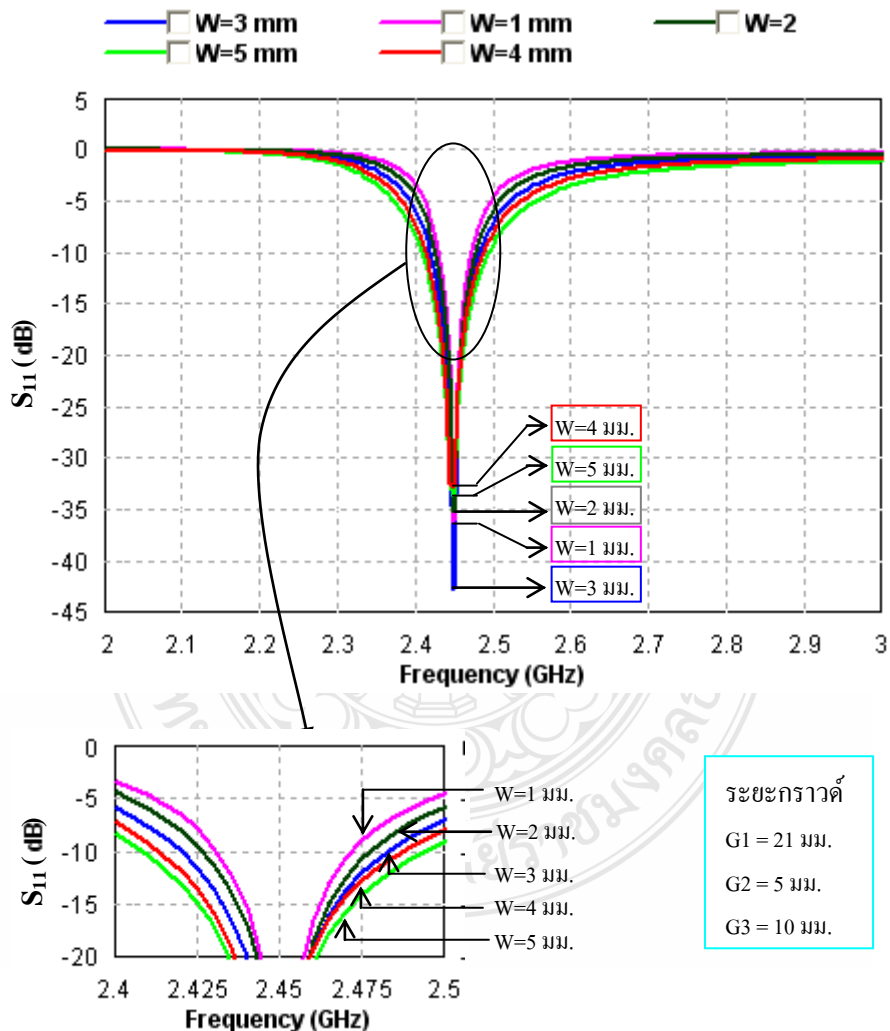
ระยะ  $G_1 = 21$  มม.                      ระยะ  $G_2 = 5$  มม.                      ระยะ  $G_3 = 10$  มม.

ระยะกราวด์ดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการจำลองผลในหัวข้อถัดไป

### 3.3.2 การวิเคราะห์สายอากาศแบบช่องเปิดแคบ

ในการศึกษาและวิเคราะห์สายอากาศแบบช่องเปิดแคบ จะขอเริ่มศึกษาจากช่องเปิดแบบแคบ หลังจากนั้นจึงเป็นแบบกว้าง โดยกำหนดให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2.44-2.45 GHz เท่านั้น จากนั้นจะนำสายอากาศที่ให้แบนด์วิดท์กว้างมากเพียงพอไปใช้ในการออกแบบสายอากาศที่ให้สองแถบความถี่มาตรฐานในระบบเครือข่ายไร้สาย (WLAN) ต่อไป

สำหรับการออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดแคบนี้ จะกำหนดให้ความกว้างช่องเปิด (W) ไม่เกินกว่า 5 มม. โดยจะเริ่มที่ 1 มม. และให้เปลี่ยนไปครั้งละ 1 มม. และทุกครั้งที่เปลี่ยนค่า W จะต้องปรับความยาวช่องเปิด (L) พร้อมกับปรับระยะ  $L_m$  เพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2.44-2.45 GHz โดยมีการแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีที่สุดทุกครั้ง ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับมีค่าที่เป็นมาตรฐานใกล้เคียงกัน ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.7 และตารางที่ 3.9



รูปที่ 3.7 การสูญเสียย้อนกลับของช่องเปิดแบบแคบเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างช่องเปิด (W)

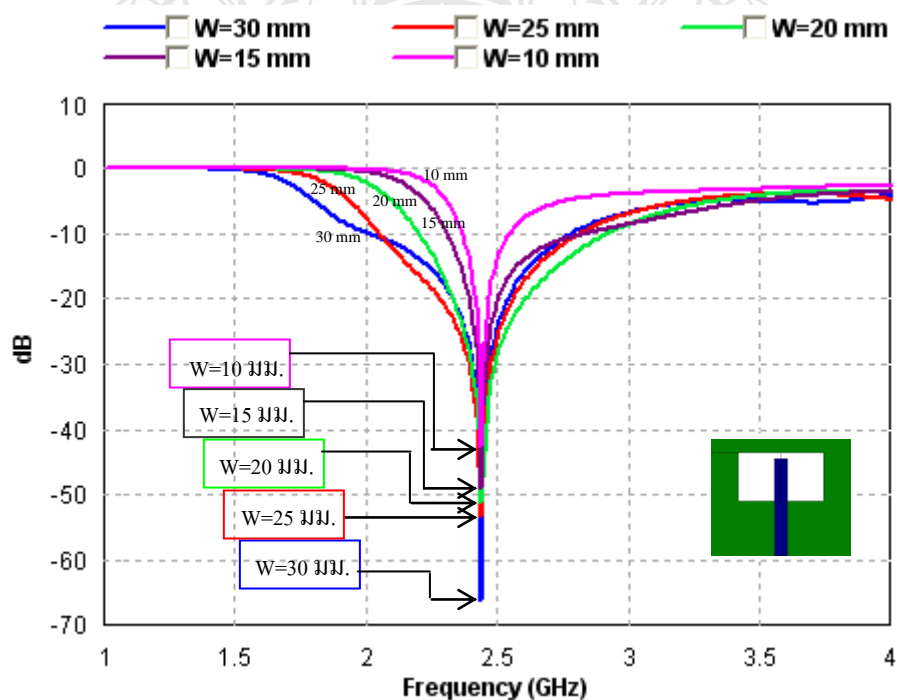
ตารางที่ 3.9 คุณลักษณะสายอากาศแบบช่องเปิดแคบ เมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างช่องเปิด

ความกว้าง (มม.)	ความยาว (มม.)	Fr (GHz)	S <sub>11</sub> (dB)	BW (GHz)
W= 1	L=44.8	2.45	-36.06	0.035 (2.435-2.470 GHz)
W= 2	L=44	2.45	-35.18	0.045 (2.430 -2.475 GHz)
W= 3	L=43	2.45	-42.75	0.055 (2.425-2.480 GHz)
W= 4	L=42	2.45	-32.82	0.070 (2.415-2.485 GHz)
W= 5	L=41	2.45	-33.55	0.080 (2.410-2.490 GHz)

จากผลการจำลองในตารางที่ 3.9 แสดงให้เห็นได้ว่า เมื่อช่องเปิดแคบเกินไป จะทำให้แบนด์วิดท์แคบมาก ๆ ไม่ครอบคลุมมาตรฐาน WLAN ตามที่ต้องการ ดังนั้นในขั้นต่อไป จะเป็นการจำลองแบบและวิเคราะห์ช่องเปิดแบบกว้างเพื่อให้ได้แบนด์วิดท์ที่กว้างเพียงพอต่อการนำไปใช้งาน

### 3.3.3 การวิเคราะห์สายอากาศแบบช่องเปิดกว้าง

สายอากาศแบบช่องเปิดกว้างนี้ จะใช้วิธีวิเคราะห์เช่นเดียวกับสายอากาศแบบช่องเปิดแคบ คือ กำหนดความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการให้อยู่ในช่วงระหว่าง 2.44-2.45 GHz ซึ่งเป็นความถี่กึ่งกลางของ WLAN 2.4 GHz จากนั้นเปลี่ยนแปลงความกว้างช่องเปิด (W) เป็นดังนี้ 10, 15, 20, 25 มม. ตามลำดับ และทุกครั้งที W เปลี่ยนไป จะต้องปรับความยาวช่องเปิด (L) และระยะ Lm เพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ 2.44-2.45 GHz ที่มีการแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ดี ผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับแสดงดังรูปที่ 3.8 และคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศแสดงในตารางที่ 3.10



รูปที่ 3.8 การสูญเสียย้อนกลับของช่องเปิดแบบกว้างเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างช่องเปิด (W)

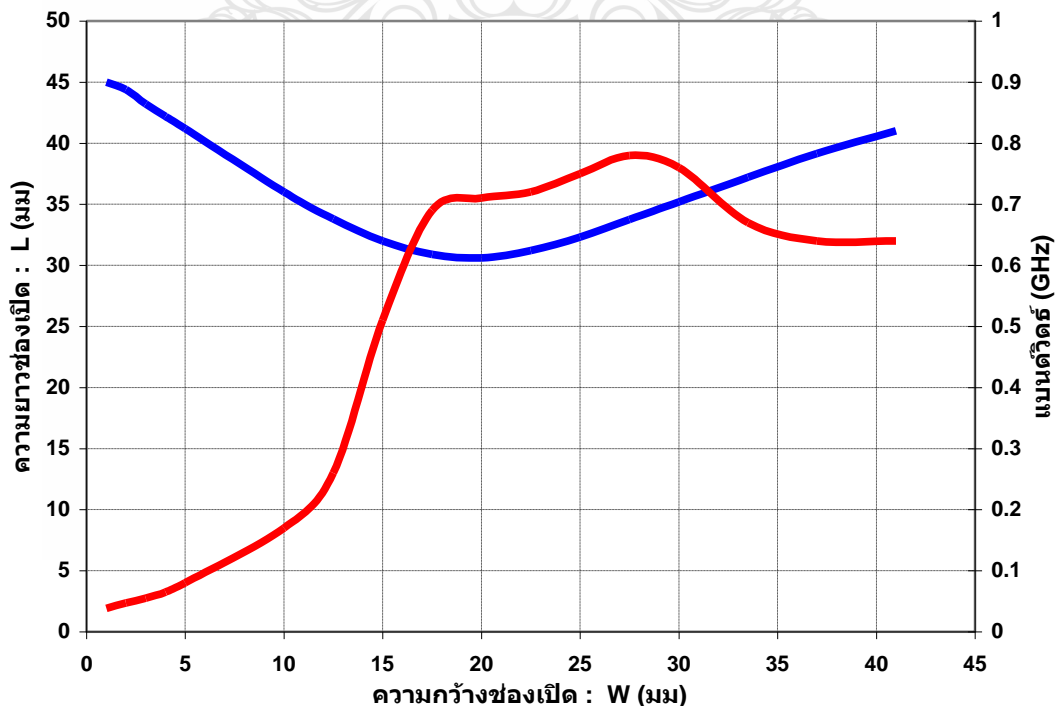
ตารางที่ 3.10 คุณลักษณะสายอากาศแบบช่องเปิดกว้าง เมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างช่องเปิด

ความกว้าง (มม.)	ความยาว (มม.)	Fr (GHz)	S <sub>11</sub> (dB)	BW (GHz)
W= 10.0	L=36	2.44	-42.5	0.17 (2.37-2.54 GHz)
W= 15.0	L=32	2.44	-49.08	0.51 (2.32-2.83 GHz)
W= 20.0	L=30.6	2.44	-51.03	0.71 (2.21-2.92 GHz)
W= 25.0	L=32.3	2.44	-53.25	0.75 (2.06-2.81 GHz)
W= 30.0	L=35.2	2.44	-66.28	0.76(2.02-2.78 GHz)

จากผลที่แสดงในตารางที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าแบนด์วิดธ์จะกว้างขึ้นเมื่อความกว้างช่องเปิด (W) มากขึ้น ขณะเดียวกันความยาวช่องเปิด (L) จะลดลง ทั้งนี้ก็เพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2.44 GHz แต่ถ้า W กว้างมากถึงจุด ๆ หนึ่งความยาวช่องเปิด (L) จะเปลี่ยนแปลงจากลดลงกลายเป็นเริ่มมากขึ้น กลับกันช่วงแรกที่ L ลดลง สังเกตได้ชัดเจนที่ความกว้างระหว่าง W=20 มม. และ W=25 มม.

### 3.3.4 สรุปผลการวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดรูปร่างพื้นฐาน

เมื่อนำผลการจำลองที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง W และ L พร้อมแบนด์วิดธ์ ไปสร้างเป็นกราฟเปรียบเทียบที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.44 GHz โดยกำหนดให้ความกว้างช่องเปิด (W) เป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการกำหนดความยาวช่องเปิด (L) และแบนด์วิดธ์ ดังรูปที่ 3.9 ในการสร้างกราฟเปรียบเทียบนี้จะให้ W เริ่มต้นที่ 10 มม. และสิ้นสุดที่ 30 มม.



รูปที่ 3.9 ความยาวช่องเปิด (L) และแบนด์วิดธ์ที่เปลี่ยนแปลงตามความกว้างช่องเปิด (W)

ตารางที่ 3.11 สรุปขนาดช่องเปิดและแบนด์วิดท์ ที่ความถี่ 2.44 GHz

ความกว้าง W (มม.)	ความยาว L (มม.)	BW (GHz)
1.0	44.8	0.035
2.0	44.0	0.045
3.0	43.0	0.055
4.0	42.0	0.070
5.0	41.0	0.080
10.0	36.0	0.17
12.5	33.8	0.26
15.0	32.0	0.51
17.5	30.9	0.69
20.0	30.6	0.71
22.5	31.2	0.72
25.0	32.3	0.75
27.5	33.74	0.78
30.0	35.2	0.76
33.5	37.2	0.67
37.0	39.14	0.64
41.0	41.0	0.64

จุดเปลี่ยน L เริ่มมาก

การวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดรูปร่างพื้นฐานตั้งแต่แบบช่องเปิดแคบจนถึงช่องเปิดกว้าง ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ละเอียดแสดงในตารางที่ 3.11 ซึ่งถูกนำไปใช้ในการสร้างกราฟเปรียบเทียบในรูปที่ 3.9 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างช่องเปิด (W) กับความยาวช่องเปิด (L) และแบนด์วิดท์ได้ จากกราฟแสดงให้เห็นได้ว่า เมื่อช่องเปิดมีความกว้าง (W) ไม่มาก ความยาวช่องเปิดจะยาว แต่เมื่อช่องเปิดเริ่มกว้างมากขึ้น ความยาวช่องเปิด (L) จะค่อย ๆ ลดลง แต่เมื่อความกว้าง W ถึงจุด ๆ หนึ่ง กลับทำให้ความยาวช่องเปิด (L) เพิ่มขึ้น เมื่อดูจากกราฟจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความยาวที่สัมพันธ์กับความกว้างจะเป็นเส้นโค้งที่มีจุดเปลี่ยนอยู่ที่ตำแหน่ง  $W \approx 20$  มม. ซึ่งในการวิเคราะห์จะสิ้นสุดที่ช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ส่วนแบนด์วิดท์เมื่อช่องเปิดแคบแบนด์วิดท์จะไม่ค่อยกว้างมากนัก และจะกว้างมากขึ้นเมื่อช่องเปิดกว้างขึ้น เช่นเดียวกัน ความกว้างช่องเปิดจะกว้างถึงจุด ๆ หนึ่งแบนด์วิดท์ก็จะเริ่มลดลง แต่ไม่มากนัก ซึ่งที่ตำแหน่ง  $W=L=41$  มม. ช่องเปิดจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส แบนด์วิดท์จะมีค่า 0.64 GHz

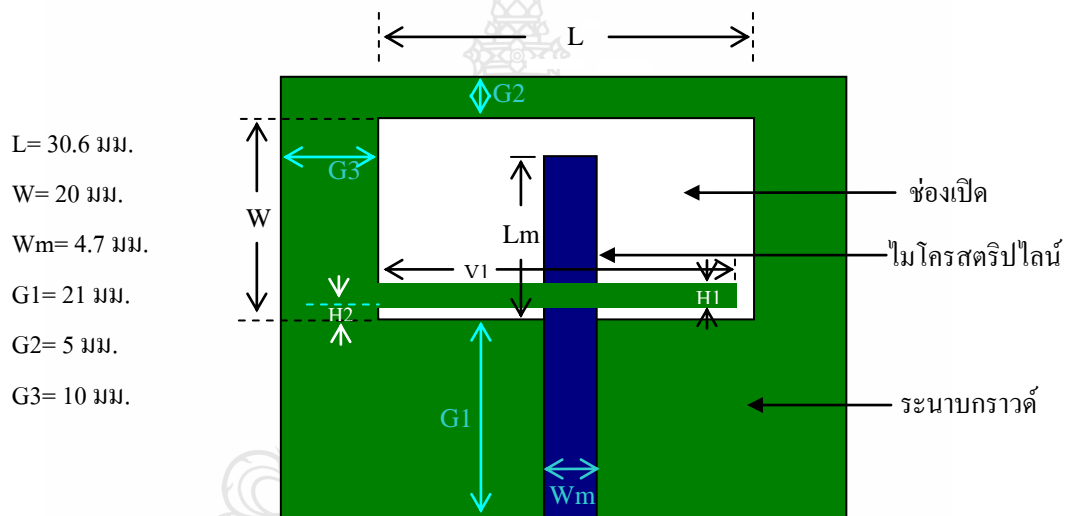
ดังนั้นขนาดสายอากาศช่องเปิดกว้างที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการออกแบบขั้นต่อไปด้วยการแทรกตัวนำไว้ภายในช่องเปิด เพื่อให้สามารถใช้งานได้ในย่าน WLAN จึงใช้ความกว้างช่องเปิด  $W=20$  มม. ความยาวช่องเปิด  $L=30.6$  มม.

### 3.4 การออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับสองแถบความถี่

จากการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดรูปร่างพื้นฐานที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 2.44 GHz ที่ผ่านมา พบว่าขนาดสายอากาศที่เหมาะสมต่อการนำไปทำการปรับปรุงเพื่อให้ได้สองแถบความถี่มาตรฐาน WLAN คือ ความกว้างช่องเปิด  $W=20$  มม. ความยาวช่องเปิด  $L=30.6$  มม. ในการแทรกเส้นตัวนำลงไปภายในช่องเปิดจะต้องกำหนดความยาวความกว้างเส้นตัวนำและระยะการวางให้เหมาะสม พร้อมกับต้องปรับระยะ  $L_m$  ทุกครั้ง เพื่อให้มีการแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีที่สุด [11]

#### 3.4.1 การแทรกเส้นตัวนำแนวนอนจากกราวด์เข้าไปในช่องเปิด

ในที่นี้จะทดลองแทรกเส้นนำแนวนอนที่ต่อขยายจากกราวด์ด้านซ้ายผ่านเข้าไปในช่องเปิด ดังรูปที่ 3.10



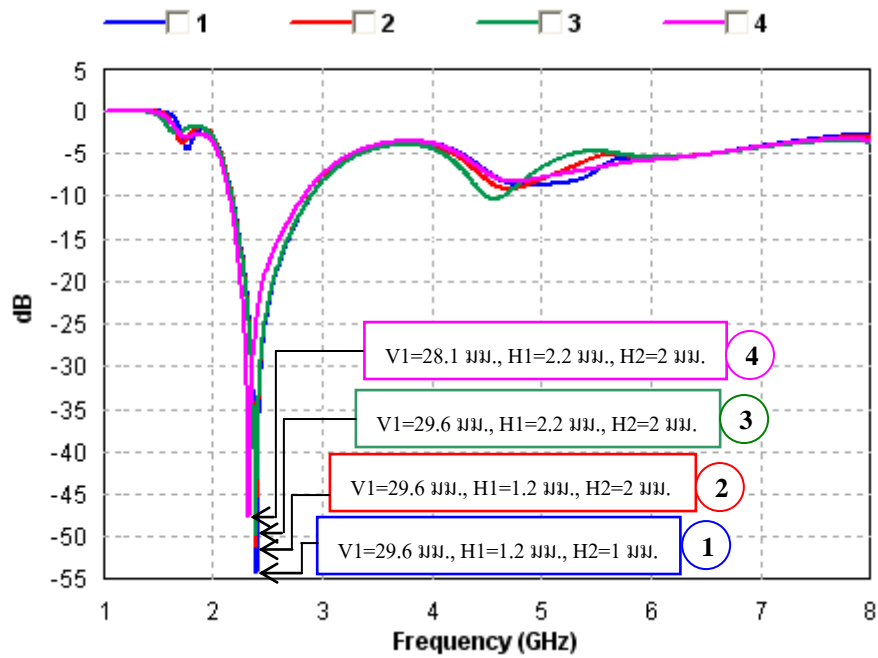
รูปที่ 3.10 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดพร้อมเส้นตัวนำแนวนอน

เบื้องต้นจะกำหนดให้เส้นตัวนำที่แทรกเข้าไปในช่องเปิดมีความกว้าง( $H_1$ ) เป็น 1.2 มม. และให้ปลายสุดของเส้นตัวนำอยู่ห่างจากขอบช่องเปิดล่างและข้างเป็นระยะ 1 มม. นั่นคือ  $V_1=29.6$  มม. โดยมีขั้นตอนในการจำลองตามลำดับ ดังนี้

- แทรกเส้นตัวนำแนวนอนกว้าง 1.2 มม. ในช่องเปิดห่างจากขอบล่างและขอบข้าง 1 มม.
- ยกระดับเส้นแนวนอนห่างจากขอบช่องเปิดล่างเป็นระยะ 2 มม. โดยคงความกว้างและยาว
- ขยายเส้นตัวนำให้กว้างขึ้นจาก 1.2 มม. เป็น 2.2 มม. ( $H_1=2.2$  มม.)
- ปรับเส้นตัวนำให้สั้นลงจากเดิมเป็น 28.1 มม. (ห่างจากขอบข้างขวา 2.5 มม.)

ผลการเปรียบเทียบด้านการสูญเสียย้อนกลับของการปรับความยาวและความกว้างเส้นตัวนำแนวนอน ( $V_1$  และ  $H_1$ ) รวมทั้ง  $H_2$  แสดงดังรูปที่ 3.11



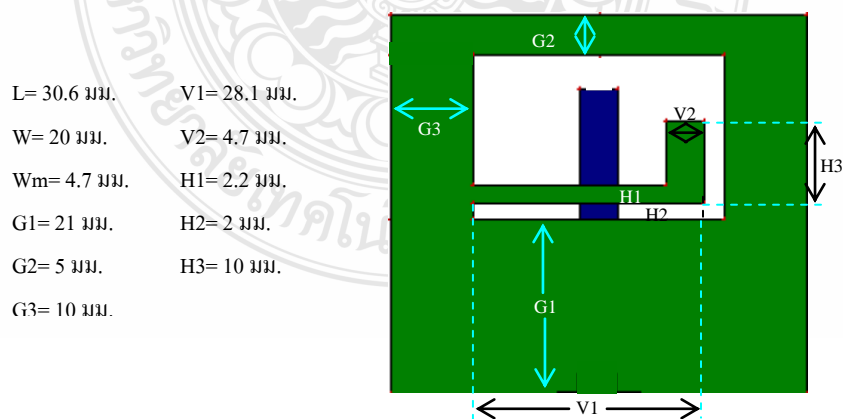


รูปที่ 3.11 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อแทรกเส้นตัวนำแวนอนในช่องเปิดที่ขนาดและระยะแตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาการสูญเสียย้อนกลับจากรูปที่ 3.11 พบว่าการเปลี่ยนขนาดและระยะการวางเส้นตัวนำช่องเปิดในแวนอนแทบจะไม่มีผลแตกต่างกัน แต่ที่ความถี่สูงแนวโน้มของแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุดคือแบบที่ 4 ดังนั้นจะนำขนาดของเส้นตัวนำแวนอนในแบบที่ 4 ไปใช้ในการวิเคราะห์ขั้นต่อไป คือการแทรกเส้นตัวนำรูปมุมฉากลงในช่องเปิด

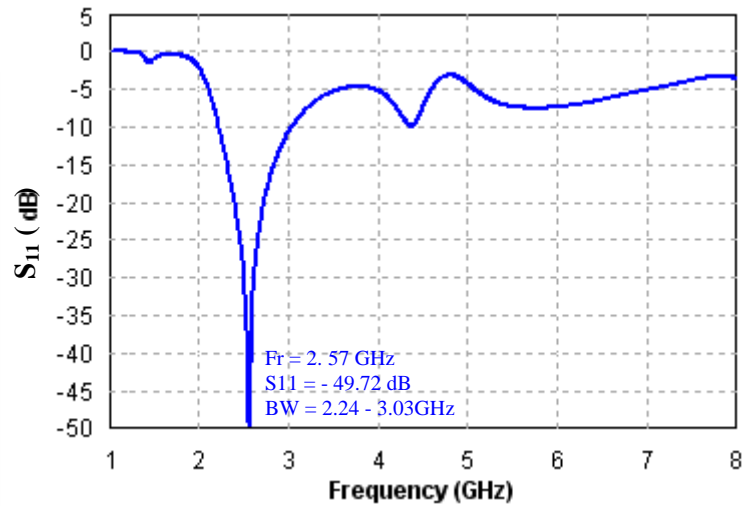
### 3.4.2 การแทรกตัวนำรูปมุมฉากจากราวด์เข้าไปในช่องเปิด

สายอากาศแบบช่องเปิดที่มีการแทรกเส้นตัวนำแวนอนจากราวด์ในรูปแบบที่ 4 ที่ได้วิเคราะห์มาแล้ว จะถูกนำมาปรับเปลี่ยนเส้นตัวนำให้เป็นรูปมุมฉาก ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดพร้อมเส้นตัวนำรูปมุมฉาก

การแทรกเส้นตัวนำรูปมุมฉากจะทำให้เกิดการสูญเสียย้อนกลับตามรูปที่ 3.13 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า มีแนวโน้มการเกิดแถบความถี่ในช่วง 5-6 GHz แต่ความถี่เรโซแนนซ์สูงกว่า 2.44 GHz



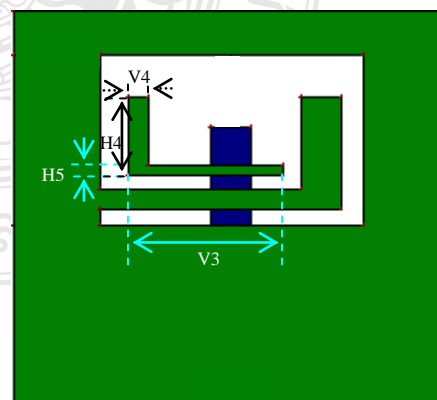
รูปที่ 3.13 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อแทรกเส้นตัวนำมุมฉากจากกราวด์ลงในช่องเปิด

สายอากาศช่องเปิดที่แทรกเส้นตัวนำมุมฉากที่ออกจากกราวด์ ตามที่ได้วิเคราะห์มาแล้วนี้จะถูกนำมาใช้ในการออกแบบเพื่อให้ได้สองแถบความถี่

### 3.4.3 การออกแบบสายอากาศสองแถบความถี่มาตรฐาน WLAN

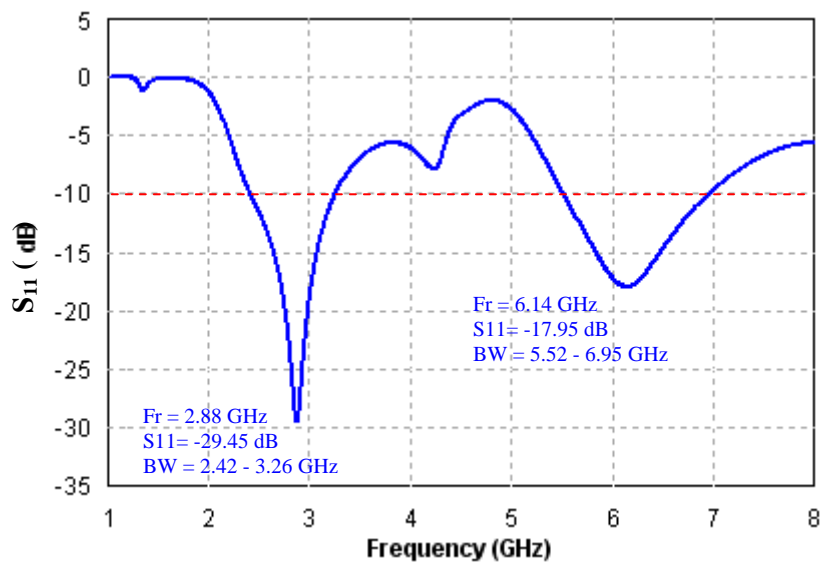
การออกแบบสายอากาศเพื่อให้ได้สองแถบความถี่มาตรฐานใน WLAN นั้นสามารถทำได้หลายรูปแบบ ในที่นี้จะทำการออกแบบโดยนำรูปแบบและขนาดสายอากาศตามที่แสดงในรูปที่ 3.12 มาทำการแทรกตัวนำรูปมุมฉากให้อยู่เหนือเส้นตัวนำรูปมุมฉากที่ออกจากกราวด์ ดังรูปที่ 3.14

- L= 30.6 มม.      V1 = 28.1 มม.
- W= 20 มม.      V2 = 4.7 มม.
- Wm= 4.7 มม.    H1 = 2.2 มม.
- G1= 21 มม.     H2 = 2 มม.
- G2= 5 มม.      H3 = 10 มม.
- G3= 10 มม.     V3 = 18 มม.
- V 4= 2.5 มม.
- H4 = 9 มม.
- H5 = 1.2 มม.



รูปที่ 3.14 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดพร้อมสองตัวนำรูปมุมฉาก

ตัวนำมุมฉากที่สองจะถูกจัดวางให้ห่างจากขอบข้างขวา 3.3 มม. และห่างจากขอบเส้นมุมฉากล่าง 1.8 มม. ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.15



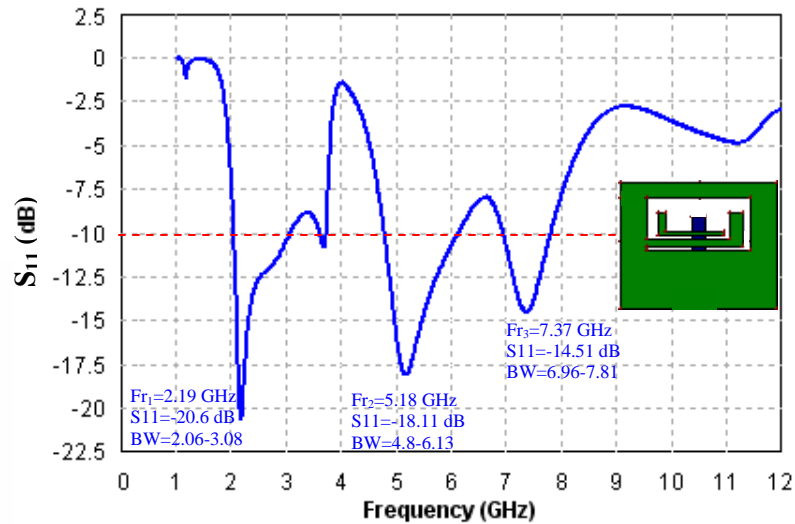
รูปที่ 3.15 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเพิ่มการแทรกสองตัวนำรูปมุมฉากลงในช่องเปิด

จากผลการสูญเสียย้อนกลับตามรูปที่ 3.15 จะได้สองแถบความถี่ โดยแถบความถี่ด้านต่ำจะมีความถี่เรโซแนนซ์สูงกว่า 2.44 GHz ขณะเดียวกันแถบความถี่ทั้งสองยังไม่ครอบคลุมมาตรฐานความถี่ที่ต้องการ ดังนั้นในขั้นต่อไปจึงต้องทำการขยายสายอากาศให้ใหญ่ขึ้นโดยคงขนาดกราวด์เดิมไว้ แล้วปรับแต่งขนาดของเส้นตัวนำมุมฉากที่อยู่ภายในรวมถึงการจัดวางให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม เพื่อให้ได้สองแถบความถี่มาตรฐาน WLAN ตามที่ต้องการ

ในที่นี้จะขยายช่องเปิดจาก  $L=30.6$  มม. เป็น  $L=37.5$  มม. และคงความกว้าง  $W=20$  มม. โดยที่  $G1=21.2$  มม.  $G2=5$  มม.  $G3=10$  มม. โดยมีพารามิเตอร์ทางขนาดที่ได้จากการปรับแต่งเส้นตัวนำรูปมุมฉากทั้งสองตัวให้เหมาะสม แสดงในตารางที่ 3.12 และการสูญเสียย้อนกลับที่เกิดขึ้นแสดงในรูปที่ 3.16

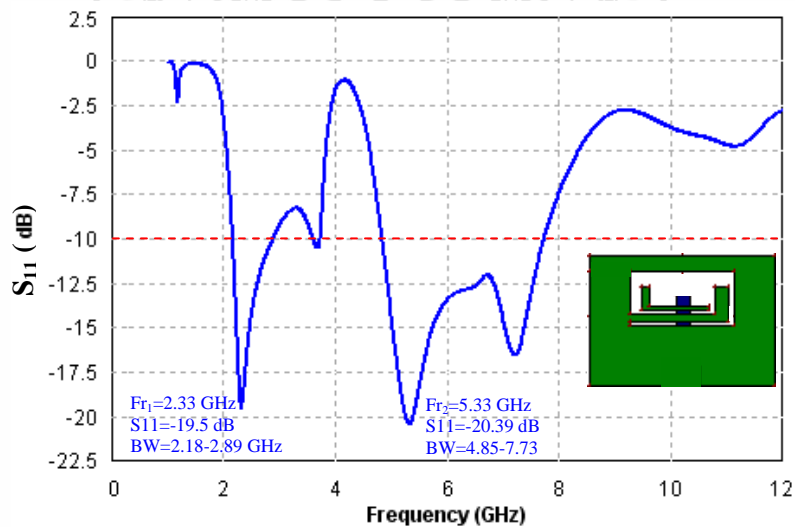
ตารางที่ 3.12 ค่าพารามิเตอร์ทางขนาดของสายอากาศที่ได้ปรับขยายความยาว L: หน่วย มม.

$L = 37.5$	$G3 = 10$	$H3 = 12$
$W = 20$	$V1 = 35$	$V3 = 24.05$
$Wm = 4.7$	$V2 = 4.7$	$V4 = 2.5$
$G1 = 21.2$	$H1 = 2.2$	$H4 = 7.9$
$G2 = 5$	$H2 = 2$	$H5 = 1.2$



รูปที่ 3.16 การสูญเสียย้อนกลับ เมื่อ  $L=37.5$  มม.  $G_1=21.2$  มม.  $G_2=5$  มม.  $G_3=10$  มม.

ผลการสูญเสียย้อนกลับในรูปที่ 3.16 แสดงให้เห็นได้ว่า แบนด์วิดท์ที่แถบความถี่ด้านต่ำและด้านสูง ครอบคลุมมาตรฐานที่ต้องการ แต่ถ้าสามารถขยายแถบความถี่ด้านสูงให้กว้างมากกว่า 6 GHz ก็น่าจะนำไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่า ดังนั้นจึงทดลองขยายความกว้างของกราวด์ด้านข้างคือ  $G_3$  เป็น 14.5 มม. จะทำให้ทั้งความถี่เรโซแนนซ์และแบนด์วิดท์ขยับสูงขึ้นตามที่ต้องการได้ สามารถวิเคราะห์ได้จากผลการสูญเสียย้อนกลับที่เกิดขึ้นในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การสูญเสียย้อนกลับ เมื่อ  $L=37.5$  มม.  $G_1=21.2$  มม.  $G_2=5$  มม.  $G_3=14.5$  มม.

นำผลจากการเปลี่ยนแปลงระยะกราวด์  $G_3$  มาเปรียบเทียบกัน ระหว่าง  $G_3=10$  มม. และ  $G_3=14.5$  มม. ดังตารางที่ 3.13 จะเห็นได้ว่าสายอากาศที่มีระยะกราวด์  $G_3$  แตกต่างกันนี้ยังคงมีแบนด์วิดท์ครอบคลุมมาตรฐาน IEEE 802.11b/g/a (2.4-2.4835, 5.15-5.35 GHz), IEEE 802.11h

(5.47-5.725 GHz, 5.725-5.825 GHz), IEEE 802.11n (2.4-2.4835 GHz, 5.15-5.35 GHz, 5.725-5.825 GHz) ตรงตามที่ต้องการ ซึ่งการทำให้แบนด์วิดท์ที่แถบความถี่สูง (แถบความถี่ที่ 2) กว้างมากขึ้นก็เป็นเพราะว่าการสูญเสียย้อนกลับที่ความถี่ประมาณ 6-7 GHz ถูกทำให้ลดน้อยลงได้

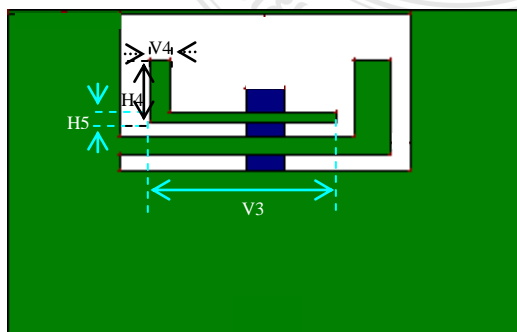
ตารางที่ 3.13 คุณลักษณะสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนแปลง G3 โดย L=37.5 มม. G1=21.2 มม. G2=5 มม.

ระยะกราวด์ G3 (มม.)	แถบความถี่ที่ 1 (ต่ำ)			แถบความถี่ที่ 2 (สูง)		
	Fr (GHz)	S <sub>11</sub> (dB)	BW (GHz)	Fr (GHz)	S <sub>11</sub> (dB)	BW (GHz)
10	2.19	-20.6	2.06-3.08	5.18	-18.11	4.8-6.13
14.5	2.33	-19.5	2.18-2.89	5.33	-20.39	4.85-7.73

แต่เนื่องจากในตอนต้นของการออกแบบและวิเคราะห์ผลต้องการให้สายอากาศชนิดนี้มีความถี่เรโซแนนซ์แรกที่ 2.44-2.45 GHz ซึ่งอยู่ในช่วงแถบความถี่ด้านต่ำหรือก็คือแถบความถี่แรก และต้องสามารถทำให้เกิดแถบความถี่ด้านสูงหรือก็คือแถบความถี่ที่สองที่รองรับกับมาตรฐานของ WLAN ทุกมาตรฐาน ดังนั้นในขั้นตอนสุดท้ายจึงเป็นการทำให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์แรกที่ 2.44-2.45 GHz โดยมีแถบความถี่ที่สองรองรับทุกมาตรฐานในช่วง 5-6 GHz ด้วย

### 3.4.4 การปรับเพิ่มความถี่ เรโซแนนซ์แรก

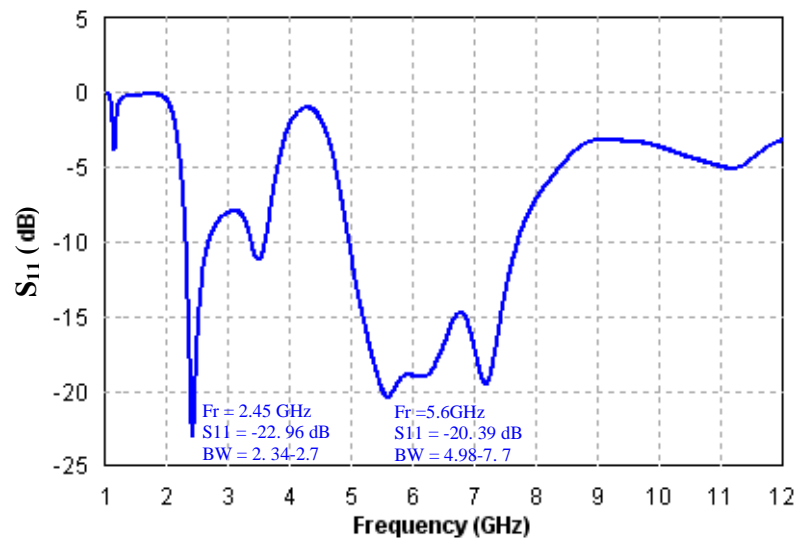
จากรูปแบบและขนาดสายอากาศตามหัวข้อ 2.43 ซึ่งได้ความถี่เรโซแนนซ์แรกที่ 2.33 GHz ถ้าต้องการให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์แรกที่ 2.44-2.45 GHz สามารถทำได้ 2 วิธี คือลดขนาดสายอากาศแล้วปรับแต่งพารามิเตอร์ของเส้นตัวนำมุมฉากทั้งสองเพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์แรกที่ 2.44-2.45 GHz เท่านั้น แต่วิธีนี้จะยุ่งยากเพราะต้องปรับแต่งเส้นตัวนำมุมฉากจนกว่าจะได้สองแถบความถี่ที่ต้องการ อีกวิธีคือลดขนาดของกราวด์ด้านบน คือ G2 ให้น้อยลงโดยไม่ต้องปรับแต่งใด ๆ นอกจาก Lm เพราะจากการวิเคราะห์ที่ผ่านมามีพบว่าจะไม่มีผลต่อความกว้างของแบนด์วิดท์แต่จะมีผลทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นขยับสูงขึ้น วิธีนี้ไม่ยุ่งยากเพราะเพียงแต่ลดขนาดกราวด์ด้านบน (G2) ให้เล็กลงพร้อมทั้งปรับระยะ Lm เพื่อให้เกิดการแมทซิมพีแดนซ์ที่ดีเท่านั้น ดังนั้นในการวิเคราะห์นี้จะขอนำวิธีการลดขนาดกราวด์ G2 มาใช้ โดยมีรูปร่างสายอากาศแสดงดังรูปที่ 3.18



- L= 37.5 มม.
- W= 20 มม.
- Wm= 4.7 มม.
- G1= 21.2 มม.
- G2= 0.5 มม.
- G3= 14.5 มม.
- V1 = 35.0 มม.
- V2 = 4.7 มม.
- H1 = 2.2 มม.
- H2 = 2 มม.
- H3 = 12 มม.
- V3 = 24.05 มม.
- V4 = 2.5 มม.
- H4 = 7.9 มม.
- H5 = 1.2 มม.

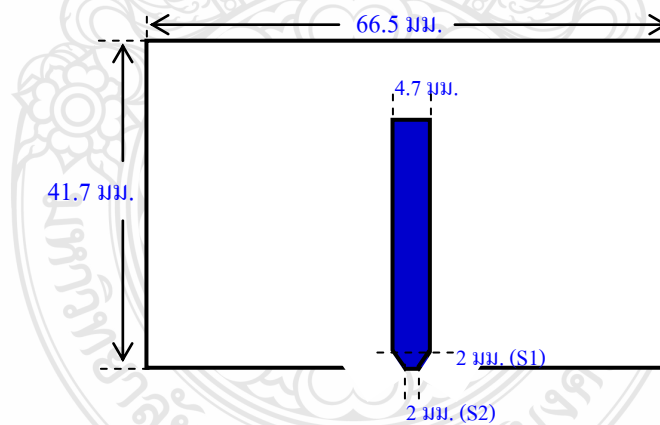
รูปที่ 3.18 โครงสร้างสายอากาศที่ลดระยะกราวด์ด้านบน

เมื่อทดลองลดขนาดของกราวด์ G2 จาก 5 มม. เป็น 0.5 มม. พบว่าได้ความถี่เรโซแนนซ์ตรงกับที่ต้องการคือ 2.45 GHz ผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับแสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อ L=37.5 มม. G1=21.2 มม. G2=0.5 มม. G3=14.5 มม.

เนื่องจากการแมทซิมพีแดนซ์ด้านแถบความถี่ต่ำอาจปรับแต่งให้ดีกว่านี้ได้ ดังนั้นจึงทดลองตัดมุมล่างของไมโครสตริปไลน์ โดยมีระยะการตัดมุมดังรูปที่ 3.20

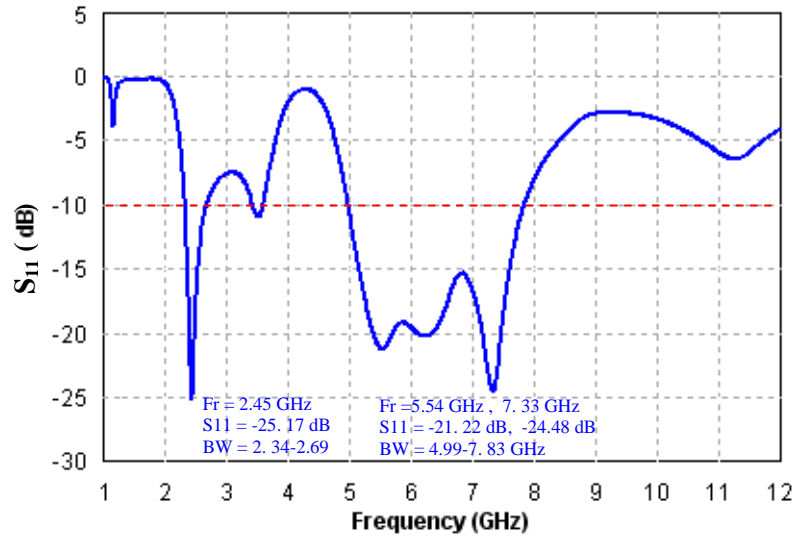


รูปที่ 3.20 โครงสร้างด้านหลังสายอากาศที่มีการตัดมุมไมโครสตริปไลน์

ในการจำลองได้กำหนดให้ความกว้างของไมโครสตริปไลน์เท่ากับ 4.7 มม. ลักษณะการตัดสองมุมล่างของไมโครสตริปไลน์จะเป็นการตัดเฉียงที่ระยะห่างจากขอบล่าง 2 มม. (S1) และห่างจากขอบข้าง 1.35 มม. ดังนั้นระยะกลางไมโครสตริปที่ไม่ถูกตัดจะเท่ากับ 2 มม. (S2) ดังรูปที่

3.20 ไมโครสตริปไลน์นี้จะอยู่ด้านตรงข้ามกับสายอากาศช่องเปิด โดยถูกวางอยู่บนวัสดุฐานรองพื้นที่ของชิ้นงานที่รวมถึงสายอากาศช่องเปิดและระนาบกราวด์ คือ 66.5 มม. x 41.7 มม.

ผลการจำลองพบว่า การแมทซ์อิมพีแดนซ์ดีขึ้น ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อ  $G_2=0.5$  มม.  $G_3=14.5$  มม. และตัดมุมไมโครสตริปไลน์

จากผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับระหว่างการตัดมุมและไม่ตัดมุมไมโครสตริปไลน์จะถูกนำมาเปรียบเทียบในด้านความถี่เรโซแนนซ์และแบนด์วิดท์ ดังตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 คุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดแบบไม่ตัดมุมและตัดมุมไมโครสตริปไลน์

คุณลักษณะสายอากาศ		$G_2 = 5$ มม.	$G_2 = 0.5$ มม.	$G_2 = 0.5$ มม.
		ไม่ตัดมุม	ไม่ตัดมุม	ตัดมุม
แถบความถี่ต่ำ	Fr (GHz)	2.33	2.45	2.45
	$S_{11}$ (dB)	-19.5	-22.96	-25.17
	Bandwidth (GHz)	2.18 -2.89	2.34-2.7	2.34-2.69
แถบความถี่สูง	Fr (GHz)	5.33	5.6	7.33
	$S_{11}$ (dB)	-20.39	-20.39	-24.48
	Bandwidth (GHz)	4.85-7.73	4.98-7.7	4.99-7.83

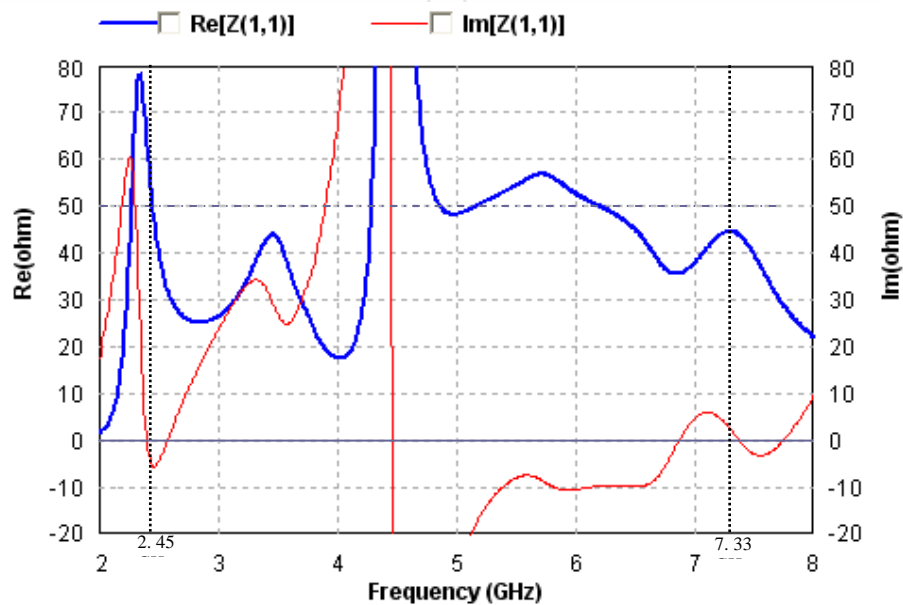
จากตารางที่ 3.14 แสดงให้เห็นได้ว่า สายอากาศนี้ แม้ว่าจะกำหนดให้ระนาบกราวด์บนเป็น 5 มม. หรือลดลงเป็น 0.5 มม. พร้อมทั้งตัดและไม่ตัดมุมล่างของไมโครสตริปไลน์ก็ตาม ต่างก็สามารถนำไปใช้งานได้สองย่านความถี่ครอบคลุมมาตรฐาน WLAN ที่ต้องการ

### 3.5 ผลการจำลองคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศที่ผ่านการวิเคราะห์

สายอากาศช่องเปิดที่ผ่านการวิเคราะห์ตามรูปที่ 3.18 ที่มีการตัดมุมไมโครสตริปไลน์ โดยมีผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับตามที่แสดงในรูปที่ 3.21 จะถูกนำไปจำลองหาคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศต่อไป

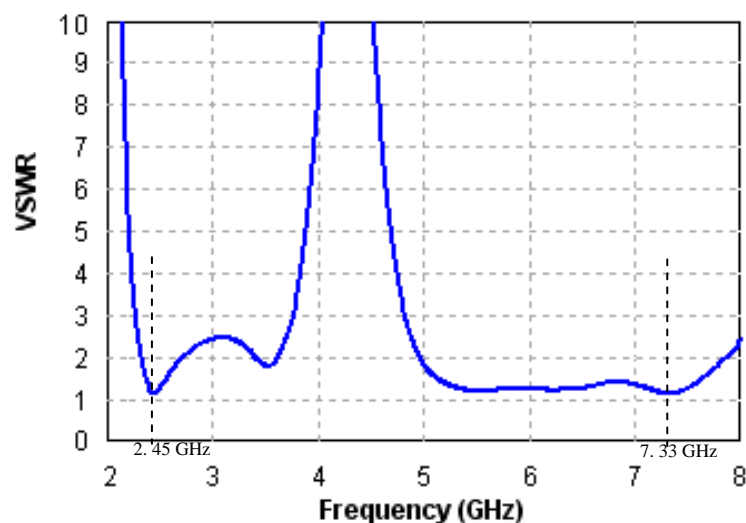
#### 3.5.1 อินพุทอิมพีแดนซ์

สายอากาศสองแถบความถี่ที่ได้ออกแบบและวิเคราะห์ผลจะมีอินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance:  $Z_{in}$ ) ที่ประกอบด้วยค่าที่เป็นจริงและจินตภาพ ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 อินพุทอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการจำลอง

#### 3.5.2 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง



รูปที่ 3.23 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งที่ได้จากการจำลอง



อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) เป็นส่วนหนึ่งที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสายอากาศ ถ้า VSWR=1 สายอากาศนี้จะมีประสิทธิภาพดีที่สุดไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้นเลย แต่เป็นไปได้ ดังนั้นถ้าที่ความถี่ใด VSWR มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด ก็ถือว่าสายอากาศสามารถใช้งานได้ดี ณ ความถี่นั้น

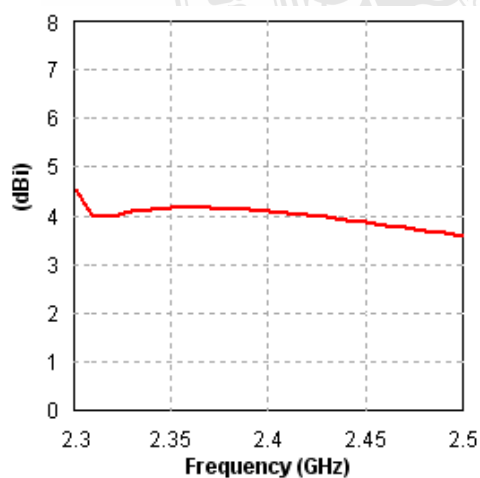
สรุปผลการจำลองคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศที่ผ่านการวิเคราะห์เพื่อนำไปสร้างจริงบนวัสดุฐานรองชนิด RT/Duroid 5880 แสดงในตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.15 คุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศช่องเปิดแบบตัดมุมไมโครสตริปไลน์

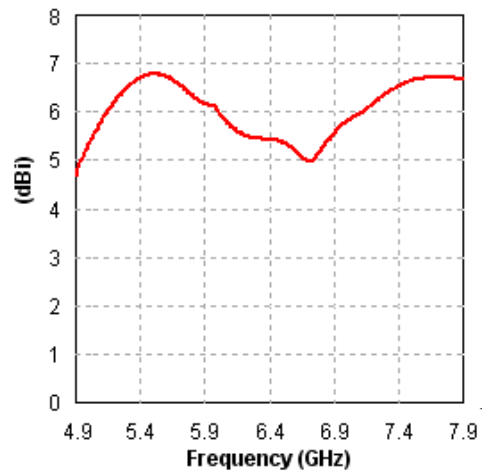
คุณสมบัติ		แถบความถี่ด้านต่ำ	แถบความถี่ด้านสูง
ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)		2.45	7.33
S <sub>11</sub> (dB)		-25.17	-24.48
Z <sub>in</sub> (Ω)	real	51.4	44.55
	Imaginary	-5.423	1.462
Bandwidth (GHz)		2.34-2.69	4.99-7.83
VSWR		1.117	1.127

### 3.5.3 อัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศ

อัตราขยายหรือเกนของสายอากาศที่ได้จากการจำลองจะแสดงดังรูปที่ 3.24 โดยจะแสดงอัตราขยายในช่วงของแบนด์วิดท์แรกและแบนด์วิดท์ที่สอง ผลที่แสดงในรูปที่ 3.24(ก) แสดงให้เห็นได้ว่า ในช่วงแถบความถี่ด้านต่ำ 2.3-2.5 GHz จะมีเกนเฉลี่ยประมาณ 4 dBi และเกนเฉลี่ยในช่วงแถบความถี่ด้านสูง 4.9-7.9 GHz จะประมาณ 6 dBi โดยมีเกนสูงสุดเท่ากับ 6.76 dBi ที่ความถี่ 5.50 GHz



(ก) เกนระหว่างความถี่ 2.3-2.5 GHz

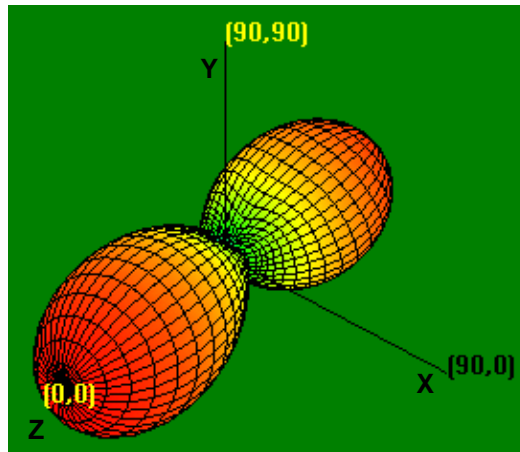


(ข) เกนระหว่างความถี่ 4.9-7.9 GHz

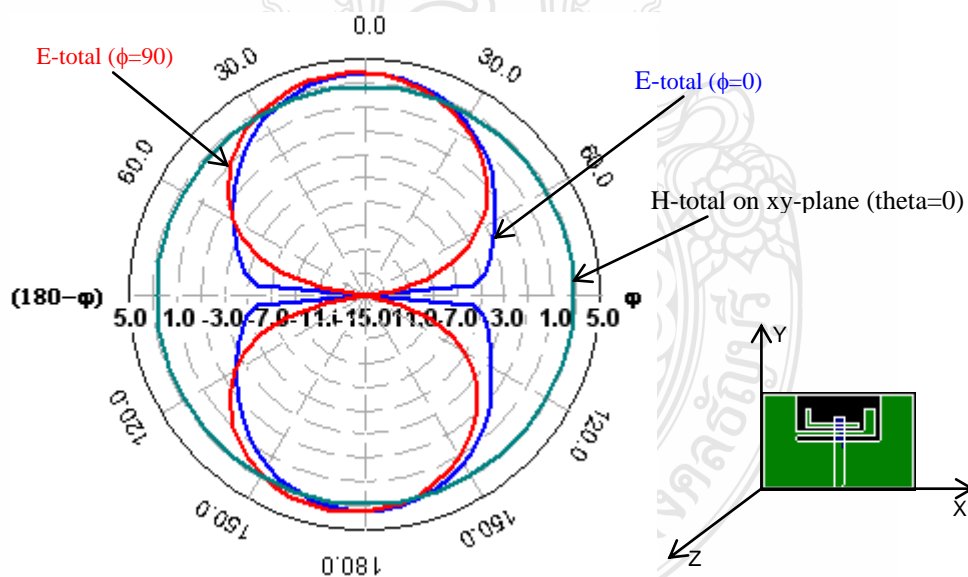
รูปที่ 3.24 เกนของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง

### 3.5.4 แบบรูปการแผ่สนามระยะไกล

การจำลองแบบรูปการแผ่สนามระยะไกล (Far Field Radiation Pattern) ของสายอากาศ จะพิจารณาที่สามความถี่ซึ่งเป็นความถี่กึ่งกลางมาตรฐานที่ต้องการ คือ ที่ความถี่ 2.45 GHz, 5.25 GHz และ 5.8 GHz โดยแสดงทั้งสามมิติและสองมิติ ดังรูปที่ 3.25-3.27

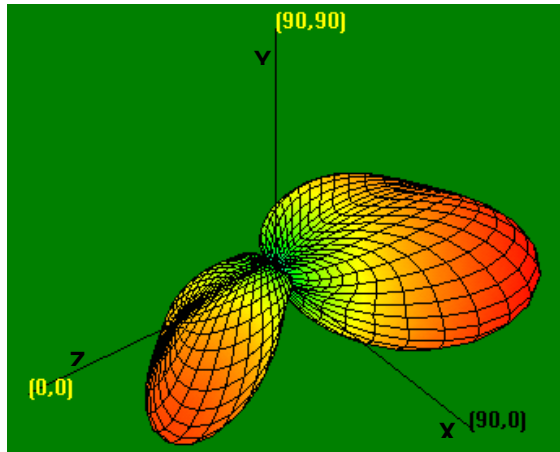


(ก) แบบรูปการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามมิติ

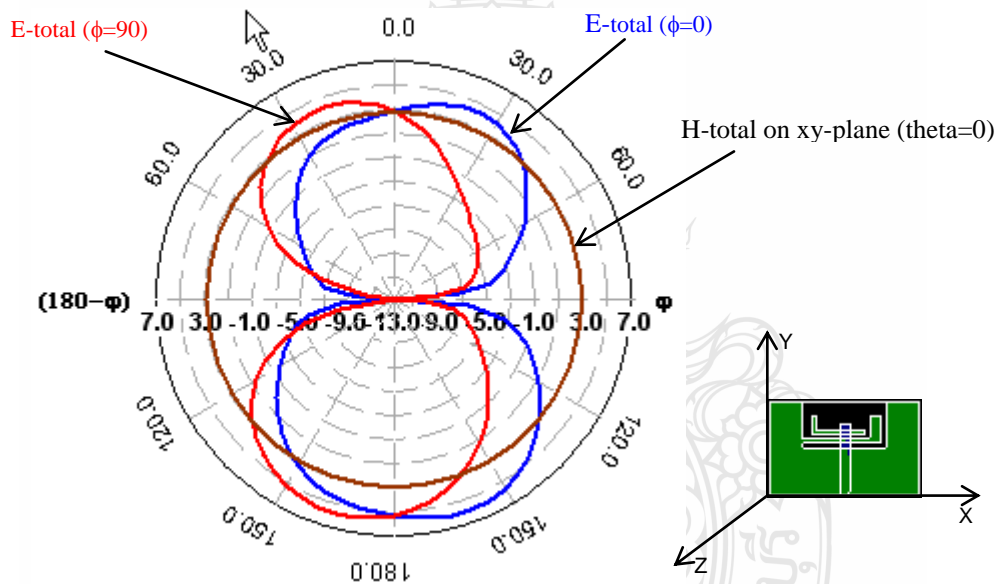


(ข) แบบรูปการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองมิติ

รูปที่ 3.25 แบบรูปการแผ่สนามระยะไกลที่ความถี่ 2.45 GHz

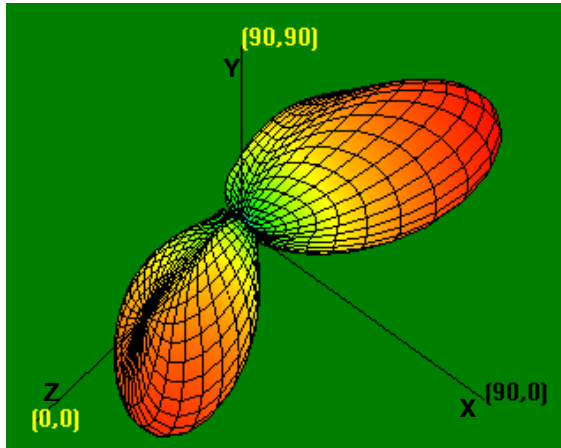


(ก) แบบรูปการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามมิติ

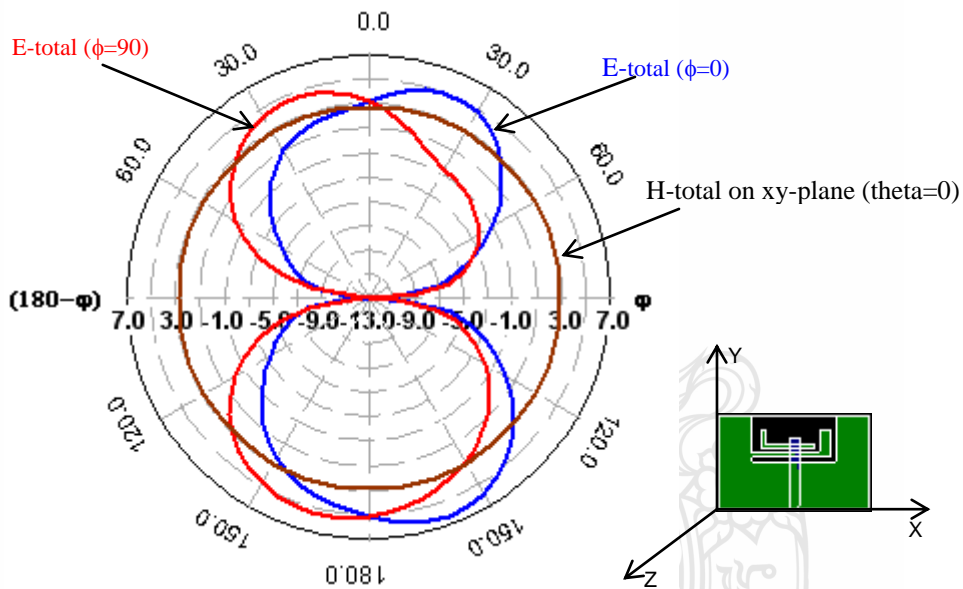


(ข) แบบรูปการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองมิติ

รูปที่ 3.26 แบบรูปการแผ่สนามระยะไกลที่ความถี่ 5.25 GHz



(ก) แบบรูปการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามมิติ



(ข) แบบรูปการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองมิติ

รูปที่ 3.27 แบบรูปการแผ่สนามระยะไกลที่ความถี่ 5.8 GHz

### 3.6 สรุปผลการศึกษาสายอากาศช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าร่วมกับเส้นตัวนำ

การศึกษารอกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดบนวัสดุฐานรองชนิด RT/Duroid 5880 เพื่อให้สามารถใช้งานระบบเครือข่ายไร้สาย (WLAN) ตามมาตรฐาน IEEE 802.11a/b/g/h/n ได้นั้นจะเริ่มต้นวิเคราะห์ตั้งแต่สายอากาศช่องเปิดรูปร่างพื้นฐานที่ป้อนสัญญาณด้วยไมโครสตริปไลน์ที่วางอยู่บนระนาบตรงข้ามกับสายอากาศในลักษณะสมมาตรกันทั้งซ้ายและขวา ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2.44-

2.45 GHz เป็นความถี่ประมาณกึ่งกลางของ WLAN 802.11b/g (2.4-2.4835 GHz) จะถูกนำมาใช้ในการอ้างอิงออกแบบสายอากาศนี้ การวิเคราะห์เบื้องต้นเป็นการศึกษาผลกระทบของกราวด์ที่อยู่รอบสายอากาศ คือ กราวด์ด้านล่าง (G1) กราวด์ด้านบน (G2) และกราวด์ด้านข้าง (G3) จากนั้นวิเคราะห์หาขนาดช่องเปิดที่เหมาะสม ด้วยการเปลี่ยนความกว้างช่องเปิดให้มีค่าที่แตกต่างกันและทุกครั้งที่ก็จะปรับความยาวช่องเปิดเพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ประมาณ 2.44 GHz และพร้อมปรับระยะระหว่างปลายขอบไมโครสตริปไลน์กับขอบล่างช่องเปิด (Lm) เพื่อให้มีการแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีด้วย จากการศึกษาและวิเคราะห์ก่อนที่จะนำไปออกแบบให้ได้สองความถี่มาตรฐาน ผลเป็นดังนี้

1) ระยะกราวด์ด้านล่าง (G1) จะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์และแบนด์วิดท์ ถ้า G1 มีค่ามากจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ลดต่ำลงได้ ขณะเดียวกันก็จะทำให้แบนด์วิดท์กว้างมากขึ้น โดยมีขอบความถี่แรกของแบนด์วิดท์นั้นเลื่อนต่ำลง (ตารางที่ 3.6)

2) ระยะกราวด์ด้านบน (G2) จะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์และช่วง (ย่าน) แบนด์วิดท์ โดยไม่มีผลต่อความกว้างของแบนด์วิดท์เลย ถ้า G2 มีค่ามากจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ต่ำลงได้ ขณะเดียวกันก็จะทำให้ช่วงของการเกิดแบนด์วิดท์เลื่อนต่ำลง (ตารางที่ 3.4)

3) ระยะกราวด์ด้านข้างทั้งสอง (G3) จะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์และ แบนด์วิดท์ ถ้า G3 มีค่ามากขึ้นจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์สูงขึ้น ขณะเดียวกันก็จะทำให้แบนด์วิดท์มากขึ้นและช่วงการเกิดแบนด์วิดท์เลื่อนสูงขึ้น (ตารางที่ 3.5)

4) เพื่อความเหมาะสมเลือกใช้  $G1=21$  มม.  $G2=5$  มม. และ  $G3=10$  มม. ไปใช้ในการวิเคราะห์ช่องเปิดของสายอากาศตั้งแต่ช่องเปิดแคบจนถึงช่องเปิดกว้าง

5) ความกว้างและความยาวของช่องเปิดจะสัมพันธ์กัน เมื่อช่องเปิดแคบจะต้องให้ความยาวช่องเปิดยาวมากขึ้น และความยาวช่องเปิดจะสั้นลงเมื่อความกว้างช่องเปิดเริ่มกว้างมากขึ้น และเมื่อช่องเปิดกว้างมากถึงจุด ๆ หนึ่งก็จะทำให้ความยาวช่องเปิดเริ่มปรับยาวขึ้นแทนที่จะลดสั้นไปเรื่อย ๆ สามารถแสดงได้ดังกราฟเป็นเส้นโค้งแบบพาราโบลา (รูปที่ 3.9 และตารางที่ 3.11)

6) ความกว้างช่องเปิดจะมีผลต่อความกว้างของแบนด์วิดท์ของสายอากาศ เมื่อช่องเปิดกว้างมากขึ้นแบนด์วิดท์ก็จะกว้างตาม จนถึงจุด ๆ หนึ่งแบนด์วิดท์ก็จะค่อย ๆ ลดลง (รูปที่ 3.9 และตารางที่ 3.11)

7) จากผลการวิเคราะห์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2.44 GHz จึงเลือกใช้ขนาดสายอากาศ ดังนี้  $G1=21$  มม.  $G2=5$  มม.  $G3=10$  มม.  $W=20$  มม. และ  $L=30.6$  มม. ไปใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบด้วยการแทรกเส้นตัวนำรูปมุมฉากลงในช่องเปิด

ในการศึกษาออกแบบเพื่อให้สายอากาศช่องเปิดที่ผ่านการวิเคราะห์นี้สามารถใช้งานได้สองย่านความถี่มาตรฐาน WLAN นั้น จะจำลองผลตั้งแต่การยื่นเส้นตัวนำแนวนอนจากระนาบกราวด์ด้านข้างซ้ายเข้าไปช่องเปิด จากนั้นเปลี่ยนเป็นเส้นตัวนำรูปมุมฉาก สุดท้ายเพิ่มเส้นตัวนำรูปมุมฉากอีกหนึ่งตัวไว้ภายในช่องเปิดลอยอยู่เหนือเส้นตัวนำรูปมุมฉากแรก สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ ได้ดังนี้

1) การแทรกเส้นตัวนำแนวนอนจากกราวด์เข้าไปในช่องเปิด ที่ระดับความสูงห่างจากขอบช่องเปิดล่าง 2 มม. โดยมีความกว้างช่องเปิดเท่ากับ 2.2 มม. ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสม พบว่าความยาวของเส้นตัวนำจะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ (รูปที่ 3.11)

2) จากเส้นตัวนำที่ต่อขึ้นไปในช่องเปิดจะถูกรับแต่งให้เป็นรูปมุมฉากที่มีความกว้างของตัวนำแนวตั้งกว้างเป็น 4.7 มม. พบว่ามีแนวโน้มน่าจะเกิดเบนด์วิธในช่วงความถี่ 5-6 GHz (รูปที่ 3.13)

3) เมื่อเพิ่มเส้นตัวนำรูปมุมฉากเดี่ยวเข้าไปในช่องเปิด และจัดวางให้อยู่เหนือเส้นตัวนำมุมฉากแรก โดยจัดให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม ก็จะทำให้ได้สองแถบความถี่ แต่แถบความถี่ทั้งสองยังไม่ครอบคลุมมาตรฐาน WLAN ที่ต้องการ (รูปที่ 3.15)

4) ทำการขยายช่องเปิดเป็น  $L = 37.5$  มม. โดยคงความกว้าง  $W = 20$  มม. เมื่อปรับแต่งตำแหน่งการวางของเส้นตัวนำมุมฉากทั้งสอง ทำให้ได้สองแถบความถี่มาตรฐาน WLAN ตามที่ต้องการได้ โดยมีเบนด์วิธที่แถบความถี่สูงกว้างพอดี (รูปที่ 3.16)

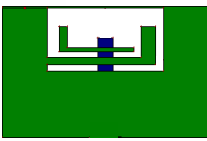
5) เพื่อให้เบนด์วิธที่แถบความถี่สูงกว้างมากขึ้นจึงขยายกราวด์ด้านข้าง ( $G3$ ) เป็น 14.5 มม. (รูปที่ 3.17) โดยมีความถี่เรโซแนนซ์แรกที่ 2.33 GHz

6) เพื่อให้ความถี่เรโซแนนซ์แรกลดลงเป็น 2.44-2.45 GHz จะเลือกใช้วิธีที่ง่ายที่สุด คือลดระยะกราวด์ด้านบน ( $G2$ ) ลงเป็น 0.5 มม. โดยยังคงได้สองแถบความถี่มาตรฐาน WLAN (รูปที่ 3.19)

7) ปรับการแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz ให้ดีขึ้นกว่าที่แสดงในรูปที่ 3.19 ด้วยการตัดมุมล่างสองข้างของไมโครสตริปไลน์ (รูปที่ 3.21)

ขนาดของสายอากาศที่ได้ผ่านการวิเคราะห์มาแล้ว ตามผลการสูญเสียย้อนกลับในรูปที่ 3.19 จะแสดงในตารางที่ 3.16

ตารางที่ 3.16 สรุปค่าพารามิเตอร์ทางขนาดของสายอากาศที่จะนำไปสร้างจริง: หน่วย มม.

$L = 37.5$	$G2 = 0.5$	$V1 = 35.0$	$H3 = 12.0$	$H5 = 1.2$
$W = 20.0$	$G3 = 14.5$	$V2 = 4.7$	$V3 = 24.05$	
$W_m = 4.7$	$S1 = 2.0$	$H1 = 2.2$	$V4 = 2.5$	
$G1 = 21.2$	$S2 = 2.0$	$H2 = 2.0$	$H4 = 7.9$	

## บทที่ 4

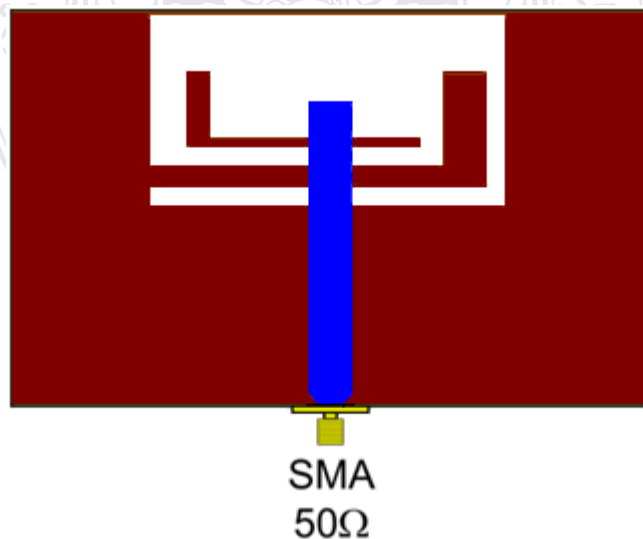
### ผลการวัดสายอากาศ

#### 4.1 บทนำ

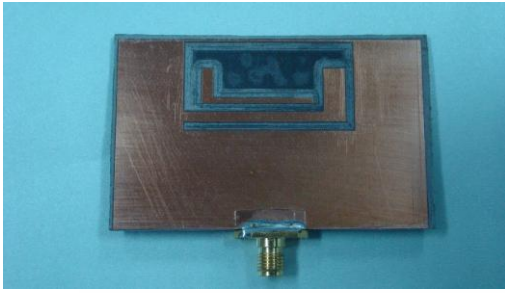
สายอากาศช่องเปิดกว้างที่มีการแทรกเส้นตัวนำรูปมุมฉากบนวัสดุฐานรองชนิด RT/Duroid 5880 ที่ให้ผลดีที่สุด ซึ่งได้ผ่านการจำลองและวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม IE3D ในบทที่ 3 มาแล้ว จะถูกนำมาทำการสร้างจริงและวัดผลด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ในที่นี้จะทำการวัดคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ คือ การสูญเสียย้อนกลับ (return loss:  $S_{11}$ ) และแบบรูปการแผ่กระจายสนามระยะไกลทั้งสองมิติและสามมิติ ผลการสูญเสียย้อนกลับระหว่างการจำลองและการวัด จะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน

#### 4.2 สายอากาศช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่แทรกเส้นตัวนำมุมฉากสำหรับสองแถบความถี่

สายอากาศสองแถบความถี่ที่ออกแบบบนวัสดุฐานรอง RT/Duroid 5880 จะประกอบด้วย ระบายกราวด์ที่เจาะช่องเปิดกว้างสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีการแทรกเส้นตัวนำมุมฉากสองเส้น ตัวนำมุมฉากแรกจะถูกต่อยื่นออกมาจากกราวด์ด้านซ้ายมือ ส่วนตัวที่สองจะถูกออกแบบให้ลอยอยู่เหนือตัวนำมุมฉากแรก โดยมีไมโครสตริปไลน์เป็นตัวป้อนสัญญาณอยู่บนระนาบตรงข้ามกับสายอากาศช่องเปิด ดังรูปที่ 4.1 สายอากาศรูปแบบนี้ที่ได้ผ่านการจำลองมาแล้วจะถูกนำมาสร้างจริง ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 รูปแบบสายอากาศที่ออกแบบสำหรับสองแถบความถี่



(ก) สายอากาศบนระนาบกราวด์

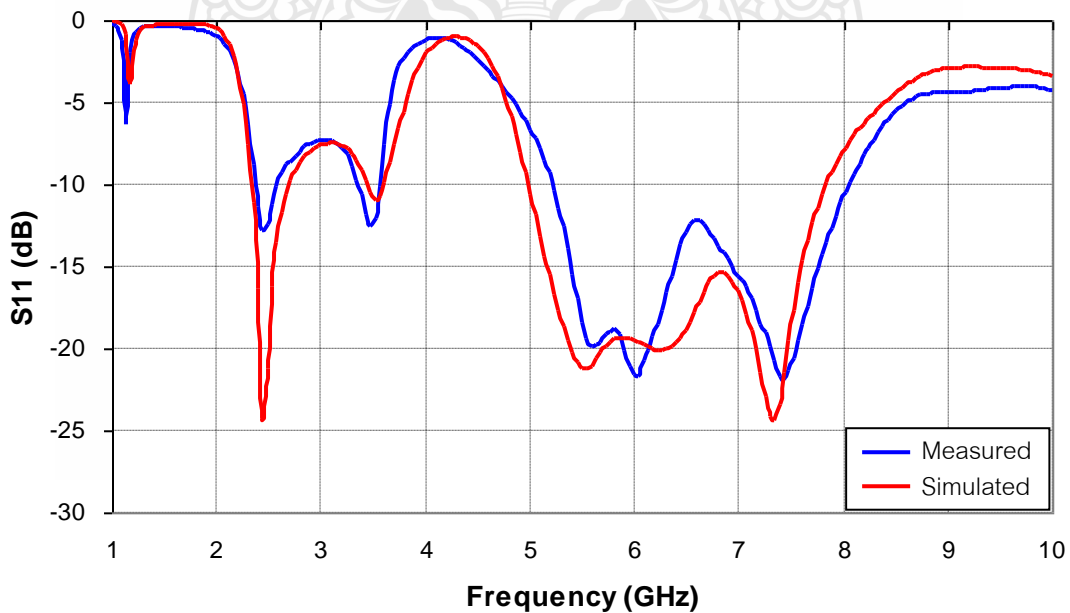


(ข) ระนาบสายนำสัญญาณไมโครสตริปไลน์

รูปที่ 4.2 สายอากาศที่สร้างบนวัสดุฐานรอง RT/Duroid 5880

รูปที่ 4.2 เป็นสายอากาศที่สร้างจริงบนวัสดุฐานรอง RT/Duroid 5880 รูปที่ 4.2(ก) แสดงสายอากาศแบบช่องเปิดกว้างสี่เหลี่ยมผืนผ้าสร้างบนระนาบกราวด์ที่กว้าง 66.5 มม. สูง 41.7 มม. ขนาดของช่องเปิดจะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์แรก ส่วนเส้นตัวนำรูปมุมฉากทั้งสองจะมีผลตัดแถบความถี่ที่สอง และจะกระทบต่อแถบความถี่แรกบ้าง ส่วนรูปที่ 4.2(ข) ทางขวามือ แสดงอีกระนาบของสายอากาศ ซึ่งเป็นระนาบของสายนำสัญญาณไมโครสตริปไลน์ที่มีความกว้าง 4.7 มม. และมีความยาว 31.7 มม. โดยมุมล่างทั้งสองมุมถูกตัดเฉียงและถูกต่อเข้ากับหัวต่อ (Connector) ของสายอากาศที่ใช้ในย่านความถี่สูง เพื่อใช้สำหรับเชื่อมต่อกับสายส่งสัญญาณแบบโคแอกเซียลภายนอก

### 4.3 ผลการวัดการสูญเสียย้อนกลับ



รูปที่ 4.3 การสูญเสียย้อนกลับจากการวัดและการจำลอง



สายอากาศช่องเปิดที่ได้สร้างจริงบนวัสดุฐานรอง RT/Duroid 5880 จะถูกนำไปวัดการสูญเสียย้อนกลับด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ผลการวัดจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลอง แสดงดังรูปที่ 4.3

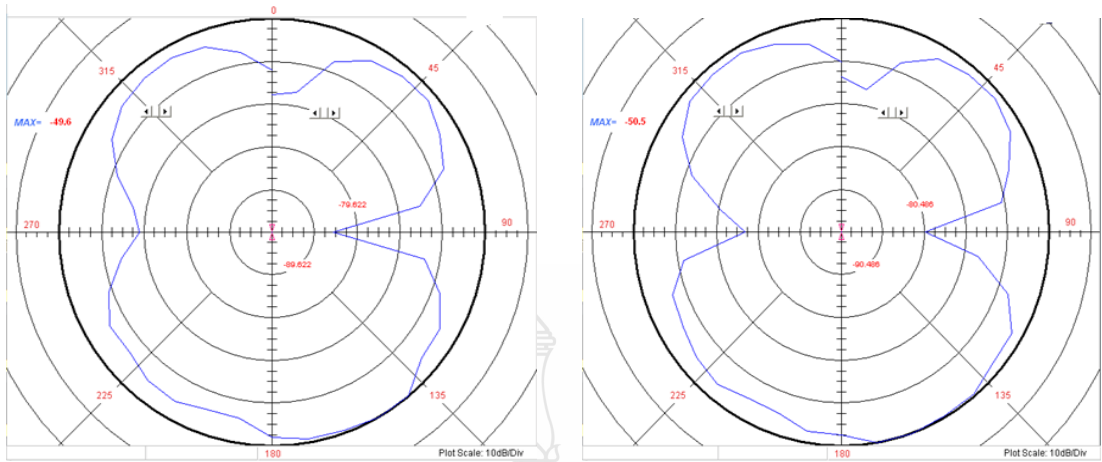
การสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) แสดงให้เห็นว่า สายอากาศที่สร้างนี้ยังมีผลการสูญเสียย้อนกลับที่แถบความถี่ต่ำมากกว่าผลการจำลอง แต่ก็ยังพอใช้งานได้ คือ มีแถบความถี่ด้านต่ำครอบคลุมตามมาตรฐาน WLAN IEEE 802.11b/g (2.4-2.4845 GHz) โดยมีความถี่เรโซแนนซ์ 2.44 GHz และ  $S_{11} = -12.82$  dB ส่วนที่แถบความถี่สูงมีแบนด์วิดท์ที่กว้างใกล้เคียงกับผลการจำลอง แต่ขอบความถี่ทั้งสองข้างถูกขยับสูงขึ้นไปกว่าผลการจำลอง ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถรองรับการใช้งานในมาตรฐานความถี่ IEEE 802.11a (5.15-5.35 GHz) ใดๆก็ตามก็ยังสามารถนำไปใช้งานตามมาตรฐานความถี่ IEEE 802.11h (5.47-5.725 GHz, 5.725-5.825 GHz) ค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศระหว่างการจำลองและการวัด แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะสายอากาศระหว่างการจำลองแบบกับการวัดจริง

แถบความถี่	ผลที่ได้รับ	Resonance Freq. (GHz)	S11 (dB)	Bandwidth (GHz)	Freq Range (GHz)
ที่ 1	จำลองแบบ	2.45	-25.17	0.35	2.34-2.69
	การวัด	2.44	-12.82	0.21	2.37-2.58
ที่ 2	จำลองแบบ	7.33	-24.48	2.84	4.99-7.83
	การวัด	7.43	-21.95	2.82	5.2-8.02

#### 4.4 ผลการวัดแบบรูปการแผ่สนามระยะไกล

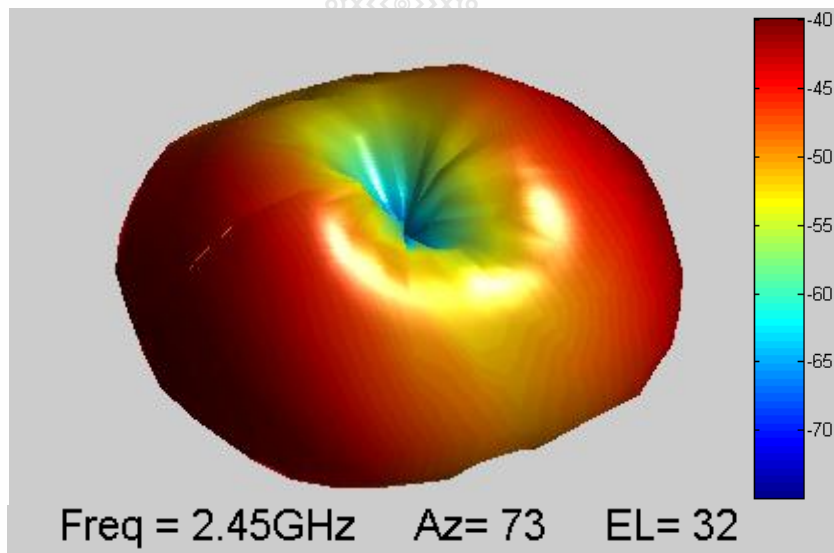
สายอากาศที่สร้างจะถูกนำไปวัดแบบรูปการแผ่สนามที่แผ่กระจายในรูปแบบสองมิติและสามมิติ ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz แสดงดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 ตามลำดับ



E-theta

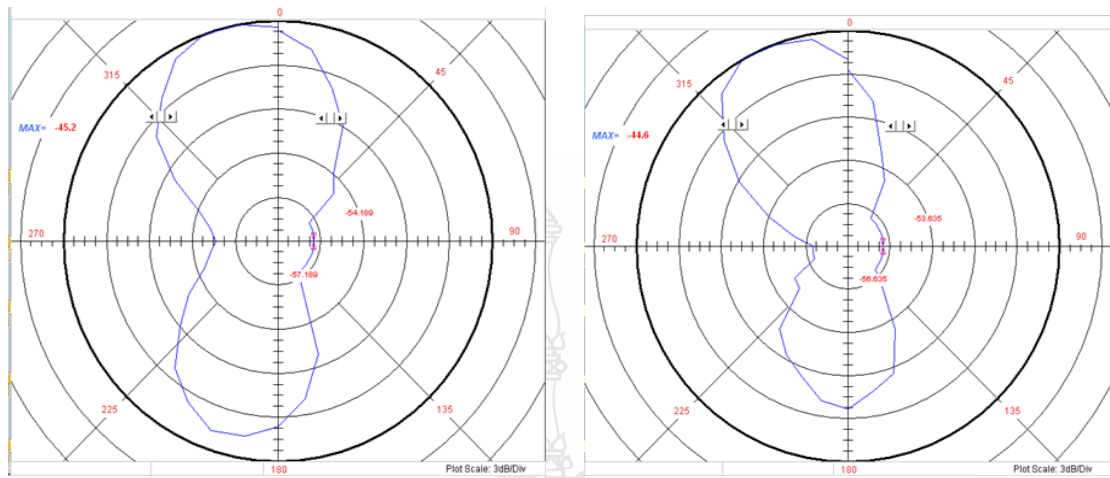
E-phi

(ก) แบบรูปสองมิติ



(ข) แบบรูปสามมิติ

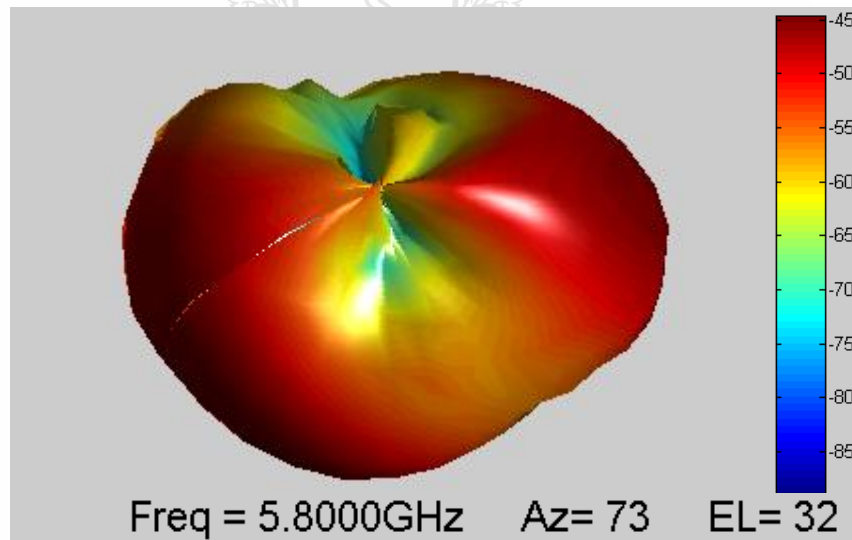
รูปที่ 4.4 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz



E-theta

E-phi

(ก) แบบรูปสองมิติ



(ข) แบบรูปสามมิติ

รูปที่ 4.5 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามของสายอากาศที่ความถี่ 5.8 GHz

## บทที่ 5

### สรุปผลการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศ

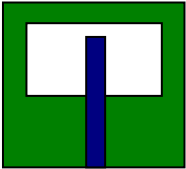
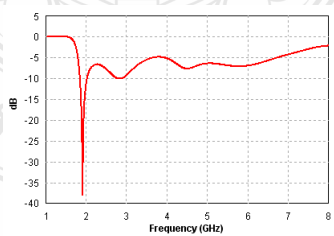
#### 5.1 บทนำ

การออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดกว้างด้วยโปรแกรม IE3D ของบริษัท Zeland บนวัสดุฐานรองชนิด RT/Duriod 5880 นั้น เริ่มจากการนำสายอากาศช่องเปิดรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เจาะอยู่บนระนาบกราว์ที่ป้อนด้วยไมโครสตริปไลน์ มาทำการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากระยะกราว์ด์ทั้งสี่ด้านรอบช่องเปิด ในเบื้องต้นขนาดของช่องเปิดจะถูกกำหนดโดยไม่สนใจที่จะต้องให้ความถี่เรโซแนนซ์ตรงกับความถี่กึ่งกลางมาตรฐาน IEEE 802.11b/g คือ อยู่ในช่วงระหว่าง 2.44-2.45 GHz จากนั้นเลือกขนาดกราว์ด์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบสายอากาศช่องเปิดรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ให้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ประมาณ 2.44-2.45 GHz สุดท้ายเป็นการแทรกตัวนำมุมฉากหนึ่งตัว และเพิ่มเป็นสองตัวลงในช่องเปิดรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อให้ได้แบนด์วิดท์คู่ที่กว้างเพียงพอสำหรับการนำไปใช้ใน WLAN ครอบคลุมมาตรฐานของ IEEE 802.11b/g (2.4-2.4835 GHz), IEEE 802.11a (5.15-5.35 GHz), IEEE 802.11h (5.47-5.725 GHz, 5.725-5.825 GHz), IEEE 802.11n (2.4-2.4835 GHz, 5.15-5.35 GHz, 5.725-5.825 GHz)

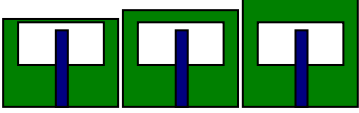
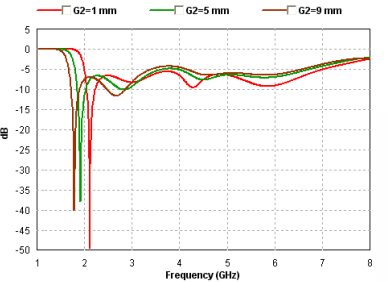
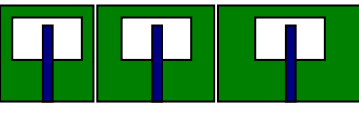
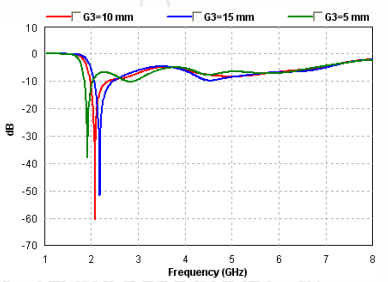
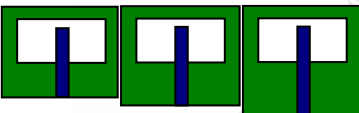
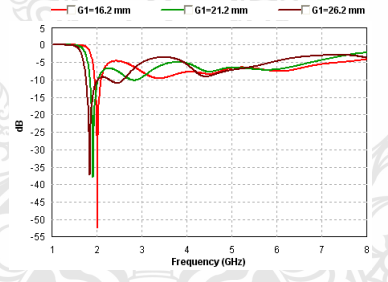

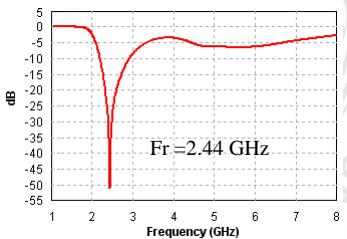
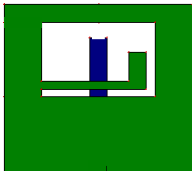
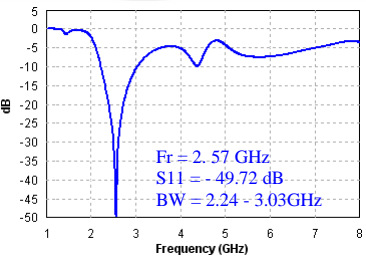
#### 5.2 สรุปผลการจำลองออกแบบและวิเคราะห์ผล

จากการออกแบบและจำลองผลทั้งหมดด้วยโปรแกรม IE3D สามารถสรุปขั้นตอนการออกแบบและวิเคราะห์ผลดังแสดงในตารางที่ 5.1

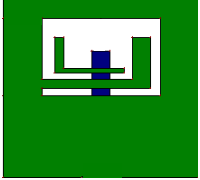
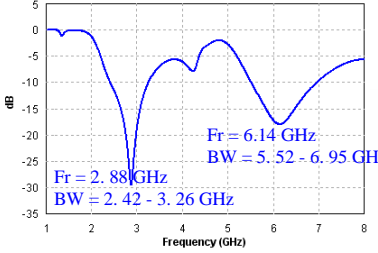
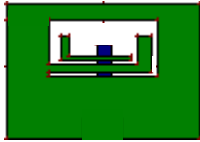
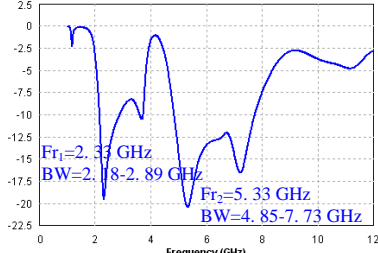
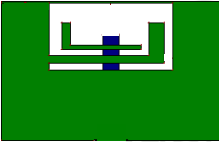
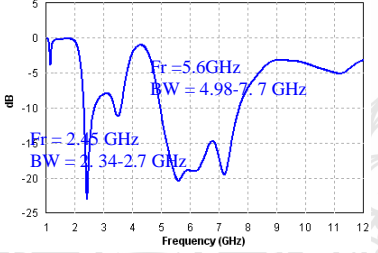
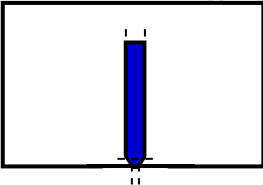
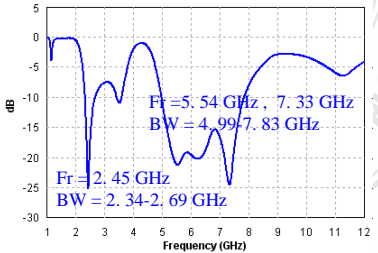
ตารางที่ 5.1 สรุปขั้นตอนการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า

สายอากาศช่องเปิด	การสูญเสียย้อนกลับ	รายละเอียด
สายอากาศต้นฉบับสำหรับวิเคราะห์ระยะกราว์ด์ 		กำหนดให้ระยะกราว์ด์บนและข้างเท่ากับ 5 มม. ล่างเท่ากับ 21.2 มม. และขนาดช่องเปิด 37.5 x 20 ตร.มม.

ตารางที่ 5.1 สรุปขั้นตอนการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ต่อ)

สายอากาศช่องเปิด	การสูญเสียย้อนกลับ	รายละเอียด
<p>ระยะกราวด์บนไม่เท่ากัน</p> 		<p>เมื่อระยะกราวด์บนมาก ความถี่เรโซแนนซ์จะลดลง (สีน้ำตาล)</p>
<p>ระยะกราวด์ข้างไม่เท่ากัน</p> 		<p>เมื่อระยะกราวด์ข้างมาก ความถี่เรโซแนนซ์จะเลื่อน สูงขึ้น (สีน้ำเงิน)</p>
<p>ระยะกราวด์ล่างไม่เท่ากัน</p> 		<p>เมื่อระยะกราวด์ล่างมาก ความถี่เรโซแนนซ์จะเลื่อน ต่ำลง (สีน้ำตาล)</p>
<p>สายอากาศต้นฉบับสำหรับการ ออกแบบสองแถบความถี่</p> 		<p>ระยะกราวด์บน = 5 มม. ระยะกราวด์ข้าง = 10 มม. ระยะกราวด์ล่าง = 21 มม. ช่องเปิด = 30.6 x 20 ตร.มม.</p>
<p>สายอากาศที่แทรกหนึ่งตัวนำ มุมฉาก</p> 		<p>ระยะกราวด์บน = 5 มม. ระยะกราวด์ข้าง = 10 มม. ระยะกราวด์ล่าง = 21 มม. ช่องเปิด = 30.6 x 20 ตร.มม. (รายละเอียดจากรูปที่ 3.13)</p>

ตารางที่ 5.1 สรุปขั้นตอนการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ต่อ)

สายอากาศช่องเปิด	การสูญเสียย้อนกลับ	รายละเอียด
<p>สายอากาศที่แทรกสองตัวนำ มุมฉาก</p> 		<p>ระยะกราวด์บน= 5 มม. ระยะกราวด์ข้าง= 10 มม. ระยะกราวด์ล่าง= 21 มม. ช่องเปิด = 30.6 x 20 ตร.มม. (รายละเอียดจากรูปที่ 3.14)</p>
<p>สายอากาศที่แทรกสองตัวนำ มุมฉาก เมื่อปรับความยาวช่อง เปิด ระยะกราวด์ข้างและล่าง</p> 		<p>ระยะกราวด์บน= 5 มม. ระยะกราวด์ข้าง= 14.5 มม. ระยะกราวด์ล่าง= 21.2 มม. ช่องเปิด = 37.5 x 20 ตร.มม. (รายละเอียดจากรูปที่ 3.17)</p>
<p>สายอากาศที่ลดระยะกราวด์บน เพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz</p> 		<p>ระยะกราวด์บน= 0.5 มม. ระยะกราวด์ข้าง= 14.5 มม. ระยะกราวด์ล่าง= 21.2 มม. ช่องเปิด = 37.5 x 20 ตร.มม. (รายละเอียดจากรูปที่ 3.18)</p>
<p>การตัดมุมไมโครสตริปไลน์ เพื่อให้เกิดการแมทซ์ อิมพีแดนซ์ที่ดีที่สุด</p> 		<p>ระยะกราวด์บน= 0.5 มม. ระยะกราวด์ข้าง= 14.5 มม. ระยะกราวด์ล่าง= 21.2 มม. ช่องเปิด = 37.5 x 20 ตร.มม. (รายละเอียดจากรูปที่ 3.20)</p>

### 5.3 สรุปผลการวัดสายอากาศ

เมื่อนำสายอากาศรูปแบบสุดท้ายไปทำการสร้างจริงบนวัสดุฐานรองชนิด RT/Duroid 5880 และทำการวัดผลด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ก็พบว่าการสูญเสียย้อนกลับที่แถบความถี่แรก (แถบความถี่ด้านต่ำ) ไม่ดีเท่ากับผลการจำลอง โดยมีขอบความถี่ด้านสูงต่ำกว่าผลที่ได้จากการจำลอง ขณะที่การสูญเสียย้อนกลับที่แถบความถี่ด้านสูงที่วัดได้จะไม่ต่างจากที่จำลองมากนัก แต่มีขอบความถี่ทั้งด้านต่ำและสูงเคลื่อนสูงขึ้นจากผลที่จำลองได้ ที่เป็นเช่นนี้ก็อาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การสร้างอาจยังไม่เที่ยงตรงนักเพราะพารามิเตอร์บางตัวมีขนาดเล็ก ขอบสายอากาศไม่เรียบตรง มุมช่องเปิดไม่เป็นมุมฉาก วิธีการบัดกรีหัวต่อ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามผลการวัดก็แสดงให้เห็นได้ว่า สายอากาศรูปแบบนี้สามารถนำไปใช้งานในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) ครอบคลุมมาตรฐานของ IEEE 802.11b/g (2.4-2.4835 GHz), IEEE 802.11h/n (5.47-5.725 GHz, 5.725-5.825 GHz) ได้ ยกเว้นเฉพาะมาตรฐาน IEEE 802.11a (5.15-5.35 GHz) เท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริง ถ้าสร้างตัวใหม่ให้ดีกว่าเดิม ก็อาจจะครอบคลุมทุกมาตรฐานความถี่ที่ต้องการได้

### 5.4 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

5.4.1 ในการออกแบบสายอากาศควรต้องกำหนดระยะกราวด์ทั้งสี่ด้านให้เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งระยะกราวด์ด้านข้าง ถ้ากำหนดให้ใหญ่เกินไปก็จะทำให้สายอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น และความถี่ที่ได้ก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

5.4.2 ต้องระวังเรื่องการสร้างสายอากาศ โดยเฉพาะขอบและมุมช่องเปิด พร้อมทั้งการบัดกรีหัวต่อ เพราะจะมีผลต่อการสูญเสียที่เกิดขึ้น

5.4.3 ในการออกแบบสายอากาศเพื่อใช้งานควรต้องทำการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบสายอากาศ การเกิดควมถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการว่าเกี่ยวข้องกับขนาดของสายอากาศอย่างไร

5.4.4 รูปร่างสัณฐานและการจัดตำแหน่งการวางสัณฐานจะมีส่วนสำคัญต่อการกำหนดแถบความถี่

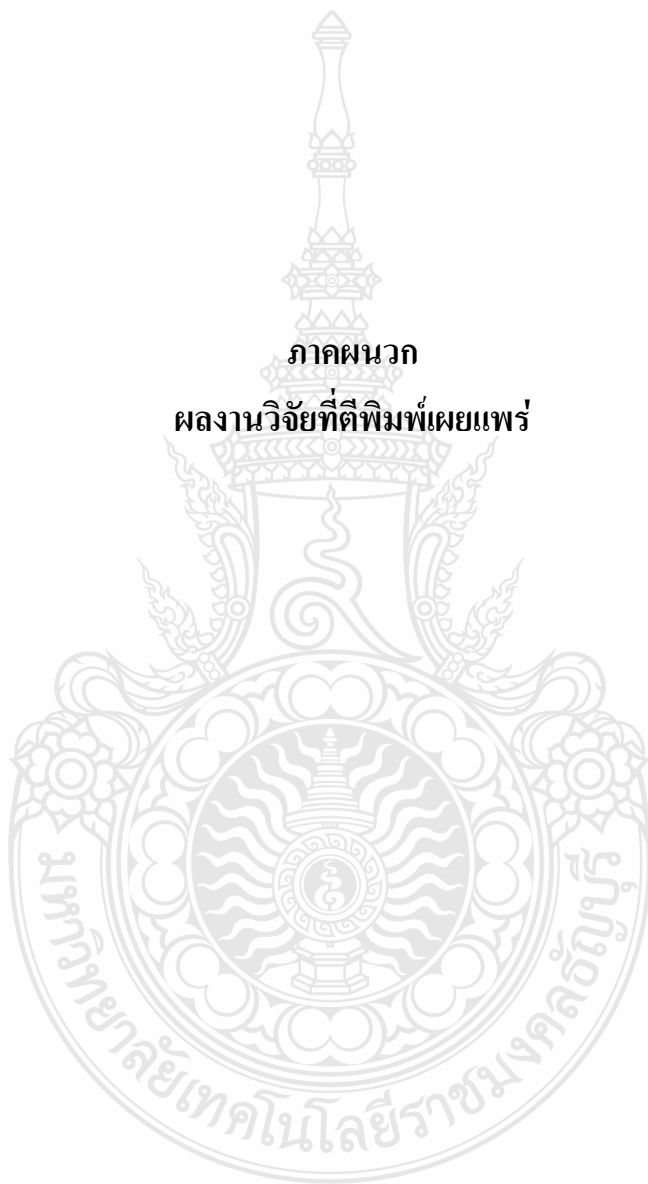
5.4.5 ควรปรับระยะระหว่างปลายไมโครสตริปไลน์และขอบช่องเปิดล่างให้เหมาะสมที่สุด เพื่อให้เกิดการแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีที่สุด

## เอกสารอ้างอิง

- [1] IE3D User's Manual Release 9, Zeland software, Inc., U.S.A., 2002.
- [2] <http://www.guru-ict.com> **Update:** 23 Sep 2008
- [3] Constantine A. Balanis, **Antenna Theory Analysis and Design**. New Jersey :John Wiley & Sons,2005.
- [4] Ramesh Garg, Prakash Bhartia, Inder Bahl, Apisak Ittipiboon. **Microstrip Antenna Design Handbook**. Boston: Artech House. 2000.
- [5] Guillermo Gonzalez, **MIicrowave Transistor Amplifiers Analysis and Design**. New Jersey : Prentice Hall Uppers Saddle River,1997,pp.143-151.
- [6] The Nan Chang, The Alan Lin ., **An L- shaped circularly polarized slot antenna** , IEEE 1999.
- [7] P. Wiriyacokol , N. Anantrasirichai , C. Benjangkprasert , and T. Wakabayashi. , **Creating Dual-Frequency on Simple-Structured Slot Antennas for IEEE 802.11 a/b/g/h/j Applications**, IEEE2006.
- [8] P. Rakluea , N. Anantrasirichai ., **A Dual Band Right Angle Microstrip Slot Antenna**, IEEE 2006.
- [9] N. Anantrasirichai , S chanoodhorm , J. Nakasuwan , P. Rakluea., **Designing Rectangular Slot Loop Antenna for WLAN Application**, IEEE2006.
- [10] P. Rakluea , K. Janchitrapongveg , N. Anantrasirichai ., **Analysis of Right Angle Microstrip Slot Antenna**, IEEE2005.
- [11] กฤตพล นาคเจริญ. ,การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสองความถี่ วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.



ภาคผนวก  
ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่



The cover features a dark red background with a pattern of white, concentric, irregular lines that resemble electromagnetic field lines or wave patterns. The text is white and positioned in the upper left and lower right areas.

# **PIERS 2007**

**Progress In Electromagnetics Research Symposium**

## **Proceedings**

**March 26 - 30, 2007**

**Beijing, CHINA**

[www.emacademy.org](http://www.emacademy.org)

[www.piers.org](http://www.piers.org)

### **PIERS 2007 Beijing Proceedings**

Copyright © 2007 The Electromagnetics Academy. All rights reserved.

Published by

The Electromagnetics Academy

777 Concord Avenue, Suite 207

Cambridge, MA 02138

[www.emacademy.org](http://www.emacademy.org)

[www.piers.org](http://www.piers.org)

ISSN: 1559-9450

## TECHNICAL PROGRAM SUMMARY

### Monday AM, March 26, 2007

1A1	NSFC Workshop on Metamaterials 1.....	15
1A2	Polarimetric Radar Remote Sensing.....	15
1A3	Periodical Structure, EM Theory and Applications.....	16
1A4	Safety Issues of Wireless Communication.....	16
1AP	Poster Session 1.....	17

### Monday PM, March 26, 2007

1P1	NSFC Workshop on Metamaterials 2.....	18
1P2a	Rough Surface Scattering and Related Phenomena.....	19
1P2b	Remote Sensing and Scattering.....	19
1P3a	Theory of Debye plasmas, Screened Coulomb Potentials, Radiation from Weakly Coupled Plasmas....	20
1P3b	Optical Fiber and Wireless Communication.....	20
1P4	New Challenges and Opportunities in Computational Electromagnetics.....	20
1P5	Inverse Problem in the Mechanics, Materials and Electromagnetics.....	21

### Tuesday AM, March 27, 2007

2A1	Novel Theoretical Advances and Potential Applications of Metamaterials.....	21
2A2	Remote Sensing of Water Cycle Related Components.....	22
2A3	Optical Matter: Modeling and Experimental Realizations 1.....	22
2A4	Extended/Unconventional Electromagnetic Theory, EHD/EMHD and Electrobiolgy 1.....	23
2A5	Microwave Applications in Material Processing and Characterization.....	23
2A6a	Biomedical Applications of Light Scattering Methods.....	24
2A6b	Medical and Biological Applications of Microwaves.....	24
2A7	Electromagnetic Systems and Components for Defense and Security.....	24
2AP	Poster Session 2.....	25

**Thursday AM, March 29, 2007**

4A1a	Biophotonics and Plasmonics .....	37
4A1b	Nanotechnology .....	37
4A2	Low Frequency EM Wave Seabed Logging to Indicate the Existence of Hydrocarbon Layers 1 .....	38
4A3	Dissipative Solitons 1 .....	38
4A4	Integral Equations and Fast Solvers .....	39
4A5	Electromagnetic and Seismic and Flow Field Imaging in the Geophysical and Environment Sciences and Engineering .....	39
4A6	High Speed I/O Signal and Power Integrity Analysis .....	40
4A7	Electromagnetic and Optical Wave Technologies for Communications and Sensing .....	40

**Thursday PM, March 29, 2007**

4P1	Electromagnetics in Photonic Crystals .....	41
4P2a	Low Frequency EM Wave Seabed Logging to Indicate the Existence of Hydrocarbon Layers 2 .....	41
4P2b	New Applications of Radar for Non-destructive Testing .....	42
4P3	Dissipative Solitons 2 .....	42
4P4	Computational Electromagnetics .....	43
4P5a	MRI Electromagnetics .....	43
4P5b	Medical Electromagnetics and Biological Effects .....	43
4P6	Advances in EM Computer-Aided Design .....	44
4P7	Antenna Theory and Radiation .....	44

**Friday AM, March 30, 2007**

5A1	Metamaterials and Photonic Crystals .....	45
5A2	Methods in Electromagnetic Scattering by Rough and Complex Surfaces .....	45
5A3	Large-scale Passive Optical Waveguide Devices, Design and Simulation .....	46
5A4a	Computational Electromagnetics and Photonics, Method and Applications .....	46
5A4b	Computational Electromagnetics: ADI-FDTD .....	47
5A5	Photonics Computer-Aided Design .....	47
5A6	Waveguides, Circuits and Systems .....	47
5A7	Antennas and Systems .....	48

Progress in Electromagnetics Research Symposium  
March 26–30, 2007  
Beijing, CHINA

**PIERS 2007 BEIJING ORGANIZATION**

---

**PIERS Chair**

J. A. Kong, MIT, USA

**PIERS 2007 Beijing General Chair**

J.-M. Kuang, Beijing Institute of Technology, CHINA

**PIERS 2007 Beijing International Advisory Committee**

L. C. Botten	W. C. Chew	N. Engheta	Z.-H. Feng
A. K. Fung	K. Gong	T. M. Habashy	Y. Hara
H.-C. Huang	A. Ishimaru	E. Jakeman	J. S. Jiang
L.-W. Li	X. W. Li	I. V. Lindell	S. G. Liu
K.-M. Luk	S. Mano	Y. Miyazaki	P. Pampaloni
A. Priou	K. Senne	Z. Sha	L. Tsang
J. Wu	K. Yasumoto	H. J. Yin	J. Zehentner
W. X. Zhang			

**PIERS 2007 Beijing Technical Program Committee**

S. J. Anderson	A. Baghai-Wadji	G. Berginc	W. M. Boerner
H. Braunisch	C.-H. Chan	K.-S. Chen	T. J. Cui
Y. Du	T. Endo	H. C. Fernandes	T. Grzegorzczk
M. Hallikainen	S. He	W. Hong	J. Hu
Q. Jiang	K. Kobayashi	F. Li	S. Lucyszyn
A. Massa	E. L. Miller	M. Moghaddam	R. Muttukrishnan
Z. P. Nie	J. Pribetich	J. Qian	G. S. N. Raju
L. X. Ran	C. M. Rappaport	X. Q. Sheng	J. Vrba
C. Wang	B.-I. Wu	G. Xie	S. J. Xu
X. W. Xu	D. X. Yang	D. Z. Zhang	L. X. Zhang
X. M. Zhang	Y. H. Zhang	J. Zhou	

**PIERS 2007 Beijing NSFC Workshop Committee**

L. X. Ran	L. F. Shen	X. Y. Xiong	J. H. Xu
S. J. Xu	Z. T. Zhang	X. M. Zhang	

**PIERS 2007 Beijing Symposium Committee**

J. P. An	H. S. Chen	K. S. Chen	Y. Du
J. T. Huangfu	Q. Jiang	L. X. Ran	L. F. Shen
H. G. Wang	B. I. Wu	X. M. Zhang	S. A. Zhong

**PIERS 2007 Beijing Administrative Committee**

J. J. Bao	H. S. Chen	X. X. Cheng	T. Jiang
D. X. Li	Z. Y. Li	Y. Luo	X. Lv
L. Peng	D. X. Wang	X. T. Wang	S. Xi
P. L. Xie	L. Y. Yu	H. F. Zhang	J. J. Zhang

## PIERS 2007 BEIJING SESSION ORGANIZERS

---

I. Akduman	N. Akhmediev	D. J. Bergman	B. N. Biswas
D. K. Callebaut	L. Capineri	D. Cardimona	C.-C. Chang
H.-W. Chang	K.-S. Chen	D. Cheng	H.-C. Chiu
C-K. Chou	L. Crocco	T. J. Cui	N. Engheta
H. C. C. Fernandes	J.-M. R. Fournier	T. M. Grzegorzcyk	Z.-H. Gu
L. Gurel	W. W. Hu	X.-H. Hu	D. Jiao
J.-M. Jin	M. Josse	M. Kagami	H. Kikuchi
K. Kobayashi	F. N. Kong	J. Li	L.-W. Li
X. Lu	J. T. Lue	A. Mehta	D. Mirshekar-Syahkal
Y. Miyazaki	M. Oristaglio	A. J. F. Orlando	C. Pan
M. Rajarajan	C. Rockstuhl	M. Rubinstein	H. Sahinturk
C. Seo	Y. Shestopalov	J. C. Shi	M. Spivack
M. I. Stockman	S. Tjuatja	S. Tomljenovic-Hanic	D. P. Tsai
G. Videen	T. Wakabayashi	C. G. Windsor	P. Winkler
C.-J. Wu	G. Xie	J. G. Xin	C. L. Xu
X.-B. Xu	X. J. Xu	J. X. Yan	J. Yang
L. Yang	A. Yapar	H. C. Yin	J. Zehentner
Q. J. Zhang	X. J. Zhang	D. L. Zu	

## PIERS 2007 BEIJING SPONSORSHIP

---

- National Natural Science Foundation of China
- Beijing Institute of Technology
- Zhejiang University
- The Electromagnetics Academy at Zhejiang University
- College of Info Science and Engineering, Zhejiang University
- College of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology
- BIT Center for Electromagnetic Simulation
- MIT Center for Electromagnetic Theory and Applications/Research Laboratory of Electronics
- The Electromagnetics Academy



---

**Session 3A5**  
**Plasmonic Nanophotonics**

---

**Wednesday AM, March 28, 2007**

**Room E (Jinyuan)**

Organized by Din Ping Tsai, Chien-Cheng Chang

Chaired by Din Ping Tsai, Chien-Cheng Chang

---

- 08:40 A Novel Eigenmode Analysis of the Plasmonic Modes in Metal Nanoparticle Periodic Arrays  
*K. H. Fung, C. T. Chan,*
- 09:00 A Theoretical Study of Particle Plasmons for Single and Multiple Metallic Nanospheres  
*Ruey-Lin Chern, Chih-Yu Kuo, Chien-Cheng Chang,*
- 09:20 Spectrum Compression of a Short Pulse from a Central Obstructed Circular Aperture in the Far-field  
*Pin Han,*
- 09:40 Focusing Light with Sub-wavelength Aperture  
*K. R. Chen,*
- 10:00 **Coffee Break**
- 10:20 Computational Model of Electromagnetic Propagation through Nanowire with Applications in Nanophotonic Devices  
*Erping Li, Hong-San Chu, R. Vahldieck,*
- 10:40 Optimization of the Coupling of the Surface Plasmon Re-emitted from Silver Nanorods  
*Sheng Chung Chen, Zheng Yu Lin, Dong Lin Li, Huai Yi Xie, Jun You Iv, Kuo Pin Chiu, Din Ping Tsai,*
- 11:00 Manipulating Tunneling Frequencies by Magnetic Fields for Resonant Tunneling Effects of Surface Plasmon Polaritons  
*Yung-Chiang Lan,*

---

**Session 3A6**  
**Wireless Communication Component**

---

**Wednesday AM, March 28, 2007**

**Room F (Xiuyuan)**

Organized by Chulhun Seo

Chaired by Chulhun Seo, Hyeong Dong Kim

---

- 08:40 Improvement of PAE in Doherty Amplifier Using Dual Bias Control and PBG Structure  
*Hyoungjun Kim, Chulhun Seo,*

- 09:00 Very Low Power Single-ended Cross-coupled Oscillator in CMOS Technology  
*Jiho Ryu, Sangwook Nam,*
- 09:20 Cascode Feedback Amplifier Combined with Resonant Matching for UWB System  
*Pei-Zong Rao, Yuh-Chuan Cheng, Ching-Piau Liang, Shyh-Jong Chung,*
- 09:40 Compact Surface-mount Wideband and Multi-band Internal Chip Antenna for Mobile Handset  
*H. C. Choi, D. S. Shin, S. U. Park, H. D. Kim,*
- 10:00 **Coffee Break**
- 10:20 Broadband Internal Antenna for Mobile DTV Handsets  
*Seung-Gil Jeon, Dong-Hyun Seo, Yeon-Sik Yu, Jae-Hoon Choi,*
- 10:40 A Compact Band-selective Filter and Antenna for UWB Application  
*Yohan Jang, Hoon Park, Sangwook Jung, Jae-hoon Choi,*
- 11:00 Class E Amplifier for Wireless LAN with Digital Pre-distortion  
*Chan Hyuk Park, Kyung Heon Koo,*

---

**Session 3A7**  
**Microstrip Patch Antennas, Phased Arrays and Optical Beam Forming**

---

**Wednesday AM, March 28, 2007**

**Room G (Hengyuan)**

Organized by Baidyanath N. Biswas

Chaired by Baidyanath N. Biswas, Subal Kar

---

- 08:20 Decreasing of Mutual Coupling in Array Antennas by Using Fractal Elements  
*Naser Yousefzadeh, Changiz Ghobadi,*
- 08:40 Optical Generation of mm-Wave Signal with Wide Linewidth Lasers for Broadband Communications  
*B. N. Biswas,*
- 09:00 Characterization of a Self-complementary Sierpinski Gasket Microstrip Antenna  
*B. N. Biswas, Rowdra Ghatak, Rabindra K. Mishra, Dipak R. Poddar,*
- 09:20 Characteristics Study of Four Coplanar Waveguide Feeding Devices  
*Wenwen Chai, Xiaojuan Zhang, Jibang Liu,*
- 09:40 Broadband Microstrip Patch Antenna Fed by a Novel Coupling Device  
*Wenwen Chai, Xiaojuan Zhang, Jibang Liu,*
- 10:00 **Coffee Break**

- 10:20 A Novel Wideband Antenna Design Using U-slot  
*Wenwen Chai, Xiaojuan Zhang, Jibang Liu,*
- 10:40 Couple-fed Circular Polarization Bow Tie Microstrip Antenna  
*Huan-Cheng Lien, Yung-Cheng Lee, Huei-Chiou Tsai,*
- 11:00 Lightwave Technique of mm-Wave Generation for Broadband Mobile Communication  
*B. N. Biswas, A. Banerjee, A. Mukherjee, S. Kar,*
- 11:20 Investigate Rectangular Slot Antenna with L-shaped Strip  
*G. Khunead, J. Nakasuwan, N. Songthanapitak, N. Anantrasirichai,*
- 15:40 Photonic Crystals in Diamond for Quantum Information Technology  
*Joseph Salzman,*
- 16:00 Novel Inorganic Compound Glasses for Photonic Crystal and Bandgap Structures  
*D. Furniss, A. B. Seddon,*
- 16:20 Thermal Radiation from Chiral Layer-by-layer Photonic Crystal Structures  
*Jeffrey Chi Wai Lee, C. T. Chan,*
- 16:40 Anomalous Properties of the Band-edge States in Large-sized Two-dimensional Photonic and Phononic Quasicrystals  
*Y. Lai, Z. Q. Zhang, C. H. Chan, L. Tsang,*

**Session 3P1****Novel Materials and Methods in Photonic Crystals**

Wednesday PM, March 28, 2007

Room E (Jinyuan)

Organized by Snjezana Tomljenovic-Hanic  
Chaired by Snjezana Tomljenovic-Hanic, Christian Grillet

- 13:00 Microassembly of Rod-connected Diamond Structures at Optical Wavelengths  
*K. Aoki, S. Iwamoto, Y. Arakawa,*
- 13:20 Design of high- $Q$  Cavities in Photosensitive Material-based Photonic Crystal Slab Heterostructures  
*S. Tomljenovic-Hanic, C. M. de Sterke, M. J. Steel, D. J. Moss,*
- 13:40 A Macrocell Approach for the Analysis of 2D Photonic Crystals Devices  
*L. Crocco, F. Cuomo, T. Isernia,*
- 14:00 Surface Waves in Photonic Crystals  
*M. Kafesaki, S. Foteinopoulou, T. Koschny, E. N. Economou, C. M. Soukoulis,*
- 14:20 Tunable Photonic Crystal Based on SOI  
*Caihua Chen, Binglin Miao, Dennis W. Prather,*
- 14:40 Optical Properties of Mesoscopic Systems of Coupled Microspheres  
*V. N. Astratov, S. P. Ashili, A. M. Kapitonov,*
- 15:00 **Coffee Break**
- 15:20 2D Photonic Crystals in Chalcogenide Glass  
*Cameron Smith, Christian Grillet, Eric C. Mägi, Yinlan Ruan, Darren Freeman, Barry Luther-Davies, Steve Madden, Andrei Rode, Snjezana Tomljenovic-Hanic, David Moss, Benjamin J. Eggleton,*

- 17:00 Broadband Slow Light and Nonlinear Switching Devices  
*G. Böttger, J.-M. Brosi, A. Maitra, J. Wang, A. Y. Petrov, M. Eich, J. Leuthold, W. Freude,*

**Session 3P2****Advanced Inverse Scattering Techniques for Non-invasive Diagnostics Applications**

Wednesday PM, March 28, 2007

Room F (Xiuyuan)

Organized by Lorenzo Crocco, Ibrahim Akduman  
Chaired by Lorenzo Crocco, Ibrahim Akduman

- 13:00 Dealing with Aspect-limited Data through an Innovative Microwave Imaging Multi-source Technique — Potentialities and Limitations  
*D. Franceschini, M. Benedetti, M. Donelli, P. Rocca, A. Massa,*
- 13:20 Closed Approximation for one Dimensional Scattering of an Inhomogeneous Anisotropic Medium in Time<sup>d</sup> domain and its Inverse Scattering Solution  
*L.-L. Li, F. Li,*
- 13:40 Permittivity Variation Reconstruction in Longitudinally Inhomogeneous Dielectric Loaded Waveguides  
*F. Akleman, A. Yapar,*
- 14:00 Testing the Iterative Multiscaling Method against Experimental Data — On the Effects of the Electromagnetic Source Modeling in the Reconstruction Process  
*D. Franceschini, M. Donelli, G. Franceschini, P. Rocca, A. Massa,*
- 14:20 The Singular Sources Method — A Non-iterative Scheme for Medium Reconstructions  
*R. W. E. Potthast,*



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางกัลยกร ชุนเอียด
วัน เดือน ปีเกิด	29 เมษายน 2514
ที่อยู่	10/136 หมู่ 3 ตำบลบางรักพัฒนา อำเภอบางบัวทอง จังหวัดนนทบุรี 11110
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อ พ.ศ. 2538 สำเร็จการศึกษาระดับครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อ พ.ศ. 2545
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2538 อาจารย์ 1 ระดับ 3 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตนนทบุรี พ.ศ. 2553 (ปัจจุบัน) อาจารย์ ระดับ 7 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่	กัลยกร ชุนเอียด, ผู้ช่วยศาสตราจารย์จินตนา นาคสุวรรณ, รองศาสตราจารย์ ดร. นายุทธ สงชนาพิทักษ์ , รองศาสตราจารย์ นภินันท์ อนันตรศิริชัย , <b>Investigate Rectangular Slot Antenna with L-Shaped Strip</b> , Progress In Electronics Research Symposium PIERS 2007 , March 26-30, 2007 Beijing, CHINA