

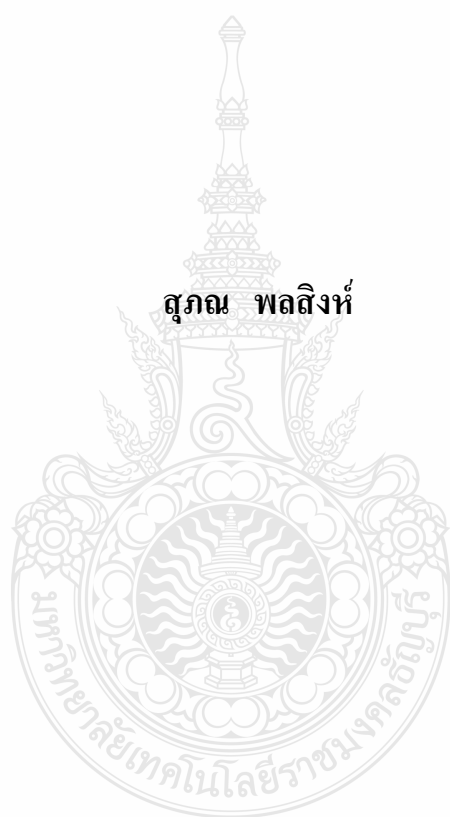
สายอากาศแพทช์ย่านความถี่แถบคู่ที่ป้อนด้วย
สายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม

CPW - FED PATCH ANTENNA FOR DUAL-BAND



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สายอากาศแพทช์ย่านความถี่แถบคู่ที่ป้อนด้วย
สายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศแพทช์ย่านความถี่แถบคู่ที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบ ระนาบร่วม
ชื่อ - นามสกุล	นายสุภณ พลสิงห์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. ไพฑูรย์ รักเหลือ
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศแพทช์ย่านความถี่แถบคู่ที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม ซึ่งมีข้อดี คือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูก และมีโครงสร้างที่ง่ายเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารไร้สายยุคใหม่

สายอากาศถูกออกแบบให้ได้ความถี่แถบคู่ที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 a/b/g/n โดยมีโครงสร้างของแพทช์ 2 รูปร่างคือแพทช์รูปสี่เหลี่ยมและแพทช์รูปสามเหลี่ยม ซึ่งสายอากาศถูกสร้างอยู่บนวัสดุฐานรอง FR4 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 4.4 และมีความหนาของวัสดุฐานรอง 1.6 มิลลิเมตร ซึ่งจะจำลองและวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม IE3D โดยทฤษฎีพื้นฐานของระเบียบวิธีโมเมนต์

จากผลการทดสอบของสายอากาศทั้ง 2 รูปร่างแสดงให้เห็นว่าแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมีแบนด์วิดท์ 2.18 GHz (2.03 GHz - 4.21 GHz) และ 750 MHz (4.75 GHz - 5.5 GHz) สำหรับแพทช์รูปสามเหลี่ยมมีแบนด์วิดท์ 660 MHz (2.00 - 2.66 GHz) และ 1.47 GHz (4.15 GHz - 5.62 GHz) โดยสายอากาศจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานสองทิศทาง ซึ่งเหมาะสำหรับนำไปติดตั้งในอุปกรณ์การสื่อสารไร้สาย

คำสำคัญ: สายอากาศแพทช์ ย่านความถี่แถบคู่ แพทช์รูปสี่เหลี่ยม แพทช์รูปสามเหลี่ยม

Thesis Title	CPW- Fed Patch Antenna for Dual Band
Name - Surname	Mr. Supon Posing
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Dr. Paitoon Raklua
Academic Year	2011

ABSTRACT

This thesis proposes the CPW-Fed patch antenna for dual-band. An advantage of the patch antenna is small size, light weight, and simple structure which are suitable for modern wireless communication systems.

The antenna is designed for dual-band of 2.4 GHz, and 5.2 GHz with IEEE standards namely 802.11 a/b/g/n. Two shapes of patch antenna are introduced with rectangle, and triangle. The antennas are fabricated on FR4 substrate with dielectric constant 4.4, and thickness 1.6 mm. The simulation and analysis use software IE3D based on Method of Moment (MOM).

From the measurement results of both shapes show that the rectangle patch shape has bandwidth 2.18 GHz (2.03 GHz - 4.21 GHz), and 750 MHz (4.75 GHz - 5.5 GHz). In case of, the triangle patch shape has bandwidth 660 MHz (2.00 - 2.66 GHz), and 1.47 GHz (4.15 GHz - 5.62 GHz). The radiation patterns of these antennas are bi-directional. It is suitable for the installation of wireless communication devices.

Keywords: patch antenna, dual-band, rectangle patch shape, triangle patch shape

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ดร.ไพฑูรย์รักเหลือ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และสนับสนุนในการทำวิจัยมาด้วยดี ตลอดผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

กราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สายอากาศแพทช์ย่านความถี่แถบคู่ที่ ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมที่ให้คำแนะนำแ่งมุมที่เป็นประโยชน์ในการวิจัยและกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสในการรายงานผลการวิจัย และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัยครั้งต่อไป

ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณมหาลัยวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่ได้สนับสนุนทุนการศึกษา

ท้ายนี้ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณ บิดา มารดาที่ให้การสนับสนุนแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สุภณ พลสิงห์



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	3
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทบทวนวรรณกรรม.....	5
2.2 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม.....	5
2.3 การหาคูณลักษณะของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง.....	7
2.4 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป.....	10
2.5 พารามิเตอร์พื้นฐานในการวิเคราะห์สายอากาศ.....	11
3 การออกแบบและการจำลองแบบสายอากาศแพทช์แบบแถบความถี่กว้างสองแถบความถี่ที่ ป้อนด้วยสายส่งระนาบร่วม.....	20
3.1 การออกแบบสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยม.....	20
3.2 การออกแบบสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยม.....	36
4 การทดสอบและผลการทดสอบ.....	53
4.1 สายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม.....	53
4.2 สายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วม.....	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	73
5.1 สรุปผลการวิจัย	73
5.2 ข้อเสนอแนะ	74
รายการอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก.....	76
ภาคผนวก ก คุณสมบัติของแผ่น PCB ชนิด FR-4.....	77
ภาคผนวก ข คุณสมบัติของ SMA Connector	80
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	89
ประวัติผู้เขียน.....	99



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_1 รูปสี่เหลี่ยม.....	27
3.2 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_1 รูปสี่เหลี่ยม	28
3.3 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_2 รูปสี่เหลี่ยม	29
3.4 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_2 รูปสี่เหลี่ยม.....	30
3.5 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_1 รูปสามเหลี่ยม .	42
3.6 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_1 รูปสามเหลี่ยม..	43
3.7 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_2 รูปสามเหลี่ยม.	44
3.8 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_2 รูปสามเหลี่ยม ...	45
4.1 ผลเปรียบเทียบการจำลองกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบ ระนาบร่วม	55
4.2 ผลเปรียบเทียบการจำลองกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบ ระนาบร่วม	65
4.3 เปรียบเทียบค่าการจำลองกับค่าการวัดที่ความถี่ต่างๆ ของแผ่น FR4	72



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของสายนำสัญญาณ	6
2.2 โครงสร้างของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง.....	7
2.3 โครงสร้างของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง.....	7
2.4 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป	10
2.5 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์.....	11
2.6 ระบบพิกัดทรงกลมซึ่งใช้สำหรับการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศ	12
2.7 แบบรูปการแผ่กำลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว	13
2.8 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ.....	14
2.9 สายอากาศในโหมดการส่ง.....	16
2.10 การก่อรูปคลื่นนิ่ง.....	18
2.11 การเกิดการย้อนกลับของกำลังงาน	19
3.1 โปรแกรม AppCAD for Windows	21
3.2 การคำนวณของโปรแกรม AppCAD for Windows ของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยม.....	22
3.3 โครงสร้างสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม	25
3.4 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) จากการจำลองของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยม แบบระนาบร่วม.....	25
3.5 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) ที่ได้จากการปรับเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดของสาย อากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม	26
3.6 ผลการจำลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการปรับเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดของสายอากาศแพทช์ รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม	26
3.7 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_1 รูปสี่เหลี่ยม	27
3.8 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_1 รูปสี่เหลี่ยม	28
3.9 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_2 รูปสี่เหลี่ยม	29

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.10 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า L_2 รูปสี่เหลี่ยม.....	30
3.11 แบบรูปการแผ่พลังงานจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม ที่ความถี่ 2.4GHz ในระนาบ 3 มิติ.....	31
3.12 แบบรูปการแผ่พลังงานจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม ที่ความถี่ 5.2GHz ในระนาบ 3 มิติ.....	31
3.13 ทิศทางกระแสจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2.4GHz ในระนาบ 2 มิติ.....	32
3.14 ความหนาแน่นกระแสจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม ที่ความถี่ 2.4 GHz ในระนาบ 2 มิติ.....	32
3.15 ทิศทางกระแสจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 5.2 GHz ในระนาบ 2 มิติ.....	33
3.16 ความหนาแน่นกระแสจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ ความถี่ 5.2 GHz ในระนาบ 3 มิติ.....	33
3.17 รูปชิ้นงานของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ได้จากโปรแกรมIE3D.....	34
3.18 รูปชิ้นงานจริงของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม.....	35
3.19 โปรแกรม AppCAD for Windows.....	36
3.20 การคำนวณของ โปรแกรม AppCAD for Windows!แพทช์รูปสามเหลี่ยม.....	37
3.21 โครงสร้างสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วม.....	40
3.22 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) จากการจำลองของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยม แบบระนาบร่วม.....	40
3.23 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) ที่ได้จากการปรับเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดของสาย อากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วม.....	41
3.24 ผลการจำลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการปรับเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดของสายอากาศแพทช์ รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วม.....	41
3.25 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_1 รูปสามเหลี่ยม.....	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.26 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า I_1 รูปสามเหลี่ยม	43
3.27 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_2 รูปสามเหลี่ยม	44
3.28 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า I_2 รูปสามเหลี่ยม	45
3.29 แบบรูปการแผ่พลังงานจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2.4 GHz ในระนาบ 3 มิติ	46
3.30 แบบรูปการแผ่พลังงานจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 5.2 GHz ในระนาบ 3 มิติ	46
3.31 ทิศทางกระแสจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2.4 GHz ในระนาบ 2 มิติ	47
3.32 ความหนาแน่นกระแสจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2.4 GHz ในระนาบ 3 มิติ	48
3.33 ทิศทางกระแสจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 5.2 GHz ในระนาบ 2 มิติ	48
3.34 ความหนาแน่นกระแสจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์แบบระนาบร่วมที่ความถี่ 5.2 GHz ในระนาบ 3 มิติ	49
3.35 ซึ้นงานของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ได้จากโปรแกรม IE3D	50
3.36 ซึ้นงานจริงของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วม	50
4.1 การต่ออุปกรณ์เพื่อใช้วัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับอิมพีแดนซ์และอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน	52
4.2 ผลการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมในย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz	53
4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.4 ค่าการทำงานของอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ที่ย่าน 2.331 - 4.739 GHz และที่ย่านความถี่ 4.957 - 6.741 GHz.....	54
4.5 การเปรียบเทียบการจำลองของค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม	55
4.6 การเปรียบเทียบการจำลองของอัตราส่วนคลื่นนิ่งกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2 GHz - 6 GHz.....	56
4.7 การต่ออุปกรณ์เพื่อใช้วัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยม	57
4.8 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมในแนวระนาบ x - z (Co - Pol).....	57
4.9 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมในแนวระนาบ x - z (Cross - Pol).....	58
4.10 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 2.4 GHz ระนาบ x-z.....	58
4.11 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 5.2 GHz ระนาบ x-z.....	59
4.12 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมในแนวระนาบ y - z (Co - Pol)	59
4.13 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมในแนวระนาบ y - z (Cross - Pol).....	60
4.14 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 2.4 GHz ระนาบ y-z.....	60
4.15 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 5.2 GHz ระนาบ y-z.....	61
4.16 การต่ออุปกรณ์เพื่อใช้วัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับอิมพีแดนซ์และอัตราคลื่นนิ่งของแรงดัน	62
4.17 ผลการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมในย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz.....	62
4.18 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz	63
4.19 ค่าการทำงานของอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ที่ย่าน 2.331-4.739 GHz และที่ย่านความถี่ 4.957-6.741GHz	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.20 การเปรียบเทียบการจำลองของค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วม.....	65
4.21 การเปรียบเทียบการจำลองของอัตราส่วนคลื่นนิ่งกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2 GHz - 6 GHz	66
4.22 การต่ออุปกรณ์เพื่อใช้วัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยม.....	67
4.23 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมในแนวระนาบ x - z (Co - Pol).....	67
4.24 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมในแนวระนาบ x - z (Cross - Pol)	68
4.25 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมที่ความถี่ 2.4 GHz ระนาบ x-z ..	68
4.26 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมที่ความถี่ 5.2 GHz ระนาบ x-z ..	69
4.27 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมในแนวระนาบ y - z (Co - Pol).....	69
4.28 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมในแนวระนาบ y - z (Cross - Pol)	70
4.29 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมที่ความถี่ 2.4 GHz ระนาบ y-z ...	70
4.30 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมที่ความถี่ 5.2 GHz ระนาบ y-z ...	71
4.31 การต่ออุปกรณ์วัดอัตราขยายแพทช์รูปสี่เหลี่ยม.....	71
4.32 การต่ออุปกรณ์วัดอัตราขยายแพทช์รูปสามเหลี่ยม.....	72

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสื่อสารแบบไร้สายในระบบเครือข่ายตามมาตรฐาน IEEE802.11 นั้น มีการใช้งานอยู่หลายความถี่เช่น IEEE 802.11 b/g (2.4-2.4835 GHz), IEEE 802.11 a (5.15-5.35 GHz), IEEE 802.11 j (4.940-4.990 GHz) [1] และในย่านของ Public safety frequency (4.940-4.990 GHz) ที่เป็นระบบสื่อสารไร้สายทั้งหมดคงไม่สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์หากขาดสายอากาศซึ่งสายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ส่งคลื่นวิทยุด้วยการแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าให้เป็นคลื่นวิทยุแผ่กระจายออกไปในขณะเดียวกันก็จะทำหน้าที่ดักจับคลื่นวิทยุในอากาศแล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าส่งเข้าอุปกรณ์สื่อสารต่อไปสายอากาศที่ใช้งานกับระบบการสื่อสารแบบเคลื่อนที่หรือแบบมือถือควรจะต้องมีขนาดเล็กกระทัดรัด น้ำหนักเบา มักนิยมออกแบบด้วยสายอากาศไมโครสตริปเนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นดังกล่าวและยังสามารถออกแบบให้ทำงานได้หลายย่านความถี่รวมไปถึงการติดตั้งเข้ากับวงจรไมโครเวฟได้โดยง่าย สายอากาศไมโครสตริปมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นแผ่นตัวนำเล็กๆ ทำหน้าที่แผ่พลังงานคลื่น (Radiator) นิยมเรียกกันว่าแพทช์ (Patch) ซึ่งแพทช์จะอยู่บนวัสดุฐานรอง (Substrate) และมีกราวด์ซึ่งเป็นแผ่นตัวนำประกบอยู่คนละด้านของฐานรอง สายอากาศไมโครสตริปเริ่มได้รับความนิยมตั้งแต่ปี ค.ศ.1970 เป็นต้นมา [2] สายอากาศไมโครสตริปหรือสายอากาศแบบแพทช์เมื่อเริ่มแรกมีความกว้างแถบที่แคบมาก แต่ในปัจจุบันได้รับการพัฒนารูปแบบและการทำงานเพื่อให้มีแถบความถี่กว้าง ในบางงานวิจัยจะออกแบบสายอากาศแพทช์ให้มีแถบความถี่ที่กว้างมากสายอากาศแพทช์มีรูปแบบหลากหลาย แต่ที่ได้รับความนิยมมากอย่างหนึ่ง คือสายอากาศแบบขั้วเดียวหรือมักเรียกว่าสายอากาศโมนโพล (Monopole) เนื่องจากมีโครงสร้างง่าย และมักจะออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Print circuit board : PCB) ซึ่งบางกรณีอาจเรียกว่า Printed monopole

สายอากาศโมนโพลสามารถจัดการป้อน (Feeding) สัญญาณได้หลายแบบ เช่น ป้อนด้วยสายส่งแกนร่วม (Coaxial feedline) สายส่งไมโครสตริป (Microstrip feed line) สายส่งระนาบร่วม (Coplanar waveguide feed line) หรือเป็นแบบคัพเฟล (Couple feed) เป็นต้น แต่การป้อนด้วยสายส่งไมโครสตริปและแบบระนาบร่วมนิยมใช้งานร่วมกับสายอากาศแบบแพทช์โมนโพลแนวระนาบ หากพิจารณาข้อดีต่างๆ เช่นการตอบสนองความถี่ที่กว้างการสูญเสียเนื่องจากตัวสายส่งน้อย มีความถี่รบกวนต่ำ รวมทั้งง่ายต่อการใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มเติมโดยไม่ต้องทำ Viahole [3-4] จะพบว่าการป้อนแบบสายส่งระนาบร่วมสามารถตอบสนองต่อสิ่งดังกล่าวได้มีความเหมาะสมกว่าการป้อน

แบบสายส่งไมโครสตริป มีงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวกับการออกแบบสายอากาศสำหรับย่านความถี่กว้าง (1.85-6.39 GHz) [5] และการออกแบบสายอากาศย่านความถี่กว้างมาก (3.1-10.6 GHz) [6] เพื่อรองรับการใช้งานกับระบบโครงข่ายการสื่อสารไร้สาย (Wireless communication system) ต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) มีการออกแบบสายอากาศให้ใช้งานได้หลายแถบความถี่และเป็นแบบแถบความถี่กว้าง ซึ่งมีนักวิจัยสนใจศึกษาอยู่เป็นจำนวนมาก [7-8]

สายอากาศแพทช์แถบความถี่ที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมนับได้ว่าเป็นสายอากาศที่นำมาใช้เพื่อรองรับระบบสื่อสารข้อมูลในปัจจุบันมากขึ้น ได้รับความนิยมในการออกแบบเนื่องจากมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีประสิทธิภาพสูงเพราะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางไฟฟ้าได้ดี [9-14] และจากโครงสร้างสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมที่มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นการสูญเสียของสัญญาณและการผิดเพี้ยนต่ำ มีแบนด์วิดท์ที่กว้างอย่างไรก็ตามเมื่อนำสายส่งระนาบร่วมมาออกแบบร่วมกับสายอากาศแบบแพทช์ซึ่งมีแบนด์วิดท์ที่แคบ จึงต้องมีการปรับแต่งรูปร่างของแพทช์ไปในลักษณะต่างๆ เพื่อให้สายอากาศตอบสนองต่อการมีแบนด์วิดท์ที่กว้างขึ้น

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอสายอากาศแพทช์แถบความถี่กว้างสองย่านความถี่ที่ป้อนด้วยสายส่งระนาบร่วมที่มีการทำงานสองแถบความถี่และเป็นแถบความถี่กว้างสามารถรองรับการทำงานในระบบสื่อสารไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 a/b/g/n ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาการวิจัยสายอากาศสำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย

1.2.2 ศึกษาการออกแบบสายอากาศแพทช์แบบแถบความถี่กว้างสองแถบความถี่ที่ป้อนด้วยสายส่งระนาบร่วม

1.2.3 วิเคราะห์พารามิเตอร์และคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศ ด้วยโปรแกรม IE3D

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ออกแบบและสร้างสายอากาศแพทช์แบบแถบความถี่กว้างสองแถบความถี่ที่ถูกป้อนด้วยสายส่งระนาบร่วม

1.3.2 สายอากาศมีแถบความถี่กว้างสองแถบความถี่ โดยมีแบนด์วิดท์ความถี่ที่หนึ่งเท่ากับ 2 GHz (2 GHz - 4 GHz) และความถี่ที่สองเท่ากับ 1 GHz (5 GHz - 6 GHz) ร่วม ทั้งมีการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง และมีอัตราขยายไม่ต่ำกว่า 2 dBi ตลอดย่านความถี่ที่ใช้งาน

1.3.3 ได้สมการในการออกแบบสายอากาศ ที่ได้จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์และคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศ

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1.4.1 ศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวข้องกับสายอากาศแพทช์โมโนโพล แนวระนาบ

1.4.2 ศึกษาโปรแกรม IE3D เพื่อใช้ในการออกแบบสายอากาศ

1.4.3 จำลองการทำงานสายอากาศที่ออกแบบและปรับปรุงรูปแบบหรือโครงสร้างให้ได้ผลดีที่สุด

1.4.4 นำพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองไปใช้ในการสร้างสายอากาศจริงบนแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB)

1.4.5 ทดสอบสายอากาศที่สร้างขึ้น เพื่อหาความกว้างแถบความถี่ และแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น

1.5 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ภาคการศึกษาที่ 2/2553			ภาคการศึกษาที่ 1/2554			
	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
1. เสนอหัวข้อวิทยานิพนธ์							
2. ออกแบบสายอากาศ							
3. จำลองการทำงาน							
4. สร้างสายอากาศจริง							
5. วัดการใช้งานจริง							
6. วิเคราะห์ผลที่ได้							
7. ปรับปรุงการออกแบบ							
8. วิเคราะห์เพื่อสรุปผล							
9. เขียนรายงานวิทยานิพนธ์							
10. นำเสนอวิทยานิพนธ์							

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถนำหลักการออกแบบสายอากาศที่ได้รับเป็นแนวทาง ในการนำไปใช้ในการ ออกแบบเพื่อการผลิตได้

1.6.2 สามารถนำสายอากาศต้นแบบไปใช้งานจริงได้

1.6.3 เป็นการสร้างแนวคิดการออกแบบสายอากาศที่ไม่ซับซ้อนใช้วัสดุราคาถูก หาได้ง่ายซึ่งจะ เป็นการช่วยประหยัดต้นทุนการผลิต

1.6.4 สามารถนำแนวคิดที่ได้ไปขยายผลในการออกแบบสายอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงได้



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบสายอากาศแบบแพทช์แบบแถบความถี่กว้างสองแถบความถี่โดยจะใช้ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการออกแบบเพื่อใช้งานย่านความถี่สื่อสารไร้สายตามมาตรฐาน IEEE802.11b/g (2.4-2.4835 GHz) IEEE802.11a (5.15-5.35 GHz) IEEE802.11j (4.90-5.091 GHz) และ Public safety frequency (4.94-4.990 GHz)

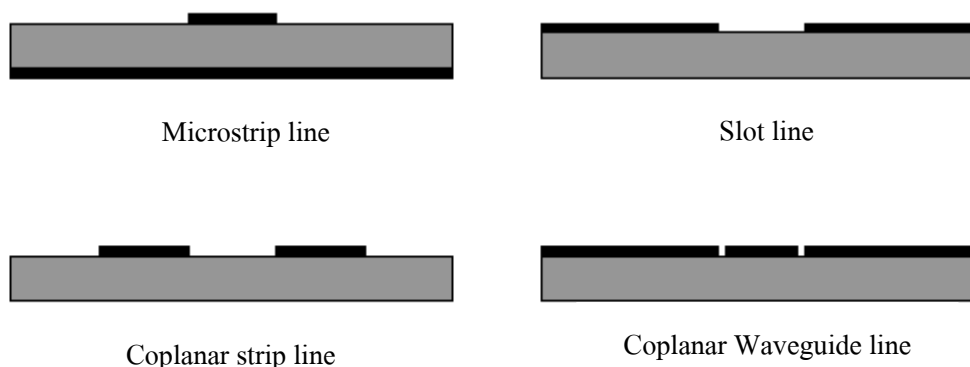
2.1 ทบทวนวรรณกรรม

สายนำสัญญาณที่ถูกนำมาใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟมีอยู่หลายชนิด ได้แก่ สายโคแอกเซียล ไมโครสตริป และสายนำสัญญาณระนาบร่วม ซึ่งไมโครสตริปกับสายนำสัญญาณระนาบร่วมจะนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการออกแบบและการสร้างรวมทั้งยังสามารถพัฒนาไปเป็นวงจรรวมไมโครเวฟ จากผลการวิจัยและพัฒนาที่ผ่านมาโครงสร้างที่เป็นไมโครสตริปจะประสบปัญหาและข้อจำกัด เช่น เมื่อต้องการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์จำเป็นจะต้องมีช่องผ่าน (Via hole) เพื่อเชื่อมต่อตัวนำด้านบนกับระนาบกราวด์ด้านล่าง ซึ่งจะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของสัญญาณสูง (High dispersion) และการสูญเสียสูง (High insertion loss) เพื่อแก้ปัญหาในงานวิจัยดังกล่าวจึงนำเสนอสายอากาศโครงสร้างระนาบร่วมที่มีกราวด์ด้านบน สามารถลดการบิดเบี้ยวของสัญญาณ (Low dispersion) และการสูญเสีย (Low insertion loss) โครงสร้างที่ได้มีความแข็งแรงที่สามารถลดช่องผ่านและเป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อการออกแบบเพื่อใช้งาน

สายนำสัญญาณระนาบร่วม (Coplanar Waveguide : CPW) มีการป้อนสัญญาณระหว่างช่องเปิดทั้งสองข้าง ที่อยู่บนระนาบเดียวกันกับกราวด์ ทำให้เห็นข้อได้เปรียบคือเป็นสายอากาศที่ให้แถบความถี่กว้าง ออกแบบโดยใช้รูปแบบง่าย โดยใช้การปรับขนาดช่องเปิดทั้งสองข้าง และความยาวของสายป้อนสัญญาณ

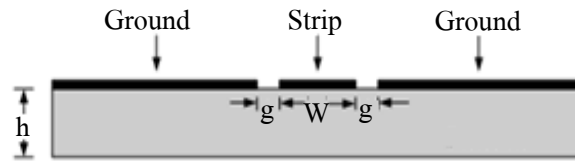
2.2 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม

โครงสร้างที่ใช้สายนำสัญญาณบนวงจรรวมไมโครเวฟมีโครงสร้างเป็นแบบระนาบซึ่งที่มีใช้กันทั่วไปมีดังนี้ คือ สายนำสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip line) สายนำสัญญาณแบบร่อง (Slot line) สายนำสัญญาณระนาบแบบคู่ (Coplanar strips) และสายนำสัญญาณระนาบร่วม (CPW) แสดงในภาพที่ 2.1

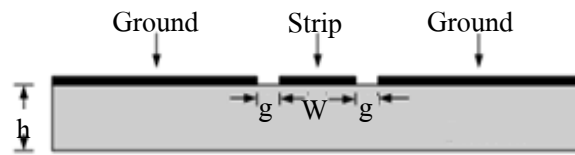


ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของสายนำสัญญาณ

สายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ สายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง CPW และชนิดมีกราวด์ด้านล่าง (Conductor-backed Coplanar Waveguide) ในภาพที่ 2.2 แสดงลักษณะโครงสร้างของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง ซึ่งประกอบไปด้วยสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมอยู่ตรงกลางด้านบนของฐานรองไดอิเล็กตริก (Substrate) โดยมีความกว้างของสายนำสัญญาณคือ W ด้านข้างทั้งสองด้านของสายนำสัญญาณมีลักษณะเป็นร่อง (Slot) และระนาบกราวด์ตามลำดับ มีความกว้างระหว่างสายนำสัญญาณถึงระนาบกราวด์คือ g และมีความสูงของฐานรองไดอิเล็กตริกคือ h ส่วนสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่างแสดงในภาพที่ 2.3 ซึ่งต่างกับชนิดแรกตรงที่จะมีกราวด์ทางด้านล่างของฐานรองไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นมา ลักษณะการแผ่กระจายของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าบนสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมจะเป็นแบบ Quasi transverse electromagnetic ข้อดีของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมคือสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ เช่น ทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุได้ง่าย เนื่องจากไม่ต้องมีการเจาะรูผ่านฐานรองไดอิเล็กตริกเพื่อเชื่อมต่อกราวด์ให้กับอุปกรณ์เหล่านั้น สามารถนำมาต่อรวมในวงจรเดียวกันกับไมโครสตริปได้ง่าย การบิดเบี้ยวของรูปสัญญาณ (Dispersion) และค่าความสูญเสีย (Losses) ต่ำกว่าการใช้ไมโครสตริป จากข้อดีที่กล่าวมาข้างต้นทำให้โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมเหมาะกับการทำเป็นวงจรรวมไมโครเวฟ



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง

2.3 การหาค่าคุณลักษณะของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง

การวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม [1] จะใช้การวิเคราะห์แบบ Quasi-Static ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของวิธีการส่งคงรูป (Conformal mapping) [2] โดยอาศัยเทคนิคที่ใช้การหาค่าความนำไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำที่กระจายอยู่บนสายนำสัญญาณ ซึ่งการวิเคราะห์แบบนั้นสามารถหาค่าคุณลักษณะพื้นฐานต่าง ๆ ของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมได้

ค่าความจุไฟฟ้าโดยรวมต่อหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณ สามารถหาได้จากผลรวมของค่าความจุไฟฟ้าของครึ่งระนาบด้านบนซึ่งอยู่ในชั้นของไดอิเล็กตริก (Dielectric layer) โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการส่งคงรูป เพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective dielectric constant) และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic impedance) จะอยู่ในเทอมอัตราส่วนของการอินทิกรัลวงรีแบบสมบูรณ์ขั้นแรก (Complete elliptic integral of the first kind) โดยกำหนดให้

$$\epsilon_{re} = \frac{C}{C^a} \quad (2.1)$$

$$V_p = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2.2)$$

$$\lambda_g = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2.3)$$

$$Z_0 = \frac{1}{C_{V_p}} = \frac{C}{c \sqrt{\epsilon_{re}} C^a} \quad (2.4)$$

โดย

C หมายถึง ค่าความจุไฟฟ้าโดยรวมต่อหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณ

C^a หมายถึง ค่าความจุไฟฟ้าในลักษณะเดียวกับ C แต่จะแทนไดอิเล็กตริกทั้งหมดด้วยอากาศ

ϵ_{re} หมายถึง ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผลของฐานรอง

V_p หมายถึง ความเร็วเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณ

Error! Reference source not found. หมายถึง ความยาวคลื่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณ

Error! Reference source not found. หมายถึง ความเร็วของสนามไฟฟ้าในอวกาศว่าง

Z_0 หมายถึง อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

ในการหาค่าความจุไฟฟ้าของสายนำสัญญาณจะใช้วิธีการส่งคงรูปซึ่งในที่นี้จะไม่ขอกล่าวถึงวิธีการหาค่าความจุไฟฟ้าของสายนำสัญญาณ แต่จะพิจารณาเฉพาะการหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณหาได้จากสมการ

$$Z_o = \frac{30\pi k'(k_1)}{\sqrt{\epsilon_{re}} K(k_1)} \quad (2.5)$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลหาได้จาก [7]

$$\epsilon_{re} = 1 + q(\epsilon_r - 1) \quad (2.6)$$

โดยที่

$$q = \frac{1K(k_2)K'(k_1)}{2K(k_2)K'(k_1)} \quad (2.7)$$

โดย q หมายถึง ตัวประกอบการคูณ
และ

$$k_1 = \frac{a}{b} \quad (2.8)$$

$$k_2 = \frac{\tanh(\pi a / 2h)}{\tanh(\pi b / 2h)} \quad (2.9)$$

โดย θ หมายถึง ตัวแปรเชิงซ้อน
โดย

$$k_1 = \frac{s}{2} \quad (2.10)$$

$$b = \frac{(2W + s)}{b} \quad (2.11)$$

โดย

H หมายถึง ความสูงของฐานรองไดโอดีเล็กตริก

S หมายถึง ความกว้างของสายนำสัญญาณ

W หมายถึง ความกว้างของร่อง

การอินทิกรัลวงรีแบบสมบูรณ์ชั้นแรกสามารถหาได้โดย

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta}} \quad (2.12)$$

โดย θ หมายถึง ตัวแปรเชิงซ้อน
โดย

$$K'(k) = K(k') \quad (2.13)$$

$$K' = \sqrt{1 - k^2} \quad (2.14)$$

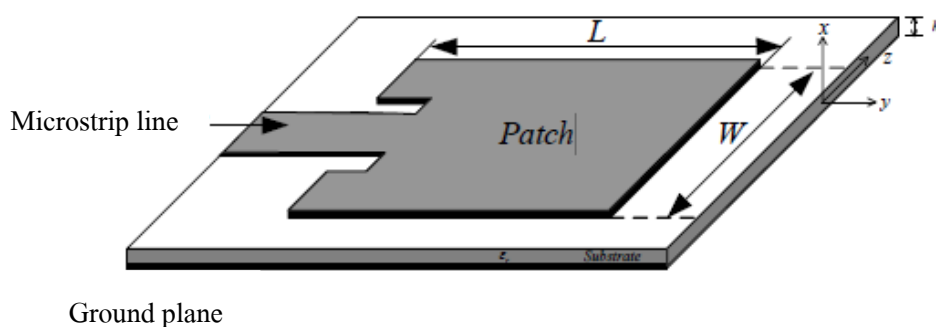
และอัตราส่วนของ $\frac{K(k)}{K'(k)}$ สามารถหาได้โดยการประมาณคือ

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{\pi}{\ln[2(1 + \sqrt{k'})/(1 - \sqrt{k'})]} \quad \text{เมื่อ } 0 \leq k \leq 0.707 \quad (2.15)$$

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{1}{\pi} \ln[2(1 + \sqrt{k})/(1 - \sqrt{k})] \quad \text{เมื่อ } 0.707 \leq k \leq 1 \quad (2.16)$$

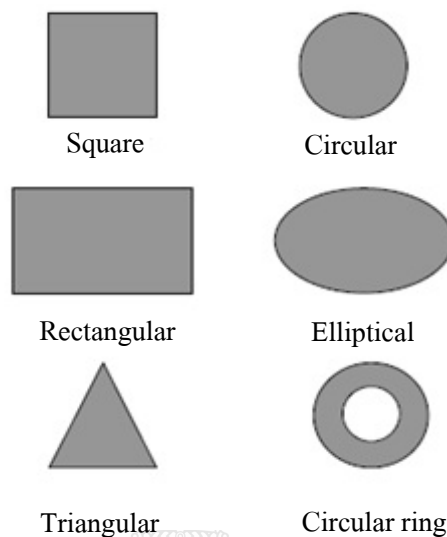
2.4 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปจะประกอบด้วยแผ่นตัวนำ 2 แผ่นวางขนานกัน โดยมีแผ่นตัวนำที่อยู่ด้านบนซึ่งมีรูปร่างต่างๆ เช่น รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปวงกลม วงรี ฯลฯ เรียกว่า ตัวแพร่กระจายคลื่น (Radiation patch) โดยทั่วไปมักจะเป็นแผ่นทองแดง ส่วนแผ่นตัวนำที่อยู่ด้านล่างจะเป็นลักษณะเป็นแผ่นตัวนำทั้งแผ่น โดยในอุดมคติจะต้องมีขนาดใหญ่กว่าแพร์ตัวกระจายคลื่นอย่างมากเรียกว่า แผ่นกราวด์ (Ground plane) และมีวัสดุที่ไม่เป็นสื่อกลางทางไฟฟ้า (Dielectric substrate) กั้นกลางระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น Patch ประกอบด้วยแผ่นตัวนำบางๆ ที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตอยู่บนแผ่นสารตัวกลางและอีกด้านหนึ่งของสารตัวกลางจะเป็นพื้นกราวด์ แผ่นตัวนำจะเป็นตัวกำหนดการแพร่กระจายคลื่นซึ่งหาได้จากการคำนวณตามรูปร่างลักษณะต่างๆ ดังภาพที่ 2.5



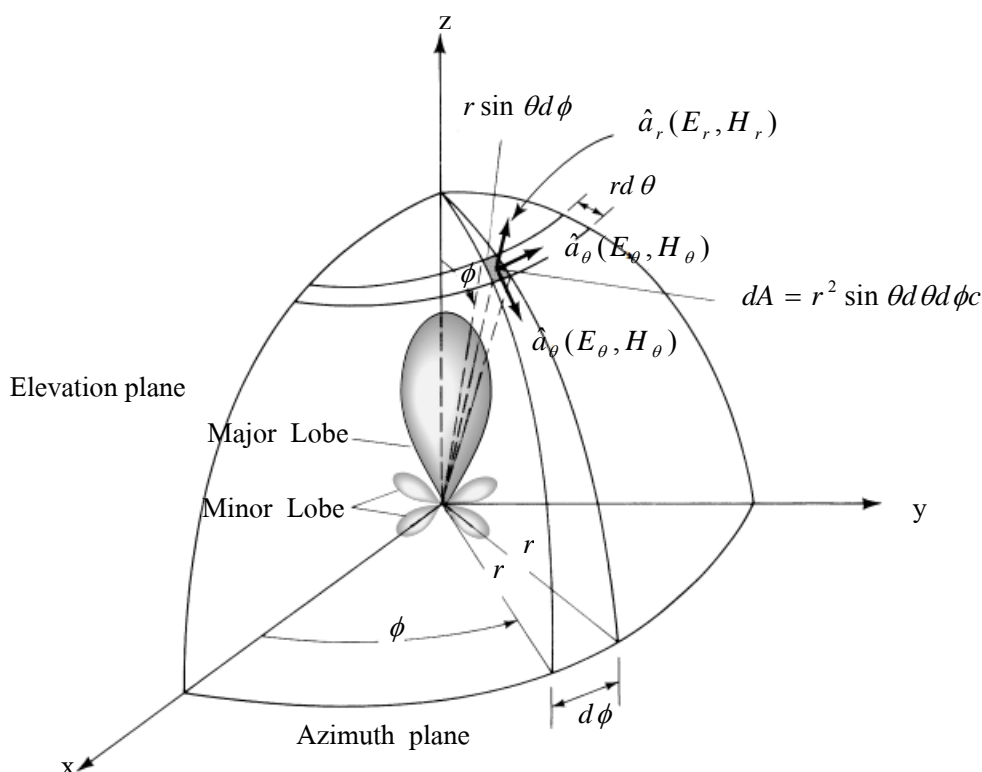
ภาพที่ 2.5 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์

2.5 พารามิเตอร์พื้นฐานในการวิเคราะห์สายอากาศ

พารามิเตอร์พื้นฐานที่พิจารณาในหัวข้อนี้จะพิจารณาในเรื่อง แบบการแผ่พลังงาน บริเวณต่างๆ ของสนามจากสายอากาศ การโพลาไรซ์ของคลื่น อัตราการขยาย อิมพีแดนซ์ด้านเข้า อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ

2.5.1 แบบการแผ่พลังงาน (Radiation pattern)

แบบภาพการแผ่พลังงานหรือภาพแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ได้ถูกนิยามว่าเป็นการนำเสนอคุณสมบัติในการแผ่กำลังงานของสายอากาศในรูปของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นไปในรูปพิกัดตำแหน่ง (Space coordination) ในการพิจารณาแบบภาพการแผ่กำลังงานจะต้องกระทำในบริเวณสนามระยะไกล (Far-field region) เท่านั้น และจะนำเสนอในรูปฟังก์ชันของพิกัดทาง (Directional coordinate) เสมอ คุณสมบัติของการแผ่กำลังงาน สามารถที่จะแสดงในภาพของการกระจายพลังงานในแต่ละตำแหน่งและทิศทางที่เป็นแบบสองมิติและสามมิติซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งของผู้สังเกตตลอดเส้นทางหรือผิวของทรงกลมที่มีรัศมีคงที่ ดังแสดงในภาพที่ 2.4

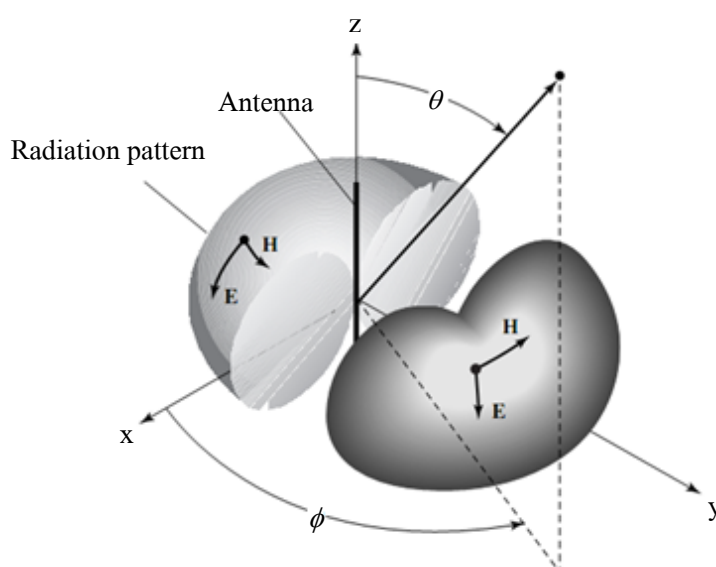


ภาพที่ 2.6 ระบบพิกัดทรงกลมซึ่งใช้สำหรับการวิเคราะห์แบบภาพการแผ่กำลังงานของสายอากาศ [10]

เส้นการกวาดของกำลังงานที่ได้รับที่ตำแหน่งรัศมีคงที่จะถูกเรียกว่า แบบภาพกำลังงาน (Field pattern) และอีกวิธีหนึ่ง ถ้าเป็นรูปแบบที่ใช้ในการเปลี่ยนสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กตามฟังก์ชันของตำแหน่ง เราเรียกว่า แบบรูปแอมพลิจูดของสนาม (Amplitude field pattern) ในทางปฏิบัติ นั้น แบบภาพการแผ่กำลังงานแบบสามมิติ จะถูกวัดและบันทึกในภาพของแบบสองมิติโดยการพล็อตแบบตามฟังก์ชันของมุม θ และ ϕ ให้สัมพันธ์และต่อเนื่องกันแบบภาพแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) แบบมีทิศทาง (Direction) และแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omni direction)

ตัวแผ่กำลังงานแบบไอโซโทรปิก (Isotropic radiation) คือ “สายอากาศที่ถูกสมมติขึ้นมาว่าไม่มีการสูญเสียภายในตัวเองและมีการแผ่ออกมาทุกทิศทาง” ถึงแม้ว่าตัวแผ่กำลังงานแบบนี้จะไม่มีจริงในทางปฏิบัติ แต่ก็มีความประโยชน์ในการนำมาใช้เป็นตัวอ้างอิงเพื่อหาคุณสมบัติของสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่มีอยู่จริง สำหรับสายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional antenna) คือ “สายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่กำลังงานหรือรับคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่นๆ” ซึ่งคำนี้มักจะมาใช้กับสายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (Maximum

directivity) มากกว่าจะใช้สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่น (Half-wave dipole) ซึ่งตัวอย่างของสายอากาศที่มีแบบภาพการแผ่กำลังงานแบบมีทิศทาง ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 2.6 จะเห็นได้ชัดเจนว่า ในระนาบมุมกวาด (Azimuth plane) นั้นแบบภาพการแผ่กำลังงานจะไม่มีทิศทาง แต่ส่วนที่มีทิศทางจะอยู่ในระนาบมุมยก (Elevation plane) ซึ่งเราเรียกแบบภาพการแผ่กำลังงานชนิดนี้ว่าเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยวน (Omni directional pattern) โดยมีนิยาม “เป็นแบบภาพการแผ่กำลังงานที่ไม่มีทิศทางในระนาบที่กำหนดให้ ในที่นี้คือมุมกวาด (Azimuth) และระนาบที่อยู่ตั้งฉากกันจะมีแบบภาพการแผ่กำลังงานเป็นแบบมีทิศทาง ในกรณีนี้คือมุมยก (Elevation)”



ภาพที่ 2.7 แบบรูปการแผ่กำลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยวน [10]

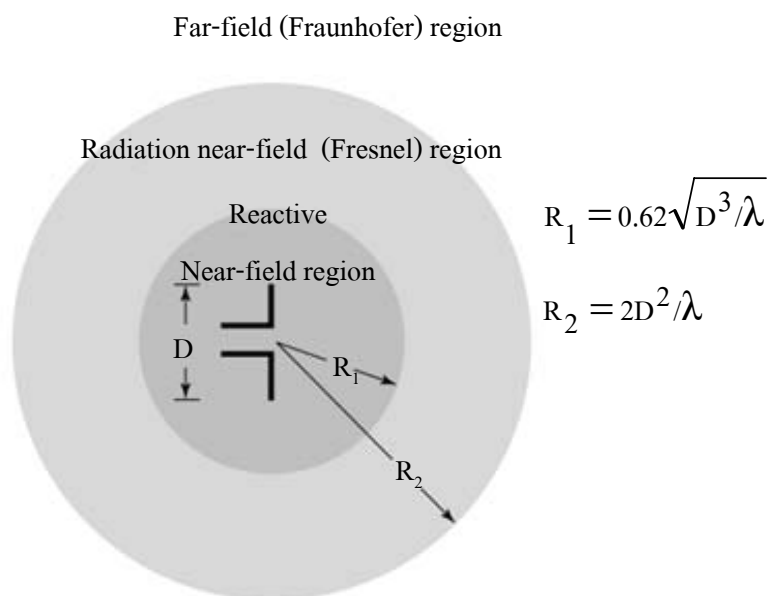
แบบภาพการแผ่กระจายกำลังงานจะเป็นตัวแสดงถึงการกระจายกำลังงานออกไปตามฟังก์ชันของทิศทางของสัญญาณที่ส่งออกไปซึ่งเป็นฟังก์ชันของทิศทาง ถึงแม้ว่าเราจะใช้คำว่า “การรับคลื่น” ในกรณีที่เป็นสายอากาศรับด้วย ตามทฤษฎีภาวะย้อนกลับ (Reciprocity theorem) ถึงแม้ว่าแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่สมบูรณ์จะเป็นฟังก์ชันแบบ 3 มิติ แต่ทั่วไปจะใช้งานกันเพียง 2 มิติ ก็เพียงพอที่จะบอกคุณลักษณะของสายอากาศที่มีทิศทางได้

ในทางปฏิบัติแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบหนึ่งๆสามารถวัดได้โดยการหมุนสายอากาศในระนาบหนึ่งๆ ขณะที่ระดับของกำลังงานที่รับได้จะเป็นฟังก์ชันของการหมุนของสายอากาศ เพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ถูกต้องควรที่จะจัดสภาพแวดล้อมที่อยู่รอบ

สายอากาศที่จะทำการวัดให้ปราศจากวัตถุหนึ่งๆ ที่อาจจะทำให้เกิด การสะท้อนสัญญาณและส่งกลับไปยังสายอากาศที่ทำการวัดอยู่

2.5.2 บริเวณต่างๆ ของสนามจากสายอากาศ

บริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ สนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive-Near field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiation-Near field) และสนามระยะไกล (Far field) ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ

บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด และมีสนามเป็นชนิดรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ บริเวณนี้จะมีระยะทาง $R_1 = 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ จากผิวของสายอากาศเมื่อ λ เป็นความยาวคลื่น และ D เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ

บริเวณสนามกระจายระยะใกล้เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่บริเวณระหว่างสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกลโดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่และการกระจายของสนามตามมุมต่างๆ นั้นแปรตามระยะทางจากสายอากาศเมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นสนามในบริเวณนี้จะมีระยะทาง $0.62\sqrt{D^3/\lambda} \leq R \leq 2D^2/\lambda$

บริเวณสนามระยะไกลเป็นบริเวณสนามของสายอากาศซึ่งการแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่างๆ ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติใหญ่ที่สุดเท่ากับ D บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง R มากกว่า $2D^2/\lambda$ จากสายอากาศ ซึ่งในบริเวณนี้สนามมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse field) และการแพร่กระจายของสนามตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางของขอบในบริเวณดังกล่าว R มีค่าเท่ากับ $2D^2/\lambda$ และขอบนอกเป็นอนันต์

2.5.3 การโพลาไรซ์ของคลื่น

การโพลาไรซ์ของคลื่นเป็นคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไปที่อธิบายทิศทางและขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า ซึ่งแปรผันตามเวลาโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศในทิศทางหนึ่งทิศทางใดจะเป็นโพลาไรซ์ของคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศนั้น (เมื่อเป็นสายอากาศส่ง) หรือเป็นโพลาไรซ์ของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้น จากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังงานที่ขั้วของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาให้จะหมายถึงทิศทางที่สายอากาศมีเกณฑ์มากที่สุด ดังนั้น โพลาไรซ์ของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกันจะแตกต่างกัน

การแบ่งชนิดของโพลาไรซ์เซชันแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ โพลาไรซ์เซชันแบบเส้นตรง (Linearly polarization) โพลาไรซ์เซชันแบบวงรี (Elliptically polarization) และโพลาไรซ์เซชันแบบวงกลม (Circularly polarization) ขึ้นอยู่กับลักษณะการหมุนของยอดเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า ถ้าเวกเตอร์ที่แสดงสนามที่แปรผันกับเวลา ณ จุดใดๆ ในสนามซึ่งเป็นเส้นตรงเสมอจะเรียกว่าเป็นโพลาไรซ์เซชันแบบเส้นตรง ซึ่งการพิจารณาจะอ้างอิงกับพื้นโลก ถ้าเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตั้งฉากกับพื้นโลก เรานิยามว่าเป็นโพลาไรซ์เซชันแบบแนวขึ้น (Vertically polarization) แต่ถ้าเวกเตอร์สนามไฟฟ้าขนานกับพื้นโลก เรานิยามว่าเป็นโพลาไรซ์เซชันแบบแนวนอน (Horizontally polarization)

โพลาไรซ์เซชันแบบวงรีและวงกลมนั้นทิศทางการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า อาจจะเป็นแบบตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาก็ได้ในการให้นิยามนี้คือหลักคั้งนี้ คือเมื่อเรากำหนดระนาบ x-y คงที่ระนาบหนึ่งและเมื่อเรามองจากทิศทางของสายอากาศส่ง ถ้าเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ปรากฏบนระนาบนี้หมุนตามเข็มนาฬิกา เรากำหนดว่าเป็นโพลาไรซ์เซชันแบบตามเข็มนาฬิกาหรือแบบหมุนเวียนขวา แต่ถ้าเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ปรากฏบนระนาบนี้หมุนทวนเข็มนาฬิกาเรากำหนดว่าเป็นโพลาไรซ์เซชันแบบทวนเข็มนาฬิกาหรือแบบหมุนเวียนซ้าย

2.5.4 อัตราการขยาย (Gain)

ค่าอัตราการขยายของสายอากาศ สามารถพิจารณาได้ 2 กรณีคือ

1) อัตราการขยายจริง (Absolute gain) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดไว้หมายถึง อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่อความเข้มการแผ่กระจายกำลังงานที่ได้รับเข้ามา

2) อัตราขยายสัมพัทธ์ (Relative gain) หมายถึง อัตราส่วนของอัตราการขยายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่ออัตราการขยายกำลังงานของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทาง โดยกำลังงานที่ป้อนให้กับอินพุตของสายอากาศจะต้องเหมือนกันทั้งสองตัว

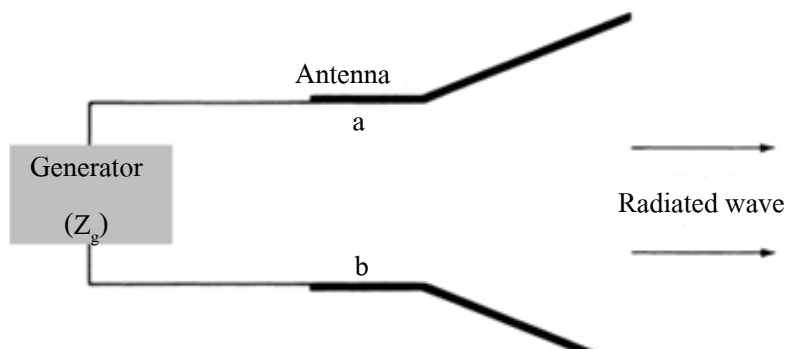
2.5.5 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input impedance)

อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศคือเป็นค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งเกิดขึ้นที่ขั้วด้านเข้าของสายอากาศ หรือเป็นอัตราส่วนของแรงดันกับกระแสดันกับกระแสที่ขั้วของสายอากาศ หรือเป็นอัตราส่วนขององค์ประกอบที่เหมาะสมของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่จุดหนึ่งๆ “ซึ่งในหน่วยนี้ เราจะสนใจค่าอิมพีแดนซ์อินพุตที่ขั้วด้านเข้าของสายอากาศ” ดังแสดงในภาพที่ 2.9 ในที่นี้คือ a-b อัตราส่วนของแรงดันกับกระแสที่ขั้วนี้ขณะไม่มีโหลดใดๆ ต่ออยู่ จะทำให้เกิดค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.17)$$

โดยที่

- Z_A คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ขั้ว a-b (โอห์ม)
- R_A คือ ค่าความต้านทานของสายอากาศที่ขั้ว a-b (โอห์ม)
- X_A คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศที่ขั้ว a-b (โอห์ม)



ภาพที่ 2.9 สายอากาศในโหมดการส่ง

ปกติอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายจะเป็นฟังก์ชันของความถี่ และจะแปรผันกับสายส่งเฉพาะในช่วงความถี่หนึ่งๆ เท่านั้น นอกจากนี้อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศยังขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ อีกได้แก่ รูปทรง วิธีการป้อนสัญญาณ และสิ่งแวดล้อมข้างเคียงเนื่องจากคำนวณได้ยากจึงมักพบว่าส่วนใหญ่จะหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ได้จากการทดลองในการออกแบบสายอากาศนั้นต้องคำนึงถึงค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ด้วย เนื่องจากสายส่งและตัว SMA connector ที่ใช้มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ดังนั้นเราควรออกแบบค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้มีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม

2.5.6 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio: SWR)

ถ้าคลื่นที่มีแอมพลิจูดและความถี่เท่ากันสองคลื่นที่ในสายส่งในทิศทางตรงกันข้ามคลื่นทั้งสองจะรวมตัวกันและหักล้างซึ่งกันและกันสลับกันไป ผลที่ได้จะเป็นคลื่นนิ่ง (Standing wave) ภาพที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่าคลื่นทั้งสองคลื่นรวมตัวเป็นคลื่นนิ่งได้อย่างไร สังเกตว่าจุดที่เกิดแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุดอยู่ที่เดิมเมื่อเทียบกับเวลา จุดที่ผ่านคลื่นศูนย์ (Zero crossing) เรียกว่า โหนด (Node) และตำแหน่งที่เกิดแอมพลิจูดสูงสุดเรียกว่า แอนติโหนด (Antinodes) อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) ในสายส่งที่มีการสูญเสียพลังงานน้อยมีค่าจำกัดความเป็นอัตราส่วนของแรงดันที่มากที่สุดต่อแรงดันที่น้อยที่สุด เมื่อเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์

$$VSWR = \frac{|V_{\max}|}{|V_{\min}|} \quad (2.18)$$

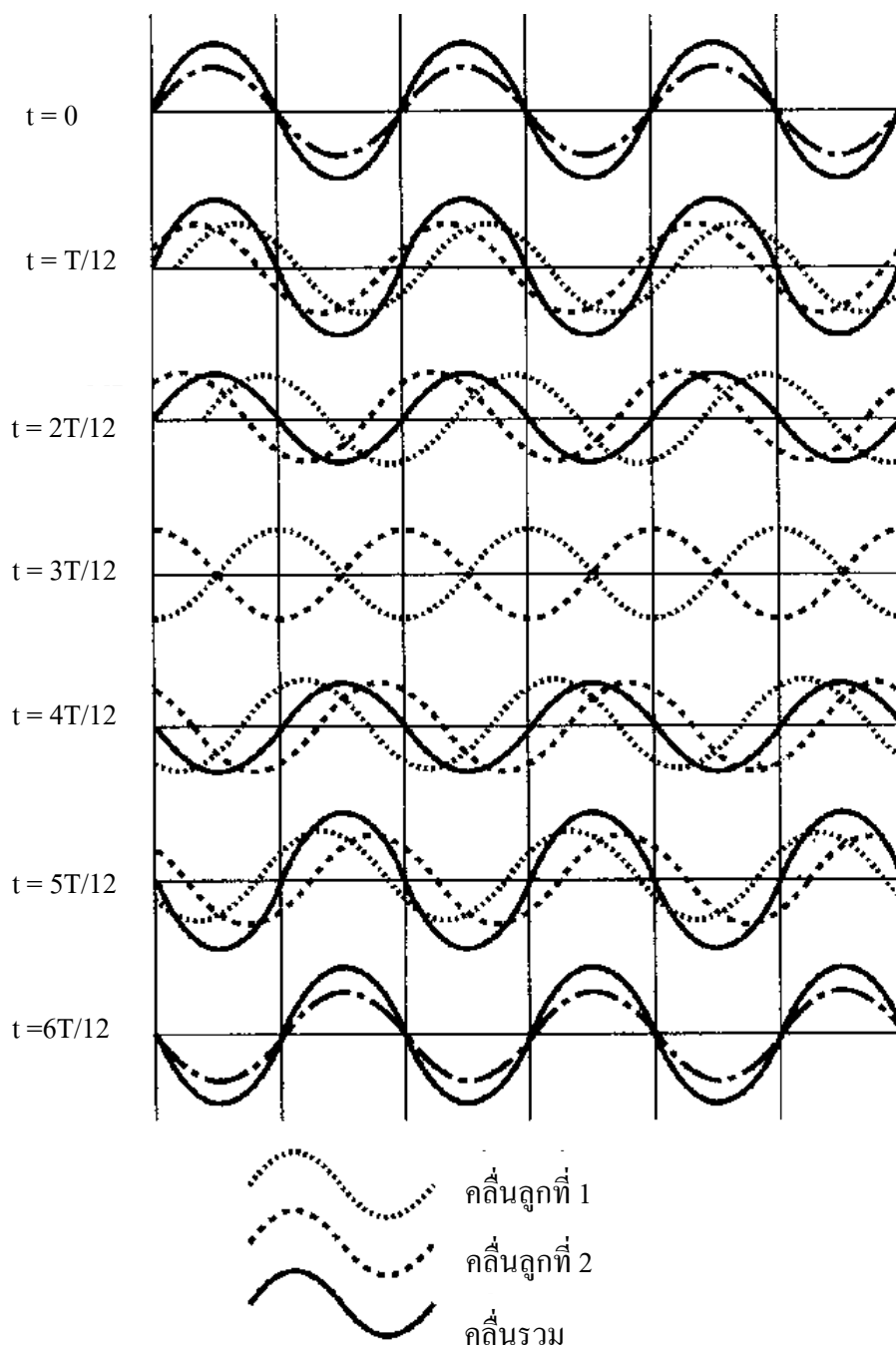
เราสามารถให้ค่าจำกัดความ VSWR ให้เป็นค่าที่จุดๆหนึ่งในสายโดยใช้ความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์การสะท้อนดังนี้

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (2.19)$$

$$|\Gamma| = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (2.20)$$

โดยที่

- $|\Gamma|$ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น
- Z_0 คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ
- Z_1 คือ อิมพีแดนซ์ของโหลด



ภาพที่ 2.10 การก่อรูปคลื่นนิ่ง

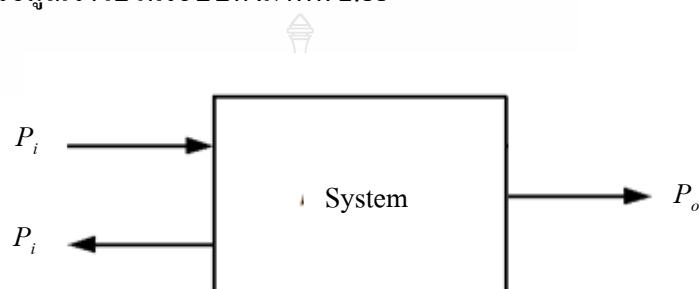
จากสมการ 2.20 จะพบว่า ถ้า $Z_1 = Z_0$ จะทำให้ $\Gamma = 0$ นั่นคือจะไม่เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นซึ่งจะส่งผลให้ค่า $VSWR=1$ ซึ่งก็คือการแมตซ์กันระหว่างสายส่งกับสายอากาศนั่นเอง แต่ถ้า $Z_1 \neq Z_0$ จะทำให้ $\Gamma \neq 0$ ก็จะส่งผลทำให้ค่า $VSWR \neq 1$ นั่น คือการเกิดการไม่แมตซ์กันระหว่างสาย

ส่งกับสายอากาศ ซึ่งมีค่า VSWR มีค่ามาก ๆ ก็อาจส่งผลกระทบต่อเครื่องส่งทำให้เครื่องส่งเกิดความเสียหายได้ สำหรับค่า VSWR ที่สามารถยอมรับได้ในทางปฏิบัตินั้นจะต้องมีค่าไม่เกิน 1.5

2.5.7 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return loss)

การสูญเสียนั้นจะเกิดขึ้นทุกครั้งเมื่อระบบการสื่อสารเริ่มทำงาน ซึ่งผลของมันอาจจะไม่เป็นที่ต้องการ เพราะมันจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพต่ำลงนั่นเอง โดยการสูญเสียในทางโทรคมนาคมที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้คือ

ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return loss) ซึ่งการสูญเสียประเภทนี้มักจะเกิดขึ้นเมื่อมีการส่งสัญญาณข้อมูลเข้าไปในระบบดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 การเกิดการย้อนกลับของกำลังงาน

จากภาพที่ 2.11

P_i คือ กำลังงานของสัญญาณอินพุต

P_r คือ กำลังงานของสัญญาณที่สะท้อนกลับ

P_o คือ กำลังงานของสัญญาณเอาต์พุต

ซึ่งค่าของ Return loss สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Return loss} = -10 \log(P_r/P_i) \quad (2.21)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าค่า Return loss คืออัตราส่วนของ P_r กับ P_i แสดงถึงประสิทธิภาพการส่งผ่าน ซึ่งแสดงได้ว่าถ้าค่า Return loss มากๆ จะยิ่งดีเนื่องจากจะมีประสิทธิภาพการส่งผ่านที่ดีนั่นเอง

บทที่ 3

การออกแบบและการจำลองแบบสายอากาศแพทช์แบบแถบความถี่กว้างสองแถบ ความถี่ที่ป้อนด้วยสายส่งระนาบร่วม

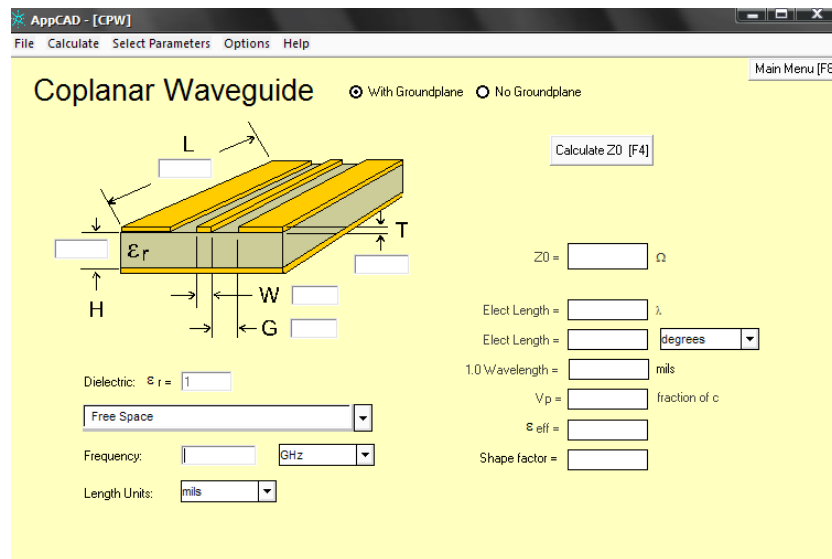
การออกแบบสายอากาศแบบแพทช์แบบแถบความถี่กว้างสองแถบความถี่ การเพิ่มขนาดแบนด์วิดท์เพื่อให้ได้สายอากาศแบบแพทช์แบบแถบความถี่กว้างสองแถบความถี่ที่สามารถรองรับการใช้งานในเครือข่ายการสื่อสารไร้สายตามมาตรฐาน IEEE802.11b/g (2.4-2.4835GHz) IEEE802.11a (5.15-5.35 GHz) IEEE802.11j (4.90-5.091 GHz) และ Public safety frequency (4.94-4.990 GHz)

สายอากาศแบบระนาบร่วมนี้ได้ออกแบบใช้งานที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz โดยใช้สารแบบอีพ็อกซี (Epoxy) เป็นสารตัวกลางซึ่งอีพ็อกซีมีค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารตัวกลางของวัสดุที่นำมาทำแผ่นรองรับ (ϵ_r) มีค่าคงที่เท่ากับ 4.4 และความหนาแน่นของสารที่เป็นสารตัวกลาง (h) มีค่าประมาณ 1.6 มิลลิเมตร โดยในการเชื่อมต่อสัญญาณให้กับแผ่นแพร์กระจายคลื่นของสายอากาศแบบระนาบร่วมจะใช้การป้อนสัญญาณแบบระนาบร่วม (CPW)

การออกแบบในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบสายนำสัญญาณโครงสร้างระนาบร่วมไม่มีกราวด์ด้านล่างเพื่อที่จะให้ได้สายนำสัญญาณที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 50 โอห์มซึ่งประกอบไปด้วยสตริปที่อยู่ตรงกลางด้านบนบนฐานรองไดอิเล็กตริกด้านข้างของสตริปทั้งสองด้านจะมีลักษณะเป็นร่องและระนาบกราวด์ในการออกแบบจะใช้โปรแกรม AppCAD for Windows และในส่วนวัสดุที่นำมาใช้ทำตัวสายอากาศประกอบด้วยแผ่นวงจรพิมพ์แบบหน้าเดียวสำหรับโครงงานนี้ได้เลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์สำหรับงานทางด้านไมโครเวฟรุ่น FR-4 เนื่องจากเป็นแผ่นวงจรพิมพ์ที่หาซื้อได้ง่ายและราคาไม่แพง

3.1 การออกแบบสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยม

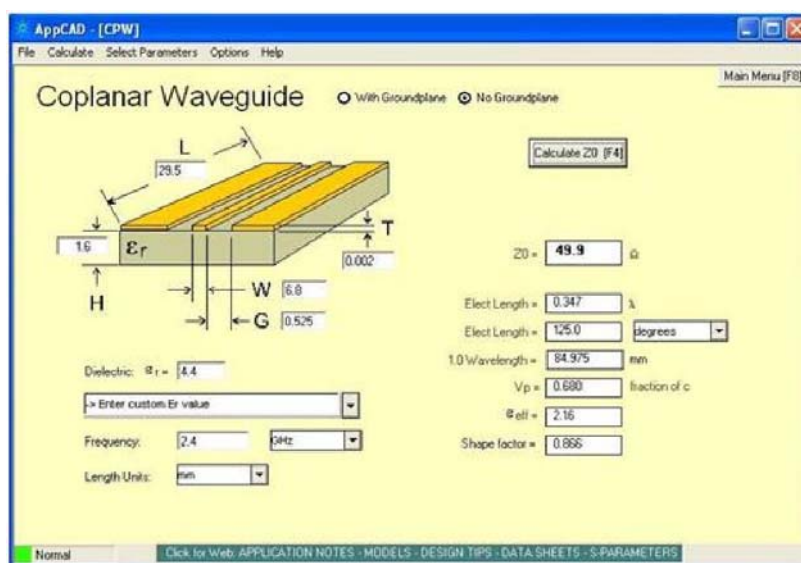
3.1.1 การออกแบบสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2.4 GHz การออกแบบจะใช้โปรแกรม AppCAD for Windows ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 โปรแกรม AppCAD for windows

โดยทำการกำหนดค่าต่างๆ สำหรับการคำนวณด้วยโปรแกรม AppCAD for windows ดังนี้

ความกว้างของสตริป (W)	=	6.8 mm
ความกว้างระหว่างสตริปถึงระนาบกราวด์ (G)	=	0.5 mm
ความหนาของทองแดง (T)	=	0.002 mm
ความสูงของฐานรองไดอิเล็กตริก (H)	=	1.6 mm
ความยาว (L)	=	29.5 mm
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r)	=	4.4
ค่าการสูญเสียแทนเจนซ์ ($\tan \delta$)	=	0.02
ความถี่	=	2.4 GHz



ภาพที่ 3.2 การคำนวณของโปรแกรม AppCAD for windows ของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยม

จากการคำนวณของโปรแกรม AppCAD for windows จะได้ค่าต่างๆดังนี้

Z_0 : Transmission line characteristic impedance	= 49.9 ohm
Elect Length :Electrical length of the line as a fraction of wave length	= 0.347 λ
Elect Length :Electrical length of the line user selected angle units	= 125.0 degrees
Physical Length : Length of onewavelength in use selected length unit	= 84.975 mm
V_p : Velocity of propagation as fraction of c	= 0.680 fraction of c
ϵ_{eff} : Effective dielectric constant	= 2.16
Shape factor : Line width [linewidth + (2 x gap spacing)]	= 0.866

ความกว้างของตัวสายอากาศ (w_1) หาได้จากสมการ 3.1 ($j=0.6$) [14]

$$w_1 = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} x (j) \quad (3.1)$$

โดยที่

- c คือ ความเร็วแสง (ประมาณ 3×10^8 m/s)
- f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการออกแบบ

- ϵ_{eff} คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล
 ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง
 j คือ factor ของแผ่นปรินต์ที่นำมาทำสายอากาศ

ดังนั้น

$$w_1 = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.4 \times 10^9} \sqrt{\frac{2}{4.4 + 1}} \times 0.6$$

$$\approx 22.8 \text{ mm}$$

3.1.2 การออกแบบสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 5.2GHz

โดยทำการกำหนดค่าต่างๆสำหรับการคำนวณด้วยโปรแกรม AppCAD for Windows ดังนี้

ความกว้างของสตริป(W_f)	=	6.8 mm
ความกว้างระหว่างสตริปถึงระนาบกราวด์(G)	=	0.5 mm
ความหนาของทองแดง(T)	=	0.002 mm
ความสูงของฐานรองไดอิเล็กตริก(H)	=	1.6 mm
ความยาว(l_2)	=	22 mm
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก(ϵ_r)	=	4.4
ค่าการสูญเสียแทนเจนต์($\tan \delta$)	=	0.02
ความถี่	=	5.2 GHz

จากการคำนวณของโปรแกรม App CAD จะได้ค่าต่างๆดังนี้

Z_0	=	49.9 ohm
Elect Length	=	0.752 λ
Elect Length	=	270.8 degrees
Physical Length	=	39.219 mm
V_p	=	0.680 fraction of c
ϵ_{eff}	=	2.16
Shape factor	=	0.866

หาความกว้างของตัวสายอากาศ(w_2) หาได้จากสมการ(3.1)

$$w_2 = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \times (j)$$

$$w_2 = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 5.2 \times 10^9} \sqrt{\frac{2}{4.4 + 1}} \times 0.6$$

$$\approx 10.5 \text{ mm}$$

จากโปรแกรม AppCAD for Windows จะได้

$$Z_0 = 49.9 \text{ ohm}$$

$$wf = 6.8 \text{ mm}$$

$$G = 0.5 \text{ mm}$$

$$L = 29.5 \text{ mm}$$

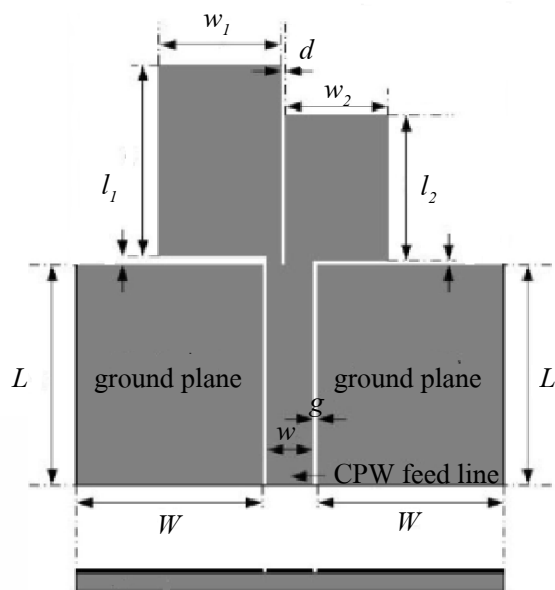
ค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g) ได้จากสมการ [5]

$$\lambda_g = \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.2)$$

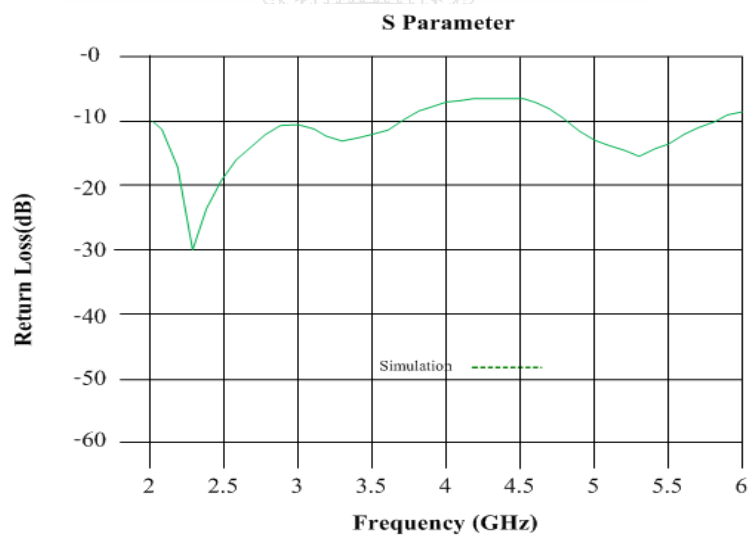
ดังนั้นสามารถหาความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g) ที่ความถี่ 2.4 GHz ได้ดังนี้ ($\epsilon_{eff} = 2.16$)

$$\begin{aligned} \lambda_g &= \frac{3 \times 10^8}{2.4 \times 10^9 \sqrt{2.16}} \\ &= 85.05 \text{ mm} \end{aligned}$$

นำค่าที่ได้มาทำการสร้างแบบจำลองสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมด้วยโปรแกรม IE3D ซึ่งแสดงดังภาพที่ 3.3 และทำการวิเคราะห์โครงสร้างสายอากาศหาค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) และแบนด์วิดท์ซึ่งแสดงดังภาพที่ 3.4



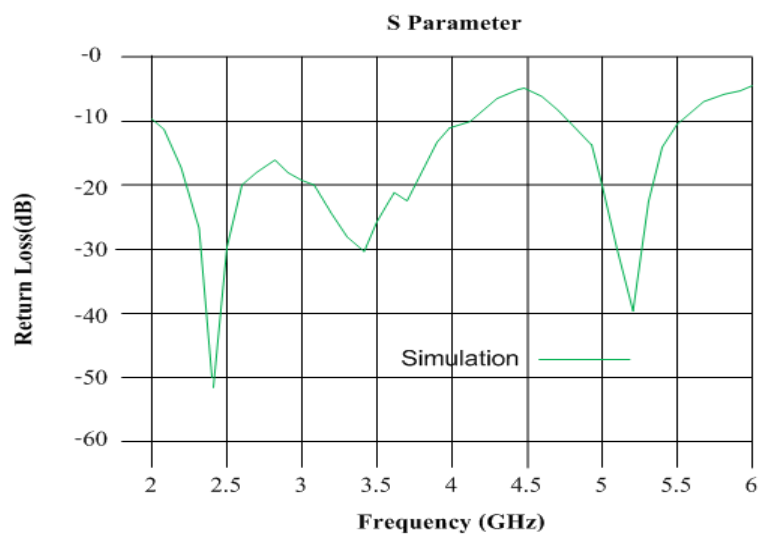
ภาพที่ 3.3 โครงสร้างสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม



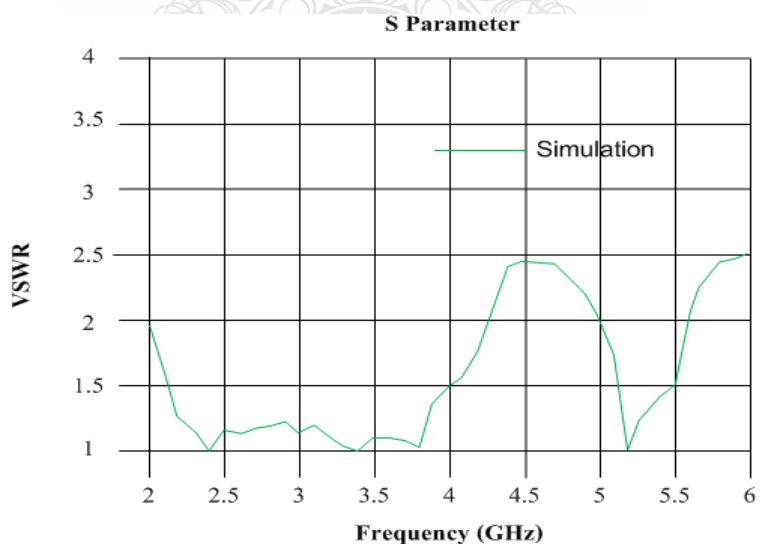
ภาพที่ 3.4 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) จากการจำลองของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม

จากนั้นทำการปรับเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดโดย $w_1 = 18.5$ mm, $w_2 = 14.5$ mm, $l_1 = 29$ mm, $l_2 = 22$ mm, $w_f = 6.8$ mm, $W = 27.5$ mm, $L = 29.5$ mm, $g = 0.5$ mm, $s_1 = 3.85$ mm, $s_2 =$

0.5 mm, $d = 0.95$ mm, ได้กราฟดังภาพที่ 3.5 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) และภาพที่ 3.6 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง

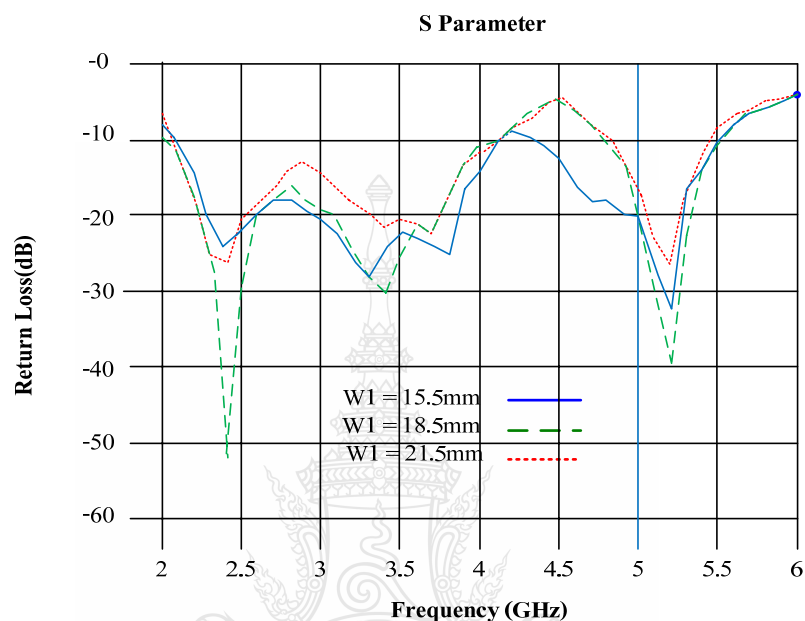


ภาพที่ 3.5 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) ที่ได้จากการปรับเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม



ภาพที่ 3.6 ผลการจำลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการปรับเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม

จำลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_1 เมื่อกำหนดให้ $w_f = 6.8$ mm, $W = 27.5$ mm, $L = 29.5$ mm, $w_2 = 14.5$ mm, $g = 0.5$ mm, $s_1 = 3.85$ mm, $s_2 = 0.5$ mm, $l_1 = 29$ mm, $l_2 = 22$ mm, $d = 0.95$ mm มีผลการจำลองแบบดังภาพที่ 3.7 และผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ จะได้ค่าความถี่กลาง f_1 , f_2 และค่าแบนด์วิดท์แสดงดังตารางที่ 3.1



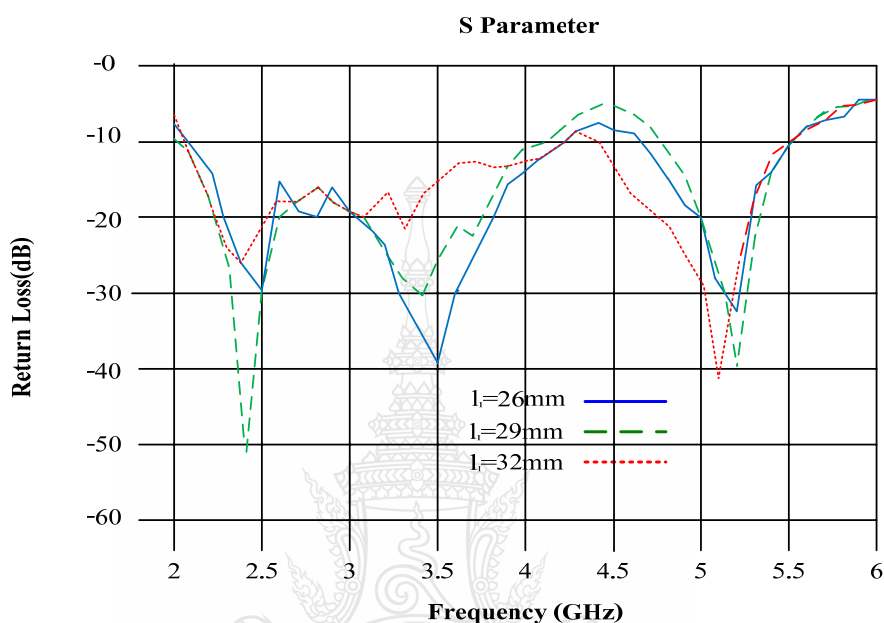
ภาพที่ 3.7 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_1 รูปสี่เหลี่ยม

ผลการจำลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_1 จะมีผลต่อค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ดี สังเกตเห็นได้ว่าที่ค่า $w_1 = 18.5$ mm นั้นจะมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ดีที่สุดและมีผลค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศเป็นผลตอบสนองแบบสองความถี่

ตารางที่ 3.1 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับโดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_1 รูปสี่เหลี่ยม

w_1	f_1 / BW (GHz)	f_2 / BW (GHz)
15.5 mm	2.4 / 2.03	5.2 / 1.25
18.5 mm	2.4 / 2.18	5.2 / 0.75
21.5 mm	2.4 / 2.14	5.2 / 0.93

จำลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_1 เมื่อกำหนดให้ $w_f = 6.8$ mm, $W = 27.5$ mm, $L = 29.5$ mm, $w_1 = 18.5$ mm, $w_2 = 14.5$ mm, $g = 0.5$ mm, $s_1 = 3.85$ mm, $s_2 = 0.5$ mm, $l_2 = 22$ mm, $d = 0.95$ mm มีผลการจำลองแบบดังภาพที่ 3.8 และผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับจะได้ค่าความถี่กลาง f_1 , f_2 และค่าแบนด์วิธที่แสดงดังตารางที่ 3.2



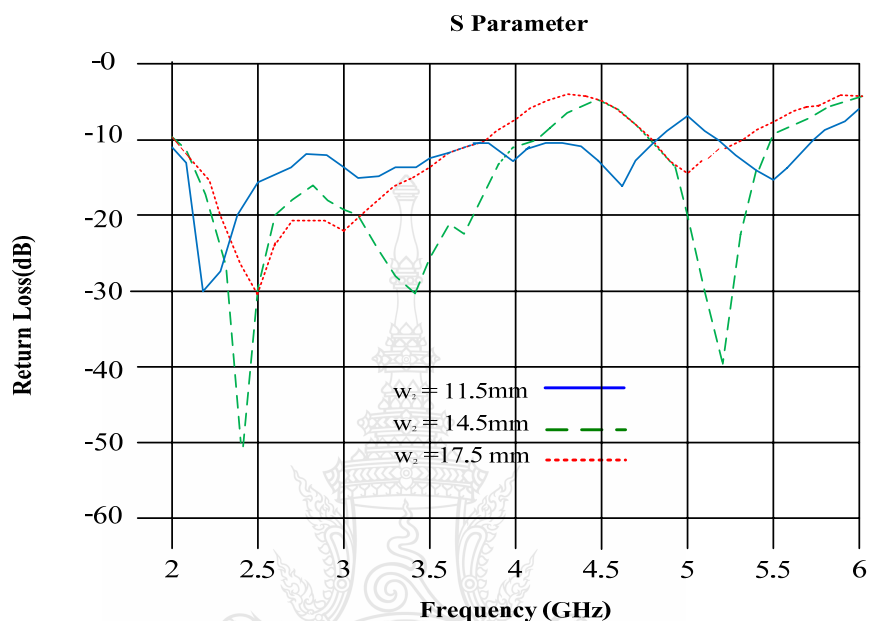
ภาพที่ 3.8 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_1 รูปสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 3.2 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_1 รูปสี่เหลี่ยม

l_1	f_1 / BW (GHz)	f_2 / BW (GHz)
26 mm	2.4 / 1.85	5.2 / 1.04
29 mm	2.4 / 2.18	5.2 / 0.75
32 mm	2.4 / 2.21	5.2 / 1.09

ผลการจำลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_1 สังเกตได้ ว่าที่ค่า $l_1 = 29$ mm นั้นจะมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับดีที่สุดและมีผลค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศมีค่าสม่ำเสมอเป็นผลตอบสนองแบบสองความถี่

จำลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_2 เมื่อกำหนดให้ $w_f = 6.8$ mm, $W = 27.5$ mm, $L = 29.5$ mm, $w_1 = 18.5$ mm, $g = 0.5$ mm, $s_1 = 3.85$ mm, $s_2 = 0.5$ mm, $l_1 = 29$ mm, $l_2 = 22$ mm, $d = 0.95$ mm มีผลการจำลองแบบดังภาพที่ 3.9 และผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับจะได้ค่าความถี่กลาง f_1 , f_2 และค่าแบนด์วิดท์แสดงดังตารางที่ 3.3



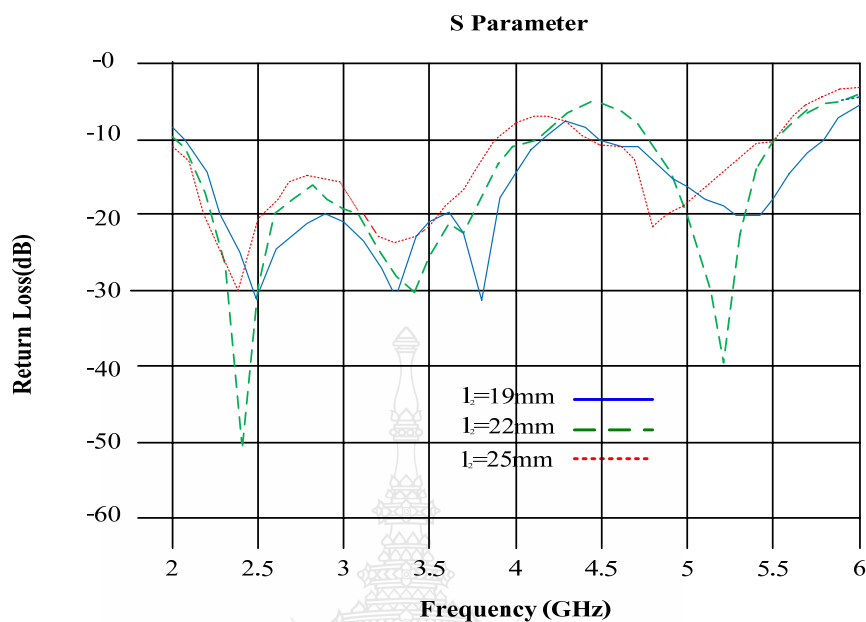
ภาพที่ 3.9 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_2 รูปสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 3.3 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับโดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_2 รูปสี่เหลี่ยม

w_2	f_1/BW (GHz)	f_2/BW (GHz)
11.5 mm	2.4 / 1.85	5.2 / 1.04
14.5 mm	2.4 / 2.18	5.2 / 0.75
17.5 mm	2.4 / 2.21	5.2 / 1.09

จำลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_2 เมื่อกำหนดให้ $w_f = 6.8$ mm, $W = 27.5$ mm, $L = 29.5$ mm, $w_1 = 18.5$ mm, $w_2 = 14.5$ mm, $g = 0.5$ mm, $s_1 = 3.85$ mm, $s_2 = 0.5$ mm, $l_1 =$

29 mm, $d = 0.95$ mm มีผลการจำลองแบบดังภาพที่ 3.10 และผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับจะได้ค่าความถี่กลาง f_1 , f_2 และค่าแบนด์วิดท์แสดงดังตารางที่ 3.4

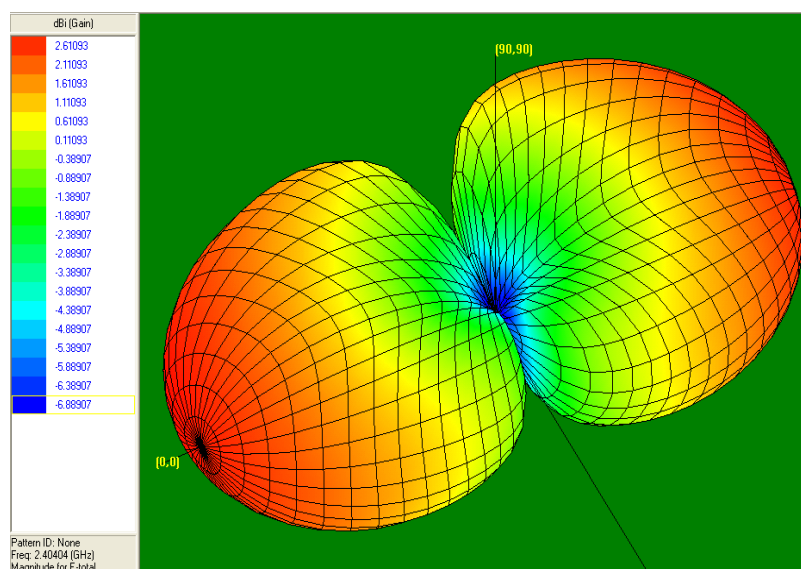


ภาพที่ 3.10 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_2 รูปสี่เหลี่ยม

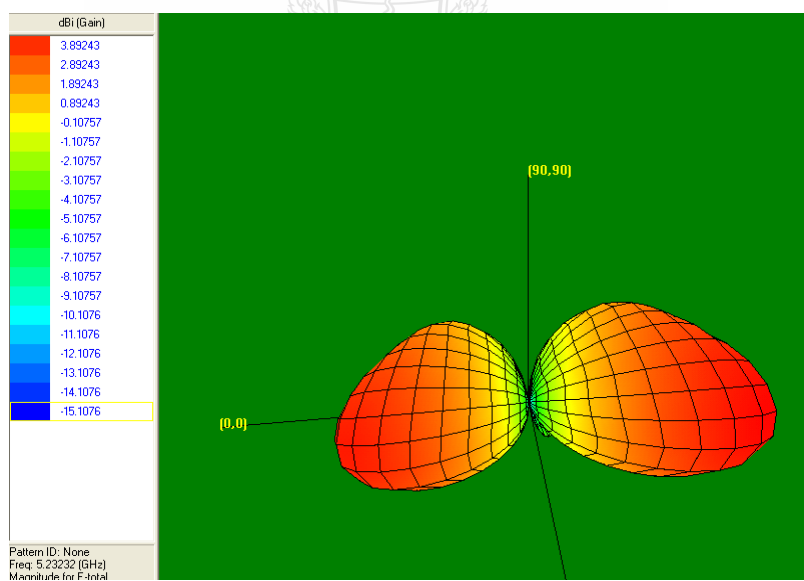
ตารางที่ 3.4 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_2 รูปสี่เหลี่ยม

l_2	f_1 / BW (GHz)	f_2 / BW (GHz)
19 mm	2.4 / 1.85	5.2 / 1.22
22 mm	2.4 / 2.18	5.2 / 0.75
25 mm	2.4 / 1.95	5.2 / 1.09

ผลการจำลองแบบภาพการแผ่พลังงานของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่สร้างขึ้นสรุปได้ว่าเป็นสายอากาศชนิดที่มีลักษณะการโพลาไรซ์เซชันเป็นแบบเส้นตรง (Linearly polarization) ที่มีสองทิศทางตามแนวแกน x-z (0-180 องศา) โดยมีอัตราขยายประมาณ 5.5 dB จากการจำลองซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการจำลอง



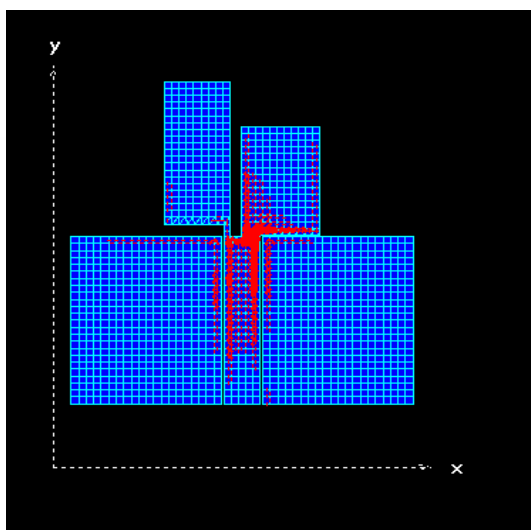
ภาพที่ 3.11 แบบภาพการแผ่พลังงานจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบ
ระนาบที่ความถี่ 2.4 GHz ในระนาบ 3 มิติ



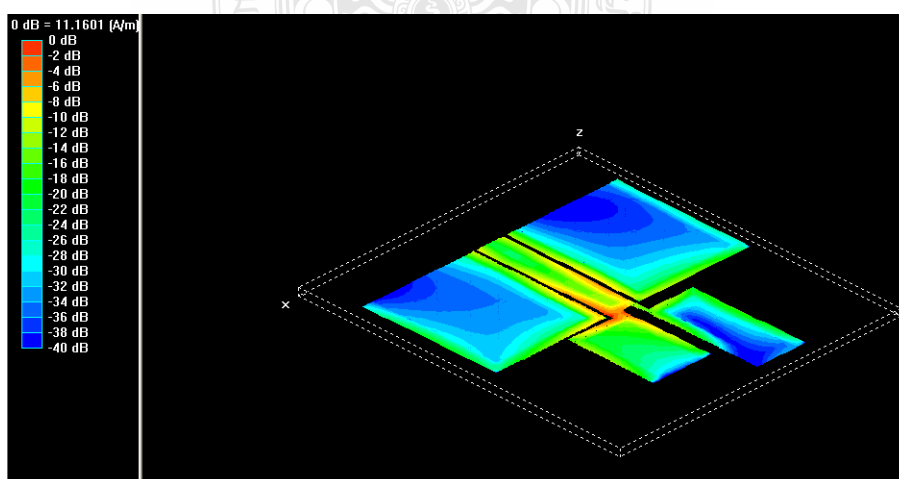
ภาพที่ 3.12 แบบภาพการแผ่พลังงานจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบ
ระนาบร่วมที่ความถี่ 5.2 GHz ในระนาบ 3 มิติ

จากภาพที่ 3.11 และภาพที่ 3.12 เป็นแบบภาพการแผ่พลังงานจากการจำลองแบบของ
สายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz ในระนาบ 3 มิติจะเห็น

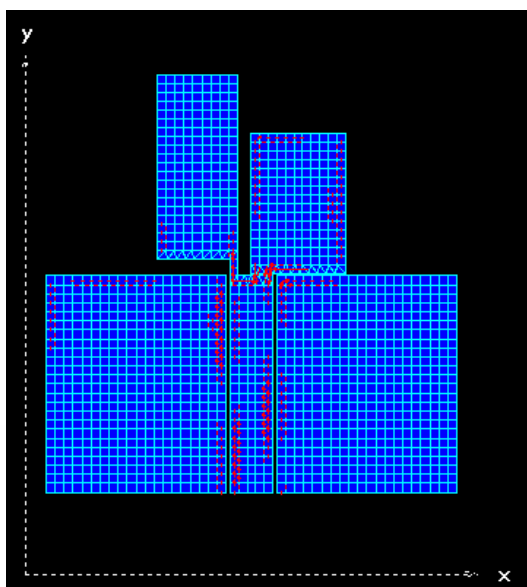
ว่ามีการแผ่พลังงานได้ดีที่มุม 30 องศาและมุม 150 องศาซึ่งจากภาพของผลการจำลองจะเห็นว่าที่ความถี่ 2.4 GHz จะมีอัตราการขยายของสัญญาณประมาณ 2.46 dBi และที่ความถี่ 5.2 GHz มีอัตราการขยายของสัญญาณประมาณ 1.93 dBi โดยสังเกตได้จากระดับความเข้มของสีของแบบภาพการแผ่พลังงานในระนาบ 3 มิติจะเป็นสีแดงเข้ม



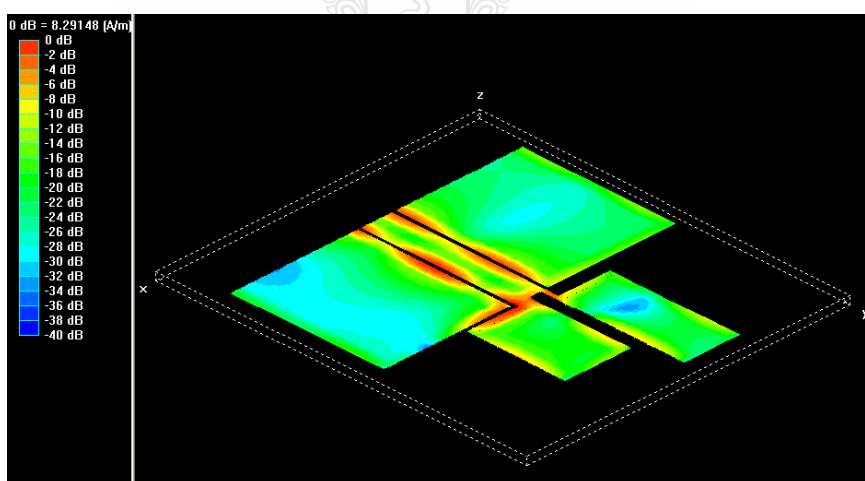
ภาพที่ 3.13 ทิศทางกระแสจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2.4 GHz ในระนาบ 2 มิติ



ภาพที่ 3.14 ความหนาแน่นกระแสจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2.4 GHz ในระนาบ 3 มิติ



ภาพที่ 3.15 ทิศทางกระแสจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม ที่ความถี่ 5.2 GHz ในระนาบ 2 มิติ



ภาพที่ 3.16 ความหนาแน่นกระแสจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม ที่ความถี่ 5.2 GHz ในระนาบ 3 มิติ

จากภาพที่ 3.13-3.16 แสดงทิศทางและความหนาแน่นกระแสจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ตามลำดับซึ่งจะสังเกตได้จากขนาดของลูกศรที่แสดงอยู่ภายในตัวสายอากาศโดยลูกศรที่มีขนาดใหญ่จะมี

ความสัมพันธ์กับความหนาแน่นกระแสของตัวสายอากาศที่มีสีแดงเข้มโดยจะอยู่ที่บริเวณจุดป้อนสัญญาณ

3.1.3 การออกแบบและสร้างสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม

หลังจากได้ทำการวิเคราะห์การจำลองแบบด้วยโปรแกรม IE3D จนได้ขนาดของโครงสร้างสายอากาศที่เหมาะสมที่สุดแล้วนำค่าที่ได้มาสร้างเป็นสายอากาศจะได้ค่าดังนี้

$$W = 27.5 \text{ mm}$$

$$l_1 = 29 \text{ mm}$$

$$L = 29.5 \text{ mm}$$

$$l_2 = 22 \text{ mm}$$

$$w_f = 6.8 \text{ mm}$$

$$g = 0.5 \text{ mm}$$

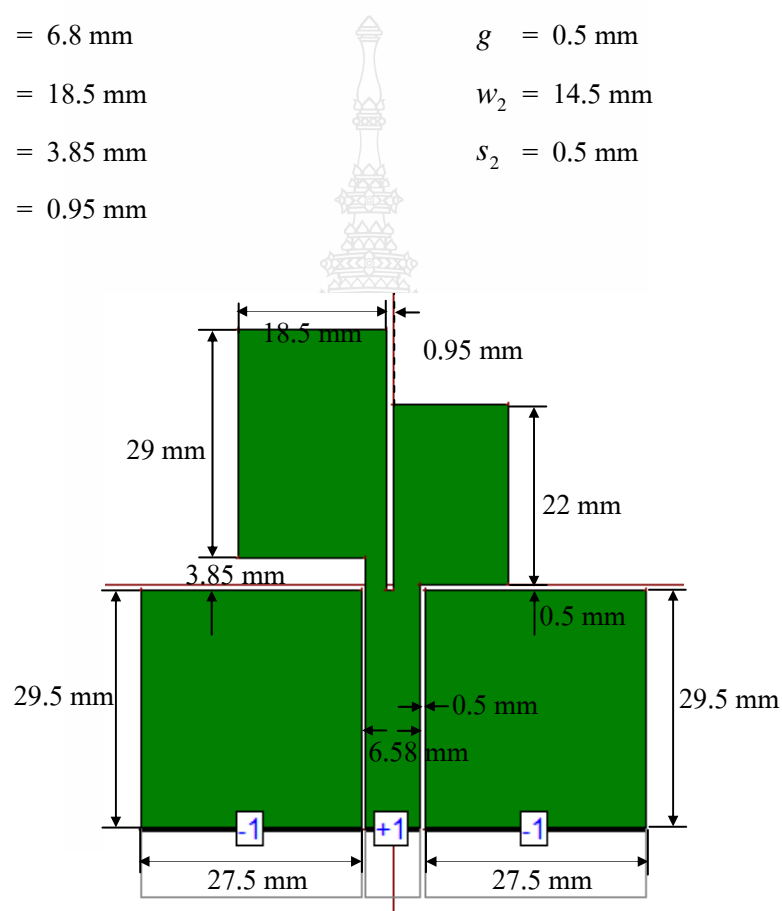
$$w_1 = 18.5 \text{ mm}$$

$$w_2 = 14.5 \text{ mm}$$

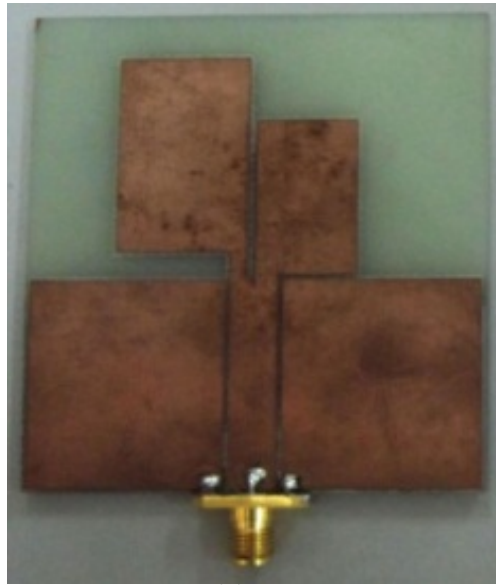
$$s_1 = 3.85 \text{ mm}$$

$$s_2 = 0.5 \text{ mm}$$

$$d = 0.95 \text{ mm}$$



ภาพที่ 3.17 ภาพชิ้นงานของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ได้จากโปรแกรม IE3D



ภาพที่ 3.18 ภาพชิ้นงานจริงของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม

นำค่าที่ได้จากการจำลองแบบที่เหมาะสมมาแปลงเป็นค่าความยาวคลื่นที่ความถี่ 2.4 GHz

$$W = 0.3236 \lambda$$

$$l_1 = 0.3412 \lambda$$

$$L = 0.3471 \lambda$$

$$l_2 = 0.2588 \lambda$$

$$w_f = 0.08 \lambda$$

$$g = 0.0058 \lambda$$

$$w_1 = 0.2177 \lambda$$

$$w_2 = 0.1706 \lambda$$

$$s_1 = 0.0453 \lambda$$

$$s_2 = 0.0058 \lambda$$

$$d = 0.0111 \lambda$$

นำค่าที่ได้จากการจำลองที่เหมาะสมมาแปลงเป็นค่าความยาวคลื่นที่ความถี่ 5.2 GHz

$$W = 0.7011 \lambda$$

$$l_1 = 0.7394 \lambda$$

$$L = 0.7521 \lambda$$

$$l_2 = 0.5609 \lambda$$

$$w_f = 0.1733 \lambda$$

$$g = 0.0127 \lambda$$

$$w_1 = 0.4717 \lambda$$

$$w_2 = 0.3697 \lambda$$

$$s_1 = 0.0981 \lambda$$

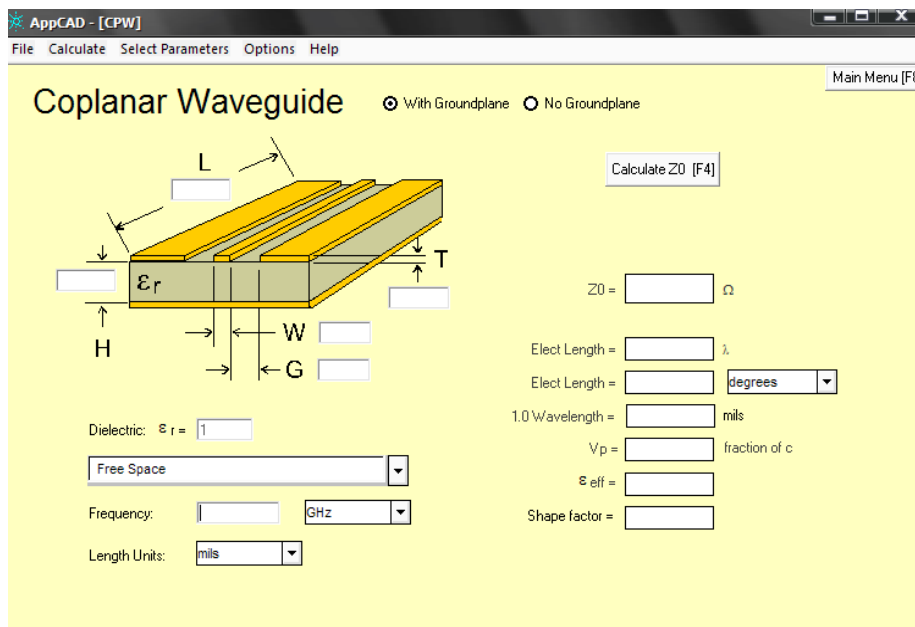
$$s_2 = 0.0127 \lambda$$

$$d = 0.0242 \lambda$$

3.2 การออกแบบสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยม

3.2.1 การออกแบบสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2.4 GHz

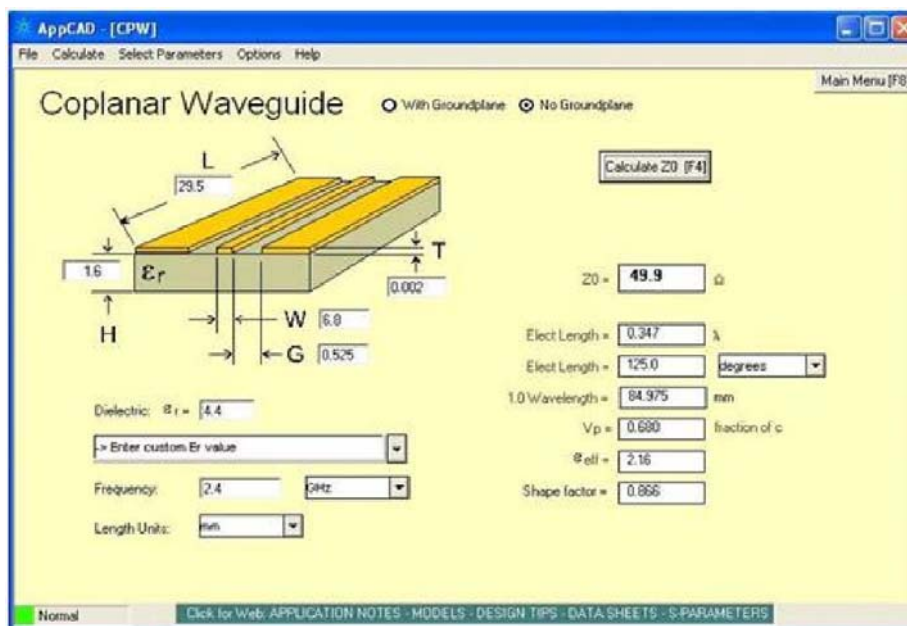
การออกแบบจะใช้โปรแกรม AppCAD for Windows ดังภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 โปรแกรม AppCAD for Windows

โดยทำการกำหนดค่าต่างๆสำหรับการคำนวณด้วยโปรแกรม AppCAD for Windows ดังนี้

ความกว้างของสตริป (W)	= 6.8 mm
ความกว้างระหว่างสตริปถึงระนาบกราวด์ (G)	= 0.5 mm
ความหนาของทองแดง (T)	= 0.002 mm
ความสูงของฐานรองไดอิเล็กตริก (H)	= 1.6 mm
ความยาว (L_1)	= 29.5 mm
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r)	= 4.4
ค่าการสูญเสียแทนเจนซ์ ($\tan \delta$)	= 0.02
ความถี่	= 2.4 GHz



ภาพที่ 3.20 การคำนวณของโปรแกรม AppCAD for windows แพทช์รูปสามเหลี่ยม

จากการคำนวณของโปรแกรม AppCAD for windows จะได้อัตราต่าง ๆ ดังนี้

Z_0 : Transmission line characteristic impedance	= 49.9 ohm
Elect Length: Electrical length of the line as a fraction of wave length	= 0.347 λ
Elect Length: Electrical length of the line in user selected angle units	= 125.0 degrees
Physical Length: Length of one wavelength in use selected length unit	= 84.975 mm
V_p : Velocity of propagation as fraction of c	= 0.680 fraction of c
ϵ_{eff} : Effective dielectric constant	= 2.16
Shape factor : Line width [linewidth + (2 x gap spacing)]	= 0.866

ความกว้างของตัวสายอากาศ (w_1) หาได้จากสมการ 3.1 ($j=0.6$) [14]

$$w_1 = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} x (j)$$

โดยที่

- c คือ ความเร็วแสง (ประมาณ 3×10^8 m/s)
 f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการออกแบบ
 ϵ_{eff} คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล
 ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง
 J คือ factor ของแผ่นปรีนที่นำมาทำสายอากาศ

$$w_1 = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.4 \times 10^9} \sqrt{\frac{2}{4.4 + 1}} \times 0.6$$

$$\approx 22.8 \text{ mm}$$

3.2.2 การออกแบบสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 5.2 GHz

โดยทำการกำหนดค่าต่างๆสำหรับการคำนวณด้วยโปรแกรม AppCAD for windows ดังนี้

ความกว้างของสตริป (w)	= 6.8 mm
ความกว้างระหว่างสตริปถึงระนาบกราวด์ (G)	= 0.5 mm
ความหนาของทองแดง (T)	= 0.002 mm
ความสูงของฐานรองไดอิเล็กตริก (H)	= 1.6 mm
ความยาว (l_2)	= 22 mm
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r)	= 4.4
ค่าการสูญเสียแทนเจนซ์ ($\tan \delta$)	= 0.02
ความถี่	= 5.2 GHz

จากการคำนวณของโปรแกรม App CAD จะได้ค่าต่างๆดังนี้

Z_0	= 49.9 ohm
Elect Length	= 0.752 λ
Elect Length	= 270.8 degrees
Physical Length	= 39.219 mm
V_p	= 0.680 fraction of c
ϵ_{eff}	= 2.16
Shape factor	= 0.866

หาความกว้างของตัวสายอากาศ (w_2) หาได้จากสมการ

$$w_2 = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \times (j)$$

$$w_2 = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 5.2 \times 10^9} \sqrt{\frac{2}{4.4 + 1}} \times 0.6$$

$$\approx 10.5 \text{ mm}$$

จากโปรแกรม AppCAD for Windows จะได้

$$Z_0 = 49.9 \text{ ohm}$$

$$wf = 6.8 \text{ mm}$$

$$G = 0.5 \text{ mm}$$

$$L = 29.5 \text{ mm}$$

ค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g) ได้จากสมการ (3.2)

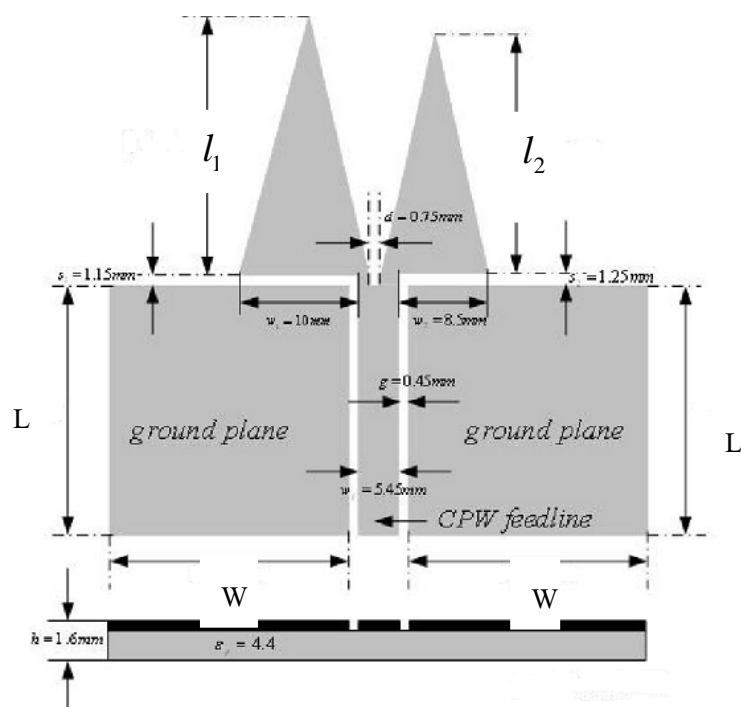
$$\lambda_g = \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

ดังนั้นสามารถหาความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g) ที่ความถี่ 2.4 GHz ได้ดังนี้ ($\epsilon_{eff} = 2.16$)

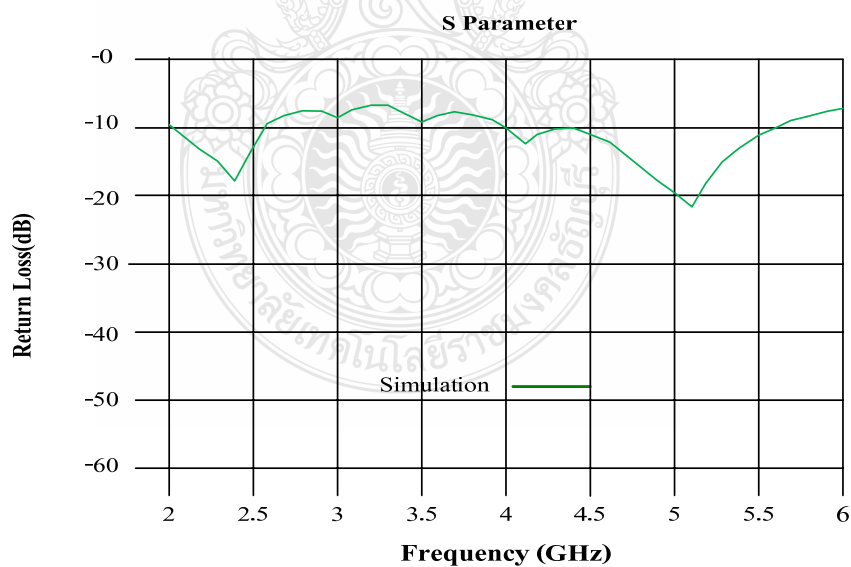
$$\lambda_g = \frac{3 \times 10^8}{2.4 \times 10^9 \sqrt{2.16}}$$

$$= 85.05 \text{ mm}$$

นำค่าที่ได้มาทำการสร้างแบบจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรม IE3D ซึ่งแสดงภาพที่ 3.21 และทำการวิเคราะห์โครงสร้างสายอากาศหาค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) และแบนด์วิดท์ซึ่งแสดงดังภาพที่ 3.22

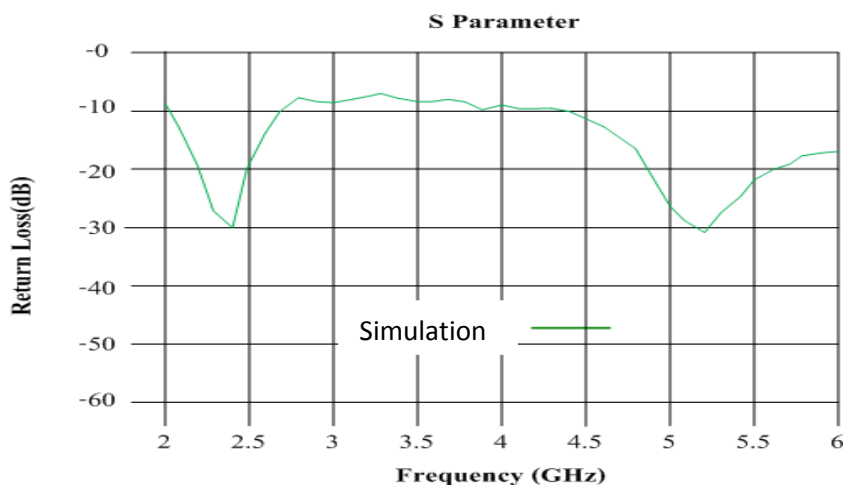


ภาพที่ 3.21 โครงสร้างสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วม

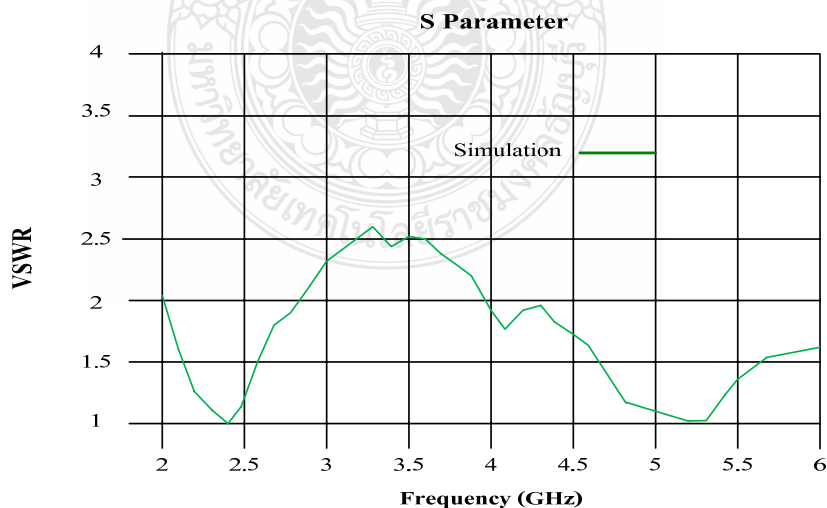


ภาพที่ 3.22 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) จากการจำลองของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วม

จากนั้นทำการปรับเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดโดย $w_1 = 10.0$ mm $w_2 = 8$ mm $l_1 = 34$ mm $l_2 = 31$ mm $w_f = 5.45$ mm $W = 22$ mm $L = 23.5$ mm $g = 0.45$ mm $s_1 = 1.15$ mm $s_2 = 1.25$ mm $d = 0.75$ mm ได้กราฟดังภาพที่ 3.23 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) และ ภาพที่ 3.24 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง

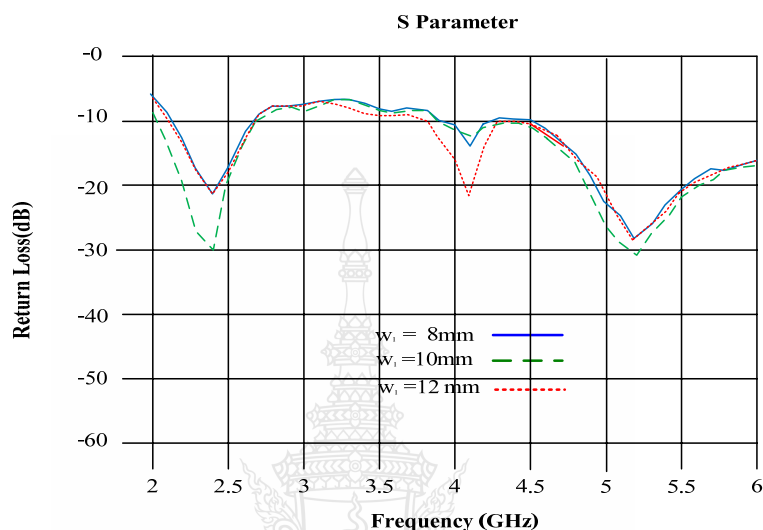


ภาพที่ 3.23 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) ที่ได้จากการปรับเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วม



ภาพที่ 3.24 ผลการจำลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการปรับเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วม

จำลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_1 เมื่อกำหนดให้ $w_f = 5.45$ mm $W = 22$ mm $L = 23.5$ mm $w_2 = 8.5$ mm $g = 0.45$ mm $s_1 = 1.15$ mm $s_2 = 1.25$ mm $l_1 = 29$ mm $l_2 = 34$ mm $d = 0.75$ mm มีผลการจำลองแบบดังภาพที่ 3.25 และผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับจะได้ค่าความถี่กลาง f_1 f_2 และค่าแบนด์วิดท์แสดงดังตารางที่ 3.5



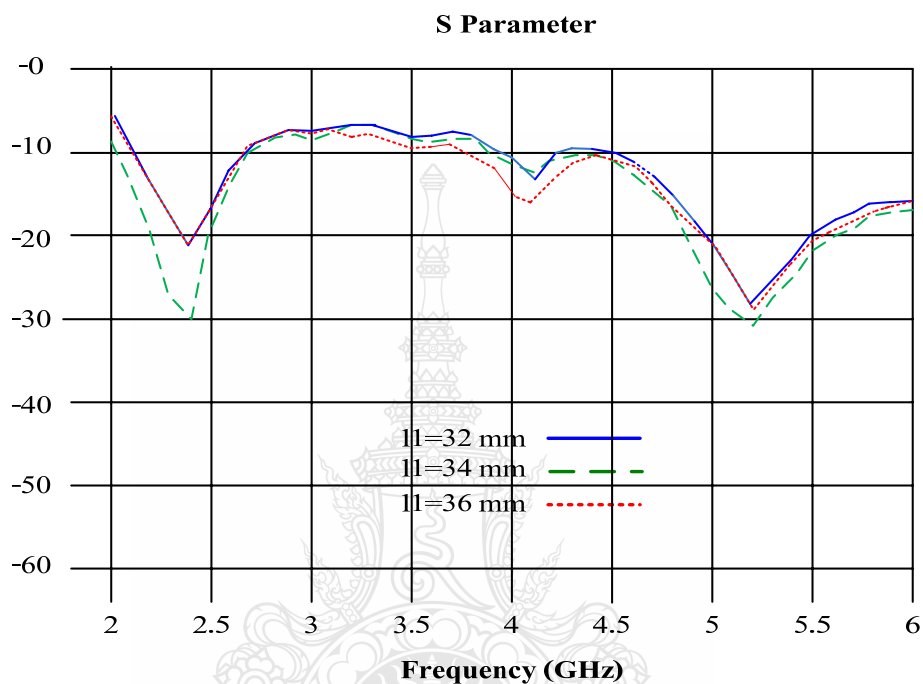
ภาพที่ 3.25 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_1 รูปสามเหลี่ยม

ตารางที่ 3.5 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับโดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_1 รูปสามเหลี่ยม

w_1	f_1 / BW (GHz)	f_2 / BW (GHz)
8 mm	2.4 / 0.45	5.2 / 1.03
10 mm	2.4 / 0.66	5.2 / 1.47
12 mm	2.4 / 0.63	5.2 / 1.46

ผลการจำลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_1 จะมีผลต่อค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ดี สังเกตเห็นได้ว่าที่ค่า $w_1 = 10.0$ mm นั้นจะมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ดีที่สุดและมีผลค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศเป็นผลตอบสนองแบบสองความถี่

จำลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_1 เมื่อกำหนดให้ $w_f = 5.45$ mm $W = 22$ mm $L = 23.5$ mm $w_1 = 10$ mm $w_2 = 8.5$ mm $g = 0.45$ mm $s_1 = 1.15$ mm $s_2 = 1.25$ mm $l_2 = 31$ mm $d = 0.75$ mm มีผลการจำลองแบบดังภาพที่ 3.26 และผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับจะได้ค่าความถี่กลาง f_1 f_2 และค่าแบนด์วิดท์แสดงดังตารางที่ 3.6



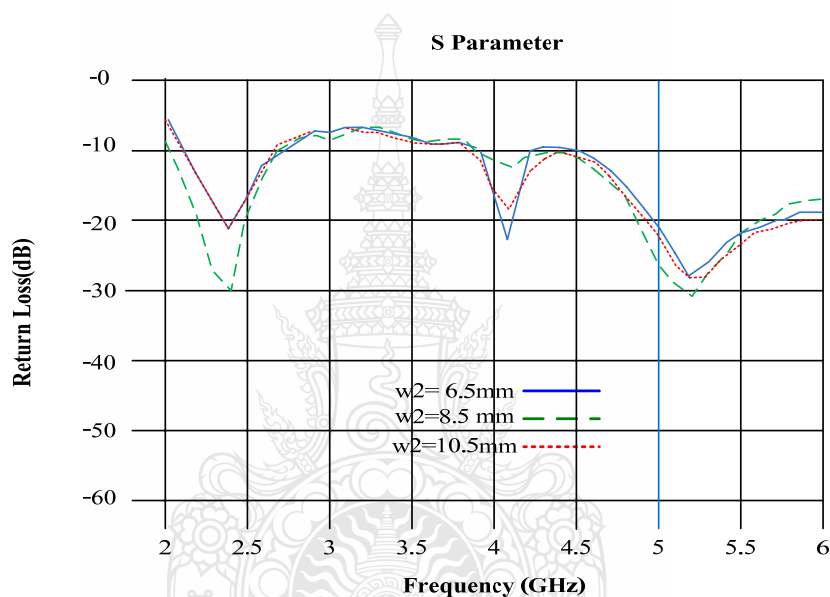
ภาพที่ 3.26 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_1 รูปสามเหลี่ยม

ตารางที่ 3.6 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับโดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_1 รูปสามเหลี่ยม

l_1	f_1 / BW (GHz)	f_2 / BW (GHz)
32 mm	2.4 / 0.64	5.2 / 1.39
34 mm	2.4 / 0.66	5.2 / 1.47
36 mm	2.4 / 0.66	5.2 / 1.45

ผลการจำลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_1 สังเกตได้ว่าที่ค่า $l_1 = 34$ mm นั้นจะมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ดีที่สุดและมีผลค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศมีค่าสม่ำเสมอเป็นผลตอบสนองแบบสองความถี่

จำลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_2 เมื่อกำหนดให้ $w_f = 5.45$ mm $W = 22$ mm $L = 23.5$ mm $w_1 = 10$ mm $g = 0.45$ mm $s_1 = 1.15$ mm $s_2 = 1.25$ mm $l_1 = 34$ mm $l_2 = 31$ mm $d = 0.75$ mm มีผลการจำลองแบบดังภาพที่ 3.27 และผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับจะได้ค่าความถี่กลาง f_1 f_2 และค่าแบนด์วิดท์แสดงดังตารางที่ 3.7

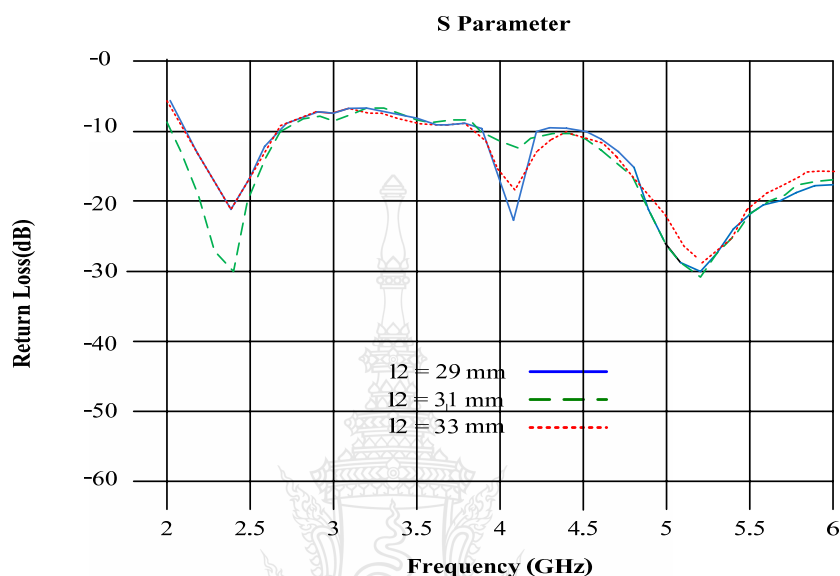


ภาพที่ 3.27 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_2 รูปสามเหลี่ยม

ตารางที่ 3.7 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับโดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_2 รูปสามเหลี่ยม

w_2	f_1 / BW (GHz)	f_2 / BW (GHz)
6.5 mm	2.4 / 0.64	5.2 / 1.32
8.5 mm	2.4 / 0.66	5.2 / 0.47
10.5 mm	2.4 / 0.64	5.2 / 1.44

จำลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_2 เมื่อกำหนดให้ $w_f = 5.45$ mm $W = 22$ mm $L = 23.5$ mm $w_1 = 10$ mm $w_2 = 8.5$ mm $g = 0.45$ mm $s_1 = 1.15$ mm $s_2 = 1.25$ mm $l_1 = 34$ mm, $d = 0.75$ mm มีผลการจำลองแบบดังภาพที่ 3.28 และผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับจะได้ค่าความถี่กลาง f_1 f_2 และค่าแบนด์วิดท์แสดงดังตารางที่ 3.8

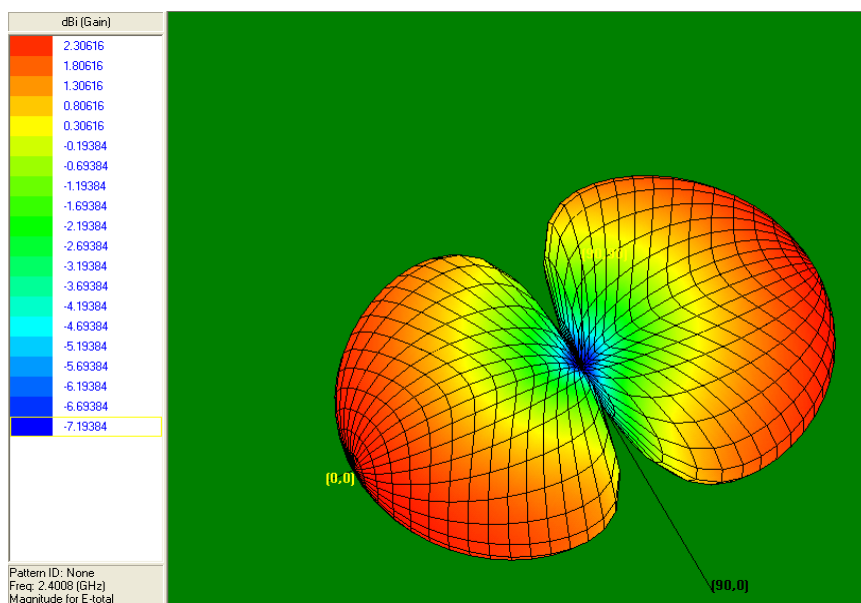


ภาพที่ 3.28 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_2 รูปสามเหลี่ยม

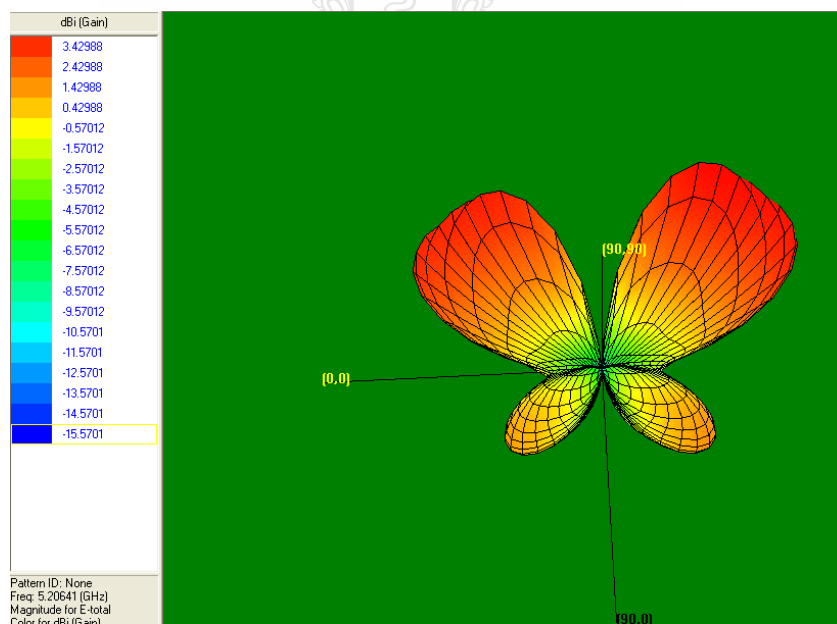
ตารางที่ 3.8 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับโดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_2 รูปสามเหลี่ยม

l_2	f_1 / BW (GHz)	f_2 / BW (GHz)
29 mm	2.4 / 0.63	5.2 / 1.43
31 mm	2.4 / 0.66	5.2 / 0.47
33 mm	2.4 / 0.65	5.2 / 1.39

ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่สร้างขึ้นสรุปได้ว่าเป็นสายอากาศชนิดที่มีลักษณะการโพลาไรซ์เซชันเป็นแบบเส้นตรง (Linearly polarization) ที่มีสองทิศทางตามแนวแกน $x - z$ (0-180 องศา) โดยมีอัตราขยายประมาณ 5.3 dB จากการจำลองซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการจำลอง

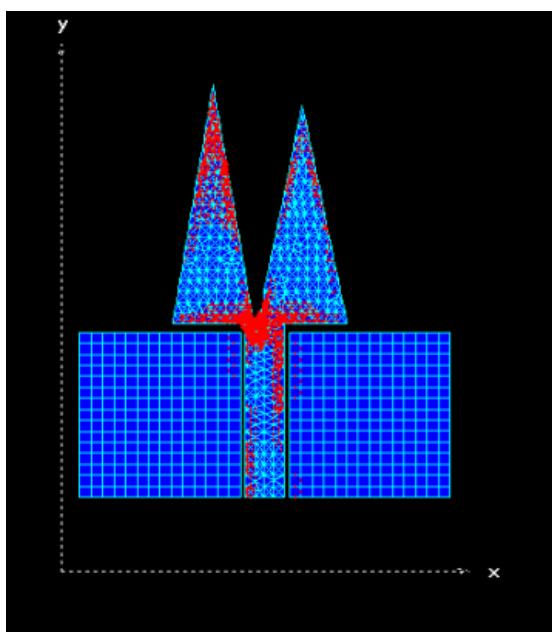


ภาพที่ 3.29 แบบภาพการแผ่พลังงานจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยม แบบ
ระนาบร่วมที่ความถี่ 2.4 GHz ในระนาบ 3 มิติ

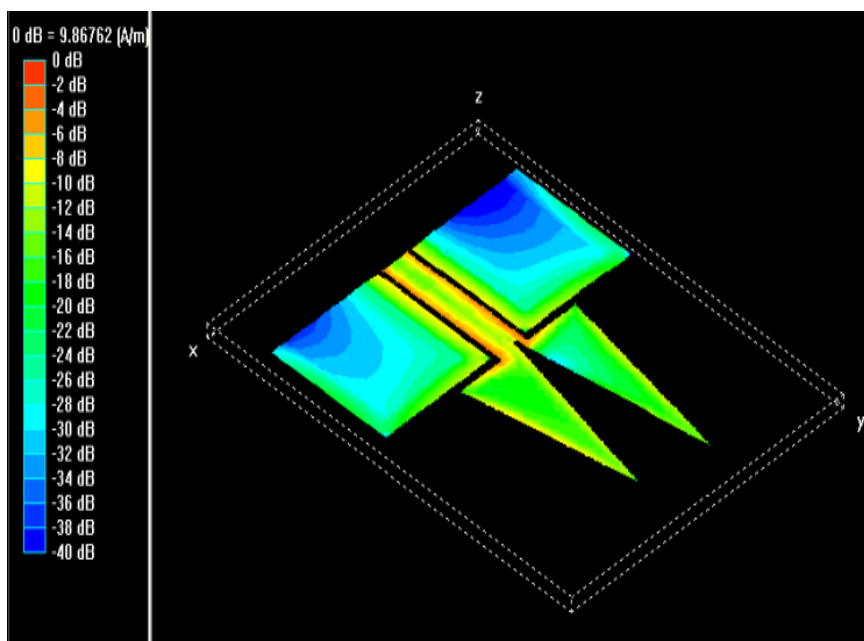


ภาพที่ 3.30 แบบรูปการแผ่พลังงานจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยม
แบบระนาบร่วมที่ความถี่ 5.2 GHz ในระนาบ 3 มิติ

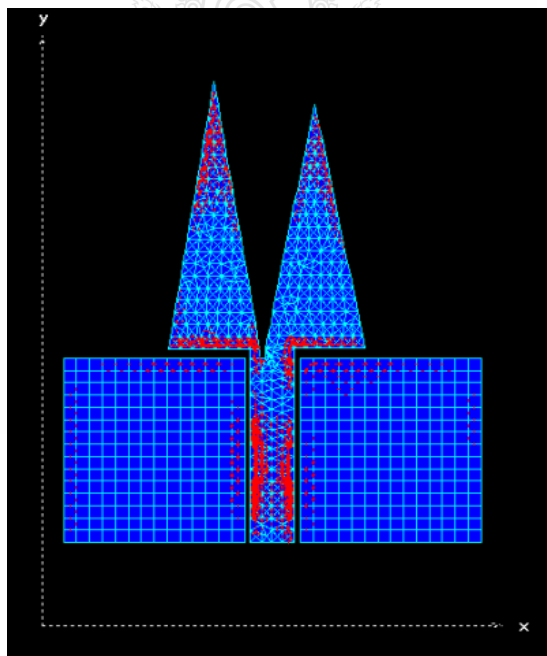
จากภาพที่ 3.29 และภาพที่ 3.30 เป็นแบบภาพการแผ่พลังงานจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz ในระนาบ 3 มิติ จะเห็นว่าการแผ่พลังงานได้ดีที่มุม 30 องศาและมุม 150 องศา ซึ่งจากรูปของผลการจำลองจะเห็นว่าที่ความถี่ 2.4 GHz จะมีอัตราการขยายของสัญญาณประมาณ 2.31 dBi และที่ความถี่ 5.2 GHz มีอัตราการขยายของสัญญาณประมาณ 1.81 dBi โดยสังเกตได้จากระดับความเข้มของสีของแบบภาพการแผ่พลังงานในระนาบ 3 มิติ จะเป็นสีแดงเข้ม



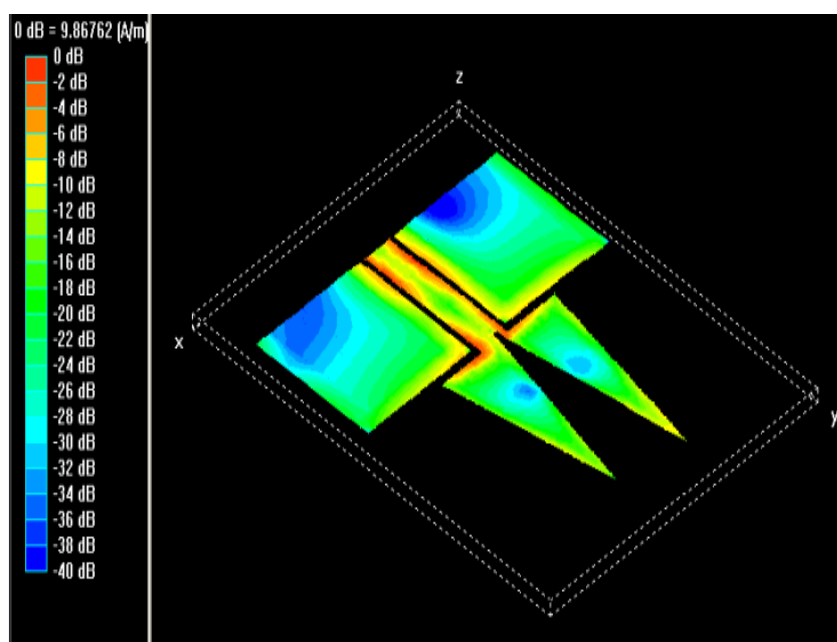
ภาพที่ 3.31 ทิศทางกระแสดจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2.4 GHz ในระนาบ 2 มิติ



ภาพที่ 3.32 ความหนาแน่นกระแสจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยม
แบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2.4 GHz ในระนาบ 3 มิติ



ภาพที่ 3.33 ทิศทางกระแสจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยม
แบบระนาบร่วมที่ความถี่ 5.2 GHz ในระนาบ 2 มิติ



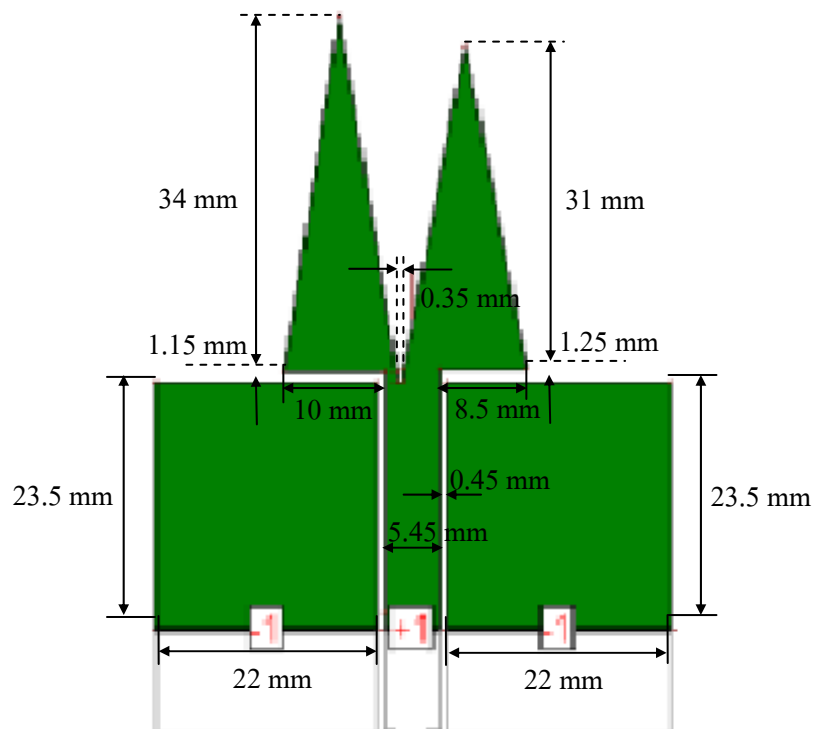
ภาพที่ 3.34 ความหนาแน่นกระแสจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 5.2 GHz ในระนาบ 3 มิติ

จากภาพที่ 3.31 - 3.34 แสดงทิศทางและความหนาแน่นกระแสจากการจำลองแบบของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับซึ่งจะสังเกตได้จากขนาดของลูกศรที่แสดงอยู่ภายในตัวสายอากาศโดยลูกศรที่มีขนาดใหญ่จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นกระแสของตัวสายอากาศที่มีสีแดงเข้มโดยจะอยู่ที่บริเวณจุดป้อนสัญญาณ

3.2.3 การออกแบบและการสร้างสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วม

หลังจากได้ทำการวิเคราะห์การจำลองแบบด้วยโปรแกรม IE3D จนได้ขนาดของโครงสร้างสายอากาศที่เหมาะสมที่สุดแล้วนำค่าที่ได้มาสร้างเป็นสายอากาศจะได้ค่าดังนี้

$W = 22 \text{ mm}$	$l_1 = 34 \text{ mm}$
$L = 23.5 \text{ mm}$	$l_2 = 31 \text{ mm}$
$w_f = 5.45 \text{ mm}$	$g = 0.45 \text{ mm}$
$w_1 = 10 \text{ mm}$	$w_2 = 8.5 \text{ mm}$
$s_1 = 1.15 \text{ mm}$	$s_2 = 1.25 \text{ mm}$
$d = 0.75 \text{ mm}$	



ภาพที่ 3.35 ภาพชิ้นงานของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ได้จากโปรแกรม IE3D



ภาพที่ 3.36 ภาพชิ้นงานจริงของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วม

นำค่าที่ได้จากการจำลองแบบที่เหมาะสมมาแปลงเป็นค่าความยาวคลื่นที่ความถี่ 2.4 GHz

$$W = 0.2637 \lambda \quad l_1 = 0.4076 \lambda$$

$$L = 0.2817 \lambda \quad l_2 = 0.3716 \lambda$$

$$w_f = 0.0653 \lambda \quad g = 0.0053 \lambda$$

$$w_1 = 0.1198 \lambda \quad w_2 = 0.1019 \lambda$$

$$s_1 = 0.0137 \lambda \quad s_2 = 0.0149 \lambda$$

$$d = 0.0089 \lambda$$

นำค่าที่ได้จากการจำลองที่เหมาะสมมาแปลงเป็นค่าความยาวคลื่นที่ความถี่ 5.2 GHz

$$W = 0.5714 \lambda \quad l_1 = 0.8831 \lambda$$

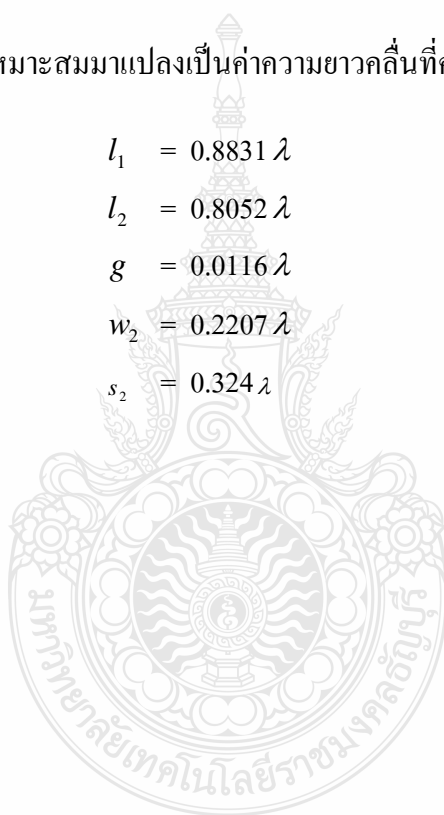
$$L = 0.6104 \lambda \quad l_2 = 0.8052 \lambda$$

$$w_f = 0.1415 \lambda \quad g = 0.0116 \lambda$$

$$w_1 = 0.2597 \lambda \quad w_2 = 0.2207 \lambda$$

$$s_1 = 0.0298 \lambda \quad s_2 = 0.324 \lambda$$

$$d = 0.0194 \lambda$$



บทที่ 4

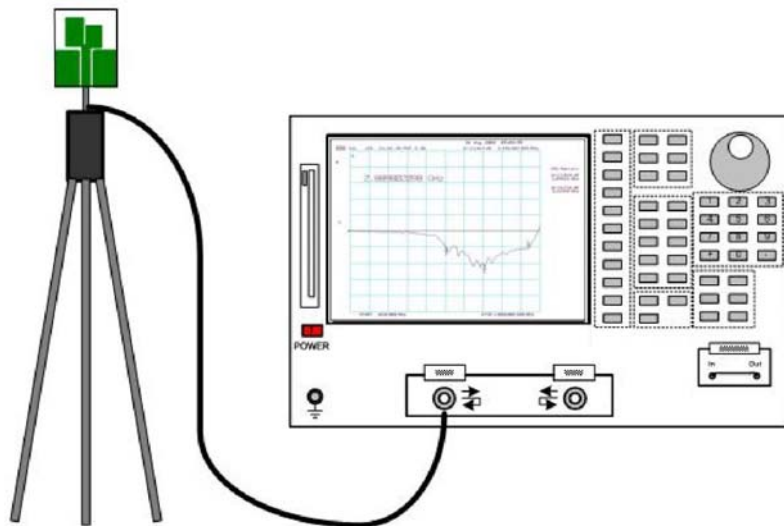
การทดสอบและผลการทดสอบสายอากาศ

สำหรับการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศที่ได้ทำการสร้างขึ้นนั้นจะแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ การทดสอบวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับอิมพีแดนซ์ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และการทดสอบวัดแบบภาพการแผ่พลังงานของสายอากาศ

4.1 สายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม

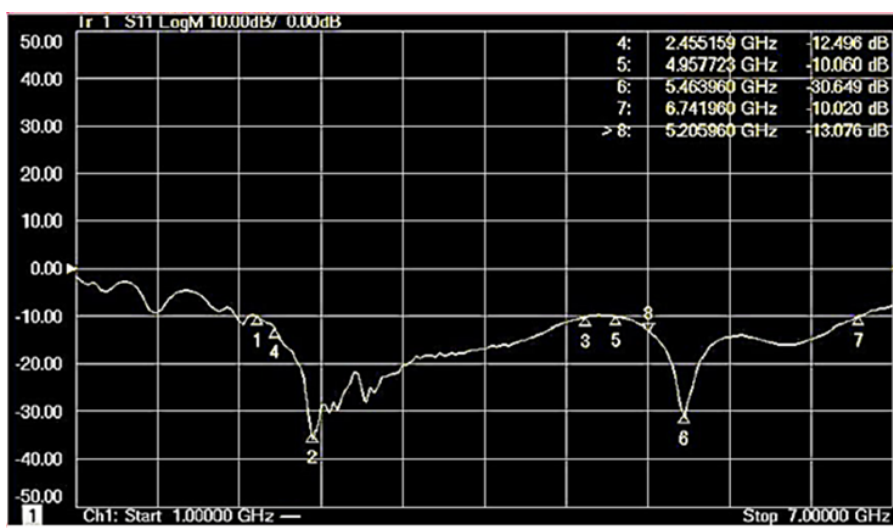
4.1.1 การทดสอบวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับอิมพีแดนซ์และอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยม

สำหรับวิธีการทดสอบทำการต่อสายอากาศเข้ากับเครื่องวิเคราะห์ข่ายงานไฟฟ้า (Network analyzer) ยี่ห้อ Agilent รุ่น N5230C โดยทำการป้อนสัญญาณอยู่ในช่วง 1 GHz ถึง 7 GHz โดยการต่ออุปกรณ์ดังในภาพที่ 4.1



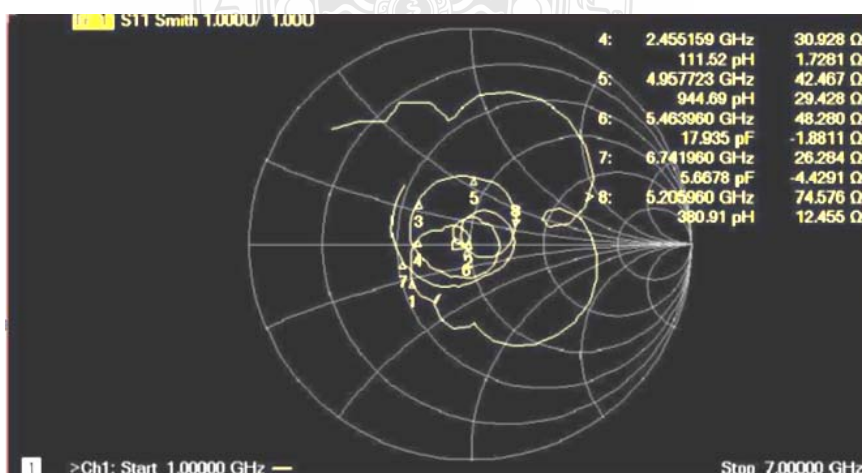
ภาพที่ 4.1 การต่ออุปกรณ์เพื่อใช้วัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับอิมพีแดนซ์และอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน

ผลการวัดค่าจากเครื่องมือวัดเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย (Network analyzer)



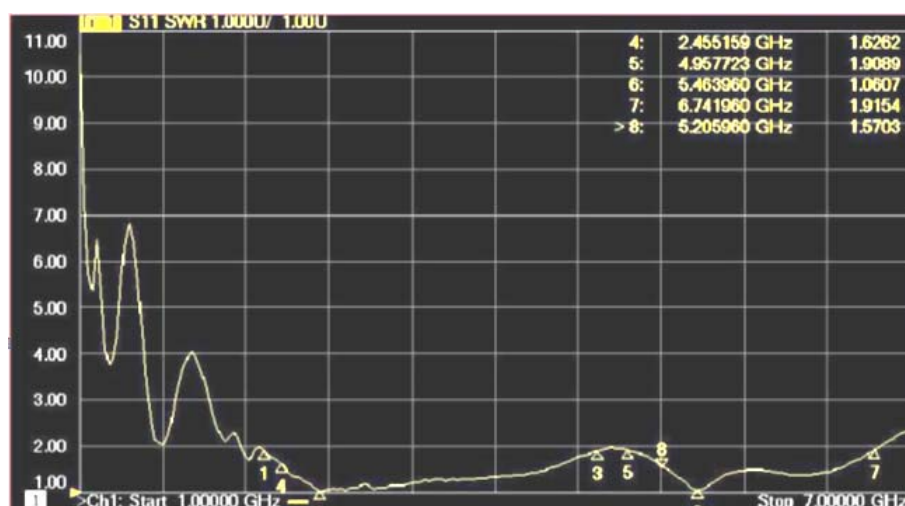
ภาพที่ 4.2 ผลการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมในย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz

จากภาพที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงผลการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ที่ย่าน 2.331-4.739 GHz และที่ย่านความถี่ 4.957 - 6.741 GHz



ภาพที่ 4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม ที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz

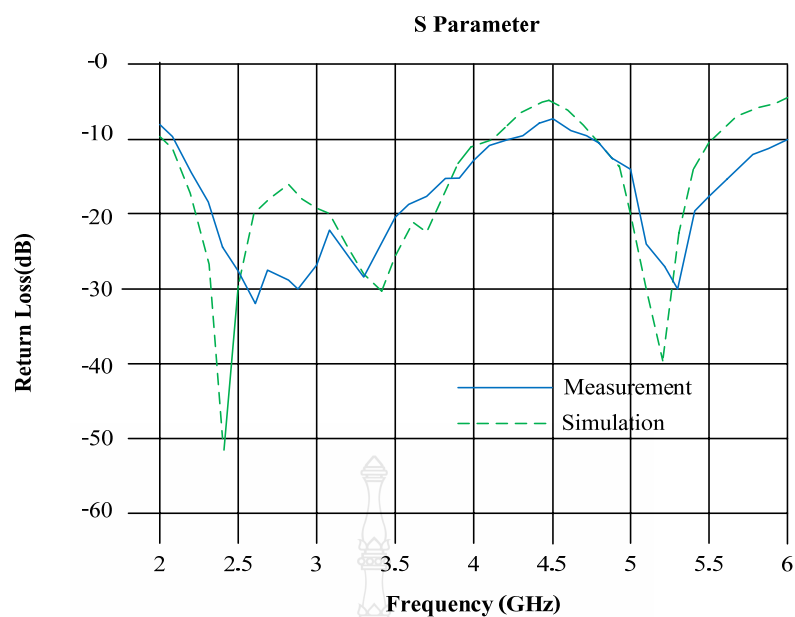
จากภาพที่ 4.3 มีค่าการทำงานของอิมพีแดนซ์อยู่ที่ 30.90 โอห์มที่ความถี่ 2.45 GHz และมีค่าการทำงานของอิมพีแดนซ์อยู่ที่ 74.63 โอห์มที่ความถี่ 5.20 GHz ซึ่งแสดงถึงผลของการแมตซ์อิมพีแดนซ์ (Impedance matching) ของสายอากาศแพทช์แพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม



ภาพที่ 4.4 ค่าการทำงานของอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ที่ย่าน 2.331- 4.739 GHz และที่ย่านความถี่ 4.957- 6.741 GHz

จากภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงผลของการวัดของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 1 GHz - 7 GHz มีค่าการทำงานของอัตราคลื่นนิ่งต่ำกว่า 2 ที่ย่านความถี่ 2.331 GHz - 4.739 GHz และที่ย่านความถี่ 4.957 GHz - 6.74 GHz

ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมดังภาพที่ 4.5

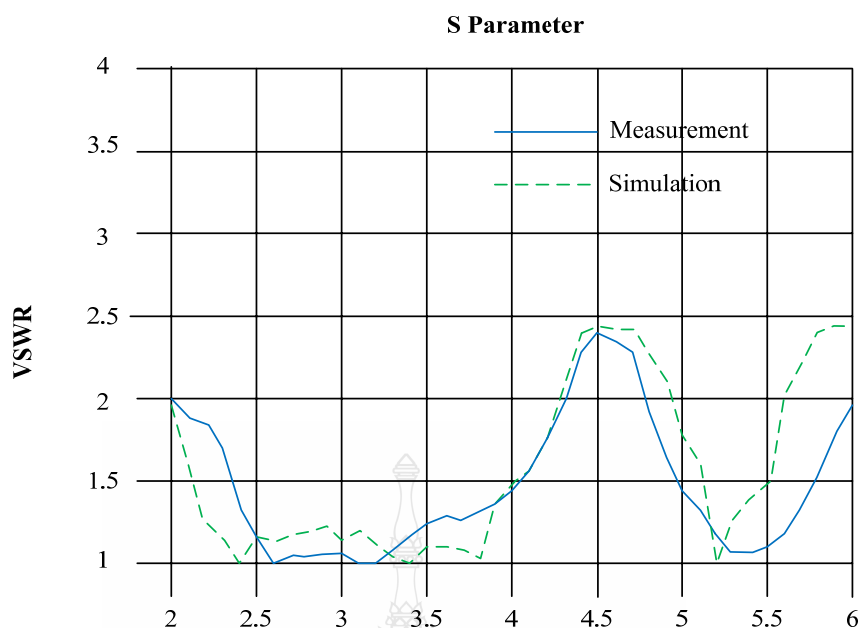


ภาพที่ 4.5 การเปรียบเทียบการจำลองของค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับกับการวัด
ชิ้นงานจริงของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม

จากภาพที่ 4.5 ผลที่ได้จากการวัดชิ้นงานเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบการ
จำลองมีค่าความสูญเสียย้อนกลับที่น้อย

ตารางที่ 4.1 ผลเปรียบเทียบการจำลองกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยม
แบบระนาบร่วม

สายอากาศแพทช์ รูปสี่เหลี่ยม	f_1 (GHz)	BW at -10 dB (GHz)	f_2 (GHz)	BW at -10 dB (GHz)
ผลจากการจำลอง	2.4	2.18 GHz	5.2	0.75 GHz
ชิ้นงานจริง	2.4	2.15 GHz	5.2	1.25 GHz

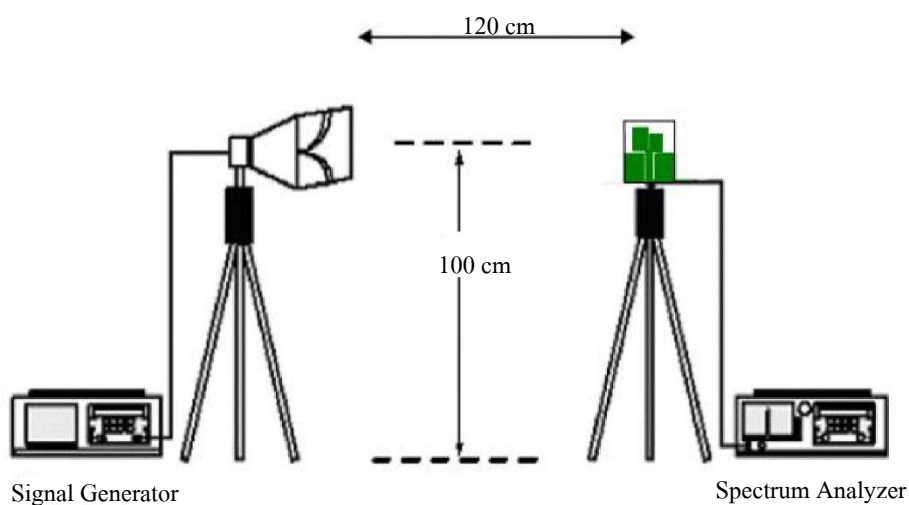


ภาพที่ 4.6 การเปรียบเทียบการจำลองของอัตราส่วนคลื่นนิ่งกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2 GHz - 6 GHz

จากภาพที่ 4.6 ผลที่ได้จากการวัดชิ้นงานจริงโดยการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองของอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ย่านความถี่ 2.331- 4.739 GHz และที่ย่านความถี่ 4.957 - 6.741 GHz

4.1.2 การทดสอบวัดแบบภาพการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยม

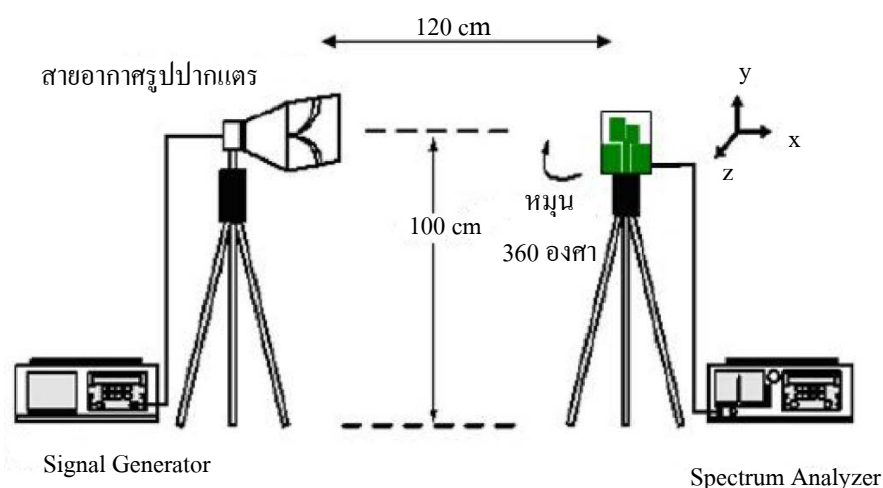
การวัดแบบภาพการแผ่พลังงานของสายอากาศโดยต่ออุปกรณ์ตามภาพที่ 4.7 โดยที่เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่สูง (Radio frequency signal generator) ตั้งความถี่ไว้ที่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz ส่งกำลังคลื่นออกไป 0 dBm โดยผ่านสายอากาศรูปปากแตร (Horn Antenna) ไปยังสายอากาศตัวรับสัญญาณ ซึ่งเป็นสายอากาศที่จะทำการทดสอบและผ่านสายเข้าเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum analyzer) ยี่ห้อ Agilent รุ่น E4407B ซึ่งจะแสดงค่าความแรงของสัญญาณความถี่สูงที่รับได้สำหรับตำแหน่งความสูงของสายอากาศทั้งสองมีค่าเท่ากับ 100.00 cm และระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสองมีค่าเท่ากับ 120.00 cm โดยจะทำการหมุนสายอากาศที่ทำการทดสอบตั้งแต่ 0 องศาจนถึง 360 องศา



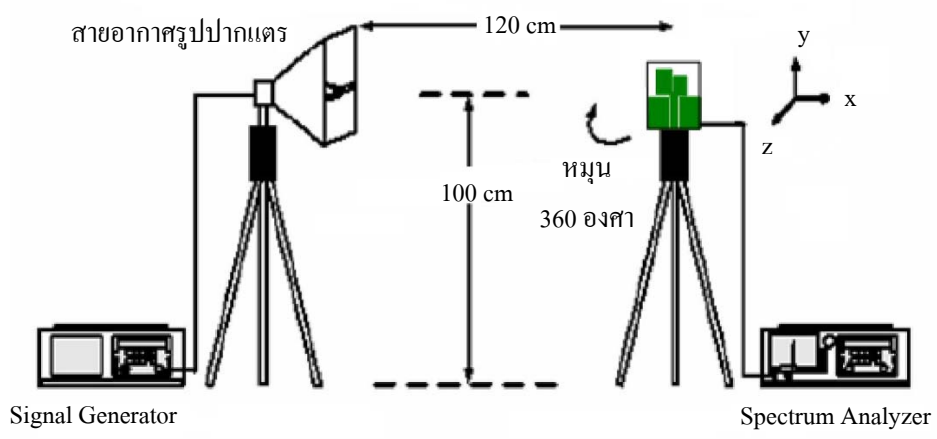
ภาพที่ 4.7 การต่ออุปกรณ์เพื่อใช้วัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยม

การวัดแบบภาพการแผ่พลังงานของสายอากาศจะทำการวัดที่สองระนาบคือระนาบ $x-z$ และระนาบ $y-z$ ซึ่งในแต่ละระนาบจะทำการวัดระดับของสายอากาศที่เป็น โพลาริเซชันเดียวกัน (Co-Polarization) และ โพลาริเซชันไขว้ (Cross-Polarization)

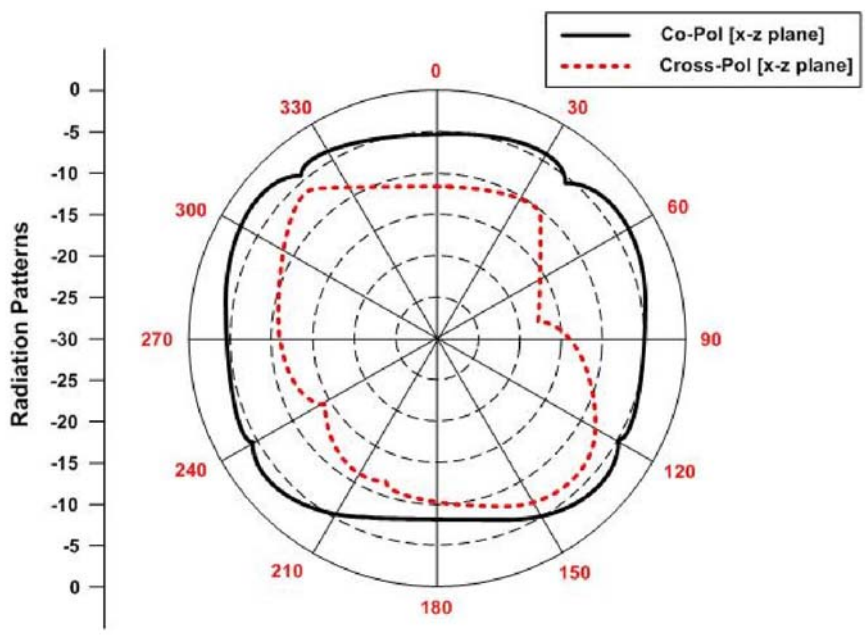
สำหรับภาพที่ 4.8 และภาพที่ 4.9 เป็นการวัดแบบภาพการแผ่พลังงานของสายอากาศระนาบ $x-z$ และภาพที่ 4.10 และภาพที่ 4.11 เป็นผลของการวัดแบบภาพการแผ่พลังงานของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วม



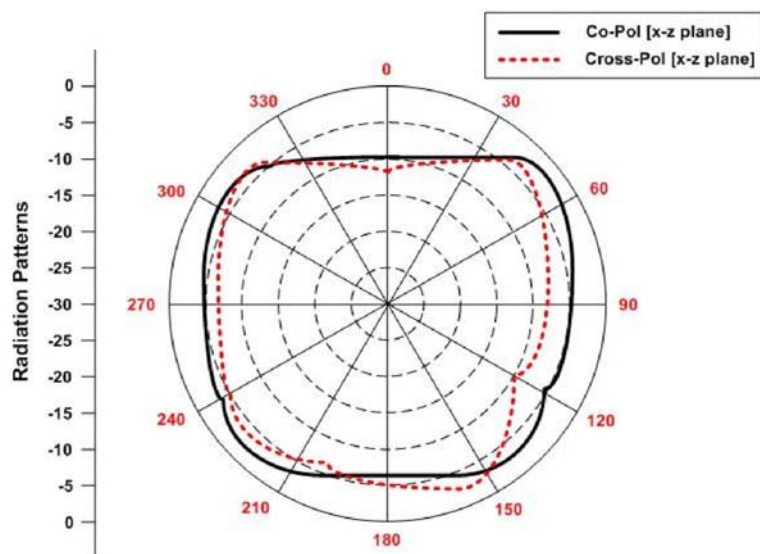
ภาพที่ 4.8 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยม ในแนวระนาบ $x-z$ (Co-Pol)



ภาพที่ 4.9 การต่ออุปกรณ์วัดแบบภาพการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมในแนวระนาบ x-z (Cross-Pol)

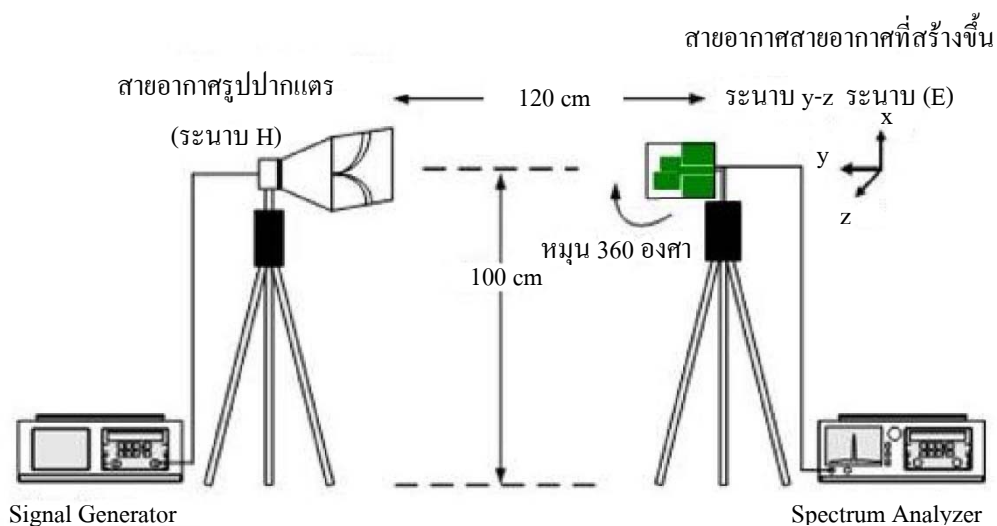


ภาพที่ 4.10 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 2.4 GHz ระนาบ x-z

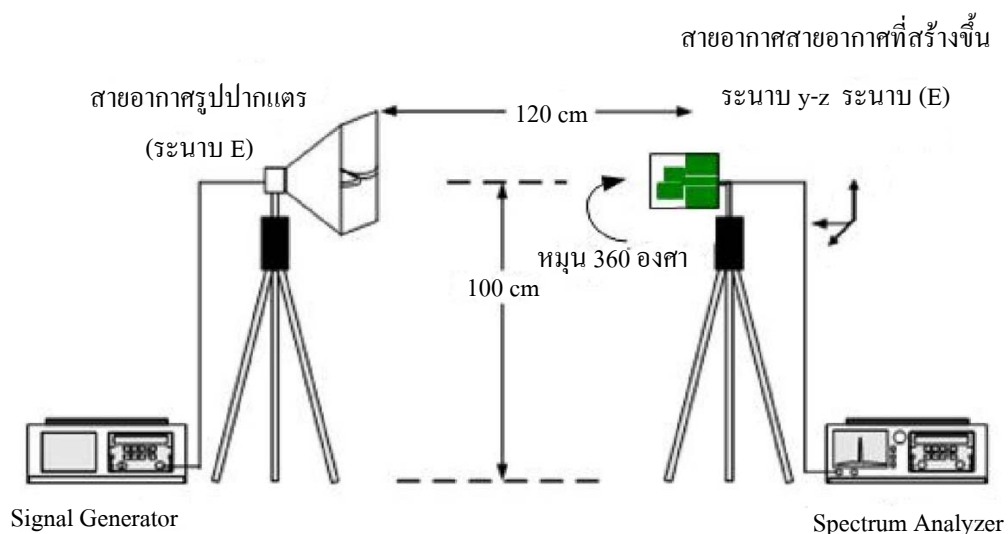


ภาพที่ 4.11 แบบภาพการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 5.2 GHz
ระนาบ x-z

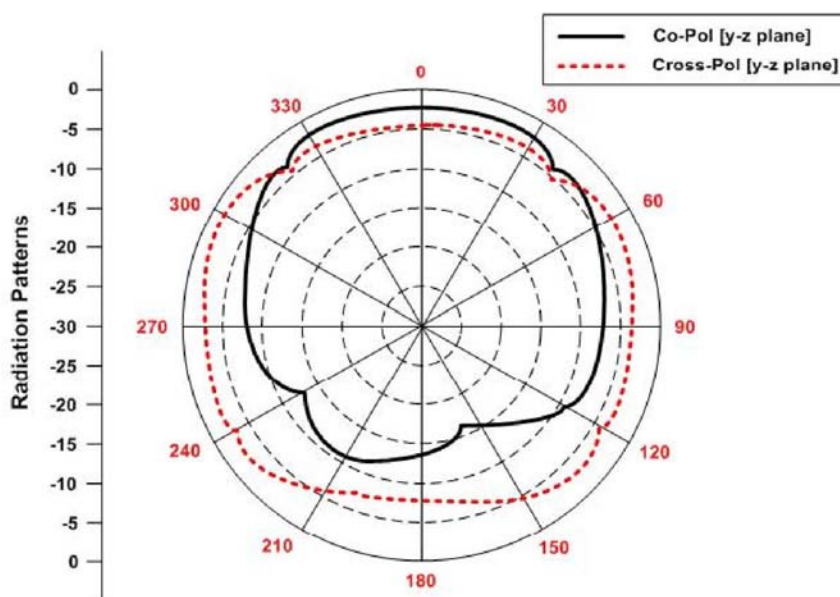
การวัดแบบภาพการแผ่พลังงานของสายอากาศระนาบ y-z ทำการวัดตามภาพที่ 4.12 และภาพที่ 4.13 ผลการวัดแบบภาพการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมตามรภาพที่ 4.14 และภาพที่ 4.15



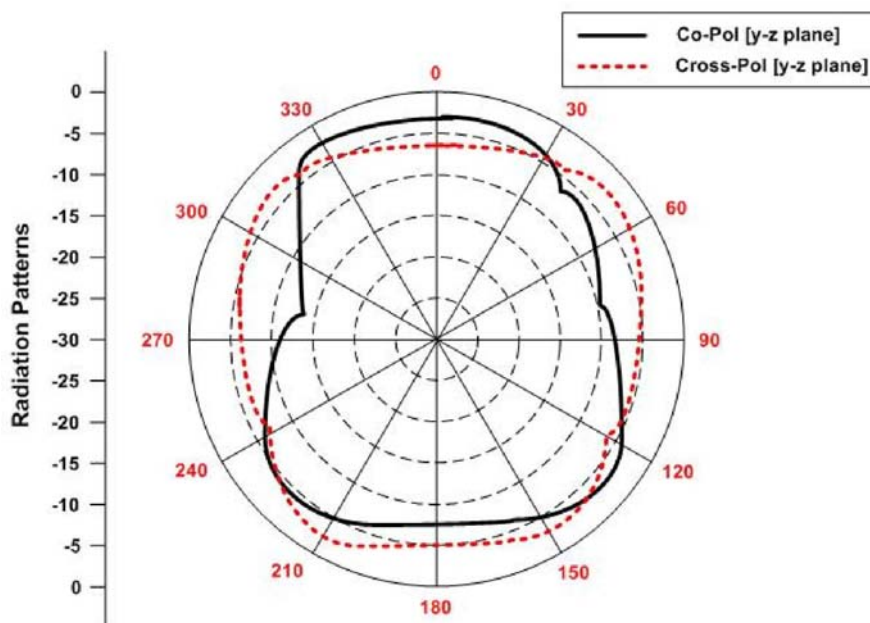
ภาพที่ 4.12 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมในแนว ระนาบ y-z (Co-Pol)



ภาพที่ 4.13 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมในแนวระนาบ y-z (Cross-Pol)



ภาพที่ 4.14 แบบภาพการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 2.4 GHz ระนาบ y-z



ภาพที่ 4.15 แบบภาพการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 5.2 GHz
ระนาบ y-z

4.2 สายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วม

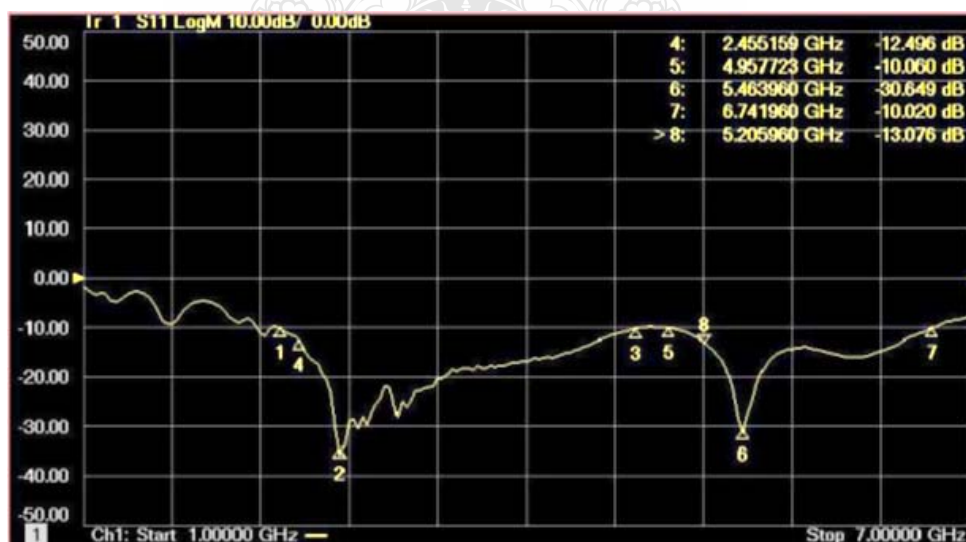
4.2.1 การทดสอบวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับอิมพีแดนซ์และอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยม

สำหรับวิธีการทดสอบทำการต่อสายอากาศเข้ากับเครื่องวิเคราะห์ข่ายงานไฟฟ้า (Network analyzer) ยี่ห้อ Agilent รุ่น N5230C ทำการป้อนสัญญาณอยู่ในช่วง 1 GHz ถึง 7 GHz โดยการต่ออุปกรณ์ดังในภาพที่ 4.16



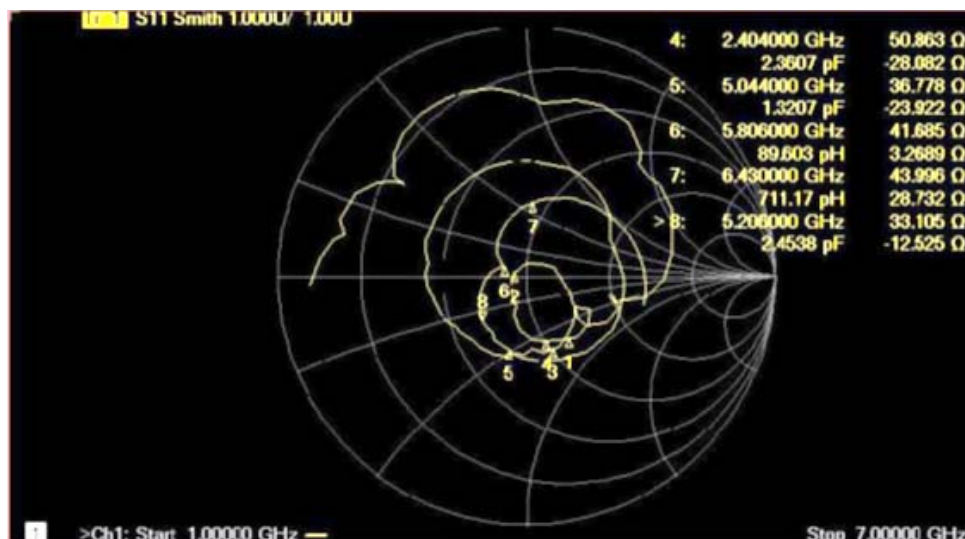
ภาพที่ 4.16 การต่ออุปกรณ์เพื่อใช้วัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับอิมพีแดนซ์ และอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน

สำหรับวิธีการทดสอบทำการต่อสายอากาศกับเครื่องวิเคราะห์ข่ายงานไฟฟ้าผลการวัดค่าจากเครื่องมือวัดเครื่องวิเคราะห์ข่ายงาน (Network analyzer)



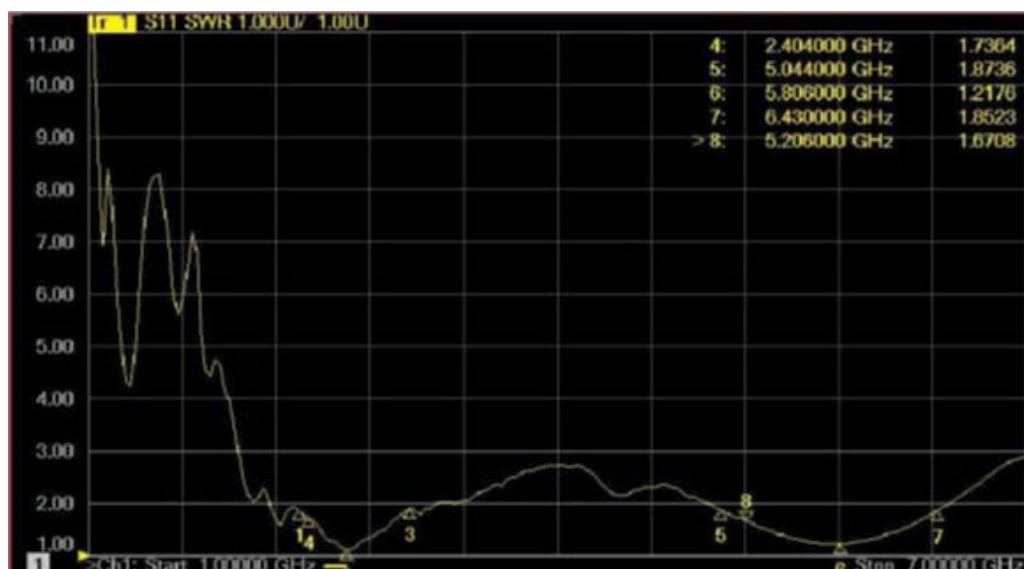
ภาพที่ 4.17 ผลการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมในย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz

จากภาพที่ 4.17 แสดงให้เห็นถึงผลการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ที่ย่าน 2.344-3.052 GHz และที่ย่านความถี่ 5.044 - 6.430 GHz



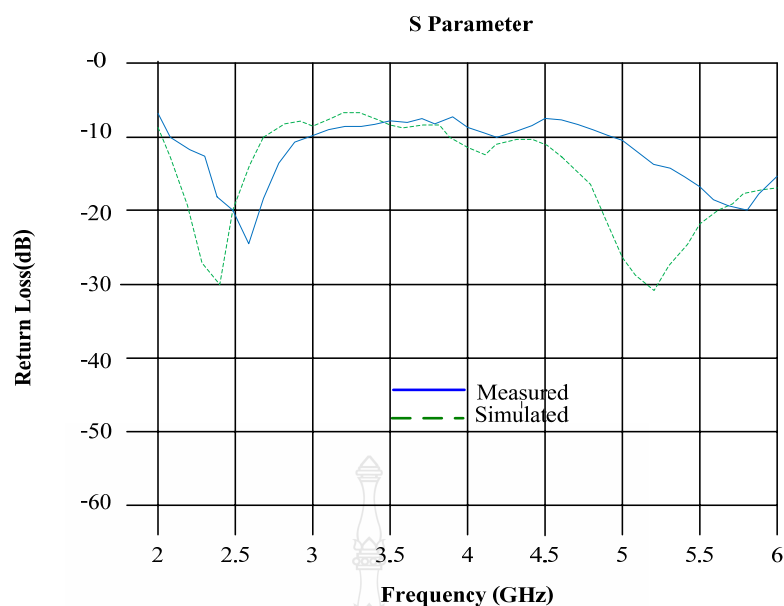
ภาพที่ 4.18 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz

จากภาพที่ 4.18 มีค่าการทำงานของอิมพีแดนซ์อยู่ที่ 50.09 โอห์มที่ความถี่ 2.40 GHz และมีค่าการทำงานของอิมพีแดนซ์อยู่ที่ 33.15 โอห์มที่ความถี่ 5.2 GHz ซึ่งแสดงถึงผลของการแมตซ์อิมพีแดนซ์ (Impedance matching) ของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วม



ภาพที่ 4.19 ค่าการทำงานของอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบ
ระนาบร่วมที่ความถี่ 2.331- 4.739 GHz และที่ย่านความถี่ 4.957- 6.741 GHz

จากภาพที่ 4.19 แสดงให้เห็นถึงผลของการวัดของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 1 GHz-7 GHz มีค่าการทำงานของอัตราคลื่นนิ่งต่ำกว่า 2 ที่ย่านความถี่ 2.344 GHz - 3.052 GHz และที่ย่านความถี่ 5.044 GHz - 6.430 GHz ผลการเปรียบเทียบแบบการจำลองกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบ ร่วมดังภาพที่ 4.20

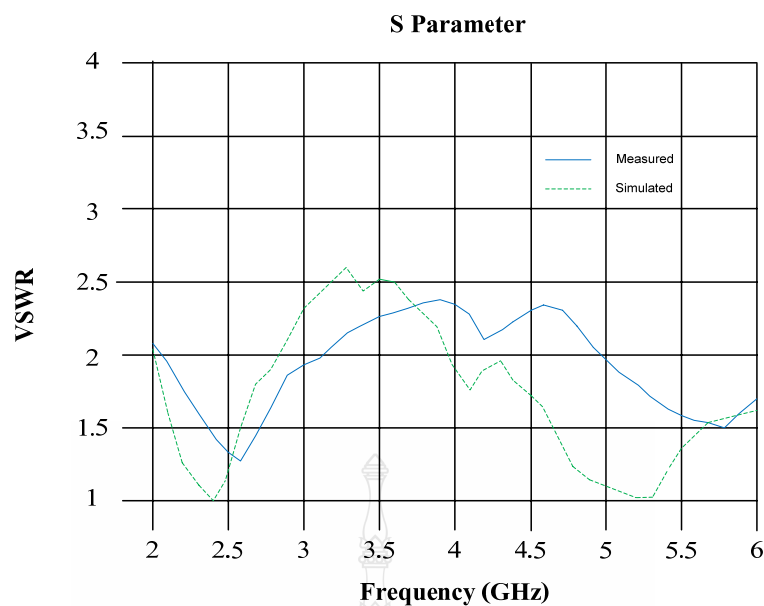


ภาพที่ 4.20 การเปรียบเทียบการจำลองของค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับกับการวัด
ชิ้นงานจริงของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วม

จากภาพที่ 4.20 ผลที่ได้จากการวัดชิ้นงานเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบ
การจำลองมีค่าความสูญเสียย้อนกลับที่น้อย เนื่องจากสภาพแวดล้อมของห้องความ
สูญเสียของสายที่ใช้ทำการวัดและตัวเชื่อมต่อ (SMA Connector)

ตารางที่ 4.2 ผลเปรียบเทียบการจำลองกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแพทช์รูป
เหลี่ยมแบบระนาบร่วม

สายอากาศแพทช์ รูปสามเหลี่ยม	f_1 (GHz)	BW at -10 dB (GHz)	f_2 (GHz)	BW at -10 dB (GHz)
ผลจากการจำลอง	2.4	0.66 GHz	5.2	1.47 GHz
ชิ้นงานจริง	2.4	0.861 GHz	5.2	0.986 GHz

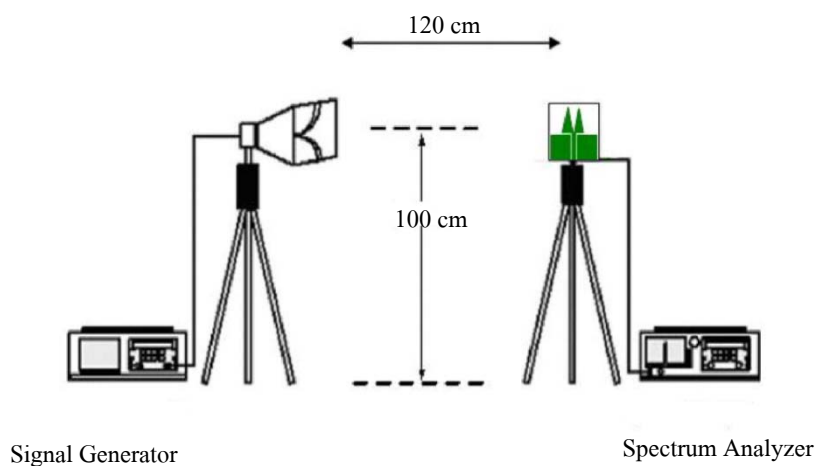


ภาพที่ 4.21 การเปรียบเทียบการจำลองของอัตราส่วนคลื่นนิ่งกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมที่ความถี่ 2 GHz - 6 GHz

จากภาพที่ 4.21 ผลที่ได้จากการวัดชิ้นงานจริงเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองของอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) มีค่าแบนด์วิดท์ที่ต่างกันแต่ก็ยังครอบคลุมที่ย่านความถี่ 2.344 - 3.052 GHz และที่ย่านความถี่ 5.044 - 6.430 GHz

4.2.2 การทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปสามเหลี่ยม

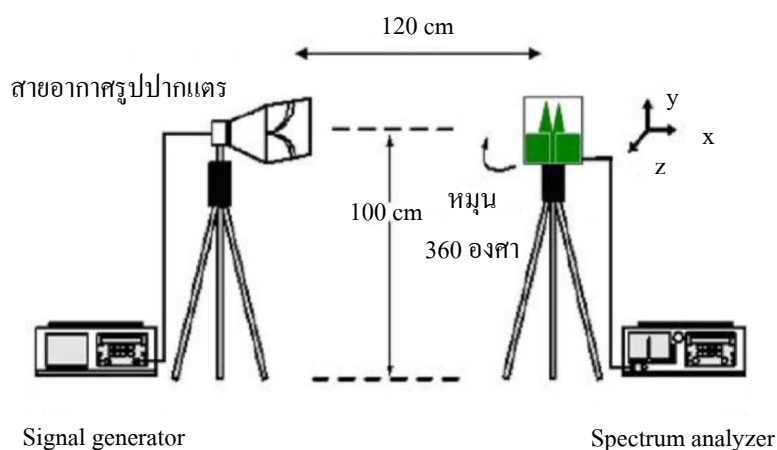
การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศโดยต่ออุปกรณ์ตามภาพที่ 4.22 โดยที่เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่สูง (RF Signal Generator) ตั้งความถี่ไว้ที่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz ส่งกำลังคลื่นออกไป 0 dBm โดยผ่านสายอากาศรูปปากแตร (Horn antenna) ไปยังสายอากาศตัวรับสัญญาณซึ่งเป็นสายอากาศที่จะทำการทดสอบและผ่านสายเข้าเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum analyzer) ยี่ห้อ Agilent รุ่น E4407B ซึ่งจะแสดงค่าความแรงของสัญญาณความถี่สูงที่รับได้สำหรับตำแหน่งความสูงของสายอากาศทั้งสองมีค่าเท่ากับ 100.00 cm และระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสองมีค่าเท่ากับ 120.00 cm โดยจะทำการหมุนสายอากาศที่ทำการทดสอบตั้งแต่ 0 องศาจนถึง 360 องศา



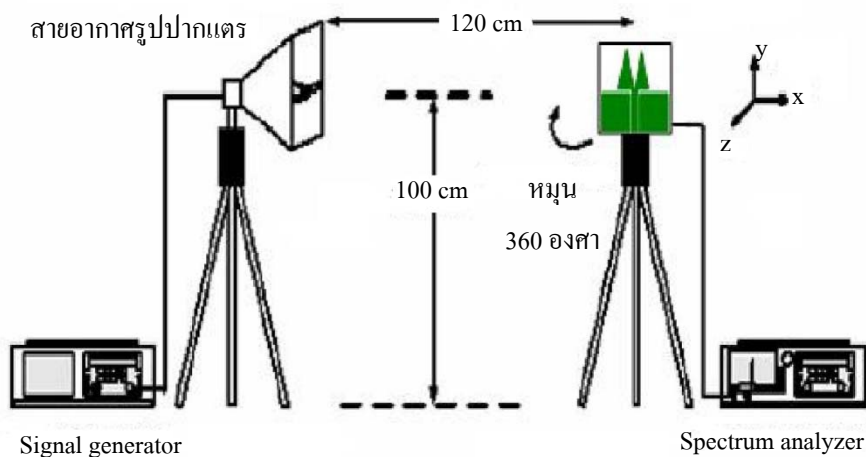
ภาพที่ 4.22 การต่ออุปกรณ์เพื่อใช้วัดแบบภาพการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยม

การวัดแบบภาพการแผ่พลังงานของสายอากาศจะทำการวัดที่สองระนาบคือระนาบ $x-z$ และระนาบ $y-z$ ซึ่งในแต่ละระนาบจะทำการวัดระดับของสายอากาศที่เป็น โพลาริเซชันเดียวกัน (Co-polarization) และ โพลาริเซชันไขว้ (Cross-polarization)

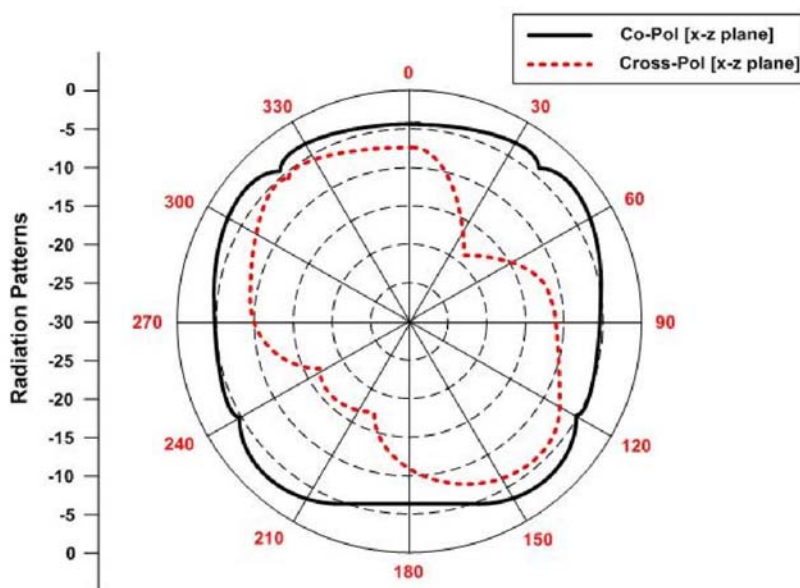
สำหรับการวัดแบบภาพการแผ่พลังงานของสายอากาศระนาบ $x-z$ จะทำการวัดตามภาพที่ 4.23 และ 4.24 และผลการวัดแบบภาพการแผ่พลังงานของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมแสดงตามภาพที่ 4.25 และ 4.26



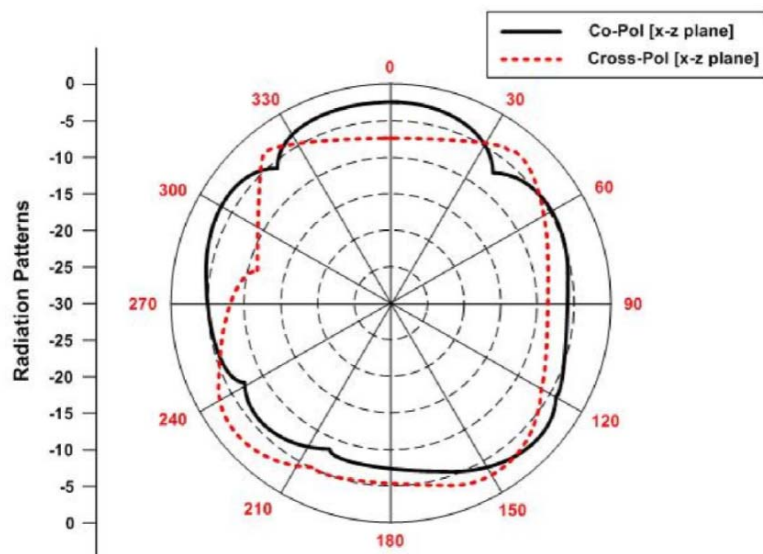
ภาพที่ 4.23 การต่ออุปกรณ์วัดแบบภาพการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมในแนวระนาบ $x-z$ (Co-pol)



ภาพที่ 4.24 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยม
ในแนวระนาบ x-z (Cross-pol)

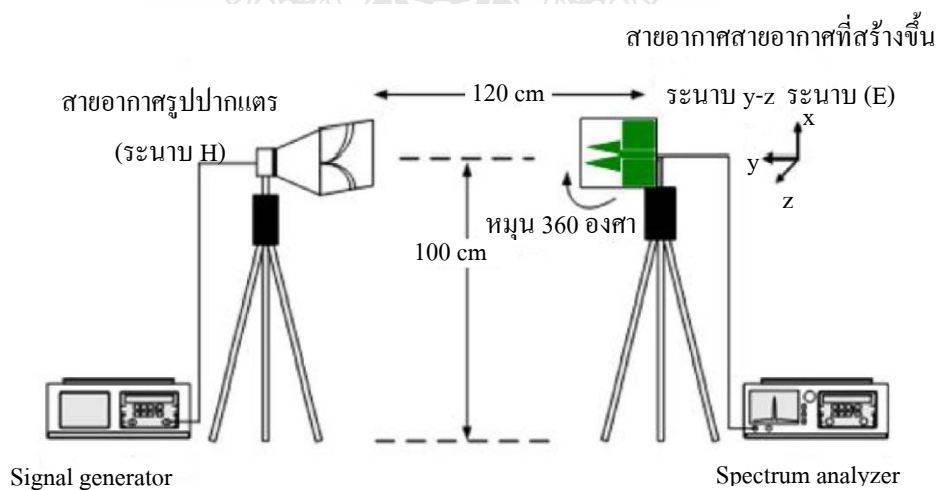


ภาพที่ 4.25 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมที่ความถี่ 2.4 GHz
ระนาบ x-z

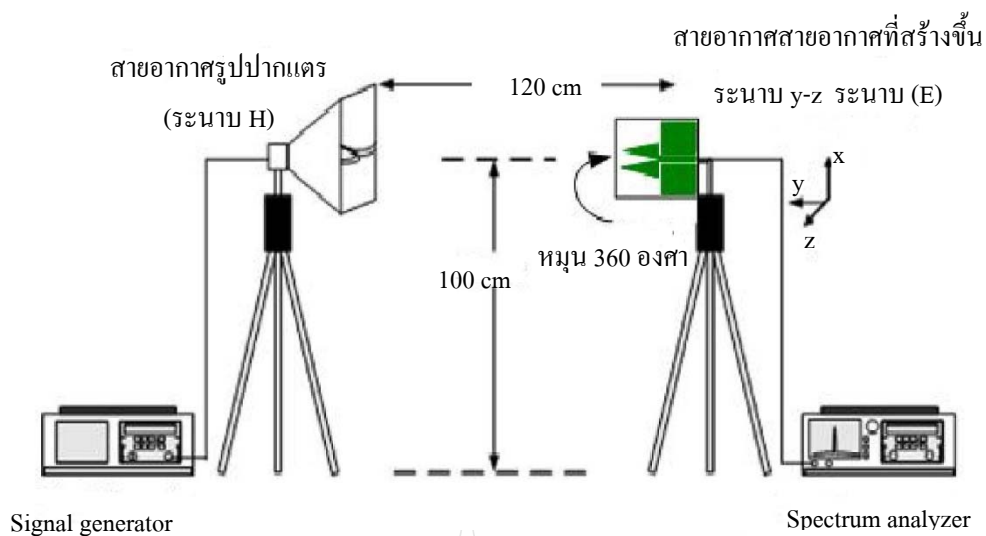


ภาพที่ 4.26 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมที่ความถี่ 5.2 GHz
ระนาบ x-z

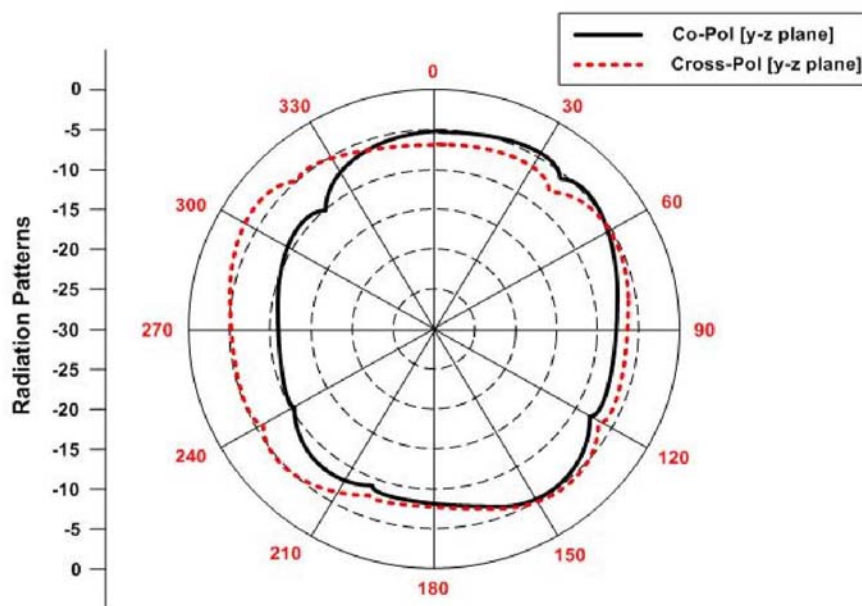
การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศระนาบ y-z ทำการวัดตามภาพที่ 4.27 และภาพที่ 4.28 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมตามภาพที่ 4.29 และภาพที่ 4.30



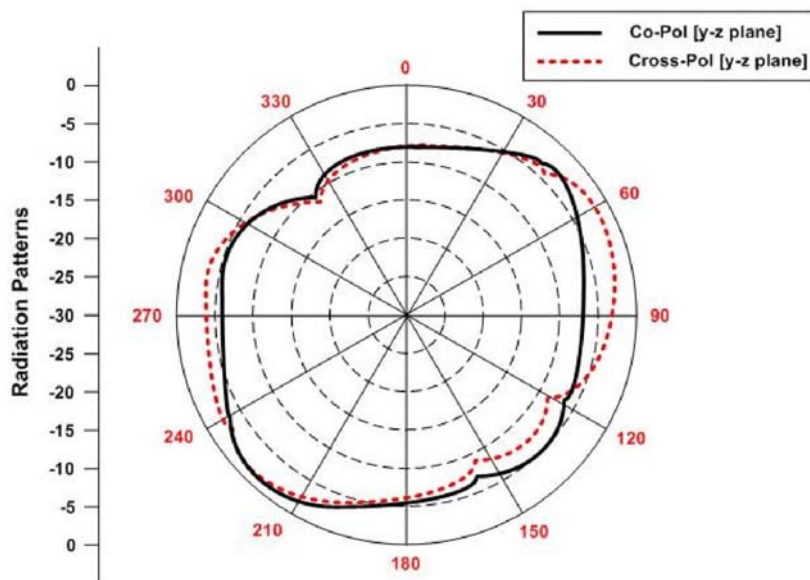
ภาพที่ 4.27 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยม
ในแนวระนาบ y-z (Co-pol)



ภาพที่ 4.28 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยม ในแนวระนาบ y-z (Cross-pol)



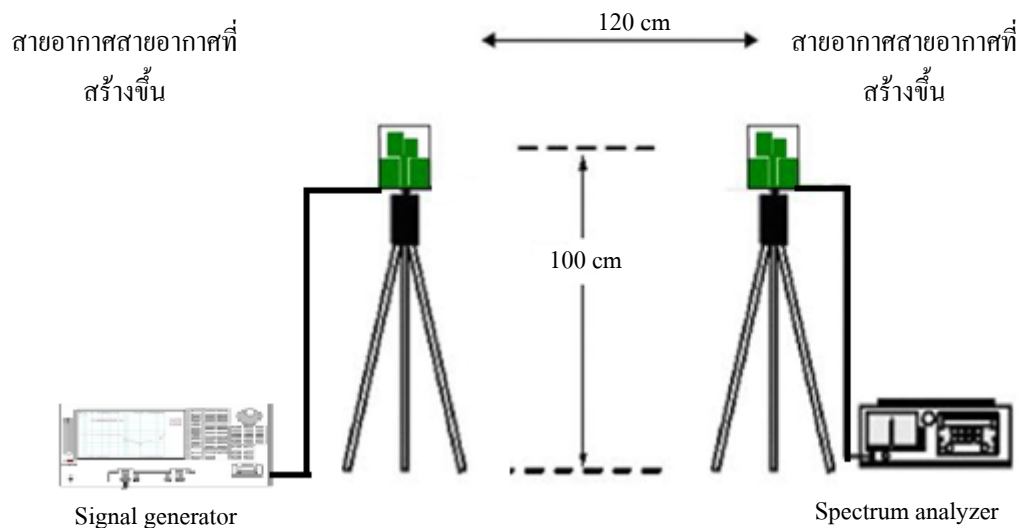
ภาพที่ 4.29 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมที่ความถี่ 2.4 GHz ระนาบ y-z



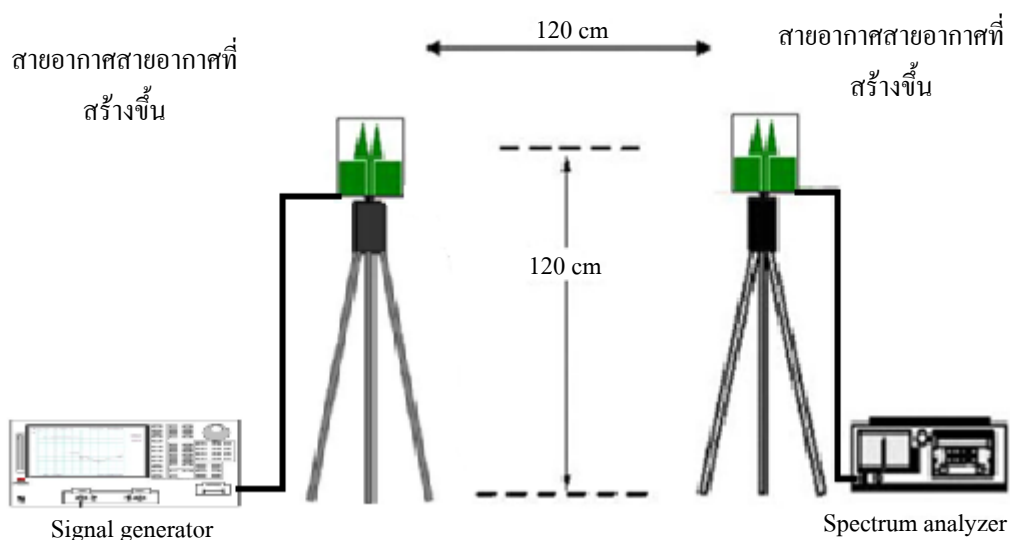
ภาพที่ 4.30 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมที่ความถี่ 5.2 GHz
ระนาบ y-z

ผลการวัดอัตราขยาย

$$(G_{or})_{dB} = (G_{0r})_{dB} = \left(\frac{1}{2}\right) \left[20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_t} \right) \right] \quad (4.1)$$



ภาพที่ 4.31 การต่ออุปกรณ์วัดอัตราขยายแพทช์รูปสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 4.32 การต่ออุปกรณ์วัดอัตราขยายแพทช์รูปสามเหลี่ยม

อัตราขยายพลังงานที่ได้จากการวัดที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ช่วงต่ำ 2.4 GHz และความถี่ช่วงสูง 5.2 GHz โดยสายอากาศแพทช์ทั้งสองรูปแบบ ผลลัพธ์ทั้งสองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและทั้ง 2 ช่วงความถี่มีทิศทางของแบบแผ่พลังงานเป็นแบบสองทิศทางคือ Z และ -Z อัตราขยายพลังงานสูงสุดของสายอากาศแพทช์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ช่วงต่ำ 2.4 GHz สายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมีค่า 2.45 dBi และสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมมีค่า 2.05 dBi ที่ความถี่เรโซแนนซ์ช่วงสูง 5.2 GHz สายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมีค่า 2.15 dBi และสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมมีค่า 0.91 dBi

ในการทดสอบแผ่น FR4 เพื่อทดสอบหาค่าการเลี้ยวของความถี่เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในย่านความถี่ต้องการออกแบบ ในที่นี้จะใช้วิธีการออกแบบการป้อนสัญญาณกับตัวนำ

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าการจำลองกับค่าการวัดที่ความถี่ต่างๆ ของแผ่น FR4

	Frequency (GHz)											
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	
การจำลองจำโปรแกรม IE3D (GHz)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	
การวัด	1.0	1.51	2.05	2.52	3.3	3.54	4.3	4.56	5.3	5.57	6.6	

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอสายอากาศแบบแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบแถบความถี่กว้างสองแถบความถี่ การเพิ่มขนาดแบนด์วิดท์ เพื่อให้ได้สายอากาศแบบแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบแถบความถี่กว้างสองแถบความถี่ที่สามารถรองรับการใช้งานในเครือข่ายการสื่อสารไร้สาย ตามมาตรฐาน IEEE802.11b/g (2.4-2.4835 GHz) IEEE802.11a (5.15-5.35 GHz) IEEE802.11j (4.90-5.091 GHz) และ Public safety frequency (4.94-4.990 GHz)

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการออกแบบและสร้างสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมและรูปสามเหลี่ยมที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่จะสามารถใช้งานในย่านความถี่คือ 2.4 GHz และ 5.2 GHz เพิ่มแบนด์วิดท์ของความถี่เรโซแนนซ์และการปรับแต่งให้ได้ค่าที่ดีที่สุดเพื่อทำให้อัตราส่วนของตัวสายอากาศและความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ ให้ความถี่ดังกล่าวรองรับการใช้งานในเครือข่ายการสื่อสารไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11b/g (2.4-2.4835 GHz) IEEE 802.11a (5.15-5.35 GHz) และ IEEE 802.11j (4.90-5.091 GHz) อีกทั้งยังสามารถช่วยลดขนาดของตัวสายอากาศแบบแพทช์ให้มีขนาดเล็กลง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแพทช์ความถี่แถบคู่ที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมเพื่อให้สามารถใช้งานในย่านความถี่กว้างโดยจะจำลองแบบ (Simulation) โครงสร้างของสาย อากาศด้วยโปรแกรม IE3D สายอากาศจะมีความทำงานสองโหมดที่สอดคล้องกับการปรับขนาดของสาย อากาศแพทช์โดยให้แพทช์กว้างเรโซแนนซ์ในโหมดหนึ่งที่มีความถี่ 2.4 GHz และแพทช์ขนาดเล็กเรโซแนนซ์ในโหมดที่สองที่มีความถี่ 5.2 GHz โดยมีวัตถุประสงค์ให้สายอากาศที่นำเสนอมีแบนด์วิดท์กว้างซึ่งค่าแบนด์วิดท์ของความถี่เรโซแนนซ์ช่วงต่ำมีค่าเท่ากับ 2.18 GHz และความถี่เรโซแนนซ์ช่วงสูงมีค่าเท่ากับ 0.75 GHz สายอากาศที่นำเสนอออกแบบให้มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ 50 โอห์มเพื่อใช้งานกับการสื่อสารย่านความถี่ 2.03-5.5 GHz ซึ่งจะครอบคลุมมาตรฐาน IEEE802.11b/g (2.4-2.4835 GHz) IEEE802.11a (5.15-5.35 GHz) IEEE802.11j (4.90-5.091 GHz) และ Public safety frequency (4.94-4.990 GHz) ผลการจำลองเปรียบเทียบกับกรณีวัดพบว่ามีค่าสอดคล้องกัน เมื่อค่าแบนด์วิดท์พิจารณาที่ค่าสะท้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า -10 dB.

สายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมเป็นการสร้างขึ้นเพื่อเปรียบเทียบการทำงาน of สาย อากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแบบระนาบร่วมผลที่ได้จากการจำลองแบบการทำงานของสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมค่าความสูญเสียเนื่องจากการ ย้อนกลับมากกว่า -10 dB ที่ย่านความถี่ 2.4 GHz มีแบนด์วิดท์ 0.66 GHz และ 5.2 GHz มีแบนด์วิดท์ 1.47 GHz

จากผลการจำลองแบบการทำงานและทำให้เหมาะสมมากที่สุดจะพบว่าสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยม ได้ค่าแบนด์วิดท์สูงสุดและจากการวัดชิ้นงานจริงด้วยเครื่องวิเคราะห์ข่ายงานไฟฟ้า (Network analyzer) พบว่าสายอากาศแพทช์รูปสามเหลี่ยมแบบระนาบร่วมมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมากกว่า -10 dB มี ค่าความสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า - 25 dB ที่ความถี่ 2.70 GHz และมีค่าความสูญเสียย้อนกลับต่ำสุด -13 dB ที่ความถี่ 5.25 GHz

5.2 ข้อเสนอแนะ

จะเห็นได้ว่านอกจากการเลือกรูปแบบพื้นฐานของสายอากาศแพทช์ รูปสี่เหลี่ยม รูปสามเหลี่ยมแล้วอาจประยุกต์ใช้กับรูปแบบใหม่ๆ เช่น วงกลม สามเหลี่ยมด้านเท่า หกเหลี่ยมด้านเท่า เป็นต้นและเทคนิคการเกิดการทำงานสองแถบความถี่ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอเพียงสองรูปแบบซึ่งยังมีอีกหลายรูปแบบที่ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกันได้เพื่อให้เกิดคุณลักษณะของการนำไปใช้งานของสายอากาศแพทช์สองแถบความถี่ เพื่อใช้งานในย่านการสื่อสารแบบไร้สาย แต่การแผ่กระจายคลื่นยังไม่ได้นำเทคนิคใดๆ มาปรับใช้ จะเป็นการดียิ่งหากได้มีการนำเทคนิคต่างๆ มาใช้ และนำโครงสร้างของสายอากาศแพทช์นี้ไปประยุกต์ใช้งาน เพื่อพัฒนาสายอากาศต้นแบบนี้ให้มีความสามารถในการบีบไปในทิศทางที่ต้องการหรือนำไปพัฒนาให้มีอัตราขยายที่สูงขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] IEEE 808.11.[online]. Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki> [2011, January 9].
- [2] William F. Richards. "Microstrip antennas," Edited by Y. T. Lo and S. W. Lee. Antenna Handbook .Newyork: Van Nostrand Reinhold Company Inc, 1988.
- [3] Liu. W.-C., "Wideband dual-frequency double inverted-L CPW-fed monopole antenna for WLAN application," in Proc. IEEE Microwaves Antennas and Propag., 2005, pp.505-510.
- [4] A.A. Eldek, C.M. Allen, A. Z. Elsherbeni, C.E. Smith and Kai-Fong Lee, "Slot Antenna for Dual And Wideband Operation in Wireless Communication Systems," IEEE Antennas and Propag .Mag., vol. 44, 2002.
- [5] ไกรสร สาริชา, ประยุทธ อัครเอกฒาลิน และเวช วิเวก "สายอากาศร่องหกเหลี่ยมด้านเท่าแบบแถบความถี่ กว้างที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมที่มีการจูนสตัดป์สามเหลี่ยมด้านเท่า," Proc.EECON29 Conf., vol. 2, หน้า 781 – 784, พฤศจิกายน 2549.
- [6] A. Horita and H. Iwasaki, "Planar Trapezoid Dipole Antenna with Ultra Wideband Characteristic," in Proc. IEEE-APS Int. Symp., vol. 2B, pp. 540-543, 2005.
- [7] T. Archevapanichai, and T. Wakabayashi, "E - Shaped Slot Antenna for WLAN Applications", ICCAS, pp. 2854-2857, October, 2007.
- [8] C. Chulvanich, and et al., " Design Narrow Slot Antenna for Dual Frequency," PIERS, China, March, 2007.
- [9] Agrawell N.P., Kumar G., Ray K.P., "Wideband planar monopole antennas," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 46, pp. 249-251, 1998.
- [10] Constanine A. Balanis., "Antenna Theory :Analysis and Design," Singapore: John wiley&Son,1997.
- [11] ECTI-CARD.[online]. Available from :<http://www.ecti-thailand.org> [2009, December 22].
- [12] Syze J.Y., Wong K.- L, 2001 Bandwidth enhancement of a microstrip - Line Fred Printed Wide slot antenna. IEEE Antennas and Wireless Propagation, 49 (7), 1020-1024.
- [13] Horng - Dean Chen and Hong -Twu Chen., "A CPW - Fed Dual - Frequency Monopole Antenna," IEEE trans. antennas propag., vol. 52, no.4, Apr. 2004.
- [14] C. A. Balanis, "Antenna Theory", 2nd Edition, New York, John Wiley & Son, Inc, 1982.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของแผ่น PCB ชนิด FR-4



DS-7405 (ANSI:FR-4)			Designation	DS-7405	
GENERAL PROPERTIES			ANSI Grade	FR-4	
Test Item	Unit	Treatment	Property Data		
			Standard Value	Guaranteed Value	
Tg	°C	DSC	135	above 130	
		TMA	135	above 130	
		DMA	155	above 160	
CTE x - axis	ppm/°C	Ambien to Tg	18	less than 20	
y - axis			13	less than 15	
z - axis			55	less than 60	
Flammability		UL-94	V-0	V-0	
Insulation Resistance	ohm	C-96/20/65	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$	Above 5×10^{11}	
		C-96/20/65+D-2/100	$1 \times 10^{10} - 1 \times 10^{11}$	Above 1×10^9	
Volume Resistance	Ohm-cm	C-96/20/65	$1 \times 10^{14} - 1 \times 10^{15}$	Above 1×10^{12}	
		C-96/20/65+C-96/40/90	$1 \times 10^{13} - 1 \times 10^{14}$	Above 1×10^{12}	
Surface Resistance	ohm	C-96/20/65	$1 \times 10^{13} - 1 \times 10^{14}$	Above 1×10^{12}	
		C-96/20/65+C-96/40/90	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$	Above 1×10^{11}	
Arc Resistance	min.seconds	-	110	Above 60	
Dielectric Constant (1MHz)	-	C-96/20/65	4.4-4.8	less than 5.5	
		C-96/20/65+D-48/50	4.6-5.2	less than 5.8	
Dielectric Constant (1MHz)	-	C-96/20/65	0.015-0.020	less than 0.035	
		C-96/20/65+D-48/50	0.018-0.023	less than 0.045	
Comparative Tracking Index	volt	IEC Method	-	-	
Solder Float(250°C)	sec	A	Above 180	Above 120	
Peel Streng	Cu.foloz (0.035mm)	kgt/cm	A	1.8-2.2	Above 1.43
Flexural Strength	kgt/mm ²	A	40-50	Above 32.7	

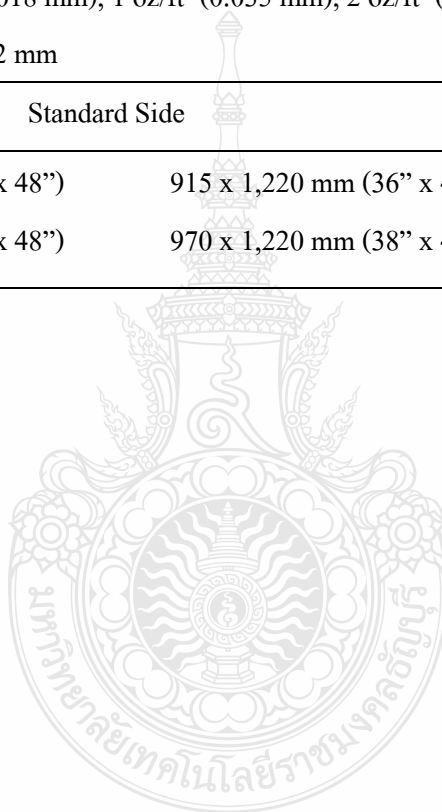
DS-7405 (ANSI:FR-4)			Designation	DS-7405
			GENERAL PROPERTIES	
Water Absorption	%	E-24/50+D-24/23	0.10-0.15	Less than 0.25

Specimen Thickness: 1.6 mm

PERCHASING INFORMATION

- Copper foil: 0.5oz/ft² (0.018 mm), 1 oz/ft² (0.035 mm), 2 oz/ft² (0.070 mm) available.
- Thickness: 0.2 mm to 3.2 mm

Standard Side		Tolerance (mm)
1,020 x 1,220 mm (40" x 48")	915 x 1,220 mm (36" x 48")	+3
1,070 x 1,220 mm (42" x 48")	970 x 1,220 mm (38" x 48")	0



ภาคผนวก ข

คุณสมบัติของ SMA connector





SMA - 50 Ohm Connectors

Panel Mount

142-0701-621	4
142-0701-626	4
142-0701-631	4
142-0701-636	4
142-0701-701	7
142-0701-706	7
142-1701-011	5
142-1701-016	5
142-1701-031	4
142-1701-036	4
142-1701-041	5
142-1701-046	5
142-1701-121	5
142-1701-126	5
142-1701-131	4
142-1701-136	4
142-1701-191	7
142-1701-196	7
142-1701-201	6
142-1701-206	6
142-1711-001	7
142-1711-006	7
142-1711-011	8
142-1711-016	8
142-1711-021	8
142-1711-026	8
142-1711-031	8
142-1711-036	8
142-1801-031	6
142-1801-036	6
142-1801-041	6
142-1801-046	6
2-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric	4, 6
2-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Flush Dielectric	4
2-Hole Flange Mount Plug Receptacle - Extended Dielectric	6
2-Hole RA Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric	8
2-Hole RA Flange Mount Jack Receptacle -Extended Dielectric	8
2-Hole RA Flange Mount Jack Receptacle -Extended Dielectric	8
4-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric	5
4-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Flush Dielectric	4
4-Hole Flange Mount Jack Receptacle -Extended Dielectric	7
4-Hole Flange Mount Plug Receptacle - Extended Dielectric	6
4-Hole RA Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric	7
4-Hole Right Angle Flange Mount Jack Receptacle	7
Specifications	2, 3

SMA - 50 Ohm Connectors

Specifications

JOHNSON Components®

INCHES (MILLIMETERS)
CUSTOMER DRAWINGS AVAILABLE UPON REQUEST

ELECTRICAL RATINGS

Impedance: 50 ohms**Frequency Range:**

Dummy loads	0-2 GHz
Flexible cable connectors	0-12.4 GHz
Uncabled receptacles, RA semi-rigid and adapters	0-18.0 GHz
Straight semi-rigid cable connectors and field replaceable connectors	0-26.5 GHz

VSWR: (f = GHz)

	Straight Cabled Connectors	Right Angle Cabled Connectors
RG-178 cable	1.20 + .025f	1.20 + .03f
RG-316, LMR-100 cable	1.15 + .02f	1.15 + .03f
RG-58, LMR-195 cable	1.15 + .01f	1.15 + .02f
RG-142 cable	1.15 + .01f	1.15 + .02f
LMR-200, LMR-240 cable	1.10 + .03f	1.10 + .06f
.086 semi-rigid	1.07 + .008f	1.18 + .015f
.141 semi-rigid (w/contact)	1.05 + .008f	1.15 + .015f
.141 semi-rigid (w/o contact)	1.035 + .005f	

Jack-bulkhead jack adapter and plug-plug adapter

Jack-jack adapter and plug-jack adapter

Uncabled receptacles, dummy loads

Field replaceable (see page 59)

Working Voltage: (Vrms maximum)[†]

Connectors for Cable Type

RG-178

RG-316; LMR-100, 195, 200

RG-58, RG-142, LMR-240, .086 semi-rigid, uncabled receptacles, .141 semi-rigid w/o contact

.141 semi-rigid with contact and adapters

Dummy loads

Dielectric Withstanding Voltage: (VRMS minimum at sea level)[†]

Connectors for RG-178

Connectors for RG-316; LMR-100, 195, 200

Connectors for RG-58, RG-142, LMR-240, .086 semi-rigid, field replaceable, uncabled receptacles

Connectors for .141 semi-rigid with contact and adapters

Connectors for .141 semi-rigid w/o contact, dummy loads

Corona Level: (Volts minimum at 70,000 feet)[†]

Connectors for RG-178

Connectors for RG-316; LMR-100, 195, 200

Connectors for RG-58, RG-142, LMR-240, .086 semi-rigid, uncabled receptacles, .141 semi-rigid w/o contact

Connectors for .141 semi-rigid with contact and adapters

Dummy loads

Insertion Loss: (dB maximum)

Straight flexible cable connectors and adapters

Right angle flexible cable connectors

Straight semi-rigid cable connectors with contact

Right angle semi-rigid cable connectors

Straight semi-rigid cable connectors w/o contact

Straight low loss flexible cable connectors

Right Angle low loss flexible cable connectors

Uncabled receptacles, field replaceable, dummy loads

Insulation Resistance: 5000 megohms minimum

Contact Resistance: (milliohms maximum) **Initial** **After Environmental**

Center contact (straight cabled connectors and uncabled receptacles)

Center contact (right angle cabled connectors and adapters)

Field replaceable connectors

Outer contact (all connectors)

Braid to body (gold plated connectors)

Braid to body (nickel plated connectors)

*N/A where the cable center conductor is used as a contact

RF Leakage: (dB minimum, tested at 2.5 GHz)

Flexible cable connectors, adapters and .141 semi-rigid connectors w/o contact

Field replaceable w/o EMI gasket

.086 semi-rigid connectors and .141 semi-rigid connectors with contact, and field replaceable with EMI Gasket

Two-way adapters

Uncabled receptacles, dummy loads

RF High Potential Withstanding Voltage: (Vrms minimum, tested at 4 and 7 MHz)[†]

Connectors for RG-178

Connectors for RG-316; LMR-100, 195, 200

Connectors for RG-58, RG-142, LMR-240, .086 semi-rigid, .141 semi-rigid cable w/o contact, uncabled receptacles

Connectors for .141 semi-rigid with contact and adapters

Power Rating (Dummy Load): 0.5 watt @ +25°C, derated to 0.25 watt @ +125°C

MECHANICAL RATINGS

Engagement Design: MIL-C-39012, Series SMA

Engagement/Disengagement Force: 2 inch-pounds maximum

Mating Torque: 7 to 10 inch-pounds

Bulkhead Mounting Nut Torque: 15 inch-pounds minimum

Coupling Proof Torque: 15 inch-pounds minimum

Coupling Nut Retention: 60 pounds minimum

Contact Retention:

6 lbs. minimum axial force (captivated contacts)

4 inch-ounce minimum torque (uncabled receptacles)

Cable Retention:

Connectors for RG-178

Connectors for RG-316, LMR-100

Connectors for LMR-195, 200

Connectors for RG-58, LMR-240

Connectors for RG-142

Connectors for .086 semi-rigid

Connectors for .141 semi-rigid

*Or cable breaking strength whichever is less.

Durability: 500 cycles minimum

100 cycles minimum for .141 semi-rigid connectors w/o contact

ENVIRONMENTAL RATINGS (Meets or exceeds the applicable paragraph of MIL-C-39012)

Temperature Range: -65°C to +165°C

Thermal Shock: MIL-STD-202, Method 107, Condition B

Corrosion: MIL-STD-202, Method 101, Condition B

Shock: MIL-STD-202, Method 213, Condition I

Vibration: MIL-STD-202, Method 204, Condition D

Moisture Resistance: MIL-STD-202, Method 106

[†]Avoid user injury due to misapplication. See safety advisory definitions on page 2.

Johnson Components® • P.O. Box 1732 • Waseca, MN 56093-0832 • 1-800-247-8256 • Fax: 507-835-6287 • www.johnsoncomp.com

MATERIAL SPECIFICATIONS

Bodies: Brass per QQ-B-626, gold plated* per MIL-G-45204 .00001" min. or nickel plated per QQ-N-290

Contacts: Male - brass per QQ-B-626, gold plated per MIL-G-45204 .00003" min.

Female - beryllium copper per QQ-C-530, gold plated per MIL-G-45204 .00003" min.

Nut Retention Spring: Beryllium copper per QQ-C-533. Unplated

Insulators: PTFE fluorocarbon per ASTM D 1710 and ASTM D 1457 or Tefzel per ASTM D 3159

Expansion Caps: Brass per QQ-B-613, gold plated per MIL-G-45204 .00001" min. or nickel plated per QQ-N-290

Crimp Sleeves: Copper per WW-T-799 or brass per QQ-B-613, gold plated per MIL-G-45204 .00001" min. or nickel plated per QQ-N-290

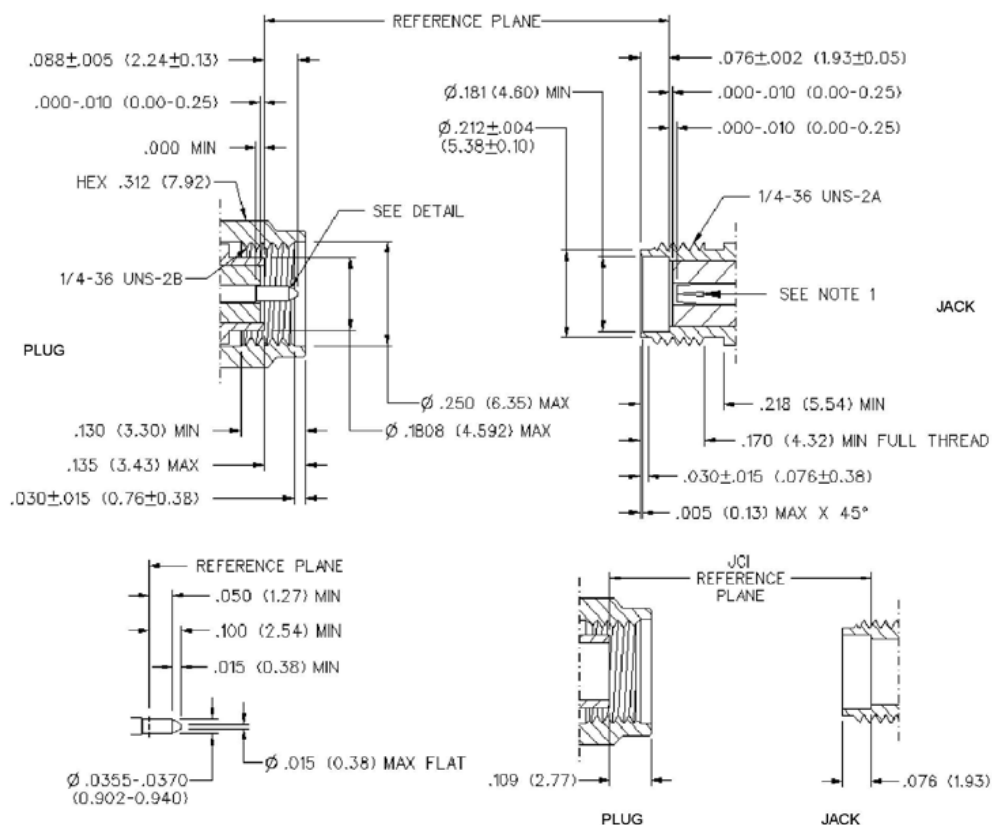
Mounting Hardware: Brass per QQ-B-626 or QQ-B-613, gold plated per MIL-G-45204 .00001" min. or nickel plated per QQ-N-290

Seal Rings: Silicone rubber per ZZ-R-765

EMI Gaskets: Conductive silicone rubber per MIL-G-83528, Type M

* All gold plated parts include a .00005" min. nickel underplate barrier layer.

Mating Engagement for SMA Series per MIL-C-39012



NOTES

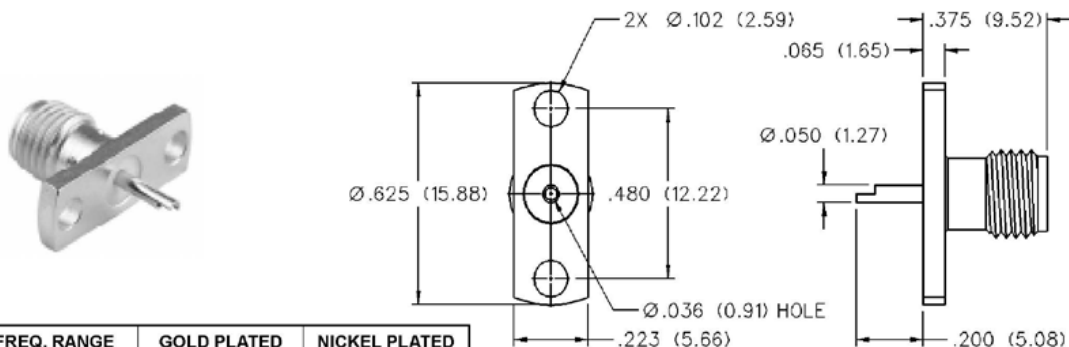
1. ID OF CONTACT TO MEET VSWR, CONTACT RESISTANCE AND INSERTION WITHDRAWAL FORCES WHEN MATED WITH DIA .0355-.0370 MALE PIN.

SMA - 50 Ohm Connectors



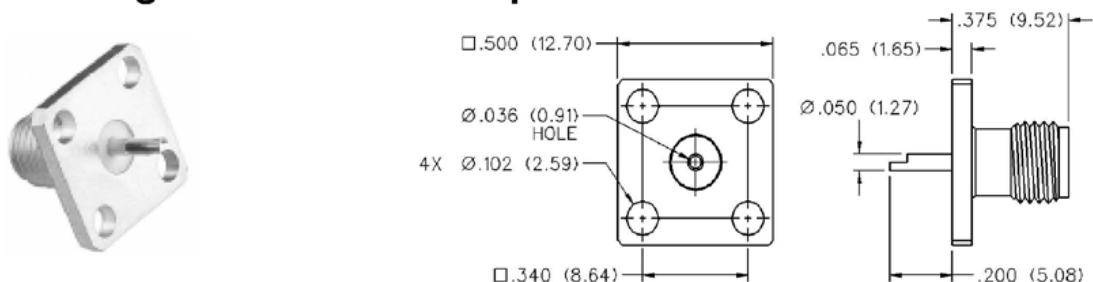
Panel Mount

2-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Flush Dielectric



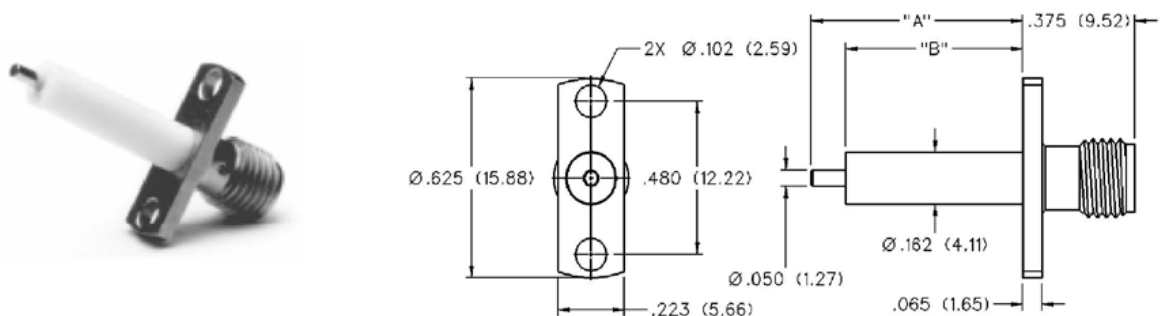
VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
VSWR: N/A 0-18 GHz	142-0701-621	142-0701-626

4-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Flush Dielectric



VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
VSWR: N/A 0-18 GHz	142-0701-631	142-0701-636

2-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric



VSWR & FREQ. RANGE	PRODUCT SERIES	GOLD PLATED	NICKEL PLATED	"A"	"B"
VSWR: 1.15 + .02 f (GHz) 0-18 GHz	Brass	142-1701-131	142-1701-136	.705 (17.91)	.590 (14.99)
		142-1701-031	142-1701-036	.240 (6.10)	.180 (4.57)

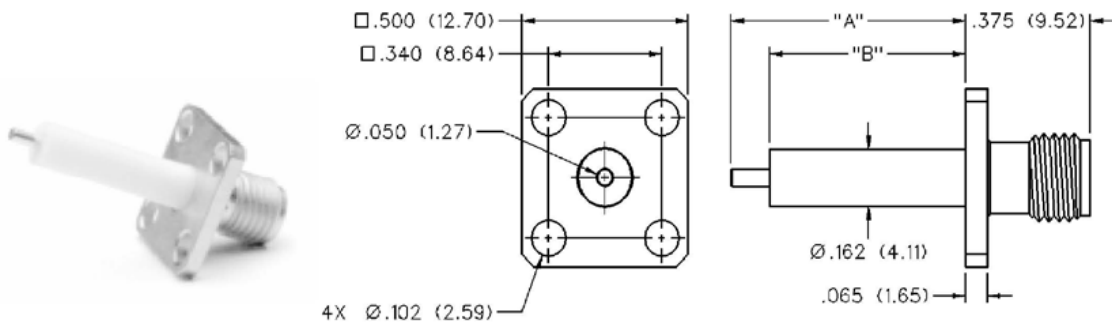


INCHES (MILLIMETERS)
CUSTOMER DRAWINGS AVAILABLE UPON REQUEST

SMA - 50 Ohm Connectors

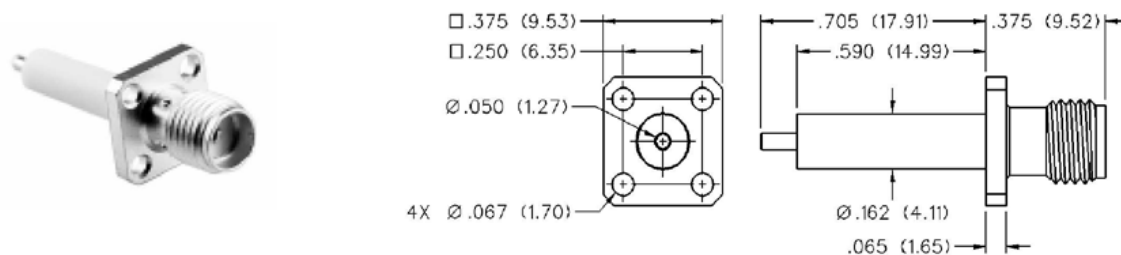
Panel Mount

4-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric



VSWR & FREQ. RANGE	PRODUCT SERIES	GOLD PLATED	NICKEL PLATED	"A"	"B"
VSWR: 1.15 + .02 f (GHz) 0-18 GHz	Brass	142-1701-121	142-1701-126	.705 (17.91)	.590 (14.99)
		142-1701-041	142-1701-046	.190 (4.83)	.095 (2.41)

4-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric



VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
VSWR: 1.15 + .02 f (GHz) 0-18 GHz	142-1701-011	142-1701-016

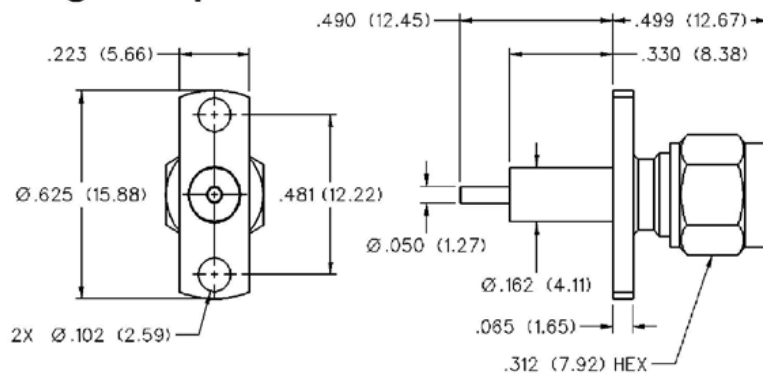
SMA - 50 Ohm Connectors

Panel Mount

JOHNSON
Components®

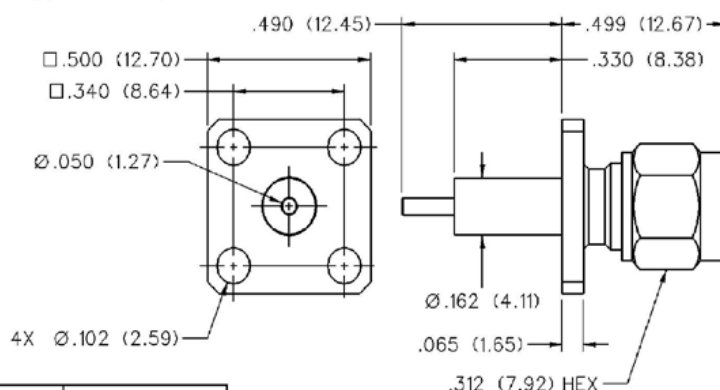
INCHES (MILLIMETERS)
CUSTOMER DRAWINGS AVAILABLE UPON REQUEST

2-Hole Flange Mount Plug Receptacle - Extended Dielectric



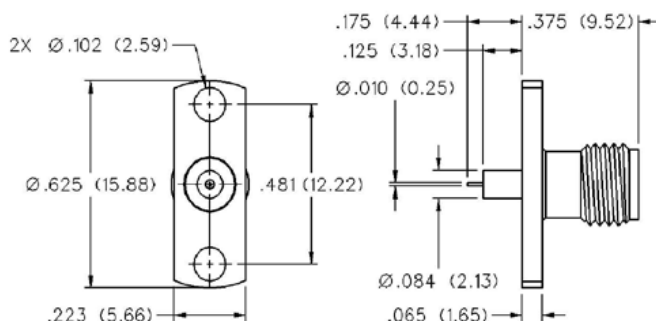
VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
VSWR: 1.15 + .02 f (GHz) 0-18 GHz	142-1801-041	142-1801-046

4-Hole Flange Mount Plug Receptacle - Extended Dielectric



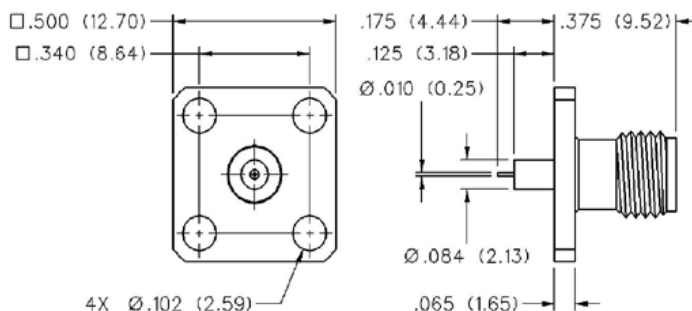
VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
VSWR: 1.15 + .02 f (GHz) 0-18 GHz	142-1801-031	142-1801-036

2-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric



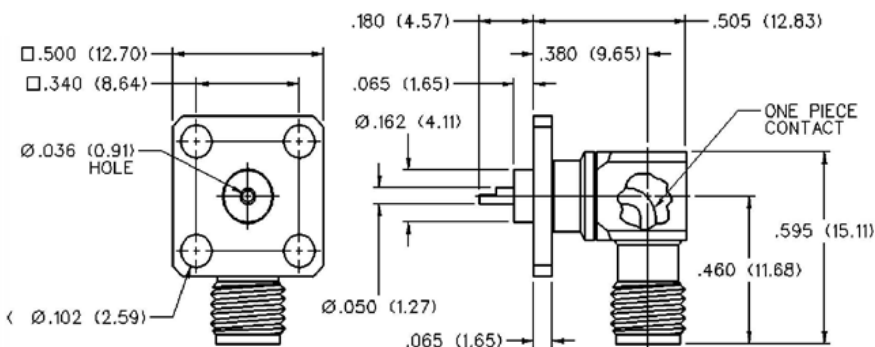
GOLD PLATED	NICKEL PLATED
142-1701-201	142-1701-206

**4-Hole Flange Mount Jack Receptacle -
Extended Dielectric**



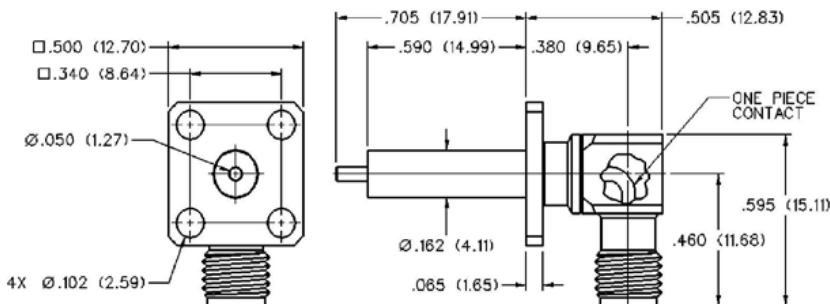
GOLD PLATED	NICKEL PLATED
142-1701-191	142-1701-196

4-Hole Right Angle Flange Mount Jack Receptacle



VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
VSWR: N/A 0-18 GHz	142-0701-701	142-0701-706

**4-Hole RA Flange Mount Jack Receptacle -
Extended Dielectric**



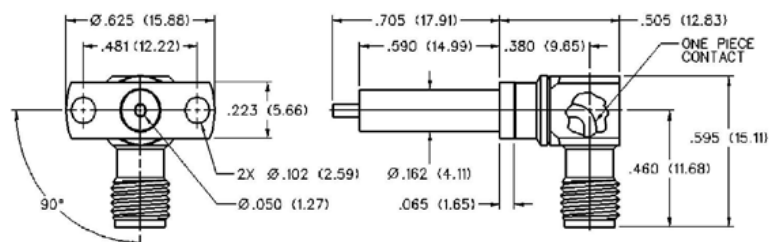
GOLD PLATED	NICKEL PLATED
142-1711-001	142-1711-006

SMA - 50 Ohm Connectors

Panel Mount

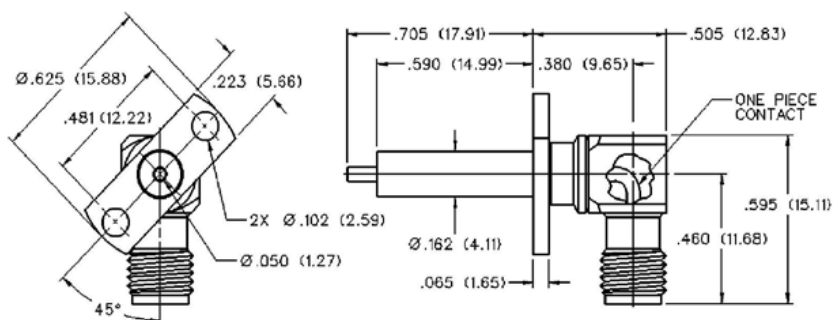
JOHNSON
Components®
INCHES (MILLIMETERS)
CUSTOMER DRAWINGS AVAILABLE UPON REQUEST

2-Hole RA Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric 90° Orientation



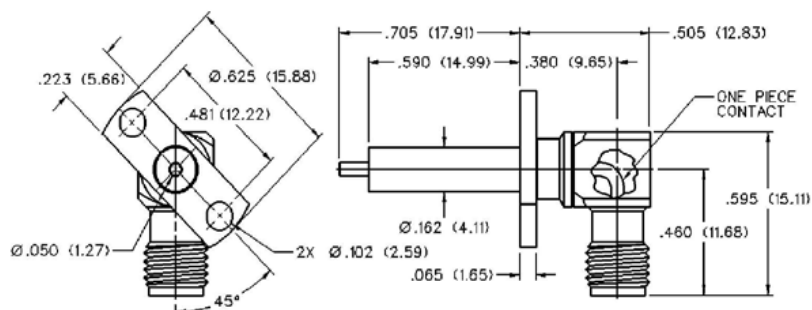
GOLD PLATED	NICKEL PLATED
142-1711-011	142-1711-016

2-Hole RA Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric +45° Orientation

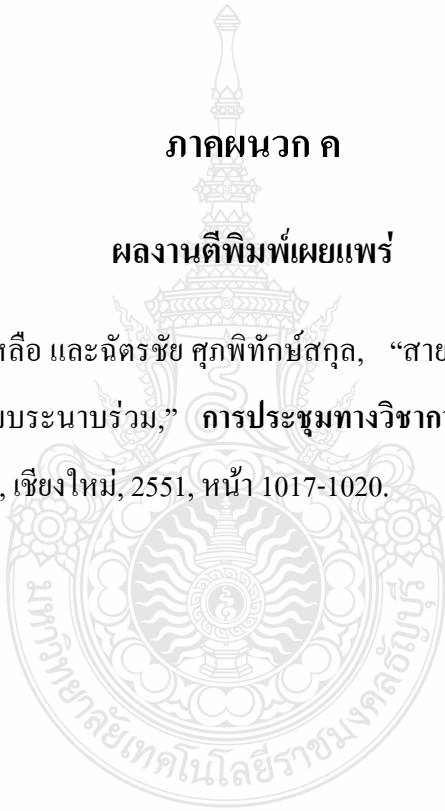


GOLD PLATED	NICKEL PLATED
142-1711-021	142-1711-026

2-Hole RA Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric -45° Orientation



GOLD PLATED	NICKEL PLATED
142-1711-031	142-1711-036



ภาคผนวก ค

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

สุภณ พลสิงห์, ไพฑูรย์ รักเหลือ และฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล, “สายอากาศแพทช์ย่านความถี่แถบคู่ที่
ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม,” การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า(EECON)
ครั้งที่ 33,1-3 ธันวาคม 2553, เชียงใหม่, 2551, หน้า 1017-1020.

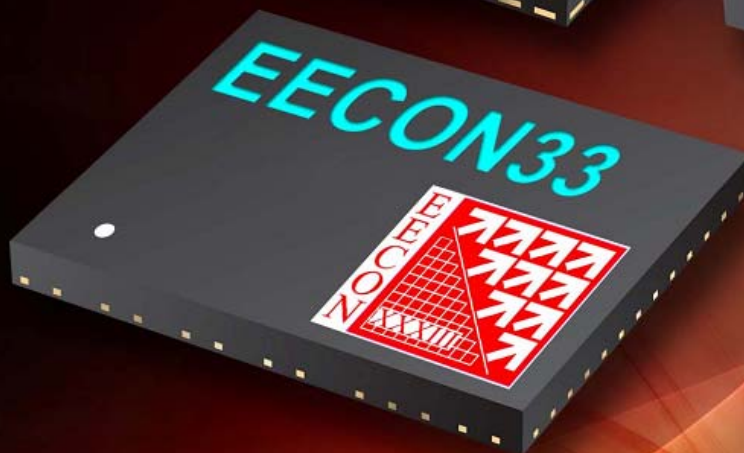


การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๓

33rd Electrical Engineering Conference (EECON-33)

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- โฟโตนิกส์ (PH)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)

กลับสู่สารบัญหลัก



ร่วมจัดโดย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ABB **CSG**
SOLUTION



*111 Years Engineering
Innovation*



คณะกรรมการ
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
ครั้งที่ 33

ดร.คมสันต์	ดาโรจน์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.พระทีพัฒน์	ภาสบุตร	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผศ.ดร.ชัชวาลย์	เชรบุตร	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.สุพจน์	สุขโพธารมณี	มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
อาจารย์บุญช่วย	ทรัพย์มนชัย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ศิริโรจน์	ศิริสุขประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.สรารุช	จันทเขต	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

คณะกรรมการสทบ

อาจารย์พูนศรี	วรรณการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
รศ.ปุ่นขวีร์	จามจรีกุล	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
อาจารย์ชุติพันธ์	อู่ยายโสสม	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
อาจารย์ณรงค์	นันทกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผศ.ดร.ศิริโรตม์	เกตุแก้ว	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ดร.ประมุข	อุณหเลขกะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ยี่งรัมย์	อรธเวชกุล	มหาวิทยาลัยราชธานี





คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
ครั้งที่ 33

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PW	อ.ไชยะ แซ่มซ้อย
PE	รศ.ดร.บุษนา กุลวิทิต
CM	รศ.ดร.วาฬิต เบนจพลกุล
CT	ผศ.ดร.สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์
EL	รศ.ดร.บรรจง โคประเสริฐพงศ์
DS	รศ.ดร.สมชาย จิตะพันธ์กุล
CP	รศ.ดร.เอกชัย สิลารัตน์
PH	ผศ.ดร.ทับทิม อ่างแก้ว
GN	รศ.ดร.มานะ ศรีพุทธศักดิ์
BE	ผศ.ดร.อาภรณ์ ชีรมงคลรัมย์

มหาวิทยาลัยกรุงเทพ

PW	ดร.ณัฐภพ นิ่มปิติวัน
CM	ผศ.สงกรานต์ กั้นทวงค์
CT	อ.อัศวพงศ์ เอกศิริ
EL	อ.สมศักดิ์ อภิรักษ์สมบัติ
DS	ผศ.ชนะศักดิ์ พันธุ์ประสิทธิ์
CP	ดร.ลออ บุญเกษม
PH	รศ.ดร.กิพรัตน์ วงษ์เจริญ
GN	อ.กัญจนา พัฒนวรพันธุ์
BE	ผศ.ดร.สุพจน์ สุขไพธามณ์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

PW	รศ.สันติ อัครศรีพงษ์ธร
PE	ผศ.ดร.ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ
CM	ผศ.ดร.ศรีจิตรา เจริญลาภนพรัตน์
CT	ผศ.ดร.พีระยศ แสนโกชน์
EL	ผศ.ดร.ชูเกียรติ การะเกตุ
DS	รศ.ดร.วุฒิพงศ์ อารีกุล
CP	รศ.ดร.มงคล รักษาพัชรวงค์

PH	ดร.พิสุทธิ์ รัตศักดิ์
GN	ผศ.ดร.วชิระ จงบุรี
BE	ผศ.ดร.ดุสิต ธนเพทาย

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

EL	ผศ.ดร.จิรนุช เสงี่ยมศักดิ์
PH	ผศ.ดร.นันทกานต์ วงศ์เกษม

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

PW	ผศ.ดร.สมบูรณ์ นุชประยูร
PE	รศ.ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ
CM	ผศ.ธราดล โกมลมิตร
CT	อ.จิรศักดิ์ วัฒนาเดชาพันธ์
EL	ผศ.ดร.นิภาภรณ์ ศิริพล
DS	ผศ.ดร.เสริมศักดิ์ เอื้อตรงจิตต์
CP	ผศ.กสิน ประกอบไวทยกิจ
PH	ผศ.พันธ์ธาดา นรากร
GN	รศ.ดร.เอกชัย แสงอินทร์
BE	รศ.ดร.นิพนธ์ ชีระอำพน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

PW	ผศ.ดร.สถิตทิพย์ สิ้นธุสนธิชาติ
CM	ดร.สารวิทย์ บุญยะเวศ
CT	ดร.ทิพย์ แม้นเมฆ
EL	รศ.ดร.พีระพล ยุวภูมิตานนท์
DS	ผศ.ดร.เผ่าศักดิ์ ศิริสุข
CP	ผศ.ดร.ธันวา ศรีประโม่ง
PH	รศ.ดร.อธิคม ฤกษ์บุตร
GN	รศ.ดร.สุเจตน์ ชันทรัมย์

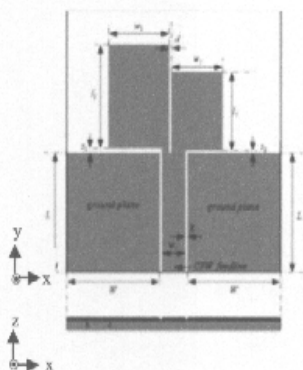


และแพทช์ขนาดเล็กร โชนแนซันในโหมดสอง (5.2GHz) สายอากาศที่นำเสนอนี้ ออกแบบให้มีการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ 50 โอห์มเพื่อใช้งานกับระบบสื่อสารไร้สาย

2. การออกแบบและสร้าง

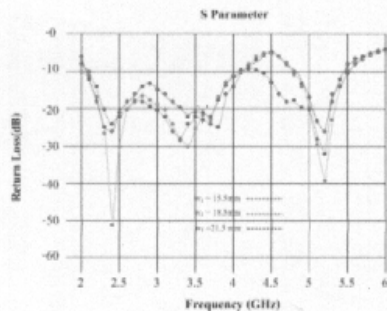
การออกแบบสายอากาศย่านความถี่กว้างที่ป้อนด้วยเสานำสัญญาณแบบระนาบร่วมที่มีการปรับแพทช์รูปสี่เหลี่ยมและการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะของเสานำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกรวดค้ำด้านล่าง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีการส่งคงรูปเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective dielectric constant) และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic impedance) จะอยู่ในเทอมอีตราส่วนของอินทิกรัลรีเบบสมบูรณ์ขั้นแรก (Complete elliptic integral of the first kind)[3] ร่วมกับโปรแกรม IE3D ในการออกแบบและหาค่าที่เหมาะสมที่สุด(Optimization) ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยสตริป(Strip)อยู่ตรงกลางด้านบนของฐาน ไดอิเล็กตริก(Substrate)โดยมีความกว้างของสตริป (w_f) = 6.80 mm.[11-13] มีร่อง(Slot)และระนาบกรวดค้ำตามลำดับมีความกว้างระหว่างสตริปถึงระนาบกรวดค้ำ(g) = 0.5 mm. และวัสดุที่นำมาใช้เป็นแผ่นวงจรพิมพ์แบบหนาเดี่ยว โดยใช้ FR4 มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) = 4.4 ค่าการสูญเสียแทนเจนซ์ ($\tan\delta$) = 0.02 ความสูงของฐานรองไดอิเล็กตริก (h) = 1.6 mm. ความหนาของทองแดง (t) = 0.002 mm.

การจำลองหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของสายอากาศแบบระนาบร่วม

- จำลอง โดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_f เมื่อกำหนดให้ $w_f = 6.8$ mm., $W=27.5$ mm., $L= 29.5$ mm., $g= 0.5$ mm., $s_1= 3.85$ mm., $d=0.95$ mm., $w_2 = 14.5$ mm., $l_1 = 29$ mm., $l_2 = 22$ mm., $s_2 = 0.5$ mm. มีผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 2 และผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_f จะได้ค่าความถี่กลาง f_c , f_u และค่าแบนด์วิดท์แสดงดังตารางที่ 1



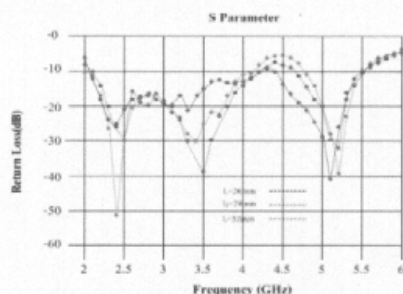
รูปที่ 2 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_f

ตารางที่ 1 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_f

w_f	f_c / BW (GHz)	f_u / BW (GHz)
$w_f = 15.5$ mm	2.4 / 2.03	5.2 / 1.25
$w_f = 18.5$ mm	2.4 / 2.18	5.2 / 0.75
$w_f = 21.5$ mm	2.4 / 2.14	5.2 / 0.69

ผลการจำลอง โดยการเปลี่ยนแปลงค่า w_f จะมีผลต่อค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ดี สังเกตเห็นได้ว่าที่ค่า $w_f = 18.5$ mm. นั้น จะมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ดีที่สุด และมีผลค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศเป็นผลตอบสนองแบบสองความถี่

- จำลอง โดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_1 เมื่อกำหนดให้ $w_f = 6.8$ mm., $W=27.5$ mm., $L= 29.5$ mm., $g= 0.5$ mm., $s_1 = 3.85$ mm., $d=0.95$ mm., $w_1 = 18.5$ mm., $w_2 = 14.5$ mm., $l_2 = 22$ mm., $s_2 = 0.5$ mm. มีผลการจำลองแสดงรูปที่ 3 และผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_1 จะได้ค่าความถี่กลาง f_c , f_u และค่าแบนด์วิดท์แสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 3 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_1



ตารางที่ 2 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_1

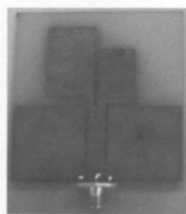
l_1	f_1 / BW (GHz)	f_2 / BW (GHz)
$l_1 = 26$ mm	2.4 / 1.85	5.2 / 1.04
$l_1 = 29$ mm	2.4 / 2.18	5.2 / 0.75
$l_1 = 32$ mm	2.4 / 2.21	5.2 / 1.09

ผลการจำลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่า l_1 ดังที่ได้ ว่าเป็นที่ค่า $l_1 = 29$ mm. นั้นจะมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ต่ำและมีผลค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศเป็นผลตอบสนองแบบสองความถี่ และถ้าลดความยาว l_1 และเพิ่มค่าความกว้าง w_1 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศมีค่าต่ำกว่า -10 dB เกิดผลตอบสนองแบบ แถบความถี่กว้าง ซึ่งสามารถนำไปออกแบบเป็นสายอากาศแถบความถี่กว้างได้

3. สายอากาศต้นแบบและการวัด

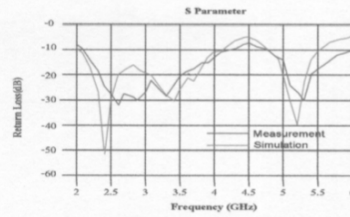
หลังจากได้ทำการวิเคราะห์การจำลองแบบด้วยโปรแกรม IE3D จนได้ขนาดต่างๆของโครงสร้างสายอากาศที่เหมาะสมที่สุด นำค่าที่ได้มาสร้างเป็นสายอากาศแสดงดังรูปที่ 4 เป็นชิ้นงานจริงของสายอากาศแพทช์ย่านความถี่แถบคู่ที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมและมีค่าของสายอากาศแสดงดังนี้

- $W = 27.5$ mm.
- $L = 29.5$ mm.
- $w_f = 6.8$ mm.
- $w_1 = 18.5$ mm.
- $s_1 = 3.85$ mm.
- $d = 0.95$ mm.
- $l_1 = 29$ mm.
- $l_2 = 22$ mm.
- $g = 0.5$ mm.
- $w_2 = 14.5$ mm.
- $s_2 = 0.5$ mm.



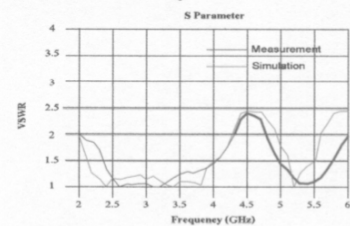
รูปที่ 4 ชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบระนาบร่วมแพทช์รูปสี่เหลี่ยม

ผลการเปรียบเทียบการจำลองกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบระนาบร่วมแพทช์รูปสี่เหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 5



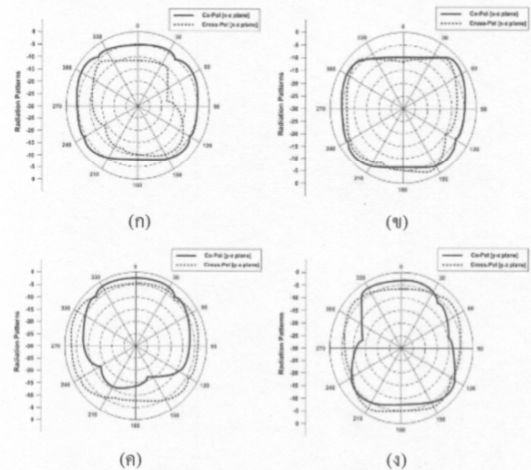
รูปที่ 5 การเปรียบเทียบการจำลองของค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศ

จากรูปที่ 5 ผลที่ได้จากการวัดชิ้นงานเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองมีความแตกต่างกันที่แบนด์วิดท์และค่าสูญเสียย้อนกลับ โดยจะมีความแตกต่างจากการจำลองอยู่เล็กน้อย



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบการจำลองของอัตราส่วนคลื่นนิ่งกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศ

จากรูปที่ 6 ผลที่ได้จากการวัดชิ้นงานจริงเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองของอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีความแตกต่างกันที่ความกว้างของแบนด์วิดท์และมีอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่สูงกว่าจากการจำลองและรูปที่ 7 แสดงผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ



รูปที่ 7 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ (ก) ความถี่ 2.4 GHz ระนาบ x-z (ข) ความถี่ 2.4 GHz ระนาบ y-z (ค) ความถี่ 5.2 GHz ระนาบ x-z (ง) ความถี่ 5.2 GHz ระนาบ y-z



4. สรุป

สายอากาศแพทช์ความถี่แถบคู่รูปสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม โดยอาศัยหลักการของสายอากาศแพทช์ที่มีขนาดที่ต่างกันทำให้เกิดการโชนกันสองโหมดความถี่ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมากกว่า -10 dB ที่ย่านความถี่ 2.4 GHz มีแบนด์วิดท์ 2.18 GHz (2.03- 4.21GHz) และ 5.2 GHz มีแบนด์วิดท์ 0.75 GHz (4.75- 5.5GHz) จากผลการจำลองการทำงานและทำให้เหมาะสมมากที่สุด จะพบว่าสายอากาศได้ค่าแบนด์วิดท์ที่สูงที่สุดและการวัดขึ้นงานจริงด้วยเครื่องวิเคราะห์ข่ายงานไฟฟ้า (Network Analyzer) พบว่าสายอากาศแพทช์ความถี่แถบคู่รูปสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม มีความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมากกว่า -10 dB ที่ความถี่ช่วงต่ำมีค่าความสูญเสียย้อนกลับต่ำสุด -33 dB ที่ความถี่ 2.70 GHz และความถี่ช่วงสูงมีค่าแบนด์วิดท์ 2.15 GHz (2.20-4.35GHz) และมีค่าความสูญเสียย้อนกลับต่ำสุด -30 dB ที่ความถี่ 5.37 GHz และมีค่าแบนด์วิดท์ 1.25 GHz (4.75-6GHz)

กิตติกรรม

ขอขอบคุณ อาจารย์ไพฑูรย์ รักเหลือและผศ.จินตนา นาคะสุธรรม ในการร่วมงานวิจัยที่ให้คำแนะนำวัตถุประสงค์และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพสถานที่ทำงาน จึงขอขอบคุณอย่างสูงมา ณ. ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Agrawell, N.P., Kumar, G., Ray, K.P. 1998 Wideband planar monopole antennas. IEEE Transaction on Antennas Propagation, AP-46,249-251
- [2] Constanine A. Balanis. 1997. Antenna Theory Analysis and Design. Singapore: John wiley&Son.
- [3] ECTI-CARD. 2009. [online] Available: http://www.ecti-thailand.org/assets/papers/16_pub_1.pdf. (Retrieved December 22, 2009)
- [4] Sze, J.Y., Wong, K.- L. 2001 Bandwidth enhancement of a microstrip-Line Fed Printed Wide slot antenna. IEEE Antennas and Wireless Propagation, 49(7), 1020-1024.
- [5] Horng-Dean Chen and Hong-Twu Chen. 2004. "A CPW- Fed Dual-Frequency Monopole Antenna," IEEE transactions on antennas and propagation, vol.52.no.4, April.
- [6] A.A. Eldek, C.M. Allen, A. Z. Elsherbeni, C.E. Smith and Kai-Fong Lee, " Slot Antenna for Dual and Wideband Operation in Wireless Communication Systems ", IEEE Antenna's and Propagation Magazine, Vol.44, 2002.
- [7] ไกรศร สารีชา, ประยุทธ์ อัครเอกพลีและเวช วิเวกม "สายอากาศร่องหกเหลี่ยมด้านเท่าแบบแถบความถี่กว้างที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมที่มีการจูนสตรัมสามเหลี่ยมด้านเท่า", EECON29 Conferen,

Vol 2, หน้า 781-784, พฤศจิกายน 2549.

- [8] A. Horita and H. Iwasaki "Planar Trapezoid Dipole Antenna with Ultra Wideband Characteristic", IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 2B, pp.540-543, 2005
- [9] T. Archevapanichai, and T. Wakabayashi, "E-Shaped Slot Antenna for WLAN Applications", ICCAS, pp.2854-2857, October, 2007.
- [10] C. Chulvanich, J. Nakasuwan, N. Songthanapitak, N. Anantrasirichai and T. Wakabayashi, "Design Narrow Slot Antenna for Dual Frequency" , PIERS, China, March, 2007
- [11] C. A. Balanis, "Antenna Theory", 2nd Edition, New York, John Wiley & Son, Inc, 1982.
- [12] I. J. Bahl and P. Bhartia, "Microstrip Antennas", Dedham MA, Artech house Inc., 1980.
- [13] E. O. Hammerstad, "Equation for Microstrip Circuit Design", 5th IEEE Europe Microwave conference, pp. 268-272, 1975.



ศุภณ พลสิงห์ ปัจจุบันเป็นนักศึกษาปริญญาโทสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแขนงอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจงานด้านวิศวกรรมสายอากาศย่านความถี่ไมโครเวฟ



ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ อาจารย์ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคมคณะวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจ ด้านวิศวกรรมสายอากาศ



ดร. นัตถชัย สุภทท์ภักษ์สกุล เป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจด้านประมวลสัญญาณเสียง



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ- นามสกุล	นายสุภณ พลสิงห์
วันเดือนปีเกิด	2 พฤศจิกายน 2500
ที่อยู่	37/242 หมู่ 16 แขวงคลองสามวาตะวันตก เขตคลองสามวา กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า-สื่อสาร จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปี พ.ศ. 2545
ประสบการณ์การทำงาน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม

