

การศึกษาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิดแฉวลำดับ

รูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

STUDY ON RADIATION PATTERN OF RIGHT ANGLE
THIN - FILM SLOT ARRAY ANTENNA

กิตติศักดิ์ ทองดา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

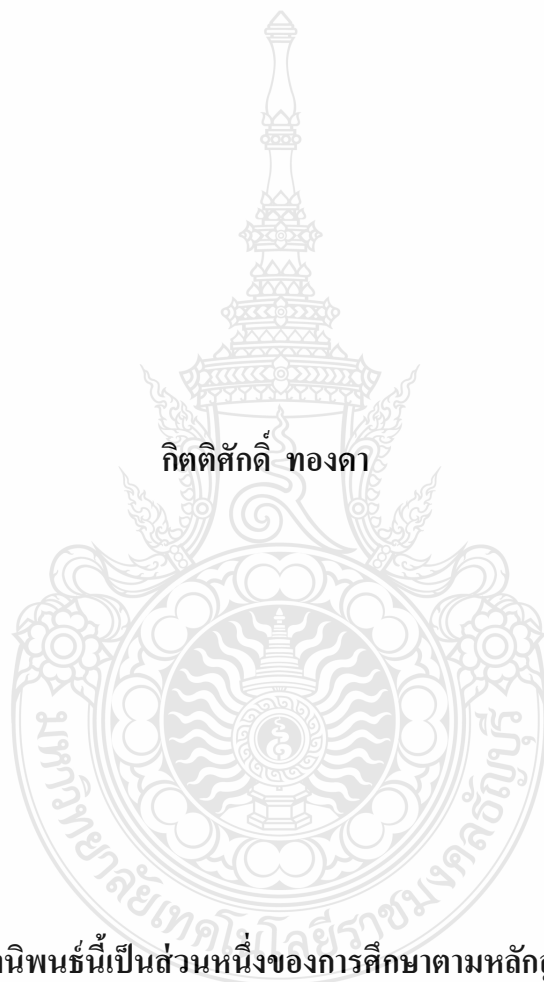
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับ

รูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง



กิตติศักดิ์ ทองดา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิดแฉวลำดับรูป ตัวแอลแบบฟิล์มบาง Study on Radiation Pattern of Right Angle Thin - Film Slot Array Antenna
ชื่อ-นามสกุล	นายกิตติศักดิ์ ทองดา
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ไพฑูรย์ รักเหลือ, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ดร.อำนวยการ เรื่องวาริ)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.กนก เอนจิระพงษ์เวช)

กรรมการ

(ดร.นัทรชัย ศุภพิทักษ์สกุล)

กรรมการ

(ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมหมาย ผิวสอาด)

วันที่ 10 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2556

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับ รูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง
ชื่อ - นามสกุล	นายกิตติศักดิ์ ทองคา
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ไพฑูรย์ รักเหลือ, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง โดยใช้วัสดุฐานรองแบบไม่ล่าฟิล์มที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3.2 และมีความหนา 0.4 มิลลิเมตรซึ่งมีการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป IE3D (Zeland) โดยสายอากาศที่ออกแบบจะมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ออกแบบและสร้างได้ง่าย มีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า - 10 dB

สายอากาศถูกออกแบบโดยกำหนดความถี่ที่ 2.45 GHz ประกอบไปด้วยสายอากาศ 1 ช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง กับสายอากาศ 2 ช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง และสายอากาศ 4 ช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง ได้ค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ - 36 dB กับ - 39 dB และ - 41 dB อัตราการขยาย 1.95 dBi กับ 2.89 dBi และ 4.47 dBi อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง 1.01 : 1 กับ 1.1 : 1 และ 1.11 : 1 มีขนาดแบนด์วิดท์ 195 MHz (2.35 - 2.545 GHz) กับ 105 MHz (2.395 - 2.5 GHz) และ 100 MHz (2.4 - 2.5 GHz) ตามลำดับ การเปรียบเทียบสายอากาศระหว่างแบบกาวด้อนั้นกับแบบกาวด์จกัคมีผลใกล้เคียงกัน

จากการทดสอบสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่ความถี่ 2.45 GHz ได้ค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ - 33 dB อัตราการขยาย 3.28 dBi อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง 1.2 : 1 และมีแบนด์วิดท์ 120 MHz (2.395 - 2.515 GHz) การยึดหยุ่นของสายอากาศได้ค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ - 29 dB ซึ่งจากการทดสอบสายอากาศจากโครงสร้างจริงนั้นใกล้เคียงกับผลการจำลอง

คำสำคัญ: แบบรูปการแผ่พลังงาน สายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง ไม่ล่าฟิล์ม

Thesis Title	Study on Radiation Pattern of Right Angle Thin - Film Slot Array Antenna
Name - Surname	Mr. Kittisak Thongda
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Mr. Paitoon Raklua, D.Eng.
Academic Year	2012

ABSTRACT

This thesis is to study on radiation pattern of right angle thin - film slot array antenna. The antenna on mylar polyester film substrate that dielectric constant of 3.2 and thickness of 0.4 mm. The antenna is designed using IE3D (Zeland) simulation software. The antenna designed was for small lightweight and easy fabricated. Which the return loss is lower than - 10 dB.

The antenna is designed in frequencies at 2.45 GHz include right angle thin - film 1 slot array antenna, right angle thin - film 2 slot array antenna, and right angle thin - film 4 slot array antenna. The return loss of - 36 dB, - 39 dB, and - 41 dB gain 1.95 dBi, 2.89 dBi, and 4.47 dBi VSWR 1.01 : 1, 1.1 : 1, and 1.11 : 1 and bandwidth 195 MHz (2.35 - 2.545 GHz), 105 MHz (2.395 - 2.5 GHz), and 100 MHz (2.4 - 2.5 GHz). The comparison results between the antenna ground infinite nearby with antenna ground fixed is similar.

The measurement of right angle thin - film slot array antenna at frequencies of 2.45 GHz, shows the return loss of - 33 dB, gain 3.3 dBi, VSWR 1.2 : 1 and bandwidth 120 MHz (2.395 - 2.515 GHz). The return loss of flexibility antenna is - 29 dB. The test results of antenna is similar with the simulation results.

Keywords: radiation pattern, right angle thin - film slot array antenna, mylar film

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีจากความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ดร.ไพฑูริย์ รักเหลือ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.อำนาจ เรืองวารี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.กนก เจนจิระพงศ์เวช ผู้ทรงคุณวุฒิกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า และให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือ และสถานที่ทำงานวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ เสมอมา

ขอขอบคุณ คุณพรเทพ ทองชัย คุณอนุชา มาละใจ คุณบุญฤทธิ์ คุ่มเขตและคุณทินวัฒน์ จังจิง นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ท่านได้ให้ความอนุเคราะห์สำหรับข้อมูลการทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์และแนวคิด ขอขอบคุณบุคลากรบัณฑิตวิทยาลัยทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และพนักงานบริษัท ทู คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) หน่วยงานทรูออนไลน์ เขตปฏิบัติการดอนเมืองทุกท่าน ที่ให้ความเอาใจใส่ช่วยเหลือดูแลให้กำลังใจ อีกทั้งมอบความรักและความเมตตาแล้วก็ตามกรุณา ที่เสียสละเวลาทำการอบรมสั่งสอนเสริมสร้างความรู้และทักษะเพื่อปลูกฝังนิสัยที่ถูกต้องอันดีงามตลอดมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเดชา ทองดา คุณแม่บุษบา ทองดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

กิตติศักดิ์ ทองดา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	๗
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	2
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	2
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของไมโครสตริป.....	4
2.2 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป.....	6
2.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด.....	18
2.4 ระเบียบวิธี โมเมนต์ (The Moment of Method).....	23
2.5 ประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริป.....	28
2.6 มาตรฐานเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11.....	29
2.7 มาตรฐานเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.16.....	32
2.8 ทฤษฎีพื้นฐานและการนำไปใช้ในการจำลองสายอากาศของโปรแกรม IE3D.....	33
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
3 การออกแบบสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง.....	36
3.1 การออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณ ไมโคร สตริป (Microstrip Line).....	36

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.2 การออกแบบสายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบางที่ถูกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip Line).....	41
3.3 การออกแบบสายอากาศช่องเปิดมุม 135 องศา แบบฟิล์มบางที่ถูกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip Line).....	48
3.4 การออกแบบสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบางที่ถูกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip Line).....	55
3.5 การออกแบบสายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา แบบฟิล์มบางที่ถูกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip Line).....	61
3.6 การออกแบบสายอากาศช่องเปิดสองแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่ถูกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip Line).....	69
3.7 การออกแบบสายอากาศช่องเปิดแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่ถูกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip Line).....	76
3.8 การเปรียบเทียบผลการจำลองของสายอากาศช่องเปิดแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง.	83
3.9 สรุปผลการออกแบบของสายอากาศช่องเปิดแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง.....	90
4 การทดสอบและผลการทดลอง.....	91
4.1 การทดสอบและผลการทดลองของสายอากาศช่องเปิดแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง...	91
4.2 สรุปผลการทดสอบ	101
5 สรุปผลการวิจัย	102
5.1 สรุปผลการทดลอง	102
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	104
รายการอ้างอิง.....	105
ภาคผนวก.....	108
ภาคผนวก ก ภาพต้นแบบ สายอากาศช่องเปิดแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง	109
ภาคผนวก ข ผลการวัดคุณลักษณะต่างๆ ของไมล้าฟิล์มและ DATA SHEET.....	111
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	121
ประวัติผู้เขียน.....	140

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 การเปรียบเทียบของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางแบบต่างๆ....	68
4.1 ผลเปรียบเทียบการจำลองกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง	94
5.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศที่ได้จากการจำลองและการวัดจริง	104



สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของไมโครสตริป 4
2.2	ลักษณะของแบบรูปการแผ่พลังงานในไมโครสตริป 5
2.3	โครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ 7
2.4	เส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป 7
2.5	สายส่งไมโครสตริปที่มี $w/h \gg 1$ 10
2.6	สายส่งไมโครสตริปที่มี $w/h \ll 1$ 10
2.7	ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิภาพ 12
2.8	การส่งผ่านของคลื่น TEM แบบอุดมคติในไมโครสตริป 13
2.9	สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบช่องต่อ 15
2.10	สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบมุมฉาก 16
2.11	สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบขั้น 17
2.12	สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบรูปตัว T 18
2.13	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด 19
2.14	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ส่งผ่านคลื่นแบบปิดวงจร 19
2.15	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ส่งผ่านคลื่นแบบเปิดวงจร 19
2.16	การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น 21
2.17	การกระจายคลื่นจากช่องเปิด 22
2.18	วิธีการเลื่อนจุดกึ่งกลางของช่องเปิดออกจากจุดกึ่งกลางของสายส่งสัญญาณ 22
2.19	วิธีการปรับความยาวท่อนสั้น 23
2.20	วิธีการหมุนช่องเปิด 23
2.21	เส้นลวดนำไฟฟ้าขนาดบางรักษาไว้ที่ศักย์คงตัว 25
2.22	การแบ่งเส้นลวดออกเป็น N ส่วน 26
3.1	โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริป 37
3.2	พารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริป 37
3.3	โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบางที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโคร สตริป 42
3.4	พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบาง 42

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.5 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ S1	43
3.6 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ A1.....	44
3.7 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz..	45
3.8 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ ของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz.....	45
3.9 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ x-z และระนาบ y-z ที่ระยะทางต่างๆ กัน...	46
3.10 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบางที่ ออกแบบที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz ที่ระยะทางแตกต่างกัน	47
3.11 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดมุม 135 องศา แบบฟิล์มบางที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโคร สตริป.....	49
3.12 พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดมุม 135 องศา แบบฟิล์มบาง.....	49
3.13 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ S2	50
3.14 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ A2=B1.....	51
3.15 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz..	51
3.16 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ ของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz.....	52
3.17 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ x-z และระนาบ y-z ที่ระยะทางต่างๆ กัน...	53
3.18 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศช่องเปิดมุม 135 องศา แบบฟิล์มบางที่ ออกแบบที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz ที่ระยะทางแตกต่างกัน	54
3.19 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบางที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโคร สตริป.....	55
3.20 พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบาง.....	56
3.21 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ S3	57
3.22 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ A3=B2.....	58
3.23 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz..	58
3.24 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ ของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz.....	59
3.25 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ x-z และระนาบ y-z ที่ระยะทางต่างๆ กัน...	60
3.26 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบางที่ได้ ออกแบบที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz ที่ระยะทางแตกต่างกัน	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.27 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา แบบฟิล์มบางที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริป.....	62
3.28 พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา แบบฟิล์มบาง.....	62
3.29 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ S4.....	63
3.30 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ A4=B3.....	64
3.31 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz..	65
3.32 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ ของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz.....	65
3.33 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบไกลระนาบ x-z และระนาบ y-z ที่ระยะทางต่างๆ กัน...	66
3.34 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา แบบฟิล์มบางที่ออกแบบที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz ที่ระยะทางแตกต่างกัน	67
3.35 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดสองแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริป	69
3.36 พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดสองแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง.....	69
3.37 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ S5=S6.....	71
3.38 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ A5=A6=B4=B5.....	72
3.39 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz..	73
3.40 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ ของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz.....	73
3.41 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบไกลระนาบ x-z และระนาบ y-z ที่ระยะทางต่างๆ กัน...	74
3.42 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศช่องเปิดสองแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่ออกแบบที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz ที่ระยะทางแตกต่างกัน.....	75
3.43 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริป.....	76
3.44 พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง.....	76
3.45 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ S6=S7=S8=S9.....	79
3.46 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ A7=A8=A9=A10=B6=B7=B8=B9	79
3.47 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz..	80
3.48 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ ของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz.....	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.49	แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ $x-z$ และระนาบ $y-z$ ที่ระยะทางต่างๆ กัน... 81
3.50	ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศช่องเปิดแฉลบรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่ออกแบบที่ความถี่ 2.45 GHz ที่ระยะทางแตกต่างกัน 82
3.51	เปรียบเทียบโครงสร้างสายอากาศช่องเปิดแฉลบรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางทั้ง 3 แบบ 84
3.52	เปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดแฉลบรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางทั้ง 3 แบบ 85
3.53	เปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแฉลบรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางทั้ง 3 แบบ 86
3.54	เปรียบเทียบอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศช่องเปิดแฉลบรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางทั้ง 3 แบบ..... 86
3.55	เปรียบเทียบสายอากาศช่องเปิดแฉลบรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางระหว่างกาวค้อนันต์กับการกำหนดขนาดกาวด์..... 87
3.56	การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดแฉลบรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางระหว่างกาวค้อนันต์กับการกำหนดขนาดกาวด์..... 87
3.57	เปรียบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสายอากาศช่องเปิดแฉลบรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางระหว่างกาวค้อนันต์กับการกำหนดขนาดกาวด์..... 88
3.58	การเปรียบเทียบระหว่างการกาวค้อนันต์กับการกำหนดกาวด์ของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบ $x-z$ 89
3.59	การเปรียบเทียบระหว่างการกาวค้อนันต์กับการกำหนดกาวด์ของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบ $y-z$ 89
4.1	เครื่องมือวัดวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น E8363B 91
4.2	วิธีการวัดและวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดแฉลบรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง..... 92
4.3	ผลการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดแฉลบรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง..... 92
4.4	ผลการวัดค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศช่องเปิดแฉลบรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง 93

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.5	การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ได้จากการจำลองกับการวัด ขึ้นงานจริงของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง..... 94
4.6	การเปรียบเทียบการจำลองของอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งกับการวัดขึ้นงานจริงของ สายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง..... 95
4.7	การทดสอบการวัดอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์ม บาง..... 96
4.8	เปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองแบบของค่าอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิด แถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง..... 97
4.9	การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอล แบบฟิล์มบางในแนวระนาบ $x-z$ 98
4.10	การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอล แบบฟิล์มบางในแนวระนาบ $y-z$ 98
4.11	การเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงกับการจำลองของแบบรูปการแผ่พลังงานของ สายอากาศในระนาบ $x-z$ 99
4.12	การเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงกับการจำลองของแบบรูปการแผ่พลังงานของ สายอากาศในระนาบ $y-z$ 99
4.13	การยืดหยุ่นของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง..... 100
4.14	การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ได้จากการวัดขึ้นงานจริงกับ การยืดหยุ่นขึ้นงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง 101
5.1	การเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการจำลองและการวัดจริงสายอากาศช่อง เปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง..... 102

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Δ	Delta
ϵ_{eff}	Effective Dielectric Constant
AES	Advanced Encryption Standard
Bf	Band Width Factor
BW	Band Width
C	Capacitor
CCK	Complimentary Code Keying
cm	Centimeter
d	Distance
dB	Decibel
dB <i>i</i>	Decibel Isotropic
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EAP-FAST	Extensible Authentication Protocol - Flexible Authentication Via Secure Tunneling
EAP-TLS	Extensible Authentication Protocol -Transport Layer Security
f	Frequency
f_c	Frequency Center
f_h	Frequency High
f_l	Frequency Low
f_r	Frequency Resonance
GHz	Giga Hertz
h	High
IAPP	Inter Access Point Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITU	International Telecommunication Union
L	Long
LEAP	Lightweight Extensible Authentication Protocol

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

MAC	Media Access Control
Mbps	Mega Bit Per Second
MHz	Mega Hertz
mm	Millimeter
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuit
MOM	Method of Moment
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PEAP	Protected Extensible Authentication Protocol
Q	Quality Factor
QoS	Quality of Service
RF	Radio Frequency
S_{11}	Return Loss
TEM	Transverse Electric-Magnetic
VoIP	Voice Over IP
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
W	Wide
WECA	Wireless Ethernet Comparability Alliance
WEP	Wired Equivalent Privacy
WPA	Wi-Fi Protected Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WiFi	Wireless Fidelity
Z _m	Input Impedance

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านอินเทอร์เน็ตและมัลติมีเดียได้รับความนิยมและแพร่หลายมากขึ้น จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ระบบการสื่อสารไร้สายได้ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง และมีการเติบโตอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าอุปกรณ์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น โทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile) และคอมพิวเตอร์แบบพกพา (Notebook) จะต้องต่ออุปกรณ์ไร้สายที่สามารถใช้งานได้หลายๆ ระบบ โดยในแต่ละระบบก็จะมีควมถี่ที่ใช้งานแตกต่างกัน ในปัจจุบันได้มีการกำหนดมาตรฐานเพื่อที่จะมารองรับย่านความถี่ที่ได้มาใช้งานในหลากหลาย ระบบของการสื่อสารไร้สาย ตัวอย่างเช่น การสื่อสารท้องถิ่นไร้สาย Wireless Local Area Network (WLAN) กับอีกระบบเครือข่ายตรวจจับแบบไร้สาย Wireless Sensor Network (WSN) เป็นต้น โดยจะมีย่านความถี่ที่ใช้งานตามมาตรฐานต่างๆ คือ IEEE 802.11a/b/g/h/j/n สำหรับ WLAN และ WSN มาตรฐานต่างๆ ที่กล่าวมาได้กำหนดย่านความถี่เดียวกัน ผสมผสานเทคโนโลยีในปัจจุบันเข้าด้วยกันสามารถนำเสนอข้อมูลใช้งานด้านมัลติมีเดียส่งผ่านข้อมูลทั้งภาพและเสียงในระบบไร้สายด้วยความเร็วที่สูง เนื่องจากการใช้งานระบบสื่อสารต่างๆ เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการกำหนดมาตรฐานต่างๆ ขึ้นมารองรับดังที่กล่าวมา ซึ่งแต่ละประเทศหรือแต่ละพื้นที่ก็จะใช้มาตรฐานความถี่ที่ต่างกันออกไป ฉะนั้นการรับส่งข้อมูลต่างๆ ข้ามระบบไม่สามารถกระทำได้นั้นจึงได้มีการคิดค้นสายอากาศที่สามารถใช้งานได้หลากหลายขึ้นมาเพื่อที่จะรองรับกับระบบการสื่อสารไร้สายต่างๆ โดยการใช้สายอากาศเพียงตัวเดียวซึ่งจะเป็นการช่วยให้สะดวกต่อการนำไปใช้งาน อีกทั้งยังประหยัดค่าใช้จ่ายอันเกิดจากการเพิ่มอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ

งานวิจัยนี้จึงมีการศึกษาและการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิด แถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง โดยใช้วัสดุฐานรองแบบใหม่ซึ่งมีขนาดที่บางกว่า FR-4 และสามารถที่จะประยุกต์ใช้งานกับระบบไร้สายแบบต่างๆ ได้ ซึ่งการออกแบบสายอากาศมีการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป IE3D (Zeland) รวมทั้งทำการสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ โดยสายอากาศที่ออกแบบจะมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีรูปร่างไม่ซับซ้อน ออกแบบและสร้างได้ง่าย ราคาไม่สูงมากนักมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ดีและมีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า - 10 dB ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบเครือข่ายแบบไร้สายที่มีประสิทธิภาพต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาคุณลักษณะของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

1.2.2 ศึกษาการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

1.2.3 วิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศด้วยโปรแกรม IE3D (Zeland)

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ออกแบบสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

1.3.2 วิเคราะห์คุณลักษณะแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางเพื่อให้ออกแบบสายอากาศที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้

1.3.3 สายอากาศมีอัตราขยายของสายอากาศ (Antenna Gain) ไม่ต่ำกว่า 2 dBi ในย่านความถี่ใช้งาน

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย จะประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ตามลำดับดังนี้คือ

1.4.1 ศึกษางานวิจัยและหนังสือที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

1.4.2 ออกแบบสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

1.4.3 ศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่ออกแบบเพื่อวิเคราะห์ตัวแปรของสายอากาศ

1.4.4 ศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่ออกแบบ

1.4.5 ทดสอบคุณสมบัติและทำการวิเคราะห์ลักษณะต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

1.4.6 บันทึกผลการทดลองและสรุปผลการทดลองที่ได้จากการดำเนินงานวิเคราะห์ลักษณะต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

สำหรับรายละเอียดของวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางจำลองผลการทำงานของสายอากาศด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป IE3D (Zeland) วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 5 บท โดยสรุปดังนี้

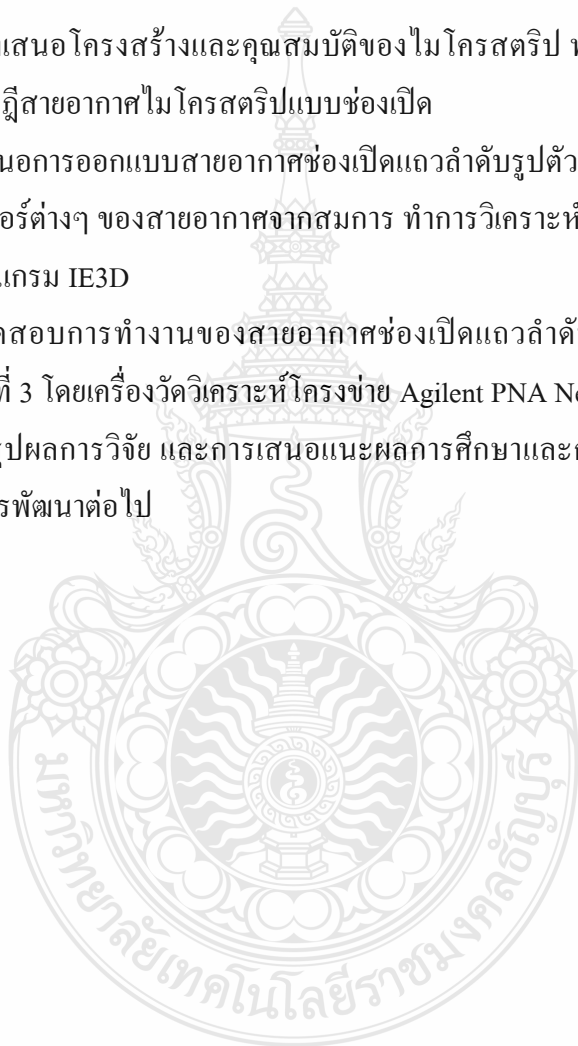
บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาของการวิจัย วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของงานวิจัย ขั้นตอนการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 นำเสนอโครงสร้างและคุณสมบัติของไมโครสตริป ทฤษฎีสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปและทฤษฎีสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด

บทที่ 3 เสนอการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง โดยการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศจากสมการ ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ด้วยการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม IE3D

บทที่ 4 ทดสอบการทำงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางต้นแบบที่กล่าวในบทที่ 3 โดยเครื่องวัดวิเคราะห์โครงข่าย Agilent PNA Network Analyzers E8363B

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และการเสนอแนะผลการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์ทั้งหมด เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป



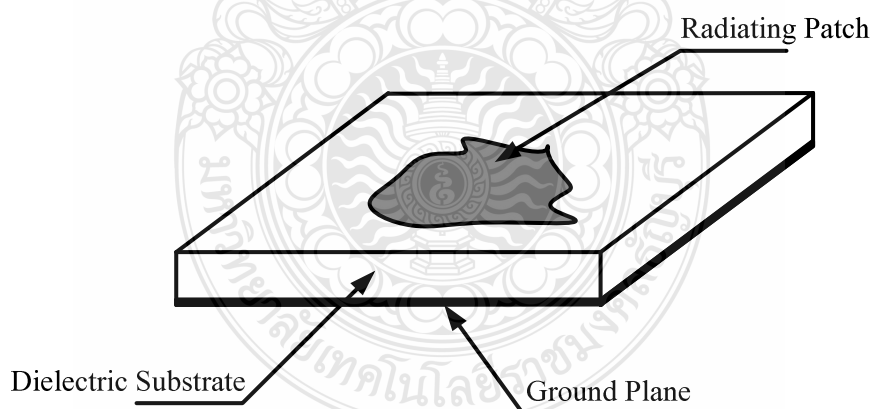
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย โครงสร้างและคุณสมบัติของไมโครสตริป ทฤษฎีสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปและทฤษฎีสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด ทั้งนี้รวมไปถึงเทคโนโลยีเครือข่ายไร้สาย WLAN นอกจากนี้ยังมีวิธีการวิเคราะห์สายอากาศและ โปรแกรมจำลองการทำงานของสายอากาศ IE3D (Zeland)

2.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของไมโครสตริป [1-7]

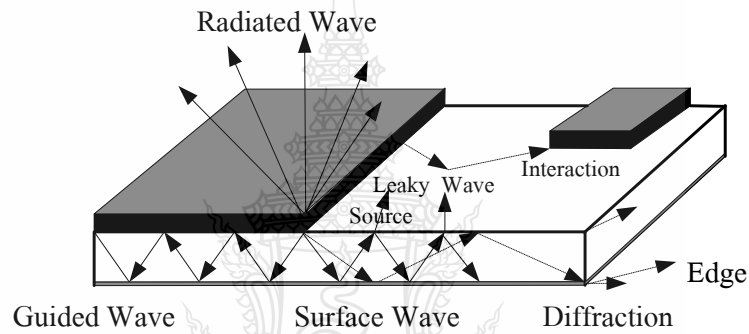
ไมโครสตริปเป็นแผ่นวงจรที่ใช้กันอย่างมากในย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยที่ลักษณะโครงสร้างของไมโครสตริปจะประกอบไปด้วยแผ่นตัวนำบางๆ ที่มีความสูญเสียพลังงานต่ำวางอยู่บนวัสดุที่เรียกว่าวัสดุฐานรอง และอีกด้านหนึ่งของวัสดุฐานรองจะเป็นระนาบกราวด์ (Ground Plane) โดยโครงสร้างของไมโครสตริปนั้นสามารถจะนำไปเป็นวงจรที่ใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟและสามารถนำไปเป็นสายอากาศสำหรับคลื่นความถี่ไมโครเวฟได้อีกด้วย



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของไมโครสตริป

2.1.1 คลื่นที่แผ่กระจายในไมโครสตริป

คลื่นถูกนำทาง (Guided Wave) สำหรับทิศทางการแผ่กระจายคลื่นของคลื่นถูกนำทางนั้น จะมีลักษณะมุมของการแผ่กระจายทำมุมอยู่ระหว่างช่วง 6 ถึง 9 นาฬิกา (ทิศตามเข็มนาฬิกา) โดยลักษณะการแผ่กระจายคลื่นนั้นจะแผ่กระจายอยู่เฉพาะในวัสดุฐานรอง และคลื่นจะสะท้อนไปมาระหว่างตัวนำสองตัว คลื่นถูกนำทางนี้จะนำไปใช้อย่างมากกับสายส่งสัญญาณสำหรับคลื่นแบบนี้มีส่วนในการสะสมพลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ต้องการในสายอากาศแบบแผ่นเมื่อเลือกใช้วัสดุฐานรองที่บางและมีสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity) สูงจะทำให้คลื่นแบบนี้มีอิทธิพลสูง



ภาพที่ 2.2 ลักษณะของคลื่นที่แผ่กระจายในไมโครสตริป

คลื่นแผ่พลังงาน (Radiated Wave) คลื่นแบบนี้จะมีทิศทางการแผ่กระจายคลื่นเป็นมุมที่อยู่ระหว่างช่วง 9 ถึง 3 นาฬิกาโดยจะมีทิศทางที่แผ่ขึ้นไปบนอากาศที่ไม่มีการปิดกั้นของขอบเขตใดๆ ลักษณะของคลื่นแบบนี้จะใช้มากในงานเกี่ยวกับสายอากาศ คลื่นแบบนี้จะมีอิทธิพลสูงเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่หนา (เปรียบเทียบกับความยาวคลื่น) และค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าต่ำ

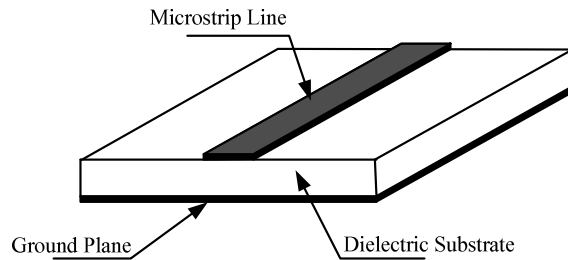
คลื่นรั่ว (Leaky Wave) ลักษณะการแผ่กระจายคลื่นจะอยู่ในช่วง 3 - 6 นาฬิกาโดยคลื่นรั่วจะแผ่กระจายมาจากคลื่นที่สะท้อนมาจากกระดานกราวด์ และไปยังจุดเชื่อมต่อระหว่างอากาศกับแผ่นไดอิเล็กตริก เมื่อคลื่นที่สะท้อนมาถึงตำแหน่งนี้จะทำให้เกิดคลื่นที่ถูกส่งไปในอากาศนั้นคือ คลื่นรั่วออกจากคลื่นที่สะท้อนกลับลงไปวัสดุฐานรอง (Surface Wave) ลักษณะของคลื่นรั่วที่เกิดขึ้นนี้จะนำไปช่วยในการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งจะอยู่ในเงื่อนไขของความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในแต่ละสายอากาศ เช่น ทำให้มีสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ที่สูง

คลื่นผิว (Surface Wave) มุมในการแผ่กระจายที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าของคลื่นร้าว จึงทำให้เกิดคลื่นที่สะท้อนกลับมายังวัสดุฐานรองซึ่งเรียกคลื่นแบบนี้ว่าคลื่นผิว เมื่อคลื่นผิวถูกส่งมาที่ขอบของโครงสร้างดั่งรูป จะทำให้เกิดการแผ่กระจายคลื่นออกมาจากโครงสร้างคลื่นที่แผ่กระจายออกมานี้ทำให้เกิดผลเสียต่อแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ คือ ทำให้พลังงานในการส่งหรือรับน้อยลง ลักษณะของคลื่นแบบนี้จะมีความสำคัญเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่หนาและสภาพยอมทางไฟฟ้ามีค่าสูง

ความต้องการคลื่นในสายส่งสัญญาณและสายอากาศในการแผ่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่งสัญญาณนั้นคลื่นถูกนำทางจะถูกกระตุ้นมากที่สุด ขณะที่จะต้องหลีกเลี่ยงคลื่นแผ่พลังงาน คลื่นร้าว และคลื่นผิว ในทางตรงกันข้ามถ้าเป็นสายอากาศนั้นต้องการให้เกิดคลื่นแผ่พลังงานมากที่สุด และจะต้องป้องกันการเกิดคลื่นนำทางในแผ่นตัวนำและคลื่นผิว

2.2 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป [8-10]

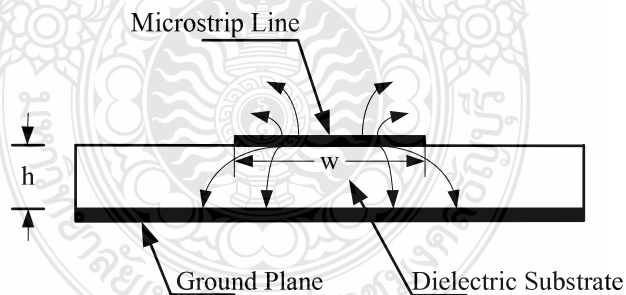
สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ (Microstrip Line) ที่ใช้งานอยู่โดยทั่วไปนั้นจะมีโครงสร้างดังที่แสดงในภาพที่ 2.3 กล่าวคือ จะมีรูปร่างเป็นสตริปหรือแถบโลหะแคบๆ อยู่บนวัสดุฐานรองซึ่งเป็นสาร ไดอิเล็กตริก และด้านล่างของวัสดุฐานรองจะเป็นระนาบกราวด์พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านอยู่ในวัสดุฐานรองบริเวณที่อยู่ระหว่างแถบโลหะแคบกับระนาบกราวด์ ความหนาของวัสดุฐานรองและความกว้างของสตริปนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ (Characteristic Impedance) ที่ต้องการ สำหรับวัสดุฐานรองที่ใช้งานทั่วไปจะมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน และคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุฐานรองที่นำมาใช้ คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ซึ่งจะเป็นค่าที่บ่งบอกคุณสมบัติของการเป็นสาร ไดอิเล็กตริก โดยเทียบกับอากาศว่า ค่านี้จะส่งผลทำให้คุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ของสายส่งไมโครสตริปมีการเปลี่ยนแปลงค่า Lossangent ที่ความถี่ 10 GHz คือ ค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างกระแสการนำกับกระแสดิสเพลซเมนต์ซึ่งค่านี้จะแสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสมาก น้อยเพียงใด โดยที่มีค่ายิ่งต่ำก็ยิ่งดีค่าคงตัวของความร้อน (Thermal Conductivity) เป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่าสาร ไดอิเล็กตริกนั้นมีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดีมากน้อยเพียงใด ค่านี้ยิ่งสูงก็ยิ่งดี สุดท้ายค่าความขรุขระของผิวและความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength) ซึ่งความขรุขระของผิวนั้นจัดว่ามีความสำคัญมากเช่นเดียวกันเพราะจะมีผลกระทบต่อ การส่งผ่านของคลื่นไปตามไมโครสตริป เพราะฉะนั้นความขรุขระน้อยจะดีกว่า สำหรับความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นจะบอกถึงความสามารถในการรับกำลังคลื่นด้วย ดังนั้นค่าสูงจะดีกว่าค่าต่ำ



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์

2.2.2 การส่งผ่านคลื่นในสายส่งไมโครสตริป

ถึงแม้สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปจะมีโครงสร้างง่ายๆ แต่การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปโดยละเอียดทางทฤษฎีนั้นเป็นสิ่งที่ยุ่งยากมาก ทั้งนี้เป็นเพราะเงื่อนไขขอบเขตของระบบค่อนข้างยุ่งยากเมื่อเทียบกับท่อนำคลื่นหรือสายนำสัญญาณชนิดอื่น อย่างไรก็ตาม ได้มีผู้ทำการศึกษาทางทฤษฎีและพบว่า คลื่นที่ส่งผ่านไปตามไมโครสตริปนั้นจะใกล้เคียงกับโหมด Quasi - TEM Mode (TEM) มากแต่จะไม่ใช่มอด TEM เสียทีเดียว จึงเรียกโหมดดังกล่าวนี้ว่าโหมดกึ่ง TEM ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.4 โดยแสดงถึงเส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของสายส่ง



ภาพที่ 2.4 เส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

สัญญาณแบบไมโครสตริปที่คลื่นส่งผ่านในโหมดกึ่ง TEM ซึ่งพออนุโลมให้เป็นโหมด TEM นี้สามารถนำใช้หลักการวงจรกระจายในการวิเคราะห์หาคุณลักษณะของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปได้กล่าวคือ เราสามารถหาค่าอินดักแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวได้

ก็จะนำค่าทั้งสองนี้ไปคำนวณค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ได้ อย่างไรก็ตามการหาค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปจะยุ่งยากกว่าของสายคู่ขนานหรือสายโคแอกเชียล เพราะสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปมีทั้งสารไดอิเล็กตริกและอากาศอยู่ในบริเวณที่พลังงานของคลื่นส่งผ่าน สำหรับการหาค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวนั้นจะไม่ถูกรบกวนจากการมีสารไดอิเล็กตริก

ถึงแม้การหาค่าคาปาซิแตนซ์จะยุ่งยากกว่าปกติ แต่ก็มีวิธีที่ทำได้ง่ายขึ้น โดยใช้วิธีหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant) ของระบบซึ่งจะรวมผลของสารไดอิเล็กตริกและอากาศเข้าด้วยกันและเนื่องจากสารไดอิเล็กตริกทั้งหลายมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ ดังนั้นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลที่หาได้ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ไปด้วย อย่างไรก็ตามจากการศึกษาทางทฤษฎีและการทดลองของผู้เชี่ยวชาญพบว่าในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 2 GHz ลงมา ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลจะเปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องมาจากกรณีของไฟฟ้าสถิตน้อยมาก จึงสามารถอนุมานให้ใช้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของไฟฟ้าสถิตได้สำหรับในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 2 GHz ก็ต้องคำนึงถึงการปรับแต่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลให้เหมาะสมกับความถี่ที่ใช้งาน

ในการหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของกรณีไฟฟ้าสถิตนั้นจะใช้แนวคิดของวงจรกระจายดังต่อไปนี้ คือเมื่อคลื่นที่ส่งผ่านไปไมโครสตริปเป็นโหมด TEM คุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ (Z_c) ของสายส่งสัญญาณ จะเขียนในรูปของค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว (L) และค่าคาปาซิแตนซ์ (C) ต่อหนึ่งหน่วยความยาวได้ในสมการที่ 2.1

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.1)$$

ในขณะเดียวกันความเร็วเฟส V_p จะเขียนได้เป็น

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.2)$$

จากสมการที่ 2.2 นี้ทำให้เขียน Z_c ในรูปของ V_p กับ L หรือ C ได้ดังนี้

$$Z_c = V_p L \quad (2.3)$$

ในขั้นต่อไปเราจะพิจารณากรณีที่มีวัสดุฉนวนรองที่เป็นสารไดอิเล็กตริกถูกเอาออกไปเหลือแต่อากาศเพียงอย่างเดียวที่โอบล้อมสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปอยู่ในสภาพเช่นนี้ค่าความเร็วเฟสของคลื่น TEM ที่ส่งผ่านจะเร็วเท่ากับความเร็วแสง และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวจะเปลี่ยนไป โดยที่ค่าอินดักแตนซ์ไม่ถูกรบกวน ถ้าให้ค่าคาปาซิแตนซ์ที่เปลี่ยนไปนี้มีค่าเป็น C_0 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง C_0 กับความเร็วเฟสในสมการที่ 2.4

$$C = \frac{1}{\sqrt{LC_0}} \quad (2.4)$$

ในขณะเดียวกันค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ (Z_0) ก็เขียนได้ดังนี้

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C_0}} \quad (2.5)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.4 หาค่าด้วยสมการที่ 2.2 จะได้ผลดังนี้

$$\frac{C}{C_0} = \left(\frac{c}{v_p}\right)^2 \quad (2.6)$$

ตามนิยามทั่วไปค่าของ C/C_0 คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของสาร (ไดอิเล็กตริก) ที่กำลังโอบล้อมระบบเก็บประจุอยู่ ค่านี้จะเปรียบเหมือนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่มีวัสดุฉนวนรองเป็นสารไดอิเล็กตริกและด้านบนเป็นอากาศอยู่นั่นคือ

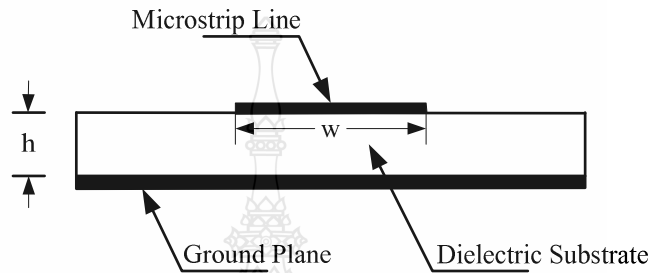
$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{c}{v_p}\right)^2 \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.3 ถึงสมการที่ 2.7 จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง Z_c, Z_0 และ ϵ_{eff} ได้ดังนี้

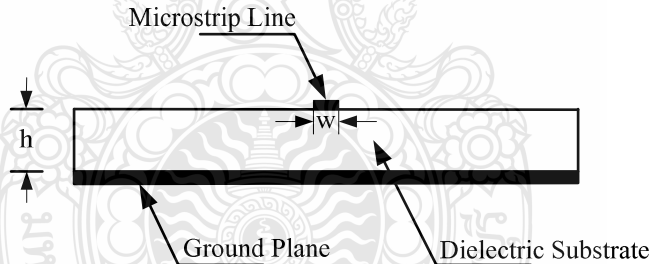
$$Z_c = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.8)$$

$$Z_0 = Z_c \sqrt{\epsilon_{eff}} \quad (2.9)$$

$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{c}{v_p} \right)^2 \quad (2.10)$$



ภาพที่ 2.5 สายส่งไมโครสตริปที่มี $w/h \gg 1$



ภาพที่ 2.6 สายส่งไมโครสตริปที่มี $w/h \ll 1$

จากสมการที่กล่าวมาข้างต้น ถ้าเราสามารถรู้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลได้ก็จะทำให้สามารถคำนวณคุณสมบัติอื่นตามมาได้ อย่างไรก็ตามค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลจะเปลี่ยนแปลงตามความกว้างของไมโครสตริปเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของวัสดุฐานรองซึ่งพิจารณาได้ 2 กรณี ดังต่อไปนี้กรณีแรกคือกรณีที่ $w/h \gg 1$ แสดงได้ดังภาพที่ 2.5 ในกรณีนี้เส้นแรงไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอยู่ระหว่างบริเวณที่มีแถบสตริปกับระนาบกราวด์ดังกล่าวจะส่งผลให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลมีค่าเข้าใกล้ค่า ϵ_r ของวัสดุฐานรองสำหรับกรณีที่สองคือ

กรณีที่มี $w/h \ll 1$ แสดงดังภาพที่ 2.6 ในกรณีนี้เส้นแรงไฟฟ้าจะผ่านวัสดุฐานรองครึ่งหนึ่งและผ่านอากาศครึ่งหนึ่งซึ่งจะทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลมีค่าเข้าใกล้ $\left(\epsilon_r + \frac{1}{2}\right)$ จากที่อธิบายมานี้จะเห็นได้ว่า ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลจะเปลี่ยนแปลงตามค่า w/h ดังนั้นจึงได้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลที่สามารถออกแบบได้ดังสมการที่ 2.11

$$\frac{1}{2}(\epsilon_r + 1) \leq \epsilon_{eff} \leq \epsilon_r \quad (2.11)$$

และเพื่อความสะดวกในการคำนวณและการออกแบบต่อไป ได้มีการเขียนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลดังสมการต่อไปนี้

$$\epsilon_{eff} = 1 + q(\epsilon_r - 1); \quad \frac{1}{2} \leq q \leq 1 \quad (2.12)$$

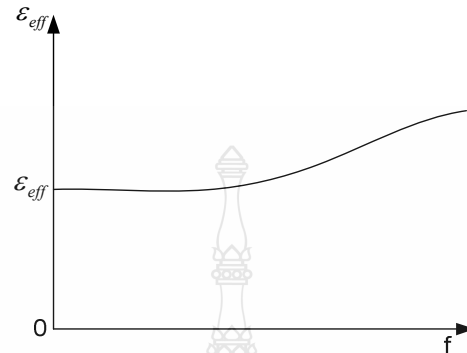
ค่า q ในสมการที่ 2.12 นี้ ได้ถูกเรียกว่าฟิลลิงแฟกเตอร์ (Filling Factor) ซึ่งหมายถึงตัวประกอบที่แสดงให้เห็นว่าวัสดุฐานรองที่เป็นสารไดอิเล็กตริกจะมีผลต่อโครงสร้างไมโครสตรักเจอร์นั้นมากน้อยแค่ไหน เมื่อเขียนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลตามสมการที่ 2.12 ค่า q ก็จะเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงตามค่า w/h

ในกรณีที่ความถี่ใช้งานสูงขึ้นกว่า 2 GHz จะได้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปความเร็วเฟสก็จะเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งทำให้ได้สมการที่ 2.13

$$\epsilon_{eff}(f) = \left(\frac{c}{v_p(f)}\right)^2 \quad (2.13)$$

เมื่อพิจารณาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลตามสมการที่ 2.13 นี้จะพบว่า ในช่วงความถี่ต่ำนั้นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลจะลู่เข้าหากรณีของไฟฟ้าสถิตและเมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นเข้าหาความถี่สูง จะทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลลู่เข้าสู่ของวัสดุฐานรอง เพราะความเร็วเฟสจะลู่เข้าสู่ความเร็วของแสงในสารไดอิเล็กตริกที่เป็นวัสดุฐานรอง ดังนั้น

โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิภาพตามความถี่จะเป็นไปดังภาพที่ 2.7 ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิภาพนั้นจะสูงขึ้นตามความถี่



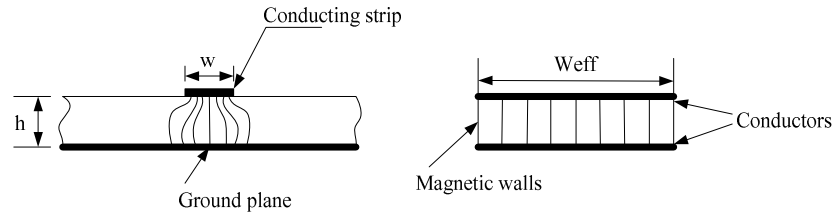
ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิภาพ

2.2.3 การลดทอนกำลังสัญญาณของไมโครสตริป

เนื่องจากไมโครสตริปทำด้วยโลหะที่ไม่สมบูรณ์แบบและมีสารไดอิเล็กตริกคั่นในบริเวณที่คลื่นส่งผ่าน ดังนั้นการลดทอนสัญญาณจึงเกิดจากทั้งสองสาเหตุนี้ เมื่อพิจารณาว่าไมโครสตริปส่งผ่านคลื่นในโหมด TEM เราจะสามารถเขียนค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณได้ในสมการที่ 2.14

$$\alpha = \frac{R}{2Z_c} + \frac{GZ_c}{2} = \alpha_m + \alpha_d \quad (2.14)$$

โดยที่ α_m และ α_d เป็นค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณที่เกิดจากสารประกอบโลหะและสารไดอิเล็กตริกตามลำดับ การหาค่าโดยการวิเคราะห์ให้ละเอียดตามทฤษฎีจะทำได้ลำบากมากเพราะการกระจายของสนามแม่เหล็กบนผิวโลหะมีความสลับซับซ้อนมากเช่นเดียวกับการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่า w/h และความหนาของแถบสตริป t อีกด้วยในทางปฏิบัตินั้นจึงมักใช้วิธีคิดที่ง่ายขึ้น โดยสมมติให้คลื่น TEM ส่งผ่านอยู่ภายในบริเวณข้างใต้แถบสตริปเท่านั้น ดังที่แสดงไว้ในภาพที่ 2.15 เสร็จแล้วคำนวณการสูญเสียในเนื้อโลหะในสภาพดังกล่าวแล้ว จึงนำผลที่ได้นั้นไปคูณกับค่าคงที่ค่าหนึ่งเพื่อทำการชดเชยให้มีความถูกต้องมากขึ้นเมื่อให้ค่าคงที่ดังกล่าวเป็น K จะได้ α_m ในสมการที่ 2.15



ภาพที่ 2.8 การส่งผ่านของคลื่น TEM แบบอุดมคติในไมโครสตริป

$$\alpha_m = \frac{KR}{2Z_c} = \frac{KR_s}{wZ_c} = \sqrt{\frac{\omega\mu_u}{2\sigma}} \sqrt{\frac{K}{wZ_c}} = \sqrt{\frac{\omega\mu_u}{2 \times 5.8 \times 10^7 \sigma_r}} \cdot \frac{K}{wZ_c} \text{ Nep/m} \quad (2.15)$$

โดยที่ σ_r คือค่าคงตัวของการนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative Conductivity) ที่ได้เมื่อเทียบกับทองแดงซึ่งมี $\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m ค่า K นั้นจะขึ้นอยู่กับ w/h และความถี่ โดยที่ในกรณีที่ค่า w/h มีค่าใหญ่มากๆ ซึ่งหมายถึงคลื่น TEM จะเข้าใกล้แบบอุดมคติ ค่า K ก็จะเข้าหา 1 ในกรณีสลับกัน คือ $w/h \ll 1$ ค่า K ก็จะเข้าหา 0.5 ในทางปฏิบัตินั้นพบว่ากรณีที่ออกแบบให้มีอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติเป็น 50Ω โดยที่ $\epsilon_r = 10$ จะได้ค่า $K = 0.63$ สำหรับการหาค่า α_d ก็จะอาศัยหลักการคิดค่า ϵ_{eff} ขึ้นมาใหม่ดังรายละเอียดต่อไปนี้

$$\alpha_d = \frac{GZ_c}{2} = \frac{Z_c}{2} (\omega C \tan \delta_{eff}) = \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{2cC} (\omega C \tan \delta_{eff}) \quad (2.16)$$

$$= \frac{\pi f \sqrt{\epsilon_{eff}}}{c} \tan \delta_{eff} \text{ Nep/m} \quad (2.17)$$

โดยที่ค่า $\tan \delta_{eff}$ นั้นเปรียบเหมือนค่า $\tan \delta$ ประสิทธิภาพ ซึ่งจะสัมพันธ์กับ $\tan \delta$ ในสมการที่ 2.18

$$\frac{\tan \delta_{eff}}{\tan \delta} = \frac{1 - (1/\epsilon_{eff})}{1 - (1/\epsilon_r)} \quad (2.18)$$

ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.18 นี้เป็นสิ่งที่สมเหตุสมผล เพราะเมื่อแทนค่า ϵ_{eff} ด้วย 1 ซึ่งหมายถึงตัวกลางเป็นอวกาศค่า $\tan \delta_{eff}$ จะเท่ากับ 0 และเมื่อแทนค่า $\epsilon_{eff} = \epsilon_r$ ซึ่งหมายถึงตัวกลางจะเป็นสารไดอิเล็กตริกทั้งหมด ค่า $\tan \delta_{eff}$ จะเท่ากับ $\tan \delta$

เมื่อนำค่า α_m และ α_d ในสมการที่ 2.16 และสมการที่ 2.17 แทนกลับไปในสมการที่ 2.14 ก็จะได้ค่า α ผลรวมออกมา และเนื่องจากเรานิยมเขียนค่า α ให้อยู่ในหน่วย dB/m เขียนความถี่ที่ใช้งานให้มีหน่วยเป็น GHz และเขียนความกว้างของแถบสตริปให้มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร ดังนั้น α จะเขียนได้ในสมการที่ 2.19

$$\alpha = \frac{72K}{wZ_c} \sqrt{\frac{f}{\sigma_r}} + 91f \sqrt{\epsilon_{eff}} \frac{1 - (1/\epsilon_{eff})}{1 - (1/\epsilon_r)} \tan \delta \text{ dB/m} \quad (2.19)$$

จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่า α_m แปรตาม \sqrt{f} ในขณะที่ α_d แปรตาม f ซึ่งทำให้ดูเหมือนว่า α_d จะมีค่าสูงกว่า α_m อย่างไรก็ตามในระยะหลังนี้ได้มีการพัฒนาซบสเตรตที่มีคุณสมบัติดีขึ้น คือมีค่า $\tan \delta$ ต่ำมาก ทำให้ในช่วงความถี่ที่ $f < 10$ GHz ค่า α_m จะใหญ่กว่าค่า α_d และเป็นค่าสูญเสียหลักของไมโครสตริป

2.2.4 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuities in Microstrip)

แบบช่องต่อ (Series Gap) คุณลักษณะของความไม่ต่อเนื่องแบบช่องต่อในสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปนั้นถูกมองในลักษณะของค่าคาปาซิแตนซ์โดยภาพที่ 2.9 แสดงโครงสร้างและวงจรสมมูลของสายส่งสัญญาณไมโครสตริปแบบช่องต่อ ในการแปลงเป็นวงจรสมมูลที่บริเวณช่องต่อจะทำการแปลงเป็นวงจรจ่ายแบบ π ที่มีแต่ละองค์ประกอบของวงจรเป็นตัวเก็บประจุซึ่งสามารถหาค่าของแต่ละองค์ประกอบในวงจรสมมูลได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$C_1 = \frac{1}{2} C_\epsilon \quad (2.20)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} C_0 - \frac{1}{4} C_\epsilon \quad (2.21)$$

เมื่อ

$$C_0 = w \left(\frac{\epsilon_r}{9.6} \right)^{0.8} \left(\frac{g}{w} \right)^{m_0} e^{K_0} \times 10^{-2} \quad (2.22)$$

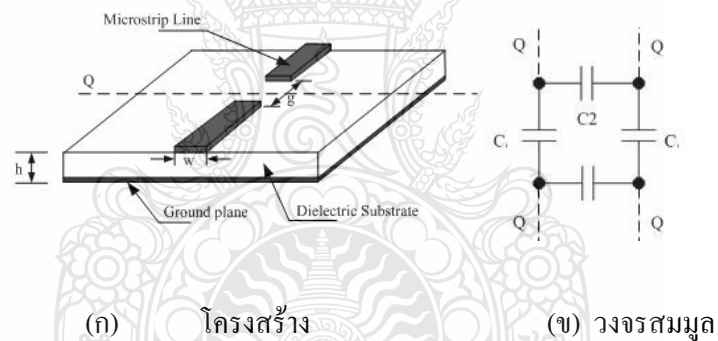
$$C_\epsilon = w \left(\frac{\epsilon_r}{9.6} \right)^{0.8} \left(\frac{g}{w} \right)^{m_0} e^{K_0} \times 10^{-12} \quad (2.23)$$

$$m_0 = \frac{w}{h} \left(0.619 \log \frac{w}{h} - 0.3853 \right) \quad (2.24)$$

$$m_e = \begin{cases} 0.8675 & ; \text{for } \frac{g}{w} < 0.3 \\ \frac{1.565}{\left(\frac{w}{h}\right)^{0.16}} - 1 & ; \text{for } \frac{g}{w} < 0.3 \end{cases} \quad (2.25)$$

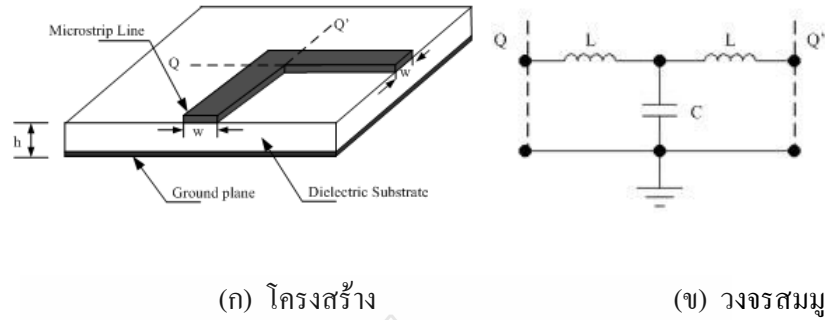
$$K_0 = 4.26 - 1.453 \log \frac{w}{h} \quad (2.26)$$

$$K_e = 2.043 \left(\frac{w}{h} \right)^{0.12} \quad (2.27)$$



ภาพที่ 2.9 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบช่องต่อ

แบบมุมฉาก (Right-Angled) การเปลี่ยนลักษณะของสายส่งไมโครสตริปจากเส้นตรง ให้กลายเป็นมุมแบบมุมฉากนั้นทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องบนสายส่งไมโครสตริปโดยที่การเปลี่ยนรูปร่างในลักษณะนี้ ส่วนใหญ่จากการส่งผ่านสัญญาณหรือการกรองสัญญาณ จากภาพที่ 2.10 แสดงโครงสร้างและวงจรสมมูลของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบมุมฉาก



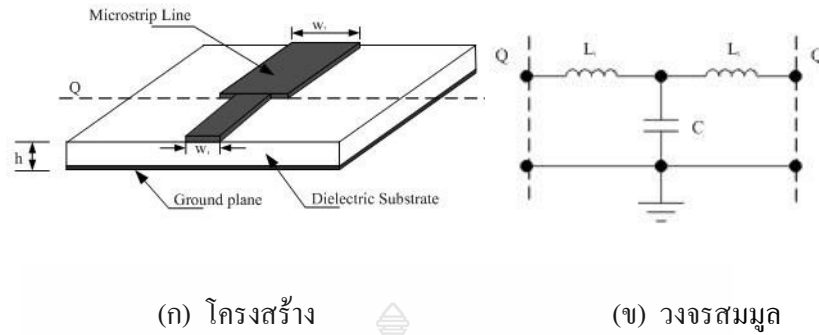
ภาพที่ 2.10 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบมุมฉาก

ในการแปลงวงจรสมมูลที่บริเวณมุมฉากนั้นจะทำการแปลงเป็นวงจรข่ายแบบ T โดยจะมีตัวเหนี่ยวนำสองตัวต่ออนุกรมกัน และมีตัวเก็บประจุต่อขนาน ซึ่งสามารถหาค่าของอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์ของแต่ละองค์ประกอบได้ดังนี้

$$m_e = \begin{cases} w \left[\frac{(14\epsilon_r + 1)(w/h) - (1.83\epsilon_e - 2.25)}{\sqrt{w/h}} + \frac{0.02\epsilon_r}{w/h} \right] & ; \text{for } \frac{w}{h} < 1 \\ w \left[(9.5\epsilon_r + 1.25)(w/h) + 5.2\epsilon_r + 7 \right] \times 10^{-12} & ; \text{for } \frac{w}{h} > 1 \end{cases} \quad (2.28)$$

$$L = 100h \left(4\sqrt{\frac{w}{h}} - 4.21 \right) \times 10^{-9} \quad (2.29)$$

แบบขั้น (Microstrip Step) การที่เปลี่ยนขนาดความกว้างของแผ่นไมโครสตริปจะทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของค่าอิมพีแดนซ์ในสายส่งสัญญาณขึ้น โดยการออกแบบให้แผ่นไมโครสตริปเกิดความไม่ต่อเนื่องแบบเป็นขั้นนี้ ส่วนใหญ่จะทำเมื่อต้องการทำแมตซ์ตัวแปลงสัญญาณ ตัวเชื่อมต่อสัญญาณ ตัวกรองสัญญาณ และการส่งผ่านสัญญาณ จากภาพที่ 2.11 จะพบว่า การหาค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ สามารถพิจารณาได้จาก ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลในเทอมของอินดักแตนซ์กับคาปาซิแตนซ์ ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.30



(ก) โครงสร้าง

(ข) วงจรสมมูล

ภาพที่ 2.11 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบขั้น

$$L_1 = \frac{L_{w1}}{L_{w1} + L_{w2}} L \quad (2.30)$$

$$L_2 = \frac{L_{w2}}{L_{w1} + L_{w2}} L \quad (2.31)$$

$$L = h \left[40.5 \left(\frac{w_1}{w_2} - 1 \right) - 75 \left(\frac{w_1}{w_2} \right) + 0.2 \left(\frac{w_1}{w_2} - 1 \right)^2 \right] \times 10^{-9} \quad (2.32)$$

เมื่อ L_{w1} และ L_{w2} เป็นตัวเหนี่ยวนำต่อหน่วยความยาวของสายไมโครสตริปที่มีความกว้างเป็น w_1 และ w_2 ตามลำดับ

$$c = \sqrt{w_1 w_2} \left[(10.1 \log \epsilon_r + 2.33) \frac{w_1}{w_2} - 12.6 \log \epsilon_r - 3.17 \right] \quad (2.33)$$

แบบรูปตัว T (Microstrip T - Junction) คือสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบรูปตัว T มีโครงสร้างและวงจรสมมูลดังแสดงในภาพที่ 2.12 จากโครงสร้างและวงจรสมมูลจะเห็นว่าแบบรูปตัว T นั้น จะมีลักษณะคล้ายรูปมุมฉาก การออกแบบให้สายส่งสายอากาศไมโครสตริปเกิดความไม่ต่อเนื่องแบบเป็นขั้นนี้ส่วนใหญ่จะใช้ในวงจรไมโครเวฟ เช่น เพื่อต้องการเพิ่มพอร์ทในการส่งสัญญาณ ตัวเชื่อมต่อสัญญาณ ตัวกรองสัญญาณ การทำแมตซ์เพื่อเชื่อมต่อวงจรหรือนำไปใช้ออกแบบป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริป จากวงจรสมมูลจะพบว่าในการหาค่า

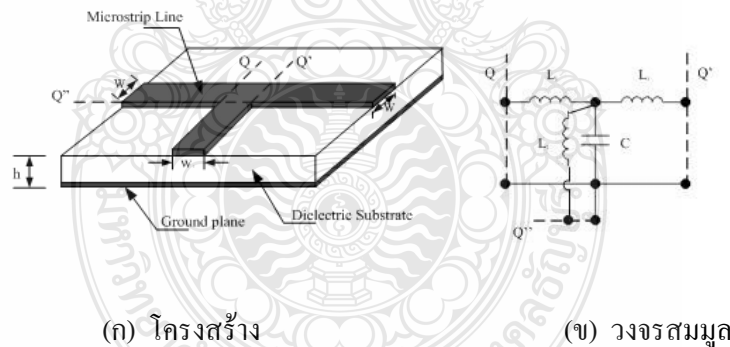
ของคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์นั้นสามารถที่จะพิจารณาในเทอมของอินดักแตนซ์กับคาปาซิแตนซ์ โดยกำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำที่อยู่ทางด้านพอร์ต Q'' มีค่าเป็น L_1 ส่วนตัวเหนี่ยวนำที่อยู่ทางด้านพอร์ต Q และทางด้านพอร์ต Q' โดยมีค่าอินดักแตนซ์เป็น L_2 ละมีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่ ซึ่งค่าของแต่ละองค์ประกอบสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$L_1 = hL_w \left[\left(0.12 \frac{w}{h} - 0.47 \right) \frac{w}{h} + 0.195 \frac{w}{h} - 0.357 + 0.0283 \sin \left(\pi \frac{w}{h} - 0.75\pi \right) \right] \quad (2.34)$$

$$L_2 = -wL_w \left[\frac{w}{h} \left(-0.016 \frac{w}{h} + 0.064 \right) + \frac{0.016}{w/h} \right] \quad (2.35)$$

เมื่อ L_w เป็นค่าอินดักแตนซ์ต่อหน่วยความยาวของสายส่งไมโครสตริปที่มีความกว้างเป็น w

$$C = w \left[\frac{100}{\tanh(0.0072Z_0)} + 0.64Z_0 - 261 \right] \times 10^{-12} \quad (2.36)$$



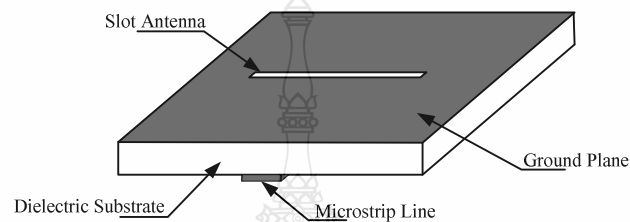
ภาพที่ 2.12 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบรูปตัว T

2.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด [11-18]

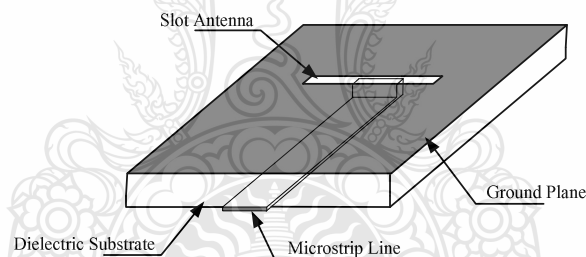
2.3.1 โครงสร้างของสายอากาศ

ลักษณะของโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดจะประกอบด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์และสายอากาศแบบช่องเปิดวางตั้งฉากกับไมโครสตริปไลน์ อยู่บน

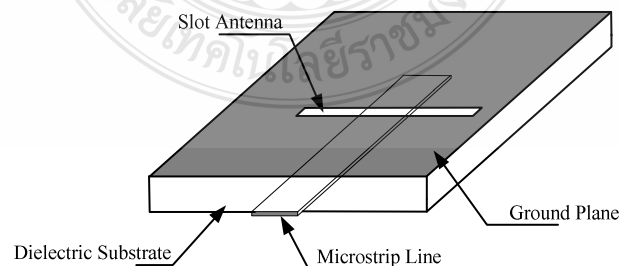
ระนาบกราวด์ โดยมีวัสดุฐานรองเป็นตัวกั้นกลางระหว่างสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์กับสายอากาศแบบช่องเปิด ดังแสดงในภาพที่ 2.13 โดยลักษณะของการส่งผ่านสัญญาณ ของคลื่นนั้นจะมีอยู่ 2 แบบหลักๆ คือ แบบปิดวงจรซึ่งจะเป็นการต่อตัวนำจากสายส่งสัญญาณ ผ่านวัสดุฐานรองไปปิดวงจรที่ขอบของช่องเปิด (Microstrip Terminated in A Short Circuit) ดังภาพที่ 2.14 และอีกวิธีคือแบบเปิดวงจร (Microstrip Terminated in A Open Circuit) ซึ่งแสดงในภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.13 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด



ภาพที่ 2.14 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ส่งผ่านคลื่นแบบปิดวงจร



ภาพที่ 2.15 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ส่งผ่านคลื่นแบบเปิดวงจร

2.3.2 การแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบช่องเปิด

สายอากาศแบบช่องเปิดนั้นจะมีการกระจายคลื่นผ่านหลายตัวกลาง ซึ่งเกิดเนื่องจากแหล่งกำเนิดคลื่นนั้นอยู่ที่บริเวณหนึ่ง ส่วนคลื่นที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศจะกระจายไปในอีกบริเวณหนึ่งซึ่งมีตัวกลางที่ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.16 จากภาพแสดงการเดินทางของคลื่นจากตัวกลางที่ 1 ไปยังตัวกลางที่ 2 โดยที่ตัวกลางที่ 1 ถูกปิดล้อมด้วยผิวปิด S' ถ้าตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 มีค่าคงที่ของตัวกลางไม่เหมือนกันหรือมีค่าอินทริกติกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ไม่เหมือนกัน คลื่นที่เคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดคลื่นเมื่อกระทบกับผิวขอบเขตจะเกิดการสะท้อนกลับของคลื่นเข้าสู่ตัวกลางที่ 1 ส่วนหนึ่ง และส่งผ่านคลื่นเข้าไปในตัวกลางที่ 2 อีกส่วนหนึ่ง ดังนั้นถ้าให้ \vec{E}^i และ \vec{H}^i เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบที่เกิดจากแหล่งกำเนิดคลื่น โดยที่ \vec{E}^r และ \vec{H}^r เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการสะท้อนที่ผิวขอบเขต ส่วน \vec{E}^t และ \vec{H}^t เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางที่ 2 ดังนั้นในตัวกลางที่ 1 คลื่นที่ปรากฏอยู่ก็คือผลบวกระหว่างคลื่นตกกระทบกับคลื่นสะท้อนรวมกัน ส่วนในตัวกลางที่ 2 นั้นก็จะมีเพียงคลื่นที่ส่งผ่าน โดยสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\vec{E}_i^i + \vec{E}_i^r = \vec{E}_i^t \quad (2.37)$$

$$\vec{H}_i^i + \vec{H}_i^r = \vec{H}_i^t \quad (2.38)$$

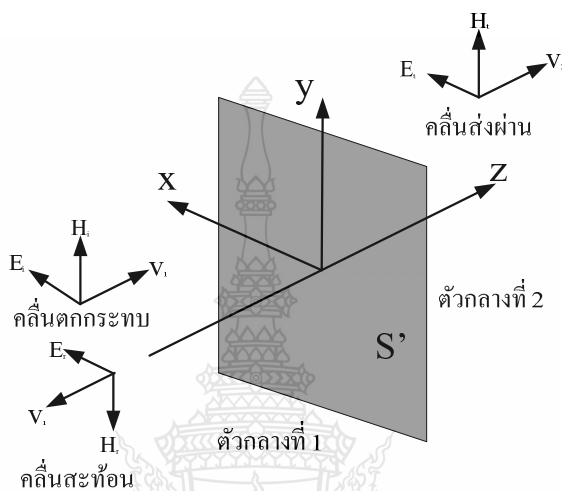
โดยที่ตัวห้อย i หมายถึง ส่วนประกอบของสนามในแนวขนานกับผิวขอบเขต

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นตรงผิวขอบเขตนั้น เราสามารถคิดได้ว่าเกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าสมมูล และกระแสแม่เหล็กสมมูลที่กระจายอยู่บนขอบเขตในรูปสมการต่อไปนี้

$$\vec{J} = \vec{n} \times \vec{H}_i^t \quad (2.39)$$

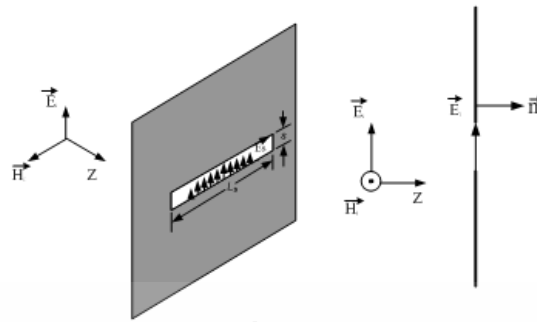
$$\vec{M} = \vec{n} \times \vec{E}_i^t \quad (2.40)$$

โดยที่ \vec{J} คือ กระแสไฟฟ้าสมมูล
 \vec{M} คือ กระแสแม่เหล็กสมมูล
 \vec{n} คือ เวกเตอร์หน่วยที่ผิวขอบเขต



ภาพที่ 2.16 การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น

เมื่อคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ากระทบแผ่นตัวนำสมบูรณ์แบบที่มีช่องเปิดแคบๆ ดังภาพที่ 2.17 โดยมีทิศของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับแนวของช่องเปิด และถ้าให้ความกว้างของช่องเปิด (S) มีค่าน้อยๆ นั้น หมายความว่าช่องเปิดแคบมากๆ กระแสไฟฟ้าสมมูล ($\vec{J} = \vec{n} \times \vec{H}'$) จะมีขนาดจำกัดและเมื่อให้ S เข้าใกล้ศูนย์ กระแสไฟฟ้าสมมูลที่นี้อาจตัดทิ้งได้เพราะเนื่องจากมีขนาดเล็กมาก แต่ส่วนที่เป็นกระแสแม่เหล็กสมมูล ($\vec{M} = \vec{n} \times \vec{E}'$) นั้น ไม่สามารถที่จะตัดทิ้งได้ทั้งหมดเพราะเมื่อ S เข้าใกล้ศูนย์ สนามไฟฟ้าที่ช่องเปิดจะดูเข้าหาอนันต์จึงไม่สามารถตัดทิ้งได้

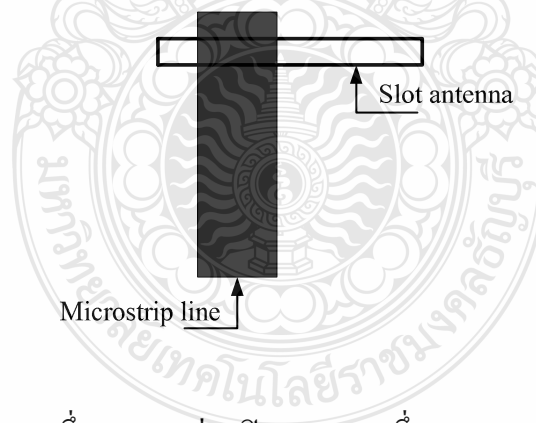


ภาพที่ 2.17 การกระจายคลื่นจากช่องเปิด

2.3.3 การทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบช่องเปิด

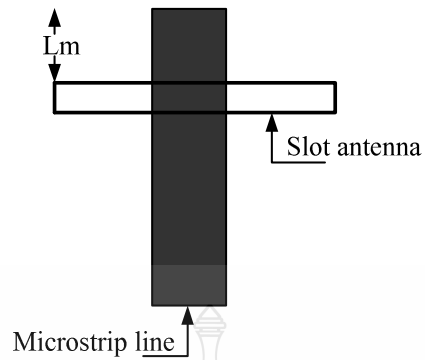
วิธีในการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริบแบบช่องเปิดนั้น โดยพื้นฐานจะมีด้วยกัน 3 วิธี คือ

1) วิธีการเลื่อนจุดกึ่งกลางของช่องเปิดออกจากจุดกึ่งกลางของสายส่งสัญญาณ (Offset Microstrip Feeding) เป็นวิธีเลื่อนหรือเปลี่ยนตำแหน่งของจุดกึ่งกลางของช่องเปิดออกจากจุดกึ่งกลางของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริบไลน์ โดยเลื่อนไปทางซ้ายหรือทางขวาทำนองดังภาพที่ 2.18



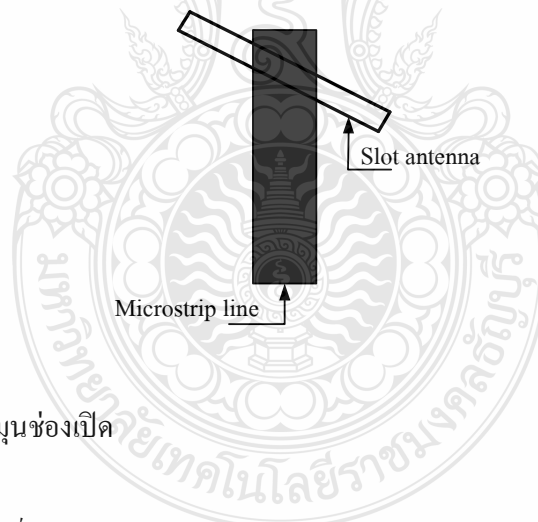
ภาพที่ 2.18 วิธีการเลื่อนจุดกึ่งกลางของช่องเปิดออกจากจุดกึ่งกลางของสายส่งสัญญาณ

2) วิธีการปรับความยาวท่อนสั้น (Stub - Turning) โดยวิธีนี้จะเป็นการเปลี่ยนขนาดความยาวของสายส่งสัญญาณ จากภาพที่ 2.19 กำหนดให้ L_m เป็นความยาวของท่อนสั้นวัดเทียบจากขอบของช่องเปิดจนถึงปลายสายส่งสัญญาณ การทำแมตซ์อิมพีแดนซ์วิธีนี้จะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ด้วย



ภาพที่ 2.19 วิธีการปรับความยาวท่อนสั้น

3) วิธีการหุนช่องเปิด (Center - Fed But Inclined Microstrip Line Feed) วิธีการนี้คือการทำให้ช่องเปิดไม่ตั้งฉากกับสายส่งสัญญาณแสดงดังภาพที่ 2.27 ซึ่งการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์วิธีนี้ จะมีความยุ่งยากและไม่ค่อยได้รับความนิยม



ภาพที่ 2.20 วิธีการหุนช่องเปิด

2.4 ระเบียบวิธีโมเมนต์ (The Moment of Method)

ระเบียบวิธีโมเมนต์มีประโยชน์ในเรื่องแนวคิดอย่างง่าย ระเบียบวิธีโมเมนต์จะนำมาใช้กับการแก้สมการเชิงอินทิกรัล ยกตัวอย่างเช่น สมมติต้องการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ เพื่อแก้สมการของปัวซงส์ ผลเฉลยเชิงอินทิกรัลในสมการของปัวซงส์คือ

$$V = \int \frac{\rho_v dv}{4\pi\epsilon_r} \quad (2.41)$$

สมการที่ 2.41 ได้มาจากกฎของคูลอมบ์และการกระจายประจุที่กำหนดมาให้คือ $\rho_v(x, y, z)$ จะทำให้เราสามารถหาค่าศักย์ $V(x, y, z)$ สนามไฟฟ้า $E(x, y, z)$ และประจุรวมได้ และอีกนัยหนึ่งถ้าเราทราบค่าศักย์แต่ไม่ทราบการกระจายประจุ เราจะหา ρ_v จากสมการที่ 2.41 อย่างไรในสถานการณ์นั้นสมการที่ 2.41 จะกลายเป็นสมการที่ถูกเรียกว่า สมการอินทิกรัล (Integral Equation) ซึ่งโดยทั่วไปสมการ Kernel Integral เป็นสมการหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับฟังก์ชันไม่รู้ค่าภายในเครื่องหมายอินทิกรัลซึ่งมีรูปแบบทั่วไปคือ

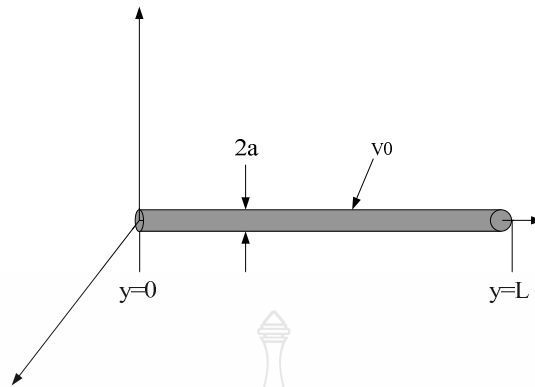
$$V(x) = \int_a^b K(x, t) \rho(t) dt \quad (2.42)$$

เมื่อทราบค่าฟังก์ชัน $K(x, t)$ ฟังก์ชัน $V(t)$ และลิมิต a และ b ก็หาค่าฟังก์ชันตัวไม่รู้ค่า $\rho(t)$ ได้ ซึ่งฟังก์ชัน $K(x, t)$ จะถูกเรียกว่า ส่วนประกอบหลัก (Kernel) ของสมการระเบียบวิธีโมเมนต์ เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขระเบียบวิธีหนึ่งที่ใช้แก้สมการเชิงอินทิกรัลดังเช่นสมการที่ 2.42 ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่อธิบายได้ดีที่สุดเป็นตัวอย่าง

มาพิจารณาเส้นลวดนำไฟฟ้าขนาดบางที่มีรัศมี a ความยาว L ($L \gg a$) อยู่ที่ตำแหน่งในอากาศว่าง ดังแสดงในภาพที่ 2.21 โดยกำหนดให้เส้นลวดถูกบำรุงรักษาที่ศักย์ V_0 เป้าหมายคือหาความหนาแน่นประจุตามเส้นลวดโดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ เมื่อเราหา ρ_L ได้แล้ว ก็หาความสัมพันธ์ปริมาณสนามได้ ซึ่ง ณ จุดใดๆ บนเส้นลวด สมการที่ 2.41 จะลดลงเป็นสมการเชิงอินทิกรัลที่มีรูปแบบเป็น

$$V_0 = \int_0^L \frac{\rho_L dl}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (2.43)$$

เนื่องจากสมการที่ 2.43 ประยุกต์ใช้กับจุดสังเกตทุกๆ ที่บนเส้นลวด ซึ่งที่จุดตายตัว y_k จะรู้จักกันในนาม จุดเข้าคู่ (Match Point)



ภาพที่ 2.21 เส้นลวดนำไฟฟ้าขนาดบางรักษาไว้ที่ศักย์คงตัว

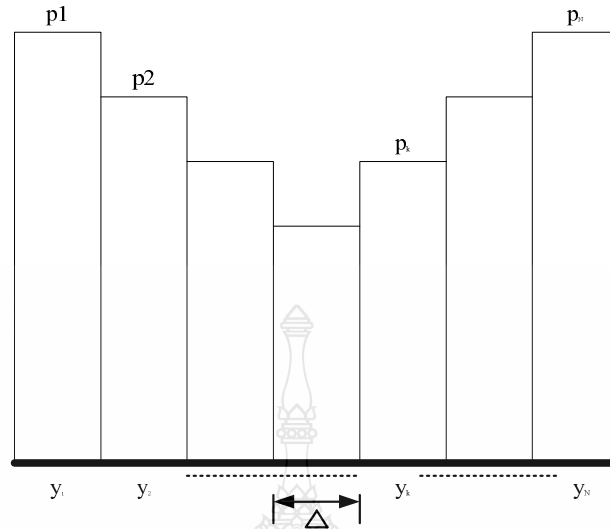
$$V_{0(y)} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^L \frac{\rho_L(y) dy}{|y_k - y|} \quad (2.44)$$

การอินทิเกรตเป็นหัวใจสำคัญของการหาพื้นที่ภายใต้เส้นโค้ง ถ้า Δy มีขนาดเล็กการอินทิเกรต $f(y)$ ตลอด $0 < y < L$ จะกำหนดได้โดย

$$\int_0^L f(y) dy = f(y_1)\Delta y + \dots + f(y_N)\Delta y = \sum_{k=1}^N f(y_k)\Delta y \quad (2.45)$$

เมื่อช่วง L ถูกแบ่งออกเป็น N หน่วย ซึ่งแต่ละหน่วยมีความยาว Δy สำหรับเส้นลวดที่ถูกแบ่งออกเป็น N ส่วน ซึ่งแต่ละส่วนมีความยาวเท่ากับ Δ ที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.22 จะทำให้สมการที่ 2.44 กลายเป็น

$$4\pi\epsilon_0 V_0 \cong \frac{\rho_1 \Delta}{|y_k - y_1|} + \frac{\rho_2 \Delta}{|y_k - y_2|} + \dots + \frac{\rho_N \Delta}{|y_k - y_N|} \quad (2.46)$$



ภาพที่ 2.22 การแบ่งเส้นลวดออกเป็น N ส่วน

เมื่อ $\Delta = L/N = \Delta y$ การสมมติในสมการที่ 2.46 นั้นคือความหนาแน่นตัวไม่รู้ค่า ρ_k บนส่วนที่ k ให้เป็นค่าคงตัว ดังนั้นในสมการที่ 2.46 เรามีค่าคงตัวตัวไม่รู้ค่า $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ เนื่องจากสมการที่ 2.46 ต้องใช้ได้กับทุกจุดบนเส้นลวดเราจึงได้รับ N คล้ายกับสมการโดยเลือกจุดเข้าสู่ N ที่ $y_1, y_2, \dots, y_k, \dots, y_n$ บนเส้นลวดดังนั้นเราจะได้รับ

$$\begin{aligned}
 4\pi\epsilon_0 V_0 &\cong \frac{\rho_1 \Delta}{|y_1 - y_1|} + \frac{\rho_2 \Delta}{|y_1 - y_2|} + \dots + \frac{\rho_N \Delta}{|y_1 - y_N|} \\
 &\cong \frac{\rho_1 \Delta}{|y_k - y_1|} + \frac{\rho_2 \Delta}{|y_k - y_2|} + \dots + \frac{\rho_N \Delta}{|y_k - y_N|} \\
 \therefore 4\pi\epsilon_0 V_0 &\cong \frac{\rho_1 \Delta}{|y_N - y_1|} + \frac{\rho_2 \Delta}{|y_N - y_2|} + \dots + \frac{\rho_N \Delta}{|y_N - y_N|} \quad (2.47)
 \end{aligned}$$

ความคิดเรื่องการนำด้านซ้ายมือเข้าสู่กับด้านขวามือของสมการที่ 2.44 ที่จุดเข้าสู่จะคล้ายกับแนวคิดการกำหนดโมเมนต์ในทางกล ซึ่งเป็นการวางเหตุผลว่าทำให้วิธีการนี้จึงถูกเรียกว่าระเบียบวิธีโมเมนต์ จะเห็นได้จากภาพที่ 2.22 ว่าจุดเข้าสู่ $y_1, y_2, \dots, y_k, \dots, y_n$ ได้ถูกวางไว้ที่จุดศูนย์กลางของแต่ละส่วนซึ่งสมการที่ 2.47 สามารถนำมาใส่ไว้ในรูปแบบเมทริกซ์ได้เป็น

$$[B] = [A][\rho] \quad (2.48)$$

เมื่อ

$$[B] = 4\pi\epsilon_0 V_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ A_{mm} & \cdot & \cdot & \cdot \\ A_{N1} & A_{N2} & \dots & A_{NN} \end{bmatrix}$$

$$A_{mn} = \frac{\Delta}{[y_m - y_n]} mn \quad (2.50)$$

จะได้

$$[\rho] = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \rho_N \end{bmatrix}$$

(2.51)

ในสมการที่ 2.51 มีตัวแปร $[\rho]$ เป็นเมทริกซ์ที่ยังไม่รู้ค่าสมาชิก (Element) เราสามารถหา $[\rho]$ จากสมการที่ 2.51 โดยใช้หลักเกณฑ์ของคราเมอร์ (Cramer's rule) โดยใช้วิธีการผกผันเมทริกซ์

(Matrix Inversion) หรือโดยใช้วิธีการกำจัดแบบเกาส์ (Gaussian Elimination) ซึ่งสำหรับการใช้การผกผันแมทริกซ์ คือ

$$[\rho] = [A]^{-1}[B] \quad (2.52)$$

เมื่อ $[A]^{-1}$ เป็นตัวผกผันของแมทริกซ์ $[A]$ ในสมการที่ 2.47 หรือ 2.50

2.5 ประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริป

สำหรับองค์ประกอบ (Element) ของสายอากาศไมโครสตริปชนิดต่างๆ ประสิทธิภาพจะเป็นตัวกำหนดกำลังของการแผ่พลังงาน โดยกำลังที่ได้รับได้ทางอินพุทขององค์ประกอบส่วนประกอบต่างๆ จะเกิดการลดทอนขึ้นที่ตัวนำ การสูญเสียจากโหนดที่รวมอยู่ในแต่ละองค์ประกอบ สำหรับองค์ประกอบไมโครสตริปที่มีประสิทธิภาพอยู่จะอยู่ที่ 80 ถึง 99 เปอร์เซ็นต์ จะมีลักษณะบาง และมักจะพบว่าเมื่อแผ่นวงจรพิมพ์มีความบางมากๆ จะมีการลดทอนน้อย โดยค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio : VSWR) สามารถแมทซ์ที่ 50 โอห์มได้ แต่จะมีแบนด์วิดท์แคบ และการสูญเสียเนื่องจากอุณหภูมิก็มีจำนวนมากหรือไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งมากขึ้นอย่างรวดเร็ว และเปอร์เซ็นต์การสะท้อนก็จะมากขึ้น โดยการสูญเสียที่เกิดจากสารรองรับจะสามารถถูกกำจัดออกไปโดยใช้สารรองรับที่เป็นอากาศ ($\epsilon_r \cong 1$) ด้วย เมื่อส่วนใหญ่ขององค์ประกอบมีการแยกกันระหว่างองค์ประกอบ และกราวนด์เพลน สารรองรับจะมีผลต่อคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปจากที่ได้ทราบแล้วว่า ค่าไดเรกทิวิตี (Directivity) และค่าอัตราการขยายของสายอากาศไมโครสตริปสามารถที่จะกำหนดค่าประสิทธิภาพของสายอากาศหาได้จาก

$$G = \eta D \quad (2.53)$$

โดยที่

G หมายถึง อัตราขยายของสายอากาศ

D หมายถึง ไดเรกทิวิตี

η หมายถึง ประสิทธิภาพของสายอากาศ

การหาอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปนั้น การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปจะต้องออกแบบสายอากาศขึ้นมาจำนวนหนึ่งคู่ โดยมีลักษณะเหมือนกัน ในทางทฤษฎีอัตราขยายของทั้งสองชุดต้องเท่ากัน ดังนั้นสามารถวัดหาอัตราขยายของสายอากาศได้โดยการต่ออุปกรณ์เพื่อทำการหาค่าต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าอัตราขยายจากสมการที่ 2.54 และ 2.55

$$P_r = P_t - L_f - L_{line} + G_t + G_r \quad (2.54)$$

$$G_r = P_r - P_t + L_f + L_{line} - G_t \quad (2.55)$$

โดยที่

P_t หมายถึง กำลังงานทางด้านส่ง (dBm)

P_r หมายถึง กำลังงานทางด้านรับ

L_{line} หมายถึง กำลังงานที่สูญเสียในสายส่งทางด้านส่งและด้านรับ

L_f หมายถึง กำลังงานที่สูญเสียในอากาศ = $20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)$

G_t หมายถึง อัตราขยายของสายอากาศทางด้านส่ง

G_r หมายถึง อัตราขยายของสายอากาศทางด้านรับ

2.6 มาตรฐานเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11 [19-21]

เครือข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11 ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2540 โดยสถาบัน The Institute of Electronics and Electrical Engineers (IEEE) ซึ่งมีข้อกำหนดระบุว่าผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สายในส่วนของ Physical Layer (PHY Layer) นั้นมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลที่ความเร็ว 1, 2, 5.5, 11 และ 54 Mbps โดยมีสื่อส่งสัญญาณ 3 ประเภทให้เลือกใช้งานอันได้แก่คลื่นวิทยุย่านความถี่ 2.4 GHz 2.5 GHz และคลื่นอินฟราเรดส่วนในระดับชั้น Media Access Control Layer (MAC Layer) นั้น ได้ทำการกำหนดกลไกของการทำงานแบบ Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance (CSMA/CA) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับ Collision Detection (CSMA/CD) ของมาตรฐาน IEEE 802.3 Ethernet ซึ่งนิยมใช้งานบนระบบเครือข่ายแลนที่ใช้สายโดยที่มีกลไกต่างๆ ในการเข้ารหัสข้อมูล ก่อนแพร่กระจายสัญญาณไปบนอากาศพร้อมกับการตรวจสอบผู้ใช้งานอีกด้วย

มาตรฐาน IEEE 802.11 ในยุคเริ่มแรกนั้นให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ค่อนข้างต่ำทั้งไม่มีการรับรองคุณภาพมาตรฐานของการให้บริการที่เรียกว่า Quality of Service (QoS) ซึ่งมีความสำคัญในสภาพแวดล้อมที่มีแอปพลิเคชันหลากหลายประเภทให้ใช้งานนอกจากนั้นกลไกในเรื่องการรักษา

ความปลอดภัยที่นำมาใช้ก็ยังมีช่องโหว่จำนวนมาก IEEE จึงได้มีการจัดตั้งคณะทำงานขึ้นมาหลายชุดด้วยกันเพื่อทำการพัฒนาและปรับปรุงมาตรฐานให้มีศักยภาพเพิ่มสูงขึ้น

2.6.1 IEEE 802.11a

เป็นมาตรฐานที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่มาตั้งแต่เมื่อปี พ.ศ. 2542 โดยใช้เทคโนโลยี Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) เพื่อที่จะมาพัฒนาให้ผลิตภัณฑ์ไร้สาย มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็วสูงสุด 54 Mbps โดยใช้คลื่นวิทยุย่านความถี่ 5 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาตให้ใช้งานโดยทั่วไปเนื่องจากทางประเทศไทยได้สงวนไว้ใช้สำหรับกิจการทางด้านดาวเทียม ข้อเสียของผลิตภัณฑ์มาตรฐาน IEEE 802.11a ก็คือมีรัศมีการใช้งานในระยะสั้นและมีราคาแพงดังนั้นผลิตภัณฑ์ไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11a จึงได้รับความนิยมน้อย

2.6.2 IEEE 802.11b

เป็นมาตรฐานที่ถูกตีพิมพ์และเผยแพร่ออกมาพร้อมกับมาตรฐาน IEEE 802.11a เมื่อปี พ.ศ. 2542 ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีและได้รับความนิยมในการใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุดกว่าได้ผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบมาให้ออกแบบมาตรฐาน IEEE 802.11b โดยใช้เทคโนโลยีที่เราเรียกว่า Complimentary Code Keying (CCK) ร่วมกับเทคโนโลยี Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) เพื่อให้สามารถรับส่งข้อมูลได้ด้วยอัตราความเร็ว 11 เมกะบิตต่อวินาที โดยใช้คลื่นสัญญาณวิทยุย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่อนุญาตให้ใช้งานในแบบสาธารณะทางด้านวิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรมและการแพทย์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ใช้ความถี่ย่านนี้มีหลายชนิดทั้งผลิตภัณฑ์ที่รองรับเทคโนโลยี Bluetooth ทั้งโทรศัพท์ไร้สายและเดาโมโครเวฟจึงทำให้การใช้งานนั้นมีปัญหาในเรื่องของสัญญาณรบกวนของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ แต่ข้อดีของมาตรฐาน IEEE 802.11b ก็คือสนับสนุนการใช้งานเป็นบริเวณกว้างกว่ามาตรฐาน IEEE 802.11a ผลิตภัณฑ์มาตรฐาน IEEE 802.11b เป็นที่รู้จักในเครื่องหมายการค้า Wi-Fi ซึ่งได้กำหนดขึ้นมาโดย Wireless Ethernet Comparability Alliance (WECA) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้รับเครื่องหมาย Wi-Fi นั้นได้ผ่านการตรวจสอบและรับรองว่าเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE 802.11b ซึ่งสามารถใช้งานร่วมกันกับผลิตภัณฑ์ของผู้ผลิตรายอื่นๆ ได้

2.6.3 IEEE 802.11g

เป็นมาตรฐานที่นิยมใช้งานกันมากในปัจจุบันและได้เข้ามาทดแทนผลิตภัณฑ์ที่รองรับมาตรฐาน IEEE 802.11b เนื่องจากสนับสนุนอัตราความเร็วของการรับส่งข้อมูลในระดับ 54 เมกะบิตต่อวินาที โดยใช้เทคโนโลยี OFDM บนคลื่นสัญญาณวิทยุย่านความถี่ 2.4 GHz และให้รัศมีการทำงานที่มากกว่า IEEE 802.11a พร้อมความสามารถในการใช้งานร่วมกันกับมาตรฐาน IEEE 802.11b ได้ (Backward - Compatible)

2.6.4 IEEE 802.11e

เป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาสำหรับการใช้งานแอปพลิเคชันทางด้านมัลติมีเดียอย่าง VoIP (Voice Over IP) เพื่อที่จะสามารถทำการควบคุมและรับประกันคุณภาพของการใช้งานตามหลักการ QoS โดยการปรับปรุง MAC Layer ให้มีคุณสมบัติในการรับรองการใช้งานให้มีประสิทธิภาพ

2.5.5 IEEE 802.11f

มาตรฐานนี้เป็นที่รู้จักกันในนาม Inter Access Point Protocol (IAPP) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาสำหรับจัดการกับผู้ใช้ที่เคลื่อนที่ข้ามเขตการให้บริการของแอเสสพอยต์ตัวหนึ่งไปยังแอเสสพอยต์อีกตัวหนึ่งเพื่อให้บริการในแบบโรมมิ่งสัญญาณระหว่างกัน

2.6.6 IEEE 802.11h

มาตรฐานที่ออกแบบมาสำหรับผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สายที่ใช้งานย่านความถี่ 5 GHz ให้ทำงานถูกต้องตามข้อกำหนดการใช้ความถี่ของประเทศในยุโรป

2.6.7 IEEE 802.1i

เป็นมาตรฐานในด้านการรักษาความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สาย โดยการปรับปรุง MAC Layer เนื่องจากระบบเครือข่ายไร้สายมีช่องโหว่มากมายในการใช้งาน ซึ่งโดยเฉพาะฟังก์ชันการเข้ารหัสแบบ WEP 64/128 bit ซึ่งใช้คีย์ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลย ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับสภาพการใช้งานที่ต้องการความมั่นใจในการรักษาความปลอดภัยของการสื่อสารระดับสูง มาตรฐาน IEEE 802.11i จึงได้กำหนดเทคนิคการเข้ารหัสที่ใช้คีย์ชั่วคราว ด้วย WPA WPA2 และการเข้ารหัสในแบบ AES (Advanced Encryption Standard) ซึ่งมีความน่าเชื่อถือสูง

2.6.8 IEEE 802.11k

เป็นมาตรฐานที่ใช้จัดการการทำงานของระบบเครือข่ายไร้สายทั้งจัดการการใช้งานคลื่นวิทยุให้มีประสิทธิภาพ มีฟังก์ชันการเลือกช่องสัญญาณ การโรมมิ่งและการควบคุมกำลังส่ง นอกจากนี้ยังมีการร้องขอและปรับแต่งค่าให้เหมาะสมกับการทำงาน การหาคะพิกัดการใช้งานสำหรับเครื่องโคลแอนต์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ระบบการจัดการสามารถทำงานจากศูนย์กลางได้

2.6.9 IEEE 802.11n

เป็นมาตรฐานของผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สายที่คาดหมายกันว่า จะเข้ามาแทนที่มาตรฐาน IEEE 802.11a IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน โดยให้อัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลในระดับ 100 เมกะบิตต่อวินาที

2.6.10 IEEE 802.1x

เป็นมาตรฐานที่ใช้งานกับระบบรักษาความปลอดภัย ซึ่งก่อนใช้งานระบบเครือข่ายไร้สาย จะต้องตรวจสอบสิทธิ์ในการใช้งานก่อน โดยจะใช้โปรโตคอลอย่าง LEAP PEAP EAP - TLS และ EAP - FAST ซึ่งรองรับการตรวจสอบผ่านเซิร์ฟเวอร์ เช่น RADIUS Kerberos เป็นต้น

2.7 มาตรฐานเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.16 [22-23]

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) หรือมาตรฐาน IEEE 802.16 คือเทคโนโลยีไร้สายความเร็วสูงล่าสุด มีการแยกเวอร์ชันเป็น IEEE 802.16a ซึ่งได้รับอนุมัติออกมาเมื่อเดือนมกราคม 2004 โดยสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ หรือ IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) มีรัศมีทำการ 30 ไมล์ (ประมาณ 48 กิโลเมตร) และมีความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลสูงสุด 75 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) กว้างกว่า 10 เท่า และเร็วกว่า 30 เท่า เมื่อเทียบกับ 3G

2.7.1 มาตรฐาน WiMAX แบบ IEEE 802.16

เป็นมาตรฐานที่ให้ระยะทางการเชื่อมโยงในช่วงระยะสั้นๆ แค่ 1.6 – 4.8 กิโลเมตร เท่านั้น เป็นมาตรฐานเดียวที่สนับสนุนรูปแบบการใช้งาน“ในระดับสายตา”หรือที่เรียกว่า Line of Sight (LoS) แต่มาตรฐานนี้ก็กลับมีการเปิดใช้งานในช่วงความถี่ที่สูงมากคือ 10 - 66 กิกะเฮิรตซ์ (GHz) เลยทีเดียว

2.7.2 มาตรฐาน WiMAX แบบ IEEE 802.16a

เป็นมาตรฐานที่แก้ไขปรับปรุงจาก IEEE 802.16 เดิมก่อนหน้านี้นี้ โดยมีการปรับลดระดับความถี่ที่ใช้งาน ให้ลงมาที่ย่านความถี่ 2 - 11 GHz ซึ่งคุณสมบัติเด่นที่ได้รับการแก้ไขข้อบกพร่องจากมาตรฐาน 802.16 เดิมคือเพิ่มคุณสมบัติการรองรับการทำงานแบบที่ไม่อยู่ในระดับสายตา Non Line of Sight (NLoS) อีกทั้งยังมีคุณสมบัติการทำงานในส่วนของภาคขยายสัญญาณ เมื่อมีสิ่งกีดขวางเกิดขึ้นตามสภาพแวดล้อมขวางกั้น อาทิเช่น ต้นไม้ อาคาร ฯลฯ

นอกจากนี้ก็ยังช่วยให้สามารถขยายระบบเครือข่ายเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตไร้สายความเร็วสูงได้อย่างกว้างยิ่งขึ้นกว่ามาตรฐานเดิม ด้วยรัศมีทำการที่ไกลเพิ่มขึ้นจากมาตรฐานแรกไปถึง 31 ไมล์ (ประมาณ 48 - 50 กิโลเมตร) และมีอัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงสุดถึง 75 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) ทำให้สามารถรองรับการเชื่อมต่อการใช้งานกับระบบเครือข่ายของบริษัทที่ใช้สายประเภทที่ 1 (T1-type) มากกว่า 60 ราย และการเชื่อมต่อแบบ Asynchronous Digital Subscriber Line (ADSL) ตามบ้านเรือนที่พังกาศียกหลายร้อยครัวเรือนได้พร้อมกันโดยไม่เกิดปัญหาในการใช้งาน

2.7.3 มาตรฐาน WiMAX แบบ IEEE 802.16e

เป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาให้สนับสนุนการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์พกพาประเภทต่างๆ เช่น อุปกรณ์พีดีเอ โน้ตบุ๊ก มือถือ เป็นต้น โดยให้รัศมีทำงานที่ 1.6 – 4.8 กิโลเมตร ได้มีระบบที่ช่วยให้ผู้ใช้งานยังสามารถสื่อสารได้โดยให้คุณภาพในการสื่อสารที่ดีและมีเสถียรภาพขณะใช้งาน แม้ว่ามีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา

2.8 ทฤษฎีพื้นฐานและการนำไปใช้ในการจำลองสายอากาศของโปรแกรม IE3D

การจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ทำให้ความแน่นอนถูกต้องแม่นยำสูงในการวิเคราะห์และออกแบบสิ่งที่ยู่ยากซับซ้อนเช่นวงจรไมโครเวฟและวงจรพิมพ์ทางความถี่วิทยุ สายอากาศวงจรถอดความเร็วสูงและส่วนประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ เป็นต้น โปรแกรม IE3D เป็นโปรแกรมจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นสมบูรณ์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศไมโครสตริปและวงจรรวมที่ใช้งานที่แผ่นพิมพ์วงจรและวงจรถอดในรูปแบบสามมิติเช่นวงจรรวมไมโครเวฟและมิลลิเมตรเวฟ (มิลลิเมตร ICs) เป็นต้น โปรแกรม IE3D ได้ถูกนำมาใช้เหมือนเป็นมาตรฐานอุตสาหกรรมในการจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามมิติซึ่งงานส่วนใหญ่ที่ต้องการปรับปรุงให้ดีขึ้นจะใช้ IE3D มาช่วยดังนั้น IE3D จึงนิยมกลายเป็นเครื่องมือจำลองของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถทำได้หลายอย่างและใช้งานมีประสิทธิภาพและความถูกต้องแม่นยำ ทฤษฎีพื้นฐานและการนำไปใช้งานของโปรแกรม IE3D นั้นใช้สมการเบื้องต้นคือสมการอินดิกรัลที่หาได้จากฟังก์ชันของกรีนใน IE3D สามารถสร้างแบบรูปร่างได้ทั้งกระแสไฟฟ้าบนโครงสร้างโลหะและกระแสแม่เหล็กที่แทนด้วยสนามที่แพร่กระจายบนช่องโลหะโดยทั่วไปแล้วปัญหาที่เกิดจากการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกสมมติจากโครงสร้างตัวนำในสิ่งแวดล้อมที่เป็นฉนวนที่เกิดขึ้น

สำหรับโปรแกรม IE3D นั้นมีวิวัฒนาการมาจากวิธีการ MPIE (Mixed - Potential Integral Equation) ซึ่งใช้วิเคราะห์โครงสร้างไมโครสตริปที่ไม่สม่ำเสมอ และสายอากาศหลากหลายรูปทรง โดยอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎี Roof - Top Basis Function บนรูปทรงของสี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยมที่ถูกนำมาประกอบกันเป็นสายอากาศวิธีการนี้มีความแม่นยำ มีประสิทธิภาพและตอบสนองกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ รวมทั้งผลลัพธ์เชิงตัวเลขของการวัดที่ได้มีความถูกต้อง วิธีนี้ไม่เพียงแต่มีประสิทธิภาพในการคำนวณเท่านั้น แต่ช่วยในการตีความหมายสนามทางกายภาพกับรูปทรงทางกายภาพที่เหมือนกัน เพื่อให้รู้ว่ากระแสปฏิบัติตัวอย่างไรบนโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้ โดยเฉพาะกระแสที่ไหลบริเวณขอบเขตรอยต่อ อัลกอริทึมนี้ได้พัฒนาและเรียกว่า Pseudo - Mesh หรือ P - Mesh

ซึ่งได้มาจากการประยุกต์ของวิธีโมเมนต์ คือ MIPE ที่ใช้สำหรับหาการกระจายของกระแสและประจุบนผิวของโครงสร้างสายอากาศ

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

P. Raklua K. Janchitrapongveg and N. Anantrasirichai [24] นำเสนอการวิเคราะห์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องมุมฉากขวาที่ความถี่เดียวและความถี่คู่ สายอากาศการประกอบไปด้วยตัวสายอากาศกับช่องตัว L ซึ่งมีผลกระทบกับความถี่เดียวและความถี่คู่ลักษณะของสายอากาศจะมีความต้านทานทางด้านอิมพิแดนซ์ S11 ด้านพารามิเตอร์ VSWR รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจะใช้วิธีแตกต่างกันทางด้านเวลา ในด้านการทดลองนั้นได้ใช้โปรแกรม IE3D ทำการจำลองขึ้นมา ซึ่งได้ถูกออกแบบให้มีสายอากาศมีขนาดเล็กโดยใช้วัสดุฐานรองแบบ RT/duroid 5880 (ฉนวน 2.2) หนาเพียง 2.2 มิลลิเมตร สายอากาศประกอบไปด้วยตัวสายอากาศกับช่องตัว L และ FR4 สามารถกำหนดความถี่ที่ต้องการได้ ที่ความถี่ 8 GHz กับความถี่ 9 GHz โดยสายอากาศมีขนาด 28 มิลลิเมตร x 21 มิลลิเมตร สูง 2.2 มิลลิเมตร สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องมุมฉากขวาที่ความถี่เดียวและความถี่คู่นี้ มีข้อดีคือสามารถกำหนดความถี่ที่ต้องการได้ง่ายกว่าแบบอื่น แต่มีข้อเสียคือ ขนาดความหนาของสายอากาศยังมีความหนาอยู่มาก

T. Jangjing P. Raklua W. Chanwattanapong and S. Chaimool [25] นำเสนอการวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉาก สองย่านความถี่ โดยมีการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางและแบบสองทิศทาง สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานกับเครือข่ายไร้สายแบบเมฆ สายอากาศถูกออกแบบให้ช่องเปิดมีขนาดและตำแหน่งที่แตกต่างกัน เพื่อที่จะสามารถผลิตความถี่ได้สองย่านความถี่คือที่ 2.45 GHz และ 5.2 GHz และมีรูปแบบการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางและแบบสองทิศทาง โดยช่องเปิดถูกวางอยู่บนวัสดุฐานรองแบบไมลาฟิล์มที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3.2 และความหนาเพียง 0.3 มิลลิเมตร เพื่อนำไปใช้สำหรับการรองรับเทคโนโลยีสายอากาศที่มีความยืดหยุ่นสูงต่อไป รวมทั้งสายอากาศ มีขนาดโดยรวมกว้าง 8 เซนติเมตร x 13 เซนติเมตร ได้ความกว้างแบนด์วิดท์ 200 MHz (2.3-2.5 GHz) และแบนด์วิดท์ 400 MHz (5.1-5.5 GHz) มีอัตราขยาย 2.02 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz และมีอัตราขยาย 4.16 dBi ที่ความถี่ 5.2 GHz มีข้อดีคือเราสามารถทำการกำหนดความถี่และแบบรูปการแผ่พลังงานที่ต้องการได้แต่มีข้อเสียคือ ขนาดของสายอากาศยังมีความใหญ่อยู่มาก

A. Malajai W. Chanwattanapong and P. Raklua [26] นำเสนอการออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่แถวความถี่แถบกว้าง เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้งานใน WLAN (2.4-2.5 GHz) WiMAX (2.3-2.7 GHz) และ 3G (2.1 GHz) ได้ โดยใช้วิธีการนำสายอากาศแบบช่อง

เปิดมุมจาก 4 ช่องมาต่อแบบแถวลำดับ ให้ขนาดและตำแหน่งที่ต่างกันเพื่อสามารถผลิตความถี่ที่แตกต่างกันออกมาได้ โดยแต่ละความถี่จะต้องไม่รบกวนกันซึ่งกันและกัน โดยช่องเปิดถูกวางอยู่บนวัสดุฐานรองแบบไมล้าฟิล์มที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3.2 และความหนา 0.3 มิลลิเมตร ส่วนตัวของสายอากาศนั้นมีขนาดโดยรวมถึง 12.75 เซนติเมตร x 15 เซนติเมตร ได้ผลความถี่แถบกว้างตั้งแต่ 2.02 - 3.04 GHz มีข้อดีคือ สามารถกำหนดความถี่ที่เราต้องการได้และยังช่วยลดการรบกวนของช่วงความถี่ของระบบ WLAN WiMAX และ 3G แต่มีข้อเสียคือ ขนาดของสายอากาศยังมีความใหญ่มากๆ



บทที่ 3

การออกแบบสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

ในปัจจุบันวิวัฒนาการทางเทคโนโลยีในด้านการสื่อสารได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและมีความเติบโตอย่างรวดเร็ว เช่น การสื่อสารไร้สาย การสื่อสารดาวเทียม และการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น ซึ่งระบบสื่อสารเหล่านี้จะใช้งานที่ย่านความถี่ไมโครเวฟเพื่อใช้ในการรับส่งข้อมูลข่าวสารต่างๆ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาในส่วนของารรับและแพร่กระจายคลื่นสัญญาณให้มีความเหมาะสมเช่นเดียวกัน โดยสายอากาศที่นิยมใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟและได้มีการศึกษาพัฒนาอย่างกว้างขวางชนิดหนึ่งก็คือ สายอากาศไมโครสตริป เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการคือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีรูปร่างไม่ซับซ้อน ออกแบบและสร้างได้ง่าย ราคาไม่สูงมากนัก ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริปที่นิยมใช้งานทั่วไปได้แก่ สายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น (Microstrip Patch Antenna) กับสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด (Microstrip Slot Antenna) และสายอากาศไมโครสตริปไดโพล (Microstrip Dipole Antenna) โดยสายอากาศแต่ละชนิดต่างมีข้อได้เปรียบและเสียเปรียบแตกต่างกันไป ซึ่งการพิจารณาเลือกใช้สายอากาศชนิดใดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของลักษณะการใช้งานนั้นๆ

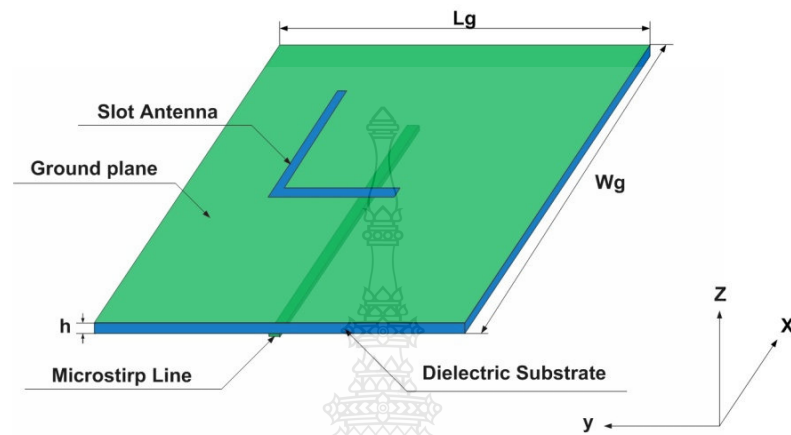
ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางและทำการออกแบบสายอากาศฟิล์มบางแบบแถวลำดับโดยการนำเอาพื้นฐานในการออกแบบที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 มาช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะที่สำคัญต่างๆ ของสายอากาศ ซึ่งในการวิเคราะห์นั้นจะทำการจำลองโครงสร้างของสายอากาศโดยใช้ซอฟต์แวร์ IE3D

3.1 การออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางที่ถูกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip Line)

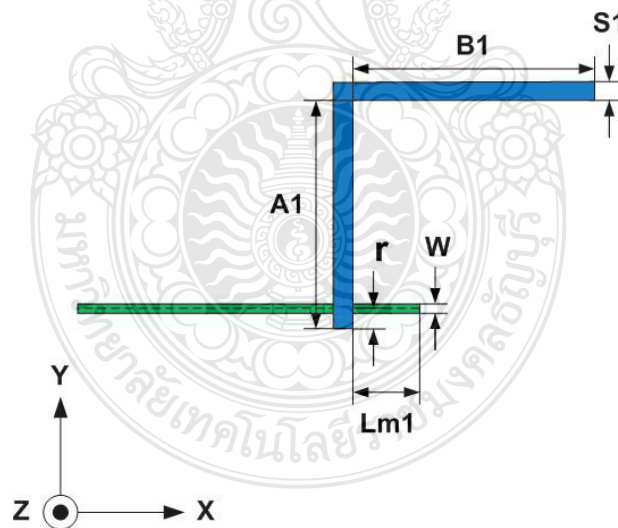
3.1.1 โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบาง

จากสมมุติฐานในการออกแบบของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริปนั้น เริ่มต้นจากแนวความคิดมาจากการออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริปพื้นฐาน ที่มีโครงสร้างของสายอากาศไม่ซับซ้อน รวมทั้งยังให้คุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศที่ดี จากข้อดีต่างๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดพื้นฐานนั้นจึงได้ถูกพัฒนามาเป็นสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบาง จากการเปรียบเทียบในลักษณะทางโครงสร้างของสายอากาศทั้งสอง

แบบนี้ จะเห็นได้ว่าสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางสามารถลดขนาด โครงสร้างลงจากสายอากาศแบบช่องเปิดพื้นฐานลงมาประมาณ 20% อีกทั้งยังสามารถจัดวางรูปแบบของช่องเปิดได้หลายรูปแบบ เพื่อที่จะรองรับต่อการออกแบบสายอากาศหลายความถี่เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริป



ภาพที่ 3.2 พารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริป

จากภาพที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริป โดยโครงสร้างจะประกอบไปด้วยช่องเปิดแบบฟิล์มบางวางอยู่บนระนาบกราวด์ ที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริปสำหรับระนาบกราวด์มีความกว้าง W_g และความยาว L_g รวมทั้งสายอากาศมีความหนาของวัสดุฐานรอง (Substrate) h ในส่วนของพารามิเตอร์อื่นๆ ของตัวสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางแสดงดังภาพที่ 3.2 ประกอบไปด้วย

- A1 คือ ความยาวแนวนอนที่อยู่ด้านในของช่องเปิดแบบฟิล์มบาง
- B1 คือ ความยาวแนวตั้งที่อยู่ด้านในของช่องเปิดแบบฟิล์มบาง
- W คือ ความกว้างของสายส่งไมโครสตริป
- S1 คือ ความกว้างของช่องเปิดแบบฟิล์มบาง
- Lm1 คือ ระยะห่างระหว่างขอบแนวนอนของช่องเปิดแบบฟิล์มบางถึงปลายเปิดของสายส่ง
- r คือ ระยะห่างแกนกลางของความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ถึงปลายขอบของช่องเปิดแบบฟิล์มบางในแนวแกนตั้ง

สำหรับการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้เน้นการออกแบบเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สายในย่านความถี่ 2.45 GHz ดังนั้นขั้นตอนแรกเลยจะทำการกำหนดวัสดุฐานรองที่นำมาออกแบบ คือ Mylar Film ที่ประกอบไปด้วยคุณสมบัติดังนี้

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก	ϵ_r	=	3.2
ความหนาของวัสดุฐานรอง	h	=	0.3 มิลลิเมตร
ค่าความนำของทองแดง	σ	=	5.8×10^7 S/m
ค่าความหนาของทองแดง	t	=	0.1 มิลลิเมตร
ค่าตัวประกอบการกระจาย	$\tan \delta$	=	0.009

ในการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางสิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ การออกแบบสายส่งไมโครสตริปให้มีอิมพีแดนซ์ (Z_0) 50 โอห์ม ในย่านความถี่ที่ออกแบบดังนั้นจึงต้องคำนวณหาความกว้างของสายส่งไมโครสตริป (W_m) จากสมการที่ 3.1 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) และความหนาของวัสดุฐานรอง (h)

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

เมื่อ
$$B = \frac{60\pi^2}{Z_c \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.2)$$

โดยสมการที่ 3.1 ใช้เมื่อ $Z_c \sqrt{\epsilon_{eff}} \leq 89.91$

นำค่า ϵ_r ของวัสดุฐานรอง = 3.2 และค่า $Z_c = 50$ โอห์ม แทนลงในสมการที่ 3.2 จะได้

$$B = \frac{60\pi^2}{50\sqrt{3.2}} = 7$$

นำค่าของ B แทนลงในสมการที่ 3.1 จะได้

$$\frac{Wm}{0.3} = \frac{2}{\pi} \left\{ 7 - 1 - \ln(2(7) - 1) + \frac{3.2 - 1}{2(3.2)} [\ln(7 - 1)] + 0.39 - \frac{0.61}{3.2} \right\}$$

$$= \frac{2}{\pi} \{ 7 - 1 - 2.6 + 0.62 + 0.39 - 0.19 \}$$

$$= \frac{2}{\pi} \times 4.22$$

$$Wm = 0.8mm (\approx 1mm)$$

ในการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางนั้น พารามิเตอร์ที่เป็นตัวกำหนดให้ได้มาซึ่งความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) ที่ต้องการ คือ ความยาวรวมของ $A+B$ โดยจะต้องออกแบบให้มีความยาวประมาณ $0.5\lambda_g$ ของความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ รวมทั้งยังกำหนดให้ขนาดความยาวของ $A = B$ เช่นกัน ซึ่งพารามิเตอร์ A และ B จะสอดคล้องกับสมการในการออกแบบหาความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศดังสมการที่ 3.3

$$f_r = \frac{0.5c}{(A+B)\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.3)$$

เมื่อ

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W_m} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

และความยาวคลื่นสัมพันธ์คำนวณได้จาก

$$\lambda_g = \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.5)$$

โดยที่	c	คือ ความเร็วแสง (ประมาณ 3×10^8 m/s)
	f_r	คือ ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการออกแบบ (GHz)
	ϵ_{eff}	คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิภาพเท่ากับ 2.6

จากสมการที่ 3.3 และ 3.4 เป็นการประมาณค่าเริ่มต้นในการหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบาง ซึ่งสามารถทำให้การออกแบบสายอากาศง่ายยิ่งขึ้น

ในการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวกำหนดให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการคือ ความยาวทั้งสองด้านของ Slot Antenna ซึ่งได้แก่ ความยาว A และ ความยาว B โดยที่ความยาวของตัว Slot Antenna ในแต่ละความถี่ของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะนำเอาไปเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g) เพื่อที่จะหาความยาวที่เหมาะสมในการออกแบบสายอากาศ ดังนั้นสมการพื้นฐานในการหา (λ_g) ในวิทยานิพนธ์นี้แสดงดังสมการที่ 3.5 เมื่อทำการออกแบบให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการและใช้ค่าตัวไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ที่กำหนดไว้จะให้ความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g)

หาค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g) ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \lambda_{g2.45} &= \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \\ &= \frac{3 \times 10^8}{(2.45 \times 10^9) \sqrt{2.6}} \\ &= 75.94 \text{ มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าความยาวของสายส่งไมโครสตริปจะมีความยาวมากกว่า $0.5 \lambda_g$ ซึ่งความยาวของสายส่งไมโคร ไมโครสตริปจะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางเนื่องจากสายอากาศยังมีความยาวเพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีพื้นที่ที่ไม่ถูกใช้ในการแพร่กระจายคลื่นเพิ่มมากขึ้นและจะมีการลดทอนของสัญญาณมากขึ้นด้วย จึงทำให้มีการรับ - ส่งสัญญาณของสายอากาศนั้นจะมีประสิทธิภาพลดลงและต้องคำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากการขยายตัวตามความยาวของสนามไฟฟ้าบริเวณขอบแผ่นแพร่กระจายคลื่นด้วย

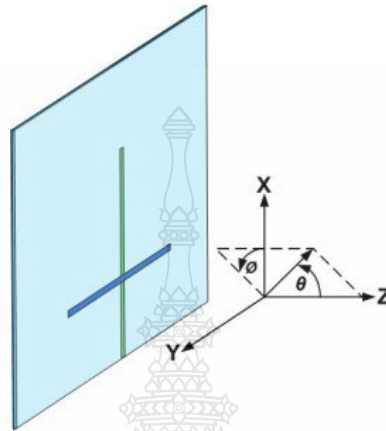
ความยาวของ Slot Antenna ของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางจะแปรผกผันกับความยาวของคลื่นของความถี่เรโซแนนซ์ คือ ถ้าความยาวของ Slot Antenna ของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางนั้นมีความยาวเพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ต่ำลง แต่ถ้าความยาวของ Slot Antenna ของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางนั้นมีความยาวที่สั้นลงจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์สูงขึ้น ส่วนความกว้างของ Slot Antenna ของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางจะแปรผกผันกับความยาวคลื่นของความถี่เรโซแนนซ์ ถ้าความกว้างของ Slot Antenna ของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางแคบลงจะทำให้มีความถี่เรโซแนนซ์ที่สูงขึ้น และถ้าความกว้างของ Slot Antenna ของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางนั้นมีความกว้างเพิ่มขึ้นจะทำให้มีความถี่เรโซแนนซ์ที่ต่ำลงที่ความยาวของ Slot Antenna เดียวกัน ความกว้างของ Slot Antenna ของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางนั้นมีความสัมพันธ์กับแบนด์วิดท์ของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางคือ เมื่อความกว้างของ Slot Antenna ของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางมีขนาดกว้างขึ้นก็จะทำให้แบนด์วิดท์ของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางนั้นกว้างขึ้นด้วย และเมื่อความกว้างของแบนด์วิดท์ของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางเพิ่มขึ้นก็จะทำให้มีอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางนั้นเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าความกว้างของ Slot Antenna ของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางขนาดที่แคบลงก็จะทำให้แบนด์วิดท์ของสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางนั้นแคบลงด้วย เป็นผลทำให้อัตราการขยายสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบางนั้นลดลงด้วย

3.2 การออกแบบสายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบางที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip Line)

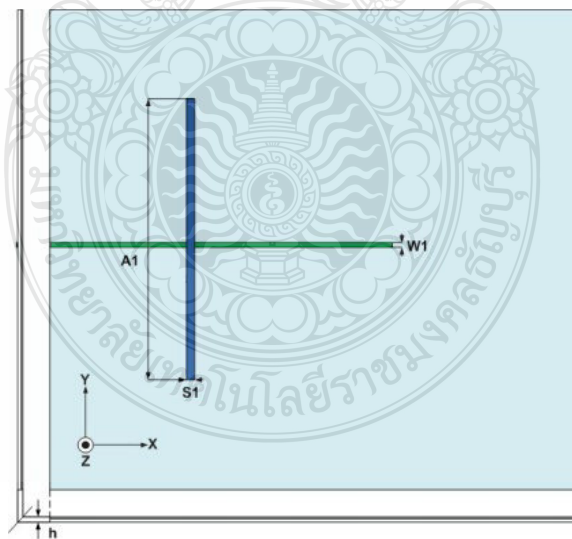
3.2.1 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบาง

ในการออกแบบสายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบางที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริปนั้นจะมีวิธีการออกแบบและใช้วัสดุฐานรองเหมือนกันกับสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบาง ดังนั้นค่าความกว้างของสายส่งไมโครสตริปเท่ากับ 1 มิลลิเมตร การออกแบบสายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบางแบบนี้ นั้น จะมีโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกับการสายอากาศ

ช่องเปิดแบบฟิล์มหนึ่งความถี่ โดยจะการทำสายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบาง โดยเลือกสายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบาง นำมาวางบนวัสดุฐานรองเดียวกันและใช้ตัวป้อนสัญญาณเดียวกันในการป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์



ภาพที่ 3.3 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบางที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริป



ภาพที่ 3.4 พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบาง

3.2.2 ความหมายของพารามิเตอร์ต่างๆ

W_1 คือ ความกว้างของสายอากาศไมโครสตริปไลน์สายอากาศตัวที่ 1

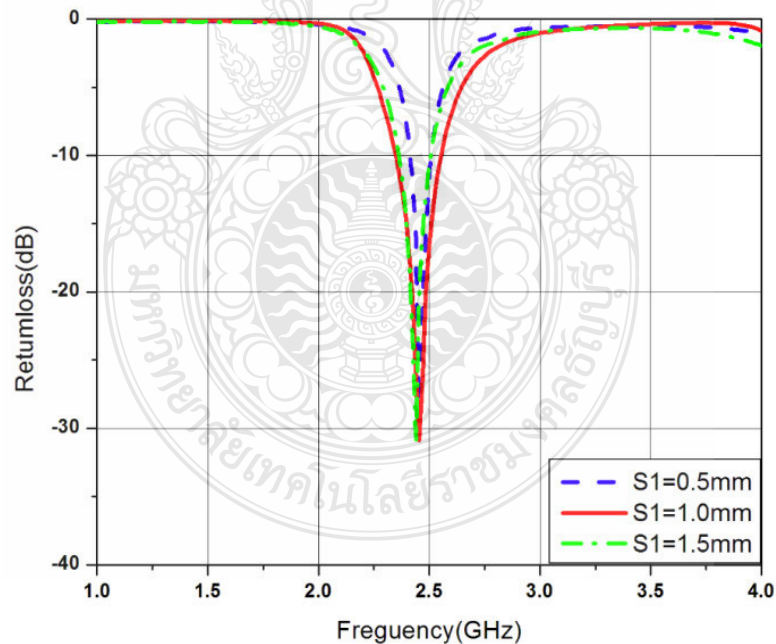
A_1 คือ ความยาวในแนวแกนตั้งของความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 1

S_1 คือ ความกว้างของช่องเปิดความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 1

การออกแบบสายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบางสามารถทำได้โดยกำหนดความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz เพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่เหมาะสมกับสายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบางมากที่สุด

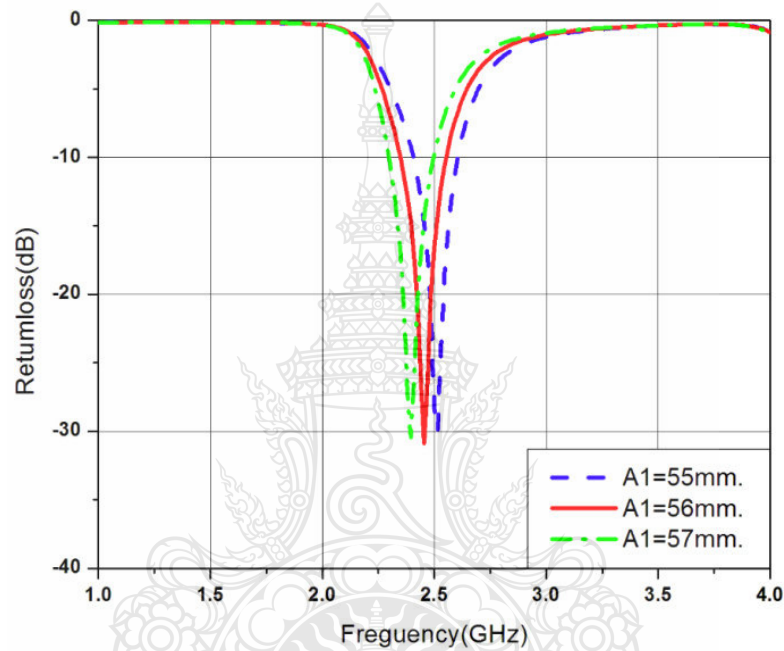
3.2.3 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบาง

เมื่อได้โครงสร้างของสายอากาศและขนาดต่างๆ ของตัวสายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบางโดยการคำนวณแล้ว เราสามารถทำการจำลองการทำงานและหาผลตอบสนองความถี่ของสายอากาศที่เหมาะสมได้ โดยการจำลองสายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบาง โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป IE3D (Zeland) เพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนด แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อให้ได้แบบรูปของการแพร่กระจายที่เหมาะสมมากที่สุด



ภาพที่ 3.5 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ S_1

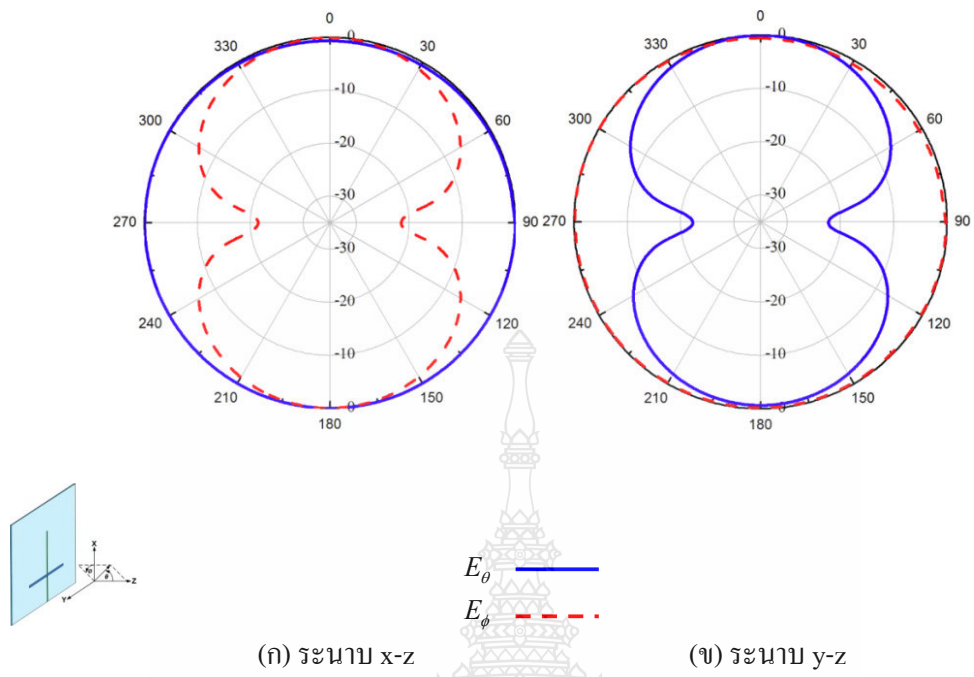
จากภาพที่ 3.5 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ต่อความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรพารามิเตอร์ S1 เป็น 0.5 มิลลิเมตร 1 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่า พารามิเตอร์ S1 มีผลกระทบกับการเปลี่ยนแปลงแบนด์วิดท์ (Impedance Bandwidth) ของสายอากาศเป็นอย่างมาก แต่ก็ยังมีผลกระทบกับแมตซ์อิมพีแดนซ์เช่นเดียวกัน จากภาพเมื่อ S1 มีค่าต่ำจะทำให้มีความกว้างแถบน้อยกว่า S1 ที่ค่าสูง โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย



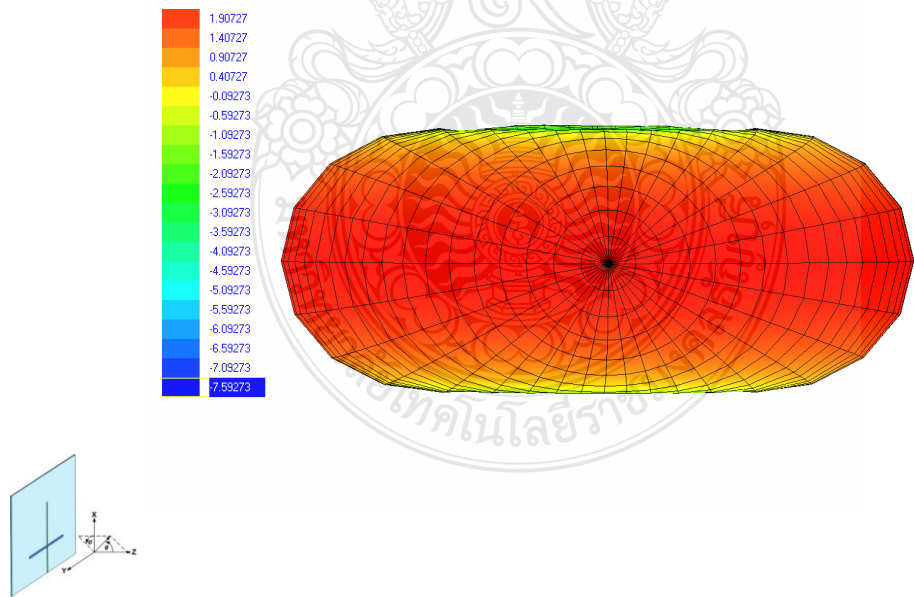
ภาพที่ 3.6 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ A1

จากภาพที่ 3.6 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ต่อความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรพารามิเตอร์ A1 เป็น 55 มิลลิเมตร 56 มิลลิเมตร และ 57 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่า พารามิเตอร์ A1 มีผลกระทบกับการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของสายอากาศอย่างมาก

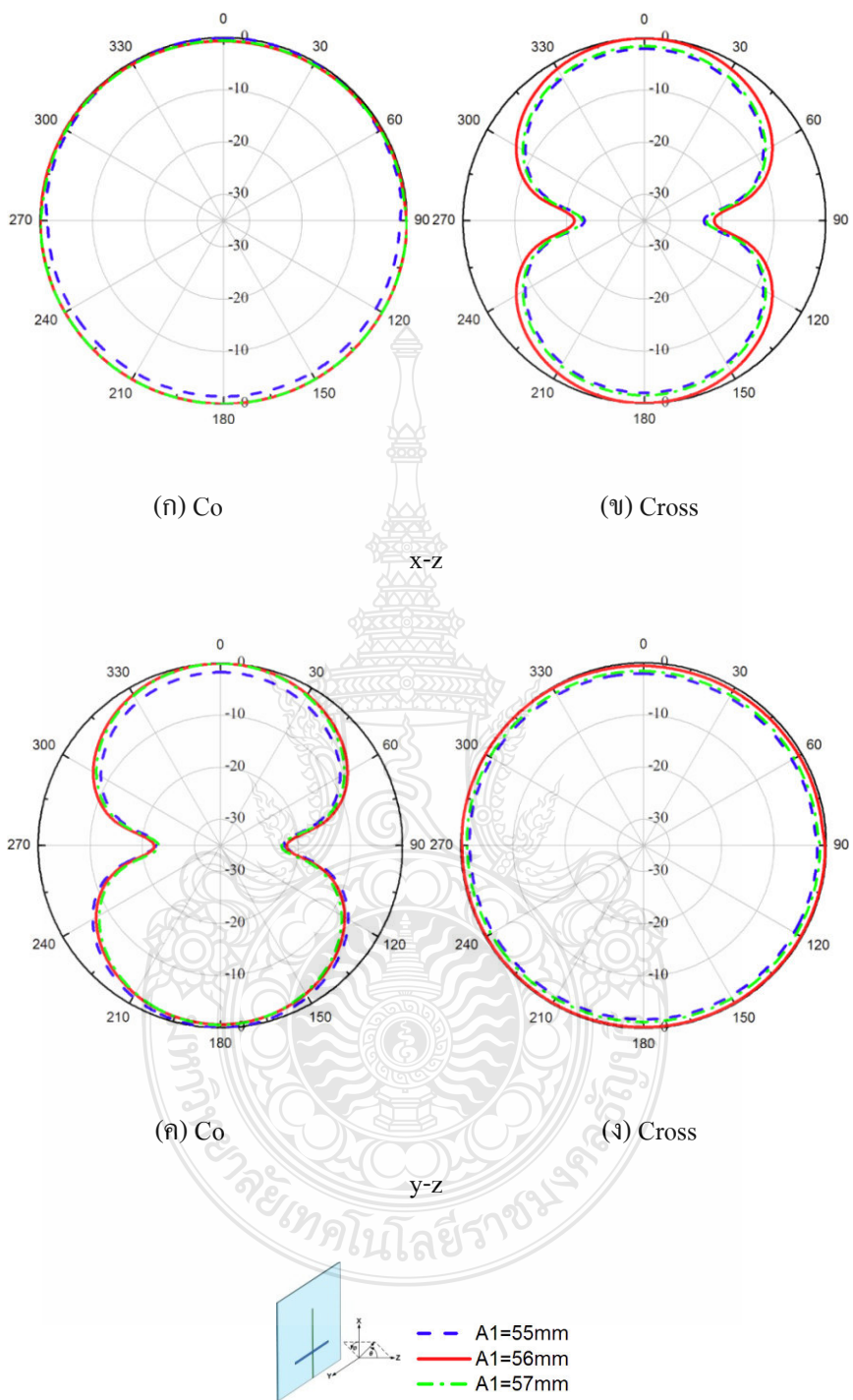
จากภาพที่ 3.7 และ 3.8 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 2 มิติและแบบ 3 มิติ ของตัวสายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบาง ที่ความถี่ 2.45 GHz ทั้งในระนาบอะซิมูท (Azimuth) และในระนาบเอเลเวชัน (Elevation) ตามลำดับ โดยมีลักษณะแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional)



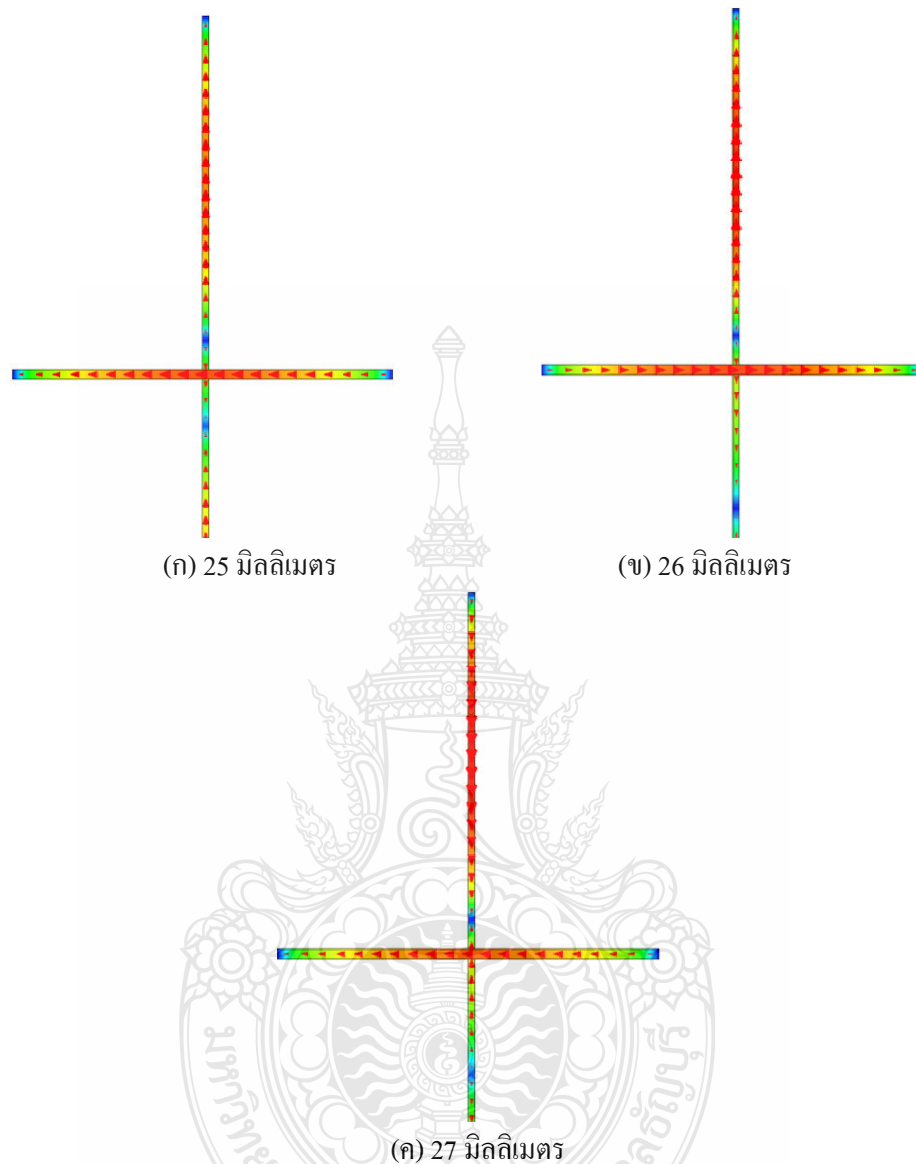
ภาพที่ 3.7 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz



ภาพที่ 3.8 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ ของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45GHz



ภาพที่ 3.9 แบบรูปการแผ่พลังงานในระยะไกลระนาบ $x-z$ และระนาบ $y-z$ ที่ระยะทางต่างๆ กัน



ภาพที่ 3.10 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบางที่ออกแบบที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz ที่ระยะทางแตกต่างกัน

จากภาพที่ 3.9 แสดงรูปเปรียบเทียบแบบการแผ่พลังงานก็มีผลกระทบจากระยะของสายอากาศที่ต่างๆ กัน ในระนาบ $x-z$ และระนาบ $y-z$ จากภาพที่ 3.9 (ก) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวตั้ง (E_{θ}) ในระนาบ $x-z$ ที่ระยะทางต่างๆ กัน ที่ความถี่ 2.45 GHz จากภาพที่ 3.9 (ข) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวนอน (E_{ϕ}) ในระนาบ $x-z$ ที่

ระยะทางต่างๆ กัน ที่ความถี่ 2.45 GHz จากภาพที่ 3.9 (ค) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวตั้ง (E_{θ}) ในระนาบ y-z ที่ระยะทางต่างๆ กันที่ ความถี่ 2.45 GHz จากภาพที่ 3.9 (ง) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวอน (E_{ϕ}) ในระนาบ y-z ที่ระยะทางต่างๆ กันที่ความถี่ 2.45 GHz

จากภาพที่ 3.10 (ก) แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 2.45 GHz เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ A1 เป็น 25 มิลลิเมตร จากภาพที่ 3.10 (ข) แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ A1 เป็น 26 มิลลิเมตร จากภาพที่ 3.10 (ค) แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ A1 เป็น 27 มิลลิเมตร มีการแพร่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของความถี่ 2.45 GHz ที่ระยะทางแตกต่างกัน ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบางโดยใช้ Software IE3D Version 11.5

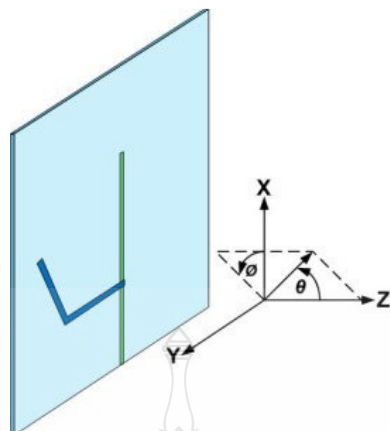
3.3 การออกแบบสายอากาศช่องเปิดมุม 135 องศา แบบฟิล์มบางที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip Line)

3.3.1 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดมุม 135 องศา แบบฟิล์มบาง

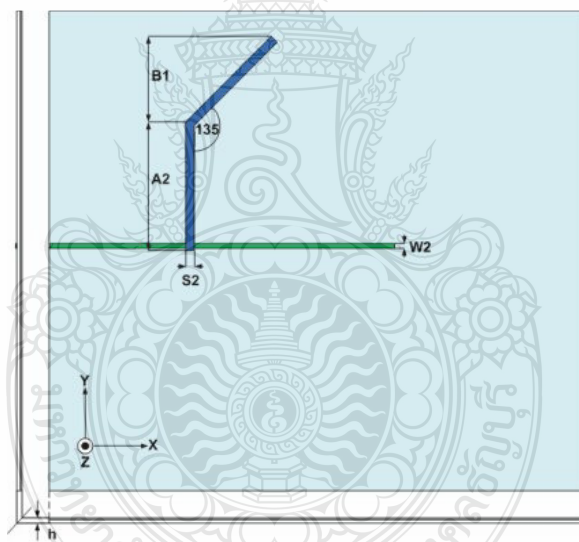
ในการออกแบบสายอากาศช่องเปิดมุม 135 องศา แบบฟิล์มบางที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริปนั้นจะมีวิธีการออกแบบและใช้วัสดุฐานรองเหมือนกันกับสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบาง ดังนั้นค่าความกว้างของสายส่งไมโครสตริปเท่ากับ 1 มิลลิเมตร การออกแบบสายอากาศช่องเปิดมุม 135 องศา แบบฟิล์มบางแบบนี้ จะมีโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกับการสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มหนึ่งความถี่ โดยจะการทำสายอากาศช่องเปิดมุม 135 องศา แบบฟิล์มบาง โดยเลือกสายอากาศช่องเปิดมุม 135 องศา แบบฟิล์มบางนำมาวางบนวัสดุฐานรองเดียวกันและใช้ตัวป้อนสัญญาณเดียวกันในการป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์

3.3.2 ความหมายของพารามิเตอร์ต่างๆ

- W_2 คือ ความกว้างของสายอากาศไมโครสตริปไลน์สายอากาศตัวที่ 2
- A_2 คือ ความยาวในแนวแกนตั้งของความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 2
- S_2 คือ ความกว้างของช่องเปิดความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 2
- B_1 คือ ความยาวในแนวแกนนอนของความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 1



ภาพที่ 3.11 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดมุม 135 องศา แบบฟิล์มบางที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริป

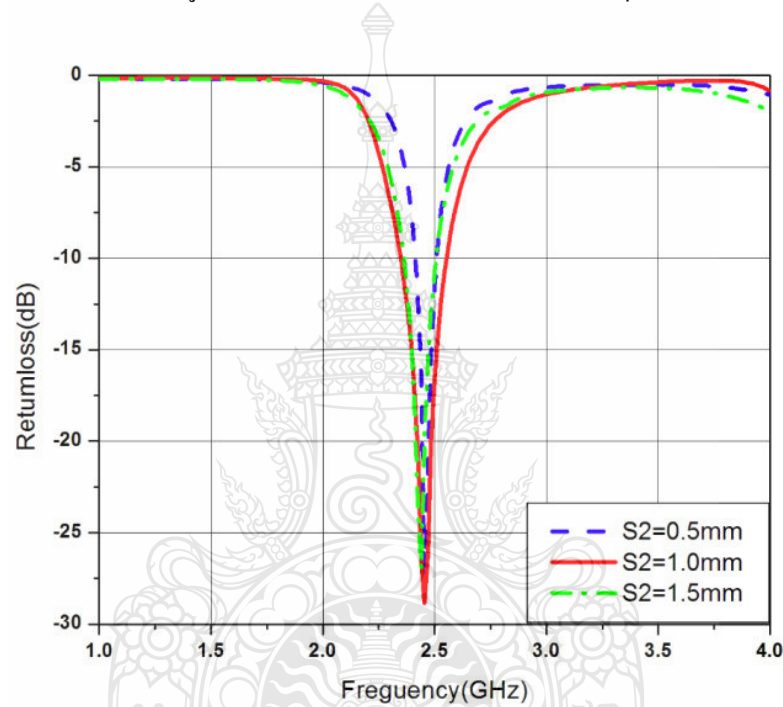


ภาพที่ 3.12 พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดมุม 135 องศา แบบฟิล์มบาง

การออกแบบสายอากาศช่องเปิดมุม 135 องศา แบบฟิล์มบาง สามารถทำได้โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz เพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่เหมาะสมกับสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางมากที่สุด

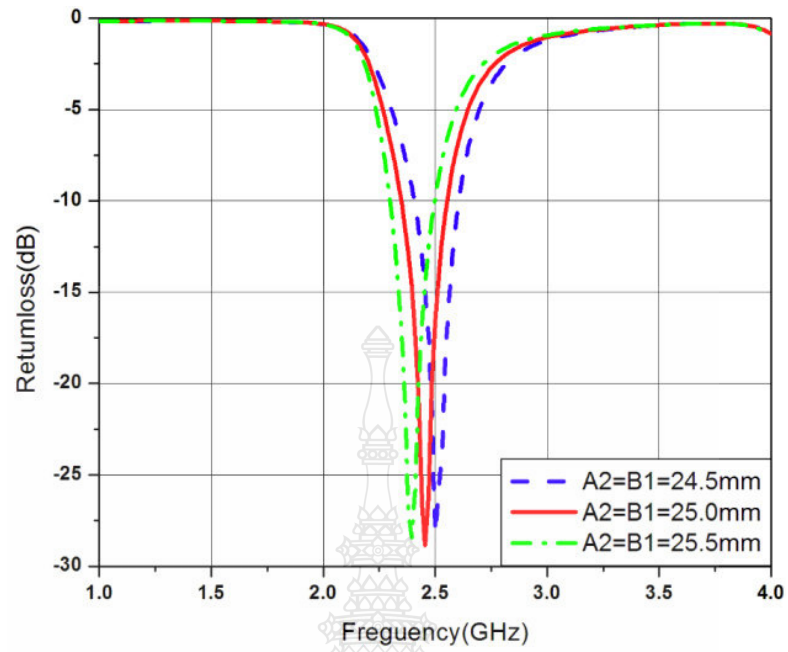
3.3.3 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดมุม 135 องศา แบบฟิล์มบาง

เมื่อได้โครงสร้างของสายอากาศและขนาดต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดมุม 135 องศา แบบฟิล์มบางโดยการคำนวณแล้ว เราสามารถทำการจำลองการทำงานและหาผลตอบสนองความถี่ของสายอากาศที่เหมาะสมได้ โดยการจำลองสายอากาศช่องเปิดมุม 135 องศา แบบฟิล์มบาง โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป IE3D (Zeland) เพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนด แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อให้ได้แบบรูปของการแพร่กระจายที่เหมาะสมมากที่สุด

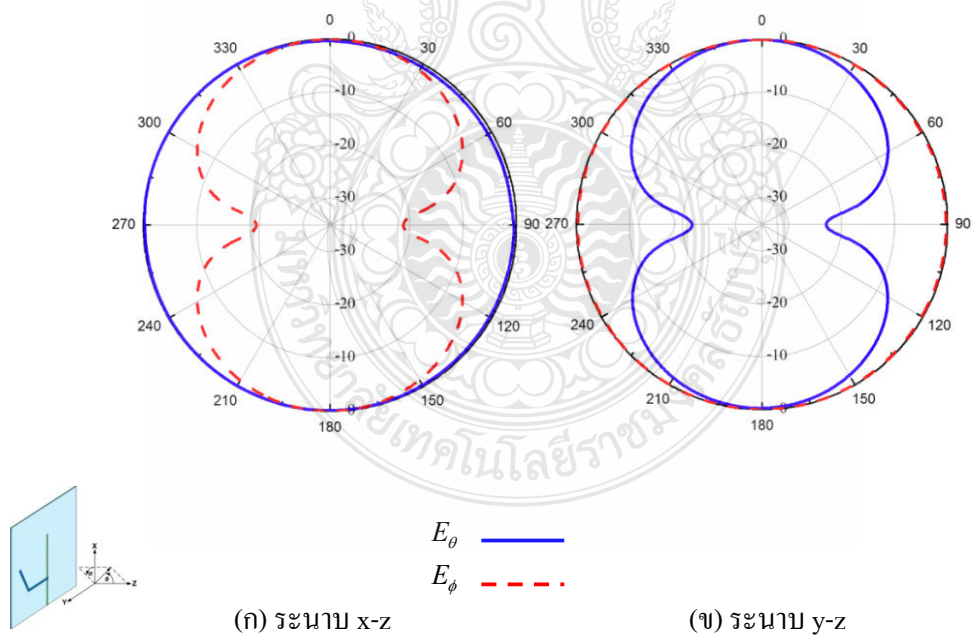


ภาพที่ 3.13 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ S2

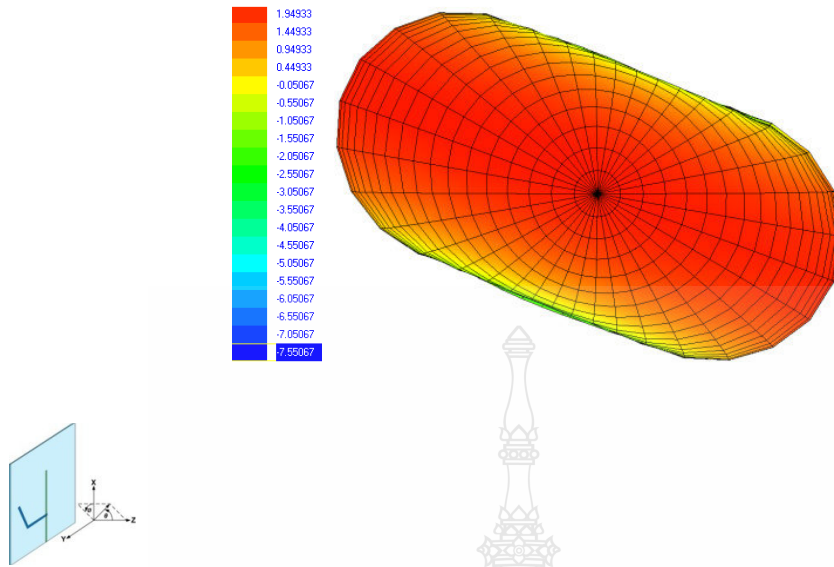
จากภาพที่ 3.13 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ต่อความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ S2 เป็น 0.5 มิลลิเมตร 1 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร จะเห็นว่าพารามิเตอร์ S2 มีผลกระทบกับการเปลี่ยนแปลงค่าแบนด์วิดท์ (Impedance Bandwidth) ของตัวสายอากาศเป็นอย่างมาก แต่ก็ยังมีผลกระทบกับแมตซ์อิมพีแดนซ์เช่นเดียวกัน จากภาพเมื่อ S2 มีค่าต่ำ จะทำให้มีความกว้างแบนน้อยกว่า S2 ที่ค่าสูง โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย



ภาพที่ 3.14 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $A_2=B_1$



ภาพที่ 3.15 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz

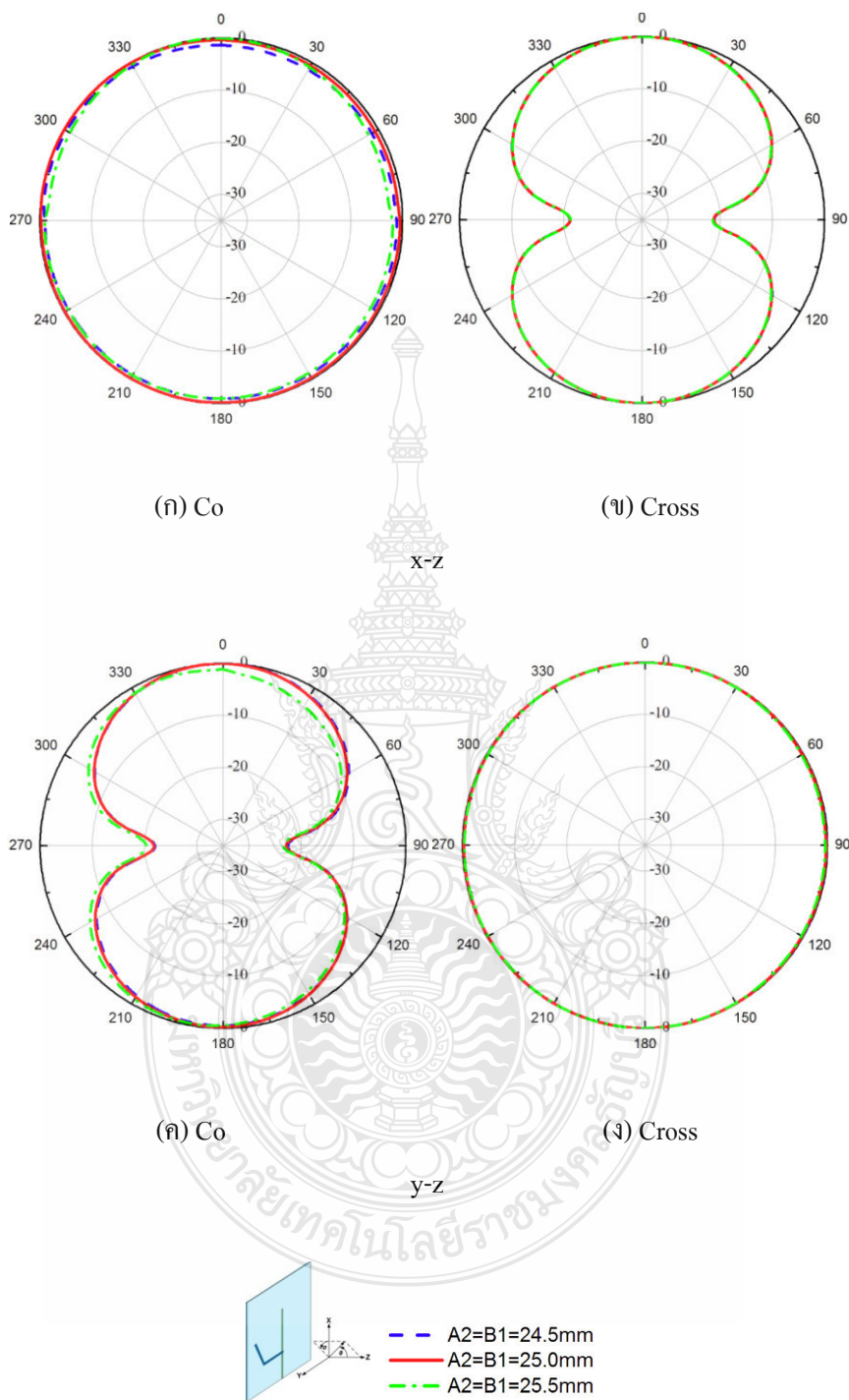


ภาพที่ 3.16 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ ของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz

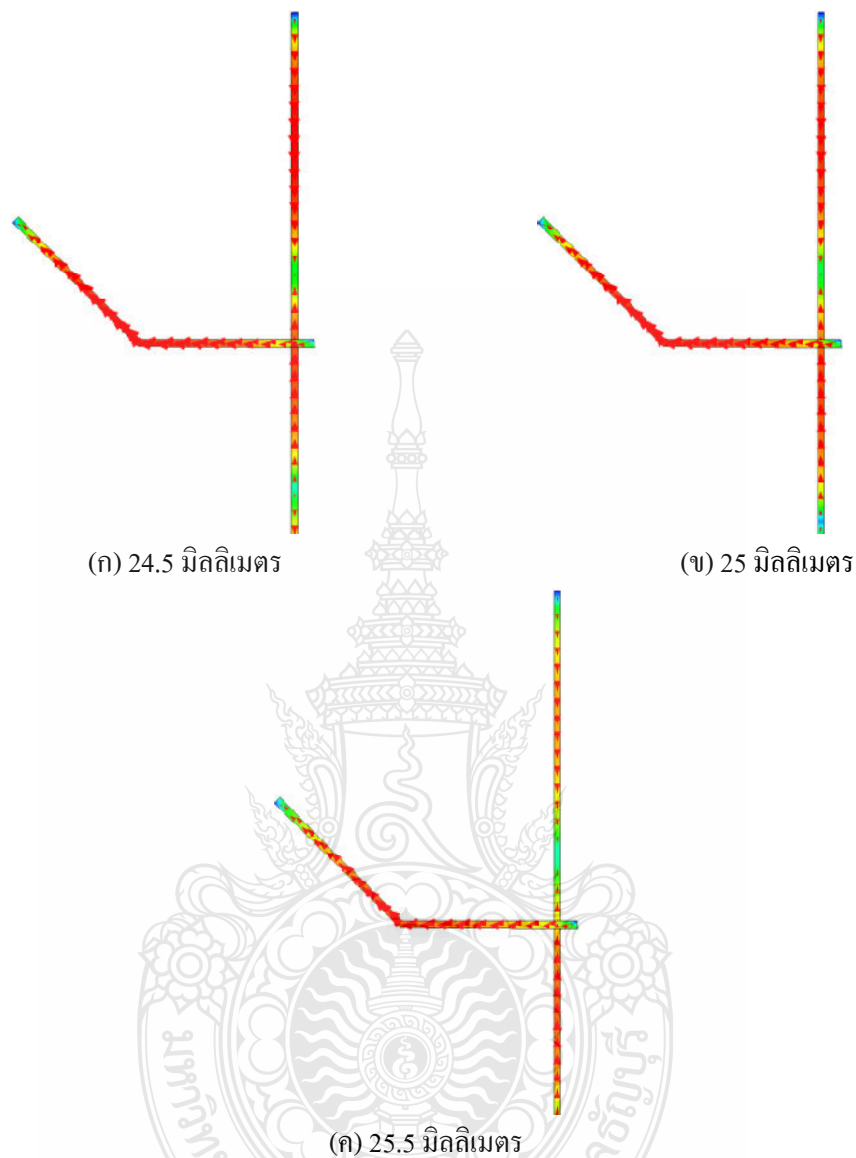
จากภาพที่ 3.14 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ต่อความถี่เรโซแนนซ์เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ $A_2=B_1$ เป็น 24.5 มิลลิเมตร 25 มิลลิเมตร และ 25.5 มิลลิเมตร จะเห็นว่าพารามิเตอร์ $A_2=B_1$ มีผลกระทบกับการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของสายอากาศอย่างมาก

จากภาพที่ 3.15 และ 3.16 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 2 มิติและแบบ 3 มิติ ของตัวสายอากาศช่องเปิดมุม 135 องศา แบบฟิล์มบาง ที่ความถี่ 2.45 GHz ทั้งในระนาบอะซิมูท (Azimuth) และในระนาบเอเลเวชัน (Elevation) ตามลำดับ โดยมีลักษณะแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional)

จากภาพที่ 3.17 แสดงภาพเปรียบเทียบแบบการแผ่พลังงานมีผลกระทบจากระยะของสายอากาศที่ต่างๆ กัน ในระนาบ $x-z$ และระนาบ $y-z$ จากภาพที่ 3.17 (ก) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวตั้ง (E_θ) ในระนาบ $x-z$ ที่ระยะทางต่างๆ กัน ที่ความถี่ 2.45 GHz จากภาพที่ 3.17 (ข) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวนอน (E_θ) ในระนาบ $x-z$ ที่ระยะทางต่างๆ กัน ที่ความถี่ 2.45 GHz จากภาพที่ 3.17 (ค) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวตั้ง (E_θ) ในระนาบ $y-z$ ที่ระยะทางต่างๆ กัน ที่ความถี่ 2.45 GHz และสุดท้ายจากภาพที่ 3.17 (ง) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวนอน (E_θ) ในระนาบ $y-z$ ที่ระยะทางต่างๆ กัน ที่ความถี่ 2.45 GHz



ภาพที่ 3.17 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบไกลระนาบ x-z และระนาบ y-z ที่ระยะทางต่างๆ กัน



ภาพที่ 3.18 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศช่องเปิดมุม 135 องศา แบบฟิล์มบางที่ออกแบบที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz ที่ระยะทางแตกต่างกัน

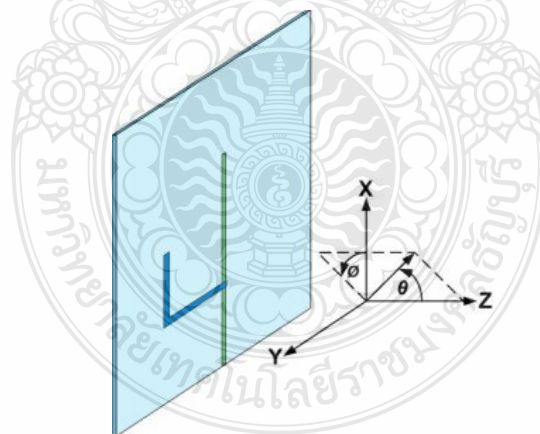
จากภาพที่ 3.18 (ก) แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรของพารามิเตอร์ $A_2=B_1$ เป็น 24.5 มิลลิเมตร จากภาพที่ 3.18 (ข) แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz ทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรพารามิเตอร์ $A_2=B_1$ เป็น 25 มิลลิเมตร และจากภาพที่ 3.18 (ค) แสดงความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่

เรโซแนนซ์ 2.45 GHz เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรพารามิเตอร์ $A_2=B_1$ เป็น 25.5 มิลลิเมตร มีการแพร่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz ที่ระยะทางแตกต่างกันซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบางโดยใช้ Software IE3D Version 11.5

3.4 การออกแบบสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบางที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip Line)

3.4.1 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบาง

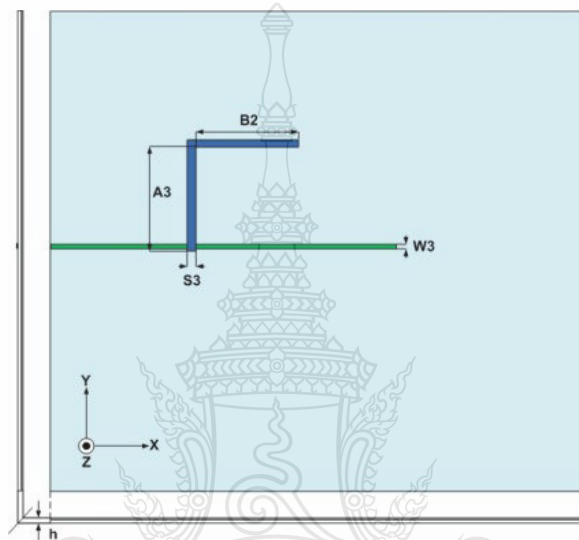
ในการออกแบบสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบางที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริปนั้นจะมีวิธีการออกแบบและใช้วัสดุฐานรองเหมือนกันกับสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบาง ดังนั้นค่าความกว้างของสายส่งไมโครสตริปเท่ากับ 1 มิลลิเมตร การออกแบบสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบางแบบนี้ จะมีโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกับการสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มหนึ่งความถี่ โดยจะการทำสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบาง โดยเลือกสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบางนำมาวางบนวัสดุฐานรองเดียวกันและใช้ตัวป้อนสัญญาณเดียวกันในการป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์



ภาพที่ 3.19 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบางที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริป

3.4.2 ความหมายของพารามิเตอร์ต่างๆ

- W_3 คือ ความกว้างของสายอากาศไมโครสตริปไลน์สายอากาศตัวที่ 3
 A_3 คือ ความยาวในแนวแกนตั้งของความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 3
 B_2 คือ ความยาวในแนวแกนนอนของความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 2
 S_3 คือ ความกว้างของช่องเปิดความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 3



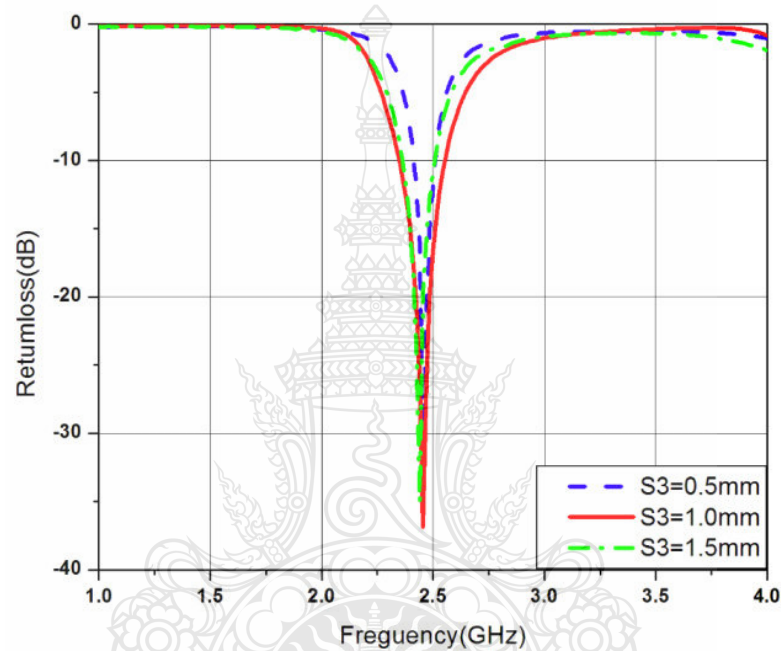
ภาพที่ 3.20 พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศช่องมุม 90 องศา ลำดับแบบฟิล์มบาง

การออกแบบสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบางสามารถทำได้โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz เพื่อให้ได้ซึ่งแบบรูปการแผ่พลังงานที่เหมาะสมกับสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบางมากที่สุด

3.4.3 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบาง

เมื่อได้โครงสร้างของสายอากาศและขนาดต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบาง โดยการคำนวณแล้ว เราสามารถทำการจำลองการทำงานและหาผลตอบสนองความถี่ของสายอากาศที่เหมาะสมได้ โดยการจำลองสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบาง โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป IE3D (Zeland) เพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนด แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อให้ได้แบบรูปของการแพร่กระจายที่เหมาะสมมากที่สุด

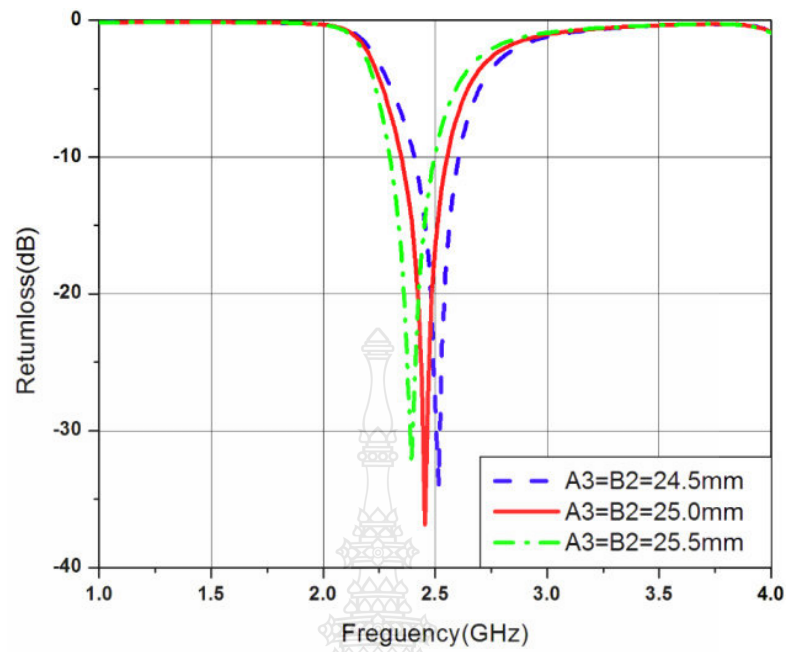
จากภาพที่ 3.21 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ต่อความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ S3 เป็น 0.5 มิลลิเมตร 1 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ S3 มีผลกระทบกับการเปลี่ยนแปลงค่าแบนด์วิดท์ (Impedance Bandwidth) ของตัวสายอากาศเป็นอย่างมาก แต่ก็ยังมีผลกระทบกับแมตซ์อิมพีแดนซ์เช่นเดียวกัน จากภาพเมื่อ S3 มีค่าต่ำจะทำให้มีความกว้างแถบน้อยกว่า S3 ที่ค่าสูง โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย



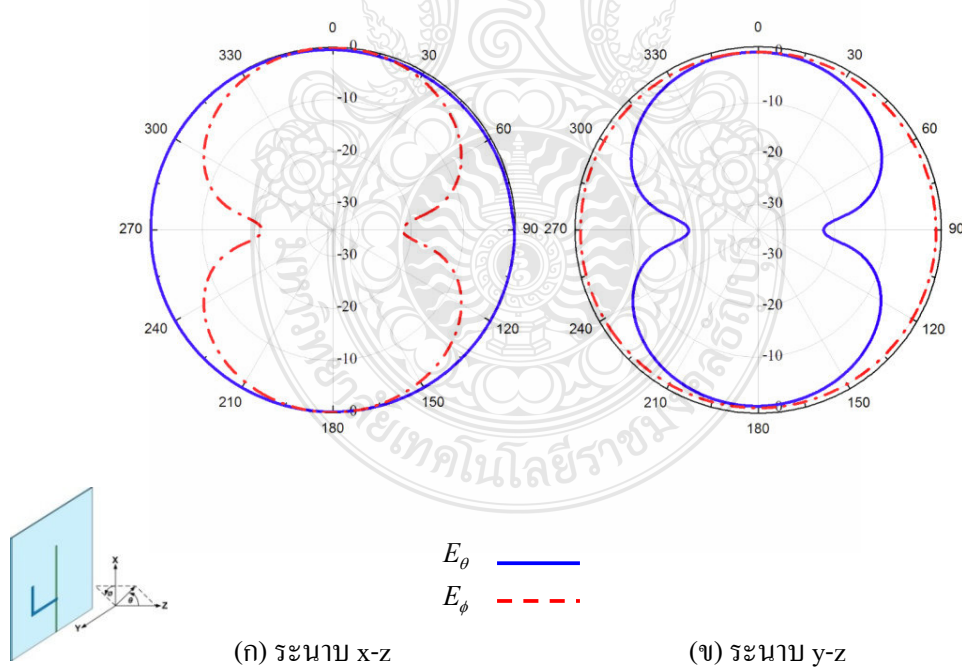
ภาพที่ 3.21 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ S3

จากภาพที่ 3.22 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ต่อความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ A3=B2 เป็น 24.5 มิลลิเมตร 25 มิลลิเมตร และ 25.5 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ A3=B2 มีผลกระทบกับการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของสายอากาศอย่างมาก

จากภาพที่ 3.23 และ 3.24 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 2 มิติและแบบ 3 มิติ ของตัวสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบาง ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz ทั้งในระนาบอะซิมูท (Azimuth) และในระนาบเอเลเวชัน (Elevation) ตามลำดับ โดยมีลักษณะแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional)

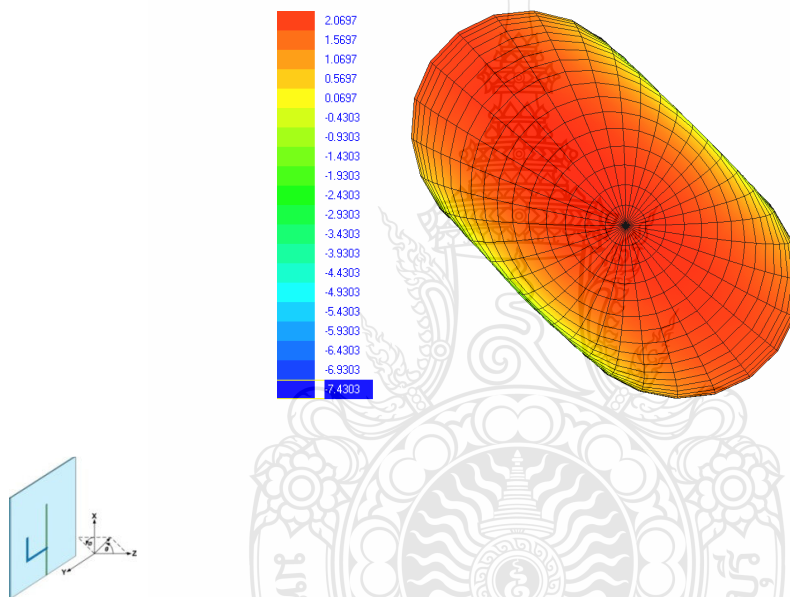


ภาพที่ 3.22 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $A_3=B_2$



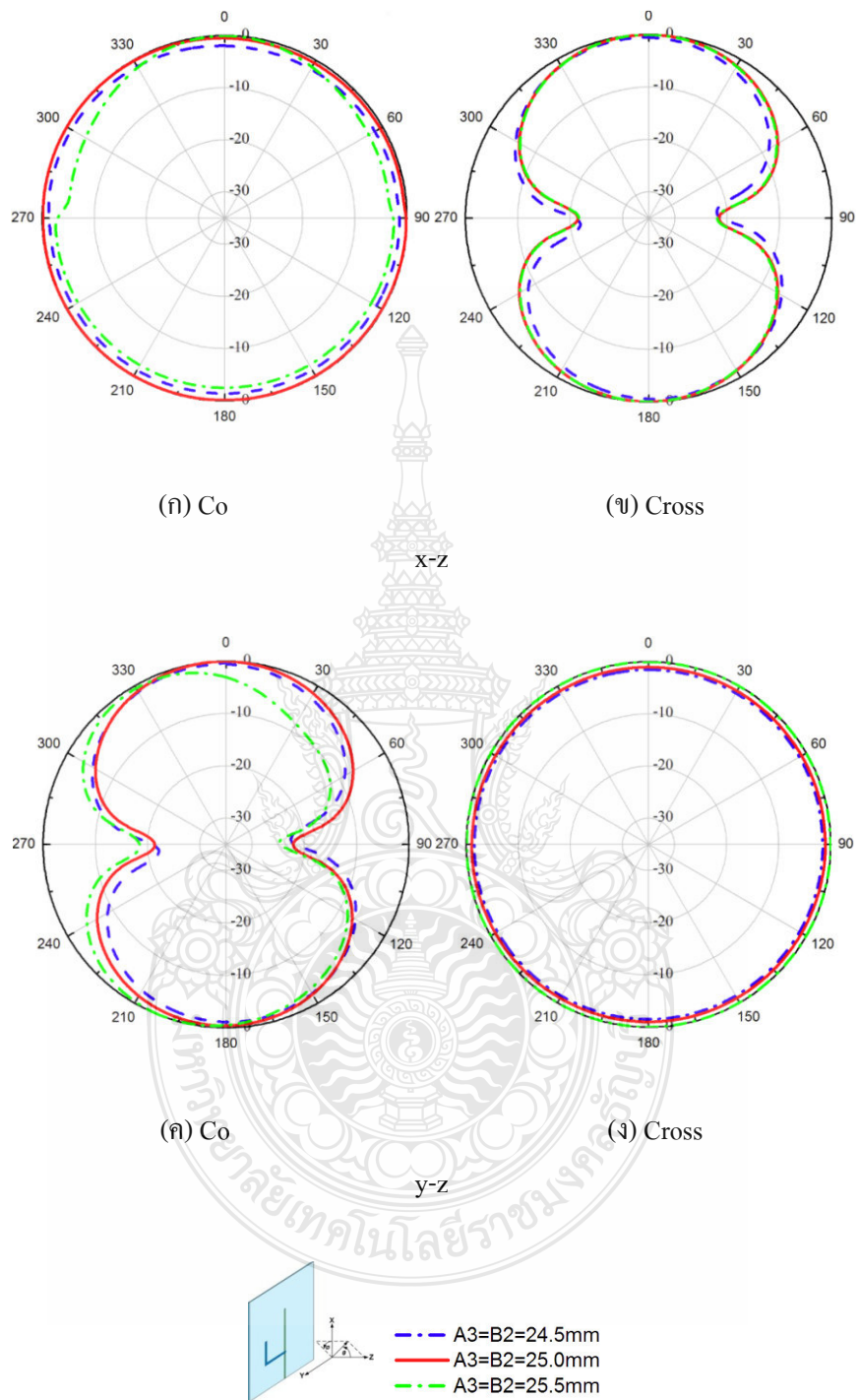
ภาพที่ 3.23 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz

จากภาพที่ 3.25 แสดงภาพเปรียบเทียบแบบการแผ่พลังงานก็มีผลกระทบจากระยะของสายอากาศที่ต่างๆ กัน ในระนาบ x-z และระนาบ y-z จากภาพที่ 3.25 (ก) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวตั้ง (E_{θ}) ในระนาบ x-z ที่ระยะทางต่างๆ กัน ที่ความถี่ 2.45 GHz จากภาพที่ 3.25 (ข) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวนอน (E_{θ}) ในระนาบ x-z ที่ระยะทางต่างๆ กัน ที่ความถี่ 2.45 GHz จากภาพที่ 3.25 (ค) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวตั้ง (E_{θ}) ในระนาบ y-z ที่ระยะทางต่างๆ กัน ที่ความถี่ 2.45 GHz และสุดท้ายจากภาพที่ 3.25 (ง) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวนอน (E_{θ}) ในระนาบ y-z ที่ระยะทางต่างๆ กัน ที่ความถี่ 2.45 GHz

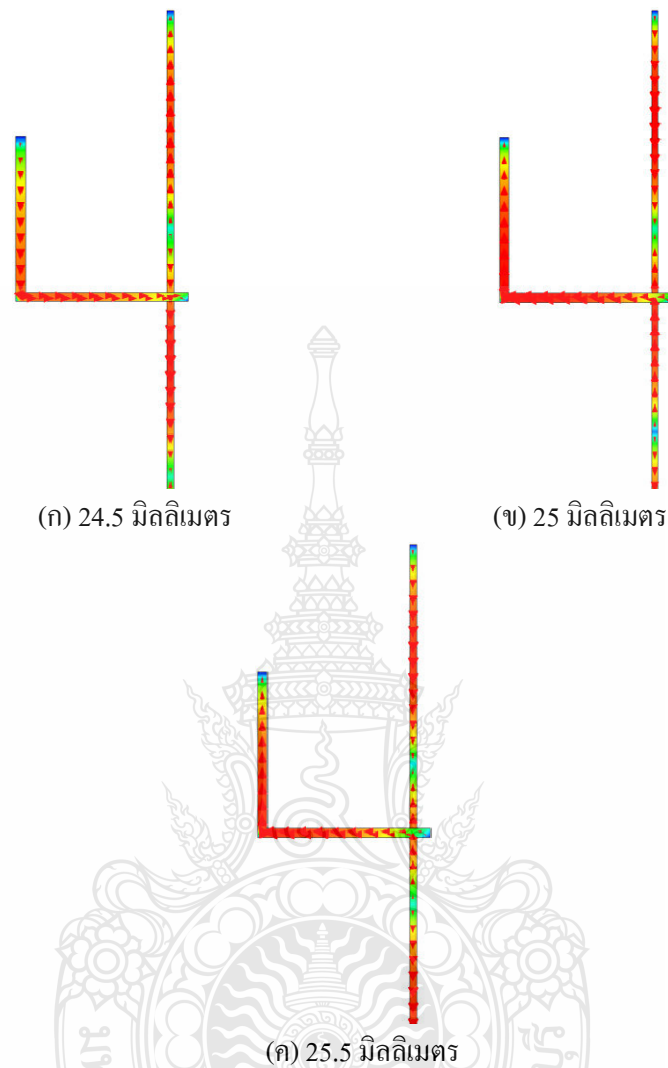


ภาพที่ 3.24 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ ของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz

จากภาพที่ 3.26 (ก) แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรของพารามิเตอร์ที่ $A_3=B_2$ เป็น 24.5 มิลลิเมตร จากภาพที่ 3.26 (ข) แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ที่ $A_3=B_2$ เป็นขนาด 25 มิลลิเมตร จากภาพที่ 3.26 (ค) แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ $A_3=B_2$ เป็น 25.5 มิลลิเมตร มีการแพร่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของความถี่ 2.45 GHz ที่ระยะทางแตกต่างกันซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบางโดยใช้ Software IE3D Version 11.5



ภาพที่ 3.25 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบไถลระนาบ x-z และระนาบ y-z ที่ระยะทางต่างๆ กัน



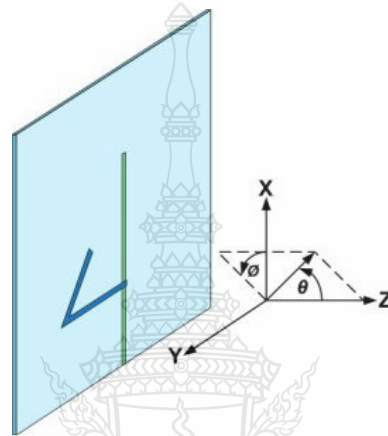
ภาพที่ 3.26 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบางที่ออกแบบที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz ที่ระยะทางแตกต่างกัน

3.5 การออกแบบสายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา แบบฟิล์มบางที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip Line)

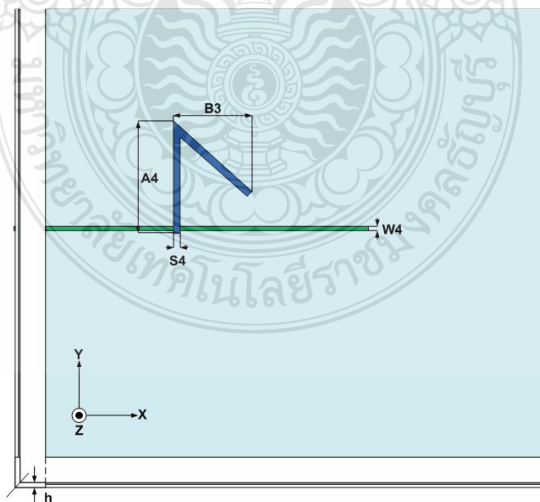
3.5.1 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา แบบฟิล์มบาง

ในการออกแบบสายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา ฟิล์มบางที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริปนั้นจะมีวิธีการออกแบบและใช้วัสดุฐานรองเหมือนกันกับสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์ม

บาง ดังนั้นค่าความกว้างของสายส่งไมโครสตริปเท่ากับ 1 มิลลิเมตร การออกแบบสายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา แบบฟิล์มบางแบบนี้ นั้น จะมีโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกับการสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มหนึ่งความถี่ โดยจะการทำสายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา แบบฟิล์มบาง โดยเลือกสายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา แบบฟิล์มบางนำมาวางบนวัสดุฐานรองเดียวกันและใช้ตัวป้อนสัญญาณเดียวกันในการป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์



ภาพที่ 3.27 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา แบบฟิล์มบางที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริป



ภาพที่ 3.28 พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา แบบฟิล์มบาง

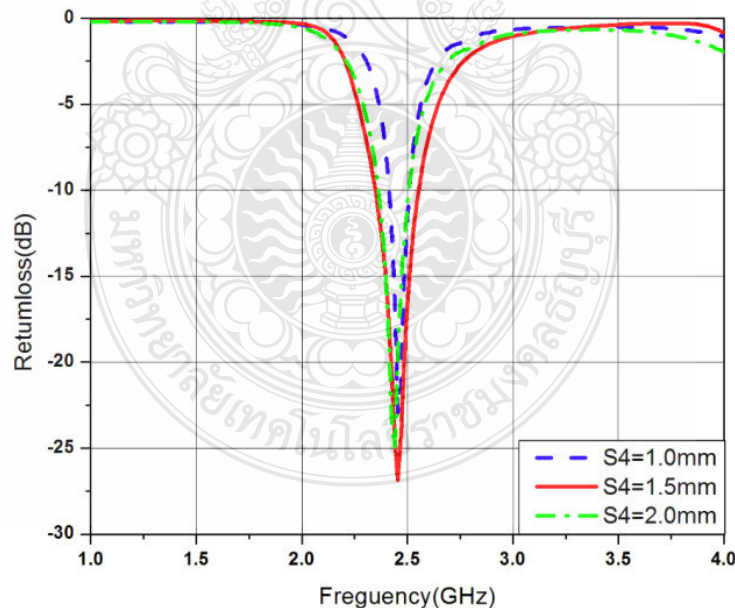
3.5.2 ความหมายของพารามิเตอร์ต่างๆ

- W_4 คือ ความกว้างของสายอากาศไมโครสตริปไลน์สายอากาศตัวที่ 4
 A_4 คือ ความยาวในแนวแกนตั้งของความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 4
 B_3 คือ ความยาวในแนวแกนนอนของความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 3
 S_4 คือ ความกว้างของช่องเปิดความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 4

การออกแบบสายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา แบบฟิล์มบางสามารถทำได้โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz เพื่อให้ได้ซึ่งแบบรูปการแผ่พลังงานที่เหมาะสมกับสายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา แบบฟิล์มบางมากที่สุด

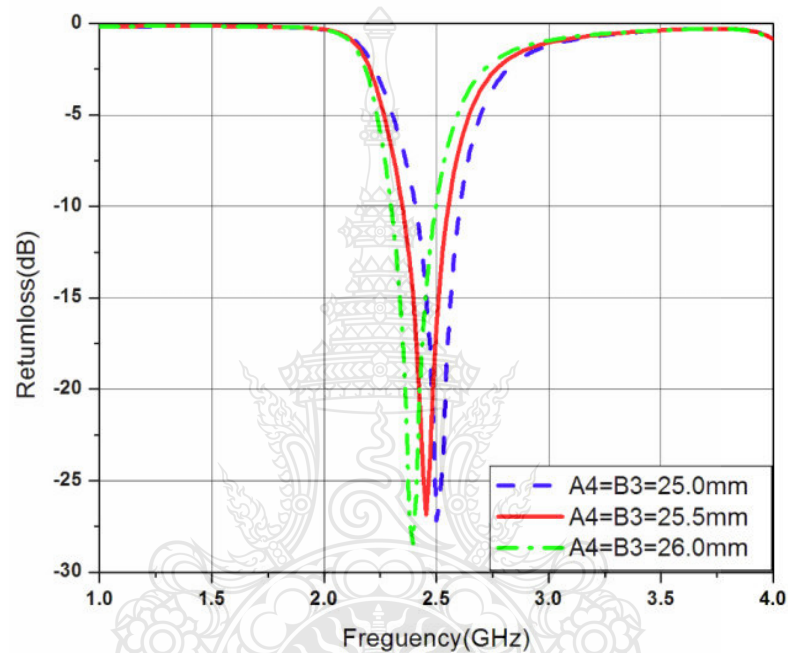
3.5.3 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา แบบฟิล์มบาง

เมื่อได้โครงสร้างของสายอากาศและขนาดต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา แบบฟิล์มบางโดยการคำนวณแล้ว เราสามารถทำการจำลองการทำงานและหาผลตอบสนองความถี่ของสายอากาศที่เหมาะสมได้ โดยการจำลองสายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา แบบฟิล์มบาง โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป IE3D (Zeland) เพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนด แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อให้ได้แบบรูปของการแพร่กระจายที่เหมาะสมมากที่สุด



ภาพที่ 3.29 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ S_4

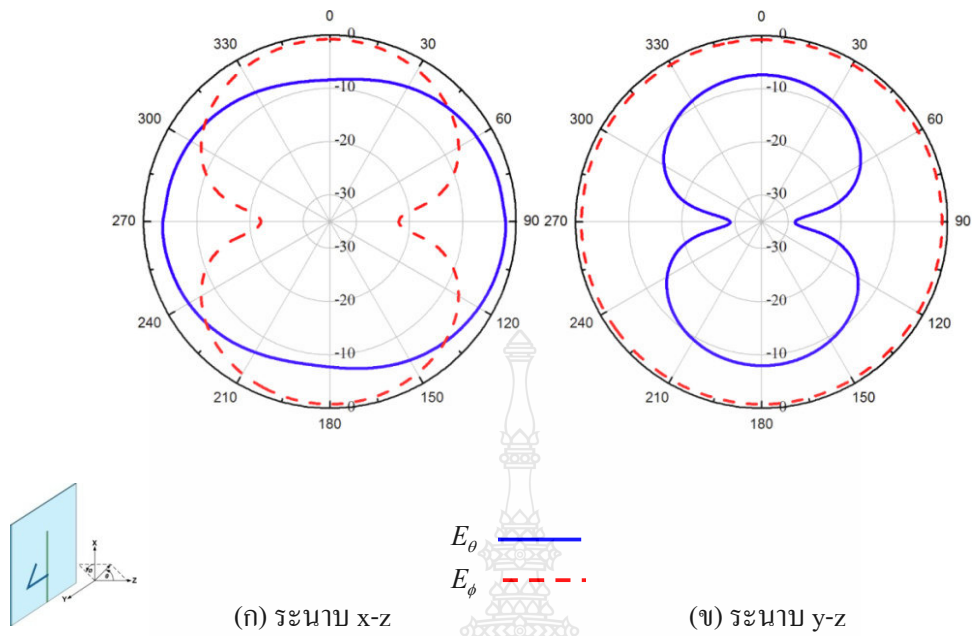
จากภาพที่ 3.29 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ต่อความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ S4 เป็น 1 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2 มิลลิเมตร จะเห็นว่าพารามิเตอร์ S4 มีผลกระทบกับการเปลี่ยนแปลงแบนด์วิดท์ (Impedance Bandwidth) ของสายอากาศเป็นอย่างมาก แต่ก็ยังมีผลกระทบกับแมตซ์อิมพีแดนซ์เช่นเดียวกัน จากภาพเมื่อ S4 มีค่าต่ำจะทำให้มีความกว้างแถบน้อยกว่า S4 ที่ค่าสูง โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย



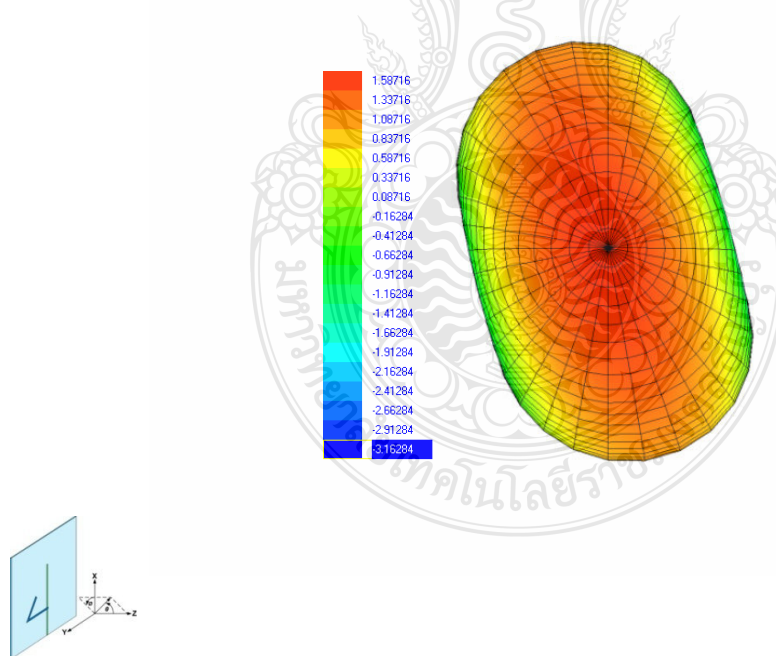
ภาพที่ 3.30 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $A4=B3$

จากภาพที่ 3.30 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ต่อความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $A4=B3$ เป็น 25 มิลลิเมตร 25.5 มิลลิเมตร และ 26 มิลลิเมตร จะเห็นว่าพารามิเตอร์ $A4=B3$ มีผลกระทบกับการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของสายอากาศอย่างมาก

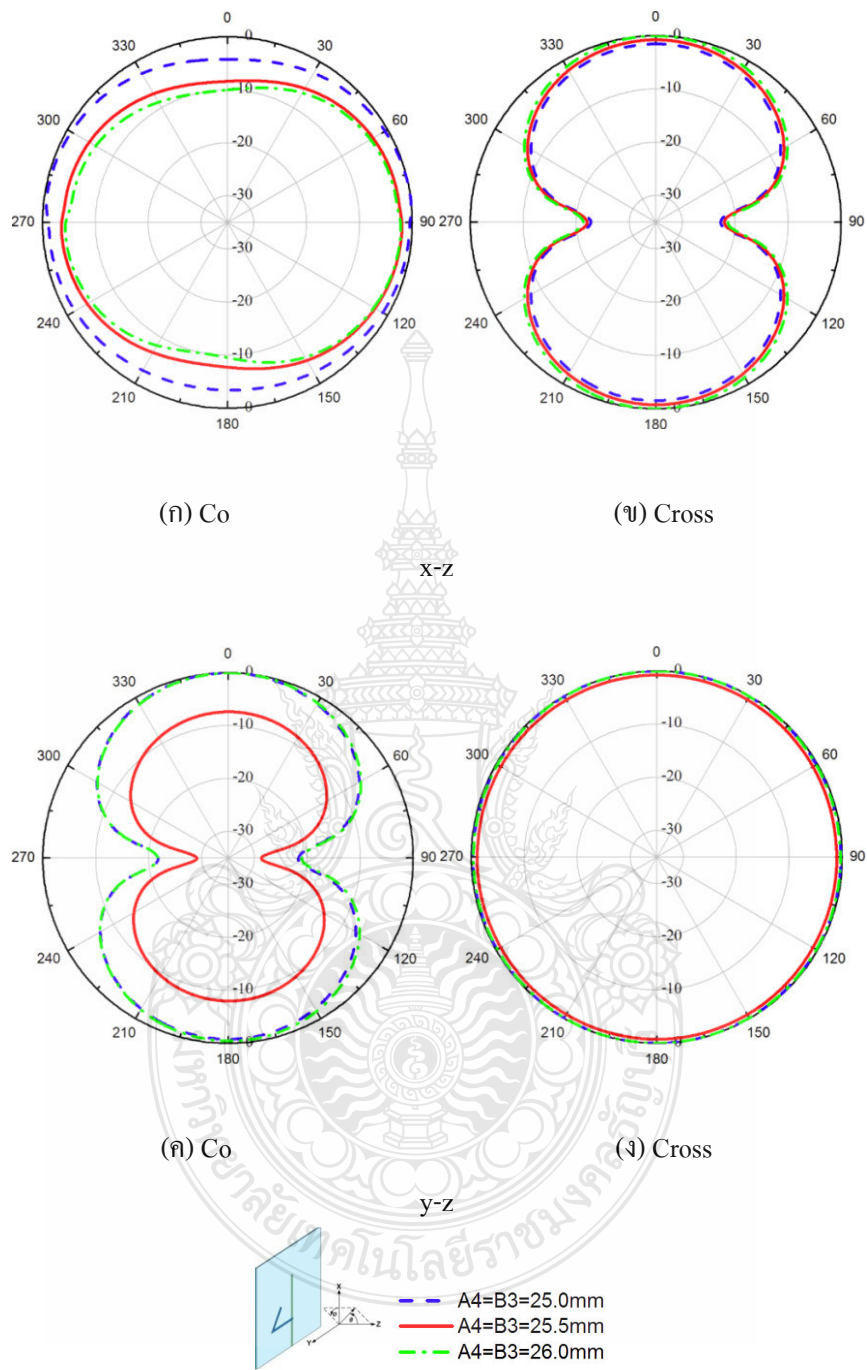
จากภาพที่ 3.31 และ 3.32 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 2 มิติและแบบ 3 มิติ ของตัวสายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา แบบฟิล์มบาง ที่ความถี่ 2.45 GHz ทั้งในระนาบอะซิมูท (Azimuth) และในระนาบเอเลเวชัน (Elevation) ตามลำดับ โดยมีลักษณะแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional)



ภาพที่ 3.31 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz

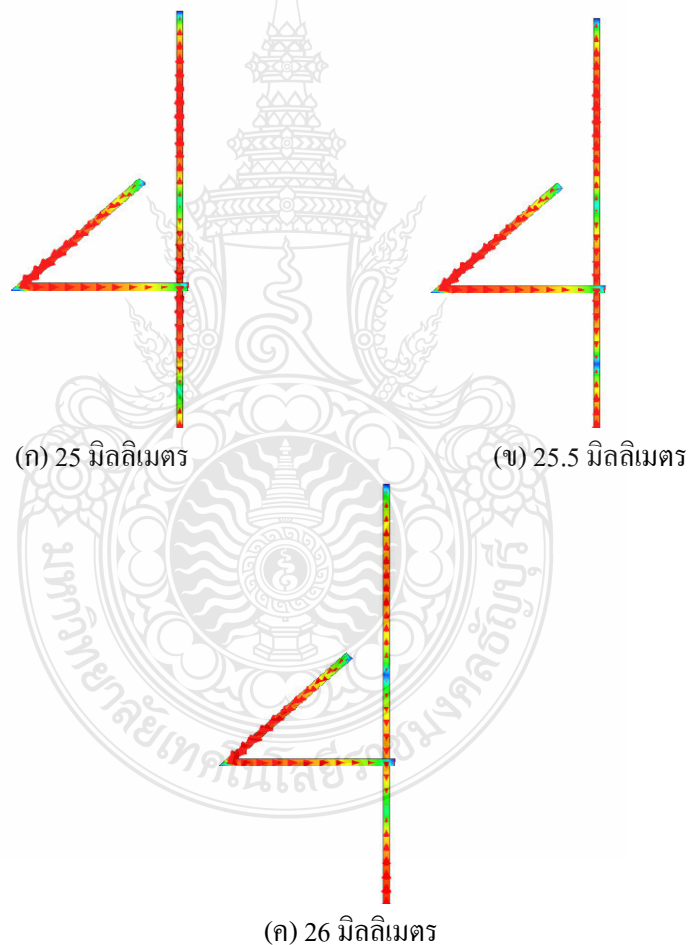


ภาพที่ 3.32 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ ของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz



ภาพที่ 3.33 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบไคระนาบ x-z และระนาบ y-z ที่ระยะทางต่างๆ กัน

จากภาพที่ 3.33 แสดงภาพเปรียบเทียบแบบการแผ่พลังงานก็มีผลกระทบจากระยะของสายอากาศที่ต่างๆ กัน ในระนาบ $x-z$ และระนาบ $y-z$ จากภาพที่ 3.33 (ก) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวตั้ง (E_θ) ในระนาบ $x-z$ ที่ระยะทางต่างๆ กันที่ความถี่ 2.45 GHz จากภาพที่ 3.33 (ข) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวนอน (E_θ) ในระนาบ $x-z$ ที่ระยะทางต่างๆ กันที่ความถี่ 2.45 GHz จากภาพที่ 3.33 (ค) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวตั้ง (E_θ) ในระนาบ $y-z$ ที่ระยะทางต่างๆ กันที่ความถี่ 2.45 GHz และสุดท้ายจากภาพที่ 3.33 (ง) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวนอน (E_θ) ในระนาบ $y-z$ ที่ระยะทางต่างๆ กันที่ความถี่ 2.45 GHz



ภาพที่ 3.34 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา แบบฟิล์มบางที่ออกแบบที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz ที่ระยะทางแตกต่างกัน

จากภาพที่ 3.34 (ก) แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ A4=B3 เป็น 25 มิลลิเมตร จากภาพที่ 3.34 (ข) แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 2.45 GHz เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ A4=B3 เป็น 25.5 มิลลิเมตร และจากภาพที่ 3.34 (ค) แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 2.45 GHz เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรพารามิเตอร์ A4=B3 เป็น 26 มิลลิเมตร มีการแพร่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของควมถี่ 2.45 GHz ที่ระยะทางแตกต่างกันซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา แบบฟิล์มบาง โดยใช้ Software IE3D Version 11.5

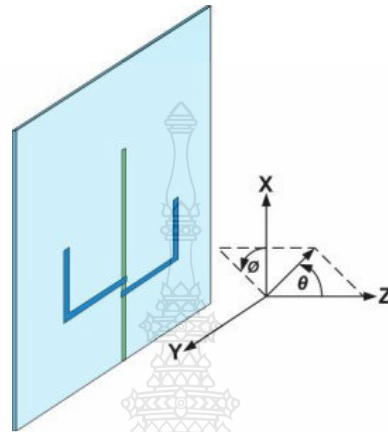
ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบของสายอากาศช่องเปิดแฉวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางแบบต่างๆ

ขนาดมุมของสายอากาศ (องศา)	ย่านความถี่ 2.45 GHz	
	การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)	อัตราขยายของสายอากาศ (Gain)
180	- 30.2 dB	1.90 dBi
135	- 32.8 dB	1.94 dBi
90	- 36.8 dB	2.26 dBi
45	- 26.0 dB	1.58 dBi

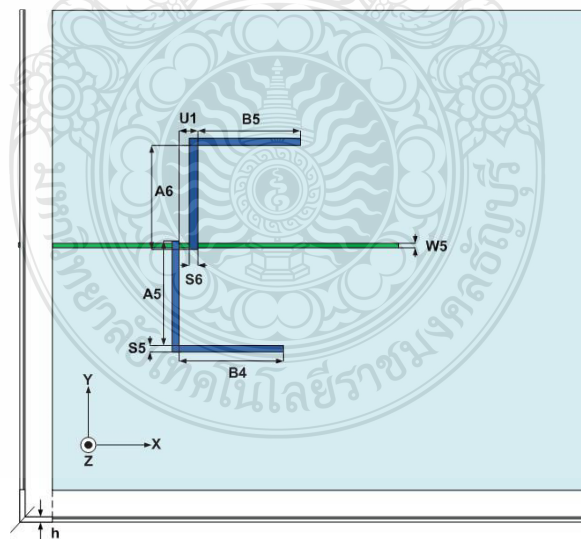
จากตารางที่ 3.1 แสดงผลที่ได้จากการเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) และอัตราขยายของสายอากาศ (Gain) ของสายอากาศช่องเปิดแฉวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางแบบต่างๆ ซึ่งได้แก่สายอากาศช่องเปิดมุม 180 องศา แบบฟิล์มบาง มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ - 30.2 dB และมีค่าอัตราขยายของสายอากาศ 1.9 dBi ที่สายอากาศช่องเปิดมุม 135 องศา แบบฟิล์มบาง มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ - 32.8 dB และมีค่าอัตราขยายของสายอากาศ 1.94 dBi ที่สายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบาง มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ - 36.8 dB และมีค่าอัตราขยายของสายอากาศ 2.26 dBi และที่สายอากาศช่องเปิดมุม 45 องศา แบบฟิล์มบาง มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ - 26 dB และมีค่าอัตราขยายของสายอากาศ 1.58 dBi จึงได้ทำการนำสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศา แบบฟิล์มบางมาพัฒนาเป็นสายอากาศช่องเปิดแฉวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางต่อไป

3.6 การออกแบบสายอากาศช่องเปิดสองแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip Line)

3.6.1 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดสองแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง



ภาพที่ 3.35 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดสองแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริป



ภาพที่ 3.36 พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดสองแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

ในการออกแบบสายอากาศช่องเปิดสองแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริปนั้นจะมีวิธีการออกแบบและใช้วัสดุฐานรองเหมือนกันกับสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบาง ดังนั้นค่าความกว้างของสายส่งไมโครสตริปเท่ากับ 1 มิลลิเมตร การออกแบบสายอากาศช่องเปิดสองแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางแบบนี้ นั้นจะมีโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกับการสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มหนึ่งความถี่ โดยจะการทำสายอากาศช่องเปิดสองแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง โดยเลือกสายอากาศช่องเปิดสองแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางนำมาวางบนวัสดุฐานรองเดียวกันและใช้ตัวป้อนสัญญาณเดียวกันในการป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์

3.6.2 ความหมายของพารามิเตอร์ต่างๆ

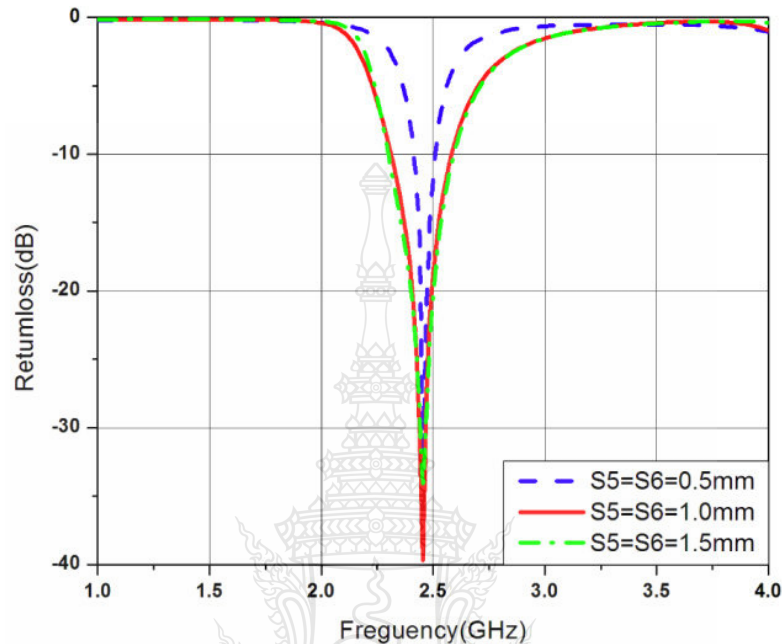
- W_5 คือ ความกว้างของสายอากาศไมโครสตริปไลน์ตัวที่ 5
- A_5 คือ ความยาวในแนวแกนตั้งของความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 5
- B_4 คือ ความยาวในแนวแกนนอนของความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 4
- A_6 คือ ความยาวในแนวแกนตั้งของความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 6
- B_5 คือ ความยาวในแนวแกนนอนของความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 5
- S_5 คือ ความกว้างของช่องเปิดความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 5
- S_6 คือ ความกว้างของช่องเปิดความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 6
- U_1 คือ ระยะจากขอบทางซ้ายของช่องเปิดในแนวแกนตั้งของช่องเปิดความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 1 กับช่องเปิดในแนวแกนตั้งของช่องเปิดความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 2

การออกแบบสายอากาศช่องเปิดสองแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางสามารถทำได้โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz เพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่เหมาะสมกับสายอากาศช่องเปิดสองแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางมากที่สุด ซึ่งได้นำพารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดมุม 90 องศาแบบฟิล์มบางมาพัฒนาต่อเป็นสายอากาศช่องเปิดสองแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางต่อไป

3.6.3 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดสองแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

เมื่อได้โครงสร้างของสายอากาศและขนาดต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดสองแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางโดยการคำนวณแล้ว เราสามารถทำการจำลองการทำงานและหาผลตอบสนองความถี่ของสายอากาศที่เหมาะสมได้ โดยการจำลองสายอากาศช่องเปิดสองแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบ

ฟิล์มบาง โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป IE3D (Zeland) เพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนด แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อให้ได้แบบรูปของการแพร่กระจายที่เหมาะสมมากที่สุด

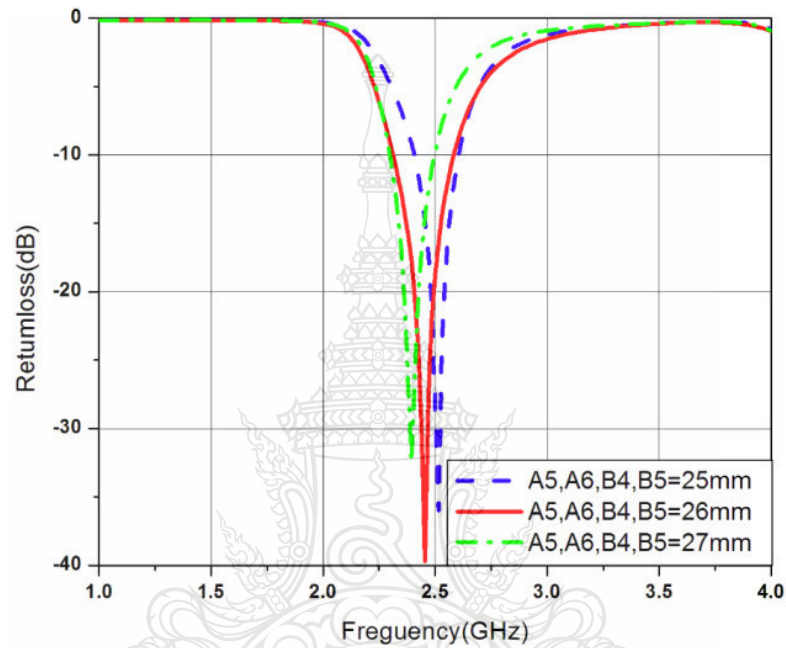


ภาพที่ 3.37 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $S_5=S_6$

จากภาพที่ 3.37 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ต่อความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $S_5=S_6$ เป็น 0.5 มิลลิเมตร 1 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ $S_5=S_6$ มีผลกระทบบกับการเปลี่ยนแปลงแบนด์วิดท์ (Impedance Bandwidth) ของสายอากาศเป็นอย่างมาก แต่ก็ยังมีผลกระทบบกับแมตซ์อิมพีแดนซ์เช่นเดียวกัน จากภาพเมื่อ $S_5=S_6$ มีค่าต่ำจะทำให้มีความกว้างแถบน้อยกว่า $S_5=S_6$ ที่ค่าสูง โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

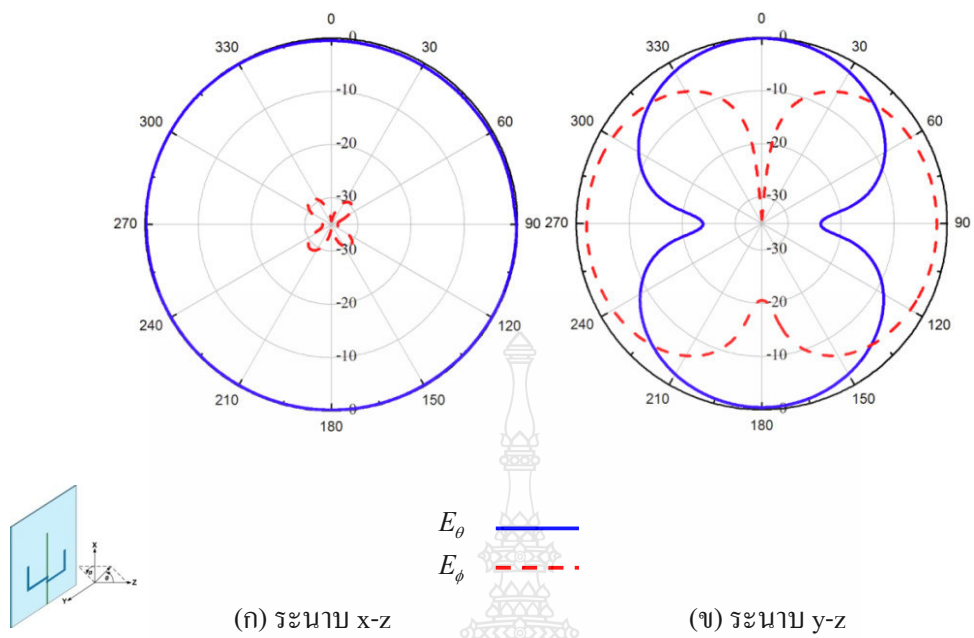
จากภาพที่ 3.38 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ต่อความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ $A_5=A_6=B_4=B_5$ เป็น 25 มิลลิเมตร 26 มิลลิเมตร และ 27 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ $A_5=B_4$ มีผลกระทบบกับการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของสายอากาศช่องเปิดสองแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางอย่างมาก

จากภาพที่ 3.39 และ 3.40 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 2 มิติและแบบ 3 มิติ ของตัวสายอากาศช่องเปิดสองแฉกลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง ที่ความถี่ 2.45 GHz ทั้งในระนาบอะซิมูท (Azimuth) และในระนาบเอเลเวชัน (Elevation) ตามลำดับ โดยมีลักษณะแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional)

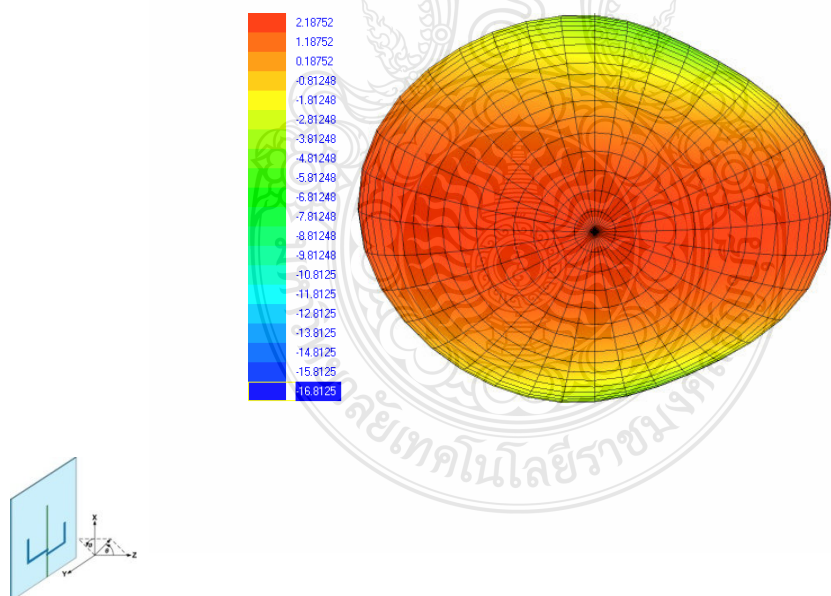


ภาพที่ 3.38 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $A_5=A_6=B_4=B_5$

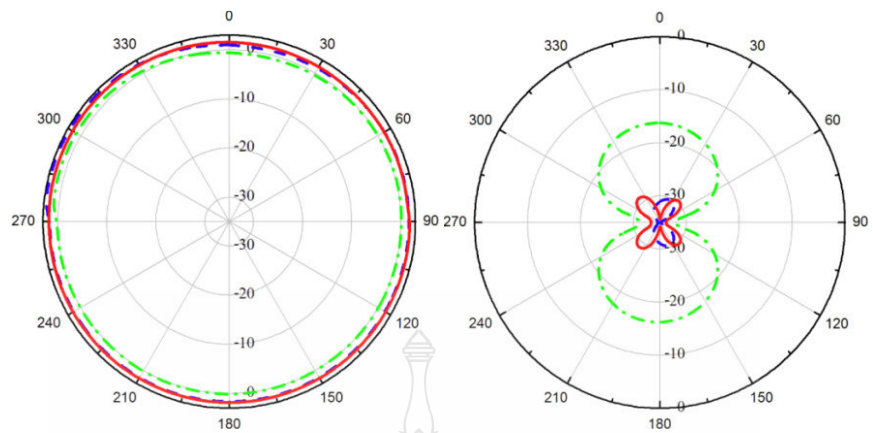
จากภาพที่ 3.41 แสดงรูปเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานก็มีผลกระทบจากระยะของสายอากาศที่ต่างๆ กัน ในระนาบ x-z และระนาบ y-z จากภาพที่ 3.41 (ก) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวตั้ง (E_θ) ในระนาบ x-z ที่ระยะทางต่างๆ กันที่ความถี่ 2.45 GHz จากภาพที่ 3.41 (ข) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวนอน (E_ϕ) ในระนาบ x-z ที่ระยะทางต่างๆ กันที่ความถี่ 2.45 GHz จากภาพที่ 3.41 (ค) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวตั้ง (E_θ) ในระนาบ y-z ที่ระยะทางต่างๆ กันที่ความถี่ 2.45 GHz ภาพที่ 3.41 (ง) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวนอน (E_ϕ) ในระนาบ y-z ที่ระยะทางต่างๆ กันที่ความถี่ 2.45 GHz



ภาพที่ 3.39 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz

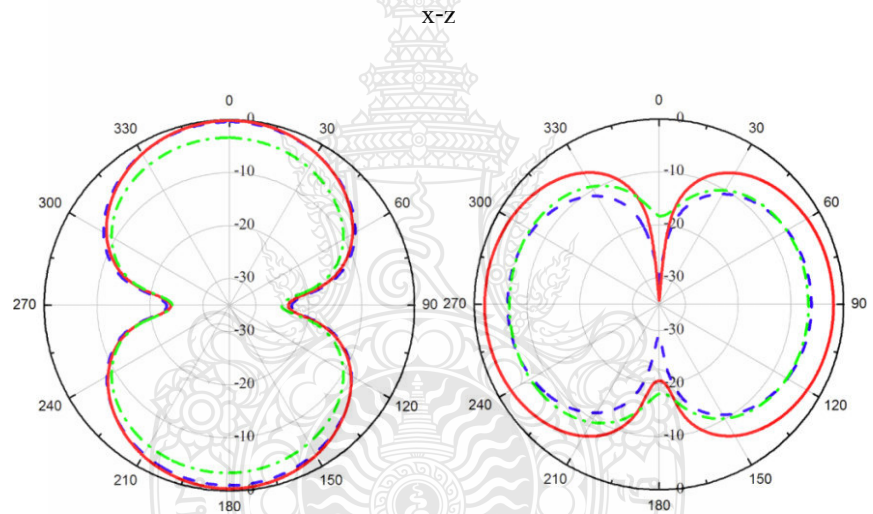


ภาพที่ 3.40 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ ของสายอากาศที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz



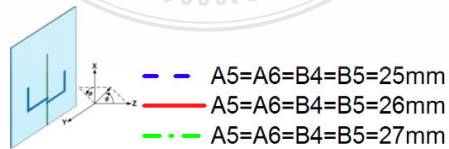
(ก) Co

(จ) Cross



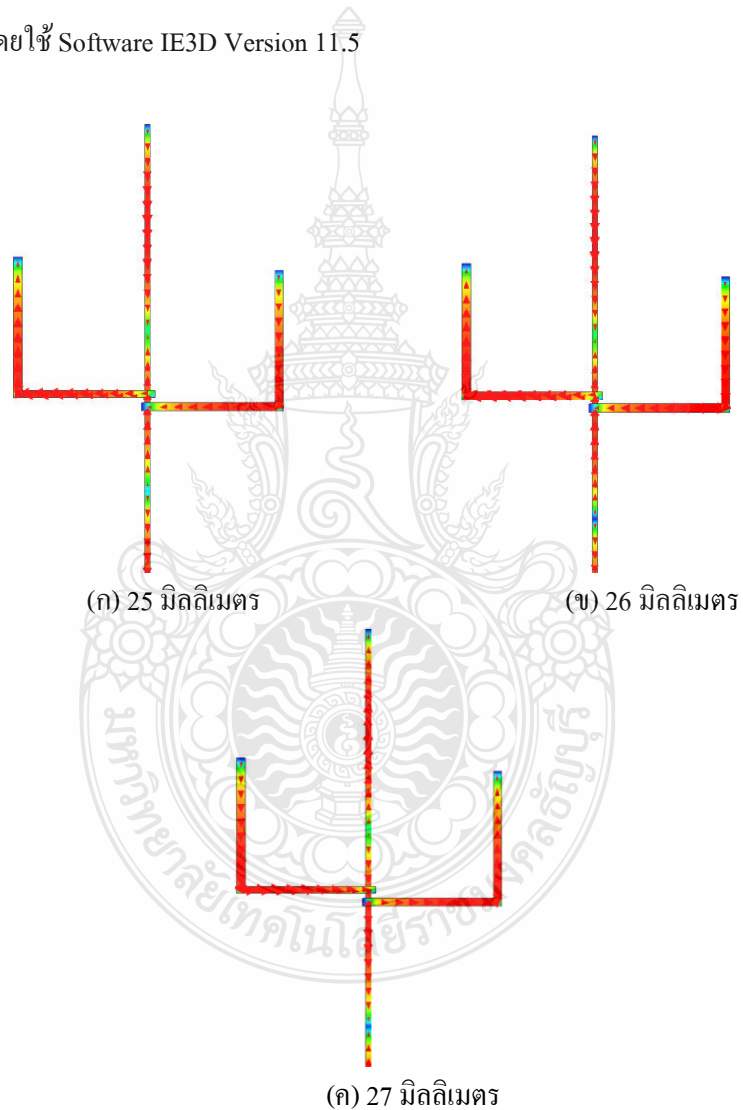
(ค) Co

(ง) Cross



ภาพที่ 3.41 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบไจโรระนาบ x-z และระนาบ y-z ที่ระยะทางต่างๆ กัน

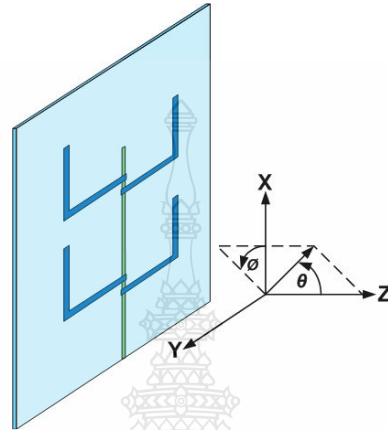
จากภาพที่ 3.42 (ก) แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อที่จะทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่ $A_5=A_6=B_4=B_5$ เป็น 25 มิลลิเมตร จากภาพที่ 3.42 (ข) แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 2.45 GHz เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ $A_5=A_6=B_4=B_5$ เป็นขนาด 26 มิลลิเมตร จากภาพที่ 3.42 (ค) แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 2.45 GHz ทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $A_5=A_6=B_4=B_5$ เป็น 27 มิลลิเมตร มีการแพร่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของควมถี่ 2.45 GHz ที่ระยะทางแตกต่างกันซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศช่องเปิดสองแฉวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางโดยใช้ Software IE3D Version 11.5



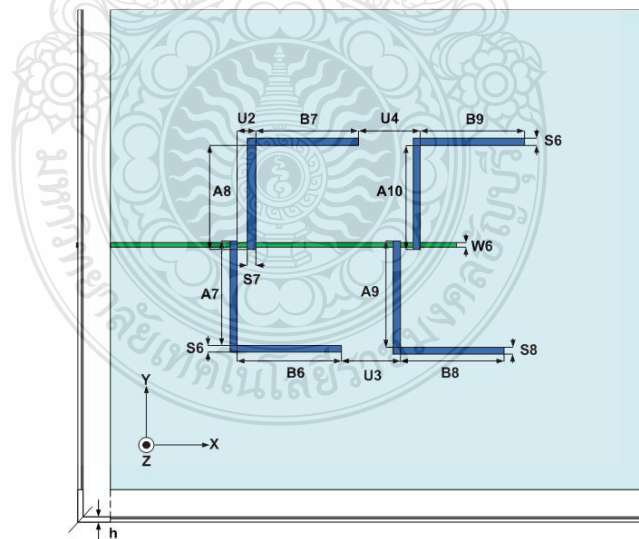
ภาพที่ 3.42 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศช่องเปิดสองแฉวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่ออกแบบที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz ที่ระยะทางแตกต่างกัน

3.7 การออกแบบสายอากาศช่องเปิดแฉกดำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip Line)

3.7.1 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดแฉกดำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง



ภาพที่ 3.43 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดแฉกดำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป



ภาพที่ 3.44 พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดแฉกดำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

ในการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริป นั้นจะมีวิธีการออกแบบและใช้วัสดุฐานรองเหมือนกันกับสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มบาง ดังนั้นค่าความกว้างของสายส่งไมโครสตริปจึงเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ส่วนในการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางแบบนี้จะมีโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกับการสายอากาศช่องเปิดแบบฟิล์มหนึ่งความถี่ โดยจะการทำสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง โดยเลือกสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางนำมาวางบนวัสดุฐานรองเดียวกันและใช้ตัวป้อนสัญญาณเดียวกันในการป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์

3.7.2 ความหมายของพารามิเตอร์ต่างๆ

- W_6 คือ ความกว้างของสายอากาศไมโครสตริปไลน์ตัวที่ 6
- A_7 คือ ความยาวในแนวแกนตั้งของความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 7
- B_6 คือ ความยาวในแนวแกนนอนของความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 6
- A_8 คือ ความยาวในแนวแกนตั้งของความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 8
- B_7 คือ ความยาวในแนวแกนนอนของความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 7
- A_9 คือ ความยาวในแนวแกนตั้งของความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 9
- B_8 คือ ความยาวในแนวแกนนอนของความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 8
- A_{10} คือ ความยาวในแนวแกนตั้งของความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 10
- B_9 คือ ความยาวในแนวแกนนอนของความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 9
- S_6 คือ ความกว้างของช่องเปิดความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 6
- S_7 คือ ความกว้างของช่องเปิดความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 7
- S_8 คือ ความกว้างของช่องเปิดความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 8
- S_9 คือ ความกว้างของช่องเปิดความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 9
- U_2 คือ ระยะจากขอบทางซ้ายของช่องเปิดในแนวแกนตั้งของช่องเปิดความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 1 กับช่องเปิดในแนวแกนตั้งของช่องเปิดความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 2
- U_3 คือ ระยะจากขอบทางขวาของช่องเปิดในแนวแกนตั้งของช่องเปิดความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 1 กับช่องเปิดในแนวแกนตั้งของช่องเปิดความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 3

U_4 คือ ระยะจากขอบทางซ้ายของช่องเปิดในแนวแกนตั้งของช่องเปิดความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 2 กับช่องเปิดในแนวแกนตั้งของช่องเปิดความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศตัวที่ 4

ในการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางนั้นสามารถทำได้ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz เพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่เหมาะสมกับสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางมากที่สุด ซึ่งได้มีการนำเอาพารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดสองแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางมาพัฒนาต่อเป็นสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางต่อไป

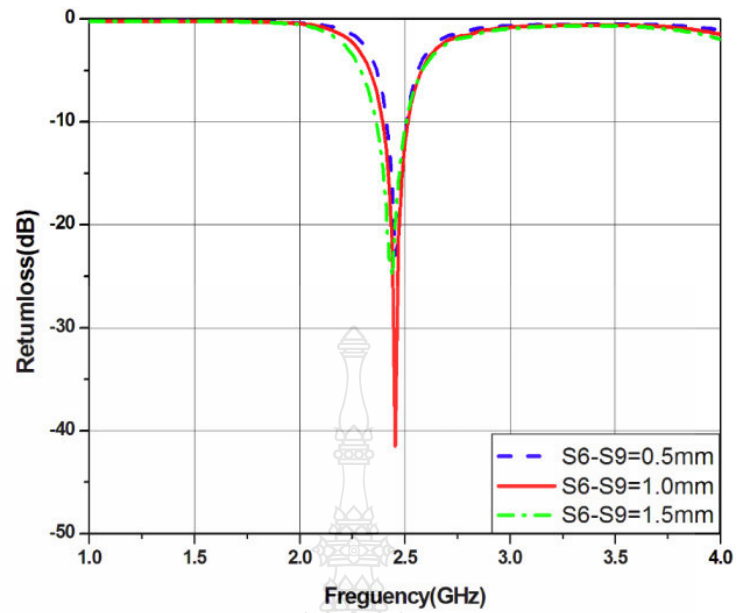
3.7.3 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

เมื่อได้โครงสร้างของสายอากาศและขนาดต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง โดยการคำนวณแล้ว เราสามารถจำลองการทำงานและหาผลตอบสนองความถี่ของสายอากาศที่เหมาะสมได้ โดยการจำลองสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป IE3D (Zeland) เพื่อที่จะใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนดแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อให้ได้แบบรูปของการแพร่กระจายที่เหมาะสมมากที่สุด

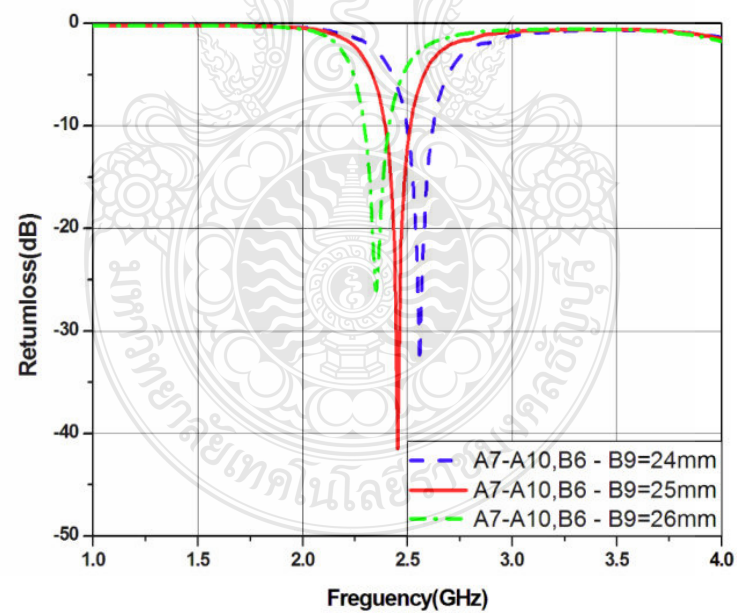
จากภาพที่ 3.45 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ต่อความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ $S_6=S_7=S_8=S_9$ เป็น 0.5 มิลลิเมตร 1 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร จะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ $S_6=S_7=S_8=S_9$ มีผลกระทบกับการเปลี่ยนแปลงแบนด์วิดท์ (Impedance Bandwidth) ของสายอากาศเป็นอย่างมาก แต่ก็ยังมีผลกระทบกับแมตซ์อิมพีแดนซ์เช่นเดียวกัน จากภาพเมื่อ $S_6=S_7=S_8=S_9$ จะมีค่าต่ำจะทำให้มีความกว้างแถบน้อยกว่า $S_6=S_7=S_8=S_9$ ที่ค่าสูง โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

จากภาพที่ 3.46 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ต่อความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $A_7=A_8=A_9=A_{10}=B_6=B_7=B_8=B_9$ เป็น 24 มิลลิเมตร 25 มิลลิเมตร และ 26 มิลลิเมตร จะเห็นว่าพารามิเตอร์ $A_7=A_8=A_9=A_{10}=B_6=B_7=B_8=B_9$ มีผลกระทบกับการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของสายอากาศอย่างมาก

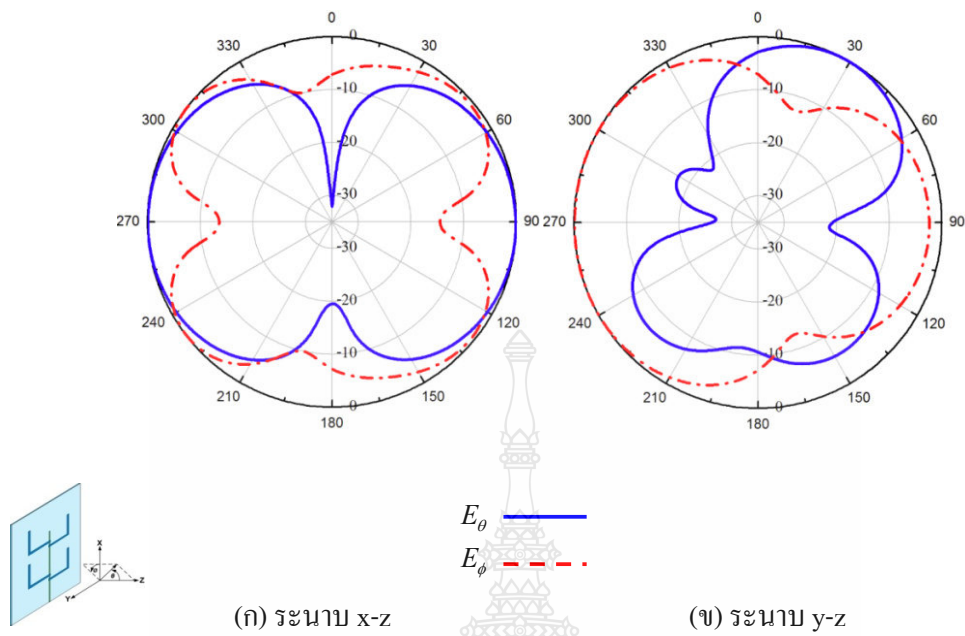
จากภาพที่ 3.47 และ 3.48 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 2 มิติ และแบบ 3 มิติ ของตัวสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz ทั้งในระนาบอะซิมูท (Azimuth) และในระนาบเอเลเวชัน (Elevation) ตามลำดับ โดยที่มีลักษณะของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสองทิศทาง (Bidirectional)



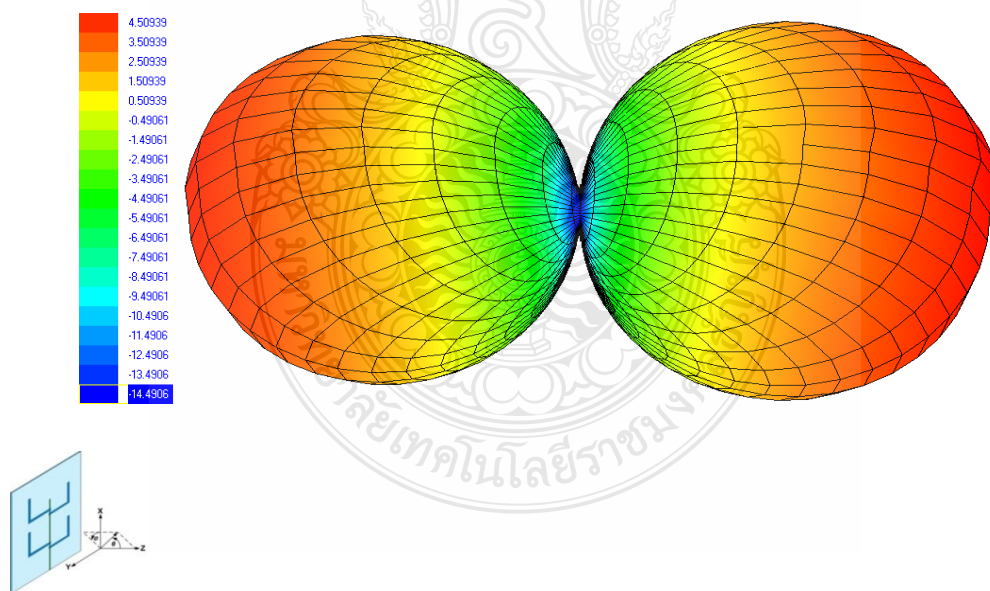
ภาพที่ 3.45 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $S_6=S_7=S_8=S_9$



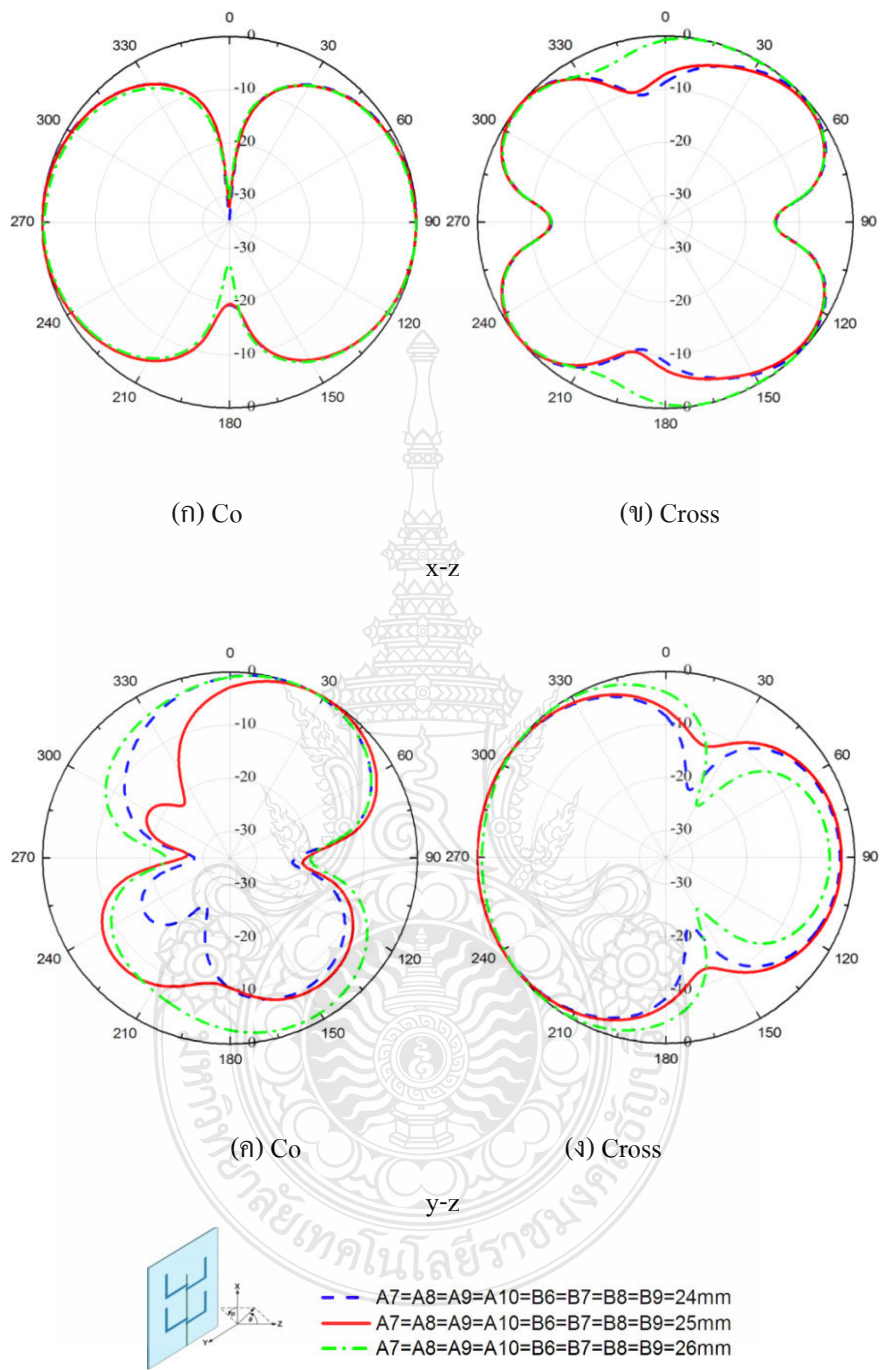
ภาพที่ 3.46 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $A_7=A_8=A_9=A_{10}=B_6=B_7=B_8=B_9$



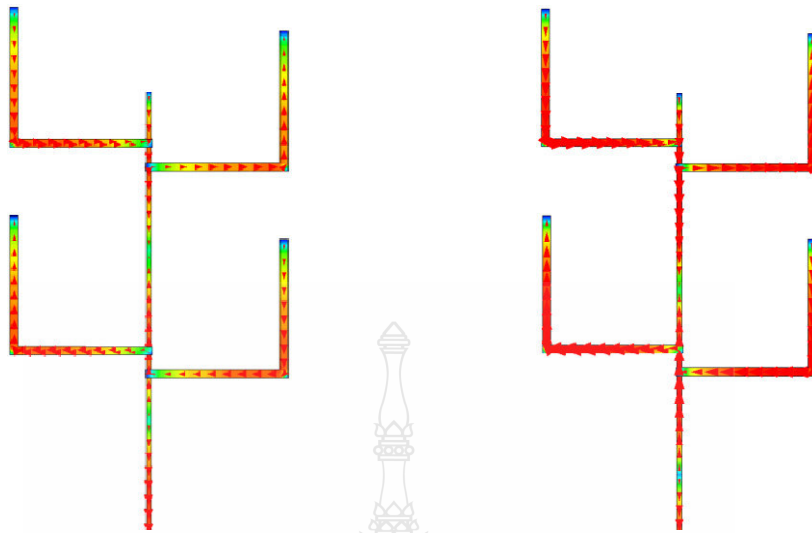
ภาพที่ 3.47 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz



ภาพที่ 3.48 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ ของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz

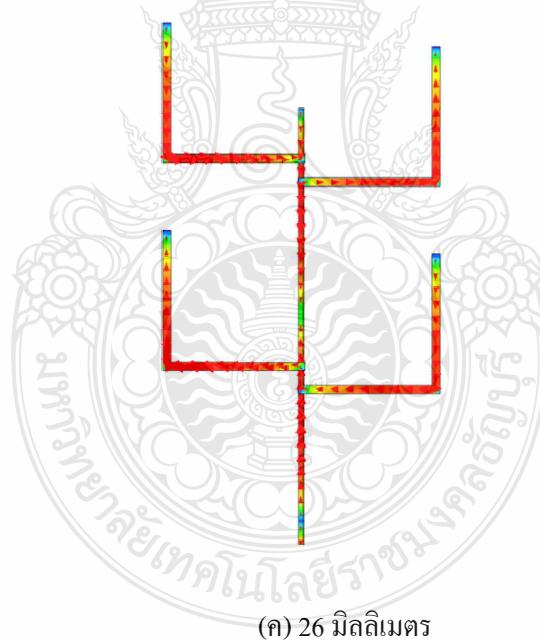


ภาพที่ 3.49 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบไคระนาบ x-z และระนาบ y-z ที่ระยะทางต่างๆ กัน



(ก) 24 มิลลิเมตร

(ข) 25 มิลลิเมตร



(ค) 26 มิลลิเมตร

ภาพที่ 3.50 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง
ที่ออกแบบที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz ที่ระยะทางแตกต่างกัน

จากภาพที่ 3.49 แสดงรูปเปรียบเทียบแบบการแผ่พลังงานก็มีผลกระทบจากระยะของสายอากาศที่ต่างๆ กัน ในระนาบ x-z และระนาบ y-z จากภาพที่ 3.49 (ก) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวตั้ง (E_{θ}) ในระนาบ x-z ที่ระยะทางต่างๆ กัน ที่ความถี่ 2.45 GHz จากภาพที่ 3.49 (ข) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวนอน (E_{θ}) ในระนาบ x-z ที่ระยะทางต่างๆ กัน ที่ความถี่ 2.45 GHz จากภาพที่ 3.49 (ค) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวตั้ง (E_{θ}) ในระนาบ y-z ที่ระยะทางต่างๆ กัน ที่ความถี่ 2.45 GHz และสุดท้ายจากภาพที่ 3.49 (ง) แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวนอน (E_{θ}) ในระนาบ y-z ที่ระยะทางต่างๆ กัน ที่ความถี่ 2.45 GHz

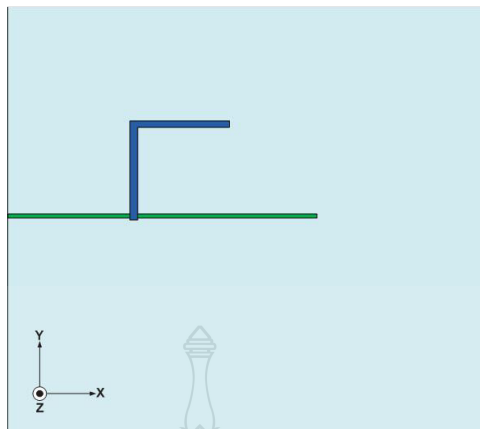
จากภาพที่ 3.50 (ก) แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 2.45 GHz โดยที่ความยาวคลื่น $\{(A7+B6) (A8+B7) \text{ และ } (A9+B8) (A10+B9)\}$ เท่ากับ 24 มิลลิเมตร จากภาพที่ 3.50 (ข) แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 2.45 GHz ที่ความยาวคลื่น $\{(A7+B6) (A8+B7) \text{ และ } (A9+B8) (A10+B9)\}$ เท่ากับ 25 มิลลิเมตร จากภาพที่ 3.50 (ค) แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz ที่ความยาวคลื่น $\{(A7+B6) (A8+B7) \text{ และ } (A9+B8) (A10+B9)\}$ เท่ากับ 26 มิลลิเมตร และมีการแพร่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของความถี่ 2.45 GHz ที่ระยะทางแตกต่างกันซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง โดยใช้ Software IE3D Version 11.5

3.8 การเปรียบเทียบผลการจำลองของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

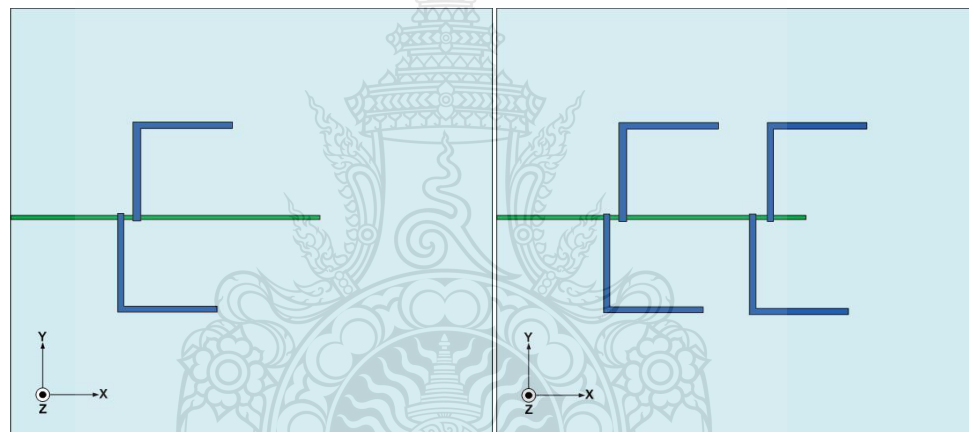
3.8.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองของโครงสร้างสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางทั้ง 3 รูปแบบ

แสดงผลการเปรียบเทียบผลการจำลองของโครงสร้างสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ สายอากาศ 1 ช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มกับสายอากาศ 2 ช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางและที่สายอากาศ 4 ช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางโดยใช้การจำลองแบบของ Software IE3D Version 11.5

จากภาพที่ 3.51 (ก) แสดงโครงสร้างสายอากาศ 1 ช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง จากภาพที่ 3.51 (ข) แสดงโครงสร้างสายอากาศ 2 ช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง จากภาพที่ 3.51 (ค) แสดงโครงสร้างสายอากาศ 4 ช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่มีขนาดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางทั้ง 3 แบบ เหมือนกันทุกประการ



(ก) สายอากาศ 1 ช่องเปิด

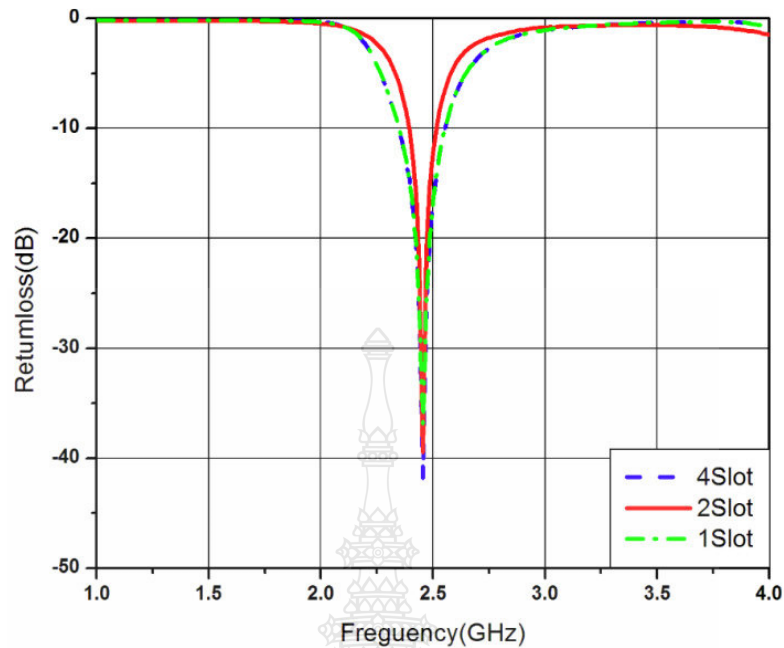


(ข) สายอากาศ 2 ช่องเปิด

(ค) สายอากาศ 4 ช่องเปิด

ภาพที่ 3.51 เปรียบเทียบ โครงสร้างสายอากาศช่องเปิด แถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางทั้ง 3 แบบ

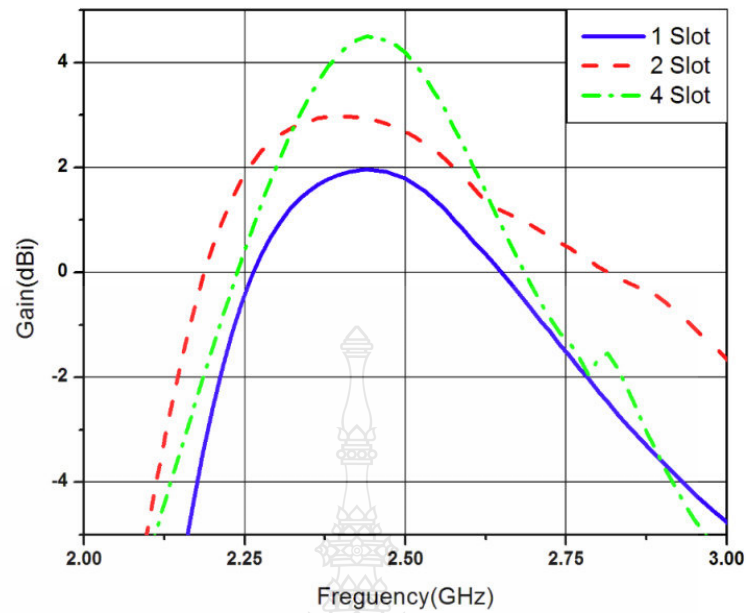
จากภาพที่ 3.52 การเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิด แถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางทั้ง 3 แบบ โดยที่สายอากาศ 1 ช่องเปิด แถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง มีค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศเท่ากับ -36 dB กับตัวสายอากาศ 2 ช่องเปิด แถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง มีค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศเท่ากับ -39 dB กับตัวสายอากาศ 4 ช่องเปิด แถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางมีค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศเท่ากับ -41 dB



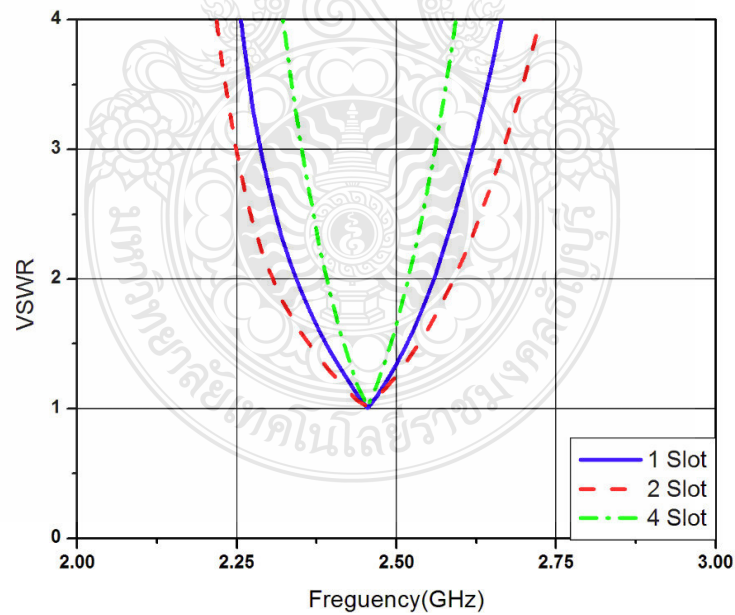
ภาพที่ 3.52 เปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางทั้ง 3 แบบ

จากภาพที่ 3.53 การเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางทั้ง 3 แบบ โดยที่สายอากาศ 1 ช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางมีค่าอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 1.94 dBi กับตัวสายอากาศ 2 ช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางมีค่าการอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 2.89 dBi และตัวสายอากาศ 4 ช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางมีค่าอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 4.47 dBi โดยใช้การจำลองแบบของ Software IE3D Version 11.5

จากภาพที่ 3.54 การเปรียบเทียบอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางทั้ง 3 แบบ โดยที่สายอากาศ 1 ช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางมีอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศเท่ากับ 1.01 : 1 กับตัวสายอากาศ 2 ช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง มีอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศเท่ากับ 1.10 : 1 และตัวสายอากาศ 4 ช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศเท่ากับ 1.11 : 1 โดยใช้การจำลองแบบของ Software IE3D Version 11.5

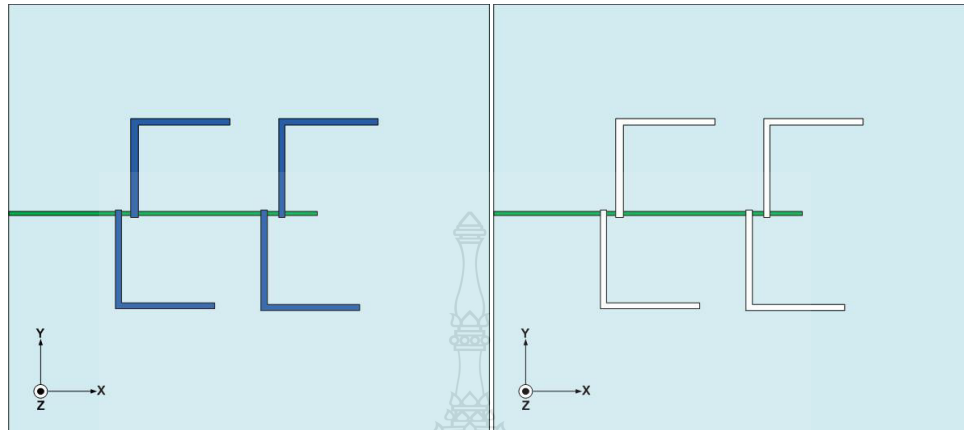


ภาพที่ 3.53 เปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางทั้ง 3 แบบ



ภาพที่ 3.54 เปรียบเทียบอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางทั้ง 3 แบบ

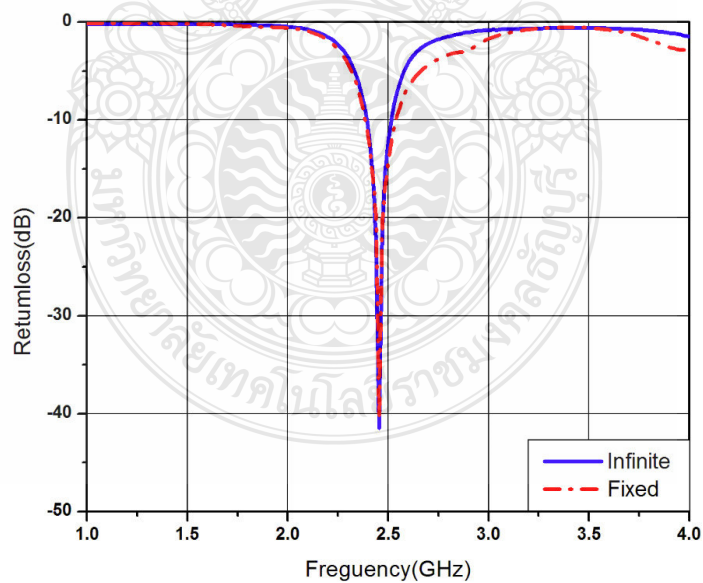
3.8.2 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง



(ก) กาวัดอนันต์

(ข) กำหนดขนาดกาวัด

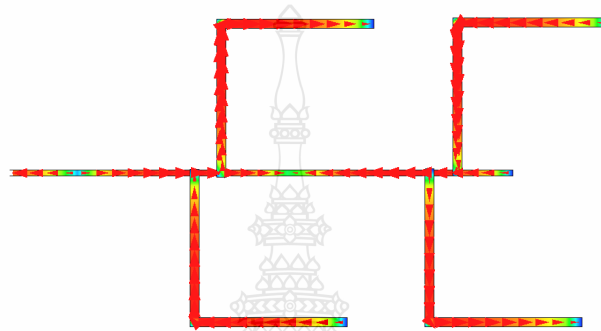
ภาพที่ 3.55 เปรียบเทียบสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางระหว่างกาวัดอนันต์กับการกำหนดขนาดกาวัด



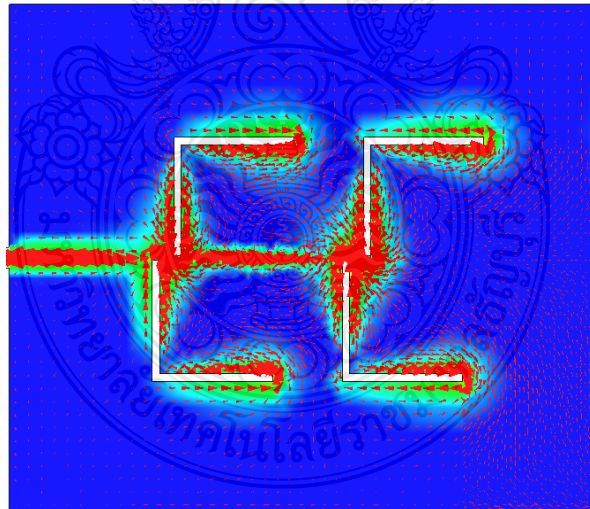
ภาพที่ 3.56 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางระหว่างกาวัดอนันต์กับการกำหนดขนาดกาวัด

จากภาพที่ 3.55 (ก) แสดงรูปสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางโดยทำการกำหนดขนาดกาวด์แบบอนันต์ จากภาพที่ 3.55 (ข) การรูปสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางโดยทำการกำหนดขนาดกาวด์แบบกำหนดขนาด

จากภาพที่ 3.56 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางระหว่างกาวด์อนันต์กับการกำหนดขนาดกาวด์

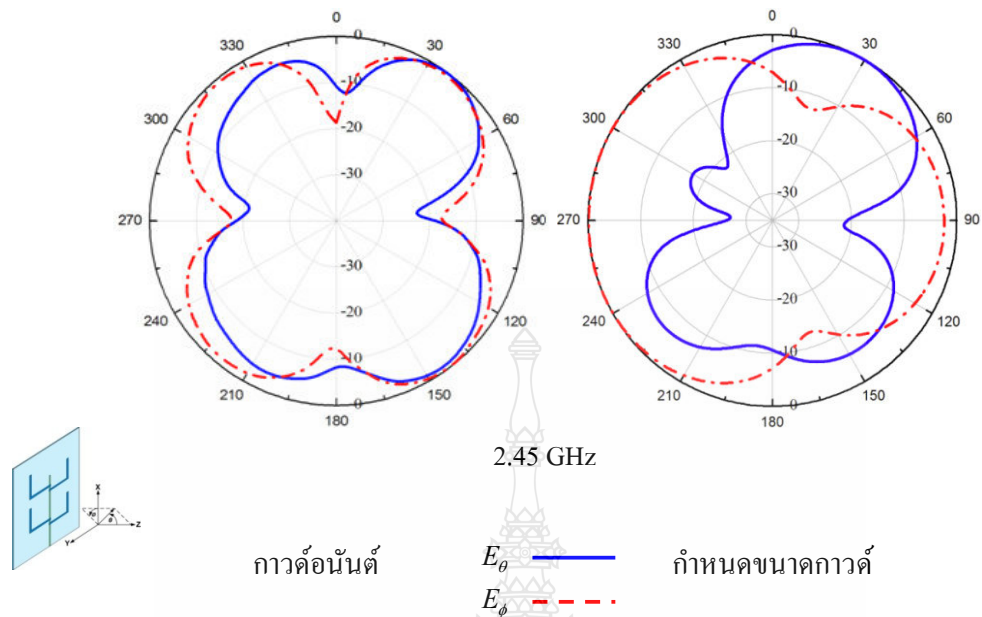


(ก) กาวด์อนันต์

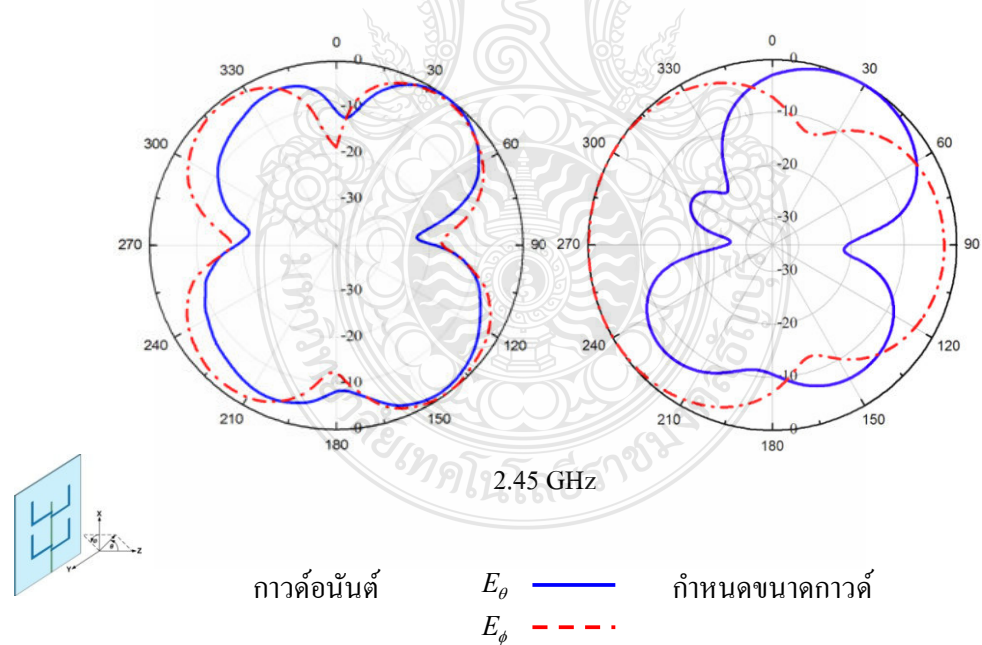


(ข) กำหนดขนาดกาวด์

ภาพที่ 3.57 เปรียบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางระหว่างกาวด์อนันต์กับการกำหนดขนาดกาวด์



ภาพที่ 3.58 การเปรียบเทียบระหว่างการกาวด์อ้วนันต์กับการกำหนดกาวด์ของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบ x-z



ภาพที่ 3.59 การเปรียบเทียบระหว่างการกาวด์อ้วนันต์กับการกำหนดการกาวด์ของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบ y-z

จากภาพที่ 3.57 (ก) แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 2.45 GHz ของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางโดยทำการกำหนดขนาดกาวด์ของสายอากาศแบบอนันต์ จากภาพที่ 3.57 (ข) แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 2.45 GHz ของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางโดยทำการกำหนดขนาดกาวด์ของสายอากาศแบบกำหนดขนาด

จากภาพที่ 3.58 และ ภาพที่ 3.59 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบ x-z (ระนาบ E) และระนาบ y-z (ระนาบ H) โดยที่รูปด้านซ้ายมือจะแสดงถึงผลที่ได้จากการกำหนดขนาดกาวด์ของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง ส่วนรูปด้านขวามือแสดงถึงผลที่ได้จากการกำหนดขนาดกาวด์ของตัวสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางโดยภาพแสดงความถี่ที่ 2.45 GHz จากการเปรียบเทียบกันระหว่างแบบกาวด์อนันต์และแบบกำหนดขนาดของกาวด์มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกัน รวมทั้งสายอากาศสามารถที่จะแผ่พลังงานได้ทั้งโพลาไรซ์แบบแนวตั้ง (E_{θ}) และโพลาไรซ์แบบแนวนอน (E_{ϕ}) ทั้งสองระนาบ

3.9 สรุปผลการออกแบบของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

ในบทนี้ได้กล่าวการออกแบบและการวิเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับแบบฟิล์มบางที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป ซึ่งทำการออกแบบสายอากาศที่มีความถี่ 2.45 GHz โดยผลที่นำมาวิเคราะห์นั้นจะได้มาจากแบบจำลองโครงสร้างของตัวสายอากาศ ซึ่งคำนวณโดยใช้สมการการออกแบบและซอฟต์แวร์ IE3D Version 11.5 สำหรับโครงสร้างของหนึ่งช่องเปิดต่อหนึ่งความถี่ สายอากาศจะถูกออกแบบให้มีช่องเปิดหนึ่งช่องเปิดต่อหนึ่งความถี่ต่อแถวลำดับกันอยู่ ซึ่งจากการวิเคราะห์สายอากาศทำให้เห็นได้ว่าสายอากาศที่ถูกออกแบบนั้นจะมีความยาวของสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับความถี่ใช้งาน รวมทั้งสายอากาศยังมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นด้วย แต่สายอากาศแบบนี้ก็ยังมีผลกระทบในเรื่องของสัญญาณแทรกข้ามของสายอากาศบางส่วนที่ส่งผลต่อรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศอีกด้วย สายอากาศถูกสร้างโดยกำหนดความถี่ที่ 2.45 GHz ประกอบไปด้วย สายอากาศ 1 ช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางกับสายอากาศ 2 ช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางและสายอากาศ 4 ช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง ได้ค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ - 36 dB กับ - 39 dB และ - 41 dB อัตราการขยาย 1.95 dBi กับ 2.89 dBi และ 4.47 dBi มีอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง 1.01 : 1 กับ 1.10 : 1 และ 1.11 : 1 และมีขนาดแบนด์วิดท์ 195 MHz (2.35 - 2.545 GHz) กับ 105 MHz (2.395 - 2.5 GHz) และ 100 MHz (2.4 - 2.5 GHz) ตามลำดับ การเปรียบเทียบสายอากาศระหว่างแบบกาวด์อนันต์กับแบบกาวด์จำกัดมีผลใกล้เคียงกัน

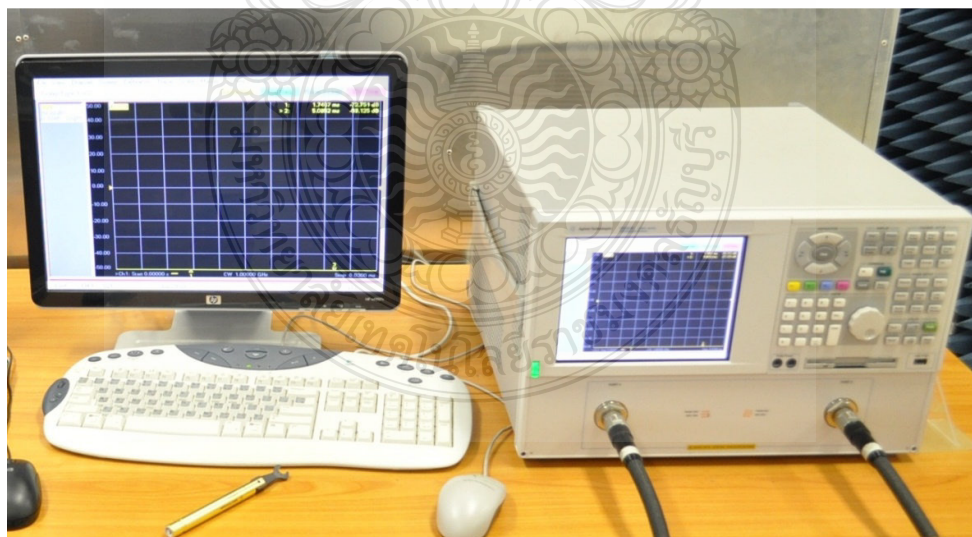
บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดลอง

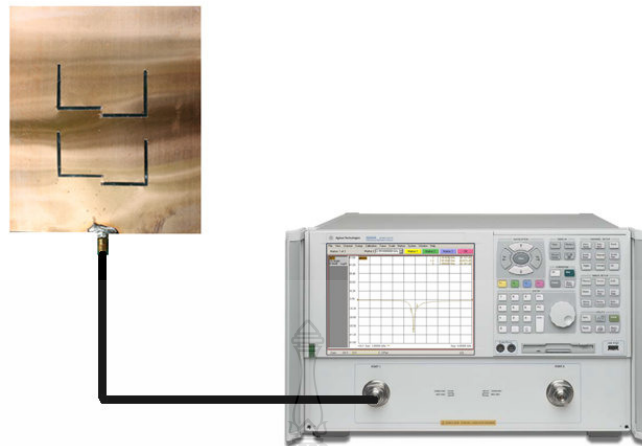
สำหรับการทดสอบและวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ทำการสร้างขึ้นในแบบแถบความถี่กว้างจะมีการทดสอบประสิทธิภาพต่างๆ ของสายอากาศ คือ การทดสอบวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง อัตราการขยายและอิมพีแดนซ์รวมถึงการทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

4.1 การทดสอบและผลการทดลองของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

ในการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะและประสิทธิภาพของสายอากาศนั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องมือในการทดสอบคือเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Agilent PNA Network Analyzers รุ่น E8363B แสดงได้ดังภาพที่ 4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ (Z_m) อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) และอัตราการขยาย (Gain) ของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง ซึ่งการต่อสายอากาศเข้ากับ เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) เพื่อวัดผลการทดสอบของสายอากาศที่สร้างขึ้นแสดงดังภาพที่ 4.2

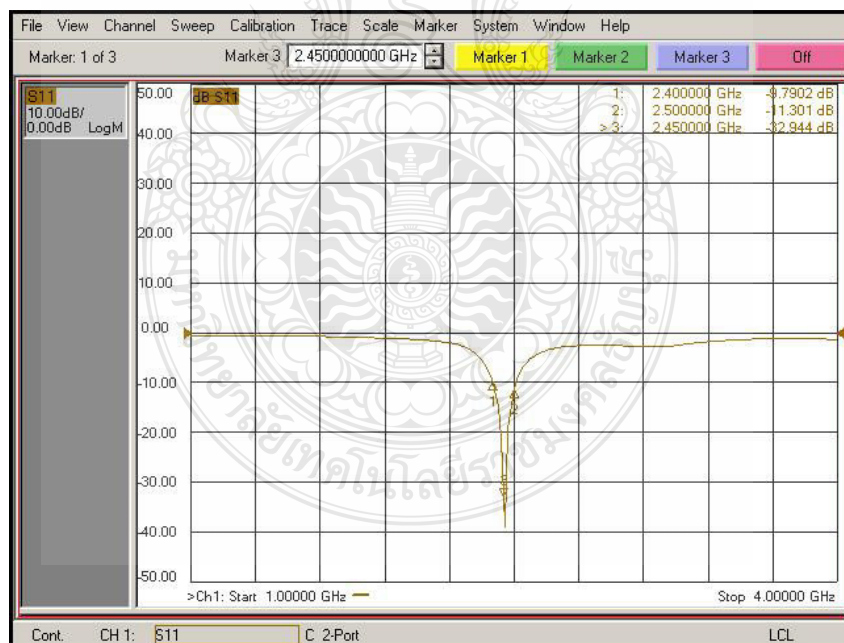


ภาพที่ 4.1 เครื่องมือวัดวิเคราะห์โครงข่าย(Network Analyzer) รุ่น E8363B



ภาพที่ 4.2 วิธีการวัดและวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

4.1.1 ผลการทดสอบการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ อิมพีแดนซ์และอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศ

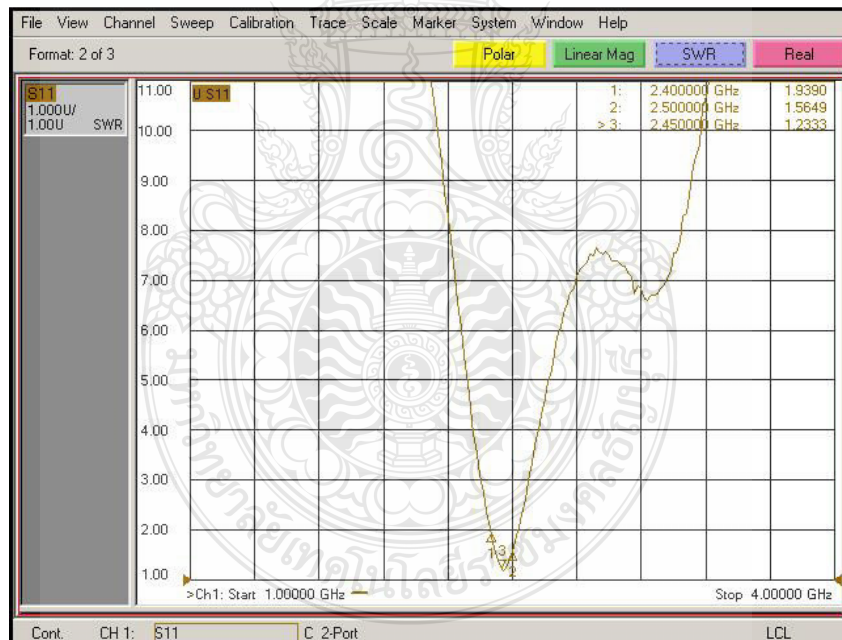


ภาพที่ 4.3 ผลการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

จากภาพที่ 4.3 แสดงผลการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางตามที่ได้ออกแบบไว้ ณ ช่วงความถี่ 2.45 GHz ซึ่งได้มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ - 33 dB ในส่วนของผลการวัดค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่ความถี่ 2.45 GHz ตามที่ได้ออกแบบไว้ซึ่งมีค่า VSWR ต่ำกว่า 2 ดังแสดงในภาพที่ 4.4

ในการทดสอบสามารถคำนวณหาความกว้างแบนด์วิดท์จากกราฟค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) โดยจะคิดจากช่วงความถี่ที่มีค่า $S_{11} < 10$ dB หรือสามารถคำนวณหาแบนด์วิดท์จากกราฟอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) จากช่วงความถี่ที่มี $SWR < 2$ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

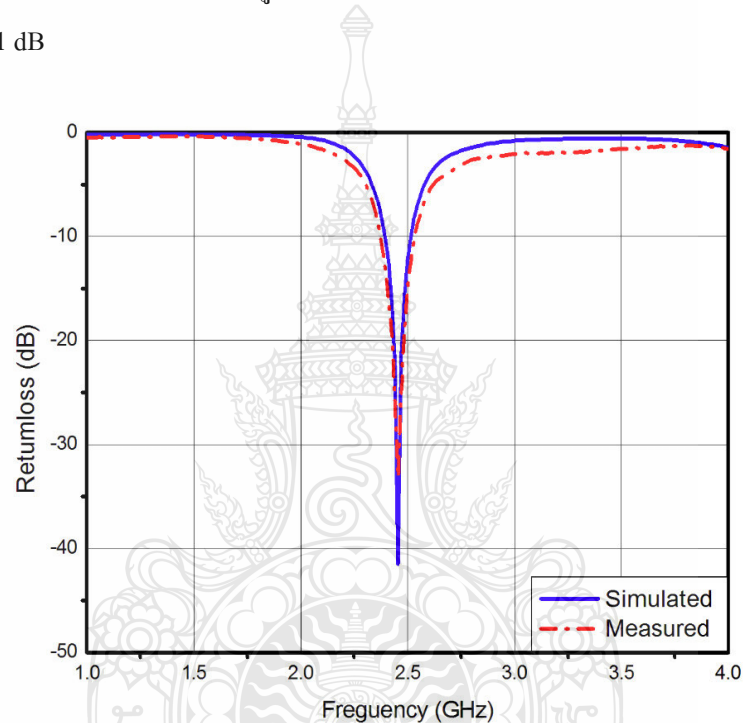
$$\text{Bandwidth} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_r} \times 100\%$$



ภาพที่ 4.4 ผลการวัดค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

4.1.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศ

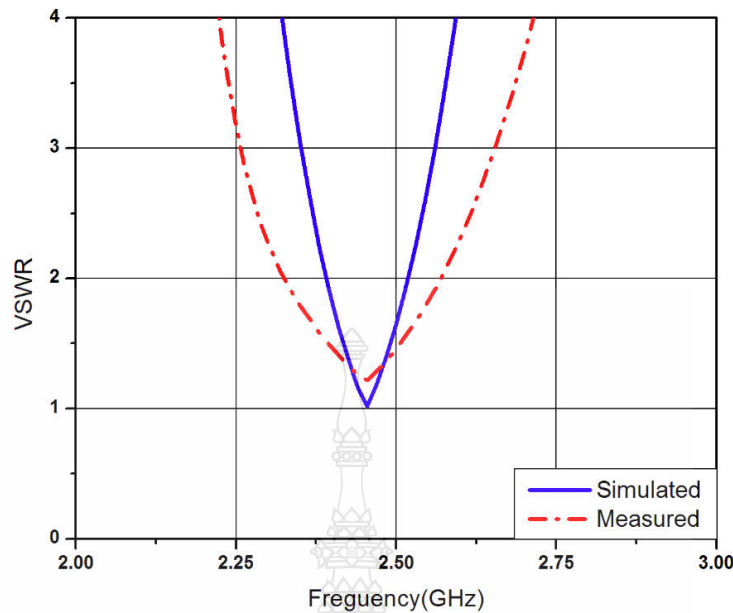
เมื่อนำผลที่ได้จากการวัดชิ้นงานจริงมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยเครื่องวิเคราะห์เครือข่าย Agilent PNA Network Analyzers รุ่น E8363B ดังที่แสดงในภาพที่ 4.5 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกัน โดยผลที่ได้จากการวัดชิ้นงานจริงสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าความสูญเสียย้อนกลับที่ - 33 dB ซึ่งน้อยกว่าผลที่ได้จากการจำลองสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าความสูญเสียย้อนกลับที่ - 41 dB



ภาพที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ได้จากการจำลองกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

ตารางที่ 4.1 ผลเปรียบเทียบการจำลองกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

สายอากาศไมล้าฟิล์ม	$f_{max} - f_{min}$ (GHz)	f_c (GHz)	Bandwidth
ผลการจำลองการทำงาน (Simulated)	2.4 – 2.5	2.45	39.76%
ผลจากการวัดชิ้นงานจริง (Measured)	2.41 – 2.5	2.455	36.65 %

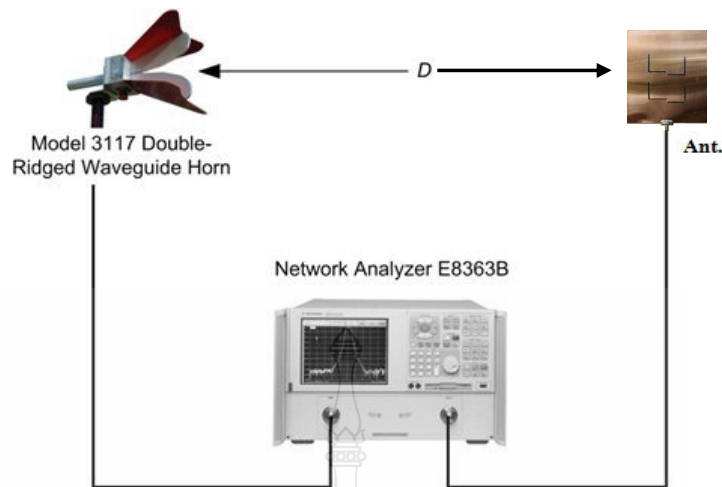


ภาพที่ 4.6 การเปรียบเทียบการจำลองของอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศช่องเปิดแฉะลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

จากภาพที่ 4.6 แสดงผลที่ได้จากการวัดชิ้นงานจริงและผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของสายอากาศช่องเปิดแฉะลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง ได้ผลอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งมีความสอดคล้องกันเช่นเดียวกับผลของการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับซึ่งค่าที่ได้จากการวัดชิ้นงานจริงจะมีแบนด์วิดท์แคบลง อาจเป็นเพราะมีการคลาดเคลื่อนของค่าตัวเลขทศนิยมในการสร้างชิ้นงานจริงที่ไม่ละเอียดเท่ากับการจำลองการทำงานหรืออาจจะเป็นเพราะค่าคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาสร้างมีค่าไม่คงที่เท่าที่ควรจึงมีผลให้ค่าจากการวัดทดสอบคลาดเคลื่อนไปแต่แถบความถี่ที่ได้นั้นก็ยังอยู่ในช่วงของการใช้งาน

4.1.3 ผลการทดสอบการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ

การทดสอบการวัดอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแฉะลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง เป็นวิธีการวัดวิเคราะห์คุณลักษณะและประสิทธิภาพของสายอากาศโดยการนำสายอากาศรูปฮอร์นที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่งและสายอากาศช่องเปิดแฉะลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางซึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับต่อเข้ากับเครื่องมือวัดวิเคราะห์ดังภาพที่ 4.7 และสามารถคำนวณหาอัตราขยายได้จากสมการที่ 4.1 และ 4.2



ภาพที่ 4.7 การทดสอบการวัดอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

$$P_r = P_t - L_f - L_{line} + G_t + G_r \quad (4.1)$$

หรือ

$$G_r = P_r - P_t + L_f + L_{line} - G_t \quad (4.2)$$

โดยที่

P_r คือ กำลังที่ได้รับ

P_t คือ กำลังที่ส่งออก

L_{line} คือ กำลังที่สูญเสียในสายนำสัญญาณทั้งทางด้านส่งและด้านรับ

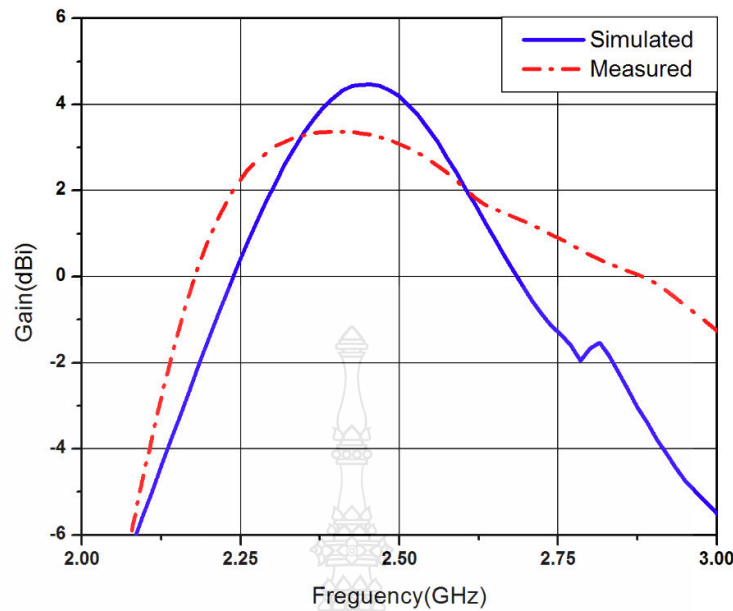
L_f คือ การสูญเสียในอากาศ $20 \text{ LOG} \frac{4\pi D}{\lambda}$

D คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับ (2 เมตร)

G_t คือ อัตราการขยายของสายอากาศด้านส่ง

G_r คือ อัตราการขยายของสายอากาศด้านรับ

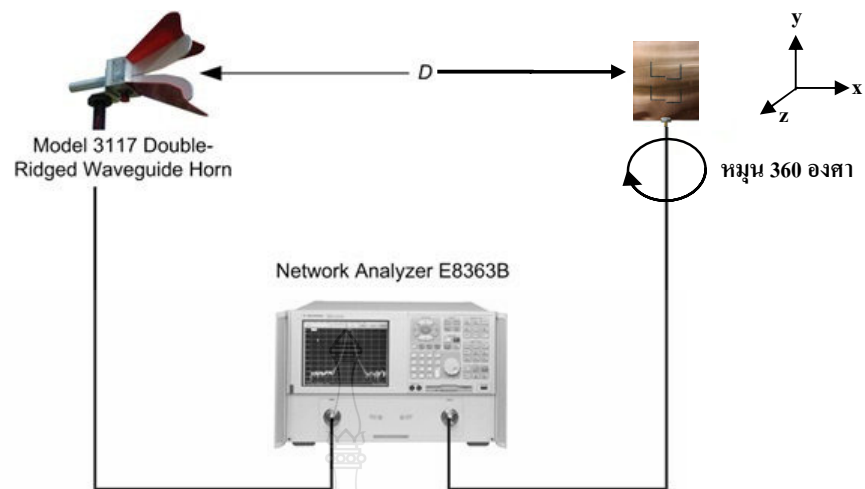
ในส่วนของการเปรียบเทียบของค่าอัตราขยายจากการจำลองกับผลการวัดของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่ความถี่ 2.45 GHz อัตราขยายค่าที่ได้จากการจำลองเท่ากับ 4.47 dBi ค่าที่ได้จากการวัดจริงเท่ากับ 3.28 dBi ดังภาพที่ 4.8



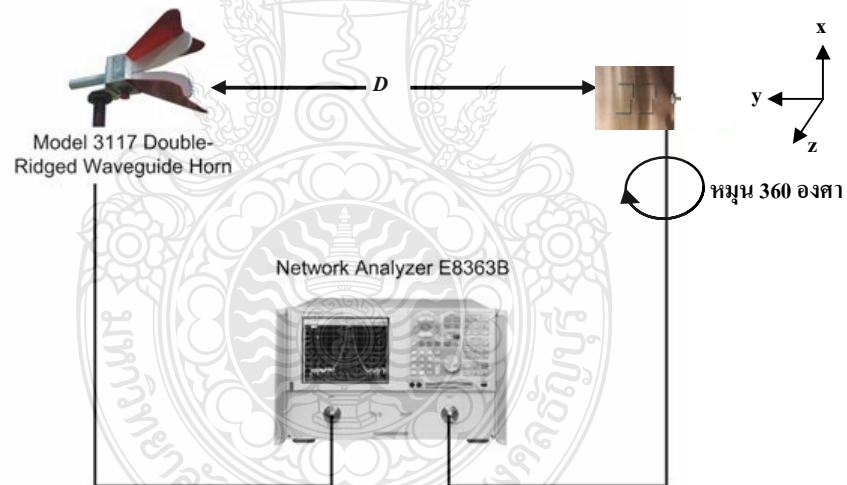
ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองแบบของค่าอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแฉว ลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

4.1.4 การทดสอบการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

แบบรูปการแผ่พลังงานสำหรับสายอากาศช่องเปิดแฉวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางใน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีการใช้งานย่านความถี่ 2.45 GHz โดยความถี่ที่ใช้งานในการวัดแบบรูปการแผ่ พลังงานความถี่ที่ 2.45 GHz ส่วนเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดจะประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ โคจรข่าย (Network Analyzer) รุ่น E8363B ร่วมกับ โปรแกรมแสดงค่าการแผ่พลังงานสามารถวัดทั้ง กำลังและความถี่ในย่านแถบความถี่ที่ออกแบบโดยปรับความถี่รับที่ต้องการได้ การวัดแบบรูปการแผ่ พลังงานแบบสนามไฟฟ้าระยะไกลของสายอากาศแบบระนาบร่วมแบบบนพื้นที่โล่ง โดยที่สายอากาศ ส่งและสายอากาศรับอยู่ในระนาบเดียวกันระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับประมาณ 2 เมตรสาย นำสัญญาณทั้งด้านส่งและรับยาวด้านละ 5 เมตร โดยจะทำการหมุนสายอากาศทดสอบตั้งแต่ 0 องศา จนกว่าจะครบรอบทั้ง 360 องศา โดยใช้การปรับระนาบที่ด้านรับครั้งละ 5 องศา เพื่อดูค่าความ แดกต่างของสัญญาณที่สายอากาศสามารถรับได้ในแต่ละระนาบ โดยจะทำการทดสอบของสายอากาศ ช่องเปิดแฉวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางทั้งระนาบ x-z และระนาบ y-z สามารถทำการทดลองการ วัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศช่องเปิดแฉวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางได้

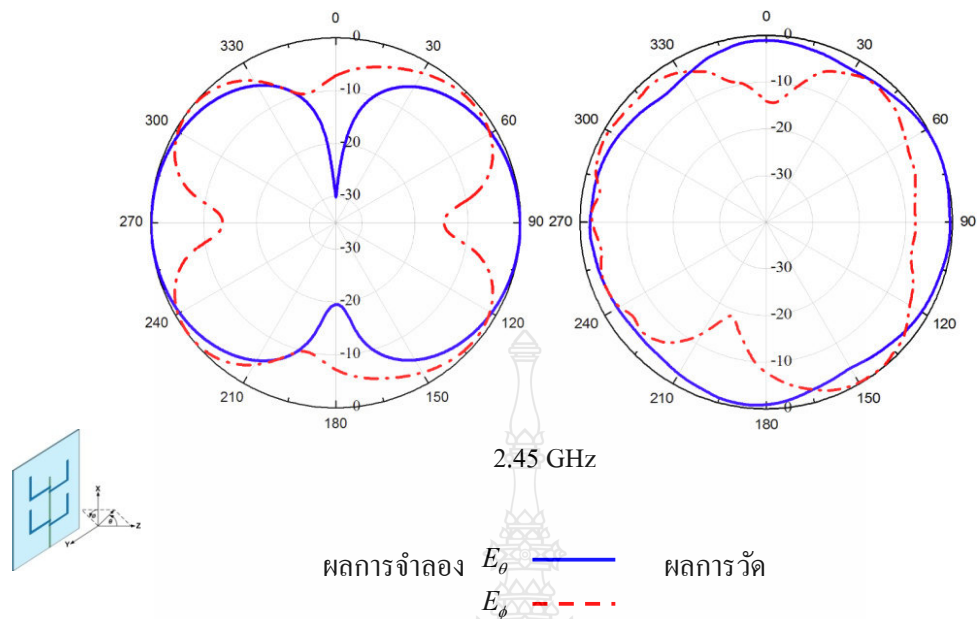


ภาพที่ 4.9 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางในแนวระนาบ $x-z$

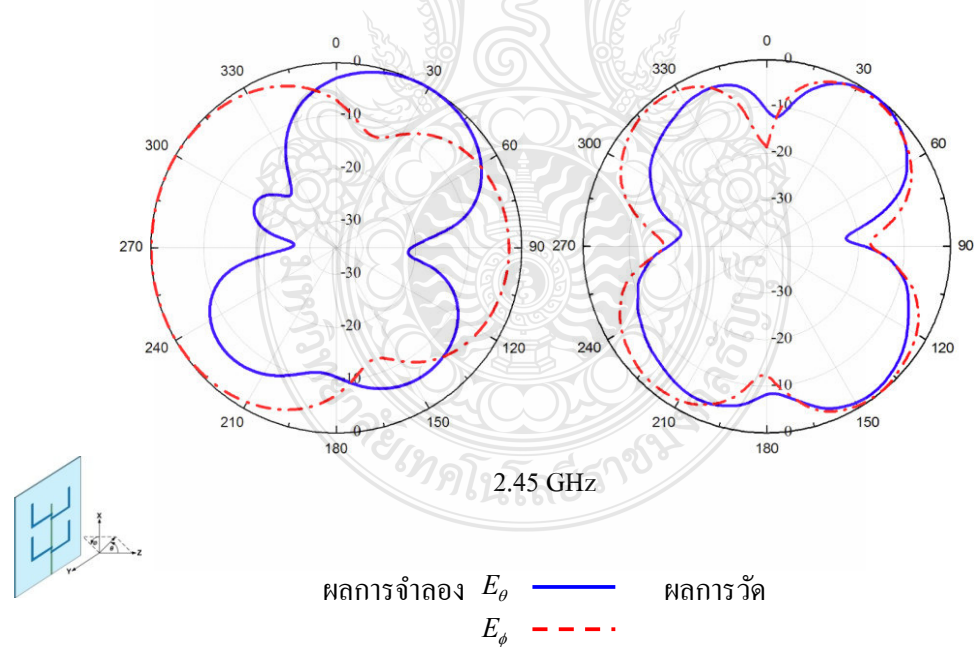


ภาพที่ 4.10 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางในแนวระนาบ $y-z$

จากภาพที่ 4.9 และ 4.10 แสดงการต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางในแนวระนาบ $x-z$ และระนาบ $y-z$ ของสายอากาศกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น E8363B



ภาพที่ 4.11 การเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงกับการจำลองของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบ x-z



ภาพที่ 4.12 การเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงกับการจำลองของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบ y-z

จากภาพที่ 4.11 และ ภาพที่ 4.12 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบ $x-z$ (ระนาบ E) และระนาบ $y-z$ (ระนาบ H) โดยที่ภาพด้านซ้ายมือจะแสดงถึงแบบจำลอง ส่วนรูปด้านขวามือแสดงถึงผลที่ได้จากการวัดทดสอบที่ความถี่ 2.45 GHz การเปรียบเทียบกันระหว่างการจำลองและการวัดทดสอบจะเห็นได้ว่าการจำลองมีความราบเรียบของแบบรูปการแผ่พลังงานมากกว่าการวัดทดสอบ เนื่องจากมีผลจากสภาพแวดล้อมของการทดสอบรวมทั้งสายอากาศสามารถที่จะแผ่พลังงานได้ทั้งโพลาไรซ์แบบแนวตั้ง (E_θ) และ โพลาไรซ์แบบแนวนอน (E_ϕ) ทั้งสองระนาบนั้นทำสายอากาศที่วัดจริงได้ไม่เท่าขนาดที่ออกแบบไว้ สำหรับอัตราขยายของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz ได้เท่ากับ 3.28 dBi จะเป็นการแผ่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง (Bidirectional)

4.1.5 การทดสอบการยึดหยุ่นของสายอากาศ

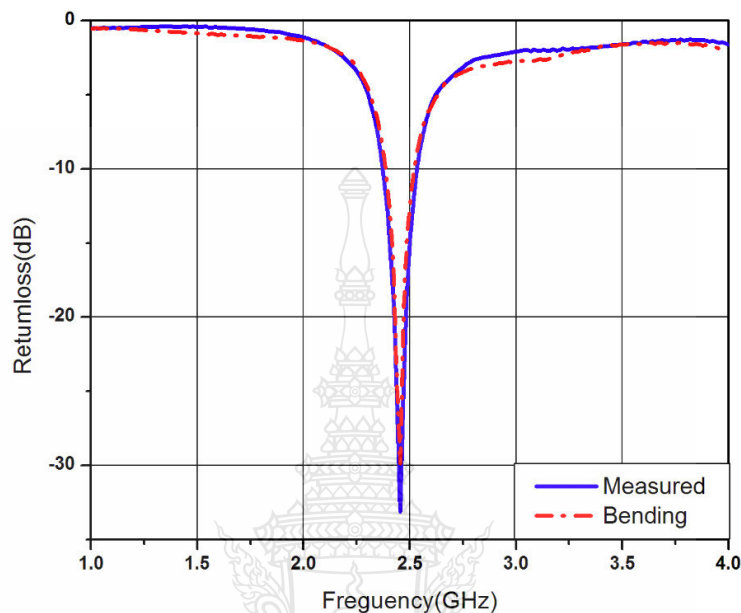
ทำการทดสอบ ผลจากการยึดหยุ่นของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ได้จากการวัดชิ้นงานจริงกับการยึดหยุ่นชิ้นงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง



ภาพที่ 4.13 การยึดหยุ่นของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

จากภาพที่ 4.13 แสดงการยึดหยุ่นของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางและจากภาพที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ได้จากการวัดชิ้นงานจริงกับการยึดหยุ่นชิ้นงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางจะเห็นได้ว่าการวัด

ชิ้นงานจริงของสายอากาศ ได้ค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับเท่ากับ - 33 dB แต่การยืดหยุ่น ชิ้นงานของสายอากาศค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับลดลงเท่ากับ - 29 dB เท่านั้น



ภาพที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ได้จากการวัดชิ้นงานจริงกับการยืดหยุ่นชิ้นงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

4.2 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่ที่ออกแบบ ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริปที่ความถี่ 2.45 GHz ประกอบไปด้วยค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับเท่ากับ - 33 dB อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) เท่ากับ 1.20 : 1 แบนด์วิดท์เท่ากับ 2.395 - 2.515 GHz (120 MHz) และอัตราการขยายเท่ากับ 3.28 dBi มีการแผ่พลังงานของสายอากาศเป็นแบบสองทิศทาง (Bidirectional) ซึ่งจากผลการวัดด้วยการทดสอบสายอากาศจากโครงสร้างจริงนั้นพิสูจน์ให้เห็นได้ว่ามีผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกับผลการจำลอง

บทที่ 5

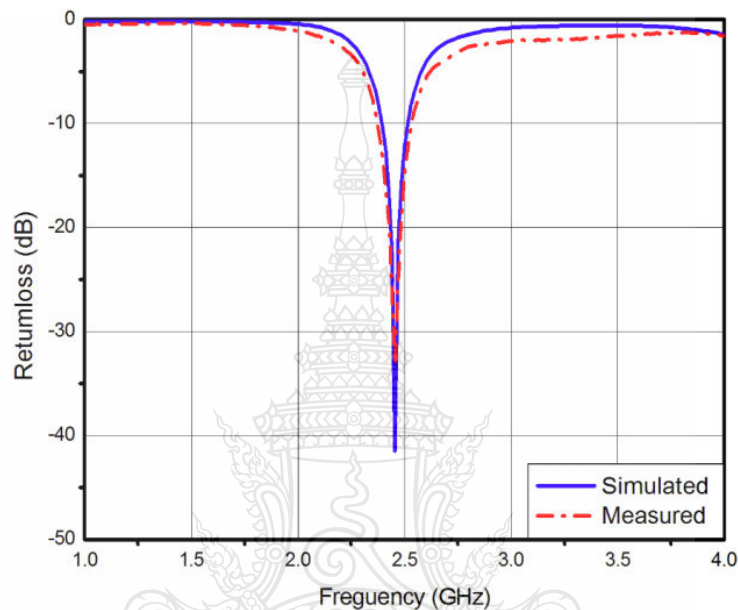
สรุปผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลสรุปการวิจัยของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริปกับแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางตามที่ได้ทำการศึกษายากแบบและวิเคราะห์ทดสอบคุณสมบัติทางพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 ซึ่งในบทนี้จะทำการสรุปคุณสมบัติของสายอากาศดังกล่าวที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรมจำลองเครือข่าย IE3D (Zeland) และการสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อทำการวัดวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสายอากาศแบบต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว

5.1 สรุป

การศึกษาและการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอโครงสร้างของสายอากาศที่ง่ายต่อการออกแบบไม่ซับซ้อน รวมทั้งสายอากาศจะถูกออกแบบให้มีช่องเปิดที่มีขนาดและตำแหน่งในการจัดวางที่เหมือนกัน 2 ชุด วางอยู่บนระนาบกราวนด์เดียวกันกับวัสดุฐานรอง Mylar Film ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3.2 และมีความหนา 0.4 มิลลิเมตร โดยหลักในการออกแบบสายอากาศนี้มีข้อดีคือ ช่องเปิดมุมฉากแต่ละอันสามารถที่จะผลิตย่านความถี่ที่ต้องการได้อิสระจากกัน แต่เราได้ทำการออกแบบให้ช่องเปิดมุมฉากมีความถี่เดียวกันเพื่อเพิ่มการสูญเสียย้อนกลับและอัตราการขยายให้มากขึ้นทั้งยังได้คุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศที่ดี เช่น แมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดี มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางที่ความถี่ 2.45 GHz รวมทั้งมีอัตราขยายที่ยอมรับได้ (≥ 2 dBi) เป็นต้น แต่สายอากาศแบบนี้ทำให้เกิดสัญญาณแทรกข้าม (Crosstalk) ของช่องเปิดมุมฉากแต่ละอันขึ้น ทำให้เกิดผลกระทบกับคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศ ความถี่ต่างๆ ซึ่งเกิดขึ้นตามลักษณะของการจัดวางช่องเปิดของสายอากาศนอกจากนี้สายอากาศที่นำเสนอขึ้นยังได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการและมีแบนด์วิดท์ครอบคลุมกับย่านความถี่ใช้งานตามมาตรฐาน WLAN ซึ่งในส่วนของผลการจำลองการทำงานของสายอากาศ พบว่ามีค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ -41 dB ที่ความถี่ 2.45 GHz ผลจากการวัดจริงของสายอากาศจะมีการสูญเสียย้อนกลับที่ -33 dB ดังแสดงในภาพที่ 5.1 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการจำลองและการวัดจริงของสายอากาศ นอกจากนี้ยังพบว่าผลการจำลองการทำงานของสายอากาศที่ได้มีความกว้างแบนด์วิดท์เท่ากับ 2.4 – 2.5 GHz (100 MHz) กับอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.11 : 1 และอัตรา

การขยายเท่ากับ 4.47 dBi ในขณะที่ผลจากการวัดจริงความกว้างแบนด์วิดท์เท่ากับ 2.395 – 2.515 GHz (120 MHz) กับอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.20 : 1 และอัตราการขยายเท่ากับ 3.28 dBi ซึ่งได้แสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของสายอากาศที่ได้จากการวัดและการจำลองสายอากาศดังตารางที่ 5.1



ภาพที่ 5.1 การเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการจำลองและการวัดจริงของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

จากโครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง ที่ได้นำเสนอมาแล้วนั้น จะเห็นว่าโครงสร้างของสายอากาศที่ออกแบบสามารถสร้างได้ง่าย มีราคาถูก และมีขนาดที่บางกว่าสายอากาศที่ใช้วัสดุฐานรองแบบ FR4 จึงเหมาะกับการประยุกต์ใช้งานกับ WLAN ในส่วนของวิทยานิพนธ์เล่มนี้อาศัยการจำลองการทำงานและการวิเคราะห์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศนอกจากนี้ยังมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง อัตราการขยายของสายอากาศ แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศและการความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม IE3D 11.5 (Zeland) รวมทั้งต้องอาศัยเครื่องวัดวิเคราะห์โครงข่าย Agilent PNA Network Analyzers E8363B เพื่อทำการวัดวิเคราะห์และทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศที่สร้างขึ้นซึ่งผลของการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะให้ผลที่น่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับ

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศที่ได้จากการจำลองและการวัดจริง

คุณลักษณะของสายอากาศ	ย่านความถี่ 2.45 GHz	
	ผลที่ได้จากการจำลอง	ผลที่ได้จากการวัดจริง
การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss)	- 41 dB	- 33 dB
อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR)	1.11 : 1	1.20 : 1
อัตราการขยายของสายอากาศ (Gain)	4.47 dBi	3.28 dBi
อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance : Z_{in})	$51.09 - j 0.34 \Omega$	$53.74 + j 7.22 \Omega$
แบนด์วิดท์ (Impedance Bandwidth)	2.4 – 2.5 GHz (100 MHz)	2.395 - 2.515 GHz (120 MHz)

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบต่างๆ จากการยึดหยุ่นของสายอากาศช่องเปิด แถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบางที่ใช้ไม่ลำฟิล์มเป็นวัสดุฐานรอง

5.2.2 ควรศึกษาและวิเคราะห์การออกแบบติดตั้งสายอากาศเพื่อประยุกต์ใช้งานจริงกับ อุปกรณ์ที่รองรับการสื่อสารท้องถิ่นไร้สาย Wireless Local Area Network (WLAN)

รายการอ้างอิง

- [1] Roberto Caso, Student Member, IEEE, Andrea A. Serra, Marcos Rodriguez-Pino, Paolo Nepa, Member, IEEE, and Giuliano Manara, Fellow, IEEE, "A Wideband Slot-Coupled Stacked-Patch Array for Wireless Communications," **IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters**, Vol. 9, 2010, pp.141-144.
- [2] Lev Pazin and Yehuda Leviatan, "Inverted-F Laptop Antenna With Enhanced Bandwidth for Wi-Fi/WiMAX Applications," **IEEE Transaction on Antennas and Propagation**, Vol.59, No.3, March 2011, pp.153-156
- [3] Y. Sung, "A Printed Wide-Slot Antenna With a Modified L-Shaped Microstrip Line for Wideband Applications," **IEEE Transaction on Antennas and Propagation**, Vol.59, No.10, October 2011, pp.157-160
- [4] Hossein Eskandari, Mahmood Rafaei Booket, Manouchehr Kamyab, and Mehdi Veysi, Student Member, IEEE, "Investigations on a Class of Wideband Printed Slot Antenna," **IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters**, Vol. 9, 2010, pp.145-148
- [5] ไพฑูรย์ รักเหลือ, สายอากาศหลายความถี่แบบช่องเปิดมุมฉากที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริป, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2552.
- [6] กฤตพล นาคเจริญ, การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสองความถี่, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [7] วิชระพล นาคทอง, การเพิ่มแบนด์วิดท์และลดขนาดของสายอากาศโมนโพลแบบระนาบด้วยเทคนิคการเจาะร่อง, วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาไฟฟ้า แขนงวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.
- [8] เอกรัฐ หล่อพิเชียร, สายอากาศช่องเปิดระนาบร่วมแถบความถี่กว้างสำหรับระบบเครือข่ายไร้สาย, วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.

- [9] ประกาศิต ต้นตือลงการ และ จีระศักดิ์ ช่วงชัย, “สายอากาศร่องสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมแบบสองความถี่โดยใช้ร่องคู่รูปตัวแอล,” วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ 6, ฉบับที่ 2, กรกฎาคม - ธันวาคม 2553, หน้า 252-257.
- [10] Y. Yoshimura, “A Microstrip Line Slot Antenna,” **IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques**, Vol. MTT-20 , 1972, pp. 760-762.
- [11] D. M. Pozar, “Reciprocity Method of Analysis for Printed Slot and Slot-Coupled Micro-strip Antenna,” **IEEE Trans on Antennas Propag**, Vol. AP-46, 1996, pp. 1439-1446.
- [12] B. N. Das, and K. K. Joshi, “Impedance of a Radiating Slot in the Ground Plane of a Microstrip Line,” **IEEE Trans on Antennas Propag**, Vol. AP-30, 1982, pp. 922-926.
- [13] S. K. Sharma, L. Shafai, and N. Jacob, “Investigation of Wide-Band Microstrip Slot Antenna,” **IEEE Trans on Antennas Propag**, Vol. 52, no. 3, Mar 2004, pp. 865-872.
- [14] P. Rakluea, N. Anantrasirichai, K. Janchitrapongveg, and T. Wakabayashi, “Multiband Microstrip-Fed Right Angle Slot Antenna Design for Wireless Communication Systems,” **ETRI Journal**, Vol.31, No. 3, June 2009, pp. 271-276.
- [15] P. Rakluea, Multiband Microstrip-Fed Right Angle Slot Antenna Design for Wireless Communication Systems,” **ETRI Journal**, Vol.31, No.3, June 2009, pp. 277-282.
- [16] Yong, S.-L.S., Kishk, A.A. and Lee, K.-F. “Wideband Circularly Polarized Antenna with L-Shaped Slot,” **IEEE Trans on Antenna and Prog**, Vol.56, No.6, June 2008, pp. 1780-1783.
- [17] Lin, S.-K. and Lin, Y.-C. “A Compact Sequential Rotation Array,” **IEEE Trans on Antenna and Prog**, Vol.59, No.7, (July 2011), pp. 2721-2724.
- [18] P. Rakluea , V. Pirajanchai, N. Anantrasirichai, K. Janchitrapongveg, and T. Wakabayashi, “Characteristics of Right Angle Microstrip Slot Antenna for Dual Frequency,” **Proceedings of 2005 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems**, December 13-16, 2005 , Hong Kong.
- [19] P. Rakluea, K. Janchitrapongveg, N. Anantrasirichai, and T. Wakabayashi, “Analysis of Right Angle Microstrip Slot Antenna,” **TENCON 2005**, 2005 IEEE Region 10, 21-24 Nov. 2005.

- [20] P. Rakluea, and N. Anantrasirichai, "A Dual Band Right Angle Microstrip Slot Antenna," **2006 International Conference on Communications Circuits and Systems Proceedings**, 25-28 June, 2006.
- [21] A. Pomsathit, C. Benjangkaprasert, N. Anantrasirichai, V. Chutchavong', and T. Wakabayashi, "Circularly Polarized Right Angle Slot Antennas for WLAN of IEEE 802.11b/g," **Microwave Conference**, 2005 European, Vol. 1, 4-6 Oct, 2005.
- [22] K. Kumar, and N. Gunasekaran, "A Novel Wide Band Planar N Shaped Base Station Antenna," **2011 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP)**, 10-12 Feb, 2011, pp. 294–296.
- [23] X. D. Huang, C. H. Cheng and L. Zhu, "Wideband antenna using a multiple-mode slotline radiator proposal and implementation," **IET Microw on Antennas Propag**, 2011, Vol. 5, Iss. 14, pp. 1773–1778.
- [24] A. Pomsathit, C. Benjangkaprasert, N. Anantrasirichai, P. Rakluea and T. Wakabayashi, "Design of Right Angle Slot Antenna for Dual Band and Dual Polarized with Wireless Network," **International Conference on Control Automation and Systems 2010**, Gyeonggi-do, Korea, Oct. 27-30, 2010 in KINTEX, pp. 225-229.
- [25] Thinnawat Jangjing, Paitoon Rakluea, Wanchalerm Chanwattanapong, and Sarawuth Chaimool, "A Novel Dual Band and Dual Pattern Right Angle Slot Antenna," **Thailand-Japan Microwave 2011(TJMW2011)**, Bangkok, Thailand, 10-12 Aug, 2011, pp. 289-292.
- [26] Thinnawat Jangjing, Wanchalerm Chanwattanapong, Paitoon Rakluea, Numyoot Songthana-pitak, "Study of Dual-Directional Pattern Right Angle Slot Antenna for Dual-Band Applications," **The Japan Society for Simulation Technology (JSST 2011)**, Tokyo, JAPAN, October 22-23, 2011, pp. 293-296.

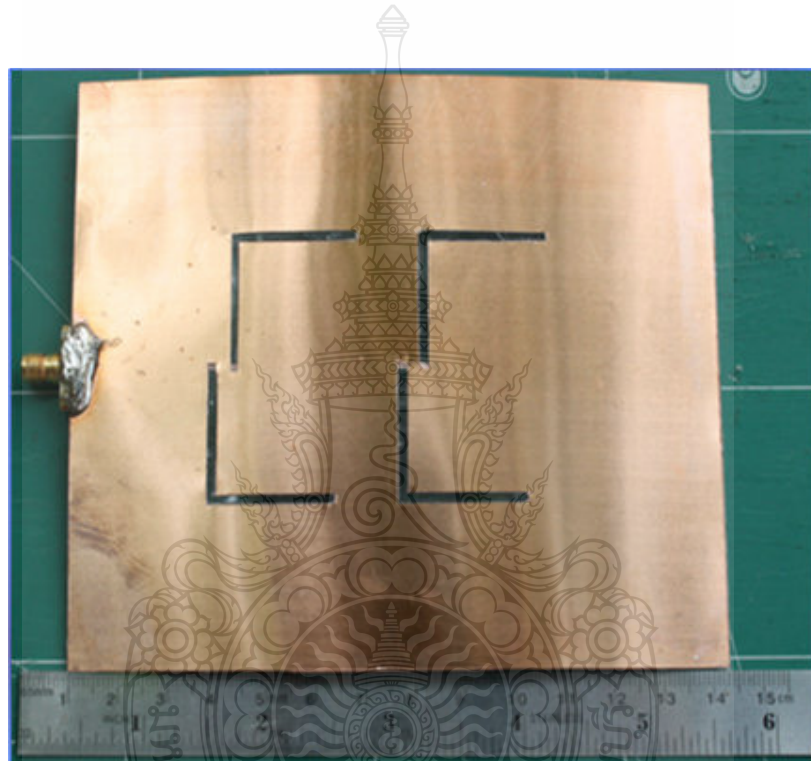
ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ภาพต้นแบบ สายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง





ภาพที่ ก 1 ต้นแบบสายอากาศช่องเปิดแฉวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง

ภาคผนวก ข

ผลการวัดคุณลักษณะต่างๆ ของไมล้าฟิล์มและ DATA SHEET



FEATURES

- Good dimensional stability.
- Soldering reliability has been bettered
- Good electrical properties
- High density automatic mounting can be carried out

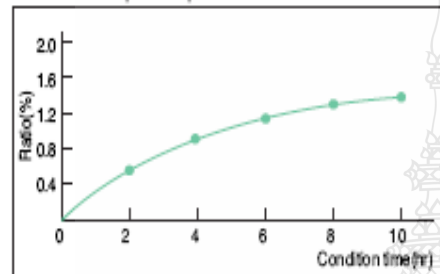
APPLICATIONS

Computer, Instrumentation, VCR, Television, Electronic Toy, etc.,

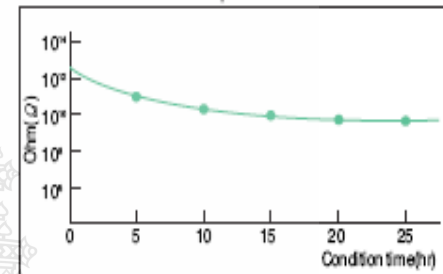
INTERNATIONAL STANDARD RECOGNITION

- UL : E103670
- CSA : LS-93237
- BSI : 6741
- VDE : VDE-Reg-Nr. 4945

Water absorption at pressure cooker

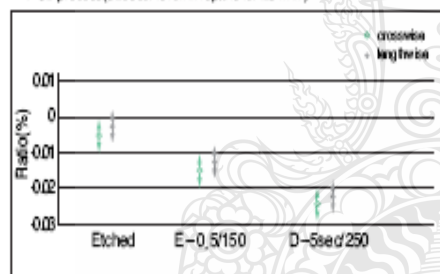


Insulation resistance at pressure cooker



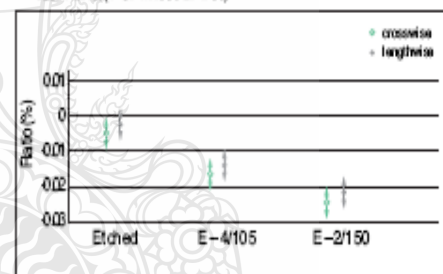
Dimensional stability

PCB process (size 360X310mm span 310X254mm)

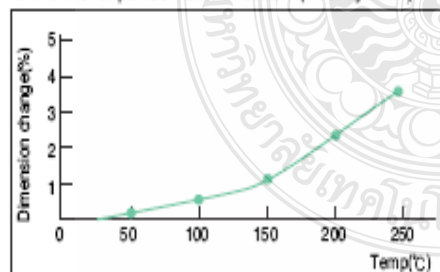


Dimensional stability

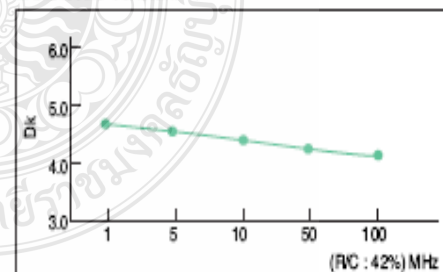
Test method (PC. TM650.2.4.39)



Thermal expansion of Z-direction (Test by TMA)



Dielectric constant



GENERAL PROPERTIES

			Designation	DS-7405
			ANSI Grade	FR-4
Test Item	Unit	Treatment Condition	Property Data	
			Standard Value	Guaranteed Value
Tg	°C	DSC	135	above 130
		TMA	135	above 130
		DMA	165	above 160
CTE x-axis y-axis z-axis	ppm/°C	Ambient to Tg	18	less than 20
			13	less than 15
			55	less than 60
Flammability	-	UL-94	V-0	V-0
Insulation Resistance	ohm	C-96/20/65	1 x 10 ⁹ - 1 x 10 ⁹	above 5 x 10 ⁹
		C-96/20/65+D-2/100	1 x 10 ⁹ - 1 x 10 ⁹	above 1 x 10 ⁹
Volume Resistivity	ohm-cm	C-96/20/65	1 x 10 ¹⁴ - 1 x 10 ¹⁴	above 1 x 10 ¹⁴
		C-96/20/65+C-96/40/90	5 x 10 ¹⁴ - 5 x 10 ¹⁴	above 5 x 10 ¹⁴
Surface Resistance	ohm	C-96/20/65	5 x 10 ¹⁰ - 5 x 10 ¹⁰	above 1 x 10 ¹⁰
		C-96/20/65+C-96/40/90	1 x 10 ¹⁰ - 1 x 10 ¹⁰	above 1 x 10 ¹⁰
Arc Resistance	min.seconds		110	above 60
Dielectric Constant (1 MHz)	-	C-96/20/65	4.5 - 4.8	less than 5.5
		C-96/20/65+D-48/50	4.6 - 5.2	less than 5.8
Dissipation Factor (1 MHz)	-	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(260°C)	sec	A	above 180	above 120
Peel Strength	Cu. foil 1oz (0.035mm)	kgf/cm	A	1.8 - 2.2
Flexural Strength	kgf/mm ²	A	40 - 50	above 32.7
Water Absorption	%	E-24/50+D-24/23	0.10 - 0.15	less than 0.25

Specimen Thickness : 1.6mm

PURCHASING INFORMATION

- Copper foil : 0.5 oz/ft²(0.018 mm), 1 oz/ft²(0.035 mm), 2 oz/ft²(0.070 mm) available.
- Thickness : 0.4mm to 3.2mm

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

* Other sheet size and thickness could be available upon request.

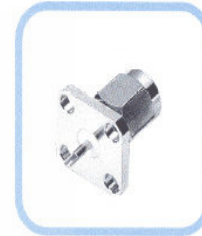
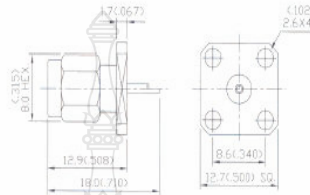


Panel Mount Receptacle (Solder Pot Contact)

Square Flange Plug Receptacle (Solder Pot Contact)

PART NO:19-12-1-TGG

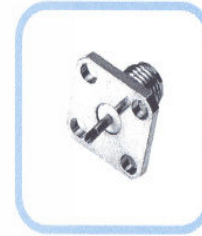
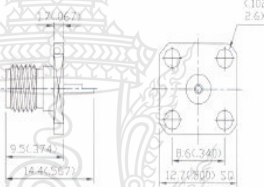
- Finish: gold plated center contact & body (see Notes 1)
- Insulation: Teflon



Square Flange Jack Receptacle (Solder Pot Contact)

PART NO:19-13-1-TGG

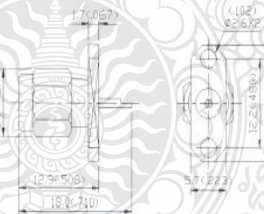
- Finish: gold plated center contact & body (see Notes 1)
- Insulation: Teflon



2 Hole Flange Plug Receptacle (Solder Pot Contact)

PART NO:19-14-1-TGG

- Finish: gold plated center contact & body (see Notes 1)
- Insulation: Teflon

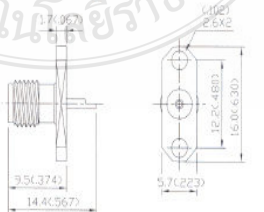


2 Hole Flange Jack Receptacle (Solder Pot Contact)

PART NO:19-17-2-TGG

- Finish: gold plated center contact & body (see Notes 1)
- Insulation: Teflon

4108050



Notes: 1. Nickel plated body available, change the part no. suffix from TGG to TGN ;
 Passivated for stainless steel body available, change the part no. suffix from TGG to TCG

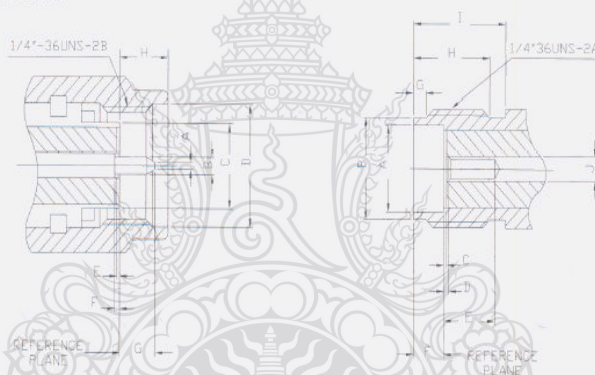
SMA

50 ohm 0-18 GHz

SMA connectors are semi-precision, subminiature devices that provide repeatable electrical performance from DC to 12.4 GHz with flexible cable. Semi-rigid cabling extends the frequency range of the device to 18 GHz. These devices offer broadband performance with low reflection and constant 50 ohm impedance. These properties, along with minimum attenuation and low VSWR have made the SMA extremely popular in the microwave community.

The SMA design has been broadened to accommodate many interconnect requirements and is available in pressure crimp, clamp and solder terminal attachments. SMA design parameters have incorporated the considerations of balancing cost, size, weight and performance to yield the best value in your microwave system. Among typical applications are components, such as dividers, mixers, amplifiers, trimmers and attenuators. SMA connectors are also used to provide interconnections from printed circuit board striplines to coaxial cable.

Interface Dimensions:



PLUG

Letter	Millimeters (Inches)	
	Minimum	Maximum
A	0.00 (.000)	0.38 (.015)
B	0.90 (.0355)	0.94 (.037)
C	—	4.59 (.1808)
D	6.35 (.250)	—
E	0.00 (.000)	0.18 (.007)
F	0.00 (.000)	0.25 (.010)
G	—	2.54 (.100)
H	—	3.43 (.135)

JACK

Letter	Millimeters (Inches)	
	Minimum	Maximum
A	4.60 (.1810)	4.67 (.1837)
B	5.28 (.208)	5.49 (.216)
C	0.00 (.000)	0.18 (.007)
D	0.00 (.000)	0.25 (.010)
E	2.92 (.115)	—
F	1.88 (.074)	1.98 (.078)
G	0.38 (.015)	1.14 (.045)
H	4.32 (.170)	—
I	5.54 (.218)	—
J	1.24 (.049)	1.30 (.051)



EMC Antennas
**Double-Ridged
 Waveguide Horn**
 Model 3117

Features:

- **Maintains Single Lobe Radiation Pattern Over Frequency**
- **Ultra Broadband: 1 GHz - 18 GHz**
- **300 W Power Input Capacity**
- **Optimized High Frequency Gain**
- **Low VSWR**



ETS-Lindgren's Model 3117 Double-Ridged Waveguide Horn
 PATENT PENDING

The Model 3117 Double-Ridged Waveguide is a the latest addition to a family of double-ridged waveguide horn antennas for microwave and EMC measurement from ETS-Lindgren. Users of this antenna benefit from uniform illumination of target surfaces and accurate gain measurement. In addition, the Model 3117 exhibits high gain and low VSWR across its frequency band, accepting moderate power input of 300 watts.

The electrical characteristics of this antenna were designed and modeled using powerful workstations running electromagnetic simulation software. Equally important, experienced RF

engineers worked with our manufacturing team to produce a practical and affordable realization of the modeling process. On completion, the antenna was tested and calibrated at our A2LA accredited lab facility. All production units are individually calibrated at this facility.

Features Single Lobe Radiation Pattern

The Model 3117 maintains a single main lobe pattern in the direction of the horn axis over its frequency range. This characteristic is essential for even distribution of electromagnetic energy on a target surface, and accurate

measurement of gain and vector information. The Model 3117's unique design suppresses the propagation of high order modes. The result is an antenna with a well-defined single lobe radiation pattern that outperforms other antennas in its class.

Ultra Broadband

The Model 3117 sweeps from 1 GHz to 18 GHz without stopping for band breaks, making it ideal for automated testing. It has the widest usable frequency range of any antenna in its class, with no performance degradation from high order modes.



EMC Antennas Double-Ridged Waveguide Horn

Model 3117

Power Input

The Model 3117 uses a Type N connector and accepts up to 300 watts of continuing input power with up to 400 watts of peak power. The antenna's high gain and low VSWR over its operating frequency translates into efficient amplifier use and high field strengths.

Uniform Gain, Low VSWR

The Model 3117 has a more uniform gain and antenna factor because of the better behavior of its radiation pattern. Since the pattern is stable over frequency, the gain and the AF also remain stable. Similar antennas of this class exhibit large variations of the gain and the AF as the frequency increases.

Construction

An antenna constructed to maximize structural integrity is better able to maintain its electrical properties. The benefits are better measurement repeatability, lower uncertainty values and longer calibration validity. The Model 3117 is constructed to be a rugged antenna that thrives in an environment of constant use. This antenna includes both tripod and rear "stinger" mounts. The stinger mount permits on-axis rotation/polarization.

Standard Configuration

- Antenna Assembly
- Mounting bracket drilled to accept ETS-Lindgren or other tripod mounts with 1/4 in x 20 threads
- Rear "stinger" for use with on-axis mount positioners
- Individually calibrated at 1 m per SAE ARP 958 at our A2LA accredited lab. 3 m calibration per ANSI C63.5 available at additional cost. Actual antenna factors and a signed Certificate of Calibration Conformance included with manual

Options

- Antenna Mast
- Antenna Tripod

Applications

FCC-15	FCC-18	IEC/CISPR/EN	SAE J1112	SAE J551	MIL-STD-461E	MIL-STD 286	MACSIM
RE	RE	RE, RI	RE, RI	RE, RI	RE, RI	TX, RX	RE

Electrical Specifications

MODEL	FREQUENCY RANGE	VSWR RATIO (AVG)	MAXIMUM CONTINUOUS POWER	PEAK POWER	IMPEDANCE (NOMINAL)	CONNECTORS
3117	1 GHz - 18 GHz	3.5:1 max <2:1 above 1.5 GHz	300 W	400 W	50 Ω	Type N

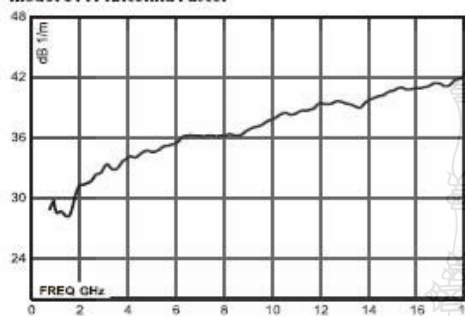
Physical Specifications

MODEL	WIDTH	DEPTH	HEIGHT	WEIGHT
3117	17.1 cm 6.0 in	17.3 cm + 10.1 cm mount 6.8 in + 4.0 in mount	15.5 cm 6.1 in	1.13 kg 2.5 lb

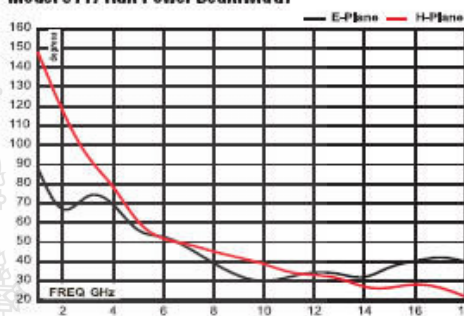


EMC Antennas
Double-Ridged Waveguide Horn
 Model 3117

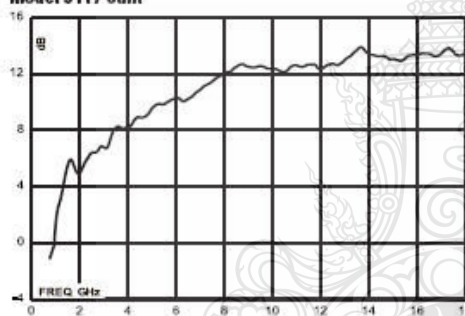
Model 3117 Antenna Factor



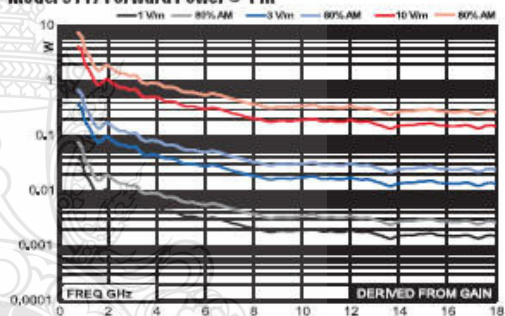
Model 3117 Half Power Beamwidth



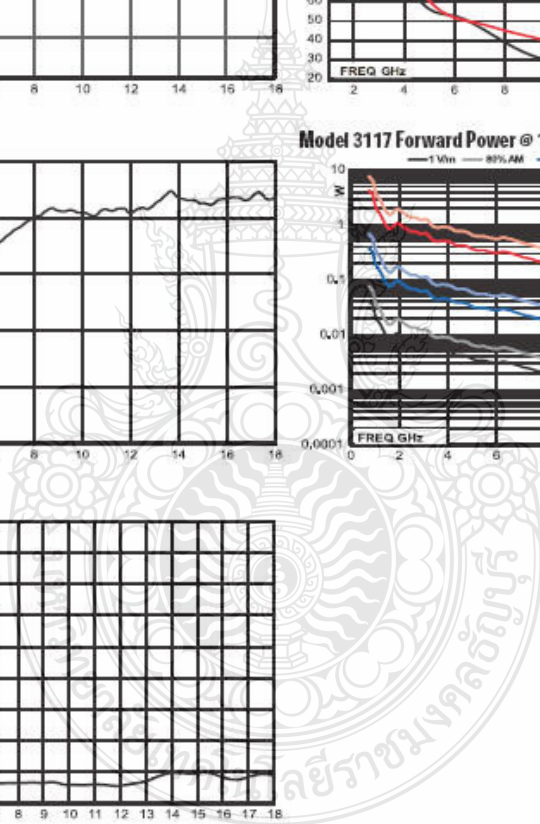
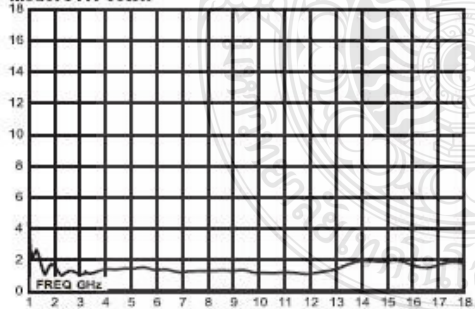
Model 3117 Gain

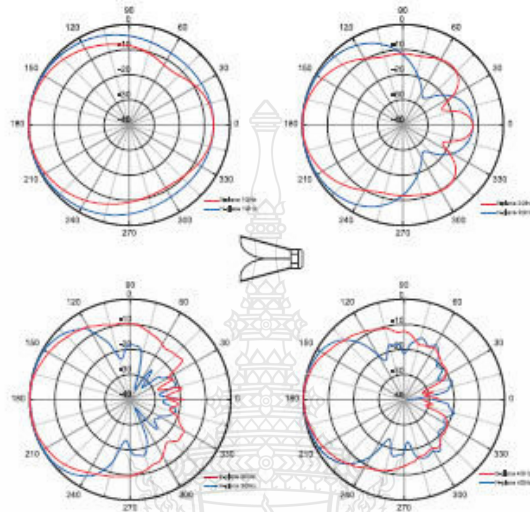
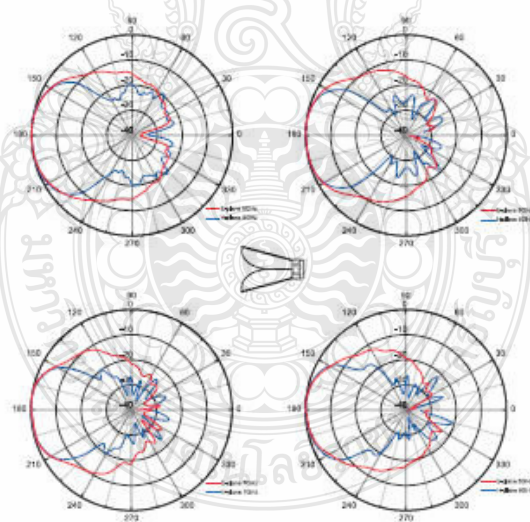


Model 3117 Forward Power @ 1 m

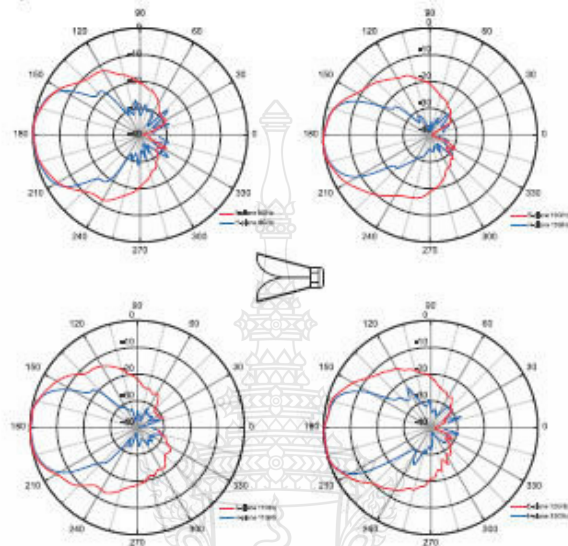


Model 3117 VSWR

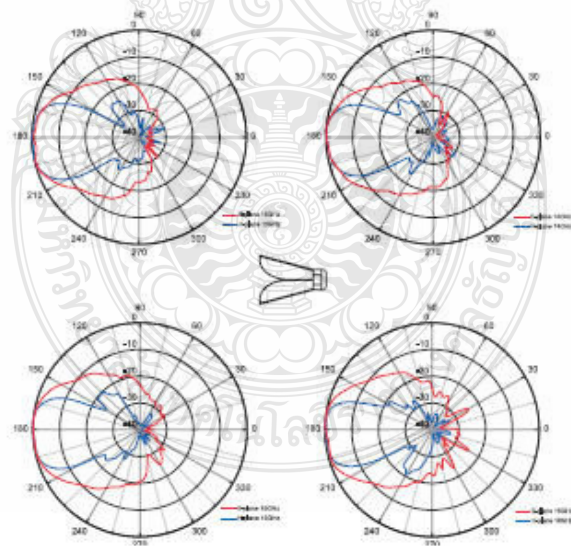


Model 3117 (1 GHz - 4 GHz)**Model 3117 (5 GHz - 8 GHz)**

Model 3117 (9 GHz - 12 GHz)



Model 3117 (13 GHz - 16 GHz)





ภาคผนวก ค
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] กิตติศักดิ์ ทองดา, วิโรจน์ พิราจนนชัย, ไพฑูรย์ รักเหลือ. “สายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉากที่มีการแผ่พลังงานสองทิศทาง, ”การประชุมวิชาการงานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ (ECTI-CARD 2012), คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, ประเทศไทย, 21-22 มิถุนายน 2555, หน้า 220-225.
- [2] Kittisak Thongda, Virote Pirajanchai, and Paitoon Raklua. “A Novel Thin-Film Slot Antenna for Wireless Sensor Network IEEE 802.11b/g, ”**Thailand – Japan Micro Wave 2012 (TJMW2012)**, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, August 7 – 10, 2012, page 173-174.





ECTI
Association

ECTI-CARD 2012
การประชุมวิชาการ งานวิจัย และพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 4

21 - 22 มิถุนายน 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปทุมธานี

Committee

Steering Committee

รศ.ดร.ประยุทธ์ อัครเอกคณาภิน (KMUTNB)

รศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย (KMUTT)

รศ.ดร.วุฒิพงษ์ อารีกุล (KU)

General Chair

ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ (KMITL)

ศ.ดร.ประกาศ จงสถิตวัฒนา (CU)

General Co-Chairs

รศ.ดร.นำยุทธ สงค์ธนาพิทักษ์ (RMUTT)

ผศ.ดร.สมหมาย ศิวสอาด (RMUTT)

Technical Program Chair

รศ.ดร.ชาลี เจริญลาภนพรัตน์ (SIIT)

Technical Program Co-Chair

ผศ.จินตนา นาคะสุวรรณ (RMUTT)

Local Arrangement Chair

ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ (RMUTT)

Publication Chair

ผศ.ชนะพงศ์ นพวงศ์ ณ อุทยาน (RMUTT)

Publicity Chair

มาโนช ประชา (RMUTT)

Finance Chairs

วิโรจน์ พิราจเนนชัย (RMUTT)

รุจิพรรณ สัมปโนนา (BU)

ไพริน แก้วกวย (ECTI)

Exhibition Chair

สมชาย เบียนสูงเนิน (RMUTT)

Workshop Chair

ดร.ฉัตรชัย สุภพิทักษ์สกุล (RMUTT)

General Secretary

ดร.วิสิทธิ์ ล้อธรรมจักร (RMUTT)

General Assistant Secretary

ผศ.วัฒนา พันธุ์ลำเจียก (RMUTT)

Technical Program Committee

ผศ.ดร.ปิยะ โควินท์ทวิวัฒน์ (NPRU)

ดร.จิรนุช เสี่ยงมศักดิ์ (KKU)

รศ.ดร.อภิรักษ์ ธนชยานนท์ (KMITL)

ดร.กสิณ วิเชียรชม (KMITL)

ดร.นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ (RMUTI)

ดร.ก้องภพ อยู่เย็น (NASA)

รศ.ดร.กนก เจนจิระพงศ์เวช (KMITL)

ดร.วันวิสา ชัชวงษ์ (KMITL)

รศ.ดร.ธำรงรัตน์ อมรรักษา (KMUTT)

รศ.ดร.จันทนา จันทราพรชัย (SU)

ดร.สุภาภรณ์ เกียรติสิน (MU)

ดร.กิติวัฒน์ นิ่มเกิดผล (RMUTT)

รศ.ณรงค์ บวบทอง (TU)

ดร.วินัย วิชัยพาณิชย์ (RMUTT)

ผศ.ดร.พงษ์ศักดิ์ กীরติวินทกร (KMUTNB)

ดร.กมล เขมะรังษี (NECTEC)

ดร.มัทธิกา อ่องแดง (DPU)

ดร.คามพ์เมษ บุญยะเวศ (TU)

รศ.ดร.ชวลิต เบญจางคประเสริฐ (KMITL)

ดร.ณัฐพงศ์ ศรีรัตน์ (Skyworks)

ผศ.ดร.ดวงอาทิตย์ ศรีมูล (RSU)

รศ.เวก วิเวก (KMUTNB)

ดร.สมมาตร แสงเงิน (MUT)

ดร.ศราวุธ ชัยมูล (KMUTNB)

ผศ.ดร.เบญจมาศ พนมรัตน์รักษ์ (KMUTT)

ดร.อิทธิเสก นิลกำแหง (SIIT)

รศ.ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย (CU)

ดร.พีระยศ แสนโกจักษ์ (KU)

ผศ.ดร.จิรวัดน์ คชสาร (RMUTT)

ผศ.ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ (RMUTT)

ผศ.ดร.ณัฐภพ นุ่มปีดิวัน (BU)

ผศ.ดร.ธวัชชัย เตชะxonันต์ (CU)

ผศ.ดร.ปานจิต ดำรงกุลกำจร (KU)

ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง (RMUTT)

ผศ.ดร.สมชัย หิรัญวโรดม (RMUTT)

ดร.สุรินทร์ แห่งมงาม (RMUTT)

รศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ (KMITL)

ดร.วรรณรีย์ วงศ์ไครรัตน์ (RMUTI)

ผศ.ดร.สมเกียรติ ฤกษ์วรัญญู (KMITL)

ผศ.ดร.ยุพิน สรรพคุณ (KMUTNB)

ดร.สมเกียรติ อุดมทรราชกุล (RMUTSB)

ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร (RMUTT)

Mr.Lin M.M. Myint (SIU)

ดร.วิสิทธิ์ ลือธรรมจักร (RMUTT)

สารบัญ

Game and Living

1075	Virtual treasures collection game on Android for marketing and tourism support	180
1034	ระบบสแกนวัตถุสามมิติด้วยอุปกรณ์คินค	184
1014	ยุทธการพระพิรุณ: เกมฝึกสมองบนระบบปฏิบัติการไอโอเอส	190
1039	การประยุกต์ใช้สัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลายเพื่อควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าระยะไกล	196
1041	โป๊งแปะ : เกมค้นหาแบบหลายผู้เล่น	201

Antenna design

1079	สายอากาศไมโครสตริปแบบไม่ล้าฟิล์มช่องสี่เหลี่ยมมุมโค้งสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์	208
1074	สายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากสำหรับความถี่แถบกว้าง	214
1069	สายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉากที่มีการแผ่พลังงานสองทิศทาง	220
1065	An Improved Method for DOA Estimation	226
1016	สายอากาศต้นท่อนต่ำอัตราขยาย 10.5 dBi ที่แผ่คลื่นแบบชี้ทิศทางในย่าน 1.7 – 2.7 GHz	231

Healthcare Technology

1029	ซอฟต์แวร์จำลองสถานการณ์การให้บริการของโรงพยาบาลทางจิตเวชโดยใช้ทฤษฎีแถวคอย	238
1047	สเตปโตสโคปไร้สาย	244
1049	ระบบวัดอัตราการเต้นของหัวใจผ่านเครือข่ายโทรศัพท์มือถือ	250
1003	โปรแกรมบนโทรศัพท์เคลื่อนที่อัจฉริยะ สำหรับกิจวัตรประจำวันของผู้สูงอายุ	256

Software and Algorithm

1048	การปรับเพิ่มส่วนประสานกับผู้ใช้สำหรับโปรแกรมมูเดิ้ล	264
1050	ระบบรายงานการเข้าใช้เครือข่ายคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้	270
1038	การตรวจจับ Malware สำหรับระบบตรวจสอบสถานะเว็บไซต์	276
1092	เทคนิคการปรับปรุงอัลกอริทึมอาณานิคมมดเพื่อการหา ระยะทางการเจาะผ่านวงจรที่เหมาะสมที่สุด	282

สายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉากที่มีการแผ่พลังงานสองทิศทาง

กิตติศักดิ์ ทองคา วิโรจน์ พิจาณนชัย ไพฑูรย์ รักเหลือ

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

E-mail : Kittis5@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการศึกษาและการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉาก ที่มีการแผ่พลังงานสองทิศทาง โดยจะทำการวิเคราะห์ด้วยการจำลองแบบโครงสร้างของสายอากาศด้วยโปรแกรม IE3D เพื่อประยุกต์การใช้งานกับเครือข่ายตรวจจับแบบไร้สายความถี่ที่ 2.45GHz ซึ่งจะครอบคลุมมาตรฐานของ IEEE802.11b/g (2.4-2.4835GHz) โดยได้การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ -33dB อัตราการขยายของสายอากาศ 3.28dBi และขนาดของแบนด์วิดท์ขาเข้า (2.395-2.515GHz) 180MHz ซึ่งผลจากการทดลองของสายอากาศใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยการจำลองโครงสร้างสายอากาศ

Abstract

This paper presents analysis angle microstrip slot antenna. The pattern antenna bidirectional of simulation procedure is confirmed by comparing IE3D software. An antenna for wireless sensor network (WSN) at frequency 2.45GHz Comprehensive standard IEEE 802.11b/g (2.4-2.4835GHz) of the return losses -33dB gain antenna 3.28dBi and Impedance bandwidth (2.395-2.515GHz) 180MHz. The results of the experiment microstrip antenna nearby results of the analysis.

คำสำคัญ

สายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉาก, การแผ่พลังงานสองทิศทาง, เครือข่ายตรวจจับแบบไร้สาย

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้วิวัฒนาการทางเทคโนโลยีในด้านการสื่อสารได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมีความเติบโตอย่างรวดเร็วทางด้านสายอากาศก็เช่นเดียวกัน สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna) [1] นับได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้อย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ คือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีรูปร่างไม่ซับซ้อน ออกแบบ และสร้างได้ง่าย ราคาไม่สูงมากนัก สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานกับ

ระบบของการสื่อสารไร้สายต่างๆ ได้ดี เช่น ระบบเครือข่ายตรวจจับแบบไร้สาย (wireless sensor network) [2]

แนวคิดของการสร้างสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉาก (Microstrip Slot Antenna) [3]-[5] ที่มีการแผ่พลังงานสองทิศทาง (Bidirectional) นั้น เกิดจากต้องการที่จะทำการพัฒนาสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉากที่มีเพียงการแผ่พลังงานรอบทิศทาง (Omnidirectional) ให้สามารถที่จะมีการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) แบบอื่นๆ ได้บ้าง เช่น การแผ่พลังงานสองทิศทาง เพื่อที่จะใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์การสร้างสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉากที่มีการแผ่พลังงานรูปแบบอื่นๆ ต่อไป

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉากที่มีการแผ่พลังงานสองทิศทาง เพื่อที่จะนำประยุกต์ใช้งานกับเครือข่ายตรวจจับแบบไร้สาย (wireless sensor network) โดยให้ได้ตามมาตรฐานของ IEEE802.11b/g (2.4-2.4835 GHz) ที่ความถี่ (Frequency) 2.45GHz โดยได้การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ -33dB อัตราการขยายของสายอากาศ 3.28dBi และแบนด์วิดท์ขาเข้า (Impedance Bandwidth) เท่ากับ 180MHz (2.395-2.515GHz) โดยในส่วนของ การวิเคราะห์การจำลองแบบโครงสร้างสายอากาศด้วยโปรแกรม IE3D

2. การออกแบบและสร้างสายอากาศ

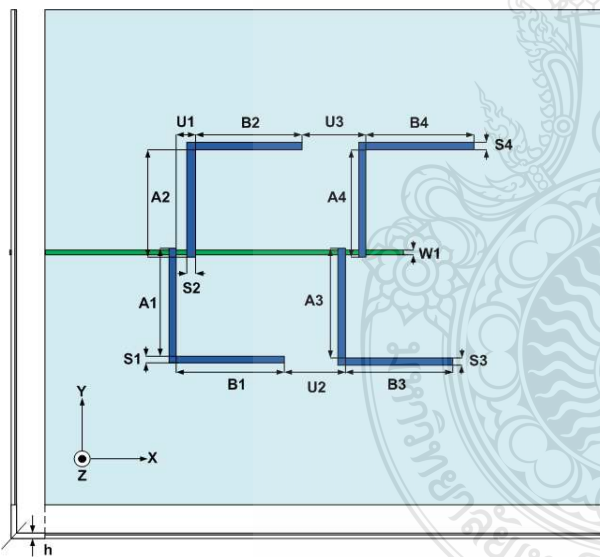
สายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉากนั้น ออกแบบมาจากแผ่นทองแดง (Copperplate) นำมาประกอบเข้ากันกับตัวแผ่นโพลีเอสเตอร์ฟิล์ม (Polyester film) โดยที่พื้นผิวของแผ่นโพลีเอสเตอร์ฟิล์มมีค่าไดอิเล็กทริก (Dielectric) คงที่ $\epsilon_r = 3.2$ และมีความหนา $h = 0.4$ มิลลิเมตร โดยที่ช่องเปิดส่วน A และ B นั้นมีขนาดเท่ากันทุกประการ และทำการกำหนดความถี่ต่างๆ ที่ต้องการใช้งานโดยคำนวณจากสมการที่ (1)

$$f_r = \frac{0.5c}{(A+B)\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (1)$$

และ

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-1/2} \quad (2)$$

โดยที่ค่า ϵ_{eff} นั้นเป็นค่าประสิทธิผล (Effective Value) ของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกได้จากสมการที่ (2) เมื่อคำนวณออกมาแล้วจะเห็นได้ว่าจะได้ความยาวของสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉาก ($A+B$) ที่เราต้องการได้ โดยทำการปรับแต่งตัว A , B และ U ซึ่งจะมีผลกระทบต่อถึงคุณลักษณะของสายอากาศ (Parameter) ต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉาก สายอากาศจะถูกสร้างเหมือนในรูปที่ 1 โดยประกอบด้วยมุมแนวนอน (A) และมุมแนวตั้ง (B) โดยที่ A และ B มีขนาดเท่ากันทุกประการ ส่วน $A=B=0.25 \lambda_g$ และความยาวของช่องสายอากาศจะเป็น $A+B=0.5 \lambda_g$ เท่ากับ 25.8 มิลลิเมตร โดยที่ให้ความยาวของสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉาก $A1=A2=A3=A4$ และ $B1=B2=B3=B4$



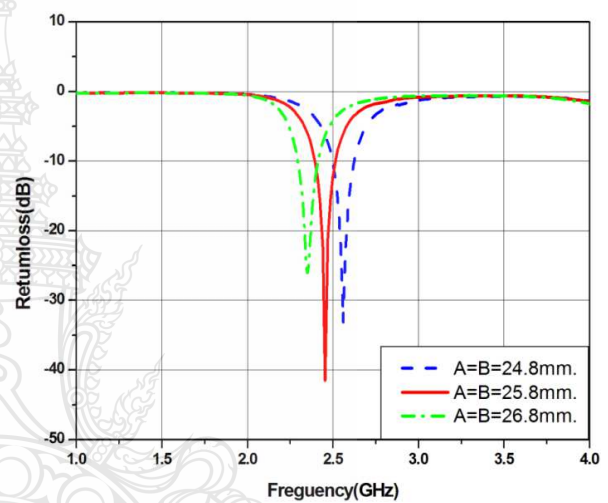
รูปที่ 1 สายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉาก

ส่วนความกว้างของช่องสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉาก ($S1$) นั้นเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร โดยที่ $S1=S2=S3=S4$ จะมีขนาดเท่ากัน เพื่อที่จะได้รองรับกับระบบการสื่อสารทั่วไปที่มีค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ (Impedance) ที่ 50 โอห์ม ในที่นี้สายนำสัญญาณไมโครสตริปจะมีความกว้าง ($W1$) = 1 มิลลิเมตร ในส่วนของระยะห่างระหว่างช่องเปิดมุมฉากช่องที่ 1 กับช่อง

เปิดมุมฉากช่องที่ 2 ($U1$) = 3 มิลลิเมตร ระยะห่างจากช่องเปิดมุมฉากช่องที่ 1 กับช่องเปิดมุมฉากช่องที่ 3 ($U2$) = 13 มิลลิเมตร และระยะห่างจากช่องเปิดมุมฉากช่องที่ 2 กับช่องเปิดมุมฉากช่องที่ 4 ($U3$) = 13 มิลลิเมตร

3. ผลการวิเคราะห์และผลการทดลอง

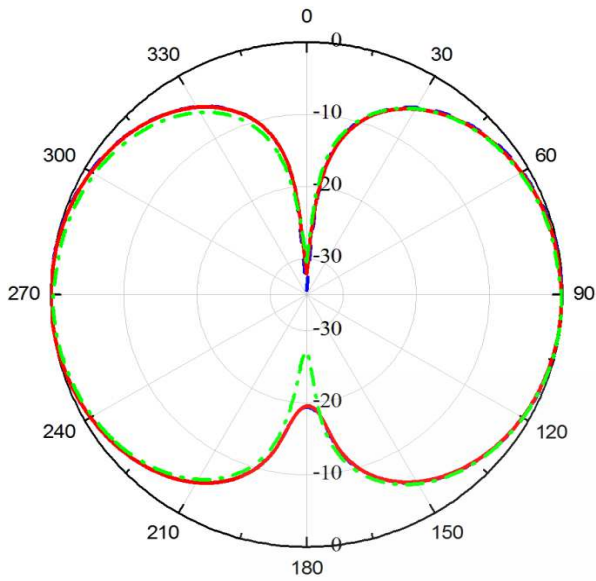
เมื่อทำการวิเคราะห์การจำลองแบบโครงสร้างสายอากาศจะเห็นว่า ระยะของสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉาก ($A=B$) จะมีผลกระทบอย่างมากกับการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) และแบนด์วิดท์ ดังในรูปที่ 2 ทำให้การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับและแบนด์วิดท์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม



รูปที่ 2 เปรียบเทียบการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่

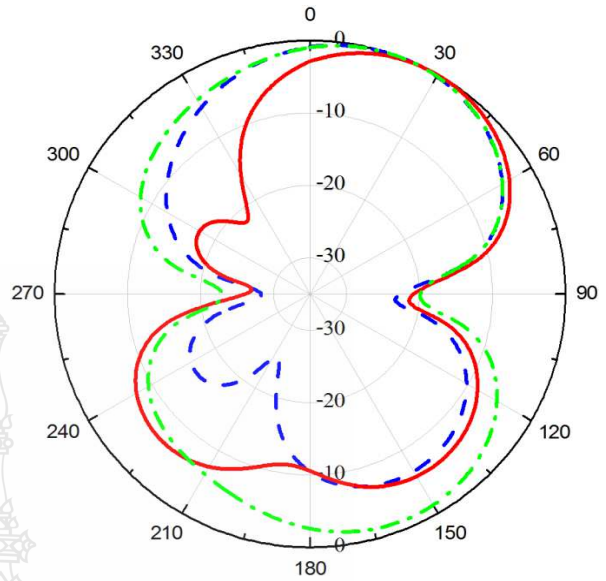
ความยาวช่องเปิดต่าง ๆ กัน

แบบรูปการแผ่พลังงานก็มีผลกระทบจากระยะของสายอากาศที่ต่างกัน ทำการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ xz และระนาบ yz ดังในรูปที่ 3 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ xz ที่ระยะทางต่างๆกันที่ความถี่ 2.45GHz (ก) แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวตั้ง (E_θ) และ (ข) แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาไรซ์แบบแนวนอน (E_ϕ) ทั้งสองระนาบ

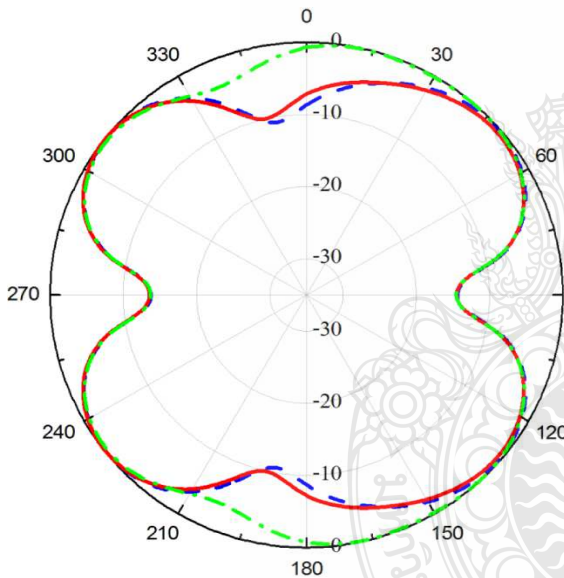


(ก) แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาริซ์แบบแนวตั้ง (E_{θ})

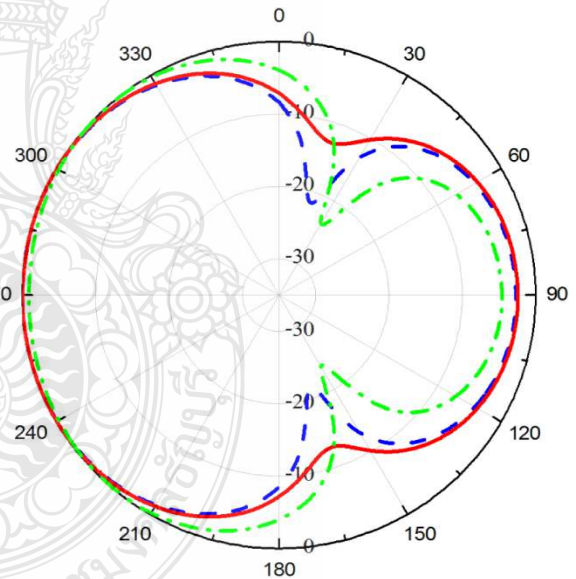
แผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาริซ์แบบแนวอน (E_{ϕ}) ทั้งสองระนาบเช่นกัน



(ข) แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาริซ์แบบแนวตั้ง (E_{θ})



(ค) แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาริซ์แบบแนวอน (E_{ϕ})



(ง) แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาริซ์แบบแนวอน (E_{ϕ})

- - - A=B=24.8mm.
 — A=B=25.8mm.
 - - - A=B=26.8mm.

- - - A=B=24.8mm.
 — A=B=25.8mm.
 - - - A=B=26.8mm.

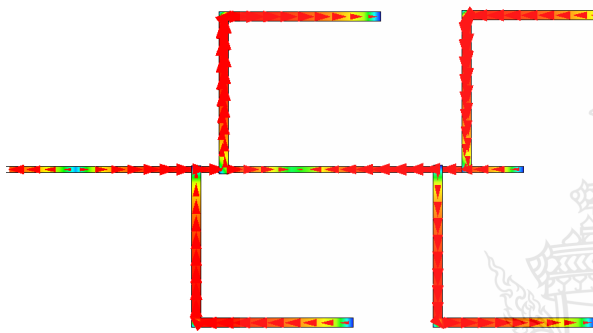
รูปที่ 3 แบบรูปการแผ่พลังงานในระยะไกลระนาบ xz ที่ระยะทางต่างๆกัน

รูปที่ 4 แบบรูปการแผ่พลังงานในระยะไกลระนาบ yz ที่ระยะทางต่างๆกัน

ส่วนในรูปที่ 4 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในระนาบ yz ที่ระยะทางต่างๆกันที่ความถี่ 2.45GHz (ก) แบบรูปแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่โพลาริซ์แบบแนวตั้ง (E_{θ}) และ (ข) แบบรูปการ

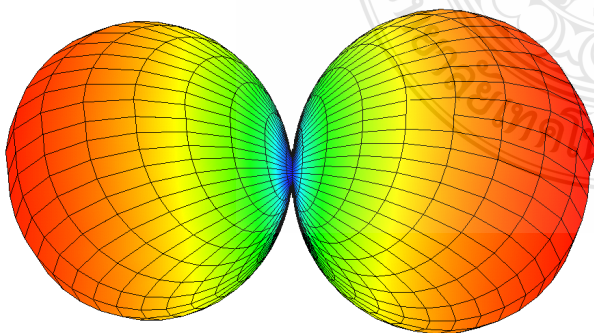
จากการจำลองความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอยู่ภายในสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉาก ที่มีการแผ่พลังงาน

สองทิศทางที่ความถี่ 2.45GHz จะพบว่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะไหลจากสายอากาศในช่องที่ 1 ($A1+B1$) ไปเสริมกำลังกับความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายอากาศในช่องที่ 3 ($A3+B3$) และในขณะเดียวกันนั่นเอง ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไหลมาจากตัวสายอากาศในช่องที่ 2 ($A2+B2$) ก็จะไปเสริมกำลังกับความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายอากาศในช่องที่ 4 ($A4+B4$) อีกด้วยเป็นเช่นนี้ดังในรูปที่ 5 จะสังเกตได้ว่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉาก จะมีมากที่สุดในช่วงบริเวณมุมฉากของสายอากาศและจะมีน้อยที่สุดในช่วงบริเวณปลายทั้งสองด้านของมุมฉากของสายอากาศ



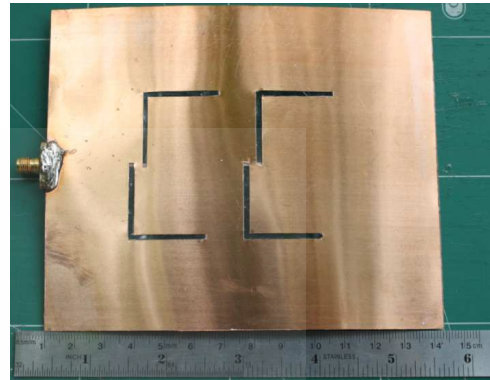
รูปที่ 5 จำลองความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉากที่ความถี่ 2.45GHz

ส่วนของการจำลองรูปแบบการแผ่พลังงานแบบสามมิติของสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉากที่มีการแผ่พลังงานสองทิศทางที่ความถี่ 2.45GHz จะเห็นได้ว่าจะเป็นรูปแบบการแผ่พลังงานสองทิศทาง โดยทั้งคู่จะมีขนาดใกล้เคียงกัน ดังในรูปที่ 6



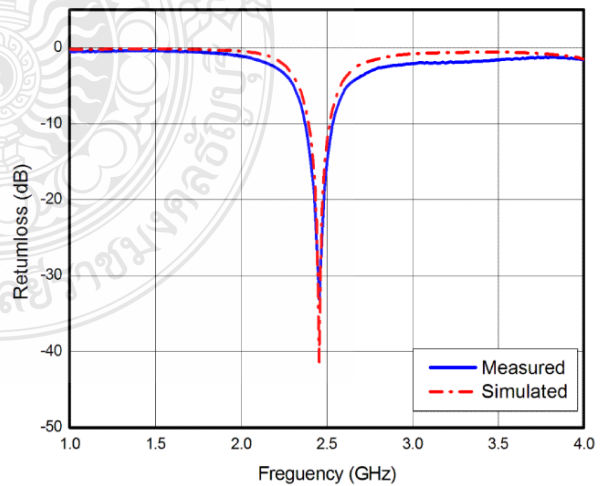
รูปที่ 6 จำลองแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสามมิติของสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉากที่ความถี่ 2.45GHz

ภาพถ่ายของสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉากที่มีการแผ่พลังงานสองทิศทาง ที่ความถี่ 2.45GHz ที่ใช้ในการวัดจริง โดยจะมีขนาดพื้นที่ทั้งหมดคือ ความกว้างคูณความยาวคูณความสูง เท่ากับ 112 x 134 x 0.4 มิลลิเมตร ดังในรูปที่ 7



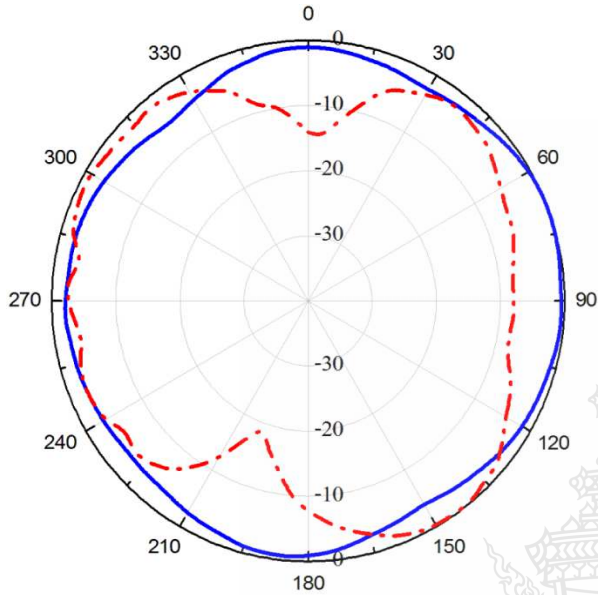
รูปที่ 7 สายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉาก

เมื่อทำการเปรียบเทียบการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ระหว่างการวัดจริงกับการวิเคราะห์การจำลองแบบโครงสร้างสายอากาศด้วยโปรแกรม IE3D ของสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉากที่มีการแผ่พลังงานสองทิศทาง ที่ความถี่ 2.45GHz นั้น ผลการวิเคราะห์ได้ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ -41dB แบนด์วิดท์ (2.4-2.5GHz) 100MHz ส่วนผลการทดลองวัดจริงนั้นได้ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับอยู่ที่ -33dB แบนด์วิดท์ (2.395-2.515GHz) 180MHz ดังที่เห็นในรูปที่ 8

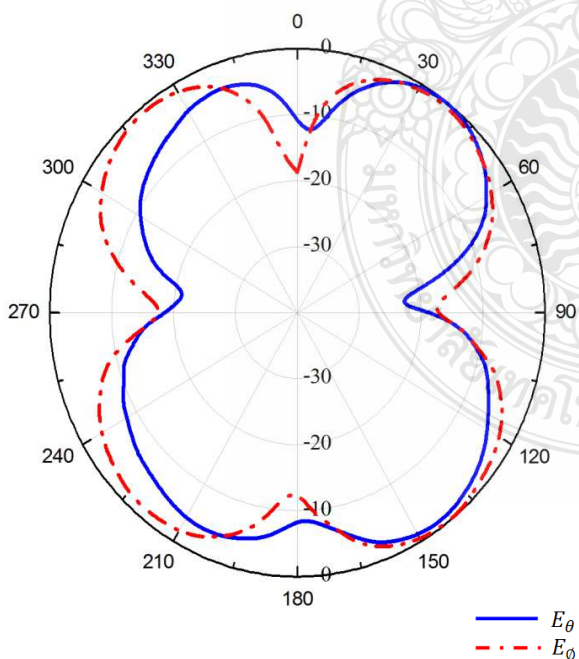


รูปที่ 8 เปรียบเทียบอัตราการสูญเสียระหว่างการวัดจริงกับการจำลอง

ข้อมูลการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานใน
ระยะโคจรระนาบ xz ของสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉากที่
ความถี่ 2.45GHz อยู่ในรูปที่ 9 ส่วนแบบรูปการแผ่พลังงานใน
ระยะโคจรระนาบ yz ของสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉากที่
ความถี่ 2.45 GHz อยู่ในรูปที่ 10 เช่นกัน

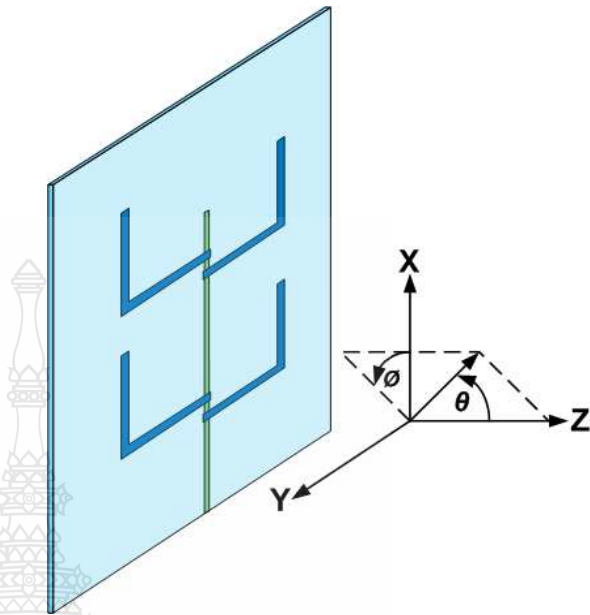


รูปที่ 9 แบบรูปการแผ่พลังงานในระยะโคจรระนาบ xz ที่
ความถี่ 2.45GHz



รูปที่ 10 แบบรูปการแผ่พลังงานในระยะโคจรระนาบ yz ที่
ความถี่ 2.45GHz

การจัดวางตำแหน่งของสายอากาศช่องเปิดแบบมุม
ฉากที่มีการแผ่พลังงานสองทิศทาง ที่ความถี่ 2.45GHz ดังใน
รูปที่ 11



รูปที่ 11 พิกัดเชิงขั้วของสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉาก

ตารางคุณลักษณะของสายอากาศของสายอากาศช่องเปิดแบบ
มุมฉากที่มีการแผ่พลังงานสองทิศทางที่ความถี่ 2.45GHz โดย
เปรียบเทียบระหว่างการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ
อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง อัตราการขยายของสายอากาศ
อิมพีแดนซ์ขาเข้า และแบนด์วิดท์จากผลที่ได้จากการจำลองกับ
ผลที่ได้จากการวัดจริงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบผลระหว่างการจำลองกับการวัดจริง

คุณลักษณะของ สายอากาศ	ผลที่ได้ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz	
	การจำลอง	การวัดจริง
การสูญเสียเนื่องจากการ ย้อนกลับ (Return Loss)	-41 dB	-33 dB
อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR)	1.11 : 1	1.20 : 1
อัตราการขยายของ สายอากาศ (Gain)	4.47dBi	3.28dBi
อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance: Z_{in})	$51.09-j0.34 \Omega$	$53.74+j7.22 \Omega$
แบนด์วิดท์ (Impedance Bandwidth)	2.4–2.5 GHz (100 MHz)	2.395-2.515GHz (180 MHz)

4. สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษาสายอากาศเปิดแบบมุมฉากนั้นสามารถทำการกำหนดความถี่ที่ 2.45GHz รูปแบบการแผ่พลังงานสองทิศทางได้ ส่วนสายอากาศประกอบด้วยตัวสายอากาศและตัวช่องเปิดแบบมุมฉากเพื่อให้กำเนิดความถี่ออกมา ส่วนความยาวของช่องเปิดมุมฉากนั้น $(A+B)$ ซึ่งมีขนาดเท่ากับที่ $A=B = 0.25 \lambda_g$ และ $A+B = 0.5 \lambda_g$ โดย A , B และ U จะสามารถปรับแต่งเพื่อให้ได้ความถี่ที่ต้องการ และเสริมกำลังอัตราการขยายของสายอากาศให้สูงขึ้นอีกด้วย แล้วสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉาก ได้การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ -33dB อัตราการขยายของสายอากาศที่ 3.28dBi และแบนด์วิดท์ 180MHz (2.395-2.515GHz)

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Natarajamani, S K Behera and S K Patra, "Compact Slot Antenna For UWB Application and Band," *International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks*, 2010
- [2] A. G. Alhaddad, R. A. Abd-Alhameed, D. Zhou, C. H. See, E. A. Elkhazmi, and P. S. Excell, "Compact Dual-band Balanced Handset Antenna for WLAN Application," PIRS Online, 2010.
- [3] A. Pomsathit, C. Benjangkprasert, N. Anantrasirichai, Paitoon Raklua and T. Wakabayashi, "Design of Right Angle Slot Antenna for Dual Band and Dual Polarized with Wireless Network," *International Conference on Control, Automation and Systems 2010*, Gyeonggi-do, Korea, Oct. 27-30, 2010 in KINTEX.
- [4] T. Jangjing, P. Raklua, W.Chanwattanapng and S. Chaimool, "A Nove Dual Band and Dual Pattern Right Angle Slot Antenna" *Thailand-Japan MicroWave (TJMW2011) King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang Thailand August 10-12, 2011*
- [5] M Tangitjetsada , B Kumkhet , P Raklua , and C Benjangkprasert, "A Novel Thin-Film UWB Antennas with Single or Dual Band-Notched Performances" *International Conference on Intelligent System Application on Power Systems (ISAP2011)*, Lotte Hotel Jeju, Jeju, Korea, December 25-28, 2011

Thailand – Japan MicroWave 2012



TJMW 2012

August 7 – 10, 2012
Chulalongkorn University,
Bangkok, Thailand



THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

**Proceedings of
Thailand – Japan MicroWave 2012
(TJMW2012)**



Organized and cosponsored by
IEICE Electronics Society,
IEICE Bangkok Section,
IEICE Technical Committee on Microwaves
and
Department of Electrical Engineering, Chulalongkorn University

Technically cosponsored by
IEEE MTT/AP/ED Thailand Chapter,
ECTI Association,
IEEE MTT-S Japan Chapter,
IEEE MTT-S Kansai Chapter,
IEEE MTT-S Nagoya Chapter,
IEICE Technical Committee on Antennas and Propagation,
IEICE Technical Committee on Integrated Circuits and Devices
and
The 3rd International Conference on Integrated Circuits and Devices
in Vietnam (ICDV2012)

Organizing Committee

General Chairs	Tuptim Angkaew, Chulalongkorn Univ. Kiyomichi Araki, Tokyo Inst. of Tech.
Vice Chairs	Monai Krairiksh, KMITL Vech Vivek, KMUTNB Hiroschi Okazaki, NTT DOCOMO
Secretaries	Chuwong Phongcharoenpanich, KMITL Pasu Kaewplung, Chulalongkorn Univ. Tadashi Kawai, Univ. of Hyogo Hiroyuki Kayano, Toshiba
Technical Program Chairs	Prayoot Akkaraekthalin, KMUTNB Kenjiro Nishikawa, Kagoshima Univ.
Technical Program Vice Chairs	Danai Torrungrueng, Asian Univ. Titipong Lertwiriya-prapa, KMUTNB Minoru Fujishima, Hiroshima Univ. Kunio Sakakibara, Nagoya Inst. of Tech.
Technical Program Members	Kenji Itoh, Kanazawa Inst. of Tech. Hiromitsu Uchida, Mitsubishi Electric Masahiro Kitagawa, Osaka Univ. Tomohiko Mitani, Kyoto Univ. Mayumi Matsunaga, Ehime Univ. Makoto Taromaru, Fukuoka Univ. Yasushi Horii, Kansai Univ. Takashi Shimizu, Utsunomiya Univ. Masataka Ohira, Saitama Univ.
Publication Chairs	Akkarat Boonpoonga, KMUTNB Jukkrit Tagapanij, Mahanakorn Univ. Shoichi Narahashi, NTT DOCOMO
Publication Vice Chair	Kei Satoh, NTT DOCOMO
Publicity Chair	Sarawut Chaimool, KMUTNB Atsushi Sanada, Yamaguchi Univ.
Publicity Vice Chair	Naoki Shinohara, Kyoto Univ.
Financial Chairs	Duang-rudee Worasuchee, Chulalongkorn Univ. Kensuke Okubo, Okayama Pref. Univ.
Financial Vice Chair	Takana Kaho, NTT
Local Arrangement Chairs	Nisachon Tangsangiumvisai, Chulalongkorn Univ. Chaiyachet Saivichit, Chulalongkorn Univ. Supatana Auethavekiat, Chulalongkorn Univ.
Local Arrangement Members	Tadashi Kawai, Univ. of Hyogo Kosuke Katayama, Hiroshima Univ.

Student Encouragement Chairs Denchai Worasawate, Kasetsart Univ.
Chaodit Asawakul, Chulalongkorn Univ.
Shigeo Kawasaki, JAXA

Student Encouragement

Vice Chair

Futoshi Kuroki, Kure Nat. Coll. of Tech.

Advisory Members

Ikuo Awai

Osamu Hashimoto

Kazuhiko Honjo

Yasushi Itoh

Kazukiyo Joshin

Yoshio Kobayashi

Futoshi Kuroki

Koji Mizuno



WE5: Young Researchers Session

Wednesday, August 8th, 2012, 14:20-15:40

Co-Chairs: Wanwisa Thaiwirot, KMUTNB

Kunio Sakakibara, Nagoya Institute of Technology

- WE5-1 A Printed Pentagonal Slot Antenna for WLAN/WiMAX Applications**
Pichet Moeikham, Chatree Mahatthanajatuphat, and Prayoot Akkaraekthalin
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
- WE5-2 A Novel Pulse for UWB Localization System**
Nakarin Ratchapo and Wilaiporn Lee
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
- WE5-3 Bandwidth and Gain Amelioration of a Circularly Polarized Microstrip Fed L-Slot Antenna by Using Metamaterial Reflective Surface**
Chawalit Rakluea, Sarawuth Chaimool, and Prayoot Akkaraekthalin
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
- WE5-4 A Novel Thin-Film Slot Antenna for Wireless Sensor Network IEEE 802.11b/g**
Kittisak Thongda, Virote Pirajnanchai, and Paitoon Rakluea
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
- WE5-5 Simplified Local SAR Measurement Method Using Broadband Phantom Composed of Solid Material**
Keita Ochiyama#, Naobumi Michishita#, Yoshihide Yamada#, Hiroyuki Arai*, and Toshiyasu Tanaka##
National Defense Academy, * Yokohama National University, ## Microwave Factory Co., Ltd.
- WE5-6 Absorption Characteristics of Thin Wave Absorber Composed of Mushroom Structures**
Junichi Shinohara#, Naobumi Michishita#, Yoshihide Yamada#, and Hideki Hada*
National Defense Academy, * Fujitsu Limited
- WE5-7 A Study on Wider Bandwidth of J-Shaped Folded Monopole Antenna**
Hiroki Kobayashi#, Nguyen Tuan Hung#, Hisashi Morishita#, and Yoshio Koyanagi*
National Defense Academy, * Panasonic Mobile Communications Co., Ltd
- WE5-8 Analysis and Design of a 4-Port TE/TM Mode and Frequency Splitter in Anisotropic Photonic Crystal Structure**
Piyanat Limchanyawong, Malinda Hongthong, and Tuptim Angkaew
Chulalongkorn University

A Novel Thin-film Slot Antenna for Wireless Sensor Network IEEE 802.11b/g

Kittisak THONGDA Virote PIRAJNANCHAI and Paitoon RAKLUEA

Department of Electronic and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pratumthani, 12110, Thailand

E-mail: Kittis5@hotmail.com

Abstract This paper presents a novel Thin-Film of microstrip slot antenna the radiation bidirectional pattern of simulation procedure is confirmed by comparing IE3D software. An antenna for wireless sensor network (WSN) at frequency 2.45GHz Comprehensive standard IEEE 802.11b/g (2.4-2.4835GHz) of the return losses -33dB for gain antenna 3.28 dBi and Impedance bandwidth (2.515-2.395GHz) 180MHz. The results of the experiment microstrip slot antenna nearby simulation of the analysis.

Keyword Thin-Film , microstrip slot antenna, bidirectional, wireless sensor network

1. INTRODUCTION

Today this evolution in communication technology developed to continued growth quickly the same antenna. Microstrip antenna [1] is a popular device used in the present since there great features are many as small are weight light the shapes are simple designed and built more easily at affordable. Can be applied in wireless LAN of communication systems are good as wireless sensor network (WSN) [2].

The concept of creating microstrip slot antenna [3]-[4] the radiation bidirectional pattern. The need to be developed microstrip slot antenna with only the in radiated omnidirectional pattern be able to have some form of other radiation pattern such as radiated bidirectional pattern. In order to be adopted in the analysis of microstrip slot antenna where the antenna radiation pattern to the other.

This paper presents analysis microstrip slot antenna the radiated bidirectional pattern. An antenna for wireless sensor network (WSN) that frequency 2.45GHz Comprehensive standard IEEE 802.11b/g (2.4-2.4835GHz) of the return losses -33dB for gain antenna 3.28dBi and Impedance bandwidth (2.395-2.515GHz) 180 MHz.

2. DESING AND CONSTRUCTION

Microstrip slot antenna the Mylar® Polyester Film substrate has a dielectric constant $\epsilon_r = 3.2$ and a thickness $h = 0.4$ mm. Where A and B are equal in the length of a Microstrip slot antenna ($A + B$) at adjustment of A , B , and U which effect to resonant frequency of antenna. Figure 1 shows the geometry of the proposed antenna which consists of a horizontal (A) and vertical (B) The lenth of slot A and $B = 0.25\lambda_g$ length of microstrip slot antenna $A+B = 0.5\lambda_g$ or 25.8 mm and a slot width is 1.5 mm. that same all slot. Then, a microstrip fed line is designed for impedance 50 ohm that width 1 mm. For a distance between another slot $U1$, $U2$, and $U3$, there are 3, 13, and 13 mm., respectively.

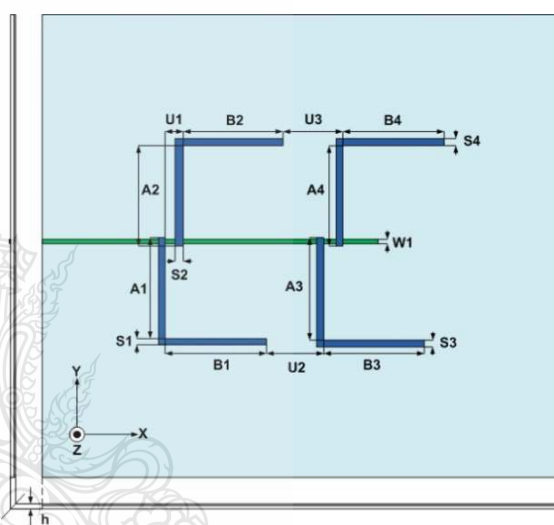


Fig.1. The proposed antenna geometry.

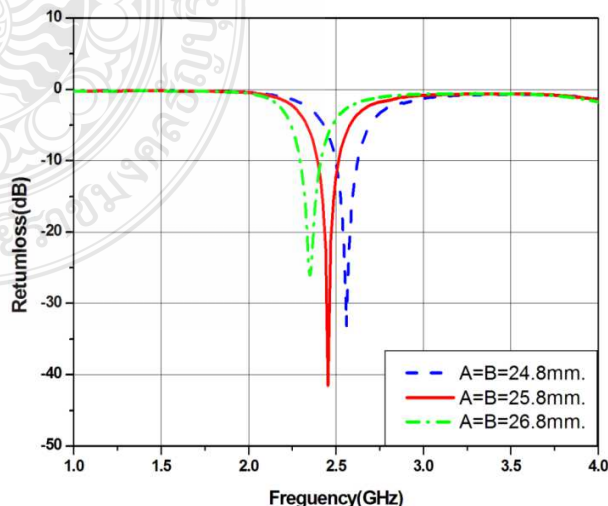


Fig.2. The simulated results of return loss when changes slot length.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 2 shows the effect of the various slot lengths on a return loss when change a length of slot A and slot B. the simulated results is clearly seen that the length of $A=B$ are mostly effect on the impedance matching of the antenna at a resonant frequency.

For the simulation result, it can be predicted responsible. When a slot length is changed 24.8 mm., 25.8 mm. ,and 26.8 mm., it affect on a resonant frequency of antenna that center frequency at 2.3 GHz, 2.45 GHz and 2.55 GHz, respectively. For the prototype antenna is fabricated slot length 25.8 mm. that resonant frequency of all slot at 2.45 GHz. The ground plane size ($W_g \times L_g$) is 112 mm. \times 134 mm. The measured results of the resonant frequency correlate well with the simulated results. The measured impedance bandwidths are (2.395- 2.515) 180MHz at a center frequency 2.45 GHz which a minimum S_{11} is -33 dB and -41 dB for simulation as shown in Fig.3. In addition, VSWR have about 1.11:1 in simulation and 1.20:1 for measurement results.

For Figure 4, a measured radiation patterns at frequency 2.45 GHz in x-z plane and y-z plane which confirm the measured radiation pattern result has bidirectional. Furthermore, a gain of the prototype antenna is 4.47 dBi and 3.28 dBi for simulated and measured results, respectively. An input impedance of the thin film slot antenna is about $53.4 + j7.22$ ohm

4. CONCLUSION

The prototype microstrip slot antenna at frequency 2.45 GHz. We can observe that proposed antenna has bidirectional radiation pattern. The thin-film wideband antenna are successfully designed, simulated, and measured. It is has been designed suitable for applications in the wireless LAN of communication systems are good as wireless sensor network (WSN). Because the device has a thickness of 0.4mm and its size is not too much more than a conventional antenna. The measurement results of the prototype slot antenna has the return loss-33dB at 2.45 GHz, antenna gain is 3.28 dBi and impedance bandwidth (2.395-2.45GHz) 180MHz.

5. REFERENCES

[1] A. Pomsathit, C. Benjangkprasert, N. Anantrasirichai, P. Raklua and T. Wakabayashi, "Design of Right Angle Slot Antenna for Dual Band and Dual Polarized with Wireless Network," International Conference on Control, Automation and Systems 2010, Gyeonggi-do, Korea, Oct. 27-30, 2010.

[2] T. Jangjing, P. Raklua, W.Chanwattanapng and S. Chaimool, "A Novel Dual Band and Dual Pattern Right Angle Slot Antenna" Thailand-Japan MicroWave (TJMW2011), King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang, Thailand August 10-12, 2011

[3] M. Tangitjetsada, B. Kumkhet , P. Raklua , and C. Benjangkprasert, "A Novel Thin-Film UWB Antennas with Single or Dual Band-Notched Performances.," International Symposium of Antenna and Propagation (ISAP2011).,Lotte Hotel Jeju, Korea, 2011.

[4] P. Thongyoy, P. Raklua ,and T. Nopavong na Ayudthaya, "Compact Thin-Film UWB Antenna with Round Corner Rectangular Slot and Partial Circular Patch.," ECTI-CON, Hua Hin, Prachuap Khiri Khan, Thailand, May 16-18, 2012

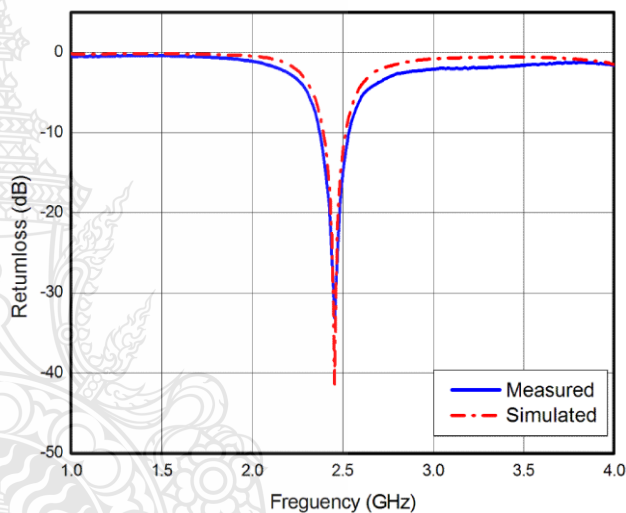


Fig.3. Simulated and measured results of Return loss

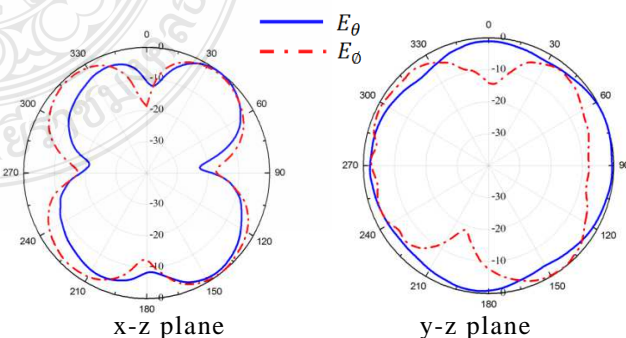


Fig.4. Radiation pattern measurement at 2.45 GHz

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายกิตติศักดิ์ ทองดา
วัน เดือน ปีเกิด	8 เมษายน 2526
ที่อยู่	26 หมู่ 11 ต.แก้อใหญ่ อ.เมือง จ.สุรินทร์
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
พ.ศ. 2552	สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2547 - 2548	ดำรงตำแหน่งช่างเทคนิค บริษัท เวลด์ อิเล็กทริก (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2549 – ปัจจุบัน	ดำรงตำแหน่งช่างเทคนิค บริษัท ทรูคอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)

