

การเพิ่มประสิทธิภาพระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายผ่านความถี่วิทยุด้วยวิธีอิมพัลส์

เชาว์ ชนะดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

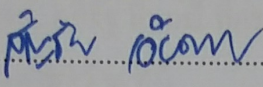
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ธันวาคม 2561

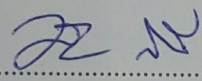
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

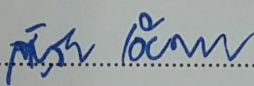
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ เชาวน์ ชนะดี ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

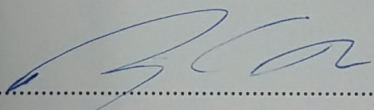
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

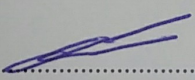
..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ดร. สัตย์ชัย เอียคปราบ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

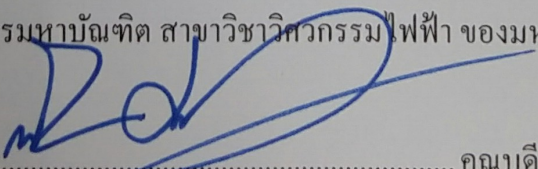
..... ประธาน
(ดร. อภิรัฐ ลิ่มมณี)

..... กรรมการ
(ดร. สัตย์ชัย เอียคปราบ)

..... กรรมการ
(ดร. ภาณุวัฒน์ ด้านกลาง)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาวิณี ศักดิ์สุนทรศิริ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณยศ คุรุกิจ โกศล)

วันที่ ๒๘ เดือน ธันวาคม พ.ศ. ๒๕๖๑

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก
ดร. สัตยชัย เอียดปราบ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ
ในการทำวิทยานิพนธ์นี้มาโดยตลอด ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์นี้
ดร. ภาณุวัฒน์ คำนกลาง และ ดร. อภิรัฐ ลิ้มมณี ที่กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ตลอดจน
คณาจารย์ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้
ผู้ดำเนินโครงการ ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่
ทำการทดลอง เครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินโครงการ

เชาว์ ชนะดี

56910511: สาขาวิชา: วิศวกรรมไฟฟ้า; วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า)

คำสำคัญ: ตัวนำแม่เหล็กเทียม/ ตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก/ วงจรเรียงกระแส/

การเก็บเกี่ยวพลังงาน

เขาว์ ณะดี: การเพิ่มประสิทธิภาพระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน ไร้สาย่านความถี่วิทยุด้วยวิธี

อภิวัดดู (EFFICIENCY IMPROVEMENT IN RF ENERGY HARVESTING SYSTEM BY USING METAMATERIAL) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: สัญชัย เอียดปราบ, ปร.ด. 91 หน้า. ปี พ.ศ. 2561.

วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพระบบเก็บเกี่ยวพลังงานคลื่นความถี่วิทยุด้วยโครงสร้างอภิวัดดูและสามารถนำกำลังไฟฟ้าที่ได้ไปเป็นแหล่งจ่ายพลังให้กับโหลดหรืออุปกรณ์ในระบบ Internet of thing (IoT) system ในโครงงานนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาและการออกแบบโครงสร้างของอภิวัดดูเพื่อใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน ไร้สายจากคลื่นความถี่วิทยุที่ 2.45 GHz (ISM band) สายอากาศแบบไมโครสตริปถูกนำมาใช้สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ สำหรับโครงสร้างอภิวัดดูที่ถูกนำมาใช้สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพในระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน ไร้สายมี 2 แบบ คือ 1) โครงสร้างอภิวัดดูแบบตัวนำแม่เหล็กเทียม (Artificial magnetic conductor: AMC) ซึ่งถูกออกแบบให้วางไว้ที่ด้านหลังของสายอากาศภาครับ เพื่อใช้ในการสะท้อนกลับในรูปแบบการเสริมเฟสทำให้ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น อัตราการขยายและประสิทธิภาพของสายอากาศเพิ่มขึ้น และ 2) โครงสร้างอภิวัดดูแบบตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก Multiple split-ring resonators (MSRR) ซึ่งเป็น โครงสร้างที่มีดัชนีการหักเหเป็นค่าลบ ถูกออกแบบให้วางไว้ด้านหน้าของสายอากาศภาครับ ซึ่งคุณลักษณะของ โครงสร้างนี้ช่วยลดการจางหายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับการออกแบบโครงสร้างอภิวัดดูทั้งสอง เราได้จำลองและวิเคราะห์คุณลักษณะ โดยใช้โปรแกรม CST Microwave studio จากนั้นได้ทำการทดลองด้วยการนำระบบที่มีและไม่มีโครงสร้างอภิวัดดูมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างอภิวัดดูสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพให้กับระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน ไร้สายได้ถึง 26.37%

56910511: MAJOR: ELECTRICAL ENGINEERING; M.Eng. (ELECTRICAL ENGINEERING)

KEYWORD: ARTIFICIAL MAGNETIC CONDUCTOR/ MULTIPLE SPLIT-RING RESONATORS/ RECTENNA/ ENERGY HARVESTING

CHAO CHANADEE: EFFICIENCY IMPROVEMENT IN RF ENERGY HARVESTING SYSTEM BY USING METAMATERIAL. ADVISORY COMMITTEE: SANCHAI EAIDPRAB, Ph.D. 91 P. 2018.

This thesis proposes an efficiency improvement in RF energy harvesting system by using metamaterials. This energy harvesting system is applied to store energy in a small battery for supply a load or sensor device in the IoT system. The study and design of the metamaterials is performed to applied with antennas for improvement of efficiency of energy harvesting system at 2.45 GHz (ISM band), there are two types of metamaterial in this work, 1) Artificial magnetic conductor (AMC) with the in-phase reflection property for increment radiation intensity, gain and efficiency of the antenna. It is installed behind the receiver antenna in this work. 2) Multiple split-ring resonators (MSRR), it has negative refraction index property. The MSRR is useful to reduce the evanescence of the electromagnetic wave. The suitable placement of MSRR is in front of the receiver antenna. The both of metamaterials are simulated and analyzed by using the CST Microwave studio. In the measurement, the comparison between the case of the antenna with and without metamaterials is performed for 2.45 GHz energy harvesting system. From the measurement results, it is found that the efficiency of the energy harvesting system can be improved by using the metamaterials up to 26.37%

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
แผนการดำเนินงาน.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย.....	4
การเก็บเกี่ยวพลังงาน.....	9
พื้นฐานสายอากาศ.....	11
ไมโครสตริป.....	22
วงจรเรียงกระแส.....	28
สมการของฟรีส.....	28
อภิวัด.....	32
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
3 หลักการและแนวทางการออกแบบ.....	45
4 ผลการวิจัย.....	75
ผลการทดสอบสายอากาศไมโครสตริปและการเปรียบเทียบ S-Parameter.....	75
ผลการทดสอบสายอากาศเรียงกระแส.....	77

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5	
สรุปและอภิปรายผล.....	89
สรุปผลการทดลอง.....	89
ข้อเสนอแนะ.....	90
บรรณานุกรม.....	91
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	93

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 เปรียบเทียบมาตรฐาน IEEE 802.11.....	5
2-2 เปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย ของสายอากาศแต่ละประเภท.....	14
2-3 รายละเอียดของการหาค่าความเก็บประจุรวมและค่าการเหนี่ยวนำรวม.....	44
3-1 ค่าตัวแปรของสายอากาศเริ่มต้นกับสายอากาศปรับปรุง.....	52
3-2 ค่าความกว้างแพทช์และค่าช่องว่างระหว่างแพทช์ของ โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม อาร์เรย์ที่เหมาะสม.....	59
4-1 อัตราการขยายที่เปลี่ยนแปลงของสายอากาศเรียงกระแสดที่มีและไม่มีโครงสร้าง อภิวัดคู่ที่ความสูงสับสเตรทแตกต่างกัน.....	82
4-2 ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าตามระยะทางต่าง ๆ.....	85

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 หลักการทำงานของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย.....	8
2-2 การเก็บเกี่ยวพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ.....	10
2-3 การแปลงสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า.....	11
2-4 ชนิดของสายอากาศ.....	13
2-5 องค์ประกอบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	15
2-6 ช่วงกว้างความถี่	19
2-7 การโพลาไรซ์.....	20
2-8 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป	22
2-9 โครงสร้างทางกายภาพของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป	25
2-10 เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบตามขวางของไมโครสตริปไลน์	25
2-11 ส่วนต่าง ๆ ของไมโครสตริป	26
2-12 วงจรเรียงกระแสแบบไมโครสตริป	28
2-13 ระบบการสื่อสารไร้สายอย่างง่าย	30
2-14 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนด้านเข้าและด้านออก ของเครื่องรับ	31
2-15 ประเภทของอภิวัดจากค่าความซึมซาบแม่เหล็กได้ (μ) และ สภาพยอมทางไฟฟ้า (ϵ)	33
2-16 โครงสร้างตัวกาทอนแบบวงแหวนแยก	34
2-17 เฟสการสะท้อนกลับของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม Artificial magnetic conductor (AMC) แบบ MUSHROOM-LIKE.....	37
2-18 โครงสร้างไดอะแกรมของตัวนำแม่เหล็กเทียม Artificial magnetic conductor (AMC) แบบ MUSHROOM-LIKE: (ก) โครงสร้าง และ (ข) ตัวแปรสำคัญ.....	38
2-19 วงจรสมมูล LC สำหรับโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม Artificial magnetic conductor (AMC) แบบ MUSHROOM-LIKE.....	38
2-20 สายอากาศกับโครงสร้าง EBG และ PSR	40
2-21 ผลจากการวัด (ก) ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้ (ข) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ของสายอากาศ.....	40
2-22 โครงสร้างไดอะแกรมของ EBG แบบ MUSHROOM-LIKE.....	41
2-23 การตั้งของสายอากาศโมโนโพลที่อยู่บนโครงสร้างอภิวัดที่เป็นตัวนำแม่เหล็กเทียม ...	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-24 ผลการจำลองระหว่างสายอากาศโมโนโพลที่มีและไม่มีโครงสร้างอภิวัดคู่ที่เป็นตัวนำแม่เหล็กเทียม (ก) การเปรียบเทียบอัตราการขยาย (ข) รูปแบบการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	42
2-25 ตัวอย่างการหาค่าความเก็บประจุรวม (ก) และค่าการเหนี่ยวนารวม (ข)	43
2-26 ความถี่เรโซแนนท์ของโครงสร้างอภิวัดคู่แบบตัวนำทอนแบบวงแหวนแยก (MSRR) ...	44
3-1 ภาพรวมของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายกับอภิวัดคู่.....	45
3-2 โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ.....	47
3-3 ส่วนต่าง ๆ ของไมโครสตริป	47
3-4 แบบจำลองสายอากาศไมโครสตริปเริ่มต้นโดยใช้โปรแกรม CST.....	50
3-5 รายละเอียดของสายอากาศไมโครสตริปเริ่มต้น	51
3-6 กราฟ S_{11} จากสายอากาศเริ่มต้นที่ความถี่ $f = 2.45$ GHz	51
3-7 3D Radiation pattern จากสายอากาศเริ่มต้นที่ความถี่ $f = 2.45$ GHz	51
3-8 Surface current จากสายอากาศเริ่มต้นที่ความถี่ $f = 2.45$ GHz	52
3-9 แบบจำลองสายอากาศไมโครสตริปปรับปรุงโดยใช้โปรแกรม CST	53
3-10 รายละเอียดของสายอากาศไมโครสตริปปรับปรุง.....	53
3-11 กราฟของ (S_{11}) จากสายอากาศปรับปรุงที่ความถี่ $f = 2.45$ GHz.....	53
3-12 3D Radiation pattern จากสายอากาศปรับปรุงที่ความถี่ $f = 2.45$ GHz.....	54
3-13 Surface current จากสายอากาศปรับปรุงที่ความถี่ $f = 2.45$ GHz.....	54
3-14 โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 ชนิด Mushroom-Like	55
3-15 แบบจำลองโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 เริ่มต้นโดยใช้โปรแกรม CST.....	57
3-16 รายละเอียดของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 เริ่มต้น	57
3-17 เฟสการสะท้อนเทียบกับความถี่จากโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 เริ่มต้นที่มีความสูงสับสเตรท $h = 1.6$ mm ของความถี่ $f = 2.45$ GHz.....	58
3-18 เฟสการสะท้อนเทียบกับความถี่จากโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 เริ่มต้นที่มีความสูงสับสเตรท $h = 1$ mm ของความถี่ $f = 2.45$ GHz.....	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-19 เฟสการสะท้อนเทียบกับความถี่จากโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 เริ่มต้น ที่มีความสูงสับสเตรท $h= 0.8$ mm ของความถี่ $f= 2.45$ GHz.....	58
3-20 เฟสการสะท้อนเทียบกับความถี่จากโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 ปรับปรุงที่มีความสูงสับสเตรท $h= 1.6$ mm ของความถี่ $f= 2.45$ GHz	60
3-21 เฟสการสะท้อนเทียบกับความถี่จากโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 ปรับปรุงที่มีความสูงสับสเตรท $h= 1$ mm ของความถี่ $f= 2.45$ GHz	60
3-22 เฟสการสะท้อนเทียบกับความถี่จากโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 ปรับปรุงที่มีความสูงสับสเตรท $h= 0.8$ mm ของความถี่ $f= 2.45$ GHz	60
3-23 โครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก Split Ring Resonator (SRR)	61
3-24 โครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบเดี่ยวโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio.....	64
3-25 รายละเอียดโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบเดี่ยว	64
3-26 จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่า S_{11} และ S_{21}	65
3-27 ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบเดี่ยว	66
3-28 โครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ 5x5 โดยใช้โปรแกรม CST Microwave studio	67
3-29 จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่า S_{11} และ S_{21} จากโครงสร้างตัวกำทอน แบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ 5x5 ที่มีความสูงสับสเตรท $h= 1.6$ mm.....	68
3-30 จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่า S_{11} และ S_{21} จากโครงสร้างตัวกำทอน แบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ 5x5 ที่มีความสูงสับสเตรท $h= 1$ mm.....	69
3-31 จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่า S_{11} และ S_{21} จากโครงสร้างตัวกำทอน แบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ 5x5 ที่มีความสูงสับสเตรท $h= 0.8$ mm.....	70
3-32 ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ 5x5 ที่มีความสูงสับสเตรท $h= 1.6$ mm.....	71
3-33 ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ 5x5 ที่มีความสูงสับสเตรท $h= 1$ mm	71

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-34 ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ 5x5 ที่ความสูงสับสเตรท $h=0.8$ mm	72
3-35 วงจรเรกติไฟเออร์	73
3-36 สายอากาศเรียงกระแสด.....	74
4-1 การออกแบบไมโครสตริป และ โครงสร้างอภิวัดคู่ที่ใช้ในการวิจัย.....	75
4-2 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้า Agilent PNA Network analyzer	76
4-3 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศไมโครสตริปที่แสดงจากโปรแกรม CST.....	76
4-4 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศไมโครสตริปที่แสดงจากการวัดจริงด้วยเครื่อง Network analyzer	77
4-5 รูปแบบการทดลองทั้ง 3 กรณี	78
4-6 อัตราการขยายของสายอากาศเรียงกระแสด.....	78
4-7 อัตราการขยายของสายอากาศเรียงกระแสดที่มีโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ที่ความสูงสับสเตรทเท่ากับ 1.6 mm.....	79
4-8 อัตราการขยายของสายอากาศเรียงกระแสดมีทั้งโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์และโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ ที่ความสูงสับสเตรทเท่ากับ 1.6 mm	79
4-9 อัตราการขยายของสายอากาศเรียงกระแสดที่มีโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ที่ความสูงสับสเตรทเท่ากับ 1 mm.....	80
4-10 อัตราการขยายของสายอากาศเรียงกระแสดมีทั้งโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์และโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ ที่ความสูงสับสเตรทเท่ากับ 1 mm.	80
4-11 อัตราการขยายของสายอากาศเรียงกระแสดที่มีโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ที่ความสูงสับสเตรทเท่ากับ 0.8 mm.....	81
4-12 อัตราการขยายของสายอากาศเรียงกระแสดมีทั้งโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์และโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ ที่ความสูงสับสเตรทเท่ากับ 0.8 mm	81

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-13 ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าด้วยไมโครมิเตอร์ของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายมีเพียงสายอากาศเรียงกระแสด	83
4-14 ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าด้วยไมโครมิเตอร์ของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายที่มีโครงสร้าง AMC วางไว้ด้านหลังของสายอากาศเรียงกระแสด	84
4-15 ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าด้วยไมโครมิเตอร์ของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายมีทั้งโครงสร้าง AMC และ MSRR โดยที่โครงสร้าง MSRR จะถูกนำมาวางไว้ด้านหน้าของสายอากาศเรียงกระแสด	84
4-16 กราฟเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศเรียงกระแสดมีทั้งโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์และโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์	86
4-17 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าของสายอากาศเรียงกระแสดมีทั้งโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์และโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์	86
4-18 กราฟการเปรียบเทียบระหว่างการชาร์จประจุไฟฟ้าของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไม่มีอภิวัดศุและระบบเก็บเกี่ยวพลังงานกับอภิวัดศุ AMC และ MSRR	87
4-19 กราฟการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานกับอภิวัดศุ AMC และ MSRR	88

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง (Internet of things หรือ IoT) เข้ามามีบทบาทกับชีวิตมนุษย์มากขึ้นและยังมีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว มีการนำระบบ IoT มาประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น บ้านเรือนอัจฉริยะ การดูแลสุขภาพเคลื่อนที่ และระบบอุตสาหกรรมอัตโนมัติ เป็นต้น การทำงานของระบบ IoT นี้จะมีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (WSN) เป็นส่วนสำคัญและทำหน้าที่ในการติดต่อระหว่างอุปกรณ์เซ็นเซอร์ต่าง ๆ ด้วยเหตุนี้ในระบบ IoT จึงประกอบไปด้วยอุปกรณ์เซ็นเซอร์จำนวนมากและทำให้เกิดข้อจำกัดในการใช้พลังงานของตัวเซ็นเซอร์โหนดซึ่ง โดยส่วนใหญ่แล้วนั้นตัวเซ็นเซอร์โหนดจะใช้แบตเตอรี่ในการจ่ายพลังงานยิ่งเมื่อมีการจัดวางในตำแหน่งที่มีความสูงมาก ๆ หรือในพื้นที่ที่เสี่ยงอันตราย ทำให้เกิดความยากในการเปลี่ยนหรือขนานแบตเตอรี่มาชาร์จใหม่ เราจึงได้ทำการศึกษาหลาย ๆ เทคนิค เพื่อที่จะนำมาแก้ปัญหาและสามารถติดตั้งตัวเซ็นเซอร์โหนดไว้ได้นานที่สุด โดยที่ไม่ต้องเก็บกลับมาชาร์จพลังงานใหม่ และหนึ่งในนั้นคือ การเก็บเกี่ยวพลังงานจากภายนอก (Energy harvesting) เพื่อนำกลับมาชาร์จพลังงานให้กับแบตเตอรี่

พลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวมาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มีอยู่หลายรูปแบบ ยกตัวอย่างเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar power), พลังงานความร้อน (Thermal energy) และพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ (RF Energy) เป็นต้น ซึ่งการเก็บเกี่ยวพลังงานแสงอาทิตย์ยังมีปัญหาหลายประการ เช่น กลางวัน/ กลางคืน สภาพอากาศ เป็นต้น ส่วนการเก็บเกี่ยวพลังงานความร้อนมาใช้นั้นยังทำได้น้อยมาก แต่ในด้านของพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุนั้น สามารถเก็บเกี่ยวได้อยู่รอบ ๆ ตัวเรา เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้ระบบการสื่อสารและส่งผ่านข้อมูลแบบไม่มีสายนำสัญญาณ หรือ (Wireless LAN: WLAN) ที่มีมาตรฐานเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11 ที่ความถี่วิทยุ 2.4 GHz และ 5 GHz หรือที่เรียกกันว่า เทคโนโลยี Wi-Fi ที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งในอาคารบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรม สถานศึกษา เป็นต้น โดยเราสามารถเก็บเกี่ยวคลื่นความถี่วิทยุที่อยู่รอบ ๆ ตัวเรา มาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ แต่เนื่องจากคลื่นความถี่วิทยุที่อยู่รอบตัวเรานั้นมีกำลังหรือความเข้มของสัญญาณที่ต่ำ ซึ่งปัญหาหลักของการเก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุนั้น คือ การลดทอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการจางหายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นหมายความว่าประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานนั้นจะแปรผกผันกับระยะทางการรับ ยิ่งระยะทางระหว่างตัว

กระจายสัญญาณ Wi-Fi กับอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุหรือที่เรียกกันว่า
สายอากาศเรียงกระแสด (Rectenna) มากขึ้นกำลังไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวได้นั้นก็จะน้อยมาก

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในด้านการเพิ่มประสิทธิภาพระบบเก็บเกี่ยว
พลังงานไร้สายจากคลื่นความถี่วิทยุ โดยได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของโครงสร้างวัสดุประดิษฐ์หรือ
อภิวัด (Metamaterial) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สาย ซึ่งโครงสร้าง
อภิวัดเหล่านี้มีข้อดี คือ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายให้สูงขึ้น เช่น มี
แบนด์วิธ (Bandwidth) ที่กว้างขึ้น และอัตราขยาย (Gain) ที่ดีขึ้น สำหรับโครงสร้างอภิวัดนั้น
ได้ถูกนิยามว่าเป็นวัสดุประดิษฐ์เชิงวิศวกรรม ซึ่งมีคุณสมบัติที่ไม่ปรากฏตามธรรมชาติ
โดยคุณสมบัติของวัสดุเหล่านี้มักเกิดจากการผนวกกันของวัสดุขนาดเล็ก ที่มีคุณสมบัติไม่
เหมือนกัน จากการศึกษาคุณสมบัติของโครงสร้างอภิวัด พบว่า มีโครงสร้างอภิวัด 2 ชนิดที่
สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สาย คือ 1) โครงสร้างอภิวัดแบบ
ตัวนำแม่เหล็กเทียม (Artificial magnetic conductor: AMC) และ 2) โครงสร้างอภิวัดแบบ
ตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก Multiple split-ring resonators (MSRR) โดยเป้าหมายของงานวิจัยนี้
คือ การนำโครงสร้างอภิวัด ทั้ง 2 ชนิดมาเพิ่มประสิทธิภาพระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายที่ความถี่
วิทยุ 2.45 GHz (ISM Band) ให้ดียิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษา ออกแบบและสร้างระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายจากคลื่นความถี่วิทยุ
ความถี่ 2.45 GHz
2. เพื่อออกแบบและสร้างอภิวัดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน
ไร้สายจากคลื่นวิทยุความถี่ 2.45 GHz

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. เรียนรู้เกี่ยวกับการทำงานและคุณสมบัติของโครงสร้างอภิวัด
2. เรียนรู้เกี่ยวกับการทำงานของสายอากาศเรียงกระแสด
3. สามารถออกแบบสายอากาศและโครงสร้างอภิวัดให้ทำงานในย่านความถี่ที่กำหนด
ได้
4. สามารถออกแบบโครงสร้างอภิวัดแบบตัวนำแม่เหล็กเทียม (Artificial magnetic
conductor: AMC) และ โครงสร้างอภิวัดแบบตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก Multiple split-ring
resonators (MSRR) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สาย

ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างสายอากาศไมโครสตริปที่ความถี่ 2.45 GHz สำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในความถี่วิทยุ 2.45 GHz และนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก
2. ออกแบบและสร้างอภิวัดสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายที่ความถี่ 2.45 GHz

แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน ประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาหลักการทํางานของสายอากาศเรียงกระแสดและทฤษฎีของสายอากาศ
2. ศึกษาหลักการทํางานของโครงสร้างอภิวัดและคุณสมบัติ
3. ออกแบบสายอากาศ
4. ออกแบบโครงสร้างอภิวัด
5. สร้างสายอากาศไมโครสตริป
6. สร้างโครงสร้างอภิวัด
7. สร้างวงจรเรียงกระแส
8. ทดสอบการทํางานของระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน
9. วิเคราะห์การทํางานและแก้ไขปรับปรุงข้อผิดพลาด

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทำวิทยานิพนธ์การออกแบบและสร้างอภิวัดสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายที่ความถี่ 2.45 GHz เพื่อให้ได้ความรู้ที่นำไปใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ จึงจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รูปแบบและเทคนิคต่าง ๆ ในการออกแบบและสร้างอภิวัด สายอากาศ และระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายที่ความถี่วิทยุ โดยการศึกษาค้นคว้าจากหนังสือและงานวิจัยต่าง ๆ สรุปสาระสำคัญ ดังนี้

1. ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย
2. การเก็บเกี่ยวพลังงาน
3. โครงสร้างพื้นฐานของการส่งพลังงานไร้สาย
4. พื้นฐานสายอากาศ
5. ไมโครสตริป
6. วงจรเรียงกระแส (Rectifier circuit)
7. สมการของฟรีส (Friis transmission equation)
8. อภิวัด
9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

ระบบเครือข่ายไร้สายหรือไวเลสแลน (Wireless LAN: WLAN) หมายถึง เทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารข้อมูลระหว่างเครื่องหรืออุปกรณ์คอมพิวเตอร์ตั้งแต่ 2 เครื่อง ให้สามารถสื่อสารกันได้ โดยผ่านคลื่นความถี่วิทยุเป็นช่องทางการสื่อสารข้อมูลแทนการใช้สายสัญญาณ การรับส่งข้อมูลผ่านอากาศช่วยลดการใช้สายสัญญาณและเวลาในการติดตั้งลง ทำให้ระบบเครือข่ายไร้สายได้รับความนิยมมากขึ้น ระบบเครือข่ายไร้สายใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศเพื่อรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ และระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์กระจายสัญญาณ (Access Point) โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้อาจเป็นคลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency) หรืออินฟราเรด (Infrared) ก็ได้ การสื่อสารผ่านเครือข่ายไร้สายมีมาตรฐาน IEEE 802.11 เป็นมาตรฐานกำหนดรูปแบบการสื่อสาร ซึ่งมาตรฐานแต่ละตัวจะบอกถึงความเร็วและคลื่นความถี่สัญญาณที่แตกต่างกันในการสื่อสารข้อมูล เช่น 802.11b และ 802.11g ที่ความเร็ว 11 Mbps และ 54 Mbps ตามลำดับ รายละเอียดเพิ่มเติมของ มาตรฐาน IEEE 802.11 มีดังนี้

1. มาตรฐาน IEEE 802.11

ในยุคเริ่มแรกนั้นให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ค่อนข้างต่ำ ทั้งไม่มีการรับรองคุณภาพของการให้บริการที่เรียกว่า QoS (Quality of service) ซึ่งมีความสำคัญในสภาพแวดล้อมที่มีแอปพลิเคชันหลากหลายประเภทให้ใช้งาน นอกจากนั้นกลไกในเรื่องรักษาความปลอดภัยที่นำมาใช้ก็ยังมีช่องโหว่จำนวนมาก IEEE จึงได้ตั้งคณะทำงานขึ้นมาหลายชุดด้วยกัน เพื่อทำการพัฒนาและปรับปรุงมาตรฐานให้มีศักยภาพเพิ่มสูงขึ้น

1.1 มาตรฐาน IEEE 802.11a เป็นมาตรฐานที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่เมื่อปี พ.ศ. 2542 โดยใช้เทคโนโลยี OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) เพื่อพัฒนาให้ผลิตภัณฑ์ไร้สายมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูงสุด 54 Mbps โดยใช้คลื่นวิทยุย่านความถี่ 5 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาตให้ใช้งานทั่วไปในประเทศไทย เนื่องจากสงวนไว้สำหรับกิจการทางด้านการทหาร ข้อเสียของผลิตภัณฑ์มาตรฐาน IEEE 802.11a คือ มีรบกวนการใช้งานในระยะสั้นและมีราคาแพง ดังนั้นผลิตภัณฑ์ไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11a จึงได้รับความนิยมน้อย

1.2 มาตรฐาน IEEE 802.11b เป็นมาตรฐานที่ถูกตีพิมพ์และถูกเผยแพร่ออกมาพร้อมกับมาตรฐาน IEEE 802.11a เมื่อปี พ.ศ. 2542 ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีและได้รับความนิยมในการใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด ผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบมาให้รองรับมาตรฐาน IEEE 802.11b ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า CCK (Complimentary code keying) ร่วมกันกับเทคโนโลยี DSSS (Direct sequence spread spectrum) เพื่อให้สามารถรับส่งข้อมูลได้ด้วยอัตราความเร็วสูงสุดที่ 11 Mbps โดยใช้คลื่นสัญญาณวิทยุย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่อนุญาตให้ใช้งานในแบบสาธารณะทางด้านวิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรม และการแพทย์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ใช้ความถี่ย่านนี้มีหลายชนิด ทั้งผลิตภัณฑ์ที่รองรับเทคโนโลยี Bluetooth โทรศัพท์ไร้สายและเดาโมโครเวฟ จึงทำให้การใช้งานนั้นมีปัญหาในเรื่องของสัญญาณรบกวนของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ข้อดีของมาตรฐาน IEEE 802.11b คือ สนับสนุนการใช้งานเป็นบริเวณกว้างกว่ามาตรฐาน IEEE 802.11a ผลิตภัณฑ์มาตรฐาน IEEE 802.11b เป็นที่รู้จักในเครื่องหมายการค้า Wi-Fi ซึ่งถูกกำหนดขึ้นโดย WECA (Wireless ethernet compatibility alliance) โดยผลิตภัณฑ์ที่รับเครื่องหมาย Wi-Fi ได้ผ่านการตรวจสอบและรับรองว่าเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE 802.11b ซึ่งสามารถใช้งานร่วมกับผลิตภัณฑ์ของผู้ผลิตรายอื่น ๆ ได้

1.3 มาตรฐาน IEEE 802.11g เป็นมาตรฐานที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันและได้เข้ามาทดแทน

ผลิตภัณฑ์ที่รองรับมาตรฐาน IEEE 802.11b เนื่องจากสนับสนุนอัตราความเร็วของการรับส่งข้อมูลในระดับ 54 Mbps โดยใช้เทคโนโลยี OFDM บนคลื่นสัญญาณวิทยุย่านความถี่ 2.4 GHz และให้รัศมีการทำงานที่มากกว่า IEEE 802.11a พร้อมความสามารถใช้งานร่วมกับมาตรฐาน IEEE 802.11b ได้

1.4 มาตรฐาน IEEE 802.11n เป็นมาตรฐานที่สามารถทำงานบนคลื่นความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz ได้ รองรับความเร็วตั้งแต่ 300–450 Mbps โดยมีสัญญาณตั้งแต่ 2–4 เสา บนตัวอุปกรณ์กระจายสัญญาณไร้สายและหากผู้ใช้ต้องการใช้งานที่ความเร็วสูงสุด เครื่องคอมพิวเตอร์พกพาหรืออุปกรณ์เครื่องที่รองรับมาตรฐาน IEEE 802.11n ด้วยเช่นกัน มาตรฐาน 802.11n สามารถทำงานร่วมกับมาตรฐาน 802.11b, g ได้ โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพลดลงเหมือนมาตรฐาน 802.11g เมื่อมีอุปกรณ์ 802.11b เข้ามาใช้งานร่วมกัน

1.5 มาตรฐาน IEEE 802.11ac เป็นมาตรฐานใหม่ของระบบเครือข่ายไร้สาย ที่คาดว่า จะมาแทนที่มาตรฐาน IEEE 802.11n ในอนาคต โดยการใช้การโมเลกุลสัญญาณแบบใหม่ ปรับช่องสัญญาณให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและรองรับการส่งข้อมูลพร้อมกันถึง 8 ชุด ส่งผลให้มาตรฐาน IEEE802.11ac สามารถทำความเร็วสูงสุดตามทฤษฎีได้ที่ประมาณ 6.93 Gbps แต่ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถรับส่งข้อมูลพร้อมกันได้เพียง 3 ชุด และความเร็วสูงสุดประมาณ 1.3 Gbps เท่านั้น อย่างไรก็ตาม มาตรฐาน IEEE 802.11ac จะรองรับการใช้งานเฉพาะบนคลื่นความถี่ 5 GHz

ตารางที่ 2-1 เปรียบเทียบมาตรฐาน IEEE 802.11

มาตรฐาน	คลื่นความถี่	ความเร็วในการรับและส่งข้อมูล	ข้อดี	ข้อเสีย
IEEE 802.11a	5 GHz	54 Mbps	- สามารถปรับระดับการรับและส่งข้อมูลให้ช้าลงเพื่อเพิ่มระยะทางการเชื่อมต่อให้มากขึ้นได้	- มาตรฐานนี้ไม่สามารถเข้ากันได้กับอุปกรณ์ที่รองรับมาตรฐาน IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g ได้ - มีราคาสูงกว่า 802.11b

ตารางที่ 2-1 (ต่อ)

มาตรฐาน	คลื่น ความถี่	ความเร็วในการรับ และส่งข้อมูล	ข้อดี	ข้อเสีย
IEEE 802.11b	2.4 GHz	11 Mbps	- ระยะทางในการติดต่อ ระหว่างอุปกรณ์ ค่อนข้างไกล - ช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย ได้ดีเพราะไม่จำเป็นต้อง มีจุดรับส่งสัญญาณ	- การรับส่งข้อมูล ค่อนข้างช้ามาก เมื่อ เทียบกับมาตรฐานอื่น ๆ
IEEE 802.11g	2.4 GHz	54 Mbps	- ตัวกระจายสัญญาณ ของอุปกรณ์สามารถเพิ่ม ประสิทธิภาพการรับ-ส่ง สัญญาณเป็น 2 เท่า ของการรับส่งสัญญาณ	- การกระจายสัญญาณนี้ จะมีผลทำให้อุปกรณ์ ไร้สาย ในมาตรฐาน 802.11b มีประสิทธิภาพ ลดลงเมื่อใช้อุปกรณ์ ร่วมกัน
IEEE 802.11n	2.4 GHz, 5 GHz	150, 300 Mbps	- เพิ่มความสามารถ ในการกันสัญญาณ รบกวน - สามารถใช้ความถี่ได้ 2 ย่าน	- จะมีการเพิ่ม ความสามารถ ในการป้องกันสัญญาณ รบกวนแต่ก็ยังคงมี สัญญาณรบกวนแทรก สอดในบางเวลา
IEEE 802.11ac	5 GHz	6.9 Gbps	- มีการรับ - ส่งข้อมูลที่ เร็วขึ้นและสามารถส่ง ได้มากที่สุด	- อุปกรณ์ไร้สายที่ รองรับมาตรฐานนี้มีน้อย - ราคาอุปกรณ์ค่อนข้าง สูง

2. หลักการทำงานเบื้องต้นของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย



ภาพที่ 2-1 หลักการทำงานของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

การทำงานเบื้องต้นของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย นั้นจะคล้าย ๆ กับวิทยุสื่อสารทั่ว ๆ ไป คือ เริ่มแรกต้องแปลงข้อมูลที่ต้องการจะส่งให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณวิทยุ แล้วส่งสัญญาณออกไปโดยใช้สายอากาศเป็นตัวส่ง อีกด้านหนึ่งก็จะใช้สายอากาศเป็นตัวรับสัญญาณเช่นกัน แล้วจึงแปลงสัญญาณกลับมาเป็นข้อมูลตามเดิม โดยสัญญาณวิทยุที่ใช้ในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนั้น จะแตกต่างจากวิทยุสื่อสารตรงที่คลื่นวิทยุของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย จะมีความถี่ในย่านที่สูงกว่า ทั้งยังมีความสามารถเปลี่ยนช่วงความถี่ของสัญญาณได้อีก โดยที่สามารถแบ่งช่วงความถี่ (Bandwidth) ได้ถึง 12 ช่อง และสามารถเปลี่ยนช่วงความถี่ของสัญญาณไปมาได้อย่างรวดเร็ว ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการรบกวนและทำให้แต่ละเครื่องสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ โดยไม่ถูกรบกวนจากเครื่องอื่นแม้จะเชื่อมต่อกันอยู่หลายเครื่อง

1. ข้อดีของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

1.1 ความคล่องตัว: ผู้ใช้สามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่ไหนก็ได้ภายในองค์กร ซึ่งบริเวณนั้นอาจไม่สามารถติดตั้งสายสัญญาณได้

1.2 ความสะดวก: เนื่องจากไม่ต้องมีการใช้สายสัญญาณในการเชื่อมต่อแต่ละเครื่องเข้าด้วยกันแม้กระทั่งสถานที่ ที่สายสัญญาณไม่สามารถเข้าถึงกันได้

1.3 ประหยัดค่าใช้จ่าย: ถึงแม้ตัวฮาร์ดแวร์ของเทคโนโลยีนี้จะมีราคาค่อนข้างสูง แต่ในบางกรณีค่าติดตั้งสายสัญญาณอาจจะสูงกว่าก็ได้ และในบางกรณีที่สายอาจจะเก่าจำเป็นต้องมีการติดตั้งใหม่

1.4 ความสามารถในการขยายเครือข่าย: ระบบเครือข่ายแบบนี้สามารถปรับแต่งได้หลายแบบ ใช้ได้กับเครือข่ายขนาดเล็กไปจนถึงเครือข่ายขนาดใหญ่

2. ข้อเสียของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

2.1 อัตราข้อผิดพลาดของข้อมูล: ในระบบไร้สายมีอัตราข้อผิดพลาดในการรับ ส่งข้อมูลค่อนข้างสูงเนื่องจากการใช้คลื่นวิทยุ โดยมีคลื่นรบกวน เส้นทางการส่งข้อมูลหลายทาง การลดทอนของสัญญาณค่อนข้างสูง การรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นเหตุก่อให้เกิดข้อผิดพลาด

2.2 ความปลอดภัยของข้อมูล: การกำหนดทิศทางและขอบเขตของคลื่นวิทยุไม่สามารถทำได้ ซึ่งข้อมูลที่ถูกส่งด้วยคลื่นวิทยุอาจถูกตรวจจับได้ง่าย

2.3 การรบกวน: ในเครือข่ายที่ใช้สายเฉพาะเครื่องที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบเท่านั้นที่สามารถส่งสัญญาณข้อมูลได้ แต่สำหรับเครือข่ายไร้สายแล้วเครื่องที่อยู่ต่างเครื่องกันก็สามารถส่งข้อมูลได้ ทำให้เกิดการรบกวนกันขึ้นได้

2.4 กำลังไฟฟ้าสำรอง: เครื่องส่วนใหญ่ที่ใช้เทคโนโลยีนี้ในการเชื่อมต่อก็จะเป็นโน้ตบุ๊ก ซึ่งการเชื่อมต่อต้องใช้กำลังไฟฟ้าค่อนข้างสูง

การเก็บเกี่ยวพลังงาน

การเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy harvest) เป็นการแปลงพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ให้เปลี่ยนเป็นพลังงานซึ่งมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar power) ดังภาพที่ 2-2 (ก) พลังงานความร้อน (Thermal energy) ดังภาพที่ 2-2 (ข) และพลังงานคลื่นความถี่ (Radio frequency energy) ดังภาพที่ 2-2 (ค) เป็นต้น ซึ่งการเก็บเกี่ยวพลังงานแสงอาทิตย์ยังมีปัญหาหลายประการ เช่น กลางวัน/ กลางคืน สภาพอากาศ เป็นต้น ส่วนการเก็บเกี่ยวพลังงานความร้อนมาใช้นั้นยังทำได้น้อยมาก พลังงานคลื่นความถี่วิทยุ (Meesomphorn, Lapawong, & Nakmongkol, 2015) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เราเลือกมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้



(ก) พลังงานแสงอาทิตย์



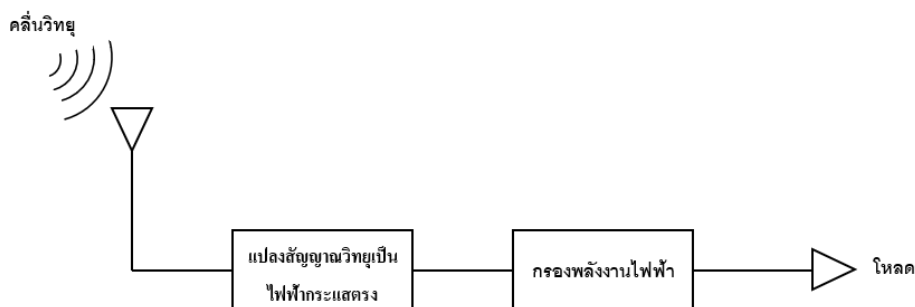
(ข) พลังงานความร้อน



(ค) พลังงานคลื่นความถี่วิทยุ

ภาพที่ 2-2 การเก็บเกี่ยวพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ

ในปัจจุบันแนวโน้มของการใช้เครือข่ายท้องถิ่นไร้สายมีมากขึ้น จะทำให้มีการปล่อยสัญญาณไร้สายออกมามากขึ้นตลอดเวลา แต่เราไม่ได้มีการใช้เครือข่ายไร้สายตลอดเวลา ดังนั้นสัญญาณไร้สายจึงถูกปล่อยทิ้งโดยไร้ประโยชน์เราจึงนำสัญญาณความถี่จากสัญญาณไร้สายนี้มาแปลงให้เกิดประโยชน์ จึงคิดค้นวิธีการรับพลังงานคลื่นความถี่วิทยุนี้ขึ้นมาเป็นอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ โดยการแปลงพลังงานคลื่นความถี่วิทยุเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง โดยการสร้างสายอากาศต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแส (Rectifier) เพื่อรับสัญญาณไร้สาย และต่อเข้ากับแบตเตอรี่หรือโหลด โดยตรงให้กับอุปกรณ์ ดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 การแปลงสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า

หลักการทำงานของส่วนต่าง ๆ ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. Energy harvester คือ ส่วนที่ทำการเก็บเกี่ยวพลังงานต่าง ๆ จากภายนอกมาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นพลังงานจาก แสง ความร้อน หรือคลื่นไมโครเวฟ (WLAN) เป็นต้น
2. Power management เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการจัดการพลังงาน ตั้งแต่ในส่วนของ การแปลงพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการเก็บเกี่ยวเพื่อนำไปชาร์จแบตเตอรี่หรือนำไปประยุกต์ใช้กับ อุปกรณ์ที่ใช้พลังงานต่ำ การนำพลังงานไปจ่ายให้กับระบบ รวมถึงการจัดการพลังงานของ แบตเตอรี่เพื่อป้องกันการเสียหาย
3. Energy storage หรือแบตเตอรี่เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการเก็บสะสมพลังงานไว้เพื่อนำไปใช้งาน

พื้นฐานสายอากาศ

สายอากาศเป็นอุปกรณ์สำหรับรับและส่งคลื่นความถี่ทั้งในย่านความถี่วิทยุ (Radio frequency) และความถี่ไมโครเวฟ (Microwave frequency) ในการสื่อสารแบบไร้สายนั้น โดยทั่วไปจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก คือ เครื่องส่ง (Transmitter) สายนำสัญญาณ (Transmission line) สายอากาศ (Antenna) และเครื่องรับ (Receiver) โดยสายนำสัญญาณจะทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากเครื่องส่งไปยังสายอากาศมายังเครื่องรับสายอากาศนั้นอาจกล่าวได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงกำลังไฟฟ้าจากเครื่องส่งให้เป็นกำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในขณะเดียวกันก็จะทำหน้าที่รับกำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วส่งเข้าสายนำสัญญาณในรูปของกำลังไฟฟ้าเพื่อส่งผ่านไปยังเครื่องรับต่อไป

1. ประเภทของสายอากาศแบบแบ่งตามรูปร่าง

- 1.1 แบ่งตามลักษณะโครงสร้างสายอากาศสามารถแบ่งได้ตามลักษณะโครงสร้าง

ดังนี้

1.1.1 สายอากาศแบบลวดตัวนำ (Wire antenna) สายอากาศเส้นลวดเป็นสายอากาศพื้นฐานที่นิยมใช้มากที่สุด โดยรูปร่างของสายอากาศชนิดนี้มีหลายรูปแบบ เช่น ไคโพลหรือโมโนโพล บ่วง สายอากาศเกลียว สำหรับสายอากาศบ่วงไม่จำกัดรูปเฉพาะวงกลม แต่สามารถสร้างเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส วงรี สามเหลี่ยมหรือรูปใด ๆ ก็ได้ อย่างไรก็ตามวงกลมจะเป็นโครงสร้างที่ง่ายและนิยมมากที่สุด ดังภาพที่ 2-4 (ก)

1.1.2 สายอากาศแบบช่องเปิด (Aperture antenna) สายอากาศชนิดนี้มีการใช้งานมากในอดีต โดยเฉพาะการใช้งานในย่านความถี่สูง สายอากาศชนิดนี้มีประโยชน์มากในด้านอากาศยานหรือยานอวกาศเนื่องจากความสะดวกในการติดตั้งและยังสามารถหุ้มด้วยฉนวนหรือวัสดุที่ไม่เป็นสื่อทางไฟฟ้าได้อีก เพื่อป้องกันสภาพที่เป็นอันตรายต่อระบบสื่อไฟฟ้า ดังภาพที่ 2-4 (ข)

1.1.3 สายอากาศแบบอาร์เรย์ (Array antenna) การประยุกต์ใช้งานสายอากาศโดยส่วนมากแล้วจะมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นไม่เหมือนกัน ทำให้เกิดวิธีการนำอิมพีแดนซ์มาใช้งานร่วมกันเพื่อสนองกับความต้องการใช้งานต่าง ๆ ซึ่งเราสามารถกำหนดให้ทิศทางหลักในการแพร่ของคลื่นของสายอากาศอยู่ทางทิศใดก็ได้ การนำสายอากาศหลาย ๆ อิมพีแดนซ์มาต่อเรียงกันเป็นแถว เรียกว่าอาร์เรย์ มีผลทำให้อัตราการขยายมากขึ้น และยังควบคุมทิศทางการแพร่คลื่นได้ ดังภาพที่ 2-4 (ค)

1.1.4 สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip antenna) สายอากาศไมโครสตริปมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูก สามารถผลิตด้วยเทคโนโลยีวงจรมินิ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานร่วมกับวงจรรีเลย์ทรานซิสเตอร์และสายอากาศไมโคร สตริปสามารถใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟได้ดี ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐานคือ แผ่นตัวนำสายอากาศ ชั้นวัสดุรองฐาน ระบายกราวด์ และสายนำสัญญาณ สำหรับสายอากาศไมโครสตริปนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ในแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ และคุณสมบัติแตกต่างกันไป ดังนั้นในการออกแบบหรือเลือกใช้สายอากาศชนิดใดจะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน ดังภาพที่ 2-4 (ง)

1.1.5 สายอากาศจาน (Dish antenna) เป็นสายอากาศที่นิยมใช้ในการรับส่งสัญญาณดาวเทียม ซึ่งทำหน้าที่สะท้อนสัญญาณที่ตกกระทบผิวจานสายอากาศไปยังตัวป้อนสัญญาณที่ทำหน้าที่แปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า (กรณีรับสัญญาณ) หรือในทางกลับกัน ตัวป้อนสัญญาณจะแปลงสัญญาณไฟฟ้าที่ต้องการส่งให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ไปยังผิวของจานสายอากาศเพื่อสะท้อนไปยังทิศทางที่ต้องการสื่อสาร ดังภาพที่ 2-4 (จ)



(ก) สายอากาศแบบลวดตัวนำ



(ข) สายอากาศแบบช่องเปิด



(ค) สายอากาศแบบอาร์เรย์



(ง) สายอากาศไมโครสตริป



(จ) สายอากาศจาน

ภาพที่ 2-4 ชนิดของสายอากาศ

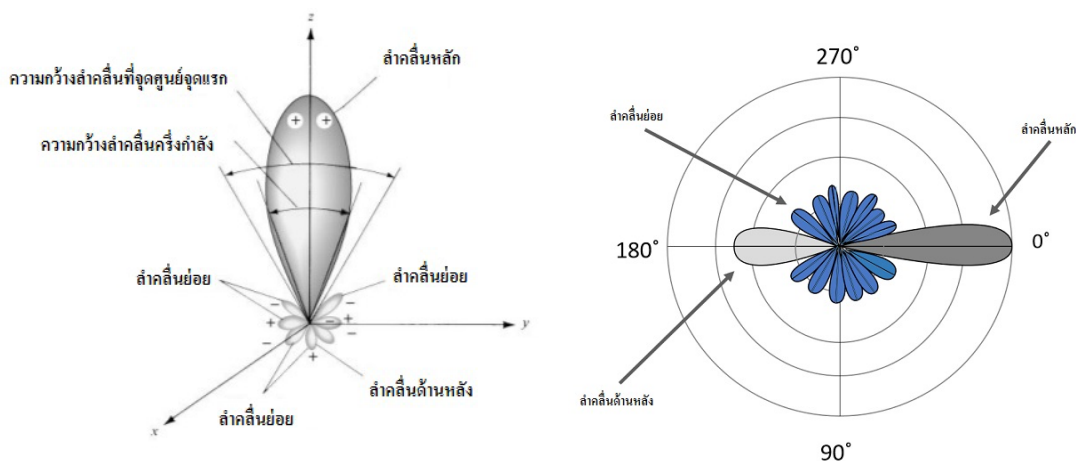
ตารางที่ 2-2 เปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย ของสายอากาศแต่ละประเภท

ประเภทของสายอากาศ	ข้อดี	ข้อเสีย
สายอากาศแบบลวดตัวนำ (Wire antenna)	- มีโครงสร้างที่ง่ายต่อการติดตั้ง - ราคาถูก	- ต้องปรับทิศทางของสัญญาณ เอง
สายอากาศแบบช่องเปิด (Aperture antenna)	- บังคับทิศทางได้แน่นอน - สามารถใช้งานด้านความถี่สูง มาก ๆ - ติดตั้งง่าย	- ใช้งานได้ในวงแคบ - ใช้งานเฉพาะด้านเท่านั้น
สายอากาศแบบอาร์เรย์ (Array antenna)	- เพิ่มประสิทธิภาพขึ้นทำให้รับ สัญญาณได้ดีขึ้น - อัตราขยายมากขึ้น	- ทิศทางรับและส่งสัญญาณต้อง ตรงกันพอดี
สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip antenna)	- ราคาถูก - มีขนาดเล็ก - ใช้งบงานที่ใช้ความถี่สูงได้ดี	- มีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจาก สัญญาณแทรกสอดได้ง่าย
สายอากาศจาน (Dish antenna)	- สามารถใช้งานกับการสื่อสาร ระยะทางที่ไกลมากได้ดี - ประสิทธิภาพในการรับส่งสูง	- ทิศทางการส่งสัญญาณแคบ มาก - มีขนาดใหญ่ - ราคาสูง

2. พารามิเตอร์ของสายอากาศ

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation patterns) ความหมายของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นซึ่งเป็นฟังก์ชันของเฟส (Phase) หรือโพลาไรเซชัน (Polarization) ซึ่งมีคุณสมบัติเหล่านี้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปของพลังงานเป็นฟังก์ชันของแบบรูปที่เขียนอยู่ในรูป 2 มิติ หรือ 3 มิติ เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าที่จุดห่างไกลจากแหล่งกำเนิดคลื่นในทิศของ θ หรือ ϕ แบบรูปการกระจายคลื่นโดยทั่วไปจะมี 2 แบบ คือ ถ้าเขียนจากสนามไฟฟ้า $D|\theta, \phi|$ จะเรียกว่า รูปแบบสนาม (Field pattern) ถ้าเป็นแบบรูปที่เขียนจากกำลังคลื่น $D|\theta, \phi|^2$ จะเรียกว่าแบบรูปกำลัง (Power pattern) และโดยปกติจะหารไว้ด้วยค่าสูงสุดซึ่งจะทำให้แบบรูปมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 หรือถ้ากำกับหน่วยเป็น dB ค่าสูงสุดก็จะเป็น 0 dB บางครั้งการแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของเฟสก็มีความหมายในทางปฏิบัติเช่นเดียวกันแบบรูปที่แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของเฟสนี้เรียกว่า แบบรูปเฟส ซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับเฟสเกี่ยวกับความ

เข้มนของสนามไฟฟ้า ส่วนอยู่ใน $D|\theta, \phi|$ ทั้งสิ้น นอกจากนั้น $D|\theta, \phi|$ ยังบอกทิศทางของการโพลาไรซ์ของ E อีกด้วย



ภาพที่ 2-5 องค์ประกอบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

จากภาพที่ 2-5 องค์ประกอบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น มีดังนี้

2.1 ลำคลื่นย่อย (Side lobe หรือ Minor lobe) คือ ลำคลื่นส่วนอื่นทั้งหมด นอกจากลำคลื่นหลัก

2.2 ความกว้างลำคลื่น (Beam width) คือ ค่าความกว้างของลำคลื่นหลัก

2.3 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-power beam width: HPBW) คือ มุมที่วัดระหว่างจุด 2 จุดที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น main lobe มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด (-3 dB)

2.4 ความกว้างลำคลื่นที่จุดศูนย์จุดแรก (First null beam width: FNBW) คือ มุมที่เกิดจากการที่ค่าของกำลังเป็นศูนย์ครั้งแรก

3. Voltage standing wave ratio (VSWR)

บางครั้งเรียกว่า Standing wave ratio (SWR) คือ อัตราส่วนของแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุดของรูปคลื่นนิ่งบนสายนำสัญญาณ อัตราส่วนนี้เป็นค่าวัดปริมาณที่โหลดผิดไปจากสถานะที่โหลดแมทซ์มากที่สุดเท่าไรจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 เสมอ ถ้าโหลดที่ต่อมีค่าความต้านทานเท่ากับ R_L และสายนำสัญญาณมีอิมพีแดนซ์ของสายเท่ากับ Z_0 เราสามารถคำนวณค่า VSWR ได้จาก

$$VSWR = \frac{Z_0}{R_L} \text{ หรือ } VSWR = \frac{R_L}{Z_0} \quad (2-1)$$

แล้วแต่ว่าตัวใดมีค่ามากกว่าจะอยู่ด้านบน หรือถ้ามี Reflection coefficient ซึ่งแทนด้วย Γ สามารถหาได้จาก

$$VSWR = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (2-2)$$

$$\Gamma = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (2-3)$$

โดยที่ Γ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น

Z_0 คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

Z_1 คือ อิมพีแดนซ์ของโหลด

จากสมการข้างบน จะพบว่า ถ้า $Z_1 = Z_0$ จะทำให้ $\Gamma = 0$ นั่นคือ จะไม่เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นซึ่งจะส่งผลให้ค่า $VSWR = 1$ ซึ่งก็คือ การแมตซ์กันระหว่างสายส่งกับสายอากาศนั่นเอง แต่ถ้า $Z_1 \neq Z_0$ จะทำให้ $\Gamma \neq 0$ จะส่งผลทำให้ค่า $VSWR \neq 1$ นั่นคือ จะเกิดการไม่แมตซ์กันระหว่างสายส่งกับสายอากาศ ซึ่งถ้าค่า $VSWR$ มีค่ามาก ๆ ก็อาจส่งผลกระทบต่อเครื่องส่งทำให้เครื่องส่งเกิดความเสียหายได้ สำหรับค่า $VSWR$ ที่สามารถยอมรับได้ในทางปฏิบัตินั้นจะต้องมีค่าไม่เกิน 1.5 การวัดค่า $VSWR$ เครื่องมือที่ใช้วัด เรียกว่า Refectometer หรืออาจเรียกว่า SWR Meter ซึ่งจะมีสเกลที่วัดได้อ่านค่าออกมาเป็น $VSWR$

4. อัตราการขยาย (Gain)

อัตราการขยายในเรื่องสายอากาศ หมายถึง อัตราขยายของสายอากาศที่ใช้คุณสมบัติไดเรกทิวิตี (Directivity) สามารถระบุปริมาณการแพร่ของคลื่นมีมากในทิศทางใด หรือความสามารถในการส่ง หรือรับคลื่นของสายอากาศนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศมาตรฐาน สายอากาศมาตรฐาน ก็คือ สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น (Half-wave dipole) หรือแหล่งกำเนิดคลื่นแบบจุด (Point source) โดยจะต้องคำนึงถึงสิ่งต่าง ๆ เช่น การสูญเสียในตัวสายอากาศ การไม่เข้ากันระหว่างสายนำสัญญาณกับสายอากาศ เป็นต้น ซึ่งทำให้ต้องมีนิยามสำหรับอัตราการขยายในกรณีต่าง ๆ เหล่านี้

4.1 อัตราขยายของสายอากาศ (Power gain) อัตราขยายของสายอากาศ (Power gain) และความสามารถในการชี้ทิศทางสายอากาศ (Directivity) เมื่อเราให้กำลังไฟฟ้าอินพุตที่เท่ากันแก่สายอากาศหนึ่งกับสายอากาศที่เป็นมาตรฐานอัตราการขยายของสายอากาศในทิศใด ๆ ของสายอากาศนั้น คือ อัตราส่วนระหว่างพอยน์ติงเพาเวอร์ที่เกิดจากสายอากาศนั้นกับพอยน์ติงเพาเวอร์ที่เกิดจากสายอากาศมาตรฐาน นั่นคือ เมื่อเขียนเป็นสมการจะเป็นดังนี้

$$G(\theta, \phi) = \frac{|\bar{E}(\theta, \phi)|^2 / z_0}{|\bar{E}_0(\theta, \phi)|^2 / z_0} = \frac{|\bar{E}(\theta, \phi)|^2}{|\bar{E}_0(\theta, \phi)|^2} \quad (2-4)$$

โดยที่ $G(\theta, \phi)$ คือ อัตราขยายของตัวสายอากาศในทิศ (θ, ϕ)

$\bar{E}(\theta, \phi)$ คือ สนามไฟฟ้าจากสายอากาศที่ต้องการรู้ค่าอัตราขยาย

$\bar{E}_0(\theta, \phi)$ คือ สนามไฟฟ้าจากสายอากาศที่ใช้เป็นมาตรฐาน

และเนื่องจากค่ากำลังสองของกำลังไฟฟ้าจะแปรโดยตรงกับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับสายอากาศเฉพาะฉะนั้นถ้าให้ w และ w_0 เป็นกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับสายอากาศที่ต้องการรู้ค่าอัตราขยายและสายอากาศมาตรฐานตามลำดับเราจะได้อัตราขยายของสายอากาศเป็นดังนี้

$$G(\theta, \phi) = \frac{|\bar{E}(\theta, \phi)|^2 / w}{|\bar{E}_0(\theta, \phi)|^2 / w_0} \quad (2-5)$$

สายอากาศที่ใช้เป็นมาตรฐานนั้น ในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า VHF ลงมานิยมใช้ สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่นเป็นสายอากาศมาตรฐาน เนื่องจากเป็นสายอากาศที่สร้างขึ้นง่ายและมีคุณสมบัติต่าง ๆ ที่รู้แน่นอน และสำหรับคลื่นความถี่ที่สูงกว่า UHF ขึ้นไปโดยเฉพาะเมื่อสูงกว่าไมโครเวฟขึ้นไประบบสายส่งและ โครงสร้างของสายอากาศเปลี่ยนไปจากช่วงความถี่ต่ำ ในทางปฏิบัติการใช้สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่นเป็นสายอากาศมาตรฐาน ก็อาจจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ง่ายเนื่องจากตัวสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับส่วนประกอบอื่น ๆ ฉะนั้นโดยทั่วไปจึงนิยมใช้แหล่งกำเนิดคลื่นแบบจุด ซึ่งส่งคลื่นออกไปทุกทิศทุกทางเท่ากันหมดเป็นตัวเปรียบเทียบ เราเรียกอัตราขยายของตัวสายอากาศนี้ว่า อัตราขยายสัมบูรณ์ของสายอากาศ (Absolute power gain) ในกรณีข้างต้นที่ใช้สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่นเป็นมาตรฐานอัตราขยายที่ได้จะเป็นค่าเปรียบเทียบเรียกว่า อัตราขยายสัมพัทธ์ของสายอากาศ (Relative power gain) ในบางกรณี ถึงแม้ความถี่จะต่ำกว่า UHF ลงไปก็ตามบางครั้งก็ใช้นิยามของอัตราขยายสัมบูรณ์โดยเฉพาะเมื่อคิดทางทฤษฎีเมื่อให้ $G_a(\theta, \phi)$ คือ ค่าอัตราขยายสัมบูรณ์ของสายอากาศ

$$G_a(\theta, \phi) = \frac{F(\theta, \phi)}{W/4\pi} = \frac{4\pi r^2 |\bar{E}(\theta, \phi)|^2}{z_0 W} \quad (2-6)$$

ถ้าเราให้ w_r, w_1 เป็นกำลังคลื่นที่กระจายออกไปและกำลังไฟฟ้าสูญเสียตามลำดับจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$W_r = W - W_1 = \eta W \quad (2-7)$$

โดยที่ η เป็นสัมประสิทธิ์ของการกระจายคลื่น W_r นั้นจากนิยามของ $F(\theta, \phi)$ จะได้
เป็น

$$W_r = \oint F(\theta, \phi) d\Omega \quad (2-8)$$

เขียนในรูป $G_a(\theta, \phi)$

$$\text{ถ้าเราให้ } G_a(\theta, \phi) = \eta \frac{4\pi F(\theta, \phi)}{\oint F(\theta, \phi) d\Omega} \quad (2-9)$$

$$G_a(\theta, \phi) = \eta G_d(\theta, \phi) \quad (2-10)$$

$$\text{เราจะได้ } G_a(\theta, \phi) = \frac{F(\theta, \phi)}{\frac{1}{4\pi} \oint F(\theta, \phi) d\Omega} \quad (2-11)$$

$G_d(\theta, \phi)$ คือ อัตราส่วนของกำลังคลื่นที่กระจายออกไปในทิศใดต่อค่าเฉลี่ยของกำลังคลื่นที่กระจายออกไปจากสายอากาศนั้น และจะเห็นได้ว่าเป็นค่าที่สามารถคำนวณได้โดยตรงจากแพทเทินของการกระจายคลื่น โดยที่ไม่มีกำลังไฟฟ้าอินพุตเข้ามาเกี่ยวข้อง ในความหมายเช่นนี้ $G_d(\theta, \phi)$ จึงถูกเรียกว่า ความสามารถในการชี้ทิศ (Directivity) และก็เช่นเดียวกับในกรณีของอัตราขยายของสายอากาศ ถ้าพูดถึงความสามารถในการชี้ทิศลอย ๆ ก็หมายถึง ความสามารถในการชี้ทิศ ในทิศที่มีกำลังคลื่นกระจายออกไปมากที่สุด

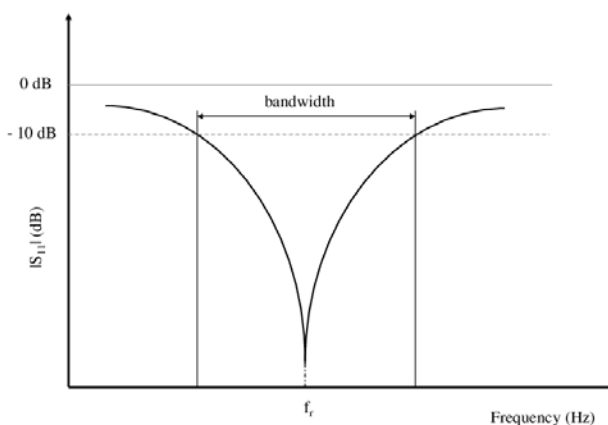
เมื่อพิจารณาจากสมการ $G_a(\theta, \phi) = \eta G_d(\theta, \phi)$ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายของสายอากาศกับความสามารถในการชี้ทิศจะเห็นได้ว่าอัตราขยายของสายอากาศจะต่ำกว่าความสามารถในการชี้ทิศเสมอเพราะว่า น้อยกว่าหนึ่งเสมอ

สรุปได้ว่า ค่าอัตราขยายกับความสามารถในการชี้ทิศทางสายอากาศมีความสัมพันธ์กัน คือ อัตราขยายสามารถบอกทิศทางของสายอากาศได้

5. ช่วงกว้างความถี่ (Bandwidth)

ช่วงความถี่ของสายอากาศจะถูกกำหนดความถี่โดยย่านของความถี่ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสายอากาศ โดยทั่วไปช่วงความถี่จะเป็นอัตราส่วนระหว่างความถี่ด้านสูงกับความถี่ด้านต่ำหรือเปอร์เซ็นต์ของความถี่กลาง (Center frequency) เนื่องจากคุณสมบัติของสายอากาศที่ไม่เหมือนกัน จึงเป็นการยากที่จะพิจารณาค่าของช่วงกว้างความถี่ จึงมีวิธีที่นิยมที่สุดในการพิจารณาค่าของช่วงกว้างความถี่ คือ Pattern bandwidth และ Impedance bandwidth

5.1 Impedance bandwidth คือ ย่านของความถี่ซึ่งมีค่าของ Input impedance อยู่ในช่วงมาตรฐาน โดยมาตรฐานแล้ว $VSWR \leq 2$ (or $|\Gamma| \leq \frac{1}{3}$) และมีการสะท้อนกลับของคลื่นประมาณ 11% ของกำลังส่งทางด้านอินพุตพิจารณาดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 ช่วงกว้างความถี่

5.2 Pattern bandwidth คือ ค่าความแตกต่างระหว่างความถี่ที่ทำให้กำลังที่ได้รับลดลงครึ่งหนึ่ง (Half power) ของค่าสูงสุด ผลต่างของความถี่จะเรียกว่าเป็นช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศ การหาความถี่เฉลี่ยเพื่อออกแบบสายอากาศในทางปฏิบัติใช้สูตร

$$f_m = \sqrt{f_L \times f_H} \quad (2-12)$$

เมื่อ f_m คือ ค่าความถี่เฉลี่ยเชิงเรขาคณิต

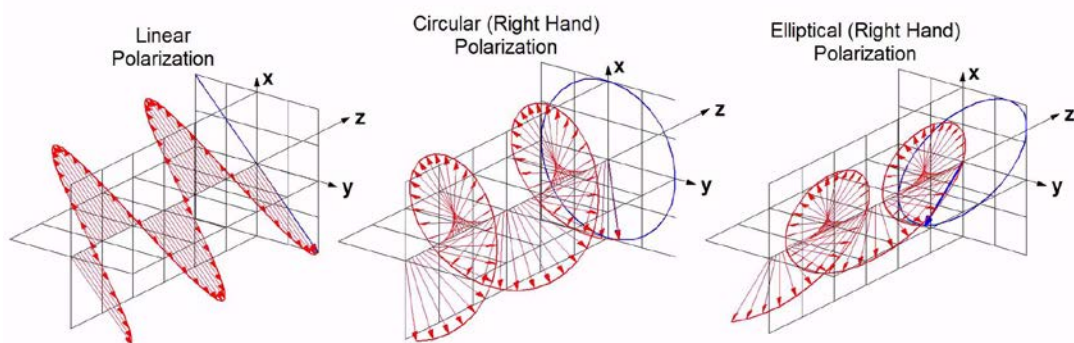
f_L คือ ค่าต่ำสุดของแถบความถี่

f_H คือ ค่าสูงสุดของแถบความถี่

6. การโพลาไรซ์ (Polarization)

การโพลาไรซ์ คือ พื้นที่ของการแพร่กระจายของสายอากาศ พิจารณาที่องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าโดยทั่วไปแล้วคลื่นระนาบไม่ได้มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งทิศทางเดียว ในการใช้นิยามของการโพลาไรซ์นี้ เราถือเอาตำแหน่งของสนามไฟฟ้า E บนระนาบที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เป็นหลัก ถ้าตำแหน่งปลายของ E เป็นเส้นตรง เราเรียกโพลาไรซ์ของกรณีนี้ว่า การโพลาไรซ์แบบเส้นตรง (Linear polarization) ถ้าเป็นการโพลาไรซ์แบบเส้นตรงที่ขนานกับพื้นโลก เราเรียกว่า การโพลาไรซ์แบบขนานกับพื้นโลก (Horizontal polarization) ถ้าตั้งฉากกับพื้นโลกเราเรียกว่า การโพลาไรซ์แบบตั้งฉากกับพื้นโลก (Vertical polarization) ตำแหน่งของ E นั้นทั่ว ๆ ไปจะเป็นรูปร่างรี จะเป็นวงกลมหรือเส้นตรงก็ต่อเมื่อเป็นกรณีพิเศษ

การโพลาไรซ์แบบวงรีและวงกลมนั้นทิศทางการหมุนของ E อาจจะเป็นแบบตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาก็ได้ คือ เมื่อเรากำหนดระนาบ X-Y คงที่ระนาบหนึ่งและเมื่อเรามองจากทิศทางของสายอากาศส่ง ถ้าสนามไฟฟ้า E ที่ปรากฏบนระนาบนี้หมุนตามเข็มนาฬิกาจะกำหนดว่าการโพลาไรซ์แบบตามเข็มนาฬิกาหรือแบบหมุนขวา ถ้า $\vec{0E}$ หมุนทวนเข็มนาฬิกาก็จะเป็นการโพลาไรซ์แบบทวนเข็มนาฬิกาหรือหมุนซ้าย



ภาพที่ 2-7 การโพลาไรซ์

7. อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Antenna impedance)

อิมพีแดนซ์ที่เกี่ยวกับสายอากาศนั้นมีอยู่หลายคำด้วยกัน

7.1 อินพุทอิมพีแดนซ์ (Input impedance) อินพุทอิมพีแดนซ์ คือ เป็นอัตราส่วนของโวลเตจและกระแสที่จุดป้อนของสายอากาศ

$$Z_{in} = \frac{V}{I} = R + jx \quad (2-13)$$

ปกติแล้ว Z_{in} มีทั้งส่วนที่เป็นความต้านทานและส่วนที่เป็นรีแอกแตนซ์ (Reactance) คือ เมื่อนำสายสัญญาณซึ่งค่าอิมพีแดนซ์เป็นความต้านทานอย่างเดี๋ยวมาคู่ โดยตรงกับสายอากาศ ส่วนใหญ่จะเกิดการไม่แมตซ์ขึ้น คือ พลังงานของคลื่นบางส่วนจะถูกสะท้อนกลับมาจากเครื่องส่ง ในทางปฏิบัติส่วนมากจึงต้องใช้วงจรแมตซ์ซิ่ง (Matching circuit) มาต่อไว้ระหว่างสายส่งกับสายอากาศเพื่อเป็นการลดพลังงานส่วนนี้ให้น้อยลง

7.2 อิมพีแดนซ์ของการกระจายคลื่น อิมพีแดนซ์ของการกระจายคลื่นในกรณีของสายอากาศ ถ้ากระแสที่จุดป้อนเป็น I และกำลังคลื่นที่กระจายออกไปจากสายอากาศ (Radiation power) เป็น W_r ให้ความต้านทานของการกระจายคลื่นเป็นดังสมการที่ 2-14

$$R_r = \frac{W_r}{|I|^2} \quad (2-14)$$

ในความเป็นจริงแล้ว คลื่นที่ออกจากผิวของสายอากาศยังมีส่วนคลื่นที่ไม่ได้กระจายออกไปรวมอยู่ด้วย ซึ่งกำลังคลื่นส่วนนี้จะเป็นพลังงานสะสมอยู่ใกล้ ๆ ตัวสายอากาศ ลักษณะเดียวกับพลังงานส่วนที่สะสมอยู่ใน L และ C ในวงจรไฟฟ้าธรรมดา นั่นคือ กำลังคลื่นที่ออกจากผิวของสายอากาศจะเป็นกำลังคลื่นเชิงซ้อน (Complex power) ทำให้เราได้นิยามของอิมพีแดนซ์ของการกระจายคลื่นเป็นดังนี้

$$Z_r = R_r + jx_r = \frac{W_r + jW_s}{|I|^2} \quad (2-15)$$

โดยที่ W_s เป็นกำลังคลื่นที่เก็บสะสมอยู่ในตัวกลางรอบๆสายอากาศ

7.3 อิมพีแดนซ์ระหว่างสายอากาศ (Mutual impedance) เมื่อสายอากาศในระบบมีมากกว่า 1 ตัวขึ้นไปกำลังคลื่นที่ส่งออกจากสายอากาศแต่ละอันจะส่งผลทำค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศอื่นเปลี่ยนไป ถ้าสายอากาศในระบบมีอยู่ n ตัว จากคุณสมบัติที่เป็นเชิงเส้นของสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) เราจะได้แรงดันที่จุดป้อนสายอากาศ

$$V_i = \sum_{j=1}^N V_{ij} \frac{I_j}{I_j} \quad (2-16)$$

$$\text{ถ้าเราให้} \quad Z_i = \frac{V_{ij}}{I_j} \quad (2-17)$$

$$\text{เราจะได้} \quad V_i = \sum_{j=1}^N Z_{ij} I_j \quad \text{ถ้า } i \neq j \quad (2-18)$$

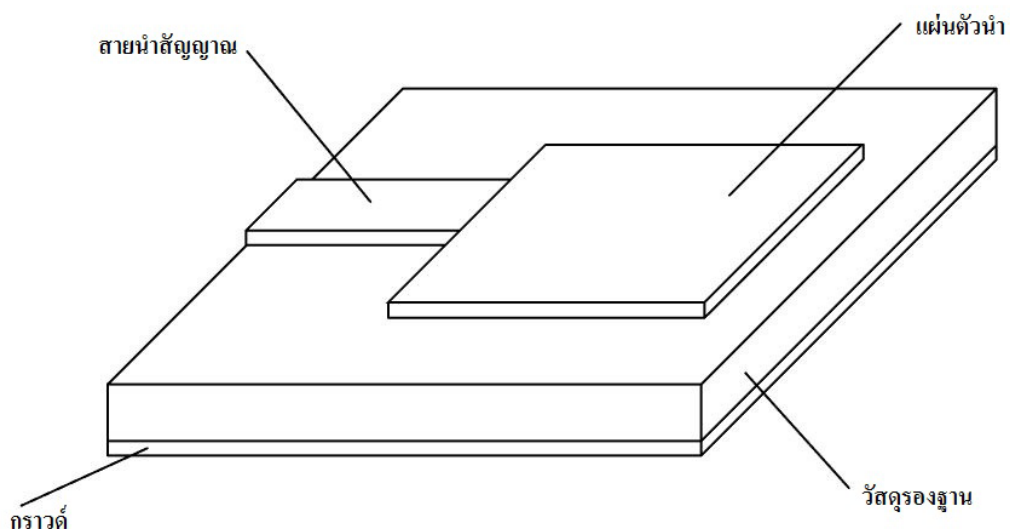
จะเรียกว่า อิมพีแดนซ์ระหว่างสายอากาศและถ้า $i \neq j$ จะเรียกว่า อิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับการกระจายคลื่นของสายอากาศ

ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปใจความสำคัญได้ว่า อินพุทอิมพีแดนซ์ให้พิจารณาเหมือนค่าอิมพีแดนซ์ทั่ว ๆ ไป อิมพีแดนซ์ของการกระจายคลื่นจะมองเป็นกำลังคลื่นที่ออกจากผิวสายอากาศเป็นเชิงซ้อนและอิมพีแดนซ์ระหว่างสายอากาศจะพิจารณาที่สายอากาศสองอันขึ้นไป

ไมโครสตริป

1. โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป

คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป (Werfelli., Tayari., Chaoui., Lahiani & Ghariani., 2016) คือ ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูก สามารถผลิตด้วยเทคโนโลยีวงจรมินิพี ซึ่งสามารถนำไปใช้งานร่วมกับวงจรมินิพีได้ และสายอากาศไมโครสตริปสามารถใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟได้ดี ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป ประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐาน คือ แผ่นตัวนำสายอากาศ ชั้นวัสดุฐานรอง ระบายกราวด์และสายนำสัญญาณ โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป ดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป

1.1 แผ่นตัวนำสายอากาศ แผ่นตัวนำสายอากาศเป็นโลหะแบบบางทำหน้าที่เป็นตัวแพร่พลังงานและมีค่าความต้านทานต่ำทนต่อสภาวะแวดล้อมสามารถยึดติดกับชั้นวัสดุฐานรองได้เป็นอย่างดี โดยทั่วไปทำจากทองแดง ทองคำหรืออลูมิเนียม แผ่นตัวนำอาจมีรูปร่างต่าง ๆ เช่น สี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัส วงกลม วงรี ฯลฯ วัสดุที่นำมาใช้ทำแผ่นตัวนำสายอากาศนี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศและความซับซ้อนในการผลิตนอกจากนี้แล้วขนาดและรูปร่างของแผ่นตัวนำสายอากาศยังเป็นปัจจัยต่อการกำหนดความถี่ใช้งาน รูปแบบการแพร่พลังงานและอิมพีแดนซ์ขาเข้า ปัจจุบันแผ่นตัวนำสายอากาศที่ใช้เป็นส่วนใหญ่เป็นแผ่นตัวนำรูปสี่เหลี่ยมและวงกลมเนื่องจากการออกแบบและการผลิตสามารถทำได้ง่าย

1.2 ชั้นวัสดุฐานรอง ชนิดและขนาดของชั้นวัสดุฐานรองเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบสายอากาศและเป็นองค์ประกอบสำคัญที่กำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศ ไมโครสตริป การแพร่พลังงานของสายอากาศจะลดลงเมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรองเพิ่มมากขึ้น โดยที่ความหนาของชั้นวัสดุฐานรองมีค่าคงที่ การแพร่พลังงานของสายอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของชั้นวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้น และการแพร่พลังงานนี้จะมีปริมาณลดลง เมื่อความหนาต่อความยาวคลื่นมีค่าประมาณ 0.05 การเลือกวัสดุเพื่อใช้เป็นวัสดุฐานรองนอกจากต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางกล สมบัติทางเคมี ความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลง ความสามารถในการยึดติดกับผิวโลหะได้ดี ความเรียบของผิวซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดกับโลหะ และสามารถผลิตเป็นชั้นวัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศได้ นอกจากนี้สมบัติทางไฟฟ้ายังเป็นตัวแปรสำคัญในการเลือกวัสดุ โดยมีค่าปัจจัยที่ต้องคำนึงดังต่อไปนี้

1.2.1 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Dielectric constants: ϵ_r) วัสดุที่ใช้ควรเป็นวัสดุเนื้อเดียว เพื่อให้ค่าสภาพยอมของสารไดอิเล็กตริกมีค่าคงที่ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกบ่งบอกคุณสมบัติของการเป็นสารไดอิเล็กตริกโดยเทียบกับอากาศว่าง ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ควรมีค่าต่ำ เนื่องจากค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ต่ำทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพที่ดีและทำให้การผลิตมีความผิดพลาดน้อย

1.2.2 ค่า Loss tangent ($\tan \delta$) คือ ค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างกระแสการนำกับกระแสดิสเพลซเมนต์โดยเมื่อนำสารไดอิเล็กตริกไปคั่นกลางระหว่างแผ่นโลหะคู่หนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ ซึ่งค่านี้แสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสเล็กน้อยเพียงใด โดยค่านี้ควรมีค่าที่ต่ำ เพื่อลดพลังงานการสูญเสียเนื่องจากการสูญเสียของไดอิเล็กตริกทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศสูงขึ้น

1.2.3 ค่าคงตัวของการนำความร้อน (Thermal conductivity) แสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดีมากน้อยเพียงใด ซึ่งค่านี้ยิ่งสูงยิ่งดี

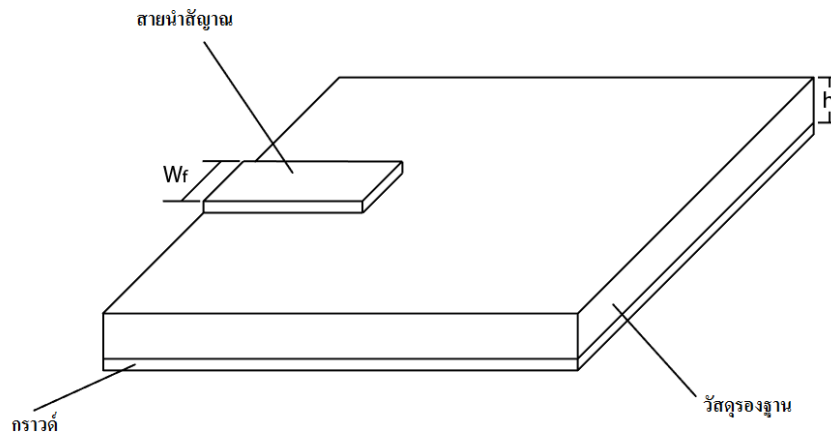
1.3 ระนาบกราวด์ (Ground plane) เป็นแผ่นโลหะขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับแผ่นตัวนำสายอากาศ ซึ่งส่วนใหญ่ทำจากโลหะชนิดเดียวกันกับสายอากาศ โดยขนาดของระนาบกราวด์นี้จะส่งผลกระทบต่อรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น เนื่องจากคลื่นเลี้ยวเบนที่บริเวณขอบของระนาบกราวด์ นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศอีกด้วย เนื่องจากการวิเคราะห์สายอากาศส่วนใหญ่มีข้อสมมุติว่าแผ่นระนาบกราวด์มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นตัวนำสายอากาศมากจนสามารถประมาณได้ว่าเป็นอนันต์ขนาดที่จำกัดของระนาบกราวด์จะมีผลต่อลำคลื่นหลัก (Main lobe) น้อยมาก แต่จะทำให้เกิดลำคลื่นด้านหลังของรูปแบบการแผ่กระจายคลื่น

1.4 สายนำสัญญาณ (Transmission Line) สายนำสัญญาณจะเป็นส่วนสำคัญในการนำสัญญาณเข้าสู่สายอากาศ สายนำสัญญาณที่ใช้กับสายอากาศแบบไมโครสตริปมีหลายแบบ ที่นิยมใช้ คือ แบบไมโครสตริปไลน์ (Microstrip line) และแบบท่อนำคลื่นระนาบรวม (Coplanar waveguide: CPW) สายนำสัญญาณดังกล่าวนี้สามารถใช้กับสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นปะ (Patch antenna) หรือแบบช่องเปิด (Slot antenna) ได้ แต่ต้องขึ้นอยู่กับโครงสร้างการจัดวาง เช่น สายอากาศแบบแผ่นปะจะนิยมใช้ไมโคร สตริปไลน์โดยจัดวางให้อยู่ในระนาบเดียวกัน ถ้าเป็นสายอากาศแบบช่องเปิดจะใช้ไมโครสตริปไลน์หรือ CPW ได้ทั้งสองแบบ ถ้าใช้ไมโครสตริปไลน์ช่องเปิดที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศจะถูควางอยู่บนระนาบกราวด์ ส่วนไมโครสตริปไลน์จะอยู่ฝั่งตรงข้าม แต่ถ้าใช้สายแบบ CPW สายอากาศช่องเปิดบนระนาบกราวด์จะอยู่ระนาบเดียวกันกับสายนำแบบ CPW

2. โครงสร้างพื้นฐานของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป

สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป หรือเรียกสั้น ๆ ว่า ไมโครสตริปไลน์ ได้รับความนิยมนำมาใช้กับความถี่ย่านไมโครเวฟ เพราะมีข้อดีคือ ง่ายต่อการเชื่อมต่อและมีขนาดเล็ก ดังภาพที่ 2-8 แสดงโครงสร้างของไมโครสตริปไลน์ ซึ่งมีรูปร่างเป็นแถบตัวนำแคบ ๆ วางอยู่บนชั้นวัสดุฐานรอง (Substrate) ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริก และด้านล่างของวัสดุฐานรองเป็นระนาบกราวด์ (Ground plane) ซึ่งมีลักษณะเป็นโลหะ พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านอยู่ในวัสดุฐานรองในบริเวณที่อยู่ระหว่างแถบตัวนำแคบ ๆ กับผิวโลหะของระนาบกราวด์ด้านล่าง การที่แถบตัวนำของสายนำสัญญาณไมโครสตริปมีด้านบนสัมผัสกับอากาศและด้านล่างสัมผัสกับสารไดอิเล็กตริกทำให้การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกแยกไปในอากาศส่วนหนึ่งและส่วนที่เหลือผ่านไปนสารไดอิเล็กตริก แถบตัวนำจะมีความกว้าง W ความหนา t ถูควางบนวัสดุฐานรอง (Substrate) โดยที่

ความกว้างของสตริปนั้นขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ คุณลักษณะที่ต้องการสำหรับความหนาของตัวสตริปที่นำมาใช้ออกแบบสายอากาศโดยทั่วไปนั้นมามีค่าประมาณ 0.035 มิลลิเมตร

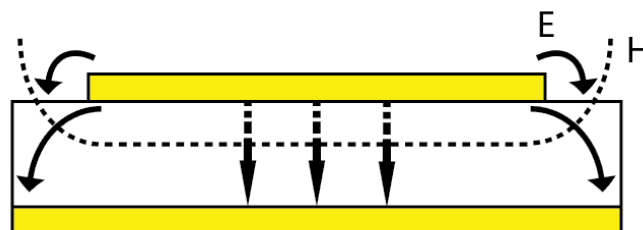


ภาพที่ 2-9 โครงสร้างทางกายภาพของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป

3. การส่งผ่านคลื่นในไมโครสตริปไลน์

การส่งผ่านคลื่นในไมโครสตริปไลน์นั้นใกล้เคียงกับโหมด TEM แต่ไม่ใช่โหมด TEM เพราะมีสนามในแนวแกนอยู่ด้วย จึงนิยมเรียกโหมดดังกล่าวว่า โหมดกึ่ง TEM (quasi TEM mode) ดังภาพที่ 2-10 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในระนาบตามขวางของไมโครสตริปไลน์ การที่มีสนามในแกนอยู่นั้นเป็นเพราะโครงสร้างที่มีสารไดอิเล็กตริกและอากาศอยู่ในระนาบเดียวกันและในสภาพที่มีสนามในแนวแกนเกิดขึ้นนี้ โหมดที่ส่งผ่านนั้นจะเป็นไฮบริดโหมด

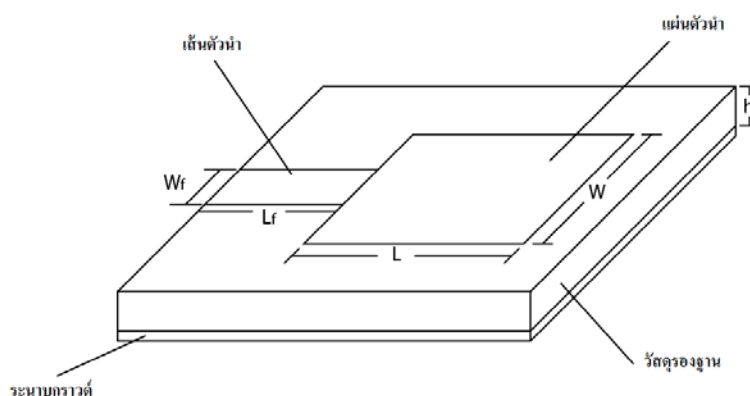
การที่คลื่นส่งผ่านในโหมดกึ่ง TEM ซึ่งพออนุโลมให้เป็นโหมด TEM นี้ทำให้สามารถใช้หลักการวงจรกระจายในการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของไมโครสตริปได้ โดยวิธีการหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective dielectric constant: ϵ_{eff}) ของระบบซึ่งจะรวมผลของสารไดอิเล็กตริกและอากาศเข้าด้วยกัน



ภาพที่ 2-10 เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบตามขวางของไมโครสตริปไลน์

4. การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปและเส้นไมโครสตริป

ไมโครสตริปไลน์มีลักษณะเป็นแถบโลหะแคบ โดยความกว้างของแถบโลหะเป็นตัวกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของไมโครสตริปไลน์ที่ต้องการออกแบบเพื่อให้แมตช์กับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งที่นำมาต่อเข้าที่ปลายสายไมโครสตริป ส่วนความยาวเป็นตัวช่วยในการปรับแต่งให้มีค่าการสูญเสียย้อนกลับเกิดน้อยที่สุด



ภาพที่ 2-11 ส่วนต่าง ๆ ของไมโครสตริป

เมื่อ f คือ Resonant Frequency หน่วย Hz

h คือ ความสูงสับสเตรท (Height of dielectric substrate) หน่วย mm

ϵ_r คือ Relative permittivity

C คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s

W คือ ความกว้างแพทช์ (Width of the patch element) หน่วย mm

l คือ ความยาวแพทช์ (Actual length) หน่วย mm

ϵ_{eff} คือ ค่าไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective relative permittivity)

l_{eff} คือ ความยาวแพทช์ประสิทธิผล (Effective length)

l_f คือ ความยาวฟีดไลน์ (Feed line length) หน่วย mm

l_g คือ ความยาวของระนาบกราวด์ (Ground plan length) หน่วย mm

W_f คือ ความกว้างของฟีดไลน์ (Feed line width) หน่วย mm

W_g คือ ความกว้างของระนาบกราวด์ (Ground plan width) หน่วย mm

λ คือ ความยาวคลื่น (Lamda)

Δl คือ Length extension

4.1 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

ขั้นที่ 1 คำนวณค่าความกว้างของแพทช์ (W)

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (2-19)$$

ขั้นที่ 2 คำนวณค่า Effective dielectric constant (ϵ_{reff})

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-1/2} \quad (2-20)$$

ขั้นที่ 3 คำนวณค่า Effective Length (l_{eff})

$$l_{eff} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (2-21)$$

ขั้นที่ 4 คำนวณค่า Length extension (Δl)

$$\Delta l = 0.412h \left[\frac{\epsilon_{reff} + 0.3}{\epsilon_{reff} + 0.258} \right] \left[\frac{\left[\frac{W}{h}\right] + 0.264}{\left[\frac{W}{h}\right] + 0.8} \right] \quad (2-22)$$

ขั้นที่ 5 คำนวณค่าความยาวจริงของแพทช์ (l)

$$l = l_{eff} - (2\Delta l) \quad (2-23)$$

ขั้นที่ 6 คำนวณค่าความยาว (l_g) และความกว้าง (W_g) ของระนาบกราวด์

$$l_g = 6h + l \quad (2-24)$$

$$W_g = 6h + W \quad (2-25)$$

ขั้นที่ 7 คำนวณค่าความกว้าง (W_f) และความยาว (l_f) ของฟีดไลน์

$$\lambda = \frac{c}{f_0} \quad (2-26)$$

$$W_f = \frac{\lambda}{40} \quad (2-27)$$

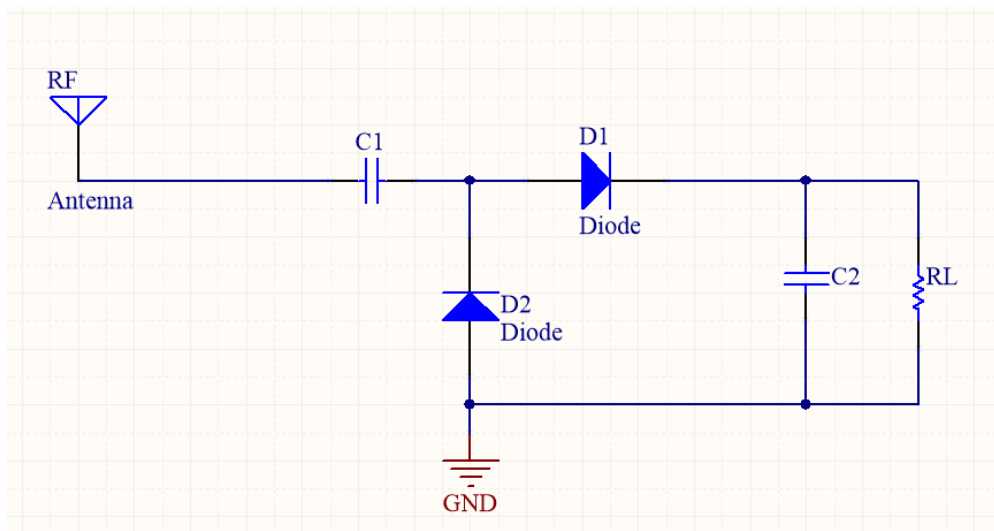
$$l_f = W_f \times 3.96 \quad (2-28)$$

วงจรเรียงกระแส (Rectifier circuit)

วงจรเรียงกระแสหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เรกติไฟเออร์ คือ วงจรไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณกระแสสลับให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงหรือมีคุณสมบัติยอมให้ไฟฟ้าไหลผ่านไปทิศทางใดทิศทางหนึ่ง อุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการแปลงสัญญาณ ได้แก่ ไดโอด ซีดทีกี ไดโอด

1. วงจรเรียงกระแสแบบไมโครสตริปไลน์ (Microstrip line rectifier circuit)

การทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบไมโครสตริปไลน์ (Microstrip line rectifier circuit) คือ เมื่อสัญญาณ RF (Radio frequency) ผ่าน C1 ทำหน้าที่เป็น C-coupling เพื่อให้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงผ่านได้และไม่ยอมให้ไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่าน เมื่อสัญญาณครึ่งบวกทางแผ่นตัวนำเข้ามาไดโอด D1 จะถูกไบอัสตรงทำให้กระแสไหลในวงจรเกิดแรงดันตกคร่อมที่ RL ตามลักษณะของสัญญาณอินพุตแต่เมื่อสัญญาณครึ่งลบเข้ามาไดโอด D2 จะถูกไบอัสตรงจึงทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่าน RL ในวงจร ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตที่ไหลคจึงเป็นสัญญาณรูปครึ่งไซน์ อธิบายได้ดังภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2-12 วงจรเรียงกระแสแบบไมโครสตริป

สมการของฟรีส (Friis transmission equation)

สมการของฟรีสเสนอขึ้นครั้งแรกโดยวิศวกรไฟฟ้าชาวเดนมาร์ก ฮาราลิท ฟรีส มีใจความสำคัญสรุปไว้อย่างง่าย ๆ คือ กำลังของคลื่นวิทยุจะแปรผกผันกับกำลังสองของระยะทาง และสามารถใช้อธิบายถึงการเชื่อมโยงในระบบสื่อสาร เริ่มจากระบบสื่อสารไร้สายอย่างง่าย ดังภาพที่ 2-12 สมมติให้เครื่องส่งมีกำลังด้านออกเป็น P_t ส่งผ่านไปยังสายอากาศภาคส่ง สายอากาศภาคส่ง

มีอัตราขยาย G_t ผ่านออกไปสู่อากาศไปเครื่องรับเข้าทางสายอากาศภาครับที่มีอัตราขยาย G_r กำลังที่ออกจากสายอากาศภาครับ คือ P_r ระยะทางระหว่างสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศภาครับคือ R และเมื่อพิจารณาเบื้องต้นก่อนว่ากำลังที่ได้รับมาจากแหล่งกำเนิดชนิดไอโซทรอปิก สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$S_1 = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (2-29)$$

สมการที่ (2-29) จะสมมุติว่าไม่มีการคิดผลจากการสูญเสียในชั้นบรรยากาศ ผลจากการไม่แมทซ์ของการโพราไรซ์ ผลจากการไม่แมทซ์ของอิมพีแดนซ์ที่ป้อนเข้ากับสายอากาศ อีกทั้งไม่มีการคิดขวางระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับและสุดท้ายคือ กำหนดให้สายอากาศทำงานในบริเวณสนามระยะไกล หากเราจะพิจารณาโดยเพิ่มเติมเงื่อนไขอัตราขยายของสายอากาศเข้าไปในสมการความหนาแน่นกำลังจะประกอบไปด้วยอัตราขยายของสายอากาศรูปแบบของสมการจะพัฒนาเป็น

$$S_D = \frac{P_t}{4\pi R^2} G_t \quad (2-30)$$

กำลังที่ได้รับจะเท่ากับความหนาแน่นกำลังที่บริเวณ โดยพื้นที่ประสิทธิภาพผลสายอากาศของเครื่องรับ

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} A_{er} \quad (2-31)$$

พื้นที่ประสิทธิภาพสัมพันธ์กับอัตราขยายสายอากาศโดยแสดงได้ดังนี้

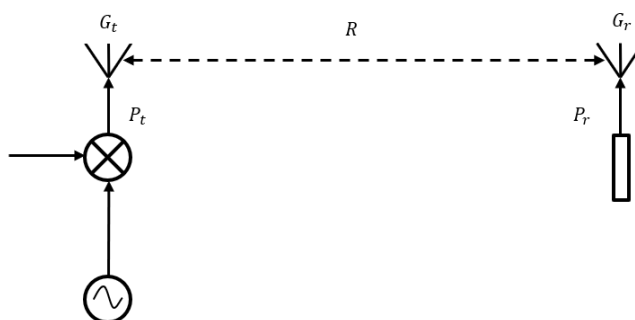
$$G_r = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} A_{er} \rightarrow A_{er} = \frac{G_r \lambda_0^2}{4\pi} \quad (2-32)$$

แทนค่าในสมการที่ (2-31) และ (2-32) ได้

$$P_r = P_t \frac{G_t G_r \lambda_0^2}{(4\pi R)^2} \quad (2-33)$$

สมการนี้รู้จักกันว่า สมการการส่งกำลังฟรีส กล่าวคือ กำลังที่ได้รับแปรผันตรงกับอัตราขยายของสายอากาศและแปรผกผันกับระยะทาง R^2 หากเราสมมติให้กำลังต่ำสุดที่เครื่องรับ

สามารถรับได้เป็น $P_t = S_{i,min}$ สัญญาณต่ำสุดจะแปรผกผันกับกำลังสองของระยะทางและที่กำลังต่ำสุดนี้เองจะเป็นตัวกำหนดหรือเป็นตัวบ่งบอกระยะทางไกลสุดที่เครื่องรับแต่ละเครื่องสามารถรับได้ระยะทางดังกล่าวคือ



ภาพที่ 2-13 ระบบการสื่อสารไร้สายอย่างง่าย

$$R_{max} = \sqrt{\left[\frac{P_r G_r G_t \lambda_0^2}{(4\pi)^2 S_{i,min}} \right]} \quad (2-34)$$

จากที่ได้กล่าวมาแล้วสมการที่ (2-34) เป็นสมการในอุดมคติไม่รวมผลของการสูญเสียต่าง ๆ ที่เกิดจากเครื่องส่งและเครื่องรับ เช่น เครื่องส่งและเครื่องรับไม่อยู่ในแนวเดียวกัน การไม่แมตซ์กันของโพลาไรซ์ การไม่แมตซ์กันของอิมพีแดนซ์และการสูญเสียในชั้นบรรยากาศซึ่งสามารถเพิ่มตัวประกอบ L_{sys} แทนที่การสูญเสียรวมทั้งหมดแทนลงในสมการได้

$$R_{max} = \sqrt{\left[\frac{P_r G_r G_t \lambda_0^2}{(4\pi)^2 S_{i,min} L_{sys}} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2-35)$$

ตัวแปร $S_{i,min}$ ซึ่งเป็นขนาดต่ำสุดของสัญญาณที่เครื่องรับสามารถรับหรือตรวจจับได้นั้นในทางปฏิบัติอาจมีความยุ่งยากที่จะกำหนดหรือเลือกเพื่อที่จะมาแทนค่าในสมการเพื่อหา ระยะทางไกลที่สุดระหว่างเครื่องรับกับเครื่องส่ง และเป็นการดีหากจะดัดแปลงสมการ (2-35) ให้ อยู่ในสมการซึ่งด้วยตัวแปรที่เรียกว่า ตัวประกอบของสัญญาณรบกวนและสัญญาณด้านออกของเครื่องรับกับอัตราส่วนระหว่างสัญญาณด้านออกและสัญญาณรบกวนด้านออกเพื่อที่จะแปลงสมการดังกล่าว จะอธิบายควบคู่กับภาพที่ 2-13 ในภาพตัวประกอบของสัญญาณรบกวน F ถูกกำหนดโดย

$$F = \frac{S_i/N_i}{S_0/N_0} \quad (2-36)$$

ดังนั้นที่ระยะทางไกลสุดที่เครื่องรับสามารถรับได้

$$S_i = S_{i,min} = N_i F \left(\frac{S_0}{N_0} \right)_{min} = kTBF \left(\frac{S_0}{N_0} \right)_{min} \quad (2-37)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ของโบลท์ซมานน์ (Boltzmann constant) ตัวแปร T คือ ค่าสัมบูรณ์ของอุณหภูมิและตัวแปร B คือ ช่วงกว้างความถี่ของเครื่องรับเมื่อเราแทนค่า S_i จากสมการที่ (2-37) แทนลงในสมการที่ (2-35) ทำให้ได้ระยะทางสูงสุดในอัตราส่วนของสัญญาณด้านออก คือ

$$R_{max} = \sqrt{\left[\frac{P_r G_t G_r \lambda_0^2}{(4\pi)^2 kTBF(S_0/N_0)_{min} L_{sys}} \right]} \quad (2-38)$$

เมื่อ P_t = กำลังในการส่ง (วัตต์)

G_t = อัตราขยายสายอากาศภาคส่ง (เท่า/ ไม่มีหน่วย)

G_r = อัตราขยายสายอากาศภาครับ (เท่า/ ไม่มีหน่วย)

λ_0 = ความยาวคลื่นในอากาศ (เมตร)

$K = 1.38 \times 10^{-23}$ (จูล/ เคลวิน)

T = อุณหภูมิ (เคลวิน)

B = ช่วงกว้างความถี่ (เฮิร์ต)

F = ตัวประกอบสัญญาณรบกวน (ไม่มีหน่วย)

$\frac{S_0}{N_0}$ = SNR ต่ำสุดของเครื่องรับด้านนอก (ไม่มีหน่วย)

L_{sys} = การสูญเสียของระบบ (ไม่มีหน่วย)

R_{max} = ระยะทางสูงสุดที่เครื่องรับสามารถรับได้ (เมตร)



ภาพที่ 2-14 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนด้านเข้าและด้านออกของเครื่องรับ

อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนด้านออกสำหรับระยะทาง R คือ

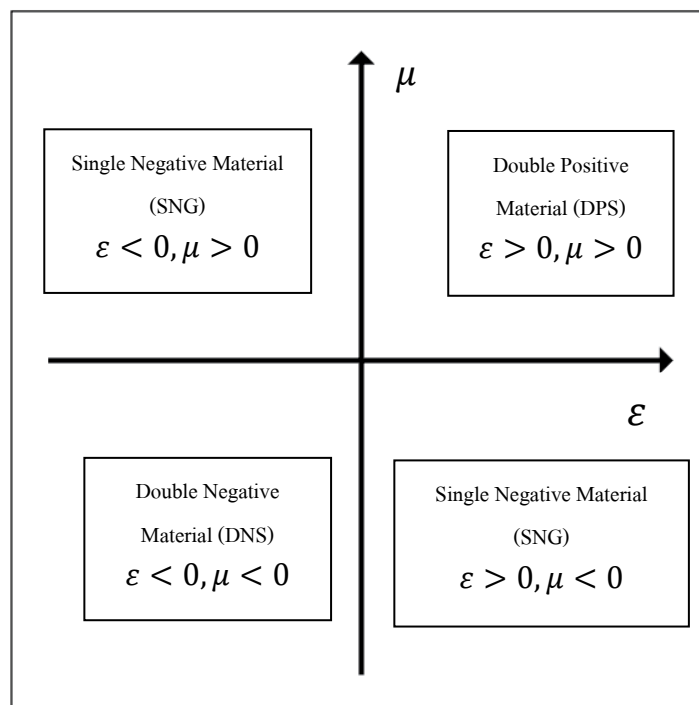
$$\frac{S_0}{N_0} = \frac{P_t G_t G_r}{kTBFL_{sys}} \left(\frac{\lambda_0}{4\pi R} \right)^2 \quad (2-39)$$

สมการ (2-38) ทำให้เราเห็นว่าหากต้องการให้ได้ระยะทางจะต้องทวีคูณกำลังด้านออกเพิ่มขึ้นถึง 4 เท่า สำหรับกรณีพิเศษอื่น ๆ เช่น ในระบบเรดาร์ หากต้องการให้กำลังด้านออกเพิ่มขึ้นเพียงสองเท่าต้องเพิ่มกำลังด้านออกถึง 16 เท่าและในสมการที่ (2-39) หากต้องการเพิ่มอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนอาจจะสามารถทำได้โดยเลือกทำสิ่งหนึ่งสิ่งใด ต่อไปนี้กล่าวคือ ลดระยะทาง R เพิ่มกำลังส่ง P_t หรือแม้แต่การเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ G_t หรือ G_r สามารถส่งผลให้อัตราส่วนสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน

อภิวัดดู (Metamaterial)

อภิวัดดู (Metamaterial) ถูกนิยามว่าเป็นวัสดุเสมือนหรือวัสดุประดิษฐ์เชิงวิศวกรรมที่ถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการซึ่งมีคุณสมบัติที่ไม่ปรากฏขึ้นตามธรรมชาติ โดยคุณสมบัติของวัสดุเหล่านี้ถูกเกิดจากโครงสร้างมากกว่าการจัดเรียง (Composition) จากการผนวกกันของวัสดุขนาดเล็ก (ปกติจะมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นมาก) ที่มีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน (Inhomogeneous) เพื่อทำให้เกิดคุณสมบัติ ประสิทธิภาพในระดับมาโคร (Macroscopic) อย่างที่ทราบกันเป็นอย่างดี ตัวอย่างที่มีผลต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากการผนวกตัวของ การเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก (Electric and Magnetic moments) ซึ่งผลกระทบระดับมาโครจะอยู่ในรูปของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กประสิทธิภาพ (Effective permittivity : ϵ_{eff} and Permeability : μ_{eff}) ดังนั้นอภิวัดดูสามารถที่จะประกอบขึ้นจากการฝังของวัสดุประดิษฐ์หลายชนิดรวมตัวกันเข้าไปยังในตัวกลางหรือผิวของตัวกลางที่กำหนดซึ่งสามารถเลือกพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้อย่างอิสระ ตัวอย่างเช่น คุณสมบัติต่าง ๆ ของตัวกลาง ขนาด รูปร่างและส่วนประกอบที่จะใส่เข้าไปไม่ว่าจะเป็นความหนาแน่นหรือการจัดวางตำแหน่งเพื่อให้ได้ผลตอบสนองพิเศษทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่สามารถเกิดขึ้นจากวัสดุตามธรรมชาติทั่วไป การวิจัยในระยะแรกของอภิวัดดูเป็นการศึกษาวัสดุที่มีดัชนีการหักเหที่เป็นลบ (Negative reflection index) เป็นพื้นฐานของการนำไปออกแบบสร้างซูเปอร์เลนส์ (Superlens) ที่สามารถขยายภาพให้ได้ความละเอียดสูง นอกจากนี้อภิวัดดูยังถูกพัฒนาสำหรับใช้งานที่เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) อีกด้วย

อภิวัดสามารถจำแนกประเภทได้จากค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (μ) และสภาพยอมทางไฟฟ้า (ϵ) ได้ดังนี้ (ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์., 2557; สราวุธ ชัยมูล และประยูทธ อัครเอกตมาลิน., 2554) วัสดุทั่วไปแล้วจะมีค่าความซึมซาบแม่เหล็ก และสภาพยอมทางไฟฟ้าที่เป็นบวกตามวัสดุคู่มือขวา (Double-Positive material: DPS) และยังมีวัสดุบางชนิดที่บางช่วงความถี่อาจจะมีค่าความซึมซาบแม่เหล็ก และสภาพยอมทางไฟฟ้าค่าใดค่าหนึ่งที่เป็นลบจะเรียกวัสดุเหล่านี้ว่า SNG (Single negative medium) ถ้าวัสดุใดมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าเป็นลบ เรียกว่า ENG (Epsilon negative medium) และความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบ เรียกว่า MNG (Mu negative medium) อย่างไรก็ตามยังไม่ปรากฏว่ามีวัสดุที่เป็นได้ทั้ง DNG SNG หรือ DPS



ภาพที่ 2-15 ประเภทของอภิวัดจากค่าความซึมซาบแม่เหล็กได้ (μ) และสภาพยอมทางไฟฟ้า (ϵ)

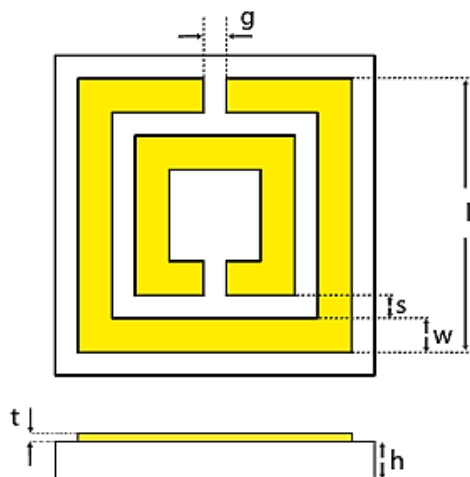
1. ตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก Split ring resonator (SRR)

ตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกเป็นอภิวัดที่มีการออกแบบโครงสร้างของอะตอมเทียมในอภิวัดให้มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบ จะใช้หลักการการเกิดเรโซแนนซ์ของโครงสร้างของตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก ซึ่งในการประยุกต์ใช้กับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานที่ความถี่วิทยุจะช่วยให้การจางหายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลดน้อยลง

1.1 การออกแบบโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก Split ring resonator

(Filiberto Bilotti, Toscano, & Vegni, 2007; Ziolkowski, 2003)

การออกแบบโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก Split ring resonator โดยใช้ PCB ชนิด FR-4 ทั่วไปแล้วจะมีรูปแบบแตกต่างกันออกไป เช่น สี่เหลี่ยม วงกลม หรือหกเหลี่ยม เป็นต้น ในการออกแบบเพื่อให้สอดคล้องกับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศไมโครสตริปจะมียอดประกอบ 2 อย่าง คือ 1.) แผ่นโลหะ 2.) PCB ชนิด FR-4 สำหรับการใช้งานในช่วงความถี่วิทยุ โครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกถูกออกแบบโดยไม่มีระนาบกราวด์และตัวแปรต่าง ๆ ของโครงสร้างนี้อธิบายดังภาพที่ 2-16 การออกแบบโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก สามารถอธิบายโดยใช้ทฤษฎีวงจรสมมูล LC ดังขั้นตอนต่อไปนี้



ภาพที่ 2-16 โครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก

เมื่อ ความกว้างของตัวนำเป็น w

ระยะห่างระหว่างตัวนำเป็น s

ความยาวของการแยกเป็น g

ความยาวของวงแหวนตัวนำที่ L

จำนวนของวงแหวน N

ค่าความซึมซาบแม่เหล็กประสิทธิภาพ $\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6}$

ความหนาวัสดุฐานรอง $h = 1.6$ มิลลิเมตร

ความหนาของวัสดุตัวนำ $t = 0.035$ มิลลิเมตร

อินทิกรัลวงรีแบบสมบูรณ์ชั้นแรก K

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน S_{21}

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11}

ค่าความเร็วแสง $c_0 = 3 \times 10^8$

1.1.1 ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก

ขั้นตอนที่ 1 หาค่าความจุต่อหน่วยความยาวระหว่างแถบคู่ขนาน (C_0)

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{K(\sqrt{1-k^2})}{K(k)} \quad (2-40)$$

โดยที่

$$k = \frac{\frac{s}{2}}{w + \frac{s}{2}} \quad (2-41)$$

ขั้นตอนที่ 2 หาค่าความจุรวมของตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก (C_{SRR})

$$C_{SRR} = \frac{N-1}{2} [2l - (2N-1)(w+s)] C_0 \quad (2-42)$$

ขั้นตอนที่ 3 หาค่าอัตราส่วนการเติม (The fill ratio)

$$\rho = \frac{l-l_N}{l+l_N} = \frac{(N-1)(w+s)}{l-(N-1)(w+s)} \quad (2-43)$$

ขั้นตอนที่ 4 หาค่าความเหนี่ยวนำของตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก (L_{SRR})

$$L_{SRR} = 4\mu_0 [l - (N-1)(s+w)] \left[\ln\left(\frac{0.98}{\rho}\right) + 1.84\rho \right] \quad (2-44)$$

ขั้นตอนที่ 5 หาค่าความถี่เรโซแนนซ์ของตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{SRR}C_{SRR}}} \quad (2-45)$$

ขั้นตอนที่ 6 การคำนวณหาค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Ziolkowski, 2003)

$$k_0 = \frac{2\pi f_0}{c_0} \quad (2-46)$$

และค่าความซึมซาบแม่เหล็กจะเท่ากับ

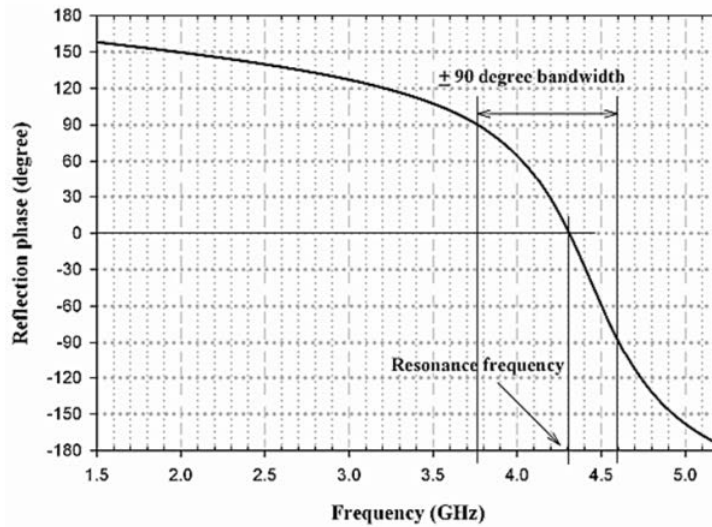
$$\mu_r \sim \frac{2}{jk_0 t} \frac{1-V_2}{1+V_2}; \quad V_2 = S_2 - S_1 \quad (2-47)$$

2. ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า Electromagnetic band gap (EBG) (Nguyen, Kim, Kim, & Jang, 2009)

ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างแบบเป็นคาบ ประกอบไปด้วย ไดอิเล็กตริก (Dielectric) โลหะ ที่ซึ่งสามารถกีดขวางการแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทาง และความถี่ที่เจาะจงอีกทั้งยังสามารถสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ คุณสมบัติเหล่านี้เป็นการแสดงความหลากหลายทางโครงสร้างของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสายอากาศไมโครสตริปที่ความถี่วิทยุถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

2.1 พื้นผิวอิมพีแดนซ์สูง (High impedance surfaces) คุณสมบัติที่มีความสำคัญของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมประเภทพื้นผิวอิมพีแดนซ์สูง คือ การยับยั้งการกระจายของคลื่นพื้นผิวในช่วงความถี่ที่เจาะจงหรือที่เรียกกันว่า Stopband ซึ่งผลลัพธ์จากการยับยั้งการกระจายของคลื่นพื้นผิวเมื่อสายอากาศออกแบบให้อยู่บน โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมจะทำให้สถานะของการแผ่คลื่นดีขึ้นมากกว่าสายอากาศที่ใช้ระนาบกราวด์แบบธรรมดา

2.2 ตัวนำแม่เหล็กเทียม Artificial magnetic conductor (AMC) อีกหนึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของ โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม Artificial magnetic conductor (AMC) คือ คุณลักษณะการสะท้อนในรูปแบบของการเสริมเฟส คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกสะท้อนจากโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมจะมีการเปลี่ยนแปลงของเฟสจาก -180 ถึง 180 องศาเมื่อเทียบกับความถี่โดยที่ คุณลักษณะการสะท้อนในรูปแบบของการเสริมเฟสมากกว่าหักล้างเฟสจะอยู่ในช่วง $+90$ ถึง -90 องศาและที่ความถี่ของเฟสการสะท้อนเป็น 0 องศา นั้นหมายถึง ความถี่เรโซแนนซ์ของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม หรือที่เรียกกันว่าเป็นตัวนำแม่เหล็กเทียม Artificial magnetic conductor (AMC) ดังภาพที่ 2-17



ภาพที่ 2-17 เฟสการสะท้อนกลับของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม Artificial magnetic conductor (AMC) แบบ MUSHROOM-LIKE

2.3 การออกแบบโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม Artificial magnetic conductor (AMC) การออกแบบโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมชนิด Mushroom-Like โดยใช้ PCB ชนิด FR-4 ในการออกแบบเพื่อให้สอดคล้องกับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศไมโครสตริปจะมีองค์ประกอบ 4 อย่าง คือ 1) แผ่นโลหะ 2) ระบายกราวนด์ 3) เวียส์ และ 4) PCB ชนิด FR-4 ดังภาพที่ 2-18 (ก) ตัวแปรต่าง ๆ ของโครงสร้างนี้อธิบายดังภาพที่ 2-19 (ข) การออกแบบโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมสามารถใช้ทฤษฎีวงจรสมมูล LC ในการอธิบายได้ ดังภาพที่ 2-19 ซึ่ง Capacitor เกิดขึ้นจากแนวสนามแม่เหล็กระหว่าง ระบายแผ่นโลหะและ Inductor เกิดขึ้นจากเวียส์ที่เชื่อมต่อกันกับระบายกราวนด์ นอกจากนี้วงจรสมมูล LC ยังสามารถนำไปคาดการณ์เฟสการสะท้อนของคลื่นตลอดจนคุณสมบัติของคลื่นพื้นผิว นอกจากนี้ค่า L และ C ในวงจรสมมูลสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-48) และ (2-49)

$$C = \frac{w\epsilon_0(1+\epsilon_r)}{\pi} \cosh^{-1} \left(\frac{w+g}{g} \right) \quad (2-48)$$

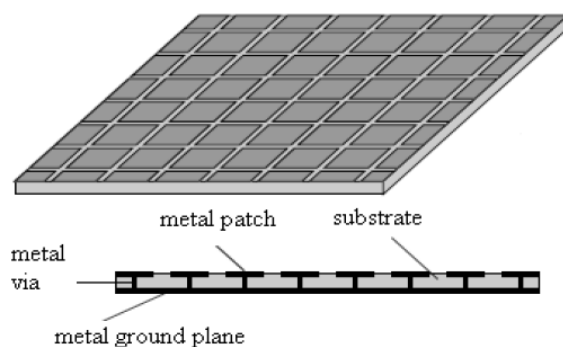
$$L = \mu_0\mu_r h \quad (2-49)$$

ส่วนย่อยช่วงความถี่ของเฟสการสะท้อนกลับระหว่าง $\pm 90^\circ$ คือ

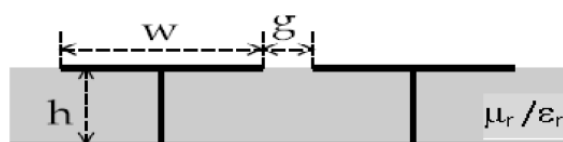
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} : \text{ความถี่เรโซแนนท์} \quad (2-50)$$

$$BW = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2-51)$$

โดยที่ η คือ ค่าความต้านทานในอากาศมีค่าเท่ากับ 120π

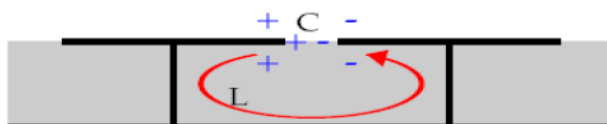


(ก)



(ข)

ภาพที่ 2-18 โครงสร้างไดอะแกรมของตัวนำแม่เหล็กเทียม Artificial magnetic conductor (AMC) แบบ MUSHROOM-LIKE: (ก) โครงสร้าง และ (ข) ตัวแปรสำคัญ



ภาพที่ 2-19 วงจรสมมูล LC สำหรับโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม Artificial magnetic conductor (AMC) แบบ MUSHROOM-LIKE

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก $\epsilon_r = 4.3$

ค่าความซึมซาบแม่เหล็กประสิทธิผล $\mu_r = 1$

ความหนาวัสดุฐานรอง $h = 1.6$ มิลลิเมตร

ค่าความนำของวัสดุตัวนำ (ทองแดง) $\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m

ความหนาของวัสดุตัวนำ $t = 0.035$ มิลลิเมตร

ค่าไดอิเล็กตริกทอสแทนเจนต์ $\tan \delta = 0.02$

ความกว้างของระนาบโลหะ w

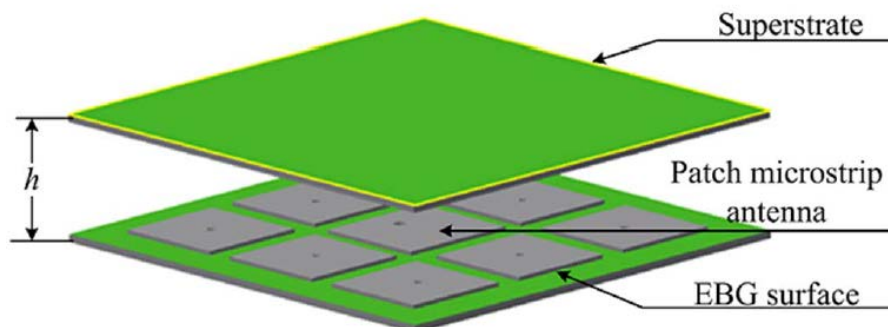
ความกว้างช่องว่างระหว่างราบโลหะ g

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการออกแบบและสร้างอภิวัดสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศไมโครสตริปในระบบเก็บเกี่ยวพลังงานที่ความถี่วิทยุ 2.45 GHz โดยระบบจะประกอบไปด้วย 3 ส่วน ได้แก่ 1) งานวิจัยของ Fhafhiem, Naktong, Khoomwong and Krachodnok (2016) นำเสนอเกี่ยวกับสายอากาศภาครับที่ถูกออกแบบโดยใช้อภิวัดที่มีโครงสร้างแบบอิเล็กโตรแมกเนติกแบนนแก่ป (EBG) รูปแบบ MUSHROOM-LIKE วางอยู่ล้อมรอบสายอากาศตัวรับ 2) งานวิจัยของ Nguyen, Kim, Kim, and Jang (2009); Meriche, Attia, Messai, and Denidni (2016) นำเสนอเกี่ยวกับโครงสร้างอภิวัดที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำแม่เหล็กเทียม (Artificial magnetic conductor: AMC) เพื่อใช้เป็นระนาบกราวด์ของสายอากาศภาคส่ง และ 3) งานวิจัยของ Filiberto, Toscano, and Vegni (2007) นำเสนอเกี่ยวกับ โครงสร้างอภิวัดที่มีดัชนีการหักเหเป็นลบ

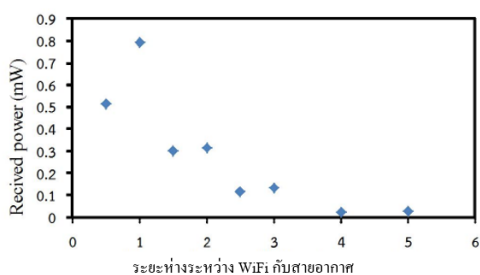
1. งานวิจัยของ Fhafhiem, et al. (2016)

เรื่อง Design of resonator rectenna using metamaterials for wireless power transmission ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปภาครับที่ความถี่ 2.45 GHz ที่ใช้งานร่วมกับอภิวัดชนิด EBG แบบ MUSHROOM-LIKE และ โครงสร้างพื้นผิวสะท้อนบางส่วน Partially reflective surface (PRS) เพื่อปรับปรุงอัตราการขยายของสายอากาศให้ดีขึ้น โดยที่โครงสร้าง EBG แบบ MUSHROOM-LIKE สามารถช่วยยับยั้งการเกิดคลื่นพื้นผิวบนสายอากาศได้

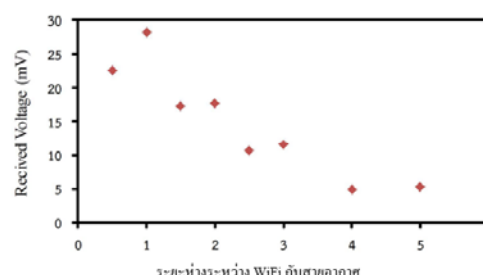


ภาพที่ 2-20 สายอากาศกับโครงสร้าง EBG และ PSR

งานวิจัยข้างต้นได้ทำการทดลองและวัดผลของโครงสร้าง EBG และ PSR เมื่อใช้งานร่วมกับสายอากาศผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสายอากาศเมื่อไม่มีโครงสร้าง EBG และ PSR มีอัตราการขยายเป็น 5.21 dBi และเมื่อใช้งานร่วมกับโครงสร้าง EBG อัตราการขยายเพิ่มขึ้นเป็น 8.08 dBi สุดท้ายเมื่อใช้ทั้งโครงสร้าง EBG และ PSR อัตราการขยายเพิ่มขึ้นเป็น 11.97 dBi นอกจากนี้ในงานวิจัยได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนระยะห่างของสายอากาศภาครับและ WiFi



(ก) ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้



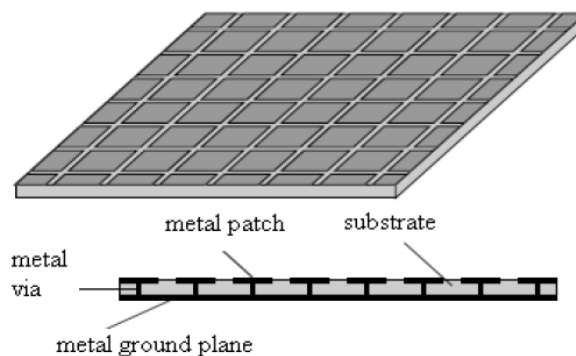
(ข) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ของสายอากาศ

ภาพที่ 2-21 ผลจากการวัด (ก) ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้ (ข) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ของสายอากาศ

2. งานวิจัยของ Nguyen, et al. (2009)

เรื่อง Design of a wideband mushroom-like electromagnetic bandgap structure with magneto-dielectric substrate ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างของ วัสดุที่ถูกเรียกว่า Electromagnetic band gap (EBG) หรือช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าและสามารถเรียกอีกอย่างหนึ่ง คือ ตัวนำแม่เหล็กเทียม Artificial magnetic conductor (AMC)

เพื่อนำมาใช้แทนไดอิเล็กตริกสับสเตรท (Dielectric substrate) สำหรับเพิ่มคุณภาพแบนด์วิดท์ การสะท้อนกลับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและลดขนาดการออกแบบของสายอากาศ

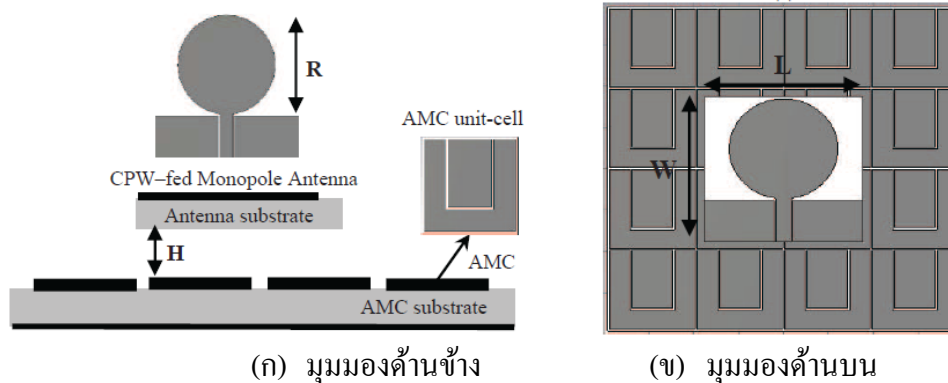


ภาพที่ 2-22 โครงสร้างไออะแกรมของ EBG แบบ MUSHROOM-LIKE

งานวิจัยข้างต้นได้ใช้การออกแบบและจำลองโครงสร้างของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าระหว่างโครงสร้างของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้กับ Normal dielectric substrate และ Magneto-dielectric substrates ซึ่งเห็นได้ว่า Magneto-dielectric substrates ที่นำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม นั้นมีช่วงความถี่แบนด์วิดมากกว่าโครงสร้างของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้กับ Normal dielectric substrate ประมาณ 25%

3. งานวิจัยของ Meriche, Attia, Messai, and Denidni (2016)

เรื่อง Gain improvement of a wideband monopole antenna with novel artificial magnetic conductor ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มอัตราการขยายของสายอากาศโมโนโพล โดยใช้โครงสร้างอวิวัตต์ที่เป็นตัวนำแม่เหล็กเทียม (Artificial magnetic conductor: AMC) วางด้านหลังสายอากาศเพื่อที่จะสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาในลักษณะเสริมเฟสซึ่งทำให้การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดีขึ้น

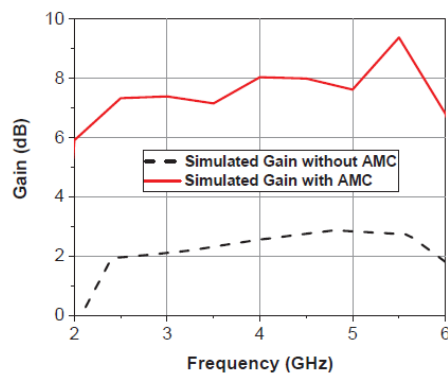


(ก) มุมมองด้านข้าง

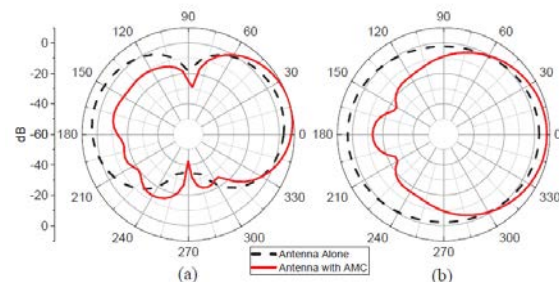
(ข) มุมมองด้านบน

ภาพที่ 2-23 การตั้งของสายอากาศโมโนโพลที่อยู่บนโครงสร้างอภิวัดคู่ที่เป็นตัวนำแม่เหล็กเทียม

จากงานวิจัยที่กล่าวไว้ข้างต้น โครงสร้างอภิวัดคู่ที่เป็นตัวนำแม่เหล็กเทียมถูกออกแบบให้เป็นอาร์เรย์ 4x4 และมีสายอากาศโมโนโพลวางไว้ด้านบนผลการจำลองเห็นได้ว่าอัตราการขยายของสายอากาศโมโนโพลที่มีโครงสร้างอภิวัดคู่ที่เป็นตัวนำแม่เหล็กเทียมมีอัตราการขยายมากกว่าสายอากาศโมโนโพลที่ไม่มีโครงสร้างอภิวัดคู่ที่เป็นตัวนำแม่เหล็กเทียมประมาณ 3 เท่า และมีรูปแบบการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีขึ้น ดังภาพที่ 2-24



(ก) การเปรียบเทียบอัตราการขยาย



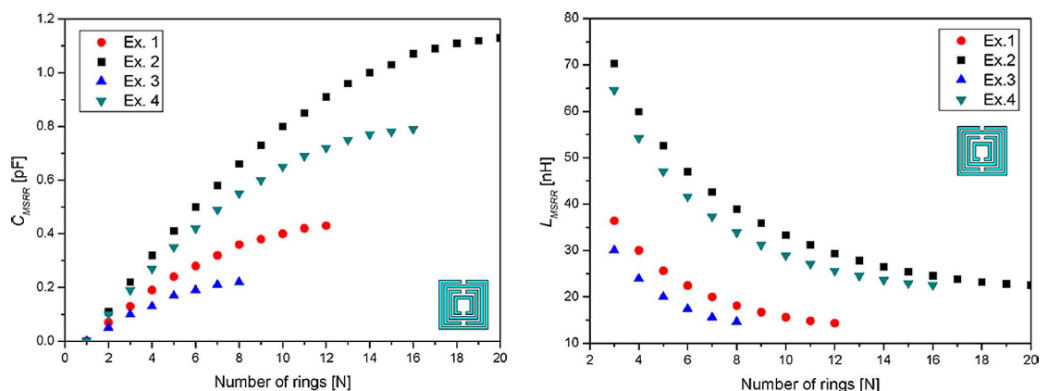
(ข) รูปแบบการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ภาพที่ 2-24 ผลการจำลองระหว่างสายอากาศโมโนโพลที่มีและไม่มีโครงสร้างอภิวัดคู่ที่เป็นตัวนำแม่เหล็กเทียม (ก) การเปรียบเทียบอัตราการขยาย (ข) รูปแบบการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

4. งานวิจัยของ Filiberto, et al. (2007)

เรื่อง Design of Spiral and Multiple split-ring resonators for the realization of miniaturized metamaterial samples งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบโครงสร้างอภิวัดรูปแบบตัวกำทอนแบบวงแหวนและวงแหวนแยก Spiral resonators (SR) and Multiple split-ring resonators (MSRR) ที่มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบทำให้เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นโครงสร้างอภิวัดรูปแบบตัวกำทอนแบบวงแหวนและวงแหวนแยก จะทำให้ความจางหายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลดลง งานวิจัยนี้ออกแบบโครงสร้างอภิวัดรูปแบบตัวกำทอนแบบวงแหวนและวงแหวนแยกโดยใช้หลักการการเกิดเรโซแนนซ์ f_0 ของโครงสร้างของตัวกำทอนแบบวงแหวนและแบบวงแหวนแยกซึ่งให้ทฤษฎีวงจรสมมูล LC ในการหาการเกิดเรโซแนนซ์

การออกแบบโครงสร้างอภิวัดรูปแบบตัวกำทอนแบบวงแหวนและวงแหวนแยกที่กล่าวมาข้างต้นเราได้เน้นเฉพาะการออกแบบโครงสร้างอภิวัดรูปแบบตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก (MSRR) เพราะโครงสร้างนี้สามารถประยุกต์ใช้งานกับช่วงความถี่วิทยุได้



(ก) ค่าความเก็บประจุรวม

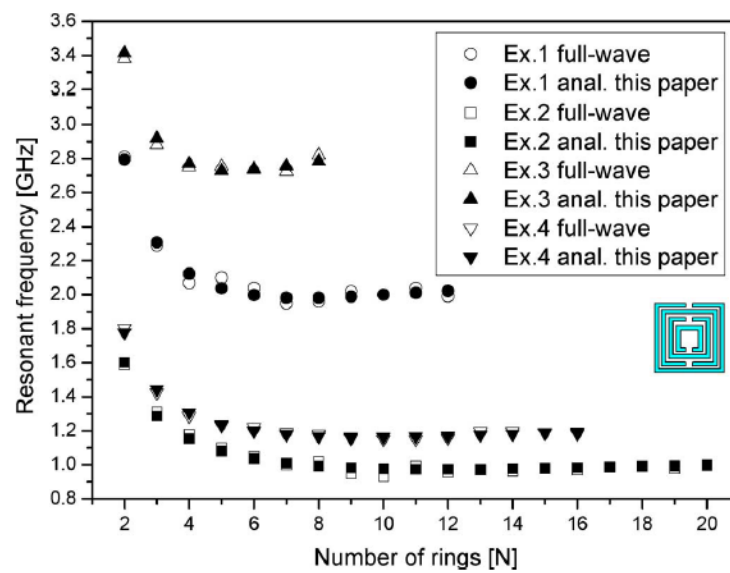
(ข) ค่าการเหนี่ยวนำรวม

ภาพที่ 2-25 ตัวอย่างการหาค่าความเก็บประจุรวม (ก) และค่าการเหนี่ยวนำรวม (ข)

จากภาพที่ 2-25 เป็นการแสดงตัวอย่างการหาค่าความเก็บประจุรวมและค่าการเหนี่ยวนำรวม โดยกำหนดให้ N คือ จำนวนรอบของวงแหวนส่วนรายละเอียดของตัวอย่างจะแสดงดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 รายละเอียดของการหาค่าความถี่ประจุมและค่าการเหนี่ยวนำรวม

ตัวอย่างที่	ความยาวของวงแหวน ตัวนำที่ 1 (L) mm	ความกว้างของตัวนำเป็น (w) mm	ระยะห่างระหว่างตัวนำ เป็น (s) mm
1	5	0.1	0.1
2	8	0.1	0.1
3	5	0.1	0.2
4	8	0.1	0.15



ภาพที่ 2-26 ความถี่เรโซแนนซ์ของโครงสร้างอภิวัดแบบตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก (MSRR)

บทที่ 3

หลักการและแนวคิดการออกแบบ

บทนี้กล่าวถึงการคำนวณและการออกแบบสายอากาศและอภิวัดสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพระบบเก็บเกี่ยวพลังงานที่ความถี่วิทยุ 2.45 GHz โดยการออกแบบทั้งการคำนวณและออกแบบจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave studio จะได้ผลการจำลอง เช่น ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับ S_{11} ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน S_{21} ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ ค่า S_{11} และ S_{21} เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการบ่งบอกถึงความกว้างแถบความถี่ของสายอากาศและการส่งผ่านของสายอากาศ และเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการดำเนินการและจำลองดังกล่าว



ภาพที่ 3-1 ภาพรวมของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายกับอภิวัด

ภาพรวมของระบบดังภาพที่ 3-1 คือ การเพิ่มประสิทธิภาพในระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายที่ความถี่วิทยุ 2.45 GHz การวิจัยครั้งนี้ได้สร้างสายอากาศที่รับสัญญาณไร้สายที่คลื่นความถี่วิทยุ 2.45 GHz มาใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานและความถี่ที่เลือกรับคือ 2.4-2.8 GHz การเก็บเกี่ยวพลังงานที่คลื่นความถี่วิทยุในความเป็นจริงแล้วนั้นจะเกิดการสูญเสียขึ้นในระบบ ยกตัวอย่างเช่น ความสูญเสียภายในอากาศ ความไม่แม่นยำของการโพลาไรซ์ การไม่แม่นยำของอิมพีแดนซ์ที่ป้อนเข้าสายอากาศ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้เราได้ศึกษาและหาวิธีแก้ปัญหาโดยนำวัสดุพิเศษหรือที่

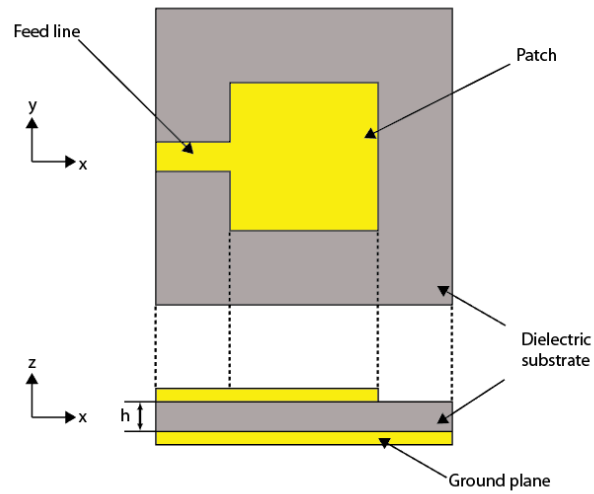
เรียกว่า “อภิวัดดู” มาใช้สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพในระบบเก็บเกี่ยวพลังงานซึ่งอภิวัดดูที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 โครงสร้างแบบ MUSHROOM-LIKE ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำแม่เหล็กเทียม (Artificial magnetic conductor: AMC) และส่วนที่ 2 โครงสร้างอภิวัดดูที่มีค่าดัชนีการหักเหที่เป็นลบหรือที่เรียกกันว่าโครงสร้างอภิวัดดูแบบตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก (MSRR) จากนั้นได้ทำการออกแบบอภิวัดดูที่มีโครงสร้างแบบ MUSHROOM-LIKE ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำแม่เหล็กเทียม (Artificial magnetic conductor: AMC) และถูกนำมาวางไว้ด้านหลังสายอากาศภาครับเพื่อใช้เป็นระนาบกรวดของสายอากาศทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการสะท้อนกลับในลักษณะเสริมเฟสทำให้ช่วงของแบนด์วิธที่ อัตราการขยายและช่วยยับยั้งการเกิดคลื่นพื้นผิวเพื่อให้สัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ดีขึ้น นอกจากนี้เราได้วางอภิวัดดูที่มีค่าดัชนีการหักเหที่เป็นลบหรือที่เรียกกันว่าโครงสร้างอภิวัดดูแบบตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก (MSRR) ไว้ใกล้กับสายอากาศภาครับเพื่อลดการจางหายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกส่งผ่าน โครงสร้างนี้ ดังนั้นจึงได้สร้างระบบเก็บเกี่ยวพลังงานที่มีความถี่วิทยุ 2.45 GHz พร้อมกับประยุกต์ใช้อภิวัดดูเหล่านี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สาย

1. การออกแบบและการสร้างสายอากาศ

มาตรฐานความถี่ 2.45 GHz เป็นช่วงความถี่ที่ใช้กันระหว่าง 2.412GHz–2.462 GHz ซึ่งอยู่ในมาตรฐานสากล 802.11b/g/n มีข้อดีคือ เป็นที่นิยมและใช้กันในหลายอุปกรณ์ ส่วนข้อเสียคือความหนาแน่นของช่องความถี่ 2.4 GHz มีอยู่มากจึงอาจทำให้เกิดการรบกวนของสัญญาณ

สายอากาศที่ถูกออกแบบเพื่อใช้กับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายที่มีความถี่วิทยุ 2.45 GHz นั้นเป็นสายอากาศที่ถูกออกแบบให้มีขนาดเล็ก กะทัดรัดและมีแบนด์วิธที่กว้างพอ ครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งาน โดยส่วนใหญ่แล้วนั้นเป็นสายอากาศแบบไมโครสตริปแพตช์ เนื่องจากเป็นสายอากาศที่มีขนาดและน้ำหนักเบาและสามารถสร้างได้ง่าย

ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปให้ทำงานในช่วงความถี่ที่ต้องการ ค่าที่จำเป็นต้องทราบตัวแปรสำหรับการออกแบบ คือ ความถี่ที่ทำงาน (f_0) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) และค่าความสูงสับสเตรท (h) ของวัสดุที่ใช้ออกแบบซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ FR-4 ในการออกแบบสายอากาศ



ภาพที่ 3-2 โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก $\epsilon_r = 4.3$

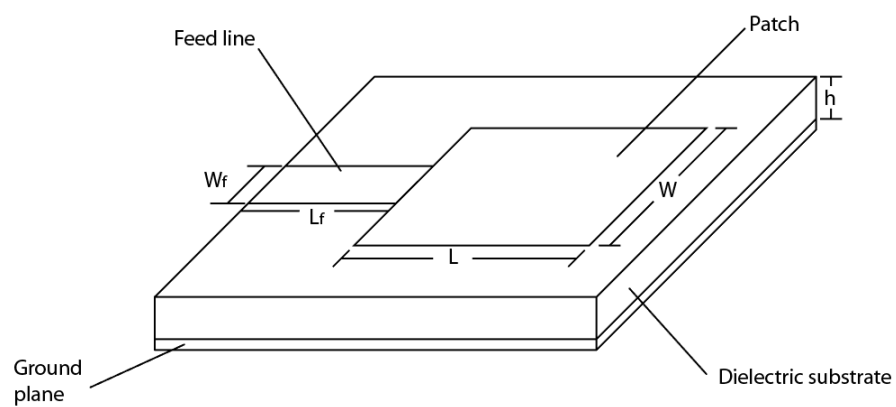
ความหนาวัสดุฐานรอง $h = 1.6$ มิลลิเมตร

ค่าความนำของวัสดุตัวนำ (ทองแดง) $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$

ความหนาของวัสดุตัวนำ $t = 0.035$ มิลลิเมตร

ค่าไดอิเล็กตริกทอสแทนเจนต์ $\tan \delta = 0.02$

สมการที่ใช้ในการออกแบบไมโครสตริป



ภาพที่ 3-3 ส่วนต่าง ๆ ของไมโครสตริป

เมื่อ f คือ Resonant frequency หน่วย Hz

h คือ ความสูงสับสเตรท (Height of dielectric substrate) หน่วย mm

ϵ_r คือ Relative permittivity

C คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s

W คือ ความกว้างแพทช์ (Width of the patch element) หน่วย mm

l คือ ความยาวแพทช์ (Actual length) หน่วย mm

ϵ_{eff} คือ ค่าไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective relative permittivity)

l_{eff} คือ ความยาวแพทช์ประสิทธิผล (Effective length)

l_f คือ ความยาวฟีดไลน์ (Feed line length) หน่วย mm

l_g คือ ความยาวของระนาบกราวด์ (Ground plan length) หน่วย mm

W_f คือ ความกว้างของฟีดไลน์ (Feed line width) หน่วย mm

W_g คือ ความกว้างของระนาบกราวด์ (Ground plan width) หน่วย mm

λ คือ ความยาวคลื่น (Lamda)

Δl คือ Length extension

ขั้นที่ 1 คำนวณค่าความกว้างของแพทช์ (W)

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (3-1)$$

$$W = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.45 \times 10^9 \sqrt{\frac{4.3 + 1}{2}}}$$

$$W = 37.6 \text{ mm}$$

ขั้นที่ 2 คำนวณค่า Effective dielectric constant (ϵ_{reff})

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-1/2} \quad (3-2)$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{4.3 + 1}{2} + \frac{4.3 - 1}{2} \left(1 + \frac{12 \times 1.6 \times 10^{-3}}{37.6 \times 10^{-3}} \right)^{-1/2}$$

$$\epsilon_{reff} = 3.49$$

ขั้นที่ 3 คำนวณค่า Effective length (l_{eff})

$$l_{eff} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (3-3)$$

$$l_{eff} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.45 \times 10^9 \sqrt{3.49}}$$

$$l_{eff} = 32.8 \text{ mm}$$

ขั้นที่ 4 คำนวณค่า Length extension (Δl)

$$\Delta l = 0.412h \left[\frac{\epsilon_{reff} + 0.3}{\epsilon_{reff} + 0.258} \right] \left[\frac{\left[\frac{W}{h} \right] + 0.264}{\left[\frac{W}{h} \right] + 0.8} \right] \quad (3-4)$$

$$\Delta l = 0.412 \times 0.0016 \left[\frac{3.49 + 0.3}{3.49 + 0.258} \right] \left[\frac{\left[\frac{37.6 \times 10^{-3}}{1.6 \times 10^{-3}} \right] + 0.264}{\left[\frac{37.6 \times 10^{-3}}{1.6 \times 10^{-3}} \right] + 0.8} \right]$$

$$\Delta l = 0.652 \text{ mm}$$

ขั้นที่ 5 คำนวณค่าความยาวจริงของแพทช์ (l)

$$l = l_{eff} - (2\Delta l) \quad (3-5)$$

$$l = (32.8 \times 10^{-3}) - (2 \times 0.652 \times 10^{-3})$$

$$l = 31.496 \text{ mm}$$

ขั้นที่ 6 คำนวณค่าความยาว (l_g) และความกว้าง (W_g) ของระนาบกราวด์

$$l_g = 6h + l \quad (3-6)$$

$$l_g = (6 \times 1.6 \times 10^{-3}) + (31.496 \times 10^{-3})$$

$$l_g = 41.096 \text{ mm}$$

$$W_g = 6h + W \quad (3-7)$$

$$W_g = (6 \times 1.6 \times 10^{-3}) + (37.6 \times 10^{-3})$$

$$W_g = 47.2 \text{ mm}$$

ขั้นที่ 7 คำนวณค่าความกว้าง (W_f) และความยาว (l_f) ของฟีดไลน์

$$\lambda = \frac{c}{f_0} \quad (3-8)$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{2.45 \times 10^9}$$

$$\lambda = 122.4 \text{ mm}$$

$$W_f = \frac{\lambda}{40} = \frac{122.4 \times 10^{-3}}{40} \quad (3-9)$$

$$W_f = 3.06 \text{ mm}$$

$$l_f = W_f \times 3.96 \quad (3-10)$$

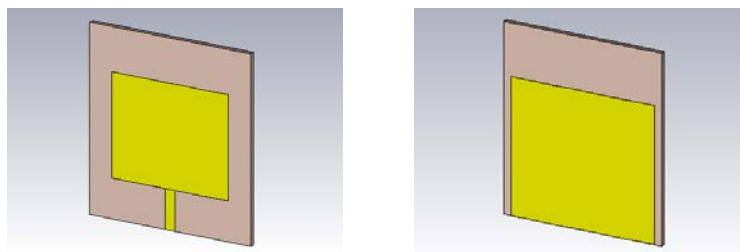
$$l_f = 3.06 \times 10^{-3} \times 3.96 = 12.1176 \text{ mm}$$

2. การจำลองสายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST Microwave studio

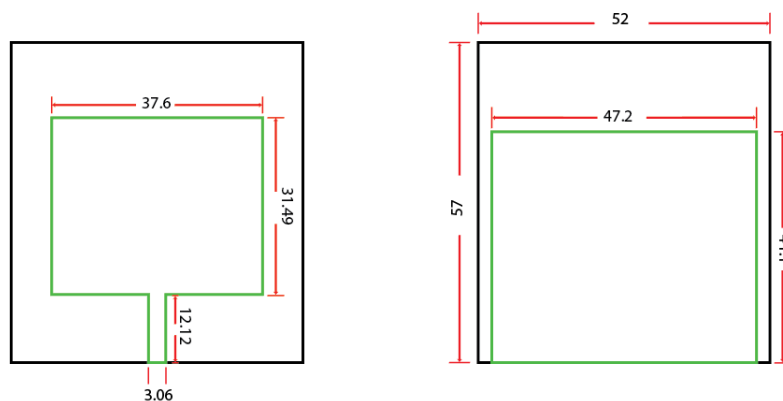
ในการออกแบบได้ใช้แผ่น FR-4 ที่มีความหนา $h = 1.6 \text{ mm}$ ที่ความถี่ $f = 2.45 \text{ GHz}$ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก $\epsilon_r = 4.3$ จะได้สายอากาศไมโครสตริปดังนี้

2.1 สายอากาศเริ่มต้นที่ความถี่ $f = 2.45 \text{ GHz}$ ได้สายอากาศไมโครสตริป

ดังภาพที่ 3-5

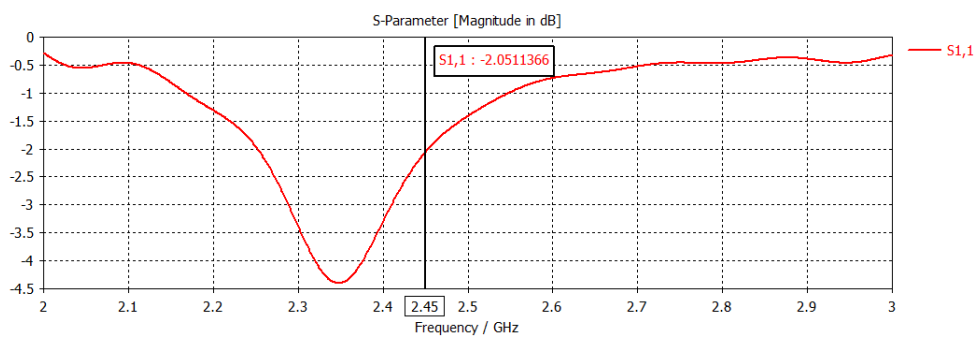


ภาพที่ 3-4 แบบจำลองสายอากาศไมโครสตริปเริ่มต้นโดยใช้โปรแกรม CST

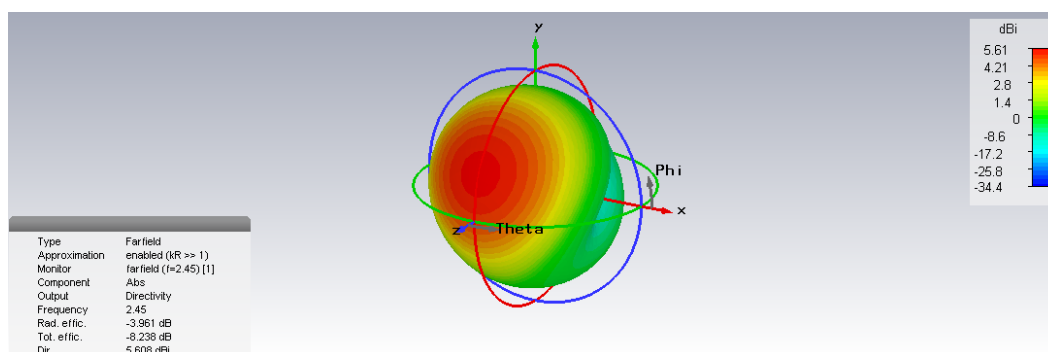


ภาพที่ 3-5 รายละเอียดของสายอากาศไมโครสตริปเริ่มต้น

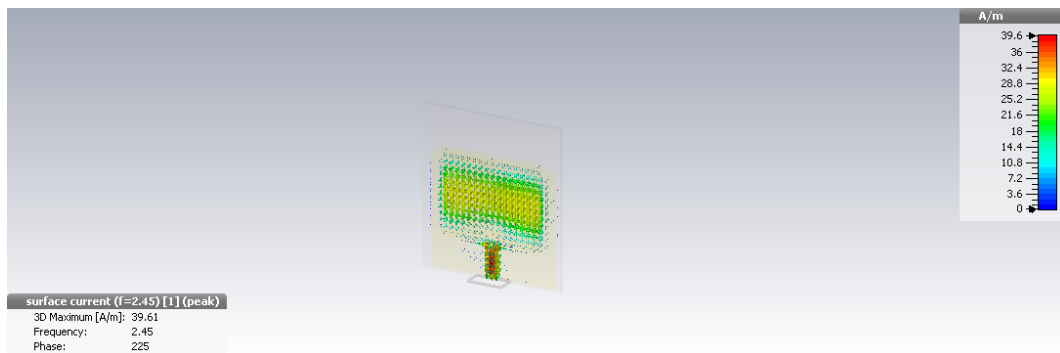
จากการจำลองสายอากาศเริ่มต้นจะได้กราฟ S_{11} ดังภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-6 กราฟ S_{11} จากสายอากาศเริ่มต้นที่ความถี่ $f = 2.45 \text{ GHz}$



ภาพที่ 3-7 3D Radiation pattern จากสายอากาศเริ่มต้นที่ความถี่ $f = 2.45 \text{ GHz}$



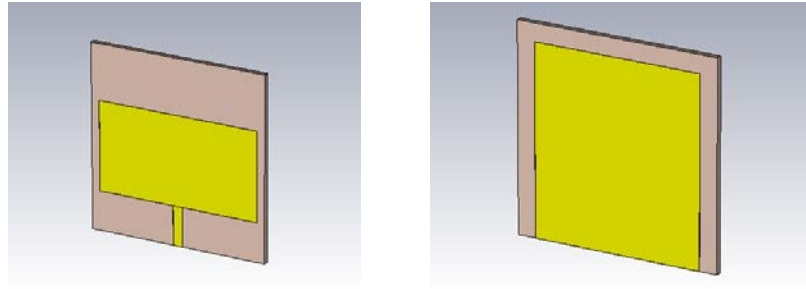
ภาพที่ 3-8 Surface current จากสายอากาศเริ่มต้นที่ความถี่ $f = 2.45 \text{ GHz}$

จากกราฟ เมื่อนำค่าความกว้าง ความยาวที่คำนวณได้ เพื่อสร้างแผ่นไมโครสตริปในโปรแกรม CST จะได้ค่าความถี่ $f = 2.35 \text{ GHz}$ และได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $S_{11} = -4.39 \text{ dB}$ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากความถี่ที่ต้องการ ใช้อยู่มาดั่งนั้นจึงได้มีการปรับปรุงตัวแปรของแบบสายอากาศใหม่ในหัวข้อต่อไป

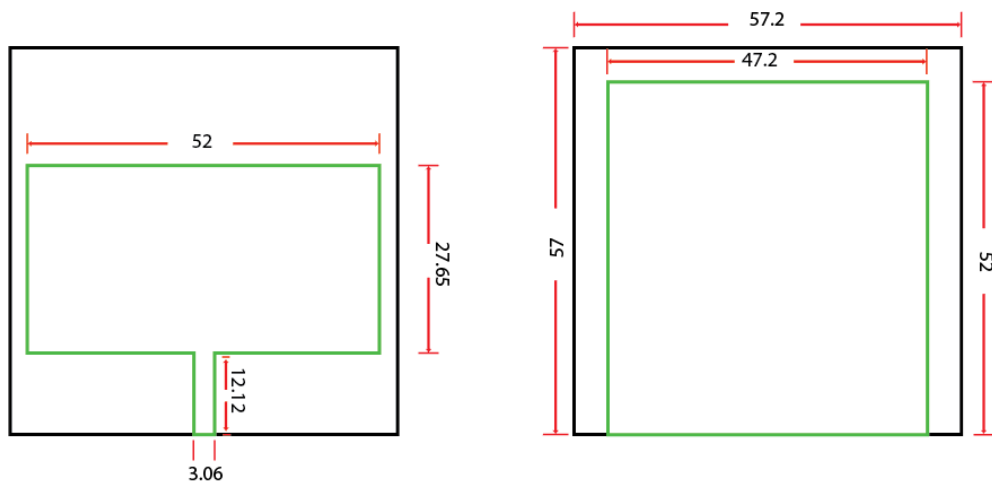
2.2 สายอากาศที่ปรับปรุง จากสายอากาศเริ่มต้นที่เราได้ออกแบบตามค่าตัวแปรที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อที่ 3.1.1 จะเห็นได้ว่าค่าความถี่ที่ได้ นั่นคือ $f = 2.35 \text{ GHz}$ ซึ่งคลาดเคลื่อนจากความถี่ที่กำหนดไว้คือ $f = 2.45 \text{ GHz}$ อยู่มาดั่งนั้นการออกแบบสายอากาศได้ทำการปรับแต่งใหม่เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ดียิ่งขึ้นและตรงตามความถี่ที่ต้องการใช้ตามตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ค่าตัวแปรของสายอากาศเริ่มต้นกับสายอากาศปรับปรุง

ค่าตัวแปร	สายอากาศเริ่มต้น (mm)	สายอากาศปรับปรุง (mm)
W_g	47.2	47.2
l_g	41.096	52
W	37.6	52
l	31.49	27.65
W_s	52	57.2
l_s	57	57

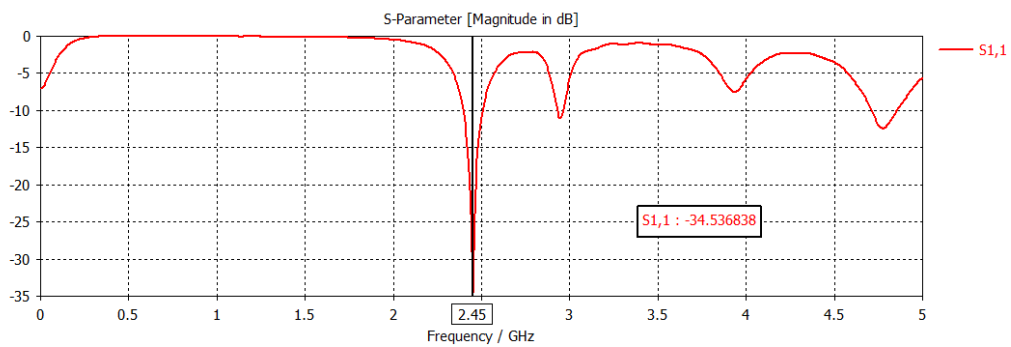


ภาพที่ 3-9 แบบจำลองสายอากาศไมโครสตริปปรับปรุงโดยใช้โปรแกรม CST

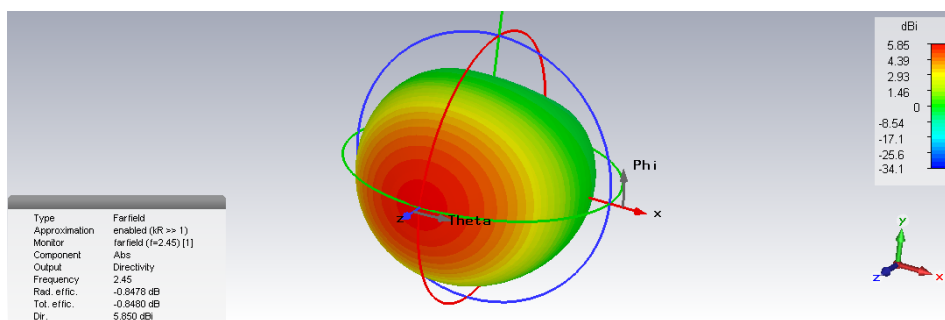


ภาพที่ 3-10 รายละเอียดของสายอากาศไมโครสตริปปรับปรุง

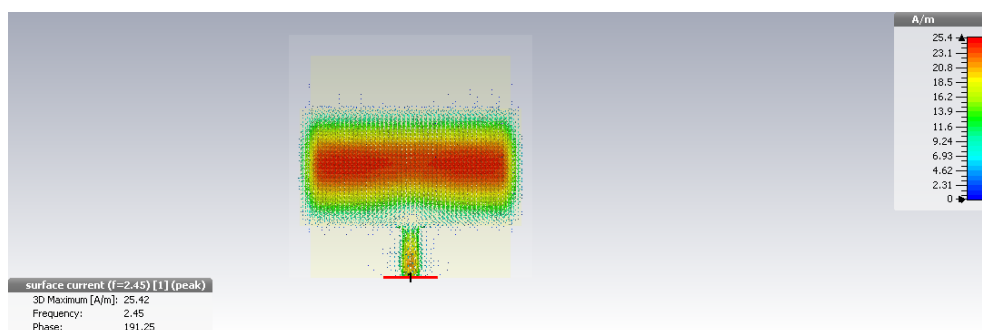
จากการจำลองสายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST จะได้กราฟของ (S_{11}) ดังภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-11 กราฟของ (S_{11}) จากสายอากาศปรับปรุงที่ความถี่ $f = 2.45 \text{ GHz}$



ภาพที่ 3-12 3D Radiation pattern จากสายอากาศปรับปรุงที่ความถี่ $f = 2.45 \text{ GHz}$



ภาพที่ 3-13 Surface current จากสายอากาศปรับปรุงที่ความถี่ $f = 2.45 \text{ GHz}$

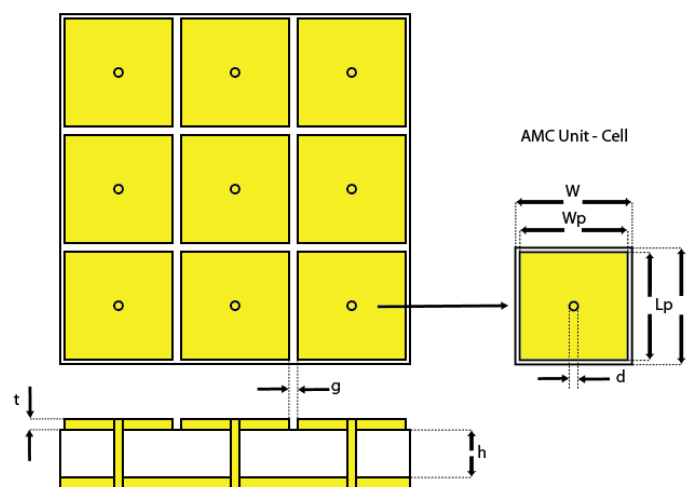
สามารถสรุปได้ว่าเมื่อเราทำการปรับปรุงการออกแบบด้วยวิธีปรับค่าความกว้างและความยาว ดังตารางที่ 3-1 พร้อมกับใช้โปรแกรมจำลอง CST สร้างสายอากาศปรับปรุงดังภาพที่ 3-9 เพื่อดูค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) และค่าแบนด์วิดท์ที่เหมาะสม จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ($S_{11} \approx -34.536 \text{ dB}$) และค่าแบนด์วิดท์ ที่ -10 dB เท่ากับ 8.57%

3. การออกแบบโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม (Artificial magnetic conductor: AMC)

ปัจจุบันมีประเภทโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมที่แตกต่างกันอยู่มากมายและยังมีการออกแบบโครงสร้างใหม่ ๆ ขึ้นมาอยู่ตลอด การวิจัยครั้งนี้เน้นไปที่โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม ชนิด Mushroom-Like ที่สามารถออกแบบและประยุกต์ใช้กับแผ่น Print circuit board (PCB) ชนิด FR-4 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่หาใช้ได้ง่ายและมีราคาถูก อย่างไรก็ตามข้อเสียของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม คือ ณ ความถี่เรโซแนนท์โครงสร้างเหล่านี้จะแสดงคุณลักษณะการเกิดขึ้นของช่องความถี่ที่แคบโดยเฉพาะในช่วงความถี่ต่ำกว่า 1 GHz ช่องความถี่จะแคบมากนอกจากนี้ขนาดของโครงสร้างจะมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยซึ่งยากต่อการประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศที่มีขนาดเล็ก

ในการออกแบบโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม ให้ทำงานในช่วงความถี่ที่ต้องการ ค่าที่จำเป็นต้องทราบสำหรับการออกแบบ คือ ความถี่ที่ทำงาน (f_0) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ความกว้างของระนาบโลหะ (w) ความกว้างช่องว่างระหว่างระนาบโลหะ (g) ค่าความซึมซาบแม่เหล็กประสิทธิภาพ (μ_r) และค่าความสูงสับสเตรท (h) ของวัสดุที่ใช้ออกแบบซึ่งในการวิจัยครั้งนี้จะใช้ FR-4 ในการออกแบบโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 ชนิด Mushroom-Like ดังภาพที่ 3-14

สมการที่ใช้ในการออกแบบ โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม



ภาพที่ 3-14 โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 ชนิด Mushroom-Like

เมื่อ w คือ ความกว้างของระนาบกราวด์ (Ground plan width) หน่วย mm

L คือ ความยาวของระนาบกราวด์ (Ground plan length) หน่วย mm

w_p คือ ความกว้างแพทช์ (Width of the patch element) หน่วย mm

L_p คือ ความยาวแพทช์ (Length of the patch element) หน่วย mm

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเวียส์ (Vias) หน่วย mm

g คือ ช่องว่างระหว่างแพทช์ (Gap between patch element) หน่วย mm

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าในสุญญากาศ (Permittivity of vacuum = 8.854×10^{-12})

μ_0 คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กในสุญญากาศ (Permeability of vacuum = $1.25663706 \times 10^{-6}$)

μ_r คือ Relative permeability = 1

การออกแบบโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 ให้มีความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2.45 GHz ซึ่งใช้ทฤษฎีวงจรมูล LC ในการอธิบายและสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-37) และสมการที่ (2-38)

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่าความเก็บประจุของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม

$$C = \frac{w_p \epsilon_0 (1 + \epsilon_r)}{\pi} \cosh^{-1} \left(\frac{w_p + g}{g} \right) \quad (3-11)$$

$$C = \frac{29.3 \times 10^{-3} \times 8.854 \times 10^{-12} (1 + 4.3)}{\pi} \cosh^{-1} \left(\frac{29.3 \times 10^{-3} + 0.5 \times 10^{-3}}{0.5 \times 10^{-3}} \right)$$

$$C = 2.0924 \times 10^{-12} \text{ F}$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าความเหนี่ยวนำของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม

$$L = \mu_0 \mu_r h \quad (3-12)$$

$$L = (1.25663706 \times 10^{-6}) \times (1) \times (1.6)$$

$$L = 2.01 \times 10^{-6} \text{ H}$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าความถี่เรโซแนนซ์ของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3-13)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(2.01 \times 10^{-6})(2.0924 \times 10^{-12})}}$$

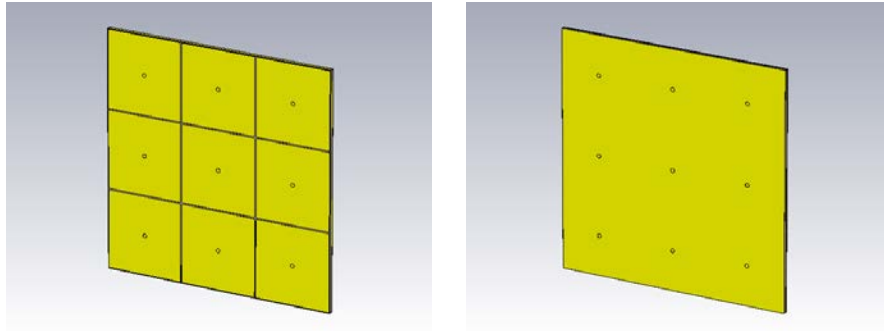
$$f_0 = 2.4538 \times 10^9$$

4. การจำลองโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 โดยใช้โปรแกรม CST

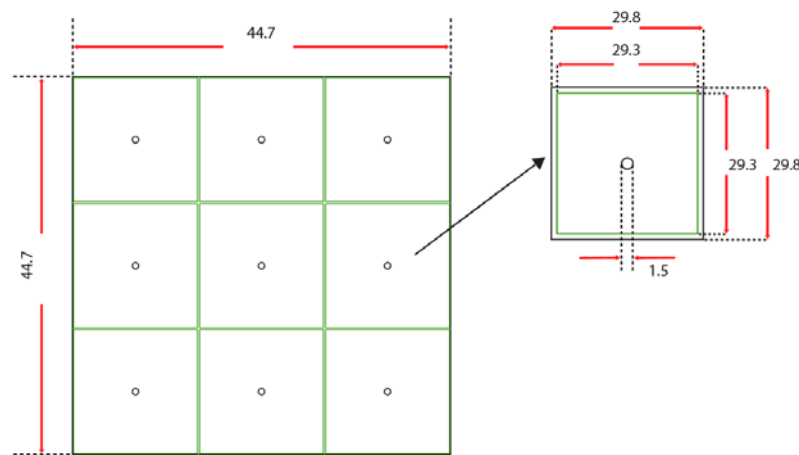
Microwave studio

ในการออกแบบเราได้ใช้แผ่น FR-4 ที่มีความสูงสับสเตรทแตกต่างกันคือ $h = 1.6, 1, 0.8 \text{ mm}$ ที่ความถี่ใช้งาน $f = 2.45 \text{ GHz}$ และมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก $\epsilon_r = 4.3, \mu_r = 1$ จะได้โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมดังนี้

4.1 โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 เริ่มต้น แผ่น FR-4 ที่มีความสูง สับสเตรท $h = 1.6, 1, 0.8 \text{ mm}$ ที่ความถี่ $f = 2.45 \text{ GHz}$ จะให้ความกว้างแพทช์ $w_p = 29.3 \text{ mm}$ และ ช่องว่างระหว่างแพทช์ $g = 0.5 \text{ mm}$ โดยโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 ที่ออกแบบจะเป็นดังภาพที่ 3-15

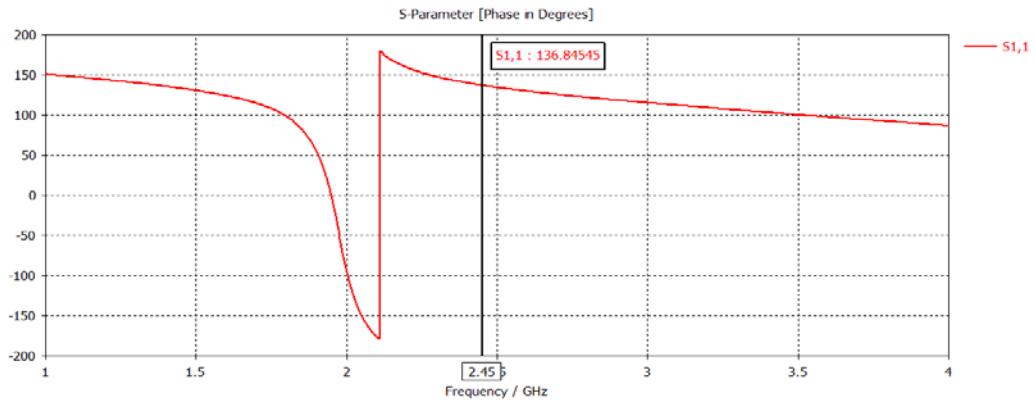


ภาพที่ 3-15 แบบจำลองโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 เริ่มต้นโดยใช้โปรแกรม CST

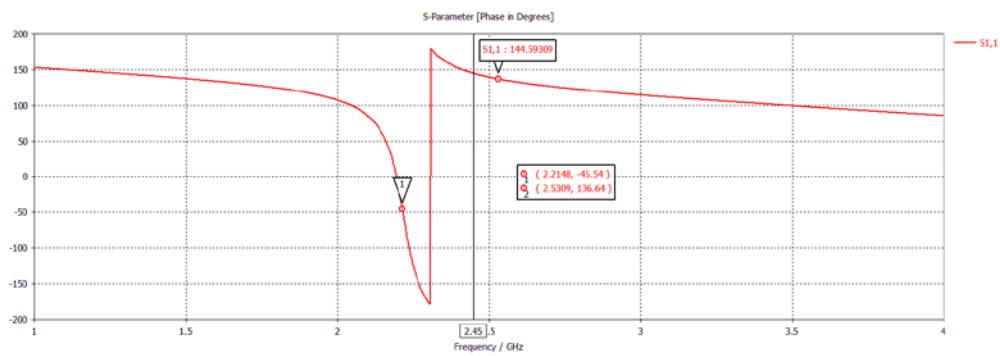


ภาพที่ 3-16 รายละเอียดของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 เริ่มต้น

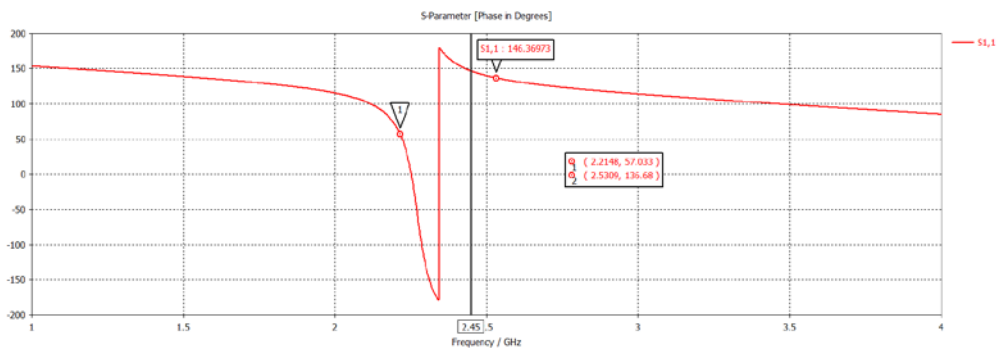
จากการโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 เริ่มต้น จะได้กราฟเฟสการสะท้อน เทียบกับความถี่ ดังภาพที่ 3-17 ถึง ภาพที่ 3-19



ภาพที่ 3-17 เฟสการสะท้อนเทียบกับความถี่จากโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 เริ่มต้น
ที่มีความสูงสับสเตรท $h = 1.6 \text{ mm}$ ของความถี่ $f = 2.45 \text{ GHz}$



ภาพที่ 3-18 เฟสการสะท้อนเทียบกับความถี่จากโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 เริ่มต้น
ที่มีความสูงสับสเตรท $h = 1 \text{ mm}$ ของความถี่ $f = 2.45 \text{ GHz}$



ภาพที่ 3-19 เฟสการสะท้อนเทียบกับความถี่จากโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 เริ่มต้น
ที่มีความสูงสับสเตรท $h = 0.8 \text{ mm}$ ของความถี่ $f = 2.45 \text{ GHz}$

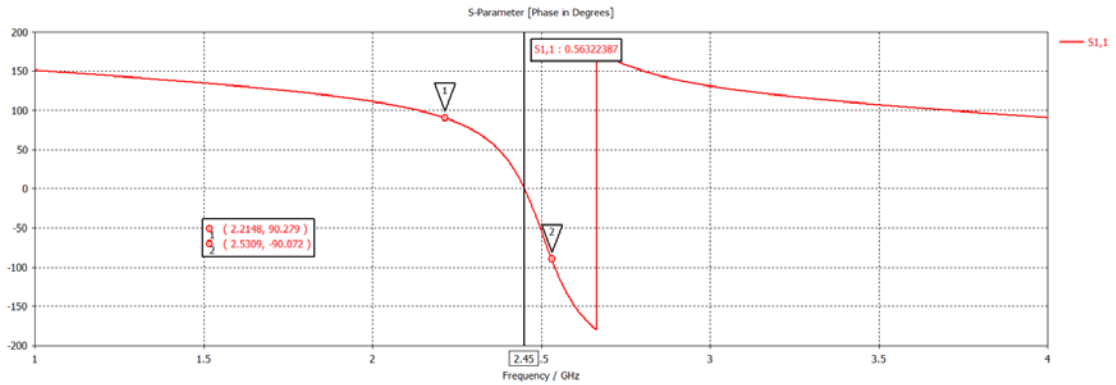
จากกราฟเมื่อนำความกว้างแพทช์และช่องว่างระหว่างแพทช์ที่คำนวณได้ เพื่อสร้างช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าอาร์เรย์ 3x3 ที่มีความสูงสับสเตรทเป็น 1.6 1 0.8 mm ในโปรแกรม CST จะได้ค่าที่เฟสเป็น 0 องศาหรือค่าความถี่เรโซแนนท์ที่ $f_0 = 1.94$ 2.195 2.25 GHz ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากความถี่ที่ต้องการใช้อยู่มาก ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงตัวแปรของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมใหม่ในหัวข้อต่อไปนี้

4.2 โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ที่ปรับปรุง จากโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์เริ่มต้นที่เราได้ออกแบบตามค่าตัวแปรที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อ 3.3.1 จะเห็นได้ว่าค่าที่เฟสเป็น 0 องศาที่ความสูงสับสเตรท $h = 1.6$ 1 0.8 mm มีค่าความถี่เรโซแนนท์ที่ได้แตกต่างกันคือ $f_0 = 1.94$ 2.195 2.25 GHz ตามลำดับ ซึ่งคลาดเคลื่อนจากความถี่ที่กำหนดไว้คือ $f_0 = 2.45$ GHz อยู่มาก ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ได้ทำการปรับแต่งใหม่เพื่อให้ได้ค่าที่เฟสเป็น 0 องศาที่ค่าความถี่เรโซแนนท์เป็น $f_0 = 2.45$ GHz โดยได้ทำการปรับปรุงค่าความกว้างแพทช์และค่าช่องว่างระหว่างแพทช์ของ โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ให้มีค่าที่เหมาะสม ดังตารางที่ 3-2

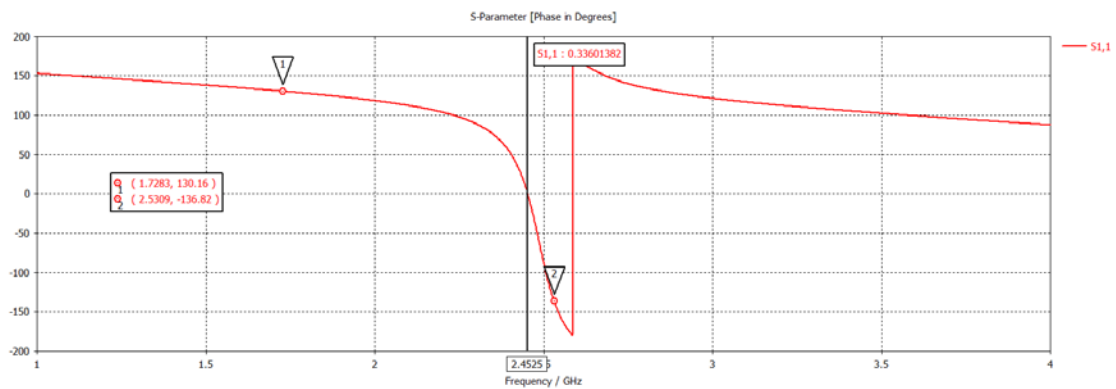
ตารางที่ 3-2 ค่าความกว้างแพทช์และค่าช่องว่างระหว่างแพทช์ของ โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ที่เหมาะสม

ความสูงสับสเตรท (h)	ความกว้างแพทช์ (w_p)	ช่องว่างระหว่างแพทช์ (g)
mm	mm	mm
1.6	24	1
1	25.9	1
0.8	26.8	1

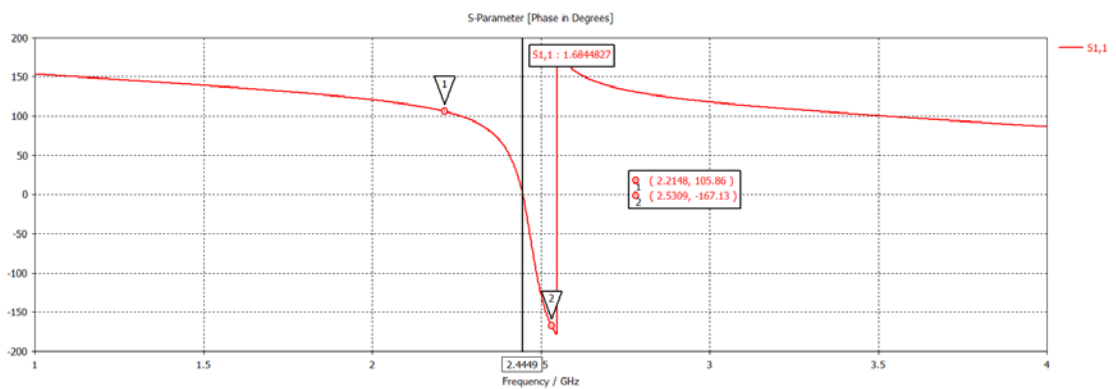
จากโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 ที่ได้ปรับปรุงค่าความกว้างแพทช์และค่าช่องว่างระหว่างแพทช์ จะได้กราฟเฟสการสะท้อนเทียบกับความถี่ ดังภาพที่ 3-20 ถึง 3-22



ภาพที่ 3-20 เฟสการสะท้อนเทียบกับความถี่จากโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 ปรับปรุงที่มีความสูงสับสเตรท $h = 1.6 \text{ mm}$ ของความถี่ $f = 2.45 \text{ GHz}$



ภาพที่ 3-21 เฟสการสะท้อนเทียบกับความถี่จากโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 ปรับปรุงที่มีความสูงสับสเตรท $h = 1 \text{ mm}$ ของความถี่ $f = 2.45 \text{ GHz}$



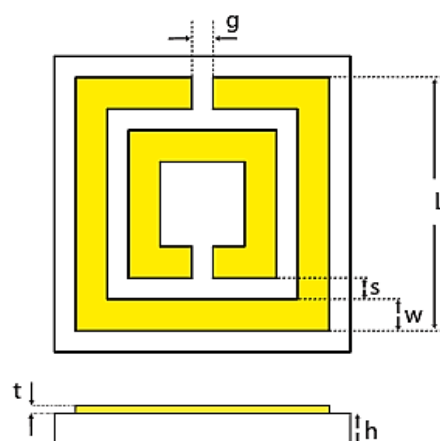
ภาพที่ 3-22 เฟสการสะท้อนเทียบกับความถี่จากโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 ปรับปรุงที่มีความสูงสับสเตรท $h = 0.8 \text{ mm}$ ของความถี่ $f = 2.45 \text{ GHz}$

จากกราฟเมื่อนำความกว้างแพทช์และช่องว่างระหว่างแพทช์ที่คำนวณได้ เพื่อสร้างช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าอาร์เรย์ 3x3 ในโปรแกรม CST จะได้ค่าที่เฟสเป็น 0 องศาหรือค่าความถี่เรโซแนนท์ที่ $f_0 = 2.45$ GHz และมีการสะท้อนในรูปแบบของการเสริมเฟสในช่วงความถี่ 2.2 GHz ถึง 2.5 GHz

สามารถสรุปได้ว่าเมื่อเราทำการปรับปรุงการออกแบบให้ความกว้างแพทช์และช่องว่างระหว่างแพทช์ด้วยการปรับความกว้างแพทช์ ช่องว่างระหว่างแพทช์ ในการใช้โปรแกรมจำลองโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ 3x3 ได้ทำการปรับค่าความกว้างแพทช์ให้มีค่าต่าง ๆ กันและกำหนดค่าช่องว่างระหว่างแพทช์เท่ากับ 1 mm เพื่อดูค่าที่เฟสเป็น 0 องศาหรือค่าความถี่เรโซแนนท์ ให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งค่าความกว้างแพทช์ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 24 mm ที่ความสูงสับสเตรท $h = 1.6$ mm ที่ความถี่ 2.45 GHz, ความสูงสับสเตรท $h = 1$ mm ค่าความกว้างแพทช์ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 25.9 mm และที่ความสูงสับสเตรท $h = 0.8$ mm ค่าความกว้างแพทช์ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 26.8 mm

5. การออกแบบและสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก Split ring resonator (SRR)

การออกแบบโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก Split ring resonator โดยใช้ PCB ชนิด FR-4 จะใช้รูปแบบสี่เหลี่ยมในการออกแบบเพื่อให้สอดคล้องกับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศไมโครสตริปซึ่งมี 2 องค์ประกอบ แผ่นโลหะ และ PCB ชนิด FR-4 สำหรับการใช้งานในช่วงความถี่วิทยุ $f = 2.45$ GHz โครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกถูกออกแบบโดยไม่มีระนาบกรวดและตัวแปลต่าง ๆ ของโครงสร้างนี้อธิบายตามภาพที่ 3-23



ภาพที่ 3-23 โครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก Split ring resonator (SRR)

เมื่อ ความกว้างของตัวนำเป็น w
 ระยะห่างระหว่างตัวนำเป็น s
 ความยาวของการแยกเป็น g
 ความยาวของวงแหวนตัวนำวงนอก L
 จำนวนของวงแหวน N
 ค่าความซึมซาบแม่เหล็กประสิทธิภาพ $\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6}$
 ความหนาวัสดุฐานรอง $h = 1.6$ มิลลิเมตร
 ความหนาของวัสดุตัวนำ $t = 0.035$ มิลลิเมตร
 อินทิกรัลวงรีแบบสมบูรณ์ชั้นแรก K
 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน S_{21}
 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11}
 ค่าความเร็วแสง $c_0 = 3 \times 10^8$

ในการออกแบบโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกให้ทำงานในช่วงความถี่ที่ต้องการ ค่าที่จำเป็นต้องทราบตัวแปรสำหรับการออกแบบ คือ ความถี่ที่ทำงาน (f_0) ค่าความซึมซาบแม่เหล็กที่เป็นลบ (μ) ของวัสดุที่ใช้ออกแบบซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ FR-4 ที่มีความสูงสัณฐานแตกต่างกัน คือ ในการออกแบบสายอากาศ

การออกแบบโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกให้มีความถี่เรโซแนนซ์เป็น 2.45 GHz สามารถใช้ทฤษฎีวงจรสมมูล LC คำนวณได้จากสมการที่ (2-42) และ (2-44)

5.1 ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก กำหนดตัวแปรสำหรับการออกแบบเริ่มต้นคือ จำนวนของวงแหวน $N = 2$ ระยะห่างระหว่างตัวนำเป็น $s = 1 \text{ mm}$, ความกว้างของตัวนำเป็น $w = 1 \text{ mm}$, ความยาวของวงแหวนตัวนำวงนอก $l = 9.5 \text{ mm}$

ขั้นตอนที่ 1 หาค่าความจุต่อหน่วยความยาวระหว่างแถบคู่ขนาน (C_0)

$$k = \frac{\frac{s}{2}}{w + \frac{s}{2}} \quad (3-14)$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{1}{2}}$$

$$k = 0.333 \quad (3-15)$$

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{K(\sqrt{1-k^2})}{K(k)}$$

$$C_0 = (8.854 \times 10^{-12}) \frac{K(\sqrt{1-0.333^2})}{K(0.333)}$$

$$C_0 = (8.854 \times 10^{-12}) \frac{2.235}{1.617}$$

$$C_0 = 12.237 \times 10^{-12} F$$

ขั้นตอนที่ 2 หาค่าความจุรวมของตัวกำหนดแบบวงแหวนแยก (C_{SRR})

$$C_{SRR} = \frac{N-1}{2} [2l - (2N-1)(w+s)] C_0 \quad (3-16)$$

$$C_{SRR} = \frac{(2)-1}{2} [2(9.5 \times 10^{-3}) - (2(2)-1)(1 \times 10^{-3} + 1 \times 10^{-3})] (12.237 \times 10^{-12})$$

$$C_{SRR} = 7.95 \times 10^{-14} F$$

ขั้นตอนที่ 3 หาค่าอัตราส่วนการเติม (The fill ratio)

$$\rho = \frac{l-l_N}{l+l_N} = \frac{(N-1)(w+s)}{l-(N-1)(w+s)} \quad (3-17)$$

$$\rho = \frac{(2-1)(1 \times 10^{-3} + 1 \times 10^{-3})}{(9.5 \times 10^{-3}) - (2-1)(1 \times 10^{-3} + 1 \times 10^{-3})}$$

$$\rho = 0.266$$

ขั้นตอนที่ 4 หาค่าความเหนี่ยวนำของตัวกำหนดแบบวงแหวนแยก (L_{SRR})

$$L_{SRR} = 4\mu_0 [l - (N-1)(s+w)] \left[\ln \left(\frac{0.98}{\rho} \right) + 1.84\rho \right] \quad (3-18)$$

$$L_{SRR} = 4(1.257 \times 10^{-6}) [(9.5 \times 10^{-3}) - (2-1)(2 \times 10^{-3})] \left[\ln \left(\frac{0.98}{0.266} \right) + 1.84(0.266) \right]$$

$$L_{SRR} = 67.878 \times 10^{-9} H$$

ขั้นตอนที่ 5 หาค่าความถี่เรโซแนนท์ของตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{srr}C_{srr}}} \quad (3-19)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(67.878 \times 10^{-9})(7.95 \times 10^{-14})}}$$

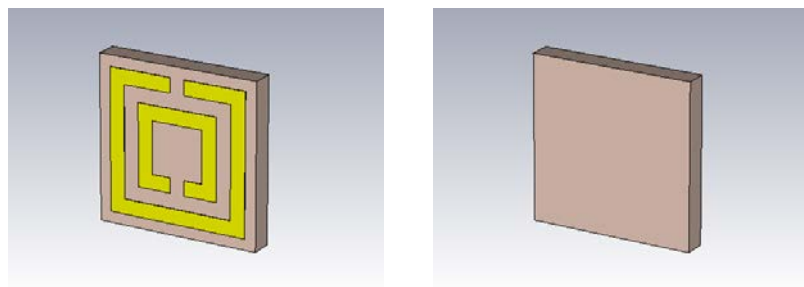
$$f_0 = 2.166 \text{ GHz}$$

5.2 การจำลองโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกโดยใช้โปรแกรม CST

Microwave studio

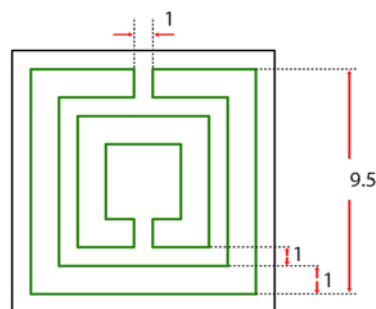
ในการออกแบบโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกเริ่มต้นได้ใช้แผ่น FR-4 ที่มีความสูงสับสเตรท $h = 1.6 \text{ mm}$ เพื่อให้ได้ค่าความซึมซาบแม่เหล็กที่เป็นลบเราได้ทำการจำลองโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกตามความถี่ที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.4.1 เพื่อนำค่า S-Parameter มาวิเคราะห์ดังนี้

5.2.1 โครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบเดี่ยว



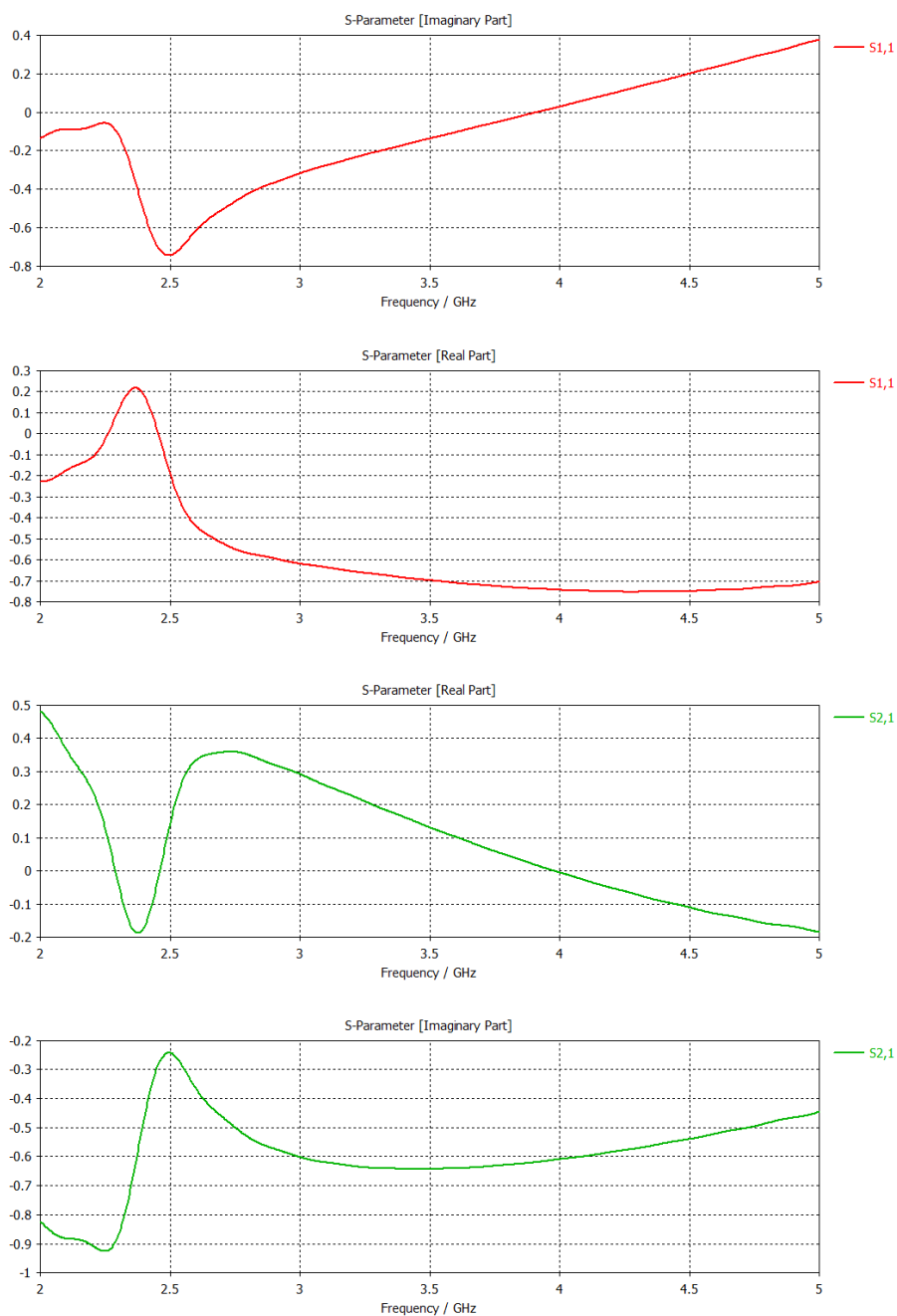
ภาพที่ 3-24 โครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบเดี่ยวโดยใช้โปรแกรม

CST Microwave studio



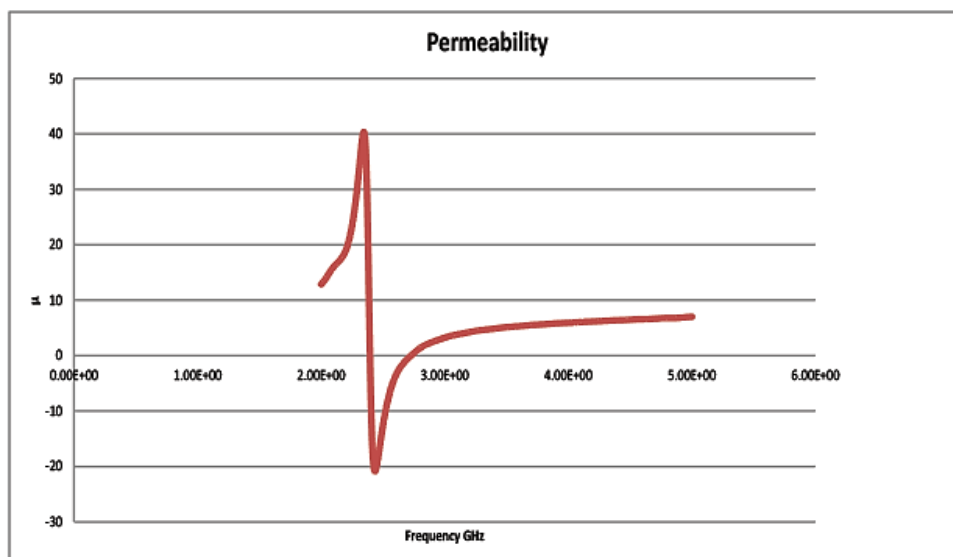
ภาพที่ 3-25 รายละเอียดโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบเดี่ยว

จากการจำลองโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบเดี่ยวจะได้
S-Parameter ดังภาพที่ 3-26



ภาพที่ 3-26 จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่า S_{11} และ S_{21}

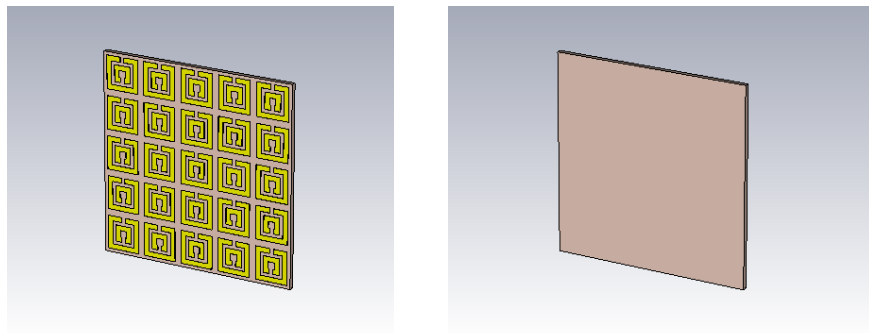
เมื่อได้จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่า S_{11} และ S_{21} เราสามารถหาค่าความซึมซาบแม่เหล็กได้จากสมการที่ 2-47 ดังภาพที่ 3-27



ภาพที่ 3-27 ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบเดี่ยว

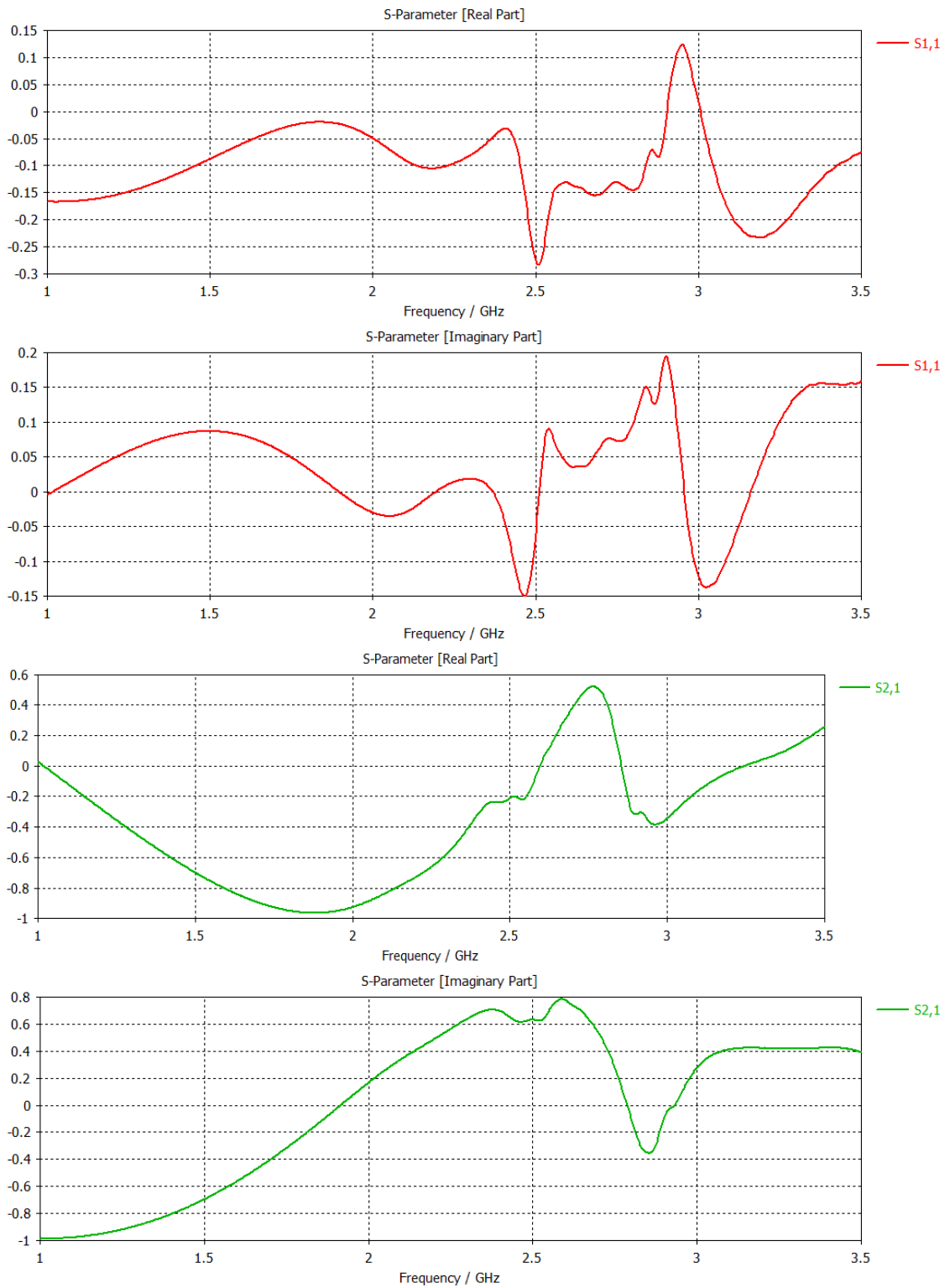
จากภาพที่ 3-27 ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบเดี่ยวที่ออกแบบไว้ในหัวข้อ 5.1 ซึ่งมีความถี่เรโซแนนท์ $f_0 = 2.166 \text{ GHz}$ มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กประมาณ $\mu \approx 17.65$ แต่จะเห็นว่าที่ความถี่ใช้งาน $f = 2.45 \text{ GHz}$ มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กประมาณ $\mu \approx -19.82$ ซึ่งมีค่าเหมาะสมกับคุณสมบัติของโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบเดี่ยวที่มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบ

5.2.2 โครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ 5x5 เพื่อการใช้งานและสามารถให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางผ่านได้อย่างเหมาะสมจึงออกแบบขนาดของโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกให้มีขนาดขนาดใหญ่ขึ้นและได้ออกแบบบนแผ่น FR-4 ที่มีความสูงสลับสเตรทต่างกัน คือ $h = 1.6 \text{ 1 0.8 mm}$ โดยการนำโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบเดี่ยวที่ออกแบบไว้ในหัวข้อ 5.2.1 มาจำลองเป็นโครงสร้างแบบอาร์เรย์ 5x5 ในโปรแกรม CST Microwave studio จากนั้นจึงทำการหาค่าความซึมซาบแม่เหล็ก ดังต่อไปนี้

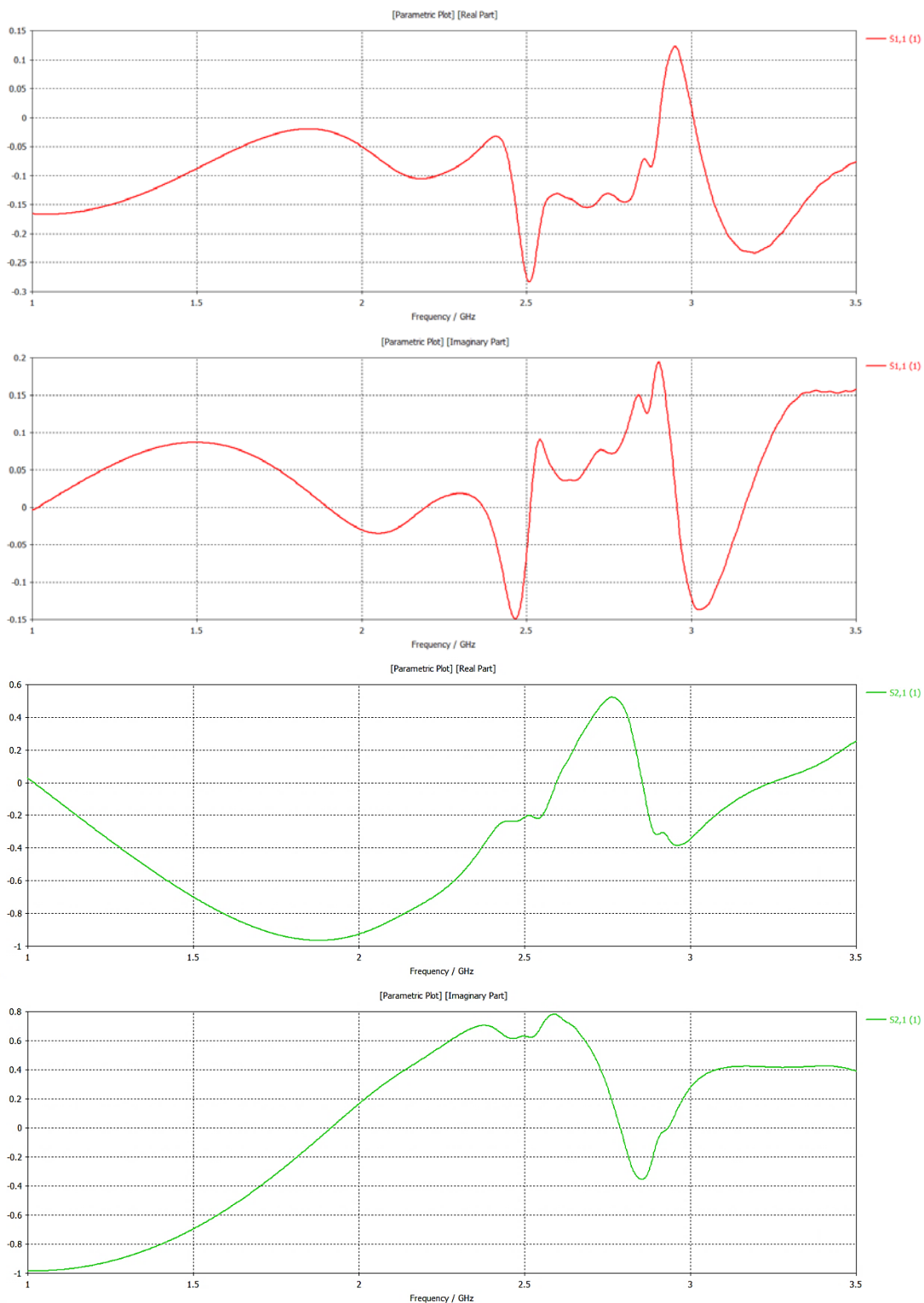


ภาพที่ 3-28 โครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ 5x5 โดยใช้โปรแกรม CST Microwave studio

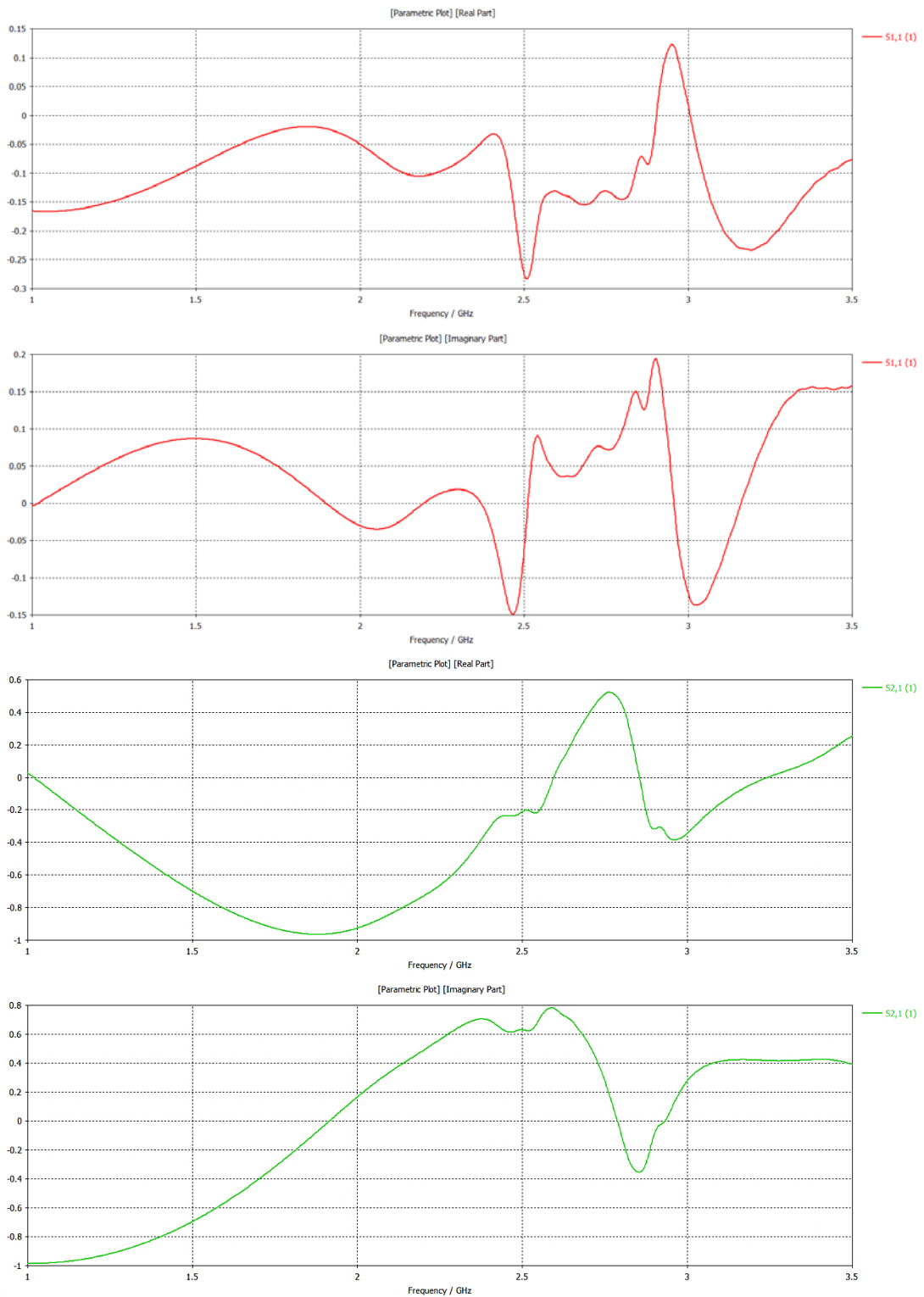
จากการจำลองโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ 5x5 โดยใช้โปรแกรม CST Microwave studio จะได้ S-Parameter ดังภาพที่ 3-29 ถึงภาพที่ 3-31



ภาพที่ 3-29 จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่า S_{11} และ S_{21} จากโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ 5x5 ที่มีความสูงสับสเตรท $h = 1.6 \text{ mm}$

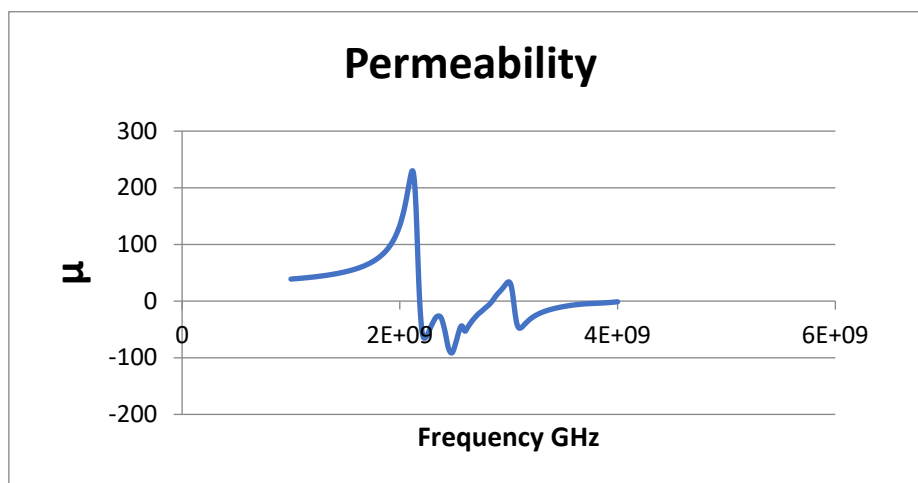


ภาพที่ 3-30 จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่า S_{11} และ S_{21} จากโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ 5×5 ที่มีความสูงสับสเตรท $h = 1 \text{ mm}$

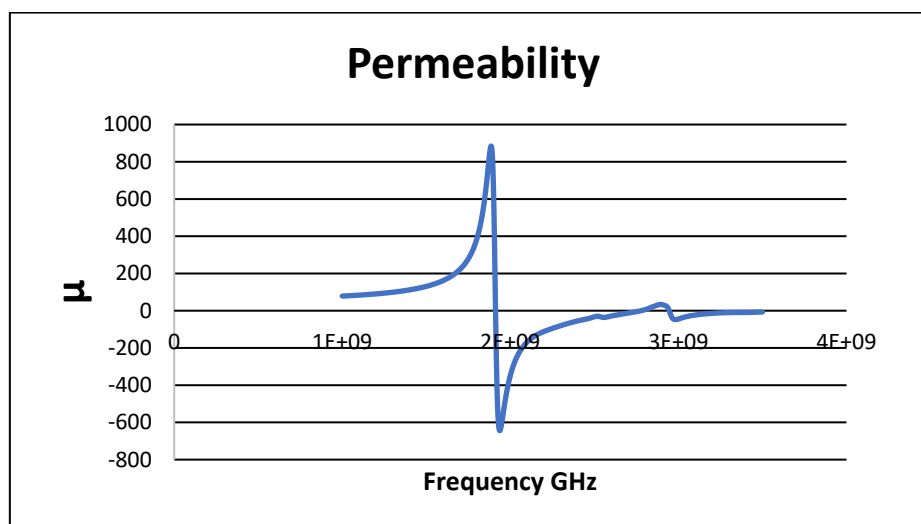


ภาพที่ 3-31 จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่า S_{11} และ S_{21} จากโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ 5×5 ที่มีความสูงสับสเตรท $h = 0.8 \text{ mm}$

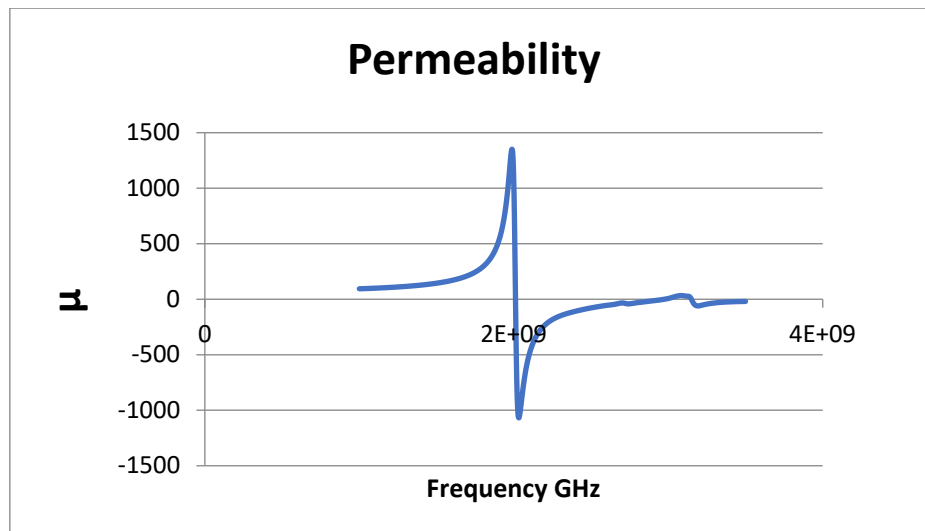
เมื่อได้จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่า S_{11} และ S_{21} จากโครงสร้างตัวกำหนดแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ 5x5 เราสามารถหาค่าความซึมซาบแม่เหล็กได้จากสมการที่ 2-47 ดังภาพที่ 3-32 ถึง 3-34



ภาพที่ 3-32 ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของโครงสร้างตัวกำหนดแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ 5x5 ที่ความสูงสับสเตรท $h = 1.6 \text{ mm}$



ภาพที่ 3-33 ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของโครงสร้างตัวกำหนดแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ 5x5 ที่ความสูงสับสเตรท $h = 1 \text{ mm}$



ภาพที่ 3-34 ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของ โครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ 5x5 ที่ความสูงสัสดรท $h = 0.8 \text{ mm}$

จากภาพที่ 3-32 ถึง 3-34 ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของ โครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ 5x5 ที่มีความสูงสัสดรท $h = 1.6 \text{ } 1.0.8 \text{ mm}$ และมีความถี่ใช้งาน $f = 2.45 \text{ GHz}$ มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กประมาณ $\mu \approx -86.06 - 45.4 - 90.19$ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเหมาะสมกับคุณสมบัติของ โครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกที่มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบ

สรุปได้ว่าโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ 5x5 ที่มีความสูงสัสดรท $h = 1.6 \text{ } 1.0.8 \text{ mm}$ และมีความถี่ใช้งาน $f = 2.45 \text{ GHz}$ มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบ และมีขนาดที่เหมาะสมกับการใช้งานร่วมกับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานที่ความถี่วิทยุได้

6. เส้นไมโครสตริปเรียงกระแสด

6.1 วงจรเรียงกระแส Rectifier วงจรเรียงกระแสหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า

เรกติไฟเออร์ คือ วงจรไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณกระแสสลับให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง วงจรเรียงกระแสที่นำมาใช้ในวงจรนี้ได้ นำมาจากการออกแบบวงจรรีเรียงกระแสขนาดเล็กที่ความถี่ 5.8 GHz นำมาใช้งาน โดยมีเส้นของไมโครสตริปดังภาพที่ 3-2 ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ได้นำมาประยุกต์เพื่อใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz ดังนั้นตัวเก็บประจุที่นำมาต่อคัปปีงจะสามารถคำนวณได้ค่า $C_{coupling} \approx 15 \text{ pF}$ โดยพบว่าไม่สามารถหาตัวเก็บประจุที่มีค่าตรงกับการคำนวณจึงใช้ค่าที่ใกล้เคียงดังสมการที่ 3-20 และต่อด้วยช้อตกีโอดีความถี่สูง

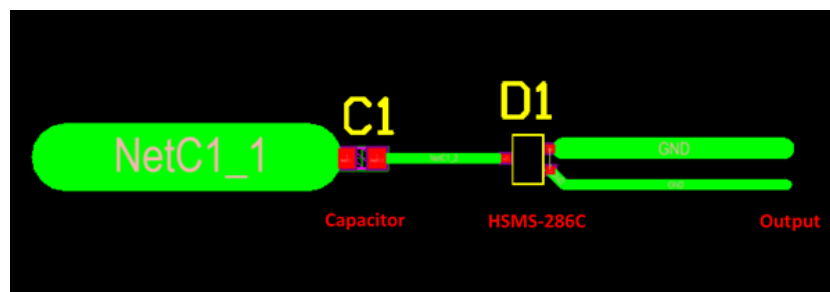
HSMS-286C ทำหน้าที่ให้ไฟด้านบวกผ่านออกมาได้เพียงอย่างเดียวสุดท้ายที่เอาต์พุตเราจะได้ไฟฟ้ากระแสตรง

$$C_{coupling} = \frac{10}{2\pi fZ} \quad (3-20)$$

$$C_{coupling} = \frac{10}{2\pi \times 2.45 \times 10^9 \times 50}$$

$$C_{coupling} = 1.299 \times 10^{-11} pF$$

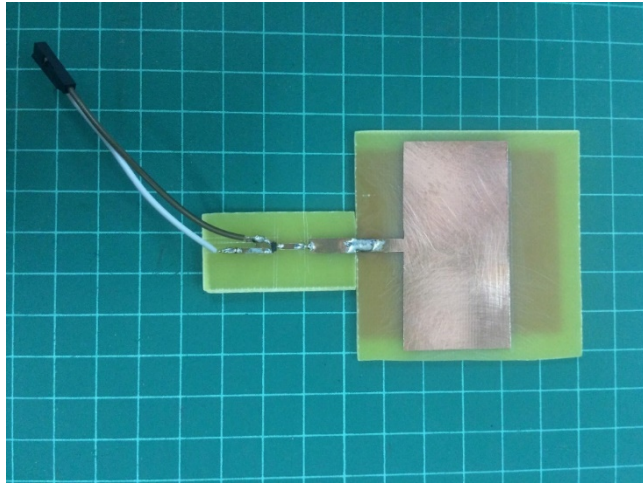
$$C_{coupling} \approx 15 pF$$



ภาพที่ 3-35 วงจรเรกติไฟเออร์

7. สายอากาศเรียงกระแส

สายอากาศเรียงกระแส คือ การนำเอาสายอากาศที่ได้จากการออกแบบและสร้างมาต่อรวมกับวงจรเรกติไฟเออร์ที่สร้างขึ้นมา จะได้สายอากาศเรียงกระแสสำหรับย่านความถี่ 2.45 GHz และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงออกมาได้ ไฟฟ้าที่ได้นี้อาจมีปริมาณที่น้อยในการที่จะเพิ่มไฟที่ออกมานั้นสามารถทำได้โดยการนำโครงสร้างอภิวัดคู่ทั้งสองชนิดที่ได้ออกแบบ โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม (Artificial magnetic conductor: AMC) และออกแบบและสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก Split ring resonator (SRR) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สาย ดังภาพที่ 3-36

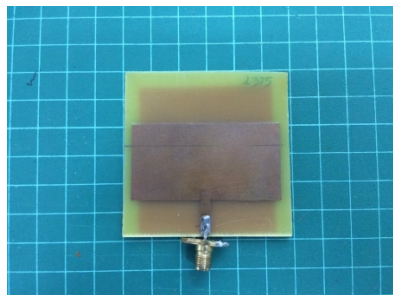


ภาพที่ 3-36 สายอากาศเรียงกระแสด

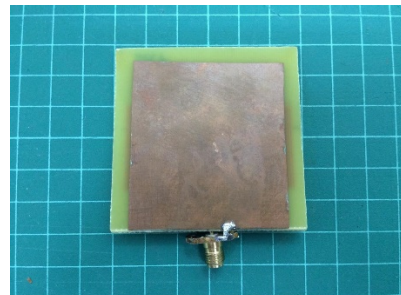
บทที่ 4

ผลการวิจัย

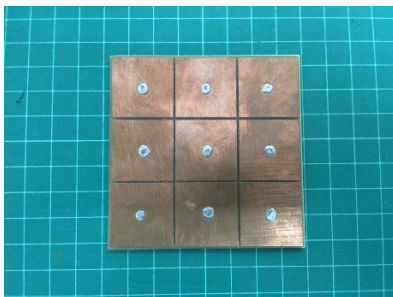
การทดสอบและวิเคราะห์คุณลักษณะของโครงสร้างอภิวัดและสายอากาศที่ได้ทำการสร้างขึ้นมีการทดสอบประสิทธิภาพต่าง ๆ ของสายอากาศ เช่น แรงดัน พลังงาน และประสิทธิภาพของสายอากาศเรียงกระแสด จากการทดลองนำโครงสร้างอภิวัดและสายอากาศที่ได้จากการออกแบบในบทที่ 3 มาวางลงบนแผ่น FR4 ที่ความสูงสับเมตรท 1.6 mm เพราะเป็นความสูงที่หาได้ง่ายและมีราคาถูกแล้วใช้น้ำยาคัดแผ่นปริ้น Print circuit board (PCB) กัดทองแดงออกเพื่อให้ได้แผ่นตัวนำ ขนาดเท่ากับที่ออกแบบไว้ ดังภาพที่ 4-1



(ก) สายอากาศไมโครสตริปด้านหน้า



(ข) สายอากาศไมโครสตริปด้านหลัง



(ค) โครงสร้างอภิวัด AMC



(ง) โครงสร้างอภิวัด MSRR

ภาพที่ 4-1 การออกแบบไมโครสตริป และโครงสร้างอภิวัดที่ใช้ในการวิจัย

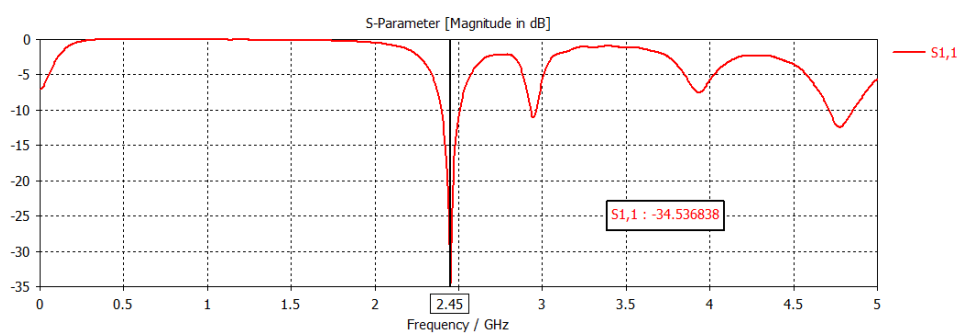
ผลการทดสอบสายอากาศไมโครสตริปและการเปรียบเทียบ S-Parameter

ในการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป ที่ความถี่ 2 GHz–2.8 GHz จะมีเครื่องมือที่สำคัญในการทดสอบ คือ เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้า Agilent PNA Network analyzer ดังภาพที่ 4-2 ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ (S_{11})

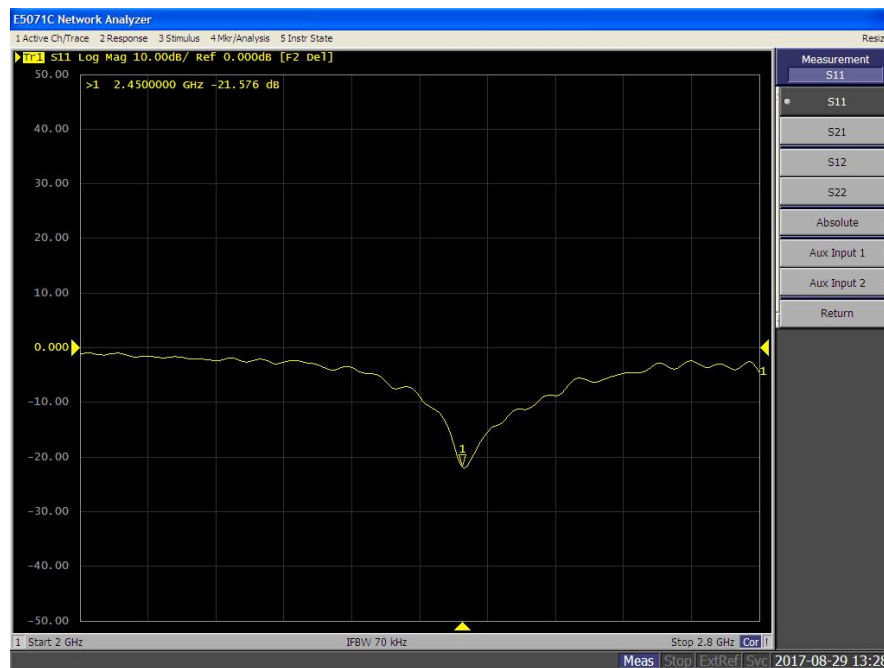


ภาพที่ 4-2 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้า Agilent PNA Network analyzer

หลังจากทำการออกแบบสายอากาศสำเร็จก็ทำการกัดแผ่นปรินต์ให้ได้รูปแบบที่ออกแบบตามโปรแกรม CST และนำสายอากาศมาทดลองในเครื่อง Agilent PNA Network analyzer จึงได้ผลทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศดังภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศไมโครสตริปที่แสดงจากโปรแกรม CST



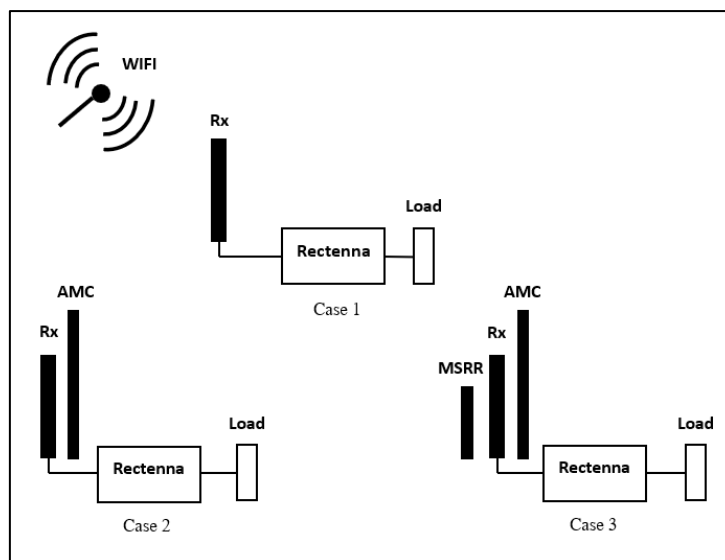
ภาพที่ 4-4 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศไมโครสตริปที่แสดงจากการวัดจริงด้วยเครื่อง Network analyzer

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าสายอากาศไมโครสตริปที่สร้างขึ้นมานั้น ผลการทดสอบจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับที่ความถี่ 2.4 GHz – 2.57 GHz ค่าที่ได้จากการจำลองจะมีค่า -34.536 dB และค่าที่ได้จากการวัดจริงจะมีค่า -21.576 dB

ผลการทดสอบสายอากาศเรียงกระแส

การทดลองจะถูกแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ 1) ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายมีเพียงสายอากาศเรียงกระแส 2) ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายมีโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์วางไว้ด้านหลังของสายอากาศเรียงกระแส โดยมีระยะห่างเท่ากับ 2 mm และ 3) ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายมีทั้งโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์และโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ โดยที่โครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ จะถูกนำมาวางไว้ด้านหน้าของสายอากาศเรียงกระแสและมีระยะห่างเท่ากับ 5 mm การทดลองทั้ง 3 กรณีทำขึ้นเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายที่ได้มีการประยุกต์ใช้งานร่วมกับโครงสร้างอภิวัด การทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ 1) การจำลองเพื่อเปรียบเทียบอัตรา

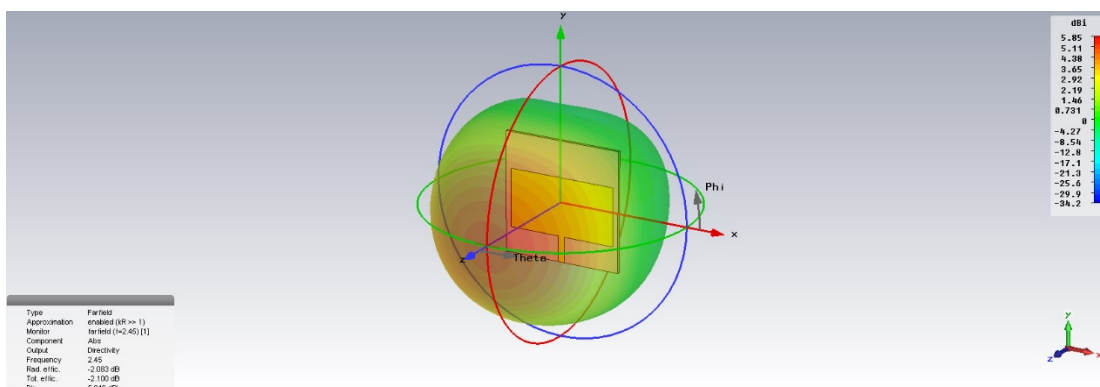
การขยายของสายอากาศเรียงกระแสด และ 2) การทดลองจริงโดยที่สายอากาศเรียงกระแสดจะทำการเก็บเกี่ยวพลังงานที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งลักษณะการทดลองดังภาพที่ 4-5



ภาพที่ 4-5 รูปแบบการทดลองทั้ง 3 กรณี

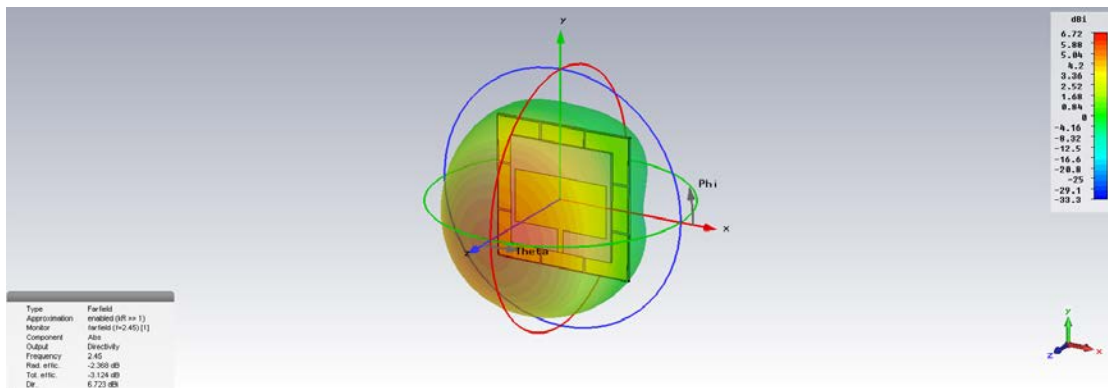
1. การจำลองสายอากาศเรียงกระแสด

การจำลองสายอากาศเรียงกระแสดจะถูกแบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น เพื่อเปรียบเทียบอัตราการขยายที่เปลี่ยนแปลงของสายอากาศเรียงกระแสดที่มีและไม่มีโครงสร้างอภิวัดคู่ที่มีความสูงสลับสเตรทแตกต่างกัน สายอากาศเรียงกระแสดที่ไม่มีโครงสร้างอภิวัดคู่อยู่ในระบบบจะมีอัตราการขยายเท่ากับ 5.85 dBi ดังภาพที่ 4-6

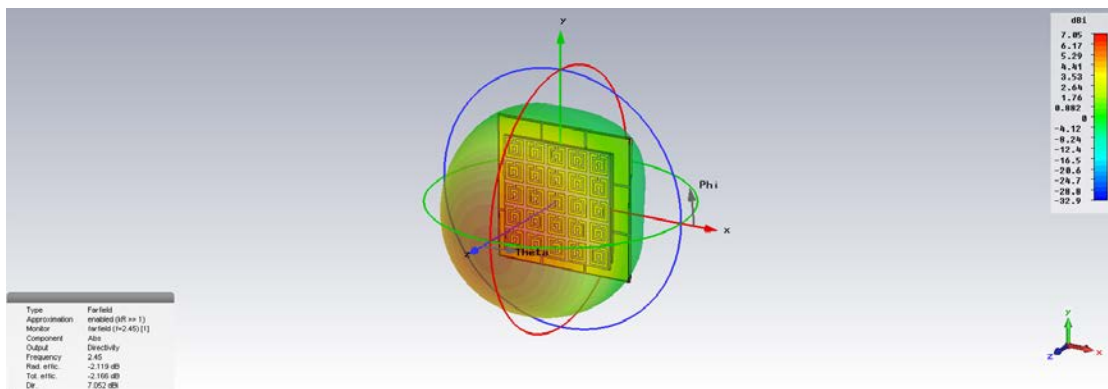


ภาพที่ 4-6 อัตราการขยายของสายอากาศเรียงกระแสด

1.1 การจำลองสายอากาศเรียงกระแสดั้งที่ความสูงสับสเตรทของโครงสร้างอภิวัดคู่เท่ากับ 1.6 mm อัตราการขยายที่เปลี่ยนแปลงของสายอากาศเรียงกระแสดั้งที่มีโครงสร้างอภิวัดคู่อยู่ในระบบที่ความสูงสับสเตรทเท่ากับ 1.6 mm ดังภาพที่ 4-7 และภาพที่ 4-8

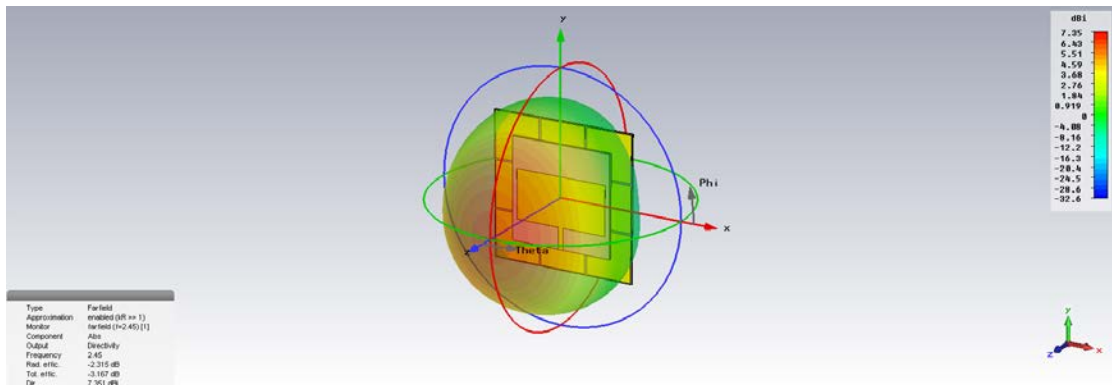


ภาพที่ 4-7 อัตราการขยายของสายอากาศเรียงกระแสดั้งที่มีโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ที่ความสูงสับสเตรทเท่ากับ 1.6 mm

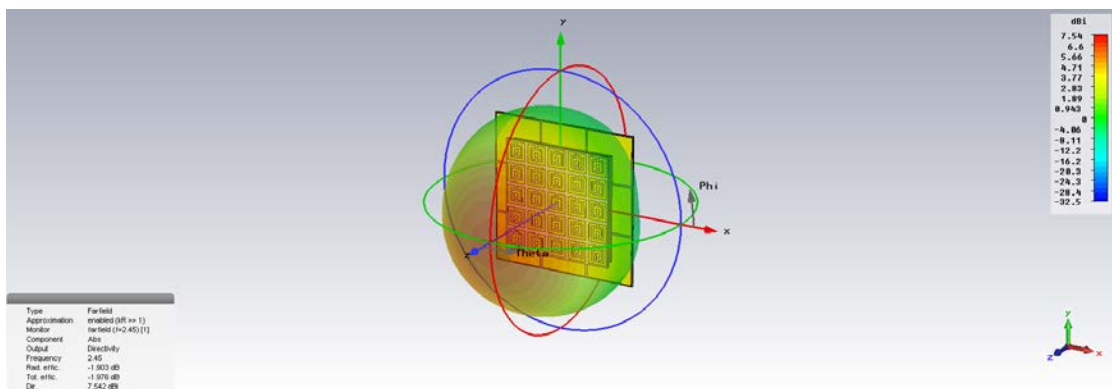


ภาพที่ 4-8 อัตราการขยายของสายอากาศเรียงกระแสดั้งทั้ง โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์และโครงสร้างตัวกำกับบนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ ที่ความสูงสับสเตรทเท่ากับ 1.6 mm

1.2 การจำลองสายอากาศเรียงกระแสดั้งที่ความสูงสับสเตรทของโครงสร้างอภิวัดคู่เท่ากับ 1 mm อัตราการขยายที่เปลี่ยนแปลงของสายอากาศเรียงกระแสดั้งที่มีโครงสร้างอภิวัดคู่อยู่ในระบบที่ความสูงสับสเตรทเท่ากับ 1 mm ดังภาพที่ 4-9 และภาพที่ 4-10

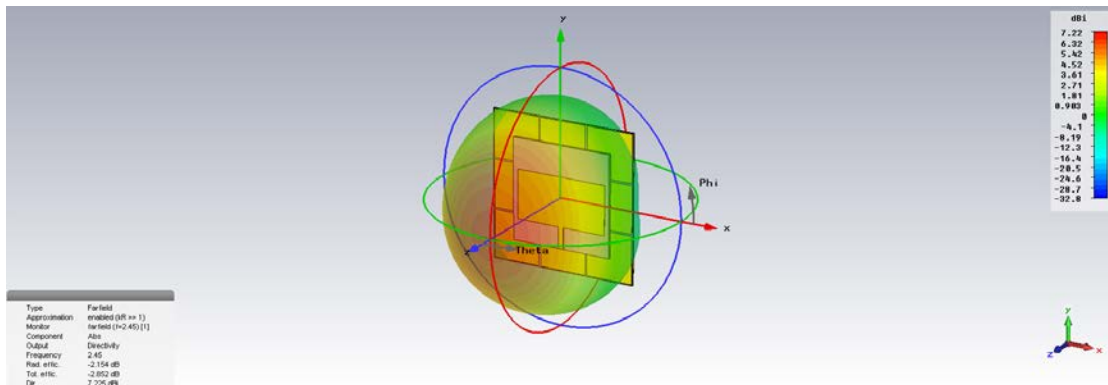


ภาพที่ 4-9 อัตราการขยายของสายอากาศเรียงกระแสดที่มีโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ที่ความสูงสับสเตรทเท่ากับ 1 mm

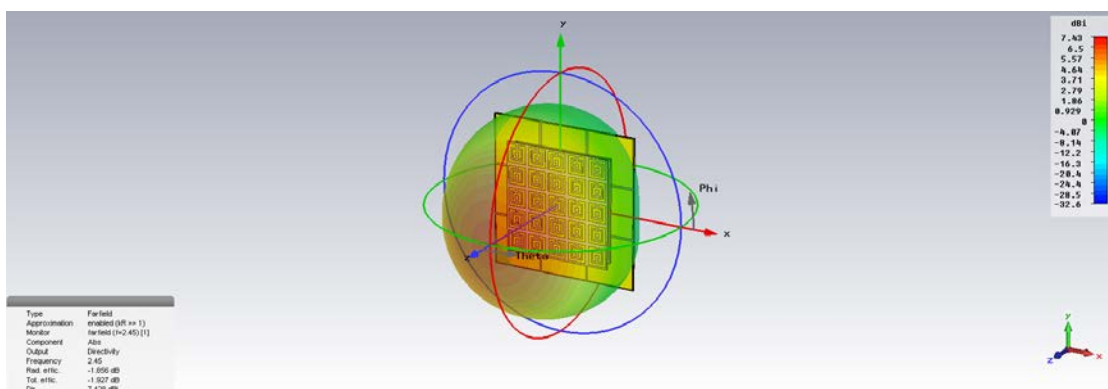


ภาพที่ 4-10 อัตราการขยายของสายอากาศเรียงกระแสดมีทั้ง โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ และ โครงสร้างตัวนำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ ที่ความสูงสับสเตรทเท่ากับ 1 mm

1.3 การจำลองสายอากาศเรียงกระแสดที่ความสูงสับสเตรทของโครงสร้างอภิวัดคู่เท่ากับ 0.8 mm อัตราการขยายที่เปลี่ยนแปลงของสายอากาศเรียงกระแสดที่มีโครงสร้างอภิวัดคู่อยู่ในระบบที่ความสูงสับสเตรทเท่ากับ 0.8 mm ดังภาพที่ 4-11 และภาพที่ 4-12



ภาพที่ 4-11 อัตราการขยายของสายอากาศเรียงกระแสดที่มีโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์ที่ความสูงสับสเตรทเท่ากับ 0.8 mm



ภาพที่ 4-12 อัตราการขยายของสายอากาศเรียงกระแสดมีทั้งโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์และโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์ ที่ความสูงสับสเตรทเท่ากับ 0.8 mm

จากการจำลองอัตราการขยายที่เปลี่ยนแปลงของสายอากาศเรียงกระแสดที่มีและไม่มีโครงสร้างอภิวัดคู่ที่ความสูงสับสเตรทแตกต่างกันเราสามารถนำค่าอัตราการขยายที่ได้จากการจำลองมาอธิบายไว้ในตารางที่ 4-1

เมื่อได้ค่าอัตราการขยายของสายอากาศเรียงกระแสดที่มีและไม่มีโครงสร้างอภิวัดคู่ที่ความสูงสับสเตรทแตกต่างกันแล้ว สามารถคำนวณหาค่ากำลังที่ออกจากสายอากาศเรียงกระ P_r จากสมการของฟรีสและสมมุติว่าไม่มีการคิดผลจากการสูญเสียในชั้นบรรยากาศ ผลจากการไม่แมทซ์ของการโพลาริเซชัน ผลจากการไม่แมทซ์ของอิมพีแดนซ์ที่ป้อนเข้ากับสายอากาศ อีกทั้งไม่มี

การศึกษาระหว่างสายอากาศภาคส่งของ Wifi-hub (TL-WA901ND) และสายอากาศเรียงกระแสด โดยที่สายอากาศภาคส่งมีกำลังด้านออกเป็น $P_t \approx 50\text{mW}$ และมีอัตราขยาย $G_t = 5\text{ dBi}$ (Tp-link, online) ในการคำนวณหาค่ากำลังที่ออกจากสายอากาศเรียงกระแสดจากสมการที่ 2-33 ระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศเรียงกระแสด ซึ่งได้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ $R = 5\text{ cm}$ ค่ากำลังที่ออกจากสายอากาศเรียงกระแสดที่ได้จากการคำนวณถูกนำมาอธิบายไว้ในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 อัตราการขยายที่เปลี่ยนแปลงของสายอากาศเรียงกระแสดที่มีและไม่มีโครงสร้าง อภิวัดคู่ที่มีความสูงสับสเตรทแตกต่างกัน

ประเภทของสายอากาศเรียงกระแสด ที่ทดสอบ	ความสูง สับสเตรท (mm)	อัตราการ ขยายที่ เปลี่ยนแปลง G_r (dBi)	ค่ากำลังที่ออกจาก สายอากาศเรียงกระแสด P_r (mW)
สายอากาศเรียงกระแสดที่ไม่มีโครงสร้าง อภิวัดคู่	1.6	5.85	11.1
	1	5.85	11.1
	0.8	5.85	11.1
สายอากาศเรียงกระแสดที่มีโครงสร้าง AMC	1.6	6.72	12.78
	1	7.35	13.98
	0.8	7.22	13.73
สายอากาศเรียงกระแสดที่มีโครงสร้าง AMC และ MSRR	1.6	7.05	13.41
	1	7.54	14.34
	0.8	7.43	14.13

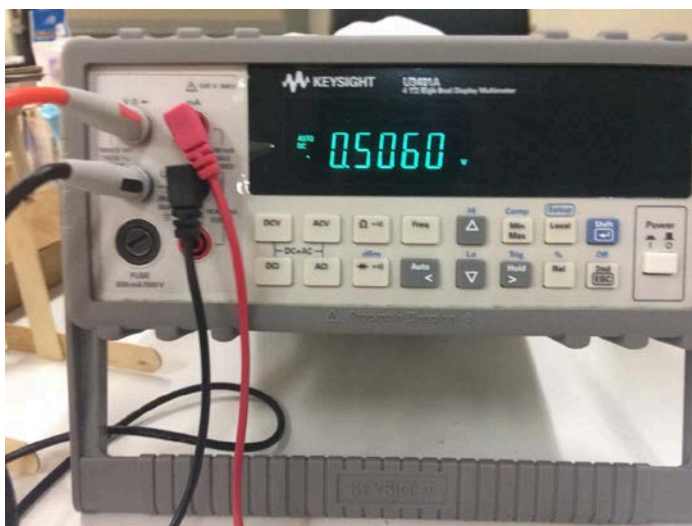
จากตารางที่ 4-1 สรุปได้ว่าเมื่อนำเอาโครงสร้างอภิวัดคู่ทั้ง โครงสร้างตัวนำแม่เหล็ก เทียมอาร์เรย์และ โครงสร้างตัวนำทอนแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศเรียงกระแสดสามารถเพิ่มอัตราการขยายของสายอากาศเรียงกระแสดได้ ซึ่งส่งผลทำให้ค่ากำลังที่ออกจากสายอากาศเรียงกระแสด P_r เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันเมื่อพิจารณาจากสมการของฟรีส โดยจากการจำลองจะเห็นว่าโครงสร้างอภิวัดคู่ที่มีความสูงสับสเตรทเท่ากับ 1 mm สามารถเพิ่มอัตราการขยายให้กับสายอากาศเรียงกระแสดได้มากที่สุดแต่เนื่องจาก แผ่น FR 4 ที่มีความหนาสับสเตรทเท่ากับ 1 mm นั้นสามารถหาได้ยากและมีราคาแพงพร้อมทั้งนำเอามาสร้างขึ้นจริงได้ค่อนข้างยาก

ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้แผ่น FR 4 ที่มีความหนาสี่เหลี่ยมเท่ากับ 1.6 mm เพราะสามารถหาได้ง่ายและเป็นที่นิยมในการนำมาวาดเป็นแผ่น PCB พร้อมกับยังสามารถช่วยเพิ่มอัตราการขยายให้กับสายอากาศเรียงกระแสได้เช่นกัน ดังนั้นเราจึงได้ทำการสร้างโครงสร้างอภิวัดและสายอากาศที่ได้จากการออกแบบในบทที่ 3 เพื่อให้ได้แผ่นตัวนำ ขนาดเท่ากับที่ออกแบบไว้ ดังภาพที่ 4-1 และได้นำสายอากาศเรียงกระแสและโครงสร้างอภิวัดมาทดสอบจริงที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ดังหัวข้อต่อไปนี้

2. การทดสอบสายอากาศเรียงกระแสที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

2.1 ผลการทดสอบระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายมีเพียงสายอากาศเรียงกระแส

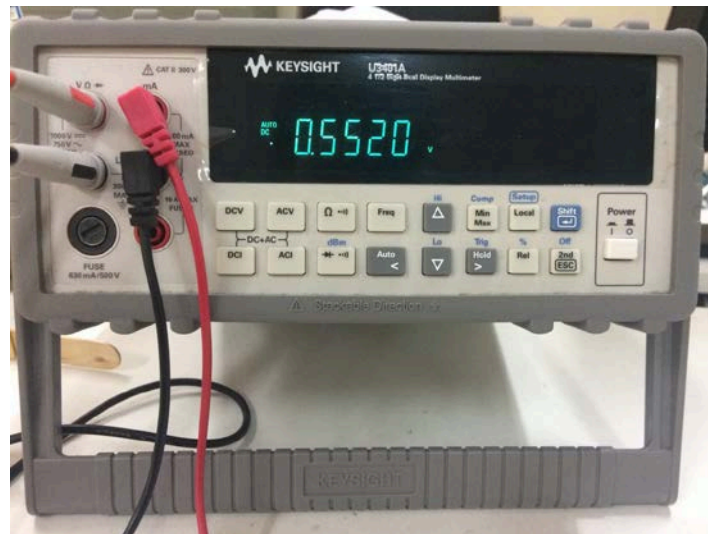
ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าด้วยไมโครมิเตอร์โดยการนำสายอากาศมาเชื่อมต่อกัน ดังภาพที่ 4-13



ภาพที่ 4-13 ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าด้วยไมโครมิเตอร์ของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายมีเพียงสายอากาศเรียงกระแส

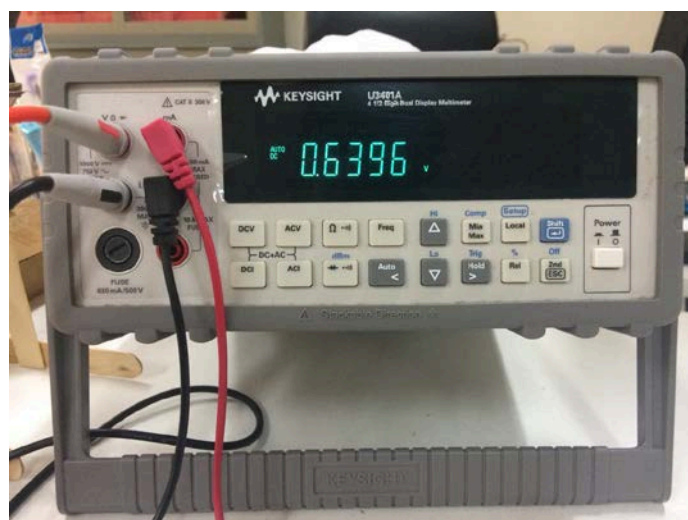
2.2 ผลการทดสอบระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายที่มีโครงสร้าง AMC วางไว้

ด้านหลังของสายอากาศเรียงกระแส ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าด้วยไมโครมิเตอร์โดยการนำสายอากาศมาเชื่อมต่อกัน ดังภาพที่ 4-14



ภาพที่ 4-14 ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าด้วยไมโครมิเตอร์ของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายที่มีโครงสร้าง AMC วางไว้ด้านหลังของสายอากาศเรียงกระแสด

2.3 ผลการทดสอบระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายที่มีทั้งโครงสร้าง AMC และ MSRR ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าด้วยไมโครมิเตอร์โดยการนำสายอากาศมาเชื่อมต่อกัน ดังภาพที่ 4-15

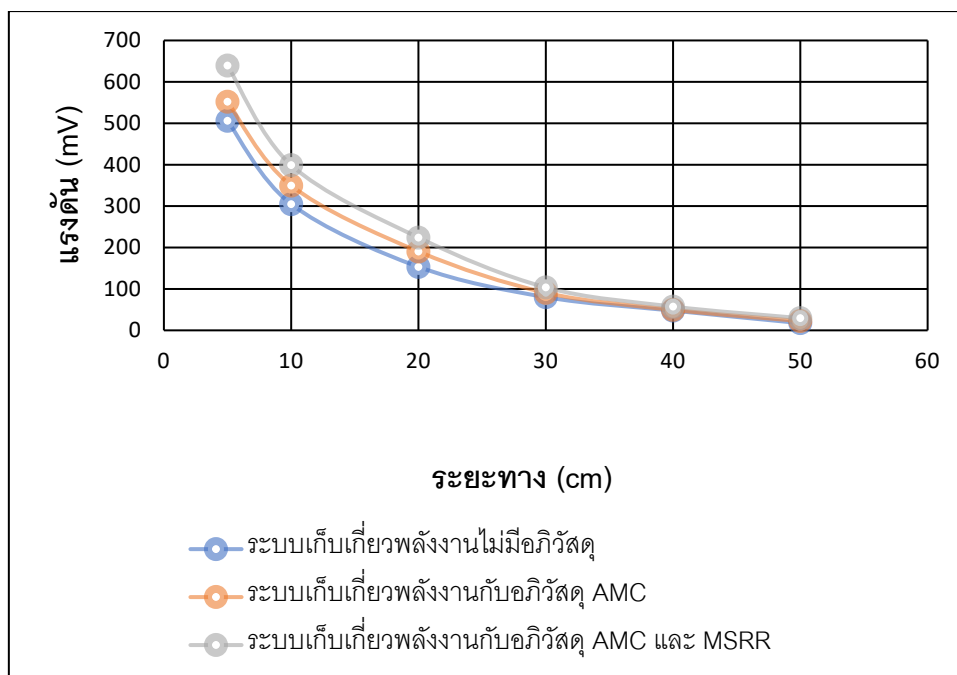


ภาพที่ 4-15 ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าด้วยไมโครมิเตอร์ของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายมีทั้งโครงสร้าง AMC และ MSRR โดยที่โครงสร้าง MSRR จะถูกนำมาวางไว้ด้านหน้าของสายอากาศเรียงกระแสด

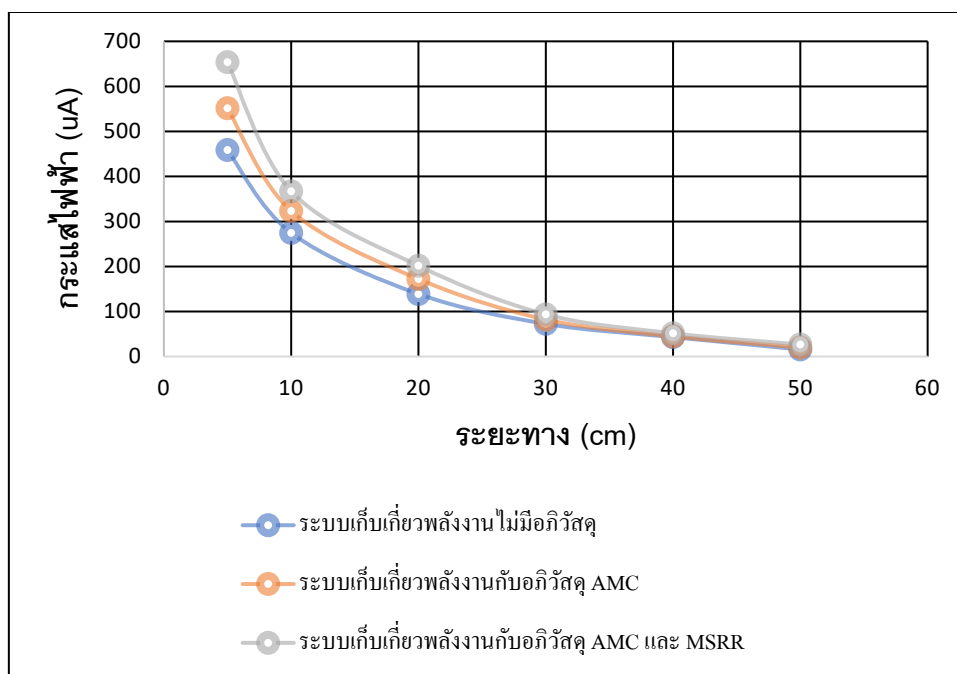
จากภาพที่ 4-15 จะเห็นว่าเมื่อระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายมีทั้งโครงสร้าง AMC และ MSRR จะทำให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 26.37% จากนั้นเราได้ทำการทดลองที่ระยะทางต่าง ๆ ได้ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าตามระยะทางต่าง ๆ

ระยะทาง (cm)	เวลา (h)	ระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน ไม่มีอภิวัดดู		ระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน กับอภิวัดดู AMC		ระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน กับอภิวัดดู AMC และ MSRR	
		Voltage	Current	Voltage	Current	Voltage	Current
		(mV)	(uA)	(mV)	(uA)	(mV)	(uA)
5	1	506.11	458.75	552	551.54	639.6	653.78
10	1	304.89	274.60	349.67	323.32	399.06	367.11
20	1	153.41	138.97	190.38	172.20	224.14	201.60
30	1	80.21	72.68	90.77	82.26	103.77	93.64
40	1	47.59	43.17	49.65	44.97	57.48	51.64
50	1	17.44	15.89	22.42	20.26	29.46	26.68



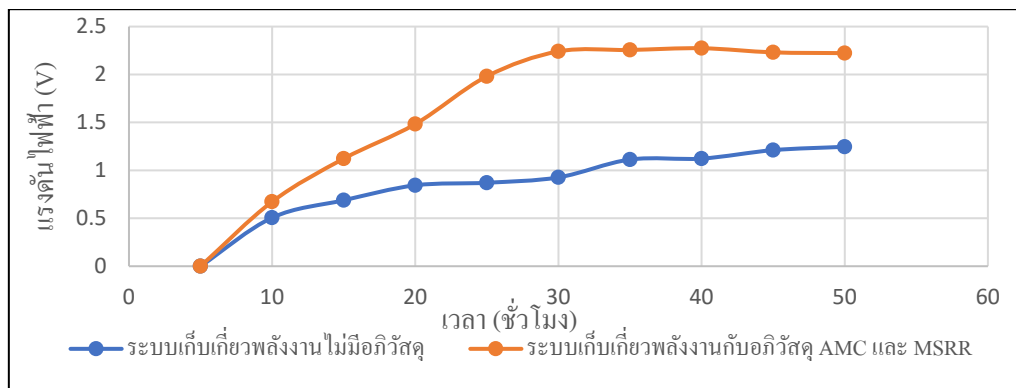
ภาพที่ 4-16 กราฟเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศเรียงกระแสมิทั้งโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์และโครงสร้างตัวนำแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์



ภาพที่ 4-17 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าของสายอากาศเรียงกระแสมิทั้งโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมอาร์เรย์และโครงสร้างตัวนำแบบวงแหวนแยกแบบอาร์เรย์

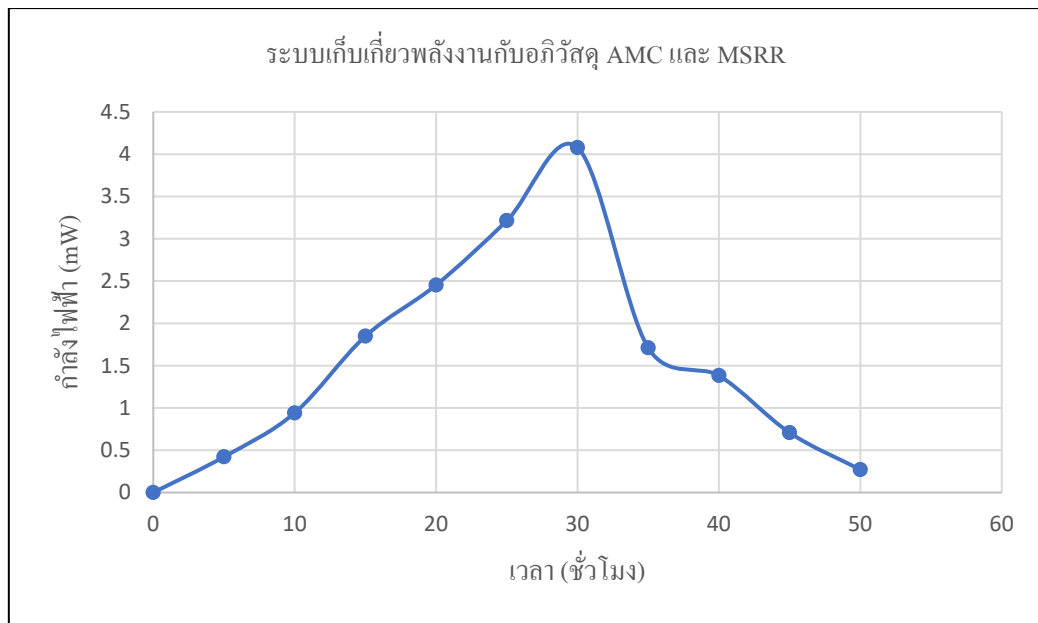
ผลการทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงาน

1. การเปรียบเทียบระหว่างการชาร์จประจุไฟฟ้าของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไม่มีอภิวัดศุ และของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานกับอภิวัดศุ AMC และ MSRR ระยะเวลา 0–50 ชั่วโมง



ภาพที่ 4-18 กราฟการเปรียบเทียบระหว่างการชาร์จประจุไฟฟ้าของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไม่มีอภิวัดศุและระบบเก็บเกี่ยวพลังงานกับอภิวัดศุ AMC และ MSRR

จากภาพที่ 4-18 แสดงให้เห็นว่าการชาร์จประจุไฟฟ้าจะได้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายที่มีโครงสร้าง AMC และ MSRR ใช้ระยะเวลาตั้งแต่ 0–31 ชั่วโมง จนถึงชั่วโมงที่ 34 จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงและมีค่าคงที่ ณ เวลาประมาณ 40 ชั่วโมง ที่แรงดันไฟฟ้า 2.25 V ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายที่ไม่มีอภิวัดศุจะใช้เวลาในการชาร์จประจุตั้งแต่ 0–37 ชั่วโมงและเริ่มมีค่าคงที่ ณ เวลาประมาณ 44 ชั่วโมง ที่แรงดันไฟฟ้า 1.184 V เห็นได้ชัดว่าระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายที่มีโครงสร้าง AMC และ MSRR สามารถชาร์จประจุไฟฟ้าได้มากกว่าระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายที่ไม่มีอภิวัดศุที่ระยะเวลา 50 ชั่วโมง



ภาพที่ 4-19 กราฟการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานกับอภิวัดดู AMC และ MSRR

จากภาพที่ 4-19 ได้นำค่าแรงดันในระยะเวลาต่าง ๆ มาทำการหาค่ากระแสที่ค่าตัวเก็บประจุขนาด 5.5 V 0.33 F เพื่อที่จะทำการหาค่ากำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่เวลาต่าง ๆ ดังภาพที่ 4-19 และใช้กำลังไฟฟ้าที่ได้คำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟ จะได้พลังงานในหน่วยจูลหรือวัตต์วินาที = 366.3 Ws หรือ 366.3 J

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผล

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลอง พบว่า วัสดุประดิษฐ์หรือที่เรียกกันว่าอภิวัด ชนิด โครงสร้างอภิวัดแบบตัวนำแม่เหล็กเทียม (Artificial magnetic conductor: AMC) และ โครงสร้างอภิวัดแบบตัวนำทองแบบวงแหวนแยก Multiple split-ring resonators (MSRR) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายสูงสุดถึง 26.37% โดยวิทยานิพนธ์นี้สร้าง โครงสร้างอภิวัดที่ใช้สำหรับความถี่ 2.45 GHz และสร้างสายอากาศที่ต่อกับวงจรเรียงกระแส เรียกว่า สายอากาศเรียงกระแส (Rectenna) เพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานสำหรับเป็นแหล่งจ่ายให้กับโหลดหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้แรงดันและกระแสต่ำ เช่น การรับส่งข้อมูลของเซ็นเซอร์ โหลดที่ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำได้

ในขั้นตอนแรกเราได้ทำการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปและโครงสร้างอภิวัดชนิด โครงสร้างอภิวัดแบบตัวนำแม่เหล็กเทียม และ โครงสร้างอภิวัดแบบตัวนำทองแบบวงแหวนแยก ที่ความถี่ 2.45 GHz โดยใช้โปรแกรม CST จากนั้นได้นำค่าตัวแปลต่าง ๆ มาสร้างจริงบนแผ่น FR-4 ที่มีความหนา 1.6 mm ซึ่งมีราคาถูกและหาง่าย ขึ้นต่อมาเมื่อได้สายอากาศไมโครสตริปและโครงสร้างอภิวัดทั้ง โครงสร้างอภิวัดแบบตัวนำแม่เหล็กเทียม และ โครงสร้างอภิวัดแบบตัวนำทองแบบวงแหวนแยก เราได้ทำการออกแบบวงจรเรียงกระแสและนำมาต่อกับสายอากาศไมโครสตริปเพื่อเป็นสายอากาศเรียงกระแส จากนั้นได้นำมาใช้เก็บเกี่ยวพลังงาน แต่พลังงานที่ได้มานั้นมีค่าต่ำมากเราจึงทำการเพิ่มโครงสร้างอภิวัดเข้าไปในระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สาย โดยที่โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม (AMC) ถูกนำมาวางไว้ด้านหลังสายอากาศภาครับเพื่อใช้เป็นระนาบกรวดของสายอากาศทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการสะท้อนกลับในลักษณะเสริมเฟสทำให้ช่วงของแบนด์วิด อัตรการขยายและช่วยยับยั้งการเกิดคลื่นพื้นผิวเพื่อให้สัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ดีขึ้น และ โครงสร้างอภิวัดแบบตัวนำทองแบบวงแหวนแยก (MSRR) วางไว้ใกล้กับสายอากาศภาครับเพื่อนลดการจางหายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกส่งผ่าน ผลปรากฏว่าเมื่อระบบเก็บเกี่ยวพลังงานสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายที่ไม่มีอภิวัดและเมื่อทำการชาร์จประจุในเวลาที่เหมาะสมก็จะสามารถนำไฟฟ้ามาใช้ได้

ข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบและผลการทดลองใช้สายอากาศเรียงกระแสบกับโครงสร้างอิฐคู้ที่สร้างขึ้น ทำให้รู้ว่าสายอากาศไมโครสตริปที่ใช้นั้นมีอัตราการขยายที่ค่อนข้างต่ำ และมีรูปแบบการแพร่กระจายของคลื่นที่ไม่ตรงทิศทางเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นควรสร้างสายอากาศแบบอาร์เรย์ที่มีอัตราการขยายที่สูงกว่าและทำให้สามารถรับสัญญาณได้ดีกว่า นอกจากนี้การเพิ่มชุดของสายอากาศเรียงกระแสบเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ามากขึ้นให้เพียงพอกับความต้องการของโหลดหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่าง ๆ ได้

บรรณานุกรม

- ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์. (2557). *สายอากาศเรโซเนเตอร์ที่มีโพลาไรซ์แบบวงกลม โดยใช้วัสดุช่องว่าง แอบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า*. รายงานการวิจัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (หน้า 25). นครราชสีมา.
- ศราวุธ ชัยมูล และประยุทธ์ อัครเอกผาลิน. (2554). *อภิวัดสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านสายอากาศ. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 21(2), 472-482.
- Fhafhiem, N., Naktong, W., Khoomwong, E. & Krachodnok, P. (2016). Design of resonator rectenna using metamaterials for wireless power transmission. In *proceedings of the 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)* (pp 1-4). Thailand: Chiang Mai.
- Filiberto, F., Toscano, A. & Vegni, L. (2007). Design of Spiral and Multiple Split-Ring Resonators for the Realization of Miniaturized Metamaterial Samples. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 55(8), 2258-2267.
- Meesomphorn, K., Lapawong, A. & Nakmongkol, N. (2015). *Energy Harvest from Wireless LAN*. Department of Electrical Engineering Burapha University.
- Meriche, M.A., Attia, H., Messai, A. & Denidni, T.A. (2016). Gain improvement of a wideband monopole antenna with novel artificial magnetic conductor. In *proceedings of the 17th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM)* (pp 1-2). Canada: Montreal.
- Nguyen, T.T., Kim, D.J., Kim, S.H. & Jang J.H. (2009). Design of a Wideband Mushroom-like Electromagnetic Bandgap Structure with Magneto-Dielectric Substrate. In *proceedings of The 6th International Conference on Information Technology and Applications (ICITA)* (pp. 130-135). Vietnam: Hanoi.
- Tp-link. (2018). Specifications *TL-WA901ND*. Retrieved from https://www.tp-link.com/eg/products/details/cat-12_TL-WA901ND.html#specifications.

- Werfelli, H., Tayari, K., Chaoui, M., Lahiani, M. & Ghariani, H. (2016). Design of rectangular microstrip patch antenna. In *proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)* (pp. 798 – 803). Tunisia: Monastir.
- Ziolkowski, R. W. (2003). Design, Fabrication, and Testing of Double Negative Metamaterials. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 51(7), 1516-1529.