การออกแบบโพรงช่องว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีเจาะรูแบบคาบบนแผ่นกราวด์

(Design of EBG using Periodic Holes on ground plane)

โดย

นายโกศล สว่างวัฒนกิจ รหัสนักศึกษา B5402984

นายอรรถโกวิท หงษา รหัสนักศึกษา B5430857

นายภควัต ทะสังขา รหัสนักศึกษา B5542253

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษารายวิชา 527499 โครงงานวิศวกรรมโทรคมนาคม

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2554

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประจำภาคการศึกษาที่ 3 ปีการศึกษา 2558

การออกแบบโพรงช่องว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีเจาะรูแบบคาบบนแผ่นกราวด์

คณะกรรมการสอบโครงงาน

_____

(รองศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล)

กรรมการ

_____

(อาจารย์ เศรษฐวิทย์ ภูฉายา)

กรรมการ

_____

(รองศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ วงศ์สรรค์)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับรายงานฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม รายวิชา 527499 โครงงานวิศวกรรมโทรคมนาคม ประจำปีการศึกษา 2558

โครงงาน	การออกแบบโพรงช่องว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีเจาะรูแบบคาบบนแผ่นกราวด์ (Design of EBG using Periodic Holes on ground plane)
จัดทำโดย	นายโกศล สว่างวัฒนกิจ
	นายอรรถโกวิท หงษา
	นายภควัต ทะสังขา
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
ภาคการศึกษาที่	3/2558

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันทีวีดิจิตอลได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของเรา และในการรับสัญญาณของระบบทีวีดิจิตอลต้องใช้สายอากาศที่เป็น Wideband antenna ซึ่งเมื่อนำไปใช้งานในพื้นที่ห่างไกลจากสถานีส่งตั้งแต่ 80 กิโลเมตรขึ้นไป พบว่าไม่สามารถรับสัญญาณได้ครบทุกช่องสัญญาณ เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มอัตราขยายทำให้ความสามารถในการรับช่องสัญญาณได้ไม่ครบถ้วน เนื่องจาก Bandwidth แคบลง ดังนั้นในโครงงานฉบับนี้จึงได้ทำการออกแบบวิธีขยายกำลังของสายอากาศโดยใช้ EBG structure แบบ periodic hole บนแผ่นกราวด์มาวางด้านหน้าของสายอากาศแบบ printed dipole antenna ที่ใช้ในการรับสัญญาณของทีวีดิจิตอลในช่วงความถี่ 510-790 MHz ซึ่งจะส่งผลให้สายอากาศมีอัตราขยายที่เพิ่มขึ้นโดยที่ยังมีความกว้าง Bandwidth ที่กว้างเท่าเดิม

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานเรื่องการออกแบบโพรงช่องว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีเจาะรูแบบคาบบนแผ่นกราวด์(Design of EBG using Periodic Holes on ground plane) สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างยิ่ง รศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ผู้ที่เป็นแนวคิดริเริ่มในหัวข้อโครงงานเรื่อง การออกแบบโพรงช่องว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีเจาะรูแบบคาบบนแผ่นกราวด์ (Design of EBG using Periodic Holes on ground plane) ที่ได้กรุณาช่วยเหลือสนับสนุน ให้คำปรึกษาแนะแนว และอาจารย์ สมภพ พิมพล ที่ได้ให้ยืมอุปกรณ์มาใช้ในการทำโครงงานนี้ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ช่วยตรวจสอบ แก้ไข ข้อบกพร่องในทุกขั้นตอนต่างๆของการจัดทำโครงงานดังกล่าวนี้ นอกจากนี้คณะผู้จัดทำโครงงานขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือคณะผู้จัดทำในด้านต่างๆ

คณะผู้จัดทำโครงงานใคร่ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษาตลอดจนบิดามารดา เพื่อนๆทุกคนและผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามมาไว้ ณ ที่นี้ ที่ได้ให้กำลังใจและมีส่วนช่วยเหลือให้โครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี สุดท้ายนี้กลุ่มผู้จัดได้คาดหวังว่าโครงงานนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ ไม่มากก็น้อย และหากโครงงานชิ้นนี้มีข้อผิดพลาดประการใดทางคณะผู้จัดทำโครงงานใครขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

นายโกศล สว่างวัฒนกิจ

นายอรรถโกวิท หงษา

นายภควัต ทะสังขา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ปัญหาและที่มาของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	1
1.3 ขอบเขตการทำงาน	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงาน	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	
2.1 บทนำ	3
2.2 สายอากาศ (Antenna)	3
2.3 สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna)	3
2.4 สายอากาศแผ่นพิมพ์ (Printed Patch Antenna)	4
2.5 บริเวณการแผ่พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	5
2.5.1 บริเวณสนามระยะใกล้รีแอกทีฟ	6
2.5.2 บริเวณแผ่พลังงานสนามใกล้	6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.5.3 บริเวณสนามไกล 6

2.6 แบบรูปการแผ่พลังงาน 6

2.6.1 แบบรูปไอโซโทรปิก (Isotropic Pattern) 7

2.6.2 สายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) 7

2.6.3 สายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (Omnidirectional Antenna) 7

2.6.4 แบบรูปการแผ่พลังงานหลัก 8

2.6.5 พูดลื่นของแบบรูปการแผ่พลังงาน 8

2.7 ความกว้างลำคลื่นของแบบรูป 8

2.7.1 ความกว้างลำครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth) 9

2.7.2 ความกว้างลำแรกกำลังเป็นศูนย์ (First-Null Beamwidth) 9

2.8 อัตราขยายของสายอากาศ 9

2.9 ความกว้างแถบความถี่ 10

2.10 การโพลาไรซ์ของสายอากาศ 11

2.11 การแมตซ์อิมพิแดนซ์สายอากาศในทางปฏิบัติ 11

2.12 อภิวัสดุ 12

2.13 ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า 13

2.14 พื้นผิวเลือกความถี่ผ่าน 13

2.15 สรุป 16

บทที่ 3 การออกแบบโครงงาน

3.1 บทนำ 17

3.2 โครงสร้างและพารามิเตอร์ของ Band-Notch Printed Dipole antenna และ

Mushroom-like EBG 3x3 elements (EBG Reflector) 17

3.3 การออกแบบแผ่นกราวด์โลหะแม่เหล็กประดิษฐ์ โดยใช้ทฤษฎีพื้นผิวเลือกความถี่ผ่าน (frequency selective surface) 31

3.4 สรุป 49

บทที่ 4 ผลการทดสอบ

4.1 บทนำ 50

4.2 การวัดอิมพิแดนซ์คุณลักษณะ 50

4.2.1 ขั้นตอนการวัดค่าอิมพิแดนซ์คุณลักษณะ 50

4.3 ความกว้างแถบของสายอากาศ 51

4.3.1 ขั้นตอนการวัดความกว้างแถบ 51

4.4 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ 53

4.4.1 ขั้นตอนการวัดอัตราส่วนคลื่นนิ่ง 53

4.5 แบบรูปการแผ่กำลังและการโพลาไรซ์ของสายอากาศ 54

4.5.1 การวัดแบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามแม่เหล็ก 55

4.5.2 การวัดแบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้า 56

4.6 อัตราขยาย 58

4.6.1 อัตราการสูญเสียในอากาศว่าง (free space loss) 58

4.6.2 อัตราขยายของสายอากาศ 59

4.7 สรุป 65

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป 66

5.2 ข้อเสนอแนะ 67

บรรณานุกรม 68

ประวัติผู้เขียน 69

สารบัญรูป

รายการ	หน้า
รูปที่ 2.1 การกระจายของกระแสในสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น	4
รูปที่ 2.2 สายอากาศแผ่นพิมพ์ในรูปเชิงเรขาคณิตต่างๆ	5
รูปที่ 2.3 แสดงระยะของการแผ่พลังงานทั้งสามแบบ	5
รูปที่ 2.4 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว	7
รูปที่ 2.5 ภาพแสดงพูชนิดต่างๆบนแบบรูปการแผ่พลังงานสามมิติแบบเชิงขั้ว	8
รูปที่ 2.6 การโพลาไรซ์ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า	11
รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า	13
รูปที่ 2.8 ผลตอบสนองความถี่ทางอุดมคติของวงจรกรองความถี่	14
รูปที่ 2.9 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแบบต่างๆ	15
รูปที่ 2.10 Center Connected or N-Pole Element	15
รูปที่ 2.11 Loop Type Element	16
รูปที่ 2.12 Plate Type Element	16
รูปที่ 2.13 Combination Element	16
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศ Band-notch printed dipole	17
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของ mushroom-like EBG 3x3 element (EBG Reflector)	18
รูปที่ 3.3 ระยะห่างระหว่าง Band-Notched Printed Dipole Antennna และ EBG Reflector	18
รูปที่ 3.4 Band-notched printed dipole antenna ในโปรแกรม CST Microwave Studio	19
รูปที่ 3.5 S-Parameter (S_{11}) ของ Band-notched printed dipole antenna	20
รูปที่ 3.6 แบบรูปการแผ่กำลัง และอัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz	20

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ของ Band-notched printed dipole antenna

รูปที่ 3.7 แบบรูปการแผ่กำลัง และอัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz 21

ของ Band-notched printed dipole antenna

รูปที่ 3.8 แบบรูปการแผ่กำลัง และอัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz 21

ของ Band-notched printed dipole Antenna

รูปที่ 3.9 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 530 MHz 22

ของ Band-notched printed dipole antenna

รูปที่ 3.10 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 530 MHz 22

ของ Band-notched printed dipole antenna

รูปที่ 3.11 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 650 MHz 23

ของ Band-notched printed dipole antenna

รูปที่ 3.12 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 650 MHz 24

ของ Band-notched printed dipole antenna

รูปที่ 3.13 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 786 MHz 24

ของ Band-notched printed dipole antenna

รูปที่ 3.14 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 786 MHz 25

ของ Band-notched printed dipole antenna

รูปที่ 3.15 Band-Notched Printed Dipole Antennna และ EBG Reflector 25

ในโปรแกรม CST Microwave Studio

รูปที่ 3.16 S-Parameter (S_{11}) ของ Band-Notched Printed Dipole Antennna 26

และ EBG Reflector

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.17 แบบรูปการแผ่กำลัง และอัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz 26
ของ Band-Notched Printed Dipole Antennna และ EBG Reflector
รูปที่ 3.18 แบบรูปการแผ่กำลัง และอัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz 27
ของ Band-Notched Printed Dipole Antennna และ EBG Reflector
รูปที่ 3.19 แบบรูปการแผ่กำลัง และอัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz 27
ของ Band-Notched Printed Dipole Antennna และ EBG Reflector
รูปที่ 3.20 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 530 MHz 28
ของ Band-notched printed dipole antenna และ EBG Reflector
รูปที่ 3.21 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 530 MHz 28
ของ Band-notched printed dipole antenna และ EBG Reflector
รูปที่ 3.22 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 650 MHz 29
ของ Band-notched printed dipole antenna และ EBG Reflector
รูปที่ 3.23 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 650 MHz 30
ของ Band-notched printed dipole antenna และ EBG Reflector
รูปที่ 3.24 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 786 MHz 30
ของ Band-notched printed dipole antenna และ EBG Reflector
รูปที่ 3.25 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 786 MHz 31
ของ Band-notched printed dipole antenna และ EBG Reflector
รูปที่ 3.26 อลูมิเนียมขนาด 100x100mm ความหนา 2mm วางด้านหน้าสายอากาศ 32
Band-Notch Printed Dipole เป็นระยะ $\lambda/4$
รูปที่ 3.27 S-Parameter ของอลูมิเนียมขนาด 20x20mm ,40x40mm,…, 320x320mm 32

รูปที่ 3.28 S-Parameter ของอลูมิเนียมขนาด 100x100mm 33

รูปที่ 3.29 อลูมิเนียมขนาด 100x200mm แนวตั้ง(ซ้าย) และขนาด 200x100mm แนวนอน(ขวา) 33

รูปที่ 3.30 S-Parameter ของการขยายอลูมิเนียมทั้งแนวตั้งและแนวนอน เมื่อ S1,1 33
ในภาพคือ อลูมิเนียมขนาด 100x100mm

รูปที่ 3.31 รูเจาะที่กึ่งกลางแผ่นอลูมิเนียม 34

รูปที่ 3.32 S-Parameter ของรูเจาะรัศมี 1-39mm 34

รูปที่ 3.33 การเพิ่มรูของรูรัศมี 1mm ให้เป็นแบบ nxn โดยระยะห่างระหว่างรู 36
นับจากจุดศูนย์กลางเป็น 5mm

รูปที่ 3.34 ระยะระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง 36

รูปที่ 3.35 อลูมิเนียมที่มีรูเจาะรัศมี 1 mm ระยะห่างระหว่างรูนับจาก 42
จุดศูนย์กลาง 5mm และจำนวน nxn=19x19

รูปที่ 3.36 S-Parameter ของระยะระหว่าง driven กับ แผ่นกราวด์โลหะ 43
แม่เหล็กประดิษฐ์ 115mm

รูปที่ 3.37 S-Parameter ของระยะระหว่าง driven กับ แผ่นกราวด์โลหะ 43
แม่เหล็กประดิษฐ์ 120mm

รูปที่ 3.38 S-Parameter ของระยะระหว่าง driven กับ แผ่นกราวด์โลหะ 44
แม่เหล็กประดิษฐ์ 125mm

รูปที่ 3.39 ผลสำเร็จของสายอากาศ 44

รูปที่ 3.40 S-Parameter ของสายอากาศผลสำเร็จ 45

รูปที่ 3.41 แบบรูปการแผ่กำลัง และอัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz 45

รูปที่ 3.42 แบบรูปการแผ่กำลัง และอัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz 45

รูปที่ 3.43 แบบรูปการแผ่กำลัง และอัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz 46

รูปที่ 3.44 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 530 MHz 46

รูปที่ 3.45 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 530 MHz 47

รูปที่ 3.46 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 650 MHz 47

รูปที่ 3.47 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 650 MHz 48

รูปที่ 3.48 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 786 MHz 48

รูปที่ 3.49 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 786 MHz 49

รูปที่ 4.1 ผลการวัดอิมพิแดนซ์ด้านเข้าความถี่ 650 MHz 51

รูปที่ 4.2 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน 51

รูปที่ 4.3 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ 53

รูปที่ 4.4 ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ 54

รูปที่ 4.5 การวัดแบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามแม่เหล็ก 55

รูปที่ 4.6 แบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบของ 55
สายอากาศ (Band-Notch Printed Dipole Antenna) ย่านความถี่ 510-790 MHz

รูปที่ 4.7 แบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามแม่เหล็กในโปรแกรมและการวัดทดสอบจริง 56

รูปที่ 4.8 การวัดแบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้า 56

รูปที่ 4.9 แบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ 57
ของสายอากาศ (Band-Notch Printed Dipole Antenna) ย่านความถี่ 510-790 MHz

รูปที่ 4.10 แบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้าในโปรแกรมและการวัดทดสอบจริง 57

รูปที่ 4.11 สายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่นที่ใช้เป็นสายอากาศภาคส่ง 59

รูปที่ 4.12 สายอากาศภาครับ 60

รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอัตราขยายของสายอากาศภาครับ 64

รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบ S_{11} ระหว่างผลในโปรแกรม 64

CST Microwave Studio 2014 กับ ผลจากการวัดจริง

รูปที่ 5.1 การจัดเรียงองค์ประกอบของสายอากาศ 66

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

รายการ **หน้า**

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของ Band-notch printed dipole และ mushroom-like EBG 3x3 element (EBG Reflector) 18

ตารางที่ 3.2 ขนาดรัศมีของรู และอัตราขยายที่ความถี่ 530 ,650 และ 786 MHz 34

ตารางที่ 3.3 แสดงอัตราขยายของโครางสร้างรายคาบแบบ nxn ที่ขนาดรูรัศมีต่างๆ 37

ตารางที่ 3.4 แสดงการเลื่อนตำแหน่งและระยะของแผ่นกราวด์โลหะแม่เหล็กประดิษฐ์ 42

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบอัตราขยายระหว่าง (สายอากาศ+แผ่นสะท้อน) (sompop pimpol ,2014) กับ (สายอากาศ+แผ่นสะท้อน+แผ่นเจาะรู) 63

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบอัตราขยายที่ได้จากโปรแกรมจำลองผลและการวัดทดสอบจริง 63

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาและที่มาของโครงงาน

ในปัจจุบันทีวีดิจิตอลได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของเรา และในการรับสัญญาณของระบบทีวีดิจิตอลต้องใช้สายอากาศที่เป็น Wideband antenna ซึ่งเมื่อนำไปใช้งานในพื้นที่ห่างไกลจากสถานีส่งตั้งแต่ 80 กิโลเมตรขึ้นไป พบว่าไม่สามารถรับสัญญาณได้ครบทุกช่องสัญญาณ เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มอัตราขยายทำให้ความสามารถในการรับช่องสัญญาณได้ไม่ครบถ้วน เนื่องจาก Bandwidth แคบลง ดังนั้นในโครงงานฉบับนี้จึงได้ทำการออกแบบวิธีขยายกำลังของสายอากาศโดยใช้ EBG structure แบบ periodic hole บนแผ่นกราวด์มาวางด้านหน้าของสายอากาศแบบ printed dipole antenna ที่ใช้ในการรับสัญญาณของทีวีดิจิตอลในช่วงความถี่ 510-790 MHz ซึ่งจะส่งผลให้สายอากาศมีอัตราขยายที่เพิ่มขึ้นโดยที่ยังมีความกว้าง Bandwidth ที่กว้างเท่าเดิม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อศึกษาผลของ EBG structure ต่อ radiation pattern ของสายอากาศ
2. เพื่อศึกษาการใช้โปรแกรมจำลองการแผ่คลื่นของสายอากาศด้วยโปรแกรม CST Microwave
3. เพื่อศึกษาการออกแบบ และผลการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กของวัสดุอลูมิเนียม
4. เพื่อศึกษาระยะห่างระหว่าง EBG structure กับสายอากาศเพื่อให้ได้กำลังขยายที่มากขึ้น และ matching กัน

1.3 ขอบเขตการทำงาน

1. ศึกษาผลจากการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กของวัสดุอลูมิเนียม
2. ศึกษาผลจาก EBG structure ต่อ radiation pattern ของสายอากาศในช่วงความถี่ที่ต้องการคือ 510-790 MHz
3. ศึกษาการใช้งานโปรแกรมจำลองคลื่นสนามแม่เหล็ก CST Microwave

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4. ออกแบบ EBG structure ที่สามารถขยายกำลังของสายอากาศที่ทำงานในช่วงความถี่ที่ต้องการแล้วจำลองผลการออกแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave
5. สร้างอุปกรณ์ตามแบบจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave และทดสอบเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับ EBG structure
2. เขียนโครงการและเสนอกับอาจารย์ที่ปรึกษา
3. ศึกษาการใช้โปรแกรม CST Microwave
4. ทดลองวาดต้นแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave
5. นำต้นแบบที่ผ่านการ Simulation จนได้ค่าที่ต้องการแล้วนำไปสร้างชิ้นงานต้นแบบ
6. สรุปผลการทดลอง
7. นำเสนอโครงงาน

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงาน

1. สามารถนำความรู้ที่ได้มาใช้ประกอบวิชาชีพได้
2. สามารถนำเอาความรู้ในทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้
3. สามารถทำงานเป็นทีมได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 บทนำ

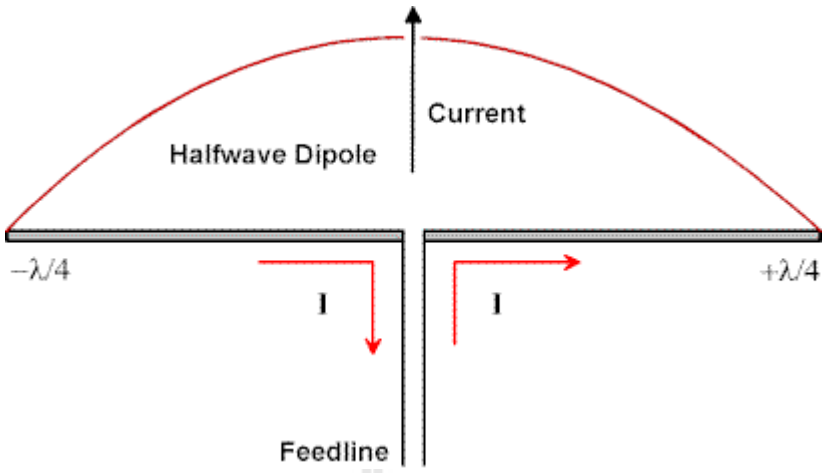
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของสายอากาศและค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ พร้อมทั้งทฤษฎีของอภิวัสดุ (Metamaterial) และเทคนิคการออกแบบของอภิวัสดุด้วยเทคนิคช่องแถบว่างแม่เหล็กไฟฟ้าและพื้นผิวเลือกความถี่ผ่าน (Frequency Selective Surface)

2.2 สายอากาศ (Antenna)

สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนพลังงานของคลื่นที่เดินทางในอุปกรณ์นำทางให้อยู่ในรูปพลังงานของคลื่นที่เดินทางในอากาศว่างในกรณีที่เป็นสายอากาศส่ง (Transmitting Antenna) หรือในทางกลับกันเมื่อทำหน้าที่เป็นสายอากาศการรับ (Receiving Antenna) ก็จะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานของคลื่นที่เดินทางในอากาศว่างให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปพลังงานของคลื่นที่เดินทางในอุปกรณ์การนำทาง โดยการทำงานทั้งสองหน้าที่จะต้องทำได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าเทียมกันเท่าที่จะเป็นไปได้ และที่สำคัญในขณะที่ใช้งานนั้น กำลังงานของคลื่นที่แผ่กระจายออกไปในอากาศว่างจะต้องมีรูปแบบการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมที่กำหนดหรือที่ได้ออกแบบไว้

2.3 สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna)

สายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศอย่างง่าย ที่มีองค์ประกอบเป็นแท่งโลหะ 2 แท่ง วางเป็นแนวเส้นตรง โดยจุดกึ่งกลางของสายอากาศไดโพลจะต่อเข้ากับเครื่องส่งโดยใช้สายส่งเป็นตัวกลาง ในการเชื่อมต่อเครื่องส่งจะจ่ายสัญญาณเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับไปยังสายอากาศ กระแสของสัญญาณนี้จะไหลไปยังขั้วหนึ่งของไดโพลและไหลกลับมายังอีกขั้วหนึ่งของไดโพล ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของกระแสที่ส่งไปยังขั้วของแรกไดโพล

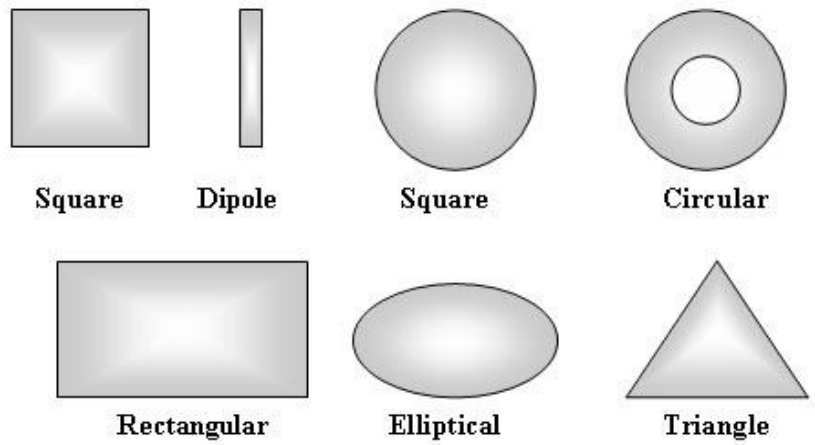


รูปที่ 2.1 การกระจายของกระแสในสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น

ไดโพลอุดมคติ (Ideal Dipole) เป็นสายอากาศสมมติซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษาสายอากาศชนิดอื่นๆ สามารถพิจารณาให้เป็นองค์ประกอบเล็กๆ ของความยาวไดโพล (Infinitesimal Dipole) ที่มีการแจกแจงกระแสที่มีลักษณะที่เท่ากันตลอด คุณลักษณะทางทฤษฎีของไดโพลอุดมคติจะประมาณให้มีค่าทางไฟฟ้าเท่ากับสายอากาศไดโพลที่มีขนาดเล็ก

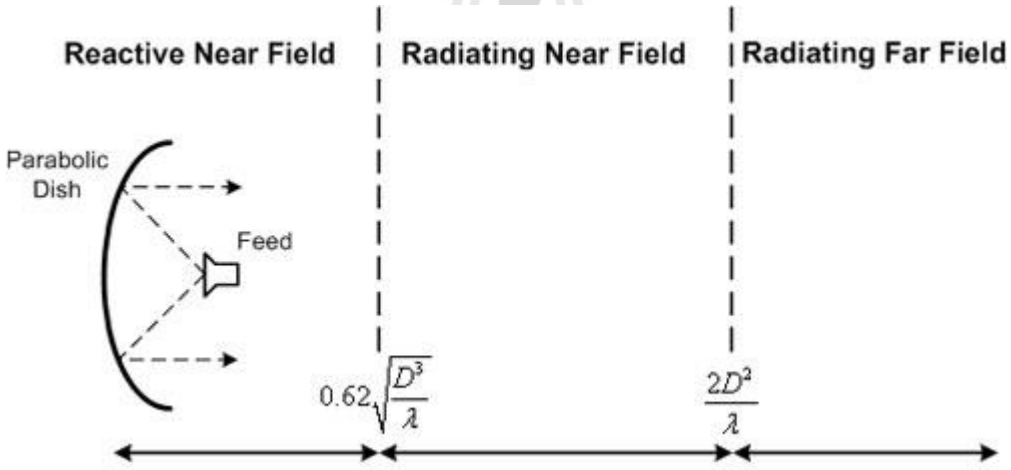
2.4 สายอากาศแผ่นพิมพ์ (Printed Patch Antenna)

สายอากาศซึ่งใช้ตัวแผ่พลังงานเป็นแบบแผ่นพิมพ์ โดยโครงสร้างของสายอากาศแผ่นพิมพ์ประกอบด้วยแผ่นตัวนำซึ่งทำหน้าที่ในการแผ่กระจายคลื่นวางอยู่บนแผ่นไดอิเล็กตริกซับเสตรด (Dielectric Substrate) โดยมีระนาบกราวด์โลหะรองรับอยู่ด้านล่างอีกชั้นหนึ่ง ปัจจุบันส่วนที่เป็นแผ่นซึ่งใช้ในการแผ่พลังงาน ได้ถูกพัฒนาออกมาในลักษณะที่แตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์ในการใช้งาน เช่น แผ่นสี่เหลี่ยม รูปวงกลม หรือรูปแบบเชิงเรขาคณิตอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สายอากาศแผ่นพิมพ์ในรูปเชิงเรขาคณิตต่างๆ

2.5 บริเวณการแผ่พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 แสดงระยะของการแผ่พลังงานทั้งสามแบบ

พื้นที่ว่างหรืออวกาศว่างที่อยู่ล้อมรอบสายอากาศในขณะที่มีการแผ่พลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 3 บริเวณดังรูปที่ 2.3 โดยพิจารณาจากระยะทางที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

2.5.1 บริเวณสนามระยะใกล้รีแอกทีฟ

บริเวณสนามระยะใกล้รีแอกทีฟ (Reactive Near-Field Region) นี้ คือ บริเวณโดยรอบและอยู่ใกล้สายอากาศมากที่สุด โดยสนามที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะเป็นสนามที่เกิดจากค่ารีแอกแตนซ์หรือจากกำลังที่เป็นจำนวนจินตภาพเป็นส่วนใหญ่

2.5.2 บริเวณแผ่พลังงานสนามใกล้

บริเวณแผ่พลังงานสนามใกล้ (Radiating Near-Field Region) คือ บริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างบริเวณสนามใกล้รีแอกทีฟและบริเวณสนามไกล ซึ่งเรียกว่า บริเวณเฟรสเนล (Fresnel Region) โดยสนามที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะมีการแผ่พลังงานที่เป็นส่วนของจำนวนจริงเป็นส่วนใหญ่ แต่การแผ่พลังงานของสนามเชิงมุม (Angular Field) ยังคงขึ้นอยู่กับระยะทางที่ห่างออกไปจากสายอากาศอีกด้วย

2.5.3 บริเวณสนามไกล

บริเวณสนามไกล (Far-Field Region) นั้นจะเป็นบริเวณที่ถัดจากบริเวณเฟรสเนล ซึ่งบางครั้งเรียกว่า บริเวณเฟราน์โฮเฟอร์ (Fraunhofer Region) เงื่อนไขของสนามไกลนี้ องค์ประกอบของสนามเชิงมุมจะไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างสายอากาศไปยังจุดสังเกตใดๆ ทั้งสิ้นองค์ประกอบของสนามที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electromagnetic Wave : TEM Wave) กับทิศทางการแผ่คลื่น สามารถนำมาพล็อตเพื่อหารูปแบบการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) ที่เกิดขึ้นจริงจากสายอากาศได้

2.6 แบบรูปการแผ่พลังงาน

แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) หรือรูปแบบของสายอากาศ (Antenna Pattern) คือ การบอกคุณสมบัติในการแผ่พลังงานของสายอากาศในรูปของกราฟิกหรือในรูปของฟังก์ชันในทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพิกัดตำแหน่ง โดยมีศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับแบบรูปการแผ่พลังงาน ดังนี้

2.6.1 แบบรูปไอโซโทรปิก (Isotropic Pattern)

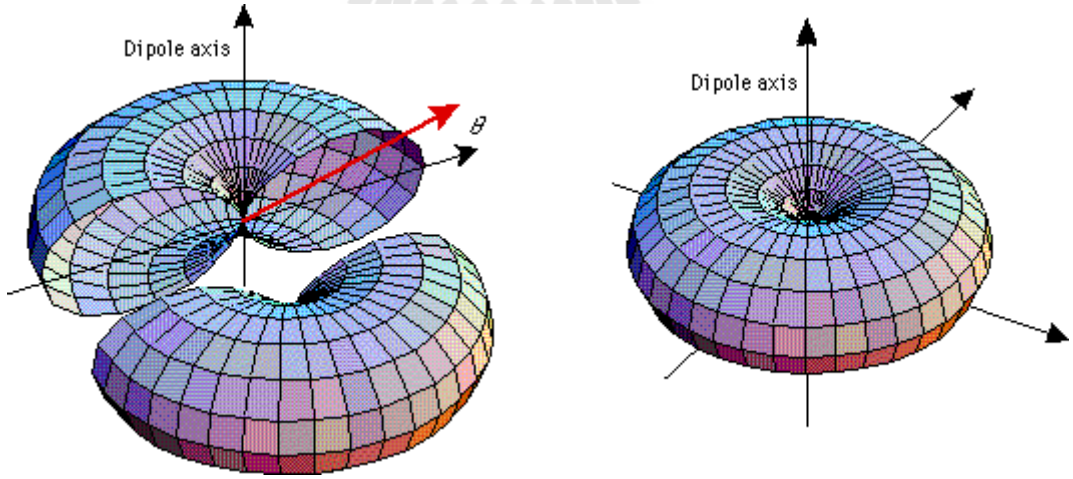
จะเป็นการแผ่พลังงานของสายอากาศที่มีการแผ่พลังงานออกไปในทุกทิศทางเท่ากันทั้งหมดเสมือนมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม ซึ่งในความเป็นจริงนั้นไม่มีสายอากาศใดเลยที่มีแบบรูปในลักษณะเช่นนี้ทั้งในทฤษฎีและปฏิบัติ จึงถือว่าเป็นแบบรูปที่เป็นอุดมคติมากกว่า

2.6.2 สายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional Antenna)

สายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) คือ สายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่พลังงานหรือรับกำลังเข้ามาในทิศทางใดทิศทางหนึ่งอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าทิศทางอื่น

2.6.3 สายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (Omnidirectional Antenna)

สายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (Omnidirectional Antenna) คือสายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่พลังงานออกไปรอบตัวในระนาบใดระนาบหนึ่ง ส่วนระนาบอื่นที่ตั้งฉากกันจะมีการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.4



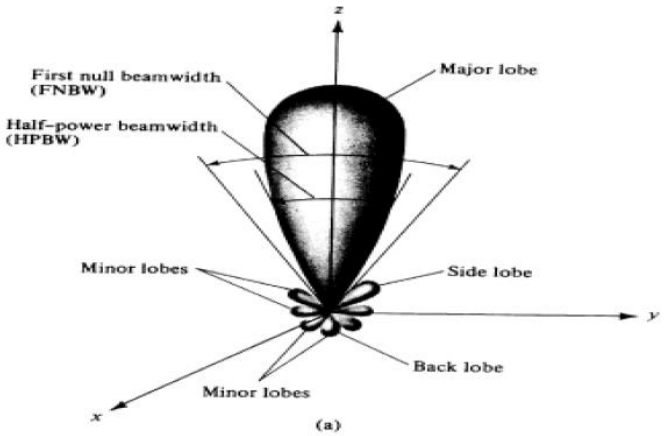
รูปที่ 2.4 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว

2.6.4 แบบรูปการแผ่พลังงานหลัก

แบบรูปการแผ่พลังงานหลัก คือรูปแบบการแผ่พลังงานแบบสองมิติของสายอากาศที่มีโพลาไรซ์แบบเส้นตรง (Linear Polarization) โดยวัดกำลังของคลื่นจากระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane : เป็นระนาบที่ขนานกับเวกเตอร์สนามไฟฟ้า) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane : เป็นระนาบที่ขนานกับเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก) ในทิศทางที่มีการแผ่พลังงานสูงสุด

2.6.5 พูคลื่นของแบบรูปการแผ่พลังงาน

พูคลื่นของแบบรูปการแผ่พลังงานคือ ส่วนต่างๆของแบบรูปการแผ่พลังงานที่บ่งบอกถึงบริเวณที่มีความเข้มการแผ่พลังงานแตกต่างกันอย่างไร พูของแบบรูปนี้จะแบ่งย่อยออกเป็นพูคลื่นใหญ่ (Major/Main Lobe) พูคลื่นเล็ก (Minor Lobe) พูข้าง (Side Lobe) และพูหลัง (Back Lobe) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ภาพแสดงพูชนิดต่างๆบนแบบรูปการแผ่พลังงานสามมิติแบบเชิงขั้ว

2.7 ความกว้างลำคลื่นของแบบรูป

2.7.1 ความกว้างลำครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth)

ความกว้างลำครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth) คือในระนาบหนึ่งๆของแบบรูปที่ประกอบด้วยทิศทางที่มีลำคลื่นสูงสุดและมีมุมที่อยู่ระหว่างสองทิศทางซึ่งความเข้มการแผ่พลังงานมีค่ากำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับค่าสูงสุด ซึ่งคำนี้มักจะใช้อธิบายถึงความกว้างของลำคลื่นที่มีค่าความเข้มพลังงานลดลง 3 dB (-3 dB Beamwidth)

2.7.2 ความกว้างลำแรกกำลังเป็นศูนย์ (First-Null Beamwidth)

ความกว้างลำแรกกำลังเป็นศูนย์ (First-Null Beamwidth)คือ ในระนาบหนึ่งๆของแบบรูปที่ประกอบด้วยทิศทางที่มีลำคลื่นสูงสุดและมีมุมที่อยู่ระหว่างสองทิศทางซึ่งความเข้มการแผ่พลังงานมีค่ากำลังเท่ากับศูนย์ตำแหน่งแรกเมื่อเทียบกับค่าสูงสุด

2.8 อัตราขยายของสายอากาศ

อัตราขยายของสายอากาศ คืออัตราส่วนของค่าความเข้มการแผ่พลังงาน U ในทิศทางที่กำหนดให้กับค่าความเข้มการแผ่พลังงานที่สายอากาศได้รับในทางปฏิบัตินั้นสายอากาศจะมีอัตราขยายมากเพียงพอตามที่ต้องการหรือไม่ จะมีปัจจัยหลายประการเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นผลให้การส่งผ่านพลังงานจากเครื่องส่งไปยังสายอากาศหรือจากสายอากาศมายังเครื่องรับลดต่ำลงได้ เช่น การสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการไม่แมตซ์กันระหว่างสายส่งและสายอากาศ การสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายส่ง และการสูญเสียภายในตัวสายอากาศซึ่งเกิดจากส่วนประกอบของสายอากาศเอง เช่น การสูญเสียจากไดอิเล็กตริกและตัวนำที่ประกอบเป็นโครงสร้างสายอากาศซึ่งโดยปกติแล้วกำลังที่ถูกแผ่ออกมาจากสายอากาศมักจะมีค่าน้อยกว่ากำลังที่ป้อนให้กับระบบสายอากาศเสมอ

การวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศมีอยู่หลายวิธีด้วยกันวิธีที่ง่ายที่สุดคือวิธีแบบใช้สายอากาศอ้างอิง (Reference Antenna Method) หรือ วิธีการเปรียบเทียบ (Comparison Method) หรือ วิธีการแทนที่ (Substitution Method) ซึ่งสามารถหาได้โดยการเปรียบเทียบกำลังที่ได้รับด้วย

สายอากาศอ้างอิง(P_{ref}) กับกำลังที่ได้รับจากสายอากาศ (P_{test}) ค่าอัตราขยายที่ต้องการทราบจะหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$G_{test} = \frac{P_{test}}{P_{ref}} G_{ref} \quad (2.1)$$

เมื่อต้องการคำตอบ ให้มีหน่วยเป็น dB สามารถหาได้จากสมการ

$$G_{test}\ (\text{dB}) = P_{test}\ (\text{dB}) - P_{ref}\ (\text{dB}) + G_{ref}\ (\text{dB}) \quad (2.2)$$

ก่อนที่จะนำวิธีการแทนที่มาใช้นั้น เราจะต้องปรับเทียบเพื่อหาค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้ในการอ้างอิงเสียก่อน โดยการใช้สายอากาศสองตัวที่เหมือนกันทุกประการมาเป็นสายอากาศรับและส่งจากนั้นวัดค่ากำลังที่ส่งออกไปและค่าของกำลังที่รับได้ นำมาคำนวณหาค่าอัตราขยาย ซึ่งจะเป็นอัตราขยายของสายอากาศอ้างอิง ดังสมการ

$$G = \frac{4\pi r}{\lambda} \sqrt{\frac{P_{rec}}{P_0}} \quad (2.3)$$

เมื่อ G คือ ค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้เป็นตัวอ้างอิง

r คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศทั้งสอง

P_{rec} และ P_0 คือ กำลังที่รับได้และกำลังที่ส่งออกไป ตามลำดับ

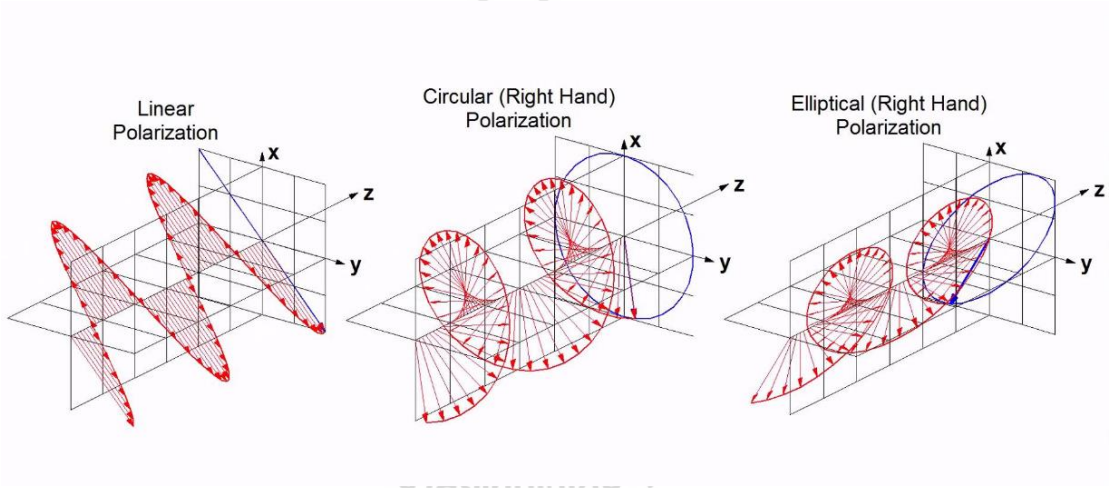
λ คือ ความยาวคลื่นในสายอากาศ

2.9 ความกว้างแถบความถี่

ความกว้างแถบความถี่ (Frequency Bandwidth : FBW) ของสายอากาศ คือ ย่านหรือช่วงความกว้างของความถี่ที่สายอากาศสามารถทำงานได้โดยที่ไม่สูญเสียคุณลักษณะที่กำหนดไว้ โดยคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศเมื่อถูกนำไปใช้งานจะต้องตรงต่อความต้องการที่กำหนดหรือที่ออกแบบไว้ เช่น อิมพิแดนซ์ด้านเข้า แบบรูปการแผ่พลังงาน ความกว้างลำ การโพลาไรซ์ อัตราขยาย ทิศทางของลำคลื่น และประสิทธิภาพการแผ่พลังงาน

2.10 การโพลาไรซ์ของสายอากาศ

การโพลาไรซ์ของคลื่นที่ถูกแผ่พลังงานออกไปจากสายอากาศส่ง ณ ตำแหน่งที่กำหนดให้และอยู่ในบริเวณสนามไกลก็คือ การโพลาไรซ์ของคลื่นระนาบ ณ ที่ตำแหน่งนั้นนั่นเอง ส่วนการโพลาไรซ์ของคลื่นที่รับเข้ามาโดยสายอากาศการรับคือ การโพลาไรซ์ของคลื่นระนาบที่แผ่เข้ามาหาตัวสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้ ทำให้เกิดค่าความหนาแน่นเส้นแรงกำลังในทิศทางดังกล่าว ซึ่งส่งผลให้เกิดกำลังสูงสุดเกิดขึ้นที่ขั้วของสายอากาศนั่นเอง โดยรูปแบบของการโพลาไรซ์เป็นการโพลาไรซ์ของสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นการอธิบายให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า ณ จุดที่กำหนดให้ โดยทั่วไปจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ แบบเส้นตรง แบบวงกลม และแบบวงรีดังแสดงในรูปที่2.6 / /



รูปที่ 2.6 การโพลาไรซ์ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า

2.11 การแมตซ์อิมพิแดนซ์สายอากาศในทางปฏิบัติ

การแมตซ์ทางอิมพิแดนซ์ของสายอากาศจะต้องดูที่ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{VSWR} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \qquad (2.4)$$

การไม่แมตซ์ (Mismatch) อิมพิแดนซ์ของสายอากาศกับสายส่งนั้นเป็นสิ่งที่ต้องพึงระวังอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในระบบการส่งสัญญาณวิทยุที่มีกำลังส่งสูงนั้นหาก VSWR มีค่าสูงขึ้นจะทำให้

ขนาดของคลื่นนิ่งที่เกิดขึ้นภายในสายส่งมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย และอีกกรณีหนึ่งที่เกิดการไม่แมตซ์อิมพิแดนซ์นี้อาจทำให้ความถี่ของเครื่องส่งมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งผลที่เกิดนี้เรียกว่า การดึงความถี่ (Frequency Pulling)

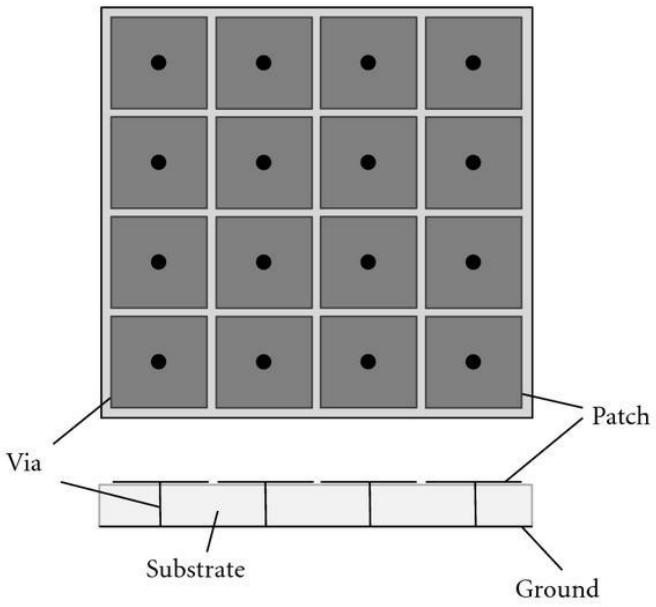
ในการออกแบบสายอากาศในทางปฏิบัติค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ตรวจสอบความแมตซ์ทางอิมพิแดนซ์เราจะใช้พารามิเตอร์ S_{11} ซึ่งก็คือค่า VSWR ในรูปของหน่วย เดซิเบล ซึ่งค่ามาตรฐานที่ใช้กันคือให้ S_{11} ในช่วงความถี่เราออกแบบมีค่า ต่ำกว่า -10 dB

2.12 อภิวัสดุ

อภิวัสดุ หรือ Metamaterial โดยนิยาม คือ วัสดุประดิษฐ์เชิงวิศวกรรมซึ่งมีคุณสมบัติที่ไม่ปรากฏในธรรมชาติ ถูกสร้างขึ้นโดยใช้การประกอบกันของวัสดุหลายชนิดที่แตกต่างกัน เช่น โลหะ หรือ พลาสติก วัสดุจะถูกออกแบบด้วยรูปแบบซ้ำๆที่มีขนาดเล็กยิ่งกว่าความยาวคลื่นของช่วงที่ต้องการใช้งาน คุณสมบัติของอภิวัสดุจะไม่ถูกกำหนดด้วยชนิดของวัสดุพื้นฐานที่นำมาใช้ แต่จะถูกกำหนดด้วยการออกแบบโครงสร้างที่แม่นยำของ รูปร่าง,ทรงเรขาคณิต และ ขนาด ซึ่งจากสิ่งเหล่านี้จะทำให้เกิดการจัดการกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทั้ง การปิดกั้น,การดูดซับ,การขยาย,การบิดโค้งคลื่น เพื่อให้เกิดประโยชน์ตามที่ต้องการจากวัสดุธรรมดาเหล่านี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.13 ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

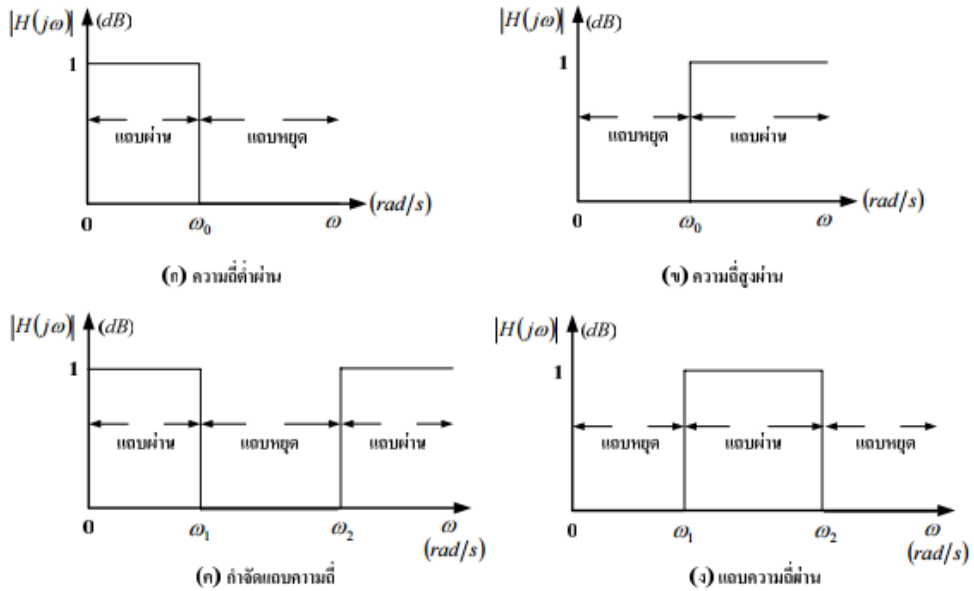


รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ (Electromagnetic Bandgap : EBG) เป็นอภิวัสดุประเภทหนึ่งโดยทั่วไปจะประกอบด้วยโลหะรูปต่างๆที่วางเป็นรายคาบบนระนาบกราวด์ที่แยกด้วยชั้นรองไดอิเล็กตริก (Dielectric Substrate) อาจจะเชื่อมต่อ (Via) หรือไม่เชื่อมต่อกับระนาบกราวด์ก็ได้โดยรูปแบบอย่างหนึ่งของ ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าในโครงงานชิ้นนี้ได้ใช้ในรูปแบบ โครงสร้างคล้ายเห็ด (Mushroom-like EBG Structure) ซึ่งจะมีการเชื่อมต่อ (Via) ระหว่างรูปโลหะที่อยู่บนไดอิเล็กตริกกับระนาบกราวด์ ดังแสดงในรูปที่2.7

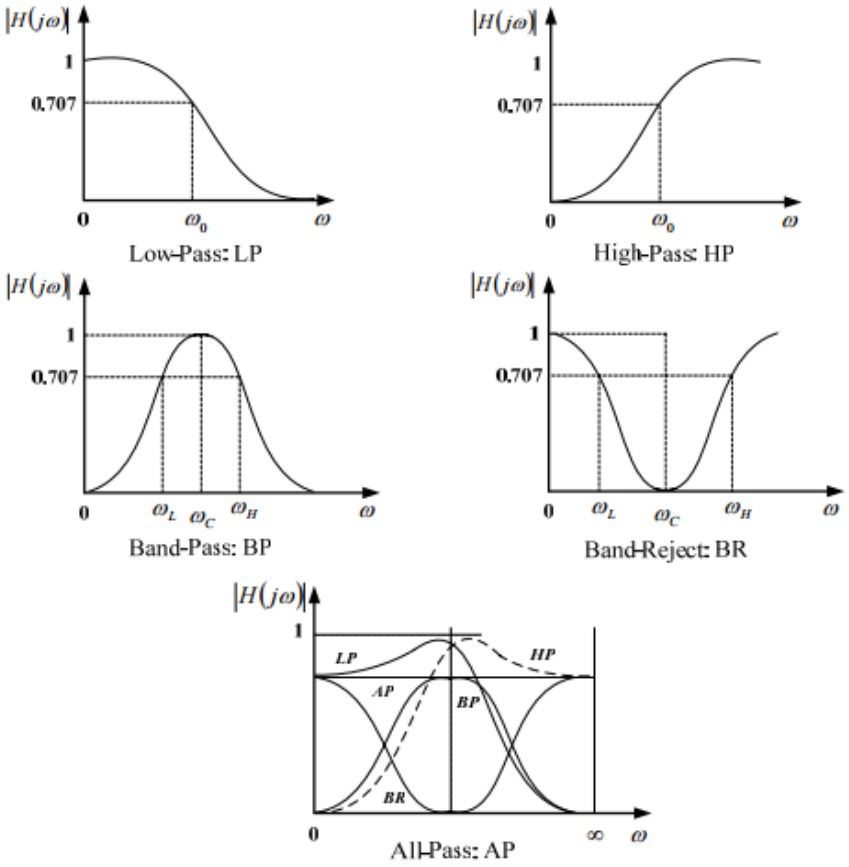
2.14 พื้นผิวเลือกความถี่ผ่าน

พื้นผิวเลือกความถี่ผ่าน หรือ (Frequency Selective Surface :FSS) คือพื้นผิวราบเรียบใดๆซึ่งมีการออกแบบคล้ายกับวงจรกรองความถี่ โดยสามารถจำแนกชนิดของวงจรกรองความถี่ได้เป็น วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-Pass Filter : LPF) วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High-Pass Filter : HPF) วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band-Pass Filter) วงจรกรองกำจัดแถบความถี่ (Band-Reject Filter) และวงจรกรองผ่านทุกความถี่ (All-Pass Filter) แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ผลตอบสนองความถี่ทางอุดมคติของวงจรกรองความถี่

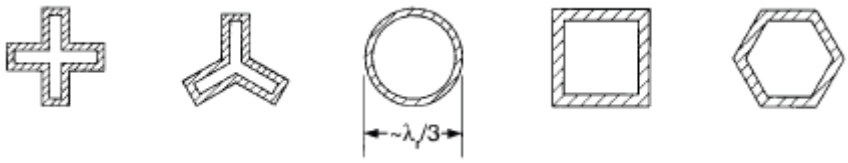
จากรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองความถี่อุดมคติของวงจรกรองความถี่ ทั้งหมด โดยวงจรกรองความถี่ความถี่ต่ำผ่านจะยอมให้ความถี่ตั้งแต่ดีซีจนถึงความถี่ตามต้องการผ่านได้ ω0 และลดทอนความถี่ที่มีค่าสูงกว่า ω0 ซึ่งเรียกว่าความถี่คัทออฟ (Cutoff Frequency) ช่วงความถี่ต่ำจาก 0 ถึง ω0 เรียกว่าแถบผ่าน (Pass-Band) หรือ แบนด์วิดท์ (Bandwidth: BW) และ ช่วงความถี่สูงกว่า ω0 เรียกว่าแถบหยุด (Stop-Band) กรณีวงจรกรองความถี่สูงผ่านจะตรงข้ามกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน นั่นคือช่วงความถี่จาก 0 ถึง ω0 เรียกว่าแถบหยุดและช่วงความถี่จาก ω0 ถึง ∞ เรียกว่าแถบผ่าน วงจรกรองความถี่แถบความถี่ผ่านจะยอมให้ความถี่จาก ωL ถึง ωH ผ่านได้แต่ไม่ยอมให้ความถี่ต่ำกว่า ωL และสูงกว่า ωH ผ่าน ส่วนวงจรกรองความถี่แบบกำจัดแถบความถี่จะตรงข้ามกับวงจรกรองความถี่แถบความถี่ผ่าน นั่นคือลดทอนความถี่ช่วง ωL ถึง ωH แต่ยอมให้ความถี่ต่ำกว่า ωL และสูงกว่า ωH ผ่านได้ สำหรับวงจรกรองความถี่ผ่านทุกความถี่จะยอมให้ความถี่ผ่านตลอดย่าน (0 ถึง∞) เช่นกัน



รูปที่ 2.9 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแบบต่างๆ

ลักษณะเฉพาะของ FSS คือ ใช้กับระบบความถี่แคบ (narrow band) มีรูปร่างลักษณะเป็นแบบ 2 มิติ ทำมาจากฉนวนหรือโลหะซึ่งรูปร่าง , ขนาด , การเว้นช่องว่างและการกำหนดตำแหน่งล้วนมีผลต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่าน FSS ทำให้บางแถบความถี่จะส่งผ่านสัญญาณ และบางแถบความถี่จะสะท้อนสัญญาณ เราสามารถจำแนกประเภทของ FSS ได้ 4 ประเภท ได้แก่ Center Connected or N-Pole Element , Loop Type Element , Plate Type Element และ Combination Element ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ถึง 2.13

รูปที่ 2.10 Center Connected or N-Pole Element



รูปที่ 2.11 Loop Type Element

รูปที่ 2.12 Plate Type Element

รูปที่ 2.13 Combination Element

2.15 สรุป

สายอากาศแบบแผ่นพิมพ์รูปแบบร่องไดโพลที่ถูกออกแบบมาใช้ในการรับสัญญาณดิจิตอลทีวีในประเทศไทยได้ถูกออกแบบมาให้สามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ 510-790 MHz ซึ่งทำให้ได้อัตราขยายที่ไม่สูงมากนักจึงต้องสร้างอุปกรณ์ที่สามารถเพิ่มอัตราขยายโดยใช้เทคนิคของอภิวัสดุเข้ามาช่วยโดยใช้เทคนิค ช่องว่างแถบแม่เหล็กเพื่อสร้างตัวสะท้อนในการผลักรูปแบบการแผ่พลังงานรอบทิศทางของสายอากาศแบบแผ่นพิมพ์ให้มาเสริมกันจนกลายเป็นการรูปแบบแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง จากนั้นใช้วัสดุที่มีโครงสร้างเป็นพื้นผิวเลือกความถี่ผ่านเพื่อบีบให้ทิศทางของพลังงานที่แผ่ออกมาไปในทิศทางเดียวมากขึ้นส่งผลให้ได้อัตราขยายที่มากขึ้น

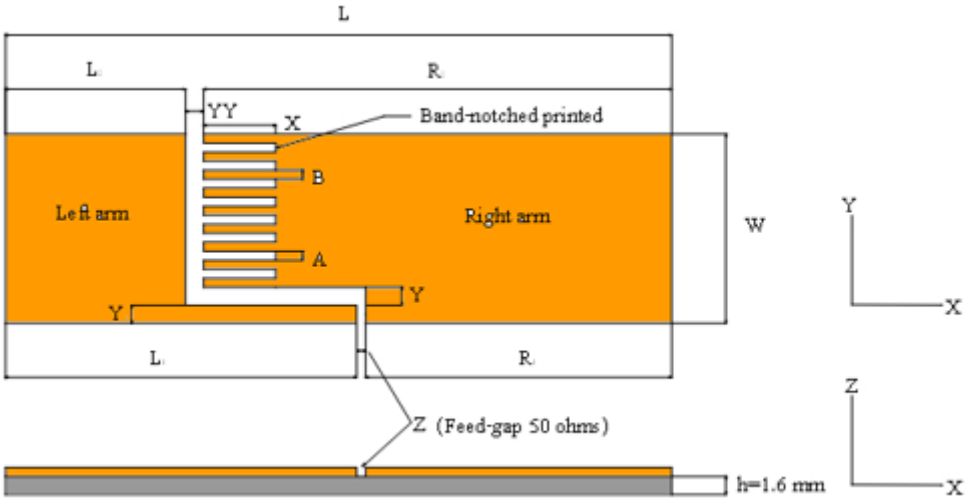
บทที่ 3

การออกแบบโครงงาน

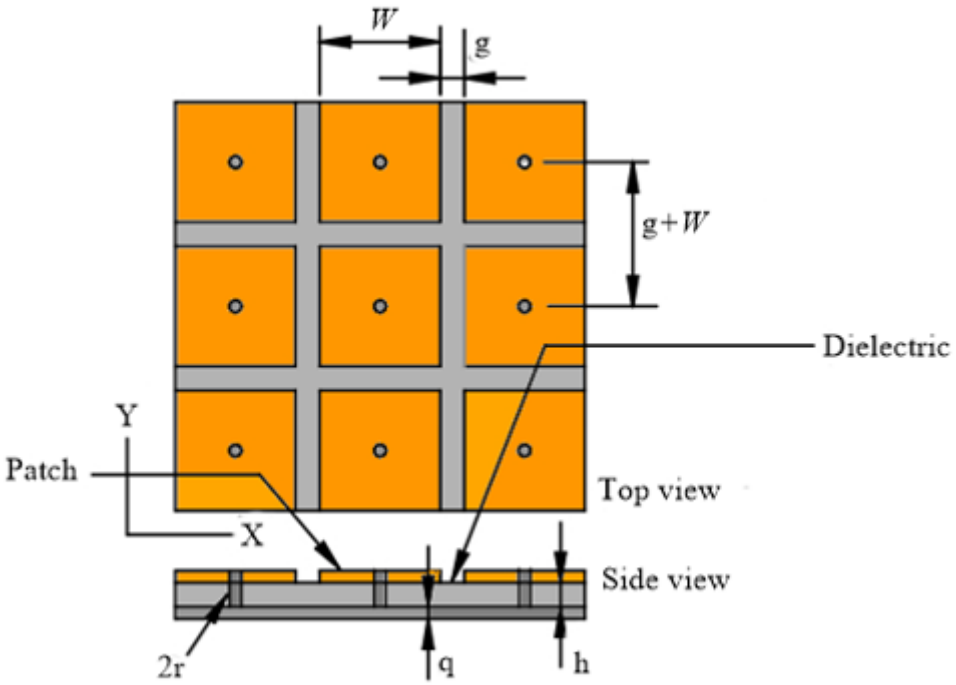
3.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการออกแบบแผ่นกราวด์โลหะแม่เหล็กประดิษฐ์ ในช่วงความถี่ 510-790 MHz เพื่อเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศ Band-Notched Printed Dipole ที่มาพร้อมกับ EBG Reflector โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ในการจำลองผล ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างและพารามิเตอร์ของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ อันได้แก่ Band-Notched Printed Dipole Antenna และ EBG Reflector จากนั้นจะเป็นการออกแบบ แผ่นกราวด์โลหะแม่เหล็กประดิษฐ์โดยใช้ ทฤษฎีพื้นผิวเลือกความถี่ผ่าน (frequency selective surface)

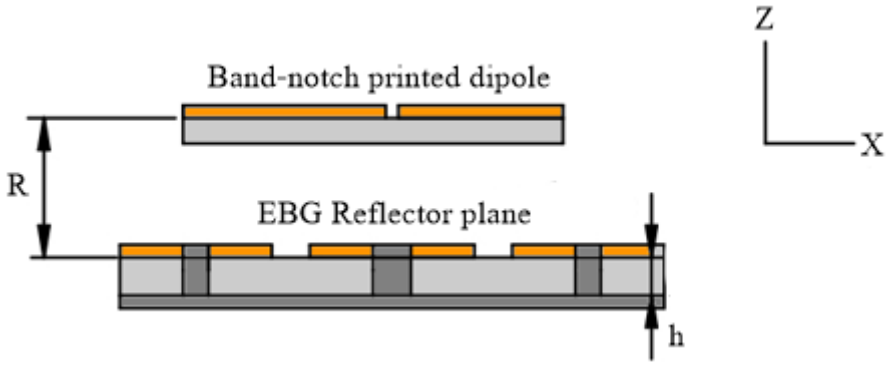
3.2 โครงสร้างและพารามิเตอร์ของ Band-Notched Printed Dipole antenna และ Mushroom-like EBG 3x3 element (EBG Reflector)



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศ Band-notch printed dipole



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของ mushroom-like EBG 3x3 element (EBG Reflector)

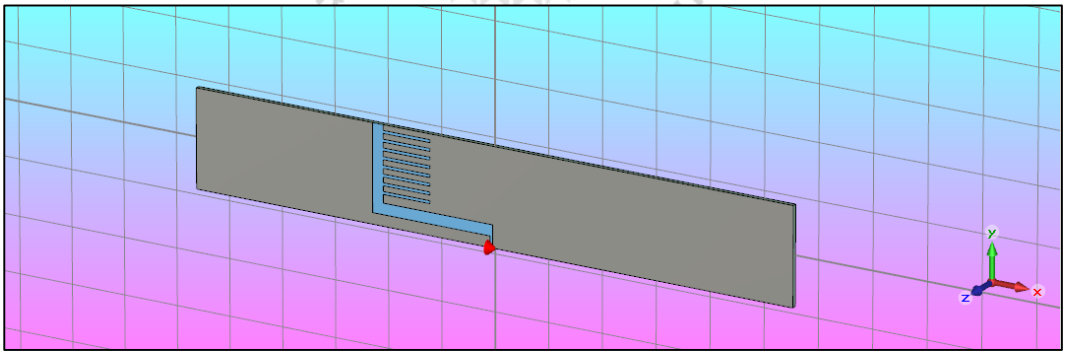


รูปที่ 3.3 ระยะห่างระหว่าง Band-Notched Printed Dipole Antennna และ EBG Reflector

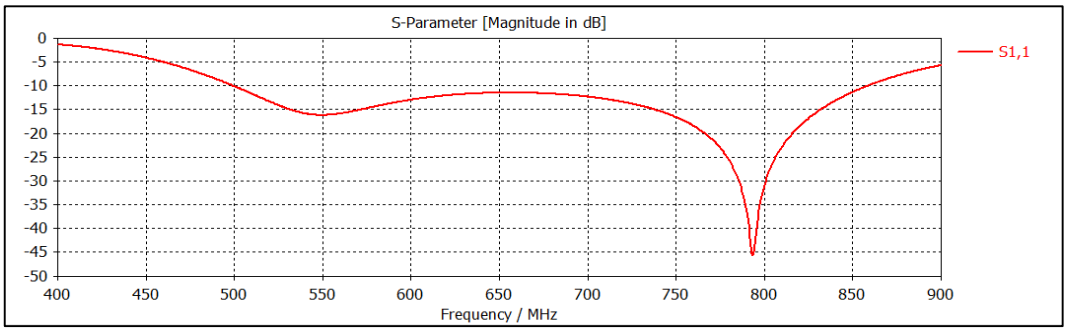
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของ Band-notch printed dipole และ mushroom-like EBG 3x3 element (EBG Refector)

ความกว้างของสายอากาศ (W)	35 mm
ความยาวของสายอากาศ (L)	223 mm
ความยาวของแขนซ้ายหลัก (L_1)	110.5 mm
ความยาวของแขนซ้ายรอง (L_2)	66.5 mm
ความยาวของแขนขวาหลัก (R_1)	111.5 mm

ความยาวของแขนขวารอง (R_2)	152.5 mm
ช่องของระยะการป้อน (Z)	1 mm
ความกว้างของช่องป้อน (Y)	4.5 mm
ความกว้างของพารามิเตอร์ระยะการป้อน (Y_1)	4 mm
ความกว้างของช่อง (YY)	4 mm
ความกว้างของ band-notched (A)	1 mm
ช่องระหว่าง band-notched (B)	2 mm
ความลึกของช่อง band-notched (X)	17.5 mm
ระยะระหว่างสายอากาศกับพื้นผิว EBG (R)	135 mm
ระยะระหว่าง Patch (g)	20 mm
ความกว้างของ Patch (*W*)	93 mm
รัศมีของรูแผ่น EBG (r)	2.3 mm
ความลึกของ Dielectric (h)	1.6 mm

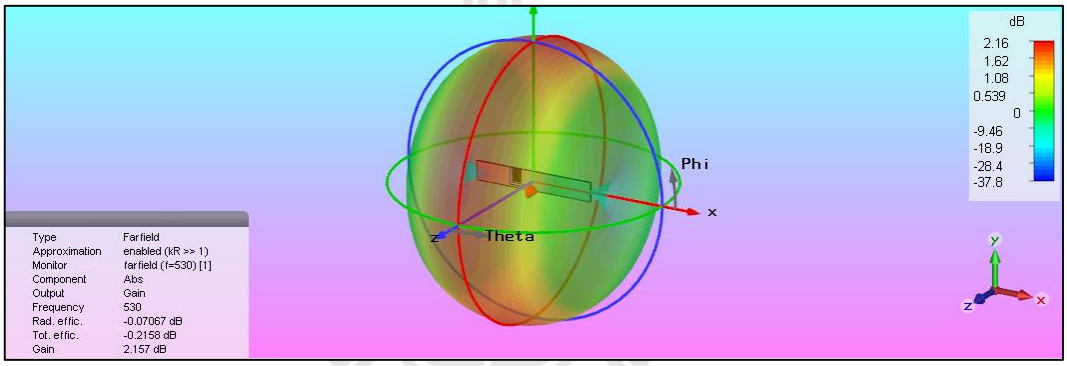


รูปที่ 3.4 Band-notched printed dipole antenna ในโปรแกรม CST Microwave Studio



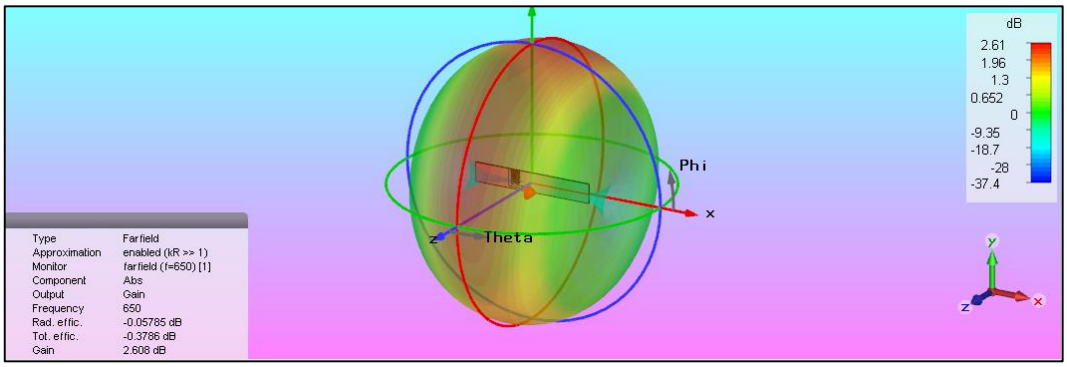
รูปที่ 3.5 S-Parameter (S_{11}) ของ Band-notched printed dipole antenna

จากรูปที่ 3.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนในหน่วย dB ของ Band-notched printed dipole antenna ซึ่งมีค่าต่ำกว่า -10 dB ในย่านความถี่ 510-790 MHz



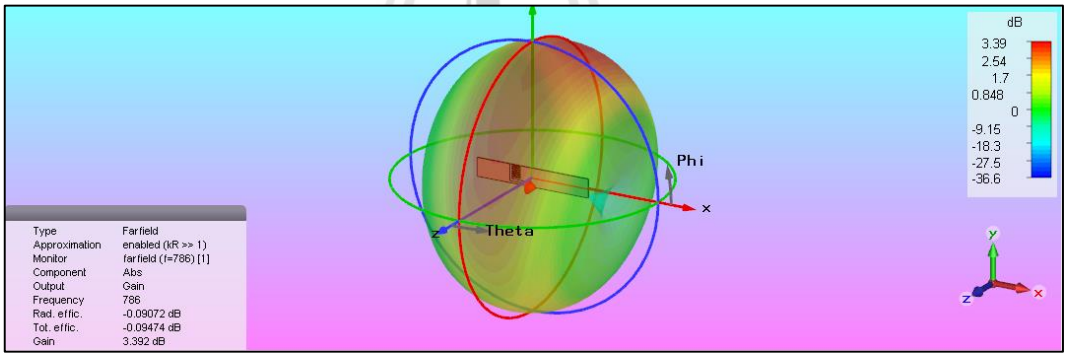
รูปที่ 3.6 แบบรูปการแผ่กำลัง และอัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz ของ Band-notched printed dipole Antenna

จากรูปที่ 3.6 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ Band-notched printed dipole Antenna ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (Omnidirectional Antenna) ในรูปแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 530 MHz จะได้อัตราขยายเท่ากับ 2.157 dB



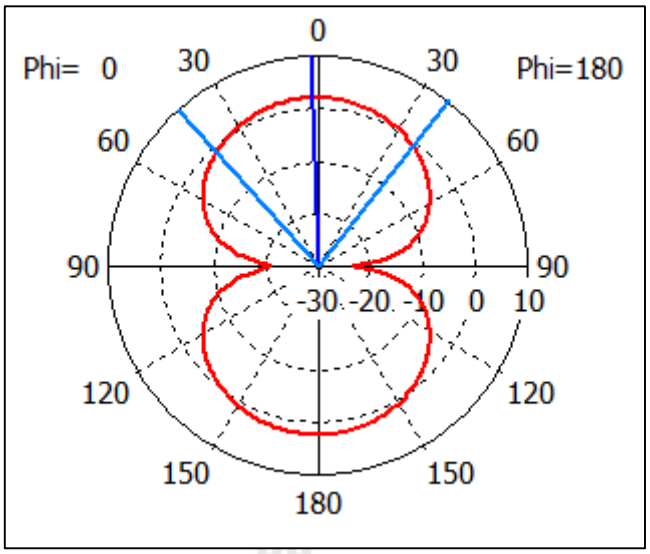
รูปที่ 3.7 แบบรูปการแผ่กำลัง และอัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz ของ Band-notched printed dipole Antenna

จากรูปที่ 3.7 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ Band-notched printed dipole Antenna ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (Omnidirectional Antenna) ในรูปแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 650 MHz จะได้อัตราขยายเท่ากับ 2.608 dB



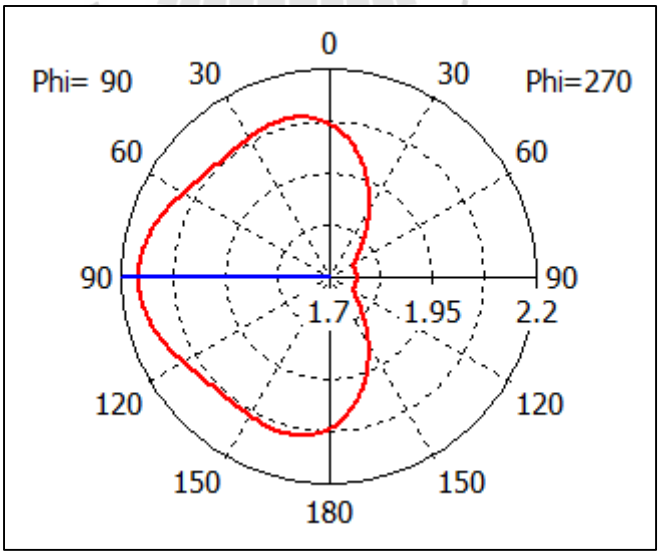
รูปที่ 3.8 แบบรูปการแผ่กำลัง และอัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz ของ Band-notched printed dipole Antenna

จากรูปที่ 3.8 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ Band-notched printed dipole Antenna ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (Omnidirectional Antenna) ในรูปแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 786 MHz จะได้อัตราขยายเท่ากับ 3.392 dB



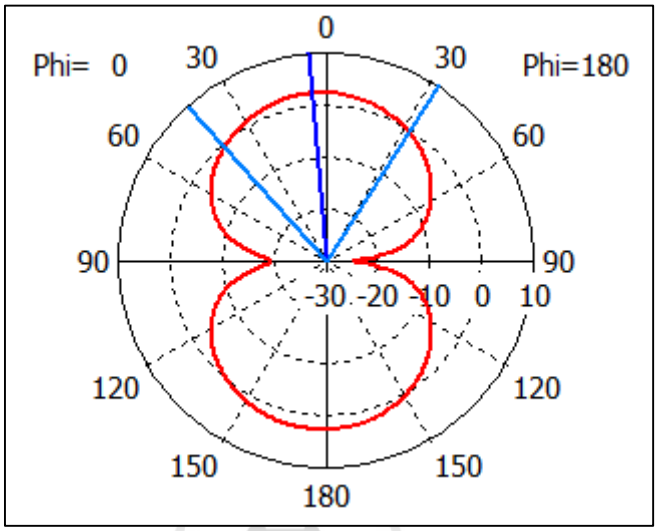
รูปที่ 3.9 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 530 MHz ของ Band-notched printed dipole antenna

จากรูปที่ 3.9 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ Band-notched printed dipole Antenna ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (Omnidirectional Antenna) ในรูปแบบ 2 มิติ ที่ความถี่ 530 MHz ในระนาบสนามไฟฟ้า



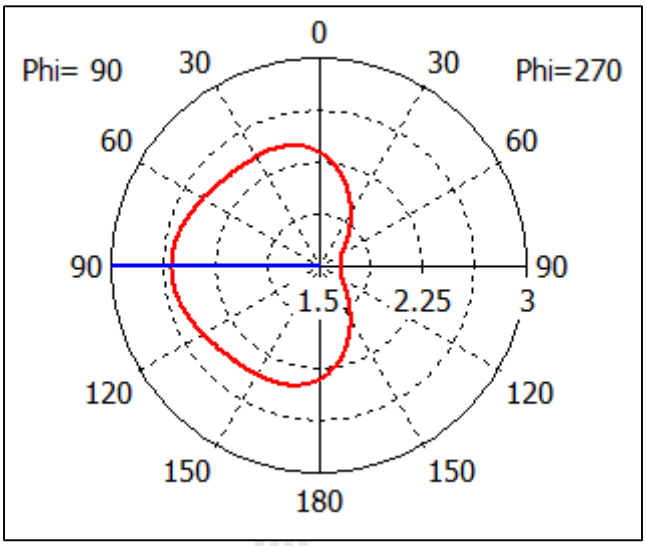
รูปที่ 3.10 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 530 MHz ของ Band-notched printed dipole antenna

จากรูปที่ 3.10 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ Band-notched printed dipole Antenna ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (Omnidirectional Antenna) ในรูปแบบ 2 มิติ ที่ความถี่ 530 MHz ในระนาบสนามแม่เหล็ก



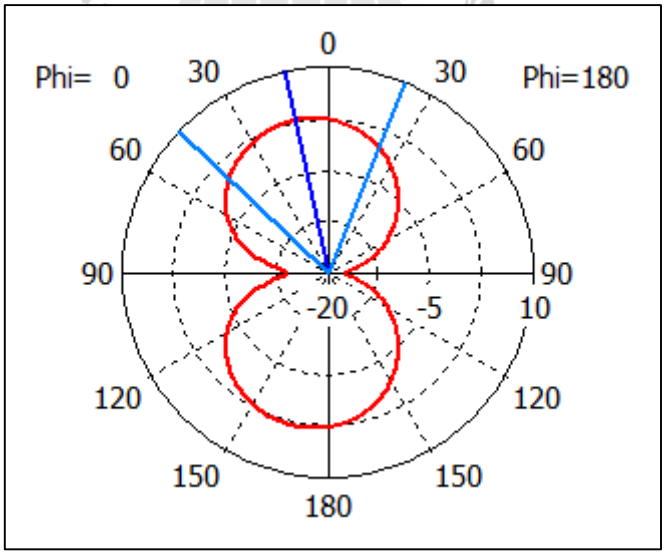
รูปที่ 3.11 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 650 MHz ของ Band-notched printed dipole antenna

จากรูปที่ 3.11 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ Band-notched printed dipole Antenna ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (Omnidirectional Antenna) ในรูปแบบ 2 มิติ ที่ความถี่ 650 MHz ในระนาบสนามไฟฟ้า



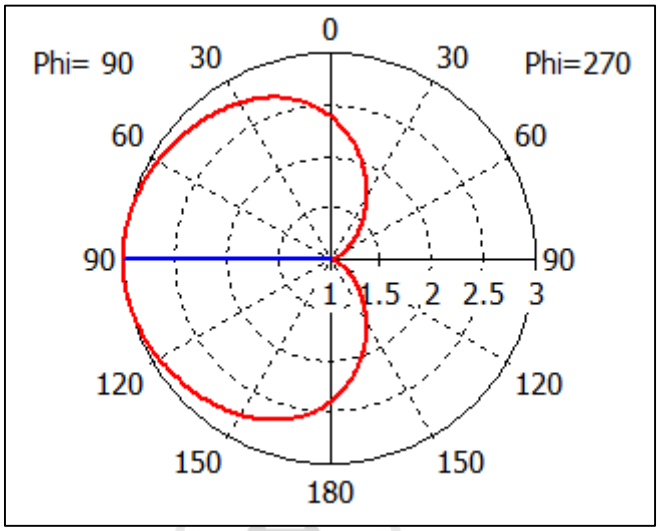
รูปที่ 3.12 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 650 MHz ของ Band-notched printed dipole antenna

จากรูปที่ 3.12 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ Band-notched printed dipole Antenna ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (Omnidirectional Antenna) ในรูปแบบ 2 มิติ ที่ความถี่ 650 MHz ในระนาบสนามแม่เหล็ก



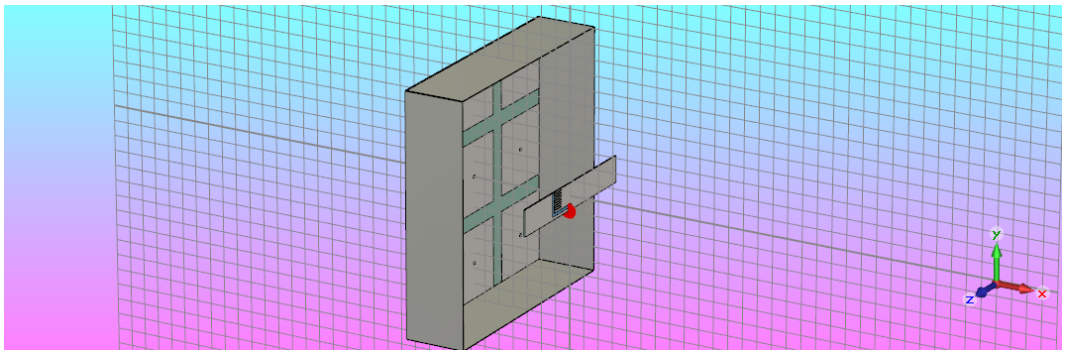
รูปที่ 3.13 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 786 MHz ของ Band-notched printed dipole antenna

จากรูปที่ 3.13 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ Band-notched printed dipole Antenna ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (Omnidirectional Antenna) ในรูปแบบ 2 มิติ ที่ความถี่ 786 MHz ในระนาบสนามไฟฟ้า

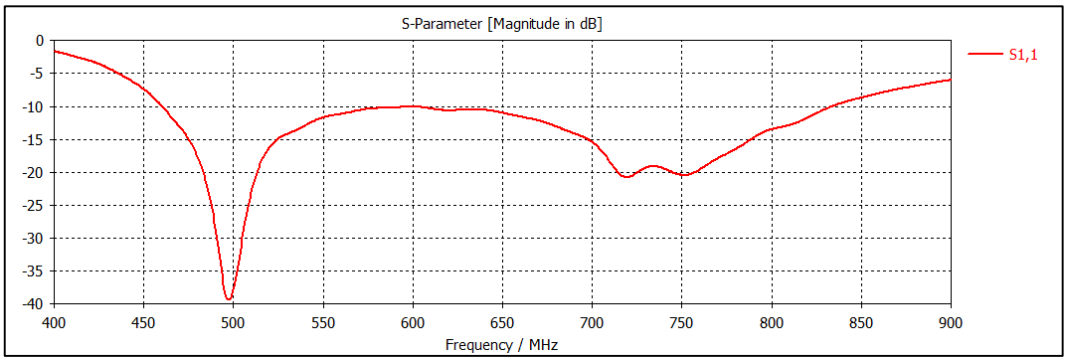


รูปที่ 3.14 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 786 MHz ของ Band-notched printed dipole antenna

จากรูปที่ 3.14 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ Band-notched printed dipole Antenna ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (Omnidirectional Antenna) ในรูปแบบ 2 มิติ ที่ความถี่ 786 MHz ในระนาบสนามแม่เหล็ก

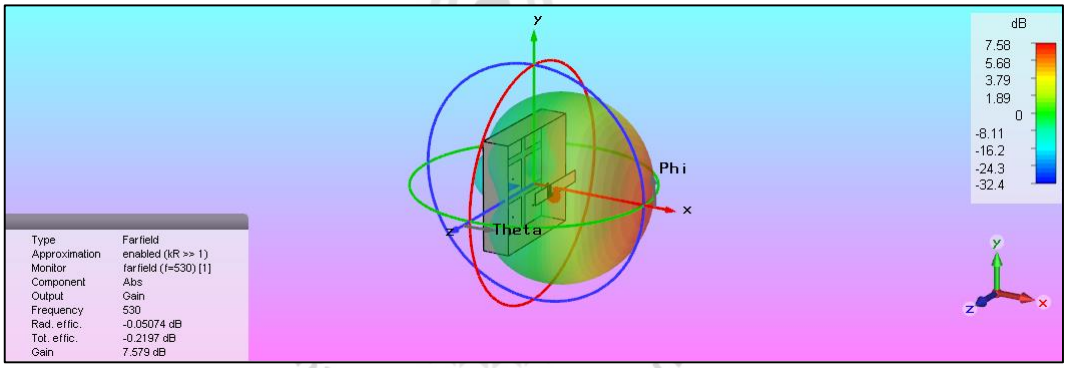


รูปที่ 3.15 Band-Notched Printed Dipole Antennna และ EBG Reflector ในโปรแกรม CST Microwave Studio



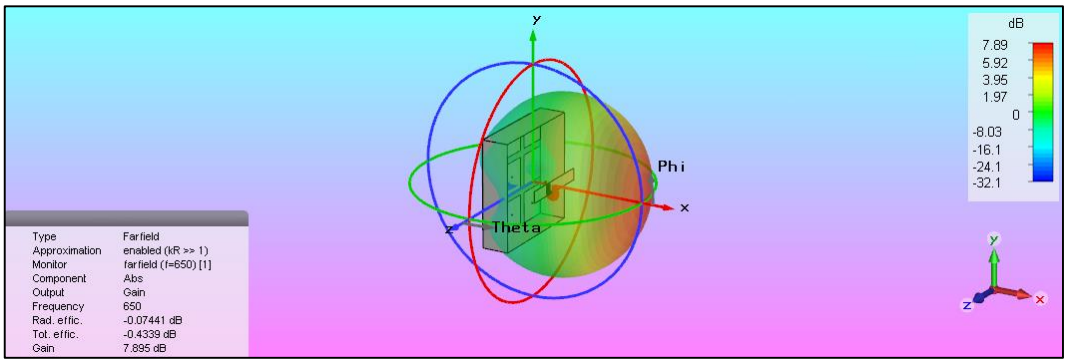
รูปที่ 3.16 S-Parameter (S_{11}) ของ Band-Notched Printed Dipole Antennna และ EBG Reflector

จากรูปที่ 3.16 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนในหน่วย dB ของ Band-Notched Printed Dipole Antennna และ EBG Reflector ซึ่งมีค่าต่ำกว่า -10 dB ในย่าน 519-790 MHz



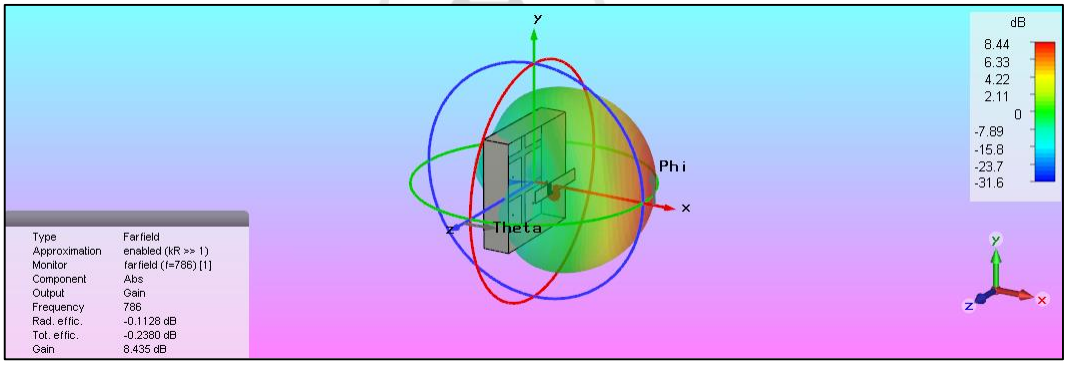
รูปที่ 3.17 แบบรูปการแผ่กำลัง และอัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz ของ Band-Notched Printed Dipole Antennna และ EBG Reflector

จากรูปที่ 3.17 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ Band-notched printed dipole Antenna และ EBG Reflector ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) ในรูปแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 530 MHz จะได้อัตราขยายเท่ากับ 7.579 dB



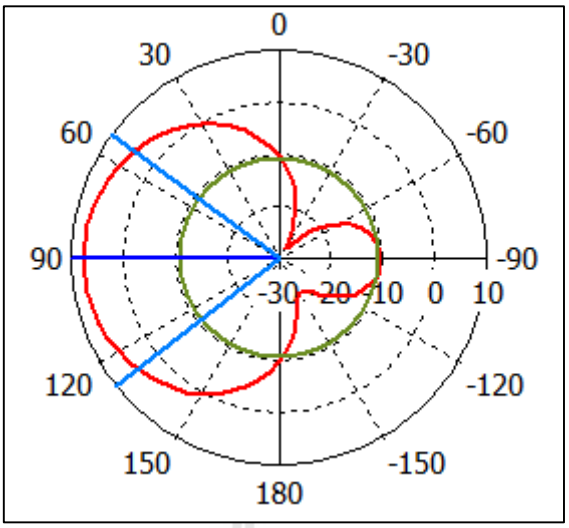
รูปที่ 3.18 แบบรูปการแผ่กำลัง และอัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz ของ Band-Notched Printed Dipole Antennna และ EBG Reflector

จากรูปที่ 3.18 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ Band-notched printed dipole Antenna และ EBG Reflector ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) ในรูปแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 650 MHz จะได้อัตราขยายเท่ากับ 7.895 dB



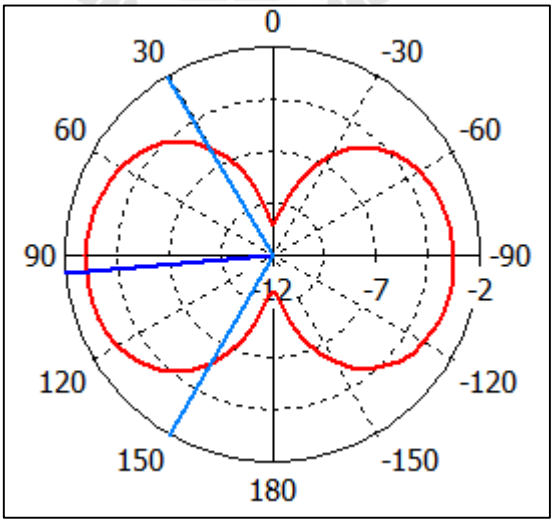
รูปที่ 3.19 แบบรูปการแผ่กำลัง และอัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz ของ Band-Notched Printed Dipole Antennna และ EBG Reflector

จากรูปที่ 3.19 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ Band-notched printed dipole Antenna และ EBG Reflector ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) ในรูปแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 786 MHz จะได้อัตราขยายเท่ากับ 8.435 dB



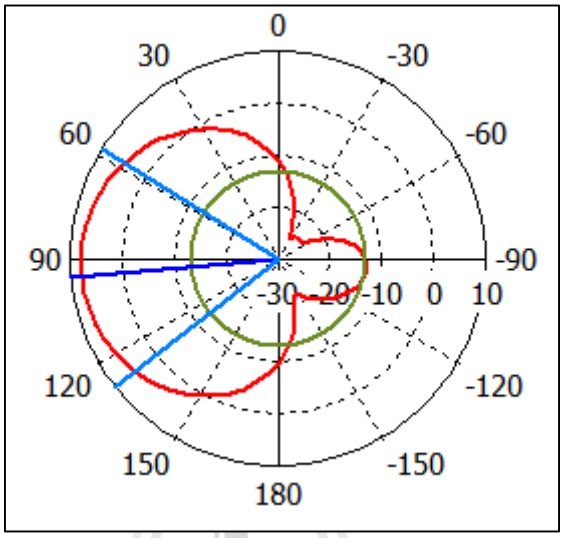
รูปที่ 3.20 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 530 MHz ของ Band-notched printed dipole antenna และ EBG Reflector

จากรูปที่ 3.20 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ Band-notched printed dipole Antenna และ EBG Reflector ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) ในรูปแบบ 2 มิติ ที่ความถี่ 530 MHz ในระนาบสนามไฟฟ้า



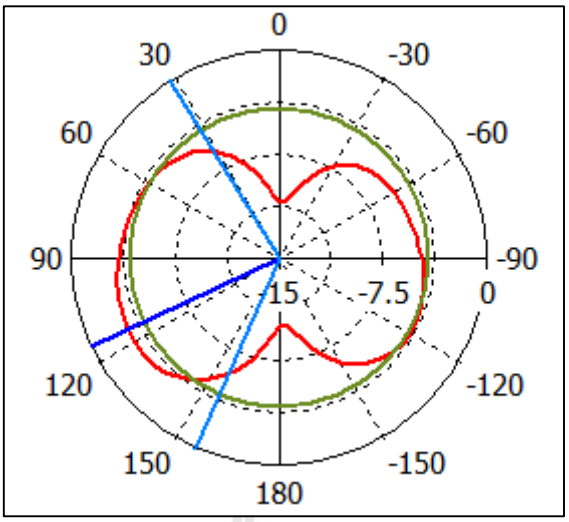
รูปที่ 3.21 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 530 MHz ของ Band-notched printed dipole antenna และ EBG Reflector

จากรูปที่ 3.21 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ Band-notched printed dipole Antenna และ EBG Reflector ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) ในรูปแบบ 2 มิติ ที่ความถี่ 530 MHz ในระนาบสนามแม่เหล็ก



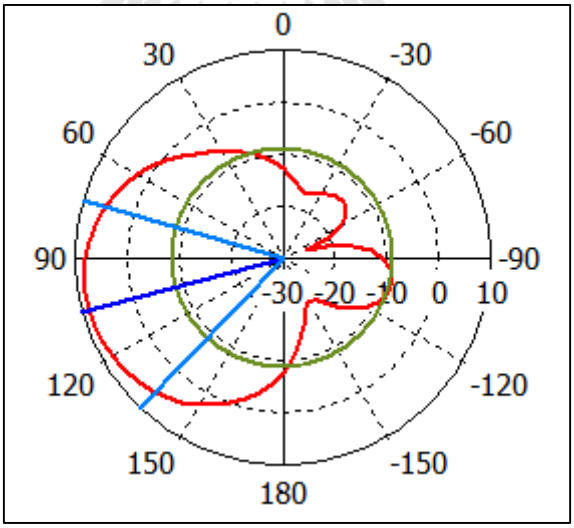
รูปที่ 3.22 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 650 MHz ของ Band-notched printed dipole antenna และ EBG Reflector

จากรูปที่ 3.22 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ Band-notched printed dipole Antenna และ EBG Reflector ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) ในรูปแบบ 2 มิติ ที่ความถี่ 650 MHz ในระนาบสนามไฟฟ้า



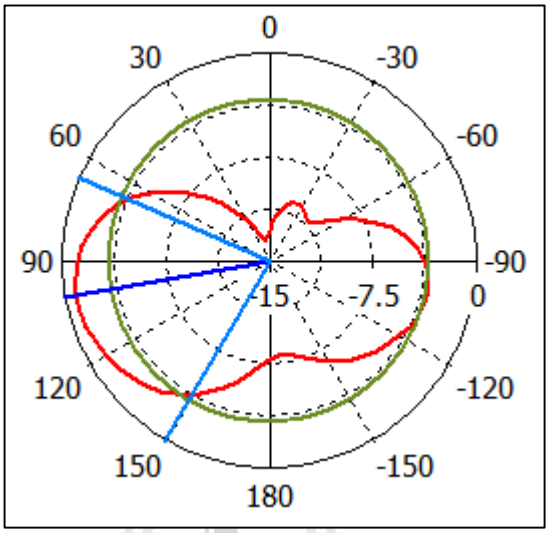
รูปที่ 3.23 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 650 MHz ของ Band-notched printed dipole antenna และ EBG Reflector

จากรูปที่ 3.23 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ Band-notched printed dipole Antenna และ EBG Reflector ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) ในรูปแบบ 2 มิติ ที่ความถี่ 650 MHz ในระนาบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.24 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 786 MHz ของ Band-notched printed dipole antenna และ EBG Reflector

จากรูปที่ 3.24 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ Band-notched printed dipole Antenna และ EBG Reflector ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) ในรูปแบบ 2 มิติ ที่ความถี่ 786 MHz ในระนาบสนามไฟฟ้า



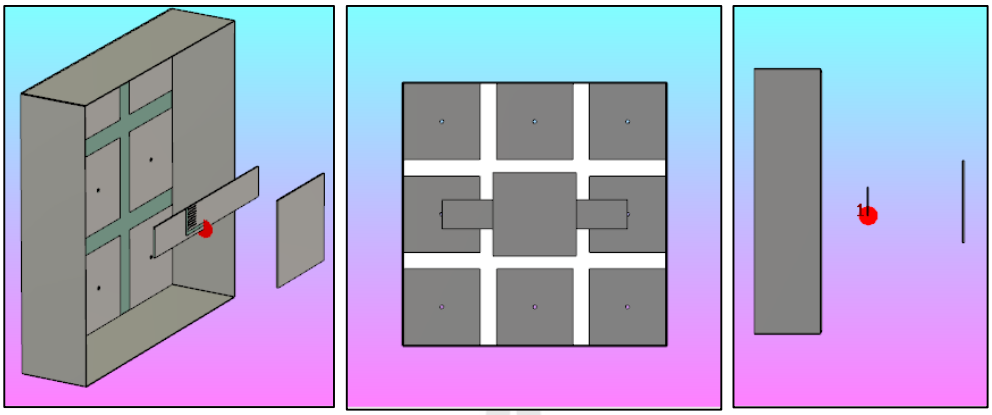
รูปที่ 3.25 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 786 MHz ของ Band-notched printed dipole antenna และ EBG Reflector

จากรูปที่ 3.25 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ Band-notched printed dipole Antenna และ EBG Reflector ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) ในรูปแบบ 2 มิติ ที่ความถี่ 786 MHz ในระนาบสนามแม่เหล็ก

3.3 การออกแบบ แผ่นกราวด์โลหะแม่เหล็กประดิษฐ์ โดยใช้ทฤษฎีพื้นผิวเลือกความถี่ผ่าน (frequency selective surface)

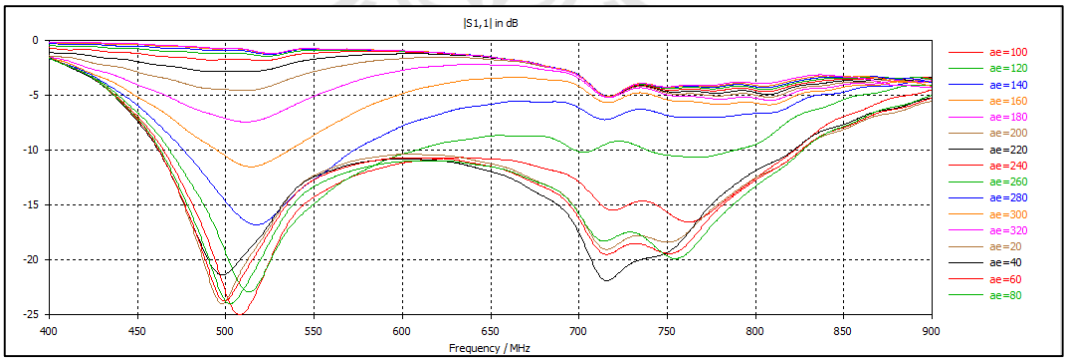
ในการออกแบบเราจะใช้วัสดุอลูมิเนียมที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร โดยขั้นตอนการออกแบบจะเริ่มจาก การใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ในการจำลองผล ทดสอบหาขนาดของแผ่นอลูมิเนียมที่เหมาะสมและวางห่างจาก driven เป็นระยะ λ/4 โดยเริ่มจากขนาด 20x20mm ,40x40mm ,60x60mm,… ,320x320mm พบว่า ขนาดแผ่นที่เล็กกว่า 100x100mm ลงมามีค่า S-Parameter ที่สามารถยอมรับได้ในการใช้งาน เนื่องจากในช่วง ความถี่ 510-790 MHz มีค่าต่ำกว่า -

10 dB และอัตราขยายของขนาดแผ่นที่เล็กกว่า 100x100mm ก็ต่ำลงเช่นกัน ดังนั้นเราจึงเลือกขนาดแผ่น 100x100mm นี้ในการออกแบบต่อไป



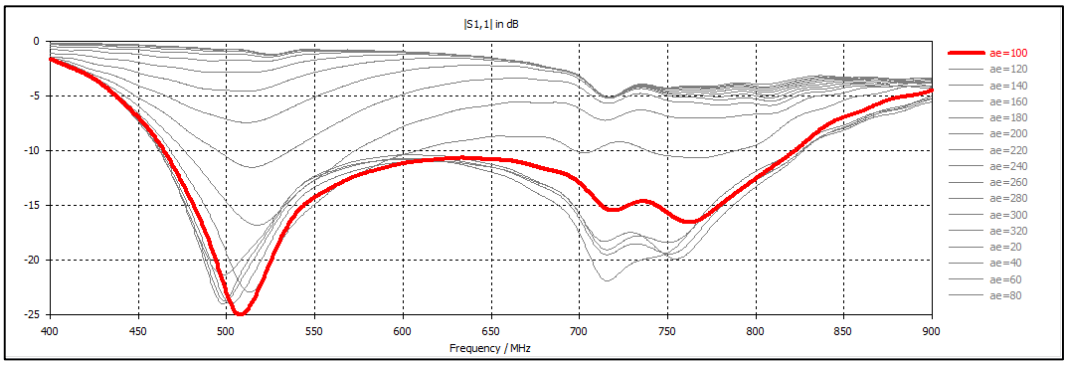
รูปที่ 3.26 อลูมิเนียมขนาด 100x100mm ความหนา 2mm วางด้านหน้าสายอากาศ Band-Notch Printed Dipole เป็นระยะ λ/4

จากรูปที่ 3.26 แสดงการสุ่มหาขนาดของแผ่นอลูมิเนียมที่เหมาะสม ตั้งแต่ขนาด 20x20mm ,40x40mm,…, 320x320mm ซึ่งวางห่างจากสายอากาศ Band-Notch Printed Dipole เป็นระยะ λ/4



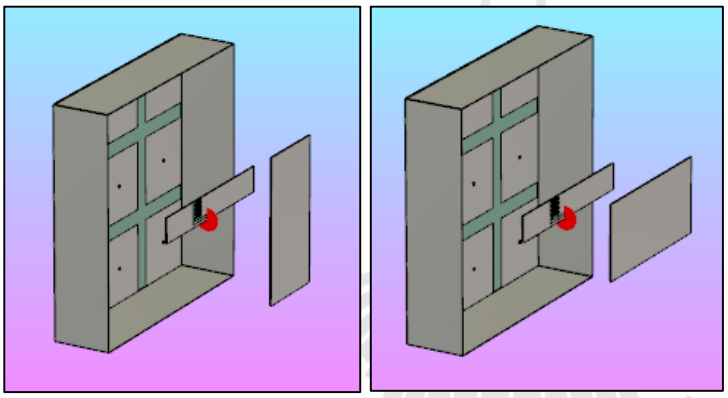
รูปที่ 3.27 S-Parameter ของอลูมิเนียมขนาด 20x20mm ,40x40mm,…, 320x320mm

จากรูปที่ 3.27 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนในหน่วย dB ของการสุ่มหาขนาดของแผ่นอลูมิเนียมที่เหมาะสมพบว่า ขนาด 100x100mm มีค่าที่ต่ำกว่า -10 dB และให้อัตราขยายที่มากกว่าขนาดแผ่นที่เล็กลงมา แสดงดังรูปที่ 3.28



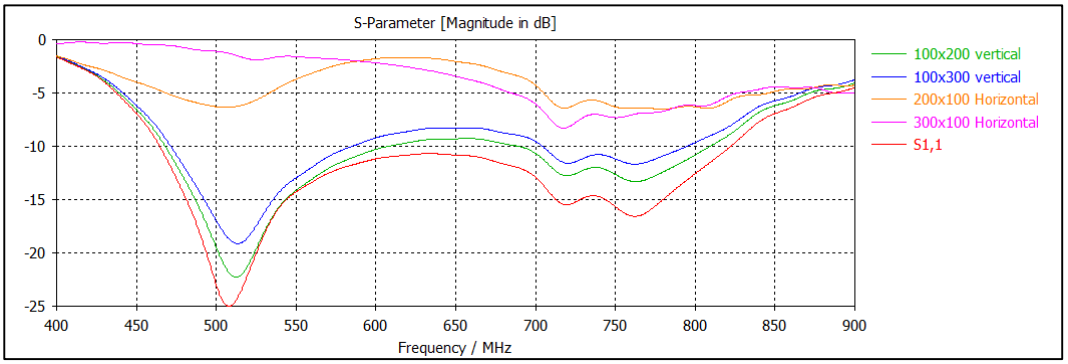
รูปที่ 3.28 S-Parameter ของอลูมิเนียมขนาด 100x100mm

จากนั้นทำการขยายแผ่นอลูมิเนียม 100x100mm นี้ ในแนวตั้งและแนวนอน เป็น 100x200mm ,100x300mm และ 200x100mm ,300x100mm



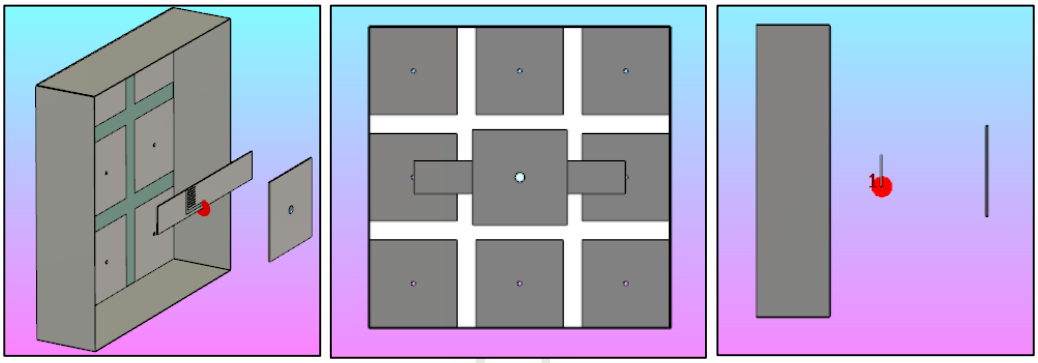
รูปที่ 3.29 อลูมิเนียมขนาด 100x200mm แนวตั้ง(ซ้าย) และขนาด 200x100mm แนวนอน(ขวา)

จากรูปที่ 3.29 แสดงการขยายแผ่นอลูมิเนียมขนาด 100x100mm ทั้งแนวตั้งและแนวนอน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน มากกว่า -10 dB ดังแสดงในรูปที่ 3.30

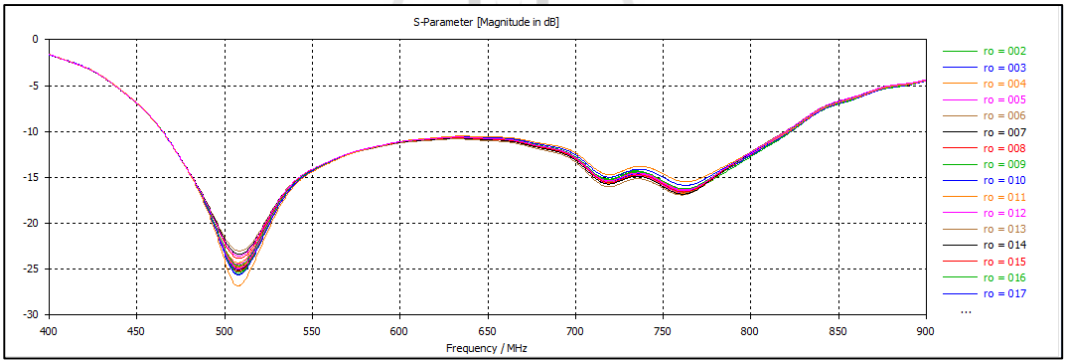


รูปที่ 3.30 S-Parameter ของการขยายอลูมิเนียมทั้งแนวตั้งและแนวนอน เมื่อ S1,1 ในภาพคือ อลูมิเนียมขนาด 100x100mm

จากรูปที่ 3.30 พบว่า การขยายแผ่นอลูมิเนียมขนาด 100x100mm นั้นไม่ทำให้ S-Parameter ต่ำกว่า -10 แต่อย่างใด ดังนั้นเราจึงเลือกอลูมิเนียม ขนาด 100x100mm ในการสุ่มค่ารูเจาะที่กึ่งกลางแผ่นอลูมิเนียมตั้งแต่ รัศมี 1mm ไปจนถึงรัศมี 39mm ดังรูปที่ 3.31 และ 3.32



รูปที่ 3.31 รูเจาะที่กึ่งกลางแผ่นอลูมิเนียม



รูปที่ 3.32 S-Parameter ของรูเจาะรัศมี 1-39mm

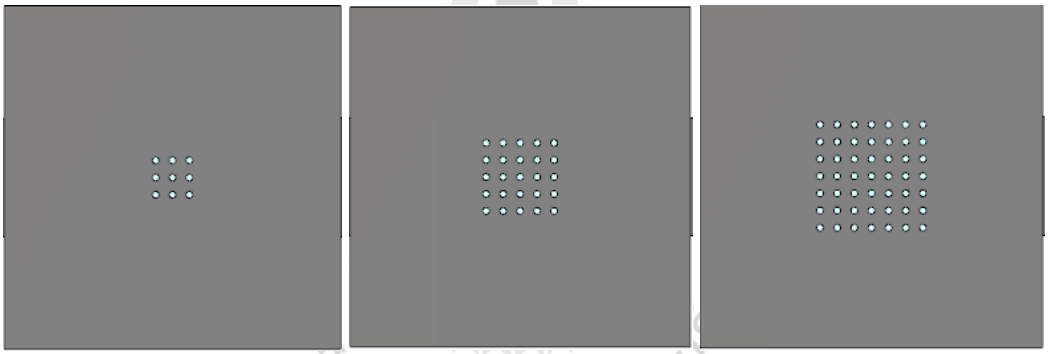
ตารางที่ 3.2 ขนาดรัศมีของรู และอัตราขยายที่ความถี่ 530 ,650 และ 786 MHz

รัศมีของรูเจาะ (mm)	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
1	7.579	8.361	9.467
2	7.582	8.36	9.461
3	7.579	8.359	9.468
4	7.574	8.362	9.461

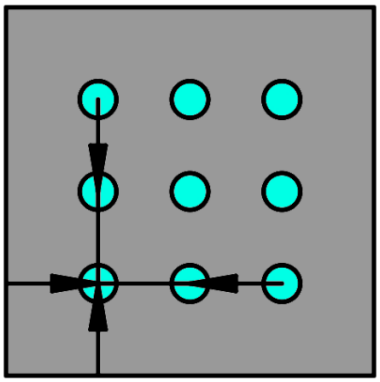
5	7.577	8.362	9.464
6	7.578	8.362	9.466
7	7.579	8.359	9.47
8	7.579	8.359	9.47
9	7.576	8.363	9.462
10	7.58	8.36	9.466
11	7.58	8.361	9.473
12	7.577	8.363	9.648
13	7.573	8.364	9.464
14	7.58	8.364	9.473
15	7.58	8.363	9.474
16	7.581	8.366	9.476
17	7.584	8.37	9.487
18	7.581	8.366	9.484
19	7.581	8.368	9.488
20	7.578	8.372	9.488
21	7.583	8.373	9.497
22	7.582	8.372	9.503
23	7.583	8.376	9.505
24	7.584	8.377	9.506
25	7.584	8.379	9.509
26	7.585	8.381	9.523
27	7.583	8.388	9.524
28	7.586	8.388	9.537
29	7.585	8.394	9.539
30	7.587	8.396	9.546
31	7.586	8.401	9.551
32	7.59	8.402	9.572
33	7.59	8.408	9.582

34	7.59	8.413	9.59
35	7.59	8.418	9.598
36	7.591	8.423	9.609
37	7.589	8.429	9.623
38	7.597	8.434	9.645
39	7.596	8.439	9.661

จากตารางที่ 3.2 พบว่ารูรัศมี 39mm ให้ค่าอัตราขยายที่มากที่สุด แต่ไม่สามารถนำมาเจาะโครงสร้างแบบรายคาบได้ เราจึงเลือกรูที่มีขนาดเล็กลงมาที่สามารถขยายรูแบบรายคาบได้ โดยเราจะเลือกรูขนาดรัศมี 1-15mm มาขยายเป็นจำนวน nxn โดยที่มีระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลางเป็น 5,10,15,… mm จนกระทั่งไม่สามารถเพิ่มจำนวนรูเป็น 3x3 ได้



รูปที่ 3.33 การเพิ่มรูของรูรัศมี 1mm ให้เป็นแบบ nxn โดยระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลางเป็น 5mm



รูปที่ 3.34 ระยะระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง

ในขั้นตอนแรกเราจะยึดขนาดของรูรัศมี 1mm และระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลางเป็น 5mm จากนั้นจะทำการเพิ่มรูตามรูปที่ 3.33 จนเต็มแผ่น จากนั้นจะเพิ่มระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลางดังรูปที่ 3.34 เป็น 5mm, 10mm,15mm,20mm,25mm ตามลำดับ โดยที่รัศมียังคงเป็น 1mm เพิ่มเป็นจำนวน nxn ตามเดิม ทำจนกระทั่งไม่สามารถเพิ่มรูเป็น 3x3 ได้ จึงเริ่มทำรูรัศมีถัดไปโดยใช้วิธีการเดิม จะได้อัตราขยายตามตาราง โดยที่ S-Parameter ต่ำกว่า -10 dB ในย่าน 510-790MHz ในทุกรูปแบบ

ตารางที่ 3.3 แสดงอัตราขยายของโครางสร้างรายคาบแบบ nxn ที่ขนาดรูรัศมีต่างๆ

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.579	8.361	9.467
5x5	7.579	8.361	9.468
7x7	7.579	8.361	9.469
9x9	7.579	8.361	9.474
11x11	7.58	8.361	9.475
13x13	7.58	8.361	9.475
15x15	7.745	8.142	9.497
17x17	7.745	8.141	9.498
19x19	7.745	8.142	9.498
รูรัศมี=1mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=5mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.58	8.362	9.464
5x5	7.581	8.362	9.471
7x7	7.581	8.362	9.472
9x9	7.58	8.362	9.472
รูรัศมี=1mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=10mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.574	8.362	9.459
5x5	7.575	8.362	9.458
7x7	7.574	8.361	9.457
รูรัศมี=1mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=15mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.579	8.362	9.471
5x5	7.579	8.361	9.472
รูรัศมี=1mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=20mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.579	8.36	9.461
รูรัศมี=1mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=25mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.579	8.36	9.467
5x5	7.58	8.362	9.47
7x7	7.579	8.36	9.472
9x9	7.579	8.361	9.479
11x11	7.579	8.36	9.48
13x13	7.579	8.36	9.479
15x15	7.744	8.132	9.499
17x17	7.743	8.134	9.498
19x19	7.743	8.135	9.493
รูรัศมี=2mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=5mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.582	8.361	9.457
5x5	7.583	8.362	9.464
7x7	7.584	8.362	9.465
9x9	7.583	8.364	9.464
รูรัศมี=2mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=10mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.583	8.36	9.462
5x5	7.583	8.36	9.463
7x7	7.58	8.358	9.442
รูรัศมี=2mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=15mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.577	8.364	9.46
5x5	7.582	8.363	9.466
รูรัศมี=2mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=20mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.582	8.359	9.463
รูรัศมี=2mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=25mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.581	8.363	9.472
5x5	7.581	8.364	9.48
7x7	7.58	8.364	9.481
9x9	7.576	8.358	9.459
รูรัศมี=3mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=10mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.584	8.364	9.476
5x5	7.584	8.364	9.481
7x7	7.578	8.358	9.47
รูรัศมี=3mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=15mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.579	8.36	9.476
5x5	7.577	8.358	9.456
รูรัศมี=3mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=20mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.58	8.359	9.471
รูรัศมี=3mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=25mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.575	8.362	9.464
5x5	7.576	8.363	9.473
7x7	7.573	8.364	9.472
9x9	7.577	8.364	9.474
รูรัศมี=4mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=10mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.575	8.362	9.461
5x5	7.574	8.363	9.466
7x7	7.574	8.362	9.465
รูรัศมี=4mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=15mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.574	8.362	9.466
5x5	7.577	8.362	9.468
รูรัศมี=4mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=20mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.574	8.362	9.466
รูรัศมี=4mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=25mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.575	8.363	9.469
5x5	7.575	8.364	9.471
รูรัศมี=5mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=15mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.573	8.363	9.467
5x5	7.575	8.364	9.47
รูรัศมี=5mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=20mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.579	8.362	9.475
รูรัศมี=5mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=25mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.58	8.36	9.477
5x5	7.581	8.362	9.482
รูรัศมี=6mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=15mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.581	8.361	9.473
5x5	7.58	8.362	9.475
รูรัศมี=6mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=20mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.579	8.362	9.462
รูรัศมี=6mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=25mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.581	8.362	9.476
5x5	7.583	8.365	9.482
รูรัศมี=7mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=15mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.581	8.361	9.477
5x5	7.576	8.364	9.47
รูรัศมี=7mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=20mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.579	8.362	9.464
รูรัศมี=7mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=25mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.582	8.364	9.48
5x5	7.581	8.361	9.48
รูรัศมี=8mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=20mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.58	8.361	9.469
รูรัศมี=8mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=25mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.581	8.365	9.486
5x5	7.579	8.36	9.485
รูรัศมี=9mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=20mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.578	8.366	9.464
รูรัศมี=9mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=25mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.585	8.37	9.481
รูรัศมี=10mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=25mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.585	8.371	9.489
รูรัศมี=11mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=25mm			

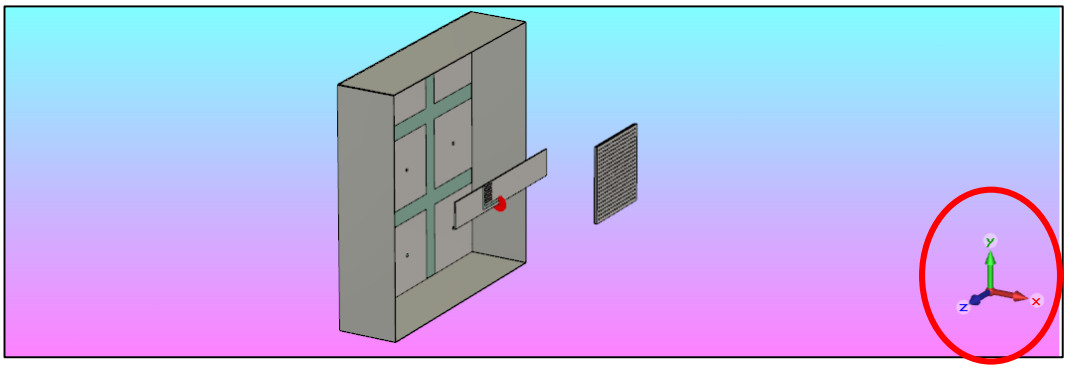
nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.583	8.37	9.491
รูรัศมี=12mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=25mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.581	8.364	9.478
รูรัศมี=13mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=30mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.583	8.37	9.499
รูรัศมี=14mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=30mm			

nxn	อัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz (dB)	อัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz (dB)
3x3	7.579	8.36	9.49
รูรัศมี=15mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง=35mm			

จากตารางข้างต้นพบว่า รูเจาะรัศมี 1mm ,ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง 5mm และจำนวน nxn=19x19 ให้อัตราขยายมากที่สุด จากนั้นทำการหาตำแหน่งและระยะห่างระหว่าง driven กับ แผ่นกราวด์โลหะแม่เหล็กประดิษฐ์ที่ให้อัตราขยายมากที่สุด



รูปที่ 3.35 อลูมิเนียมที่มีรูเจาะรัศมี 1 mm ระยะห่างระหว่างรูนับจากจุดศูนย์กลาง 5mm และจำนวน nxn=19x19

ตารางที่ 3.4 แสดงการเลื่อนตำแหน่งและระยะของแผ่นกราวด์โลหะแม่เหล็กประดิษฐ์

เลื่อนไปทาง +Z เป็นระยะ			
	อัตราขยายที่ความถี่ 530MHz	อัตราขยายที่ความถี่ 650MHz	อัตราขยายที่ความถี่ 786MHz
10 mm	7.743	8.259	9.424
20 mm	7.741	8.252	9.356

เลื่อนไปทาง -Z เป็นระยะ			
	อัตราขยายที่ความถี่ 530MHz	อัตราขยายที่ความถี่ 650MHz	อัตราขยายที่ความถี่ 786MHz
10 mm	7.736	8.253	9.523
20 mm	7.735	8.276	9.591
30 mm	7.73	8.28	9.623
40 mm	7.724	8.29	9.652
50 mm	7.72	8.285	9.663
60 mm	7.706	8.27	9.619

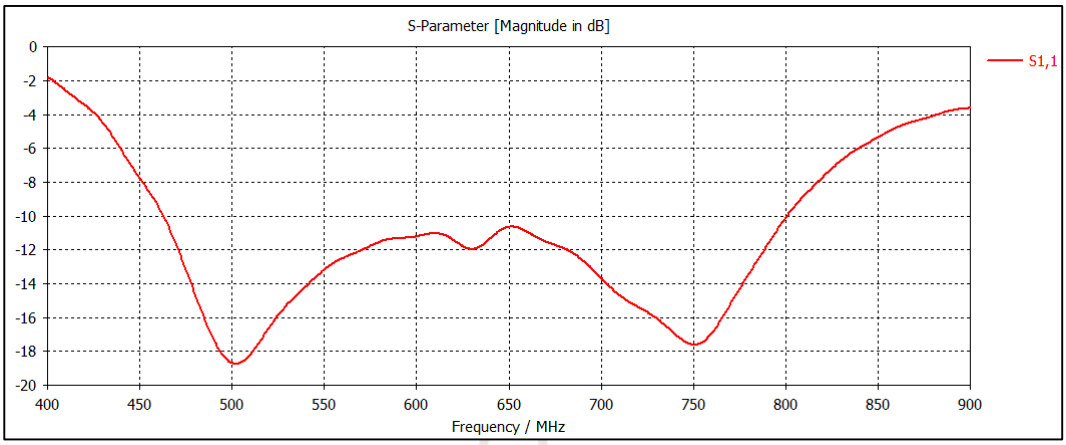
พบว่าเลื่อนระยะไปทางแกน –Z 50mm ให้อัตราขยายมากที่สุด

เลื่อนไปทาง -Z 50 mm และเลื่อนไปทาง +Y			
	อัตราขยายที่ความถี่ 530MHz	อัตราขยายที่ความถี่ 650MHz	อัตราขยายที่ความถี่ 786MHz
10 mm	7.72	8.298	9.681
20 mm	7.721	8.305	9.683
30 mm	7.723	8.311	9.667

เลื่อนไปทาง -Z 50 mm และเลื่อนไปทาง -Y			
	อัตราขยายที่ความถี่ 530MHz	อัตราขยายที่ความถี่ 650MHz	อัตราขยายที่ความถี่ 786MHz
10 mm	7.72	8.302	9.638
20 mm	7.721	8.3	9.589

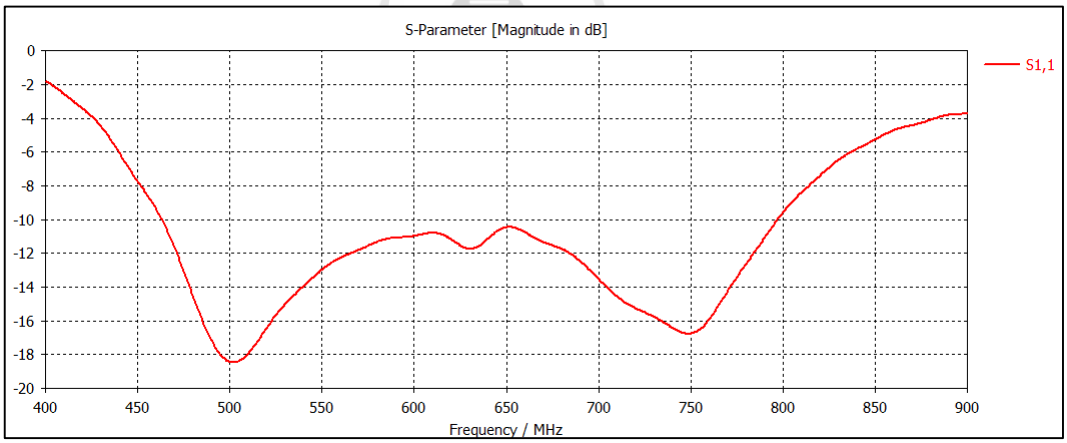
พบว่าเลื่อนระยะไปทางแกน –Z 50mm และเลื่อนระยะไปทางแกน +Y 20mm ให้อัตราขยายมากที่สุด จากนั้นจะทำการเลื่อนระยะระหว่าง driven กับ แผ่นกราวด์โลหะแม่เหล็กประดิษฐ์

เลื่อน -Z 50 mm +Y 20 mm ระยะระหว่าง driven กับ แผ่นกราวด์โลหะแม่เหล็กประดิษฐ์			
	อัตราขยายที่ความถี่ 530MHz	อัตราขยายที่ความถี่ 650MHz	อัตราขยายที่ความถี่ 786MHz
115mm	7.721	8.305	9.683
120mm	7.733	8.346	9.703
125mm	7.753	8.38	9.722



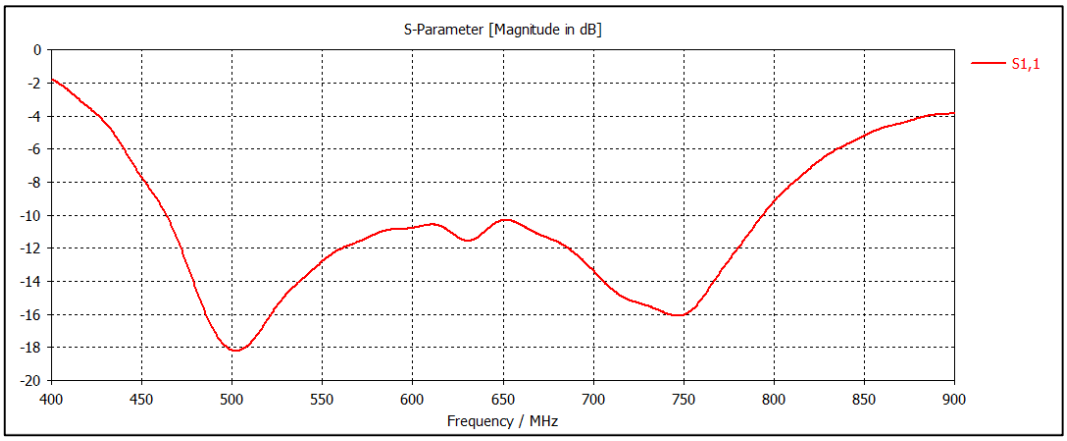
รูปที่ 3.36 S-Parameter ของระยะระหว่าง Driven Element กับ แผ่นกราวด์โลหะแม่เหล็กประดิษฐ์

115mm



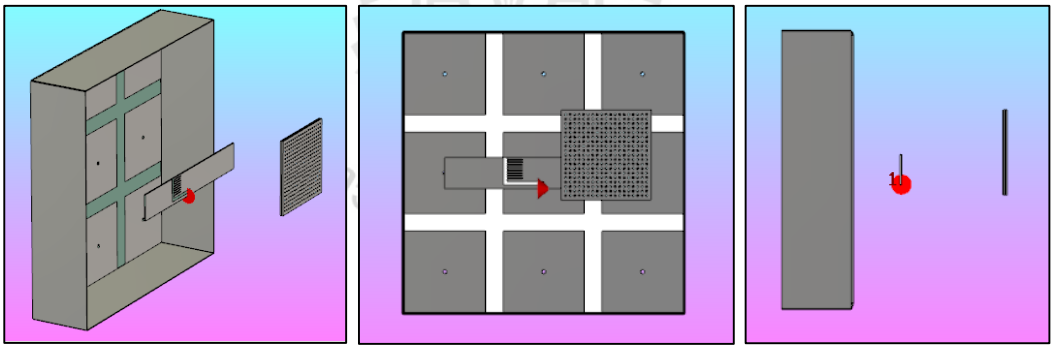
รูปที่ 3.37 S-Parameter ของระยะระหว่าง Driven Element กับ แผ่นกราวด์โลหะแม่เหล็กประดิษฐ์

120mm



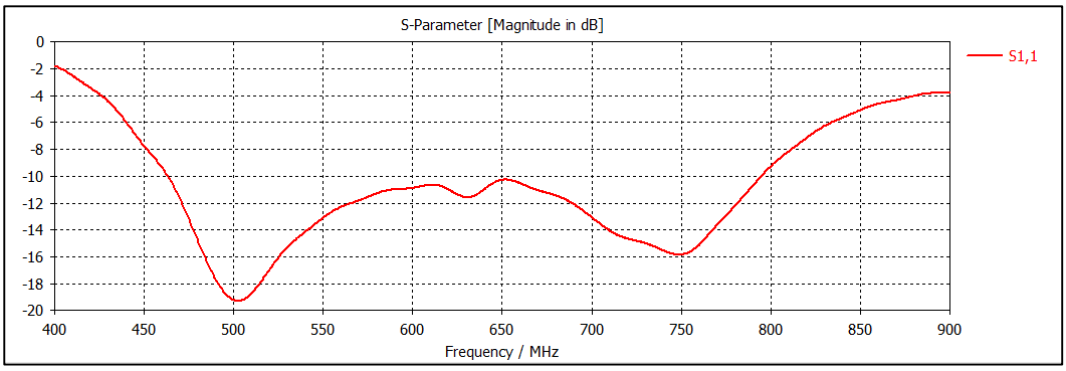
รูปที่ 3.38 S-Parameter ของระยะระหว่าง Driven Element กับ แผ่นกราวด์โลหะแม่เหล็กประดิษฐ์ 125mm

จากตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.36 , 3.37 และ 3.38 แสดงอัตราขยายและ S-Parameter เราจะเลือกระยะระหว่าง driven กับ แผ่นกราวด์โลหะแม่เหล็กประดิษฐ์ 120mm เนื่องจากให้อัตราขยายที่สูงและ S-Parameter ไม่สูงจนเกินไป จากนั้นจะทำการเพิ่มอัตราขยายโดยเพิ่มความหนาของแผ่นอลูมิเนียมจากเดิมหนา 2mm เป็น 4mm ได้ผลสำเร็จดังรูป



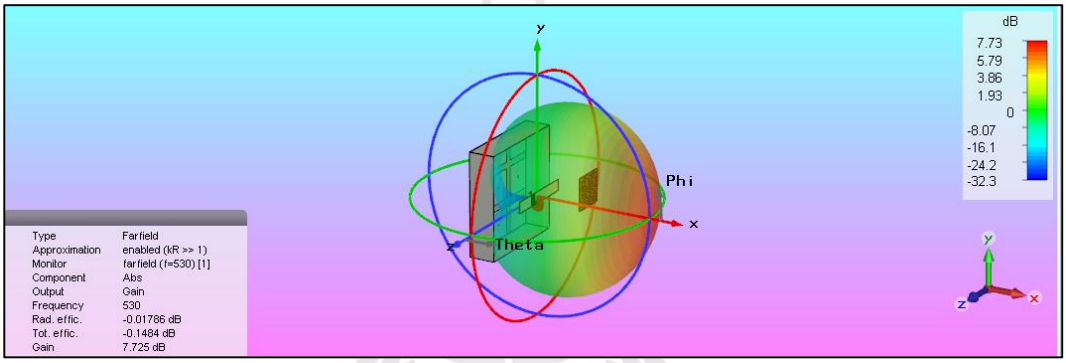
รูปที่ 3.39 ผลสำเร็จของสายอากาศ

จากรูปที่ 3.39 แสดงผลสำเร็จของสายอากาศซึ่ง ระยะระหว่าง Driven Element และ แผ่นกราวด์โลหะแม่เหล็กประดิษฐ์ เท่ากับ 120mm



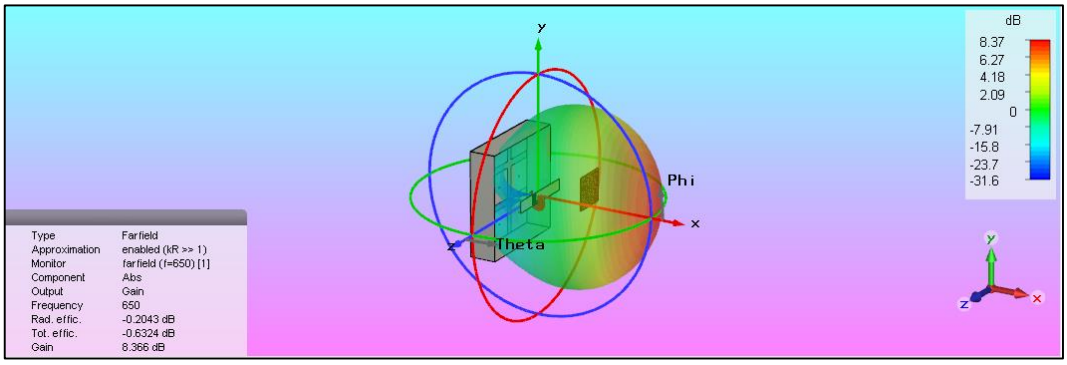
รูปที่ 3.40 S-Parameter ของสายอากาศผลสำเร็จ

จากรูปที่ 3.40 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศผลสำเร็จ ซึ่งมีค่าต่ำกว่า -10 dB ในย่าน 510-790MHz



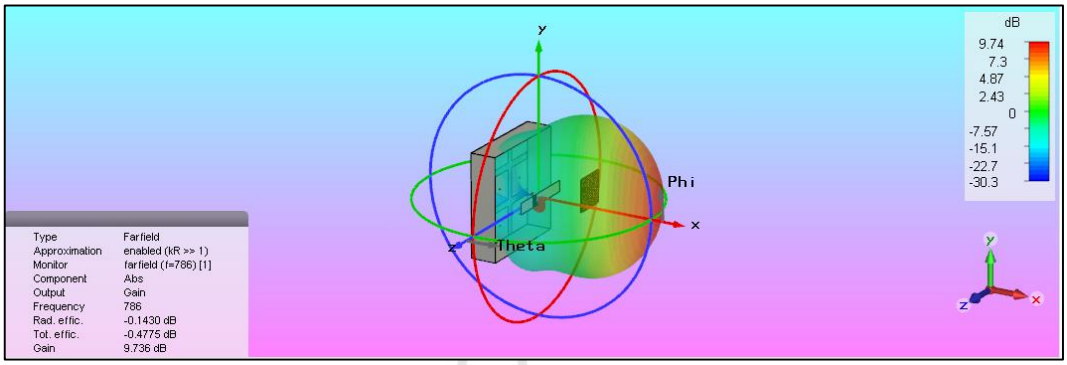
รูปที่ 3.41 แบบรูปการแผ่กำลัง และอัตราขยายที่ความถี่ 530 MHz

จากรูปที่ 3.41 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ สายอากาศผลสำเร็จ ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) ในรูปแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 530 MHz จะได้อัตราขยายเท่ากับ 7.725 dB



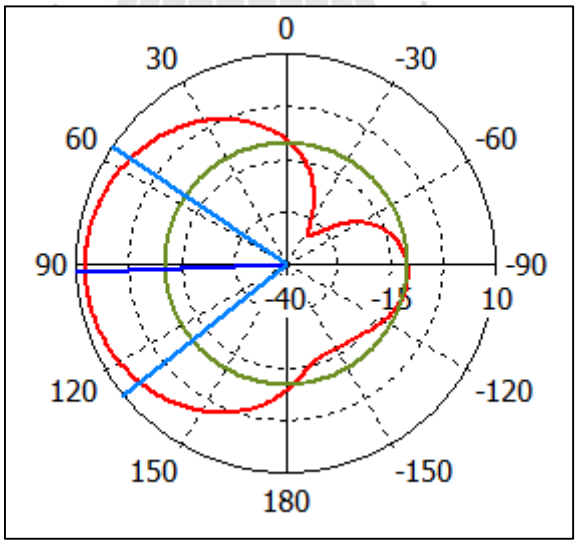
รูปที่ 3.42 แบบรูปการแผ่กำลัง และอัตราขยายที่ความถี่ 650 MHz

จากรูปที่ 3.42 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ สายอากาศผลสำเร็จ ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) ในรูปแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 650 MHz จะได้อัตราขยายเท่ากับ 8.366 dB



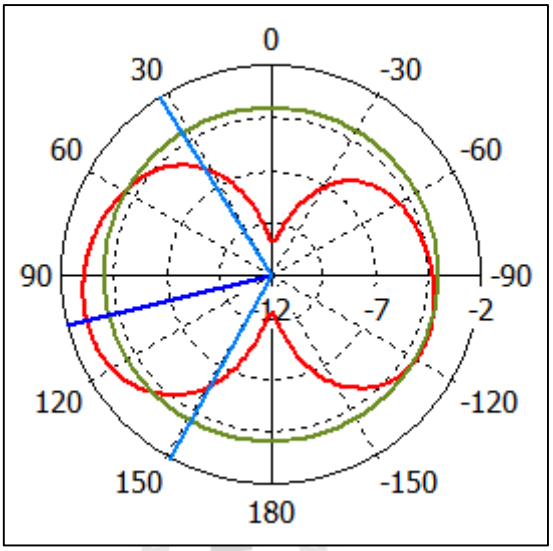
รูปที่ 3.43 แบบรูปการแผ่กำลัง และอัตราขยายที่ความถี่ 786 MHz

จากรูปที่ 3.43 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ สายอากาศผลสำเร็จ ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) ในรูปแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 786 MHz จะได้อัตราขยายเท่ากับ 9.736 dB



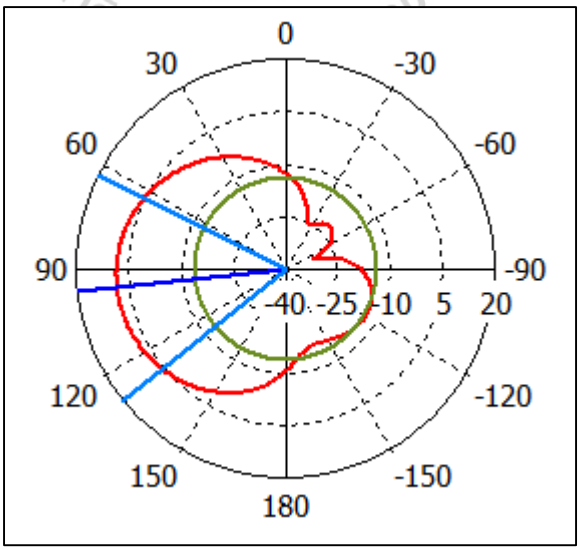
รูปที่ 3.44 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 530 MHz

จากรูปที่ 3.44 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ สายอากาศผลสำเร็จ ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) ในรูปแบบ 2 มิติ ที่ความถี่ 530 MHz ในระนาบสนามไฟฟ้า



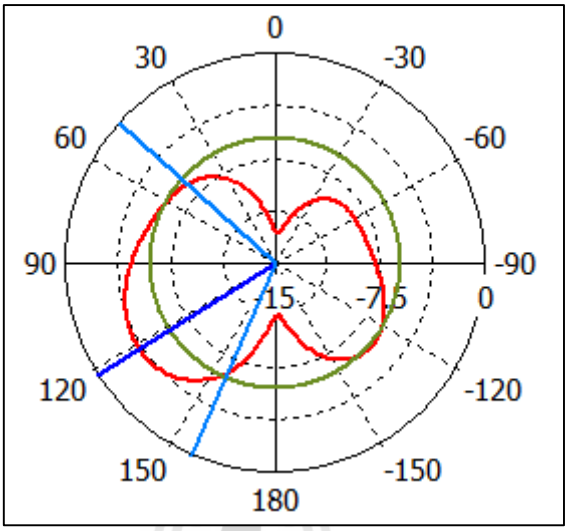
รูปที่ 3.45 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 530 MHz

จากรูปที่ 3.45 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ สายอากาศผลสำเร็จ ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) ในรูปแบบ 2 มิติ ที่ความถี่ 530 MHz ในระนาบแม่เหล็ก



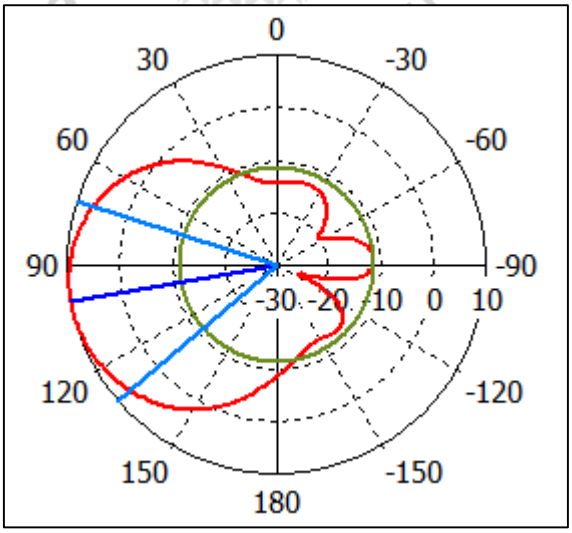
รูปที่ 3.46 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 650 MHz

จากรูปที่ 3.46 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ สายอากาศผลสำเร็จ ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) ในรูปแบบ 2 มิติ ที่ความถี่ 650 MHz ในระนาบสนามไฟฟ้า



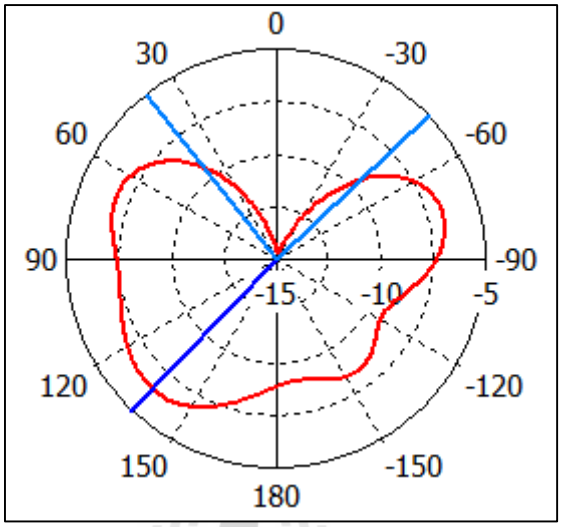
รูปที่ 3.47 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 650 MHz

จากรูปที่ 3.47 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ สายอากาศผลสำเร็จ ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) ในรูปแบบ 2 มิติ ที่ความถี่ 650 MHz ในระนาบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.48 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 786 MHz

จากรูปที่ 3.48 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ สายอากาศผลสำเร็จ ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) ในรูปแบบ 2 มิติ ที่ความถี่ 786 MHz ในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.49 รูปแบบการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 786 MHz

จากรูปที่ 3.49 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของ สายอากาศผลสำเร็จ ซึ่งมีการแผ่กำลังแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) ในรูปแบบ 2 มิติ ที่ความถี่ 786 MHz ในระนาบสนามแม่เหล็ก

3.4 สรุป

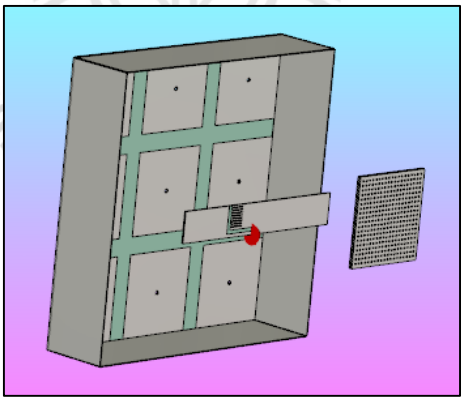
ในบทนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบแผ่นกราวด์โลหะแม่เหล็กประดิษฐ์โดยใช้ทฤษฎีพื้นผิวเลือกความถี่ผ่าน (frequency selective surface) โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio 2014 ในการจำลองผล โดยใช้วัสดุอลูมิเนียมในการออกแบบ เพื่อให้ได้อัตราขยายมากที่สุด และสามารถใช้งานในย่านความถี่ 510-790 MHz ได้ และยังสามารถบอกค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนได้ แต่ในความเป็นจริงอาจมีความคลาดเคลื่อนจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ดังนั้นเราจึงต้องยึดความสามารถในการประมวลผลของโปรแกรมเป็นหลัก เพื่อให้ได้ผลตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงบทสรุปของโครงงาน เรื่อง การออกแบบโพรงช่องว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีเจาะรูแบบคาบบนแผ่นกราวด์ (Design of EBG using Periodic Holes on ground plane) ซึ่งได้ศึกษาการออกแบบแผ่นกราวด์โลหะแม่เหล็กประดิษฐ์โดยใช้ทฤษฎีพื้นผิวเลือกความถี่ผ่าน (frequency selective surface) ที่สามารถทำงานได้ในย่านความถี่ 510-790 MHz ซึ่งสายอากาศประกอบไปด้วย สายอากาศ (Band-Notch Printed Dipole Antenna) (Sompop Pimpol ,2014) ,EBG Reflector (Mushroom-like EBG 3x3 elements) (Sompop Pimpol ,2014) และแผ่นกราวด์โลหะแม่เหล็กประดิษฐ์ มีลักษณะการจัดเรียงขององค์ประกอบดังรูปที่ 5.1 แล้วทำการวัดทดสอบคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศได้แก่ ค่าอิมพิแดนซ์คุณลักษณะ ความกว้างแถบของสายอากาศ อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ แบบรูปการแผ่กำลังและโพลาไรซ์ของสายอากาศ การวัดสนามแม่เหล็ก การวัดสนามไฟฟ้า และอัตราขยายของสายอากาศ



รูปที่ 5.1 การจัดเรียงองค์ประกอบของสายอากาศ

สรุปผลที่ได้จากการวัดทดสอบสายอากาศพบว่าสอดคล้องกับผลเฉลยที่ได้จากการจำลองผลในโปรแกรม CST Microwave Studio 2014 แต่ผลที่ได้จากการวัดทดสอบอาจมีค่าคลาดเคลื่อนไปบ้าง อาจเกิดจากการสูญเสียในตัวสายอากาศ เช่น การสูญเสียของ Dielectric และ Conductor และอาจเกิดจากการสูญเสียในสายส่ง การสูญเสียจากการสร้างชิ้นงานเนื่องจากชิ้นงานมีความ

คลาดเคลื่อนจากแบบจำลองในโปรแกรม CST Microwave Studio 2014 รวมถึงการจัดวางระยะระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

สายอากาศที่ประกอบไปด้วย สายอากาศ (Band-Notch Printed Dipole Antenna) (Sompop Pimpol ,2014) ,EBG Reflector (Mushroom-like EBG 3x3 elements) (Sompop Pimpol ,2014) และแผ่นกราวด์โลหะแม่เหล็กประดิษฐ์ ที่ทำงานในย่านความถี่ 510-790 MHz นี้ ได้ทำการทดสอบจริงแล้วพบว่า ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไปจากการจำลองผลในโปรแกรม CST Microwave Studio 2014 อยู่พอสมควร อาจเนื่องจากการสร้างสายอากาศจริงนั้นมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยของระยะระหว่าง สายอากาศ (Band-Notch Printed Dipole Antenna) (Sompop Pimpol ,2014) กับ แผ่นกราวด์โลหะแม่เหล็กประดิษฐ์ ไม่แม่นตรงเหมือนในโปรแกรมจำลองผล และสภาพแวดล้อมที่ทำการวัดจริงอาจมีสัญญาณรบกวน หรือมีการสะท้อนกลับของสัญญาณก็เป็นได้ ดังนั้น เราควรสร้างสายอากาศให้เหมือนกับโปรแกรมจำลองผลมากที่สุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์สายอากาศในโปรแกรม CST Microwave Studio ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 มาใช้ในการสร้างสายอากาศจริงในช่วงความถี่ 510-790 MHz และวัดทดสอบคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศ ได้แก่ ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ความกว้างแถบสายอากาศ และรูปแบบการแผ่กำลังทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

4.2 การวัดอิมพิแดนซ์คุณลักษณะ

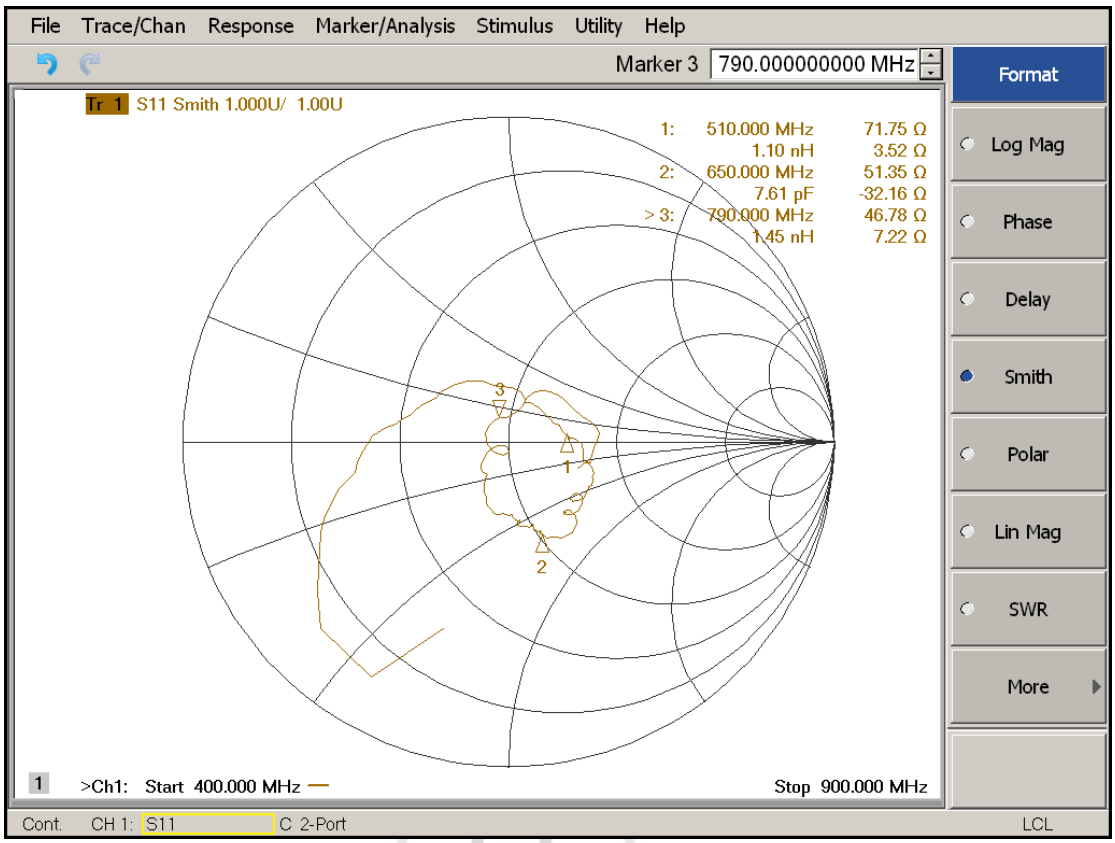
อิมพิแดนซ์ด้านเข้าเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ เนื่องจากหากสายอากาศไม่แมตซ์กับสายนำสัญญาณจะทำให้ไม่สามารถใช้งานจริงได้ เพราะจะทำให้เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณมายังเครื่องส่งได้ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เครื่องส่งเสียหาย ในโครงงานนี้ได้ใช้สายนำสัญญาณที่มีอิมพิแดนซ์คุณลักษณะของสายส่ง 50 โอห์ม ดังนั้นสายอากาศจะต้องมีอิมพิแดนซ์ด้านเข้าใกล้เคียง 50 โอห์ม มากที่สุด จึงจะทำให้สายอากาศและสายนำสัญญาณเกิดการแมตซ์ซึ่ง

4.2.1 ขั้นตอนการวัดค่าอิมพิแดนซ์คุณลักษณะ

ขั้นตอนที่ 1 ทำการ Calibrate เครื่อง Network Analyzer ที่ความถี่ 510-790 MHz เพื่อกำจัดค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในสายนำสัญญาณ

ขั้นตอนที่ 2 ทำการต่อสายนำสัญญาณจาก Port 1 ไปยังสายอากาศ (Band-Notch Printed Dipole Antenna)

ขั้นตอนที่ 3 เลือกคำสั่ง Format เป็น Smith Chart



รูปที่ 4.1 ผลการวัดอิมพิแดนซ์ด้านเข้าความถี่ 650 MHz

จากผลการวัดค่าอิมพิแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศที่ความถี่ 650 MHz โดยดูจากแผนภูมิสมิธ มีค่าเท่ากับ 51.35 โอห์ม แสดงว่าสามารถนำสายอากาศไปใช้งานกับสายโคแอกเชียลที่มีค่าอิมพิแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ได้

4.3 ความกว้างแถบของสายอากาศ

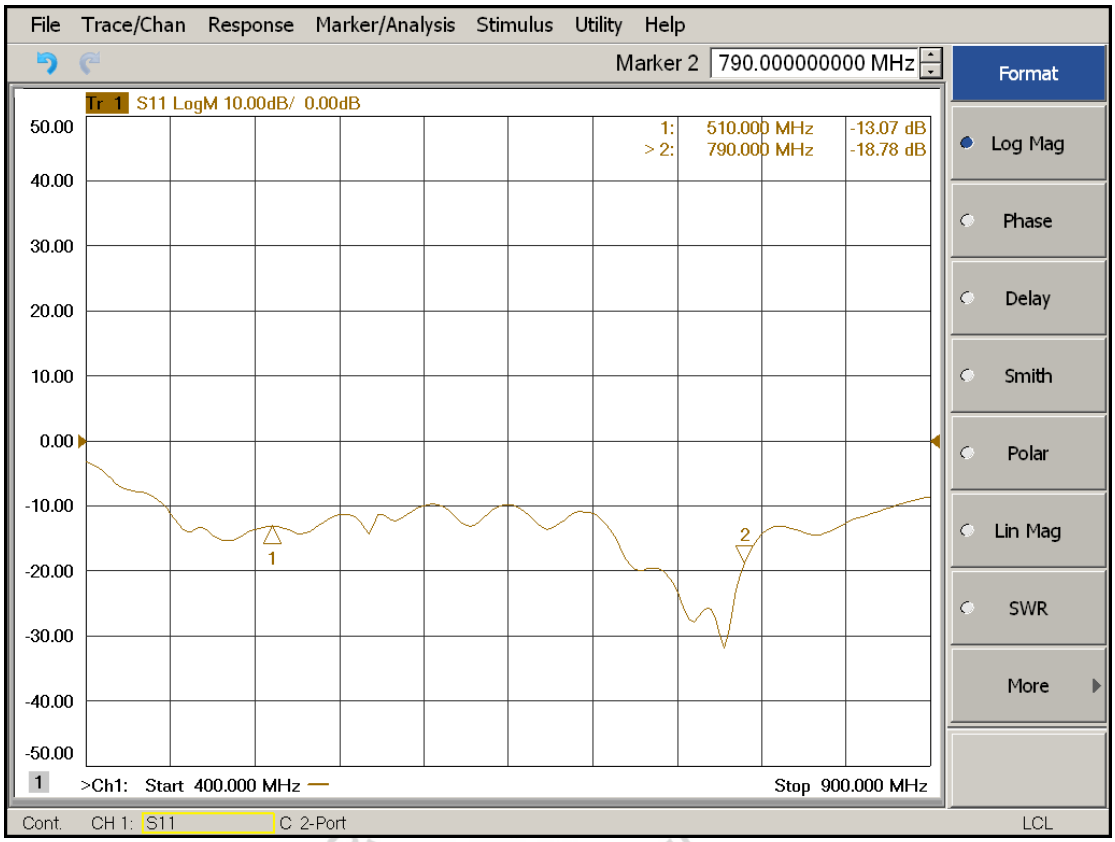
ความกว้างแถบของสายอากาศ คือ ช่วงของความถี่ที่สายอากาศสามารถใช้งานได้ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสายอากาศนั้นๆ ซึ่งในโครงงานนี้สายอากาศมีความกว้างแถบ 510-790 MHz โดยที่ความกว้างแถบ 510-790 MHz ต้องต่ำกว่า -10 dB

4.3.1 ขั้นตอนการวัดความกว้างแถบ

ขั้นตอนที่ 1 ทำการ Calibrate เครื่อง Network Analyzer ที่ความถี่ 510-790 MHz เพื่อกำจัดค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในสายนำสัญญาณ

ขั้นตอนที่ 2 ทำการต่อสายนำสัญญาณจาก Port 1 ไปยังสายอากาศ (Band-Notch Printed Dipole Antenna)

ขั้นตอนที่ 3 เลือกคำสั่ง Format เป็น Log Mag



รูปที่ 4.2 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

เป็นผลการวัดความกว้างแถบ โดยสายอากาศ (Band-Notch Printed Dipole Antenna) มีความกว้างแถบอยู่ที่ประมาณ 450-850 MHz จะได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss : S_{11}) เท่ากับ -10 dB ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ในการใช้งานจริง

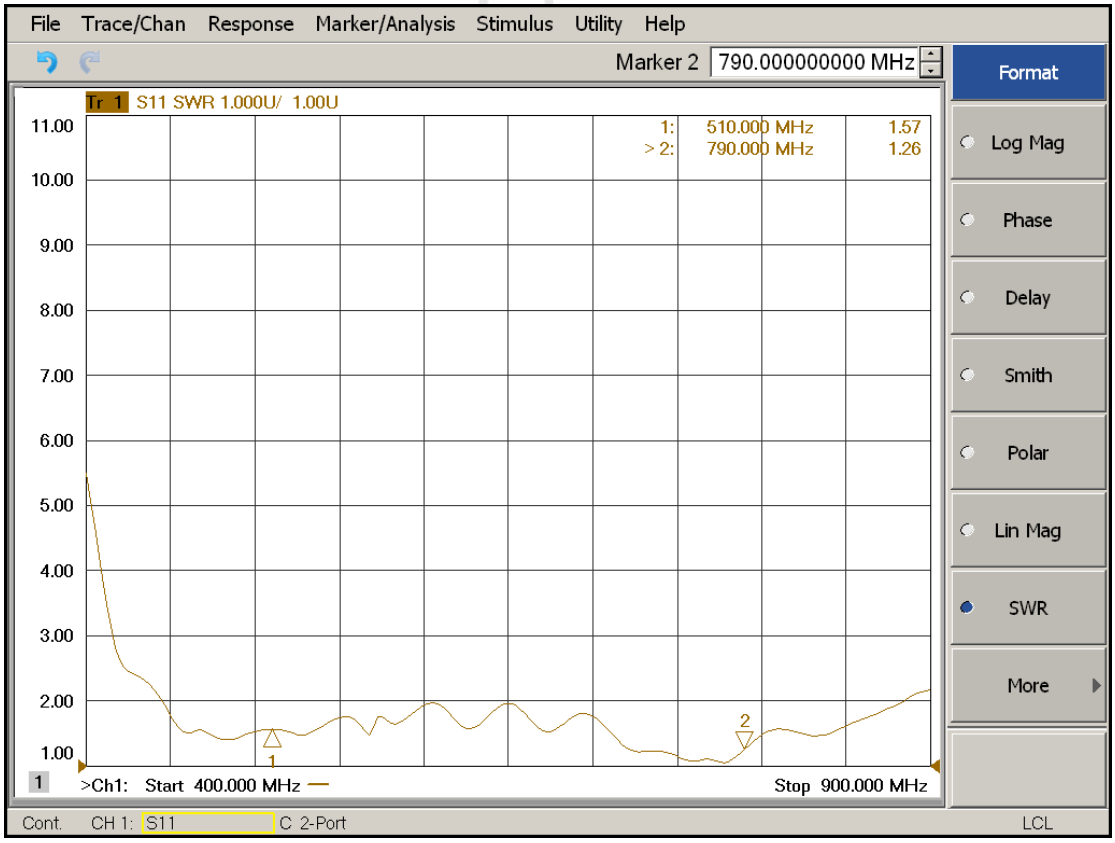
4.4 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ

4.4.1 ขั้นตอนการวัดอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

ขั้นตอนที่ 1 ทำการ Calibrate เครื่อง Network Analyzer ที่ความถี่ 510-790 MHz เพื่อกำจัดค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในสายนำสัญญาณ

ขั้นตอนที่ 2 ทำการต่อสายนำสัญญาณจาก Port 1 ไปยังสายอากาศ (Band-Notch Printed Dipole Antenna)

ขั้นตอนที่ 3 เลือกคำสั่ง Format เป็น SWR



รูปที่ 4.3 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ

จากผลการทดลองวัดสายอากาศ (Band-Notch Printed Dipole Antenna) ย่านความถี่ 510-790 MHz จะเห็นว่า มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ต่ำกว่า 2

4.5 แบบรูปการแผ่กำลังและโพลาไรซ์ของสายอากาศ

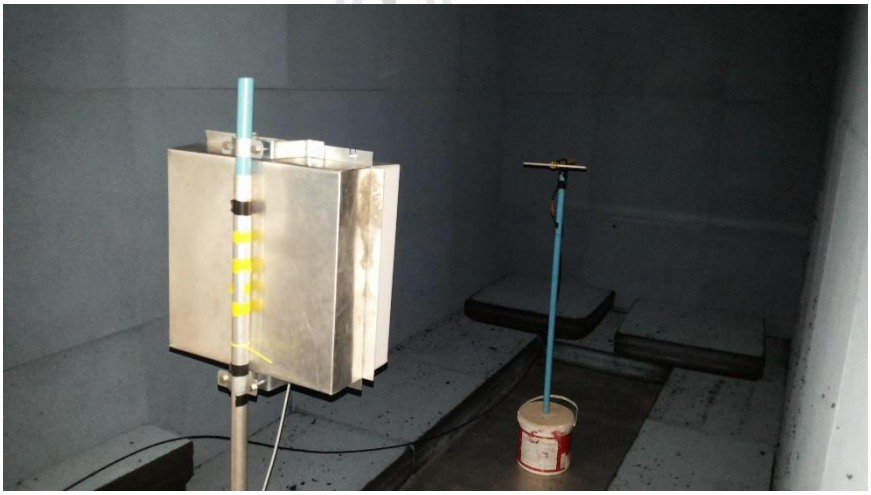
การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานทำได้โดยการที่บริเวณสนามไกล สามารถคำนวณได้จาก

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \tag{2.5}$$

เมื่อ R คือ ระยะของสนามระยะไกล

D คือ ความยาวสูงสุดของสายอากาศ

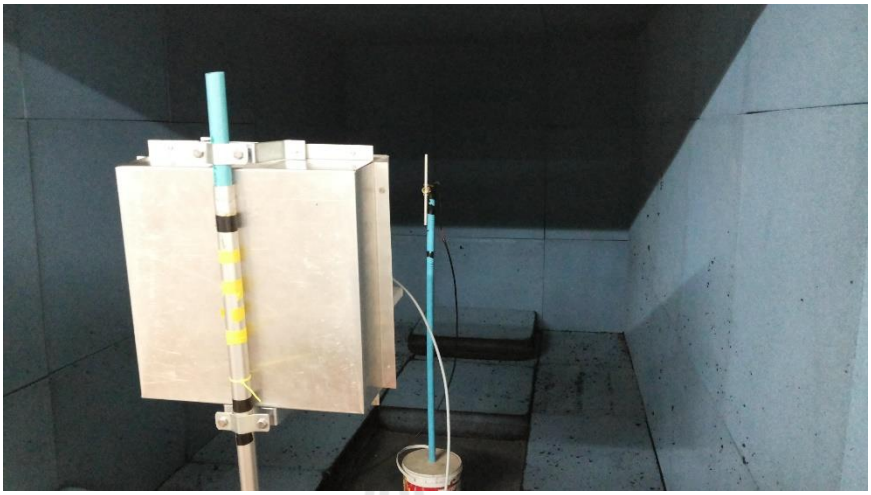
λ คือ ความยาวคลื่นของสายอากาศ



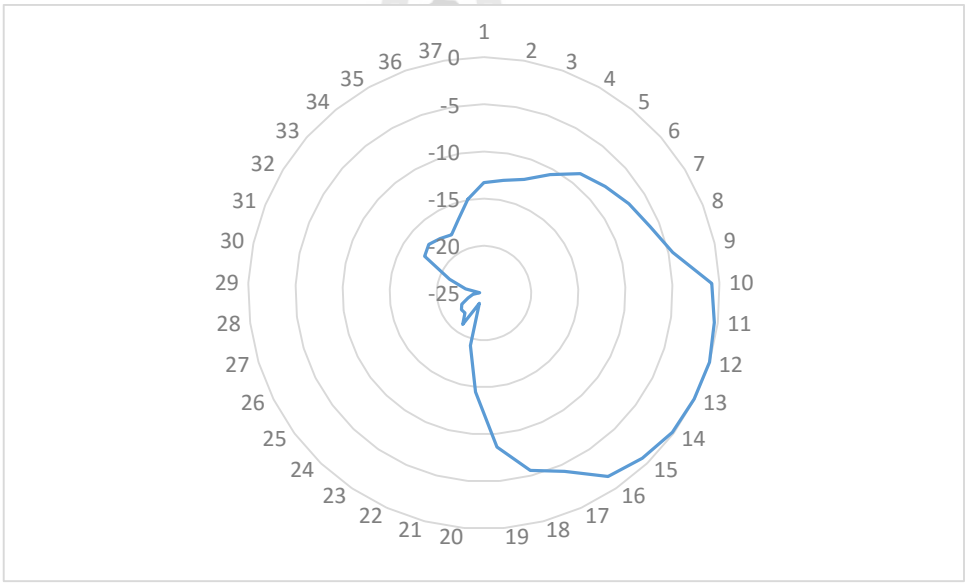
รูปที่ 4.4 ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ

ในการวัดแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศ (Band-Notch Printed Dipole Antenna) ย่านความถี่ 510-790 MHz ความยาวสูงสุดของสายอากาศ เท่ากับ 452.5 mm ทำให้ได้ระยะสนามไกลมากกว่า 880 mm โดยสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับต้องวางระยะห่างกันอย่างน้อย 880 mm ซึ่งในโครงงานนี้ใช้สายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่นที่ความถี่ 510-790 MHz เป็นสายอากาศอ้างอิง ทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่งซึ่งมีกำลังส่ง -5 dBm (เป็นค่ากำลังส่งของ Network Analyzer ที่ได้ตั้งไว้) ที่ความถี่ 510-790 MHz และสายอากาศที่นำมาทดสอบจะทำการหมุนรับคลื่น จาก 0 องศา ถึง 360 องศา โดยทำการหมุนทีละ 10 องศา

4.5.1 การวัดแบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามแม่เหล็ก

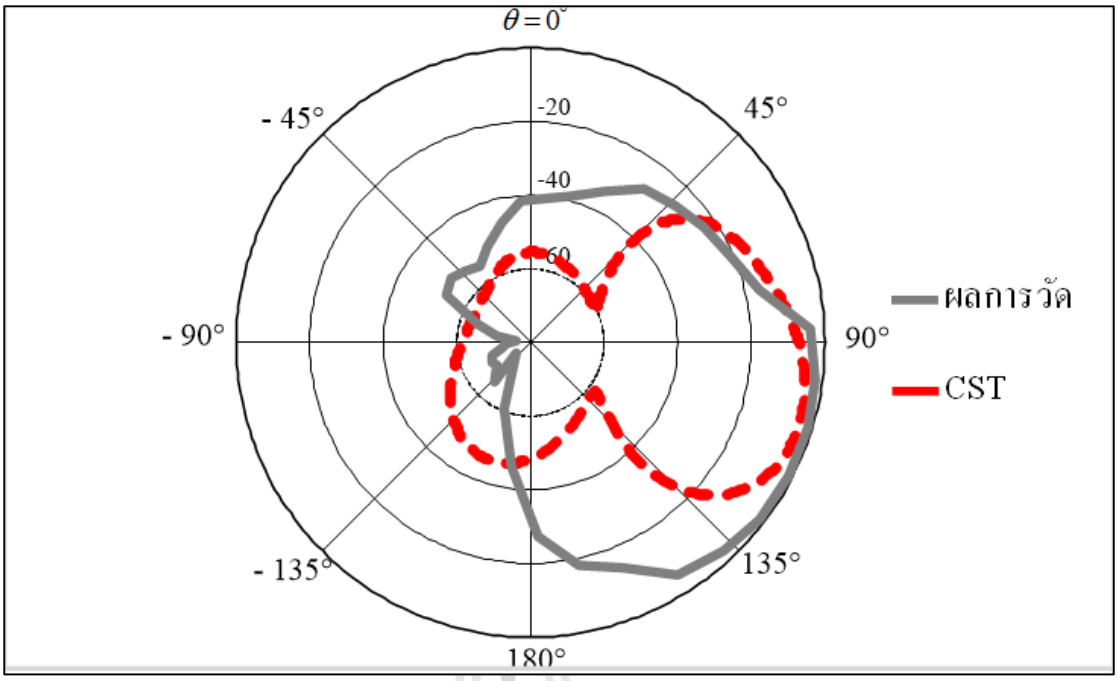


รูปที่ 4.5 การวัดแบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามแม่เหล็ก



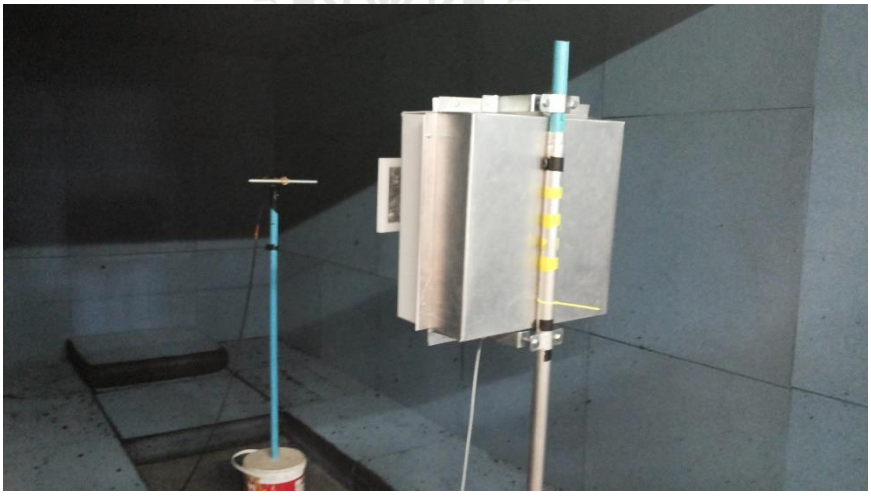
รูปที่ 4.6 แบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศ

(Band-Notch Printed Dipole Antenna) ย่านความถี่ 510-790 MHz

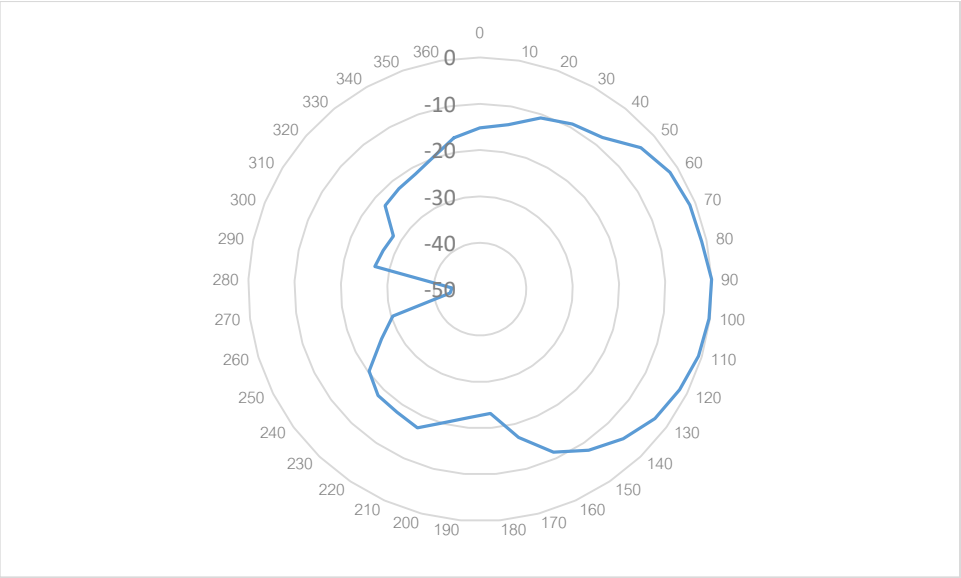


รูปที่ 4.7 แบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามแม่เหล็กในโปรแกรมและการวัดทดสอบจริง

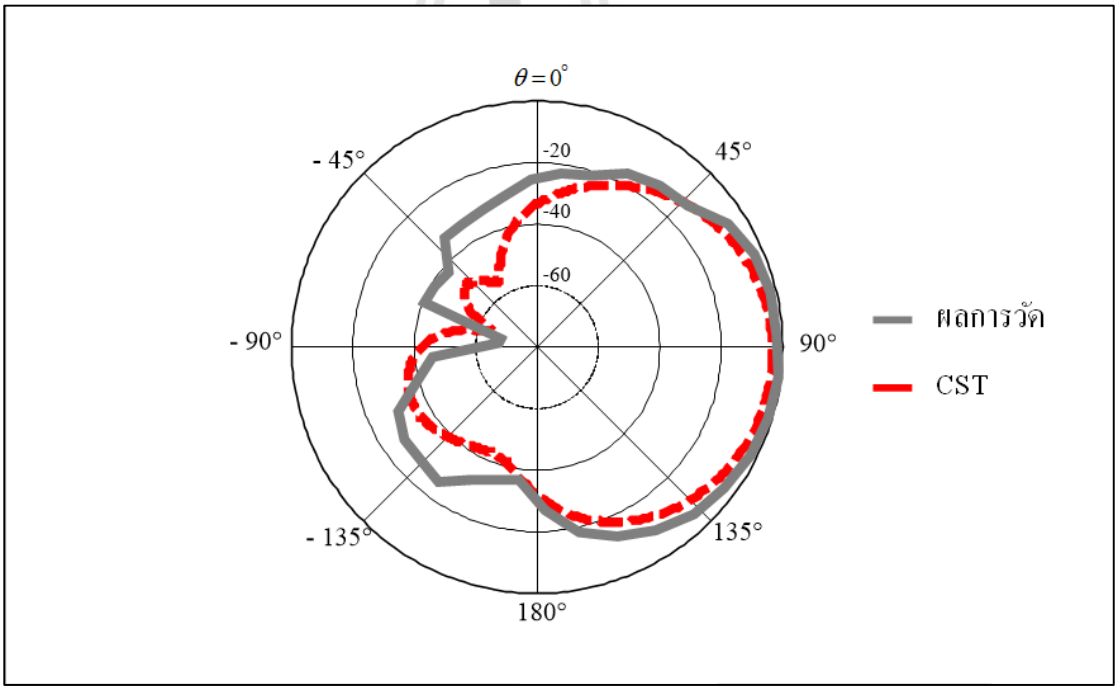
4.5.2 การวัดแบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 4.8 การวัดแบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 4.9 แบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศ (Band-Notch Printed Dipole Antenna) ย่านความถี่ 510-790 MHz



รูปที่ 4.10 แบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้าในโปรแกรมและการวัดทดสอบจริง

4.6 อัตราขยาย

4.6.1 อัตราการสูญเสียในอากาศว่าง (free space loss)

การหาอัตราการสูญเสียในอากาศว่างของสายอากาศที่ใช้ในการทดสอบสามารถหาได้จากสมการ

$$loss(dB) = 20log[\frac{\lambda}{4\pi R}] \quad (2.6)$$

R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ (เมตร)

λ คือ ความยาวคลื่น (เมตร)

จากการคำนวณระยะสนามไกลไกลมีค่า 0.88 เมตร ซึ่งระยะระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ จะต้องมีระยะ (R) มากกว่า 0.88 เมตร เพราะฉะนั้นจึงได้ทำการติดตั้งสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับห่างกันเป็นระยะ 1.2 เมตร และนำมาแทนค่าในสมการเพื่อหาค่าอัตราการสูญเสียในอากาศว่างได้ ดังนี้

f = 530 MHz $loss(dB) = 20log[\frac{0.439}{4\pi(1.2)}]$ = -28.506 dB

f = 570 MHz $loss(dB) = 20log[\frac{0.526}{4\pi(1.2)}]$ = -29.138 dB

f = 610 MHz $loss(dB) = 20log[\frac{0.491}{4\pi(1.2)}]$ = -29.727 dB

f = 650 MHz $loss(dB) = 20log[\frac{0.461}{4\pi(1.2)}]$ = -30.279 dB

f = 730 MHz $loss(dB) = 20log[\frac{0.410}{4\pi(1.2)}]$ = -31.287 dB

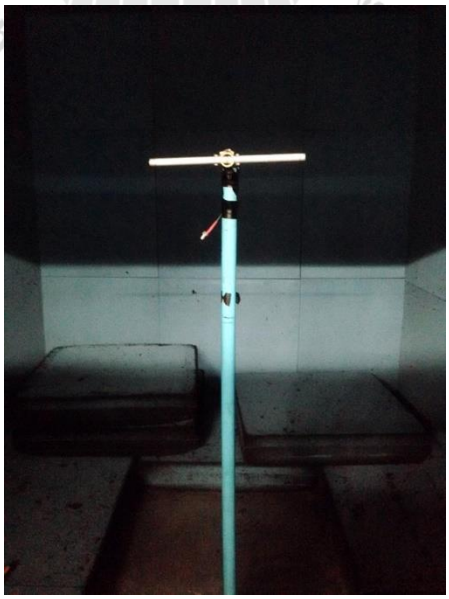
f = 770 MHz $loss(dB) = 20log[\frac{0.389}{4\pi(1.2)}]$ = 31.750 dB

4.6.2 อัตราขยายของสายอากาศ

การคำนวณอัตราขยายของสายอากาศซึ่งจะกระทำในระนาบไฟฟ้า เนื่องจากเป็นระนาบที่นำไปใช้งานจริง โดยวัดกำลังส่งและกำลังที่รับได้จากสายอากาศไดโพลที่มีความเหมือนกันทุกประการ จากนั้นแทนในสมการ

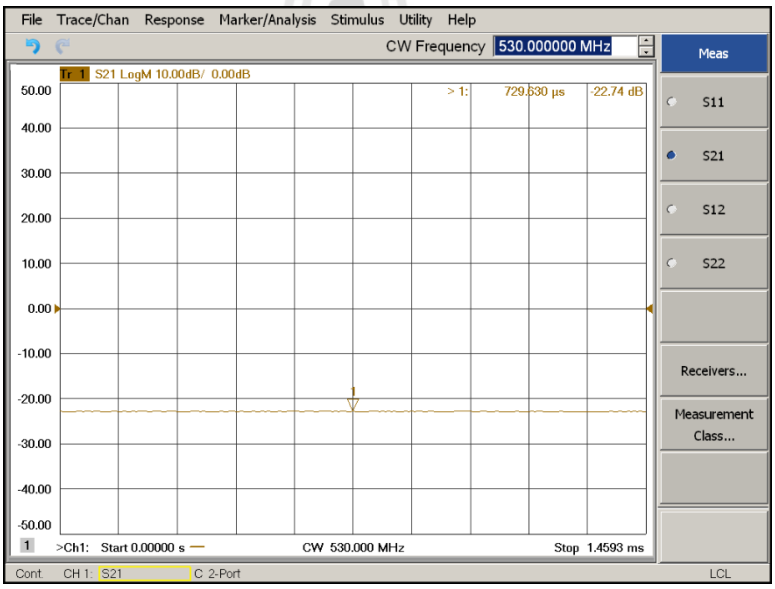
$$G_r = P_r - P_t - G_t - 20log\frac{\lambda}{4\pi R} \quad (2.7)$$

ใช้คำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศโดยจะใช้สายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่นเป็นสายอากาศภาคส่งที่ทำงานในย่านความถี่ 510-790 MHz และสายอากาศที่ได้ออกแบบเป็นภาครับ วางห่างกันเป็นระยะ 1.2 เมตร โดยที่กำลังของสายอากาศภาคส่ง (P_t) เท่ากับ -5 dBm (เป็นค่ากำลังส่งของ Network Analyzer ที่ได้ตั้งไว้) และอัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง (G_t) เท่ากับ 2.15 dB (เป็นการประมาณค่าว่าสายอากาศไดโพลนี้มีอัตราขยายเท่ากับ 2.15 dB)

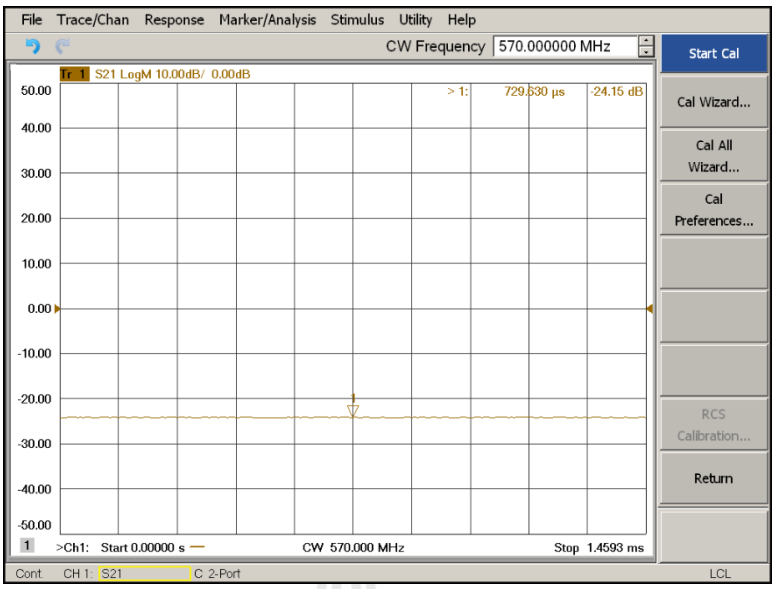


รูปที่ 4.11 สายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่นที่ใช้เป็นสายอากาศภาคส่ง

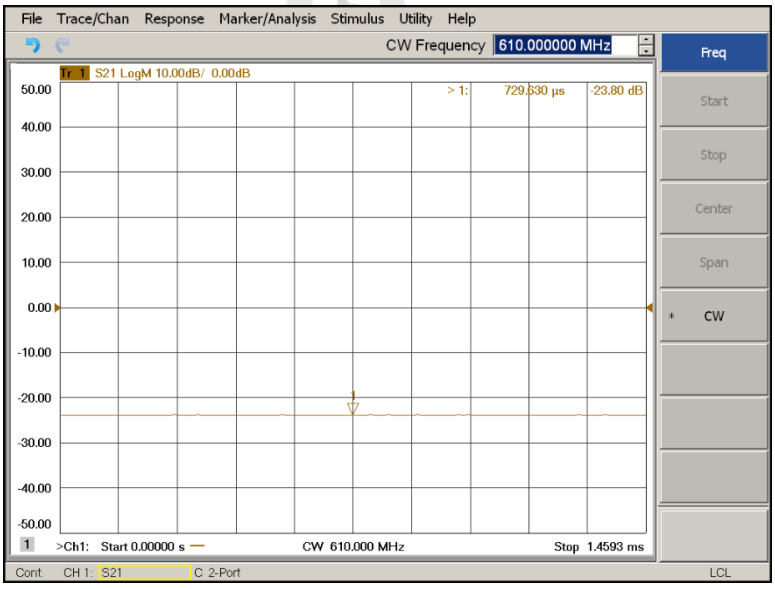
รูปที่ 4.12 สายอากาศภาครับ



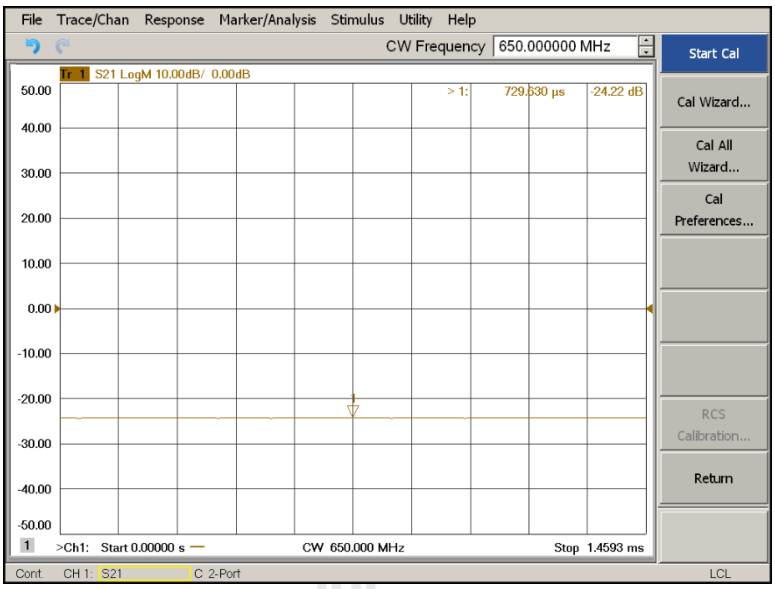
ที่ความถี่ 530 MHz : G_r = -22.74+5-2.15+28.506 = 8.616 dB



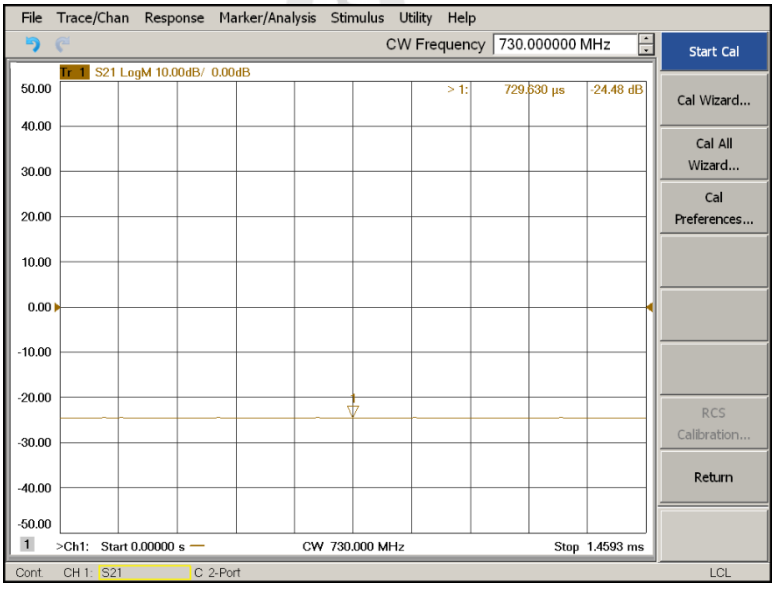
ที่ความถี่ 570 MHz : G_r = -24.15+5-2.15+29.138 = 7.838 dB



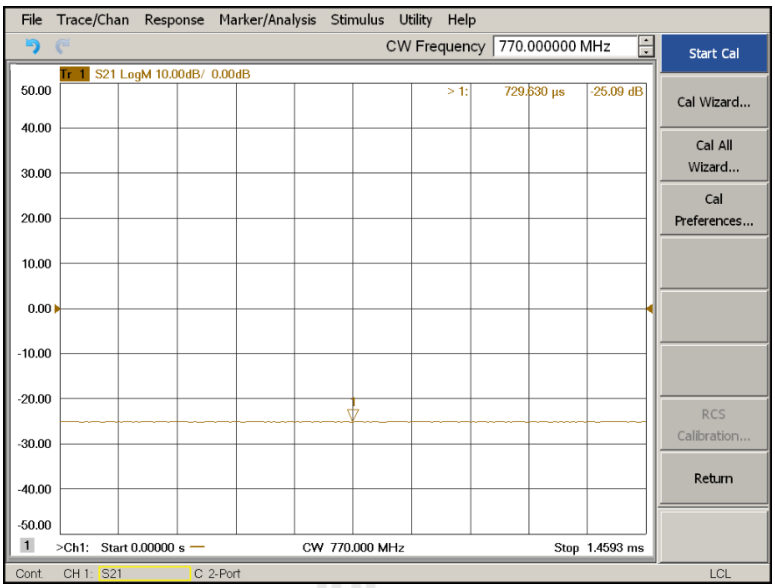
ที่ความถี่ 610 MHz : G_r = -23.8+5-2.15+29.727 = 8.777 dB



ที่ความถี่ 650 MHz : G_r = -24.22+5-2.15+30.279 = 8.909 dB



ที่ความถี่ 730 MHz : G_r = -24.48+5-2.15+31.287 = 9.657 dB



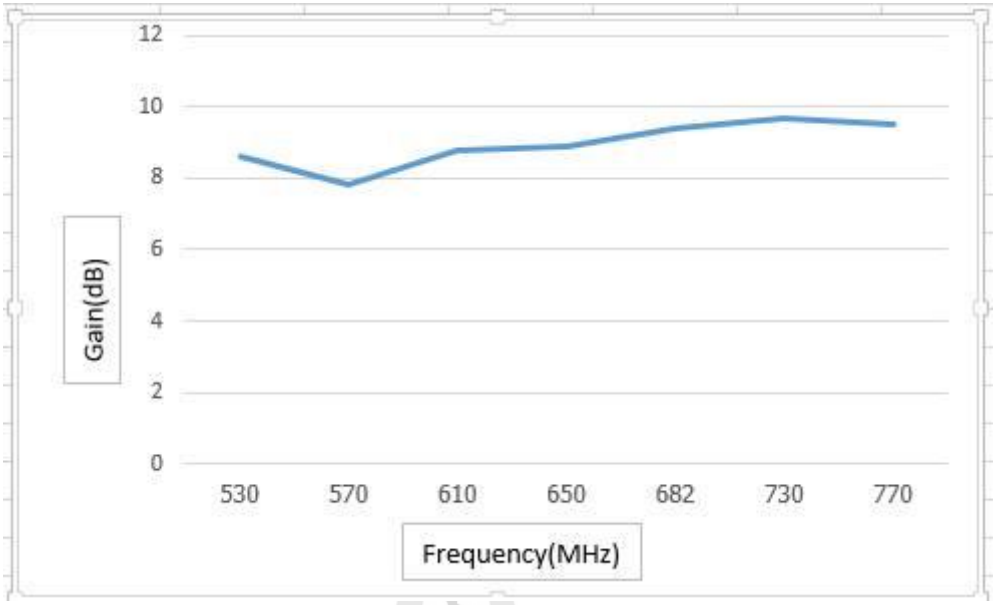
ที่ความถี่ 770 MHz : G_r = -25.09+5-2.15+31.750 = 9.510 dB

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบอัตราขยายระหว่าง (สายอากาศ+แผ่นสะท้อน) (sompop pimpol ,2014) กับ (สายอากาศ+แผ่นสะท้อน+แผ่นเจาะรู)

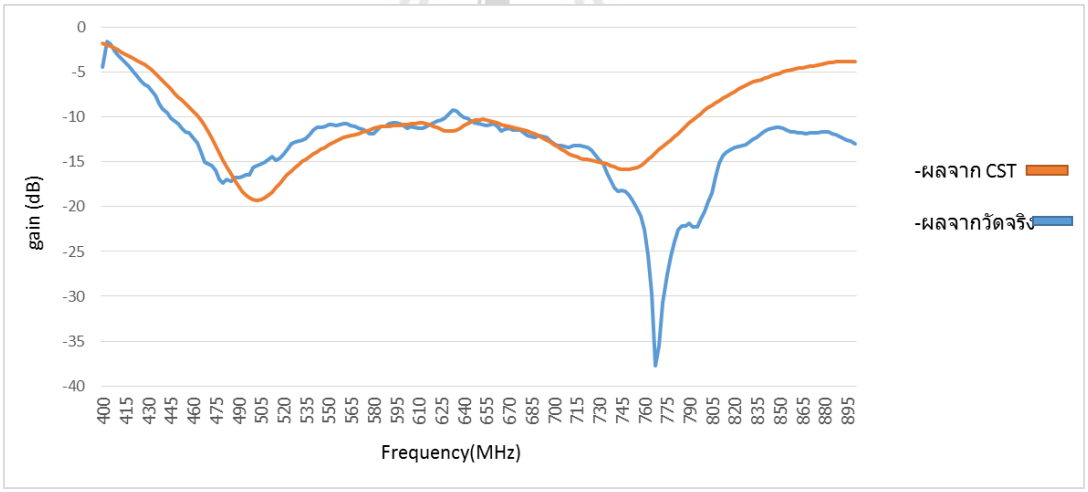
	ความถี่ 650 MHz
อัตราขยายของสายอากาศและแผ่นสะท้อน (sompop pimpol ,2014)	6.96 dB
อัตราขยายของสายอากาศ+แผ่นสะท้อน+แผ่นเจาะรู	8.909 dB

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบอัตราขยายที่ได้จากโปรแกรมจำลองผลและการวัดทดสอบจริง

	ความถี่ 530 MHz	ความถี่ 570 MHz	ความถี่ 610 MHz	ความถี่ 650 MHz	ความถี่ 730 MHz	ความถี่ 770 MHz
อัตราขยายในโปรแกรมจำลองผล	7.725	7.876	8.139	8.366	9.124	9.633
อัตราขยายจากการวัดทดสอบจริง	8.616	7.838	8.777	8.909	9.657	9.51



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอัตราขยายของสายอากาศภาครับ



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบ S_{11} ระหว่างผลในโปรแกรม CST Microwave Studio 2014 กับ ผลจากการวัดจริง

4.7 สรุป

ในบทนี้เป็นการวัดทดสอบสายอากาศ ย่านความถี่ 510-790 MHz ตามที่ได้ออกแบบในโปรแกรม CST Microwave Studio 2014 ไว้ในบทที่ 3 แล้วทำการวัดทดสอบพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ค่าอิมพิแดนซ์คุณลักษณะ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ซึ่งพบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการจำลองผลในโปรแกรม จึงสามารถนำไปใช้งานจริงได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บรรณานุกรม

[1] รองศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ วงศ์สรรค์, วิศวกรรมสายอากาศ (พิมพ์ครั้งที่ 4), ศูนย์นวัตกรรม และเทคโนโลยีการศึกษา และทีมงานฟาสต์บุ๊คส์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2556.

[2] https://en.wikipedia.org/wiki/Metamaterial

[3] http://www.slideshare.net/BhaskaraNaikS/frequency-selective-surfaces

[4] http://research-system.siam.edu/images/researchin /Analysis_and_Design _of_Differentiator-Based_Three-Input_Single-Output _Current_Mode _Universal_Filter _with_Independent_Electronically_Tuned_ Quality_Factor_Capability/11_Chapter_3.pdf

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายโกศล สว่างวัฒนกิจ เกิดเมื่อวันที่ 22 พฤศจิกายน พ.ศ. 2535 ภูมิลำเนาอยู่ที่ 36/1 ตำบลหินดาด อำเภอห้วยแถลง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนห้วยแถลงพิทยาคม อำเภอห้วยแถลง จังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

นายอรรถโกวิท หงษา เกิดเมื่อวันที่ 29 พฤศจิกายน พ.ศ. 2535 ภูมิลำเนาอยู่ที่ 5/15 ตำบลชุมพวง อำเภอชุมพวง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนชุมพวงศึกษา อำเภอชุมพวง จังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

นายภควัต ทะสังขา เกิดเมื่อวันที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2534 ภูมิลำเนาอยู่ที่ 150/58 หมู่ 6 ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนแก่นนครวิทยาลัย อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี