



รายงานการวิจัย

ระบบป้อนแบบใหม่โดยใช้เทคนิคช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับ
สายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปแบบแพทช์
(New Feed System Using EBG Technique
for MSA Phased Array Antenna)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

ระบบป้อนแบบใหม่โดยใช้เทคนิคช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับ
สายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปแบบแพทช์
(New Feed System Using EBG Technique
for MSA Phased Array Antenna)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ว่าที่ ร้อยตรีวรากรณ์ สาริษา

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

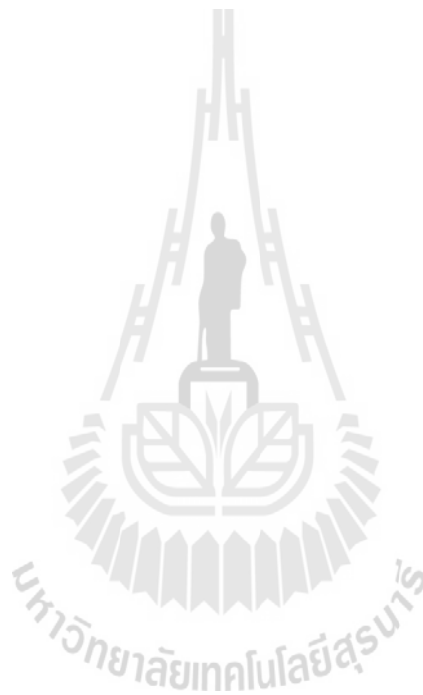
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ธันวาคม 2557

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สามารถดำเนินการได้ และได้รับผลสำเร็จบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้
ทุกประการ โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2557
สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ ว่าที่ร้อยตรี วรากรณ์ สาริษา ผู้ร่วมวิจัยซึ่งช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง
ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ วงศ์สรรค์

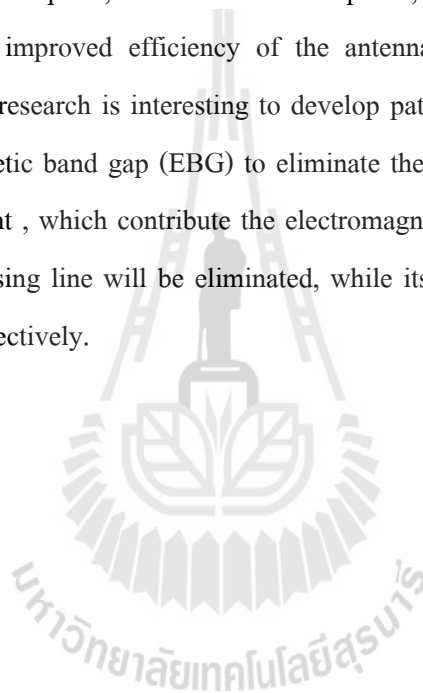


บทคัดย่อ

การพัฒนาและเจริญเติบโตของระบบการสื่อสารไร้สายอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน เป็นความท้าทายต่อนักวิจัยและวิศวกรด้านวิศวกรรมสายอากาศเพื่อสร้างโครงสร้างสายอากาศและปรับปรุงออกแบบสายอากาศที่มีอยู่เดิมให้มีประสิทธิภาพตามต้องการ เนื่องจากความก้าวหน้าในการคำนวณด้านทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและเทคโนโลยีการสร้างและผลิตสายอากาศหรือแม้แต่วัสดุที่นำมาใช้สร้าง ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าที่ซับซ้อนหรืออภิวัด (metamaterial) มาช่วยในการออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสื่อสารข้อมูลผ่านระบบไร้สาย จำเป็นที่ต้องใช้สายอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมที่สุดของกับการใช้งานแต่ละประเภท องค์ประกอบหนึ่งที่มีส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศ ได้แก่ระบบป้อน (feed system) ซึ่งทำหน้าที่ในการป้อนกำลังงานให้แก่สายอากาศ ซึ่งจะถูกออกแบบให้เหมาะสมกับสายอากาศกับโครงสร้างและการนำไปใช้งานแต่ละประเภทของสายอากาศ ระบบป้อนสำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป (microstrip array antenna) มีวิธีด้วยกัน คือ การป้อนแบบเส้นไมโครสตริป (stripline feed) การป้อนด้วยสายโคแอกเซียล (coaxial cable) หรือโพรบนำสัญญาณ (probe feed) การป้อนแบบเชื่อมต่อ (coupled feed) และการป้อนแบบช่องเปิด (aperture feed) พบว่ามีความยุ่งยากซับซ้อนและเกิดการสูญเสียในระบบป้อนอนข้างมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบป้อนแบบใหม่ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศให้ดีขึ้นด้วยเทคนิคช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic band gap) โดยสามารถขจัดคลื่นผิว (surface wave) อีกทั้งสามารถปรับหรือควบคุมขนาด (amplitude) หรือเฟส (phase) ของสัญญาณในแต่ละหน่วยเซลล์ (unit cell) เพื่อลดค่าการสูญเสีย (loss) ลดพู่ข้าง (side lobe) และเพิ่มอัตราขยาย (gain) ของสายอากาศ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศแถวลำดับดีขึ้น

Abstract

At present, the development and growth of the wireless communication systems have been challenged for the researchers and engineers who want to develop and improve any antenna for utilizing in the desired applications appropriately. The patch antenna is one of the antenna types that are widely applied in several advantages and low profile property such as light weight and simple to increase gain by using the construction of array. Feeder system is part of the development of the improved performance of the microstrip array antenna which can separately classified into four types such as feeding with: a stripline, a coaxial cable or probe, and by coupling and aperture. Nowadays, researchers have improved efficiency of the antenna by applying the benefits of Metamaterials (MTMs). This research is interesting to develop patch array antenna included with metamaterials or electromagnetic band gap (EBG) to eliminate the surface wave, adopt or control phase and amplitude of current, which contribute the electromagnetic wave direct to patch array, with this method, loss in phasing line will be eliminated, while its gain and performance will be increased and enhanced, respectively.



สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
สารบัญเรื่อง	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย	2
1.4 ข้อยกเว้นเบื้องต้น	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย	
1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน	3
1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย	3
1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย.....	4
1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	4
1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล	4
1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	4
1.6.7 การทดสอบสมมุติฐาน	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ	5
2.2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.2.1 สายอากาศไมโครสตริปและระบบป้อนกำลังงาน.....	5
2.2.2 เทคนิคและรูปแบบวิธีการป้อนสำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป	
1) เทคนิคการป้อนด้วยสายเฟสหรือสายไมโครสตริป (phasing line).....	11

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2) เทคนิคการป้อนด้วยสายเฟสและการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยแถวลำดับไมโครสตริป.....	13
2.3 สรุป	19
3 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
3.1 บทนำ.....	21
3.2 สายอากาศไมโครสตริป (microstrip antenna),.....	21
3.2.1 คุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป.....	23
3.2.2 วิธีการป้อนกำลังงานของสายอากาศไมโครสตริป.....	25
3.3 สายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป (microstrip array antenna)	25
3.3.1 ลักษณะการป้อนของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป (แบบเก่า)	
1) การป้อนของสายอากาศแถวลำดับแบบอนุกรม (series feed)	26
2) การป้อนของสายอากาศแถวลำดับแบบขนาน (parallel feed)	26
3.4 ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า	
3.4.1 คำจำกัดความ โครงสร้าง และพารามิเตอร์ของโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า..	27
3.5 คุณสมบัติของอภิวัดสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านสายอากาศ.....	30
3.6 สรุป.....	32
4 การจำลองและออกแบบระบบป้อนใหม่	
4.1 กล่าวนำ.....	33
4.2 จำลองสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปโดยการป้อนกำลังงานด้วยสายเฟสแบบเก่า.....	35
4.3 จำลองตัวกระตุ้นสัญญาณด้วยตัวป้อนแบบไดโพลแบบโบว์ไท (bow-ties dipole).....	37
4.3.1) ความยาวของไดโพลแบบโบว์ไท (l _{bowtie})	38
4.3.2) ขนาดความกว้างส่วนปลายของแขนไดโพลแบบโบว์ไท (w _{bowtie}).....	40
4.3.3) ความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพลแบบโบว์ไท (w _{bot}).....	40
4.3.4) ความหนาของไดโพลแบบโบว์ไท (t _{bow}).....	41
4.3.5) ระยะห่างระหว่างแขนของไดโพลแบบโบว์ไท (d _{feed}).....	43
4.4 พิจารณาผลการจำลองตัวกระตุ้นกำลังงานด้วยตัวกระตุ้นไดโพลแบบโบว์ไท (Bowtie Dipole) ร่วมกับ EBG.....	47
4.4.1) จำลอง EBG 1 unit วางตำแหน่งกึ่งกลางของระนาบกราวด์.....	47

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4.2) จำลอง EBG 2 unit วางตำแหน่งกึ่งกลางของระนาบกราวด์.....	54
ก) พิจารณาความสูงระหว่างไดโพลแบบ โบว์ไทท์กับ EBG ที่เหมาะสม.....	54
ข) พิจารณาช่องว่างระหว่างหน่วยเซลล์ (g_unit) ที่เหมาะสม.....	59
4.5 สายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป 2x4 อีลิเมนต์ โดยการป้อนกำลังด้วยตัวป้อนแบบใหม่.....	63
4.6 สรุป.....	70
5 สร้างและทดสอบสายอากาศด้วยระบบป้อนแบบใหม่	
5.1 กล่าวนำ.....	72
5.2 ขั้นตอนการสร้างระบบป้อนแบบใหม่.....	72
5.3 ผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ	
5.3.1 ความกว้างแถบและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (s11).....	73
5.3.2 อัตราขยาย (gain).....	75
5.3.3 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (radiation pattern).....	77
5.4 สรุป.....	78
6 สรุปและข้อเสนอแนะ	
6.1สรุป.....	80
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทาทพัฒนา.....	83
บรรณานุกรม.....	84
ภาคผนวก ก บททความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	88
ประวัติผู้วิจัย.....	89

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สรุปงานปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบป้อน.....6
3.1	ข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของสายอากาศไมโครสตริป.....22
4.1	ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของ EBG.....48
4.2	สรุปพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของระบบป้อนใหม่ด้วยไดโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG.....62
4.3	แสดงความกว้างแถบ โดยเปรียบเทียบความสูงกับระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์.....65
4.4	แสดงอัตราขยายของสายอากาศโดยเปรียบเทียบความสูงกับระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์.....66
4.5	เปรียบเทียบอัตราขยายและความกว้างแถบสำหรับการป้อนแต่ละแบบ.....69
4.6	สรุปแบบรูปการแผ่กำลังงานจากการป้อนด้วยสายเฟสและระบบป้อนแบบใหม่.....70
5.1	ค่าคุณลักษณะของสายอากาศจากลักษณะการป้อนแบบเก่าและแบบใหม่.....76



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างการป้อนผ่านจุดร่วมแบบเครือข่ายของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป 4x4 อีลิเมนต์.....	12
2.2 โครงสร้างการป้อนผ่านจุดร่วมแบบเครือข่ายของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป	12
2.3 โครงสร้างการป้อนการเหนี่ยวนำจากอีกด้านของกราวด์ของแผ่นวงจรพิมพ์.....	13
2.4 การป้อนจากเหนี่ยวนำของแถวลำดับแพทช์รูปสี่เหลี่ยม 2x2 อีลิเมนต์.....	14
2.5 การป้อนด้วยการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยร่องแถวลำดับร่วมกับโครงสร้างตัวสะท้อนคู่ ด้วยเทคนิคช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าแบบหนึ่งมิติ.....	15
2.6 การป้อนด้วยการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยร่องแถวลำดับร่วมด้วยเทคนิค FSS และโพรง ฟาบรี-เปโฌ.....	15
2.7 การป้อนด้วย (ก) การเหนี่ยวนำจากช่อง (ข) การเหนี่ยวนำจากช่องเสริมด้วยช่องว่างแถบ แม่เหล็กไฟฟ้า โครงสร้างคล้ายดอกเห็ด.....	16
2.8 การป้อนผ่านท่อนำคลื่นและส่งผ่านช่องแถวลำดับ.....	17
2.9 การป้อนกำลังงานผ่านท่อนำคลื่นและส่งผ่านช่องแถวลำดับ.....	17
2.10 แสดงโครงสร้างการป้อนผ่านท่อนำคลื่น.....	17
2.11 การวางชั้นแผ่นกราวด์โลหะกับแผ่น EBG.....	18
2.12 รูปร่าง FSS แต่ละยูนิต ชั้นบน (ซ้าย) และชั้นล่าง (ขวา).....	18
2.13 ตำแหน่งในการป้อนแบบหลายแหล่งจ่าย.....	18
2.14 แผนผังการพัฒนาและปรับปรุงระบบการป้อนกำลังงานสำหรับสายอากาศแถวลำดับ ไมโครสตริป.....	19
3.1 สายอากาศเส้นลวดบนระนาบกราวด์ EBG.....	22
3.2 สายอากาศไมโครสตริปพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก.....	23
3.3 แสดงกระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก.....	24
3.4 การป้อนกำลังงานสายอากาศไมโครสตริป.....	25
3.5 แสดงระบบป้อนแบบอนุกรม.....	26

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 แสดงระบบป้อนแบบขนาน	27
3.7 EBG แบบ 3 มิติ.....	28
3.8 EBG แบบ 2 มิติ.....	28
3.9 พารามิเตอร์และรูปแบบของค่าเหนี่ยวนำและค่าความจุของ โครงสร้าง EBG.....	29
3.10 แหล่งกำเนิดอยู่ในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์และแบบจำลองเมื่อใช้กับ สายอากาศ	31
4.1 แสดงโครงสร้างสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปจำนวน 2 x 4 อีลิเมนต์ด้วยป้อนแบบสายเฟส.....	35
4.2 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับและความกว้างแถบของสายอากาศแถว ลำดับไมโครสตริปจำนวน 2x4 อีลิเมนต์โดย การป้อนกำลังด้วยสายเฟส	36
4.3 แบบรูปการแผ่กำลังงานระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) ของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปจำนวน 2x4 อีลิเมนต์	36
4.4 แสดงแบบจำลองอัตราของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปจำนวน 2x4 อีลิเมนต์ และแบบรูปการแผ่กำลังงานในลักษณะสามมิติ.....	37
4.5 โครงสร้างของไดโพลแบบ โบว์ไท (bow-tie dipole).....	38
4.6 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ จากการปรับความยาวไดโพลแบบ โบว์ไท ..	39
4.7 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับจากค่าความยาวไดโพลแบบ โบว์ไท เท่ากับ 3.90 มิลลิเมตร.....	39
4.8 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับจากความกว้างไดโพลแบบ โบว์ไท.....	40
4.9 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพล แบบโบว์ไท.....	41
4.10 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพล แบบโบว์ไทเท่ากับ 0.9 มิลลิเมตร	41
4.11 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความหนาไดโพลแบบ โบว์ไท	42
4.12 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความหนาไดโพลแบบ โบว์ไทเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของระยะห่างระหว่างแกนไดโพลแบบ โบว์ไท่	43
4.14 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของระยะห่างระหว่างแกนไดโพล แบบ โบว์ไท่ เท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร	44
4.15 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของระยะห่างระหว่างแกนไดโพลแบบ โบว์ไท่ เท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร	44
4.16 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความยาวไดโพลแบบ โบว์ไท่	45
4.17 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความยาวไดโพลแบบ โบว์ไท่เท่ากับ 4.7625 มิลลิเมตร	45
4.18 แสดงความกว้างแถบของความยาวไดโพลแบบ โบว์ไท่	46
4.19 แบบรูปการแผ่กำลังงานระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) ของไดโพลแบบ โบว์ไท่	46
4.20 แสดงค่าอัตราขยายของไดโพลแบบ โบว์ไท่	47
4.21 แสดงโครงสร้างตัวป้อนสัญญาณ ไดโพลแบบ โบว์ไท่ร่วมกับ EBG	48
4.22 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความสูงระหว่างโบว์ไท่กับ EBG	49
4.23 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับจากการปรับขนาด EBG	50
4.24 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของรัศมีตัวเชื่อม	50
4.25 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของช่องว่างระหว่างเซลล์	51
4.26 แสดงค่าโครงสร้างตัวป้อนไดโพลแบบ โบว์ไท่ร่วมกับ EBG 1 หน่วย	52
4.27 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของตัวป้อนไดโพลแบบ โบว์ไท่ ร่วมกับ EBG 1 หน่วย	52
4.28 แสดงค่าความกว้างแถบของตัวป้อนไดโพลแบบ โบว์ไท่ร่วมกับ EBG 1 หน่วย	53
4.29 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังงานระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) ของตัวป้อนไดโพลแบบ โบว์ไท่ร่วมกับ EBG 1 หน่วย	54
4.30 แสดงอัตราขยายของตัวป้อนไดโพลแบบ โบว์ไท่ร่วมกับ EBG 1 หน่วย	54
4.31 แสดงความสูงระหว่างไดโพลแบบ โบว์ไท่กับ EBG	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 แสดงความกว้างแถบตัวป้อน เมื่อความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทก์กับ EBG เท่ากับ 9 มิลลิเมตร (0.3λ).....	55
4.33 แสดงความกว้างแถบตัวป้อน เมื่อความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทก์กับ EBG เท่ากับ 9 มิลลิเมตร (0.75λ).....	56
4.34 แสดงอัตราขยายของความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทก์กับ EBG เท่ากับ 0.3λ	56
4.35 แสดงอัตราขยายของความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทก์กับ EBG เท่ากับ 0.75λ	57
4.36 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับจากความสูงของไดโพลแบบโบว์ไทก์กับ EBG.....	57
4.37 แสดงความกว้างแถบของไดโพลแบบโบว์ไทก์กับ EBG ที่ความสูงเท่ากับ 22 มิลลิเมตร.....	58
4.38 แสดงอัตราขยายของไดโพลแบบโบว์ไทก์กับ EBG ที่ความสูง 22 มิลลิเมตร.....	58
4.39 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังงานระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็กของไดโพลแบบโบว์ไทก์กับ EBG ที่ความสูงเท่ากับ 22 มิลลิเมตร	59
4.40 โครงสร้าง EBG 2 หน่วยเซลล์	59
4.41 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของช่องว่างระหว่าง EBG 2 หน่วย	60
4.42 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังงานระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของช่องว่างระหว่างหน่วยเซลล์	60
4.43 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังงานระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็กของระยะห่างช่องว่างหน่วยเซลล์ของ EBG เท่ากับ 20 มิลลิเมตร.....	61
4.44 แสดงอัตราขยายและแบบรูปการแผ่กำลังงานแบบสามมิติ.....	62
4.45 แสดงโครงสร้างสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป จำนวน 2×4 อีลิเมนต์ ร่วมกับตัวป้อนแบบใหม่	63
4.46 แสดงผลการจำลองค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับด้วยระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์ (d_{MSA}) เท่ากับ 3.75 มิลลิเมตร ($\lambda/8$).....	64
4.47 แสดงผลการวัดค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับด้วยระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์ (d_{MSA}) เท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร ($\lambda/4$)	64
4.48 แสดงผลการวัดค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับด้วยระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์ (d_{MSA}) เท่ากับ 15 มิลลิเมตร ($\lambda/2$).....	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.49 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับจากความสูงและระยะห่างเท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร	67
4.50 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับด้วยระยะระหว่างอีลิเมนต์จาก 8.4375 ถึง 14.140625 มิลลิเมตร	67
4.51 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับเมื่อ h_{MSA} เท่ากับ 7.5 มิลลิเมตรและ d_{MSA} เท่ากับ 9.375 มิลลิเมตร	68
4.52 ผลการจำลองค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของการป้อนแบบเก่าและระบบป้อนแบบใหม่.....	68
4.53 แบบรูปการแผ่กำลังงานระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของการป้อนแบบเก่าและระบบป้อนแบบใหม่.....	69
4.54 แสดงอัตราขยายแบบรูปการแผ่กำลังงานแบบ 3 มิติ	69
5.1 ตัวกระตุ้นสัญญาณโคโพลแบบ โบว์ไท.....	73
5.2 ต้นแบบระบบป้อนแบบใหม่สำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป 2x4 อีลิเมนต์	73
5.3 แสดงความกว้างแถบและค่าการสูญเสียกำลังงานย้อนกลับ	74
5.4 เปรียบเทียบค่าการสูญเสียกำลังงานย้อนกลับ (s11) สำหรับระบบป้อนแบบเก่าและระบบป้อนแบบใหม่ (จากการจำลองและการวัดทดสอบ).....	75
5.5 ลักษณะการวางตัวของสายอากาศเพื่อทดสอบอัตราขยาย	75
5.6 ผลการวัดกำลังงานภาครับของสายอากาศจากการป้อนสัญญาณด้วยระบบป้อนแบบใหม่...76	76
5.7 ลักษณะการวางตัวของสายอากาศเพื่อวัดแบบรูปการแผ่กำลังงาน	77
5.8 แบบรูปการแผ่กำลังงาน (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก.....	77
5.9 แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศจากการป้อนกำลังงานด้วยระบบป้อนใหม่	78
5.10 แสดงอิมพอดแดนซ์ของสายอากาศจากการป้อนกำลังด้วยระบบป้อนใหม่.....	78
6.1 เทคนิคการป้อนการป้อนกำลังสำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการพัฒนาและเติบโตของระบบการสื่อสารไร้สายมีมาอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดความท้าทายต่อนักวิจัยด้านสายอากาศในการพัฒนาหรือวิจัยเพื่อปรับปรุงสายอากาศเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การประยุกต์ใช้งานของสายอากาศด้านการสื่อสารไร้สายที่จำเป็นต้องใช้โครงสร้างสายอากาศที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานในด้านนั้นๆ อาทิเช่น สายอากาศสำหรับการให้บริการอินเทอร์เน็ตไร้สายความเร็วสูง (wimax application) สายอากาศสำหรับย่านความถี่ Ku หรือ อุปกรณ์ชุดทดลองประสิทธิภาพของสายอากาศ ณ ความถี่ 10 GHz หรือย่านความถี่ x-band (ช่วงความถี่ 8 GHz -12 GHz) เป็นต้น ซึ่งมีความหลากหลายของระบบการป้อนกำลังให้กับสายอากาศ เมื่อพิจารณาคูณสมบัติของระบบการป้อน (feed system) ของสายอากาศที่ดีนั้น จะต้องป้อนกำลังให้แก่สายอากาศได้แบบสมบูรณ์ เพื่อกระตุ้นให้สายอากาศทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ระบบป้อน จึงถือเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศโดยตรง โดยมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องออกแบบระบบป้อนให้เหมาะสมกับโครงสร้างสายอากาศแต่ละชนิดสำหรับการใช้งานหรือการประยุกต์โครงสร้างให้เหมาะสมกับลักษณะงานในแต่ละด้านดังกล่าว ถึงแม้ว่าจากที่ผ่านมาถึงปัจจุบัน งานวิจัยเพื่อนำเสนอการพัฒนาประสิทธิภาพของสายอากาศในส่วนของระบบป้อนจะมีการนำเสนออยู่เป็นระยะ แต่มีเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการพัฒนาประสิทธิภาพในส่วนอื่นๆ

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ตระหนักถึงความจำเป็นและให้ความสำคัญกับระบบป้อนของสายอากาศ ซึ่งสามารถพัฒนาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศให้ดีขึ้นกว่าการป้อนแบบเก่าหรือแบบเดิมที่มีการใช้งาน โดยอาศัยหลักการป้อนกำลังงานผ่านสายเฟสที่ผ่านๆมา

ซึ่งเมื่อก้าวถึงโครงสร้างสายอากาศที่มีพื้นฐานด้านโครงสร้างที่เรียบง่าย สำหรับสายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศประเภทหนึ่งที่น่าสนใจนำมาประยุกต์ใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สายอย่างกว้างขวาง สืบเนื่องจากลักษณะโครงสร้างของไมโครสตริปที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ไม่ต้านลม ง่ายต่อการนำไปใช้งานและปรับปรุงค่าคุณลักษณะให้เหมาะสมตามลักษณะการใช้งานนั้นๆ สำหรับการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศซึ่งสามารถทำได้โดยง่ายด้วยวิธีการพื้นฐานทั่วไป คือ การนำสายอากาศมาจัดทำแถวลำดับ (antenna array) ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ เพื่อเลือกเป็นสายอากาศสำหรับการออกแบบและพัฒนาระบบป้อนสำหรับโครงสร้างสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปแบบแพทช์ ซึ่งเมื่อก้าวถึงระบบป้อนกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปนั้น มีอยู่ทั้งหมด 4 วิธีด้วยกัน คือ 1) การป้อนแบบเส้นไมโคร

สตริป (strip line feed) 2) การป้อนด้วยสายโคแอกเซียล (coaxial cable feed) หรือโพรบนำสัญญาณ (probe feed) 3) การป้อนแบบเชื่อมต่อ (coupled feed) และ 4) การป้อนแบบช่องเปิด (aperture feed) ซึ่งโดยปกติแล้วจะเกิดการสูญเสียกำลัง (loss power) อันเนื่องจากโครงสร้างระบบป้อนหรือภายในสายส่ง (transmission line) ค่อนข้างสูง

งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบป้อนแบบใหม่สำหรับสายอากาศไมโครสตริปแกลวลำดับ โดยเลือกใช้สายอากาศไมโครสตริปแกลวลำดับ จำนวน 2×4 อิลิมเมนต์ ณ ความถี่ 10 GHz ซึ่งเป็นความถี่การใช้งานย่าน x-band หรือ สำหรับใช้เป็นสายอากาศต้นแบบการป้อนกำลังผ่านสายเฟสแบบเก่ากับการป้อนแบบใหม่ที่ไม่ใช้ผ่านสายเฟส ในการป้อนกำลัง ซึ่งเป็นนวัตกรรมใหม่สำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพการป้อนกำลังของสายอากาศแกลวลำดับไมโครสตริปด้วยเทคนิคช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic band gap หรือ EBG) ซึ่งจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศให้ดีขึ้นในส่วนของ การขจัดคลื่นผิว (surface wave) และเทคนิคการวางตัวของโครงสร้างสายอากาศกับระบบป้อนใหม่ในลักษณะเป็นโพรงฟาบรี-เปโรต์ (fabry-perot cavity resonator : FPC/FPR) ซึ่งสามารถลดค่าการสูญเสีย (loss) จากการป้อนแบบเก่า และควบคุมพูข้าง (side lobe) ให้เหมาะสม อีกทั้งยังสามารถเพิ่มอัตราขยาย (gain) ของสายอากาศให้สูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศแกลวลำดับไมโครสตริปแบบแพทช์ดีกว่าลักษณะการป้อนกำลังแบบเก่า

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลระบบป้อนที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศแกลวลำดับไมโครสตริปแบบแพทช์

1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองผลของระบบป้อนสำหรับสายอากาศแกลวลำดับไมโครสตริปแบบแพทช์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Computer Simulation Technology (CST)

1.2.3 สร้างสายอากาศที่ใช้ระบบป้อนต้นแบบ เพื่อเปรียบเทียบผลของการวัดทดสอบ และผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

1.3.1 ระบบป้อนแบบใหม่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศแกลวลำดับไมโครสตริปแบบแพทช์โดยลดความยุ่งยากและความซับซ้อนของโครงสร้างและการสูญเสียของสัญญาณที่เกิดขึ้นบนสายส่งที่ใช้ป้อนแบบเก่าและเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 งานวิจัยนี้จะพัฒนาระบบป้องกันของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปแบบแพทช์ โดยใช้เทคนิคช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

1.4.2 ศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองผลระบบสายอากาศและระบบป้องกันด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 จำลองผลสำหรับวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปแบบแพทช์ด้วยเทคนิคระบบป้องกันใหม่

1.5.2 วิจัย พัฒนา ออกแบบ และสร้างระบบป้องกันต้นแบบที่สามารถทดแทนระบบป้องกันแบบสายเฟส (phasing line)

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

1. ศึกษาและสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปแบบแพทช์
2. ศึกษาและสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิธีการป้องกันสำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปแบบแพทช์
3. ศึกษาและสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป
4. ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองผลระบบป้องกันสำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป
5. ออกแบบและสร้างระบบป้องกันต้นแบบสำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป
6. วิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบป้องกันใหม่กับระบบป้องกันแบบสายเฟสเดิม
7. จัดทำเล่มวิจัย และปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องของผลงานวิจัย

1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองผล
2. สร้างระบบป้องกันต้นแบบเพื่อวัดทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศด้วยระบบป้องกันใหม่

1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการระบบสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 4 (F4) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 3000

1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC)
2. โปรแกรมสำเร็จรูป CST
3. โปรแกรม MATLAB™
4. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น 8722D

50MHz-40GHz

1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

1. เก็บรวบรวมข้อมูลเทคนิคการป้อนจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
2. เก็บรวบรวมผลจากการจำลองการป้อนของระบบสายอากาศจากโปรแกรมสำเร็จรูป CST
3. เก็บรวบรวมผลที่ได้จากการออกแบบ สร้าง และ วัดทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศด้วยระบบป้อนต้นแบบใหม่

1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศด้วยระบบป้อนใหม่กับระบบป้อนแบบสายเฟสแบบเก่า

1.6.7 การทดสอบสมมุติฐาน

สมมุติฐานที่กำหนดในหัวข้อที่ 1.3 จะได้รับการพิสูจน์ด้วยเทคนิควิธีเฉพาะทางวิศวกรรมที่ได้นำเสนอ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป
- 1.7.2 ได้นวัตกรรมใหม่ของระบบป้อนสำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

วัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยนี้ คือ การออกแบบและสร้างระบบป้อนสำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป โดยพัฒนาระบบป้อนด้วยเทคนิคช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบป้อนแบบใหม่ที่ไม่ต้องใช้สายเฟสซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียภายในสายส่งกำลังงานระหว่างแพทช์ (patch) แต่ละอิลิเมนต์ (element) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องดำเนินการสำรวจและศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการดำเนินการวิจัย ตลอดจนข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อที่จะนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ โดยฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนั้นเป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียงและได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ ฐานข้อมูล IEEE และฐานข้อมูล IEICE และนอกจากนี้ยังได้ทำการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งอื่น ๆ เช่น จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัยต่าง ๆ ทั้งในและต่างประเทศ ผลการสืบค้นที่ได้จะใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบการป้อนของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป รวมถึงระบบการป้อนที่มีการทำงานร่วมกับโครงสร้างแบบต่างๆ เพื่อทำหน้าที่ส่งผ่านหรือเหนี่ยวนำคลื่น เช่น ผ่านร่อง (slot) ผ่านท่อนำคลื่น (waveguide) และ ผ่านโพรง (cavity) เป็นต้น ตลอดจนการใช้โครงสร้างของอภิวัด (metamaterial) เช่น ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic band gap หรือ EBG) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมาพัฒนาระบบป้อนดังกล่าว

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 สายอากาศไมโครสตริปและระบบป้อนกำลังงาน

สายอากาศไมโครสตริป (microstrip antenna) (Jame and Hall, 1989) ประกอบด้วยส่วนที่เป็นแผ่นหรือแพทช์ (patch) ที่เป็นตัวนำ โดยทั่วไปจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือวงกลมซึ่งจะถูกแยกออกจากกันด้วยแผ่นระนาบกราวด์ที่มีความบางซึ่งสอดคล้องและสัมพันธ์กับความยาวคลื่นของความถี่การใช้งานที่ถูกออกแบบ และมีลักษณะเป็นชั้นหรือที่เรียกว่าวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (dielectric substrate) ไมโครสตริปได้รับความนิยมอย่างมากในการใช้งานทางด้านสายอากาศ เนื่องจากมีลักษณะแบนราบ น้ำหนักเบา และมีความสะดวกในการสร้างและการติดตั้งและราคาถูก

สายอากาศไมโครสตริปสามารถทำการป้อนกำลังได้หลายวิธี แต่ที่นิยมมีอยู่ 4 วิธี คือ
1) การป้อนกำลังด้วยเส้นไมโครสตริป (microstrip line feed) 2) การป้อนกำลังด้วยโพรบ (probe feed)

3) การป้อนกำลังด้วยการเชื่อมต่อกับช่องเปิด (aperture-coupling feed) และ 4) การป้อนกำลังด้วยการเชื่อมต่อระยะใกล้ (proximity-coupling feed) (Kuldeep and Gupta, 2013)

สำหรับระบบป้อนกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปได้มีการวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศ เช่น เพิ่มอัตราขยาย ขยายความกว้างแถบ ลดพูซัง เป็นต้น เมื่อพิจารณาเกี่ยวกับระบบป้อนที่ใช้ในการพัฒนาหรือปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศที่ผ่านมา จนถึงปัจจุบัน สามารถกล่าวได้โดยสรุป ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สรุปงานปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบป้อนกำลังสำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป

ปี/ผู้นำเสนอ	เรื่อง	ลักษณะการป้อน	ผลการวิจัย
1995 /A.M. J assim and H.D.Hristov	Cavity feed technique for slot-coupled microstrip Patch array antenna	ใช้เทคนิคการป้อนด้วยท่อนำคลื่นผ่านร่อง	ทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศดีขึ้น โดยที่พูซังต่ำลง
2005 /K.Shambavi, Z. Alex, T. N. Krishna	Design and Analysis of High Gain Millimeter Wave Microstrip Antenna Array for Wireless Application	ใช้เทคนิคการป้อนแบบเครือข่ายด้านเดียวกันแบบจุดร่วมผ่านสายส่งหรือเส้นสตริป	ทำให้อัตราขยายสูงขึ้น
2006 /M. K. A. Rahim', A. Asrokin, M. H. Jamaluddin, M. R. Ahmad, T. Masril and M. Z.A. Abdul Aziz	Microstrip Patch Antenna Array at 5.8 GHz for Point to Point Communication	ใช้เทคนิคการป้อนแบบเครือข่ายด้านเดียวกันแบบจุดร่วมผ่านสายส่งหรือเส้นสตริป	มีค่าสูญเสียย้อนกลับ -30.42 dB และมีอัตราขยายเพิ่มขึ้น

ปี/ผู้นำเสนอ	เรื่อง	ลักษณะการป้อน	ผลการวิจัย
2006 /R. Weily, P. K.P. Esselle, S. Trevor and B.C. Sanders	High Gain Antenna with Improved Radiation Bandwidth using Dual 1- D EBG Resonators and Array Feed	ใช้เทคนิคการป้อน แบบเครือข่ายผ่าน เส้นสตริปและ เหนี่ยวนำผ่านช่อง เปิดแถวลำดับ	ทำให้อัตราขยายสูงขึ้น และสามารถปรับปรุง ความกว้างแถบ
2007 /Y. Li, K.P. Esselle.	Slot-Array-Fed EBG Resonator Antenna with High Gain and Large Bandwidth	ใช้เทคนิคการป้อน แบบร่องแถวลำดับ ของช่องว่างแถบ แม่เหล็กไฟฟ้า มิติเดียว	สามารถลดความกว้าง แถบได้ 8 % มี อัตราขยายเพิ่มขึ้นเป็น 32 dB
2007 /A. Neto et al.	EBG Enhanced Feeds for the Improvement of the Aperture Efficiency of Reflector Antennas	ใช้เทคนิคการป้อน แบบผ่านท่อนำ คลื่น	ทำให้ประสิทธิภาพการ สะท้อนกำลังและการ ป้อนมีค่าสูงขึ้น 80% ความกว้างแถบเพิ่มขึ้น 10%
2009 /D. Serhal, M. Hajj, R. Chantalat, J. Drouet and B. Jecko	Multifed Sectoral EBG Antenna for WiMAX Applications	ใช้เทคนิคการป้อน แบบหลายช่อง ป้อน (Multifed)	ได้ผลการวัดทดสอบ กับผลการจำลองที่ดีขึ้น
2009 /Y. Li, K.P. Esselle	Small EBG resonator high-gain antenna using in-phase highly- reflecting surface	ใช้เทคนิคการป้อน แบบท่อนำคลื่น	ทำให้อัตราขยายสูงและ ความกว้างแถบกว้าง ขึ้น
2010 /A. Kanso et al	Multifeed EBG Dual Band Antenna to Feed a Reflector Antenna	ใช้เทคนิคการป้อน ของสายอากาศ แบบหลายลำคลื่น	มีอัตราขยายสูงขึ้น

ปี/ผู้นำเสนอ	เรื่อง	ลักษณะ การป้อน	ผลการวิจัย
2010 /L. Moustafa and B. Jecko	Design of a Wideband Highly Directive EBG Antenna Using Double-Layer Frequency Selective Surfaces and Multifeed Technique for Application in the Ku-Band	ใช้เทคนิคการป้อนผ่านเส้นสตริปแบบหลายแหล่งจ่าย (Multisource)	ทำให้อัตราขยายสูงขึ้นและความกว้างแถบกว้างขึ้น
2010 /A.Kanso, R. Chantalat, M. Thevenot, T. Monediere and B. Jecko	EBG Dual Band Antenna Using Two Layer FSS to Feed a Reflector Antenna	ใช้เทคนิคการป้อนแบบสี่เหลี่ยมท่อนาคลิ้นและปากแตร	การออกแบบศูนย์กลางเฟสแบบเดียวกันทั้งสองแถบความถี่ทำให้การสะท้อนของสายอากาศดีกว่า
2011 /T.I. Huque, A.A. Chowdhury, K. Hosain and S. Alam	Performance Analysis of Corporate Feed Rectangular Patch Element and Circular Patch Element 4x2 Microstrip Array Antennas	ใช้เทคนิคการป้อนผ่านเส้นสตริปแบบจตุรรม	ทำให้อัตราขยายสูงขึ้นและลดพุงข้าง
2011 /R. Vaidya, K. Gupta, Sanjeev K. Mishra, J. Mukherjee	Effect of Superstrate Height on Gain of MSA Fed Fabry Perot Cavity Antenna	ใช้เทคนิคการป้อนผ่านแพทช์แบบสี่เหลี่ยม	สามารถเพิ่มอัตราขยายได้โดยการปรับความสูงของชั้นวางซ้อนที่เหมาะสม

ปี/ผู้นำเสนอ	เรื่อง	ลักษณะ การป้อน	ผลการวิจัย
2012 /R. Vaidya, K. Mishra, K. Gupta, J.Mukherjee.	Efficient high gain wideband antenna with circular array of square parasitic patches	ใช้เทคนิคการป้อน ผ่านแพทช์แบบ วงกลม	สามารถลดพูข้างได้ 85% โครงสร้างแบน
2012 /K. Lu, Y. ding and K.w. Leung	A New Fabry-Perot Resonator Antenna Fed by an L-Probe	ใช้เทคนิคการป้อน สายอากาศ ด้วย ฟาบรี-เปโร เร โซเนเตอร์	ทำให้อัตราขยายเพิ่มขึ้น
2012 /L.U (L) Kai, L.K. Wa	On the Millimeter-wave Half-loop-fed Fabry- Perot Resonator Antenna	ใช้เทคนิคการป้อน ด้วยฟาบรี-เปโร เรโซเนเตอร์ป้อน โดยสายโคเอ็ก เซียลแบบลูปครึ่ง วงรอบ	ระดับคลอสโพลารไรซ์ ต่ำลงและพูข้างน้อยกว่า โดยป้อนด้วยโพรบรูป ตัวแอล (L)
2013 /K.K. Singh, S.C.Gupta	Review and Analysis of Microstrip Patch Array Antenna with different configurations	ใช้เทคนิคการป้อน ที่อาศัยการ เหนี่ยวนำระหว่าง ด้านกราวด์ของ แผ่นวงจรพิมพ์ไป ยังแพทช์ซึ่งอยู่อีก ระนาบหนึ่ง	สายอากาศที่มีจำนวนอี ลิเมนต์มากกว่าจะมี อัตราขยายดีกว่าแพทช์ แบบเดี่ยว
2014 /M.M.Bilgic and K.Yegin	Low Profile Wideband Antenna Array With Hybrid Microstrip and Waveguide Feed Network for Ku Band	ใช้เทคนิคการป้อน แบบท่อนำคลื่น	ทำให้อัตราขยายเพิ่มขึ้น ที่ 29.4 dBi

ปี/ผู้นำเสนอ	เรื่อง	ลักษณะการป้อน	ผลการวิจัย
	Satellite Reception Systems		
2015 /K. W. Eccleston	Effect of microstrip feeds on half-mode SIW distributed amplifier performance	ใช้เทคนิคการป้อนแบบท่อนำคลื่นครึ่งคลื่น (a half-mode waveguide)	ทำให้อัตราขยายเพิ่มขึ้น
2015 /Veeramani.and R.P. Dwivedi	Comparative Study of Coplanar waveguide Feed and Microstrip Feed for Log Periodic Antennas	ใช้เทคนิคการป้อนแบบท่อนำคลื่นและแบบเส้นไมโครสตริป	ทำให้ประสิทธิภาพของความกว้างแถบจากการป้อนแบบ ท่อนำคลื่นไม่ดี มีค่าน้อยกว่า การป้อนแบบ ไมโครสตริป และมีอัตราขยายไม่สูงทั้งสองแบบ
2015 /R.Raut and K.Talandage	Bandwidth And Gain Enhancement Of Rectangular MSA By Using Parasitic Patch And Capacitive Feeding Technique For Wideband Application	ใช้เทคนิคการป้อนแบบเส้นไมโครสตริป	ทำให้ความกว้างแถบเพิ่มขึ้น 60.75%
2016 /R. Kumar and R.K. Chaudhary	Wideband Circularly Polarized Cubic Dielectric Resonator Antenna Excited With Modified Microstrip Feed	ใช้เทคนิคการป้อนแบบเส้นไมโครสตริป	ทำให้อัตราขยายสูงขึ้น 90.65%

ปี/ผู้นำเสนอ	เรื่อง	ลักษณะการป้อน	ผลการวิจัย
2016 /A.A. Nour1, F.Fezai and T. Monediere	Comparison of Different Feeding Techniques of a Low-Profile Dual-band Circularly Polarized Microstrip Antenna	เปรียบเทียบการป้อน 3 แบบ คือ การป้อนแบบปากแตรเดี่ยว การป้อนแบบปากแตรคู่ และการป้อนแบบสายโคเอ็กซ์เชียลคู่	การป้อนแบบปากแตรเดี่ยว มีความกว้างแถบที่ดีที่สุด การป้อนแบบปากแตรคู่ มีประสิทธิภาพดีลำดับถัดมา และการป้อนแบบสายโคเอ็กซ์เชียลคู่ มีประสิทธิภาพต่ำสุด
2016 /G.C. Huang, M. F. Iskander, M.H. Antenna	A Wideband Circularly Polarized Stacked Patch Antenna Array and Feed System	การป้อนแบบผ่านแพทช์แบบวงกลมคู่	ผลการวิจัย ทำให้อัตราขยายเพิ่มขึ้น
2016 /G. Das, A. Sharma, R. K. Gangwar	Two Elements Dual Segment Cylindrical Dielectric Resonator Antenna Array with Annular Shaped Microstrip Feed	ใช้เทคนิคการป้อนแบบเครือข่าย	ทำให้ความกว้างแถบเพิ่มขึ้น

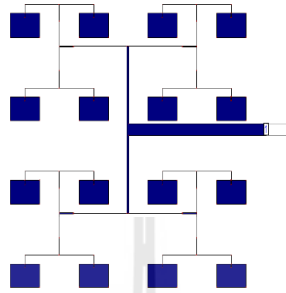
2.2.2 เทคนิคและรูปแบบวิธีการป้อนสำหรับสายอากาศแกลวลำดับไมโครสตริป

เมื่อได้พิจารณาแบ่งหัวข้อตามเทคนิคหรือรูปแบบวิธีการป้อนด้วยลักษณะตามโครงสร้างของสายอากาศ

1) เทคนิคการป้อนด้วยสายเฟสหรือสายไมโครสตริป (phasing line)

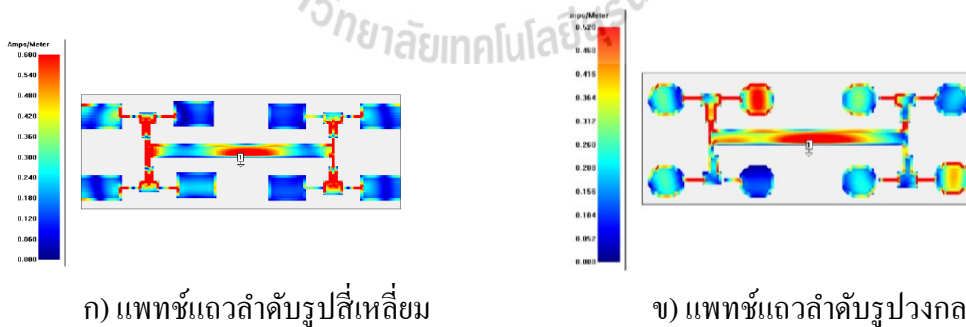
ระบบป้อนกำลังงานด้วยเทคนิคสายเฟสหรือสายไมโครสตริป เป็นเทคนิคที่ใช้กันมาอย่างต่อเนื่องโดยตลอดในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เนื่องด้วยลักษณะด้าน โครงสร้างของสายอากาศ จึงทำให้มีความง่ายในการออกแบบ คือ ใช้ตัวป้อนแบ่งกำลัง (power divider) จากตำแหน่งจุดป้อนแรก ผ่านสายส่งหรือสายไมโครสตริปไปยังแพทช์ อีลิเมนต์อื่น ๆ ที่จัดแกลวลำดับ Shambavi, Alex and Krishna (2005-2009) ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแกลวลำดับไมโครสตริปเพื่อเพิ่มอัตราขยาย

โดยพิจารณาและวิเคราะห์ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปจากการนำมาแถวจัดลำดับจำนวน 2x2, 4x4 และ 8x8 อีลิเมนต์ ซึ่งได้ออกแบบและจำลองด้วยโปรแกรม IE3D พบว่าสำหรับอีลิเมนต์ 8x8 ให้อัตราขยายเท่ากับ 18.43 dBi และความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 10.49 องศา โดยใช้มีลักษณะการป้อนผ่านจตุรร่วมแบบเครือข่าย (corporate feed network) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



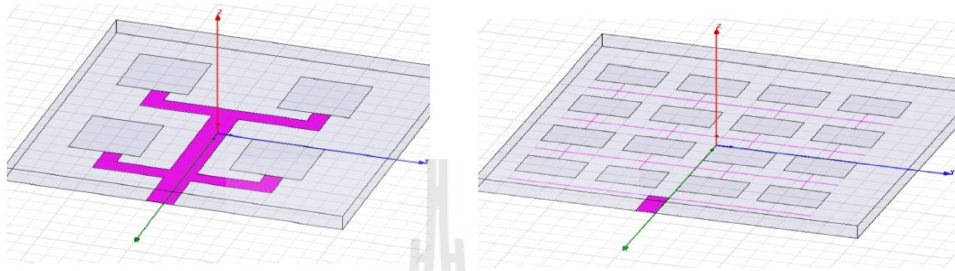
รูปที่ 2.1 โครงสร้างการป้อนผ่านจตุรร่วมแบบเครือข่ายของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป 4x4 อีลิเมนต์

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้อนกำลังผ่านจตุรร่วมแบบเครือข่ายของสายอากาศแบบแถวลำดับไมโครสตริปของแพทช์รูปสี่เหลี่ยมและแพทช์รูปวงกลม พบว่าแถวลำดับไมโครสตริปของแพทช์รูปวงกลม มีข้อได้เปรียบบางอย่าง เช่น มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ทิศทางการสะท้อนที่สูงขึ้น และจากการวิจัย ได้สายอากาศที่มีอัตราขยายเพิ่มขึ้น ลดพูน้าง การออกแบบแสดงดังรูปที่ 2.2 (TanvirAl-Amin Chowdhury Kamal, Shah, 2011)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างการป้อนผ่านจตุรร่วมแบบเครือข่ายของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป ก) แพทช์รูปสี่เหลี่ยมและ ข) แพทช์รูปวงกลม

Singh and Gupta (2013) ได้นำเสนอการป้อนที่อาศัยการเหนี่ยวนำระหว่างด้านกราวด์ของแผ่นวงจรพิมพ์ไปยังแพทช์ที่อยู่อีกระนาบหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยได้วิเคราะห์สายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ที่มีอีลิเมนต์แตกต่างกัน พบว่าสายอากาศที่มีจำนวนอีลิเมนต์มากกว่าจะมีอัตราขยายดีกว่าแพทช์แบบเดี่ยว

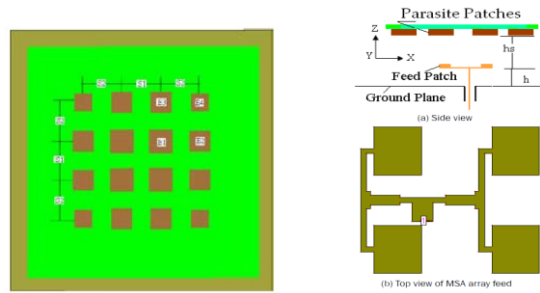


รูปที่ 2.3 โครงสร้างการป้อนการเหนี่ยวนำจากอีกด้านของกราวด์ของแผ่นวงจรพิมพ์

ปัจจุบันเทคนิคการป้อนด้วยสายเฟสสำหรับโครงสร้างของสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์ มีวิธีการป้อนได้สองวิธี คือ การป้อนผ่านจุดร่วมแบบเครือข่ายในด้านเดียวกันและการป้อนผ่านจุดร่วมแบบเครือข่ายอีกด้านหนึ่ง โดยอาศัยการเหนี่ยวนำระหว่างสายส่งกับแพทช์

2) เทคนิคการป้อนด้วยสายเฟสและการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยแถวลำดับไมโครสตริป

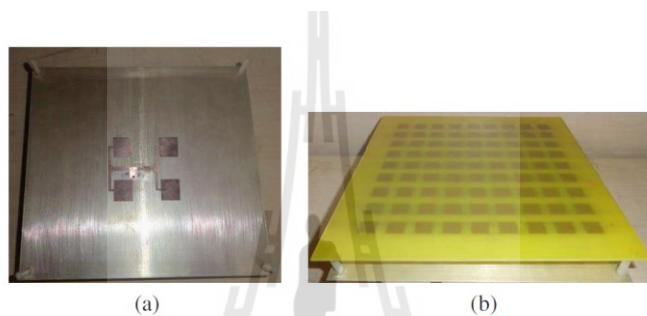
Rajashree และคณะ (2011 และ 2012) ได้นำเสนอการป้อนกำลังจากการเหนี่ยวนำด้วยแพทช์แถวลำดับตัวป้อนรูปสี่เหลี่ยม 2×2 อีลิเมนต์ โดยศึกษาความสูงที่เหมาะสมระหว่างระนาบกราวด์กับแพทช์แถวลำดับตัวป้อน (h) และความสูงที่เหมาะสมระหว่างแพทช์แถวลำดับตัวป้อนกับแพทช์ปรสิตด้านบน (h_s) ซึ่งทำหน้าที่ในการแผ่กระจายคลื่น ดังรูปที่ 2.4 พบว่าแพทช์แถวลำดับตัวป้อนจะเสมือนถูกวางในโพรงฟาบรี-เปโร (fabry-perot cavity หรือ FPC) ซึ่งความสูงของโพรงฟาบรี-เปโร มีผลต่ออัตราขยายของสายอากาศ



(ก) ลักษณะ โครงสร้าง (Rajashree, Shishir and Rajiv, 2011)

รูปที่ 2.4 การป้อนจากเหนืยวนำของแถวลำดับแพทช์รูปสี่เหลี่ยม 2x2 อีลิเมนต์

(ก)

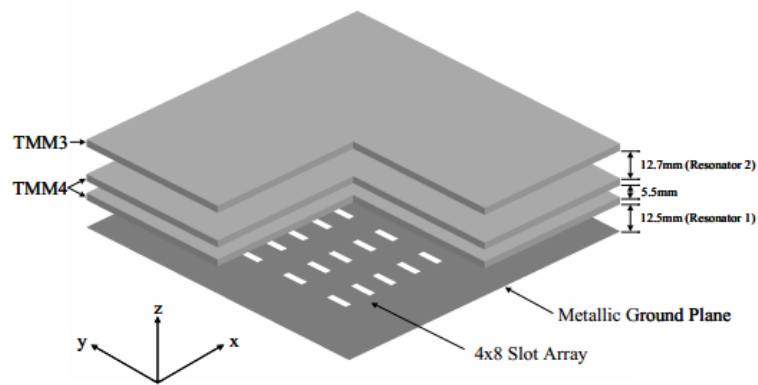


(ข) ชิ้นงานต้นแบบ (A. R. Vaidya, Rajiv, S. K. Mishra, and J. Mukherjee, 2012)

รูปที่ 2.4 การป้อนจากเหนืยวนำของแถวลำดับแพทช์รูปสี่เหลี่ยม 2x2 อีลิเมนต์ (ต่อ)

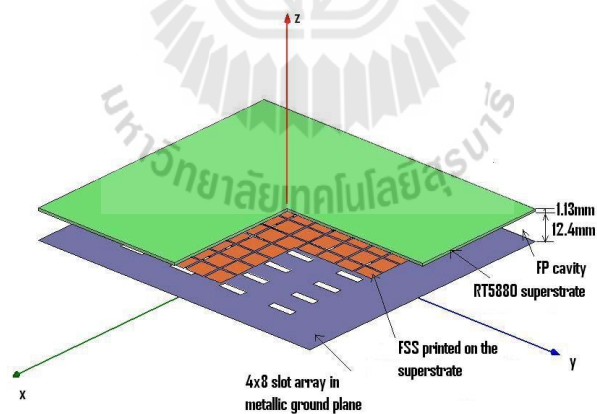
3) เทคนิคการป้อนด้วยการเหนืยวนำระหว่างชั้นด้วยร่อง ท่อนำคลื่น และโพรง

การประยุกต์โครงสร้างในส่วนของกรเหนืยวนำจากร่องแถวลำดับ Andrew และคณะ (2006) ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแถวลำดับ ไมโครสตริปโดยการป้อนแบบเครือข่าย (feed network) ผ่านช่องแถวลำดับจำนวนสามสิบสองช่องร่วมกับ โครงสร้างตัวสะท้อนคู่ด้วยเทคนิคช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าหนึ่งมิติ แสดงดังรูปที่ 2.5 ทำให้อัตราขยายเพิ่มขึ้นจาก 23 dBi. เป็น 27 dBi.



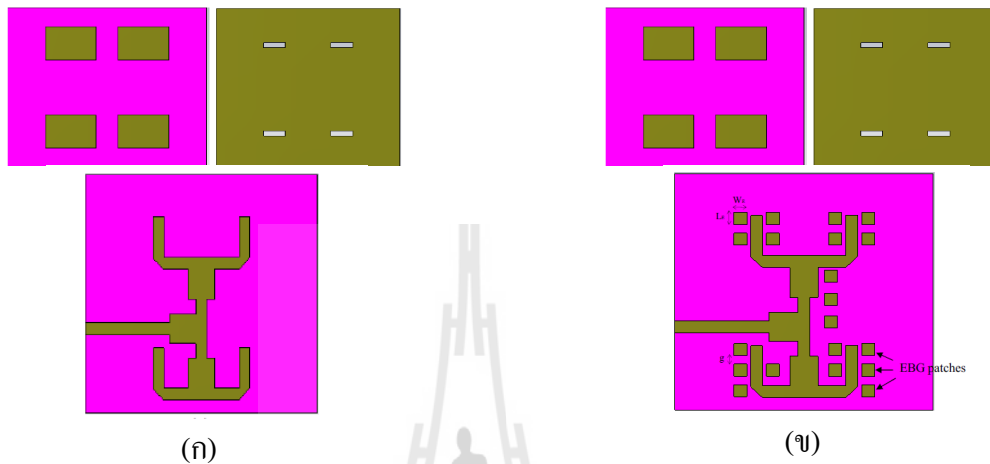
รูปที่ 2.5 การป้อนด้วยการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยร่องแถวลำดับร่วมกับโครงสร้างตัวสะท้อนคู่ด้วยเทคนิคช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าแบบหนึ่งมิติ

ต่อมาในปี 2007 Yading และ Karu พัฒนาการป้อนแบบร่องแถวลำดับโดยใช้ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ 1 มิติ มีอัตราขยายสูงและให้ความกว้างแถบกว้าง ในงานวิจัยนี้นำเสนอการลดความสูงของโครงสร้างสายอากาศด้วยเทคนิค FSS (frequency selective surface) และโพรงฟาบรี-เปโซ ซึ่งยังคงให้อัตราขยายที่ดีและความกว้างแถบตามที่ต้องการ โดยสามารถเพิ่มความกว้างแถบได้ 8 % มีอัตราขยายเพิ่มขึ้นเป็น 32 dB ดังรูปที่ 2.6



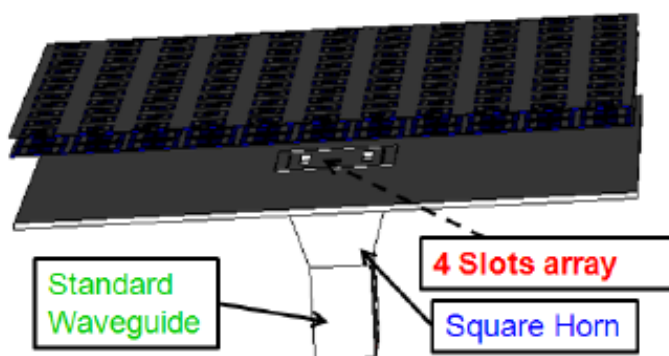
รูปที่ 2.6 การป้อนด้วยการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยร่องแถวลำดับร่วมด้วยเทคนิค FSS และโพรงฟาบรี-เปโซ

ปี 2012 มีการนำเสนอการออกแบบโครงสร้างสายอากาศแถวลำดับ 2×2 อีลิเมนต์ โดยใช้เทคนิคการป้อนด้วยการเหนี่ยวนำจากช่อง ซึ่งได้ใช้ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าแบบโครงสร้างคล้ายดอกเห็ดวางเสริมในชั้นเดียวกันกับสายป้อนหรือสายไมโครสตริป ทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับดีขึ้นและอัตราขยายเพิ่มขึ้น (Alias et al., 2012) แสดงดังรูปที่ 2.7

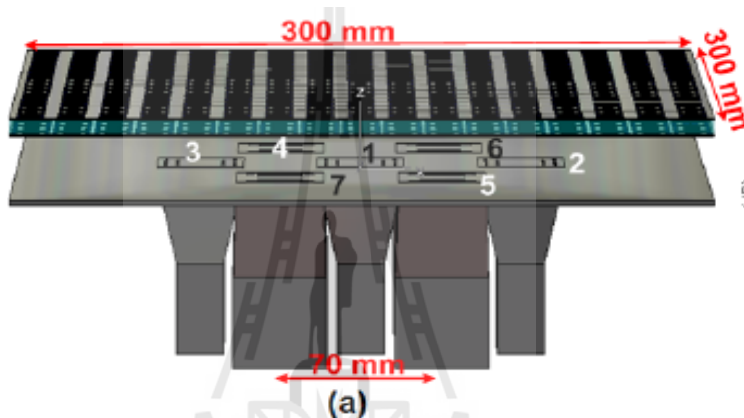


รูปที่ 2.7 การป้อนด้วย (ก) การเหนี่ยวนำจากช่อง (ข) การเหนี่ยวนำจากช่องเสริมด้วยช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าโครงสร้างคล้ายดอกเห็ด

สำหรับการป้อนกำลังผ่านท่อนำคลื่น (waveguide) หรือช่องเปิด (aperture) มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง คือ ในปี 2010 Kanso และคณะ ได้นำเสนอการป้อนกำลังผ่านท่อนำคลื่นและส่งผ่านช่องแถวลำดับเพื่อเหนี่ยวนำคลื่นด้วยระยะความสูงระหว่างโครงสร้างของช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ากับระนาบช่องแถวลำดับที่เหมาะสม สำหรับประยุกต์ใช้กับสายอากาศแบบหลายลำคลื่น แสดงดังรูปที่ 2.8 และต่อมา ปี 2011 Kanso และคณะ ได้พัฒนาต่อผลงานวิจัยดังกล่าว โดยนำเสนอลักษณะการป้อนกำลังของสายอากาศแบบหลายลำคลื่นให้เป็นการป้อนแบบหลายช่อง (multifeed) โดยการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างการป้อนกำลัง แสดงดังรูปที่ 2.9 นอกจากนี้ Serhal และคณะ (2009) ได้นำเสนอการออกแบบการป้อนกำลังแบบหลายช่องป้อนโดยผ่านท่อนำคลื่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศ สำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านเครือข่ายบริการอินเทอร์เน็ตไร้สายความเร็วสูง (wimax application)

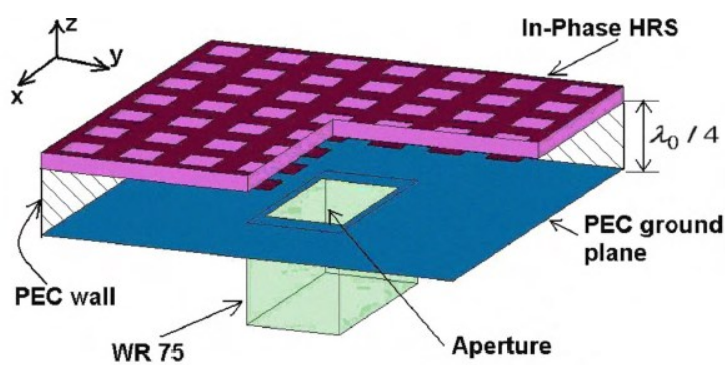


รูปที่ 2.8 การป้อนผ่านท่อนำคลื่นและส่งผ่านช่องแฉวลำดับ



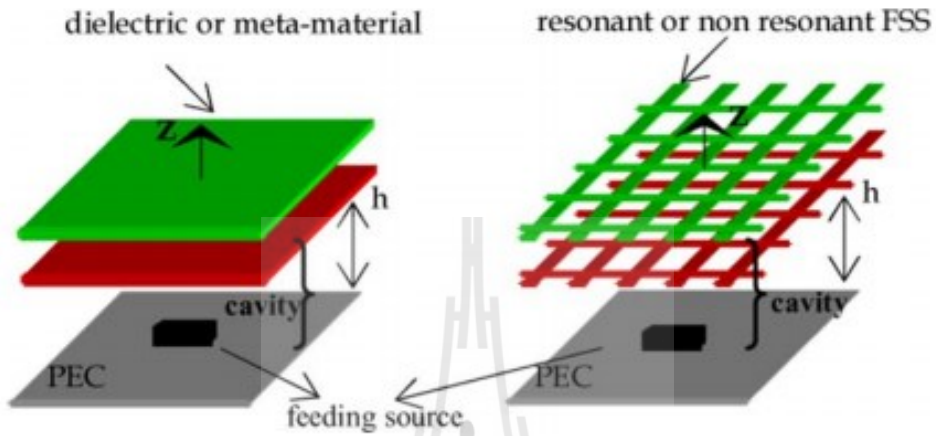
รูปที่ 2.9 การป้อนกำลังผ่านท่อนำคลื่นและส่งผ่านช่องแฉวลำดับ

ในปี 2009 Yading และ Karu ได้นำเสนอการใช้เทคนิคด้านคุณสมบัติของ HRS (Highly Reflecting Surface) เพื่อออกแบบสายอากาศแบบสองชั้นสำหรับสายอากาศช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีโครงสร้างคล้ายดอกเห็ด ส่งผลให้ได้ความกว้างแถบที่กว้างขึ้น โดยใช้การป้อนผ่านท่อนำคลื่น ดังโครงสร้างแสดงในรูปที่ 2.10

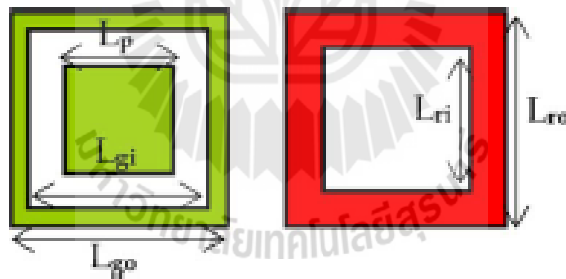


รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างการป้อนผ่านท่อนำคลื่น

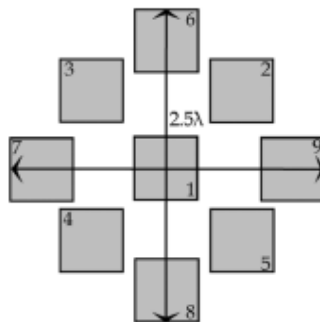
ในปี 2010 Lina และ Bernard ได้วิจัยการนำเทคนิคช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อเพิ่มอัตราขยายและความกว้างแถบเพิ่มขึ้น โดยใช้เทคนิคการป้อนจากหลายแหล่งจ่ายร่วมกับ FSS สองชั้นสำหรับย่านความถี่ Ku โดยมีลักษณะการวางชั้นแผ่นกราวด์โลหะกับแผ่น EBG ดังรูปที่ 2.1 และ 2.12 ซึ่งลักษณะตำแหน่งในการวางบนระนาบกราวด์แสดงได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.11 การวางชั้นแผ่นกราวด์โลหะกับแผ่น EBG



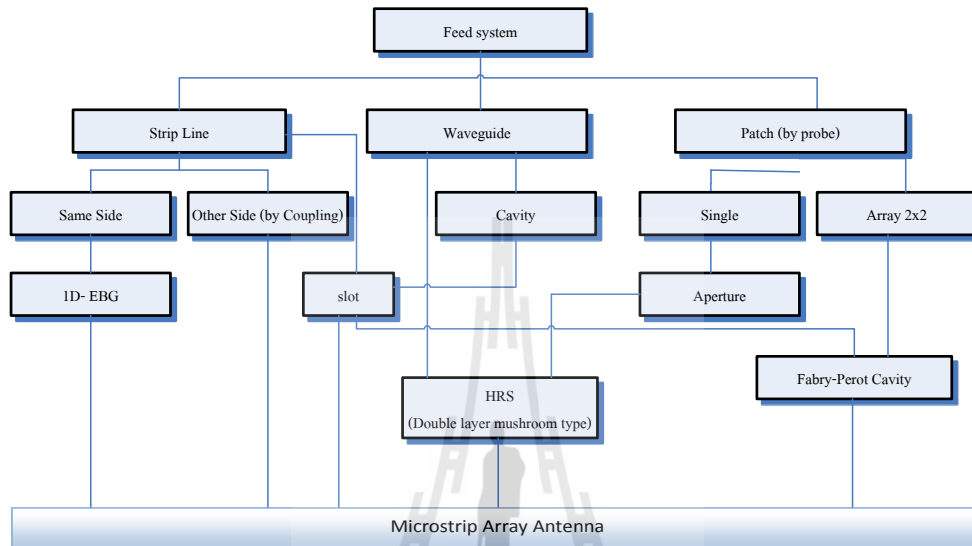
รูปที่ 2.12 รูปร่าง FSS แต่ละยูนิต ชั้นบน (ซ้าย) และชั้นล่าง (ขวา)



รูปที่ 2.13 ตำแหน่งในการป้อนแบบหลายแหล่งจ่าย

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมสามารถสรุปการป้อนกำลังสำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างของระบบป้อนของสายอากาศ สามารถสรุปได้ดังแผนผังในรูปที่

2.14



รูปที่ 2.14 แผนผังการพัฒนาและปรับปรุงระบบการป้อนกำลังสำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป

2.3 สรุป

ในงานวิจัยด้านสายอากาศโดยทั่วไปนั้นมีการพัฒนา ปรับปรุง และประยุกต์เทคนิคต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบสายอากาศให้ดียิ่งขึ้น อาทิเช่น อัตราขยายที่เพิ่มขึ้น ความกว้างแถบที่เพิ่มขึ้น หรือระดับของพู่ซังที่ลดลง และเมื่อพิจารณาถึงระบบป้อนกำลังงานของสายอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปที่กำลังนิยมนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในระบบการสื่อสารไร้สาย พบว่าเทคนิคการป้อนกำลังด้วยการกระตุ้นสัญญาณโดยตรงผ่านสายส่งหรือกระตุ้นผ่านโพรบที่ส่งผ่านสัญญาณไปยังสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปโดยการแบ่งกำลังของสายเฟส (phasing line) ซึ่งมีข้อจำกัดในเรื่องของการสูญเสียภายในสายเฟสดังกล่าว อีกทั้งอาจส่งผลให้ความกว้างแถบลดลง จึงได้มีการพัฒนาโครงสร้างสำหรับระบบป้อนกำลังงานให้ใช้สายเฟสน้อยลงและได้นำเทคนิคการเหนี่ยวนำด้วยโครงสร้างต่าง ๆ ได้แก่ การเหนี่ยวนำผ่านร่อง การกระตุ้นผ่านท่อนำคลื่น

หรือการสะท้อนคลื่นด้วยโพรงฟาบริ-เปโซ แต่ก็ยังไม่สามารถแก้ปัญหาคาร์บอนไดออกไซด์ในสายหรือการสูญเสียอันเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำจากช่องหรือความสูงของโพรงได้เลย

สำหรับแนวทางหรือสมมติฐานในงานวิจัยนี้ คือ การพัฒนาระบบป้อนกำลังงานเพื่อลดการสูญเสียภายในสายเฟส โดยอาจจะพัฒนาร่วมกับเทคนิคของ EBG ที่มีคุณสมบัติเป็นอภิวัดมาปรับปรุงโครงสร้าง เพื่อให้ระบบป้อนมีโครงสร้างที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสำหรับการจ่ายกำลังงาน ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องไว้ในบทที่ 3 ต่อไป



บทที่ 3

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

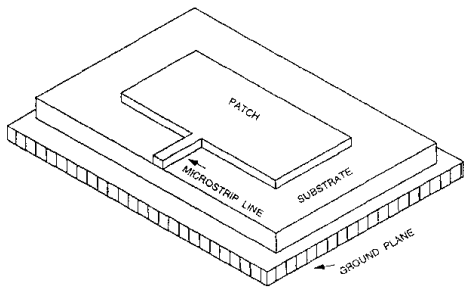
3.1 บทนำ

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศแกลวลำดับไมโครสตริปและโครงสร้างของ EBG สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบป้องกันกำลังงานที่เหมาะสมเพื่อลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากสายเฟส ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะแบ่งออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ได้ดังนี้ (1) ลักษณะโครงสร้างและการทำงานของสายอากาศไมโครสตริป (2) ทฤษฎีและหลักการของ EBG ในการประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศ และ (3) คุณสมบัติของอภิวัดสำหรับ การประยุกต์ใช้ด้านสายอากาศ

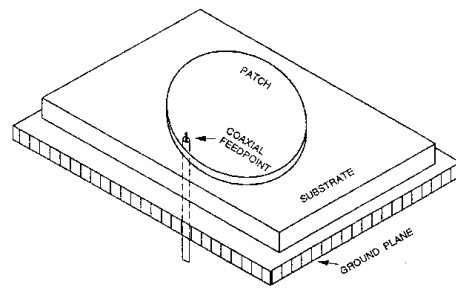
3.2 สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna)

สายอากาศไมโครสตริปประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นแผ่นหรือแพทช์ (patch) ที่เป็นตัวนำ โดยทั่วไปจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือวงกลม ซึ่งจะถูกแยกออกจากกันด้วยแผ่นระนาบกราวด์ที่มีความบาง (เป็นเศษส่วนของความยาวคลื่น) และมีลักษณะเป็นชั้นที่เรียกว่า วัสดุฐานรองหรือ ซับสเตรต (substrate) ของสารไดอิเล็กตริก จากรูปที่ 3.1 (ก) และ (ข) แสดงสายอากาศแบบแพทช์ไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากและรูปวงกลมตามลำดับ ซึ่งสายอากาศดังกล่าวมีความสะดวกในการสร้างลงในแผ่นวงจรพิมพ์ (printed circuit board หรือ PCB) โดยที่แพทช์จะถูกวางไว้ที่ด้านหนึ่งของแผ่นวงจรพิมพ์ และอีกด้านหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นแผ่นกราวด์ สำหรับการป้อนกำลัง (feed) ให้แก่สายอากาศไมโครสตริปสามารถทำได้หลายวิธี ดังรูปที่ 3.1 (ก) แสดงการป้อนกำลังด้วยเส้นไมโครสตริป (microstrip line) และรูปที่ 3.1 (ข) แสดงการป้อนกำลังด้วยตัวนำผ่านช่องเปิดเล็ก ๆ ในระนาบกราวด์ เรียกว่าการเชื่อมต่อแบบช่องเปิด (aperture coupling) สำหรับสายอากาศไมโครสตริป นั้น ความแม่นยำของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองถือว่ามีความสำคัญมากเพราะเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าคงที่ของการเดินทางของคลื่น ความถี่เรโซแนนซ์ และคุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ

สายอากาศไมโครสตริปนับว่ามีข้อดีหรือข้อได้เปรียบกว่าสายอากาศไมโครเวฟ ทำให้สายอากาศไมโครสตริปถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 MHz ถึง 100 GHz แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศไมโครสตริปก็มีข้อจำกัดเช่นกันเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครเวฟดังตารางที่ 3.1 แสดงข้อได้เปรียบที่เป็นจุดเด่นของสายอากาศไมโครสตริปและข้อจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครเวฟ



(ก) แพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก



(ข) แพทช์รูปวงกลม

รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์

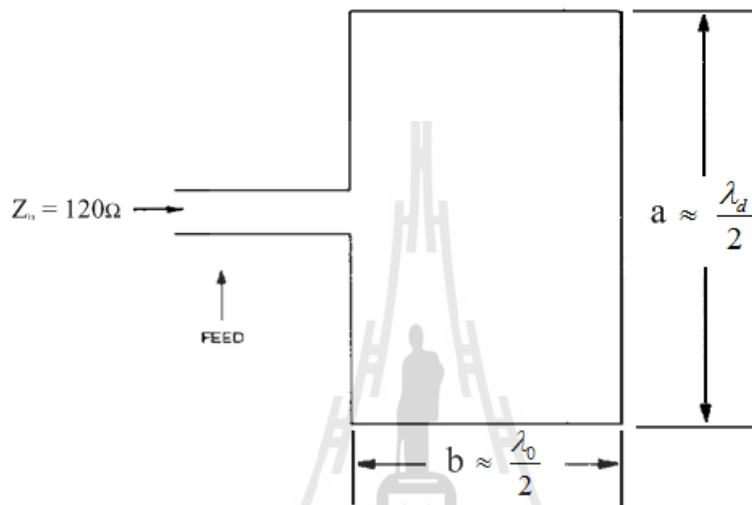
ตารางที่ 3.1 ข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของสายอากาศไมโครสตริป

ข้อได้เปรียบของสายอากาศไมโครสตริป	ข้อจำกัดของสายอากาศไมโครสตริป
<ul style="list-style-type: none"> ▪ น้ำหนักเบา ปริมาณน้อย มีโครงสร้างรูปร่างที่บาง ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงมุมและมาตราส่วนได้อย่างชัดเจน ▪ ราคาถูก ▪ ง่ายต่อการป้อนกำลังสำหรับโพลาริไรซ์ที่เป็นแบบเส้นตรงและวงกลม ▪ ง่ายต่อการออกแบบและสร้างสำหรับสายอากาศที่เป็นแบบความถี่สูงและโพลาริไรซ์คู่ ▪ สามารถอินทิเกรตร่วมกับวงจรไมโครเวฟ ▪ การทำเส้นป้อนกำลังงานและการแมตช์สายอากาศสามารถออกแบบและสร้างในเวลาเดียวกันกับโครงสร้างของสายอากาศ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ มีความกว้างแถบ (bandwidth) ที่แคบ ▪ มีอัตราขยายที่ค่อนข้างต่ำ ($\approx 6dB$) ▪ มีความต้านทานการสูญเสียมากและมีความซับซ้อนของโครงสร้างการป้อนกำลังสำหรับสายอากาศแกลวลาคับ ▪ เกิดการแผ่กระจายคลื่นภายนอกจากจุดป้อนกำลังงานและจุดเชื่อมต่อ ▪ เกิดการกระตุ้นของคลื่นบนผิวหน้า

ซึ่งจากข้อจำกัดของสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ที่กล่าวข้างต้น สามารถลดผลของข้อจำกัดเหล่านั้นได้ ยกตัวอย่างเช่น ความกว้างแถบสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้ถึง 60% ด้วยการใส่

เทคนิคเฉพาะอัตราขยายที่ต่ำสามารถแก้ไขได้โดยการใช้เทคนิคของสายอากาศแถวลำดับ การเกิดคลื่นผิวหน้าสามารถใช้เทคนิคของการเชื่อมต่อ (coupling) เข้ามาช่วยได้ และสำหรับอัตราขยาย คลื่นบนผิวหน้า และแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ลดลงสามารถใช้ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าในการแก้ไขข้อจำกัดนี้ได้

3.2.1 คุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป



รูปที่ 3.2 สายอากาศไมโครสตริปพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก

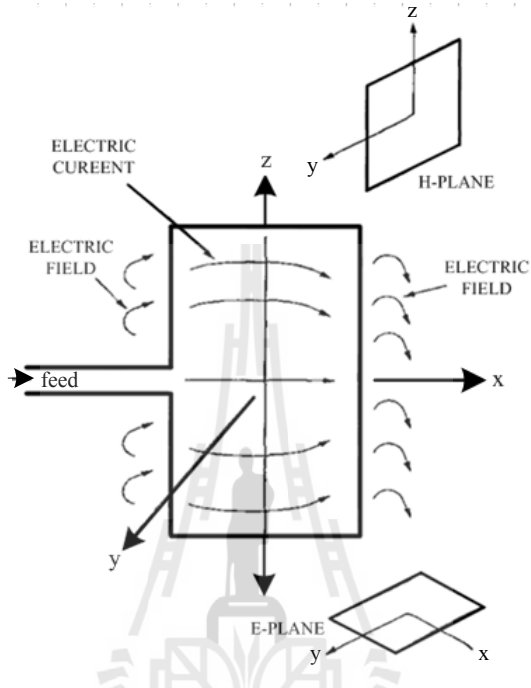
พิจารณาคูณลักษณะของแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากดังรูปที่ 3.2 แสดงมิติพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป โดยค่าความนำของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความกว้าง a โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์จะเป็นฟังก์ชันของความยาว b ซึ่งจะถูกระบุโดยสมการ (3.1) และ (3.2)

$$a \approx \lambda_d \approx \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{เมตร}) \quad (3.1)$$

$$b = 0.49\lambda_d = 0.49 \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{เมตร}) \quad (3.2)$$

โดยที่ λ_d, λ_0 คือ ความยาวคลื่นในสารไดอิเล็กตริกและในอวกาศอิสระตามลำดับ และ ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง (dielectric constant)

เนื่องจากการแปรผันของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าความนำของตัวป้อนสัญญาณ การทดสอบเพื่อหาความยาวที่แท้จริงของแพทช์จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง



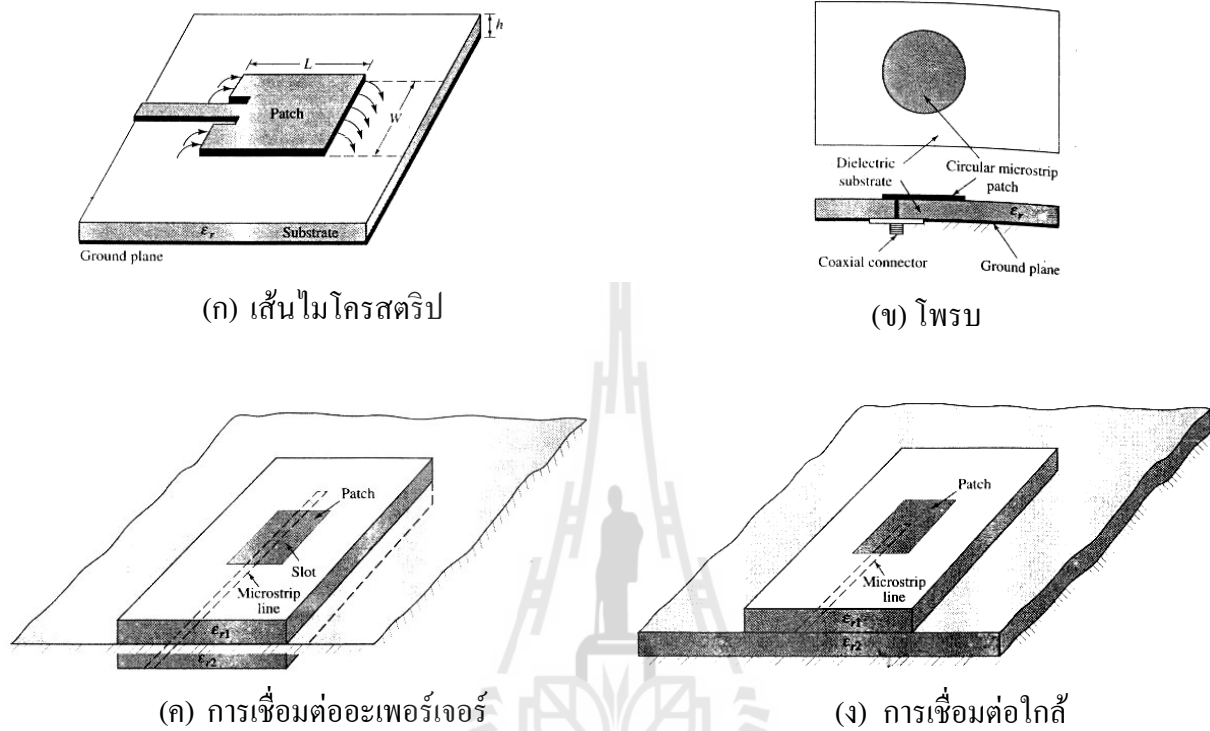
รูปที่ 3.3 แสดงกระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก

จากรูปที่ 3.3 เป็นการแสดงกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงของสนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอบ ๆ แพทช์ โดยปกติสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบของแพทช์ที่ถูกต่อด้วยสายนำสัญญาณและด้านตรงข้ามขอบซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ คลื่นที่แผ่กระจายจากสายอากาศในรูปที่ 3.3 จะมีการโพลาไรซ์ในแนวนอน ซึ่งระนาบของสนามไฟฟ้า (ระนาบ x-y: E-plane) จะมีทิศทางในแนวนอน และระนาบของสนามแม่เหล็ก (ระนาบ y-z: H-plane) จะมีทิศทางในแนวตั้ง จากระยะห่าง b ซึ่งเป็นระยะของขอบทั้งสองด้านของแพทช์จะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่เดินทางภายในสารไดอิเล็กตริก ($0.49\lambda_d$) ซึ่งที่ระยะห่างขนาดนี้จะมีผลทำให้ร่องที่อยู่ตรงข้ามมีการป้อนด้วยเฟสที่ตรงกันข้าม อย่างไรก็ตามสนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกมาจากองค์ประกอบทั้งสองจะมีการเสริมกันเนื่องจากเฟสตรงกัน ทำให้ทิศทางการแผ่กระจายคลื่นออกมาในทิศตั้งฉากกับองค์ประกอบ

3.2.2 วิธีการป้อนกำลังของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปสามารถทำการป้อนกำลังได้หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกัน 4 วิธี คือ (1) การป้อนกำลังด้วยเส้นไมโครสตริป (microstrip line feed) (2) การป้อนกำลังด้วยโพรบ

(probe feed) (3) การป้อนกำลังด้วยการเชื่อมต่ออะเพอร์เจอร์เจอร์ (aperture-coupling feed) และ (4) การป้อนกำลังด้วยการเชื่อมต่อใกล้เคียง (proximity-coupling feed) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.4 (ก) (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 แสดงการป้อนกำลังสายอากาศไมโครสตริป

3.3 สายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป (microstrip array antenna)

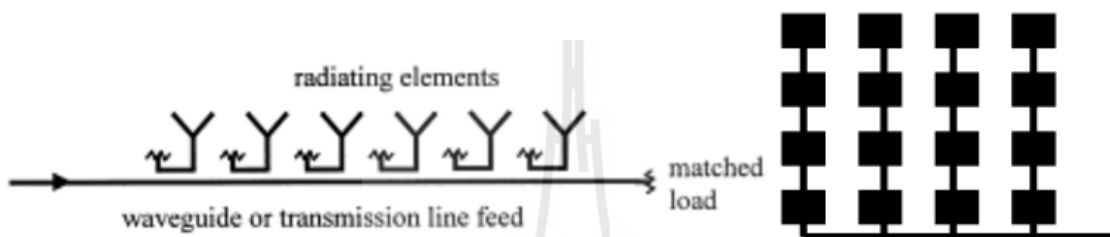
จากสายอากาศไมโครสตริป คือสายอากาศที่ประกอบไปด้วยแผ่นโลหะวางติดอยู่บนสารแผ่นฐาน ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริกเหนือระนาบกราวด์ (ground plane) จากข้อดีคือ มีน้ำหนักเบา และข้อดีอื่นๆ ของสายอากาศไมโครสตริปที่กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้น ซึ่งโดยปกติของสายอากาศไมโครสตริปโดยพื้นฐานจะข้อเสียคือ มีอัตราขยาย (gain) ต่ำและความกว้างแถบแคบ (bandwidth)

ซึ่งการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริป สามารถทำได้โดยการนำมาทำแถวลำดับในแต่ละอีลีเมนต์ หรือเรียกว่า แถวลำดับไมโครสตริป (microstrip array) คือการรวมกันของไมโครสตริปด้วยการป้อนกำลังผ่านสายป้อน (feed line) ประกอบด้วย ตัวแบ่งกำลัง (power dividers) ด้วยสายส่ง (transmission line) หรือ สายเฟส (phasing line) และเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าการสูญเสียของกำลังงานที่จ่ายให้กับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปแต่ละอีลีเมนต์นั้น จะเกิดขึ้นภายในส่งหรือสายเฟสดังกล่าวมาโดยตลอด

3.3.1 ลักษณะการป้อนของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป (แบบเก่า)

1) การป้อนของสายอากาศแถวลำดับแบบอนุกรม (series feed)

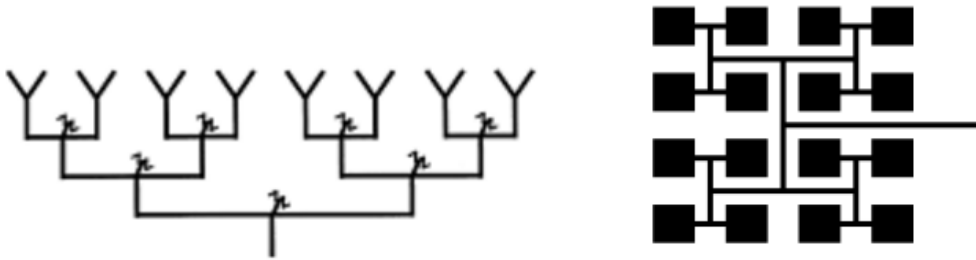
ระบบการป้อนกำลังสำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปแบบอนุกรม จะส่งผ่านเส้นสตริปหรือสายเฟสในลักษณะเป็นเส้นตรงตามแนวการวางตัวของแพทช์แต่ละอีลีเมนต์ เช่น การป้อนผ่านท่อนำคลื่น (waveguide) ซึ่งลักษณะการจ่ายกำลังจะส่งผ่านแต่ละอีลีเมนต์ทีละอีลีเมนต์ไปเรื่อยๆ โดยมีแหล่งกำเนิดเพียงแหล่งเดียวที่ป้อนจากต้นทางของแถวลำดับ ดังแสดงระบบป้อนแบบอนุกรมดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงระบบป้อนแบบอนุกรม

2) การป้อนของสายอากาศแถวลำดับแบบขนาน (parallel feed)

ระบบการป้อนกำลังสำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปแบบขนาน หรือจะนิยมเรียกว่า ระบบการป้อนแบบคอร์เปอร์เรท (corporate feed) หรือระบบป้อนแบบป้อนร่วม เนื่องจากมีลักษณะคล้ายคลึงกับแผ่นผังก่อสร้างองค์กรหรือโครงข่ายใยแมงมุม โดยมีแหล่งกำเนิดเพียงจุดเดียวเช่นกันกับการป้อนแบบอนุกรม ซึ่งการป้อนแบบขนานจะทำให้เกิดการแบ่งพลังงานจากแหล่งกำเนิดอย่างชัดเจนกว่าการป้อนแบบอนุกรม อย่างไรก็ตาม ระบบการป้อนแบบขนานเป็นที่นิยมากกว่าการป้อนแบบอนุกรม ซึ่งสามารถออกแบบการจ่ายกำลังงานผ่านตัวแบ่งกำลัง (power divider) ทำให้อีลีเมนต์แต่ละอีลีเมนต์สามารถควบคุมได้อย่างอิสระ แต่การส่งผ่านเส้นสตริปหรือสายเฟสจะต้องคำนึงถึงความยาวของสายเฟสที่พอดีกับความยาวคลื่นที่ต้องการ ด้วยเหตุนี้ความแตกต่างของเฟสจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังงานจากระยะและขนาดของเส้นสตริปหรือสายเฟส ซึ่งลักษณะของระบบป้อนแบบขนานแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงระบบป้องกันแบบขนาน

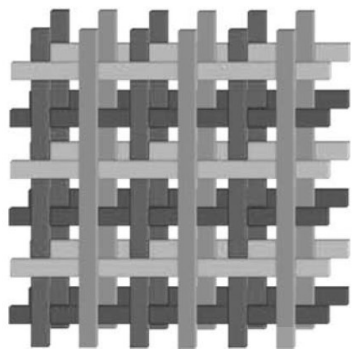
จะเห็นได้ว่า ระบบป้องกันกำลังงานสำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป ทั้ง 2 ลักษณะมีข้อดีข้อด้อยที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของการประยุกต์ใช้งานที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามระบบป้องกัน ทั้ง 2 แบบ ยังคงใช้การป้องกันกำลังผ่านเส้นสตริปหรือสายเฟสแบบเก่า กล่าวคือ กำลังงานที่จ่ายให้กับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปโดยผ่านเส้นสตริปหรือสายเฟสจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังงานภายในสายเฟสโดยไม่จำเป็น ดังนั้นงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการพัฒนาแบบใหม่เพื่อลดการสูญเสียกำลังงานที่เกิดขึ้นรายละเอียดสำหรับการออกแบบในบทที่ 4 ต่อไป

3.4 ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

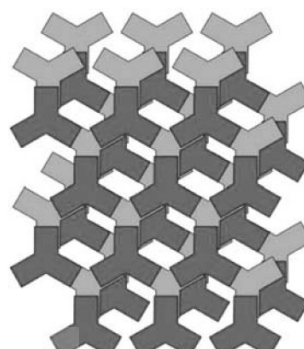
3.4.1 คำจำกัดความ โครงสร้าง และพารามิเตอร์ของช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ EBG (Electromagnetic Band Gap) คือ วัสดุที่ขัดขวางหรือสนับสนุนการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแถบความถี่ที่เฉพาะเจาะจงสำหรับทุก ๆ มุมตกกระทบและทุก ๆ สถานะของการโพลาไรซ์ โดยปกติแล้ว EBG จะประกอบด้วยวัสดุที่เป็นไดอิเล็กตริกและตัวนำที่เป็นโลหะ สามารถแบ่งประเภทของ EBG ตามลักษณะโครงสร้างของ EBG ได้ 3 ประเภทได้แก่ (1) EBG โครงสร้างปริมาตรแบบ 3 มิติ (2) EBG ระนาบบนผิวหน้าแบบ 2 มิติ และ (3) EBG เส้นส่งผ่านพลังงานแบบ 1 มิติ รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างของ EBG แบบ 3 มิติคือ มีโครงสร้างเป็นลักษณะแบบกองฟืน (woodpile) ซึ่งประกอบด้วยแถบสี่เหลี่ยมของไดอิเล็กตริก (E. Ozbay, A. Abeyta, G. Tuttle, M. Tringides, R. Biswas, C. T. Chan, C. M. Soukoulis, and K. M. Ho, 1994) และมีโครงสร้างเป็นแถวลำดับแบบมีขา 3 ขา (tripod array) ซึ่งจะเป็นโลหะหลาย ๆ ชั้นซ้อนกันอยู่ (A.S. Barlevy, and Y. Rahmat Samii, 2001) แสดงดังรูปที่ 3.5(ก) และ (ข) ตามลำดับ สำหรับ EBG ระนาบบนผิวหน้า แบบ 2 มิติจะมีลักษณะเป็นผิวหน้าคล้ายดอกเห็ด (mushroom-like) (D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous, and E. Yablonovitch, 1999) และผิวหน้าแบบหนึ่งระนาบ(uni-planar) (F.-R. Yang, K.-P. Ma, Y. Qian, and T. Itoh, 1999) แสดงดังรูปที่ 3.7(ก) และ (ข) ตามลำดับจากรูปที่ 3.7(ก) แสดง EBG เส้นส่งผ่านพลังงานแบบ 1 มิติที่เป็นเส้นไมโครสตริปกับช่องกลมบนระนาบกราวด์ (V. Radisic, Y. Qian, R. Coccioli, and T. Itoh, 1998)

และรูปที่ 3.8(ข) แสดง EBG เส้นส่งผ่านพลังงานแบบ 1 มิติ ที่เส้นส่งผ่านพลังงานประกอบด้วยส่วนทางขวามือและทางซ้ายมือ (C. Caloz and T. Itoh, 2005)

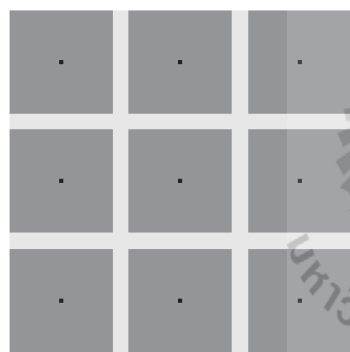


(ก) ลักษณะแบบกรองพีน



(ข) ลักษณะแถวลำดับแบบมี 3 ขา

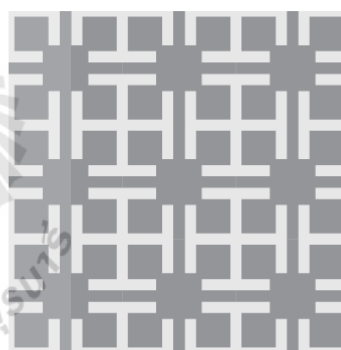
รูปที่ 3.7 EBG แบบ 3 มิติ



Top view



(ก) ผิวหน้าคล้ายดอกเห็ด (ด้านหน้า)



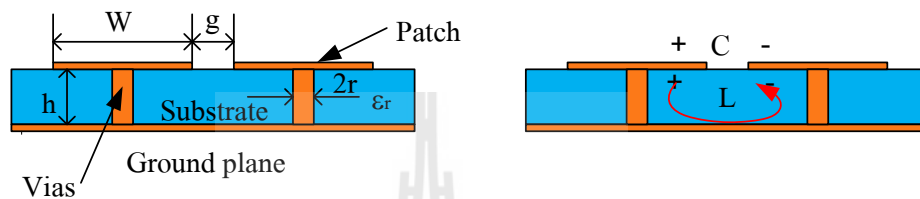
Top view



(ข) ผิวหน้าแบบหนึ่งระนาบ (ด้านหน้า)

รูปที่ 3.8 EBG แบบ 2 มิติ

ระนาบสำหรับพารามิเตอร์ของ EBG เพื่อช่วยแก่การทำ ความเข้าใจในวิธีดำเนินการของ EBG ในชั้นต้นผู้วิจัยจะนำเสนอโครงสร้างอย่างง่าย คือ โครงสร้าง EBG ที่มีผิวหน้าคล้ายดอกเห็ดแบบ 2 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.8(ก) โครงสร้าง EBG แบบ 2 มิติ ประกอบด้วย 4 ส่วนดังนี้ (1) แผ่นกราวด์โลหะ (metal ground plane) (2) วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (dielectric substrate) (3) แผ่นโลหะวางเป็นคาบบนไดอิเล็กตริกหรือแพทช์และ (4) ตัวเชื่อมแนวตั้งระหว่างแผ่นโลหะด้านบนกับแผ่นกราวด์โลหะหรือเวีย (vias) ซึ่งคูมามีรูปทรงเรขาคณิตคล้ายดอกเห็ด



รูปที่ 3.9 พารามิเตอร์และรูปแบบของค่าเหนี่ยวนำและค่าความจุของ โครงสร้าง EBG

จากรูปที่ 3.9 แสดงโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้าง EBG ประกอบด้วย ค่าต่าง ๆ ดังนี้

- W คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำด้านบน
- g คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำด้านบน
- h คือ ความสูงของฐานรองไดอิเล็กตริก
- ϵ_r คือ ค่าคงที่สภาพยอมของ ไดอิเล็กตริก
- r คือ รัศมีของเวีย
- $(W+g)$ คือ ระยะคาบเล็กที่เปรียบเทียบการดำเนินการความยาวคลื่น

สามารถอธิบายรูปแบบสื่อกลางของโครงสร้าง EBG ได้ด้วยวงจรสมมูลของวงจรที่ประกอบไปด้วยค่าเหนี่ยวนำ (L) และค่าความจุ (C) โดยค่าความจุที่เกิดขึ้นเป็นผลจากช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำด้านบน และค่าเหนี่ยวนำเกิดจากกระแสที่ไหลไปตามตัวนำที่อยู่ใกล้กัน ซึ่งสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์ขนานหาได้จากสมการ (3.3)

$$Z = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (\text{โอห์ม}) \quad (3.3)$$

ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรคำนวณได้จากสมการ (3.4)

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{เรเดียน}) \quad (3.4)$$

ที่ความถี่ต่ำค่าอิมพีแดนซ์จะเป็นการเหนี่ยวนำและรองรับคลื่นระดับพื้นผิวของสนามแม่เหล็กตามขวาง (TM surface wave) โดยจะเปลี่ยนเป็นค่าความจุที่ความถี่สูงรองรับคลื่นระดับพื้นผิวของสนามไฟฟ้าตามขวาง (TE surface wave) และเมื่อเข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ (ω_0) ซึ่ง EBG จะไม่รองรับคลื่นระดับพื้นผิวใด ๆ เนื่องจากอยู่ในภาวะที่ค่าอิมพีแดนซ์สูงมาก ๆ และการที่อิมพีแดนซ์ระดับพื้นผิวสูงมากส่งผลให้แน่ใจว่าคลื่นระดับพื้นผิวจะสะท้อนกลับโดยไม่กลับเฟสที่เกิดขึ้นบน PEC โดยที่ค่าของตัวเก็บประจุสามารถพิสูจน์โดยใช้การส่งคงรูป (conformal mapping) ซึ่งเป็นเทคนิคการคำนวณการกระจายสนามไฟฟ้าสถิต 2 มิติ หาค่าได้จากสมการ (3.5)

$$C = \frac{W\epsilon_0(1+\epsilon_r)}{\pi} \cosh^{-1} \left(\frac{W+g}{g} \right) \quad (\text{คูอมบ์}) \quad (3.5)$$

ค่าความเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากวงจรกระแสดังแสดงในรูปที่ 3.8 ประกอบด้วยเวียและแผ่นโลหะ สำหรับกระแสโซลินอยด์ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กสามารถคำนวณด้วยกฎของแอมแปร์ จากวงจรสมมูลตัวเหนี่ยวนำคำนวณจากพลังสนามแม่เหล็กสะสมและกระตุ้นด้วยกระแส จะได้ค่าความเหนี่ยวนำจากสมการ (3.6)

$$L = \mu h \quad (\text{ไมโครเฮนรี}) \quad (3.6)$$

3.5 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านสายอากาศ

การใช้วัสดุเพื่อการประยุกต์ใช้งานด้านสายอากาศมีการกล่าวถึงไว้อย่างชัดเจนถึงแนวทางในการพิจารณาคุณสมบัติที่เหมาะสมของวัสดุและความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งาน (ศราวุธ และประยูทธ, 2554) ได้จำแนกการประยุกต์ใช้งานสำหรับสายอากาศไว้ทั้งหมด 7 หัวข้อได้แก่

1. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศขนาดเล็ก
2. เพื่อใช้ในการออกแบบตัวนำประดิษฐ์ (Artificial Conductors)
3. เพื่อใช้ในการออกแบบวัสดุฐานรอง (Substrate Material)
4. เพื่อใช้ในการออกแบบชั้นวางซ้อน (Superstrate) หรือฝาครอบ (radome)

5. เพื่อใช้การลดการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศในสายอากาศแถวลำดับและระบบ MIMO

6. เพื่อใช้ในการออกแบบสายอากาศคลื่นร้าวและเรโซเนเตอร์อันดับที่สูง

7. เพื่อควบคุมทิศทางลำคลื่น (Steering Beam Antennas)

สำหรับการประยุกต์ใช้งานของอภิวัดเพื่อใช้ในการออกแบบวัสดุฐานรอง และการออกแบบชั้นวางซ้อนเป็นพื้นฐานคุณสมบัติของอภิวัดที่นำมาพิจารณาถึงแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงระบบป้อนกำลังงานสำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปที่จะกล่าวไว้ในขั้นต้น

การใช้อภิวัดในการออกแบบชั้นวางซ้อนหรือฝาครอบ วางบนหรือครอบสายอากาศ (โดยปกติจะใช้สายอากาศไมโครสตริปหรือสายอากาศร่อง) เพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ โดยมีกรเพิ่มชั้นวางซ้อนที่มีคุณสมบัติ คือ ค่าดัชนีการหักเห (n) จะมีค่าเท่ากับ ZRI (Zero Refractive Index) หรือใกล้เคียงศูนย์ NZR (Near Zero Refraction) ตามกฎของสเนลล์ เมื่อคลื่นเดินทางผ่านตัวกลาง ที่มีค่า $n = 0$ คลื่นจะตั้งฉากกับพื้นผิวสัมผัสหรือคลื่นจะขนานกันออกแสดงดังรูปที่ 3.10 เมื่อแหล่งกำเนิดอยู่ในตัวกลางที่มีค่า n_1 เข้าใกล้ 0 ดังนั้นมุมของคลื่นที่ออกจากตัวกลางที่หนึ่งไปยังตัวกลางที่สอง (θ_2) จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์หรือตั้งฉากกับผิวเพราะ $\theta_2 = \sin^{-1}(n_1/n_2 \sin \theta_1)$



รูปที่ 3.10 แหล่งกำเนิดอยู่ในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์และแบบจำลอง เมื่อใช้กับสายอากาศไมโครสตริป (ภาพจาก ศราวุธ และ ประยูทธ, 2554)

ดังนั้นชั้นวางซ้อนจึงเปรียบเสมือนอุปกรณ์บังคับทิศทางคลื่นให้ขนานออกไป (Directive Confining Device) ทำให้สภาพเจาะจงทิศทาง (directivity) ในทิศทางบรอดไซด์ (broadside) เพิ่มขึ้น เมื่อวิเคราะห์ในมุมมองของเรโซเนเตอร์จะพบว่าการจัดวางสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งมีระนาบกราวด์ด้านล่างและการวางชั้นวางซ้อนไว้ด้านบนคล้ายกับมีแผ่นกระจกสะท้อนที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่สูงมากสองแผ่นขนานกันในระยะที่เหมาะสม ซึ่งโดยปกติมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นจะทำให้เกิดการสะท้อนกลับไปกลับมาหลายครั้งจนทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ เรียกเรโซเนเตอร์

แบบนี้ว่าฟาบรี-เปโฆเรโซเนเตอร์ สายอากาศจะมีสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงมากเพราะมีค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor: Q) ที่สูง และเนื่องจากมีค่า Q ที่สูงดังนั้นความกว้างแถบของสายอากาศจึงแคบมาก โดยทั่วไปชั้นวางซ้อนอกิวส์คูมีจะใช้คุณสมบัติของ ENZ และส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างที่มีสองชั้นเพื่อทำให้เกิด ENZ จึงทำให้สายอากาศมีความหนาหรือมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนกรณีของ MNZ ได้ออกแบบโครงสร้างเป็นลักษณะของผิวสะท้อนที่มีเพียงชั้นเดียวจึงทำให้สายอากาศมีลักษณะบางรวมทั้งมีความกว้างแถบและอัตราขยายที่มากขึ้น

3.6 สรุป

สำหรับการออกแบบระบบป้อนกำลังงานของอากาศแถวลำดับไมโครสตริป เพื่อทดแทนการป้อนผ่านสายส่งหรือการป้อนแบบเฟส ด้วยคุณสมบัติของโครงสร้าง EBG ที่มีผิวหน้าคล้ายดอกเห็ดแบบ 2 มิติ ประกอบด้วย 4 ส่วนดังนี้ แผ่นกราวด์โลหะ วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก แผ่นโลหะวางเป็นคาบบนไดอิเล็กตริกหรือแพทช์และตัวเชื่อมแนวตั้งระหว่างแผ่นโลหะด้านบนกับแผ่นกราวด์โลหะหรือเวีย (vias) ซึ่งในส่วนของวัสดุฐานรองที่มีข้อจำกัดด้านคุณสมบัติเรื่องสภาพยอมทางไฟฟ้า ค่าความซึมซาบแม่เหล็กและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ จึงต้องศึกษาคุณสมบัติของอิวส์คูในการออกแบบวัสดุฐานรอง และออกแบบชั้นวางซ้อน เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบป้อนแบบใหม่สำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปต่อไป



บทที่ 4

การจำลองและออกแบบระบบป้อนใหม่

4.1 กล่าวนำ

สำหรับบทนี้จะนำเสนอการออกแบบระบบป้อนแบบใหม่สำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปแบบแพทช์ (MSA) โดยการพิจารณาลักษณะของโครงสร้างตัวป้อนที่เหมาะสมเพื่อศึกษาความเป็นไปได้สำหรับการป้อนกำลังให้กับสายอากาศโดยใช้สายเฟส โดยพิจารณาตัวกระตุ้นสัญญาณ เทคนิค EBG ที่นำมาใช้โดยพิจารณาจำนวน EBG ตำแหน่งของ EBG และเทคนิคอื่นๆที่เหมาะสมสำหรับพัฒนาระบบป้อนแบบใหม่สำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปแบบแพทช์

ซึ่งโครงสร้างตัวป้อนที่ผู้วิจัยให้ความสนใจและนำมาพิจารณาและพัฒนาเพื่อเป็นตัวกระตุ้นสัญญาณให้กับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป (MSA) ได้แก่ ไดโพลแบบโบว์ไทท์ (bowtie dipole) ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นเรื่องความกว้างแถบก่อนข้างกว้างและลักษณะของโครงสร้างพื้นฐานที่ง่ายต่อการขึ้นรูปขึ้นงานร่วมกับ MSA โดยพิจารณา ตำแหน่งและจำนวนเซลล์ของ EBG ที่เหมาะสม และใช้ลักษณะการจัดวางตำแหน่งของระบบป้อนแบบใหม่กับ MSA ในลักษณะโพรงฟารี-เปโรต์ (Fabry-Perot Cavity Resonator : FPC) โดยได้ทำการจำลองโครงสร้างในส่วนของระบบป้อนแบบใหม่ และ MSA ด้วยโปรแกรมจำลอง CST studio 2009 เพื่อพิจารณาค่าคุณลักษณะที่ต่างๆของสายอากาศที่สำคัญ ได้แก่ อัตราขยายของสายอากาศ ความกว้างแถบของสายอากาศและที่เกี่ยวข้องอื่นๆ

ดังนั้นสามารถสรุปขั้นตอนการจำลองระบบป้อนแบบใหม่สำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป ออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) จำลองโครงสร้างสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปแบบเก่า โดยเลือกจำลองสายอากาศแถวลำดับจำนวน 2x4 อิลิเมนต์ ณ ความถี่ 10 GHz ซึ่งทำการป้อนกำลังผ่านสายเฟสแบบเดิม ด้วยวัสดุฐานรองเป็น Duroid 2.65 ความหนาวัสดุเท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร ขนาดความกว้างและความยาว เท่ากับ 110 และ 81 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นแผ่นชนิดเดียวกันกับการใช้งานในห้องทดสอบสายอากาศ

- 2) จำลองโครงสร้างตัวกระตุ้นสัญญาณ โดยเลือกใช้ตัวกระตุ้นสัญญาณด้วยไดโพลแบบโบว์ไทท์ที่ความถี่ 10 GHz ด้วยวัสดุชนิด FR4 ความหนา 1.6 มิลลิเมตรค่าความกว้างและความยาวของแผ่น FR4 เท่ากันกับ ข้อ 1) โดยพิจารณาค่าคุณลักษณะต่างๆ ดังนี้ ค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ (s11) ค่าความกว้างแถบ (bandwidth) ค่าอัตราขยาย (gain) โดยแสดงผลการจำลองค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดของโครงสร้าง ได้แก่ ความยาว

ของไดโพลแบบโบว์ไท (l_{bowties}) ความกว้างส่วนปลายของแขนไดโพลแบบโบว์ไท (w_{bowties}) ความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพลแบบโบว์ไท (w_{bot}) ความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพลแบบโบว์ไท (w_{bot}) ความหนาของไดโพลแบบโบว์ไท (t_{bow}) และระยะห่างระหว่างแขนไดโพลแบบโบว์ไท (d_{feed}) และได้เลือกค่าที่เหมาะสมที่สุด ณ ความถี่ 10 GHz เพื่อใช้เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนต่อไป

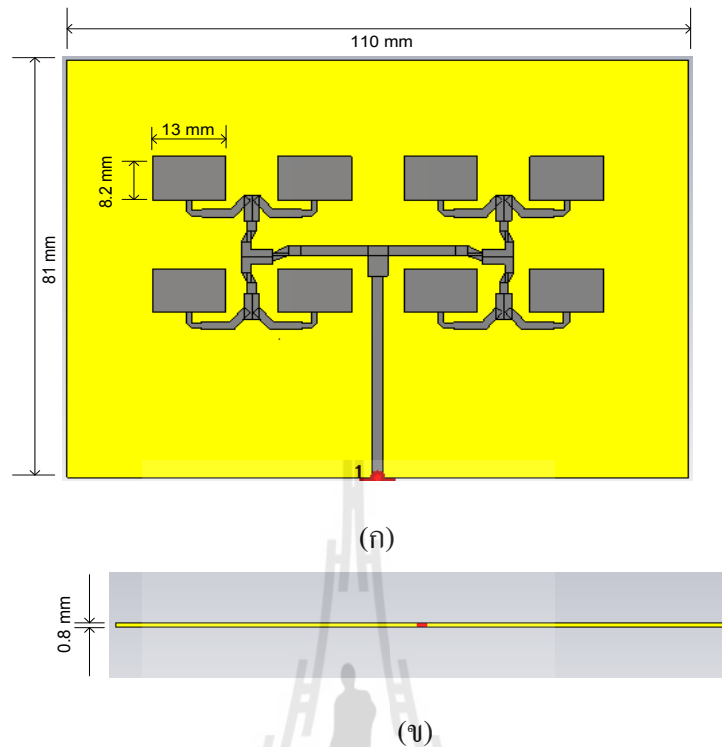
3) จำลองโครงสร้างตัวกระตุ้นสัญญาณด้วยตัวป้อนไดโพลแบบโบว์ไท จากนั้นทำการจำลองตัวกระตุ้น (ด้วยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากข้อ 2) ร่วมกับโครงสร้าง EBG บนระนาบกราวด์ เพื่อพิจารณาค่าคุณลักษณะจากพารามิเตอร์ของ EBG แต่ละพารามิเตอร์ โดยกำหนดให้ 1 หน่วยเซลล์ของ EBG เท่ากับจำนวน EBG ที่น้อยที่สุด คือ 4 เซลล์ (Fan Yang and Yahya Rahmat-Samii, 2009) พิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ ของ EBG จำนวนเซลล์ และพิจารณาการวางตำแหน่งของ EBG ที่เหมาะสมกับลักษณะลำคลื่นของสายอากาศจากการป้อนผ่านสายเฟสแบบเก่า โดยลำดับความสำคัญในการพิจารณาค่าคุณลักษณะ คือ ค่าอัตราขยาย แบบรูปการแผ่กำลังงาน และความกว้างแถบ ตามลำดับ ดังนั้น โครงสร้างตัวกระตุ้นสัญญาณด้วยไดโพลแบบโบว์ไทที่พัฒนา ร่วมกับ EBG นี้ จะเรียกว่า ตัวป้อนใหม่ ในลำดับถัดไป

4) จำลองโครงสร้างระบบป้อนใหม่ ที่ประกอบตัวป้อนใหม่และลักษณะการวางตัวแบบ FPC เพื่อป้อนกำลังงานแบบไม่ผ่านสายเฟสให้กับ MSA ซึ่งในขั้นตอนนี้ได้เลือก MSA จำนวนอีลิเมนต์เท่ากับ ข้อ 1 คือ 2x4 อีลิเมนต์ จากนั้นทำการพิจารณา 1) ความสูงระหว่าง ตัวป้อนใหม่กับ MSA และ 2) ระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์ของสายอากาศที่สามารถให้อัตราขยายได้สูงสุด และแบบรูปการแผ่กำลังงานสอดคล้องกับแบบรูปการแผ่กำลังงานของการป้อนแบบผ่านสายเฟสหรือแบบเก่า

5) เปรียบเทียบค่าคุณลักษณะของสายอากาศจากการจำลองโครงสร้างระบบป้อนใหม่กับระบบป้อนผ่านสายเฟสแบบเก่า (จากข้อ 1) โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่เกี่ยวข้องดังนี้
1) อัตราขยาย 2) แบบรูปการแผ่กำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

ซึ่งจากขั้นตอนที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะแสดงในรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนในลำดับถัดไป

4.2. จำลองสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปโดยการป้อนกำลังด้วยสายเฟสแบบเก่า

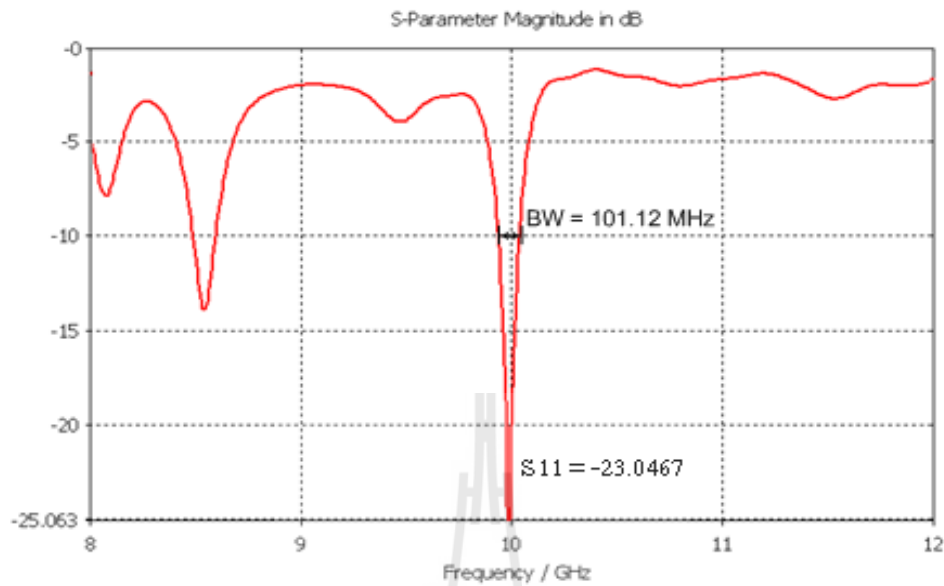


รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปจำนวน 2 x 4 อีลิเมนต์ ด้วยป้อนแบบสายเฟส (ก) ด้านบน (ข) ด้านข้าง

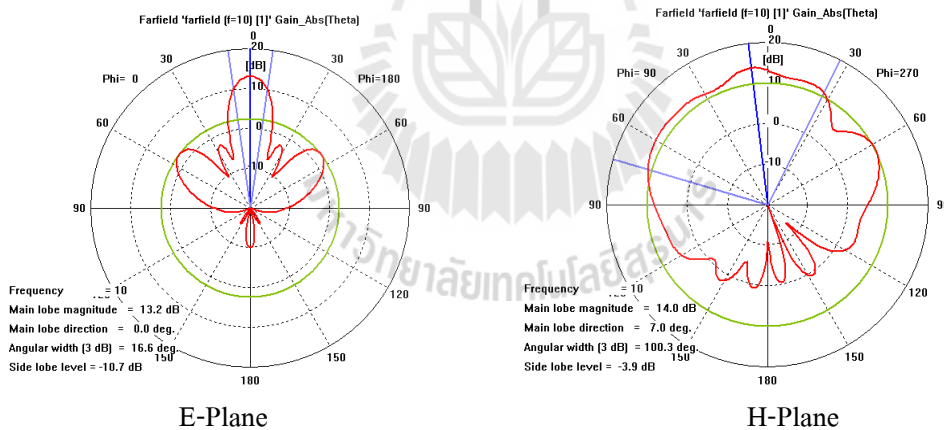
สำหรับการพิจารณาขั้นต้นของระบบป้อน ได้ออกแบบและจำลองโครงสร้างสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปแบบแพทช์ โดยการจำลองระบบป้อนกำลังงานแบบเก่าหรือผ่านสายเฟส เพื่อเป็นสายอากาศอ้างอิงสำหรับเปรียบเทียบค่าคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศหลังจากการพัฒนาระบบป้อนแบบใหม่ด้วยชนิดเดียวกันโดยไม่จ่ายกำลังงานผ่านสายเฟสที่ ด้วยโปรแกรม CST studio 2009 โดยโครงสร้างของสายอากาศที่กำลังพัฒนา มีขนาดอีลิเมนต์จำนวน 2x4 อีลิเมนต์ ขนาดความกว้างของแพทช์ มีค่าเท่ากับ 8.2 มิลลิเมตร ความยาว มีค่าเท่ากับ 13 มิลลิเมตร ใช้วัสดุฐานรองเป็น Duriod มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเท่ากับ 2.65 มีค่าความหนา 0.8 มิลลิเมตร โดยที่ ขนาดความกว้างของขนาดกราวด์เท่ากับ 81 มิลลิเมตร และมีความยาวของกราวด์เท่ากับ 110 มิลลิเมตร ซึ่งได้แสดงโครงสร้างของสายอากาศดังรูปที่ 4.1

ซึ่งผลการจำลองจะพบว่า สายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปแบบแพทช์ที่ทำการป้อนกำลังด้วยวิธีเก่า หรือป้อนผ่านสายเส้นสตริป ค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของสายอากาศ (s11) ที่ต่ำกว่า -10 dB ซึ่งมีกว้างแถบเท่ากับ 101.12 MHz หรือ 1.011% และค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ (s11) เท่ากับ -23.0467 dB ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และแบบรูปการแผ่กำลังงานใน

สนามไฟฟ้า (E-plane) และสนามแม่เหล็ก (H-plane) และอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 13.93 dB ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4 ตามลำดับ



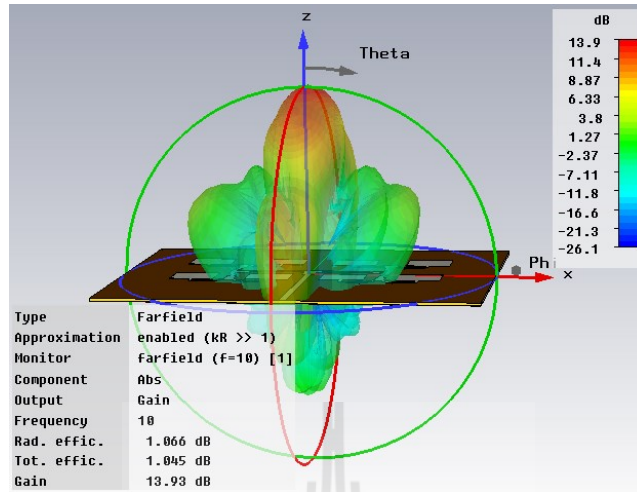
รูปที่ 4.2 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับและความกว้างแถบของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปจำนวน 2x4 อีลิเมนต์โดย การป้อนกำลังด้วยสายเฟส



รูปที่ 4.3 แบบรูปการแผ่กำลังงานระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) ของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปจำนวน 2x4 อีลิเมนต์

ซึ่งจากการจำลองสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปโดยการป้อนกำลังด้วยสายเฟสดังกล่าว พบว่ากระบวนการออกแบบตัวแบ่งกำลังงาน (power divider) ที่จ่ายกำลังผ่านเส้นสตริปบนแผ่นวงจรพิมพ์ มีความซับซ้อนและยุ่งยากในรายละเอียดค่อนข้างมาก ถึงแม้ว่าที่ผ่านๆมา วิธีการนี้จะวิธีการพื้นฐานที่สะดวกในการเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปก็ตามแต่ด้วย

ปริทัศน์วรรณกรรมที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ได้นำแนวคิดและเทคนิคจากการปริทัศน์วรรณกรรมได้นำเสนอนั้น มาประยุกต์ใช้เพื่อลดเซกการสูญเสียกำลังงานจากการป้อนกำลังผ่านสายเฟสแบบเดิม



รูปที่ 4.4 แสดงแบบจำลองอัตราของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปจำนวน 2x4 อิลิเมนต์ และแบบรูปการแผ่กำลังงานในลักษณะสามมิติ

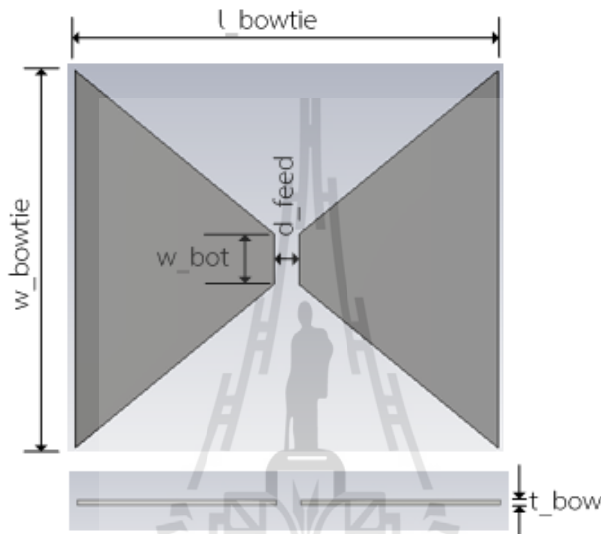
เนื่องจากระบบป้อนใหม่ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ ได้มีจุดประสงค์เพื่อลดการการสูญเสียภายในสายเฟสดังที่กล่าวมาขึ้นต้น เพื่อให้สามารถชดเชยค่าการสูญเสียภายในสายเฟสจากการป้อนแบบเก่าได้ ซึ่งส่งผลให้สามารถเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศให้มากขึ้น ดังนั้นทางผู้วิจัยได้พิจารณาลักษณะตัวป้อนแบบใหม่ที่เหมาะสม โดยเลือกตัวกระตุ้นสัญญาณที่สอดคล้องกับโครงสร้างสายอากาศ และพิจารณาเทคนิควิธีที่เหมาะสมกับลักษณะการวางของระบบป้อนใหม่ร่วมกับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปแบบแพทช์ สำหรับการป้อนสัญญาณให้สายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปแบบแพทช์แต่ละอิลิเมนต์ทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพทุกอิลิเมนต์ ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดในลำดับต่อไป

4.3 จำลองตัวกระตุ้นสัญญาณด้วยตัวป้อนแบบไดโพลแบบโบว์ไท (Bow-Ties Dipole)

จากการสืบค้นงานวิจัยที่ผ่านมา โครงสร้างสายอากาศไดโพลได้ถูกพัฒนาโครงสร้างเพื่อใช้งานร่วมแผ่นวงจรพิมพ์อย่างกว้างขวาง การพัฒนาโครงสร้างเป็นลักษณะโบว์หรือเรียกว่า ไดโพลแบบโบว์ไท เป็นอีกหนึ่งโครงสร้างที่ถูกนำมาพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ ทั้งการเพิ่มความกว้างแถบให้กว้างขึ้นหรือเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศ จึงได้เลือกโครงสร้างตัวป้อนกำลังงานในลักษณะเป็นไดโพลแบบโบว์ไท ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งได้ทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นต่างๆ ของโบว์ไท ได้แก่ ความยาวของไดโพลแบบโบว์ไท ($l_{bowties}$) ความกว้างส่วนปลายของแขนไดโพลแบบโบว์ไท (w_{bowtie}) ความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพลแบบโบว์ไท (w_{bot}) ความหนาของไดโพลแบบโบว์ไท (t_{bow}) ระยะห่างระหว่างแขนไดโพลแบบโบว์ไท (d_{feed}) เพื่อจำลองหาค่าคุณลักษณะที่เหมาะสมด้วยการพิจารณาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของแต่ละตัว

พารามิเตอร์เริ่มต้นการจำลอง โครงสร้างตัวกระตุ้นกำลังงานด้วยไดโพลแบบโบว์ไทต์ ดังต่อไปนี้

ความยาวของไดโพลแบบโบว์ไทต์ (l_{bowtie})	เท่ากับ	0.5λ
ความกว้างส่วนปลายของแขนไดโพลแบบโบว์ไทต์ (w_{bowtie})	เท่ากับ	0.25λ
ความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพลแบบโบว์ไทต์ (w_{bot})	เท่ากับ	0.033λ
ความหนาของไดโพลแบบโบว์ไทต์ (t_{bow})	เท่ากับ	0.0033λ
ระยะห่างระหว่างแขนไดโพลแบบโบว์ไทต์ (d_{feed})	เท่ากับ	0.033λ



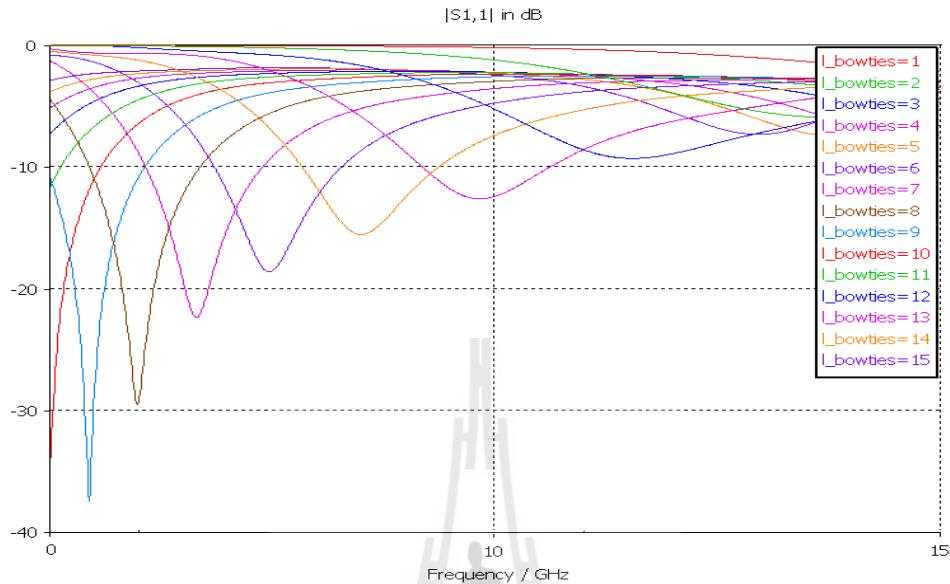
รูปที่ 4.5 โครงสร้างของไดโพลแบบโบว์ไทต์ (bow-tie dipole)

จากนั้นได้พิจารณาค่าที่เหมาะสมสำหรับการเรโซแนนซ์ที่เหมาะสม ณ ความถี่ 10 GHz ของพารามิเตอร์แต่ละตัว โดยเลือกพิจารณาความยาวของไดโพลแบบโบว์ไทต์เป็นพารามิเตอร์เป็นพารามิเตอร์แรก ดังนี้

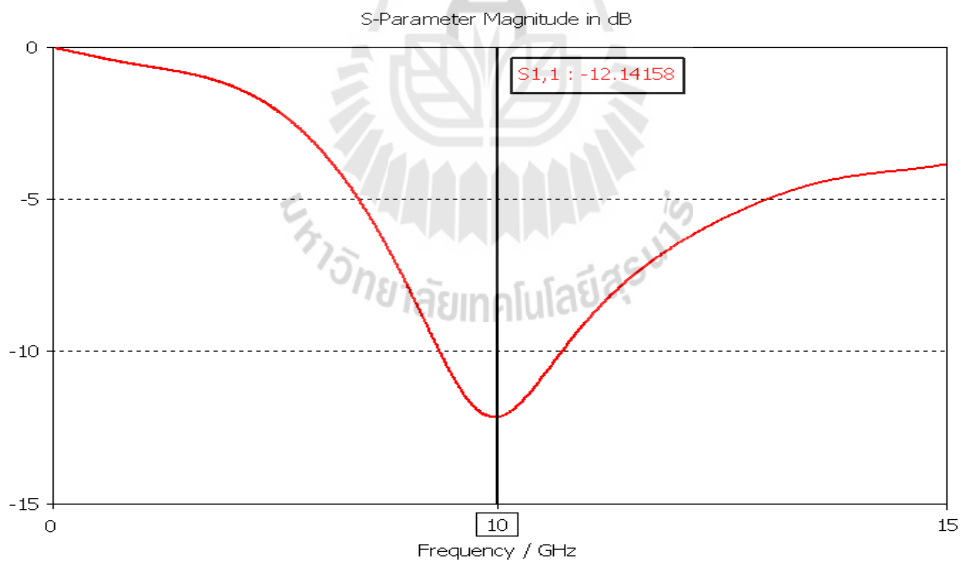
4.3.1) ความยาวของไดโพลแบบโบว์ไทต์ (l_{bowtie})

จากพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ได้กำหนดค่าเริ่มต้นดังกล่าวไว้ข้างต้น ได้ทำการปรับค่าขนาดค่าความยาวของไดโพลแบบโบว์ไทต์จากความยาว $1 - 15 (0.033\lambda - 0.5\lambda)$ มิลลิเมตร พบว่า เมื่อความยาวของไดโพลแบบโบว์ไทต์เพิ่มขึ้น จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ของความถี่นั้นลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งค่าความยาวของไดโพลแบบโบว์ไทต์มีเท่ากับ 4 มิลลิเมตร เป็นค่าที่ดีที่สุด เนื่องจากมีค่า s_{11} ต่ำกว่า -10 dBGHz ณ ความถี่ที่ทำการออกแบบ ต่อจากนั้นทำการปรับความยาวของไดโพลแบบโบว์ไทต์ให้เล็กลงเป็น 3.90 มิลลิเมตร เพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์ของความถี่ 10 GHz ที่ดีขึ้น โดยที่ค่า S_{11} ต่ำกว่า -10 dB จากความถี่ 8.4644 GHz ถึง 12.982 GHz กล่าวคือมีความกว้างแถบเท่ากับ 4.5179 GHz และ ณ ความถี่ 10 GHz มีค่า s_{11} เท่ากับ -12.14158 dB ดังรูปที่ 4.7

นั่นคือสามารถกำหนดพารามิเตอร์แรกในการออกแบบซึ่งเป็นจึงเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับความยาวของแขนไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 3.90 มิลลิเมตร ซึ่งได้ดำเนินการพิจารณาขนาดความกว้างของแขนไดโพลแบบโบว์ไทในลำดับต่อไป



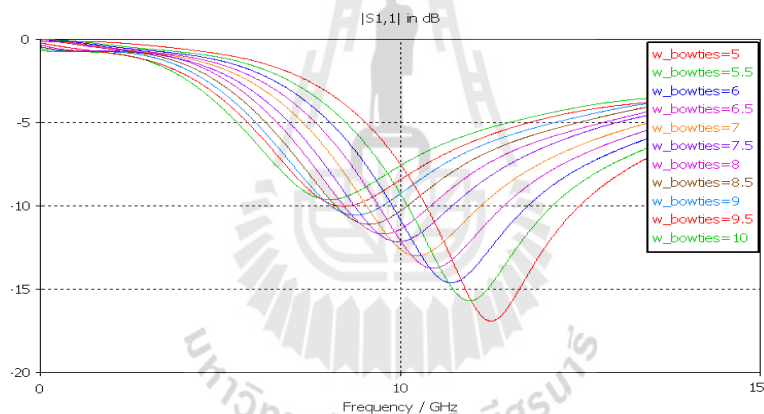
รูปที่ 4.6 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ จากการปรับความยาวไดโพลแบบโบว์ไท



รูปที่ 4.7 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับจากค่าความยาวไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 3.90 มิลลิเมตร

4.3.2) ขนาดความกว้างส่วนปลายของแขนไดโพลแบบโบว์ไท (w_bowtie)

จากผลการจำลองค่าความยาวไดโพลแบบโบว์ไทที่เหมาะสมเท่ากับ 3.90 มิลลิเมตร ต่อมาจากการจำลองค่าที่เหมาะสมของความกว้างส่วนปลายของแขนไดโพลแบบโบว์ไท (w_bowties) โดยยังคงค่าความยาวของไดโพลแบบโบว์ไทและพารามิเตอร์อื่นๆ ไว้เช่นเดิม ซึ่งจากการปรับระยะความกว้างส่วนปลายของแขนไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 5-10 มิลลิเมตร หรือ $0.067\lambda - 0.333\lambda$ พบว่าจากการเพิ่มความกว้างส่วนปลายของแขนไดโพลแบบโบว์ไททำให้ความถี่ที่เรโซแนนซ์มีค่าจะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่า เมื่อขนาดของโครงสร้างหรือพื้นที่ประสิทธิผลมีขนาดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่ที่เรโซแนนซ์สัญญาณลดลง ดังแสดงผลการจำลองในรูปที่ 4.8 ซึ่งจะพบว่า w_bowties ที่สามารถเรโซแนนซ์สัญญาณที่ความถี่ 10 GHz ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 0.25λ (ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับความกว้างส่วนปลายของแขนไดโพลแบบโบว์ไท อยู่แล้วจากค่าเริ่มต้น) จึงได้คงค่าความกว้างส่วนปลายแขนของไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร ไว้เช่นเดิมเพื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์อื่นต่อไป

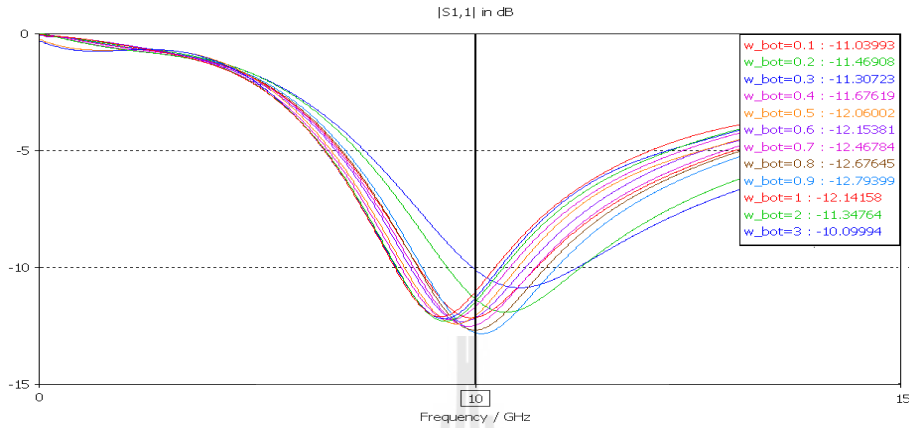


รูปที่ 4.8 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับจากความกว้างไดโพลแบบโบว์ไท

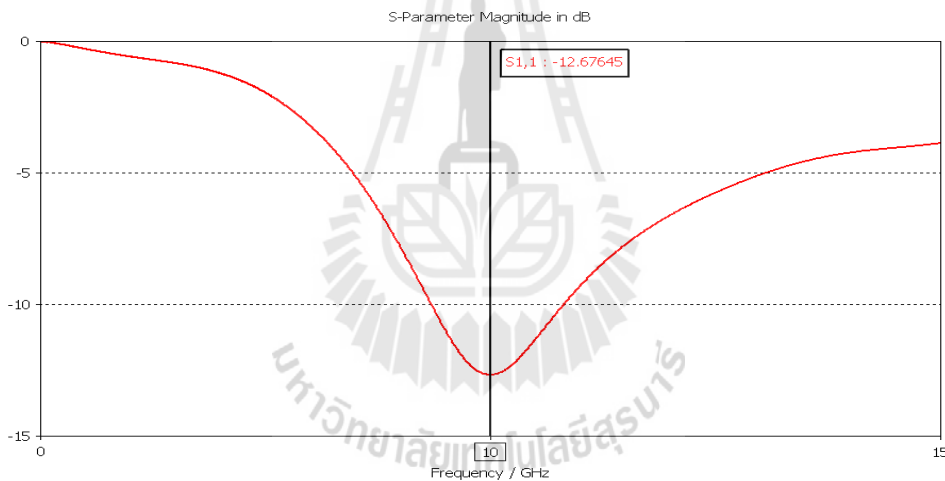
4.3.3) ความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพลแบบโบว์ไท (w_bot)

จากผลการจำลองค่าความยาวไดโพลแบบโบว์ไทที่เหมาะสมเท่ากับ 3.9 มิลลิเมตร และความกว้างส่วนปลายของแขนไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร จากนั้นทำการจำลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพลแบบโบว์ไท (w_bot) ซึ่งเป็นส่วนความกว้างสำหรับการป้อนสัญญาณเข้าเข้า โดยได้จำลองขนาดความกว้างจาก 0.1-3.0 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จากการปรับค่าความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพลแบบโบว์ไทเพิ่มขึ้น ทำให้ความถี่ที่เรโซแนนซ์เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพลแบบโบว์ไทที่เหมาะสมสำหรับความถี่ 10 GHz มีขนาดความกว้างเท่ากับ 0.9 มิลลิเมตรหรือ 0.03λ จึงเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับความกว้าง

ส่วนต้นของแขนไดโพลแบบโบว์ไทต์ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เพื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์อื่นในลำดับถัดไป



รูปที่ 4.9 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพลแบบโบว์ไท่

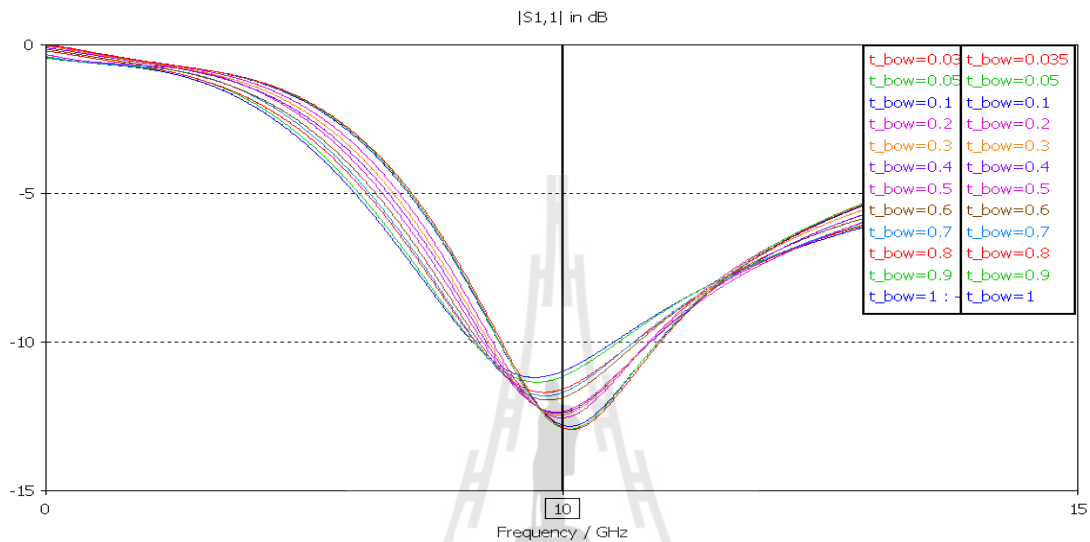


รูปที่ 4.10 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความกว้างส่วนต้นของแขน ไดโพลแบบโบว์ไท่เท่ากับ 0.9 มิลลิเมตร

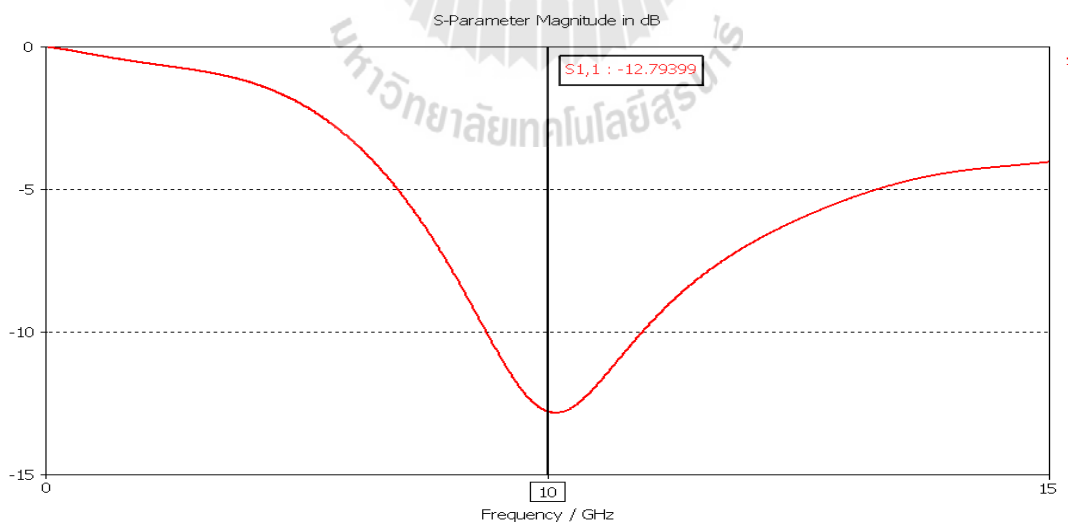
4.3.4) ความหนาของไดโพลแบบโบว์ไท่ (t_bow)

จากผลการจำลองหาค่าที่เหมาะสมของความยาวไดโพลแบบโบว์ไท่เท่ากับ 3.90 มิลลิเมตร ความกว้างส่วนปลายของแขนไดโพลแบบโบว์ไท่เท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร และความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพลแบบโบว์ไท่เท่ากับ 0.9 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาขนาดความหนาของไดโพลแบบโบว์ไท่ (t_bow) ความหนาจาก 0.035 มิลลิเมตร ถึง 1.0 มิลลิเมตร จากผลการจำลองค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับที่ครอบคลุมความถี่ 10 GHz ทุกค่า ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งความหนาเท่ากับ 0.035 มิลลิเมตรเป็นค่าความหนาที่มีค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับที่ดีที่สุด

ซึ่งเป็นค่าติดกับผิวเคลือบบนผิววัสดุฐานรองของแผ่นวงจรพิมพ์โดยทั่วๆ ไป จะมีความบางเกินไป ไม่เหมาะต่อการนำมาขึ้นรูปเป็นไดโพลแบบโบว์ไท จึงได้เลือกค่าความหนาของแผ่นทองสำหรับทำเป็นไดโพลแบบโบว์ไทเป็น 0.1 มิลลิเมตร เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับความหนาของไดโพลแบบโบว์ไทเพื่อใช้ในการพิจารณาค่าพารามิเตอร์อื่นต่อไป ซึ่งได้แสดงผลการจำลองค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความหนาที่เหมาะสมไว้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความหนาไดโพลแบบโบว์ไท

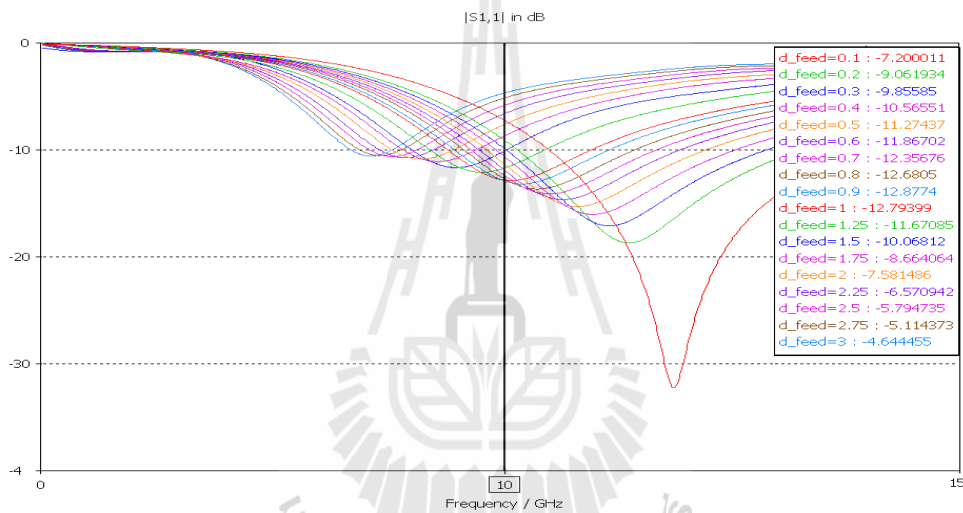


รูปที่ 4.12 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความหนาไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร

4.3.5) ระยะห่างระหว่างแขนของไดโพลแบบโบว์ไทท์ (d_{feed})

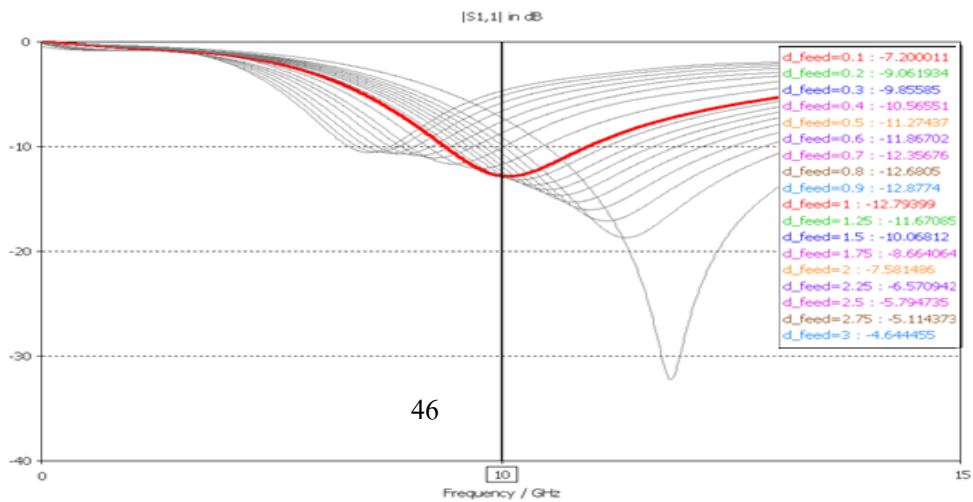
จากผลการจำลองหาค่าที่เหมาะสมของความยาวไดโพลแบบโบว์ไทท์เท่ากับ 3.9 มิลลิเมตร ความกว้างส่วนปลายของแขนไดโพลแบบโบว์ไทท์เท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร ความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพลแบบโบว์ไทท์เท่ากับ 0.9 มิลลิเมตร และความหนาเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร

จากนั้นได้ทำการพิจารณาระยะห่างระหว่างแขนไดโพลแบบโบว์ไทท์ (d_{feed}) โดยการจำลองจากค่า 0.1 ถึง 3.0 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าการเรโซแนนซ์ของความถี่จะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างแขนทั้ง 2 ข้างของไดโพลแบบโบว์ไทท์เพิ่มขึ้น และ เรโซแนนซ์ได้ดีที่สุด ณ ความถี่ 11.83 GHz ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดมาทั้งหมดข้างต้น ดังรูปที่ 4.13



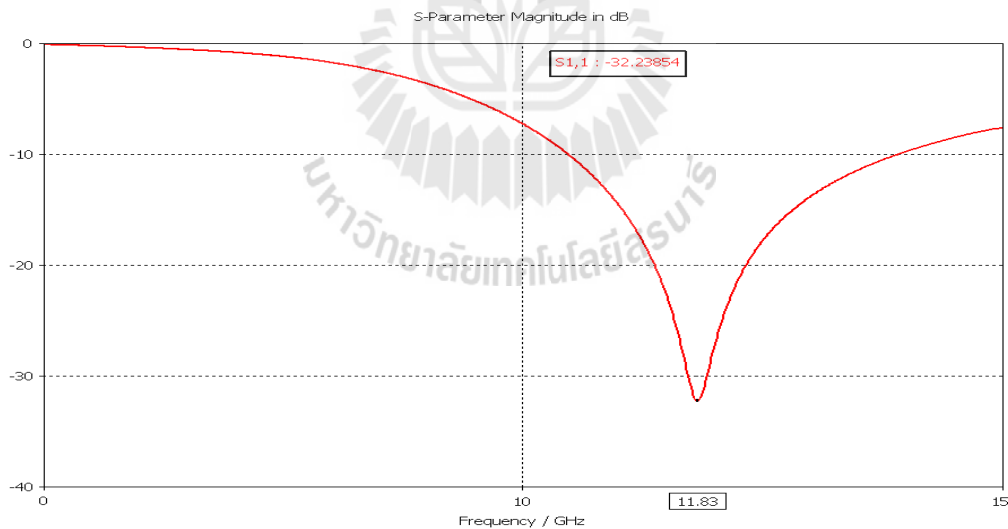
รูปที่ 4.13 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของระยะห่างระหว่างแขนไดโพลแบบโบว์ไทท์

เนื่องจากระยะห่างระหว่างแขนไดโพลแบบโบว์ไทท์เป็นพารามิเตอร์ตัวสุดท้ายของการพารามิเตอร์ทั้งหมดของไดโพลแบบโบว์ไทท์ ซึ่งจากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่า ระยะห่างระหว่างแขนไดโพลแบบโบว์ไทท์จะมีค่าเท่ากับ 1 มิลลิเมตรสามารถเรโซแนนซ์ความถี่ที่ 10 GHz ได้ค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับเท่ากับ -12.27399 dB ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ก็ตาม แต่ไม่ใช่ความถี่ที่เรโซแนนซ์ได้ดีที่สุดของ ณ ตอนนี้อยู่ของระยะห่างระหว่างแขนไดโพลแบบโบว์ไทท์ จากพารามิเตอร์ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 4.14 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของระยะห่างระหว่างแขนไดโพลแบบโบว์ไท เท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร

ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ระยะห่างระหว่างแขนไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับที่ดีที่สุดคือ -32.23854 dB ณ ความถี่ 11.83 GHz เป็นระยะห่างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแขนไดโพลแบบโบว์ไท ดังรูปที่ 4.15

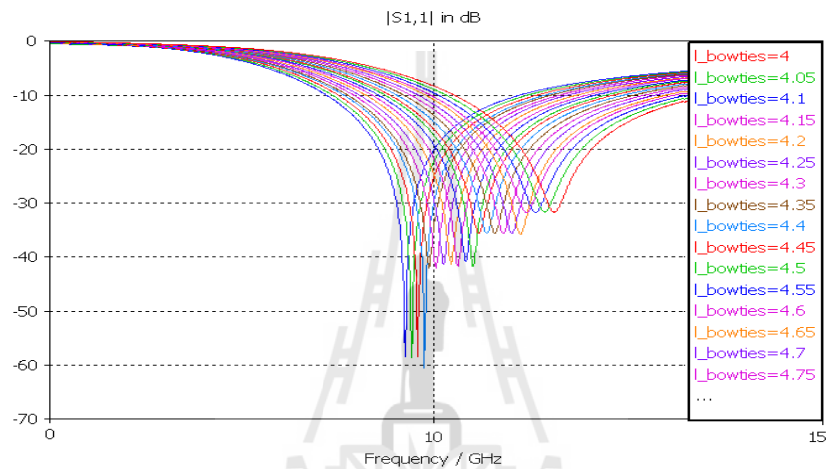


รูปที่ 4.15 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของระยะห่างระหว่างแขนไดโพลแบบโบว์ไท เท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร

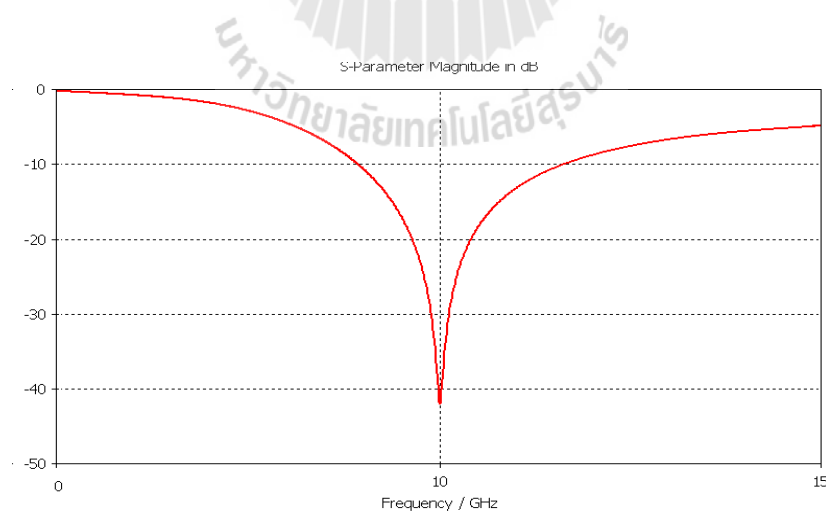
ซึ่งกระบวนการต่อจากนี้เป็นการย้อนกลับไปปรับพารามิเตอร์ ที่สามารถเปลี่ยนความถี่ได้ง่ายที่สุด นั่นคือ ความยาวของไดโพลแบบโบว์ไท จากเดิมที่ขนาดความยาวของโบว์ไทที่เลือกใช้เท่ากับ 3.75 มิลลิเมตร จึงได้ทำการปรับขนาดของความยาวของไดโพลแบบโบว์ไทเพิ่มขึ้น จาก 4 มิลลิเมตร ถึง 5 มิลลิเมตร เพื่อพิจารณาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความถี่ 10 GHz ดังแสดงค่าผลการ

จำลองค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับในรูปที่ 4.16 ซึ่งจะสังเกตได้ว่า ความยาวไดโพลแบบโบว์ไทท์ ที่สามารถเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 10 GHz ได้ดีที่สุดในรูปที่ 4.16 คือ 4.75 – 4.8 มิลลิเมตร โดยได้ปรับความยาวไดโพลแบบโบว์ไทท์เป็น 4.7625 มิลลิเมตร ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ความถี่ที่ 10 GHz ได้ดีที่สุดในรูปที่ 4.16 โดยมีค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับมีค่าเท่ากับ -41.96328 dB และความกว้างแถบเท่ากับ 2.686 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ

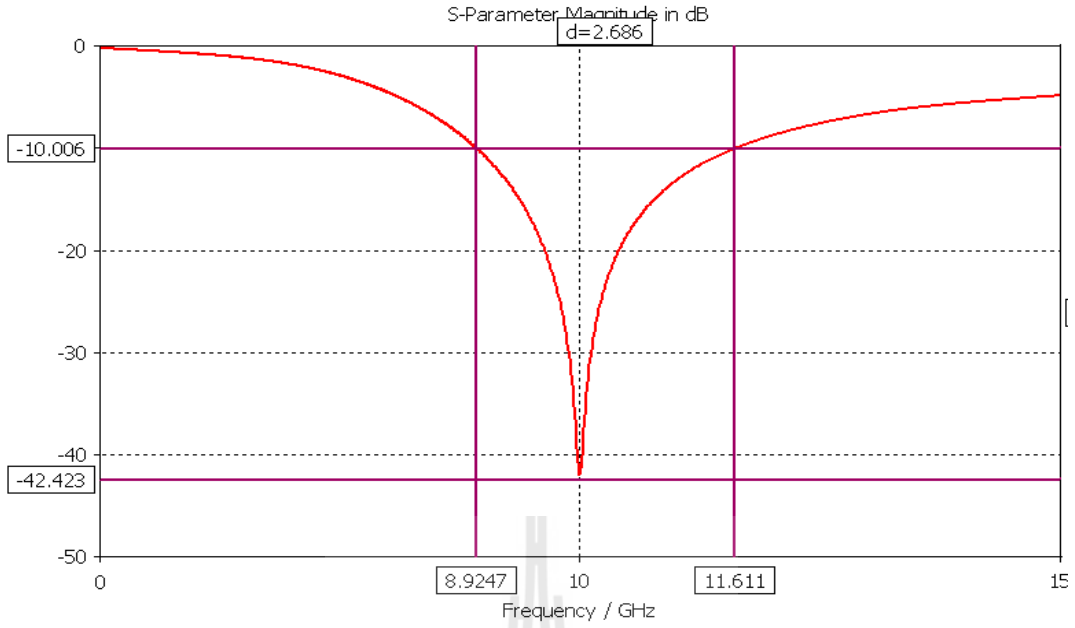
ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาอัตราขยายของไดโพลแบบโบว์ไทท์ จะมีค่าเท่ากับ 2.257 dB รวมทั้ง ได้แสดงแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศ และค่าอัตราขยายของสายอากาศ ดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ



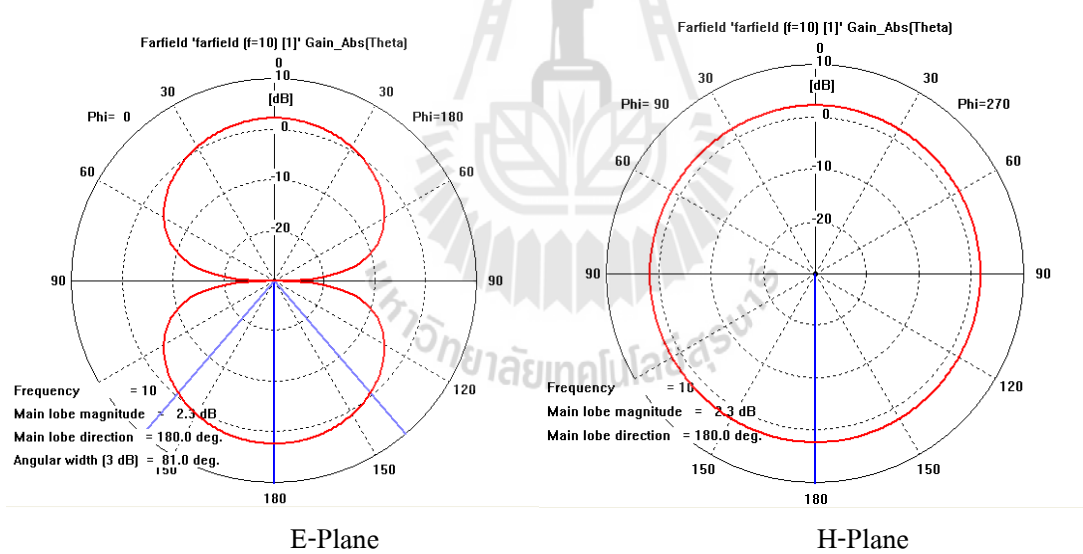
รูปที่ 4.16 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความยาวไดโพลแบบโบว์ไทท์



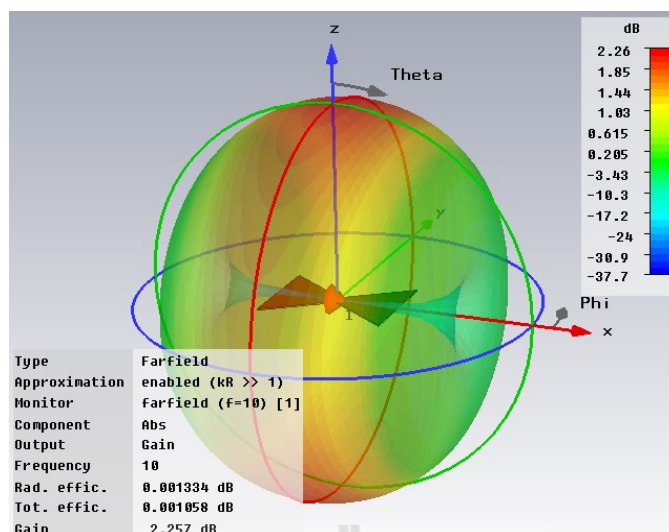
รูปที่ 4.17 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความยาวไดโพลแบบโบว์ไทท์เท่ากับ 4.7625 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.18 แสดงความกว้างแถบของความยาวไดโพลแบบโบว์ไท



รูปที่ 4.19 แบบรูปการแผ่กำลังงานระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) ของไดโพลแบบโบว์ไท



รูปที่ 4.20 แสดงค่าอัตราขยายของไดโพลแบบโบว์ไท

ดังนั้นสามารถสรุปพารามิเตอร์ทั้งหมดของตัวกระตุ้น ไดโพลแบบโบว์ไทได้ดังนี้

ความยาวของไดโพลแบบโบว์ไท (l_bowties)	=	4.7625	มิลลิเมตร
ความกว้างส่วนปลายของแขนไดโพลแบบโบว์ไท (w_bowties)	=	7.5	มิลลิเมตร
ความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพลแบบโบว์ไท (w_bot)	=	0.9	มิลลิเมตร
ความหนาของไดโพลแบบโบว์ไท (t_bow)	=	0.1	มิลลิเมตร
ระยะห่างระหว่างแขนไดโพลแบบโบว์ไท (d_feed)	=	0.1	มิลลิเมตร

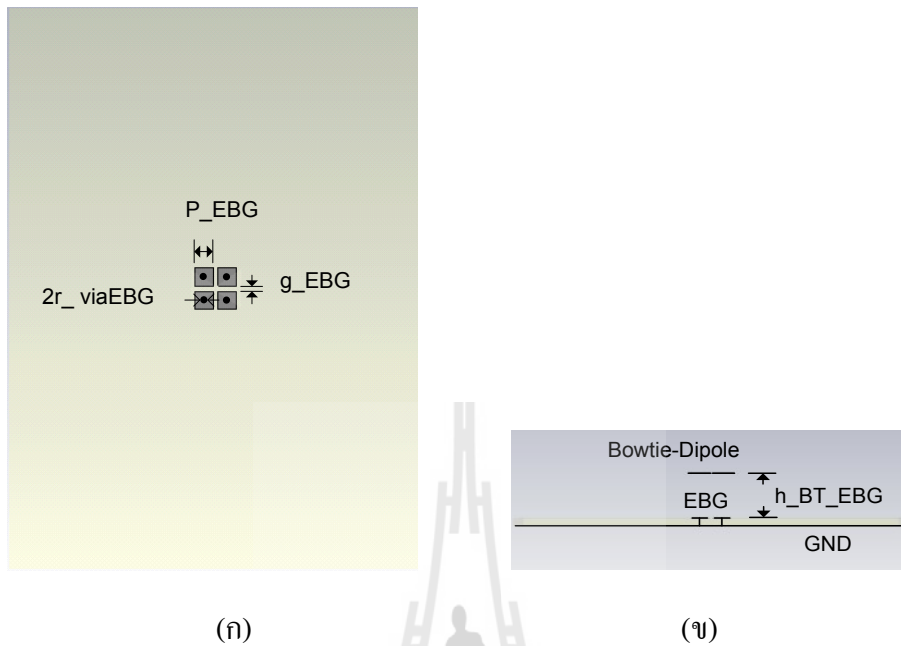
4.4 พิจารณาผลการจำลองตัวกระตุ้นกำลังงานด้วยตัวกระตุ้นไดโพลแบบโบว์ไท (Bowtie Dipole)

ร่วมกับ EBG

4.4.1) จำลอง EBG 1 unit วางตำแหน่งกึ่งกลางของระนาบกราวด์

โดยกำหนดให้ จำนวน EBG 1 หน่วย เท่ากับ 4 เซลล์ ซึ่งแต่ละเซลล์ จะมีขนาดความกว้างและความยาวแทนด้วยตัวแปร P_{EBG} รัศมีตัวเชื่อมแทนด้วยตัวแปร r_{viaEBG} และระยะห่างระหว่างเซลล์แทนด้วยตัวแปร g_{EBG} ตามลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 4.20 โดยได้กำหนดค่าเริ่มต้นจากบทที่ 4 เรื่องการออกแบบโครงสร้าง EBG ที่เหมาะสม[Fan Yang and Yahya Rahmat-Samii :2009] ได้ทำการจำลองโดยเลือกใช้วัสดุฐานรองเป็น FR4 เนื่องจากสามารถลดต้นทุนของราคาวัสดุจากเดิมและสามารถหาซื้อได้ง่ายกว่า ซึ่งมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเท่ากับ 4.4 โดยที่ขนาดความกว้างและความยาวแผ่นวัสดุฐานเท่ากับขนาดของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปจำนวน 2×4 อีลิเมนต์ จากหัวข้อที่ 4.2 ที่ได้กล่าวมาข้างต้น นั่นคือ 81 มิลลิเมตร และ 110 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยเริ่มต้นจากการจำลองหาค่าความสูงระหว่าง EBG บนระนาบกราวด์ด้วยวัสดุฐานรองเป็น FR4 กับ

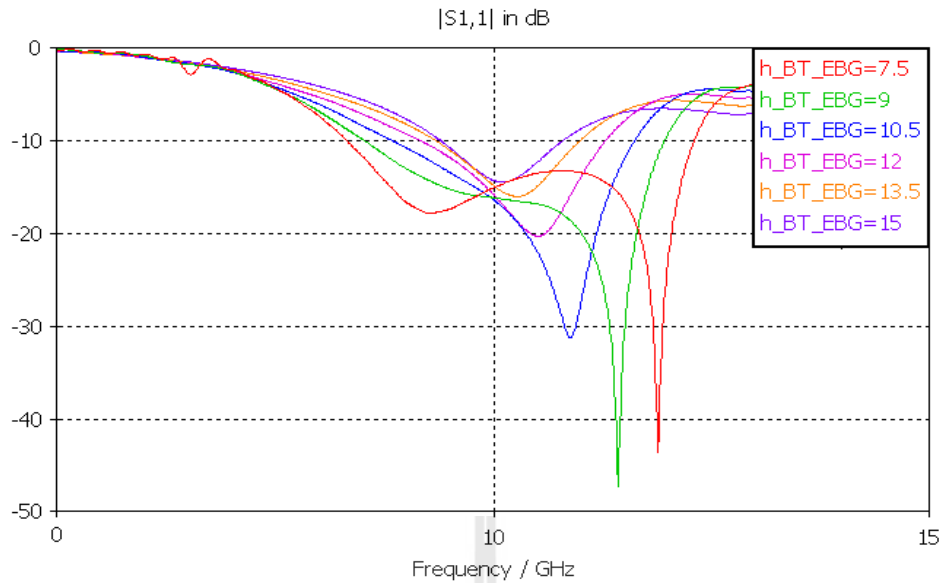
ตัวกระตุ้นสัญญาณ ไดโพลแบบโบว์ไท่ ซึ่งในที่นี้แทนด้วยตัวแปร h_{BT_EBG} เป็นพารามิเตอร์แรก สำหรับการพิจารณา ดังนั้นสามารถสรุปพารามิเตอร์ต่างของ EBG ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.21 แสดงโครงสร้างตัวป้อนสัญญาณ ไดโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG (ก) จำนวน 1 หน่วย (ข) ไดโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG (ด้านข้าง)

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของ EBG

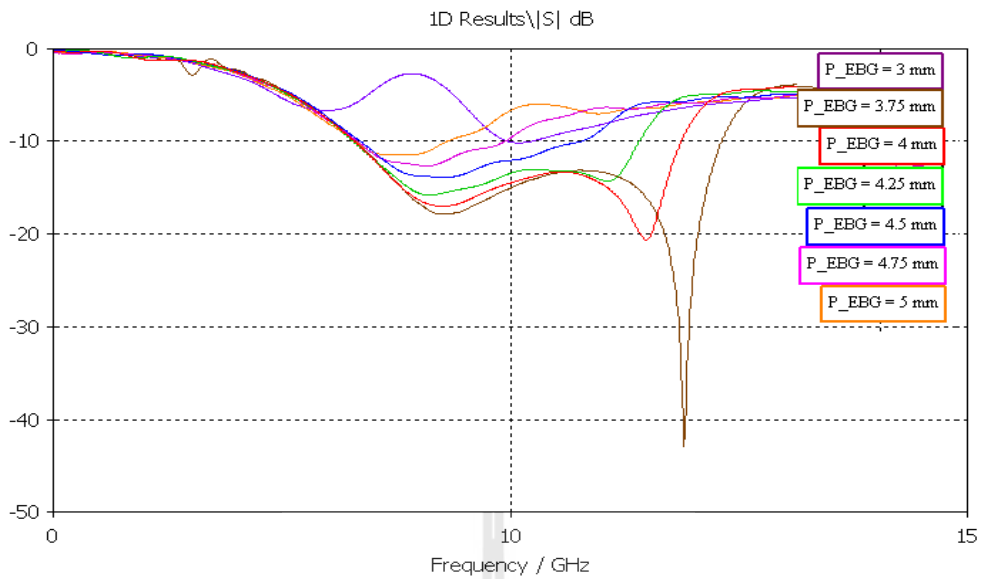
ขนาด EBG (กว้าง X ยาว) : P_EBG	$0.12\lambda \times 0.12\lambda$
รัศมีตัวเชื่อม EBG : r_viaEBG	0.005λ
ระยะห่างระหว่างเซลล์ EBG : g_EBG	0.02λ



รูปที่ 4.22 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความสูงระหว่าง โบว์ไทท์กับ EBG

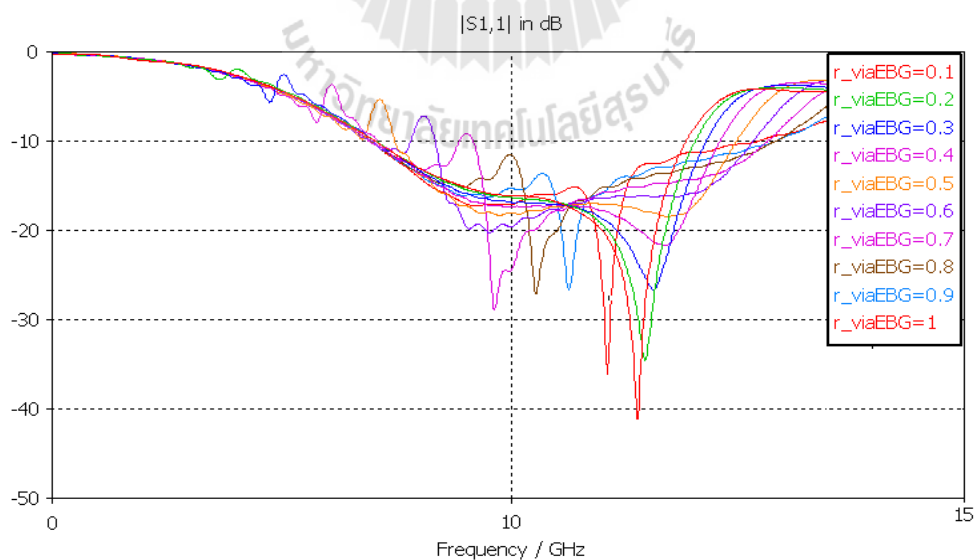
ผลการจำลองค่าความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทท์กับ EBG จาก 7.5 มิลลิเมตร ($\lambda/4$) ถึง 15 มิลลิเมตร ($\lambda/2$) เพื่อพิจารณาความสูงที่เหมาะสมสำหรับการเรโซแนนซ์ ณ ความถี่ 10 GHz ปรากฏว่า ค่าความสูงที่ให้ค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ ณ ความถี่ 10 GHz ต่ำที่สุด มีค่าความสูงเท่ากับ 9.0 มิลลิเมตร จึงได้ทำการเลือกค่าความสูงเท่ากับ 9.0 มิลลิเมตร เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับเริ่มต้นพิจารณา คุณสมบัติของพารามิเตอร์ EBG แต่ละตัว เนื่องจากมีค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับที่ต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.22

ต่อมา ได้ทำการพิจารณาขนาดความกว้างและความยาวของ EBG (P_EBG) จาก 3 มิลลิเมตร ถึง 5 มิลลิเมตร ปรากฏว่าขนาดของ EBG ที่ 3.75 มิลลิเมตร 4.0 มิลลิเมตร และ 4.25 มิลลิเมตร เป็นค่าที่เหมาะสมเนื่องจากค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ที่ชัดเจนที่สุด ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นค่า P_EBG ซึ่งเป็นพารามิเตอร์แรกสำหรับใช้พิจารณาพารามิเตอร์อื่นต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ซึ่งในที่นี้ได้เลือก ขนาดของ EBG เท่ากับ 3.75 มิลลิเมตร เพื่อพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงขนาดของรัศมีของตัวเชื่อมที่มีผลต่อการเรโซแนนซ์ของความถี่ต่อไป



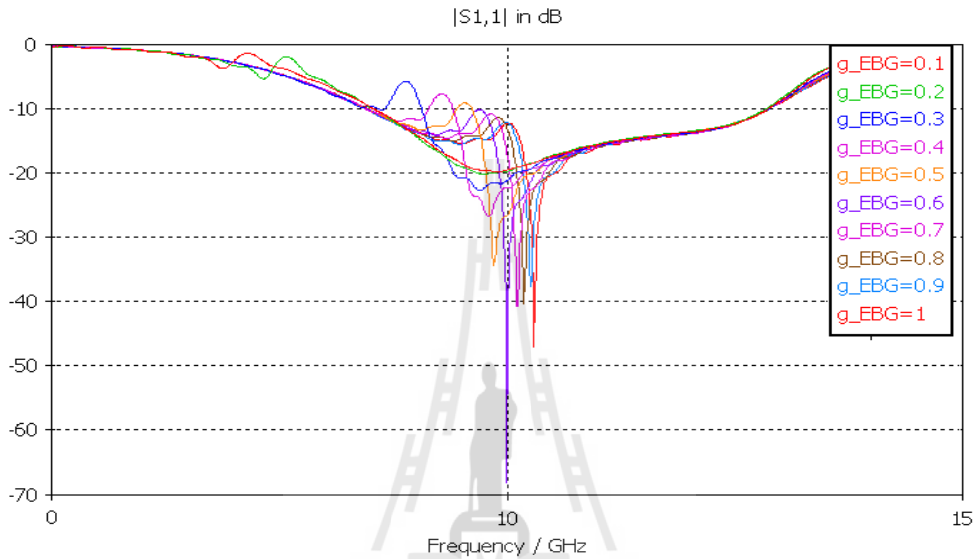
รูปที่ 4.23 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับจากการปรับขนาด EBG

พารามิเตอร์ตัวถัดมาจากรูปร่างและความยาวของ EBG ที่นำมาพิจารณาผลการเรโซแนนซ์ของความถี่จากขนาดของโครงสร้าง นั่นคือ รัศมีตัวเชื่อมของ EBG (r_{viaEBG}) ซึ่งจะพบว่าขนาดรัศมี จาก 0.1-1.0 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับที่ดีที่สุดของแต่ละขนาด จะเห็นได้ว่า เมื่อรัศมีของตัวเชื่อมขนาดใหญ่ขึ้น ผลของการเรโซแนนซ์ของความถี่จะยิ่งต่ำลง ซึ่งค่าที่เกิดการเรโซแนนซ์ ณ ความถี่ 10 GHz ได้ดีที่สุดคือ 0.7 มิลลิเมตร ซึ่งได้เลือกใช้เป็นรัศมีตัวเชื่อม และพิจารณาพารามิเตอร์ตัวอื่นต่อไป ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของรัศมีตัวเชื่อม

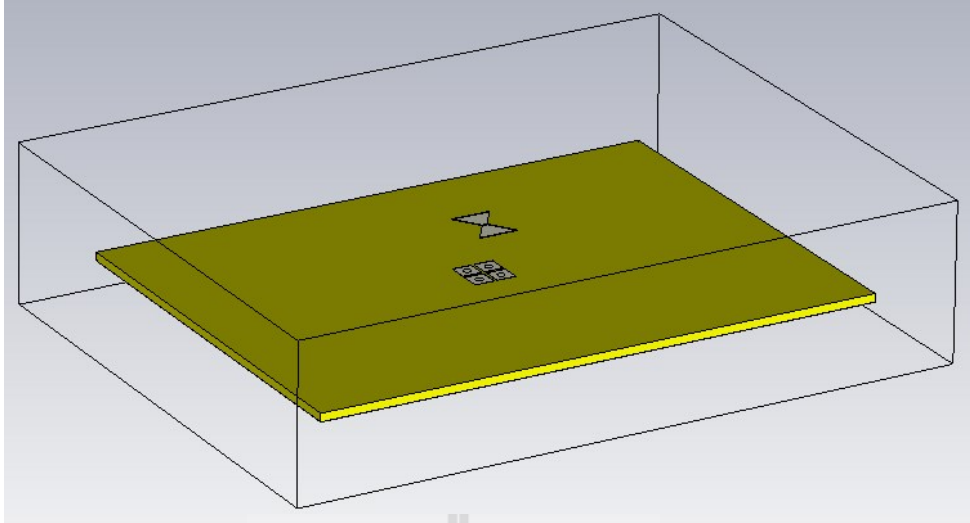
ต่อจากนั้นได้ พิจารณาความกว้างของช่องว่างระหว่างเซลล์ของ EBG (g_EBG) ด้วยการกำหนดพารามิเตอร์ตัวที่ได้กล่าวมาแล้วไว้เช่นเดิม โดยการพิจารณาจากค่า g_EBG เท่ากับ 0.1-1.0 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่า ระยะช่องว่างที่เลือกมาจำลองผลตลอดช่วงที่ได้กล่าวมา สามารถเรโซแนนซ์ความถี่ที่ 10 GHz ได้ทุกค่า ซึ่งระยะห่างของว่างที่เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณที่ความถี่ 10 GHz ได้น้อยที่สุด คือ 0.6 มิลลิเมตร จึงใช้ค่าช่องว่างระหว่างเซลล์เท่ากับ 0.6 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.24 เป็นค่าที่เหมาะสมในการพิจารณาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องตัวอื่นต่อไป



รูปที่ 4.25 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของช่องว่างระหว่างเซลล์

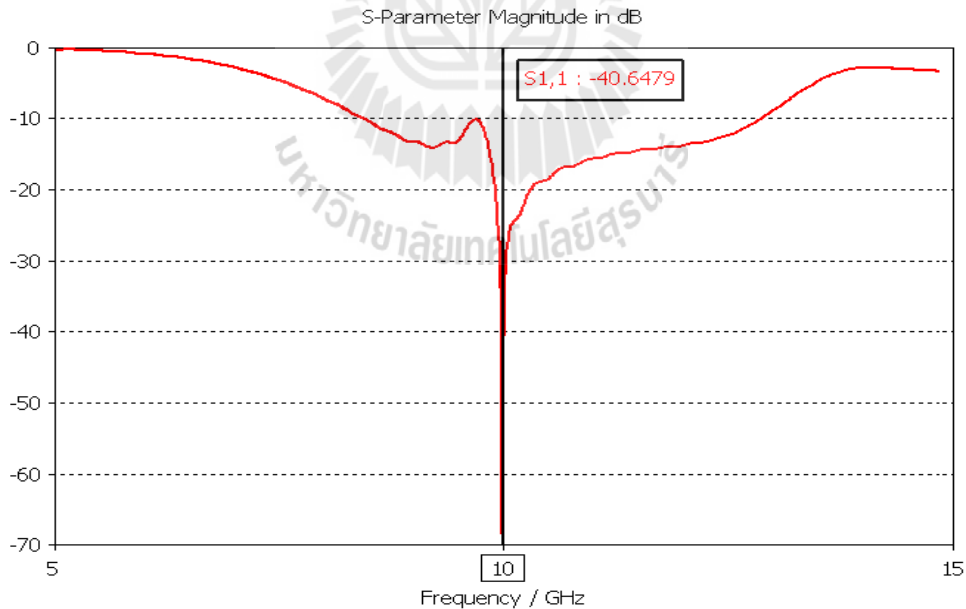
จากการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทุกตัวของ EBG 1 หน่วย หรือจำนวน 2×2 เซลล์ โดยการวางตัวบริเวณกึ่งกลางของแผ่นวงจรพิมพ์ร่วมกับไดโพลแบบโบว์ไท สามารถสรุปพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทั้งหมดสำหรับความถี่ 10 GHz ได้ดังนี้ และลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 4.26

ขนาดความกว้างของ EBG (P_EBG)	=	3.75	มิลลิเมตร
ความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทกับ EBG (h_BT_EBG)	=	9.0	มิลลิเมตร
รัศมีตัวเชื่อม (r_viaEBG)	=	0.735	มิลลิเมตร
ช่องว่างระหว่างเซลล์ (g_EBG)	=	0.6	มิลลิเมตร

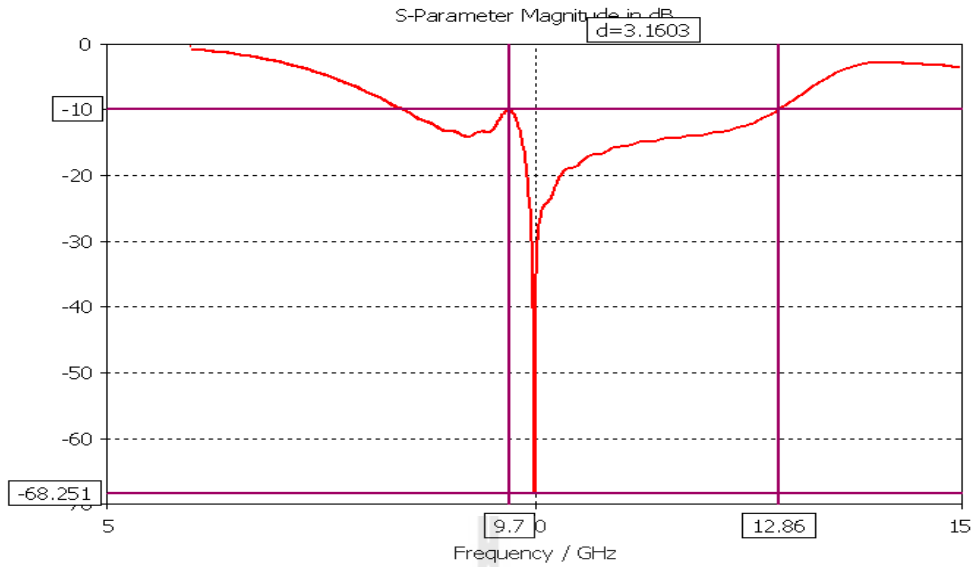


รูปที่ 4.26 แสดงค่าโครงสร้างตัวป้อนไดโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG 1 หน่วย

จากการจำลองโครงสร้างด้วยพารามิเตอร์ดังกล่าว พบว่า ค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ ณ ความถี่ 10 GHz มีค่าเท่ากับ -40.6479 dB และมีความกว้างแถบเท่ากับ 3.1603 GHz ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติเรื่องความกว้างแถบที่ค่อนข้างกว้างสำหรับไดโพลแบบโบว์ไท่ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และ 4.28 ตามลำดับ

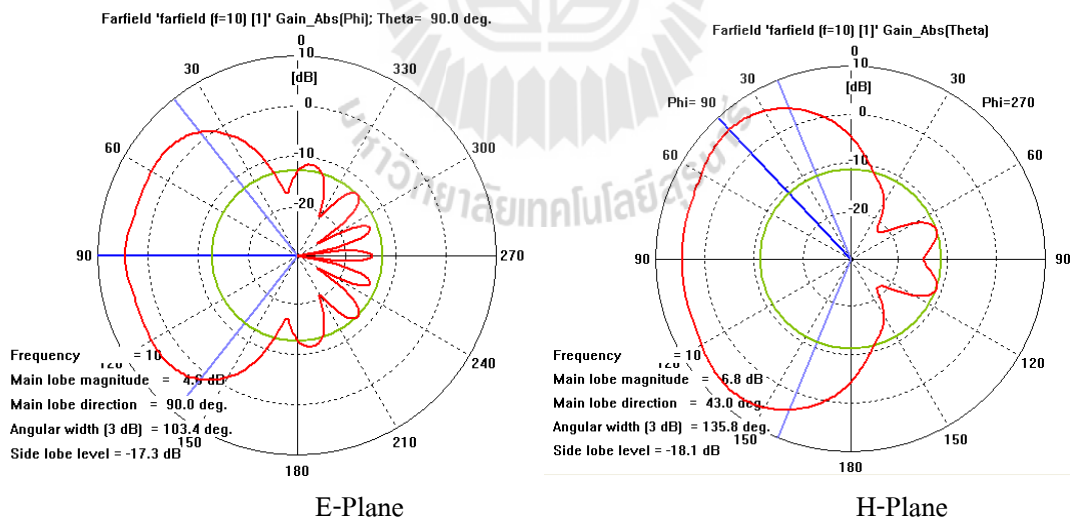


รูปที่ 4.27 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของตัวป้อนไดโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG 1 หน่วย

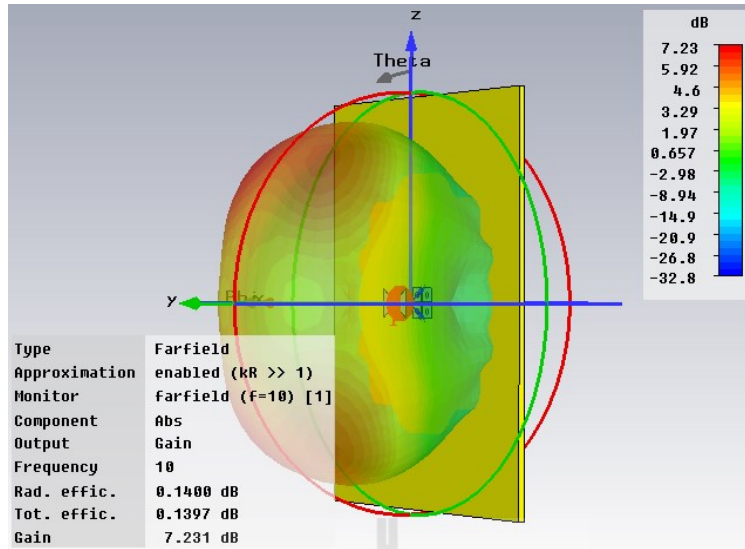


รูปที่ 4.28 แสดงค่าความกว้างแถบของตัวป้อนไดโพลแบบโบว์ไทร่วมกับ EBG 1 หน่วย

ซึ่งผลการพิจารณาแบบรูปการแผ่กำลังงานของตัวป้อนไดโพลแบบโบว์ไทร่วมกับ EBG 1 หน่วย โดยที่มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีทิศทางการแผ่กำลังงานในด้านหน้า เท่ากับ 103.4 องศา และ 135.8 องศา ตามลำดับ และค่าอัตราขยาย เท่ากับ 7.231 dB ดังแสดงในรูปที่ 4.29 และ 4.30 ตามลำดับ



รูปที่ 4.29 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังงานระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) ของตัวป้อนไดโพลแบบโบว์ไทร่วมกับ EBG 1 หน่วย



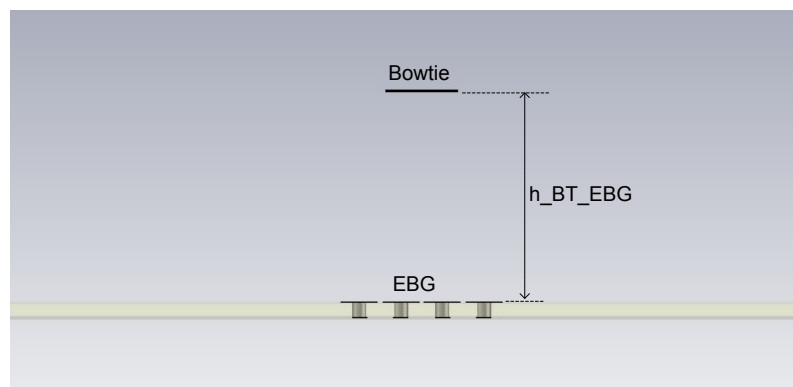
รูปที่ 4.30 แสดงอัตรายายของตัวป้อนไดโพลแบบโบว์ไทร่วมกับ EBG 1 หน่วย

สำหรับขั้นตอนต่อไป จะกล่าวถึงการพิจารณาพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกหนึ่งตัว คือ ช่องว่างระหว่างหน่วยเซลล์ (g_{unit}) เมื่อทำการเพิ่มจำนวนเซลล์ EBG มากขึ้น ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

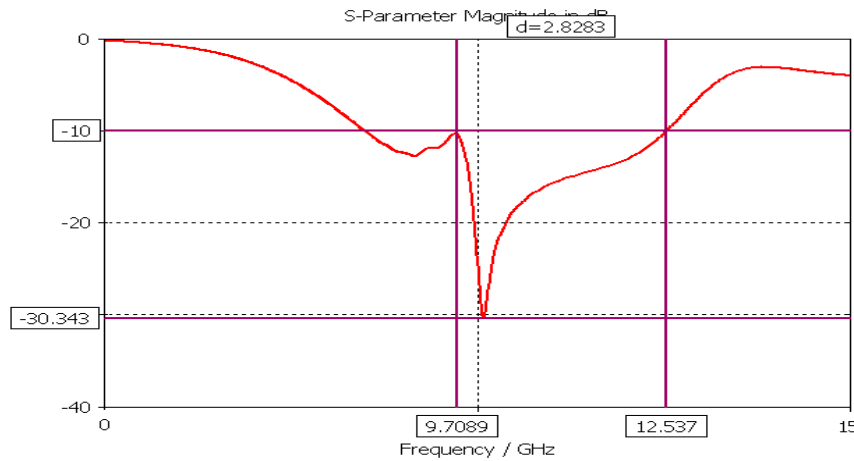
4.4.2) จำลอง EBG 2 unit วางตำแหน่งกึ่งกลางของระนาบกราวด์

ก) พิจารณาความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทร่วมกับ EBG ที่เหมาะสม

ได้ทำการจำลอง EBG จำนวน 2 หน่วยเซลล์ซึ่งแต่ละหน่วยเซลล์มีขนาดพารามิเตอร์ ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยกำหนดให้ ช่องว่างระหว่างหน่วยเซลล์ (g_{unit}) มีขนาดเท่ากับ ช่องว่างระหว่างเซลล์ (g_{EBG}) คือ 0.6 มิลลิเมตร โดยพิจารณาความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทร่วมกับ EBG (h_{BT_EBG}) แสดงดังรูปที่ 4.31

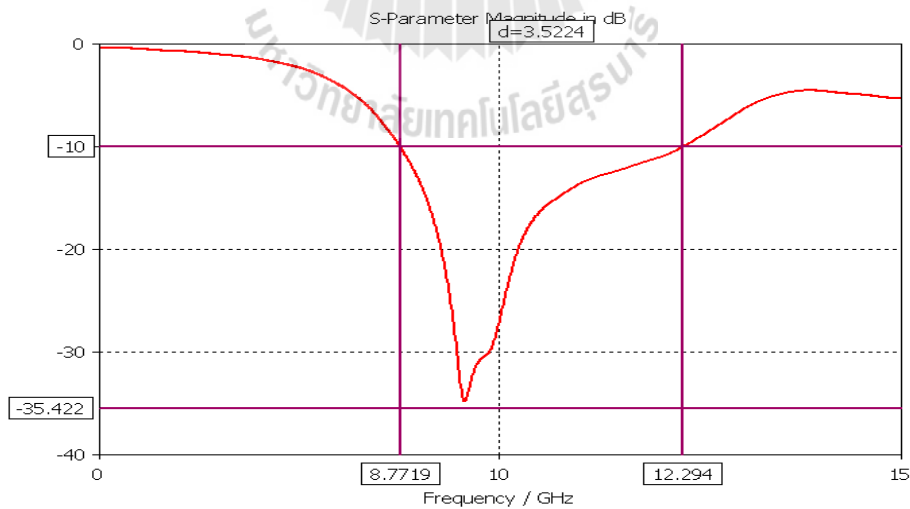


รูปที่ 4.31 แสดงความสูงระหว่างไดโพลแบบ โบว์ไทร่วมกับ EBG



รูปที่ 4.32 แสดงความกว้างแถบตัวป้อน เมื่อความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทท์กับ EBG เท่ากับ 9 มิลลิเมตร (0.3λ)

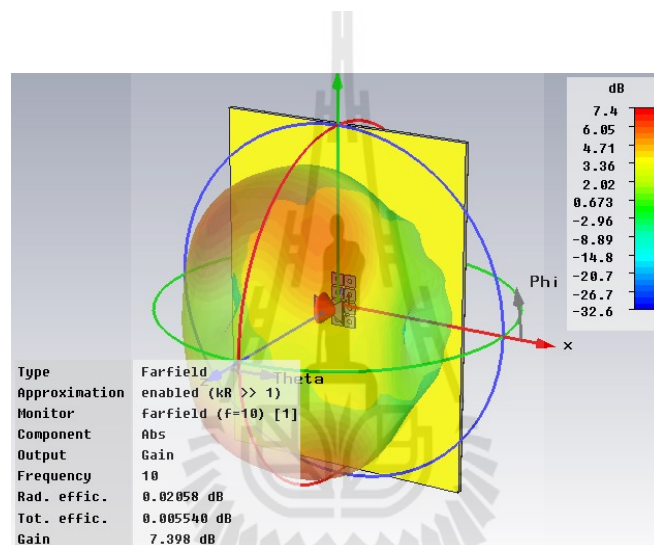
จากผลการจำลองการเรโซแนนซ์ของตัวป้อน ร่วมกับ EBG จำนวน 2 หน่วย ที่ความสูงเท่ากับ 9 (0.3λ) มิลลิเมตร พบว่าการเรโซแนนซ์ของความกว้างแถบไม่ได้ครอบคลุมความถี่กลางของการออกแบบเท่าที่ควร ถึงแม้ว่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของกำลังงาน ณ ความถี่ 10 GHz จะมีค่าต่ำสุดก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 4.32 จึงได้พิจารณาความสูงอื่น โดยการคงค่าพารามิเตอร์ทุกตัวของไดโพลแบบโบว์ไทท์ และ EBG เพื่อหาระยะความสูงที่เหมาะสมของการเรโซแนนซ์เพื่อครอบคลุมความถี่กลางมากที่สุด



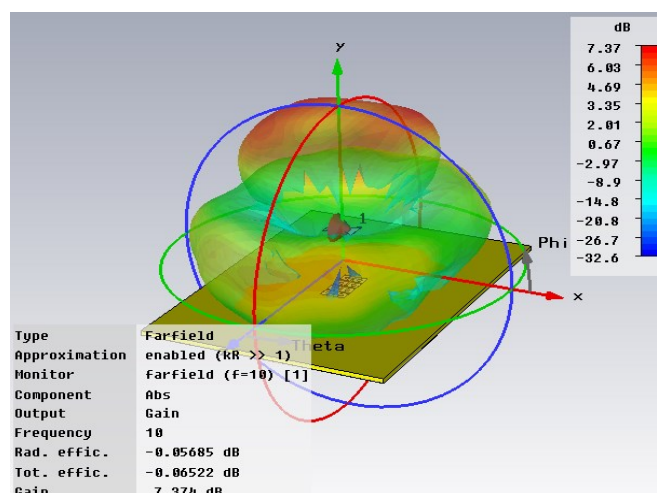
รูปที่ 4.33 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทท์กับ EBG เท่ากับ 0.75λ

จากการปรับระยะความสูงของไดโพลแบบโบว์ไทเป็น $3\lambda/4$ หรือ 0.75λ ซึ่งเท่ากับ 22.5 มิลลิเมตร ทำให้การเรโซแนนซ์สัญญาณของตัวป้อน ณ ความถี่ 10 GHz ครอบคลุมความถี่กลางที่ ออกแบบมากขึ้น ดังรูปที่ 4.33 และพบว่า ความสูงระหว่าง EBG กับไดโพลแบบโบว์ไท เท่ากับ 0.75λ ทำให้ความกว้างแถบของตัวป้อนมีค่ามากขึ้นจาก 2.8283 dB เป็น 3.5224 GHz ซึ่งมีความถี่เรโซแนนซ์ที่ครอบคลุมความถี่กลางของการจำลองมากขึ้น

เมื่อพิจารณาอัตราขยาย จะมีค่าเท่า 7.374 dB ถึงแม้จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความสูง 0.75λ ซึ่งมีอัตราขยายเท่ากับ 7.398 dB แต่มีแบบรูปการแผ่กำลังงานหรือทิศทางของลำคลื่นบริเวณด้านหน้าที่ยากขึ้น กล่าวคือความสูงที่ 0.75λ ให้ลักษณะของโพลด้านหน้าที่เหมาะสมกว่าความสูงเท่ากับ 0.3λ ดังแสดงในรูปที่ 4.34 และ 4.35



รูปที่ 4.34 แสดงอัตราขยายของความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทกับ EBG เท่ากับ 0.3λ

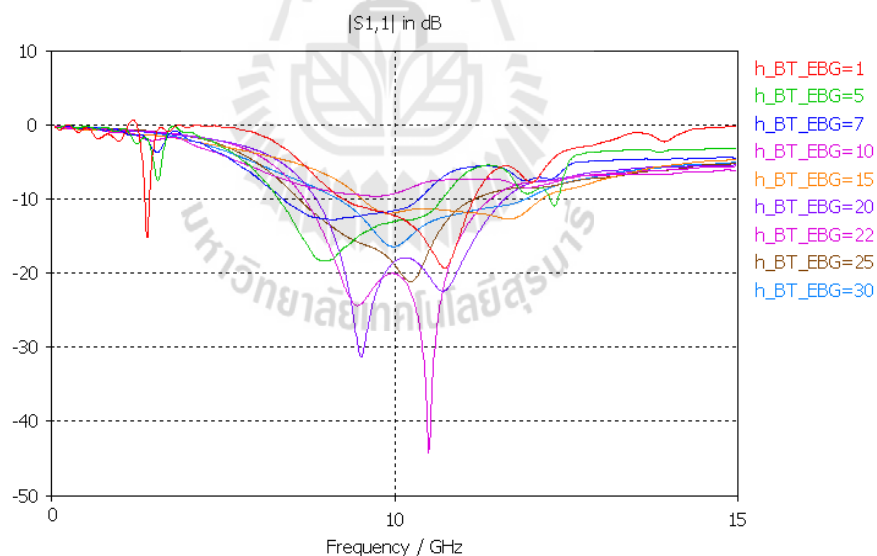


รูปที่ 4.35 แสดงอัตราขยายของความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทกับ EBG เท่ากับ 0.75λ

จากผลพิจารณาค่าความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทท์กับ EBG ที่เหมาะสม ซึ่งสามารถ เรโซแนนซ์ความถี่ตามที่ออกแบบและค่าคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพการสะท้อน ความกว้าง แถบ อัตรายาย และลักษณะแบบรูปการแผ่กำลังงาน ทำให้ค่าความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทท์ กับ EBG เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญและต้องพิจารณาให้มากขึ้น โดยได้พิจารณาในละเอียดอีกครั้งหนึ่ง จึงได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของ EBG ใหม่ทั้งหมดเพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่ครอบคลุมความถี่กลางของการออกแบบมากที่สุด และยังคงรักษาค่าอัตรายายให้มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าเดิมที่สุดด้วยเช่นกัน โดยใช้การตัดสินใจจากผลการจำลองพารามิเตอร์ของ EBG แต่ละตัว ในหัวข้อที่กล่าวมาข้างต้น จึงสามารถสรุปพารามิเตอร์ของ EBG ดังต่อไปนี้

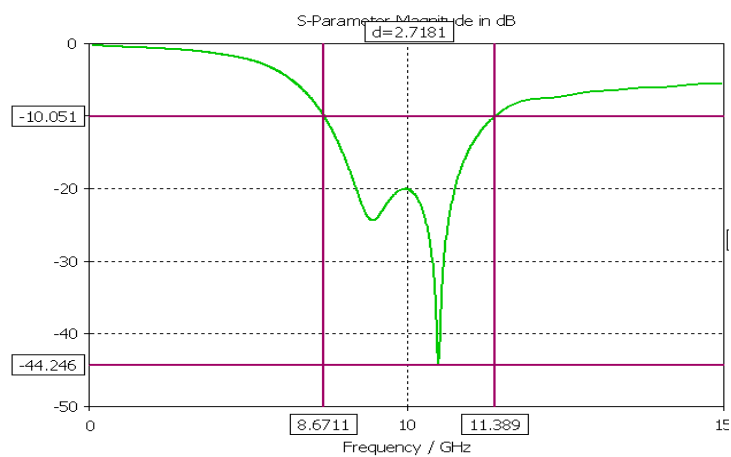
P_EBG	=	5	มิลลิเมตร
r_viaEBG	=	0.45	มิลลิเมตร
g_EBG	=	1	มิลลิเมตร

ซึ่งผลการจำลองความสูงของไดโพลแบบโบว์ไทท์กับ EBG ณ ความถี่ 10 GHz ที่ระยะ $0.033\lambda - 1\lambda$ (1-30 มิลลิเมตร) ค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 4.36

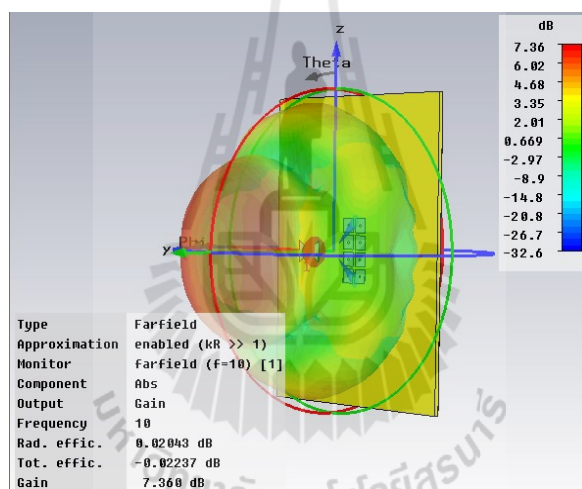


รูปที่ 4.36 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับจากความสูงของไดโพลแบบโบว์ไทท์กับ EBG

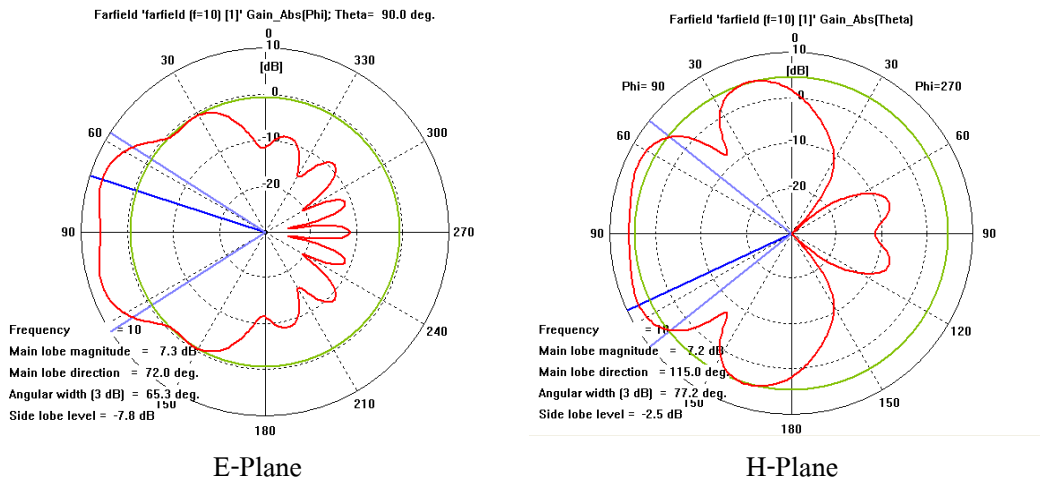
ซึ่งจากผลการจำลองระยะความสูงเท่ากับ 22 มิลลิเมตรสามารถเรโซแนนซ์ความถี่ ณ 10 GHz ได้ดีที่สุด มีค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับเท่ากับ -20.31229 dB ความกว้างแถบเท่ากับ 2.7181 GHz ครอบคลุมช่วงความถี่ 8.6711 GHz ถึง 11.389 GHz ดังรูปที่ 4.37 ซึ่งให้ค่าอัตรายาย เท่ากับ 7.360 dB ดังแสดงในรูปที่ 4.38 และรูปการแผ่กำลังงานได้แสดงดังรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.37 แสดงความกว้างแถบของไดโพลแบบโบว์ไท่กับ EBG ที่ความสูงเท่ากับ 22 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.38 แสดงอัตราขยายของไดโพลแบบโบว์ไท่กับ EBG ที่ความสูง 22 มิลลิเมตร



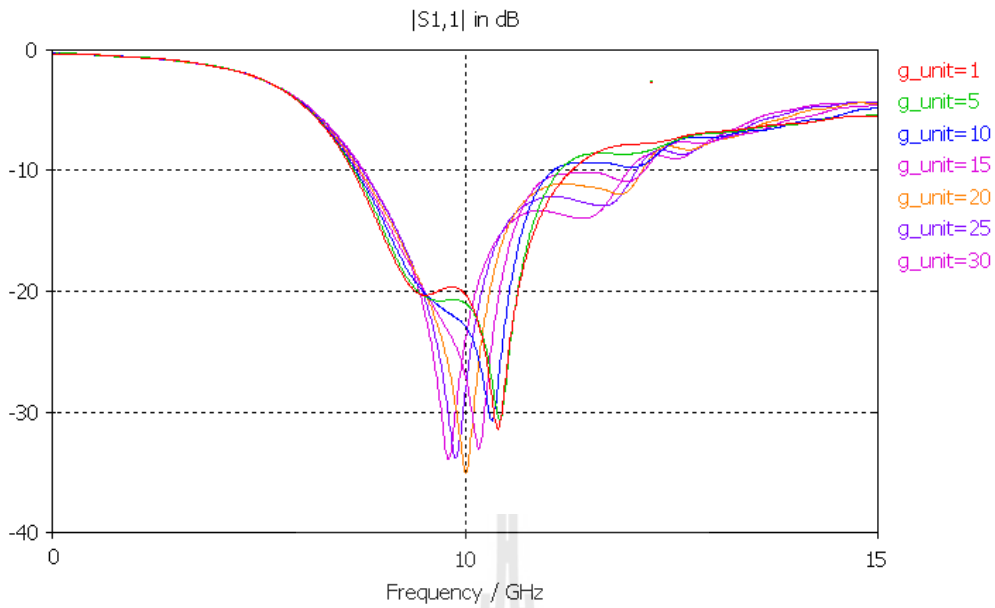
รูปที่ 4.39 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังงานระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็กของไดโพลแบบโบว์ไทท์กับ EBG ที่ความสูงเท่ากับ 22 มิลลิเมตร

ดังนั้นผลจากการปรับพารามิเตอร์ของ EBG และความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทท์กับ EBG ที่เหมาะสมจากที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดของขั้นตอนการพิจารณาช่องว่างระหว่างหน่วยเซลล์ในขั้นตอนต่อไป

จ) พิจารณาช่องว่างระหว่างหน่วยเซลล์ (g_unit) ของ EBG ที่เหมาะสม

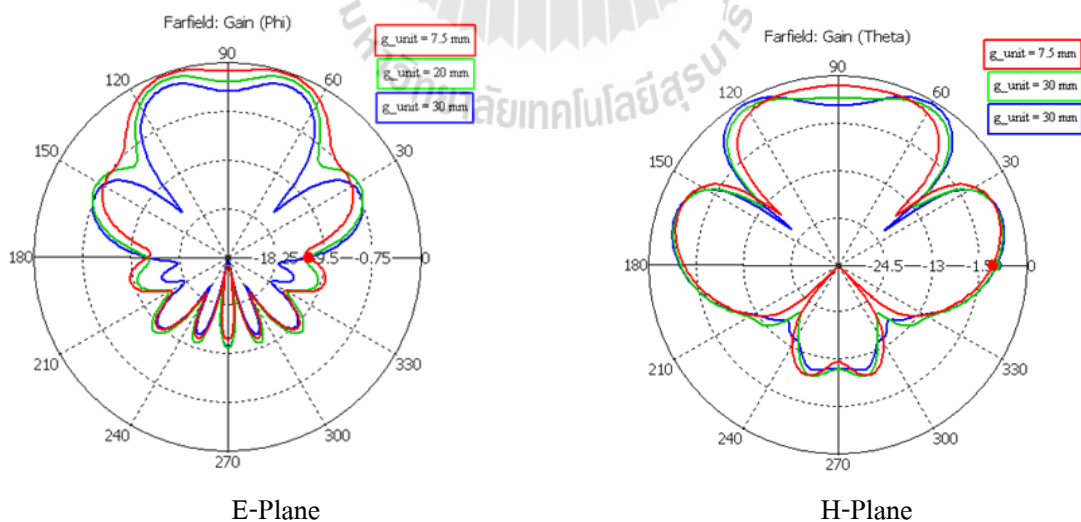


รูปที่ 4.40 โครงสร้าง EBG 2 หน่วยเซลล์



รูปที่ 4.41 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของช่องว่างระหว่าง EBG 2 หน่วย

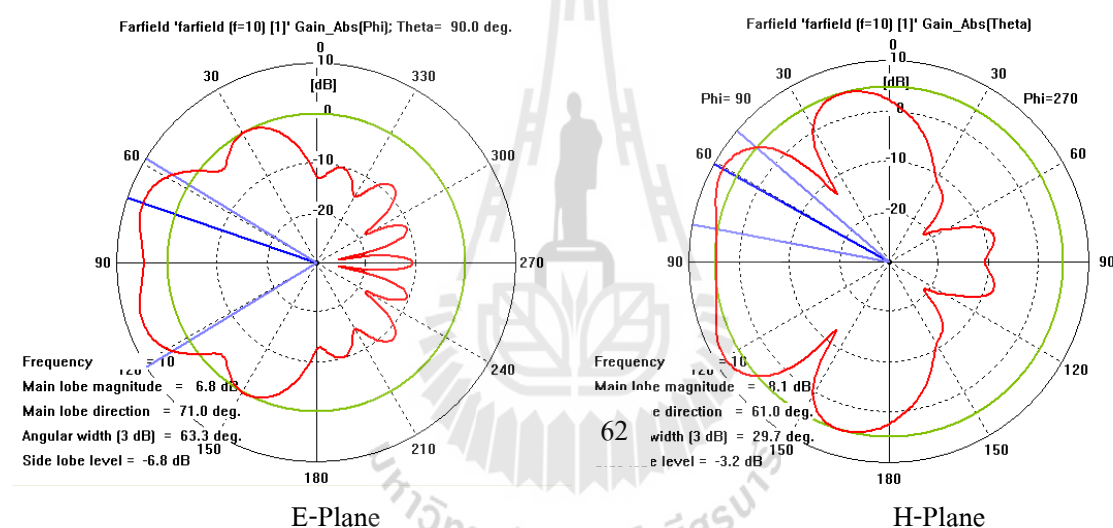
ด้วยระยะความสูงระหว่างไดโพลแบบโพลโทรมกับ EBG เท่ากับ 22 มิลลิเมตร จากนั้นทำการพิจารณาระยะห่างระหว่าง EBG ทั้ง 2 หน่วย (g_unit) ที่เหมาะสม โดยทำการจำลองระยะห่างระหว่าง EBG ในช่วง $0.033\lambda - 1\lambda$ (1 – 30 มิลลิเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.41 ปรากฏว่าช่องว่างระหว่างเซลล์ที่เรโซแนนซ์ ณ ความถี่ 10 GHz ได้ดีที่สุด คือ 20 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 4.39 และเมื่อทำการจำลองเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังงานของช่องว่างระหว่างหน่วยเซลล์ของ EBG ที่ 7.5, 20 และ 30 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของช่องว่างระหว่างหน่วยเซลล์

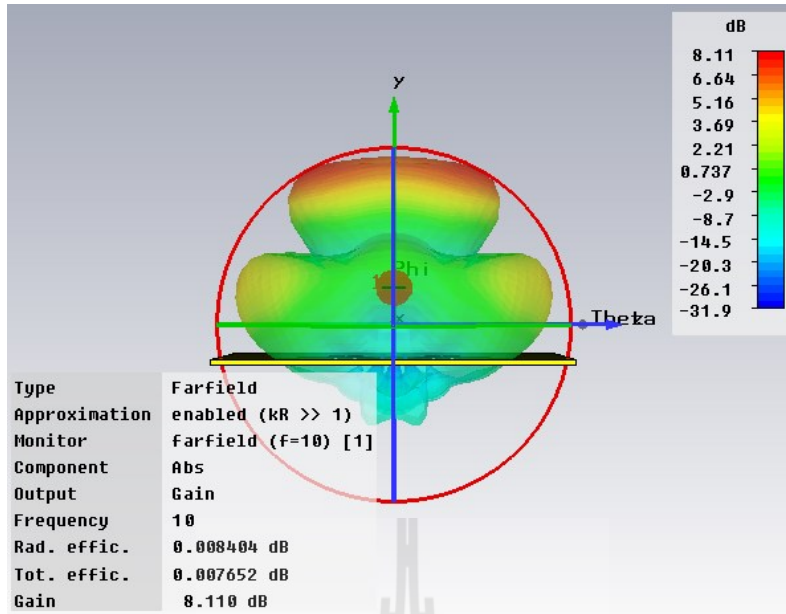
ซึ่งทางผู้วิจัยได้พิจารณาความสำคัญของลำคลื่นด้านหน้าเพื่อรองรับการส่งกำลังงานสายอากาศแถวลำดับที่แพทช์แต่ละอิลิเมนต์ให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด จึงพิจารณาแบบรูปการกำลังงานจากตัวป้อนสัญญาณให้เป็นแนวระนาบกับแพทช์แต่ละอิลิเมนต์บริเวณด้านหน้ามากที่สุด นั่นคือแต่ละอิลิเมนต์ของสายอากาศจะได้รับกำลังงานด้วยเฟสที่ต่างกัน

และเนื่องจากงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวป้อนโคโพลแบบโบว์ไท่เพียงตัวเดียวในการจ่ายกำลังงาน นั่นคือเป็นแหล่งจ่ายเพียงแหล่งเดียวที่ต้องป้อนกำลังงานให้กับแพทช์แต่ละอิลิเมนต์ด้วยเฟสของสัญญาณแต่ละตำแหน่งที่ต่างกันด้วยตำแหน่งของแหล่งจ่ายอยู่แล้ว นั่นคือสายอากาศแถวลำดับแต่ละอิลิเมนต์จึงจะสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพทุกอิลิเมนต์ จึงเป็นที่มาด้วยสมมติฐานดังกล่าวในการเลือกระยะช่องว่างระหว่างหน่วยเซลล์ของ EBG เพื่อให้ค่าแบบรูปการแผ่กำลังงานที่วางตัวในแนวระนาบกับสายอากาศแถวลำดับมากที่สุด เพื่อให้ได้ตามจุดประสงค์ที่วางไว้ต่อไป



รูปที่ 4.43 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังงานระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็กของระยะห่างระหว่างหน่วยเซลล์ของ EBG เท่ากับ 20 มิลลิเมตร

ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าจากการนำ EBG จำนวน 2 หน่วย วางบนระนาบกราวด์ด้วยระยะห่าง 20 มิลลิเมตร และความสูงระหว่างโคโพลแบบโบว์ไท่กับ EBG เท่ากับ 22 มิลลิเมตร มีอัตราขยายเท่ากับ 8.110 dB ซึ่งอัตราขยายสามารถเพิ่มขึ้น 5.853 dB (โคโพลแบบโบว์ไท่เพียงอย่างเดียวเท่ากับ 2.257 dB) และมีทิศทางลำคลื่นบริเวณส่วนหน้ามีความเป็นระนาบมากที่สุด ได้แสดงแบบรูปการแผ่กำลังงานและอัตราขยาย ดังรูปที่ 4.43 และ 4.44 ตามลำดับ และสามารถสรุปพารามิเตอร์ทั้งหมดได้ตาม ตารางที่ 4.2



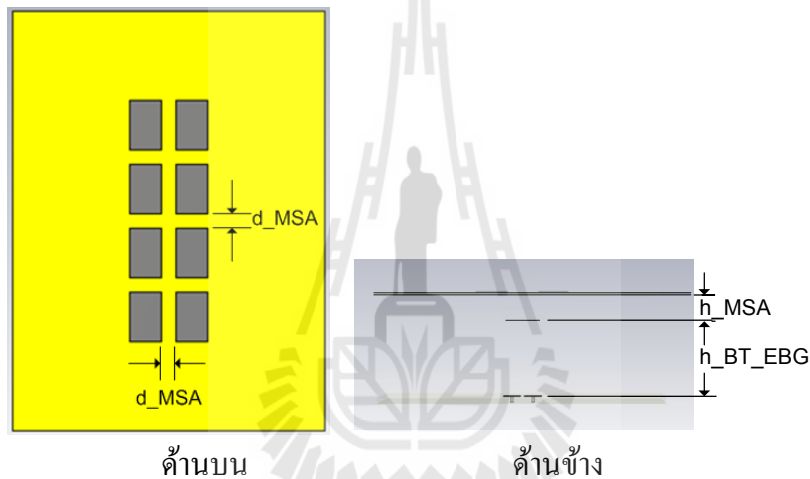
รูปที่ 4.44 แสดงอัตรายายและแบบรูปการแผ่กำลังงานแบบสามมิติ

ตารางที่ 4.2 สรุปพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของระบบป้อนใหม่ด้วยไดโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG

ความยาวของไดโพลแบบโบว์ไท่ (l_{bowties})	4.7625	มิลลิเมตร
ความกว้างส่วนปลายของแขนไดโพลแบบโบว์ไท่ (w_{bowties})	7.5	มิลลิเมตร
ความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพลแบบโบว์ไท่ (w_{bot})	0.9	มิลลิเมตร
ความหนาของไดโพลแบบโบว์ไท่ (t_{bow})	0.1	มิลลิเมตร
ระยะห่างระหว่างแขนไดโพลแบบโบว์ไท่ (d_{feed})	0.1	มิลลิเมตร
ขนาดความกว้างของ EBG (P_{EBG})	5	มิลลิเมตร
รัศมีตัวเชื่อม (r_{viaEBG})	0.5	มิลลิเมตร
ช่องว่างระหว่างเซลล์ (g_{EBG})	1	มิลลิเมตร
ช่องว่างระหว่างหน่วยเซลล์ (g_{unit})	20	มิลลิเมตร
ความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไท่กับ EBG ($h_{\text{BT-EBG}}$)	22	มิลลิเมตร

4.5 สายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป 2x4 อีลิเมนต์ โดยการป้อนกำลังด้วยตัวป้อนแบบใหม่

จากการจำลองตัวป้อนใหม่ ด้วยตัวกระตุ้นสัญญาณโคโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG ดังกล่าวมาข้างต้น ได้นำโครงสร้างดังกล่าวทำการป้อนกำลังให้กับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป ซึ่งได้ทำการออกแบบโครงสร้างสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปความถี่ 10 GHz จำนวน 2x4 อีลิเมนต์ ขนาดความกว้างของแพทช์ เท่ากับ 8.2 มิลลิเมตร (0.2733λ) ขนาดความยาว เท่ากับ 15 มิลลิเมตร (0.5λ) โดยใช้ขนาดสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป ใช้วัสดุฐานรองเป็น FR4 ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเท่ากับ 4.4 ซึ่งราคาถูกกว่าและหาซื้อได้สะดวกกว่าวัสดุฐานรองชนิด Duroid ($\epsilon_r = 2.65$) หรือ Teflon ($\epsilon_r = 2.08$) ที่ใช้เป็นวัสดุฐานรองของสำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปที่ป้อนกำลังงานผ่านสายเฟสในปัจจุบัน

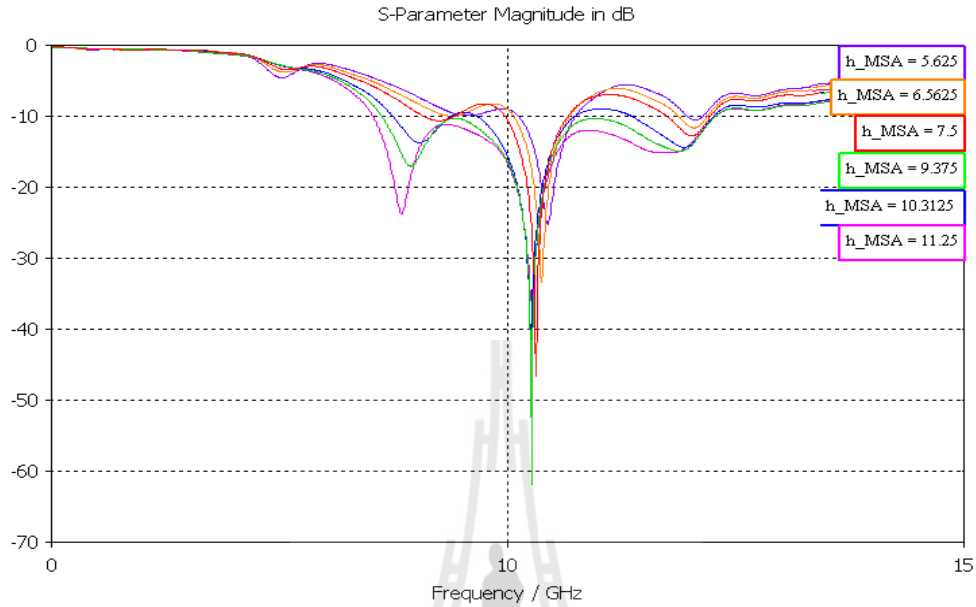


รูปที่ 4.45 แสดงโครงสร้างสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป จำนวน 2x4 อีลิเมนต์ ร่วมกับตัวป้อนแบบใหม่

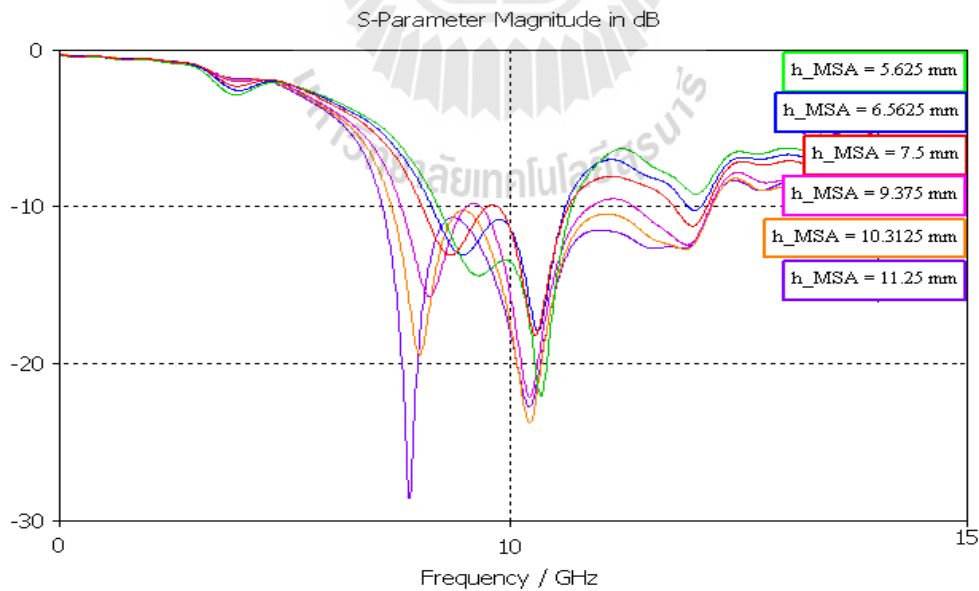
โดยการวางตัวของโครงสร้างสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป (MSA) กับระบบป้อนใหม่ ได้วางโครงสร้างในลักษณะโพรงเรโซเนเตอร์ฟาบรี-เปโร (Fabry-Perot Cavity Resonator : FPC) ซึ่งอาศัยหลักการการสะท้อนคลื่นภายในโพรงด้วยความสูงระหว่างตัวป้อนแบบใหม่กับสายอากาศ (h_{MSA}) และระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์แต่ละตัวของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศเรโซแนนซ์ที่ออกแบบได้ดีที่สุด ณ ความถี่ 10 GHz โดยได้พิจารณาผลการจำลองค่าอัตราขยาย และความกว้างแถบ ของสายอากาศจากการป้อนด้วยระบบป้อนใหม่ และผลการจำลองประสิทธิภาพของสายอากาศ จากการป้อนกำลังด้วยระบบป้อนใหม่กับการป้อนด้วยแบบเก่า ในหัวข้อที่ 4.2 เพื่อยืนยันสมมติฐานของการพัฒนาระบบป้อนแบบใหม่ที่ได้พัฒนาขึ้น

ซึ่งขั้นตอนการพิจารณาผลการจำลอง ได้พิจารณาจากค่าอัตราขยายและความกว้างแถบของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป จากผลการจำลองค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ (S11) จากความสูงระหว่างตัวป้อนแบบใหม่กับสายอากาศ ของแต่ละระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์ของ

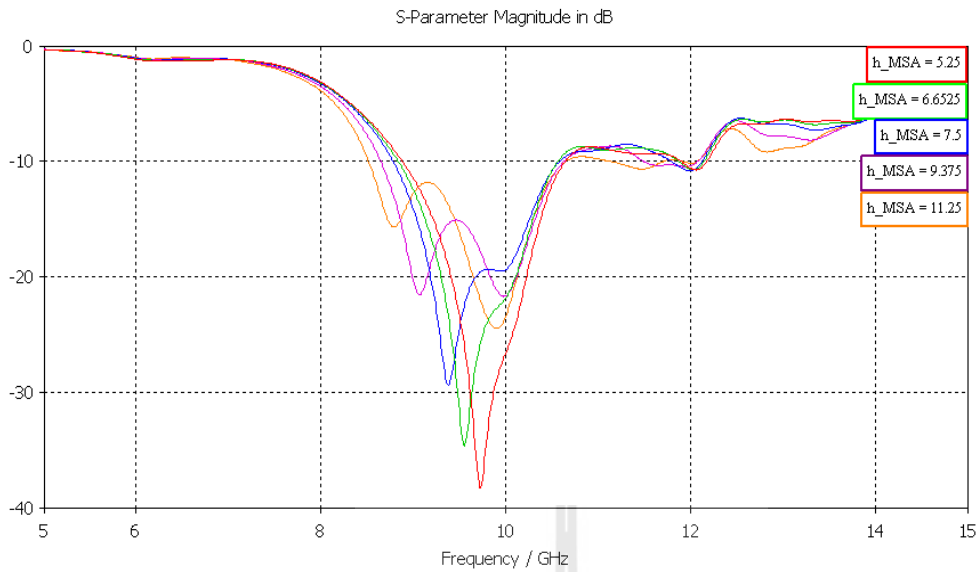
สายอากาศแถวลำดับไมโครสริป ดังต่อไปนี้ คือ ระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์ (d_{MSA}) เท่ากับ 3.75 ($\lambda/8$), 7.5 ($\lambda/4$) และ 15 ($\lambda/2$) มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 4.46 แสดงผลการจำลองค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับด้วยระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์ (d_{MSA}) เท่ากับ 3.75 มิลลิเมตร ($\lambda/8$)



รูปที่ 4.47 แสดงผลการวัดค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับด้วยระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์ (d_{MSA}) เท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร ($\lambda/4$)



รูปที่ 4.48 แสดงผลการวัดค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับด้วยระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์ (d_{MSA}) เท่ากับ 15 มิลลิเมตร ($\lambda/2$)

จากผลการวัดค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของสายอากาศแถวลำดับ ณ ตำแหน่งความถี่สูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทท์กับสายอากาศแถวลำดับ ด้วยระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์เท่ากับ $\lambda/8$, $\lambda/4$ และ $\lambda/2$ ดังแสดงในรูปที่ 4.46 ถึง 4.48 ตามลำดับนั้น สามารถสรุปความกว้างแถบและอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป ได้ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

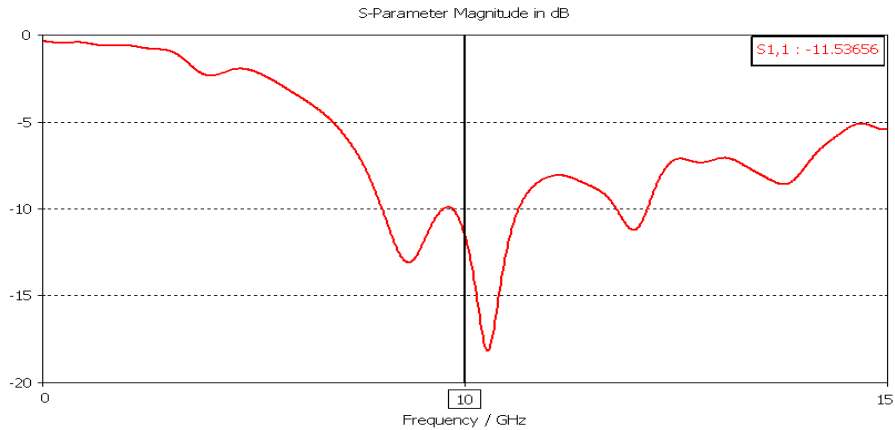
ตารางที่ 4.3 แสดงอัตราขยายของสายอากาศโดยเปรียบเทียบความสูงกับระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์

ความสูงระหว่างตัวป้อนแบบใหม่กับ MSA (มิลลิเมตร)	อัตราขยายของสายอากาศ (dBi) ด้วยระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์		
	3.75 (มิลลิเมตร)	7.5 (มิลลิเมตร)	15 (มิลลิเมตร)
5.625	13.08	11.85	7.638
6.5625	14.86	14.36	9.121
7.5	15.23	15.35	10.29
9.375	13.25	14.05	10.92
10.3125	11.31	12.38	10.20
11.25	10.57	10.60	10.74

ตารางที่ 4.4 แสดงความกว้างแถบโดยเปรียบเทียบความสูงกับระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์

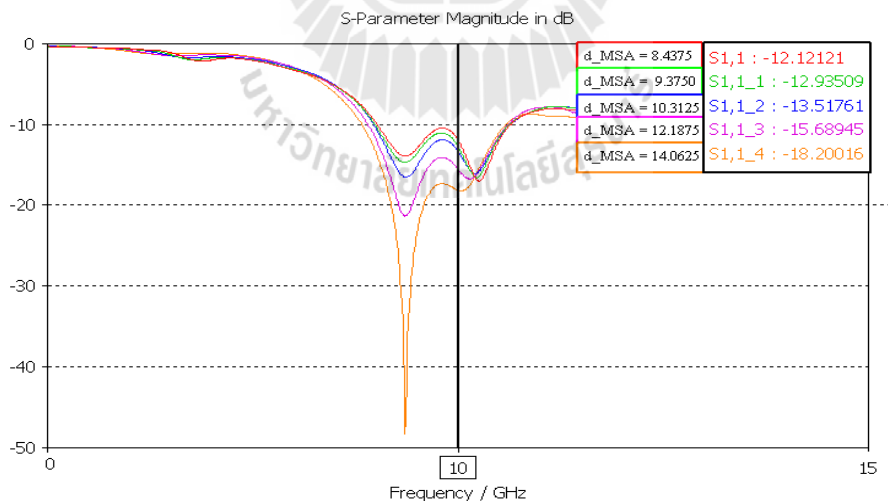
ความสูงระหว่าง ตัวป้อนแบบใหม่ กับ MSA (มิลลิเมตร)	ความกว้างแถบของสายอากาศ (GHz) ด้วยระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์		
	3.75 (มิลลิเมตร)	7.5 (มิลลิเมตร)	15 (มิลลิเมตร)
5.625	0.64 (10.11 - 10.75)	0.7867 (9.8523 - 10.639)	1.7587 (8.8849 - 10.644)
6.5625	0.622 (10.064 - 10.686)	1.5542 (9.1238 - 10.678)	1.7223 (8.8408-10.564)
7.5	0.6952 (9.9698 - 10.686)	1.5964 (9.0156 - 10.612)	1.7996 (8.7846-10.584)
9.375	3.6483 (8.6323 - 12.281)	1.2144 (9.6626 - 10.877)	1.9787 (8.6517-10.63)
10.3125	1.083 (9.666 - 10.749)	3.5541 (8.6789 - 12.233)	2.0485 (8.5724-10.621)
11.25	3.7889 (8.5421 - 12.331)	3.988 (8.578 - 12.566)	2.1329 (8.5185-10.651)

จากผลการจำลองความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทและระยะห่างแต่ละอีลิเมนต์ของสายอากาศ ค่าที่เหมาะสมของความสูงเท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร (0.25λ) และระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์เท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร (0.25λ) ได้อัตราขยายและความกว้างแถบที่ดีที่สุดคือ 15.35 dB และ 1.5964 GHz ตามลำดับ ซึ่งค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับที่ความถี่ 10 GHz เท่ากับ 11.53655 dB ดังแสดงในรูปที่ 4.49



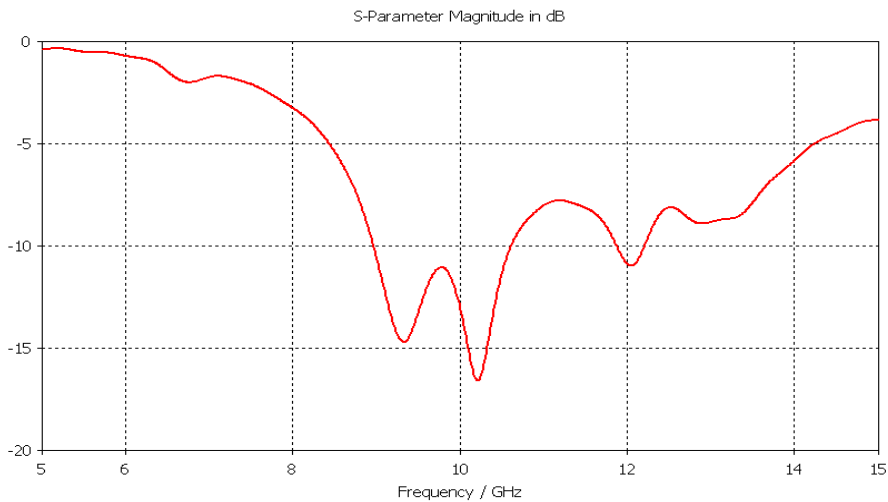
รูปที่ 4.49 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับจากความสูงและระยะห่างเท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร

จากนั้นทำการปรับระยะห่างแต่ละอิลิเมนต์ของ MSA แต่ละอิลิเมนต์เท่ากับ 8.4375, 9.375, 10.3125, 12.1875 และ 14.0625 มิลลิเมตร พบว่าอัตราขยายจะมีค่าเท่ากับ 15.12, 14.75, 14.22, 12.79 และ 11.12 dB ตามลำดับ นั่นคืออัตราขยายมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างแต่ละอิลิเมนต์เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันกับค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับที่มีค่าต่ำลงด้วยเมื่อระยะห่างของ MSA มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับความกว้างแถบ ซึ่งจะค่าเพิ่มขึ้นตามระยะห่างแต่ละอิลิเมนต์ของ MSA ดังแสดงในรูปที่ 4.50



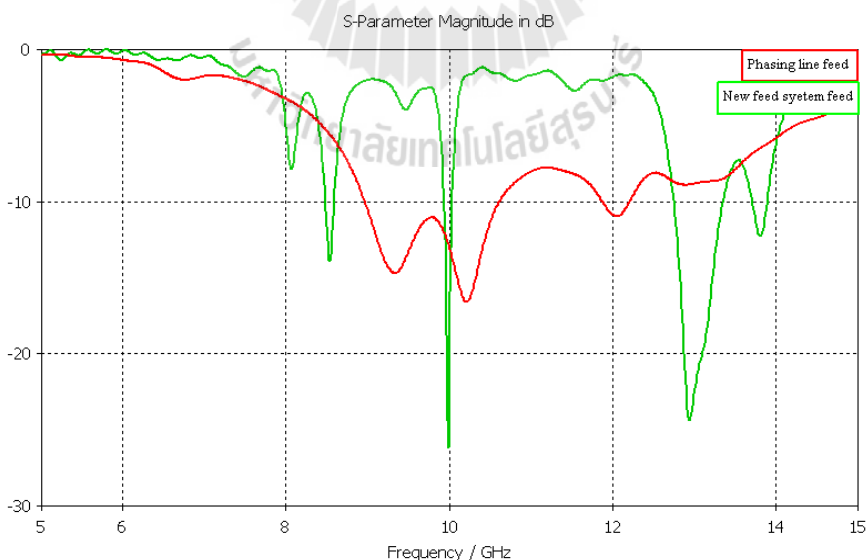
รูปที่ 4.50 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับด้วยระยะระหว่างอิลิเมนต์จาก 8.4375 ถึง 14.140625 มิลลิเมตร

ซึ่งกล่าวได้ว่าด้วยความสูงระหว่างตัวป้อนแบบใหม่กับ MSA เท่ากับ 7.5 และระยะห่างแต่ละอิลิเมนต์ของ MSA แต่ละอิลิเมนต์จาก 8.4375 – 10.3125 มิลลิเมตร นั่นคือสามารถนำมาพิจารณาในลำดับต่อไป

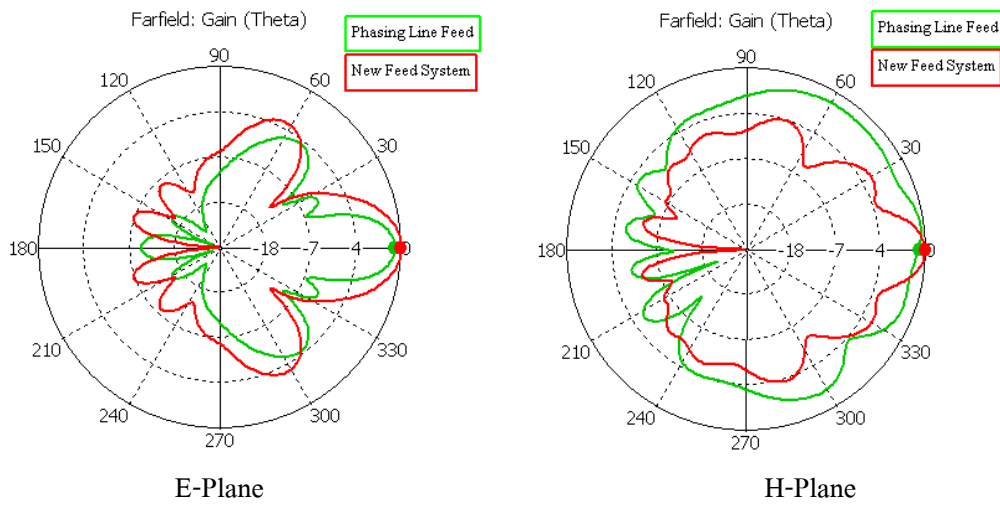


รูปที่ 4.51 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับเมื่อ h_{MSA} เท่ากับ 7.5 มิลลิเมตรและ d_{MSA} เท่ากับ 9.375 มิลลิเมตร

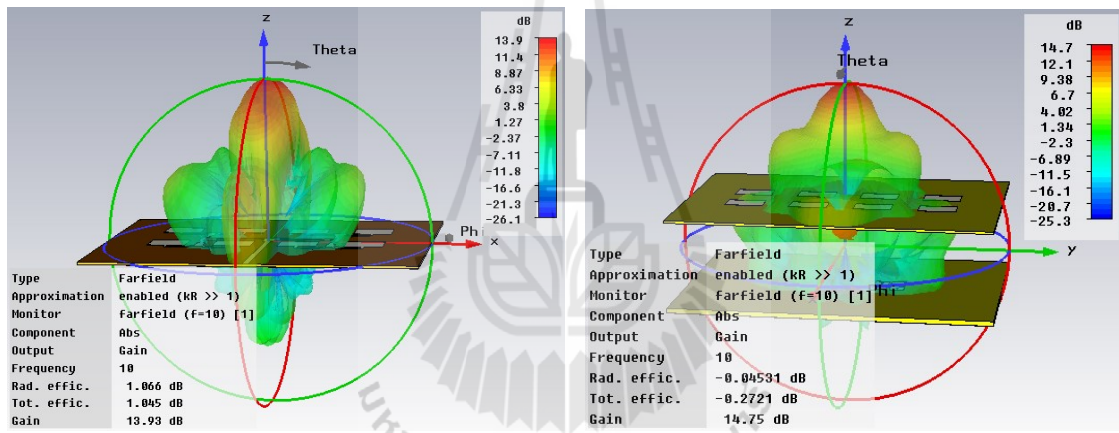
ซึ่งทางผู้วิจัยได้พิจารณาค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับที่เหมาะสมกับอัตราขยายของสายอากาศที่สามารถชดเชยค่าการสูญเสียกำลังงานภายในสายเฟสจากการป้อนกำลังแบบเก่าได้ด้วยระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์เท่ากับ 9.375 มิลลิเมตร ดังผลการจำลองค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับและแบบรูปการกำลังงานของการป้อนแบบเก่าและระบบป้อนแบบใหม่ดังรูปที่ 4.52 และ 4.53 ตามลำดับ



รูปที่ 4.52 ผลการจำลองค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของการป้อนแบบเก่าและระบบป้อนแบบใหม่



รูปที่ 4.53 แบบรูปการแผ่กำลังงานระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของการป้อนแบบเก่าและระบบป้อนแบบใหม่



(ก) การป้อนแบบเก่า

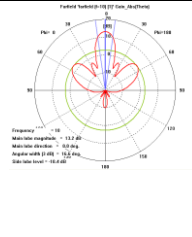
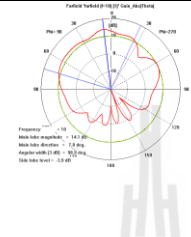
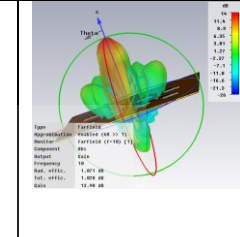
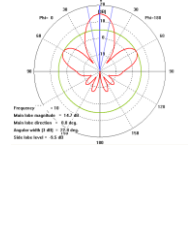
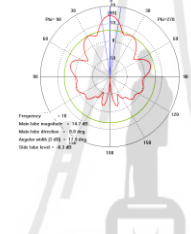
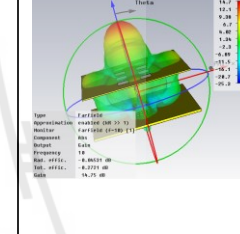
(ข) การป้อนแบบใหม่

รูปที่ 4.54 แสดงอัตราขยายแบบรูปการแผ่กำลังงานแบบ 3 มิติ

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพสำหรับด้วยการป้อนแบบเก่าและระบบป้อนแบบใหม่

ลักษณะตัวป้อน	อัตราขยาย (dBi)	ความกว้างแถบ (MHz)	ประสิทธิภาพรวม (Total Efficiency)
การป้อนแบบเก่า	13.93	101.12 (1.0112%)	0.9774
ระบบป้อนแบบใหม่	14.75	1676.60 (17.135%)	0.9510

ตารางที่ 4.6 สรุปแบบรูปการแผ่กำลังงานจากการป้อนด้วยสายเฟสและระบบป้อนแบบใหม่

เทคนิคการป้อน	แบบรูปการแผ่กำลังงาน			ความกว้างลำคลื่น (HPBW)	
	ระนาบสนามไฟฟ้า	ระนาบสนามแม่เหล็ก	แบบสามมิติ	ระนาบสนามไฟฟ้า	ระนาบสนามแม่เหล็ก
				ไฟฟ้า	แม่เหล็ก
การป้อนแบบเก่า				16.6	98.9
ระบบป้อนแบบใหม่				22.8	17.9

จากผลการจำลองระบบป้อนแบบใหม่ด้วยตัวกระตุ้นไดโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG และเทคนิคการวางโครงสร้างด้วย FPC เพื่อป้อนกำลังงานให้กับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปสามารถสูญเสียภายในสายเฟสได้อันเนื่องมาจากการป้อนกำลังด้วยสายเฟสแบบเก่า ซึ่งได้แสดงอัตราขยายและความกว้างแถบ ดังตารางที่ 4.5 ซึ่งผลการจำลองแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป ดังตารางที่ 4.6

4.6 สรุป

จากการจำลองโครงสร้างตัวป้อนแบบใหม่ โดยใช้สายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์จำนวน 2×4 อิลิเมนต์ที่ความถี่ 10 GHz เป็นสายอากาศอ้างอิง ซึ่งพัฒนาตัวป้อนกำลังแบบด้วยไดโพลแบบโบว์ไท่ด้วยคุณสมบัติเด่นเรื่องความกว้างแถบที่กว้างและคุณสมบัติของ EBG ในการขจัดคลื่นผิวร่วมกับโครงสร้างของระนาบกราวด์ที่ช่วยเสริมคลื่น ทำให้อัตราขยายเฉพาะตัวป้อนไดโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG มีค่าเท่ากับ 8.110 dB และได้ทำการวางโครงสร้างตัวป้อนแบบใหม่เพื่อป้อนกำลังงานให้กับ MSA ในลักษณะโพรงฟารี-เปโซ ด้วยระยะความสูงของไดโพลแบบโบว์ไท่เท่ากับ 0.733λ (22 มิลลิเมตร) ความสูงของสายอากาศจากไดโพลแบบโบว์ไท่ เท่ากับ 0.25λ (7.5 มิลลิเมตร)

และระยะห่างของสายอากาศแถวลำดับแต่อีลิเมนต์ของเท่ากับ 0.3125λ (9.375 มิลลิเมตร) ทำให้ตัวป้อนแบบใหม่นี้สามารถจ่ายกำลังงานให้กับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปมีอัตราขยายเท่ากับ 14.75 dB โดยที่ขนาดของสายอากาศเท่ากันกับขนาดของสายอากาศที่มีการป้อนกำลังผ่านแบบเก่า ซึ่งได้ค่าอัตราขยายสูงกว่าลักษณะการป้อนกำลังแบบเก่าหรือการป้อนผ่านสายเฟสที่มีค่าเท่ากับ 13.93 dB (หรือ 14.01 dB จากคู่มือ) อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความกว้างแถบของสายอากาศได้มากถึง 1670.60 MHz คิดเป็น 17.135% ซึ่งเมื่อเทียบกับการป้อนแบบเก่าที่มีความกว้างแถบเพียง 101.12 MHz หรือ 1.0112% และให้ผลการจำลองแบบรูปการแผ่กำลังงานที่ใกล้เคียงกับการป้อนแบบเก่าดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6 สามารถยืนยันสมมติฐานของงานวิจัยได้จากการจำลองผลด้วยลักษณะตัวป้อนดังกล่าว

จากผลการจำลองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างตัวกระตุ้นไดโพลแบบโบว์ไทเมื่อนำมาพัฒนาร่วม EBG และ FBC เพื่อป้อนกำลังให้กับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป โดยใช้ขนาดมาตรฐานในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปโดยทั่วไป ซึ่งได้อ้างอิงกับการป้อนแบบเก่าหรือผ่านสายเฟสแบบเดิม พบว่าระบบป้อนใหม่สามารถลดเซคค่าการสูญเสียจากสายอันเนื่องมาจากการสูญเสียกำลังงานภายในสายเฟสจากการป้อนแบบเดิมได้ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มอัตราขยายและความกว้างแถบให้กับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปให้มากขึ้น ซึ่งสามารถลดความซับซ้อนในการออกแบบการแบ่งกำลังงานเพื่อป้อนให้แพทช์แต่ละอีลิเมนต์ได้ ซึ่งมีข้อดีว่าการป้อนแบบเก่าคือสามารถปรับและแก้ไขประสิทธิภาพของสายอากาศโดยไม่ต้องขึ้นรูปชิ้นงานใหม่ทั้งหมดเพราะสามารถปรับปรุงและแก้ไขได้โดยง่ายในส่วนของระบบป้อนได้โดยตรง ซึ่งผลการวัดทดสอบสายอากาศจากต้นแบบจากการป้อนกำลังด้วยระบบป้อนใหม่ จะแสดงในบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 5

สร้างและทดสอบสายอากาศด้วยระบบป้อนแบบใหม่

5.1 กล่าวนำ

สำหรับบทนี้เป็นการนำผลการจำลองระบบป้อนแบบใหม่ที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะของระบบป้อนแบบใหม่ในบทที่ 4 เพื่อสร้างต้นแบบสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป และทำการวัดทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ที่สำคัญ ของสายอากาศ ในช่วงความถี่ 5-15 GHz ซึ่งได้แก่ ค่าอัตราขยาย (gain) ค่าความกว้างแถบ (bandwidth) ค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ (S11) แบบรูปการแผ่กำลัง (radiation pattern) อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (standing wave ratio: SWR) และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ เพื่อเปรียบเทียบค่าคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้จากลักษณะการป้อนแบบใหม่ (ไม่ใช่สายเฟส) กับลักษณะการป้อนกำลังแบบเก่า (ใช้สายเฟส) ในลำดับต่อไป

5.2 ขั้นตอนการสร้างระบบป้อนแบบใหม่

จากผลการจำลองระบบป้อนแบบใหม่ด้วยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในบทที่ 4 ด้วยตัวกระตุ้นสัญญาณชนิดไดโพลแบบ โบว์ไทท์ ซึ่งได้ใช้พารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบดังต่อไปนี้

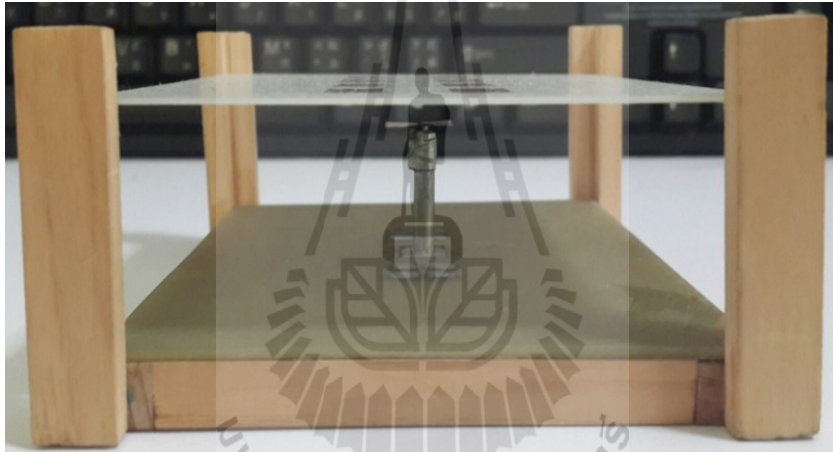
ความยาวของไดโพลแบบโบว์ไทท์ (l_bowties)	=	4.7625	มิลลิเมตร
ความกว้างส่วนปลายของแขนไดโพลแบบโบว์ไทท์ (w_bowties)	=	7.5	มิลลิเมตร
ความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพลแบบโบว์ไทท์ (w_bot)	=	0.9	มิลลิเมตร
ความหนาของไดโพลแบบโบว์ไทท์ (t_bow)	=	0.1	มิลลิเมตร
ระยะห่างระหว่างแขนไดโพลแบบโบว์ไทท์ (d_feed)	=	0.1	มิลลิเมตร

โดยเลือกใช้สายนำสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดแข็ง (rigid coaxial) หรือกึ่งแข็ง (semi-rigid coaxial) เพื่อใช้ในการส่งสัญญาณให้กับไดโพลแบบโบว์ไทท์ ซึ่งจำเป็นต้องวางตัว ณ แห่งกึ่งระหว่าง EBG และระยะความสูงที่ตามที่ได้ทำการการออกแบบในบทที่ 4 ซึ่งขั้นตอนการแมตต์ได้ใช้วิธีการแมตซ์แบบ Pawsey Stup ด้วยความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น



รูปที่ 5.1 ตัวกระตุ้นสัญญาณไดโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG

จากนั้นนำสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับขนาด 2x4 อีลิเมนต์ ด้วยขนาดของสายพื้นฐานที่ได้นำมาออกแบบ ซึ่งทำการการป้อนกำลังโดยตรงให้กับสายอากาศด้วยเทคนิคฟาริ-เปโซ เรโซเนเตอร์ ซึ่งลักษณะโครงสร้างของตัวป้อนแบบใหม่สำหรับสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.2

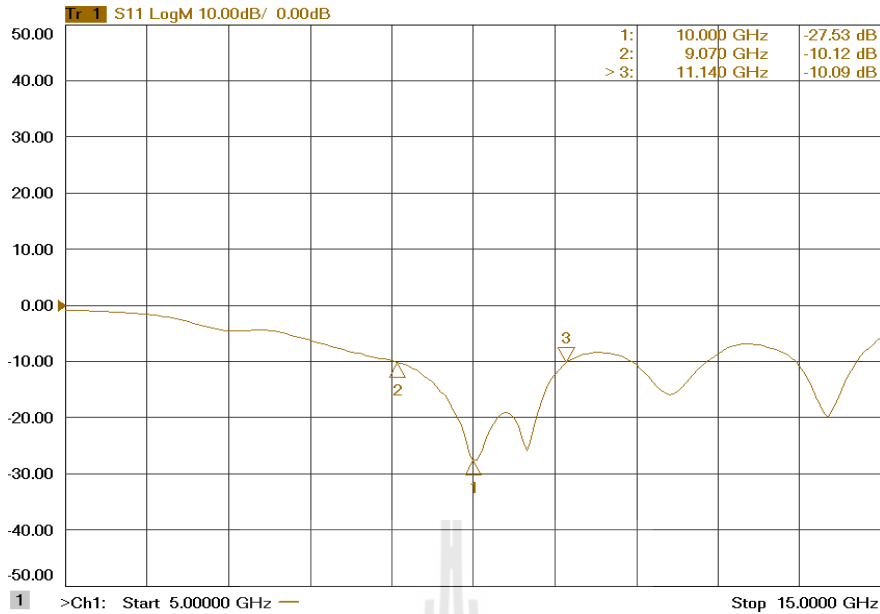


รูปที่ 5.2 ต้นแบบระบบป้อนแบบใหม่สำหรับสายอากาศแถวไมโครสตริป 2x4 อีลิเมนต์

5.3 ผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ

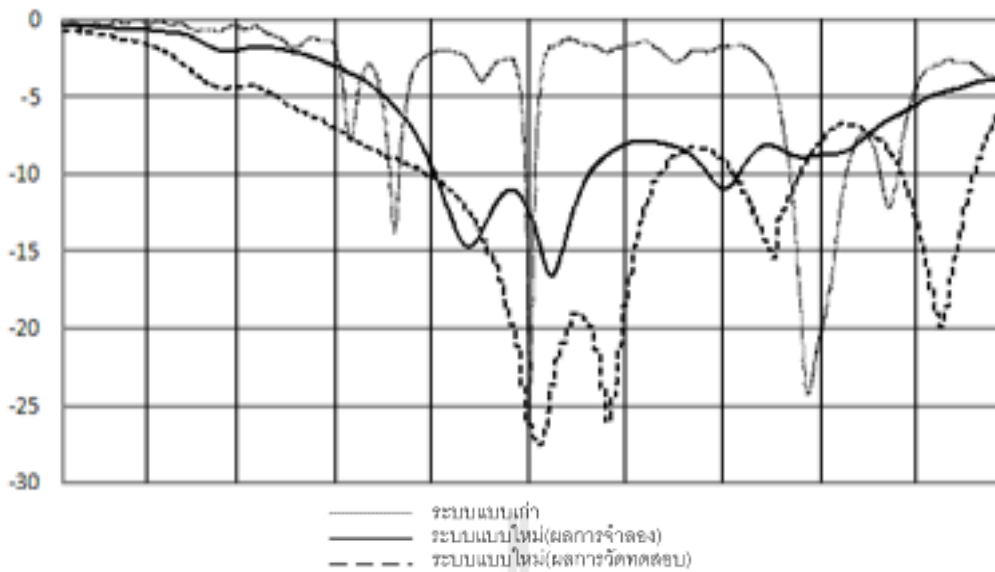
5.3.1 ความกว้างแถบ (bandwidth) และค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ (s11)

จากการทดสอบคุณสมบัติสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปจำนวน 2x4 อีลิเมนต์ ที่ความถี่ 10 GHz ได้ค่า s11 เท่ากับ -27.53 dB และมีความกว้างแถบเท่ากับ 2.070 GHz ในช่วงความถี่ 9.070 – 11.140 GHz คิดเป็น 20.48 % ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงความกว้างแถบและค่าการสูญเสียกำลังงานย้อนกลับ

จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองการป้อน ด้วยวิธีเท่ากับระบบป้อนแบบใหม่ที่ได้พัฒนาขึ้น จากผลการจำลองและผลการวัดทดสอบสายอากาศ จะเห็นได้ว่า ค่าการสูญเสียกำลังงานย้อนกลับและความกว้างแถบของสายอากาศจากการวัดทดสอบด้วยระบบป้อนใหม่ให้ค่าที่ดีกว่าผลการจำลอง ซึ่งสาเหตุอันเนื่องมาจากกระบวนการแมตซ์ที่จำเป็นต้องพัฒนาเพิ่มเข้ามาในกระบวนการสร้างชิ้นงาน (ซึ่งในขั้นตอนการจำลองไม่มี) เพราะด้วยหลักการของ FBC นั้นต้องอาศัยส่วนของพื้นที่ว่างดังกล่าว เพื่อให้สามารถเกิดการสะท้อนกำลังงานได้ โดยไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆ ถึงแม้ว่ากระบวนการสร้างต้นแบบจะมีส่วนการแมตซ์นี้เพิ่มเข้ามาในภายหลังเพื่อให้เกิดการส่งกำลังงานที่สมบูรณ์ก็ตาม แต่ไม่มีผลกระทบในทางลบต่อค่าคุณสมบัติของสายอากาศ ไม่ว่าจะเป็นค่าการสูญเสียกำลังงานย้อนกลับ หรือความกว้างแถบของสายอากาศ อีกทั้งยังส่งผลในทางบวกทั้งค่าการสูญเสียกำลังงานย้อนกลับและความกว้างแถบของสายอากาศ ดังแสดงดังรูปที่ 5.4



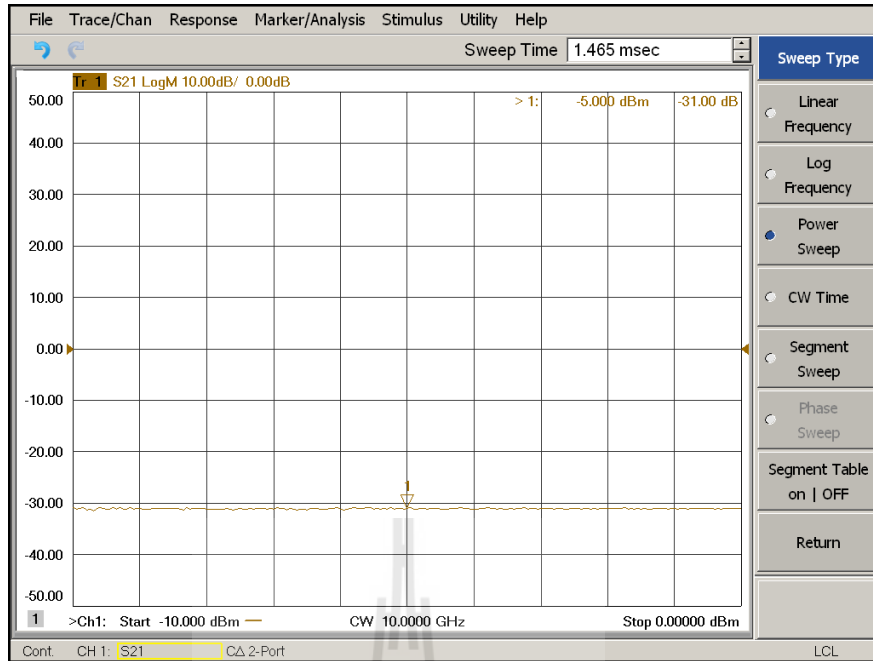
รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบค่าการสูญเสียกำลังงานย้อนกลับ (s11) สำหรับระบบป้อนแบบเก่าและระบบป้อนแบบใหม่ (จากการจำลองและการวัดทดสอบ)

5.3.2 อัตราขยาย (Gain)

ได้ทำการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ โดย กำหนดให้กำลังตัวเครื่องส่ง เท่ากับ -5 dB ค่าอัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง เท่ากับ -13.8 dB ระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ 1.269 เมตร โดยลักษณะการจัดวางดังรูปที่ 5.5 และค่ากำลังงานภาครับเท่ากับ -31.00 dB ดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.5 ลักษณะการวางตัวของสายอากาศเพื่อทดสอบอัตราขยาย



รูปที่ 5.6 ผลการวัดกำลังงานภาครับของสายอากาศจากการป้อนสัญญาณด้วยระบบป้อนแบบใหม่

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_{ot} G_{or} \quad (5.1)$$

สามารถคำนวณอัตราขยายของสายอากาศได้จากสมการ (1) จะได้ว่า อัตราขยาย เท่ากับ 14.71 dB ซึ่งสามารถสรุปค่าอัตราขยายและความกว้างแถบของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปแบบแพทช์ จำนวน 2x4 อิลิเมนต์ ได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าคุณลักษณะของสายอากาศจากลักษณะการป้อนแบบเก่าและแบบใหม่

ค่าคุณลักษณะ	ระบบป้อน		
	การป้อนแบบผ่านสายเฟส	ระบบป้อนแบบใหม่ (ผลการจำลอง)	ระบบป้อนแบบใหม่ (ผลการวัดทดสอบ)
อัตราขยาย (dB)	13.93	14.75	14.71
ความกว้างแถบ (MHz)	101.12 (1.0112%)	1676.60 (17.135%)	2070 (20.48%)
HPBW (องศา) (E:H)	16.6:98.9	22.8:17.9	18:35

5.3.3 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (radiation pattern)

จากโครงสร้างสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปด้วยระบบป้อนแบบใหม่ ได้ทำการวัดแบบรูปการแผ่กำลังงานในแนวระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก โดยลักษณะการวางตัวของสายอากาศได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.7(ก) และ 5.7(ข)



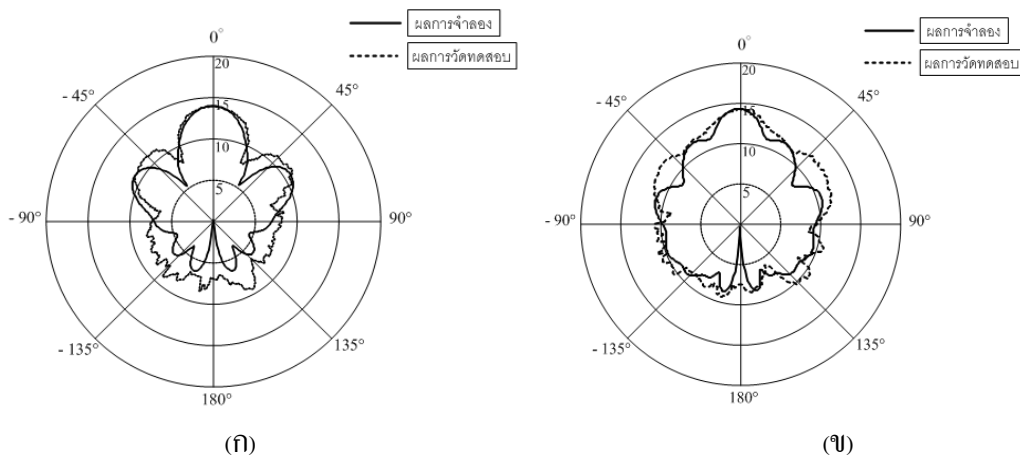
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.7 ลักษณะการวางตัวของสายอากาศเพื่อวัดแบบรูปการแผ่กำลังงาน (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

ซึ่งผลการวัดทดสอบสายอากาศด้วยระบบป้อนใหม่ ได้ทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลอง ได้ลักษณะแบบรูปการแผ่กำลังงานในลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.8

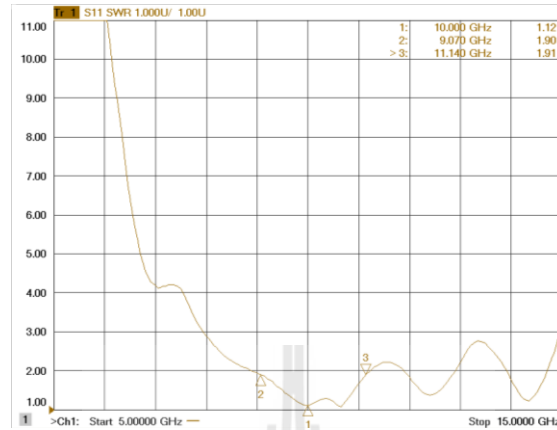


(ก)

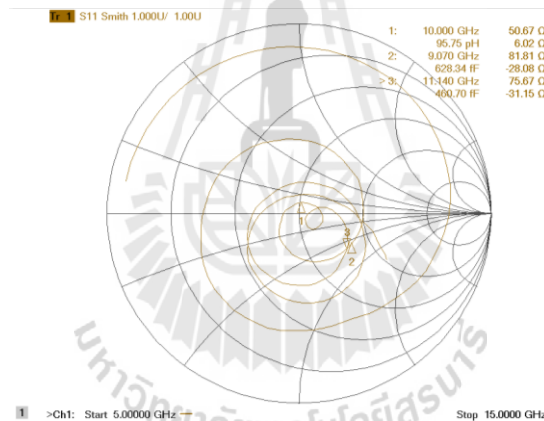
(ข)

รูปที่ 5.8 แบบรูปการแผ่กำลังงาน (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

จากนั้นได้ทำการวัดทดสอบค่า SWR และ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จะมีค่าเท่ากับ 1.12 และ 50.67 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.9 และ 5.10



รูปที่ 5.9 แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศจากการป้อนกำลังด้วยระบบป้อนใหม่



รูปที่ 5.10 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจากการป้อนกำลังด้วยระบบป้อนใหม่

5.4 สรุป

จะเห็นได้ว่าผลการวัดทดสอบระป้อนแบบใหม่ ด้วยเทคนิค FPC และ ตัวกระตุ้นแบบ โบว์ไท่ ร่วมกับ EBG บนระนาบกราวด์ มีค่าอัตราขยายของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 14.71 dB ในขณะที่ผลการจำลองมีค่าอัตราขยายเท่ากับ 14.75 dB ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการป้อนกำลังผ่านสายเฟสแบบเก่าที่มีอัตราขยายจะเท่ากับ 13.93 dB และผลการวัดค่าความกว้างแบนของสายอากาศจากระบบป้อนใหม่ มีค่าความกว้างแถบเท่ากับ 2.07 GHz หรือ 20.48% ในขณะที่ผลการจำลองมีค่าความกว้างแถบมีค่าเท่ากับ 1.67676 GHz และความกว้างแถบ มีค่าเท่ากับ 17.135 MHz ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง พบว่าผลการจำลองความกว้างแถบของสายอากาศด้วยระบบป้อนแบบเก่า มีค่าความกว้างแถบ

เพียงแค่ 101.12 MHz หรือ 1.0112% จะเห็นได้ว่าด้วย สมมติฐานจากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST สามารถยืนยันสมมติฐานดังกล่าวได้ ด้วยผลการวัดค่าคุณลักษณะของสายอากาศ คืออัตราขยาย และความกว้างแถบของสายอากาศภาคเวทาล์ดับไมโครสตริปขนาด 2x4 อีลิเมนต์ ด้วยระบบป้อนใหม่ที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งจะนำเสนอผลสรุปโครงการวิจัยนี้ในบทที่ 6 ในลำดับต่อไป

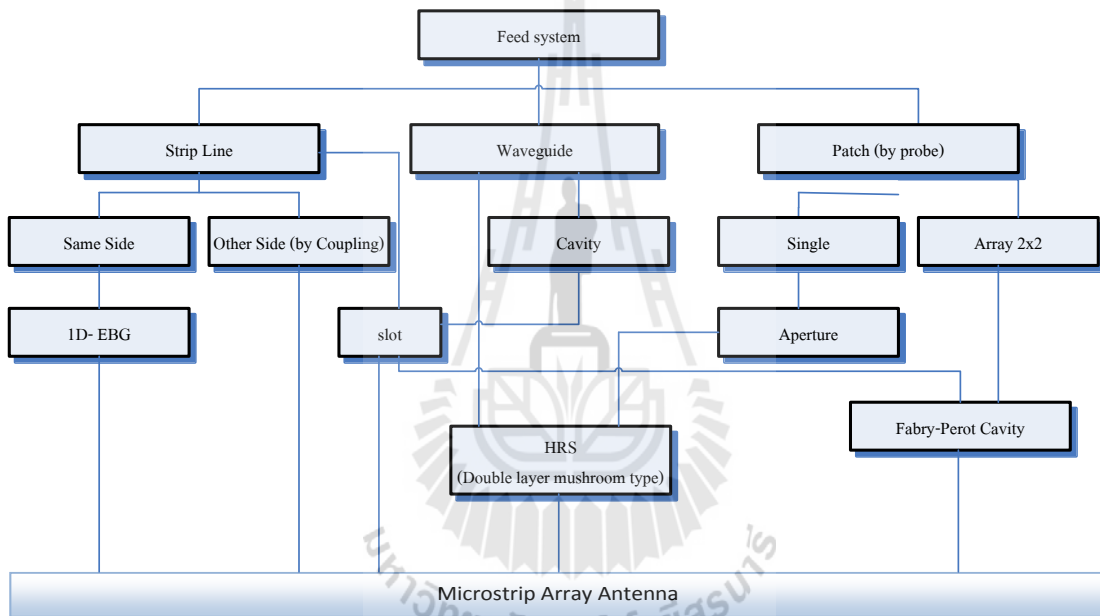


บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

ด้วยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาระบบป้อนใหม่สำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป (MSA) โดยไม่ผ่านสายเฟสและยังคงคุณสมบัติของสายอากาศไว้เช่นเดิม ทั้งอัตราขยายและความกว้างแถบของสายอากาศ ซึ่งต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าอัตราขยายและความกว้างแถบของสายอากาศที่เคยป้อนกำลังแบบผ่านสายเฟสแบบเก่า ซึ่งจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมจากบทที่ 2 พบว่า เทคนิควิธีที่นำการพัฒนาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศโดยศึกษาเทคนิควิธีการป้อนกำลัง ซึ่งพบว่ามียู่หลากหลายวิธีด้วยกัน ดังแสดงรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 เทคนิคการป้อนการป้อนกำลังสำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป

จากรูป 6.1 สามารถสรุปประสิทธิภาพของสายอากาศอันเนื่องมาจากการป้อนในแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) เทคนิคการป้อนด้วยสายเฟสหรือสายไมโครสตริป (phasing line)

การป้อนกำลังแบบสายเฟสหรือสายไมโครสตริป มีลักษณะ โครงสร้างที่ออกแบบได้หลายแบบ อาทิเช่น โครงสร้างแถวลำดับไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม โครงสร้างแถวลำดับไมโครสตริปแบบวงกลม ซึ่งโครงสร้างแถวลำดับมีการออกแบบขนาดต่างๆ เช่น 2x2 4x4 8x8 เป็นต้น ลักษณะการป้อนสามารถป้อนจากตำแหน่งจุดป้อนผ่านสายส่งไปยังแพทช์ หรือการป้อนโดยอาศัยการเหนี่ยวนำระหว่างกราวด์ไปยังแพทช์ ซึ่งเป็นการป้อนผ่านจุดร่วมแบบเครือข่าย สำหรับการออกแบบสายอากาศที่มีลักษณะ โครงสร้างที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศในแง่การเพิ่ม

อัตราขยาย การเพิ่มความกว้างแถบ การลดพูซัง โดยพบว่า การป้อนแบบเครือข่ายของสายอากาศที่มีจำนวนอีลิเมนต์มากกว่าจะมีอัตราขยายดีกว่าโครงสร้างของสายออกแบบที่มีอีลิเมนต์น้อยกว่า การป้อนโดยอาศัยการเหนี่ยวนำระหว่างกราวด์ไปยังแพทช์แบบรูปวงกลมจะดีกว่าแพทช์แบบสี่เหลี่ยม เนื่องจาก มีมิติขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ทิศทางการสะท้อนสูง ทำให้อัตราขยายเพิ่มขึ้น และสามารถลดพูซังได้

2) เทคนิคการป้อนด้วยสายเฟสและการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยแถวลำดับไมโครสตริป

ในส่วนของเทคนิคการป้อนด้วยสายเฟสเมื่อพิจารณาร่วมกับการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยแถวลำดับไมโครสตริป จากการศึกษาพบว่า ความสูงระหว่างระนาบกราวด์กับแพทช์แถวลำดับตัวป้อนที่เหมาะสม อาทิ แพทช์แถวลำดับตัวป้อนที่วางแบบโพรงฟาบรี-เปโฆ โดยที่ความสูงของโพรงฟาบรี-เปโฆ จะมีผลต่ออัตราขยายของสายอากาศ

3) เทคนิคการป้อนด้วยการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยร่อง ท่อนำคลื่น และ โพรง

สำหรับเทคนิคการป้อนด้วยการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นมีการออกแบบโครงสร้างหลายแบบ อาทิเช่น การป้อนด้วยการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยร่อง การป้อนด้วยการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยท่อนำคลื่น และ โพรง เป็นต้น จากการศึกษาพบว่า การป้อนด้วยการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยร่องแถวลำดับจะสามารถออกแบบร่วมกับโครงสร้างสะท้อนคู่ด้วย EBG แบบหนึ่งมิติ ออกแบบร่วมกับเทคนิค FSS และ โพรงฟาบรี-เปโฆ หรือออกแบบร่วมกับ EBG กับโครงสร้างแบบ mushroom like จากการออกแบบร่วมกับเทคนิคดังกล่าวจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศได้ในเรื่อง การเพิ่มอัตราขยาย และการเพิ่มความกว้างแถบได้ ในส่วนการป้อนด้วยการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยท่อนำคลื่นและโพรง สามารถใช้วิธีการป้อนแบบหลายช่องป้อน โดยออกแบบสายอากาศด้วย EBG กับโครงสร้างแบบ mushroom like หรือ ใช้เทคนิคการป้อนแบบหลายแหล่งจ่ายร่วมกับเทคนิค FSS ก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่อง อัตราขยายที่เพิ่มขึ้นได้

จากการศึกษาการป้อนแบบต่างๆ ร่วมกับการออกแบบโครงสร้างสายอากาศแบบต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ โดยสรุปแล้ว พบว่า เทคนิคการป้อนกำลังด้วยการกระตุ้นสัญญาณโดยตรงผ่านสายส่งหรือกระตุ้นผ่านโพรงที่ส่งผ่านสัญญาณไปยังสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป โดยการแบ่งกำลังของสายเฟส (phasing line) มีข้อจำกัดในเรื่องของการสูญเสียภายในสายเฟส อีกทั้งอาจส่งผลให้ความกว้างแถบลดลง จึงได้มีการพัฒนาโครงสร้างสำหรับระบบป้อนกำลังงานให้ใช้สายเฟสน้อยลงและได้นำเทคนิคการเหนี่ยวนำด้วยโครงสร้างต่าง ๆ เพื่อแก้ปัญหา และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศในเรื่องการเพิ่มอัตราขยาย ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองโครงสร้างตัวกระตุ้นสัญญาณด้วยไดโพลแบบโบว์ไท่ ร่วมกับอภิวัดแบบ 2 มิติ ชนิด EBG ด้วยโครงสร้างแบบ mushroom like แทนระนาบกราวด์ที่เคยใช้บนแผ่นวงจรพิมพ์ในการป้อนแบบเก่า ซึ่งลักษณะการวางตัวของตัวป้อนกับสายอากาศแถวลำดับไมโคร

สตริปจะเป็นลักษณะการเหนี่ยวนำสัญญาณจะเป็นแบบฟาบรี-เปโร เรโซเนเตอร์ ซึ่งเป็นเทคนิคการสะท้อนคลื่นภายในโพรงอากาศว่างหรือ fabry-perot cavity (FPC) จึงเป็นเทคนิคที่สอดคล้องกับวางตัวของโครงสร้างที่สามารถนำมาาระบบป้อนกำลังให้กับสายอากาศแถวลำดับโดยไม่ต้องป้อนกำลังผ่านสายเฟส

ซึ่งจากการนำสายอากาศไดโพลแบบโบว์ไทมาพัฒนาร่วมกับ EBG จำนวน 2 หน่วย แต่ละหน่วยประกอบด้วย 4 เซลล์โดยระยะห่างระหว่าง หน่วยเซลล์เท่ากับ 20 มิลลิเมตร ซึ่งคุณสมบัติเด่นช่วยจัดคลื่นผิวทำให้อัตราขยายของตัวกระตุ้นมีค่าเท่ากับ 9.224 dB (ซึ่งแบบรูปการแผ่กำลังงานไม่ได้สูงที่จุดกึ่งกลาง) ได้ทำการเลือกแบบรูปการแผ่กำลังงานที่สม่ำเสมอในแนวระนาบ เนื่องจากแหล่งเป็นแหล่งเดียว เฟสที่ตกกระทบกับสายอากาศจะไม่เท่ากัน ซึ่งลักษณะแบบรูปการแผ่กำลังงานที่สม่ำเสมอในแนวระนาบจึงเป็นลักษณะตัวกระตุ้นที่เหมาะสมที่สุดทำให้อัตราขยายมีค่าเท่ากับ 8.110 dB และความกว้างมีค่าเท่ากับ 2.5334 GHz

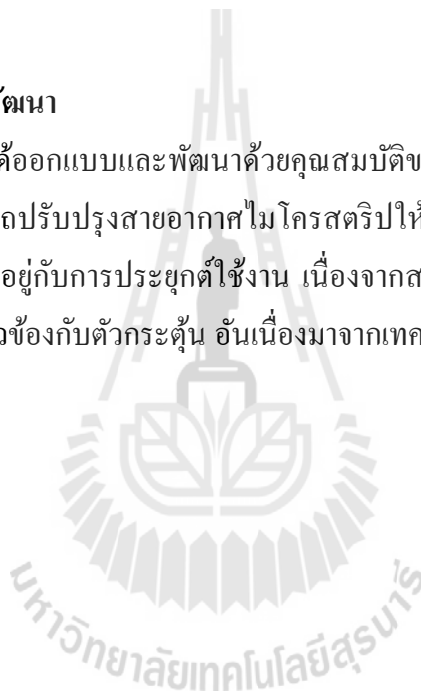
จากตัวป้อนแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้น ได้จำลองโครงสร้างร่วมกับ MSA 2x4 อีลิเมนต์ (ซึ่งเป็นสายอากาศแถวลำดับที่มีการใช้งานในห้องปฏิบัติการด้านสายอากาศโดยปกติ) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศด้วยการป้อนกำลังจากระบบป้อนที่พัฒนาขึ้น

ซึ่งผลการจำลองโครงสร้างตัวป้อนแบบใหม่เพื่อส่งสัญญาณให้กับ MSA ด้วยความสูงที่เหมาะสมและระยะห่างของอีลิเมนต์ของสายอากาศที่ได้ทำการปรับระยะที่เหมาะสมคือ 0.733λ (22 มิลลิเมตร) ทำให้ตัวป้อนแบบใหม่สามารถป้อนกำลังงานให้กับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปมีอัตราขยายเท่ากับ 14.75 dB (ด้วยขนาดของสายอากาศตามพื้นฐานของทฤษฎีการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป) ซึ่งสามารถให้ค่าอัตราขยายสูงกว่าลักษณะการป้อนกำลังแบบเก่า (13.93 dB หรือ 14.01 dB จากคู่มือ) อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความกว้างแถบของสายอากาศได้มากถึง 1670.60 MHz คิดเป็น 17.135% และเทียบกับการป้อนแบบเก่าจะมีค่าเท่ากับ 101.12 MHz คิดเป็น 1.0112% ดังตารางสรุปที่ 5.1 ซึ่งผลการวัดทดสอบมีค่าอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 14.71 และความกว้างแถบที่เพิ่มขึ้นเป็น 2.07 GHz หรือ 20.48% และผลการจำลองค่าประสิทธิภาพรวม (total efficiency) ของสายอากาศด้วยระบบป้อนใหม่มีค่าเท่ากับ 0.9510 dBi ในขณะที่ระบบป้อนแบบเก่าจะให้ค่าประสิทธิภาพรวมเท่ากับ 0.9774 dBi จะพบว่า ด้วยองค์ประกอบหรือเทคนิคของโครงสร้างการป้อนแบบใหม่ของสายอากาศที่มีมากกว่าโครงสร้างของ ระบบป้อนแบบเก่า (มีตัวนำและไดอิเล็กตริกมากกว่า) ทำให้เกิดการสูญเสียภายในระบบป้อนที่มากกว่าการป้อนแบบเดิม ส่งผลให้ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศลดน้อยลงด้วย แต่ด้วยสภาพเจาะจงทิศทางจากการป้อนด้วยระบบใหม่ที่มีค่ามากกว่าระบบป้อนแบบเก่า ทำให้อัตราขยายของสายอากาศจากการป้อนด้วยระบบใหม่มีค่าที่สูงกว่าระบบป้อนแบบเก่า ตามลำดับ

ซึ่งข้อดีอีกประการคือ วัสดุฐานรองที่นำมาจำลองผลและสร้างต้นแบบระบบป้อนสามารถใช้วัสดุที่สามารถหาซื้อได้ง่ายโดยทั่วไป คือ FR4 ซึ่งมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเท่ากับ 4.4-4.5 ทำให้สามารถลดต้นทุนของวัสดุฐานรองลงได้ ซึ่งวัสดุฐานรองที่มีการใช้สำหรับการป้อนผ่านสายเฟสโดยทั่วไป หรือที่มีการใช้ทดสอบในห้องทดสอบสายอากาศปกติ มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเท่ากับ 2.08 หรือ 2.65 ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้ ซึ่งจะมีราคาค่อนข้างสูงกว่าวัสดุฐานรองแบบ FR4 ดังนั้นด้วยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยอีกข้อหนึ่งที่ต้องการพัฒนาระบบป้อนโดยใช้งบประมาณให้น้อยที่สุด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า เทคนิคการป้อนแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศดีขึ้นกว่าเดิมทั้งอัตราขยายและความกว้างแถบของสายอากาศแวลด์ับไมโครสตริปได้ โดยไม่มีการใช้สายเฟสภายในตัวสายอากาศแต่อย่างใด

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

สำหรับระบบป้อนที่ได้ออกแบบและพัฒนาด้วยคุณสมบัติของไดโพลแบบโบว์ไทท์ที่มีความกว้างแถบค่อนข้างกว้าง สามารถปรับปรุงสายอากาศไมโครสตริปให้รองรับความกว้างแถบที่เกิดขึ้นจากตัวกระตุ้นได้ในอนาคตขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากสายอากาศถูกวางตัวในลักษณะที่สามารถปรับปรุงได้โดยไม่เกี่ยวข้องกับตัวกระตุ้น อันเนื่องมาจากเทคนิค FPC ที่ได้นำมาประยุกต์ใช้



บรรณานุกรม

- ศราวุธ ชัยมูล และ ประยูทธ อัครเอกมาลิน. (2554). **อภิวัดุดสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านสายอากาศ (Metamaterials for Antenna Applications)**. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 หน้า 472-482
- Bilgic, M.M. and Yegin, K. 2014. April. Low Profile Wideband Antenna Array with Hybrid Microstrip and Waveguide Feed Network for Ku Band, Satellite Reception Systems. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**. Vol. 62. No. 4
- Das, G. Sharma A. and Gangwar, R. K. 2016. Two Elements Dual Segment Cylindrical Dielectric Resonator Antenna Array with Annular Shaped Microstrip Feed
- Eccleston, W. 2015. Effect of microstrip feeds on half-mode SIW distributed amplifier performance. **Microwave Conference (APMC)**. IEEE
- Huang, G.C. and Iskander M. F. and Hoque, M. 2016. A Wideband Circularly Polarized Stacked Patch Antenna Array and Feed System, **National Science Foundation grant number: IIP-1553297 and by CERDEC**
- Huque, T.I. Chowdhury, A.A. Hosain K. and Alam, S. 2011. Performance Analysis of Corporate Feed Rectangular Patch Element and Circular Patch Element 4x2 Microstrip Array Antennas. **(IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications**. Vol. 2. No. 7
- Jassim, A.M. Hristov, H.D. 1995. Cavity feed technique for slot-coupled microstrip Patch array antenna, **IEE Proceedings online no 19952224**
- Kai, L.U and Wa, L.K. 2012. On the Millimeter-wave Half-loop-fed Fabry-Perot Resonator Antenna, **Proceedings of APMC 2012**. Kaohsiung, Taiwan, Dec. 4-7
- Kanso, A. Chantalat, R. Thevenot, M. Monediere T. and Jecko, B. 2010. EBG Dual Band Antenna Using Two Layer FSS to Feed a Reflector Antenna, **Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)**, p. 1- 4
- Kanso, A. Chantalat, R. Thevenot, M. Naeem, U. Bila, S. and Monediere, T. 2011. Multifeed EBG Dual Band Antenna to Feed a Reflector Antenna, **Proceedings of the 41st European Microwave Conference**

- Kumar, R. and Chaudhary, R. K. 2016. IEEEA Wideband Circularly Polarized Cubic Dielectric Resonator Antenna Excited With Modified Microstrip Feed. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. Vol. 15
- Li, Y. and Esselle, K.P. 200. A Height-Reduced Slot-Array-Fed EBG Resonator Antenna with High Gain and Large Bandwidth. **Antennas and Propagation Society International Symposium**. P.4417- 4420
- Li, Y. and Esselle, K.P. 2009. October. Small EBG resonator high-gain antenna using in-phase highly-reflecting surface. **Electronics letters 8th** Vol. 45 No. 21
- Lu, K. Ding, Y. Leung, K.W. 2012. March. A New Fabry-Perot Resonator Antenna Fed by an L-Probe, **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 60, No. 3
- Moustafa, L. and Jecko, B. 2010. Design of a Wideband Highly Directive EBG Antenna Using Double-Layer Frequency Selective Surfaces and Multifeed Technique for Application in the Ku-Band, **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters** Vol. 9
- Nour, A.A. Fezai, F. and Monediere, T. 2016. Comparison of Different Feeding Techniques of a Low-Profile Dual-band Circularly Polarized Microstrip Antenna
- Neto, A. Lombart, N. Gerini, G. Bonnedal, D. and Maagt, P. 2007. August. EBG Enhanced Feeds for the Improvement of the Aperture Efficiency of Reflector Antennas, **IEEE Transactions on Antennas and Propagations**, Vol. 55, No. 8
- Rahim, M. K. A. Asrokin, A. Jamaluddin, M. H. Ahmad, M. R. Masril, T. and Abdul Aziz, M. Z.A. 2006. Microstrip Patch Antenna Array at 5.8 GHz for Point to Point Communication. **International RF and Microwave Conference Proceeding, September 12-14**. Putrajaya. Malaysia.
- Raut, R. and Talandage, K. 2015. Bandwidth And Gain Enhancement Of Rectangular MSA By Using Parasitic Patch And Capacitive Feeding Technique For Wideband Application. **International Conference on Microwave**. December 18-20
- Serhal, D. Hajj, M. Chantalat, R. Drouet, J. and Jecko, B. 2009. Multifed Sectoral EBG Antenna for WiMAX Applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation letters**, Vol. 8
- Singh, K.K. Gupta, S. C. 2013. February. Review and Analysis of Microstrip Patch Array Antenna with different configurations. **International Journal of Scientific & Engineering Research**. Vol. 4, Issue 2

- Shambavi, K. Alex, Z.C. and Naveen, T.2005 – 2009. Design and Analysis of High Gain Millimeter Wave Microstrip Antenna Array for Wireless Application. **Journal of Theoretical and Applied Information Technology**
- Vaidya, R. Gupta, K. Sanjeev Mishra, K. Mukherjee, J. 2011.Effect of Superstrate Height on Gain of MSA Fed Fabry Perot Cavity Antenna. **Loughborough Antennas & Propagation Conference, Loughborough. UK. 14-15 November**
- Vaidya, R. Mishra, K. Gupta, K. Mukherjee, J.2012. Efficient high gain wideband antenna with circular array of square parasitic patches, Antennas and Propagation (APCAP). **IEEE Asia-Pacific Conference. p.39-40**
- Veeramani and Dwivedi, R.P. 2015. Comparative Study of Coplanar waveguide Feed and Microstrip Feed for Log Periodic Antennas. **2nd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)**
- Weily, R. Esselle, P. K.P. Trevor, S. and Sanders, B.C. 2006. High Gain Antenna with Improved Radiation Bandwidth using Dual 1-D EBG Resonators and Array Feed. **Antennas and Propagation Society International Symposium. P.3-10.**
- Yang, F. and Rahmat-Samii, Y. 2003. “Microstrip antennas integrated with electromagnetic bandgap (EBG) structures: A low mutual coupling design for array applications.” **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 51, No. 10, pp. 2936–2946.
- Yang,F. and Rahmat-Samii, Y. 2009. **Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering. Cambridge University Press, Cambridge**

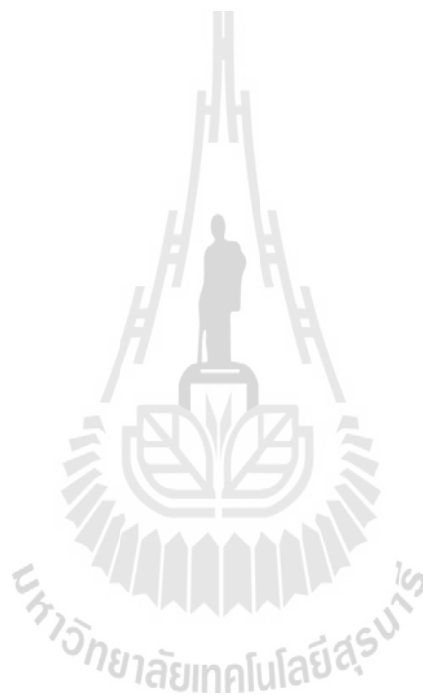
ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Warakorn Sarikha, Piyaporn Krachodnok, Rangsan Wongsan “Exciting Technique for MSA Array
By Using Single Patch With Surrounded Metallic Plate,” **ECTI-CON 2014**, Nakhon
Rachasima, Thailand, May 14-17, 2014.



ประวัติผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรคร์ เกิดเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2507 เกิดที่ ตำบลปากน้ำประแสร์ อำเภอกาญจนบุรี จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์ เมื่อปี พ.ศ. 2532 จากนั้นได้ศึกษาต่อระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2537 ต่อมาปี พ.ศ. 2541 ได้รับการรับรองด้านวิศวกรรมอวกาศ (Certification in Space Engineer) โดย International Space University, France (SSP'98 at Cleveland State University, Ohio, USA) ได้ศึกษาต่อระดับปริญญาเอกวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2546 สำหรับประวัติการทำงานในอดีต ปี พ.ศ. 2532 เป็นอาจารย์ประจำแผนกอิเล็กทรอนิกส์ ที่สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ ปีพ.ศ. 2532 ถึง 2533 เป็นอาจารย์พิเศษคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม กรุงเทพมหานคร นอกจากนี้ ปีพ.ศ. 2535 ถึง 2535 เป็นที่ปรึกษาด้านอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ปี พ.ศ. 2546 ถึง 2548 ได้เป็นหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นอาจารย์พิเศษมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น ปีพ.ศ. 2553 ถึง 2553 เป็นรองอธิการบดีฝ่ายพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นนายกสโมสรพนักงานสายวิชาการและสายปฏิบัติการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันเป็นรองศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเป็นคณะกรรมการจัดทำมาตรฐานด้านเทคนิคในกิจการกระจายเสียงและกิจการโทรทัศน์ ตามคำสั่งคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ที่ 5/2555