

สายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์โดยใช้อิวิสต์



ว่าที่ร้อยตรี วรากรณ์ สาริษา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

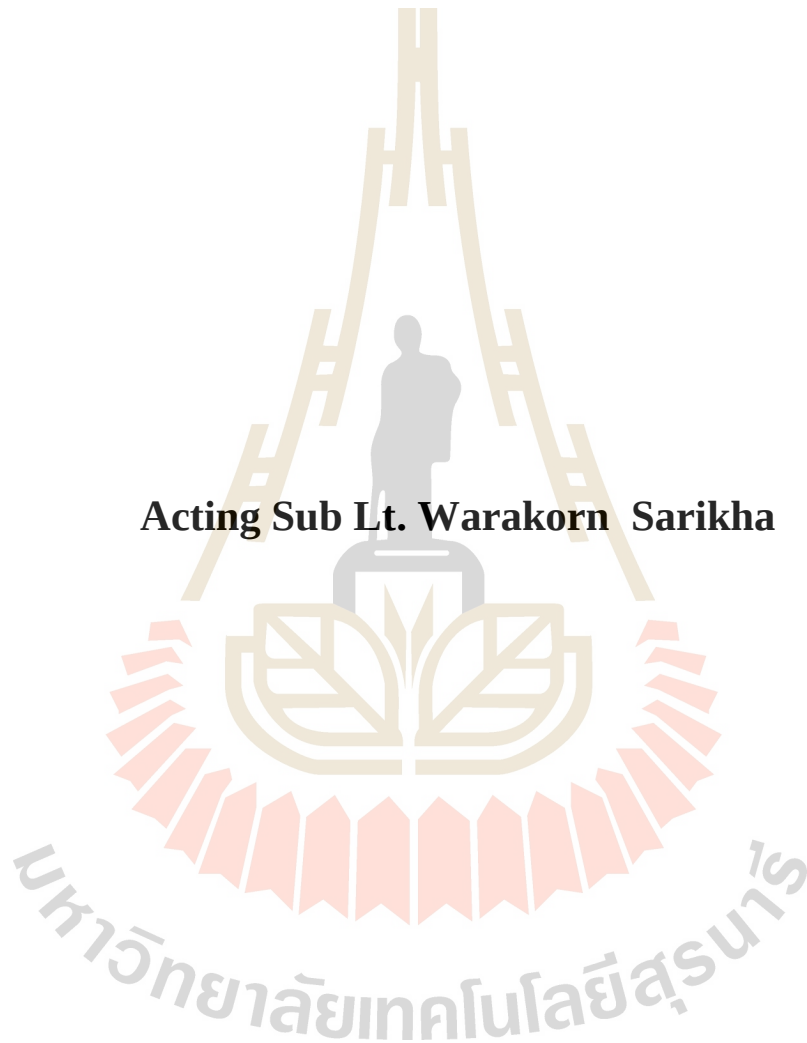
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2560

**PATCH ARRAY ANTENNA USING
METAMATERIAL TECHNIQUE**

Acting Sub Lt. Warakorn Sarikha



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Telecommunication Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

สายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์โดยใช้อิวกัส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปริญญาตรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศ. ดร. ประยุทธ์ อัครเอกมาลิน)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. รุ่งสรรค์ วงศ์สรรค์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

กรรมการ

(รศ. ดร. มนต์ทิพย์ อูชาสกุล)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์)

กรรมการ

(ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชานประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วรากรณ์ สาริชา : สายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์โดยใช้อิทธิพล (PATCH ARRAY ANTENNA USING METAMATERIAL TECHNIQUE) อาจารย์ที่ปรึกษา :
รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์, 120 หน้า

การพัฒนาและเจริญเติบโตของระบบการสื่อสารไร้สายอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน เป็นความท้าทายต่อนักวิจัยและวิศวกรด้านวิศวกรรมสายอากาศเพื่อสร้างโครงสร้างสายอากาศและปรับปรุงออกแบบสายอากาศที่มีอยู่เดิมให้มีประสิทธิภาพตามต้องการ เนื่องจากความก้าวหน้าในการคำนวณด้านทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและเทคโนโลยีการสร้างและผลิตสายอากาศหรือแม้แต่วัสดุที่นำมาใช้สร้าง ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าที่ซับซ้อนหรืออิทธิพล (metamaterial) มาช่วยในการออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสื่อสารข้อมูลผ่านระบบไร้สาย จำเป็นที่ต้องใช้สายอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมที่สุดของกับการใช้งานแต่ละประเภท องค์ประกอบหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศโดยตรง ได้แก่ ระบบป้อน (feed system) ซึ่งทำหน้าที่ในการป้อนกำลังงานให้กับสายอากาศ พบว่าเกิดการสูญเสียในระบบป้อนค่อนข้างมากจากการป้อนผ่านเฟสด้วยวิธีเก่า ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ออกแบบตัวกระตุ้นกำลัง (power exciter) ที่เหมาะสมสำหรับระบบป้อน โดยเลือกทดสอบสมมติฐานของงานวิจัยด้วยสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ ณ ความถี่ X-band โดยใช้อิทธิพลแบบ 2 มิติ หรือ EBG ชนิดดอกเห็ด (mushroom) ได้ทำการพิจารณาจำนวนและตำแหน่งของ EBG ที่เหมาะสมร่วมกับเทคนิคการวางตัวของสายอากาศแบบโพรงฟาบรี-เปโรต์ เรโซเนเตอร์ (Fabry-Pérot Resonator : FPR) พบว่า ผลการวัดทดสอบให้ค่าอัตราขยายและความกว้างแถบสำหรับสายอากาศแถวลำดับจำนวน 2×4 อีลิเมนต์ มีค่าเท่ากับ 14.71 dB และ 20.48 % ตามลำดับ ในขณะที่อัตราขยายและความกว้างแถบของสายอากาศด้วยการป้อนแบบเก่ามีค่าเท่ากับ 13.93 dB และความกว้างแถบเท่ากับ 1.0112 % ซึ่งสามารถเพิ่มทั้งอัตราขยายและความกว้างแถบให้สูงขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นความกว้างแถบของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ที่ค่อนข้างแคบ สามารถเพิ่มมากขึ้นกว่า 10% กล่าวได้ว่า ระบบป้อนแบบใหม่นี้เป็นวิธีการป้อนกำลังโดยไม่ผ่านสายเฟสในการส่งกำลังแบบสิ้นเชิง

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

WARAKORN SARIKHA : PATCH ARRAY ANTENNA USING
METAMATERIAL TECHNIQUE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.

RANGSAN WONGSAN, D.Eng. 120 PP.

PATCH ARRAY ANTENNA/MINIATURE EBG/FEED SYSTEM

The ongoing development and growth of wireless communication systems are continuing. The challenge researchers and engineers in high engineering who want to develop and improve any antenna for utilizing in the desired applications appropriately, which depends on any objective of the research. The patch antenna is one of the antenna types that are widely applied in several advantages and low profile property such as lightweight and simple to increase gain by using the construction of array.

Presently, there are applications of complex electromagnetic material properties or metamaterials to design and improve the performance of the antennas. Especially as wireless data communication, it is necessary to use the most efficient and suitable antenna for each type of application. One part of antenna system is important and affects the properties of the antenna is the power input, which transmits the power through the phasing line to the antenna with this feed method, the loss will be more happen in phasing line. Therefore, in this research, the new feeder is designed to excite the RF power for X-band patch array antenna (PPA) by using mushroom-like EBG work together with bow-tie dipole antenna. The appropriate design of this feeder can provide the uniform phase of excited power to PAA that is a similar to the technique of Fabry-Pérot Resonator. Consequently, the larger bandwidth and more gain can be provided form PAA than the excitation with phasing line. From

the simulation results compared to the measured results, it is found that the proposed antenna, 2x4 element of PPA, can provide 20.48% of the bandwidth and the 14.71 dB of the gain. While the bandwidth and gain that obtained from the older method are 1.0112% and 13.93 dB, respectively. Thus, the bandwidth of the PAA are improved more than 10% and the gain is improved more than the original feed method was provide.



School of Telecommunication Engineering

Student's Signature

S. Warat

Academic Year 2017

Advisor's Signature

W. Rongson

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลต่างๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษาและช่วยแก้ปัญหาต่างๆ แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ศ. ดร.ประยุทธ์ อัครเอกมลิน ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญ พานิชย์รศ. ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล และ ผศ.ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้คำชี้แนะและคำแนะนำเกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและแนะนำในด้านต่างๆ ด้วยดี คุณวิรัตน์ อาจหาญ ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการติดต่อประสานงานเกี่ยวกับเอกสารต่างๆ ของการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณคำแนะนำและกำลังใจที่ดีจาก ดร.สมภพ พิมพล ดร.ภูมิพงษ์ ดวงตั้ง ดร.ศรัณย์ คัมภีร์ภัทร ดร.เกอทัรา คำพิกุล คุณพิรศักดิ์คำสาลี คุณภรภัทร เปรมฤดีชัยศักดิ์ คุณสพล นราโชติกา คุณระพีพันธ์ ขัดปิก คุณอวยชัย ยางชัย และพี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ของการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณแม่วันดี ทองสุก ผู้เป็นทั้งมารดาและบิดาของผู้วิจัยและเป็นกำลังใจที่ดียิ่งเสมอ คุณอรจิตร ไชยลิขิต และ ค.ช ภูมิฤทธิกรณ์ สาริษา ผู้เป็นภรรยาและลูกเปรียบเสมือนแรงใจที่สำคัญยิ่งต่อผู้วิจัยเป็นกำลังใจตลอดระยะเวลาในการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อีกทั้งญาติพี่น้อง เพื่อนสนิทมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่คอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์โดยตลอดจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้ครู อาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาและความรู้ด้านต่างๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ตลอดจนบิดา มารดา ภรรยาและลูก รวมทั้งญาติพี่น้องและกัลยาณมิตร ทุกๆท่าน และประโยชน์ที่ถึงแก่มต่อสังคมและประเทศชาติในอนาคตต่อไป

ว่าที่ ร.ต.วราภรณ์ สาริษา

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	3
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของเบื้องต้น.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย	4
1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน	4
1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย	4
1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย	4
1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	4
1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล	5
1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล	5
1.6.7 การทดสอบสมมุติฐาน.....	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ปรัชญ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ	6
2.2 ปรัชญ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.1	สายอากาศไมโครสตริปและระบบป้อนกำลังงาน	6
2.2.2	เทคนิคและรูปแบบวิธีการป้อนสำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป	12
1)	เทคนิคการป้อนด้วยสายเฟสหรือสายไมโครสตริป (phasing line)	12
2)	เทคนิคการป้อนด้วยสายเฟสและการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยแถวลำดับไมโครสตริป	14
3)	เทคนิคการป้อนด้วยการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยร่องท่อนำคลื่นและโพรง	15
2.3	สรุป	20
3	ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
3.1	บทนำ	23
3.2	สายอากาศไมโครสตริป (microstrip antenna)	23
3.2.1	คุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป	24
3.2.2	วิธีการป้อนกำลังงานของสายอากาศไมโครสตริป	26
3.3	สายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป (microstrip array antenna)	26
3.3.1	ลักษณะการป้อนของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป(แบบเก่า)	27
1)	การป้อนของสายอากาศแถวลำดับแบบอนุกรม (series feed)	27
2)	การป้อนของสายอากาศแถวลำดับแบบขนาน (parallel feed)	27
3.4	ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า	28
3.4.1	คำจำกัดความ โครงสร้าง และพารามิเตอร์ของโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า	28
3.5	คุณสมบัติของอภิวัดสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านสายอากาศ	32
3.6	ทฤษฎีและหลักการแนวความคิดการส่งกำลังด้วยระบบป้อนใหม่ สำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์	37
3.7	สรุป	40
4	การจำลองและออกแบบระบบป้อนใหม่	
4.1	กล่าวนำ	41
4.2	จำลองสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปโดยการป้อนกำลังงานด้วยสายเฟสแบบเก่า	42
4.3	วิธีการออกแบบและจำลองตัวกระตุ้น	46

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4	จำลองตัวกระตุ้นสัญญาณด้วยตัวป้อนแบบไดโพลแบบโบว์ไท (bow-ties dipole)	49
4.4.1)	ความยาวของไดโพลแบบโบว์ไท (l_{bowtie}).....	50
4.4.2)	ขนาดความกว้างส่วนปลายของแขนไดโพลแบบโบว์ไท (w_{bowtie})	52
4.4.3)	ความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพลแบบโบว์ไท (w_{bot})	52
4.4.4)	ความหนาของไดโพลแบบโบว์ไท (t_{bow})	54
4.4.5)	ระยะห่างระหว่างแขนของไดโพลแบบโบว์ไท (d_{feed})	55
4.5	พิจารณาผลการจำลองตัวกระตุ้นกำลังงานด้วยตัวกระตุ้นไดโพลแบบโบว์ไท (Bowtie Dipole) ร่วมกับ EBG	60
4.5.1)	จำลอง EBG ร่วมกับ ตัวกระตุ้น ไดโพลแบบโบว์ไท ร่วมกับ EBG	61
4.5.2)	จำลอง EBG 1 unit วางตำแหน่งกึ่งกลางของระนาบกราวด์	65
4.5.3)	จำลอง EBG 2 unit วางตำแหน่งกึ่งกลางของระนาบกราวด์	70
	ก) ศึกษาความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทกับ EBG ที่เหมาะสม	70
	ข) ศึกษาช่องว่างระหว่างหน่วยเซลล์ (g_{unit}) ที่เหมาะสม	70
4.6	พิจารณาวิธีการป้อนกำลังด้วยโพรง (cavity) ร่วมกับ EBG	81
4.7	พิจารณาป้อนกำลังด้วยตัวป้อนแบบใหม่ ร่วมกับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป	85
4.7.1	ตัวกระตุ้นไดโพลแบบโบว์ไท	85
4.7.2	ตัวกระตุ้นกำลังด้วยโพรงภายในโพรงทำการเจาะรูบนผนัง.....	92
4.7.3	พิจารณาตัวกระตุ้นที่เหมาะสม.....	94
4.8	สรุป	98
5.	การสร้างและทดสอบสายอากาศด้วยระบบป้อนแบบใหม่	
5.1	กล่าวนำ	100
5.2	ขั้นตอนการสร้างระบบป้อนแบบใหม่	100
5.3	ผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ.....	102
5.3.1	ความกว้างแถบและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (s_{11}).....	102
5.3.2	อัตราขยาย (gain).....	103

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3.3	แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (radiation pattern).....	103
5.4	สรุป	105
6	สรุปและข้อเสนอแนะ	
6.1	สรุป	110
6.2	ข้อเสนอแนะและแนวทาพัฒนา.....	114
	รายการอ้างอิง.....	115
	ภาคผนวก ก บทควมวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	118
	ประวัติผู้เขียน.....	120



สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

2.1 สรุปงานปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบป้องกันสำหรับ สายอากาศ แถวลำดับไมโครสตริป.....	7
3.1 ข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของสายอากาศไมโครสตริป	23
4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวกระตุ้นไดโพลแบบโบว์ไท.....	50
4.2 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของ EBG	60
4.3 สรุปพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของระบบป้องกันใหม่ด้วยไดโพลแบบโบว์ไทร่วมกับ EBG	61
4.4 ตัวกระตุ้นด้วยโพรบภายในโพรงทำการเจาะผนังด้านบน	80
4.5 แสดงอัตราขยายของสายอากาศโดยเปรียบเทียบความสูงกับระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์	81
4.6 แสดงความกว้างแถบโดยเปรียบเทียบความสูงกับระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์	88
4.7 ค่าคุณลักษณะของสายอากาศจากลักษณะการป้องกันแบบเก่าและแบบใหม่.....	97
4.8 สรุปแบบรูปการแผ่กำลังจากการป้องกันด้วยสายเฟสและระบบป้องกันแบบใหม่	97

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

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

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 แสดงระบบป้อนแบบอนุกรม.....	27
3.6 แสดงระบบป้อนแบบขนาน	28
3.7 EBG แบบ 3 มิติ.....	29
3.8 EBG แบบ 2 มิติ.....	29
3.9 พารามิเตอร์และรูปแบบของค่าเหนี่ยวนำและค่าความจุของโครงสร้าง EBG	31
3.10 แผนผังสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็ก	35
3.11 แหล่งกำเนิดอยู่ในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์และแบบจำลอง เมื่อใช้กับสายอากาศไมโครสตริป (ภาพจาก ศราวุธและ ประยุทธ์, 2554)	36
3.12 โครงสร้างระบบป้อนใหม่กับสายอากาศ)	37
3.13 ลักษณะการวางตัวของสายอากาศแถวลา ดับและระบบป้อน.....	38
3.14 แสดงลักษณะตา แห่งของแพทช์และแหล่งกา เนิด.....	38
3.15 ตัวกระตุ้นไดโพลแบบโบว์ไท.....	40
3.16 ตัวกระตุ้นด้วยโพรบภายในโพรงทา การเจาะรูบนผนังด้านบน	40
4.1 แสดงโครงสร้างสายอากาศแถวลาดับไมโครสตริปจำนวน 2 x 4 อีลิเมนต์ด้วยป้อนแบบสายเฟส.....	43
4.2 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับและความกว้างแถบของสายอากาศแถว ลาดับไมโครสตริปจำนวน 2x4 อีลิเมนต์โดย การป้อนกำลังด้วยสายเฟส	44
4.3 แบบรูปการแผ่กำลังงานระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) ของสายอากาศแถวลาดับไมโครสตริปจำนวน 2x4 อีลิเมนต์.....	45
4.4 แสดงแบบจำลองอัตราของสายอากาศแถวลาดับไมโครสตริปจำนวน 2x4 อีลิเมนต์ และแบบรูปการแผ่กำลังงานในลักษณะสามมิติ.....	46
4.5 ลักษณะคลื่นจากแหล่งกา เนิดไปยังแพทช์ (มุมมองด้านข้าง)	47
4.6 แพทช์จา นวน 2x4 อีลิเมนต์ (มุมมองด้านบน)	47
4.7 มุมมองแพทช์แถวลา ดับในแต่ละด้าน	48
4.8 โครงสร้างของไดโพลแบบโบว์ไท (bow-tie dipole).....	49
4.9 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ จากการปรับความยาวไดโพลแบบ โบว์ไท .	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับจากค่าความยาวไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 3.90 มิลลิเมตร	51
4.11 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับจากความกว้างไดโพลแบบโบว์ไท	52
4.12 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพลแบบโบว์ไท	53
4.13 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 0.9 มิลลิเมตร	53
4.14 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความหนาไดโพลแบบโบว์ไท	54
4.15 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความหนาไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร	55
4.16 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของระยะห่างระหว่างแขนไดโพลแบบโบว์ไท	55
4.17 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของระยะห่างระหว่างแขนไดโพลแบบโบว์ไท เท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร	56
4.18 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของระยะห่างระหว่างปีกไดโพลแบบโบว์ไท เท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร	57
4.19 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความยาวไดโพลแบบโบว์	57
4.20 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความยาวไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 4.7625 มิลลิเมตร	58
4.21 แสดงความกว้างแถบของความยาวไดโพลแบบโบว์ไท	59
4.22 แสดงค่าอัตราขยายของไดโพลแบบโบว์ไท	60
4.23 แบบรูปการแผ่กำลังงานระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก(H-Plane) ของไดโพลแบบโบว์ไท.....	62
4.24 ลักษณะการตัด EBG ตามแนวโบว์ไทและแบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก.....	62
4.25 แบบรูปการแผ่กำลังในลักษณะสมมาตร	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 ลักษณะการจัดวางตัวกระตุ้น โดยใช้ไดโพลโบว์ไท่ร่วมกับ EBG	64
4.27 แบบรูปการแผ่กำลังตัวกระตุ้นแบบโบว์ไท่ทางานร่วมกับ EBG	64
4.28 รูปการแผ่กำลังในลักษณะ 3 มิติ	65
4.29 แสดงโครงสร้างตัวป้อน อนุสัญญาไดโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG (ก) จำนวน 1 หน่วย (ข) ไดโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG (ด้านข้าง)	66
4.30 แสดงค่าโครงสร้างตัวป้อนไดโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG 1 หน่วย	67
4.31 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของตัวป้อนไดโพลแบบโบว์ไท่ ร่วมกับ EBG 1 หน่วย.....	68
4.32 แสดงค่าความกว้างแถบของตัวป้อนไดโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG 1 หน่วย).....	68
4.33 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H- Plane) ของตัวป้อนไดโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG 1 หน่วย.....	69
4.34 แสดงอัตราขยายของตัวป้อนไดโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG 1 หน่วย.....	69
4.35 แสดงความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไท่กับ EBG	70
4.36 แสดงความกว้างแถบตัวป้อน เมื่อความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไท่ กับ EBG เท่ากับ 9 มิลลิเมตร (0.3λ).....	70
4.37 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไท่ กับ EBG เท่ากับ 0.75λ	71
4.38 แสดงอัตราขยายเมื่อความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไท่กับ EBG เท่ากับ 0.3λ	72
4.39 แสดงอัตราขยายเมื่อความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไท่กับ EBG เท่ากับ 0.75λ	72
4.40 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของ ไดโพลแบบโบว์ไท่กับ EBG	73
4.41 แสดงความกว้างแถบของไดโพลแบบโบว์ไท่กับ EBG ที่ความสูงเท่ากับ 22 มิลลิเมตร	74
4.42 แสดงอัตราขยายของไดโพลแบบโบว์ไท่กับ EBG ที่ความสูง 22 มิลลิเมตร.....	74
4.43 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก ของไดโพลแบบ โบว์ไท่กับ EBG ที่ความสูงเท่ากับ 22 มิลลิเมตร	75
4.44 โครงสร้าง EBG ขนาด 2 หน่วยเซลล์.....	76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.45	แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของช่องว่างระหว่าง EBG 2 หน่วยเซลล์..... 77
4.46	แสดงแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของ ช่องว่างระหว่างหน่วยเซลล์..... 78
4.47	แสดงแบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็กของ ระยะห่างระหว่าง หน่วยเซลล์ของ EBG เท่ากับ 20 มิลลิเมตร 79
4.48	แสดงอัตราขยายและแบบรูปการแผ่กำลังแบบสามมิติ 80
4.49	โครงสร้างตัวกระตุ้นด้วยโพรบภายในโพรงทางการเจาะรูบนผนังด้านบน 81
4.50	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนตัวกระตุ้นด้วยโพรบภายในโพรงทางการ เจาะรูบนผนัง ด้านบน 82
4.51	แสดงความกว้างแถบตัวกระตุ้น 82
4.52	แสดงแบบรูปการแผ่กำลังสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก 83
4.53	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (ระยะห่างระหว่างหน่วยเซลล์เท่ากับ 15 มิลลิเมตร) 83
4.54	แสดงแบบรูปการแผ่กำลัง(ระยะห่างระหว่างหน่วยเซลล์เท่ากับ 15 มิลลิเมตร) 84
4.55	แสดงความกว้างแถบ(ระยะห่างระหว่างหน่วยเซลล์เท่ากับ 20 มิลลิเมตร) 84
4.56	แสดงโครงสร้างสายอากาศแถวตา ดับไมโครสตริป จา นวน 2x4 อีลิเมนต์ ร่วมกับ ตัวป้อน แบบใหม่ 85
4.57	แสดงผลการจำลองค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับด้วยระยะห่างระหว่าง อีลิเมนต์ (d_MSA) เท่ากับ 3.75 มิลลิเมตร ($\lambda/8$) 86
4.58	แสดงผลการวัดค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับด้วยระยะห่างระหว่าง อีลิเมนต์(d_MSA) เท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร ($\lambda/4$) 87
4.59	แสดงผลการวัดค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับด้วยระยะห่างระหว่าง อีลิเมนต์ (d_MSA) เท่ากับ 15 มิลลิเมตร ($\lambda/2$) 88
4.60	แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับจากความสูงและระยะห่าง เท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร 89
4.61	แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับด้วยระยะระหว่างอีลิเมนต์จาก 8.4375 ถึง 14.140625 มิลลิเมตร 90

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.62	แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับเมื่อ h_{MSA} เท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร และ d_{MSA} เท่ากับ 9.375 มิลลิเมตร	91
4.63	สายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์โดยวิธีป้องกันการด้วยโพรง	91
4.64	อัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์โดยวิธีป้องกันการด้วยโพรง	92
4.65	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์โดยวิธีป้องกันการด้วยโพรง	93
4.66	ผลการจำลองค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของการป้อนแบบเก่าและระบบป้อนแบบใหม่	93
4.67	แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของการ ป้อนแบบเก่าและระบบป้อนแบบใหม่	94
4.68	แสดงอัตราขยายแบบรูปการแผ่กำลังแบบ 3 มิติของการป้อนแบบเก่าและระบบป้อนแบบใหม่	95
4.69	แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของการป้อนแบบเก่าและระบบป้อนแบบใหม่	95
4.70	แสดงอัตราขยายแบบรูปการแผ่กำลังแบบ 3 มิติ ของการป้อนแบบเก่าและระบบป้อนแบบใหม่	96
5.1	ต้นแบบตัวกระตุ้นสัญญาณโคโพลแบบโบว์ไท	101
5.2	ต้นแบบระบบป้อนแบบใหม่สำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป 2x4 อิลิเมนต์	101
5.3	แสดงความกว้างแถบและค่าการสูญเสียกำลังงานย้อนกลับ	102
5.4	เปรียบเทียบค่าการสูญเสียกำลังงานย้อนกลับ (s_{11}) สำหรับระบบป้อนแบบเก่าและระบบป้อนแบบใหม่ (จากการจำลองและการวัดทดสอบ)	103
5.5	ลักษณะการวางตัวของสายอากาศเพื่อทดสอบอัตราขยาย	104
5.6	ผลการวัดกำลังงานภาครับของสายอากาศจากการป้อนสัญญาณด้วยระบบป้อนแบบใหม่ ..	104
5.7	ลักษณะการวางตัวของสายอากาศเพื่อวัดแบบรูปการแผ่กำลังงาน	106
5.8	แบบรูปการแผ่กำลังงาน (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก	107
5.9	แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศจากการป้อนกำลังงานด้วยระบบป้อนใหม่	107
5.10	แสดงอิมพอดแดนซ์ของสายอากาศจากการป้อนกำลังด้วยระบบป้อนใหม่	108
6.1	เทคนิคการป้อนการป้อนกำลังสำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป	110

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการพัฒนาและเติบโตของระบบการสื่อสารไร้สายมีมาอย่างต่อเนื่องและสร้างความท้าทายต่อนักวิจัยด้านสายอากาศ เพื่อพัฒนาและปรับปรุงงานวิจัยด้านสายอากาศเพิ่มมากขึ้น โครงสร้างของสายอากาศถูกออกแบบและพัฒนาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพค่าคุณลักษณะ ต่างๆ ตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานนั้นๆ โดยพัฒนาเฉพาะส่วนของสายอากาศ เพื่อเพิ่มอัตราขยายหรือความกว้างแถบของสายอากาศแต่ละชนิด

สายอากาศแพทช์ เป็นสายอากาศชนิดหนึ่ง ซึ่งถูกนำมาพัฒนาอย่างกว้างขวางในระบบสื่อสาร โดยพัฒนาตามจุดประสงค์ของการใช้งานนั้นๆ อาทิเช่น การเพิ่มอัตราขยายด้วยการนำมาแถวลำดับ (array) ของแพทช์แต่ละอีลิเมนต์

ระบบการป้อน (feed system) ของสายอากาศ เป็นองค์ประกอบหนึ่งของสายอากาศที่สำคัญและน่าสนใจ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศได้โดยตรง อันเนื่องมาจากกำลังจากแหล่งกำเนิดที่ถูกจ่ายผ่านระบบป้อนหรือเรียกว่า สายเฟส (phasing line) พบว่ามีความหลากหลายขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างของสายอากาศในแต่ละชนิด ซึ่งเมื่อพิจารณาคุณสมบัติของระบบการป้อนของสายอากาศ คุณสมบัติที่ดีนั้นจะต้องป้อนกำลังให้แก่สายอากาศได้แบบสมบูรณ์เพื่อสามารถกระตุ้นกำลังให้กับสายอากาศสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศ ได้อย่างชัดเจนและจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องออกแบบระบบป้อนให้เหมาะสมกับ โครงสร้างสายอากาศแต่ละชนิดงานวิจัยที่ผ่านมาจะนำเสนอในหลากหลายประเด็นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศอย่างต่อเนื่อง พบว่างานวิจัยเพื่อนำเสนอการพัฒนาประสิทธิภาพของสายอากาศในส่วนของระบบป้อน โดยตรงมีน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การนำเสนอานวิจัยเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในส่วนอื่นๆ

เมื่อกล่าวถึง โครงสร้างสายอากาศที่มีพื้นฐานที่เรียบง่ายและกะทัดรัดถูกนำมาประยุกต์ใช้งานของสายอากาศด้านการสื่อสารไร้สายย่านความถี่สูงได้อย่างเหมาะสม ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่า สายอากาศไมโครสตริป หรือ สายอากาศแพทช์ ได้ถูกนำมาพัฒนางานวิจัยอย่างกว้างขวาง เป็นสายอากาศประเภทหนึ่งที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สายอย่างกว้างขวาง โดยสามารถนำไปประยุกต์การใช้งานได้หลากหลายด้าน อาทิเช่น สายอากาศสำหรับการให้บริการ

อินเทอร์เน็ตไร้สายความเร็วสูง (wimax application) สายอากาศสำหรับย่านความถี่ Ku หรือ อุปกรณ์ชุดทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศ ณ ความถี่ 10 GHz หรือย่านความถี่ X-band (ช่วงความถี่ 8-12 GHz) เป็นต้น ซึ่งลักษณะโครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์ที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ไม่ต้านลม ง่ายต่อการไปใช้งานและปรับปรุงค่าคุณลักษณะให้เหมาะสมตามลักษณะการใช้งานนั้นๆ สามารถเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศซึ่งสามารถทำได้โดยง่ายด้วยการนำสายอากาศมาจัดทำแถวลำดับ (array antenna)

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์เพื่อดำเนินงานวิจัย ออกแบบ และพัฒนาระบบป้อนใหม่ ด้วยโครงสร้างสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ ซึ่งเมื่อกล่าวถึงระบบป้อนกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปนั้น มีอยู่วิธีการป้อนด้วยวิธีการแบบเก่า ทั้งหมดสี่วิธีด้วยกัน คือ การป้อนแบบเส้นไมโครสตริป (strip line feed) การป้อนด้วยสายโคแอกเซียล (coaxial cable feed) หรือโพรบนำสัญญาณ (probe feed) การป้อนแบบเชื่อมต่อ (coupled feed) และการป้อนแบบช่องเปิด (aperture feed) ซึ่งโดยปกติแล้วจะเกิดการสูญเสียกำลัง (loss power) อันเนื่องจากโครงสร้างระบบป้อนหรือภายในสายส่ง (transmission line) ค่อนข้างสูง

จากงานวิจัยด้านสายอากาศที่ผ่านมา พบว่ามีการประยุกต์ใช้วัสดุและเทคโนโลยีต่างๆ ร่วมกับโครงสร้างสายอากาศ กล่าวคือ

ด้วยคุณสมบัติของอภิวัด (metamaterials) ได้รับความนิยมนำมาแพร่หลายในการนำมาวิจัยและพัฒนาในงานด้านความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งอภิวัดมีคุณสมบัติพิเศษทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษซึ่งไม่ปรากฏตามธรรมชาติ คือมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (permittivity) ที่เป็นลบหรือเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งอภิวัดได้ถูกนิยามว่าเป็นวัสดุประดิษฐ์เชิงวิศวกรรม (artificial material) โดยคุณสมบัติดังกล่าวของอภิวัดจะเกิดจากการออกแบบการจัดเรียงโครงสร้างวัสดุขนาดเล็กมากๆ ซึ่งจากคุณสมบัติการออกแบบดังกล่าวทำให้เกิดการวิจัยออกแบบโครงสร้างของวัสดุเพื่อทำให้เกิดคุณสมบัติของอภิวัดในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งการนำโครงสร้างอภิวัดมาช่วยในการออกแบบและพัฒนาสายอากาศจึงกลายมาเป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ

ทางผู้วิจัยได้ตระหนักถึงความจำเป็นและให้ความสำคัญกับระบบป้อนของสายอากาศ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศได้โดยตรง และเป็นส่วนที่สามารถพัฒนาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศให้ดีขึ้นกว่าการป้อนด้วยวิธีเดิมหรือแบบเก่าที่ยังคงใช้วิธีการดังกล่าวจนถึงปัจจุบัน โดยผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและพิจารณาความเหมาะสมของหลักการป้อนและแนวทางการเป็นไปได้ในการลดการสูญเสียภายในสายเฟส หรือประสิทธิภาพของค่า

คุณลักษณะของสายอากาศยังคงเทียบเท่าการป้อนผ่านสายเฟสแต่ใช้เทคนิคและวิธีการที่ต่าง กัน เพื่อนำมาประยุกต์การพัฒนาส่วนการป้อนกำลังของสายอากาศ

สำหรับงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบป้อนกำลังให้กับสายอากาศ แถวลำดับแพทช์ ด้วยโครงสร้างตัวกระตุ้นกำลัง (power exciter) ที่เหมาะสมร่วมกับอภิวัดและ เทคนิคการวางตัวของสายอากาศแบบ ฟาบริ-เปโรต์ เรโซเนเตอร์ (fabry-pérot resonator) เพื่อลดเซช การสูญเสียกำลังอันเนื่องมาจากการป้อนผ่านสายเฟสด้วยวิธีการป้อนแบบเก่า โดยทำการออกแบบ โดยเลือกตัวกระตุ้นกำลังที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความกว้างแถบของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ ให้เพิ่มมากขึ้นกว่าการป้อนผ่านสายเฟสแบบเก่า ซึ่งทำการออกแบบและทดสอบสมมติฐานการ ดังกล่าว ด้วยสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ในย่านความถี่ X-band ณ ความถี่ใช้งานที่ 10 GHz

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลระบบป้อนที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์

1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการออกแบบและจำลองผลของระบบป้อนสำหรับ สายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ โดยจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Computer Simulation Technology (CST)

1.2.3 สร้างสายอากาศด้วยระบบป้อนต้นแบบใหม่ และเปรียบเทียบค่าคุณลักษณะของ สายอากาศจากการป้อนด้วยวิธีเก่าและระบบป้อนแบบใหม่

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 ระบบป้อนแบบใหม่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ โดยลดการสูญเสียของสัญญาณที่เกิดขึ้นในสายส่งกำลังแบบเก่า ทำให้สามารถเพิ่มความกว้างแถบ ของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ให้สูงขึ้นจากวิธีป้อนแบบเก่า มากกว่า 10% และอัตราขยายมี ค่าสูงขึ้น

1.4 ขอบเขตของงาน

1.4.1 งานวิจัยนี้จะพัฒนาระบบป้อนของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์โดยใช้เทคนิค ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

1.4.2 ศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองผลระบบสายอากาศและระบบป้อน ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 จำลองผลสำหรับวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ด้วยเทคนิคระบบป้อนใหม่

1.5.2 วิจัย พัฒนา ออกแบบ และสร้างระบบป้อนต้นแบบที่สามารถทดแทนระบบป้อนแบบสายเฟส

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

1. ศึกษาและสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์
2. ศึกษาและสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิธีการป้อนสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์
3. ศึกษาและสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์
4. ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองผลระบบป้อนสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์
5. ออกแบบและสร้างระบบป้อนต้นแบบสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์
6. วิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์จากระบบป้อนใหม่กับระบบป้อนแบบสายเฟสเดิม
7. จัดทำเล่มวิจัย และปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องของผลงานวิจัย

1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองผล
2. สร้างระบบป้อนต้นแบบเพื่อวัดทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศด้วยระบบป้อนใหม่

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 HewlettPackard รุ่น 8722D 50 MHz - 40 GHz

1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

1. เก็บรวบรวมข้อมูลเทคนิคการป้อนจากการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
2. เก็บรวบรวมผลจากการจำลองการป้อนของระบบสายอากาศจากโปรแกรมสำเร็จรูป

CST

3. เก็บรวบรวมผลที่ได้จากการออกแบบ สร้าง และวัดทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศด้วยระบบป้อนต้นแบบใหม่

1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศด้วยระบบป้อนใหม่กับระบบป้อนแบบสายเฟสแบบเก่า

1.6.7 การทดสอบสมมุติฐาน

สมมุติฐานที่กำหนดในหัวข้อที่ 1.3 จะได้รับการพิสูจน์ด้วยเทคนิควิธีเฉพาะทางวิศวกรรมที่ได้นำเสนอ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

1.7.2 ได้นวัตกรรมใหม่ของระบบป้อนสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

สายอากาศแกลวลำดับแบบแพทช์ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศให้ดีขึ้นตามจุดประสงค์การประยุกต์ใช้งานทั้งเรื่องเพิ่มอัตราขยายให้สูงขึ้นหรือเพิ่มความกว้างแถบให้กว้างขึ้น แตกต่างกันไป ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยและการประยุกต์ใช้งาน ด้วยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศ โดยพัฒนาส่วนป้อนกำลังสำหรับสายอากาศ สำหรับสายอากาศแกลวลำดับแบบแพทช์แบบแพทช์ และด้วยสมมุติฐานของงานวิจัย สำหรับการพัฒนาระบบป้อนด้วยเทคนิคช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบป้อนแบบใหม่ที่ไม่ใช้สายเฟส ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการสูญเสียกำลังภายในสายส่งจากตัวป้อนไปยังแพทช์ (patch) แต่ละอีลิเมนต์ (element) ดังนั้น ทางผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการสำรวจและศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในส่วนลักษณะการป้อนกำลังของสายอากาศแบบแพทช์ ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการดำเนินการวิจัย ตลอดจนข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ โดยฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนั้นเป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียงและได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่น ฐานข้อมูล IEEE , ICEIC และฐานข้อมูล IEICE ฯลฯ และนอกจากนี้ยังได้ทำการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งอื่น ๆ เช่น จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัยต่าง ๆ ทั้งในและต่างประเทศ ผลการสืบค้นที่ได้จะใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป

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

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 สายอากาศแบบแพทช์และระบบป้อนกำลัง

สายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ มักจะนิยมเรียกจกกันในชื่อ สายอากาศไมโครสตริป (Jame and Hall, 1989) ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นแผ่นหรือแพทช์ (patch) ที่เป็นตัวนำ โดยทั่วไปจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือวงกลมซึ่งจะถูกแยกออกจากกันด้วยแผ่นระบายกราวด์ที่มีความบางซึ่งสอดคล้องและสัมพันธ์กับความยาวคลื่นของความถี่การใช้งานที่ถูกออกแบบ และมีลักษณะเป็นชั้นหรือที่เรียกว่าวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก สายอากาศแพทช์ได้รับความนิยมอย่างมากในการใช้งานทางด้านสายอากาศ เนื่องจากมีลักษณะแบนราบ น้ำหนักเบา และมีความสะดวกในการสร้างและการติดตั้งและราคาถูก

สายอากาศแพทช์สามารถทำการป้อนกำลังได้หลายวิธี แต่ที่นิยมมีอยู่ 4 วิธี คือ 1) การป้อนกำลังด้วยเส้นไมโครสตริป 2) การป้อนกำลังด้วยโพรบ (probe feed) 3) การป้อนกำลังด้วยการเชื่อมต่อกับช่องเปิด (aperture-coupling feed) และ 4) การป้อนกำลังด้วยการเชื่อมต่อนะยะใกล้ (proximity-coupling feed) (Kuldeep และ Gupta, 2013)

สำหรับระบบป้อนกำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ได้มีการวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศ เช่น เพิ่มอัตราขยาย ขยายความกว้างแถบ ลดพุงข้าง เป็นต้น เมื่อพิจารณาเกี่ยวกับระบบป้อนที่ใช้ในการพัฒนาหรือปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศที่ผ่านมา จนถึงปัจจุบัน สามารถกล่าวได้โดยสรุป ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สรุปงานปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สำหรับระบบป้อนกำลังสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์

ปี	ผู้นำเสนอ	เรื่อง	เทคนิคการป้อนกำลัง
1989	Ely Levine และคณะ	Corporate feed design for microstrip arrays	ป้อนผ่านเส้นสตริปแบบจตุรร่วม
1993	Tzyy - Sheng และคณะ	Corporate feed design for microstrip arrays	ป้อนผ่านเส้นสตริปแบบจตุรร่วม
1995	A.M. J assim และ H.D.Hristov	Cavity feed Technique for Slot-Coupled Microstrip Patch Array Antenna	ป้อนกำลังผ่านท่อนำคลื่นและร่อง
2005	K.Shambavi, และ คณะ	Design and Analysis of High Gain Millimeter Wave Microstrip Antenna Array for Wireless Application	ป้อนกำลังแบบจตุรร่วมผ่านสายส่งหรือเส้นสตริปแบบเครือข่ายบนระนาบด้านเดียวกัน

ตารางที่ 2.1 สรุปงานปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สำหรับระบบป้อนกำลังสำหรับ
สายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ (ต่อ)

ปี	ผู้นำเสนอ	เรื่อง	เทคนิคการป้อนกำลัง
2006	M. K. A. Rahim และคณะ	Microstrip Patch Antenna Array at 5.8 GHz for Point to Point Communication	ป้อนกำลังแบบจุดร่วมผ่านสายส่งหรือเส้นสตริปแบบเครือข่ายบนระนาบด้านเดียวกัน
2006	R. Weily และ คณะ	High Gain Antenna with Improved Radiation Bandwidth using Dual 1-D EBG Resonators and Array Feed	ป้อนกำลังด้วยเส้นสตริปแบบเครือข่ายและเหนี่ยวนำด้วยช่องเปิดแถวลำดับ
2007	Y. Li และ K.P. Esselle.	Slot-Array-Fed EBG Resonator Antenna with High Gain and Large Bandwidth	ป้อนกำลังผ่านร่องแถวลำดับของช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ 1 มิติ
2007	A. Neto และ คณะ	EBG Enhanced Feeds for the Improvement of the Aperture Efficiency of Reflector Antennas	ป้อนกำลังแบบผ่านท่อนำคลื่น
2009	Y. Li และ K.P. Esselle	Small EBG Resonator High Gain Antenna using In-phase Highly Reflecting Surface	ป้อนกำลังแบบท่อนำคลื่น
2009	D. Serhal, และ คณะ	MultifedSectoral EBG Antenna for WiMAX Applications	ป้อนกำลังแบบท่อนำคลื่นแบบหลายช่อง
2010	A. Kanso และ คณะ	Multifeed EBG Dual Band Antenna to Feed a Reflector Antenna	ป้อนกำลังของสายอากาศแบบหลายลำคลื่น
2010	L. Moustafa และ 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	ป้อนกำลังผ่านเส้นสตริปแบบหลายแหล่งจ่าย

ตารางที่ 2.1 สรุปงานปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สำหรับระบบป้อนกำลังสำหรับ
สายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ (ต่อ)

ปี	ผู้นำเสนอ	เรื่อง	เทคนิคการป้อนกำลัง
2010	A.Kanso และคณะ	EBG Dual Band Antenna Using Two Layer FSS to Feed a Reflector Antenna	ป้อนกำลังผ่านท่อนำคลื่น แบบสี่เหลี่ยมและปากแตร
2011	T.I. Huque และคณะ	Performance Analysis of Corporate Feed Rectangular Patch Element and Circular Patch Element 4x2 Microstrip Array Antennas	ป้อนกำลังผ่านเส้นสตริป แบบจตุรรม
2011	R. Vaidya และคณะ	Effect of Superstrate Height on Gain of MSA Fed Fabry Perot Cavity Antenna	ป้อนกำลังผ่านแพทช์ รูปสี่เหลี่ยม
2012	R. Vaidya, และคณะ	Efficient high Gain Wide Band Antenna with Circular Array of Square Parasitic Patches	ป้อนกำลังผ่านแพทช์ รูปวงกลม
2012	K. Lu และคณะ	A New Fabry-Perot Resonator Antenna Fed by an L-Probe	ป้อนกำลังโพรบ รูปตัว L ร่วมกับ ฟาบรี-เปโรต์ เรโซเนเตอร์
2012	L.U (L) Kai และ L.K. Wa	On the Millimeter-wave Half-loop- fed Fabry-Perot Resonator Antenna	ป้อนกำลังด้วย สายโคเอ็กเซียลร่วมกับ ฟาบรีเปโรต์ เรโซเนเตอร์
2013	K.K. Singh และ S.C.Gupta	Review and Analysis of Microstrip Patch Array Antenna with Different Configurations	ป้อนกำลังโดยอาศัยการ เหนี่ยวนำระหว่างชั้น
2014	M.M.Bilgic และ K.Yegin	Low Profile Wideband Antenna Array With HybridMicrostrip and Waveguide Feed Network for Ku Band Satellite Reception Systems	ป้อนกำลังผ่านท่อนำคลื่น

ตารางที่ 2.1 สรุปงานปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สำหรับระบบป้อนกำลังสำหรับ
สายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ (ต่อ)

ปี	ผู้นำเสนอ	เรื่อง	เทคนิคการป้อนกำลัง
2015	K. W. Eccleston	Effect of Microstrip Feeds on Half-mode SIW Distributed Amplifier Performance	ป้อนกำลังผ่านท่อนำคลื่น
2015	Veeramani. และ R.P. Dwivedi	Comparative Study of Coplanar Waveguide Feed and Microstrip Feed for Log Periodic Antennas	ป้อนกำลังด้วยท่อนำคลื่นผ่านเส้นสตริป
2015	R. Raut และ K. Talandage	Bandwidth And Gain Enhancement Of Rectangular MSA By Using Parasitic Patch And Capacitive Feeding Technique For Wideband Application	ป้อนกำลังแบบเส้นสตริป
2016	R. Kumar และ R. K. Chaudhay	Wideband Circularly Polarized Cubic Dielectric Resonator Antenna Excited With Modified Microstrip Feed	ป้อนกำลังแบบเส้นสตริป
2016	A. A. Nourl และคณะ	Comparison of Different Feeding Techniques of a Low-Profile Dual-band Circularly Polarized Microstrip Antenna	ป้อนกำลังแบบปากแตรเดี่ยว และปากแตรคู่ โดยกระตุ้นกำลังด้วยสายโคเอ็กเซียลแบบคู่
2016	G. C. Huang และคณะ	A Wideband Circularly Polarized Stacked Patch Antenna Array and Feed System	ป้อนกำลังแบบผ่านแพทช์แบบวงกลมคู่
2016	G. Das และคณะ	Two Elements Dual Segment Cylindrical Dielectric Resonator Antenna Array with Annular Shaped Microstrip Feed	ป้อนกำลังแบบเครือข่าย

ต่อจากนั้นผู้วิจัยได้นำเสนองานวิจัยแสดงความกว้างแถบและอัตราขยายโดยตรง ตามวัตถุประสงค์ของผู้วิจัยที่ได้นำเสนอ ซึ่งมีทั้งนำเสนอความกว้างแถบหรืออัตราขยายเพียงอย่างเดียว หรือนำเสนอทั้ง 2 ประเด็นในงานวิจัยเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างงานวิจัยที่นำเสนอความกว้างแถบและอัตราขยายของสายอากาศ

ปี	ผู้นำเสนอ	เรื่อง	ความกว้างแถบ (% BW)	อัตราขยาย (dBi)
2012	Kai Lu และ <i>et.,al</i>	A New Fabry-Perot Resonator Antenna Fed by an L-Probe	5	11.1
2014	M.M. Bilgic และ K. Tegin	High Gain, Wideband Aperture Coupled Microstrip Antenna Design Based on Gain- Bandwidth Product Analysis	54	9.5
2014	Km. Kamakshi และ <i>et.,al</i>	Novel Design of Microstrip Antenna with Improved Bandwidth	30.5	9.86
2015	Yi fei Zhang และ <i>et.,al</i>	Ka-band phased patch array antenna integrated with a PET-controlled phase shifter	23	15.6
2015	ZM Razi และ <i>et.,al</i>	A novel design Fabry-Perot antenna using metamaterial superstrate for gain and bandwidth enhancement	0.92	8
2016	Elham Sharifi Moghaddam	Design of a Compact Multilayer Circular Polarized Phased Array Transmit Antenna System for Satellite Applications	-	16.7

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างงานวิจัยที่นำเสนอความกว้างแถบและอัตราขยายของสายอากาศ (ต่อ)

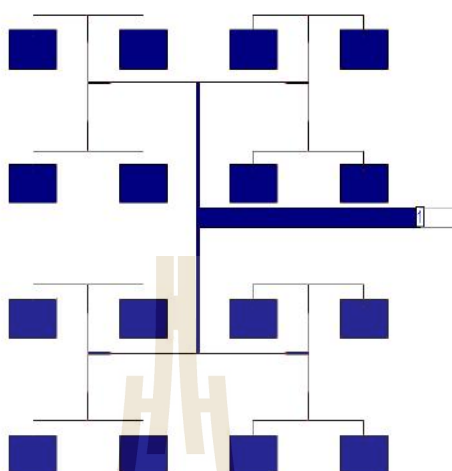
ปี	ผู้นำเสนอ	เรื่อง	ความกว้างแถบ (% BW)	อัตราขยาย (dBi)
2016	Nagendra Kushwaha และRaj Kumar	Design of a wideband high gain antenna using FSS for circularly polarized applications	74.28	-
2016	Poulomi Guptaและ <i>et.,al</i>	Dielectric Resonator Working as Feed as Well as Antenna: New Concept for Dual-Mode Dual-Band Improved Design	8.3 และ 13	6.5 และ 10.3
2016	Hamza Kaouach และ <i>et.,al</i>	High-efficiency wideband transmit-array antenna with linear polarization in Q-band	8.7	22

2.2.2 เทคนิคและรูปแบบวิธีการป้อนสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์

เมื่อได้พิจารณาแบ่งหัวข้อตามเทคนิคหรือรูปแบบวิธีการป้อนด้วยลักษณะตามโครงสร้างของสายอากาศ

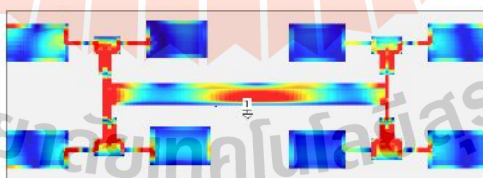
1) เทคนิคการป้อนด้วยสายเฟสหรือสายไมโครสตริป (phasing line)

ระบบป้อนกำลังด้วยเทคนิคสายเฟสหรือสายไมโครสตริป เป็นเทคนิคที่ใช้กันมาอย่างต่อเนื่องโดยตลอดในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เนื่องด้วยลักษณะด้านโครงสร้างของสายอากาศ จึงทำให้มีความง่ายในการออกแบบ คือ ใช้ตัวป้อนแบ่งกำลัง (power divider) จากตำแหน่งจุดป้อนแรกผ่านสายส่งหรือสายไมโครสตริปไปยังแพทช์ อีลิเมนต์อื่น ๆ ที่จัดแถวลำดับ Shambavi, Alex and Krishna (2005-2009) ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์เพื่อเพิ่มอัตราขยายโดยพิจารณาและวิเคราะห์ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์จากการนำมาแถวจัดลำดับจำนวน 2x2, 4x4 และ 8x8 อีลิเมนต์ ซึ่งได้ออกแบบและจำลองด้วยโปรแกรม IE3D พบว่าสำหรับอีลิเมนต์ 8x8 ให้อัตราขยายเท่ากับ 18.43 dBi และความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 10.49 องศา โดยใช้มีลักษณะการป้อนผ่านจุดร่วมแบบเครือข่าย (corporate feed network) ดังแสดงในรูปที่ 2.1

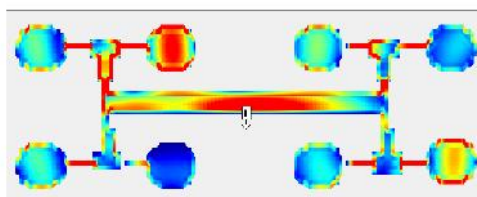


รูปที่ 2.1 โครงสร้างการป้อนผ่านจุดร่วมแบบเครือข่ายของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ 4x4 อีลิเมนต์

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้อนกำลังผ่านจุดร่วมแบบเครือข่ายของสายอากาศแบบแถวลำดับแบบแพทช์ของแพทช์รูปสี่เหลี่ยมและแพทช์รูปวงกลมพบว่าแถวลำดับไมโครสตริปของแพทช์แพทช์รูปวงกลมมีข้อได้เปรียบบางอย่าง เช่น มีคิขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ทิศทางการสะท้อนที่สูงขึ้น เป็นต้น และจากการวิจัย ได้สายอากาศที่มีอัตราขยายเพิ่มขึ้น ลดพวง้าง การออกแบบแสดงดังรูปที่ 2.2 (TanvirAl-Amin Chowdhury Kamal และ Shah, 2011)

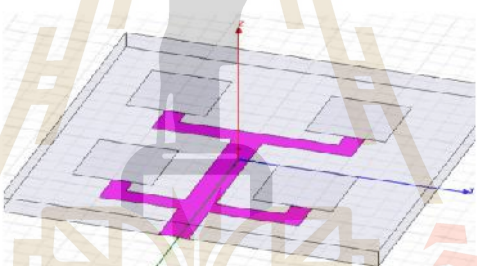


รูปที่ 2.2 โครงสร้างการป้อนผ่านจุดร่วมแบบเครือข่ายของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์
ก) แพทช์แถวลำดับรูปสี่เหลี่ยม ข) แพทช์แถวลำดับรูปวงกลม



รูปที่ 2.3 โครงสร้างการป้อนผ่านจุดร่วมแบบเครือข่ายของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์
ก) แพทช์แถวลำดับรูปสี่เหลี่ยม ข) แพทช์แถวลำดับรูปวงกลม (ต่อ)

Singh และ Gupta ได้นำเสนอการป้อนที่อาศัยการเหนี่ยวนำระหว่างด้านกราวด์ของแผ่นวงจรพิมพ์ไปยังแพทช์ซึ่งอยู่อีกระนาบหนึ่ง (Singh และ Gupta, 2013) แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยได้วิเคราะห์สายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ที่มีอีลิเมนต์แตกต่างกัน พบว่าสายอากาศที่มีจำนวนอีลิเมนต์มากกว่าจะมีอัตราขยายดีกว่าแพทช์แบบเดี่ยว



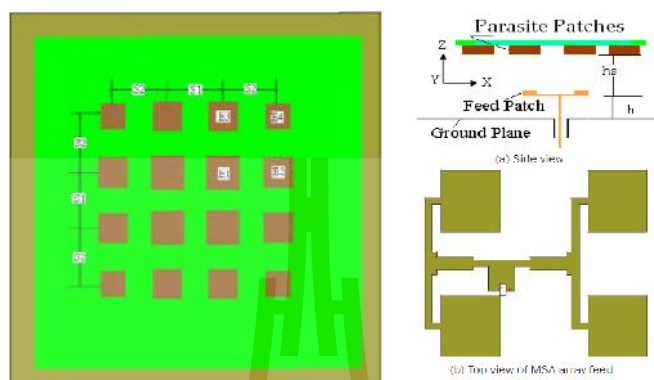
รูปที่ 2.4 โครงสร้างการป้อนการเหนี่ยวนำจากอีกด้านของกราวด์ของแผ่นวงจรพิมพ์

ปัจจุบันเทคนิคการป้อนด้วยสายเฟสสำหรับโครงสร้างของสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์ มีวิธีการป้อนได้สองวิธี คือ การป้อนผ่านจุดร่วมแบบเครือข่ายในด้านเดียวกันและการป้อนผ่านจุดร่วมแบบเครือข่ายอีกด้านหนึ่ง โดยอาศัยการเหนี่ยวนำระหว่างสายส่งกับแพทช์

2) เทคนิคการป้อนด้วยสายเฟสและการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยแถวลำดับไมโครสตริป

Rajashree และ คณะ ได้นำเสนอการป้อนกำลังจากการเหนี่ยวนำด้วยแพทช์แถวลำดับตัวป้อนรูปสี่เหลี่ยม 2×2 อีลิเมนต์ โดยศึกษาความสูงที่เหมาะสมระหว่างระนาบกราวด์กับแพทช์แถวลำดับตัวป้อน (h) และความสูงที่เหมาะสมระหว่างแพทช์แถวลำดับตัวป้อนกับแพทช์ปรสิติด้านบน (h_s) ซึ่งทำหน้าที่ในการแผ่กระจายคลื่น ซึ่ง แสดงลักษณะโครงสร้าง (Rajashree, *et al.*, 2011) และชิ้นงานต้นแบบ (A. R. Vaidya *et al.*, 2012) ดังรูปที่ 2.5 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

พบว่าแพทช์แถวลำดับตัวป้อนจะเสมือนถูกวางในโพรงฟาบรี-เปโรต์ ซึ่งความสูงของโพรง มีผลต่ออัตราขยายของสายอากาศ



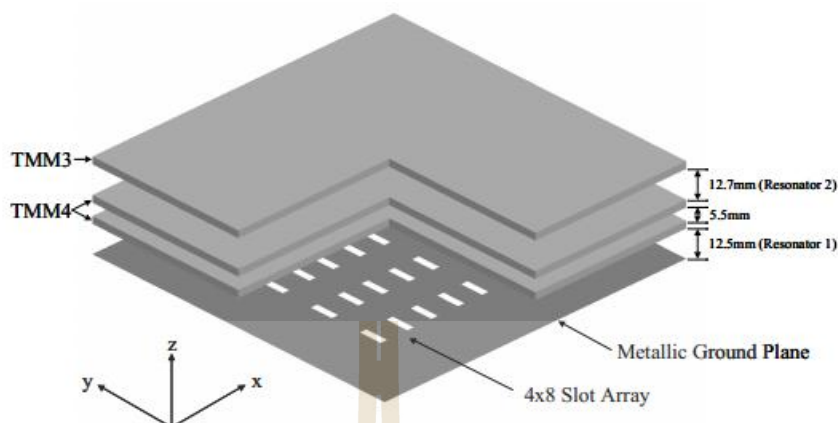
(ก) ลักษณะ โครงสร้าง (Rajashree, Shishir and Rajiv, 2011)



(ข) ชิ้นงานต้นแบบ

รูปที่ 2.5 ต้นแบบการป้อนจากเหนียวนำด้วยแถวลำดับแพทช์รูปสี่เหลี่ยม 2x2 อิลิเมนต์

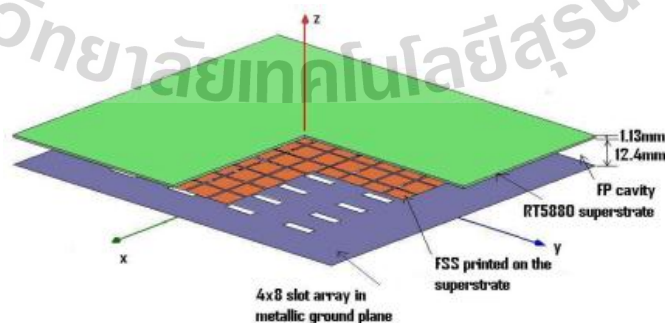
3) เทคนิคการป้อนด้วยการเหนียวนำระหว่างชั้นด้วยร่อง ท่อนำคลื่น และ โพรง การประยุกต์โครงสร้างในส่วนของการเหนียวนำจากร่องแถวลำดับ Andrew และคณะ ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์โดยการป้อนแบบเครือข่าย (feed network) ผ่านช่องแถวลำดับจำนวนสามสิบสองช่องร่วมกับโครงสร้างตัวสะท้อนคู่ด้วยเทคนิคช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าหนึ่งมิติ (Andrew *et al.*, 2006) แสดงดังรูปที่ 2.6 ทำให้อัตราขยายเพิ่มขึ้นจาก 23 dBi เป็น 27 dBi



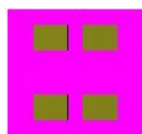
รูปที่ 2.6 การป้อนด้วยการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยร่องแถวลำดับร่วมกับโครงสร้างตัวสะท้อนคู่ด้วยเทคนิคช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าแบบหนึ่งมิติ

ต่อมาในปี 2007 Yading และ Karu พัฒนาการป้อนแบบร่องแถวลำดับโดยใช้ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ 1 มิติ มีอัตราขยายสูงและให้ความกว้างแถบกว้าง ในงานวิจัยนี้นำเสนอการลดความสูงของโครงสร้างสายอากาศด้วยเทคนิค FSS (frequency selective surface) และโพรงฟารี-เปโรต์ ซึ่งยังคงให้อัตราขยายที่ดีและความกว้างแถบตามที่ต้องการ (Yading และ Karu, 2007) โดยสามารถเพิ่มความกว้างแถบได้ 8 % มีอัตราขยายเพิ่มขึ้นเป็น 32 dBi ดังรูปที่ 2.7

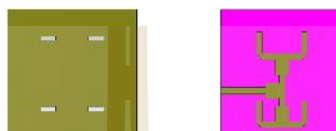
ปี 2012 มีการนำเสนอการออกแบบโครงสร้างสายอากาศแถวลำดับ 2x2 อิลิเมนต์ โดยใช้เทคนิคการป้อนด้วยการเหนี่ยวนำจากช่อง ซึ่งได้ใช้ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าแบบโครงสร้างคล้ายดอกเห็ดวางเสริมในชั้นเดียวกันกับสายป้อนหรือเส้นสตริป ทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับดีขึ้น และอัตราขยายเพิ่มขึ้น (Alias *et al.*, 2012) แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 การป้อนด้วยการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยร่องแถวลำดับร่วมด้วยเทคนิค FSS และ โพรงฟารี-เปโรต์



(ก)



(ข)



(ค)

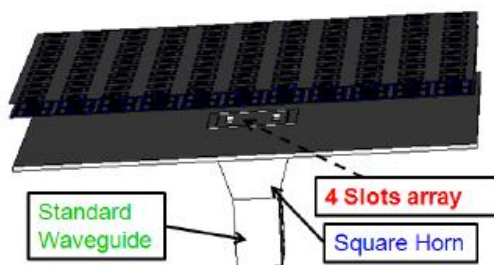
รูปที่ 2.8 (ก) แพทช์แถวลำดับ

(ข) ลักษณะการป้อนด้วยสายเฟสและเหนี่ยวนำจากช่อง

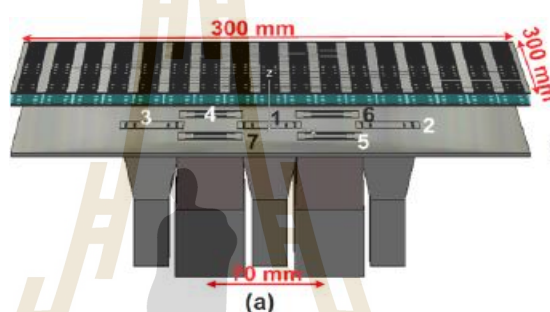
(ค) ลักษณะการป้อนด้วยสายเฟสและเหนี่ยวนำจากช่อง

ร่วมกับช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าโครงสร้างคล้ายดอกเห็ด

สำหรับการป้อนกำลังผ่านท่อนำคลื่น (waveguide) หรือช่องเปิด (aperture) มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง คือ ในปี 2010 Kanso และคณะ ได้นำเสนอการป้อนกำลังผ่านท่อนำคลื่นและส่งผ่านช่องแถวลำดับเพื่อเหนี่ยวนำคลื่นด้วยระยะความสูงระหว่างโครงสร้างของช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ากับระนาบช่องแถวลำดับที่เหมาะสม สำหรับประยุกต์ใช้กับสายอากาศแบบหลายลำคลื่น แสดงดังรูปที่ 2.9 และในปีต่อมา ได้พัฒนาต่อของงานวิจัยดังกล่าว โดยนำเสนอลักษณะการป้อนกำลังของสายอากาศแบบหลายลำคลื่นให้เป็นการป้อนแบบหลายช่อง (multifeed) โดยการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างการป้อนกำลัง (Kanso *et al.*, 2011) แสดงดังรูปที่ 2.10 นอกจากนี้ Serhal และคณะ ได้นำเสนอการออกแบบการป้อนกำลังแบบหลายช่องป้อนโดยผ่านท่อนำคลื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศ สำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านเครือข่ายบริการอินเทอร์เน็ตไร้สายความเร็วสูง (wimax application) (Serhal *et al.*, 2009)

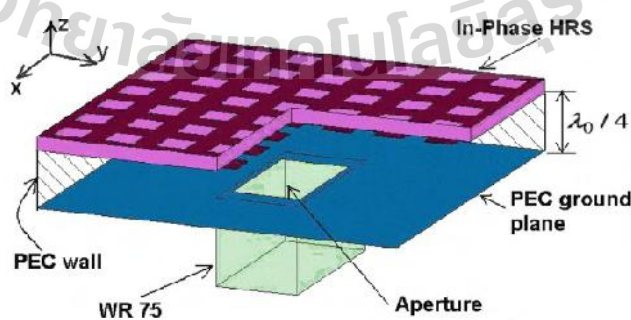


รูปที่ 2.9 การป้อนผ่านท่อนำคลื่นและส่งผ่านช่องแถวลำดับ



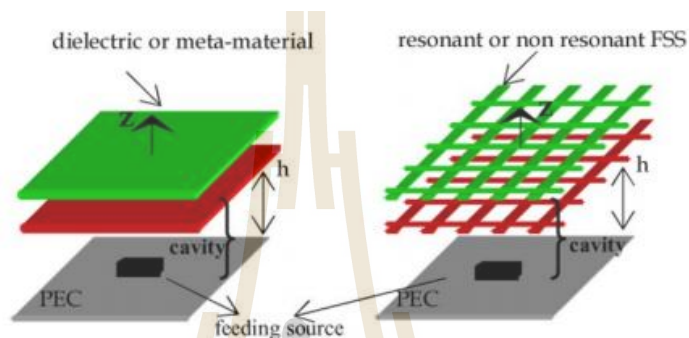
รูปที่ 2.10 การป้อนกำลังผ่านท่อนำคลื่นและส่งผ่านช่องแถวลำดับ

ในปี 2009 มีการนำเสนอโดยใช้เทคนิคด้านคุณสมบัติของ HRS (Highly Reflecting Surface) เพื่อออกแบบสายอากาศแบบสองชั้นสำหรับสายอากาศช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีโครงสร้างคล้ายดอกเห็ดส่งผลให้ได้ความกว้างแถบที่กว้างขึ้น โดยใช้การป้อนผ่านท่อนำคลื่น (Yading และ Karu, 2009) ดังโครงสร้างแสดงในรูปที่ 2.11

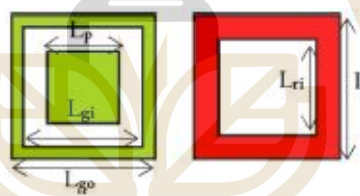


รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างการป้อนผ่านท่อนำคลื่น

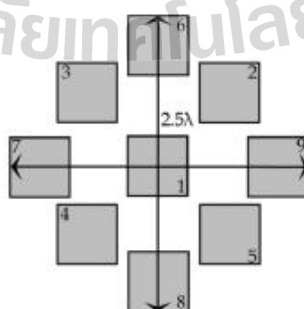
ในปี 2010 ได้วิจัยการนำเทคนิคช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อเพิ่มอัตราขยายและความกว้างแถบเพิ่มขึ้น โดยใช้เทคนิคการป้อนจากหลายแหล่งจ่ายร่วมกับ FSS สองชั้นสำหรับย่านความถี่ Ku โดยมีลักษณะการวางชั้นแผ่นกราวด์โลหะกับแผ่น EBG (Lina และ Bernard , 2010) ดังรูปที่ 2.12 และ 2.13 ซึ่งลักษณะตำแหน่งในการวางบนระนาบกราวด์แสดงได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.12 การวางชั้นแผ่นกราวด์โลหะกับแผ่น EBG

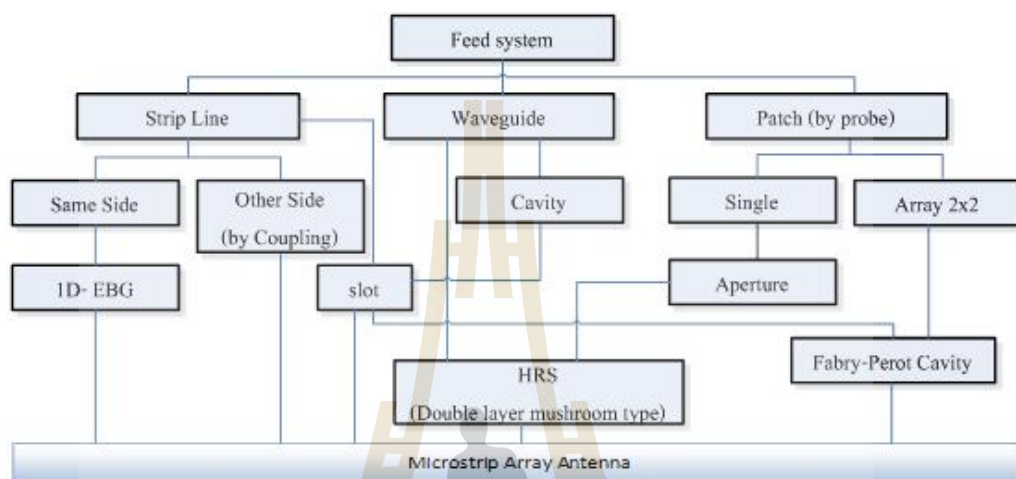


รูปที่ 2.13 รูปร่าง FSS แต่ละยูนิต



รูปที่ 2.14 ตำแหน่งในการป้อนแบบหลายแหล่งจ่าย

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมสามารถสรุปการป้อนกำลังสำหรับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริบเมื่อพิจารณาจากโครงสร้างของระบบป้อนของสายอากาศ สามารถสรุปได้ดังแผนผังในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แผนผังการพัฒนาและปรับปรุงระบบการป้อนกำลังสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์

2.3 สรุป

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า มีการพัฒนาและปรับปรุงมาโดยตลอด อีกทั้งได้มีการประยุกต์ร่วมกับเทคนิคต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบสายอากาศให้ดียิ่งขึ้น ทั้งเพิ่มอัตราขยายหรือควบคุมความกว้างแถบให้ได้ตามวัตถุประสงค์ หรือลดระดับของพียงของแบบรูปการแผ่กำลังให้น้อยลงซึ่งเมื่อพิจารณาถึงระบบป้อนกำลังของสายอากาศของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์นั้น พบว่าเทคนิคการป้อนกำลังด้วยการกระตุ้นสัญญาณยังคงผ่านสายส่งกำลังหรือเส้นสตริบ โดยทำการกระตุ้นกำลังผ่านโพรบที่ส่งผ่านสัญญาณไปยังสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ ซึ่งทำการแบ่งกำลังด้วยสายเฟส (phasing line) ตามจำนวนของอีลิเมนต์ที่ต้องการออกแบบ จะพบว่ามีข้อจำกัดในเรื่องของการสูญเสียภายในสายเฟสดังกล่าวข้างต้น อีกทั้งอาจส่งผลให้ความกว้างแถบลดลงจึงได้มีการปรับปรุงในส่วนของการป้อนในแบบต่างๆ เพื่อลดการใช้สายเฟสให้น้อยลงและได้นำเทคนิคการเหนี่ยวนำด้วยโครงสร้างต่าง ๆ อาทิเช่น การเหนี่ยวนำผ่านร่อง การกระตุ้นผ่านท่อนำคลื่น และลักษณะการวาง

สายอากาศกับระบบป้อน โดยอาศัยการสะท้อนคลื่นด้วยโพรงฟาบรี-เปโรต์ พบว่า ยังไม่สามารถแก้ปัญหาคาร์บอนสะสมในสายเฟสหรือการสูญเสียกำลังอันเนื่องมาลักษณะการป้อนดังกล่าวได้

ผลการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าว พบว่าแนวทางหรือสมมติฐานสำหรับงานวิจัยนี้สามารถพัฒนาระบบป้อนกำลังเพื่อลดการสูญเสียภายในสายเฟส โดยการพิจารณาตัวกระตุ้นที่เหมาะสมกับโครงสร้างสายอากาศเพื่อพัฒนาร่วมกับเทคนิคของ EBG ที่มีคุณสมบัติเป็นอภิวัดคุมปรับปรุงโครงสร้าง เพื่อให้ระบบป้อนมีโครงสร้างที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสำหรับการจ่ายกำลัง ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องไว้ในบทที่ 3 ต่อไป



บทที่ 3

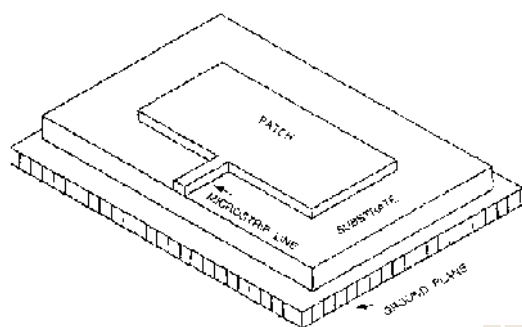
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

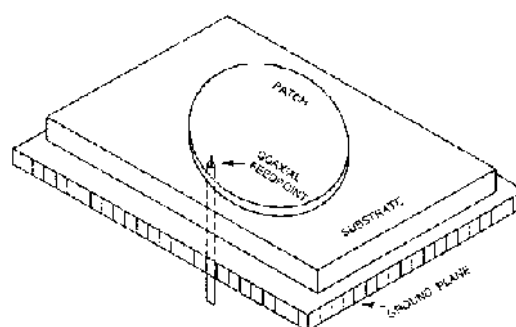
สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบระบบป้อนที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์และด้วยโครงสร้าง EBG เพื่อลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากสายเฟสแบบเก่า ซึ่งได้แบ่งเนื้อหาออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ได้แก่ สายอากาศไมโครสตริปและวิธีการป้อนกำลัง สายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์และวิธีการป้อนกำลัง ทฤษฎีและหลักการของ EBG สำหรับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศ คุณสมบัติของอภิวัดสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านสายอากาศและหลักการแนวคิดการส่งกำลังด้วยระบบป้อนใหม่ สำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ ซึ่งได้กล่าวถึงบทสรุปไว้ในส่วนท้ายของเนื้อหา

3.2 สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna)

สายอากาศไมโครสตริปประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นแผ่นหรือแพทช์ (patch) ที่เป็นตัวนำ โดยทั่วไปจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือวงกลม ซึ่งจะถูกแยกออกจากกันด้วยแผ่นระนาบกราวด์ที่มีความบาง (เป็นเศษส่วนของความยาวคลื่น) และมีลักษณะเป็นชั้นที่เรียกว่า วัสดุฐานรองหรือ ซับสเตรต (substrate) ของสารไดอิเล็กตริก จากรูปที่ 3.1 (ก) และ (ข) แสดงสายอากาศแบบแพทช์ไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากและรูปวงกลม ตามลำดับ ซึ่งสายอากาศดังกล่าวมีความสะดวกในการสร้างลงในแผ่นวงจรพิมพ์ (printed circuit board หรือ PCB) โดยที่แพทช์จะถูกวางไว้ที่ด้านหนึ่งของแผ่นวงจรพิมพ์ และอีกด้านหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นแผ่นกราวด์ สำหรับการป้อนกำลัง (power feeding) ให้แก่สายอากาศไมโครสตริปสามารถทำได้หลายวิธีดังรูปที่ 3.1 (ก) แสดงการป้อนกำลังด้วยเส้นไมโครสตริป (microstrip line) และรูปที่ 3.1 (ข) แสดงการป้อนกำลังด้วยตัวนำผ่านช่องเปิดเล็ก ๆ ในระนาบกราวด์ เรียกว่าการเชื่อมต่อแบบช่องเปิด (aperture coupling) สำหรับสายอากาศไมโครสตริปนั้น ความแม่นยำของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองถือว่ามีความสำคัญมากเพราะเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าคงที่ของการเดินทางของคลื่น ความถี่เรโซแนนซ์ และคุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ



(ก) แพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก



(ข) แพทช์รูปวงกลม

รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์

ตารางที่ 3.1 ข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของสายอากาศไมโครสตริป

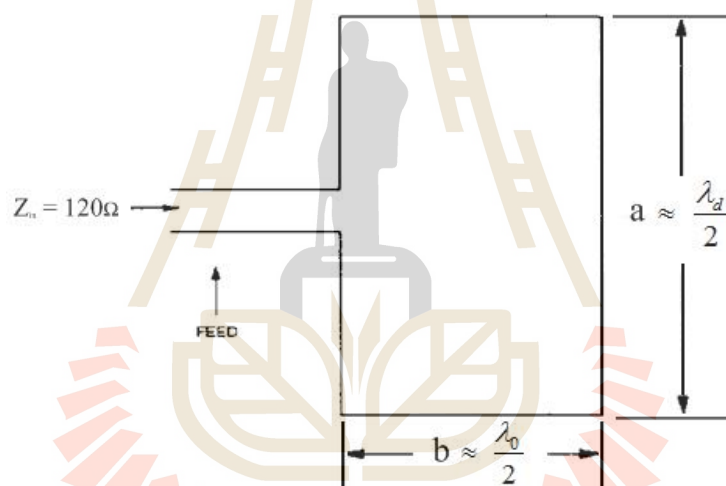
ข้อได้เปรียบของสายอากาศไมโครสตริป	ข้อจำกัดของสายอากาศไมโครสตริป
■ น้ำหนักเบา ปริมาณน้อย มีโครงสร้างรูปร่างที่บาง ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงมุมและมาตราส่วนได้อย่างชัดเจน ■ ราคาถูก ■ ง่ายต่อการป้อนกำลังสำหรับโพลาริซที่เป็นแบบเส้นตรงและวงกลม ■ ง่ายต่อการออกแบบและสร้างสำหรับสายอากาศที่เป็นแบบความถี่คู่และโพลาริซคู่ ■ สามารถอินทิเกรตร่วมกับวงจรไมโครเวฟ ■ การทำเส้นป้อนกำลังงานและการแมตช์สายอากาศสามารถออกแบบและสร้างในเวลาเดียวกันกับโครงสร้างของสายอากาศ	■ มีความกว้างแถบ (bandwidth) ที่แคบ ■ มีอัตราขยายที่ค่อนข้างต่ำ (≈ 6 dB) ■ มีความต้านทานการสูญเสียมากและมีความซับซ้อนของโครงสร้างการป้อนกำลังสำหรับสายอากาศแฉวลำดับ ■ เกิดการแผ่กระจายคลื่นภายนอกจากจุดป้อนกำลังงานและจุดเชื่อมต่อ ■ เกิดการกระดอนของคลื่นบนผิวหน้า

สายอากาศไมโครสตริปนับว่ามีข้อดีหรือข้อได้เปรียบกว่าสายอากาศไมโครเวฟ ทำให้สายอากาศไมโครสตริปถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 100

MHz ถึง 100 GHz แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศไมโครสตริปก็มี ซึ่งได้แสดงข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ ดังตารางที่ 3.1

จากข้อจำกัดและได้เปรียบของสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ดังกล่าว สามารถลดผลของข้อจำกัดเหล่านั้นได้ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ยกตัวอย่าง อัตราขยายที่ต่ำสามารถแก้ไขได้โดยการใช้เทคนิคของสายอากาศแถวลำดับ ความกว้างแถบสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้ถึง 60% ด้วยการใช้เทคนิคเฉพาะเพื่อปรับปรุงในส่วน of โครงสร้างสายอากาศ และการเกิดคลื่นผิวน้ำสามารถใช้เทคนิคของการเชื่อมต่อ (coupling) มาช่วยได้ และสำหรับอัตราขยายคลื่นบนผิวน้ำ และแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ลดลงสามารถใช้ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าในการแก้ไขข้อจำกัดนี้ได้

3.2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป



รูปที่ 3.2 สายอากาศไมโครสตริปพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก

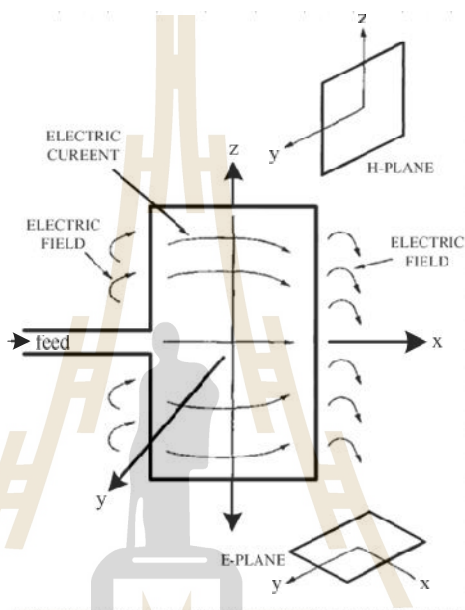
พิจารณาคูณลักษณะของแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากดังรูปที่ 3.2 แสดงมิติพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป โดยค่าความนำของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความกว้าง a โดยที่ ความถี่เรโซแนนซ์จะเป็นฟังก์ชันของความยาว b ซึ่งจะถูกกำหนดโดยสมการ (3.1) และ (3.2)

$$a \approx l_d \approx \frac{l_0}{\sqrt{e_r}} \quad (\text{เมตร}) \quad (3.1)$$

$$b = 0.49 l_d = 0.49 \frac{l_0}{\sqrt{e_r}} \quad (\text{เมตร}) \quad (3.2)$$

โดยที่ I_d, I_0 คือ ความยาวคลื่นในสารไดอิเล็กตริกและในอวกาศอิสระตามลำดับ และ ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง (dielectric constant)

เนื่องจากการแปรผันของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าความนำของตัวป้อนสัญญาณ การทดสอบเพื่อหาความยาวที่แท้จริงของแพทช์จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง

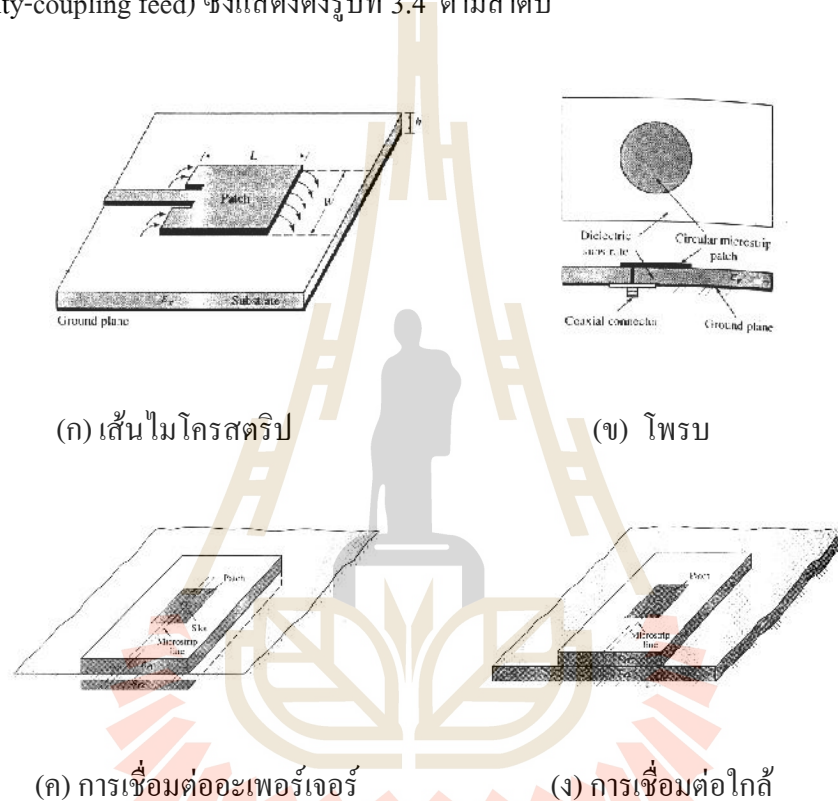


รูปที่ 3.3 แสดงกระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก

จากรูปที่ 3.3 เป็นการแสดงกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงของสนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอบ ๆ แพทช์ โดยปกติสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบของแพทช์ที่ถูกต่อด้วยสายนำสัญญาณและด้านตรงข้ามขอบซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ คลื่นที่แผ่กระจายจากสายอากาศในรูปที่ 3.3 จะมีการโพลาไรซ์ในแนวนอน ซึ่งระนาบของสนามไฟฟ้า (ระนาบ x-y: E-plane) จะมีทิศทางในแนวนอน และระนาบของสนามแม่เหล็ก (ระนาบ y-z : H-plane) จะมีทิศทางในแนวตั้งจากระยะห่าง b ซึ่งเป็นระยะของขอบทั้งสองด้านของแพทช์จะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่เดินทางภายในสารไดอิเล็กตริก ($0.49I_d$) ซึ่งที่ระยะห่างขนาดนี้จะมีผลทำให้ร่องที่อยู่ตรงข้ามมีการป้อนด้วยเฟสที่ตรงกันข้ามอย่างไรก็ตามสนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกมาจากองค์ประกอบทั้งสองจะมีการเสริมกันเนื่องจากเฟสตรงกัน ทำให้ทิศทางการแผ่กระจายคลื่นออกมาในทิศตั้งฉากกับองค์ประกอบ

3.2.2 วิธีการป้อนกำลังของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศแพทช์หรือไมโครสตริป สามารถอธิบายลักษณะการป้อนกำลัง ที่เป็น นิยมหรือมีการใช้การมาอย่างต่อเนื่อง ด้วยกันทั้งหมด 4 วิธี คือ (ก) การป้อนกำลังด้วยเส้นไมโครสตริป (microstrip line feed) (ข) การป้อนกำลังด้วยโพรบ (probe feed) (ค) การป้อนกำลังด้วยการเชื่อมต่ออะเพอร์เจอร์ (aperture-coupling feed) และ (ง) การป้อนกำลังด้วยการเชื่อมต่อใกล้ (proximity-coupling feed) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.4 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 แสดงการป้อนกำลังสายอากาศไมโครสตริป

3.3 สายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ (patch array antenna)

จากสายอากาศไมโครสตริปคือสายอากาศที่ประกอบไปด้วยแผ่นโลหะวางติดอยู่บนสารแผ่นฐานซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริกเหนือระนาบกราวด์ (ground plane) จากข้อดีคือ มีน้ำหนักเบา และข้อดีอื่นๆ ของสายอากาศไมโครสตริปที่กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้นซึ่งโดยปกติของสายอากาศไมโครสตริปโดยพื้นฐานจะข้อเสียคือมีอัตราขยาย (gain) ต่ำและความกว้างแถบแคบ (bandwidth)

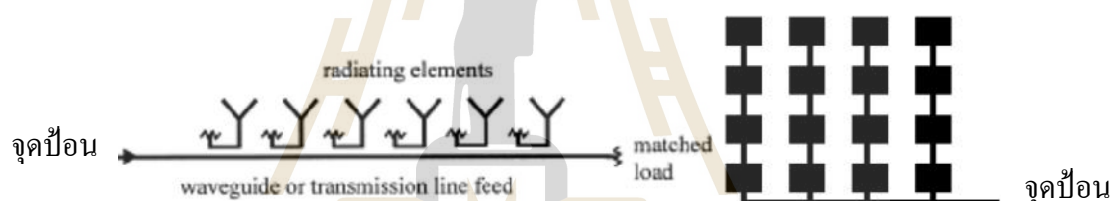
ซึ่งการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริป สามารถทำได้โดยการนำมาทำแถวลำดับในแต่ละอีลีเมนต์ หรือเรียกว่า แถวลำดับไมโครสตริป (microstrip array) คือการรวมกันของ

ไมโครสตริปด้วยการป้อนกำลังผ่านสายป้อน (feed line) ประกอบด้วย ตัวแบ่งกำลัง (power divider) ด้วยสายส่ง (transmission line) หรือ สายเฟส (phasing line) และเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าการสูญเสียของกำลังงานที่จ่ายให้กับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์แต่ละอีลีเมนต์นั้น จะเกิดขึ้นภายในส่งหรือสายเฟสดังกล่าวมาโดยตลอด

3.3.1 ลักษณะการป้อนของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์

1) การป้อนของสายอากาศแถวลำดับแบบอนุกรม (series feed)

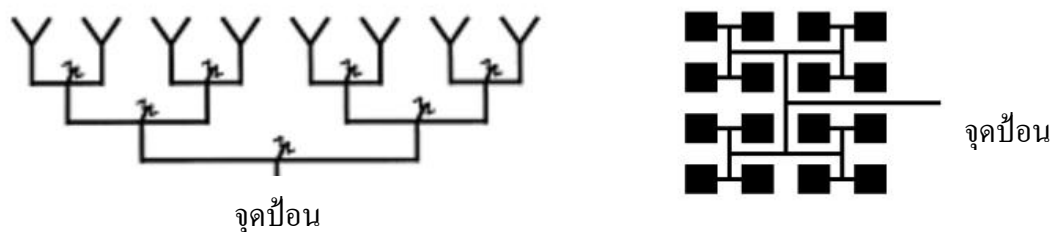
ระบบการป้อนกำลังสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์แบบอนุกรม จะส่งผ่านเส้นสตริปหรือสายเฟสในลักษณะเป็นเส้นตรงตามแนวการวางตัวของแพทช์แต่ละอีลีเมนต์ เช่น การป้อนผ่านท่อนำคลื่น (waveguide) ซึ่งลักษณะการจ่ายกำลังจะส่งผ่านแต่ละอีลีเมนต์ทีละอีลีเมนต์ไปเรื่อยๆ โดยมีแหล่งกำเนิดเพียงแหล่งเดียวที่ป้อนจากต้นทางของแถวลำดับ ดังแสดงระบบป้อนแบบอนุกรมดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงระบบป้อนแบบอนุกรม

2) การป้อนของสายอากาศแถวลำดับแบบขนาน (parallel feed)

ระบบการป้อนกำลังสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์แบบขนาน หรือจะนิยมเรียกว่า ระบบป้อนแบบป้อนร่วม (corporate feed) เนื่องจากมีลักษณะคล้ายคลึงกับแผนผังโครงสร้างองค์กรหรือโครงข่ายใยแมงมุม โดยมีแหล่งกำเนิดเพียงจุดเดียวเช่นกันกับการป้อนแบบอนุกรม ซึ่งการป้อนแบบขนานจะทำให้เกิดการแบ่งพลังงานจากแหล่งกำเนิดอย่างชัดเจนกว่าการป้อนแบบอนุกรม อย่างไรก็ตาม ระบบการป้อนแบบขนานเป็นที่นิยมกว่าการป้อนแบบอนุกรม ซึ่งสามารถออกแบบการจ่ายกำลังงานผ่านตัวแบ่งกำลัง (power divider) ทำให้อีลีเมนต์แต่ละอีลีเมนต์สามารถควบคุมได้อย่างอิสระ แต่การส่งผ่านเส้นสตริปหรือสายเฟสจะต้องคำนึงถึงความยาวของสายเฟสที่พอดิบกับความยาวคลื่นที่ต้องการ ด้วยเหตุนี้ความแตกต่างของเฟสจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังงานจากระยะและขนาดของเส้นสตริปหรือสายเฟส ซึ่งลักษณะของระบบป้อนแบบขนานแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงระบบป้อนแบบขนาน

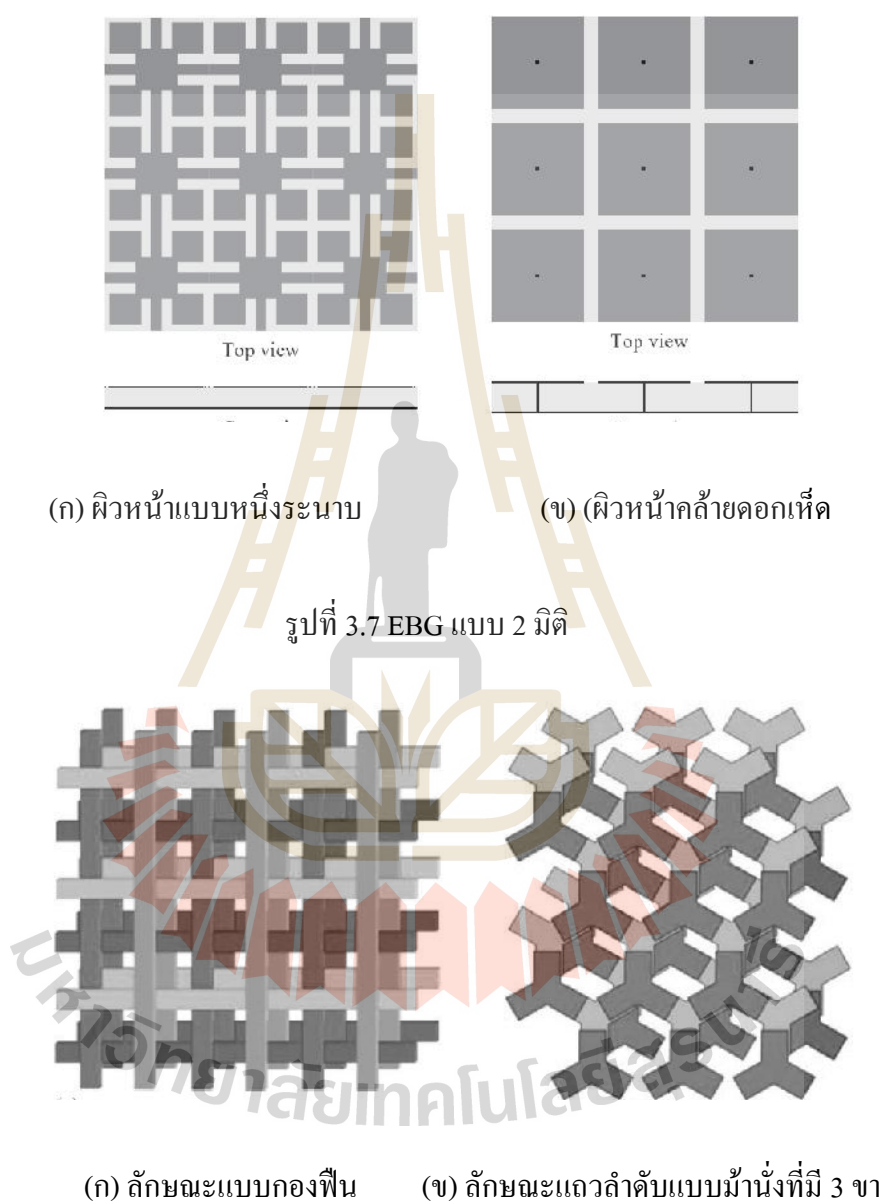
จะเห็นได้ว่า ระบบป้อนกำลังงานสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ ทั้ง 2 ลักษณะมีข้อดีข้อด้อยที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของการประยุกต์ใช้งานที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตาม ระบบป้อน ทั้ง 2 แบบ ยังคงใช้การป้อนกำลังผ่านเส้นสตริปหรือสายเฟสแบบเก่า กล่าวคือ กำลังที่จ่ายให้กับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์โดยผ่านเส้นสตริปหรือสายเฟสจะให้เกิดการสูญเสียกำลังภายในสายเฟสโดยไม่จำเป็น

3.4 ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

3.4.1 คำจำกัดความ โครงสร้าง และพารามิเตอร์ของช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ EBG (Electromagnetic Band Gap) คือ วัสดุที่จัดวางหรือสนับสนุนการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแถบความถี่ที่เฉพาะเจาะจงสำหรับทุก ๆ มุมตกกระทบและทุก ๆ สถานะของการโพลาไรซ์ โดยปกติแล้ว EBG จะประกอบด้วยวัสดุที่เป็นไดอิเล็กตริกและตัวนำที่เป็นโลหะ สามารถแบ่งประเภทของ EBG ตามลักษณะโครงสร้างของ EBG ได้ 3 ประเภทได้แก่ (1) EBG เส้นส่งผ่านกำลังงานแบบ 1 มิติ (2) EBG ระนาบบนผิวหน้าแบบ 2 มิติ และ (3) โครงสร้างปริมาตรแบบ 3 มิติ โดยลักษณะผิวหน้าแบบหนึ่งระนาบ (uni-planar) (F.-R. Yang, K.-P. Ma, Y. Qian, and T. Itoh, 1999) เป็น EBG เส้นส่งผ่านพลังงานแบบ 1 มิติที่เป็นเส้นไมโครสตริปกับช่องกลมบนระนาบกราวด์ (V. Radisic, Y. Qian, R. Coccioli, and T. Itoh, 1998) และ EBG เส้นส่งผ่านกำลังงานแบบ 1 มิติ ที่เส้นส่งผ่านพลังงานประกอบด้วยส่วนทางขวามือและทางซ้ายมือ (C. Caloz and T. Itoh, 2005) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.7 (ก) ลักษณะ EBG เป็นระนาบบนผิวหน้าแบบ 2 มิตินั้น จะมีลักษณะเป็นผิวหน้าคล้ายดอกเห็ด (mushroom-like) (D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous, and E. Yablonovitch, 1999) แสดงดังรูป 3.7 (ข) และลักษณะ EBG แบบ 3 มิติจะมีโครงสร้างเป็นแบบกองฟืน (woodpile) ซึ่งประกอบด้วยแถบสี่เหลี่ยมของไดอิเล็กตริก (E. Ozbay, A. Abeyta, G.

Tuttle, M. Tringides, R. Biswas, C. T. Chan, C. M. Soukoulis, and K. M. Ho, 1994) และมีโครงสร้างเป็นแถวลำดับแบบมี 3 ขา (tripod array) ซึ่งจะเป็นโลหะหลาย ๆ ชั้นซ้อนกันอยู่ (A.S. Barlevy, and Y. Rahmat Samii, 2001) แสดงดังรูปที่ 3.8 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 EBG แบบ 3 มิติ

ในการประยุกต์ใช้ EBG เพื่อออกแบบให้เสาอากาศมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และมีประสิทธิภาพ เป็นอีกหัวข้อหนึ่งที่เป็นความต้องการสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายที่

ทันสมัย ตารางที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่ไหลบนโครงสร้างของระนาบกราวด์ ที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ (perfect electric conductor หรือ PEC) และ EBG พบว่า ในกรณีที่ 1 เมื่อกระแสไฟฟ้ามีทิศพุ่งขึ้นในแนวตั้งของระนาบกราวด์ตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์กระแสจินตภาพ (J) ก็จะมีทิศพุ่งขึ้นในแนวตั้งเช่นเดียวกัน ส่งผลให้สายอากาศมีการแผ่กำลังที่มีประสิทธิภาพดี แต่สายอากาศจะมีขนาดใหญ่ เพื่อให้สายอากาศมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน จึงได้กำหนดตำแหน่งของสายอากาศให้อยู่ในแนวนอนเหมือนกับระนาบกราวด์ตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ พบว่าสายอากาศมีการแผ่กำลังที่ไม่มีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เนื่องจากกระแสไฟฟ้าและกระแสจินตภาพมีทิศตรงข้ามกัน ดังเช่นกรณีที่ 2 ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะกระแสที่ไหลผ่านระนาบกราวด์ตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์จะมีการกลับเฟส ดังนั้นจึงแก้ปัญหาด้วยการนำ EBG มาใช้ทดแทนระนาบกราวด์ตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่าน EBG จะไม่มีการกลับเฟส ทำให้กระแสไฟฟ้าและกระแสจินตภาพมีทิศทางเดียวกัน ส่งผลให้สายอากาศมีการแผ่กำลังที่มีประสิทธิภาพดี และนอกจากนี้ยังมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ดังกรณีที่ (3) ในตารางที่ 3.2

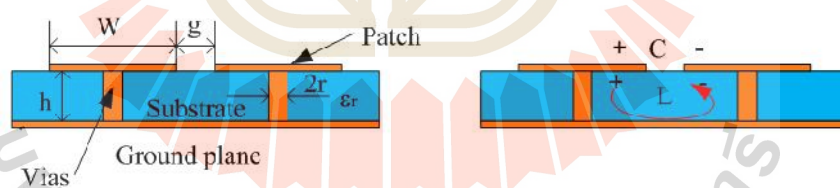
ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่ไหลบนโครงสร้างของระนาบกราวด์ที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ และ EBG

ทิศทางการไหลของกระแส	ประสิทธิภาพ	โครงสร้างง่าย ไม่ซับซ้อน
1) 	☒	☐
2) 	☐	☒
3) 	☒	☒

จากคุณสมบัติและประสิทธิภาพของ EBG จึงได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับสายอากาศเส้นลวด (wire antenna) ออกตีพิมพ์เผยแพร่มากมาย โดยออกแบบประยุกต์ให้สายอากาศเส้นลวดมีโครงสร้างบนระนาบกราวด์ที่เป็น EBG (Z. Li and Y. Rahmat-Samii, 2000, F. Yang and Y. Rahmat-Samii, 2001, F. Yang and Y. Rahmat-Samii, 2003, S. Clavijo, R. E. Diaz, and W. E. McKinzie, 2003, and H. Nakano, K. Hitosugi, N. Tatsuzawa, D. Togashi, H. Mimaki, and J.

Yamauchi, 2005) ตัวอย่างของสายอากาศเส้นลวดได้แก่ สายอากาศไดโพล (dipole antenna) สายอากาศโมโนโพล (monopole antenna) และสายอากาศรูปก้นหอย (spiral antenna) นอกจากนี้ EBG ยังสามารถปรับให้สมรรถนะของสายอากาศให้มีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศให้มากขึ้นอีกด้วย ได้แก่ การออกแบบให้เป็นสายอากาศหลายแถบความถี่ และสายอากาศแถบความถี่กว้าง อาทิเช่น สายอากาศเคิร์ล (curl antenna) เป็นสายอากาศอย่างง่ายที่มีแบบรูปโพลาริซ์แบบวงกลม (H. Nakano, S. Okuzawa, K. Ohishi, H. Mimaki, and J. Yamauchi, 1993, J. S. Colburn and Y. Rahmat-Samii, 1996) แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของสายอากาศเคิร์ลไม่ดัดนัก ถ้าวางอยู่บนระนาบกราวด์ PEC เนื่องจากกระแสไฟฟ้าและ กระแสจลนภาพมีทิศทางตรงข้ามกัน เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการใช้ระนาบกราวด์ EBG แทนระนาบกราวด์ตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ (F. Yang and Y. Rahmat-Samii, 2001) กระแสที่ไหลผ่าน EBG จะไม่มีการกลับเฟส ทำให้กระแสไฟฟ้าและกระแสจลนภาพมีทิศทางเดียวกัน ส่งผลให้สายอากาศมีการแผ่กำลังที่มีประสิทธิภาพดี

ซึ่งพารามิเตอร์ของ EBG ที่มีผิวหน้าคล้ายดอกเห็ดแบบ 2 มิติ โดยประกอบด้วย 4 ส่วนได้แก่ (1) แผ่นกราวด์โลหะ (metalground plane) (2) วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (dielectric substrate) (3) แผ่นโลหะวางเป็นคาบบนไดอิเล็กตริกหรือแพทช์และ (4) ตัวเชื่อมแนวตั้งระหว่างแผ่นโลหะด้านบนกับแผ่นกราวด์โลหะหรือเวีย (vias) ซึ่งแสดงรูปทรงเรขาคณิตที่มีลักษณะคล้ายดอกเห็ด ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 พารามิเตอร์และรูปแบบของค่าเหนี่ยวนำและค่าความจุของโครงสร้าง EBG

โดยที่ สามารถอธิบายพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้าง EBG รูปที่ 3.9 ได้ดังนี้

W	คือ	ความกว้างของแผ่นตัวนำด้านบน
g	คือ	ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำด้านบน
h	คือ	ความสูงของฐานรองไดอิเล็กตริก
ϵ_r	คือ	ค่าคงที่สภาพยอมของไดอิเล็กตริก
r	คือ	รัศมีของเวีย

$(W+g)$ คือ ระยะคาบเล็กที่เปรียบเทียบการดำเนินการความยาวคลื่น

รูปแบบสื่อกลางของโครงสร้าง EBG สามารถอธิบายได้ด้วยวงจรสมมูลของวงจรที่ประกอบไปด้วยค่าเหนี่ยวนำ (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)

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

โดยที่ค่าของตัวเก็บประจุสามารถพิสูจน์โดยใช้การส่งคงรูป (conformal mapping) ซึ่งเป็นการคำนวณการกระจายสนามไฟฟ้าสถิต 2 มิติ หาได้จากสมการ (3.5)

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

ค่าความเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากวงจรกระแสแสดงในรูปที่ 3.9 ประกอบด้วยเวียและแผ่นโลหะ สำหรับกระแสโซลินอยด์ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กสามารถคำนวณด้วยกฎของแอมแปร์ จากวงจรสมมูลตัวเหนี่ยวนำคำนวณจากพลังสนามแม่เหล็กสะสมและกระตุ้นด้วยกระแสจะได้ค่าความเหนี่ยวนำจากสมการ (3.6)

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

3.5 คุณสมบัติของอภิวัด (Metamaterial) สำหรับการประยุกต์ใช้ด้านสายอากาศ

คุณสมบัติทางวัสดุในธรรมชาติโดยปกติจะมีค่าคุณสมบัติโดยพื้นฐานที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามคุณสมบัติของชนิดนั้นๆ วัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษที่ไม่ปรากฏตามธรรมชาติคือ อภิวัด ได้รับความนิยมนำมาให้ความสนใจต่อนักวิจัยและนักวิทยาศาสตร์เป็นอย่างมาก ซึ่งในช่วง

หลายปีที่ผ่านมาโดยได้ถูกนิยามไว้ว่าเป็นวัสดุเชิงวิศวกรรมที่มีคุณสมบัติที่ไม่ปรากฏตามธรรมชาติ โดยการเกิดคุณสมบัติดังกล่าวนั้นเกิดจากโครงสร้างมากกว่าการจัดเรียง จากการผนวกรวมกันของ วัสดุนาโนเล็กซึ่งตามปกติวัสดุที่ถูกจัดเรียงเพื่อทำการผนวกรวมกันนั้นจะมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นมากๆ ที่มีคุณสมบัติไม่เหมือนกันเพื่อทำให้เกิดคุณสมบัติประสิทธิผลในระดับมาโคร ด้วยคุณสมบัติของวัสดุนั้นถูกนำมาใช้ในการชดเชยข้อจำกัดของวัสดุตามธรรมชาติ นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยจึงให้ความสนใจนำคุณสมบัติดังกล่าวมาทำการออกแบบวิจัยพัฒนาสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมใหม่ๆ ขึ้นตามมา (ศราวุธและประยุทธ์, 2011)

ซึ่งโดยทั่วไปนั้นวัสดุนี้อาจถูกกำหนดคุณสมบัติจากโครงสร้างที่ได้จากการออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อให้เกิดคุณสมบัติตามที่ต้องการ โดยคุณสมบัติดังกล่าวนี้จะไม่อยู่ในวัสดุที่มีอยู่ในธรรมชาติ หากทำการพิจารณาวัสดุในระดับไมโครจะเห็นความไม่สม่ำเสมอของวัสดุอยู่ ซึ่งจากคุณสมบัติดังกล่าวนี้มันจะถูกแสดงด้วยคุณสมบัติประสิทธิผลของการตอบสนองในระดับมหภาค (effective macroscopic behavior)

ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับอภิวัดในยุคแรกๆ เริ่มต้นจากการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่มีดัชนีการหักเหเป็นลบ (negative reflection index) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มความละเอียดของรูปภาพซึ่งถูกนำมาออกแบบและสร้างซูเปอร์เลนส์ (super lens) ซึ่งจากการนำคุณสมบัติดังกล่าวพบว่าสามารถทำการขยายภาพโดยภาพที่ได้มีความละเอียดสูงขึ้นจากการที่ใช้เลนส์ปกติทั่วไป ต่อจากนั้นไม่นานได้มีการนำคุณสมบัติของอภิวัดมาออกแบบและพัฒนาสำหรับใช้งานเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) อีกทั้งยังมีการนำไปพัฒนาวิจัยเกี่ยวกับทางด้านคลื่นเสียง (acoustic) และงานทางด้านคลื่นปฐพี (seismic) อีกด้วย อภิวัดนั้นถือได้ว่าเป็นเป็นเทคโนโลยีที่สามารถนำไปวิจัยพัฒนาและประยุกต์ใช้กับงานหลายด้าน เช่น งานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมไมโครเวฟ วิศวกรรมสายอากาศ วิศวกรรมสารกึ่งตัวนำ วิศวกรรมออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ของแข็ง วัสดุศาสตร์ วิทยาศาสตร์นาโน และอื่นๆ อีกมากมาย

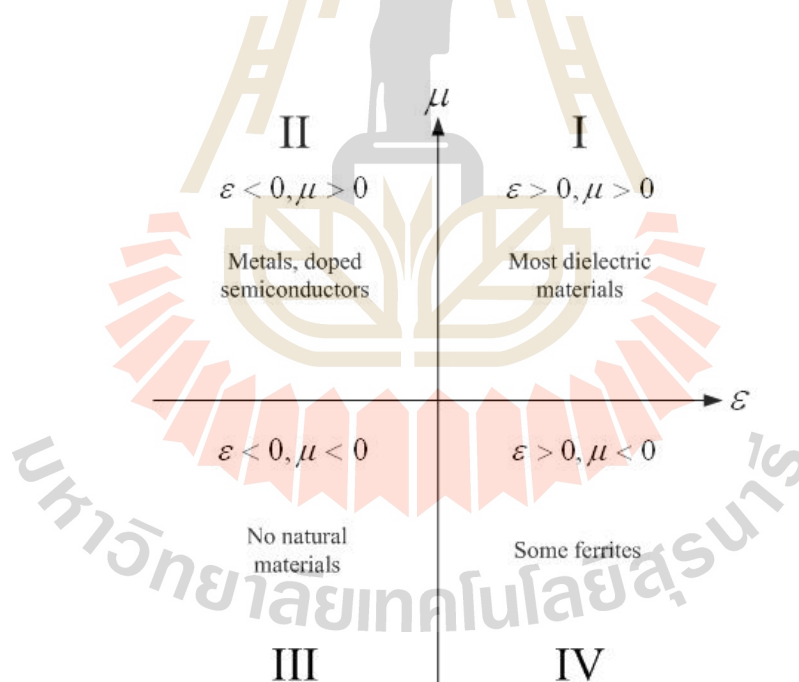
เป็นที่ทราบกันดีว่าตัวกลางที่มีผลต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากการผนวกตัวของ การเหนี่ยวนำของโมเมนต์ทางไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (electric and magnetic moment) ซึ่งผลกระทบระดับมาโครจะอยู่ในรูปของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (effective permittivity : ϵ) และความซึมซาบแม่เหล็กประสิทธิผล (permeability : μ) ของตัวกลางขนาดใหญ่ (bulk medium) ดังนั้น อภิวัดก็อาจจะเกิดจากการประกอบรวมกันของวัสดุประติษฐ์หลายชนิดฝังตัวเข้าไปยังในตัวกลาง หรือผิวของตัวกลางที่ผู้ออกแบบเป็นผู้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้อย่างอิสระ เช่น คุณสมบัติต่างๆ ของตัวกลาง รูปร่าง ขนาด การจัดวางตำแหน่ง และอื่นๆ เพื่อให้ได้ผลได้ผลตอบสนองพิเศษทางแม่เหล็กไฟฟ้า

เริ่มแรกในการวิจัยเกี่ยวกับอภิวัดผู้วิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นความสนใจไปยังวัสดุที่มีดัชนีหักเหเป็นลบซึ่งจะทำให้เกิดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบทั้งคู่ ($\epsilon < 0$ และ $\mu < 0$) ซึ่งวัสดุชนิดนี้จะเรียกว่า Double Negative Medium (DNG) เนื่องจากวัสดุ DNG มีคุณสมบัติตรงข้ามกับวัสดุส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในธรรมชาติคือ มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นบวกทั้งคู่ ($\epsilon > 0$ และ $\mu > 0$) หรือเรียกว่า Double Positive Medium (DPS) ในปี ค.ศ. 1968 แนวคิดเกี่ยวกับวัสดุเชิงซ้อนที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบทั้งคู่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากโดย Veselgo ได้ตั้งสมมติฐานและหาคำตอบเชิงทฤษฎีว่าเมื่อคลื่นระนาบเดินทางเข้าไปยังตัวกลางที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบทั้งคู่จะเกิดผลอย่างไรจากผลการศึกษาเขาพบว่าทิศทางของพอยน์ติงเวกเตอร์ (pointing vector) จะขนานกับทิศทางของความเร็วเฟส (phase velocity) แต่มีทิศทางตรงกันข้ามกัน (anti-parallel) ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาในกรณีที่คลื่นเคลื่อนที่ในตัวกลาง DPS เมื่อพิจารณาคลื่นระนาบเดียวกันพบว่าทิศทางของพอยน์ติงเวกเตอร์ที่เกิดขึ้นจะขนานกันและมีทิศทางเดียวกันกับความเร็วเฟส ในกรณีที่อภิวัดที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบทั้งคู่ นั้นได้มีการเรียกชื่อหลายชื่อ เช่น DNG มาจากค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าซึมซาบเป็นลบทั้งคู่ อีกชื่อหนึ่งคือ Negative Refractive Index (NRI) มาจากคุณสมบัติของวัสดุที่มีมุมหักเหเป็นลบ (left handed medium: LHM) ซึ่งโดยปกติทั่วไปของวัสดุจะพิจารณาโดยใช้กฎมือขวาของปริมาณเวกเตอร์สามตัวคือสนามไฟฟ้า (E) สนามแม่เหล็ก (H) และทิศทางของการเคลื่อนที่ (k) แต่ในทางตรงกันข้ามอภิวัดจะมีการพิจารณาปริมาณเวกเตอร์โดยใช้กฎมือซ้าย (backward wave: BW) ซึ่งมาจากนิยามของ Veselgo เพราะทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นนั้นเกิดขึ้นตรงกันข้ามกับทิศทางของพอยน์ติงเวกเตอร์ และ Negative Phase Velocity (NPV) เกิดขึ้นจากคุณสมบัติของคลื่นเมื่อเดินทางผ่านอภิวัดแล้วจะทำให้เวกเตอร์เฟสที่เกิดขึ้นมีค่าเป็นลบนอกจากนี้ในช่วงความถี่ใดๆ เมื่อคลื่นเดินทางผ่านวัสดุบางชนิดอาจทำให้คุณสมบัติของวัสดุมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าหรือค่าซึมซาบแม่เหล็กมีค่าเป็นลบ ซึ่งในกรณีดังกล่าวนี้จะเรียกว่า single negative medium (SNG) โดยถ้าในกรณีที่วัสดุมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นลบเพียงอย่างเดียวจะเรียกว่า epsilon negative medium (ENG) และในกรณีที่ค่าซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบอย่างเดียวเรียกว่า mu negative medium (MNG)

นอกจากนี้คุณสมบัติของอภิวัดที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากอีกประเภทหนึ่งคือ กรณีที่อภิวัดนั้นมีค่าดัชนีหักเหมีค่าเท่ากับศูนย์ (zero refractive index: ZRI) หรือมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (near zero refractive index: NZI) โดยจากคุณสมบัติดังกล่าวนี้สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งหมด 3 กรณี ดังนี้

1. Epsilon Near Zero (ENZ) คือ วัสดุมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ ($w = 0$) หรือมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ($w \rightarrow 0$) และค่าซึมซาบแม่เหล็กมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง ($m \geq 1$)
2. Mu Near Zero (MNZ) คือ วัสดุมีค่าซึมซาบแม่เหล็กเท่ากับศูนย์ ($m = 0$) หรือมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ($m \rightarrow 0$) และมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้ามากกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง ($w \geq 1$)
3. Mu-Epsilon Near Zero (MENZ) คือ วัสดุมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าซึมซาบแม่เหล็กมีค่าเท่ากับศูนย์ ($w = m = 0$) หรือวัสดุมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าซึมซาบแม่เหล็กมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ($w \rightarrow m \rightarrow 0$)

จากทั้งสามกรณีที่เกิดขึ้นนั้นจะมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับศูนย์ ($n = 0$) หรือดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์ ($n \rightarrow 0$) เมื่อทำการพิจารณาในคุณสมบัติอื่นจะพบว่ามีแตกต่างกัน (ศราวุธและประยูทธ, 2011) ดังนั้นสามารถแสดงคุณสมบัติของอภิวัดในกรณีต่างๆด้วยค่าพารามิเตอร์ของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (w และ m) พารามิเตอร์ทั้งสองนี้สามารถนำมาแบ่งกลุ่มของวัสดุได้แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผนผังสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็ก

กล่าวคือการใช้อภิวัดเพื่อการประยุกต์ใช้งานด้านสายอากาศมีการกล่าวถึงไว้อย่างชัดเจนถึงแนวทางในการพิจารณาคูณสมบัติที่เหมาะสมของวัสดุและความเหมาะสมสำหรับการ

ประยุกต์ใช้งาน (ศราวุธและประยุทธ, 2554) ได้จำแนกการประยุกต์ใช้งานสำหรับสายอากาศไว้ทั้งหมด 7 หัวข้อ ได้แก่

1. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศขนาดเล็ก
2. เพื่อใช้ในการออกแบบตัวนำประดิษฐ์ (artificial conductors)
3. เพื่อใช้ในการออกแบบวัสดุฐานรอง (substrate material)
4. เพื่อใช้ในการออกแบบชั้นวางซ้อน (superstrate) หรือฝาครอบ (radome)
5. เพื่อใช้การลดการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศในสายอากาศแถวลำดับและ ระบบ MIMO
6. เพื่อใช้ในการออกแบบสายอากาศคลื่นรั่วและเรโซเนเตอร์อันดับที่สูง
7. เพื่อควบคุมทิศทางลำคลื่น (steering beam antennas)

สำหรับการประยุกต์ใช้งานของอภิวัดใช้ในการออกแบบวัสดุฐานรอง และการออกแบบชั้นวางซ้อนเป็นพื้นฐานคุณสมบัติของอภิวัดที่นำมาพิจารณาถึงแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงระบบป้อนกำลังงานสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ที่จะกล่าวไว้ในขั้นต้น

การใช้อภิวัดในการออกแบบชั้นวางซ้อนหรือฝาครอบวางบนหรือครอบสายอากาศ (โดยปกติจะใช้สายอากาศไมโครสตริปหรือสายอากาศร่อง) เพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ โดยมีการเพิ่มชั้นวางซ้อนที่มีคุณสมบัติคือค่าดัชนีการหักเห (n) จะมีค่าเท่ากับ ZRI (zero refractive index) หรือใกล้เคียงศูนย์ NZR (near zero refraction) ตามกฎของสเนลล์เมื่อคลื่นเดินทางผ่านตัวกลาง 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 3.11 แหล่งกำเนิดอยู่ในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์และแบบจำลอง

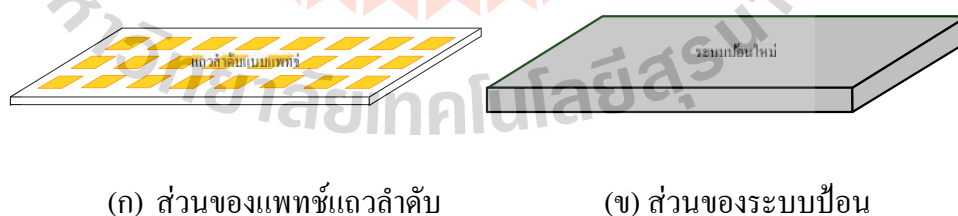
เมื่อใช้กับสายอากาศไมโครสตริป (ภาพจากศราวุธ และ ประยุทธ, 2554)

ดังนั้นชั้นวางซ้อนจึงเปรียบเสมือนอุปกรณ์บังคับทิศทางคลื่นให้ขนานออกไป (directive confining device) ทำให้สภาพเจาะจงทิศทาง (directivity) ในทิศทางบรอดไซด์

(broadside) เพิ่มขึ้นเมื่อวิเคราะห์ในมุมมองของเรโซเนเตอร์จะพบว่าการจัดวางสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งมีระนาบกราวด์ด้านล่างและการวางชั้นวางซ้อนไว้ด้านบนคล้ายกับมีแผ่นกระจกสะท้อนที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่สูงมากสองแผ่นขนานกันในระยะที่เหมาะสม (ซึ่งโดยปกติมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น) จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับไปกลับมาหลายครั้งจนทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ เรียกเรโซเนเตอร์แบบนี้ว่าฟาบริ-เปโม่เรโซเนเตอร์สายอากาศจะมีสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงมากเพราะมีค่าตัวประกอบคุณภาพ (quality factor: Q) ที่สูงและเนื่องจากมีค่า Q ที่สูงดังนั้นความกว้างแถบของสายอากาศจึงแคบมาก โดยทั่วไปชั้นวางซ้อนนอกวิสตุมิจะใช้คุณสมบัติของ ENZ และส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างที่มีสองชั้นเพื่อทำให้เกิด ENZ จึงทำให้สายอากาศมีความหนาหรือมีขนาดใหญ่ขึ้นส่วนกรณีของ MNZ ได้ออกแบบโครงสร้างเป็นลักษณะของผิวสะท้อนที่มีเพียงชั้นเดียวจึงทำให้สายอากาศมีลักษณะบางรวมทั้งมีความกว้างแถบและอัตราขยายที่มากขึ้น

3.6 ทฤษฎีและหลักการแนวคิดการส่งกำลังด้วยระบบป้อนใหม่ สำหรับสายอากาศ แถวลำดับแบบแพทช์

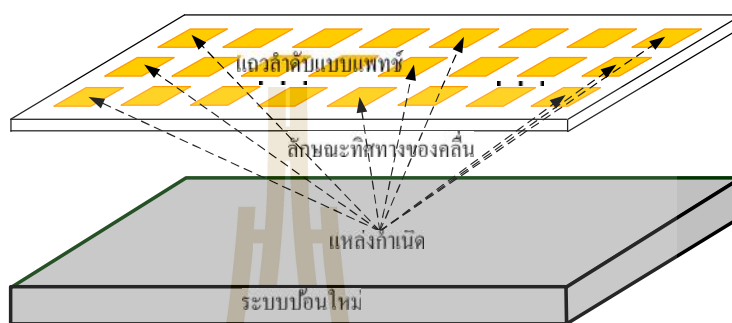
ด้วยแนวคิดจากแหล่งกำเนิดเพียงแหล่งเดียวรวมกับการวางตัวขับเคลื่อนในลักษณะซ้อนกันเพื่อบังคับทิศทางของคลื่นให้แผ่กำลังในทิศทางแบบบรอดไซด์นั้น สามารถออกแบบตัวกระตุ้นกำลังให้มีแบบรูปการแผ่กำลังให้เกิดเป็นระนาบในด้านหน้า หรือมีลักษณะเป็นแถวลำดับในแนวบรอดไซด์ (broadside array) เพื่อให้สามารถป้อนกำลังให้กับแพทช์แถวลำดับได้ทุกอีลิเมนต์ โดยส่วนของสายอากาศและระบบป้อนสามารถแยกออกจากกันได้โดยสิ้นเชิง ซึ่งจะง่ายต่อการพัฒนาหรือปรับปรุงเฉพาะส่วนของสายอากาศ ตามวัตถุประสงค์ของการประยุกต์ใช้งานนั้นๆ ดังรูปที่ 3.12



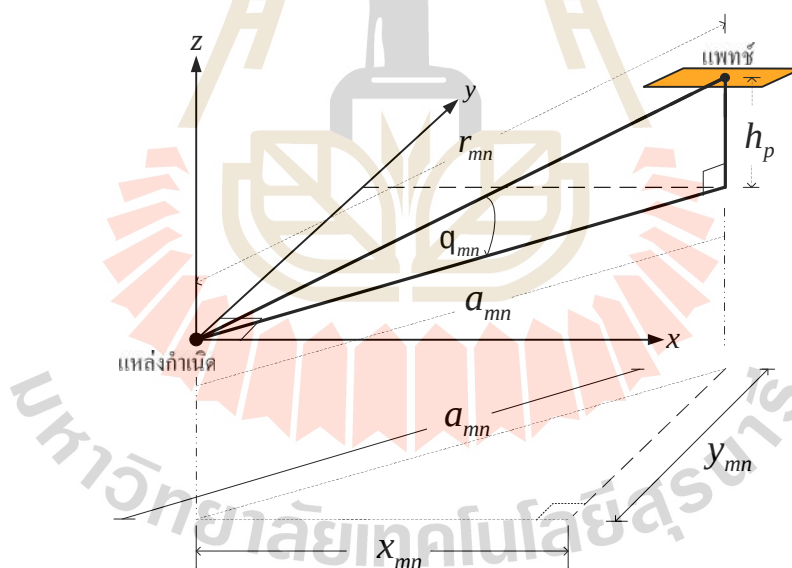
รูปที่ 3.12 โครงสร้างระบบป้อนใหม่กับสายอากาศ

จะเห็นได้ว่าด้วยลักษณะการวางตัวของระบบป้อนกับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ในลักษณะดังรูปที่ 3.13 กำลังจากแหล่งกำเนิดจากด้านล่างสามารถกระตุ้นกำลังให้กับแพทช์ได้ทุก

ๆ อีลิเมนต์ ก็ต่อเมื่อขนาดและทิศทางของคลื่นแต่ละตำแหน่งของแพทช์จะต้องไม่เท่ากัน แต่เฟสตกกระทบบนแพทช์แต่ละอีลิเมนต์จะต้องมีขนาดที่สม่ำเสมอทุก ๆ อีลิเมนต์ จึงจะทำให้เกิดความ เป็นระนาบของแบบรูปการแผ่กำลังในทิศทางบรอดไซด์ได้ด้วยค่า q_{mn} และ r_{mn} ที่เหมาะสม



รูปที่ 3.13 ลักษณะการวางตัวของสายอากาศแถวลำดับและระบบป้อน



รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะตำแหน่งของแพทช์และแหล่งกำเนิด

จากจำนวนอีลิเมนต์ของสายอากาศแพทช์แถวลำดับเท่ากับ $m \times n$ อีลิเมนต์ สามารถคำนวณมุมระหว่างจากแหล่งกำเนิดกับจุดศูนย์แพทช์แต่ละอีลิเมนต์ได้เท่ากับ

$$q_{mn} = \tan^{-1} \left(\frac{h_r}{a_1} \right) \quad (3.7)$$

หรือ

$$q_{mn} = \sin^{-1} \left(\frac{h_r}{r_1} \right) \quad (3.8)$$

และสามารถคำนวณ ระยะการจัดของระยะทางของคลื่นหรือ เรียกว่า ระยะรังสีของคลื่น (r_{mn}) แต่ละตำแหน่ง ของแต่ละอีลิเมนต์ที่เหมาะสมตามจำนวนแพทช์ที่ได้ทำการออกแบบ ซึ่งแสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ กรณีจำนวนแพทช์เท่ากับ 1 อีลิเมนต์ ดังรูปที่ 3.14 และสามารถคำนวณจากสมการ (3.9) และ (3.10)

$$r_{mn} = \sqrt{(a_{mn})^2 + (h_p)^2} \quad (3.9)$$

และ

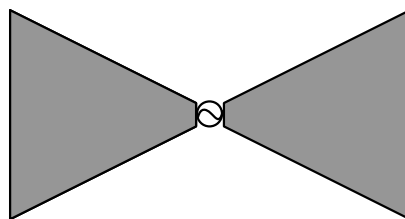
$$a_{mn} = \sqrt{(x_{mn})^2 + (y_{mn})^2} \quad (3.10)$$

โดยที่ x_{mn} และ y_{mn} สามารถคำนวณได้จากขนาดของแพทช์และช่องว่างระหว่างอีลิเมนต์ที่ได้ใช้ในการออกแบบ ด้วยตำแหน่งที่เหมาะสมของแพทช์จะทำให้เกิดการแผ่กระจายของลำคลื่นในทิศทางด้านหน้า (broadside beam) ที่เกิดจากการกระตุ้นกำลังด้วยระบบป้อนให้กับแพทช์ทุกๆ อีลิเมนต์ด้วยพื้นฐานสมการของรังสีของระนาบที่ (3.11)

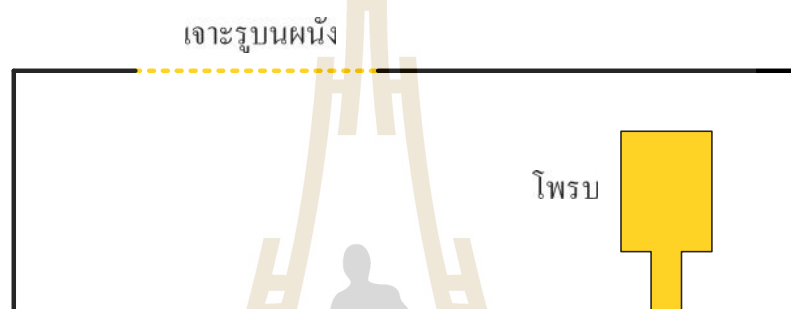
$$r_{mn} = n\lambda / 2, n=1, 2, 3, \dots \quad (3.11)$$

โดยที่ ระยะของเส้นรังสี (ray) ของคลื่นที่ออกจากแหล่งกำเนิดไปยังแพทช์แต่ละอีลิเมนต์ในแต่ละตำแหน่งจะไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับค่าช่องว่างระหว่างและค่าขนาดของ MSA ที่ได้ทำการออกแบบ เพื่อเกิดการเสริมรับกัน ระหว่างคลื่นรังสีที่ส่งออกจากแหล่งเดียว ไปยังแพทช์แต่ละตัว ด้วย แบบรูปการแผ่กำลังงานในทิศทางได้หน้าแบบระนาบจากตัวกระตุ้นหรือตัวป้อน

จากการวิเคราะห์และพิจารณาโครงสร้างตัวกระตุ้น พบว่าตัวกระตุ้นที่มีความสอดคล้องโครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ ได้เลือกมาพิจารณา 2 โครงสร้างด้วยกัน ได้แก่ ตัวกระตุ้นไดโพลแบบโบว์ไท และ ตัวกระตุ้นด้วยควาติเตอร์พวงด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 3.15 และ 3.16



รูปที่ 3.15 ตัวกระตุ้นไดโพลแบบโบว์ไท



รูปที่ 3.16 ตัวกระตุ้นด้วยโพรบภายในโพรงทำการเจาะรูบนผนังด้านบน

3.7 สรุป

สำหรับบทนี้ได้กล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วย สายอากาศแบบแพทช์ ลักษณะการป้อนของสายอากาศแถวลำดับ และแนวคิดความเป็นไปได้ต่อการออกแบบระบบป้อนกำลังงานสำหรับอากาศแถวลำดับไมโครสตริป เพื่อทดแทนการป้อนผ่านสายส่งหรือการป้อนแบบเฟส ด้วยคุณสมบัติของโครงสร้าง EBG ที่มีผิวหน้าคล้ายดอกเห็ดแบบ 2 มิติ โดยลักษณะของตำแหน่งที่เหมาะสมของ EBG ร่วมกับ โครงสร้างตัวกระตุ้นกำลังที่สอดคล้องกันสามารถพัฒนาเพื่อให้เกิดการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางด้านหน้าได้จากการกระตุ้นให้แพทช์สามารถทำงานได้ทุกอีลิเมนต์ และทฤษฎีและแนวทางของการระบบป้อนใหม่ของการส่งกำลังทิศทางด้านหน้าเชิงระนาบ ซึ่งในส่วนของขั้นตอนการออกแบบและจำลองระบบป้อนด้วยตัวกระตุ้นด้วยตำแหน่งของแพทช์ที่เหมาะสม จะแสดงในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

การจำลองและออกแบบระบบป้อนใหม่

4.1 กล่าวนำ

สำหรับบทนี้จะนำเสนอการออกแบบระบบป้อนแบบใหม่สำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ (patch array antenna : PAA) โดยการพิจารณาลักษณะของโครงสร้างตัวป้อนที่เหมาะสม เพื่อศึกษาความเป็นไปได้สำหรับการป้อนกำลังให้กับสายอากาศโดยใช้สายเฟส โดยพิจารณาตัวกระตุ้นสัญญาณ ร่วมกับ EBG โดยพิจารณาจำนวนและตำแหน่งของ EBG ร่วมกับเทคนิคต่าง ๆ ที่เหมาะสม สำหรับพัฒนาระบบป้อนแบบใหม่สำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ ซึ่งโครงสร้างตัวป้อนที่ผู้วิจัยให้ความสนใจและนำมาพิจารณาและพัฒนาเพื่อเป็นตัวกระตุ้นสัญญาณให้กับ PAA ได้แก่ ไดโพลแบบโบว์ไท (bowtie dipole) ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นเรื่องความกว้างแถบคั่นกว้างและลักษณะของโครงสร้างพื้นฐานที่ง่ายต่อการขึ้นรูปขึ้นงานร่วมกับ PAA โดยพิจารณา ตำแหน่งและจำนวนเซลล์ของ EBG ที่เหมาะสม และใช้ลักษณะการจัดวางตำแหน่งของระบบป้อนแบบใหม่กับ PAA ในลักษณะ FPR โดยได้ทำการจำลองโครงสร้างในส่วนของระบบป้อนแบบใหม่ และ PAA ด้วยโปรแกรมจำลอง CST studio 2009 เพื่อพิจารณาค่าคุณลักษณะที่ต่างๆ ที่สำคัญของสายอากาศ ทำให้สามารถปรับปรุงอัตราขยายและความกว้างแถบของสายอากาศให้เพิ่มขึ้น

ดังนั้นสามารถสรุปขั้นตอนการจำลองระบบป้อนแบบใหม่สำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ ออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) จำลองโครงสร้างสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์แบบเก่า โดยเลือกจำลองสายอากาศแถวลำดับจำนวน 2×4 อิลิเมนต์ ณ ความถี่ 10 GHz ซึ่งทำการป้อนกำลังผ่านสายเฟสแบบเดิมด้วยวัสดุฐานรองเป็น Duroid 2.65 ความหนาวัสดุเท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร ขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 110 และ 81 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นแผ่นชนิดเดียวกันกับการใช้งานในห้องทดสอบสายอากาศ

- 2) จำลองโครงสร้างตัวกระตุ้นสัญญาณ โดยเลือกใช้ตัวกระตุ้นสัญญาณด้วยไดโพลแบบโบว์ไทที่ความถี่ 10 GHz ด้วยวัสดุชนิด FR4 ความหนา 1.6 มิลลิเมตรค่าความกว้างและความยาวของแผ่น FR4 เท่ากันกับ ข้อ 1) โดยพิจารณาค่าคุณลักษณะต่างๆ ดังนี้

ค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ (S_{11}) ค่าความกว้างแถบ (bandwidth) ค่าอัตราขยาย (gain) โดยแสดงผลการจำลองค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดของโครงสร้าง ได้แก่ ความยาวของไดโพลแบบโบว์ไท (l_{bowties}) ความกว้างส่วนปลายของไดโพลแบบโบว์ไท (w_{bowties}) ความกว้างส่วนต้นของไดโพลแบบโบว์ไท (w_{bot}) ความกว้างส่วนต้นของไดโพลแบบโบว์ไท (w_{bot}) ความหนาของไดโพลแบบโบว์ไท (t_{bow}) และระยะห่างระหว่างปีกไดโพลแบบโบว์ไท (d_{feed}) และได้เลือกค่าที่เหมาะสมที่สุด ณ ความถี่ 10 GHz เพื่อใช้เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนต่อไป

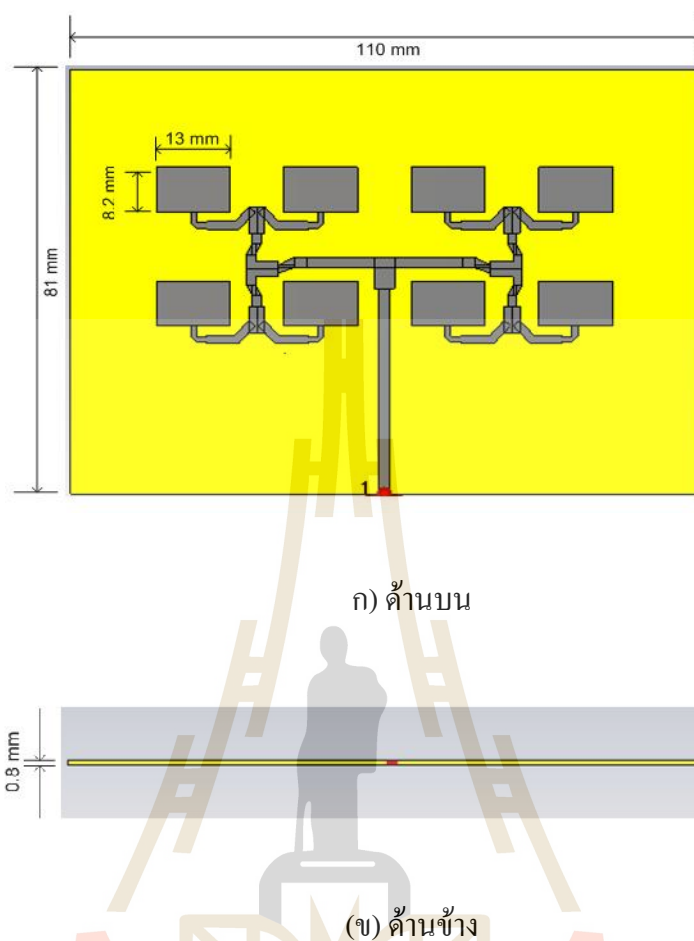
3) จำลองโครงสร้างตัวกระตุ้นสัญญาณด้วยตัวป้อนไดโพลแบบโบว์ไท จากนั้นทำการจำลองตัวกระตุ้น (ด้วยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากข้อ 2) ร่วมกับโครงสร้าง EBG บนระนาบกราวด์ เพื่อพิจารณาค่าคุณลักษณะจากพารามิเตอร์ของ EBG แต่ละพารามิเตอร์ โดยกำหนดให้ 1 หน่วยเซลล์ของ EBG เท่ากับจำนวน EBG ที่น้อยที่สุด คือ 4 เซลล์ (Fan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

4) จำลองโครงสร้างระบบป้อนใหม่ ที่ประกอบด้วยตัวป้อนใหม่และลักษณะการวางตัวแบบ FPR เพื่อป้อนกำลังแบบไม่ผ่านสายเฟสให้กับ PAA ซึ่งในขั้นตอนนี้ได้เลือก PAA จำนวนอีลิเมนต์ เท่ากันกับ ข้อ 1 คือ 2×4 อีลิเมนต์ จากนั้นทำการพิจารณา 1) ความสูงระหว่าง ตัวป้อนใหม่กับ PAA และ 2) ระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์ของสายอากาศที่สามารถให้อัตราขยายได้สูงสุด และแบบรูปการแผ่กำลังสอดคล้องกับแบบรูปการแผ่กำลังของการป้อนแบบผ่านสายเฟสหรือแบบเกา

5) เปรียบเทียบค่าคุณลักษณะของสายอากาศจากการจำลองโครงสร้างระบบป้อนใหม่กับระบบป้อนผ่านสายเฟสแบบเกา (จากข้อ 1) โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่เกี่ยวข้อง ดังนี้ 1) ความกว้างแถบ 2) อัตราขยาย 3) แบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

ซึ่งจากขั้นตอนที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะแสดงในรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนในลำดับถัดไป

4.2. จำลองสายอากาศแฉวลำดับแบบแพทช์โดยการป้อนกำลังด้วยสายเฟสแบบเกา

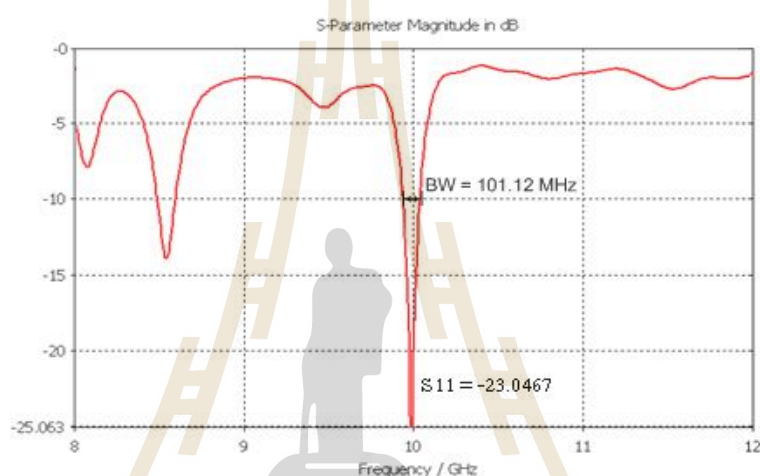


รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์จำนวน 2 X 4 อีลิเมนต์
ด้วยป้อนแบบสายเฟส

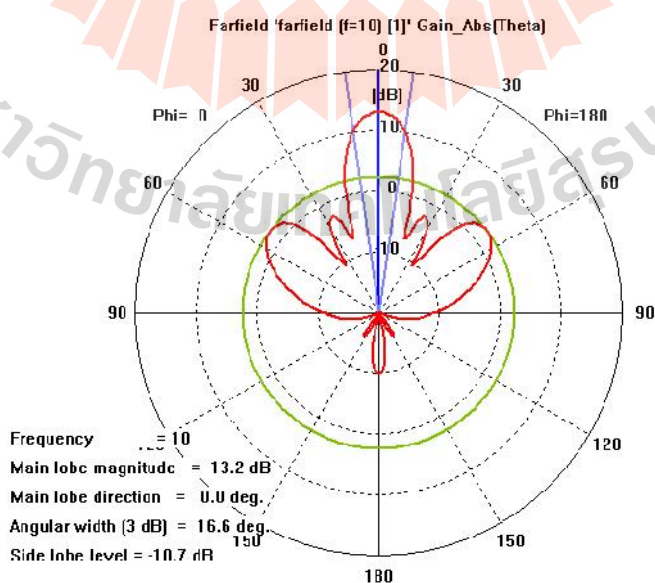
สำหรับการพิจารณาขั้นตอนของระบบป้อน ได้ออกแบบและจำลองโครงสร้างสายอากาศ
แถวลำดับแบบแพทช์แบบแพทช์ โดยการจำลองระบบป้อนกำลังแบบเก่าหรือผ่านสายเฟส เพื่อเป็น
สายอากาศอ้างอิงสำหรับเปรียบเทียบค่าคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศหลังจากการพัฒนา

ระบบป้อนแบบใหม่ด้วยชนิดเดียวกันโดยไม่จ่ายกำลังผ่านสายเฟสโดยใช้โปรแกรม CST
studio 2009 โดยโครงสร้างของสายอากาศที่กำลังพัฒนา มีขนาดอีลิเมนต์จำนวน 2 X 4 อีลิเมนต์
ขนาดความกว้างของแพทช์ มีค่าเท่ากับ 8.2 มิลลิเมตร ความยาว มีค่าเท่ากับ 13 มิลลิเมตร ใช้วัสดุ
ฐานรองเป็น Duriod มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเท่ากับ 2.65 มีค่าความหนา 0.8 มิลลิเมตร โดยที่
ขนาดความกว้างของแผ่นกราวด์เท่ากับ 81 มิลลิเมตรและมีความยาวเท่ากับ 110 มิลลิเมตรซึ่งได้
แสดงโครงสร้างของสายอากาศดังรูปที่ 4.1

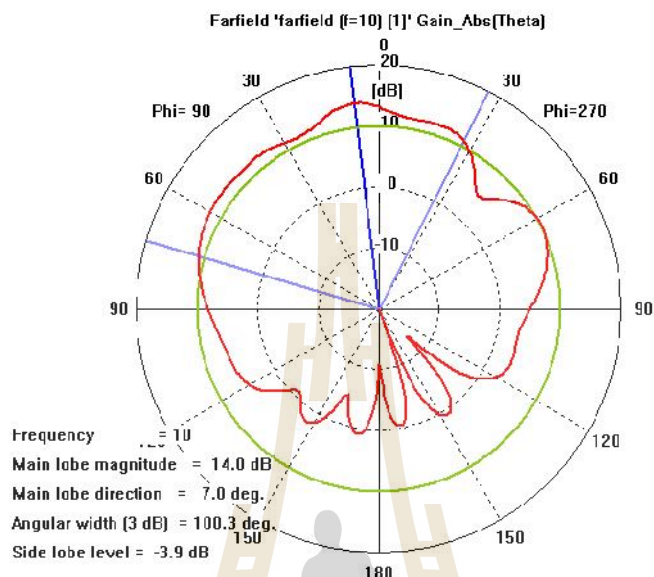
ซึ่งผลการจำลองจะพบว่า สายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ที่ทำการป้อนกำลังด้วยวิธีเก่า หรือป้อนผ่านสายเส้นสตริป ค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของสายอากาศ (s11) ที่ต่ำกว่า -10 dBi ซึ่งมีกึ่งแถบเท่ากับ 101.12 MHz หรือ 1.011 % และค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ (s11) เท่ากับ -23.0467 dBi ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และแบบรูปการแผ่กำลังในสนามไฟฟ้า (E-plane) และสนามแม่เหล็ก (H-plane) และอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 13.93 dBi ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับและความกว้างแถบของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์จำนวน 2 X 4 อีลิเมนต์โดยการป้อนกำลังแบบเก่า



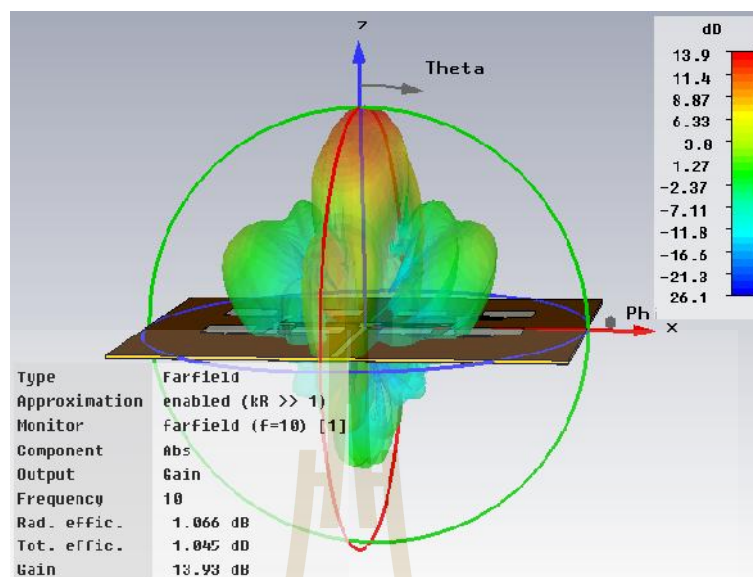
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.3 (ก) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) และ
(ข) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane)

ซึ่งจากการจำลองสายอากาศแฉกลำดับแบบแพทช์จำนวน 2 X 4 อิลิเมนต์ ด้วยวิธีการป้อนแบบเก่า ผ่านสายเฟสหรือเส้นสตริป พบว่ากระบวนการออกแบบตัวแบ่งกำลัง (power divider) บนแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อให้เกิดการป้อนกำลังที่สมบูรณ์นั้น มีความซับซ้อนและใช้เวลาค่อนข้างมาก แต่ก็ยังใช้วิธีการดังกล่าว ให้กับสายอากาศแฉกลำดับแบบแพทช์ในการเพิ่มอัตราขยายด้วยแฉกลำดับมาจนถึงปัจจุบัน ถึงแม้ว่าจากปริทัศน์วรรณกรรมในบทที่ 2 มีการใช้เทคนิคต่างๆ ร่วมกับการแบ่งกำลังสำหรับการป้อน แต่ยังคงมีส่วนของการป้อนกำลังผ่านสายเฟสรวมอยู่ด้วย ซึ่งทำให้ยังคงมีการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการป้อนอยู่เช่นเดิม

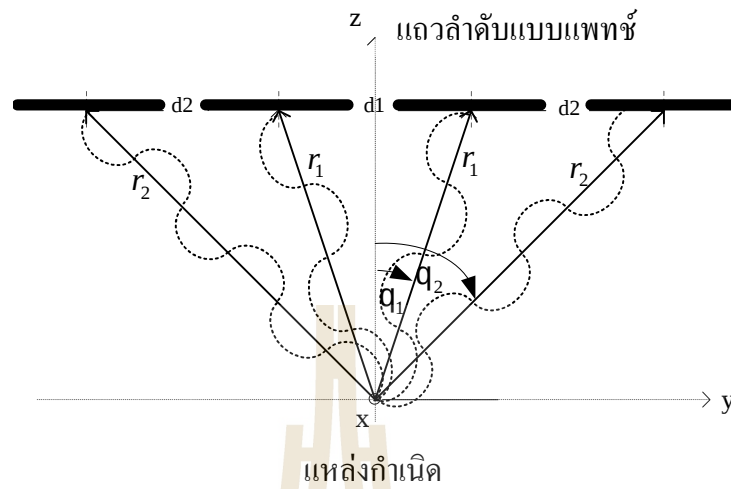


รูปที่ 4.4 แสดงแบบจำลองอัตราของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์จำนวน 2 X 4
อีลิเมนต์ และแบบรูปการแผ่กำลังในลักษณะสามมิติ

เนื่องจากระบบป้อนใหม่ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ ได้มีจุดประสงค์เพื่อลดการการสูญเสียภายในสายเฟสดังที่กล่าวมาขึ้นต้น เพื่อให้สามารถชดเชยค่าการสูญเสียภายในสายเฟสจากการป้อนแบบเก่าได้ ซึ่งส่งผลให้สามารถเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศให้มากขึ้น และสามารถเพิ่มความกว้างแถบความถี่ใช้งานให้มากขึ้น ดังนั้นทางผู้วิจัยได้พิจารณาลักษณะตัวป้อนแบบใหม่ที่เหมาะสม โดยเลือกตัวกระตุ้นสัญญาณที่สอดคล้องกับโครงสร้างสายอากาศ และพิจารณาเทคนิควิธีที่เหมาะสมกับลักษณะการวางของระบบป้อนใหม่ร่วมกับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ สำหรับการป้อนสัญญาณให้สายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์แต่ละอีลิเมนต์ทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพทุกๆอีลิเมนต์ ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดในลำดับต่อไป

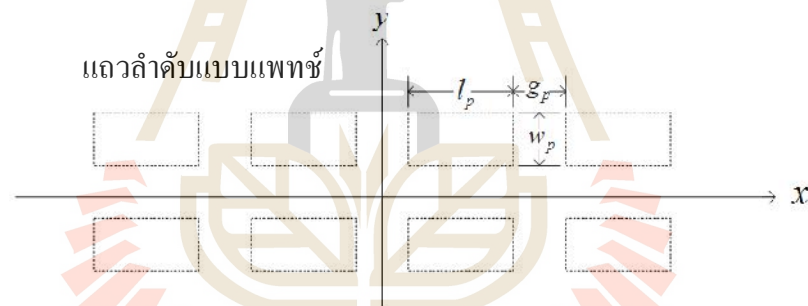
4.3 วิธีการออกแบบและจำลองตัวกระตุ้น

จากแนวคิดและทฤษฎีการแผ่กำลังแบบระนาบในทิศทางด้านหน้า ในบทที่ 3 ด้วยระยะ r_k โดยที่



รูปที่ 4.5 ลักษณะคลื่นจากแหล่งกำเนิดไปยังแถวลำดับแบบแพทช์

โดยมีลักษณะการจัดวางแถวลำดับของแพทช์ เท่ากับ 2 X 4 อีลีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แถวลำดับแบบแพทช์จำนวน 2 X 4 อีลีเมนต์

$$q_1 = \tan^{-1} \left(\frac{h_r}{a_1} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{h_r}{r_1} \right) \quad (4.1ก)$$

หรือ

$$q_2 = \tan^{-1} \left(\frac{h_r}{a_2} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{h_r}{r_2} \right) \quad (4.1ข)$$

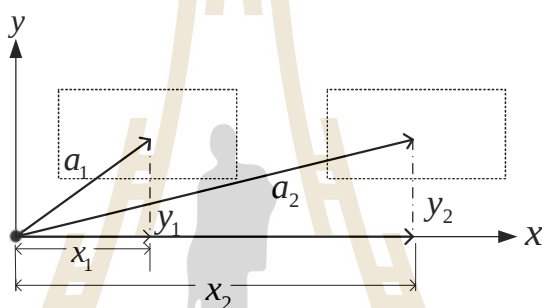
ด้วยลักษณะการวางตัวของ PAA ในลักษณะเป็นระนาบ ทำให้ $y_1 = y_2$

$$r_1 = \sqrt{a_1^2 + h_r^2} \quad (4.2ก)$$

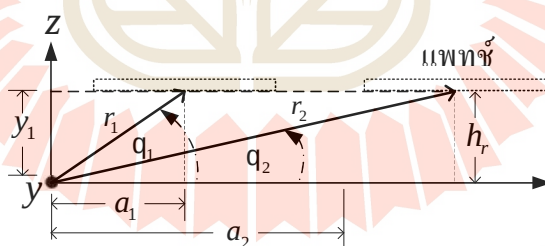
$$r_2 = \sqrt{a_2^2 + h_r^2} \quad (4.2ข)$$

$$a_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}, \quad (4.3ก)$$

$$a_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \quad (4.3ข)$$



(ก) ด้านบน



(ข) ด้านข้าง

รูปที่ 4.7 มุมมองแพทช์แถวลำดับในแต่ละด้าน

ซึ่งกรณี จำนวน PAA เท่ากับ 2 X 4 อีลีเมนต์ สามารถหาค่า และ x_1 และ x_2 ได้จากสมการที่ (4.4) และ (4.5) ตามลำดับ

$$x_1 = \frac{(w_p + g_p)}{2} \quad (4.4)$$

$$x_2 = \left[\left(\frac{3}{2} \right) (w_p + g_p) \right] + \left[\left(\frac{3}{2} \right) (l_p + g_p) \right] \quad (4.5)$$

โดยที่ ระยะของเส้นรังสี (ray) ของคลื่นที่ออกจากแหล่งกำเนิดไปยังแพทช์แต่ละอีลิเมนต์ ในแต่ละตำแหน่งจะไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับขนาดและระยะห่างของของแพทช์ ที่ได้ทำการออกแบบ เพื่อเกิดการเสริมรับกัน ระหว่างคลื่นรังสีที่ส่งออกจากแหล่งเดียว ไปยังแพทช์แต่ละตัว แบบรูปการแผ่กำลังในทิศทางได้นี้หน้าแบบระนาบจากตัวกระตุ้นหรือตัวป้อน

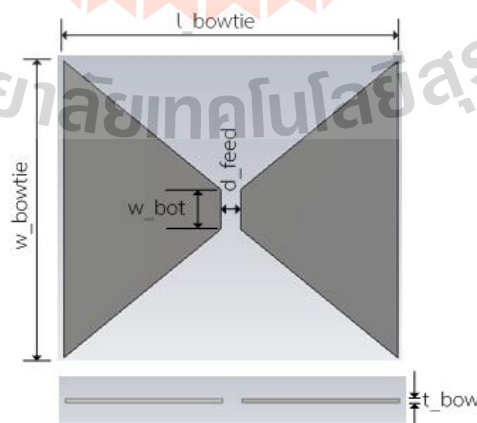
จากหลักการการแผ่กำลังด้วยแหล่งกำเนิดเพียงจุดเดียวจากแถวลำดับด้านข้าง (broadside array) ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.32

จึงได้พิจารณาตัวกระตุ้นแบ่งเป็น 2 แบบ เพื่อทำการจำลองค่าพารามิเตอร์ต่าง ดังนี้

- 1) จำลองตัวกระตุ้นด้วยโบว์ไท
- 2) จำลองตัวกระตุ้น ด้วย cavity ด้วยการเจาะผนังด้านบน

4.4 จำลองตัวกระตุ้นสัญญาณด้วยตัวป้อนแบบไดโพลชนิดโบว์ไท (Bow-Tie Dipole)

จากการสืบค้นงานวิจัยที่ผ่านมา โครงสร้างสายอากาศไดโพลได้ถูกพัฒนาโครงสร้างเพื่อใช้งานร่วมแผ่นวงจรพิมพ์อย่างกว้างขวาง การพัฒนาโครงสร้างเป็นลักษณะโบว์หรือเรียกว่าไดโพลแบบโบว์ไท เป็นอีกหนึ่งโครงสร้างที่ถูกนำมาพัฒนาเพื่อเพิ่มความกว้างแถบของสายอากาศ ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 โครงสร้างของไดโพลแบบโบว์ไท (bow-tie dipole)

ทำการออกแบบโบว์ไทโดยกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น ได้แก่ ความยาวของไดโพลแบบโบว์ไท (l_{bowtie}) ความกว้างส่วนปลายของไดโพลแบบโบว์ไท (w_{bowtie}) ความกว้างส่วนต้นของไดโพลแบบโบว์ไท (w_{bot}) ความหนาของไดโพลแบบโบว์ไท (t_{bow}) ระยะห่างระหว่างปีกของไดโพลแบบโบว์ไท (d_{feed}) ซึ่งพารามิเตอร์เริ่มต้นการจำลองโครงสร้างตัวกระตุ้นกำลังด้วยไดโพลแบบโบว์ไทดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1

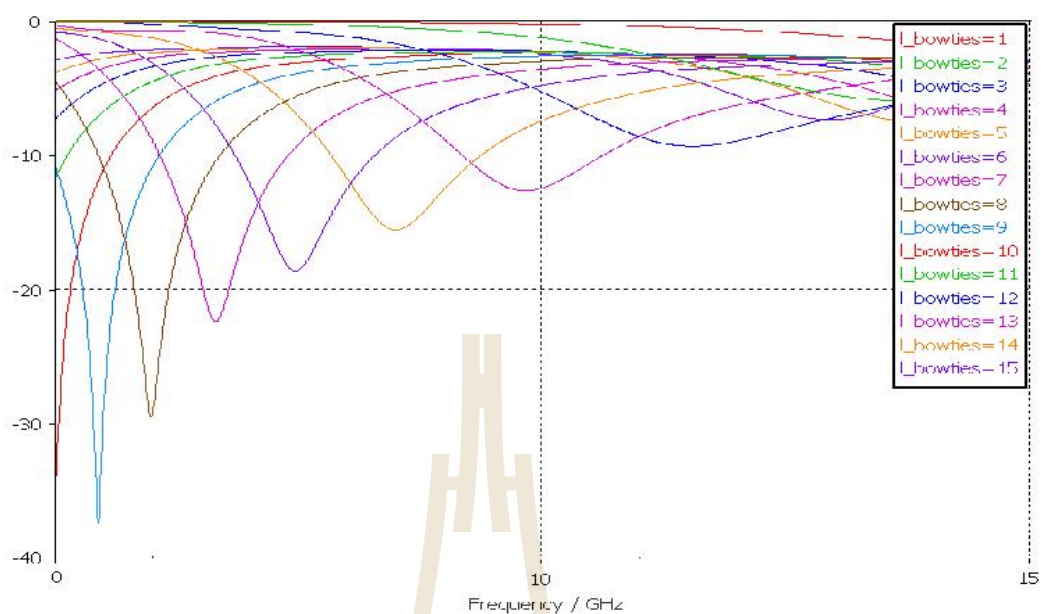
พารามิเตอร์	ความยาวคลื่น (λ)
ความยาวของไดโพลแบบโบว์ไท (l_{bowtie})	0.5
ความกว้างส่วนปลายของไดโพลแบบโบว์ไท (w_{bowtie})	0.25
ความกว้างส่วนต้นของไดโพลแบบโบว์ไท (w_{bot})	0.033
ความหนาของไดโพลแบบโบว์ไท (t_{bow})	0.0033
ระยะห่างระหว่างปีกไดโพลแบบโบว์ไททั้ง 2 ข้าง (d_{feed})	0.033

จากนั้นได้พิจารณาการเรโซแนนซ์ที่เหมาะสม ณ ความถี่ 10 GHz ของพารามิเตอร์แต่ละตัว โดยเลือกพิจารณาความยาวของไดโพลแบบโบว์ไทเป็นพารามิเตอร์เป็นพารามิเตอร์แรก ดังนี้

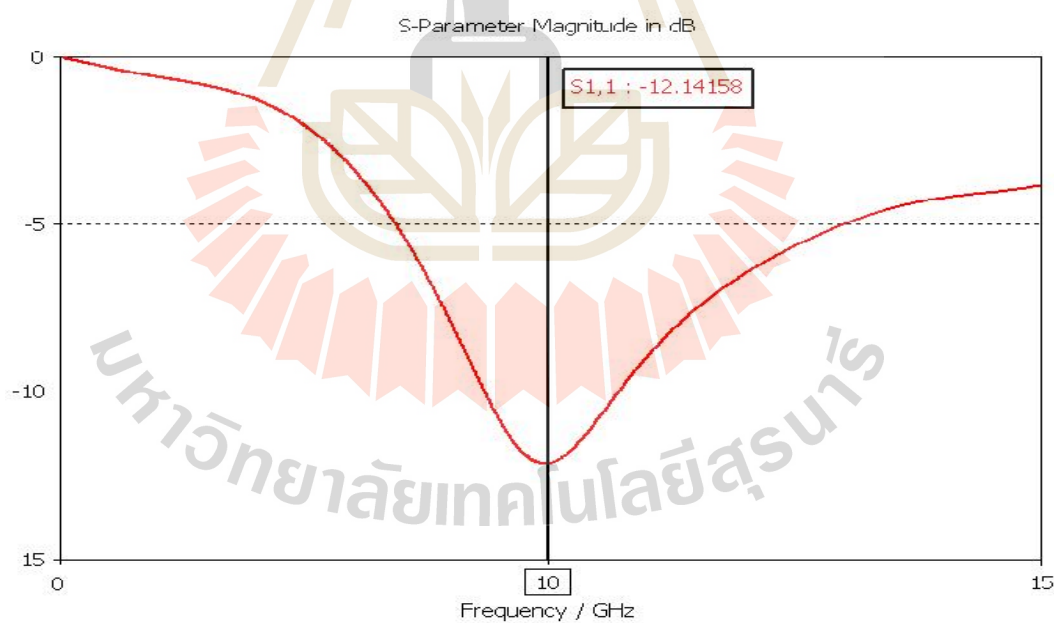
4.4.1) ความยาวของไดโพลแบบโบว์ไท (l_{bowtie})

จากพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ได้กำหนดค่าเริ่มต้นดังกล่าวไว้ข้างต้น ได้ทำการปรับค่าขนาดค่าความยาวของไดโพลแบบโบว์ไทจากความยาว 1– 15 ($0.033\lambda - 0.5\lambda$) มิลลิเมตร พบว่าเมื่อความยาวของไดโพลแบบโบว์ไทเพิ่มขึ้น จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ของความถี่นั้นลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งค่าความยาวของไดโพลแบบโบว์ไทมีเท่ากับ 4 มิลลิเมตร เป็นค่าที่ดีที่สุด เนื่องจากมีค่า S_{11} ต่ำกว่า -10 dBi ณ ความถี่ที่ทำการออกแบบ ต่อจากนั้นทำการปรับความยาวของไดโพลแบบโบว์ไทให้เล็กลงเป็น 3.90 มิลลิเมตร เพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์ของความถี่ 10 GHz ที่ดีขึ้น โดยที่ค่า S_{11} ต่ำกว่า -10 dBi จากความถี่ 8.4644 GHz ถึง 12.982 GHz โดยมีความกว้างแถบเท่ากับ 4.5179 GHz และ ณ ความถี่ 10 GHz มีค่า S_{11} เท่ากับ -12.14158 dBi ดังรูปที่ 4.10

นั่นคือสามารถกำหนดพารามิเตอร์แรกในการออกแบบซึ่งเป็นจึงเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับความยาวของไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 3.90 มิลลิเมตร ซึ่งได้ดำเนินการพิจารณาค่าขนาดความกว้างของไดโพลแบบโบว์ไทในลำดับต่อไป



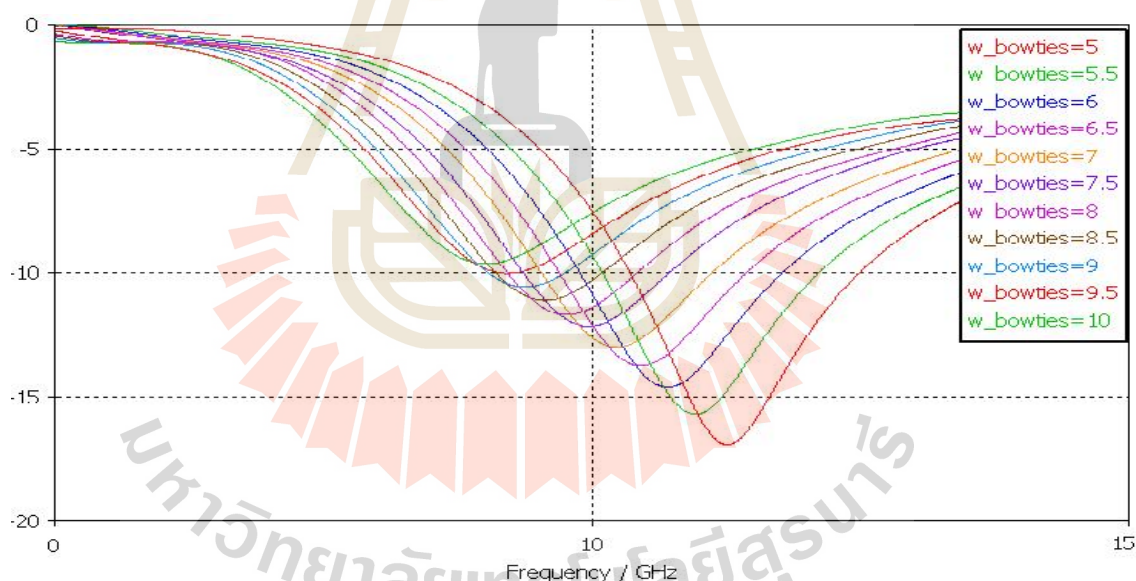
รูปที่ 4.9 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ จากการปรับความยาวไดโพลแบบโบว์ไท



รูปที่ 4.10 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับจากค่าความยาวไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 3.90 มิลลิเมตร

4.3.2) ขนาดความกว้างส่วนปลายของไดโพลแบบโบว์ไท (bowties)

จากผลการจำลองค่าความยาวไดโพลแบบโบว์ไทที่เหมาะสมเท่ากับ 3.90 มิลลิเมตร ต่อมาจากการจำลองค่าที่เหมาะสมของความกว้างส่วนปลายของไดโพลแบบโบว์ไท (w_{bowties}) โดยยังคงค่าความยาวของไดโพลแบบโบว์ไทและพารามิเตอร์อื่นๆ ไว้เช่นเดิม ซึ่งจากการปรับระยะความกว้างส่วนปลายของไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 5-10 มิลลิเมตร หรือ 0.067λ ถึง 0.333λ พบว่าจากการเพิ่มความกว้างส่วนปลายของไดโพลแบบโบว์ไททำให้ความถี่เรโซแนนซ์มีค่าจะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่า เมื่อขนาดของโครงสร้างหรือพื้นที่ประสิทธิภาพมีขนาดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์สัญญาณลดลง ดังแสดงผลการจำลองในรูปที่ 4.11 ซึ่งจะพบว่า w_{bowties} ที่สามารถเรโซแนนซ์สัญญาณที่ความถี่ 10 GHz ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 0.25λ (ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับความกว้างส่วนปลายของไดโพลแบบโบว์ไทอยู่แล้ว จากค่าเริ่มต้น) จึงได้คงค่าความกว้างส่วนปลายของไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 7.5 มิลลิเมตรไว้เช่นเดิมเพื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์อื่นต่อไป

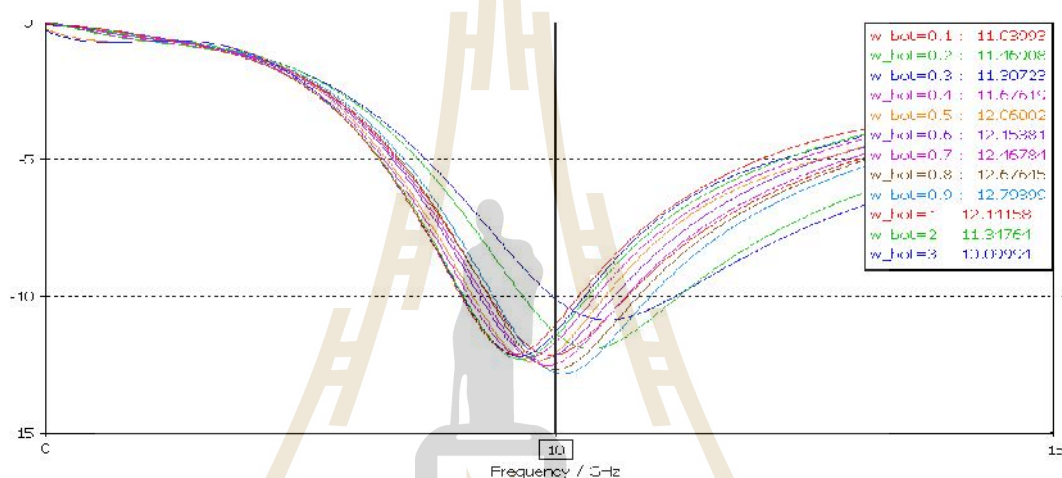


รูปที่ 4.11 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับจากความกว้างไดโพลแบบโบว์ไท

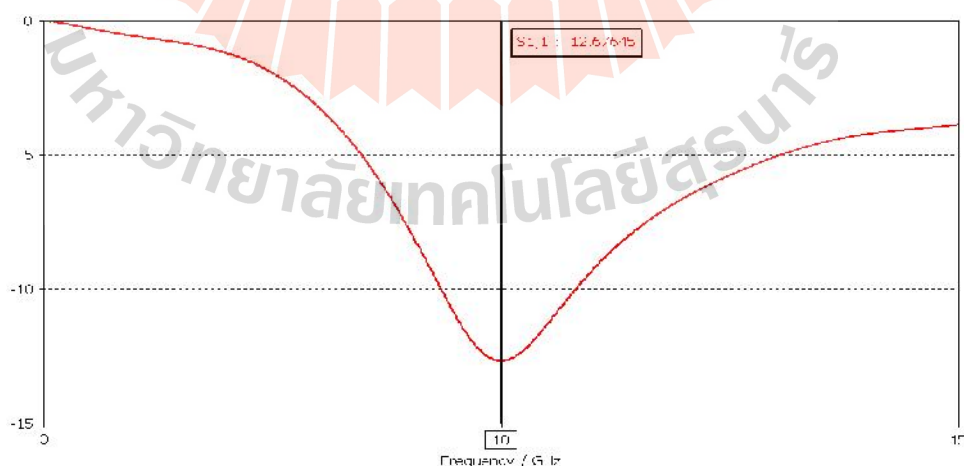
4.3.3) ความกว้างส่วนต้นของไดโพลแบบโบว์ไท (w_{bot})

จากผลการจำลองค่าความยาวไดโพลแบบโบว์ไทที่เหมาะสมเท่ากับ 3.9 มิลลิเมตร และความกว้างส่วนปลายของไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร จากนั้นทำการจำลองเพื่อหา

ค่าที่เหมาะสมของค่าความกว้างส่วนต้นของไดโพลแบบโบว์ไท (w_{bot}) ซึ่งเป็นส่วนความกว้างสำหรับการป้อนสัญญาณเข้าเข้า โดยได้จำลองขนาดความกว้างจาก 0.1-3.0 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.12 จากการปรับค่าความกว้างส่วนต้นของไดโพลแบบโบว์ไทเพิ่มขึ้น ทำให้ความถี่ที่เรโซแนนซ์เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งความกว้างส่วนต้นของไดโพลแบบโบว์ไทที่เหมาะสมสำหรับความถี่ 10 GHz มีขนาดความกว้างเท่ากับ 0.9 มิลลิเมตรหรือ 0.03λ จึงเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับความกว้างส่วนต้นของไดโพลแบบโบว์ไทดังแสดงในรูปที่ 4.13 เพื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์อื่นในลำดับถัดไป



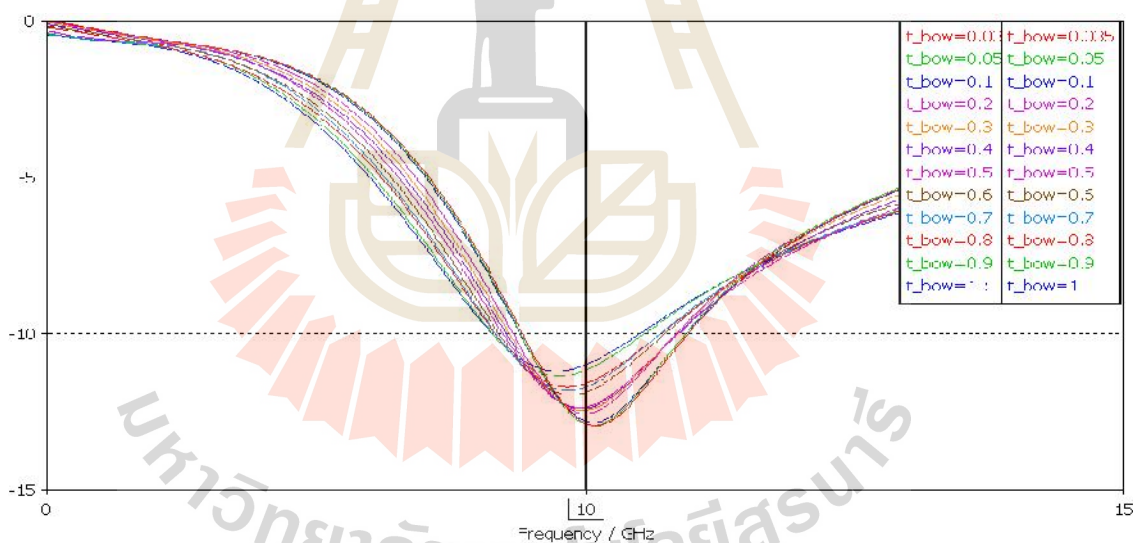
รูปที่ 4.12 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความกว้างส่วนต้นของไดโพลแบบโบว์ไท



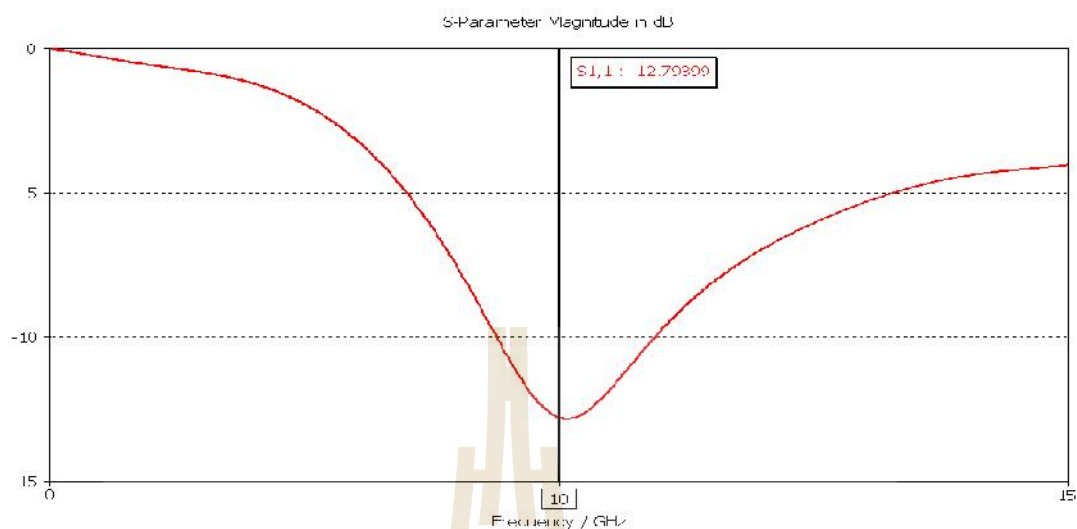
รูปที่ 4.13 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความกว้างส่วนต้นของไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 0.9 มิลลิเมตร

4.4.4) ความหนาของไดโพลแบบโบว์ไท (t_{bow})

จากผลการจำลองหาค่าที่เหมาะสมของความยาวไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 3.90 มิลลิเมตร ความกว้างส่วนปลายของไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 7.5 มิลลิเมตรและความกว้างส่วนต้นของไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 0.9 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาขนาดความหนาของไดโพลแบบโบว์ไท (t_{bow}) ความหนาจาก 0.035 มิลลิเมตร ถึง 1.0 มิลลิเมตร จากผลการจำลองค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับที่ครอบคลุมความถี่ 10 GHz ทุกค่า ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งความหนาเท่ากับ 0.035 มิลลิเมตรเป็นค่าความหนาที่มีค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นค่าที่ดีกับผิวเคลือบบนผิววัสดุฐานรองของแผ่นวงจรพิมพ์โดยทั่วไป จะมีความบางเกินไปไม่เหมาะต่อการนำมาขึ้นรูปเป็นไดโพลแบบโบว์ไท จึงได้เลือกค่าความหนาของแผ่นทองสำหรับทำเป็นไดโพลแบบโบว์ไทเป็น 0.1 มิลลิเมตร เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับความหนาของไดโพลแบบโบว์ไทเพื่อใช้ในการพิจารณาค่าพารามิเตอร์อื่นต่อไป ซึ่งได้แสดงผลการจำลองค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความหนาที่เหมาะสมไว้ดังรูปที่ 4.15



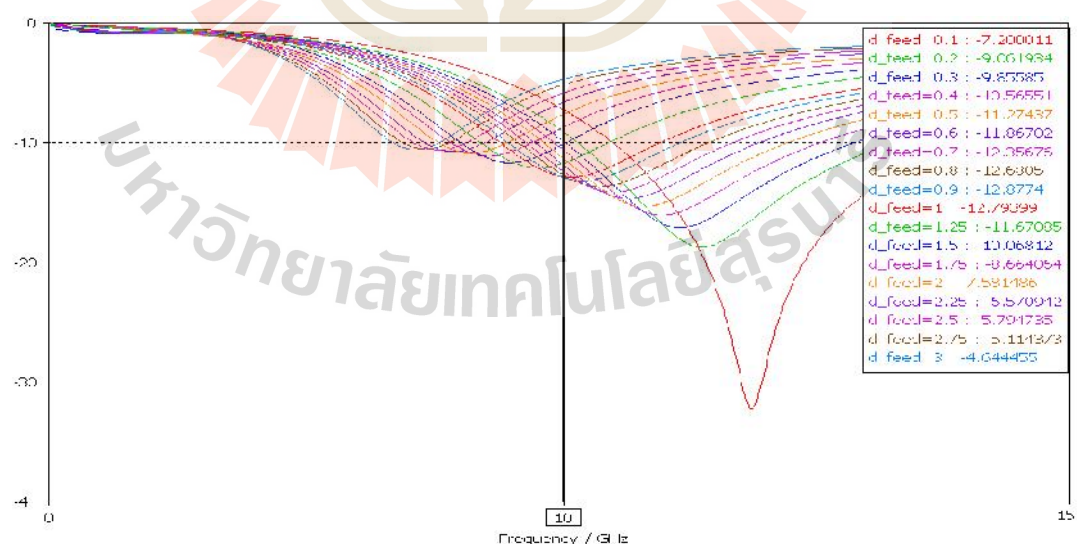
รูปที่ 4.14 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความหนาไดโพลแบบโบว์ไท



รูปที่ 4.15 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความหนาไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร

4.4.5) ระยะห่างระหว่างของไดโพลแบบโบว์ไท (d_{feed})

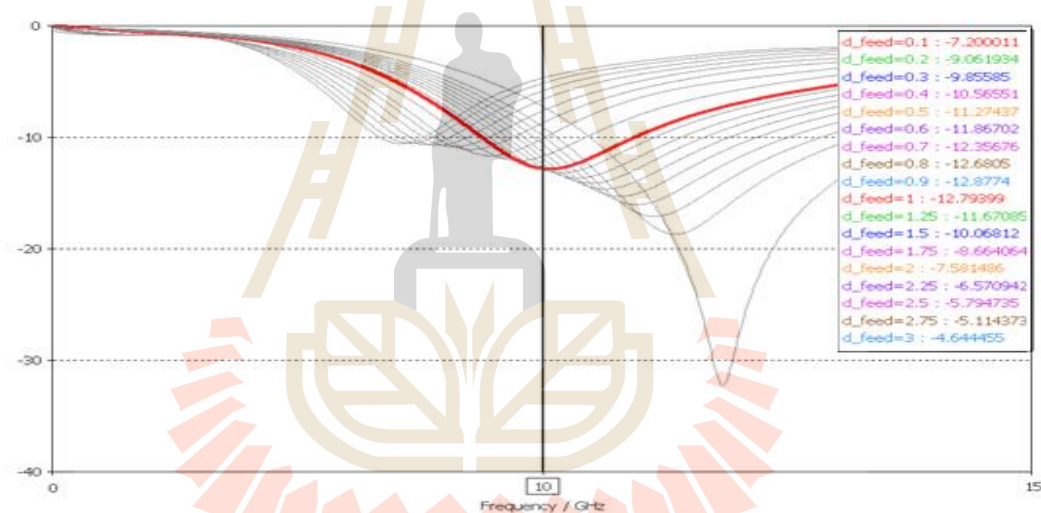
จากผลการจำลองหาค่าที่เหมาะสมของความยาวไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 3.9 มิลลิเมตร ความกว้างส่วนปลายของไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร ความกว้างส่วนต้นของไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 0.9 มิลลิเมตร และความหนาเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.16 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของระยะห่างระหว่างปีกไดโพลแบบโบว์ไท

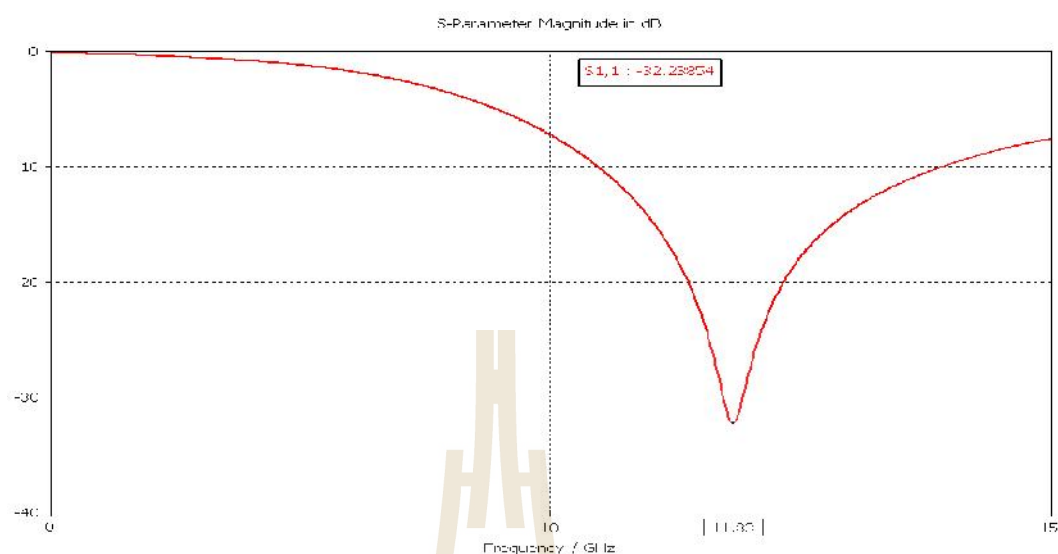
จากนั้นได้ทำการพิจารณาระยะห่างระหว่างปีกไดโพลแบบโบว์ไท (d_{feed}) โดยการจำลองจากค่า 0.1 ถึง 3.0 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าการเรโซแนนซ์ของความถี่จะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างปีกทั้ง 2 ข้างของไดโพลแบบโบว์ไทเพิ่มขึ้น และ เรโซแนนซ์ได้ดีที่สุด ณ ความถี่ 11.83 GHz ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดมาทั้งหมดข้างต้น ดังรูปที่ 4.16

เนื่องจากระยะห่างระหว่างปีกไดโพลแบบโบว์ไทเป็นพารามิเตอร์ตัวสุดท้ายของการพารามิเตอร์ทั้งหมดของไดโพลแบบโบว์ไท ซึ่งจากรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่า ระยะห่างระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทจะมีค่าเท่ากับ 1 มิลลิเมตรสามารถเรโซแนนซ์ความถี่ที่ 10 GHz ได้ค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับเท่ากับ -12.27399 dBi ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ก็ตาม แต่ไม่ใช้ความถี่ที่เรโซแนนซ์ได้ดีที่สุดของ ณ ตอนนี้อยู่ของระยะห่างระหว่างปีกไดโพลแบบโบว์ไท จากพารามิเตอร์ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น

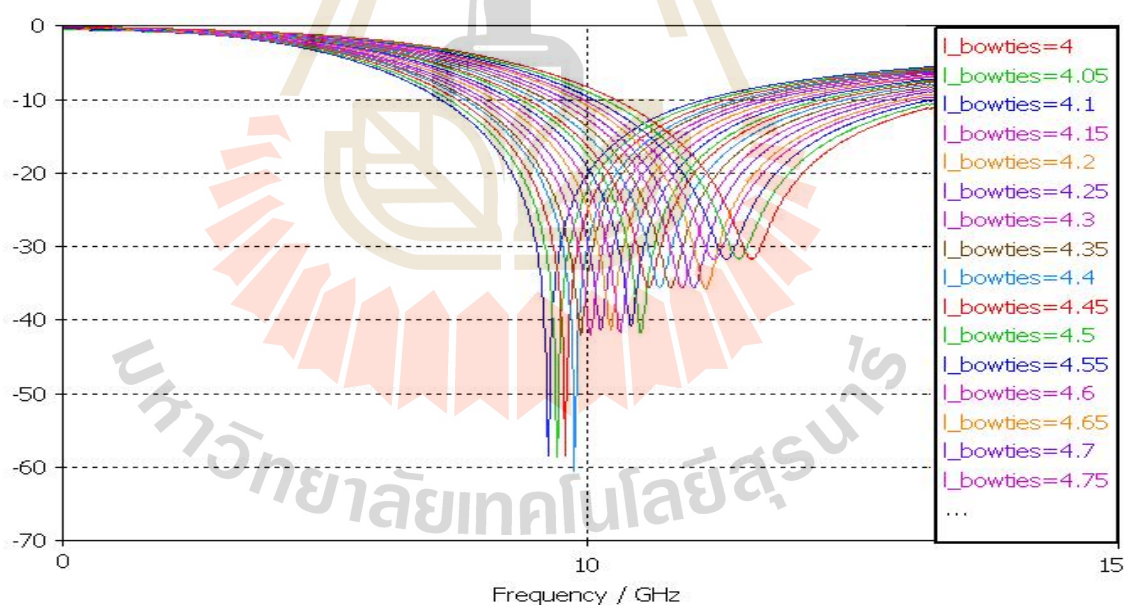


รูปที่ 4.17 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของระยะห่างระหว่างปีกไดโพลแบบโบว์ไท เท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร

ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ระยะห่างระหว่างปีกไดโพลแบบโบว์ไทเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับที่ดีที่สุดคือ -32.23854 dBi ณ ความถี่ 11.83 GHz เป็นระยะห่างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระยะห่างระหว่างปีกไดโพลแบบโบว์ไท ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของระยะห่างระหว่างปีกไดโพลแบบโบว์ไท่ เท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร

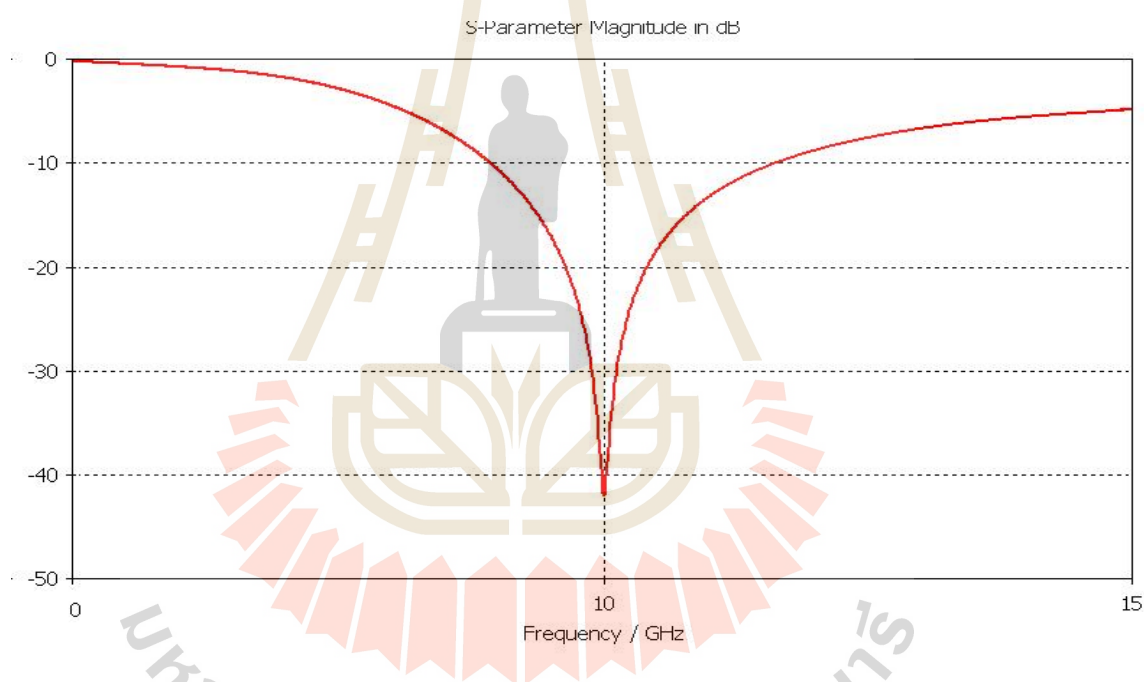


รูปที่ 4.19 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความยาวไดโพลแบบโบว์ไท่

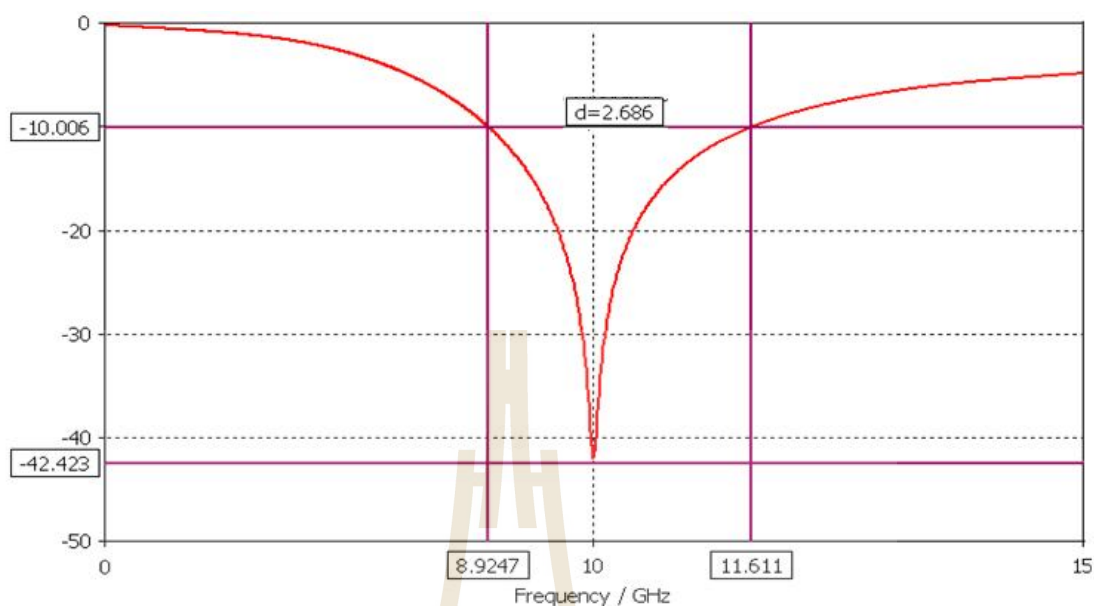
ซึ่งกระบวนการต่อจากนี้เป็นการย้อนกลับไปปรับพารามิเตอร์ ที่สามารถเปลี่ยนความถี่ได้ง่ายที่สุด นั่นคือ ความยาวของไดโพลแบบโบว์ไท่ จากเดิมที่ขนาดความยาวของโบว์ไท่ที่เลือกใช้เท่ากับ 3.75

มิลลิเมตร จึงได้ทำการปรับขนาดของความยาวของไดโพลแบบโบว์ไทเพิ่มขึ้นจาก 4 มิลลิเมตร ถึง 5 มิลลิเมตร เพื่อพิจารณาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความถี่ 10GHz ดังแสดงค่าผลการจำลองค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับในรูปที่ 4.19

เมื่อพิจารณาโดยละเอียด พบว่า ความยาวไดโพลแบบโบว์ไท เท่ากับ 4.75 – 4.8 มิลลิเมตร สามารถเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 10 GHz โดยขนาดความยาวไดโพลแบบโบว์ไทเป็น 4.7625 มิลลิเมตร ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ความถี่ที่ 10 GHz ได้ดีที่สุด มีค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับมีค่าเท่ากับ -41.96328 dBi และความกว้างแถบเท่ากับ 2.686 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ

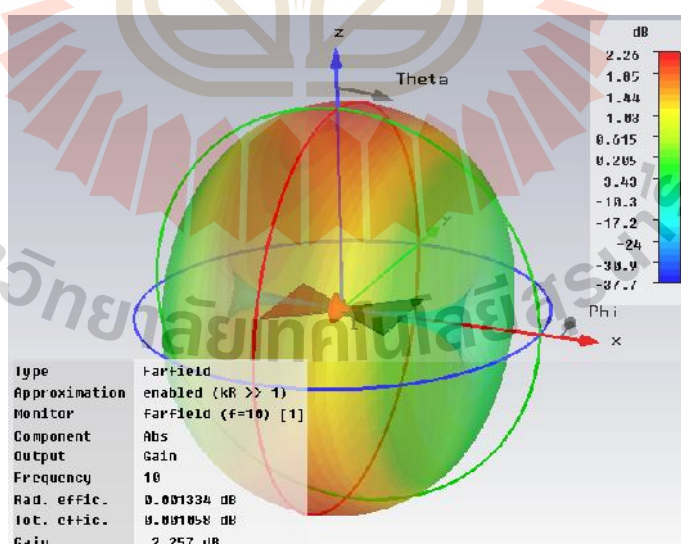


รูปที่ 4.20 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความยาวไดโพลแบบโบว์ไท เท่ากับ 4.7625 มิลลิเมตร

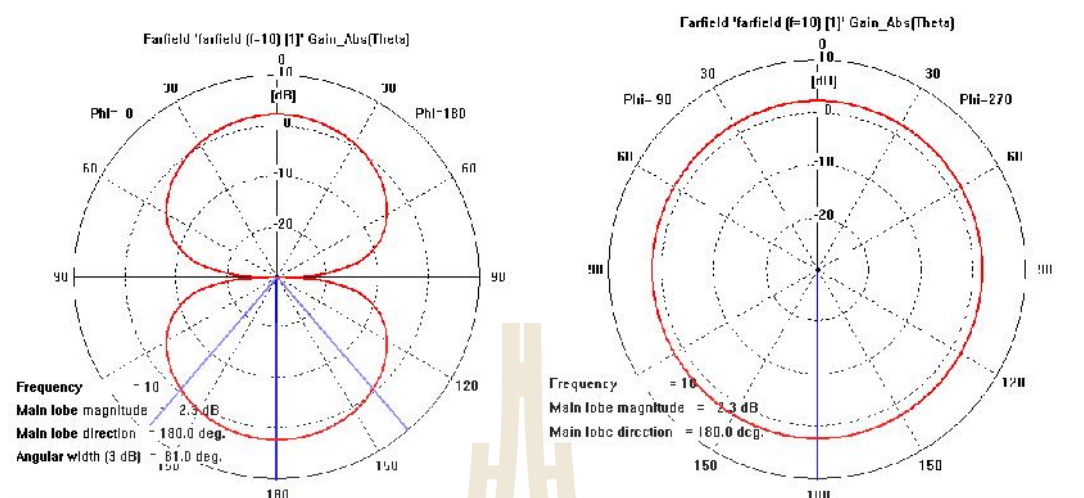


รูปที่ 4.21 แสดงความกว้างแถบของความยาวไดโพลแบบโบว์ไท

ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาอัตราขยายของไดโพลแบบโบว์ไท จะมีค่าเท่ากับ 2.257 dBi ดังรูปที่ รูปที่ 4.22 และได้แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของไดโพลแบบโบว์ไท ดังรูปที่ 4.23 ตามลำดับ



รูปที่ 4.22 แสดงค่าอัตราขยายของไดโพลแบบโบว์ไท



ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.23 แบบรูปการแผ่กำลังของไดโพลแบบโบว์ไท

ผลจากการจำลองจากขั้นตอนสุดท้ายจึงได้นำค่าพารามิเตอร์ของตัวกระตุ้นไดโพลแบบโบว์ไทที่ผ่านการจำลองแล้ว มาสรุปไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวกระตุ้นไดโพลแบบโบว์ไท

พารามิเตอร์	มิลลิเมตร
ความยาวของไดโพลแบบโบว์ไท (l_bowties)	4.7625
ความกว้างส่วนปลายของไดโพลแบบโบว์ไท (w_bowties)	7.5
ความกว้างส่วนต้นของไดโพลแบบโบว์ไท (w_bot)	0.9
ความหนาของไดโพลแบบโบว์ไท (t_bow)	0.1
ระยะห่างระหว่างปีกไดโพลแบบโบว์ไท (d_feed)	0.1

4.5 พิจารณาผลการจำลองตัวกระตุ้นกำลังงานด้วยตัวกระตุ้นไดโพลแบบโบว์ไท (Bowtie Dipole) ร่วมกับ EBG

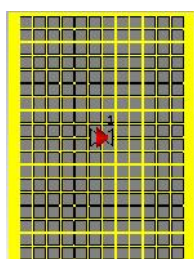
4.5.1) จำลอง EBG ร่วมกับ ตัวกระตุ้น ไดโพลแบบโบว์ไท ร่วมกับ EBG

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของ EBG

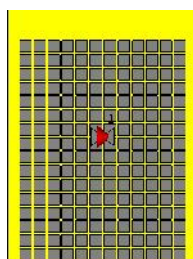
ขนาด EBG (กว้าง X ยาว) : P_EBG	$0.12\lambda \times 0.12\lambda$
รัศมีตัวเชื่อม EBG : r_viaEBG	0.005λ
ระยะห่างระหว่างเซลล์ EBG: g_EBG	0.02λ

กำหนดค่าเริ่มต้นจากบทที่ 4 เรื่องการออกแบบโครงสร้าง EBG ที่เหมาะสม [Fan Yang and Yahya Rahmat-Samii : 2009] ดังแสดงในตาราง 4.3 และได้ทำการจำลองโดยเลือกใช้วัสดุฐานรองเป็น FR4 ซึ่งมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเท่ากับ 4.4 โดยที่ขนาดความกว้างและความยาวแผ่นวัสดุฐานเท่ากับ 81 มิลลิเมตร และ 110 มิลลิเมตร ตามลำดับ

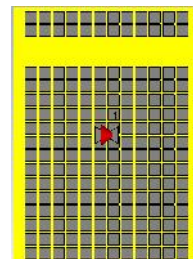
จากค่าเริ่มต้นในตารางที่ 4.3 ได้ทำการจำลองผล ณ ความถี่ 10 GHz ในช่วงความถี่ X-band สามารถหาค่าที่เหมาะสม ได้ดังนี้ ขนาดความกว้างของ EBG (P_EBG) มีค่าเท่ากับ 5 มิลลิเมตร รัศมีตัวเชื่อม (r_viaEBG) มีค่าเท่ากับ 0.45 มิลลิเมตร ช่องว่างระหว่างเซลล์ (g_EBG) มีค่าเท่ากับ 1 มิลลิเมตร โดยได้ทำการจำลองตัวกระตุ้นแบบโบว์ไทร่วมกับ EBG ด้วยระยะระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทกับ EBG (h_BT_EBG) เท่ากับ $3\lambda/2$ ได้จำลองเติมพื้นที่ระนาบกราวด์และทำการลดจำนวน EBG หรือ ตัดออกทีละ 2×12 เซลล์ ตามแนวการวางตัวของโบว์ไทบนระนาบกราวด์ พบว่า แบบรูปการแผ่กำลังมีความแตกต่างกันไป อันเนื่องมาจากช่องว่างที่ถูกตัดออก ซึ่งจะเกิดลักษณะการสมมาตรของแบบรูปการแผ่กำลัง จากการตัดบริเวณกึ่งกลางของพื้นที่ EBG ออกไปตามแนวโบว์ไท ในรูปที่ 4.24 และพบว่า อัตราขยายของตัวกระตุ้นแบบโบว์ไทเพิ่มขึ้นจาก 2.257 dBi เป็น 8.616 dBi ถึง 10.58 dBi ซึ่งตำแหน่งสูงสุดของอัตราขยายไม่ได้อยู่บริเวณกึ่งกลางระนาบ โดยที่แบบรูปการแผ่กำลังจะสูงขึ้นตามตำแหน่งการวางตัวของ EBG และจะสามารถแบ่งลำคลื่นเป็น 2 พู โดยที่แบบรูปการแผ่กำลังจะสมมาตรกันเมื่อ EBG ถูกตัดบริเวณกึ่งกลางของทำให้ EBG ที่เหลือจะมีจำนวนที่เท่า ๆ กันทั้ง 2 ข้าง ซึ่งลักษณะการวาง EBG ในลักษณะดังกล่าวจะทำให้แบบรูปการแผ่กำลังเกิดขึ้นในลักษณะที่สมมาตรทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ซึ่ง ได้แสดงลักษณะการวางตำแหน่งของ EBG ดังรูปที่ 4.24 (ก-6) และแบบรูปการแผ่กำลังดังรูปที่ 4.24 (ข-6)



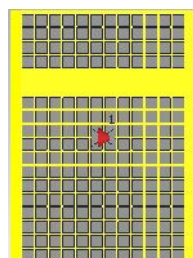
(ก-1)



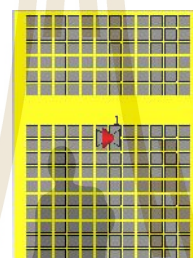
(ก-2)



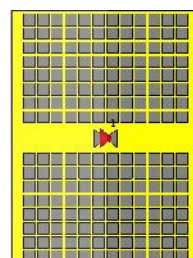
(ก-3)



(ก-4)

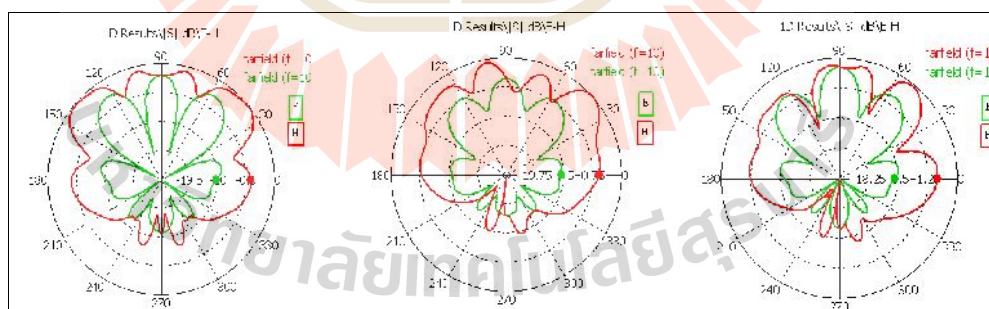


(ก-5)



(ก-6)

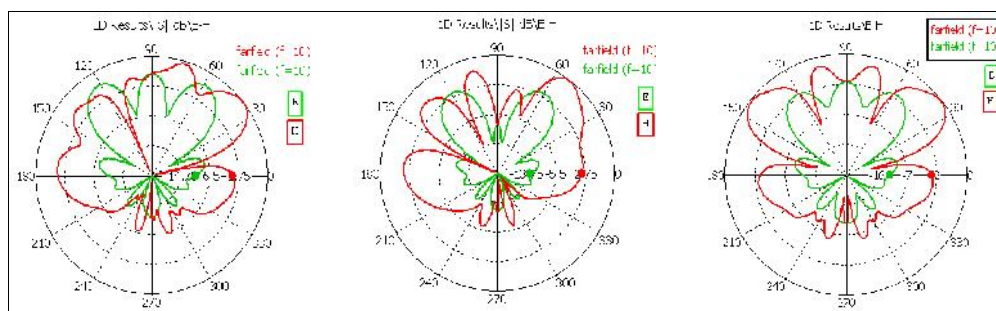
รูปที่ 4.24 (ก) ลักษณะการตัดจำนวน EBG บนระนาบกราวด์



(ข-1)

(ข-2)

(ข-3)

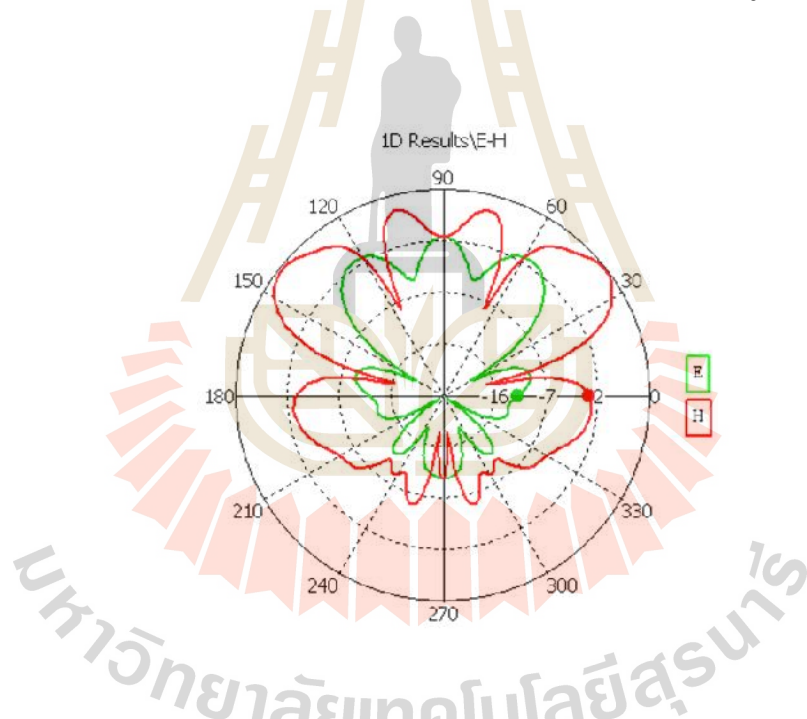


(ข-4)

(ข-5)

(ข-6)

(ข) แบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก
รูปที่ 4.24 (ข) ลักษณะการตัดจำนวน EBG ตามแนวโบริโทและแบบรูปการแผ่กำลัง

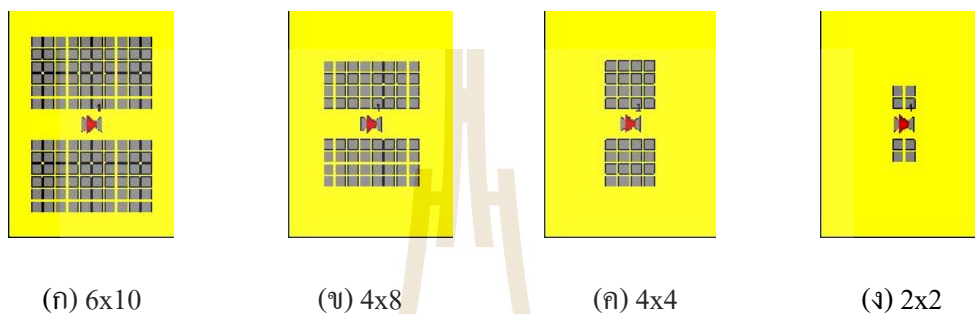


รูปที่ 4.25 แบบรูปการแผ่กำลังในลักษณะสมมาตร

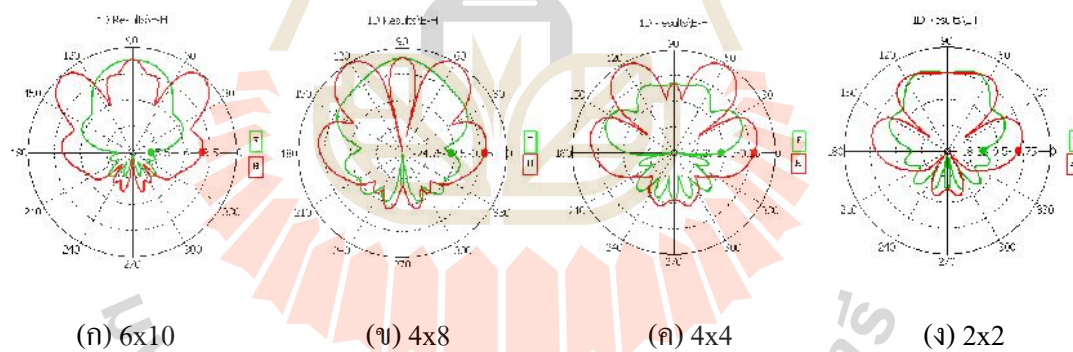
ซึ่งผู้วิจัยให้ความสนใจแบบรูปการแผ่กำลังของตัวกระตุ้นแบบโบริโท ร่วมกับ EBG บนระนาบกราวด์ในลักษณะแบบสมมาตรดังกล่าว เพื่อเป็นแนวทางในการจำลองหาความเป็นระนาบในทิศทางด้านหน้าของแบบรูปการแผ่กำลังที่เหมาะสมที่สุดต่อไป ดังรูปที่ 4.25

ต่อจากนั้น ผู้วิจัยได้ทำการลดจำนวน EBG ลง เป็น 6×10 , 4×8 , 4×4 และ 2×2 เซลล์ ด้วยระยะห่างระหว่างหน่วยเซลล์ เท่ากับ $\lambda/2$ (15 เซนติเมตร) พบว่าผลการจำลอง

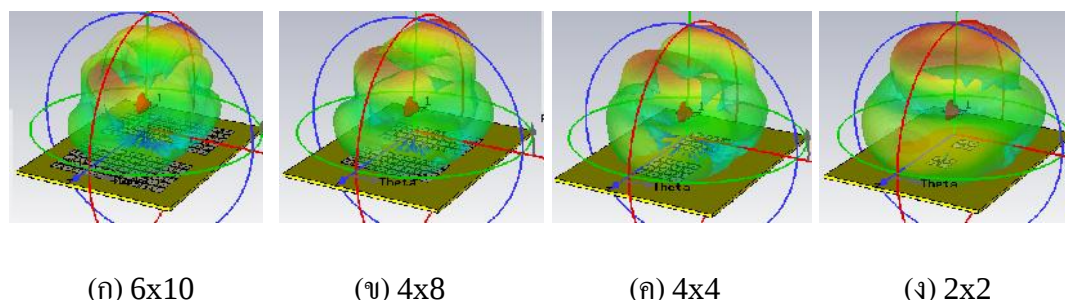
อัตราขยายมีค่าเท่ากับ 12.29 dBi, 11.51dBi, 11.14 dBi และ 7.674 dBi ตามลำดับ จากการลดจำนวน EBG ให้น้อยลง จะเห็นได้ว่า อัตราขยายจะลดลงตามจำนวน EBG พบว่าแบบรูปการแผ่กำลังมีความเป็นระนาบในทิศทางด้านหน้ามากยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.26 การลดจำนวน EBG เป็น 6 x 10 , 4 x 8 , 4 x 4 และ 2x2 เซลล์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.27 แบบรูปการแผ่กำลังการลดจำนวน EBG เป็น 6 x 10 , 4 x 8 , 4 x 4 และ 2x2 เซลล์ตามลำดับ



รูปที่ 4.28 รูปการแผ่กำลังในลักษณะ 3 มิติ จากการลดจำนวน EBG เป็น 6 x 10 , 4 x 8 , 4 x 4 และ 2x2 เซลล์ ตามลำดับ

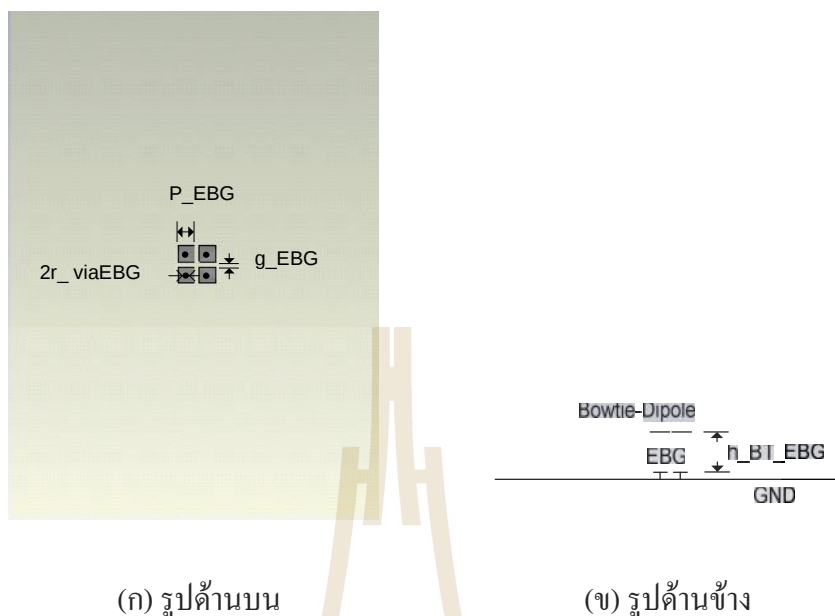
จะเห็นได้ว่า ผลการลดจำนวน EBG จากเต็มพื้นที่ระนาบกราวด์ เหลือจำนวน 2 x 2 เซลล์ ต่อ 1 หน่วยเซลล์ ด้วยระยะห่างระหว่างหน่วยเซลล์ มีค่าเท่ากับ 15 มิลลิเมตร ($\lambda/2$) ทำให้แบบแผนรูปการแผ่กำลังที่ส่งออกไปในทิศทางด้านหน้ามีความเป็นระนาบมากที่สุด และมีค่าอัตราขยายเท่ากับ 7.476 dBi

ลำดับถัดไป จะเป็นการพิจารณาระยะห่างระหว่างหน่วยเซลล์ของ EBG ความสูงที่เหมาะสม โดยรายละเอียดของ เพื่หาระยะห่างระหว่างหน่วยเซลล์ที่ให้อัตราขยายของตัวกระตุ้นมากที่สุดและยังคงความเป็นระนาบของแบบรูปการแผ่กำลังในทิศทางด้านหน้ามากที่สุด

4.5.2) จำลอง EBG 1 หน่วยเซลล์วางตำแหน่งกึ่งกลางของระนาบกราวด์

โดยกำหนดให้ จำนวน EBG 1 หน่วย เท่ากับ 4 เซลล์ ซึ่งแต่ละเซลล์ จะมีขนาดความกว้างและความยาวแทนด้วยตัวแปร P_EBG รัศมีตัวเชื่อมแทนด้วยตัวแปร r_viaEBG และระยะห่างระหว่างเซลล์แทนด้วยตัวแปร g_EBG ตามลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 4.29 โดยได้กำหนดค่าเริ่มต้นจากบทที่ 4 เรื่องการออกแบบโครงสร้าง EBG ที่เหมาะสม (Fan Yang และ Yahya Rahmat-Samii, 2009) ได้ทำการจำลองโดยเลือกใช้วัสดุฐานรองเป็น FR4 แทน Teflon หรือ Duroid ซึ่งมีราคาก่อนข้างสูง ทำให้สามารถลดต้นทุนของราคาวัสดุจากเดิมและสามารถหาซื้อได้ง่ายกว่า ซึ่งมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเท่ากับ 4.4 โดยที่ขนาดความกว้างและความยาวแผ่นวัสดุฐานรองจะเท่ากับ 81 มิลลิเมตร และ 110 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นขนาดเดียวกับวัสดุฐานรองของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์จำนวน 2 X 4 อิลลิเมนต์ จากหัวข้อที่ 4.2 ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

โดยเริ่มต้นการจำลอง จากพิจารณาค่าความสูงระหว่าง EBG บนระนาบกราวด์กับตัวกระตุ้นสัญญาณไดโพลแบบโบว์ไท



รูปที่ 4.29 ตัวป้อนสัญญาณไดโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG 1 หน่วยเซลล์

ผลการจำลองค่าความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไท่กับ EBG จาก 7.5 มิลลิเมตร ($\lambda/4$) ถึง 15 มิลลิเมตร ($\lambda/2$) เพื่อพิจารณาความสูงที่เหมาะสมสำหรับการเรโซแนนซ์ ณ ความถี่ 10 GHz พบว่า ความสูงที่ให้ค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ ณ ความถี่ 10 GHz ต่ำที่สุด มีค่าความสูงเท่ากับ 9.0 มิลลิเมตร จึงได้ทำการเลือกค่าความสูงเท่ากับ 9.0 มิลลิเมตร เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับพิจารณาคูณสมบัติของพารามิเตอร์ EBG

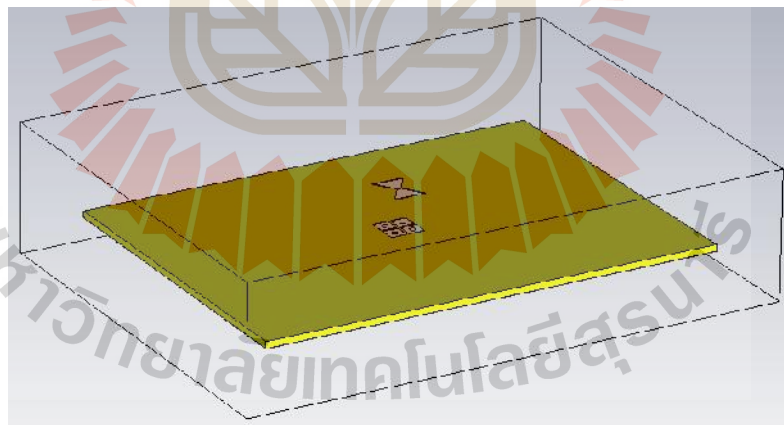
การพิจารณาขนาดความกว้างและความยาวของ EBG (P_{EBG}) จาก 3 มิลลิเมตร ถึง 5 มิลลิเมตร พบว่าขนาดของ EBG ที่ 3.75 มิลลิเมตร 4.0 มิลลิเมตร และ 4.25 มิลลิเมตร เป็นค่าที่เหมาะสมเนื่องจากค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับต่ำกว่า -10 dBi ที่ชัดเจนที่สุด ซึ่งสามารถเลือกนำมาพิจารณาเป็นค่า P_{EBG} ได้ทั้ง 3 ค่า ซึ่งในที่นี้ได้เลือกขนาดของ EBG เท่ากับ 3.75 มิลลิเมตร เพื่อใช้พิจารณาพารามิเตอร์อื่นต่อไป

ต่อมาขนาดความกว้างและความยาวของ EBG ที่นำมาพิจารณาความถี่เรโซแนนซ์ของ รัศมีตัวเชื่อม (r_{viaEBG}) ซึ่งโดยจำลองขนาดรัศมี จาก 0.1 - 1.0 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อรัศมีของตัวเชื่อมมีขนาดใหญ่ขึ้น ผลของการเรโซแนนซ์ของความถี่จะยิ่งน้อยลง ซึ่งขนาดรัศมีเท่ากับ 0.7 มิลลิเมตร สามารถเรโซแนนซ์ ณ ความถี่ 10 GHz ได้ดีที่สุด ซึ่งได้เลือกใช้เป็นรัศมีเพื่อใช้พิจารณาพารามิเตอร์อื่นต่อไป

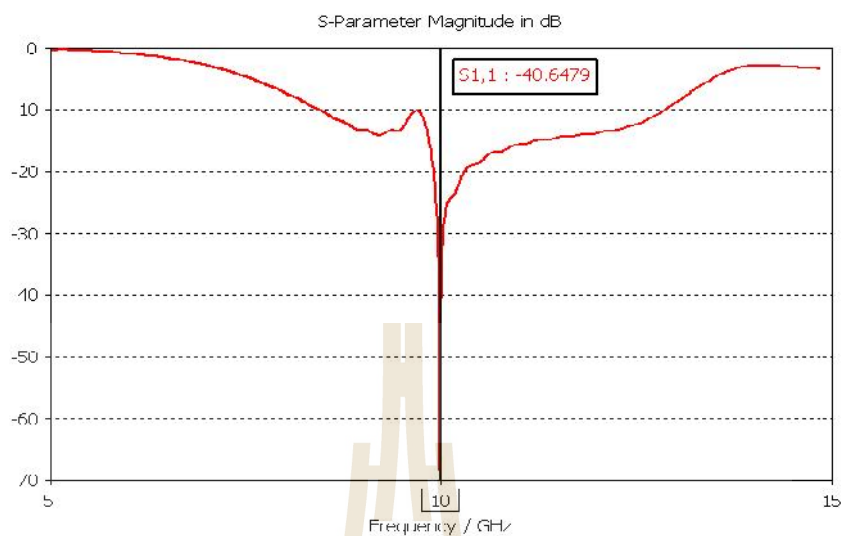
ต่อจากนั้น พิจารณาความกว้างของช่องว่างระหว่างเซลล์ของ EBG (g_{EBG}) ตั้งแต่ 0.1 - 1.0 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่า ความกว้างของช่องว่างที่เลือกมาจำลองผลตลอดช่วงที่ได้กล่าวมา สามารถเรโซแนนซ์ความถี่ที่ 10 GHz ได้ทุกค่า ซึ่งระยะห่างของช่องว่างที่เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณที่ความถี่ 10 GHz ได้น้อยที่สุด คือ 0.6 มิลลิเมตร ดังนั้น พิจารณาเลือกค่าช่องว่างระหว่างเซลล์เท่ากับ 0.6 มิลลิเมตร เป็นค่าที่เหมาะสมของ g_{EBG}

ดังนั้นสามารถสรุป การพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทุกตัวของ EBG 1 หน่วย (2x2 เซลล์) โดยการวางตัวบริเวณกึ่งกลางของแผ่นวงจรพิมพ์ร่วมกับไดโพลแบบโบว์ไท สำหรับความถี่ 10 GHz ได้ดังนี้ ขนาดความกว้างของ EBG (P_{EBG}) มีค่าเท่ากับ 3.75 มิลลิเมตร ความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทกับ EBG ($h_{\text{BT_EBG}}$) มีค่าเท่ากับ 9.0 มิลลิเมตร รัศมีตัวเชื่อม (r_{viaEBG}) มีค่าเท่ากับ 0.735 มิลลิเมตร ช่องว่างระหว่างเซลล์ (g_{EBG}) มีค่าเท่ากับ 0.6 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงลักษณะโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4.30

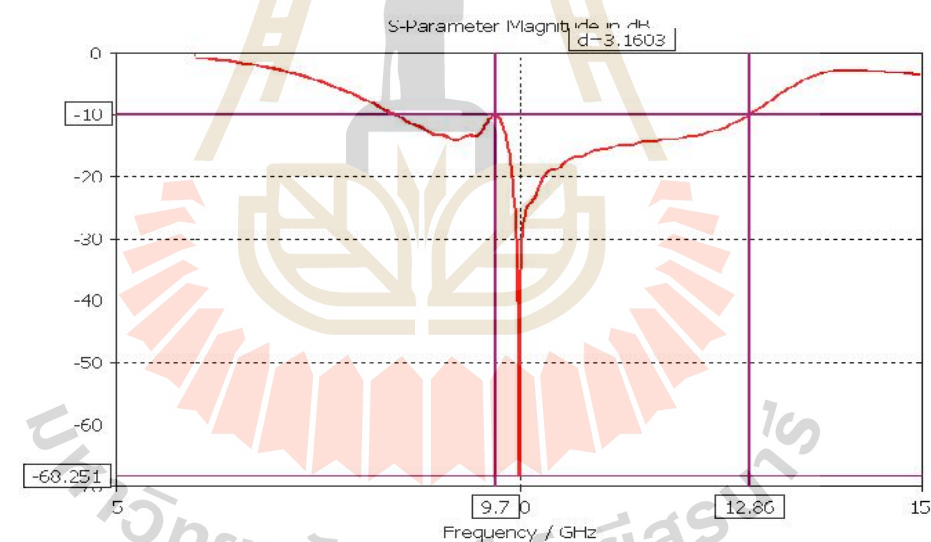
ซึ่งผลการจำลองโครงสร้างด้วยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว พบว่า ค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ ณ ความถี่ 10 GHz มีค่าเท่ากับ -40.6479 dBi และมีความกว้างแถบเท่ากับ 3.1603 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.31 และ 4.32 ตามลำดับ จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ความกว้างแถบที่เกิดขึ้นจากไดโพลแบบโบว์ไทร่วมกับ EBG 1 หน่วย ค่อนข้างกว้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.30 โครงสร้างตัวป้อนไดโพลแบบโบว์ไทร่วมกับ EBG 1 หน่วย

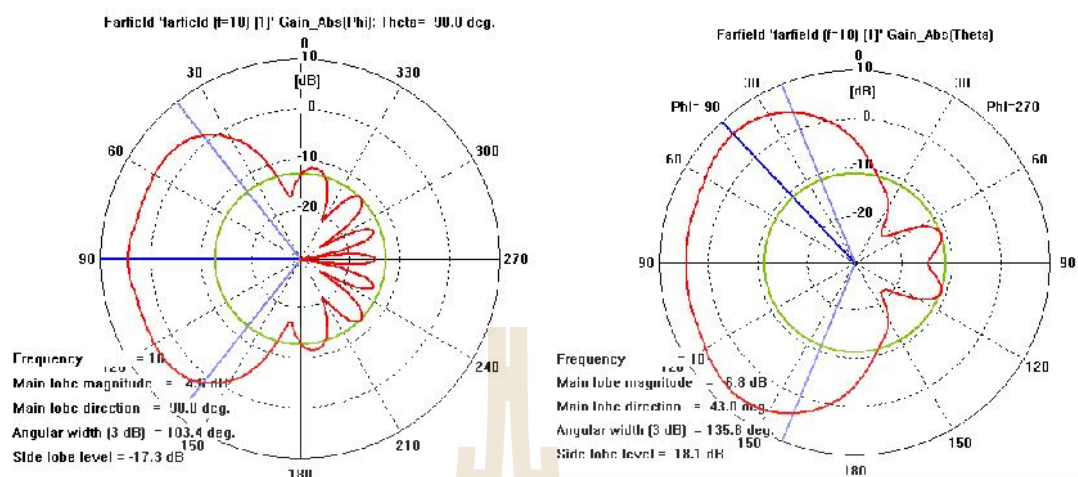


รูปที่ 4.31 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของตัวป้อนไดโพลแบบโบว์ไทร่วมกับ EBG 1 หน่วย



รูปที่ 4.32 แสดงค่าความกว้างแถบของตัวป้อนไดโพลแบบโบว์ไทร่วมกับ EBG 1 หน่วย

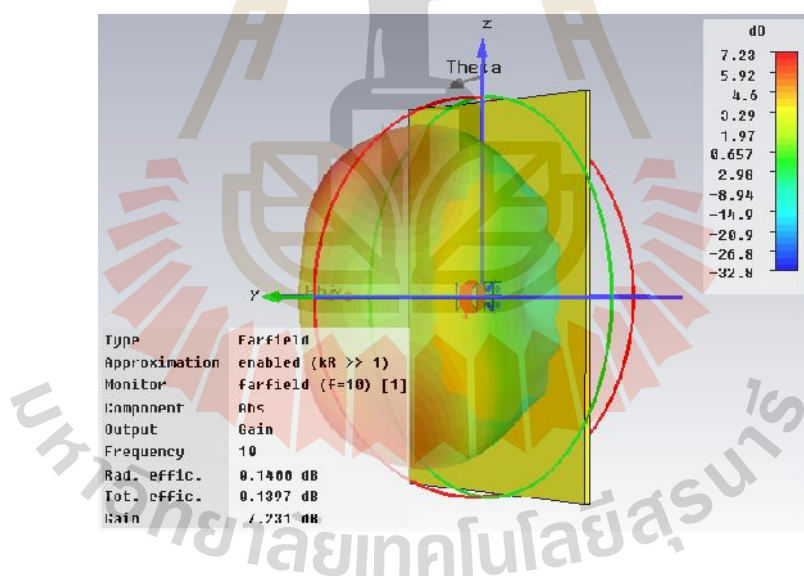
ซึ่งพบว่าแบบรูปการแผ่กำลังของตัวป้อนไดโพลแบบโบว์ไทร่วมกับ EBG 1 หน่วย โดยที่มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีทิศทางการแผ่กำลังในด้านหน้า เท่ากับ 103.4 องศา และ 135.8 องศา ตามลำดับ และค่าอัตราขยาย เท่ากับ 7.231 dBi ดังแสดงในรูปที่ 4.33 และ 4.34 ตามลำดับ



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า

(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.33 แบบรูปการแผ่กำลังตัวกระตุ้นกำลังโคโพลแบบโบว์ไทร่วมกับ EBG 1 หน่วย



รูปที่ 4.34 อัตราขยายของตัวป้อนโคโพลแบบโบว์ไทร่วมกับ EBG 1 หน่วย

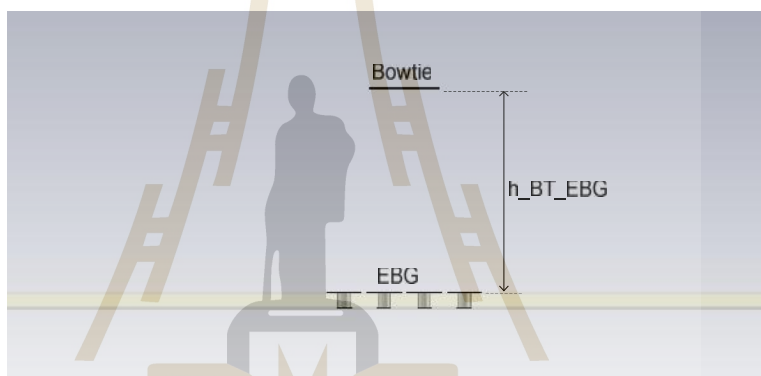
จะเห็นได้ว่าลักษณะแบบรูปการแผ่กำลังของตัวกระตุ้นกำลังโคโพลแบบโบว์ไทร่วมกับ EBG 1 หน่วย มีลักษณะไม่เป็นระนาบในทิศทางด้านหน้า

สำหรับขั้นตอนต่อไป ทำการเพิ่มหน่วยเซลล์ของ EBG เพื่อพิจารณาความเป็นระนาบของแบบรูปการแผ่กำลัง ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

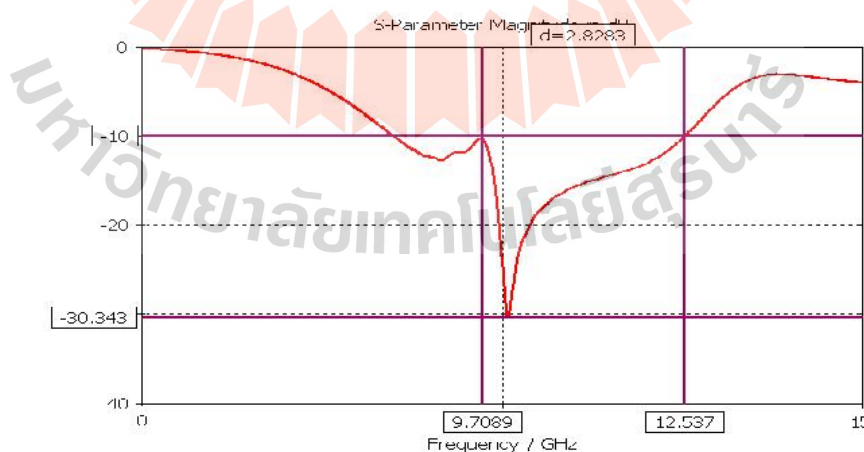
4.5.3) จำลอง EBG 2 หน่วยเซลล์วางตำแหน่งกึ่งกลางของระนาบกราวด์

ก) พิจารณาความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทท์กับ EBG ที่เหมาะสม

ได้ทำการจำลอง EBG จำนวน 2 หน่วยเซลล์ซึ่งแต่ละหน่วยเซลล์มีขนาดพารามิเตอร์ ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยกำหนดให้ ช่องว่างระหว่างหน่วยเซลล์ (g_{unit}) มีขนาดเท่ากับ ช่องว่างระหว่างเซลล์ (g_{EBG}) คือ 0.6 มิลลิเมตร โดยพิจารณาความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทท์กับ EBG (h_{BT_EBG}) แสดงดังรูปที่ 4.35

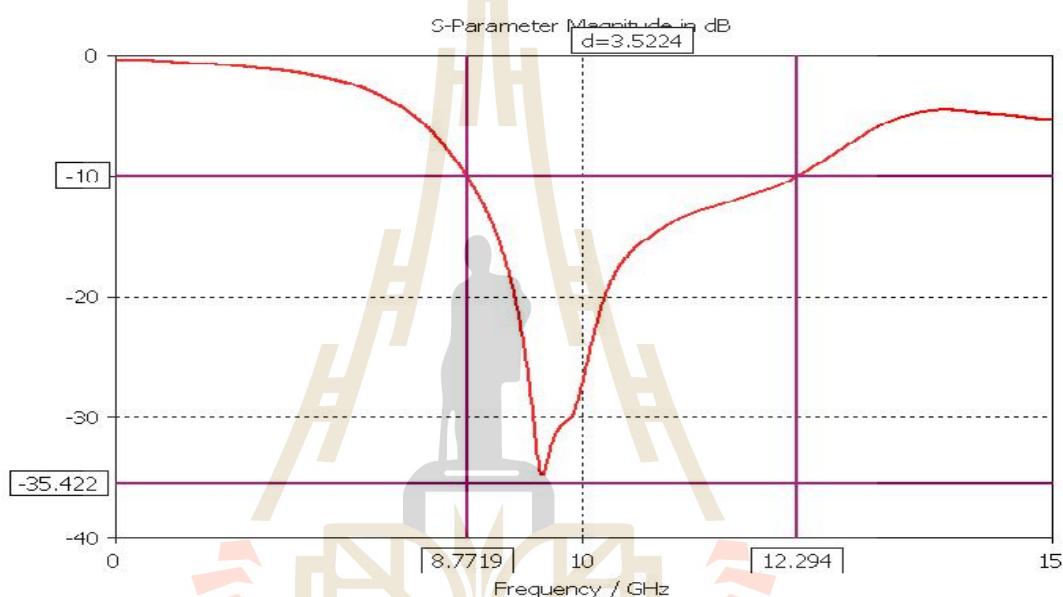


รูปที่ 4.35 ความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทท์กับ EBG



รูปที่ 4.36 ความกว้างแถบตัวป้อน เมื่อความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทท์กับ EBG เท่ากับ 9 มิลลิเมตร (0.3λ)

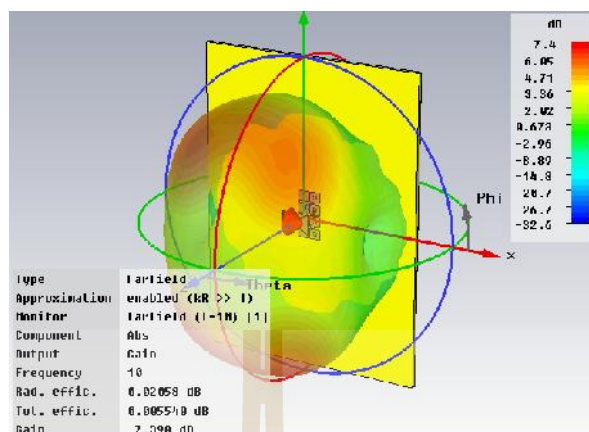
จากผลการจำลองการเรโซแนนซ์ของตัวป้อน ร่วมกับ EBG จำนวน 2 หน่วย ที่ความสูงเท่ากับ $9 (0.3\lambda)$ มิลลิเมตร พบว่าการเรโซแนนซ์ของความกว้างแถบไม่ได้ครอบคลุมความถี่กลางของการออกแบบเท่าที่ควร ถึงแม้ว่าค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของกำลังงาน ณ ความถี่ 10 GHz จะมีค่าต่ำสุดก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 4.36 จึงได้พิจารณาความถี่อื่น โดยการคงค่าพารามิเตอร์ทุกตัวของไดโพลแบบโบว์ไท และ EBG เพื่อหาระยะความสูงที่เหมาะสมของการเรโซแนนซ์เพื่อครอบคลุมความถี่กลางมากที่สุด



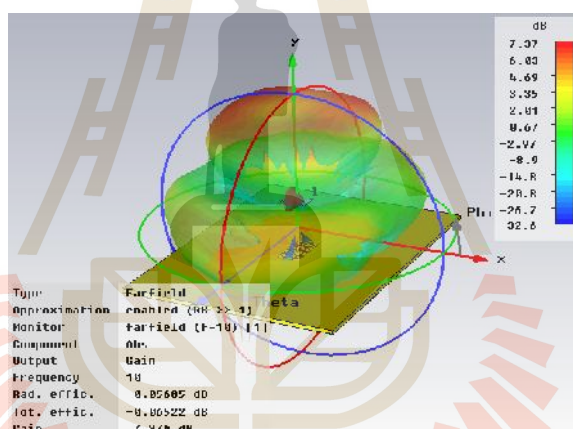
รูปที่ 4.37 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของความสูงระหว่างไดโพลแบบ โบว์ไทกับ EBG เท่ากับ 0.75λ

จากการปรับระยะความสูงของไดโพลแบบโบว์ไทเป็น $3\lambda/4$ หรือ 0.75λ ซึ่งเท่ากับ 22.5 มิลลิเมตร ทำให้การเรโซแนนซ์สัญญาณของตัวป้อน ณ ความถี่ 10 GHz ครอบคลุมความถี่กลางที่ออกแบบมากขึ้น ดังรูปที่ 4.37 และพบว่า ความสูงระหว่าง EBG กับไดโพลแบบโบว์ไท เท่ากับ 0.75λ ทำให้ความกว้างแถบของตัวป้อนมีค่ามากขึ้นจาก 2.8283 GHz เป็น 3.5224 GHz ซึ่งมีความถี่เรโซแนนซ์ที่ครอบคลุมความถี่กลางของการจำลองมากขึ้น

เมื่อพิจารณาอัตราขยาย จะมีค่าเท่า 7.374 dBi ถึงแม้จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความสูง 0.75λ ซึ่งมีอัตราขยายเท่ากับ 7.398 dBi แต่มีแบบรูปการแผ่กำลังหรือทิศทางของลำคลื่นบริเวณด้านหน้ามากขึ้น กล่าวคือความสูงที่ 0.75λ ให้ลักษณะของโหนดด้านหน้าที่เหมาะสมกว่าความสูงเท่ากับ 0.3λ ดังแสดงในรูปที่ 4.38 และ 4.39



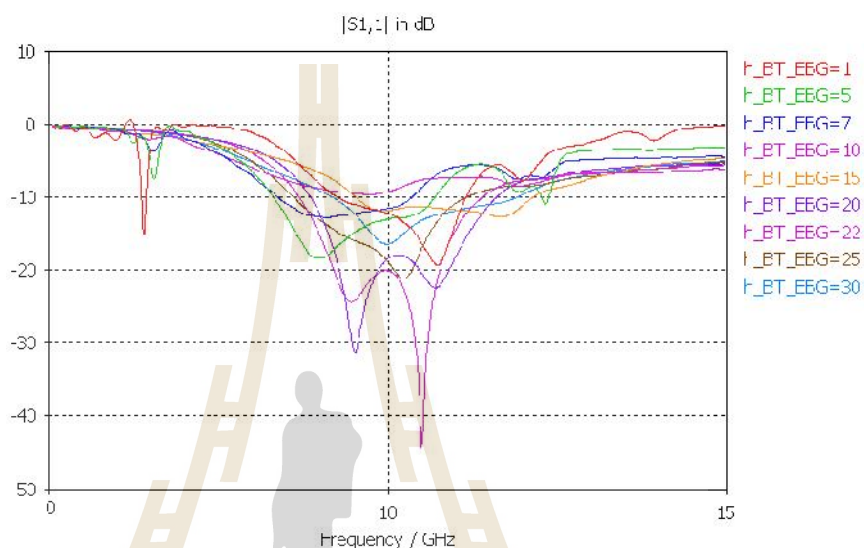
รูปที่ 4.38 แสดงอัตราขยายเมื่อความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไท่กับ EBG เท่ากับ 0.3λ



รูปที่ 4.39 แสดงอัตราขยายเมื่อความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไท่กับ EBG เท่ากับ 0.75λ

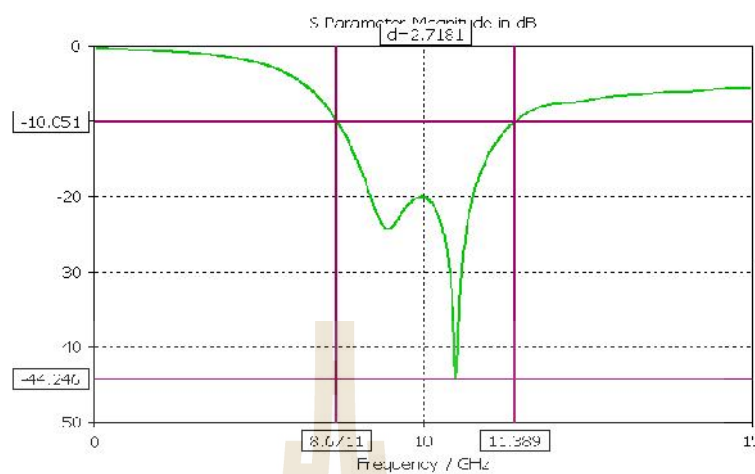
จากผลพิจารณาค่าความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไท่กับ EBG ที่เหมาะสม ซึ่งสามารถ
เรโซแนนซ์ความถี่ตามที่ต้องการและค่าคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพการสะท้อน ความ
กว้างแถบ อัตราขยาย และลักษณะแบบรูปการแผ่กำลัง ทำให้ค่าความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์
ไท่กับ EBG เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญและต้องพิจารณาให้มากขึ้น โดยได้พิจารณาในละเอียด
อีกครั้งหนึ่ง จึงได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของ EBG ใหม่ทั้งหมดเพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่
ครอบคลุมความถี่กลางของการออกแบบมากที่สุด และยังคงรักษาค่าอัตราขยายให้มีค่าที่ใกล้เคียง
กับค่าเดิมที่สุดด้วยเช่นกัน โดยใช้การตัดสินใจจากผลการจำลองพารามิเตอร์ของ EBG แต่ละตัว ใน

หัวข้อที่กล่าวมาข้างต้น จึงสามารถสรุปพารามิเตอร์ของ EBG ดังต่อไปนี้ P_{EBG} มีค่าเท่ากับ 5 มิลลิเมตร r_{viaEBG} มีค่าเท่ากับ 0.45 มิลลิเมตร และ g_{EBG} มีค่าเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ซึ่งผลการจำลองความสูงของไดโพลแบบโบว์ไทท์กับ EBG ณ ความถี่ 10 GHz ที่ระยะ 0.033λ ถึง 1λ (1 ถึง 30 มิลลิเมตร) ค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 4.40

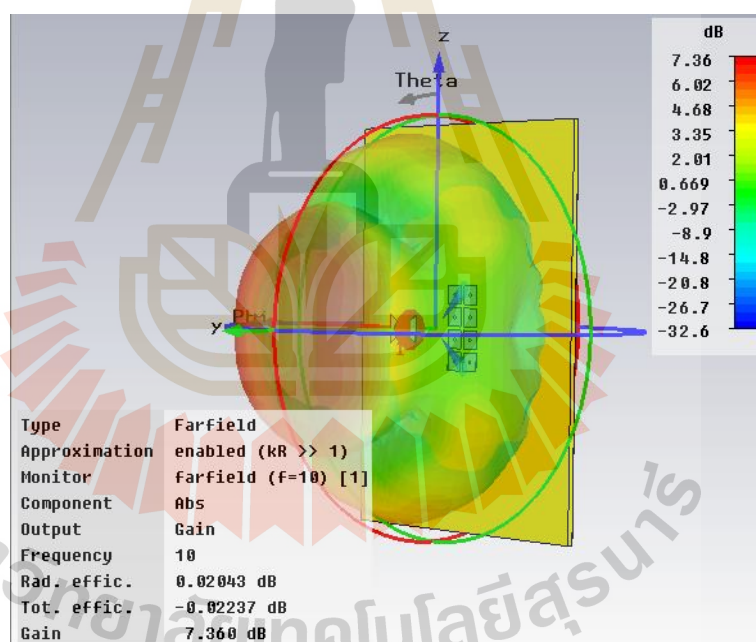


รูปที่ 4.40 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของไดโพลแบบโบว์ไทท์กับ EBG

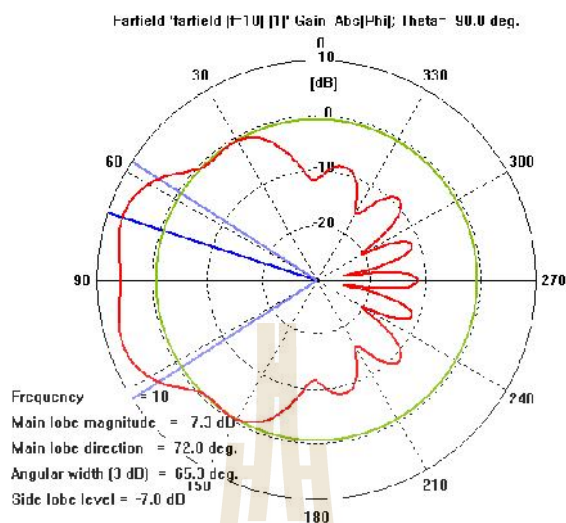
ซึ่งจากผลการจำลองระยะความสูงเท่ากับ 22 มิลลิเมตรสามารถเรโซแนนซ์ครอบคลุมช่วงความถี่ 8.6711 GHz ถึง 11.389 GHz ได้ดีที่สุด ทั้งค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับและความกว้างแถบ มีค่าเท่ากับ 2.7181 GHz และ -20.31229 dBi ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.41 ซึ่งให้ค่าอัตราขยายเท่ากับ 7.360 dBi ดังแสดงในรูปที่ 4.42 และแบบรูปการแผ่กำลังได้แสดงดังรูปที่ 4.43



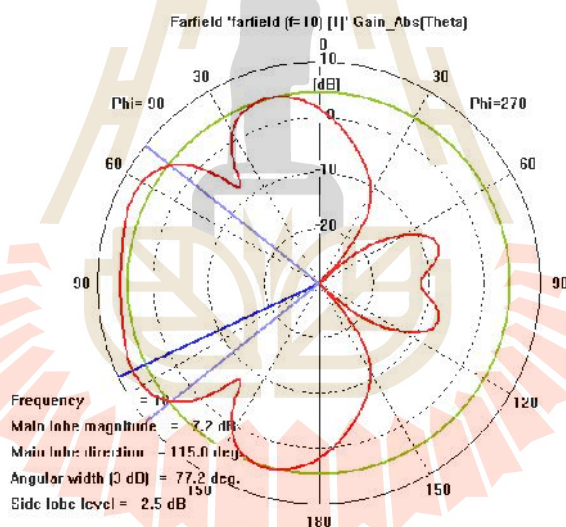
รูปที่ 4.41 แสดงความกว้างแถบของไดโพลแบบโบว์ไท่กับ EBG ที่ความสูงเท่ากับ 22 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.42 อัตราขยายของไดโพลแบบโบว์ไท่กับ EBG ณ ความสูง 22 มิลลิเมตร



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

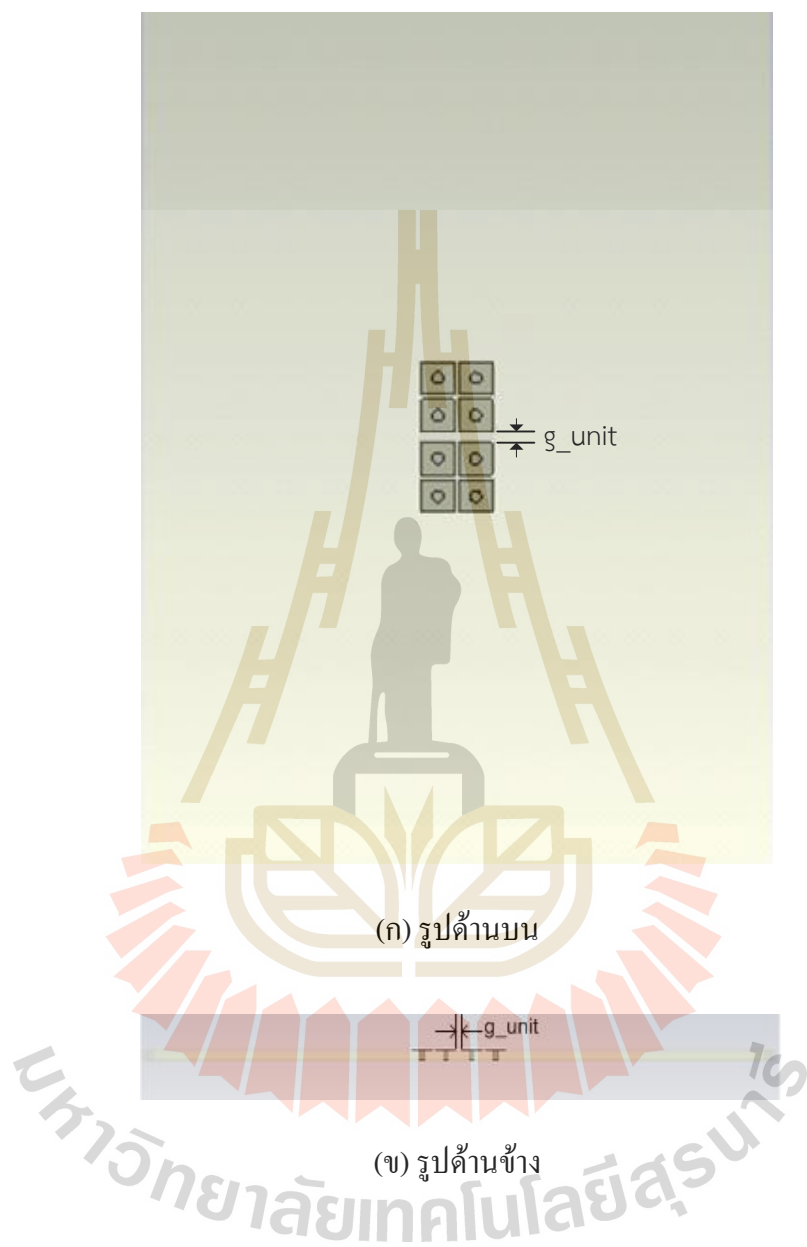


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

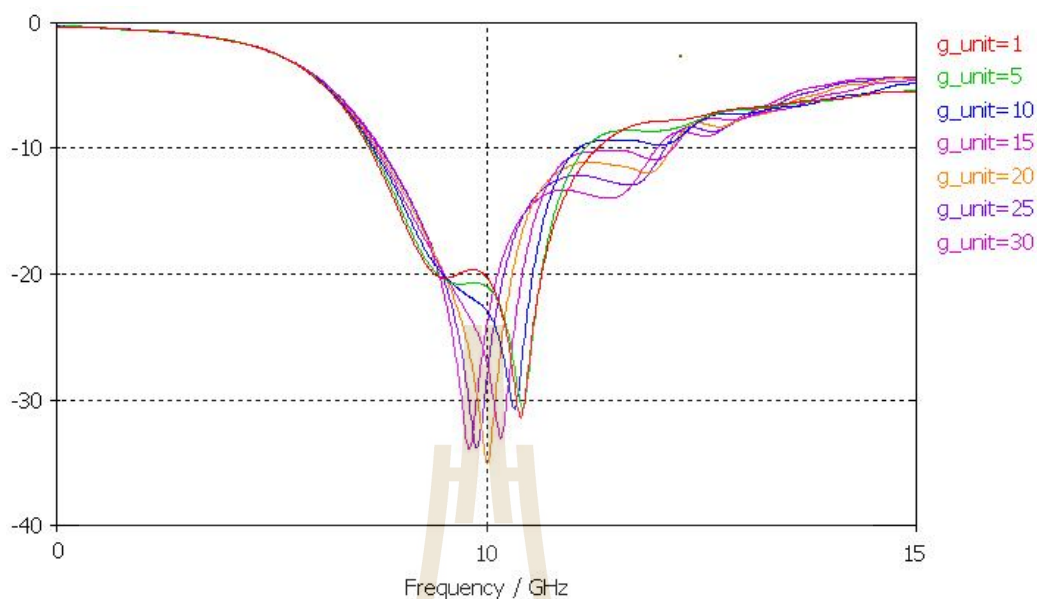
รูปที่ 4.43 แบบรูปการแผ่กำลังของไดโพลแบบโบว์ไทร่วมกับ EBG ณ ความสูง 22 มิลลิเมตร

ดังนั้นผลจากการปรับพารามิเตอร์ของ EBG และความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทร่วมกับ EBG ที่เหมาะสมจากที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดของขั้นตอนการพิจารณาช่องว่างระหว่างหน่วยเซลล์ในขั้นตอนต่อไป

ข) พิจารณาช่องว่างระหว่างหน่วยเซลล์ (g_{unit}) ของ EBG ที่เหมาะสม



รูปที่ 4.44 โครงสร้าง EBG ขนาด 2 หน่วยเซลล์

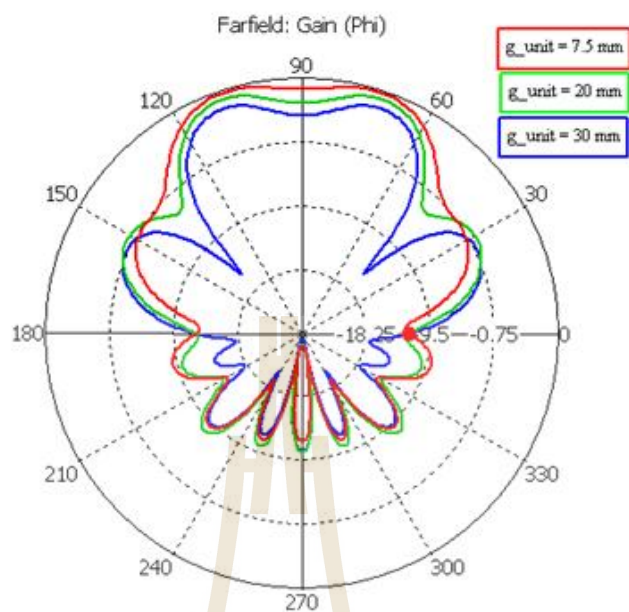


รูปที่ 4.45 การสูญเสียกำลังย้อนกลับของช่องว่างระหว่าง EBG 2 หน่วยเซลล์

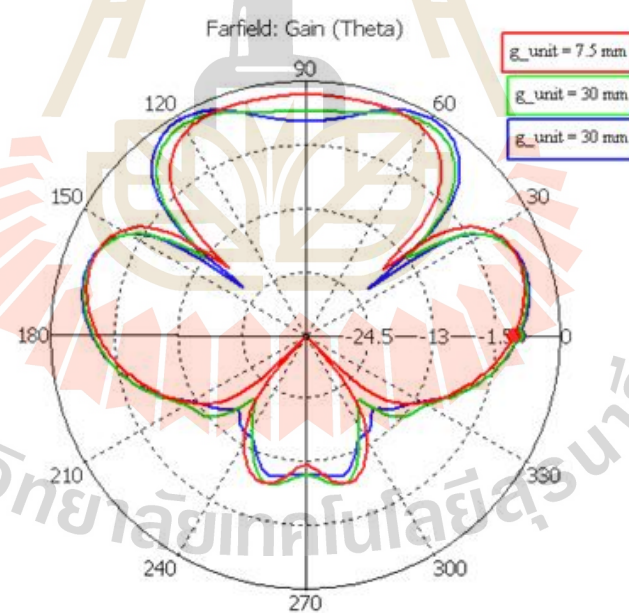
ด้วยระยะความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG เท่ากับ 22 มิลลิเมตร จากนั้นทำการพิจารณาระยะห่างระหว่าง EBG ทั้ง 2 หน่วย (g_{unit}) ที่เหมาะสม โดยทำการจำลองระยะห่างระหว่าง EBG ในช่วง 0.033λ ถึง 1λ (1 ถึง 30 มิลลิเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.45 ปรากฏว่าช่องว่างระหว่างเซลล์ที่เรโซแนนซ์ ณ ความถี่ 10 GHz ได้ดีที่สุด คือ 20 มิลลิเมตร และได้ทำการจำลองเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังที่ช่องว่างระหว่างหน่วยเซลล์ของ EBG เท่ากับ 7.5, 20 และ 30 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.46 พบว่า รูปการแผ่กำลังในทิศทางด้านหน้ามีความเป็นระนาบมากที่สุดที่ระยะช่องว่างระหว่างหน่วยเซลล์ของ EBG เท่ากับ 20 มิลลิเมตร

ซึ่งทางผู้วิจัยได้พิจารณาความสำคัญของลำคลื่นด้านหน้าเพื่อรองรับการส่งกำลังงานสายอากาศแถวลำดับที่แพทช์แต่ละอีลิเมนต์ให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด จึงพิจารณาแบบรูปการแผ่กำลังจากตัวป้อนสัญญาณให้เป็นแนวระนาบ เพื่อรองรับตำแหน่งของแพทช์แต่ละอีลิเมนต์ที่เหมาะสม นั่นคือแต่ละอีลิเมนต์ของสายอากาศจะได้รับกำลังงานด้วยเฟสที่ต่างกัน

และเนื่องจากงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวป้อนไดโพลแบบโบว์ไท่เพียงตัวเดียวในการจ่ายกำลังงาน นั่นคือเป็นแหล่งจ่ายเพียงแหล่งเดียวที่ต้องป้อนกำลังให้กับแพทช์แต่ละอีลิเมนต์ด้วยเฟสของคลื่นตกกระทบแต่ละตำแหน่งที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ด้วยเฟสของคลื่นที่ตกกระทบสายอากาศแถวลำดับแต่ละอีลิเมนต์ที่แตกต่างกัน จะทำให้ทุกอีลิเมนต์ของแพทช์แถวลำดับสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ



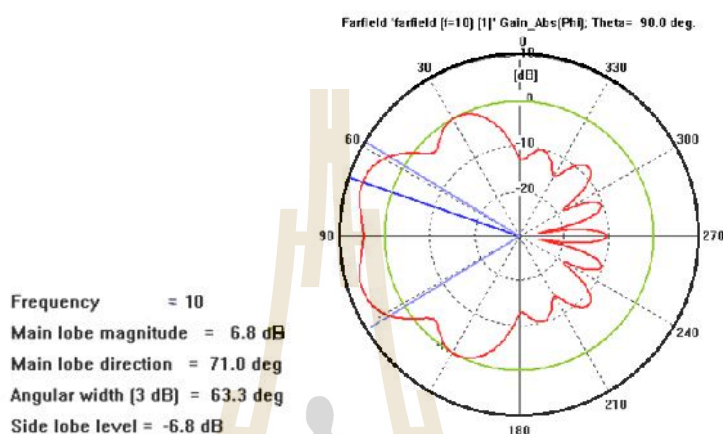
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



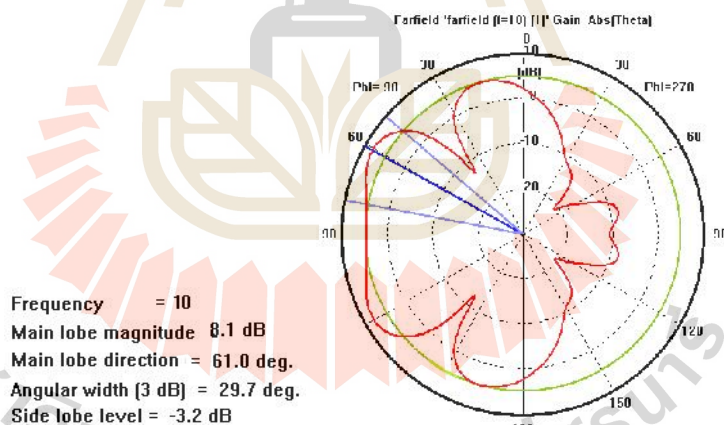
(ข) ระนาบแม่เหล็ก

รูปที่ 4.46 แบบรูปการแผ่กำลังของช่องว่างระหว่างหน่วยเซลล์

จึงเป็นที่มาจากสมมติฐาน ในการเลือกระยะช่องว่างระหว่างหน่วยเซลล์ของ EBG ที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดแบบรูปการแผ่กำลังที่วางตัวในลักษณะเดียวกับแนวระนาบสายอากาศแถวลำดับมากที่สุด เพื่อให้ได้ตามจุดประสงค์ที่วางไว้ต่อไป



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

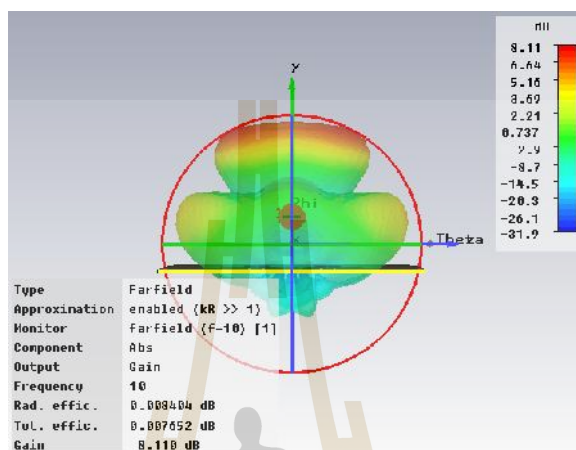


(ข) ระนาบสนามไฟฟ้า

รูปที่ 4.47 แบบรูปการแผ่กำลังของระยะห่างระหว่างหน่วยเซลล์ของ EBG เท่ากับ 20 มิลลิเมตร
ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าจากการนำ EBG จำนวน 2 หน่วยเซลล์ วางบนระนาบกราวด์

ด้วยระยะห่าง 20 มิลลิเมตร และความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทท์กับ EBG เท่ากับ 22 มิลลิเมตร พบว่าสามารถให้อัตราขยายเท่ากับ 8.110 dBi ซึ่งเพิ่มขึ้นมา 5.853 dBi (ในขณะที่ไดโพล

ลแบบโบว์ไทเพียงอย่างเดียวมีค่าอัตราขยายเท่ากับ 2.257 dBi) และมีทิศทางลำคลื่นบริเวณส่วนหน้ามีความเป็นระนาบมากที่สุด ได้แสดงแบบรูปการแผ่กำลังและอัตราขยาย ดังรูปที่ 4.47 และ 4.48 ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปพารามิเตอร์ทั้งหมดได้ดัง ตารางที่ 4.3



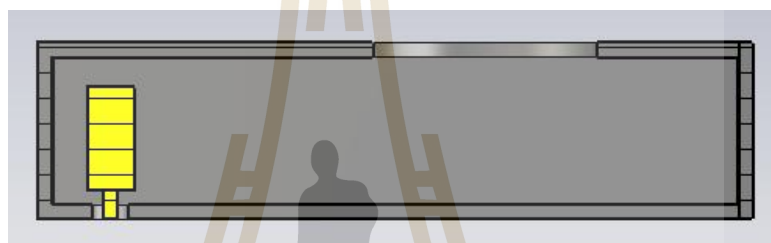
รูปที่ 4.48 แสดงอัตราขยายและแบบรูปการแผ่กำลังแบบสามมิติ

ตารางที่ 4.3 สรุปพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของระบบป้อนใหม่ด้วยไดโพลแบบโบว์ไทร่วมกับ EBG

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
ความยาวของไดโพลแบบโบว์ไท (l_bowties)	4.7625
ความกว้างส่วนปลายของไดโพลแบบโบว์ไท (w_bowties)	7.5
ความกว้างส่วนต้นของไดโพลแบบโบว์ไท (w_bot)	0.9
ความหนาของไดโพลแบบโบว์ไท (t_bow)	0.1
ระยะห่างระหว่างไดโพลแบบโบว์ไท (d_feed)	0.1
ขนาดความกว้างของ EBG (P_EBG)	5
รัศมีตัวเชื่อม (r_viaEBG)	0.5
ช่องว่างระหว่างเซลล์ (g_EBG)	1
ช่องว่างระหว่างหน่วยเซลล์ (g_unit)	20
ความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทกับ EBG (h_BT-EBG)	22

4.6 พิจารณาวิธีการป้อนกำลังด้วยโพรง (cavity) ร่วมกับ EBG

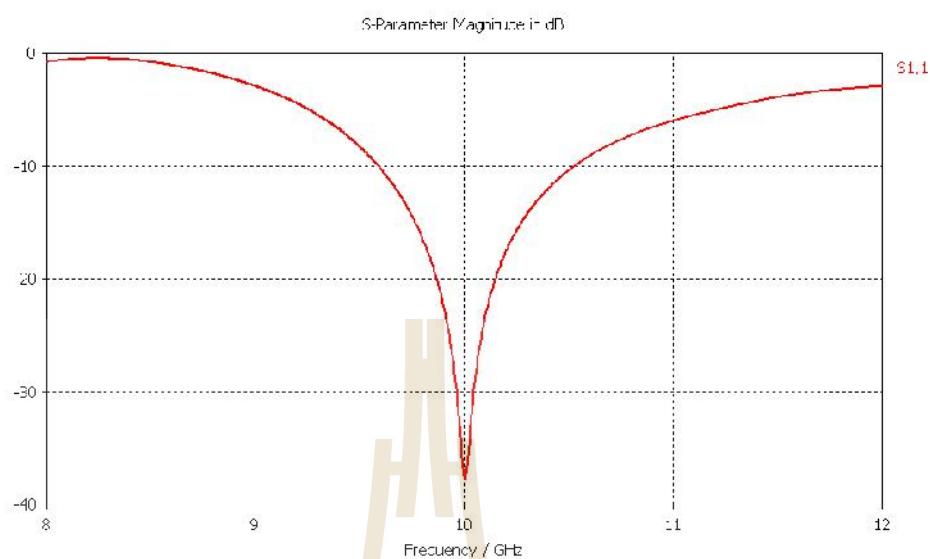
ในลำดับถัดมา ได้ทำการออกแบบและจำลองตัวกระตุ้น อีกหนึ่งชนิด ด้วยแนวคิดจากงานวิจัย เกี่ยวกับเทคนิคการป้อนด้วยท่อนำคลื่นหรือโพรงผ่านช่อง (A.M. J assim และ H.D.Hristov, 1995) ได้เลือกออกแบบโพรงเป็นตัวสะสมพลังงานและกระตุ้นกำลังด้วยโพรงโดยทำการเจาะรูบนผนังด้านบน เสมือนเป็นตำแหน่งของแหล่งจ่ายกำลังจากด้านล่าง ไปยังสายอากาศ แถวลำดับแบบแพทช์จากรูบนผนังดังกล่าว ด้วยพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.3 และได้แสดงรูปในโครงสร้างในมุมมองตัดขวาง ดังรูปที่ 4.49



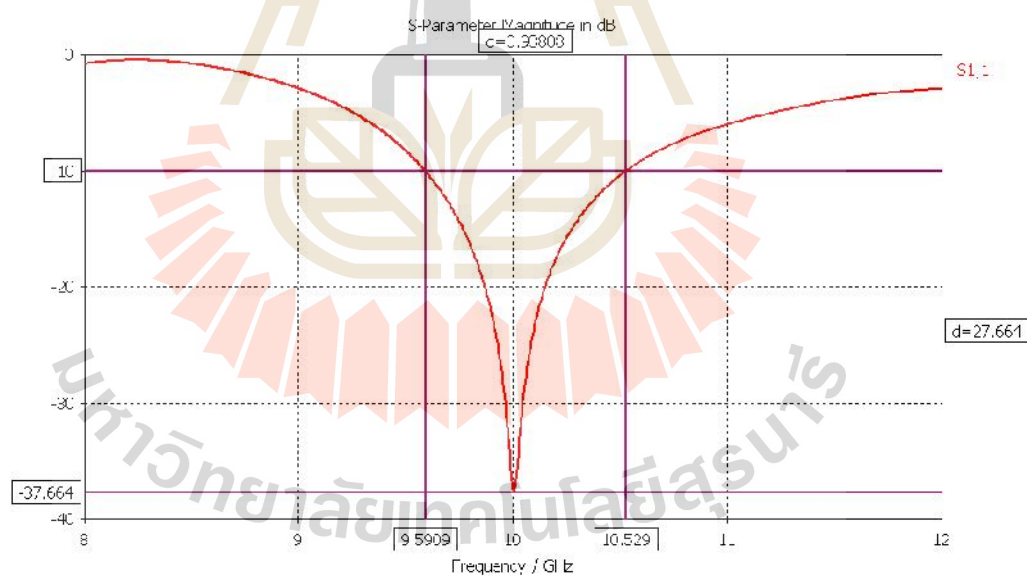
รูปที่ 4.49 โครงสร้างตัวกระตุ้นด้วยโพรงภายในโพรงทำการเจาะรูบนผนังด้านบน

ตารางที่ 4.4 ตัวกระตุ้นด้วยโพรงภายในโพรงทำการเจาะผนังด้านบน

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
ความกว้างโพรง	22.86
ความยาวโพรง	44.85
ความสูงของโพรง	10.16
ความหนาผนัง	1
รัศมีรูบนผนัง	8.515
รัศมีโพรง 1	1.64755
รัศมีโพรง 2	5.91

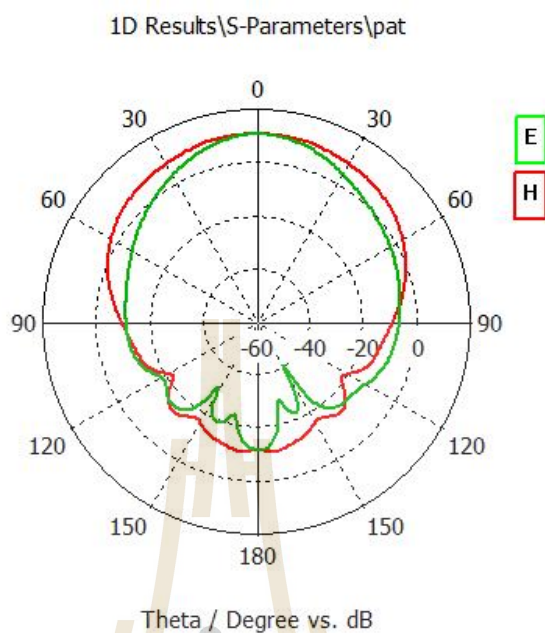


รูปที่ 4.50 การสูญเสียกำลังย้อนกลับตัวกระตุ้นด้วยโพรมภายในโพรงทำการ
เจาะรูบนผนังด้านบน



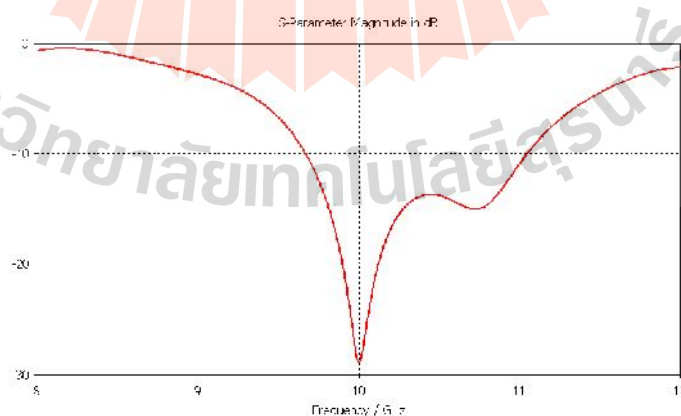
รูปที่ 4.51 ความกว้างแถบตัวกระตุ้นด้วยโพรมภายในโพรงทำการเจาะรูบนผนังด้านบน

จะเห็นได้ว่า แบบรูปการแผ่กำลังที่ได้ จะไม่เป็นระนาบในทิศทางด้านหน้า ของตัวกระตุ้นซึ่ง
จากผลการจำลองผล จะได้ค่าอัตราขยายเท่ากับ 6.953 dBi ความกว้างแถบมีค่าเท่ากับ 938.08 MHz
แบบรูปการแผ่กำลัง ไว้ในรูปที่ 4.50 , รูปที่ 4.51 และ รูปที่ 4.52 ตามลำดับ

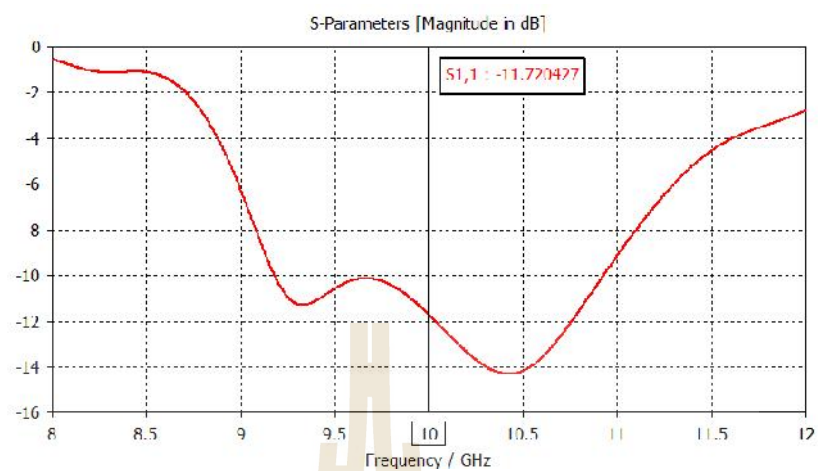


รูปที่ 4.52 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

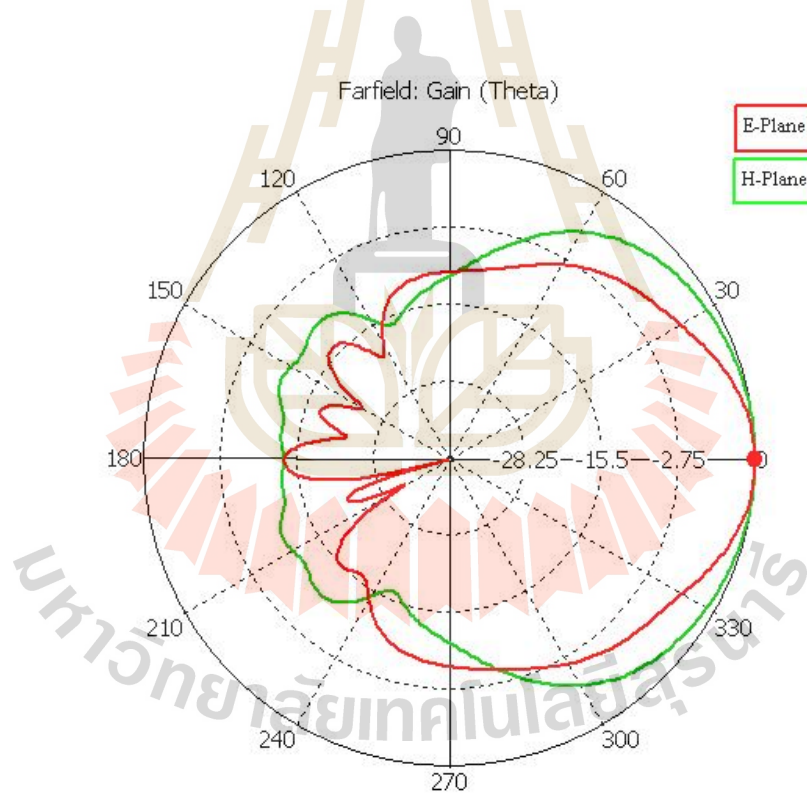
ต่อจากนั้น จำลอง EBG จำนวน 2 หน่วย บนระนาบกราวด์ความกว้างเท่ากับ 81 มิลลิเมตร ความยาวเท่ากับ 110 มิลลิเมตร ด้วยระยะห่างระหว่างหน่วยเซลล์เท่ากับ 15 และ 20 มิลลิเมตร จะได้ อัตราขยายมีค่าเท่ากับ 9.378 dBi และ 8.894 dBi ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่อระยะห่างระหว่างหน่วยเซลล์เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราขยายลดลง ขณะเดียวกัน ความกว้างแถบจะเพิ่มขึ้นเป็น 1735.2 GHz จาก 1.3801 GHz



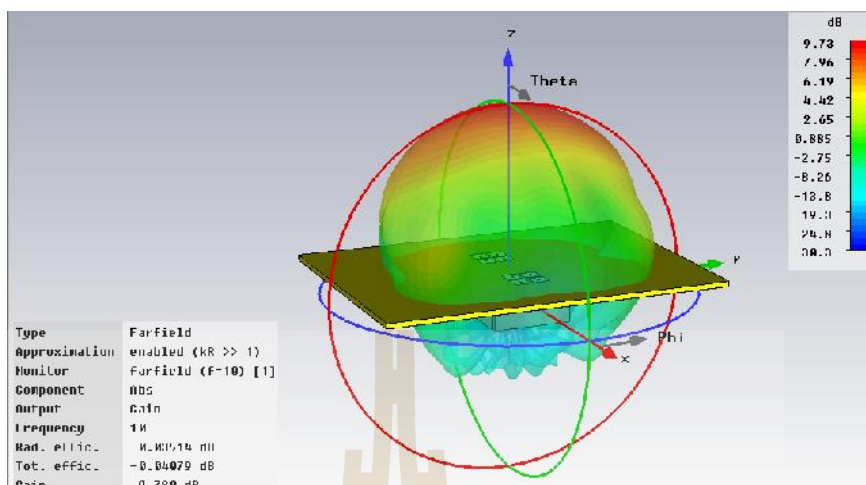
รูปที่ 4.53 แสดงค่าการสูญเสียกำลังย้อนกลับ(ระยะห่างระหว่างหน่วยเซลล์เท่ากับ 15 มิลลิเมตร)



รูปที่ 4.54 ความกว้างแถบ (ระยะห่างระหว่างหน่วยเซลล์เท่ากับ 20 มิลลิเมตร)



รูปที่ 4.55 แสดงแบบรูปการแผ่กำลัง (ระยะห่างระหว่างหน่วยเซลล์เท่ากับ 15 มิลลิเมตร)



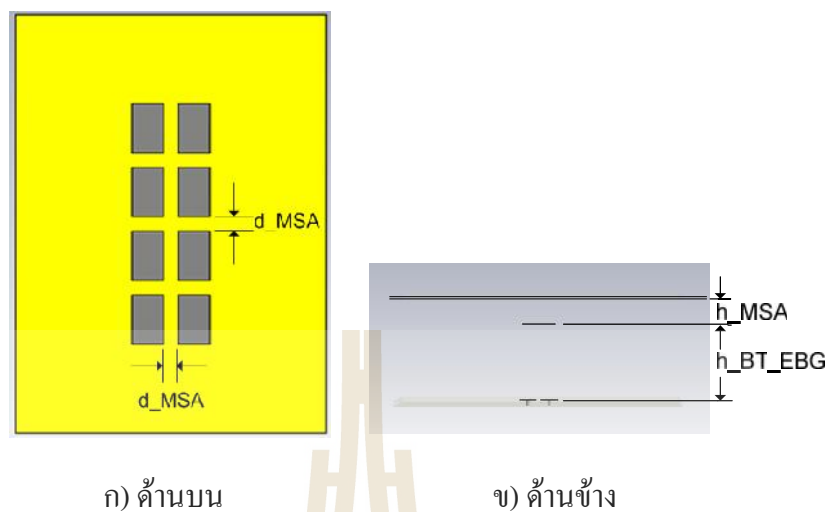
รูปที่ 4.56 แบบรูปการแผ่กำลังแบบ 3 มิติ (ระยะห่างระหว่างหน่วยเซลล์เท่ากับ 15 มิลลิเมตร)

4.7 พิจารณาป้อนกำลังด้วยตัวป้อนแบบใหม่ ร่วมกับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์

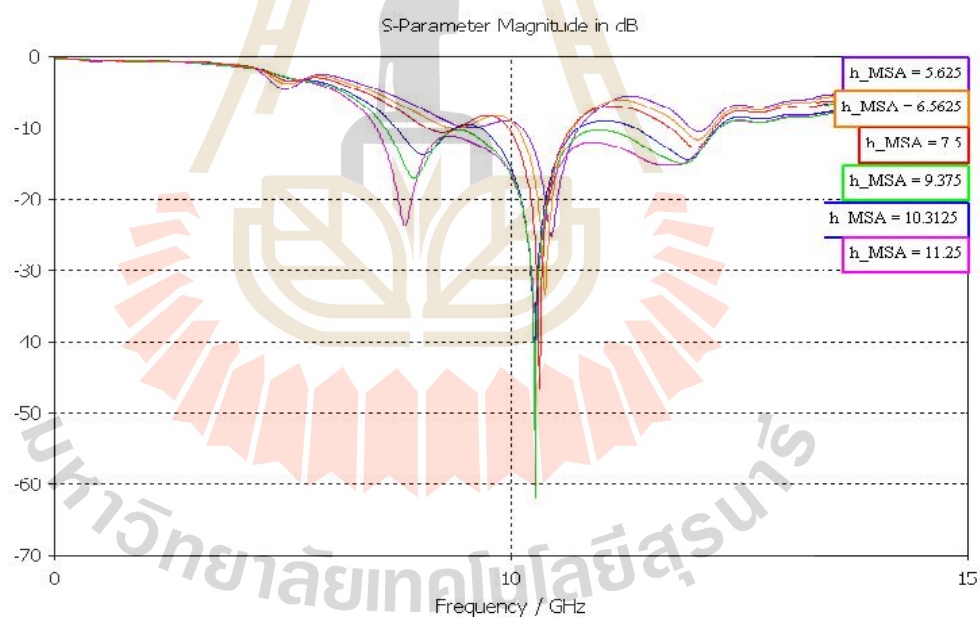
4.7.1 ตัวกระตุ้นไดโพลแบบโบว์ไท

จากการจำลองตัวป้อนใหม่ ด้วยตัวกระตุ้นไดโพลแบบโบว์ไทร่วมกับ EBG ดังกล่าว มาข้างต้น ได้นำโครงสร้างดังกล่าวทำการป้อนกำลังให้กับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ ซึ่งได้ทำการออกแบบโครงสร้างสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ความถี่ 10 GHz จำนวน 2 X 4 อิลิเมนต์ ขนาดความกว้างของแพทช์ เท่ากับ 8.2 มิลลิเมตร (0.2733λ) ขนาดความยาว เท่ากับ 15 มิลลิเมตร (0.5λ) โดยใช้ขนาดสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ ใช้วัสดุฐานรองเป็น FR4 ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเท่ากับ 4.4 ซึ่งราคาถูกกว่าและหาซื้อได้สะดวกกว่าวัสดุฐานรองชนิด Duroid ($\epsilon_r = 2.65$) หรือ Teflon ($\epsilon_r = 2.08$) ที่ใช้เป็นวัสดุฐานรองของสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ที่ป้อนกำลังผ่านสายเฟสในปัจจุบัน

โดยการวางตัวของโครงสร้างสายอากาศแถวลำดับตัวแบบแพทช์ (PAA) กับระบบป้อนใหม่ ได้วางโครงสร้างในลักษณะโพรงเรโซเนเตอร์ฟาบรี-เปโรต์ ซึ่งอาศัยหลักการการสะท้อนคลื่นภายในโพรงด้วยความสูงระหว่างตัวป้อนแบบใหม่กับสายอากาศ (h_{PAA}) และระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์แต่ละตัวของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศเรโซแนนซ์ที่ออกแบบได้ดีที่สุด ณ ความถี่ 10 GHz โดยได้พิจารณาผลการจำลองค่าอัตราขยาย และความกว้างแถบ ของสายอากาศจากการป้อนด้วยระบบป้อนใหม่ และผลการจำลองประสิทธิภาพของสายอากาศ จากการป้อนกำลังด้วยระบบป้อนใหม่กับการป้อนด้วยแบบเก่า ในหัวข้อที่ 4.2 เพื่อยืนยันสมมติฐานของการพัฒนาระบบป้อนแบบใหม่ที่ได้พัฒนาขึ้น



รูปที่ 4.56 โครงสร้างสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ จำนวน 2 X 4 อีลิเมนต์ ร่วมกับตัวป้อนแบบใหม่



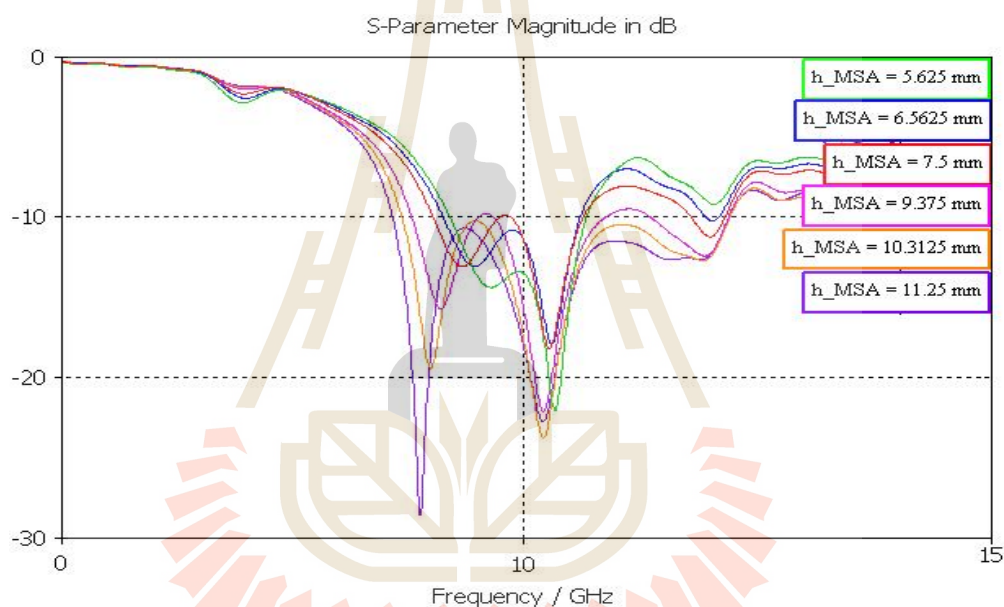
รูปที่ 4.57 แสดงผลการจำลองค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับด้วยระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์ (d_{PAA}) เท่ากับ 3.75 มิลลิเมตร ($\lambda/8$)

ซึ่งขั้นตอนการพิจารณาผลการจำลอง ได้พิจารณาจากค่าอัตราขยายและความกว้างแถบของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ จากผลการจำลองค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ (s11)

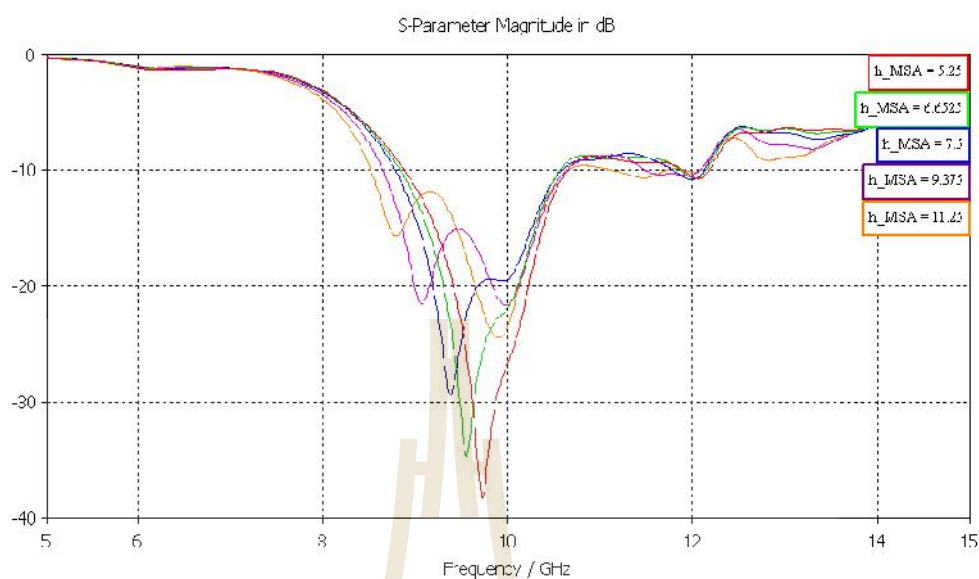
จากความสัมพันธ์ระหว่างตัวป้อนแบบใหม่กับสายอากาศ ของแต่ละระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์ของสายอากาศแถวลำดับไมโครสริป ดังต่อไปนี้ คือ ระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์ (d_{PAA}) เท่ากับ 3.75 ($\lambda/8$), 7.5 ($\lambda/4$) และ 15 ($\lambda/2$) มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

จากผลการวัดค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของสายอากาศแถวลำดับ ณ ตำแหน่งความถี่สูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไท่กับสายอากาศแถวลำดับ ด้วยระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์เท่ากับ $\lambda/8$, $\lambda/4$ และ $\lambda/2$ ดังแสดงในรูปที่ 4.57 ถึง 4.59 ตามลำดับนั้น

สามารถสรุปความกว้างแถบและอัตราขยาย ของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ ได้ดังตารางที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.58 แสดงผลการวัดค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับด้วยระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์ (d_{PAA}) เท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร ($\lambda/4$)



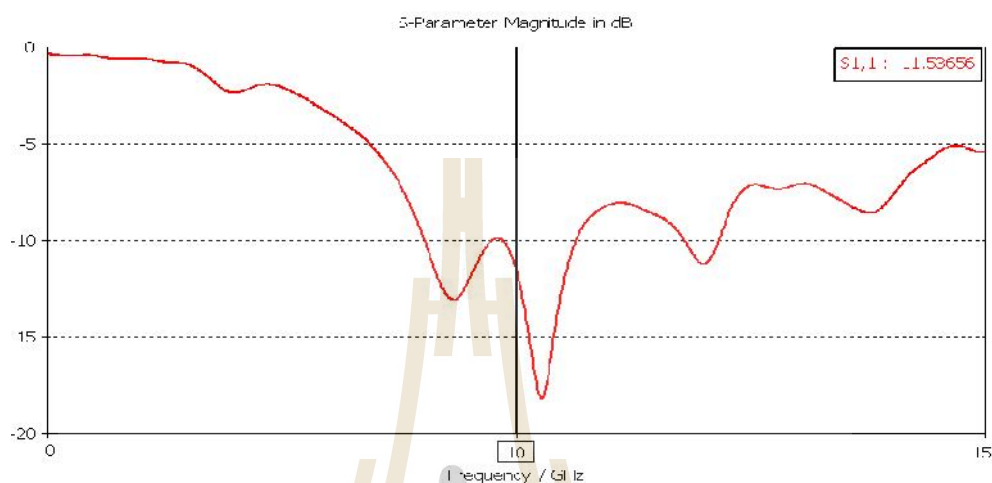
รูปที่ 4.59 แสดงผลการวัดค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับด้วยระยะห่างระหว่าง
อีลิเมนต์ (d_{PAA}) เท่ากับ 15 มิลลิเมตร ($\lambda/2$)

ตารางที่ 4.5 แสดงอัตราขยายของสายอากาศโดยเปรียบเทียบความสูงกับระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์

ความสูงระหว่าง ตัวป้อนแบบใหม่ กับ PAA (มิลลิเมตร)	อัตราขยายของสายอากาศ (dBi) ด้วยระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์ที่แตกต่าง		
	ระยะห่าง 3.75 (มิลลิเมตร)	ระยะห่าง 7.5 (มิลลิเมตร)	ระยะห่าง 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

จากผลการจำลองความสูงระหว่างไดโพลแบบโบว์ไทและระยะห่างแต่ละอีลิเมนต์ของ
สายอากาศ ค่าที่เหมาะสมของความสูงเท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร (0.25λ) และระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์
เท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร (0.25λ) ได้อัตราขยายและความกว้างแถบที่ดีที่สุดคือ 15.35 dBi และ 1.5964

GHz ตามลำดับ ซึ่งค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับที่ความถี่ 10 GHz เท่ากับ 11.53655 dBi ดังแสดงในรูปที่ 4.60



รูปที่ 4.60 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับจากความสูงและระยะห่าง เท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร

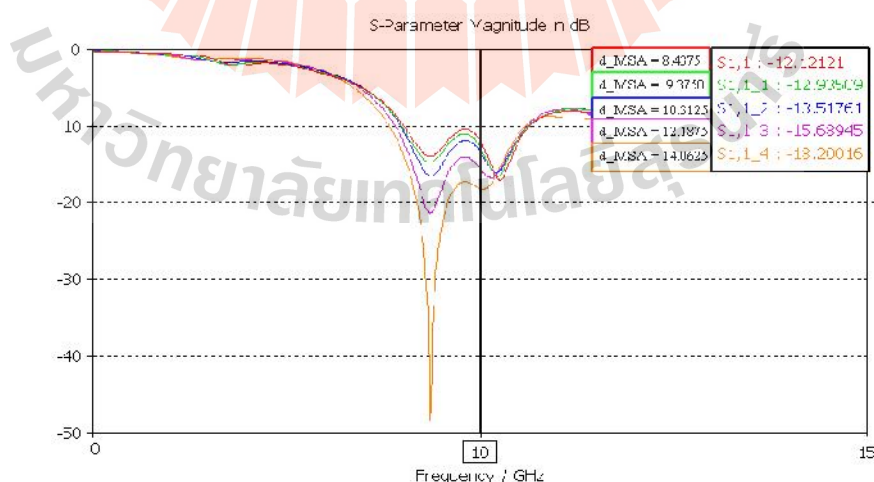
ตารางที่ 4.6 แสดงความกว้างแถบโดยเปรียบเทียบความสูงกับระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์

ความสูง ระหว่างตัวป้อน แบบใหม่ กับ PAA (มิลลิเมตร)	ความกว้างแถบของสายอากาศ (GHz) ด้วยระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ที่แตกต่าง		
	ระยะห่าง 3.75(มิลลิเมตร)	ระยะห่าง 7.5 (มิลลิเมตร)	ระยะห่าง 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)

ตารางที่ 4.6 แสดงความกว้างแถบโดยเปรียบเทียบความสูงกับระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์ (ต่อ)

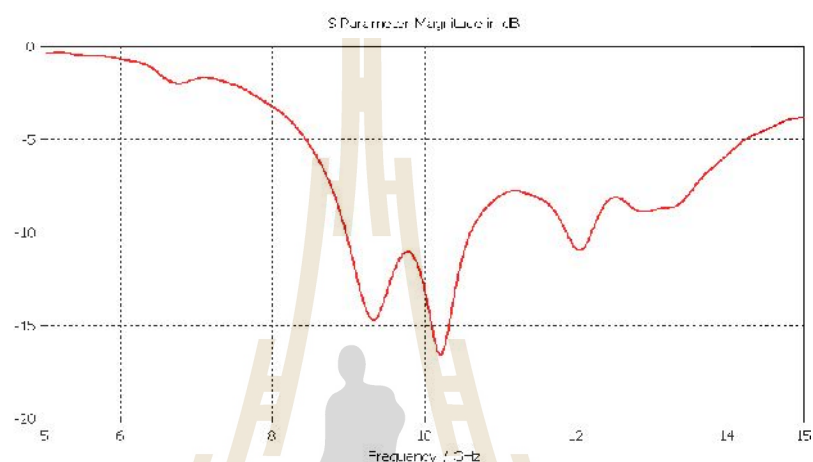
ความสูง ระหว่างตัวป้อน แบบใหม่ กับ PAA (มิลลิเมตร)	ความกว้างแถบของสายอากาศ (GHz) ด้วยระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์ที่แตกต่างกัน		
	ระยะห่าง 3.75(มิลลิเมตร)	ระยะห่าง 7.5 (มิลลิเมตร)	ระยะห่าง 15 (มิลลิเมตร)
9.375	3.6483 (8.6323 - 12.281)	1.2144 (9.6626 - 10.877)	1.9787 (8.6517-10.63)
10.3125	1.083 (9.666 - 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)

จากนั้นทำการปรับระยะห่างแต่ละอีลิเมนต์ของ PAA แต่ละอีลิเมนต์เท่ากับ 8.4375, 9.375, 10.3125, 12.1875 และ 14.0625 มิลลิเมตร พบว่าอัตราขยายจะมีค่าเท่ากับ 15.12, 14.75, 14.22, 12.79 และ 11.12 dBi ตามลำดับ นั่นคืออัตราขยายมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างแต่ละอีลิเมนต์เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ยวกันกับค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับที่มีค่าต่ำลงด้วยเมื่อระยะห่างของ PAA มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับความกว้างแถบ นั่นคือความกว้างแถบมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะห่างแต่ละอีลิเมนต์ของ PAA ดังแสดงในรูปที่ 4.61

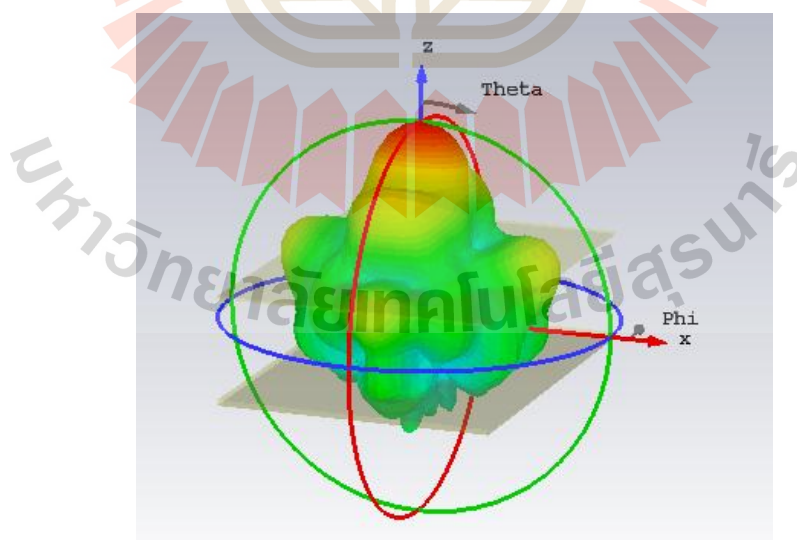


รูปที่ 4.61 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับด้วยระยะระหว่างอีลิเมนต์จาก 8.4375 ถึง 14.140625 มิลลิเมตร

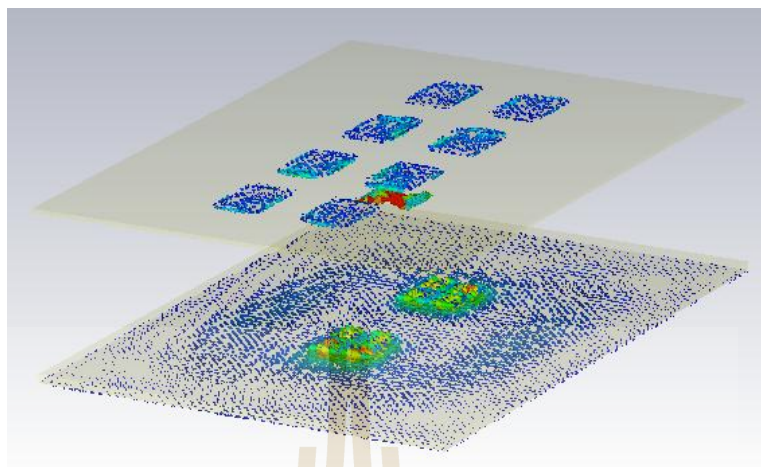
ซึ่งกล่าวได้ว่าด้วยความสูงระหว่างตัวป้อนแบบใหม่กับ PAA เท่ากับ 7.5 และระยะห่างแต่ละอิลิเมนต์ของ PAA แต่ละอิลิเมนต์จาก 8.4375 – 10.3125 มิลลิเมตร สามารถนำมาพิจารณาได้ค่าการจรรณาค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ ซึ่งระยะห่างแต่ละอิลิเมนต์ของ PAA เท่ากับ 9.375 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด ดังแสดงการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนดังรูปที่ 4.62



รูปที่ 4.62 แสดงค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับเมื่อ h_{PAA} เท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร และ d_{PAA} เท่ากับ 9.375 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.63.แบบรูปการแผ่กำลังในรูป 3 มิติ ของสายอากาศแฉกลำดับแบบแพทช์ด้วยวิธีการป้อนด้วยไดโพลแบบโบวไท



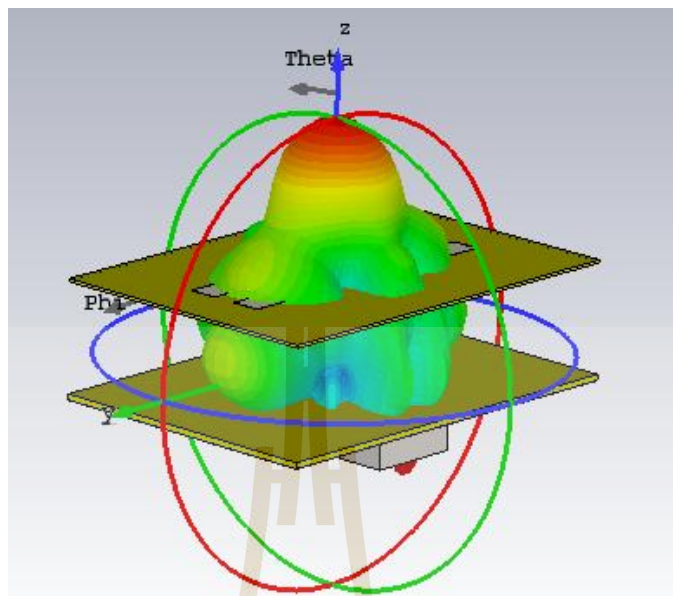
รูปที่ 4.64 ผลการจำลองการแจกแจงรูปของกระแสของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ด้วย
วิธีการป้อนด้วยไดโพลแบบโบว์ไท

ซึ่งการจำลองการแจกแจงรูปของกระแสที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างตัวป้อนและอีลิเมนต์ของ PAA และแบบรูปการแผ่กำลังในรูป 3 มิติ ของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ ดังแสดงในรูปที่ 4.63 และ 4.64 ตามลำดับ

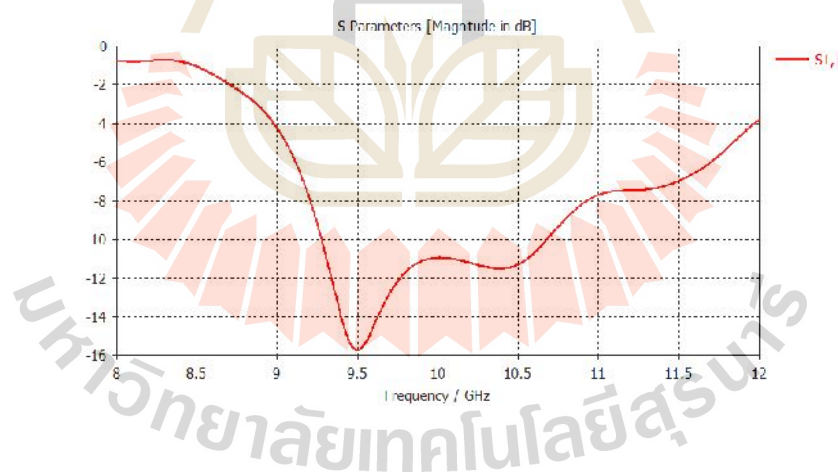
ขั้นตอนต่อไปจะกล่าวถึงวิธีการป้อนด้วยโพรง ซึ่งกระตุ้นกำลังด้วยโพรงและทำการเจาะรูบนผนังด้านบนของโพรงเพื่อส่งกำลังร่วมกับ EBG บนระนาบกราวด์ขนาดเดียวกันและผลการพิจารณาถึงความเหมาะสมของจำนวนและตำแหน่งจากการศึกษามาแล้วข้างต้น

4.7.2 ตัวกระตุ้นกำลังด้วยโพรงภายในโพรงทำการเจาะรูบนผนัง

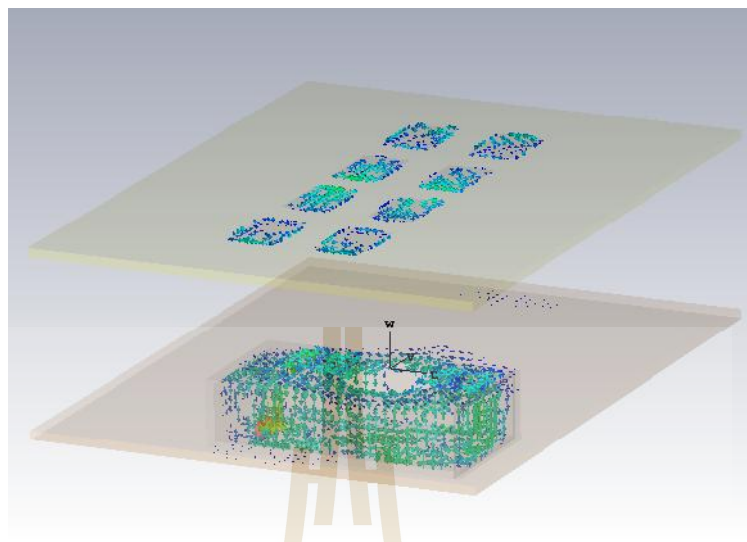
จากผลการจำลองตัวป้อนแบบโพรงเจาะรูบนผนังด้านบนให้อัตราขยายเท่ากับ 6.953 dBi ความกว้างแถบกับ 938.08 MHz หลังจากวาง EBG บนระนาบกราวด์ ขนาดความกว้างเท่ากับ 81 มิลลิเมตรและความยาวเท่ากับ 110 มิลลิเมตร อัตราขยายเพิ่มขึ้นเป็น 9.378 dBi และความกว้างแถบมีค่าเท่ากับ 1380 MHz จากนั้นทำการป้อนกำลังด้วยระบบป้อนดังกล่าวให้กับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ จำนวน 2 X 4 อีลิเมนต์ ด้วยระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์ของ PAA เท่ากับ 9.375 มิลลิเมตร ด้วยความสูงประมาณหนึ่งความยาวคลื่น 29.5 มิลลิเมตร พบว่า อัตราขยายของสายอากาศจะมีค่าเท่ากับ 15.78 dBi และความกว้างแถบเป็น 1410.5 MHz ดังแสดงแบบรูปการแผ่กำลังในรูป 3 มิติ และการสูญเสียกำลังย้อนกลับ ดังรูปที่ 4.45 และ รูปที่ 4.46 ตามลำดับ และผลการจำลองการแจกแจงรูปของกระแสที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างตัวป้อนและอีลิเมนต์ของ PAA ดังแสดงในรูปที่ 4.67



รูปที่ 4.65 แบบรูปการแผ่กำลังในรูป 3 มิติ ของสายอากาศแฉกลำดับแบบแพทช์
ด้วยวิธีการป้อนแบบโพรงเจาะรูบนผนังด้านบน



รูปที่ 4.66 การสูญเสียกำลังย้อนกลับของสายอากาศแฉกลำดับแบบแพทช์โดยวิธีป้อนการด้วยโพรง



รูปที่ 4.67 ผลการจำลองการแจกแจงรูปของกระแสของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ด้วย
วิธีการป้อนด้วยโพรงเจาะรูบนผนังด้านบน

จากการจำลอง วิธีการป้อนกำลังด้วยโพรงเจาะรูบนผนังด้านบนร่วมกับ EBG พบว่า คุณสมบัติเด่นของโพรงซึ่งสามารถลดพลังงานให้น้อยลงได้ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มอัตราขยายและความกว้างแถบให้กับสายอากาศแถวลำดับให้สูงขึ้น

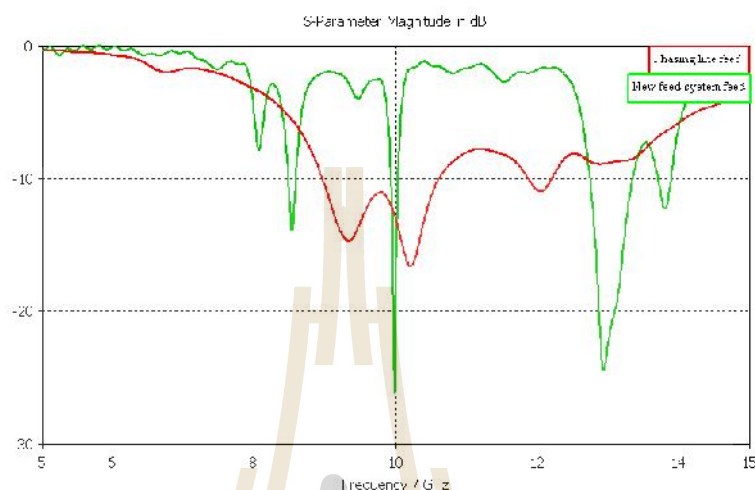
กล่าวคือ จากการจำลอง ตัวกระตุ้นกำลัง ทั้ง 2 แบบ พบว่าสามารถทำหน้าที่เป็นตัวป้อนกำลังโดยไม่มีการใช้สายเฟสหรือเส้นสตริปเพื่อป้อนกำลังได้อย่างดี ให้กับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ ถึงแม้จะทำให้ค่าความกว้างแถบและอัตราขยายที่แตกต่างกันก็ตาม แต่ให้ค่าความกว้างแถบและอัตราขยายที่สูงกว่าวิธีการป้อนผ่านสายเฟสแบบเก่า

4.7.3 พิจารณาตัวกระตุ้นที่เหมาะสม

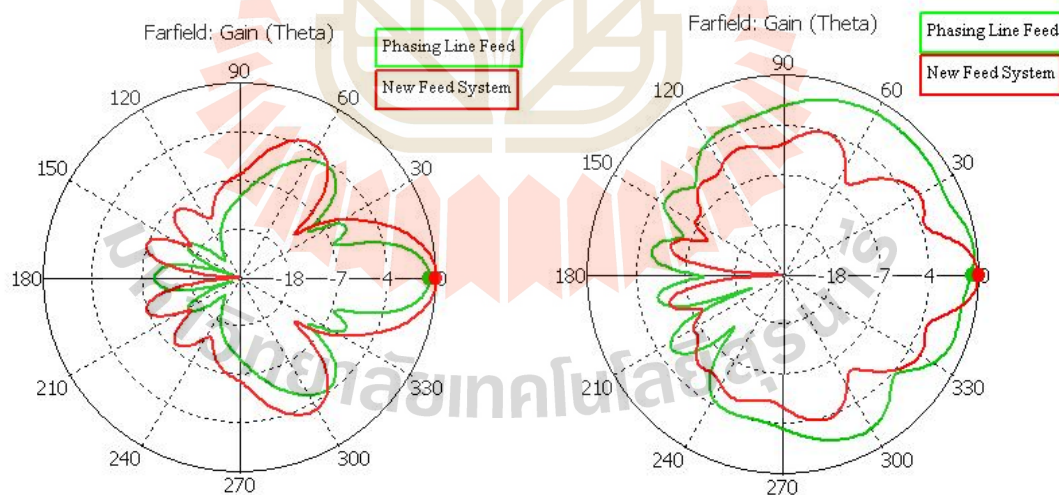
จากการพิจารณาความกว้างแถบของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการป้อนทั้ง 2 แบบ ผู้วิจัยได้พิจารณาเลือกตัวกระตุ้นที่เหมาะสมหรับชดเชยการสูญเสียภายในระบบส่งกำลังร่วมกับความกว้างแถบที่ดีกว่า ดังนั้นผู้วิจัยเลือกตัวกระตุ้นแบบโบว์ไท่เป็นตัวกระตุ้นสำหรับระบบป้อนแบบใหม่

พบว่า ค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับที่เหมาะสมกับอัตราขยายของสายอากาศที่สามารถชดเชยค่าการสูญเสียกำลังงานภายในสายเฟสจากการป้อนกำลังแบบเก่าได้ด้วยระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์เท่ากับ 9.375 มิลลิเมตร ดังผลการจำลองค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับและแบบรูปการแผ่กำลังของการป้อนแบบเก่าและระบบป้อนแบบใหม่ดังรูปที่ 4.68 และ 4.69

ตามลำดับ และแสดงผลแสดงอัตราขยายแบบรูปการแผ่กำลังแบบ 3 มิติของการป้อนแบบเก่าและระบบป้อน แบบใหม่ ดังรูปที่ 4.70



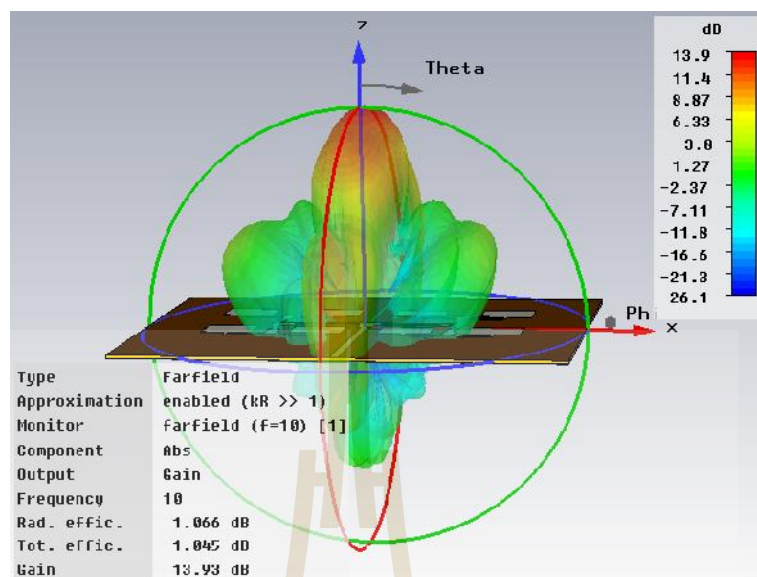
รูปที่ 4.68 ผลการจำลองค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับของการป้อนแบบเก่าและระบบป้อนแบบใหม่



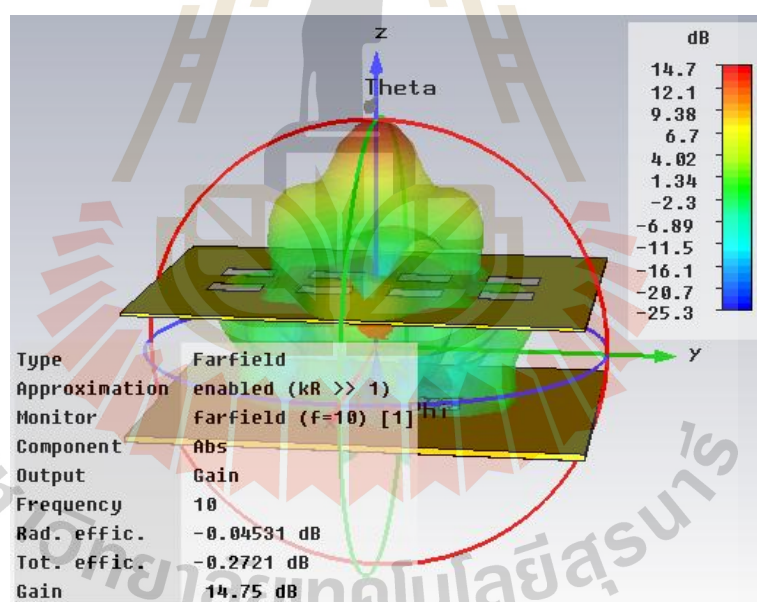
ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.69 แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของการป้อนแบบเก่าและระบบป้อนแบบใหม่



(ก) การป้อนแบบเก่า



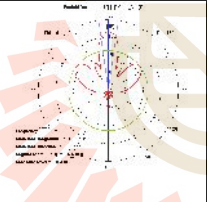
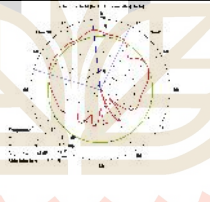
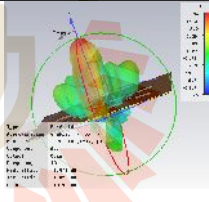
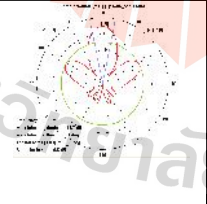
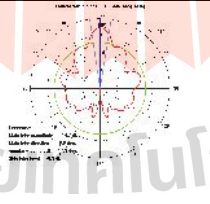
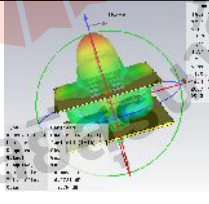
(ข) การป้อนแบบใหม่

รูปที่ 4.70 แสดงอัตราขยายแบบรูปการแผ่กำลังแบบ 3 มิติ ของการป้อนแบบเก่าและระบบป้อนแบบใหม่

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพสำหรับการป้อนแบบเก่าและระบบป้อนแบบใหม่

ลักษณะตัวป้อน	อัตราขยาย (dBi)	ความกว้างแถบ (MHz)	ประสิทธิภาพรวม (Total Efficiency)
การป้อนแบบแบบเก่า	13.93	101.12 (1.0112%)	1.2670
ระบบป้อนแบบใหม่	14.75	1676.60 (17.135%)	0.9774

ตารางที่ 4.8 สรุปแบบรูปการแผ่กำลังจากการป้อนด้วยสายเฟสและระบบป้อนแบบใหม่

แบบรูปการแผ่กำลัง					
เทคนิคการป้อน	ระนาบสนามไฟฟ้า	ระนาบสนามแม่เหล็ก	แบบสามมิติ	ความกว้างลำคลื่น (HPBW)	
				ระนาบสนามไฟฟ้า	ระนาบสนามแม่เหล็ก
การป้อนแบบเก่า				16.6	98.9
ระบบป้อนแบบใหม่				22.8	17.9

จากผลการจำลองระบบป้อนแบบใหม่ด้วยตัวกระตุ้นไดโพลแบบโบวีโทร่วมกับ EBG และเทคนิคการวางโครงสร้างด้วย FPR เพื่อป้อนกำลังให้กับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ สามารถสูญเสียภายในสายเฟสได้อันเนื่องมาจากการป้อนกำลังด้วยสายเฟสแบบเก่า ซึ่งได้แสดงอัตราขยายและความกว้างแถบ ดังตารางที่ 4.5 ซึ่งผลการจำลองแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ ดังตารางที่ 4.6 โดยได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพสำหรับการป้อนแบบเก่าและระบบ

ป้อนแบบใหม่ ดังตารางที่ 4.7 และ ได้สรุปแบบรูปการแผ่กำลังจากการป้อนด้วยสายเฟสและระบบป้อนแบบใหม่ดังตารางที่ 4.8

4.8 สรุป

จากการจำลองโครงสร้างตัวป้อนแบบใหม่ โดยใช้สายอากาศแบบแพทช์จำนวน 2×4 อีลิเมนต์ที่มีความถี่ 10 GHz เป็นสายอากาศอ้างอิง ซึ่งพัฒนาตัวป้อนกำลังแบบด้วยไดโพลแบบโบว์ไท่ ด้วยคุณสมบัติเด่นเรื่องความกว้างแถบที่กว้างและคุณสมบัติของ EBG ในการจัดคลื่นผิวร่วมกับโครงสร้างของระนาบกราวด์ที่ช่วยเสริมคลื่น ทำให้อัตราขยายเฉพาะตัวป้อนไดโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG มีค่าเท่ากับ 8.110 dBi และได้ทำการวางโครงสร้างตัวป้อนแบบใหม่เพื่อป้อนกำลังให้กับ PAA ในลักษณะโพรงฟาบริ-เปโรต์ ด้วยระยะความสูงของไดโพลแบบโบว์ไท่เท่ากับ 0.733λ (22 มิลลิเมตร) ความสูงของสายอากาศจากไดโพลแบบโบว์ไท่ เท่ากับ 0.25λ (7.5 มิลลิเมตร) และระยะห่างของสายอากาศแถวลำดับแต่อีลิเมนต์ของเท่ากับ 0.3125λ (9.375 มิลลิเมตร) ทำให้ตัวป้อนแบบใหม่นี้สามารถจ่ายกำลังงานให้กับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์มีอัตราขยายเท่ากับ 14.75 dBi โดยที่ขนาดของสายอากาศเท่ากับกับขนาดของสายอากาศที่มีการป้อนกำลังผ่านแบบเก่า ซึ่งได้ค่าอัตราขยายสูงกว่าลักษณะการป้อนกำลังแบบเก่าหรือการป้อนผ่านสายเฟสที่มีค่า เท่ากับ 13.93 dBi (หรือ 14.01 dBi จากคู่มือ) อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความกว้างแถบของสายอากาศได้มากถึง 1670.60 MHz คิดเป็น 17.135 % ซึ่งเมื่อเทียบกับการป้อนแบบเก่าที่มีความกว้างแถบเพียง 101.12 MHz หรือ 1.0112 % และให้ผลการจำลองแบบรูปการแผ่กำลังแบบรูปการแผ่กำลังที่ใกล้เคียงกับการป้อนแบบเก่าดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6 สามารถยืนยันสมมติฐานของงานวิจัยได้จากการจำลองผลด้วยลักษณะตัวป้อนดังกล่าว

จากผลการจำลองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างตัวกระตุ้นไดโพลแบบโบว์ไท่เมื่อนำมาพัฒนาร่วม EBG และ FPR เพื่อป้อนกำลังให้กับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ โดยใช้ขนาดมาตรฐานในการออกแบบสายอากาศแบบแพทช์โดยทั่ว ๆ ไป ซึ่งได้อ้างอิงกับการป้อนแบบเก่าหรือผ่านสายเฟสแบบเดิม พบว่าระบบป้อนใหม่สามารถลดเซดค่าการสูญเสียจากสายอื่นเนื่องมาจากการสูญเสียกำลังงานภายในสายเฟสจากการป้อนแบบเดิมได้ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มอัตราขยายและความกว้างแถบให้กับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ให้มากขึ้น ซึ่งสามารถลดความซับซ้อนในการออกแบบการแบ่งกำลังงานเพื่อป้อนให้แพทช์แต่ละอีลิเมนต์ได้ ซึ่งมีข้อดีว่าการป้อนแบบเก่าคือสามารถปรับและแก้ไขประสิทธิภาพของสายอากาศโดยไม่ต้องขึ้นรูปชิ้นงานใหม่ทั้งหมด ถึงแม้ว่าโครงสร้างทั้งหมดของสายอากาศจะมีความหนาที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากโครงสร้างของตัวป้อนกำลัง แต่

เพราะสามารถปรับปรุงและแก้ไขได้โดยง่ายในส่วนจากระบบป้อนได้โดยตรง ซึ่งผลการวัดทดสอบสายอากาศต้นแบบจากการป้อนกำลังด้วยระบบป้อนใหม่ จะแสดงในบทที่ 5 ต่อไป



บทที่ 5

สร้างและทดสอบสายอากาศด้วยระบบป้อนแบบใหม่

5.1 กล่าวนำ

สำหรับบทนี้เป็นการนำผลการจำลองระบบป้อนแบบใหม่ที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะของระบบป้อนแบบใหม่ในบทที่ 4 โดยได้เลือกตัวกระตุ้นแบบโบว์ไท เพื่อสร้างต้นแบบร่วมกับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศได้ทั้งอัตราขยายและความกว้างแถบ และทำการวัดทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ที่สำคัญซึ่งได้แก่ ค่าอัตราขยาย (gain) ค่าความกว้างแถบ (bandwidth) ค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ (S_{11}) แบบรูปการแผ่กำลัง (radiation pattern) อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (standing wave ratio: SWR) และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ เพื่อเปรียบเทียบค่าคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้จากลักษณะการป้อนแบบใหม่ (ไม่ใช่สายเฟส) กับลักษณะการป้อนกำลังแบบเก่า (ใช้สายเฟส) ในลำดับต่อไป

5.2 ขั้นตอนการสร้างระบบป้อนแบบใหม่

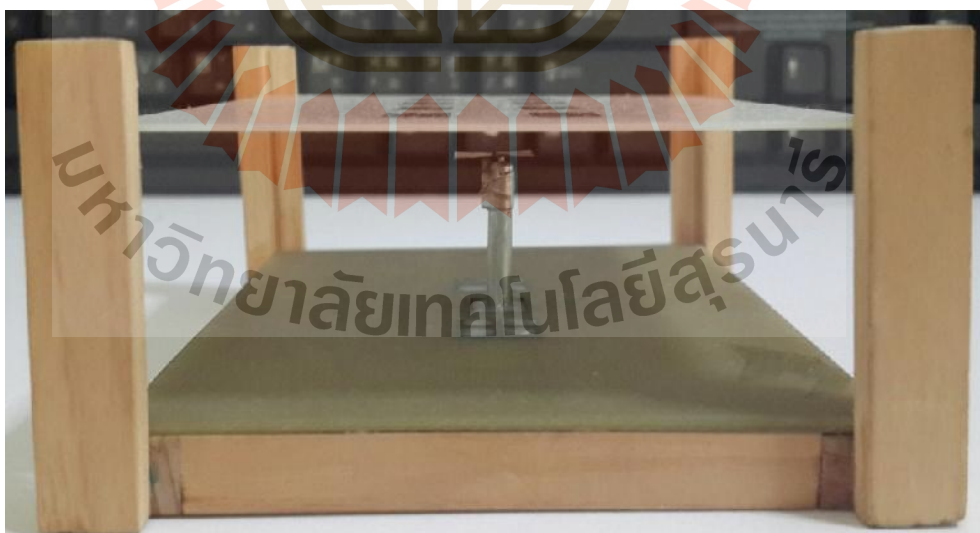
จากผลการจำลองระบบป้อนแบบใหม่ด้วยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในบทที่ 4 ด้วยตัวกระตุ้นสัญญาณชนิดไดโพลแบบโบว์ไท ซึ่งได้ใช้พารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบดังต่อไปนี้ ความยาวของไดโพลแบบโบว์ไท ($l_{bowties}$) มีค่าเท่ากับ 4.7625 มิลลิเมตร ความกว้างส่วนปลายของแขนไดโพลแบบโบว์ไท ($w_{bowties}$) มีค่าเท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร ความกว้างส่วนต้นของแขนไดโพลแบบโบว์ไท (w_{bot}) มีค่าเท่ากับ 0.9 มิลลิเมตร ความหนาของไดโพลแบบโบว์ไท (t_{bow}) มีค่าเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างแขนไดโพลแบบโบว์ไท (d_{feed}) มีค่าเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร

โดยเลือกใช้สายนำสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดแข็ง (rigid coaxial) หรือกึ่งแข็ง (semi-rigid coaxial) เพื่อใช้ในการส่งสัญญาณให้กับไดโพลแบบโบว์ไท ซึ่งจำเป็นต้องวางตัว ณ ตำแหน่งกึ่งระหว่าง EBG และระยะความสูงที่ตามที่ได้ทำการการออกแบบในบทที่ 4 ซึ่งขั้นตอนการเมตต์ได้ใช้วิธีการเมตซ์แบบ Pawsey Stub ด้วยความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น



รูปที่ 5.1 ต้นแบบตัวกระตุ้นสัญญาณโดยใช้ไดโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG

จากนั้นนำสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับขนาด 2x4 อีลิเมนต์ ด้วยขนาดของสายพื้นฐานที่ได้นำมาออกแบบ ซึ่งทำการการป้อนกำลังโดยตรงให้กับสายอากาศด้วยเทคนิค ฟาบริ-เปโรท์ เรโซเนเตอร์ ซึ่งลักษณะโครงสร้างของตัวป้อนแบบใหม่สำหรับสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.2

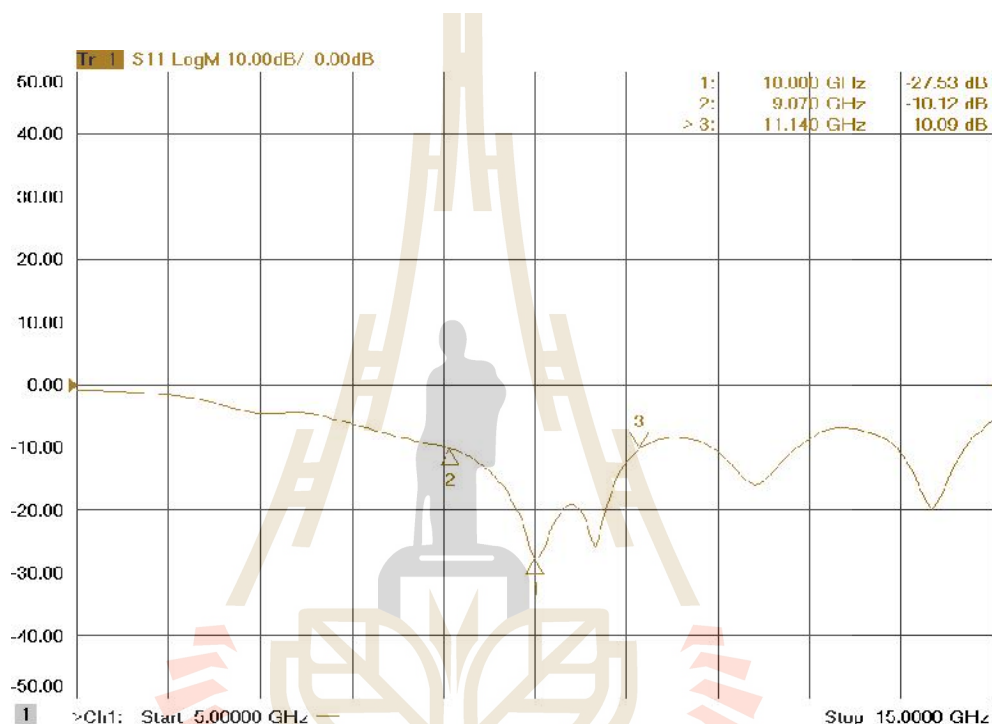


รูปที่ 5.2 ต้นแบบระบบป้อนแบบใหม่สำหรับสายอากาศแถวไมโครสตริป 2x4 อีลิเมนต์

5.3 ผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ

5.3.1 ความกว้างแถบ (bandwidth) และค่าการสูญเสียกำลังจากการสะท้อนกลับ (S_{11})

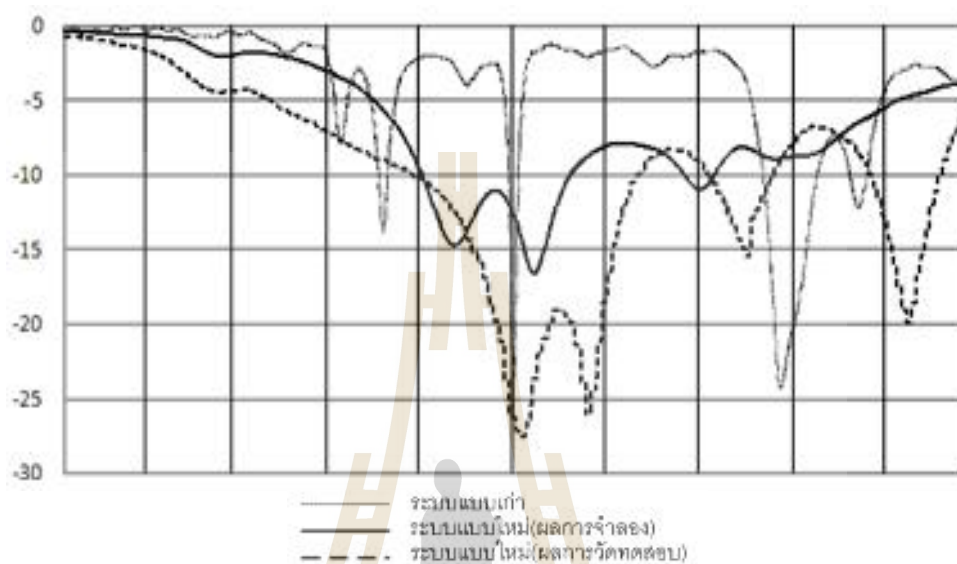
จากการทดสอบคุณสมบัติสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์จำนวน 2x4 อีลิเมนต์ ที่ความถี่ 10 GHz ได้ค่า S_{11} เท่ากับ -27.53 dBi และมีความกว้างแถบเท่ากับ 2.070 GHz ในช่วงความถี่ 9.070–11.140 GHz คิดเป็น 20.48 % ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ค่าการสูญเสียกำลังงานย้อนกลับ

จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองการป้อน ด้วยวิธีเท่ากับระบบป้อนแบบใหม่ที่ได้พัฒนาขึ้น จากผลการจำลองและผลการวัดทดสอบสายอากาศ จะเห็นได้ว่า ค่าการสูญเสียกำลังงานย้อนกลับและความกว้างแถบของสายอากาศจากการวัดทดสอบด้วยระบบป้อนใหม่ให้ค่าที่ดีกว่าผลการจำลอง ซึ่งสาเหตุอันเนื่องมาจากระบบการแมตช์ที่จำเป็นต้องพัฒนาเพิ่มเข้ามาในกระบวนการสร้างชิ้นงาน เพราะด้วยหลักการของฟาบรี-เปโรต์ เรโซเนเตอร์นั้นต้องอาศัยส่วนของพื้นที่ว่างดังกล่าว เพื่อให้สามารถเกิดการสะท้อนกำลังงานได้ โดยไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆ ถึงแม้ว่ากระบวนการสร้างต้นแบบจะมีส่วนการแมตช์นี้เพิ่มเข้ามาในภายหลังเพื่อให้เกิดการส่งกำลังงานที่สมบูรณ์ก็ตาม แต่ไม่มีผลกระทบในทางลบต่อค่าคุณสมบัติอื่นของสายอากาศ แต่ได้ส่งผลใน

ทางบวกทั้งค่าการสูญเสียกำลังงานย้อนกลับและความกว้างแถบที่ดีขึ้นต่อสายอากาศ ดังแสดงดังรูปที่ 5.4



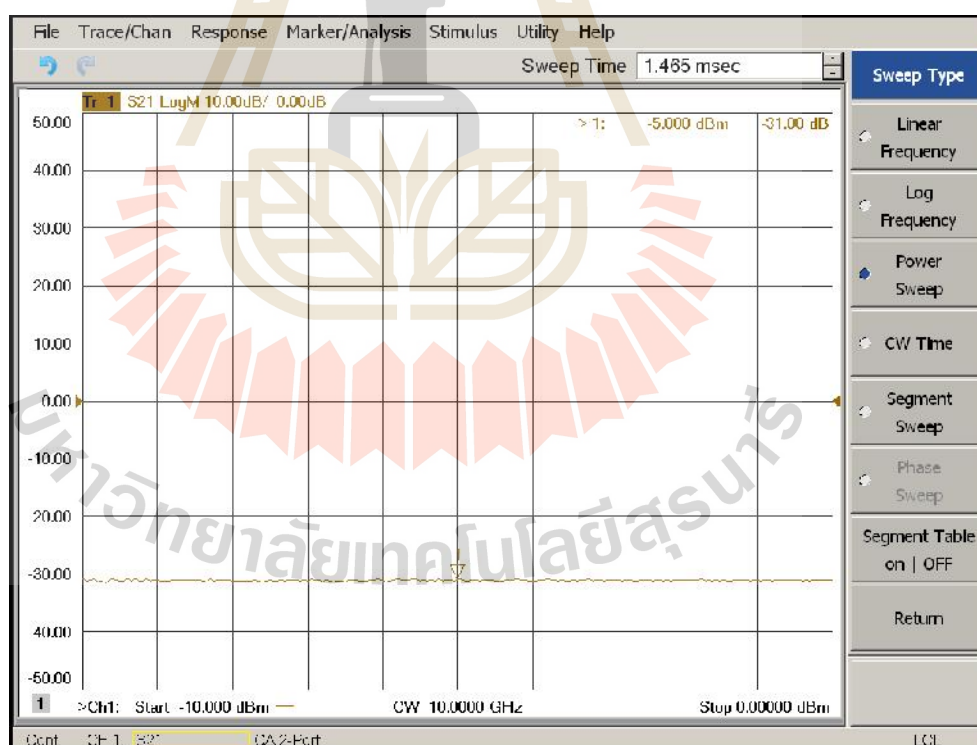
รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบค่าการสูญเสียกำลังงานย้อนกลับสำหรับระบบป้อนแบบเก่าและระบบป้อนแบบใหม่

5.3.2 อัตราขยาย

ได้ทำการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ โดยกำหนดให้กำลังตัวเครื่องส่งเท่ากับ -5 dBi ค่าอัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง เท่ากับ -13.8 dBi ระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ 1.269 เมตร โดยลักษณะการจัดวางดังรูปที่ 5.5 และค่ากำลังงานภาครับเท่ากับ -31.00 dBi ดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.5 ลักษณะการติดตั้งสายอากาศเพื่อทดสอบอัตราขยาย



รูปที่ 5.6 ผลการวัดกำลังงานภาครับของสายอากาศจากการป้อนสัญญาณด้วยระบบป้อนแบบใหม่

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{1}{4\pi R} \right)^2 G_{0t} G_{0r} \quad (5.1)$$

สามารถคำนวณอัตราขยายของสายอากาศได้จากสมการ (1) จะได้ว่า อัตราขยาย เท่ากับ 14.71 dBi ซึ่งสามารถสรุปค่าอัตราขยายและความกว้างแถบของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์แบบแพทช์จำนวน 2x4 อีลิเมนต์ ได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าคุณลักษณะของสายอากาศจากลักษณะการป้อนแบบเก่าและแบบใหม่

ค่าคุณลักษณะของสายอากาศ	ระบบป้อน		
	การป้อนแบบผ่านสายเฟส	ป้อนแบบใหม่ (ผลการจำลอง)	ป้อนแบบใหม่ (ผลการวัดทดสอบ)
อัตราขยาย (dBi)	13.93	14.75	14.71
ความกว้างแถบ (MHz)	101.12 (1.0112%)	1676.60 (17.135%)	2070 (20.48%)

5.3.3 แบบรูปการแผ่กระจายกำลัง

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

ซึ่งผลการวัดทดสอบสายอากาศด้วยระบบป้อนใหม่ ได้ทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลอง ได้ลักษณะแบบรูปการแผ่กำลังงานในลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.8

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

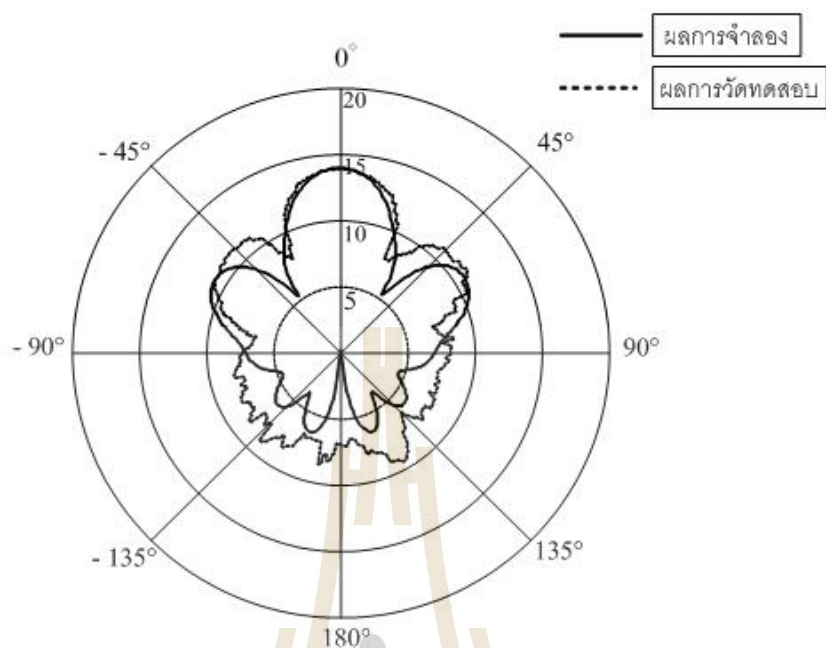


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

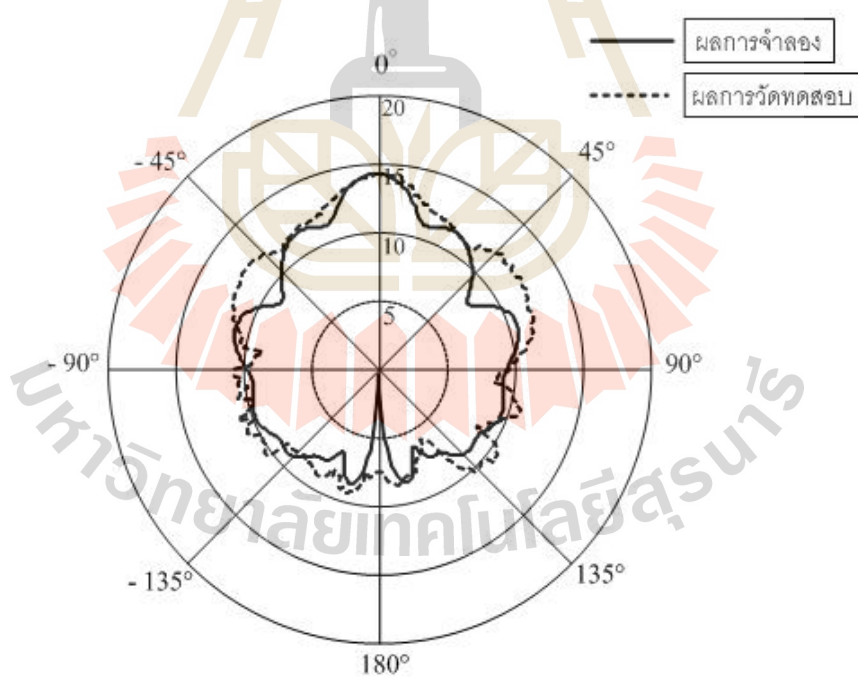


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.7 ลักษณะการวางตัวของสายอากาศเพื่อวัดแบบรูปการแผ่กำลัง

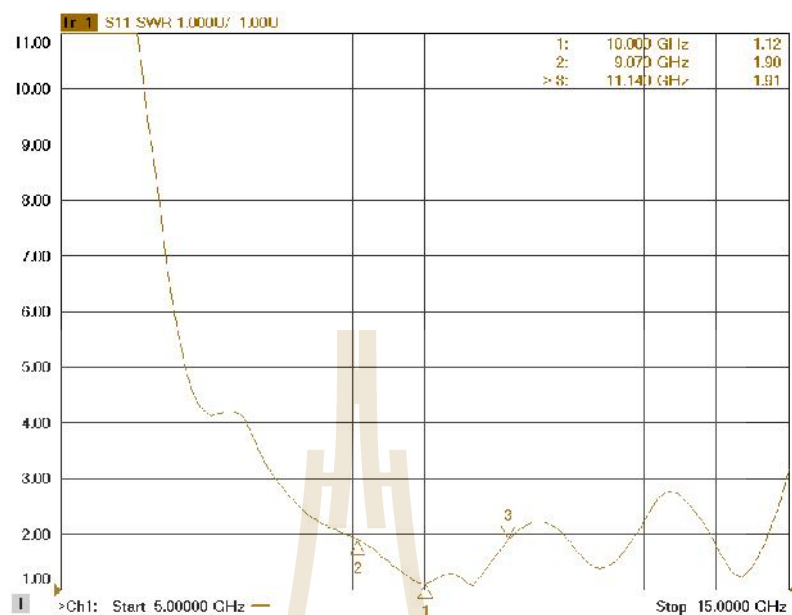


(ก)

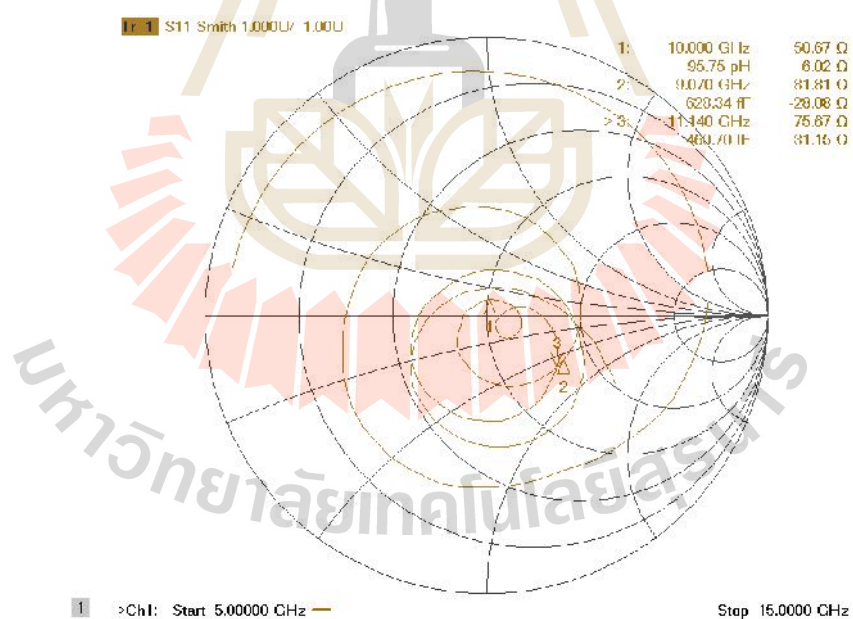


(ข)

รูปที่ 5.8 แบบรูปการแผ่กำลังงาน (ก) ระบายสนามไฟฟ้า (ข) ระบายสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 5.9 แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศจากการป้อนกำลังด้วยระบบป้อนใหม่



รูปที่ 5.10 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจากการป้อนกำลังด้วยระบบป้อนใหม่

5.4 สรุป

จะเห็นได้ว่าผลการวัดทดสอบระบบป้อนแบบใหม่ ด้วยเทคนิค FPR และ ตัวกระตุ้นแบบโบว์ ไทพร้อมกับ EBG บนระนาบกราวด์ มีค่าอัตราขยายของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 14.71 dBi ในขณะที่ผลการจำลองมีค่าอัตราขยายเท่ากับ 14.75 dBi ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการป้อนกำลังผ่านสายเฟสแบบเก่าที่มีอัตราขยายจะเท่ากับ 13.93 dBi และผลการวัดค่าความกว้างแบนของสายอากาศจากระบบป้อนใหม่ มีค่าความกว้างแถบเท่ากับ 2.07 GHz หรือ 20.48% ในขณะที่ผลการจำลองมีค่าความกว้างแถบมีค่าเท่ากับ 1.67676 GHz และความกว้างแถบ มีค่าเท่ากับ 17.135 MHz ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง พบว่าผลการจำลองความกว้างแถบของสายอากาศด้วยระบบป้อนแบบเก่า มีค่าความกว้างแถบเพียงแค่ 101.12 MHz หรือ 1.0112% จะเห็นได้ว่าด้วย สมมติฐานจากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST สามารถยืนยันสมมติฐานดังกล่าวได้ ด้วยผลการวัดค่าคุณลักษณะของสายอากาศ คืออัตราขยายและความกว้างแบนของสายอากาศสเกลลำดับแบบแพทช์ขนาด 2x4 มิลลิเมตร ด้วยระบบป้อนใหม่ที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งจะนำเสนอผลสรุปโครงการวิจัยนี้ในบทที่ 6 ในลำดับต่อไป

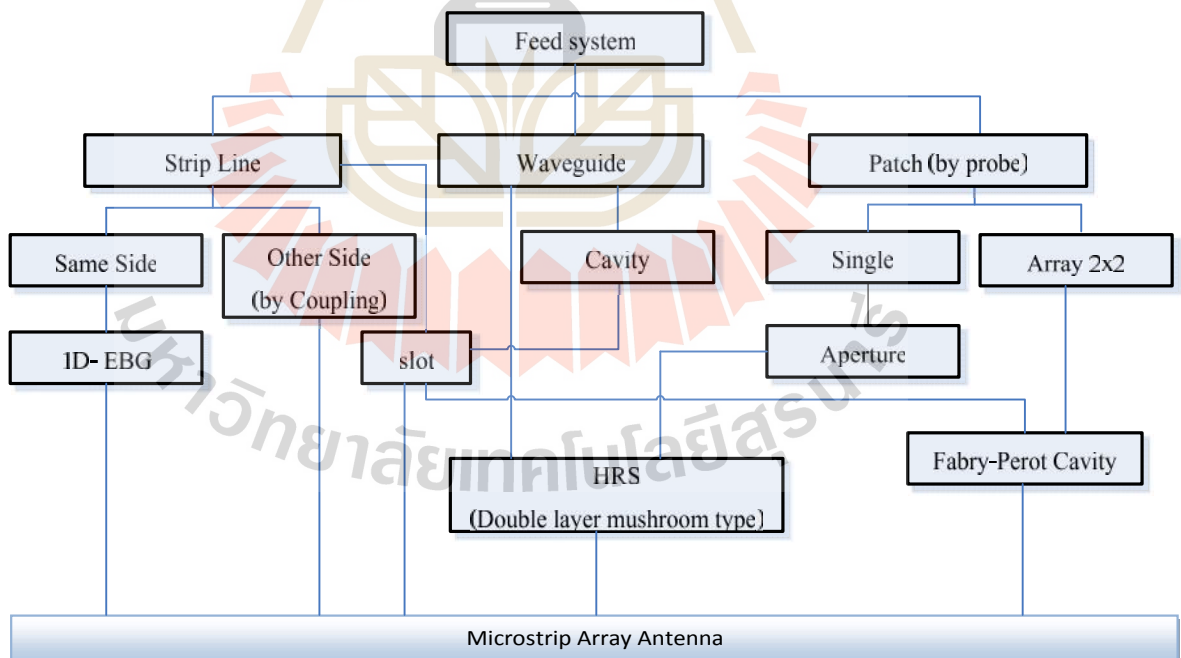


บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

ด้วยวัตถุประสงค์ของงานวิจัย เพื่อพัฒนาระบบป้อนแบบใหม่สำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ (PPA) ด้วยการส่งกำลังแบบไม่ผ่านสายเฟสและคงคุณสมบัติของสายอากาศแถวไมโครสตริปจากการป้อนกำลังด้วยสายเฟสไว้ได้เช่นเดิม ทั้งอัตราขยายและความกว้างแถบของสายอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สามารถเพิ่มความกว้างแถบของสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์ให้สูงกว่าเดิมเมื่อเทียบกับการป้อนกำลังแบบเก่า ซึ่งจากผลการศึกษาปรีทศวรรณกรรมจากบทที่ 2 พบว่า มีเทคนิควิธีต่าง ๆ ที่มีการนำการพัฒนาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศตามจุดประสงค์ของงานวิจัยนั้น ๆ ซึ่งเมื่อศึกษาและพิจารณาเฉพาะส่วนของเทคนิคและวิธีต่าง ๆ ของการป้อนกำลัง ซึ่งพบว่ามีอยู่หลากหลายวิธีด้วยกัน ดังแสดงรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 เทคนิคการป้อนการป้อนกำลังสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์

จากรูป 6.1 สามารถสรุปประสิทธิภาพของสายอากาศอันเนื่องมาจากการป้อนในแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) เทคนิคการป้อนด้วยสายเฟสหรือสายไมโครสตริป (phasing line)

การป้อนกำลังแบบสายเฟสหรือสายไมโครสตริป มีลักษณะโครงสร้างที่ออกแบบได้หลายแบบ อาทิเช่น โครงสร้างแถวลำดับแบบแพทช์แบบสี่เหลี่ยม โครงสร้างแถวลำดับแพทช์แบบวงกลม ซึ่งโครงสร้างแถวลำดับมีการออกแบบขนาดต่างๆ เช่น 2x2 4x4 และ 8x8 อิลิเมนต์ เป็นต้น ลักษณะการป้อนสามารถป้อนจากตำแหน่งจุดป้อนผ่านสายส่งไปยังแพทช์ หรือการป้อนโดยอาศัยการเหนี่ยวนำระหว่างกราวด์ไปยังแพทช์ ซึ่งเป็นการป้อนผ่านจุดร่วมแบบเครือข่าย สำหรับการออกแบบสายอากาศที่มีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศในแง่การเพิ่มอัตราขยาย การเพิ่มความกว้างแถบ การลดพูน้าง โดยพบว่า การป้อนแบบเครือข่ายของสายอากาศที่มีจำนวนอิลิเมนต์มากกว่าจะมีอัตราขยายดีกว่า โครงสร้างของสายออกแบบที่มีอิลิเมนต์น้อยกว่า การป้อนโดยอาศัยการเหนี่ยวนำระหว่างกราวด์ไปยังแพทช์แบบรูปวงกลมจะดีกว่าแพทช์แบบสี่เหลี่ยม เนื่องจาก มีมิติขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ทิศทางการสะท้อนสูง ทำให้อัตราขยายเพิ่มขึ้น และสามารถลดพูน้างได้

2) เทคนิคการป้อนด้วยสายเฟสและการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยแถวลำดับแบบแพทช์

ในส่วนของเทคนิคการป้อนด้วยสายเฟสเมื่อพิจารณาเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยแถวลำดับแบบแพทช์ จากการศึกษาพบว่า ความสูงระหว่างระนาบกราวด์กับแพทช์แถวลำดับตัวป้อนที่เหมาะสม อาทิ แพทช์แถวลำดับตัวป้อนที่วางแบบโพรงฟาบรี-เปโรต์ โดยที่ความสูงของโพรงฟาบรี-เปโรต์จะมีผลต่ออัตราขยายของสายอากาศ

3) เทคนิคการป้อนด้วยการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยร่องท่อนำคลื่น และโพรง

สำหรับเทคนิคการป้อนด้วยการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นมีการออกแบบโครงสร้างหลายแบบ อาทิเช่น การป้อนด้วยการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยร่อง การป้อนด้วยการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยท่อนำคลื่น และโพรง เป็นต้น จากการศึกษาพบว่า การป้อนด้วยการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยร่องแถวลำดับจะสามารถออกแบบร่วมกับโครงสร้างสะท้อนคู่ด้วย EBG แบบหนึ่งมิติ ออกแบบร่วมกับเทคนิค FSS และโพรงฟาบรี-เปโรต์ หรือออกแบบร่วมกับ EBG กับโครงสร้างแบบ จากการออกแบบร่วมกับเทคนิคดังกล่าวจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศได้ในเรื่อง การเพิ่มอัตราขยาย และการเพิ่มความกว้างแถบได้ ในส่วนการป้อนด้วยการเหนี่ยวนำระหว่างชั้นด้วยท่อนำคลื่นและโพรง สามารถใช้วิธีการป้อนแบบหลายช่องป้อน โดยออกแบบสายอากาศ

ด้วย EBG กับโครงสร้างแบบคล้ายดอกเห็ด (mushroom) หรือ ใช้เทคนิคการป้อนแบบหลายแหล่งจ่ายร่วมกับเทคนิค FSS ก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่อง อัตราขยายที่เพิ่มขึ้นได้

จากการศึกษาการป้อนแบบต่างๆ ร่วมกับการออกแบบโครงสร้างสายอากาศแบบต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ โดยสรุปแล้ว พบว่า เทคนิคการป้อนกำลังด้วยการกระตุ้นสัญญาณโดยตรงผ่านสายส่งหรือกระตุ้นผ่านโพรบที่ส่งผ่านสัญญาณไปยังสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์โดยการแบ่งกำลังของสายเฟส มีข้อจำกัดในเรื่องของการสูญเสียภายในสายเฟส อีกทั้งอาจส่งผลให้ความกว้างแถบลดลงจึงได้มีการพัฒนาโครงสร้างสำหรับระบบป้อนกำลังงานให้ใช้สายเฟสน้อยลงและได้นำเทคนิคการเหนี่ยวนำด้วยโครงสร้างต่าง ๆ เพื่อแก้ปัญหา และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศในเรื่องการเพิ่มอัตราขยาย ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองโครงสร้างตัวกระตุ้นสัญญาณโดยเลือกใช้สายอากาศไดโพลแบบโบว์ไท่ ร่วมกับอภิวัดแบบ 2 มิติ ชนิด EBG ด้วยโครงสร้างแบบคล้ายดอกเห็ดแทนระนาบกราวด์ที่เคยใช้บนแผ่นวงจรพิมพ์ในการป้อนแบบเก่า ซึ่งลักษณะการวางตัวของตัวป้อนกับสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์จะเป็นลักษณะการเหนี่ยวนำสัญญาณระหว่างโพรงฟาบรี-เปโรท์เรโซเนเตอร์ ซึ่งเป็นเทคนิคการสะสมกำลังภายในโพรงอากาศว่างเพื่อส่งกำลังต่อไปยังแพทช์ จึงเป็นเทคนิคที่สอดคล้องกับวางตัวของโครงสร้างที่สามารถนำมาระบบป้อนกำลังให้กับสายอากาศแถวลำดับโดยไม่ต้องป้อนกำลังผ่านสายเฟส

ซึ่งตัวป้อนกำลังจะประกอบด้วยไดโพลแบบโบว์ไท่ร่วมกับ EBG จำนวน 2 หน่วย เซลล์บนระนาบกราวด์ โดยแต่ละหน่วยจะประกอบด้วย 4 เซลล์ ซึ่งระยะห่างระหว่าง หน่วยเซลล์เท่ากับ 20 มิลลิเมตร และด้วยคุณสมบัติเด่นช่วยขจัดคลื่นของ EBG ผิวทำให้อัตราขยายของตัวกระตุ้นมีค่าเท่ากับ 9.224 dB แต่แบบรูปการแผ่กำลังไม่ได้สูงสุด ณ บริเวณกึ่งกลางระนาบ จึงได้ทำการลดจำนวน EBG ลง เพื่อให้เกิดแบบรูปการแผ่กำลังที่สม่ำเสมอทั้งระนาบ กล่าวได้ว่ากำลังที่ส่งออกไปด้วยแหล่งกำเนิดเป็นแหล่งเดียว ทำให้เฟสที่ตกกระทบสายอากาศแถวลำดับแต่ละอิลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งระยะการจัดของเส้นรังสีแต่ละแพทช์จะมีขนาดไม่เท่ากัน ส่งผลให้เกิดลักษณะแบบรูปการแผ่กำลังมีความสม่ำเสมอหรือเท่ากันทั้งแนวระนาบ พบว่า จากลักษณะตัวป้อนกำลังดังกล่าว มีความเหมาะสมของการเกิดแบบรูปการแผ่กำลังเป็นแบบระนาบในทิศทางด้านหน้าของการใช้งาน ซึ่งค่าอัตราขยายจะมีค่าเท่ากับ 8.110 dB และความกว้างแถบเท่ากับ 2.5334 GHz หรือ 25.334%

จากผลการจำลองโครงสร้างตัวป้อนแบบใหม่ดังกล่าว โดยใช้ป้อนกำลังให้กับ PPA ด้วยความสูงและระยะห่างของอิลิเมนต์ของตัวป้อนกับสายอากาศที่เหมาะสม พบว่าระยะความสูงเท่ากับ 0.733λ หรือ 22 มิลลิเมตร และระยะห่างเท่ากับ 0.667λ หรือ 20 มิลลิเมตร จะมีค่าอัตราขยาย

เท่ากับ 14.75 dB ซึ่งค่าอัตราขยายจะมีค่าเท่ากับ 13.93 dB หรือ 14.01 dB (จากคู่มือการทดลอง สายอากาศประจำห้องปฏิบัติการ) และความกว้างแถบของสายอากาศจะมีค่าเท่ากับ 1.67060 GHz หรือ 17.135 % และได้ทำการเปรียบเทียบกับการป้อนแบบเก่าที่มีค่าเท่ากับ 101.12 MHz หรือ 1.0112% พบว่า ค่าทั้งอัตราขยายและความกว้างแถบของ PAA ด้วยการป้อนกำลังจากระบบป้อนแบบใหม่ จะมีค่าสูงกว่าลักษณะการป้อนกำลังแบบเก่า ดังแสดงไว้ในตารางสรุปที่ 5.1

ต่อจากนั้น ทำการผลการวัดทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบแพทช์จากชิ้นงานต้นแบบ พบว่า มีค่าอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 14.71 dB และค่าความกว้างแถบเท่ากับ 2.07 GHz หรือ 20.48 % จะเห็นได้ว่า ค่าความกว้างแถบมีค่ามากกว่าการจำลอง ซึ่งส่งผลมาจากส่วนของการแมตช์แบบไดโพลแบบโบว์ไทด์ด้วยสายโคแอกเชียลแบบแข็ง (rigid coaxial) เพิ่มเติมเข้ามา นอกเหนือจากการจำลอง ซึ่งพบว่า โครงสร้างทั้งหมดของสายอากาศจะมีความหนาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของตัวกระตุ้นดังกล่าว

กล่าวได้ว่า ถึงแม้ว่า PPA จะมีความหนาเพิ่มมากขึ้น แต่สามารถแลกเปลี่ยน (trade-off) ความกว้างแถบจากการป้อนด้วยระบบป้อนใหม่กับวิธีการป้อนแบบเก่ามากกว่า 10 % เมื่อเทียบกับลักษณะการป้อนด้วยสายเฟสแบบเก่าที่มีความบางของสายอากาศมากกว่า และความซับซ้อนในการออกแบบที่มากกว่าลักษณะการป้อนแบบเก่าก็ตาม

พบว่า ค่าประสิทธิภาพรวม (total efficiency) ของระบบป้อนแบบเก่าและระบบป้อนใหม่มีค่า 1.2670 dB และ 0.9774 dB ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า พื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศทั้งระบบ จะขึ้นอยู่กับค่า ประสิทธิภาพจากตัวนำและไดอิเล็กตริกและ สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ พบว่า ค่าประสิทธิภาพรวมของระบบป้อนใหม่มีค่าน้อยกว่าระบบป้อนแบบเก่า แต่ให้อัตราขยายที่มากกว่า ซึ่งประสิทธิภาพจากตัวนำและไดอิเล็กตริกของสายอากาศที่เกิดขึ้นจากระบบป้อนใหม่มีประสิทธิภาพสูงกว่าด้วยโครงสร้างของระบบป้อนที่แตกต่างกัน นั่นคือ ระบบป้อนใหม่เกิดการสูญเสียจากระบบส่งกำลังที่น้อยกว่าการป้อนกำลังแบบเก่า

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

ประสิทธิภาพของสายอากาศดีขึ้นกว่าเดิมทั้งอัตราขยายและความกว้างแถบของสายอากาศแฉะลำดับแบบแพทช์ได้โดยไม่มีการใช้สายเฟสภายในตัวสายอากาศแต่อย่างใด

สามารถกล่าวสรุปได้ว่า ด้วยสมมติฐานที่กำหนดไว้ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศแฉะลำดับแบบแพทช์ ในส่วนของการป้อน ซึ่งได้พัฒนาร่วมกับเทคนิคช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ EBG ด้วยตำแหน่งที่เหมาะสมของการเกิดความกว้างลำคลื่นในทิศทางด้านหน้า สำหรับสายอากาศแบบแพทช์ ซึ่งคุณสมบัติสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศให้ดีขึ้นในส่วนของการจัดคลื่นผิว อีกทั้งสามารถสะสมกำลังงานภายในระบบป้อนจากลักษณะการวางตัวของโครงสร้างสายอากาศ ในลักษณะโพรงฟาบริ-เปโรต์ โซเนเตอร์ ทำให้กำลังงานถูกส่งออกไปในลักษณะบรอดไซด์ตามแนวแกนของ PPA ซึ่งเป็นทิศทางด้านหน้าของสายอากาศ ในขณะที่ใช้งานจริง สามารถรักษาอัตราขยายไว้ได้ด้วยลักษณะการป้อนแบบใหม่ ซึ่งพบว่าสามารถลดค่าการสูญเสียจากการป้อนแบบเก่า และสามารถเพิ่มความกว้างแถบของสายอากาศให้มากขึ้น อีกทั้งยังสามารถเพิ่มอัตราขยายให้สูงขึ้นได้ จากการปรับแต่งเฉพาะสายอากาศแพทช์ ถึงแม้ว่า จะถูกชดเชยด้วยความกว้างแถบที่ลดลง แต่ยังคงมากกว่าลักษณะการป้อนแบบเก่าหรือแบบเดิม

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนา

สำหรับระบบป้อนที่ได้ออกแบบและพัฒนาด้วยคุณสมบัติของไดโพลแบบโบว์ไทท์ที่มีความกว้างแถบค่อนข้างกว้าง สามารถปรับปรุงสายอากาศแพทช์ให้รองรับความกว้างแถบที่เกิดขึ้นจากตัวกระตุ้นได้ในอนาคตขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งานเนื่องจากสายอากาศถูกวางตัวในลักษณะที่สามารถปรับปรุงได้โดยไม่เกี่ยวข้องกับตัวกระตุ้น อันเนื่องมาจากเทคนิคโพรง FPR ที่ได้นำมาร่วมพัฒนาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศ ดังกล่าวมาข้างต้น ซึ่งลักษณะการทำงานของแฉะลำดับแบบแพทช์เปรียบเสมือนปรสิต (parasitic) ที่สามารถรับกำลังจากตัวป้อนกำลังได้โดยตรง ทำให้เกิดการสูญเสียภายในระบบป้อนน้อยกว่าวิธีการป้อนกำลังแบบเดิม

รายการอ้างอิง

- รังสรรค์ วงศ์สรรค์. 2555. **วิศวกรรมสายอากาศ** (พิมพ์ครั้งที่ 3). ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีการศึกษา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ศราวุธ ชัยมูล และ ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน. (2554). **อภิวัดสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านสายอากาศ (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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

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.**

Warakorn Sarikha and Rangsan Wongsan, Unidirectional Bow-Tie Antenna with Bandwidth and Gain Improvement, **International Conference on Electronics, Information and Communication (ICEIC 2017), 174-177, 2017.**

- หมายเหตุ รวบรวมผลการตอบรับการตีพิมพ์บทความวิชาการฉบับเต็ม (Full Paper)



ประวัติผู้เขียน

ว่าที่ ร.ต.วรากรณ์ สาริษา เกิดเมื่อวันที่ 3 มกราคม 2523 จบการศึกษาชั้นประถมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 จากโรงเรียนบ้านควนสามัคคี ต.พ่วงพรมคร อ.เคียนซา จ.สุราษฎร์ธานี พ.ศ 2536 และจบการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาชั้น 1-6 โรงเรียนพรุพิพิทยาคม ต.พรุพิ อ.บ้านนาสาร จ.สุราษฎร์ธานี

ปี 2542-2546 ทำหน้าที่เป็นประธานสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม รุ่นที่ 7 และกิจกรรมต่างๆ ภายในรั้วมหาวิทยาลัย อาทิเช่น สมาชิกองค์การบริหาร องค์การนักศึกษา ประจำปี พ.ศ 2543 ค่ายอบรมภาวะผู้นำ (ค่ายสวนอภัย 2) ปี พ.ศ. 2543 กลุ่มแกนนำกิจกรรมรับน้องใหม่และกิจกรรมนักศึกษา ช่วงปี พ.ศ. 2543-2545 และกิจกรรมอื่น ๆ ของมหาวิทยาลัย

ปี พ.ศ. 2546 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา ในปี พ.ศ 2551

ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาเอกวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วศ.ด.) สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา และทำหน้าที่ เป็นอาจารย์ประจำคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี