



รายงานการวิจัย

สายอากาศอัตราขยายสูงและน้ำหนักเบาสำหรับระบบเรดาร์โดยใช้ปากแตร
ครอบด้วยโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ารูปทรงกระบอก
(High-Gain and Light-Weight Antenna for Radar System Using
a Horn covered with Cylindrical EBG Cavity)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

สายอากาศอัตราขยายสูงและน้ำหนักเบาสำหรับระบบเรดาร์โดยใช้ปากแตร
ครอบด้วยโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ารูปทรงกระบอก
(High-Gain and Light-Weight Antenna for Radar System Using
a Horn covered with Cylindrical EBG Cavity)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรคต์
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายศรันย์ คัมภีร์ภัทร

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

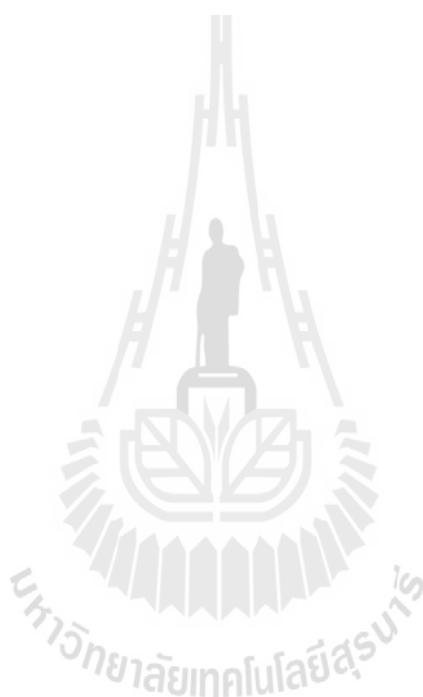
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ธันวาคม 2557

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สามารถดำเนินการได้ และได้รับผลสำเร็จบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้
ทุกประการ โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2556
สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายศรันย์ คัมภีร์ภัทร ผู้ร่วมวิจัยซึ่งช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

รังสรรค์ วงศ์สรรค์



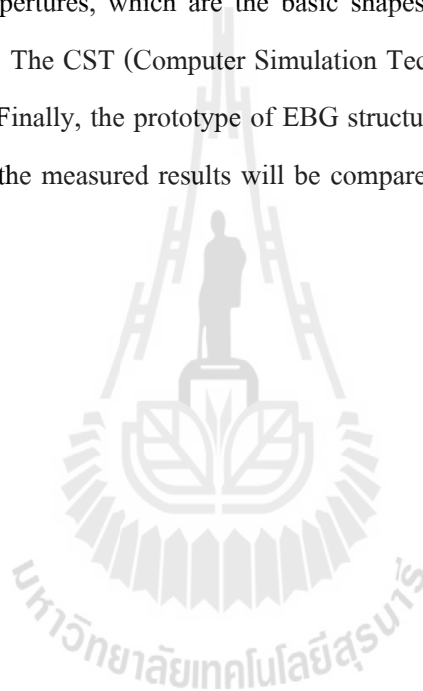
บทคัดย่อ

สายอากาศปากแตร (horn antenna) เป็นสายอากาศอะเพอร์เจอร์ (aperture antenna) ชนิดหนึ่งที่มีอัตราขยายสูงเมื่อเทียบกับสายอากาศชนิดอื่น ๆ จากข้อดีดังกล่าว จึงมีการนำสายอากาศปากแตรมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย นอกจากนี้ยังมีการนำตัวสะท้อนพาราโบลิคมาใช้งานร่วมกับสายอากาศปากแตรเพื่อให้สายอากาศมีอัตราขยายที่สูงมากขึ้น เพื่อเป็นการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศปากแตรให้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอเทคนิคการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศปากแตรโดยใช้ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap หรือ EBG) มาประกอบรวม ซึ่งสามารถพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศ ในส่วนของการเพิ่มอัตราขยาย โดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนกำลังงาน (power transfer) ผ่าน โครงสร้างของ EBG ดังกล่าว โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์การเพิ่มอัตราขยายของอะเพอร์เจอร์รูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งเป็นรูปทรงพื้นฐานของสายอากาศปากแตร ที่ความถี่ขึ้นย่านไมโครเวฟ (uplink microwave band) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST (Computer Simulation Technology) ในการออกแบบและจำลองผลระบบสายอากาศ สุดท้ายได้สร้างต้นแบบของโครงสร้าง EBG ซึ่งได้จากการคำนวณ เพื่อนำไปใช้งานร่วมกับสายอากาศปากแตร และนำมาวัดทดสอบเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบและจากโปรแกรมสำเร็จรูป CST



Abstract

A horn antenna is a type of aperture antenna, which provides the moderately high gain as compared to the other antennas. Consequently, the horn antenna is widely applied for various tasks. Applications requiring high gain antenna such as the parabolic reflector can be applied with the horn antenna to enhance the higher gain. Therefore, this research proposes a technique to enhance the gain of horn antenna by using Electromagnetic Band Gap (EBG) transfer the power from its aperture through EBG structure. This study has analyzed the EBG utilization for gain enhancement of rectangular apertures, which are the basic shapes of horn antenna at an uplink frequency of microwave band. The CST (Computer Simulation Technology) is used to design and simulate the antenna system. Finally, the prototype of EBG structure, which is installed with horn antennas, is fabricated. Then the measured results will be compared to the simulated results for validation.



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 สมมุติฐานของการวิจัย	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล	3
1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรม	
2.1 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1.1 สายอากาศสำหรับระบบเรดาร์.....	4
2.1.2 โพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap หรือ EBG).....	7
2.2 สรุป.....	10
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
3.1 สายอากาศปากแตร	11
3.2 โพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า.....	13
3.2.1 คำจำกัดความ และ โครงสร้างของ EBG.....	13
3.2.2 โครงสร้างของ EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะแบบกอน์เฟิน	17
3.2.3 โครงสร้างของ EBG และอภิวัดดู	20
3.3 สรุป.....	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศ	
4.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลอง	
สายอากาศปากแตร	21
4.1.1 สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิม	21
4.1.2 สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากเพิ่มปีกสแลบ	21
4.2 ศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองสายอากาศปากแตร	
รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากเพิ่มปีกสแลบร่วมกับ โครงสร้าง EBG.....	23
4.3 สรุป	28
บทที่ 5 ผลการวัดทดสอบ	
5.1 วิธีการสร้างสายอากาศปากแตรต้นแบบ	29
5.2 ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราส่วนคลื่นนิ่ง	31
5.3 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์	34
5.4 ผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน	35
5.5 ผลการวัดทดสอบอัตรายาย	40
5.6 เปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและการจำลอง	43
5.7 สรุป	43
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
6.1 บทสรุป.....	44
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	44
เอกสารอ้างอิง	46
ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	50
ประวัติผู้วิจัย.....	52

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่ไหลบนโครงสร้างของระนาบกราวด์ ที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์และ โพรงของ EBG	8
ตารางที่ 4.1	ผลการจำลองจากโปรแกรมสำเร็จรูป CST	28
ตารางที่ 5.1	การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบและการจำลองด้วย โปรแกรมสำเร็จรูป CST.....	43



สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 สายอากาศแถวลำดับแบบจัดเฟสในอะลาสกา	5
รูปที่ 2.2 สายอากาศท่อนำคลื่นแบบร่องสำหรับระบบเรดาร์เรือพาณิชย์	6
รูปที่ 2.3 สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกสำหรับระบบเรดาร์ ควบคุมการจราจรทางอากาศ	7
รูปที่ 2.4 โพรง EBG ที่มีลักษณะเป็นแบบกึ่งพื้นทรงกระบอก มาล้อมรอบสายอากาศโมนิโพล	9
รูปที่ 3.1 ลักษณะของสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากทั้งสามแบบหลัก	12
รูปที่ 3.2 ลักษณะของท่อนำคลื่นแบบท่อเหลี่ยมและท่อกลม	13
รูปที่ 3.3 สายอากาศปากแตรต่อด้วยท่อนำคลื่นที่มีสายอากาศไดโพล ขนาดเล็กเป็นจุดป้อน	13
รูปที่ 3.4 EBG เส้นส่งผ่านพลังงานแบบ 1 มิติ	14
รูปที่ 3.5 EBG ระนาบบนผิวหน้าแบบ 2 มิติ	15
รูปที่ 3.6 EBG โครงสร้างปริมาตรแบบ 3 มิติ	15
รูปที่ 3.7 พารามิเตอร์และรูปแบบของค่าหนึ่งขั้วนำและค่าความจุ ของโครงสร้าง EBG	16
รูปที่ 3.8 หนึ่งหน่วยเซลล์ของโพรงเป็นลักษณะแบบกึ่งพื้นแบบระนาบ ที่มีสี่ชั้น (Weily et al., 2005)	18
รูปที่ 3.9 หนึ่งหน่วยเซลล์ของโพรงเป็นลักษณะแบบกึ่งพื้นแบบระนาบ ที่มีชั้นเดียว	18
รูปที่ 4.1 สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิม	22
รูปที่ 4.2 สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากเพิ่มปีกสแลบ	22
รูปที่ 4.3 สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากเพิ่มปีกสแลบ ร่วมกับโครงสร้าง EBG	23
รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราขยายและการจัดรูปแบบการวางตำแหน่ง ของ EBG ในรูปแบบตามสมการทางเรขาคณิตแบบต่าง ๆ	24
รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราขยายและระยะห่างระหว่างสายอากาศ ปากแตรและโครงสร้างของ EBG (d)	25

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราขยายและมีรัศมีของควอดราติก (r)	25
รูปที่ 4.7 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศปากแตรทั้ง 3 แบบ	26
รูปที่ 4.8 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรทั้ง 3 แบบ	27
รูปที่ 5.1 สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิมที่เพิ่มปีกสแลบ	30
รูปที่ 5.2 โครงสร้าง EBG ที่มีการจัดรูปแบบการวางตำแหน่งเป็นแบบควอดราติก	30
รูปที่ 5.3 สายอากาศปากแตรต้นแบบ	31
รูปที่ 5.4 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศปากแตรต้นแบบ จากการวัดทดสอบ	32
รูปที่ 5.5 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศปากแตรต้นแบบจากการวัดทดสอบ	32
รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างผลวัดทดสอบ และผลจากการจำลอง	33
รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนคลื่นนิ่งระหว่างผลวัดทดสอบ และผลจากการจำลอง	33
รูปที่ 5.8 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศปากแตรต้นแบบจากการวัดทดสอบ	34
รูปที่ 5.9 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า	36
รูปที่ 5.10 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก	37
รูปที่ 5.11 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรต้นแบบจากการวัดทดสอบ	38
รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานระหว่างผลวัดทดสอบ และผลจากการจำลอง	39
รูปที่ 5.13 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยม มุมฉากแบบดั้งเดิม	40
รูปที่ 5.14 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศปากแตรต้นแบบ	41

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ระบบเรดาร์เป็นระบบที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการระบุระยะทาง ความสูง ทิศทาง ความเร็วของวัตถุที่อยู่กับที่และเคลื่อนที่ เครื่องส่งจะส่งคลื่นวิทยุออกมา แล้วไปสะท้อนกับวัตถุ เป้าหมายและเครื่องรับจะจับสัญญาณที่สะท้อนกลับออกมา ถึงแม้ว่าสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจาก อ่อนมากแต่ระบบก็สามารถขยายได้ ปัจจุบันระบบเรดาร์ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย ได้แก่ (1) การถ่ายภาพด้วยระบบเรดาร์ หลักการพื้นฐาน คือ มีชุดผลิตสัญญาณเรดาร์ส่งสัญญาณ เรดาร์ (pulse) จากชุดส่งสัญญาณ (radar transmitter) คู่เป้าหมายภาคพื้น เมื่อสัญญาณเรดาร์กระทบ เป้าหมายที่เป็นวัตถุ เช่น อาคารสิ่งปลูกสร้าง ถนน ต้นไม้ แม่น้ำ เป็นต้น จะสะท้อนสัญญาณกลับ (back scattering) เข้าตัวรับสัญญาณเรดาร์ (radar receiver) ผ่านกระบวนการสร้างภาพถ่ายเรดาร์ ตัวแปรของการสะท้อนของสัญญาณเรดาร์ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ เช่น ลักษณะพื้นผิว ของวัตถุว่าเรียบหรือขรุขระ ลักษณะภูมิประเทศว่าเป็นภูเขาหรือโค้งเว้า สภาพความชื้น เป็นต้น โดยระบบเรดาร์สามารถถ่ายภาพได้ทุกสภาพอากาศ เช่น เมฆ หมอก ฝนตก ทั้งในเวลากลางวันและ กลางคืนได้ (2) การใช้ระบบเรดาร์ในการตรวจอากาศ ตรวจจับหาบริเวณที่มีฝนหรือฝนฟ้าคะนอง รวมทั้งรายงานความแรงทิศทางและความเร็วในการเคลื่อนตัวของกลุ่มฝนนั้น ๆ ด้วย ตรวจและ ติดตามการเคลื่อนตัว รวมทั้งหาศูนย์กลางของพายุหมุน ตรวจหิมะ ลูกเห็บ เมฆ ซึ่งช่วยในการ พยากรณ์อากาศระยะสั้น วิเคราะห์ทิศทางและความเร็วลมชั้นบนในระดับต่าง ๆ รวมทั้งช่วยในการ เตือนภัยและเตรียมการป้องกันน้ำท่วม เพราะเรดาร์สามารถตรวจจับ และรายงานผลการตรวจใน ขณะที่ปรากฏการณ์ต่าง ๆ กำลังเกิดขึ้นจริง (real time observation) ในบริเวณที่ห่างออกไปจากสถานี เรดาร์หลายร้อยกิโลเมตร ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยสายตาศักดิ์ และด้วยการนำเอาวิทยาการอัน ทันสมัยของคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้กับเครื่องเรดาร์ ก็ยิ่งทำให้เพิ่มความรวดเร็วในการทำงานของ เรดาร์ยิ่งขึ้น และ (3) การตรวจจับและการค้นคว้าวิจัยด้านการจราจรทางอากาศ ระบบนำร่อง และใช้ ในทางการทหาร คือ ระบบนำร่องจีปนาวูช ระบบเรดาร์ในการลาดตระเวนและสนามรบ เป็นต้น

จากข้อดีของระบบเรดาร์ดังกล่าว ส่งผลให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับ ระบบเรดาร์อย่างกว้างขวาง แต่ทั้งนี้ระบบเรดาร์ที่ใช้งานในปัจจุบันนั้นยังคงมีขนาดใหญ่ ทำให้ต้อง ใช้พื้นที่ติดตั้งบริเวณกว้าง อีกทั้งในขณะที่ใช้งานส่วนของสายอากาศทั้งหมดก็จะหมุนโดยรอบ 360 องศา จำเป็นต้องออกแบบกลไกการหมุนที่ต้องรองรับน้ำหนักให้สามารถทำงานได้อย่างมี ประสิทธิภาพ ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบและ วิเคราะห์ระบบสายอากาศสำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบเรดาร์ โดยใช้สายอากาศปากแตร (horn

antenna) ซึ่งเป็นสายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์ (aperture antenna) ที่มีการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านออกมาทางอะเพอร์เจอร์หรือช่องเปิดของตัวสายอากาศ ทำให้สายอากาศปากแตรมีอัตราขยายที่สูงและมีค่าเป็นสัดส่วนโดยประมาณกับความถี่ยกกำลังสอง และหากต้องการให้สายอากาศมีประสิทธิภาพและสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงขึ้นก็สามารถออกแบบให้พื้นที่ของอะเพอร์เจอร์มีขนาดกว้างกว่าความยาวคลื่นใช้งานยกกำลังสอง และข้อดีอีกประการหนึ่ง คือ ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศปากแตรจะขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของตัวป้อน (feeder) ทำให้ง่ายต่อการแมตช์สายอากาศ (รังสรรค์ วงศ์สรรค์) และงานวิจัยนี้ได้นำโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap หรือ EBG) ที่สามารถพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศให้ดีขึ้นในส่วนของการขจัดคลื่นผิว และการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ ส่งผลให้ระบบสายอากาศมีขนาดเล็ก กระทัดรัด น้ำหนักเบา ทำให้ง่ายในการติดตั้งใช้งาน และสายอากาศยังมีอัตราขยายสูงมากกว่า 15 dB สำหรับการใช้งานในเรดาร์ระยะสั้น (Short Range Radar หรือ SRR) ช่วงความถี่ X band (8 – 12 GHz) ที่ระยะความยาวคลื่น (wavelength range) 2.5 – 3.75 เซนติเมตร และช่วงความถี่ I band (8 – 10 GHz) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน ITU ตามลำดับ สำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบเรดาร์ท่าอากาศยาน (airport radar system)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลของสายอากาศปากแตรและโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบเรดาร์

1.2.2 ออกแบบและจำลองผลระบบสายอากาศสำหรับระบบเรดาร์ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST (Computer Simulation Technology)

1.2.3 สร้างระบบสายอากาศต้นแบบ เพื่อเปรียบเทียบผลของการวัดทดสอบ และผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศปากแตรและโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

1.3.2 ออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศปากแตร และโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

1.3.3 สร้างระบบสายอากาศต้นแบบ เพื่อเปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

1.4 สมมุติฐานของการวิจัย

1.4.1 โพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศปากแตร และการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ

1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

1.5.1 วิธีดำเนินการวิจัย

- ศึกษาและสำรวจวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศปากแตรและโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

- ศึกษาการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST ทำการออกแบบสายอากาศปากแตรและโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า จำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และวิเคราะห์สมรรถนะของสายอากาศ เพื่อใช้งานในระบบเรดาร์

- สร้างสายอากาศปากแตรและโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า วัดทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST รวมทั้งสรุปผลงานวิจัย

- จัดทำบทความสำหรับนำเสนอผลการวิจัยและส่งตีพิมพ์

- จัดทำรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

1.5.2 สถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 4 (F4) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย

เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป และเป็นบริการความรู้แก่สถาบันการศึกษาและหน่วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศ หน่วยงานเอกชนหรือบริษัทที่ดำเนินธุรกิจเกี่ยวกับการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์สื่อสารและโทรคมนาคม

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

สายอากาศมีหน้าที่สำคัญในระบบการสื่อสาร คือ การรับและส่งสัญญาณข้อมูล ดังนั้นการเลือกใช้สายอากาศที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้งานก็จะเป็นการใช้งานสายอากาศได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ สายอากาศที่ใช้สำหรับระบบเรดาร์โดยส่วนมากจะเป็นสายอากาศที่มีอัตราขยายสูงและมีความกว้างลำครึ่งกำลัง (Half Power Beamwidth หรือ HPBW) ที่แคบมาก ๆ ที่เรียกว่า ลำคลื่นรูปปลายดินสอ (pencil beam) เพื่อความแม่นยำในการชี้เป้า (target locating) โดยในบทนี้จะกล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศที่นิยมนำมาใช้งานในระบบเรดาร์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีลักษณะโครงสร้างชนิดต่าง ๆ การออกแบบ และการประยุกต์ใช้งานที่เหมาะสมกับแต่ละโครงสร้าง

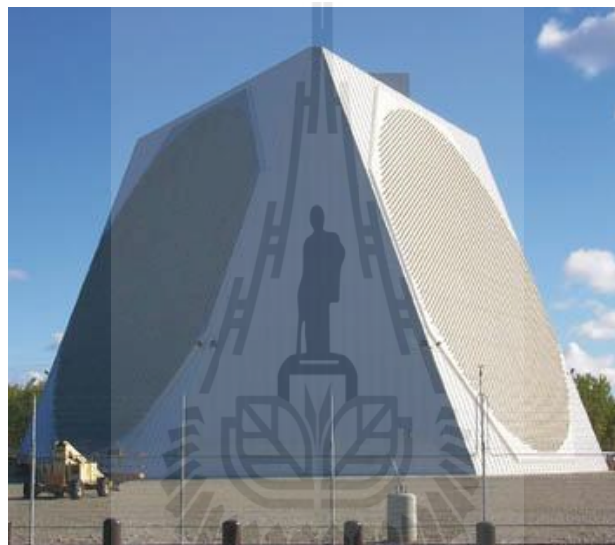
2.1 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 สายอากาศสำหรับระบบเรดาร์

สายอากาศในระบบเรดาร์มีหน้าที่ในการรวมและกำหนดทิศทางของคลื่นเรดาร์ที่ถูกส่งออกไป โดยให้การสะท้อนทางกายภาพของจากรเรดาร์ในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งสามารถปรับรูปร่างของแนวคลื่น (beam shape) ให้เป็นไปตามที่ต้องการทั้งภาครับและภาคส่งได้ ปัจจุบันสายอากาศที่ใช้งานในระบบเรดาร์มีสามชนิดหลัก ๆ ได้แก่ (1) สายอากาศแถวลำดับแบบจัดเฟส (phased array antenna) (2) สายอากาศท่อนำคลื่นแบบร่อง (slotted waveguide antenna) และ (3) สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลา (parabolic reflector antenna) (http://en.wikipedia.org/wiki/Radar#Antenna_design; <http://www.radartutorial.eu/06.antennas/an02.en.html>)

สายอากาศแถวลำดับแบบจัดเฟส เป็นสายอากาศแถวลำดับที่สามารถกำหนดให้มีการแผ่พลังงานออกไปในทิศทางตามที่ต้องการได้ ประกอบด้วยอิลิเมนต์สำหรับการแผ่คลื่นจำนวนมาก ซึ่งแต่ละอิลิเมนต์หรือกลุ่มของอิลิเมนต์จะถูกแยกออกจากกันด้วยตัวเปลี่ยนเฟส (phase shifter) โดยอิลิเมนต์หรือกลุ่มของอิลิเมนต์จะให้ลำคลื่นที่มีความต่างเฟสกัน สำหรับการสวิตช์ลำคลื่นได้รับการพัฒนาบนพื้นฐานของสายอากาศแถวลำดับแบบวงกลม (Krairiksh, Ngamjanyaporn, and Kessuwan, 2002) สายอากาศแถวลำดับแบบจัดเฟสถูกนำมาใช้งานในระบบเรดาร์ตั้งแต่สมัยสงครามโลกครั้งที่สอง สำหรับเป็นระบบนำร่องจีปนาวิธ จากรูปที่ 2.1 แสดงสายอากาศแถวลำดับแบบจัดเฟสในอะลาสกา จะเห็นว่าสายอากาศมีขนาดใหญ่และมีจำนวนของอิลิเมนต์มาก ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายที่สูงในการก่อสร้างและประสิทธิภาพของอิลิเมนต์ในการ

เปลี่ยนเฟสลดลง ต่อมาสายอากาศแถวลำดับแบบจัดเฟสได้ถูกพัฒนาให้มีขนาดกระทัดรัดและโครงสร้างเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่น ๆ อาทิเช่น การติดตั้งสายอากาศบนยานพาหนะ เรือ หรือเครื่องบิน สายอากาศแถวลำดับแบบจัดเฟสนอกจากจะใช้งานเป็นระบบนำร่อง จีปนาวธในระบบเรดาร์แล้ว ยังถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในระบบการค้นหาและการชี้เอกลักษณ์ของวัตถุหรือเป้าหมาย ด้วยการสร้างภาพจำลอง (imaging) การติดตามเป้าหมายจากระบบจำลองผล (simultaneous target tracking) และระบบการนำทาง (navigation system) (Skolnik, 1990) ข้อดีของสายอากาศแถวลำดับแบบจัดเฟส คือ อัตราขยายที่สูง ในขณะที่เดียวกันก็มีข้อจำกัด คือ ลำคลื่นสามารถครอบคลุมพื้นที่ได้ไม่เกิน 120° และมีความซับซ้อนของโครงสร้างและระบบการเปลี่ยนเฟส



รูปที่ 2.1 สายอากาศแถวลำดับแบบจัดเฟสในอะลาสก้า

สายอากาศท่อนำคลื่นแบบร่อง เป็นการนำท่อนำคลื่นมาประยุกต์เป็นสายอากาศด้วยการเจาะร่องท่อนำคลื่น สายอากาศท่อนำคลื่นแบบร่องนี้สามารถรองรับการใช้งานย่านความถี่ตั้งแต่ 300 MHz ถึง 25 GHz นิยมนำมาใช้งานในระบบนำทางเรดาร์เช่นเดียวกับสายอากาศแถวลำดับแบบจัดเฟส เนื่องจากมีราคาต้นทุนที่ถูกกว่ามาก (<http://www.radartutorial.eu/06.antennas/an30.en.html>) นอกจากนี้สายอากาศท่อนำคลื่นแบบร่องยังสามารถพบเห็นได้อย่างแพร่หลายในสายอากาศเรดาร์แบบสามมิติ (3D radar antennas) เพราะมีข้อดีในเรื่องของการสูญเสียต่ำ ประสิทธิภาพสูง และการโพลาไรซ์เส้นตรง (linear polarization) ที่มีโพลาไรซ์ไขว้ต่ำ (low cross-polarization) (Skolnik, 2001; Liu, Jackson, and Long, 2012) รูปที่ 2.2 แสดงสายอากาศท่อนำคลื่น

แบบร่องที่ใช้ในระบบเรดาร์ของเรือพาณิชย์ (http://en.wikipedia.org/wiki/Radar#Slotted_waveguide)



รูปที่ 2.2 สายอากาศท่อนำคลื่นแบบร่องสำหรับระบบเรดาร์เรือพาณิชย์

สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลาโบลิก เป็นสายอากาศที่ได้รับความนิยมสูงสุดสำหรับใช้งานในระบบเรดาร์ เนื่องจากสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกสามารถออกแบบให้มีค่าอัตราขยายที่มากกว่า 30 dB ในย่านความถี่ไมโครเวฟหรือย่านความถี่ที่สูงกว่า ด้วยหลักการที่ใช้ตัวสะท้อนพาราโบลิกทำหน้าที่ในการรับส่งคลื่น และมีสายอากาศส่วนป้อน (feed antenna) ขนาดเล็กที่ใช้สำหรับป้อนสัญญาณให้กับผิวสะท้อนพาราโบลิก โดยสายอากาศส่วนป้อนจะถูกติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งของจุดโฟกัส ซึ่งอยู่ด้านหลังของผิวสะท้อนพาราโบลิก (วงศ์สรรรงค์, 2555) รูปที่ 2.3 แสดงสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกที่ใช้งานในระบบเรดาร์สำหรับควบคุมการจราจรทางอากาศ (http://en.wikipedia.org/wiki/Parabolic_antenna) สำหรับสายอากาศส่วนป้อนที่นิยมใช้ในการป้อนสัญญาณให้กับผิวสะท้อนพาราโบลิก คือ สายอากาศปากแตร (horn antenna) เนื่องจากอัตราขยายของสายอากาศปากแตรจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าสภาพเงาเชิงทศทาง (Balanis, 1997) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของสายอากาศส่วนป้อน

จากหลักการของสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกที่ใช้สายอากาศปากแตรเป็นสายอากาศส่วนป้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอสายอากาศสำหรับระบบเรดาร์โดยใช้สายอากาศปากแตรร่วมกับ EBG ซึ่งงานวิจัยนี้ได้้นำโครงสร้างของ EBG มาประยุกต์ใช้เพื่อทดแทนตัวสะท้อนพาราโบลิกที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ได้สายอากาศต้นแบบสำหรับระบบเรดาร์ที่มีขนาดเล็ก กระทัดรัด น้ำหนักเบา และง่ายต่อการติดตั้งและใช้งาน



รูปที่ 2.3 สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลาโบลิกสำหรับระบบเรดาร์ควบคุมการจราจรทางอากาศ

2.1.2 โพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap หรือ EBG)

ในการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นไปตามทิศทางของระนาบกราวด์ โดยจะมีการแผ่พลังงานไปยังอากาศว่าง ซึ่งคลื่นผิวนี้อาจลดประสิทธิภาพและอัตราขยายของสายอากาศ การเลี้ยวเบนของคลื่นผิวนี้อาจเพิ่มการแผ่พลังงานของพวยคลื่นด้านหลัง (back lobe) ให้มากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio) ที่ไม่ดี ปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้ EBG ร่วมกับโครงสร้างของสายอากาศ เพื่อลดหรือขจัดคลื่นผิวนอกจากนี้ EBG ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศได้ในส่วนของอัตราขยาย และลดระดับการแผ่พลังงานของพวยคลื่นด้านข้างและด้านหลัง และการเชื่อมต่อร่วม (mutual coupling) สำหรับสายอากาศแถวลำดับ (Yang and Rahmat-Samii, 2009) ในการประยุกต์ใช้ EBG เพื่อลดหรือขจัดคลื่นผิวนของสายอากาศนั้น อาจทำได้โดยการออกแบบให้ EBG ล้อมรอบสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์เพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศและลดระดับของพวยคลื่นด้านหลัง (Coccioli et al., 1999; Gonzalo, Maagt, and Sorolla, 1999; Colburn and Rahmat-Samii, 1999) หรือในการออกแบบสายอากาศสำหรับระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลก GPS โดยใช้โพรง EBG แทนที่ใช้วงกลมหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น (quarter-wavelength choke rings) (McKinzie III et al., 2002)

ในการประยุกต์ใช้ EBG เพื่อออกแบบให้สายอากาศมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และมีประสิทธิภาพ เป็นอีกหัวข้อหนึ่งที่เป็นความต้องการสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายที่ทันสมัย ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่ไหลบน โครงสร้างของระนาบกราวด์ที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ (Perfect Electric Conductor หรือ PEC) และ EBG พบว่าในกรณีที่ 1 เมื่อกระแสไฟฟ้ามีทิศพุ่งขึ้นในแนวตั้งของระนาบกราวด์ตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์กระแสจินตภาพ (J) ก็จะมีทิศพุ่งขึ้นในแนวตั้งเช่นเดียวกัน ส่งผลให้สายอากาศมีการแผ่พลังงานที่มีประสิทธิภาพดี แต่สายอากาศจะมีขนาดใหญ่ เพื่อให้สายอากาศมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน จึงได้กำหนดตำแหน่งของสายอากาศให้อยู่ในแนวอนเหมือนกับระนาบกราวด์ตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ พบว่าสายอากาศมีการแผ่พลังงานที่ไม่มีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เนื่องจากกระแสไฟฟ้าและกระแสจินตภาพมีทิศตรงข้ามกัน ดังเช่นกรณีที่ 2 ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะกระแสที่ไหลผ่านระนาบกราวด์ตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์จะมีการกลับเฟส ดังนั้นจึงแก้ปัญหาด้วยการนำ EBG มาใช้ทดแทนระนาบกราวด์ตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่าน EBG จะไม่มีการกลับเฟส ทำให้กระแสไฟฟ้าและกระแสจินตภาพมีทิศตรงกัน ส่งผลให้สายอากาศมีการแผ่พลังงานที่มีประสิทธิภาพดี และนอกจากนี้ยังมี โครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ดังกรณีที่ 3

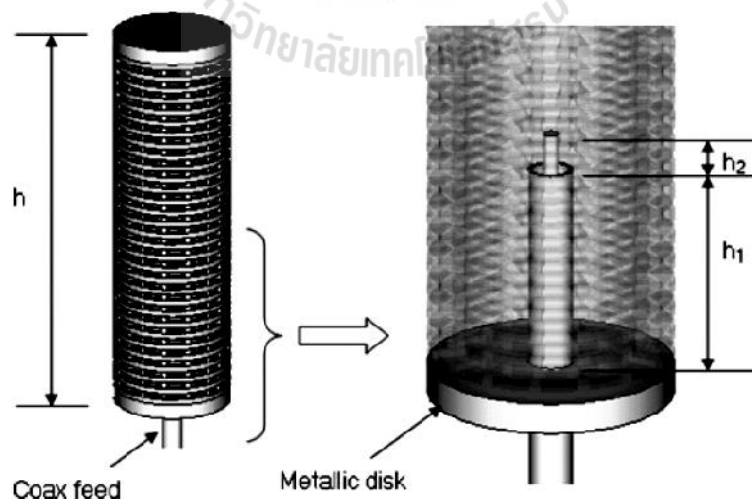
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่ไหลบน โครงสร้างของระนาบกราวด์ที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์และ โพรงของ EBG

ทิศทางการไหลของกระแส	ประสิทธิภาพ	โครงสร้างง่าย ไม่ซับซ้อน
	✓	✗
	✗	✓
	✓	✓

จากแนวคิดดังกล่าวจึงได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับสายอากาศเส้นลวด (wire antenna) ออกตีพิมพ์เผยแพร่มากมาย โดยออกแบบประยุกต์ให้สายอากาศเส้นลวดมีโครงสร้างบนระนาบกราวด์ที่เป็น EBG (Li and Rahmat-Samii, 2000; Yang and Rahmat-Samii, 2001; Yang and Rahmat-Samii,

2003; Clavijo, Diaz, and E. McKinzie, 2003; Nakano et al., 2005) ตัวอย่างของสายอากาศเส้นลวด ได้แก่ สายอากาศไดโพล (dipole antenna) สายอากาศโมโนโพล (monopole antenna) และสายอากาศรูปก้นหอย (spiral antenna) นอกจากนี้ EBG ยังสามารถปรับให้สมรรถนะของสายอากาศให้มีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศให้มากขึ้นอีกด้วย ได้แก่ การออกแบบให้เป็นสายอากาศหลายแถบความถี่ และสายอากาศแถบความถี่กว้าง อาทิเช่น สายอากาศเคิร์ลเป็นสายอากาศอย่างง่ายที่มีแบบรูปโพลาริซแบบวงกลม (Nakano et al., 1993; Colburn and Rahmat-Samii, 1996) แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของสายอากาศเคิร์ลไม่ดีมาก ถ้าวางอยู่บนระนาบกราวด์ PEC เนื่องจากกระแสไฟฟ้าและ กระแสจินตภาพมีทิศตรงข้ามกัน เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการใช้ระนาบกราวด์ EBG แทนระนาบกราวด์ตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ (Yang and Rahmat-Samii, 2001) กระแสที่ไหลผ่าน EBG จะไม่มีการกลับเฟส ทำให้กระแสไฟฟ้าและ กระแสจินตภาพมีทิศทางเดียวกัน ส่งผลให้สายอากาศมีการแผ่พลังงานที่มีประสิทธิภาพดี

EBG สามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบสายอากาศเพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศได้มากถึง 20 dBi อาทิเช่น การใช้โพรง EBG แบบ 3 มิติในการออกแบบสายอากาศโมโนโพล (monopole antenna) ให้มีลำคลื่นที่แคบ (narrow-beam) เพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศให้สูงขึ้น สำหรับการประยุกต์ใช้งานในแถบความยาวคลื่นมิลลิเมตร (millimeter wave) ที่ความถี่ 95 GHz (Lee et al., 2009) โดยนำโพรง EBG ที่มีลักษณะเป็นแบบกึ่งทรงกระบอกมาล้อมรอบสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.4 จากการวัดทดสอบพบว่าระบบสายอากาศมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beam Width หรือ HPBW) 6.5° และมีอัตราขยาย 5 dBi

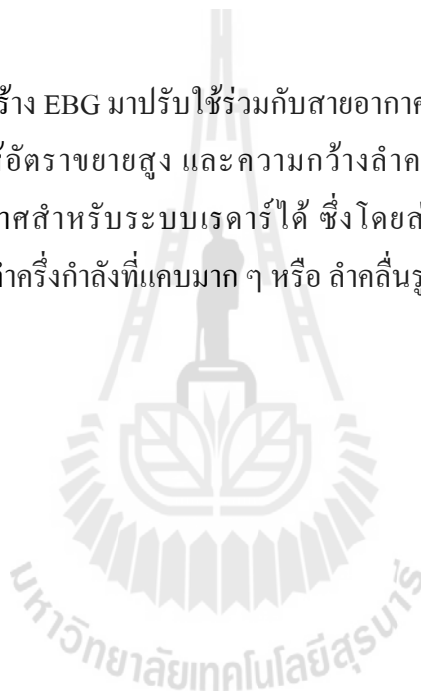


รูปที่ 2.4 โพรง EBG ที่มีลักษณะเป็นแบบกึ่งทรงกระบอกมาล้อมรอบสายอากาศโมโนโพล

จากแนวคิดดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้นำโพรง EBG แบบ 3 มิติมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศปากแตร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศให้ดียิ่งขึ้น ในการใช้งานเรดาร์ระยะสั้นช่วงความถี่ X band (8 – 12 GHz) ที่ระยะความยาวคลื่น 2.5 – 3.75 เซนติเมตร และช่วงความถี่ I band (8 – 10 GHz) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน ITU ตามลำดับ ระบบสายอากาศประกอบด้วยสายอากาศปากแตรที่ด้านหน้าของสายอากาศจะมีโครงสร้างของ EBG แบบ 3 มิติซึ่งจะทำหน้าที่เสมือนเป็นวงจรรีโซแนนซ์ให้แก่สายอากาศปากแตร ดังนั้นงานวิจัยนี้จะมีจุดเด่นแตกต่างจากสายอากาศที่ใช้ในระบบเรดาร์ปัจจุบันคือ มีน้ำหนักเบา ปลอดภัย หนาแน่น ง่ายในการติดตั้งและใช้งาน และสายอากาศมีอัตราขยายที่สูงมากกว่า 20 dB

2.2 สรุป

การนำโครงสร้าง EBG มาปรับใช้ร่วมกับสายอากาศปากแตร เพื่อลดขนาดตัวสะท้อนพาราโบลาขนาดใหญ่ แต่ให้อัตราขยายสูง และความกว้างลำคลื่นกำลังที่แคบ สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นสายอากาศสำหรับระบบเรดาร์ได้ ซึ่งโดยส่วนมากจะเป็นสายอากาศที่มีอัตราขยายสูงและมีความกว้างลำคลื่นกำลังที่แคบมาก ๆ หรือ ลำคลื่นรูปปลายคินสอ เพื่อความแม่นยำในการชี้เป้า



บทที่ 3

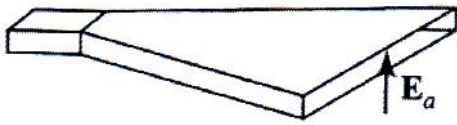
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศปากแตรและโครงสร้างของ EBG สำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบเรดาร์ระยะสั้นช่วงความถี่ X band (8 – 12 GHz) ที่ระยะความยาวคลื่น 2.5 – 3.75 เซนติเมตร และช่วงความถี่ I band (8 – 10 GHz) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน ITU ตามลำดับ ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะแบ่งออกเป็นสองหัวข้อ คือ หัวข้อแรกกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างพื้นฐาน และการป้อนกำลังงานของสายอากาศปากแตร และหัวข้อที่สองกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าในการประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศ และสรุป

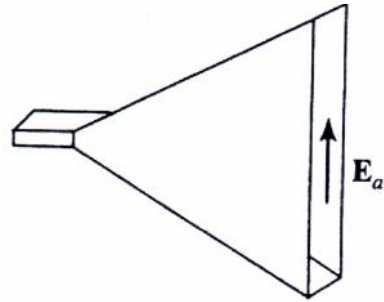
3.1 สายอากาศปากแตร

สายอากาศปากแตรเป็นสายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์ (aperture antenna) ที่มีการปล่อยพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านออกมาจากอะเพอร์เจอร์หรือช่องเปิดของสายอากาศ ซึ่งจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับการทำงานของเครื่องขยายเสียงที่เรียกว่าเมกะโฟน (megaphone) หรือไมโครโฟน (microphone) แบบที่มีตัวสะท้อนพาราโบลา ในกรณีที่ใช้สายอากาศปากแตรทำหน้าที่ในการรับสัญญาณ ก็จะใช้อะเพอร์เจอร์สำหรับรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในการออกแบบสายอากาศปากแตรให้มีความกว้างแถบมากขึ้นนั้น สามารถกระทำได้โดยการกาง (flaring) ส่วนของปากแตรให้มีลักษณะตามการเปลี่ยนแปลงของสนามเอกซ์โปเนนเชียล

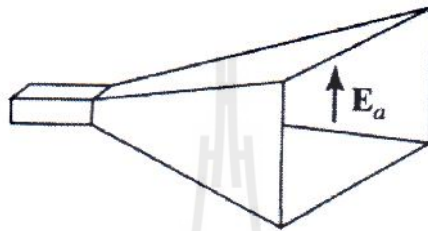
สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangular horn antenna) นิยมใช้งานกับความถี่ย่านไมโครเวฟ เพราะมีคุณสมบัติที่เป็นจุดเด่น คือ มีอัตราขยายที่สูงและมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่ำ นอกจากนี้ยังให้ความกว้างแถบค่อนข้างกว้างและที่สำคัญ คือ สามารถออกแบบและสร้างได้ง่าย สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากถูกแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบหลัก ได้แก่ (1) ปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane sectoral horn) (2) ปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane sectoral horn) และ (3) ปากแตรทรงพีระมิด แสดงดังรูปที่ 8.1(ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ (วงศ์สรรค์, 2555)



(ก) ปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามแม่เหล็ก



(ข) ปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามไฟฟ้า



(ค) ปากแตรทรงพีระมิด

รูปที่ 3.1 ลักษณะของสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากทั้งสามแบบหลัก

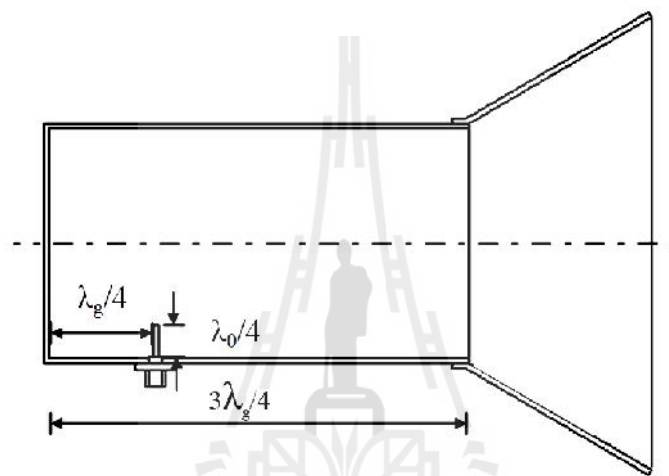
สำหรับการป้อนกำลังงานให้แก่สายอากาศปากแตรนั้น จะใช้ท่อนำคลื่น (waveguide) ซึ่งเป็นสายส่งสัญญาณชนิดหนึ่ง (สายโคแอกเชียลที่ไม่มีตัวนำตรงกลาง) โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นท่อกลม หรือท่อเหลี่ยมขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งานแสดงดังรูปที่ 3.2 ท่อนำคลื่นนิยมทำมาจากทองแดงหรืออะลูมิเนียม และฉนวนด้านในฉาบด้วยเงินเพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นตัวนำที่ดี (<http://th.wikipedia.org/wiki/ไมโครเวฟ>) ใช้สำหรับการส่งผ่านกำลังงานจากจุดป้อน คือ สายอากาศไดโพลขนาดเล็ก (short dipole) ไปยังสายอากาศปากแตร รูปที่ 3.3 แสดงสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ต่อด้วยท่อนำคลื่นแบบท่อเหลี่ยมซึ่งภายในมีสายอากาศไดโพลขนาดเล็กเป็นจุดป้อน และระยะห่างในการออกแบบจุดป้อน โดยที่ λ_g คือ ความยาวคลื่นของสัญญาณในท่อ (wavelength of the signal in the guide) และ λ_0 คือ ความยาวคลื่นในอากาศว่าง (wavelength in free space)



(ก) ท่อนำคลื่นแบบท่อเหลี่ยม

(ข) ท่อนำคลื่นแบบท่อกลม

รูปที่ 3.2 ลักษณะของท่อนำคลื่นแบบท่อเหลี่ยมและท่อกลม



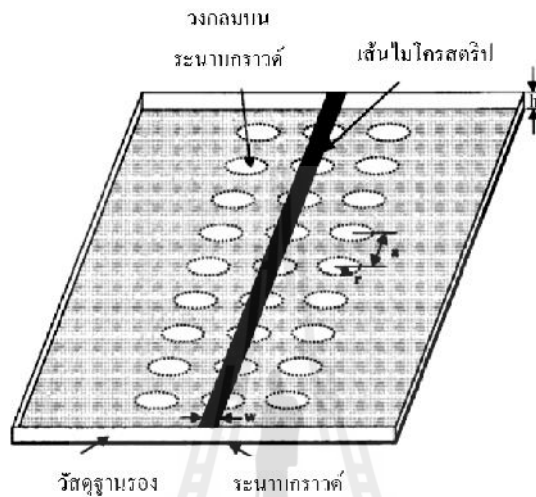
รูปที่ 3.3 สายอากาศปากแตรต่อด้วยท่อนำคลื่นที่มีสายอากาศไดโพลขนาดเล็กเป็นจุดป้อน

3.2 โพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

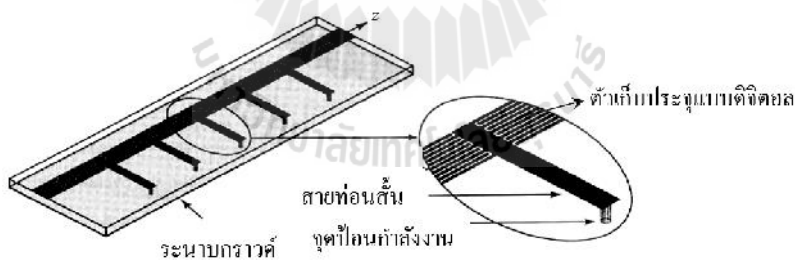
3.2.1 คำจำกัดความ และโครงสร้างของ EBG

โพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ EBG (Electromagnetic Band Gap) คือ วัสดุที่ขัดขวางหรือสนับสนุนการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแถบความถี่ที่เฉพาะเจาะจงสำหรับทุก ๆ มุมตกกระทบ และทุก ๆ สถานะของการโพลาไรซ์ โดยปกติแล้ว EBG จะประกอบด้วยวัสดุที่เป็นไดอิเล็กตริกและตัวนำที่เป็นโลหะ สามารถแบ่งประเภทของ EBG ตามลักษณะโครงสร้างของ EBG ได้ 3 ประเภทได้แก่ (1) EBG เส้นส่งผ่านพลังงานแบบ 1 มิติ เช่น เส้นใยโครสตรูปกับช่องกลมบนระนาบกราวด์ (Radisic et al., 1998) และเส้นส่งผ่านพลังงานที่ประกอบด้วยส่วนทางขวามือและทางซ้ายมือ (Caloz and Itoh, 2005) แสดงดังรูปที่ 3.4(ก) และ (ข) ตามลำดับ (2) EBG ระนาบบนผิวหน้าแบบ 2 มิติ จะมีลักษณะเป็นผิวหน้าคล้ายคอกเห็ด

(mushroom-like) (Sievenpiper et al., 1999) ดังรูปที่ 3.5(ก) และผิวหน้าแบบหนึ่งระนาบ (uni-planar) (Yang et al., 1999) ดังรูปที่ 3.5(ข) และ (3) EBG โครงสร้างปริมาตรแบบ 3 มิติ คือ มีโครงสร้างเป็นลักษณะแบบกองฟืน (woodpile) ซึ่งประกอบด้วยแถบสี่เหลี่ยมของไดอิเล็กตริก (Ozby et al., 1994) และมีโครงสร้างเป็นแถวลำดับแบบมีขา 3 ขา (tripod array) ซึ่งจะเป็นโลหะหลาย ๆ ชั้นซ้อนกันอยู่ (Barlevy and Rahmat-Samii, 2001) แสดงดังรูปที่ 3.6(ก) และ (ข) ตามลำดับ

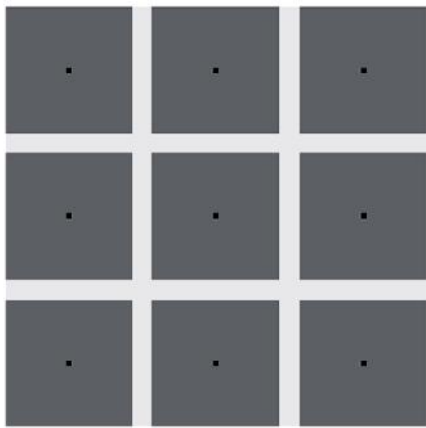


(ก) เส้นไมโครสตริป (Radisic et al., 1998)



(ข) เส้นส่งผ่านพลังงานส่วนทางขวามือ และทางซ้ายมือ (Caloz and Itoh, 2005)

รูปที่ 3.4 EBG เส้นส่งผ่านพลังงานแบบ 1 มิติ

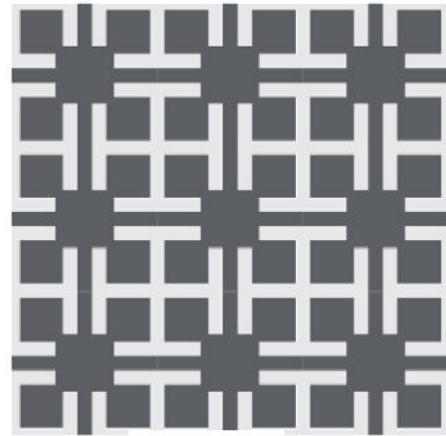


ด้านนอก



ด้านข้าง

(ก) ผิวหน้าคล้ายดอกเห็ด
(Sievenpiper et al., 1999)



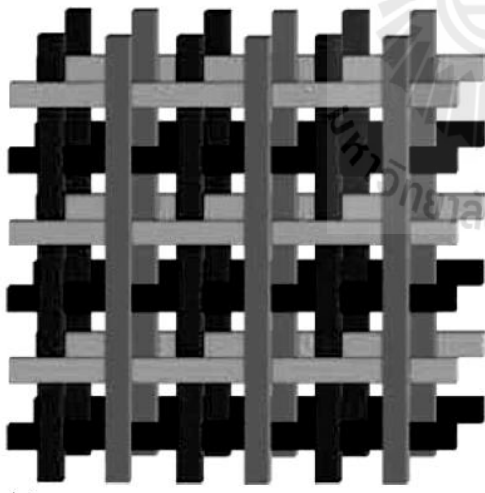
ด้านบน



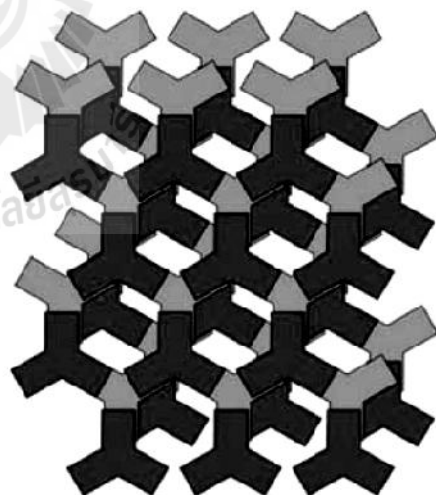
ด้านข้าง

(ข) ผิวหน้าแบบหนึ่งระนาบ
(Yang et al., 1999)

รูปที่ 3.5 EBG ระนาบบนผิวหน้าแบบ 2 มิติ



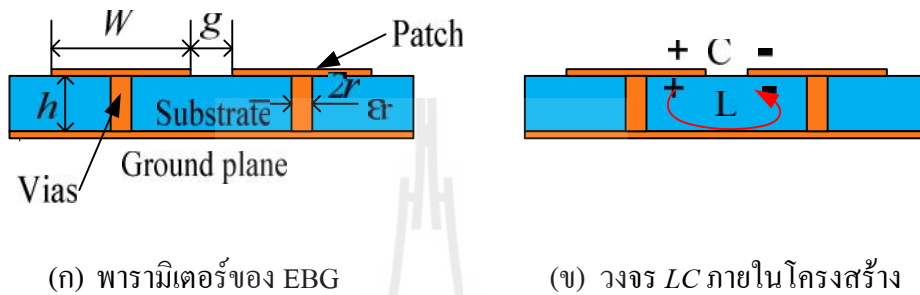
(ก) โพรงเป็นลักษณะแบบก่องฟืน
(Ozbay et al., 1994)



(ข) โพรงเป็นแถวลำดับแบบม้านั่งที่มี 3 ขา
(Barlevy and Rahmat-Samii, 2001)

รูปที่ 3.6 EBG โครงสร้างปริมาตรแบบ 3 มิติ

สำหรับพารามิเตอร์ของ EBG เพื่อง่ายแก่การทำความเข้าใจในวิธีดำเนินการของ EBG ผู้วิจัยจะนำเสนอโครงสร้างอย่างง่าย คือ โครงสร้าง EBG ที่มีผิวหน้าคล้ายดอกเห็ดแบบ 2 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โครงสร้าง EBG แบบ 2 มิตินี้ ประกอบด้วยสี่ส่วนดังนี้ (1) แผ่นกราวด์โลหะ (metal ground plane) (2) วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (dielectric substrate) (3) แผ่นโลหะวงเป็นคาบบน ไดอิเล็กตริกหรือแพทช์ และ (4) ตัวเชื่อมแนวตั้งระหว่างแผ่น โลหะด้านบนกับแผ่นกราวด์โลหะหรือเวีย (vias) ซึ่งคูมีรูปทรงเรขาคณิตคล้ายดอกเห็ด



รูปที่ 3.7 พารามิเตอร์และรูปแบบของค่าเหนี่ยวนำและค่าความจุของโครงสร้าง EBG

จากรูปที่ 3.7(ก) แสดงโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้าง EBG ประกอบด้วย ค่าต่าง ๆ ดังนี้

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

สามารถอธิบายรูปแบบสื่อกลางของโครงสร้าง EBG ได้ด้วยวงจรสมมูลของวงจรที่ประกอบไปด้วยค่าเหนี่ยวนำ (L) และค่าความจุ (C) ดังรูปที่ 3.7(ข) โดยค่าความจุที่เกิดขึ้นเป็นผลจากช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำด้านบน และค่าเหนี่ยวนำเกิดจากกระแสที่ไหลไปตามตัวนำที่อยู่ใกล้กัน ซึ่งสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์ขนานหาได้จากสมการ (3.1)

$$Z = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (3.1)$$

ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรคำนวณได้จากสมการ (3.2)

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.2)$$

ที่ความถี่ต่ำค่าอิมพีแดนซ์จะเป็นการเหนี่ยวนำและรองรับคลื่นระดับพื้นผิวของสนามแม่เหล็กตามขวาง (TM surface wave) โดยจะเปลี่ยนเป็นค่าความจุที่ความถี่สูงรองรับคลื่นระดับพื้นผิวของสนามไฟฟ้าตามขวาง (TE surface wave) และเมื่อเข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ (ω_0) EBG จะไม่รองรับคลื่นระดับพื้นผิวใด ๆ เนื่องจากอยู่ในภาวะที่ค่าอิมพีแดนซ์สูงมาก ๆ และการที่อิมพีแดนซ์ระดับพื้นผิวสูงมากส่งผลให้แน่ใจว่าคลื่นระดับพื้นผิวจะสะท้อนกลับโดยไม่กลับเฟสที่เกิดขึ้นบน PEC โดยที่ค่าของตัวเก็บประจุสามารถพิสูจน์โดยใช้การส่งคงรูป (conformal mapping) ซึ่งเป็นเทคนิคการคำนวณการกระจายสนามไฟฟ้าสถิต 2 มิติ หาค่าได้จากสมการ (3.3)

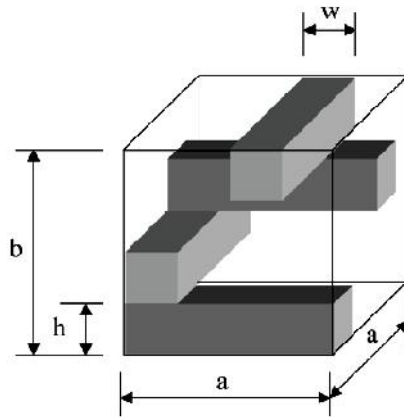
$$C = \frac{W\epsilon_0(1+\epsilon_r)}{\pi} \cosh^{-1}\left(\frac{W+g}{g}\right) \quad (3.5)$$

ค่าความเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากวงจรกระแสตรงแสดงในรูปที่ 3.7(ข) ประกอบด้วยเวียและแผ่นโลหะ สำหรับกระแสโซลินอยด์ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กสามารถคำนวณด้วยกฎของแอมแปร์ จากวงจรสมมูลตัวเหนี่ยวนำคำนวณจากพลังสนามแม่เหล็กสะสมและกระตุ้นด้วยกระแส จะได้ค่าความเหนี่ยวนำจากสมการ (3.4)

$$L = \mu h \quad (3.4)$$

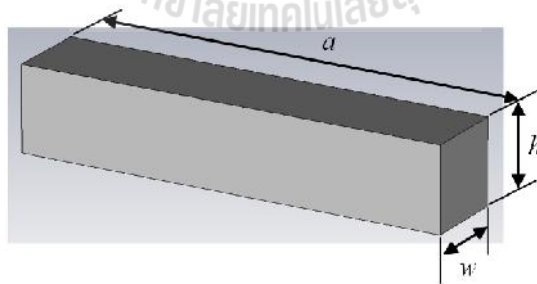
3.2.2 โครงสร้างของ EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะแบบกองฟืน

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างของ EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะแบบกองฟืนแบบระนาบ (planar woodpile EBG structures) (Weily et al., 2005; Lee et al., 2009) จะมีโครงสร้างทางกายภาพที่มีลักษณะเป็นชั้น ๆ (layer-by-layer) ประกอบด้วยแท่งที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลมหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัสก็ได้ มาจัดวางเรียงตัวกัน รูปที่ 3.8 แสดงหนึ่งหน่วยเซลล์ของโพรงเป็นลักษณะแบบกองฟืนแบบระนาบที่มีสี่ชั้น ซึ่งถูกกำหนดด้วยค่าพารามิเตอร์ คือ ค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) หรือ ความยาวซ้ำในระนาบแนวนอน (repeat distance in the horizontal plane: a) ความกว้างของแท่ง (rod width: w) และความสูงรวมของหนึ่งหน่วยเซลล์ (total height of the unit cell: b) โดยความต่อเนื่องของชั้น คือ การตั้งฉากของแต่ละชั้นและแท่งที่วางขนานจะถูกขดเชยด้วยการวางในชั้นที่สี่ ที่จะต้องวางตรงตำแหน่งกึ่งกลางของแลตทิซ










รูปที่ 3.8 หนึ่งหน่วยเซลล์ของโฟรงเป็นลักษณะแบบกองหินแบบระนาบที่มีสี่ชั้น
(Weily et al., 2005)

จากลักษณะหนึ่งหน่วยเซลล์ของโฟรงเป็นลักษณะแบบกองหินแบบระนาบที่มีสี่ชั้น งานวิจัยนี้จึงได้ดัดแปลงออกแบบให้เป็นเพียงชั้นเดียว แสดงดังรูปที่ 3.9 เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับสายอากาศปากแตร โดยได้ศึกษาการจัดรูปแบบการวางตำแหน่งของ EBG ในรูปแบบตามสมการทางเรขาคณิตแบบต่าง ๆ (Thaiviro, Krachodnok, and Wongsan, 2008) ได้แก่ การวางตัวในแนวระนาบ (planar) สามเหลี่ยม (triangular) ควอดราติก (quadratic) วงกลม (circular) เกาส์ (gaussian) โคไซน์ (cosine) และ โคไซน์จัตุรัส (squared cosine) แสดงดังตารางที่ 3.1 เพื่อหารูปแบบการวางตำแหน่งของ EBG ที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศปากแตร สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบเรดาร์



รูปที่ 3.9 หนึ่งหน่วยเซลล์ของโฟรงเป็นลักษณะแบบกองหินแบบระนาบที่มีชั้นเดียว

ตารางที่ 3.1 รูปแบบการวางตำแหน่งของ EBG

รูปแบบการวาง EBG	สมการ	รูปร่างของ EBG
แนวระนาบ	-	
สามเหลี่ยม	$f(x, y) = A \left(1 - \frac{2}{D} \sqrt{x^2 + y^2} \right)$	
ควอดราทิก	$f(x, y) = A \left[1 - \left(\frac{2}{D} \sqrt{x^2 + y^2} \right)^2 \right]$	
วงกลม	$f(x, y) = A \sqrt{1 - \left(\frac{2}{D} \sqrt{x^2 + y^2} \right)^2}$	
เกาส์	$f(x, y) = A e^{-\left(\frac{2}{D} \sqrt{x^2 + y^2} \right)^2}$	
โคไซน์	$f(x, y) = A \cos \left(\frac{\pi}{D} \sqrt{x^2 + y^2} \right)$	
โคไซน์จัตุรัส	$f(x, y) = A \cos^2 \left(\frac{\pi}{D} \sqrt{x^2 + y^2} \right)$	

3.2.3 โครงสร้างของ EBG และอภิวัดดู

อภิวัดดู (metamaterials) คือ วัสดุประดิษฐ์เชิงวิศวกรรม ที่ถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อให้มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งมีคุณสมบัติที่ไม่ปรากฏตามธรรมชาติ โดยคุณสมบัติของวัสดุเหล่านั้นปกติเกิดจากโครงสร้างมากกว่าการจัดเรียง (composition) จากการผนวกกันของวัสดุขนาดเล็ก (ปกติจะมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นมาก) ที่มีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน (inhomogeneous) (อังกวิศิษฐพันธ์, 2553; ชัยมูล และ อัครเอกผาติน, 2554) คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่วาดังกล่าว คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (electric permittivity: ϵ) ค่าความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก (magnetic permeability: μ) และค่าดัชนีการหักเหของแสง (refractive index: n) ดังนั้นอภิวัดดูสามารถที่จะประกอบขึ้นจากการฝังของวัสดุประดิษฐ์หลายชนิดรวมตัวกันเข้าไปยังในตัวกลางหรือผิวของตัวกลางที่กำหนดซึ่งผู้ออกแบบสามารถเลือกพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้อย่างอิสระได้แก่ คุณสมบัติต่าง ๆ ของตัวกลาง ขนาด รูปร่างและส่วนประกอบที่จะใส่เข้าไปไม่ว่าจะเป็นความหนาแน่นหรือการจัดวางตำแหน่งเพื่อให้ได้ผลตอบสนองพิเศษทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่สามารถเกิดขึ้นจากวัสดุตามธรรมชาติทั่วไป เช่น ค่าความซึมซาบได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ และค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ ด้วยเหตุผลนี้วัสดุทางแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดนี้จึงถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า วัสดุเหนือธรรมชาติ (วงศ์เกษมและมาตรา, 2552)

โครงสร้างของ EBG ซึ่งเป็นหนึ่งในอภิวัดดู (Yang and Rahmat-Samii, 2009) ซึ่งมีคุณสมบัติทั้งผิวที่มีอิมพีแดนซ์สูง (high impedanc surface หรือ HIS) และมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าที่เข้าใกล้ศูนย์ (epsilon near zero หรือ ENZ) โดยทั่วไปโครงสร้างของ EBG จะประกอบด้วย โลหะรูปต่าง ๆ ที่เป็นรอยคาบวางบนระนาบกราวด์ที่แยกด้วยชั้นรองไดอิเล็กตริก และอาจจะเชื่อมต่อ (via) หรือไม่เชื่อมต่อกับระนาบกราวด์ก็ได้ ซึ่งจากคุณสมบัตินี้สามารถใช้ EBG ในการออกแบบเพื่อลดขนาดและเพิ่มประสิทธิภาพการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ นอกจากนี้ EBG ยังช่วยในการกำจัดคลื่นผิว จึงทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของสายอากาศเพิ่มมากขึ้น

3.3 สรุป

จากทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องของสายอากาศปากแตร โดยเริ่มศึกษาจากลักษณะโครงสร้างของสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบหลัก ต่อมาได้ศึกษาในส่วนของการป้อนกำลังงานให้แก่สายอากาศ โดยได้เลือกวิธีการป้อนกำลังงานด้วยท่อนำคลื่นแบบท่อเหลี่ยมเป็นตัวส่งผ่านกำลังงานจากจุดป้อนซึ่งภายในท่อนำคลื่นมีสายอากาศไดโพลขนาดเล็กเป็นจุดป้อนไปยังสายอากาศปากแตร และในหัวข้อสุดท้ายได้ศึกษาโครงสร้างของ EBG แบบต่าง ๆ โดยได้เน้นไปที่โครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะแบบกึ่งวงกลมแบบระนาบที่มีชั้นเดียวมาประยุกต์ร่วมกับสายอากาศปากแตรสำหรับใช้งานในระบบเรดาร์

บทที่ 4

การวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบสายอากาศปากแตรและโครงสร้างของ EBG ซึ่งได้ศึกษาการจัดรูปแบบการวางตำแหน่งของ EBG ในรูปแบบตามสมการทางเรขาคณิตแบบต่าง ๆ ระยะห่างระหว่างสายอากาศปากแตรและโครงสร้างของ EBG และขนาดรัศมีของรูปร่าง EBG โดยได้ทำการจำลองระบบสายอากาศด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับแก้ปัญหาทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของระบบสายอากาศก่อนที่จะได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นมา ซึ่งจะได้อธิบายในบทต่อไป

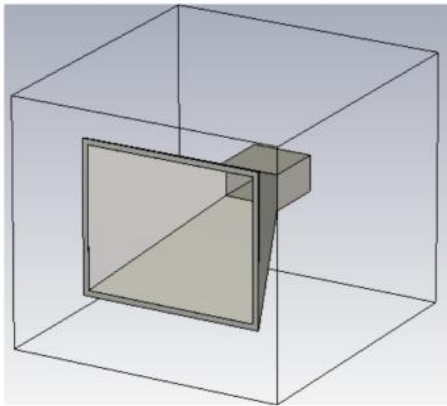
4.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองสายอากาศปากแตร

4.1.1 สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิม

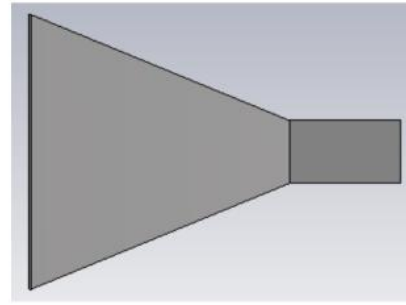
สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิมประกอบด้วยท่อนำคลื่นแบบท่อเหลี่ยมซึ่งภายในมีโพรงขนาดเล็กเป็นจุดป้อนและส่วนที่เป็นช่องเปิดสำหรับการแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Bakshi et al., 2009; Constantine, 2005) โดยมีความถี่ปฏิบัติการในการออกแบบที่ 10 GHz และมีความถี่ครอบคลุมการใช้งานตั้งแต่ 8 - 12 GHz รูปที่ 4.1 แสดงการออกแบบและจำลองผลสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิมด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST โดยช่องเปิดมีความกว้างเท่ากับ 3λ จากผลการจำลองพบว่าความกว้างลำครึ่งกำลัง (half-power beamwidth หรือ HPBW) ซึ่งได้แสดงเป็นอัตราส่วนมุมกวาดต่อมุมเงย (ratio of azimuth pattern to evaluation pattern หรือ AZ:EL) เท่ากับ $24^{\circ}:21.7^{\circ}$ (1.11:1) และมีอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 17.67 dB

4.1.2 สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากเพิ่มปีกสแลบ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงานและอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิมด้วยการเพิ่มปีกสแลบ (wing-slab) ที่มีขนาดเท่ากับ $5\lambda/8$ ติดเข้าไปที่ด้านข้างของช่องเปิดทั้งด้านซ้ายและขวา (Kampeephat, Krachodnok, and Wongsan, 2013) แสดงดังรูปที่ 4.2 จากการจำลองผลพบว่า ปีกสแลบทั้งสองด้านสามารถควบคุม HPBW ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กให้มีความสมมาตรมากขึ้น แสดงเป็นอัตราส่วนมุมกวาดต่อมุมเงยเท่ากับ $20.6^{\circ}:21.7^{\circ}$ (1:1.05) และมีอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 18.08 dB

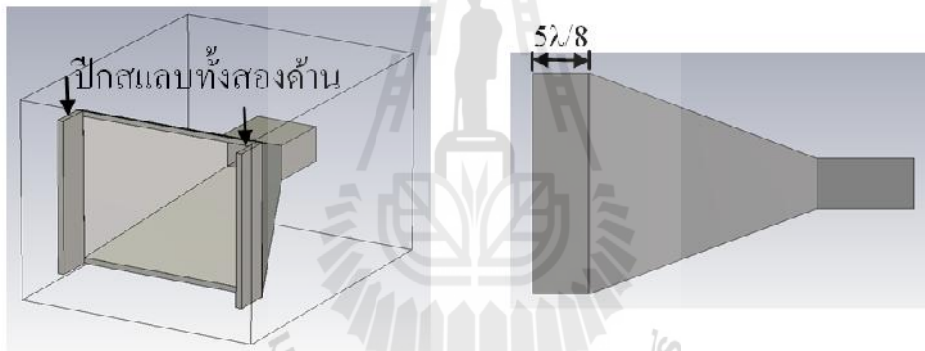


(ก) ภาพโดยรวมของระบบ



(ข) ด้านข้าง

รูปที่ 4.1 สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิม



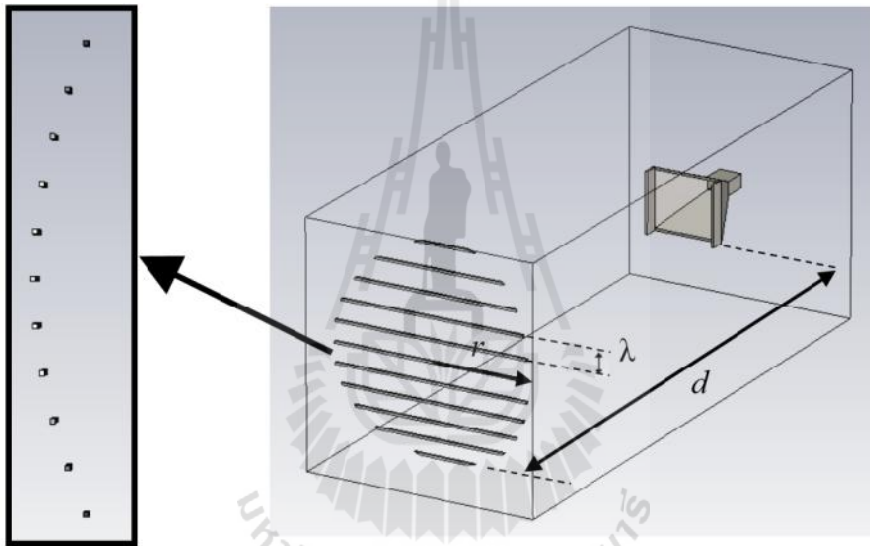
(ก) ภาพโดยรวมของระบบ

(ข) ด้านข้าง

รูปที่ 4.2 สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากเพิ่มปีกสแลบ

4.2 ศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากเพิ่มปีกสแลบร่วมกับโครงสร้าง EBG

จากรูปที่ 4.3 แสดงแบบจำลองโครงสร้างของสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่ทำการเพิ่มปีกสแลบเพื่อควบคุม HPBW ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กให้มีความสมมาตร ร่วมกับโครงสร้าง EBG สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศมีสามตัวแปร คือ (1) การจัดรูปแบบการวางตำแหน่งของ EBG ในรูปแบบตามสมการทางเรขาคณิตแบบต่าง ๆ ได้แก่ การวางตัวในแนวระนาบ สามเหลี่ยม ควอดราติก วงกลม เกาส์ โคไซน์ และโคไซน์จัตุรัส ดังได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 (2) ระยะห่างระหว่างสายอากาศปากแตรและโครงสร้างของ EBG (d) และ (3) รัศมีของรูปร่าง EBG (r)

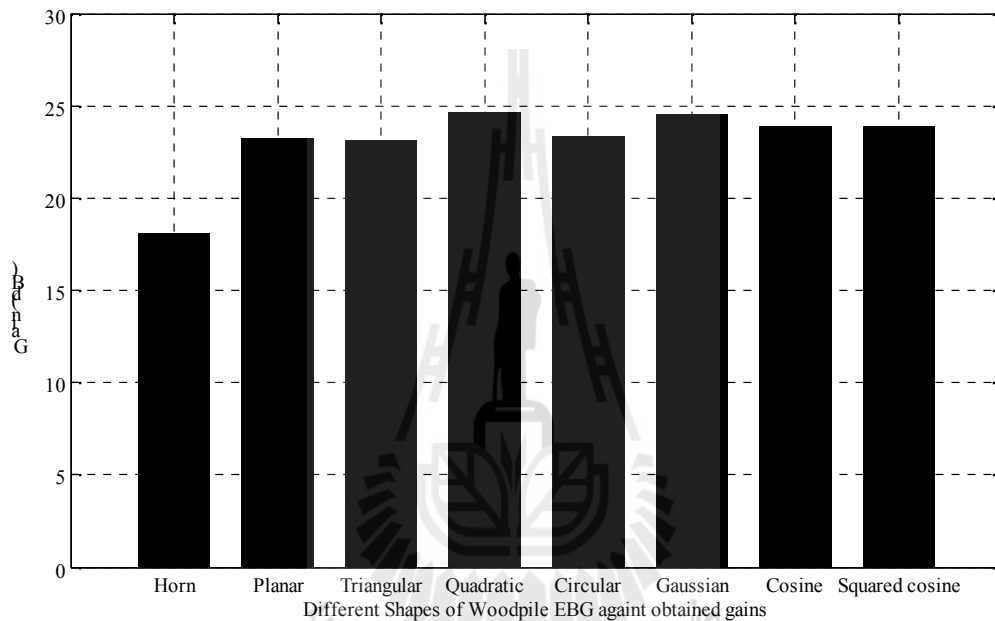


รูปที่ 4.3 สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากเพิ่มปีกสแลบร่วมกับโครงสร้าง EBG

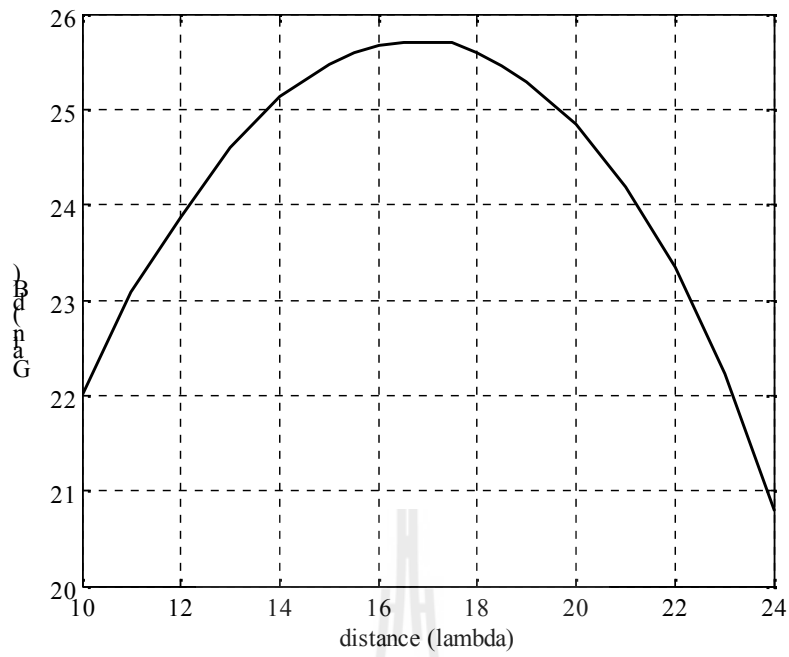
ในขั้นแรกได้ทำการศึกษาผลของการจัดรูปแบบการวางตำแหน่งของ EBG ในรูปแบบตามสมการทางเรขาคณิตแบบต่าง ๆ โดยกำหนดให้ระยะ $d = 30\lambda$ และรัศมี $r = 5\lambda$ พบว่าที่ความถี่ปฏิบัติการเท่ากับ 10 GHz รูปแบบการวางตำแหน่งของ EBG ที่เป็นแบบควอดราติกมีค่าอัตราขยายของสายอากาศสูงที่สุด คือ 24.34 dB แสดงดังรูปที่ 4.4 นอกจากนี้ยังมี HPBW ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่น้อยที่สุดอีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้รูปแบบการวางตำแหน่งของ EBG ที่เป็นแบบควอดราติกในการเพิ่มอัตราขยายและช่วยลดคลื่นผิวที่เกิดบนปีกสแลบของสายอากาศ ขั้นตอนต่อมาได้ทำการศึกษาผลของระยะ d โดยกำหนดให้รัศมี $r = 5\lambda$ พบว่าที่ระยะ

$d = 16.5\lambda$ สายอากาศมีอัตราขยายสูงสุด คือ 25.70 dB แสดงดังรูปที่ 4.5 และในลำดับสุดท้ายได้ทำการศึกษาค่ารัศมีของควอดราติกหรือ r โดยกำหนดให้ $d = 16.5\lambda$ พบว่าที่ $r = 5.3\lambda$ สายอากาศมีอัตราขยายเพิ่มขึ้นจาก 25.70 dB เป็น 25.74 dB แสดงดังรูปที่ 4.6

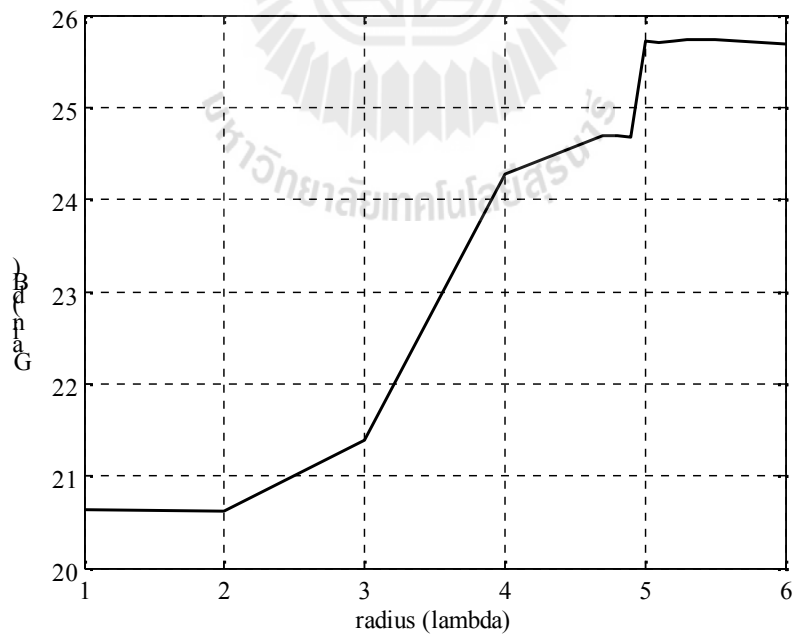
ดังนั้นจะเห็นได้ชัดเจนว่าอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากเพิ่มปีกสแลบร่วมกับโครงสร้าง EBG ที่จัดรูปแบบการวางตำแหน่งเป็นแบบควอดราติก โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศปากแตรและโครงสร้างของ EBG เท่ากับ 16.5λ และมีรัศมีของควอดราติกเท่ากับ 5.3λ จะมีค่าสูงกว่าอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิมถึงประมาณ 8 dB



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราขยายและการจัดรูปแบบการวางตำแหน่งของ EBG ในรูปแบบตามสมการทางเรขาคณิตแบบต่าง ๆ

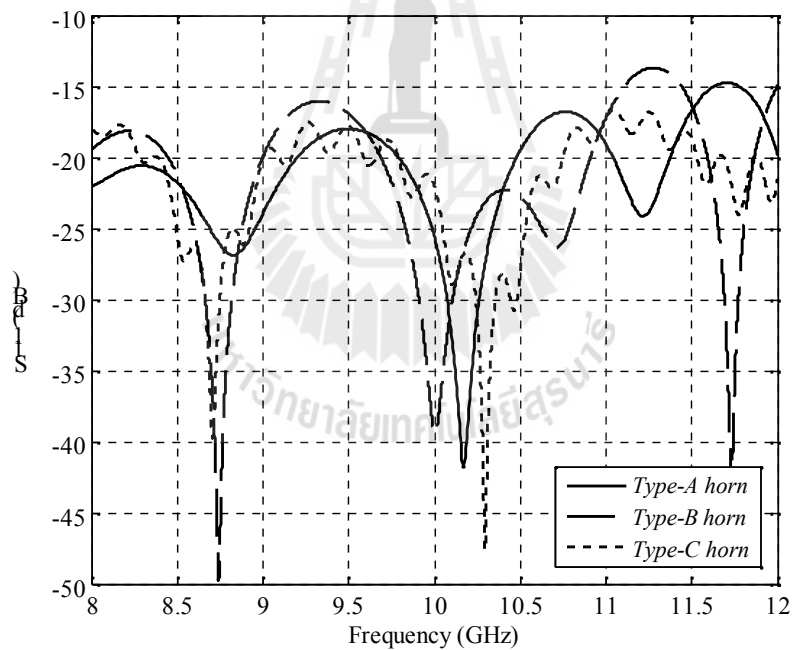


รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราขยายและระยะห่างระหว่างสายอากาศปากแตร และ โครงสร้างของ EBG (d)

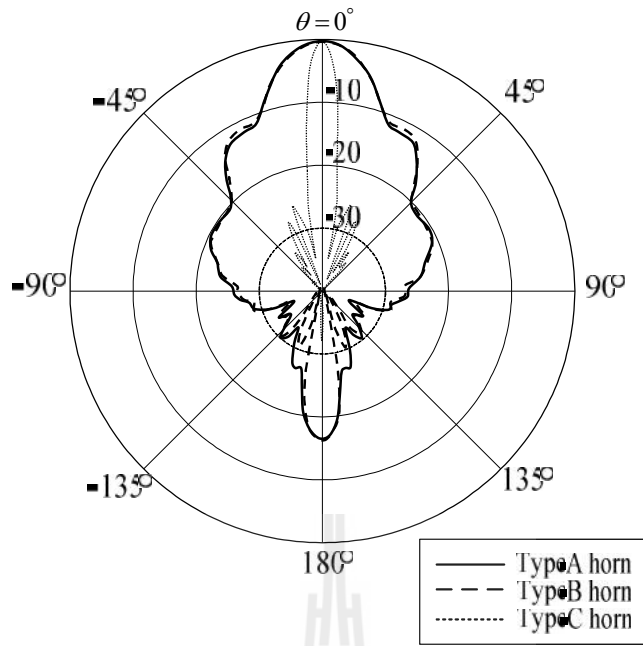


รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราขยายและมีรัศมีของควอดราทิก (r)

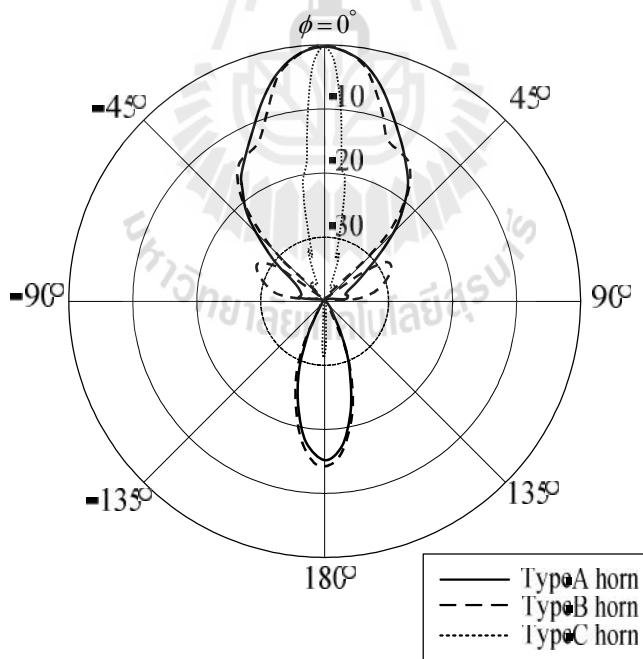
จากรูปที่ 4.7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflection coefficient หรือ S_{11}) ของสายอากาศปากแตรทั้ง 3 แบบ คือ (1) สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิม (*Type-A horn*) (2) สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากเพิ่มปีกสแลบ (*Type-B horn*) และ (3) สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากเพิ่มปีกสแลบร่วมกับโครงสร้าง EBG ที่จัดรูปแบบการวางตำแหน่งเป็นแบบควอดราติก (*Type-C horn*) จะเห็นได้ว่าค่า S_{11} (-10 dB) ของสายอากาศปากแตรทั้งสามแบบครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 8 - 12 GHz ซึ่งสามารถรองรับการใช้งานสำหรับระบบเรดาร์ระยะสั้นช่วงความถี่ X-band (8 - 12 GHz) และช่วงความถี่ I-band (8 - 10 GHz) ได้ รูปที่ 4.8 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานหรือนอร์มัลไรซ์ (normalized) แล้ว ที่ความถี่ปฏิบัติการ 10 GHz จากการจำลองผลจะเห็นว่าสายอากาศปากแตรแบบ C มี HPBW ที่สมมาตรทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กและแคบที่สุด ซึ่งได้แสดงในรูปแบบของอัตราส่วนระนาบมุมกวาดต่อมุมยก (azimuth:elevation หรือ AZ:EL) เท่ากับ 6.9°:6.8° หรือ 1.01:1 นอกจากนี้ยังมีค่าระดับโหลบข้าง (side lobe level หรือ SLL) และอัตราขยายแสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.7 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศปากแตรทั้ง 3 แบบ



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.8 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรทั้ง 3 แบบ

ตารางที่ 4.1 ผลการจำลองจากโปรแกรมสำเร็จรูป CST

พารามิเตอร์	สายอากาศปากแตร แบบ A	สายอากาศปากแตร แบบ B	สายอากาศปากแตร แบบ C
HPBW (AZ:EL)	24°:21.7° 1.11:1	20.6°:21.7° 1:1.05	6.9°:6.8° 1.01:1
E-plane SLL	-18.1 dB	-18.1dB	-16.5 dB
H-plane SLL	-22.2 dB	-26.4 dB	-20.0 dB
อัตราขยาย	17.67 dB	18.08 dB	25.74 dB

จากหัวข้อที่กล่าวข้างต้นทำให้ได้สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากเพิ่ม ปีกสแลบร่วมกับโครงสร้าง EBG ที่จัดรูปแบบการวางตำแหน่งเป็นแบบควอดราติกเป็นสายอากาศ ต้นแบบที่มีอัตราขยายสูงและมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่สมมาตรทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและ ระนาบสนามแม่เหล็ก ซึ่งตรงกับวัตถุประสงค์ในการออกแบบเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบเรดาร์ ระบบเรดาร์ระยะสั้นช่วงความถี่ X-band และ I-band ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน ITU ตามลำดับ จากนั้นจึงเข้าสู่ขั้นตอนในการสร้างสายอากาศปากแตรต้นแบบซึ่งจะได้กล่าวต่อไปใน บทที่ 5

4.3 สรุป

สำหรับการออกแบบสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิม ให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์นั้น ขั้นตอนแรกได้ทำการออกแบบปีกสแลบขนาดเท่ากับ $5\lambda/8$ ติดเข้าไปที่ด้านข้างของช่องเปิดทั้งด้านซ้ายและขวา เพื่อควบคุม HPBW ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ให้มีความสมมาตร จากนั้นได้ทำการศึกษาการจัดรูปแบบการวางตำแหน่งของ EBG ในรูปแบบตามสมการทางเรขาคณิตแบบต่าง ๆ พบว่าการจัดรูปแบบการวางตำแหน่งเป็นแบบควอดราติกทำให้สายอากาศปากแตรมีอัตราขยายสูงสุด โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศปากแตรและโครงสร้างของ EBG เท่ากับ 16.5λ และมีรัศมีของควอดราติกเท่ากับ 5.3λ ส่งผลให้มีค่าสูงกว่าอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิมถึงประมาณ 8 dB โดยได้ทำการจำลองโครงสร้างสายอากาศด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ซึ่งเป็นโปรแกรมการแก้ปัญหาทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของสายอากาศ ก่อนที่จะได้ทำการสร้างสายอากาศปากแตรต้นแบบขึ้นมา

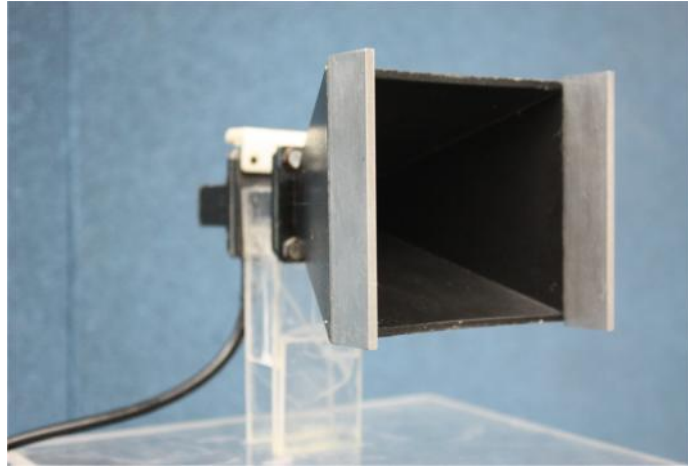
บทที่ 5

ผลการวัดทดสอบ

จากทฤษฎีและหลักการทั้งหมดที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ผ่านมา ในบทนี้จะทำการออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากเพิ่มปีกสแลบร่วมกับโครงสร้าง EBG ที่จัดรูปแบบการวางตำแหน่งเป็นแบบควอดราติก และได้ทำการสร้างสายอากาศปากแตรต้นแบบขึ้น จากนั้นวัดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ ค่า S_{11} อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (standing wave ratio หรือ SWR) แบบรูปการแผ่พลังงานทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก อิมพีแดนซ์ (impedance หรือ Z) และอัตราขยาย ในการวัดทดสอบคุณลักษณะข้างต้นจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer) HP รุ่น HP8720C สุดท้ายได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและจากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

5.1 วิธีการสร้างสายอากาศปากแตรต้นแบบ

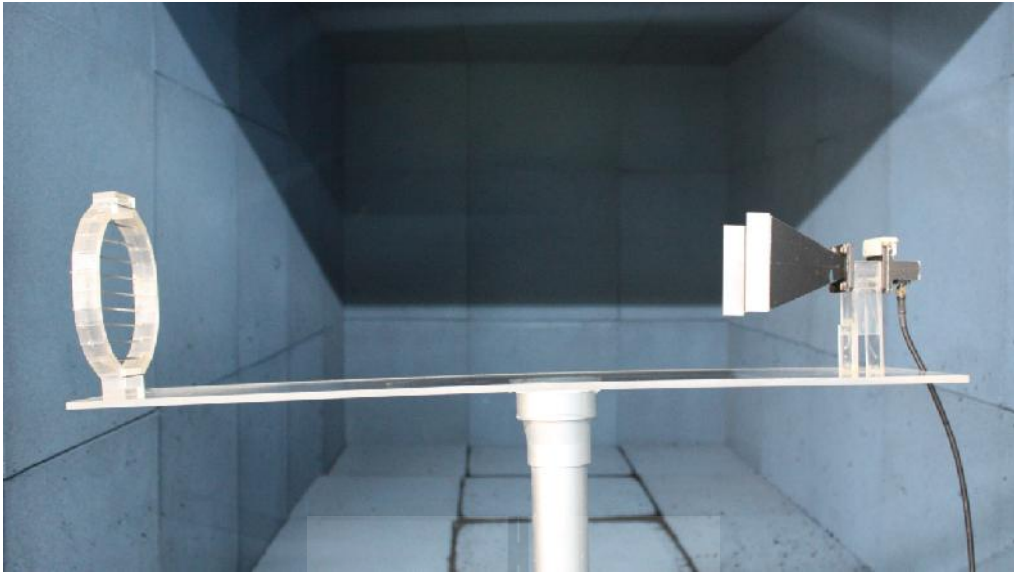
จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 จนได้ขนาดและรูปแบบของสายอากาศปากแตรตามที่ต้องการ โดยสายอากาศปากแตรต้นแบบประกอบด้วยสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิมโดยมีขนาดความกว้างของท่อนำคลื่นเท่ากับ 0.76λ (2.3 เซนติเมตร) และความกว้างของช่องเปิดเท่ากับ 3λ (9 เซนติเมตร) ที่เพิ่มปีกสแลบขนาดเท่ากับ $5\lambda/8$ ติดเข้าไปที่ด้านข้างของช่องเปิดทั้งด้านซ้ายและขวา และโครงสร้าง EBG ที่มีการจัดรูปแบบการวางตำแหน่งเป็นแบบควอดราติก โดยโครงสร้าง EBG ถูกสร้างจากอะลูมิเนียม ($\epsilon_r = 8.4, \tan \delta = 0.002$) ที่เป็นแท่งสี่เหลี่ยมมีขนาดเท่ากับความกว้างและความสูงของแท่งเท่ากันคือ 0.064λ แสดงดังรูปที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ โดยโครงสร้างของ EBG มีระยะห่างจากสายอากาศปากแตร เท่ากับ 16.5λ และมีรัศมีของควอดราติกเท่ากับ 5.3λ รูปที่ 5.3 แสดงระบบโดยรวมของสายอากาศปากแตรต้นแบบ



รูปที่ 5.1 สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิมที่เพิ่มปีกสแลบ



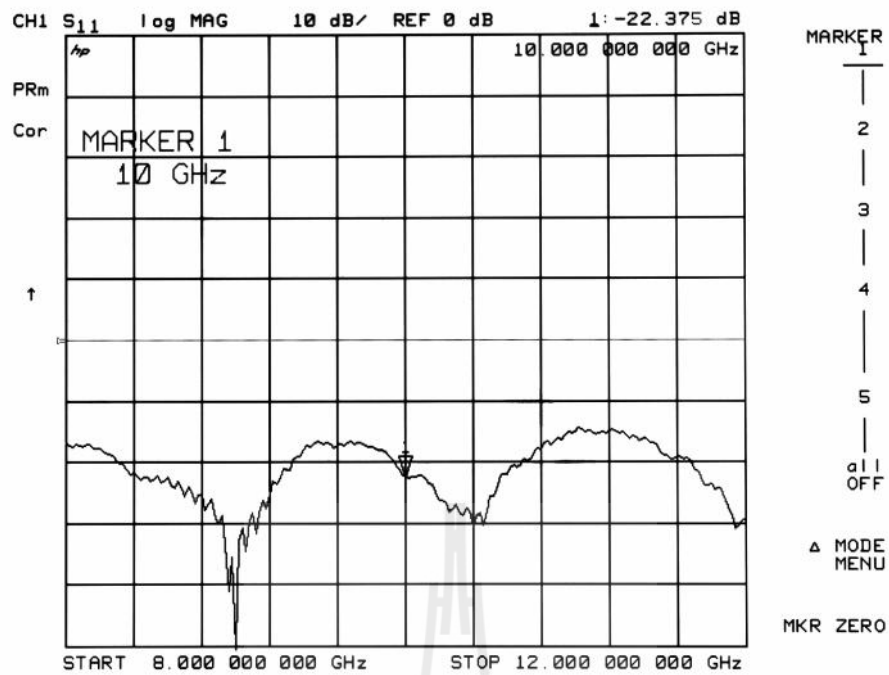
รูปที่ 5.2 โครงสร้าง EBG ที่มีการจัดรูปแบบการวางตำแหน่งเป็นแบบควอดราทิก



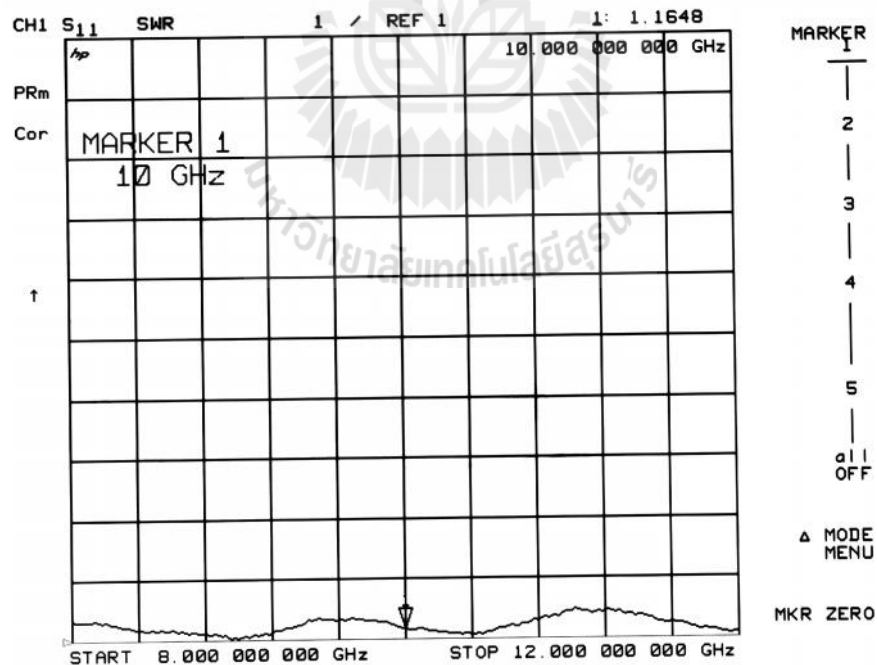
รูปที่ 5.3 สายอากาศปากแตรต้นแบบ

5.2 ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

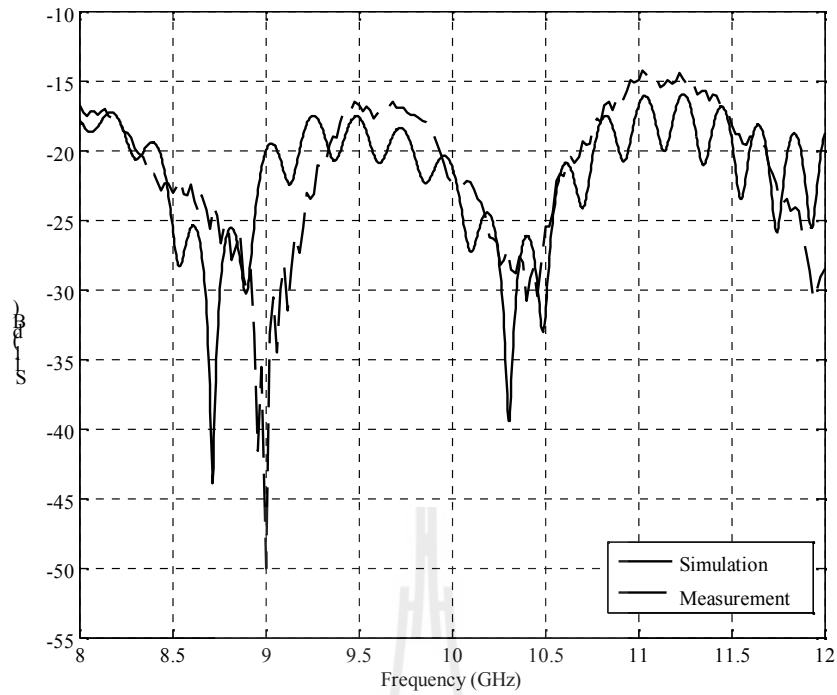
สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาการแมตซ์อิมพีแดนซ์ด้านเข้าคือ ค่า S_{11} และ SWR ในการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ S_{11} หมายถึง การสะท้อนกลับของกำลังไฟฟ้าด้านเข้าของสายอากาศซึ่งขนาดของ S_{11} อาจจะมีค่าได้ตั้งแต่ 0 dB ถึง ลบอนันต์ (negative infinity dB) ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 dB แสดงว่าไม่แมตซ์อย่างสมบูรณ์ และถ้ามีค่าเป็นลบอนันต์ แสดงว่ามีการแมตซ์ที่สมบูรณ์แบบที่สุด และสำหรับค่า SWR สามารถมีค่าต่ำสุดตั้งแต่ 1 ถึงอนันต์ โดยถ้า SWR มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าสายอากาศนั้นมีการแมตซ์ที่สมบูรณ์แบบ หมายความว่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้าที่ป้อนให้กับสายอากาศมีการแผ่พลังงานออกไปทั้งหมดไม่มีการสะท้อนกลับมา และถ้าสายอากาศมีค่า SWR เท่ากับอนันต์ หมายความว่าสายอากาศนั้นไม่แมตซ์ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ส่งออกไปเกิดการสะท้อนกลับมาทั้งหมด ซึ่งจะส่งผลให้เครื่องส่งได้รับความเสียหายได้ (รังสรรค์ และ ชวงค์, ม.ป.ป) ในการใช้งานด้านวิศวกรรมสายอากาศค่าของ S_{11} ที่ยอมรับได้ถ้ามีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งจะสอดคล้องกับค่า SWR เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า จึงจะยอมรับได้ว่าสายอากาศนั้นมีการแมตซ์ที่ดี จากรูปที่ 5.4 และ 5.5 แสดงกราฟค่า S_{11} และ SWR ของสายอากาศปากแตรต้นแบบตามลำดับ จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าที่ความถี่ปฏิบัติการ 10 GHz สายอากาศปากแตรต้นแบบมีค่า S_{11} เท่ากับ -22.375 dB และมีค่า SWR เท่ากับ 1.1648 แสดงว่าสายอากาศปากแตรต้นแบบมีการแมตซ์ที่ดี และรูปที่ 5.6 และ 5.7 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลวัดทดสอบและผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ของค่า S_{11} และ SWR ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากราฟทั้งสองมีความสอดคล้องกัน



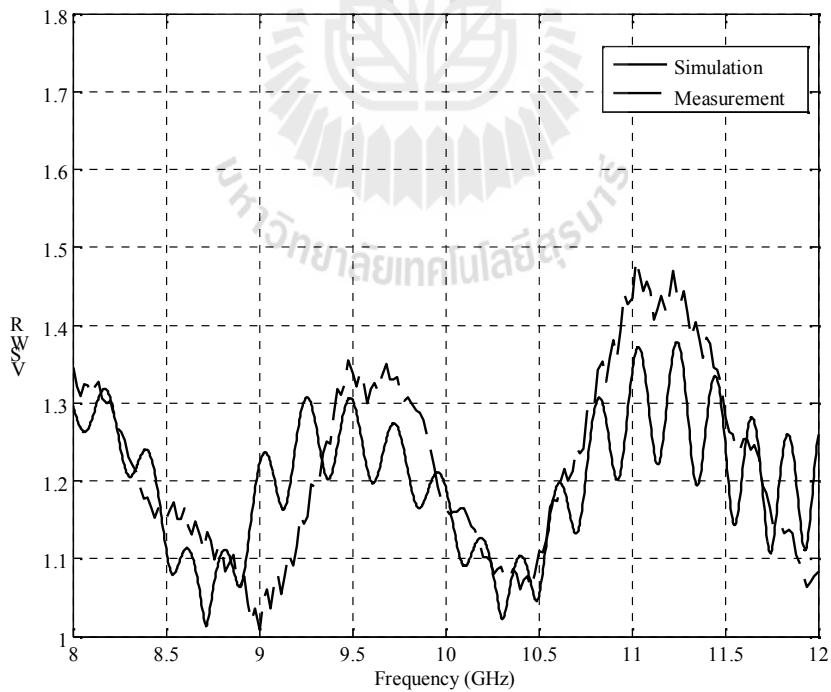
รูปที่ 5.4 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศปากแตรต้นแบบจากการวัดทดสอบ



รูปที่ 5.5 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศปากแตรต้นแบบจากการวัดทดสอบ



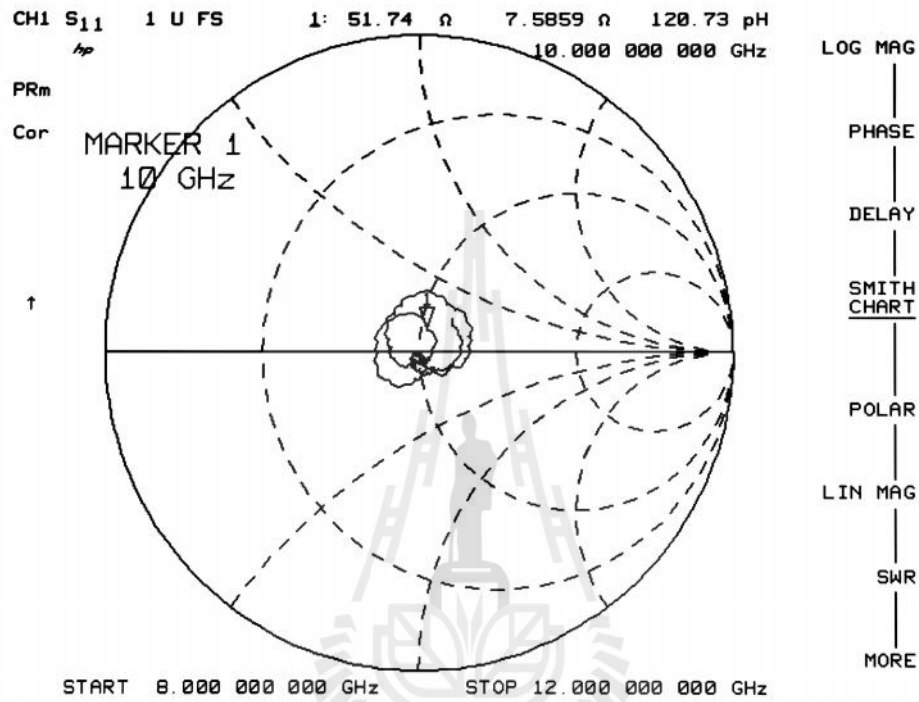
รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างผลจากการจำลองและผลวัดทดสอบ



รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนคลื่นนิ่งระหว่างผลจากการจำลองและผลวัดทดสอบ

5.3 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์

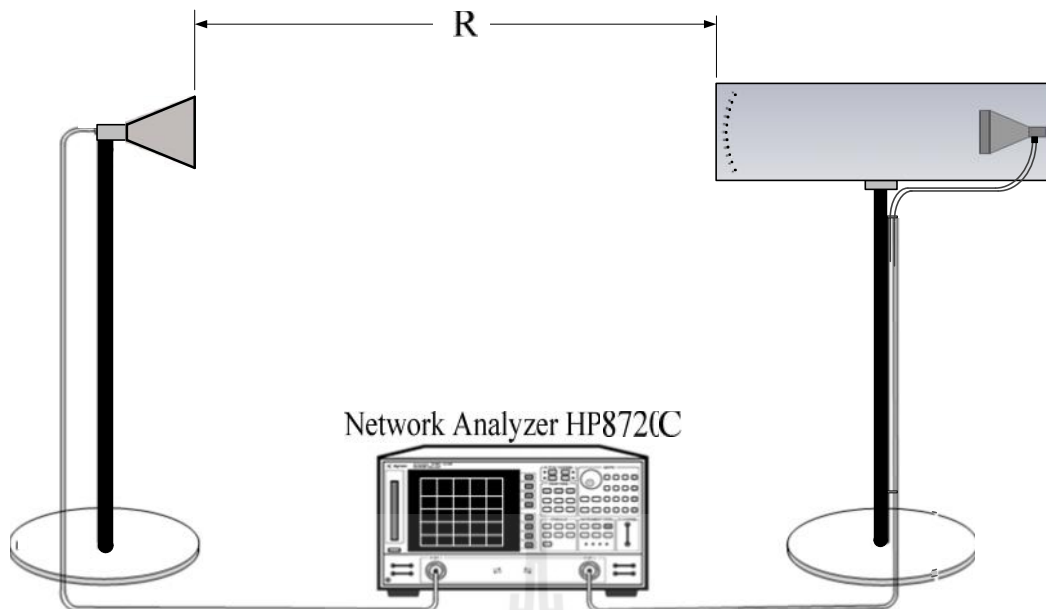
จากการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศปากแตรต้นแบบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ที่ความถี่ปฏิบัติการ 10 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 5.8 มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ $51.74 + j7.5859 \Omega$ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ขอมรับได้ คือ 50Ω



รูปที่ 5.8 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศปากแตรต้นแบบจากการวัดทดสอบ

5.4 ผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน

จากรูปที่ 5.9 และ 5.10 แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรดัดแบบ ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ โดยทำการทดสอบในพื้นที่โล่งภายนอกอาคาร (outdoor) และมีระยะ R ในการติดตั้งระหว่างสายอากาศวัดทดสอบและสายอากาศอ้างอิงเท่ากับสนามระยะไกล คือ $R \geq 2D^2 / \lambda$ โดยที่ D คือ ขนาดของสายอากาศวัดทดสอบ ซึ่งในที่นี้ได้ใช้สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิม โดยมีความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 10 GHz เป็นสายอากาศอ้างอิงโดยทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศปากแตรดัดแบบที่นำมาวัดทดสอบทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาครับ ซึ่งจะมีการหมุนรอบแนวแกนหมุนเพื่อรับคลื่นจากสายอากาศภาคส่งตั้งแต่มุม 0 องศา จนถึงมุม 360 องศา ทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรดัดแบบในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 5.11 จากผลการวัดทดสอบสายอากาศดัดแบบมี HPBW ซึ่งได้แสดงเป็นอัตราส่วนมุมกวาดต่อมุมเงย (ratio of azimuth pattern to evaluation pattern หรือ AZ:EL) คือ $7.1^\circ:7^\circ$ หรือ 1.01:1 และมีระดับโหลบข้าง (side lobe levels หรือ SLL) ในระนาบสนาม E และสนาม H เท่ากับ -16.0 dB และ -19.0 dB ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ดังรูปที่ 5.12 คือ มี HPBW เท่ากับ $6.9^\circ:6.8^\circ$ หรือ 1.01:1 และหรือ SLL ในระนาบสนาม E และสนาม H เท่ากับ -16.5 dB และ -20.0 dB ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่า HPBW ที่ได้จากการวัดทดสอบมีค่ามากกว่าเล็กน้อย แต่มีอัตราส่วนของความสมมาตรของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานทั้งที่เท่ากัน และแสดงเป็นตารางสรุปผลดังตารางที่ 5.1

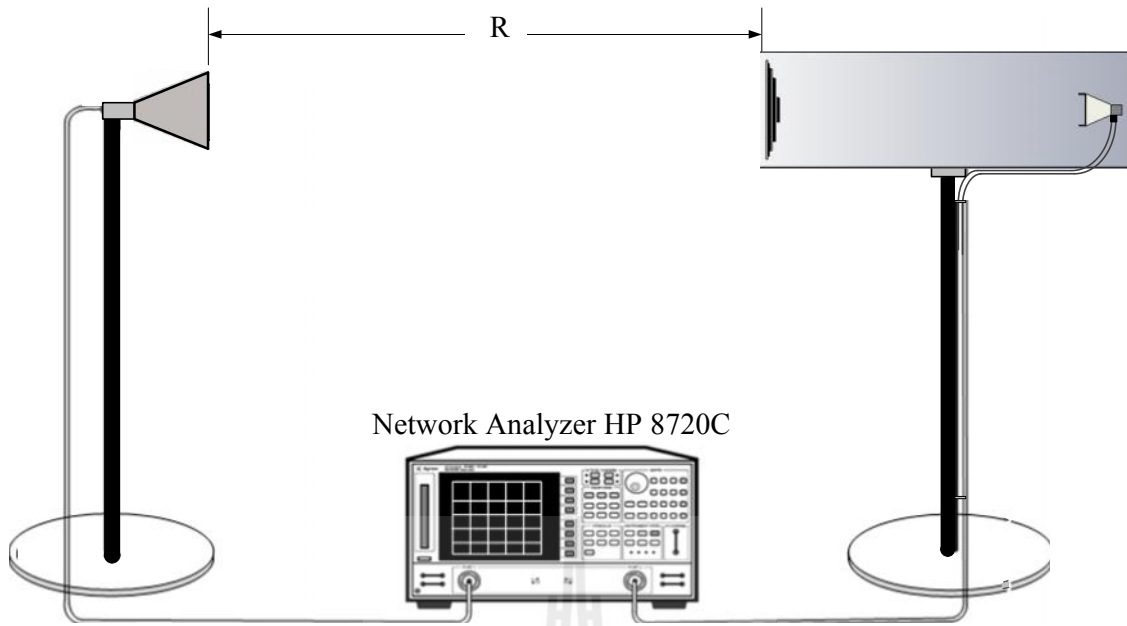


(ก) แบบจำลองการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

รูปที่ 5.9 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

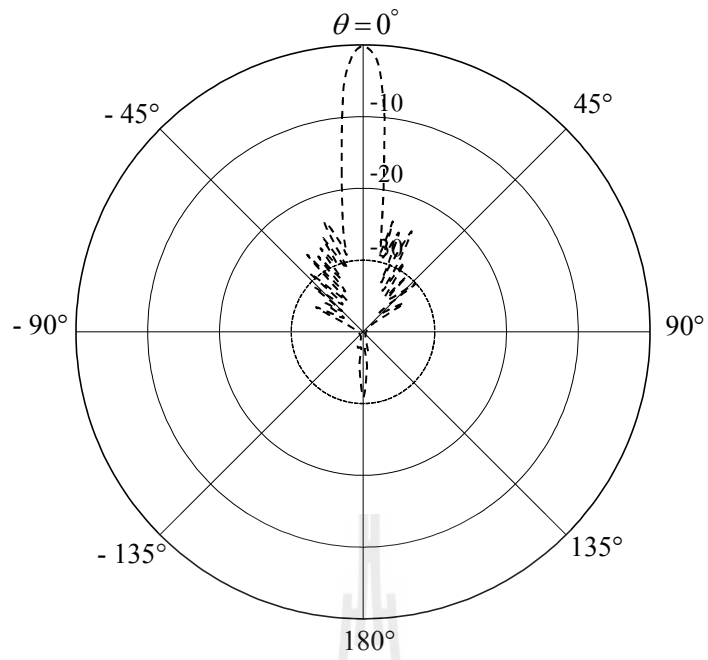


(ก) แบบจำลองการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

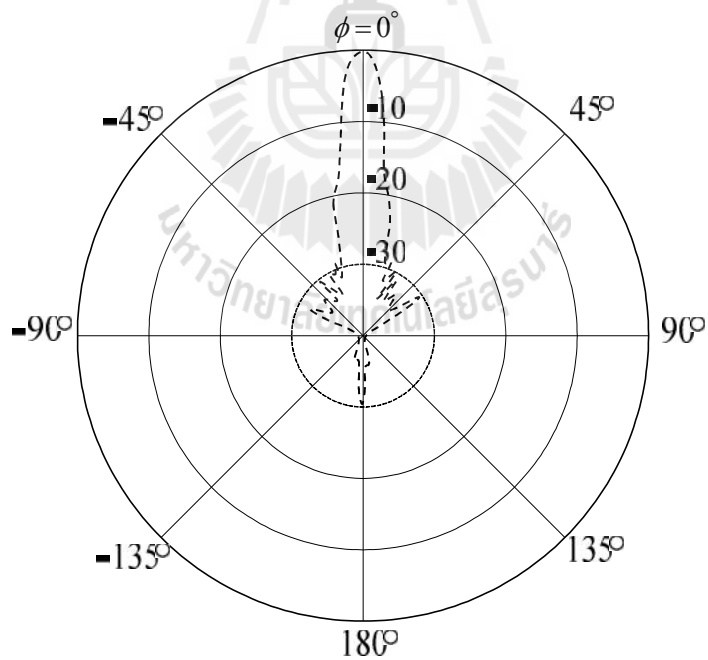


(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.10 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

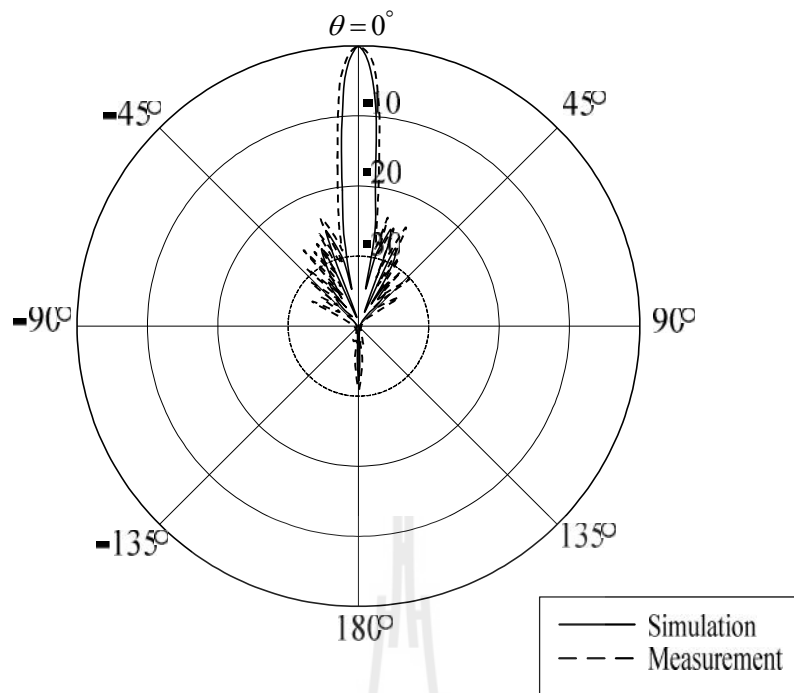


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

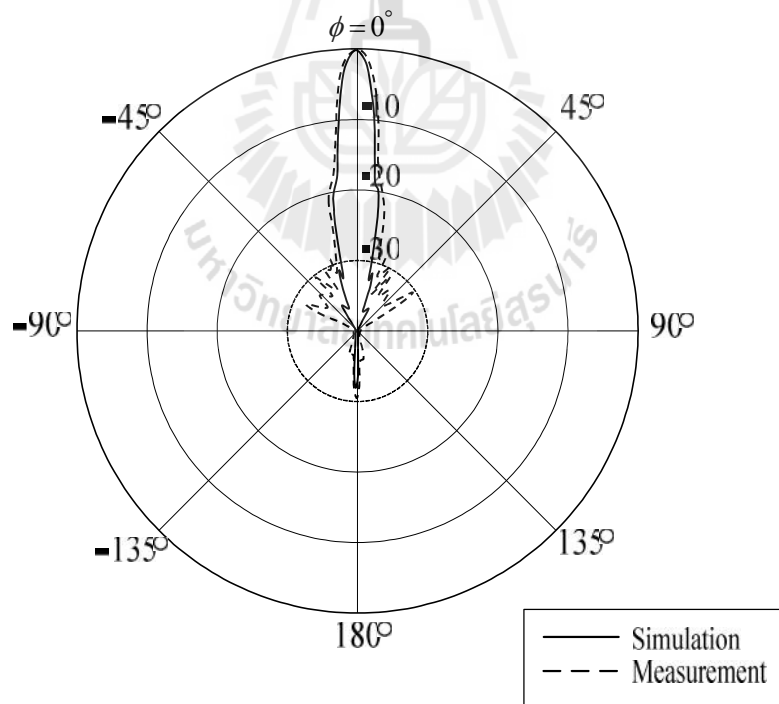


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.11 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรต้นแบบจากการวัดทดสอบ



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

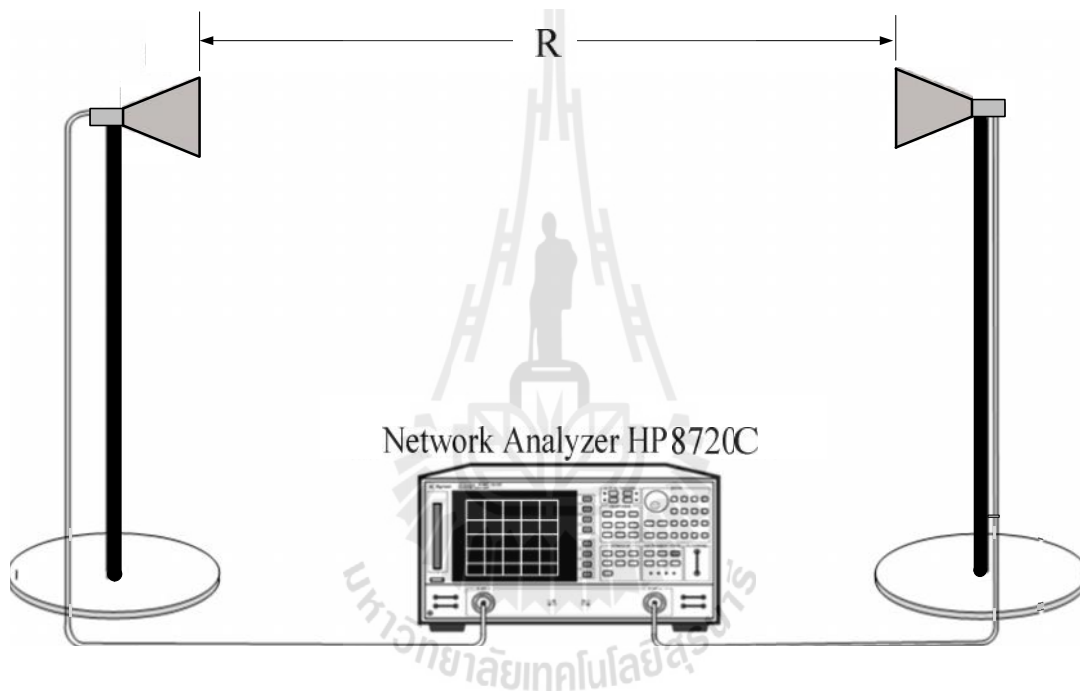


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

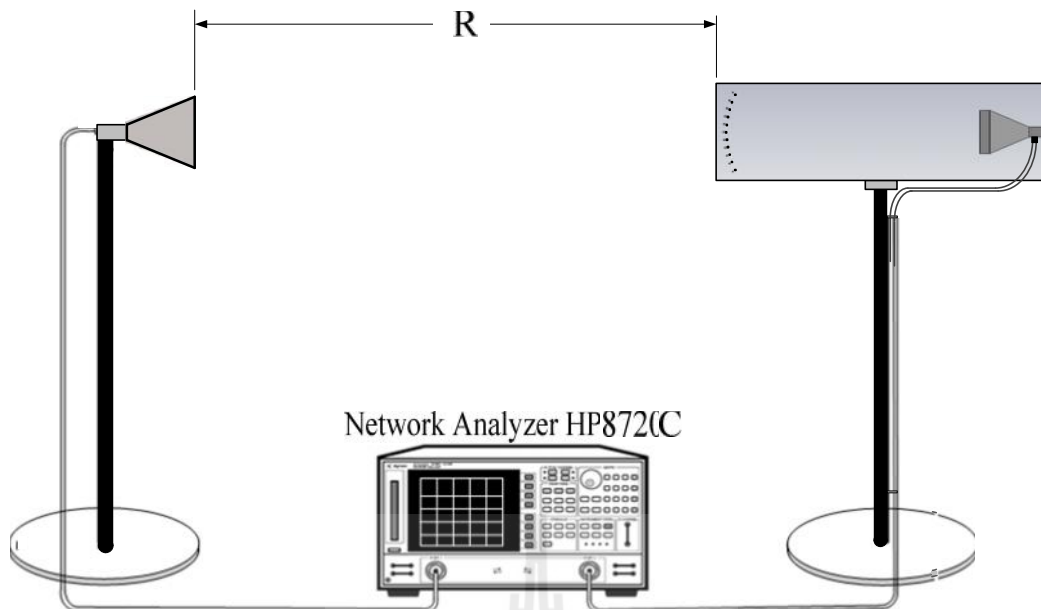
รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานระหว่างผลวัดทดสอบและผลจากการจำลอง

5.5 ผลการวัดทดสอบอัตรายาย

สำหรับการวัดอัตรายายของสายอากาศปากแตรต้นแบบนั้นแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน ได้แก่ (1) การวัดอัตรายายของสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิม เพื่อหาอัตรายายของสายอากาศอ้างอิงสำหรับการวัด แสดงดังรูปที่ 5.13 ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้สายอากาศสองตัว (two-antenna method) ที่มีลักษณะเหมือนกันสำหรับการวัดทดสอบ โดยตัวที่หนึ่งใช้ทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่งและอีกตัวหนึ่งที่เหลือจะเป็นสายอากาศภาครับ และ (2) การวัดอัตรายายของสายอากาศปากแตรต้นแบบ โดยกำหนดให้สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิมเป็นสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศปากแตรต้นแบบเป็นสายอากาศภาครับแสดงดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.13 วิธีการวัดทดสอบอัตรายายของสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิม



รูปที่ 5.14 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศปากแตรต้นแบบ

สำหรับการคำนวณค่าอัตราขยายของสายอากาศจะใช้สมการการส่งผ่านของฟรีส (Friis transmission equation) เป็นพื้นฐานในการคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศ โดยสมการการส่งผ่านของฟรีสที่นำมาใช้ คือ

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

$$G_{dB} = \left(\frac{P_{r,dB} - P_{t,dB} + Loss}{2} \right) \quad (5.2)$$

$$G_{dB} = \left(\frac{P_{r,dB} - P_{t,dB} + 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)}{2} \right) \quad (5.3)$$

$$G_{r_{dB}} = P_{r_{dB}} - P_{t_{dB}} - G_{t_{dB}} + 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (5.4)$$

โดยที่	P_t	คือ กำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศภาคส่ง
	P_r	คือ กำลังที่รับได้จากสายอากาศภาครับ
	G_{dB}	คือ อัตราขยายรวมของสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับเมื่อสายอากาศตัวทั้งสองตัวมีลักษณะเหมือนกัน
	G_t	คือ อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง
	G_r	คือ อัตราขยายของสายอากาศภาครับ
	R	คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ

จากสมการ (5.3) สามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิมที่ความถี่ปฏิบัติการ 10 GHz ได้โดยกำหนดระยะ $R = 3$ เมตร กำลังงานภาคส่งที่ส่งออกหรือ $P_t = -10$ dB วัดทดสอบกำลังภาครับที่รับได้หรือ $P_r = -36.904$ dB ดังนั้นสามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิมได้ดังนี้

$$G_{dB} = \left(\frac{(-36.904) - (-10) + 20 \log \left(\frac{4\pi 3}{0.03} \right)}{2} \right) = 17.54 \text{ dB}$$

สำหรับการวัดอัตราขยายของสายอากาศปากแตรต้นแบบ จะกำหนดให้สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิมเป็นสายอากาศภาคส่งซึ่งมีค่าอัตราขยายเท่ากับ 17.54 dB และกำหนดสายอากาศปากแตรต้นแบบเป็นสายอากาศภาครับ จากสมการ (5.4) สามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศปากแตรต้นแบบที่ความถี่ปฏิบัติการ 10 GHz โดยกำหนดระยะ $R = 3$ เมตร กำลังงานภาคส่งที่ส่งออกหรือ $P_t = -10$ dB วัดทดสอบกำลังภาครับที่รับได้หรือ $P_r = -28.844$ dB ได้ดังนี้

$$G_{r_{dB}} = (-28.844) - (-10) - 17.54 + 20 \log \left(\frac{4\pi 3}{0.03} \right) = 25.6 \text{ dB}$$

5.6 เปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและการจำลอง

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบและการจำลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST จะเห็นว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกัน โดยจะเห็นได้ว่าค่า HPBW ที่ได้จากผลการวัดทดสอบมีค่ามากกว่าเล็กน้อย แต่มีอัตราส่วนของความสมมาตรของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานทั้งที่เท่ากัน ซึ่งสอดคล้องกับอัตราขยายของผลจากการวัดทดสอบที่มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย และค่า SLL ที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบและการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

พารามิเตอร์	ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST	ผลจากการวัดทดสอบ
HPBW (AZ:EL)	6.9°:6.8° 1.01:1	7.1°:7° 1.01:1
E-plane SLL	-16.5 dB	-16.0 dB
H-plane SLL	-20.0 dB	-19.0 dB
อัตราขยาย	25.74 dB	25.6 dB

5.7 สรุป

ในบทนี้ได้แสดงการออกแบบ การสร้าง และการวัดทดสอบคุณลักษณะสมบัติของสายอากาศปากแตรต้นแบบ ทั้งนี้เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และผลจากการวัดทดสอบว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ทำการวัดทดสอบได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในสนามระยะไกล อิมพีแดนซ์ และอัตราขยาย พบว่าค่าที่ได้มีความคล้ายคลึงกัน

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

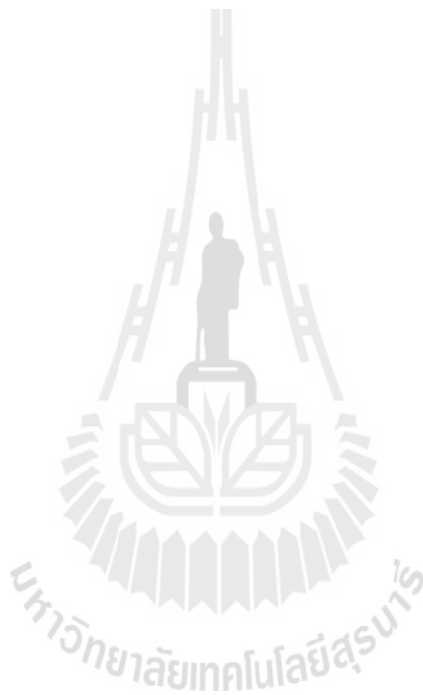
งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิม ให้มีคุณสมบัติเป็นสายอากาศอัตรายายสูงและน้ำหนักเบาสำหรับระบบเรดาร์ ระยะสั้นช่วงความถี่ X-band (8 – 12 GHz) และช่วงความถี่ I-band (8 – 10 GHz) ให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน ITU ตามลำดับ ซึ่งในขั้นแรกได้ทำการปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิมด้วยการเพิ่มปีกสแลบที่มีขนาดเท่ากับ $5\lambda/8$ ติดเข้าไปที่ด้านข้างของช่องเปิดทั้งด้านซ้ายและขวา เพื่อควบคุม HPBW ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กให้มีความสมมาตรมากขึ้น จากนั้นได้นำเทคโนโลยีใหม่มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศปากแตร คือ โครงสร้าง EBG เพื่อปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศให้ดียิ่งขึ้น ในส่วนของการขจัดคลื่นผิว ลดระดับโวลบด้านข้างและหลัง และเพิ่มอัตรายายของสายอากาศ โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบโครงสร้าง EBG ให้มีความเหมาะสมกับสายอากาศปากแตร และการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบเรดาร์ ได้แก่ (1) การจัดรูปแบบการวางตำแหน่งของ EBG ในรูปแบบตามสมการทางเรขาคณิตแบบต่าง ๆ ได้แก่ การวางตัวในแนวราบ สามเหลี่ยม กวอดราทิก วงกลม เกาส์ โคไซน์ และโคไซน์จัตุรัส (2) ระยะห่างระหว่างสายอากาศปากแตรและ โครงสร้างของ EBG และ (3) รัศมีของรูปร่าง EBG จากการวิเคราะห์และออกแบบพบว่าอัตรายายของสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่เพิ่มปีกสแลบร่วมกับโครงสร้าง EBG ซึ่งจัดรูปแบบการวางตำแหน่งเป็นแบบกวอดราทิก โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศปากแตรและ โครงสร้างของ EBG เท่ากับ 16.5λ และมีรัศมีของกวอดราทิกเท่ากับ 5.3λ จะมีค่าสูงกว่าอัตรายายของสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบดั้งเดิมถึงประมาณ 8 dB

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

จากบทสรุปจะพบว่าในงานวิจัยนี้ โครงสร้างของ EBG ที่ถูกคำนวณและออกแบบให้มีรูปร่างที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศนั้นมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะระยะห่างระหว่างสายอากาศปากแตรและ โครงสร้าง EBG ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้าง EBG จะทำหน้าที่เป็นเหมือนเรโซเนเตอร์ที่นำมาวางอยู่ด้านหน้าสายอากาศปากแตรเพื่อเพิ่มอัตรายายของสายอากาศให้สูงขึ้นเมื่อมีระยะที่เหมาะสมกับความถี่ปฏิบัติการเท่านั้น สำหรับการจัดรูปแบบการวางตำแหน่งของ EBG ในรูปแบบตามสมการทางเรขาคณิตแบบต่าง ๆ นอกจากจะทำให้ได้อัตรายายที่ต่างกันแล้ว ยังส่งผลให้

สายอากาศปากแตรมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่แตกต่างกันอีกด้วย ทั้งในส่วนของค่า HPBW และระดับโวลต์ด้านข้าง จากคุณสมบัตินี้เองเราจึงสามารถนำโครงสร้าง EBG ที่จัดรูปแบบการวางตำแหน่งที่แตกต่างกันไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่น ๆ ที่มีความเหมาะสมได้ ซึ่งสามารถปรับปรุงและพัฒนาต่อไปได้อีก ขึ้นอยู่กับความสนใจและการประยุกต์ใช้งานในอนาคต

ในลำดับสุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่าแนวความคิด วิธีการศึกษาวิเคราะห์และออกแบบ รวมถึงผลการวิเคราะห์และผลการทดลองจากงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ เป็นแนวทางที่ดีให้แก่ผู้ที่สนใจศึกษาและค้นคว้าในเรื่องของการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากด้วยโครงสร้าง EBG



เอกสารอ้างอิง

- นันทกานต์ วงศ์เกษม และ คณิศร์ มาตรา. (2552). **วัสดุเหนือธรรมชาติ**. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 หน้า 133-149
- นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์. (2553). **อภิวัดดู (Metamaterials)**. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีที่ 3 ฉบับที่ 2 หน้า 52-60
- รังสรรค์ วงศ์สรรค์ และ ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์. (ม.ป.ป.). **คู่มือการทดลองพื้นฐานของสายอากาศ**. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- รังสรรค์ วงศ์สรรค์. (2555). **วิศวกรรมสายอากาศ**. สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ศราวุธ ชัยมูล และ ประยูทธ อัครเอกตาดิน. (2554). **อภิวัดดูสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านสายอากาศ (Metamaterials for Antenna Applications)**. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 หน้า 472-482
- A. B. Constantine, **Antenna theory: Analysis and Design**, Wiley-Interscience, 2005.
- A.D. Olver, P.J.B. Clarricoats, L. Shafai, and A.A. Kishk, **Microwave horns and feeds**, IEEE Press, New Jersey 1994.
- A.S. Barlevy, and Y. Rahmat-Samii, "Characterization of electromagnetic band-gaps composed of multiple periodic tripods with interconnecting vias: concept, analysis, and design," **IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques**, Vol. 49, 2001, pp. 242-353.
- A.W. Love, **Electromagnetic horn antennas**, IEEE Press, New York, 1976.
- C. Caloz and T. Itoh, **Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications**, Wiley-IEEE Press, 2005.
- D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous, and E. Yablonovitch, "High-Impedance Electromagnetic Surfaces with a Forbidden Frequency Band," **IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques**, Vol. 47, 1999, pp. 2059-2074.
- E. Ozbay, A. Abeyta, G. Tuttle, M. Tringides, R. Biswas, C. T. Chan, C. M. Soukoulis, and K. M. Ho, "Measurement of a three-dimensional photonic band gap in a crystal structure made of dielectric rods," **Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics**, Vol. 50, No.3, 1994, pp. 1945-1948.

- F. Yang and Y. Rahmat-Samii, "A Low-Profile Circularly Polarized Curl Antenna over an Electromagnetic Band Gap (EBG) Surface," **Microwave and Optical Technology Letters**, Vol. 31, No. 4, 2001, pp. 264-267.
- F. Yang and Y. Rahmat-Samii, "Reflection phase characterizations of the EBG ground plane for low profile wire antenna applications," **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 51, No. 10, 2003, pp. 2691–2703.
- F. Yang and Y. Rahmat-Samii, "Reflection Phase Characterizations of the EBG Ground Plane for Low Profile Wire Antenna Applications," **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 51, No. 10, 2003, pp. 2691-2703.
- F. Yang and Y. Rahmat-Samii, **Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering**, Cambridge University Press, Cambridge, 2009.
- F.-R. Yang, K.-P. Ma, Y. Qian, and T. Itoh, "A Uniplanar Compact Photonic-Bandgap (UC-PBG) Structure and Its Applications for Microwave Circuits," **IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques**, Vol. 47, 1999, pp. 1509-1014.
- G. Cakir and L. Sevgi, "Design of a Novel Microstrip Electromagnetic Band Gap (EBG) Structure," **Microwave and Optical Technology Letters**, Vol. 46, No. 4, 2005.
- I. Poole, "Horn antenna," 2010. http://www.radio-electronics.com/info/antennas/horn_antenna/horn_antenna.php
- J. Liu, D. R. Jackson, and Y. Long, "Substrate integrated waveguide (SIW) leaky-wave antenna with transverse slots," **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 60, No. 1, 2012, pp.20 - 29.
- J. S Colburn and Y.Rahmat-Samii, "Patch antennas on externally perforated high dielectric constant substrates," **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 47, 1999, pp. 1785-1794.
- K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 4, No. 8, 1966, pp. 302-307.
- K.A. Bakshi, A.V. Bakshi, and U.A. Bakshi, **Antennas and Wave Propagation**, Technical Publications, 2009.

- M. A. Koerner and R. L. Rogers, "Gain Enhancement of a Pyramidal Horn Using E- and H-Plane Metal Baffles," **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 48, No. 4, 2000, pp. 529-538.
- M. Clenet and L. Shafai, "Investigations on Directivity Improvement of Wide Flare Angle Conical Horns Using Inserted Metallic Discs," **IEE Proceedings on Microwaves Antennas and Propagation**, Vol. 147, No. 2, 2000, pp. 100-105.
- M. Skolnik, **Introduction to radar systems**, 3rd ed. McGraw Hill, 2001.
- M. Thevenot, C. Cheype, A. Reineix, and B. Jecko, "Directive Photonic Band-Gap Antennas," **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, Vol. 47, No. 11, 1999, pp. 2115-2122.
- M. Krairiksh, P. Ngamjanyaporn, and C. Kessuwan, "Flat four beam compact phased array antenna," **IEEE Microwave and Wireless Component Letters**, Vol. 12, No. 5, 184-186, May 2002.
- P. Bevilaqua, "The Horn Antenna," 2009-2011. <http://www.antenna-theory.com/antennas/aperture/horn.php>
- P. de Maagt, R. Gonzalo, Y. C. Vardaxoglou, and J. M. Baracco, "Electromagnetic bandgap antennas and components for microwave and (sub) millimeter wave applications," **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 51, No. 10, 2003, pp. 2667-2677.
- R. Coccioli, F. R. Yang, K. P. Ma, and T. Itoh, "Aperture-coupled patch antenna on UC-PBG substrate," **IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques**, Vol. 47, 1999, pp. 2123-2130.
- R. Gonzalo, P. J. I. de Maagt, and M. Sorolla, "Enhanced Patch Antenna Performance by Suppressing Surface Waves Using Photonic Band-Gap Structures," **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, Vol. 47, No. 11, 1999, pp. 2131-2138.
- R. Gonzalo, P. Maagt, and M. Sorolla, "Enhanced patch-antenna performance by suppressing surface waves using photonic-bandgap substrates," **IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques**, Vol. 47, 1999, pp. 2131-2138.
- S. Kampeephat, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "A Study of Gain Enhancement of Horn Antenna Using EBG," **The 2012 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP 2012)**, Singapore, August 2012, pp. 195-196.

- S. Kampeephat, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "A Study of Gain Enhancement of Horn Antenna Using Various Shaped Woodpile EBG," **The 2012 Thailand-Japan MicroWave (TJMW 2012)**, Bangkok, Thailand, August 2012.
- S. Kampeephat, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "Gain Improvement for Rectangular Horn Antenna with Additional EBG," **The 2013 Thailand-Japan MicroWave (TJMW 2013)**, Bangkok, Thailand, December 2013.
- S. Kampeephat, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "Gain Improvement for Conventional Rectangular Horn Antenna with Additional EBG Structure," **The 2014 International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2014)**, Nakhon Ratchasima, Thailand, May 2014.
- S. Kampeephat, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "Gain Improvement for Conventional Rectangular Horn Antenna with Additional EBG Structure," **World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET), International Journal of Electrical, Robotics, Electronics and Communications Engineering**, Vol. 8, No. 7, 2014, pp. 904-909.
- S. Silver, **Microwave Antenna Theory and Design**, McGraw-Hill, 1949.
- Skolnik. M.I. **Radar handbook**, McGraw-Hill, 1990.
- V. Radisic, Y. Qian, R. Coccioli, and T. Itoh, "Novel 2-D photonic bandgap structure for microstrip lines," **IEEE Microwave and Guided Wave Letters**, Vol. 8, No. 2, 1998, pp. 69-71.
- V. Rodriguez, "A brief history of horns," **In Compliance Magazine**, November 2010.
- V. Thavivrot, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "Radiation Pattern Synthesis from Various Shaped Reflectors Base on PO and PTD Methods for Point-to-Multipoint Applications," **WSEAS Transactions on Communications**, Vol. 7, No. 6, 2008, pp. 531-540.
- Y. Lee, X. Lu, Y. Hao, S. Yang, J.R.G. Evans and C.G. Parini, "Narrow-beam azimuthally omnidirectional millimetre-wave antenna using freeformed cylindrical woodpile cavity", **IET Microwave, Antenna and Propagation**, Vol. 4, Iss. 10, 2010, pp. 1491-1499.
- Z. Li and Y. Rahmat-Samii, "PBG, PMC and PEC ground planes: a case study of dipole antennas," **IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium**, Vol. 4, 2000, pp. 2258-2261.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

S. Kampeephat, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "Efficiency Improvement for Conventional Rectangular Horn Antenna by Using EBG Technique," **World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET), International Journal of Electrical, Robotics, Electronics and Communications Engineering**, Vol. 8, No. 7, 2014, pp. 1015-1020.

รายชื่อบทความวิจัยเต็มรูปแบบที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

S. Kampeephat, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "Gain Improvement for Conventional Rectangular Horn Antenna With Additional EBG Structure," **The 2014 International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)**, May, 2014, pp. 1-4.

S. Kampeephat, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "Gain Improvement for Rectangular Horn Antenna with Additional EBG," **The 2013 Thailand-Japan MicroWave (TJMW)**, December, 2013.

S. Kampeephat, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "A Study of Gain Enhancement of Horn Antenna Using Various Shaped Woodpile EBG," **The 2012 Thailand-Japan MicroWave (TJMW)**, August, 2012.

S. Kampeephat, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "A Study of Gain Enhancement of Horn Antenna Using EBG," **The 2012 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)**, 2012, pp. 195-196.

S. Kampeephat, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "High-Gain and Light-Weight Antenna for Radar System Using a Horn Covered with Curved Woodpile EBG," **The 2012 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)**, 2012, pp. 1628-1630.

ประวัติผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ เกิดเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2507 เกิดที่ ตำบลปากน้ำประแสร์ อำเภอกะเลง จังหวัดระยอง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์ เมื่อปีพ.ศ. 2532 จากนั้นได้ศึกษาต่อระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำเร็จการศึกษาเมื่อปีพ.ศ. 2537 ต่อมาปีพ.ศ. 2541 ได้รับการรับรองด้านวิศวกรรมอวกาศ (Certification in Space Engineer) โดย International Space University, France (SSP'98 at Cleveland State University, Ohio, USA) ได้ศึกษาต่อระดับปริญญาเอกวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำเร็จการศึกษาเมื่อปีพ.ศ. 2546 สำหรับประวัติการทำงานในอดีต ปีพ.ศ. 2532 เป็นอาจารย์ประจำแผนกอิเล็กทรอนิกส์ ที่สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ ปีพ.ศ. 2532 ถึง 2533 เป็นอาจารย์พิเศษคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม กรุงเทพมหานคร นอกจากนี้ ปีพ.ศ. 2535 ถึง 2536 เป็นที่ปรึกษาด้านอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ปีพ.ศ. 2546 ถึง 2548 ได้เป็นหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นอาจารย์พิเศษมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ปีพ.ศ. 2553 ถึง 2553 เป็นรองอธิการบดีฝ่ายพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นนายกสโมสรพนักงานสายวิชาการและสายปฏิบัติการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันเป็นรองศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเป็นคณะกรรมการจัดทำมาตรฐานด้านเทคนิคในกิจการกระจายเสียงและกิจการโทรทัศน์ ตามคำสั่งคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ที่ 5/2555