

สายอากาศหอนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดที่มีลำคลื่นสมมาตร
สำหรับป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น

SYMMETRICAL BEAM COMPACT APERTURE WAVEGUIDE ANTENNA
FOR FRONT-FED REFLECTOR ANTENNA



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-D-018-180

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดที่มีลำคลื่นสมมาตร
สำหรับป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น

SYMMETRICAL BEAM COMPACT APERTURE WAVEGUIDE ANTENNA
FOR FRONT-FED REFLECTOR ANTENNA



T148656



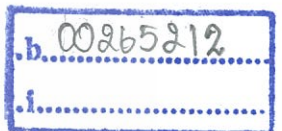
คณะวิท- วิศวกรรม

KANAWAT NUANGWONGSA

เลขหมู่

เลขทะเบียน 148656

ในเดือนปี 14 7116 2560



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-D-018-180

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYMMETRICAL BEAM COMPACT APERTURE WAVEGUIDE ANTENNA
FOR FRONT-FED REFLECTOR ANTENNA



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016
KMITL-2016-EN-D-018-180

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดที่มีลำคลื่นสมมาตรสำหรับป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น

Thesis Title Symmetrical Beam Compact Aperture Waveguide Antenna for Front-Fed Reflector Antenna

นักศึกษา นายคณะวัตติ์ เนื่องวงษา

รหัสประจำตัว 53610108

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-D-018-180

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ศ.ดร.โมนอย	ไกรฤกษ์	
ผศ.ดร.พิชญ	สุพรรณกุล	
ผศ.ดร.ทับทิม	อ่างแก้ว	
ผศ.ดร.ศรวัฒน์	ชีวปรีชา	
รศ.ดร.ชวรงค์	พงศ์เจริญพาณิชย์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 5 ตุลาคม พ.ศ. 2559 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
คนบตี คณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 5 ตุลาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดที่มีลำคลื่นสมมาตรสำหรับป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น
นักศึกษา	นายคณະวัติ เนื่องวงษา
รหัส	53610108
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดที่มีลำคลื่นสมมาตรสำหรับป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น โดยปกติสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวทั่วไปนั้นมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่สมมาตรกัน แต่เมื่อมีการออกแบบช่องเปิดแบบพาราซิติคให้เป็นเพิ่มเข้าไปแล้วพบว่าสายอากาศจะมีลำคลื่นทิศทางเดียวที่มีความสมมาตรกันมากขึ้น และจากผลการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการแพร่กระจายคลื่นออกด้านหน้าช่องเปิด แล้วออกแบบช่องเปิดแบบพาราซิติคเข้าประกบที่บริเวณปากของช่องเปิดในแนวตั้งทั้งด้านบนและล่าง (เรียงซ้อนกันบนและล่างในแนวตั้งเทียบกับผิวโลก) เพื่อทำให้เกิดลำคลื่นที่มีความสมมาตร โดยกำหนดขนาดของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความกว้าง a เท่ากับ 23.1 mm และความสูง b เท่ากับ 11.55 mm ตามลำดับ ซึ่งจากผลการออกแบบพบว่าสายอากาศสามารถใช้งานได้ครอบคลุมย่านความถี่ X-Band (10.00 GHz ถึง 10.50 GHz) และจากผลการจำลองเพื่อหาขนาดของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่างๆของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดนี้แล้วทำการสร้างและทดสอบแล้ว พบว่าจากผลการจำลองค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) มีค่าเท่ากับ 70° (70° เท่ากันทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก) และความกว้างลำคลื่นที่ -10 dB มีค่าเท่ากับ 137° (137° เท่ากันทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก) และผลการทดสอบพบว่าค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 70° และความกว้างลำคลื่นที่ -10 dB มีค่าเท่ากับ 137° โดยที่ผลจากการจำลองและผลจากการทดสอบมีแนวโน้มไปในแนวเดียวกัน และจากการผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 8.13 dBi ส่วนผลการทดสอบมีค่าเท่ากับ 8.24 dBi ตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาและออกแบบคุณสมบัติทั้งหมดของสายอากาศพบว่าสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดนี้มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนแบบผิวโค้งพาราโบลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Symmetrical Beam Compact Aperture Waveguide Antenna for Front-Fed Reflector Antenna
Student	Mr. Kanawat Nuangwongsa
Student ID.	53610108
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

ABSTRACT

This research presents a symmetrical beam compact aperture waveguide antenna for front-fed reflector antenna. The proposed antenna is able to rectify the asymmetry and also achieve a symmetrical unidirectional beam through the application of two parasitic coupling apertures. The design of the antenna is that of a rectangular waveguide (radiating aperture) vertically jointed to the two coupling apertures of the same measurement widthwise (i.e., one stacked on top and the other underneath) to achieve the symmetrical beam. The rectangular waveguide is 23.1 mm and 11.55 mm in width (a) and height (b), respectively, to propagate the X-Band frequency band of 10.00 GHz - 10.50 GHz. Simulations were carried out to determine the optimal antenna parameters and a compact aperture waveguide antenna prototype was subsequently fabricated and tested. The simulated beam widths in the E-plane and H-planes at -3 dB were equally 70° (i.e., 70° for both the E-plane and H-planes) and at -10 dB also equally 137° , while the measured results at -3 dB were equally 70° and at -10 dB equally 135° . The simulation and measured results are thus in good agreement. The simulated and measured antenna gains are, respectively, 8.13 dBi and 8.24 dBi. The findings validate the applicability of the compact aperture waveguide antenna as the front-fed for rotationally symmetric parabolic reflectors.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเรียบร้อย ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รองศาสตราจารย์ ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นผู้ช่วยเหลือ ดูแลในด้านการศึกษาและงานวิจัยทั้งในเวลาและนอกเวลาราชการ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และคำแนะนำที่มีประโยชน์ในช่วงเวลาที่ข้าพเจ้าได้เข้ามาเรียนระดับปริญญาเอก นอกจากนี้ต้องขอขอบพระคุณอาจารย์อีกสองท่าน คือ รองศาสตราจารย์ ดร. สมผล โกศลวิตร และศาสตราจารย์ ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ คำแนะนำพื้นฐานด้านวิชาการและเคยให้คำปรึกษาและโอกาสในการทำงานวิจัยในการทำ วิทยานิพนธ์ ระดับปริญญาโท ทำให้ข้าพเจ้าได้นำความรู้มาทำงานวิจัยในระดับปริญญาเอกให้สำเร็จลุล่วง ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

สุดท้ายขอขอบคุณสมาชิกในห้องปฏิบัติการการสื่อสารไร้สายทุกท่าน ที่ให้การแนะนำช่วยเหลือและสนับสนุนงานวิจัยของข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมา

คณะวัด เมืองวงษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	
สารบัญรูปภาพ.....	
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 สายอากาศในระบบสื่อสารย่านความถี่ X-Band.....	6
2.3 งานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศที่มีลำคลื่นสมมาตร.....	8
2.4 รูปแบบการกระตุ้นสัญญาณด้วยโพรบที่ใช้ในท่อนำคลื่น.....	14
2.5 สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว.....	15
2.6 การจำลองค่า $ S_{11} $ (dB).....	19
2.7 การจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....	23
2.8 อัตราขยายของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว.....	24
2.9 บทสรุป.....	25
บทที่ 3 การออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด.....	27
3.1 บทนำ.....	27
3.2 โครงสร้างของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด.....	28
3.3 การศึกษาและออกแบบช่องเปิดพาราซิติค.....	30
3.3.1 การจำลอง $ S_{11} $ (dB) เพื่อหาระยะบ่อนสัญญาณของโพรบ (l_1) เมื่อมีการ เพิ่มช่องเปิดแบบพาราติค.....	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 การจำลอง $ S_{11} $ (dB) เพื่อหาความลึกของช่องเปิดจนถึงตำแหน่งโพรบ (l_2).....	32
3.3.3 การจำลอง $ S_{11} $ (dB) และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เพื่อหาค่าความ ลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3).....	33
3.3.4 การจำลอง $ S_{11} $ (dB) และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เพื่อหาค่าความ สูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1).....	37
3.3.5 การจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าภายในโครงสร้างสายอากาศช่องเปิด พาราซิติค.....	42
3.4 ผลการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	44
3.5 บทสรุป.....	47
บทที่ 4 การออกแบบ และการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น.....	49
4.1 บทนำ.....	49
4.2 รูปแบบเรขาคณิตของพื้นผิวของสายอากาศสะท้อนคลื่น.....	50
4.3 การออกแบบสายอากาศสะท้อนคลื่น.....	51
4.4 การจำลอง $ S_{11} $ (dB) ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่น ด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น.....	53
4.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อน คลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น.....	55
4.6 การจำลองความเข้มสนามไฟฟ้า.....	60
4.7 อัตราขยายของสายอากาศ.....	63
4.8 บทสรุป.....	64
บทที่ 5 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศ.....	66
5.1 บทนำ.....	66
5.2 ขั้นตอนการทดสอบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้า ให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น.....	66

สารบัญ (ต่อ)

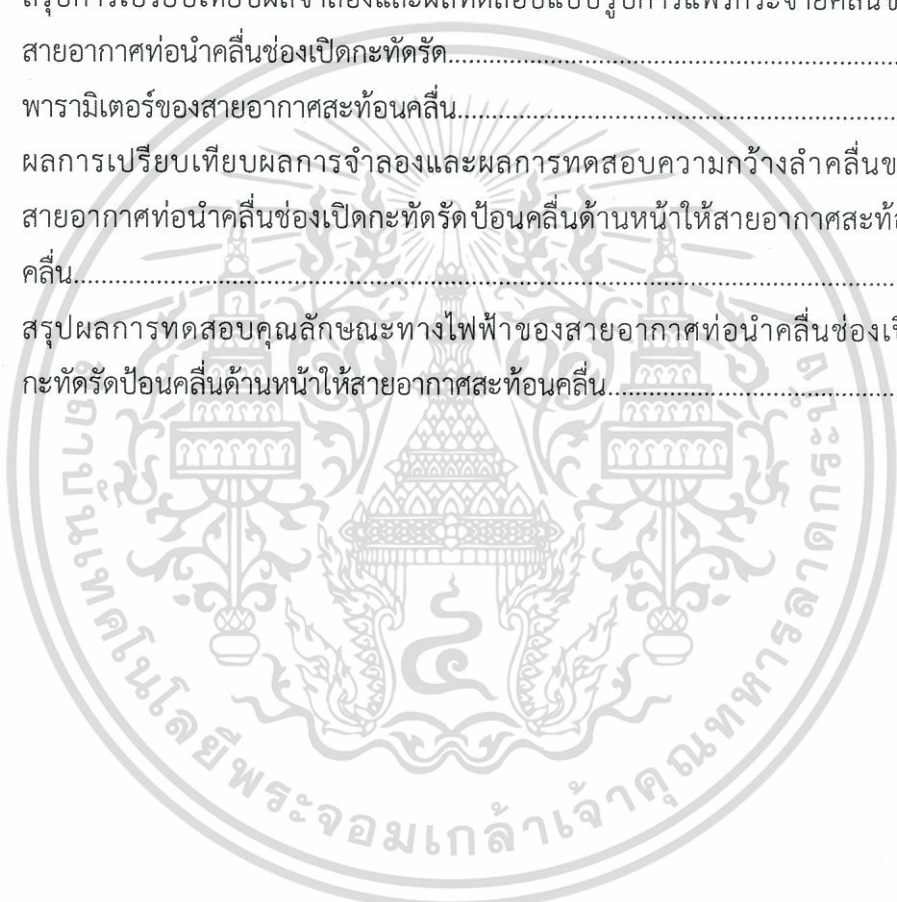
	หน้า
5.2.1 ขั้นตอนการทดสอบ $ S_{11} $ (dB) ของสายอากาศ.....	66
5.2.2 ขั้นตอนการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....	67
5.2.3 ขั้นตอนการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ.....	67
5.3 สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด.....	68
5.3.1 ผลการทดสอบ $ S_{11} $ ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด.....	69
5.3.2 ผลการทดสอบแบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด.....	70
5.3.3 ผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด....	71
5.4 สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น.....	72
5.4.1 การทดสอบ $ S_{11} $ (dB) ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น.....	73
5.4.2 การทดสอบแบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศ.....	75
5.4.3 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ.....	76
5.5 บทสรุป.....	78
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	79
6.1 บทนำ.....	79
6.2 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	79
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	81
เอกสารอ้างอิง.....	82
ประวัติผู้เขียน.....	87

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การคำนวณหาค่าความถี่ตัด (f_c) ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม.....	16
2.2	พารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว.....	19
2.3	ขนาดพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว.....	23
2.4	สรุปผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ -3 dB และ -10 dB ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว.....	24
3.1	ความถี่ตัด (f_c) ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด $a \times b = 23.1 \times 6.5 \text{ mm}^2$	29
3.2	พารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด.....	29
3.3	สรุปการเปรียบเทียบผลการจำลองความกว้างลำคลื่นที่ -3 dB และ -10 dB เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3).....	37
3.4	สรุปการเปรียบเทียบผลการจำลองความกว้างลำคลื่นที่ -3 dB และ -10 dB เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ให้ละเอียดมากขึ้น.....	41
3.5	พารามิเตอร์ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด.....	42
3.6	การเปรียบเทียบผลการจำลองความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้าที่บริเวณขอบของช่องเปิด ของสายอากาศช่องเปิดเดี่ยวและสายอากาศช่องเปิดแบบพาราซิติค.....	45
3.7	เปรียบเทียบผลการจำลองความกว้างลำคลื่นที่ -3 dB และ -10 dB ในกรณีของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวและสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด.....	46
4.1	สรุปผลการจำลองความกว้างลำคลื่นของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดและสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวเมื่อใช้ป้อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่น.....	56
4.2	สรุปผลการจำลองระดับลำคลื่นด้านข้าง (SLL) และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (F/B) ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดและสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวเมื่อใช้ป้อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่น.....	57
4.3	การเปรียบเทียบผลการจำลองความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้าที่บริเวณด้านหน้าสายอากาศท่อนำคลื่น.....	57
4.4	การเปรียบเทียบผลการจำลองความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้าที่บริเวณด้านหน้าสายอากาศสะท้อนคลื่น.....	58

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.5	การจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าเมื่อนำสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวมาเป็นตัวป้อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่น.....	60
4.6	การจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าเมื่อนำสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดมาเป็นตัวป้อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่น.....	62
5.1	พารามิเตอร์ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด.....	69
5.2	สรุปการเปรียบเทียบผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด.....	71
5.3	พารามิเตอร์ของสายอากาศสะท้อนคลื่น.....	72
5.4	ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบความกว้างลำคลื่นของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้สายอากาศสะท้อนคลื่น.....	76
5.5	สรุปผลการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้สายอากาศสะท้อนคลื่น.....	77



สารบัญรูปร่าง

รูปที่		หน้า
2.1	สายอากาศที่ใช้ในระบบการสื่อสารย่านความถี่ X-Band [14-17].....	7
2.2	ลักษณะของลำคลื่นของสายอากาศที่ป้อนสัญญาณด้านหน้า (Front feed) ของสายอากาศสะท้อนคลื่น [18-19].....	7
2.3	สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [20]	8
2.4	สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [21]	9
2.5	สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [22]	10
2.6	สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [23]	10
2.7	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากเอกสารอ้างอิง [23].....	11
2.8	สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [24]	12
2.9	สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [25]	12
2.10	สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [26]	13
2.11	สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [27]	14
2.12	รูปแบบการกระตุ้นสัญญาณด้วยโพรบที่ใช้ในท่อนำคลื่น [28].....	15
2.13	ท่อนำคลื่นที่นำมาออกแบบเป็นสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว.....	16
2.14	ค่าการลดทอนของสัญญาณในท่อนำคลื่นทองเหลืองพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยม.....	18
2.15	ค่าการลดทอนของสัญญาณในท่อนำคลื่นทองเหลืองพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมในฟังก์ชันของความถี่เมื่อเปลี่ยนแปลงโหมดในการแพร่กระจายคลื่น.....	18
2.16	สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว.....	19
2.17	ผลการจำลอง $ S_{11} $ (dB) ของสายอากาศขนาด $23.10 \times 11.55 \times 25.35 \text{ mm}^3$...	20
2.18	ผลการจำลอง $ S_{11} $ (dB) เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งป้อนสัญญาณ l_1	20
2.19	ผลการจำลอง $ S_{11} $ (dB) เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งป้อนสัญญาณ l_1 ให้ละเอียดขึ้น.....	21
2.20	ผลการจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าของสายอากาศที่มีขนาด $23.10 \times 11.55 \times 25.35 \text{ mm}^3$ (ก) ด้านข้าง และ (ข) ด้านบน.....	21
2.21	ผลการจำลองความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้าที่บริเวณขอบของช่องเปิดของสายอากาศที่มีขนาด $23.10 \times 11.55 \times 25.35 \text{ mm}^3$	22
2.22	ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า และ (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก.....	23
2.23	ผลจำลองอัตราขยายของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว.....	24
2.24	ผลการจำลองอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศช่องเปิดเดี่ยว.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา μ X ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.1	โครงสร้างของช่องเปิดแบบพาราซิติค.....	28
3.2	โครงสร้างสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด.....	28
3.3	เปรียบเทียบผลจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าภายในโครงสร้างสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว และสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด.....	30
3.4	ผลการจำลอง $ S_{11} $ (dB) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนระยะป้อนสัญญาณของโพรบ (l_1) ตั้งแต่ 4.55 mm ถึง 21.85 mm	31
3.5	ผลการจำลอง $ S_{11} $ (dB) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดจนถึงตำแหน่งโพรบ (l_2) ตั้งแต่ 17.00 mm ถึง 118.30 mm	32
3.6	ผลการจำลอง $ S_{11} $ (dB) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดจนถึงตำแหน่งโพรบ (l_2) ให้ละเอียดมากขึ้น ตั้งแต่ 84.50 mm ถึง 89.91 mm	33
3.7	โครงสร้างของสายอากาศเมื่อปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3) (ก) มุมมอง Perspective และ (ข) มุมมองด้านข้าง.....	34
3.8	ผลการจำลอง $ S_{11} $ (dB) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3) ตั้งแต่ 0.00 mm ถึง 35.72 mm	34
3.9	ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3) ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	35
3.10	ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3) ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	35
3.11	ผลการจำลอง $ S_{11} $ (dB) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3) ให้ละเอียดมากขึ้น ตั้งแต่ 7.94 mm ถึง 15.96 mm	36
3.12	ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3) ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	36
3.13	ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3) ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	36
3.14	โครงสร้างสายอากาศเมื่อมีการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) (ก) มุมมอง Perspective และ (ข) มุมมองด้านข้าง.....	38
3.15	ผลการจำลอง $ S_{11} $ (dB) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ตั้งแต่ 0.00 mm ถึง 10.68 mm	38
3.16	ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา \times ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	39
3.18 ผลการจำลอง $ S_{11} $ (dB) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ให้ละเอียดมากขึ้น ตั้งแต่ 4.00 mm ถึง 7.60 mm	40
3.19 ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ให้ละเอียดมากขึ้น ในระนาบสนามไฟฟ้า.....	40
3.20 ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ให้ละเอียดมากขึ้น ในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	41
3.21 ผลจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าภายในโครงสร้างสายอากาศช่องเปิด (ก) แนวแกน yz และ(ข) แนวแกน xz.....	42
3.22 ผลจำลองอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศช่องเปิดพาราซิติค.....	43
3.23 เปรียบเทียบผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศช่องเปิดเดี่ยว และแบบพาราซิติค ที่ความถี่ 10.25 GHz (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก.....	44
3.24 เปรียบเทียบผลจำลอง Cross-polarization ของสายอากาศช่องเปิดที่ความถี่ 10.25 GHz.....	44
3.25 ผลจำลองอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิด เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1).....	46
4.1 รูปร่างสองมิติของสายอากาศสะท้อนคลื่น [48].....	50
4.2 การวางตำแหน่งของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด และสายอากาศสะท้อนคลื่น.....	52
4.3 การหาค่ามุม θ ของสายอากาศ.....	52
4.4 การเปรียบเทียบระยะโฟกัสของสายอากาศแบบสายอากาศสะท้อนคลื่น [48].....	53
4.5 การกำหนดค่าการวางตำแหน่งของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดที่ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น.....	54
4.6 ผลจำลอง $ S_{11} $ (dB) ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น.....	54
4.7 ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดที่ความถี่ 10.00 GHz (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า และ (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XI ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.8	ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิด กะทัดรัดที่ความถี่ 10.25 GHz (a) ระนาบสนามไฟฟ้า และ (b) ระนาบ สนามแม่เหล็ก.....	55
4.9	ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิด กะทัดรัดที่ความถี่ 10.50 GHz ในระนาบ (a) สนามไฟฟ้า และ (b) สนามแม่เหล็ก	56
4.10	ผลจำลอง Cross-polarization ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิด กะทัดรัดที่ ความถี่ (ก) 10.00 GHz (ข) 10.25 GHz และ (ค) 10.50 GHz.....	59
4.11	เปรียบเทียบผลจำลองอัตราขยายสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิด กะทัดรัด มาเป็น ตัวป้อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่น.....	63
5.1	แผนผังการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....	67
5.2	โครงสร้างของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิด กะทัดรัด.....	68
5.3	รูปถ่ายสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิด กะทัดรัด.....	68
5.4	เปรียบเทียบผลการจำลองและผลทดสอบ $ S_{11} $ (dB) ของสายอากาศท่อนำคลื่น ช่องเปิด กะทัดรัด.....	70
5.5	เปรียบเทียบผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 10.25 GHz.....	70
5.6	เปรียบเทียบผลจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศท่อนำคลื่น ช่องเปิด กะทัดรัด.....	72
5.7	การวางตำแหน่งในการทดสอบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิด กะทัดรัด ป้อนคลื่น ด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น.....	73
5.8	รูปถ่ายสายอากาศสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิด กะทัดรัด ป้อนคลื่น ด้านหน้า ให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น.....	74
5.9	ผลการทดสอบ $ S_{11} $ (dB) ของสายอากาศสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิด กะทัดรัด ป้อนคลื่น ด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น.....	74
5.10	แผนผังการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสายอากาศ.....	75
5.11	เปรียบเทียบผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความถี่ 10.25 GHz.....	76
5.12	ผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิด กะทัดรัด ป้อนคลื่น ด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

เทคโนโลยีระบบวิทยุสมัครเล่น (Amateur Radio) หรือ Ham Radio เกิดขึ้นมาในศตวรรษที่ 19 โดยจุดเริ่มต้นเกิดขึ้นครั้งแรกอย่างเป็นทางการที่สหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ.1909 [1] หลังจากนั้น ได้มีสถานีส่งที่ประเทศแคนาดา และประเทศอังกฤษรวมทั้งหมด 89 สถานี [2] ซึ่งวัตถุประสงค์ในการก่อตั้งสถานีส่งก็เหมือนกับการสื่อสารวิทยุสมัครเล่นทั่วไปที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารกัน [3] ซึ่งภายหลังจากนั้นสมาชิกในชมรมก็ได้มีก่อตั้งวงการอุตสาหกรรมใหม่ๆขึ้น [4] อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดการกระตุ้นเศรษฐกิจ ทำให้ประเทศมีขีดความสามารถเพิ่มขึ้น และที่สำคัญคือการสื่อสารวิทยุสมัครเล่นสามารถช่วยชีวิตคนในเวลาฉุกเฉินได้เป็นอย่างดี [5]

ถึงแม้ว่าความถี่ที่ใช้งานของระบบการสื่อสารคลื่นความถี่วิทยุสมัครเล่นจะอยู่ระหว่างช่วงความถี่ตั้งแต่ความถี่ต่ำ จนถึงความถี่มากกว่า 300.00 GHz แต่ในแต่ละประเทศจะมีการจัดสรรความถี่ที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ข้อกำหนดของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union; ITU) ได้แบ่งช่วงความถี่ออกเป็น 3 ช่วงคือ ITU Region 1 ประกอบด้วยประเทศในยุโรป รัสเซีย แอฟริกา และตะวันออกกลาง ซึ่งแบ่งช่วงความถี่เป็น LF VHF MF และHF มีความถี่ตั้งแต่ (30.00 to 300.00 kHz) จนถึง (28.00 to 29.70 GHz) ITU Region 2 ประกอบด้วยประเทศอเมริกา รวมถึงกรีนแลนด์ ซึ่งแบ่งช่วงความถี่เป็น LF MF VHF UHF SHF และ EHF มีความถี่ตั้งแต่ (135.70 to 137.80 kHz) จนถึง (241.00 to 250.00 GHz) และ ITU Region 3 ประกอบด้วยประเทศออสเตรเลีย อินโดนีเซีย ญี่ปุ่น นิวซีแลนด์ แปซิฟิกใต้ และเอเชียใต้ของแถบประเทศในไซบีเรีย [6]

สำหรับในประเทศไทย มีหลายย่านความถี่ตามข้อกำหนดของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (ITU) และใช้กำลังส่งได้สูงสุดตามที่กฎหมายกำหนดแต่ละลำดับชั้นของใบอนุญาต สำหรับประเทศไทยตามประกาศคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ เรื่อง หลักเกณฑ์การอนุญาตและกำกับดูแลกิจการวิทยุสมัครเล่น พ.ศ. 2557 ซึ่งความถี่ต่ำ (28.00 MHz – 29.70 MHz) และมีกำลังส่งไม่เกิน 100 วัตต์ จนถึงความถี่สูงตั้งแต่ (248.00 GHz – 250.00 GHz) และมีกำลังส่งไม่เกิน 10 วัตต์ [7]

ปัจจุบันคลื่นความถี่วิทยุสมัครเล่น ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่กำหนดในการใช้งาน สามารถใช้งานได้แต่มีข้อกำหนดในการสื่อสารแต่ละประเทศที่จะประกาศใช้งาน โดยไม่ตรงกับย่านความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารโดยทั่วไป จะเห็นได้ว่าระบบการสื่อสารด้วยวิทยุสมัครเล่นมีการนำไปใช้ในการสื่อสารทั่วโลก ซึ่งปัญหาอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นอย่างทีกล่าวมาข้างต้น คือ ในแต่ละประเทศมีการใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานความถี่ในระบบวิทยุสมัครเล่นที่แตกต่างกัน นั้นอาจทำให้การติดต่อสื่อสารกันระหว่างผู้ส่ง และผู้รับ ในระยะไกล ไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ ในบางประเทศ หรืออาจติดต่อสื่อสารกันได้ไม่เต็ม

และในระบบวิทยุสมัครเล่นมีช่วงความถี่ที่นิยมใช้งานมากที่สุดในหลายๆประเทศคือช่วงความถี่ 10.00 GHz – 10.50 GHz เนื่องจากเป็นช่วงความถี่สูง และมีการพัฒนาขึ้นโดยการนำสายอากาศสะท้อนคลื่นมาทำงานร่วมกันทำให้มีระยะในการสื่อสารไกลมาก [8] และส่วนประกอบของระบบการสื่อสารในระบบวิทยุสมัครเล่นประกอบด้วยวงจรรากส่ง สายอากาศส่ง และสายอากาศสะท้อนคลื่น ซึ่งในส่วนของวงจรรากส่ง และสายอากาศสะท้อนคลื่นนั้นเป็นส่วนที่มีการออกแบบไว้ใช้งานที่มีความเหมาะสมในการใช้งานแล้ว ยังเหลือเพียงสายอากาศส่งเพียงอย่างเดียวที่สามารถออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นได้ ซึ่งสายอากาศที่เป็นที่นิยมนำมาใช้ในระบบมีหลายแบบและหนึ่งในนั้นคือสายอากาศฮอร์นแบบ corrugate จากคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศฮอร์นแบบ corrugate นั้นถูกออกแบบมาเพื่อต้องการให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวที่มีความกว้างลำคลื่นที่สมมาตรกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก มีค่า cross-polarize ต่ำ และมีประสิทธิภาพสูง แต่เนื่องจากโครงสร้างมีความซับซ้อนจึงยากในการออกแบบและสร้าง ดังนั้นจึงมีการออกแบบและพัฒนาสายอากาศมาเป็นสายอากาศฮอร์นแบบ choke ที่มีการออกแบบและสร้างง่ายขึ้นและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น [9] แต่ด้วยขนาดพื้นที่หน้าตัดที่มีขนาดใหญ่จึงมีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากโครงสร้างสายอากาศบดบังลำคลื่นด้านหน้าของสายอากาศสะท้อนคลื่น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำหลักการวางตำแหน่งของโครงสร้างสายอากาศมาจากการออกแบบสายอากาศฮอร์นแบบ choke ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่ง่ายในการออกแบบและสร้างสายอากาศ

จากบทความวารสารวิชาการที่ผ่านมามีพบว่าในการออกแบบโครงสร้างสายอากาศที่นำมาใช้เป็นตัวบ่อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นนั้น สายอากาศตัวดังกล่าวจะต้องมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีความกว้างลำคลื่นสมมาตรกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กที่มีความกว้างลำคลื่น -10 dB ซึ่งที่ค่าความกว้างลำคลื่นที่ -10 dB เกิดจากการพิจารณาประสิทธิภาพรวมของสายอากาศมาจากการรวมกันของประสิทธิภาพของการ spillover รวมกับประสิทธิภาพของการ illumination เนื่องจากเมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวจะพบว่าที่ยอดของลำคลื่น 0 dB ณ ตำแหน่งนี้จะมีประสิทธิภาพของการ illumination สูงที่สุดแต่จะมีประสิทธิภาพของการ spillover น้อยที่สุด ซึ่งที่ตำแหน่งความกว้างลำคลื่นที่ -10 dB ทำให้ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศมีค่ามากที่สุด [10]

ถึงแม้จะมีงานวิจัยเรื่องสายอากาศที่จะนำไปใช้บ่อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นที่สามารถตอบสนองต่อการใช้งานในย่านความถี่ที่กว้าง และใช้งานครอบคลุมย่านความถี่ X-Band ทั้งหมดตั้งแต่ย่านความถี่ 10.00 GHz ถึง 10.50 GHz ก็ตาม ยกตัวอย่างเช่น สายอากาศฮอร์นแบบพีระมิดแบบต่างๆ และสายอากาศฮอร์น corrugate แบบต่างๆ ซึ่งสายอากาศฮอร์นแบบพีระมิด และสายอากาศฮอร์น corrugate ที่กล่าวถึงนั้นมีข้อดีคือมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีความกว้างลำคลื่นสมมาตรกัน แต่เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศมีความซับซ้อนและให้การออกแบบและสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยากตามไปด้วย ดังนั้นการออกแบบสายอากาศที่จะนำไปใช้ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นจากวัสดุที่หาได้ง่าย ลดขั้นตอนในการออกแบบและสร้าง มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน มีขนาดเล็ก และน้ำหนักเบา จึงเป็นวิธีการแก้ปัญหาที่เป็นไปได้วิธีหนึ่งที่ทำให้ระบบการนำสายอากาศไปใช้ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นมีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้

จากที่มาและความสำคัญที่ได้กล่าวมาข้างต้น สายอากาศที่จะนำไปใช้ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นจำเป็นอย่างมากที่ต้องมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สมมาตรกันทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก เพื่อแก้ปัญหาการเกิดความกว้างลำคลื่นเกินขอบ หรือเล็กกว่าขอบของสายอากาศสะท้อนคลื่นทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศต่ำลง โดยได้ศึกษาเทคนิคการเพิ่มช่องเปิดพาราซิติคส์เหลี่ยม โดยการเพิ่มช่องเปิดพาราซิติคส์เหลี่ยมที่มีแนวคิดในการออกแบบมาจากการเพิ่มร่อง (grooves) ที่ด้านหน้าช่องเปิดของสายอากาศฮอร์นแบบ choke ที่กำหนดให้มีความลึกเท่ากับ 0.25λ แต่เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศฮอร์นแบบ choke นั้นถูกออกแบบมาจากท่อนำคลื่นทรงกระบอกกลมทำให้การวางตำแหน่งของช่องเปิดจึงถูกออกแบบให้วางช่องเปิดไว้โดยรอบท่อนำคลื่นทรงกระบอกกลมนั้นเพิ่มเข้าไป แต่เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้มีการออกแบบเริ่มต้นด้วยการใช้ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความสูง a และมีความกว้าง b และมีอัตราส่วน $a=2b$ ซึ่งโดยโครงสร้างแล้วสายอากาศจะมีลำคลื่นไม่สมมาตร และจากผลการจำลองในบทที่ 2 พบว่าจะเกิดการเลี้ยวเบนของเส้นแรงไฟฟ้าที่บริเวณขอบด้านบนและล่างของสายอากาศ ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาการเกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นที่บริเวณขอบด้านบนและล่างของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว โดยการเพิ่มช่องเปิดที่ขอบด้านบนและล่างของสายอากาศและกำหนดให้มีความลึกเริ่มต้นเท่ากับ $0.25\lambda_g$ เพื่อต้องการให้สายอากาศมีความกว้างลำคลื่นสมมาตรกันและมี $|S_{11}|$ (dB) ตามความต้องการของระบบที่ออกแบบสายอากาศไว้สำหรับป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นย่านความถี่ x-band

เพื่อต้องการออกแบบให้สายอากาศที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นสายอากาศที่ใช้สำหรับป้อนสัญญาณด้านหน้าให้สายอากาศสะท้อนคลื่นในย่านความถี่ X-Band ที่สามารถครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 10.00 ถึง 10.50 GHz ตามความต้องการของระบบโดยคำนึงถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้า $|S_{11}|$ (dB) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยายเป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา พัฒนา และออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดที่มีลำคลื่นสมมาตรเพื่อใช้ป้อนสัญญาณด้านหน้าให้สายอากาศสะท้อนคลื่น โดยโครงสร้างของสายอากาศถูกออกแบบมาจากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า และป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเชียล ซึ่งโดยปกติแล้วโครงสร้างท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั้น เมื่อมีการวางตำแหน่งของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความกว้างเท่ากับ a ในแนวแกน x และมีความสูง b ในแนวแกน y และมีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นในแนวแกน z ซึ่งเมื่อนำท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามาป้อนสัญญาณด้วยโคแอกเชียลโพรบแล้วพบว่า มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่สมมาตรกัน โดยมีความกว้างลำคลื่นในระนาบ yz กว้างมากกว่าความกว้างลำคลื่นในระนาบ xz ดังนั้นจึงมีการเพิ่มช่องเปิดพาราซิติคสี่เหลี่ยมที่มีแนวคิดในการออกแบบมาจากการเพิ่มร่อง (grooves) ที่ด้านหน้าช่องเปิดของสายอากาศฮอร์นแบบ choke ที่กำหนดให้มีความลึกเท่ากับ 0.25λ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้มีการออกแบบด้วยการใช้ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความสูง a และมีความกว้าง b เพื่อต้องการให้สายอากาศมีความกว้างลำคลื่นสมมาตรกันและมี $|S_{11}|$ (dB) ตามความต้องการของระบบที่ออกแบบสายอากาศไว้สำหรับป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นย่านความถี่ x-band

ซึ่งเมื่อมีการออกแบบโดยการเพิ่มช่องเปิดพาราซิติคเข้าไปที่บริเวณขอบด้านบนและล่างของสายอากาศ พบว่า $|S_{11}|$ (dB) ครอบคลุมช่วงกว้างความถี่ตั้งแต่ 10.0 ถึง 10.5 GHz อีกทั้งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางที่มีความกว้างลำคลื่นสมมาตรกันที่กว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW:-3 dB) และความกว้างลำคลื่น -10 dB ทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก และเมื่อสายอากาศช่องเปิดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับตัวสะท้อนคลื่นแบบพาราโบลามีอัตราขยายมากกว่า 28.38 dBi โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อาศัยโปรแกรม Computer simulation technology (CST) microwave studio ในการจำลองลักษณะทางไฟฟ้าต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดที่มีลำคลื่นสมมาตรสำหรับเป็นตัวป้อนสัญญาณให้กับตัวสะท้อนคลื่น และได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบพร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบ สำหรับหัวข้อย่อยลำดับถัดไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย วัตถุประสงค์การศึกษาขอบเขตการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎี และหลักการออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวในย่านความถี่ x-Band โดยเนื้อหาประกอบด้วย การอธิบายส่วนประกอบของระบบการสื่อสารย่าน x-Band ที่มีการเพิ่มระยะการรับส่งสัญญาณโดยใช้สายอากาศสะท้อนคลื่น และการออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว

บทที่ 3 กล่าวถึงการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสายอากาศที่จะทำการออกแบบจากการใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในการจำลอง โดยเริ่มต้นจากการวิเคราะห์ และศึกษาพารามิเตอร์จากวิธีการเพิ่มส่วนประกอบของสายอากาศที่เป็นช่องเปิดพาราซิติค โดยการวิเคราะห์จาก $|S_{11}|$ (dB) และความกว้างลำคลื่นของสายอากาศ สุดท้ายจึงเป็นปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของสายอากาศสำหรับการนำไปสร้าง และทดสอบ

บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการออกแบบของสายอากาศสะท้อนคลื่น และการนำสายอากาศท่อนำคลื่น ช่องเปิดกะทัดรัดที่ออกแบบไว้มาป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น และผลการจำลองซึ่ง ประกอบไปด้วย $|S_{11}|$ (dB) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยาย

บทที่ 5 กล่าวถึงผลจากการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิด กะทัดรัดที่ได้ทำการวิเคราะห์มาในขั้นต้นแล้วนำมาสร้างทดสอบจริง จากนั้นนำผลการจำลองมา เปรียบเทียบกับผลในการทดสอบ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบประกอบไปด้วย $|S_{11}|$ (dB) แบบรูปการ แพร่กระจายคลื่น และอัตราขยาย

บทที่ 6 กล่าวถึงข้อสรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ ผลกระทบต่างๆในการเปลี่ยนแปลง พารามิเตอร์ ผลทดสอบของสายอากาศทั้งหมดที่ได้ทำการสร้างขึ้น พร้อมด้วย ข้อดี และ ข้อเสียของ สายอากาศ แนวทางการพัฒนา และข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี และหลักการออกแบบสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว

2.1 บทนำ

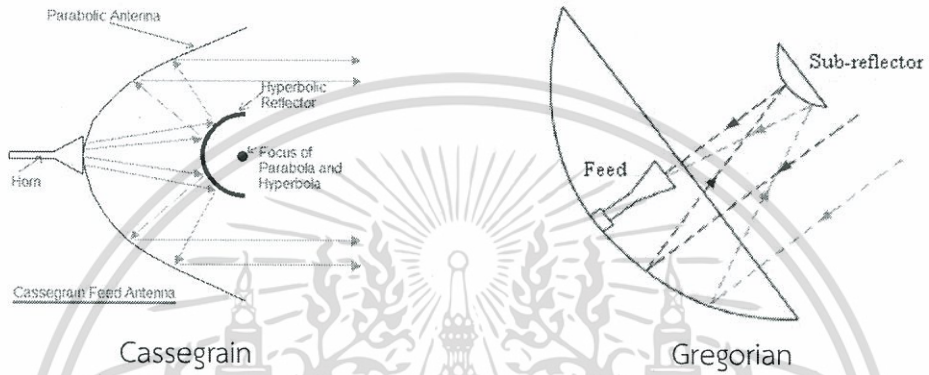
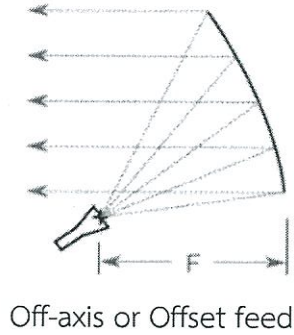
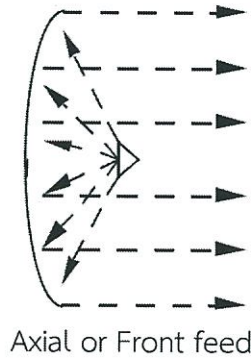
จากวัตถุประสงค์ของการออกแบบสายอากาศในบทที่ 1 เพื่อต้องการนำสายอากาศที่ออกแบบไปป้อนสัญญาณบริเวณด้านหน้าให้สายอากาศสะท้อนคลื่น ดังนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบสายอากาศนี้ นอกจาก $|S_{11}|$ (dB) แล้วยังต้องพิจารณาถึงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศด้วย เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นจากด้านหน้านั้นจะมีประสิทธิภาพสูงสุดก็ต่อเมื่อ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของตัวสายอากาศที่นำมาป้อนสัญญาณนั้นมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สมมาตรกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

ซึ่งคุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งหมดของสายอากาศสะท้อนคลื่น ขึ้นอยู่กับโครงสร้างผิวโค้งของสายอากาศสะท้อนคลื่นและสายอากาศตัวป้อนสัญญาณ หรือ feeder ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ที่คล้ายกับการเดินทางของแสงผ่านเลนส์หรือที่เรียกว่า ray tracing ลักษณะทางเรขาคณิตของของรูปทรงพาราโบลา และพิจารณาที่จุดป้อนสัญญาณด้านหน้า หรือ front fed [11]

2.2 สายอากาศในระบบสื่อสารย่านความถี่ X-Band

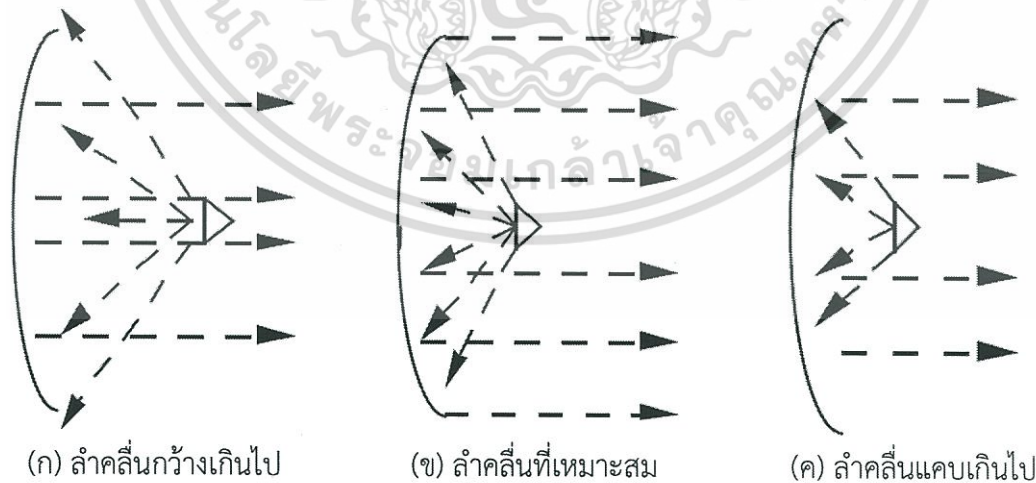
ในระบบการสื่อสารย่าน X-Band สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากของระบบ เนื่องจากเป็นตัวกำหนดความสามารถในการรับส่งสัญญาณของระบบรับส่งสัญญาณ โดยทั่วไปสายอากาศที่มีขนาดใหญ่จะมีกำลังการขยายสูงเนื่องจากมีพื้นที่ในการรับส่งสัญญาณกว้าง สายอากาศมีหลายชนิด มีหน้าที่โพกัสสัญญาณให้มีทิศทางเพื่อที่จะเพิ่มความเข้มของสัญญาณในทิศทางที่ต้องการสื่อสาร ดังนั้นสายอากาศจึงมีส่วนช่วยในการเพิ่มกำลังของสัญญาณในการรับส่งสัญญาณในทิศทางที่ต้องการ

โดยที่สายอากาศที่จะนำมาป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นนั้นมีการป้อนสัญญาณหลายรูปแบบ ดังตัวอย่างสายอากาศในรูปที่ 2.1 สายอากาศในย่านความถี่ X-Band ที่จะนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้เป็นสายอากาศที่ใช้เป็นตัวป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น ซึ่งลักษณะของลำคลื่นของสายอากาศที่ป้อนสัญญาณด้านหน้า (Front feed) ของสายอากาศสะท้อนคลื่นนั้นมีข้อดีคือการป้อนสัญญาณด้านหน้า (Front feed) ให้อัตราขยายสูง [12-13]



รูปที่ 2.1 สายอากาศที่ใช้ในระบบการสื่อสารย่านความถี่ X-Band [14-17]

และลักษณะการป้อนสัญญาณด้านหน้านั้นมีหลายรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งจากลักษณะของลำคลื่นของสายอากาศที่ป้อนสัญญาณด้านหน้า (Front feed) ของสายอากาศสะท้อนคลื่นมีลำคลื่นทั้งหมด 3 แบบคือ ลำคลื่นกว้างเกินไป ลำคลื่นที่เหมาะสม และลำคลื่นแคบเกินไป



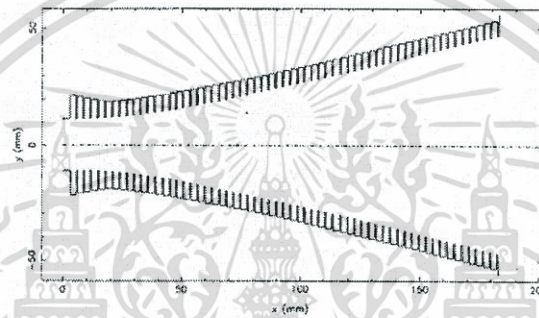
รูปที่ 2.2 ลักษณะของลำคลื่นของสายอากาศที่ป้อนสัญญาณด้านหน้า (Front feed) ของสายอากาศสะท้อนคลื่น [18-19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

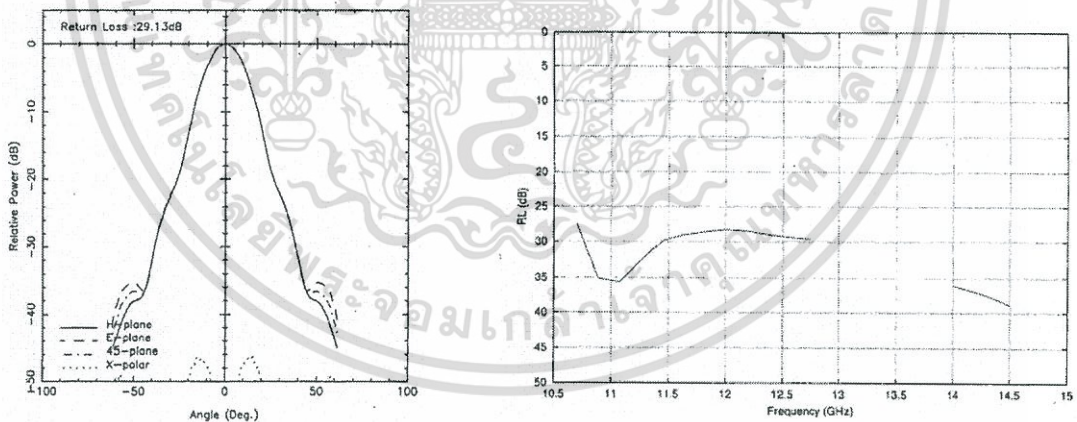
2.3 งานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศที่มีลำคลื่นสมมาตร

สายอากาศที่ใช้ในการป้อนสัญญาณให้แผ่นสะท้อนคลื่นผิวโค้งย่านความถี่ X-Band จะถูกพิจารณาคุณลักษณะทางไฟฟ้าอยู่ 2 ประเภทหลักๆ คือ $|S_{11}|$ (dB) ครอบคลุมช่วงกว้างความถี่ X-Band และการแพร่กระจายคลื่น สำหรับการแพร่กระจายคลื่นที่มีลำคลื่นสมมาตรนั้นมีหลากหลายงานวิจัยที่น่าสนใจและควรนำมาศึกษาเป็นอย่างยิ่ง

ยกตัวอย่างเช่น ในปี 2005 นักวิจัย Christophe Granet และคณะ [20] ได้ออกแบบสายอากาศฮอร์นแบบ corrugate ที่มีอัตราขยายสูงในย่านความถี่ KU-Band (10.7-12.75 GHz และ 14.0-14.5 GHz) มีโครงสร้างเป็นสายอากาศสายอากาศฮอร์นแบบ corrugate ดังรูปที่ 2.3 (ก) - (ค) ทำให้ได้สายอากาศที่มีระดับลำคลื่นด้านข้างต่ำกว่า -35 dB มี $|S_{11}|$ (dB) ต่ำกว่า -29.13 dB ที่ความถี่ 12.46 GHz



(ก) โครงสร้างสายอากาศ Corrugate horn ในย่านความถี่ KU-Band ของ C. Granet และคณะ [20]



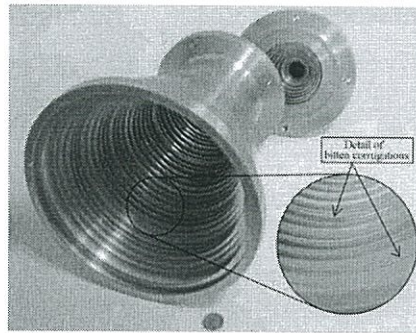
(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

(ค) $|S_{11}|$ (dB)

รูปที่ 2.3 สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [20]

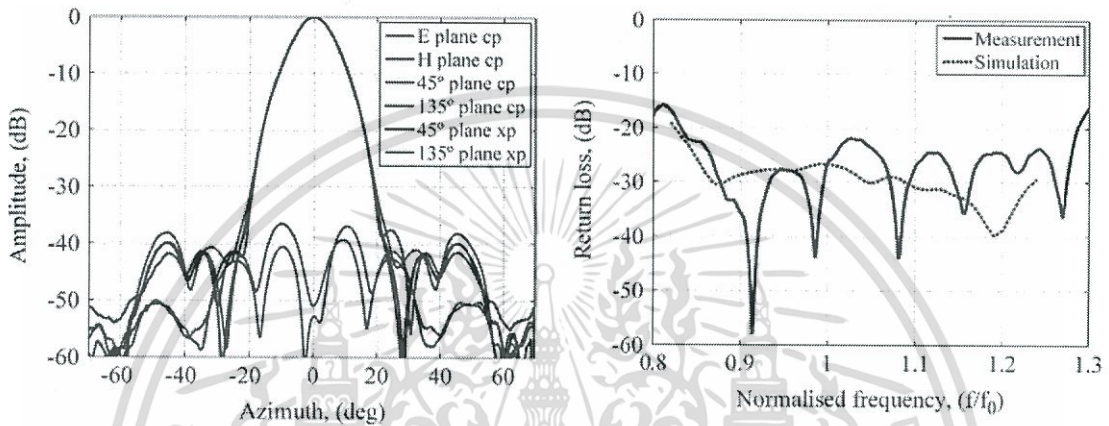
ในปี 2006 นักวิจัย Jorge Teniente และคณะ [21] ได้ออกแบบสายอากาศฮอร์นแบบ corrugate ที่มีอัตราขยายสูงในย่านความถี่ X-Band มีโครงสร้างเป็นสายอากาศสายอากาศฮอร์นแบบ corrugate ผสมระหว่างแนวตั้งและแนวนอน ดังรูปที่ 2.4 (ก) - (ค) ทำให้ได้สายอากาศมีค่าอัตราขยายของสายอากาศมากกว่า 24 dB มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สมมาตรกันทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก และมีระดับลำคลื่นด้านข้างต่ำกว่า -40 dB ที่ความถี่ 10 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) โครงสร้างสายอากาศ Corrugate horn ในย่านความถี่ 10 GHz ของ J. Teniente และคณะ

[21]

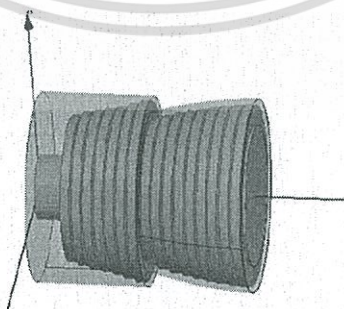


(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

(ค) $|S_{11}|$ (dB)

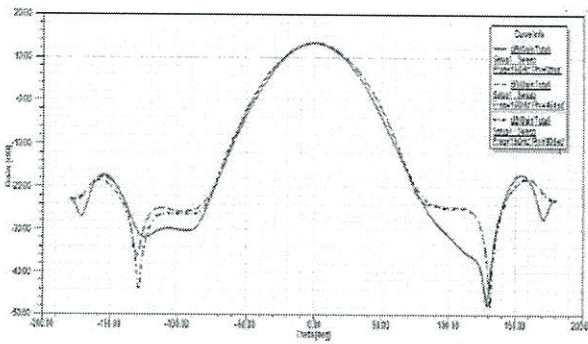
รูปที่ 2.4 สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [21]

ในปี 2008 นักวิจัย Digisha J. Patel และคณะ [22] ได้ศึกษาสายอากาศฮอร์นแบบ corrugate ทรงกระบอกกลมซ้อนกันสองขนาดออกแบบในย่าน KU-Band (12 GHz – 18 GHz) เป็นสายอากาศฮอร์นแบบ corrugate ทรงกระบอกกลม และใช้งานในโหมดลำคลื่นแบบ Gaussian ดังรูปที่ 2.5 (ก) – (ค) โดยโครงสร้างสายอากาศประกอบด้วยโครงสร้างฮอร์นแบบ corrugate ที่มีก็นำฮอร์นแบบ corrugate 2 ขนาดมาวางซ้อนกัน ทำให้ได้สายอากาศที่มีค่าอัตราขยายของสายอากาศมากกว่า 14 dB มีระดับลำคลื่นด้านข้างต่ำกว่า -20 dB และมีค่า cross polarized เท่ากับ -22 dB มีค่า $|S_{11}|$ (ต่ำกว่า -10 dB) ครอบคลุมย่านความถี่ KU-Band (12 GHz – 18 GHz)

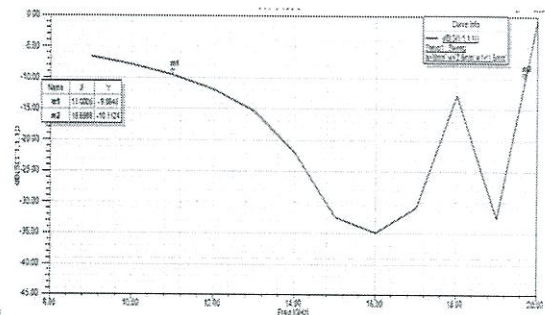


(ก) โครงสร้างสายอากาศในย่าน KU-Band (12 – 18 GHz) ของ Digisha J. Patel และคณะ [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



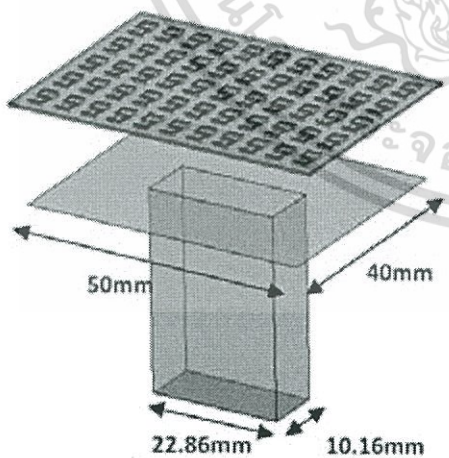
(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น



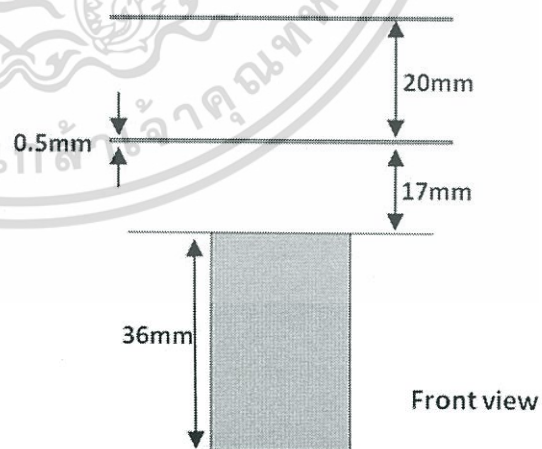
(ค) VSWR

รูปที่ 2.5 สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [22]

ในปี 2010 นักวิจัย T. Aribi [23] ได้ออกแบบการเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในย่านความถี่ X-Band เป็นสายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดเท่ากับ $22.86 \times 10.16 \text{ mm}^2$ และมีการเพิ่มแผ่น metamaterial 2 แผ่นซ้อนกัน โดยแผ่นแรกถูกวางห่างจากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมในระยะ 17 mm และแผ่นที่สองถูกวางห่างจากแผ่นแรกเท่ากับ 20 mm ดังรูปที่ 2.6 โดยแผ่น metamaterial 2 แผ่นซ้อนกันเพื่อต้องการเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมและมีการใช้งานที่ความถี่ 10.00 GHz ซึ่งโครงสร้างสายอากาศประกอบด้วยท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม และแผ่น metamaterial 2 แผ่นซ้อนกัน แต่ละแผ่นมีความหนาเท่ากับ 0.50 mm และมีขนาด $40.00 \times 50.00 \text{ mm}^2$ และ $41.00 \times 56.00 \text{ mm}^2$ ตามลำดับ และจากรูปที่ 2.7 พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมเมื่อไม่มีแผ่น metamaterial มีความกว้างลำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กแตกต่างกันมาก และเมื่อมีการออกแบบแผ่น metamaterial เพิ่มเติมพบว่าทำให้ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศแคบลงแต่ยังคงมีความแตกต่างกันมาก



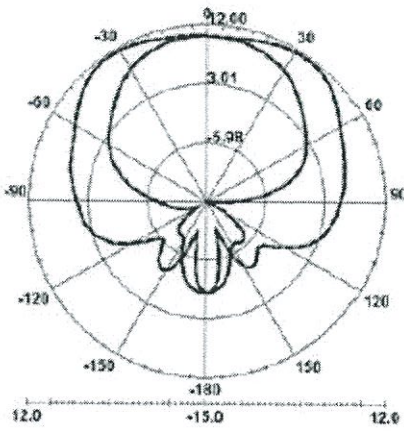
(ก) แผ่น metamaterial 1 ชั้น



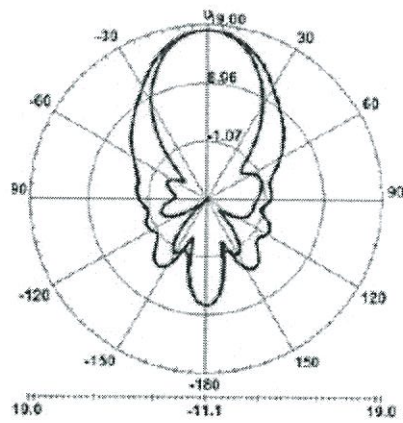
(ข) แผ่น metamaterial 2 ชั้น

รูปที่ 2.6 โครงสร้างสายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่ 10 GHz ของ T. Aribi [23]

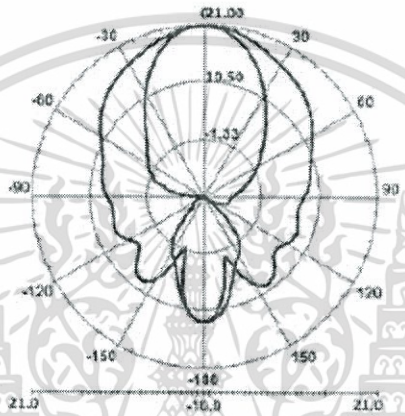
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม



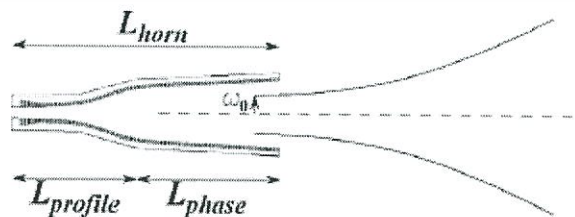
(ข) เมื่อเพิ่มแผ่น แผ่น metamaterial 1 ชั้น



(ง) เมื่อเพิ่มแผ่น metamaterial 2 ชั้น

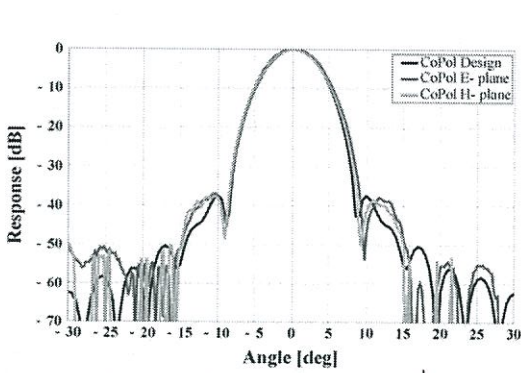
รูปที่ 2.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากเอกสารอ้างอิง [23]

ในปี 2013 นักวิจัย Johannes E. McKay และคณะ [24] ได้ศึกษาสายอากาศฮอร์นแบบ corrugate ทรงกระบอกกลมขนาดเล็กที่มีระดับลำคลื่นด้านข้างต่ำ (SLL; Side Lobe Level) ที่ความถี่ 94 GHz สายอากาศฮอร์นแบบ corrugate ทรงกระบอกกลมขนาดเล็ก และมีการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว ใช้งานในโหมดลำคลื่นแบบ Gaussian ดังรูปที่ 2.8 (ก) - (ค) โครงสร้างสายอากาศประกอบด้วยฮอร์นแบบ corrugate ทรงกระบอกกลมรัศมี 8.64 mm และมีความยาว 66.3 mm ทำให้ได้สายอากาศที่มีค่าอัตราขยายของสายอากาศมากกว่า 22 dB มีระดับลำคลื่นด้านข้างต่ำกว่า -50 dB

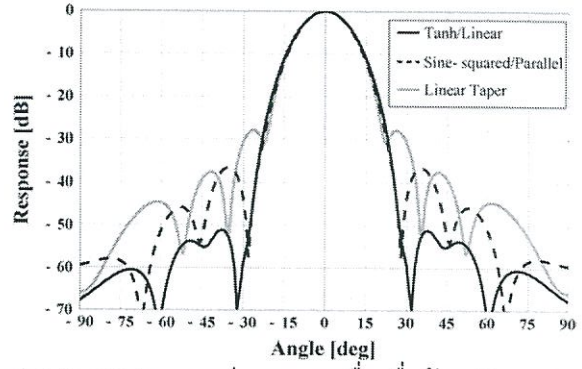


(ก) โครงสร้างสายอากาศ Corrugate horn ที่ความถี่ 94 GHz ของ Johannes E. McKay และคณะ [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



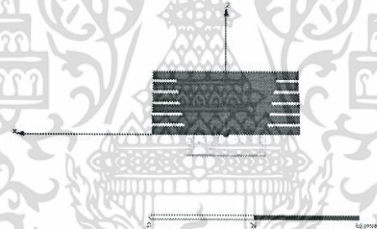
(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น



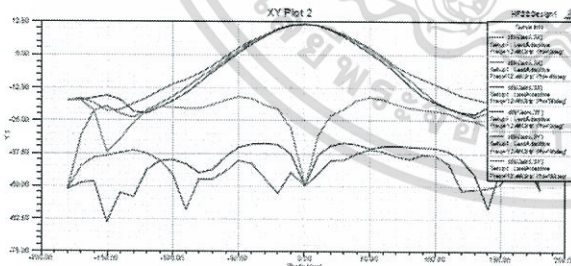
(ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อป้อนสัญญาณแบบต่างๆ

รูปที่ 2.8 สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [24]

ในปี 2014 นักวิจัย Mitaldevi. V. Gohil และคณะ [25] ได้ศึกษาสายอากาศฮอร์นแบบ corrugate ทรงกระบอกกลม (Corrugated) ที่ความถี่ 12.50 GHz เป็นสายอากาศฮอร์นแบบ corrugate ทรงกระบอกกลม และมีการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว ดังรูปที่ 2.9 (ก) - (ค) โครงสร้างสายอากาศประกอบด้วยโครงสร้างฮอร์นแบบ corrugate ที่มีการเจาะรูทั้งหมด 5 รู่ง ทำให้ได้สายอากาศที่มีค่าอัตราขยายของสายอากาศมากกว่า 12 dB และมีค่า cross polarized เท่ากับ -27 dB มีค่า $|S_{11}|$ (dB) เท่ากับ -27 dB ที่ความถี่ 12.46 GHz



(ก) โครงสร้างสายอากาศ Corrugate horn ที่ความถี่ 12.46 GHz ของ Mitaldevi. V. Gohil และคณะ [25]



(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

$ S_{11} $ (dB)	Cross-polarize	Gain
-27 dB	-27 dB	12 dB

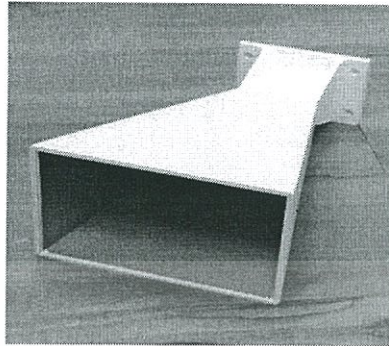
(ค) คุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศ

รูปที่ 2.9 สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [25]

ในปี 2015 ของนักวิจัย Ke-Ru Chou [26] ได้ออกแบบสายอากาศเครื่องวัดระดับน้ำในย่านความถี่ C-Band เป็นสายอากาศสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด และมีการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว (Unidirectional pattern) ดังรูปที่ 2.10 (ก) - (ค) โครงสร้างสายอากาศประกอบด้วย

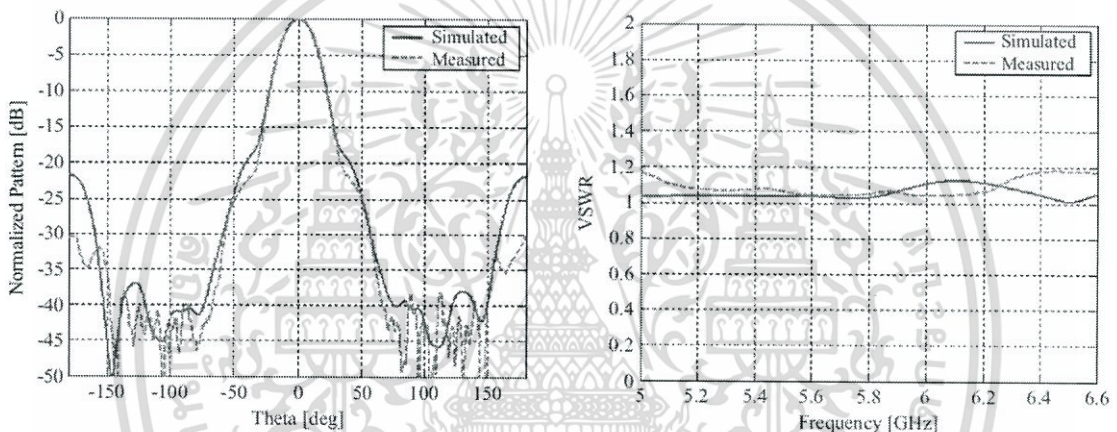
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างปากแตรทรงพีระมิดที่มีขนาดความกว้าง 145 mm สูง 105 mm และยาว 255 mm ทำให้ได้ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวที่มีลำคลื่นใกล้เคียงกันมากคือ E-plane และ H-plane เท่ากับ 26° และ 25° และมีช่วงความถี่ครอบคลุมย่านความถี่ 5.4-6.2 GHz



(ก) โครงสร้างสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดสำหรับเครื่องวัดระดับน้ำในย่านความถี่ C-Band ของ

Ke-Ru Chou และคณะ [26]

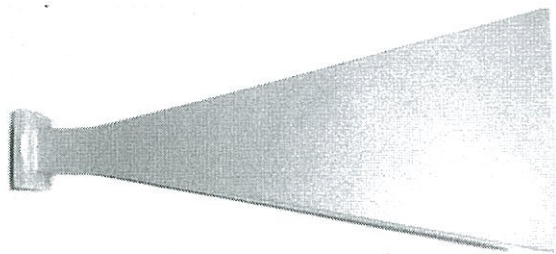


(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

(ค) VSWR

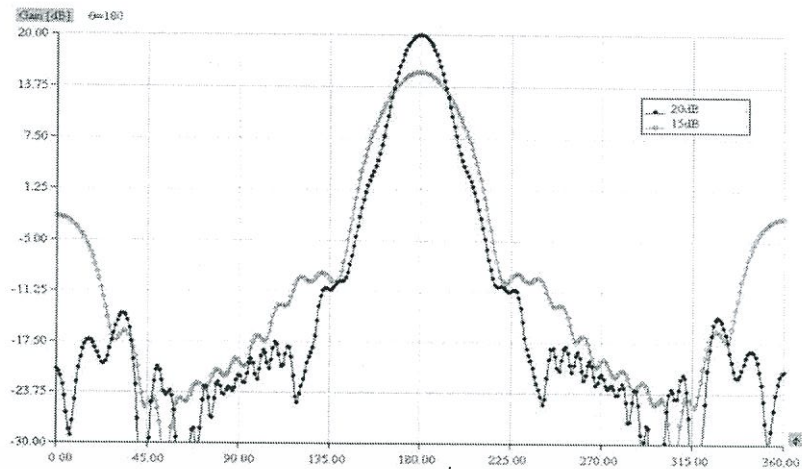
รูปที่ 2.10 สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [26]

ในปี 2015 ของนักวิจัย Pendurthy A S. D. [27] ได้ออกแบบสายอากาศในย่านความถี่ X-Band เป็นสายอากาศสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด และมีการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว ดังรูปที่ 2.11 (ก) - (ค) โครงสร้างสายอากาศประกอบด้วยโครงสร้างปากแตรทรงพีระมิดที่มีขนาดความกว้าง 123.69 mm สูง 91.95 mm และยาว 255.52 mm ทำให้ได้ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวที่มีลำคลื่นใกล้เคียงกันมากคือ E-plane และ H-plane เท่ากับ 25° และ 30° และมีช่วงความถี่ครอบคลุมย่านความถี่ X-Band

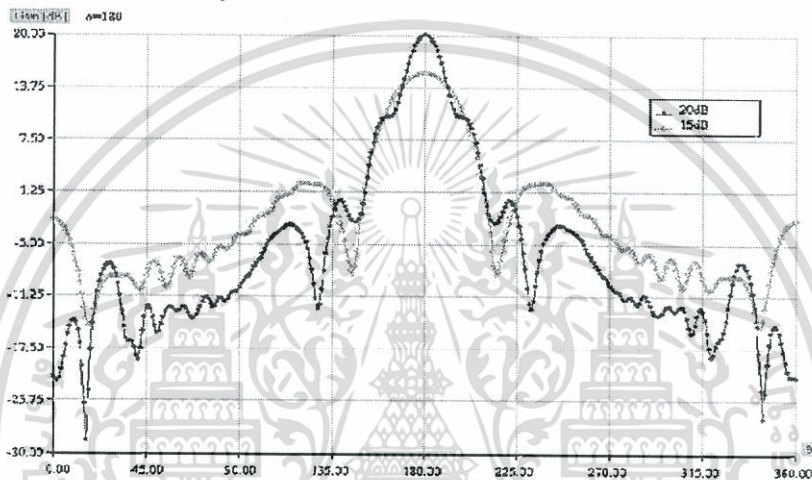


(ก) โครงสร้างสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดในย่านความถี่ X-Band ของ Pendurthy A S. D. [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า



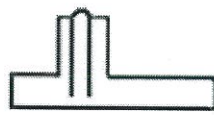
(ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 2.11 สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [27]

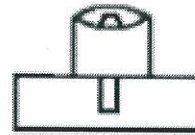
2.4 รูปแบบการกระตุ้นสัญญาณด้วยโพรบที่ใช้ในท่อนำคลื่น

โดยทั่วไปรูปแบบการกระตุ้นสัญญาณด้วยโพรบที่ใช้ในท่อนำคลื่น เบื้องต้นมีลักษณะการกระตุ้นสัญญาณด้วยโพรบที่ใช้ในท่อนำคลื่นทั้งหมด 4 แบบคือ รูปที่ 2.12 (ก) เป็นการกระตุ้นสัญญาณแบบโพรบ (Probe feeding) ซึ่งเป็นรูปแบบทั่วไปที่ย่านความถี่ไม่กว้างมากนัก รูปที่ 2.12 (ข) เป็นการกระตุ้นสัญญาณแบบ End-on feeding เป็นรูปแบบที่ให้ค่า VSWR ต่ำกว่า 1.2:1 รูปที่ 2.12 (ค) และ (ง) เป็นการกระตุ้นสัญญาณแบบ Cross bar feeding และ Door knob feeding ซึ่งเป็นรูปแบบที่ใช้กับระบบที่มีการส่งกำลังสูง และด้วยเทคนิควิธีต่างๆ เหล่านี้สามารถทำให้สายอากาศมีย่านความถี่ต่างๆ ได้ตามวัตถุประสงค์ในการออกแบบ ซึ่งมีลักษณะของรูปแบบการกระตุ้นสัญญาณด้วยโพรบที่ใช้ในท่อนำคลื่นดังแสดงในรูปที่ 2.12 [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ด้านข้าง



ด้านหน้าช่องเปิด

(ก) Probe feeding

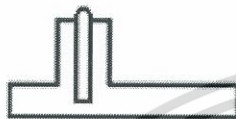


ด้านข้าง

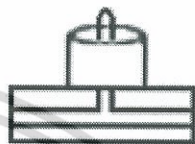


ด้านหน้าช่องเปิด

(ข) End-on feeding



ด้านข้าง



ด้านหน้าช่องเปิด

(ค) Cross bar feeding



ด้านข้าง



ด้านหน้าช่องเปิด

(ง) Door knob feeding

รูปที่ 2.12 รูปแบบการกระตุ้นสัญญาณด้วยโพรบที่ใช้ในท่อนำคลื่น [28]

ลักษณะการกระตุ้นสัญญาณด้วยโพรบที่ใช้ในท่อนำคลื่นที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือแบบทั่วไปคือ การกระตุ้นสัญญาณแบบโพรบ (Probe feeding) เนื่องจากในวัตถุประสงค์ในการออกแบบ สายอากาศนั้นต้องการย่านความถี่ X-Band (10.00 ถึง 10.50 GHz) ซึ่งมีย่านความถี่ไม่สูงมาก

2.5 สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว

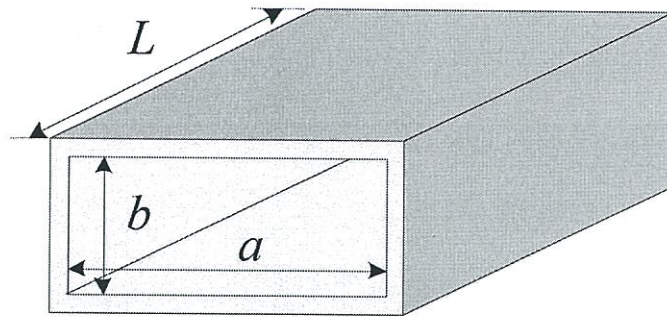
การออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวให้ใช้งานได้ในช่วงความถี่ x-band (10.00 GHz – 10.50 GHz) นั้นออกแบบโครงสร้างสายอากาศมาจากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม โดยคำนวณหา ความถี่ตัดของท่อนำคลื่นจากขนาดพารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดเดี่ยวที่ประกอบด้วย ความกว้าง (a) และความสูง (b) ด้านหน้าช่องเปิดหาได้จากสูตรการหาความถี่ตัด (f_c ; cut off frequency) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.2

โดยที่ในการพิจารณาโหมดในการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั้น ต้อง กำหนดให้ความกว้าง (a) และความสูง (b) มีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ 2.1 ดังรูปพารามิเตอร์ของ ท่อนำคลื่นในรูปที่ 2.11 มีอัตราส่วนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a = 2b$$

2.1



รูปที่ 2.13 ท่อนำคลื่นที่นำมาออกแบบเป็นสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว

ความถี่ตัดของท่อนำคลื่น [29-34]

$$f_c(mn) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad m, n = 0, 1, \dots \quad (m = n \neq 0) \quad 2.2$$

เมื่อกำหนดให้ f_c คือความถี่ตัด

μ คือค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็ก; $\mu = \mu_0\mu_r$

ϵ คือค่าสภาพความยอมไฟฟ้า; $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$

ตารางที่ 2.1 การคำนวณหาค่าความถี่ตัด (f_c) ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม

a (mm)	b (mm)	m	n	f_c (GHz)	f_{center} (GHz)
23.0	11.5	1	0	6.520	9.780
23.0	11.5	2	0	13.040	

จากตารางที่ 2.1 พบว่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่มีความกว้าง (a) และความสูง (b) ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมในตารางนำมาออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวในงานวิจัยนี้ได้ใช้ท่อทองเหลืองสี่เหลี่ยมที่มีขนาดพารามิเตอร์ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่นำมาใช้งานเป็น $a = 23.1$ mm และ $b = 11.55$ mm เนื่องจากเป็นขนาดของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่หาซื้อได้ตามท้องตลาด และขนาดไม่ใหญ่จนเกินไปที่จะสามารถนำมาใช้ในการผลิตสายอากาศได้จริง อีกทั้งค่าความถี่กลางยังอยู่ในความถี่ที่ใกล้เคียงกับความถี่ 10.25 GHz

จากรูปพารามิเตอร์ของท่อนำคลื่นในการหาค่าความยาวของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวแล้วก็จะคำนวณหาความยาวของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว (L) ซึ่งสามารถหาได้จาก การพิจารณาค่าความถี่ตัด (f_c) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเริ่มออกแบบสายอากาศที่มีขนาด $a = 23.1$ mm และ $b = 11.55$ mm โดยกำหนดค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของทองเหลืองเท่ากับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\sigma_c = 1.566 \times 10^7$ S/m มาใช้ในการคำนวณ เนื่องจากเป็นขนาดของท่อสี่เหลี่ยมที่หาซื้อได้ตามท้องตลาด และมีค่าความถี่กลางที่ใช้งานอยู่ที่ความถี่เท่ากับ 10 GHz ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการใช้งาน โดยใช้การคำนวณดังสมการที่ 2.3 ถึง 2.4 ดังต่อไปนี้ [35-36]

$$\lambda_c = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad 2.3$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad 2.4$$

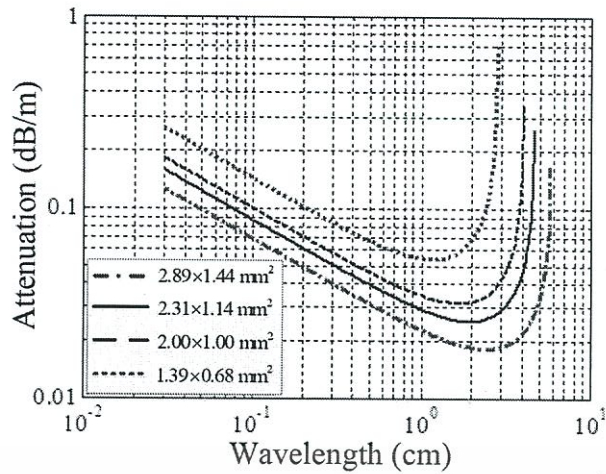
พิจารณาค่าการลดทอนของสัญญาณภายในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมเพื่อพิจารณาช่วงความถี่ที่เหมาะสมในการนำท่อนำคลื่นที่มีขนาดความกว้าง $a = 23.1$ mm และความสูง $b = 11.55$ mm มาใช้ออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวโดยใช้สมการที่ 2.5 ที่อยู่ในโหมด TE_{mn}^z ดังต่อไปนี้ [37-38]

$$(\alpha_c)_{mn} = \frac{2R_s}{b\eta\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2}} \left\{ \left(1 + \frac{b}{a}\right) \left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2 + \frac{b^2m^2 + abn^2}{b^2m^2 + a^2n^2} \left[1 - \left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2\right] \right\} \quad 2.5$$

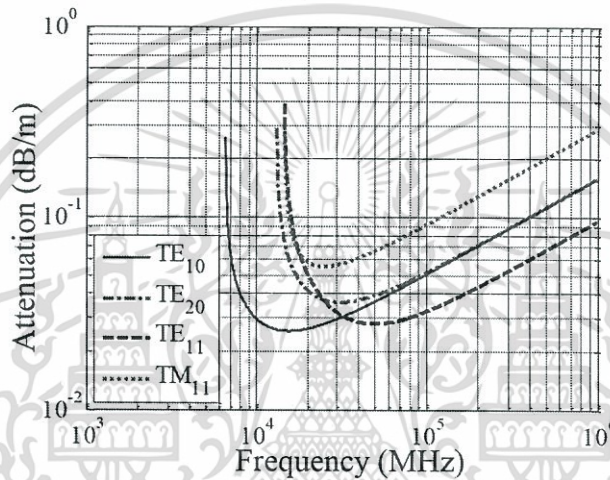
ซึ่งจากวัตถุประสงค์ในการออกแบบสายอากาศที่ใช้ท่อสี่เหลี่ยมมาสร้างสายอากาศนี้เนื่องจากต้องการให้ท่อนั้นมีโหมดเป็น TE_{10} ดังนั้นจึงใช้สมการหาค่าการลดทอนของสัญญาณในโหมดการแพร่กระจายคลื่น TE_{10} ดังสมการที่ 2.6 ต่อไปนี้ [39-40]

$$\alpha_c = \frac{0.00337}{a^{3/2}} \left[\frac{\frac{1}{2} \frac{a}{b} \left(\frac{f}{f_c}\right)^{3/2} + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{-1/2}}{\sqrt{\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 - 1}} \right] \text{ dB/m} \quad 2.6$$

จากสมการค่าการลดทอนของสัญญาณในโหมดการแพร่กระจายคลื่น TE_{10} ดังสมการที่ 2.6 ในวิทยานิพนธ์นี้มีผลการจำลองการลดทอนของสัญญาณในรูปที่ 2.12 ถึง 2.13



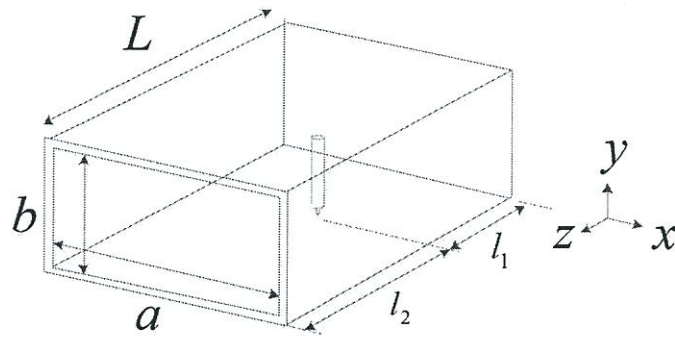
รูปที่ 2.14 ค่าการลดทอนของสัญญาณในท่อนำคลื่นทองเหลืองพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยม



รูปที่ 2.15 ค่าการลดทอนของสัญญาณในท่อนทองเหลืองสี่เหลี่ยมในฟังก์ชันของความถี่

จากผลการคำนวณค่าการลดทอนของสัญญาณในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมในโหมด TE_{10} ในฟังก์ชันของความยาวคลื่นดังแสดงในรูปที่ 2.14 พบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดของท่อนำคลื่นตั้งแต่ $(a \times b)$ เท่ากับ $23.10 \times 11.55 \text{ mm}^2$ นั้นมีผลทำให้ค่าการลดทอนของสัญญาณต่ำมากตลอดช่วงความถี่ที่คำนวณเหมาะที่จะนำมาใช้งานกับย่านความถี่ที่ต้องการออกแบบทุกขนาดท่อ แต่เมื่อพิจารณาค่าการลดทอนของสัญญาณในท่อนำคลื่นทองเหลืองพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมในฟังก์ชันของความถี่เมื่อเปลี่ยนแปลงโหมดในการแพร่กระจายคลื่นในรูปที่ 2.15 ร่วมด้วย พบว่าท่อนำคลื่นที่มีขนาด $(a \times b)$ เท่ากับ $23.10 \times 11.55 \text{ mm}^2$ ในโหมด TE_{10} สามารถใช้งานได้หลังจากความถี่ตัดที่เท่ากับ 6.49 GHz เป็นต้นไป ซึ่งค่าความถี่ตัดได้จากการคำนวณในสมการที่ 2.4 เป็นจุดเริ่มต้นการทำงานของท่อนำคลื่นที่โหมด TE_{10} ไปจนถึงโหมดที่สูงกว่า ที่เหมาะสมการนำท่อนำคลื่นไปใช้งานคือความถี่ตั้งแต่ 6.494 ถึง 12.987 GHz ซึ่งจากผลการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ต้องการออกแบบ (10.0-10.5 GHz) อยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการใช้งานดังแสดงในรูปที่ 2.16 และมีผลการจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศดังหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว

ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว

Parameters	Antenna Structures
a	ความกว้างของสายอากาศ
b	ความสูงของสายอากาศ
L	ความยาวทั้งหมดของสายอากาศ
l	ความสูงของโพรบ
l_1	ระยะป้อนสัญญาณของโพรบ
l_2	ระยะความลึกของช่องเปิดจนถึงตำแหน่งโพรบ

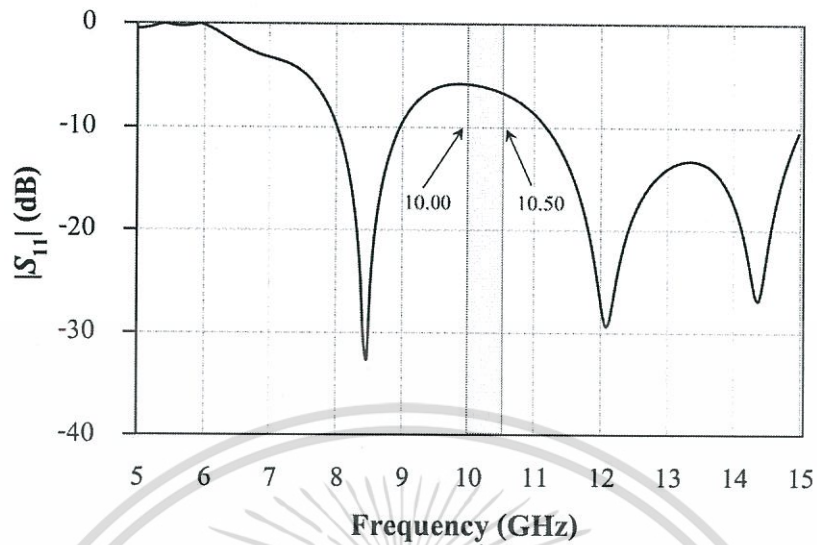
กำหนดให้สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวมีการกระตุ้นสัญญาณด้วยโพรบที่มีความยาว l ซึ่งก็คือ 0.25λ โดยในการจำลองในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้โพรบเป็นตัวกำเนิดคลื่นที่มีความถี่ 10.25 GHz ซึ่งจะได้ความยาวของโพรบคือ 7.32 mm ดังรูปที่ 2.16

2.6 การจำลองค่า $|S_{11}|$ (dB)

เมื่อได้ผลการคำนวณหาขนาดของพารามิเตอร์ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งได้นำมาออกแบบโครงสร้างสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยมีความยาวของท่อนำคลื่น (L) และความยาวของโพรบกำเนิดคลื่น (l) ซึ่งท่อนำคลื่นขนาด ($a \times b$) เท่ากับ $23.10 \times 11.55 \text{ mm}^2$ จะมีค่าความถี่ระหว่าง dominant mode และ TE₂₀ เท่ากับ 9.74 GHz มีความยาวของท่อนำคลื่น (L) คำนวณได้จากสมการที่ (2.4 ถึง 2.5) จะได้ความยาวของท่อนำคลื่น (L) เท่ากับ $0.75\lambda_g$ หรือที่ระยะ L ที่มีค่าเท่ากับ 25.35 mm โดยมีความยาวของโพรบ (l) 0.25λ หรือ 7.32 mm และมีตำแหน่งของจุดป้อนสัญญาณของโพรบจะอยู่ที่ตำแหน่ง $0.25\lambda_g$ ของท่อนำคลื่นซึ่งจะแทนด้วยตัวแปร l_1 ที่มีค่าเท่ากับ 8.45 mm และส่วนของปากท่อนำคลื่นที่อยู่ห่างจากจุดตำแหน่งของโพรบเท่ากับ $0.50\lambda_g$ จะแทนด้วยตัวแปร l_2 มีค่าเท่ากับ 16.89 mm แล้วจึงนำไปจำลองผลของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

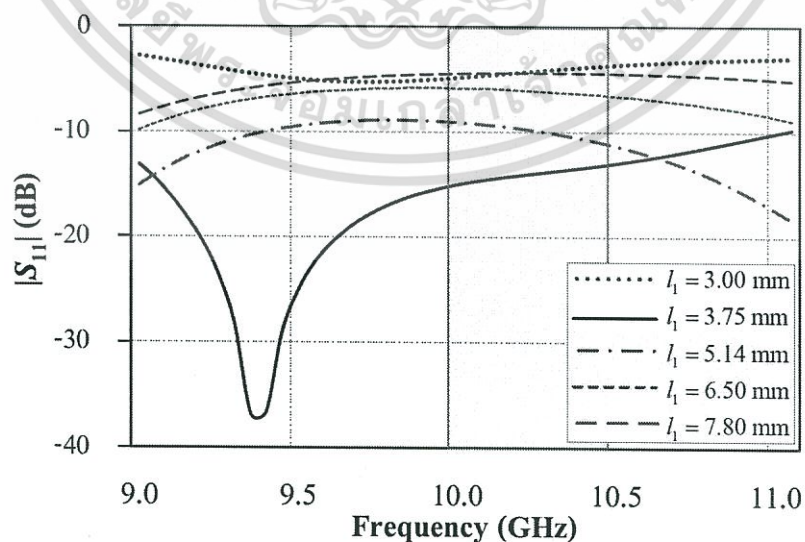
ด้วยโปรแกรมจำลองการเพื่อดูความถี่ที่ใช้งานได้ของสายอากาศที่ออกแบบ ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.17 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศที่มีขนาด $23.10 \times 11.55 \times 25.35 \text{ mm}^3$

จากกราฟแสดง $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศขนาด $(a \times b \times L)$ เท่ากับ $23.10 \times 11.55 \times 25.35 \text{ mm}^3$ ที่มีแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ 10.25 GHz ในรูปที่ 2.17 จะเห็นว่าสามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 8.5 GHz และมากกว่า 11.0 GHz ซึ่งจากการคำนวณค่าความถี่ dominant mode มีค่า 6.52 GHz แต่จากผลการจำลองความถี่ที่ใช้งานได้อยู่ที่ 8.5 GHz ซึ่งมีความแรงของสัญญาณที่ปล่อยออกมาต่ำกว่า -10 dB ที่เพียงพอต่อการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ แต่ค่าความถี่ที่ใช้งานได้ยังไม่ตรงกับความถี่ที่ต้องการ

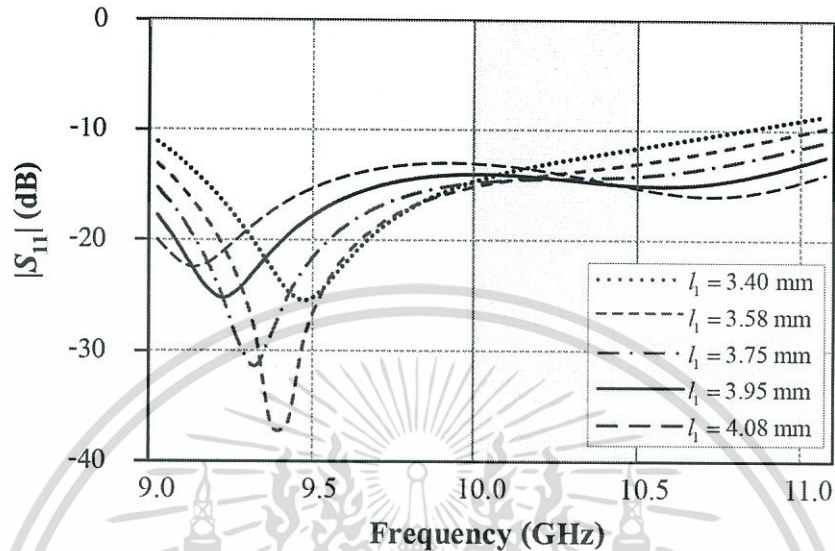
ดังนั้นจึงทำการทดลองเปลี่ยนตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณหรือระยะ l_1 โดยการปรับเปลี่ยนค่ามีผลการเปลี่ยนแปลงดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.18 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งป้อนสัญญาณ l_1

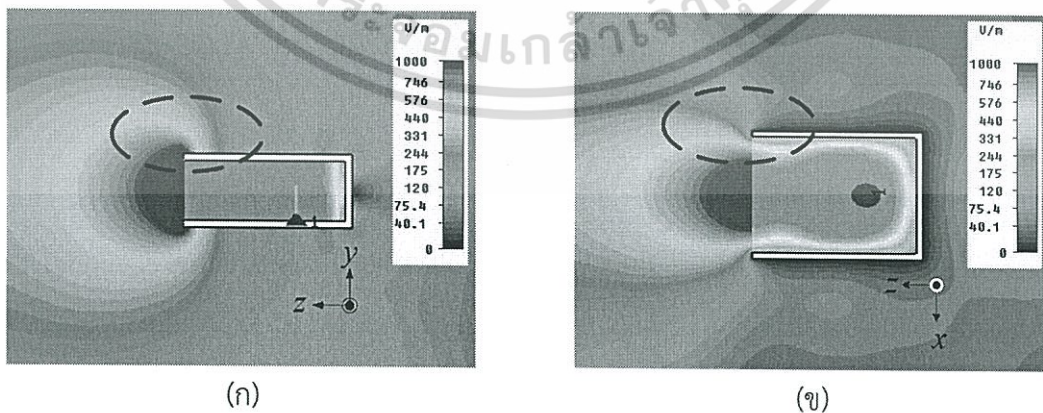
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองในรูปที่ 2.18 เมื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุดบ่อนสัญญาณของโพรบซึ่งจะแทนด้วยตัวแปร l_1 พบว่าที่ความยาว $l_1 = 3.75$ mm มีค่า $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวตรงกับค่าที่ต้องการออกแบบ ซึ่งความยาวที่นำมาจำลองนั้นกว้างมาก จึงได้มีการจำลองผลให้ละเอียดขึ้นเพื่อให้ได้ค่าความยาวของท่อนำคลื่นที่เหมาะสมดังผลการจำลองในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งบ่อนสัญญาณ l_1 ให้ละเอียดขึ้น

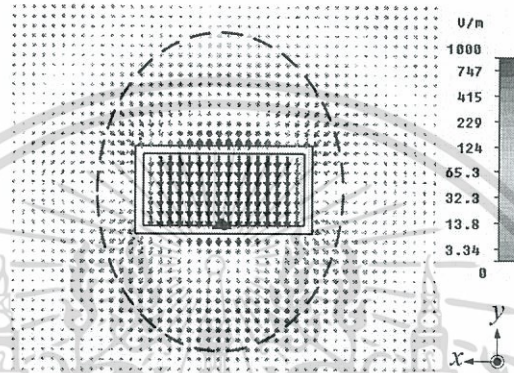
จากผลการจำลองในรูปที่ 2.19 เมื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งบ่อนสัญญาณ l_1 ให้ละเอียดขึ้นตั้งแต่ 3.40 mm ถึง 4.08 mm พบว่าค่า $|S_{11}|$ (dB) จากผลการจำลองมีการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน และค่าตำแหน่งบ่อนสัญญาณ l_1 ในท่อนำคลื่นที่เหมาะสมในการนำมาออกแบบสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว คือที่ $l_1 = 3.95$ mm ซึ่งมีช่วง $|S_{11}|$ (ต่ำกว่า -10 dB) ตั้งแต่ 8.72 GHz ถึง 11.30 GHz ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการออกแบบ แต่จากผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) ในรูปที่ 2.19 ค่าความถี่ที่เรโซแนนซ์นั้นยังไม่ตรงกับค่าที่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องมีการจำลองค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นเพิ่มเติม เพื่อหาขนาดของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อไป



รูปที่ 2.20 ผลการจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าของสายอากาศที่มีขนาด $23.10 \times 11.55 \times 25.35$ mm³ (ก) ด้านข้าง และ (ข) ด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองในรูปที่ 2.20 พบว่าสายอากาศช่องเปิดเดี่ยวในรูป (ก) แนวแกน yz มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงตลอดช่วงความยาวของท่อนำคลื่นที่นำมาใช้ออกแบบสายอากาศ และยังเกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นที่บริเวณขอบด้านบนและล่างของท่อนำคลื่นสูง (บริเวณวงกลม) และในรูป (ข) แนวแกน xz นั้นพบว่าที่บริเวณขอบด้านข้างทั้งสองของท่อนำคลื่นมีปริมาณความเข้มสนามไฟฟ้าที่ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับในแนวแกน yz ซึ่งเมื่อพิจารณารวมกันพบว่าที่บริเวณขอบของท่อนำคลื่นหรือช่องเปิดของสายอากาศนี้มีความเข้มสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกันมากในแนวแกนดังรูป (ก) และ (ข) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กไม่สมมาตรกัน



รูปที่ 2.21 ผลการจำลองความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้าที่บริเวณขอบของช่องเปิดของสายอากาศที่มีขนาด $23.10 \times 11.55 \times 25.35 \text{ mm}^3$

จากผลการจำลองความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้าที่บริเวณขอบของช่องเปิดของสายอากาศที่มีขนาด $23.10 \times 11.55 \times 25.35 \text{ mm}^3$ ในรูปที่ 2.21 พบว่าเส้นแรงไฟฟ้ามีความหนาแน่นสูงสุดอยู่ที่ตรงกลางของท่อนำคลื่น และเมื่อพิจารณาบริเวณที่ไกลออกมาจากเดิม (ในเส้นประ) พบว่าความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้าจากเดิมที่หนาแน่นตรงกลางท่อนำคลื่นจะค่อยๆ มีความหนาแน่นลดลงซึ่งมีลักษณะเป็นวงรี เมื่อเกิดลักษณะการแพร่กระจายคลื่นดังกล่าวส่งผลให้สายอากาศนี้มีความกว้างลำคลื่นที่ไม่สมมาตรกันและมีความกว้างลำคลื่นที่แตกต่างกันมาก ซึ่งมีผลการจำลองที่สนับสนุนผลการจำลองดังกล่าวดังแสดงในหัวข้อต่อไป

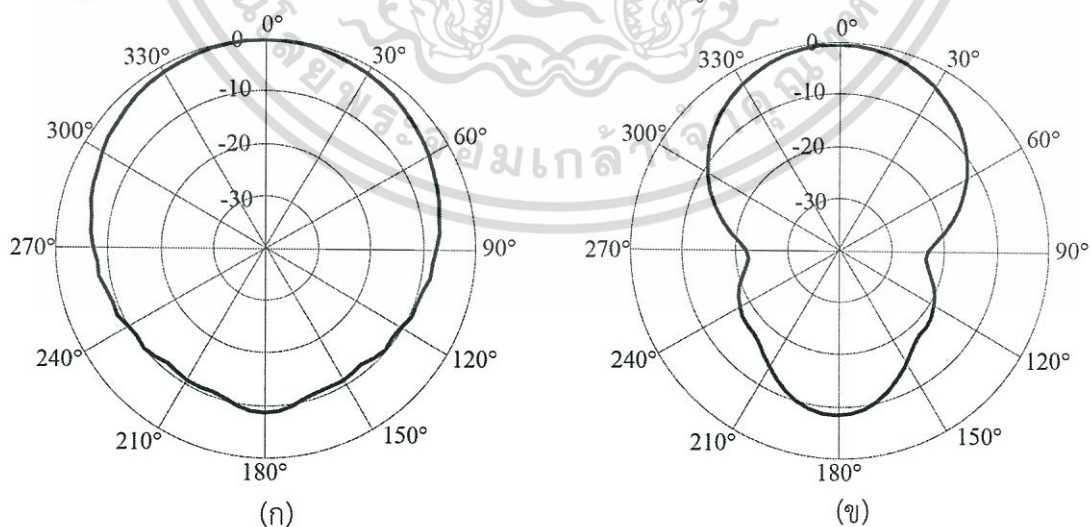
ตารางที่ 2.3 ขนาดพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว

Parameters	Antenna Structures	ขนาด (mm)
a	ความกว้างของสายอากาศ	23.10
b	ความสูงของสายอากาศ	11.55
L	ความยาวของสายอากาศ	25.35
l	ความสูงของโพรบ	7.32
l_1	ระยะป้อนสัญญาณของโพรบ	8.45
l_2	ความลึกของโครงสร้างสี่เหลี่ยมจนถึงโพรบ	16.90

จากผลการออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่า $|S_{11}|$ (dB) ครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการออกแบบ แต่ยังมีค่าเรโซแนนซ์ยังไม่ตรงกับความถี่กลาง (10.25 GHz) ที่ต้องการออกแบบ โดยขนาดพารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดเดี่ยวดังตารางที่ 2.3 และมีผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นดังหัวข้อต่อไป

2.7 การจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิด

การจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวที่มีขนาดดังตารางที่ 2.4 และเมื่อจำลองผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแล้วพบว่า สายอากาศช่องเปิดเดี่ยวมีแบบรูปกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว และมีผลการจำลองดังรูปที่ 2.22 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.22 ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว

(ก) ระบายสนามไฟฟ้า และ (ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

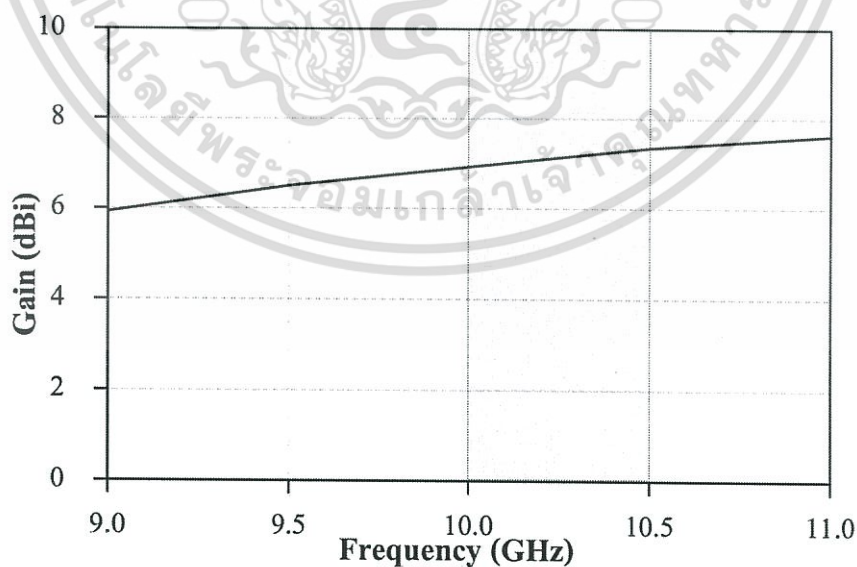
จากผลการจำลองในรูปที่ 2.22 พบว่าสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวที่มีค่าความยาวของท่อนำคลื่นที่เหมาะสมในการนำมาออกแบบสายอากาศช่องเปิดเดี่ยว $L = 25.35$ mm และมีขนาดความกว้างเท่า $a = 15$ mm และความสูง $b = 30$ mm ซึ่งทำให้มีความกว้างลำคลื่นที่ไม่สมมาตรกันและมีความกว้างลำคลื่นที่แตกต่างกันมาก คือมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังระนาบสนามไฟฟ้าเท่ากับ 106° และระนาบสนามแม่เหล็กเท่ากับ 60° และ -10 dB มีความกว้างลำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเท่ากับ 250° และระนาบสนามแม่เหล็กเท่ากับ 120° สรุปผลดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สรุปผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ -3 dB และ -10 dB ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว

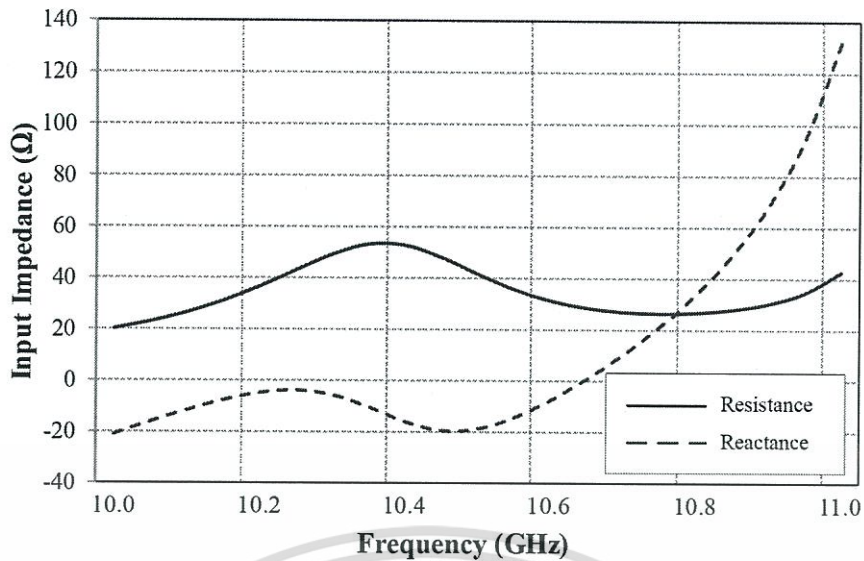
ผลการจำลองที่ความถี่ 10.25 GHz	ความกว้างลำคลื่น			
	HPBW (-3 dB)		-10 dB	
	E-plane	H-plane	E-plane	H-plane
สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว	106°	60°	250°	120°

จากตารางสรุปผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ HPBW (-3 dB) และ -10 dB ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวที่ความถี่กลางนั้น สายอากาศมีความกว้างลำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กมีความแตกต่างกันมากทั้งที่ HPBW (-3 dB) และ -10 dB ดังตารางที่ 2.4

2.8 อัตราขยายของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว



รูปที่ 2.23 ผลจำลองอัตราขยายของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว



รูปที่ 2.24 ผลการจำลองอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว

จากผลการจำลองในรูปที่ 2.23 พบว่าสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวมีอัตราขยายของสายอากาศตลอดย่านความถี่ 10 GHz ถึง 10.5 GHz เฉลี่ยมากกว่า 6.8 dBi และจากผลการจำลองอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศช่องเปิดเดี่ยว พบว่าที่ความถี่ความถี่กลาง 10.25 GHz ซึ่งเป็นความถี่กลางมีค่า $Z = 46.17 - j4.59 \Omega$ ดังแสดงในรูปที่ 2.24

2.9 สรุป

จากผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวในบทที่ 2 พบว่าสายอากาศช่องเปิดเดี่ยวมีความกว้างลำคลื่นที่ไม่สมมาตรกันและยังแตกต่างกันมาก และยังพบว่า เมื่อพิจารณาความเข้มสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบของท่อนำคลื่นของสายอากาศนี้มีความเข้มสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกันมากในแนวแกนดังรูปที่ 2.20 (ก) และ (ข) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กไม่สมมาตรกัน และจากผลการจำลองยังพบอีกว่าในบริเวณช่องเปิดของท่อนำคลื่นที่นำมาออกแบบเป็นสายอากาศนี้จะมีการเกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงเฉพาะในระนาบ yz ดังรูปที่ 2.21 ซึ่งทำให้การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศไม่สมมาตรกันในระนาบ yz และ xz ทำให้ไม่เหมาะสมที่จะนำไปป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นโดยตรง

ดังนั้นเมื่อต้องการนำสายอากาศที่มีโครงสร้างที่เป็นท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมไปใช้ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น จึงต้องคำนึงถึงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นหลัก ซึ่งจากผลการจำลองทั้งหมดในบทนี้จึงต้องทำการลดความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของคลื่นที่ขอบด้านบนและล่างของสายอากาศ ในระนาบ yz เพื่อบังคับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของ

สายอากาศให้มีความสมมาตรกัน ซึ่งมีการศึกษาและออกแบบโครงสร้างสายอากาศเพิ่มเติมในบทต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด

3.1 บทนำ

จากบทที่ 2 พบถึงปัญหาของสายอากาศช่องเปิดที่ถูกป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล ทำให้มีความกว้างลำคลื่นที่ -3 dB และ -10 dB แตกต่างกัน เกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นที่บริเวณขอบด้านบนและล่างของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว ทำให้สายอากาศมีความกว้างลำคลื่นไม่สมมาตรกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

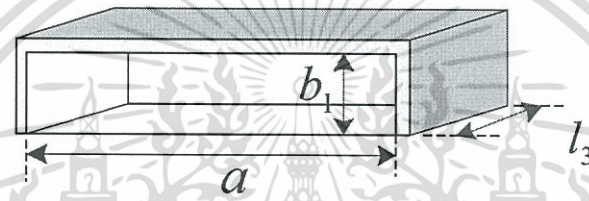
แนวคิดในการออกแบบสายอากาศจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 พบว่าสายอากาศฮอร์นแบบ corrugate นั้นถูกออกแบบมาเพื่อต้องการให้มีความกว้างลำคลื่นที่สมมาตรกัน มีค่า cross-polarize ต่ำ และมีประสิทธิภาพสูง [41-45] แต่เนื่องจากโครงสร้างมีความซับซ้อนจึงยากในการออกแบบและสร้าง ดังนั้นจึงมีการออกแบบและพัฒนาสายอากาศมาเป็นสายอากาศฮอร์นแบบ choke ที่มีกรอกแบบและสร้างง่ายขึ้นและมีประสิทธิภาพสูง แต่ด้วยขนาดพื้นที่หน้าตัดที่มีขนาดใหญ่จึงมีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากโครงสร้างสายอากาศบดบังลำคลื่นด้านหน้าสายอากาศสะท้อนคลื่น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำหลักการวางตำแหน่งของโครงสร้างสายอากาศมาจากการออกแบบสายอากาศฮอร์นแบบ choke ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่ง่ายในการออกแบบและสร้างสายอากาศ

ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงเทคนิควิธีการเพิ่มช่องเปิดพาราซีติกส์เหลี่ยม โดยการเพิ่มช่องเปิดพาราซีติกส์เหลี่ยมมีแนวคิดในการออกแบบมาจากการเพิ่มร่อง (grooves) ที่ด้านหน้าช่องเปิดของสายอากาศฮอร์นแบบ choke ที่กำหนดให้มีความลึกเท่ากับ 0.25λ [46-47] แต่เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศฮอร์นแบบ choke นั้นถูกออกแบบมาจากท่อนำคลื่นทรงกระบอกกลมทำให้การวางตำแหน่งของช่องเปิดจึงถูกออกแบบให้วางช่องเปิดไว้โดยรอบท่อนำคลื่นทรงกระบอกกลมนั้นเพิ่มเข้าไป แต่เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้มีการออกแบบเริ่มต้นด้วยการใช้ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความสูง a และมีความกว้าง b และมีอัตราส่วน $a=2b$ ซึ่งโดยโครงสร้างแล้วสายอากาศจะมีลำคลื่นไม่สมมาตร และจากผลการจำลองในบทที่ 2 พบว่าจะเกิดการเลี้ยวเบนของเส้นแรงไฟฟ้าที่บริเวณขอบด้านบนและล่างของสายอากาศ ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาการเกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นที่บริเวณขอบด้านบนและล่างของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว โดยการเพิ่มช่องเปิดที่ขอบด้านบนและล่างของสายอากาศและกำหนดให้มีความลึกเริ่มต้นเท่ากับ 0.25λ เพื่อต้องการให้สายอากาศมีความกว้างลำคลื่นสมมาตรกันและมี $|S_{11}|$ (dB) ตามความต้องการของระบบที่ออกแบบสายอากาศไว้สำหรับป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นย่านความถี่ x-band เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย เทคนิควิธีการเพิ่มช่องเปิดพาราซีติกส์เหลี่ยม การศึกษาและออกแบบช่องเปิดพาราซีติกส์เหลี่ยม และบทสรุป

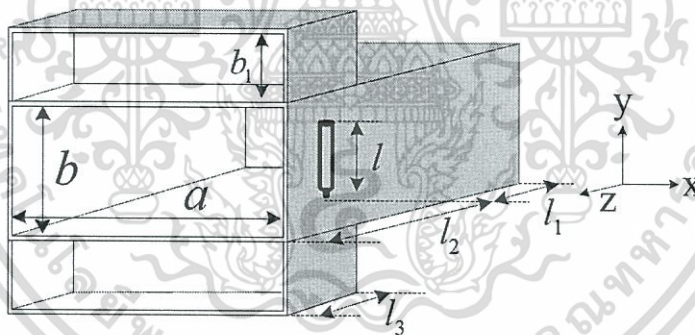
3.2 โครงสร้างของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด

จากบทที่ 2 โครงสร้างสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวเพียงอย่างเดียว จะมีความกว้างลำคลื่นที่ไม่สมมาตรกันและแตกต่างกันมาก คือที่ -3 dB จะมีความกว้างลำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเท่ากับ 103° และระนาบสนามแม่เหล็กเท่ากับ 59° และ -10 dB มีความกว้างลำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเท่ากับ 250° และระนาบสนามแม่เหล็กเท่ากับ 120° ตามลำดับ แต่การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น มีความต้องการสายอากาศที่ใช้ป้อนสัญญาณด้านหน้านั้นมีความกว้างลำคลื่นที่สมมาตรกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก เพื่อนำสายอากาศนี้ไปป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

จากบทที่ผ่านมาสามารถแก้ไขความกว้างลำคลื่นที่ไม่สมมาตรกันได้ด้วยเทคนิควิธีปรับแต่งที่โครงสร้างสายอากาศ โดยการเพิ่มช่องเปิดพาราซิติคสี่เหลี่ยมที่ขอบด้านบนและล่างของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการเลี้ยวเบนของคลื่น แสดงดังรูปที่ 3.1 ถึง 3.2



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของช่องเปิดแบบพาราซิติค



รูปที่ 3.2 โครงสร้างสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด

การออกแบบสายอากาศเพิ่มเติมโดยการเพิ่มช่องเปิดพาราซิติคสี่เหลี่ยมที่ขอบด้านบนและล่างของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว นั้นตัวช่องเปิดพาราซิติคมีโครงสร้างเป็นท่อทองเหลืองสี่เหลี่ยมผืนผ้าเนื่องจากเป็นเป็นการใช้วัสดุชนิดเดียวกันกับโครงสร้างหลักเพื่อให้่ายในการออกแบบและง่ายต่อการเชื่อมต่อ โดยการพิจารณาขนาดพารามิเตอร์ของโครงสร้างช่องเปิดแบบพาราซิติคใช้การคำนวณหาค่าความถี่ตัด (f_c) จากสมการในบทที่ 2 จากข้อมูลในตารางที่ 3.1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ความถี่ตัด (f_c) ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด $a \times b = 23.1 \times 6.5 \text{ mm}^2$

a (mm)	b (mm)	m	n	f_c (GHz)
23.1	6.5	1	0	6.494
23.1	6.5	2	0	12.987

จากตารางที่ 3.1 พบว่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่มีความกว้าง (a) และความสูง (b) ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมในตารางสามารถนำมาออกแบบสายอากาศช่องเปิดได้ ซึ่งมีขนาด $a = 23.1 \text{ mm}$ และ $b = 6.5 \text{ mm}$ ซึ่งมีค่าความถี่กลาง (f_{center}) ของท่ออยู่ในความถี่ที่ใกล้เคียงกับความถี่กลางที่ต้องการออกแบบคือ 10.25 GHz และจากสมการที่ 2.3 ได้พิจารณาหาความยาวของท่อที่นำมาใช้เป็นช่องเปิดพาราซิติคนี้ซึ่งเรียกชื่อตามโครงสร้างช่องเปิดนี้คือความลึกของช่องเปิดพาราซิติคและมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ $l_2 = 0.25\lambda_g$

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด

Parameters	Antenna Structures
a	ความกว้างของสายอากาศ
b	ความสูงของสายอากาศ
L	ความยาวของสายอากาศ
l	ความสูงของโพรบ
l_1	ระยะบ่อนสัญญาณของโพรบ
l_2	ความลึกของช่องเปิดจนถึงตำแหน่งโพรบ
l_3	ความลึกของช่องเปิดพาราซิติค
b_1	ความสูงของช่องเปิดพาราซิติค

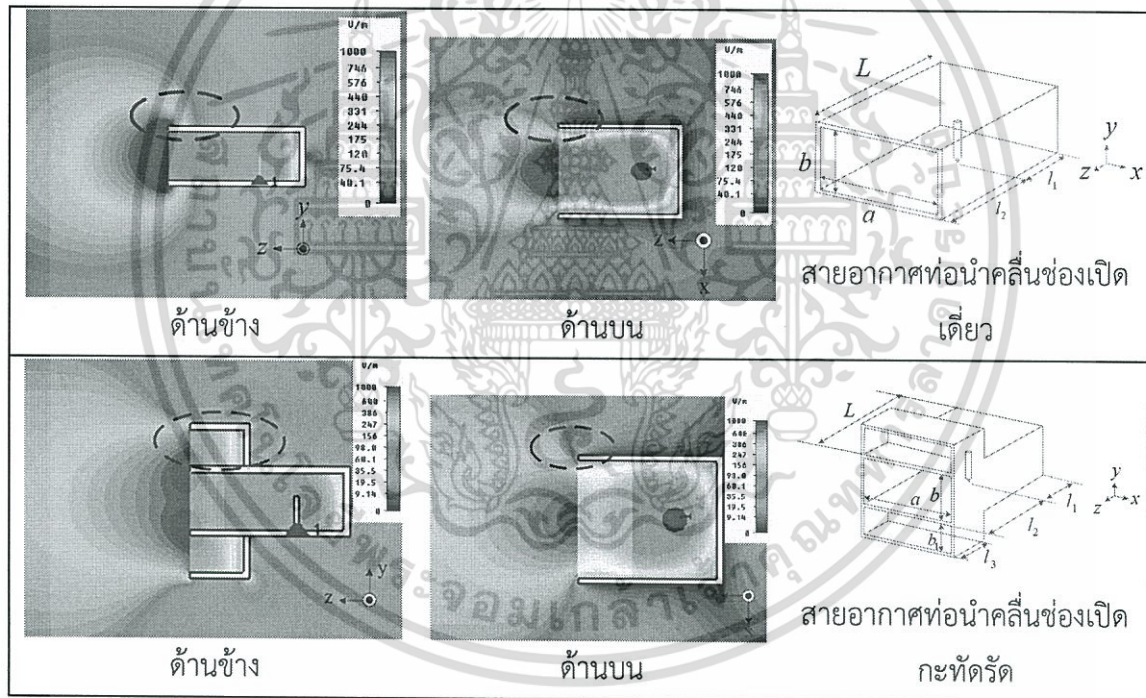
จากการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวในบทที่ 2 และการออกแบบเพิ่มเติมโครงสร้างสายอากาศ โดยการเพิ่มช่องเปิดให้กับสายอากาศที่ขอบด้านบนและล่างของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว ซึ่งเมื่อกำหนดจุดสังเกตจากด้านหน้าในทิศ $-x$ พบว่าจำนวนช่องเปิดของสายอากาศทั้งหมดคือ 3 ช่องเปิด ซึ่งช่องเปิดที่เพิ่มขึ้นถูกติดตั้งที่ปลายของสายอากาศช่องเปิดเดี่ยวตามบทที่ 2 อยู่ในลักษณะช่องเปิดแบบพาราซิติคคัปปลิง โดยมีการอธิบายพารามิเตอร์ของสายอากาศทั้งหมดดังตารางที่ 3.1

จากการออกแบบเพิ่มเติมโครงสร้างสายอากาศ โดยการเพิ่มช่องเปิดให้กับสายอากาศด้านหน้าเพื่อวัตถุประสงค์ในการสร้างสายอากาศคือมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สมมาตรกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีผลของการจำลองการเพิ่มช่องเปิดแบบพาราซิติคให้กับสายอากาศดังหัวข้อต่อไป

3.3 การศึกษาและออกแบบช่องเปิดพาราซิติค

จากผลการจำลองการออกแบบสายอากาศช่องเปิดเดี่ยวในบทที่ 2 ผลการจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าภายในโครงสร้างสายอากาศช่องเปิดเดี่ยว พบว่าที่บริเวณขอบของช่องเปิดเดี่ยวของสายอากาศในระนาบ yz มีการเกิดการเลี้ยวเบนของสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงมาก 2 บริเวณคือ ด้านบน และล่างของช่องเปิดเดี่ยว จึงได้มีการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศเพิ่มเติมเพื่อลดความเข้มของสนามไฟฟ้าในบริเวณดังกล่าว

ซึ่งจากผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในระนาบ xz กลับพบว่ามีความเข้มสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบด้านข้างทั้งสองของช่องเปิดเดี่ยวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับบริเวณในระนาบ yz ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเกิดการแพร่กระจายออกจากช่องเปิดไม่เท่ากันทำให้มีความกว้างลำคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กนั้นไม่สมมาตรกัน ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบช่องเปิดแบบพาราซิติคเพิ่มเติมเข้าไปเฉพาะในบริเวณขอบของช่องเปิดในระนาบ yz ดังรูปที่ 3.3



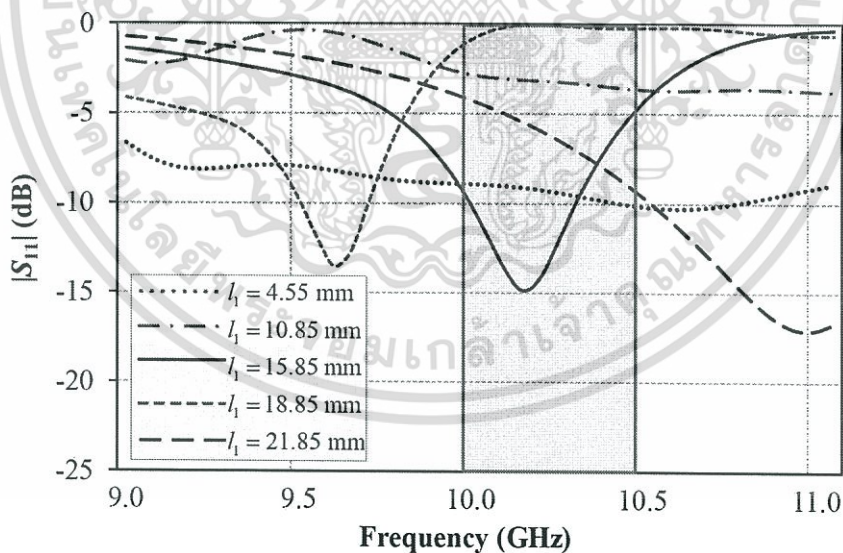
รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบผลจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าภายในโครงสร้างสายอากาศช่องนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว และสายอากาศช่องนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด

จากการเปรียบเทียบผลจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าในรูปที่ 3.3 ภายในโครงสร้างสายอากาศช่องเปิด พบว่าในแนวแกน yz ที่บริเวณขอบภายในช่องเปิดแบบพาราซิติค (เส้นประวงรี) มีความเข้มของสนามไฟฟ้าเข้าไปภายในช่องเปิดนี้สูงมาก และเมื่อพิจารณาต่อไปอีกยังพบว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าเกิดการเลี้ยวเบนออกไปนอกช่องเปิดพาราซิติคอีกครั้งมีค่าน้อยมาก ทำให้ค่าความเข้ม

สนามไฟฟ้าในบริเวณที่เคยเกิดการเลี้ยวเบนนั้นไม่ไปรบกวนสนามบริเวณอื่น และจากผลการจำลอง ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในแนวแกน xz นั้นพบว่าที่บริเวณขอบด้านข้างทั้งสองของท่อนำคลื่นมี ปริมาณความเข้มสนามไฟฟ้าที่น้อยมากเมื่อเทียบกับในแนวแกน yz เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการ จำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในบทที่ 2 ซึ่งเมื่อพิจารณาารวมกันพบว่าที่บริเวณขอบของท่อนำคลื่น หรือช่องเปิดของสายอากาศนี้มีความเข้มสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกันน้อยมาก ทำให้แบบรูปการ แพร่กระจายคลื่นของสายอากาศช่องเปิดพาราซิติกมีความสมมาตรกันยิ่งขึ้นดังผลการจำลองการ ทำงานของสายอากาศในหัวข้อต่อไป

3.3.1 การจำลอง $|S_{11}|$ (dB) เพื่อหาระยะป้อนสัญญาณของโพรบ (l_1) เมื่อมีการเพิ่มช่องเปิดแบบ พาราซิติก

จากการออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวในบทที่ 2 ซึ่งกำหนดให้ระยะป้อน สัญญาณของโพรบ (l_1) มีค่า $l_1 = 8.45$ mm พบว่า $|S_{11}|$ (ต่ำกว่า -10 dB) ตั้งแต่ 8.72 GHz ถึง 11.30 GHz ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการออกแบบ แต่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นยังไม่ สมมาตรกันตามวัตถุประสงค์ในการออกแบบ จึงมีการออกแบบตัวช่องเปิดแบบพาราซิติกเพิ่มเติมเพื่อ ต้องการให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สมมาตรกัน โดยกำหนดให้ขนาดของช่องเปิดแบบพารา ซิติกที่นำมาติดตั้งเพิ่มเติมนั้นมีขนาดตามหัวข้อที่ 3.2 คือมี ความกว้าง ($a = 23.10$ mm) ความสูง ($b_1 = 6.50$ mm) และความยาวของสายอากาศ ($L = 25.35$ mm) โดยกำหนดให้ขนาดของสายอากาศ ช่องเปิดเดี่ยวมีค่าเท่าเดิม และมีผลการจำลองดังรูปที่ 3.4



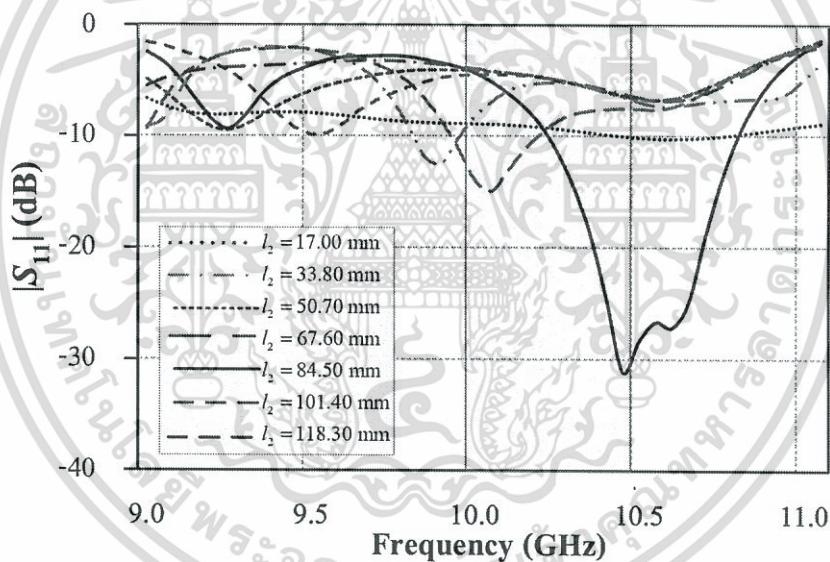
รูปที่ 3.4 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนระยะป้อนสัญญาณของโพรบ (l_1) ตั้งแต่ 4.55 mm ถึง 21.85 mm

จากผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนระยะป้อนสัญญาณของโพรบ (l_1) ตั้งแต่ 4.55 mm ถึง 21.85 mm ในรูปที่ 3.4 พบว่าเมื่อติดตั้งช่องเปิดแบบพาราซิติกเพิ่มเติมที่บริเวณขอบ

ด้านบนและล่างของช่องเปิดของสายอากาศทำให้ค่า $|S_{11}|$ (dB) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก และระยะป้อนสัญญาณของโพรบ (l_2) ที่เหมาะสมในการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบพาราซิติคคือ $l_2 = 15.85$ mm แต่ย่านความถี่ยังไม่ครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการออกแบบ ดังนั้นจึงต้องมีการจำลองค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นเพิ่มเติม เพื่อหาขนาดของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อไป

3.3.2 การจำลอง $|S_{11}|$ (dB) เพื่อหาค่าความลึกของช่องเปิดจนถึงตำแหน่งโพรบ (l_2)

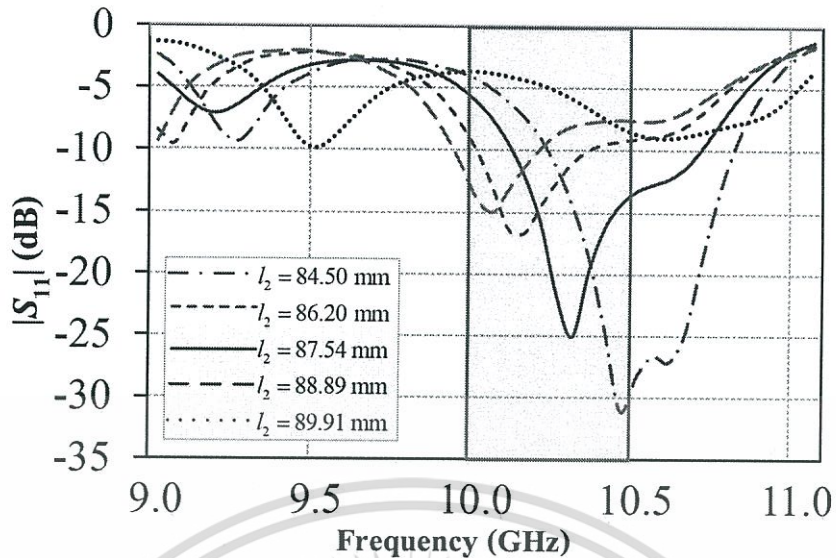
จากการออกแบบช่องเปิดแบบพาราซิติคนั้นกำหนดให้มีขนาดของช่องเปิดแบบพาราซิติคตามตารางที่ 3.1 และกำหนดขนาดพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศตามบทที่ 2 จากผลการจำลองพบว่าค่า $|S_{11}|$ (dB) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก ดังนั้นหลังจากที่มีการติดตั้งช่องเปิดแบบพาราซิติคเพิ่มเติมแล้ว ในขั้นตอนต่อไปเป็นการหาค่าความลึกของช่องเปิดจนถึงตำแหน่งโพรบ (l_2) ซึ่งในบทที่ 2 เริ่มกำหนดให้ค่าความลึกของช่องเปิดจนถึงตำแหน่งโพรบ (l_2) มีค่าเท่ากับ 16.90 mm ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด โดยมีผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิดจนถึงตำแหน่งโพรบ (l_2) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมดังรูปที่ 3.5 ถึง 3.6



รูปที่ 3.5 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดจนถึงตำแหน่งโพรบ (l_2) ตั้งแต่ 17.00 mm ถึง 118.30 mm

จากรูปที่ 3.5 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดจนถึงตำแหน่งโพรบ (l_2) พบว่ามีค่า $|S_{11}|$ (dB) ที่แตกต่างกันมาก ซึ่งเกิดขึ้นจากการจำลองผลที่กำหนดค่าการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดจนถึงตำแหน่งโพรบ (l_2) กว้างมากเกินไป และจากผลการจำลองความลึกของช่องเปิดจนถึงตำแหน่งโพรบ (l_2) ที่มีค่า 84.50 mm เป็นช่วงที่มีความถี่เรโซแนนซ์ใกล้เคียงค่าความถี่กลางมากที่สุด จึงทำการจำลองผลความลึกของช่องเปิดพาราซิติคที่มีค่าใกล้เคียงกับค่า 84.50 mm ให้ละเอียดมากขึ้น เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

ปรับเปลี่ยนค่าความลึกของช่องเปิดจนถึงตำแหน่งโพรบ (l_2) ให้ละเอียดมากขึ้น

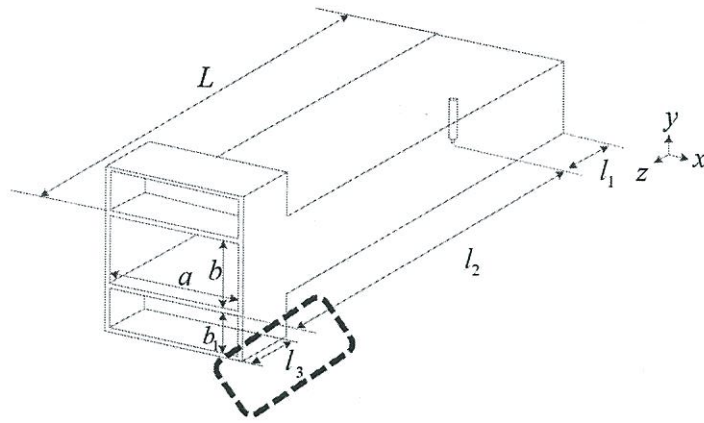


รูปที่ 3.6 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดจนถึงตำแหน่งโพรบ (l_2) ให้ละเอียดมากขึ้น ตั้งแต่ 84.50 mm ถึง 89.91 mm

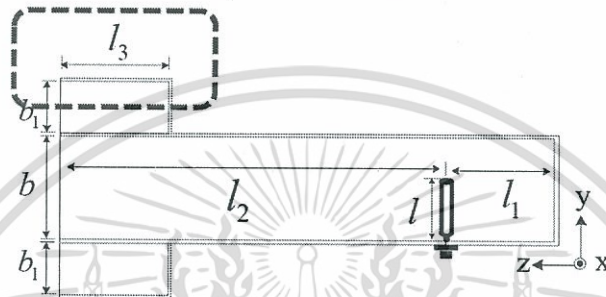
จากผลการจำลองในรูปที่ 3.6 ซึ่งพบว่าผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดจนถึงตำแหน่งโพรบ (l_2) ให้ละเอียดมากขึ้น พบว่ามีค่า $|S_{11}|$ (dB) ผลการจำลองความลึกของช่องเปิดจนถึงตำแหน่งโพรบ (l_2) ที่มีค่า 87.54 mm เป็นช่วงที่มีความถี่เรโซแนนซ์ใกล้เคียงค่าความถี่กลางมากที่สุด และเมื่อพิจารณาความกว้างลำคลื่นที่ -3 dB และ -10 dB พบว่ามีความกว้างลำคลื่นทั้งไม่สมมาตรกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงได้ปรับเปลี่ยนความลึกและความสูงของช่องเปิดพาราซิติคเพื่อให้สายอากาศมีความกว้างลำคลื่นที่สมมาตรกันดังหัวข้อ 3.3.3 และ 3.3.4 ต่อไป

3.3.3 การจำลอง $|S_{11}|$ (dB) และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เพื่อหาค่าความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3)

การออกแบบช่องเปิดแบบพาราซิติค โดยกำหนดให้มีพารามิเตอร์ของสายอากาศและช่องเปิดแบบพาราซิติคตามตารางที่ 3.1 เมื่อปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3) ดังแสดงโครงสร้างสายอากาศเมื่อปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3) ดังรูปที่ 3.7 และมีผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ดังรูปที่ 3.9 ถึง 3.10

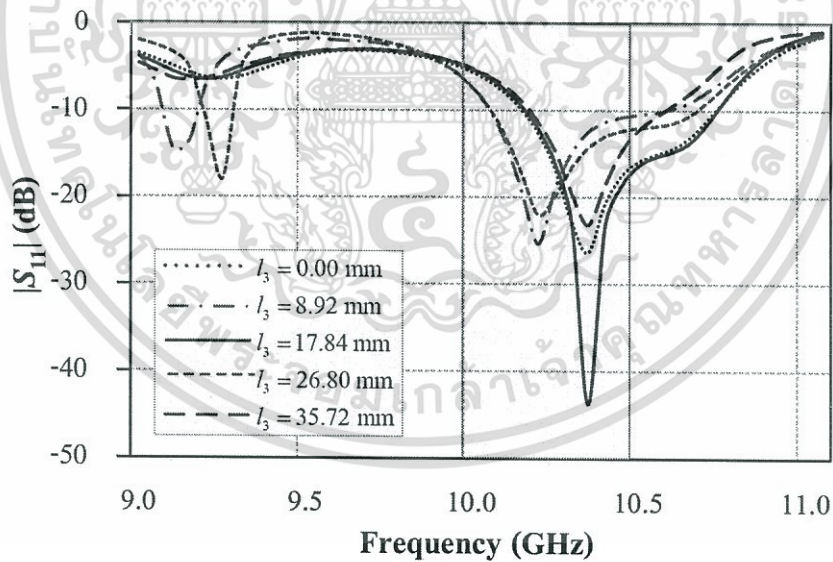


(ก) มุมมอง Perspective



(ข) มุมมองด้านข้าง

รูปที่ 3.7 โครงสร้างของสายอากาศเมื่อปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3) (ก) มุมมอง Perspective และ (ข) มุมมองด้านข้าง

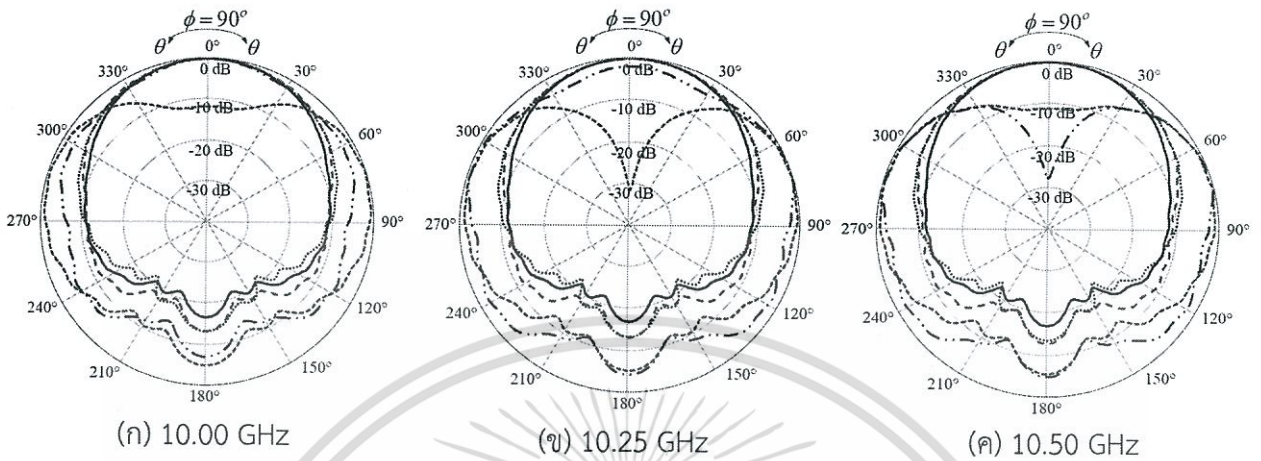


รูปที่ 3.8 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3) ตั้งแต่ 0.00 mm ถึง 35.72 mm

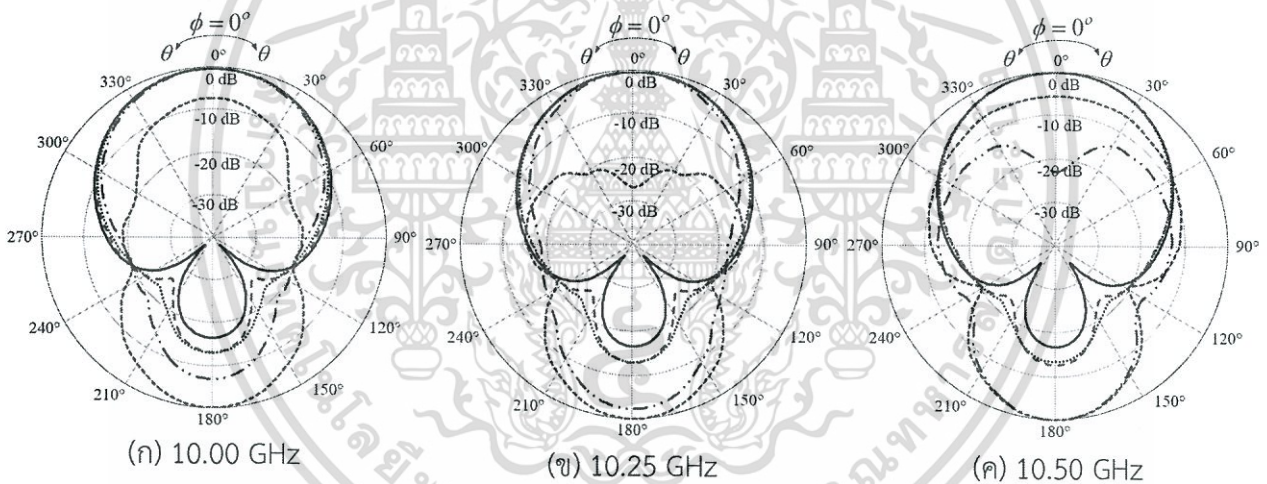
จากรูปที่ 3.8 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3) ตั้งแต่ 0.00 mm ถึง 35.72 mm พบว่าค่าของช่วง $|S_{11}|$ (dB) มีความเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากเช่นเดียวกับการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) และจากผลการจำลองยังพบว่าเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติคตั้งแต่ 0.00 mm ถึง 35.72 mm มีผลกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นอย่างมาก ดังแสดงผลในรูปที่ 3.9 ถึง 3.10



รูปที่ 3.9 ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3) ในระนาบสนามไฟฟ้า

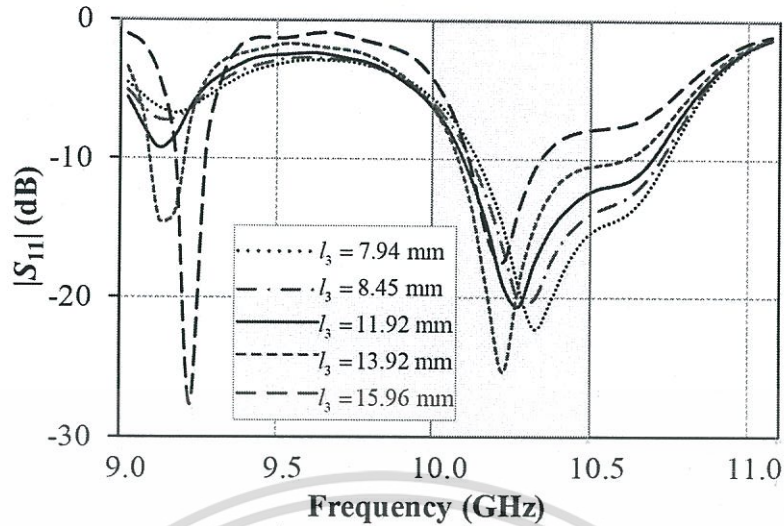


รูปที่ 3.10 ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

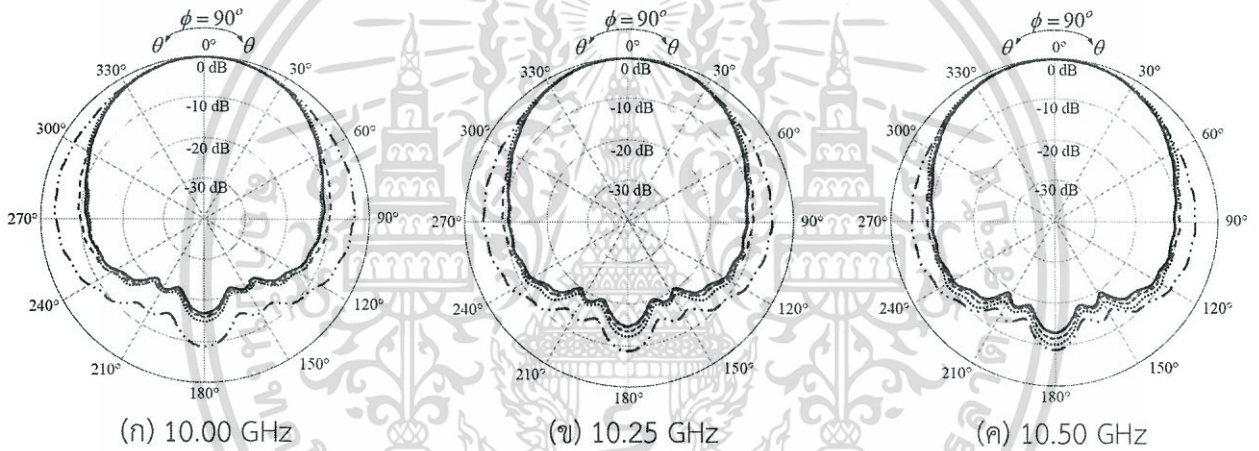
จากรูปที่ 3.9 ถึงรูปที่ 3.10 พบว่าผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3) ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและในระนาบแม่เหล็ก มีค่าความกว้างลำคลื่นที่แตกต่างกันมาก ซึ่งเกิดขึ้นจากการจำลองผลที่กำหนดค่าการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3) กว้างมากเกินไป ซึ่งช่วงความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3) ที่ทำให้มีความกว้างลำคลื่นที่ใกล้เคียงกันมาก แต่ยังไม่สมมาตรกันทั้งสองระนาบ ดังนั้นจึงทำการจำลองผลความลึกของช่องเปิดพาราซิติคที่มีค่าอยู่ในช่วง 8.92 mm ถึง 17.84 mm ให้ละเอียดมากขึ้น เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดดังรูปที่ 3.11 ถึง 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

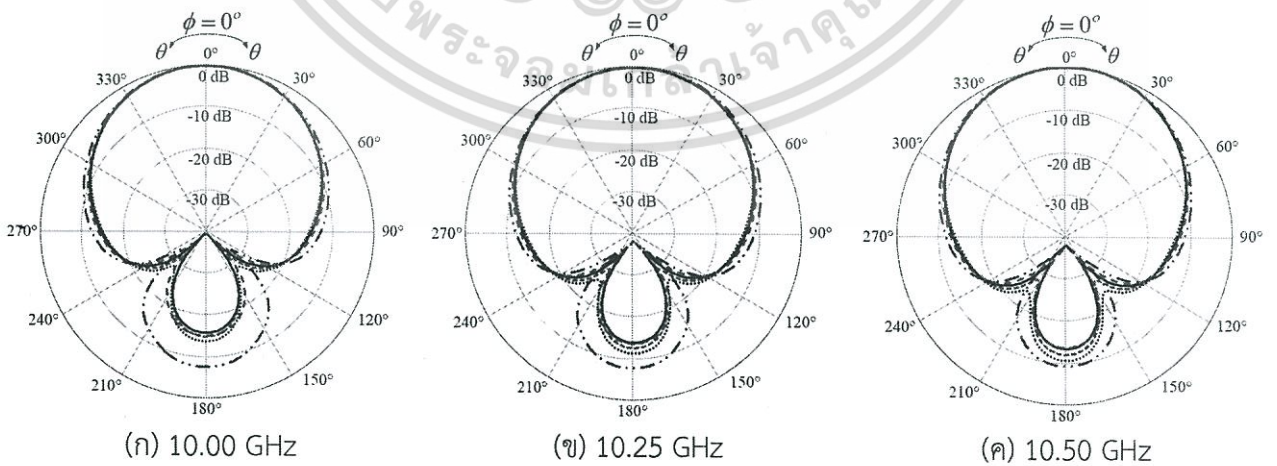
ปรับเปลี่ยนค่าความลึกของช่องเปิดพาราซีติก (l_3) ให้ละเอียดมากขึ้น



รูปที่ 3.11 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซีติก (l_3) ให้ละเอียดมากขึ้น ตั้งแต่ 7.94 mm ถึง 15.96 mm



รูปที่ 3.12 ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซีติก (l_3) ในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.13 ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซีติก (l_3) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 สรุปการเปรียบเทียบผลการจำลองความกว้างลำคลื่นที่ -3 dB และ -10 dB เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3)

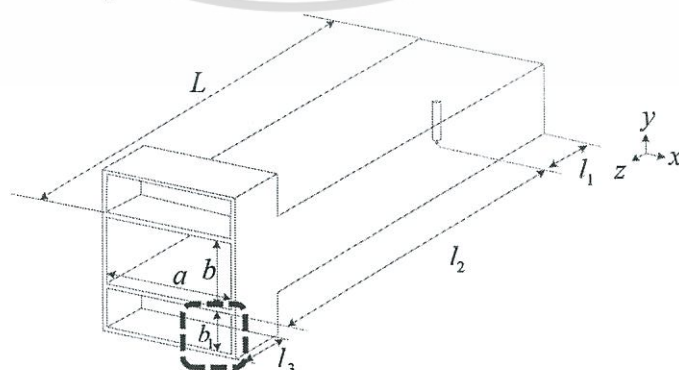
Aperture heights (b_1) (mm)	10.00 GHz				10.25 GHz				10.50 GHz			
	HPBW (-3 dB)		Beamwidth -10 dB		HPBW (-3 dB)		Beamwidth -10 dB		HPBW (-3 dB)		Beamwidth -10 dB	
	E-plane	H-plane	E-plane	H-plane	E-plane	H-plane	E-plane	H-plane	E-plane	H-plane	E-plane	H-plane
$l_3 = 7.94$	83°	66°	177°	128°	84°	65°	180°	128°	86°	65°	182°	128°
$l_3 = 8.45$	65°	43°	118°	90°	65°	44°	112°	88°	66°	43°	123°	84°
$l_3 = 11.92$	73°	70°	137°	137°	72°	70°	137°	137°	72°	70°	138°	138°
$l_3 = 13.92$	86°	69°	158°	132°	86°	67°	159°	130°	89°	67°	165°	129°
$l_3 = 15.96$	146°	61°	284°	121°	58°	53°	312°	108°	52°	41°	136°	79°

จากผลการจำลองในรูปที่ 3.11 ถึง 3.13 เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_3) พบว่าความกว้างลำคลื่นที่ -10 dB ของสายอากาศมีความสมมาตรกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก แต่ที่ความกว้างลำคลื่น -3 dB ยังมีความกว้างลำคลื่นแตกต่างกัน 2° ถึง 3° ที่ความถี่ 10.00 GHz ถึง 10.50 GHz ตามลำดับ ดังสรุปผลการจำลองในตารางที่ 3.3

ดังนั้นจึงได้จำลองผลปรับความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) เพื่อให้ได้ความกว้างลำคลื่นที่สมมาตรกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กที่ -3 dB และ -10 dB ตามที่ต้องการ ออกแบบดังแสดงผลการจำลองในหัวข้อ 3.3.4

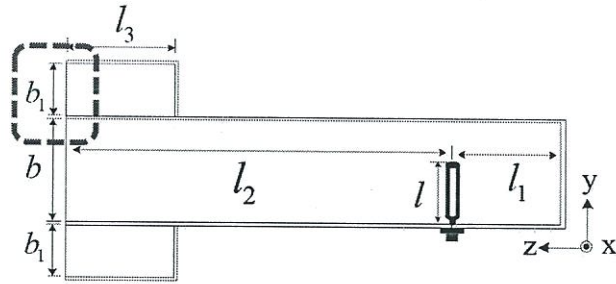
3.3.4 การจำลอง $|S_{11}|$ (dB) และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เพื่อหาค่าความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1)

ปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ดังแสดงโครงสร้างสายอากาศเมื่อมีการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ดังรูปที่ 3.14 และมีผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ดังรูปที่ 3.16 ถึง 3.17



(ก) มุมมอง Perspective

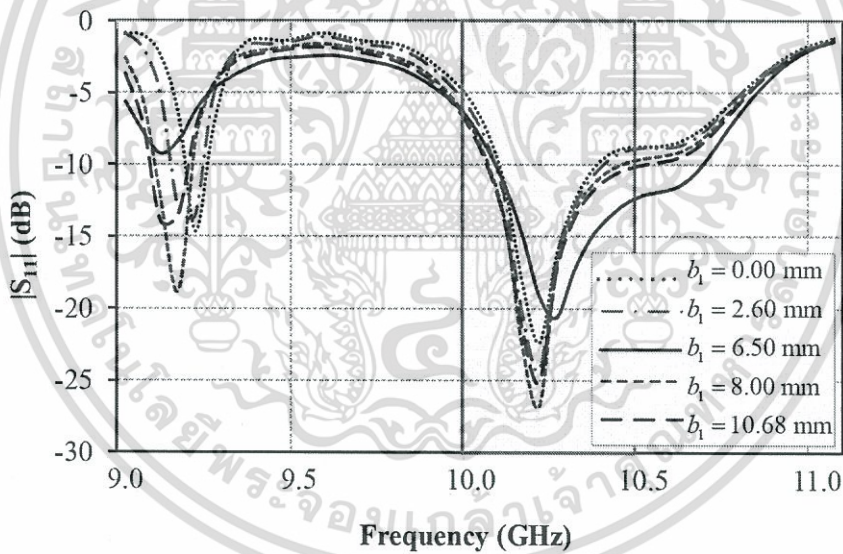
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) มุมมองด้านข้าง

รูปที่ 3.14 โครงสร้างสายอากาศเมื่อมีการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) (ก) มุมมอง Perspective และ (ข) มุมมองด้านข้าง

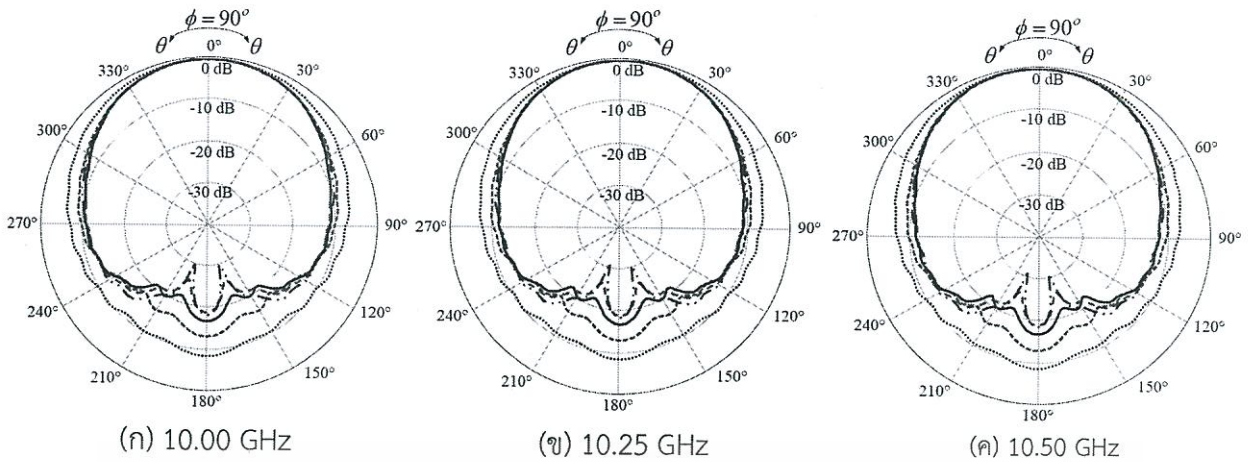
จากการกำหนดขนาดของช่องเปิดแบบพาราซิติค แล้วทำการจำลองผลหาค่าความสูงของช่องเปิดพาราซิติคที่เพิ่มเข้าไป ซึ่งถ้ากำหนดขนาดของพารามิเตอร์ให้มีค่าความสูงค่าหนึ่ง แล้วจะพบว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่บริเวณช่องเปิดจะมีความเข้มสูงสุด และจะมีความเข้มน้อยที่สุด ที่บริเวณท้ายปิดของช่องเปิดพาราซิติคนี้ซึ่งมีการออกแบบหาค่าความสูงของช่องเปิดพาราซิติค และมีผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ดังรูปที่ 3.15



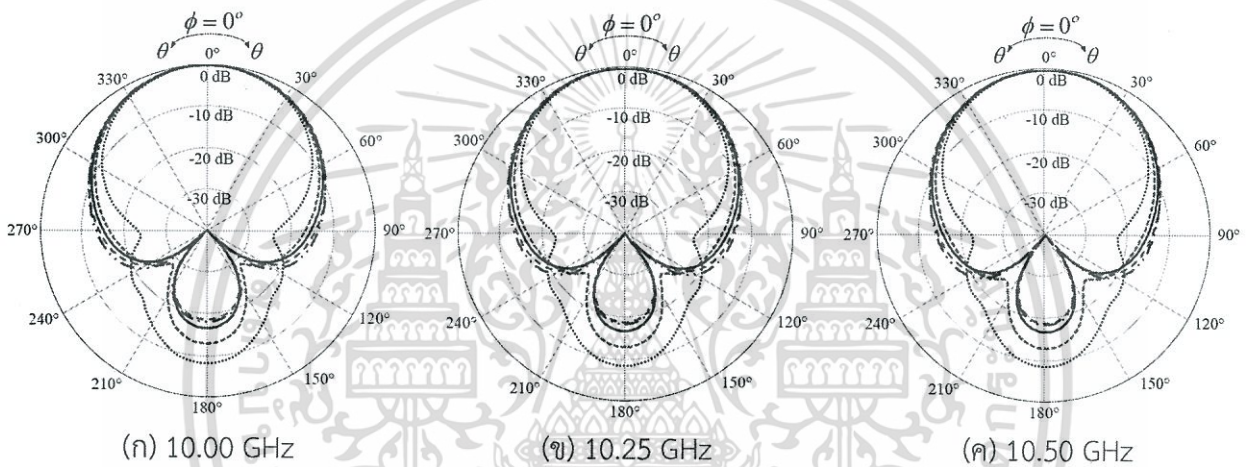
รูปที่ 3.15 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ตั้งแต่ 0.00 mm ถึง 10.68 mm

จากรูปที่ 3.15 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ตั้งแต่ 0.00 mm ถึง 10.68 mm พบว่า $|S_{11}|$ (dB) มีความใกล้เคียงกันมาก และจากผลการจำลองยังพบว่าเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ตั้งแต่ 0.00 mm ถึง 10.68 mm มีผลกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นอย่างมากดังแสดงผลในรูปที่ 3.16 ถึง 3.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ในระนาบสนามไฟฟ้า

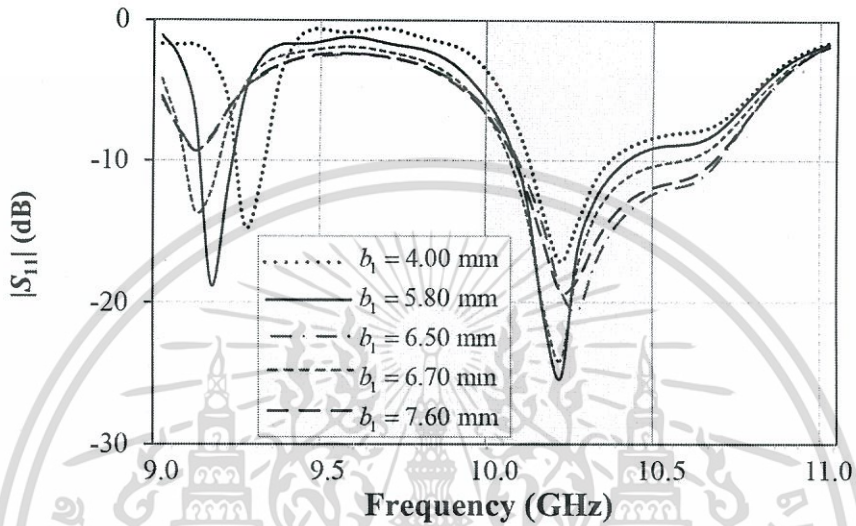


รูปที่ 3.17 ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

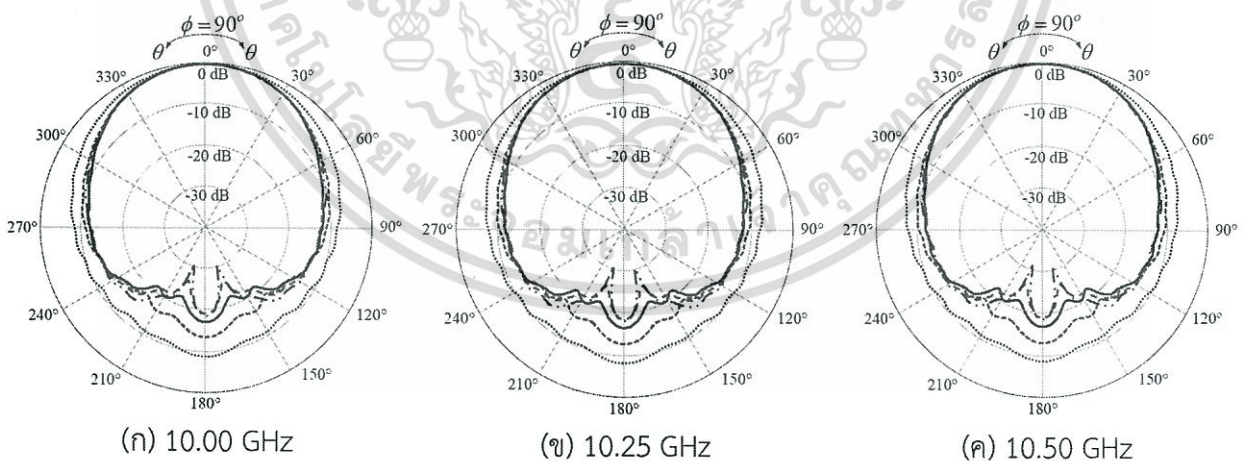
จากผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ในรูปผลการจำลองที่ 3.16 ถึงรูปที่ 3.17 เมื่อกำหนดให้ค่าความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) มีค่าตั้งแต่ 0.00 mm ถึง 10.68 mm พบว่าเมื่อทำการเพิ่มส่วนของช่องเปิดพาราซิติคที่มีความสูงเท่ากับ b_1 เพียงเล็กน้อย ค่าความกว้างลำคลื่นที่ -3 dB ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กก็จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเข้าใกล้กัน ที่ความสูงของช่องเปิดพาราซิติคเท่ากับ 6.50 mm มีค่าความกว้างลำคลื่นที่ -3 dB และ -10 dB ทั้งในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กนั้นมีความกว้างลำคลื่นที่ใกล้เคียงกันแต่ยังไม่สมมาตรกัน ดังนั้นจึงจำลองปรับเปลี่ยนค่าความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ที่ใกล้เคียงกับค่า 6.50 mm ให้ละเอียดมากขึ้น เพื่อหาค่าความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ที่ทำให้สายอากาศมีความกว้างลำคลื่นที่สมมาตรกันมากที่สุดดังผลการจำลองในรูปที่ 3.18 ถึง 3.20

ปรับเปลี่ยนค่าความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ให้ละเอียดมากขึ้น

จากผลการจำลองเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ทั้งในระนาบสนามสนามไฟฟ้าและในระนาบแม่เหล็กมีค่าความกว้างลำคลื่นที่แตกต่างกันอย่างมากระหว่างกัน ซึ่งเกิดขึ้นจากการจำลองผลที่กำหนดค่าการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) มากเกินไป ดังนั้นจึงได้จำลองผลของสายอากาศให้มีขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ให้ละเอียดมากขึ้น เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดดังผลการจำลองในรูปที่ 3.18 ถึง 3.20

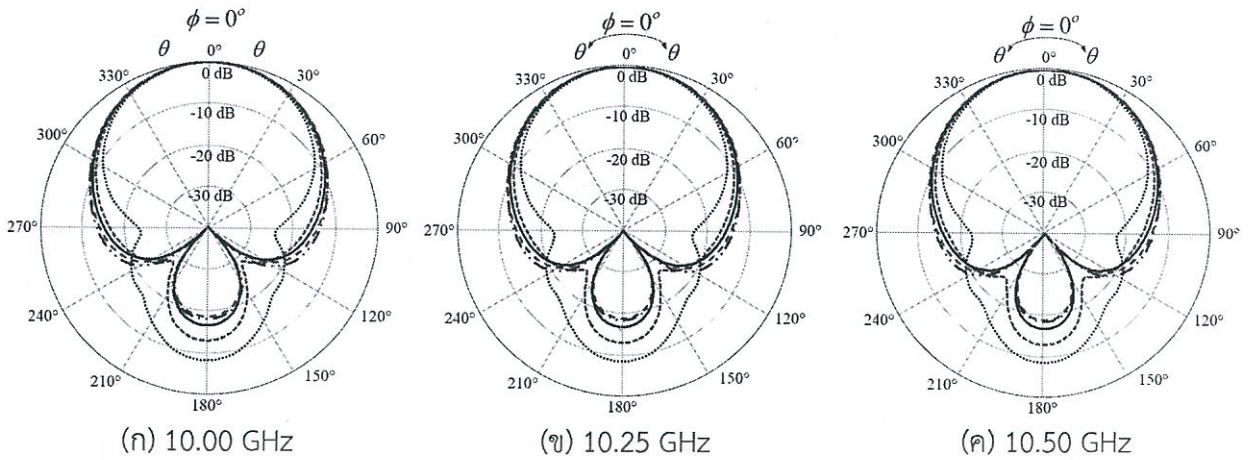


รูปที่ 3.18 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ให้ละเอียดมากขึ้น ตั้งแต่ 4.00 mm ถึง 7.60 mm



รูปที่ 3.19 ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) ให้ละเอียดมากขึ้น ในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติก (b_1) ให้ละเอียดมากขึ้น ในระนาบสนามแม่เหล็ก

ตารางที่ 3.4 สรุปการเปรียบเทียบผลการจำลองความกว้างลำคลื่นที่ -3 dB และ -10 dB เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติก (b_1) ให้ละเอียดมากขึ้น

Apertures heights (b_1) (mm)	10.00 GHz				10.25 GHz				10.50 GHz			
	HPBW (-3 dB)		Beamwidth -10 dB		HPBW (-3 dB)		Beamwidth -10 dB		HPBW (-3 dB)		Beamwidth -10 dB	
	E-plane	H-plane	E-plane	H-plane	E-plane	H-plane	E-plane	H-plane	E-plane	H-plane	E-plane	H-plane
$b_1 = 4.00$	80°	68°	224°	134°	80°	67°	202°	134°	79°	66°	190°	130°
$b_1 = 5.80$	70°	70°	137°	137°	70°	70°	137°	137°	72°	72°	138°	138°
$b_1 = 6.50$	73°	70°	137°	137°	72°	70°	137°	137°	72°	70°	138°	138°
$b_1 = 6.70$	77°	70°	156°	136°	76°	69°	154°	138°	76°	69°	151°	138°
$b_1 = 7.60$	75°	69°	168°	140°	73°	69°	160°	140°	69°	72°	158°	136°

จากผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติก (b_1) ดังผลการจำลองในรูปที่ 3.19 ถึง 3.20 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มส่วนของช่องเปิดพาราซิติกที่มีความสูงเท่ากับ b_1 เพียงเล็กน้อย ค่าความกว้างลำคลื่นที่ -3 dB ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กก็จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเข้าใกล้กัน หรือมีความเป็นลำคลื่นสมมาตรมากขึ้น เมื่อ $b_1 = 6.50$ mm จากเดิมในหัวข้อ 3.3.3 ค่าความกว้างลำคลื่นที่ -3 dB ที่มีความกว้างแตกต่างกันเท่ากับ 2° ถึง 3° แต่เมื่อปรับเปลี่ยนความลึกของช่องเปิดพาราซิติกให้ละเอียดมากยิ่งขึ้น ซึ่งพบว่าที่ความลึกของช่องเปิดพาราซิติก $b_1 = 5.80$ mm นั้นทำให้ค่าความกว้างลำคลื่นทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กที่ -3 dB และ -10 dB สมมาตรกันตามวัตถุประสงค์ในการออกแบบสายอากาศ ดังแสดงผลในตารางที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด

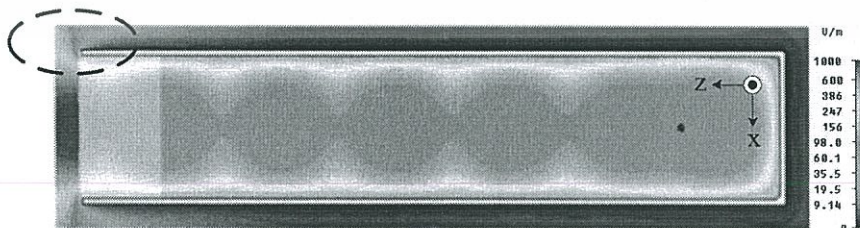
Parameters	Physical Size (mm)	Electrical Size
a	23.10	$0.610\lambda_g$
b	11.55	$0.305\lambda_g$
L	115.00	$3.402\lambda_g$
l	7.31	0.250λ
l_1	15.85	$0.419\lambda_g$
l_2	87.54	$2.590\lambda_g$
l_3	11.92	$0.315\lambda_g$
b_1	5.80	$0.172\lambda_g$

จากผลการจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าทั้งหมดของการออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดที่ใช้เป็นตัวบ่อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นในบพที่ 2 ถึงบพที่ 3 พบว่าโครงสร้างของสายอากาศมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ $a \times b = 23.1 \times 11.55 \text{ mm}^2$ (ยังไม่รวมความหนาของท่อนำคลื่นที่มีความหนาเท่ากับ 1.15 mm) และมีความยาวของสายอากาศทั้งหมดเท่ากับ $L = 115 \text{ mm}$ จากผลการจำลองพบว่าสายอากาศมีค่า $|S_{11}|$ (dB) ครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการออกแบบ และยังมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวที่มีความสมมาตรของความกว้างลำคลื่นทั้งสองระนาบ เป็นไปตามความต้องการในการออกแบบสายอากาศ โดยมีผลการจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าภายในโครงสร้างสายอากาศช่องเปิดพาราซิติคในหัวข้อต่อไป

3.3.5 การจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าภายในโครงสร้างสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด



(ก)



(ข)

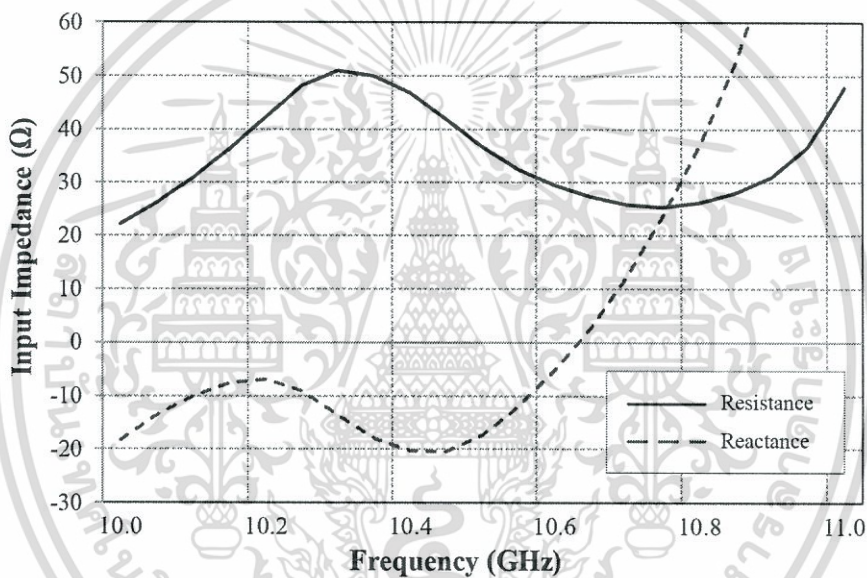
รูปที่ 3.21 ผลจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าภายในโครงสร้างสายอากาศช่องเปิด

(ก) แนวแกน yz และ(ข) แนวแกน xz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าภายในโครงสร้างสายอากาศช่องเปิดในรูปที่ 3.21 พบว่า ในแนวแกน yz ที่บริเวณขอบภายในช่องเปิดแบบพาราซิติค (เส้นประวงรี) มีความเข้มของสนามไฟฟ้าเข้าไปภายในช่องเปิดนี้สูงมาก และเมื่อพิจารณาต่อไปอีกยังพบว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าเกิดการเลี้ยวเบนออกไปนอกช่องเปิดพาราซิติคอีกครั้งมีค่าน้อยมาก ทำให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในบริเวณที่เคยเกิดการเลี้ยวเบนนั้นไม่ไปรบกวนสนามบริเวณอื่น และจากผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในแนวแกน xz นั้นพบว่าที่บริเวณขอบด้านข้างทั้งสองของท่อนำคลื่นมีปริมาณความเข้มสนามไฟฟ้าที่น้อยมากเมื่อเทียบกับในแนวแกน yz เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในบทที่ 2

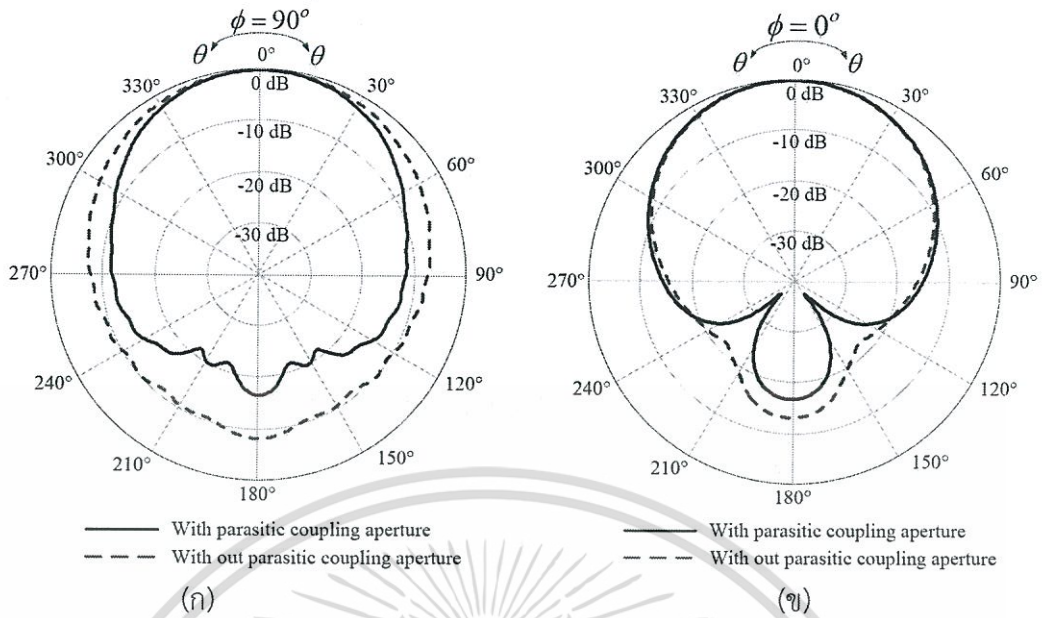
ซึ่งเมื่อพิจารณารวมกันพบว่าที่บริเวณขอบของท่อนำคลื่นหรือช่องเปิดของสายอากาศนี้มีความเข้มสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกันน้อยมาก ทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศช่องเปิดพาราซิติคมีความสมมาตรกันยิ่งขึ้นดังผลการจำลองการทำงานของสายอากาศในหัวข้อต่อไป



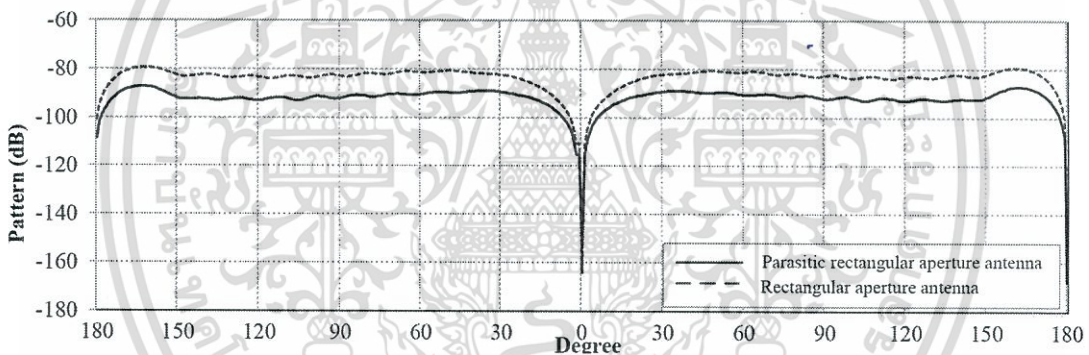
รูปที่ 3.22 ผลจำลองอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศช่องเปิดพาราซิติค

จากผลการจำลองอินพุตอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศช่องเปิดเดี่ยว พบว่าที่ความถี่กลาง 10.25 GHz ซึ่งเป็นความถี่กลางมีค่า $Z = 49.57 - j11.22 \Omega$ ดังแสดงในรูปที่ 3.22

3.4 ผลการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น



รูปที่ 3.23 เปรียบเทียบผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศช่องเปิดเดี่ยวและแบบพาราซิติค ที่ความถี่ 10.25 GHz (ก) ระบายสนามไฟฟ้า (ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

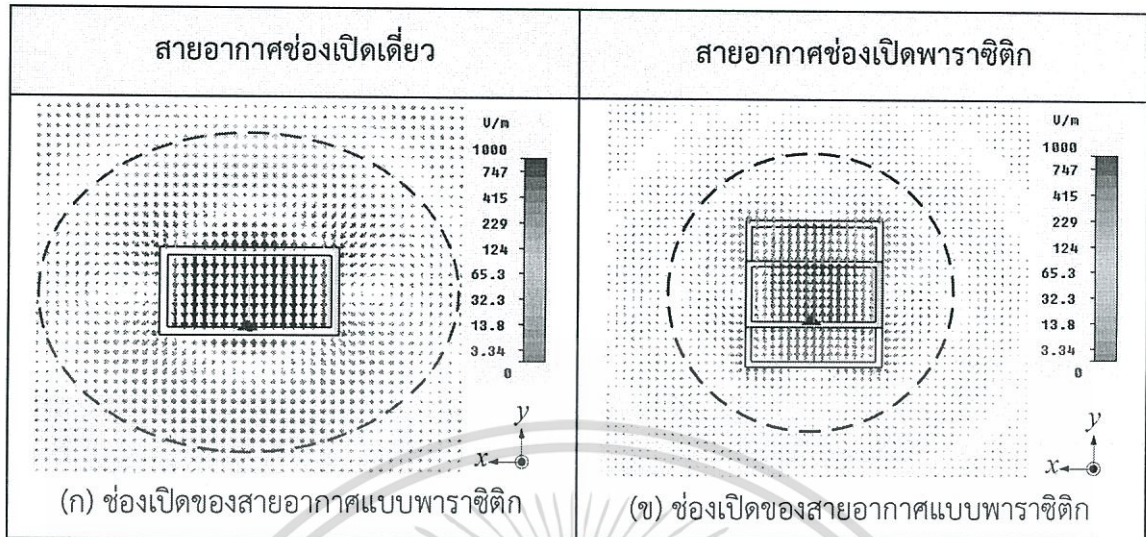


รูปที่ 3.24 เปรียบเทียบผลจำลอง Cross-polarization ของสายอากาศช่องเปิด ที่ความถี่ 10.25 GHz

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศช่องเปิดเดี่ยวและแบบพาราซิติค ที่ความถี่ 10.25 GHz ในกรณีของสายอากาศช่องเปิดเดี่ยวที่ (เส้นประ) ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กพบว่ามีความกว้างลำคลื่นที่แตกต่างกันมาก อีกกรณีคือเมื่อเพิ่มช่องเปิดพาราซิติคเข้าไปที่บริเวณช่องเปิดด้านหน้าในระนาบ yz (เส้นทึบ) จากนั้นพิจารณาความกว้างลำคลื่นทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กพบว่ามีความกว้างลำคลื่นที่ใกล้เคียงกันมาก จนมีค่าเข้าหาแบบลำคลื่นสมมาตรดังผลการเปรียบเทียบผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศช่องเปิดเดี่ยวและแบบพาราซิติค ที่ความถี่ 10.25 GHz ในรูปที่ 3.23 และจากการเพิ่มช่องเปิดพาราซิติคเข้าไปที่ตัวสายอากาศเดิมยังส่งผลให้ค่า cross polarization ของสายอากาศมีค่าต่ำมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศในกรณีเป็นสายอากาศช่องเปิดเดี่ยวเพียงอย่างเดียว ดังแสดงผลการเปรียบเทียบในรูปที่ 3.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 การเปรียบเทียบผลการจำลองความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้าที่บริเวณขอบของช่องเปิด ของสายอากาศช่องเปิดเดี่ยวและสายอากาศช่องเปิดแบบพาราซิติค



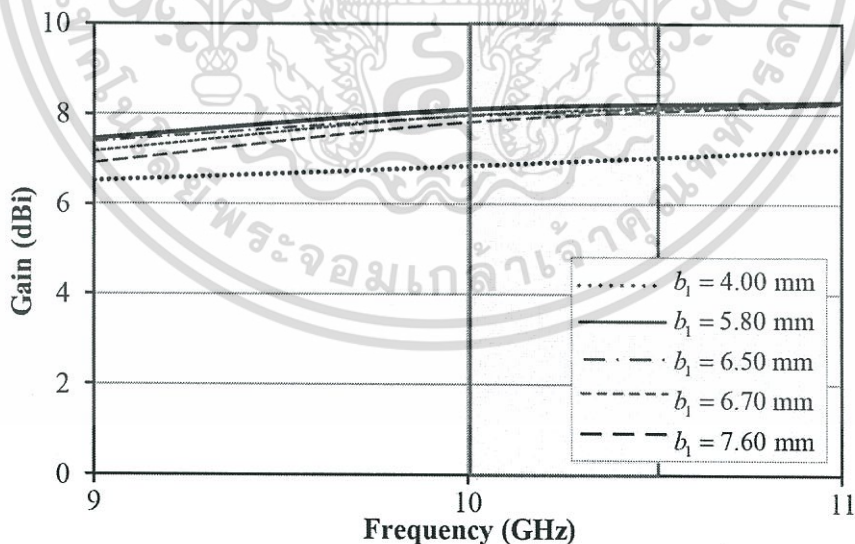
จากผลการเปรียบเทียบผลการจำลองความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้าที่บริเวณขอบของช่องเปิด ของสายอากาศช่องเปิดเดี่ยวและสายอากาศช่องเปิดแบบพาราซิติคในตารางที่ 3.6 ในกรณีสายอากาศช่องเปิดเดี่ยว พบว่าความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้าที่บริเวณขอบของช่องเปิดของสายอากาศในรูป (ก) เส้นแรงไฟฟ้ามีความหนาแน่นสูงสุดอยู่ที่ตรงกลางของท่อนำคลื่น และเมื่อพิจารณาบริเวณที่ไกลออกมาจากเดิม (ในเส้นประ) พบว่าความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้าจากเดิมที่หนาแน่นตรงกลางท่อนำคลื่นจะค่อยๆมีความหนาแน่นลดลงซึ่งมีลักษณะเป็นวงรี เมื่อเกิดลักษณะการแพร่กระจายคลื่นดังกล่าวส่งผลให้สายอากาศนี้มีความกว้างลำคลื่นที่ไม่สมมาตรกันและมีความกว้างลำคลื่นที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลการจำลองที่สนับสนุนผลการจำลองดังกล่าวดังแสดงในตารางที่ 3.6

ส่วนในกรณีสายอากาศช่องเปิดพาราซิติค พบว่าความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้าที่บริเวณขอบของช่องเปิดของสายอากาศ ในรูป (ข) เส้นแรงไฟฟ้ามีความหนาแน่นสูงสุดอยู่ที่ตรงกลางของท่อนำคลื่น และเมื่อพิจารณาบริเวณที่ไกลออกมาจากเดิม (ในเส้นประ) พบว่าความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้าจากเดิมที่หนาแน่นตรงกลางท่อนำคลื่นจะค่อยๆมีความหนาแน่นลดลงซึ่งมีลักษณะเป็นวงกลม เมื่อเกิดลักษณะการแพร่กระจายคลื่นดังกล่าวส่งผลให้สายอากาศนี้มีความกว้างลำคลื่นที่สมมาตรกันและมีความกว้างลำคลื่นที่เท่ากัน ซึ่งมีผลการจำลองที่สนับสนุนผลการจำลองดังกล่าวดังแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 เปรียบเทียบผลการจำลองความกว้างลำคลื่นที่ -3 dB และ -10 dB ในกรณีของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวและสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด

Frequency (GHz)	HPBW (-3 dB)				Beam width (-10 dB)			
	Without parasitic		With parasitic		Without parasitic		With parasitic	
	E-Plane	H-plane	E-plane	H-plane	E-plane	H-plane	E-plane	H-plane
10.00	110°	62°	73°	70°	268°	115°	137°	137°
10.25	106°	60°	72°	70°	245°	113°	137°	137°
10.50	102°	60°	72°	70°	242°	112°	138°	138°

จากตารางสรุปผลการเปรียบเทียบผลการจำลองความกว้างลำคลื่นที่ -3 dB และ -10 dB ในกรณีของสายอากาศช่องเปิดเดี่ยวและแบบพาราซิติคในตารางที่ 3.7 พบว่าทั้ง 3 ความถี่คือ 10.00 GHz 10.25 GHz และ 10.50 GHz มีผลการจำลองเป็นไปในแนวเดียวกันคือ ผลการจำลองในกรณีสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว ที่เป็นท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมท่อนั้นมีความกว้างลำคลื่นที่ -3 dB และ -10 dB ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแตกต่างกันมาก ส่วนในกรณีสายอากาศช่องเปิดแบบพาราซิติคนั้นมีความกว้างลำคลื่นที่ -3 dB และ -10 dB ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแตกต่างกันน้อยมาก ซึ่งตรงตามความต้องการในการออกแบบสายอากาศที่จะนำไปใช้ในการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น



รูปที่ 3.25 ผลจำลองอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิด เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลจำลองอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิด ในรูปที่ 3.25 อัตราขยายของสายอากาศเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) พบว่าในการเปลี่ยนแปลงค่าของความสูงของช่องเปิดพาราซิติคที่ความถี่กลาง (10.25 GHz) มีผลกับอัตราขยายน้อยมาก และความสูงของช่องเปิดพาราซิติคที่นำมาออกแบบสายอากาศคือ $b_1 = 5.80$ mm มีอัตราขยายเท่ากับ 8.24 dBi ดังผลการทดสอบสายอากาศในบทที่ 5

3.5 บทสรุป

โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดแบบพาราซิติคที่มีการเพิ่มช่องเปิดแบบพาราซิติคนี้สามารถออกแบบและสร้างได้ง่าย ซึ่งต้องคำนึงถึงคือการเลือกขนาดของท่อนำคลื่นที่เหมาะสมแล้ว ยังต้องคำนึงถึงค่าความถี่ตัดของท่อนำคลื่นที่นำมาสร้างสายอากาศด้วย และโดยปกติแล้วเงื่อนไขในการออกแบบท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมโหมดของคลื่นที่นำมาพิจารณาคือโหมด TE_{10} ซึ่งการออกแบบช่องเปิดแบบพาราซิติคที่นำมาติดตั้งเพิ่มเติมภายหลังจึงต้องออกแบบภายใต้โหมด TE_{10} เช่นเดียวกัน

สายอากาศช่องเปิดพาราซิติคพบว่าสายอากาศช่องเปิดนี้มีส่วนประกอบอยู่ 3 ส่วนหลักๆคือสายอากาศช่องเปิดเดี่ยว และช่องเปิดแบบพาราซิติคอีก 2 ตัวที่ออกแบบเพิ่มเติมบริเวณขอบของช่องเปิดด้านบนและล่าง ซึ่งจากบทที่ 2 สรุปไว้ว่าสายอากาศช่องเปิดเดี่ยวนี้มีความกว้างเท่ากับ a และความสูงเท่ากับ b และมีความยาวเท่ากับ L โดยมีการกระตุ้นสัญญาณด้วยโพรบที่มีความยาวของโพรบเท่ากับ $l = \lambda / 4$ ถูกรว้างจากส่วนท้ายของสายอากาศที่ถูกปิดด้วยโลหะ ทำให้สายอากาศแบบช่องเปิดเดี่ยวนี้มีผลตอบสนองทางความถี่ครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานคือความถี่ 10.0 GHz ถึง 10.5 GHz และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว แต่มีค่าความกว้างลำคลื่นของทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กมีค่าแตกต่างกันมาก ส่วนช่องเปิดแบบพาราซิติคอีก 2 ตัวนั้นมีความกว้างเท่ากับความกว้างของสายอากาศคือ a แต่มีความสูง b_1 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า b และมีความลึกของช่องเปิดพาราซิติคเท่ากับ l_2

ผลสรุปของเทคนิควิธีการเพิ่มช่องเปิดแบบพาราซิติคที่ขอบของช่องเปิดหลักในแนวตั้งตามแนวระนาบ yz โดยการติดตั้งช่องเปิดแบบพาราซิติคสองช่องประกบติดที่ขอบทั้งด้านบนและล่างของช่องเปิดหลักนั้น สามารถบีบให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นให้มีความกว้างลำคลื่นในแนวระนาบ yz และระนาบ xz มีค่าใกล้เคียงกันมาก สายอากาศช่องเปิดพาราซิติคนี้ถูกป้อนสัญญาณด้วยอิเล็กทรอนิกส์โพรบ ซึ่งการป้อนสัญญาณในลักษณะนี้มีความมั่นคงแข็งแรงทางด้านกายภาพ ซึ่งปรับแก้ซึ่งได้ง่ายและง่ายต่อการออกแบบและสร้างสายอากาศ การป้อนสัญญาณด้วยอิเล็กทรอนิกส์โพรบที่ได้นำเสนอพบว่าช่วง $|S_{11}|$ (dB) ครอบคลุมช่วงความถี่ความต้องการออกแบบ ส่วนของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งสองระนาบยังคงเป็นชนิดเจาะจงทิศทางทั้งสองระนาบและการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้งเช่นเดียวกันกับบทที่ 2 นอกจากนี้มีอัตราขยายสายอากาศมากกว่า 8 dBi ตลอดย่านความถี่

จากผลการจำลองในบทที่ 3 พบว่าสายอากาศช่องเปิดถูกออกแบบมาเพื่อเป็นตัวป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักในการออกแบบคือสายอากาศที่นำมา

ใบอนุญาตให้ตัวสะท้อนคลื่นนี้ต้องมีผลตอบสนองความถี่ครอบคลุมย่านความถี่ 10.0 GHz ถึง 10.5 GHz และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว โดยมีเงื่อนไขคือมีความกว้างลำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าสมมาตรกับความกว้างลำคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กทั้งความกว้างลำคลื่นที่ -3 dB และ -10 dB ซึ่งจากวัตถุประสงค์หลักในการออกแบบคือต้องออกแบบสายอากาศมาใช้ใบอนุญาตให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น ดังนั้นเมื่อออกแบบสายอากาศตัวที่ใช้ใบอนุญาตที่มีคุณสมบัติครบตามที่ต้องการ หลังจากนั้นจึงขั้นตอนเป็นการออกแบบสายอากาศสะท้อนคลื่น ซึ่งถูกออกแบบในบทที่ 5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบ และการป้อนสัญญาณ ให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น

4.1 บทนำ

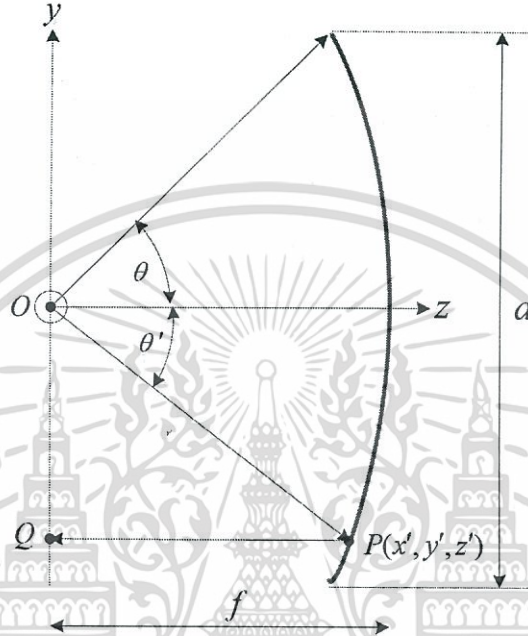
จากวัตถุประสงค์ของการออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด เพื่อต้องการลำคลื่นของสายอากาศหลักสมมาตรกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นตัวป้อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่น เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการป้อนสัญญาณ และเกิดการ spillover loss น้อยที่สุด

จากบทที่ 2 เป็นโครงสร้างของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีความกว้างลำคลื่นไม่สมมาตร ซึ่งยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น และบทที่ 3 เป็นการออกแบบโครงสร้างสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด ซึ่งพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศนั้นสมมาตรกันทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก และยังมี $|S_{11}|$ (dB) ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการออกแบบคือย่านความถี่ X-Band (10.00 ถึง 10.50 GHz) ซึ่งคุณสมบัติของสายอากาศที่ออกแบบนี้มีความเหมาะสมที่จะนำมาป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น จึงได้ออกแบบสายอากาศสะท้อนคลื่นและพิจารณาคุณสมบัติต่างๆของสายอากาศสะท้อนคลื่นดังหัวข้อต่อไป

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการออกแบบสายอากาศสะท้อนคลื่น โดยการเริ่มต้นจากการกำหนดอัตราส่วน F/D และหลังจากนั้นเป็นการออกแบบสายอากาศสะท้อนคลื่นจากสมการพาราโบลา และนำมาพล็อตตำแหน่งในแนวแกน y โดยที่กำหนดค่าในแนวแกน x มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 180 mm จากนั้นได้เส้นกราฟพาราโบลาแล้วทำการหมุนเส้นกราฟในแนวแกน z ให้ครบหนึ่งรอบก็จะได้สายอากาศสะท้อนคลื่นตามต้องการ ซึ่งจากผลการจำลองในบทนี้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวที่มีอัตราขยายสูงถึงเท่ากับ 28 dBi และมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 5° และมีช่วง $|S_{11}|$ (dB) ต่ำกว่า -10 dB ตามความต้องการของระบบการสื่อสารย่านความถี่ X-Band (10.00 ถึง 10.50 GHz) ซึ่งผลการจำลองต่างๆที่กล่าวมานี้ได้ถูกนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และสำหรับเนื้อหาในบทนี้ประกอบไปด้วย รูปแบบเรขาคณิตของพื้นผิวของสายอากาศสะท้อนคลื่น การออกแบบสายอากาศสะท้อนคลื่น การจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดที่ใช้ป้อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่น เช่น $|S_{11}|$ (dB) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น การจำลองความสมมาตรของลำคลื่นที่ -10 dB อัตราขยายของสายอากาศ และบทสรุป

4.2 รูปแบบเรขาคณิตของพื้นผิวของสายอากาศสะท้อนคลื่น

พิจารณาจากรูปที่ 4.1 พื้นผิวของตัวสะท้อนคลื่นมีรูปแบบการหมุนเส้นโค้งพาราโบลารอบแกนทำให้คลื่นกระจายออกจากจุดโฟกัสของตัวสะท้อนแล้วถูกเปลี่ยนเป็นคลื่นระนาบ (Plane wave) การออกแบบผิวสะท้อนของคลื่นจะใช้หลักการหักเหของแสง (Optical techniques) โดยไม่นับรวมการทำให้ผิดรูปมิติร่างของคลื่นทุกรูปแบบ (การแตกกระจายของคลื่นเนื่องจากสิ่งกีดขวางต่างๆ) หรือจากขอบของตัวสะท้อนเอง เพื่อเลือกกระนาบตั้งฉากกับแกนของตัวสะท้อนที่ผ่านจุดโฟกัส [48]



รูปที่ 4.1 รูปร่างสองมิติของสายอากาศสะท้อนคลื่น [48]

จากรูปที่ 4.1 พบว่า

$$OP + PQ = 2f \quad 4.1$$

ดังนั้น

$$OP = r' \quad 4.2$$

เขียนใหม่ได้เป็น

$$r'(1 + \cos \theta') = 2f \quad 4.3$$

หรือ

$$r' = \frac{2f}{1 + \cos \theta'} = f \sec^2 \left(\frac{\theta'}{2} \right) ; \theta \leq \theta_0 \quad 4.4$$

พื้นผิวของสายอากาศสะท้อนคลื่นคือการหมุนรอบแกนของรูปพาราโบล่า โดยที่สมการที่ 4.4 คือสมการของพื้นผิวพาราโบล่าในพิกัดทรงกลม ที่บอกตำแหน่งโดย (r', θ', ϕ') และเนื่องจากเป็นการหมุนที่สมมาตรกันจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า ϕ'

4.3 การออกแบบสายอากาศสะท้อนคลื่น

โดยทั่วไปสายอากาศที่เป็นสายอากาศสะท้อนคลื่นจะมีความโค้งเหมือนกัน แต่จะแตกต่างกันที่ความลึกของแผ่นสะท้อน จึงทำให้สายอากาศที่เป็นแผ่นสะท้อนผิวโค้งมีหลากหลายขนาด และวิธีที่ใช้อธิบายลักษณะความโค้งของแผ่นสะท้อนคือ อธิบายด้วยอัตราส่วน f/D ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวของจุดโฟกัส (f) ต่อระยะของเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศสะท้อนคลื่น (D) ซึ่งสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

1. งานวิจัยนี้เป็นกรออกแบบสายอากาศสะท้อนคลื่น (จานรับสัญญาณ) ในย่าน X-Band โดยกำหนดค่า F/D ไว้ที่ 0.38 และเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 360 mm คำนวณระยะ Focus ของจานสายอากาศตามสมการที่ 4.7 จะได้สายอากาศสะท้อนคลื่นย่าน X-Band มีความยาวโฟกัสเท่ากับ [48]

$$f = 0.38(D) = 0.38(360) = 136.80 \text{ mm}$$

2. คำนวณหาขนาดสวนโค้งของสายอากาศสะท้อนคลื่น โดยใช้สมการ พาราโบลา

$$y = \frac{x^2}{4f} \quad 4.5$$

เมื่อ f คือระยะโฟกัสของสายอากาศสะท้อนคลื่น (จานพาราโบลา)
 x คือระยะทางตามแนวแกน x โดยมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง $D/2$
 y คือระยะความลึกของจานตามแนวแกน y

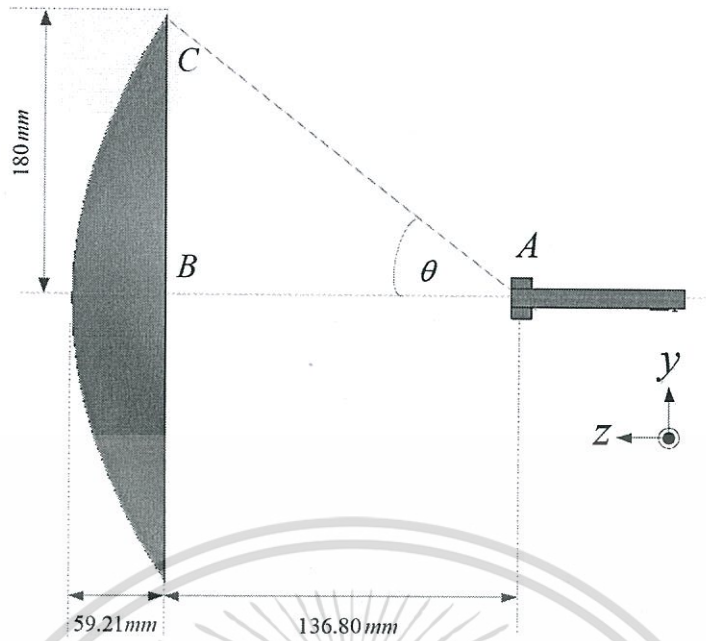
จากนั้นจึงนำสมการพาราโบลาและระยะโฟกัส ที่ได้ไป plot กราฟ โดยใช้ค่า x ตั้งแต่ 0 ถึง 180.00 mm ระยะโฟกัสเท่ากับ 136.80 mm โดยอัตราส่วนระหว่างระยะโฟกัสของสายอากาศแบบสายอากาศสะท้อนคลื่นและค่าระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศสะท้อนคลื่นหาได้ดังสมการที่ 4.6

$$\frac{f}{D} = \frac{\text{focal length}}{\text{Diameter of dish}} \quad 4.6$$

โดยกำหนดให้ f คือระยะโฟกัสของสายอากาศแบบสายอากาศสะท้อนคลื่น

D คือระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศสะท้อนคลื่น

$$f = \frac{D^2}{16d} \quad 4.7$$

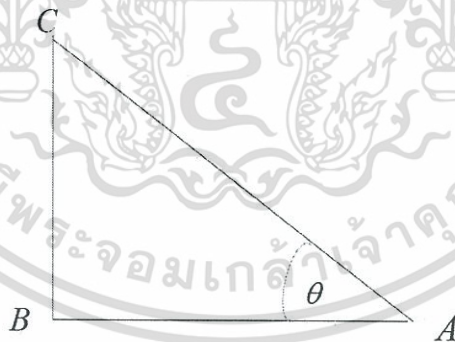


รูปที่ 4.2 การวางตำแหน่งของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด และสายอากาศสะท้อนคลื่น

จากรูปที่ 4.2 เมื่อวางสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดใช้งานกับสายอากาศสะท้อนคลื่นดังรูปแล้วพบว่า จะเกิดมุม θ ซึ่งเป็นมุมจากขอบของสายอากาศสะท้อนคลื่นมาทำมุมกับจุดโฟกัส ซึ่งเป็นแกนเดียวกันกับแกนกลาง สามารถหาค่ามุมนี้ได้จากสมการ 4.4 [48]

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{BC}{AB} \right)$$

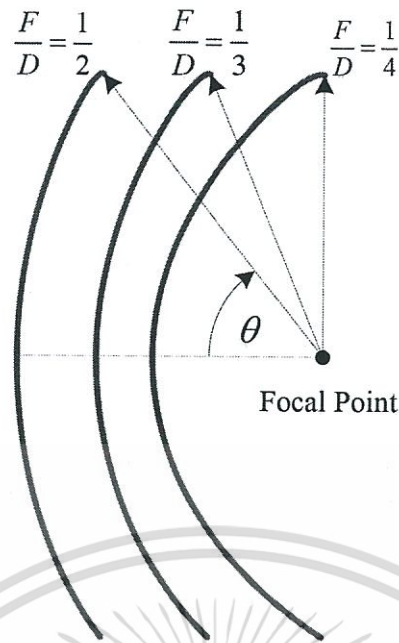
4.8



รูปที่ 4.3 การหาค่ามุม θ ของสายอากาศ

โดยปกติอัตราส่วนระหว่างระยะโฟกัสของสายอากาศแบบสายอากาศสะท้อนคลื่นและค่าระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศสะท้อนคลื่นมีอัตราส่วนตามสมการที่ 4.8 และมีรูปอธิบายการหาค่ามุม θ ของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 4.3 และเมื่ออัตราส่วนนี้มีค่าน้อยแล้วพบว่าระยะโฟกัสจะมีค่ามาก ทำให้มุม θ มีค่าน้อย ส่วนเมื่ออัตราส่วนนี้มีค่ามากขึ้นระยะโฟกัสก็จะมีค่าน้อยลง และทำให้มุม θ มีค่ามาก ดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

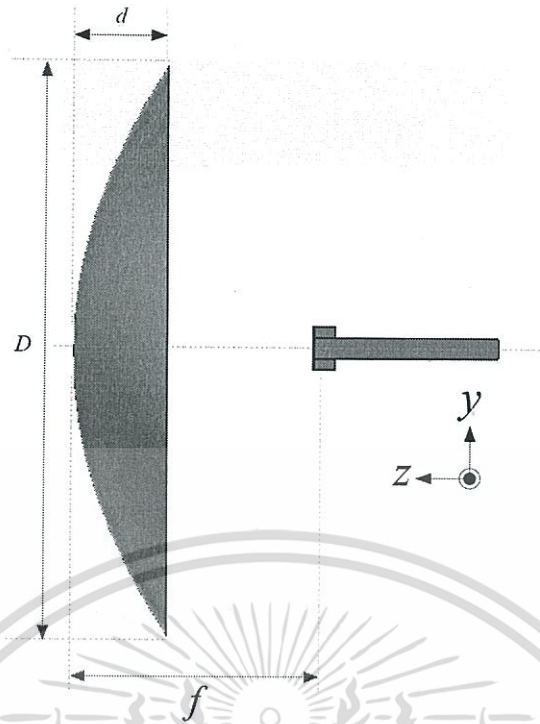


รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบระยะโฟกัสของสายอากาศแบบสายอากาศสะท้อนคลื่น [48]

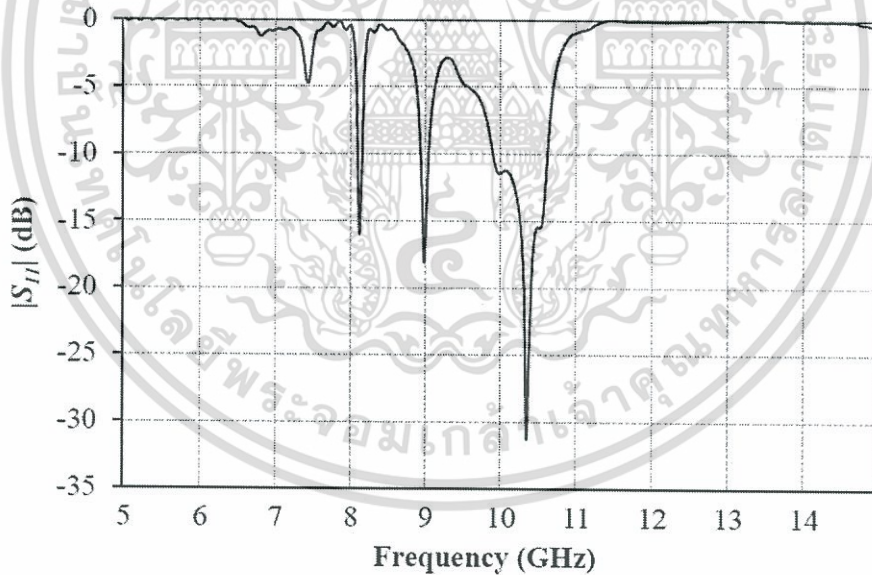
เมื่อสังเกตแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น พบว่าเมื่ออัตราส่วนของ f/D มีค่าน้อย แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวป้อนสัญญาณจะต้องกว้าง และเมื่อ f/D มีค่ามาก จะต้องใช้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวป้อนสัญญาณปานกลาง ดังนั้นความแตกต่างของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นจึงมีความสำคัญมากต่อการแพร่กระจายคลื่นรวมของสายอากาศที่พุ่งออกจากสายอากาศสะท้อนคลื่น

4.4 การจำลอง $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดที่ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น

จากหัวข้อผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 พบว่าค่า $|S_{11}|$ (dB) มีความถี่ที่เรโซแนนซ์ที่ความถี่กลาง 10.22 GHz และมีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ (dB) ตั้งแต่ 10.04 ถึง 10.65 GHz ซึ่งครอบคลุมตามความต้องการของระบบการสื่อสารย่านความถี่ X-Band ซึ่งในหัวข้อนี้กล่าวถึงการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดที่ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น โดยการกำหนดขนาดของพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศสะท้อนคลื่นตามข้อมูลในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งกำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นสะท้อนคลื่นมีวโค้งมีค่าเท่ากับ 360 mm โดยมีความลึกของแผ่นสะท้อนคลื่นมีวโค้งเท่ากับ 59.21 mm และมีความยาวโฟกัส 136.80 mm โดยมีกรวางตำแหน่งต่างๆของสายอากาศรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การกำหนดค่าการวางตำแหน่งของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดที่ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น



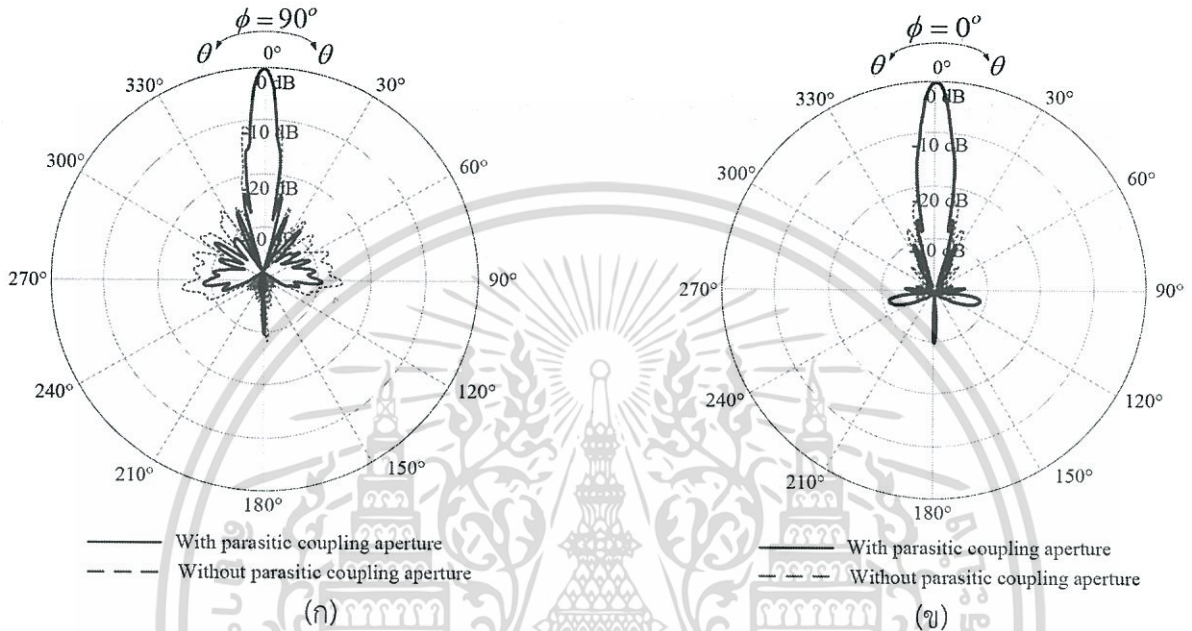
รูปที่ 4.6 ผลจำลอง $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น

ผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศ พบว่าค่า $|S_{11}|$ (dB) มีความถี่ที่เรโซแนนซ์ที่มีความถี่กลาง 10.22 GHz และมีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ (dB) ตั้งแต่ 10.04 ถึง 10.65 GHz ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งครอบคลุมตามความต้องการของระบบการสื่อสารย่านความถี่ X-Band (10.00 ถึง 10.50 GHz)

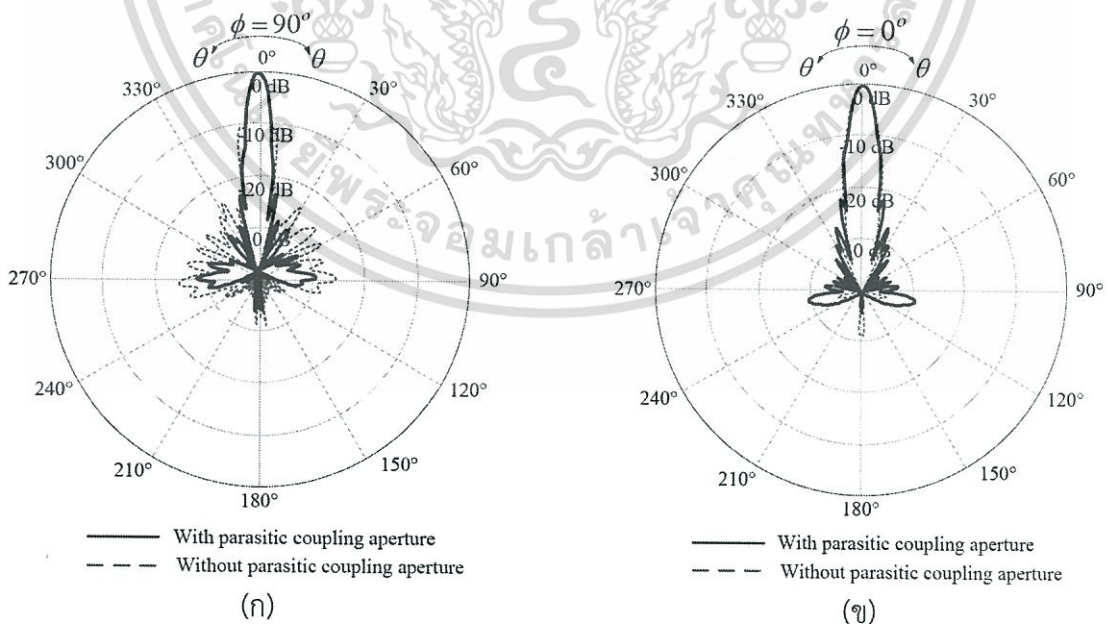
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดที่ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น

การจำลองผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นนั้นมีผลดังรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.9 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณดังสมการที่ 4.5 พบว่ามีค่าความกว้างลำคลื่นแคบเป็นไปในแนวทางเดียวกัน เป็นผลทำให้มีอัตราขยายของสายอากาศสูงดังหัวข้อ 4.4 ตามลำดับ

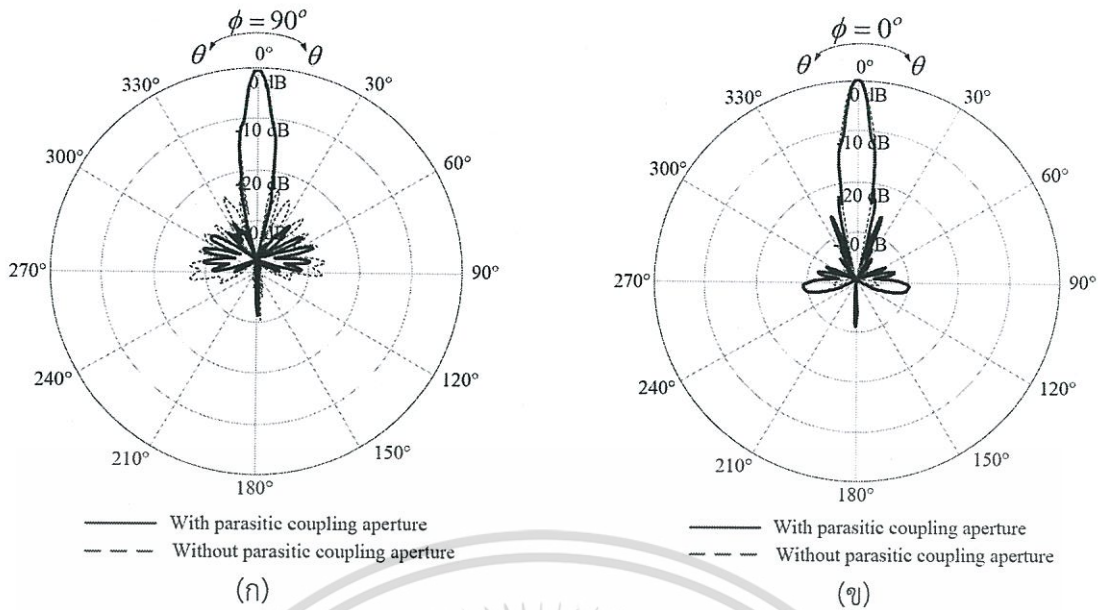


รูปที่ 4.7 ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด ที่ความถี่ 10.00 GHz (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า และ (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.8 ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด ที่ความถี่ 10.25 GHz (a) ระนาบสนามไฟฟ้า และ (b) ระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด ที่ความถี่ 10.50 GHz (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า และ (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

จากผลการคำนวณดังสมการที่ 4.9 พบว่ามีค่าความกว้างลำคลื่นเป็นไปในแนวทางเดียวกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.69° เป็นผลทำให้มีอัตราขยายของสายอากาศสูงตามลำดับ

$$BW = \frac{70\lambda}{D} \quad 4.9$$

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการจำลองความกว้างลำคลื่นของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดและสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวเมื่อใช้ป้อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่น

Antenna	10.00 GHz		10.25 GHz		10.50 GHz	
	E-plane	H-plane	E-plane	H-plane	E-plane	H-plane
Without parasitic	4.9°	5.9°	4.9°	6.0°	5.0°	5.9°
With parasitic	5.3°	5.8°	5.3°	5.5°	5.5°	5.0°

จากผลการจำลองการนำสายอากาศที่ได้ออกแบบมาใช้ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นในรูปที่ 4.7 ถึง รูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.1 คือสรุปผลการจำลองความกว้างลำคลื่น เมื่อสายอากาศป้อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่นในกรณีที่สายอากาศมีช่องเปิดแบบพาราซิติกและไม่มีช่องเปิดแบบพาราซิติก พบว่าสายอากาศช่องเปิดพาราซิติก (สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด) เมื่อป้อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่น มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีของสายอากาศช่องเปิดเดี่ยวเมื่อป้อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่น

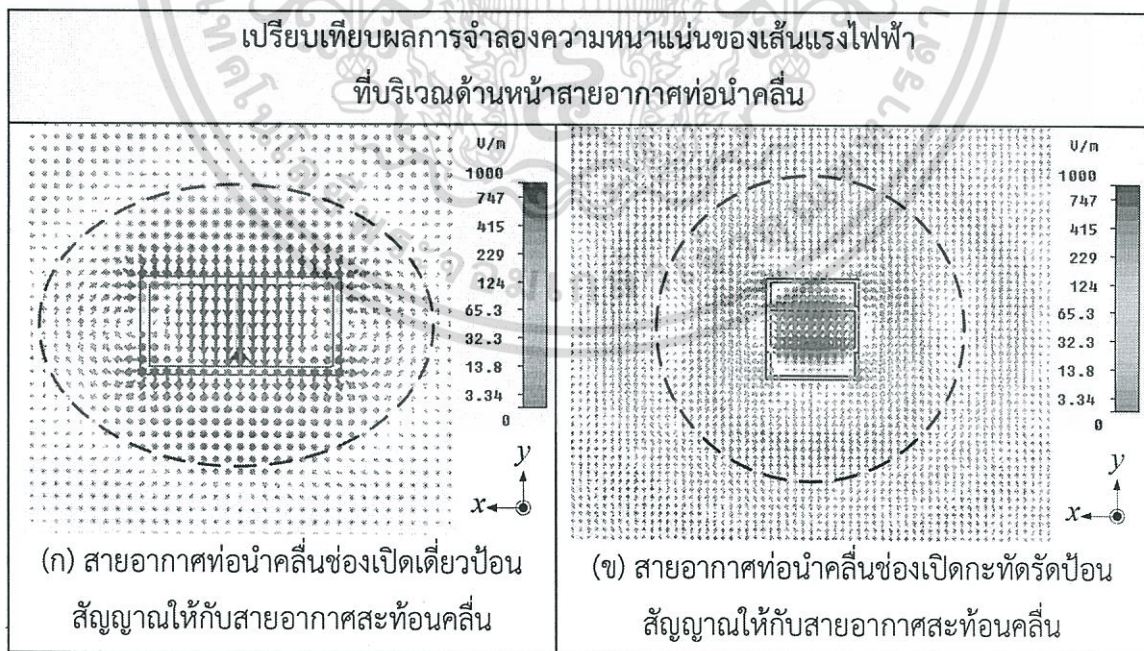
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการจำลองระดับลำคลื่นด้านข้าง (SLL) และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (F/B) ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดและสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวเมื่อใช้ป้อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่น

Antenna	10.00 GHz		10.25 GHz		10.50 GHz	
	SLL (dB)	F/B (dB)	SLL (dB)	F/B (dB)	SLL (dB)	F/B (dB)
Without parasitic	-11.2	26.3	-10.7	29.3	-22.9	27.3
With parasitic	-24.2	27.8	-21.6	32.0	-23.6	28.3

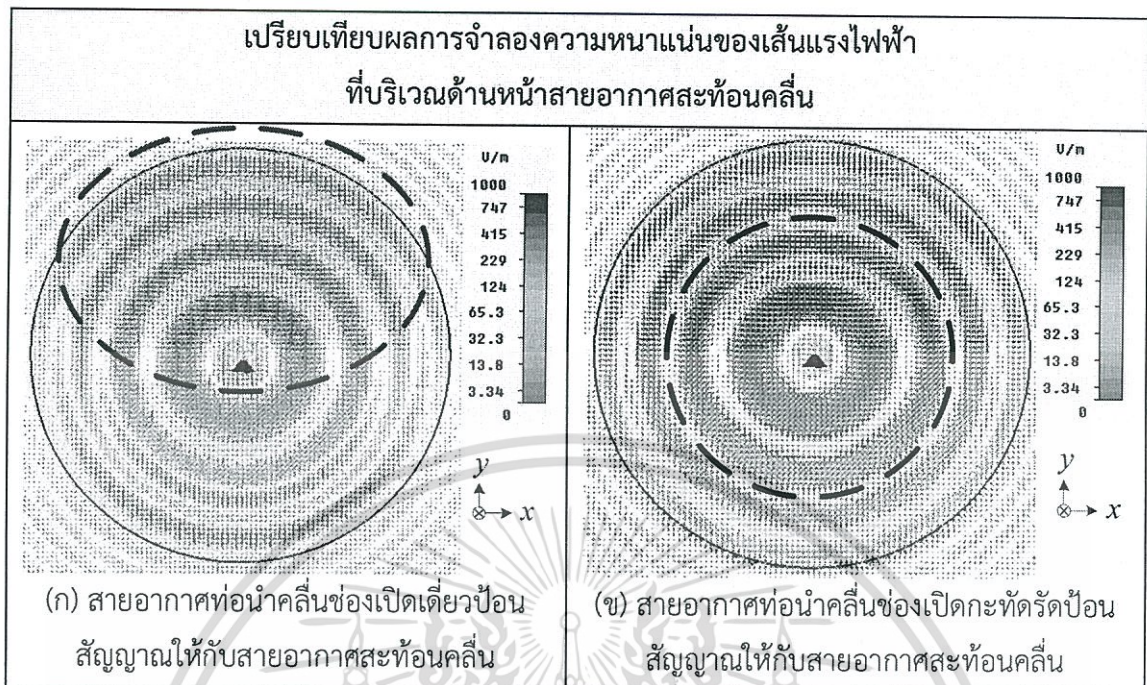
จากตารางที่ 4.2 คือผลการจำลองระดับลำคลื่นด้านข้าง (SLL) และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (F/B) เมื่อสายอากาศป้อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่นในกรณีที่มีสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดและสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว ซึ่งสรุปผลการจำลองมาจากรูปที่ 4.7 ถึง 4.9 พบว่าในกรณีของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด มีระดับลำคลื่นด้านข้าง (SLL: Side lobe level) ต่ำกว่าแบบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวตลอดย่านความถี่ และมีค่าอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (F/B; Front to Back ratio) ต่ำกว่าแบบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวตลอดย่านความถี่อีกด้วย

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้าที่บริเวณด้านหน้าสายอากาศท่อนำคลื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

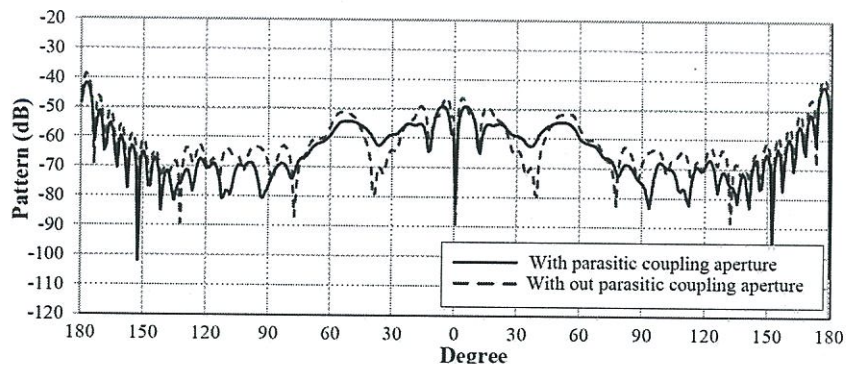
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลการจำลองความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้าที่บริเวณด้านหน้าสายอากาศสะท้อนคลื่น



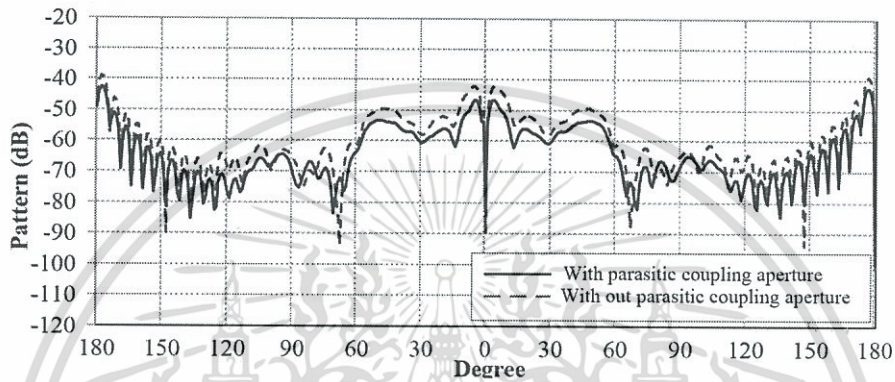
จากผลการเปรียบเทียบผลการจำลองความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้าที่บริเวณขอบของสายอากาศแบบท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวและสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดในตารางที่ 4.3 ในกรณีสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวที่ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น พบว่าความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้าที่บริเวณขอบของช่องเปิดของสายอากาศ ในตารางที่ 4.3 (ก) เส้นแรงไฟฟ้ามีความหนาแน่นสูงสุดอยู่ที่ตรงกลางของท่อนำคลื่น และเมื่อพิจารณาบริเวณที่ไกลออกมาจากเดิม (ในเส้นประ) พบว่าความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้าจากเดิมที่หนาแน่นตรงกลางท่อนำคลื่นจะค่อยๆ มีความหนาแน่นลดลงซึ่งมีลักษณะเป็นวงรี ส่งผลให้ความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้าที่ขอบด้านหน้าของสายอากาศสะท้อนคลื่นมีค่าไม่สม่ำเสมอดังตารางที่ 4.4 (ก) เมื่อเกิดลักษณะการแพร่กระจายคลื่นดังกล่าวส่งผลให้สายอากาศนี้มีความกว้างลำคลื่นที่ไม่สมมาตรกันและมีความกว้างลำคลื่นที่ต่างกันเล็กน้อย

ส่วนในกรณีสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น พบว่าความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้าที่บริเวณขอบของช่องเปิดของสายอากาศ ในตารางที่ 4.3 (ข) เส้นแรงไฟฟ้ามีความหนาแน่นสูงสุดอยู่ที่ตรงกลางของท่อนำคลื่น และเมื่อพิจารณาบริเวณที่ไกลออกมาจากเดิม (ในเส้นประ) พบว่าความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้าจากเดิมที่หนาแน่นตรงกลางท่อนำคลื่นจะค่อยๆ มีความหนาแน่นลดลงซึ่งมีลักษณะเป็นวงกลมสม่ำเสมอ ส่งผลให้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ขอบด้านหน้าของสายอากาศสะท้อนคลื่นมีค่าสม่ำเสมอดังตารางที่ 4.4 (ข) เมื่อเกิดลักษณะการแพร่กระจายคลื่นดังกล่าวส่งผลให้สายอากาศนี้มีความกว้างลำคลื่นที่สมมาตรกันและมีความกว้างลำคลื่นที่เท่ากัน

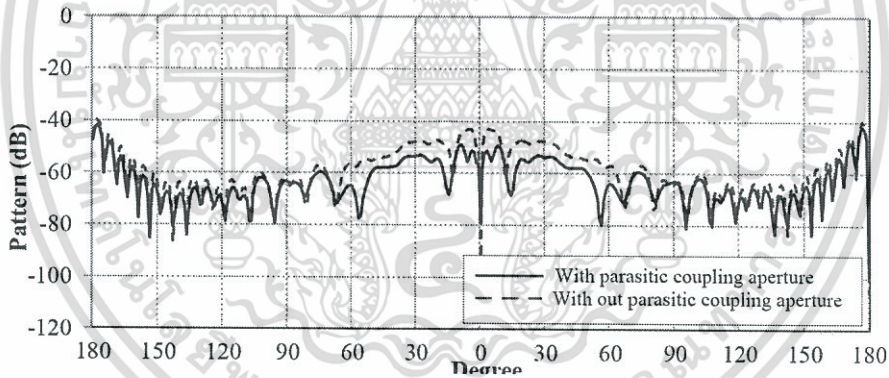
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบผลจำลอง Cross-polarization ของสายอากาศช่องเปิดพาราซีติก ที่ความถี่ (ก) 10.00 GHz (ข) 10.25 GHz และ (ค) 10.50 GHz

จากผลการจำลอง Cross-polarization ของสายอากาศสะท้อนคลื่นที่มีสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวและแบบท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด เป็นตัวบ่อนสัญญาณด้านหน้าในรูปที่ 4.10 พบว่าในกรณีของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดเป็นตัวบ่อนสัญญาณด้านหน้านั้นมีค่า cross-polarize ต่ำกว่าในกรณีของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวเป็นตัวบ่อนสัญญาณด้านหน้า และยังมีความ cross-polarize ต่ำกว่า -40 dB ดังนั้นจึงไม่สามารถนำผล cross-polarize มาเขียนพร้อมกับการเขียนผลของ co-polarize ได้ชัดเจน

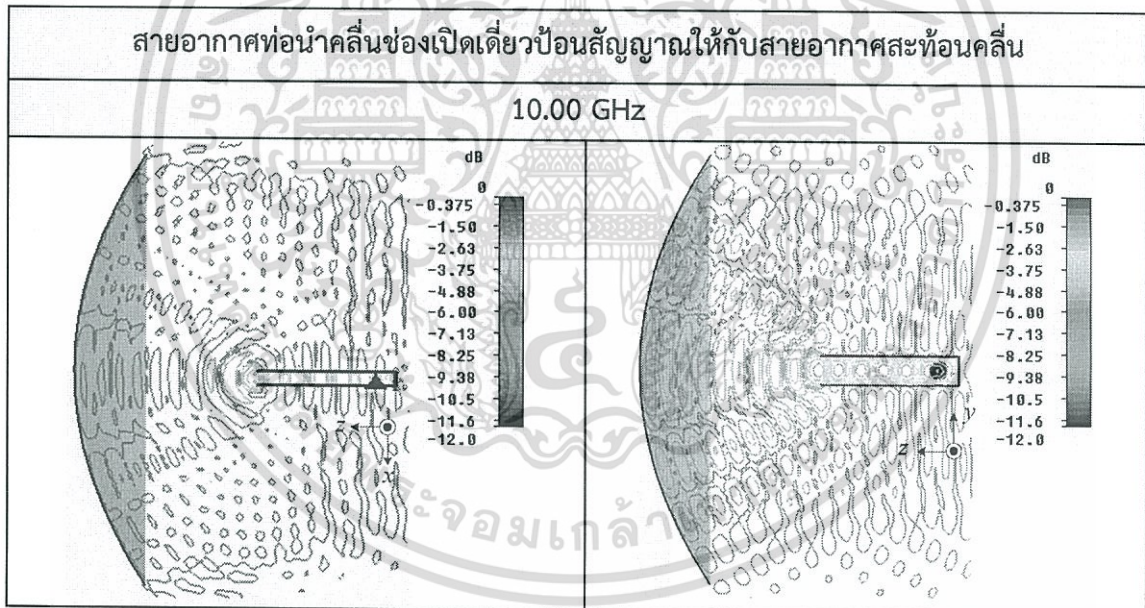
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การจำลองความเข้มสนามไฟฟ้า

จากวัตถุประสงค์หลักในการออกแบบสายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อต้องการออกแบบสายอากาศที่จะนำไปใช้ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นในระบบสื่อสารย่านความถี่ X-Band (10.00 ถึง 10.50 GHz) ซึ่งสายอากาศที่จะนำมาป้อนสัญญาณที่ด้านหน้า (Front feed) ให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นนั้นต้องมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สมมาตรกันทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก และโดยปกติแล้วจะพิจารณาค่าความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่จะนำมาป้อนสัญญาณที่ด้านหน้าจะต้องมีความสมมาตรตั้งแต่ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง หรือ HPBW (-3 dB) จนถึงค่าความกว้างลำคลื่น (-10 dB) ทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก จึงจะทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพสูงสุด

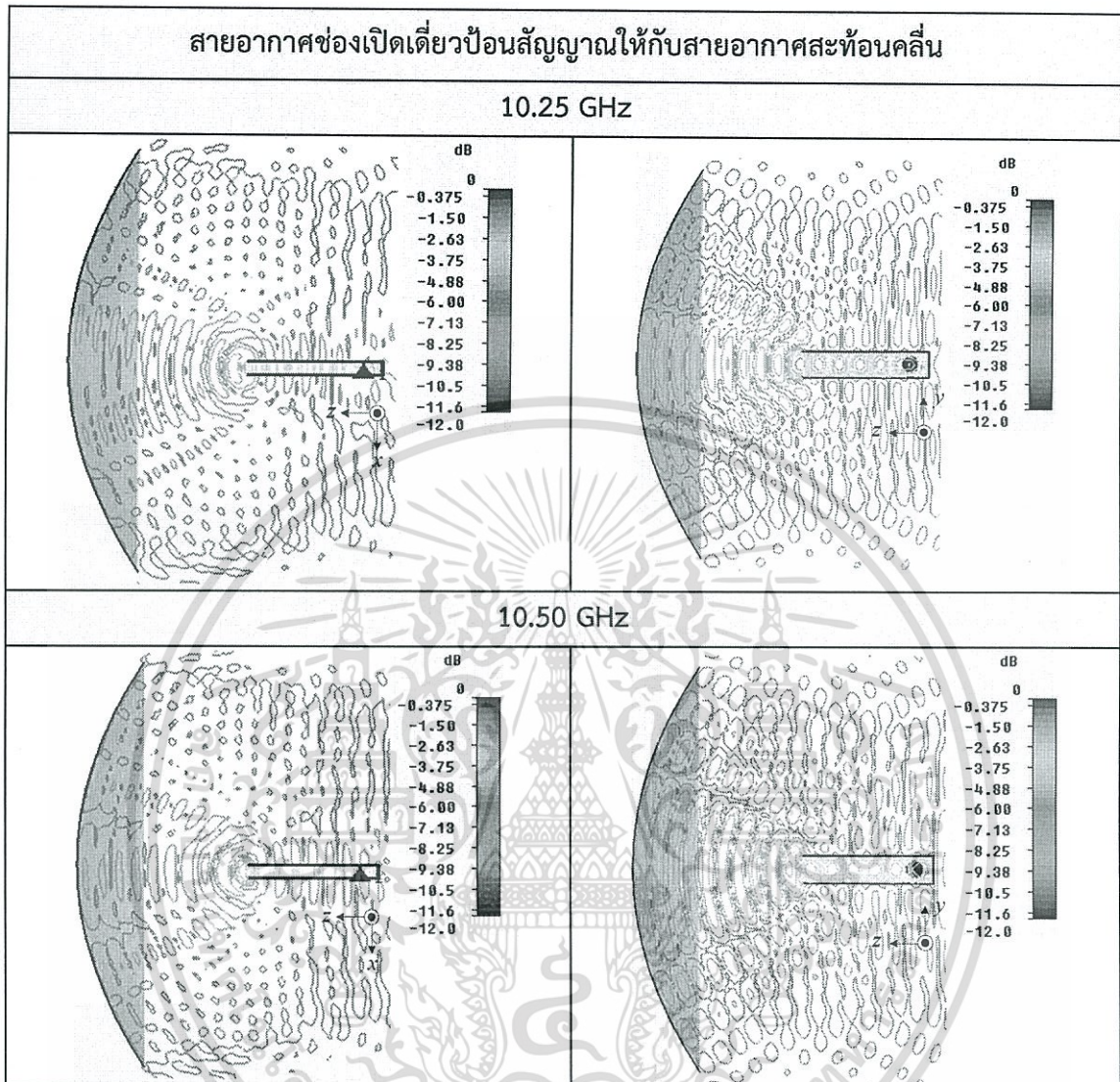
ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงต้องพิจารณาความสมมาตรของลำคลื่นของสายอากาศ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากผลการจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าในตารางที่ 4.5 และ 4.6 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.5 การจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าเมื่อนำสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวมาเป็นตัวป้อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

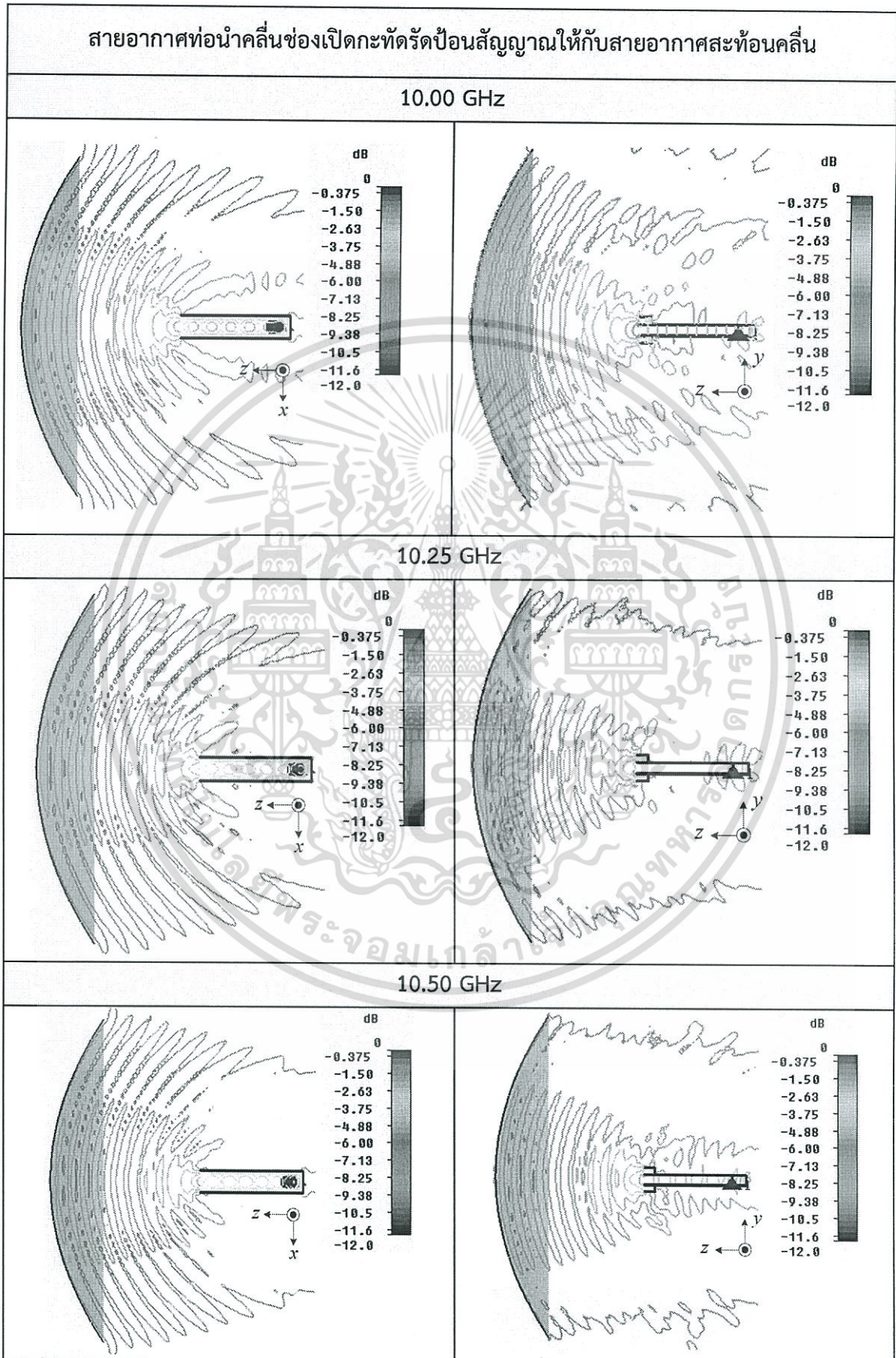
ตารางที่ 4.5 การจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าเมื่อนำสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวมาเป็นตัวบ่อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่น (ต่อ)



จากผลการจำลองความสมมาตรของลำคลื่นที่ -10 dB เมื่อนำสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวมาเป็นตัวบ่อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่นในตารางที่ 4.5 เมื่อเราทำการนอร์มอลไลซ์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ พบว่าที่ความเข้มสนามไฟฟ้าเท่ากับ -10 dB ทั้งในระนาบ yz และระนาบ xz มีแนวของเส้น Isoline ที่เกิดจากการนอร์มอลไลซ์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าแตกต่างกันมากเหมือนกันทั้งสามความถี่คือ 10.00 10.25 และ 10.50 GHz ตามลำดับ ซึ่งจากผลที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างกันของเส้น Isoline ที่เกิดจากการนอร์มอลไลซ์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้านี้ทำให้การทำงานของสายอากาศช่องเปิดเดี่ยวที่นำมาเป็นตัวบ่อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่นไม่เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงมีการออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าวดังแสดงผลการจำลองในตารางที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 การจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าเมื่อนำสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดมาเป็นตัวป้อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองความสมมาตรของลำคลื่นที่ -10 dB เมื่อนำสายอากาศช่องเปิดแบบพาราซิติคมาเป็นตัวป้อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่นในตารางที่ 4.6 พบว่าเส้น Isoline ที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าเท่ากับ -10 dB ทั้งในระนาบ yz และระนาบ xz นั้น มีแนวของเส้น Isoline ที่เกิดจากการนอร์มอลไลซ์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า จะวางตัวในลักษณะเดียวกันที่ขอบของแผ่นสะท้อนคลื่นเหมือนกันทั้งสามความถี่คือ 10.00 10.25 และ 10.50 GHz ตามลำดับ ซึ่งจากผลที่เกิดขึ้นจากเส้น Isoline -10 dB ทำให้การทำงานของสายอากาศช่องเปิดแบบพาราซิติคที่นำมาเป็นตัวป้อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่นนั้นมีการทำงานเต็มประสิทธิภาพ และยังช่วยยืนยันความถูกต้องของผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีความกว้างลำคลื่นสมมาตรกัน

4.7 อัตราขยายของสายอากาศ

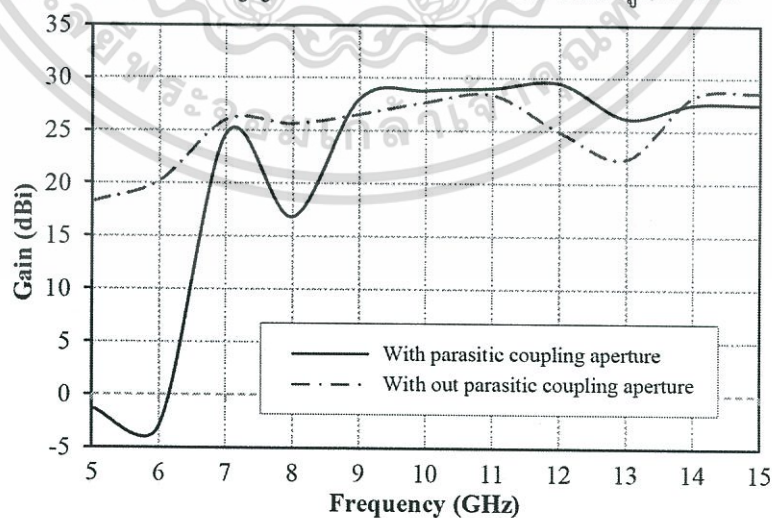
จากรูปที่ 4.5 คือการจำลองการทำงานของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด และสายอากาศสะท้อนคลื่นทำให้สายอากาศมีอัตราขยายสูงเมื่อกำหนดให้อัตราขยายของสายอากาศขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ด้านหน้างานของสายอากาศสะท้อนคลื่นหาได้จากสมการที่ 4.10 [40]

$$A = \pi r^2 \quad 4.10$$

เมื่อกำหนดให้ A คือพื้นที่ด้านหน้างานของสายอากาศสะท้อนคลื่น A คือรัศมีของแผ่นสะท้อนซึ่งมีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านหน้าของแผ่นสะท้อนคลื่น และสามารถหาอัตราขยายของสายอากาศได้จากสมการที่ 4.11 [40]

$$G(dBi) = 10 \log_{10} \left(\eta \frac{4\pi}{\lambda^2} A \right) \quad 4.11$$

เมื่อกำหนดให้ η คือประสิทธิภาพของสายอากาศปกติกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 50% ซึ่งผลจากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 4.11 พบว่ามีค่าอัตราขยายของสายอากาศใกล้เคียงกับผลการจำลองซึ่งผลจำลองอัตราขยายของสายอากาศป้อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่นดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบผลจำลองอัตราขยายสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดมาเป็นตัวป้อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองการนำสายอากาศที่ได้ออกแบบมาใช้ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นในรูปที่ 4.5 เมื่อพิจารณาที่ย่านความถี่ 10.00 GHz ถึง 10.50 GHz พบว่าสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด มีอัตราขยายของสายอากาศสูงกว่าในกรณีของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวคือที่ 10.00 GHz มีอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 28.83 dBi ที่ 10.25 GHz มีอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 28.62 dBi และที่ 10.50 GHz มีอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 28.41 dBi ตามลำดับ

4.8 บทสรุป

ในการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศสะท้อนคลื่นนั้น เริ่มจากออกแบบสายอากาศสะท้อนคลื่น ในย่าน X-Band ที่มีความถี่กลางคือ 10.25 GHz โดยกำหนดค่า F/D ไวที่ 0.38 และเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 360 mm แล้วคำนวณหาระยะ Focus ของสายอากาศสะท้อนคลื่นซึ่งมีความยาวโฟกัสเท่ากับ 136.80 mm จากนั้นคำนวณหาสวนโค้งของสายอากาศสะท้อนคลื่นจากสมการพาราโบลา สุดท้ายจึงนำสมการพาราโบลาและระยะโฟกัส ที่ได้ไป plot กราฟ โดยใช้ค่า x ตั้งแต่ 0 ถึง 180.00 mm ระยะโฟกัสเท่ากับ 136.80 mm เพื่อหาค่าในแนวนอน y เมื่อได้ระยะในแกน x และ y แล้วให้ plot กราฟ และหมุนในแนวแกน z ก็จะได้สายอากาศสะท้อนคลื่นที่มีค่า F/D เท่ากับ 0.38 เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 360 mm และความยาวโฟกัสเท่ากับ 136.80 mm

ในบทนี้ได้รวบรวมการออกแบบสายอากาศสะท้อนคลื่น และผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น ซึ่งประกอบด้วย $|S_{11}|$ (dB) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ระดับลำคลื่นด้านข้าง (SLL: Side lobe level) อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (F/B; Front to Back ratio) และอัตราขยายของสายอากาศ

จากผลการจำลองการทำงานของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น พบว่าค่า $|S_{11}|$ (dB) มีความถี่ที่เรโซแนนซ์ที่ความถี่กลาง 10.22 GHz และมีค่า $|S_{11}|$ (dB) ตั้งแต่ 10.04 ถึง 10.65 GHz ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งครอบคลุมตามความต้องการของระบบการสื่อสารย่านความถี่ X-Band (10.00 ถึง 10.50 GHz) ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของผลการจำลองการนำสายอากาศที่ได้ออกแบบมาใช้ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น พบว่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กมีค่าแตกต่างกันน้อยมากคือที่ความถี่ต่ำ (10.00 GHz) มีความกว้างลำคลื่นต่างกันเท่ากับ 0.5° ที่ความถี่กลาง (10.00 GHz) มีความกว้างลำคลื่นต่างกันเท่ากับ 0.2° และที่ความถี่สูง (10.00 GHz) มีความกว้างลำคลื่นต่างกันเท่ากับ 0.5° ส่วนระดับลำคลื่นด้านข้าง (SLL: Side lobe level) และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (F/B; Front to Back ratio) พบว่าในกรณีของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด มีระดับลำคลื่นด้านข้าง (SLL) ต่ำกว่าแบบ

สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวตลอดย่านความถี่ และมีค่าอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (F/B) ต่ำกว่าแบบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวตลอดย่านความถี่อีกด้วย

จากผลการจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าเมื่อนำสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดมาเป็นตัวป้อนสัญญาณให้สายอากาศสะท้อนคลื่น พบว่ามีความเข้มสนามไฟฟ้าเท่ากับ -10 dB ทั้งในระนาบ yz และระนาบ xz นั้น มีแนวของความเข้มสนามไฟฟ้าวางตัวในลักษณะเดียวกันที่ขอบของแผ่นสะท้อนคลื่น เหมือนกันตลอดย่านความถี่ ซึ่งจากผลที่เกิดขึ้นจากความเข้มสนามไฟฟ้าที่ -10 dB นั้น ช่วยยืนยันความถูกต้องของผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีความกว้างลำคลื่นสมมาตรกันอีกด้วย และอัตราขยายของสายอากาศที่ย่านความถี่ 10.00 GHz ถึง 10.50 GHz พบว่าที่ 10.00 GHz มีอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 28.83 dBi – 28.41 dBi ที่ 10.00 GHz ถึง 10.50 GHz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศ

5.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดเพียงอย่างเดียว และการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด ร่วมกับสายอากาศสะท้อนคลื่นในย่านความถี่ X-Band (10.00 ถึง 10.50 GHz) จากการออกแบบโดยโปรแกรมการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์ดังผลการจำลองในเนื้อหาบทที่ 3 และ 4 เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลอง และสอดคล้องกับการผลการทดสอบ

ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะประกอบไปด้วยสองส่วน ส่วนแรกคือสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดเพียงอย่างเดียว และส่วนที่สองคือสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น ซึ่งทั้งสองส่วนประกอบด้วยพารามิเตอร์ของสายอากาศ ผลการทดสอบ $|S_{11}|$ (dB) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยายของสายอากาศ โดยการทดสอบในห้องไร้การสะท้อนและการทดสอบในที่โล่ง ส่วนสุดท้ายของบทที่ 5 คือบทสรุป

5.2 ขั้นตอนการทดสอบสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น

ขั้นตอนการทดสอบสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นมีการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศหลักๆอยู่ทั้งหมด 3 ผลการทดสอบคือ การทดสอบ $|S_{11}|$ (dB) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ ซึ่งในขั้นตอนการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นสามารถเก็บผลการทดสอบเพิ่มได้อีก 2 ผลการทดสอบคือ ค่า F/B และ SLL ซึ่งจะทดสอบเพิ่มเติมเฉพาะกรณีที่สายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น ดังผลการทดสอบในหัวข้อที่ 5.4.2

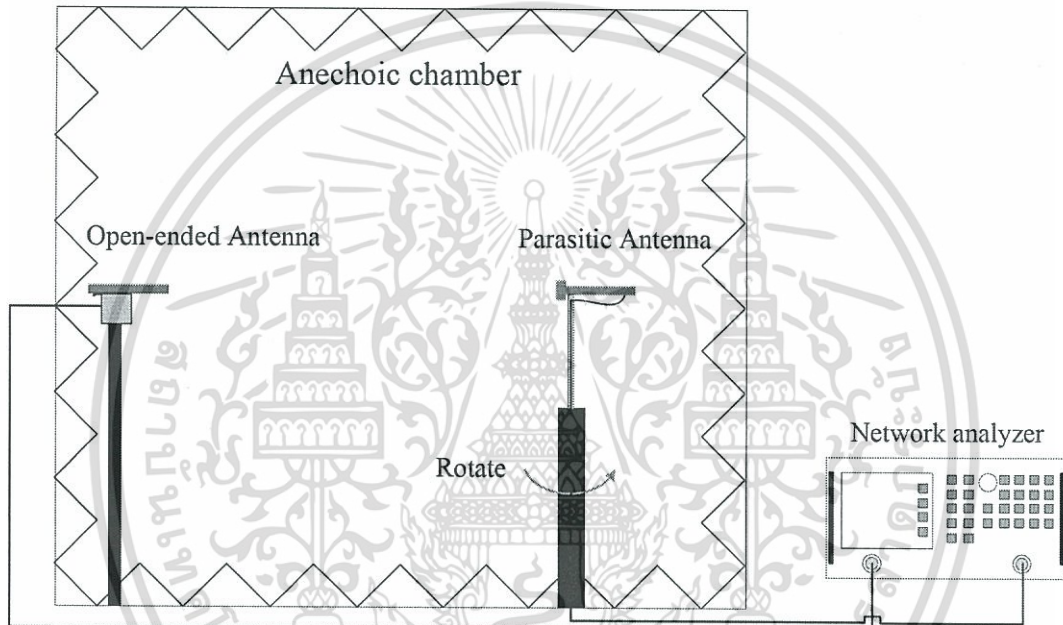
5.2.1 ขั้นตอนการทดสอบ $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศ

การทดสอบ $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศช่องเปิดแบบพาราซิติคย่านความถี่ X-Band ได้ทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายยี่ห้อ Agilent รุ่น 8720C สำหรับการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยาย ได้ทำการทดสอบในห้องไร้การสะท้อน (Anechoic chamber) ซึ่งการทดสอบเริ่มต้นจากการนำสายอากาศช่องเปิดแบบพาราซิติคมาเชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย เพื่อทดสอบพารามิเตอร์ S

5.2.2 ขั้นตอนการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด ซึ่งทำการทดสอบในห้องไร้การสะท้อนเพื่อลดสัญญาณรบกวน โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคือ เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายยี่ห้อ Agilent รุ่น 8720C เช่นเดียวกับการทดสอบอิมพีแดนซ์ ดังแสดงสภาพแวดล้อมการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศช่องเปิดพาราซิติคในรูปที่ 5.1

ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ มีการทดสอบโดยการเก็บค่าพารามิเตอร์ $|S_{21}|$ (dB) หรือ $|S_{12}|$ (dB) โดยใช้สายอากาศส่งเป็นสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวที่มีโพลาริซแบบเชิงเส้น ขณะที่ตัวรับคือสายอากาศช่องเปิดพาราซิติคที่ต้องการทดสอบที่ถูกเชื่อมต่อกับคอนเนคเตอร์ชนิด SMA ดังแสดงสภาพแวดล้อม และแผนผังการทดสอบในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แผนผังการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

สำหรับรูปที่ 5.1 คือแผนผังการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น ที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศบนพื้นที่สนามระยะไกล (R) และขนาดช่องเปิดของสายอากาศเท่ากับ 37.80 mm ดังนั้นระยะสนามไกลที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 97.63 mm

5.2.3 ขั้นตอนการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ

ในส่วนของการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น วิธีทดสอบโดยการเก็บค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านของสายอากาศเป็นวิธีการทั่วไปที่ใช้ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ และการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ ด้วยวิธีการทดสอบอัตราขยายส่งผ่าน วิธีที่ใช้

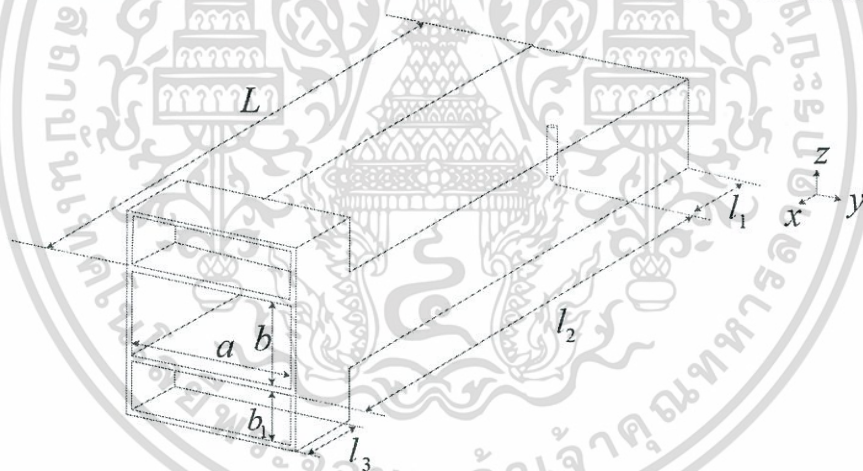
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบคือ การคำนวณจากสมการของฟรีส (Friis formula) และสมการอัตราขยายสมบูรณ์ (Absolute gain) วิธีนี้สามารถดัดแปลงขั้นตอนการทดสอบจากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยการเก็บค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านของสายอากาศมาคำนวณในวิทยานิพนธ์นี้

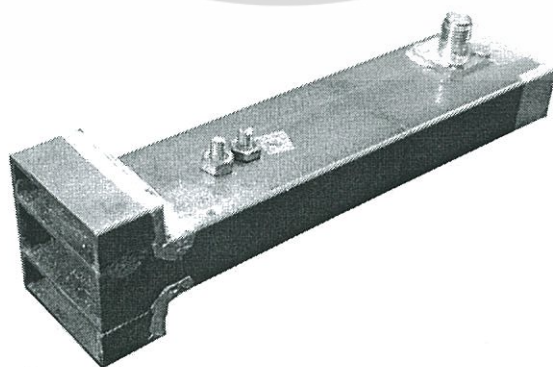
5.3 สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด

ในหัวข้อนี้นำเสนอการสร้างสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด เพื่อใช้ในการทดสอบ และยืนยันผลที่ได้จากการวิเคราะห์ที่ระบุไว้ในบทที่ 3 โดยสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดนี้ ถูกสร้างขึ้นจากท่อนำคลื่นทองเหลืองที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมเป็นเนื้อทองเหลืองที่มีค่าสภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity หรือ Specific conductance) เท่ากับ $\sigma = 15.2 \times 10^6 \text{ S/m}$ ท่อนำคลื่นมีความหนาของเนื้อทองเหลือง 1.15 mm

การออกแบบและสร้างสายอากาศนั้นเริ่มจากการสร้างสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวที่มีขนาด $25.40 \times 115.00 \times 12.70 \text{ mm}^3$ (กว้าง \times ยาว \times สูง) แล้วนำท่อนำคลื่นทองเหลืองที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาด $25.40 \times 13.07 \times 7.65 \text{ mm}^3$ จำนวนสองตัวมาประกบที่บริเวณขอบด้านบนและล่างในแนว xz-plane ของช่องเปิดเดี่ยว ซึ่งมีขนาดโดยรวมของสายอากาศคือ $25.40 \times 115.00 \times 28.00 \text{ mm}^3$ ดังโครงสร้างของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 โครงสร้างของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด



รูปที่ 5.3 รูปถ่ายสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

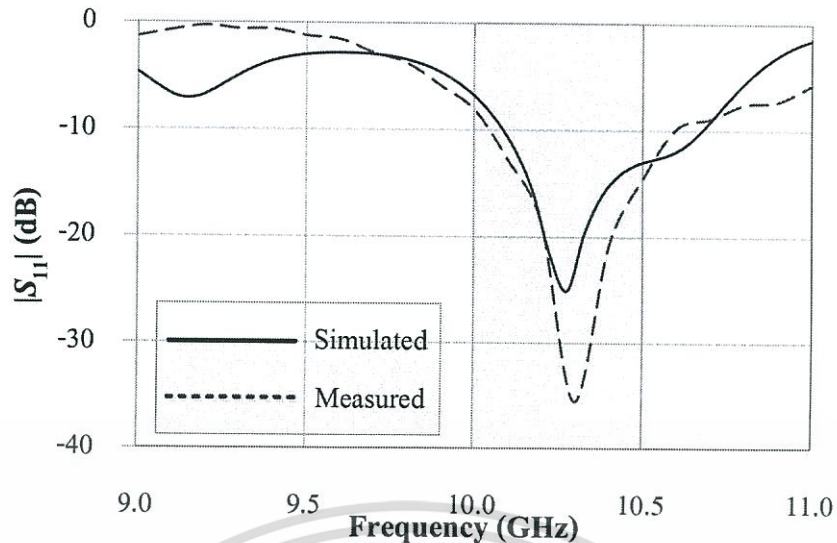
จากโครงสร้างของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดในรูปที่ 5.2 และในรูปที่ 5.3 ค่าความกว้างของสายอากาศ (a) และความสูงของสายอากาศ (b) เท่ากับ 23.10 mm และ 11.55 mm ระยะป้อนสัญญาณของโพรบ (l_1) เท่ากับ 15.85 mm ความยาวของสายอากาศ (L) เท่ากับ 115 mm ความลึกของช่องเปิดพาราซิติค (l_2) และความสูงของช่องเปิดพาราซิติค (b_1) มีค่ากับ 87.54 mm และ 5.80 mm ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.2 จากรูปถ่ายของสายอากาศช่องเปิดแบบพาราซิติคที่ออกแบบและสร้างจากท่อนำคลื่นทองเหลืองที่มีพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าในรูปที่ 5.3 พบว่ามีการติดตั้งตัวปรับจูนความถี่เพิ่มเติม 2 ตำแหน่งเนื่องจากการสร้างสายอากาศที่ความถี่สูงนั้นผลการทดสอบมีความคลาดเคลื่อน ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดของพารามิเตอร์ที่มีขนาดเล็กในหน่วย mm ดังนั้นในการสร้างสายอากาศจึงต้องอาศัยการเพิ่มตัวปรับจูนค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศซึ่งมี 2 ตัวคือตัวปรับเลื่อนความถี่ และตัวปรับความกว้างความถี่ และจากการทดสอบพบว่า การเพิ่มตัวปรับจูนค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศนี้มีผลกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศน้อยมาก เนื่องจากตำแหน่งที่เพิ่มตัวปรับจูนค่าอิมพีแดนซ์อยู่ห่างจากช่องเปิดของสายอากาศ

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
a	ความกว้างของสายอากาศ	23.10
b	ความสูงของสายอากาศ	11.55
L	ความยาวของสายอากาศ	115.00
l	ความสูงของโพรบ	7.31
l_1	ระยะป้อนสัญญาณของโพรบ	15.85
l_2	ความลึกของช่องเปิดจนถึงตำแหน่งโพรบ	87.54
l_3	ความลึกของช่องเปิดพาราซิติค	11.92
b_1	ความสูงของช่องเปิดพาราซิติค	5.80

5.3.1 ผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด

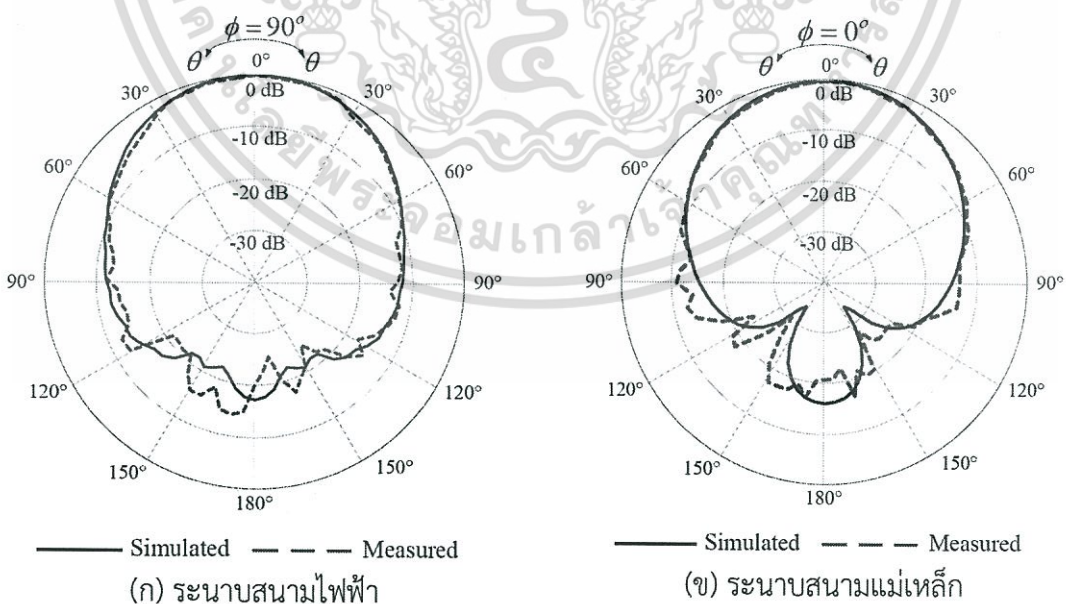
ผลจำลอง $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศที่ได้นำเสนอมีการเรโซแนนซ์ที่ความถี่กลาง 10.22 GHz และมีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ (dB) ตั้งแต่ 10.07 ถึง 10.67 GHz สำหรับในส่วนของผลการทดสอบ $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศที่มีการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 10.25 GHz และมีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ (dB) ตั้งแต่ 10.05 ถึง 10.55 GHz ดังรูปที่ 5.4 ซึ่งครอบคลุมตามความต้องการของระบบการสื่อสารย่านความถี่ X-Band



รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลทดสอบ $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด

5.3.2 ผลการทดสอบแบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด

ในหัวข้อนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบ E-plane และ H-plane มีความกว้างครึ่งกำลังของลำคลื่น (Half-power beamwidth: HPBW) ดังรูปที่ 5.5 และความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่ -10 dB ดังรูปที่ 5.5 บนระนาบ E-plane และ H-plane ที่ความถี่ 10.00 10.25 และ 10.50 GHz ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่ามีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางตลอดย่านความถี่ใช้งาน 10.00 ถึง 10.50 GHz



รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 10.25 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 สรุปการเปรียบเทียบผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด

The antenna	10.25 GHz			
	HPBW (-3 dB)		Beamwidth (-10 dB)	
	E-plane	H-plane	E-plane	H-plane
Simulated	70°	70°	137°	137°
Measured	70°	70°	135°	135°

จากผลการเปรียบเทียบผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด ในตารางที่ 5.2 พบว่าที่ความถี่ 10.25 GHz ซึ่งเป็นความถี่กลางที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง -3 dB และความกว้างลำคลื่นที่ -10 dB สมมาตรกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กเท่ากับ 70° และ 137° ตามลำดับ และจากผลการทดสอบสายอากาศ มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง -3 dB และความกว้างลำคลื่นที่ -10 dB สมมาตรกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กเท่ากับ 70° และ 135° ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ในการออกแบบสายอากาศเพื่อใช้ป้อนสัญญาณด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น

5.3.3 ผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด

ในส่วนของการทดสอบอัตราขยายสายอากาศ ใช้สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวเป็นสายอากาศส่ง (G_t) และใช้สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดเป็นสายอากาศรับ (G_r) อัตราขยายสายอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.1 และ 5.2 [38]

$$G_r = P_r - P_t - G_t + L_s + L_r + L_f \quad 5.1$$

เมื่อกำหนดให้

P_r คือกำลังงานด้านรับ (dBm)

P_t คือกำลังงานด้านส่ง (dBm)

L_f คือการสูญเสียจากสายนำสัญญาณด้านส่ง (dB)

L_r คือการสูญเสียจากสายนำสัญญาณด้านรับ (dB)

L_s คือการสูญเสียจากระยะทาง (dB)

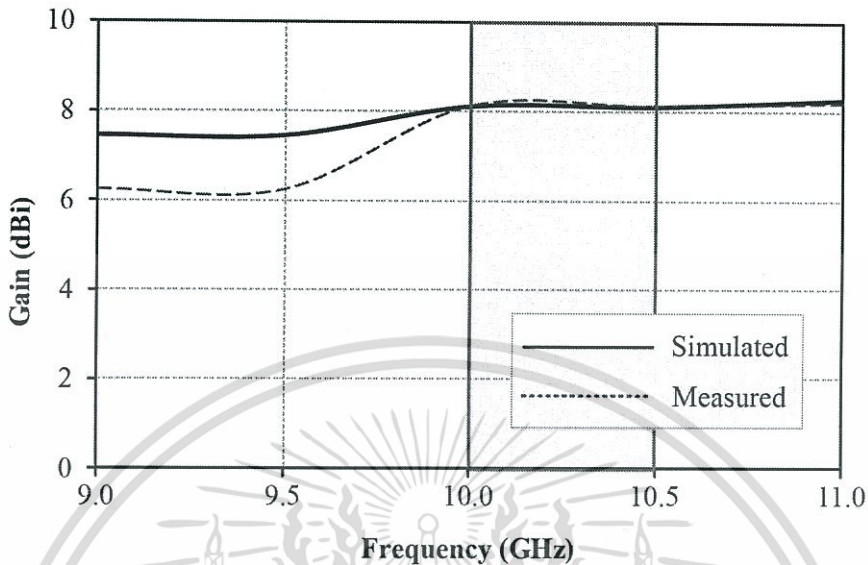
R คือระยะทางระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่ง

$$L_s = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad 5.2$$

ผลจำลองอัตราขยายสายอากาศสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดที่ได้นำเสนอที่ความถี่ 10.00 10.25 และ 10.50 GHz มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 8.12 8.13 และ 8.15 dBi ตามลำดับ ในส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของผลทดสอบอัตราขยายที่ความถี่ 10.00 10.25 และ 10.50 GHz มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 8.12 8.24 และ 8.27 dBi ตามลำดับ และมีอัตราขยายเฉลี่ยที่ใช้งานในระบบการสื่อสารย่านความถี่ X-Band มากกว่า 8.21 dBi ดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบผลจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัด

5.4 สายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น

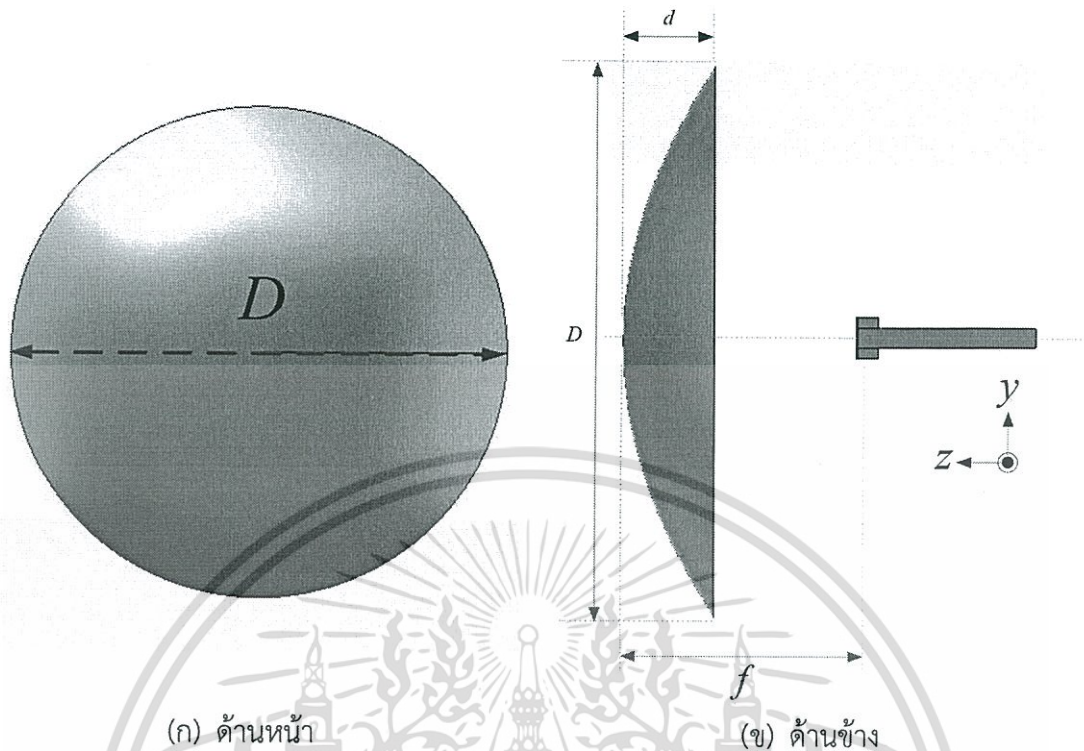
การวางตำแหน่งในการทดสอบสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น เมื่อกำหนดให้พารามิเตอร์ของสายอากาศสะท้อนคลื่นประกอบด้วย D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศสะท้อนคลื่น d คือความลึกของสายอากาศสะท้อนคลื่น และ f คือระยะโฟกัสของสายอากาศสะท้อนคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 5.8 และตารางที่ 5.3

ซึ่งจากรูปที่ 5.7 การวางตำแหน่งในการทดสอบสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น พบว่าช่องเปิดของสายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้ถูกวางในแนวอนตามแกน $+z$ โดยจากโครงสร้างสายอากาศนี้มีการวางตัวของอิเล็กทริกโพรบตั้งขึ้นในแนวแกน y

ตารางที่ 5.3 พารามิเตอร์ของสายอากาศสะท้อนคลื่น

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศสะท้อนคลื่น	360.00
d	ความลึกของสายอากาศสะท้อนคลื่น	59.21
f	ระยะโฟกัสของสายอากาศสะท้อนคลื่น	136.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 การวางตำแหน่งในการทดสอบสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น

5.4.1 การทดสอบ $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น

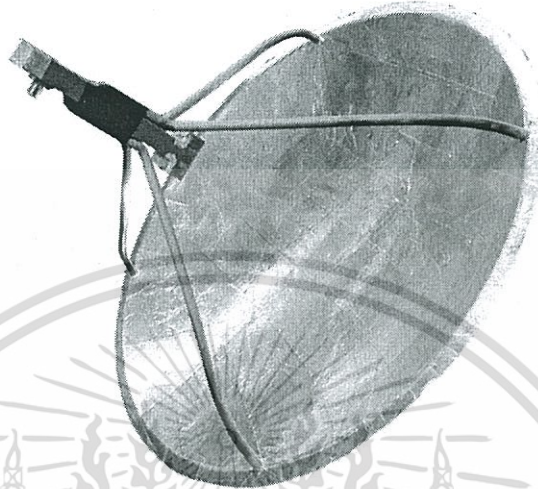
จากหัวข้อผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดเพียงอย่างเดียวซึ่งได้นำเสนอในบทที่ 4 พบว่าค่า $|S_{11}|$ (dB) มีการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 10.22 GHz และมีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ (dB) ตั้งแต่ 10.04 ถึง 10.65 GHz

เมื่อสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายยี่ห้อ Agilent รุ่น 8720C และได้ทำการทดสอบในห้องไร้การสะท้อน (Anechoic chamber) ซึ่งการทดสอบเริ่มต้นจากการนำสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นมาเชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

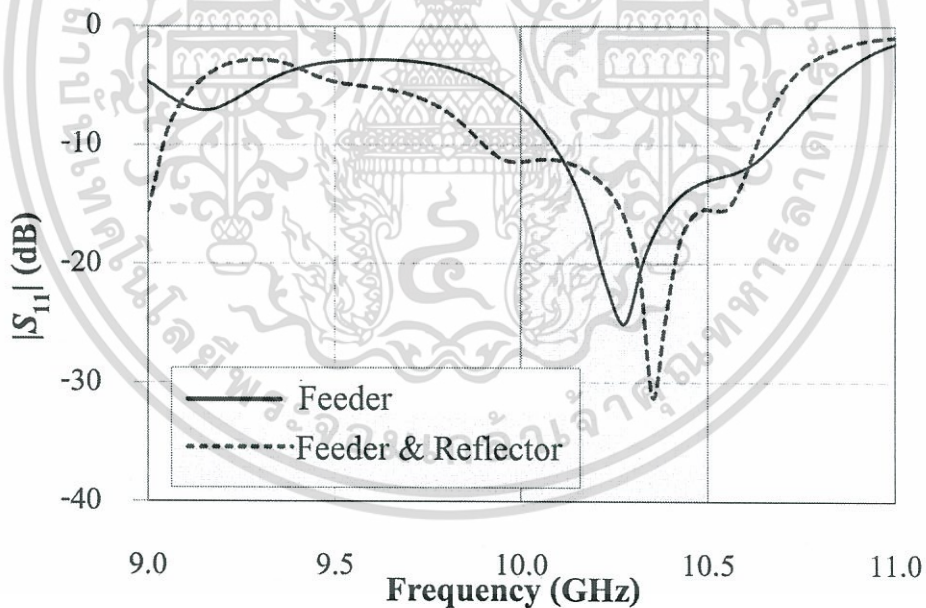
จากการออกแบบโครงสร้างสายตามตารางที่ 5.3 ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศสะท้อนคลื่นเท่ากับ 360.00 mm ความลึกของสายอากาศสะท้อนคลื่น 59.21 mm และระยะโฟกัสของสายอากาศสะท้อนคลื่น 136.80 mm เมื่อนำมาสร้างเป็นสายอากาศสะท้อนคลื่นจะได้โครงสร้างสายอากาศดังรูปที่ 5.8 โดยโครงสร้างแผ่นสะท้อนคลื่นถูกออกแบบมาจากการขึ้นรูปด้วยไฟเบอร์กราส ที่มีความหนา 2.0 mm และใช้แผ่นฟิล์มอลูมิเนียมที่มีความหนา 0.030 mm ปิดทับพื้นผิวโค้งทั้งหมด ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงระยะที่คลื่นเดินทางเข้าไปในตัวนำได้หรือค่า skin depth แล้วพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะเท่ากับ $\delta = 0.8348 \mu\text{m}$ เมื่อกำหนดให้ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของอลูมิเนียมเท่ากับ $\rho = 2.82 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของอลูมิเนียมเท่ากับ $\mu = 1.256665 \times 10^{-6} \text{H/m}$ ที่ความถี่ 10.25 GHz ซึ่งจากผลการคำนวณพบว่าความหนาของแผ่นฟิล์มอลูมิเนียมที่นำมาใช้งานที่ความถี่ 10.25 GHz ได้



รูปที่ 5.8 รูปถ่ายสายอากาศสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น



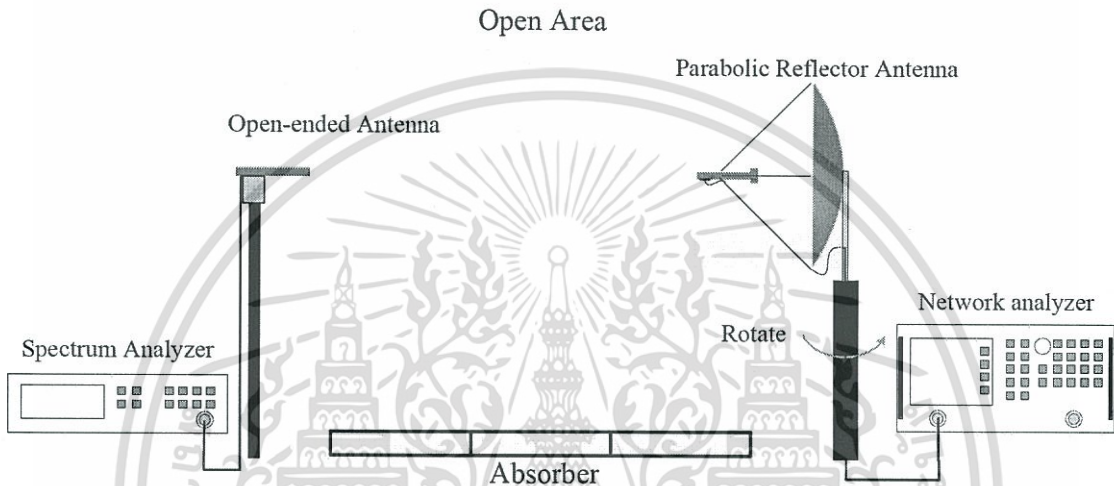
รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบ $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น

จากผลการทดสอบค่า $|S_{11}|$ (dB) ในรูปที่ 5.9 พบว่า $|S_{11}|$ (dB) ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ 9.98 ถึง 10.51 GHz ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่ตามความต้องการของระบบการสื่อสารย่านความถี่ X-Band (10.00 GHz – 10.50 GHz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

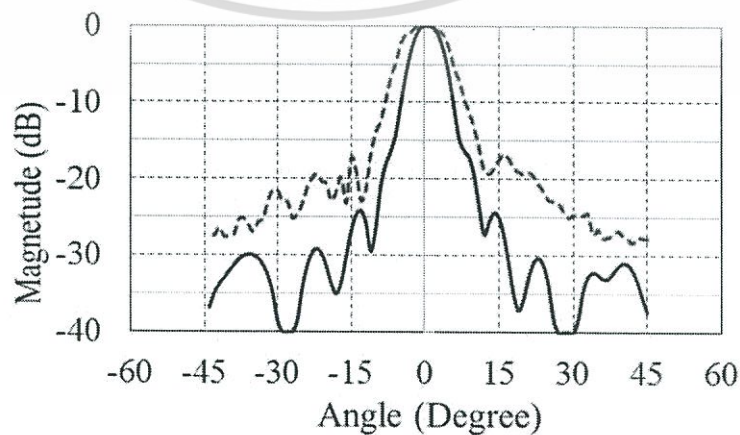
5.4.2 การทดสอบแบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบ E-plane และ H-plane มีความกว้างครึ่งกำลังของลำคลื่น (Half-power beamwidth: HPBW) ดังรูปที่ 5.10 ถึง 5.12 และความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่ -10 dB ดังตารางที่ 5.4 บนระนาบ E-plane และ H-plane ที่ความถี่ 10.00 10.25 และ 10.50 GHz ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางตลอดย่านความถี่ใช้งาน 10.00 ถึง 10.50 GHz



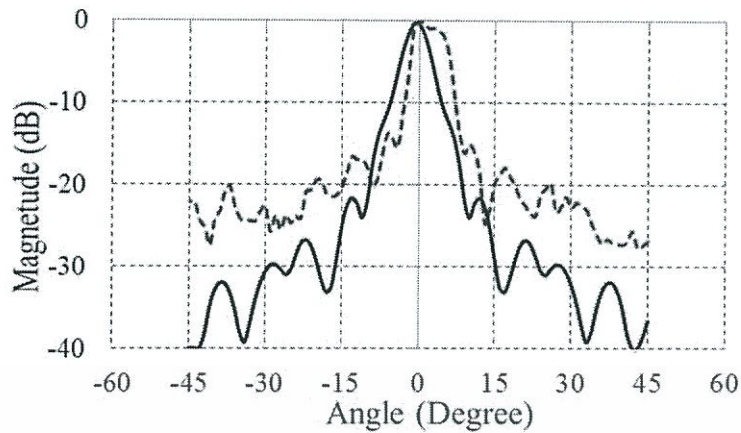
รูปที่ 5.10 แผนผังการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสายอากาศ

จากรูปที่ 5.10 แผนผังการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น ที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศบนพื้นที่สนามระยะไกล (R) และขนาดช่องเปิดของสายอากาศเท่ากับ 360 mm สนามระยะไกลมากกว่า 8.85 m เนื่องจากระยะการทดสอบมีระยะไกลมากดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงต้องทดสอบในที่โล่งที่ระยะ 9.0 m และมีการวางแผ่นดูดซับคลื่น (Absorber) ที่บริเวณกึ่งกลางเพื่อลดสัญญาณที่เกิดจากการสะท้อนที่พื้นในระยะไกล ดังรูปที่ 5.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความถี่ 10.25 GHz

จากผลการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 10.25 GHz ในรูปที่ 5.11 พบว่าสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้สายอากาศสะท้อนคลื่น มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทาง และมีความกว้างลำคลื่นใกล้เคียงกันคือในระนาบสนามไฟฟ้ามีความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 10.0° และในระนาบสนามแม่เหล็กมีความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 5.0° ซึ่งมีความกว้างลำคลื่นแคบเนื่องจากเป็นสายอากาศชนิดมีแผ่นสะท้อนคลื่น ซึ่งได้สรุปผลลงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบความกว้างลำคลื่นของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้สายอากาศสะท้อนคลื่น

The antenna	10.25 GHz	
	E-plane	H-plane
Simulated	5.3°	5.5°
Measured	10.0°	5.0°

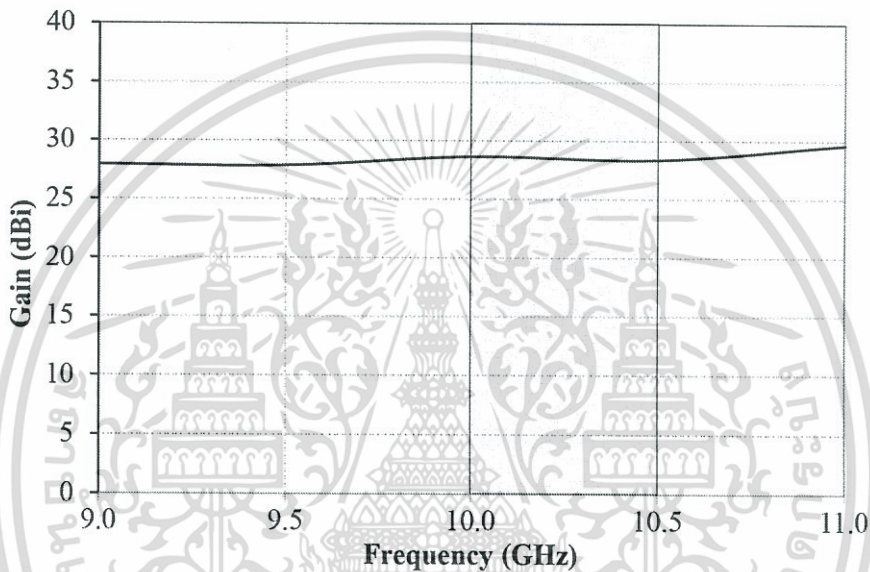
5.4.3 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้สายอากาศสะท้อนคลื่น

ในส่วนของการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้สายอากาศสะท้อนคลื่น ได้ใช้สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยวเป็นสายอากาศส่ง (G_r) และใช้สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้สายอากาศสะท้อนคลื่นเป็นสายอากาศรับ (G_r) อัตราขยายสายอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.3 [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A = \frac{(\pi D)^2}{\lambda^2} \quad 5.3$$

ผลจำลองอัตราขยายสายอากาศที่ได้นำเสนอที่ความถี่ 10.00 10.25 และ 10.50 GHz ตามลำดับ มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 28.83 28.62 และ 28.41 dBi ในส่วนของผลทดสอบอัตราขยายที่ความถี่ 10.00 10.25 และ 10.50 GHz ตามลำดับ MHz มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 28.82 28.55 และ 28.40 dBi และมีอัตราขยายเฉลี่ยที่ใช้งานในระบบการสื่อสารย่านความถี่ X-Band (10.00 ถึง 10.50 GHz) มากกว่า 28.59 dBi ดังแสดงในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 ผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้สายอากาศสะท้อนคลื่น

ตารางที่ 5.5 สรุปผลการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้สายอากาศสะท้อนคลื่น

Frequency (GHz)	S ₁₁ (dB)	HPBW (-3 dB)		Gain (dBi)
		E-plane	H-plane	
10.00	-11.45	5.3°	5.8°	28.82
10.25	-14.64	5.3°	5.5°	28.55
10.50	-15.52	5.5°	5.0°	28.40

จากตารางที่ 5.5 สรุปผลการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้าให้สายอากาศสะท้อนคลื่น พบว่าค่า |S₁₁| (ต่ำกว่า -10 dB) ตลอดย่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ที่ต้องการออกแบบ และมีความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 5.0° ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการออกแบบ ซึ่งเมื่อลำคลื่นของสายอากาศแคบแล้ว ส่งผลให้สายอากาศมีอัตราขยายของสายอากาศสูงตามไปด้วย ซึ่งจากการทดสอบพบว่าอัตราขยายของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 28.82 dBi – 28.40 dBi ที่ความถี่ 10.00 GHz – 10.50 GHz และผลของอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (F/B) และระดับลำคลื่นด้านข้าง (SLL) ของสายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้ก็มีค่าต่ำตลอดย่านความถี่ที่ต้องการออกแบบด้วยเช่นเดียวกัน

จากคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดป้อนคลื่นด้านหน้า ให้สายอากาศสะท้อนคลื่นที่สรุปไว้ข้างต้น พบว่าสายอากาศช่องเปิดแบบพาราซิติคที่ป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานในระบบสื่อสารย่านความถี่ X-Band

5.5 บทสรุป

การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศที่นำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดเพียงอย่างเดียว ในหัวข้อที่ 5.2 มีผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศที่ได้นำเสนอมีความถี่เรโซแนนซ์ที่ 10.22 GHz และมีค่า $|S_{11}|$ (dB) ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ความถี่ 10.04 ถึง 10.65 GHz สำหรับในส่วนของผลการทดสอบ $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศมีความถี่เรโซแนนซ์ที่ 10.25 GHz และมีค่า $|S_{11}|$ (dB) ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ความถี่ 10.05 ถึง 10.55 GHz และผลจากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane (yz) และ H-plane (xz) มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางและมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังใกล้เคียงกันคือมีค่าเท่ากับ 70.0° ส่วนค่าความกว้างลำคลื่นที่ -10 dB มีค่าใกล้เคียงกันคือมีค่าเท่ากับ 135.0° ทั้งสองระนาบที่ความถี่ 10.25 GHz นอกจากนี้ผลการทดสอบอัตราขยายเฉลี่ยมากกว่า 8.21 dBi ตลอดย่านความถี่ใช้งานเช่นเดียวกัน

จากคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศช่องเปิดแบบพาราซิติคป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นย่านความถี่ X-Band ในหัวข้อที่ 5.3 ผลจากการทดสอบ $|S_{11}|$ (dB) พบว่าสายอากาศช่องเปิดแบบพาราซิติคป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นมีค่า $|S_{11}|$ (dB) ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ 9.90 ถึง 10.63 GHz และมีการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 10.35 GHz ผลจากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบ E-plane (yz) และ H-plane (xz) มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางและมีความกว้างลำคลื่นใกล้เคียงกันคือมีค่าเท่ากับ 5.0° ทั้งสองระนาบที่ความถี่ 10.00 GHz 10.25 GHz และ 10.50 GHz นอกจากนี้ผลการทดสอบอัตราขยายมีค่าเท่ากับ 28.82 dBi – 28.40 dBi ที่ความถี่ 10.00 GHz – 10.50 GHz

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดที่มีลำคลื่นสมมาตรสำหรับป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นใช้งานในย่านความถี่ x-band โดยออกแบบโครงสร้างของสายอากาศมาจากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่บริเวณช่องเปิดของสายอากาศถูกประกบด้วยตัวพาราซิติคัปปลิ่งและป้อนสัญญาณด้วยโพรบ โดยมีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ที่สามารถรองรับการทำงานในย่านความถี่ x-band ตั้งแต่ 10.00 ถึง 10.50 GHz สายอากาศที่ได้นำเสนอมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 70° และความกว้างลำคลื่น (-10 dB) 140° สมมาตรกันทั้งสองระนาบ (ระนาบ yz และระนาบ xz) นอกจากนี้มีอัตราขยายเฉลี่ยที่ใช้ในย่านความถี่ x-band มากกว่า 8.13 dBi โครงสร้างสายอากาศที่ได้นำเสนอนี้มีขนาดเล็ก และสะดวกต่อการติดตั้งด้วยขนาดของสายอากาศช่องเปิดพาริติกมีมิติ $25.4 \times 115.0 \times 28.0 \text{ mm}^3$ และขนาดของสายอากาศสะท้อนคลื่นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 360 mm และมีความลึก 59.21 mm ทำให้เมื่อรวมกันแล้วมีอัตราขยายเฉลี่ย มากกว่า 28.38 dBi สำหรับในส่วนการจำลองและการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าพบว่ามีความถี่เรโซแนนซ์ที่สอดคล้องกันและใกล้เคียงกัน ในส่วนของรายละเอียดของเนื้อหาในบทนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน สำหรับส่วนแรกจะกล่าวถึงการศึกษาและออกแบบสายอากาศที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และส่วนที่สองของบทนี้จะเป็นข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาสายอากาศในอนาคต

6.2 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้เริ่มจากการศึกษาประวัติความเป็นมา และการพัฒนาระบบการสื่อสารแบบจุดต่อจุด (point-to-point) ซึ่งเริ่มจากตั้งวัตถุประสงค์หลักในการออกแบบสายอากาศนี้เพื่อใช้เป็นสายอากาศป้อนสัญญาณโพกัสด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น โดยการใช้สายอากาศช่องเปิดมาประยุกต์ใช้งาน จากนั้นทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ทั้ง $|S_{11}|(\text{dB})$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) ความกว้างลำคลื่นที่ต่ำกว่า -3 dB ระดับลำคลื่นด้านข้าง (SLL) อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (F/B) ความซับซ้อนในการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศ และขนาดโครงสร้างของสายอากาศ จากการเปรียบเทียบพบว่าสิ่งที่น่าสนใจ คือ $|S_{11}|(\text{dB})$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง และความกว้างลำคลื่นที่ต่ำกว่า -3 dB ซึ่งจากวัตถุประสงค์หลักในการออกแบบสายอากาศนี้เพื่อใช้เป็นสายอากาศป้อนสัญญาณที่ตำแหน่งโพกัสด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่น ดังนั้นสายอากาศที่ได้ออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการออกแบบนี้ต้องมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี คือมี $|S_{11}|$ (dB) ครอบคลุมย่านความถี่ X-Band ต้องมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง และความกว้างลำคลื่นที่ -10 dB เท่ากันหรือสมมาตรกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ตลอดย่านความถี่ X-Band (10.00 – 10.50 GHz)

ในส่วนแรกได้ศึกษาจากผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศช่องเปิดเดี่ยว พบว่าสายอากาศช่องเปิดเดี่ยวมีความกว้างลำคลื่นที่ไม่สมมาตรกันและยังแตกต่างกันมาก และยังพบว่าเมื่อพิจารณาความเข้มสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบของท่อนำคลื่นของสายอากาศนี้มีความเข้มสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกันมากในระนาบ yz และ xz ดังรูปที่ 2.18 (ก) และ (ข) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กไม่สมมาตรกัน ซึ่งมีความกว้างลำคลื่นที่ไม่สมมาตรกันและแตกต่างกันมาก คือที่ -3 dB จะมีความกว้างลำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเท่ากับ 103° และระนาบสนามแม่เหล็กเท่ากับ 59° และ -10 dB มีความกว้างลำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเท่ากับ 250° และระนาบสนามแม่เหล็กเท่ากับ 120° ตามลำดับ และจากผลการจำลองยังพบอีกว่าในบริเวณช่องเปิดของท่อนำคลื่นที่นำมาออกแบบเป็นสายอากาศนี้จะมีการเกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงเฉพาะในระนาบ yz ทำให้ไม่เหมาะสมที่จะนำไปป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นโดยตรง

จากข้อจำกัดข้างต้นสามารถแก้ไขได้ด้วยเทคนิควิธีปรับแต่งที่โครงสร้างสายอากาศ โดยการเพิ่มช่องเปิดพาราซิติคส์เหลี่ยมที่ขอบด้านบนและล่างของสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการเลี้ยวเบนของคลื่น ซึ่งง่ายต่อการออกแบบและสร้างสายอากาศต้นแบบ โดยต้องคำนึงถึงคือการเลือกขนาดของท่อนำคลื่นที่เหมาะสม และต้องคำนึงถึงค่าความถี่ตัดของท่อนำคลื่นที่นำมาสร้างสายอากาศด้วย และโดยปกติแล้วเงื่อนไขในการออกแบบท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมโหมดของคลื่นที่นำมาพิจารณาคือโหมด TE_{10} ซึ่งการออกแบบช่องเปิดแบบพาราซิติคส์ที่นำมาติดตั้งเพิ่มเติมภายหลังจึงต้องออกแบบภายใต้โหมด TE_{10} เช่นเดียวกัน ซึ่งสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดนี้มีส่วนประกอบอยู่ 3 ส่วนหลักๆคือ สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว และช่องเปิดแบบพาราซิติคส์อีก 2 ตัวที่ออกแบบเพิ่มเติมบริเวณขอบของช่องเปิดโดยการหาขนาดของช่องเปิดพาราซิติคส์ต้องคำนวณมาจากความถี่ตัดเช่นเดียวกันกับการหาขนาดของท่อนำคลื่นหลักที่นำมาสร้างสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดเดี่ยว ซึ่งผลสรุปของเทคนิควิธีการเพิ่มช่องเปิดแบบพาราซิติคส์ที่ขอบของช่องเปิดหลักในแนวตั้งตามแนวระนาบ yz นั้นทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นให้มีความกว้างลำคลื่นในแนวระนาบ yz และระนาบ xz มีค่าใกล้เคียงกันมาก สายอากาศช่องเปิดพาราซิติคส์นั้นถูกป้อนสัญญาณด้วยอิเล็กทรอนิกส์โพรบ และพบว่าสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดนี้มีค่า $|S_{11}|$ (dB) ครอบคลุมช่วงความถี่ความถี่ต้องการออกแบบ นอกจากนี้มีอัตราขยายสายอากาศมากกว่า 8 dBi ตลอดย่านความถี่

หลังจากที่ได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำไปป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นแล้ว จากนั้นจึงมีการออกแบบสายอากาศสะท้อนคลื่นในย่านความถี่ X-Band ที่มีความถี่กลางคือ 10.25 GHz โดยกำหนดค่า F/D ไวที่ 0.38 และเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 360.00 mm แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาระยะ Focus ของสายอากาศสะท้อนคลื่นซึ่งมีความยาวโฟกัสเท่ากับ 136.80 mm จากนั้นคำนวณหาสวนโคงของสายอากาศสะท้อนคลื่น จากสมการพาราโบลา สูดท้ายจึงนำสมการพาราโบลา และระยะโฟกัส ที่ได้ไป plot กราฟ โดยให้แกน x ตั้งแต่ 0 ถึง 180.00 mm ระยะโฟกัสเท่ากับ 136.80 mm เพื่อหาค่าในแนวนอน y เมื่อได้ระยะในแกน x และ y แล้วให้ plot กราฟ และหมุนในแนวแกน z ก็จะได้สายอากาศสะท้อนคลื่นที่มีค่า F/D เท่ากับ 0.38 เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 360 mm และความยาวโฟกัสเท่ากับ 136.80 mm

ในการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดได้ทำการศึกษาจากบทความวิจัยที่มีมาก่อน และอาศัยหลักการทางทฤษฎีจากเอกสาร วิธีการทดสอบที่ใช้ในการทดสอบอัตราขยายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ วิธีการทดสอบอัตราขยายโดยการคำนวณจากสมการของฟรีส พบว่าในกรณีของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดตัวเดียวมีอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 8.24 dBi และในกรณีของสายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดที่มีลำคลื่นสมมาตรสำหรับป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นมีอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 28.82 dBi - 28.40 dBi ที่ความถี่ 10.00 GHz - 10.50 GHz ในย่านความถี่ X-Band

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

สายอากาศท่อนำคลื่นช่องเปิดกะทัดรัดที่มีลำคลื่นสมมาตรสำหรับป้อนคลื่นด้านหน้าให้กับสายอากาศสะท้อนคลื่นที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ถึงแม้ว่าคุณสมบัติที่ดีคือมี $|S_{11}|$ (dB) \leq -10 dB ครอบคลุมตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน x-band (10.0 GHz - 10.5 GHz) มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวและมีความกว้างลำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าสมมาตรกันกับสนามแม่เหล็ก และยังให้อัตราขยายของสายอากาศที่สูงแล้วก็ตาม

แต่ยังมีข้อจำกัดต่อการนำไปใช้งานอยู่ เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศช่องเปิดที่เป็นฮอร์นที่ใช้ในเชิงพาณิชย์แล้ว จะมีผลตอบสนองทางความถี่กว้างมากกว่า และมีอัตราขยายที่สูงกว่า แต่อย่างไรก็ดีสายอากาศที่ได้นำเสนอนี้เป็นสายอากาศต้นแบบ ซึ่งจากหลักการดังกล่าวมาทั้งหมดในวิทยานิพนธ์นี้เมื่อต้องการเปลี่ยนแปลงย่านความถี่ซึ่งยังคงมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสมมาตรกันนั้นจะสามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์เชิงอุตสาหกรรมในอนาคตได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] General post office. 1927. International Radiotelegraph Convention of Washington: International Radiotelegraph Convention and General and Supplementary Regulations. 2nd ED. London. Great Britain.
- [2] Gernsback. H. 1909. First Annual Official Wireless Blue Book of the Wireless Association of America. New York: Modern Electrics Publication.
- [3] Patrick R. J. Brown. 1996. The Influence of Amateur Radio on the Development of the Commercial Market for Quartz Piezoelectric Resonators in the United States. Bliley.net.
- [4] Jack S. Kilby. 2000, "Turning Potential into Realities: The Invention of the Integrated Circuit," Nobel Lecture. Dallas, Texas Instruments Incorporated.
- [5] Bazlur Rahman. 2009, "Information and Communication Technology for Development (ICT4D) - Role of Amateur Radio in Developing Communication," NIRAPAD Barta, Issue 15, May 2009.
- [6] International Telecommunication Union; ITU. 2012. Radio Regulations Articles. Printed in Switzerland. Geneva.
- [7] คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.). "หลักเกณฑ์การขออนุญาตและกำกับดูแลกิจการวิทยุสมัครเล่น." [Online]. Available: <http://www.ratchakitcha.soc.go.th/>. 2557.
- [8] Brian Thorson. "Entering the Exciting World of Amateur Ten Gigahertz." [Online]. Available: <http://www.ham-radio.com/sbms/>.
- [9] P. J. B. Clarricoats and A. D. Olver. Corrugated horns for microwave antennas. IEE Electromagnetic Waves Series 18. Peter Peregrinus Ltd. 1984.
- [10] Paul Wade. 1997. Chapter 11: Parabolic Dish Feeds-Performance Analysis.
- [11] J. J. Condon and S. M. Ransom. "Reflector Antennas". Essential Radio Astronomy. National Radio Astronomy Observatory.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] D. Turrin, W2IMU, "Parabolic Reflector Antennas and Feeds," *The ARRL UHF/Microwave Experimenter's Manual*, ARRL, 1990.
- [13] Y. Rahmat-Samii, "Reflector Antennas," *Antenna Handbook: theory, applications, and design*, 1988, pp. 15-42.
- [14] P. C. Wade, N1BWT, "Secrets of Parabolic Dish Antennas," *Proceeding of Microwave Update'94*, ARRL, 1994, pp. 34-56.
- [15] V. Galindo, "Design of dual-reflector antennas with arbitrary phase and amplitude distributions," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 12, Jul 1964.
- [16] D. I. L. de Villiers, "Analytical Prediction of Feed Efficiency in Offset Gregorian Reflector Antennas with Non Planar Log-periodic Type Feeds," *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, Marrakesh, Morocco, Mar. 20–23, 2011.
- [17] Thomas A. Milligan. *Modern Antenna Design*. Second Edition. A John Wiley & Sons Inc. Publication. 2005.
- [18] P. G. Ingerson and W. V. T. Rusch, "Radiation form a paraboloid with an axially defocused feed," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-21, no. 1, Jan 1973, pp. 104-106.
- [19] W. F. Williams, "High Efficiency Antenna Reflector," *Microwave Journal*, July 1965, pp. 79-82.
- [20] Christophe Granet, G.James, "Design of Corrugated Horns: A Primer." *IEEE antennas and propagation*, April 2005, pp.76 -84
- [21] J. Teniente, R. Gonzalo, and C. del-Rio. "Innovative High-Gain Corrugated Horn Antenna Combining Horizontal and Vertical Corrugations." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 5. 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [22] Digisha J. Patel, Dr. A. C. Suthar, "Design of Corrugated Conical Gaussian profiled Horn Antenna for Multi Beam Application." **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, Volume: 03, Issue: 05, May-2016.
- [23] T. Aribi, R. Khajeh Mohammad Lou, and Ch.Ghobadi. "Enhancement Gain of Rectangular waveguide Antenna by Electromagnetic Metmaterial." **International Conference on Communications Engineering**, December 2010.
- [24] J. E. McKay, D. A. Robertson, P. A. S. Cruickshank, R. I. Hunter, D. R. Bolton, R. J. Wylde and G. M. Smith. "Compact Wideband Corrugated Feed horns With Ultra-Low Side lobes for Very High Performance Antennas and Quasi-Optical Systems." **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, vol. 61, no. 4. 2013
- [25] M.V.Gohil, B.J.Makwana and R.B.Ambaliya. "Corrugated Horn Antennas: A Review." **International Journal of Advanced Technology & Engineering Research (IJATER)**, vol. 4, Issue 2, 2014, pp. 27-29.
- [26] K. R. Chou, T. D. Wu¹, H. N. Lin, T. S. Liao, and K. K. Tiong (2015) Design and Simulation of a C-Band Pyramidal Horn Antenna for Water-Level Radar Sensors, **Journal of Marine Science and Technology**, vol. 23, no. 2, 220-224.
- [27] P. A S. Dayal. "Design of X-Band Pyramidal Horn Antenna." **International Journal of Applied Control, Electrical and Electronics Engineering (IJACEEE)** Vol 3, No.1/2, May 2015.
- [28] Ahmad Shahid Khan. 2014. **Microwave Engineering Concepts and Fundamental**. Baco Raton. Taylor & Francis Group.
- [29] S. Silver. **Microwave Antenna Theory and Design**. Peter Peregrinus Ltd, On behalf of the Institution of Electrical Engineering, London, United Kingdom.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [30] K. Saeed, R. D. Pollard and I. C. Hunter. "Substrate Integrated Waveguide Cavity Resonators for Complex Permittivity Characterization of Materials." *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, no. 10. 2008.
- [31] Y. Li and J. Papapolymerou. "A Novel High-Q Cavity Resonator for Reconfigurable WPAN Applications at 60 GHz." *Proceedings of the 39th European Microwave Conference*, Rome, Italy. 2009.
- [32] S. Adhikari, Y. J. Ban, and K. Wu. "Magnetically Tunable Ferrite Loaded Substrate Integrated Waveguide Cavity Resonator." *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 21, no. 3. 2011.
- [33] D. Srimoon, C. Phongcharoenpanich, and M. Krairiksh. "Probe-Fed Rectangular Ring Antenna with a Cross-Strip for Low Cross-Polarization." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 5, 2006, pp. 1586-1591.
- [34] M. Miao and C. Nguyen. "A Novel Multilayer Aperture-Coupled Cavity Resonator for Millimeter-Wave CMOS RFICs." *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, vol. 55, no. 4. 2007.
- [35] R. S. Elliott. *Antenna Theory and Design*. John Wiley & Sons, New York, 2003.
- [36] V. F. Fusco. *Foundation of Antenna Theory and Techniques*. Pearson Education Limited. The Queens University of Belfast.
- [37] Constantine A. Balanis. *Advanced Engineering Electromagnetics*. Second Edition, USA, 2012.
- [38] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory Analysis and Design*. John Wiley & Sons, 1997.
- [39] T. Moreno. *Microwave Transmission Design Data by Theodore Moreno*. 1948.
- [40] R. E. Collin. *Field Theory of Guided Waves*, 2nd ed., Piscataway, New Jersey, 1992

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [41] T. Salimi, A. Maghoul, and A. A. Abbasid. "Design of a Compact Gaussian Profiled Corrugated Horn Antenna for Low Sidelobe-Level Applications." *International Journal of Computer Theory and Engineering*, Vol. 5, No. 2, April 2013.
- [42] J. M. Lee and J. M. Woo. "Design of Array Synthesis Horn Antenna for High Power Microwave Applications." *PIERS Proceedings*, and Moscow, Russia. 2012.
- [43] M. Bersanelli, M. Bensadoun, G. De Amici, M. Limon, G. F. Smoot, S. Tanaka, C. Witebsky, and J. Yamada. "Construction Technique and Performance of a 2 GHz Rectangular Corrugated Horn." *IEEE Transactions on Antennas and Propagations*, vol. 40, no. 9. 1992.
- [44] J. Teniente, A. Martínez, B. Larumbe, A. Ibáñez, and R. Gonzalo. "Design Guidelines of Horn Antennas That Combine Horizontal and Vertical Corrugations for Satellite Communications." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 4. 2015.
- [45] J. Teniente, R. Gonzalo, C. del Rio, J. Marti-Canales, M. Sorolla, A. Fernandez, K. M. Likin and R. Martin. "Corrugated Horn Antenna for Low-Power Testing of the Qusioptical Transmission Lines at TJ-II Stellerator." *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, vol. 20, no. 10. 1999.
- [46] A.D. Olver, P.J.B. Clarricoats, A.A. Kishk, L. Shafai. *Microwave Horns and Feeds*. IEEE Press. 1994.
- [47] P.J.B. Clarricoats, A.D. Olver. *Corrugated Horns for Microwave Antennas*. Peter Peregrinus Ltd. 1984.
- [48] S. Rao, L. Shafai and S. Sharma. **Handbook of reflector antennas and feed systems: Volume III (Applications of reflectors)**. British library cataloguing in publication data, 2013.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายคณะวัตติ เนื่องวงษา
วัน เดือน ปีเกิด 26 มกราคม 2525
ที่อยู่ 164/1 หมู่ที่ 12 ตำบลศิลา อำเภอเมือง
จังหวัดขอนแก่น 40000

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2546 สำเร็จการศึกษา หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง

ช่างไฟฟ้าเครื่องกล แผนกวิชาซีพีไฟฟ้า

วิทยาลัยเทคนิคขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น

พ.ศ. 2550 สำเร็จการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552 สำเร็จการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) การออกแบบสายอากาศ
2.) การวิเคราะห์และออกแบบโมเดลการแพร่กระจายคลื่น

การตีพิมพ์บทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วารสารทางวิชาการ

- [1] Kanawat Nuangwongsa and Chuwong Phongcharoenpanich, "Design of Symmetrical Beam Triple-Aperture Waveguide Antenna for Primary Feed of Reflector," International Journal of Antennas and Propagation (IJAP), Volume 2016, Article ID 5830527, 14 pages.

การประชุมทางวิชาการ

- [1] Kanawat Nuangwongsa, Chuwong Phongcharoenpanich and Sompol Kosulvit, "Improvement of Unidirectional Antenna Using a Hemispherical Monopole with Circular Reflector for IEEE 802.11 a/b/g/n," 1st International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS 2011), KMITL, Bangkok, Thailand, January 2012.
- [2] Kanawat Nuangwongsa, Chuwong Phongcharoenpanich and Sompol Kosulvit, "A Dual-Band Unidirectional Antenna Using a Hemispherical Monopole with Circular Reflector," The 2011 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS 2011), The Decade of Intelligent and Green Signal Processing & Communications, pp. 206, Chiangmai, Thailand, December 2011.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้