การเพิ่มแบนด์วิดท์และอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบ ด้วยเทคนิคการปรับจูนโพรบและโครงสร้างปากแตร

THE ENHANCEMENT OF BANDWIDTH AND GAIN OF PLANAR MONOPOLE ANTENNA WITH PROBE AND HORN STRUCTURE TUNING TECHNIQUES

วัลนพ หลักแวงมล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การเพิ่มแบนด์วิดท์และอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบ
ด้วยเทคนิคการปรับจูนโพรบและโครงสร้างปากแตร

วัลนพ หลักแวงมล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเพิ่มแบนด์วิดท์และอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบด้วยเทคนิคการปรับจูนโพรบและโครงสร้างปากแตร

The Enhancement of Bandwidth and Gain of Planar Monopole Antenna with Probe and Horn Structure Tuning Techniques

ชื่อ – นามสกุล นายวัลนพ หลักแวงมล

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์อำนวย เรืองวารี, Dr.-Ing.

ปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรี ศรีนนท์ฉัตร, Ph.D.)

.... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์สมศักดิ์ อรรคทิมากูล, Ph.D.)

.... กรรมการ

(อาจารย์วิเชียร อูปแก้ว, Ph.D.)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อำนวย เรืองวารี, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 18 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มแบนด์วิดท์และอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบ ด้วยเทคนิคการปรับจูนโพรบและโครงสร้างปากแตร
ชื่อ – นามสกุล	นายวัลนพ หลักแวงมล
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อำนวย เรืองวารี, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการพัฒนาสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบ เพื่อรองรับการประยุกต์ใช้งานสองย่านความถี่สำหรับการสื่อสารแบบไร้สายให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ตามมาตราฐาน IEEE802.111b/g 2.45 GHz (2.4-2.48 GHz) และ IEEE802.16e 3.5 GHz (3.4-3.69 GHz) ด้วยเทคนิคการปรับจูนโพรบ และเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศด้วยการปรับเพิ่มโครงสร้างปากแตร

โครงสร้างสายอากาศถูกออกแบบและจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม CST ร่วมกับระเบียบวิธีเชิงประสบการณ์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด สายอากาศต้นแบบมีส่วนประกอบ 2 ส่วน ส่วนแรกคือโพรบรูปวงกลมที่มีการเพิ่มสตับตัวไอลักษณะแนวนอน ถูกสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR4 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ε_r) เท่ากับ 4.3 ความหนาของวัสดุฐานรอง (h) เท่ากับ 0.0764 มิลลิเมตร และความหนาของวัสดุตัวนำ (t) เท่ากับ 0.017 มิลลิเมตร ส่วนที่สองคือท่อนำคลื่นรูปวงแหวนที่เชื่อมต่อกับโครงสร้างปากแตรแบบรูปทรงกรวย ถูกสร้างบนแผ่นทองแดงที่มีความหนา (t_c) เท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร และมีค่าความนำของวัสดุตัวนำ (σ) เท่ากับ $5.8\times10^7 S/m$

ผลการจำลองแบบและผลการทดสอบวัดของสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบด้วยเทคนิคการปรับจูนโพรบและโครงสร้างปากแตร พบว่าสายอากาศที่นำเสนอมีผลตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่ย่านความถี่ต่ำเท่ากับ 2.47 GHz ครอบคลุมย่านความถี่ 2.36-2.49 GHz และผลตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่ย่านความถี่สูงเท่ากับ 3.49 GHz ครอบคลุมย่านความถี่ 3.13-4.18 GHz โดยอัตราขยายของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 8.34 dBi และ 10.08 dBi ตามลำดับ สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสองทิศทาง สามารถนำมาสร้างและประยุกต์ใช้งานได้จริง

คำสำคัญ: การเพิ่มแบนด์วิดท์ การเพิ่มอัตราขยาย การปรับจูนโพรบ สายอากาศปากแตร

Thesis Title The Enhancement of Bandwidth and Gain of Planar Monopole Antenna with Probe and Horn Structure Tuning Techniques

Name - Surname Mr. Wannop Lakvaengmon

Program Electronics and Telecommunication Engineering

Thesis Advisor Assistant Professor Amnoiy Ruengwaree, Dr.-Ing.

Academic Year 2018

ABSTRACT

This thesis presented the development of planar monopole antenna to support the dual band frequencies for a better performance of wireless communication according to IEEE802.111b/g 2.45 GHz (2.4-2.48 GHz) and IEEE802.16e 3.5 GHz (3.4-3.69 GHz) standard by using probe tuning technique and increasing gain by adding horn structure.

The prototype antenna was designed for a simulation by using CST program together with an experiential methodology to find out the most appropriate parameter. The prototype antenna consisted of two parts: 1) circular probe with horizontal I-shaped stubs was constructed on the PCB (FR4) with a dielectric constant (ε_r) of 4.3 and a substrate thickness (h) of 0.0764 mm., a conductor material thickness (t) of 0.017 mm., and 2) annular waveguide connecting to conical horn antenna was constructed by a copper sheet with a thickness of 0.35 mm. and a conductivity (σ) of $5.8\times10^{7} S/m$.

The findings of the simulation and the measurement of the planar monopole antenna with probe tuning techniques and horn structure showed that the new design of antenna had frequency response with low frequency resonance at 2.47 GHz., covered the applications frequency range of 2.36-2.49 GHz and the high frequency resonance at 3.49 GHz. It also covered the applications frequency range of 3.13-4.18 GHz while the bi-directional radiation patterns gained 8.34 dBi and 10.08 dBi, respectively. The new design could be fabricated and brought about by practical application.

Keywords: bandwidth enhancement, gain enhancement, probe tuning, horn antenna

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีจากความเมตตากรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อำนวย เรืองวารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิคส์และโทรคมนาคม ผู้ช่วยศาตราจารย์ ดร. จักรี ศรีนนท์ฉัตร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. วิเชียร อูปแก้ว และรองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ อรรคทิมากูล ผู้ทรงคุณวุฒิกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วัชรพล นาคทอง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นายภาณุวิทย์ ทองบ่อ และนายสุวัฒน์ สกุลชาติ รุ่นพี่ในห้องปฏิบัติการวิจัยความถี่สูง (High Frequency Research Laboratory : HFRL) ที่คอยแนะนำความรู้ด้านอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม และให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ เสมอมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขออุทิศส่วนกุศลทั้งหลายแก่พระคุณของบิดา มารดา ขอบคุณครอบครัว ญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ที่เป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

วัลนพ หลักแวงมล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย (3)

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ (4)

กิตติกรรมประกาศ (5)

สารบัญ (6)

สารบัญตาราง (8)

สารบัญรูป (9)

บทที่ 1 บทนำ 11

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 11

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 11

1.3 ขอบเขตของการศึกษา 12

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัยและขั้นตอนการศึกษา 12

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 13

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 14

2.1 ทบทวนวรรณกรรม 14

2.2 สายอากาศไดโพลและสายอากาศโมโนโพล 23

2.3 สายอากาศไมโครสตริปและสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ 25

2.4 สายอากาศสองทิศทางที่ใช้วงแหวนวงกลมล้อมรอบโพรบ 26

2.5 สายอากาศปากแตรทรงกรวย 27

2.6 พารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศที่ใช้ในงานวิจัย 28

2.7 มาตรฐานเครือข่ายการสื่อสารแบบไร้สาย 37

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 40

3.1 บทนำ 40

3.2 การออกแบบสายอากาศ 40

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล 54

4.1 ผลการทดสอบวัดค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ 55

4.2 ผลการทดสอบวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ 57

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 ผลการทดสอบวัดค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง 58
4.4 ผลการทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสนามไฟฟ้าระยะไกล 59
4.5 สรุปผลการทดสอบวัดสายอากาศ 61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 62
5.1 สรุปผลการวิจัย 62
5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาสายอากาศในอนาคต 63
บรรณานุกรม 64
ภาคผนวก 67
ภาคผนวก ก คุณสมบัติทั่วไปของแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 68
ภาคผนวก ข คุณสมบัติของขั้วต่อแบบ SMA 71
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ 76
ประวัติผู้เขียน 103

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบที่มีโพรบแตกต่างกัน 15
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบเทคโนโลยีไร้สายแบบต่างๆ 39
ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบผลการจำลองสายอากาศต้นแบบ เมื่อปรับจูนสายอากาศ 47
ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ของขนาดความยาว W กับอัตราขยายของสายอากาศ 49
ตารางที่ 3.3 ขนาดของพารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบ 51
ตารางที่ 3.4 ค่าอัตราขยายจากการจำลองแบบของสายอากาศที่นำเสนอด้วยโปรแกรม CST 52
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบผลการจำลองแบบและผลการทดสอบวัดค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบ 56
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบผลการจำลองแบบและผลการทดสอบวัดค่าอัตราขยาย 58
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบผลการจำลองแบบและผลการทดสอบวัดอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง 59

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ผลการจำลองแบบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเมื่อปรับโพรบให้ต่างกัน 15
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบที่มีโพรบรูปวงกลม 16
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบที่มีโพรบรูปวงกลม 16
รูปที่ 2.4 ผลการเปรียบเทียบค่า (s_{11}) เมื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสายอากาศ 18
รูปที่ 2.5 โครงสร้างสายอากาศที่มีโพรบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าร่วมกับโครงสร้างปากแตร 18
รูปที่ 2.6 ผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อปรับขนาดของสตับ 19
รูปที่ 2.7 สายอากาศโมโนโพลแบบระนาบร่วมกับโครงสร้างปากแตรทรงกรวย 20
รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบความแตกต่างของอัตราขยายเมื่อรัศมีโครงสร้างปากแตรต่างกัน 20
รูปที่ 2.9 สายอากาศไดโพลอุดมคติ (Ideal dipole antenna) 24
รูปที่ 2.10 สายอากาศโมโนโพลอุดมคติ (Ideal monopole antenna) 25
รูปที่ 2.11 โครงสร้างสายอากาศของไมโครสตริป 25
รูปที่ 2.12 สายอากาศสองทิศทางที่ใช้วงแหวนวงกลมล้อมรอบเส้นลวดตัวนำ 26
รูปที่ 2.13 ลักษณะของสายอากาศปากแตรรูปกรวย 27
รูปที่ 2.14 บริเวณสนามการแผ่กระจายคลื่นจากสายอากาศ 31
รูปที่ 2.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางของสายอากาศ 32
รูปที่ 2.16 แบบรูปการแผ่พลังงานหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร 36
รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศพื้นฐานโพรบรูปตัวไอ 41
รูปที่ 3.2 โครงสร้างสายอากาศรูปวงแหวน 42
รูปที่ 3.3 โครงสร้างโพรบรูปวงกลม (r_2) 43
รูปที่ 3.4 ผลการจำลองค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศ เมื่อปรับจูนรัศมี r_2 44
รูปที่ 3.5 โครงสร้างของโพรบรูปตัวไอแนวนอนเชื่อมต่อกับส่วนของโพรบรูปวงกลม r_2 45
รูปที่ 3.6 ผลการจำลองแบบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศ เมื่อปรับ W_1 46
รูปที่ 3.7 ผลการจำลองแบบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศ เมื่อปรับ L_1 46
รูปที่ 3.8 โครงสร้างสายอากาศแบบปากแตรวงกลม 48
รูปที่ 3.9 โครงสร้างสายอากาศต้นแบบ 48
รูปที่ 3.10 โครงสร้างของสายอากาศด้านข้างที่แสดงความยาวของตัวแปร W 49

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.11 โครงสร้างสายอากาศที่กำหนดขนาดของพารามิเตอร์ 50
รูปที่ 3.12 ผลการจำลองแบบอัตราขยายของสายอากาศ (ไม่เพิ่มโครงสร้างปากแตร) 51
รูปที่ 3.13 ผลการจำลองแบบอัตราขยายของสายอากาศ (เมื่อเพิ่มโครงสร้างปากแตร) 52
รูปที่ 3.14 สรุปขั้นตอนการออกแบบสายอากาศต้นแบบ 53
รูปที่ 4.1 ขนาดของพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศต้นแบบ 54
รูปที่ 4.2 สายอากาศโมโนโพลแบบระนาบ (ชิ้นงานจริง) 55
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบผลการจำลองแบบและผลการทดสอบวัดค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศ 55
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการจำลองแบบและผลการทดสอบวัดค่าอัตราขยาย 57
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการจำลองแบบและผลการทดสอบวัดค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง 58
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสนามไฟฟ้าระยะไกลของสายอากาศ 60
รูปที่ 4.7 ผลการจำลองแบบและผลการทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ E-plane 60
รูปที่ 4.8 ผลการจำลองแบบและผลการทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน ในระนาบ H-plane 61

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่างๆ เช่น การสื่อสารผ่านดาวเทียม การสื่อสารผ่านวิทยุสื่อสาร หรือการสื่อสารผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวทำให้การสื่อสารเป็นไปด้วยความรวดเร็ว มีประสิทธิภาพและก่อให้เกิดประโยชน์ในหลายด้าน ยกตัวอย่างเช่น ทำให้นักเรียนที่อยู่ห่างไกลความเจริญสามารถเรียนรู้ผ่านทางดาวเทียมได้ ทำให้มนุษย์สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ในทุกที่ทุกเวลา เป็นต้น

สิ่งสำคัญที่ทำให้เทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายถูกพัฒนาขึ้น ส่วนหนึ่งมาจากการพัฒนาสายอากาศ ซึ่งปัจจุบันแม้ว่าเทคโนโลยีด้านสายอากาศจะถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง แต่ก็มีข้อจำกัดในหลายด้าน เช่น สายอากาศโดยทั่วไปสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่เดียว มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบทิศทางเดียว และมีอัตราขยายของสายอากาศต่ำ ทำให้ไม่ครอบคลุมการสื่อสารแบบไร้สายในพื้นที่บริเวณกว้าง มีช่วงความถี่ใช้งานที่จำกัด ไม่เพียงพอต่อการให้บริการที่มีความหลากหลาย

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและพัฒนาโครงสร้างสายอากาศรูปแบบใหม่ โดยนำโครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบ [1, 2, 3, 5, 10, 11] ที่มีการปรับจูนสตับเพื่อเพิ่มช่วงความถี่ใช้งานให้ครอบคลุมการให้บริการมากขึ้น [7, 8, 9, 12] อีกทั้งได้นำโครงสร้างของท่อนำคลื่นรูปวงแหวนมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบ ทำให้สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานลักษณะสองทิศทางทำให้ครอบคลุมพื้นที่การใช้งานมากขึ้น [14, 16] นอกจากนี้ได้นำโครงสร้างของสายอากาศปากแตรมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศ ทำให้อัตราขยายของสายอากาศเพิ่มสูงขึ้น [4, 6, 13,17] โดยสายอากาศนี้สามารถรองรับเครือข่ายการสื่อสารแบบไร้สายตามมาตรฐาน IEEE802.111b/g 2.45 GHz (2.4-2.48 GHz) และ IEEE802.16e 3.5 GHz (3.4-3.69 GHz)

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อพัฒนาการเพิ่มอัตราขยายและแบนด์วิดท์ของสายอากาศแบบโมโนโพล

1.2.2 เพื่อพัฒนาเทคนิคการปรับจูนสตับและโครงสร้างปากแตร

1.2.3 เพื่อออกแบบและสร้างสายอากาศแบบโมโนโพล ร่วมกับเทคนิคการปรับจูนสตับ และโครงสร้างปากแตร

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ออกแบบและสร้างสายอากาศแบบโมโนโพล สำหรับประยุกต์ใช้งานที่ความถี่ตามมาตรฐาน IEEE802.111b/g 2.45 GHz (2.4-2.48 GHz) และ IEEE802.16e 3.5 GHz (3.4-3.69 GHz)

1.3.2 ปรับเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศแบบโมโนโพลด้วยโครงสร้างปากแตร เพื่อให้มีอัตราขยายไม่น้อยกว่า 7 dBi

1.3.3 ออกแบบและสร้างสายอากาศต้นแบบที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสองทิศทาง

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

1.4.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศแบบโมโนโพล

1.4.2 ศึกษาเทคนิคการออกแบบสายอากาศแบบโมโนโพล

1.4.3 ศึกษาเทคนิคการนำโครงสร้างปากแตรมาประยุกต์ใช้กับสายอากาศแบบโมโนโพล

1.4.4 ศึกษาการใช้งานระบบเครือข่ายการสื่อสารไร้สายตามมาตรฐาน IEEE

1.4.5 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม CST เพื่อใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลอง

1.4.6 ทำการออกแบบสายอากาศแบบโมโนโพลเพื่อประยุกต์ใช้งานด้านการสื่อสารแบบไร้สายสองย่านความถี่เพื่อรองรับมาตรฐาน IEEE802.111b/g 2.45 GHz (2.4-2.48 GHz) และ IEEE802.16e 3.5 GHz (3.4-3.69 GHz)

1.4.7 ทำการออกแบบโครงสร้างสายอากาศแบบปากแตรเพื่อประยุกต์ใช้งานกับสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบ

1.4.8 ทำการวิเคราะห์สัญญาณจากผลการจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST

1.4.9 ทำการสร้างสายอากาศแบบโมโนโพลบนโครงสร้างปากแตร จากผลการจำลองแบบที่สามารถใช้งานไปใช้ในทางปฏิบัติ

1.4.10 วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการวัดและจำลองแบบ จากนั้นสรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีสายอากาศให้มีช่วงความถี่ใช้งานมากขึ้น และครอบคลุมพื้นที่การใช้งานบริเวณกว้าง

1.5.2 เป็นแนวทางให้นักวิจัยนำเทคนิคการพัฒนาสายอากาศไปต่อยอดให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดนวัตกรรมสายอากาศที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งานในอนาคต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

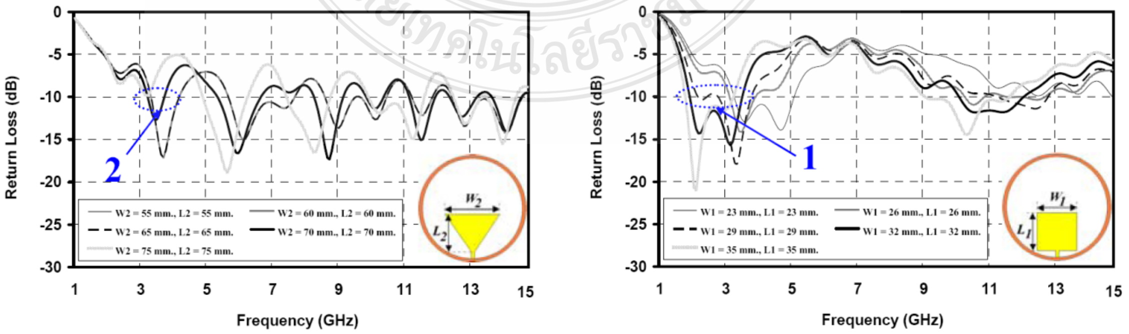
บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนแรกจะอธิบายเนื้อหาที่เกี่ยวกับการทบทวนวรรณกรรมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นการนำเสนอแนวคิด เทคนิคการเพิ่มแบนด์วิดท์และเทคนิคการเพิ่มอัตราการขยายให้กับสายอากาศ ส่วนที่สองจะกล่าวถึงทฤษฎีของสายอากาศชนิดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เช่น ทฤษฎีของสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบ ทฤษฎีของสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง พารามิเตอร์สำคัญของสายอากาศที่ใช้ในงานวิจัยเป็นต้น

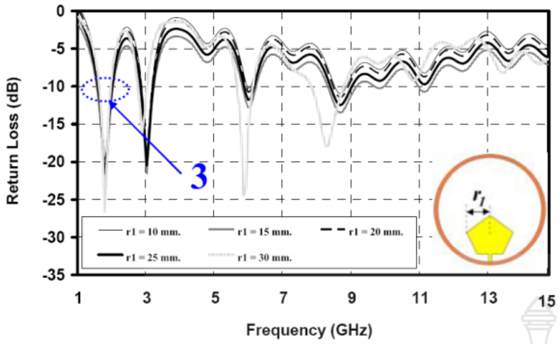
2.1 ทบทวนวรรณกรรม

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่านได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบสำหรับประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่ต่างๆ มีงานวิจัยที่กล่าวถึงเทคนิคการสร้างสายอากาศให้มีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในสองทิศทาง และงานวิจัยที่กล่าวถึงการเพิ่มสตับให้กับสายอากาศเพื่อขยายช่วงความถี่ใช้งาน อีกทั้งบางงานวิจัยได้กล่าวถึงการเพิ่มโครงสร้างปากแตรเพื่อเพิ่มอัตราการขยาย โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

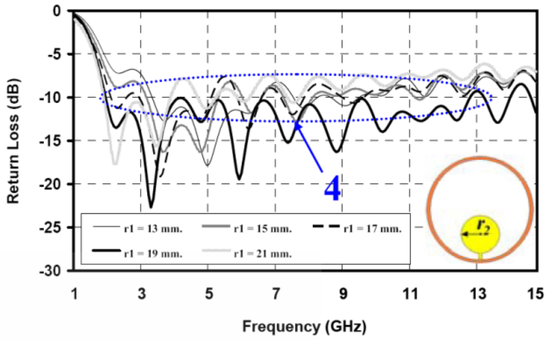
วัชรพล นาคทอง และคณะ [1] งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการปรับเปลี่ยนโพรบป้อนสัญญาณแบบรูปทรงเรขาคณิต ร่วมกับท่อนำคลื่นรูปวงแหวนสำหรับการสื่อสารแบบไร้สาย โดยเปรียบเทียบผลการจำลองแบบเมื่อโพรบป้อนสัญญาณมีรูปร่างต่างกันดังนี้ โพรบรูปสามเหลี่ยม โพรบรูปสี่เหลี่ยม โพรบรูปห้าเหลี่ยม และโพรบรูปวงกลมแสดง ดังรูปที่ 2.1 .



(ก) (ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2.1 ผลการจำลองแบบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเมื่อปรับโพรบให้มีรูปร่างต่างกัน [1] (ก) โพรบรูปสามเหลี่ยม (ข) โพรบรูปสี่เหลี่ยม (ค) โพรบรูปห้าเหลี่ยม (ง) โพรบรูปวงกลม

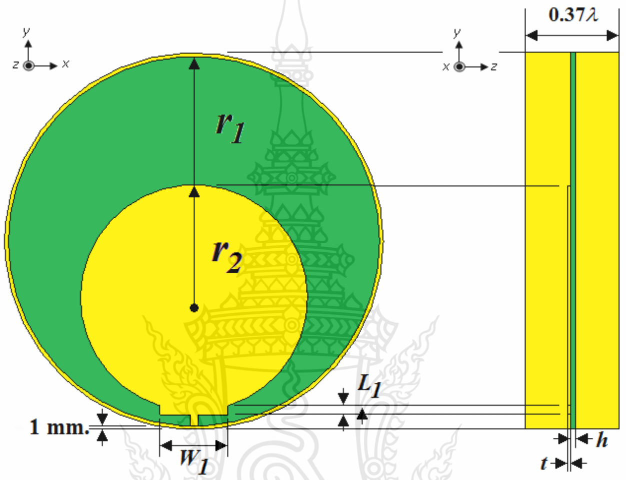
จากกราฟในรูปที่ 2.1 พบว่าการปรับเปลี่ยนรูปร่างของโพรบป้อนสัญญาณในสายอากาศจะส่งผลทำให้ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ และช่วงความถี่ใช้งานของสายอากาศแตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปผลได้ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบที่มีรูปร่างของโพรบแตกต่างกัน

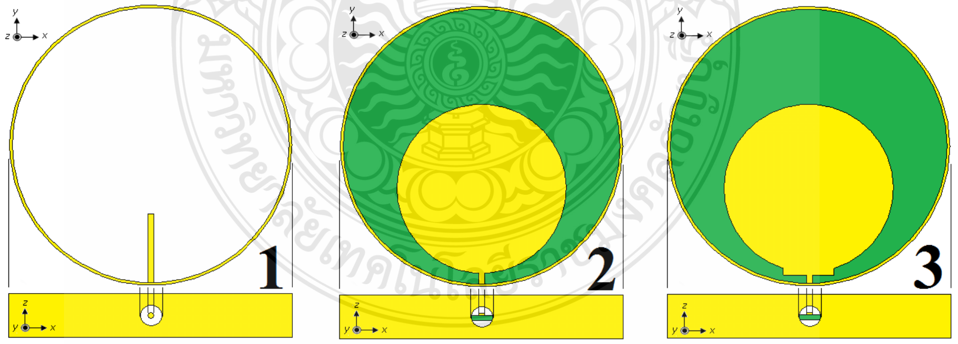
รูปแบบโพรบ	f_c (GHz)	BW (GHz)	BW (%)	Gain (dBi)
สามเหลี่ยม	3.53	3.25-3.81	15.86	7.09
สี่เหลี่ยม	2.72	1.82-3.62	66.18	5.68
ห้าเหลี่ยม	1.92	1.63-2.21	30.21	4.46
วงกลม	7.36	1.98-12.74	146.2	9.12

จากตารางที่ 2.1 พบว่าคุณลักษณะของสายอากาศที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบรูปวงกลมมีค่าเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์เท่ากับ 146.2 และมีอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 9.12 dBi ซึ่งมีคุณลักษณะที่ดีที่สุด อีกทั้งพบว่าการเพิ่มโครงสร้างของท่อนำคลื่นรูปวงแหวนจะส่งผลให้สายอากาศมีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานมีลักษณะเป็นแบบสองทิศทาง ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเทคนิคการออกแบบสายอากาศที่มีการป้อนโพรบรูปวงกลม และการเพิ่มโครงสร้างของท่อนำคลื่นรูปวงแหวนมาเป็นแนวทางในการพัฒนาสายอากาศต้นแบบ

ปิยดนัย บุญไมตรี และคณะ [2] ได้ออกแบบสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบที่มีโพรบรูปวงกลมร่วมกับท่อนำคลื่นรูปวงแหวน สำหรับการใช้งานการสื่อสารแบบไร้สาย โดยใช้โปรแกรม CST ในการวิเคราะห์และการจำลองแบบ สายอากาศถูกสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR4 ซึ่งมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ε_r) เท่ากับ 4.3 ความหนาของวัสดุฐานรอง (h) เท่ากับ 0.764 มิลลิเมตร และความหนาของแผ่นทองแดง (t_c) มีขนาดเท่ากับ 0.017 มิลลิเมตร โครงสร้างสายอากาศและขั้นตอนการออกแบบสายอากาศแสดง ดังรูปที่ 2.2 และ รูปที่ 2.3 ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบที่มีโพรบรูปวงกลม [2]



(ก) ขั้นตอนที่ 1 (ข) ขั้นตอนที่ 2 (ค) ขั้นตอนที่ 3

รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบที่มีโพรบรูปวงกลม [2]

จากรูปที่ 2.2 และ รูปที่ 2.3 แสดงขั้นตอนการออกแบบสายอากาศรูปวงแหวน โดยเริ่มจากการคำนวณหาความยาวคลื่นของความถี่พื้นฐาน ดังสมการ (2.1) จากนั้นออกแบบท่อนำคลื่นรูปวงแหวนดังรูปที่ 2.3(ก) ซึ่งสามารถคำนวณรัศมีของวงแหวนได้ ดังสมการ (2.2) จากนั้นทำการออกแบบโพรบรูปวงกลม ดังรูปที่ 2.3(ข) และคำนวณรัศมีของโพรบรูปวงกลม ดังสมการ (2.3) และ สมการ (2.4) ขั้นตอนสุดท้ายคือการเพิ่มสตับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ตำแหน่งด้านล่างของโพรบวงกลม ดังรูปที่ 2.3(ค)

ความยาวคลื่นที่ใช้ในการออกแบบสามารถคำนวณได้ ดังสมการ (2.1) [2]

$$\lambda_c = \frac{c}{f}(1.5) \tag{2.1}$$

รัศมีวงแหวนวงกลม (r_1) สามารถคำนวณได้ ดังสมการ (2.2) [2]

$$r_1 = \frac{(\lambda_c)(1.8412)}{2\pi} \tag{2.2}$$

ความยาวคลื่นของความถี่คัทออฟสามารถคำนวณได้ ดังสมการ (2.3) [2]

$$(\lambda_r = \frac{c}{f_r}) \tag{2.3}$$

รัศมีโพรบรูปวงกลม (r_2) สามารถคำนวณได้ ดังสมการ (2.4) [2]

$$(r_2 = \frac{\lambda_r}{4\pi}) \tag{2.4}$$

เมื่อ r_1 คือรัศมีของท่อนำคลื่นรูปวงแหวน

r_2 คือรัศมีของโพรบรูปวงกลม

f คือความถี่คัทออฟ

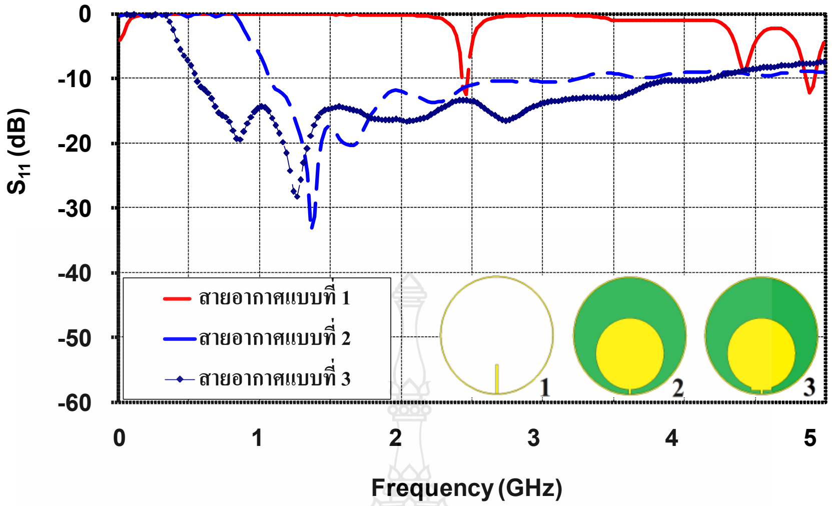
λ_c คือความยาวคลื่นของความถี่คัทออฟ

f_r คือความถี่เรโซแนนซ์

λ_r คือความยาวคลื่นของความถี่เรโซแนนซ์

c คือความเร็วแสง

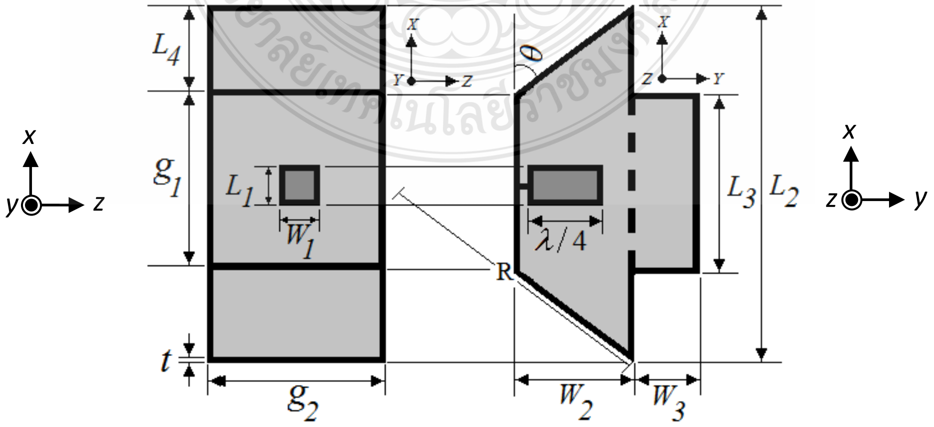
จากการจำลองแบบของสายอากาศด้วยโปรแกรม CST ได้ผลดังแสดง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ผลการเปรียบเทียบค่า (s_{11}) เมื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสายอากาศ

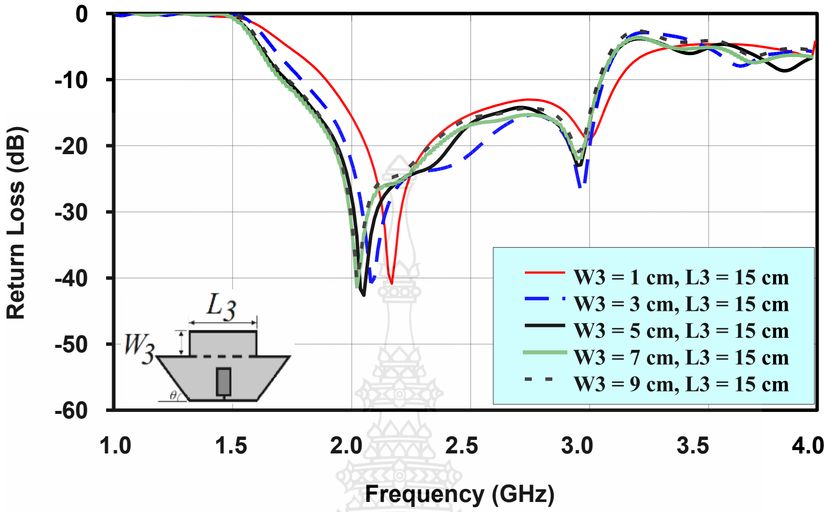
จากกราฟ รูปที่ 2.4 พบว่าเมื่อเพิ่มสตับรูปตัวไอลักษณะแนวนอนตรงตำแหน่งด้านล่างของโพรบรูปวงกลม และทำการปรับจูนสตับโดยปรับขนาดความกว้าง (W_1) และความยาว (L_1) จะส่งผลทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศเปลี่ยนแปลงไป และที่สำคัญจะทำให้ช่วงความถี่ใช้งานของสายอากาศเกิดการเลื่อนตำแหน่ง ทำให้สามารถปรับการเลื่อนช่วงความถี่ใช้งานได้ตามทิศทางที่ต้องการ ซึ่งเทคนิคการปรับจูนนี้จะถูกนำไปเป็นแนวทางพัฒนาสายอากาศต่อไป

Wannop Lakvaengmon และคณะ [3] ได้ออกแบบสายอากาศที่ใช้โพรบป้อนสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าร่วมกับโครงสร้างสายอากาศปากแตรทรงสี่เหลี่ยมสองชั้น โดยโครงสร้างทั้งหมดถูกสร้างบนแผ่นโลหะที่มีความหนา 0.22 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างสายอากาศที่มีโพรบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าร่วมกับโครงสร้างปากแตร [3]

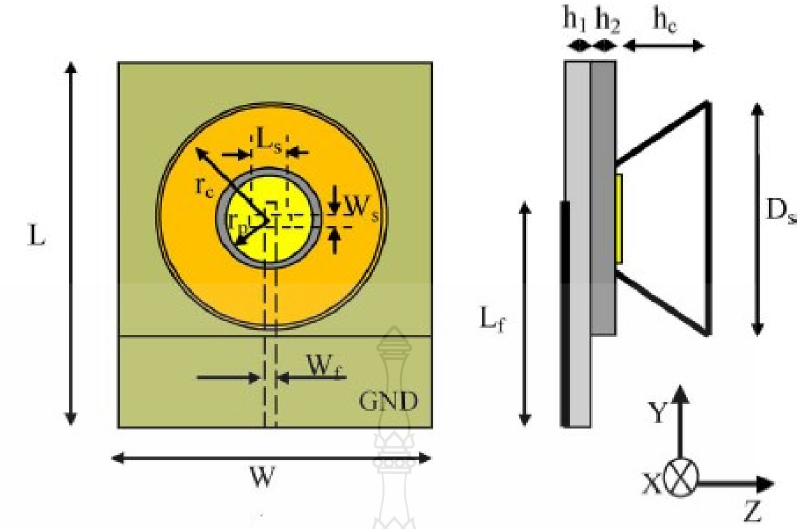
สิ่งที่น่าสนใจของงานวิจัยนี้ คือเทคนิคการปรับจูบสายอากาศให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่ที่ต้องการ โดยมีการปรับจูนโพรบป้อนสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อปรับขนาดของสตับ [3]

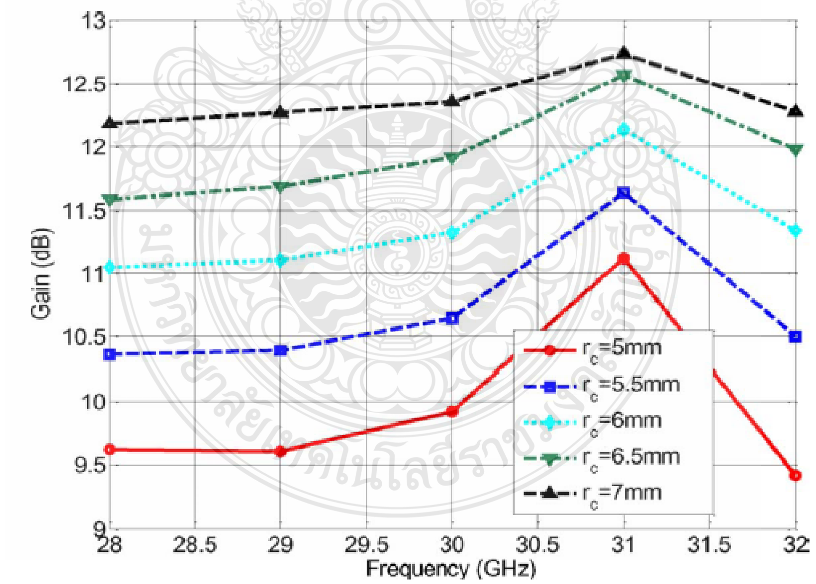
จากกราฟ รูปที่ 2.6 พบว่าเมื่อทำการปรับขนาดความกว้าง (W_1) และความยาว (L_1) ของโพรบ ป้อนสัญญาณ จะส่งผลทำให้ความถี่เรโซแนนซ์และความกว้างของช่วงความถี่ใช้งานเปลี่ยนไป โดยค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด คือความกว้าของโพรบเท่ากับ 5 เซนติเมตร และความยาวของโพรบมีขนาดเท่ากับ 15 เซนติเมตร เมื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ พบว่ามีค่าสูงถึง 84 เปอร์เซ็นต์ (1.59–3.34 GHz) ครอบคลุมความถี่ใช้งานดังนี้คือ DCS, PCS, IMT-2000, WLAN และ WiMAX อีกทั้งพบว่าการเพิ่มโครงสร้างปากแตรสองชั้นทำให้สายอากาศมีอัตราการขยายเพิ่มขึ้นเป็น 7.59 dBi

Huanbin Jiang และคณะ [4] ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบ โครงสร้างของสายอากาศในส่วนนี้ถูกสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR4 ร่วมกับโครงสร้างปากแตรทรงกรวยซึ่งใช้วัสดุเป็นแผ่นทองแดง โครงสร้างทั้งหมดแสดง ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สายอากาศโมโนโพลแบบระนาบร่วมกับโครงสร้างปากแตรทรงกรวย [4]

สิ่งที่น่าสนใจของงานวิจัยนี้ คือมีการเปรียบเทียบความแตกต่างของอัตราขยาย ในกรณีที่โครงสร้างปากแตรทรงกรวยมีรัศมีแตกต่างกัน จากผลการจำลองแบบพบว่าได้กราฟ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของอัตราขยายเมื่อรัศมีโครงสร้างปากแตรต่างกัน [4]

จากการวิเคราะห์กราฟ รูปที่ 2.8 ได้ข้อสรุปว่าขนาดรัศมีของโครงสร้างปากแตรจะมีผลต่ออัตราขยาย เมื่อรัศมีของสายอากาศเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้อัตราขยายเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย และเมื่อสังเกตจากกราฟจะพบว่า อัตราขยายของสายอากาศจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ แต่จะลดลงเมื่อความถี่ของสายอากาศเท่ากับ 31 GHz ซึ่งสามารถนำข้อสรุปที่ได้จากงานวิจัยนี้มาเป็นแนวทางในการพัฒนาสายอากาศต่อไป

Sachin Kalraiya และคณะ [5] ได้สร้างสายอากาศที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ 2 ย่านความถี่ คือ WLAN 2.4 GHz (2.4-2.5 GHz) และ WiMAX 3.5 GHz (3.3-3.6 GHz) ซึ่งสายอากาศถูกออกแบบบนแผ่น FR4 โดยโครงสร้างหลักของสายอากาศประกอบด้วยสตริปรูปตัว U กลับด้าน และสตริปรูปตัว L กลับด้าน สายอากาศมีการปรับปรุงในส่วนของระนาบกราวด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายอากาศ แต่ข้อเสียคือโครงสร้างของสายอากาศมีความซับซ้อนทั้งด้านการออกแบบและการปรับจูน

Phairote Wounchoum และคณะ [6] ได้ออกแบบสายอากาศที่ใช้โพรบป้อนสัญญาณรูปวงกลมร่วมกับโครงสร้างปากแตรรูปเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งถูกออกแบบให้ส่งสัญญาณบริเวณภายนอกอาคาร โดยสายอากาศมีความถี่ใช้งานอยู่ที่ 2.4 GHz (2.4–2.48 GHz) มีการแพร่กระจายคลื่นแบบเจาะจงทิศทางเดียว มีความถี่เรโซแนนซ์ที่ตำแหน่งค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับน้อยกว่า -30 dB และการเพิ่มโครงสร้างปากแตรรูปเอกซ์โพเนนเชียลทำให้อัตราการขยายของสายอากาศอยู่ที่ 14.6 dBi สิ่งที่น่าสนใจของงานวิจัยนี้คือการออกแบบโครงสร้างสายอากาศที่นำโพรบซึ่งถูกล้อมรอบด้วยวงแหวนมาประยุกต์ใช้ ทำให้ง่ายต่อการออกแบบและสูตรในการคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆทำได้ไม่ยาก นอกจากนี้การนำเทคนิคการเพิ่มโครงสร้างปากแตรมาใช้เพื่อเพิ่มอัตราขยายเป็นเทคนิคที่น่าสนใจ แต่ข้อเสียคือมีการแพร่กระจายคลื่นเพียงทิศทางเดียวและนำมาประยุกต์ใช้กับความถี่ได้เพียงช่วงความถี่เดียว ซึ่งยังไม่ตรงกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

Amnoiy Ruengwaree และคณะ [7] ได้ออกแบบสายอากาศที่มีช่วงความถี่กว้างโดยใช้เทคนิคการปรับจูนสตับรูปตัว L และการปรับจูนสตับรูปตัว I จากเทคนิคการปรับจูนดังกล่าวทำให้สายอากาศมีช่วงความถี่ใช้งานกว้างขึ้น โดยมีเปอร์เซ็นต์แบนด์วิทด์อยู่ที่ 100.67% (2.05-6.18 GHz) สามารถตอบสนองการใช้งาน ตามมาตรฐาน WLAN/WiMAX ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเทคนิคการปรับจูนช่วงความถี่โดยการปรับจูนสตับรูปตัว I มาเป็นแนวทางในการพัฒนาสายอากาศ

Yingsong LI และคณะ [8] ได้ออกแบบสายอากาศที่มีการใช้งานในสามช่วงความถี่ โดยใช้เทคนิคการปรับจูนด้วยสตับรูปตัว T ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยสายอากาศวงแหวน โดยสายอากาศดังกล่าว

สามารถตอบสนองการใช้งานในช่วงความถี่ตามมาตรฐานของการสื่อสารแบบไร้สาย WLAN (5.2-5.9 GHz), HIPERLAN (4.0-4.4 GHZ) และ C-band (7.8-8.0 GHz)

Amnoiy Ruengwaree and Wannop Lakvaengmon [9] ได้ออกแบบสายอากาศที่มีการนำเทคนิคการปรับจูนโพรบรูปวงกลมและตัวไอที่มีลักษณะแนวนอนเพื่อขยายแบนด์วิดท์ ส่งผลทำให้สายอากาศสามารถตอบสนองความถี่ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b/g/n 2.45 GHz (2.4-2.48 GHz) และ IEEE 802.16e 3.5 GHz (3.4-3.69 GHz) และงานวิจัยนี้พัฒนาสายอากาศให้มีแบบรูปการแผ่พลังแบบสองทิศทาง โดยใช้สายอากาศแบบวงแหวนต่อเชื่อมล้อมรอบโพรบ นอกจากนี้ยังเพิ่มโครงสร้างปากแตรรูปทรงกรวยให้กับสายอากาศ ทำให้อัตราขยายเพิ่มมากขึ้น

S. Kornsing และคณะ [10] ได้ออกแบบโครงสร้างสายอากาศวงแหวนที่มีการปรับจูนของโพรบรูปวงกลม โดยได้นำไปประยุกต์ใช้งานในระบบไมโม ด้วยเทคนิคการจัดเรียงสายอากาศแบบกลับด้านเพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ โดยโครงสร้างสายอากาศถูกออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ซึ่งมีค่าไดอิเล็กตริกของสายอากาศมีค่าเท่ากับ $(\varepsilon_r) = 4.3$ และค่าความหนาแน่นของวัสดุฐานรอง $(h) = 0.764$ มิลลิเมตร สายอากาศนี้ได้นำไปประยุกต์ใช้งานในช่วงความถี่ 1–4 GHz มีอัตราการขยายอยู่ที่ 4.19 dBi

A. Azman และคณะ [11] งานวิจัยนี้ได้ออกแบบสายอากาศแบบใหม่ ซึ่งได้นำสายอากาศแบบโมโนโพลมาประยุกต์ใช้ โดยมีโครงสร้างของโพรบเป็นรูปตัว L และรูปตัว U กลับด้าน สายนำสัญญาณระนาบคู่ และป้อนสัญญาณจากสายนำสัญญาระนาบคู่ (CPW)โดยสายอากาศดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับความถี่ใช้งานสองช่วงความถี่คือ 2.4 GHz และ 5.2 GHz โดยที่ความถี่ 2.4 GHz มีอัตราขยายเท่ากับ 1.18 dBi และที่ความถี่ 5.2 GHz มีอัตราขยายเท่ากับ 2.4 dBi ซึ่งจากผลการวัดสายอากาศพบว่าสายอากาศสามารถใช้งานได้ตามความถี่ที่ต้องการ แต่มีข้อเสียคืออัตราขยายค่อนข้างต่ำ

จากการทบทวนวรรณกรรมทำให้ได้แนวทางการพัฒนาสายอากาศ โดยเลือกใช้โพรบป้อนสัญญาณรูประนาบวงกลมที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR4 เนื่องจากสายอากาศชนิดนี้ให้ผลตอบสนองความถี่ใช้งานที่มีช่วงความถี่กว้าง อีกทั้งให้ค่าอัตราขยายสูงและง่ายต่อการออกแบบ [1, 2, 3, 5, 10, 11] นอกจากนี้ยังได้แนวทางการปรับจูนโพรบป้อนสัญญาณเพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ โดยการปรับจูนสตับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ตำแหน่งด้านล่างของโพรบรูปวงกลม [7, 8, 9, 12] อีกทั้งเลือกพัฒนาสายอากาศโดยใช้ท่อนำคลื่นรูปวงแหวน เนื่องจากสายอากาศชนิดนี้ให้แบบรูปการแผ่พลังงานในลักษณะสองทิศทาง ซึ่งจะครอบคลุมพื้นที่ใช้งานตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย [14,16] ในส่วนของโครงสร้างสายอากาศที่ทำหน้าที่เพิ่มอัตราขยาย ได้แนวทางการพัฒนาสายอากาศโดยใช้โครงสร้างปากแตร

เนื่องจากการคำนวณและออกแบบโครงสร้างของสายอากาศไม่ซับซ้อน และให้อัตราขยายสูง [4, 6, 13, 17]

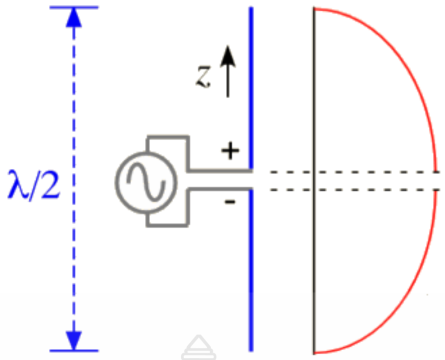
2.2 สายอากาศไดโพลและสายอากาศโมโนโพล [18]

สายอากาศ (Antenna) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบสื่อสารโทรคมนาคมที่มีอากาศเป็นสายนำสัญญาณ โดยคำจำกัดความของสายอากาศตาม Webster's Dictionary; IEEE Standard Definition Terms of Antennas คือ อุปกรณ์ที่เป็นตัวนำหรือส่วนประกอบของตัวนำสำหรับรับส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางในอากาศนั้นประกอบไปด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางตั้งฉากกันเสมอและตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นที่เดินทาง บางครั้งเราเรียกว่าคลื่นโหมด TEM (Transverse Electric Magnetic) สายอากาศแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด เช่น สายอากาศเส้นลวด (Wire Antenna) สายอากาศช่องเปิด (Aperture Antenna) สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna) เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการพัฒนาการสื่อสารแบบไร้สาย แนวทางการออกแบบสายอากาศมีความแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับรูปแบบของระบบที่ต้องการใช้งานร่วมกับสายอากาศ ซึ่งสายอากาศที่ทำงานในระบบการสื่อสารแบบไร้สายที่ถูกนำมาใช้คือสายอากาศไดโพลและสายอากาศโมโนโพล

2.2.1 สายอากาศไดโพลและไดโพลอุดมคติ

สายอากาศไดโพล (Dipole antenna) เป็นสายอากาศที่มีความนิยมอย่างมาก และมีโครงสร้างง่ายที่สุดประกอบด้วยเส้นลวดสองเส้นที่มีความยาว L วางเป็นแนวเส้นตรง ดังรูปที่ 2.9 โดยจุดกึ่งกลางของตัวไดโพลจะประกอบเข้ากับเครื่องส่งซึ่งใช้สายส่งเป็นตัวกลางเพื่อที่จะทำการเชื่อมต่อ เครื่องส่งจะจ่ายสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับไปยังสายอากาศ กระแสของสัญญาณจะไหลไปยังขั้วหนึ่งของไดโพลและไหลกลับมาอีกขั้วหนึ่งของไดโพล ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของกระแสที่ส่งไปยังขั้วแรกของไดโพล

การแจกแจงรูปของกระแส (Current distribution) ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าขนาดของสัญญาณกระแสสลับที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของสายอากาศไดโพลซึ่งมีค่าไม่เท่ากัน โดยที่ปลายทั้งสองจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดกลางหรือจุดอื่นๆ บนตัวไดโพล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวของไดโพลและความถี่ของสัญญาณที่มาจากเครื่องส่ง



รูปที่ 2.9 สายอากาศไดโพลอุดมคติ (Ideal dipole antenna) [18]

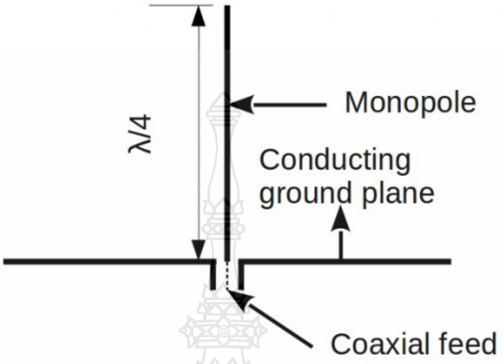
สายอากาศไดโพลมีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ถูกใช้เป็นสายอากาศมาตรฐาน ที่เรียกว่า สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น (Half wavelength Dipole หรือ $\lambda/2-Dipole$) โดยอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ $\lambda/2-Dipole$ นี้มีค่าเท่ากับ $73+j42.5\Omega$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ มีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง ซึ่งสายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศที่นิยมนำมาใช้งานในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศใกล้เคียงกับหัวต่อคอนเนกเตอร์ SMA 50 โอห์ม ทำให้ไม่ต้องใช้วงจรแปลงค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มเติม ผลลัพธ์ที่ได้คือสามารถออกแบบแผงสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีราคาถูก (Low cost) ขนาดเล็กกะทัดรัด (Compact) และมีรูปทรงสัณฐานต่ำ (Low profile) อีกทั้งยังให้คุณสมบัติการทำงานของสายอากาศเป็นไปตามที่ต้องการได้ง่าย

2.2.2 สายอากาศโมโนโพล (Monopole antenna)

ปัจจุบันสายอากาศที่ทำงานในระบบการสื่อสารแบบไร้สายที่ถูกนำมาใช้งานมากที่สุดคือ สายอากาศแบบโมโนโพล (Monopole antenna) โดยสายอากาศแบบปลอก (Sleeve antenna) เป็นสายอากาศโมโนโพลที่นิยมนำมาใช้มากที่สุด เนื่องจากมีคุณลักษณะเป็นแถบกว้าง (Broadband characteristics) และเป็นสายอากาศชนิดหนึ่งที่โครงสร้างไม่ยุ่งยาก บางครั้งเรียกสายอากาศชนิดนี้ว่า สายอากาศแบบเส้น (Whip antenna) ทำหน้าที่ในการแผ่กระจายคลื่น ถูกติดตั้งอยู่บนระนาบกราวด์แบบอนันต์ ซึ่งสายอากาศนี้จะมีคุณลักษณะคล้ายกับสายอากาศไดโพล ในทางปฏิบัติสายอากาศโมโนโพลมีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพล ถ้าระบบกราวด์ที่กว้างจะทำให้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแตกต่างจากระนาบกราวด์แบบอนันต์

สายอากาศโมโนโพลเป็นสายอากาศที่มีขั้วเดียวที่มีความยาวเท่ากับ $\lambda/4$ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ Omnidirectional และมีโพลาไรเซชันตามแนวของเส้นลวดตัวนำเช่นกัน สายอากาศโมโนโพลเป็นสายอากาศที่วางตั้งเหนือกราวน์เพลน (Ground plane) หรือพื้นดิน

โดยใช้ทฤษฎีเงา (Image theory) สายอากาศโมโนโพลนิยมนำมาใช้งานในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าใกล้เคียงกับหัวต่อคอนเนกเตอร์ SMA 50 โอห์ม ทำให้ไม่ต้องใช้วงจรแปลงค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มเติม โครงสร้างสายอากาศโมโนโพล แสดงดังรูปที่ 2.10

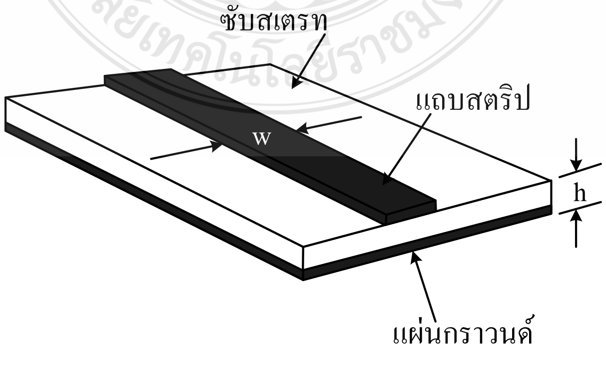


รูปที่ 2.10 สายอากาศโมโนโพลอุดมคติ (Ideal monopole antenna) [18]

2.3 สายอากาศไมโครสตริปและสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ [19]

2.3.1 สายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปเป็นสายนำสัญญาณที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์และใช้ในการเชื่อมชิ้นส่วนของวงจรต่างๆ เนื่องจากไมโครสตริปมีขนาดเล็กมากจึงเหมาะสมกับการทำวงจรรวม แต่มีข้อจำกัดคือสามารถรับกำลังได้ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับท่อนำคลื่น นอกจากนี้ยังมีค่าลดทอนสัญญาณค่อนข้างสูงด้วย โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปประกอบด้วยสามส่วนคือ ส่วนบนเป็นแถบสตริปทำหน้าที่แผ่กระจายคลื่น ส่วนที่สองเป็นวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกที่อยู่ระหว่างกราวด์กับส่วนของการแผ่กระจายคลื่นที่เป็นแผ่นตัวนำ ส่วนที่สามเป็นส่วนกราวด์ แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป [19]

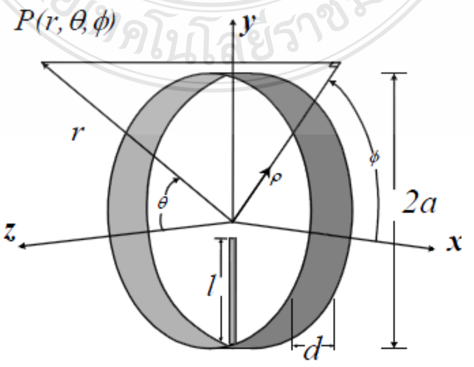
2.3.2 สายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์

สายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed antenna) เป็นสายอากาศที่ถูกพัฒนาหลังจากที่มีการนำเสนอสายอากาศไมโครสตริปแล้ว สายอากาศนี้มีความยาวเท่ากับ $\lambda/4$ ถูกสร้างบนแผ่นวงจรที่มีลักษณะเป็นแผ่นตัวนำ (Patch) ที่วางอยู่บนแผ่นไดอิเล็กตริก (Dielectric) ซึ่งเรียกว่า (Substrate) โดยมีการป้อนกำลังงานให้กับสายอากาศโมโนโพลโดยผ่านสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป และอาศัยกราวน์เพลนของสายอากาศนำสัญญาณแบบไมโครสติปเป็นกราวน์เพลนแบบอนันต์ของสายอากาศไปในตัว (เคาท์เตอร์โพซ หรือ Counterpoise) จึงทำให้สายอากาศโมโนโพลมีโครงสร้างเป็นแบบราบ (Flat) บาง เบา เล็กกะทัดรัด ราคาถูก และโดยทั่วไปจะมีรูปทรงสัณฐานต่ำ กล่าวคือออกแบบง่ายแต่ประสิทธิภาพในการใช้งานต่ำลง แต่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

คุณสมบัติของสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์มีดังนี้ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีทั้งแบบ Omnidirectional และ Uni-directional ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของ Patch เนื่องจากสายอากาศโมโนโพลที่สร้างขึ้นมาถูกสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ ดังนั้นค่าความยาวคลื่นที่ใช้เพื่อสร้างสายอากาศ จึงมีความยาวคลื่นไม่เท่ากับความยาวคลื่นในอากาศ

2.4 สายอากาศสองทิศทางที่ใช้วงแหวนวงกลมล้อมรอบโพรบ [20]

โครงสร้างของสายอากาศชนิดนี้ประกอบด้วยโพรบเชิงเส้นยาว l ยื่นออกมาจากสายนำสัญญาณเคเบิลแกนร่วม (Coaxial) โดยมีรัศมีและความหนาของวงแหวนเป็น a และ d ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศชนิดนี้คือ a มีค่าเท่ากับ 0.3019λ, d มีค่าเท่ากับ 0.154λ และ l มีค่าเท่ากับ 0.24λ สำหรับเส้นลวดตัวนำที่วางในแนวแกน y ซึ่งพิจารณาให้วงแหวนเป็นส่วนหนึ่งของท่อนำคลื่นทรงกระบอกกลมที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเดินทางไปตามทิศทางแนว z และ $-z$ และจะมีการแพร่กระจายคลื่นของสนามดังกล่าวที่ช่องเปิดของวงแหวนทั้งสอง



รูปที่ 2.12 สายอากาศสองทิศทางที่ใช้วงแหวนวงกลมล้อมรอบเส้นลวดตัวนำ [20]

สมการของสนามการแพร่กระจายคลื่นทั้งหมดของสายอากาศ เกิดจากผลรวมของสนามจากแต่ละช่องเปิดที่แพร่กระจายออกไปในทิศทางตรงกันข้ามกันแต่มีเฟสตรงกัน โดยสมการของสนามที่แพร่กระจายคลื่นจะไม่คิดผลการเลี้ยวเบนจากขอบของวงแหวนตัวนำและการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดทั้งสอง ซึ่งผลลัพธ์สมการสนามของสายอากาศ แสดงได้ดังสมการ (2.5) และ (2.6)

$$E_\theta = -\frac{ke^{-jkr}}{\varepsilon r} E_{11} 2a \sin ø J_1(1.8412) \frac{J_1(ka \sin\theta)}{ka \sin\theta} \sin(\frac{1}{2} kd \cos\theta \qquad (2.5)$$

$$E_\theta = -\frac{ke^{-jkr}}{\varepsilon r} E_{11} 2a \cos\theta \cos ø \frac{(1.8412)^2 J_1(1.8412)}{(1.8412)^2-(ka \sin\theta)^2} J'_1(\frac{1}{2} kd \cos\theta) \qquad (2.6)$$

เมื่อ A_{11} คือแอมพลิจูดสัมพัทธ์ของสนามในโหมด TE_{11}

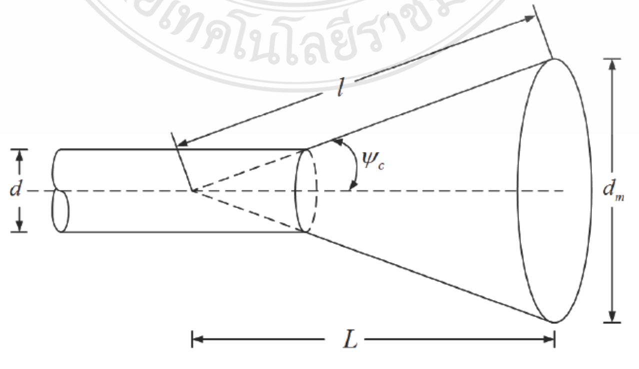
J_1 คือฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่หนึ่ง

k คือเลขคลื่นในช่องว่างอิสระ

2.4.1 สมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของช่องเปิดในแกน X

จากโครงสร้างสมการสนามไฟฟ้าที่ใช้กับสายอากาศดั้งเดิมนั้น เมื่อนำมาใช้หาค่าพารามิเตอร์ของไดเวอร์ซิตี้เชิงตำแหน่งนั้นจะไม่สามารถนำมาหาได้โดยตรง เนื่องจากสมการสนามไฟฟ้านั้นใช้สำหรับช่องเปิดที่ชี้ไปตามทิศทางแนวแกน Z แต่ค่าพารามิเตอร์ของไดเวอร์ซิตี้เชิงตำแหน่งนั้น ได้กำหนดการชี้ทิศทางไปตามแนวแกน X ซึ่งต่างทิศทางกัน ดังนั้นจำเป็นต้องหาสมการสนามไฟฟ้าในกรณีที่ปากวงแหวนชี้ไปในทิศทาง Z

2.5 สายอากาศปากแตรทรงกรวย (Conical horn antenna) [21]



รูปที่ 2.13 สายอากาศปากแตรรูปทรงกรวย [21]

จาก รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างของสายอากาศปากแตรรูปกรวย (Conical horn antenna) ซึ่งเป็นสายอากาศอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับความนิยมนำมาใช้อย่างมากในการเพิ่มอัตราขยาย ซึ่งอัตราขยายของสายอากาศชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับรัศมีของปากแตรทรงกรวย ส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้กับย่านความถี่ไมโครเวฟ สายอากาศปากแตรทรงกรวยมีจุดเด่นคล้ายกันกับสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular horn antenna) โดยปกติสายอากาศปากแตรรูปกรวยนิยมกระตุ้นโดยท่อนำคลื่นทรงกระบอก (Cylindrical waveguide) ซึ่งจะทำงานในโหมด TE11 และนอกจากนี้ยังสามารถต่อร่วมกับท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular waveguide)

สำหรับสายอากาศปากแตรทรงกรวยเราไม่สามารถควบคุมความกว้างของแถบความถี่ในระนาบหลักได้อย่างอิสระ ท่อนำคลื่นวงกลมสามารถรองรับในแนวแกนสนามไฟฟ้าใดๆ ได้ขึ้นอยู่กับความต้องการโพลาไรเซชันภายในสายอากาศปากแตร ในการวิเคราะห์ขนาดอะเพอเจอร์ของสายอากาศปากแตรทรงกรวยเราใช้วิธีคล้ายกับสายอากาศปากแตรมุมฉาก กรวยของสายอากาศปากแตรไปยังจุดป้อนของท่อนำคลื่น เฟสที่อะเพอเจอร์มีค่าประมาณสมการกำลังสอง โดยสมการสนามของท่อนำคลื่น ดังสมการ 2.7 และ สมการ 2.8

$$E_{\rho} = \frac{E_0}{\rho} J_1^{'}(\frac{x_{11}^{'}\rho}{a})\cos\phi_c \tag{2.7}$$

$$E_{\rho} = -\frac{E_0}{\rho} J_1^{'}(\frac{x_{11}^{'}\rho}{a})\sin\phi_c \tag{2.8}$$

เมื่อ $J_1^{'}$ คือฟังก์ชันเบสเซล

$x_{11}^{'}$ คือความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเบสเซลของโหมดในท่อนำคลื่น

ρ คือองค์ประกอบการแพร่กระจายในท่อนำคลื่น

a คือรัศมีท่อนำคลื่น

ϕ_c คือค่าพิกัดทรงกระบอก

2.6 พารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศที่ใช้ในงานวิจัย [22]

2.6.1 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) [22]

VSWR คืออัตราส่วนของแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุดของรูปคลื่นนิ่งบนสายนำสัญญาณ อัตราส่วนนี้ถูกนำมาวิเคราะห์การแมตช์อิมพีแดนซ์ว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด โดยถ้าค่า VSWR

เท่ากับ 1 หมายความว่าคลื่นเคลื่อนที่ด้วยแรงดันสม่ำเสมอตลอดสายสัญญาณ ซึ่งเป็นสภาวะแมตช์อิมพีแดนซ์พอดี ค่า VSWR สามารถคำนวณได้ ดังสมการ (2.9)

$$VSWR = \frac{|V_{\max}|}{|V_{\min}|} = \frac{|I_{\max}|}{|I_{\min}|} = \frac{|1-|\Gamma||}{|1+|T||} \quad (2.9)$$

เมื่อ VSWR คือค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง

$V_{\max}$ คือค่าแรงดันสูงสุด

$V_{\min}$ คือแรงดันต่ำสุด

$I_{\max}$ คือกระแสสูงสุด

$I_{\min}$ คือกระแสต่ำสุด

Γ คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดันยังสามารถหาได้จากอัตราส่วนผลต่างและผลรวมระหว่างโหลดกับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ ดังสมการ (2.10)

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.10)$$

เมื่อ Γ คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

V_r คือแรงดันสะท้อนกลับ

V_i คือแรงดันตกกระทบ

Z_L คือโหลดอิมพีแดนซ์

Z_0 คืออิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

การคำนวณค่า VSWR ที่ยอมรับได้ สามารถคำนวณได้จากการนำค่าอ้างอิงของ S_{11} ที่กำหนดช่วงความถี่ใช้งาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ -10 dB มาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Γ) โดยสามารถคำนวณได้ ดังสมการ (2.11) ดังนี้

$$S_{11} = -10\log|\Gamma|^2$$

เมื่อแทนค่า $S_{11} = 10\, dB$ จะได้

$$-10\log|\Gamma|^2 = 10$$

$$\log|\Gamma|^2 = -1$$

$$|\Gamma|^2 = 10^{-1} = 0.1$$

$$|\Gamma| = \sqrt{0.1}$$

$$|\Gamma| = 0.3162$$

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Γ) ที่ยอมรับได้ จะมีค่า 90 เปอร์เซ็นต์ของ $|\Gamma|$ ที่คำนวณได้ ดังนั้นค่าที่ยอมรับได้จะมีค่าเท่ากับ $|\Gamma| = 0.9 \times 0.316 = 0.284$ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหา ค่า VSWR ดังสมการ (2.9) จะได้

$$VSWR = \frac{|1-|\Gamma||}{|1+|\mathrm{T}||} = \frac{1+0.284}{1-0.284} = \frac{1.284}{0.7156} = 1.794$$

ดังนั้นค่า VSWR ที่ยอมรับได้จะมีค่าเท่ากับ 1.794

2.6.2 การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss)

การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศ แสดงค่ากำลังสูญเสียที่โหลด เมื่ออิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณและสายอากาศไม่แมตช์อิมพีแดนซ์กัน การสูญเสียย้อนกลับมีความสัมพันธ์กับ VSWR ซึ่งเป็นการแสดงการแมตช์อิมพีแดนซ์ระหว่างสายนำสัญญาณกับสายอากาศ โดยการสูญเสียย้อนกลับสามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.11)

$$S_{11} = -10\log|\Gamma|^2 \tag{2.11}$$

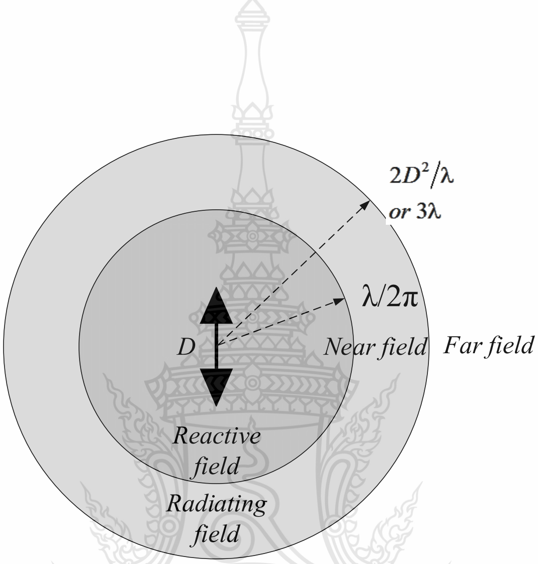
สำหรับการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่สมบูรณ์ระหว่างสายนำสัญญาณและสายอากาศ เมื่อ $\Gamma = 0$ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเป็นอนันต์ แสดงว่าไม่มีกำลังงานสะท้อนกลับ ในทำนองเดียวกันเมื่อ $\Gamma=1$ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับจะเป็น 0 dB ซึ่งแสดงว่าไม่มีกำลังสะท้อนกลับ

2.6.3 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Wave radiation pattern)

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ เป็นการนำเสนอคุณสมบัติในการแผ่กำลังงานของสายอากาศในรูปฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ตามพิกัดตำแหน่ง (Space coordination) การพิจารณาแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมี 3 ระยะ คือที่ระยะใกล้รีแอกทีฟ (Reactive near field) สนาม

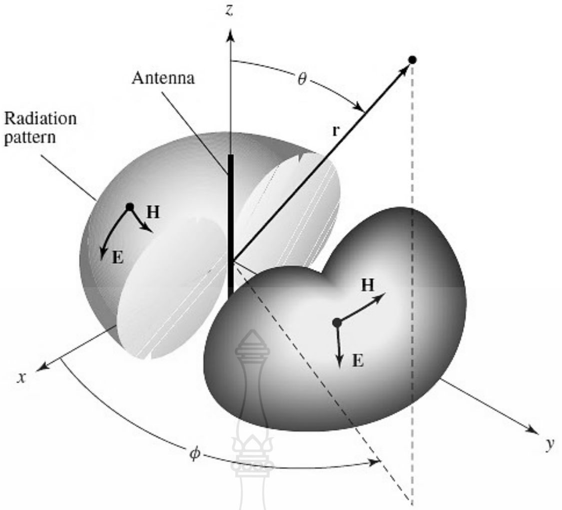
การแผ่กระจายคลื่นระยะใกล้ (Radiating near field) และบริเวณการแผ่กระจายคลื่นสนามระยะไกล (Far-field) โดยแต่ละบริเวณจะพิจารณาจากระยะห่างจากสายอากาศออกไปบริเวณรอบๆ

รูปที่ 2.14 แสดงฟังก์ชันของตำแหน่งการสังเกตตลอดบริเวณรอบๆ สายอากาศเมื่อ D เป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ λ เป็นความยาวคลื่นที่พิจารณา และ r เป็นรัศมีหรือระยะห่างจากสายอากาศ เพื่อให้เห็นถึงสนามแต่ละบริเวณจึงแสดงในรูปของการแผ่กระจายคลื่นในแต่ละตำแหน่งและทิศทางที่เป็นแบบสองมิติ



รูปที่ 2.14 บริเวณสนามการแผ่กระจายคลื่นจากสายอากาศ [22]

ดังนั้นเส้นการกวาดของการแผ่กระจายคลื่นที่ตำแหน่งรัศมีคงที่และรอบสายอากาศเรียกว่า แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation pattern) โดยแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ออกไปรอบตัวเท่ากันหมดหรือรอบทิศทางที่เท่ากันหมดเรียกว่า การแผ่กระจายคลื่นแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) ซึ่งเป็นแบบรูปในอุดมคติที่มีการพิจารณาจากสายอากาศไดโพลขนาดเล็กจิ๋ว ส่วนแบบรูปที่ได้จากสายอากาศไดโพลในอุดมคตินั้น จะเป็นสายอากาศแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional antenna) ดังรูปที่ 2.15 นอกจากนี้หากแบบรูปมีการเปลี่ยนหรือเบนไปจะพิจารณาแบบมีทิศทาง (Direction)



รูปที่ 2.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางของสายอากาศ [22]

2.6.4 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna efficiency) [22]

ประสิทธิภาพของสายอากาศเป็นพารามิเตอร์ที่รวมประสิทธิภาพการสูญเสียที่สายอากาศและในโครงสร้างของสายอากาศ การสูญเสียต่างๆ หาได้จากค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับจากการไม่แมตช์อิมพีแดนซ์ระหว่างสายนำสัญญาณกับสายอากาศ การสูญเสียจากตัวนำและฉนวน ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศสามารถเขียนได้ ดังสมการ (2.12)

$$e_t = e_r e_c e_d \tag{2.12}$$

เมื่อ e_t คือประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ

e_r คือประสิทธิภาพการสะท้อนกลับเนื่องจากการไม่แมตช์อิมพีแดนซ์

e_c คือประสิทธิภาพของตัวนำ

e_d คือประสิทธิภาพของฉนวน (Dielectric)

โดยทั่วไป e_c และ e_d จะรวมเป็นตัวเดียวกัน ดังสมการ (2.13)

$$e_{cd} = e_c e_d = \frac{R_r}{R_r + R_L} \tag{2.13}$$

เมื่อ R_r คือความต้านทานจากการแผ่พลังงานคลื่นออกไป

R_L คือความต้านทานที่โหลด

2.6.5 สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) [22]

สภาพเจาะจงทิศทางเป็นการบอกความสามารถเชิงทิศทางของสายอากาศเป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มของการแพร่พลังงานในทิศทางที่สนใจกับความเข้มของการแพร่พลังงานโดยเฉลี่ย เมื่อมีการแผ่พลังงานออกไปรอบทิศทางอย่างเท่าเทียมกัน โดยไม่คิดกำลังส่วนที่สูญเสียไป ดังสมการ (2.14)

$$D_g = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{\mathrm{P}_{rad}} \tag{2.14}$$

เมื่อ D_g คือไดเรคทีฟเกน (ไม่มีหน่วย)

U คือความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

U_0 คือความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิคพอยท์ซอร์ส (W/หน่วยของมุมตัน)

P_{rad} คือกำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (W)

โดยทั่วไปไม่กำหนดทิศทางใช้สภาพเจาะจงทิศทางในทิศที่สายอากาศแผ่พลังงานได้ดีที่สุด (D_O) ดังสมการ (2.15)

$$D_0 = \frac{U_{\max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{\max}}{\mathrm{P}_{rad}} \tag{2.15}$$

เมื่อ D_0 คือไดเรคติวิตี (ไม่มีหน่วย)

$U_{\max}$ คือค่าสูงสุดของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

U_0 คือความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิคพอยท์ซอร์ส (W/หน่วยของมุมตัน)

P_{rad} คือกำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (W)

2.6.6 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain) [22]

อัตราขยายของสายอากาศเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากสภาพเจาะจง โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่สภาพเจาะจงทิศทางแสดงคุณสมบัติในการชี้ทิศทาง

ของสายอากาศเท่านั้นการคิดอัตราขยายของสายอากาศ วัดเทียบกับสายอากาศอ้างอิง โดยอัตราขยายของสายอากาศส่งคือกำลังสองอัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามตามทิศที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มสนามที่จุดเดียวกันของสายอากาศอ้างอิงหรือแสดงในรูปของอัตราส่วนของค่าพลังงานที่ต้องใช้ในการส่งของสายอากาศทั้งสอง เพื่อให้เกิดความเข้มสนามขนาดเท่ากัน (ณ จุดเดียวกัน) ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุดหรืออัตราขยายของสายอากาศรับ คือ อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มการแผ่พลังงานของสายอากาศทดสอบกับสายอากาศอ้างอิง ณ จุดตั้งสายอากาศที่เดียวกัน

การใช้สายอากาศอ้างอิงมักเป็นแบบไดโพลขนาด $\lambda/2$ หรือแบบไอโซโทรปิค (Isotropic) ซึ่งมีลักษณะพิเศษ คือกระจายคลื่นได้รอบตัวทุกทิศทางในปริมาณที่เท่ากัน อัตราขยายกำลัง (Power gain) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้นั้นจะมีค่าเท่ากับ 4π คูณด้วยอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่งเมื่อไม่กำหนดทิศทางไว้ โดยทั่วไปคิดอัตราขยายกำลังในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ดังสมการ (2.16)

$$Gain = \frac{4\pi U(\theta,\phi)}{P_{in}} \tag{2.16}$$

เมื่อ $U(\theta,\phi)$ คือความแรงของการแพร่กระจายคลื่น

P_{in} คือกำลังงานที่ป้อนให้กับไอโซโทรปิคพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย

โดยทั่วไปอัตราขยายสัมพันธ์ เป็นอัตราส่วนของอัตราขยายกำลังในทิศทางที่กำหนดให้ต่ออัตราขยายกำลังงานของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางที่ป้อนเข้าสายอากาศทั้งสองนั้นต้องเท่ากัน สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบเป็นสายอากาศไดโพล สายอากาศปากแตร หรือสายอากาศอื่นๆ ซึ่งคำนวณอัตราขยายได้ง่ายหรือรู้ค่าอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบเป็นไอโซโทรปิคพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้นจึงได้ G_g ดังสมการ (2.17)

$$G_g = \frac{4\pi U(\theta,\phi)}{P_{in}} \tag{2.17}$$

กำลังที่แพร่กระจายทั้งหมด (P_{rad}) มีความสัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ P_{in} ดังสมการ (2.18)

$$P_{rad} = e_t P_{in} \tag{2.18}$$

เมื่อ e_t คือประสิทธิผลรวมของสายอากาศ

P_{rad} คือกำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด

ทำให้สมการ 2.17 และ 2.18 มีความสัมพันธ์กัน ดังสมการ (2.19)

$$G_g(\theta,\phi) = \frac{\left[4\pi U(\theta,\phi)\right]}{P_{rad}} \tag{2.19}$$

และมีความสัมพันธ์กับอัตราขยายไดเรคติวิตี ดังสมการ (2.20)

$$G_g(\theta,\phi) = e_t D_g(\theta,\phi) \tag{2.20}$$

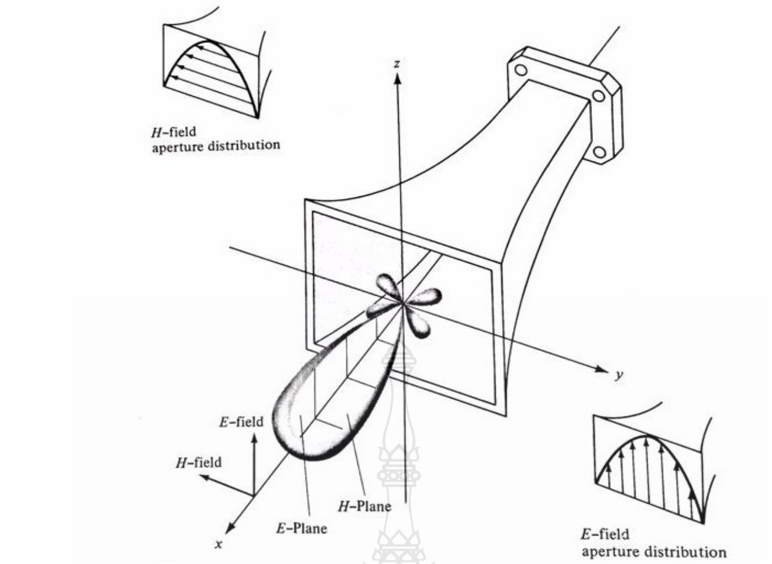
ในทำนองเดียวกัน ค่าสูงสุดของอัตราขยาย (G_o) จะมีความสัมพันธ์กับค่าไดเรคติวิตี ดังสมการ (2.21)

$$G_o = G_g(\theta,\phi)\big|_{\max} \tag{2.21}$$

ในทางปฏิบัติเมื่อกล่าวถึงอัตราขยายของสายอากาศหมายถึงอัตราขยายกำลังที่มีค่าสูงสุด ดังสมการ (2.22)

$$G_o = 10log_{10}\left[e_t D_0\right] \tag{2.22}$$

คุณสมบัติของสายอากาศในเทอมของรูปแบบกระจายคลื่นหลัก (Principal pattern) ของสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก H สำหรับสายอากาศโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น (Linearly polarization) รูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบ E จะเป็นระนาบที่บรรจุเวคเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางของการแผ่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนรูปแบบกระจายคลื่นในระนาบ H จะเป็นระนาบที่บรรจุเวคเตอร์สนามแม่เหล็ก และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ตัวอย่างแบบรูปการแผ่พลังงานหลัก ดังรูปที่ 2.16 โดยมีระนาบ XZ เป็นระนาบ H หลัก



รูปที่ 2.16 แบบรูปการแผ่พลังงานหลักระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร [23]

ค่าอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปสามารถที่จะกำหนดค่าประสิทธิภาพของสายอากาศ ดังสมการ (2.23)

$$G = \eta D \tag{2.23}$$

เมื่อ G คืออัตราขยายของสายอากาศ

D คือสภาพการเจาะจงทิศทาง

η คือประสิทธิภาพของสายอากาศ

2.6.7 อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input impedance) [23]

พิจารณาสายอากาศเสมือนเป็นชิ้นส่วนหนึ่งในวงจรไฟฟ้า เมื่อต่อแหล่งกำเนิดสัญญาณเพื่อป้อนพลังงานให้กับสายอากาศ พลังงานจะไหลเข้าสู่สายอากาศทีละน้อยเนื่องจากมีการต้านการไหลของพลังงานที่เรียกว่า อิมพีแดนซ์หรือความต้านทานเชิงซ้อนเกิดขึ้น อิมพีแดนซ์ดังกล่าวจะปรากฏที่ขั้วของสายอากาศ เรียกว่า อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Z_{in}) ดังสมการ (2.24)

$$Z_{in} = R_{in} + JX_{in} \tag{2.24}$$

เมื่อ X_{in} คือความต้านทานเชิงจินตภาพที่ทำให้เกิดการสะสมของพลังงานในบริเวณสนามใกล้สายอากาศโดยไม่แผ่กระจายออกไป และ R_{in} ประกอบด้วยสองส่วนคือ R_r หมายถึงความต้านทานพลังคลื่นที่แผ่ออกไปโดยสายอากาศ และ R_L หมายถึงความต้านทานที่โหลด ซึ่งรวมถึงความต้านทานจากการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความร้อน สารไดอิเล็กตริกและตัวนำ

2.6.8 แบนด์วิดท์ (Bandwidth) [23]

แบนด์วิดท์ของสายอากาศเป็นช่วงของความถี่ที่สามารถนำไปใช้งานได้ดี ซึ่งช่วงความถี่ถูกกำหนดโดย VSWR $\cong$ 2 หรือพิจารณาจากค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ระดับ -10 dB ดังสมการ (2.25) ถึง สมการ (2.28)

$$BW = f_H - f_L \tag{2.25}$$

$$f_c = \frac{f_H - f_L}{2} + f_L \tag{2.26}$$

$$BW_{narrowband}(\%) = \frac{f_H + f_L}{f_c} \times 100 \tag{2.27}$$

$$BW_{broadband}(\%) = \frac{f_H}{f_L} \times 100 \tag{2.28}$$

เมื่อ BW คือแบนด์วิดท์ของสายอากาศ

f_H คือขอบความถี่สูงของย่านความถี่

f_L คือขอบความถี่ต่ำของย่านความถี่

f_c คือความถี่กลางของย่านความถี่

2.7 มาตรฐานเครือข่ายการสื่อสารแบบไร้สาย [23]

Wi-Fi ย่อมาจาก wireless fidelity หมายถึงชุดผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่สามารถใช้ได้กับมาตรฐานเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย (WLAN) เทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11 ถือกำเนิดขึ้นในปี พ.ศ. 2540 จัดตั้งโดยองค์การ Institute of Electrical and Electronics Engineers หรือ IEEE ในยุคเริ่มแรกนั้นให้ประสิทธิภาพการทำงานค่อนข้างต่ำ อีกทั้งไม่มีการรับรองคุณภาพของการให้บริการ และมาตรฐานความปลอดภัยต่ำ จากนั้นทาง IEEE จึงจัดตั้งคณะทำงานขึ้นมาปรับปรุงหลายกลุ่มด้วยกัน มาตรฐาน IEEE 802.11b เสร็จสมบูรณ์เมื่อปี พ.ศ. 2540 ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า CCK

(Complimentary Code Keying) ผนวกกับ DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 11 Mbps ผ่านคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz ซึ่งถูกจัดสรรไว้สำหรับการใช้งานสาธารณะ ด้านวิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรม และการแพทย์ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ความถี่ย่านนี้ เช่น IEEE 802.11, Bluetooth, โทรศัพท์ไร้สาย, และเตาไมโครเวฟ มีระยะการส่งสัญญาณได้ไกลมาก ถึง 100 เมตร

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์อุปกรณ์เครือข่ายไร้สายภายใต้มาตรฐานนี้ถูกผลิตออกมาเป็นจำนวนมาก และที่สำคัญแต่ละผลิตภัณฑ์มีความสามารถทำงานร่วมกันได้ อุปกรณ์ของผู้ผลิตทุกยี่ห้อต้องผ่านการตรวจสอบจากสถาบัน Wi-Fi Alliance เพื่อตรวจสอบมาตรฐานของอุปกรณ์และความเข้ากันได้ของแต่ละผู้ผลิต ปัจจุบันนี้นิยมนำอุปกรณ์ WLAN ที่มาตรฐาน 802.11b ไปใช้ในองค์กรธุรกิจ สถาบันการศึกษา สถานที่สาธารณะ และกำลังแพร่เข้าสู่สถานที่พักอาศัยมากขึ้น

มาตรฐาน IEEE 802.11a เป็นการใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) เพื่อปรับปรุงความเร็วในการส่งข้อมูลให้วิ่งได้สูงถึง 54 Mbps บนความถี่ 5 GHz ซึ่งจะมีคลื่นรบกวนน้อยกว่าความถี่ 2.4 GHz ที่มาตรฐานอื่นใช้กัน ที่ความเร็วนี้สามารถทำการแพร่ภาพและข่าวสารที่ต้องการความละเอียดสูงได้ อัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลสามารถปรับระดับให้ช้าลงได้ เพื่อเพิ่มระยะทางการเชื่อมต่อให้มากขึ้น แต่ข้อเสียก็คือ ความถี่ 5 Ghz นั้น หลายๆ ประเทศไม่อนุญาตให้ใช้ เช่นประเทศไทย เพราะได้จัดสรรให้อุปกรณ์ประเภทอื่นไปแล้ว และระยะการส่งข้อมูลของ IEEE 802.11a ยังสั้นเพียง 30 เมตรเท่านั้น อีกทั้งอุปกรณ์ของ IEEE 802.11a ยังมีราคาสูงกว่า IEEE 802.11b ด้วย ดังนั้นอุปกรณ์ IEEE 802.11a จึงได้รับความนิยมน้อยกว่า IEEE 802.11b มาก จึงทำไม่ได้รับความนิยมเท่าที่ควร

มาตรฐาน IEEE 802.11g เป็นการนำเทคโนโลยี OFDM ของ 802.11a มาพัฒนาบนความถี่ 2.4 GHz ทำให้ใช้ความเร็ว 3.6-5.4 Mbps ซึ่งเป็นความเร็วที่สูงกว่ามาตรฐาน 802.11b ซึ่ง 802.11g สามารถปรับระดับความเร็วในการสื่อสารลงเหลือ 2 Mbps ได้ตามสภาพแวดล้อมของเครือข่ายที่ใช้งาน มาตรฐานนี้เป็นที่ยอมรับจากผู้ใช้เป็นจำนวนมากและกำลังจะเข้ามาแทนที่ 802.11b ในอนาคตอันใกล้

มาตรฐาน IEEE 802.11e เป็นมาตรฐานที่ได้จากการปรับปรุง MAC Layer ของ IEEE 802.11 เพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานหลักการ เกี่ยวกับด้านมัลติมีเดีย (Multimedia) เนื่องจาก IEEE 802.11e เป็นการปรับปรุง MAC Layer ดังนั้นมาตรฐานเพิ่มเติมนี้จึงสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN ทุกเวอร์ชันได้

มาตรฐาน IEEE 802.11i เป็นมาตรฐานที่ได้จากการปรับปรุง MAC Layer ของ IEEE 802.11 ในด้านความปลอดภัย เนื่องจากเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN มีข้อด้อยอยู่มากโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเข้ารหัสข้อมูล (Encryption) ด้วย key ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง คณะทำงานชุด IEEE 802.11i ได้นำเอาเทคนิคขั้นสูงมาใช้ในการเข้ารหัสข้อมูลด้วย key ที่มีการเปลี่ยนค่าอยู่เสมอและการตรวจสอบผู้ใช้ที่มีความปลอดภัยสูง มาตรฐานเพิ่มเติมนี้จึงสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN ได้ทุกเวอร์ชัน แต่อย่างไรก็ตามการทำงานของคณะทำงานชุดนี้ยังไม่แล้วเสร็จในขณะนี้

มาตรฐาน IEEE 802.11n เป็นมาตรฐานที่มีความเร็วในการถ่ายโอนข้อมูลอยู่ที่ 74 Mbps และสูงสุดที่ 248 Mbps ซึ่งสามารถรับส่งข้อมูลได้เร็วกว่ารุ่นก่อนถึงประมาณ 5 เท่า นอกจากนี้ก็ยังมีรัศมีทำการภายในอาคารที่ 70 เมตร และนอกอาคารที่ 160 เมตร เพิ่มความสามารถในการป้องกันสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ความถี่ 2.4 GHz เหมือนกัน และสามารถรองรับอุปกรณ์มาตรฐาน IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g ได้ มาตรฐาน IEEE 802.11n นี้ได้เสร็จสมบูรณ์ในปี พ.ศ. 2552 สามารถเปรียบเทียบรายละเอียดของเทคโนโลยีไร้สายแบบต่างๆได้ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบเทคโนโลยีไร้สายแบบต่างๆ

เปรียบเทียบเทคโนโลยีไร้สายแบบต่าง ๆ					
เทคโนโลยี	มาตรฐาน	เครือข่าย	อัตราความเร็ว	ระยะทาง	ความถี่
Wi-Fi	IEEE 802.11a	WLAN	สูงสุด 54 Mbps	100 m	5 GHz
Wi-Fi	IEEE 802.11b	WLAN	สูงสุด 11 Mbps	100 m	2.4 GHz
Wi-Fi	IEEE 802.11g	WLAN	สูงสุด 54 Mbps	100 m	2.4 GHz
WiMAX	IEEE 802.16d	WMAN	สูงสุด 75 Mbps (20 MHz BW)	6.4 – 10 km	Sub 11 GHz
WiMAX	IEEE 802.16e	Mobile WMAN	สูงสุด 30 Mbps (10 MHz BW)	1.6 – 5 km	2 – 6 GHz

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการออกแบบสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบ การเพิ่มขนาดแบนด์วิดท์ การเพิ่มช่วงความถี่ใช้งานของสายอากาศและเทคนิคการปรับจูนโพรบเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติตามต้องการ สามารถรองรับการใช้งานในเครือข่ายการสื่อสารแบบไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11b/g 2.45 GHz (2.4-2.48 GHz) และ IEEE 802.16e 3.5 GHz (3.4-3.69 GHz) นอกจากนี้ยังทำการออกแบบโครงสร้างสายอากาศแบบปากแตร เพื่อเสริมให้สายอากาศโมโนโพลแบบระนาบมีอัตราขยายเพิ่มขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (CST) เพื่อช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์หาตัวแปรที่เหมาะสม

3.2 การออกแบบสายอากาศ

การออกแบบสายอากาศในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความถี่เรโซแนนซ์ดังนี้คือ 2.45 GHz และ 3.5 GHz การออกแบบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบรูปวงกลม โดยมีการเพิ่มสตับรูปตัวไอแนวนอนเพื่อปรับจูนให้สายอากาศมีความถี่ใช้งานครอบคลุมช่วงความถี่ตามต้องการ ส่วนที่สองเป็นการเพิ่มโครงสร้างปากแตรแบบสองทิศทางเพื่อเพิ่มอัตราขยายและเพิ่มทิศทางการแผ่กระจายคลื่น ในส่วนของการออกแบบสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบรูปวงกลมจะถูกสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR4 ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก	$\varepsilon_r = 0.43$
ความหนาวัสดุฐานรอง	$h = 0.764$ มิลลิเมตร
ค่าความนำของวัสดุตัวนำ (ทองแดง)	$\sigma = 5.8 \times 10^7 S/m$
ความหนาของวัสดุตัวนำ	$t = 0.017$ มิลลิเมตร

ในส่วนของโครงสร้างปากแตรแบบสองทิศทางจะใช้วัสดุเป็นแผ่นทองแดง ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

ความหนาของแผ่นทองแดง $t_c = 1.0$ มิลลิเมตร

ค่าความนำของวัสดุตัวนำ (ทองแดง) $\sigma = 5.8 \times 10^7 S/m$

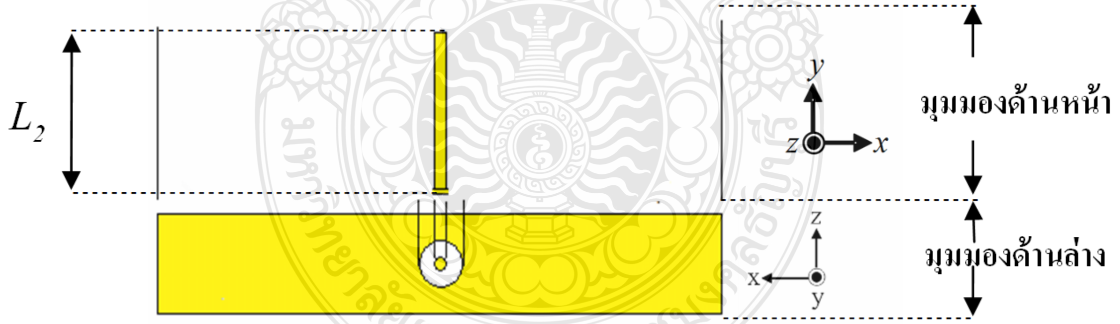
การออกแบบสายอากาศมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.2.1 คำนวณความยาวโครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศโมโนโพล L_2 ให้มีความถี่พื้นฐานที่ 2.45 GHz ซึ่งความยาวของโพรบเท่ากับ $\lambda/4$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{2.45 \times 10^9} = 122.40 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้น $$L_2 = \frac{\lambda}{4} = \frac{122.4}{4} = 30.60 \text{ มิลลิเมตร}$$

ซึ่งจะได้ความยาวของโพรบ (L_2) มีค่าเท่ากับ 30.60 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศพื้นฐานโพรบรูปตัวไอ

3.2.2 คำนวณโครงสร้างรัศมีของสายอากาศรูปวงแหวนให้ได้ความถี่พื้นฐานที่ 2.45 GHz โดยเริ่มจากการคำนวณหาความยาวคลื่นคัทออฟ (λ_c) จากสมการ (2.1)

$$\lambda_c = \frac{3 \times 10^8}{2.45 \times 10^9}(1.5) = 183.60 \text{ มิลลิเมตร}$$

เมื่อ λ_c คือความยาวคลื่นคัทออฟ

f คือความถี่พื้นฐาน

จากการคำนวณจะได้ความยาวคลื่นคัทออฟมีค่าเท่ากับ 183.60 มิลลิเมตร จากนั้นนำความความยาวคลื่นที่คำนวณได้ ดังสมการ (2.1) มาคำนวณหาขนาดรัศมีของสายอากาศรูปวงแหวน ดังสมการ (2.2)

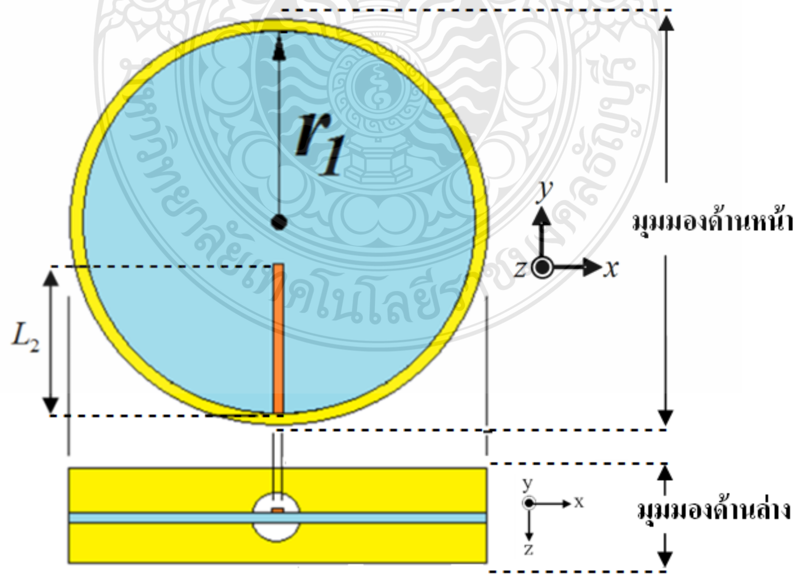
$$r_1 = \frac{(\lambda_c)(1.8412)}{2\pi}$$

$$r_1 = \frac{(\lambda_c)(1.8412)}{2\pi} = \frac{0.1836 \times 1.8412}{2 \times 3.14} = 53.80 \text{ มิลลิเมตร}$$

เมื่อ r_1 คือรัศมีของสายอากาศรูปวงแหวน

λ_c คือความยาวคลื่นคัทออฟ

จากการคำนวณจะได้รัศมีของสายอากาศรูปวงแหวน (r_1) มีค่าเท่ากับ 53.80 มิลลิเมตร เมื่อทำการออกแบบจะได้โครงสร้างของสายอากาศรูปวงแหวน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างสายอากาศรูปวงแหวน

3.2.3 คำนวณรัศมีของโพรบรูปวงกลม (r_2) และวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยใช้โปรแกรม CST เริ่มจากการคำนวณหาความยาวคลื่นของความถี่เรโซแนนซ์ ดังสมการ (2.3)

$$\lambda_r = \frac{c}{f_r} = \frac{3\times10^8}{2.45\times10^9} = 122.40 \text{ มิลลิเมตร}$$

เมื่อ λ_r คือความยาวคลื่นของความถี่เรโซแนนซ์

c คือความเร็วของแสง

f_r คือความถี่เรโซแนนซ์

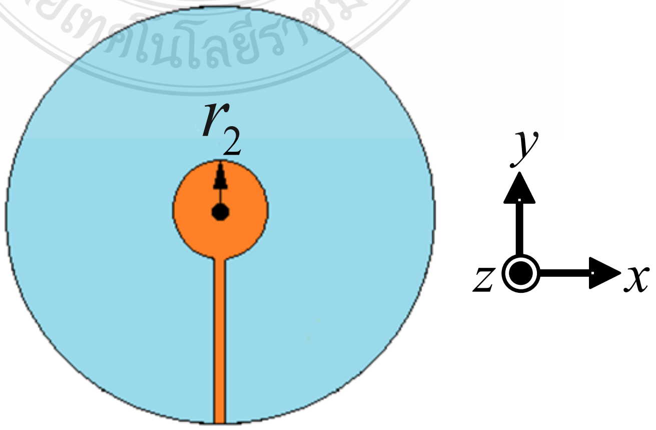
จะได้ความยาวคลื่นของความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 122.40 มิลลิเมตร จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ (2.4) เพื่อคำนวณหาความยาวรัศมีของโพรบรูปวงกลม

$$r_2 = \frac{\lambda_r}{4\pi} = \frac{0.1224}{4\times3.14} = 9.75 \text{ มิลลิเมตร}$$

เมื่อ r_2 คือรัศมีของโพรบรูปวงกลม

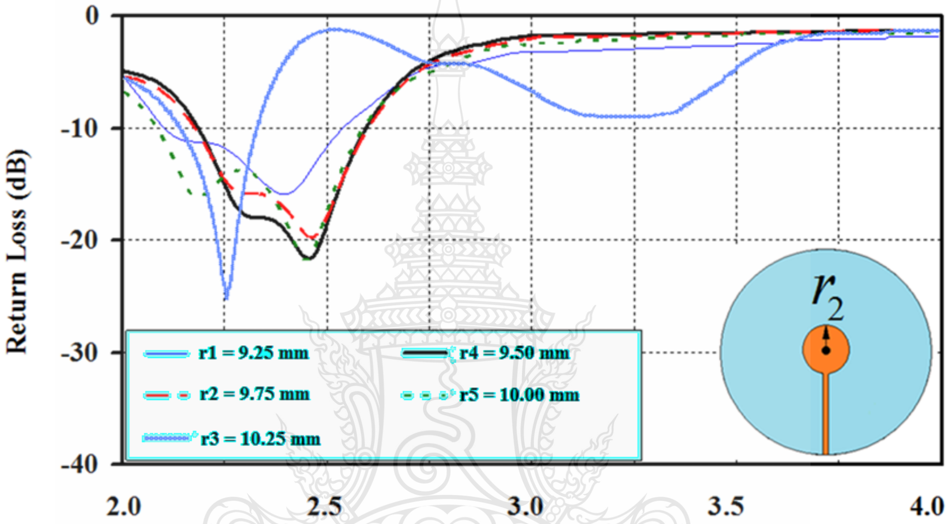
λ_r คือความยาวคลื่นของความถี่เรโซแนนซ์

จากการคำนวณจะได้รัศมีของโพรบรูปวงกลม (r_3) มีค่าเท่ากับ 9.75 มิลลิเมตร เมื่อทำการออกแบบแล้วจะได้โครงสร้างโพรบรูปวงกลม ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างโพรบรูปวงกลม (r_2)

เมื่อได้รัศมีของโพรบรูปวงกลม r_2 จากการคำนวณแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือปรับจูนเพื่อหาค่า r_2 ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะใช้โปรแกรม CST ช่วยในการวิเคราะห์ โดยทำการปรับขนาดรัศมีของโพรบรูปวงกลมตั้งแต่ $0.075\lambda < r_2 < 0.084\lambda$ [21] เมื่อแทนค่า $\lambda = 122.40$ มิลลิเมตร จะได้ช่วงของการปรับค่าดังนี้คือ $9.18 < r_2 < 10.28$ มิลลิเมตร ดังนั้นจึงทำการปรับค่าความยาวรัศมีของโพรบรูปวงกลม r_2 ดังนี้คือ 9.25, 9.50, 9.75, 10.00 และ 10.25 มิลลิเมตร จากการจำลองแบบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศ เมื่อปรับ r_2 โดยใช้โปรแกรม CST พบว่าได้ผล ดังรูปที่ 3.4

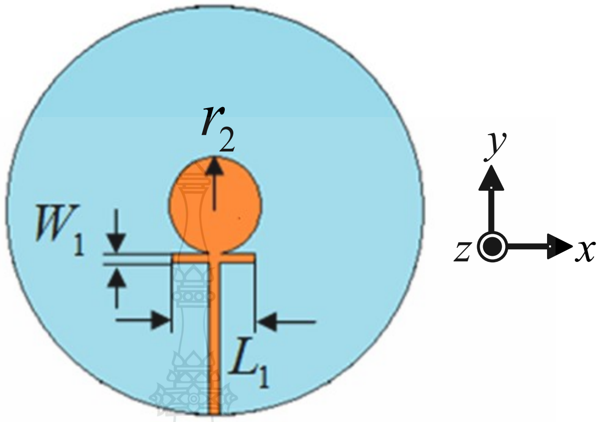


รูปที่ 3.4 ผลการจำลองแบบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศเมื่อปรับจูนรัศมี r_2

จากการวิเคราะห์กราฟ รูปที่ 3.4 พบว่าค่ารัศมีที่เหมาะสมที่สุดคือ r_2 มีขนาดเท่ากับ 9.50 มิลลิเมตร เพราะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์มีค่าใกล้เคียงกับ 2.45 GHz มากที่สุด ซึ่งเป็นความถี่พื้นฐานที่ต้องการ สายอากาศถูกออกแบบบนโครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์ FR4 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ε_r) เท่ากับ 4.3 ความหนาของวัสดุฐานรอง (h) เท่ากับ 0.764 มิลลิเมตร และความหนาของแผ่นทองแดง (t) เท่ากับ 0.017 มิลลิเมตร ซึ่งจากการออกแบบจะได้โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศ แต่ยังต้องปรับพารามิเตอร์อื่นเพิ่มเติม เนื่องจากแบนด์วิดท์ที่ได้ยังไม่ครอบคลุมย่านความถี่ใช้งานทั้งหมดที่ต้องการ

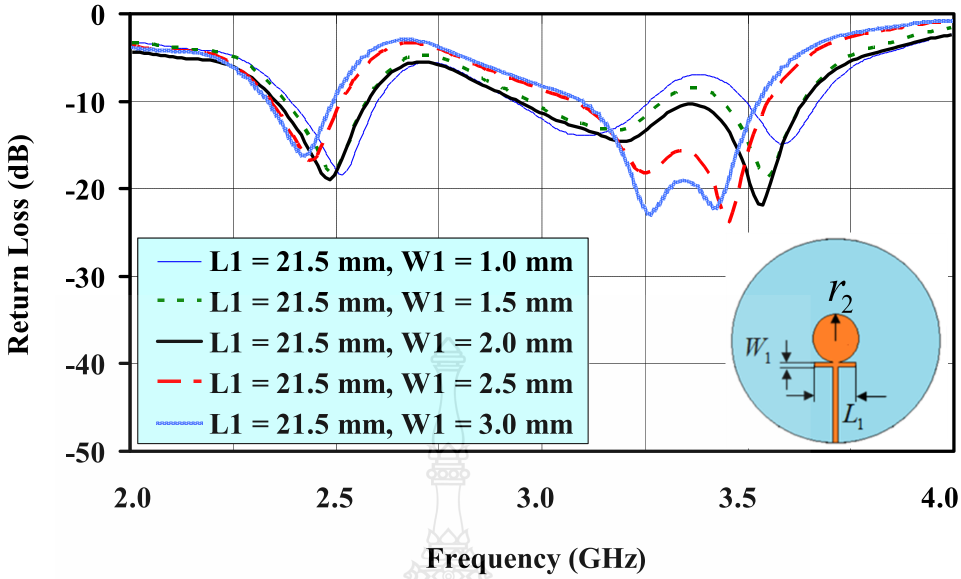
3.2.4 การขยายแบนด์วิดท์ด้วยเทคนิคการเพิ่มสตับรูปตัวไอแนวนอนให้เชื่อมต่อกับส่วนของโพรบรูปวงแหวนวงกลม (r_2) เพื่อใช้ในการปรับจูนความถี่ ดังรูปที่ 3.5 โดยโครงสร้างของสายอากาศถูกออกแบบบนแผ่น FR4 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ε_r) เท่ากับ 4.3 ความหนาของวัสดุ

ฐานรอง (h) เท่ากับ 0.764 มิลลิเมตร และความหนาของแผ่นทองแดง (t) เท่ากับ 0.017 มิลลิเมตร จากการออกแบบจะได้โครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 3.5



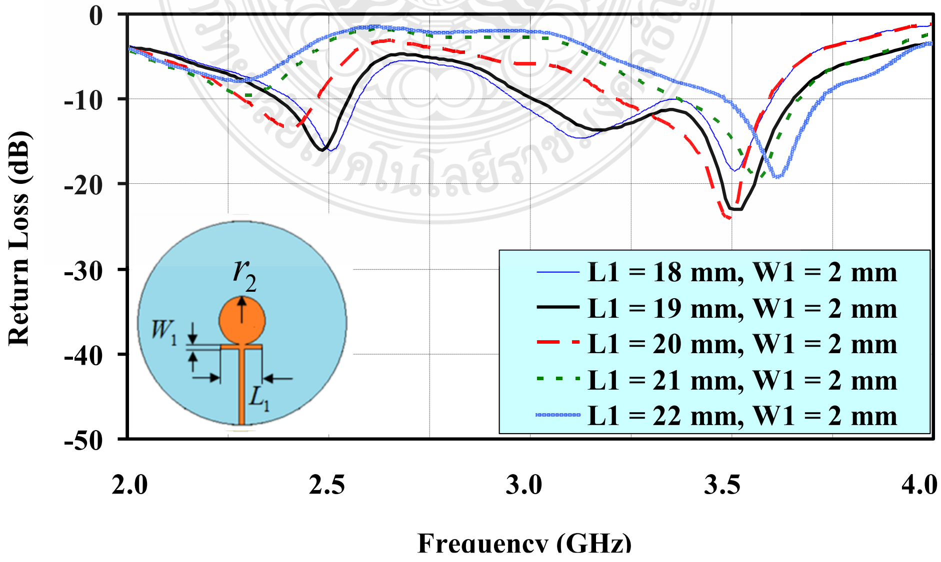
รูปที่ 3.5 โครงสร้างของโพรบรูปตัวไอแนวนอนเชื่อมต่อกับส่วนของโพรบรูปวงกลม r_2

จากนั้นทำการปรับค่าความกว้างของโพรบรูปตัวไอแนวนอน (W_1) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดให้ค่าความยาวของโพรบรูปตัวไอแนวนอน (L_1) มีความยาวคงที่เท่ากับ 21.50 มิลลิเมตร ทำการปรับขนาดความกว้างของโพรบรูปตัวไอนอน (W_1) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตั้งแต่ $0.008\lambda < W_1 < 0.03\lambda$ [21] เมื่อแทนค่า $\lambda = 122.4$ มิลลิเมตร จะได้ช่วงของการปรับค่าดังนี้คือ $0.979 < W_1 < 3.672$ มิลลิเมตร ในการปรับขนาดความกว้างของ (W_1) ทำการปรับขนาดดังนี้ 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 มิลลิเมตร ซึ่งจากการจำลองค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศพบว่าได้ผลการจำลอง ดังรูปที่ 3.6 จากการวิเคราะห์กราฟการจำลองแบบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศ พบว่าขนาดของความกว้างของโพรบรูปตัวไอแนวนอนที่เหมาะสมที่สุดคือ W_1 มีค่าเท่ากับ 2 มิลลิเมตร เนื่องจากทำการพิจารณากราฟในรูปที่ 3.6 พบว่าสามารถหาขนาด W_1 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร ทำให้สายอากาศสามารถตอบสนองความถี่ 2 ย่านความถี่ โดยความถี่เรโซแนนซ์แรกมีค่าเท่ากับ 2.48 GHz และความถี่เรโซแนนซ์ที่สอง มีค่าเท่ากับ 3.53 GHz ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศเท่ากับ -18.19 dB และ -21.77 dB ตามลำดับ ซึ่งทำให้ได้ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ที่ต้องการแต่ต้องทำการปรับจูนเพิ่มเติม เนื่องจากที่ความถี่เรโซแนนซ์ทั้งสองต้องมีค่าที่ใกล้เคียงความถี่ใช้งานมากกว่านี้



รูปที่ 3.6 ผลการจำลองแบบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศ เมื่อปรับขนาด W_1

ในขั้นตอนต่อมาจึงทำการปรับค่าความยาวของโพรบรูปตัวไอแนวนอน (L_1) ขั้นตอนนี้จะกำหนดค่าความกว้างของโพรบรูปตัวไอแนวนอน (W_1) ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 2 มิลลิเมตร จากนั้นทำการปรับขนาดความยาวของตัวแปร L_1 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยมีค่าตั้งแต่ $0.14\lambda < L_1 < 0.2\lambda$ [15] เมื่อแทนค่า $\lambda = 122.4$ มิลลิเมตร จะได้ช่วงการปรับค่าของความยาวโพรบรูปตัวไอแนวนอนได้ดังนี้คือ $17.136 < L_1 < 24.48$ [21] มิลลิเมตร ดังนั้นจึงทำการปรับขนาดความกว้างของ L_1 ดังนี้ 18.0, 19.0, 20.0, 21.0 และ 22.0 มิลลิเมตร ซึ่งจากการจำลองแบบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศพบว่าได้ผลการจำลองแบบ แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ผลการจำลองแบบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศเมื่อปรับ L_1

จากการวิเคราะห์กราฟ ดังรูปที่ 3.7 พบว่าเมื่อขนาดของ L_1 เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ย่านความถี่ที่ต่ำกว่าเลื่อนไปทางด้านซ้าย ในทางกลับกับเมื่อค่าของ L_1 เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ย่านความถี่ที่สูงกว่าเลื่อนไปทางด้านขวา ซึ่งจากการวิเคราะห์กราฟ ดังรูปที่ 3.7 พบว่าค่าของ L_1 ที่เหมาะสมที่สุดมีค่าเท่ากับ 19.0 มิลลิเมตร เพราะค่าดังกล่าวทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำและความถี่สูงเท่ากับ 2.47 GHz และ 3.53 GHz ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ใช้งานที่ต้องการมากที่สุด โดยค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศเท่ากับ -16.03 dB และ -23.01 dB ตามลำดับ ซึ่งสนับสนุนย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานคือ IEEE 802.11b/g, 2.45 GHz (2.4 – 2.48 GHz) และ IEEE 802.16e, 3.5 GHz (3.4 – 3.69 GHz) โดยผลจากการปรับจูนแต่ละขั้นตอนจะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ และแบนด์วิดท์ของสายอากาศซึ่งจะสรุปดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบผลการจำลองสายอากาศต้นแบบเมื่อปรับจูนสายอากาศ

การปรับจูนสายอากาศ	ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)	แบนด์วิดท์ (GHz)	แบนด์วิดท์ (%)
การปรับค่ารัศมีวงกลม r_2	2.45	2.18 - 2.59	17.22
ปรับค่าความกว้าง W_1 สตับรูปตัวไอ	2.48	2.33 - 2.60	10.88
	3.53	3.08 - 3.62	15.29
ปรับค่าความยาว L_1 สตับรูปตัวไอ	2.47	2.37 - 2.54	6.88
	3.50	3.10 - 3.65	15.57

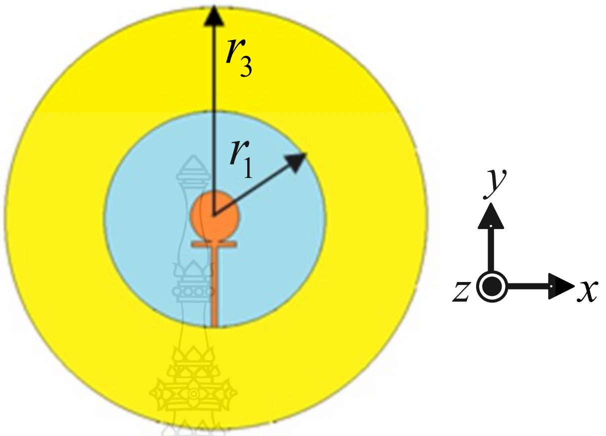
3.2.5 ออกแบบโครงสร้างสายอากาศปากแตรทรงกรวยเพื่อเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศ โดยคำนวณรัศมีโครงสร้างปากแตรทรงกรวยจากสมการ [22]

$$r_3 = 2r_1 = 5.38 \times 2 = 107.60 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

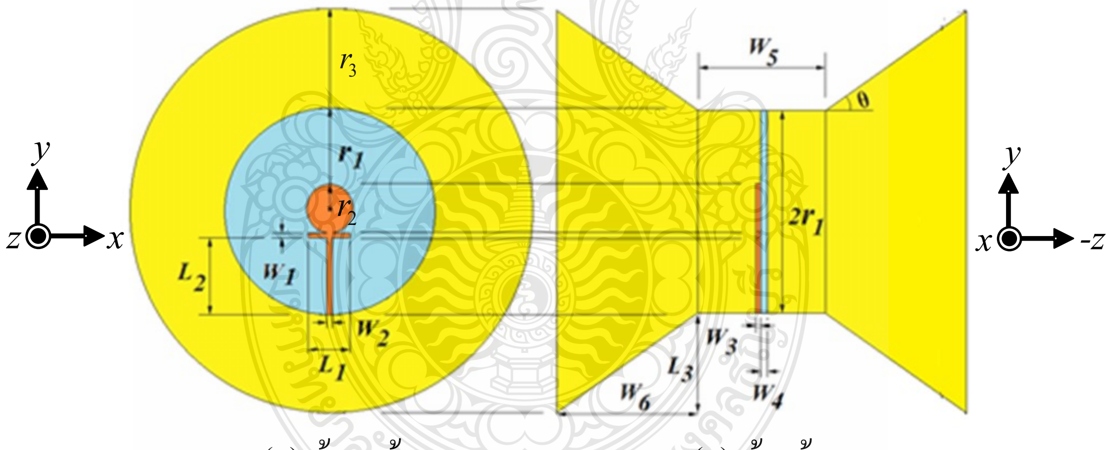
เมื่อ r_2 คือรัศมีของสายอากาศวงแหวนวงกลม

r_3 คือรัศมีของสายอากาศปากแตรวงกลม

จากการคำนวณจะได้ขนาดรัศมีของสายอากาศปากแตรทรงกรวยเท่ากับ 107.6 มิลลิเมตร โดยวัสดุที่ใช้ออกแบบในการสร้างคือแผ่นทองแดง เมื่อทำการออกแบบแล้วจะได้โครงสร้างปากแตรทรงกรวย ดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 โครงสร้างสายอากาศแบบปากแตรวงกลม

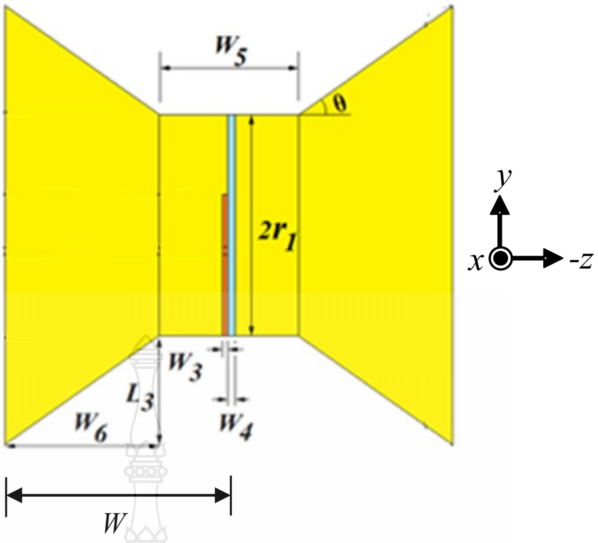


รูปที่ 3.9 โครงสร้างสายอากาศต้นแบบ

3.2.6 หาค่าความยาวของท่อนำคลื่นรูปวงแหวนที่เหมาะสมที่สุด

การหาค่าความยาวของท่อนำคลื่นรูปวงแหวนมีขั้นตอนดังนี้คือ

(1) จำลองแบบด้วยโปรแกรม CST เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของความยาวสายอากาศจากปลายสุดของปากแตรถึงจุดกึ่งกลางของท่อนำคลื่นรูปวงแหว (W) และอัตราขยายของสายอากาศ โดยหาว่า W จะต้องมีความยาวเท่าใดจึงจะทำให้ได้อัตราขยายมากที่สุด ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 โครงสร้างของสายอากาศด้านข้างที่แสดงความยาวของตัวแปร *W*

จากการจำลองแบบสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบความยาวของ *W* กับอัตราขยายของสายอากาศได้ผล ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ของขนาดความยาว *W* กับอัตราขยายของสายอากาศ

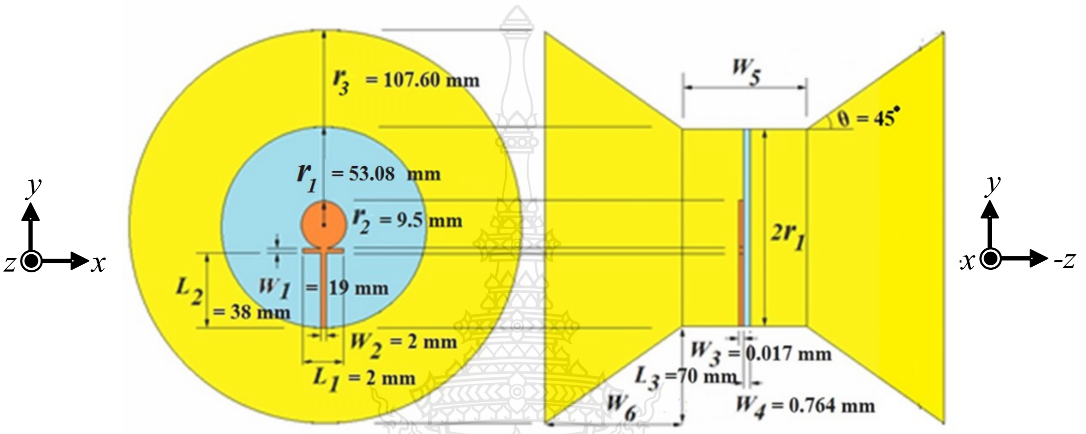
ความยาวของสายอากาศ (*W*)	อัตราขยายที่ความถี่ (2.45 GHZ)	อัตราขยายที่ความถี่ (3.50 GHZ)
60 มิลลิเมตร	7.94 dBi	7.64 dBi
70 มิลลิเมตร	8.34 dBi	7.89 dBi
80 มิลลิเมตร	9.41 dBi	8.21 dBi
90 มิลลิเมตร	8.93 dBi	7.68 dBi
100 มิลลิเมตร	7.98 dBi	7.12 dBi

จากตารางที่ 3.2 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มขนาดความยาวของ *W* จากความยาวเท่ากับ 60 มิลลิเมตร จนถึง 100 มิลลิเมตร จะทำให้ค่าอัตราขยายของสายอากาศมีค่าต่างกัน โดยค่าที่ดีที่สุดคือ เมื่อ *W* มีค่าเท่ากับ 80 มิลลิเมตร เพราะทำให้อัตราขยายสูงที่สุด จากกราฟพบว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 2.45 GHz มีอัตราขยายเท่ากับ 9.41 dBi ที่ความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 3.50 GHz มีอัตราขยายเท่ากับ 8.21 dBi ส่วนที่ความยาวค่าอื่นพบว่าให้อัตราขยายต่ำกว่าทั้งหมด ดังนั้นความยาวของ *W* ที่ดี

ที่สุดจึงมีค่าเท่ากับ 80 มิลลิเมตร ซึ่งค่านี้จะถูกนำไปคำนวณหาความยาวของท่อนำคลื่นรูปวงแหวนต่อไป

(2) คำนวณความยาวท่อนำคลื่นรูปวงแหวน (W_5)

จากรูปที่ 3.11 พบว่า ขนาดของความยาว W , W_6 และ W_5 มีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ $W = W_5/2 + W_6$ สามารถคำนวณหาความยาวของ W_6 ได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 โครงสร้างสายอากาศที่กำหนดขนาดของพารามิเตอร์

จากรูปที่ 3.11 พบว่าค่าของ W_6 จะมีความสัมพันธ์กับค่าของ r_1 และ r_3 ดังนี้ คือ $W_6 = r_3 - r_1$ เมื่อแทนค่า $r_3 = 107.6$ มิลลิเมตร และ $r_1 = 53.8$ มิลลิเมตร จะได้ W_6 มีค่าดังนี้คือ $W_6 = r_3 - r_1 = 107.60 - 53.80 = 53.80$ มิลลิเมตร จากนั้นคำนวณหาค่าของ W_5 จากความสัมพันธ์ของสมการ $W = W_5/2 + W_6$ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า W_5 ได้ดังนี้

แทนค่า $W = 80$ มิลลิเมตร และแทนค่า $W_6 = 53.8$ มิลลิเมตร จะได้

$$80 = W_5/2 + 53.80$$

$$W_5/2 = 80 - 53.80 = 26.20$$

$$W_5 = 26.20 \times 2 = 52.40 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้นจะได้ความยาวของท่อนำคลื่นรูปวงแหวนมีค่าเท่ากับ 52.40 มิลลิเมตร

3.2.7 ค่าที่ได้จากการคำนวณและปรับจูนพารามิเตอร์อื่นๆที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างสายอากาศ

(1) ความกว้างของโพรบมีขนาดเท่ากับ $\lambda/64$ จะได้ $W_2 = 2$ มิลลิเมตร

(2) ความหนาของแผ่นทองแดงที่เลือกใช้ จะได้ $W_3 = 0.017$ มิลลิเมตร

(3) ความหนาของแผ่น FR4 ที่เลือกใช้ จะได้ $W_4 = 0.764$ มิลลิเมตร

(4) ความยาวของท่อนำคลื่นทรงกระบอก W_5 จะมีความยาวของท่ออยู่ในช่วงระหว่าง $0.36\lambda < W_5 < 0.7\lambda$ เมื่อแทนค่า $\lambda = 1.224$ มิลลิเมตร จะได้ $44.064 < W_5 < 85.68$ มิลลิเมตร เลือกความยาวของ $W_5 = 60$ มิลลิเมตร

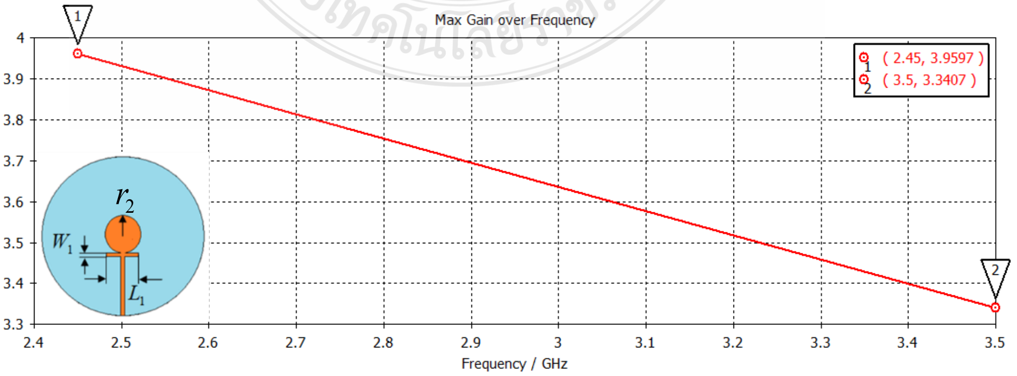
(5) ความกว้างโครงสร้างปากแตรทรงกรวย มีขนาด $W_5 = 0.571\lambda$ แทนค่า $\lambda = 1.224$ มิลลิเมตร ดังนั้นจะได้ $W_6 = 70$ มิลลิเมตร

(6) ความยาวของโพรบ (L_2) มีค่าเท่ากับ $\lambda / 4$ เมื่อแทนค่า $\lambda = 1.224$ มิลลิเมตร จะได้ $L_2 = 30$ มิลลิเมตร สามารถสรุปขนาดของพารามิเตอร์ทั้งหมดของโครงสร้างสายอากาศ ดังตารางที่ 3.3

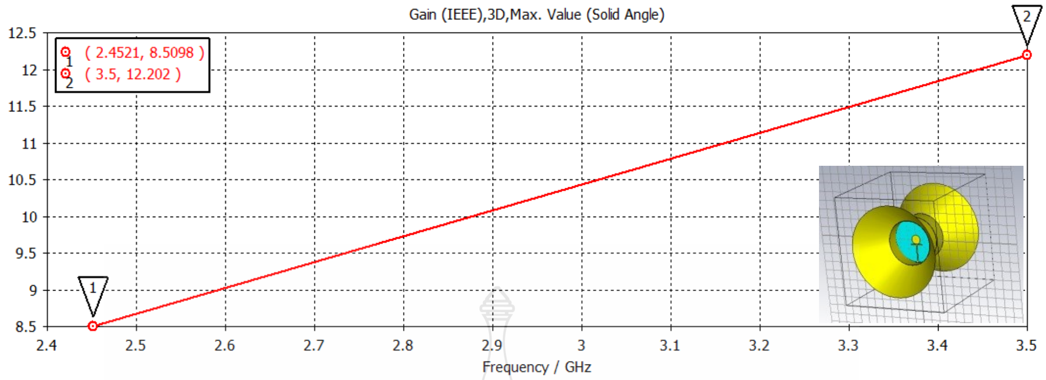
ตารางที่ 3.3 ขนาดพารามิเตอร์ทั้งหมดของสายอากาศต้นแบบ

ความกว้าง		ความยาว	
ตัวแปร	ขนาด (มิลลิเมตร)	ตัวแปร	ขนาด (มิลลิเมตร)
W1	19	*L1*	2
W2	2	*L2*	38
W3	0.017	*L3*	70
W4	0.764	r_1	53.80
W5	52.40	r_2	107.6
W6	70	r_3	9.75

ในส่วนการวิเคราะห์หาค่าอัตราขยายของสายอากาศที่นำเสนอด้วโปรแกรม CST ทำให้ได้ผลการจำลองแบบสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



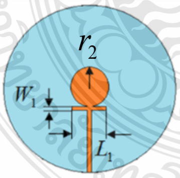
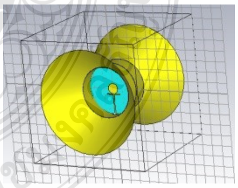
รูปที่ 3.12 ผลการจำลองแบบอัตราขยายของสายอากาศ (ไม่เพิ่มโครงสร้างปากแตร)



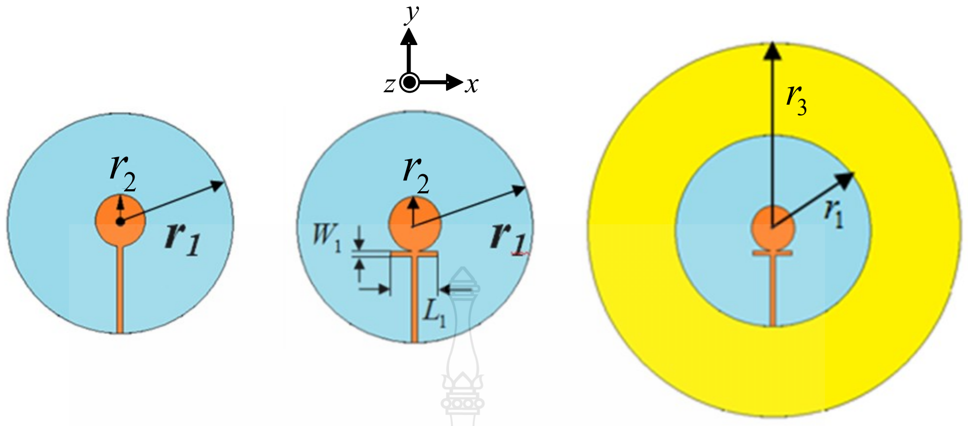
รูปที่ 3.13 ผลการจำลองแบบอัตราขยายของสายอากาศ (เมื่อเพิ่มโครงสร้างปากแตร)

จากรูปที่ 3.12 และ รูปที่ 3.13 แสดงผลการจำลองแบบค่าอัตราขยายของสายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST พบว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz เมื่อทำการเพิ่มโครงสร้างปากแตรทรงกรวยเข้าไปจะทำให้สายอากาศมีอัตราขยายเพิ่มขึ้นจาก 3.96 dBi เป็น 8.50 dBi และที่ความถี่เรโซแนนซ์ 3.50 GHz พบว่าอัตราขยายเพิ่มขึ้นจาก 3.34 dBi เป็น 12.20 dBi จากผลการจำลองอัตราขยายสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มโครงสร้างปากแตรทรงกรวยเข้าไปในสายอากาศจะส่งผลให้อัตราขยายเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสรุปอัตราขยายได้ ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าอัตราขยายจากการจำลองแบบของสายอากาศที่นำเสนอด้วยโปรแกรม CST

ความถี่เรโซแนนซ์	เมื่อไม่มีโครงสร้างปากแตร 	เมื่อมีโครงสร้างปากแตร 	อัตราขยายเพิ่มขึ้น
2.45 GHz	3.96 dBi	8.51 dBi	114.65%
3.5 GHz	3.34 dBi	12.20 dBi	265.27%

สามารถสรุปขั้นตอนการออกแบบสายอากาศต้นแบบได้ ดังรูปที่ 3.14



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 3.14 สรุปขั้นตอนการออกแบบสายอากาศต้นแบบ

โดยเริ่มจากขั้นตอนที่ 1 ในรูปที่ 3.14 (ก) เป็นการเพิ่มโพรบแบบวงกลม จากนั้นในขั้นตอนที่ 2 ดังรูปที่ 3.14 (ข) ทำการปรับจูนโพรบวงกลมด้วยการเพิ่มสตับรูปตัวไอแนวนอน และขั้นตอนสุดท้ายคือรูปที่ 3.14 (ค) เป็นการปรับเพิ่มโครงสร้างปากแตรให้กับสายอากาศ

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบด้วยเทคนิคการปรับจูนโพรบและโครงสร้างปากแตรเพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์และอัตราขยายของสายอากาศโดยได้สรุปผลการทดสอบวัดคุณสมบัติต่างๆ ทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศและข้อเสนอแนะในการพัฒนาสายอากาศ ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

สายอากาศโมโนโพลแบบระนาบที่มีเทคนิคการปรับจูนโพรบและโครงสร้างปากแตรเพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์และอัตราขยายได้ถูกออกแบบและสร้างจริง เมื่อใช้เทคนิคการปรับจูนโพรบด้วยการเพิ่มสตับรูปตัวไอในแนวนอนและทำการปรับค่าให้เหมาะสมจะทำให้สายอากาศสามารถขยายช่วงความถี่ใช้งานจากช่วงความถี่เดียวเป็นสองช่วงความถี่ เมื่อทดสอบวัดคุณสมบัติต่างๆและทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศ พบว่าสายอากาศที่นำเสนอมีผลตอบสนองของความถี่เรโซแนนซ์ 2 ช่วงความถี่ คือที่ความถี่เรโซแนนซ์ของช่วงความถี่ต่ำเท่ากับ 2.45 GHz และที่ความถี่เรโซแนนซ์ของช่วงความถี่สูงเท่ากับ 3.50 GHz ครอบคลุมการใช้งานตามมาตรฐาน IEEE802.111b/g 2.45 GHz (2.4-2.48 GHz) และ IEEE802.16e 3.50 GHz (3.40-3.69 GHz) อัตราขยายของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 8.34 และ 10.08 ตามลำดับ

ผลการจำลองแบบค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งที่ความถี่เรโซแนนซ์ของช่วงความถี่ต่ำที่ 2.47 GHz มีค่าเท่ากับ 1.4 ส่วนผลการทดสอบวัดค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งมีค่าเท่ากับ 1.7 ในขณะที่ความถี่เรโซแนนซ์ของช่วงความถี่สูงที่ 3.49 GHz พบว่าผลการจำลองแบบค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งมีค่าเท่ากับ 1.1 ส่วนผลการทดสอบวัดค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งมีค่าเท่ากับ 1.2 ซึ่งพบว่าทั้งสองช่วงความถี่มีค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งไม่เกิน 1.79 ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ช่วงความถี่ต่ำเท่ากับ 2.47 GHz และที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ช่วงความถี่สูงเท่ากับ 3.49 GHz พบว่าทั้งผลการจำลองแบบและผลการทดสอบวัดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และทั้งสองช่วงความถี่มีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบสองทิศทาง

5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาสายอากาศในอนาคต

สายอากาศโมโนโพลแบบระนาบด้วยเทคนิคการปรับจูนโพรบและโครงสร้างปากแตรเพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์และอัตราขยาย สามารถนำไปพัฒนาดังนี้

5.2.1 ควรพัฒนาให้สายอากาศสามารถประยุกต์ใช้งานได้ในหลายย่านความถี่มากขึ้น โดยใช้เทคนิคการปรับจูนสตับรูปตัวไอแนวนอนที่เชื่อมต่อกับโพรบรูปวงกลม เมื่อสายอากาศได้รับการปรับจูนอย่างเหมาะสมจะทำให้สายอากาศมีช่วงความถี่ใช้งานเพิ่มขึ้น

5.2.2 ควรพัฒนาสายอากาศให้สามารถเลือกแบบรูปการแผ่พลังงานแบบทิศทางเดียวหรือสองทิศทางได้ โดยการเจาะรูตรงกลางของท่อนำคลื่นรูปวงแหวน จากนั้นนำแผ่นโลหะไปปิดกั้นที่รูตรงกลาง จะทำให้สามารถเลือกแบบรูปการแผ่พลังงานได้ เช่น ในกรณีที่ต้องการให้สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานในทิศทางเดียว ให้ใช้แผ่นโลหะปิดกั้นรูตรงกลางของท่อนำคลื่นรูปวงแหวน แต่ถ้าต้องการให้สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบสองทิศทางให้นำแผ่นโลหะออก เป็นต้น ซึ่งการพัฒนาสายอากาศในรูปแบบนี้จะทำให้สายอากาศมีฟังก์ชันการใช้งานเพิ่มมากขึ้น

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบด้วยเทคนิคการปรับจูนโพรบและโครงสร้างปากแตรเพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์และอัตราขยายของสายอากาศโดยได้สรุปผลการทดสอบวัดคุณสมบัติต่างๆ ทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศและข้อเสนอแนะในการพัฒนาสายอากาศ ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

สายอากาศโมโนโพลแบบระนาบที่มีเทคนิคการปรับจูนโพรบและโครงสร้างปากแตรเพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์และอัตราขยายได้ถูกออกแบบและสร้างจริง เมื่อใช้เทคนิคการปรับจูนโพรบด้วยการเพิ่มสตับรูปตัวไอในแนวนอนและทำการปรับค่าให้เหมาะสมจะทำให้สายอากาศสามารถขยายช่วงความถี่ใช้งานจากช่วงความถี่เดียวเป็นสองช่วงความถี่ เมื่อทดสอบวัดคุณสมบัติต่างๆและทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศ พบว่าสายอากาศที่นำเสนอมีผลตอบสนองของความถี่เรโซแนนซ์ 2 ช่วงความถี่ คือที่ความถี่เรโซแนนซ์ของช่วงความถี่ต่ำเท่ากับ 2.45 GHz และที่ความถี่เรโซแนนซ์ของช่วงความถี่สูงเท่ากับ 3.50 GHz ครอบคลุมการใช้งานตามมาตรฐาน IEEE802.111b/g 2.45 GHz (2.4-2.48 GHz) และ IEEE802.16e 3.50 GHz (3.40-3.69 GHz) อัตราขยายของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 8.34 และ 10.08 ตามลำดับ

ผลการจำลองแบบค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งที่ความถี่เรโซแนนซ์ของช่วงความถี่ต่ำที่ 2.47 GHz มีค่าเท่ากับ 1.4 ส่วนผลการทดสอบวัดค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งมีค่าเท่ากับ 1.7 ในขณะที่ความถี่เรโซแนนซ์ของช่วงความถี่สูงที่ 3.49 GHz พบว่าผลการจำลองแบบค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งมีค่าเท่ากับ 1.1 ส่วนผลการทดสอบวัดค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งมีค่าเท่ากับ 1.2 ซึ่งพบว่าทั้งสองช่วงความถี่มีค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งไม่เกิน 1.79 ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ช่วงความถี่ต่ำเท่ากับ 2.47 GHz และที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ช่วงความถี่สูงเท่ากับ 3.49 GHz พบว่าทั้งผลการจำลองแบบและผลการทดสอบวัดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และทั้งสองช่วงความถี่มีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบสองทิศทาง

5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาสายอากาศในอนาคต

สายอากาศโมโนโพลแบบระนาบด้วยเทคนิคการปรับจูนโพรบและโครงสร้างปากแตรเพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์และอัตราขยาย สามารถนำไปพัฒนาดังนี้

5.2.1 ควรพัฒนาให้สายอากาศสามารถประยุกต์ใช้งานได้ในหลายย่านความถี่มากขึ้น โดยใช้เทคนิคการปรับจูนสตับรูปตัวไอแนวนอนที่เชื่อมต่อกับโพรบรูปวงกลม เมื่อสายอากาศได้รับการปรับจูนอย่างเหมาะสมจะทำให้สายอากาศมีช่วงความถี่ใช้งานเพิ่มขึ้น

5.2.2 ควรพัฒนาสายอากาศให้สามารถเลือกแบบรูปการแผ่พลังงานแบบทิศทางเดียวหรือสองทิศทางได้ โดยการเจาะรูตรงกลางของท่อนำคลื่นรูปวงแหวน จากนั้นนำแผ่นโลหะไปปิดกั้นที่รูตรงกลาง จะทำให้สามารถเลือกแบบรูปการแผ่พลังงานได้ เช่น ในกรณีที่ต้องการให้สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานในทิศทางเดียว ให้ใช้แผ่นโลหะปิดกั้นรูตรงกลางของท่อนำคลื่นรูปวงแหวน แต่ถ้าต้องการให้สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบสองทิศทางให้นำแผ่นโลหะออก เป็นต้น ซึ่งการพัฒนาสายอากาศในรูปแบบนี้จะทำให้สายอากาศมีฟังก์ชันการใช้งานเพิ่มมากขึ้น

บรรณานุกรม

[1] วัชรพล นาคทอง, เสกสรรค์ พลศรี, ปิยดนัย บุญไมตรี, อำนวย เรืองวารี "การปรับเปลี่ยนโพรบป้อนสัญญาณแบบรูปทรงเรขาคณิตร่วมกับสายอากาศรูปวงกลมสำหรับการสื่อสารไร้สาย," การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 32 (EE CON-32), pp. 1-4, 2552.

[2] ปิยดนัย บุญไมตรี และคณะ " สายอากาศวงแหวนที่มีโพรบรูปวงกลมสำหรับการใช้งานการสื่อสารแบบไร้สาย " การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 39 (EECON-39), pp. 1–4. 2559.

[3] Wannop Lakvaengmon, Watcharaphon Naktong, Virote Pirajnanchai and Amnoiy Ruengwaree "The Bandwidth Expansion of Double-Horn Antenna with a Squared Probe for Wireless Communication Application," 2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON), pp. 1-5, 2017

[4] Huanbin Jiang, Wanshun Jiang and Yuemin Ning "Design of a novel R-band conical horn antenna fed with rectangle waveguide," 2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), pp. 1-3, 2012.

[5] Sachin Kalraiya, Hari Shankar Singh, Manoj Kumar Meshram and M. Thottapan, "Microstripline-Fed Dual Band Printed Monopole Antenna for WLAN/WiMAX Applications," IEEE Region 10 Symposium, pp. 224-227,2014

[6] Phairote Wounchoum, Pitchanun Wongsiritorn, Sompol Kosulvit "Exponential Horn Antenna Excited by Circular Ring for Bridging Outdoor Wireless LAN Applications," International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 1-2, 2017

[7] Amnoiy Ruengware, Apinya Innok, Watcharaphon Naktong and Piyadanaiboonmaitree, "The Bandwidth Enhancement of Rectangular Slot Antenna with L-shaped and double I-shaped Stub Tuning for WLAN/WiMAX Applications," 2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), pp. 1–4. 2015.

[8] Yingsong Li, Shu Chang, Ming Li and Xiaodong Yang "A Compact Ring UWB Antenna with Tri-notch Band Characteristics Using slots and tuning stub" 2011 4th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, pp. 12-15, 2011.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[9] Amnoiy Ruengwaree, Wannop Lakvaengmon and Watcharaphon Naktong “Bi - Directional Circular Horn Antenna with Circular Probe Tuning for Dual Band Applications,” 2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC), pp 440-443, 2017.

[10] S. Kornsing, A. Innok, W. Naktong and A. Ruengwaree “The Ring Antenna with Circular Probe Feeding for MIMO Systems,” 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 1-2, 2017

[11] A. Azman, M. Z. A. Abd Aziz, M. K. Suaidi, A. Salleh, H. Nornikman and F. Malek, “CPW-FED Compact Monopole Antenna for Dual-Band WLAN/WiMAX Applications,” 2015 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT), pp. 485-488, 2015.

[12] สุวัฒน์ สกุลชาติ, วัชรพล นาคทอง, วัลนพ หลักแวงมล และอำนวย เรืองวารี “การออกแบบสายอากาศปากแตรสองทิศทางที่มีการปรับเพิ่มสตับที่ส่วนปลายของโพรบป้อนพลังงานสำหรับประยุกต์ใช้งานเครือข่ายไร้สาย,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9, pp.1-4, 2560.

[13] Ayman Elboushi and Abdelrazik Sebak, “High-Gain Hybrid Microstrip/Conical Horn Antenna for MMW Applications,” IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, pp.129-132, 2012.

[14] วัชรพล นาคทอง, ปิยดนัย บุญไมตรี, ภัสส์กุญช์ ฐิติมหัทธนกุศล และอำนวย เรืองวารี “การศึกษาการจัดวางสายอากาศวงแหวนที่มีโพรบรูปวงกลม สาหรับใช้งานในระบบไมโม,” บทความวิจัยวารสารเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า (EENET JOURNAL VOL. 1, NO.2), 2017.

[15] M.Jusoh, M.F.Jamlos, M.F.Malek, M.R.Kamarudi and H.Haruns “Analysis of Radiation Efficiency Effects on UWB MIMO Tree-Antenna Positioning,” Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), pp.897-900, 2012.

[16] Souphanna Vongsack, Chuwong Phongcharoenpanich, Sompol Kosulvit, Kazuhiko Hamamoto, Toshio Wakabayashi “Investigation of Two-probe Excited Circular Ring Antenna with Square Reflector,”2011 6th International Conference on Telecommunication Systems, Services and Applications (TSSA), pp. 102-105, 2011.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[17] R. Bickel, H. Matzner and Z. Ibragimov, “A Dual-Polarized Horn Antenna Based on Four Waveguides,” 2015 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), pp. 235-237, 2015.

[18] รังสรรค์ วงศ์สรรค์. (2555). วิศวกรรมสายอากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 3. นครราชสีมา : ยืนหยัดชัดเจน.

[19] โมไนย ไกรฤกษ์. (2535). ทฤษฎีสายอากาศ. กรุงเทพฯ : ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.

[20] บัณฑิต โรจน์อารยานนท์.(2539). วิศวกรรมไมโครเวฟ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[21] C.A.Balanis. (2005). Antenna Theory: Analysis Design, Third Edition. New York : John Wiley & Sons.

[22] กิตติศักดิ์ ทองดา, "การศึกษาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง," ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์

[23] ประยุทธ อัครเอกฒาลิน. (2550). การออกแบบวงจรไมโครเวฟ : Microwave Circuit Design. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติทั่วไปของแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4

DOOSAN Electro-Materials

DS-7405A

(ANSI : FR-4) HIGH C.T.I

COPPER CLAD LAMINATES

FEATURES

- High C.T.I Value(above 400V)
- Good dimensional stability, soldering reliability has been bettered
- Good electrical properties
- High density automatic mounting can be carried out

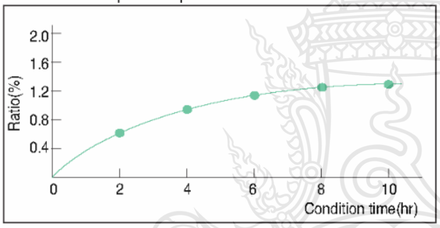
INTERNATIONAL STANDARD RECOGNITION

- BSI : 6741
- VDE : VDE-Reg-Nr. 4945
- UL : E103670

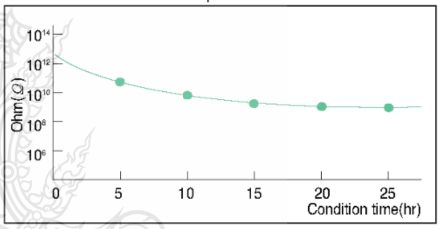
APPLICATIONS

Computer & peripherals, Instrumentation, VCR, Television, Electronic Toy, etc.,

■ Water absorption at pressure cooker

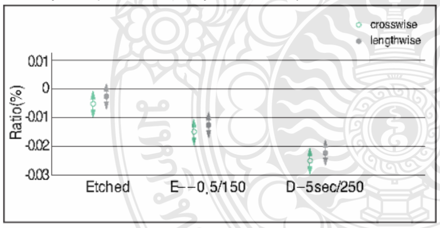


■ Insulation resistance at pressure cooker



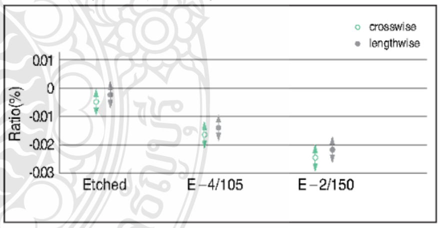
■ Dimensional stability

PCB process(size360X310mm span310X254mm)

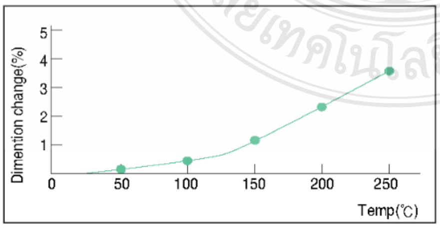


■ Dimensional stability

Test method(IPC. TM.650 2. 4. 39)

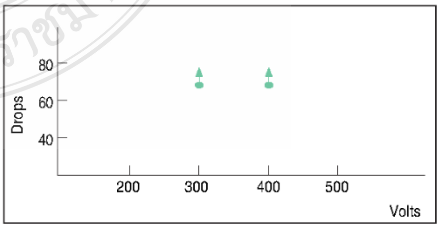


■ Thermal expansion of Z-direction(Test by TMA)



■ Anti-Tracking(IEC-Method)

Electrode distance:4mm 0.1% NH_4Cl



The World Leader in Technology and Quality

COPPER CLAD LAMINATES

GENERAL PROPERTIES

Test Item		Unit	Treatment Condition	Designation: DS-7405A, ANSI Grade: FR-4 — Property Data: Standard Value	Guaranteed Value
Tg		℃	DSC TMA DMA	135 135 165	above 130 above 130 above 160
CTE	x-axis y-axis z-axis	ppm/℃	Ambient to Tg	18 13 55	less than 20 less than 15 less than 60
Flammability		-	UL-94	V-0	V-0
Insulation Resistance		ohm	C-96/20/65 C-96/20/65+D-2/100	1×10^{12} - 1×10^{13} 1×10^{10} - 1×10^{11}	above 5×10^{11} above 1×10^{9}
Volume Resistivity		ohm-cm	C-96/20/65 C-96/20/65+C-96/40/90	1×10^{14} - 1×10^{15} 5×10^{13} - 5×10^{14}	above 1×10^{13} above 5×10^{12}
Surface Resistance		ohm	C-96/20/65 C-96/20/65+C-96/40/90	5×10^{13} - 5×10^{14} 1×10^{12} - 1×10^{13}	above 1×10^{12} above 1×10^{11}
Arc Resistance		min.seconds		110	above 60
Dielectric Constant (1 MHz)		-	C-96/20/65 C-96/20/65+D-48/50	4.5 - 4.8 4.6 - 5.2	less than 5.5 less than 5.8
Dissipation Factor (1 MHz)		-	C-96/20/65 C-96/20/65+D-48/50	0.015 - 0.020 0.018 - 0.023	less than 0.035 less than 0.045
Comparative Tracking Index		volt	IEC Method	above 400	above 400
Solder Float(260℃)		sec	A	above 180	above 120
Peel Strength	Cu.foil 1oz (0.035mm)	kgf/cm	A	1.5 - 1.8	above 1.43
Flexural Strength		kgf/mm²	A	40 - 50	above 32.7
Water Absorption		%	E-24/50+D-24/23	0.10 - 0.15	less than 0.25

Specimen Thickness : 1.6mm

PURCHASING INFORMATION

- Copper foil : 0.5 oz/ft²(0.018 mm), 1 oz/ft²(0.035 mm), 2 oz/ft²(0.070 mm) available.
- Thickness : 0.4mm to 3.2mm

Standard Size		Tolerance(mm)
1,020 X 1,220mm (40" X 48") 1,070 X 1,220mm (42" X 48") 1,020 X 1,020mm (40" X 40")	915 X 1,220mm (36" X 48") 970 X 1,220mm (38" X 48")	+3 -0

※Other sheet size and thickness could be available upon request.

ภาคผนวก ข

คุณสมบัติของขั้วต่อแบบ SMA

SMA - 50 Ohm Connectors

142-0701-621 4
142-0701-626 4
142-0701-631 4
142-0701-636 4
142-0701-701 7
142-0701-706 7
142-1701-011 5
142-1701-016 5
142-1701-031 4
142-1701-036 4
142-1701-041 5
142-1701-046 5
142-1701-121 5
142-1701-126 5
142-1701-131 4
142-1701-136 4
142-1701-191 7
142-1701-196 7
142-1701-201 6
142-1701-206 6
142-1711-001 7
142-1711-006 7
142-1711-011 8
142-1711-016 8
142-1711-021 8
142-1711-026 8
142-1711-031 8
142-1711-036 8
142-1801-031 6
142-1801-036 6
142-1801-041 6
142-1801-046 6
2-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric 4, 6
2-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Flush Dielectric 4
2-Hole Flange Mount Plug Receptacle - Extended Dielectric 6
2-Hole RA Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric 8
2-Hole RA Flange Mount Jack Receptacle -Extended Dielectric 8
2-Hole RA Flange Mount Jack Receptacle -Extended Dielectric 8
4-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric 5
4-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Flush Dielectric 4
4-Hole Flange Mount Jack Receptacle -Extended Dielectric 7
4-Hole Flange Mount Plug Receptacle - Extended Dielectric 6
4-Hole RA Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric 7
4-Hole Right Angle Flange Mount Jack Receptacle 7
Specifications 2, 3

SMA - 50 Ohm Connectors

Specifications

JOHNSON Components®

INCHES (MILLIMETERS)
CUSTOMER DRAWINGS AVAILABLE UPON REQUEST

ELECTRICAL RATINGS

Impedance: 50 ohms

Frequency Range:

Dummy loads	0-2 GHz
Flexible cable connectors	0-12.4 GHz
Uncabled receptacles, RA semi-rigid and adapters	0-18.0 GHz
Straight semi-rigid cable connectors and field replaceable connectors	0-26.5 GHz

VSWR: (f = GHz)

	Straight Cabled Connectors	Right Angle Cabled Connectors
RG-178 cable	1.20 + .025f	1.20 + .03f
RG-316, LMR-100 cable	1.15 + .02f	1.15 + .03f
RG-58, LMR-195 cable	1.15 + .01f	1.15 + .02f
RG-142 cable	1.15 + .01f	1.15 + .02f
LMR-200, LMR-240 cable	1.10 + .03f	1.10 + .06f
.086 semi-rigid	1.07 + .008f	1.18 + .015f
.141 semi-rigid (w/contact)	1.05 + .008f	1.15 + .015f
.141 semi-rigid (w/o contact)	1.035 + .005f	
Jack-bulkhead jack adapter and plug-plug adapter	1.05 + .01f	
Jack-jack adapter and plug-jack adapter	1.05 + .005f	
Uncabled receptacles, dummy loads	N/A	
Field replaceable (*see page 59*)	N/A	

Working Voltage: (Vrms maximum)†

Connectors for Cable Type	Sea Level	70K Feet
RG-178	170	45
RG-316; LMR-100, 195, 200	250	65
RG-58, RG-142, LMR-240, .086 semi-rigid, uncabled receptacles, .141 semi-rigid w/o contact	335	85
.141 semi-rigid with contact and adapters	500	125
Dummy loads	N/A	

Dielectric Withstanding Voltage: (VRMS minimum at sea level)†

Connectors for RG-178	500
Connectors for RG-316; LMR-100, 195, 200	750
Connectors for RG-58, RG-142, LMR-240, .086 semi-rigid, field replaceable, uncabled receptacles	1000
Connectors for .141 semi-rigid with contact and adapters	1500
Connectors for .141 semi-rigid w/o contact, dummy loads	N/A

Corona Level: (Volts minimum at 70,000 feet)†

Connectors for RG-178	125
Connectors for RG-316; LMR-100, 195, 200	190
Connectors for RG-58, RG-142, LMR-240, 086 semi-rigid, uncabled receptacles, .141 semi-rigid w/o contact	250
Connectors for .141 semi-rigid with contact and adapters	375
Dummy loads	N/A

Insertion Loss: (dB maximum)

Straight flexible cable connectors and adapters	$0.06\sqrt{f\,(GHz)}$	tested at 6 GHz
Right angle flexible cable connectors	$0.15\sqrt{f\,(GHz)}$	tested at 6 GHz
Straight semi-rigid cable connectors with contact	$0.03\sqrt{f\,(GHz)}$	tested at 10 GHz
Right angle semi-rigid cable connectors	$0.05\sqrt{f\,(GHz)}$	tested at 10 GHz
Straight semi-rigid cable connectors w/o contact	$0.03\sqrt{f\,(GHz)}$	tested at 16 GHz
Straight low loss flexible cable connectors	$0.06\sqrt{f\,(GHz)}$	tested at 1 GHz
Right Angle low loss flexible cable connectors	$0.15\sqrt{f\,(GHz)}$	tested at 1 GHz
Uncabled receptacles, field replaceable, dummy loads	N/A	

Insulation Resistance: 5000 megohms minimum

Contact Resistance: (milliohms maximum)

	Initial	After Environmental
Center contact (straight cabled connectors and uncabled receptacles)	3.0*	4.0*
Center contact (right angle cabled connectors and adapters)	4.0	6.0
Field replaceable connectors	6.0	8.0
Outer contact (all connectors)	2.0	N/A
Braid to body (gold plated connectors)	0.5	N/A
Braid to body (nickel plated connectors)	5.0	N/A

*N/A where the cable center conductor is used as a contact

RF Leakage: (dB minimum, tested at 2.5 GHz)

Flexible cable connectors, adapters and .141 semi-rigid connectors w/o contact	-60 dB
Field replaceable w/o EMI gasket	-70 dB
.086 semi-rigid connectors and .141 semi-rigid connectors with contact, and field replaceable with EMI Gasket	-90 dB
Two-way adapters	-90 dB
Uncabled receptacles, dummy loads	N/A

RF High Potential Withstanding Voltage: (Vrms minimum, tested at 4 and 7 MHz)†

Connectors for RG-178	335
Connectors for RG-316; LMR-100, 195, 200	500
Connectors for RG-58, RG-142, LMR-240, .086 semi-rigid, .141 semi-rigid cable w/o contact, uncabled receptacles	670
Connectors for .141 semi-rigid with contact and adapters	1000

Power Rating (Dummy Load): 0.5 watt @ + 25°C, derated to 0.25 watt @ +125°C

MECHANICAL RATINGS

Engagement Design: MIL-C-39012, Series SMA
Engagement/Disengagement Force: 2 inch-pounds maximum
Mating Torque: 7 to 10 inch-pounds
Bulkhead Mounting Nut Torque: 15 inch-pounds minimum
Coupling Proof Torque: 15 inch-pounds minimum
Coupling Nut Retention: 60 pounds minimum
Contact Retention:
6 lbs. minimum axial force (captivated contacts)
4 inch-ounce minimum torque (uncabled receptacles)

Cable Retention:

	Axial Force*(lbs)	Torque (in-oz)
Connectors for RG-178	10	N/A
Connectors for RG-316, LMR-100	20	N/A
Connectors for LMR-195, 200	30	N/A
Connectors for RG-58, LMR-240	40	N/A
Connectors for RG-142	45	N/A
Connectors for .086 semi-rigid	30	16
Connectors for .141 semi-rigid	60	55

*Or cable breaking strength whichever is less.

Durability: 500 cycles minimum
100 cycles minimum for .141 semi-rigid connectors w/o contact

ENVIRONMENTAL RATINGS (Meets or exceed the applicable paragraph of MIL-C-39012)

Temperature Range: - 65°C to + 165°C
Thermal Shock: MIL-STD-202, Method 107, Condition B
Corrosion: MIL-STD-202, Method 101, Condition B
Shock: MIL-STD-202, Method 213, Condition I
Vibration: MIL-STD-202, Method 204, Condition D
Moisture Resistance: MIL-STD-202, Method 106

†Avoid user injury due to misapplication. See safety advisory definitions on page 2.

SMA - 50 Ohm Connectors

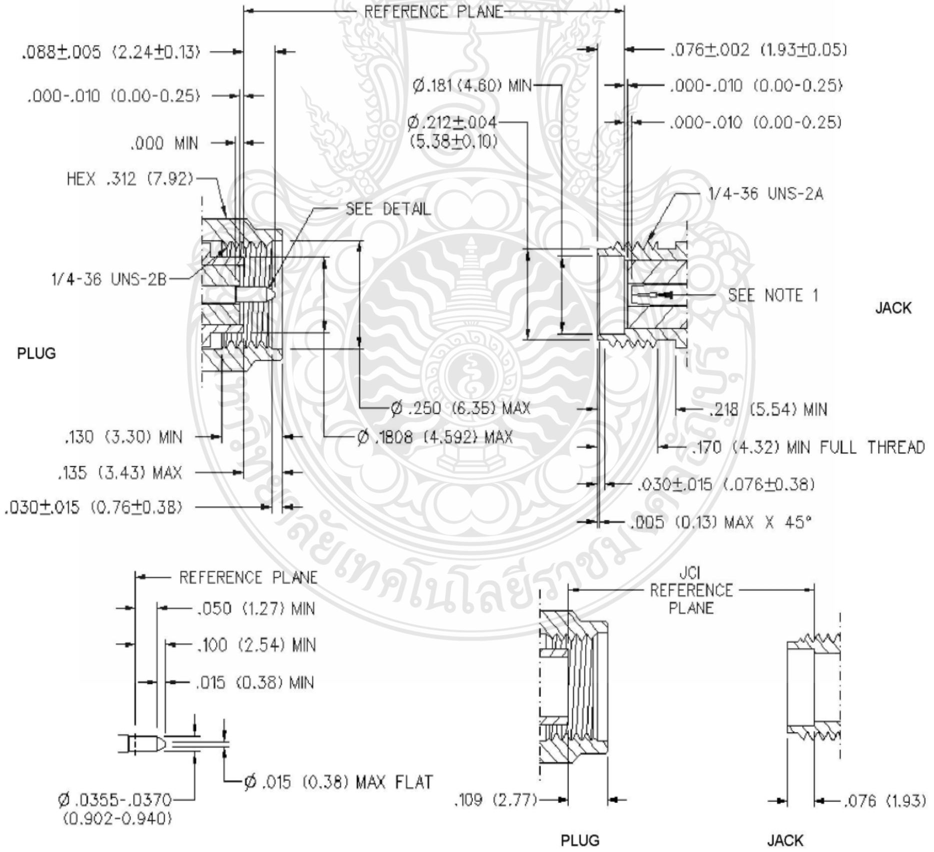
Specifications

MATERIAL SPECIFICATIONS

Bodies: Brass per QQ-B-626, gold plated* per MIL-G-45204 .00001" min. or nickel plated per QQ-N-290
Contacts: Male - brass per QQ-B-626, gold plated per MIL-G-45204 .00003" min.
Female - beryllium copper per QQ-C-530, gold plated per MIL-G-45204 .00003" min.
Nut Retention Spring: Beryllium copper per QQ-C-533. Unplated
Insulators: PTFE fluorocarbon per ASTM D 1710 and ASTM D 1457 or Tefzel per ASTM D 3159
Expansion Caps: Brass per QQ-B-613, gold plated per MIL-G-45204 .00001" min. or nickel plated per QQ-N-290
Crimp Sleeves: Copper per WW-T-799 or brass per QQ-B-613, gold plated per MIL-G-45204 .00001" min. or nickel plated per QQ-N-290
Mounting Hardware: Brass per QQ-B-626 or QQ-B-613, gold plated per MIL-G-45204 .00001" min. or nickel plated per QQ-N-290
Seal Rings: Silicone rubber per ZZ-R-765
EMI Gaskets: Conductive silicone rubber per MIL-G-83528, Type M

* All gold plated parts include a .00005" min. nickel underplate barrier layer.

Mating Engagement for SMA Series per MIL-C-39012



NOTES

1. ID OF CONTACT TO MEET VSWR, CONTACT RESISTANCE AND INSERTION WITHDRAWAL FORCES WHEN MATED WITH DIA .0355-.0370 MALE PIN.

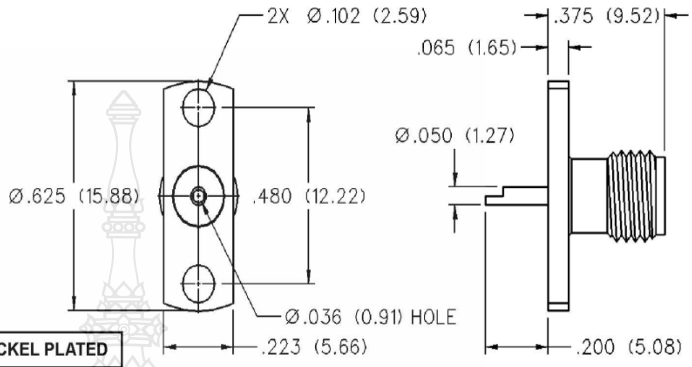
SMA - 50 Ohm Connectors

JOHNSON Components®

Panel Mount

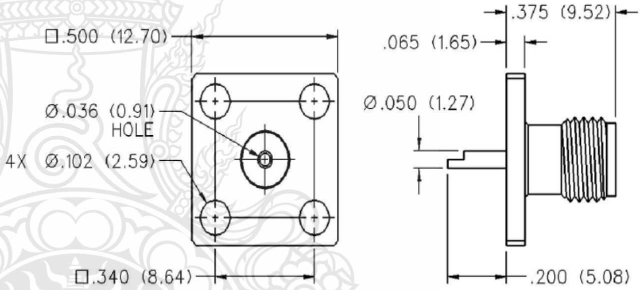
INCHES (MILLIMETERS)
CUSTOMER DRAWINGS AVAILABLE UPON REQUEST

2-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Flush Dielectric



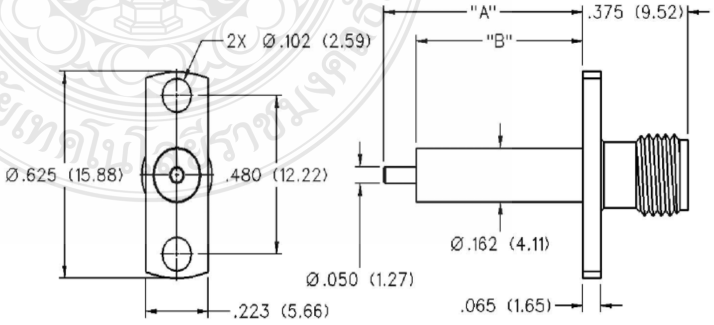
VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
VSWR: N/A 0-18 GHz	142-0701-621	142-0701-626

4-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Flush Dielectric



VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
VSWR: N/A 0-18 GHz	142-0701-631	142-0701-636

2-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric



VSWR & FREQ. RANGE	PRODUCT SERIES	GOLD PLATED	NICKEL PLATED	"A"	"B"
VSWR: 1.15 + .02 f (GHz) 0-18 GHz	Brass	142-1701-131	142-1701-136	.705 (17.91)	.590 (14.99)
		142-1701-031	142-1701-036	.240 (6.10)	.180 (4.57)

ภาคผนวก ค

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

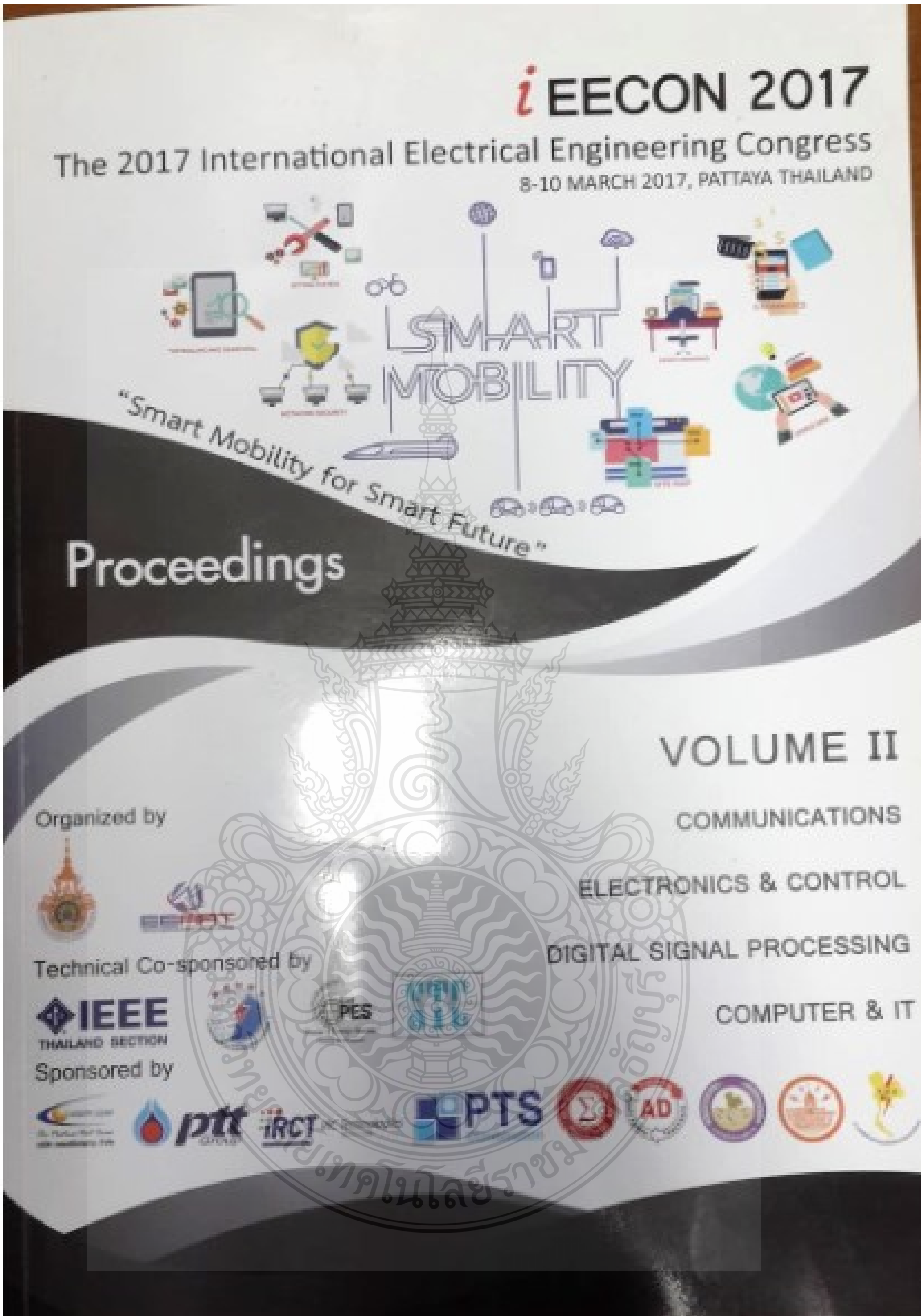
[1] Wannop Lakvaengmon "The Bandwidth Expansion of Double-Horn Antenna with a Squared Probe for Wireless Communication Aplication" 5th International Electrical Engineering Congress, Pattaya, Thailand, 8-10 March 2017

[2] Amnoiy Ruengwaree, Wannop Lakvaengmon, Watcharaphon Naktong "Bi - Directional CircularHorn Antenna with Circular Probe Tuning for Dual Band Applications" 2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC), Kuala Lumpar, Malaysia, 13-16 Nov. 2017

[3] สุวัฒน์ สกุลชาติ, วัชรพล นาคทอง, วัลนพ หลักแวงมล และอำนวย เรืองวารี "การออกแบบสายอากาศปากแตรสองทิศทางที่มีการปรับเพิ่มสตับที่ส่วนปลายของโพรบป้อนพลังงานสำหรับประยุกต์ใช้งานเครือข่ายไร้สาย", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9 (EENET), จันทบุรี, ประเทศไทย, 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2560

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ที่ 1

[1] Wannop Lakvaengmon "The Bandwidth Expansion of Double-Horn Antenna with a Squared Probe for Wireless Communication Aplication" 5th International Electrical Engineering Congress, Pattaya, Thailand, 8-10 March 2017


iEECON 2017
The 2017 International Electrical Engineering Congress
8-10 MARCH 2017, PATTAYA THAILAND
SMART MOBILITY
"Smart Mobility for Smart Future"
Proceedings
VOLUME II
COMMUNICATIONS
ELECTRONICS & CONTROL
DIGITAL SIGNAL PROCESSING
COMPUTER & IT
Organized by
Technical Co-sponsored by
IEEE
THAILAND SECTION
PES
Sponsored by
ptt
iRCT
PTS
AD

Author Index

A

A. Dasgupta 715, 719
A. Nawikavatan 707, 711
A. Ruangphanit 783
A.Jaya Laxmi 65
Abhishek Kumar 337
Abu Khari A'ain 739
Achara Pichetjamroen 153, 169, 295
Achaya Huntajidkul 665
Achmad Munir 561, 771
Adisorn Kamlungpetch 695
Adtha Lawanna 363
Aekkarat Suksukont 671
Aekkawat Bupi 273, 281
Ahmad Ali 9
Akkradach Watcharapupong 791
Alexander Gercikow 827
Alexandre César Rodrigues da Silva 743
Amnoiy Ruengwaree 577
Amornrat Limmanee 212
Anawach Sangswang 265, 325
Andriyan Bayu Suksmono 561
Anik Tahabilder 307
Anuchit aurairat 161
Anuwat Wanthong 735
Apichai Suyapan 109
Apirak Tudsorn 767
Apitep Saekow 585
Aranya Walairacht 791
Ardyono Priyadi 315
Areerat Suputtitada 763
Aris Sunawar 269
Arjnarong Mathaweesansurn 819
Arparwan Wisitwekin 763
Asheesh K Singh 337
Aswin Hongsingthong 209
Aumnad Phdungsilp 277
Aunnisa Hami 791

Boonyarit Intiyot 257
Buncha Sansoda 799
Bundit Khemmanee 221
Bundit Tanboonjit 125
Bunlung Neammanee 241
Busara Piriyanont 237

C

C. Manop 285
C. Phongcharoenpanich 541
C. Soemphol 541
C. Thammarat 707, 711
C. Tumrongwittyapak 601
Cattareeya Suwanasri 355
Chabar Suriyaammaranon 281
Chai Wankan 807
Chaipichit Cumpim 683, 687
Chaiwat Buajong 45
Chaiyod Pirak 31
Chaiyong Soemphol 52
Chakkrit Termritthikun 64
Chalermchai Jeerapan 81
Chan Anyapo 351, 81
Chan Gook Park 64
Chanchai Thongsopa 4
Chanin Bunlaksananusorn 2
Chanon Warisarn 4
Chaowanan Jamroen 2
Charinsak Saetiaw 4
Charnon Chupong ....
Charoen Vongchumyen 665,
Chatchai Chokchai ....
Chatkaew Pongmala ....
Chatrpol Pakasiri ....
Chatuporn Duangthong ....
Chavaree Thueanpangthaim ....
Chawalit Jeenanunta ....
Chayaphon Tanwongvarl ....
Chompoonuch Jinjakam ....
Chowarit Mitsantisuk ....
Chumpol Siriwattanasit ....
Cuong Nguyen Mau ....

Kulsawasd Jitkajornwanich 153, 407

L

L. Bun 81, 129
Liu RenHe 751
Luqman Ali 657

M

M. B. B. Sharifian 303
M. Boonpramuk 45
M.C. Alvarez-Herault 81, 129
Manoch Pracha 703
Marcos Katz 433
Mark Sumner 73
Marko Vukadinovic 367
Marquez, John Carl Joel S. 613
Mauridhi Hery Purnomo 315
Mohammad-Bagher Bannae-Sharifian 85, 133
Mohsen Ebadpour 133
Mongkol Kupimai 525
Montree Siripruchyanun 787
Muhammad Ridha 561
Muhaned Zaidi 739
Murooj Nadhom 433
Muy Thoeurn 315

N

N. Pattanadech 185, 189, 193, 285
N. Pothi 69
N.Jirasuwankul 285
Naowarat Tephiruk 233
Nararat Ruangchaijatupon 557
Naras Kwanthong 375
Narathep Phruksahiran 153, 212, 441
Narathep Sakunnithimetha 469
Nareerat Saetiew 411
Narin Atiwongsangthong 209
Narongchai O-Charoen 137
Nattachai Natcharapinchai 675
Nattakoon Meengoen 633
Nattapong Duangrit 573
Nattha Chuerboonchai 665
NatthananTangsunantham 311
Navin K Paliwal 337
Navneet K. Singh 333, 337
Nestchanok Yongpraderm 811
Nguyen Duc Ninh 319
Nguyen The Cuong 319
Nguyen The Van 319
Nhlanhla Mbuli 53
Nidchabendha Chandanachulaka 117
Nithiphat Teerakawanic 347
Nithiphat Teerakawanich 153, 169, 815
Nontawat Chuladaycha 221
Nophadon Wiwatcharagoses 149, 165, 225
Noppadol Maneerat 819
Nopphadol Sitthiphol 212
Noraset Wichaipanich 581
Nouman Sadiq 379
Nuruddin Hama 299
Nutapon Nakarach 449

O

O. Saejiw 601
Ong-art Tubburee 13
Ou Bai 637

P

P. Nimsanong 189, 193
P. Phongsanam 601
P.Poonam Upadhyay 65
Paitoon Rakluea 497
Pakorn Watanachaturaporn 665, 791
Pakpum Somboon 763
Panarat Cherntanomwong 449, 453, 463
Papob Lertapanon 77
Patchadaporn Sangpet 509
Pattana Intani 351
Patumporn Wongyai 113
Pauline Kongsuwan 703
Pavel Loskot 329, 433
Pawita Bunme 153
Peerapol Yuvapoositanon 653
Peerapon Siripongwutikorn 403
Peerawut Yutthagowith 181
Perawut Chinnavornrungsee 209
Petros Kounnos 73
Phagasinee Boottho 383
Phanuwat Phunkasem 125
Phasapon Manosukritkul 209, 212, 215, 218
Phatsagul Thitimahatthanagusol 525
Phichet Moungnoul 423
Phimmasone Thammavongsy 593
Phonsit Santiprapan 57
Pinit Nuangpirom 481
Pisit Liutanakul 149, 165, 225
Piyaporn Nurarak 629
Piyasak Kranprakon 265
Pongtorn Angsuchotmetee 703
Poompat Saengudomlert 477, 513
Poonam Kumari 533, 537
Pornchai Chanyagorn 387
Pornchai Supnithi 565, 569, 585, 589, 593
Pornchanok Namonta 45
Prabhuraj Shanmugham ....
Pradeep Kumar 33
Prado, Seigfred V. 61
Prajuab Inrawong 69
Prakit Intachai 65
Prapas Phongsanam 5
Prapun Suksompong 3
Prasert Pinpathomrat 7
Prasitchai Boonserm 4

Supakorn Harnsoongnoen 735
Supakorn Siddhichai 675
Supaporn Bundasak 427
Supapradit marsong 289
Supat Kittiratsatcha 197
Supattra Sukatjasakul 141
Suphaphorn Panikhorn 831
Suphon Kumapalavalee 355
Suppakitti Sopasoap 699
Surachai Ongkittikul 691
Surachai Tunsiri 521
Surachet Kanprachar 645
Surasak Niemcharoen 212, 273, 281
Surbhi Suman 333
Susumu Saito 585
Sutheera Puntheeranurak 399
Suttichai Premrudeepreechacharn 13, 17
Suwat Kitcharoenwat 799
Suwat Pattaramalai 461, 485, 529
Suwit Kiravittaya 49

T

Tad Chotiwattanatrakul 149
Takuya Tsugawa 565, 569, 593
Tamoghno Nath 501
Tanayoot Sangsuwan 311
Tatsuhito Aihara 157
Tatsuyoshi Kajikawa 17
Taweechai Ouypornkochagorn 617, 641
Thanapong Suwanasri 355
Thanatchai Kulworawanichpong 245
Thanayus Laosawatdigun 347
Thanomsak Sopon 489, 545
Thanomsok Sopon 553
Thaweesak Penpokai 791
Theeranon Chaiyakun 225
Theerayod Wiangtong 391
Thongchai Jenweerawat 791
Tidarat Areera 359
Tiranee Achalakul 411
Tomoaki Sato 13, 423
Tomorn Soonthornnapha 145
Tungala, Kerwin L 613

U

Varunyou Nontaboot 311
Venkata Reddy Kota 97, 105
Vichian Hathairatsiri 799
Vijit Kinnares 197
Virote Pirajnanchai 577
Vorapoj Patanavijit 621

W

W. Permpoonsinsup 37, 41
W. Wattakapaiboon 185
W.Jaikhang 29
W.JAMRATNAW 229
W.Permpoonsinsup 29, 33, 45
Wanchalerm Chanwattanapong 497
Wanchalerm Pora 795
Wannaree Wongtrairat 489, 545, 553, 597
Wannop Lakvaengmon 577
Wanwisa Thaiwirot 509
Wasif Khan 657
Watchara Yodkaew 201
Watcharaphon Naktong 577
Watid Phakphisut 589, 593
Watjanapong Kasemsiri 791
Weerawoot Kanokbannakorn 201, 299, 347
Werachet Khan-ngern 117
Wijarn Wangdee 77
Wilailak Siriwongrungsan 273
William Lovegreen 637
Win Hlaing 311
Wiphusana Chayinthu 61
Wisan Tangwongcharoen 215
Wisit Lumchanow 661
Wissanu Charerntanom 137
Wisut Titiroongruang 209, 212, 215, 218, 273, 281
Wittawat Puangsaijai 399
Worapol Tangsopha 121
Worrawan Chanyagorn 387
Wudhichai Assawinchaichote 723
Wutthichai Sa-nga-ngam 695
Wutthikrai Busayaporn 121

X

Xiancheng Zheng 249, 343
Xiaohua Wu 249, 343

CM059 A New Expression for Computing Topside ...
Punyawi Jamjareegulgarn , Pornchai Supnithi, Kornyanat Hozumi, Takuya Tsugawa
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand. 573

CM060 **Monopole MIMO Antenna using Decagon Fractal Patch Resonator and Defected Ground Plane for WLAN application**
Chatchai Chokchai, Nattapong Duangrit, and Prayoot Akkaraekthalin
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand 577

CM061 **The Bandwidth Expansion of Double- Horn Antenna with a Squared Probe for Wireless Communication Applications**
Wannop Lakvaengmon, Watcharaphon Naktong, Virote Pirajnanchai and Amnoiy Ruengwaree
Rajamangala University of Technology Thanyaburi,Thailand 581

CM062 **Regional Map of The F2-Layer Critical Frequency Over Southeast Asia**
Noraset Wichaipanich, Kornyanat Hozumi
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand 58

CM063 **Nominal ionospheric delay gradient estimation at Suvarnabhumi airport, Thailand**
Jirapoom Budth, Pornchai Supnithi, Susumu Saito and Apitep Saekow
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok

... Algorithm of Write Voltage Optimization in NAND Flash Memory

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

5th International Electrical Engineering Congress, Pattaya, Thailand, 8-10 March 2017

The Bandwidth Expansion of Double-Horn Antenna with a Squared Probe for Wireless Communication Applications

Wannop Lakvaengmon, Watcharaphon Naktong, Virote Pirajnanchai and Amnoiy Ruengwaree
Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT), Pathumthani, Thailand,
email: wannop.iserve@gmail.com,Watcharaphol_n@mail.rmutt.ac.th, amnoiy.r@en.rmutt.ac.th

***Abstract*— This article is presented the bandwidth expansion of double-horn antenna with a squared probe for wireless communication applications by using the basic structure of a monopole antenna with a double-horn waveguide to increase the gain and spread the applied frequency in the desired spectrum. The entire structure of the antenna was fabricated on a metal sheet with a thickness of t = 0.2 mm. It was designed with the CST program to improve impedance bandwidth to support wireless communication devices and WiFi system. The results of measurement found that the antenna had an impedance bandwidth of 70.99% (1.59 – 3.34 GHz), which conformed to support wireless communication standard.**

Keywords*— *bandwidth enhancement; horn – shaped; gain; wireless communication

I. Introduction

The antenna for wireless communication is designed for indoor installation in meeting rooms, class rooms, etc. The most used energy distribution antenna is a directional pattern, which is a microstrip or waveguide antenna. The bi-directional pattern antenna is a microstrip antenna with a rectangular hole and rounded antenna. The omi-directional pattern antenna is property of a monopole antenna with ground plane. The antennas mentioned are used generally with a frequency standard to support GSM (0.9 GHz), DCS (1.72 - 1.88 GHz), PCS (1.85 - 1.99 GHz), IMT- 2000 (1.92 - 2.17 GHz), WLAN IEEE 802. 11a/b/g 2.4 GHz (2.4 - 2.48 GHz), IEEE 802.16e 3.5 GHz (3.4 - 3.6 GHz), IEEE802.11j (4.90 - 5.091 GHz), and Public Safety Frequency (4.94 - 4.99 GHz [1-2]). The antenna in Thai commerce still has a high price and is difficult to maintain. However, some are available at high cost, which leads to the buying of a new one. Some antennas with lower prices do not cover the whole required frequency range and have a narrow bandwidth. Therefore, This research has been developed a new structure for an antenna by using low cost materials and easily to found in Thailand. It was designed as a basic monopole antenna [2-6] with double-horn waveguide to increase the bandwidth. The CST program is used to find the most appropriate parameters [7-12].

II. Design and Simulation

A. Antenna Structure

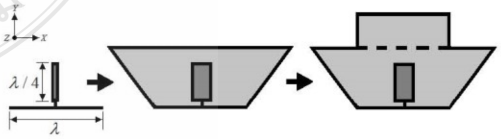
Metal sheet was selected for using in the design. The thickness of the metal sheet is t = 0.2 mm. The length of the squared probe is $\lambda/4$ [2-6] and the length of the ground plane is g1, g2 $=0.98\lambda$, as shown in (1) and Fig.1(a), respectively . The monopole antenna with ground plane was combined with double horn waveguide [7-12] which is design from (2) and (3) as shown in Fig.1(b) and Fig.1(c). The step 3 as shown in Fig.3 was designed the size of rectangular aperture with a width and length of 0.33λ. The prototype antenna was adjusted for maximum efficiency, as shown in Fig.2, and other parameter values, as shown in Table I.

$$\frac{\lambda}{4}=\frac{0.158}{4} \quad : \lambda=\frac{3\times10^{8}}{1.85\times10^{9}} \tag{1}$$

$$L_2=\sqrt{52\lambda W_2} \tag{2}$$

$$R^2=W_2^2+\left(\frac{L_2}{1.7}\right)^2 \tag{3}$$

When λ is the wave length, R is the oblique length of horn aperture, W2 is the width of the lower horn aperture, L2 is the length of the lower horn aperture and g1 is the length of ground plane.



(a) Step 1 (b) Step 2 (c) Step 3

Fig.1. The process of fabricated prototype antenna.

978-1-5090-4666-9/17/$31.00 ©2017 IEEE

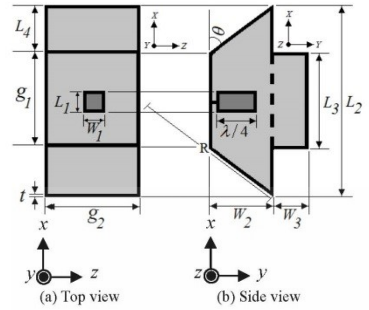


Fig.2. The parameters of the prototype antenna.

TABLE I. THE PARAMETERS OF THE PROTOTYPE ANTENNA

Width (W)		Length (L)	
Variations	Size(cm.)	Variations	Size(cm.)
W_1	2	L_1	2
W_2	10	L_2	29
W_3	5	L_3	15
g_1	15	T	0.02
g_2	15	θ	45°

B. The Result of Simulation and Analysis

There are two parts of the structure for tuning of the double horn antenna with square probe. Part 1: Adjusting of the feeding structure as I-shaped probe was designed with height of $\lambda/4$ as shown in Fig.2(b). Then, the dimension of I-shaped probe as W_1 and L_1 were adjusted from 1, 1.5, 2, 2.5, and 3 cm. From the adjustments, the most appropriate values are W_1=2 cm. and L_1=2 cm. As the simulation results, the antenna responds to 2 ranges of resonance frequency, which are the low frequency of 38.39% (1.81 – 2.67 GHz) and high frequency of 6.96% (2.91 – 3.12 GHz), as shown in Fig.3.

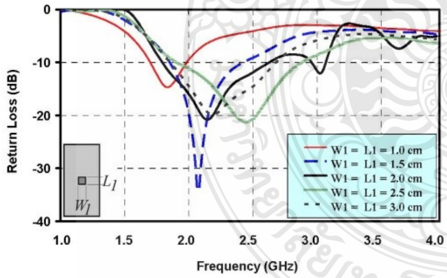


Fig.3. The simulation result of return loss of antenna when adjusting W_1 and L_1.

Part 2: The step 2 in Fig.1(b) is the design of lower horn aperture part. The design was achieved by using (2) and (3) . The dimensions are W_2 of 10 cm. and L_2 of 29 cm. Then, the square horn aperture as shown in Fig.1(c) was designed. The width L_3 is selected as 15 mm. The length W_3 is adjusted from 1, 3, 5, 7 and 9 cm. The result of adjustment shows that the most appropriate values are W_3 = 5 cm. and L_3 = 15 cm. The frequency response of the prototype antenna is 57.50% (1.71-3.09 GHz), as shown in Fig.4. The bandwidth was increased by 47%, gain of 8.11 dBi. The conclusion results of the antenna structure were tuning in all 3 steps as shown in Fig.5.

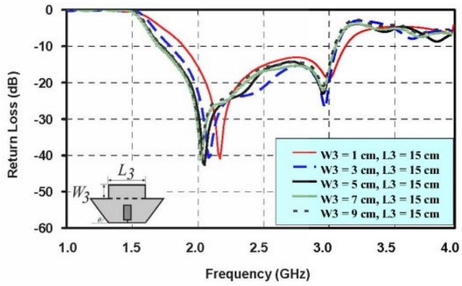


Fig.4. The simulation results of return loss of antenna when adjusting W3 and L3

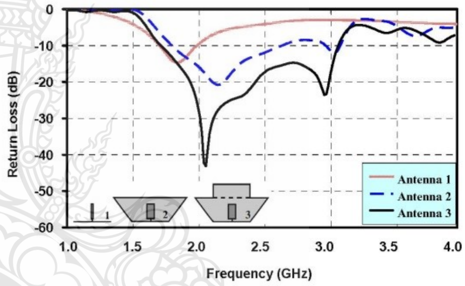
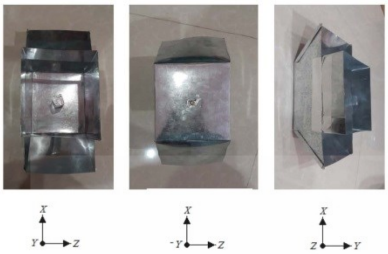


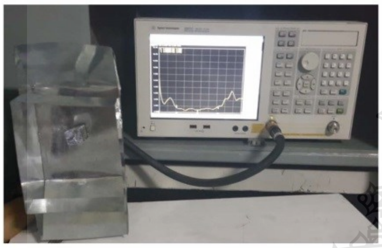
Fig.5. The simulation results of the antenna return loss with 3 step tuning.

III. Fabrication And Meaturement

The tuning of the antenna structure for more efficacy was achieved in II section. In this section, the prototype antenna had been fabricated as shown in Fig.6(a) and the measurement with network analyzer as shown in Fig.6(b). The simulation and measurement results in term of return loss can be compared, as seen in Fig.7. The both results tended in the same direction. In Fig.8, the VSWR of actual antenna are lower than 2 from 1.59-3.34 GHz. This experimental results had found that the antenna bandwidth is 70.99% with average gain of 7.59 dBi as shown in Fig.9. The comparison of radiation pattern in the E-plane (see Fig. 9) and H-plane (see Fig.10) show the results of the experiment at 1.8 GHz, 2.45 GHz and 3 GHz, and found that both planes had tended in same direction.



(a) The fabricated antenna.



(b) The measurement with network analyzer.

Fig.6. The prototype antenna and measurement step.

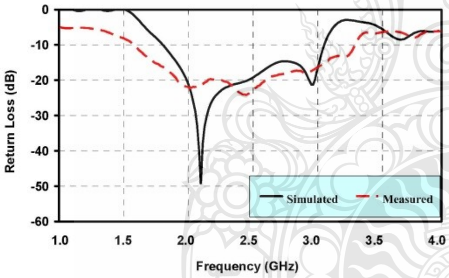


Fig.7. The comparison of simulated and measured results for return loss.

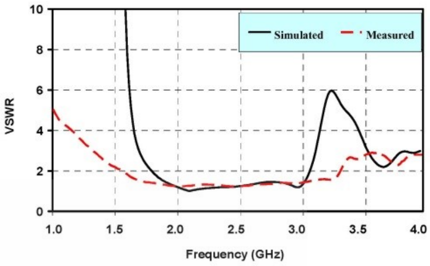


Fig.8. The comparison of Simulated and measured result for VSWR.

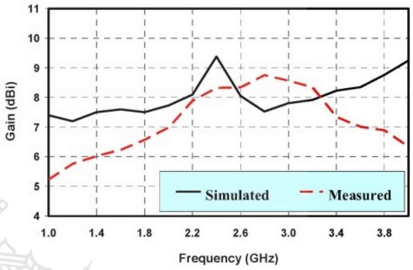
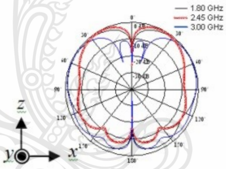
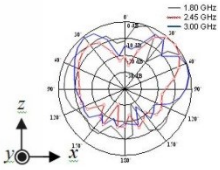


Fig.9. The comparison gain of simulated and measured results.

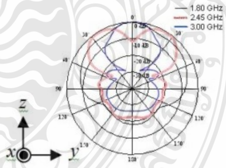


(a) simulated

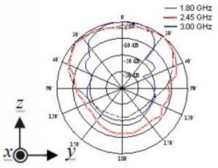


(b) measured

Fig.10. Simulated and measured result of radiation pattern in E-plane.



(a) simulated



(b) measured

Fig.11. The simulated and measured result of radiation pattern in H-plane.

IV. Conclusion

This research had been designed and fabricated the double-horn antenna with a squared probe. The purpose was to increase the bandwidth for supporting DCS, PCS, IMT- 2000, WLAN and WiMAX applications. In designing the horn, reflective metal sheet was used to increase the gain of 27.11% and the average gain of 7.59 dBi. By adjusting the size of the rectangular probe $\lambda/4$ to make it larger and adding a rectangular waveguide, it was found that a larger range of frequencies at 84% was possible. The bandwidth is 70.99% (1.59 – 3.34 GHz), as required.

Acknowledgment

Thanks to Prof. Dr.Prayoot Akkaraekthalin, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok for supporting the CST Microwave Studio.

Reference

[1] P. T. A. longkarn and S. Saleekaw, "A Dual Wide Band CPW- fed Slot Antenna with Modified Coupling Slots," 2011 International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE 2011), pp. 309-314, 2011.

[2] P. Boonmaitree, W. Naktong, S. Kornsing and A. Ruengwaree, "Rectangular slot antenna with bobbin shaped stub tuning for wireless communication application," Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2016 13th International Conference on, 28 June-1 July 2016.

[3] R. S. Kshetrimayum, "Printed Monopole Antennas for Multiband Applications," International Journal of Microwave and Optical Technology Vol. 3, no. 4, September 2008.

[4] W. G. Fano and C. Grau Escriv´a, "Near Field Characteristics of MF Monopole With A Parasitic," Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 5, 2008, pp 175-186.

[5] A. R. Mallahzadeh, A. A. Dastranj and H. R. Hassani, "A Novel Dual-Polarized Double-Ridged Horn Antenna For Wideband Applications," Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 1, 2008, pp. 67-80.

[6] Y. Chen, S. Yang, S. He and Z. Nie, "Design And Analysis Of Wideband Planar Monopole Antennas Using The Multilevel Fast Multipole Algorithm," Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 15, 2009, pp. 95 - 112.

[7] A. R. Mallahzadeh and A. Imani Progress, "Double-Ridged Antenna for Wideband Applications," In Electromagnetics Research, PIER 91, 2009, pp. 273-285.

[8] Tenigeer, N. Zhang, J. Qiu, P. Zhang and Y. Zhang, "Design of a Novel Broadband Emc Double Ridged Guide Horn Antenna," Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 39, 2013, pp. 225-236.

[9] M. Ghorbani and A. Khaleghi, "Double ridged horn antenna designs for wideband applications," 19th Iranian Conf. Electrical Eng., Tehran, Iran, May 2011.

[10] M. Puri, S. S. Dhanik, P. K. Mishra, and H. Khubchandani, "Design and simulation of double ridged horn antenna operating for UWB applications," 2013 Annual IEEE India Conf., Mumbai, India, December 2013.

[11] A. Teggatz, A. Jöstingmeier and A. S. Omar "A New TEM Double -ridged Horn Antenna for Ground Penetrating Radar Applications," 18th International Conference on Microwaves, Radar And Wireless Communications 2010, pp. 1-4.

[12] Constantine A. Balanis. Antenna Theory Analysis and Design, New York. :John Wiley & Sons, Inc, 1982.

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ที่ 2

[2] Amnoiy Ruengwaree, Wannop Lakvaengmon, Watcharaphon Naktong "Bi - Directional Circular Horn Antenna with Circular Probe Tuning for Dual Band Applications" 2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC), Kuala Lumpar, Malaysia, 13-16 Nov. 2017

Bi - Directional Circular Horn Antenna with Circular Probe Tuning for Dual Band Applications

Amnoiy Ruengwaree[1],Wannop Lakvaengmon[2], Watcharaphon Naktong[3]
Department of Electronics and Telecommunication Engineering
Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT)
Pathumthani, Thailand
Email: amnoiy@rmutt.ac.th[1], wannop_l@mail.rmutt.ac.th[2],watcharaphol_n@mail.rmutt.ac.th[2],

Apirada Namsang
Avionics Division, Civil Aviation Training Center, Bangkok,Thailand
apirada@catc.or.th

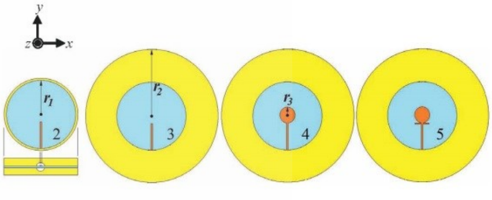
***Abstract*—This paper is presented a designed on the bi-directional circular horn antenna structure with probe tuning. The circular stubs and horizontal i-shaped tuning lines were added. The probe with the size of λ/4 was used to increase the frequency for the prototype antenna in order to support the dual application frequencies of IEEE 802.11b/g 2.45 GHz (2.4-2.48 GHz) standards and IEEE 802.16e 3.5 GHz (3.4-3.69 GHz). For the circular horn was use to increasing the gain. From the results of measurement, it was found that the antenna responded to the resonance frequency in 2 notch. In the first notch, the low frequency was equal to 2.43 GHz, while the high frequency (second notch) was equal to 3.42 GHz. The radiation pattern in the bi-directional with a gain of 8.34 dBi and 10.08 dBi, respectively.**

Keywords*—*bi-directional; circular horn antenna; circular-stub; I-shaped

I. Introduction

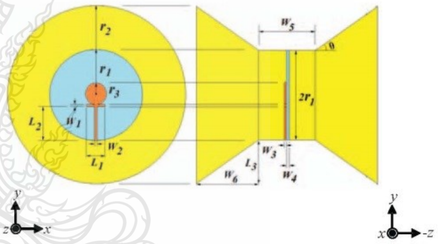
With the modern applications, WLAN IEEE 802.11a/b/g and IEEE 802.16a/d Wi-MAX are the techniques that are more main essential in wireless communications. Antenna is one of the necessary devices because of its performance needs such as compact size, high gain, provide range and various services. The functional property of the antenna has not only one frequency and specific wave propagation, but also suitable uses on specific area for point-to-point horizontal transmission. Normally most of antennas are planar structures so as to easy for fabricating. Their feed-lines frequently are created as microstrip line and CPW. Their features are presented to support requirements, but their performances are deficiency of gain[1-7]. Horn antenna is commonly used for point-to-point transmission with high gain. Its structure is several shapes such as rectangular, circular, oval, and triangular that can be various fabricated on many materials to offer high performances [8].

As mentioned previously, this researcher has developed a new model for a circular antenna structure with bi-directional functions for specific wave propagation with a circular horn to increase antenna gain. The result presents a circular horn antenna requires a probe that increases circular stubs to support WLAN IEEE 802.11a/b/g and IEEE 802.16a/d Wi-MAX, obtaining the needed frequency covering the frequency standard of IEEE 802.16e of 3.5GHz through the use of the CST program to find the most suitable parameters.



(a) (b) (c) (d)

Fig. 1. The design steps of prototypeantenna.



(a) (b)

Fig. 2. The prototype antenna structure:(a) Front view (b) Side view.

II. Design And Simulation

A. Antenna Structure Step Designing

Bi-directional circular horn antenna consist 2 kinds of material are a microstrip patch created on PCB and a horn antenna made form copper. Fig.1(a) shows the first step of antenna structure designing which is made from the copper ring with the material conductivity(σ) of 5.8x10^7 S/m covering around the circular PCB patched. The basic of circular ring is followed as (1) that is respond for the fundamental frequency of 2.45 GHz. It is become that the circular ring radius (r_1) is 53.8 mm. The circular patch was connected the I-shaped probe which had the total length of

$\lambda/4$ and fabricated on the PCB (FR-4) that its dielectric constant (ε_r) is 4.3. The substrate (h) and the copper (t) thickness of FR-4 are 0.764 mm and 0.017 mm, respectively. Then, the dual horn antennas (in yellow part) were designed following as (2) which is positioned on both sides (the front and back size) of the antenna patch as shown in Fig.1(b). So the bi-directional circular horn antenna is obtained through the radius of r_2 = 107.6 mm. After that, a circular stub on the top of I-shaped probe was added as shown in Fig.1(c) for wave propagation performances which was based on the first desired frequency of 2.45 GHz. So that the radius(r_r) was computed from (3), 9.75mm. Finally,the horizontal I-shaped stub was added over the I-shaped probe as displayed in Fig. 1(d).

$$r_1 = \frac{(\lambda_c)(1.8412)}{2\pi} \quad : \lambda_c = \frac{c}{f}(1.5) \qquad (1)$$

$$r_2 = 2r_1 \qquad (2)$$

$$r_3 = \frac{\lambda_r}{4\pi} \qquad (3)$$

r_1:the circular ring radius(mm.),
r_2: the horn antenna radius (mm.),
r_3:the circular stub radius(mm.),
λ_c : wavelength of circular horn antenna (mm.),
λ_r :wavelength frequency (mm.),
f : the fundamental frequency (2.45 GHz)(mm.).

B. Simulation and Analysis

Referring to the prototype antenna structure inFig. 2, there were three parameters which were analyzed. First, the length of circular stub radius(r_3) was tuned for the most appropriate value. It wasad justd from 9.25, 9.5, 9.75,10,and10.25 mm. It was found that the most appropriate value is r_3 = 9.5 mm because the resonant frequency is 2.45 GHz with the return loss of -2.97dB as shown in Fig. 3. It found that its bandwidth is not covered the frequency range requirement.

For the second parameter, the adjustment of the width of horizontal I-shaped stub(W_1)was to discover for the most suitable value by using the empirical method.The constant value of $L_1$was fixed at 2 1 .5 mm. So that, the length of$W_1$is changed from 1, 1.5, 2,2 .5and3 mm and found that L_1 of 21.5 mm and W_1 of 2 mm were the optimized value because the first and second notch frequency were around 2.48 and3 .53 GHz with the return loss of -1 8 .1 9 and -2 1 .7 7 dB, respectively. The frequency response were almost closed to the desired frequencies but still not satisfied, as shown in Fig.4, in order to not support IEEE 802.11b/g,2.45 GHz (- 2.4 2.4 8 GHz) and IEEE 8 0 2 .1 6 e,3 .5 GHz (3 .6 9 - 3 .4 GHz) standards.

Finally, the length of horizontal I-shaped stub(L_1) was varied. In this case, the widht $W_1$was fixed at 2 mm, but the lengthL_1could be adjusted from 18, 19, 20,21 and2 2 mm. Observing the simulation results as shown in Fig. 5, it was found that when the value of L_1 is increased, the lower notch frequency was shifted on the left hand side. On the other hand, the higher notch frequency was shifted to the right while the value of L_1 is decreased. It was noticed that the appropriated value of L_1 was equal to19 mm. The return losses are about -16 . and 0 3 - 23.0 1dB at 2.4 7 and 3.53 GHz, individually. Also from CST software programming, the impedances of the first and second notch frequency were 50.16 - j19.04 Ω and 55.27 + j6.42 Ω, that closer to 50 Ω standard.

As the critical parameters tuning described above, it can be concluded that the circular patch radius had more directly influenced to the fundamental frequency because of the main radiation resonator. Since the requirement of dual frequencies and varied bandwidth, the horizontal I-shaped stub was inserted between the feed-line and the main circular patch. Their specifications were exposed in table I. The optimized parameters of the proposed antenna are shown Table II.

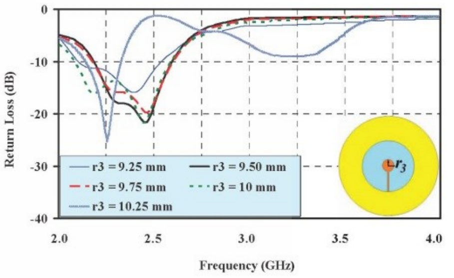


Fig.3. The simulation results of return loss by tuning r_3.

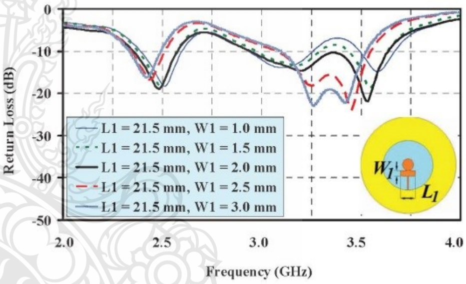


Fig.4 The simulation results of return loss of antenna when adjusting W_1.

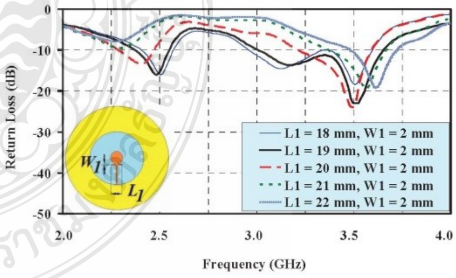


Fig.5. The simulation results of return loss of antenna when adjusting L_1.

TABLE I. COMPARISON OF SIMULATION RESULTS OF 3 PARAMETERS TUNING.

The steps of antenna tuning	f_r (GHz)	Bandwidth(GHz)	BW(%)
The circular stub radius,r_3	2.45	2.12.59 - 8	17.22
The horizontal I-shape stub,W_1	2.48	2.332. -60	10.88
	3.53	3.08 - 3.62	15.29
The horizontal I-shape stub,L_1	2.47	2.37 - 2.54	6.88
	3.50	3.6 - 3.105	15.57

TABLE II. THE PARAMETERS OF THE PROTOTYPE ANTENNA

Width		Length	
Parameters	Size (mm.)	Parameters	Size (mm.)
W_1	2	L_1	19
$W2$	2	$L2$	38
$W3$	0.017	$L3$	9
$W4$	0.764	-	-
$W5$	60	-	-
$W6$	70	-	-

III. FABRICATION AND MEATUREMENT

The bi-directional circular horn antenna with circular probe tuning had been fabricated as shown in Fig. 6. The comparisons of return losses and VSWR are shown in Fig.7-8. It is noticed that both results are agreed very well. At the lower notch frequency, the measurement return loss is around 2.43 GHz while the measurement result at the high notch frequency equals 3.42 GHz that are slightly different from simulation. Referring to the comparison of VSWR, it is acquired that the averaged VWSR measurement result is around 2 and can be accepted. Cause of the difference may due to the mismatch of fabrication process. It also got that the value of the impedance can be recognized to the standard value and the measurement gains of both notch frequencies had been presented in Table III.

The comparisons of radiation pattern in the E-plane (see Fig. 9) and H-plane (see Fig. 10) are shown the results of the experiment at 2.45 GHz, 3.5 GHz,spread the wave in bi-directional pattern.

Fig. 6. The fabricated prototype antenna.

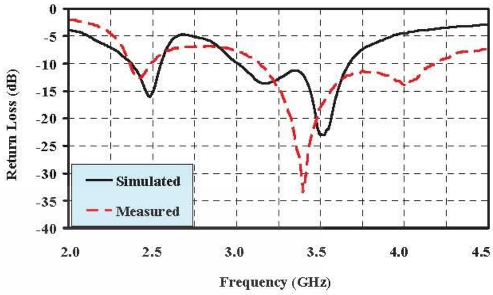


Fig. 7. The simulated and measured results of return loss.

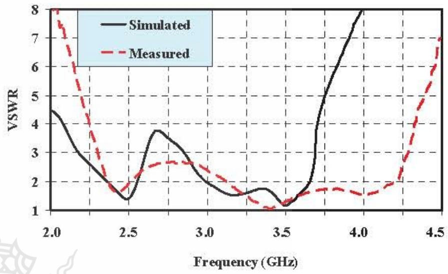
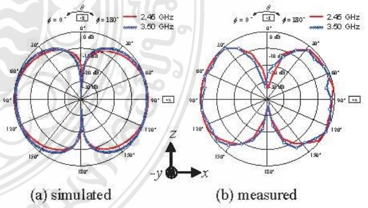


Fig. 8. The simulated and measured results of VSWR.

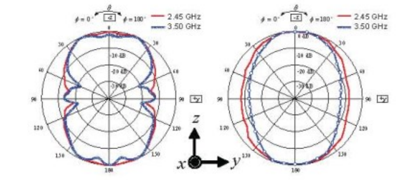
TABLE III. THE PARAMETERS OF MEASUREMENT RESULTS

Result	f_r(GHz)	BW(%)	Z(Ω)	Gain(dBi)
1st band simulation	2.47	6.93	50.16 - j19.04	9.31
1st band measurement	2.43	7.40	55.21 -j4.95	8.34
2nd band simulation	3.50	16.32	55.27 + j6.42	9.43
2nd band measurement	3.42	25.14	48.38 -j5.34	10.08



(a) simulated (b) measured

Fig. 9. The simulated and measured results of radiation pattern in E-plane.



(a) simulated (b) measured

Fig. 10. The simulated and measured results of radiation pattern in H-plane.

IV. Conclusion

This study examined the bi-directional circular horn antenna structure to increase gain and resonant frequency with adding the circular stub probes and horizontal i-shaped stub to support not only the WLAN/WiMAX system, but can be also applied for pedestrians or those are walking on the street where wifi is available or the high-speed detection on highway. From the measurement results of the antenna structure, it was found that the antenna had dual band of application frequency, which were at the low frequency of 2.43 GHz (2.34 – 2.52 GHz) and the high frequency of 3.42GHz (3.12–4.00 GHz) with impedance bandwidth at 1:1.48 and 1:1.26, and gain of 8.34 dBi and 10.08 dBi, respectively. Finally, the radiation patterns are bi-directions.

Acknowledgment

Thanks to Prof. Dr. Prayoot Akkaraekthalin, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok for supporting the CST Microwave Studio.

References

[1] N. Fhafhiem P. Boonmaitree, and A. Innok "WIDEBAND SLOT ANTENNA FOR MIMO SYSTEMS" 10th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium, at Shibaura Institute of Technology, Tokyo, Japan. 22-24 February 2016.

[2] C. Y. D. Sim, Chin Ku, H. D. Chen, T. Y. Han and H. M. Chen "Compact Size Annular-Ring Slot Antenna with Broad Circularly Polarized Bandwidth" Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2015 IEEE International Symposium on, 19-24 July 2015, pp. 578-579.

[3] D. Mitra, S. Das, D. Das and S. R. B. Chaudhuri"Wideband CPW-Fed Planar Monopole Antenna with dual notch," IAW-2011Kolkata, India, 18-22 Dec 2011.

[4] F. Zhao, H. Tang, C. Zhao, X. Gao, P. Zhuo and F. Zhang "Design of Novel Dual Band-Notched Disk Monopole Antennas," Microwave and Millimeter Wave Circuits and System Technology (MMWCST), 2012 International Workshop on, 19-20 April 2012, pp. 1-4.

[5] S. Maiti, N. Pani and A. Mukherjee "Modal Analysis and Design a planar Elliptical Shaped UWB antenna with Triple Band Notch Characteristics," Signal Propagation and Computer Technology (ICSPCT), 2014 International Conference on, 12-13 July 2014, pp. 13-15.

[6] S. Kalraiya1, H. S. Singh, M. K. Meshram and M. Thottapan "Microstripline-Fed Dual Band Printed Monopole Antenna for WLAN/WiMAX/HIPERLAN Applications," Region 10 Symposium, 2014 IEEE, 14-16 April 2014, pp. 224-227.

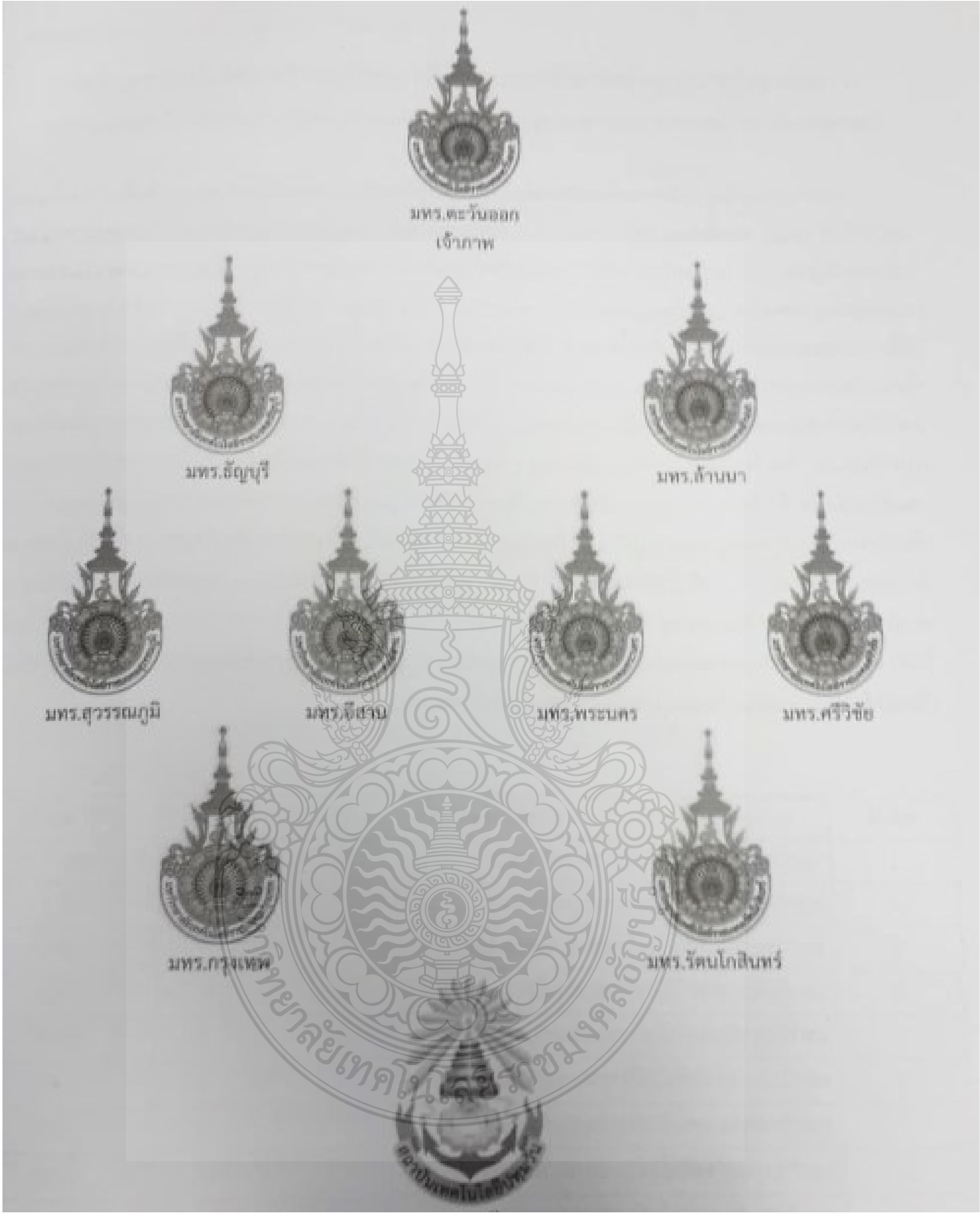
[7] A. Azman, M. Z. A. A. Aziz, M. K. Suaidi, A. Salleh, H. Nornikman and F. Malek "CPW-FED Compact Monopole Antenna for Dual- Band WLAN/ WiMAX Applications," Computer, Communications, and Control Technology (I4CT), 2015 International Conference on, 21-23 April 2015,pp. 485-488

[8] R. Bickel, H. Matzner and Z. Ibragimov "A Dual-Polarized Horn Antenna Based on Four Waveguides," Synthetic Aperture Radar (APSAR), 2015 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on, 1-4 Sept. 2015, pp. 235-237.

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ที่ 3

[3] สุวัฒน์ สกุลชาติ, วัชรพล นาคทอง, วัลนพ หลักแวงมล และอำนวย เรืองวารี “การออกแบบสายอากาศปากแตรสองทิศทางที่มีการปรับเพิ่มสตับที่ส่วนปลายของโพรบป้อนพลังงานสำหรับประยุกต์ใช้งานเครือข่ายไร้สาย”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9 (EENET) ,จันทบุรี, ประเทศไทย, 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2560

The 9th Conference of Electrical Engineering Network
of Rajamangala University of Technology
งานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9
EENET2017
"การพัฒนานวัตกรรมเพื่ออุตสาหกรรมและการเกษตรอย่างยั่งยืน"
Sustainable Development of Innovation for Industry and Agriculture
2-4 May 2017, K.P. Grand Hotel Chanthaburi
Conference Topics
Power Electronics (PE)
Control Systems and Instrumentation (CT)
Digital Signal Processing (DS)
Innovation and Invention (IN)
General Electrical Engineering (GN)
PTS
PRIMUS
SAT


มทร.ตะวันออก
เจ้าภาพ
มทร.ธัญบุรี
มทร.ล้านนา
มทร.สุวรรณภูมิ
มทร.อีสาน
มทร.พระนคร
มทร.ศรีวิชัย
มทร.กรุงเทพ
มทร.รัตนโกสินทร์

คณะกรรมการอำนวยการจัดงาน EENET2017

1.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารมย์ ตัตตะวะศาสตร์ อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก	ประธานกรรมการ
2.	รองศาสตราจารย์ ดร.อำนวย คำตื้อ รองอธิการบดีประจำวิทยาเขตจันทบุรี	กรรมการ
3.	รองศาสตราจารย์ประวิตร พุทธานนท์ รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย	กรรมการ
4.	ดร.ภทรพร ยุทธาภรณ์พินิจ ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา	กรรมการ
5.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกัลยา ปริญโญกุล คณบดีคณะเทคโนโลยีสังคม	กรรมการ
6.	นายธำรงค์ แจงเชื้อ ผู้อำนวยการสำนักงานวิทยาเขตจันทบุรี	กรรมการ
7.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนัส คงศักดิ์ คณบดีคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

1.	รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล โอฬารไพโรจน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา	ที่ปรึกษา
2.	รองศาสตราจารย์ ดร.กาณฑ์ เกิดชื่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	ประธานกรรมการ
3.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	รองประธานกรรมการ
4.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คำน่าน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา	กรรมการ
5.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ระวี ระวิกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ
6.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุริยา แก้วอาษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ

8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายชล ชุดเจือจีน — กรรมการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ — กรรมการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

10. นายสมยศ สันติมาลัย — กรรมการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิทักษ์ บุญนุ่น — กรรมการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

12. รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ หวังนิพพานโต — กรรมการ
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

13. รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง — กรรมการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สิทธิ์ชัย บุญปิยทัศน์ — กรรมการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

15. รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์ — กรรมการและเลขานุการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2017 ประจำเครือข่าย

1. รองศาสตราจารย์ ดร.อำนวย คำตื้อ — ที่ปรึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

2. นายธำรงค์ แจงเชื้อ — ที่ปรึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกัลยา ปริญโญกุล — ที่ปรึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาติชาย ไชยช่วย — ที่ปรึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

บทความสาขาไฟฟ้าสื่อสาร (CM)

CM02 การศึกษาโครงสร้างสายอากาศแบบปากแตรทรงกลมสองทิศทางที่มีการปรับเพิ่มสตับที่ส่วนปลายของโพรบป้อนพลังงานสำหรับประยุกต์ใช้งานเครือข่ายไร้สาย

บทความดีเด่น

สุวัฒน์ สกุลชาติ[1] วัชรพล นาคทอง[2] วัลนพ หลักแวงมล[1] และ อำนวย เรืองวารี[1]

[1]มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี [2]มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

CM03 การออกแบบสายอากาศโมโนโพลรูปตัวโอที่มีการปรับจูนสตับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับการประยุกต์ใช้งานในทีวีแบบดิจิทัล

การออกแบบสายอากาศปากแตรสองทิศทางที่มีการปรับเพิ่มสตับที่ส่วนปลายของโพรบป้อนพลังงาน สำหรับประยุกต์ใช้งานเครือข่ายไร้สาย

The Design of Bi - Directional Horn Antenna Structure with Adding the Stub at the End of Feeding Probe for WLAN Application

สุวัฒน์ สกุลชาติ[1] วัชรพล นาคทอง[2] วัลนพ หลักแวงมล[1]และ อำนวย เรืองวารี[1]
[1]ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 0-2549-4620 E-mail: suwat_s@mail.rmutt.ac.th, amnoiy.r@en.rmutt.ac.th
[2] สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ศูนย์กลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ 086-8698253 E-mail: Watcharaphon.na@en.rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบโครงสร้างสายอากาศปากแตรสองทิศทางที่มีการปรับเพิ่มสตับที่ส่วนปลายของโพรบป้อนพลังงาน โดยจะทำการออกแบบด้วยการจำลองแบบโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอด้วยโปรแกรม CST เพื่อวัตถุประสงค์ให้สามารถรองรับการใช้งานเครือข่ายไร้สายสองย่านความถี่ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b/g 2.45GHz (2.4 - 2.48 GHz) และ IEEE 802.16e 3.5GHz (3.4 - 3.69 GHz) จากผลการจำลองแบบพบว่า สายอากาศที่นำเสนอมีผลตอบสนองของความถี่เรโซแนนซ์ 2 ช่วงความถี่ คือที่ความถี่เรโซแนนซ์ช่วงต่ำ เท่ากับ 2.47 GHz และมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50.16 - j19.04 โอห์ม สำหรับที่ความถี่เรโซแนนซ์ช่วงสูง เท่ากับ 3.49 GHz และมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 55.27 + j6.42 โอห์ม ค่าอัตราขยายของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 9.31 dBi และ 9.43 dBi ตามลำดับ

คำสำคัญ: สองทิศทาง, โพรบ, สายอากาศปากแตร

Abstract

This paper presents the design of bi - directional horn antenna structure with adding the stub at the end of feeding probe which is designed and simulated by using CST program. The purpose of this paper is designed to support dual band frequency of IEEE 802.11 b/g 2.45 GHz (2.4 - 2.48 GHz) and IEEE 8.02 1.6e 3.5 GHz (3.4 - 3.69 GHz). The simulation results show that the lower resonance frequency of proposed antenna at 2.47 GHz have the impedance of 50.16 – j19.04 Ohm while the higher resonance frequency at 3.49 GHz have the impedance of 55.27 + j6.42 Ohm. The gains at low and high resonance frequency of antenna are 9.31 dBi and 9.43 dBi, respectively.

Keywords: Bi-directional, Probe, Horn antenna

1. บทนำ

สายอากาศแบบช่องเปิดได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานด้านการส่งสัญญาณระหว่างจุดต่อจุดกันอย่างกว้างขวาง โดยโครงสร้างสายอากาศจะมีรูปทรงต่างๆ กัน ซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้งานของแต่ละหน่วยงานที่นำไปใช้งาน [1-2] โดยมีคุณสมบัติของสายอากาศที่ใช้งานได้ความถี่เดียวเท่านั้นและทิศทางการแพร่กระจายคลื่นแบบเจาะจงทิศทาง ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานในพื้นที่เฉพาะที่เป็นจุดอับสัญญาณตามแนวยาวแบบจุดต่อจุด แต่จะไม่ครอบคลุมในส่วนพื้นที่โล่งโดยทั่วไปได้ จากที่กล่าวมา ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและพัฒนาโครงสร้างสายอากาศรูปแบบใหม่ โดยนำโครงสร้างสายอากาศรูปวงแหวนที่มีคุณสมบัติแบบเจาะจงการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางนำมาปรับจูนร่วมกับช่องเปิดรูปปากแตรเพื่อช่วยเพิ่มอัตราการขยายให้มากยิ่งขึ้น ทำให้เกิดเป็นสายอากาศปากแตร โดยส่วนที่ช่วยในการปรับจูนให้ได้ความถี่ที่ต้องการคือส่วนโพรบที่มีการเพิ่มสตับรูปวงกลม [3-6] เพื่อให้สายอากาศสามารถรองรับเครือข่ายไร้สายในระบบตามมาตรฐาน IEEE 802.11a/b/g WLAN และ IEEE 802.16e WiMAX การออกแบบอาศัยการจำลองแบบโครงสร้างด้วยการใช้โปรแกรม CST ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด

2. การออกแบบและการจำลองแบบสายอากาศ

2.1 การออกแบบสายอากาศ

โครงสร้างสายอากาศที่เริ่มทำการออกแบบนั้นเป็นโครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศแบบวงแหวน ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (1) - (3)

$$r_1 = \frac{(\lambda_c)(1.8412)}{2\pi} \quad : \lambda_c = \frac{c}{f}(1.5) \qquad (1)$$

$$r_2 = \frac{a}{2} \qquad (2)$$

$$r_3 = \frac{\lambda_y}{4\pi} \qquad (3)$$

โดยที่ c คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s

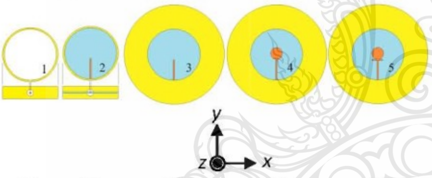
f คือ ความถี่เรโซแนนซ์

a คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องเปิดรูปปากแตร

λ_r คือ ค่าความยาวคลื่นความถี่คัทออฟ

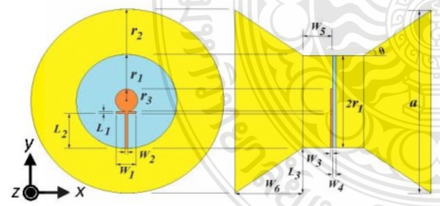
λ_c คือ ค่าความยาวคลื่นคัทออฟ

โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศแบบวงแหวนแสดงดังรูปที่ 1 (ก) มีรัศมี r_1 – 50 มม. ตามการคำนวณด้วยสมการ (1) ซึ่งโพรบมีความยาว λ/4 แสดงดังรูปที่ 1 (ข) และเมื่อนำสายอากาศรูปวงแหวนแบบแผ่นมาต่อร่วมกับช่องเปิดรูปปากแตรทั้งด้านหน้าและด้านหลัง แสดงดังรูปที่ 1 (ค) ซึ่งจะได้โครงสร้างสายอากาศแบบใหม่เป็นสายอากาศแบบรูปวงแหวนแบบแผ่นที่มีปากแตรสองทิศทางโดยมีรัศมีของปากแตรคือ r_2 – 100 มม. ตามการคำนวณด้วยสมการ (2) ในส่วนของโพรบตัวแพร่กระจายคลื่นจะทำการเพิ่มสตับรูปวงกลมที่บริเวณส่วนปลาย แสดงดังรูปที่ 1 (ง) จุดประสงค์ของการปรับจูนเพื่อให้สายอากาศสามารถรองรับการใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz โดยขนาดสตับรูปวงกลมที่ปรับเพิ่มมีรัศมี r_3 – 9.5 มม. โดยคำนวณได้จากสมการ (3) หลังจากนั้นทำการเพิ่มเส้นปรับจูนรูปตัวไอแนวนอนที่บริเวณใต้สตับรูปวงกลม แสดงดังรูปที่ 1 (จ) ด้วยมีขนาด λ/4 [7]



ก) (ข) (ค) (ง) (จ)

รูปที่ 1 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศปากแตร



(ก) มุมด้านหน้า (ข) มุมด้านข้าง

รูปที่ 2 โครงสร้างสายอากาศต้นแบบ

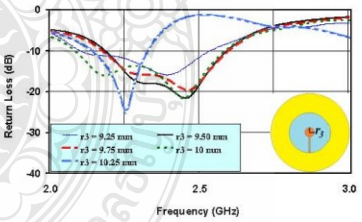
โครงสร้างสายอากาศต้นแบบออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR4 ซึ่งมีค่าคงตัว ไดอิเล็กตริก (ε_r) – 4.3 ความหนาของวัสดุฐาน รอง (h) – 0.764 มม. และความหนาของแผ่นทองแดง (t) – 0.017 มม. ค่าความนำของวัสดุ (σ) – 5.8×10^7 S/m และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (a) – 200 มม. จากการวิเคราะห์โครงสร้างสายอากาศด้วยการจำลองแบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆทำให้สายอากาศทำงานได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด พบว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่แสดงในรูปที่ 2 ที่เหมาะสมสามารถแสดงค่าได้ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมของโครงสร้างสายอากาศ

ความกว้าง		ความยาว	
ตัวแปร	ขนาด (มม.)	ตัวแปร	ขนาด (มม.)
W1	19	*L1*	2
W2	2	*L2*	38
W3	0.017	*L3*	9
W4	0.764	-	-
W5	60	-	-
W6	70	-	-

2.2 ผลการจำลองแบบโครงสร้างสายอากาศ

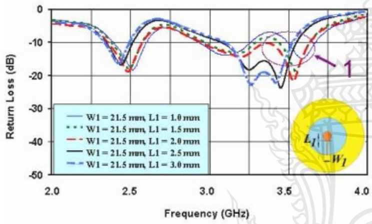
จากการออกแบบโครงสร้างสายอากาศต้นแบบ แสดงดังรูปที่ 2 จนได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนั้น สามารถอธิบายขั้นตอนการปรับจูนในส่วนโพรบได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรกทำการปรับจูนขนาดของสตับรูปวงกลมด้วยการปรับขนาดรัศมี r_3 โดยเลือกปรับด้วยค่าตั้งแต่ 9.25, 9.5, 9.75, 10 และ 10.25 มม. ซึ่งทำให้ทราบว่าค่าที่เหมาะสมคือ r_3 – 9.5 มม. มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -22.97 dB และอิมพีแดนซ์เท่ากับ 49.94 - j2.39 Ω แสดงดังรูปที่ 3



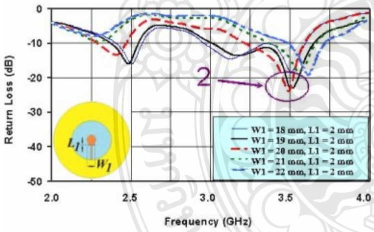
รูปที่ 3 เปรียบเทียบผลการจำลองแบบของค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเมื่อปรับค่า r_3

ขั้นตอนที่สองทำการปรับขนาดของสตับรูปตัวไอแนวนอนใต้วงกลมที่ปลายโพรบโดยกำหนดค่าความกว้างของแถบ W_1 เป็นค่าคงที่มีขนาดเท่ากับ 21.5 มม. และทำการปรับในส่วนค่าความยาวของแถบ L_1

เลือกปรับขนาดตั้งแต่ 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 มม. โดยจากการปรับจูนได้ค่าที่เหมาะสมคือ $W_1 - 21.5$ มม. และ $L_1 - 2$ มม. พบว่าสายอากาศมีผลตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ 2 ช่วง คือ ที่ความถี่เรโซแนนซ์ช่วงต่ำ 2.48 GHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเท่ากับ -18.19 dB และอิมพีแดนซ์เท่ากับ 31.63 + j3.66 Ω ที่ความถี่เรโซแนนซ์ช่วงสูง 3.53 GHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเท่ากับ -21.77 dB และอิมพีแดนซ์เท่ากับ 29.28 + j16.38 Ω จากการพิจารณาผลการจำลองแบบค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ พบว่าที่ช่วงความถี่ใช้งานทั้งสองช่วงยังไม่สามารถรองรับการใช้งานตามมาตรฐานที่ต้องการคือช่วงความถี่ต่ำ IEEE 802.11b/g 2.45 GHz (2.4 - 2.48 GHz) และช่วงความถี่สูง IEEE 802.16e 3.5GHz (3.4 - 3.69 GHz) โดยสังเกตที่ความถี่ 3.5 GHz หรือบริเวณจุดที่ 1 ในรูปที่ 4 พบว่าค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าสูง ซึ่งต้องมีการปรับโครงสร้างในส่วนนี้ต่อไป



รูปที่ 4 เปรียบเทียบผลการจำลองแบบค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเมื่อปรับ W_1 และ L_1



รูปที่ 5 เปรียบเทียบผลการจำลองแบบค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเมื่อปรับ W_1 และ L_1

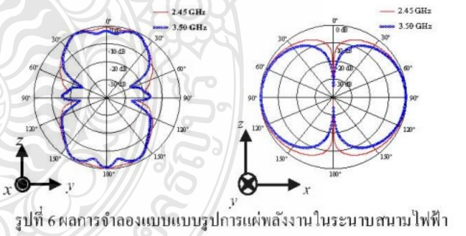
ขั้นตอนสุดท้ายทำการปรับขนาดของสตับรูปตัวไอแนวนอน โดยค่าความกว้างของแถบ W_1 เลือกปรับขนาดตั้งแต่ 18, 19, 20, 21 และ 22 มม. ในส่วนค่าความยาวของแถบ L_1 เป็นค่าคงที่เท่ากับ 2 มม.โดยปรับเปลี่ยนขนาดจากการปรับในขั้นตอนที่ 2 จากการปรับจูน พบว่าค่าที่เหมาะสมคือ W_1 เท่ากับ 19 มม. และ L_1 เท่ากับ 2 มม. ส่งผลให้สายอากาศมีผลตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ 2 ช่วง คือ ที่ความถี่เรโซแนนซ์ช่วงต่ำ 2.47 GHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเท่ากับ -16.03 dB และอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50.16 - j19.04 Ω ที่ความถี่เรโซแนนซ์ช่วงสูง 3.49 GHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเท่ากับ -23.01 dB และอิมพีแดนซ์เท่ากับ 55.27 + j6.42 Ω ซึ่งเข้าใกล้ 50 Ω และยังพบว่าจากการปรับจูนทำให้ช่วงความถี่ 3.05 - 3.65 GHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าลดลงต่ำกว่าเส้น -10 dB ตามที่ต้องการ โดยสังเกตจากจุดที่ 2 ในรูปที่ 5

ตารางที่ 2 ผลการจำลองแบบอัตราการขยาย

f_r	Z (Ω)	Gain (dBi)
2.47	50.16 –j19.04	9.31
3.49	55.27 –j6.42	9.43

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบผลการจำลองแบบค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยการปรับจูนสายอากาศทั้ง 3 รูปแบบ

ขั้นตอนการปรับจูนสายอากาศ	f_c (GHz)	Band Width (GHz)	BW (%)
ปรับค่ารัศมีวงกลม r_3	2.38	2.18 - 2.59	17.22
ปรับค่าความยาว L_1 ที่สตับรูปตัวไอ	2.41	2.33- 2.49	6.63
	3.30	3.08 - 3.52	13.33
ปรับค่าความกว้าง W_1 ที่สตับรูปตัวไอ	2.45	2.37 - 2.54	6.93
	3.37	3.10 - 3.65	16.32



รูปที่ 6 ผลการจำลองแบบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และสนามแม่เหล็ก (H-plane)

การจำลองแบบค่าอัตราการขยายมีค่า 9.31 dBi กับ 9.43 dBi ตามลำดับ แสดงตามตารางที่ 2 และจากการจำลองแบบโครงสร้างสายอากาศในการปรับจูนโพรบที่มีการเพิ่มสตับรูปวงกลมและรูปตัวไอแนวนอนดังกล่าว สามารถนำมาสรุปข้อมูลเพื่อให้ทราบผลของช่วงความถี่ใช้งานได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น แสดงดังตารางที่ 3

แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ใช้งานคือ 2.45 GHz และ 3.5 GHz คลื่นของระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) เมื่อพิจารณาผลดังกล่าวพบว่าแบบรูปการแผ่พลังงานมีลักษณะเป็นแบบสองทิศทาง แสดงดังรูปที่ 6

3. สรุป

การออกแบบ โครงสร้างสายอากาศปากแตรสองทิศทางที่มีการปรับเพิ่มสตับที่ส่วนปลายของโพรบป้อนพลังงาน เพื่อเพิ่มอัตราการขยาย โดยมีการปรับจูนเพิ่มสตับรูปวงกลมร่วมกับรูปตัวไอแนวนอนบริเวณปลายโพรบป้อนพลังงาน ช่วยเพิ่มความถี่ใช้งานตามระบบเครือข่ายไร้สาย (WLAN, WiMAX) จากผลการจำลองแบบ โครงสร้างสายอากาศด้วยโปรแกรม CST พบว่าสายอากาศมีช่วงความถี่ใช้งาน 2 ช่วงคือ ความถี่เรโซแนนซ์ช่วงต่ำที่ 2.47 GHz และความถี่เรโซแนนซ์ช่วงสูงที่ 3.49 GHz มีอัตราการขยาย 9.31 dBi และ 9.43 dBi ตามลำดับ โดยมีแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งสองช่วงความถี่มีลักษณะเป็นแบบสองทิศทางเป็นไปตามที่ต้องการ

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ อัครเอกฒาลิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้งานด้านโปรแกรม CST

เอกสารอ้างอิง

[1] S. Danacı1, E. Gürtekin1, E. Özyurt1, and A. Kara, " Design and fabrication of Ka band circular horn antenna," Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2012 20th, 18-20 April 2012, pp. 1-4.

[2] R. Bickel, H. Matzner, and Z. Ibragimov, "A Dual-Polarized Horn Antenna Based on Four Waveguides," Synthetic Aperture Radar (APSAR), 2015 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on, 1-4 Sept. 2015, pp. 235-237.

[3] กฤตยา ชาวนนท์พิทักษ์. (2551). การวิเคราะห์สายอากาศแบบสองทิศทางที่ใช้โพรบกระดุ้นวงแหวนวงรี. วิทยานิพนธ์ศึกษาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[4] M. Krairiksh, P. Keowsawat, C. Phongcharoenpanich, and S. Kosulvit, "Two-Probe Excited Circular Ring Antenna for Mimo Application," Progress In Electromagnetics Research, PIER 97, 2009, pp. 417-431.

[5] C. Y. D. Sim, Chin Ku, H. D. Chen, T. Y. Han, and H. M. Chen, "Compact Size Annular-Ring Slot Antenna with Broad Circularly Polarized Bandwidth," Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2015 IEEE International Symposium on, 19-24 July 2015, pp. 578-579.

[6] S. Kalraiya1, H. S. Singh, M. K. Meshram, and M. Thottapan, "Microstripline-Fed Dual Band Printed Monopole Antenna for WLAN/WiMAX/HIPERLAN Applications," Region 10 Symposium, 2014 IEEE, 14-16 April 2014, pp. 224-227.

[7] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, New York: John Wiley & Sons, Inc, 1982.

สุวัฒน์ สกุลชาติ สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2552 ปัจจุบันกำลังศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจ Antenna Design and Wireless Communication

วัชรพล นาคทอง กำลังศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรม ศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2559 งานวิจัยที่สนใจ Antenna Design and Wireless Communication

วัลนพ หลักแวงมล กำลังศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2559 งานวิจัยที่สนใจ Antenna Design and Wireless Communication

อำนวย เรืองวารี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยคาสเซิล ประเทศสาธารณรัฐเยอรมัน ปี พ.ศ. 2551 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจ Ultra Wideband Radar System, Ultra Fast Electrical Pulse Generator, Antenna Design

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	วัลนพ หลักแวงมล
วัน เดือน ปีเกิด	21 สิงหาคม 2526
ที่อยู่	90/270 หมู่ 6 ตำบลลาดสวาย อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12150
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์ทำงาน	ครูผู้ช่วยโรงเรียนสาธิตนวัตกรรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์	061-0177342
อีเมล์	wannop.iserve@gmail.com