



การศึกษาและออกแบบสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์
ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยรังสิต
ปีการศึกษา 2566



**STUDY AND DESIGN OF PRINTED WIDEBAND MONOPOLE ANTENNA
FED BY COPLANAR WAVEGUIDE**

**BY
CHANAPON SURIN**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL
AND COMPUTER ENGINEERING
COLLEGE OF ENGINEERING**

**GRADUATE SCHOOL, RANGSIT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2023**

วิทยานิพนธ์เรื่อง

การศึกษาและออกแบบสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์
ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม

โดย

ชนพนธ์ สุรินทร์

ได้รับการพิจารณาให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยรังสิต

ปีการศึกษา 2566

รศ. ดร. เอกรัฐ บุญภูงา
ประธานกรรมการสอบ

ดร. ไพบูรณ์ ช้อยหยด
กรรมการ

รศ. ดร. ดวงอาทิตย์ ศรีมูล
กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ผศ. ร.ต. หญิง ดร. วรณี สุขสาตร)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
8 สิงหาคม 2566

Thesis entitled

**STUDY AND DESIGN OF PRINTED WIDEBAND MONOPOLE ANTENNA
FED BY COPLANAR WAVEGUIDE**

by

CHANAPON SURIN

was submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Master of Engineering in Electrical and Computer Engineering

Rangsit University
Academic Year 2023

Assoc. Prof. Akkarat Boonpoonga, D. Eng.
Examination Committee Chairperson

Paiboon Yoiyod, D. Eng.
Member

Assoc. Prof. Duang-arthit Srimoon, D. Eng.
Member and Advisor

Approved by Graduate School

(Asst.Prof.Plт.Off. Vanee Sooksatra, D.Eng.)

Dean of Graduate School

August 8, 2023

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้เป็นอย่างดีเนื่องมาจากได้รับความอนุเคราะห์จาก
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงอาทิตย์ ศรีมูล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความสนใจได้ช่วยเหลือ และคอยให้
คำปรึกษาแนะนำเป็นอย่างดีมาโดยตลอด กราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในหลักสูตรวิศวกรรม
ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ที่ได้ให้วิชาการ
ความรู้อย่างดี ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ที่ให้กำลังใจและคำปรึกษาอย่างดีมาโดยตลอด
สุดท้ายนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเกิดขึ้นไม่ได้ถ้าไม่ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยรังสิตที่มอบ
ทุนการศึกษาเพื่อใช้ในการศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ขอกราบขอบพระคุณ

ชนพนธ์ สุรินทร์

ผู้วิจัย



6006130 : ชนพนธ์ สุรินทร์
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การศึกษาและออกแบบสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม
 หลักสูตร : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
 อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ. ดร.ดวงอาทิตย์ ศรีมูล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการศึกษาสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม สายอากาศนี้ทำงานในช่วงความถี่ 1.71 – 5.85 GHz เป็นตัวนำแผ่นบางบนแผ่นวงจรพิมพ์เอพอาร์ 4 รูปทรงของสายอากาศและระนาบกราวด์เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มุมทั้งสองใกล้จุดป้อนมีการลบมุม 25 องศาอย่างสมมาตร ระนาบกราวด์ถูกเจาะรูเพื่อสร้างท่อนำคลื่นระนาบร่วมสำหรับป้อน สายอากาศนี้ได้จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก่อนสร้างสายอากาศต้นแบบ สายอากาศนี้มีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบทิศทางคล้ายไดโอดในช่วงความถี่ต่ำของแถบความถี่ใช้งาน รูปทรงของแบบรูปการแผ่พลังงานจะเปลี่ยนเมื่อความถี่สูงขึ้นแต่ยังคงแผ่รอบทิศทางแบบไดโอดของสายอากาศอยู่ที่ 115.79% ช่วงความถี่ 1.71 GHz ถึง 5.85GHz โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยกว่า -10 dB ตลอดย่านความถี่ อัตราขยายของสายอากาศ 2.6, 4.7 และ 6.0 dBi ที่ความถี่ 1.75, 3.75 และ 5.75 GHz ตามลำดับ ทั้งสามตำแหน่ง คือ ความถี่ต่ำ กลาง และสูง อยู่ในช่วงความถี่ใช้งาน ข้อดีของสายอากาศแถบความถี่กว้าง มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน น้ำหนักเบา และ สร้างด้วยแผ่นเอพอาร์ 4 ทำให้ต้นทุนต่ำ

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 85 หน้า)

คำสำคัญ: สายอากาศโมโนโพล, แผ่นวงจรพิมพ์เอพอาร์ 4, ท่อนำคลื่นระนาบร่วม, แถบความถี่กว้าง

6006130 : Chanapon Surin
 Thesis Title : Study and Design of Printed Wideband Monopole Antenna
 Fed by Coplanar Waveguide
 Program : Master of Engineering Program in Electrical and Computer Engineering
 Thesis Advisor : Assoc. Prof. Duang-arthit Srimoon, D. Eng

Abstract

The thesis presented a study and design of printed wideband monopole antenna fed by coplanar waveguide. This antenna provides a frequency range of 1.71 – 5.85 GHz. It is a flat conductor on FR4 printed circuit board. The shape of ground and pole are rectangle where the 2 corners near the feeding point are 25 degree chamfered, symmetrically. The ground is etched to form a co-planar waveguide for feeding. According to this work, the antenna is simulated by using a computer program before fabricating a prototype. The antenna provides the omni-directional radiation as a donut shape at the low frequency of the operating band. The shape of the radiation pattern changes when the frequency is shifted higher but still omni-directional. The bandwidth of the antenna is 115.79% between 1.71 GHz and 5.85 GHz with the reflection coefficient less than -10 dB across the band. The gains of the antenna are 2.6, 4.7, and 6 dBi at the frequencies of 1.75, 3.75, and 5.75 GHz, respectively. They are the 3 points of low-, central- and high-frequency of the operating band. The advantages of the antenna are wideband, low-profile structure, light weight, and the fabrication of FR4 making it low-cost.

(Total 85 pages)

Keywords: Monopole Antenna, FR4 Printed, Co-Planar Waveguide, Wideband

Student's Signature Thesis Advisor's Signature

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	4
1.3 สมมติฐานการวิจัย	4
1.4 ขอบเขตการศึกษา	4
1.5 แนวทางการดำเนินงาน	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ทฤษฎีสายอากาศ	6
2.1.1 สัมประสิทธิ์การสะท้อน	6
2.1.2 สัญญาณสะท้อนในระบบส่งสัญญาณ	7
2.1.3 อิมพีแดนซ์	11
2.1.4 อัตราขยายสายอากาศ	13
2.1.5 แบบรูปการแผ่พลังงาน	15
2.1.6 ความสามารถในการชี้ทิศทาง	18
2.2 คุณสมบัติของคลื่นวิทยุและการจำแนกคลื่นความถี่	22
2.3 สายอากาศ	27
2.3.1 สายอากาศแผ่นพิมพ์	27
2.3.2 แกวลำดับของสายอากาศ	29
2.3.3 สายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 สายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม	31
2.4.1 ลักษณะสายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง	32
2.4.2 ลักษณะสายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง	36
บทที่ 3 การออกแบบสายอากาศ	38
3.1 สายอากาศโมโนโพลเส้นลวดเหนือระนาบกราวด์	38
3.2 สายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม	42
3.3 การออกแบบขนาดความกว้างและความยาวของสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์	45
3.4 การออกแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์สำหรับนำสัญญาณ	47
3.5 การออกแบบสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมด้วยโปรแกรมจำลอง	52
3.6 การวิเคราะห์โครงสร้างสายอากาศ	56
3.6.1 การปรับเปลี่ยนขนาดมุมตัด	58
3.6.2 การปรับเปลี่ยนขนาดโมโนโพล	61
3.6.3 การปรับเปลี่ยนท่อนำคลื่น	62
3.7 สรุป	63
บทที่ 4 ผลการจำลองและทดสอบสายอากาศ	64
4.1 สายอากาศต้นแบบที่ออกแบบ	64
4.2 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน	67
4.2.1 หลักการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน	69
4.2.2 สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่วัดได้เปรียบเทียบกับผลการจำลอง	70
4.2.3 ความกว้างแถบ	71
4.3 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1 การจัดวางอุปกรณ์ทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน	72
4.3.2 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศทดสอบ	74
4.4 ผลการวัดอัตราขยายสายอากาศ	77
4.4.1 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับวัดอัตราขยาย	77
4.4.2 ผลอัตราขยายสายอากาศ	78
4.5 สรุป	79
บทที่ 5	
สรุปผลและข้อเสนอแนะ	80
5.1 สรุป	80
5.2 ข้อเสนอแนะ	81
บรรณานุกรม	83
ประวัติผู้วิจัย	85

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	10
ค่า VSWR ต่าง ๆ ที่มีผลต่อกำลังของคลื่นวิทยุที่ส่งออกไป (Transmitted Power) และ กำลังของคลื่นสะท้อน (Reflected Power)	
2.2	25
ย่านความถี่คลื่นวิทยุ ช่วงความถี่ และความยาวคลื่น	
3.1	39
พารามิเตอร์และขนาดสายอากาศโมโนโพลเส้นลวดเหนือระนาบกราวนด์	
3.2	44
พารามิเตอร์และขนาดสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม	
3.3	49
ผลลัพธ์การปรับค่าพารามิเตอร์ W โดยเพิ่มครึ่งละ 0.2 mm ด้วยโปรแกรม App CAD	
3.4	50
ผลลัพธ์การปรับค่าพารามิเตอร์ W โดยเพิ่มครึ่งละ 0.2 mm ด้วยโปรแกรม App CAD	
3.5	51
ผลลัพธ์การปรับค่าพารามิเตอร์ W โดยลดลงครึ่งละ 0.01 mm ด้วยโปรแกรม App CAD	
3.6	52
พารามิเตอร์ของสายอากาศเบื้องต้น	
3.7	58
พารามิเตอร์ ขนาดและรายละเอียดของสายอากาศที่ใช้สำหรับสร้างสายอากาศต้นแบบ	
4.1	65
พารามิเตอร์และขนาดของสายอากาศที่ใช้สำหรับสร้างสายอากาศต้นแบบ	

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	วงจรไฟฟ้าที่แทนค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ในระบบสายส่งตั้งแต่ เครื่องส่งวิทยุสายนำสัญญาณ ไปจนถึงสายอากาศ	7
2.2	ค่า VSWR หาได้จากระดับความแรงของคลื่นที่ส่งออกไป และคลื่นนิ่งที่ เกิดจากคลื่นที่ส่งออกไปพร้อมกับคลื่นสะท้อน	8
2.3	วงจรที่ใช้แทนค่าอิมพีแดนซ์ในสายนำสัญญาณ (Z_0) ประกอบด้วย ตัว ต้านทาน (R) ขดลวดเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) (ก) บล็อกลำโพง (ข) วงจรสมมูล	12
2.4	การแผ่คลื่นของสายอากาศแบบไอโซโทรอปิกซึ่งเป็นสายอากาศในอุดม คติ	13
2.5	ระนาบการแผ่กระจายคลื่น	16
2.6	(ก) สายอากาศไดโพลและระนาบ (ข) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ yz (E-Plane) และ (ค) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ zy (H-Plane)	17
2.7	การหาความกว้างลำคลื่นกำลัง	22
2.8	ส่วนประกอบระบบการสื่อสารไร้สายโดยใช้คลื่นวิทยุรับส่งสัญญาณ	25
2.9	โครงสร้างสายอากาศซึ่งใช้ตัวแผ่พลังงานแบบแผ่นพิมพ์ชนิดต่าง ๆ (ก) รูปสี่เหลี่ยม (ข) รูปวงกลม (ค) ไดโพล	27
2.10	สายอากาศแผ่นพิมพ์ในรูปแบบเชิงเรขาคณิตต่าง ๆ	28
2.11	สายอากาศซึ่งมีตัวแผ่พลังงานแบบร่องแผ่นพิมพ์	29
2.12	สายอากาศแถวลำดับที่สร้างจากสายอากาศพื้นฐานชนิดต่าง ๆ (ก) แบบ ยาگی-อุดะ(Yagi-Uda Array) (ข) แบบอะเพอร์เจอร์ (Aperture Array) (ค) แบบแผ่นไมโครสตริป (Microstrip Patch Array) (ง) แบบร่องบนท่อนำ คลื่น (Slotted-Waveguide Array)	30
2.13	โครงสร้างของสายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง (Conductor-Backed Coplanar Waveguide)	33
2.14	โครงสร้างของสายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง (Coplanar Waveguide)	36

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1	โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลเส้นลวดเหนือระนาบกราวด์ 39
3.2	สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากการจำลองสายอากาศโมโนโพลเส้นลวดเหนือระนาบกราวด์ 40
3.3	แบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากการจำลองสายอากาศโมโนโพลเส้นลวดเหนือระนาบกราวด์ (ก) ระนาบสนาม E (ข) ระนาบสนาม H 41
3.4	โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม 43
3.5	สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากการจำลองสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม 44
3.6	แบบรูปการแผ่พลังงาน 3 มิติที่ได้จากการจำลองสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม 44
3.7	โครงสร้างของสายอากาศโดยรวม 47
3.8	โครงสร้างระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง 48
3.9	หน้าต่างของโปรแกรม AppCAD ที่ใช้ในการออกแบบท่อนำสัญญาณระนาบร่วม 49
3.10	หน้าต่างโปรแกรม AppCAD ผลที่ดีที่สุดของการปรับขนาดของ W 51
3.11	โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม 53
3.12	ตำแหน่งกำหนดพอร์ตอินพุตป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศ 53
3.13	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศโมโนโพลที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม 54
3.14	สนามไฟฟ้าบนผิวสายอากาศโมโนโพลที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม 54
3.15	ตำแหน่งที่เซาะผิวทองแดงรูปสามเหลี่ยมด้านล่างของตัวแผ่พลังงาน 55
3.16	ผลของการจำลองการเซาะผิวตัวแผ่พลังงานโดยปรับมุม (Ang) 55
3.17	โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ป้อนโดยท่อนำคลื่นระนาบร่วม 57

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18 (ก) ตำแหน่งการตัดมุม (ข) สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อมีการตัดมุม	59
3.19 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ θ	60
3.20 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ c	60
3.21 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ w	61
3.22 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ l	62
3.23 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ g	62
4.1 สายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ป้อนโดยท่อนำคลื่นระนาบร่วมดันแบบ	64
4.2 การเชื่อมต่อสายอากาศดันแบบกับสายป้อนสัญญาณผ่านหัวเชื่อมต่อ	67
4.3 อุปกรณ์สำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศและลักษณะการเชื่อมต่อ	69
4.4 ผลการวัดและการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศดันแบบ	71
4.5 อุปกรณ์และการจัดวางสำหรับวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน	74
4.6 แบบรูปการแผ่พลังงานโพลาริซั่มร่วมสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ป้อนโดยท่อนำคลื่นระนาบร่วม เส้นทึบคือผลการจำลอง จุดคือผลการวัดทุก 10° (ก) ระนาบ xz ความถี่ 1.75 GHz (ข) ระนาบ xy ความถี่ 1.75 GHz (ค) ระนาบ xz ความถี่ 3.75 GHz (ง) ระนาบ xy ความถี่ 3.75 GHz (จ) ระนาบ xz ความถี่ 5.75 GHz (ฉ) ระนาบ xy ความถี่ 5.75 GHz	76
4.7 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับทดสอบวัดอัตราขยายสายอากาศ	78

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบการสื่อสารไร้สายหลายระบบ เช่น DCS (Digital Cellular System) มีช่วงความถี่ดำเนินการ 1.71 - 1.88 GHz, PSC (Personal Communications System) มีช่วงความถี่ดำเนินการ 1.85 - 1.99 GHz, UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) มีช่วงความถี่ดำเนินการ 1.92 - 2.17 GHz, WiMAX (Worldwide Interoperability For Microwave Access) มีช่วงความถี่ดำเนินการ 2.496 - 2.690 GHz และ WLAN (Wireless Local Area Network) มีช่วงความถี่ดำเนินการ 2 ช่วงคือ 2.400 - 2.483 GHz และ 5.15 - 5.85 GHz ระบบทั้งหมดที่ระบุไว้นั้น จะต้องมีสายอากาศ (Antenna) สำหรับการส่งและรับสัญญาณ ดังนั้นสายอากาศจำนวนมาก จึงได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับระบบที่กล่าวไว้ข้างต้น อย่างไรก็ตาม สามารถสังเกตได้ว่าแต่ละระบบมีความถี่ของการดำเนินการที่ใกล้เคียงกัน หากเรามีสายอากาศที่สามารถใช้งานได้ครอบคลุมทุกช่วงความถี่ของระบบนี้ก็เป็นที่น่าสนใจ ดังนั้นการรวมกันของแถบความถี่ที่ใช้งานคือระหว่าง 1.71 - 5.85 GHz เมื่อสายอากาศที่ทำงานครอบคลุมมากกว่าหนึ่งระบบเรียกว่าสายอากาศบรอดแบนด์ (Broadband Antenna) ในขณะที่สายอากาศที่สามารถใช้งานได้ครอบคลุมเพียง 2 ย่านความถี่ด้วยกันเรียกว่าสายอากาศสองแถบความถี่ (Dual-Band Antenna) หรือครอบคลุม 3 ย่านความถี่ เรียกว่า สายอากาศสามแถบความถี่ (Tri-Band Antenna)

สายอากาศบรอดแบนด์คือสายอากาศแบบแถบความถี่กว้าง (Wideband Antenna) ได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยจำนวนมาก ยกตัวอย่าง เช่น Wideband Planar Plate Monopole Antenna (Hassani & Mazinani, 2010, pp. 23-512) ที่มีการแผ่ออกมารอบทิศทาง ให้แถบความถี่หรือแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ที่กว้างมากแต่มีการบิดเบี้ยวที่ความถี่สูง เช่นเดียวกับในสายอากาศแบบสองทิศทาง (เทพ เกื้อทวีกุล, 2558, น. 1366-1374) (Bi-Directional) ไม่แตกต่างกัน แม้ว่ามันจะมีแบนด์วิดท์กว้าง แต่มีการบิดเบี้ยวที่ความถี่สูง การออกแบบสายอากาศรูปแบบต่าง ๆ ได้รับการนำเสนอในวรรณกรรม เช่น Micro-Strip Line, Coplanar Waveguide Printed Monopole Antenna

(Valderas & Melendez, 2008) And Printed Dipole Antennas (Chen & Tsai, 2011, pp. 4826-4830) ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าสายอากาศแบบโมโนโพลนั้นมีความสามารถทำงานได้หลายแบนด์ การออกแบบสายอากาศดังกล่าวได้รับการเสนอต่อเนื่อง ดังจะได้ยกตัวอย่างงานวิจัยที่มีมาก่อนดังนี้

บทความ ได้นำเสนอสายอากาศช่องสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมโดยปรับแต่งสตัป (Stub) (ประกาศิต ต้นตอกลงการ และ จิระศักดิ์ ช่วงชัย, 2551, น.11-16) เพื่อให้ได้แบนด์วิดธ์ 60% โดยปรับสองพารามิเตอร์ คือ ความกว้างของสตริปป้อนสายอากาศ (s) และความกว้างร่องท่อนำคลื่นระนาบร่วม (w) การจับคู่อิมพีแดนซ์ที่ดีทำได้โดยการปรับแต่งระยะห่างระหว่างส่วนหัวของสายอากาศและระนาบกราวด์ นอกจากนี้ ด้วยการผสมผสานการใช้ความยาวของการปรับแต่งที่มีความยาวประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวสล็อตและการปรับแต่งความกว้าง อยู่ในช่วงประมาณ 0.59 ถึง 0.9 เท่าของความยาวสล็อตทำให้มีการใช้แบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์มากกว่า 50% นอกจากนี้ เมื่อเลือกความกว้างของสตัป การปรับให้อยู่ที่ประมาณ 0.81 เท่าของความยาวสล็อตจะได้แบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมถึงประมาณ 60%

บทความ ได้นำเสนอการศึกษาโครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลแบบแผ่นระนาบความถี่กว้าง(Chen, Qing, Wu, See, & Cai, 2006, pp. 63-73) ในแบบต่าง ๆ โดยสายอากาศสามารถครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 2 -18 GHz ที่มีคุณสมบัติการแผ่รังสีที่ดี เตรียมการพัฒนาที่สำคัญของรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานของระนาบสายอากาศโมโนโพลเพลทที่เกี่ยวกับแบนด์วิดท์ความต้านทานการกระจายกระแส และรูปแบบการแผ่รังสี ในบทความนี้มีการศึกษาสายอากาศโมโนโพลทั้งหมด 6 แบบดังนี้ (1) Planar Circular Monopole Antenna ผู้วิจัยได้นำสายอากาศโมโนโพลรูปทรงกลมและรูปไข่ วางอยู่เหนือระนาบกราวด์และป้อนโดยโคแอกเชียล (Coaxial) ผ่านช่องแคบของระนาบกราวด์ การทดลองผู้วิจัยได้กำหนดขนาดให้สายอากาศทรงกลม (CDM) และสายอากาศรูปไข่หนึ่ง (EDM1) และสายอากาศรูปไข่สอง (EDM2) โดยปรับพารามิเตอร์บางตัวให้มีความกว้างขึ้นและสูงขึ้นเพื่อผลลัพธ์ จะเห็นได้ว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจาก 2.5 เป็น 9.0 GHz ทิศทางของลำคลื่นสูงสุดของแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบ E จะแตกต่างกันไปตั้งแต่ 30° ถึง 60° จากระดับความสูงในขณะที่แบบรูปการแผ่พลังงานระนาบ H ยังคงอยู่เกือบรอบทิศทางด้วย แบบรูปสูงสุดในแนวราบเพิ่มขึ้นจาก 4 เป็น 7 dB มีความผิดเพี้ยนเล็กน้อยอาจเป็นผลมาจากรูปร่างของแผ่นดิสก์โมโนโพลการสะท้อนจากพื้นผิวโลหะ (2) Square Planar Monopole Antenna ผู้วิจัยได้นำสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบเดียวรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส มาทำการเพิ่มประสิทธิภาพ เนื่องจากได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเพราะองค์ประกอบสี่เหลี่ยมจะจัดการได้ง่ายกว่าในระหว่างกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพ

โดยมีระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตั้งอยู่เหนือระนาบกราวด์ มีการกำหนดระยะห่าง ส่วนใหญ่สายอากาศโมโนโพลแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส แบนด์วิดท์ของสายอากาศจะถูกกำหนดด้วยขนาดของสี่เหลี่ยมจัตุรัส ผู้วิจัยได้ทดลองปรับขนาดของสี่เหลี่ยมจัตุรัสและช่องว่างระหว่างสายอากาศและระนาบกราวด์ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ขึ้นอยู่กับช่องว่างของการป้อนและช่องว่างนี้จะต้องปรับให้เหมาะกับแบนด์วิดท์สูงสุด บางงานวิจัยได้ใช้เทคนิคการตัดขอบล่างด้านเดียวหรือทั้งสองด้านของแผ่น โมโนโพล (4) Rectangular Planar Monopole Antenna With Bevel ผู้วิจัยได้นำสายอากาศโมโนโพลระนาบสี่เหลี่ยมพร้อมมุมเอียง มาทำการทดสอบการปรับองศาของมุมเอียง โดยกำหนดขนาดเป็น 25 mm หน้า 0.2 mm วางเหนือกราวด์ ขนาด 150 mm และป้อนด้วยหัวเชื่อมต่อ SMA ความถี่ต่ำสุดและสูงสุดคือ 2.35 และ 4.95 GHz ของรูปแบบนี้คือแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ที่ 2.1: 1 ผู้วิจัยได้ทำการตัดขอบเอียงทั้งแบบ สมมาตร และ ไม่สมมาตร จากการทดลองการตัดขอบเอียงแบบสมมาตรให้แบนด์วิดท์ที่มากกว่าแบบไม่สมมาตรและการปรับองศาเอียงเพิ่มมากขึ้นทำให้ความถี่ขอบล่างลดลงและความถี่ขอบบนเพิ่มขึ้น การปรับองศาเอียงมีผลน้อยมากต่อแบบรูปการแผ่พลังงาน (5) Shorted Planar Monopole Antenna สายอากาศโมโนโพลแบบชอร์ตกราวด์ (Short Ground) ผู้วิจัยได้ยกตัวอย่างสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสตั้งเหนือกราวด์เพลน โดยมีขนาด 25 x 25 mm² มีเสาชื่อททรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 mm หรือ แบบ สตริป กว้าง 2 mm จากการทดลองผู้วิจัยพบว่าการชอร์ตกับกราวด์เพลนทำให้แบนด์วิดท์เพิ่มขึ้นและด้วยความไม่สมมาตรของสายอากาศทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานผิดเพี้ยนไปจากเดิม (6) Shorted Planar Monopole Antenna With Bevel ผู้วิจัยได้นำสายอากาศโมโนโพลแบบตัดขอบระนาบเอียงพร้อมชอร์ตกราวด์ ผู้วิจัยกล่าวว่า การรวมกันของทั้ง แบบระนาบมุมเอียง และแบบชอร์ตกราวด์ ให้แบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ 800 MHz ถึง 11 GHz เหมาะสำหรับการรวมกันของระบบเซลลูลาร์และ UWB โครงสร้างคร่าวๆ ทองแดงหนา 0.2 mm บนระนาบกราวด์ขนาด 200 mm ขนาดของระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส คือ 60 mm แถบป้อน กว้าง 2 mm สูง 1.2 mm แผ่นโมโนโพลตัดเอียงด้านตรงข้ามกับแถบที่ชอร์ต ผู้วิจัยทำการปรับขนาดองศาเอียงของสายอากาศแบบไม่ชอร์ตกราวด์ ผลคือแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้น ส่วนแบบชอร์ตกราวด์ลดลงอย่างมากในย่านความถี่สูง เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในย่านความถี่ต่ำ ตามการเพิ่มองศาการตัดเอียง

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้กล่าวถึงสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม ที่สามารถใช้งานได้กับหลายระบบ ได้มีการพัฒนาด้านแบบ ที่ทำงานในช่วงความถี่ 1.71 GHz ถึง 5.85 GHz โดยการกักรูปแบบของเสานำคลื่นโมโนโพล กราวด์ และ ท่อนำคลื่นระนาบร่วม ที่พิมพ์บนด้านเดียวกันของ FR4 สายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ความถี่กว้างที่ป้อนสัญญาณโดยท่อนำคลื่นระนาบคู่ สามารถทำงานได้ดีในย่านความถี่กว้างตั้งแต่

1.71 - 5.85 GHz สายอากาศโมโนโพลสามารถสร้างคลื่นความถี่ที่ใช้งานได้เพียงพอนอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน รูปแบบการแผ่รังสีและอัตราขยายสายอากาศ (Antenna Gain) ที่นำเสนอ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ โดยให้สามารถรองรับการใช้งานตลอดช่วงความถี่ที่กว้างระหว่าง 1.71 GHz ถึง 5.85 GHz ได้

1.2.2 เพื่อศึกษาและสร้างสายอากาศโมโนโพลที่ใช้งานได้ตลอดช่วงความถี่ที่ต้องการ

1.2.3 เพื่อศึกษาค้นหาสายอากาศโมโนโพลโครงสร้างใหม่ที่รองรับความถี่ช่วงกว้าง ที่น้ำหนักเบา โครงสร้างไม่ซับซ้อนและราคาถูก

1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1 การออกแบบโครงสร้างสายอากาศโดยใช้ซอฟต์แวร์จำลอง จะเป็นแนวทางในการใช้สร้างสายอากาศโมโนโพลบนแผ่น FR4 ได้จริง

1.3.2 สร้างสายอากาศแบบความถี่กว้างสำหรับใช้งานกับเครือข่ายไร้สายและรองรับการใช้งานตลอดทั้งย่าน ช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.71 GHz ถึง 5.85 GHz เพื่อเป็นฐานนำความรู้ไปสร้างสายอากาศโมโนโพลที่มีโครงสร้างใหม่แบบอื่น ๆ บนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้งานในความถี่อื่น

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1.4.1 ออกแบบสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม (Coplanar Waveguide) ด้วยวัสดุฐานรอง FR4 ให้มีแถบความถี่ดำเนินการกว้างระหว่าง 1.71 – 5.85 GHz แผ่คลื่นแบบโคจรอบ (Omni Directional) เพื่อประยุกต์ใช้กับระบบการสื่อสารไร้สายต่าง ๆ

1.4.2 กำหนดพารามิเตอร์และกำหนดค่าจริงให้กับสายอากาศให้สามารถครอบคลุมความถี่ดำเนินการตลอดช่วงความถี่ 1.71 – 5.85 GHz ดังกล่าว โดยให้สามารถมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection Coefficient) น้อยกว่า – 10 dB ตลอดช่วงความถี่ดำเนินการ

1.4.3 สร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศ ประกอบด้วย สัมประสิทธิ์การสะท้อน ช่วงความถี่ดำเนินการ แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) ทั้งระนาบสนามไฟฟ้า (E plane) และแม่เหล็ก (H plane) ความกว้างลำครึ่งกำลัง (Half Power Beam Width) และอัตราขยายสายอากาศ (Antenna Gain)

1.5 แนวทางการดำเนินงาน

1.5.1 ศึกษาการใช้งานโปรแกรมจำลองสายอากาศ วิธีการสร้าง กำหนดขนาดของพารามิเตอร์ และการกำหนดรูปแบบการทดสอบ ให้สายอากาศ

1.5.2 ศึกษาทฤษฎีของสายอากาศเบื้องต้น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน แบบรูปการแผ่พลังงาน อัตราขยายสายอากาศ ช่วงความถี่

1.5.3 ศึกษาทฤษฎีการออกแบบสายอากาศโมโนโพล โดยเฉพาะโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ โดยใช้ท่อนำคลื่นระนาบร่วม

1.5.4 ออกแบบสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมด้วยโปรแกรมจำลองสายอากาศ กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้ และปรับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ เพื่อให้ได้สายอากาศที่ความถี่กว้างสามารถทำงานได้ตลอดช่วงความถี่ที่ต้องการ

1.5.5 สร้างสายอากาศจริงตามที่ได้ออกแบบในโปรแกรมจำลอง ทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศจริงที่สร้าง เปรียบเทียบกับสายอากาศที่ถูกจำลองด้วยโปรแกรม สรุปผลที่ได้จากการทดสอบและออกแบบ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศรูปแบบการแพร่กระจายของคลื่น โดยที่สายอากาศเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้สำหรับแผ่สัญญาณคลื่นความถี่ออกไปจากระบบการส่งสัญญาณและใช้ดักจับเอาสัญญาณเข้าสู่ระบบเครื่องรับ การสื่อสารไร้สายในแต่ละวันจะต้องเกี่ยวข้องกับสายอากาศทั้งหมด โดยรูปร่างสายอากาศจะขึ้นอยู่กับการทำงานแบบตามวัตถุประสงค์การนำไปใช้งานของระบบหรือการสื่อสารนั้นๆ ส่วนความถี่ดำเนินการของสายอากาศนั้น จะถูกกำหนดตามความต้องการของระบบไว้ก่อนแล้ว และโดยทั่วไปสายอากาศจะถูกออกแบบมาเฉพาะกับการใช้งานระบบใดระบบหนึ่ง จึงไม่สามารถใช้งานได้กับหลายระบบอย่างใดก็ตาม ปัจจุบันสายอากาศได้ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในสายอากาศอันเดียวสามารถใช้งานได้หลายความถี่ ซึ่งในบทนี้จะเป็นการศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศ ซึ่งประกอบด้วย ทฤษฎีสายอากาศ ทฤษฎีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และ ทฤษฎีของคลื่นตามที่จะได้กล่าวต่อไป

2.1 ทฤษฎีสายอากาศ

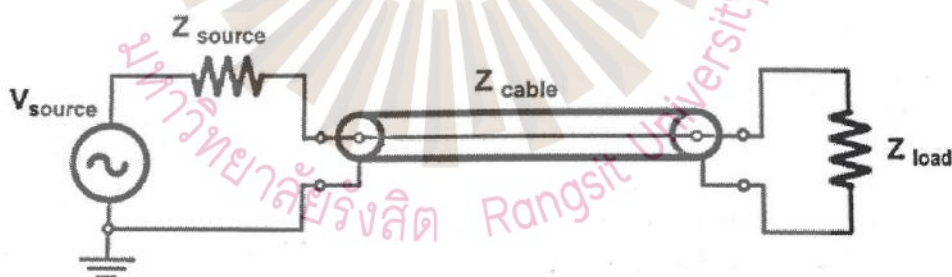
2.1.1 สัมประสิทธิ์การสะท้อน

เมื่อสายอากาศเป็นปลายทางของการส่งสัญญาณคลื่นความถี่จากเครื่องส่ง ในการส่งสัญญาณนั้น ระหว่างเส้นทางถึงปลายทาง ก็จะต้องผ่านอุปกรณ์นำสัญญาณแบบต่างๆ ซึ่งแต่ละอุปกรณ์ก็จะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) หรือค่าความต้านทานภายในอุปกรณ์นั้น ๆ เช่น สายนำสัญญาณ (Transmission Line) สายส่งแกนร่วม (Coaxial Line) หรืออาจจะเป็นท่อนำคลื่นระนาบร่วม (Co-Planar Waveguide) หัวที่ใช้ในการเชื่อมต่อ (Connector) กล่าวคือ ในการส่งคลื่นสัญญาณความถี่ออกไปยังปลายทางให้ได้กำลังส่งดีที่สุดมีค่าสูงสุด ควรจะต้องมีค่าความต้านทานหรืออิมพีแดนซ์ที่เท่ากันทุกส่วน เพราะเมื่อป้อนสัญญาณเข้าไป โดยที่โหลดมีค่าอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากับค่า

อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) ของท่อนำคลื่น โหลดจะไม่สามารถดูดกลืนพลังงานของสัญญาณได้ทั้งหมด ผลคือ พลังงานบางส่วนจะสะท้อนกลับไปยังแหล่งจ่าย และนั่นจะมีสองคลื่นที่อยู่ภายในท่อนำคลื่น ขนาดของคลื่นที่สะท้อนกลับขึ้นกับอิมพีแดนซ์ของโหลดและอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของท่อนำคลื่น เฟสของคลื่นที่สะท้อนขึ้นกับระยะทางจากโหลดถึงจุดวัด และอิมพีแดนซ์ของโหลด อัตราส่วนของแรงดันของคลื่น V^- ต่อแรงดันของคลื่นส่ง V^+ นี้เราเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection Coefficient) เขียนแสดงด้วย

$$\Gamma = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2-1)$$

การเลือกอุปกรณ์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่างกันนั้น จะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังใน สายส่ง กล่าวคือ ในระบบจะมีตัวกำเนิดสัญญาณ (Source) สำหรับกำเนิดสัญญาณความถี่สูง ซึ่งตัวกำเนิดนี้มักจะหมายถึงเครื่องส่งวิทยุ ในเครื่องส่งจะมีค่าอิมพีแดนซ์ (Z_{source}) เมื่อต่อสายสัญญาณ ต้องเลือกสายที่มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50Ω และสายอากาศก็ต้องมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50Ω หากอิมพีแดนซ์ไม่สอดคล้องกัน จะทำให้เกิดสัญญาณสะท้อนในสายนำสัญญาณ พลังงานของคลื่นวิทยุ จึงไม่สามารถส่งออกอากาศไปได้ทั้งหมด



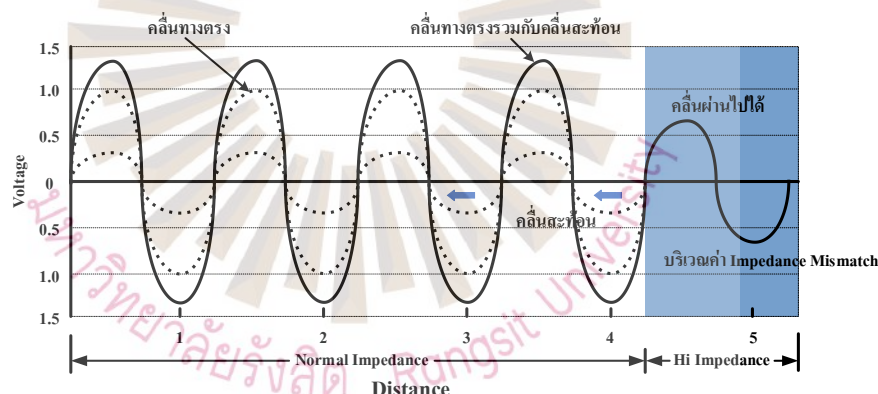
รูปที่ 2.1 วงจรไฟฟ้าที่แทนค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ในระบบสายส่ง ตั้งแต่เครื่องส่งวิทยุสายนำสัญญาณไปจนถึงสายอากาศ
ที่มา: อำนาจ มิมงคล และ อรรถพร ชันธิกุล, 2553

2.1.2 สัญญาณสะท้อนในระบบส่งสัญญาณ

ค่า VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) เป็นค่าอัตราส่วนระหว่าง V_{max} และ V_{min} ในระบบสายส่ง บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังไปยังสายอากาศ ยิ่งมีค่าน้อย

ใกล้เคียงกับ นั้นยิ่งดี แต่ถ้าค่ามากจะหมายถึงมีอัตราการสูญเสียที่สูง สำหรับในระบบการสื่อสาร จะมีการส่งสัญญาณผ่านไปในสายนำสัญญาณไปสู่สายอากาศ เปรียบได้กับเชือกที่ถูกไว้กับเสา โดยเสานั้นเปรียบเสมือนความต้านทานที่สูงมาก เมื่อสับัดเชือก คลื่นจะเดินทางจากต้นทางไปยังเสา แล้วเกิดคลื่นสะท้อนกลับมายังต้นทาง นั่นคือเกิดคลื่นสะท้อนขึ้นนั่นเอง ซึ่งจะหมายถึง กำลังที่สะท้อนกลับมายังเครื่องส่ง โดยในระบบการสื่อสารไม่ต้องการคลื่นประเภทนี้ แต่ต้องการให้คลื่นที่ ส่งจากต้นทางผ่านสายอากาศออกไปสู่อากาศโดยไม่เกิดคลื่นสะท้อนกลับมา

ค่า VSWR จะสูงขึ้นเมื่ออิมพีแดนซ์แต่ละช่วงนั้นไม่เท่ากัน หากสายอากาศมี อิมพีแดนซ์ต่ำกว่าจะทำให้เกิดคลื่นสะท้อน ดังรูปที่ 2.7 เมื่อคลื่นขนาด 1.0 โวลต์ เดินทางมาถึงยัง ระยะ 4.2 เมตร คลื่นจะสะท้อนกลับ 0.3 โวลต์ ทำให้คลื่นที่วิ่งอยู่ในสายนำสัญญาณกลายเป็นคลื่น นิ่ง (Standing Wave) มีความแรงเท่ากับ 1.3 โวลต์ ด้วยระดับความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้นนี้ ทำให้ภาคส่ง เกิดความร้อนขึ้น และยังส่งผลให้กำลังที่สามารถส่งออกอากาศไปได้ มีค่าเพียง 0.7 โวลต์เท่านั้น นี้ คือตัวอย่างของ $VSWR = 1.3$ หรือ $1.3:1$ (อ่านว่า 1.3 ต่อ 1)



รูปที่ 2.2 ค่า VSWR หาได้จากระดับความแรงของคลื่นที่ส่งออกไป
และคลื่นนิ่งที่เกิดจากคลื่นที่ส่งออกไปรวมกับคลื่นสะท้อน
ที่มา : อำนาจ มิมงคล และ อรรถพ ขันธิกุล, 2553

ในการวัดค่า VSWR นั้นจะอาศัยการวัดค่าจาก V_{Max} เทียบกับ V_{in} โดยค่าทั้งสองจะถูกแทนลงสมการ

$$VSWR = \frac{V_{Max}}{V_{in}} \quad (2-2)$$

แต่ในทางปฏิบัติแล้วเป็นไปได้ก่อนข้างยากที่จะเข้าไปวัดแบบตรง ๆ ในสายส่งสัญญาณ เพราะตัว เครื่องวัดก็มีค่าอิมพีแดนซ์ที่จะทำให้การวัดผิดเพี้ยนไปได้ จึงต้องวัดโดยอาศัยการ เหนี่ยวนำ คลื่นวิทยุจากสายนำสัญญาณออกมา โดยจะวัดค่าทางด้านไป (Forward) และทางด้าน กลับ (Reverse) มาเทียบกัน โดยก่อนอื่นจะต้องหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient, Γ) เสียก่อน หลังจากนั้นจึงจะคำนวณหาค่า VSWR ได้

$$\Gamma = \frac{V_{reverse}}{V_{forward}} = \sqrt{\frac{P_{reverse}}{P_{forward}}} \quad (2-3)$$

เมื่อ $P_{forward}$ คือ กำลังงานที่ส่งออกไป ขณะที่ เมื่อ $P_{reverse}$ คือ กำลังงานที่สะท้อนกลับมา สามารถ หา VSWR ได้เป็น

$$VSWR = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \quad (2-4)$$

ค่า VSWR ของสายอากาศโดยทั่วไปจะถูกเฉลย เนื่องจากอุปกรณ์ทุกอย่างที่ วางขายจะมีมาตรฐาน รับประกันว่ามีค่า VSWR ตามที่ได้ระบุไว้ แต่ยังมีอุปกรณ์ส่วนหนึ่งที่ไม่ได้ มาตรฐาน ทำให้ค่าที่ อ้างมาเป็นเพียงตัวเลขเท่านั้นไม่ใช่ค่าจริง การเลือกใช้อุปกรณ์จึงควรดูที่ คุณภาพ และต้องมีการวัด ค่า VSWR จริง อย่างไรก็ตาม เครื่องมือสำหรับวัดเช่น เครื่องวิเคราะห์ โครงข่ายมีราคาค่อนข้างสูง ทำให้ไม่สามารถวัดได้โดยทั่วไป หากเป็นสินค้าเกรด A จะต้องมีการ VSWR ไม่เกิน 1.1:1 สินค้า ต้องไม่มีตำหนิโดยเฉพาะผิวโลหะจะต้องเรียบ รอยบัดกรีต้องไม่มีรอย ตะปุ่มตะป่ำ เพราะความถี่ สูงระดับ GHz จะมี Skin Effect เนื่องจากคลื่นจะเดินทางที่ผิวของสายนำ สัญญาณ ดังนั้นผิวที่ไม่ เรียบจึงอาจเกิดปัญหาขึ้นได้

ค่า VSWR ที่ดีที่สุดควรมีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า ไม่มีคลื่นสะท้อนออกมา สามารถ ส่งออกอากาศได้ 100% เมื่อค่า VSWR เท่ากับ 2 จะเริ่มเป็นอันตรายต่อเครื่องส่ง เพราะจะทำให้ร้อน ง่าย แต่ถ้าสูงกว่านั้นอาจทำให้เครื่องส่งเสียหายได้ ตารางที่ 2.1 แสดงค่า VSWR ต่าง ๆ ว่ามีผล ต่อ กำลังของคลื่นวิทยุที่ส่งออกไป (Power Transmitted) และกำลังของคลื่นสะท้อนกลับมา (Power Reflected) อย่างไร

เมื่อค่า VSWR สูงขึ้นนั้นหมายถึง มีคลื่นสะท้อนจากปลายทางมายังเครื่องส่ง สูงขึ้น และเมื่อค่านี้สูงขึ้นก็จะทำให้ภาคขยายกำลังส่งสัญญาณวิทยุร้อนขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากมีความร้อนที่เกิดจากการทำงานปกติรวมกับพลังงานของคลื่นสะท้อนที่วิ่งเข้ามา หากไม่มีการระบายความร้อนที่ดีพอก็จะทำให้ภาคขยายกำลังส่งเสียหายได้ กรณีที่เกิดปัญหานี้ ได้แก่

ตารางที่ 2.1 ค่า VSWR ต่าง ๆ ที่มีผลต่อกำลังของคลื่นวิทยุที่ส่งออกไป (Transmitted Power) และ กำลังของคลื่นสะท้อน (Reflected Power)

ค่า VSWR	กำลังของคลื่นสะท้อน (power reflected)	กำลังของคลื่นส่ง (power transmitted)	สัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflection coefficient)
1.0	0%	100%	0.00
1.1	0.2%	99.8%	0.05
1.25	1.2%	98.8%	0.11
1.5	4.0%	96.0%	0.20
1.75	7.4%	92.6%	0.27
2.0	11.1%	88.9%	0.33
3.0	25.0%	75.0%	0.50
6.0	51.0%	49.0%	0.71
ค่าอนันต์ จาก Short/Open Circuit	100%	0%	1.0

ที่มา : อำนาจ มิมงคล และ อรรถพร ชันธิกุล, 2553

1) การถอดสายอากาศออกโดยไม่มีโหลดต่อไว้ เมื่อปลายวงจรเปิดออกก็จะมี ความต้านทานเท่ากับอนันต์ คลื่นก็จะสะท้อนกลับมายังภาคส่งทั้งหมด เป็นกรณีที่ทำให้ภาคส่ง เสียหายง่ายมากที่สุด ปัญหานี้จะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงเมื่อเครื่องส่งมีกำลังส่งสูง ๆ

2) การต่อสายอากาศหรือสายนำสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ผิดพลาด เช่น ในระบบ เครือข่าย ท้องถิ่นไร้สายจะมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 Ω แต่ถ้าเลือกสายนำสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ เท่ากับ 75 Ω ที่ใช้ในกล่องวงจรปิดมาใช้ จะทำให้เกิดปัญหาความไม่เข้ากันของอิมพีแดนซ์ (Impedance Mismatch) หรือการเลือกอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ไม่ถูกต้องทำให้เกิดปัญหาส่งไม่ออก และเครื่องส่งร้อนง่าย

3) การใช้สายอากาศที่สร้างขึ้นเองหรือสายอากาศที่ไม่ได้ปรับจูน สายอากาศ ทุกต้นจะต้องปรับแต่งค่า VSWR ไม่ให้เกิน 1.5:1 เพื่อให้กำลังที่ส่งไปนั้นออกอากาศไปทั้งหมดได้ แต่ถ้าประดิษฐ์สายอากาศเอง จะไม่มีเครื่องที่วัดค่า VSWR อาศัยการปรับแต่งเล็ก ๆ น้อย ๆ ซึ่งมีแต่ผู้ชำนาญเท่านั้นที่ทำได้การใช้สายอากาศประเภทนี้จะทำให้เครื่องส่งเสียบางมาก เพียง 1-2 ปี ภาคส่งก็จะเสียหายอย่างถาวร

นอกจากค่า VSWR แล้ว ยังมีอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่นิยม คือ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) โดยสามารถหาได้จาก อัตราส่วนระหว่างกำลังงานที่ส่งออกไป $P_{forward}$ และกำลังงานที่สะท้อนกลับมา P_{reward} ในหน่วยของเดซิเบล ดังนี้

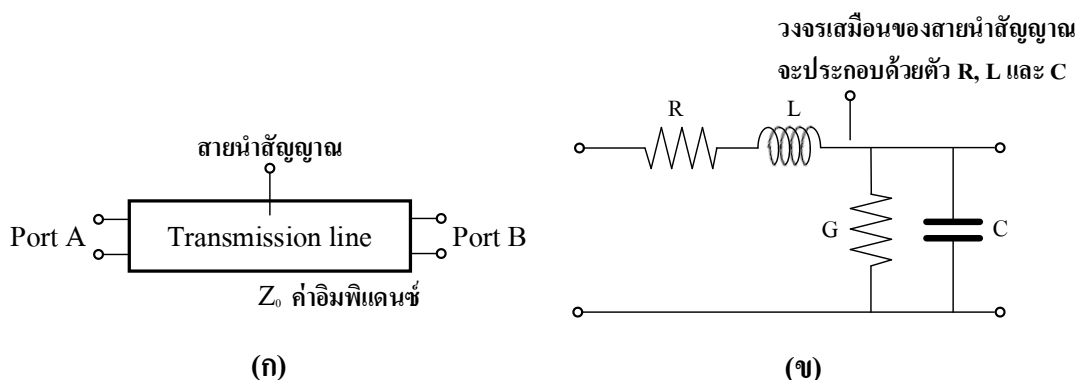
$$RL = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{reward}}{P_{forward}} \right) \quad (2-5)$$

2.1.3 อิมพีแดนซ์

เมื่อความถี่สูงขึ้น อุปกรณ์ที่อยู่ในวงจรไฟฟ้าจะมีการตอบสนองไม่เหมือนกับ การตอบสนองกับไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เนื่องจากภายในอุปกรณ์ดังกล่าวจะมีตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) และตัวเก็บประจุ (Capacitor) ณ ความถี่ต่ำ ตัวเหนี่ยวนำจะทำหน้าที่เหมือนลวดเส้นหนึ่ง แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นจะมีหน้าที่คล้ายตัวต้านทางไฟฟ้า ยิ่งความถี่สูงขึ้นเท่าใดความต้านทานก็ยิ่งมากขึ้น และตัวเก็บประจุจะส่งผลตรงกันข้าม คือ ที่ความถี่ต่ำความต้านทานไฟฟ้าจะสูงสุด แต่เมื่อ ความถี่สูงจะเกิดการนำไฟฟ้าขึ้นมา นั่นทำให้ตัววงจรไฟฟ้า สายส่งต่าง ๆ รวมไปถึงสายอากาศนั้น จะมี ความต้านทานที่แปรผันไปตามความถี่ เรียกความต้านทานนี้ว่า อิมพีแดนซ์ (Impedance) โดยคำนวณได้จากสมการ

$$Z_i = \frac{E_i}{I_i} \quad (2-6)$$

เมื่อ Z_i คือ ค่าอิมพีแดนซ์มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ohm) เมื่อ E_i คือ ค่าความต้อศักย์มีหน่วยเป็นโวลต์ (Volt) และเมื่อ I_i คือ กระแสมีหน่วยเป็นแอมป์ (Amp)



รูปที่ 2.3 วงจรที่ใช้แทนค่าอิมพีแดนซ์ในสายนำสัญญาณ (Z_0) ประกอบด้วย ตัวต้านทาน (R) ขดลวดเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) (ก) บล็อกไดอะแกรม (ข) วงจรสมมูล
ที่มา : อำนาจ มีมงคล และ อรรณพ ขันธิกุล, 2553

โมเดลที่ใช้แทนค่าอิมพีแดนซ์นั้นแสดงดังรูปที่ 2.3 จะประกอบไปด้วย ตัวต้านทาน (Resistor) แทนด้วยตัวย่อ R, G ตัวนำ (Inductor) แทนด้วยตัวย่อ L และตัวเก็บประจุ (Capacitor) แทนด้วยตัวย่อ C จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นตัว L จะมีความต้านทานเพิ่มขึ้น และตัว C จะมีความต้านทานลดลง ส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อวงจรดังกล่าวถูกป้อน ด้วย กระแสตรงที่มีความถี่ของสัญญาณเป็น Hz วงจรนี้จะเหลือแต่ค่าตัว R กับ G เท่านั้น

ในการวิเคราะห์ทางสายอากาศจะเกี่ยวข้องกับอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance) ซึ่ง ถูกนิยามไว้ว่า เป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่ซึ่งเกิดขึ้นที่ขั้วขาเข้าของสายอากาศ หรือเป็นอัตราส่วนของ แรงดันกับกระแสที่ขั้ว หรือ อัตราส่วนขององค์ประกอบที่เหมาะสมของสนามไฟฟ้า และ สนามแม่เหล็กที่จุดหนึ่ง ๆ ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2-7)$$

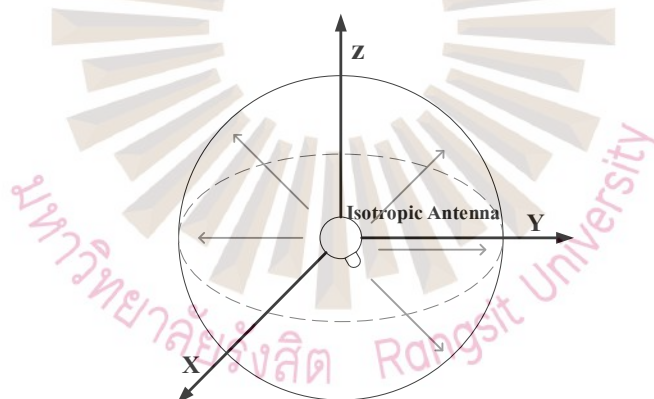
เมื่อ Z_A คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ขั้ว a- มีหน่วยเป็นโอห์ม R คือ ค่าความต้านทาน ของสายอากาศที่ขั้ว 2-6 มีหน่วยเป็นโอห์ม X_A คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศที่ขั้ว 2-6 มีหน่วย เป็นโอห์ม ส่วนที่เป็นค่าความต้านทาน R จะประกอบด้วยสององค์ประกอบ ได้แก่

$$R_A = R_r + R_L \quad (2-8)$$

R คือ ค่าความต้านทานของการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ R คือ ค่าความต้านทานที่เกิด จากการสูญเสียของสายอากาศ

2.1.4 อัตราขยายสายอากาศ

สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญตัวหนึ่งในระบบสื่อสารไร้สาย ทำหน้าที่แพร่กระจายและรับสัญญาณที่แผ่มาจากสายอากาศต้นอื่น ถ้าใช้สายอากาศที่มีประสิทธิภาพต่ำก็จะไม่สามารถรับสัญญาณหรือส่งสัญญาณวิทยุออกไปได้เลย เพื่อเป็นการวัดประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศจึงได้มีการกำหนดสายอากาศในทางทฤษฎีขึ้นมาเรียกว่า สายอากาศแบบไอโซโทรปิก (Isotropic Antenna) โดยสายอากาศแบบไอโซโทรปิกจะแผ่กระจายคลื่นเป็นรูปทรงกลมคล้ายลูกโป่ง หมายความว่า ไม่ว่าจะอยู่บริเวณใดของสายอากาศนี้ก็จะสามารถรับสัญญาณได้ดีซึ่งถือว่าเป็นสายอากาศในอุดมคติ เพราะเป็นสายอากาศที่ไม่มีจุดบอดสัญญาณเลย เช่นเดียวกับหลอดไฟที่เปล่งแสงออกมา ถึงอย่างไรก็ต้องมีขั้วไฟที่ถือเป็นจุดอับแสง ดัง รูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การแผ่คลื่นของสายอากาศแบบไอโซโทรปิกซึ่งเป็นสายอากาศในอุดมคติ

ที่มา : อำนาจ มีมงคล และ อรรถพร ชันธิกุล, 2553

ด้วยคุณสมบัติที่เป็นอุดมคตินี้ จึงถูกนำมาใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศ ประเภทอื่นๆ ที่มีใช้อยู่จริง จึงเป็นที่มาของหน่วย dBi ที่ใช้วัดอัตรากำลังขยายสายอากาศ (Antenna Gain) ซึ่งตัวอักษรที่ลงท้ายด้วยนั้น มาจากคำว่า Isotropic นั่นเอง

อัตราขยายสายอากาศนั้นวัดจากค่าพลังงานสูงสุดในทิศทางที่ต้องการ $P_{directional}$ เทียบกับพลังงานที่แผ่ออกจากสายอากาศในทางทฤษฎีแบบไอโซโทรปิก $P_{isotropic}$ ดังนั้น การเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ จึงคล้ายกับการบีบดูทรวงกลมเป็นรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งด้าน หนึ่งจะลดลงอีกด้านหนึ่งจะเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น สายอากาศแบบไดโพล (Dipole Antenna) จะมี รูปร่างการกระจายคลื่นคล้ายรูปโดนัทที่มีรูโหว่ตรงกลาง ซึ่งเปรียบเสมือนการใช้มือบีบดูโป่งตรง กลางสองข้างทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งก็ทำให้การแผ่คลื่น ณ ตำแหน่งที่บีบลดลง แต่จะไปเพิ่มการ แผ่คลื่นด้านแนวนอนทั้งสองข้าง สมการที่ใช้คำนวณอัตราขยายสายอากาศเมื่อเทียบกับสายอากาศ แบบไอโซโทรปิก ดังนี้

$$Gain = \frac{P_{directional}}{P_{isotropic}} \quad (2-9)$$

ดังนั้น อัตราขยายสายอากาศจึงเป็นสิ่งที่บอกให้ทราบว่าสายอากาศนั้นแผ่คลื่น หรือรับคลื่นได้ดีกว่าหรือด้อยกว่าสายอากาศมาตรฐานที่ใช้เปรียบเทียบอย่างไร ซึ่งสายอากาศ มาตรฐานที่ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ คือสายอากาศไอโซโทรปิก ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีคุณสมบัติการ แผ่คลื่นได้เท่า ๆ ทุกทิศทางนั่นเอง อัตราขยายสายอากาศมี 2 ลักษณะ คือ

1) อัตราขยายกำลัง (Power Gain) เป็นการเปรียบเทียบอัตราขยายกำลังของ สายอากาศ 2 ชุด คำนวณในหน่วย dB

$$Power\ gain(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} \quad (2-10)$$

เมื่อ R คือกำลังของสายอากาศที่ต้องการวัด หน่วยเป็นวัตต์ และ P คือกำลังงานของสายอากาศมาตรฐานหน่วยเป็นวัตต์

2) อัตราขยายสนาม (Field Gain) คือการวัดความเข้มของคลื่นวิทยุที่รับได้จาก สายอากาศสองชุด โดยอาศัยเครื่องมือวัดที่เรียกว่า มาตรฐานวัดความเข้มสนาม (Field Strength Meter) ซึ่งค่าที่วัดได้ออกมาจะอยู่ในหน่วยของโวลต์ต่อเมตร (v/m) และใช้สูตรคำนวณหาอัตราขยายโดย การเปรียบเทียบแรงดันจาก

$$\text{Field gain (dB)} = 10 \log_{10} \frac{V_1}{V_2} \quad (2-11)$$

เมื่อ r คือความแรงของคลื่นวิทยุที่รับได้จากสายอากาศที่ต้องการวัด มีหน่วยเป็นโวลต์, คือความแรงของคลื่นวิทยุที่ได้รับจากสายอากาศมาตรฐาน มีหน่วยเป็นโวลต์

2.1.5 แบบรูปการแผ่พลังงาน

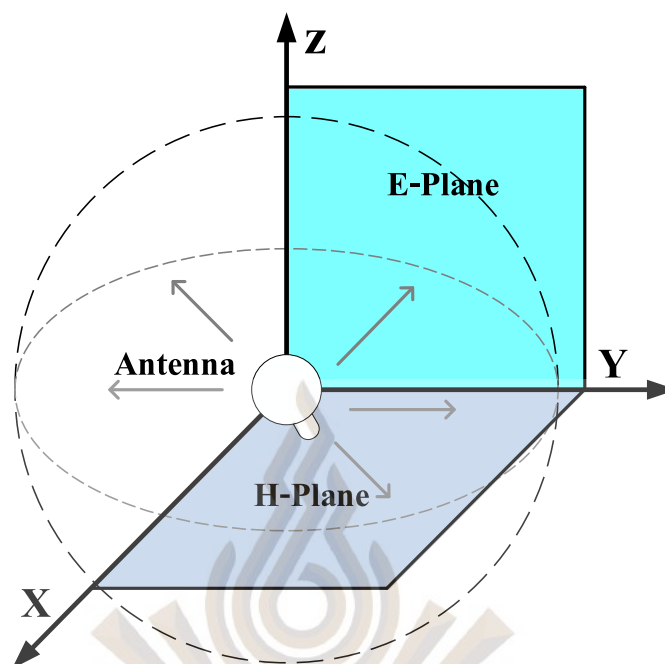
แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) คือ ลักษณะการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปในอากาศ โดยการแผ่คลื่นจะมีกำลังแรงในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่น ๆ การแผ่คลื่นจะมีกำลังแรงที่สุดตามแนวเส้นตรงที่ตั้งฉากกับจุดที่มีกระแสสูงสุดบนสายอากาศ คุณสมบัติของสายอากาศในทางทฤษฎีจะมีรูปลักษณะการกระจายคลื่นสองแบบคือ

- 1) แนวตั้ง (Vertical) จะมองการแผ่กระจายคลื่นจากมุมมองด้านข้างของสายอากาศ
- 2) แนวนอน (Horizontal) จะมองการแผ่กระจายคลื่นจากมุมมองด้านบนของสายอากาศ

แต่ในความเป็นจริงการกระจายคลื่นมีหลายรูปแบบทั้งแบบแนวสายตา สะท้อน วัตถุ สะท้อนผิวโลกหรือชั้นเมฆ ขึ้นอยู่กับระยะทาง สิ่งกีดขวาง และอีกหลายองค์ประกอบ

การวัดอัตราขยายสายอากาศที่ดีจะทำในระบบ 3 มิติ ที่มีแกน X, Y, Z ซึ่งจะเห็น กำลังงานที่แผ่ออกมาเป็นรูปร่างต่าง ๆ เช่น ทรงกลม ทรงโดนัทรูปทรงคล้ายลูกโป่งหลาย ๆ ลูกมา มัดติดกัน เป็นต้น ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ การวัดจะยุ่งยากมากโดยต้องวัดผ่านระนาบ 3 มิติ รวมถึงการแสดงผลจะยุ่งยากด้วยเช่นกัน ซึ่งต้องดูผ่านคอมพิวเตอร์ถึงจะมองเห็นภาพ 3 มิตินั้น ทำให้ในทาง ปฏิบัติการวัดการแผ่กระจายคลื่น จึงเหลือเพียง 2 ระนาบ คือ

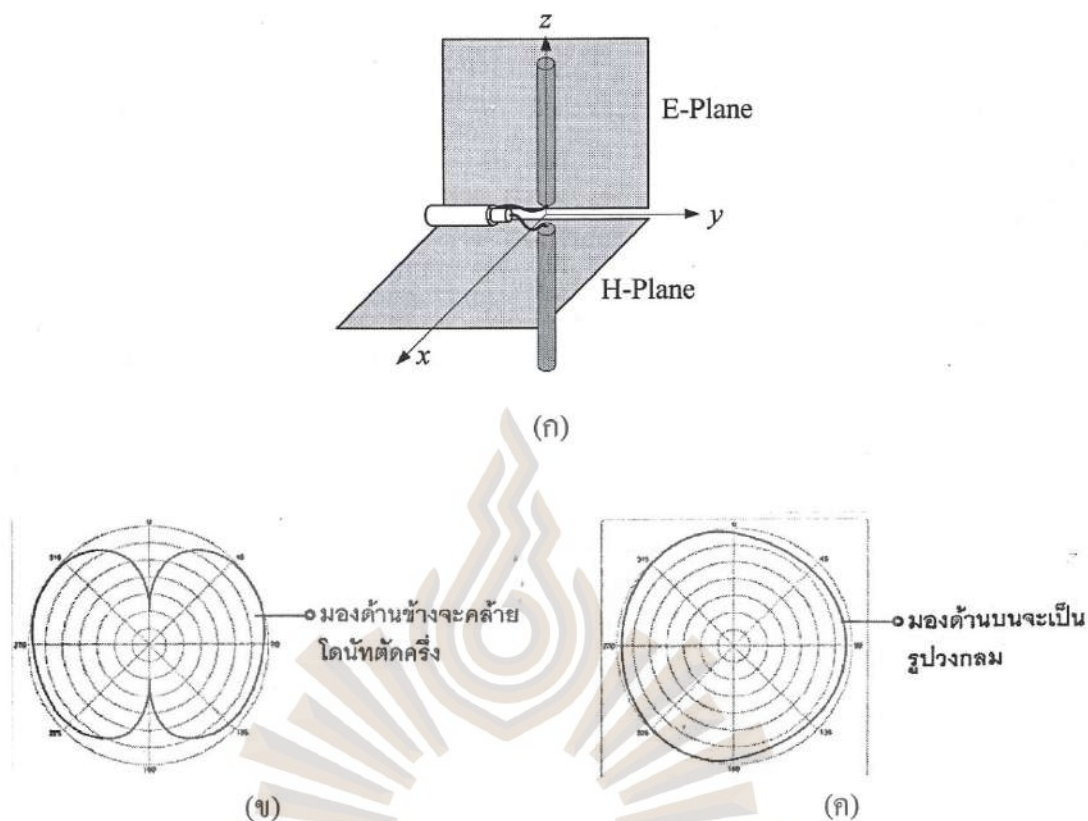
- 1) ระนาบ E (E-Plane) คือการวัดในแนวสนามไฟฟ้า ดังระนาบ yz ในรูปที่ 2.5
- 2) ระนาบ H (H-Plane) คือการวัดในแนวสนามแม่เหล็ก ดังระนาบ xy ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระนาบการแผ่กระจายคลื่น
ที่มา : อำนาจ มีมงคล และ อรรณพ ชันธิกุล, 2553

ในการแผ่พลังงานคลื่นวิทยุจากสายอากาศจะเป็นรูปแบบ 3 มิติ ดังนั้น จึงต้องมี การวัดการกระจายคลื่นจากทั้งระนาบ yz (E-Plane) และระนาบ xy (H-Plane) รูปที่ 2.6 แสดงการแผ่พลังงานคลื่นของสายอากาศรอบทิศทางแบบไดโพล ที่มีทิศทางการแผ่พลังงานคลื่นคล้ายรูป โคนัท หากมองจากด้านข้าง (E-Plane) ก็จะสังเกตเห็นคล้ายรูป โคนัทผ่าครึ่ง แต่ถ้ามองจากแนวนอน (H-Plane) จะเห็นว่าเป็นรูปทรงกลม

ประโยชน์จากแบบรูปการแผ่พลังงานนี้ เช่น สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้กับอาคารสูง ๆ ที่มีเครื่องส่งและสายอากาศเป็นจำนวนมาก หากใช้สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานเช่นนี้ คลื่นก็จะแพร่กระจายไปในแนวนอนได้ดี นั่นหมายถึง ในชั้นเดียวกัน จะสามารถรับสัญญาณได้ดี แต่ในแนวตั้งจะแผ่กระจายคลื่นได้ไม่ดี ช่วยป้องกันไม่ให้คลื่นเดินทางไประอบกวนชั้นบนและชั้นล่างได้



รูปที่ 2.6 (ก) สายอากาศไดโพลและระนาบ (ข) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ yz (E-Plane) และ (ค) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ zy (H-Plane)

ที่มา : อำนาจ มีมงคล และ อรรณพ ชันธิกุล, 2553

ในการบอกอัตราขยายสายอากาศ จะมีหน่วยที่ใช้กันอยู่ 2 หน่วย คือ dBi และ ABd แต่โดยทั่วไปมักนิยมใช้หน่วย dBi มากกว่า สอดคล้องกับทางการตลาดก็มักจะใช้หน่วย dBi มากกว่า เพราะมีค่าสูงกว่า และเนื่องจากหน่วย dBi นั้นเป็นการวัดเทียบกับสายอากาศไอโซโทรปิก ที่มีการแผ่กระจายคลื่นเป็นรูปทรงกลม ซึ่งถือว่าเป็นสายอากาศที่ไม่มีอัตราขยาย ส่วนหน่วย dBA วัดจากการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศนั้นเทียบกับสายอากาศไดโพล ซึ่งเป็นสายอากาศที่มี อัตราขยายอยู่แล้ว คือ ประมาณ 2.15 dBi ดังนั้นหน่วย ABd ค่าจึงน้อยกว่า 2.15 โดยมีสมการที่ใช้แปลงหน่วย คือ $dBd = dBi - 2.15$

2.1.6 ความสามารถในการชี้ทิศทาง

ความสามารถในการชี้ทิศทาง (Directivity) คือ ความแรงของพลังงานในทิศทางหนึ่ง เมื่อเทียบกับทิศอื่น ขณะที่อัตราขยายสายอากาศ (Antenna Gain) เป็นความสามารถของสายอากาศในการรับส่งคลื่นวิทยุ สายอากาศแต่ละแบบมีอัตราขยายแตกต่างกัน สายอากาศแบบทิศทางเดียวจะมีอัตราขยายมากกว่าสายอากาศแบบกึ่งรอบตัว และแบบรอบตัวโดยลำดับ ลักษณะการใช้งานจึงแตกต่างกันไป สายอากาศที่มีอัตราขยายสูง จะสามารถรับ-ส่งคลื่นวิทยุ ได้ดีมาก

อัตราขยายในเรื่องสายอากาศ หมายถึงอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้คุณสมบัติ การชี้ทิศทาง สามารถระบุปริมาณการแพร่ของคลื่น ว่ามีมากในทิศทางใดหรือความสามารถในการ ส่งหรือรับคลื่นของสายอากาศนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศมาตรฐาน สายอากาศมาตรฐานก็คือสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น (Half Wavelength Dipole) หรือแหล่งกำเนิดคลื่นแบบจุด (Point Source) โดยจะต้องคำนึงถึงสิ่งต่าง ๆ เช่น การสูญเสียในตัวสายอากาศ การไม่เข้ากันระหว่างสายนำสัญญาณกับสายอากาศ เป็นต้น ซึ่งทำให้ต้องมีนิยามสำหรับอัตราขยายในกรณีต่าง ๆ เหล่านี้ เป็น อัตราขยายของสายอากาศ (Power Gain) และความสามารถในการชี้ทิศทางสายอากาศ (Directivity)

เมื่อเราให้กำลังไฟฟ้าอินพุตที่เท่ากันแก่สายอากาศหนึ่งกับสายอากาศที่เป็น มาตรฐาน อัตราขยายของสายอากาศในทิศใด ๆ ของสายอากาศนั้น คืออัตราส่วนระหว่างพอยน์ติง เพาเวอร์ที่เกิดจากสายอากาศนั้นกับพอยน์ติงเพาเวอร์ที่เกิดจากสายอากาศมาตรฐาน นั่นคือ เมื่อเขียน เป็นสมการจะเป็นดังนี้

$$G(\theta, \phi) = \frac{|\vec{E}(\theta, \phi)|^2 / Z_0}{|\vec{E}_0(\theta, \phi)|^2 / Z_0} = \frac{|\vec{E}(\theta, \phi)|^2}{|\vec{E}_0(\theta, \phi)|^2} \quad (2-12)$$

โดยที่ $G(\theta, \phi)$ คือ อัตราขยายของตัวสายอากาศในทิศ (θ, ϕ)

$\vec{E}(\theta, \phi)$ คือ สนามไฟฟ้าจากสายอากาศที่ต้องการรู้คืออัตราขยาย

$\vec{E}_0(\theta, \phi)$ คือ สนามไฟฟ้าจากสายอากาศที่ใช้เป็นมาตรฐาน

และเนื่องจากค่ากำลังสองของกำลังไฟฟ้าจะแปรโดยตรงกับกำลังไฟฟ้าที่ป้อน ให้กับสายอากาศ เพราะฉะนั้นถ้าให้ W และ W_0 เป็นกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับสายอากาศที่ต้องการรู้ ค่าอัตราขยายและสายอากาศมาตรฐานตามลำดับ เราจะได้อัตราขยายของสายอากาศเป็นดังนี้

$$G(\theta, \phi) = \frac{|\bar{E}(\theta, \phi)|^2 / W}{|\bar{E}_0(\theta, \phi)|^2 / W_0} \quad (2-13)$$

อนึ่งสายอากาศที่ใช้เป็นมาตรฐานนั้น ในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า VHF ลงมานิยมใช้สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่นเป็นสายอากาศมาตรฐาน เนื่องจากเป็นสายอากาศที่สร้างขึ้นง่าย และมีคุณสมบัติต่างๆ ที่รู้แน่นอน และสำหรับช่วงคลื่นที่สูงกว่า UHF ขึ้นไปโดยเฉพาะเมื่อสูงกว่า ไมโครเวฟขึ้นไป ระบบสายส่งและโครงสร้างของสายอากาศเปลี่ยนไปจากช่วงความถี่ต่ำ ในทางปฏิบัติการใช้สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่นเป็นสายอากาศมาตรฐาน ก็อาจจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ง่ายเนื่องจากตัวสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับส่วนประกอบอื่น ๆ ฉะนั้น โดยทั่วไปจึงนิยมใช้แหล่งกำเนิดคลื่นแบบจุด ซึ่งส่งคลื่นออกไปทุกทิศทุกทางเท่ากันหมดเป็นตัวเปรียบเทียบ เราเรียกอัตราขยายของตัวสายอากาศนี้ว่า อัตราขยายสัมบูรณ์ของสายอากาศ (Absolute Power Gain) ในกรณีข้างต้นที่ใช้สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่นเป็นมาตรฐานอัตราขยายที่ได้ จะเป็นค่าเปรียบเทียบเรียกว่าอัตราขยายสัมพัทธ์ของสายอากาศ (Relative Power Gain) ในบางกรณี ถึงแม้ความถี่จะต่ำกว่า UHF ลงไปก็ตามบางครั้งก็ใช้นิยามของอัตราขยายสัมบูรณ์โดยเฉพาะเมื่อคิด ทางทฤษฎีเมื่อให้ $G_a(0,0)$ คือ ค่าอัตราขยายสัมบูรณ์ของสายอากาศจะได้

$$G(\theta, \phi) = \frac{F(\theta, \phi)}{W/4\pi} = \frac{4\pi r^2 |\bar{E}(\theta, \phi)|^2}{Z_0 W} \quad (2-14)$$

ถ้าเราให้ W_r , W เป็นกำลังคลื่นที่กระจายออกไปและกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ตามลำดับ เราจะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$W_r = W - W_l = \eta W \quad (2-15)$$

โดยที่ η เป็นสัมประสิทธิ์ของการกระจายคลื่น W_r นั้นจากนิยามของ $F(\theta, \phi)$ จะได้เป็น

$$W_r = \oint F(\theta, \phi) d\Omega \quad (2-16)$$

เขียนในรูป $G(\theta, \phi)$ ได้

$$G(\theta, \phi) = \eta \frac{4\pi F(\theta, \phi)}{\oint F(\theta, \phi) d\Omega} \quad (2-17)$$

ถ้าให้

$$G(\theta, \phi) = \frac{4\pi F(\theta, \phi)}{\frac{1}{4\pi} \oint F(\theta, \phi) d\Omega} \quad (2-18)$$

จะได้

$$G(\theta, \phi) = \eta G_d(\theta, \phi) \quad (2-19)$$

$G(\theta, \phi)$ คือ อัตราส่วนของกำลังคลื่นที่กระจายออกไปในทิศใด ๆ ต่อค่าเฉลี่ย ของกำลังคลื่นที่กระจาย ออกไปจากสายอากาศนั้น และจะเห็นได้ว่าเป็นค่าที่สามารถคำนวณได้ โดยตรงจาก Pattern ของการกระจายคลื่น โดยที่ไม่มีกำลังไฟฟ้าอินพุตเข้ามาเกี่ยวข้อง ใน ความหมายเช่นนี้ $G(\theta, \phi)$ จึงถูกเรียกว่าความสามารถในการชี้ทิศ และก็เช่นเดียวกับในกรณีของ อัตราขยายของสายอากาศ ถ้าพูดถึงความสามารถในการชี้ทิศลอย ๆ ก็หมายถึงความสามารถในการ ทิศ ในทิศที่มีกำลังคลื่นกระจายออกไปมากที่สุด

เมื่อพิจารณาสมการ $G_a(\theta, \phi) = \eta G_d(\theta, \phi)$ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราขยายของสายอากาศกับความสามารถในการชี้ทิศ จะเห็นได้ว่าอัตราขยายของสายอากาศจะต่ำ กว่าความสามารถในการชี้ทิศเสมอเพราะว่า ๆ น้อยกว่าหนึ่งเสมอ สรุปได้ว่า ค่าอัตราขยายกับความสามารถในการชี้ทิศทางสายอากาศมีความสัมพันธ์กัน คืออัตราขยายสามารถบอกทิศทางของสายอากาศได้

การวัดอัตราขยายสายอากาศ สามารถหาได้จากสมการการส่งผ่านของฟรีส (Friis Transmission Equation) โดยสมการการส่งผ่านของฟรีสที่นำมาใช้เท่ากับ

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r \quad (2-20)$$

$$P_r (dB) - P_t (dB) = -Loss (dB) + G_t (dB) + G_r (dB) \quad (2-21)$$

$$G_r (dB) = P_r (dB) - P_t (dB) + Loss (dB) - G_t (dB) \quad (2-22)$$

$$G_r (dB) = P_r (dB) - P_t (dB) + 20 \log \frac{4\pi R}{\lambda} - G_t (dB) \quad (2-23)$$

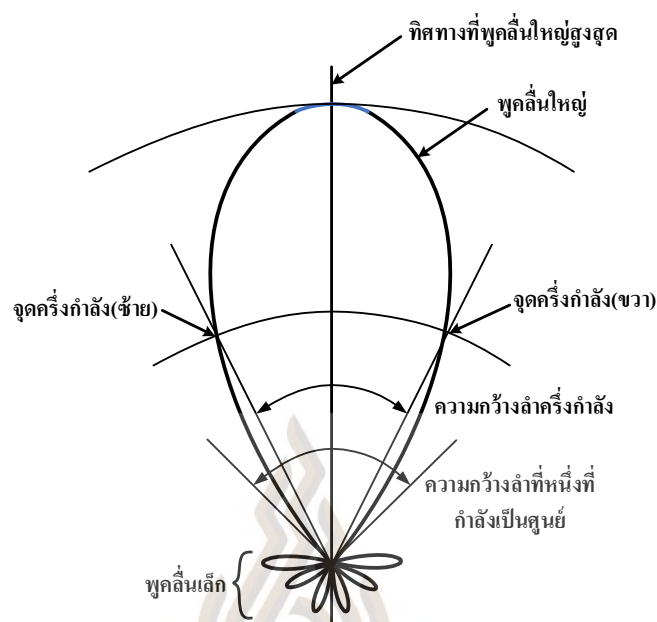
โดยที่	P_t	คือ กำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศภาคส่ง (สายอากาศปากแตร)
	P_r	คือ กำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศภาครับ (สายอากาศทดสอบ)
	G_r	คือ อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง (สายอากาศปากแตร)
	G_t	คือ อัตราขยายของสายอากาศภาครับ (สายอากาศทดสอบ)
	R	คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ (2 เมตร)

เมื่อ $P_r - P_t$ คือ ค่าของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

นอกจากนี้ ความสามารถในการชี้ทิศทาง ยังสามารถหาได้จากแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ E และแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ H ในรูปแบบของค่าความกว้างลำครึ่ง กำลัง (Half Power Beam-width : HPBW) ดังรูปที่ 2.7 (รังสรรค์ วงศ์สรรค์, 2556) โดยค่า ความสามารถในการชี้ทิศทาง (D_0) ในหน่วย dB สามารถหาได้จาก

$$D_0 = 10 \log \frac{41253}{(BW_E)(BW_H)} \quad (2-24)$$

โดย BW เป็นความกว้างลำครึ่งกำลังของการแผ่พลังงานระนาบสนามไฟฟ้า และ BW, เป็นความ กว้างลำครึ่งกำลังของการแผ่พลังงานระนาบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.7 การหาความกว้างลำครึ่งกำลัง
ที่มา : รังสรรค์ วงศ์สรรค์, 2556

2.2 คุณสมบัติของคลื่นวิทยุและการจำแนกคลื่นความถี่

คลื่นมีอยู่ในธรรมชาติทั่วไป คลื่นที่สามารถสังเกตเห็นได้ง่าย เช่น คลื่นน้ำ เมื่อโยน ก้อนหินลงไปในน้ำ จะพบว่ามีคลื่นเกิดขึ้นที่ผิวน้ำ แล้วแผ่กระจายออกไปเป็นรูปวงกลมหลาย ๆ วง เรียงกันไปเมื่อคลื่นกระทบกับใบไม้หรือวัตถุอะไรก็ตามที่ลอยอยู่ในน้ำนั้น ย่อมส่งผลให้ใบไม้หรือวัตถุนั้นลอยขึ้นลงเป็นจังหวะ ยิ่งลูกคลื่นใหญ่ขึ้นเท่าไร ก็จะทำให้วัตถุนั้นสั่นไหวได้มากขึ้น แสดงว่าคลื่นที่เดินทางไปนั้นมีพลังงานติดตามไปด้วย

คลื่นชนิดอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะคล้ายกับคลื่นน้ำเช่นกัน หากพิจารณาภาพตัดขวาง ก็พบว่าคลื่นมีลักษณะเป็นลอน ๆ คล้ายกระเบื้องมุงหลังคาบ้านเรียกว่า ลูกคลื่น วิธีการนับจำนวนลูกคลื่นสามารถกระทำได้ โดยเริ่มจากจุดสูงสุดของลูกคลื่นหนึ่งไปยังจุดสูงสุดของอีกลูกคลื่นหนึ่ง ก่อนที่ลูกคลื่นจะมีรูปร่างซ้ำเหมือนเดิม จำนวนลูกคลื่นที่เกิดขึ้นในหนึ่งวินาทีคือ ความถี่ของคลื่นที่เกิดขึ้น มีหน่วยเป็นเฮิร์ตซ์ (Hertz, Hz) ดังที่ได้เคยกล่าวไว้ตัวอย่างความถี่เช่น ถ้าคลื่นเกิดขึ้น 2 ลูกใน 1 วินาที คลื่นนี้จะมีค่าความถี่เท่ากับ 2 Hz ถ้าลูกคลื่นเกิดขึ้น 10 ลูกต่อวินาที หมายถึงคลื่นความถี่ 10 Hz เป็นต้น สิ่งที่ใช้บอกกว่าคลื่นมีขนาดความแรงเท่าไรคือ แอมพลิจูด (Amplitude) การวัดขนาด

แอมพลิจูดทำได้โดยการวัดค่าจากจุดสูงที่สุด ยิ่งคลื่นมีความแรงเท่าไรจะมีพลังงานสูงมากตามไปด้วย เปรียบเหมือนกับคลื่นน้ำที่ยิ่งมีความสูงมากเท่าไรเมื่อกระทบกับเรือย่อมทำให้เรือโคลงเคลงได้ มากเท่านั้น ความยาวคลื่น (Wavelength) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นและความถี่ของคลื่น ดังสมการต่อไปนี้

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2-25)$$

เมื่อ

c คือ ความเร็วคลื่นมีหน่วยเป็น m/s หรือความเร็ว 2.998×10^8 ms

λ คือ ความยาวคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร (m)

f คือ ความถี่ของคลื่นมีหน่วยเป็นจำนวนรอบต่อวินาทีหรือ Hz

ความยาวคลื่นเป็นตัวบ่งบอกถึงคุณสมบัติคลื่นได้ เช่น คลื่นที่มีความยาวคลื่นมากจะเดินทางไปได้ไกล ส่วนคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้นจะเดินทางไปได้ไม่ไกล เป็นต้น หากจะพูดถึงเรื่อง ของความยาวคลื่นและความถี่ของคลื่นวิทยุแล้ว จะหมายถึงตัวแปรที่ผกผันซึ่งกันและกัน คลื่นที่มีความถี่สูง ๆ เช่น ย่านโทรศัพท์มือถือ 1,800 MHz จะมีความยาวคลื่นเพียง 0.16 m แต่ถ้าเป็นคลื่น ความถี่ 900 MHz จะมีความยาวคลื่นถึง 0.32 m ซึ่งยาวกว่าความถี่ย่าน 1,800 MHz เป็นต้น คุณสมบัติด้านอื่น ๆ ของคลื่นที่ถูกนำมาใช้งานจะได้กล่าวถึงเพิ่มเติมในโอกาสต่อไป

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า คลื่นวิทยุเป็นเพียงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงหนึ่งในสเปกตรัมทั้งหมดเท่านั้น มีความเร็วเท่ากับแสงหรือประมาณ 3×10^8 m/s หากใช้คลื่นวิทยุนี้ส่งข้อมูล จะสามารถเดินทางไปถึงปลายทางได้ในเกือบจะทันที อย่างไรก็ตาม คลื่นวิทยุที่ใช้งานกันอยู่นี้ไม่ได้เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ต้องอาศัยแหล่งกำเนิด เป็นขบวนการเหนี่ยวนำ มีขั้นตอน คือ การปล่อยกระแสไฟฟ้าเป็นความถี่ผ่านขดลวดตัวนำด้วยจังหวะซ้ำ ๆ กัน จากนั้นจะเกิดสนามไฟฟ้าแผ่ออกมาจากขดลวดนั้น โดยจะมีความเข้มของสนามสูงขึ้นแล้วค่อยลดลงในทิศทางตรงกันข้ามสลับกันไป ตามกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามาในขดลวดนั้น ลักษณะคล้ายสัญญาณรูปไซน์ (Sine Wave)

คลื่นวิทยุเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกใช้ในระบบการสื่อสารต่าง ๆ หลายประเภท ได้แก่ คลื่นวิทยุกระจายเสียง มีช่วงตั้งแต่ 87.5 - 108.0 MHz คลื่นวิทยุสมัครเล่นที่มีความถี่ 144 MHz วิทยุ

สื่อสารที่ใช้กันในระบบราชการ และคลื่นที่ใช้ในระบบโทรศัพท์มือถือ มีหลายย่าน เช่น ย่าน 800, 900, 1,800, 1,900, 2,100 MHz

ความจริงแล้วในสเปกตรัมของคลื่นความถี่วิทยุจะแบ่งออกเป็นหลายช่วง แต่ละช่วงจะมีลักษณะต่างกัน ทำให้สะดวกในการนำมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานต่าง ๆ เช่น คลื่นที่อยู่ในช่วง 3 - 30 MHz เป็นคลื่นที่มีคุณสมบัติที่สามารถเดินทางไปได้ไกล ๆ จึงถูกนำมาใช้ในระบบวิทยุกระจายเสียงแบบ AM ทำให้สามารถส่งสัญญาณวิทยุไปไกลข้ามจังหวัดได้ แต่สำหรับระบบที่ไม่ต้องการให้คลื่นกระจายไปไกล เช่น ระบบโทรศัพท์มือถือ จะใช้คลื่นที่มีความถี่สูงขึ้นระหว่าง 300 - 3,000 MHz ดังนั้นเมื่อคลื่นย่านนี้เดินทางไปได้ไม่ไกลมากนัก จึงสามารถใช้ช่วงความถี่ซ้ำได้ในบริเวณที่ห่างออกไป ช่วยให้การใช้คลื่นความถี่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ตารางที่ 2.1 แสดงย่านความถี่ต่าง ๆ ที่ถูกแบ่งไว้เพื่อใช้งาน ประกอบด้วย

2.2.1 Very Low Frequency (VLF) เป็นคลื่นความถี่ย่าน 3 – 30 kHz มักจะถูกใช้ในวิทยุของเรือเดินสมุทร เนื่องจากเป็นคลื่นที่มีคุณสมบัติสามารถเดินทางไปได้ระยะไกล

2.2.2 Low Frequency และ Medium Frequency (LF, MF) เป็นคลื่นความถี่ย่าน 30 - 3,000 kHz ถูกใช้ในระบบวิทยุกระจายเสียงแบบ AM มีคุณสมบัติเดินทางได้ไกลมาก ๆ สามารถข้าม ทวีปได้โดยไม่ต้องอาศัยสถานีทวนสัญญาณ

2.2.3 High Frequency (HF) เป็นคลื่นความถี่ระหว่าง 3 – 30 MHz มักถูกเรียกว่า วิทยุคลื่นสั้น ที่ถูกใช้ในระบบวิทยุกระจายเสียงแบบ AM และระบบวิทยุสมัครเล่น

2.2.4 Very High Frequency (VHF) เป็นคลื่นความถี่ระหว่าง 30 – 300 MHz ถูกใช้ในระบบวิทยุแบบ FM และการกระจายสัญญาณโทรทัศน์ในช่อง 3, 5, 7, 9 และ 11 แบบอนาล็อกภาคพื้นดิน

2.2.5 Ultra High Frequency (UHF) เป็นคลื่นความถี่ระหว่าง 300 - 3,000 MHz ที่รู้จักในชื่อของคลื่นความถี่ไมโครเวฟ มักถูกใช้ในระบบโทรศัพท์มือถือ การกระจายสัญญาณโทรทัศน์ของสถานี Thai PBS และช่อง 3 ระบบ UHF รวมถึงความถี่ของระบบ Wireless LAN ด้วย

2.2.6 Super High Frequency (SHF) เป็นคลื่นความถี่ระหว่าง 3 - 30 GHz ถูกใช้ในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม และการรับสัญญาณโทรทัศน์จากจานดาวเทียมต่าง ๆ

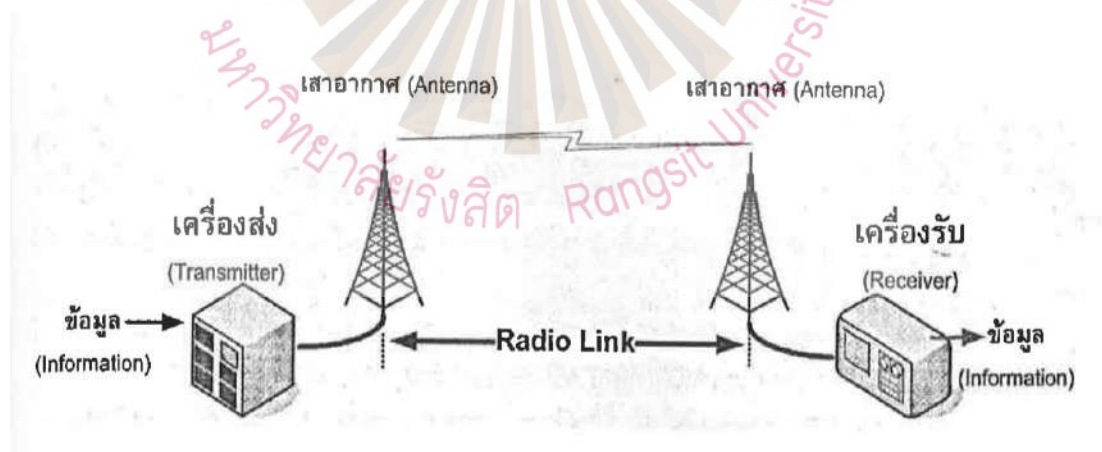
2.2.7 Extreme High Frequency (EHF) เป็นคลื่นความถี่ระหว่าง 30 – 300 GHz ถูกใช้ในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม และระบบเรดาร์ค้นหาเครื่องบิน

ตารางที่ 2.2 ย่านความถี่คลื่นวิทยุ ช่วงความถี่ และความยาวคลื่น

ย่านความถี่	ความถี่	ความยาวคลื่น
Very Low Frequency (VLF)	3 - 30 kHz	> 10 km
Low Frequency (LF)	30 - 300 kHz	10 - 1 km
Medium Frequency (MF)	300 - 3,000 kHz	1,000 - 100 m
High Frequency (HF)	3 - 30 MHz	100 - 10 m
Very High Frequency (VHF)	30 - 300 MHz	10 - 1 mm
Ultra High Frequency (UHF)	300 - 3,000 MHz	100 - 10 cm
Super High Frequency (SHF)	3- 30 GHz	10 - 1 cm
Extreme High Frequency (EHF)	30 - 300 GHz	10 - 1 mm

ที่มา : อำนาจ มีมงคล และ อรรถพ ขันธิกุล, 2553

เป้าหมายหลักของการใช้คลื่นวิทยุในการรับส่งข้อมูล คือ การส่งข้อมูลจากจุดหนึ่งไป ยังอีกจุดหนึ่งโดยใช้คลื่นวิทยุ ซึ่งไม่จำเป็นต้องเดินสายเชื่อมต่อระหว่าง 2 จุดนั้น มีส่วนประกอบอยู่ 3 ประการ คือ เครื่องส่ง สายอากาศ และเครื่องรับ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบระบบการสื่อสารไร้สายโดยใช้คลื่นวิทยุรับส่งสัญญาณ

ที่มา : อำนาจ มีมงคล และ อรรถพ ขันธิกุล, 2553

1) เครื่องส่ง (Transmitter) เมื่อต้องการจะส่งข้อมูลไม่ว่าจะเป็นสัญญาณเสียง เพลง หรือ ข้อมูลที่เป็นดิจิทัล ก็ต้องป้อนข้อมูลนี้ให้กับเครื่องส่งสัญญาณ หลังจากนั้น ข้อมูลนี้ก็จะถูก โมดูเลตเข้ากับคลื่นพาหะซึ่งเป็นคลื่นวิทยุใช้สำหรับนำพาข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทาง หลังจาก โมดูเลตเสร็จจะได้สัญญาณวิทยุ ซึ่งจะถูกนำไปผ่านวงจรขยาย เพื่อเพิ่มความแรงสัญญาณให้ สามารถส่งออกอากาศได้ในระยะทางไกล ๆ สัญญาณวิทยุนี้จะถูกส่งไปยังสายอากาศโดยผ่านสาย นำสัญญาณเพื่อออกอากาศต่อไป

2) สายอากาศ (Antenna) หน้าที่หลักของสายอากาศ คือ การแปลงสัญญาณวิทยุไปเป็น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อส่งออกอากาศไปจากภาคส่งคลื่นวิทยุ และทำหน้าที่ในการแปลงคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในอากาศไปเป็นสัญญาณวิทยุเพื่อส่งให้ภาครับดีโมดูเลตข้อมูลออกจากสัญญาณ วิทยุต่อไป สายอากาศจัดเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่มีความสำคัญมาก ถ้าสายอากาศไม่มีคุณภาพก็จะส่ง สัญญาณไม่ออกหรือไม่สามารถรับสัญญาณได้เลย ซึ่งมีตัวแปรหลาย ๆ ค่าที่ใช้บอกคุณสมบัติของ สายอากาศ เช่น อัตราขยาย (Gain) หรืออัตรขยาย ที่เป็นคุณสมบัติที่บอกว่า สายอากาศนี้มี คุณสมบัติใน การแปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาเป็นสัญญาณไฟฟ้าได้ดีเพียงใด ค่าความกว้างลำ (Beam-Width) ซึ่งบอก รูปร่างลักษณะการกระจายคลื่นว่าเป็นรูปแบบไหน การเลือกใช้สายอากาศ ที่มีทิศทางช่วยกำหนด รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นได้ดีกว่า และค่า SWR ซึ่งเป็นตัวเลขที่บอกถึง คลื่นที่สะท้อนกลับมา เมื่อเราส่งสัญญาณออกอากาศไป หากค่า SWR นี้มีค่าสูงมาก ๆ ก็อาจจะทำ ให้เครื่องส่งเกิดความเสียหายได้

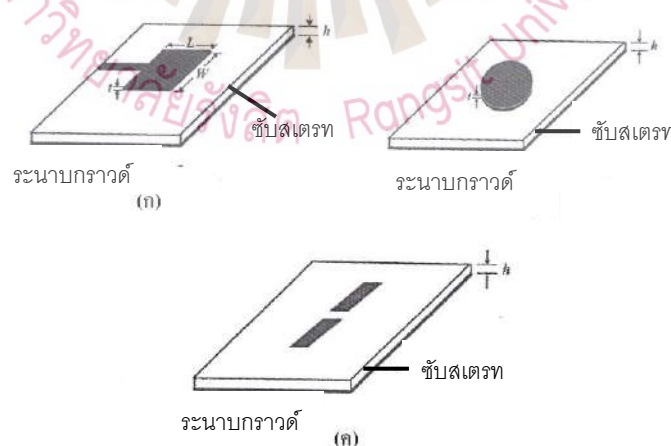
3) เครื่องรับ (Receiver) หลังจากมีการส่งสัญญาณออกอากาศ จะมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กระจายออกไป ในระบบเครื่องรับวิทยุก็จะใช้สายอากาศในการเปลี่ยนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มาเป็น สัญญาณไฟฟ้า หลังจากนั้น จะขยายสัญญาณให้มีความแรงขึ้น จากนั้นสัญญาณดังกล่าวจะถูกดีโมดู เลตแยกข้อมูลออกจากคลื่นพาหะ ข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปใช้งานต่อ เป็นการสิ้นสุดขบวนการรับและ ส่งคลื่นวิทยุ ภาครับนั้นเป็นส่วนที่สำคัญมาก เพราะเป็นส่วนที่แยกข้อมูลออกจากคลื่นพาหะ หากมี ประสิทธิภาพดีก็จะสามารถแยกคลื่นที่มีความแรงน้อยมาก ๆ ออกจากสัญญาณรบกวนได้ คำนี้นี้ส่วน ใหญ่จะรู้จักในชื่อของความไวของเครื่องรับ (Sensitivity) ในสภาวะความเป็นจริงจะมีคลื่นวิทยุ ความถี่ข้างเคียงอยู่มากมาย เครื่องรับที่ดีจะต้องมีความสามารถในการแยกแยะสัญญาณที่ต้องการกับ สัญญาณความถี่ข้างเคียงได้ คำนี้นี้มักจะเรียกว่า ความสามารถในการแยกแยะสัญญาณ (Selectivity)

2.3 สายอากาศ

สายอากาศ (Antenna) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกไปยังอากาศ โดยปรกติสายอากาศจะถูกใช้งานกับเครื่องส่งและรับ เช่น ระบบเครือข่ายท้องถิ่น ไร้สาย (Wireless LAN) ภายในจะมีสายอากาศอยู่ภายในอยู่แล้วสำหรับการรับส่งคลื่นความถี่ แต่เมื่อมีความต้องการใช้งานสายอากาศที่หลากหลาย การออกแบบจึงมีหลายประเภทเช่นกัน ดังนี้

2.3.1 สายอากาศแผ่นพิมพ์

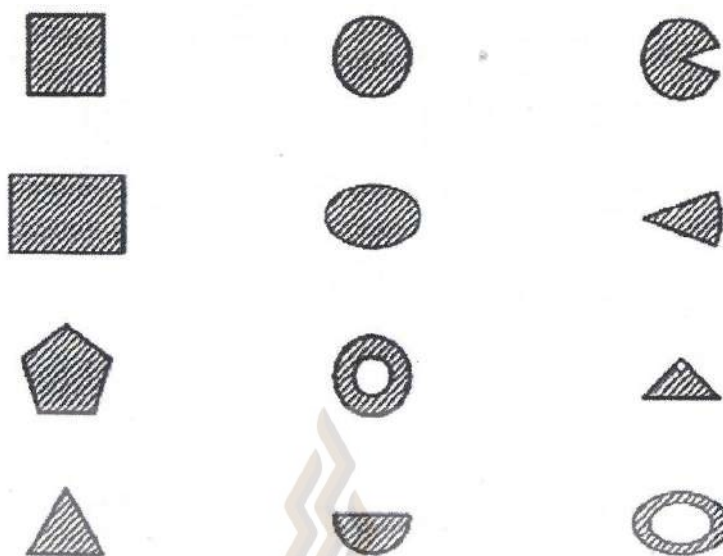
สายอากาศแผ่นพิมพ์ (Printed Patch Antennas) เป็นสายอากาศซึ่งใช้ตัวแผ่พลังงานเป็นแผ่นพิมพ์ ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาในช่วงต้นของปี ค.ศ. 1970 โดยโครงสร้างของสายอากาศแผ่นพิมพ์ประกอบด้วยแผ่นตัวนำ ซึ่งทำหน้าที่ในการแผ่กระจายคลื่นวางอยู่บนแผ่นวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (Dielectric Substrate) โดยมีระนาบกราวด์โลหะรองรับอยู่ด้านล่างอีกชั้นหนึ่ง ปัจจุบัน ส่วนที่เป็นแผ่นซึ่งใช้ในการแผ่พลังงาน ได้ถูกพัฒนาออกมาในลักษณะที่แตกต่างกันออกไปตาม วัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น แผ่นรูปสี่เหลี่ยม รูปวงกลม ดังรูปที่ 2.10 หรือรูปแบบเชิงเรขาคณิต อื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.9 โครงสร้างสายอากาศซึ่งใช้ตัวแผ่พลังงานแบบแผ่นพิมพ์ชนิดต่าง ๆ

(ก) รูปสี่เหลี่ยม (ข) รูปวงกลม (ค) ไคโพล

ที่มา : Balanis , 1997

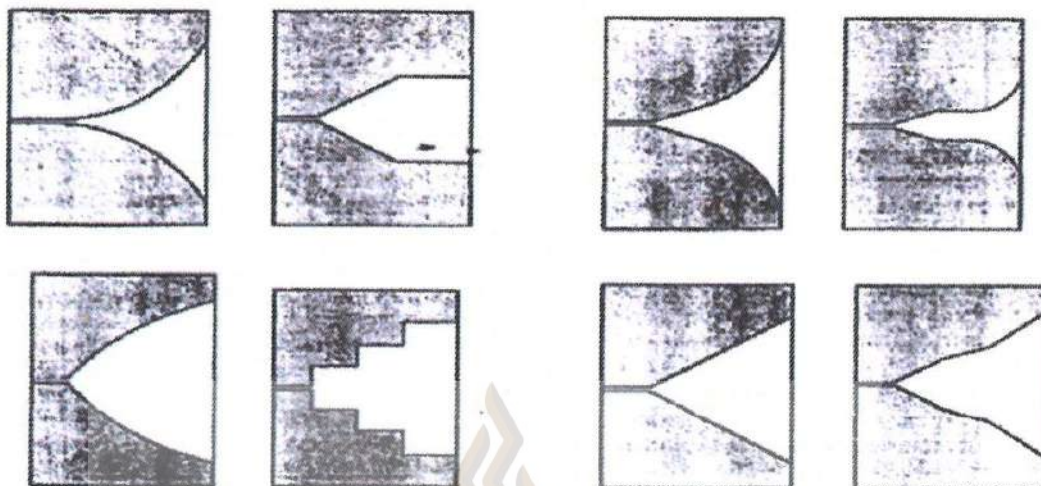


รูปที่ 2.10 สายอากาศแผ่นพิมพ์ในรูปแบบเชิงเรขาคณิตต่าง ๆ

ที่มา : Balanis , 1997

นอกจากนี้ ในปี ค.ศ. 1980 ได้มีการพัฒนาสายอากาศซึ่งใช้ตัวแผ่พลังงานแบบร่องแผ่นพิมพ์ (Printed Slot Radiators) มาใช้งานในย่านไมโครเวฟที่มีความถี่สูงกว่า 10 GHz ซึ่งในปัจจุบันยังคงเป็นที่สนใจและถูกพัฒนาออกมาในหลาย ๆ รูปแบบอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยสามารถนำมาใช้กับวงจรรวมทางอิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างสะดวกมากยิ่งขึ้น

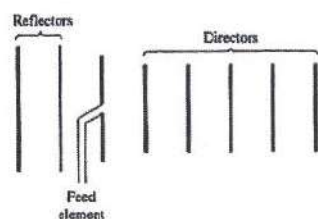
สายอากาศแผ่นพิมพ์ทั้งสองชนิดที่ได้กล่าวไปแล้วจะมีคุณลักษณะคล้ายกัน ไม่ว่าจะเป็น เรื่องของความง่ายในการสร้าง มีน้ำหนักเบา แข็งแรงทนทาน ติดตั้งร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ได้สะดวกและมีราคาถูกแต่ข้อด้อยจะไม่ตรงกับความต้องการของผู้ใช้งานก็อาจจะมีบ้าง เช่น มีค่า ของสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ไม่สูงมาก ค่าของโพลาไรซ์ไขว้ (Cross Polarization) และค่า ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency) ค่อนข้างต่ำ ซึ่งเป็นผลจากการสูญเสียของค่า ตัวนำและของไดอิเล็กตริกของวัสดุที่นำมาสร้างสายอากาศมีค่าสูง ดังนั้นการนำมาใช้งานเพื่อให้ได้ ประสิทธิภาพสูงขึ้น จึงมักจะออกแบบให้อยู่ในรูปของสายอากาศที่เป็นแถวลำดับ (Arrays) และ นิยมนำไปใช้งานกับยานอวกาศ ดาวเทียม จรวด รถยนต์ และการประยุกต์ใช้งานอื่น ๆ ที่มีการ เคลื่อนที่



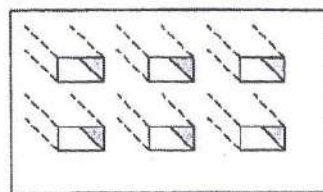
รูปที่ 2.11 สายอากาศซึ่งมีตัวแผ่พลังงานแบบร่องแผ่นพิมพ์
ที่มา : Balanis , 1997

2.3.2 แอลลำดับของสายอากาศ

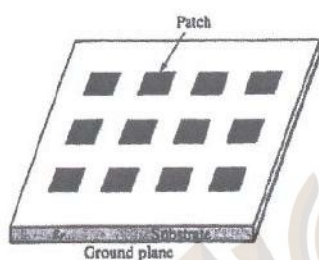
การนำสายอากาศมาจัดเป็นแอลลำดับ (Antenna Arrays) คือ การนำสายอากาศหรือตัวแผ่พลังงานที่มีลักษณะเหมือนกันตั้งแต่สองตัวขึ้นไป มาจัดวางเรียงลำดับกันตามรูปเรขาคณิต เพื่อให้ได้คุณสมบัติในการแผ่พลังงานตามลักษณะเฉพาะที่ผู้ออกแบบต้องการ ซึ่งแตกต่างจากการใช้คุณสมบัติของสายอากาศเพียงตัวเดียว นอกจากการจัดวางสายอากาศมีลักษณะเป็นแอลลำดับ เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการแล้วยังสามารถควบคุมการเปลี่ยนทิศทางของรูปแบบการแผ่พลังงานของแอลลำดับ หรือควบคุมการกวาดด้วยอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Scanning) โดยการควบคุมการเลื่อนเฟสและแอมพลิจูดของสัญญาณที่ป้อนให้กับแอลลำดับ การจัดแอลลำดับแบบนี้เรียกว่า แอลลำดับแบบจัดเฟส ทั้งนี้การออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศแบบแอลลำดับนี้จะไม่มีลักษณะที่ตายตัว แต่จะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งานในปัจจุบันได้นำเอาเทคโนโลยีด้านการประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) มาช่วยในการออกแบบทำให้เกิดนวัตกรรมใหม่ๆ เช่น สายอากาศเก่ง (Smart Antennas) และสายอากาศการติดตาม (Tracking Antennas) เป็นต้น สายอากาศแอลลำดับที่เห็นกันโดยทั่วไป แสดงไว้ในรูปที่ 2.16



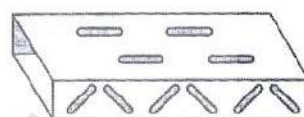
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2.12 สายอากาศแถวลำดับที่สร้างจากสายอากาศพื้นฐานชนิดต่าง ๆ (ก) แบบยาเกิ-อุดะ (Yagi-Uda Array) (ข) แบบอะเพอร์เจอร์ (Aperture Array) (ค) แบบแผ่นไมโครสตริป (Microstrip Patch Array) (ง) แบบร่องบนท่อนำคลื่น (Slotted-Waveguide Array)

ที่มา : Balanis , 1997

2.3.7 สายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์

สายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Antenna) นี้เป็นการออกแบบสายอากาศที่มีความยาวเท่ากับ $\lambda/4$ ขึ้นมาใช้งานสมัยใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาหลังจากที่มีการนำเสนอสายอากาศไมโครสตริปแล้ว เนื่องจากสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์นี้มีลักษณะเป็นแผ่นตัวนำ (Patch) ที่วางอยู่บนแผ่นไดอิเล็กตริก (Dielectric) ซึ่งเรียกว่าวัสดุฐานรอง (Substrate) โดยมีการป้อนกำลังงานให้กับสายอากาศโมโนโพลโดยผ่านสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปและ อาศัยกราวด์เพลน ของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปเป็นกราวด์เพลนถึงอนันต์ของสายอากาศไปในตัวเคเตอร์โพซ (Counterpoise) จึงทำให้สายอากาศโมโนโพลมีโครงสร้างเป็นแบบแบนราบ (Flat) บาง เบา เล็กกระทัดรัดมาก ถูก และโดยทั่วไปจะมีรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู กล่าวคือ ออกแบบง่าย แต่ประสิทธิภาพในการใช้งานของสายอากาศนั้นต่ำลง แต่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

คุณสมบัติของสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ มีดังนี้ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นมีทั้งแบบโดยรอบ (Omnidirectional) และแบบชี้ทิศทาง (Uni-Directional) ขึ้นอยู่กับชนิดของ Patch ค่าโคเรคทีวี่ขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของ patch และค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของ patch รวมถึงระบบการป้อนสัญญาณ (Feeder System) และโพลาริเซชันขึ้นอยู่กับระบบการป้อนสัญญาณ

เนื่องจากสายอากาศ โมโนโพลที่ถูกสร้างขึ้นบนแผ่นวงจรพิมพ์ ดังนั้นค่าความยาวคลื่นที่ใช้ในการสร้างสายอากาศจึงมีค่าไม่เท่ากับค่าความยาวคลื่น ในอากาศ ($\lambda \neq \lambda_0$) ซึ่งหาค่าจากสมการที่ (2.26) ดังนี้

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2-26)$$

เมื่อ $\lambda_0 = \frac{c}{f}$ เป็นค่าความยาวคลื่นในอากาศ λ_g เป็นค่าความยาวคลื่นบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Guided Waveguide) และ ϵ_{eff} เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) ซึ่งเราไม่สามารถจะนำเอาสมการที่เกี่ยวข้องกับสายนำสัญญาณไมโครสตริปมาใช้ได้ เพราะแผ่นวงจรพิมพ์ที่สร้างสายอากาศโมโนโพลนี้ ไม่มีกราวด์เพลน แต่เราสามารถที่จะประมาณค่า ϵ_{eff} นี้ได้ จากสมการที่ (2.27)

$$\epsilon_{eff} = 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left\{ 1 + \left[\frac{w_s/h}{1 + w_s/h} \right] \right\} \quad (2-27)$$

เมื่อ w_s เป็นความกว้างของสตริป

2.4 สายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม

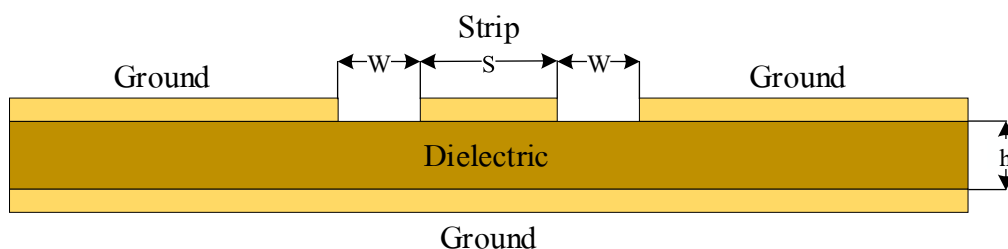
สายส่งระนาบ คือสายส่งที่มีตัวนำหรือในบางกรณีแถบอิเล็กทริก (ฉนวน) ซึ่งเป็นเส้นแบนรูปรีบิ้น ใช้เพื่อเชื่อมต่อส่วนประกอบต่างๆบนวงจรพิมพ์และวงจรรวมที่ทำงานที่ความถี่ไมโครเวฟเนื่องจากประเทระนาบเข้ากันได้ดีกับวิธีการผลิตสำหรับส่วนประกอบเหล่านี้ สายส่งเป็นมากกว่าเพียงแค่การเชื่อมโยง ด้วยการเชื่อมต่อที่เรียบง่ายการแพร่กระจายของคลื่น

แม่เหล็กไฟฟ้าไปตามเส้นลวดนั้นเร็วพอที่จะพิจารณาได้ทันทีและแรงดันไฟฟ้าที่ปลายลวดแต่ละด้านถือว่าเหมือนกัน หากเส้นลวดมีความยาวมากกว่าส่วนใหญ่ของความยาวคลื่น หนึ่งในสิบมักใช้เป็นหลัก สมมติฐานเหล่านี้จะไม่เป็นความจริงอีกต่อไปและต้องใช้ทฤษฎีสายส่งแทน ด้วยสายส่งรูปทรงเรขาคณิตของเส้นจะได้รับการควบคุมอย่างแม่นยำ (ในกรณีส่วนใหญ่หน้าตัดจะคงที่ตามความยาว) เพื่อให้สามารถคาดเดาพฤติกรรมทางไฟฟ้าได้สูง ที่ความถี่ต่ำข้อควรพิจารณาเหล่านี้จำเป็นสำหรับสายเคเบิลที่เชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เท่านั้น แต่ที่ความถี่ไมโครเวฟจะวัดระยะทางที่ทฤษฎีสายส่งมีความจำเป็นในหน่วยมิลลิเมตร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สายส่งภายในวงจร

สายส่งระนาบที่เก่าแก่ที่สุดถูกสร้างขึ้นในช่วงสงครามโลกครั้งที่สองโดย Robert M. Barrett เป็นที่รู้จักกันลอกสายไฟและเป็นหนึ่งในสี่ประเภทหลักในการใช้งานที่ทันสมัยพร้อมกับไมโคร ลอกสายไฟที่ถูกระงับ และ Coplanar ท่อนำคลื่น ทั้งสี่ประเภทนี้ประกอบด้วยตัวนำคู่หนึ่ง แม้ว่าในสามตัวนั้นตัวนำหนึ่งในนั้นคือระนาบกราวด์ ดังนั้นจึงมีโหมดการส่งสัญญาณที่น่าสนใจอย่างมาก โหมด คือ รูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ใกล้เคียงกับที่พบในสายคู่หนึ่ง สายส่งแบบระนาบอื่นๆ เช่น Slot Line , Fin Line และ Image Line ส่งไปตามแถบอิเล็กทรอนิกส์และท่อนำคลื่นในตัวพื้นผิวจะสร้างท่อนำคลื่นอิเล็กทรอนิกส์ภายในวัสดุพิมพ์ที่มีแถวของเสา ประเภทเหล่านี้ไม่สามารถรองรับโหมดเดียวกับสายคู่ได้ ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติในการรับส่งข้อมูลที่แตกต่างกัน หลายประเภทเหล่านี้มีแบนด์วิดท์ที่แคบกว่าและโดยทั่วไปแล้วจะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากกว่า ตัวนำคู่ ข้อได้เปรียบของพวกเขาขึ้นอยู่กับประเภทที่แน่นอนถูกเปรียบเทียบ แต่สามารถรวมค่าการสูญเสียและช่วงที่ดีของความต้านทานลักษณะ ในที่นี้จะกล่าวถึงสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม 2 ชนิด คือ สายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง (Conductor-Backed Coplanar Waveguide) และ ชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง (Coplanar Waveguide)

2.4.1 ลักษณะสายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง

ลักษณะของสายนำสัญญาณระนาบร่วมแบบมีกราวด์ด้านล่างมีส่วนประกอบต่างๆดังจะกล่าวต่อไปนี้ คือ วัสดุฐานรอง (Substrate) ที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าหรือไดอิเล็กตริก (Dielectric) นำไฟฟ้าต่ำ ความหนาของวัสดุฐานรอง คือ h โดยมีเส้นตัวนำไฟฟ้า สตริป (Strip) อยู่ด้านบนตรงกลางระหว่างระนาบกราวด์ (Ground) ดังรูป 2.17



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของสายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง
(Conductor-Backed Coplanar Waveguide)

ที่มา : วีรศักดิ์ แก้วศรีคำ, 2555

คุณลักษณะของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมจะถูกวิเคราะห์ด้วยพื้นฐานของวิธีการส่ง
คงรูป (Conformal Mapping) แบบ Quasi-Static โดยใช้การหาค่าความเหนี่ยวนำบนสายนำสัญญาณ
และค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งในการวิเคราะห์แบบนี้จะสามารถหาคุณลักษณะพื้นฐานของสายนำสัญญาณ
แบบระนาบร่วมได้

ผลรวมของค่าความจุไฟฟ้าที่อยู่ในอากาศเหนือระนาบด้านบนกับ ในชั้นไดอิเล็กตริก
(Dielectric Layer) ที่อยู่ระนาบด้านล่าง เพื่อหาค่าความจุไฟฟ้ารวมต่อหน่วยความยาวของสายนำ
สัญญาณ และเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant) และค่า
อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) ใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยวิธีส่งคงรูป ซึ่งอยู่ในเทอม
ของอินทิกรัลวงรีแบบสมบูรณ์ขั้นแรก (Complete Elliptic Integral Of The First Kind)

เมื่อกำหนดให้

c คือ ค่าความจุไฟฟ้ารวมต่อหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณ

c^a คือ ค่าความจุไฟฟ้าแบบเดียวกับ C แต่ค่าไดอิเล็กตริกจะถูกแทนด้วยอากาศ

$$\epsilon_{re} = \frac{c}{c^a} \quad (2-28)$$

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2-29)$$

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2-30)$$

$$Z_0 = \frac{1}{c_{V_p}} = \frac{c}{c\sqrt{\epsilon_{re}}c^a} \quad (2-30)$$

เมื่อ

ϵ_{re} หมายถึง สภาพยอมสัมพัทธ์ไดอิเล็กตริก

V_p หมายถึง ความเร็วเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

λ_g หมายถึง ความยาวของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

c หมายถึง ความเร็วของสนามไฟฟ้า

Z_0 หมายถึง อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

ในการวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ (Z_0) อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ หาได้จากสมการ

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{1}{K(k_1)/K'(k_1) + K(k_2)/K'(k_2)} \quad (2-31)$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลหาได้จาก

$$\epsilon_{re} = 1 + q(\epsilon_r - 1) \quad (2-32)$$

โดยที่

$$q = \frac{K(k_2)/K'(k_2)}{K(k_1)/K'(k_1) + K(k_2)/K'(k_2)} \quad (2-33)$$

เมื่อ q คือ ตัวประกอบการคูณ

$$k_1 = \frac{\tanh(\pi/2h_1)}{\tanh(\pi/2h_1)} \quad (2-34)$$

$$k_2 = \frac{\tanh(\pi a/2h)}{\tanh(\pi a/2h)} \quad (2-35)$$

$$k_3 = \frac{a}{b} \quad (2-36)$$

เมื่อ

$$a = \frac{S}{2} \quad (2-37)$$

$$b = \frac{(2W + S)}{2} \quad (2-38)$$

โดยที่

h คือ ความสูงของฐานรองไดโอดอิเล็กทรอนิกส์

S คือ ความกว้างของตัวนำที่อยู่ตรงกลาง

W คือ ความกว้างของร่อง

การที่จะสามารถหาค่าของปริมาตรขึ้นแรกหาได้จากสมการ

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}} \quad (2-39)$$

เมื่อ θ หมายถึงตัวแปรเชิงซ้อน

$$K'(k) = K(k') \quad (2-40)$$

$$K'(k) = \sqrt{1-k^2} \quad (2-41)$$

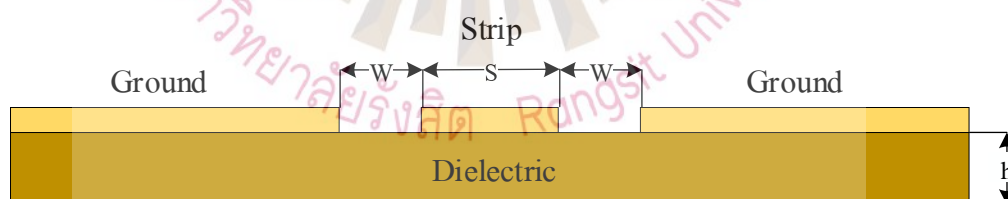
และอัตราส่วนของ $\frac{K(k)}{K'(k)}$ สามารถหาได้โดยการประมาณ คือ

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{\pi}{\ln \left[\frac{2(1+\sqrt{k'})}{1-\sqrt{k'}} \right]} \quad \text{กรณี } 0 \leq K \leq 0.707 \quad (2-42)$$

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{1}{\pi} \ln \left[\frac{2(1+\sqrt{k'})}{1-\sqrt{k'}} \right] \quad \text{กรณี } 0.707 \leq K \leq 1 \quad (2-43)$$

2.4.2 ลักษณะสายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง

สายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง มีความแตกต่างกับชนิดแรกตรงที่จะไม่มีระนาบกราวด์อยู่ด้านล่างของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก ดังรูป



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของสายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิด

ไม่มีกราวด์ด้านล่าง (Coplanar Waveguide)

ที่มา : วีรศักดิ์ แก้วศรีคำ, 2555

การหาคุณลักษณะของสายนำสัญญาณชนิดนี้จะสามารถหาได้เช่นเดียวกับสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง สมการหาได้จาก

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \quad (2-44)$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลหาได้จาก

$$\epsilon_{re} = 1 + q(\epsilon_r - 1) \quad (2-45)$$

โดยที่

$$q = \frac{1}{2} \left[\frac{K(k_4)}{K'(k_4)} \frac{K'(k_3)}{K(k_3)} \right] \quad (2-46)$$

$$k_4 = \frac{\sinh(\pi a/2h)}{\sinh(\pi b/2h)} \quad (2-47)$$

สายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมนั้นมีข้อดี คือ การเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เชื่อมต่อสามารถทำได้ง่ายเนื่องจาก ระนาบกราวด์ของสายอากาศนั้นอยู่ในระนาบเดียวกันกับสายส่งตัวนำจึงทำให้ไม่ยุ่งยากในการป้อนสัญญาณให้สายอากาศ การกระจายของสนามไฟฟ้าในสายส่งได้ดี ทำให้เหมาะกับการนำมาต่อร่วมกับวงจรอื่นได้ง่าย ค่าความสูญเสียและ รูปสัญญาณมีการบิดเบี้ยวต่ำ จากข้อดีข้างต้นที่กล่าวมาโครงสร้างของสายนำสัญญาณแบบระนาบรวมเหมาะกับการนำมาใช้ร่วมกับการสร้างสายอากาศ

บทที่ 3

การออกแบบสายอากาศ

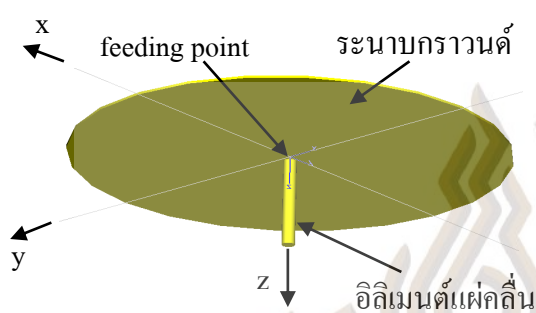
ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ป้อนโดยท่อนำคลื่นระนาบร่วม เมื่อสายอากาศนี้เป็นสายอากาศที่ให้แถบความถี่กว้าง ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้งานกับระบบเครือข่ายไร้สายต่าง ๆ ได้ โดยจะรองรับการใช้งานตลอดช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.7 GHz ถึง 6.0 GHz การออกแบบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปใช้สร้างสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์โดยให้สามารถรองรับการใช้งานตลอดช่วงความถี่ที่กว้าง และเพื่อศึกษาสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างที่ใช้งานได้ตลอดช่วงความถี่ที่ต้องการ เนื่องจากสายอากาศแบบแถบความถี่กว้าง การแผ่ออกไปของสัญญาณมักไม่สม่ำเสมอและบิดเบี้ยว โดยเฉพาะที่ความถี่สูง และเพื่อศึกษาค้นหาสายอากาศโมโนโพลโครงสร้างใหม่ที่รองรับความถี่ช่วงกว้าง นักศึกษาโครงสร้างไม่ซับซ้อน ราคาถูก โดยมีรายละเอียดวิธีการดำเนินงานและการจำลองสายอากาศดังนี้

เริ่มต้นการออกแบบสายอากาศโมโนโพลให้มีแถบความถี่กว้าง บนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม มีลักษณะการแผ่พลังงานรอบทิศทาง การออกแบบเริ่มต้นโดยเลือกที่ความถี่เริ่มต้นหรือ ความถี่ที่ต่ำสุด คือ 1.7 GHz ของช่วงความถี่ดำเนินการเนื่องจากความถี่สูง ขนาดของสายอากาศจะมีขนาดเล็ก และยากต่อการสร้างสายอากาศจริงของผู้วิจัย แต่หากเริ่มที่ความถี่ต่ำขนาดของสายอากาศจะมีขนาดใหญ่กว่า ดังนั้นจึงง่ายและสะดวกต่อการสร้างสายอากาศจริงเพราะเครื่องมือมีจำกัด จะมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

3.1 สายอากาศโมโนโพลเส้นลวดเหนือระนาบกราวด์

สายอากาศโมโนโพลเส้นลวดเหนือระนาบกราวด์ เป็นสายอากาศที่แผ่พลังงานออกจากตัวมันโดยรอบ (Omni-Directional Radiation) ในระนาบแนวนอนคล้ายโดนัทแต่ทิศทางความแรงมากที่สุดจะประมาณ 45° จากแนวระดับเนื่องจากอิทธิพลของระนาบกราวด์และสามารถรับสัญญาณจากโดยรอบได้เช่นกัน เหมาะสำหรับเครื่องส่งที่ต้องการแผ่สัญญาณเพื่อสื่อสารโดยรอบ แต่ไม่ต้องการความแรงหรืออัตราขยายที่มากนัก

โครงสร้างสายอากาศโมโนโพล (Monopole Antenna) ดังรูปที่ 3.1(ก) ประกอบด้วย อิลิเมนต์แผ่คลื่นทรงกระบอกหรือเส้นลวดตั้งอยู่ ณ ตำแหน่งกลาง และแผ่นระนาบกราวด์วงกลม ทั้งสององค์ประกอบคือโลหะที่นำไฟฟ้าได้ดี ลักษณะการใช้งานโดยทั่วไปที่พบเห็นคือจะติดตั้งอยู่บนเพดาน มีรูปลักษณะภายนอกดังรูปที่ 3.1(ข) ซึ่งเป็นวัสดุห่อหุ้ม (Radome) ปกป้องสายอากาศไว้สร้างจากพลาสติกหรือไฟเบอร์กลาสที่ทนแดดทนฝนและสัญญาณสามารถทะลุผ่านได้



(ก) โครงสร้างสายอากาศโมโนโพล
เส้นลวดเหนือระนาบกราวด์



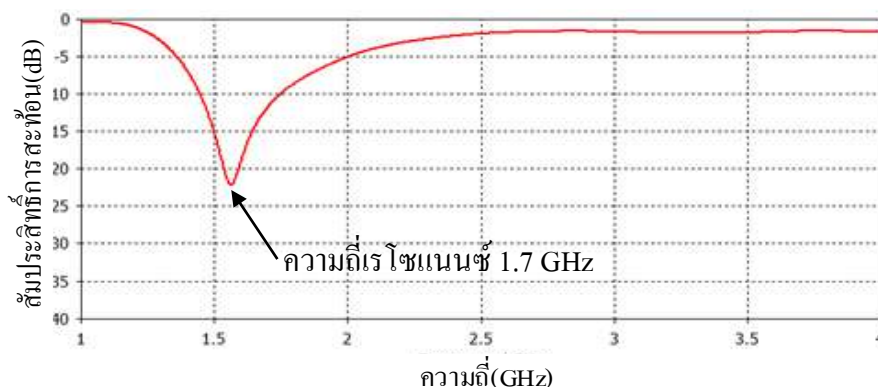
(ข) สายอากาศโมโนโพลห่อหุ้มด้วย Radome
ที่มา: Hefei Topwave Telecom Co.,Ltd, 2020

รูปที่ 3.1 สายอากาศโมโนโพลเส้นลวดเหนือระนาบกราวด์

จากโครงสร้างสายอากาศรูปที่ 3.1(ก) จะกำหนดพารามิเตอร์ให้ดังนี้ / คือความยาวของเส้นลวด l คือรัศมีของเส้นลวด R คือรัศมีของระนาบกราวด์วงกลม d คือความหนาของระนาบกราวด์วงกลม และ g คือระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับระนาบกราวด์สำหรับป้อนสัญญาณ (Feeding Point) ในการจำลองด้วยโปรแกรม เมื่อกำหนดขนาดให้กับพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.1 และกำหนดคุณสมบัติให้วัสดุ คือ เส้นลวดเป็นทองแดงและฐานระนาบกราวด์เป็นอลูมิเนียม จะได้สมประสิทธิภาพการสะท้อนระหว่างความถี่ 1.0 – 4.0 GHz ดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และขนาดสายอากาศโมโนโพลเส้นลวดเหนือระนาบกราวด์

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
l	44
r	0.5
g	1
R	100
d	1



รูปที่ 3.2 สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากการจำลองสายอากาศ
โมโนโพลเส้นลวดเหนือระนาบกราวด์

ข้อกำหนดหรือจุดสำคัญของการออกแบบหาขนาดของสายอากาศโมโนโพลเส้นลวดเหนือระนาบกราวด์นี้ คือ

- 1) ระนาบกราวด์จะต้องกว้างพอสมควร นั่นคือจะต้องมากกว่า λ เมื่อ λ คือความยาวคลื่น (Wavelength) ของความถี่ที่ใช้งาน
- 2) รัศมีของเส้นลวด r จะต้องน้อยเพื่อให้ความถี่เรโซแนนซ์ตรงกับความยาว l ของเส้นลวด
- 3) ความยาวของเส้นลวด l หรือโมโนโพล คือ $\lambda/4$
- 4) ความหนาของระนาบกราวด์วงกลม d มีผลน้อยกับสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศ

จากข้อกำหนดข้างต้น จะเริ่มต้นออกแบบสายอากาศนี้ด้วยการคำนวณหาความยาวคลื่น λ จากสมการที่ (3.1) ต่อไปนี้

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3-1)$$

- เมื่อ
- λ คือ ความยาวคลื่นหน่วยเป็น mm
 - f คือ ความถี่เรโซแนนซ์หน่วยเป็น Hz ซึ่งเป็นความถี่ที่ต้องการใช้งาน
 - c คือ ความเร็วแสงมีค่าประมาณ 2.998×10^8 m/s

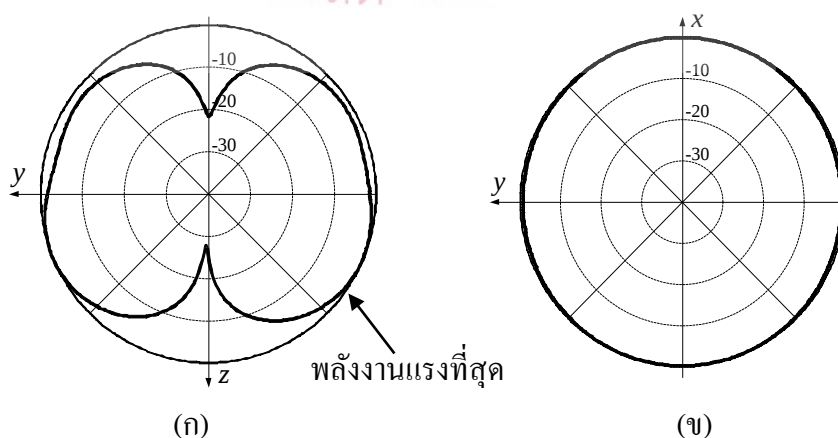
จากสมการที่ (3.1) จะยกตัวอย่างการคำนวณหาความยาวคลื่นเมื่อต้องการความถี่ใช้งาน ที่ 1.7 GHz เมื่อความเร็วคลื่น c เป็นค่าคงที่มีค่าเป็น 2.998×10^8 m/s จะได้ความยาวคลื่น λ เป็น

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2.998 \times 10^8}{1.7 \times 10^9} = 0.17635 \text{ m หรือ } 176.35 \text{ mm}$$

ดังนั้น จากตารางที่ 3.1 จึงได้กำหนดความยาวของเส้นลวด $l = 176.35 / 4 = 44 \text{ mm}$ และ กำหนดเส้นลวดให้บางที่รัศมี $r = 0.5 \text{ mm}$ ทำให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ประมาณ 1.6 GHz ดังรูปที่ 3.2 ทั้งนี้ น้อยกว่าที่ต้องการคือ 1.7 GHz ไปเล็กน้อย เนื่องจากความหนาของเส้นลวดไดโพลนั่นเอง

แบบรูปการแผ่พลังงาน ณ ความถี่ 1.7 GHz ในช่วงความถี่ดำเนินการ 1.45 – 1.75 GHz ที่ สัมประสิทธิ์การสะท้อน $< -10 \text{ dB}$ ดังรูปที่ 3.3 เมื่อ (ก) คือระนาบสนาม E และ (ข) คือระนาบ สนาม H จากรูปทำให้ทราบว่าที่ระนาบสนาม E ความแรงสนามที่มากที่สุดจะถูกกดลงมาประมาณ 30° จากแนวระดับ ส่วนระนาบสนาม H สัญญาณออกโดยรอบอย่างสม่ำเสมอ

การที่โครงสร้างสายอากาศนี้มีชื่อว่า โมโนโพล หมายความว่า มีขั้วเดียว แต่ปกติแล้ว สายอากาศจะมี 2 ขั้วเสมอ เนื่องจากต้องมีการสลับขั้วเพื่อกระจายความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไป ดังนั้นสำหรับสายอากาศโมโนโพลเส้นลวดนี้ อิเล็กเมนต์แผ่คลื่นที่โผล่พ้นจากกราวด์คือ ขั้วหนึ่ง อีกขั้วหนึ่ง คือระนาบกราวด์นั่นเอง ระนาบกราวด์บางครั้งถูกมองว่าเป็นระนาบเงา (Image Plane) ที่สะท้อนอิเล็กเมนต์แผ่คลื่นที่อยู่เหนือระนาบกราวด์นั้น เป็นอีก 1 ขั้วด้านล่าง



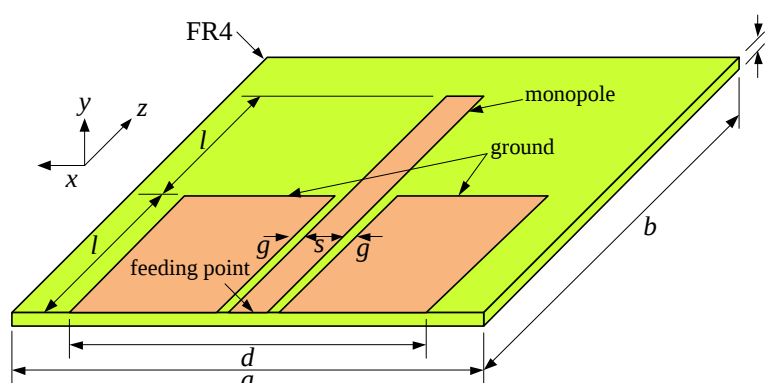
รูปที่ 3.3 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากการจำลองสายอากาศโมโนโพลเส้นลวด
เหนือระนาบกราวด์ (ก) ระนาบสนาม E (ข) ระนาบสนาม H

สังเกตว่าโครงสร้างสายอากาศเส้นลวดเหนือระนาบกราวด์ที่ได้วิเคราะห์นี้วางอยู่ในอวกาศ (Space) ที่ $\epsilon_r = 1$ ดังนั้น การได้มาซึ่งขนาด l จึงใช้สมการที่ (3-1) ได้โดยตรง

3.2 สายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม

จากสายอากาศโมโนโพลเส้นลวดเหนือระนาบกราวด์ในหัวข้อที่แล้ว ทำให้ทราบว่าความยาวของโมโนโพลจะประมาณ $\lambda/4$ ซึ่งหาได้โดยตรงจากสมการที่ (3.1) อย่างไรก็ตาม ด้วยเทคโนโลยีที่เปลี่ยนไป ความต้องการที่จะให้สายอากาศมีขนาดเล็ก กะทัดรัด สร้างง่าย ซึ่งสายอากาศโมโนโพลเส้นลวดเหนือระนาบกราวด์มีความไม่เหมาะสม เนื่องจากมีขนาดใหญ่ ผลิตยาก ต้นทุนในการผลิตสูง ดังนั้นจึงต้องหาวัสดุและแนวทางแบบใหม่เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวนี้

การสร้างสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ต้องการให้สายอากาศมีขนาดเล็กลงไม่มากนักน้อย อาจเรียกว่าเป็นวัสดุฐานรอง (Substrate) ก็ได้ ซึ่งสามารถนำวัสดุหลายชนิดมาสร้าง เช่น เทฟลอน (Teflon), อีพอกซี (Epoxy), โฟม, พลาสติก เป็นต้น วัสดุที่นิยมนำมาสร้างมากที่สุดอย่างหนึ่งคือ Epoxy มีชื่อเรียกเฉพาะว่า FR4 มีค่า ϵ_r ระหว่าง 4.3 – 4.9 ทำให้สายอากาศมีขนาดเล็กลงประมาณ 2 เท่า ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้นำเสนอสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมเพื่อเป็นการเริ่มต้นวิเคราะห์สายอากาศนำเสนอต่อไป ซึ่งมีโครงสร้างที่แตกต่างไปจากสายอากาศโมโนโพลเส้นลวดพอสมควร โดยการป้อนสัญญาณสายอากาศนี้เป็นแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม (Co-Planar Waveguide) ซึ่งการป้อนแบบนี้มีนักวิจัยอื่นนำเสนอไว้แล้ว และการป้อนสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมยังมีข้อดีคือ เป็นการป้อนสัญญาณที่รบกวนโครงสร้างที่ได้จากการจำลองด้วยซอฟต์แวร์โปรแกรมน้อยที่สุดเมื่อนำไปสร้างเป็นสายอากาศจริง โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมแสดงไว้ดังรูปที่ 3.4

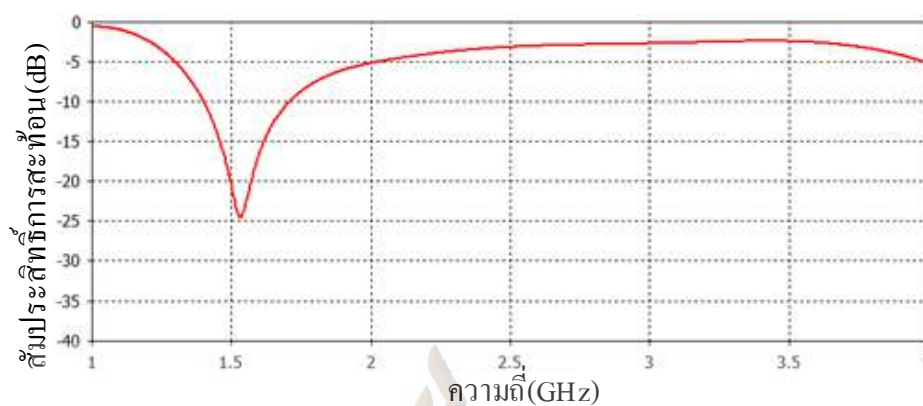


รูปที่ 3.4 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม

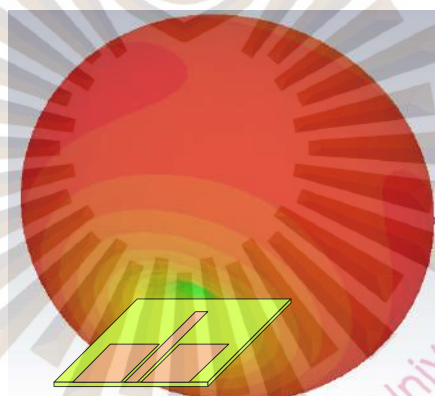
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์และขนาดสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
l	35
s	3
g	1
d	80
a	80
b	75
t	1.6

จากโครงสร้างสายอากาศรูปที่ 3.4 จะกำหนดพารามิเตอร์ให้ดังนี้ l คือความยาวของโมโนโพล s คือความกว้างของโมโนโพลและเป็นความกว้างของสตริปกลางท่อนำคลื่นระนาบร่วม ด้วย g คือความกว้างของท่อนำคลื่นระนาบร่วม d คือความกว้างของระนาบกราวด์ a คือความกว้างของ FR4 ส่วน b คือความยาวของ FR4 และ t คือความหนาของ FR4 ตำแหน่งป้อนสัญญาณ (Feeding Point) อยู่ด้านล่าง ท้องแดงเคลือบ FR4 หนา 0.05 mm เมื่อกำหนดขนาดให้กับพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.2 แล้ว จะได้สัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างความถี่ 1.0 – 4.0 GHz ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งพบว่าลักษณะของกราฟมีความใกล้เคียงกับโมโนโพลเส้นลวด มีความถี่เรโซแนนซ์ที่ 1.6 GHz ในช่วงความถี่ดำเนินการ 1.40 – 1.70 GHz ที่สัมประสิทธิ์การสะท้อน < -10 dB แต่พบว่าขนาดเล็กกว่า เบากว่า โดยเฉพาะความยาวของโมโนโพล l ที่ลดลงถึง 9 mm



รูปที่ 3.5 สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากการจำลองสายอากาศโมโนโพล บนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม



รูปที่ 3.6 แบบรูปการแผ่พลังงาน 3 มิติที่ได้จากการจำลองสายอากาศโมโนโพล บนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม

การลดลงของความยาวโมโนโพลนี้ เป็นผลมาจาก FR4 ที่โครงสร้างสายอากาศวางอยู่บน FR4 ที่ $\epsilon_r > 1$ ดังนั้น การได้มาซึ่งขนาด / จึงใช้สมการที่ (3.1) ไม่ได้โดยตรง วิธีการหาความยาวสามารถดูได้ในหัวข้อถัดไป

แบบรูปการแผ่พลังงาน 3 มิติ ณ ความถี่ 1.6 GHz ในช่วงความถี่ดำเนินการแสดงไว้ดังรูปที่ 3.6 จากรูปทำให้ทราบว่าแบบรูปการแผ่พลังงานจะเป็นแบบโคจรอบคล้ายโดนัท

3.3 การออกแบบขนาดความกว้างและความยาวของสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์

เนื่องจากสายอากาศโมโนโพลแถบความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม มีช่วงความถี่ใช้งานที่กว้าง จึงคำนวณโดยใช้ความถี่กึ่งกลางของความถี่ใช้งานระหว่างความถี่ต่ำสุด และความถี่สูงสุด มาใช้ในการคำนวณหาความยาวคลื่นเริ่มต้น โดยกำหนดค่าของตัวแปร c เป็นค่าคงที่เท่ากับ 2.998×10^8 (m/s) ตัวแปร f คือ ความถี่เริ่มต้นของช่วงความถี่ใช้งานเท่ากับ 1.7 GHz

ขั้นตอนต่อไป คือ ตัวอย่างการออกแบบขนาดความกว้างและความยาวโดยรวมของสายอากาศโมโนโพลแถบความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม โดยจะคำนวณความยาวและความกว้างด้วยสมการ (3-2) - (3-5)

$$W_1 = \frac{0.57c}{f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3-2)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} (1 + 0.3h) \quad (3-3)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{\left[\epsilon_{eff} + 0.3 \right] \cdot \left[\frac{W_1}{h} + 0.264 \right]}{\left[\epsilon_{eff} - 0.258 \right] \cdot \left[\frac{W_1}{h} + 0.8 \right]} \quad (3-4)$$

$$L_1 = \frac{0.63\lambda}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (3-5)$$

โดย ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (4.8)

ϵ_{eff} คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกประสิทธิผล

c คือ ความเร็วแสง (3×10^8 m/s)

h คือ ขนาดความหนาของวัสดุฐานรอง (1.6 มม.)

W_1 คือ ขนาดความกว้างของสายอากาศ (ม.)

L_1 คือ ขนาดความยาวของสายอากาศ (ม.)

f คือ ความถี่เรโซแนนซ์ (Hz)

หาขนาดความยาวของสายอากาศ W_1 โดยใช้สมการที่ (3-2)

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{0.57c}{f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \\ &= \frac{0.57(3 \times 10^8)}{1.7 \times 10^9} \sqrt{\frac{2}{4.8 + 1}} \\ &= 0.0617 \text{ ม. หรือ } 62 \text{ มม.} \end{aligned}$$

หาค่า ϵ_{eff} โดยใช้สมการที่ (3-3)

$$\begin{aligned} \epsilon_{eff} &= \frac{\epsilon_r + 1}{2} (1 + 0.3h) \\ &= \frac{4.8 + 1}{2} (1 + 0.3(1.6)) = 3.912 \end{aligned}$$

หาค่า ΔL โดยใช้สมการ (3-4)

$$\begin{aligned} \Delta L &= 0.412h \frac{[\epsilon_{eff} + 0.3] \cdot \left[\frac{W_1}{h} + 0.264 \right]}{[\epsilon_{eff} - 0.258] \cdot \left[\frac{W_1}{h} + 0.8 \right]} \\ &= 0.412(1.6) \frac{[3.921 + 0.3] \cdot \left[\frac{62}{1.6} + 0.264 \right]}{[3.921 - 0.258] \cdot \left[\frac{62}{1.6} + 0.8 \right]} \\ &= 0.749 \end{aligned}$$

หาขนาดความยาวของสายอากาศ L_1 โดยใช้สมการที่ (3-5)

$$\begin{aligned}
 L_1 &= \frac{0.63\lambda}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \\
 &= \frac{0.63(69.77)}{\sqrt{3.921}} - 2(0.749) \\
 &= 0.749 \text{ m หรือ } 75 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

จากการคำนวณหาขนาดพื้นที่ของสายอากาศโดยรวมได้ผลดังนี้ ความกว้าง W_1 มีขนาดโดยประมาณ 62 mm ส่วนความยาว L_1 มีขนาดโดยประมาณ 75 mm ขั้นตอนต่อไปผู้วิจัยจะดำเนินการออกแบบท่อนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดไม่มีกรวด้านล่างในหัวข้อถัดไป

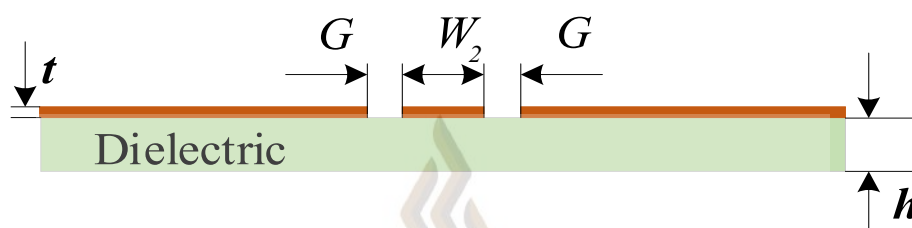


รูปที่ 3.7 โครงสร้างของสายอากาศโดยรวม

3.4 การออกแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกรวด้านล่างสำหรับนำสัญญาณ

ในการออกแบบท่อนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดไม่มีกรวด้านล่างแสดงในรูปที่ 3.8 นั้น เบื้องต้นออกแบบโดยใช้โปรแกรมจำลอง AppCAD ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้มีความใกล้เคียงหรือเท่ากับ อินพุตของสายนำสัญญาณ (Z_{in}) และหัว SMA Connector

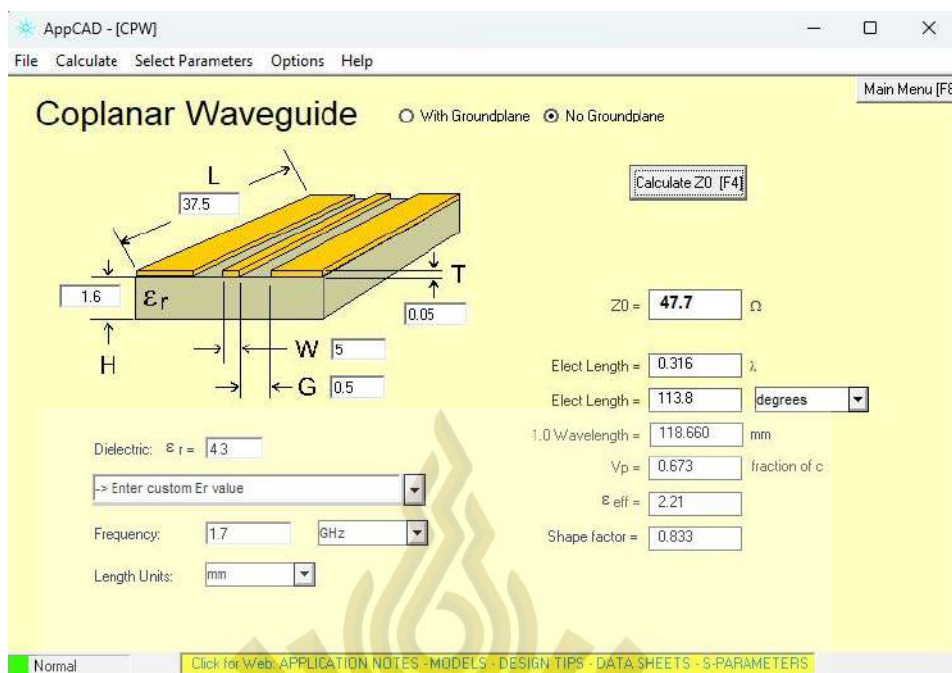
โดยทั่วไปจะใช้ค่าเท่ากับ 50 โอห์ม เพื่อให้สายนำสัญญาณระนาบร่วมมีประสิทธิภาพสูงสุดและสามารถนำสัญญาณได้ดี การออกแบบโครงสร้างของสายนำสัญญาณให้ใกล้เคียงหรือเท่ากับ 50 Ω เพื่อให้สามารถนำสัญญาณได้ดี แสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 โครงสร้างระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง

เริ่มต้นการออกแบบสายนำสัญญาณระนาบร่วมด้วยโปรแกรมจำลอง โดยโปรแกรมต้องการพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อนำมาคำนวณหา Z_0 ให้ใกล้เคียงหรือเท่ากับ 50 Ω โดยมีค่าเอฟซีลอนอาร์ (ϵ_r) หรือค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของแผ่น FR-4 เท่ากับ 4.3 เป็นค่าที่ถูกกำหนดมาจากโรงงานที่ผลิต มีความหนาของแผ่นไดอิเล็กทริก(H) เท่ากับ 1.6 mm ความหนาของแผ่นตัวนำ (t) เท่ากับ 0.05 มม. ความกว้างของสายนำสัญญาณ (W หรือ Strip) ระยะห่างของร่องนำสัญญาณ (G) ระหว่าง Strip กับระนาบกราวด์ และความยาวของสายนำสัญญาณ (L) ดังรูปที่ 3.9

จากรูปที่ 3.9 ได้ทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ลงในโปรแกรมจำลอง AppCAD โดยกำหนดความถี่ใช้งาน Frequency ที่ 1.7 GHz ตามการออกแบบขนาดของสายอากาศโดยรวมก่อนหน้านี้นี้ ความยาวของสายนำสัญญาณ (L) เท่ากับ 37.5 mm โดยอ้างอิงจากขนาดความยาวครึ่งหนึ่งของสายอากาศโดยรวมที่มีความยาวเท่ากับ 75 mm ความกว้างของสายนำสัญญาณ(W) 5 mm และระยะห่างของร่องนำสัญญาณ (G) ที่กำหนดเท่ากับ 0.5 mm หลังจากกำหนดค่าและให้โปรแกรมจำลองคำนวณจะเห็นได้ว่า Z_0 ยังไม่ใช่ค่าที่ต้องการ จึงได้ทำการปรับจนความกว้างของสายนำสัญญาณด้วยการใส่ขนาดของ(W) ลงในโปรแกรม AppCAD ตามตารางดังต่อไปนี้พร้อมผลลัพธ์ที่ได้



รูปที่ 3.9 หน้าต่างของโปรแกรม AppCAD ที่ใช้ในการออกแบบท่อนำสัญญาณระนาบร่วม

ตารางที่ 3.3 ผลลัพธ์การปรับค่าพารามิเตอร์ W โดยเพิ่มครั้งละ 0.2 mm ด้วยโปรแกรม AppCAD

ลำดับที่	ค่าที่กำหนด		ผลลัพธ์		
	G (mm)	W (mm)	Z_0 (Ω)	ϵ_{eff}	1.0 Wave length (mm)
1	0.5	5	47.7	2.21	118.66
2	0.5	5.2	47.4	2.2	118.938
3	0.5	5.4	47.1	2.19	119.206
4	0.5	5.6	46.8	2.18	119.465
5	0.5	5.8	46.5	2.17	119.716

จากตารางที่ 3.3 เริ่มจากการกำหนดขนาดเริ่มต้นการปรับค่าโดยการใส่ขนาดของตัวแปล W ให้เพิ่มมากขึ้นครั้งละ 0.2 mm จากค่าเริ่มต้น คือ 5 mm นั้น จากการวิเคราะห์จะสังเกตได้ในคอลัมน์ของค่าอิมพีแดนซ์ (Z_0) ในตารางที่ 3.3 เมื่อมีการเพิ่มมากขึ้นของขนาดความกว้างของสายนำสัญญาณ อิมพีแดนซ์ (Z_0) ที่ได้มีค่าน้อยลงเรื่อยๆ หมายความว่าประสิทธิภาพของสายนำสัญญาณน้อยลงไปด้วย เนื่องจากอินพุตอิมพีแดนซ์กำหนดไว้ที่ 50 Ω

จากการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการเพิ่มขนาดของสายนำสัญญาณ(W) ได้ผลลัพธ์ที่ห่างออกไปจากอินพุตอิมพีแดนซ์ที่กำหนด ผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับค่า W ให้น้อยลงจากค่าเริ่มต้นเดียวกันคือ 5 mm ของตารางที่ 3.3 โดยเริ่มจาก W เท่ากับ 4.8 mm และลดขนาดลงครั้งละ 0.2 mm แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ผลลัพธ์การปรับค่าพารามิเตอร์ W โดยเพิ่มครั้งละ 0.2 mm ด้วยโปรแกรม AppCAD

ลำดับที่	ค่าที่กำหนด		ผลลัพธ์		
	G (mm)	W (mm)	Z_0 (Ω)	$\mathcal{E}_{eff}$	1.0 Wave length (mm)
1	0.5	4.8	48.1	2.22	118.372
2	0.5	4.6	48.4	2.23	118.074
3	0.5	4.4	48.8	2.24	117.765
4	0.5	4.2	49.2	2.25	117.446
5	0.5	4	49.7	2.27	117.116
6	0.5	3.8	50.1	2.28	116.775

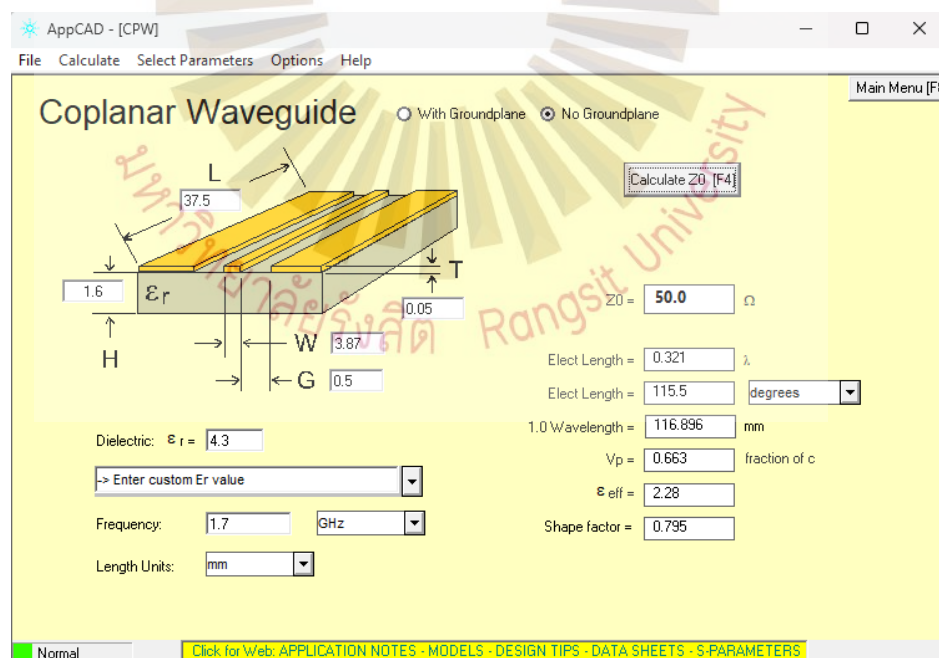
จากตารางที่ 3.4 ผลจากการปรับขนาดของ W ให้เพิ่มมากขึ้นครั้งละ 0.2 mm ทำให้แต่ละครั้งในเพิ่มขนาด ค่าอิมพีแดนซ์ (Z_0) ของสายนำสัญญาณ เข้าใกล้อินพุตอิมพีแดนซ์ 50 Ω เพิ่มขึ้นตามลำดับ จากการวิเคราะห์ตารางเพิ่มเติม สังเกตว่าในลำดับที่ 5 ขนาดของ W คือ 4 mm ค่าอิมพีแดนซ์ เท่ากับ 49.7 Ω แต่ในลำดับที่ 6 ขนาดของ W คือ 3.8 mm ค่าอิมพีแดนซ์ เท่ากับ 50.1 Ω ดังนั้นสังเกตเห็นว่า อิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณที่ได้ของลำดับที่ 5 และ 6 มีความหยาบของมากเกินไป เนื่องจากได้ปรับขนาดความกว้างของสายนำสัญญาณครั้งละ 0.2 mm ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเพิ่มความละเอียดมากขึ้น โดยการลดลงให้เหลือ 0.01 mm ในการคำนวณด้วยโปรแกรมแต่ละครั้ง แสดงในตารางที่ 3.5

จากตารางที่ 3.5 ในการปรับขนาดของ W ลดลง มีทั้งหมด 6 ลำดับ แต่ละลำดับจะลงจากเดิมครั้งละ 0.01 mm โดยเริ่มจากขนาดของ W คือ 3.88 mm เนื่องจากตารางที่ 2.2 ลำดับที่ 5 ที่ W มีขนาดเท่ากับ 4 แล้ว อิมพีแดนซ์ (Z_0) ยังได้เท่ากับ 49.7 Ω จากการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากตารางที่ 3.5 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณที่ขนาดของ W เท่ากับ 3.87 mm มีความเข้ากันดีที่สุดเนื่องจากอินพุตอิมพีแดนซ์และอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณที่ออกแบบ เท่ากันที่ 50 Ω และได้ความยาว

คลื่น (Wave Length) มากที่สุดเท่ากับ 116.896 เมื่อเทียบกับขนาดของ W ตัวอื่นที่ได้ อิมพีแดนซ์ (Z_0) เท่ากัน

ตารางที่ 3.5 ผลลัพธ์การปรับค่าพารามิเตอร์ W โดยลดลงครั้งละ 0.01 mm ด้วยโปรแกรม AppCAD

ลำดับที่	ค่าที่กำหนด		ผลลัพธ์		
	G (mm)	W_2 (mm)	$Z_0 (\Omega)$	ϵ_{eff}	1.0 Wave length (mm)
1	0.5	3.88	49.9	2.28	116.913
2	0.5	3.87	50	2.28	116.896
3	0.5	3.86	50	2.28	116.879
4	0.5	3.85	50	2.28	116.861
5	0.5	3.84	50	2.28	116.844
6	0.5	3.82	50.1	2.28	116.81



รูปที่ 3.10 หน้าต่างโปรแกรม AppCAD ผลที่ดีที่สุดของการปรับขนาดของ W

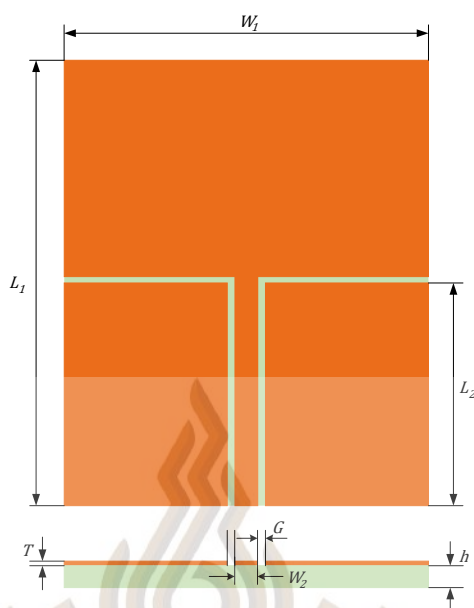
3.5 การออกแบบสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมด้วยโปรแกรมจำลอง

หลังจากการออกแบบสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมด้วยการคำนวณเพื่อหาขนาดของสายอากาศโดยรวมและใช้โปรแกรม AppCAD ช่วยในการออกแบบท่อนำคลื่นของสายอากาศแล้วได้พารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.6 ในการออกแบบสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมด้วยโปรแกรมจำลองโดยมีโครงสร้างเริ่มต้นเพื่อกำหนดขนาดต่างๆของสายอากาศลงในโปรแกรมจำลองตามตารางที่ 3.6

เริ่มต้นด้วยการกำหนดขนาดของความยาวของสายอากาศโดยรวม L_1 เท่ากับ 75 mm ให้ความกว้างของสายอากาศ W_1 เท่ากับ 62 mm โดยที่ความหนาของสายอากาศ h คือค่าที่ถูกกำหนดมาจากโรงงานที่ผลิต เท่ากับ 1.6 มม. ขนาดของ W_2 คือขนาดความกว้างของสายนำสัญญาณ เท่ากับ 3.87 mm โดย G คือความห่างระหว่างสายนำสัญญาณกับระนาบกราวด์ เท่ากับ 0.5 mm L_2 คือ ความยาวของสายนำสัญญาณ โดยรวมหรือ Coplanar Waveguide และค่าสุดท้ายคือ เอฟเฟกต์ไดอิเล็กทริก ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก เท่ากับ 4.3

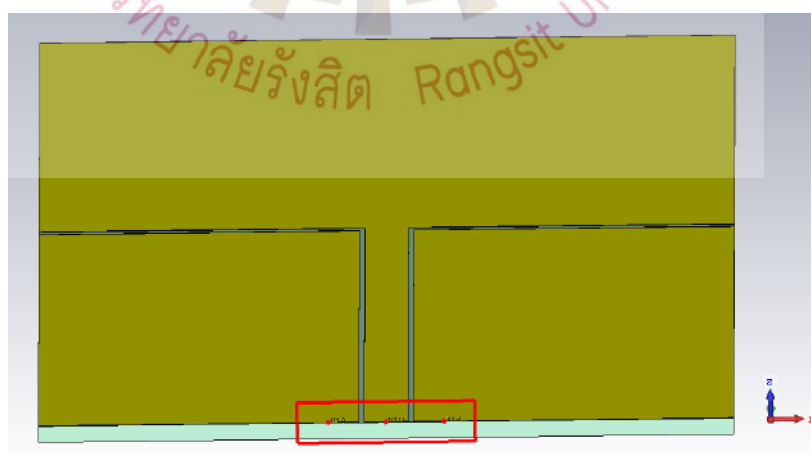
ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์ของสายอากาศเบื้องต้น

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
L_1	75
W_1	62
h	1.6
W_2	3.87
G	0.5
T	0.05
L_2	37.5
ϵ_r	4.3



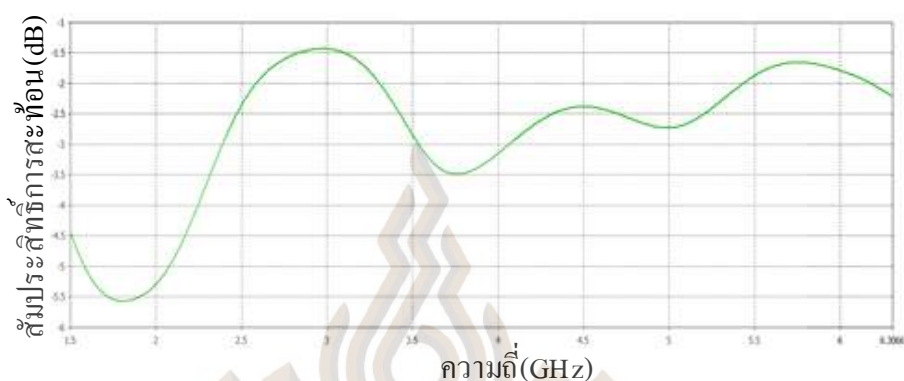
รูปที่ 3.11 โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม

จากรูปที่ 3.11 แสดงโครงสร้างของสายอากาศที่ถูกกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณหาขนาดความกว้างและความยาวของสายอากาศ โดยการออกแบบการป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมที่ออกแบบ ใช้โปรแกรม AppCAD และทั้งหมดลงในโปรแกรมจำลอง เพื่อเริ่มการจำลอง ด้วยการกำหนดพอร์ตเพื่อป้อนสัญญาณอินพุตให้มีขนาด 50 โอห์ม ตามรูปที่ 3.12

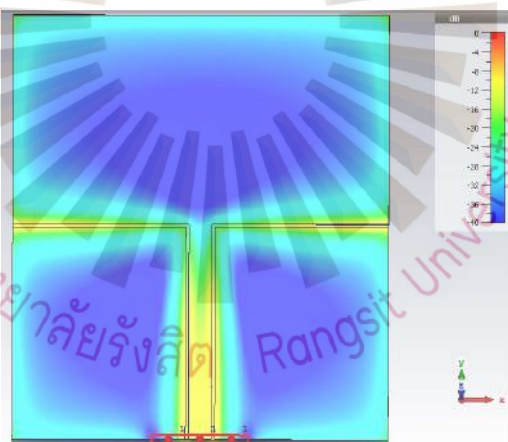


รูปที่ 3.12 ตำแหน่งกำหนดพอร์ตอินพุตป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศ

หลังจากการกำหนดพอร์ตรีบร้อยได้ทำการจำลองผลโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้ เพื่อวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและศึกษาเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของสายอากาศที่ดีที่สุด



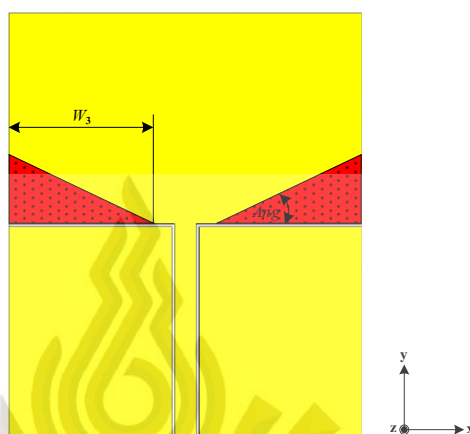
รูปที่ 3.13 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศโมโนโพลที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม



รูปที่ 3.14 สนามไฟฟ้าบนผิวสายอากาศโมโนโพลที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม

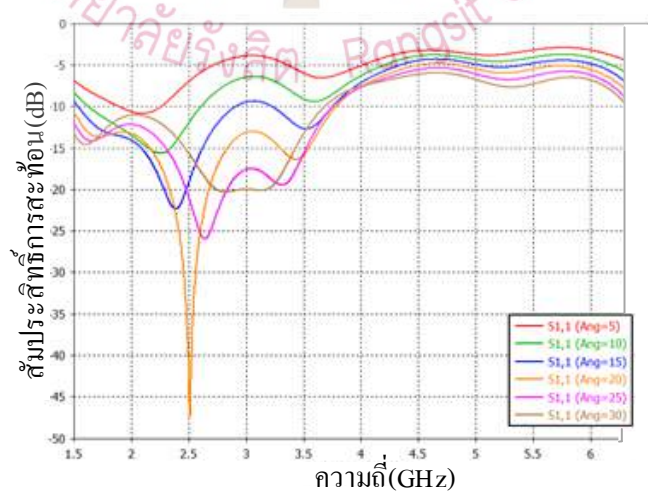
จากการจำลองแบบสายอากาศเริ่มต้นโดยวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนดังรูปที่ 3.13 เห็นได้ว่า ไม่มีช่วงความถี่ใดที่ต่ำกว่า -10 dB ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้วิธีเซาะร่องที่สายอากาศโดยพิจารณาร่วมกับสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองสายอากาศเพื่อหาตำแหน่งการเซาะร่องซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการปรับจูนสายอากาศเข้ามาช่วยให้ได้ความถี่ที่ต้องการ โดยที่สามารถทำได้ดังต่อไปนี้

1) เริ่มทำการเซาะผิวทองแดงเป็นรูปสามเหลี่ยมบริเวณด้านล่างของตัวแผ่นพลังงานทั้งสองด้านดัง รูปที่ 3.15 โดยกำหนดให้ W_3 คือความกว้างเท่ากับ 25 mm และปรับขนาดที่มุม (Ang) ของสามเหลี่ยมบริเวณที่เซาะผิวทองแดง



รูปที่ 3.15 ตำแหน่งที่เซาะผิวทองแดงรูปสามเหลี่ยมด้านล่างของตัวแผ่นพลังงาน

จากการจำลองผลที่ได้จากการเซาะผิวทองแดงรูปสามเหลี่ยมด้านล่างของตัวแผ่นพลังงาน ตามรูปที่ 3.15 ศึกษาผลการของการเปลี่ยนแปลงขนาดของมุม Ang ของสามเหลี่ยมตามลำดับคือ 5, 10, 15, 20, 25, และ 30 องศา โดยวิเคราะห์ผลที่ได้จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ดีที่สุดของสายอากาศ

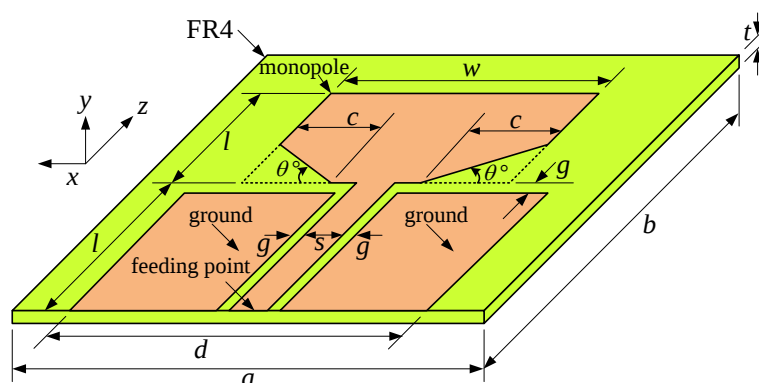


รูปที่ 3.16 การจำลองการเซาะผิวตัวแผ่นพลังงานโดยปรับมุม (Ang)

จากรูปที่ 3.16 จะเห็นได้ว่าการปรับขนาดของมุม (Ang) ที่ได้ผลที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 20° เนื่องจากช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่เริ่มจนถึงความถี่ 3.7 GHz การตอบสนองอยู่ต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน -10 dB และช่วงความถี่ที่ตอบสนองดีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมากกว่า -45 dB ที่ความถี่ 2.5 GHz

3.6 การวิเคราะห์โครงสร้างสายอากาศ

สายอากาศโมโนโพลป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม นำเสนอไว้ใน (วัชรพล นาคทอง , อำนวย เรืองวารีและ รัชชัย พุ่มพวง, 2020) ได้ถูกพัฒนาเป็นสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม ดังที่ได้เป็นสายอากาศนำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ โดยโครงสร้างสายอากาศแสดงดังรูปที่ 3.17 เมื่อสายอากาศที่มีวัสดุฐานรองเป็น FR4 มีความหนา 1.6 mm มีค่าแรงดันไฟฟ้า 4.8 ขนาดโดยรวมของโครงสร้างคือกว้าง a ยาว b สายอากาศถูกป้อนโดยท่อนำคลื่นระนาบร่วมโดยการ ป้อนสัญญาณอินพุต (Z_{in}) เข้าที่ตำแหน่งการป้อน (Feeding Point) และแกะสลักกระนาบกราวด์ทองแดงที่เคลือบบนพื้นผิวของ FR4 เพื่อสร้างช่องคู่และเส้นแถบที่เหมาะสมกับความต้านทาน 50Ω หรือที่เรียกว่าท่อนำคลื่นระนาบร่วม (Co-Planar Waveguide) ความกว้างของเส้นท่อนำคลื่นระนาบร่วมคือ s ในขณะที่ความกว้างของเส้นช่อง 2 ช่องคือ g ขนาดของกระนาบกราวด์คือกว้าง d ยาว l และ 2 มุมด้านบนของพื้นที่เหลี่ยมผืนผ้ามีการลบมุม θ° โดยความลึกเป็น c เพื่อปรับค่าคลื่นสายอากาศที่แผ่ออก เหนือพื้นที่เหลี่ยมผืนผ้าคือโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Monopole) กราวด์จะมีขนาดกว้างกว่าโมโนโพล ซึ่งหากเท่ากันสายอากาศจะเปลี่ยนเป็นไดโพล (Dipole) ช่องว่างระหว่างกราวด์และโมโนโพลคือ g ความยาวของโมโนโพลคือ l ใช้เพื่อกำหนดความถี่ต่ำเริ่มต้นที่ 1.7 GHz และโมโนโพลกว้าง w ความกว้างนี้จะถูกปรับให้มีความต้านทานที่แตกต่างกันสำหรับการปรับอิมพีแดนซ์ และความหนาของผิวทองแดงบน FR4 จะกำหนดให้เป็น ts



รูปที่ 3.17 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่
ป้อนโดยท่อนำคลื่นระนาบร่วม

สายอากาศนำเสนออีกแบบโดยการจำลองโครงสร้างด้วยซอฟต์แวร์ เพื่อศึกษาและหาปรับปรุงคุณสมบัติตามต้องการประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน แบบรูปการแผ่พลังงาน อัตราขยายของสายอากาศ หลังจากดำเนินการจำลองสายอากาศเรียบร้อยแล้วจึงสร้างสายอากาศจริง และวัดผลเพื่อเปรียบเทียบ จากการจำลองสายอากาศสามารถสรุปหลักเกณฑ์การออกแบบสายอากาศได้ดังนี้

- (1) a มีขนาดประมาณ $1/2$ ของ b
- (2) l มีขนาดเท่ากับ w
- (3) g มีขนาดประมาณ $1/3$ ของ s
- (4) c มีขนาดประมาณ $1/3$ ของ w

c มีอิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์การสะท้อนย่านความถี่สูง ต้องมีการปรับให้มีสูงขึ้นเพื่อให้ขอบความถี่ต่ำลดลง และขอบความถี่สูงเพิ่มขึ้น s ความกว้างของการป้อนสตริป ปรับให้เหมาะสม จะทำการแมตช์ดีขึ้น นอกจากนี้การปรับจูนอิมพีแดนซ์สายอากาศยังสามารถกระทำไ้ระยะห่าง g

โดยใช้หลักการออกแบบสายอากาศตามที่ได้กล่าวไว้ การจำลองสายอากาศจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถเป็นแนวทางในการสร้างสายอากาศได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม การจำลองจะมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถจำลองได้เหมือนจริงทุกประการ ทำให้ต้องละเว้นบางอย่างไป ดังนั้น ผลที่คลาดเคลื่อนไประหว่างที่ได้จากการจำลองและจากการวัดจริงเป็นเรื่องที่สามารถเกิดขึ้น

ได้ ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ถูกกำหนดไว้อีกครั้งดังตารางที่ 3.7 เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับใช้ทั้งในการจำลองและการสร้างสายอากาศต้นแบบ

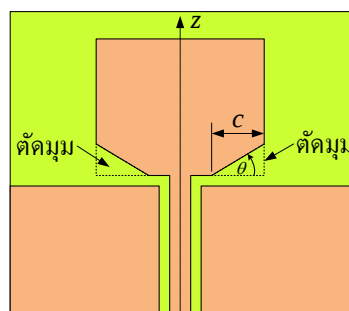
เพื่อแสดงให้เห็นอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน จึงได้แสดงการวิเคราะห์สายอากาศโดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ เพื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ใดพารามิเตอร์อื่น ๆ จะถูกคงค่าไว้เหมือนเดิมตามตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์ ขนาดและรายละเอียดของสายอากาศที่ใช้สำหรับสร้างสายอากาศต้นแบบ

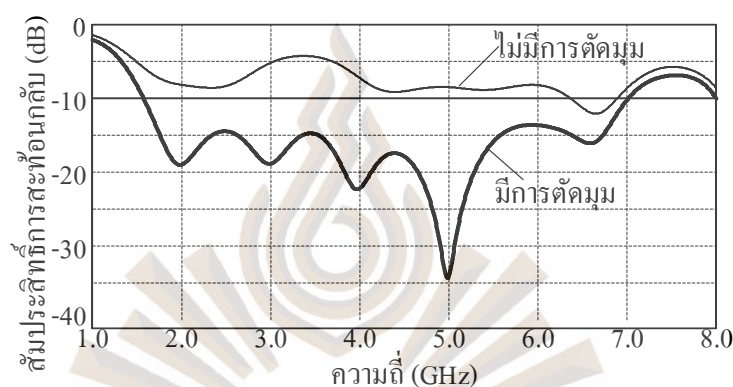
พารามิเตอร์	ขนาด (mm)	รายละเอียด
a	44.0	ความกว้างสายอากาศ
b	70.0	ความยาวสายอากาศ
w	40.0	ความกว้างโมโนโพล
l	29.0	ความยาวโมโนโพลและกราวด์
c	7.0	ความลึกของการตัดมุมจากขอบ
g	0.5	ความกว้างร่องท่อนำคลื่นระนาบร่วม
s	3.0	ความกว้างสตริปกลางท่อนำคลื่นระนาบร่วม
t	1.6	ความหนา FR4
ts	0.05	ความหนาผิวทองแดงบน FR4

3.6.1 การปรับเปลี่ยนขนาดมุมตัด

การตัดมุม (Chamfer) ของโมโนโพลจะมีอยู่ 2 ตำแหน่ง ซึ่งจะสมมาตรตามแนวแกน z เพราะตัดมุมออกเท่ากันตามรูปที่ 3.18(ก) ดังนั้นในการปรับเปลี่ยนมุมตัดจะต้องปรับ 2 มุมไปพร้อมกัน พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับมุมตัดคือ c และมุม θ โดยสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจากการจำลองสายอากาศโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เมื่อไม่มีการตัดมุมและมีการตัดมุมแสดงดังรูปที่ 3.18(ข) ในการจำลองนี้จะกำหนดให้ระนาบกราวด์มีความกว้างเท่ากับความกว้างของวัสดุฐานรอง FR4 ($a = d$) ตามรูปที่ 3.17



(ก)



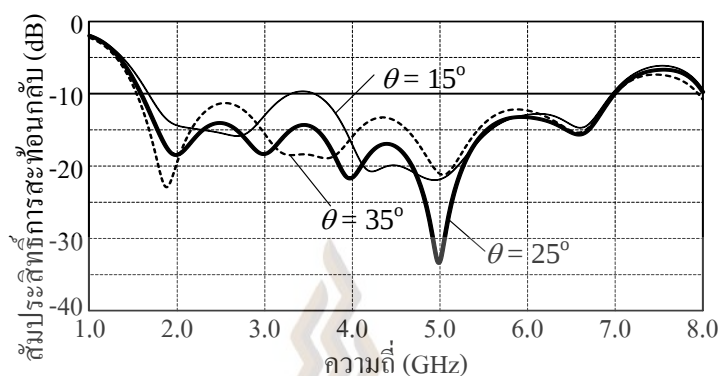
(ข)

รูปที่ 3.18 (ก) ตำแหน่งการตัดมูม (ข) สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อมีการตัดมูม

รูปที่ 3.18(ข) คือกราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ต่าง ๆ ช่วง 1.0 – 8.0 GHz ระหว่างผลที่ได้จากสายอากาศที่ไม่มีการตัดมูมกับที่มีการตัดมูมเข้าไป ที่ $c = 15 \text{ mm}$ และ $\theta = 25^\circ$ พบว่าเมื่อมีการตัดมูมโมโนโพลแล้ว สายอากาศจะแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าของสายอากาศที่ไม่ได้มีการตัดมูมจะสูงกว่าโดยเฉลี่ย 10 dB ช่วงความถี่ 1.5 – 7.0 GHz โดยที่มีความกว้างของ แบนด์วิดท์ ถึง 5.5 GHz ซึ่งถือว่าคือช่วงความถี่ดำเนินการของสายอากาศนั่นเอง อย่างไรก็ตาม การตัดมูมนั้นค่าของ c จะต้องเหมาะสม ไม่มากหรือน้อยเกินไป โดยจะมีค่าระหว่าง $1/4$ ถึง $1/3$ ของ w ส่วน θ จะอยู่ระหว่าง 20° ถึง 40° และเพื่อให้เห็นอิทธิพลของ c และ θ จะแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าให้เห็นดังนี้

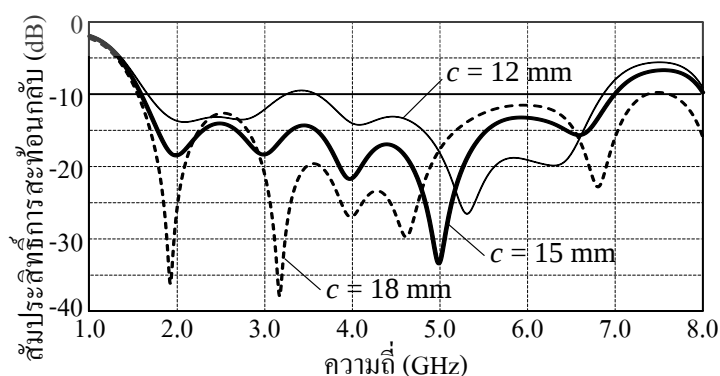
1) ผลการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ θ และคงค่า c ไว้ที่ 15 mm แสดงดังรูปที่ 3(ข) เมื่อ θ ถูกเปลี่ยนจาก 15° เป็น 25° และ 35° ตามลำดับ เมื่อปรับมุมมาที่ $\theta = 15^\circ$ จะทำให้การแมตซ์ไม่ดี ณ ความถี่ 3.5 GHz ทำให้ช่วงความถี่ใช้งานถูกแบ่งเป็นสองช่วงคือ 1.7 – 3.3 GHz และ 3.6 – 7 GHz ทำให้ไม่ตรงกับความต้องการ แต่ถ้าเพิ่มองศาที่ $\theta = 35^\circ$ จะทำให้การแมตซ์ไม่ดี ณ ความถี่ 2.5

และ 4.5 GHz เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนคือ -11 และ -13 ตามลำดับ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า อนาคตต้องปรับให้พอดีเช่นกันคืออยู่ที่ประมาณ 25°



รูปที่ 3.19 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ θ

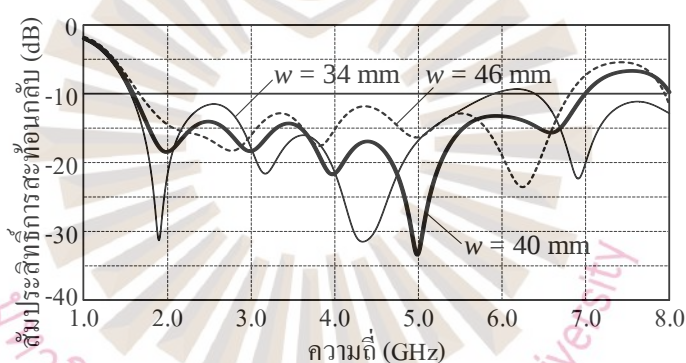
2) สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ c และคงค่าองศา θ ไว้ที่ 25° แสดงดังรูปที่ 3.19(ก) เมื่อ c ถูกตัดมุมที่ 12, 15, และ 18 mm จากรูป เมื่อ c มีค่าเท่ากับ 12 mm สายอากาศจะแมตซ์ดี ณ ช่วงความถี่สูงบริเวณ 4.0 – 6.5 GHz ความกว้างแถบเท่ากับ 2.5 GHz เท่านั้น ทำให้ความกว้างแถบแคบ และเมื่อ c มีขนาดมากขึ้นเป็น 15 mm ได้ทำให้ตลอดทั้งช่วงความถี่ดำเนินการของสายอากาศแมตซ์ดีขึ้นจนมีค่าประมาณ -15 dB ทำให้ความกว้างแถบกว้างขึ้น แต่เมื่อเพิ่มค่าของ c ขึ้นไปอีกเป็น 18 mm กลับพบว่า การแมตซ์ของสายอากาศจะดีเฉพาะช่วงความถี่ต่ำระหว่าง 1.5 – 5.0 GHz มีความกว้างแถบเท่ากับ 3.5 GHz ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ค่าของ c จะต้องเหมาะสมจึงจะทำให้สายอากาศแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีและความกว้างแถบเพียงพอสำหรับใช้งาน



รูปที่ 3.20 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ c

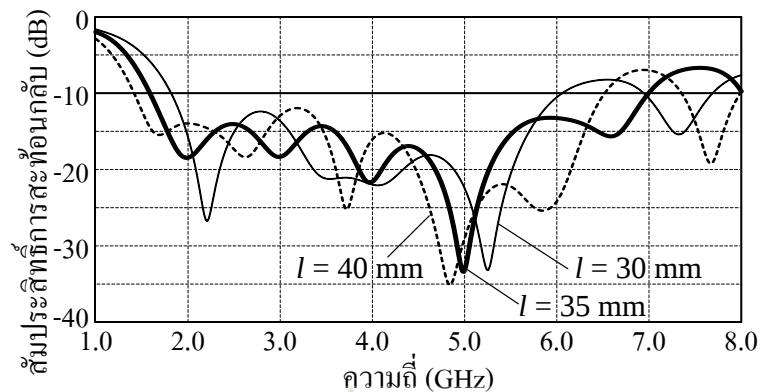
3.6.2 การปรับเปลี่ยนขนาดโมโนโพล

1) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับซึ่งเป็นผลลัพธ์เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ w แสดงดังรูปที่ 3.20(ก) เมื่อ w เปลี่ยนจาก 34 mm เป็น 40 mm และเป็น 46 mm ตามลำดับ จากรูปพบว่าเมื่อ w มีความกว้าง 34 mm สายอากาศจะแมตช์ดี ณ ช่วงความถี่กลางของช่วงความถี่ดำเนินการ ระหว่าง 1.7 – 5.8 GHz ความกว้างแถบเท่ากับ 4.1 GHz เท่านั้น ทำให้ความกว้างแถบแคบ และเมื่อ w มีความกว้างมากขึ้นเป็น 40 mm ได้ทำให้ความถี่สูงและต่ำของช่วงความถี่ดำเนินการแมตช์ดีขึ้นจนมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนประมาณ -15 dB ทำให้ความกว้างแถบกว้างขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มความกว้างของ w ขึ้นไปอีกเป็น 46 mm กลับพบว่าการแมตช์ของสายอากาศได้ลดลงตลอดทั้งความถี่แถบ ทำให้สามารถกล่าวได้ว่า ความกว้างของ w จะต้องเหมาะสม โดยจะต้องกว้างมากกว่า / เล็กน้อย



รูปที่ 3.21 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ w

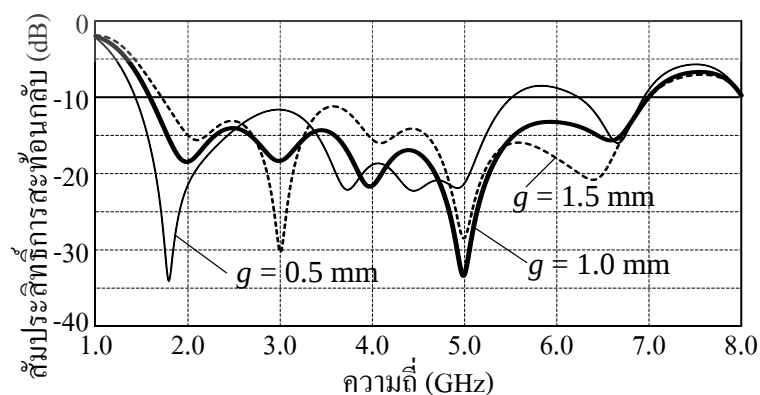
2) สำหรับสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับซึ่งเป็นผลลัพธ์เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ l แสดงดังรูปที่ 3.20(ข) เมื่อ l เปลี่ยนจาก 30 mm เป็น 35 mm และ 40 mm ตามลำดับ จากรูปพบว่า เมื่อ l มีขนาดมากขึ้น จะทำให้ช่วงความถี่ดำเนินการเลื่อนต่ำลง สังเกตได้จากขอบล่างของความถี่แถบ ณ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ -10 dB เปลี่ยนจาก 1.8 เป็น 1.6 และ 1.4 GHz ตามลำดับ การแมตช์อิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ดำเนินการมีการเปลี่ยนแปลงบ้างแต่ยังถือว่า สำหรับที่ความถี่สูง ถึงแม้จะแมตช์ไม่ดีระหว่างช่วง 6.0 – 8.0 GHz แต่เป็นช่วงที่เกินความถี่ที่ต้องการใช้งานไปแล้ว และเป็นช่วงที่แบบรูปการแผ่พลังงานบิดเบี้ยว ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่า l คือพารามิเตอร์สำหรับกำหนดความถี่การใช้งานโดยเฉพาะความถี่ต่ำขอบล่าง



รูปที่ 3.22 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ l

3.6.3 การปรับเปลี่ยนท่อนำคลื่น

ท่อนำคลื่น (Waveguide) กำหนดโดยพารามิเตอร์ g ดังรูปที่ 3.17 ผลการปรับเปลี่ยน g แสดงดังรูปที่ 3.21 เมื่อ g เปลี่ยนจาก 0.5 mm เป็น 1.0 mm และ 1.5 mm ตามลำดับ จากรูปพบว่าเมื่อ g มีความกว้างที่ 0.5 mm จะทำให้การแมตช์ไม่ดี โดยเฉพาะความถี่สูงของช่วงความถี่ดำเนินการ ณ ความถี่ 5.5 GHz แต่เมื่อเพิ่มความกว้างเป็น 1.0 mm ได้ทำให้สายอากาศแมตช์ดีตลอดทั้งย่านและทำให้ความกว้างแถบกว้างมากขึ้น และเมื่อเพิ่ม g ขึ้นไปอีก เป็น 1.5 mm ได้ทำให้การแมตช์กลับลดลง โดยเฉพาะบริเวณกลางของช่วงความถี่ดำเนินการและทำให้ขอบล่าง ณ ความถี่ต่ำที่สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ -10 dB ขยับมาอยู่ที่ 1.7 GHz ซึ่งไม่เพียงพอ แสดงว่า $g = 1.0$ mm เป็นช่องนำคลื่นที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศนำเสนอนี้



รูปที่ 3.23 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ g

3.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการพัฒนาสายอากาศเริ่มจากสายอากาศโมโนโพลที่สร้างจากเส้นลวดเหนือระนาบกราวด์ จากนั้นปรับเปลี่ยนเป็นไดโพลแผ่นบางเป็น สายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม โดยท้ายที่สุดกลายมาเป็นสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ความถี่กว้างที่ป้อนสัญญาณโดยท่อนำคลื่นระนาบคู่ โดยมุมของสายอากาศโมโนโพลและกราวด์ถูกตัดออกเป็นมุมรูปสามเหลี่ยมทำมุม 25° ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรมในบทนี้จะถูกนำไปสร้างสายอากาศจริงต้นแบบเพื่อเปรียบเทียบผลในบทต่อไป

ข้อดีของการสร้างสายอากาศด้วยแผ่น FR4 คือ

1) สร้างง่ายโดยการกัดทองแดงที่ติดอยู่บนผิวของ FR4 หรือบางครั้งเรียกว่า PCB (Printed Circuit Board) ด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การใช้น้ำยากัดผิวทองแดงหรือใช้เครื่องจักร CNC เป็นต้น

2) มีขนาดเล็ก เนื่องจาก ค่า ϵ_r ของ PCB ซึ่งปกติจะมากกว่า 1 อยู่แล้ว

อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้งานแผ่น FR4 ที่ราคาถูก จะมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศโดยตรง นั่นคืออาจทำให้มีการดูดกลืนกำลังงาน หรือทำให้ความถี่ดำเนินการของสายอากาศต่ำลงหรือสูงขึ้นได้ ซึ่งถ้านำไปสร้างเป็นสายอากาศแบบช่วงความถี่ดำเนินการแคบ (Narrow Band Antenna) จะก่อให้เกิดความยุ่งยากในการปรับจูนความถี่ ทำให้ค่าที่ได้อาจจะไม่ตรงตามต้องการ ปัญหาดังกล่าวจะไม่เกิดขึ้นกับสายอากาศแบบแถบความถี่กว้าง (Wideband Antenna) เพราะถึงแม้ความถี่จะเลื่อนไปแต่ก็ยังครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานอยู่ ซึ่งอาจปรับจูนเพิ่มเติมอีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

บทที่ 4

ผลการจำลองและทดสอบสายอากาศ

ในบทนี้จะกล่าวถึง ผลจากการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองและทดสอบสายอากาศที่ออกแบบโดยบทที่ 3 แสดงถึงการออกแบบสายอากาศในรูปแบบต่าง ๆ และวิเคราะห์ผลการออกแบบสายอากาศ โดยนำทฤษฎีของสายอากาศที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 มาช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบสายอากาศ โครงสร้างของสายอากาศที่ออกแบบเป็นสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม การออกแบบจะถูกทำบนโปรแกรมจำลองสายอากาศ และเมื่อได้ผลของการจำลองสายอากาศเป็นที่น่าพอใจแล้วด้วยโปรแกรมจำลอง จากนั้น ดำเนินการสร้างสายอากาศต้นแบบ เพื่อนำมาทดสอบหาคุณสมบัติของสายอากาศ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection Coefficient) ช่วงความถี่ดำเนินการ (Operating Frequency) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) ทั้ง E plane และ H plane โพลาริซ์ร่วม (Co Polarized) ความกว้างลำครึ่งกำลัง (Half Power Beam-Width) และอัตราขยายสายอากาศ (Antenna Gain) เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรม

4.1 สายอากาศต้นแบบที่ได้ออกแบบ

สายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ป้อนโดยท่อนำคลื่นระนาบร่วมที่ได้สร้างขึ้นเป็นสายอากาศต้นแบบ แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ป้อนโดยท่อนำคลื่นระนาบร่วมต้นแบบ

โดยมีค่าพารามิเตอร์และขนาดของสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ป้อนโดยท่อนำคลื่นระนาบร่วมแสดงในตารางที่ 4.1 เป็นค่าที่ได้จากการจำลองในบทที่ 3

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์และขนาดของสายอากาศที่ใช้สำหรับสร้างสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
a	44.0
b	70.0
w	40.0
l	29.0
c	7.0
g	0.5
s	3.0
t	1.6

หลักการออกแบบสายอากาศจะเป็นไปตามที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 เริ่มต้นจากการจำลองสายอากาศจากซอฟต์แวร์โปรแกรมน จนได้ขนาดของพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่ต้องการดังแสดงในตารางที่ 4.1 แล้ว จากนั้นจึงสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นมาเพื่อทดสอบและเปรียบเทียบผล ตามขนาดพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลอง ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยสายอากาศสร้างขึ้นจากทองแดงบน FR4 แสดงดังรูปที่ 4.1 อย่างไรก็ตาม สามารถสรุปแนวทางการออกแบบได้ดังนี้

โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลพร้อมพารามิเตอร์ที่กำหนดให้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.6 เป็นสายอากาศโมโนโพลแผ่นบางที่สร้างจากโลหะตัวนำบางบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board, PCB) ชนิด FR4 ด้านเดียว โดย FR4 กว้าง a ยาว b และมีความหนา t โดยในการจำลองได้ใช้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative Permittivity, ϵ_r) ที่ 4.8 อย่างไรก็ตาม FR4 ที่นำมาใช้สร้างสายอากาศจริงอาจคลาดเคลื่อนไปบ้าง

รูปร่างโมโนโพลเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดย 2 มุมด้านล่างที่ติดกับระนาบกราวด์ถูกตัดออกเพื่อปรับการแมตช์อิมพีแดนซ์ การตัดมุมนี้จะมีผลกับคุณสมบัติของสายอากาศโดยตรงคือ ทำ

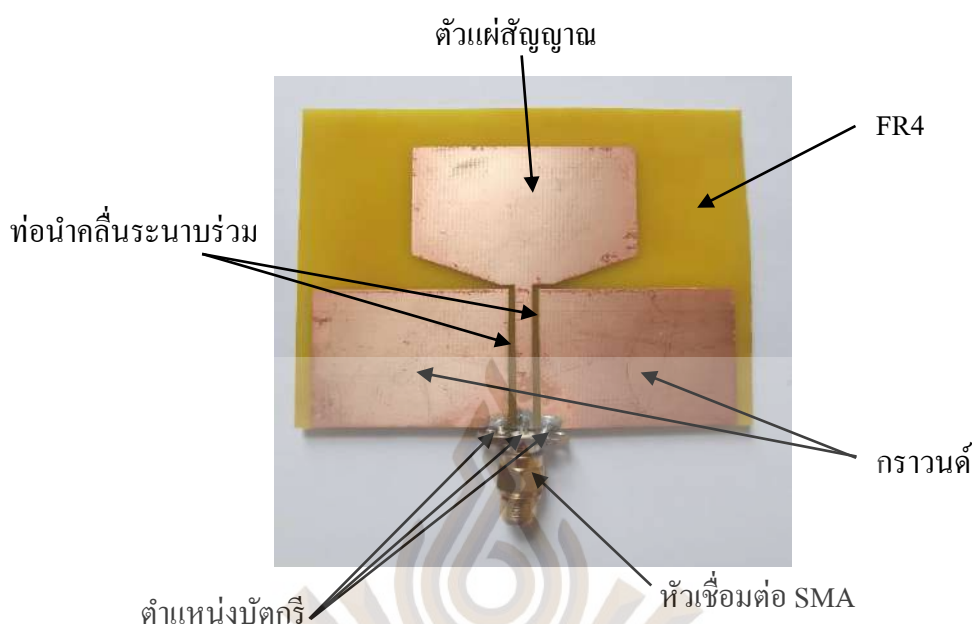
ให้สายอากาศแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีขึ้น กราวนด์มีขนาดกว้าง d ถูกกัดเพื่อสร้างเป็นท่อนำคลื่นระนาบร่วมสำหรับป้อนสัญญาณ ท่อนำคลื่นมีขนาดกว้าง g สตรีปกลางกว้าง s โดยท่อนำคลื่นระนาบร่วมจะเชื่อมต่อกับโมโนโพล อีกด้านหนึ่งเชื่อมต่อกับหัวเชื่อมต่อ SMA (SMA Connector) ณ ตำแหน่งการป้อนสัญญาณ (Feeding Point) โลหะบนผิววัสดุ FR4 คือทองแดงหนาประมาณ 0.05 mm และจะกำหนดให้โมโนโพลนี้กว้าง w สูง l ตามระนาบ xz จากการจำลองสายอากาศมีหลักเกณฑ์การออกแบบคือ

- 1) w มีขนาดใกล้เคียงกับ $l/2$
- 2) c มีขนาดประมาณ $1/3$ ของ w
- 3) ขนาดพารามิเตอร์ท่อนำคลื่นระนาบร่วม g และ s เป็นไปตามหลักการออกแบบที่ได้นำเสนอไปในบทที่ 3

l มีผลต่อความถี่การใช้งาน นั่นคือถ้าต้องการให้ช่วงความถี่ดำเนินการสูงขึ้น จะต้องลดขนาด l ลง และถ้าต้องการให้ช่วงความถี่ดำเนินการต่ำลง จะต้องเพิ่มขนาด l ขึ้น โดย l จะมีขนาดประมาณ $\lambda/2$ เมื่อ λ คือความยาวคลื่น (Wavelength) ของความถี่กลางช่วงความถี่ดำเนินการของสายอากาศนี้ อย่างไรก็ตาม จะต้องปรับขนาดไปพร้อม ๆ กับขนาดของ w ด้วย ซึ่งจะทำให้การเข้ากันได้ของอิมพีแดนซ์และความกว้างแถบคงที่ไม่แคบลง นอกจากนี้การปรับอิมพีแดนซ์ให้เข้ากันของสายอากาศยังสามารถกระทำกับระยะห่าง g ได้อีกพารามิเตอร์หนึ่งด้วย

การป้อนสัญญาณสายอากาศนี้จะป้อนผ่านพอร์ต (Port) หัวเชื่อมต่อ SMA ดังรูปที่ 4.2 โดยแกนใน (Inner Core) ของหัวเชื่อมต่อ SMA จะเชื่อมกับสตรีปด้านในของท่อนำคลื่นระนาบร่วมที่กว้าง s ด้วยการบัดกรีและแกนนอก (Outer) ของหัวเชื่อมต่อ SMA จะเชื่อมต่อกับกราวนด์ของสายอากาศโมโนโพลนี้โดยการบัดกรีเช่นกัน โดยกราวนด์จะมี 2 ด้าน ดังนั้นจะต้องบัดกรี 2 จุด

จากนั้น หัวเชื่อมต่อ SMA ของสายอากาศโมโนโพลจะเชื่อมต่อกับหัวเชื่อมต่อ SMA ของสายส่งแกนร่วม (Coaxial cable) จากรูป หัวเชื่อมต่อ SMA แกนกลางจะเป็นแบบตัวผู้ (Jack) โดยทั้งหัวเชื่อมต่อ SMA ทั้งสองและสายส่งแกนร่วมจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ในทุกความถี่ที่ 50Ω ซึ่งเหมือนกับอิมพีแดนซ์สำหรับใช้ออกแบบสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์นี้



รูปที่ 4.2 การเชื่อมต่อสายอากาศต้นแบบกับสายป้อนสัญญาณผ่านหัวเชื่อมต่อ

4.2 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

ในการทดสอบสายอากาศต้นแบบนั้นจำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ คือ เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) เพื่อนำมาใช้ทดสอบ วัดค่าและวิเคราะห์ผลของสายอากาศต้นแบบ งานวิจัยนี้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายที่ใช้ทดสอบและวัดผล คือ ยี่ห้อ Rohde And Schwarz รุ่น ZVL6 โดยตัวเครื่องสามารถวัดได้ตั้งแต่ช่วงความถี่ 9 kHz ถึง 6 GHz ป้อนสัญญาณด้วยอิมพีแดนซ์ (Impedance) ให้สายอากาศ $50\ \Omega$ สำหรับในการทดสอบสายอากาศโมโนโพล ความถี่กว้างป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมต้นแบบนี้ กำหนดช่วงความถี่ที่ต้องการทดสอบไว้ที่ 1.7 GHz ถึง 5.85 GHz

สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient, Γ) ของสายอากาศ คืออัตราส่วนระหว่างขนาด (Amplitude) ของแรงดันที่สะท้อนกลับมา (Reflected Voltage) ต่อขนาดของแรงดันที่จ่ายให้แก่สายอากาศ (Incident Voltage) ตามสมการที่ (2.1) และ (2.3) โดยจะต้องพิจารณาในความถี่ต่าง ๆ ตามช่วงความถี่ที่เราสนใจ เช่น ในการทดสอบสายอากาศนี้สนใจความถี่สำหรับดำเนินการในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย คือ ย่าน 2.4 GHz และ 5 GHz หรือใช้สำหรับเครือข่าย

โทรศัพท์มือถือ 1.7 GHz, 1.8 GHz, และ 1.9 GHz ดังนั้น ช่วงความถี่ที่พิจารณาจะอยู่ระหว่าง 1.7 – 6.0 GHz เป็นต้น

เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนคืออัตราส่วนระหว่างแรงดันที่สะท้อนกลับต่อแรงดันที่จ่ายให้แก่สายอากาศดังนั้นจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1 โดยถ้าพบว่าค่าที่ได้เข้าใกล้ 0 จะหมายถึงความถี่นั้นมีการสะท้อนกลับมาน้อยมาก สัญญาณจากเครื่องส่งจะถูกส่งผ่านสายอากาศออกไปได้หมดโดยไม่มีการสะท้อนกลับมา ในทางตรงกันข้าม ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของความถี่ใดมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าความถี่นั้นสะท้อนกลับมาหมดไม่สามารถส่งออกไปจากสายอากาศได้ ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่ความถี่ต่าง ๆ เป็นช่วงแล้ว ถ้าพบว่าช่วงความถี่ใดมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อย ก็แสดงว่าช่วงนั้นเป็นช่วงความถี่ดำเนินการของสายอากาศนั้น ซึ่งต้องมีระดับอ้างอิงเป็นตัวตัดสินแบ่งค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนนี้ เช่น 0.2 ดังนั้นถ้าช่วงความถี่ใดมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยกว่า 0.2 จะถือว่าเป็นช่วงความถี่ดำเนินการของสายอากาศนั้น แต่ถ้ามากกว่า 0.2 ก็ถือว่าอยู่นอกความถี่ดำเนินการของสายอากาศนั้น

สังเกตได้ว่าหน่วยของสัมประสิทธิ์การสะท้อน นิยมใช้เป็น เดซิเบล (Decibel, dB) เนื่องจากอัตราส่วนของแรงดันที่สะท้อนกลับมาก่อที่จ่ายให้แก่สายอากาศแต่ละความถี่บางครั้งมีค่าน้อยมาก การแสดงด้วยหน่วยเป็นเดซิเบลจะทำให้เห็นค่าได้ชัดเจนยิ่งขึ้น การทำให้หน่วยเป็นเดซิเบลสามารถทำได้โดย นำค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนทำเป็นค่า $\log$ ฐาน 10 จากนั้นคูณด้วย 20 ก็จะได้หน่วยเป็น dB เช่น

0.1	มีค่าในหน่วยเดซิเบลเป็น	$20 \log_{10} (0.1)$	= -20.00 dB
0.2	มีค่าในหน่วยเดซิเบลเป็น	$20 \log_{10} (0.2)$	= -13.98 dB
0.3	มีค่าในหน่วยเดซิเบลเป็น	$20 \log_{10} (0.3)$	= -10.46 dB
0.4	มีค่าในหน่วยเดซิเบลเป็น	$20 \log_{10} (0.4)$	= -7.96 dB
0.5	มีค่าในหน่วยเดซิเบลเป็น	$20 \log_{10} (0.5)$	= -6.02 dB

ช่วงความถี่ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่น้อยกว่าค่าตัวแบ่งสามารถนำไปหาความกว้างแถบ (Bandwidth) ของสายอากาศได้ เรียกว่าเป็น ช่วงความถี่ดำเนินการของสายอากาศนั้น ปกติแล้ว ในการพัฒนาสายอากาศโดยทั่วไป นิยมใช้ระดับอ้างอิงที่ < -10 dB

4.2.1 หลักการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศในห้องปฏิบัติการทั่วไปแสดงดังรูปที่ 4.3 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนควรวัดในห้องไร้คลื่นรบกวน (Anechoic Chamber) เพราะจะทำให้ปราศจากสัญญาณรบกวนใด ๆ ทำให้เส้นกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนในหน่วยความถี่ราบเรียบดี



รูปที่ 4.3 อุปกรณ์สำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศและลักษณะการเชื่อมต่อ

จากรูปได้ใช้พอร์ต 1 สำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ดังนั้นจะต้องตั้งโปรแกรมการวัดเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเป็นพารามิเตอร์ S_{11} ช่วงความถี่ 1.0 - 6.0 GHz แล้วทำการต่อสายสัญญาณและหัวเชื่อมต่อให้เรียบร้อย จากนั้นทำการสอบเทียบ (Calibration) เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายด้วยชุดสอบเทียบที่ประกอบด้วย short, Open, และ Load โดยเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับทดสอบ ประกอบด้วย

1) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ยี่ห้อ Rohde And Schwarz รุ่น ZVL6 ที่สามารถวัดความถี่ได้ระหว่าง 9 kHz จนถึง 6 GHz (ควรจัดหาเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายที่สามารถวัดความถี่ได้สูงกว่านี้ เช่น 9 GHz, 12 GHz, 20 GHz เป็นต้น)

2) ชุดสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Calibration Kit) ขนาด 3.5 mm ที่ประกอบด้วย Short, Open, และ Load

3) สายนำสัญญาณแบบการสูญเสียน้อย (Low Loss) ชนิดสายส่งแกนร่วม (Coaxial Cable) ความยาว 5 m จำนวน 1 เส้น

4) แท่นสำหรับจับยึดสายอากาศทดสอบ

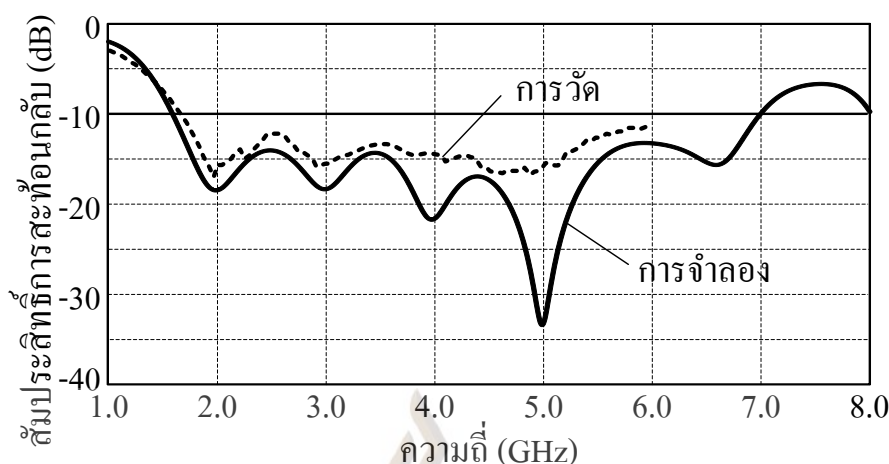
5) หัวเชื่อมต่อชนิดแปลงขนาด (Adapted Connector) จากชนิด N-type เป็น SMA

6) สายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ป้อนโดยท่อนำคลื่นระนาบร่วม

4.2.2 สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่วัดได้เปรียบเทียบกับผลการจำลอง

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากการวัดสายอากาศจริงต้นแบบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสายอากาศเป็นดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 ผลลัพธ์ที่ได้ทั้งคู่มีแนวโน้มเป็นไปในแนวทางเดียวกันและมีความใกล้เคียงกัน ในงานวิจัยนี้ได้พยายามสร้างสายอากาศให้ใกล้เคียงกับขนาดพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้ให้ได้มากที่สุด ดังนั้นการจำลองสายอากาศจึงเป็นแนวทางที่ดีสำหรับสร้างสายอากาศจริง ในรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าเส้นกราฟที่ได้จากการวัดแสดงค่าสูงสุดได้เพียง 6.0 GHz เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย R&S ในห้องปฏิบัติการสามารถวัดค่าความถี่ได้สูงสุดเพียง 6 GHz เท่านั้น

จากการสังเกตเส้นกราฟค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนทั้งคู่ที่ได้ในรูปที่ 4.4 พบว่า การที่โครงสร้างสายอากาศเป็นแบบนี้ ได้ให้ช่วงความถี่ดำเนินการกว้างมาก คือ ตั้งแต่ประมาณ 1.5 GHz ไปจนถึง 7.0 GHz ถ้าพิจารณาจากผลการจำลอง ที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน < -10 dB ส่งผลให้ได้ช่วงความถี่ที่กว้างเพียงพอสำหรับการใช้งานระบบการสื่อสารไร้สายหลายอย่าง เช่น เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) ทั้งสองย่านความถี่ คือ 2.4 GHz และ 5 GHz ที่มีหลายมาตรฐาน ดำเนินการที่ย่านความถี่นี้ไม่ว่าจะเป็น IEEE802.11a/b/g/n/ac/ax เป็นต้น นอกจากนี้ สามารถนำไปใช้กับเครือข่ายโทรศัพท์มือถือ เช่น ระบบ 5G ที่ดำเนินการช่วงความถี่ 1.7 GHz, 2.6 GHz หรือ 3.5 GHz ในอนาคต



รูปที่ 4.4 ผลการวัดและการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศต้นแบบ

จากกราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากการจำลองและการวัดดังรูปที่ 4.4 พบว่าช่วงเริ่มต้นของความถี่ดำเนินการที่ 1.5 GHz ณ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน < -10 dB ผลของการวัดจะเลื่อนไปทางขวาสูงกว่า ความถี่เริ่มต้นที่ได้จากการจำลองเล็กน้อย แต่หลังจากความถี่เริ่มต้นนี้ไปแล้ว การแมตช์ของผลที่ได้จากการวัดจะน้อยกว่าที่ได้จากการจำลอง คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนจะอยู่ที่ประมาณ < -12 dB แต่ของการจำลองจะอยู่ที่ประมาณ < -14 dB สำหรับการศึกษาวิจัยสามารถยอมรับได้ถ้าสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยกว่า -10 dB แต่หากนำไปใช้งานจริงจะต้องปรับปรุงสายอากาศให้มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยกว่า -15 dB จึงจะสามารถนำไปใช้งานจริงได้ แนวโน้มของผลลัพธ์ที่ได้ระหว่างผลการวัดกับการจำลองจะเป็นไปในแนวทางเดียวกัน

4.2.3 ความกว้างแถบ

จากช่วงความถี่ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้ดังในรูปที่ 4.3 สามารถนำไปหาความกว้างแถบ (Bandwidth) ของสายอากาศเป็นช่วงความถี่ดำเนินการ (Operating Frequency) ได้ ในงานนี้ ได้กำหนดให้ความถี่ที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยกว่าระดับอ้างอิงที่ -10 dB และเนื่องจากผลที่ได้ ไม่สามารถเปรียบเทียบความกว้างแถบระหว่างผลการวัดกับการจำลองได้เพราะไม่ทราบจุดสิ้นสุดของผลการวัดที่ระดับอ้างอิง -10 dB ที่มากกว่าความถี่ 6 GHz ได้ ดังนั้นจะได้ความกว้างแถบของการวัดและการจำลองแยกกันดังนี้

1) ความกว้างแถบของการวัด ระหว่างความถี่ 1.6 – 6.0 GHz ที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับน้อยกว่า -10 dB จะได้ความกว้างแถบเป็น 4.4 GHz หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความกว้างแถบความถี่ได้ 115.79% จาก

$$\%BW = \frac{6.0 - 1.6}{(6.0 + 1.6) / 2} \times 100$$

2) ความกว้างแถบของการจำลอง ระหว่างความถี่ 1.5 – 7.0 GHz ที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับน้อยกว่า -10 dB จะได้ความกว้างแถบเป็น 5.5 GHz หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความกว้างแถบความถี่ได้เป็น 129.41% จาก

$$\%BW = \frac{7.0 - 1.5}{(7.0 + 1.5) / 2} \times 100$$

4.3 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน

4.3.1 การจัดวางอุปกรณ์ทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน

การวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) ของสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ป้อนโดยท่อนำคลื่นระนาบร่วมมีการจัดวางและเชื่อมต่อเครื่องมือและอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.4 อุปกรณ์สำหรับทดสอบ ประกอบด้วย

1) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ยี่ห้อ Rohde And Schwarz รุ่น ZVL6 ที่สามารถวัดความถี่ได้ระหว่าง 9 kHz จนถึง 6 GHz

2) สายนำสัญญาณแบบการสูญเสียน้อย (Low Loss) ชนิดสายส่งแกนร่วม ยาว 5 m จำนวน 2 เส้น

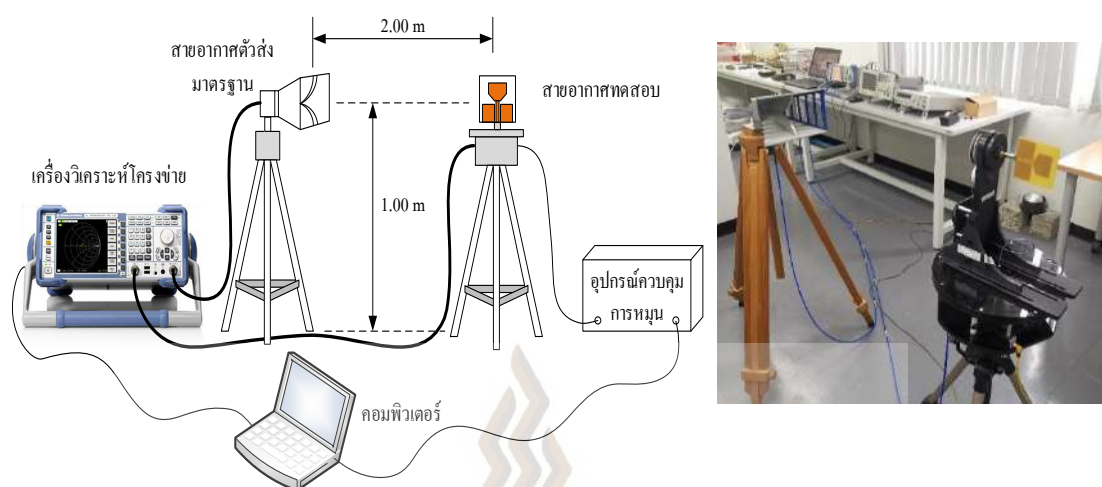
3) สายอากาศตัวส่งมาตรฐานแบบปากแตร (Horn Antenna) สำหรับส่งสัญญาณไปยังสายอากาศตัวรับซึ่งเป็นสายอากาศทดสอบ สายอากาศตัวส่งมาตรฐานจะต้องเป็นสายอากาศที่ทราบอัตราขยาย (Gain) ทุกความถี่การใช้งาน และโดยปกติมักต้องมีช่วงความถี่ดำเนินการที่กว้างให้สามารถนำไปทดสอบกับสายอากาศได้หลายประเภทและหลายความถี่ และมักเป็นสายอากาศที่

โพลาริซ์เป็นเชิงเส้นชัดเจน นอกจากสายอากาศปากแตรแล้ว ยังมีสายอากาศก้างปลา (Log Periodic Antenna) ที่นิยมนำมาใช้เป็นสายอากาศอีกชนิดหนึ่ง

- 4) แท่นสำหรับจับยึดสายอากาศตัวส่งมาตรฐาน
- 5) แท่นหมุน (Turn Table) สำหรับจับยึดสายอากาศทดสอบเพื่อหมุน โดยจะต้องสามารถหมุนได้ 0 - 360 องศา แนวนอนหรือแนวตั้ง
- 6) อุปกรณ์ควบคุมการหมุน
- 7) คอมพิวเตอร์
- 8) หัวเชื่อมต่อนิตต่าง ๆ เช่น N-type, SMA เป็นต้น
- 9) สายอากาศทดสอบ สายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ป้อนโดยท่อนำคลื่นระนาบร่วม

การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ป้อนโดยท่อนำคลื่นระนาบร่วมนั้น ได้ใช้เครื่องมือสำหรับทดสอบเป็นเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายยี่ห้อ Rohde and Schwarz รุ่น ZVL6 สามารถวัดความถี่เริ่มต้นที่ 9 kHz และความถี่สิ้นสุดที่ 6 GHz ซึ่งรองรับความถี่ที่ต้องการทดสอบ เป็นตำแหน่งความถี่ ต่ำ กลางและสูงของความถี่ดำเนินการหรือที่ 1.75 GHz, 3.75 GHz และ 5.75 GHz ตามลำดับ

โดยสายอากาศมาตรฐาน (Standard Antenna) สำหรับส่งสัญญาณเป็นสายอากาศแบบปากแตร ในขณะที่สายอากาศตัวรับสัญญาณเป็นสายอากาศทดสอบ คือสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ป้อนโดยท่อนำคลื่นระนาบร่วมซึ่งจะถูกต่อเข้ากับแท่นหมุน (Turn Table) ที่สามารถหมุนได้ 0 - 360 องศา ทั้งแนวตั้ง (Vertical) และแนวระดับ (Horizontal) ควบคุมโดยอุปกรณ์ควบคุมการหมุนผ่านคอมพิวเตอร์ ระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งและสายอากาศทดสอบคือ 2 m ซึ่งถือว่าองค์ประกอบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแบบระยะไกล (Far Field) แล้ว และสายอากาศทั้งสองวางอยู่เหนือพื้น 1 m ในห้องไร้คลื่นรบกวน



รูปที่ 4.5 อุปกรณ์และการจัดวางสำหรับวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน

4.3.2 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศทดสอบ

การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ป้อนโดยท่อนำคลื่นระนาบร่วมจะแบ่งเป็น 2 ระนาบ คือ ระนาบ xz หรือระนาบ E (E Plane) และระนาบ xy หรือระนาบ H (H Plane) ตามพิภพที่ 3.6 โดยเป็นการวัดแบบโพลาไรซ์ร่วม (Co-Polarization)

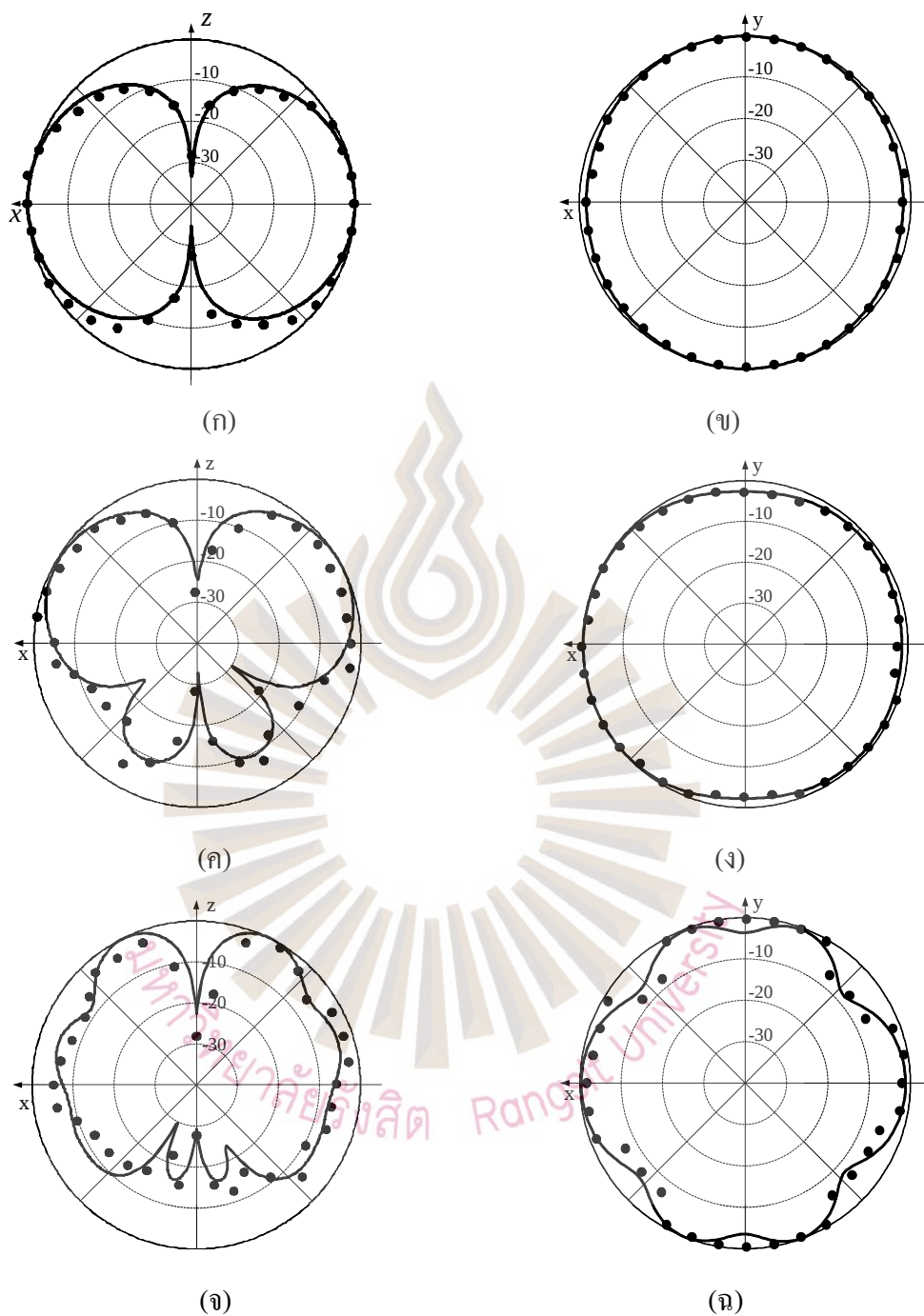
แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ได้จากการจำลองและการวัดจากสายอากาศจริง ณ ความถี่ ต่ำ กลางและสูงของความถี่ดำเนินการ หรือที่ 1.75 GHz, 3.75 GHz และ 5.75 GHz แสดงดังรูปที่ 4.6 เมื่อรูป (ก), (ค), และ (จ) คือระนาบ xz หรือระนาบสนามไฟฟ้า E ส่วนรูป (ข), (ง), และ (ฉ) คือระนาบ xy หรือระนาบสนามแม่เหล็ก H โดยเทียบระนาบอ้างอิงจากรูปที่ 3.6 ดังนั้นจะได้ว่ารูป (ก) คือระนาบ xz ความถี่ 1.75 GHz รูป (ข) คือระนาบ xy ความถี่ 1.75 GHz รูป (ค) คือระนาบ xz ความถี่ 3.75 GHz รูป (ง) คือระนาบ xy ความถี่ 3.75 GHz รูป (จ) คือระนาบ xz ความถี่ 5.75 GHz และรูป (ฉ) คือระนาบ xy ความถี่ 5.75 GHz โดยในแต่ละรูปเส้นทึบคือผลการจำลองและจุดคำคือผลการวัดทุก 10°

จากผลที่ได้พบว่า แม้สายอากาศนี้จะให้แถบความถี่ดำเนินการที่กว้าง แต่แบบรูปการแผ่พลังงาน ทั้งที่ความถี่ต่ำ 1.75 GHz, ความถี่กลาง 3.75 GHz และที่ความถี่สูง 5.75 GHz จะเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ แต่ก็ยังแผ่พลังงานแบบโคจรอบ (Omni Directional) โดยสังเกตเรียงลำดับระนาบ xz จากรูป (ก) ไป (ค) และไป (จ) และในระนาบ xy จากรูป (ข) ไป (ง) และไป (ฉ) ซึ่งเป็นสนามระนาบเดียวกันแต่ต่างความถี่กันที่ความถี่ต่ำ 1.75 GHz ทั้งระนาบ xz และ xy แบบรูปการแผ่พลังงานจะมีความสมมาตรดีและแผ่คลื่นแบบโคจรอบอย่างสม่ำเสมอทุกทิศทางคล้ายโดนัท แม้ว่าสายอากาศจะเป็นแผ่นบาง แต่ที่ความถี่สูงขึ้นเช่นที่ 5.75 GHz จะเริ่มไม่สมมาตร เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากวัสดุฐานรอง FR4 และจากโครงสร้างของสายอากาศที่มีความกว้าง

เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานระหว่างผลการจำลองและการวัด พบว่าที่ความถี่ต่ำ 1.75 GHz ทั้งระนาบ xz และ xy แบบรูปการแผ่พลังงานจะไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เพราะสัญญาณ ความถี่ต่ำนี้มีความชัดเจนสม่ำเสมอโคจรอบ แต่สังเกตว่าที่ความถี่สูง 3.75 GHz และ 5.75 GHz ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานจะแตกต่างจากการคำนวณพอสมควร เพราะสัญญาณเริ่มไม่สม่ำเสมอโคจรอบ ณ ความถี่สูงนี้ ซึ่งตำแหน่งที่วัดค่าแตกต่างกันจะอยู่บริเวณทิศทางที่สัญญาณเบา (Null) นอกจากนี้อาจได้รับผลจากส่วนอื่น ๆ ที่เป็นความต่างระหว่างการวัดจริงกับการจำลอง เช่น การวัดจริงจะต้องต่อสายสัญญาณไปสู่เครื่องมือวัด ส่วนการจำลองไม่ได้จำลองสายสัญญาณการวัดแต่อย่างใด

สำหรับระนาบ xz สามารถหาความกว้างลำครึ่งกำลัง (HPBW) ตามรูปที่ 2.7 ได้เท่ากับ 99° , 57° , 30° ณ ความถี่ 1.75 GHz, 3.75 GHz, และ 5.75 GHz ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.6(จ) แม้ว่าสัญญาณจากสายอากาศจะแรงที่สุดที่มุม 60° จากแนวระดับ แต่ที่ระหว่างมุม 0° - 15° ทั้ง 2 ทิศทางในแกน $-x$ และ $+x$ ยังพอมีพลังงานแผ่ออกมา ซึ่งเป็นข้อดีของสายอากาศนี้เพราะสามารถนำไปใช้งานจริงได้ อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 4.6(ฉ) ความแรงของสายอากาศที่มุม 45° , 135° , 225° , 315° พบว่าอัตราขยายสายอากาศมีค่าลดลง < 6 dB ซึ่งมากกว่า 3 dB หรือครั้งหนึ่งแสดงว่าสัญญาณไม่ได้แผ่ออกโคจรอบ แต่เป็นการแตกลำคลื่นออกเป็นหลายลำ อย่างไรก็ตาม ณ ทั้ง 4 ทิศทางที่สัญญาณอ่อนนั้นยังพอมีสัญญาณอยู่ มิใช่มุมอับที่สัญญาณขาดหายไป (Null) ดังนั้น ณ ความถี่ดังกล่าวนี้ยังสามารถใช้งานได้อยู่ในกรณีที่ต้องการให้สัญญาณแผ่ออกโคจรอบ แต่ถ้าใช้งานที่ความถี่มากกว่านี้ สัญญาณที่มุมทั้ง 4 จะยิ่งอ่อนลง ไม่เหมาะใช้งานจริง



รูปที่ 4.6 แบบรูปการแผ่พลังงานโพลาริซร่วมสายอากาศโมนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์
ที่ป้อนโดยท่อนำคลื่นระนาบร่วม เส้นทึบคือผลการจำลอง จุดคือผลการวัดทุก 10° (ก) ระนาบ xz
ความถี่ 1.75 GHz (ข) ระนาบ xy ความถี่ 1.75 GHz (ค) ระนาบ xz ความถี่ 3.75 GHz
(ง) ระนาบ xy ความถี่ 3.75 GHz (จ) ระนาบ xz ความถี่ 5.75 GHz
(ฉ) ระนาบ xy ความถี่ 5.75 GHz

4.4 ผลการวัดอัตราขยายสายอากาศ

4.4.1 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับวัดอัตราขยาย

การวัดอัตราขยายสายอากาศ (Antenna Gain) ของสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ป้อนโดยท่อนำคลื่นระนาบร่วม มีการจัดวางและเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 4.7 เครื่องมือสำหรับทดสอบ ประกอบด้วย

- 1) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ยี่ห้อ Rohde And Schwarz รุ่น ZVL6 ที่สามารถวัดความถี่ได้ระหว่าง 9 kHz จนถึง 6 GHz
- 2) สายนำสัญญาณแบบสูญเสียน้อย (Low Loss) ชนิดแกนร่วมยาว 5 m จำนวน 2 เส้น
- 3) สายอากาศตัวส่งมาตรฐาน ในการทดสอบนี้ใช้สายอากาศปากแตร (Horn Antenna)
- 4) แท่นสำหรับจับยึดสายอากาศตัวส่งและสายอากาศทดสอบ
- 5) หัวเชื่อมต่อชนิดต่าง ๆ เช่น N-type, SMA สำหรับเชื่อมต่อสายสัญญาณกับสายอากาศ
- 6) สายอากาศทดสอบโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ป้อนโดยท่อนำคลื่นระนาบร่วม

การวัดอัตราขยายสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ป้อนโดยท่อนำคลื่นระนาบร่วมนี้ ใช้เครื่องมือสำหรับทดสอบคล้ายกับการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน แต่มีต่างที่การทดสอบอัตราขยายสายอากาศไม่ต้องมีการหมุนสายอากาศตัวทดสอบโดยรอบ เพราะการทดสอบจะหันด้านที่ปล่อยพลังงานออกมาของสายอากาศแรงที่สุดไปยังสายอากาศตัวรับ ดังนั้นอุปกรณ์จึงเป็นดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับทดสอบวัดอัตรายายสายอากาศ

ได้กำหนดให้ระยะระหว่างสายอากาศมาตรฐานตัวส่งและสายอากาศทดสอบห่างกัน 2 m ซึ่งเป็นระยะที่ถือว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นระยะไกล (Far Field) แล้ว และสายอากาศทั้งสองวางอยู่บนแท่นเหนือพื้น 1 m ในห้องไร้คลื่นรบกวน โดยระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและทดสอบนี้จะถูกนำไปคำนวณหาค่าการสูญเสียที่เกิดจากกระยะทาง (Free Space Loss) โดยเป็นที่ทราบกันว่าอัตรายายสายอากาศหาได้จากการทดสอบเท่านั้น ส่วนการหาทางทฤษฎีจะใช้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางแทน โดยอัตรายายสายอากาศหาได้จากสมการการส่งผ่านของฟรีส (Fris Transmission Equation) ตามสมการที่ (2-20) – (2-23)

4.4.2 ผลอัตรายายสายอากาศ

การวัดอัตรายายสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ป้อนโดยท่อนำคลื่นระนาบร่วมจะกระทำเมื่อจัดวางสายอากาศตัวส่งและตัวทดสอบให้เป็นแบบโพลาริซั่มร่วม (Co-Polarization) โดยมีการวัดแล้วนำมาคำนวณ 3 ความถี่ คือ 1.75 GHz, 3.75 GHz, และ 5.75 GHz

ที่ความถี่ 1.75 GHz พบว่าอัตรายายสายอากาศมีค่าที่ 2.6 dBi เป็นช่วงที่อัตรายายขึ้นอยู่กับการสะท้อนที่มาจากความสูงของโมโนโพลเป็นหลัก ค่าที่ได้ไม่ต่างไปจากโมโนโพลทั่วไป

ที่ความถี่ 3.75 GHz พบว่าอัตราขยายสายอากาศมีค่าที่ 4.7 dBi เป็นช่วงที่อัตราขยายเริ่มสูงขึ้น เป็นช่วงความถี่ที่อัตราขยายขึ้นอยู่กับกระแสในช่องเปิดเพียง ทิศทางการชี้ของแบบรูปการแผ่พลังงานเริ่มยกสูงขึ้นจากแนวระดับไปที่ประมาณ 40° ขณะที่ ณ ความถี่ 5.75 GHz พบว่าอัตราขยายสายอากาศมีค่าที่ 6.0 dBi เป็นช่วงที่อัตราขยายสูงขึ้นมากเป็น 2 เท่าจากความถี่ 1.75 เป็นช่วงที่อัตราขยายขึ้นอยู่กับกระแสในช่องเปิดเพียงเช่นกัน ทิศทางการชี้ของแบบรูปการแผ่พลังงานเริ่มยกสูงขึ้นจากแนวระดับไปมากขึ้นที่ประมาณ 60° แต่จะแหลมมากขึ้น ทำให้อัตราขยายมากขึ้น

จากผลของอัตราขยายสายอากาศทั้ง 3 ความถี่ ทำให้ทราบว่าสายอากาศนี้อัตราขยายจะสูงเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น โดยทิศทางที่สัญญาณพุ่งออกจากสายอากาศแรงที่สุดสำหรับหาอัตราขยายจะยกสูงขึ้น

4.5 สรุป

เนื้อหาบทนี้ได้นำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้าง ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมและผลการวัดจากสายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้น พบว่าผลลัพธ์การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่น้อยกว่า -10 dB มีความกว้างแถบความถี่ดำเนินการมากกว่า 115.79% หรือ 4.4 GHz ระหว่าง 1.6 – 6.0 GHz

จากผลการทดสอบสายอากาศนี้ ทำให้พบว่าสายอากาศได้ให้ความกว้างแถบที่กว้างมาก ดังนั้นแบบรูปการแผ่พลังงานตั้งแต่ความถี่ต่ำไปจนถึงความถี่สูงของช่วงความถี่ดำเนินการจะเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ แต่ก็ยังแผ่พลังงานแบบโดยรอบ (Omni-Directional) อยู่ สังเกตจากแบบรูปการแผ่พลังงานเรียงลำดับความถี่จากต่ำไปสูงรูปที่ 4.6 ระนาบ xz โดยสามารถหาความถี่กว้างลำครึ่งกำลังได้เท่ากับ 99° , 57° , 30° ณ ความถี่ 1.75 GHz, 3.75 GHz, และ 5.75 GHz ตามลำดับ และ ณ ที่ความถี่ทั้ง 3 เดียวกันนี้ สามารถหาอัตราขยายสายอากาศได้เป็น 2.6 dBi, 4.7 dBi และ 6.0 dBi ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบ การปรับอิมพีแดนซ์ด้วยการตัดมุมและลดขนาดของตัวแผ่สัญญาณสำหรับสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม สายอากาศนี้ให้ความถี่ช่วง 1.71 GHz ถึง 5.85 GHz เป็นสายอากาศที่สร้างจากตัวนำบนผิวแผ่นวงจรพิมพ์ชนิดเอพาร์ 4 ด้านเดียว ที่มีความหนา 1.6 mm รูปร่างของอิลิเมนต์แผ่คลื่นเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดย 2 มุมด้านล่างที่ติดกับระนาบกราวด์ถูกตัดออกเพื่อปรับอิมพีแดนซ์กราวด์ถูกกัดเพื่อสร้างเป็นท่อนำคลื่นระนาบร่วมสำหรับป้อนสัญญาณ สายอากาศจะถูกจำลองด้วยโปรแกรมก่อน จากนั้นจึงสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้น สายอากาศแผ่คลื่นแบบโดยรอบคล้ายรูปร่างของโดนัทที่ความถี่ดำเนินการช่วงต่ำและรูปร่างจะเปลี่ยนไปที่ความถี่ดำเนินการสูงขึ้นแต่ก็ยังคงแผ่คลื่นแบบโดยรอบ ความกว้างแถบของสายอากาศนี้มากกว่า 115.79% ระหว่าง 1.6 GHz ถึง 6 GHz ที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับน้อยกว่า -10 dB ตลอดย่านความถี่ อัตราขยายสายอากาศ คือ 2.6, 4.7, และ 6.0 dBi ความกว้างลำคลื่นกำลังได้เท่ากับ 99°, 57°, 30° ณ ความถี่ 1.75, 3.75 และ 5.75 GHz ตามลำดับ ซึ่งเป็นตำแหน่งต่ำ กลาง และสูง ในช่วงความถี่ดำเนินการ ข้อดีของสายอากาศนี้คือ เป็นสายอากาศที่ให้แถบความถี่ดำเนินการกว้าง โครงสร้างไม่ซับซ้อน น้ำหนักเบา และสามารถสร้างด้วยเอพาร์ 4 ทำให้เป็นสายอากาศต้นทุนต่ำ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในระบบเครือข่ายไร้สายได้หลายระบบ

สายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมที่มีการปรับจูนขนาดของพารามิเตอร์ของสายอากาศ โดยเทคนิคที่นำมาใช้ในการปรับจูนขนาดตัวแผ่สัญญาณของสายอากาศ คือการเซาะผิวทองแดงเพื่อปรับโครงสร้างของตัวแผ่ของสายอากาศ ทำให้แบนด์วิดท์และผลของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศดี และกว้างมากขึ้น ด้วยหลักการออกแบบสายอากาศตามที่ได้กล่าวไว้ การจำลองสายอากาศจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถเป็นแนวทางในการสร้างสายอากาศได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม การจำลองจะมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถจำลองได้

เหมือนจริงทุกประการ ทำให้ต้องละเว้นบางอย่างไป ดังนั้น ผลที่คลาดเคลื่อนไประหว่างที่ได้จากการจำลองและจากการวัดจริงเป็นเรื่องที่สามารถเกิดขึ้นได้ ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ถูกกำหนดไว้ดังตารางที่ 4.1 เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับใช้ทั้งในการจำลองและการสร้างสายอากาศต้นแบบ เพื่อแสดงให้เห็นผลลัพธ์ที่ได้ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ จึงได้แสดงการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ เพื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและการวิเคราะห์ โดยเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ใดพารามิเตอร์อื่น ๆ จะถูกคงค่าไว้เหมือนเดิม

แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม พบว่า เนื่องจากสายอากาศมีความกว้างแถบมาก แบบรูปการแผ่พลังงานในช่วงความถี่ดำเนินการจะเปลี่ยนไปเรื่อยๆ ในช่วงความถี่ต่ำ แบบรูปการแผ่พลังงานยังคงรูปทรงกลมคล้ายโดนัทรอบตัวสายอากาศ ในระนาบ xy แต่ในช่วงความถี่ที่สูงขึ้นในช่วงความถี่ใช้งาน ที่ทำการทดสอบและวัด แบบแบบรูปการแผ่พลังงานจะเริ่มไม่สมมาตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบสายอากาศ โดยใช้โปรแกรมในการออกแบบบางส่วน ถือว่ามีความสะดวกรวดเร็วประหยัดเวลาที่ใช้ในการคำนวณได้ดีแต่ต้องระวังเรื่องการใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในโปรแกรมเนื่องจากในโปรแกรมมีความละเอียดมาก ดังนั้นในสายอากาศต้นแบบที่สร้าง พารามิเตอร์อาจคลาดเคลื่อน ทำให้ผลการวัดแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง

การปรับจูนโครงสร้างของสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองต้องศึกษารูปแบบการเจาะรูธงในรูปทรงต่างๆ เช่น เจาะเป็นรูป ทรงสี่เหลี่ยม ทรงกลม หรือ เจาะรูธงที่ระนาบกราวด์ เพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ของสายอากาศ

การสร้างสายอากาศต้นแบบต้องเลือกหาวัสดุที่ใช้สร้างที่ถูกต้องเหมาะสมและต้องใช้การวัดขนาดที่ต้องมีความแม่นยำและละเอียดมาก เพื่อให้ผลการวัดสายอากาศต้นแบบใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้ด้วยโปรแกรมจำลองคอมพิวเตอร์

การทดสอบสายอากาศต้นแบบต้องศึกษารูปแบบการทดลอง การตั้งค่า การใช้งาน ต้องมีการวางแผนการทำงานให้ดี เพื่อให้ได้ผลที่ดีที่สุด แต่ผลที่ไม่ดีนั้นเนื่องจากการทดสอบนั้นไม่ได้ทดสอบในห้องไร้การสะท้อน (Anechoic Chamber) ทำให้มีคลื่นความถี่อื่นมาปะปนได้ง่าย



บรรณานุกรม

- กัญญ์พิชญา ตั้งสกุลเดิม (2560). การศึกษาสายอากาศโคโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์แถบความถี่กว้าง (Unpublished Master's thesis). มหาวิทยาลัยรังสิต, ปทุมธานี.
- ชนพนธ์ สุรินทร์, และดวงอาทิตย์ ศรีมูล. (2564, มีนาคม). การปรับอิมพีแดนซ์ด้วยการตัดมุม สำหรับสายอากาศโมโนโพลความถี่กว้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติมหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ.
- เทพ เกื้อทวีกุล.(2560). การออกแบบสายอากาศช่องเปิดหลายความถี่ที่ป้อนด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมสำหรับระบบการสื่อสาร โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย. การประชุมวิชาการระดับชาติ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร, 4, 1366 - 1374.
- บัณฑิต ไรจน์อารยานนท์. (2559). วิศวกรรมไมโครเวฟ(Microwave Engineering) (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประกาศิต ดันตือลงการ, และ จีระศักดิ์ ช่างชัย. (2551). การศึกษารูปแบบของสัดับในสายอากาศ ร่องสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, 4(1), 11-16.
- รังสรรค์ วงศ์สรณ์. (2556). วิศวกรรมสายอากาศ (พิมพ์ครั้งที่ 3). นครราชสีมา: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ระพีพันธ์ ขัดปิก, เอกทัศน์ พุกขวรรณ, และเกษมสันต์ มณีสด. (2559). การออกแบบและสร้างสายอากาศทรงกลมสองย่านความถี่สำหรับ WLAN. วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 9(1), 44-45.
- วัชรพล นาคทอง, อำนวย เรืองวาริ, และ รัชชัย พุ่มพวง. (2563). การศึกษาการปรับสายอากาศโมโนโพลรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับแถบความถี่กว้างยิ่งยวด. Naresuan University Engineering Journal, 15(1), 17-32.
- วัชรพล นาคทอง, อำนวย เรืองวาริ, อภิญา อินทร์นอก, สุภาธิณี กรสิงห์, และ นุชนาฏ ฝาเพี้ย. (2017). สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปลูกข้างโดยใช้วัสดุฐานรองโพลีเอสเตอร์สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่แถบกว้าง. วารสารเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า, 1(2), 35-40 .
- วิวัฒน์ สิทธิกุล, และ ปาสิรัตน์ วงจำปา. (2563). วิศวกรรมสายอากาศ(Antenna Engineering) (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน).

บรรณานุกรม(ต่อ)

- วีรศักดิ์ แก้วศรีดำ. (2555). การศึกษาการออกแบบสายอากาศแบบระนาบ สำหรับการสื่อสารไร้สาย ด้วยเทคนิคการเซาะร่อง และการปรับจูนสลับ (Master's thesis). สืบค้นจาก <http://www.repository.rmutt.ac.th/dspace/handle/123456789/2275>
- Agrawall, N. P., Kumar, G., & Ray, K. P. (1998). Wide-Band Planar Monopole Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 46(2), 294-295. doi: 10.1109/8.660976
- Hassani, H. R., & Mazinani, S. M. (2010). Wideband planar plate monopole antenna, Zhurbenko, V. (Eds.) *Passive Microwave Components and Antennas*, (pp. 23-512). Retrieved from <http://www.intechopen.com/books/passive-microwave-components-and-antennas/wideband-planar-plate-monopole-antenna>
- Hefei Topwave Telecom Co.,ltd, (2020). เสาอากาศ Omni DAS ในร่ม UHF 450-470MHz. Retrieved from <https://thai.topwavecomm.com/RF-Systems-loftnet/450-470mhz-uhf-indoor-omni-das-antenna#images-1>.
- Chen, O. T.-C., & Tsai C.-Y. (2011). CPW-Fed Wideband Printed Dipole Antenna for Digital TV Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59(12), 4826-4830. Doi: 10.1109/TAP.2011.2165488
- Chen, Z. N., Ammann, M. J., Qing, X., Wu, X. H., See, T. S. P., & Cai, A. (2006). Planar Antenna. *IEEE Microwave Magazine*, 7(6), 63-73. doi: 10.1109/MW-M.2006.250315
- Singh, A. K., & Tripathy, M. R. (2018). M Shaped Ultra Wide Band Monopole Antenna for TVWS CPE. *2018 5th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*. doi: 10.1109/SPIN.2018.8474241
- Surin, C., Srimoon, D., & Mearnchu, J. (2020). A Wideband Printed Monopole Antenna with a Co-Planar Waveguide Feeding. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 965(1). doi:10.1088/1757-899X/965/1/012036
- Valderas, D., Álvarez, R., Meléndez, J., Gurutzeaga, I., Legarda, J., & Juan, I. S. (2008). UWB Staircase-Profile Printed Monopole Design. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 7, 255-259. doi: 10.1109/LAWP.2008.921364

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	ชนพนธ์ สุรินทร์
วัน เดือน ปีเกิด	22 มิถุนายน 2532
สถานที่เกิด	จังหวัดสิงห์บุรี ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	มหาวิทยาลัยรังสิต ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ , 2555
ทุนการศึกษา	ทุนการศึกษาสำหรับบุคลากรมหาวิทยาลัยรังสิต
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 95/30 หมู่ 5 ตำบล คูคต อำเภอ ลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12130
สถานที่ทำงาน	มหาวิทยาลัยรังสิต เลขที่ 52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถ.พหลโยธิน ต.หลักหก อ.เมือง จ.ปทุมธานี 12000
ตำแหน่งปัจจุบัน	วิศวกรระบบโครงข่าย

