



การศึกษาและออกแบบสายอากาศยาภิ-อูตะสองย่านความถี่
บนแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยรังสิต

ปีการศึกษา 2566



**STUDY AND DESIGN OF PRINTED DUAL-BAND YAGI-UDA ANTENNA
FOR WIRELESS LOCAL AREA NETWORK**



**BY
SOMPONGPINIT SUWANNACHART**

**A THISIS 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

การศึกษาและออกแบบสายอากาศยาคี-ฮูตสองย่านความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับเครือข่าย
ท้องถิ่นไร้สาย

โดย

สมพงษ์ พิณิจ สุวรรณชาติ

ได้รับการพิจารณาให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยรังสิต

ปีการศึกษา 2566

รศ. ดร. เอกรัฐ บุญงา
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 DUAL-BAND YAGI-UDA ANTENNA FOR
WIRELESS LOCAL AREA NETWORK**

by

SOMPONGPINIT SUWANNACHART

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. Plt. Off. Vannee Sooksatra, D.Eng.)

Dean of Graduate School

August 8, 2023

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้เป็นอย่างดีเนื่องมาจากได้รับความอนุเคราะห์จาก รศ. ดร. ดวงอาทิตย์ ศรีมูล อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยรังสิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการให้คำปรึกษา แนะนำ ชี้แนะข้อบกพร่องที่ผู้วิจัยมองข้ามและให้กำลังใจ ตลอดจนฝึกฝนและสนับสนุนผู้วิจัยให้มีความสามารถในการทำวิทยานิพนธ์จนสามารถนำเสนอผลงานให้เป็นที่รู้จักและยอมรับได้

ขอบคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่สั่งสอนและให้ความรู้มาโดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

สมพงษ์พินิจ สุวรรณชาติ

ผู้วิจัย



6006129 : สมพงษ์พินิจ สุวรรณชาติ
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การศึกษาและออกแบบสายอากาศวิทยิ-อุตะสองย่านความถี่บน
 แผ่นวงจรพิมพ์สำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย
 หลักสูตร : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณัฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
 อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ดวงอาทิตย์ ศรีมูล

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอสายอากาศวิทยิ-อุตะสองย่านความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่ครอบคลุมความถี่ช่วง 2.400 – 2.483 GHz และ 5.15 – 5.85 GHz เมื่อองค์ประกอบของสายอากาศสร้างจากตัวนำแผ่นบางบนผิวแผ่นวงจรพิมพ์ชนิดเอพอาร์ 4 ด้านเดียว ที่มีความหนา 1.6 mm สายอากาศมี 6 อิลิเมนต์ ประกอบด้วย 1 ตัวสะท้อน, 2 ไดโพลตัวขับ, 1 ตัวชี้ทิศทาง, และ 2 อิลิเมนต์ยึดเกาะ ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้มีการคัปปลิงเกิดย่านความถี่ 5 GHz ขึ้น สายอากาศนี้ป้อนโดยสายส่งแกนร่วมซึ่งจะทำให้สายอากาศแมตซ์ดีและง่ายในการสร้างใช้จริง สายอากาศจะถูกจำลองด้วยโปรแกรมก่อน จากนั้นจึงสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้น สายอากาศนี้ให้การแผ่คลื่นแบบชี้ทิศทาง โดยมีอัตราขยาย 5.9, 5.5, และ 6.8 dBi ณ ความถี่ 2.44, 5.15, และ 5.85 GHz ตามลำดับ สายอากาศนี้ให้ความถี่ครอบคลุม 2 ย่าน ที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับน้อยกว่า -15 dB ขนาดสายอากาศเมื่อไม่มีการห่อหุ้มคือ 80.0 mm x 55.0 mm หนา 5.2 mm ข้อดีของสายอากาศนี้คือ เป็นสายอากาศแบบชี้ทิศทางที่ชี้ไปในทิศทางเดียวกันทั้งสองแถบความถี่ดำเนินการ โครงสร้างไม่ซับซ้อน น้ำหนักเบา เพราะสร้างโดยเอพอาร์ 4 ทำให้เป็นสายอากาศต้นทุนต่ำ

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 88 หน้า)

คำสำคัญ: สายอากาศวิทยิอุตะ แผ่นวงจรพิมพ์เอพอาร์ 4 สองย่านความถี่ เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย อิลิเมนต์ยึดเกาะ

6006129 : Sompongpinit Suwannachart
 Thesis Title : Study and Design of Printed Dual-band Yagi-Uda Antenna for Wireless Local Area Network
 Program : Master of Engineering in Electrical and Computer Engineering
 Thesis Advisor : Assoc. Prof. Duang-arthit Srimoon, D. Eng

Abstract

This paper presents printed dual-band Yagi-Uda antenna for wireless local area network. It covered the frequency ranges of 2.400 – 2.483 GHz and 5.15 – 5.85 GHz. Elements of the antenna were constructed from a flat conductor on the surface of single side FR4 printed circuit board with a thickness of 1.6 mm. There are 6 elements, i.e., 1 reflector, 2 driven poles, 1 director, and 2 parasitic elements causing the coupling occurring in the 5 GHz frequency band. Coaxial feeding makes the antenna good at matching and easy to assemble into fabrication. For this work, the antenna is simulated by using a computer program before fabricating a prototype. The antenna provides unidirectional radiation with the gains of 5.9, 5.5, and 6.8 dBi at the operating frequencies of 2.44, 5.15, and 5.85 GHz. The antenna gives the bandwidth coverage with the reflection coefficient less than -15 dB across both bands. The size of the antenna without a radome is 80.0 mm x 44.0 mm and the thickness of 5.2 mm. The advantages of the antenna are both operating frequencies radiate in the same direction with low profile structure and light weight because it is fabricated from FR 4; therefore, it is a low-cost antenna.

(Total 88 pages)

Keywords: Yagi-Uda Antenna, FR 4 Printed Circuit Board, Dual-Band, Wireless Local Area Network, Parasitic Elements

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
	3
1.3	สมมติฐานการวิจัย
	3
1.4	ขอบเขตของการวิจัย
	4
1.5	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
	4
1.6	แนวทางการดำเนินงาน
	4
1.7	ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์
	5
บทที่ 2	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
	7
2.1	บทนำ
	7
2.2	สายอากาศ
	7
2.3	พารามิเตอร์มูลฐานของสายอากาศ
	9
2.3.1	แบบรูปการแผ่พลังงาน
	9
2.3.2	ความกว้างลำคลื่น
	12
2.3.3	สถาพเจาะจงทิศทาง
	13
2.3.4	อัตราขยาย
	18
2.3.5	แบนด์วิดท์
	20
2.3.6	โพลาไรเซชัน
	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.7 อินพุทอิมพีแดนซ์	24
2.3.8 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของสายอากาศ	25
2.4 สายอากาศไดโพล	25
2.5 สายอากาศยาเก-อูดะ	28
2.5.1 ประวัติความเป็นมา	28
2.6 คุณสมบัติของ FR4	32
2.6.1 สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric Properties)	32
2.6.2 ทฤษฎีพื้นฐานของการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า	36
2.7 โปรแกรม CST Studio Suite	40
บทที่ 3 การออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศ	42
3.1 บทนำ	42
3.2 การศึกษาค้นคว้า	42
3.3 การออกแบบสายอากาศไดโพลแถบความถี่คู่	43
3.3.1 ย่านความถี่ 2.4 GHz	44
3.3.2 ย่านความถี่ 5 GHz	46
3.4 การออกแบบสายอากาศยาเก-อูดะแถบความถี่คู่	52
3.4.1 การเพิ่มตัวสะท้อน	53
3.4.2 การเพิ่มตัวชี้ทิศทาง	57
3.4.3 การปรับปรุงโครงสร้างสายอากาศยาเก-อูดะแถบความถี่คู่	60
บทที่ 4 การทดสอบสายอากาศ	67
4.1 บทนำ	67
4.2 สายอากาศต้นแบบ	67
4.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนและความกว้างแถบ	71
4.3.1 วิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน	72
4.3.2 สัมประสิทธิ์การสะท้อน	73

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.3 ความกว้างแถบ	74
4.4 แบบรูปการแผ่พลังงาน	75
4.4.1 การจัดวางอุปกรณ์ทดสอบสายอากาศด้านแบบรูปการแผ่พลังงาน	75
4.4.2 แบบรูปการแผ่พลังงาน	76
4.5 อัตราขยายสายอากาศ	78
4.5.1 การจัดวางอุปกรณ์ทดสอบสายอากาศด้านอัตราขยาย	78
4.5.2 ผลอัตราขยายสายอากาศ	80
4.6 การทดสอบใช้งานอุปกรณ์จริง	81
4.6.1 เงื่อนไขและขอบเขตการทดสอบ	81
4.6.2 ผลการทดสอบ	82
4.7 สรุป	83
บทที่ 5	
สรุปและข้อเสนอแนะ	84
5.1 สรุป	84
5.2 ข้อเสนอแนะ	85
บรรณานุกรม	86
ประวัติผู้วิจัย	88

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ขนาดพารามิเตอร์ไดโพลบนแผ่น FR4	45
3.2 ขนาดพารามิเตอร์ไดโพลบนแผ่น FR4 พร้อมองค์ประกอบปรสิต I_2	48
3.3 ขนาดพารามิเตอร์ไดโพลบนแผ่น FR4 พร้อมองค์ประกอบปรสิต I_2 และ I_3	50
3.4 ขนาดพารามิเตอร์สายอากาศไดโพลแถบความถี่คู่ที่เพิ่มตัวสะท้อนบนแผ่น FR4	55
3.5 ขนาดพารามิเตอร์สายอากาศยาคิ-อูตะแถบความถี่คู่บนแผ่น FR4	58
3.6 ขนาดสายอากาศยาคิ-อูตะแถบความถี่คู่บนแผ่น FR4	66



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ต้นแบบสายอากาศของนายไฮน์ริช เฮิร์ตซ์ (Heinrich Hertz)	8
2.2	ระบบพิกัดทรงกลมซึ่งใช้สำหรับวิเคราะห์แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศ	10
2.3	แบบรูปการแผ่กำลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว	11
2.4	ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังและความกว้างลำคลื่นที่สำคัญเป็นศูนย์กลางแรก	13
2.5	การหาความกว้างลำครึ่งกำลัง	17
2.6	การแผ่คลื่นของสายอากาศแบบไอโซโทรปิกซึ่งเป็นสายอากาศในอุดมคติ	18
2.7	การโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล	24
2.8	สายอากาศไดโพล	26
2.9	แบบรูปการแผ่พลังงานของไดโพลอุดมคติตามหลักทฤษฎีระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane)	26
2.10	แบบรูปการแผ่พลังงานของไดโพลอุดมคติตามหลักทฤษฎีระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane)	27
2.11	การกระจายของกระแสในไดโพล $\lambda/2$	27
2.12	แบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) ของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ (เส้นทึบ) และไดโพลอุดมคติ (เส้นประ)	28
2.13	รูปวาดองค์ประกอบสายอากาศยาสูบ-อูตะ	30
2.14	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศยาสูบ	32
2.15	การเกิดโพลาไรซ์แบบ Ionic	32
2.16	แสดงตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน 2 ชุดที่ต่อในวงจรไฟฟ้าเดียวกัน	34
2.17	ค่า Loss Tangent ที่เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กตริก	35
2.18	ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีไดอิเล็กตริกอยู่ในพื้นที่ II	38
2.19	โปรแกรม CST Microwave Studio Suite	41
3.1	โครงสร้างของสายอากาศไดโพลบนแผ่น FR4	45
3.2	S_{11} ที่ได้จากการจำลองสายอากาศไดโพลเมื่อความยาว $L_f = 43 \text{ mm}$	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.3	โครงสร้างสายอากาศไดโพลที่มีการเพิ่มองค์ประกอบปรสิต I_2	47
3.4	S_{11} ที่ได้จากการจำลองเมื่อเพิ่มองค์ประกอบปรสิต I_2 กับไดโพล	49
3.5	โครงสร้างของสายอากาศไดโพลที่เพิ่มองค์ประกอบปรสิต I_2 และ I_3	50
3.6	S_{11} ที่ได้จากการจำลองเมื่อเพิ่มองค์ประกอบปรสิต I_2 และ I_3 กับไดโพล	51
3.7	แบบรูปการแผ่พลังงานไดโพลแถบความถี่คู่ (ก) ระบาย xz ความถี่ 2.44 GHz (ข) ระบาย yz ความถี่ 2.44 GHz (ค) ระบาย xz ความถี่ 5.15 GHz (ง) ระบาย yz ความถี่ 5.15 GHz (จ) ระบาย xz ความถี่ 5.85 GHz (ฉ) ระบาย yz ความถี่ 5.85 GHz	52
3.8	โครงสร้างสายอากาศไดโพลที่เพิ่มตัวสะท้อนเพื่อสร้างเป็นสายอากาศ ยากิ-อูดะ	54
3.9	สัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อความยาวต่างกันขององค์ประกอบตัวสะท้อน	56
3.10	สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ระยะห่างต่าง ๆ ระหว่างไดโพลกับตัวสะท้อน	56
3.11	โครงสร้างสายอากาศยากิ-อูดะแถบความถี่คู่	58
3.12	สัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อความยาวต่างกันขององค์ประกอบตัวชี้ ทิศทาง I_5	59
3.13	สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ระยะห่างต่าง ๆ ระหว่างไดโพลกับตัวชี้ทิศทาง	59
3.14	สัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศยากิ-อูดะแถบความถี่คู่เมื่อขนาดตาม ตารางที่ 3.5	60
3.15	แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศยากิ-อูดะแถบความถี่คู่ (ก) ระบาย xz ความถี่ 2.44 GHz (ข) ระบาย yz ความถี่ 2.44 GHz (ค) ระบาย xz ความถี่ 5.15 GHz (ง) ระบาย yz ความถี่ 5.15 GHz (จ) ระบาย xz ความถี่ 5.85 GHz (ฉ) ระบาย yz ความถี่ 5.85 GHz	62
3.16	สัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศยากิ-อูดะแถบความถี่คู่เมื่อเปลี่ยน ขนาด I_3	63
3.17	สัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศยากิ-อูดะแถบความถี่คู่เมื่อเปลี่ยน ขนาด s_2	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.18	แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศยาคี-อูเคะแถบความถี่คู่ (ก) ระนาบ xz ความถี่ 5.15 GHz (ข) ระนาบ yz ความถี่ 5.15 GHz (ค) ระนาบ xz ความถี่ 5.85 GHz (ง) ระนาบ yz ความถี่ 5.85 GHz	64
4.1	ต้นแบบของสายอากาศยาคี-อูเคะสองย่านความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์	68
4.2	เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน	72
4.3	เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากการจำลองและได้จากการวัด	73
4.4	การจัดวางอุปกรณ์สำหรับวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน	76
4.5	แบบรูปการแผ่พลังงานโพลาไรซ์ร่วมสายอากาศยาคี-อูเคะสองย่านความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์เส้นทึบคือผลการจำลอง จุดคือผลการวัดทุก 10° (ก) ระนาบ yz ความถี่ 2.44 GHz (ข) ระนาบ xz ความถี่ 2.44 GHz (ค) ระนาบ yz ความถี่ 5.15 GHz (ง) ระนาบ xz ความถี่ 5.15 GHz (จ) ระนาบ yz ความถี่ 5.85 GHz (ฉ) ระนาบ xz ความถี่ 5.85 GHz	78
4.6	การจัดวางอุปกรณ์สำหรับวัดอัตราขยายสายอากาศ	80
4.7	การทดสอบวัดสัญญาณสายอากาศเครื่อง Netscout Aircheck G2	82
4.8	การทดสอบวัดสัญญาณสายอากาศยาคี-อูเคะแถบความถี่คู่เครื่อง Netscout Aircheck G2	82

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีระบบการสื่อสารไร้สายโดยเฉพาะเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network, WLAN) กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการนำมาติดตั้งตามสถานที่ต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น ตามสถาบันการศึกษามหาวิทยาลัย สำนักงาน ศูนย์ประชุม สนามบิน ห้องสมุด ห้างสรรพสินค้า ร้านกาแฟ และตามบ้านเรือน ที่อยู่อาศัย เป็นต้น เพื่ออำนวยความสะดวกให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้อย่างสะดวก ทั่วบริเวณที่ให้บริการโดยไม่ต้องใช้สายนำสัญญาณให้ยุ่งยาก ดังนั้น เมื่อเทคโนโลยีระบบการสื่อสารไร้สายได้รับความนิยมใช้งานเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จึงทำให้อุปกรณ์ได้รับการพัฒนาให้สามารถใช้งานและตอบสนองการใช้งานระบบการสื่อสารไร้สายได้อย่างดีเช่นกัน เช่น โน้ตบุ๊ก แท็บเล็ต สมาร์ทโฟน สมาร์ททีวี เป็นต้น เมื่อความต้องการใช้งานเหล่านี้มีมากขึ้นเรื่อย ๆ ย่อมต้องทำให้สายอากาศ (Antenna) ได้รับการพัฒนาให้มีความสมบัติการกระจายสัญญาณให้ดีขึ้น ครอบคลุมการใช้งานมากยิ่งขึ้น เพื่อตอบสนองการใช้งานของผู้ใช้งานให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เนื่องจากสายอากาศเป็นส่วนหนึ่งของระบบการสื่อสารไร้สายที่สำคัญ ทำหน้าที่ส่งสัญญาณออกไปจากตัวมันทางด้านฝั่งส่ง และดักจับเอาสัญญาณเข้าสู่ตัวมันทางด้านฝั่งรับเพื่อนำสัญญาณเข้าไปสู่ระบบเพื่อใช้งานต่อไป สายอากาศจึงเป็นที่สนใจของนักวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศ ที่จะทำการวิจัยพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศให้มีความมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปทฤษฎีหลักการ และวิธีการดำเนินการงานวิจัยของสายอากาศสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายโดยย่อได้ดังนี้

บทความที่วิจัยโดย Su, Chen and Wong (2002) นำเสนอการทำงานแบบสองย่านความถี่ (Dual-Band) ของสายอากาศไดโพลที่พิมพ์ด้วยแขน U-Slotted เนื่องจากสล็อต (Slot) รูปตัวยูที่ฝังอยู่ จึงได้แขนไดโพลเพิ่มเติมอีกสองอันในการออกแบบที่เสนอ ซึ่งคือการสร้างสายอากาศไดโพลที่สองที่มีความยาวน้อยกว่าและสามารถสร้างโหมดเรโซแนนซ์ที่สูงขึ้นสำหรับการทำงานย่านความถี่ 5.2 GHz และด้วยการผสมผสานแขนไดโพลดั้งเดิมที่ออกแบบมาสำหรับการทำงานย่านความถี่ 2.4

GHz สายอากาศที่นำเสนอสามารถดำเนินการกับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในย่านความถี่ 2.4 และ 5.2 GHz ได้พร้อมกัน ความกว้างแถบแคบและใช้งานง่าย โหมดการทำงานที่ต่ำกว่าและสูงกว่าที่ต้องการยังสามารถควบคุมได้อย่างง่ายดายด้วยแขนไดโพลที่ใหญ่และเล็ก ที่คั่นด้วยสล็อตรูปตัวยู ในการออกแบบที่นำเสนอ นอกจากนี้ ยังมีการสังเกตลักษณะการแผ่คลื่นที่คั่นของสายอากาศนำเสนออีกด้วย

บทความที่วิจัยโดย Chang, Kim and Yoon (2006) นำเสนอสายอากาศไดโพลแบบสามแบนด์ (Triple Band) โดยใช้องค์ประกอบแบบพาราซิติก (Parasitic) สำหรับการให้บริการแบบไร้สายหลายรายการ สายอากาศได้รับการออกแบบและวิเคราะห์โดยการทดลองที่แถบความถี่การทำงานของระบบ PCS, IMT-2000 และ ISM เพื่อให้เกิดการทำงานแบบความถี่สามความถี่ สายอากาศที่นำเสนอจะมีโครงสร้างไดโพลที่พิมพ์ออกมาโดยมีองค์ประกอบของพาราซิติกสองตัว ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนเพิ่มเติมโดยการต่อจากสายอากาศไดโพล ผลการวัดความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศนี้ คือ 1.79, 2.03 และ 2.41 GHz และความกว้างแถบหรือแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ (Impedance Bandwidth) ที่วัดได้คือ 90 MHz จากช่วง 1,760–1,850 MHz, 210 MHz ที่วัดได้จากช่วง 1,930–2,130 MHz และ 30 MHz ที่วัดได้จาก 2,400–2,430 MHz สำหรับ VSWR < 2 อัตราขยายสายอากาศที่วัดได้คือ 2.14, 0.9 และ 0.5 dBi ตามลำดับ นอกจากนี้ จากการตรวจสอบผลการวัดสายอากาศนำเสนอ พบว่าสามารถทำงานได้ดีทั้งสามแถบความถี่ของ PCS, IMT-2000 และ ISM เมื่อพารามิเตอร์สายอากาศสำหรับการทำงานแบบสามแบนด์ได้รับการแก้ไข ดังนั้นสายอากาศที่มีโครงสร้างเรียบง่ายและมีขนาดที่ลดลงนี้ จึงสามารถใช้งานได้กับแอปพลิเคชันไร้สายหลาย ๆ แบบได้พร้อมกัน

บทความวิจัยโดย Sriramon (2008) นำเสนอสายอากาศไดโพลบรอดแบนด์บนระนาบพื้นหน้าคัทรูปตัวยู องค์ประกอบของมันสร้างจากทองแดงบนวัสดุ FR4 รูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมที่ถูกกลมมนที่มุมทั้งสองใกล้จุดป้อนสัญญาณ สายอากาศนี้ให้อัตราขยายเฉลี่ย 8.0 dBi ที่ความถี่กำลังกำลัง (Half Power Beamwidth, HPBW) ที่ 90 องศา อัตราส่วนหน้าต่อหลัง (Front-to-Back Ratio) มากกว่า 20 dB บนระนาบพื้น 160 x 140 mm² และความสูง 30 mm ในช่วงความถี่ 1.6 - 2.6 GHz (VSWR < 1.5:1) สายอากาศถูกป้อนที่กึ่งกลางระหว่างไดโพลด้วยสายโคแอกเชียล 50 โอห์ม สายอากาศนี้เหมาะสำหรับการประดิษฐ์เป็นสายอากาศสถานีฐานราคาประหยัดที่มีโพลาไรซ์เชิงเส้นของแถบระบบการสื่อสารไร้สาย DCS, PCS, UMTS และ ISM ข้อดีของสายอากาศนี้คือการประดิษฐ์รูปทรงเรขาคณิตที่ไม่ซับซ้อนและต้นทุนต่ำ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอและอธิบายถึงสายอากาศแบบสองแถบความถี่ที่สามารถใช้งานกับระบบ WLAN ที่ดำเนินการในสองย่านความถี่พร้อมกันคือ 2.400–2.483 GHz และ 5.15–5.85 GHz สายอากาศต้นแบบที่ทำงานในคลื่นความถี่ทั้งสองได้รับการพัฒนา ด้วยการเพิ่มแถบพาราซิติก 3 แถบ เข้ากับ Dipole ที่พิมพ์อยู่บนด้านเดียวกันของ FR4 ทำให้ได้เป็นสายอากาศ WLAN ที่ใช้งานได้สองแถบความถี่ (Dual-Band) ระหว่าง 2.400 - 2.483 GHz และ 5.15 - 5.85 GHz องค์ประกอบที่เป็นไดโพลและพาราซิติก สามารถสร้างความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance Frequency) ได้ 3 โหมด ทำให้ครอบคลุมความถี่ดำเนินการของ WLAN ได้หมด นอกจากนี้ ยังมีการนำเสนอค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient) แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล (Far Field Radiation Pattern) และอัตราขยายของสายอากาศ (Antenna Gain) ไว้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ด้วย

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 พัฒนาสายอากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ระบบ WLAN ในช่วงความถี่ 2.400–2.483 GHz และ 5.15–5.85 GHz ได้พร้อมกัน

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ ออกแบบ สร้างและทดสอบต้นแบบสายอากาศยาภิ-อูตะบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR4 สองย่านความถี่ให้ประสิทธิภาพดีและเป็นสายอากาศราคาถูกต้นทุนต่ำ

1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1 โครงสร้างสายอากาศยาภิ-อูตะสองย่านความถี่ทำงานในช่วงความถี่ 2.400 - 2.483 GHz และ 5.15 - 5.85 GHz

1.3.2 การออกแบบสายอากาศโดยใช้ซอฟต์แวร์จำลองโครงสร้างสายอากาศ สามารถเป็นแนวทางในการนำไปใช้สร้างสายอากาศจริงได้

1.3.3 การสร้างสายอากาศด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ FR4 จะสามารถได้สายอากาศที่มีน้ำหนักเบา ต้นทุนต่ำ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ออกแบบและจำลองสายอากาศยาภิ-อูคะ โดยการใช้โปรแกรมจำลองทางสายอากาศ เพื่อหาคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ

1.4.2 กำหนดพารามิเตอร์และกำหนดค่าจริงให้กับสายอากาศเพื่อสร้างสายอากาศยาภิ-อูคะ ให้สามารถครอบคลุมความถี่ช่วง 2.400 - 2.483 GHz และ 5.15 - 5.85 GHz

1.4.3 สร้าง ทดสอบประสิทธิภาพ ต้นแบบสายอากาศยาภิ-อูคะสองย่านความถี่บน แผ่นวงจรพิมพ์ FR4 ทำงานในช่วงความถี่ 2.400 - 2.483 GHz และ 5.15 - 5.85 GHz

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้สายอากาศยาภิ-อูคะสองย่านความถี่ที่ย่านความถี่ดำเนินการครอบคลุมช่วง 2.400 - 2.483 GHz และ 5.15 - 5.85 GHz

1.5.2 ได้สายอากาศยาภิ-อูคะสองย่านความถี่ที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบชี้ทิศทาง ทั้งสองย่านความถี่และชี้ไปในทิศทางเดียวกัน

1.5.3 ได้ต้นแบบสายอากาศยาภิ-อูคะบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR4 สองย่านความถี่ที่สามารถนำไปใช้งานได้จริงในระบบเครือข่ายท้องถิ่น ย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz และเป็นสายอากาศที่ราคาถูก โครงสร้างไม่ซับซ้อน และผลิตง่าย

1.5.4 แนวทางการออกแบบสายอากาศในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปพัฒนาสายอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไปได้

1.6 แนวทางการดำเนินงาน

1.6.1 ศึกษาทฤษฎีสายอากาศเบื้องต้น

1.6.2 ศึกษาทฤษฎีและโครงสร้างสายอากาศไดโพลและยาگی-อูเดสองย่านความถี่แบบต่างๆ

1.6.3 ศึกษาการวิเคราะห์สายอากาศโดยซอฟต์แวร์จำลองสายอากาศ

1.6.4 ออกแบบและจำลองสายอากาศยาگی-อูเดสองย่านความถี่โดยซอฟต์แวร์จำลองสายอากาศและกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้กับสายอากาศ จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของคุณสมบัติที่ต้องการ

1.6.5 สร้างสายอากาศจริงตามที่ได้ออกแบบจากการจำลอง เพื่อวัดผลคุณสมบัติต่าง ๆ และปรับเปลี่ยนค่าต่าง ๆ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของคุณสมบัติที่ต้องการ

1.6.6 เปรียบเทียบและสรุปผลที่ได้จากการจำลองและการทดสอบจากสายอากาศจริง ในคุณสมบัติต่าง ๆ และนำเสนอผลที่ได้

1.7 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์การวิจัย สมมติฐานการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และกล่าวถึงส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึง ทฤษฎี หลักการที่เกี่ยวข้องกับ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สายอากาศ พารามิเตอร์มูลฐานของสายอากาศ หลักการทำงานของสายอากาศไดโพลและหลักการทำงานของสายอากาศยาگی-อูเด

บทที่ 3 กล่าวถึง การออกแบบและโครงสร้างของสายอากาศ การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสายอากาศยาگی-อูเดสองย่านความถี่

บทที่ 4 กล่าวถึง การสร้างและทดสอบต้นแบบสายอากาศยาگی-อูเดสองย่านความถี่

บทที่ 5 กล่าวถึง บทสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ และผลการทดสอบ



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

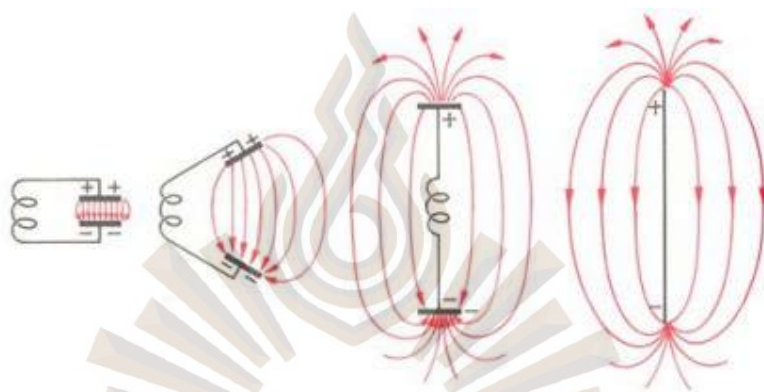
เนื้อหาของบทนี้อธิบายการทำงานพื้นฐานของสายอากาศ เริ่มต้นด้วยรุ่นสายอากาศของนายไฮน์ริช เฮิร์ตซ์ (Heinrich Hertz) ตามด้วยการแนะนำเบื้องต้นเกี่ยวกับพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่นทั่วไป อธิบายลักษณะของสายอากาศและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง และอธิบายแบบละเอียดเกี่ยวกับการทำงานของสายอากาศบางประเภท

2.2 สายอากาศ

ในทางวิศวกรรม สายอากาศ (Antenna) เป็นส่วนติดต่อระหว่างคลื่นวิทยุที่แพร่กระจายผ่านอากาศและกระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในตัวนำโลหะ ซึ่งใช้กับเครื่องส่ง (Transmitter) หรือเครื่องรับ (Receiver) ในการส่งสัญญาณเครื่องส่งวิทยุจะจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วของสายอากาศและสายอากาศจะแผ่พลังงานจากกระแสเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves) ในการรับสัญญาณสายอากาศจะสกัดกั้นพลังงานบางส่วนจากคลื่นวิทยุเพื่อสร้างกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของมันซึ่งจะถูกนำไปใช้กับเครื่องรับเพื่อขยายสัญญาณ สายอากาศเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอุปกรณ์วิทยุทั้งหมด

สายอากาศคืออาร์เรย์ของตัวนำ (องค์ประกอบ) ซึ่งเชื่อมต่อด้วยระบบไฟฟ้ากับเครื่องรับหรือเครื่องส่ง สายอากาศสามารถออกแบบมาเพื่อส่งและรับคลื่นวิทยุในแนวนอนทั้งหมดเท่า ๆ กัน (Omnidirectional Antenna) หรือในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง (Directional Antenna) สายอากาศอาจรวมถึงส่วนประกอบที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับเครื่องส่งตัวสะท้อนแสงพาราโบลา (Parabolic Reflectors) แตร (Horn) หรือองค์ประกอบพาราซิติค (Parasitic Element) ซึ่งทำหน้าที่ส่งคลื่นวิทยุไปยังลำแสงหรือแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) อื่น ๆ ที่ต้องการ

Reckeweg and Rohner (2015) สายอากาศสายแรกดังรูปที่ 2.1 ถูกสร้างขึ้นในปี 1888 โดย นายไฮน์ริช เฮิร์ตซ์ (Heinrich Hertz) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันในการทดลองบุกเบิกของเขาเพื่อพิสูจน์การมีอยู่ของคลื่นที่ทำนายโดยทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าของ นายเจมส์ เคลิร์ก แมกซ์เวลล์ (James Clerk Maxwell) นายไฮน์ริช เฮิร์ตซ์ วางสายอากาศไดโพล (Dipole Antenna) ไว้ที่จุดโฟกัสของตัวสะท้อนแสงพาราโบลา สำหรับการส่งและรับ เขาได้ตีพิมพ์ผลงานของเขาใน *Annalen der Physik und Chemie* (Vol. 36, 1889)



รูปที่ 2.1 ต้นแบบสายอากาศของนายไฮน์ริช เฮิร์ตซ์ (Heinrich Hertz)

ที่มา : Reckeweg and Rohner, 2015

Reckeweg and Rohner (2015) ต่อมาในปี 1895 นายกุสตาฟ โม มาร์โกนี (Guglielmo Marconi) เริ่มพัฒนาสายอากาศที่ใช้งานได้จริงสำหรับการโทรทางไกลแบบไร้สายซึ่งเขาได้รับรางวัลโนเบล โดยนายกุสตาฟ โม มาร์โกนี เริ่มทดสอบระบบไร้สายของเขาบนบ้านบนที่ดินของบิดาใกล้กับเมืองโบโลญญาและไม่นานก็เริ่มทดลองกับสายอากาศแบบลวดยาว พบว่าการยกสาย "อากาศ" ขึ้นเหนือพื้นดินและเชื่อมต่ออีกด้านหนึ่งของเครื่องส่งสัญญาณของเขากับดิน ระยะทางการส่งสัญญาณได้เพิ่มขึ้น ต่อมาไม่นานเขาก็สามารถส่งสัญญาณข้ามเนินเขาด้วยระยะทางประมาณ 2.4 กิโลเมตร ในภาษาอิตาลีเสาต้นที่เรียกว่า L'antenna Centrale และเสาที่มีลวดเรียกง่าย ๆ ว่า L'antenna ตั้งแต่นั้นมาชิ้นส่วนไร้สายที่ใช้กระจายและรับคลื่นเป็นที่รู้จักกันง่าย ๆ ว่าสายอากาศหรือขั้ว (Terminals) เนื่องจากความโดดเด่นของเขา การใช้คำว่าสายอากาศของนายกุสตาฟ โม มาร์โกนี จึงแพร่กระจายไปในหมู่นักวิจัยและผู้ที่ใช้ชื่นชอบระบบไร้สายและกระจายมาสู่สาธารณชนทั่วไป

ในการใช้งานทั่วไปสายอากาศอาจหมายถึงส่วนประกอบด้วยกันทั้งหมดตั้งแต่โครงสร้างรองรับ ภาชนะบรรจุ รวมทั้งส่วนประกอบอื่นๆที่แอกทิฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่ไมโครเวฟ,

สายอากาศที่รับสัญญาณไม่เพียงแต่เส้นลวดไฟฟ้าที่อยู่บนอากาศเท่านั้น แต่รวมถึงตัว Preamplifier หรือมิกเซอร์อีกด้วย สายอากาศ ใช้ในการแปลงคลื่นวิทยุให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือในทางกลับกัน มันเป็นรูปแบบหนึ่งของ ตัวแปรสัญญาณ (Transducer)

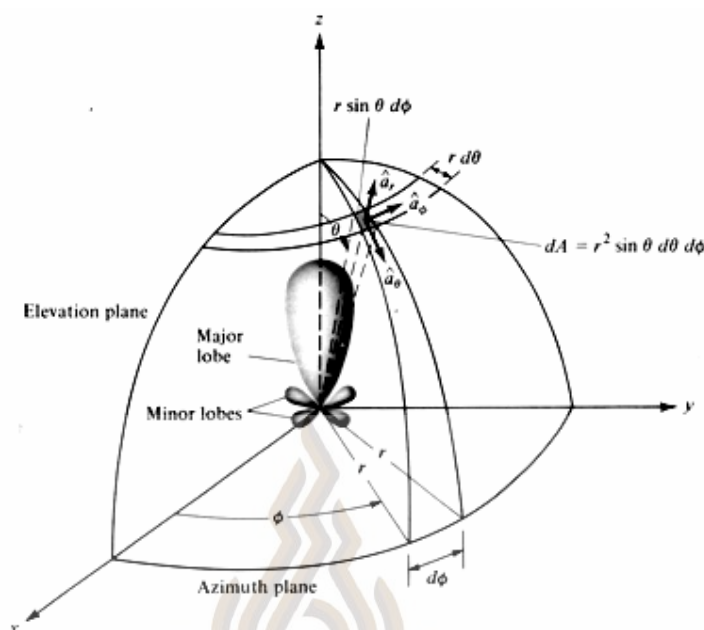
พัฒนาการอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ทำให้เครื่องมือและอุปกรณ์การสื่อสารต่าง ๆ มีประสิทธิภาพสูง ทำให้การติดต่อสื่อสารเป็นไปอย่างรวดเร็ว และกว้างขวางครอบคลุมไปทั่วโลก เกิดการแลกเปลี่ยนความรู้ เทคโนโลยีข่าวสารข้อมูลระหว่างกัน ทำให้เศรษฐกิจ สังคม และวัฒนธรรม เปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว จึงอาจกล่าวได้ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

2.3 พารามิเตอร์มูลฐานของสายอากาศ

2.3.1 แบบรูปการแผ่พลังงาน

วิทวัส สิทธิกุล และ ปาลีรัตน์ วงจำปา (2563) แบบรูปการแผ่กำลังงาน (Radiation Pattern) หรือแบบรูปกระจายคลื่นของสายอากาศ ได้ถูกนิยามว่า “เป็นการนำเสนอคุณสมบัติในการแผ่กำลังงานของสายอากาศในรูปของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นในรูปพิกัดตำแหน่ง (Space Coordinate) ในการพิจารณาแบบรูปการแผ่กำลังงานจะต้องกระทำในบริเวณสนามระยะไกล (Far-Field Region) เท่านั้น และจะนำเสนอในรูปฟังก์ชันของพิกัดทิศทาง (Directional Coordinate) เสมอ” คุณสมบัติของการแผ่กำลังงาน สามารถที่จะแสดงในรูปของการกระจายพลังงานในแต่ละตำแหน่งและทิศทางที่เป็นแบบสองมิติและสามมิติซึ่งเป็นฟังก์ชันตำแหน่งของผู้สังเกตตลอดเส้นทางหรือผิวของทรงกลมที่มีรัศมีคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

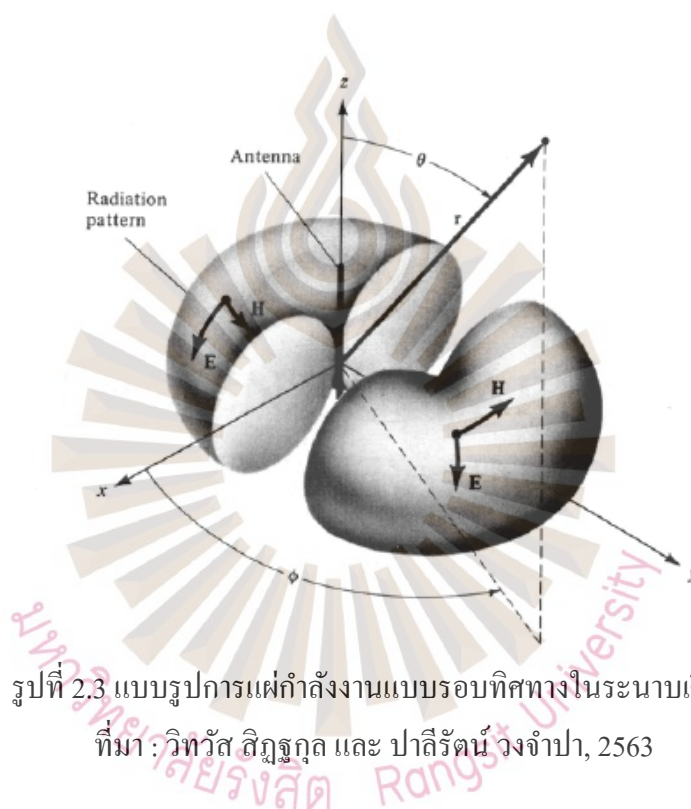
เส้นการกวาดของกำลังงานที่รับได้ที่ตำแหน่งรัศมีคงที่จะถูกเรียกว่า แบบรูปกำลังงาน (Field Pattern) และอีกวิธีหนึ่ง ถ้าเป็นแบบรูปที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กตามฟังก์ชันของตำแหน่ง เราจะเรียกว่า แบบรูปแอมพลิจูดของสนาม (Amplitude Field Pattern) ในทางปฏิบัตินั้น แบบรูปการแผ่กำลังงานแบบสามมิติ จะถูกวัดและบันทึกในรูปของแบบรูปสองมิติโดยการพล็อตแบบรูปตามฟังก์ชันของมุม θ และ ϕ ให้สัมพันธ์และต่อเนื่องกัน แบบรูปแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) แบบมีทิศทาง (Direction) และแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omnidirection)



รูปที่ 2.2 ระบบพิกัดทรงกลมซึ่งใช้สำหรับวิเคราะห์แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศ
ที่มา : วิทวัส สิทธิกุล และ ปาลีรัตน์ วงจำปา, 2563

ตัวแผ่กำลังงานแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Radiator) คือ “สายอากาศที่ถูกสมมติขึ้นมาว่าไม่มีการสูญเสียภายในตัวเองและมีการแผ่กำลังออกมาเท่ากันทุกทิศทาง” ถึงแม้ว่าตัวแผ่กำลังงานแบบนี้จะไม่มีจริงในทางปฏิบัติ แต่ก็มีประโยชน์ในการนำมาใช้เป็นตัวอ้างอิงเพื่อหาคุณสมบัติของสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่มีอยู่จริง สำหรับสายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) คือ “สายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่กำลังงานหรือรับคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่นๆ” ซึ่งคำนี้มักจะนำมาใช้กับสายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (Maximum Directivity) มากกว่าจะใช้กับสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไดโพล ความยาวครึ่งคลื่น (Half-Wave Dipole) ซึ่งตัวอย่างของสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่กำลังงานแบบมีทิศทาง ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ชัดเจนว่า ในระนาบมุมกวาด (Azimuth Plane) นั้น แบบรูปการแผ่กำลังงานจะไม่มีทิศทาง แต่ส่วนที่มีทิศทางจะอยู่ในระนาบมุมยก (Elevation Plane) ซึ่งเราเรียกแบบรูปการแผ่กำลังงานชนิดนี้ว่าเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omnidirectional Pattern) โดยมีนิยามว่า “เป็นแบบรูปการแผ่กำลังงานที่ไม่มีทิศทางในระนาบที่กำหนดให้ ในที่นี้คือมุมกวาดและระนาบที่อยู่ตั้งฉากกันจะมีแบบรูปการแผ่กำลังงานเป็นแบบมีทิศทาง ในกรณีนี้คือมุมเงย

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานจะเป็นตัวแสดงถึงการกระจายกำลังงานออกไปตามฟังก์ชันของทิศทางของสัญญาณที่ส่งออกไปจากสายอากาศ ซึ่งแสดงถึงระดับสัมพันธ์ของกำลังงานที่ส่งออกไปซึ่งเป็นฟังก์ชันของทิศทาง ถึงแม้ว่าเราจะใช้คำว่า “การแผ่กระจายกำลังงาน” กับแบบรูปที่ใช้กับสายอากาศส่ง แต่ความจริงจะเป็นแบบรูปอันเดียวกันกับแบบรูป “การรับคลื่น” ในกรณีที่เป็นสายอากาศรับด้วย ตามทฤษฎีภาวะย้อนกลับ (Reciprocity Theorem) ถึงแม้ว่าแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่สมบูรณ์จะเป็นฟังก์ชันแบบ 3 มิติ แต่ทั่วไปจะใช้งานกันเพียง 2 มิติ ก็เพียงพอที่จะบอกคุณลักษณะของสายอากาศที่มีทิศทางได้



รูปที่ 2.3 แบบรูปการแผ่กำลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว

ที่มา : วิชา ส ัญญกุล และ ปาสิรัตน์ วงจำปา, 2563

ในทางปฏิบัติแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบหนึ่งๆ สามารถวัดได้โดยการหมุนสายอากาศในระนาบนั้นๆ ขณะที่ระดับของกำลังงานที่รับได้จะเป็นฟังก์ชันของการหมุนของสายอากาศ เพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ถูกต้องควรจะต้องจัดสภาพแวดล้อมที่อยู่รอบสายอากาศที่จะทำการวัดให้ปราศจากวัตถุใดๆ ที่อาจจะทำให้เกิดการสะท้อนสัญญาณและส่งกลับไปยังสายอากาศที่ทำการวัดอยู่

แบบรูปการแผ่พลังงานเป็นการแสดงทางกราฟ 3 มิติของสนามระยะไกล คุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นฟังก์ชันของพิกัดตำแหน่ง บริเวณของสนามระยะไกล คือบริเวณที่ไกลเพียงพอสำหรับแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นซึ่งจะไม่ขึ้นอยู่กับระยะที่อยู่ห่างจาก

สายอากาศ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศใดๆ สามารถที่จะทราบได้ด้วยการวัด ทดลองและจากการคำนวณ ถ้าเราทราบลักษณะการกระจายของกระแสบนตัวสายอากาศ

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะเป็นตัวแสดงถึงการกระจายพลังงานออกไปตามฟังก์ชัน ของทิศทางของสัญญาณที่ส่งออกไปจากสายอากาศ ซึ่งแสดงถึงระดับความสัมพันธ์ของกำลังงานที่ ส่งออกไปซึ่งเป็นฟังก์ชันของทิศทางถึงแม้ว่าเราจะใช้คำว่า “การแพร่กระจายคลื่น” กับแบบรูปที่ใช้ กับสายอากาศสายส่ง แต่ความจริงมันเป็นแบบรูปเดียวกันกับแบบรูป “การรับคลื่น” ในกรณีที่เป็น สายอากาศรับด้วย ตามทฤษฎีบทภาวะย้อนกลับ (Reciprocity Theorem)

ถึงแม้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สมบูรณ์จะเป็นฟังก์ชันแบบ 3 มิติ แต่ทั่วไปจะใช้ งานกันเพียง 2 มิติก็เพียงพอที่จะบอกคุณลักษณะของสายอากาศที่มีทิศทางได้ การวัดในแต่ละมิติจะ วัดในแต่ละระนาบที่ตั้งฉากกัน คือ ระนาบที่ขนานกับสนามไฟฟ้าและระนาบที่ขนานกับ สนามแม่เหล็ก แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบหนึ่ง ๆ สามารถวัดได้โดยการหมุน สายอากาศในระนาบนั้น ๆ ขณะที่ระดับของกำลังงานที่รับได้จะเป็นฟังก์ชันของการหมุนของ สายอากาศ และเพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ถูกต้อง จึงต้องจัดสภาพแวดล้อมโดยรอบ สายอากาศที่จะทำการวัดไม่ให้มีวัตถุใด ๆ ที่จะทำให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณและส่งกลับไปยัง สายอากาศที่ทำการวัดอยู่

2.3.2 ความกว้างลำคลื่น

วิทวัส สิทธิกุล และ ปาสิรัตน์ วงจำปา (2563) ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศ (Beamwidth) คือมุมระหว่างองศาที่อยู่ตรงข้ามกันเมื่ออ้างอิงจากจุดสูงสุดของแบบรูปการแผ่ พลังงาน สำหรับความกว้างลำคลื่นที่สำคัญที่นิยมใช้บอกคุณสมบัติของสายอากาศได้แก่

2.3.2.1 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

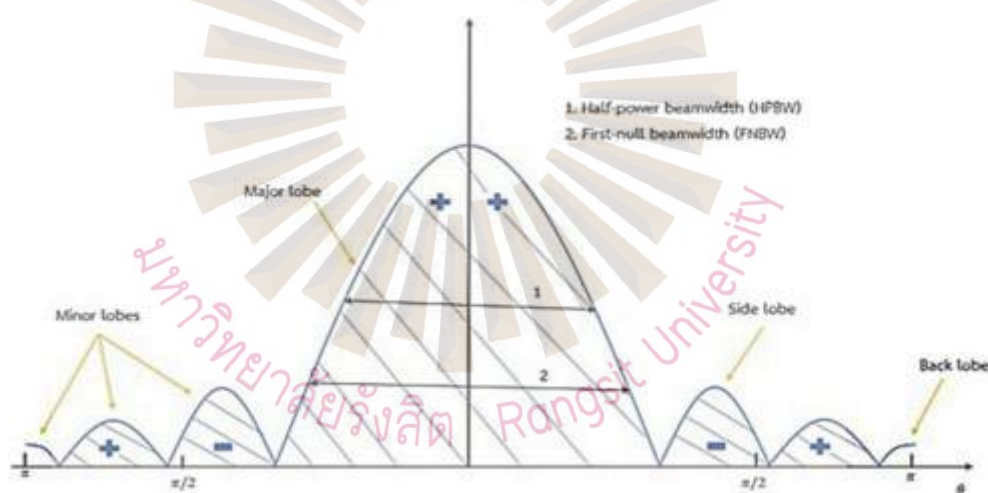
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth: HPBW) คือขนาด เจริญมุมของลำคลื่นหลักที่วัดตรงช่วงระหว่างตำแหน่งที่กำลังคลื่นลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังสูงสุด หรือความกว้างของลำคลื่นที่มีค่าความเข้มลดลง 3 dB ค่าความกว้างครึ่งกำลังถือว่าเป็นพารามิเตอร์ ที่มีความสำคัญมากตัวหนึ่ง เนื่องจากการอธิบายความสามารถในการแยกแยะเป้าหมายได้หาก

ค่าความกว้างครึ่งกำลังมีค่าน้อยแสดงว่าลำคลื่นจะมีความกว้างลำคลื่นที่แคบลงตามไปด้วย ส่วนมากจะถูกนำไปใช้งานในระบบเรดาร์ซึ่งมีความต้องการในการใช้สายอากาศที่มีลำคลื่นแคบมากๆ มาใช้ในการตรวจจับภาคพื้นหรือสิ่งผิดปกติ

2.3.2.2 ความกว้างลำคลื่นที่สำคัญเป็นศูนย์คู่แรก

ความกว้างลำคลื่นที่สำคัญเป็นศูนย์คู่แรก (First-Null Beamwidth: FNBM) คือ ขนาดเชิงมุมของลำคลื่นหลักที่วัดตรงช่วงระหว่างตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์คู่แรกเมื่อเทียบกับจากค่าสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของแบบรูปการแผ่พลังงานได้

$$\frac{FNBW}{2} \approx HPBW \quad (2-1)$$



รูปที่ 2.4 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังและความกว้างลำคลื่นที่สำคัญเป็นศูนย์คู่แรก

ที่มา : วิทวัส สิทธิกุล และ ปาลิรัตน์ วงจำปา, 2563

2.3.3 สถาพอะจงทิศทาง

รังสรรค์ วงศ์สรรค์ (2556) ความสามารถในการชี้ทิศทาง (Directivity) คือ ความแรงของพลังงานในทิศทางหนึ่ง เมื่อเทียบกับทิศอื่น ขณะที่อัตราขยายสายอากาศ (Antenna Gain) เป็นความสามารถของ สายอากาศในการรับส่งคลื่นวิทยุ สายอากาศแต่ละแบบมีอัตราขยายแตกต่าง

กัน สายอากาศแบบ ทิศทางเดียวจะมีอัตราขยายมากกว่าสายอากาศแบบกึ่งรอบตัว 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 เหล่านี้เป็น อัตราขยายของสายอากาศ (Power Gain) และความสามารถในการชี้ทิศทางสายอากาศ (Directivity)

เมื่อเราให้กำลังไฟฟ้าอินพุตที่เท่ากันแก่สายอากาศหนึ่งกับสายอากาศที่เป็น มาตรฐาน อัตราขยายของสายอากาศในทิศใด ๆ ของสายอากาศนั้น คืออัตราส่วนระหว่างพอยน์ติง เพาเวอร์ที่เกิดจากสายอากาศนั้นกับพอยน์ติงเพาเวอร์ที่เกิดจากสายอากาศมาตรฐาน นั่นคือ เมื่อเขียน เป็นสมการจะเป็นดังนี้

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

โดยที่ $G(\theta, \phi)$ คือ อัตราขยายของตัวสายอากาศในทิศ (θ, ϕ)
 $\vec{E}(\theta, \phi)$ คือ สนามไฟฟ้าจากสายอากาศที่ต้องการรู้ค่าอัตราขยาย
 $\vec{E}_0(\theta, \phi)$ คือ สนามไฟฟ้าจากสายอากาศที่ใช้เป็นมาตรฐาน

และเนื่องจากค่ากำลังสองของกำลังไฟฟ้าจะแปรโดยตรงกับกำลังไฟฟ้าที่ป้อน ให้กับสายอากาศ เพราะฉะนั้นถ้าให้ W และ W_0 เป็นกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับสายอากาศที่ต้องการรู้ ค่าอัตราขยายและสายอากาศมาตรฐานตามลำดับ เราจะได้อัตราขยายของสายอากาศเป็นดังนี้

$$G(\theta, \varnothing) = \frac{|\vec{E}(\theta, \varnothing)|^2 / W}{|\vec{E}_0(\theta, \varnothing)|^2 / W_0} \quad (2-3)$$

อนึ่งสายอากาศที่ใช้เป็นมาตรฐานนั้น ในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า VHF ลงมานิยมใช้ สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่นเป็นสายอากาศมาตรฐาน เนื่องจากเป็นสายอากาศที่สร้างขึ้นง่าย และมีคุณสมบัติต่างๆ ที่รู้แน่นอน และสำหรับช่วงคลื่นที่สูงกว่า UHF ขึ้นไปโดยเฉพาะเมื่อสูงกว่าไมโครเวฟขึ้นไป ระบบสายส่งและโครงสร้างของสายอากาศเปลี่ยนไปจากช่วงความถี่ต่ำ ในทางปฏิบัติการใช้สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่นเป็นสายอากาศมาตรฐาน ก็อาจจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ง่ายเนื่องจากตัวสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับส่วนประกอบอื่น ๆ ฉะนั้นโดยทั่วไปจึงนิยมใช้แหล่งกำเนิดคลื่นแบบจุด ซึ่งส่งคลื่นออกไปทุกทิศทุกทางเท่ากันหมดเป็นตัวเปรียบเทียบ เราเรียกอัตราขยายของตัวสายอากาศนี้ว่า อัตราขยายสัมบูรณ์ของสายอากาศ (Absolute Power Gain) ในกรณีข้างต้นที่ใช้สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่นเป็นมาตรฐาน อัตราขยายที่ได้จะเป็นค่าเปรียบเทียบเรียกว่าอัตราขยายสัมพัทธ์ของสายอากาศ (Relative Power Gain) ในบางกรณีถึงแม้ความถี่จะต่ำกว่า UHF ลงไปก็ตามบางครั้งก็ใช้นิยามของอัตราขยายสัมบูรณ์โดยเฉพาะเมื่อคิดทางทฤษฎีเมื่อให้ $G_a(\theta, \varnothing)$ คือ ค่าอัตราขยายสัมบูรณ์ของสายอากาศจะได้

$$G_a(\theta, \varnothing) = \frac{F(\theta, \varnothing)}{W/4\pi} = \frac{4\pi r^2 |\vec{E}(\theta, \varnothing)|^2}{Z_0 W} \quad (2-4)$$

ถ้าเราให้ W_r, W เป็นกำลังคลื่นที่กระจายออกไปและกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ตามลำดับ เราจะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$W_r = W - W_l = \eta W \quad (2-5)$$

โดยที่ η เป็นสัมประสิทธิ์ของการกระจายคลื่น W_r นั้นจากนิยามของ F(6,9) จะได้เป็น

$$W_r = \oint F(\theta, \varnothing) d\Omega \quad (2-6)$$

เขียนในรูป $G_a(\theta, \varnothing)$ ได้

$$G_a(\theta, \varnothing) = \eta \frac{4\pi F(\theta, \varnothing)}{\oint F(\theta, \varnothing) d\Omega} \quad (2-7)$$

ถ้าให้

$$Ga(\theta, \varnothing) = \eta \frac{4\pi F(\theta, \varnothing)}{\frac{1}{4\pi} \oint F(\theta, \varnothing) d\Omega} \quad (2-8)$$

จะได้

$$Ga(\theta, \varnothing) = \eta Gd(\theta, \varnothing) \quad (2-9)$$

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

เมื่อพิจารณาสมการ $Ga(\theta, \varnothing) = \eta Gd(\theta, \varnothing)$ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราขยายของสายอากาศกับความสามารถในการชี้ทิศ จะเห็นได้ว่าอัตราขยายของสายอากาศจะต่ำ กว่าความสามารถในการชี้ทิศเสมอเพราะว่า ๆ น้อยกว่าหนึ่งเสมอ สรุปได้ว่า ค่าอัตราขยายกับความสามารถในการชี้ทิศทางสายอากาศมีความสัมพันธ์กัน คืออัตราขยายสามารถบอกทิศทางของสายอากาศได้

การวัดอัตราขยายสายอากาศ สามารถหาได้จากสมการการส่งผ่านของฟรีส (Fris Transmission Equation) โดยสมการการส่งผ่านของฟรีสที่นำมาใช้เท่ากับ

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r \quad (2-10)$$

$$P_{r(dB)} - P_{t(dB)} = -Loss_{(dB)} + G_{t(dB)} + G_{r(dB)} \quad (2-11)$$

$$G_{r(dB)} = P_{r(dB)} - P_{t(dB)} + Loss_{(dB)} - G_{t(dB)} \quad (2-12)$$

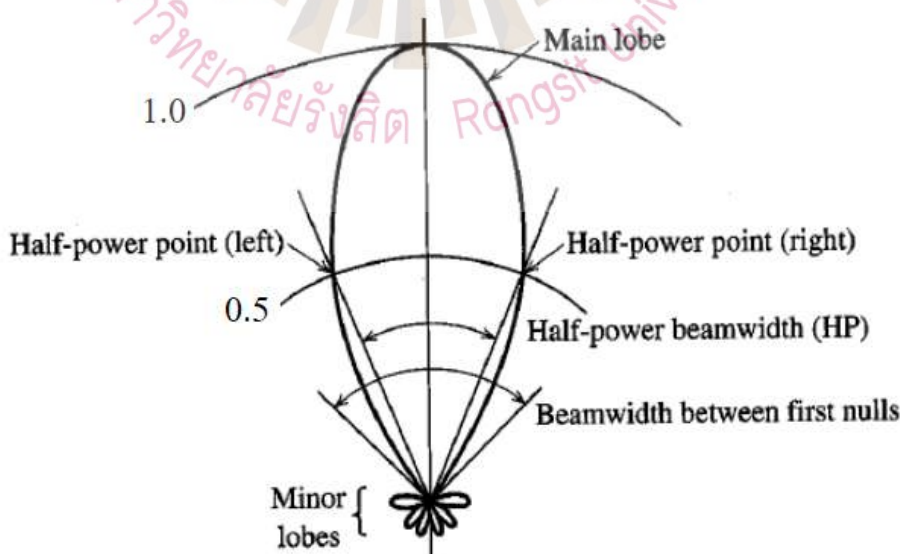
$$G_{r(dB)} = P_{r(dB)} - P_{t(dB)} + 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)_{(dB)} - G_{t(dB)} \quad (2-13)$$

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

นอกจากนี้ ความสามารถในการชี้ทิศทาง ยังสามารถหาได้จากแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ E และแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ H ในรูปแบบของค่าความกว้างลำคลื่น กำลัง (Half Power Beam-Width : HPBW) ดังรูปที่ 2.5 (รังสรรค์ วงศ์สรรค์, 2556) โดยค่า ความสามารถในการชี้ทิศทาง (D_0) ในหน่วย dB สามารถหาได้จาก

$$D_0 = 10 \log \frac{41253}{(BW_E)(BW_H)} \quad (2-14)$$

โดย BW_E เป็นความกว้างลำคลื่นกำลังของการแผ่พลังงานระนาบสนามไฟฟ้า และ BW_H เป็นความ กว้างลำคลื่นกำลังของการแผ่พลังงานระนาบสนามแม่เหล็ก



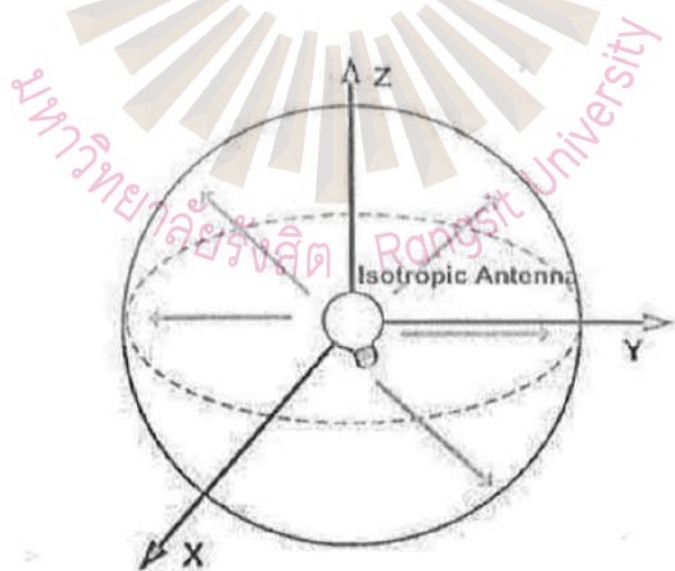
รูปที่ 2.5 การหาความกว้างลำคลื่นกำลัง

ที่มา : รังสรรค์ วงศ์สรรค์, 2556

2.3.4 อัตราขยาย

อำนาจ มีมงคล และ อรรณพ ชันธิกุล (2553) สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญตัวหนึ่งในระบบสื่อสารไร้สาย ทำหน้าที่แผ่ กระจายและรับสัญญาณที่แผ่มาจากสายอากาศคันอื่น ถ้าใช้สายอากาศที่มีประสิทธิภาพต่ำก็จะไม่สามารถรับสัญญาณหรือส่งสัญญาณวิทยุออกไปได้เลย เพื่อเป็นการวัดประสิทธิภาพการทำงานของ สายอากาศจึงได้มีการกำหนดสายอากาศในทางทฤษฎีขึ้นมา เรียกว่า สายอากาศแบบไอโซโทรปิก (Isotropic Antenna) โดยสายอากาศแบบไอโซโทรปิกจะแผ่กระจายคลื่นเป็นรูปทรงกลมคล้าย ลูกโป่ง หมายความว่า ไม่ว่าจะอยู่บริเวณใดของสายอากาศนี้ก็จะสามารถรับสัญญาณได้ดีซึ่งถือว่าเป็นสายอากาศในอุดมคติ เพราะเป็นสายอากาศที่ไม่มีจุดบอดสัญญาณเลย เช่นเดียวกับหลอดไฟที่ เปล่งแสงออกมา ถึงอย่างไรก็ต้องมีขั้วไฟที่ถือเป็นจุดอับแสง ดังรูปที่ 2.6

ด้วยคุณสมบัติที่เป็นอุดมคตินี้ จึงถูกนำมาใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศ ประเภทอื่นๆ ที่มีใช้อยู่จริง จึงเป็นที่มาของหน่วย dBi ที่ใช้วัดอัตรากำลังขยายสายอากาศ (antenna gain) ซึ่งตัวอักษรที่ลงท้ายด้วยนั้น มาจากคำว่า isotropic นั่นเอง



รูปที่ 2.6 การแผ่คลื่นของสายอากาศแบบไอโซโทรปิกซึ่งเป็นสายอากาศในอุดมคติ

ที่มา : อำนาจ มีมงคล และ อรรณพ ชันธิกุล, 2553

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

$$Gain = \frac{P_{directional}}{P_{isotropic}} \quad (2-15)$$

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

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

$$Power\ gain(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} \quad (2-16)$$

เมื่อ P_1 คือกำลังของสายอากาศที่ต้องการวัด หน่วยเป็นวัตต์ และ P_2 คือกำลังงานของสายอากาศมาตรฐาน หน่วยเป็นวัตต์

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

$$Field\ gain(dB) = 10 \log_{10} \frac{V_1}{V_2} \quad (2-17)$$

เมื่อ V_1 คือความแรงของคลื่นวิทยุที่รับได้จากสายอากาศที่ต้องการวัด มีหน่วยเป็นโวลต์ V_2 คือ ความแรงของคลื่นวิทยุที่ได้รับจากสายอากาศมาตรฐาน มีหน่วยเป็นโวลต์

2.3.5 แบนด์วิดท์

อำนาจ มีมงคล และ อรรถพ ชันธิกุล (2553) แบนด์วิดท์ (Bandwidth, BW) ของสายอากาศ หมายถึงย่านหรือช่วงความกว้างของความถี่ที่สายอากาศสามารถทำงานได้โดยที่ไม่สูญเสียคุณลักษณะที่กำหนดไว้ โดยที่คุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศเมื่อถูกนำไปใช้งานนั้นจะต้องตรงต่อความต้องการที่กำหนดหรือออกแบบไว้ เช่น ค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า แบบรูปการแพร่กระจายกำลังงาน ความกว้างลำคลื่น ขั้วคลื่น ระดับสัญญาณโวลต์ด้านข้าง อัตราขยาย ทิศทางลำคลื่นและประสิทธิภาพของการแพร่กระจายกำลังงาน ในกรณีของสายอากาศแถบกว้าง (Broadband Antenna) ซึ่งเป็นสายอากาศที่สามารถใช้งานครอบคลุมความถี่กว้างมากๆ โดยการบอกค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศมักจะบอกในรูปของอัตราส่วนของความถี่สูงสุด ($f_{\max}$) และความถี่ต่ำสุด ($f_{\min}$) ที่สามารถใช้งานได้โดยไม่ทำให้คุณสมบัติในการทำงานของสายอากาศเปลี่ยนไป โดยแสดงในรูปของสมการ

$$BW = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} \quad (2-18)$$

สายอากาศประเภทนี้ในปัจจุบันสามารถออกแบบให้มีอัตราส่วนสูงมากถึง 40:1 สำหรับสายอากาศแถบแคบ (Narrowband Antenna) มักจะใช้วิธีการบอกแบนด์วิดท์ของสายอากาศในรูปของเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่างจากความถี่กลางซึ่งเป็นความถี่ใช้งาน (f_0) ที่ใช้เริ่มต้นในการออกแบบสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$BW = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_0} \times 100\% \quad (2-19)$$

โดยที่ความถี่กลาง f_0 สามารถคำนวณได้จาก

$$f_0 = \frac{f_{\max} + f_{\min}}{2} \quad (2-20)$$

2.3.6 โพลาริเซชัน

สันติพงศ์ แต่งขาว (2547) การแยกขั้วคลื่น (Polarization) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้ได้ให้นิยามไว้ คือ เป็นขั้วของคลื่นที่มีการส่งหรือแผ่กระจายออกไปโดยสายอากาศ และถ้าไม่มีการกำหนดทิศทางมา ให้ การพิจารณาการแยกขั้วคลื่นจะกระทำในทิศทางที่มีอัตราขยายสูงสุด ซึ่งการแยกขั้ว ของคลื่นที่แผ่กระจายออกไป คือ การอธิบายคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งขนาดสัมพัทธ์ และทิศทางของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ตลอดทิศทางของการแผ่กระจาย กำลังงานออกไป

ในทางปฏิบัติ การแยกขั้วคลื่นของพลังงานที่ถูกแผ่กระจายออกไป จะเปลี่ยนแปลงตามทิศทางเมื่อเทียบจากจุดศูนย์กลางของสายอากาศ ดังนั้นหากบางส่วนของแบบรูปมีความแตกต่าง ก็จะทำให้การแยกขั้วคลื่นมีความแตกต่างกันออกไปด้วย การแยกขั้วคลื่นที่ถูกส่งออกไปหรือรับเข้ามาโดยสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้ ในบริเวณสนามระยะไกล ได้ถูกนิยามว่า การแยกขั้วของระนาบคลื่น (Plane Wave) ที่แผ่กระจายออกไป และวัดได้ในบริเวณสนามระยะไกล (ระยะเข้าสู่อนันต์) จะมีการแยกขั้วคลื่นเหมือนกับการแยกขั้วคลื่นที่อยู่ในทิศทางแนวรัศมี (Radial Direction) ซึ่ง วัดได้บริเวณรอบตัวสายอากาศ การแยกขั้วคลื่นสามารถแบ่งออกเป็นแบบต่าง ๆ ได้แก่

1) การแยกขั้วคลื่นแบบเชิงเส้น

การแยกขั้วคลื่นแบบเชิงเส้น (Linear Polarization) ความแตกต่างเชิงเฟส-เวลา (Time-Phase Difference) ระหว่างองค์ประกอบทั้งสองของคลื่น จะต้องเท่ากับ

$$\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x = n\pi, n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2-20)$$

2) การแยกขั้วคลื่นแบบวงกลม

การแยกขั้วคลื่นแบบวงกลม (Circular Polarization) เมื่อขนาดขององค์ประกอบทั้งสองของ คลื่นมีค่าเท่ากันและความแตกต่างเชิงเฟส-เวลาระหว่างทั้งสอง มีค่าเป็นจำนวนคี่ของ $\lambda/2$ นั่นคือ

$$|E_x| = |E_y| \rightarrow E_{x0} = E_{y0} \quad (2-21)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \begin{cases} +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi & , n = 0, 1, 2, \dots CW \\ -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi & , n = 0, 1, 2, \dots CCW \end{cases} \quad (2-22)$$

ถ้าทิศทางของการแผ่กระจายกำลังงานอยู่ตรงกันข้ามกัน (เช่น ทิศทาง +z เป็น -z) เฟสของสมการ (2-22) ที่มีการหมุนแบบ CW และ CCW ก็จะเปลี่ยนเป็นตรงกันข้าม

3) การแยกขั้วคลื่นวงรี

การแยกขั้วคลื่นวงรี (Elliptical Polarization) เมื่อความแตกต่างเชิงเฟส-เวลาระหว่าง องค์ประกอบทั้งสองของคลื่นมีค่าเป็นจำนวนคี่ของ $\lambda/2$ และขนาดขององค์ประกอบทั้งสองจะไม่ เท่ากัน หรือ ความแตกต่างเชิงเฟส-เวลา ระหว่างองค์ประกอบทั้งสองของคลื่นมีค่าไม่เท่ากับ $\lambda/2$ (โดย ไม่คำนึงถึงขนาด) นั่นคือ

$$|E_x| \neq |E_y| \rightarrow E_{x0} \neq E_{y0} \quad (2-23)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \begin{cases} +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi & , n = 0, 1, 2, \dots CW \\ -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi & , n = 0, 1, 2, \dots CCW \end{cases} \quad (2-24)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \begin{cases} > 0 & , n = 0, 1, 2, \dots CW \\ < 0 & , n = 0, 1, 2, \dots CCW \end{cases} \quad (2-25)$$

สำหรับการแยกขั้วคลื่นแบบวงรี เส้นโค้งที่ถูกวาดไปยังตำแหน่งที่กำหนดให้ จะเป็นฟังก์ชันของเวลาและเป็นรูปวงรี อัตราส่วนของแกนหลัก (Major Axis) และแกนรอง (Minor Axis) จะ เรียกว่า อัตราส่วนแกน (Axial Ratio: AR) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$AR = \frac{\text{major axis}}{\text{min or axis}} = \frac{OA}{OB}, 1 \leq AR \leq \infty \quad (2-26)$$

โดยที่

$$OA = \left[\frac{1}{2} \left\{ E_{x0}^2 + E_{y0}^2 + [E_{x0}^4 + E_{y0}^4 + 2E_{x0}^2 E_{y0}^2 \cos(2\Delta\phi)]^{1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad (2-27)$$

$$OB = \left[\frac{1}{2} \left\{ E_{x0}^2 + E_{y0}^2 + [E_{x0}^4 + E_{y0}^4 + 2E_{x0}^2 E_{y0}^2 \cos(2\Delta\phi)]^{1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad (2-28)$$

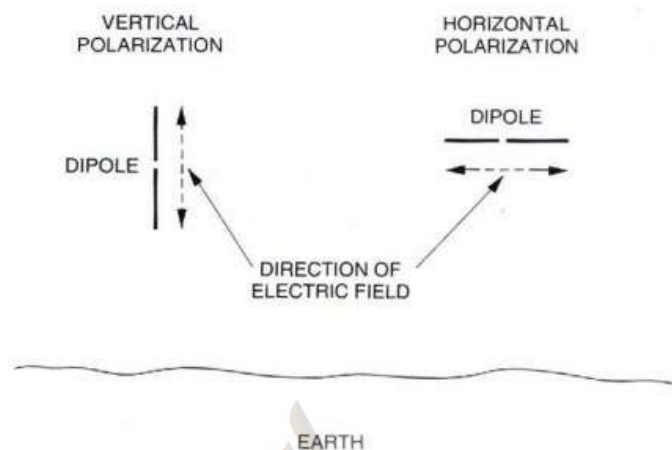
การเอียงของวงรี จะสัมพันธ์กับแกน y ซึ่งขึ้นอยู่กับมุม τ ที่กำหนดโดยสมการ

$$\tau = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2E_{x0}E_{y0}}{E_{x0}^2 - E_{y0}^2} \cos(\Delta\phi) \right] \quad (2-29)$$

เมื่อวงรีถูกวางตัวบนแกนหลัก (Principal Axes: $\tau = \frac{n\pi}{2}, n = 0, 1, 2, \dots$) แกนหลัก (แกนรอง) จะมีค่าเท่ากับ $E_{x0}(E_{y0})$ หรือ $E_{y0}(E_{x0})$ และอัตราส่วนแกนจะเท่ากับ E_{x0}/E_{y0} หรือ E_{y0}/E_{x0}

การโพลาไรซ์ของสายอากาศจะอธิบายทิศทางของสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศซึ่งถูกส่งออกไปโดยตัวสายอากาศในสนามระยะไกลจริงๆ แล้วก็ใช้ในการอธิบายทิศทางซึ่งมีความเข้มของสนามสูงสุด สายอากาศส่วนใหญ่จะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น (Linear Polarization) นั่นคือในหนึ่งรอบ (Cycle) การจذبของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงในอากาศว่าง สายอากาศดังกล่าวจะถูกแบ่งออกเป็น การโพลาไรซ์แนวตั้ง (Vertical Polarization) และการโพลาไรซ์แนวนอน (Horizontal Polarization) นอกจากนี้ยังมีการโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular) และแบบรูปวงรี (Elliptical)

บ่อยครั้งที่การโพลาไรซ์ของสายอากาศ จะอ้างอิงจากรูปทรงของตัวมันเอง เช่น ในกรณีของสายอากาศแบบเส้นลวด ซึ่งอาจจะประกอบด้วยองค์ประกอบเพียงตัวเดียว หรือหลายตัววางขนานกัน (เช่น สายอากาศไดโพลและยาถิ) เราสามารถที่จะสมมุติให้สนามไฟฟ้าซึ่งเป็นโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นให้ขนานไปกับองค์ประกอบของตัวสายอากาศ ซึ่งสายอากาศบางชนิดมีโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นเหมือนกัน แต่ไม่สามารถจะใช้รูปทรงของมันมาทำการทำนายถึงการโพลาไรซ์ของมันได้ ได้แก่ สายอากาศปากแตร (Horn) แบบบ่วง (Loop) และแบบร่อง (Slit) เป็นต้น



รูปที่ 2.7 การโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล

ที่มา : สันติพงศ์ แดงขาว, 2547

เพื่อให้การรับสัญญาณทำได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ สิ่งสำคัญก็คือสายอากาศที่ทำหน้าที่รับสัญญาณจะต้องมีการโพลาไรซ์แบบเดียวกันกับสัญญาณที่ส่งมา และเมื่อเกิดการสูญเสียสัญญาณอันเนื่องมาจากการจัดวางการโพลาไรซ์ไม่ถูกต้อง (เช่น สัญญาณที่รับได้เป็นของการโพลาไรซ์ทางแนวตั้ง แต่สายอากาศที่ใช้มีการจัดการโพลาไรซ์ทางแนวนอน) เราจะเรียกว่า การแยกการโพลาไรซ์ไขว้ (Cross-Polarization Isolation)

2.3.7 อินพุตอิมพีแดนซ์

วิทวัส สิกขะกุล และ ปาลีรัตน์ วงจำปา (2563) อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance, Z_0) ควรจะมีค่าอิมพีแดนซ์ตามที่กำหนด เช่น 50 โอห์ม ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Z_0) ถูกอธิบายเป็นอัตราส่วนของแรงดันและกระแสที่จ่ายให้แก่สายอากาศ

$$Z_{in} = \frac{V(0)}{I(0)} = \frac{V_0^+ + V_0^-}{V_0^+ - V_0^-} Z_0 \quad (2-30)$$

โดยที่	Z_0	คือค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะ (Characteristic Impedance)
	V_0	คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่สายอากาศ
	I_0	คือค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่สายอากาศ

- V_0^+ คือค่าแอมพลิจูดของแรงดันคลื่นกระทบที่จ่ายให้แก่สายอากาศ
 V_0^- คือค่าแอมพลิจูดของแรงดันคลื่นสะท้อนที่จ่ายให้แก่สายอากาศ

2.3.8 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของสายอากาศ

วิทวัส สิริฐกุล และ ปาลีรัตน์ วงจำปา (2563) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ควรจะมีค่าทั่วไปอยู่ระหว่าง -6 ถึง -10 เดซิเบล ซึ่งมีความหมายว่ากำลังของคลื่นส่งถูกสะท้อนกลับที่ร้อยละ 25.1 และร้อยละ 10 ตามลำดับ สามารถถูกอธิบายได้จากค่าอัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดของแรงดันคลื่นสะท้อนที่จ่ายให้แก่สายอากาศและค่าแอมพลิจูดของแรงดันคลื่นกระทบที่จ่ายให้แก่สายอากาศดังสมการต่อไปนี้

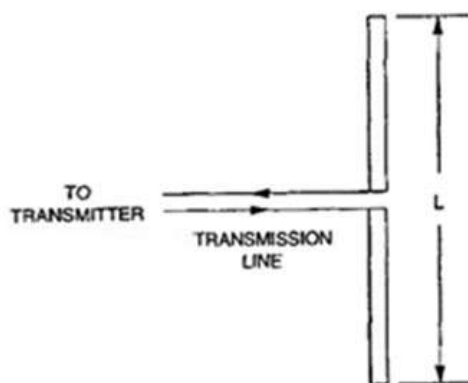
$$S_{11} = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (2-31)$$

- โดยที่ Z_0 คือค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะ
 Z_{in} คือค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า

2.4 สายอากาศไดโพล

รังสรรค์ วงศ์สรรค์ (2556) สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna) เป็นสายอากาศอย่างง่าย ที่มีองค์ประกอบเป็นแท่งโลหะ 2 แท่งวางเป็นแนวเส้นตรงที่มีความยาว L ดังรูปที่ 2.8 โดยจุดกึ่งกลางของตัวไดโพลจะต่อเข้ากับเครื่องส่งโดยใช้สายส่งเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อเครื่องส่งจะจ่ายสัญญาณเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสลับไปยังสายอากาศ กระแสของสัญญาณนี้จะไหลไปยังขั้วหนึ่งของไดโพลและไหลกลับมายังอีกขั้วหนึ่งของไดโพล ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของกระแสที่ส่งไปยังขั้วแรกของไดโพล

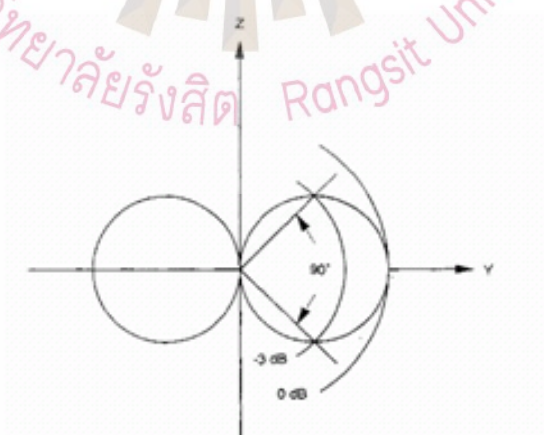
การกระจายของกระแส (Current Distribution) จะแสดงให้เห็นขนาด (Magnitude) ของสัญญาณกระแสสลับที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของสายอากาศไดโพลจะมีค่าไม่เท่ากัน โดยจะเป็นศูนย์ที่ปลายทั้งสอง แต่จะมีค่าสูงสุดที่จุดกึ่งกลางหรือที่จุดอื่น ๆ บนตัวไดโพล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวของไดโพลและความถี่ของสัญญาณที่มาจากรีโมต



รูปที่ 2.8 สายอากาศไดโพล
ที่มา : รังสรรค์ วงศ์สรรค์, 2556

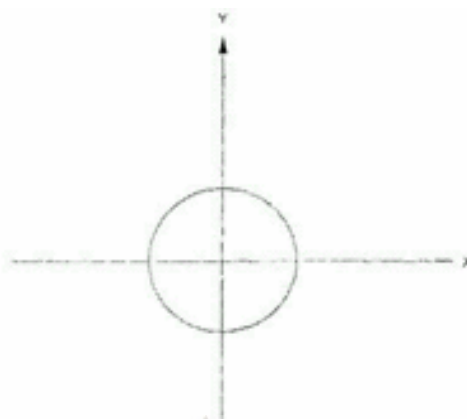
ไดโพลอุดมคติ (Ideal Dipole) เป็นสายอากาศสมมติซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษาสายอากาศชนิดอื่น ๆ สามารถพิจารณาให้เป็นองค์ประกอบเล็ก ๆ ของความยาวไดโพล (Infinitesimal Dipole) ที่มีการแจกแจงกระแสที่มีลักษณะที่เท่ากันตลอด คุณสมบัติทางทฤษฎีของไดโพลอุดมคติจะประมาณให้มีค่าทางไฟฟ้าเท่ากับสายอากาศไดโพลที่มีขนาดเล็ก ๆ

สันติพงศ์ แดงขาว (2547) รูปที่ 2.9 ได้แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) ของไดโพลอุดมคติ ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าไดโพลอุดมคตินั้นมีทิศทางการแผ่กระจายคลื่นที่มีความแรงของสัญญาณ สูงในบางทิศทางเมื่อเทียบกับทิศทางอื่น ๆ



รูปที่ 2.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของไดโพลอุดมคติตามหลักทฤษฎีระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane)

ที่มา : สันติพงศ์ แดงขาว, 2547



รูปที่ 2.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของไดโพลอุดมคติตามหลัก

ทฤษฎีระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane)

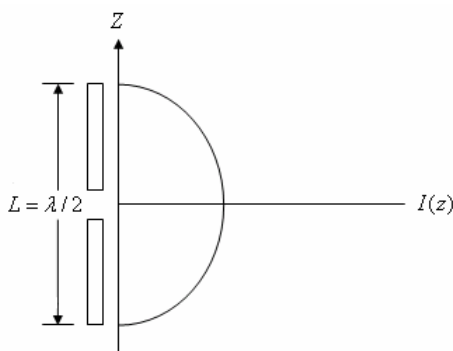
ที่มา : สันติพงศ์ แสงขาว, 2547

ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (Half-Power Beamwidth: HPBW) ของสายอากาศคือการแยกมุมต่างๆ ในลำคลื่นหลัก โดยคิดที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB) ของกำลังงานที่แพร่ออกในทิศทางของกำลังงานสูงสุด

$$HPBW = |\theta_{HPBW, left} - \theta_{HPBW, right}| \quad (2-32)$$

ค่า HPBW ของไดโพลอุดมคติระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) จะเท่ากับ 90° ดังรูปที่ 2.8

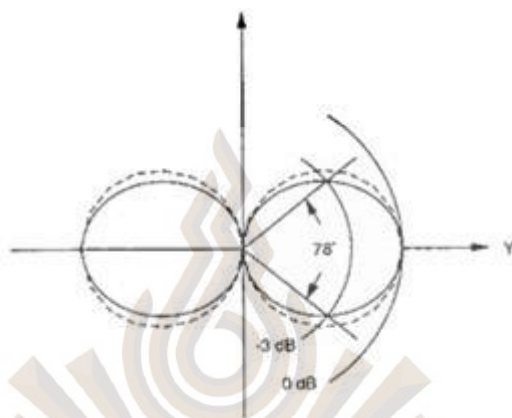
สำหรับสายอากาศไดโพลในทางปฏิบัติที่มีความยาว L ซึ่งได้ใช้กันทั่วไปจะมีขนาดความยาว $\lambda/2, \lambda$ และ $3\lambda/2$ ค่า λ เป็นค่าความยาวคลื่นของสัญญาณ กระแสที่กระจายบนไดโพล $\lambda/2$ จะมีรูปร่างของสัญญาณเป็นรูปไซน์ครึ่งเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยกระแสจะมีค่าสูงสุดที่จุดกึ่งกลางและมีค่าศูนย์ที่จุดปลายสุด



รูปที่ 2.11 การกระจายของกระแสในไดโพล $\lambda/2$

ที่มา : สันติพงศ์ แสงขาว, 2547

รูปที่ 2.12 ได้แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งจากสายอากาศไดโพลแบบ $\lambda/2$ ในระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) และในไดโพลอุดมคติ โดยสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ มี HPBW 78 องศา ในระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) และให้ผลที่แคบและบางกว่าลักษณะของสายอากาศไดโพลอุดมคติ ส่วนการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) ของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ จะมีลักษณะเป็นวงกลมดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) ของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ (เส้นทึบ) และไดโพลอุดมคติ (เส้นประ)
ที่มา : สันติพงศ์ แสงขาว, 2547

2.5 สายอากาศยาคิ-อูดา

สายอากาศยาคิ-อูดา (Yagi-Uda Antenna) หรือสายอากาศ Yagi เป็นสายอากาศแบบกำหนดทิศทางที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสายอากาศเรโซแนนซ์แบบเรโซแนนซ์ขนาดสองขั้วขึ้นไปในอาร์เรย์แบบ End-Fire องค์ประกอบเหล่านี้ส่วนใหญ่มักจะเป็นแท่งโลหะที่ทำหน้าที่เป็นไดโพลครึ่งคลื่น สายอากาศ Yagi-Uda ประกอบด้วยองค์ประกอบชิ้นส่วนขับเคลื่อน (Driver Element) ชิ้นเดียวที่เชื่อมต่อกับเครื่องส่งสัญญาณวิทยุหรือเครื่องรับวิทยุผ่านสายส่ง มีการเพิ่มองค์ประกอบที่เป็นกาฝาก ที่ไม่มีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้า มีตัวสะท้อน (Reflector) หนึ่งตัวและตัวชี้ทิศทาง (Director) จำนวนหนึ่ง

2.5.1 ประวัติความเป็นมา

วิทวัส สิกุซูกุ และ ปาสีรัตน์ วงจำปา (2563) สายอากาศยาคิ-อูดา ถูกคิดค้นขึ้นในปี 1926 โดย Shintaro Uda ของ Tohoku Imperial University, Japan ด้วยความร่วมมือของ

Hidetugu Yagi ของ Tohoku Imperial University ยากิและอุเดตีพิมพ์รายงานฉบับแรกของพวกเขาเกี่ยวกับสายอากาศแบบกำหนดทิศทางด้วยคลื่นโปรเจกเตอร์ ยากิแสดงให้เห็นถึงการพิสูจน์แนวคิดแต่ปัญหาทางวิศวกรรมพิสูจน์แล้วว่าเป็นภาระหนักกว่าระบบทั่วไป

ยากิ ตีพิมพ์การอ้างอิงภาษาอังกฤษฉบับแรกบนสายอากาศในบทความเกี่ยวกับการวิจัยคลื่นสั้นในประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2471 และมีความเกี่ยวข้องกับชื่อของเขา อย่างไรก็ตาม ยากิยอมรับเสมอว่า อุเดะ มีส่วนสำคัญต่อการออกแบบ และชื่อที่ถูกต้องสำหรับสายอากาศคือสายอากาศ Yagi-Uda (หรืออาร์เรย์) ดังที่กล่าวมา

สายอากาศยากิถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายครั้งแรกในช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง สำหรับชุดเรดาร์ในอากาศเนื่องจากความเรียบง่ายและทิศทางของมัน แม้ว่าจะถูกประดิษฐ์ขึ้นในญี่ปุ่น วิศวกรเรดาร์ชาวญี่ปุ่นหลายคนไม่ทราบถึงการออกแบบนี้จนกระทั่งช่วงปลายสงคราม ส่วนหนึ่งเป็นเพราะการแข่งขันระหว่างกองทัพบกและกองทัพเรือ ทางทหารของญี่ปุ่นเริ่มตระหนักถึงเทคโนโลยีนี้เป็นครั้งแรกหลังจากยุทธการที่สิงคโปร์เมื่อพวกเขาจับบันทึกของช่างเทคนิคเรดาร์ของอังกฤษที่กล่าวถึง "สายอากาศยากิ" เจ้าหน้าที่ข่าวกรองของญี่ปุ่นไม่รู้ด้วยซ้ำว่ายากิเป็นชื่อภาษาญี่ปุ่นในบริบทนี้ เมื่อถูกสอบปากคำ ช่างบอกว่ามันเป็นสายอากาศที่ตั้งชื่อตามอาจารย์ชาวญี่ปุ่น

หลังสงครามโลกครั้งที่ 2 การปรากฏตัวของการกระจายเสียงทางโทรทัศน์กระตุ้นให้มีการดัดแปลงการออกแบบยากิ-อุเดะอย่างกว้างขวางสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์บนชั้นคาบฟ้าในย่านความถี่ VHF (และต่อมาสำหรับโทรทัศน์ UHF) และยังเป็นสายอากาศวิทยุ FM ในบริเวณชายขอบด้วย ข้อเสียเปรียบที่สำคัญคือแบนด์วิดท์ที่แคบโดยเนื้อแท้ของ Yagi ซึ่งในที่สุดก็แก้ไขได้ด้วยการนำไดโพลอาร์เรย์แบบช่วงล๊อคแบบไวด์แบนด์ (LPDA) มาใช้ กระนั้น การเพิ่มขึ้นของ Yagi เมื่อเทียบกับ LPDA ทำให้ยังคงต้องการการรับสัญญาณที่ดีที่สุดและการออกแบบ Yagi ที่ซับซ้อนมากและผสมผสานกับเทคโนโลยีสายอากาศอื่นๆ ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถทำงานผ่านคลื่นโทรทัศน์แบบกว้างได้ และสายอากาศ Yagi-Uda ได้รับการตั้งชื่อว่า IEEE Milestone ในปี 1995



รูปที่ 2.13 รูปวาดองค์ประกอบสายอากาศยาคิ-อุตะ

ที่มา: ผู้วิจัย, 2565

รูปวาดของสายอากาศโทรทัศน์ Yagi-Uda คลื่นความถี่ย่าน VHF ปี 1954 ดังรูปที่ 2.13 ใช้สำหรับช่องสัญญาณ Analog 2-4, 54-72 MHz (ช่องของสหรัฐอเมริกา) มี 5 องค์ประกอบ คือ ตัวชี้ทิศทาง 3 ตัว, 1 ตัวสะท้อน และ 1 ตัวขับเคลื่อน ซึ่งเป็นไดโพลพับ (Folded Dipole) เพื่อให้ตรงกับสายป้อนตะกั่วคู่ขนาด 300Ω ทิศทางของลำคลื่นจะไปตามตัวชี้ทิศทาง

โดยสายอากาศจะมีองค์ประกอบหลักดังนี้ ตัวขับ (Driven Element) ซึ่งก็คือสายอากาศไดโพลที่มีความยาวครึ่งคลื่น (ที่ป้อนสัญญาณตรงกลาง) และมีอีกสองส่วนที่เพิ่มขึ้นมาจากสายอากาศไดโพลคือ รีเฟลกเตอร์ (Reflector) หรือตัวสะท้อน และ ไดเรกเตอร์ (Director) หรือตัวชี้ทิศทาง โดยทั้งสองที่เพิ่มขึ้นมานี้เรียกว่า พาราซิติกอีลิเมนต์ (Parasitic Elements) ความหมายของพาราซิติกอีลิเมนต์คือ ส่วนของสายอากาศที่ไม่ได้ต่อโดยตรงกับสายนำสัญญาณจากเครื่องรับหรือเครื่องส่ง แต่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหรือแรงดันบนตัวมันได้และช่วยเสริมจัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นตามที่ต้องการ และสายอากาศที่นำมาใช้งานร่วมกับตัวพาราซิติกเรียกว่า พาราซิติกอาร์เรย์ ส่วนที่เป็นรีเฟลกเตอร์จะต้องวางไว้ด้านหลังตัวขับและจะต้องมีความยาวมากกว่าตัวขับประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์ และส่วนที่เป็นไดเรกเตอร์จะต้องวางไว้ด้านหน้าตัวขับและจะสั้นกว่าตัวขับประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์ ระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์จะอยู่ในช่วง 0.15 ถึง 0.308 ของความยาวคลื่น

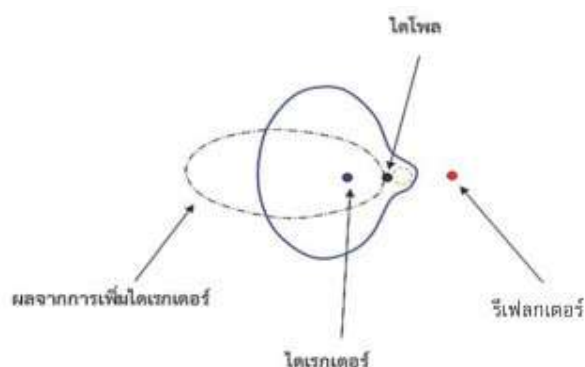
รีเฟลกเตอร์มีผลต่อรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของไดโพลแบบ $\lambda/2$ เนื่องจากมีสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าถูกเหนี่ยวนำที่มันมีผลให้ตัวรีเฟลกเตอร์สามารถแผ่คลื่นเองได้ ตัวแปรที่มีผลต่อรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นมี

- 1) ความยาวของรีเฟลคเตอร์
- 2) ระยะห่างจากไดโพลพิจารณาในรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8 ตามลำดับ

จากทั้งสองรูป เห็นได้ชัดว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางของอาร์เรย์แบบนี้ดีกว่าไดโพลอย่างเดียว เหตุที่รีเฟลคเตอร์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงนี้อธิบายได้ว่า เมื่อเราป้อนแรงดันไฟฟ้า (ที่ความถี่เรโซแนนซ์) และ กระแสให้กับไดโพลจะมีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปทุกทิศในแนวตั้งฉากกับไดโพลพลังงานบางส่วน เดินทางมาที่รีเฟลคเตอร์และเหินขวานำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งมีเฟสตามหลังแรงดันไฟฟ้าส่วนที่ป้อน ให้ไดโพลอยู่ โดยคิดจากระยะห่างของอีลิเมนต์

ตอนนี้รีเฟลคเตอร์ก็สามารถแผ่คลื่นได้ในทุกทิศที่ตั้งฉากกับมันเช่นกัน ถ้าความยาวของรีเฟลคเตอร์ และระยะห่างระหว่างไดโพล/รีเฟลคเตอร์ถูกพิจารณาเลือกมาอย่างเหมาะสมแล้ว พลังงานส่วน ที่แผ่มาจากรีเฟลคเตอร์จะไปเสริมในส่วนของไดโพลในทิศทางที่ต้องการไม่เช่นนั้นทุกอย่างตรงข้ามกัน คือ มีการหักล้างของพลังงานเกิดขึ้น

การเพิ่มค่าสภาพเจาะจงทิศทางและอัตราขยายของไดโพล สามารถทำได้อีกโดยเพิ่มพาราซิติก อีลิเมนต์อันใหม่ลงไปโดยวางในตำแหน่งตรงข้ามกับรีเฟลคเตอร์ เราเรียกอีลิเมนต์ใหม่นี้ว่า ไดเรกเตอร์ (Director) ที่มีขนาดสั้นกว่า $\lambda/2$ อยู่ประมาณ 3 ถึง 5 เปอร์เซนต์ ขณะที่ไดโพลแผ่คลื่นจะมีบางส่วน เหินขวานำให้ไดเรกเตอร์สามารถแผ่คลื่นได้เช่นเดียวกับรีเฟลคเตอร์ ในการพิจารณาเลือกความยาวของ ไดเรกเตอร์และระยะห่างระหว่างไดโพลไดเรกเตอร์ นับว่าสำคัญมาก เพราะถ้าเลือกค่าถูกต้อง พลังงานที่แผ่ จากไดเรกเตอร์จะไปเสริมกับส่วนของไดโพล เป็นการเพิ่มค่าสภาพเจาะจงทิศทางและอัตราขยายให้มากขึ้น ทว่าไปแล้ว ระยะห่างระหว่างไดโพลกับรีเฟลคเตอร์จะมีค่าระหว่าง 0.15 λ ถึง 0.25 λ ระยะห่างระหว่าง ไดโพลกับไดเรกเตอร์จะมีค่าระหว่าง 0.1 λ ถึง 0.15 λ พิจารณาผลที่มีต่อรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของไดเรกเตอร์ ไดโพล และรีเฟลคเตอร์ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศยาคิ

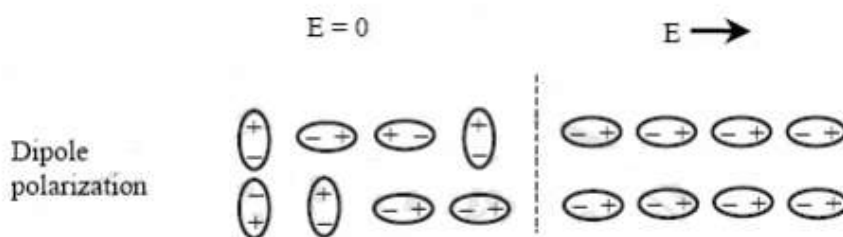
ที่มา : วิทวัส สิทธิกุล และ ปาลีรัตน์ วงจำปา, 2563

2.6 คุณสมบัติของ FR4

2.6.1 สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric Properties)

สารไดอิเล็กทริกเป็นสารที่นิยมนำมาใช้ในการทำเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า ในช่วงการค้นพบช่วงแรกนั้นสารที่นำมาใช้ คือ ไมก้า (Mica) เป็นผลึกเชิงเดี่ยวของแร่ซิลิเกต ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากมีความเสถียรสูง

Britannica (2009) สมบัติไดอิเล็กทริก คือ สมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าในวัสดุโดยเมื่อวัสดุอยู่ในสภาวะปกติจะประกอบไปด้วยโมเลกุลที่มีจุดศูนย์กลางมวลร่วมกันระหว่างโปรตอนและอิเล็กตรอน โดยจะอยู่ภายใต้แรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลและแรงยึดเหนี่ยวของอะตอม ภายในเนื้อสารจึงไม่มีประจุไฟฟ้าอิสระ แต่เมื่อสารได้รับกระแสไฟฟ้าจะทำให้กลุ่มประจุบวกถูกผลักไปในทิศทางของสนามไฟฟ้า ส่วนกลุ่มประจุลบจะถูกผลักไปในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้โมเลกุลของสารเกิดไดโพลโมเมนต์ (Dipole Moment) ขึ้นมาดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การเกิดโพลาไรซ์แบบ Ionic

ที่มา : Britannica, 2009

ในสารไดอิเล็กทริกบางตัวมีโมเลกุลที่มีขั้วอยู่แล้วเพียงแต่ทิศทางของไดโพลไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่สารไดอิเล็กทริกจะทำให้ไดโพลเล็กๆ นี้เกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันอย่างเป็นระเบียบ เมื่อพิจารณาวลสารทั้งหมดจะเห็นว่ามวลสารทั้งหมดจะเห็นว่าประจุบวกทั้งหมดย้ายออกจากประจุลบ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า สารไดอิเล็กทริกนั้นถูก โพลารไรซ์ (Polarized) ทิศทางของไดโพลจะตรงข้ามกับทิศของสนามไฟฟ้าที่ให้

สารไดอิเล็กทริกนี้มีสมบัติที่น่าสนใจ คือ สามารถเก็บประจุไฟฟ้า โดยความสามารถในการเก็บประจุของสารไดอิเล็กทริกนั้น จะใช้การเปรียบเทียบกับ การเก็บประจุไฟฟ้าของสุญญากาศ ว่าสามารถเก็บประจุได้เพิ่มขึ้นกี่เท่า ดังสมการ

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2-33)$$

โดยที่

ϵ_r คือ Relative Permittivity (Dielectric Constant)

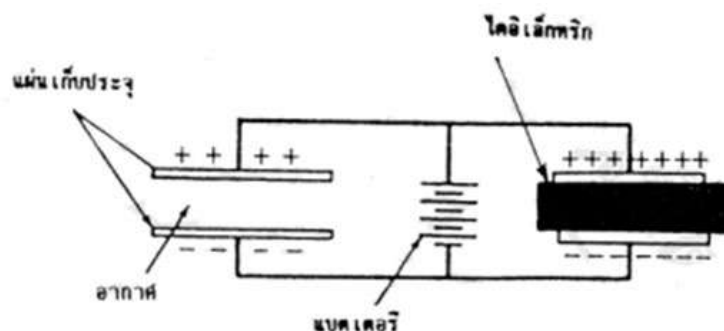
ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ มีค่า $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

C คือ ค่าความจุ มีหน่วยเป็นฟารัด (F)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นโลหะตัวนำ (m^2)

d คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (m)

โดยค่า ϵ_r เป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพและความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของสารไดอิเล็กทริกนั้นๆ มีค่าเป็นกี่เท่าของสุญญากาศ ความสามารถในการเก็บประจุจะแปรผันตรงกับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และรูปทรงของตัวเก็บประจุ ดังนั้นการเก็บประจุไฟฟ้าที่สมบูรณ์ที่สุดจะต้องไม่นำไฟฟ้าเลยถ้าหากได้รับกระแสไฟฟ้าตรง นั่นคือ จะต้องไม่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่เลยหรือความต้านทานสูงเป็นอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติแล้วสารไดอิเล็กทริกที่ใช้งานจะมีค่าความต้านทานไม่เป็นอนันต์ จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในปริมาณเล็กน้อยที่เรียกว่า กระแสรั่ว (Leakage Current) เกิดขึ้น

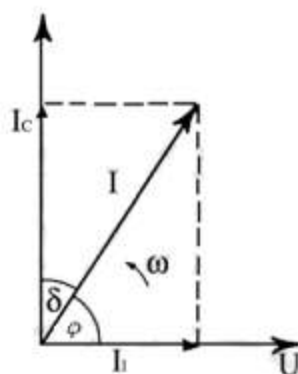


รูปที่ 2.16 แสดงตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน 2 ชุดที่ต่อในวงจรไฟฟ้าเดียวกัน

ที่มา : Britannica, 2009

เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ พฤติกรรมวัสดุจะแตกต่างออกไป เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้ากระแสสลับ สนามไฟฟ้าจะสลับตามรูปแบบของคลื่นไซน์ ดังนั้นเมื่อให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับแก่วัสดุไดอิเล็กทริก ไดโพลภายในวัสดุไดอิเล็กทริกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลับไปมาตามความถี่ของสนามไฟฟ้ากระแสสลับที่ให้ ณ ที่ความถี่สูง ไดโพลจะกลับตัวไม่ทันกับสนามที่ให้ ส่งผลให้เกิด relaxation ขึ้นหรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อใส่สนามไฟฟ้าแก่วัสดุสารไดอิเล็กทริก ไดโพลในสารวัสดุไดอิเล็กทริกจะใช้พลังงานที่ให้ในการกลับตัวไปมา แต่เมื่อความถี่สูง ไดโพลกลับไม่ทัน เมื่อกลับไม่ทัน ไดโพลจึงไม่กลับตัว เมื่อไม่กลับตัวแต่ยังคงรับพลังงานจากสนามไฟฟ้าอยู่พลังงานที่สารได้รับจะค่อยๆ สะสมเกิดเป็นความร้อนขึ้น เป็นการสูญเสียในวัสดุสารไดอิเล็กทริก

เนื่องจากตัวเก็บประจุไม่มีความต้านทานเป็นอนันต์ (Infinity) ดังนั้นจึงทำให้เกิดการรั่วของกระแสและทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นในวัสดุสารไดอิเล็กทริก โดยปกติตัวเก็บประจุจะมีกระแส I_c ที่นำศักย์ไฟฟ้าอยู่ 90° แต่ถ้ามีความต้านทานเพิ่มเข้ามามีจะทำให้เกิดการสูญเสียเป็นความร้อนเกิดขึ้นในตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2.17 ค่า Loss Tangent ที่เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กทริก

ที่มา : Britannica, 2009

$$\sigma_{AC} = \omega \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta \quad (2-34)$$

$$\text{loss factor} = \epsilon_r \tan \delta \quad (2-35)$$

เมื่อ

$$\sigma_{AC} = \text{dielectric (or AC) conductivity}$$

$$\epsilon_r \tan \delta = \text{loss factor}$$

$$\tan \delta = \text{dissipation factor}$$

เมื่อพิจารณาถึงผลของอุณหภูมิต่อค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก โดยทั่วไปแล้วค่านี้ควรจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งการที่เพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกนี้มีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่ว (Leakage Current : I_L) นั่นคือ เกิดการลดลงของ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของสาร ไดอิเล็กทริก แต่ยังมีสาเหตุอื่น ๆ อีกที่ต้องนำมาพิจารณาร่วมกันคือ

- 1) การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไม่ถึงอนันต์
- 2) การสูญเสียเนื่องจาก Dipole Relaxation
- 3) การสูญเสียเนื่องจาก Electron Polarization
- 4) การสูญเสียเนื่องจากการสั่นของไอออน

สาเหตุในข้อ 3 และ 4 นั้น จะเกิดในย่านความถี่สูง ๆ เท่านั้น และสาเหตุสำคัญที่เกิดการสูญเสียในช่วงความถี่ต่างๆ จะมาจากสาเหตุในข้อ 1 และ 2 เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ จะขึ้นกับ

ประเภทของสารไดอิเล็กทริก ในสารประเภทมีขั้วนั้น จะมีการสูญเสียเนื่องจาก Dipole Relaxation และการนำไฟฟ้า ซึ่งจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

2.6.2 ทฤษฎีพื้นฐานของการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า

ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ ปริมาณที่บ่งบอกถึงพลังงานที่สะสม และสูญเสียภายในสารที่อยู่ในสนามไฟฟ้า

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_r - i\varepsilon''_r \quad (2-36)$$

ปริมาณ ε'_r ซึ่งเป็นส่วนจริงจะบอกถึงค่าไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นปริมาณที่เกี่ยวข้องกับ พลังงานไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในสารเรียกว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและปริมาณ ε''_r เป็นจำนวนจินตภาพที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสีย โดยสัมพันธ์กับสภาพความนำไฟฟ้าของสารเรียกว่า ค่าสูญเสียไดอิเล็กตริก ค่าสภาพยอมจะมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ต่างๆ ของสาร ได้แก่ ความหนาแน่น อุณหภูมิ ความหนืด ความบริสุทธิ์และความสม่ำเสมอของสาร ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ในหลายๆ ด้าน

2.6.2.1 การกระทำระหว่างกัน (Interaction) ของวัสดุที่โปร่งใสจะถูกกำหนด คุณลักษณะ โดย ค่าสภาพยอมเชิงซ้อน (Complex Permeability) คือ

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_r - i\varepsilon''_r = \varepsilon'_r (1 - i \tan \delta_\mu) \quad (3-37)$$

โดยที่ ε'_r เป็นองค์ประกอบจำนวนจริงของ ε_r และ $\tan \delta_\mu$ คือ ตัวประกอบการสูญเสีย ของไดอิเล็กตริก (Dielectric loss Factor) ส่วนค่าความซาบซึมได้เชิงซ้อน (Complex Permeability) คือ

$$\mu_r = \mu'_r - i\mu''_r = \mu'_r (1 - i \tan \delta_\mu) \quad (2-38)$$

ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ โดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่กำหนดด้วย ปัญหาทางด้านเทคนิคต่างๆ และการหาคำตอบของปัญหาเหล่านี้ เราจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับพารามิเตอร์ของวัสดุที่ถูกนำมาใช้

1) ถ้าวัสดุที่ใช้สำหรับการสร้างอุปกรณ์คลื่นไมโครเวฟ ค่าที่แท้จริงของ ϵ_r และ μ_r จะต้องนำไปใช้เป็นข้อมูลอินพุตของรหัสคอมพิวเตอร์ที่ใช้ใน CAD (Computer Aid Design) ตัวอย่างเช่น การใช้สารไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียต่ำ มาทำเป็นชั้นสเตรตสำหรับวงจรระนาบ (Planer Circuit) เช่น วงจร DRO (Dielectric Resonator for Oscillator) ที่ใช้ในเทคโนโลยีไมโครสตริปหรือการใช้วัสดุที่สามารถดูดซับคลื่นได้ดีในอุปกรณ์ลดทอนกำลังงาน เป็นต้น

2) วัสดุที่ใช้สำหรับสร้างฝากรอบสายอากาศ (Radome) และวัสดุที่ใช้สำหรับดูดซับคลื่น เพื่อใช้ลดภาคตัดขวางเป้าเรดาร์ (Radar Cross Section: RCS)

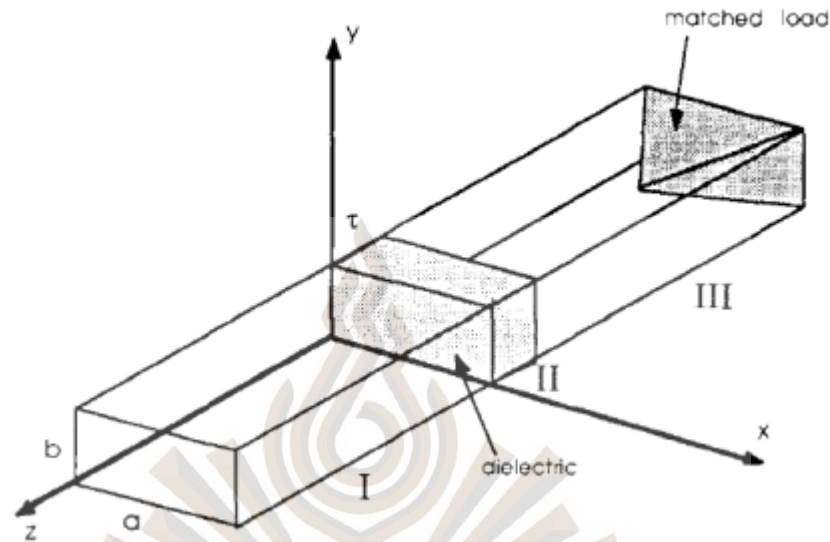
3) ค่าคงที่เชิงซ้อนของไดอิเล็กตริก บ่อยครั้งได้ถูกนำมาใช้สำหรับการหาค่าทางฟิสิกส์อื่นๆ ด้วย เช่น ค่าความชื้นของวัสดุได้มีการเปลี่ยนแปลงส่วนจำนวนจริง ให้เป็นเช่นเดียวกับส่วนจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ประสิทธิผลของไดอิเล็กตริก (Effective Dielectric Constant) ผลที่ตามมาคือสามารถเป็นไปได้ที่จะเฝ้าตรวจค่าความชื้นได้อย่างต่อเนื่อง โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

4) การที่วัสดุใดจะถูกทำให้ร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (การปรุงอาหาร การทำให้แห้ง เป็นต้น) เราจะต้องทราบค่าคงที่เชิงซ้อนของไดอิเล็กตริก และการเปลี่ยนแปลงของมัน เพื่อที่จะได้สร้างระบบคลื่นไมโครเวฟให้สามารถทำงานได้ตรงตามวัตถุประสงค์มากที่สุดชนิดหนึ่งที่มีรูปร่างที่กำหนด ได้ถูกวางไว้ในท่อนำคลื่น ข้อมูลที่เราต้องการทราบ นั่นคือ ϵ_r และ μ_r เราสามารถที่จะวัดได้จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission Coefficient) สำหรับการพิจารณาต่อไปนี้จะนำไปใช้ประโยชน์ได้

ก) วัสดุตัวอย่างที่มีโครงสร้างทางเรขาคณิตแบบง่ายๆ จะให้สมการทางคณิตศาสตร์ที่นำไปประยุกต์ใช้ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่วัดได้ (ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน S_{21}) กับค่า ϵ_r และ μ_r

ข) ขนาดของวัสดุตัวอย่างและการเลือกปริมาณการวัดจะต้องแน่ใจว่ามีความไวเพียงพอต่อการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของวัสดุนั้นได้

ค) ถ้าทั้ง ϵ_r และ μ_r เป็นประมาณการวัดเพื่อหาค่าทั้งสองค่านี้ แต่บ่อยครั้งที่เราทราบมาล่วงหน้าก่อนว่าค่า μ_r ของวัสดุมีค่าเท่ากับ 1 เราก็จะหาเพียงปริมาณการวัด เพียงค่าเดียวเพื่อหาค่า ϵ_r



รูปที่ 2.18 ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีไดอิเล็กทริกอยู่ในพื้นที่ II

ที่มา : คณากร ลอนจันทิก, 2559

ดังนั้นในต่อไปนี้จะสมมุติกันว่า $\mu_r = 1$ เพื่อที่จะหาค่า ϵ_r ท่อนำคลื่นที่จะแสดงในรูปที่ 2.3 จะทำให้สัญญาณหายไปทีโหลดและวัสดุไดอิเล็กทริกจะมีขอบเขตตั้งแต่ $z = 0$ ถึง $z = -\tau$ ค่าศักย์ไฟฟ้า คือ

$$\psi_I = \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) [c_1 e^{ik_z z} + c_2 e^{-ik_z z}], z \geq 0 \quad (2-39)$$

$$\psi_{II} = \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) [c_3 e^{ik_z z} + c_4 e^{-ik_z z}], 0 \geq z \geq -\tau \quad (2-40)$$

$$\psi_{III} = \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) c_5 e^{ik_z z}, -\tau \geq z \quad (2-41)$$

โดยที่ค่าคงที่เฟส k_z ในพื้นที่ I และ III หาได้จาก

$$k_z = \frac{\pi}{\lambda a} \sqrt{4a^2 - \lambda^2} \quad (2-42)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของท่อนำคลื่นในอากาศว่าง ค่าคงที่เฟสและ k_{z2} ในพื้นที่ II หาได้จาก

$$k_{z2} = \frac{\pi}{\lambda a} \sqrt{4 \epsilon a^2 - \lambda^2} \quad (2-43)$$

ความสัมพันธ์ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ϵ_r คือ

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - i\epsilon''_r \quad (2-44)$$

ส่วนประกอบของ $\vec{E}$ และ $\vec{H}$ ประยุกต์ได้จากความสัมพันธ์

$$\vec{E} = -\nabla \psi \quad (2-45)$$

$$\vec{H} = -i\omega \epsilon \left(\psi \hat{z} \right) + \frac{1}{i\omega \epsilon} \nabla \nabla \cdot (\psi \hat{z}) \quad (2-46)$$

การที่ประยุกต์หาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กอย่างต่อเนื่องโดยมีขอบเขตที่ $z=0$ และ $z=-\tau$ เราจะได้ความสัมพันธ์การสะท้อนดังนี้

$$\Gamma = \frac{C_1}{C_2} = \frac{-i \left[\left(\frac{k_{z2}}{k_z} \right)^2 - 1 \right] \sin(k_{z2}\tau)}{2 \left(\frac{k_{z2}}{k_z} \right) \cos(k_{z2}\tau) + i \left[\left(\frac{k_{z2}}{k_z} \right)^2 + 1 \right] \sin(k_{z2}\tau)} \quad (2-47)$$

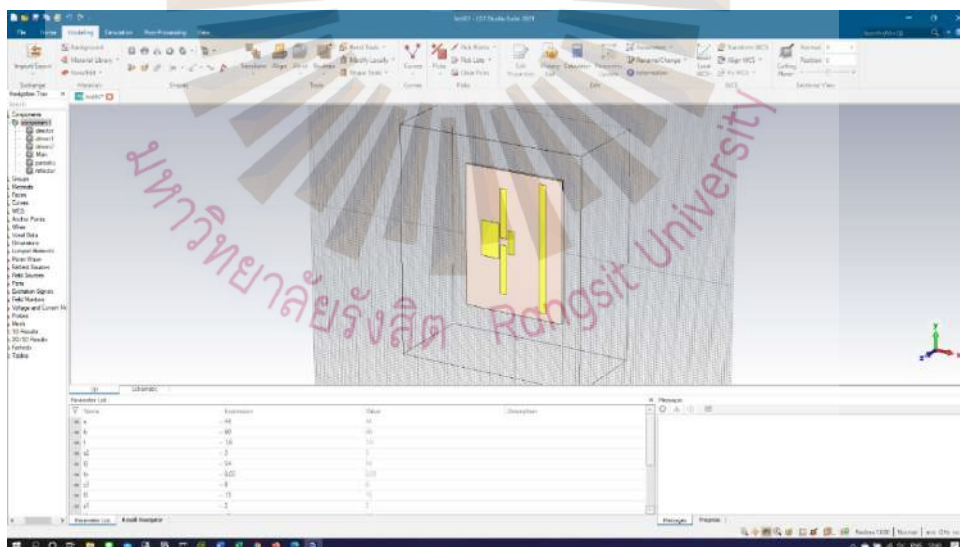
ถ้า $k_{z2}\tau$ มีขนาดเล็ก จะประมาณได้ว่า

$$\sin k_{z2}\tau \cong k_{z2}\tau \quad (2-48)$$

$$\cos k_{z2}\tau \cong 1 - \frac{1}{2}(k_{z2}\tau)^2 \quad (2-49)$$

ทางการแพทย์ ไปจนถึงอุปกรณ์ไฮเทคที่ใช้ในชีวิตประจำวัน พร้อมความสามารถในการวิเคราะห์อันหลากหลาย อาทิเช่น การออกแบบและจำลองในอุปกรณ์ความถี่สูงอย่างสายอากาศ, GPS, GSM, เรดาร์, เซ็นเซอร์, ระบบชาร์จไร้สาย, ชุดสายไฟสายเคเบิล, ระบบสื่อสาร วิเคราะห์ผลกระทบเชิงกลในมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า วิเคราะห์การไหลในสนามแม่เหล็ก บนแผงวงจรบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้มือถือ, อุปกรณ์ 4G, 5G, Wi-Fi, บลูทูธ เพื่อลดอันตรายจากการกระจายรังสี รวมไปถึงการออกแบบอุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น เครื่อง MRI, เครื่องเอกซเรย์, เครื่องกระตุ้นหัวใจ, เครื่องช่วยฟัง ไปจนถึงเครื่องมือพิเศษต่าง ๆ พร้อมคลังข้อมูลวัสดุชีวภาพเพื่อสร้างแบบจำลองร่างกายมนุษย์ เป็นต้น

CST Microwave Studio Suite แสดงดังรูป เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ทางด้าน Electromagnetic สามารถจำลองการทำงานและวิเคราะห์งานที่ใช้ความถี่สูงได้ในรูปแบบ 3D นอกจากนี้ยังออกแบบสายอากาศประเภทต่าง ๆ ได้และสามารถวิเคราะห์ผลโดยออกมาเป็นกราฟแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ที่ใช้อัตราขยาย รวมถึงแสดงออกมาเป็นเส้นกราฟเพื่อบอกว่าเป็นการโพลาไรซ์แบบใด จึงเป็นโปรแกรมที่เลือกนำมาใช้งานในด้านการออกแบบสายอากาศ



รูปที่ 2.19 โปรแกรม CST Microwave Studio Suite

ที่มา: ผู้วิจัย, 2565

บทที่ 3

การออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศ

3.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้ ได้นำเสนอการออกแบบและการวิเคราะห์สายอากาศวิทยุ-อูตะแถบความถี่ สำหรับการแผ่พลังงานทิศทางเดียว สามารถนำไปประยุกต์เป็นได้ทั้งสายอากาศตัวรับหรือสายอากาศตัวส่งกับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network, WLAN) โดยใช้ซอฟต์แวร์จำลองโครงสร้างสายอากาศที่ทำงานครอบคลุมย่านความถี่ต่ำ 2.4 GHz และทำงานครอบคลุมย่านความถี่สูง 5 GHz การออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศ เริ่มจากการจำลองโครงสร้างของสายอากาศแบบไดโพลมาไว้บนแผ่น FR4 โดยใช้พื้นฐานจากสายอากาศแบบไดโพลทั่วไป ในช่วงความถี่ 2.3 – 2.5 GHz จากนั้นได้เพิ่มแผ่นองค์ประกอบปรสิต (Parasitic Element) เข้าไปเพื่อให้เกิดเรโซแนนซ์ในช่วงความถี่สูง รองรับการงานในช่วงความถี่ 5.0 - 5.9 GHz ได้เป็นสายอากาศ 2 แถบความถี่ (Dual-Band Antenna) แล้วจึงพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อให้อัตราขยายของสายอากาศสูงกว่าสายอากาศทั่วไปโดยการเพิ่มตัวสะท้อน (Reflector) และตัวชี้ทิศทาง (Director) กลายเป็นสายอากาศวิทยุ-อูตะบนแผ่น FR4 ข้อดีของสายอากาศบน FR4 คือ โครงสร้างที่มีรายละเอียดต่ำ มีน้ำหนักเบาและวัสดุราคาถูก เป็นเสาอากาศราคาประหยัดที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานทั้งภาครับและภาคส่ง และจากการออกแบบในบทนี้ จึงทำการสร้าง ทดสอบ และใช้งานจริงในบทที่ 4 ต่อไป

3.2 การศึกษาค้นคว้า

สายอากาศที่รองรับการใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในปัจจุบันมีการเจริญเติบโตเร็วมาก เนื่องจากต้องรองรับเทคโนโลยีที่ปรับเปลี่ยนอย่างรวดเร็ว ทำให้มีการศึกษาการออกแบบสายอากาศเพื่อรองรับมาตรฐานของเทคโนโลยีเหล่านี้ ได้มีการออกแบบพัฒนาที่หลากหลาย เช่น สายอากาศแบบบรอดแบนด์ (Broadband Antenna) สายอากาศแบบดualแบนด์ (Dual-Band Antenna) สายอากาศแบบแถบความถี่กว้าง (Wideband Antenna) สายอากาศปรสิต (Parasitic Antenna) และสายอากาศวิทยุ-อูตะแถบความถี่คู่สำหรับไวไฟไร้เดือร์ สายอากาศเหล่านี้มี

ข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างกันออกไป เช่น โครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ มีความซับซ้อนส่งผลให้มีต้นทุนในการผลิตสายอากาศสูง หรือแบบรูปการแผ่พลังงานแตกต่างกันมากระหว่างความถี่ต่ำกับความถี่สูงในช่วงความถี่ดำเนินงาน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ยังมีสายอากาศอีกหลายชนิดที่ให้ความถี่ที่ครอบคลุมได้ดีในช่วงความถี่ดำเนินงาน ดังที่จะได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

สายอากาศยาภิ-อูดยะสองย่านความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์ สำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย มีโครงสร้างที่พัฒนามาจากสายอากาศไดโพล (Dipole Antenna) และสายอากาศยาภิ-อูดยะแถบความถี่คู่สำหรับไวไฟเร็วเตอร์ (ฐิตารีย์ คำคลอง, 2562) ข้อดีของสายอากาศไดโพลคือให้ความกว้างแถบที่กว้างพอสมควร โครงสร้างไม่ซับซ้อน และสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ข้อดีของสายอากาศยาภิ-อูดยะแถบความถี่คู่คือ ให้ความถี่ทั้งสองย่านความถี่ และสามารถชี้ทิศทางได้ตามที่ต้องการได้ ต้นแบบของสายอากาศดั้งเดิมทั้งสอง สร้างจากเส้นลวดกลม ทำให้สายอากาศมีโครงสร้างที่ซับซ้อนส่งผลให้มีต้นทุนการผลิตที่สูง วิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้ปรับเปลี่ยนให้เป็นสายอากาศไดโพลแผ่นบางสร้างจากทองแดงบน FR4 แทน โดยได้ทำการจำลองเพื่อทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ โดยปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของสายอากาศดังจะกล่าวต่อไป

3.3 การออกแบบสายอากาศไดโพลแถบความถี่คู่

เริ่มต้นออกแบบสายอากาศไดโพลแถบความถี่คู่ โดยการคำนวณหาความยาวคลื่นโดยใช้สมการหาความยาวคลื่น (Wavelength) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

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

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่น (m)

c คือ ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีค่าคงที่เป็น 2.998×10^8 (m/s)

f คือ ความถี่ (Hz)

สมการหาความยาวคลื่นจะถูกนำไปประยุกต์ใช้เพื่อหาความยาวของไดโพลและส่วนประกอบอื่น ๆ ต่อไป

3.3.1 ย่านความถี่ 2.4 GHz

จากสมการที่ (3-1) เมื่อแทนค่า $c = 2.998 \times 10^8$ m/s และ $f = 2.45 \times 10^9$ Hz ซึ่งถือว่าเป็นความถี่กลางของย่านความถี่ 2.4 GHz จะได้ขนาดความยาวคลื่นเป็น

$$\lambda = \frac{2.998 \times 10^8}{2.45 \times 10^9} = \frac{2.998}{24.5}$$

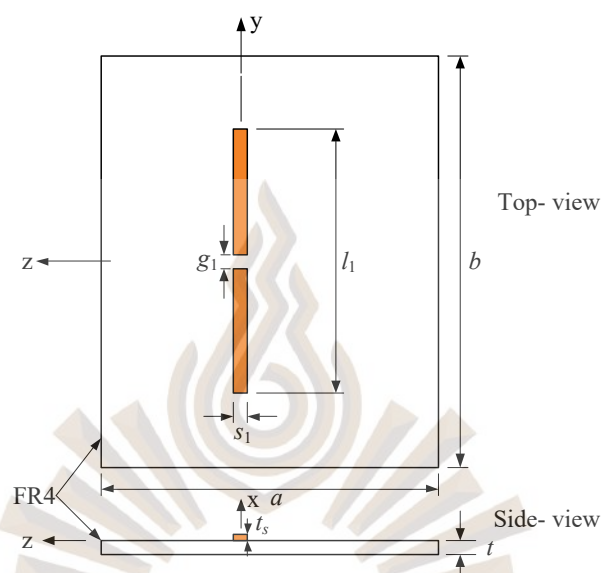
$$= 0.1224 \text{ m} \quad \text{หรือ} \quad 12.24 \text{ cm}$$

ดังนั้น ความยาวคลื่นของความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 12.24 cm และจากทฤษฎีสายอากาศ ไดโพลจะมีความยาวเป็นครึ่งของความยาวคลื่นของความถี่การใช้งาน Su, Chen and Wong (2002) หรือ $\lambda/2$ ดังนั้นความยาวของสายอากาศไดโพลจะประมาณ 6.1 cm หรือ 61 mm ที่ความถี่ 2.45 GHz นี้ ซึ่งเป็นความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance Frequency) ของสายอากาศ โดยความยาวนี้เป็นของไดโพลที่ลอยอยู่ในที่ว่าง ($\epsilon_r = 1$) แต่ถ้าไดโพลวางอยู่บนวัสดุฐานรอง (Substrate) เช่น FR4, เทปลอน เป็นต้น ขนาดไดโพลโดยเฉพาะความยาวจะลดลงตามค่าสภาพยอมสัมพัทธ์หรือค่าแรงดันสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative Permittivity, ϵ_r) ของวัสดุฐานรองนั้น ๆ ดังนั้นความยาวนี้จะใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการออกแบบสายอากาศเพื่อให้ตอบสนองต่อความถี่การใช้งานที่ย่าน 2.4 GHz นี้ จากนั้นความยาวแท้จริงเมื่อไดโพลวางอยู่บนวัสดุฐานรองจะถูกหาโดยการนำโปรแกรมจำลองสายอากาศเข้าช่วย โดยขนาดไดโพลจะแปรผกผันกับค่า ϵ_r

ทำการจำลองสายอากาศไดโพลโดยใช้โปรแกรมจำลอง CST Studio Suite (Wikipedia, 2014) มีเป้าหมายคือ ให้ไดโพลรองรับความถี่ย่าน 2.4 GHz หรือช่วงความถี่ 2.4 – 2.483 GHz ที่สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient) หรือ S_{11} ต่ำกว่า -10 dB เป็นย่านความถี่ ISM band ที่ใช้ใน WLAN จึงกำหนดความยาวของไดโพลเป็น l ดังแสดงในรูปที่ 3.1 นอกจากนี้ยังกำหนดให้ความกว้างของไดโพลเป็น s ระยะห่างระหว่างโพลคือ g กำหนดให้ความหนาของโลหะบน FR4 ที่สร้างไดโพลเป็น t ขณะที่ FR4 กว้าง a ยาว b และหนา t เมื่อไดโพลทอดยาวไปตามแกน y

ขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับจำลองไดโพลโดยโปรแกรม CST กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.1 โดยไดโพลอยู่บนแผ่น FR4 ที่มีขนาดโดยรวมของโครงสร้าง คือ กว้าง 55.0 mm และยาว 60.0 mm ที่คาดว่ายาวเพียงพอจะรองรับความยาวของไดโพลได้ (คาดว่าไดโพลยาวน้อยกว่า 61 mm เพราะอิทธิพลของ ϵ_r) มีความหนา 1.6 mm ตามความหนาของ FR4 มาตรฐาน และมีค่าสภาพยอม

สัมพัทธ์ ϵ_r เท่ากับ 4.8 ความกว้างโคโพล $s_1 = 3 \text{ mm}$ ซึ่งขนาดความกว้างมีผลกับช่วงความถี่ดำเนินการไม่มากถ้าไม่มีขนาดใหญ่เกินไป โดยตามวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดค่าเริ่มต้นไม่แคบเกินไปหากต้องนำไปเป็นต้นแบบสร้างจริงที่ต้องมีการป้อนสัญญาณจากสายสัญญาณ (Coaxial) และระยะห่างโคโพล $g_1 = 1.5 \text{ mm}$



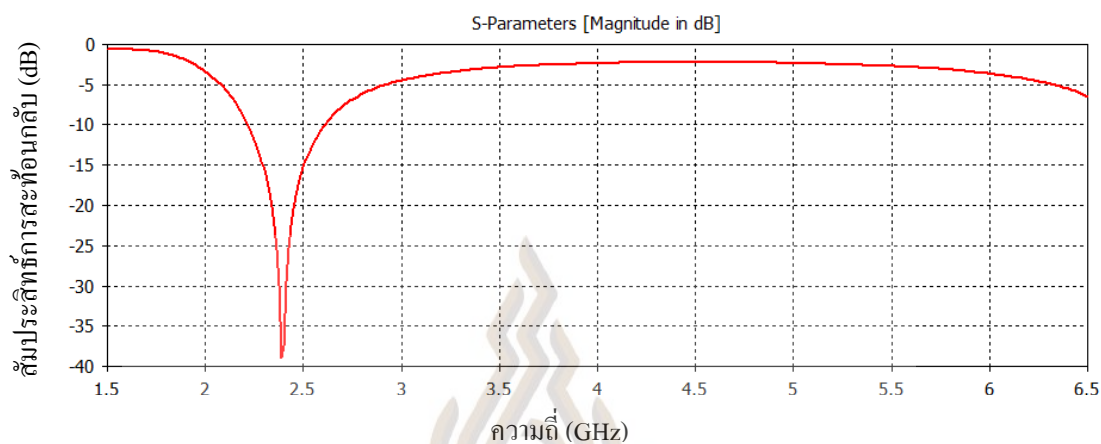
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศโคโพลบนแผ่น FR4

ตารางที่ 3.1 ขนาดพารามิเตอร์โคโพลบนแผ่น FR4

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
a	55.0
b	60.0
t	1.6
t_s	0.035
s_1	3.0
g_1	1.5
l_1	43.0

S_{11} ที่ได้จากการจำลองสายอากาศโคโพลแสดงดังในรูปที่ 3.2 พบว่าความยาว l_1 ที่ให้ความกว้างแถบครอบคลุมย่านความถี่ระหว่าง 2.4 - 2.483 GHz คือ $l_1 = 43 \text{ mm}$ การที่ l_1 ยาวลดลงจาก 61 mm เนื่องจากได้รับอิทธิพล ϵ_r ของ FR4 ที่เท่ากับ 4.8 (Wikipedia, 2006) นั่นเอง และจากการจำลองสายอากาศโคโพล ถ้าปรับค่าความยาว l_1 เพิ่มขึ้นกว่านี้จะทำให้ช่วงความถี่ดำเนินการ

ลดลง ในทางตรงกันข้าม ถ้าปรับลดความยาว l_1 จะทำให้ช่วงความถี่ดำเนินการเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น $l_1 = 43 \text{ mm}$ จึงเป็นความยาวที่ถูกเลือกเบื้องต้น ทำให้ได้ความกว้างแถบระหว่าง $2.2 - 2.6 \text{ GHz}$ ที่ $s_{11} < -10 \text{ dB}$



รูปที่ 3.2 S_{11} ที่ได้จากการจำลองสายอากาศไดโพลเมื่อความยาว $l_1 = 43 \text{ mm}$

3.3.2 ย่านความถี่ 5 GHz

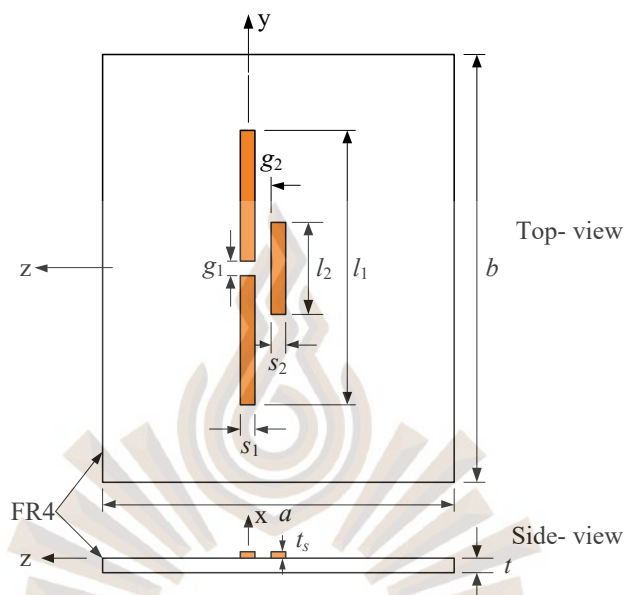
เนื่องจากจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ต้องการให้สายอากาศรองรับการใช้งานได้ทั้งย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz เพียงตัวเดียวหรือที่เรียกว่าสายอากาศแถบความถี่คู่ ดังนั้นจากสายอากาศไดโพลที่ให้ย่านความถี่ดำเนินการที่ 2.4 GHz แล้ว ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาต่อเพื่อให้มีย่านความถี่ 5 GHz เพิ่มเข้ามา วิธีการของผู้วิจัยคือ เพิ่มองค์ประกอบปรสิต (Parasitic Element) เข้าไปใกล้ๆ ไดโพล เพื่อให้เกิดการเชื่อมร่วมหรือคัปปลิง (Coupling) เกิดความถี่เรโซแนนซ์ใหม่ ได้ย่านความถี่ดำเนินการ 5 GHz

ทำการออกแบบสายอากาศบนย่านความถี่สูงที่ช่วงความถี่ 5.15 - 5.85 GHz โดยทำการเพิ่มองค์ประกอบปรสิตจำนวน 1 องค์ประกอบ มีความยาว l_2 และคำนวณหาความยาวของ l_2 นี้ ด้วยการออกแบบให้มีความถี่ดำเนินการที่ 5.5 GHz ซึ่งเป็นความถี่กลางจากช่วง 5.15 - 5.85 GHz โดยใช้สมการหาความยาวคลื่นดังสมการที่ (3-1) เมื่อแทนค่า $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ และ $f = 5.5 \times 10^9 \text{ Hz}$ จะได้

$$\lambda = \frac{2.998 \times 10^8}{5.5 \times 10^9} = \frac{2.998}{55}$$

$$= 0.0545 \text{ m หรือ } 54.5 \text{ mm}$$

ดังนั้น ความยาวคลื่นที่ความถี่ 5.5 GHz มี λ เท่ากับ 54.5 mm โดยจะได้นำไปออกแบบความยาวขององค์ประกอบปรสิตต่อไป



รูปที่ 3.3 โครงสร้างสายอากาศไดโพลที่มีการเพิ่มองค์ประกอบปรสิต l_2

การออกแบบความยาวขององค์ประกอบปรสิตจะคล้ายกับทฤษฎีสายอากาศไดโพล Chang, Kim and Yoon (2005) ที่มีความยาวเป็นครึ่งของความยาวคลื่นหรือ $\lambda/2$ ดังนั้น ความยาวขององค์ประกอบปรสิต l_2 จะกำหนดให้มีค่าเป็น $\lambda/2$ เช่นกัน หรือเท่ากับ 27.25 mm ที่ความถี่ 5.5 GHz ซึ่งความยาวขององค์ประกอบปรสิตนี้ ได้กำหนดให้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการจำลองและวิเคราะห์หาความยาวขององค์ประกอบปรสิต l_2 แต่ความยาวจะลดลงไปอีก เนื่องจากผล ϵ_r ของ FR4 ที่ 4.8 เมื่อตำแหน่งการวางองค์ประกอบปรสิต l_2 แสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งจะต้องวางในตำแหน่งที่ชิดกับไดโพลพอสมควรเพื่อให้เกิดการคับปลิงค์พลังงานจากไดโพลมาสู่องค์ประกอบปรสิต l_2 ให้เพียงพอสร้างเรโซแนนซ์ได้ โดยองค์ประกอบปรสิตจะอยู่ด้านซ้ายหรือขวาของไดโพลก็ได้ในระนาบเดียวกันและขนานไปตามแกน y จากรูป ผู้วิจัยได้เลือกวางองค์ประกอบปรสิตไว้ทางด้านขวาของไดโพล

จากการคำนวณหาความยาวขององค์ประกอบปรสิต l_2 ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 5.5 GHz ได้ทำการจำลองและวิเคราะห์สายอากาศโดยนำโปรแกรมจำลองสายอากาศเข้าช่วย เพื่อให้ได้ความยาว l_2 ที่เหมาะสม ให้ช่วงความถี่ครอบคลุม 5.15 - 5.85 GHz ที่ S_{11} ต่ำกว่า -10 dB พบว่าความยาวของ

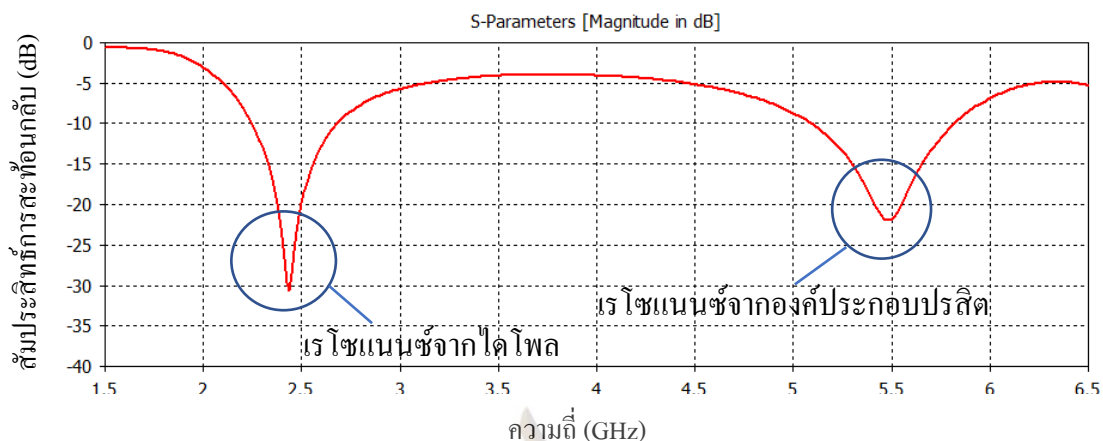
องค์ประกอบปริสติด l_2 ที่เหมาะสมคือ 14.0 mm ลดลงมาประมาณ 1/2 ของ 27.25 mm และขนาดพารามิเตอร์อื่น ๆ กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.2 โดยพารามิเตอร์ที่กำหนดเพิ่มจากตารางที่ 3.1 คือ ความกว้างองค์ประกอบปริสติดที่เพิ่ม คือ s_2 ระยะห่างระหว่างไดโพลกับองค์ประกอบปริสติด คือ g_2

ตารางที่ 3.2 ขนาดพารามิเตอร์ไดโพลบนแผ่น FR4 พร้อมองค์ประกอบปริสติด l_2

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)	พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
a	55.0	g_1	1.5
b	60.0	l_1	43.0
t	1.6	s_2	3.0
t_s	0.035	g_2	0.5
s_1	3.0	l_2	14.0

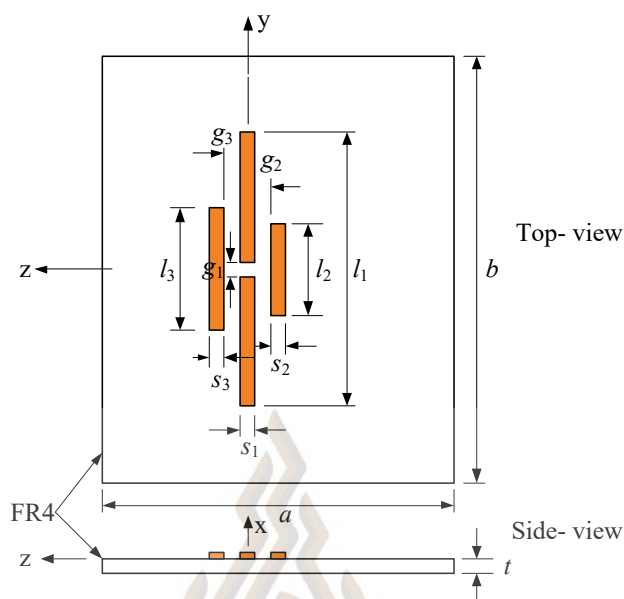
จากการจำลองสายอากาศไดโพลพร้อมกับองค์ประกอบปริสติด l_2 เมื่อกำหนดให้ความกว้าง $s_2 = 3$ mm และระยะห่าง $g_2 = 0.5$ mm จากนั้นทำการปรับค่าความยาว l_2 ให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ความถี่รองรับย่าน 5 GHz โดยความยาว l_2 เหมาะสมที่ได้คือ 14 mm โดยสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} แสดงดังรูปที่ 3.4 จะเห็นว่าความยาวขององค์ประกอบปริสติด l_2 นี้ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 5.5 GHz ได้ความกว้างแถบของการตอบสนองความถี่ S_{11} ที่ต่ำกว่า -10 dB ระหว่าง 5.15 – 5.75 GHz

จากผลลัพธ์ของความกว้างแถบที่ได้ พบว่ามีความกว้างที่ไม่เพียงพอจะรองรับการใช้งานช่วง 5.15 – 5.85 GHz ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวนี้นักวิจัยจึงได้มีแนวคิด คือ จะต้องอาศัยการเพิ่มองค์ประกอบปริสติดเข้าไปอีกเพื่อสร้างเรโซแนนซ์ใหม่ขึ้นมาเพิ่มเติมอีกเรโซแนนซ์หนึ่งใกล้ ๆ เรโซแนนซ์ที่เกิดจากองค์ประกอบปริสติดอันแรก ดังนั้น องค์ประกอบปริสติด l_3 จึงถูกเพิ่มเข้ามาเพื่อให้มีความถี่เรโซแนนซ์ใหม่อีกดังกล่าวก่อเกิดขึ้น



รูปที่ 3.4 S_{11} ที่ได้จากการจำลองเมื่อเพิ่มองค์ประกอบปรสิต L_2 กับไดโพล

เพื่อให้ได้ความกว้างแถบกว้างครอบคลุมช่วงความถี่ 5.15-5.85 GHz จึงจำเป็นต้องใช้การเพิ่ม 2 องค์ประกอบปรสิตเข้าไป สำหรับองค์ประกอบปรสิตตัวที่สองหรือ L_3 จะต้องมีขนาดความยาวที่มากกว่า L_2 เล็กน้อย เพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่น้อยกว่าที่เกิดจาก L_2 อย่างไรก็ตาม จะต้องลดความยาว L_2 ลงเล็กน้อยเพื่อให้ความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดจาก L_2 ขยับสูงขึ้นมากกว่า 5.5 GHz ดังนั้นจึงได้ใช้โปรแกรมจำลองสายอากาศช่วยในการออกแบบหาผลลัพธ์ของความยาว โดยจะกำหนดให้ $L_2 = 13$ mm และ $L_3 = 15$ mm จากนั้น ทำการจำลองด้วยองค์ประกอบปรสิตขนาดกว้าง 3 mm วางข้างๆ ไดโพลประกบทั้งสองด้านด้วยระยะห่าง 0.5 mm ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งจะออกแบบให้องค์ประกอบปรสิตที่ยาวกว่าอยู่ด้านซ้ายและสั้นกว่าอยู่ด้านขวา เมื่อขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.3 โดยพารามิเตอร์ที่กำหนดเพิ่มจากตารางที่ 3.2 คือ ความกว้างองค์ประกอบปรสิต คือ s_3 ระยะห่างระหว่างไดโพลกับองค์ประกอบปรสิต คือ g_3

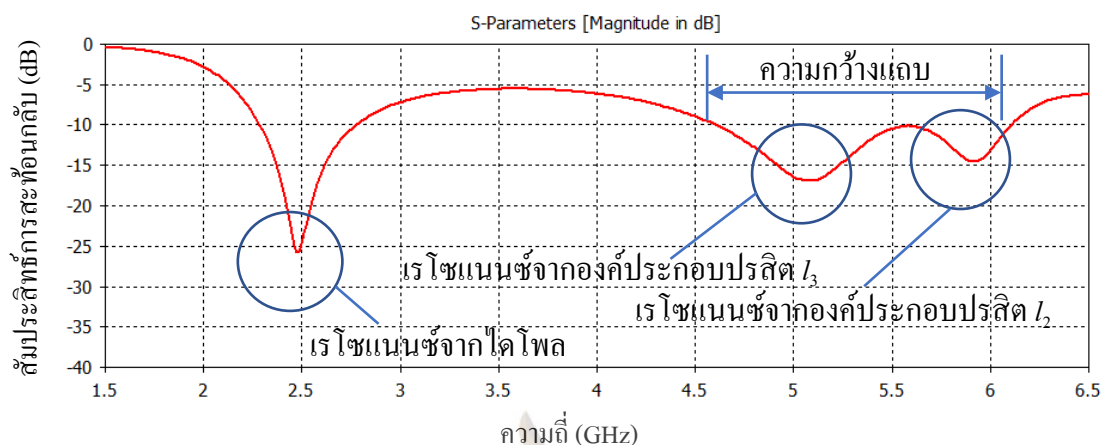


รูปที่ 3.5 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลที่เพิ่มองค์ประกอบปริสติด l_2 และ l_3

จากการจำลองสายอากาศไดโพลเมื่อเพิ่มองค์ประกอบปริสติด l_3 ได้ S_{11} แสดงไว้ดังรูปที่ 3.6 พบว่าจะได้ความถี่เรโซแนนซ์เกิดขึ้น ณ ความถี่ประมาณ 5.2 GHz เป็นเรโซแนนซ์ที่ 3 โดยจะต่ำกว่าที่เกิดจากองค์ประกอบปริสติด l_2 เนื่องจากมีความยาวที่มากกว่า ขณะที่เรโซแนนซ์ที่ 2 ที่เกิดจากองค์ประกอบปริสติด $l_2 = 13 \text{ mm}$ ได้ขยับสูงขึ้นไปที่ความถี่ 5.8 GHz และจากสองความถี่เรโซแนนซ์นี้ จะได้ความกว้างแถบความถี่ดำเนินการของสายอากาศระหว่าง 4.6 - 6.1 GHz ที่ S_{11} ต่ำกว่า -10 dB ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการคือ 5.15 - 5.85 GHz แม้ว่าการแมตช์ระหว่างช่วงความถี่ดังกล่าวนี้อาจจะยังไม่ค่อยดี แต่เราสามารถปรับจูนเพื่อให้แมตช์ดีขึ้นได้ในภายหลัง

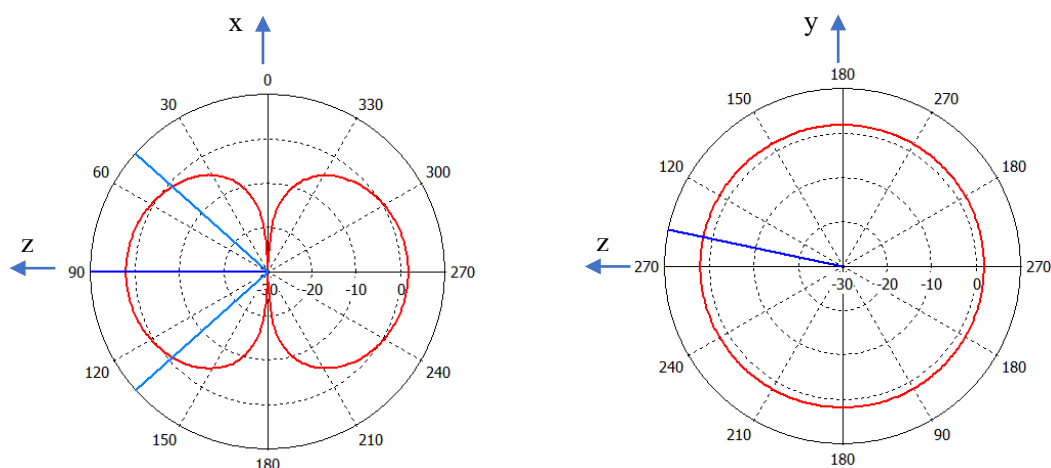
ตารางที่ 3.3 ขนาดพารามิเตอร์ไดโพลบนแผ่น FR4 พร้อมองค์ประกอบปริสติด l_2 และ l_3

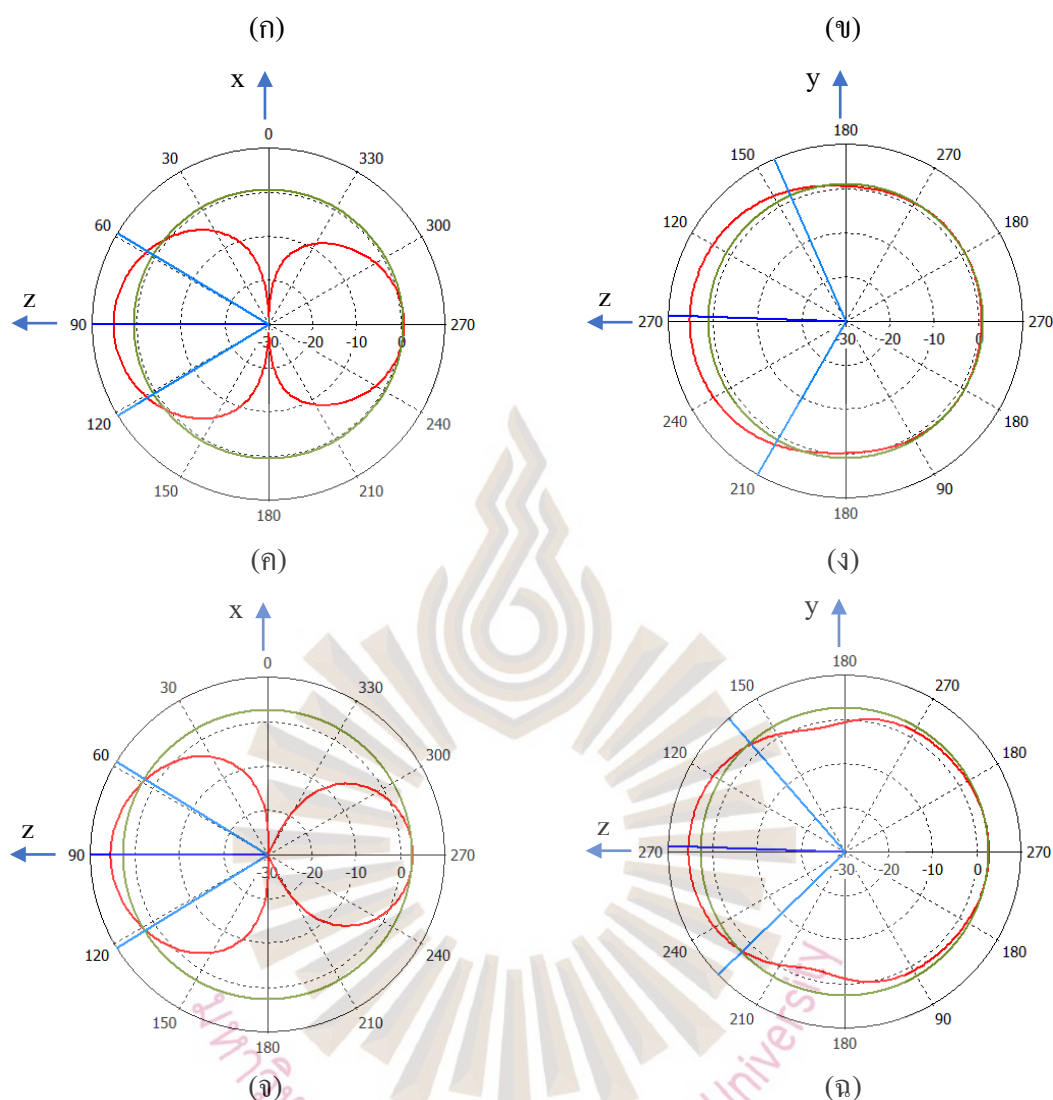
พารามิเตอร์	ขนาด (mm)	พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
a	55.0	s_2	3.0
b	60.0	g_2	0.5
t	1.6	l_2	13.0
t_s	0.035	s_3	3.0
s_1	3.0	g_3	0.5
g_1	1.5	l_3	15.0
l_1	43.0		



รูปที่ 3.6 S_{11} ที่ได้จากการจำลองเมื่อเพิ่มองค์ประกอบปริมาตร I_2 และ I_3 กับไดโพล

จากโครงสร้างสายอากาศไดโพลรูปที่ 3.5 จะได้แบบรูปการแผ่พลังงาน ณ 3 ความถี่ ดำเนินการดังรูปที่ 3.7 เมื่อรูป (ก) คือระนาบ xz ความถี่ 2.44 GHz รูป (ข) คือระนาบ yz ความถี่ 2.44 GHz รูป (ค) คือระนาบ xz ความถี่ 5.15 GHz รูป (ง) คือระนาบ yz ความถี่ 5.15 GHz รูป (จ) คือระนาบ xz ความถี่ 5.85 GHz และรูป (ฉ) คือระนาบ yz ความถี่ 5.85 GHz สังเกตว่าความถี่ 2.44 GHz แบบรูปการแผ่พลังงานจะสมมาตรทั้งสองระนาบ แต่ที่ความถี่สูงทั้งสองความถี่ แบบรูปการแผ่พลังงานจะไม่สมมาตรในแกน y เนื่องจากการคับปลิงพลังงานจากไดโพลมาที่ 2 องค์ประกอบปริมาตรด้านข้าง ส่งผลให้พลังงานชี้ออกไป 2 ทิศทางตามแกน z และ -z แต่จะชี้ไปทาง z มากกว่า เนื่องจากเป็นทิศทางที่องค์ประกอบปริมาตรมีขนาดความยาวมากกว่า ส่วนองค์ประกอบปริมาตรที่อยู่ด้านซ้ายสั้นกว่าคับปลิงกระแสได้น้อยกว่า ทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานชี้ไปทิศทาง z ดังนั้นเพื่อให้แบบรูปการแผ่พลังงานมีความใกล้เคียงกันทั้ง 3 ความถี่ เช่น ชี้ไปในทิศทางเดียวกันหรือมีอัตราขยายใกล้เคียงกัน จึงต้องปรับโครงสร้างเป็นยาสูบ-อู๊ดตามการนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้





รูปที่ 3.7 แบบรูปการแผ่พลังงานไดโพลแถบความถี่คู่ (ก) ระบาย xz ความถี่ 2.44 GHz (ข) ระบาย yz ความถี่ 2.44 GHz (ค) ระบาย xz ความถี่ 5.15 GHz (ง) ระบาย yz ความถี่ 5.15 GHz (จ) ระบาย xz ความถี่ 5.85 GHz (ฉ) ระบาย yz ความถี่ 5.85 GHz

3.4 การออกแบบสายอากาศวิทยิ-อู่ะแถบความถี่คู่

การออกแบบสายอากาศวิทยิ-อู่ะแถบความถี่คู่ โดยการคำนวณหาความยาวของแต่ละองค์ประกอบ (Elements) ของแต่ละส่วน ไม่ว่าจะเป็น ตัวชี้ทิศทาง (Director) ตัวสะท้อน (Reflector) และองค์ประกอบตัวขับ (Driven Element) ในที่นี้หมายถึงไดโพล จะใช้สมการดังต่อไปนี้ (Carr, 2001)

$$L = \frac{K}{F} \quad (3-2)$$

เมื่อ L คือความยาว (ฟุต)

F คือความถี่ (MHz)

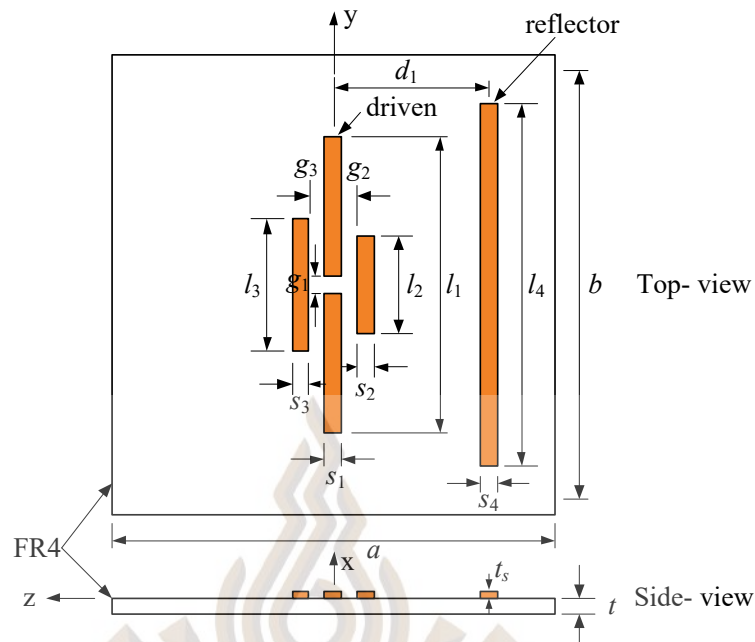
K คือ ค่าคงที่ (Driven Element: $K=478$, Reflector: $K=492$, Director: $K=461.5$,
Element Spacing: $K=142$)

อย่างไรก็ตาม สมการที่ (3-2) คือสมการสำหรับออกแบบสายอากาศยagi-อูเดที่องค์ประกอบต่าง ๆ ลอยอยู่ในที่ว่าง แต่สำหรับงานวิจัยนี้สายอากาศยagi-อูเดสร้างจากโลหะบน FR4 ซึ่งได้รับอิทธิพล ϵ_r จากวัสดุฐานรอง ดังนั้น ระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างองค์ประกอบสายอากาศยagi-อูเดต่าง ๆ จะต้องใช้โปรแกรมจำลองสายอากาศช่วย

ทำการจำลองสายอากาศยagi-อูเดแถบความถี่คู่โดยใช้โปรแกรมจำลอง CST Studio Suite โดยกำหนดให้สายอากาศไดโพลแถบความถี่คู่เป็นองค์ประกอบตัวขับ (Driven Element) และทำการคำนวณหาความยาวของตัวสะท้อน (Reflector) ตัวชี้ทิศทาง (Director) และระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ (Element Spacing) ต่าง ๆ

3.4.1 การเพิ่มตัวสะท้อน

เริ่มการจำลองสายอากาศยagi-อูเดแถบความถี่คู่ดังรูปที่ 3.8 ด้วยการคำนวณหาความยาวของตัวสะท้อนและระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนกับไดโพลที่ย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ต่ำ จากนั้นจึงเพิ่มตัวชี้ทิศทาง เพื่อให้ครบองค์ประกอบเป็นสายอากาศยagi-อูเด อย่างไรก็ตาม การเพิ่มองค์ประกอบทั้งตัวสะท้อนและตัวชี้ทิศทางจะมีอิทธิพลกับย่านความถี่ 2.4 GHz มากกว่าย่าน 5 GHz โดยที่ย่านความถี่ 5 GHz จะใช้การปรับขนาดองค์ประกอบปรกติแทน



รูปที่ 3.8 โครงสร้างสายอากาศไดโพลที่เพิ่มตัวสะท้อนเพื่อสร้างเป็นสายอากาศยาคิ-อูตะ

วิเคราะห์หาความยาวของตัวสะท้อน (Reflector) ของสายอากาศยาคิ-อูตะแถบความถี่ f_4 ด้วยการให้ตอบสนองต่อความถี่ย่าน 2.4 GHz ครอบคลุมช่วง 2.4 - 2.5 GHz นั่นคือออกแบบให้มีความถี่เรโซแนนซ์ 2.44 GHz ซึ่งจะกำหนดให้ตัวสะท้อนมีขนาดกว้าง s_4 ส่วนความยาว l_4 สามารถคำนวณหาความยาวเริ่มต้นจากสมการที่ (3.2) โดยแทนค่า $F = 2440$ และ $K = 492$ จะได้

$$L = \frac{492}{2440} = 0.2016 \text{ ฟุต} = 0.06146 \text{ m} = 61.46 \text{ mm}$$

ดังนั้น ความยาวเริ่มต้นของตัวสะท้อน l_4 ของสายอากาศแถบความถี่คู่ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.44 GHz เท่ากับ 61.46 mm

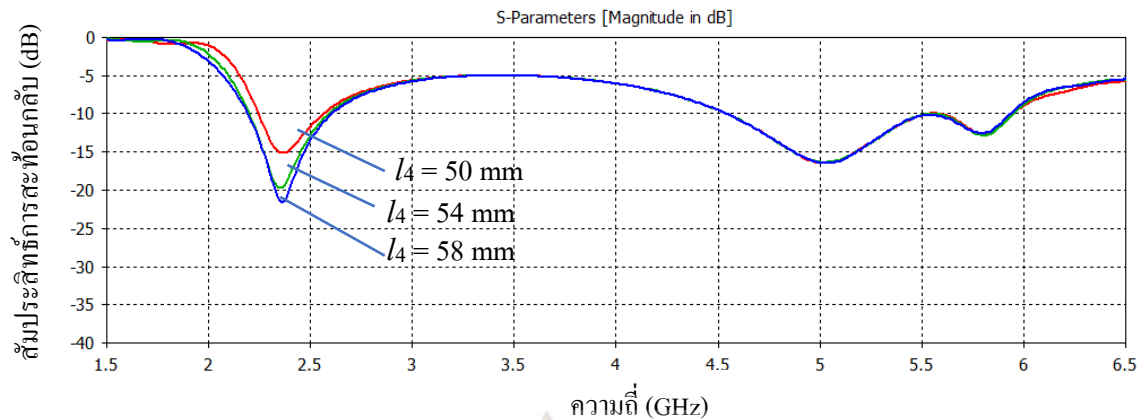
จากความยาวของตัวสะท้อนที่ได้จากการประมาณนี้ เป็นความยาวของสายอากาศที่ลอยอยู่ในที่ว่าง ($\epsilon_r = 1$) แต่ถ้าวางอยู่บนฐานรอง FR4 ขนาดความยาวจะลดลงตามค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ϵ_r ดังนั้นความยาวนี้จะใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการออกแบบสายอากาศเพื่อให้ออกแบบตอบสนองต่อความถี่การใช้งานที่ย่าน 2.4 GHz นี้ จากนั้นความยาวแท้จริงเมื่อไดโพลวางอยู่บนวัสดุฐานรองจะหาโดยโปรแกรมจำลองสายอากาศ

ทำการจำลองสายอากาศโดยใช้โปรแกรมจำลองให้สายอากาศรองรับความถี่ย่าน 2.4 GHz หรือช่วงความถี่ 2.4 – 2.483 GHz ที่สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient) หรือ S_{11} ต่ำกว่า -10 dB จึงกำหนดความยาวของตัวสะท้อน l_4 ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ระยะห่างจากไดโพลคือ d_1 ขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับจำลองสายอากาศโดยโปรแกรมกำหนดไว้ดังตารางที่ 3.5 ซึ่งต่อเนื่องมาจากการจำลองไดโพลก่อนหน้านี้ ส่วนความกว้างตัวสะท้อน คือ 3 mm ระยะห่างจากไดโพล $d_1 = 18.5$ mm

S_{11} ที่ได้จากการจำลองสายอากาศไดโพลโดยการเพิ่มตัวสะท้อนให้เป็นสายอากาศยาภิ-อูจะแสดงดังในรูปที่ 3.9 แต่ก็ถือว่าเป็นสายอากาศยาภิ-อูที่ยังไม่สมบูรณ์ เนื่องจากยังไม่มีตัวชี้ทิศทาง แต่ก็พบว่าความยาว l_4 ที่ให้ความกว้างแถบครอบคลุมย่านความถี่ระหว่าง 2.4 - 2.483 GHz คือ $l_4 = 54$ mm การที่ l_4 ยาวลดลงจาก 61.46 mm เนื่องจากได้รับอิทธิพล ϵ_r ของ FR4 และจากการจำลองสายอากาศ เมื่อ l_4 เปลี่ยนจาก 50 mm เป็น 54 mm และ 58 mm พบว่า เมื่อ l_4 มีขนาดมากขึ้น ไม่ได้ทำให้ช่วงความถี่ดำเนินการย่าน 2.4 GHz นี้มีการเลื่อนขึ้นหรือต่ำลงแต่อย่างใด เพียงการแมตช์ ณ ช่วงความถี่นี้ที่เปลี่ยนแปลงเท่านั้น นั่นคือ เมื่อ l_4 มีขนาดมากขึ้น การแมตช์จะดีขึ้น ในทางกลับกัน หาก l_4 มีขนาดลดลง การแมตช์ก็จะลดลง ดังนั้นจึงสามารถบอกได้ว่า l_4 จะต้องมีความยาวมากกว่า l_1 หรือความยาวของไดโพลเล็กน้อย เพื่อการแมตช์ที่ดีและอัตราขยายที่เหมาะสม สำหรับที่ความถี่ดำเนินการสูง พบว่า l_4 ไม่มีผลกับการแมตช์อิมพีแดนซ์ช่วงความถี่ดำเนินการนี้

ตารางที่ 3.4 ขนาดพารามิเตอร์สายอากาศไดโพลแถบความถี่คู่ที่เพิ่มตัวสะท้อนบนแผ่น FR4

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)	พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
a	55.0	g_2	0.5
b	60.0	l_2	13.0
t	1.6	s_3	3.0
t_s	0.035	g_3	0.5
s_1	3.0	l_3	15.0
g_1	1.5	s_4	3.0
l_1	43.0	d_1	18.5
s_2	3.0	l_4	54.0



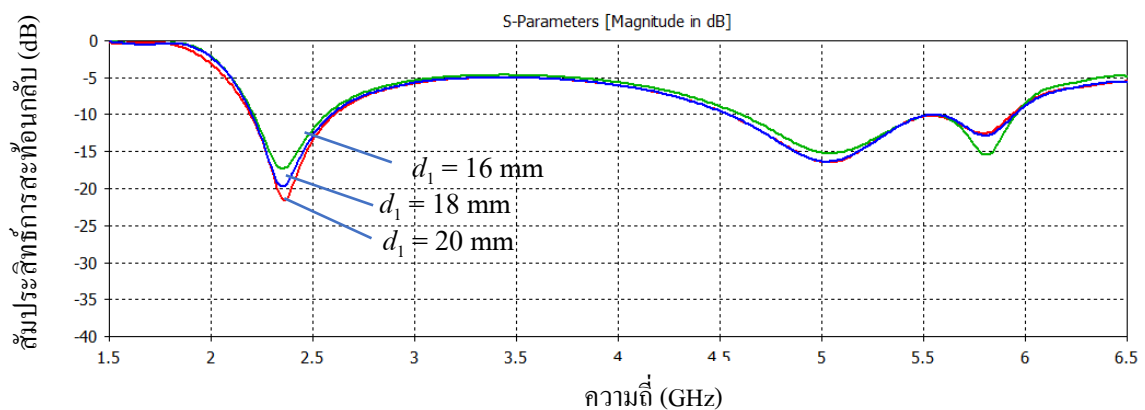
รูปที่ 3.9 สัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อความยาวต่างกันขององค์ประกอบตัวสะท้อน

ต่อไปวิเคราะห์ระยะห่างระหว่างไดโพลหรือตัวขับ (Driven Element) กับตัวสะท้อน (Reflector) แทนค่าด้วย d_1 เมื่อองค์ประกอบสายอากาศแสดงในรูปที่ 3.8 ความยาวของไดโพล เท่ากับ 43 mm ความยาวของ Reflector เท่ากับ 54 mm ทำการคำนวณหาค่าเริ่มต้นของ d_1 ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.44 GHz จากสมการที่ (3.2) แทนค่า $F = 2450$, $K = 142$

$$L = \frac{142}{2440} = 0.0582 \text{ ฟุต} = 0.01774 \text{ m} = 17.74 \text{ mm}$$

ดังนั้น ระยะเริ่มต้นระหว่างไดโพลกับตัวสะท้อนที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.44 GHz เท่ากับ 17.74 mm

จากผลการคำนวณระยะห่างที่แตกต่างกัน เพื่อหาระยะห่างระหว่างไดโพลกับตัวสะท้อนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ช่วงความถี่ครอบคลุม 2.4 – 2.5 GHz ที่ S_{11} ต่ำกว่า -10dB แสดงในรูปที่ 3.10 พบว่าระยะห่าง d_1 มีผลกับความถี่ดำเนินการต่ำย่าน 2.4 GHz คือ เมื่อ d_1 มากขึ้น การแมตช์จะดีขึ้น แต่ช่วงความถี่ไม่มีการเลื่อนสูงขึ้นหรือต่ำลง



รูปที่ 3.10 สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ระยะห่างต่าง ๆ ระหว่างไดโพลกับตัวสะท้อน

3.4.2 การเพิ่มตัวชีทิศทาง

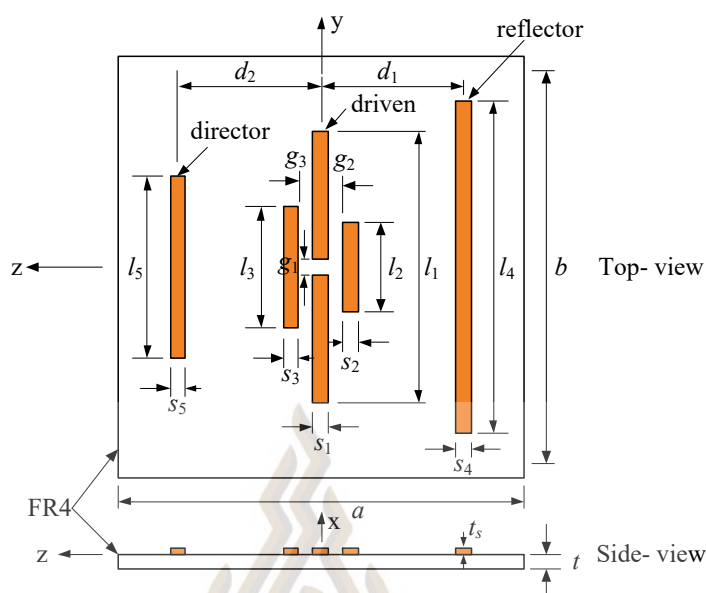
การทำให้เป็นสายอากาศยาคิ-อูเคแถบความถี่คู่อย่างสมบูรณ์จะต้องมีองค์ประกอบตัวชีทิศทาง (Director Element) ดังนั้นจึงได้เพิ่มตัวชีทิศทางเข้าไปดังรูปที่ 3.11 เมื่อเพิ่มแล้วจึงคำนวณหาความยาวของตัวชีทิศทางและระยะห่างระหว่างชีทิศทางกับไดโพลที่ย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ต่ำ การเพิ่มองค์ประกอบตัวชีทิศทางจะมีอิทธิพลกับย่านความถี่ 2.4 GHz มากกว่าย่าน 5 GHz เช่นกัน

วิเคราะห์หาความยาวตัวชีทิศทางของสายอากาศยาคิ-อูเคแถบความถี่คู่โดยจะกำหนดให้ความยาวตัวชีทิศทางแทนด้วย L_5 โดยออกแบบกับความถี่ 2.44 GHz เช่นกัน ดังนั้นสามารถคำนวณหาความยาวเริ่มต้นของ L_5 จากสมการที่ (3.2) เมื่อกำหนดค่าคงที่ของตัวชีทิศทาง $K=461.5$ และแทนค่า $F = 2440$ จะได้ความยาวตัวชีทิศทางเป็น

$$L = \frac{461.5}{2440} = 0.1892 \text{ ฟุต} = 0.05765 \text{ m} = 57.65 \text{ mm}$$

ดังนั้น ความยาวเริ่มต้นของตัวชีทิศทางสายอากาศยาคิ-อูเคแถบความถี่คู่ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.44 GHz เท่ากับ 57.65 mm ความยาวของตัวชีทิศทางที่ได้จากการประมาณนี้ เป็นความยาวที่ลอยอยู่ในที่ว่าง ($\epsilon_r = 1$) แต่ถ้าวางอยู่บนฐานรอง FR4 ขนาดความยาวจะลดลงตามค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ϵ_r ดังนั้นความยาวนี้จะใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการออกแบบสายอากาศเพื่อให้ตอบสนองต่อความถี่การใช้งานที่ย่าน 2.4 GHz นี้ จากนั้นความยาวแท้จริงจะหาโดยโปรแกรมจำลองสายอากาศ

จะกำหนดให้ความกว้างของตัวชีทิศทางเป็น s_5 และระยะห่างจากไดโพลคือ d_2 ขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับจำลองสายอากาศโดยโปรแกรมกำหนดไว้ดังตารางที่ 3.6 ซึ่งต่อเนื่องมาจากการจำลองไดโพลพร้อมตัวสะท้อนก่อนหน้านี้ ส่วนความกว้างตัวชีทิศทาง คือ 3 mm ระยะห่างจากไดโพล $d_1 = 18.5 \text{ mm}$ และ $d_2 = 27 \text{ mm}$



รูปที่ 3.11 โครงสร้างสายอากาศยาภิ-อูะแถบความถี่คู่

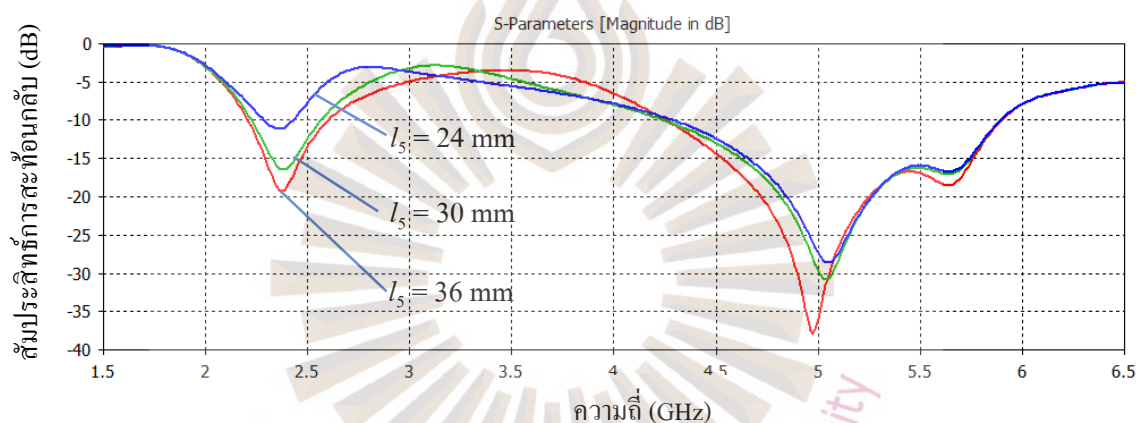
ตารางที่ 3.5 ขนาดพารามิเตอร์สายอากาศยาภิ-อูะแถบความถี่คู่บนแผ่น FR4

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)	พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
a	55.0	s_3	3.0
b	60.0	g_3	0.5
t	1.6	l_3	15.0
t_s	0.035	s_4	3.0
s_1	3.0	d_1	18.5
g_1	1.5	l_4	54.0
l_1	43.0	s_5	3.0
s_2	3.0	d_2	27.0
g_2	0.5	l_5	30.0
l_2	13.0		

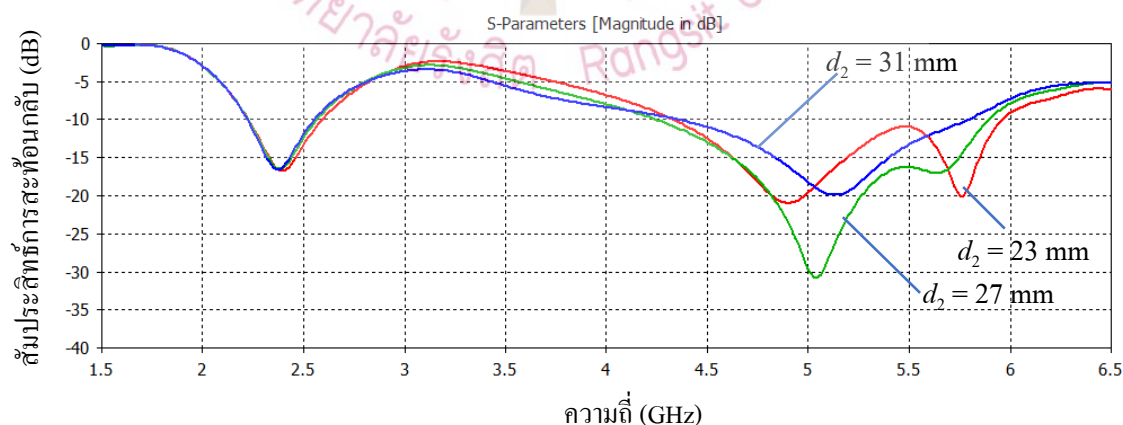
S_{11} ที่ได้จากการจำลองสายอากาศยาภิ-อูะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความยาวตัวชี้ทิศทาง l_5 แสดงดังในรูปที่ 3.12 ซึ่งถือว่าเป็นสายอากาศยาภิ-อูะที่สมบูรณ์แล้ว พบว่าความยาว l_5 ที่ให้ความกว้างแถบครอบคลุมย่านความถี่ระหว่าง 2.4 - 2.483 GHz คือ l_5 เท่ากับหรือมากกว่า 30 mm เป็นต้นไป การที่ l_5 ยาวลดลงจาก 57.65 mm เนื่องจากได้รับอิทธิพล ϵ_r ของ FR4 และจากการจำลองสายอากาศ เมื่อ l_5 เปลี่ยนจาก 24 mm เป็น 30 mm และ 36 mm พบว่า เมื่อ l_5 มีขนาดมากขึ้น ไม่ได้ทำให้ช่วงความถี่ดำเนินการย่าน 2.4 GHz นี้มีการเลื่อนขึ้น-ลงแต่อย่างใด แต่การแมตซ์ดีขึ้น ดังนั้นจึง

สามารถบอกได้ว่า L_5 จะต้องมีความสั้นกว่า L_1 หรือความยาวของไดโพลเล็กน้อย เพื่อการชี้ทิศทางที่ดี แต่ต้องไม่น้อยเกินไปเพราะจะทำให้แมตซ์ไม่ดี ขณะเดียวกันที่ความถี่ดำเนินการสูง 5 GHz พบว่า L_5 มีผลเล็กน้อยกับการแมตซ์อิมพีแดนซ์

สัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ d_2 หรือระยะห่างระหว่างองค์ประกอบตัวชี้ทิศทางกับองค์ประกอบตัวขับไดโพลแสดงดังรูปที่ 3.13 เมื่อ d_2 เปลี่ยนจาก 23 mm เป็น 27 mm และ 31 mm ตามลำดับ จากรูปพบว่า d_2 มีผลกับอิมพีแดนซ์ช่วงความถี่ดำเนินการสูงอย่างชัดเจน แต่ช่วงความถี่ดำเนินการต่ำนั้นมีผลน้อยอย่างไรก็ตาม จะได้ค่าที่เหมาะสมในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.12 สัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อความยาวต่างกันขององค์ประกอบตัวชี้ทิศทาง L_5



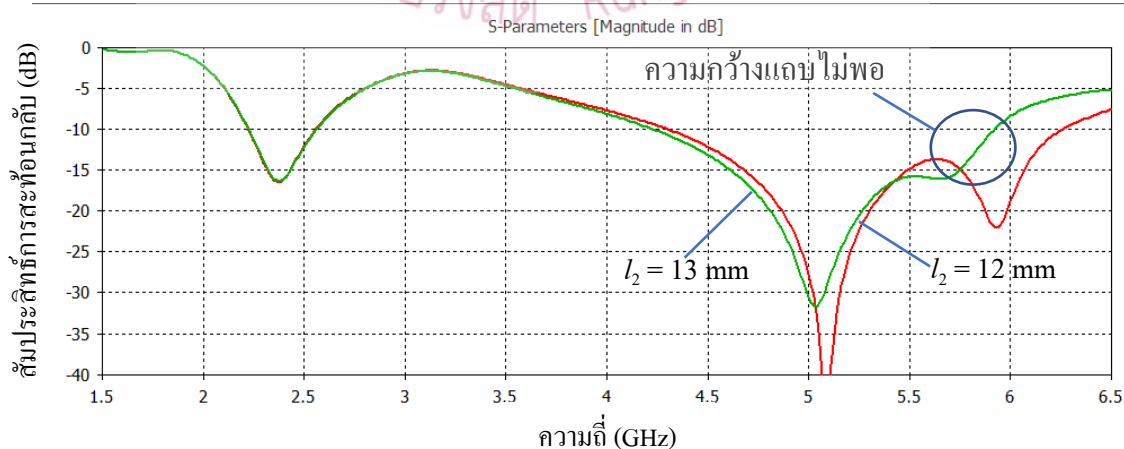
รูปที่ 3.13 สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ระยะห่างต่าง ๆ ระหว่างไดโพลกับตัวชี้ทิศทาง

3.4.3 การปรับปรุงโครงสร้างสายอากาศวิทยิ-อูะแถบความถี่คู่

ค่าพารามิเตอร์สำหรับกำหนดขนาดสายอากาศตามตารางที่ 3.6 จะได้สัมประสิทธิ์การสะท้อนเป็นดังรูปที่ 3.14 พบว่าที่ย่านความถี่ดำเนินการ 5 GHz ช่วงความถี่ดำเนินการ ได้เลื่อนลงมาต่ำเกินไป ดังนั้นเพื่อให้แถบความถี่ของสายอากาศเลื่อนสูงขึ้นไปครอบคลุมความถี่ระหว่าง 5.15 - 5.85 GHz จึงต้องมีการปรับพารามิเตอร์บางตัว นั่นคือความยาวพารามิเตอร์ l_2 และ l_3 ซึ่งจะต้องปรับให้สั้นลงเพราะจะทำให้ช่วงความถี่ดำเนินการย่าน 5 GHz เลื่อนสูงขึ้น

สัมประสิทธิ์การสะท้อนซึ่งเป็นผลลัพธ์จากการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ l_2 หรือความยาวองค์ประกอบปรีดิกที่สั้นที่สุดของไดโพลตามโครงสร้างในรูปที่ 3.11 แสดงดังรูปที่ 3.14 เมื่อ l_2 เปลี่ยนจาก 13.0 mm เป็น 12.0 mm จากรูปพบว่า เมื่อ l_2 มีขนาดสั้นลง มีผลกับความถี่สูง คือความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดจาก l_2 จะเลื่อนสูงขึ้นและแคบขึ้น ทำให้ขอบความถี่แถบสัมประสิทธิ์การสะท้อนเลื่อนไปทางขวา ครอบคลุมความถี่ 5.85 GHz ขณะที่การปรับเปลี่ยน l_2 ไม่ได้ทำให้ช่วงความถี่ดำเนินการย่าน 2.4 GHz มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ดังนั้นจึงสามารถสรุปอีกครั้งได้ว่าความยาว l_2 ใช้สำหรับปรับจูนช่วงความถี่การใช้งานย่าน 5 GHz ขอบขวาหรือของความถี่ 5.58 GHz

และสิ่งที่จะต้องพิจารณาต่อคือแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) เนื่องจากปัญหาหลักของสายอากาศแถบความถี่คู่คือ ความแตกต่างของแบบรูปการแผ่พลังงานระหว่างความถี่ดำเนินการต่ำและความถี่ดำเนินการสูง ที่อาจชี้ไปคนละทางหรือมีอัตราขยายที่ต่างกันมาก



รูปที่ 3.14 สัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศวิทยิ-อูะแถบความถี่คู่เมื่อขนาดตามตารางที่ 3.5

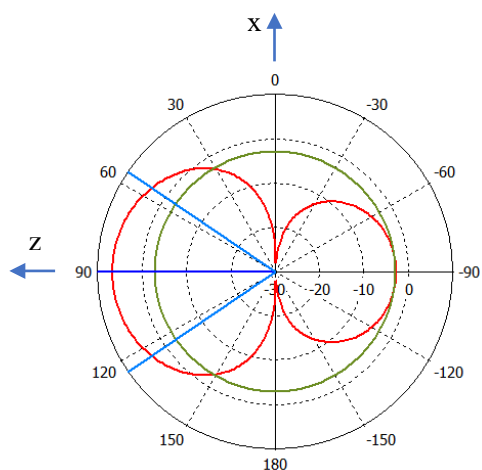
จากโครงสร้างสายอากาศยาคิ-อูตะแถบความถี่รูปที่ 3.11 จะได้แบบรูปการแผ่พลังงานของ 3 ความถี่ คือที่ย่านความถี่ต่ำ 1 ความถี่และย่านความถี่สูง 2 ความถี่ ดังรูปที่ 3.15 เมื่อรูป (ก) คือระนาบ xz ความถี่ 2.44 GHz รูป (ข) คือระนาบ yz ความถี่ 2.44 GHz รูป (ค) คือระนาบ xz ความถี่ 5.15 GHz รูป (ง) คือระนาบ yz ความถี่ 5.15 GHz รูป (จ) คือระนาบ xz ความถี่ 5.85 GHz และรูป (ฉ) คือระนาบ yz ความถี่ 5.85 GHz สังเกตว่า แบบรูปการแผ่พลังงานทั้งหมดจะสมมาตรตามแกน z และสังเกตได้ว่าการแผ่พลังงานของทุกความถี่จะชี้ไปในทิศทางเดียวกัน คือทิศ z ซึ่งเป็นข้อดีและจุดเด่นของสายอากาศนี้ นอกจากนี้ ความกว้างลำครึ่งกำลัง (Half Power Beam-Width, HPBW) ในระนาบ xz หรือระนาบสนาม E ของแต่ละความถี่จะไม่แตกต่างกันมากนัก นั่นคือความกว้างลำครึ่งกำลังจะมีขนาดเป็น 69, 72, 80 หน ความถี่ 2.44, 5.15, 5.85 GHz ตามลำดับ แต่ความกว้างลำครึ่งกำลังระนาบ yz หรือระนาบสนาม H ความกว้างลำครึ่งกำลังของแต่ละความถี่จะมีความแตกต่างกันอยู่พอสมควร คือ จะมีขนาดเป็น 108, 194, 172 หน ความถี่ 2.44, 5.15, 5.85 GHz ตามลำดับ

สำหรับอัตราส่วนกำลังหน้าต่อหลัง (Front to Back Ratio) ของสองความถี่ คือ 2.44 และ 5.15 GHz จะค่อนข้างดี แต่ หน ความถี่ 5.85 GHz จะไม่ดี คือมีอัตราส่วนเป็น 0 dB และจากการสังเกตต่อไปคือ สายอากาศนี้มีอัตราขยายสายอากาศ (Antenna Gain) คือ 6.6, 4.9, 3.7 dBi หน ความถี่ 2.44, 5.15, 5.85 GHz ตามลำดับ ซึ่งถือว่าอัตราขยายสายอากาศย่านความถี่สูงยังค่อนข้างน้อยอยู่

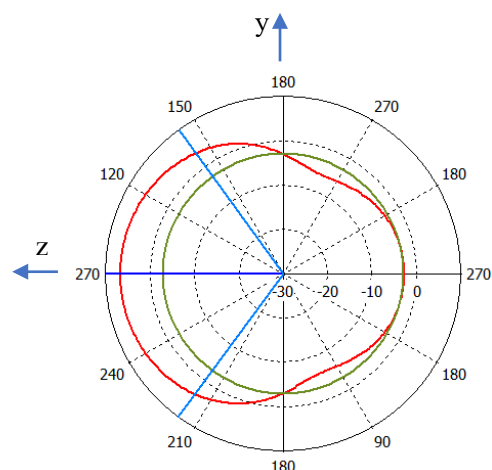
จากจุดบกพร่องของสายอากาศข้างต้น จึงจำเป็นที่จะต้องมีการปรับโครงสร้างของสายอากาศต่อเพื่อให้สายอากาศมีคุณสมบัติดีขึ้นให้ได้มากที่สุด

จากการเพิ่มองค์ประกอบตัวสะท้อนและองค์ประกอบตัวชี้ทิศทางข้างต้น จะเป็นการทำให้สายอากาศเปลี่ยนจากไดโพลแถบความถี่คู่ เป็นยาคิ-อูตะแถบความถี่คู่ โดยเฉพาะช่วงความถี่ต่ำ 2.4 GHz ดังนั้นในลำดับถัดไป จะเป็นการปรับโครงสร้างสายอากาศที่จะมีผลกับย่านความถี่สูง 5 GHz มากกว่าย่านความถี่ 2.4 GHz คือองค์ประกอบปรีสดี I_2 และ I_3 เพื่อให้สายอากาศมีคุณสมบัติดีขึ้นคือ

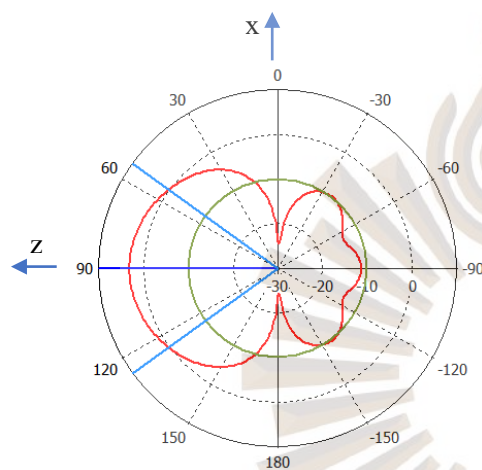
- 1) ความกว้างลำครึ่งกำลังระนาบสนาม H มีความใกล้เคียงกันมากขึ้นทั้ง 3 ความถี่
- 2) อัตราขยายสายอากาศเพิ่มมากขึ้นและใกล้เคียงกันทั้ง 3 ความถี่
- 3) อัตราส่วนกำลังหน้าต่อหลังโดยเฉพาะความถี่ 5.85 GHz ดีขึ้น



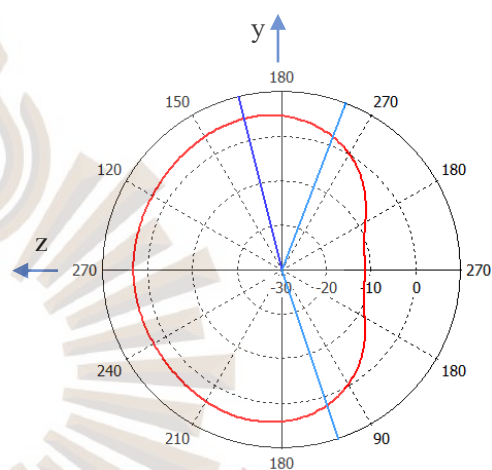
(ก)



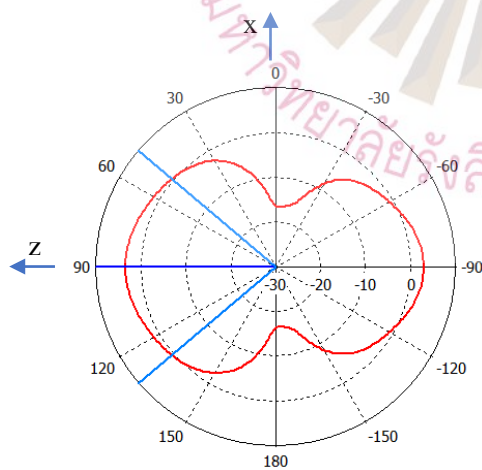
(ข)



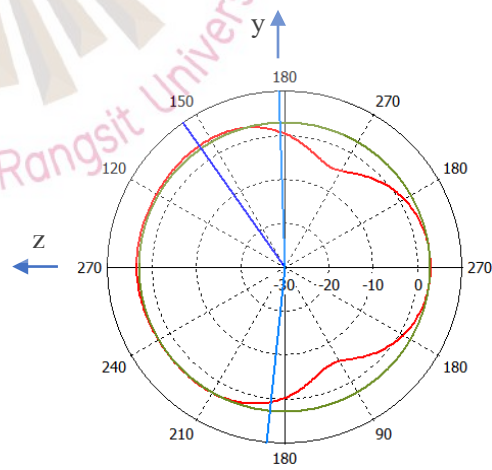
(ค)



(ง)



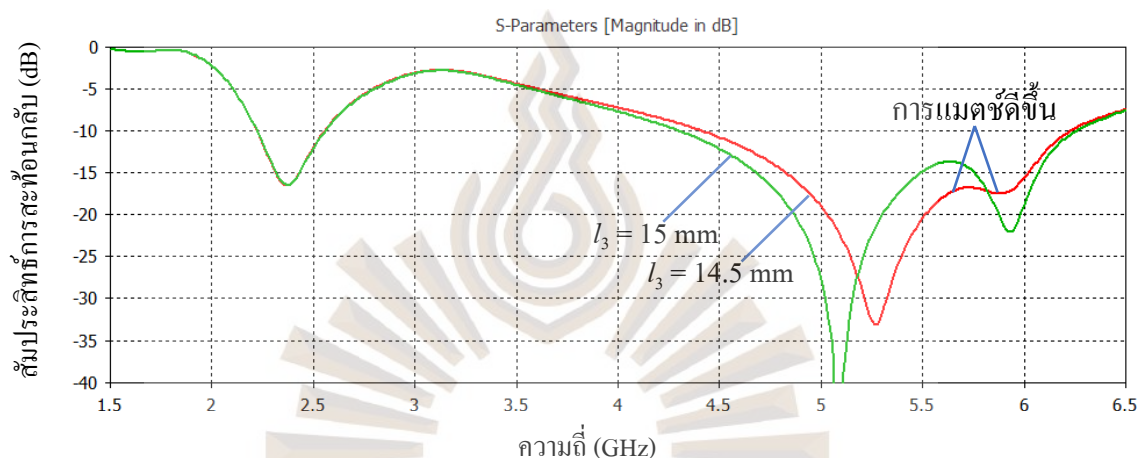
(จ)



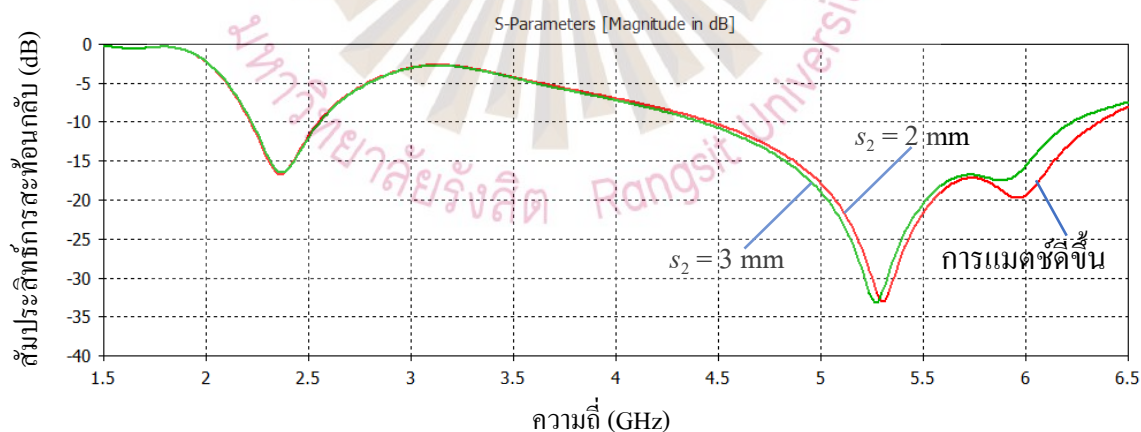
(ฉ)

รูปที่ 3.15 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศฮาดิ-อูตะแถบความถี่คู่ (ก) ระบาย xz ความถี่ 2.44 GHz
 (ข) ระบาย yz ความถี่ 2.44 GHz (ค) ระบาย xz ความถี่ 5.15 GHz (ง) ระบาย yz ความถี่ 5.15 GHz
 (จ) ระบาย xz ความถี่ 5.85 GHz (ฉ) ระบาย yz ความถี่ 5.85 GHz

ขั้นแรกทำการปรับลดขนาดความยาว l_3 ลงอีกเล็กน้อยเพื่อให้การแมตช์ดีขึ้นของย่านความถี่ 5 GHz โดยเฉพาะด้านความถี่ 5.15 GHz ให้ขยับสูงขึ้นเพื่อเสริมให้ความถี่ 5.85 GHz และตรงกลางระหว่างความถี่ 5.15 GHz และ 5.85 GHz แมตช์ดีขึ้น ผลการปรับลดความยาว l_3 เป็นดังรูปที่ 3.16 จากนั้นทำการปรับลดขนาดความกว้างของ s_2 ลงเล็กน้อยเพื่อให้การแมตช์ดีขึ้นของย่านความถี่ 5 GHz โดยเฉพาะด้านความถี่ 5.85 GHz ให้ขยับสูงขึ้นเพื่อเสริมให้ความถี่ 5.85 GHz แมตช์ดีขึ้น ผลการปรับลดความกว้าง s_2 เป็นดังรูปที่ 3.17



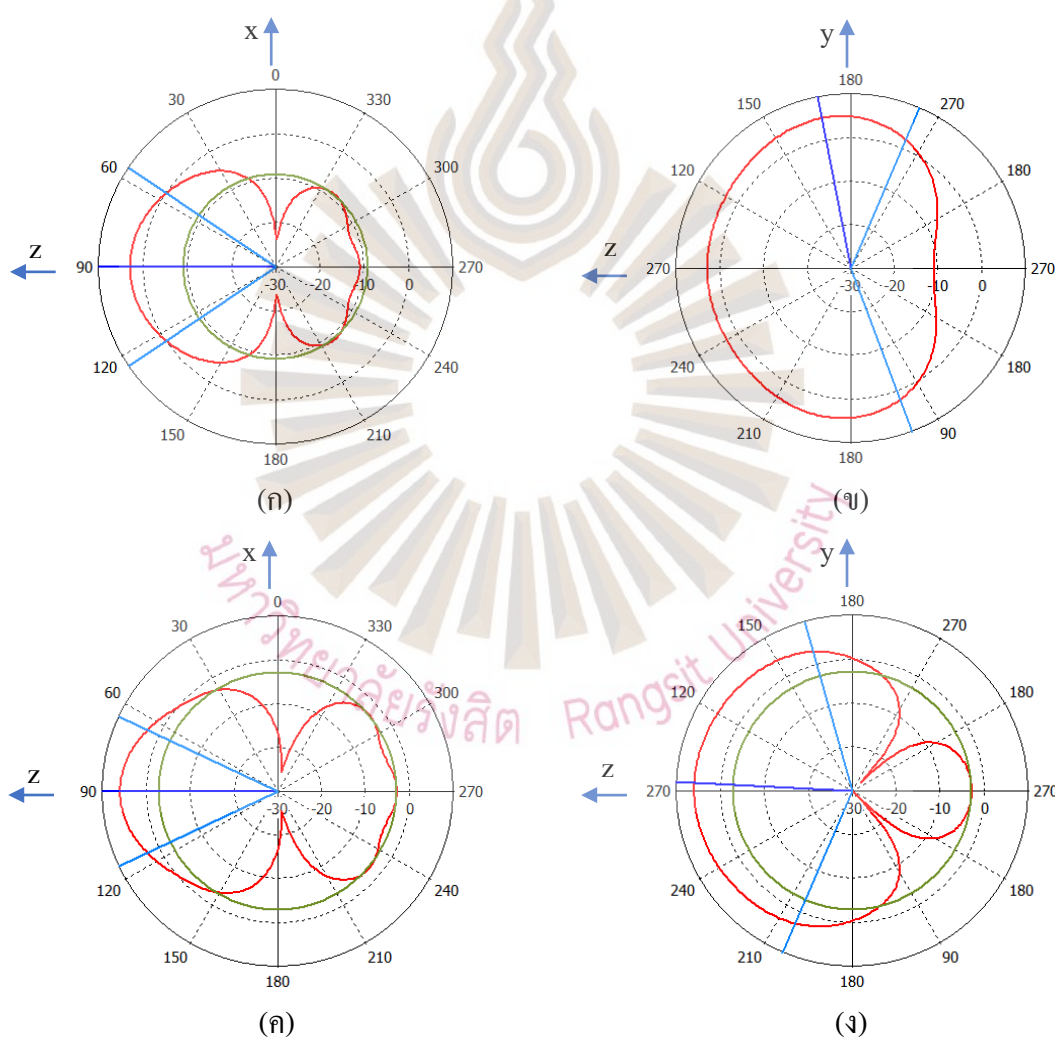
รูปที่ 3.16 สัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศยาคิ-อูตะแถบความถี่คู่เมื่อเปลี่ยนขนาด l_3



รูปที่ 3.17 สัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศยาคิ-อูตะแถบความถี่คู่เมื่อเปลี่ยนขนาด s_2

จากการลดความยาว l_3 และการลดความกว้าง s_2 ทำให้ช่วงความถี่ดำเนินการย่าน 5 GHz เลื่อนสูงขึ้นไป การปรับลดขนาดทั้งสองส่วนนี้จะเสริมให้อัตราส่วนกำลังหน้าต่อหลังดีขึ้น เนื่องจากช่วงความถี่ดำเนินการได้เลื่อนสูงขึ้นไปแต่การพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานยังคงอยู่ที่ 5.85 GHz เหมือนเดิม และการปรับลดความกว้าง s_2 ทำให้กระแสไฟฟ้าแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบน

องค์ประกอบปริมาตร L_z ด้าน $-z$ มีขนาดลดลง ทำให้ทิศ z ที่อยู่ด้านตรงข้ามแหล่งกำเนิด (ไดโพล) มีกำลังสัญญาณเพิ่มมากขึ้น อัตราส่วนกำลังหน้าต่อหลังจึงดีขึ้น รูปที่ 3.18 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานหลังจากที่ได้ปรับเปลี่ยนขนาดองค์ประกอบปริมาตรแล้ว เมื่อรูป (ก) คือระนาบ xz ความถี่ 5.15 GHz รูป (ข) คือระนาบ yz ความถี่ 5.15 GHz รูป (ค) คือระนาบ xz ความถี่ 5.85 GHz และรูป (ง) คือระนาบ yz ความถี่ 5.85 GHz พบว่าที่ความถี่ 5.15 GHz มีการเปลี่ยนแปลงน้อย แต่ความถี่ 5.85 GHz มีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเจนเมื่อเทียบกับรูปที่ 3.15 (จ) และ (ฉ) นั่นคืออัตราขยายเพิ่มขึ้นและอัตราส่วนกำลังหน้าต่อหลังดีขึ้น



รูปที่ 3.18 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศวิทยุ-อู๊ดเคแถบความถี่คู่ (ก) ระนาบ xz ความถี่ 5.15 GHz (ข) ระนาบ yz ความถี่ 5.15 GHz (ค) ระนาบ xz ความถี่ 5.85 GHz (ง) ระนาบ yz ความถี่ 5.85 GHz

อย่างไรก็ตาม จากการเก็บข้อมูลพบว่า ความกว้างลำคลื่นกำลังระนาบ xz หรือระนาบสนาม E จะมีขนาดเป็น 74, 68, 51 หน ความถี่ 2.44, 5.15, 5.85 GHz ตามลำดับ แต่ความกว้างลำคลื่นกำลังระนาบ yz หรือระนาบสนาม H ความกว้างลำคลื่นกำลังจะมีขนาดเป็น 136, 224, 141 หน ความถี่ 2.44, 5.15, 5.85 GHz ตามลำดับ พบว่าความกว้างลำคลื่นกำลังทั้งระนาบสนาม E และ H มีความใกล้เคียงกันมากขึ้นทั้ง 3 ความถี่

สายอากาศนี้มีอัตราขยาย 5.6, 5.0, 5.8 dBi หน ความถี่ 2.44, 5.15, 5.85 GHz ตามลำดับ ซึ่งถือว่าอัตราขยายสายอากาศใกล้เคียงกันทั้ง 3 ความถี่ จากเดิมที่ 6.6, 4.9, 3.7 dBi หน ความถี่ 2.44, 5.15, 5.85 GHz ตามลำดับ

สำหรับอัตราส่วนกำลังหน้าต่อหลัง หน ความถี่ 2.44, 5.15, 5.85 GHz คือ 10.8, 11.8, 8.7 dB ตามลำดับ ทำให้พบว่าอัตราส่วนกำลังหน้าต่อหลังโดยเฉพาะความถี่ 5.85 GHz ดีขึ้น

ดังนั้น จากการจำลองสายอากาศยาภิ-อูตะแถบความถี่คู่ โดยโปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์ทำให้สามารถสรุปขนาดพารามิเตอร์ของสายอากาศได้ตามตารางที่ 3.6 เมื่อโครงสร้างสายอากาศเป็นดังรูปที่ 3.11

ในบทนี้ได้ทราบถึงการออกแบบและการวิเคราะห์สายอากาศนำเสนอ โดยสายอากาศมีต้นแบบมาจากสายอากาศแบบยาภิ-อูตะมาตรฐานทั่วไป จากนั้นพัฒนามาสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR4 ให้ดำเนินการได้ในย่านความถี่ 2.4 GHz จากนั้นได้เพิ่มองค์ประกอบปรสิต (parasitic) เข้าไปเพื่อให้สายอากาศมีช่วงความถี่ดำเนินการย่าน 5 GHz ไปพร้อมกับความถี่ 2.4 GHz ด้วย ทำให้ได้เป็นสายอากาศยาภิ-อูตะแถบความถี่คู่สำหรับดำเนินการในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยได้มีการปรับขนาดส่วนต่าง ๆ ของสายอากาศในพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่กำหนดให้สำหรับสายอากาศนี้ โดยได้วิเคราะห์ว่าการที่โครงสร้างของสายอากาศนี้มีเรโซแนนซ์เกิดขึ้น 3 ความถี่ จะมีความกว้างแถบสำหรับความถี่ดำเนินการ 2 ย่านความถี่ ซึ่งเหมาะสมและเพียงพอกับการใช้งานกับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ผลที่ได้จากการออกแบบและวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์โครงสร้างสายอากาศในบทนี้ จะถูกนำไปเป็นแนวทางในการสร้างสายอากาศจริงแล้ววัดผลค่าต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบผลต่อไป ซึ่งจะได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4

ตารางที่ 3.6 ขนาดสายอากาศยางกี-อูตะแถบความถี่แบนแผ่น FR4

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
ความกว้าง FR4 (a)	55.0
ความยาว FR4 (b)	60.0
ความหนา FR4 (t)	1.6
ความหนาทองแดง (t_c)	0.035
ความยาวไดโพล (l_1)	43.0
ความกว้างไดโพล (s_1)	3.0
ระยะห่างระหว่างโพด (g_1)	1.5
ความยาวองค์ประกอบปรสิตตัวสั้น (l_2)	12.0
ความกว้างองค์ประกอบปรสิตตัวสั้น (s_2)	2.0
ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบปรสิตตัวสั้นกับไดโพล (g_2)	0.5
ความยาวองค์ประกอบปรสิตตัวยาว (l_3)	14.5
ความกว้างองค์ประกอบปรสิตตัวยาว (s_3)	3.0
ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบปรสิตตัวยาวกับไดโพล (g_3)	0.5
ความยาวตัวสะท้อน (l_4)	54.0
ความกว้างตัวสะท้อน (s_4)	3.0
ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนกับไดโพล (d_1)	18.5
ความยาวตัวชี้ทิศทาง (l_5)	30.0
ความกว้างตัวชี้ทิศทาง (s_5)	3.0
ระยะห่างระหว่างตัวชี้ทิศทางกับไดโพล (d_2)	27.0

บทที่ 4

การทดสอบสายอากาศ

4.1 บทนำ

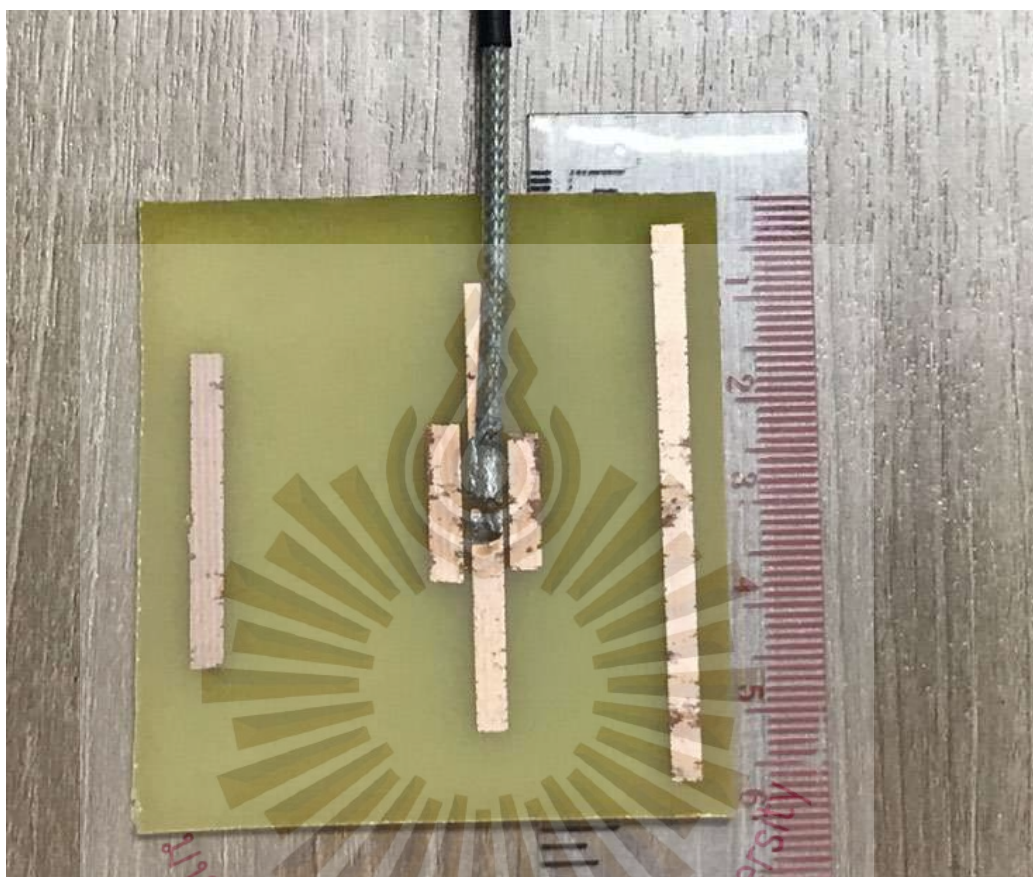
ในบทที่ 3 ได้แสดงถึงการออกแบบสายอากาศยา-อู-ดะสองย่านความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับการนำไปใช้งานกับย่านความถี่ของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย สำหรับในบทนี้จะอธิบายถึงสายอากาศต้นแบบที่ได้สร้างขึ้น การทดสอบและผลการทดสอบสายอากาศยา-อู-ดะสองย่านความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์ โดยสายอากาศต้นแบบสร้างตามขนาดที่ได้ทำการจำลองสายอากาศโดยโปรแกรมไว้ก่อนแล้ว หลังการสร้างสายอากาศต้นแบบจึงได้ทดสอบคุณสมบัติ ต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสายอากาศ เช่น สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient) ช่วงความถี่การใช้งาน (Operating Frequency) อัตราขยายสายอากาศ (Antenna Gain) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) และเมื่อทราบแบบรูปการแผ่พลังงานแล้วก็สามารถหาความกว้างลำครึ่งกำลัง (Half Power Beam-Width) ได้ อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนไปจากผลการจำลองบ้าง เนื่องจากปัจจัยทางสภาพแวดล้อมและการสร้างสายอากาศ ดังนั้นการจำลองในโปรแกรมจำลองสายอากาศจึงเป็นแนวทางในการสร้างสายอากาศได้เป็นอย่างดีนำไปสู่การสร้างสายอากาศจริง แต่จำเป็นต้องปรับแต่งเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ

4.2 สายอากาศต้นแบบ

หลังจากจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมและทำการวิเคราะห์หาสมบัติที่ต้องการแล้ว คือ ความกว้างแถบที่มากและการแมตช์ที่ดีเพียงพอกับการนำไปใช้งาน จากนั้นจึงได้สร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นมา เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบผล โดยสายอากาศนี้มีโครงสร้างตามรูปที่ 3.11 และมีค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.6

หลักการออกแบบสายอากาศจะเป็นไปตามที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 เริ่มต้นจากการจำลองสายอากาศจากโปรแกรมจำลองสายอากาศจนได้ขนาดของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามที่ต้องการดังแสดงในตารางที่ 3.6 แล้ว จากนั้นจึงสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นมาเพื่อทดสอบและเปรียบเทียบผล ตาม

ขนาดพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลอง ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยสายอากาศที่สร้างขึ้นจากทองแดงบน FR4 แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ต้นแบบของสายอากาศยาคิ-อูตะสองย่านความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์

โครงสร้างสายอากาศยาคิ-อูตะต้นแบบแสดงไว้ดังรูปที่ 4.1 เป็นสายอากาศยาคิ-อูตะที่สร้างจากแผ่นโลหะตัวนำบางบนผิวแผ่นวงจรพิมพ์ FR4 ด้านเดียว โดย FR4 หนา 1.6 mm เมื่ออิลิเมนต์ต่าง ๆ ประกอบด้วย

1) ไคโพลตัวขับ (Driven Dipole) มีรูปร่างเป็นเส้น กว้าง s_1 ยาว l_1 แยกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กันเพื่อแบ่งขั้วเรียกว่า โพล โดยไคโพลตัวขับนี้จะเชื่อมต่อกับสายสัญญาณชนิดสายส่งแกนร่วม (Coaxial Cable) เพื่อป้อนสัญญาณ โดยโพลหนึ่งจะเชื่อมต่อกับแกนนอก (Outer) จากรูปคือโพลด้านล่าง และอีกโพลหนึ่งจะต่อกับแกนใน (Inner) จากรูปคือโพลด้านบน ของสายส่งแกนร่วมที่ใช้สำหรับป้อนนี้ เมื่อสายส่งแกนร่วมจะต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของได

โพลตัวจับนี้ โดยถ้าเลือกได้ควรให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุด เนื่องจากจะมีอิทธิพลต่อสายอากาศน้อยที่สุด ซึ่งจะส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การสะท้อนและแบบรูปการแผ่พลังงาน โดยสายส่งแกนร่วมนี้จะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ในทุกความถี่ที่ 50Ω ไม่ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางจะเท่าใดก็ตาม ซึ่งเหมือนกับอิมพีแดนซ์สำหรับใช้ออกแบบสายอากาศยาภิ-อูคະນີ และระยะห่างระหว่างโพล ณ ตำแหน่งการป้อนสัญญาณคือ g_1

2) อิลิเมนต์ตัวสะท้อน (Reflector) ถูกกำหนดให้มีความกว้าง s_2 และยาว l_2 โดยอิลิเมนต์นี้ จะมีความยาวมากที่สุดและมีเพียงอิลิเมนต์เดียวเท่านั้นสำหรับ โครงสร้างสายอากาศยาภิ-อูคະນີ นำเสนอนี้ ทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่นให้กลับทิศพุ่งไปยังด้านหน้าในช่วงความถี่หนึ่งซึ่งจะต้องออกแบบให้ครอบคลุมช่วงความถี่ดำเนินการของสายอากาศ ในโครงสร้างสายอากาศยาภิ-อูคະນີมี 2 ย่านความถี่ดำเนินการ คือ ย่าน 2.4 GHz และ 5 GHz โดยย่านความถี่ที่อิลิเมนต์ตัวสะท้อนนี้มีผลคือความถี่ดำเนินการย่าน 2.4 GHz

3) อิลิเมนต์ชี้ทิศทาง (Director) ที่ถูกกำหนดให้มีความกว้าง s_3 และยาว l_3 สำหรับสายอากาศยาภิ-อูคະນີนำเสนอจะมีอิลิเมนต์ชี้ทิศทางนี้เพียงอิลิเมนต์เดียวเพื่อความสะดวกจัดของสายอากาศ และมีความยาวน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับอิลิเมนต์ตัวจับและอิลิเมนต์ตัวสะท้อน โดยสามารถเพิ่มจำนวนอิลิเมนต์ชี้ทิศทางนี้ได้ถ้าต้องการให้สายอากาศมีอัตราขยายสายอากาศ (Antenna Gain) มากขึ้น โดยย่านความถี่ที่อิลิเมนต์ตัวชี้ทิศทางนี้มีผลคือย่านความถี่ดำเนินการ 2.4 GHz

4) อิลิเมนต์เกาะติดหรืออิลิเมนต์พาราซิติค (Parasitic Element) จำนวน 2 ตัว กำหนดให้มีความกว้าง s_4, s_5 และยาว l_4, l_5 ตามลำดับ เป็นอิลิเมนต์ที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ 2 และ 3 ณ ช่วงความถี่ดำเนินการความถี่สูงย่าน 5 GHz ทำให้มีช่วงความถี่ดำเนินการที่กว้างขึ้น สำหรับสายอากาศยาภิ-อูคະນີ นำเสนอนี้ อิลิเมนต์เกาะติดทั้งสองนี้ จะมีความยาวไม่เท่ากันเนื่องจากต้องการให้เกิด เรโซแนนซ์ (Resonance) 2 ความถี่ใกล้กันแล้วคัปปลิง (Coupling) กัน ได้เป็นช่วงความถี่ดำเนินการที่กว้างครอบคลุมช่วง 5.15 – 5.85 GHz จากรูปที่ 4.1 อิลิเมนต์พาราซิติคที่อยู่ด้านซ้ายของอิลิเมนต์ตัวจับหรือใกล้กับอิลิเมนต์ชี้ทิศทางจะมีความยาว l_4 ซึ่งมากกว่าอิลิเมนต์พาราซิติค l_5 ด้านขวาของอิลิเมนต์ตัวจับที่ใกล้กับอิลิเมนต์ตัวสะท้อน ทำให้บอกได้ว่าความถี่เรโซแนนซ์จากอิลิเมนต์พาราซิติคที่ยาวกว่าจะต่ำกว่าที่ได้จากอิลิเมนต์พาราซิติคตัวสั้น

ระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ตัวขับกับตัวสะท้อนคือ d_1 ขณะที่ระยะห่างระหว่างตัวขับกับตัวชี้ทิศทางกำหนดไว้เป็น d_2 และช่องว่างระหว่างตัวขับกับอิลิเมนต์พาราซิติคคือ g_2 และ g_3 เมื่อทุกอิลิเมนต์ที่กล่าวมาคือ โลหะบางที่เกาะบนผิวของ FR4 ด้านเดียวแล้วสร้างเป็นรูปร่างตามที่กำหนด ในงานที่นำเสนอนี้ โลหะบนผิววัสดุ FR4 สร้างจากทองแดงหนา (t_c) ประมาณ 0.05 mm จากโรงงานผู้ผลิต ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งแกนร่วมอิมพีแดนซ์ 50 Ω เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 mm

ตามที่ได้กล่าวไว้ว่า สายอากาศจะถูกออกแบบโดยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาคุณสมบัติต่าง ๆ จากการจำลองสายอากาศสามารถสรุปหลักเกณฑ์การออกแบบสายอากาศได้ดังนี้

1) ออกแบบเพื่อรองรับช่วงความถี่ต่ำของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายระหว่าง 2.400 – 2.483 GHz ส่วนของสายอากาศที่มีผลต่อความถี่ย่านนี้มากที่สุด คือ อิลิเมนต์ตัวขับหรือไดโพล ดังนั้นขนาดของ l_1 จะต้องกำหนดไว้ที่ประมาณ $\lambda/2$ เมื่อ λ คือความยาวคลื่น (Wavelength) ความถี่กลางของช่วงความถี่นี้ (2.44 GHz) และเนื่องจากอิลิเมนต์พาราซิติคอยู่บน FR4 ที่ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ϵ_r ประมาณ 4.8 ซึ่งมากกว่าของอากาศ ($\epsilon_r = 1$) ทำให้ l_1 มีขนาดลดลงประมาณ 1/3 ของขนาดในอากาศ ส่วนความกว้างอิลิเมนต์ตัวขับ s_1 มีผลไม่มากนักต่อการขยับเพิ่มขึ้นหรือลดลงและการเข้ากันได้ของอิมพีแดนซ์ (Matching) ของช่วงความถี่นี้ แต่การออกแบบนี้จะกำหนดให้มีความกว้างตั้งแต่ 3 mm ขึ้นไป เนื่องจากจะต้องบังคับกริดกับสายส่งแกนร่วมเพื่อป้อนสัญญาณ ซึ่งถ้าเล็กจะทำให้อิลิเมนต์ตัวขับนี้หลุดออกจาก FR4 เพราะความร้อนการบังคับกริด และจากการจำลองพบว่า พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเข้ากันได้ของอิมพีแดนซ์ของช่วงความถี่ต่ำนี้คือ l_2 ซึ่งจะต้องให้มีความมากกว่า l_1 เล็กน้อย มิเช่นนั้นแล้ว การเข้ากันได้ของอิมพีแดนซ์ที่ 50 Ω จะไม่ค่อยดี

2) ออกแบบเพื่อรองรับช่วงความถี่สูงหรือช่วงความถี่ที่สองของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายระหว่าง 5.15 – 5.85 GHz ส่วนของสายอากาศที่มีผลต่อความถี่ช่วงนี้คือ อิลิเมนต์พาราซิติคทั้งสอง โดยขนาดของ l_4 จะต้องอยู่ที่ประมาณ $\lambda_2/2$ เมื่อ λ_2 คือความยาวคลื่นของความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2 ของช่วงนี้หรือที่ 5.15 GHz ที่สัมพันธ์กับตัวกลาง FR4 ด้วย และขนาดของ l_5 จะต้องอยู่ที่ประมาณ $\lambda_3/2$ เมื่อ λ_3 คือความยาวคลื่นความถี่เรโซแนนซ์ที่ 3 ของช่วงนี้หรือที่ 5.85 GHz ที่สัมพันธ์กับตัวกลาง FR4 เช่นกัน

และก็เป็นที่ยอมรับว่า L_4 และ L_5 มีผลต่อความถี่การใช้งาน นั่นคือถ้าต้องการให้ช่วงความถี่ดำเนินการสูงขึ้นจะต้องลดขนาดลงและถ้าต้องการให้ต่ำลงจะต้องเพิ่มขนาดขึ้น อย่างไรก็ตาม จะต้องปรับไปพร้อม ๆ กับขนาดของ s_4 กับ s_5 และ g_2 กับ g_3 ด้วย ซึ่งจะทำให้การเข้ากันได้ของอิมพีแดนซ์และความกว้างแถบคงที่ไม่แคบลง นอกจากนี้ การปรับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศนี้ยังสามารถกระทำได้กับระยะห่าง g_1 ได้อีกพารามิเตอร์หนึ่งด้วย และความกว้างของ s_4 กับ s_5 ยังมีผลกับแบบรูปการแผ่พลังงาน ที่เราสามารถปรับให้เหมาะสมเพื่อให้เปลี่ยนการชี้ทิศทางไปตามที่ต้องการได้ ซึ่งสายอากาศยาคิ-อูตะที่ดี ควรชี้ไปในทิศทางเดียวกันทุกความถี่ดำเนินการ

4.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนและความกว้างแถบ

สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient) ของสายอากาศ คืออัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดของแรงดันที่สะท้อนกลับมา (Reflected Voltage) ต่อแอมพลิจูดของแรงดันที่จ่ายให้แก่สายอากาศ (Incident Voltage) ตามสมการที่ (2-31) โดยจะต้องพิจารณาในความถี่ต่าง ๆ ตามช่วงความถี่ที่เราสนใจ เช่น ในการทดสอบสายอากาศนี้สนใจความถี่สำหรับดำเนินการในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย คือ ย่าน 2.4 GHz และ 5 GHz ดังนั้น ช่วงความถี่ที่พิจารณาจะอยู่ระหว่าง 1.5 – 6.0 GHz เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม สัมประสิทธิ์การสะท้อนนี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1 โดยค่าที่เข้าใกล้ 0 จะหมายถึงมีการสะท้อนกลับมาน้อยมากของความถี่นั้น ในทางตรงกันข้าม ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของความถี่ใดมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าความถี่นั้นสะท้อนกลับมาหมดไม่สามารถส่งออกไปจากสายอากาศได้ ดังนั้น เมื่อพิจารณาที่ความถี่ต่าง ๆ เป็นช่วงความถี่แล้ว เมื่อพบว่าช่วงความถี่ใดมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อย ก็แสดงว่าช่วงนั้นเป็นช่วงความถี่ดำเนินการของสายอากาศนั้น แต่จะต้องมีระดับอ้างอิงเป็นเกณฑ์ในการแบ่งค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนนี้ว่าต้องน้อยกว่าเท่าใดถึงจะเป็นช่วงความถี่ดำเนินการของสายอากาศนั้นได้ เช่น < -9.8 dB (VSWR 1 : 2) หรือ < -13.8 dB (VSWR 1 : 1.5) เป็นต้น และจะสังเกตได้ว่าหน่วยของสัมประสิทธิ์การสะท้อนนิยมใช้หน่วยเป็น เดซิเบล (decibel, dB) เนื่องจากอัตราส่วนของแรงดันที่สะท้อนกลับมาต่อที่จ่ายให้แก่สายอากาศแต่ละความถี่บางครั้งมีค่าน้อยมาก การแสดงด้วยหน่วยเดซิเบลจะทำให้เห็นค่าได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

ช่วงความถี่ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนสามารถนำไปหาค่าความกว้างแถบ (bandwidth) ของช่วงความถี่ดำเนินการของสายอากาศได้ โดยพิจารณาจากช่วงความถี่ที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยกว่าระดับอ้างอิง ซึ่งโดยปกติในการพัฒนาสายอากาศนิยมใช้ระดับอ้างอิงที่ < -9.8 dB

4.3.1 วิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 4.2 เป็นการจัดเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการวัดในห้องปฏิบัติการทั่วไป การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนควรวัดในห้องไร้คลื่นรบกวน (Anechoic Chamber) เพราะจะทำให้ปราศจากสัญญาณรบกวนต่าง ๆ ทำให้เส้นกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนราบเรียบดี จากรูปได้ตั้งโปรแกรมสำหรับการวัดไว้ที่พอร์ต 1 ด้วยโปรแกรมการวัดเป็นพารามิเตอร์ S_{11} ช่วงความถี่ 1.5 - 6.0 GHz โดยเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับทดสอบ ประกอบด้วย



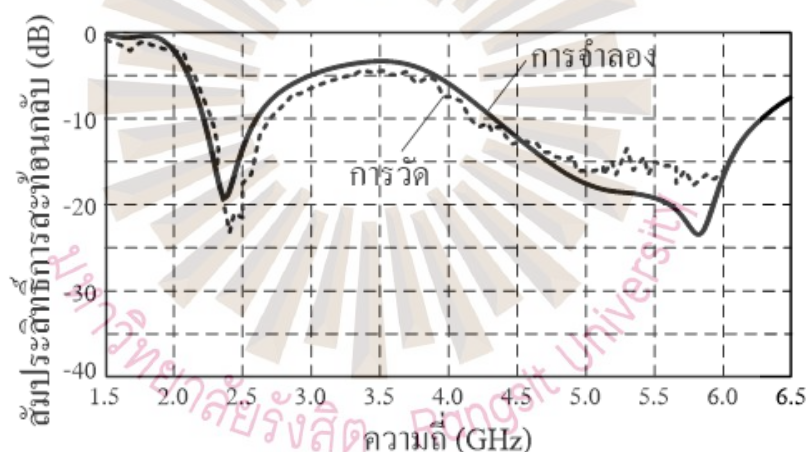
รูปที่ 4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

- 1) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ยี่ห้อ Rohde and Schwarz รุ่น ZVL6 ที่สามารถวัดความถี่ได้ระหว่าง 9 kHz จนถึง 6 GHz
- 2) ชุดปรับเทียบเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (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) สายอากาศยาคิ-อูตะสองย่านความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์

4.3.2 สัมประสิทธิ์การสะท้อน

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากการวัดสายอากาศจริงต้นแบบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสายอากาศเป็นดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 ผลลัพธ์ที่ได้ทั้งคู่มิแนวโน้มเป็นไปในแนวทางเดียวกันและมีความใกล้เคียงกัน ในงานวิจัยนี้ได้พยายามสร้างสายอากาศให้ใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้ให้ได้มากที่สุด ดังนั้นการจำลองสายอากาศจะเป็นแนวทางสำหรับการสร้างสายอากาศจริงได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 4.3 ผลการวัดแสดงช่วงความถี่สูงสุดได้ถึงเพียงแค่ 6.0 GHz เท่านั้น เนื่องจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ในห้องปฏิบัติการสามารถวัดความถี่ได้สูงสุดเพียง 6 GHz เท่านั้น



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากการจำลองและได้จากการวัด

และจากการสังเกตเส้นกราฟค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนทั้งคู่ที่ได้พบว่า การที่โครงสร้างสายอากาศเป็นเช่นนี้ ได้ให้ช่วงความถี่ดำเนินการ 2 ช่วงความถี่ คือที่ 2.4 GHz และที่ 5 GHz โดยที่ความถี่ 2.4 GHz เกิดจากไดโพล ขณะที่ความถี่ 5 GHz เกิดจากอิลิเมนต์พาราซิติค เมื่อ 2 พาราซิติคทำให้เกิด 2 ความถี่เรโซแนนซ์ใกล้เคียงกันแล้วประสานร่วมกันได้ช่วงความถี่ที่กว้างเพียงพอสำหรับการใช้งานระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายย่านความถี่สูงหรือ 5 GHz ระหว่าง 5.15 – 5.85 GHz ที่มีหลายมาตรฐานดำเนินการที่ย่านความถี่นี้อยู่ เช่น IEEE802.11a, IEEE802.11n, IEEE802.11ac, และ IEEE802.11ax เป็นต้น

จากกราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากการจำลองและได้จากการวัดรูปที่ 4.3 พบว่าช่วงความถี่ดำเนินการ ณ ย่าน 2.4 GHz ผลของการวัดจะเลื่อนไปทางขวาสูงกว่าช่วงความถี่ที่ได้จากการจำลองเล็กน้อย แต่จะแมตซ์ดีกว่าคือสัมประสิทธิ์การสะท้อน < -20 dB ความกว้างแถบจากการวัดก็กว้างกว่าการจำลองเล็กน้อย และกว้างครอบคลุมย่านความถี่ดำเนินการคือ 2.4 – 2.483 GHz

สำหรับช่วงความถี่ดำเนินการ ณ ย่าน 5 GHz การแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดสายอากาศจะน้อยกว่าที่ได้จากการจำลอง โดยสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากการวัดจะอยู่ที่ประมาณ -15 dB ที่ช่วงความถี่ระหว่าง 5.15 – 5.85 GHz ซึ่งก็ยังถือว่าแมตซ์ได้อยู่ สามารถนำไปใช้งานจริงได้ ความกว้างแถบจากการวัดครอบคลุมย่านความถี่ดำเนินการนี้ คือ 5.15 – 5.85 GHz

4.3.3 ความกว้างแถบ

จากช่วงความถี่ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้ดังในรูปที่ 4.3 สามารถนำไปหาค่าความกว้างแถบ (Bandwidth) ของสายอากาศเป็นย่านความถี่ดำเนินการได้ โดยให้ช่วงความถี่ที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยกว่าระดับอ้างอิงที่ < -9.8 dB กับค่าที่ได้จากการวัด ดังนั้นจะได้ความกว้างแถบ 2 ช่วง คือ

1) ความกว้างแถбы่านความถี่ 2.4 GHz ระหว่างความถี่ 2.25 – 2.70 GHz ที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับน้อยกว่า -9.8 dB ดังนั้นสามารถหาความกว้างแถบได้เป็น 0.45 GHz หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความถี่ได้เป็น 18.18%

2) ความกว้างแถбы่านความถี่ 5 GHz ระหว่างความถี่ 4.15 – 6.00 GHz ที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับน้อยกว่า -9.8 dB ดังนั้นสามารถหาความกว้างแถบได้เป็น 1.85 GHz หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความถี่ได้เป็น 36.45%

4.4 แบบรูปการแผ่พลังงาน

4.4.1 การจัดวางอุปกรณ์ทดสอบสายอากาศด้านแบบรูปการแผ่พลังงาน

การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศยาภิ-อูคะสองย่านความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์มีการจัดวางและเชื่อมต่อเครื่องมือและอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.4 เครื่องมือสำหรับทดสอบประกอบด้วย

- 1) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ยี่ห้อ Rohde and Schwarz รุ่น ZVL6 ที่สามารถวัดความถี่ได้ระหว่าง 9 kHz จนถึง 6 GHz
- 2) สายนำสัญญาณแบบการสูญเสียต่ำ (Low Loss) ชนิดสายส่งแกนร่วม ยาว 5 m จำนวน 2 เส้น
- 3) สายอากาศตัวส่งมาตรฐานแบบปากแตร (Horn Antenna) สำหรับส่งสัญญาณไปยังสายอากาศตัวรับซึ่งเป็นสายอากาศทดสอบ (ยาภิ-อูคะสองย่านความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์) สายอากาศตัวส่งมาตรฐานจะเป็นสายอากาศที่ทราบอัตราขยาย (Gain) ทุกความถี่การใช้งาน และมักต้องมีช่วงความถี่ดำเนินการที่กว้างให้สามารถนำไปทดสอบกับสายอากาศได้หลายความถี่ ครอบคลุมหลายระบบการสื่อสาร และมักเป็นสายอากาศที่โพลาไรซ์เป็นเชิงเส้นชัดเจน
- 4) แท่นสำหรับจับยึดสายอากาศตัวส่งมาตรฐาน
- 5) แท่นหมุน (Turn Table) สำหรับจับยึดสายอากาศทดสอบเพื่อหมุน โดยจะต้องสามารถหมุนได้ 0 - 360 องศา
- 6) อุปกรณ์ควบคุมการหมุน
- 7) คอมพิวเตอร์
- 8) หัวเชื่อมต่อชนิดต่าง ๆ เช่น N-Type, SMA เป็นต้น
- 9) สายอากาศยาภิ-อูคะสองย่านความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์ซึ่งเป็นสายอากาศทดสอบ

การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศยาภิ-อูคะสองย่านความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์ใช้เครื่องมือสำหรับทดสอบเป็นเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายยี่ห้อ Rohde and Schwarz รุ่น ZVL6 สามารถวัดความถี่เริ่มต้นที่ 9 kHz และความถี่สุดท้ายที่ 6 GHz ซึ่งรองรับความถี่ช่วงที่ต้องการทดสอบ โดยสายอากาศมาตรฐาน (Standard Antenna) สำหรับส่งสัญญาณเป็นสายอากาศแบบปากแตร (Horn Antenna) ในขณะที่สายอากาศรับสัญญาณเป็นสายอากาศยาภิ-อูคะสองย่านความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์ต่อเข้ากับแท่นหมุน (Turn Table) ที่สามารถหมุนได้ 0 - 360 องศา ทั้งแนวตั้ง

(Vertical) และแนวระดับ (Horizontal) ควบคุมโดยอุปกรณ์เครื่องควบคุมการหมุนผ่านคอมพิวเตอร์ ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศทดสอบคือ 2 m ซึ่งเป็นระยะที่ถือว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นระยะไกล (Far Field) และสายอากาศทั้งสองวางอยู่เหนือพื้น 1 m ในห้องไร้คลื่นรบกวน



รูปที่ 4.4 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน

4.4.2 แบบรูปการแผ่พลังงาน

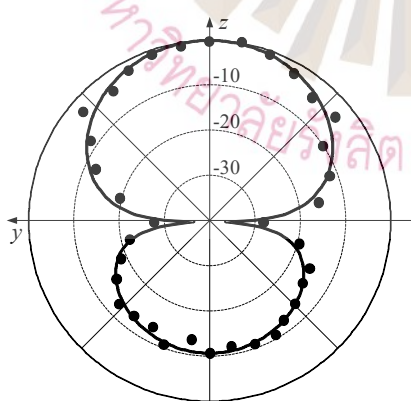
การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศยาคิ-อูตะสองย่านความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์จะกระทำ 2 ระนาบ คือ ระนาบ xz และระนาบ yz ตามรูปที่ 3.11 โดยเป็นการวัดแบบโพลาไรซ์ร่วม (Co-Polarization)

แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ได้จากการจำลองและการวัดจากสายอากาศจริง ณ ความถี่ต่ำ 1 ความถี่ และสูง 2 ความถี่ ภายในช่วงความถี่ดำเนินการหรือที่ความถี่ 2.44, 5.15 และ 5.18 GHz ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.5 เมื่อรูป (ก), (ค), และ (จ) คือระนาบ yz สนามไฟฟ้า E ส่วนรูป (ข), (ง), และ (ฉ) คือระนาบ xz สนามแม่เหล็ก H โดยเทียบระนาบอ้างอิงจากรูปที่ 3.11 หรือรูป (ก) ระนาบ yz ความถี่ 2.44 GHz รูป (ข) ระนาบ xz ความถี่ 2.44 GHz รูป (ค) ระนาบ yz ความถี่ 5.15 GHz รูป (ง) ระนาบ xz ความถี่ 5.15 GHz รูป (จ) ระนาบ yz ความถี่ 5.85 GHz และรูป (ฉ) ระนาบ xz ความถี่ 5.85 GHz โดยในแต่ละรูปเส้นทึบคือผลการจำลองและจุดดำคือผลการวัดทุก 10°

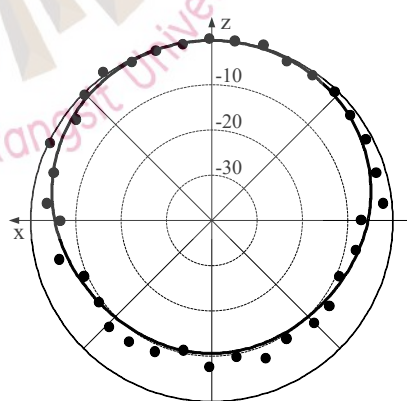
จากผลที่ได้พบว่า แม้สายอากาศนี้จะให้แถบความถี่ดำเนินการ 2 แถบ (Dual Band) แต่แบบรูปการแผ่พลังงานทั้งที่ความถี่ต่ำ 2.4 GHz และที่ความถี่สูง 5 GHz ของช่วงความถี่ดำเนินการจะไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของสายอากาศนี้ โดยจะมีการแผ่พลังงานชี้ไปในทิศทางเดียวกัน (ทิศ z) เป็นการแผ่พลังงานแบบชี้ทิศทาง (Uni-Directional) สังเกตได้จากสนามระนาบ yz รูป (ก), (ค), และ (จ) และสนามระนาบ xz จากรูป (ข), (ง), และ (ฉ) ที่เป็นสนามระนาบเดียวกันแต่ต่างความถี่กัน

ที่ความถี่ต่ำ 2.44 GHz ดังรูปที่ 4.5(ก) และ (ข) แบบรูปการแผ่พลังงานจะมีความสมมาตรดีและแผ่คลื่นแบบชี้ทิศทางอย่างสมมาตรทั้งสองระนาบ แต่ที่ความถี่สูง 5.85 GHz ในรูปที่ 4.5(จ) และ (ฉ) อาจจะไม่สมมาตรบ้าง เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากวัสดุฐานรอง FR4 และจากสายส่งแกนร่วม (Coaxial Cable) ที่โครงสร้างของสายอากาศจริงจะต้องมีการป้อนสัญญาณด้วยสายส่งนี้และยึดติดสายอากาศกับอุปกรณ์

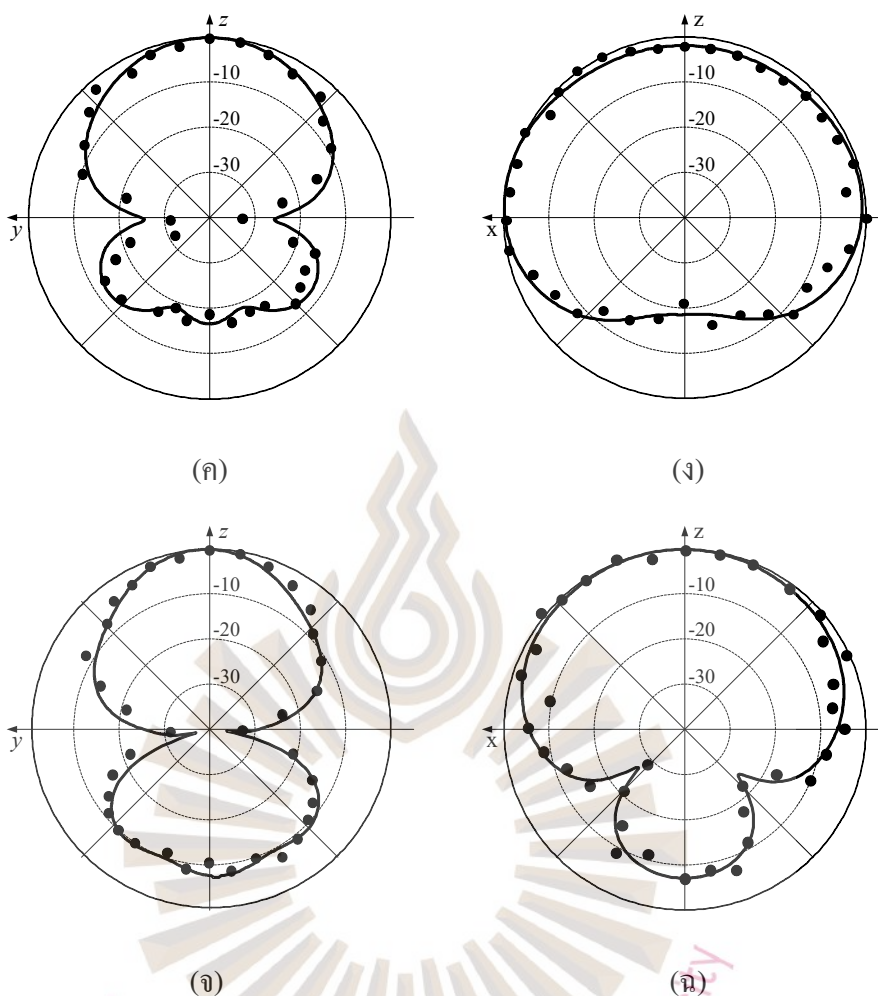
สำหรับระนาบ yz ในรูป (ก), (ค), และ (จ) สามารถหาความกว้างลำครึ่งกำลัง (Half Power Beam-Width, HPBW) ตามสมการที่ (2.32) ได้เท่ากับ 74° , 65° , 48° ณ ความถี่ 2.44, 5.15, และ 5.85 GHz ตามลำดับ ส่วนระนาบ xz ในรูป (ข), (ง), และ (ฉ) ความกว้างลำครึ่งกำลังคือ 136° , 167° , 147° ณ ความถี่ 2.44, 5.15, และ 5.85 GHz ตามลำดับ



(ก)



(ข)



รูปที่ 4.5 แบบรูปการแผ่พลังงานโพลาริไรซ์ร่วมสายอากาศยาภิ-อูตะสองย่านความถี่บน
แผ่นวงจรพิมพ์ เส้นทึบคือผลการจำลอง จุดคือผลการวัดทุก 10° (ก) ระนาบ yz ความถี่ 2.44 GHz
(ข) ระนาบ xz ความถี่ 2.44 GHz (ค) ระนาบ yz ความถี่ 5.15 GHz (ง) ระนาบ xz ความถี่ 5.15 GHz
(จ) ระนาบ yz ความถี่ 5.85 GHz (ฉ) ระนาบ xz ความถี่ 5.85 GHz

4.5 อัตราขยายสายอากาศ

4.5.1 การจัดวางอุปกรณ์ทดสอบสายอากาศด้านอัตราขยาย

การวัดอัตราขยายสายอากาศ (Antenna Gain) ของอากาศยาภิ-อูตะสองย่านความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์มีการจัดวางและเชื่อมต่อเครื่องมือและอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.6 เครื่องมือสำหรับทดสอบ 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)
- 4) แท่นสำหรับจับยึดสายอากาศตัวส่งมาตรฐานและสายอากาศทดสอบ
- 5) หัวเชื่อมต่อชนิดต่าง ๆ เช่น N-Type, SMA เป็นต้น
- 6) สายอากาศยาคิ-อุตะสองย่านความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์ซึ่งเป็นสายอากาศทดสอบ

การวัดอัตราขยายของสายอากาศยาคิ-อุตะสองย่านความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์ใช้เครื่องมือสำหรับทดสอบคล้ายกับการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน แตกต่างที่การทดสอบอัตราขยายสายอากาศไม่ต้องการหุ้มสายอากาศตัวรับหรือตัวทดสอบโดยรอบ เพราะการทดสอบจะหันด้านที่ปล่อยพลังงานออกมาแรงที่สุดไปยังสายอากาศตัวรับอยู่แล้ว ดังนั้นอุปกรณ์ที่ไม่ได้ใช้ คือ แท่นหมุน อุปกรณ์ควบคุมการหมุน และคอมพิวเตอร์

ในการจัดวางอุปกรณ์ได้กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศทดสอบเป็น 2 m ซึ่งเป็นระยะที่ถือว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นระยะไกล (Far Field) แล้วและสายอากาศทั้งสองวางอยู่เหนือพื้น 1 m ในห้องไร้คลื่นรบกวน โดยระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและทดสอบนี้เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากจะต้องนำมาหาค่าการสูญเสียที่เกิดจากระยะทาง (Free Space Loss) โดยเป็นที่ทราบกันว่า อัตราขยายสายอากาศหาได้จากการทดสอบจริงดังหัวข้อที่ 2.3.4 ส่วนทางทฤษฎีจะหาจากค่าสภาพเจาะจงทิศทางในหัวข้อที่ 2.3.3 โดยอัตราขยายสายอากาศหาได้จากสมการการส่งผ่านของฟรีส (Fris Transmission Equation) ตามสมการที่ (2-10) – (2-13)



รูปที่ 4.6 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับวัดอัตรายายสายอากาศ

4.5.2 ผลอัตรายายสายอากาศ

การวัดอัตรายายสายอากาศยา-อูคะสองย่านความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์จะกระทำเมื่อจัดวางสายอากาศตัวส่งและตัวทดสอบให้เป็นแบบโพลาไรซ์ร่วม (Co-Polarization) โดยมีการวัดแล้วนำมาคำนวณ 3 ความถี่ คือ

- 1) ความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นจากไดโพล คือ ความถี่ 2.44 GHz
- 2) ความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นจากพาราซิติคยาว คือ ความถี่ 5.15 GHz
- 3) ความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นจากพาราซิติคสั้น คือ ความถี่ 5.85 GHz

โดยที่ความถี่ 2.44 GHz พบว่าอัตรายายสายอากาศมีค่าที่ 5.9 dBi เป็นช่วงที่อัตรายายขึ้นอยู่กับการสะท้อนที่มาจากไดโพลเพียงอย่างเดียว จึงทำให้อัตรายายไม่สูงมากนัก ความถี่ 2.44 GHz นี้

เมื่อที่ความถี่ 5.15 GHz พบว่าอัตราขยายสายอากาศมีค่าที่ 5.5 dBi เพราะที่ความถี่ 5.15 GHz นี้เป็นช่วงที่อัตราขยายขึ้นอยู่กับกระแสนพาราซิติคด้วยยาวและอาจมีอิทธิพลตัวขับเคลื่อน จึงทำให้อัตราขยายไม่สูงมากนัก

ขณะที่ ณ ความถี่ 5.85 GHz พบว่าอัตราขยายสายอากาศมีค่าที่ 6.8 dBi ซึ่งสูงที่สุด เพราะที่ความถี่ 5.85 นี้ เป็นความถี่ที่สูงที่สุดใน 3 ความถี่ที่พิจารณา ซึ่งเป็นธรรมชาติปกติของหลายสายอากาศที่ความถี่สูง อัตราขยายจะสูงกว่าความถี่ต่ำ

4.6 การทดสอบใช้งานอุปกรณ์จริง

สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติหรือ กสทช. ได้สำรวจตัวเลขผู้ใช้งานอินเทอร์เน็ตในประเทศไทย พบว่ามีจำนวนผู้ใช้งานอยู่ที่ 61.21 ล้านบัญชีผู้ใช้งาน โดยคิดเป็นจำนวน 85.3% จากจำนวนประชากรทั้งหมด (จำนวนประชากรไทยปัจจุบันมีรายงานอยู่ที่ประมาณ 71.6 ล้านคน ในปี พ.ศ. 2566)

โดยจำนวนประชากรที่ใช้อินเทอร์เน็ตนั้น มีรายงานว่า 52.25 ล้านราย ใช้งานบนโซเชี่ยลมีเดีย ซึ่งคิดเป็น 72.8% ของจำนวนประชากรทั้งประเทศ ขณะที่การใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้นมีจำนวนการใช้งานประมาณ 101.2 ล้านเครื่อง ซึ่งคิดเป็น 141% ของจำนวนประชากรทั้งประเทศ ดังนั้น Wi-Fi จึงมีความสำคัญเพื่อให้ครอบคลุมอุปกรณ์ที่มี

4.6.1 เงื่อนไขและขอบเขตการทดสอบ

จากการศึกษาและออกแบบสายอากาศยาหิ-อูคะแถบความถี่คู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานในสถานการณ์จริง โดยทดสอบประยุกต์ใช้งานจริงเทียบกับสายอากาศของ Netscout Aircheck-G2 ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดระดับความแรงของสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยจะแบ่งการทดสอบเป็น 2 ช่วงความถี่ คือ 2.45 GHz และ 5 GHz ทำการทดสอบการรับสัญญาณ



(ก)



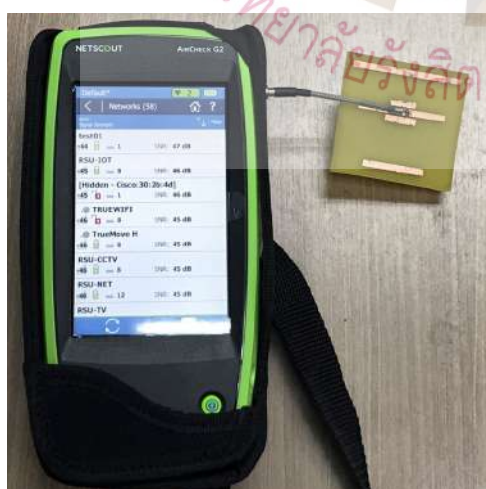
(ข)

รูปที่ 4.7 การทดสอบวัดสัญญาณสายอากาศด้วยเครื่อง Netscout Aircheck G2

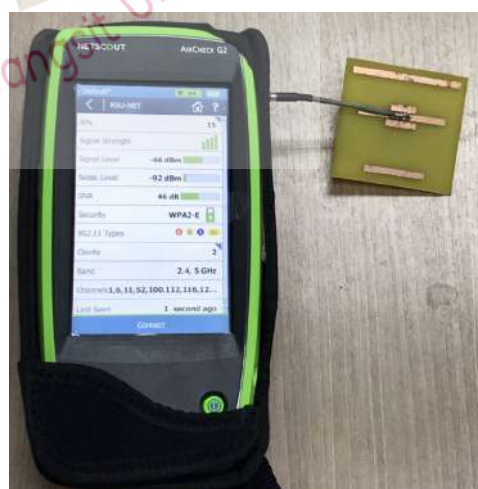
(ก) ย่านความถี่ 2.4 GHz (ข) ย่านความถี่ 5 GHz

4.6.2 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบสายอากาศยา-อูอะแถบความถี่คู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานในสถานการณ์จริง ที่ย่านความถี่ต่ำ 2.45 GHz และย่านความถี่สูง 5GHz โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบคุณภาพสัญญาณพบว่า ทั้งสองช่วงความถี่สายอากาศยา-อูอะแถบความถี่คู่บนแผ่นวงจรพิมพ์มีคุณภาพสัญญาณใกล้เคียงกับสายอากาศของเครื่องตรวจสอบสัญญาณไวไฟ Netscout Aircheck G2



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.8 การทดสอบวัดสัญญาณสายอากาศยา-อูอะแถบความถี่คู่เครื่อง Netscout Aircheck G2

(ก) ย่านความถี่ 2.4 GHz (ข) ย่านความถี่ 5 GHz

4.7 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอผลลัพธ์ที่ได้ทั้งจากการจำลองสายอากาศโดยโปรแกรมการจำลองสายอากาศเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากสายอากาศต้นแบบ ประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน แบบรูปการแผ่พลังงาน และอัตราขยายสายอากาศ โดยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสามารถบอกให้ทราบถึงความกว้างแถบความถี่การดำเนินงานของสายอากาศทั้งสองย่านความถี่ และแบบรูปการแผ่พลังงานสามารถบอกถึงความกว้างลำคลื่นกำลัง



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอสายอากาศยาภิ-อูตะสองย่านความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับการนำไปใช้งานกับย่านความถี่ของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยได้ศึกษาและออกแบบจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากนั้นทำการสร้างสายอากาศต้นแบบ และทดสอบสายอากาศจริง โดยทดสอบค่า S_{11} และแบบรูปการแผ่คลื่นของสายอากาศ การทดสอบสายอากาศแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

โดยส่วนแรกจะเป็นการทดสอบสายอากาศไดโพลแถบความถี่คู่ คือ 2.4 GHz และ 5 GHz ช่วงความถี่ต่ำเกิดจากไดโพล (L_1) ความยาว 43 มิลลิเมตร ในย่านความถี่สูงเกิดจากองค์ประกอบ Parasitic 2 ตัว คือ Parasitic L_2 ความยาว 12 มิลลิเมตร และ Parasitic L_3 ความยาว 14.5 มิลลิเมตร ความถี่ 2.44 GHz แบบรูปการแผ่พลังงานจะสมมาตรทั้งสองระนาบ แต่ที่ความถี่สูงทั้งสองความถี่แบบรูปการแผ่พลังงานจะไม่สมมาตรในแกน y และทำการปรับโครงสร้างเป็นยาภิ-อูตะต่อไป

ส่วนต่อมาจะเป็นการทดสอบสายอากาศยาภิ-อูตะ โดยจะมีการเพิ่มพารามิเตอร์ตัวสะท้อน L_4 และตัวชี้ทิศทาง L_5 เพิ่มเข้ามา ทดสอบสายอากาศจริงพบว่า ให้แถบความถี่ 2 ช่วงตรงตามที่ได้ออกแบบไว้ คือครอบคลุมช่วงความถี่ 2.400 – 2.483 GHz และ 5.15 - 5.85 GHz ที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับน้อยกว่า -10 dB มีอัตราขยาย 5.6, 5.0, และ 5.8 dBi ณ ความถี่ 2.44, 5.15, และ 5.85 GHz ตามลำดับ

หลังจากนั้นทำการทดสอบกับการนำไปใช้งานกับสถานการณ์จริงที่ย่านความถี่ต่ำ 2.45 GHz และย่านความถี่สูง 5 GHz โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบคุณภาพสัญญาณ พบว่าทั้งสองช่วงความถี่ สายอากาศยาภิ-อูตะแถบความถี่คู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ มีคุณภาพสัญญาณใกล้เคียงกับ Antenna ของเครื่องตรวจสอบสัญญาณไวไฟ Netscout Aircheck G2 และข้อดีของสายอากาศนี้ คือ ให้แบบรูปการแผ่พลังงานคงที่สม่ำเสมอทั้งช่วงความถี่ต่ำและช่วงความถี่สูง ความเข้ากันได้ของอิมพีแดนซ์

ดี โครงสร้างไม่ซับซ้อน สร้างได้ด้วยวัสดุราคาถูก น้ำหนักเบา เป็นสายอากาศต้นทุนต่ำ และสามารถนำไปใช้กับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

5.2 ข้อเสนอแนะ

การสร้างสายอากาศจริงสำหรับทดสอบ ควรที่จะต้องสร้างตำแหน่งยึดเกาะสายอากาศไว้ด้วย เพื่อยึดติดไว้กับแท่นหมุนขณะทดสอบสายอากาศให้มั่นคง นอกจากนี้ควรเลือกซื้อวัสดุฐานรอง FR4 ที่มีคุณภาพดี มิเช่นนั้นแล้วค่า ϵ_r อาจคลาดเคลื่อนไปจาก 4.8 ส่งผลให้คุณสมบัติสายอากาศเปลี่ยน



บรรณานุกรม

- เก่งกาจ เนียมจิน, อนุพนธ์ จำปาสาร, และ ลิขิต เสนาวงศ์. (2556). การลดขนาดของสายอากาศ
ไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น (*Straight*) แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้
(Master's thesis). สืบค้นจาก <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/7241>
- จิตติารักษ์ คำคลอง. (2562). สายอากาศวิทยากิ-อูตะแถบความถี่สำหรับไวไฟเรเตอร์ (Unpublished
Master's thesis). มหาวิทยาลัยรังสิต, ปทุมธานี.
- รังสรรค์ วงศ์สรรค์. (2556). วิศวกรรมสายอากาศ (พิมพ์ครั้งที่ 3). นครราชสีมา: สำนักพิมพ์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- วิวัฒน์ สิทธิกุล, และปาลิรัตน์ วงจำปา. (2563). วิศวกรรมสายอากาศ (*Antenna Engineering*).
(พิมพ์ครั้งที่ 1) กรุงเทพฯ: บริษัท ซีเอ็ดดูเลชั่น จำกัด (มหาชน).
- ศราวุธ ชัยมูล. (2561). วิศวกรรมสายอากาศ. พารามิเตอร์ของสายอากาศเบื้องต้น (พิมพ์ครั้งที่ 5).
กรุงเทพฯ: ศูนย์ผลิตตำราเรียน.
- สมพงษ์พินิจ สุวรรณชาติ, และดวงอาทิตย์ ศรีมูล. (2564, มีนาคม). สายอากาศวิทยากิอูตะสองย่าน
ความถี่บนแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย. การประชุมวิชาการเสนอ
ผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ.
- อรรพรรณ ธกามิตร. (2557). สายอากาศไดโพลแผ่นบางเหนือกราวด์รูปตัวยู (Unpublished
Master's thesis). มหาวิทยาลัยรังสิต, ปทุมธานี.
- Agrawal, 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
- Chang, H., Kim, H., & Yoon, Y. J. (2005). A Triple-Band Printed Dipole Antenna Using
Parasitic Elements. *Microwave and Optical Technology Letters*, 47(3),
221-223. doi: 10.1002/mop.21129
- Chen, H. D. (2003). Broadband CPW-Fed Square Slot Antennas With a Widened Tuning
Stub. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 51(8), 1982-1986.
doi: 10.1109/TAP.2003.814747
- Chi, Y. W., Wong, K. L., & Su, S. W. (2007). Broadband Printed Dipole Antenna
With a Step-Shaped Feed Gap for DTV Signal Reception. *IEEE Transactions on
Antennas and Propagation*, 55(11), 3353-3356. doi: 10.1109/TAP.2007.908848

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Jordan, R., & Abdallah, C. (2002). Wireless Communications and Networking: An Overview. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 44(1), 185-193. doi: 10.1109/74.997963
- Reckeweg, M., & Rohner, C. (2015, March). *Antenna Basics White Paper*. Retrieved from <https://dokumen.tips/documents/antenna-basics-white-paper-rohde-schwarz-basics-white-paper-this-white-paper-describes.html>.
- Srimoon, D. (2008). Broadband Dipole on a U-Shaped Cross-Sectional Ground Plane Antenna. *2008 Asia-Pacific Microwave Conference*, 7, 76-79. doi: 10.1109/APMC.2008.4958023
- Su, C. M., Chen, H. T., & Wong, K. L. (2002). Printed dual-band dipole antenna With U-slotted arms for 2.4/5.2 GHz WLAN operation. *Electronics Letters*, 38(22), 1308-1309. doi: 10.1049/el:20020919
- Suwannachart, S., Srimoon, D., & Mearnchu, J. (2020). A Dual-Band Printed Dipole Antenna for Unidirectional Radiation. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 965(1). doi: 10.1088/1757-899X/965/1/012035
- Wikipedia. (2016). *Antenna (radio)*. Retrieved September, 2022, from [https://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_\(radio\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_(radio))

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	สมพงษ์พินิจ สุวรรณชาติ
วัน เดือน ปีเกิด	21 มกราคม 2530
สถานที่เกิด	จังหวัดเลย ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	มหาวิทยาลัยรังสิต ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม คอมพิวเตอร์, 2553
ทุนการศึกษา	ทุนการศึกษาสำหรับบุคลากรมหาวิทยาลัยรังสิต
ที่อยู่	555/25 ภัทรีดา เรสซิเดนซ์ ราชพฤกษ์-ปทุมธานี ตำบล บ้านฉาง อำเภอเมืองปทุมธานี ปทุมธานี 12000
สถานที่ทำงาน	มหาวิทยาลัยรังสิต 52/347 ถนนพหลโยธิน ตำบลหลัก หก อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี 12000
ตำแหน่งปัจจุบัน	วิศวกรระบบโครงข่าย

