



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ สายอากาศโมโนโพลระยะนาบย่านความถี่คู่แถบกว้างขนาดกะทัดรัด
สำหรับการประยุกต์ใช้งาน LTE4G (2.57-2.69 GHz), WLAN (2.4-2.484
GHz) และ WiMAX (5.15-5.35 GHz) และ (5.25-5.85 GHz)

โดย

ผศ.ดร.ยุกติทัศน์ ชวานนท์พิทักษ์

ตุลาคม 2561

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ สายอากาศโมโนโพลระนาบย่านความถี่คู่แถบกว้างขนาดกะทัดรัด
สำหรับการประยุกต์ใช้งาน LTE4G (2.57-2.69 GHz), WLAN (2.4-2.484
GHz) และ WiMAX (5.15-5.35 GHz) และ (5.25-5.85) GHz

ผศ.ดร.ยุกติทัศน์ ขวานนท์พิทักษ์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานนครราชสีมา

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
Executive Summary.....	ค
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัยสายอากาศต้นแบบ 1.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 การจำลองและคำนวณโครงสร้างสายอากาศต้นแบบ 1.....	6
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัยสายอากาศต้นแบบ 2.....	10
3.1 การจำลองและคำนวณโครงสร้างสายอากาศ.....	10
3.2 โครงสร้างของสายอากาศ.....	10
3.3 ลำดับโครงสร้างสายอากาศและการศึกษาตัวแปร.....	11
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	20
4.1 สร้างสายอากาศ.....	20
4.2 การวัดค่า $ S_{11} $	21
4.3 การทดสอบอัตราขยาย (Gain).....	21
4.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern).....	22
4.5 ผลการทดสอบสายอากาศต้นแบบ 1.....	24
4.6 ผลการทดสอบสายอากาศต้นแบบ 2.....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทสรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	30
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	30
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	30
บรรณานุกรม.....	32
ภาคผนวก.....	34

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สายอากาศย่านความถี่คู่และสายอากาศสามย่านความถี่.....	4
2.2 สรุปค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบที่ 1.....	25
3.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบที่ 2.....	25

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่

2.1 แสดงโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบที่ 1.....	6
2.2 แสดงการศึกษาลำดับค่าตัวแปรของสายอากาศต้นแบบที่ 1.....	7
2.3 เปรียบเทียบการจำลองผล $ S_{11} $ ของสายอากาศต้นแบบที่ 1.....	8
3.1 โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ 2.....	10
3.2 การออกแบบสายอากาศย่านความถี่คู่ต้นแบบ 2 อย่างเป็นลำดับ.....	11
(ก) สายอากาศ 1 (ข) สายอากาศ 2	
3.3 ผลการจำลองค่า $ S_{11} $ เมื่อเปลี่ยนค่า $W_1 = 23$ มิลลิเมตร.....	15
3.4 ผลการจำลองค่า $ S_{11} $ เมื่อเปลี่ยนค่า W_1	15
3.5 ผลการจำลองค่า $ S_{11} $ เมื่อเปลี่ยนค่า L_1	16
3.6 ผลการจำลองค่า $ S_{11} $ เมื่อเพิ่ม parasitic สี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	17
3.7 ผลการจำลองค่า $ S_{11} $ เมื่อเปลี่ยนค่า W_2	17
3.8 ผลการจำลองค่า $ S_{11} $ เมื่อเปลี่ยนค่า L_2	18
3.9 ผลการจำลองค่า $ S_{11} $ เมื่อเปลี่ยนค่า L_1	18
4.1 สายอากาศต้นแบบ 1 (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง.....	20
4.2 สายอากาศต้นแบบ 2 (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง.....	21
4.3 ผลการทดสอบและผลการจำลองหาค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศต้นแบบ 1.....	24
4.4 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายสายอากาศต้นแบบ 1.....	24
4.5 ผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	25
ในระนาบสนามไฟฟ้า YZ และระนาบ XZ	
4.6 ผลการทดสอบและผลการจำลองหาค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศต้นแบบ 2.....	26
4.7 ผลการทดสอบและผลการจำลองหาอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ 2.....	26
4.8 ผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	28
2.4 กิกะเฮิรตซ์ 3.5 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า YZ	
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก XZ ของสายอากาศต้นแบบ 2	

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ:	MRG5980232
ชื่อโครงการ:	สายอากาศโมโนโพลระนาบย่านความถี่คู่แถบกว้างขนาดกะทัดรัดสำหรับการประยุกต์ใช้งาน LTE4G (2.57-2.69 GHz), WLAN (2.4-2.484 GHz) และ WiMAX (5.15-5.35 GHz) และ (5.25-5.85 GHz)
ชื่อนักวิจัยและสถาบัน	ผศ.ดร.ยุกติทัศน์ ชวานนท์พิทักษ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อีเมล:	yuktitath@gmail.com
ระยะเวลาโครงการ:	2 ปี

บทคัดย่อ:

โครงการนี้นำเสนอสายอากาศโมโนโพลระนาบย่านความถี่คู่แถบกว้างสำหรับการประยุกต์ใช้งานเครือข่าย LTE 4G, WLAN และ WiMAX บนความถี่ (LTE 4G: 2.570-2.690 กิกะเฮิรตซ์), (WLAN: 2.400-2.484 กิกะเฮิรตซ์, 5.150-5.350 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.725-5.825 กิกะเฮิรตซ์) และ (WiMAX: 5.250-5.850 กิกะเฮิรตซ์) สายอากาศถูกออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยการตอบสนองคุณลักษณะอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม เชื่อมต่อกับตัวต่อ SMA 50 โอห์ม โครงการนี้เกี่ยวข้องกับรูปทรงแพทช์เรโซแนนซ์หลายความถี่ นอกเหนือจากการออกแบบที่ตรงไปตรงมาโครงสร้างของสายอากาศเรียบง่ายด้วยแผ่นแพทช์และแผ่นระนาบกราวด์ ข้อได้เปรียบรวมถึงความคุ้มค่าประหยัดต้นทุน สร้างง่ายและความสมดุลระหว่างขนาดสายอากาศและอัตราขยายบรรลุลูก คุณลักษณะผลลัพธ์อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ สำหรับค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางและอัตราขยายตามแบนด์วิดท์ของสายอากาศที่นำเสนอถูกทดสอบและเปรียบเทียบกับผลการจำลองทางทฤษฎี

คำหลัก : สายอากาศย่านความถี่คู่แถบกว้าง, สายอากาศโมโนโพล, แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง, LTE 4G, WiMAX, WLAN

Abstract

Project Code : MRG5980232

Project Title : Compact Dual-Wideband Planar Monopole Antenna for LTE 4G (2.57-2.69 GHz), WLAN (2.4-2.484 GHz) and WiMAX (5.15-5.35 GHz and 5.25-5.85 GHz) Applications.

Investigator : Asst. Prof. Dr. Yuktithath Chawanonphithak
Rajamangala University of Technology Isan
Nakhonratchasima

E-mail Address : yuktithath@gmail.com

Project Period : 2 year

Abstract:

This project presents a dual-wideband planar monopole antenna for LTE 4G, WLAN and WiMAX applications over the frequency band of (LTE 4G: 2.570-2.690 GHz), (WLAN: 2.400-2.484 GHz, 5.150-5.350 GHz and 5.725-5.825 GHz) and (WiMAX: 5.250-5.850 GHz). The antenna designed on a printed circuit board (PCB) with corresponds to a $50\ \Omega$ characteristic impedance to be connected to a $50\ \Omega$ SMA connector and is of compact size. This project work deals with etching the multi-resonant mode patch shape. In addition to its straightforward design, the structure of the antenna is simple with patch and ground plane. Its advantages include cost effectiveness, easy fabrication and tradeoff between antenna size and achieved gain. The antenna characteristics results the impedance bandwidth for $|S_{11}|$ more than -10 dB, radiation patterns of the antenna is omnidirectional and gains along the bandwidth of the proposed antenna were measured and then compared with the theoretical simulation results.

Keywords : Dual-wideband antenna , Monopole antenna, Omnidirectional patterns, LTE 4G, WiMAX, WLAN

Executive Summary

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

The modern wireless devices are slim and smaller size with limited space to place the antenna. With the increasing demand for different applications, antennas are required to have dual-band or multi-band properties to accommodate various services simultaneously. For example, a smartphone, tablet, and laptop computer are equipped with a multiple frequencies to provide Wireless Local Area Network (WLAN), Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) and Long Term Evolution (LTE) applications. Hence, the dominant trend in portable design is to integrate several wireless systems into one single device. Nevertheless, as the number of operating frequency bands increases, the researchers have been presented with more challenges in antenna design to support multiple frequencies in the same antenna. Also, there is an increased demand for small, lightweight and compact antennas for wireless applications to enhance mobility. The benefits of this research can reduce system costs to wireless communications in industrial production.

The project proposes design of compact dual-wideband planar monopole antenna for LTE 4G, WLAN and WiMAX applications applicable to various wireless communication systems, including the LTE (4G) systems operated from 2.57 GHz to 2.69 GHz and IEEE 802.11 WLAN standards from 2.4 GHz to 2.484 GHz, 5.15 GHz to 5.35 GHz and 5.725 GHz to 5.875 GHz and the IEEE 802.16 WiMAX standard from 5.25 GHz to 5.85 GHz, respectively. This current research work deals with etching the multi-resonant mode patch shape. In addition to its straightforward design, the structure of the antenna is simple with patch and ground plane. Its advantages include cost effectiveness, easy fabrication and tradeoff between antenna size and achieved gain. The antenna design process can be done step-by-step. The antenna characteristics results such as the impedance bandwidth for $|S_{11}|$ lower than -10 dB, radiation pattern radiation patterns and gains along the bandwidth of the proposed antenna were measured and then compared with the theoretical simulation results. The $|S_{11}|$, radiation patterns and gains of the simulated and measured cases are in reasonable agreement.

2. วัตถุประสงค์

2.1 To design the novel dual-wideband planar monopole antenna for LTE 4G (2.57-2.69 GHz), WLAN (2.4-2.484 GHz) and WiMAX (5.15-5.35 GHz and 5.25-5.85 GHz) applications.

2.2 To analyze the characteristics of the dual-wideband planar monopole antenna for LTE 4G (2.57-2.69 GHz), WLAN (2.4-2.484 GHz) and WiMAX (5.15-5.35 GHz and 5.25-5.85 GHz) applications.

2.3 To develop and optimize the characteristics of the dual-wideband planar monopole antenna for LTE 4G (2.57-2.69 GHz), WLAN (2.4-2.484 GHz) and WiMAX (5.15-5.35 GHz and 5.25-5.85 GHz) applications.

2.4 To measurement and performance the characteristics results with $|S_{11}|$, gains and radiation patterns of the antenna.

2.5 To obtain a low cost antenna for LTE 4G (2.57-2.69 GHz), WLAN (2.4-2.484 GHz) and WiMAX (5.15-5.35 GHz and 5.25-5.85 GHz) applications.

3. ระเบียบวิธีวิจัย

Process	Method	period
1 Year		
3.1 Literature reviews and a summary of the strengths and weaknesses antenna used in modern wireless communication systems	Search the database such as IEEE Electronic Library, IET, PIER and Library	1 month
3.2 The design procedure and parametric study of the antenna structure. The antenna characteristics results the impedance bandwidth for $ S_{11} $, radiation patterns and gains	Simulation and calculations using the electromagnetic fields program	4 month
3.3 Fabrication of the antenna prototype 1 with the parameters base on the analysis in section 3.2	Fabrication on the printed circuit board (PCB) materials	1 month
3.4 Measurement the characteristics results the impedance bandwidth for $ S_{11} $, radiation patterns and gains of the antenna prototype 1	Measurement by Agilent vector network analyzer in a standard anechoic chamber	1 month

Process	Method	period
3.5 Accuracy investigation of measurement results compared with simulation results	Simulated and measured results consideration with regard to $ S_{11} $, gains and radiation patterns.	1 month
3.6 Testing the performance of the antenna prototype 1 in a real environment. Including the test signal strength and test distance covered area	Installation the antenna prototype 1 to the device in modern wireless communication systems.	2 month
3.7 Collecting data and writing research papers	Writing research papers some part (International journals)	2 month
2 Years		
3.8 Improved antenna by optimization method with reduced antenna size	Simulation and calculations using the electromagnetic fields program	4 month
3.9 Fabrication of the antenna prototype 2 with the best parameters	Fabrication on the printed circuit Board (PCB) materials	1 month
3.10 Measurement the characteristics results the impedance bandwidth for $ S_{11} $, radiation patterns and gains of the antenna prototype 2	Measurement by Agilent vector network analyzer and in a standard anechoic chamber	1 month
3.11 Accuracy investigation of measurement results compared with simulation results	Simulated and measured results are consideration with regard to $ S_{11} $, gains and radiation patterns	1 month
3.12 Testing the performance of the antenna prototype 2 in a real environment. Including the test signal strength and test distance covered area	Installation the antenna prototype 1 to the device in modern wireless communication systems	2 month
3.13 Collecting data and writing research papers	Writing research papers complete (International journals)	3 month

4. แผนการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการในแต่ละช่วง 6 เดือน

[illegible]

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันว่าธุรกิจด้านการสื่อสารไร้สายมีบทบาทต่อการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ทั่วโลก เทคโนโลยีสื่อสารไร้สายได้มีการพัฒนามาตรฐานให้รองรับกับระบบการใช้งานทางการติดต่อสื่อสารทางด้านโทรคมนาคม โดยเฉพาะย่านความถี่ไมโครเวฟมีการใช้งานในระบบสื่อสารมากมาย เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบสื่อสารดาวเทียม ระบบวิทยุสื่อสาร เป็นต้น แต่ระบบการสื่อสารไร้สายในกลุ่มบริการที่มีการเติบโตและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันที่ชัดเจนคือ การเปิดบริการระบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless local area network : WLAN) ซึ่งอยู่ในรูปแบบมาตรฐาน IEEE 802.11 และระบบเครือข่าย (Worldwide interoperability for microwave access : WiMAX) ในรูปแบบมาตรฐาน IEEE 802.16 การสื่อสารข้อมูลผ่านการสื่อสารไร้สายดังกล่าวข้างต้นนับวันจะเพิ่มสูงขึ้นทำให้เกิดการแข่งขันลงทุนสร้างเครือข่ายและการพัฒนาศักยภาพให้รองรับและดึงดูดความสนใจกับผู้ใช้บริการมากขึ้น เพราะผู้ใช้บริการในปัจจุบันมีอุปกรณ์สื่อสารที่สามารถเข้าถึงข้อมูลและติดต่อสื่อสารได้หลากหลายชนิด เช่น สมาร์ทโฟน (Smart phone), แท็บเล็ต (Tablet), โน้ตบุ๊ค (Notebook) และ คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ (Desktop) เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะติดต่อสื่อสารข้อมูลกับผู้ให้บริการได้นั้นต้องผ่านสื่อกลางคือ อากาศ ซึ่งจำเป็นต้องมีการรับและส่งข้อมูลระหว่างสถานีฐาน (Base station) กับเครื่องลูกข่าย (Client)

ดังนั้นสิ่งสำคัญในการติดต่อสื่อสารในระบบสื่อสารไร้สายทั้งหมดจำเป็นต้องมีสายอากาศ (Antenna) ติดตั้งทั้งสถานีฐานและเครื่องลูกข่ายเพื่อให้สามารถติดต่อรับส่งข้อมูลสื่อสารระหว่างกันได้ ซึ่งนำมาสู่ความสำคัญของปัญหาเพื่อพัฒนาสายอากาศให้รองรับความถี่ (Frequency) เช่น สายอากาศหนึ่งความถี่ (Single-band antenna), สายอากาศย่านความถี่คู่ (Dual-band antenna) และสายอากาศสามย่านความถี่ (Triple-band antenna) เป็นต้น ซึ่งความถี่ของระบบสื่อสารไร้สายที่สำคัญในปัญหานี้คือ ระบบ WLAN ความถี่มาตรฐาน 2.4 กิกะเฮิรตซ์ (ความกว้างแถบความถี่ (bandwidth) 2.4 ถึง 2.484 กิกะเฮิรตซ์) ความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ (ความกว้างแถบความถี่ 5.15 ถึง 5.325 กิกะเฮิรตซ์) และ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ (ความกว้างแถบความถี่ 5.725 ถึง 5.825 กิกะเฮิรตซ์) ระบบ WiMAX ความถี่มาตรฐาน 3.5 กิกะเฮิรตซ์ (3.4-3.69 กิกะเฮิรตซ์) และระบบ LTE4G (2.57-2.69 กิกะเฮิรตซ์) สังเกตได้ว่ามีความถี่มาตรฐานที่หลากหลายสามารถนำมาเลือกใช้งานได้ ซึ่งความท้าทายของปัญหานี้คือจะทำอย่างไรในการออกแบบสายอากาศให้รองรับความถี่ได้มากกว่าหนึ่งความถี่ ในขณะที่พื้นที่อุปกรณ์มีขนาดจำกัด ซึ่งในปัจจุบันต้องยอมรับว่าอุปกรณ์เครื่องลูกข่ายสมัยใหม่ส่วนใหญ่

จะมีขนาดเล็กและมีความบางเป็นหลัก ซึ่งวัสดุแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed circuit board : PCB) น่าจะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้สร้างสายอากาศมากที่สุด เพราะมีคุณสมบัติข้อดีหลายประการ เช่น สามารถรวมลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ของอุปกรณ์ได้ง่าย มีน้ำหนักเบาและบาง ราคาไม่แพง สร้างได้ง่ายไม่ซับซ้อน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษา ออกแบบและสร้างสายอากาศย่านความถี่คู่ เพื่อประยุกต์ใช้งานในระบบ LTE4G, WLAN และ WiMAX

1.2.2 ออกแบบโครงสร้างสายอากาศให้มีขนาดเล็ก มีความบาง น้ำหนักเบา ขนาดกะทัดรัด และราคาถูก

1.2.3 โครงสร้างสายอากาศเน้นความไม่ซับซ้อน สร้างได้ง่าย สามารถติดตั้งกับอุปกรณ์ขนาดเล็กได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 นำเสนอโครงสร้างสายอากาศแบบใหม่ที่มีขนาดเล็ก และแสดงให้เห็นจุดเด่นจุดด้อยของสายอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศในงานวิจัยอื่นๆ สำหรับการใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สายสมัยใหม่

1.3.2 ทำการศึกษา วิเคราะห์ และปรับปรุงคุณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งประกอบด้วย แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation pattern), ค่าอัตราขยาย (Gain) และค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ซึ่งการคำนวณจะใช้โปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศ

1.3.3 ทำการสร้าง ทดสอบและปรับปรุงสายอากาศต้นแบบ (Prototype antenna) ตามที่ได้ออกแบบไว้ จากการเลือกค่าตัวแปรที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์

1.3.4 สร้างสายอากาศต้นแบบให้มีคุณลักษณะใช้งานได้ตามเกณฑ์ (Specification) ของระบบ LTE4G, WLAN และ WiMAX

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ทำการทบทวนเอกสารและผลงานที่เกี่ยวข้องที่มีมาก่อน พร้อมทั้งสรุปจุดเด่นและจุดด้อยของสายอากาศที่ใช้ในระบบสื่อสารไร้สายสมัยใหม่

1.4.2 คำนวณหาโครงสร้างของสายอากาศและคุณลักษณะของสายอากาศ ได้แก่ แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น ค่าอัตราขยาย ค่าการสูญเสียย้อนกลับ

1.4.3 ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบที่มีค่าตัวแปรที่เหมาะสม

1.4.4 ทำการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศต้นแบบเพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผล
จากการจำลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถนำไปต่อยอดทางอุตสาหกรรมการผลิตเกี่ยวกับระบบการสื่อสาร

1.5.2 สามารถนำไปจดอนุสิทธิบัตรหรือสิทธิบัตรในส่วนโครงสร้างที่นำเสนอขึ้นมาใหม่

1.5.3 ผู้วิจัยสามารถนำงานวิจัยเพื่อเขียนบทความตีพิมพ์ในระดับชาติหรือนานาชาติ
และพัฒนานำไปสู่การขอกำหนดตำแหน่งวิชาการได้

บทที่ 2

วิธีดำเนินการวิจัยสายอากาศต้นแบบ 1

2.1 บทนำ

บทความงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีมาก่อนเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานย่านความถี่ LTE4G, WLAN และ WiMAX ซึ่งมีการนำไปประยุกต์ใช้งานหลากหลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปใช้งานในลักษณะการสื่อสารข้อมูลในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก เช่น สมาร์ทโฟน โน้ตบุ๊ก เป็นต้น งานวิจัยที่มีมาก่อนมีการใช้เทคนิคที่แตกต่างกันมีทั้งข้อดีและข้อเสียขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานในแต่ละประเภท งานวิจัยตั้งแต่ปี ค.ศ. 2003 ถึงปี ค.ศ.2013 [1]-[15] โดยมีลักษณะเป็นสายอากาศแผ่นพิมพ์ (Printed Antenna) ซึ่งมีหลายประเภทแบ่งได้ตามโครงสร้างหรือรูปแบบการป้อนสัญญาณที่แตกต่างกันยกตัวอย่าง เช่น สายอากาศโมโนโพล (Monopole Antenna), สายอากาศระนาบร่วม (Coplanar Waveguide-fed Antenna), สายอากาศร่อง (Slot Antenna) เป็นต้น งานวิจัยที่มีมาก่อนเน้นศึกษาเนื้อหาสายอากาศที่ออกแบบที่ทำให้ได้สายอากาศย่านความถี่คู่และสายอากาศสามย่านความถี่ในระบบ WLAN และ WiMAX เพื่อจะได้นำข้อดีและพัฒนาข้อด้อยที่มีมาก่อนหน้ามาประยุกต์ใช้เป็นแนวทางพัฒนาในงานวิจัยต่อไปโดยยกตัวอย่างงานวิจัยที่มีมาก่อนดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 สายอากาศความถี่คู่และสายอากาศสามย่านความถี่

เอกสารอ้างอิง	ขนาดสายอากาศ (มิลลิเมตร)	ความกว้างแถบความถี่ (กิกะเฮิรตซ์)	อัตราการขยาย (dBi)
[1]	75x75x0.8	2.17-2.56, 5.13-5.23	1.55, 1.15
[2]	28x33x1.6	2.24-2.81, 3.35-6.51	2.40, 3.00
[3]	20x23.5x1.59	2.40-2.48, 3.30-3.80, 5.15-5.80	1.14, 1.15, 1.78
[4]	22x29x0.5	2.40-2.50, 3.21-3.82, 4.90-6.51	1.20, 3.00, 1.80

เริ่มต้นด้วยการศึกษากลุ่มงานวิจัยสายอากาศย่านความถี่คู่ในปี 2003 ของ Yen-Liang Kuo และ Kin-Lu Wong [1] งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์โมโนโพลที่ได้การทำงานย่านความถี่คู่ในระบบ WLAN โดยใช้รูปทรงตัวที่ซ้อนกันสองตัวเรียกว่า ดับเบิลที (Double-T) และศึกษาการปรับค่าพารามิเตอร์ความยาว l และ h ของตัวดับเบิลทีเพื่อให้เกิดการแมตช์อิมพีแดนซ์ (Impedance Matching) และปรับค่าความกว้างแถบความถี่ ซึ่งสามารถครอบคลุมแถบความถี่ต่ำ 2.17 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.56 กิกะเฮิรตซ์ และแถบความถี่สูง 5.13 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 5.23 กิกะเฮิรตซ์ งานวิจัยนี้มีข้อดีคือการ

ออกแบบโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนเลือกใช้แผ่นพิมพ์วัสดุฐานรองแบบ FR4 ที่มีราคาถูก แต่อย่างไรก็ตาม สายอากาศมีขนาดความกว้างและความยาว 75 มิลลิเมตร x 75 มิลลิเมตร มีอัตราขยายเฉลี่ยที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์เท่ากับ 1.55 dBi และความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์เท่ากับ 1.15 dBi ซึ่งอัตราขยายต่ำทั้งแถบความถี่ต่ำและแถบความถี่สูงเมื่อเทียบกับขนาดสายอากาศที่มีขนาดใหญ่ซึ่งเป็นข้อด้อยของสายอากาศนี้

ต่อมาในปี 2010 งานวิจัยของ Qing-Xin Chu และ Liang-Hua Ye [2] เป็นการออกแบบสายอากาศระนาบร่วมซึ่งใช้รูปทรงสามเหลี่ยมรวมกับรูปตัวยูและระนาบกราวด์อยู่ด้านเดียวกัน ซึ่งเป็นโครงสร้างสายอากาศระนาบร่วมซึ่งสามารถทำให้สายอากาศได้การทำงานที่ความถี่คู่โดยมีการขยายแถบความถี่ได้มากขึ้นซึ่ง ซึ่งสามารถครอบคลุมแถบความถี่ต่ำ WLAN (2.40–2.48 กิกะเฮิรตซ์, 5.15–5.35 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.72–5.82 กิกะเฮิรตซ์) และ WiMAX (2.50–2.69 กิกะเฮิรตซ์, 3.40–3.69 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.25–5.85 กิกะเฮิรตซ์) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตแถบความถี่สูง 3.35–6.51 กิกะเฮิรตซ์ มีช่วงกว้างมากเกินไปจะทำให้เกิดการรบกวนของความถี่ที่ไม่ต้องการใช้งานเกิดขึ้นได้ ขนาดสายอากาศมีความกว้างและความยาว 28 มิลลิเมตร x 33 มิลลิเมตร มีอัตราการขยายเฉลี่ย 2.4 dBi และ 3 dBi ที่แถบความถี่ต่ำและแถบความถี่สูงตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับงานวิจัย [1] ขนาดสายอากาศจะเล็กกว่า และได้อัตราขยายที่สูงกว่า

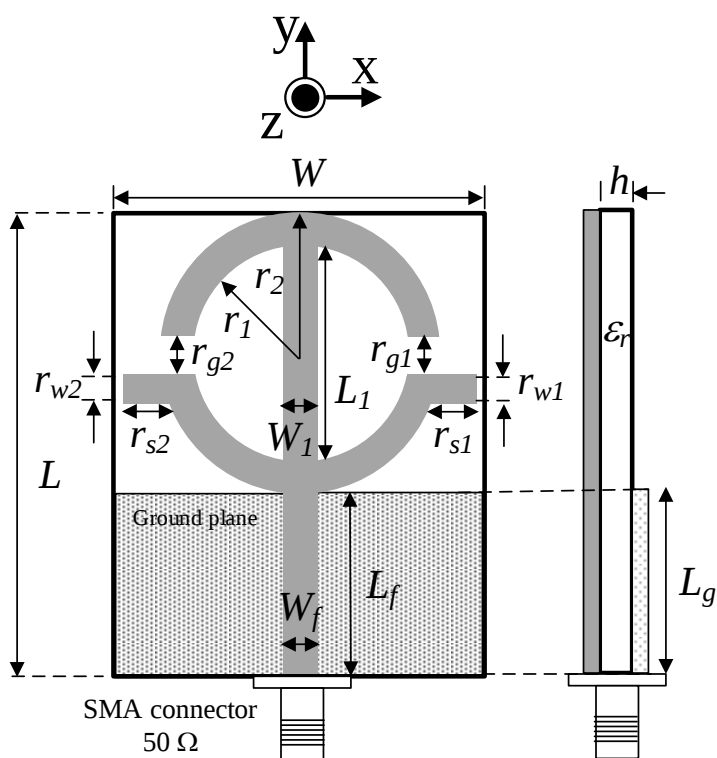
จากงานวิจัยทั้ง [1], [2] ได้สายอากาศย่านความถี่คู่ ต่อมาสายอากาศที่มีการทำงานมากกว่าความถี่คู่โดยมีกลุ่มงานวิจัยสายอากาศสามย่านความถี่ที่น่าสนใจในปี 2010 ของ Jiang Zhu, Marco A. Antoniadou และ G. V. Eleftheriades [3] เป็นการออกแบบสายอากาศระนาบร่วมที่มีการใช้อิวิสต์ในการทำให้เกิดสายอากาศความถี่คู่และมีการเจาะร่องระนาบกราวด์เพื่อทำให้เกิดสายอากาศสามความถี่และมีเทคนิคการแมตซ์อิมพีแดนซ์โดยใช้สะพานอากาศ (air-bridge) ซึ่งสามารถครอบคลุมแถบความถี่ต่ำและแถบความถี่สูง WLAN (2.40–2.48 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.15–5.80 กิกะเฮิรตซ์) และ WiMAX แถบความถี่กลาง (3.30–3.80 กิกะเฮิรตซ์) ตามลำดับ โดยมีขนาดสายอากาศขนาด 20 มิลลิเมตร x 23.5 มิลลิเมตร แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศมีข้อด้อยคือมีอัตราขยายต่ำทั้งสามย่านความถี่เท่ากับ 1.14 dBi, 1.15 dBi และ 1.78 dBi ที่แถบความถี่ต่ำ, แถบความถี่กลางและแถบความถี่สูงตามลำดับ เนื่องจากการใช้อิวิสต์ที่มีค่าการสูญเสียมากและการแมตซ์อิมพีแดนซ์โดยใช้สะพานอากาศทำให้โครงสร้างสายอากาศมีความซับซ้อน ส่วนข้อดีคือได้สายอากาศที่มีขนาดกะทัดรัด

ถัดมาในปี 2012 งานวิจัยของ Aidin Mehdipour, Abdel-Razik Sebak, Christopher W. Trueman และ Tayeb. A. Denidni [4] นำเสนอสายอากาศหลายความถี่โดยการสร้างสายอากาศเลือกใช้วัสดุแผ่นพิมพ์ Rogers RT Duroid 3003 ซึ่งทำให้ได้สายอากาศที่มีขนาด 22 มิลลิเมตร x 29 มิลลิเมตร สายอากาศใช้เทคนิคการตัดวงแหวนวงกลมและเพิ่มเส้นแนวนอนเข้าไปในวงแหวนวงกลมเพื่อให้เกิดแถบความถี่ที่ต้องการเกิดขึ้น ซึ่งสามารถครอบคลุมแถบความถี่ 2.40–2.50 กิกะเฮิรตซ์, 3.21–3.82 กิกะเฮิรตซ์ และ 4.90–6.51 กิกะเฮิรตซ์ และมีอัตราขยายเท่ากับ 1.20 dBi, 3.00 dBi และ 1.80 dBi

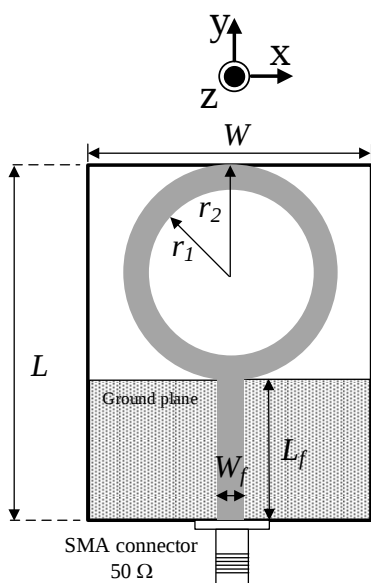
ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศได้อัตราขยายที่ต่ำเมื่อเทียบกับการเลือกใช้วัสดุที่มีราคาแพง ซึ่งจากงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้าทำให้ทราบถึงข้อดีและข้อด้อย เพื่อประโยชน์ที่จะได้นำมาพัฒนาปรับใช้ และตั้งขอบเขตงานวิจัยต่อไป

2.2 การจำลองและคำนวณโครงสร้างสายอากาศต้นแบบ 1

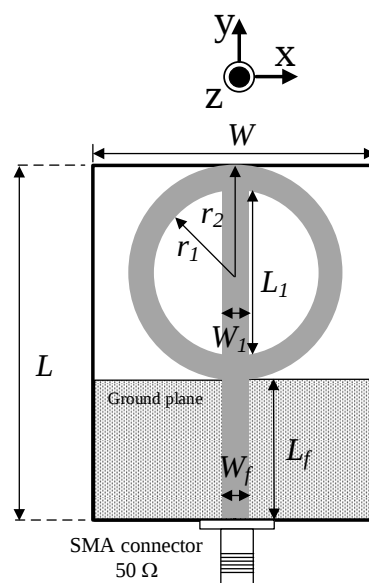
นำแนวทางจากงานวิจัยที่มีมาก่อนนำมาออกแบบด้วยการจำลองผลด้วยโปรแกรมคำนวณทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเริ่มต้นกำหนดขอบเขตการออกแบบในการประยุกต์ใช้งานของความถี่ WLAN (2.40-2.48 กิกะเฮิร์ตซ์ และ 5.15-5.80 กิกะเฮิร์ตซ์) และ WiMAX แถบความถี่กลาง (3.30-3.80 กิกะเฮิร์ตซ์) ซึ่งมีความท้าทายเพราะมีความถี่ที่แตกต่างกันหลายย่านความถี่ให้ได้อันดับแรกก่อน ซึ่งยังไม่รวมความถี่ LTE4G มาร่วมพิจารณา โดยการศึกษาตัวแปรในการออกแบบโครงสร้างนั้นจะพิจารณาค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ให้ครอบคลุมในทุกย่านความถี่ที่พิจารณา โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบที่ 1 แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 และการศึกษาค่าตัวแปรของสายอากาศต้นแบบที่ 1 ดังรูปที่ 2.2



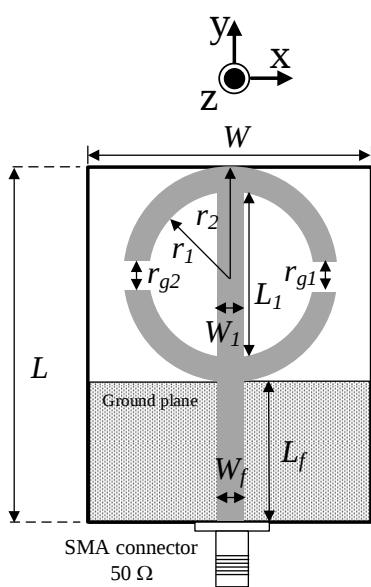
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบที่ 1



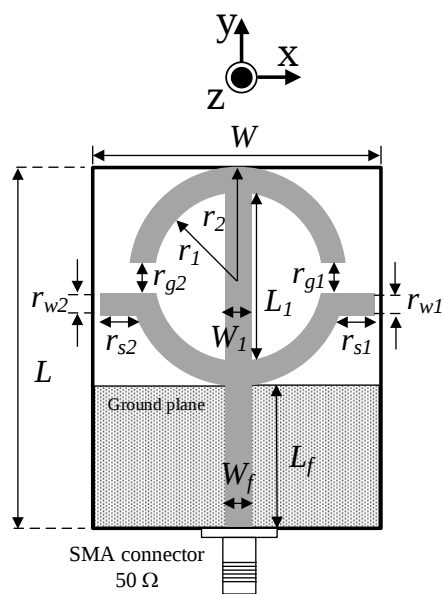
ก. Model 01



ข. Model 02

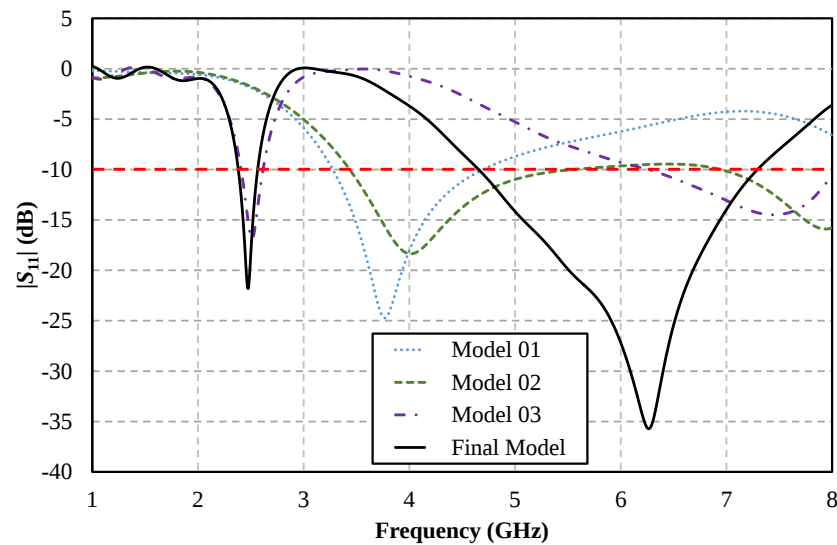


ค. Model 03



ง. Model 04

รูปที่ 2.2 แสดงการศึกษาลำดับค่าตัวแปรของสายอากาศต้นแบบที่ 1



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบการจำลองผล $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบที่ 1

การศึกษาตัวแปรแบ่งการพิจารณาโครงสร้างของสายอากาศได้ 4 ลำดับ ดังนี้

ก. Model 01 พิจารณารูปที่ 2.2 (ก) โดยค่าเริ่มต้นออกแบบโดยใช้หลักการของควิทีโมเดลที่โหมด TM_{11} โดยโครงสร้างของสายอากาศมีการป้อนสัญญาณตรงกลางวงแหวนวงกลม ซึ่งความกว้างและความยาวของการป้อนสัญญาณ W_f และ L_f มีค่า 1.5 mm และ 14 mm ตามลำดับ รัศมีวงกลมภายใน (r_1) เท่ากับ 6.5 mm และวงกลมภายนอก (r_2) เท่ากับ 8 mm การจำลองผล Model 01 ได้ค่า $|S_{11}| < -10$ dB ในรูปที่ 3 คลอบคลุมความถี่จาก 3.28 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 4.69 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งผลการจำลองมีความใกล้เคียงกับการคำนวณทางทฤษฎี

ข. Model 02 พิจารณารูปที่ 2.2 (ข) แสดงการแยกวงแหวนด้วยเส้นแนวตั้งมีค่าความกว้าง W_1 และความยาว L_1 เท่ากับ 1.5 mm และ 16 mm ตามลำดับ การจำลองผลเกิดย่านความถี่ 2 ย่านพิจารณาที่ $|S_{11}| < -10$ dB ในรูปที่ 3 โดยความถี่โซ่แนซแรกๆที่ 3.43 กิกะเฮิรตซ์ และความถี่โซ่แนซที่สองที่ 6.95 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งทำให้มีแนวโน้มเกิดเป็นสายอากาศ 2 ย่านความถี่ได้ แต่ความถี่ยังไม่ตรงกับความถี่ที่ต้องการในการประยุกต์ใช้งาน

ค. Model 03 พิจารณารูปที่ 2.3 (ค) แสดงการแยกวงแหวนและเปิดช่องวงแหวน (r_{g1} และ r_{g2}) โดยเมื่อเปิดช่องวงแหวนวงกลมมีส่วนช่วยปรับปรุงให้ย่านความถี่โซ่แนซแรกๆเท่ากับ 2.41 กิกะเฮิรตซ์ และความถี่โซ่แนซสองเท่ากับ 6.25 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีผลกระทบต่อการเลื่อนความถี่ให้ลดลงดังแสดงในรูปที่ 3

ง. Model 04 พิจารณารูปที่ 2.3 (ง) แสดงการเพิ่มความยาวสตริป (r_{s1} และ r_{s2}) เพื่อควบคุมแถบความถี่โซ่แนซแรกๆและความถี่โซ่แนซสองให้เลื่อนความถี่ให้ได้ความถี่ต่ำลงและมีการแมตซ์

อิมพีแดนซ์ที่ตรงกับความต้องการใช้งานเมื่อมีความยาวสตริปเพิ่มมากขึ้น การจำลองผลค่า $|S_{11}| < -10$ dB ในรูปที่ 3 สามารถครอบคลุมความถี่ต่ำจาก 2.38 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.56 กิกะเฮิรตซ์ และความถี่สูงจาก 4.66 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 7.29 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งสามารถครอบคลุมการประยุกต์ใช้งานของ WLAN ช่วงความถี่ (2.4–2.484 กิกะเฮิรตซ์), (5.15–5.35 กิกะเฮิรตซ์) และ (5.725–5.825 กิกะเฮิรตซ์) และการประยุกต์ใช้งานของ WiMAX ช่วงความถี่ (5.25–5.85 กิกะเฮิรตซ์) ตามลำดับ จากผลการจำลอง สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ดังตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 สรุปค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบที่ 1

พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ขนาด (มิลลิเมตร)
W	ความกว้างสายอากาศ	23
L	ความยาวสายอากาศ	30
W_1	ความกว้างของวงแหวนวงกลมแยก	1.5
L_1	ความยาวของวงแหวนวงกลมแยก	16
r_1	รัศมีภายในวงแหวนวงกลม	6.5
r_2	รัศมีภายนอกวงแหวนวงกลม	8
$r_{g1} = r_{g2}$	ความกว้างช่องว่างวงแหวน	3
$r_{s1} = r_{s2}$	ความยาวสตริป	3
$r_{w1} = r_{w2}$	ความกว้างสตริป	1.5
W_f	ความกว้างสายนำสัญญาณ	1.5
L_f	ความยาวสายนำสัญญาณ	14
L_g	ความยาวระนาบกราวด์	14
h	ความหนาของวัสดุฐานรอง	0.8

นำค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศจากตารางที่ 2.2 เพื่อนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบที่ 1 เพื่อสามารถนำไปวัดผลการทดสอบในบัทที่ 4

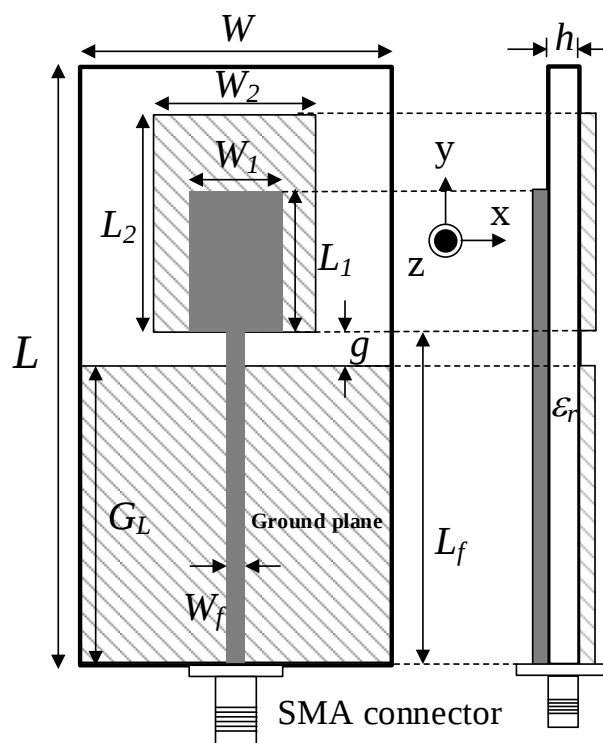
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัยสายอากาศต้นแบบที่ 2

3.1 การจำลองและคำนวณโครงสร้างสายอากาศ

การวิเคราะห์และการทดสอบสายอากาศย่านความถี่คู่ เริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่าเริ่มต้นขนาดสายอากาศและการป้อนสายนำสัญญาณโดยอาศัยทฤษฎีและสมการในการคำนวณหาค่าเริ่มต้นที่คำนวณได้ไปจำลองผลตัวสายอากาศโดยใช้โปรแกรมคำนวณทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและศึกษาตัวแปรเพื่อปรับโครงสร้างของสายอากาศให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ $|S_{11}|$ อัตราขยายและคุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศและสร้างสายอากาศเพื่อทดสอบเปรียบเทียบ เพื่อให้ได้สายอากาศย่านความถี่คู่สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบ WLAN และ WIMAX

3.2 โครงสร้างของสายอากาศ

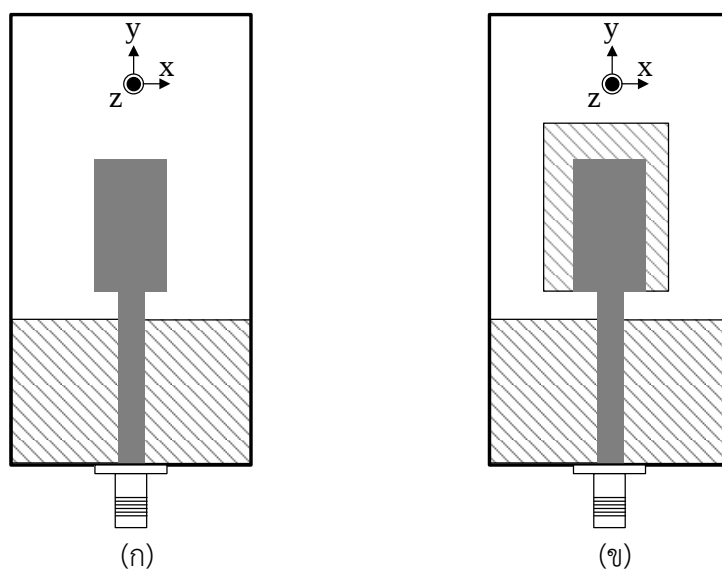


รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ 2

จากโครงสร้างสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.1 ด้านหน้าสายอากาศประกอบด้วยการป้อนสายนำสัญญาณที่รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าและด้านหลังสายอากาศเป็นระนาบกราวด์และแผ่น parasitic สี่เหลี่ยมผืนผ้า สายอากาศใช้วัสดุฐานรองเป็นสารอีพ็อกซี ซึ่งเป็นแผ่นวงจรพิมพ์ที่สามารถหาได้ง่าย ราคาถูก โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 โดยมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง (ϵ_r) เท่ากับ 4.4 และมีความสูง (h) เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร ซึ่งการสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ใช้ส่วนประกอบทั้ง 2 ด้าน ซึ่งด้านหน้าใช้สำหรับโครงสร้างตัวแพร่กระจายคลื่นและสายนำสัญญาณ ส่วนด้านหลังเป็นระนาบกราวด์และแผ่น parasitic ใช้สำหรับแมตซ์อิมพีแดนซ์เพื่อให้ได้สายอากาศครอบคลุมย่านความถี่และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นตามต้องการ

3.3 ลำดับโครงสร้างสายอากาศและการศึกษาตัวแปร

มีการเริ่มต้นพัฒนาโครงสร้างสายอากาศอย่างเป็นลำดับจากโครงสร้างสายอากาศเริ่มต้นจนถึงโครงสร้างสายอากาศสุดท้ายดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การออกแบบสายอากาศย่านความถี่คู่ต้นแบบ 2 อย่างเป็นลำดับ

(ก) สายอากาศ 1

(ข) สายอากาศ 2

จากรูปที่ 3.2 (ก) สายอากาศ 1 หาค่าเริ่มต้นของสายอากาศโดยการคำนวณหาค่าการป้อนสายนำสัญญาณและขนาดของสายอากาศรูปแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า การคำนวณหาขนาดสายอากาศรูปแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อความสูงของวัสดุฐานรอง (h) เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตรและค่าสภาพยอมทาง

ไฟฟ้าสัมผัสของวัสดุฐานรอง $\epsilon_r = 4.4$ และต้องการความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) เท่ากับ 3.87 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นความถี่กลางระหว่างความถี่ 2.40 กิกะเฮิร์ตซ์และ 5.35 กิกะเฮิร์ตซ์ แทนค่าจากทฤษฎีเพื่อหาค่าขนาดองค์ประกอบความกว้างและองค์ประกอบความยาวเริ่มต้นของค่าพารามิเตอร์ (W_1) และ (L_1) ดังนี้

$$W_r = \frac{c}{2f_r} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

$$W_r = \frac{3 \times 10^8}{2 \times (3.87 \times 10^9)} \left(\frac{4.4 + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} = 0.023 \text{ เมตร}$$

หรือ $W_1 = W_r = 23 \text{ มิลลิเมตร}$

จากนั้นหาค่าพารามิเตอร์ (L_1) ดังนี้

$$L_r = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_e}} \quad (3.2)$$

แต่เนื่องจากพารามิเตอร์ในสมการที่ยังไม่ทราบค่าคือ ϵ_e จึงต้องหาค่าพารามิเตอร์จากสมการดังนี้

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W_r} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

แทนค่า W_r , h และ ϵ_r เพื่อหาค่า ϵ_e ตามลำดับ ดังนี้

$$\epsilon_e = \frac{4.4 + 1}{2} + \frac{4.4 - 1}{2} \left(1 + \frac{12 \times 0.8 \times 10^{-3}}{23 \times 10^{-3}} \right)^{-\frac{1}{2}} = 4.127$$

เมื่อได้ค่า $\mathcal{E}_e$ จึงสามารถหาค่าพารามิเตอร์ L_r โดยการแทนค่า $\mathcal{E}_e$, f_r และ c ตามลำดับ

$$L_r = \frac{3 \times 10^8}{2 \times (3.87 \times 10^9) \sqrt{4.127}} = 0.019 \text{ เมตร}$$

หรือ

$$L_1 = L_r \text{ 19 มิลลิเมตร}$$

ดังนั้นจึงได้ค่าของขนาดแผ่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าทั้งองค์ประกอบความกว้างและองค์ประกอบความยาวเพื่อใช้เริ่มต้นในการจำลองแบบ คือ 23 มิลลิเมตรและ 19 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ลำดับถัดมาคำนวณหาค่าความกว้างการป้อนสายนำสัญญาณคำนวณหาจากอิมพีแดนซ์ประจำตัวซึ่งมีความยาวเป็นอนันต์ ซึ่งไม่คิดความหนาของตัวนำ (t) ซึ่งมีผลกระทบต่อโครงสร้างน้อยมากดังสมการต่อไปนี้

$$W_L = w + \frac{t}{\pi} \left[\ln \left(\frac{2h}{t} \right) + 1 \right] \quad (3.4)$$

$$H = h - 2t$$

เมื่อไม่คิดค่าความหนา (t) ทำให้ได้

$$W_L = w$$

$$H = h$$

ดังนั้นเมื่อต้องการอิมพีแดนซ์ประจำตัว $Z_0 = 50$ โอห์ม โดยมีความสูงของวัสดุฐานรอง $H = h = 0.8$ มิลลิเมตรและมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง $\mathcal{E}_r = 4.4$ แล้วทำการเปลี่ยนค่าความกว้างของสายนำสัญญาณ W_f ซึ่งค่า $W_f = W_L$ เพื่อแทนลงในสมการเพื่อให้ได้ค่า $Z_0 = 50$ โอห์ม ดังนี้

$$\text{เมื่อแทนค่า } W_f = W_L = 1.5 \text{ มิลลิเมตรทำให้ได้ } \frac{W_L}{H} = \frac{1.5}{0.8} = 1.875 \geq 1 \text{ ซึ่งต้องเลือกใช้}$$

สมการการคำนวณดังนี้

$$\text{เมื่อ } \frac{W_L}{H} \geq 1 \quad Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\mathcal{E}_e}} \left[\frac{W_L}{H} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W_L}{H} + 1.444 \right) \right]^{-1} \quad (3.5)$$

เมื่อหาค่า

$$\mathcal{E}_e = \frac{\mathcal{E}_r + 1}{2} + \frac{\mathcal{E}_r - 1}{2\sqrt{1 + 12\frac{H}{W_L}}} \quad (3.6)$$

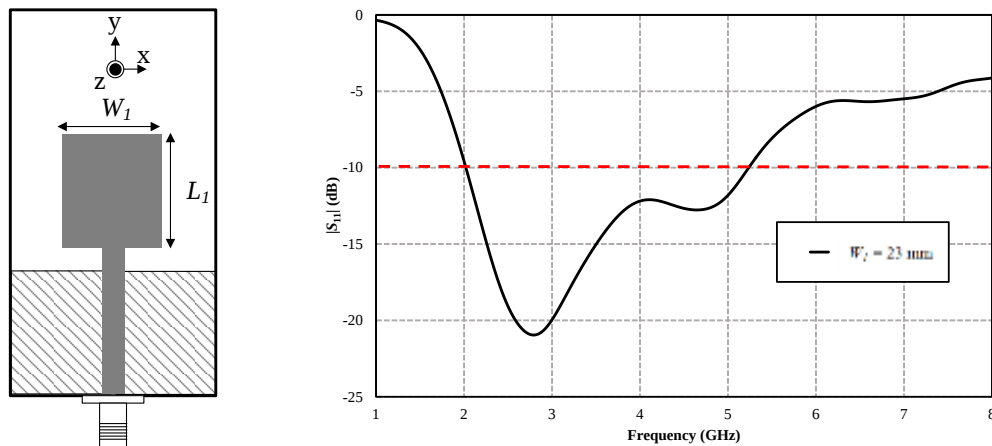
แทนค่าทั้งหมดลงในสมการ

$$\mathcal{E}_e = \frac{4.4 + 1}{2} + \frac{4.4 - 1}{2\sqrt{1 + 12\frac{0.8}{1.5}}} = 3.32$$

นำค่า $\mathcal{E}_e = 3.32$, $H = h = 0.8$ มิลลิเมตรและ $W_f = W_L = 1.5$ มิลลิเมตรนำค่าแทนลงในสมการเพื่อที่จะทราบว่าได้อิมพีแดนซ์ประจำตัวเท่ากับ 50 โอห์ม ดังนี้

$$Z_o = \frac{120\pi}{\sqrt{3.32}} \left[\frac{1.5}{0.8} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{1.5}{0.8} + 1.444 \right) \right]^{-1} = 50 \text{ โอห์ม}$$

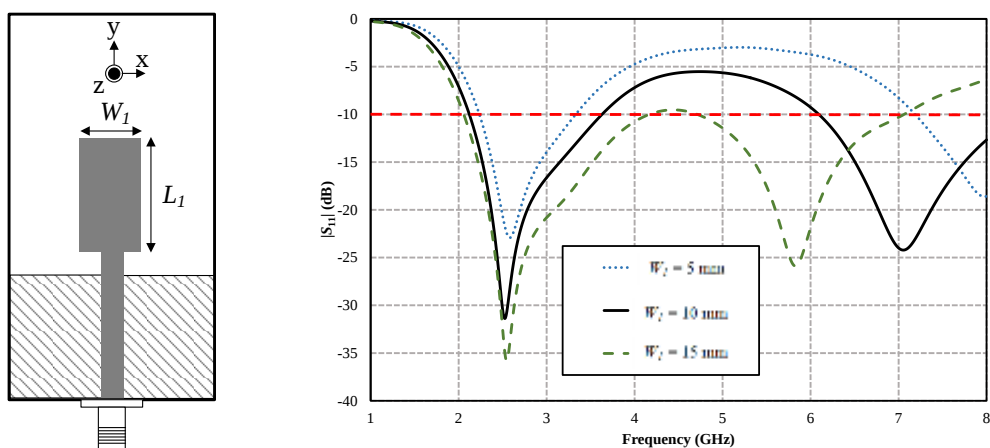
ดังนั้นค่าความกว้างการบ่อนสายนำสัญญาณ 1.5 มิลลิเมตรทำให้ได้อิมพีแดนซ์ประจำตัวเท่ากับ 50 โอห์ม นำค่าทั้งหมดที่ได้จากการคำนวณทั้งส่วนการคำนวณขนาดสายอากาศรูปแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและค่าความกว้างการบ่อนสายนำสัญญาณจากทฤษฎีเพื่อนำไปจำลองแบบ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผลจึงใช้เครื่องมือช่วยในการคำนวณทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าคือการใช้โปรแกรมจำลองทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำการจำลองแบบจากโครงสร้างสายอากาศเริ่มต้นจากการคำนวณทางทฤษฎีและทำการศึกษาตัวแปรว่าส่งผลกระทบต่อสายอากาศที่ออกแบบโดยมีรายละเอียดดังนี้โดยแสดงได้ดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ เมื่อเปลี่ยนค่า $W_1 = 23$ มิลลิเมตร

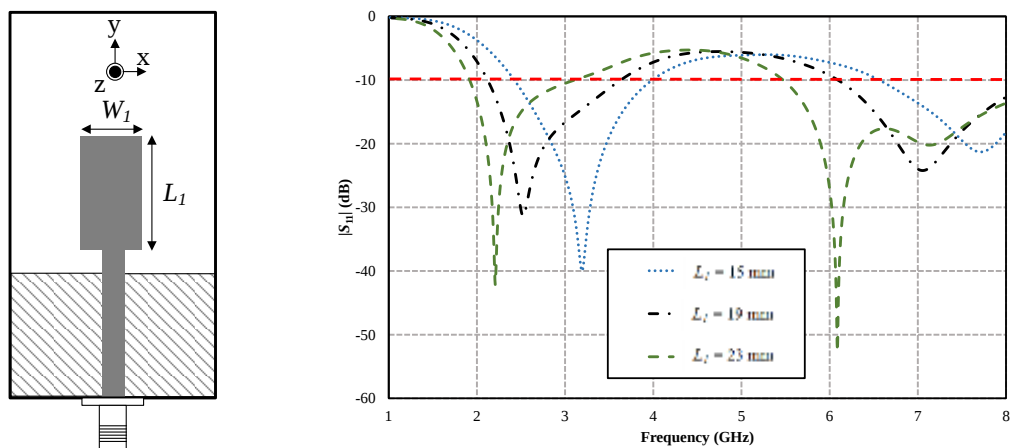
จากรูป 3.3 ผลการจำลองค่าเริ่มต้นองค์ประกอบความกว้างและองค์ประกอบความยาว รวมถึงส่วนการป้อนสายนำสัญญาณที่ได้สอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎีซึ่งครอบคลุมความถี่ 3.87 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งอยู่ในแถบความถี่ตั้งแต่ 2.03 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 5.21 กิกะเฮิรตซ์

สายอากาศ 1 การเริ่มต้นต้องทำความเข้าใจตัวแปรว่ามีผลกระทบต่อความถี่ต่าง ๆ อย่างไร โดยเริ่มต้นการจำลองผลสายอากาศ 1 (สายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า) ดังรูปที่ 3.2 (ก) เพื่อศึกษาตัวแปรองค์ประกอบความกว้าง W_1 ว่ามีผลกระทบต่อความถี่ใช้งานอย่างไร โดยนำค่าองค์ประกอบความยาว (L_1) คงที่ 19 มิลลิเมตร และค่าความกว้างการป้อนสายนำสัญญาณ (W_f) เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร มาจำลองแบบที่เกิดขึ้นดังแสดงได้ดังรูป 3.4



รูปที่ 3.4 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ เมื่อเปลี่ยนค่า W_1

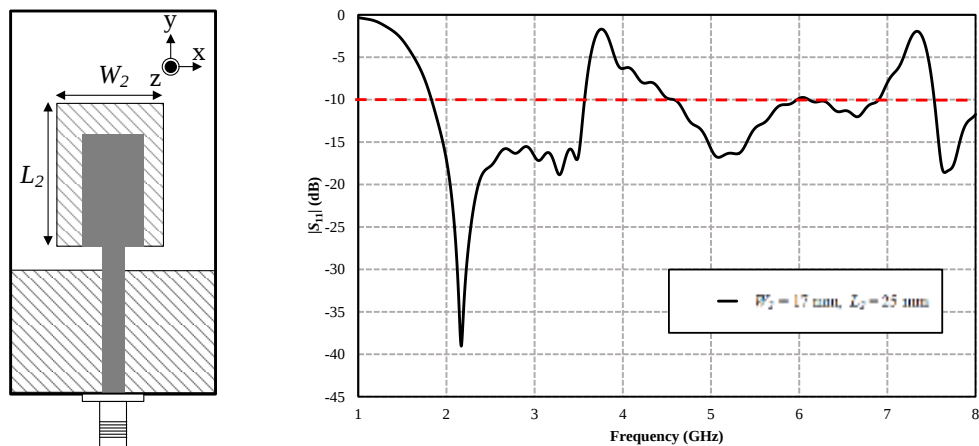
จากรูปที่ 3.4 แสดงผลกระทบขององค์ประกอบความกว้าง W_1 เมื่อมีขนาดลดลงทำให้มีผลต่อความถี่ใช้งานซึ่งทำให้ได้สายอากาศย่านความถี่คู่เกิดขึ้นจากเดิมที่เป็นสายอากาศ 1 ย่านความถี่ เมื่อค่าองค์ประกอบความกว้างเท่ากับ 10 มิลลิเมตร โดยสายอากาศทำงานที่แถบความถี่ต่ำ (lower band) ทำงานในช่วงความถี่ 2.11 กิกะเฮิรตซ์ ถึงความถี่ 3.62 กิกะเฮิรตซ์ และแถบความถี่สูง (higher band) ทำงานเริ่มต้นที่ 6.09 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งสามารถครอบคลุมการทำงานของระบบ WLAN แถบความถี่ต่ำได้แต่ยังไม่ครอบคลุมการทำงานของระบบ WiMAX และ WLAN ความถี่สูงได้



รูปที่ 3.5 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ เมื่อเปลี่ยนค่า L_1

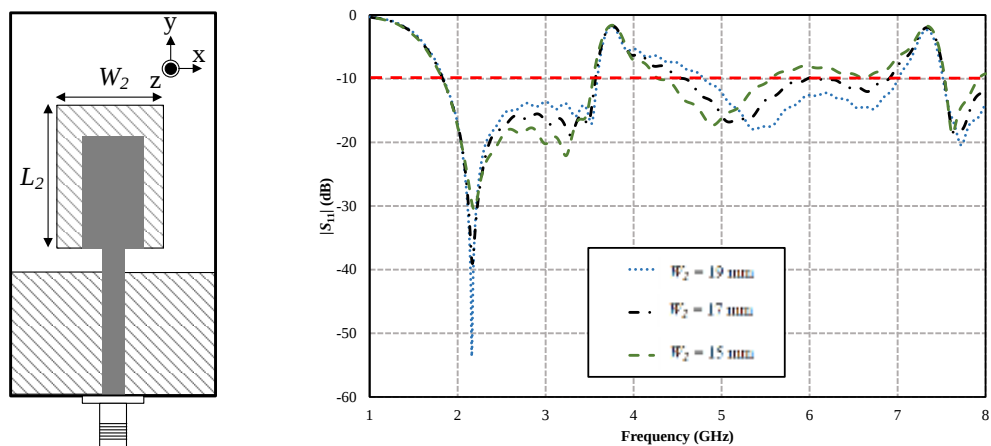
จากรูปที่ 3.5 การปรับองค์ประกอบความยาว L_1 เมื่อเพิ่มและลดความยาวจากค่า 19 มิลลิเมตร ทำให้ทราบว่าการปรับความยาวนั้นมีผลกระทบต่อการเลื่อนความถี่ต่ำและความถี่สูงได้ซึ่งจะมีประโยชน์ใช้ในการปรับแมตซ์อิมพีแดนซ์ต่อไป

สายอากาศ 2 จากการปรับค่าตัวแปรในสายอากาศ 1 ทำให้มีแนวโน้มในการเพื่อปรับปรุงสายอากาศให้มีความถี่ตามต้องการใช้งานได้ แต่ต้องมีการเพิ่มเทคนิคการแมตซ์อิมพีแดนซ์โดยใช้ parasitic สี่เหลี่ยมผืนผ้าเพิ่มเข้าไปที่ด้านหลังตรงกับแผ่นกระจายคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่อยู่ด้านหน้า ซึ่งจะได้ศึกษาค่าตัวแปรของ parasitic สี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังรูปที่ 3.6



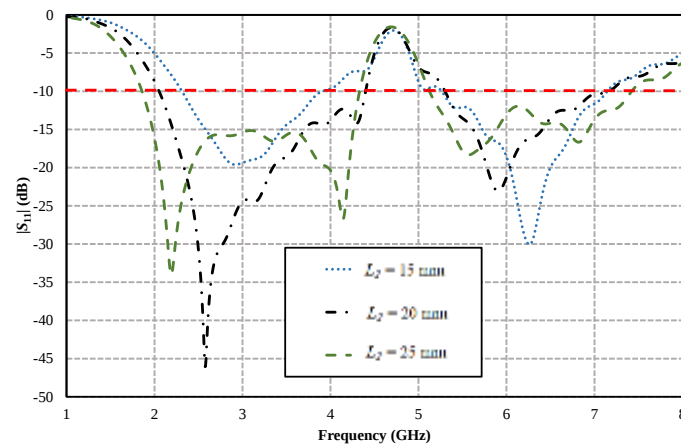
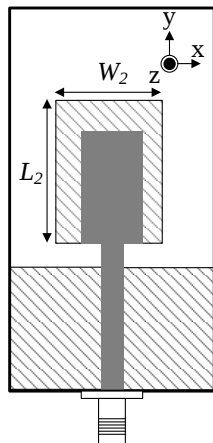
รูปที่ 3.6 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ เมื่อเพิ่ม parasitic สี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากรูปที่ 3.6 การเพิ่ม parasitic สี่เหลี่ยมผืนผ้า ค่าเริ่มต้น $W_2 = 17$ มิลลิเมตร $L_2 = 25$ มิลลิเมตร สังเกตได้ว่าความถี่ต่ำมีการขยายแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้นและความถี่สูงเลื่อนเริ่มต้นที่ความถี่ 4.61 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งการเพิ่ม parasitic ซึ่งเป็นแนวนอนที่ดี ดังนั้นจึงทำการศึกษาตัวแปร W_2 และ L_2 ว่ามีคุณสมบัติต่อความถี่อย่างไรเพื่อจะได้รู้หน้าที่และง่ายต่อการปรับจูนสายอากาศให้ได้ความถี่ตามต้องการได้



รูปที่ 3.7 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ เมื่อเปลี่ยนค่า W_2

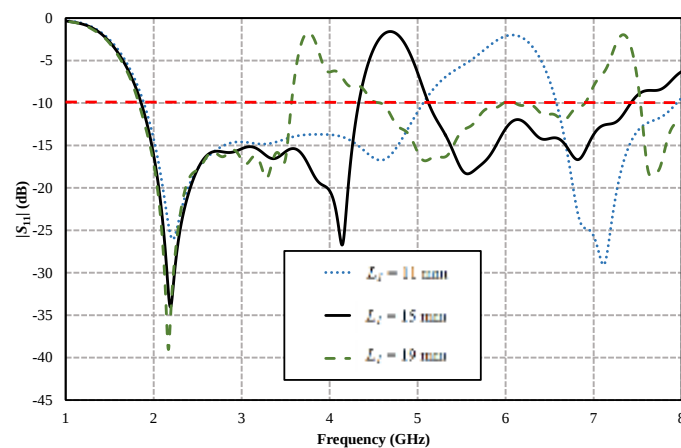
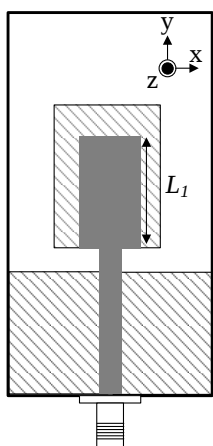
จากรูปที่ 3.7 การปรับองค์ประกอบความกว้าง W_2 เมื่อเพิ่มและลดความกว้างจาก 15- 19 มิลลิเมตร ทำให้ทราบว่า การปรับความกว้าง W_2 นั้นมีผลกระทบต่อค่าเริ่มต้นที่ความถี่สูง



รูปที่ 3.8 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ เมื่อเปลี่ยนค่า L_2

จากรูปที่ 3.8 การปรับองค์ประกอบความยาว L_2 เมื่อเพิ่มความยาวจาก 15- 25 มิลลิเมตร ทำให้ทราบว่า การปรับความยาว L_2 นั้นมีผลกระทบต่อการเลื่อนค่าเริ่มต้นที่ความถี่ต่ำและขยายแบนด์วิธความถี่กลางเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลดีต่อการครอบคลุมความถี่ WiMAX

แต่อย่างไรก็ตามความถี่สูงยังไม่สามารถครอบคลุมความถี่ที่ต้องการได้ซึ่งความถี่ขาดไปไม่มาก ซึ่งจากการศึกษาตัวแปร L_1 ของแผ่นแพร์กระจายคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าตั้งแต่ตอนแรกทำให้ทราบว่า การปรับความยาว L_1 นั้นมีผลกระทบต่อการเลื่อนความถี่ต่ำและความถี่สูงได้ซึ่งจะได้นำมาปรับความถี่เพื่อจะได้ความถี่ครอบคลุมที่ต้องการได้ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ เมื่อเปลี่ยนค่า L_1

จากรูปที่ 3.9 เมื่อ $L_1 = 15$ มิลลิเมตร ความถี่ต่ำทำงานช่วงความถี่ 1.86 กิกะเฮิรตซ์ ถึงความถี่ 4.33 กิกะเฮิรตซ์ และความถี่สูงทำงานช่วงความถี่ 5.11 กิกะเฮิรตซ์ ถึงความถี่ 7.41 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งสามารถครอบคลุมการทำงานของระบบ WLAN และ WiMAX ได้ครบความถี่ตามต้องการ

นำค่าตัวแปรทั้งหมดของสายอากาศที่ได้จากการจำลองแบบนำมาสร้างสายอากาศดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบที่ 2

พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ขนาด (มิลลิเมตร)
W	ความกว้างสายอากาศ	46
L	ความยาวสายอากาศ	60
W_1	ความกว้างของโครงสร้างสี่เหลี่ยมผืนผ้า	10
L_1	ความยาวของโครงสร้างสี่เหลี่ยมผืนผ้า	15
W_2	ความกว้าง parasitic สี่เหลี่ยมผืนผ้า	17
L_2	ความยาว parasitic สี่เหลี่ยมผืนผ้า	25
g	ระยะช่องว่าง	2
W_f	ความกว้างสายนำสัญญาณ	1.5
L_f	ความยาวสายนำสัญญาณ	32
G_L	ความยาวระนาบกราวด์	30
h	ความหนาของวัสดุฐานรอง	1.6

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 สร้างสายอากาศ

นำค่าตัวแปรทั้งหมดของสายอากาศต้นแบบ 1 และต้นแบบ 2 ที่ได้จากตารางที่ 2.2 และ 3.1 นำมาสร้างสายอากาศดังแสดงในรูป 4.1 และ 4.2



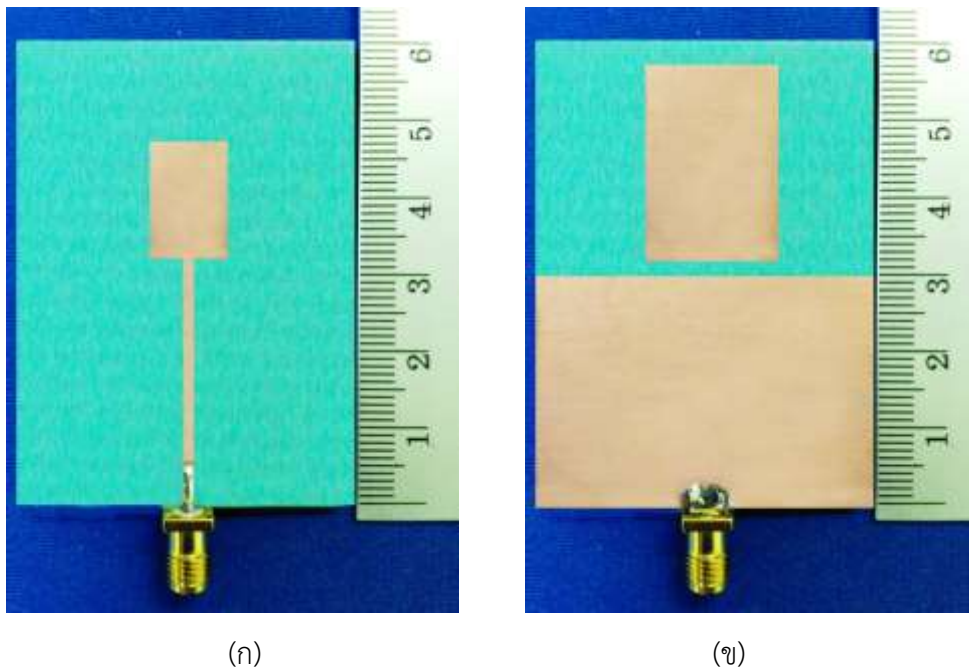
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 สายอากาศต้นแบบ 1

(ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง



รูปที่ 4.2 สายอากาศต้นแบบ 2

(ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

4.2 การวัดค่า $|S_{11}|$

ค่า $|S_{11}|$ เป็นตัวแปรที่สำคัญเพื่อใช้ในการพิจารณาการแมตช์อินพุตอิมพีแดนซ์โดยการทดสอบ $|S_{11}|$ หมายถึง การสะท้อนกลับของกำลังไฟฟ้าจากการวัดทางเข้า (พอร์ต 1) ของสายอากาศ โดยที่ค่า $|S_{11}|$ สามารถมีค่าได้ตั้งแต่ 0 dB ถึงลบอนันต์ (Negative infinity dB) กรณี $|S_{11}|$ มีค่าเท่ากับ 0 dB หมายถึง การไม่แมตช์อย่างสมบูรณ์ และกรณี $|S_{11}|$ มีค่าเป็นลบอนันต์ ($-\infty$) แสดงว่ามีการแมตช์ที่สมบูรณ์ดีที่สุด แต่สำหรับการทดสอบจริงค่า $|S_{11}|$ ที่ยอมรับได้ว่าการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดีแล้วคือเมื่อ $|S_{11}|$ เท่ากับหรือต่ำกว่า -10 dB

4.3 การทดสอบอัตราขยาย (Gain)

สำหรับการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบโดยใช้วิธีการใช้สายอากาศสองตัว (Two-antenna method) หรือสายอากาศคู่เหมือนที่มีคุณลักษณะเหมือนกันในการแมตช์อิมพีแดนซ์ $|S_{11}|$ มาใช้สำหรับการวัดทดสอบ โดยสายอากาศตัวที่ 1 ทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่ง (พอร์ต 1) และสายอากาศตัวที่ 2 (พอร์ต 2) ทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาครับ โดยมีค่า R เป็นระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสองโดยขณะทำการวัดจะหันสายอากาศด้านหน้าเข้าหากัน (ทิศทางแกน Z)

จากผลการทดสอบใช้สมการการส่งผ่านของฟรีส (Friis transmission equation) เป็นพื้นฐานในการคำนวณหาค่าอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบโดยมีสมการดังนี้

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r \quad (4.1)$$

$$G_{dB} = \left(\frac{P_{r_{dB}} - P_{t_{dB}} + Loss}{2} \right) \quad (4.2)$$

$$G_{dB} = \left(\frac{P_{r_{dB}} - P_{t_{dB}} + 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)}{2} \right) \quad (4.3)$$

$$2G_{dB} = P_r - P_t + 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (4.4)$$

โดยที่ P_t คือ กำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศภาคส่ง
 P_r คือ กำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศภาครับ
 G_{dB} คือ อัตราขยายรวมของสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับสายอากาศสองตัว
 มีลักษณะเหมือนกัน
 G_t คือ อัตราขยายสายอากาศภาคส่ง
 G_r คือ อัตราขยายสายอากาศภาครับ
 R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ
 เมื่อ $P_r - P_t$ คือ ค่าของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

4.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern)

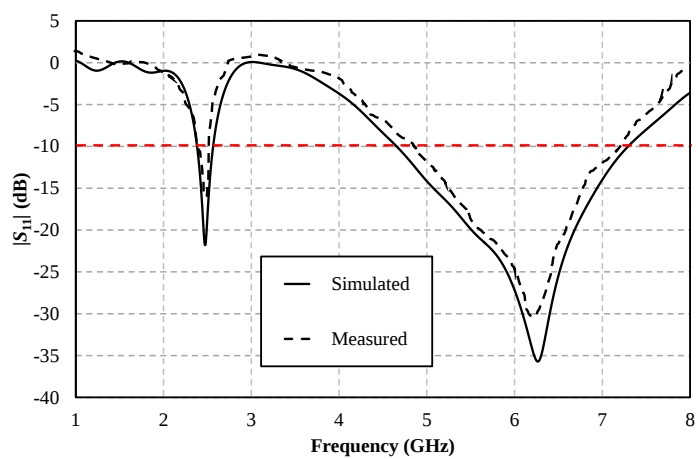
การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของระนาบสนามไฟฟ้า (YZ-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (XZ-plane) โดยนำสายอากาศทั้งภาครับและภาคส่งเข้าทดสอบในห้องที่ไม่มีการสะท้อนกลับ (Standard anechoic chamber) วิธีการทดสอบ จะหมุนสายอากาศภาครับจากมุม 0 องศาถึงมุม 360 องศาด้วยความละเอียดในการหมุนแต่ละครั้งที่ยอมรับ

กันจะมีการปรับได้ตั้งแต่มุม 1 องศา, มุม 2 องศา, 5 องศาหรือ 10 องศา ขึ้นอยู่กับว่าต้องการความละเอียดการวัดและเพื่อไม่ให้เกิดความผิดเพี้ยนของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ส่วนการทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้การหมุนมุมทีละ 5 องศา ส่วนสายอากาศส่งเป็นสายอากาศที่ออกแบบที่ความถี่เดียวกันกับสายอากาศด้านภาครับ ซึ่งการทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นมีทั้งการวัดค่าโพลาไรซ์ร่วม (Co-polarization) และโพลาไรซ์ไขว้ (Cross-polarization) การวางระดับความสูงของสายอากาศภาครับและสายอากาศภาคส่งต้องเท่ากันและต้องคำนวณระยะห่าง (R) ให้ได้ระยะห่างสนามระยะไกล (Far-field) จากการคำนวณสมการดังนี้

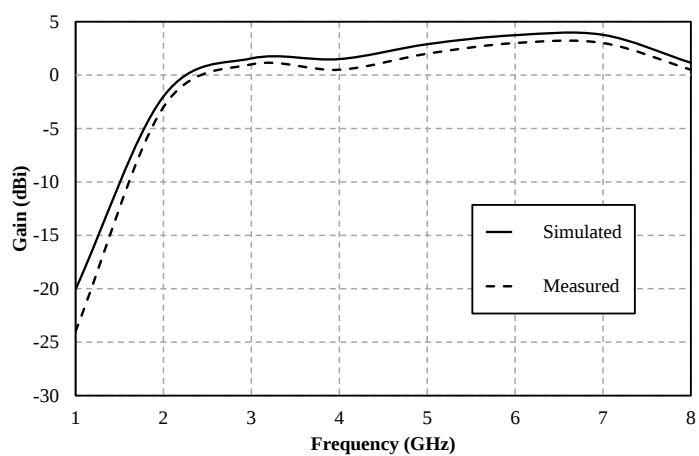
$$R \gg \frac{2D^2}{\lambda_0} \quad (4.5)$$

เมื่อ D คือ ความยาวส่วนที่ยาวที่สุดของสายอากาศสองตัวรวมกัน
 λ_0 คือ ความยาวคลื่นในอากาศ

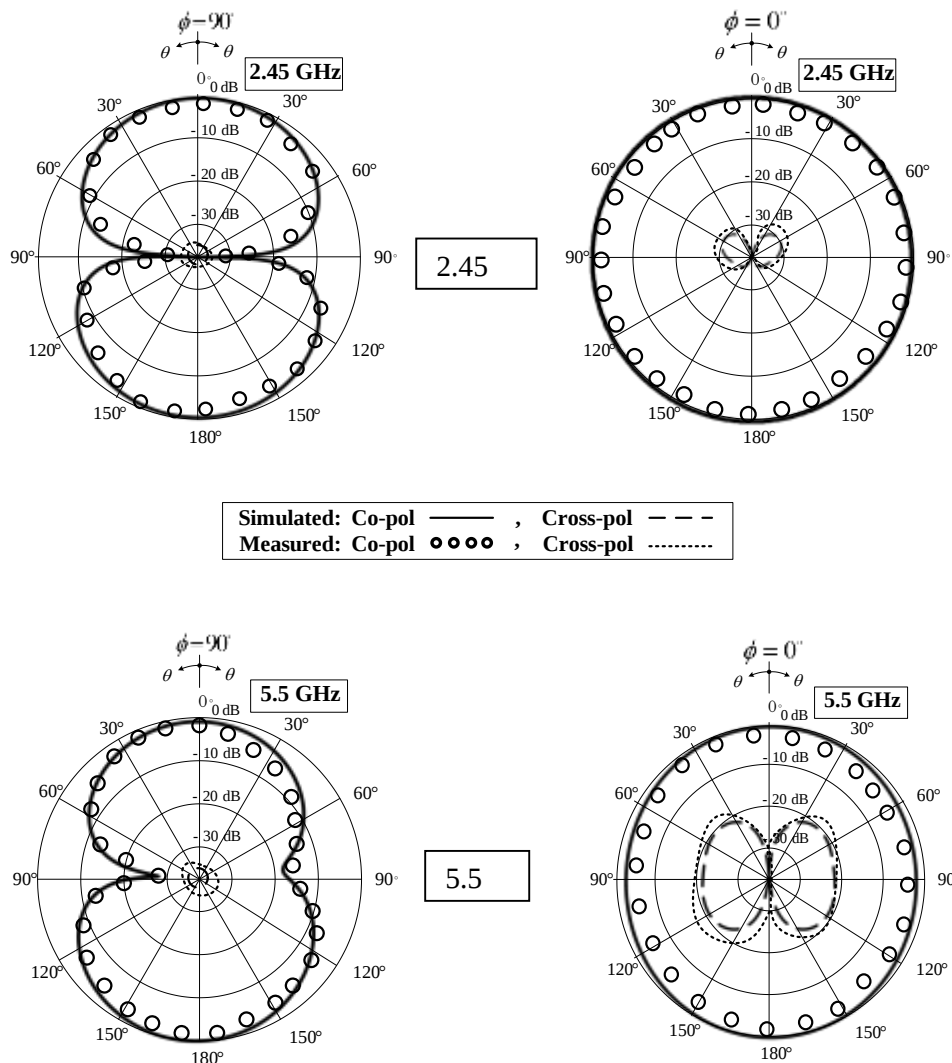
4.5 ผลการทดสอบสายอากาศต้นแบบ 1



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบ $|S_{11}|$ สายอากาศต้นแบบ 1



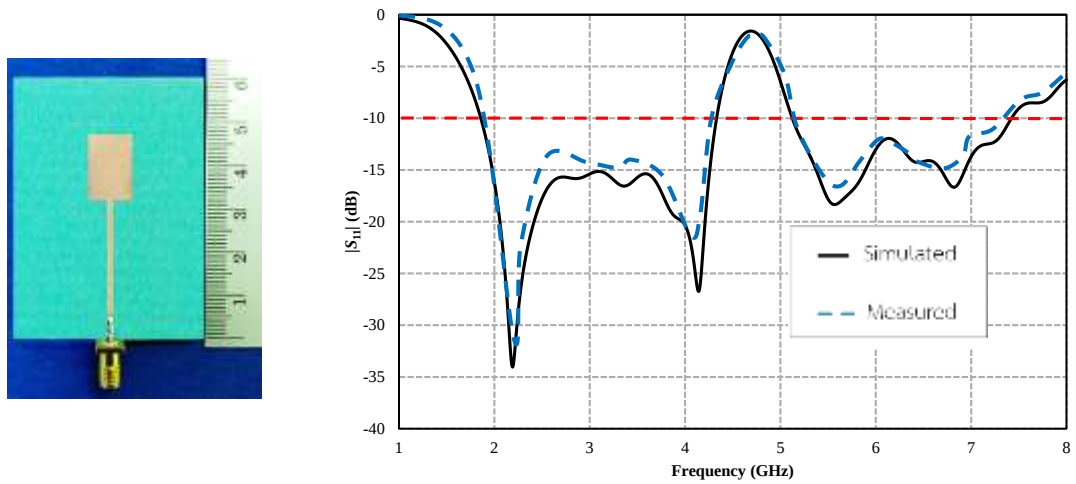
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายสายอากาศต้นแบบ 1



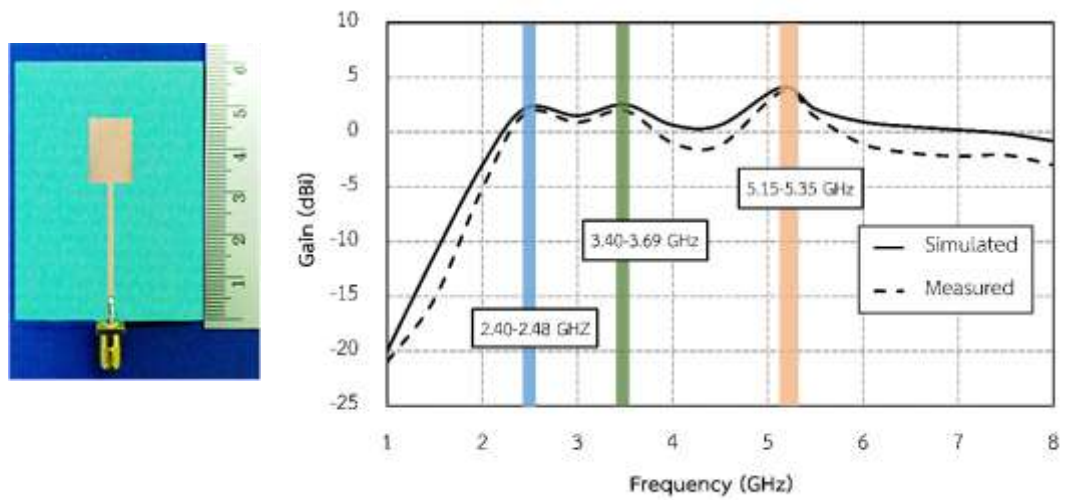
รูปที่ 4.5 ผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ YZ และ ระนาบ XZ
สายอากาศต้นแบบ 1

จากรูปที่ 4.1 แสดงรูปสายอากาศต้นแบบที่ 1 ที่สร้างขึ้นทั้งด้านหน้าและด้านหลังเพื่อนำไปทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองในรูปที่ 4.3 ซึ่งมีแนวโน้มใกล้เคียงกันผลการจำลองครอบคลุมความถี่ (2.38 กิกะเฮิรตซ์ - 2.56 กิกะเฮิรตซ์ และ 4.66 กิกะเฮิรตซ์ - 7.29 กิกะเฮิรตซ์ และผลการทดสอบครอบคลุมความถี่ (2.38 กิกะเฮิรตซ์ - 2.52 กิกะเฮิรตซ์ และ 4.43 กิกะเฮิรตซ์ - 7.22 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ รูปที่ 4.4 แสดงอัตราขยายจากผลการทดสอบเท่ากับ 1.55 dBi และ 3.2 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.5 GHz ตามลำดับ รูปที่ 4.5 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.5 กิกะเฮิรตซ์ ได้แบบรูปการแพร่กระจายแบบรอบทิศทางทั้งสองความถี่ มีค่าโพลาริเซชันต่ำกว่า -20 dB

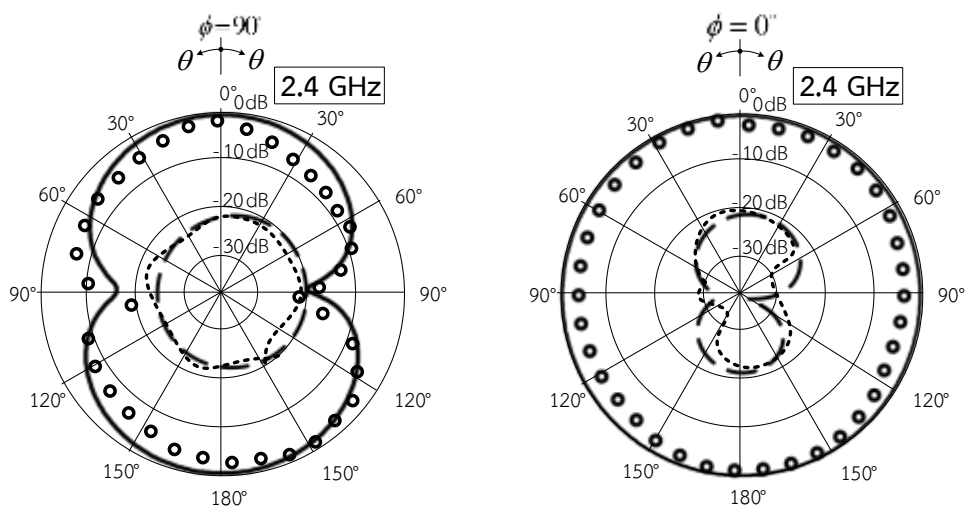
4.6 ผลการทดสอบสายอากาศต้นแบบ 2



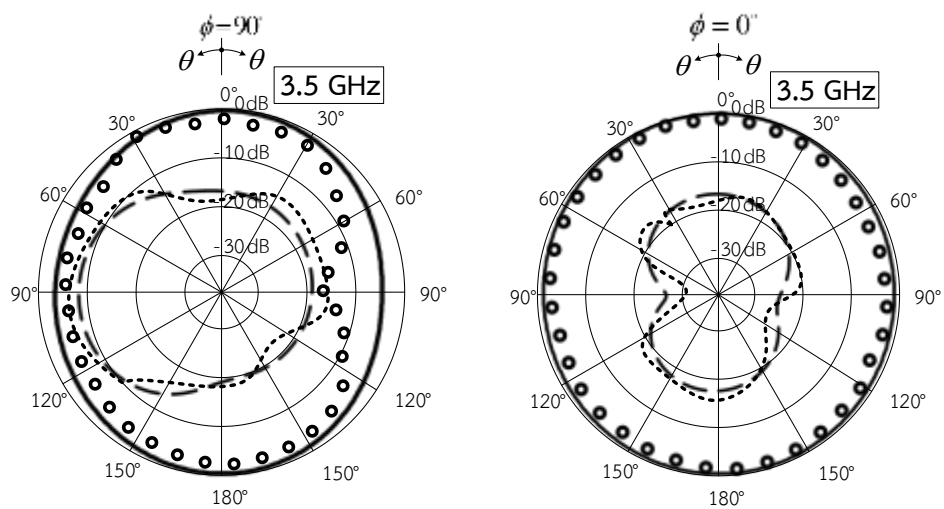
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบและผลการจำลองหาค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบ 2



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบและผลการจำลองหาอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ 2

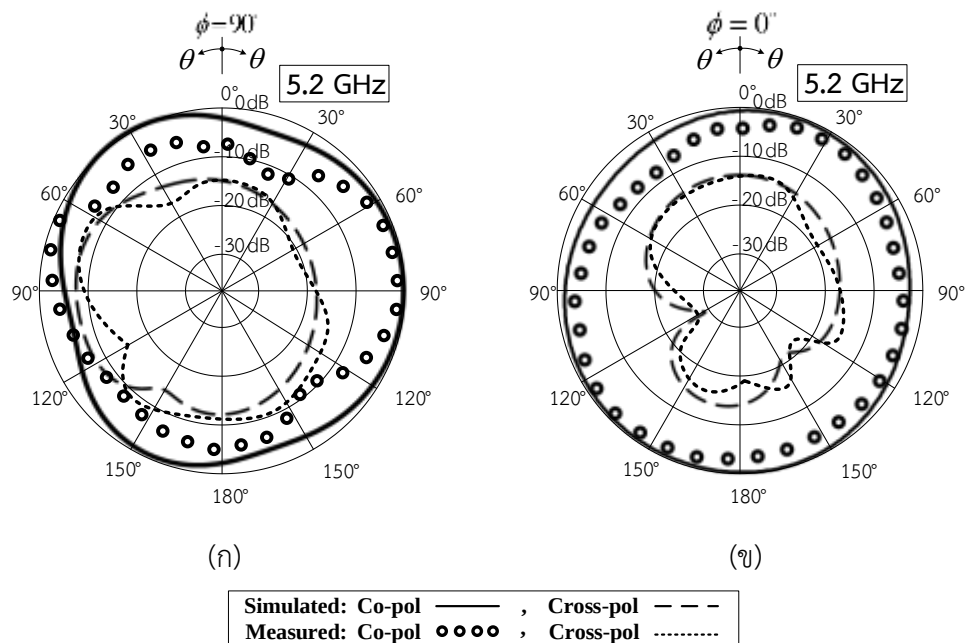


Simulated: Co-pol ——— , Cross-pol - - - -
 Measured: Co-pol ○○○○ , Cross-pol



(n)

(u)



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ 3.5 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า YZ (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก XZ ของสายอากาศต้นแบบ 2

จากรูป 4.2 แสดงสายอากาศต้นแบบ 2 จากผลการทดสอบรูปที่ 4.6 เป็นผลการทดสอบและผลการจำลองหาค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศ ผลการทดสอบทำให้ได้ค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ที่แถบความถี่ต่ำในช่วงความถี่ 1.91 กิกะเฮิรตซ์ ถึงความถี่ 4.23 กิกะเฮิรตซ์ และที่แถบความถี่สูงในช่วงความถี่ 5.11 กิกะเฮิรตซ์ ถึงความถี่ 7.31 กิกะเฮิรตซ์ และผลการจำลองที่แถบความถี่ต่ำในช่วงความถี่ 1.86 กิกะเฮิรตซ์ ถึงความถี่ 4.33 กิกะเฮิรตซ์ และที่แถบความถี่สูงในช่วงความถี่ 5.11 กิกะเฮิรตซ์ ถึงความถี่ 7.41 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ ซึ่งทั้งผลการจำลองและผลการทดสอบมีความสอดคล้องกันดี

จากรูปที่ 4.7 เป็นผลการทดสอบและผลการจำลองค่าอัตราขยายผลการทดสอบมีอัตราขยายเท่ากับ 1.87 dBi, 1.95 dBi และ 3.82 dBi และผลจำลองอัตราขยายเท่ากับ 2.08 dBi, 2.13 dBi และ 4.04 dBi ที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ , 3.5 กิกะเฮิรตซ์ และความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.8 (ก) และ (ข) แสดงผลการทดสอบและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์, ความถี่ 3.5 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ ในระนาบสนามไฟฟ้า (YZ plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (XZ plane) ซึ่งได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทางในแนวระนาบ XZ หรือระนาบแนวราบแบบเชิงเส้นโพลาริเซชันแนวตั้งที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และโพลาริเซชันแนวนอนที่ความถี่ 3.5 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ มีค่าระดับโพลาริเซชัน

เซชันไขว้จากผลการทดสอบในระนาบ YZ ที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์, ความถี่ 3.5 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ เท่ากับ -22 dB, -17 dB และ -15 dB และระนาบ XZ เท่ากับ -20 dB, -17 dB และ -15 dB ตามลำดับ ซึ่งระดับโพลาไรซ์เซชันไขว้จะต่ำในระนาบ YZ และระนาบ XZ ที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการนี้เป็นการสร้างสายอากาศเพื่อรองรับความถี่ของระบบ LTE4G, WLAN และ WiMAX ซึ่งมีย่านความถี่ที่แตกต่างกัน ซึ่งสายอากาศที่ได้มีการทำงานแบบย่านความถี่คู่ซึ่งแบ่งความถี่เป็นย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง ซึ่งดีกว่าสายอากาศที่ใช้ความถี่ช่วงกว้างเพียงความถี่เดียวเพราะจะลดปัญหาการรบกวนกันของสัญญาณที่ไม่ได้นำมาใช้งานได้ ส่วนในด้านโครงสร้างของสายอากาศนั้นมีความไม่ซับซ้อน ราบเรียบเพื่อที่จะนำไปติดกับอุปกรณ์ขนาดเล็กในปัจจุบันได้ง่ายและสามารถนำไปพัฒนาในเชิงอุตสาหกรรมได้ โดยสายอากาศถูกสร้างลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR4 ซึ่งมีค่าสภาพยอมสนามไฟฟ้าสัมพันธ์เท่ากับ 4.4 และความหนาของแผ่นวัสดุฐานรองเท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร ข้อดีของการเลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์ FR4 เนื่องจากมีราคาถูก น้ำหนักเบาและบาง สร้างง่ายรวดเร็ว

สายอากาศต้นแบบที่ 1 สามารถทำงานรองรับความถี่ระบบ WLAN และ WiMAX เท่านั้น แต่ไม่สามารถรองรับความถี่ระบบ LTE4G ได้ ผลการทดสอบครอบคลุมความถี่ (2.38 กิกะเฮิรตซ์ -2.52 กิกะเฮิรตซ์ และ 4.43 กิกะเฮิรตซ์ -7.22 กิกะเฮิรตซ์ และมีอัตราขยายจากการทดสอบเท่ากับ 1.55 dBi และ 3.2 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.5 GHz ตามลำดับ สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง

สายอากาศต้นแบบที่ 2 สามารถทำงานรองรับความถี่ระบบ LTE4G, WLAN และ WiMAX ได้ ในช่วงความถี่ต่ำความถี่ 1.91 กิกะเฮิรตซ์ ถึงความถี่ 4.23 กิกะเฮิรตซ์ และที่แถบความถี่สูงช่วงความถี่ 5.11 กิกะเฮิรตซ์ ถึงความถี่ 7.31 กิกะเฮิรตซ์ และมีอัตราขยายเท่ากับ 1.87 dBi ที่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์, 1.95 dBi ที่ 3.5 กิกะเฮิรตซ์ และ 3.82 dBi ที่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนา

5.2.1 สายอากาศนี้ยังสามารถพัฒนาเป็นสายอากาศที่มากกว่าสองย่านความถี่ได้ เรียกว่า สายอากาศหลายความถี่ได้

5.2.2 การออกแบบสายอากาศให้ได้เฉพาะช่วงความถี่ใช้งานโดยเน้นไม่ให้เกิดความถี่อื่นเข้ามารบกวน ซึ่งจะได้สายอากาศแถบความถี่ไม่กว้างมากเพราะเลือกเฉพาะแถบความถี่ที่ต้องการใช้งาน

5.2.3 การออกแบบสายอากาศแบบครอบคลุมช่วงความถี่ช่วงกว้างซึ่งจะได้แถบความถี่ที่กว้างแต่ข้อเสียคือจะได้รับความถี่รบกวนอื่นเข้ามาด้วย ซึ่งการออกแบบทั้ง 2 แบบจะมีความท้าทายที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสายอากาศว่าจะเหมาะสมหรือมีขีดจำกัดในการออกแบบด้วย

5.2.4 แผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้ถ้าต้องการให้เกิดความสูญเสียต่ำอาจจะเปลี่ยนแผ่นวงจรพิมพ์จากสารอีพ็อกซีเป็น Duroid หรือ Teflon ที่มีการสูญเสียของไดอิเล็กตริกต่ำในย่านความถี่สูงแต่จะมีราคาแพง

5.2.5 ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นควรเลือกใช้สายนำสัญญาณในการวัดให้มีความสูญเสียของสายให้มีความน้อยที่สุดและควรวัดทดสอบที่ละหนึ่งความถี่เพื่อลดการผิดเพี้ยนของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งมีผลกระทบทำให้ผลทดสอบมีค่าไม่เที่ยงตรง

โครงการนี้เน้นลำดับโครงสร้างสายอากาศในการพิจารณาเพื่อศึกษาตัวแปรในแต่ละขั้นตอนอย่างละเอียดพร้อมทฤษฎีที่ใช้สำหรับการออกแบบสายอากาศและได้ทำการทดสอบสายอากาศเพื่อเป็นแนวทางให้ผู้สนใจสามารถนำไปพัฒนาสายอากาศและปรับปรุงโครงสร้างให้มีรูปแบบที่หลากหลายเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานที่ดีขึ้นต่อไปในอนาคต

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานทางวิชาการ

1.1ระดับนานาชาติ

Yuktith Chawanonphithak and Chuwong Phongcharoenpanich. 2016. Compact Split Circular Ring Shape Dual-band Antenna with Open Ring and Additional Strip. 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2016), Chiang Mai Thailand, June 28-1 July 2016. pp. 1-4.

บรรณานุกรม

- [1] Y. L. Kuo and K. L. Wong, "Printed double-T monopole antenna for 2.4/5.2 GHz dual-band WLAN operations", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 51, no. 9, pp. 2187–2192, Sep. 2003.
- [2] Q. X. Chu and L. H. Ye, "Design of compact dual-wideband antenna with assembled monopoles", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 12, pp. 4063–4066, Dec. 2010.
- [3] J. Zhu, M. A. Antoniadis and G. V. Eleftheriades, "A compact tri-band monopole antenna with single-cell metamaterial loading", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 4, pp. 1031–1038, Apr. 2010.
- [4] A. Mehdipour, A. -R. Sebak, C. W. Trueman and T. A. Denidni, "Compact multiband planar antenna for 2.4/3.5/5.2/5.8-GHz wireless applications", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 11, pp. 144–147, Jan. 2012.
- [5] C. Y. Pan, T. S. Horng, W. S. Chen, and C. H. Huang, "Dual wideband printed monopole antenna for WLAN/WiMAX applications", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 6, pp. 149–151, 2007.
- [6] T. N. Chang and J. H. Jiang, "Meandered T-shaped monopole antenna", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 12, pp. 3976–3978, Dec. 2009.
- [7] K. Wei, Z. Zhang, W. Chen, Z. Feng, and M. F. Iskander, "A triband shunt-fed omnidirectional planar dipole array", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 9, pp. 850–853, 2010.
- [8] L. Zhang, K. Y. Seeand, B. Zhang, and Y. P. Zhang, "Integration of dual-band monopole and microstrip grid array for single-chip tri-band application", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 1, pp. 439–443, Dec. 2013.
- [9] X. -L. Liang, S. -S. Zhong, and L. -N. Zhang, "Printed S-shaped monopole antenna for tri-band WLAN application", *7th International Symposium Antennas, Propagat. & EM Theory (ISAPE)*, 2006.
- [10] W. -C. Liu, C. -M. Wu, and Y. Dai, "Design of triple-frequency microstrip-fed monopole antenna using defected ground structure", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 7, pp. 2457–2463, Jul. 2011.

- [11] Y. Zheng, P. Wang, M. Hua and P. Gao, "Compact triple-band monopole antenna for WLAN/WiMAX applications", *IEICE ELEX.*, vol. 10, no. 22, pp. 1–5, Nov 2013.
- [12] J. Anguera, E. -M. OrtigosaL, and C. Puente, "Broadband triple-frequency microstrip patch radiator combining a dual-band modified sierpinski fractal and a monoband antenna", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 11, pp. 3367–3373, Nov. 2006.
- [13] L. Peng, C. -L. Ruan, and X. -H. Wu, "Design and operation of dual/triple-band asymmetric m-shaped microstrip patch antennas", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 9, pp. 1069–1072, 2010.
- [14] D. Qi, B. Li, and H. Liu, "Compact triple-band planar inverted-F antenna for mobile handsets," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 41, pp. 483–486, 2004.
- [15] O. Quevedo-Teruel, E. Pucci, and E. Rajo-Iglesias, "Compact loaded PIFA for multifrequency applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 3, pp. 656–664, Mar. 2010.

ภาคผนวก



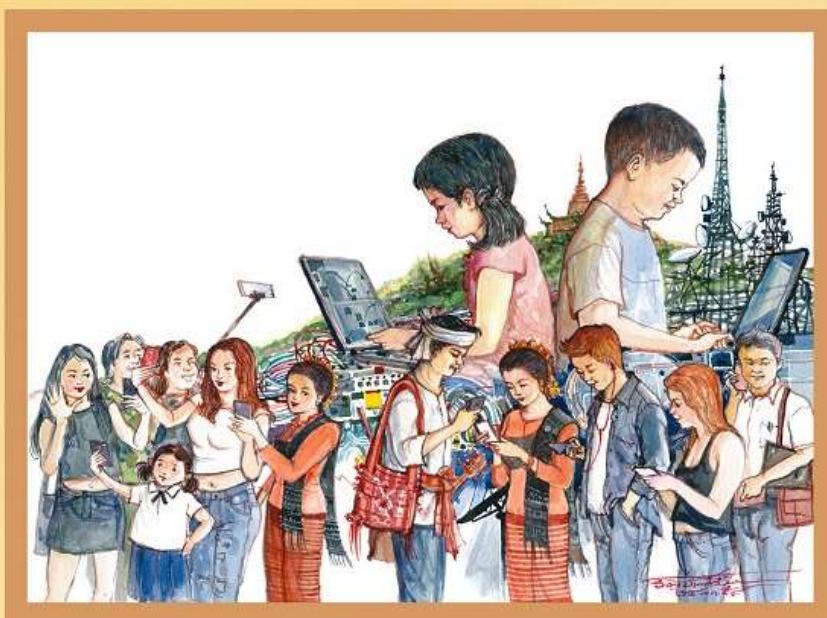
Final Program

ECTI-CON 2016

ChiangMai Thailand, June 28 - 1 July , 2016

13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics
Computer, Telecommunications and Information Technology

ECTI-CON 2016 ChiangMai, Thailand



Illustrated by Assoc.Prof. Wichit Chomtaveewiroot

Rajamangala University of Technology Lanna
ChiangMai, Thailand

ECTI-CON 2016, Chiang Mai, Thailand

Organized by



Organizing Committee

Advisory Committee

Monai Krairiksh (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand)

Prabhas Chongsatitwattana (Chulalongkorn University, Thailand)

Nipon Theeraumpon (Chiang Mai University, Thailand)

Steering Committee

Tomoaki Sato (Hirosaki University, Japan)

Yoshihiro Matsui (Tokyo National College of Technology, Japan)

Kou Yamada (Gunma University, Japan)

Prayoot Akkaraekthalin (King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand)

Naruemon Wattanapongsakorn (King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand)

Tuptim Angkaew (Chulalongkorn University, Thailand)

Kosin Chamnongthai (King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand)

Supattana Nirukkanaporn (Rungsit University, Thailand)

David Banjerdpongchai (Chulalongkorn University, Thailand)

Chutima Prommak (Suranaree University of Technology, Thailand)

June 28* - July 1*, 2016 – RMUTL, Chiang Mai, Thailand

ECTI-CON 2016, Chiang Mai, Thailand

Honorary Chairs

Nunyoot Songthanapitak (Rajamangala University of Technology Lanna, Thailand)

Kiyoshi Yoshikawa (Rajamangala University of Technology Lanna, Thailand)

Ryuichi Nakata (Toshiba Corporation, Japan)

General Chair

Prayoot Akkaraekthalin (King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand)

General Co-Chairs

Udom Sutakom (Rajamangala University of Technology Lanna, Thailand)

Kitchar Chaitanu (Rajamangala University of Technology Lanna, Thailand)

Sanit Pipithasombut (Rajamangala University of Technology Lanna, Thailand)

Passawat Wacharadumrongsak (Rajamangala University of Technology Lanna, Thailand)

Vice General Chairs

Uthen Kammarn (Rajamangala University of Technology Lanna, Thailand)

Krisda Yingkayun (Rajamangala University of Technology Lanna, Thailand)

Kosol Oranpiroj (Rajamangala University of Technology Lanna, Thailand)

Technical Program Chair

Chuwong Phongcharoenpanich (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand)

Compact Split Circular Ring Shape Dual-Band Antenna with Open Ring and Additional Strip

Yuktith Chawanonphithak
Department of Electronics Engineering, Faculty of
Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Isan,
NakhonRatchasima 30000, Thailand
e-mail: yuktith.ch@rmu.ac.th

Chuwong Phongcharoenpanich
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, THAILAND
e-mail: kpchuwong@kmitl.ac.th

Abstract—A dual-band antenna designed at the wireless local area network (WLAN) and worldwide interoperability for microwave access (WiMAX) bands is presented compact split circular ring shape dual-band antenna with open ring and addition strip. Its size is compact by the recondition circular ring shaped resonator connected. The antenna is fabricated onto a printed circuit board (PCB) on FR-4 substrate and the relative permittivity of 4.4, an overall size of 23 mm × 30 mm × 0.8 mm. This antenna can easily adjusted with open ring and strip to match impedance using a 50 ohm transmission line with SMA connector. The measured results show that the compacted antenna achieves a dual-band operating bandwidth from 2.38 GHz to 2.56 GHz and 4.66 GHz to 7.29 GHz for $|S_{11}|$ below -10 dB and the antenna yields omnidirectional patterns. The measured gains of the antenna from 2.45 and 5.5 GHz frequencies are 1.55 dBi and 3.2 dBi, respectively.

Keywords—Compact antenna; dual-band antenna; split circular ring; omnidirectional; worldwide interoperability for microwave access (WiMAX); wireless local area network (WLAN)

I. INTRODUCTION

The considerable enlargement for antennas appropriate to operate with dual-band, triple-band or multi-bands feature and the requirement of compact size for single terminal antenna in other handheld devices, such as tablet, smart phones, laptops and other similar device. These devices are under the same standard of frequencies bands, especially for the Wireless Local Area Network (WLAN: 2.4–2.484 GHz, 5.15–5.35 GHz, and 5.725–5.825 GHz) and the Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX: 2.5–2.69 GHz, 3.3–3.69 GHz, and 5.25–5.85 GHz). Printed antennas have been essential interest over the last several years because of their compact size, low profile, light weight, and low cost. A lot of such printed antennas have been reported [1–6]. The research discusses the issues above achieve wideband, dual-band or multi-bands operation. However, they usually have complicated structures or narrow bandwidth, and these operation bands cannot be adjusted easily either. The reasonable design has many challenges involve with size reduction and the antenna can have the desired properties.

In this paper, an uncomplicated shape of compact split circular ring shape dual-band antenna with open ring and

addition strip is proposed for dual-band property. The fabricated prototype antenna with a $|S_{11}|$ bandwidth covering from 2.4 to 2.484 GHz, 5.15 to 5.325 GHz and 5.725 to 5.825 GHz bands for WLAN and 5.25 to 5.85 GHz for WiMAX. The parametric study was proceeded to provide better understanding of the relationship between the antenna dimensions and the $|S_{11}|$ bandwidth.

The organization of this research paper is as follows: Section I presents the introduction of dual-band and multi-band antenna. The antenna design process and the geometry description are in Section II. The measurements on an antenna prototype are compared to the simulations in Section III. Finally, section IV concludes the paper.

II. ANTENNA STRUCTURE

The geometrical configuration of the proposed compact split circular ring shape dual-band antenna with open ring and addition strip is illustrated in Fig. 1.

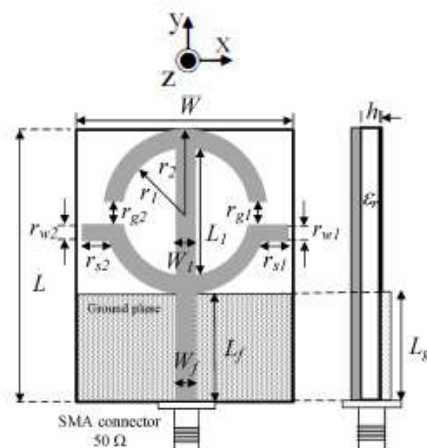


Fig. 1. Geometry of the proposed antenna.

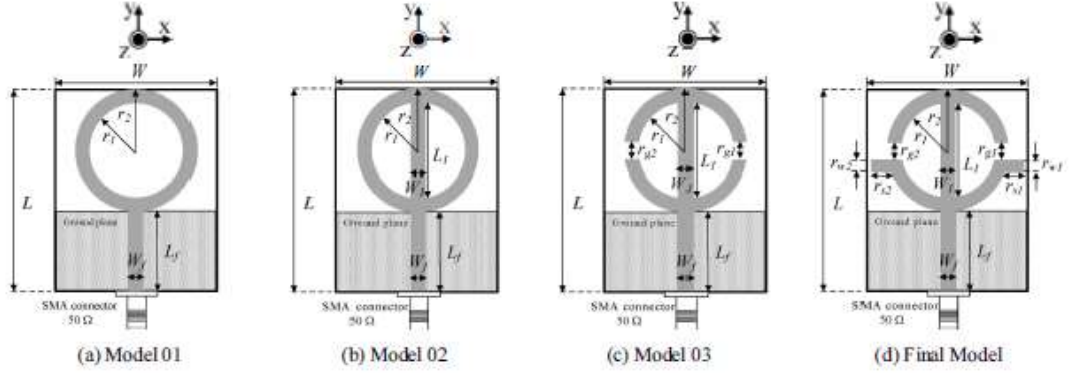


Fig. 2. Step model designs of the proposed antenna.

This antenna consists of circular ring shape of inner radius (r_1) = 6.5 mm and outer radius (r_2) = 8 mm. The width and length of split circular ring ($W_1 \times L_1$) of 1.5 mm $\times$ 16 mm. The width of gap ring ($r_{g1} = r_{g2}$) = 3 mm. The identical strips of the lengths ($r_{s1} = r_{s2}$) and the width ($r_{w1} = r_{w2}$) are fixed at 3 mm and 1.5 mm, respectively. A ground plane with dimensions ($W \times L_g$) of 23 mm $\times$ 14 mm. The antenna designed on epoxy FR-4 substrate with a thickness (h) of 0.8 mm and relative permittivity (ϵ_r) of 4.4. The strip feed line has width and lengths ($W_f \times L_f$) of 1.5 mm $\times$ 14 mm, which compatible to a 50 Ω impedance property to be connected to a 50 Ω SMA connector across the ground plane.

III. SIMULATED AND MEASURED RESULTS

The development of the model design of the proposed antenna is presented in Fig. 2. In this section, it will be described about the step impedance matching would affect the $|S_{11}|$.

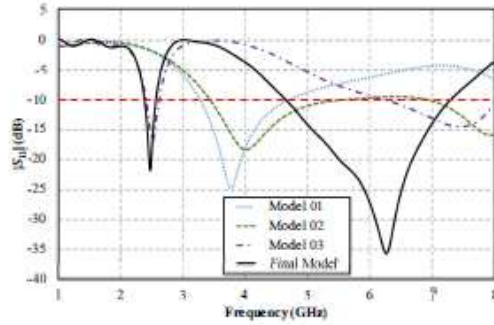


Fig. 3. Comparison of the simulated $|S_{11}|$ of development antennas.

A. Model01 (Initial circular ring shape antenna)

Let us consider Fig. 2 (a). The initial design begins with a circular ring shape with centre-fed monopole antenna. For designing the start resonance frequency cavity model of the circular ring analysis is used [7]. The circular ring shape antenna is designed for TM_{11} mode at the resonance frequency of 4.12 GHz is interpolated from the 2.4 GHz and 5.85 GHz bands. Therefore, the obtained that is initiated for the inner radius (r_1) is 6.5 mm and outer radius (r_2) is 8 mm with the strip line feed W_f and L_f are 1.5 mm and 14 mm, respectively. The simulated results is shown in Fig. 3. The Model01 antenna receives one resonant frequency with $|S_{11}| < -10$ dB, where the frequency band cover is from 3.28 GHz to 4.69 GHz. Obviously, the simulated results close to theoretical calculations.

B. Model 02 (Split circular ring shape antenna)

Fig. 2 (b) illustrates the split circular ring shape antenna (additional vertical rectangular shape at the center of circular ring). The values of the width W_1 of 1.5 mm and length L_1 of 16 mm. From Fig 3, the Model 02 antenna provides two resonant frequencies with $|S_{11}| < -10$ dB, where the first edge resonant frequency of 3.43 GHz and the second edge resonant frequency of 6.95 GHz, respectively. To improve the antenna matching impedance at the two resonant frequencies it is intended to achieve the dual-band antenna.

C. Model03 (Split circular ring shape antenna with open ring)

The split circular ring shape antenna with open ring is shown in Fig. 2 (c). The two resonant frequencies of the first edge resonant frequency and second edge resonant frequency change. However, the first edge resonant frequency is shifted to lower frequency as the width of gap ring r_{g1} and r_{g2} increase, thereby improving the impedance bandwidth. As seen in Fig. 3, the Model03 antenna provides first edge resonant frequency of 2.41 GHz and the second edge resonant frequency of 6.25 GHz.

with $|S_{11}| < -10$ dB, respectively. The first edge resonant frequency close to the lower frequency of WLAN bands.

D. Final model (Split circular ring shape antenna with open ring and addition strip)

As seen in Fig. 2 (d), the final model design antenna. It is simulated $|S_{11}|$ as also illustrated in Fig. 3. It is observed that the length of strip r_{s1} and r_{s2} control the first edge resonant frequency shifted to lower frequency and the second edge resonant frequency which both shifted to lower frequency and improves enhancements bandwidth as the length increases. The final model simulated results of impedance bandwidth with $|S_{11}| < -10$ dB. The lower band frequency ranges is from 2.38 GHz to 2.56 GHz and the higher band frequency ranges is from 4.66 GHz to 7.29 GHz, thereby covering the lower band and higher band frequencies of WLAN bands in (2.4–2.484 GHz), (5.15–5.35 GHz) and (5.725–5.825 GHz) and the higher band frequency of WiMAX bands in (5.25–5.85 GHz), respectively. The antenna achieve the dual-band antenna.

Table I specified the parameters of the proposed antenna. Fig. 4 presents the image of a prototype antenna on FR-4 substrate with the SMA connector.

TABLE I. PARAMETERS OF THE PROPOSED ANTENNA.

Parameter	Description	Value (mm)
W	The width of antenna	23
L	The length of antenna	30
W_1	The width of split circular ring	1.5
L_1	The length of split circular ring	16
r_1	The inner radius circular ring	6.5
r_2	The outer radius circular ring	8
$r_{g1} - r_{g2}$	The width of gap ring	3
$r_{s1} - r_{s2}$	The length of strip	3
$r_{w1} - r_{w2}$	The width of strip	1.5
W_f	The width of strip feed line	1.5
L_f	The length of strip feed line	14
L_g	The length of ground plane	14
h	The thickness of substrate	0.8

To demonstrate the performance of the proposed antenna. The antenna measured result shows that the proposed antenna requirements the impedance bandwidth $|S_{11}| < -10$ dB. From the result in Fig. 5, it can be seen that the measured $|S_{11}|$ compared with the simulated results. The impedance bandwidth of the lower bands frequency and higher bands frequency have the simulated impedance bandwidths of the proposed antenna are 180 MHz (2.38 GHz to 2.56 GHz, 7.28%) and 2630 MHz (4.66 GHz to 7.29 GHz, 44.01%) corresponding to the measured impedance bandwidths which

are 140 MHz (2.38 GHz to 2.52 GHz, 5.71%) and 2430 MHz (4.43 GHz to 7.22 GHz, 40.46%), respectively.

The simulated and measured average gains the two resonance frequencies is shown in Fig. 6, the obtained simulated and measured average gains for the lower bands frequency and higher bands frequency are 1.55 dBi and 3.2 dBi at the frequency of 2.45 GHz and the frequency of 5.5 GHz, respectively.

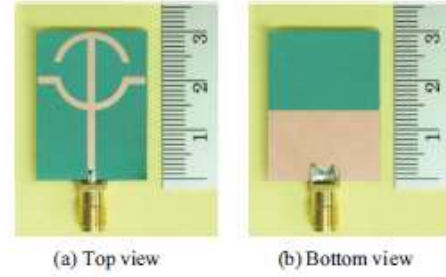


Fig. 4. Image of the prototype antenna.

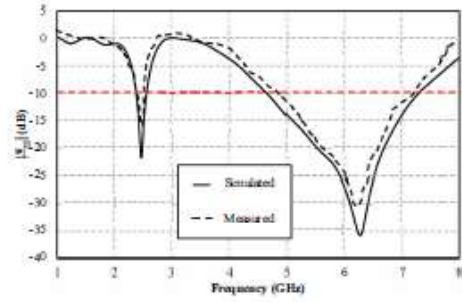


Fig. 5. Comparison of the simulated and the measured $|S_{11}|$.

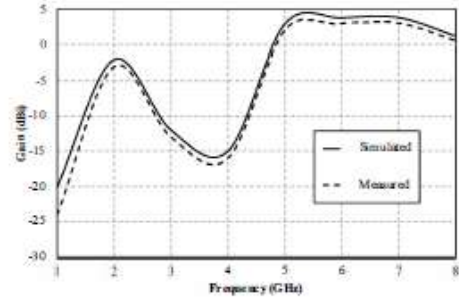


Fig. 6. Comparison of the simulated and measured antenna gain.

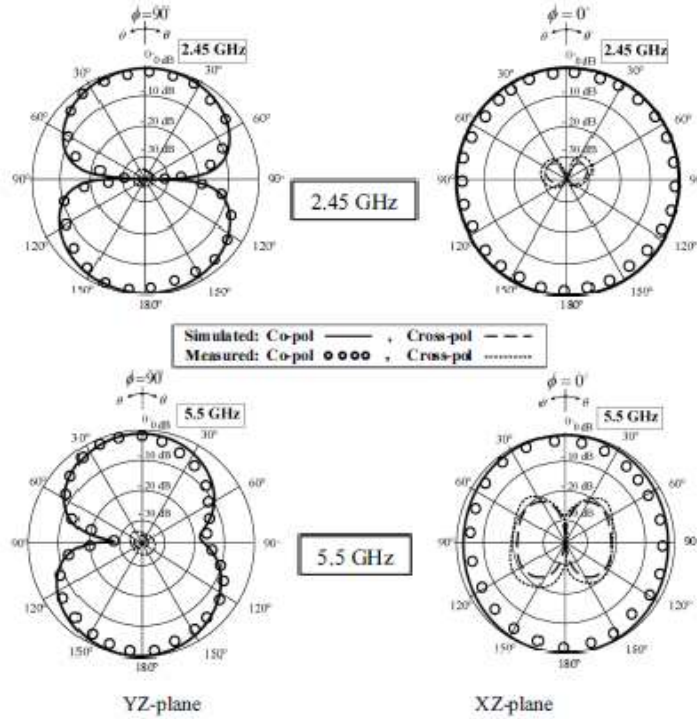


Fig. 7. Measured and simulated radiation pattern of the antenna in the YZ-plane and XZ-plane.

As for the radiation pattern from Fig. 7. The measured and simulated far-field yz-plane and xz-plane including co-polarization and cross-polarization components at the resonance frequency 2.45 GHz and 5.5 GHz. The antenna exhibits omnidirectional radiation patterns in xz-plane (co-polarization). At 2.45 GHz and 5.5 GHz, the xz-plane (cross-polarization) is around -30 dB and -20 dB and the yz-plane (cross-polarization) is around less than -30 dB, respectively. It can be observed that the simulated result agrees very well with the measured result.

IV. CONCLUSION

This paper proposes a compact split circular ring shape dual-band antenna with open ring and addition strip. To simple and compact physical size of the proposed dual-band antenna and increase the enhance bandwidth. The antenna have good impedance matching, omnidirectional radiation pattern, and appropriate gain in the WLAN bands and WiMAX bands applications.

ACKNOWLEDGMENT

This work is supported by the Thailand Research Fund (TRF) through the Research Grant for New Scholar (MRG5980232).

REFERENCES

- [1] W.-C. Liu and J.-K. Chen, "Dual-band twin stepped-patch monopole antenna for WLAN application," *Electron. Lett.*, vol. 45, no. 18, Aug. 2009.
- [2] H.-W. Liu, C.-H. Ku, and C.-F. Yang, "Novel CPW-Fed planar monopole antenna for WiMAX/WLAN applications," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 9, pp. 240-243, Mar. 2010.
- [3] C.-Y. Huang and E.-Z. Yu, "A slot-monopole antenna for dual-band WLAN applications," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 10, pp. 500-502, May. 2011.
- [4] K. Yang, H. Wang, Z. Lei, Y. Xie, and H. Lai, "CPW-fed slot antenna with triangular SRR terminated feedline for WLAN/WiMAX applications," *Electron. Lett.*, vol. 47, no. 12, Jun. 2011.
- [5] X. L. Sun, L. Liu, S. W. Cheung, and T. I. Yuk, "Dual-band antenna with compact radiator for 2.4/5.2/5.8 GHz WLAN applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 12, pp. 5924-5931, Dec. 2012.
- [6] J. Malikand, A. Patnaik, and M. V. Kartikeyan, "A compact dual-band antenna with omnidirectional radiation pattern," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 14, pp. 503-506, 2015.
- [7] I. J. Bahl and P. Bhartia, "Microstrip Antenna," Artech House, 1980.