

สายอากาศแถบความถี่กว้างแบบแผ่นแขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้า
สำหรับคอมพิวเตอร์แบบพกพา

WIDEBAND DUAL-ARM CAPACITIVELY COUPLED PATCH ANTENNA
FOR TABLET APPLICATIONS



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ KMITL-2023-EN-D-018-100 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WIDEBAND DUAL-ARM CAPACITIVELY COUPLED PATCH ANTENNA
FOR TABLET APPLICATIONS



A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023

KMITL-2023-EN-D-018-100
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศแถบความถี่กว้างแบนแผ่นแขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่ง ความจุไฟฟ้าสำหรับคอมพิวเตอร์แบบพกพา
นักศึกษา	นายสรณ นิชมานนท์
รหัสประจำตัว	61601040
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอสายอากาศช่วงความถี่กว้างแบนแผ่นแขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 และระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) ทำงานในช่วงความถี่ 1.7 GHz ถึง 2.5 GHz โดยโครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนแผ่นรูปตัวทีสำหรับการป้อนสัญญาณวางตัวอยู่ระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นสองแผ่นและส่วนแผ่นกราวนด์ มีขนาดโดยรวม 70 mm × 9 mm × 0.8 mm เป็นสายอากาศที่มีขนาดกะทัดรัดเหมาะสำหรับการนำติดตั้งใช้งานภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์สื่อสารประเภทคอมพิวเตอร์แบบพกพา จากผลการจำลองและผลการทดสอบพบว่ามีความสอดคล้องกันโดยสายอากาศที่นำเสนอมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เข้าใกล้ 50 Ω มีค่า $|S_{11}|$ น้อยกว่า -10 dB ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน มีโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางด้วยอัตราขยายในช่วง 1.47 dBi ถึง 4.33 dBi ตลอดย่านความถี่ใช้งาน นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาโครงสร้างของสายอากาศในรูปแบบของการกระจายกระแสเชิงพื้นผิวและผลกระทบบของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Wideband Dual-arm Capacitively Coupled Patch Antenna for Tablet Applications
Student	Mr. Sorana Niyamanon
Student ID.	61601040
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Prof. Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

ABSTRACT

This research presents a dual-arm wide frequency antenna with capacitance coupling technique for 4th generation wireless communication systems and wireless local area networks (WLAN). Operating in the frequency range of 1.7 GHz to 2.5 GHz, the antenna structure consists of two main parts: an input T-plate positioned between two diffusion plates and a ground plate, with overall dimensions of 70 mm × 9. mm × 0.8 mm is a compact antenna suitable for deployment within portable computer electronics and communications equipment. The simulation and test results are consistent, with the antennas being presented with an input impedance approaching 50 Ω and $|S_{11}| < -10$ dB over the entire operating frequency range. It is linearly polarized and has a directional propagation waveform with a gain between 1.47 dBi and 4.33 dBi across the entire operating band. In addition, the antenna structure in terms of surface current distribution and the effect of its parameters were studied and varied to determine the appropriate parameters for the prototype antenna.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือทั้งคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ โดยเฉพาะแนวทางในการศึกษาและการทำวิจัย ซึ่งเป็นแรงกระตุ้นให้ข้าพเจ้ามีความพยายามยิ่งขึ้นไปอยู่เสมอ ตลอดจนการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงาน ตั้งแต่เริ่มต้นจนเสร็จสมบูรณ์ ข้าพเจ้าจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ พิสิษฐ์ จันแปงเงิน ที่คอยติดต่อประสานงาน ตรวจสอบเอกสาร ตรวจสอบแก้ไข เล่มวิทยานิพนธ์ และให้คำปรึกษาในเรื่องเกี่ยวกับแผนการเรียนให้เป็นที่เรียบร้อยโดยไร้อุปสรรคใดๆ

สุดท้าย ขอขอบคุณกำลังใจจากครอบครัวของข้าพเจ้าที่คอยห่วงใย คอยสนับสนุน และรอคอยความสำเร็จของข้าพเจ้าอยู่เสมอมา แรงผลักดันทั้งหมดนี้สำคัญต่อข้าพเจ้าอย่างยิ่งและจะเป็นตลอดไป

สรณ นิยมานนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ลักษณะพื้นฐานของสายอากาศแบบแพทช์.....	4
2.3 เทคนิคการออกแบบสำหรับสายอากาศขนาดกะทัดรัด.....	8
2.4 เทคนิคการออกแบบสำหรับสายอากาศช่วงความถี่กว้าง.....	14
2.5 สายอากาศสำหรับอุปกรณ์การสื่อสารแบบพกพา.....	21
2.6 งานวิจัยเกี่ยวข้องที่มีมาก่อน.....	25
บทที่ 3 การจำลองผลของสายอากาศ.....	28
3.1 บทนำ.....	28
3.2 สายอากาศแบบแพทช์แบนเดี่ยวด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้า.....	28
3.3 สายอากาศแบบแพทช์แบนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่ง.....	29
3.4 สายอากาศแบบแพทช์แบนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอก....	32
3.5 สายอากาศแบบแพทช์แบนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่..	34
3.6 ศึกษาการปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบบแพทช์แบนคู่ด้วย เทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอก.....	36
3.7 ผลการจำลองของสายอากาศแบบแพทช์แบนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุ ไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่.....	43
3.8 สรุป.....	47
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	48
4.1 บทนำ.....	48
4.2 สายอากาศแบบแพทช์แบนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ ต้นแบบ.....	48
4.3 ขั้นตอนการทดสอบสายอากาศ.....	49
4.4 ผลการจำลองและทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแบบแพทช์แบนคู่ด้วย เทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบ.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 สรุป.....	54
บทที่ 5 ผลการจำลองและผลการทดสอบสายอากาศร่วมกับคอมพิวเตอร์แบบพกพา	55
5.1 การติดตั้งและศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากองค์ประกอบของคอมพิวเตอร์แบบพกพาที่อยู่ใกล้เคียงกับสายอากาศ.....	55
5.2 การติดตั้งสายอากาศลงบนโครงสร้างคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต.....	59
5.3 ผลการทดสอบสายอากาศ.....	60
5.4 สรุป.....	64
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	66
6.1 สรุปผลและเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	66
6.2 วิจารณ์ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางในการพัฒนา.....	66
เอกสารอ้างอิง.....	67
ประวัติผู้เขียน.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะของสายอากาศต้นแบบกับงานวิจัยที่มีมาก่อน.....	27
3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่.....	44



สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์.....	4
2.2 การป้อนสัญญาณให้กับโครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์.....	5
2.3 โครงสร้างของแผ่นแพทช์รูปทรงสี่เหลี่ยม วงกลม และสามเหลี่ยมด้วยการลัดวงจร...	9
2.4 รูปทรงเรขาคณิตของสายอากาศแบบแพทช์รูปวงกลมที่ลัดวงจรและคดเคี้ยว.....	10
2.5 โครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์ที่ใช้ระนาบกราวด์แบบคดเคี้ยว.....	11
2.6 โครงสร้างของสายอากาศรูปตัวแอลหัวกลับป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณแบบ ไมโครสตริป.....	12
2.7 โครงสร้างของสายอากาศขนาดกระทัดรัดรูปตัวยูกลับหัว.....	13
2.8 โครงสร้างของการป้อนสัญญาณให้สายอากาศแบบแพทช์ด้วยการคัปปลิงแบบ ตัวเก็บประจุ.....	14
2.9 สายอากาศแบบแพทช์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าป้อนสัญญาณด้วยโพรบ	18
2.10 โครงสร้างทางทฤษฎีของเครือข่ายอิมพีแดนซ์.....	19
2.11 โครงสร้างทางปฏิบัติของเครือข่ายอิมพีแดนซ์.....	19
2.12 รูปแบบการจัดวางแผ่นพาราซิติกแบบระนาบร่วม.....	20
2.13 รูปแบบการจัดวางแผ่นพาราซิติกบนระนาบซ้อน.....	21
2.14 รูปแบบของจอแสดงผลพื้นฐาน.....	24
2.15 แสดงลักษณะที่เป็นไปได้สำหรับสายอากาศของแฉับที่ออป.....	24
2.16 ตำแหน่งสายอากาศทั่วไปและประเภทสายอากาศสำหรับแฉับที่ออป.....	25
3.1 โครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์แขนเดี่ยวด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้า.....	29
3.2 $ S_{11} $ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนเดี่ยวด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้า เปลี่ยนแปลงค่าความยาวของแขน.....	29
3.3 โครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิง.....	30
3.4 $ S_{11} $ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงเมื่อ $L_1 = 36 \text{ mm}$ และ $L_2 = 50 \text{ mm}$	30
3.5 $ S_{11} $ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิง (ก) ปรับเปลี่ยนค่า L_1 และ (ข) ปรับเปลี่ยนค่า L_2	32
3.6 โครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้า แบบข้อศอก.....	33
3.7 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบ ข้อศอก (ก) ปรับค่าพารามิเตอร์ F_1 (ข) ปรับค่าพารามิเตอร์ F_2	34
3.8 โครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบ ข้อศอกคู่.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 การกระจายกระแสบนพื้นผิวของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่ง ความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ที่ความถี่ 1.7 GHz 2.1 GHz และ 2.45 GHz.....	36
3.10 $ S_{11} $ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอก คู่เมื่อปรับเปลี่ยนความยาว L	37
3.11 $ S_{11} $ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอก คู่เมื่อปรับเปลี่ยนความยาว L_1	38
3.12 $ S_{11} $ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอก คู่เมื่อปรับเปลี่ยนความยาว L_2	38
3.13 $ S_{11} $ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอก คู่เมื่อปรับเปลี่ยนความกว้าง W_3	39
3.14 $ S_{11} $ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอก คู่เมื่อปรับเปลี่ยนความกว้าง W_1	40
3.15 $ S_{11} $ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอก คู่เมื่อปรับเปลี่ยนความกว้าง W_2	40
3.16 $ S_{11} $ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอก คู่เมื่อปรับเปลี่ยนความกว้างของช่องว่าง G_1	41
3.17 $ S_{11} $ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอก คู่เมื่อปรับเปลี่ยนความกว้างของช่องว่าง G_2	42
3.18 $ S_{11} $ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอก คู่เมื่อปรับเปลี่ยนความกว้างของช่องว่าง G_3	42
3.19 $ S_{11} $ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอก คู่เมื่อปรับเปลี่ยนความกว้างของแผ่นการป้อนสัญญาณ F	43
3.20 $ S_{11} $ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้า แบบข้อศอกคู่.....	45
3.21 อัตราขยาย ๓ ความถี่ต่างๆ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่ง ความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบ.....	45
3.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่ง ความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่เมื่อปรับเปลี่ยนความกว้างของแผ่นการป้อนสัญญาณ F	47
4.1 ภาพถ่ายของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบ ข้อศอกคู่ต้นแบบ.....	48
4.2 การติดตั้งสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ ต้นแบบในห้องไร้การสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ผลการทดสอบ $ S_{11} $ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบ.....	51
4.4 อัตราขยาย ณ ความถี่ต่างๆ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบ.....	52
4.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบ.....	53
5.1 แบบจำลองที่นำไปใช้ในการคำนวณผลตอบแทนของสายอากาศเมื่อถูกจัดวางภายในโครงสร้างคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต.....	55
5.2 กราฟแสดงค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศเมื่อถูกนำไปวางเหนือแผ่นไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.5.....	56
5.3 กราฟแสดงค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศเมื่อถูกนำไปวางเหนือแผ่นไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3.5.....	57
5.4 กราฟแสดงค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศเมื่อถูกนำไปวางใต้แผ่นไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.5.....	57
5.5 กราฟแสดงค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศเมื่อถูกนำไปวางใต้แผ่นไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3.5.....	58
5.6 กราฟแสดงค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศเมื่อถูกนำไปวางหลังแผ่นไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.5.....	58
5.7 กราฟแสดงค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศเมื่อถูกนำไปวางหลังแผ่นไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3.5.....	59
5.8 การจัดวางสายอากาศภายในโครงสร้างคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต.....	60
5.9 ตำแหน่งการจัดวางสายอากาศภายในคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต.....	61
5.10 กราฟแสดงค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศเมื่อถูกนำไปติดตั้งภายในโครงสร้างคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตตามแนวยาว.....	62
5.11 กราฟแสดงค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศเมื่อถูกนำไปติดตั้งภายในโครงสร้างคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตตามแนวกว้าง.....	62
5.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ถูกนำไปติดตั้งภายในคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตตามแนวยาว.....	63
5.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ถูกนำไปติดตั้งภายในคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตตามแนวกว้าง.....	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของผู้คนมากขึ้นและมีการนำไปประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้านทั้งที่มีจุดประสงค์เพื่อความสะดวกรวดเร็ว เพื่อความรวดเร็วและเพื่อความปลอดภัยในชีวิตประจำวันยกตัวอย่างเช่น ด้านการศึกษา ด้านการแพทย์ ด้านการอุตสาหกรรม ด้านการขนส่งมวลชน ด้านการขนส่งสินค้า ด้านการธนาคาร ภายในบ้านเรือนที่อยู่อาศัย และระบบอินเทอร์เน็ตสำหรับทุกสรรพสิ่ง (Internet of Thing : IoT) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการประยุกต์ใช้งานการสื่อสารแบบไร้สายแต่ละประเภททำงานในช่วงความถี่ที่แตกต่างกัน จึงเป็นผลทำให้อุปกรณ์สื่อสารไร้สายที่ทันสมัยจึงต้องสามารถดำเนินการกับคลื่นความถี่ได้หลากหลายช่วงความถี่อีกทั้งความต้องการของผู้ใช้งานอุปกรณ์การสื่อสารแบบไร้สายในปัจจุบันมีความต้องการอุปกรณ์การสื่อสารแบบไร้สายที่มีขนาดเล็กกระทัดรัดและสามารถพกพาได้สะดวกสบาย ด้วยเหตุผลเหล่านี้จึงทำให้การออกแบบสายอากาศซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการติดต่อสื่อสารสำหรับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายสมัยใหม่มีความจำเป็นต้องมีขนาดเล็กกระทัดรัดสามารถวางตัวอยู่ภายในอุปกรณ์การสื่อสารไร้สายได้โดยไม่มีผลกระทบใดๆ และต้องสามารถใช้งานในหลายช่วงความถี่ครอบคลุมทุกความถี่ที่มีการสื่อสารแบบไร้สาย [1]

จากเงื่อนไขในการออกแบบสายอากาศสำหรับอุปกรณ์การสื่อสารสมัยใหม่ที่ต้องการสายอากาศขนาดเล็กกระทัดรัดพร้อมทั้งสามารถใช้งานได้หลายช่วงความถี่นี้ทำให้มีการนำเสนอการออกแบบสายอากาศที่มีหลักการออกแบบ โครงสร้าง และเทคนิควิธีการลดขนาดของสายอากาศที่แตกต่างกันออกไปดังจะกล่าวต่อไปนี้ จากบทความทางวิชาการที่เกี่ยวกับการออกแบบสายอากาศขนาดเล็กสำหรับอุปกรณ์การสื่อสารไร้สายพบว่า สายอากาศที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในลักษณะดังกล่าวจะมีโครงสร้างเป็น สายอากาศแบบแผ่น (Patch Antenna) หรือ สายอากาศแบบเอฟหัวกลับ (Inverted-F Antenna : IFA) หรือ สายอากาศแบบแอลหัวกลับ (Inverted-L Antenna : ILA) หรือ สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna) เป็นต้น เริ่มจากการนำเสนอการออกแบบสายอากาศสำหรับโทรศัพท์มือถือที่มีรูปร่างเป็นแผ่นแบบ 3 มิติ ของช่องเปิดแบบบ่วงที่สามารถตอบสนองหลายช่วงความถี่และมีช่วงความถี่กว้างจากโครงสร้างดังกล่าวสามารถใช้ในการลดขนาดของสายอากาศได้โดยมีขนาดรวมทั้งหมดเท่ากับ $22 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 1.574 \text{ mm}$ และสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 1.64 – 4.24 GHz และ 4.55 – 6.2 GHz อีกทั้งสายอากาศที่นำเสนอนี้ยังสามารถที่จะนำไปออกแบบอยู่ภายในตัวเครื่องโทรศัพท์มือถือได้อีกด้วย [2] แต่อย่างไรก็ตามในการออกแบบสายอากาศสำหรับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายที่สามารถพกพาได้และมีขนาดเล็กนั้นมักจะมีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมรอบตัวสายอากาศไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และระนาบกราวด์ภายในอุปกรณ์การสื่อสารที่วางตัวอยู่ใกล้เคียง ลักษณะการจับและพกพาอุปกรณ์ ล้วนแล้วแต่สามารถสร้างผลกระทบให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศเปลี่ยนแปลงไปในเอกสารอ้างอิงที่ [3] จึงได้มีการนำเสนอแนวคิดการออกแบบสายอากาศจากโครงสร้างของอุปกรณ์การสื่อสารโดยมีโครงสร้างจากโครงโลหะของอุปกรณ์การสื่อสารแบบบ่วงครึ่ง (Half-Loop) และออกแบบวงจรแมตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้สามารถทำการป้อนสัญญาณไปยังสายอากาศได้พบว่า สายอากาศสามารถตอบสนองช่วงความถี่ได้ 2 ช่วงความถี่ คือ 746-960 MHz และ 1710-2690 MHz จากการออกแบบลักษณะนี้มีข้อดีคือจะทำให้สายอากาศมีความคงทนมากขึ้นและสามารถใช้งานได้กับระบบการสื่อสารไร้สายแบบในยุคที่ 4 (4G Long Term Evolution : LTE) จากนั้นยังได้มีการนำเสนอสายอากาศแบบบ่วงที่ป้อนสัญญาณด้วยวิธีการคัปปลิงแบบสายนำสัญญาณไมโครสตริปรูปตัวยูสำหรับสมาร์ตโฟนโดยไม่จำเป็นต้องทำลายโครงสร้างของตัวเครื่องแลสามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 824-960 MHz และ 1710-2690 MHz ด้วยขนาดรวมทั้งหมด $72 \times 8 \text{ mm}^2$ [4] ในส่วนเอกสารอ้างอิงที่ [5] ได้มีการนำเสนอสายอากาศแปดย่านความถี่สำหรับระบบเอลทีอี (LTE) และระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายสำหรับคอมพิวเตอร์แบบพกพาโดยมีโครงสร้างโมโนโพลแบบแผ่นวางอยู่ร่วมกับโครงสร้างที่เป็นโลหะมีขนาดโดยรวมเท่ากับ $60 \times 7 \text{ mm}^2$ สามารถตอบสนองย่านความถี่ช่วง 698-960 MHz และ 1710-2690 MHz สุดท้ายในเอกสารอ้างอิงที่ [6] และ [7] ได้มีการนำเสนอการออกแบบสายอากาศสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบบ่วงและแบบช่องเปิดซึ่งสามารถรองรับและติดตั้งใช้งานร่วมกับโครงสร้างของโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ดีและสามารถตอบสนองช่วงความถี่ครอบคลุมการใช้งานจากที่กล่าวมานั้นจะเห็นได้ว่าโครงสร้างของสายอากาศสำหรับอุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สายที่สามารถพกพาได้ไม่ว่าจะเป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่และคอมพิวเตอร์แบบพกพาจะมีลักษณะโครงสร้างที่มีขนาดเล็กกระทัดรัด ในการออกแบบโครงสร้างมักจะใช้โครงสร้างแบบบ่วง แบบแผ่น แบบไมโครสตริปแบบช่องเปิด แบบขดงอ แบบเอฟและแอลหัวกลับ ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้ล้วนแล้วแต่สามารถที่จะใช้ในการลดขนาดของสายอากาศลงเพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์การสื่อสารได้

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีความสนใจและมุ่งเน้นการออกแบบสายอากาศสำหรับคอมพิวเตอร์แบบพกพาที่สามารถใช้งานสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 และระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยโครงสร้างของสายอากาศจะมีลักษณะแบบแผ่นแขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าและรองรับช่วงความถี่กว้าง

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาและออกแบบสายอากาศแถบความถี่กว้างแบบแผ่นแขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าสำหรับคอมพิวเตอร์แบบพกพา
2. ศึกษาโครงสร้างของสายอากาศแถบความถี่กว้างแบบแผ่นแขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้า
3. ศึกษาการประยุกต์ใช้งานสายอากาศแถบความถี่กว้างแบบแผ่นแขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้ากับอุปกรณ์การสื่อสารแบบไร้สายที่สามารถพกพาได้

1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาเกี่ยวกับเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายและการออกแบบสายอากาศสำหรับอุปกรณ์การสื่อสารแบบไร้สายที่สามารถพกพาได้รวมไปถึงวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ส่วนรายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของสายอากาศสำหรับอุปกรณ์การสื่อสารแบบไร้สายที่สามารถพกพาได้ไม่ว่าจะเป็น โทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือ คอมพิวเตอร์พกพาแบบต่างๆ นั้นจะกล่าวในบทที่ 2 ซึ่งจะกล่าวรวมถึงถึงลักษณะการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศแบบต่างๆ ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีของสายอากาศแบบแผ่นและเทคนิคการลดขนาดและขยายย่านความถี่ของสายอากาศ รวมไปถึงงานวิจัยที่เคยมีมาก่อนเกี่ยวกับสายอากาศที่ออกแบบสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์สื่อสารแบบพกพา

บทที่ 3 กล่าวถึงและอธิบายถึงการออกแบบสายอากาศแถบความถี่กว้างแบบแผ่นแขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าซึ่งจะถูกนำไปพิจารณาร่วมกับโครงสร้างของคอมพิวเตอร์แบบพกพา ทั้งนี้จะมีการวิเคราะห์ในรูปแบบของผลการจำลองสายอากาศในกรณีต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างและทดสอบต่อไป

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบของเสาอากาศต้นแบบที่ได้ออกแบบสำหรับคอมพิวเตอร์แบบพกพาในบทที่ 3 รวมไปถึงการเปรียบเทียบสมรรถนะของสายอากาศต้นแบบกับงานวิจัยที่เคยมีมาก่อน

บทที่ 5 กล่าวถึงการนำสายอากาศต้นแบบมาทดลองติดตั้งในโครงสร้างของคอมพิวเตอร์แทปเล็ต รวมไปถึงผลการจำลองและทดสอบสมรรถนะของสายอากาศหลังจากที่ถูกติดตั้งเข้าไปในโครงสร้างของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายพกพาแล้ว

บทที่ 6 กล่าวถึงปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับงานวิจัยนี้และข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาต่อไป



บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

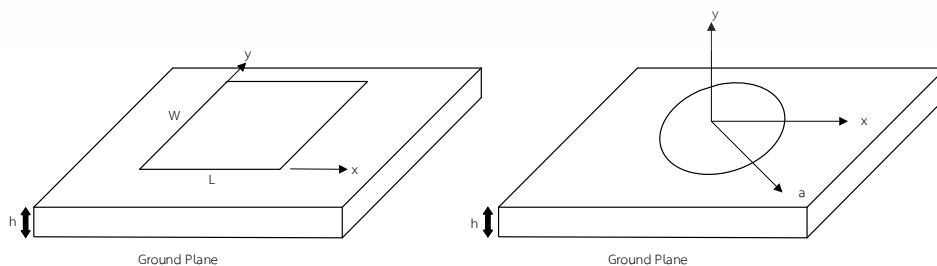
2.1 บทนำ

ในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของสายอากาศแบบแพทช์เริ่มตั้งแต่ลักษณะพื้นฐานของสายอากาศแบบแพทช์เกี่ยวกับโครงสร้าง การป้อนสัญญาณและการวิเคราะห์เบื้องต้น จากนั้นได้กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศแบบแพทช์ให้มีขนาดเล็กและกระจัดด้วยวิธีการต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นวิธีการเชื่อมต่อลงระนาบกราวด์ วิธีการเส้นคดเคี้ยว วิธีการเปลี่ยนรูปของระนาบกราวด์ และวิธีการป้อนสัญญาณด้วยการคัปปลิงแบบตัวเก็บประจุ รวมไปถึงวิธีการเพิ่มคุณสมบัติช่วงความถี่ของสายอากาศแบบแพทช์และหลักการออกแบบสายอากาศสำหรับอุปกรณ์การสื่อสารแบบพกพา

2.2 ลักษณะพื้นฐานของสายอากาศแบบแพทช์

จากต้นกำเนิดของสายอากาศแบบแพทช์นี้เริ่มมีขึ้นในปี พ.ศ. 2496 เมื่อ Deschamps เสนอให้ใช้สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปเพื่อป้อนสัญญาณให้กับอาร์เรย์ขององค์ประกอบสายอากาศแบบแผ่นพิมพ์และได้มีการนำเสนอครั้งแรกโดย Munson ในเอกสารการประชุมในปี ค.ศ. 1972 ตามด้วยบทความในวารสารในปี ค.ศ. 1974 เอกสารเหล่านี้ได้เริ่มมีการกล่าวถึงสายอากาศแบบแพทช์ และจากนั้นก็ได้มีการนำเสนอเรื่อยมาเกี่ยวกับการออกแบบและการวิเคราะห์ต่างๆ จนมาถึงปัจจุบัน

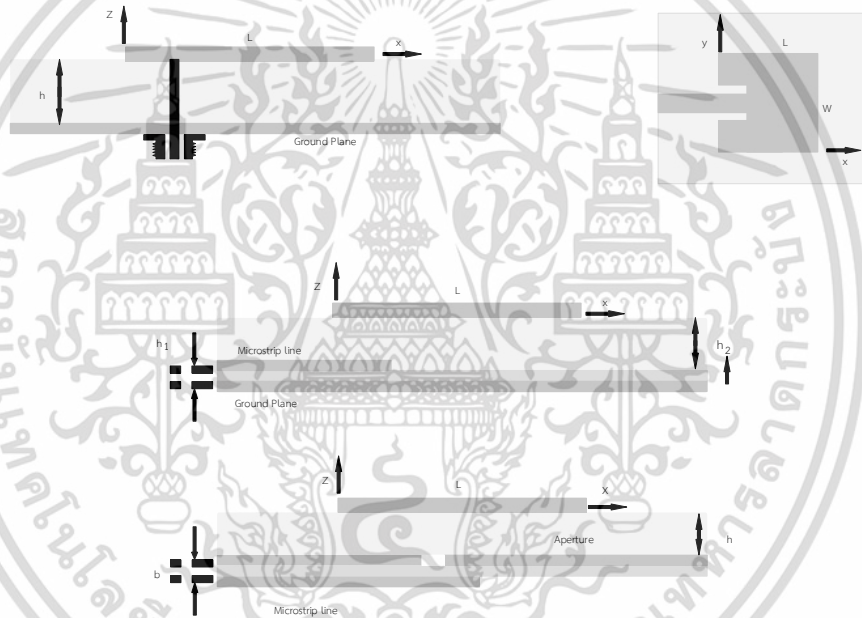
สายอากาศแบบแพทช์ (Patch Antenna) ในบางครั้งอาจถูกเรียกว่า สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna) มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในย่านความถี่ไมโครเวฟเนื่องจากมีโครงสร้างเรียบง่ายและสามารถเข้ากันได้กับเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board : PCB) ทำให้ง่ายต่อการผลิตและการออกแบบร่วมกับอุปกรณ์การสื่อสารแบบไร้สายโดยมักจะถูกซ่อนไว้ภายในโครงสร้างของอุปกรณ์ไม่ว่าจะเป็นสายอากาศแบบองค์ประกอบแบบแยกเดี่ยวหรือเป็นองค์ประกอบของอาร์เรย์ (Array) สายอากาศแบบแพทช์จะมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยแผ่นโลหะที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือวงกลม หรือรูปทรงอื่นๆ อยู่ด้านบนเป็นส่วนแพร่กระจายคลื่นและด้านล่างเป็นระนาบกราวด์ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [8]-[9]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถัดมาในการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแพทช์นั้นสามารถใช้วิธีการต่างๆ เพื่อป้อนสัญญาณเข้าไปยังโครงสร้างของสายอากาศได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยวิธีแรกคือการป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมมากในการป้อนสัญญาณสำหรับสายอากาศแบบแพทช์ที่เป็นสายอากาศแบบเดี่ยวโดยมักจะมีการป้อนสัญญาณด้วยการใช้ส่วนตัวนำด้านในของสายโคแอกเซียลแทงทะลุจากด้านล่างขึ้นมาเชื่อมต่อกับแผ่นแพร์กระจายคลื่น วิธีที่สองคือการป้อนสัญญาณแบบสายนำสัญญาณไมโครสตริปดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข) โดยสายนำสัญญาณนี้จะเชื่อมต่อโดยตรงที่ด้านบนของแผ่นแพร์กระจายคลื่น วิธีที่สามเป็นวิธีการคัปปลิงสัญญาณจากสายนำสัญญาณไมโครสตริปที่วางตัวอยู่ด้านล่างของแผ่นแพร์กระจายคลื่นดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ค) และวิธีที่สี่จะมีลักษณะที่คล้ายกับวิธีที่สามแต่การคัปปลิงนั้นจะมีช่องเปิดวางอยู่ตรงกลางระหว่างสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปและแผ่นแพร์กระจายคลื่นดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ง) [8]-[9]



รูปที่ 2.2 การป้อนสัญญาณให้กับโครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์

จากลักษณะโครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์จะเห็นได้ว่าสายอากาศลักษณะนี้มีข้อดีมากมายแต่อย่างไรก็ตามก็มีข้อเสียในการนำไปใช้งานอยู่บ้างโดยมีข้อได้เปรียบที่สำคัญคือ มีรูปร่างลักษณะรายละเอียดน้อยและมีพื้นผิวบาง สายอากาศแบบแพทช์นี้อาจจะสามารถถูกออกแบบปรับให้มีรูปร่างที่สอดคล้องกันกับวัตถุใดๆ ได้ ซึ่งหมายความว่าวัสดุฐานรองที่ใช้มันจะสามารถโค้งงอให้พอดีกับพื้นผิวโค้งใดๆ ได้ทำให้สายอากาศไม่เกะกะมาก เนื่องจากขนาดของสายอากาศแบบแพทช์ที่วางตัวอยู่บนแผ่นวัสดุฐานรองโดยทั่วไปจะมีขนาดการออกแบบที่ครึ่งความยาวคลื่นในพื้นที่ไดอิเล็กตริกจึงทำให้การใช้งานสายอากาศเหล่านี้ในย่านความถี่สูงยิ่งยวด (Ultra High Frequency : UHF) หรือสูงกว่าขึ้นไปจนถึงความถี่คลื่นมิลลิเมตร แต่ในส่วนของข้อเสียเปรียบหลักของสายอากาศแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพทช์นี้ได้แก่ การที่สายอากาศมีประสิทธิภาพการแผ่รังสีที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศอื่น และมีช่วงกว้างความถี่แคบ [8]-[9]

ค่าประสิทธิภาพการแผ่รังสี (Radiation Efficiency) ของสายอากาศแบบแพทช์จะขึ้นอยู่กับค่าสภาพยอมไฟฟ้า (ϵ) และความหนาของวัสดุฐานรอง โดยสายอากาศแพทช์ที่ใช้วัสดุฐานรองที่มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสูงและมีความหนามากๆ จะได้รับผลกระทบจากการกระตุ้นของคลื่นพื้นผิวที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ลดค่าประสิทธิภาพการแผ่รังสีลดลง โดยการใช้โฟมเป็นวัสดุฐานรองจะเป็นวิธีที่ง่ายในการลดการกระตุ้นของคลื่นพื้นผิวหรือการนำเอาวัสดุฐานรองออกจากช่องแพทช์ก็จะช่วยลดการกระตุ้นของคลื่นพื้นผิวได้ด้วยเช่นกัน ในทางกลับกันหากใช้วัสดุฐานรองที่บางเกินไปค่าประสิทธิภาพการแผ่รังสีก็จะมีค่าต่ำเนื่องจากการสูญเสียของตัวนำไฟฟ้าและไดอิเล็กตริก ยกตัวอย่างเช่นเมื่อใช้วัสดุฐานรองแบบเทฟลอน (Teflon) ทั่วไปมีค่า $\epsilon = 2.2$ ที่มีการสูญเสียพื้นผิวสัมผัส (Loss Tangent) เท่ากับ 0.001 และแผ่นทองแดงด้านบนและระนาบกราวด์มีค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับ 3.0×10^7 S/m ค่าประสิทธิภาพการแผ่รังสีสูงสุดสำหรับความหนา 0.02λ สามารถมีค่าถึงประมาณ 90% แต่เมื่อใช้โฟมเป็นวัสดุฐานรองค่าประสิทธิภาพการแผ่รังสีจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามความหนาของพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นซึ่งสามารถเข้าใกล้ 100% เป็นต้น [8]-[9]

ช่วงกว้างความถี่ (Bandwidth) ของสายอากาศแพทช์นี้จะเพิ่มขึ้นตามความหนาของวัสดุฐานรองและแปรผกผันกับค่าสภาพยอมไฟฟ้าของวัสดุฐานรอง ดังนั้นช่วงกว้างความถี่จึงมีค่ามากเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าน้อยเช่นการใช้โฟมหรืออากาศเป็นวัสดุฐานรองแต่ก็จะมีขนาดที่เพิ่มขึ้นและความหนาเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามมีเทคนิคพิเศษหลายอย่างที่ได้รับการพัฒนาเพื่อเพิ่มช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศแบบแพทช์ซึ่งรวมถึงการใช้วัสดุฐานรองที่หนาขึ้นพร้อมกับการป้อนสัญญาณเปิดช่องเปิดเพื่อหลีกเลี่ยงคาร์เร็กแดนซ์ที่เกิดขึ้นของการป้อนสัญญาณแบบโพรบหรือการใช้องค์ประกอบแบบคาปาซิทีฟเพื่อชดเชยค่าความเหนี่ยวนำของโพรบ การใช้การออกแบบเพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์คู่หรือหลายเรโซแนนซ์ซึ่งรวมถึงเรโซเนเตอร์หรือสายอากาศแบบเรียงซ้อนที่ล้อมรอบด้วยองค์ประกอบที่เป็นกาฝากและการใช้สายอากาศที่มีรูปทรงพิเศษเพื่อเพิ่มช่วงกว้างความถี่ เป็นต้น [8]-[9]

สายอากาศแบบแพทช์นี้จะมีทำงานที่ประกอบด้วยกระแสไฟฟ้าพื้นผิวในแนวนอน (Electric Surface Current) ซึ่งสัมพันธ์กับกระแสของแพทช์ที่อยู่บนผิวนทางวัสดุฐานรองเป็นระยะทางสั้นๆ เหนือระนาบกราวด์ จากพื้นฐานของทฤษฎีภาพ (Image Theory) สามารถคาดการณ์ว่ากระแสดังกล่าวจะแผ่รังสีออกมาได้ไม่ตึ๊ง แต่อย่างไรก็ตามแผ่นแพทช์และระนาบกราวด์ที่ประกบกันเป็นลักษณะของโพรง (Cavity) ที่เกิดการเรโซแนนซ์ตรงกลางระหว่างทั้งสองเป็นวัสดุฐานรองนั้นจะมีการสูญเสียเกิดขึ้นจากทั้งวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าและไดอิเล็กตริกและยังมีการสูญเสียเนื่องจากการแผ่รังสีไปสู่อากาศอีกด้วย ในกรณีที่ไม่พิจารณาการสูญเสียเนื่องจากวัสดุค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor : Q) ของสายอากาศแบบแพทช์นี้จะแปรผกผันกับความหนาของวัสดุฐานรองแต่ช่วงกว้างความถี่นั้นจะเป็นสัดส่วนกับความหนาของวัสดุฐานรองจึงจะทำให้ระดับของสนามภายในโพรงของแพทช์ที่เรโซแนนซ์จากแหล่งกำเนิดกระแสภายในโพรงเป็นสัดส่วนกับค่า Q ซึ่งหมายความว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่ากระแสบนพื้นผิวบนแพทช์เป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของวัสดุฐานรอง เมื่อแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้นของกระแสพื้นผิวที่เรโซแนนซ์จะทำให้ปรากฏการณ์ภาพ (Image Effect) เบาบางและสมดุลกันพอดีซึ่งทำให้ระดับการแผ่รังสีลดลงตามสัดส่วนของปัจจัยความหนาของวัสดุฐานรอง ดังนั้นรูปแบบของกระแสไฟฟ้าและกระแสสนามแม่เหล็ก จะถูกนำมาใช้ในการคาดการณ์การแผ่รังสีจากแผ่นแพทช์ที่เป็นอิสระจากความหนาของวัสดุฐานรองโดยประมาณเมื่อความหนาของวัสดุฐานรองลดลง ดังนั้นเมื่อไม่พิจารณาค่าการสูญเสียของวัสดุทำให้แผ่นแพทช์ยังคงเป็นแผ่นการแผ่รังสีที่ดีในทุกกรณีของความหนาของวัสดุฐานรองและเป็นไปได้ที่จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ดีแม้ว่าจะมีความหนาของวัสดุฐานรองที่บางมาก ซึ่งในกรณีที่ไม่มี การสูญเสียขีดจำกัดด้านล่างของความหนาของวัสดุฐานรอง จะถูกกำหนดโดยช่วงกว้างความถี่ที่ยอมรับได้เท่านั้น ในความเป็นจริงค่า Q ของสายอากาศแบบแพทช์นี้จะถูกจำกัดโดยค่าการสูญเสียของวัสดุ ดังนั้นสำหรับวัสดุฐานรองที่บางนั้นจะทำให้การหาค่าอิมพีแดนซ์ที่ดีค่อนข้างยาก ยกตัวอย่างเช่นสำหรับวัสดุฐานรองที่บางเพียง 0.005λ เมื่อทำให้เกิดการแผ่รังสีทางอิมพีแดนซ์จะทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพที่เหมาะสมประมาณ 65% สำหรับวัสดุฐานรองแบบเทปลอน ทั่วไปและใช้ตัวนำเป็นทองแดง [8]-[9]

โดยโหมดการทำงานสำหรับแพทช์รูปทรงสี่เหลี่ยมโหมด TM_{mn} จะมีนอร์มัลไลซ์สนามไฟฟ้า ดังแสดงในสมการที่ (2.1)

$$E_z^{mn}(x, y) = \cos\left(\frac{m\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{W}\right) \quad (2.1)$$

เมื่อ m และ n คือเลขลำดับของโหมดการทำงาน

L คือความยาวของแผ่นแพทช์

W คือความกว้างของแผ่นแพทช์

โดยโหมดการทำงานปกติสำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีลำคลื่นกว้างคือโหมด TM_{10} ซึ่งไม่มีการแปรผันตามแนวแกน y และมีความยาว L เท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในวัสดุไดอิเล็กตริกในโหมดนี้ แพทช์จะทำหน้าที่เป็นเส้นไมโครสตริปกว้างที่มีความกว้าง W และจะเกิดเรโซแนนซ์แบบสายนำสัญญาณที่มีความยาว L แต่อย่างไรก็ตามความกว้าง W มักจะมีค่ามากกว่าความยาว L เมื่อต้องการเพิ่มช่วงกว้างความถี่ในอัตราส่วน $W/L = 1.5$ [8]-[9] สำหรับแพทช์แบบวงกลมโหมด TM_{np} จะมีนอร์มัลไลซ์สนามไฟฟ้างแสดงในสมการที่ (2.2)

$$E_z(\rho, \phi) = \cos(n\phi) \frac{J_n(x'_{np}\rho)}{J_n(x'_{np}a)} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ x'_{np} คือรากที่ p^{th} ของฟังก์ชันเบสเซล (Bessel Function) $J'_n(x)$ โดยโหมดการทำงานปกติคือโหมด TM_{11} ที่มี $x'_{11} = 1.8418$ โหมดนี้มีความถี่เรโซแนนซ์ต่ำที่สุดและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีลำคลื่นกว้าง

2.3 เทคนิคการออกแบบสำหรับสายอากาศขนาดกะทัดรัด

จากวิวัฒนาการของอุปกรณ์การสื่อสารไร้สายที่มีขนาดเล็กลงทำให้สายอากาศแบบแพทช์ขนาดกะทัดรัดได้รับความนิยมอย่างมาก จากความต้องการสายอากาศขนาดเล็กที่เพิ่มขึ้นสำหรับอุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สายส่วนบุคคลเพื่อให้ได้สายอากาศแบบแพทช์ที่มีขนาดลดลงและยังคงความสามารถที่ความถี่การทำงานคงที่สามารถที่จะทำได้หลายวิธีการยกตัวอย่างเช่น การใช้วัสดุฐานรองที่มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสูง การโหลดแพทช์ด้วยการลัดวงจร การใช้โครงสร้างแพทช์แบบคดเคี้ยว การเชื่อมต่อลงระนาบกราวด์รูปตัวแอล รูปตัวยู และรูปตัวเอฟ และการป้อนสัญญาณด้วยการคัปปลิงแบบตัวเก็บประจุ เป็นต้น ลักษณะออกแบบเหล่านี้สามารถนำไปสู่การลดขนาดสายอากาศขนาดใหญ่ให้เล็กลงสำหรับความถี่ใช้งานที่คงที่ซึ่งจะกล่าวเป็นลำดับต่อไป [10]

2.3.1 การลัดวงจรแผ่นแพทช์ด้วยวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริกแบบบาง

จากรูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า วงกลม และสามเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรไปที่ระนาบกราวด์ สำหรับกรณีของแผ่นแพทช์รูปทรงสี่เหลี่ยมที่ไม่มีการลัดวงจรนั้นสายอากาศแบบแพทช์รูปทรงสี่เหลี่ยมจะทำงานที่ขนาดเท่ากับครึ่งความยาวคลื่น จากการประมาณค่าแบบโพรง (Cavity Model) ความถี่พื้นฐานหรือความถี่เรโซแนนซ์แรกของแผ่นแพทช์รูปทรงสี่เหลี่ยมในรูปที่ 2.3 โดยไม่มีพินลัดวงจรช้อตจะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.3) [10]

$$f_{10} = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.3)$$

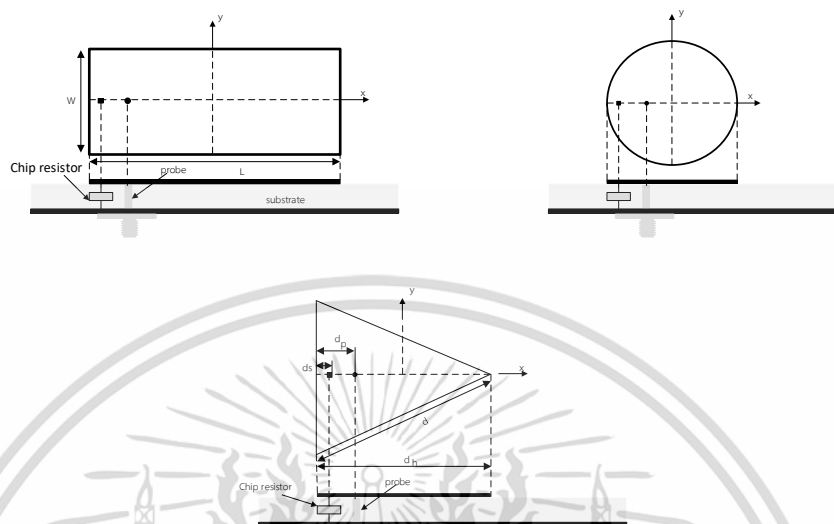
เมื่อ f_{10} คือความถี่เรโซแนนซ์ของโหมด TM_{10}

L คือความยาวของแผ่นแพทช์

ϵ_r คือค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative Permittivity)

เมื่อมีการใช้พินลัดวงจรจากแผ่นแพทช์ไปที่ระนาบกราวด์ ณ จุด $x = -L/2$ $y = 0$ หรือที่จุดศูนย์กลางของขอบแพทช์และเลือกตำแหน่งการป้อนสัญญาณบนเส้นกึ่งกลางตามแนวแกน x ความถี่เรโซแนนซ์แรกจะเกิดขึ้นที่ประมาณ $0.38 f_{01}$ เมื่อมีการใช้การเชื่อมต่อพินลัดวงจรมากกว่าหนึ่งจุดที่ขอบหรือใช้การลัดวงจรแบบแผ่นความถี่เรโซแนนซ์แรกจะเกิดขึ้นใกล้กับหรือที่ประมาณ $0.5 f_{01}$ ทำให้ในกรณีนี้สายอากาศแบบแพทช์ที่มีการลัดวงจรนี้สามารถทำงานเป็นสายอากาศที่มีความยาวคลื่นหนึ่งในสี่ส่วน ($\lambda/4$) การออกแบบลักษณะนี้เรียกว่า สายอากาศแบบแพทช์รูปทรงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบลัดวงจรด้วยพินทำงานโดยมีความยาวเรโซแนนซ์น้อยกว่าหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นและสามารถลดขนาดของสายอากาศให้เล็กลงได้น้อยลงได้อีกด้วยการลัดวงจรด้วยผนัง [10]



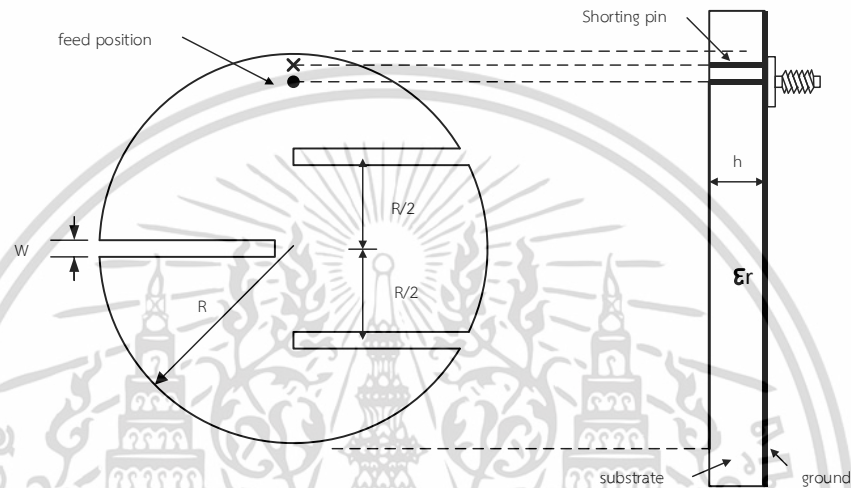
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของแผ่นแพทช์รูปทรงสี่เหลี่ยม วงกลม และสามเหลี่ยมด้วยการลัดวงจร

ด้วยเทคนิคการลัดวงจรด้วยพินจะทำให้การลดขนาดสายอากาศส่วนใหญ่เกิดจากการขยับของจุดแรงดันไฟฟ้าที่ศูนย์กลางของแพทช์รูปทรงสี่เหลี่ยมด้วยการป้อนสัญญาณที่โหมด TM_{01} และแพทช์รูปทรงวงกลมจะทำงานที่โหมด TM_{11} ณ ขอบของแผ่นแพทช์ตามลำดับซึ่งทำให้แผ่นแพทช์ที่มีการลัดวงจรเรโซแนนซ์ที่ความถี่ที่ต่ำกว่า ดังนั้น ณ ความถี่ใช้งานขนาดของแผ่นแพทช์จะสามารถลดลงได้อย่างมากและการลดขนาดของแผ่นแพทช์จะถูกจำกัดด้วยระยะห่างระหว่างจุดแรงดันไฟฟ้าที่เป็นศูนย์ในแผ่นแพทช์และขอบของแพทช์ ด้วยเหตุนี้เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของแผ่นแพทช์รูปทรงสี่เหลี่ยมและวงกลมที่โหลดด้วยการลัดวงจรสามารถคาดการณ์ว่า แผ่นแพทช์รูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า ป้อนสัญญาณที่โหมดพื้นฐาน (โหมด TM_{10}) เมื่อที่จุดแรงดันเท่ากับศูนย์อยู่ที่สองในสามของระยะห่างจากปลายสามเหลี่ยมถึงขอบด้านล่างของรูปสามเหลี่ยมจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์จะลดลงมากเมื่อใช้เทคนิคการลัดวงจรด้วยพิน [10]

2.3.2 การใช้โครงสร้างแพทช์แบบคดเคี้ยว

ในการออกแบบสายอากาศแบบแพทช์ขนาดกระทัดรัดนั้นสามารถที่จะทำได้โดยการคดเคี้ยวแพทช์ที่ถูกใช้เป็นแผ่นการแพร่กระจายคลื่น เทคนิคการคดเคี้ยวแบบนี้ทำได้โดยทำร่องคดเคี้ยวหลายๆ อันที่ที่ขอบหรือจุดบนแผ่นการแพร่กระจายคลื่น ณ จุดที่ไม่มีการแผ่รังสีหรือที่ขอบของแพทช์ จากรูปที่ 2.4 เป็นการออกแบบสายอากาศขนาดกระทัดรัดด้วยเทคนิคแบบผสมผสานระหว่างวิธีการเส้นคดเคี้ยวและการลัดวงจรด้วยพินสำหรับสายอากาศแบบแพทช์รูปวงกลม รูปที่ 2.4 แสดงรูปทรงเรขาคณิตของสายอากาศแบบแพทช์รูปวงกลมที่ลัดวงจรและคดเคี้ยว แผ่นแพทช์วงกลมมีการลัดวงจรที่ขอบด้วยหมุดลัดวงจรลงไปที่รีนาบกราวด์และช่องแคบสามช่องที่มีความยาวและความกว้างที่ต่างกันเล็กน้อย ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

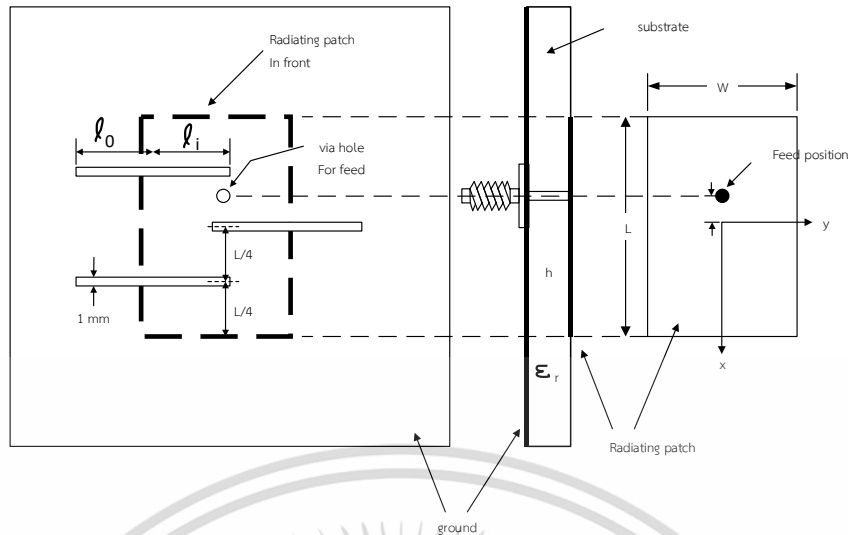
กว้างเท่ากัน โดยตัวหมุดลัดวงจรจะทำให้แผ่นแพทช์ทรงกลมเรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นแพทช์วงกลมทั่วไปที่มีขนาดเท่ากันและช่องแคบคดเคี้ยวบนแผ่นแพทช์จะเป็นตัวเพิ่มความยาวทางไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพของแผ่นแพทช์จากปัจจัยทั้งสองนี้สามารถทำให้การลดขนาดสำหรับสายอากาศแพทช์วงกลมนี้สามารถทำได้และทำงานที่ความถี่ที่กำหนดอย่างมีประสิทธิภาพ [10]



รูปที่ 2.4 รูปทรงเรขาคณิตของสายอากาศแบบแพทช์รูปวงกลมที่ลัดวงจรและคดเคี้ยว

2.3.3 การใช้ระนาบกราวนด์แบบคดเคี้ยว

จากวิธีการของเส้นคดเคี้ยวบนแผ่นแพทช์ที่ถูกใช้เป็นแผ่นการแพร่กระจายคลื่นเพื่อขยายเส้นทางบนพื้นผิวแพทช์สามารถที่จะลดความถี่เรโซแนนซ์พื้นฐานของสายอากาศได้ดังที่ได้กล่าวผ่านมาแล้วข้างต้นและแนวทางนี้ยังสามารถที่จะนำมาใช้กับแผ่นที่ทำหน้าที่เป็นระนาบกราวนด์ได้อีกด้วย รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์ที่ใช้ระนาบกราวนด์แบบคดเคี้ยว [10]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์ที่ใช้ระนาบกราวนด์แบบคดเคี้ยว

จากรูปเมื่อแผ่นแพทช์การแพร่กระจายคลื่นมีรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $W \times L$ และวางอยู่บนวัสดุฐานรองที่มีความหนา h และมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (ϵ_r) มีช่องเปิดที่เหมือนกันสามช่องวางอยู่บนระนาบกราวนด์ของสายอากาศและจัดแนวการวางด้วยระยะห่างเท่ากับ $L/4$ และวางขนานกับขอบของแผ่นแพทช์สำหรับแพร่กระจายคลื่นหรือตามแนวแกน y โดยช่องเปิดนั้นมีขนาด 1 mm สำหรับตัวอย่างที่กล่าวมานี้และความยาวของช่องเปิดเท่ากับ $l_0 + l_i$ โดยที่ l_0 และ l_i ตามลำดับคือความยาวของช่องเปิดด้านนอกและด้านในตามภาพฉายของแผ่นแพทช์สำหรับแพร่กระจายคลื่น ตัวป้อนสัญญาณแบบโพพรบถูกวางตามแนวกึ่งกลางของแผ่นแพทช์ (ตามแนวแกน x) ที่ตำแหน่ง d_p จากจุดศูนย์กลางของแพทช์

จากสายอากาศที่ได้ยกตัวอย่างมีโหมดเรโซแนนซ์พื้นฐานที่ความถี่ 2387 MHz มีช่วงกว้างความถี่ที่ 10 dB เท่ากับ 2.0% เมื่อทำการเพิ่มความยาวของช่องเปิดจะเห็นว่าความถี่เรโซแนนซ์พื้นฐานลดลงอย่างรวดเร็วสำหรับสายอากาศที่มีค่า $l_i = 14$ mm ความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้คือ 1587 MHz ซึ่งมากกว่าสายอากาศเดิมประมาณ 0.66 เท่า แสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้สามารถลดขนาดสายอากาศได้มากถึงประมาณ 56% สำหรับสายอากาศที่นำเสนอที่ทำงานด้วยความถี่ที่ ยิ่งไปกว่านั้นจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศต้นแบบนั้นจะมีค่ามากกว่า ลักษณะการทำงานแบบนี้ส่วนใหญ่เกิดจากช่องคดเคี้ยวที่ฝังอยู่ในระนาบกราวนด์ของสายอากาศ [10]

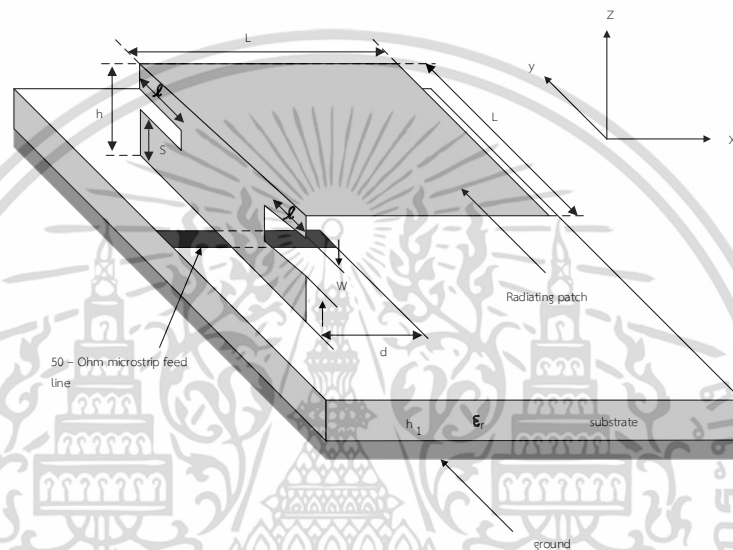
2.3.4 การใช้โครงสร้างรูปตัวเอลหัวกลับ

การใช้โครงสร้างรูปตัวเอลหัวกลับ (Planar Inverted-L) เป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการออกแบบสายอากาศแบบแพทช์ขนาดกะทัดรัดที่มีการป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของสายอากาศรูปตัวเอลหัวกลับป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปโดยถูกออกแบบให้สามารถใช้งานได้สองย่านความถี่ เมื่อแผ่นแพทช์มีความยาวรวม

$L+h$ และประกอบด้วยส่วนแนวนอนที่มีความยาว L และส่วนแนวตั้งที่มีความยาว h ส่วนแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ในเชิงวิชาการแล้ว
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกเลือกให้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด $L \times L$ และถูกรองด้วยเสาพลาสติกที่มีความสูง h วางตัวอยู่บนระนาบกราวนด์ วัสดุฐานรองมีความหนา h_1 และมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์คือ ϵ_r และสายนำสัญญาณไมโครสตริปมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50Ω และแผ่นแพทช์ของสายอากาศรูปตัวเอฟหัวกลับอยู่ตรงกลางเหนือสายป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริปโดยขอบของส่วนแนวตั้งของแผ่นแพทช์เชื่อมต่อโดยตรงกับสายนำสัญญาณไมโครสตริปในส่วนของสายป้อนสัญญาณด้านล่างส่วนแนวนอนของแผ่นแพทช์มีความยาว d ซึ่งถูกใช้เป็นสตับจูนเพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่แมชซ์สำหรับสายอากาศซึ่งความยาวที่เหมาะสมที่สุดของ d อยู่ที่ประมาณ 40% ของความยาวทั้งหมดของแผ่นแพทช์

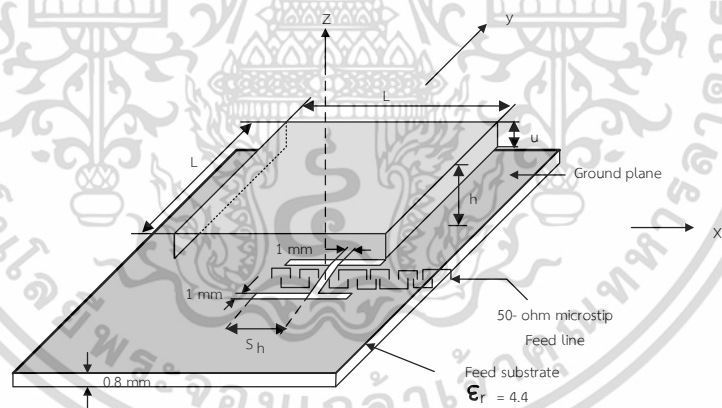


รูปที่ 2.6 โครงสร้างของสายอากาศรูปตัวเอฟหัวกลับป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป

ด้วยวิธีการการออกแบบที่นำเสนอนี้ความถี่เรโซแนนซ์สองความถี่แรกของสายอากาศจะสัมพันธ์กับโหมดการเรโซแนนซ์ตามลำดับโดยที่ความยาวของแผ่นแพทช์ที่มีความยาวคลื่นหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นและครึ่งความยาวคลื่นจะสามารถกระตุ้นให้เกิดการแมตซ์อิมพีแดนซ์ด้วยการป้อนสัญญาณจุดเดียวและสามารถทำงานได้ที่ความถี่คู่ เพื่อให้สามารถปรับอัตราส่วนของความถี่ของความถี่เรโซแนนซ์ทั้งสองร่องที่เหมือนกันสองร่องมีขนาด (xw) จะถูกแทรกไว้ที่ขอบที่ไม่การแผ่รังสีในของส่วนแนวตั้งของแผ่นแพทช์ ร่องเปิดที่สอดเข้าไปทั้งสองจะทำให้เกิดปรากฏการณ์คดเคี้ยวที่แตกต่างกันบนเส้นทางกระแสพื้นผิวแผ่นแพทช์ที่ของความถี่เรโซแนนซ์ทั้งสอง ทั้งนี้หากต้องการทำให้ได้อัตราส่วนความถี่ที่หลากหลายสามารถทำได้ด้วยด้วยการเลือกขนาดของร่องต่างๆ ต้นแบบของการออกแบบได้มีการสร้างและศึกษา พบว่าสายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้นแสดงความถี่เรโซแนนซ์สองความถี่ [10]

2.3.5 การใช้โครงสร้างรูปตัวยูกลับหัว

จากการลดขนาดของสายอากาศแบบแพทช์แล้วเกิดความยาวที่เพิ่มขึ้นของการป้อนสัญญาณที่แผ่นแพทช์นั้นสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้วิธีการโครงสร้างรูปตัวยูกลับหัว (Inverted U-shaped) รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างการออกแบบด้วยแผ่นแพทช์รูปตัวยูกลับหัว ซึ่งสามารถออกแบบได้จากการพับขอบลงสองด้านของแผ่นแพทช์สำหรับแพร่กระจายคลื่นโดยเมื่อขอบพับด้านล่างทั้งสองโค้งไปทางศูนย์กลางของแผ่นแพทช์ก็จะได้โครงสร้างที่คล้ายกับแผ่นแพทช์แบบพับ (Folded Patch) ด้วยขอบที่เพิ่มเข้ามาความยาวเรโซแนนซ์ประสิทธิผลของแผ่นแพทช์รูปตัวยูกลับหัวจะมีความมากขึ้นกว่าแผ่นแพทช์ระนาบทั่วไป การออกแบบสายอากาศขนาดกะทัดรัดแบบนี้เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานกับสายอากาศแบบแพทช์ที่มีวัสดุฐานรองเป็นอากาศและแม้ว่าความยาวสูงสุดของขอบด้านล่างจะถูกจำกัดโดยความหนาของพื้นผิวอากาศก็ยังสามารถที่จะลดความถี่เรโซแนนซ์ลงได้อย่างมีนัยสำคัญประมาณ 32% ด้วยความหนาของพื้นผิวอากาศประมาณ 5% ของความยาวคลื่นเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของแพทช์และความถี่ในการทำงานที่ต้องการได้รับการแก้ไขจะทำให้การลดลงของความถี่เรโซแนนซ์นี้สอดคล้องกับการลดขนาดสายอากาศประมาณ 54% เนื่องจากเส้นทางของกระแสบนพื้นผิวของแผ่นแพทช์ที่ยาวขึ้นนั้นเกิดในทางลงที่เพิ่มเติมในขอบที่เพิ่มเข้ามาจะทำให้แตกต่างจากการออกแบบที่คิดเคี้ยวที่เคยกล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งจะเกิดการรบกวนค่อนข้างน้อยบนการกระจายกระแสของพื้นผิวที่ถูกกระตุ้นจึงสามารถที่จะคาดว่าจะมีการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบนี้จะดีเทียบเท่ากับสายอากาศแบบแพทช์ [10]



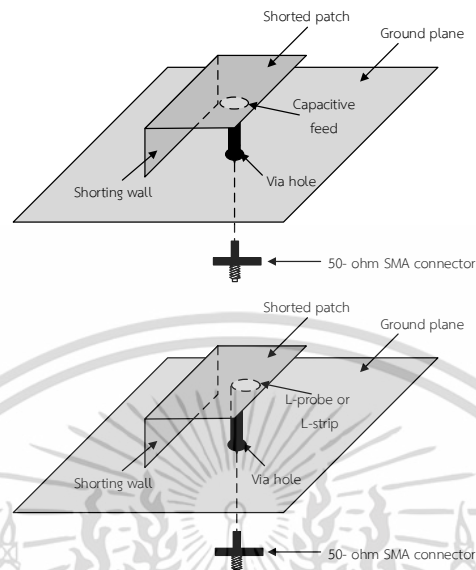
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของสายอากาศขนาดกะทัดรัดรูปตัวยูกลับหัว

2.3.6 การป้อนสัญญาณด้วยการคัปปลิงแบบตัวเก็บประจุ

จากการออกแบบสายอากาศแบบแพทช์ที่มีช่วงกว้างความถี่กว้างด้วยการป้อนสัญญาณด้วยการคัปปลิงตัวเก็บประจุ รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของการป้อนสัญญาณให้สายอากาศแบบแพทช์ด้วยการคัปปลิงตัวเก็บประจุโดยตัวป้อนสัญญาณนี้สามารถที่จะเป็นแผ่นตัวนำไฟฟ้าแบบวงกลมหรือสี่เหลี่ยมเพื่อส่งผ่านพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไปยังแผ่นแพร่กระจายคลื่น ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าความยาวโดยรวมของสายอากาศแบบแพทช์ที่มีวัสดุฐานรองแบบอากาศลดลงจากเดิมที่มีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาว $\lambda/4$ ลงให้น้อยกว่า $\lambda/8$ ได้ การออกแบบดังกล่าวที่มีปริมาตร $20 \times 8 \times 4 \text{ mm}^3$ ได้ถูกสร้างขึ้นและได้รับช่วงกว้างความถี่อิมพีแดนซ์เท่ากับ 178 MHz ความถี่กลางเท่ากับ 1.8 GHz [10]



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของการบ่อนสัญญาณให้สายอากาศแบบแพทช์ด้วยการคัปปลิ่งแบบตัวเก็บประจุ

จากโครงสร้างเรขาคณิตที่แสดงในรูปที่ 2.8 คือการคัปปลิ่งแบบตัวเก็บประจุของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไปยังแผ่นแพทช์ที่มีลักษณะการเชื่อมต่อลงระนาบกราวด์ด้วยโพรบรูปตัวแอลในการออกแบบด้วยโพรบรูปตัวแอลรวมเข้ากับแผ่นแพทช์แบบลัดวงจรจะสามารถสร้างค่าความจุไฟฟ้าเพื่อชดเชยค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากการลัดวงจรได้ซึ่งทำให้ได้อิมพีแดนซ์ที่ 50 Ω ในช่วงความถี่กว้าง [10]

2.4 เทคนิคการออกแบบสำหรับสายอากาศช่วงความถี่กว้าง

จากการออกแบบสายอากาศแบบแพทช์ที่กล่าวผ่านไปแล้วนั้นจะเห็นได้ว่าสายอากาศแบบแพทช์นั้นมีโครงสร้างที่ง่ายและยังสามารถที่จะออกแบบให้มีขนาดเล็กลงตามความต้องการได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามในการลดขนาดของสายอากาศนั้นมักจะทำให้ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศลดลง จึงได้มีการนำเสนอวิธีการออกแบบเพื่อเพิ่มช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศเพื่อชดเชยช่วงกว้างความถี่ที่ลดลงและเพื่อรองรับการใช้งานสายอากาศที่ต้องการช่วงความถี่กว้าง โดยคำจำกัดความของช่วงกว้างความถี่ (Bandwidth : BW) ของสายอากาศสามารถกำหนดได้ในแง่ของพารามิเตอร์ทางกายภาพตั้งแต่หนึ่งรายการขึ้นไปดังแสดงในสมการ (2.4) ช่วงกว้างความถี่คำนวณโดยใช้ความถี่ f_u และ f_l ที่ขอบด้านบนและด้านล่างตามลำดับของช่วงกว้างความถี่ที่ได้รับ [8],[13]

$$BW = \begin{cases} \frac{2(f_u - f_l)}{(f_u + f_l)} \times 100\% & \text{bandwidth} < 100\% \\ \frac{f_u}{f_l} : 1 & \text{bandwidth} < 100\% \end{cases} \quad (2.4)$$

โดยช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศสามารถกำหนดได้จากคุณสมบัติต่างๆ เช่น อิมพีแดนซ์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และโพลาไรซ์ เป็นต้น ประการแรกช่วงกว้างความถี่อิมพีแดนซ์คือ การพิจารณาชั้นพื้นฐานสำหรับการออกแบบสายอากาศทุกชนิดซึ่งจะช่วยให้พลังงานส่วนใหญ่ถูกส่งจากแหล่งกำเนิดไปยังสายอากาศหรือจากจุดบ่อนสัญญาณหรือระบบส่งกำลังที่เครื่องส่งและจากสายอากาศไปยังโหลดที่เครื่องรับในระบบสื่อสารไร้สายและไม่มีภาระสะท้อนกลับของสัญญาณเกิดขึ้น ถัดมาช่วงกว้างความถี่ที่พิจารณาจากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะสามารถยืนยันแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นตลอดช่วงความถี่นั้นจะมีพลังงานสูงสุดและต่ำสุดในทิศทางที่คงที่และถูกต้องและสุดท้ายช่วงกว้างความถี่ที่พิจารณาจากโพลาไรซ์ที่กำหนดไว้ของสายอากาศจะช่วยให้การพิจารณาการสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากโพลาไรซ์ไม่ตรงกันภายในช่วงความถี่ใช้งาน

2.4.1 ช่วงกว้างความถี่อิมพีแดนซ์

โดยทั่วไปสายอากาศเป็นอุปกรณ์เรโซแนนซ์ค่าอิมพีแดนซ์อินพุตจะแปรผันตามความถี่แม้ว่าอิมพีแดนซ์โดยธรรมชาติของจุดบ่อนสัญญาณจะยังคงไม่เปลี่ยนแปลง หากสายอากาศสามารถแมตช์กับจุดบ่อนสัญญาณของมันได้ดีในช่วงความถี่ใดช่วงหนึ่งช่วงความถี่นั้นจะถูกกำหนดให้เป็นช่วงกว้างความถี่อิมพีแดนซ์ ช่วงกว้างความถี่อิมพีแดนซ์สามารถระบุได้ในแง่ของการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss : $|S_{11}|$) หรืออัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟ (Voltage Standing Wave Ratio : VSWR) ในช่วงความถี่ อิมพีแดนซ์ที่เข้ากันได้ดีจะต้องครอบคลุมช่วงความถี่การทำงานที่จำเป็นสำหรับระดับที่ระบุทั้งหมดเช่น VSWR = 2 หรือ 1.5 หรือ $|S_{11}|$ น้อยกว่า -10 dB หรือ -15 dB นอกจากนี้ ช่วงกว้างความถี่อิมพีแดนซ์ยังแปรผันผกผันกับค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) ของสายอากาศตามที่กำหนดโดย [8],[13]

$$BW = \frac{VSWR - 1}{Q\sqrt{VSWR}} \quad (2.5)$$

ตามเกณฑ์ของ Chu (Chu's Criterion) เกี่ยวกับค่า Q คือค่าตัวประกอบคุณภาพ ขั้นต่ำ Q_{min} ของสายอากาศในขนาดที่กำหนดจะได้รับโดยประมาณ

$$Q_{\min} = \frac{1 + 3(k_0 R)^2}{(k_0 R)^3 [1 + (k_0 R)^2]} \quad (2.6)$$

ทฤษฎีนี้ระบุว่ารศมี R ของทรงกลมต่ำสุดที่ล้อมรอบสายอากาศอย่างสมบูรณ์กำหนด Q_{\min} ของสายอากาศที่มีประสิทธิภาพการแผ่รังสี 100% เกณฑ์ของ Chu สามารถทำนายช่วงกว้างความถี่อิมพีแดนซ์สูงสุดของสายอากาศได้อย่างไรก็ตาม สายอากาศมักจะมี Q ที่สูงกว่า Q_{\min} ที่ให้ไว้ในสมการ (2.6) มาก ตัวอย่างเช่น สายอากาศแบบแพทช์ที่มีไดอิเล็กทริกแบบบางและยอมให้สูงล้อมรอบด้วยทรงกลมที่มีรัศมีขนาดใหญ่ R ได้รับผลกระทบจากช่วงกว้างความถี่อิมพีแดนซ์ที่แคบเนื่องจากมี Q สูง

2.4.2 ช่วงกว้างความถี่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

จากช่วงกว้างความถี่ที่พิจารณาจากคุณสมบัติของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีพารามิเตอร์หลายตัวที่สามารถนำมาใช้อธิบายประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศดังรายการต่อไปนี้ [8],[13]

- ทิศทางของลำคลื่นหลัก (Main Beam)
- โลบข้าง (Side Lobe) โลบหลัง (Back Lobe) และทิศทาง
- ความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) และ ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังงาน (Half Power Beamwidth : HPBW)
- มุมตัน (Solid Angle)
- อัตราส่วนด้านหน้าต่อด้านหลัง (Front to Back Ratio)
- ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)
- ค่าประสิทธิภาพ (Efficiency)
- จุดกึ่งกลางเฟส (Phase Center)
- อัตราการขยาย (Gain)
- โพลาริซ (Polarization)

คุณสมบัติทั้งหมดนี้จะมีความแตกต่างกันไปตามความถี่ใช้งานและสามารถกำหนดช่วงความถี่ในการทำงานได้โดยการระบุพารามิเตอร์ใดๆ เหล่านี้เป็นค่าต่ำสุดหรือสูงสุดตามข้อกำหนดของระบบสำหรับสายอากาศ ความแปรผันในพารามิเตอร์เป็นผลมาจากการกระจายตามความถี่ของขนาดและเฟสของกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นผิวสายอากาศที่เกิดขึ้น รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญของโหมดการทำงานของสายอากาศ โดยปกติแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะแสดงในระบบพิกัดฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ช่วงกว้างความถี่โพลาไรซ์

จากช่วงกว้างความถี่ที่พิจารณาจากคุณสมบัติของโพลาไรซ์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับลักษณะโพลาไรซ์มีความสำคัญนอกจากพารามิเตอร์ที่กล่าวข้างต้นแล้วพารามิเตอร์เพิ่มเติมยังรวมถึงอัตราส่วนแกน มุมเอียง และลักษณะของการหมุน จึงควรระบุคุณสมบัติโพลาไรซ์ของสายอากาศแบบโพลาไรซ์เชิงเส้นหรือแบบวงกลมเพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียเนื่องจากโพลาไรซ์ที่ไม่ตรงกัน ช่วงกว้างความถี่สามารถกำหนดได้โดยการระบุระดับโพลาไรซ์ไขว้สูงสุด (Cross Polarization) หรือระดับอัตราส่วนแกน (Axial Ratio) ช่วงกว้างความถี่ควรครอบคลุมช่วงความถี่ในการทำงานทั้งหมด [8],[13]

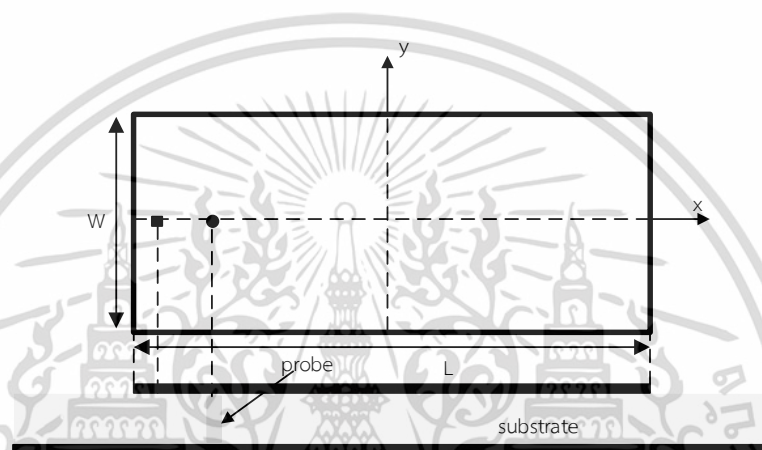
การควบคุมโพลาไรเซชันขึ้นอยู่กับควบคุมโหมดการป้อนสัญญาณที่ตั้งฉากกันของโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นและแบบวงกลม โดยการแยกระหว่างโหมดการป้อนสัญญาณที่ตั้งฉากกันของโพลาไรซ์จะสามารถกำหนดระดับโพลาไรซ์ไขว้หรือระดับของอัตราส่วนแกนได้ซึ่งค่า Q และการป้อนสัญญาณของสายอากาศจะส่งผลกระทบต่ออย่างมาก โดยทั่วไปค่า Q ต่ำ หรือ ช่วงกว้างความถี่กว้างจะส่งผลให้มีการแยกระหว่างโหมดที่ไม่ที่ตั้งนั้นจึงเป็นเรื่องยากที่จะปรับปรุงทั้งอิมพีแดนซ์และช่วงกว้างความถี่โพลาไรซ์ไปพร้อมๆ กันโดยการลดค่า Q ของสายอากาศวิธีหนึ่งที่เป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพโพลาไรซ์ภายในช่วงกว้างความถี่ที่กว้างคือ การออกแบบรูปทรงเรขาคณิตของการป้อนสัญญาณอย่างระมัดระวัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าอัตราส่วนของโพลาไรเซชันร่วมสูงสุดต่อระดับการโพลาไรซ์ไขว้ (Maximum Co-polarization to Cross-polarization) จะถูกใช้ในการประเมินลักษณะโพลาไรซ์สามารถคำนวณได้จาก [8],[13]

$$\text{Co-to-cross-pol ratio} = \text{max. co-polarization level} / \text{max. cross-polarization level} \quad (2.7)$$

ดังนั้นเทคนิคการออกแบบเพื่อให้ได้ช่วงกว้างความถี่ที่กว้างจึงได้ถูกพัฒนาโดยใช้ 3 แนวทางหลัก คือ การลดค่าของตัวประกอบคุณภาพ (Q) การใช้การแมตซ์อิมพีแดนซ์ และการใช้การเรโซแนนซ์แบบหลายจุด เป็นต้น เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศแบบแพทช์นั้นส่วนใหญ่คือ รูปร่างของส่วนแพร่กระจายคลื่น รูปแบบการป้อนสัญญาณวัสดุฐานรอง และการจัดเรียงองค์ประกอบการแพร่กระจายคลื่นและพาราซิติก โดยพื้นฐานแล้วช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศแบบแพทช์สามารถได้มาจากค่า Q ที่ต่ำและเรโซแนนซ์หลายจุดที่กระตุ้นได้ดีพร้อมๆ กัน หากพิจารณาสายอากาศเป็นตัวกรองแบบค่า Q สูง การลดค่า Q โดยการลดพลังงานรอบๆ ตัวแพร่กระจายคลื่นนั้นเป็นการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ช่วงกว้างความถี่กว้างขึ้น อีกทางหนึ่งโดยการแทรกเครือข่ายอิมพีแดนซ์ช่วงความถี่กว้างระหว่างสายอากาศกับตัวป้อนสัญญาณการแมตซ์ที่ดีในช่วงความถี่กว้างก็สามารถทำได้และหากโหมดที่อยู่ใกล้กันสองโหมดหรือมากกว่านั้นถูกกระตุ้นพร้อมๆ กันช่วงกว้างความถี่ก็จะสามารถเพิ่มเป็นสองเท่าหรือมากกว่านั้นได้ [13]

เริ่มจากการลดค่าตัวประกอบคุณภาพหรือค่า Q เมื่อสายอากาศแบบแพทช์ที่มีทรงกลมขนาดใหญ่จะได้มีช่วงกว้างความถี่ที่แคบเนื่องจากปริมาตรทั้งหมดของทรงกลมที่ล้อมรอบนั้นไม่ได้ถูกใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพดังนั้นสายอากาศแบบแพทช์ถือได้ว่าเป็นวงจรที่มีค่า Q สูง ดังนั้นวิธีหนึ่งในการบรรเทาปัญหาช่วงกว้างความถี่ที่แคบคือ การลดค่า Q นั้นๆ ไม่นิยามให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการพิจารณารูปร่างของแผ่นแพร่กระจายคลื่นที่ส่งผลกระทบต่อช่วงกว้างความถี่อิมพีแดนซ์ถึงแม้ว่าจะมีขนาดสูงสุดเท่ากันก็ตาม อย่างไรก็ตามการปรับปรุงช่วงกว้างความถี่นั้นค่อนข้างจำกัดตัวอย่างเช่น ช่วงกว้างความถี่สำหรับค่า $|S_{11}|$ น้อยกว่า -10 dB ของสายอากาศที่แสดงในรูปที่ 2.9 มีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว W/L ที่แตกต่างกัน และมีความหนาของวัสดุฐานรองเท่ากับ 1.52 mm และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองเท่ากับ 3.38 ความยาว L ถูกกำหนดไว้ที่ 54 mm ในขณะที่ความกว้าง W แตกต่างกันไปตั้งแต่ 10 mm ถึง 108 mm มีความถี่เรโซแนนซ์อยู่ที่ประมาณ 1.5 GHz จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ช่วงกว้างความถี่ได้รับผลกระทบจากรูปทรงเรขาคณิตของสายอากาศเนื่องจากค่า Q ที่ต่ำกว่าจากขนาดที่ใหญ่ขึ้น [13]



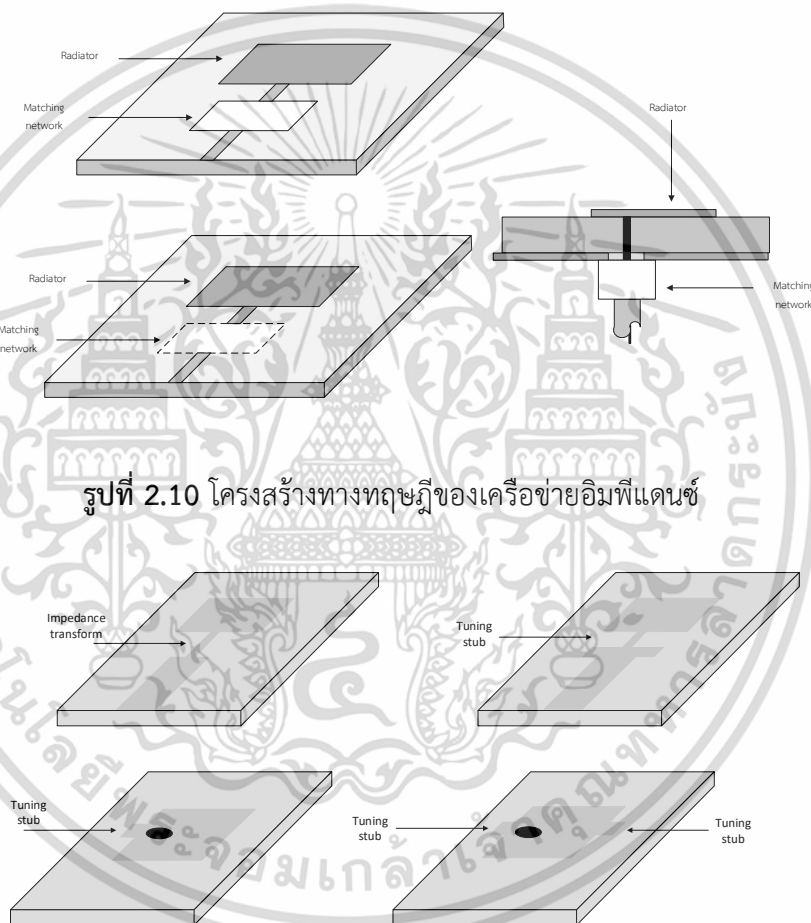
รูปที่ 2.9 สายอากาศแบบแพทช์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าป้อนสัญญาณด้วยโพรบ

ถัดมาพิจารณาวัสดุฐานรองที่มีความบางและมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำนั้นจะดีสำหรับการปรับปรุงช่วงกว้างความถี่อิมพีแดนซ์ของสายอากาศซึ่งมันจะลดค่า Q และขยายช่วงกว้างความถี่ให้กว้างขึ้น การพิจารณาที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ การสูญเสียที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากคลื่นผิวที่ไม่ต้องการซึ่งจะลดประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่น กระตุ้นการแพร่กระจายคลื่นแปลกปลอมและทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นลดลง การตรวจสอบพบว่าช่วงกว้างความถี่อิมพีแดนซ์จะเพิ่มขึ้นแบบซ้ำๆ ตามความหนาของพื้นผิวในขณะที่ประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นจะลดลงอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามช่วงกว้างความถี่ที่ทำได้จะลดลงเมื่อความหนาเกินค่าที่กำหนด [13]

ถัดมาคือการใช้เครือข่ายการแมตซ์อิมพีแดนซ์ (Impedance Matching Network) จะสามารถใช้เครือข่ายการแมตซ์อิมพีแดนซ์เพื่อให้เกิดการแมตซ์ที่ดีระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นที่มีค่าอิมพีแดนซ์ขึ้นอยู่กับความถี่และโครงสร้างการป้อนสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะคงที่ซึ่งนี้นำไปสู่ช่วงกว้างความถี่ที่กว้างขึ้นโดยธรรมชาติจะมีสองวิธีทั่วไปที่ใช้ในสายอากาศแบบแพทช์คือ การแทรกเครือข่ายที่ตรงกันแยกต่างหากโดยไม่ต้องแผ่นแพร่กระจายคลื่นและเครือข่ายการแมตซ์ที่อยู่บนแผ่นแพทช์เลยด้วยการเจาะร่องหรือบากบนแผ่นแพร่กระจายคลื่น ซึ่งทั้งสองวิธีนี้จะเป็นการแทรกเครือข่ายการแมตซ์อิมพีแดนซ์แบบสูญเสียหรือแบบไม่สูญเสียระหว่างสายอากาศกับโครงสร้างการ

ป้อนสัญญาณและสามารถที่จะปรับปรุงช่วงกว้างความถี่แอมป์แดนซ์ได้โดยตรงวิธีนี้ใช้กันทั่วไปในการใช้งานสายอากาศต่าง [13]

เครือข่ายอิมพีแดนซ์สามารถใช้ได้หลายวิธีดังแสดงในรูปที่ 2.10 สำหรับโครงสร้างการป้อนสัญญาณแบบระนาบจะใช้เครือข่ายแมตซ์และแถบป้อนสัญญาณแบบสลักบนระนาบเดียวกันได้ เครือข่ายแมตซ์สามารถใช้เป็นแบบหม้อแปลงอิมพีแดนซ์ที่ความยาวคลื่นหนึ่งในสี่ส่วน ตัวปรับจูนอุปกรณ์แบบแอกทีฟ ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดย ข้อดีวิธีนี้คือไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนส่วนแพร่กระจายคลื่นซึ่งทำให้การออกแบบง่ายขึ้นโดยอนุญาตให้ควบคุมการแมตซ์อิมพีแดนซ์และประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นได้อย่างอิสระส่วนข้อเสียเปรียบหลักคือ การเพิ่มขนาดของสายอากาศที่เพิ่มขึ้น



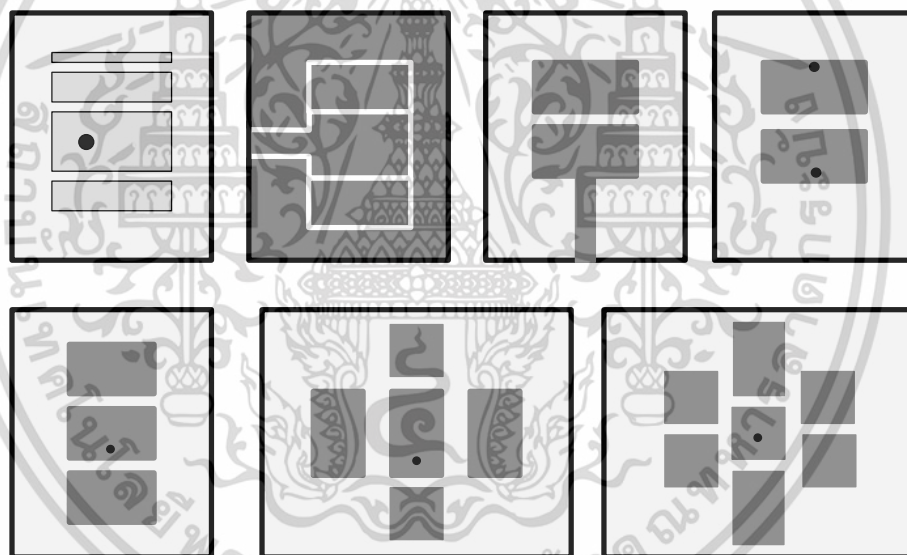
รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางทฤษฎีของเครือข่ายอิมพีแดนซ์

รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางปฏิบัติของเครือข่ายอิมพีแดนซ์

อีกวิธีการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบสายอากาศแบบแพทช์เพื่อให้สามารถมีช่วงกว้างความถี่มากขึ้นก็คือ การใช้การเรโซแนนซ์แบบหลายจุด (Multiple Resonances) สายอากาศแบบแพทช์นั้นเป็นโครงสร้างที่ทำงาน ณ ความถี่เรโซแนนซ์ด้วยช่วงกว้างความถี่ที่ค่อนข้างจำกัด การทำงานที่สามารถเกิดการเรโซแนนซ์หลายเรโซแนนซ์ที่อยู่ติดกันนั้นถูกแสดงให้เห็นว่าเป็นวิธีที่ใช้งานได้จริงในการเพิ่มช่วงกว้างความถี่ เมื่อใช้วิธีนี้การเกิดเรโซแนนซ์ที่อยู่ติดกันตั้งแต่สองตัวขึ้นไปจะถูกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

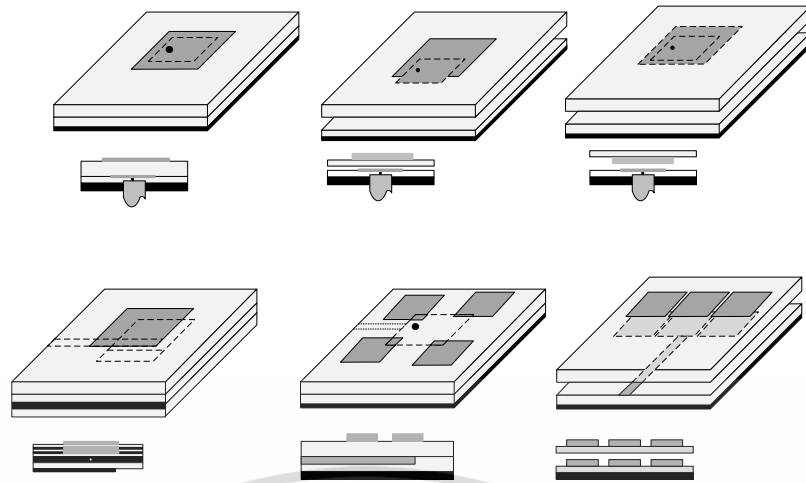
กระตุ้นอย่างมาก ณ ช่วงความถี่ใช้งานในช่วงเวลาพร้อมกันเทคนิคนี้มักจะถูกนำมาใช้ในวงจรความถี่สูงเช่น วงจรกรองความถี่และการใช้งานสายอากาศอื่นๆ เช่น สายอากาศราบคาบแบบบล็อกและสายอากาศแถวลำดับไดโพล ซึ่งวิธีที่มีลักษณะคล้ายกับวิธีการนี้คือ การเพิ่มแผ่นการแพร่กระจายคลื่นใกล้กับแผ่นแพร่กระจายคลื่นหลัก การใช้แผ่นแพทช์พาราซิติคเพื่อให้เกิดการคับปลิงทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับแผ่นแพร่กระจายคลื่นหลักโดยแผ่นแพทช์พาราซิติคนี้สามารถอยู่ในระนาบเดียวกันหรือวางซ้อนกันเหนือแผ่นแพทช์หลักก็ได้

การวางแผนพาราซิติคบนระนาบร่วมกับแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปที่ 2.12 แสดงการจัดเรียงแผ่นพาราซิติคแบบระนาบร่วมโดยที่องค์ประกอบของแผ่นพาราซิติคหนึ่งตัวหรือมากกว่าจะตั้งอยู่รอบองค์ประกอบหลักที่ถูกกระตุ้น ช่องว่างขนาดเล็กจะช่วยให้องค์ประกอบพาราซิติคสามารถคับปลิงกับองค์ประกอบที่ถูกกระตุ้นได้ซึ่งองค์ประกอบเหล่านั้นจะมีขนาดเกือบเท่ากันการกระตุ้นให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ดีและการเกิดเรโซแนนซ์ที่อยู่ติดกันนั้นก็เพื่อให้มีช่วงกว้างความถี่ที่เข้าคู่กันในวงกว้างมากขึ้น ซึ่งมักจะกว้างกว่าองค์ประกอบที่แพร่กระจายคลื่นเดี่ยวสองสามเท่าอย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีข้อเสียคือจะเกิดระดับการแพร่กระจายคลื่นที่มีโพลาริไซซ์ไขว้เพิ่มขึ้น [13]



รูปที่ 2.12 รูปแบบการจัดวางแผ่นพาราซิติคแบบระนาบร่วม

การวางแผนพาราซิติคบนระนาบซ้อนเป็นวิธีการที่คล้ายกับที่จะสามารถสร้างให้เกิดการเรโซแนนซ์หลายจุดขึ้น รูปที่ 2.13 แสดงการจัดวางองค์ประกอบที่เป็นแผ่นพาราซิติคไว้เหนือแผ่นแพทช์หลัก ช่วงกว้างความถี่จะเพิ่มขึ้นโดยอาศัยการประกบกันระหว่างองค์ประกอบแบบเรียงซ้อนและองค์ประกอบที่ถูกกระตุ้น โดยปกติสำหรับ $VSWR = 1.5$ ช่วงกว้างความถี่สามารถเพิ่มได้ถึง 10-20% โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อวัสดุฐานรองเป็นอากาศหรือเป็นวัสดุที่มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าต่ำ [13]



รูปที่ 2.13 รูปแบบการจัดวางแผ่นพาราซิติกบนระนาบซ้อน

2.5 สายอากาศสำหรับอุปกรณ์การสื่อสารแบบพกพา

เนื่องจากอุปกรณ์การสื่อสารแบบไร้สายในปัจจุบันมีลักษณะโครงสร้างที่กระทัดรัดและสามารถพกพาได้สะดวกจึงทำให้เงื่อนไขในการออกแบบสายอากาศสำหรับอุปกรณ์การสื่อสารแบบพกพานั้นต้องมีการพิจารณาปัจจัยมากยิ่งขึ้น กล่าวคือในการออกแบบและทดสอบสายอากาศเหล่านั้นเราควรกำหนดพารามิเตอร์ประสิทธิภาพของเครื่องโทรศัพท์หรืออุปกรณ์พกพาและตรวจสอบวิธีที่สิ่งเหล่านี้ได้ตอบกับการทำงานของเครือข่ายโดยปกติชุดย่อยของพารามิเตอร์เหล่านี้จะถูกระบุโดยเชื่อมโยงกับการออกแบบเครื่องโทรศัพท์หรืออุปกรณ์พกพานั้นๆ [14]

อัตราขยาย การใช้คำว่าอัตราขยายทั่วไปเมื่อใช้กับสายอากาศของอุปกรณ์การสื่อสารแบบพกพาอาจจะนั้นไม่ชัดเจนและควรหลีกเลี่ยงซึ่งในความเป็นจริงนั้นอาจจะต้องพิจารณาร่วมกับโครงสร้างหรือดูประสิทธิภาพและค่าเฉลี่ยของอัตราขยายที่มีประสิทธิผลร่วมกับอุปกรณ์นั้นๆ

ประสิทธิภาพ ประสิทธิภาพของสายอากาศของอุปกรณ์การสื่อสารแบบพกพา คือ อัตราส่วนของกำลังทั้งหมดที่แผ่โดยสายอากาศต่อกำลังงานส่งที่ขั้ว (หรือของเครือข่ายที่ตรงกันที่เกี่ยวข้อง) ผู้ปฏิบัติงานบางคนกำหนดประสิทธิภาพของขั้วต่อแยกจากกัน โดยระบุอัตราส่วนของพลังงานที่แผ่ออกมาต่อกำลังสุทธิที่ส่งไปยังสายอากาศ (กำลังส่ง - กำลังสะท้อน) ประสิทธิภาพอาจวัดได้ด้วยสายอากาศที่ขั้วเคลื่อนจากแหล่งสัญญาณภายนอก (ประสิทธิภาพแบบพาสซีฟ) หรือด้วยสายอากาศที่ขั้วเคลื่อนโดยเอาต์พุตของอุปกรณ์การสื่อสารแบบพกพา (ประสิทธิภาพแบบแอคทีฟของอุปกรณ์) ในการวัดแบบแอคทีฟอาจจะระบุกำลังส่งได้ยาก ดังนั้นพารามิเตอร์แอคทีฟที่ดีกว่าคือ การวัดกำลังการแผ่รังสีทั้งหมด (Total Radiated Power : TRP)

ช่วงกว้างความถี่ ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศคือช่วงความถี่ที่ค่าพารามิเตอร์ที่ระบุไว้ใน การออกแบบสายอากาศสำหรับอุปกรณ์การสื่อสารแบบพกพามีลักษณะคงที่คือ ช่วงกว้างความถี่เพียงพอที่จะครอบคลุมคลื่นความถี่ที่อุปกรณ์การสื่อสารแบบพกพาถูกใช้งาน

แบบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น เป็นเรื่องปกติสำหรับข้อกำหนดสำหรับสายอากาศของอุปกรณ์การสื่อสารแบบพกพาที่จะรวมการอ้างอิงตัวเครื่องไปด้วยเหตุผลคือ การที่เครื่องถูกใช้งาน เอกสารนี้จะสัญญาผู้ผลิตด้วยมือ (และบางครั้งก็ศีรษะ) ของผู้ใช้ด้วย ดังนั้นการวัดแบบรูปแบบการแพร่กระจายไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นรูปแบบใดๆ มีความสำคัญจำกัด แบบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจึงมักจะวัดในระนาบหลักสามระนาบของเครื่องพกพา

โพลาริซซ์ แพร่กระจายคลื่นจากอุปกรณ์การสื่อสารแบบพกพาถือเป็นโพลาริซซ์เชิงเส้นวงรีแบบสุ่ม การวัดกำลังการแผ่รังสีมักจะทำแยกต่างหากสำหรับส่วนประกอบสัญญาณโพลาริซซ์เชิงเส้นตรงมุมฉาก ซึ่งหมายความว่าลักษณะการแผ่รังสี 3 มิติเต็มรูปแบบของอุปกรณ์การสื่อสารแบบพกพามีรูปแบบที่แยกจากกัน 6 รูปแบบ คือระนาบการตัดสามส่วนและส่วนประกอบโพลาริซซ์สองแบบ

ค่าเฉลี่ยอัตราขยาย (Mean Effective Gain : MEG) ซึ่งคำนวณโดยการหาค่าเฉลี่ยของอัตราขยายที่วัดได้ในแต่ละจุดที่เพียงพอบนพื้นผิวทรงกลมรอบเครื่อง หากสายอากาศไม่มีการสูญเสีย ค่าเฉลี่ยอัตราขยายจะเป็น 0 dBi ดังนั้น MEG ก็คือค่าประสิทธิภาพซึ่งเท่ากับ $10 \log_{10} \eta$ โดยที่ η คือประสิทธิภาพ

การแผ่พลังงานรวม (Total Radiated Power) คือพลังงานทั้งหมดที่ออกมาจากเครื่องขณะกำลังส่งสัญญาณ ในการวัดนี้ อุปกรณ์การสื่อสารแบบพกพาจะถูกควบคุมโดยเครื่องจำลองสถานีฐานและกำลังขาออกรวมเป็นโพลาริซซ์แบบมุมฉากสุ่มตัวอย่างที่จุดบนพื้นผิวปิดรอบๆ เครื่อง

ความไวแบบไอโซทรอปิกรวม (Total Isotropic Sensitivity : TIS) ความไวถูกกำหนดให้เป็นกำลังของสัญญาณอินพุตซึ่งก่อให้เกิดอัตราความผิดพลาดของเฟรมเฉพาะหรืออัตราความผิดพลาดของบิตตกค้าง ความไวจะถูกสุ่มตัวอย่างในลักษณะโพลาริซซ์มุมฉากที่จุดใดๆ กระจายไปทั่วพื้นผิวรอบๆ เครื่อง

จากที่กล่าวไปแล้วค่า TIS และ TRP จะถูกนำมาใช้ร่วมกันเพื่อกำหนดประสิทธิภาพของอุปกรณ์การสื่อสารแบบพกพาในฐานะชิ้นส่วนของอุปกรณ์วิทยุโดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงสูงสุดที่เครื่องสามารถทำงานได้จากสถานีฐานที่มีประสิทธิภาพในระดับหนึ่ง

การวัดพื้นที่ว่างในมือและตำแหน่งศีรษะ ในระหว่างกระบวนการพัฒนาสายอากาศโดยทั่วไปแล้ว การวัดที่อธิบายข้างต้นจะทำกับชุดอุปกรณ์ในการทดสอบแบบแยกเดี่ยวซึ่งทำจากโพลีโพลีสไตรีนความหนาแน่นต่ำในการใช้งานเครื่องอาจถือให้ห่างจากศีรษะเช่น เมื่อส่งข้อความหรือเข้าถึงบริการบนเว็บหรือแนบกับศีรษะเช่นเดียวกับการใช้งานปกติ เพื่อจำลองสถานการณ์เหล่านี้เครื่องต้องได้รับการทดสอบร่วมกับแบบจำลองทางกายภาพของมือและศีรษะที่สูญเสียไป ซึ่งเรียกว่า Phantoms มักจะมีความแตกต่างที่สำคัญระหว่างประสิทธิภาพเมื่อมี Phantom และในสภาพแวดล้อมที่มีพื้นที่ว่าง

จากผลกระทบของศีรษะและมือบางครั้งเรียกว่า Detuning แต่คำนี้ไม่ค่อยมีประโยชน์นักไม่ว่าความถี่เรโซแนนท์ของสายอากาศจะเปลี่ยนแปลงหรือไม่ก็ตาม พลังงานจะสะสมอยู่ใน Phantom การแมตซ์อินพุตอาจดีขึ้นจริงๆ เมื่อวางโทรศัพท์ไว้กับมือหรือศีรษะ การระบุ Detuning โดยอ้างอิงถึงการเปลี่ยนแปลงความถี่ของการแมตซ์สายอากาศที่เหมาะสมที่สุดจะไม่ใช่ประโยชน์ ไม่ได้บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพที่ลดลงเมื่อมี Phantom หรือความถี่ของประสิทธิภาพสูงสุด การอ้างอิงถึงการเปลี่ยนแปลงในประสิทธิภาพเมื่อถือเครื่องจะเป็นประโยชน์มากกว่า โดยหาค่าเฉลี่ยตามย่านความถี่ที่เกี่ยวข้อง

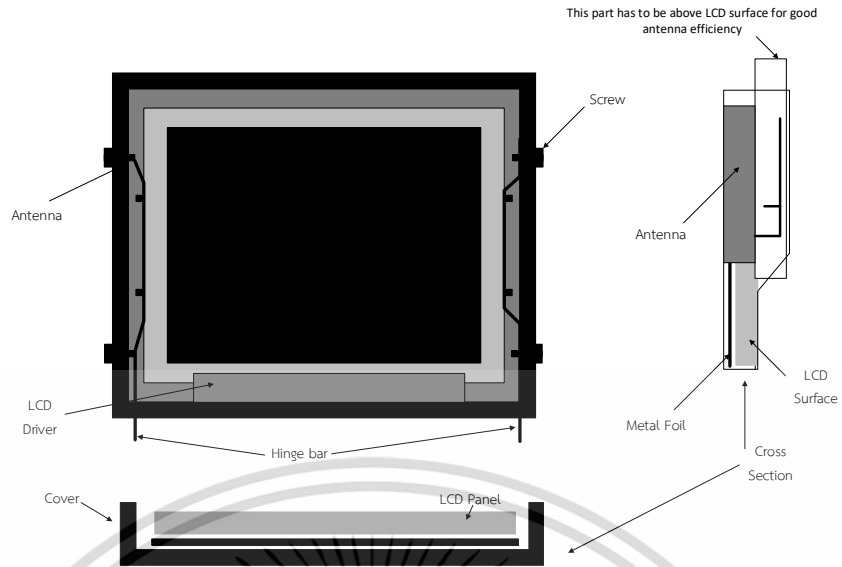
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการดูดซึมจำเพาะ (Specific Absorption Rate : SAR) อุปกรณ์การสื่อสารแบบพกพาที่วางอยู่ข้างร่างกายของผู้ใช้จะสะสมพลังงานไว้ในเนื้อเยื่อที่เจาะด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อศึกษาผลกระทบที่เป็นไปได้ต่อเนื้อเยื่อของร่างกายเราต้องตรวจสอบอัตราที่พลังงานสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อปริมาณที่กำหนดนี้คือ อัตราการดูดซึมจำเพาะ ซึ่งมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อกิโลกรัมของเนื้อเยื่อ เพื่อควบคุมความเป็นไปได้ของจุดสูงสุดในพื้นที่สูง ค่า SAR สูงสุดที่อนุญาตจะถูกระบุให้ใช้กับเนื้อเยื่อ 1 g หรือ 10 g โดยสิ่งสำคัญคือต้องแยกความแตกต่างระหว่างขีดจำกัดสำหรับการสัมผัสกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและระดับ SAR สูงสุดที่อนุญาต ขีดจำกัดสำหรับการสัมผัสกับสนามจะแสดงในรูปของกำลังไฟฟ้ามีหน่วยเป็น W/m^2 ไม่มีการจำกัดมาตรฐานทั่วไปสำหรับ SAR และมาตรฐานปัจจุบันบางรายการแสดงอยู่ในเอกสารอ้างอิงที่ [15]-[16] โดยในการใช้งานอุปกรณ์การสื่อสารแบบพกพามักจะอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้สนามเจาะเข้าไปในร่างกายของผู้ใช้ซึ่งร่างกายทั่วไปไม่เป็นเนื้อเดียวกันทางไฟฟ้าเช่น กระดูก สมอง ผิวหนัง และเนื้อเยื่ออื่นๆ มีความหนาแน่น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ปัจจัยการสูญเสียไดอิเล็กตริกและรูปร่างที่ซับซ้อนต่างกัน [14]

2.5.1 ปัญหาเกี่ยวกับการออกแบบสายอากาศสำหรับคอมพิวเตอร์แบบพกพา

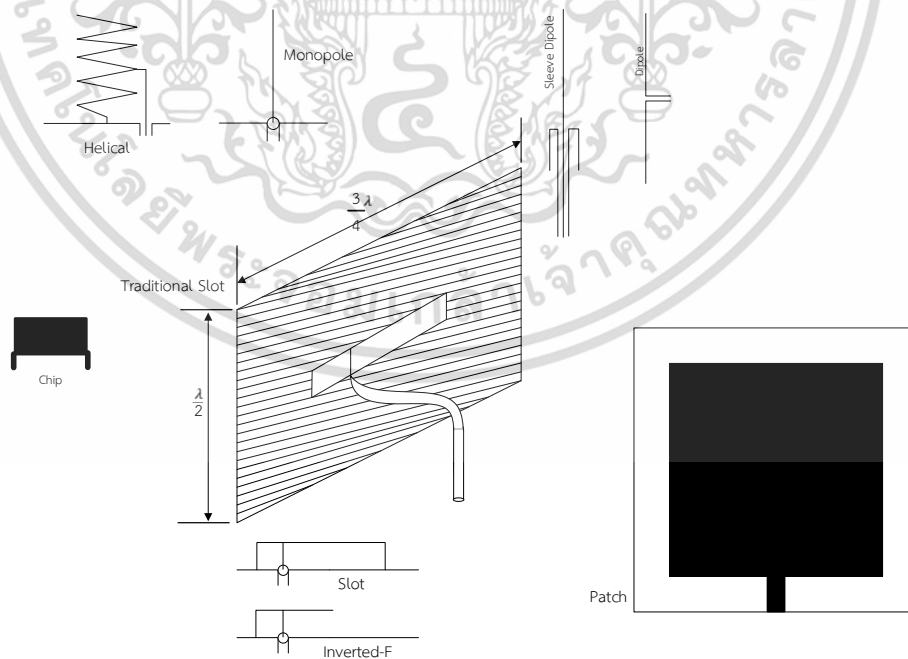
โครงสร้างของจอแสดงผลทั่วไปสำหรับคอมพิวเตอร์แบบพกพาหรือแล็ปท็อปส่วนใหญ่ที่มีระบบการสื่อสารแบบไร้สายในตัว โดยทั่วไปแล้วสายอากาศจะวางไว้บนจอแสดงผลของแล็ปท็อปเพื่อให้มั่นใจถึงประสิทธิภาพการเชื่อมต่อแบบไร้สาย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับการโครงสร้างของจอแสดงผลสำหรับแล็ปท็อป รูปที่ 2.14 แสดงรูปของจอแสดงผลพื้นฐานซึ่งประกอบด้วยแผงจอแสดงผลคริสตัลเหลว (LCD) แถบบานพับโลหะสองอันอันหนึ่งอยู่ด้านซ้ายและอีกอันอยู่ด้านขวาของจอแสดงผล ฝาครอบจอแสดงผล พอลิโพลีเอทิลีนบางซึ่งเป็นอุปกรณ์เสริมและกรอบพลาสติก การใช้พอลิโพลีเอทิลีนบางเพื่อป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีที่ใช้ฝาพลาสติกหากฝาครอบจอแสดงผลทำจากโลหะ โดยทั่วไปแล้วจะเป็นอะลูมิเนียมหรือแมกนีเซียมหรือพลาสติกเสริมแรงด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) ก็ไม่จำเป็นต้องใช้พอลิโพลีเอทิลีนแบบบาง ในแล็ปท็อปรุ่นเก่าหรือแล็ปท็อปเครื่องใหม่จอ LCD มีขนาดเล็กกว่าฝาครอบจอแสดงผลมาก จึงสามารถวางสายอากาศได้เกือบทุกที่รอบๆ ช่องว่างระหว่างแผง LCD กับฝาครอบและได้ประสิทธิภาพที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามสำหรับแล็ปท็อปรุ่นใหม่ โดยเฉพาะแล็ปท็อปประดับไฮเอนด์ช่องว่างจะมีขนาดเล็กมาก โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 3–7 mm และจอแสดงผลก็บางมากเช่นกัน เป็นผลให้พื้นที่สำหรับสายอากาศในตัวมีจำกัดมาก [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 รูปแบบของจอแสดงผลพื้นฐาน

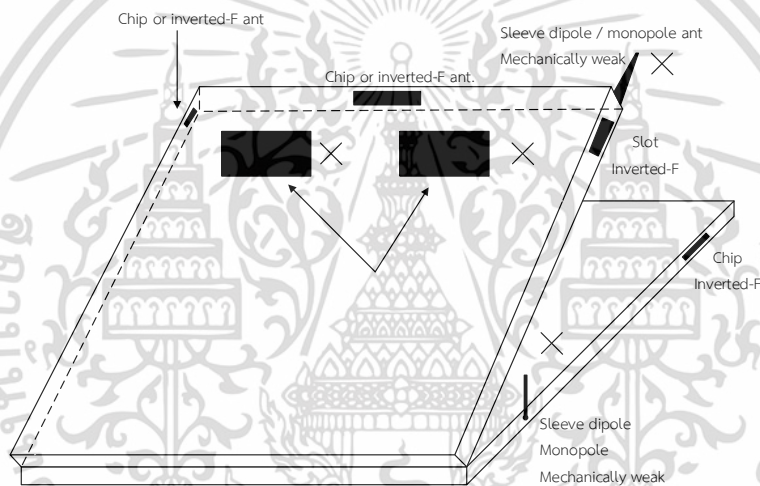
จากลักษณะที่กล่าวผ่านไปแล้วสายอากาศที่เป็นไปได้สำหรับการใช้งานในโครงสร้างของแล็ปท็อปนั้นแสดงในรูปที่ 2.15 แสดงสายอากาศที่เป็นไปได้หลายอย่างสำหรับการใช้ในโครงสร้างของแล็ปท็อป สายอากาศเหล่านี้จะทำงานได้ดีที่สุดหากติดตั้งที่ด้านบนของจอแสดงผลจึงควรวางสายอากาศที่ด้านบนของจอแสดงผลเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะที่เป็นไปได้สำหรับสายอากาศของแล็ปท็อป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามในการออกแบบสายอากาศนั้นมีข้อจำกัดการออกแบบในทางกลและอุตสาหกรรมสำหรับการใช้งานแล็ปท็อป แล็ปท็อปเองเป็นส่วนสำคัญที่รวมเอาระบบสายอากาศไว้ซึ่งส่วนใหญ่เน้นออกแบบสายอากาศยังมองว่าแล็ปท็อปเป็นองค์ประกอบหนึ่งของสายอากาศพื้นฐานและสายอากาศจริงเป็นองค์ประกอบปรับแต่ง รูปที่ 2.16 แสดงตำแหน่งสายอากาศทั่วไปและประเภทสายอากาศสำหรับแล็ปท็อป แม้ว่าสายอากาศแบบไดโพลและโมนโพลแบบปกจะมีประสิทธิภาพที่ดีมากแต่ก็มีความอ่อนแอทางกลไก มีราคาแพง และไม่ดึงดูดใจ แนวโน้มการออกแบบอุตสาหกรรมจึงไม่แนะนำให้วางไว้บนพื้นผิวของจอแสดงผลแล็ปท็อป เพื่อรักษารูปลักษณ์ที่บางและเฉียบด้วยเหตุนี้จึงมีการหลีกเลี่ยงสายอากาศแบบแพทช์และชิปที่วางอยู่บนพื้นผิวของจอแสดงผลโดยรวมแล้วควรวางสายอากาศไว้ที่ด้านหลังหรือใกล้กับด้านหลังของจอแสดงผลเพื่อให้ครอบคลุมได้ดีที่สุด การวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านล่างยังรองรับการวางสายอากาศบนจอแสดงผลอีกด้วย [14]



รูปที่ 2.16 ตำแหน่งสายอากาศทั่วไปและประเภทสายอากาศสำหรับแล็ปท็อป

เมื่อวางสายอากาศแบบระนาบบนจอแสดงผลแล็ปท็อปจะมีทิศทางหลักสองแบบที่ใช้คือการวางแนวตั้งและแนวนอน ในกรณีแรกระนาบสายอากาศจะขนานกับระนาบจอ LCD เนื่องจากแผง LCD ส่วนใหญ่เกือบจะใหญ่เท่ากับฝาครอบ LCD หรือจอแสดงผล จึงไม่มีพื้นที่สำหรับวางสายอากาศภายในฝาครอบตามทิศทางนี้แสดงว่าสายอากาศอยู่ภายนอกฝาครอบ LCD ในกรณีที่สองระนาบสายอากาศจะตั้งฉากกับแผง LCD นี่เป็นวิธีที่กะทัดรัดมากในการรวมสายอากาศเข้ากับจอแสดงผลแล็ปท็อป ประสิทธิภาพของสายอากาศจะคล้ายกันมากในทั้งสองกรณีเมื่อเปิดแล็ปท็อป อย่างไรก็ตามเมื่อปิดแล็ปท็อปเคสแรกยังคงมีประสิทธิภาพที่ดีเนื่องจากฐานแล็ปท็อปแทบไม่มีสัญญาณรบกวนกับสายอากาศสำหรับกรณีที่สองประสิทธิภาพของสายอากาศลดลงอย่างมากเนื่องจากสายอากาศเกือบจะอยู่ในกล่องเหล็กเมื่อปิดแล็ปท็อป [14]

2.6 งานวิจัยเกี่ยวข้องที่มีมาก่อน

การออกแบบสายอากาศสำหรับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแบบพกพาให้มีประสิทธิภาพสูงนั้นเป็นงานที่ได้รับความสนใจและมีการวิจัยเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยส่วนมากการออกแบบสายอากาศนั้นจะถูกออกแบบโดยคำนึงถึงโครงสร้างของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายไปพร้อมกัน

2.6.1 สายอากาศที่ถูกออกแบบอยู่บนโครงสร้างของคอมพิวเตอร์แทปเล็ต

ผลงานของ K.-L. Wong และ C.-Y. Tsai ที่ได้รับการตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 2017 [3] และผลงานของ S.-C. Chen และคณะที่ได้รับการตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 2017 [5] ได้ออกแบบสายอากาศบนแผ่น PCB โดยใช้โครงสร้างของระนาบกราวด์ขนาดใหญ่และกรอบโลหะรอบโครงสร้างของคอมพิวเตอร์แทปเล็ตเป็นส่วนต่อขยายจากโครงสร้างของสายอากาศ

งานวิจัย [3] ได้ใช้เทคนิคการลัดวงจรเพื่อปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ทำให้สายอากาศที่มีขนาดทางไฟฟ้าเท่ากับ $0.55 \lambda \times 0.41 \lambda \times 0.014 \lambda$ สามารถทำงานได้ในย่านความถี่ 746-960 MHz และ 1710-2690 MHz โดยสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ใช้งานและไม่มีการระบุถึงอัตราขยายของสายอากาศ

งานวิจัย [5] ได้ใช้เทคนิคการใช้วงจรแมทซ์ซึ่งเพื่อปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเข้ากับสายอากาศที่มีขนาดทางไฟฟ้าเท่ากับ $0.47 \lambda \times 0.35 \lambda \times 0.001 \lambda$ เพื่อให้สามารถทำงานได้ในย่านความถี่ 700-950 MHz และ 1700-2650 MHz โดยสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ใช้งานและมีอัตราขยายอยู่ในช่วง 0.98-5.1 dBi

ทั้งนี้งานวิจัยดังกล่าวคำนวณช่วงย่านความถี่ใช้งานโดยใช้เกณฑ์ $|S_{11}| \leq -6$ dB ซึ่งเป็นเกณฑ์สากลสำหรับการออกแบบสายอากาศบนอุปกรณ์สื่อสารไร้สายพกพา

2.6.2 สายอากาศที่ถูกออกแบบอยู่บนโครงสร้างของโทรศัพท์มือถือ

ผลงานของ Z.-Q. Xu และคณะที่ได้รับการตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 2018 [4] ได้ออกแบบสายอากาศโดยใช้เทคนิคการใช้ระนาบกราวด์ไม่เต็มแผ่น PCB และมีร่องรูปตัว U ระหว่างแผ่น PCB กับกรอบโลหะ โดยมีโครงสร้างของสายอากาศมีขนาดเท่ากับ $0.41 \lambda \times 0.21 \lambda \times 0.002 \lambda$ ทั้งนี้ร่องทั้งสองก่อให้เกิดการแมทซ์ที่ 2 ย่านความถี่ ได้แก่ 824-960 MHz และ 1710-2690 MHz โดยระบุว่าสายอากาศมีอัตราขยายอยู่ในช่วง 0.98 - 5.1 dBi แต่ไม่มีการกล่าวถึงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ผลงานของ L.-W. Zhang และคณะที่ได้รับการตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 2018 [6] ได้ออกแบบสายอากาศโดยใช้เทคนิคการเจาะร่องคู่ โดยโครงสร้างของสายอากาศมีขนาดเท่ากับ $0.35 \lambda \times 0.19 \lambda \times 0.002 \lambda$ สามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 801-1002 MHz และ 1695-3000 MHz โดยมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ใช้งาน และมีอัตราขยายของสายอากาศอยู่ในช่วง 0.7-3.4 dBi

ผลงานของ Y. YANG และคณะที่ได้รับการตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 2017 [11] ได้ออกแบบสายอากาศโดยใช้เทคนิคโครงสร้างแบบ Invert-F โดยสายอากาศมีขนาดทางไฟฟ้าเท่ากับ $0.3 \lambda \times 0.15 \lambda \times 0.013 \lambda$ และมีวงจรปรับอิมพีแดนซ์ขาเข้ากับแผ่นทองแดงพับเพื่อเหนี่ยวนำสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลให้สายอากาศสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 760-1000 MHz และ 1550-2550 MHz โดยมีอัตราขยายอยู่ในช่วง 0.22 – 3.78 dBi

ผลงานของ S. A. JA'AFREH และคณะที่ได้รับการตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 2016 [12] ได้ออกแบบสายอากาศในลักษณะรูปตัว H แบบมีแกนพับ ซึ่งมีขนาดทางไฟฟ้าเท่ากับ $0.78\lambda \times 0.31\lambda \times 0.051\lambda$ สายอากาศสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ 2350-3250 MHz ทั้งนี้สายอากาศดังกล่าวมีการใช้เทคนิคการป้อนสัญญาณ 2 จุดเพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้

2.6.3 สายอากาศที่ถูกลำเสนอ

สายอากาศที่ถูกลำเสนอนั้นถูกออกแบบอยู่นอกเหนือโครงสร้างของอุปกรณ์สื่อสาร โดยมีขนาดทางไฟฟ้าเท่ากับ $0.4\lambda \times 0.05\lambda \times 0.005\lambda$ ซึ่งสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ 1700-2570 MHz โดยใช้เกณฑ์การคำนวณ $|S_{11}| < -10$ dB และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวที่คงที่ตลอดย่านความถี่ใช้งานและมีอัตราขยายในช่วง 1.47 – 4.33 dBi โดยจะเห็นได้ว่าสายอากาศที่ถูกลำเสนอนั้นมีขนาดที่ไม่ใหญ่ไปกว่างานวิจัยที่เคยมีมาก่อนอื่น ๆ โดยที่มีย่านความถี่ครอบคลุมความถี่ใช้งานของโครงข่ายโทรศัพท์ไร้สาย 4G ย่าน 1800 MHz, 2100 MHz, 2300 MHz และโครงข่าย Wi-Fi ย่าน 2400 MHz และมีอัตราขยายที่สูง

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะของสายอากาศต้นแบบกับงานวิจัยที่มีมาก่อน

Reference	Electrical Size	Band (MHz)	Bandwidth (%)	Gain (dBi)
Proposed	$0.4\lambda \times 0.05\lambda \times 0.005\lambda$	1700-2570	40.70% ($ S_{11} < -10$ dB)	1.47 – 4.33
[3]	$0.55\lambda \times 0.41\lambda \times 0.014\lambda$	746-960 / 1710-2690	25.1% / 44.5% ($ S_{11} < -6$ dB)	N/A
[4]	$0.41\lambda \times 0.21\lambda \times 0.002\lambda$	824-960 / 1710-2690	15.2% / 44.5% ($ S_{11} < -6$ dB)	0.98 – 5.1
[5]	$0.47\lambda \times 0.35\lambda \times 0.001\lambda$	700-950 / 1700-2650	30.3% / 43.7% ($ S_{11} < -6$ dB)	N/A
[6]	$0.35\lambda \times 0.19\lambda \times 0.002\lambda$	801-1002 / 1695-3000	22.3% / 55.6% ($ S_{11} < -6$ dB)	0.7 – 3.4
[11]	$0.3\lambda \times 0.15\lambda \times 0.013\lambda$	760-1000 / 1550-2550	27.3% / 48.8% ($ S_{11} < -6$ dB)	0.22 – 3.78
[12]	$0.78\lambda \times 0.31\lambda \times 0.051\lambda$	2350-3250	32.1% ($ S_{11} < -10$ dB)	N/A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การจำลองผลของสายอากาศ

3.1 บทนำ

ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงการออกแบบสายอากาศช่วงความถี่กว้างแบบแผ่นแขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 และระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยทำการจำลองด้วยโปรแกรม จากการจำลองนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของส่วนประกอบต่างๆ ในโครงสร้างของสายอากาศที่สามารถทำให้สายอากาศมีขนาดเล็กและสามารถเพิ่มช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศได้อีกทั้งยังคงคุณสมบัติด้านอัตราขยายของสายอากาศไว้ตลอดช่วงกว้างความถี่

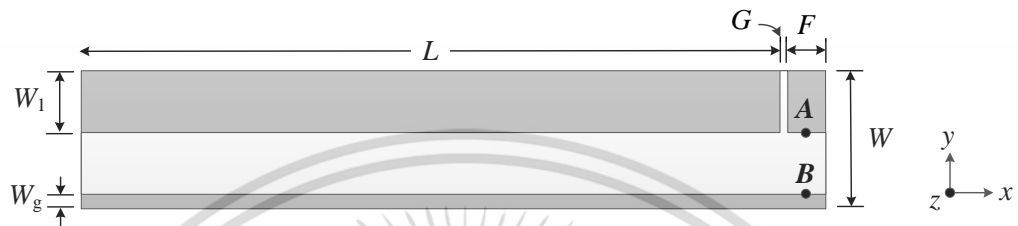
3.2 สายอากาศแบบแพทช์แขนเดี่ยวด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้า

ในการออกแบบนี้จะเริ่มต้นจากการจำลองเพื่อศึกษาโครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์แขนเดี่ยวด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้า (Single-Arm Capacitively Coupled Patch Antenna) รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์แขนเดี่ยวด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้า โดยสายอากาศถูกออกแบบด้วยวัสดุฐานรองชนิด FR4 ที่มีความหนา 0.8 mm โดยมีจุดป้อนสัญญาณไฟฟ้าที่จุด A ณ แผ่นตัวนำที่เล็กที่สุดด้านขวาบนของรูปที่ 3.1 มีขนาดเท่ากับ $(F \times W_1)$ 2 mm \times 4 mm และที่จุด B เชื่อมต่อเป็นลักษณะของระนาบกราวด์ซึ่งในจุดเชื่อมสำหรับการป้อนสัญญาณที่จุด AB นี้จะเชื่อมต่อโดยตรงกับสายนำสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 Ω สัญญาณที่ป้อนเข้าไปยังโครงสร้างของสายอากาศนี้จะถูกคัปปลิงข้ามช่องว่างคล้ายกับประจุไฟฟ้าไปยังแผ่นตัวนำอีกด้านหนึ่งที่ช่องว่าง G ขนาดเท่ากับ 0.5 mm โดยแผ่นตัวนำนั้นทำหน้าที่เป็นแผ่นการแพร่กระจายคลื่นมีขนาดเท่ากับ $L \times W_1$ มีระนาบกราวด์บาง ($W_g = 1$ mm) ที่ด้านล่างซึ่งเชื่อมต่อกับกราวด์ของสายส่ง 50 Ω ที่จุด B เนื่องจากสายอากาศได้รับการออกแบบโดยใช้โครงสร้างของไดโพลแบบบ่วงเป็นพื้นฐานโครงสร้างดังนั้นการออกแบบครั้งแรกของสายอากาศจึงมีความยาวรวมประมาณหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น ($\lambda/4$) ที่สอดคล้องกันและได้ทำการเพิ่มช่องว่างความจุไฟฟ้า (Capacitive Gap) ใกล้กับจุดป้อนสัญญาณเพื่อเฟสของสัญญาณที่เลื่อนบนแขนของส่วนการแพร่กระจายคลื่นซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้ อย่างไรก็ตามความกว้างที่เหมาะสมของช่องว่างจะทำให้เกิดการหักล้างกันของสัญญาณที่คัปปลิงระหว่างแขนทั้งสองเป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศดีขึ้นในช่วงความถี่ที่พิจารณา

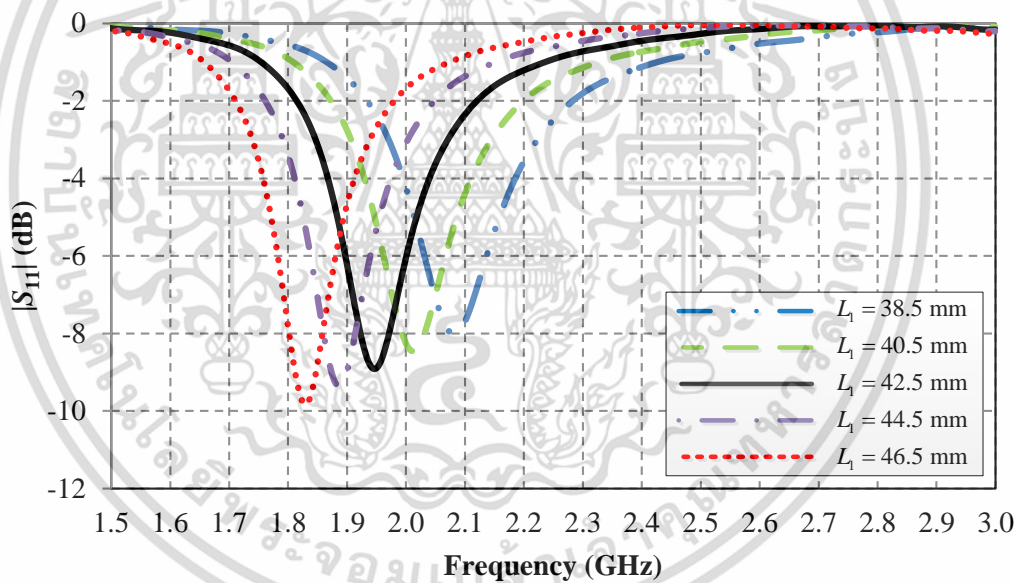
จากนั้นเพื่อศึกษาผลกระทบของความยาวแขนในส่วนของการแพร่กระจายคลื่น (L) โดยได้ทำการจำลองผลเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของแขนเปลี่ยนแปลงจาก 38.5 mm 40.5 mm 42.5 mm 44.5 mm และ 46.5 mm ตามลำดับ รูปที่ 3.2 แสดงค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนเดี่ยวด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของแขนจะเห็นว่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศที่ออกแบบได้รับอิทธิพลจากความยาวของแขนในส่วนของการแพร่กระจายคลื่นเมื่อแขนมีความยาวเพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนลงไปที่ความถี่ต่ำและเมื่อแขนมีความยาวลดลงจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ย้ายไปที่ความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากโครงสร้างของของสายอากาศแบบแพทช์แขนเดี่ยวด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้า นี้มีความถี่เรโซแนนซ์เพียงหนึ่งความถี่เท่านั้นและในการออกแบบสายอากาศมีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มช่วงกว้างความถี่จึงได้ใช้แนวคิดการออกแบบให้สายอากาศเกิดการเรโซแนนซ์หลายความถี่ด้วยการเพิ่มส่วนการแพร่กระจายคลื่นเข้าไปอีกจึงทำให้การออกแบบนี้นำไปสู่การออกแบบสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่ง (Dual-arm Capacitively Coupled Patch Antenna)



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์แขนเดี่ยวด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้า

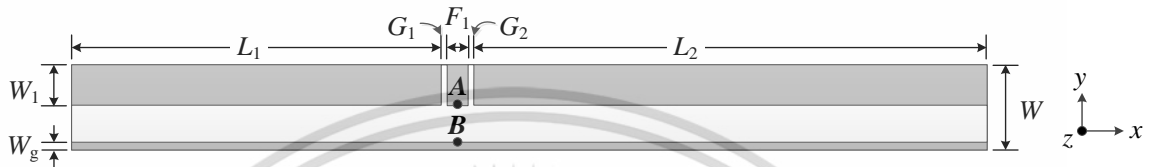


รูปที่ 3.2 $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนเดี่ยวด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้า เปลี่ยนแปลงค่าความยาวของแขน

3.3 สายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่ง

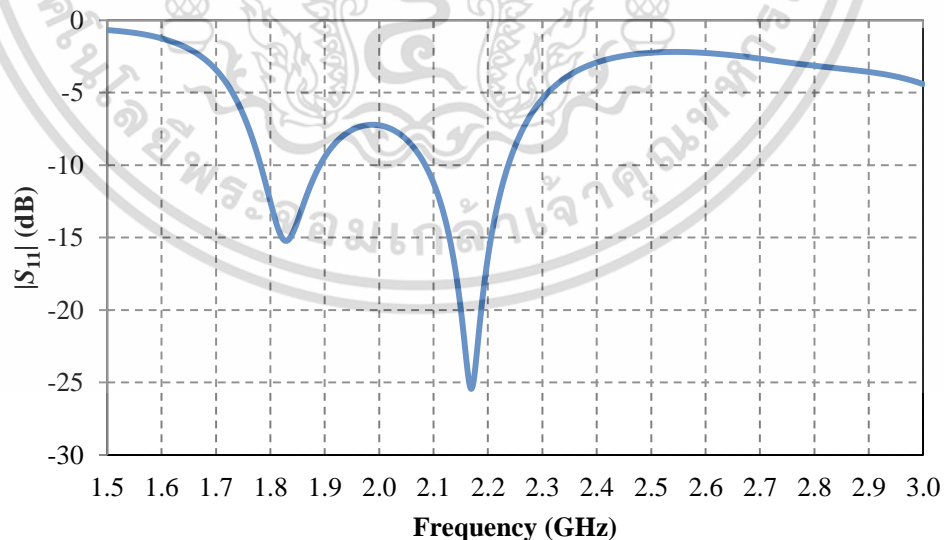
เมื่อทำการเพิ่มแขนในส่วนการแพร่กระจายคลื่นเพื่อทำให้เกิดการเรโซแนนซ์หลายความถี่ทำให้ได้โครงสร้างเป็นสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่ง (Dual-arm Capacitively Coupled Patch Antenna) ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 3.3 ใช้แผ่นวงจรพิมพ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Printed Circuit Board : PCB) ชนิด FR4 ที่มีความหนา 0.8 mm มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative Permittivity : ϵ_r) เท่ากับ 4.3 เป็นวัสดุฐานรอง อย่างไรก็ตามจากรูปได้มีการเพิ่มช่องว่างเข้าไปด้วยในแกนอีกด้านหนึ่งเป็นผลทำให้แกนการแพร่กระจายคลื่นทั้งสองแผ่นใช้ระนาบกราวด์และจุดบ่อนสัญญาณร่วมกัน โดยแกนที่เพิ่มขึ้นมีค่าความยาวเท่ากับ L_2 ด้วยความยาวของแกนที่ต่างกันนี้จะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์เพิ่มขึ้นที่ความถี่ต่างกันด้วย



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์แกนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่ง

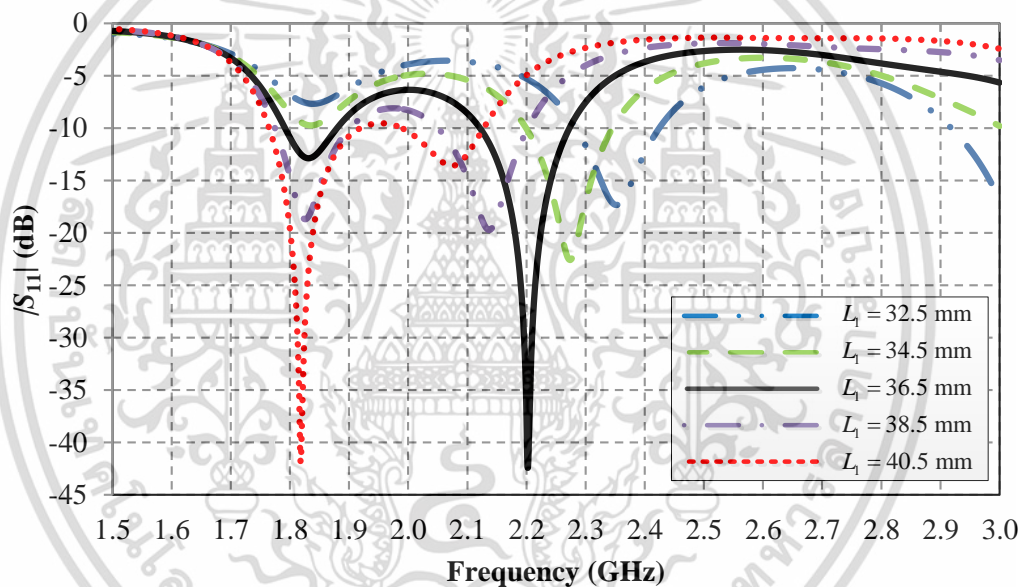
รูปที่ 3.4 แสดงค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบแพทช์แกนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งเมื่อกำหนดให้ค่าความยาวแกนทั้งสองข้าง $L_1 = 36$ mm และ $L_2 = 50$ mm จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีการเกิดเรโซแนนซ์เพิ่มขึ้นที่ความถี่ 2.16 GHz อีกหนึ่งความถี่เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบแพทช์แกนเดี่ยวด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้า ดังนั้นด้วยแนวคิดการออกแบบนี้จะสามารถปรับปรุงช่วงกว้างความถี่ได้ด้วยการขยายความถี่เรโซแนนซ์ทั้งสองโดยการเพิ่มขนาดของแพทช์สายอากาศ



รูปที่ 3.4 $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบแพทช์แกนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งเมื่อ $L_1 = 36$ mm และ $L_2 = 50$ mm

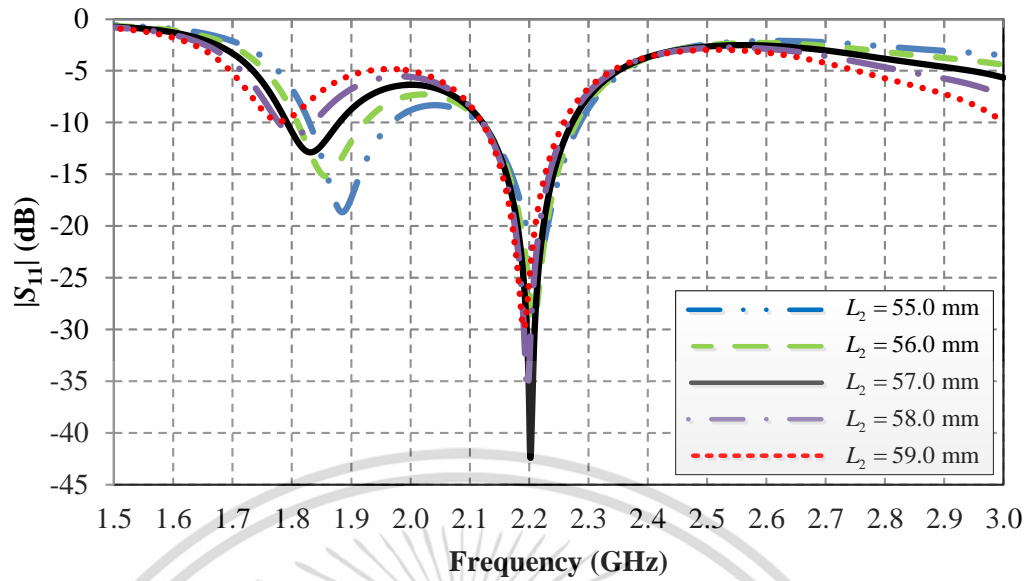
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการศึกษาผลกระทบของความยาวแขนทั้งสองข้างของสายอากาศด้วยการจำลอง แล้วเปลี่ยนค่าความยาวของแขนไปทีละด้านโดยเริ่มจากปรับเปลี่ยนความยาว L_1 ให้มีค่าเท่ากับ 32.5 mm 34.5 mm 36.5 mm 38.5 mm และ 40.5 mm ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 3.5 (ก) พบว่าค่า $|S_{11}|$ เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ความถี่ต่ำโดยมีลักษณะการเรโซแนนซ์ที่มีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB เมื่อความยาวของ L_1 มีค่าเพิ่มขึ้น ถัดมาเมื่อปรับเปลี่ยนความยาว L_2 ให้มีค่าเท่ากับ 55.0 mm 56.0 mm 57.0 mm 58.0 mm และ 59.0 mm ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 3.5 (ข) พบว่าค่า $|S_{11}|$ เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ความถี่สูงโดยมีลักษณะการเรโซแนนซ์ที่มีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB เมื่อความยาวของ L_2 มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าแขนที่หนึ่ง (L_1) ของสายอากาศนั้นจะให้การตอบสนองที่ความถี่ด้านต่ำและแขนที่สอง (L_2) ของสายอากาศนั้นจะให้การตอบสนองที่ความถี่ด้านสูงตามลำดับ



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

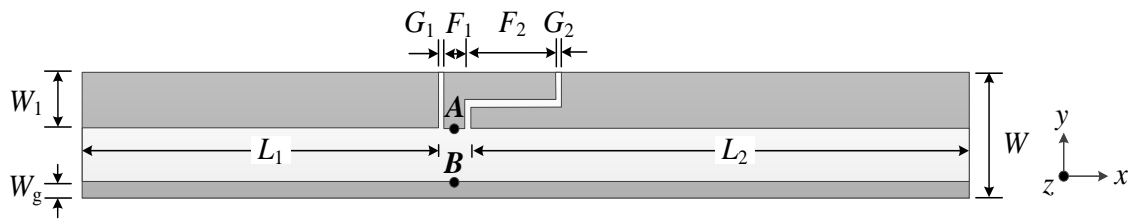
รูปที่ 3.5 $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่ง(ก) ปรับเปลี่ยนค่า L_1 และ (ข) ปรับเปลี่ยนค่า L_2

นอกจากนี้จากผลการจำลองในรูปที่ 5(ก) และ 5(ข) ยังแสดงให้เห็นว่าความลาดเอียงลงของการเกิดเรโซแนนซ์ทั้งสองความถี่นั้นมีความถี่ที่สามารถรวมกันได้อย่างสร้างสรรค์เมื่อความยาวของแขนทั้งสองถูกปรับอย่างเหมาะสมจะส่งผลให้ช่วงกว้างความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นจากการรวมกันของความถี่เรโซแนนซ์ทั้งสองความถี่ ถึงแม้ว่าสายอากาศที่นำเสนอในหัวข้อนี้จะมีลักษณะของช่วงกว้างความถี่จาก 1.74 GHz ถึง 2.35 GHz แต่ก็ยังไม่สามารถที่จะครอบคลุมการใช้งานสำหรับ 4G LTE 1700 MHz (1.71 GHz ถึง 2.17 GHz) และย่านความถี่ Wi-Fi (2.4 GHz ถึง 2.485 GHz) ดังนั้นจึงต้องทำการพัฒนาด้วยการใช้เทคนิคการเพิ่มช่วงกว้างความถี่อื่นเข้ามาช่วย

3.4 สายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอก

จากโครงสร้างเดิมของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าเพื่อให้เกิดช่วงกว้างความถี่ที่เพิ่มขึ้นจึงได้ทำการปรับรูปแบบของการคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าเดิมจากที่มีลักษณะเป็นช่องว่างแนวตรงเป็นลักษณะของช่องว่างแบบข้อศอก รูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอก จากรูปได้เริ่มทำการเพิ่มช่องแบบข้อศอกระหว่างจุดป้อนสัญญาณและแขนด้านที่สองซึ่งจะเห็นได้ว่าทำให้มีส่วนของแผ่นที่ใช้ในการป้อนสัญญาณบางส่วนยื่นเข้าไปในแขนด้านที่สองเพิ่มขึ้นกำหนดให้เป็นความยาวเท่ากับ F_2 จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของช่องว่างสำหรับคัปปลิ่งจะส่งผลต่อความต้านทานของสายอากาศซึ่งส่งผลให้มีการปรับปรุงคุณสมบัติช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศได้

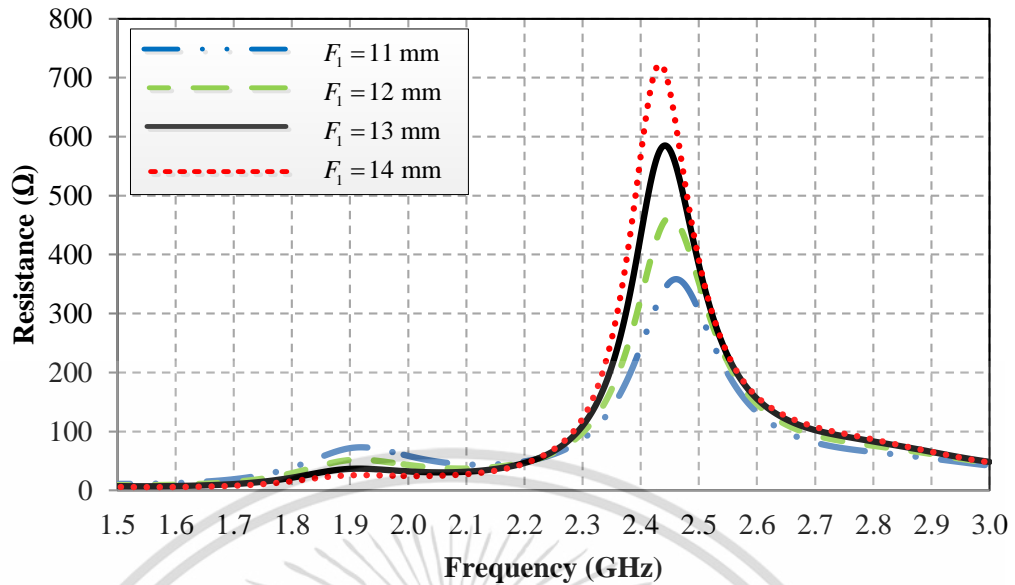
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



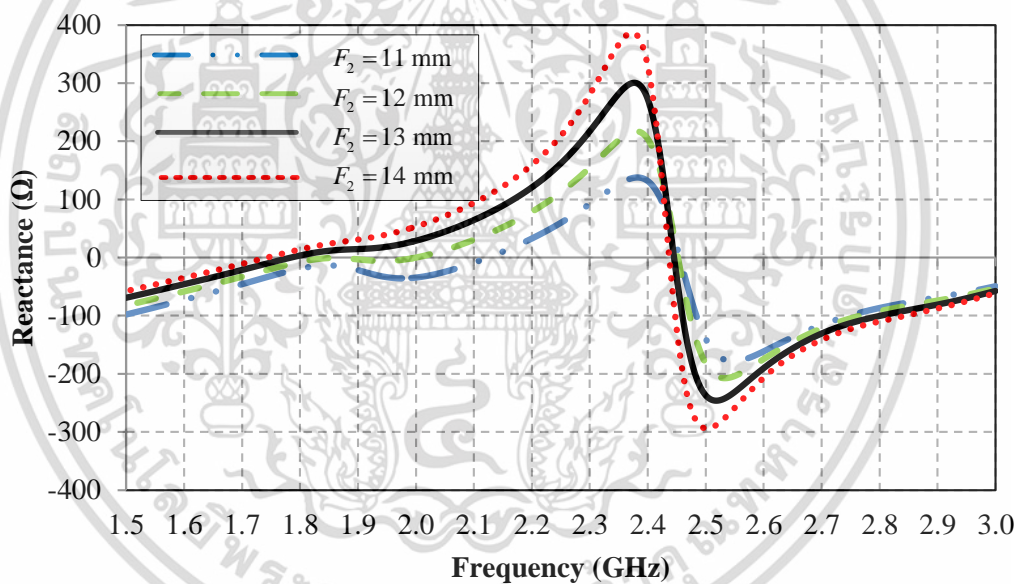
รูปที่ 3.6 โครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอก

เพื่อศึกษาผลกระทบของส่วนการป้อนสัญญาณที่ยื่นเข้าไปยังแขนด้านที่สองเพื่อประโยชน์ในการปรับปรุงช่วงกว้างความถี่นั้นจึงได้ทำการจำลองด้วยการปรับค่าความยาวในส่วนของการป้อนสัญญาณที่พารามิเตอร์ F_1 และ F_2 เริ่มจากการปรับค่าพารามิเตอร์ F_1 เท่ากับ 11 mm 12 mm 13 mm และ 14 mm ตามลำดับ พบว่าได้ผลของค่าความต้านทานต่อความถี่ของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 3.7 (ก) ซึ่งเมื่อความยาวของแผ่นการป้อนสัญญาณ F_1 มีความยาวเพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้านทานของสายอากาศเพิ่มขึ้นตาม เนื่องมาจากกระแสที่ไหลไปตามเส้นสายนำสัญญาณซึ่งในการเพิ่มแผ่นการป้อนสัญญาณนั้นจะทำให้พื้นที่สำหรับการคัปปลิงสัญญาณไปยังแขนนั้นน้อยลงจึงเป็นผลทำให้มีค่าความต้านทานเพิ่มมากขึ้น

ถัดมาเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ F_2 เท่ากับ 11 mm 12 mm 13 mm และ 14 mm ตามลำดับ พบว่าได้ผลของค่าความต้านทานต่อความถี่ของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 3.7(ข) ซึ่งเมื่อความยาวของแผ่นการป้อนสัญญาณ F_2 มีความยาวเพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้านทานของสายอากาศเพิ่มขึ้นตามอีกทั้งยังทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนไปทางความถี่ต่ำ ซึ่งในการที่ความยาวรวมของการคัปปลิงเพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (Capacitance : C) ดังสมการ $-j/\omega C$



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.7 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบแพทช์แบนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอก
(ก) ปรับค่าพารามิเตอร์ F_1 (ข) ปรับค่าพารามิเตอร์ F_2

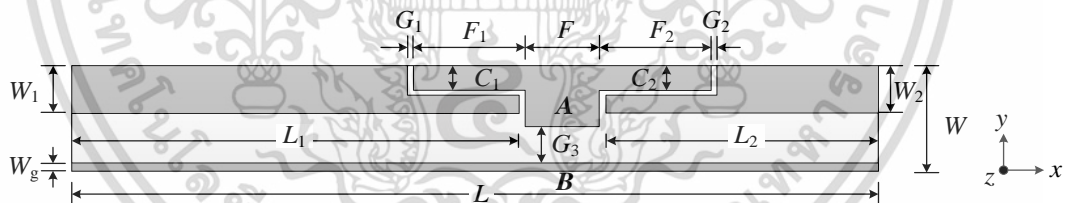
3.5 สายอากาศแบบแพทช์แบนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่

การศึกษาพารามิเตอร์และแนวคิดการออกแบบต่างในหัวข้อที่ผ่านมาจึงได้นำไปสู่การออกแบบที่เหมาะสมของสายอากาศเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานในระบบการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคที่ 4G และเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย โดยใช้แนวทางการออกแบบที่กล่าวก่อนหน้านี้และเพิ่มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การค้ำปลีงความจุไฟฟ้าแบบข้อคอกไปที่แขนทั้งสองข้างของสายอากาศจะทำให้ได้โครงสร้างของสายอากาศใหม่แสดงดังรูปที่ 3.8

รูปที่ 3.8 แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคค้ำปลีงความจุไฟฟ้าแบบข้อคอกคู่แบบด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ที่มีหนา 0.8 mm มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์เท่ากับ 4.3 เป็นวัสดุฐานรองมีขนาดรวม 70 mm × 9 mm × 0.8 mm จุดป้อนสัญญาณรูปตัวทีมีขนาดของแผ่นเท่ากับ $F = 6$ mm $F_1 = F_2 = 9$ mm และ $C_1 = C_2 = 2$ mm ซึ่งอยู่ระหว่างแผ่นแขนการแพร่กระจายคลื่นทั้งสองมีช่องว่าง $G_1 = G_2 = 0.5$ mm ซึ่งในส่วนของการแพร่กระจายคลื่นแบบแขนทั้งสองข้างมีขนาด $L_1 \times W_1 = 36$ mm × 4 mm และ $L_2 \times W_2 = 22$ mm × 4 mm ตามลำดับ ในส่วนของระนาบกราวด์นั้นมีแผ่นกราวด์ความกว้างเท่ากับ 1 mm วางตัวอยู่ด้านล่างของส่วนการแพร่กระจายคลื่นทั้งสองด้วยระยะห่าง $G_3 = 3$ mm

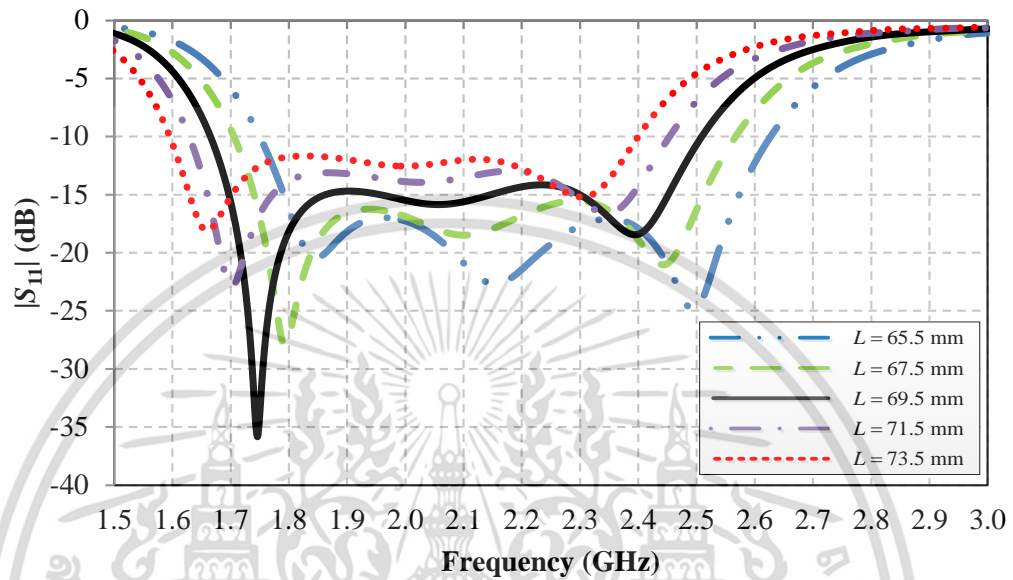
เมื่อเชื่อมต่อสายนำสัญญาณเพื่อป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศที่จุด A และกราวด์เชื่อมต่อกับแถบกราวด์ที่จุด B จะทำให้สัญญาณความถี่เกิดการค้ำปลีงเชื่อมต่อกับแพทช์ป้อนสัญญาณไปยังแผ่นของแขนสำหรับแพร่กระจายคลื่น การออกแบบช่องว่างความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมจะสามารถเพิ่มช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศที่นำเสนอได้ซึ่งช่องว่างตัวเก็บประจุนี้ยังเป็นหนึ่งในวิธีการลดขนาดของสายอากาศที่ส่งผลให้แถบการแพร่กระจายคลื่นที่มีความยาว 0.288 λ และ 0.139 λ สำหรับความถี่เท่ากับ 1.7 GHz และ 2.45 GHz ที่สอดคล้องกัน ดังนั้นสายอากาศที่เสนอมีขนาดไฟฟ้า $0.5 \lambda_{\min}$



รูปที่ 3.8 โครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคค้ำปลีงความจุไฟฟ้าแบบข้อคอกคู่

เพื่อพิจารณาคุณสมบัติของช่วงกว้างความถี่ที่ถูกปรับปรุงให้กว้างมากขึ้นจึงได้นำการพิจารณาการกระจายกระแสบนพื้นผิวแผ่นตัวนำของของสายอากาศมาพิจารณาเพิ่มเติมโดยจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio [17] ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าการกระจายกระแสบนพื้นผิวแผ่นตัวนำมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ใช้งาน จากรูปจะเห็นได้ว่าลักษณะการไหลของกระแสจากจุดป้อนสัญญาณจะเดินทางจากจุดป้อนสัญญาณค้ำปลีงไปยังแขนทั้งสองข้างเป็นลักษณะเส้นตรงแล้วไหลลงไปที่ระนาบกราวด์จากลักษณะของการกระจายกระแสบนพื้นผิวแผ่นตัวนำจะเห็นว่ามีความแรงตรงขอบด้านล่างและกระจายตัวไปทั่วทั้งแผ่น ซึ่งทำให้สามารถคาดเดาได้ว่าจะทำให้ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศมีค่ามากขึ้นและมีลักษณะของโพลาริเซชันเชิงเส้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศจะมีผลกับช่วงความถี่ทั้งหมดและความถี่เรโซแนนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงไปทางความถี่ด้านต่ำและที่ความยาว L เท่ากับ 69.5 mm สายอากาศจะให้ผล $|S_{11}|$ ที่ดีและครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งานทั้งหมด

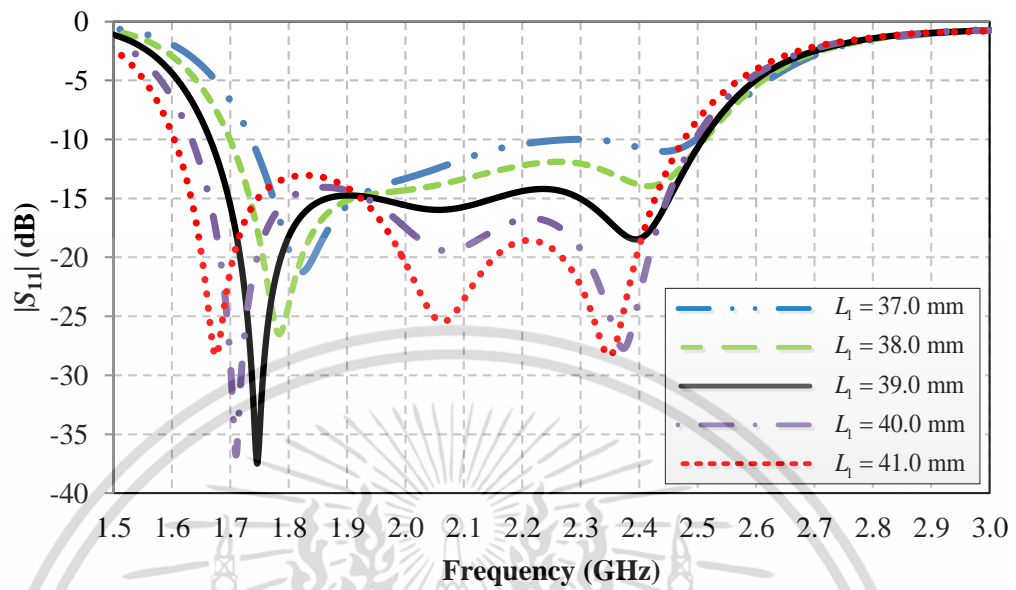


รูปที่ 3.10 $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ เมื่อปรับเปลี่ยนความยาว L

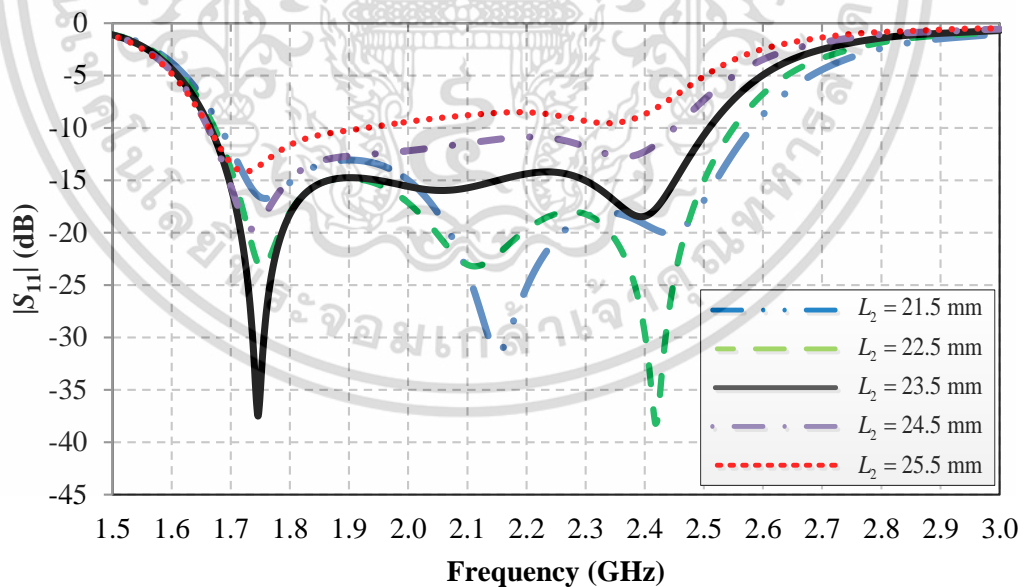
ถัดมาทำการปรับเปลี่ยนค่าความยาว L_1 ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่โดยค่า L_1 มีค่าเท่ากับ 37.0 mm 38.0 mm 39.0 mm 40.0 mm และ 41.0 mm เมื่อพิจารณาค่า $|S_{11}|$ ที่เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในรูปที่ 3.11 จากความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของแขนยาวและค่า $|S_{11}|$ ดังจะเห็นได้ว่าความแปรผันของ L_1 อย่างมีนัยสำคัญจะส่งผลกระทบต่อความถี่เรโซแนนซ์ด้านความถี่ต่ำ ซึ่งผลลัพธ์นี้สอดคล้องกันด้วยแนวคิดการออกแบบสายอากาศที่แขนด้านยาวจะเป็นส่วนทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ด้านต่ำ จึงได้เลือกความยาวแขน $L_1 = 39$ mm เนื่องจากทำให้เกิดการแมตซ์ทางอิมพีแดนซ์ที่ดีที่สุดที่ความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 1.7 GHz

ถัดมาทำการปรับเปลี่ยนค่าความยาว L_2 ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่โดยค่า L_2 มีค่าเท่ากับ 21.5 mm 22.5 mm 23.5 mm 24.5 mm และ 25.5 mm เมื่อพิจารณาค่า $|S_{11}|$ ที่เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในรูปที่ 3.12 จากความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของแขนยาวและค่า $|S_{11}|$ ดังจะเห็นได้ว่าความแปรผันของ L_2 อย่างมีนัยสำคัญจะส่งผลกระทบต่อความถี่เรโซแนนซ์ด้านความถี่สูง จึงได้ทำการปรับความยาวของแขน (L_2) เพื่อพิจารณาหา

ช่วงกว้างความถี่ที่เหมาะสมที่สุดและได้เลือกความยาวแขนของ $L_2 = 23.5$ mm และทำให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2.5 GHz



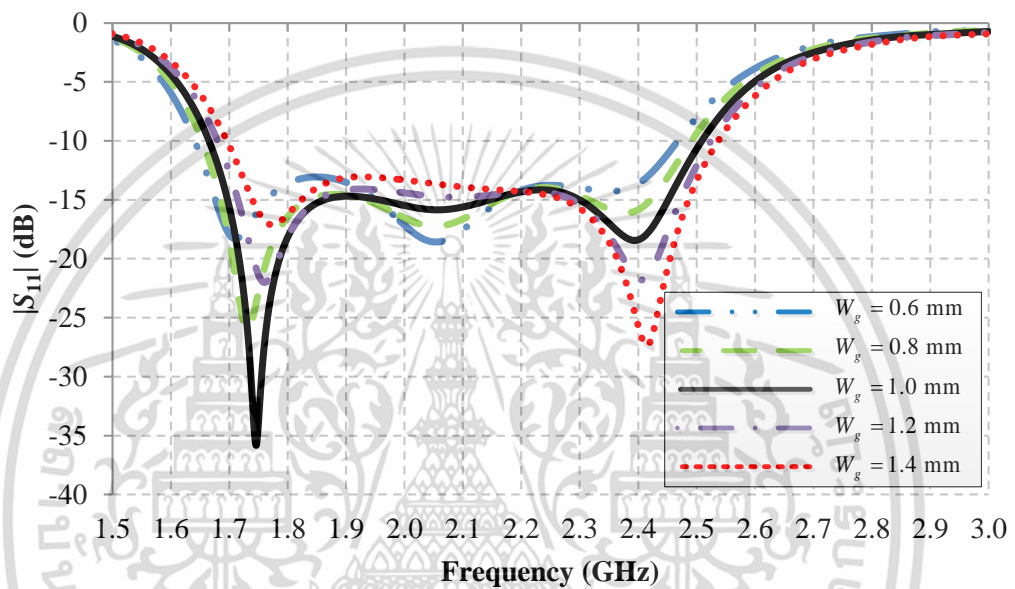
รูปที่ 3.11 $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ เมื่อปรับเปลี่ยนความยาว L_1



รูปที่ 3.12 $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ เมื่อปรับเปลี่ยนความยาว L_2

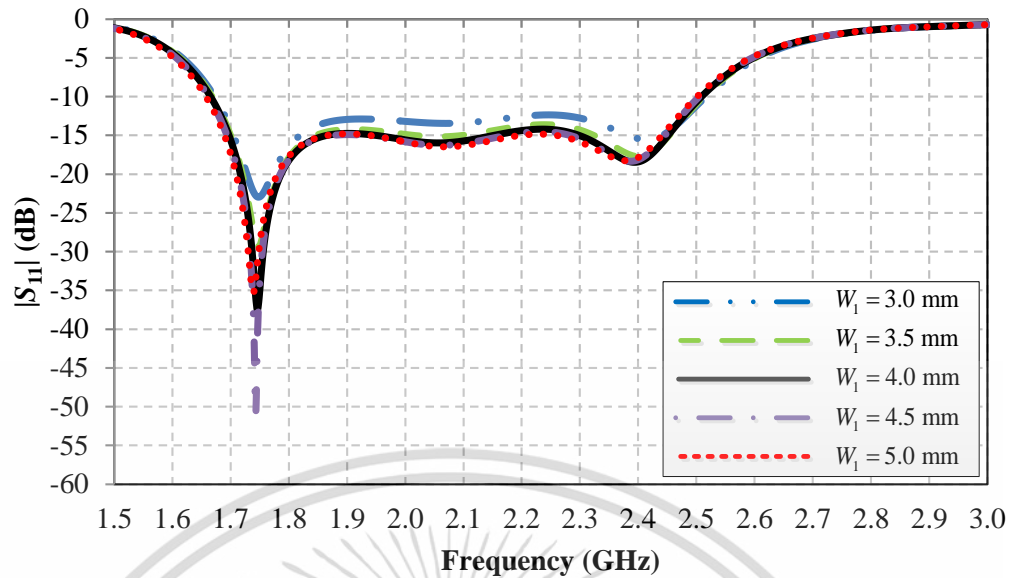
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาผลกระทบจากความกว้างของแถบกราวด์กับการแมตซ์ทางอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่นำเสนอจะแสดงในรูปที่ 3.13 จะเห็นได้ว่าการปรับเปลี่ยนค่า W_g มีค่าเท่ากับ 0.6 mm 0.8 mm 1.0 mm 1.2 mm และ 1.4 mm ค่า $|S_{11}|$ ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้ช่วงกว้างความถี่เกิดการแมตซ์ดีขึ้นและมีผลกระทบค่อนข้างมากที่ความถี่เรโซแนนซ์ด้านต่ำจากผลลัพธ์ของพารามิเตอร์พบว่าความกว้างของแถบกราวด์ $W_g = 1$ mm สามารถให้ผลลัพธ์การการแมตซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำได้ดีและยังคงการแมตซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ด้านสูงไว้ได้



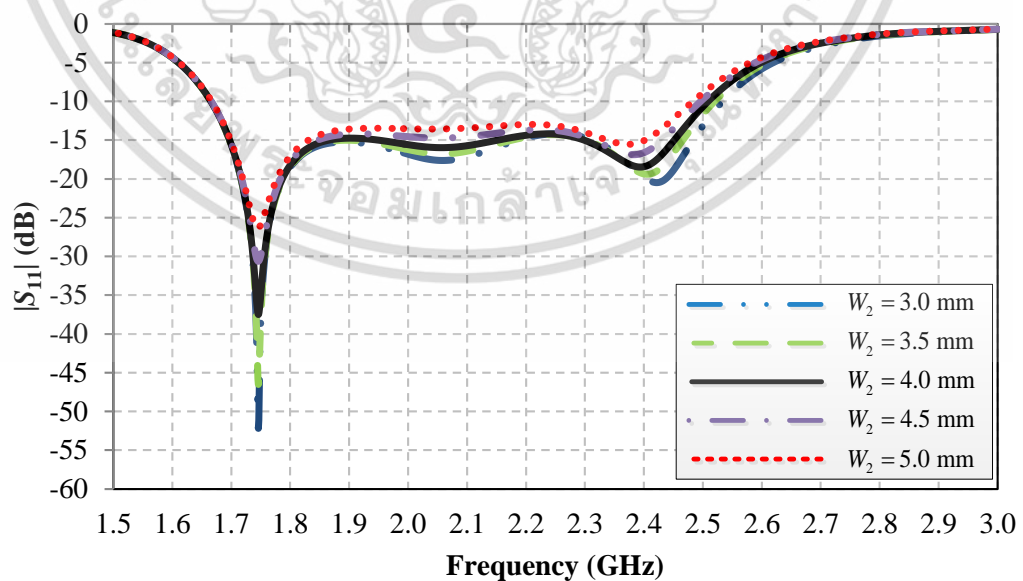
รูปที่ 3.13 $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบแพทช์แบนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อต่อคู่เมื่อปรับเปลี่ยนความกว้าง W_g

เมื่อพิจารณาผลกระทบจากความกว้างของแขนการแพร่กระจายคลื่นกับการแมตซ์ทางอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่นำเสนอจะแสดงในรูปที่ 3.14 จะเห็นได้ว่าการปรับเปลี่ยนค่า W_1 มีค่าเท่ากับ 3.0 mm 3.5 mm 4.0 mm 4.5 mm และ 5.0 mm ผลของแขนด้านยาวที่มีความกว้างเพิ่มขึ้นทำให้ค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่นำเสนอเกิดการแมตซ์ที่ไม่ค่อยดีนักที่ความกว้างน้อยกว่า 4 mm ซึ่งส่งผลต่อขนาดโดยรวมของสายอากาศดังนั้นความกว้างของแขนด้านยาวจึงถูกเลือกให้มีขนาด $W_1 = 4.0$ mm



รูปที่ 3.14 $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ เมื่อปรับเปลี่ยนความกว้าง W_1

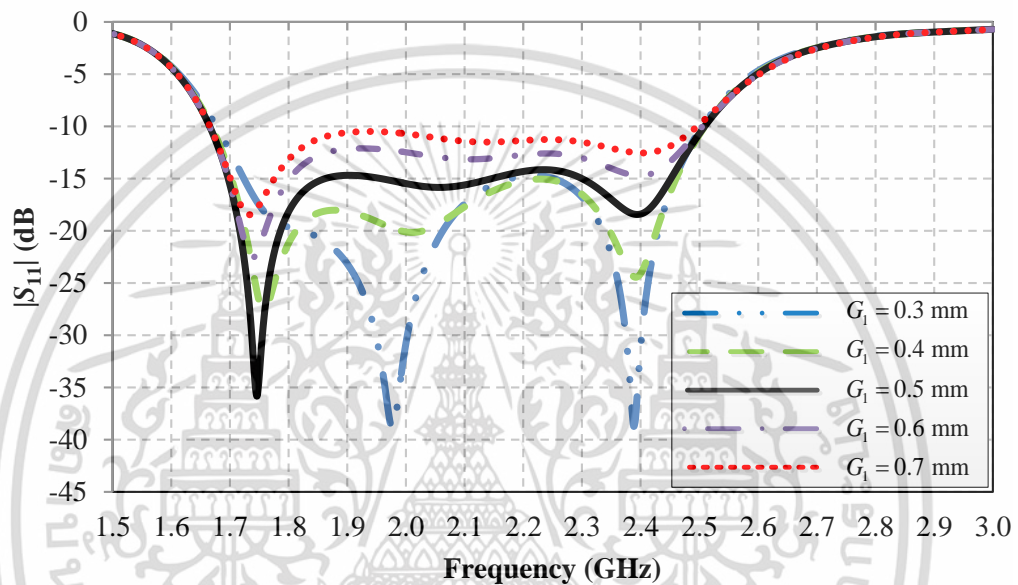
ถัดมาพิจารณาผลกระทบจากความกว้างของแขนการแพร่กระจายคลื่นด้านสั้นกับการแมตซ์ทางอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่นำเสนอจะแสดงในรูปที่ 3.15 จะเห็นได้จากการปรับเปลี่ยนค่า W_2 มีค่าเท่ากับ 3.0 mm 3.5 mm 4.0 mm 4.5 mm และ 5.0 mm ผลของแขนด้านสั้นที่มีความกว้างเพิ่มขึ้นทำให้ค่า $|S_{11}|$ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในรูปของช่วงกว้างความถี่และความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นความกว้างของแขนด้านสั้นจึงกำหนดให้มีค่า $W_2 = 4.0$ mm



รูปที่ 3.15 $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ เมื่อปรับเปลี่ยนความกว้าง W_2

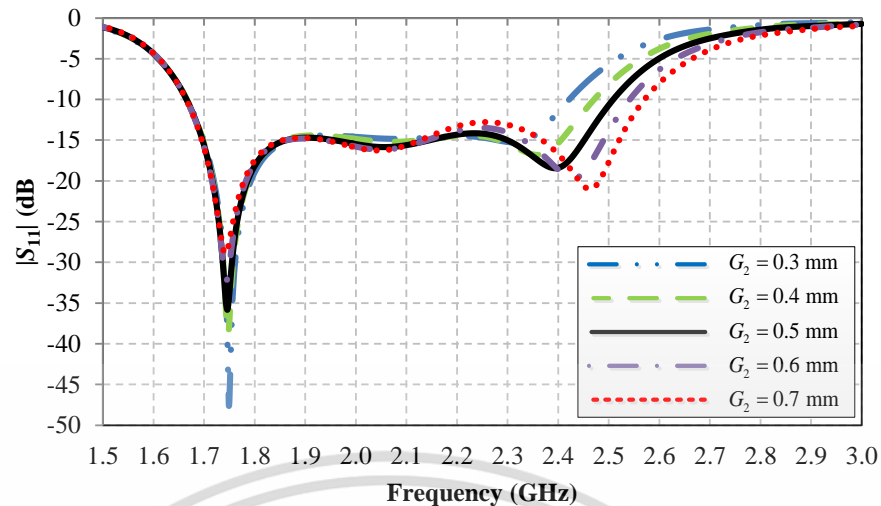
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาผลกระทบจากความกว้างของช่องว่าง ณ แขนด้านยาวกับการแมตซ์ทางอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่นำเสนอจะแสดงในรูปที่ 3.16 จะเห็นได้ว่าจากการปรับเปลี่ยนค่า G_1 มีค่าเท่ากับ 0.3 mm 0.4 mm 0.5 mm 0.6 mm และ 0.7 mm ในรูปที่ 3.16 ผลการจำลองแสดงว่าขนาดช่องว่างที่เล็กลงทำให้การแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีขึ้นที่ความถี่เรโซแนนซ์ด้านต่ำแต่อย่างไรก็ตามขนาดที่แท้จริงของช่องว่างถูกจำกัดด้วยกรรมวิธีการผลิตดังนั้นขนาดช่องว่างที่เหมาะสมของ $G_1 = 0.5$ mm



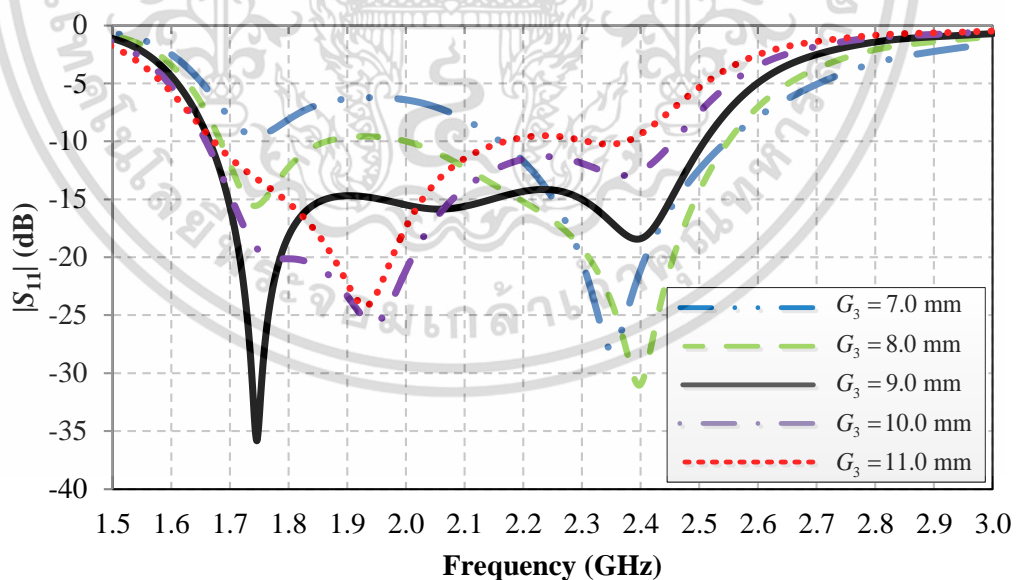
รูปที่ 3.16 $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ เมื่อปรับเปลี่ยนความกว้างของช่องว่าง G_1

เมื่อพิจารณาผลกระทบจากความกว้างของช่องว่าง ณ แขนด้านสั้นกับการแมตซ์ทางอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่นำเสนอจะแสดงในรูปที่ 3.17 จะเห็นได้ว่าจากการปรับเปลี่ยนค่า G_2 มีค่าเท่ากับ 0.3 mm 0.4 mm 0.5 mm 0.6 mm และ 0.7 mm ในรูปที่ 3.17 จะเห็นได้ว่าช่องว่าง G_2 ที่มากกว่า 0.5 mm จะส่งผลให้การแมตซ์ทางอิมพีแดนซ์แย่งลงที่ความถี่ประมาณ 2.3 GHz อย่างไรก็ตามขนาดของช่องว่างที่น้อยกว่า 0.5 mm จะส่งผลให้ช่วงกว้างความถี่ต่ำลงดังนั้นจึงเลือกขนาดช่องว่าง $G_2 = 0.5$ mm



รูปที่ 3.17 $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ เมื่อปรับเปลี่ยนความกว้างของช่องว่าง G_2

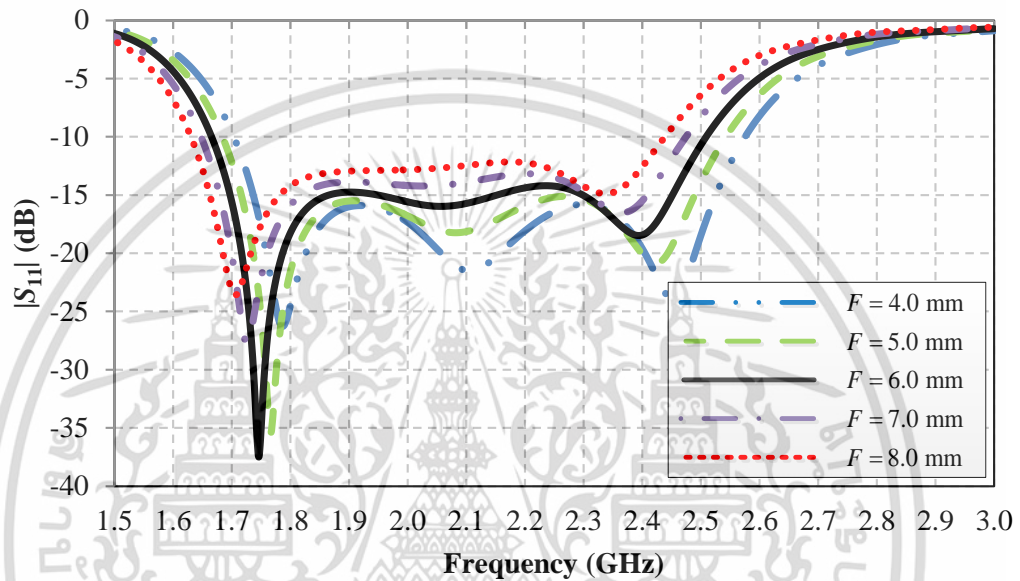
รูปที่ 3.18 แสดงผลกระทบของขนาดช่องว่างระหว่างแผ่นการแพร่กระจายคลื่นและระนาบกราวด์ ซึ่งโดยปกตินั้นสายอากาศแบบไดโพลพื้นฐานควรมีช่องว่างเล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อสร้างการกระจายกระแสสม่ำเสมอ แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างไดโพลแบบนี้ไม่ต้องการความสม่ำเสมอของการกระจายกระแส ดังนั้นขนาดช่องว่าง $G_3 = 4.0$ mm จึงถูกเลือกเนื่องจากหากระยะห่างดังกล่าวมีค่ามากขึ้นจะมีผลอย่างมากต่อช่วงกว้างความถี่และขนาดโดยรวมของสายอากาศ



รูปที่ 3.18 $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ เมื่อปรับเปลี่ยนความกว้างของช่องว่าง G_3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายในรูปที่ 3.19 แสดงค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่นำเสนอเมื่อปรับความกว้างของแผ่นการป้อนที่แตกต่างกันโดยปรับเปลี่ยนค่า F มีค่าเท่ากับ 4.0 mm 5.0 mm 6.0 mm 7.0 mm และ 8.0 mm พบว่าขนาดของแผ่นป้อนสัญญาณจะส่งผลต่อขนาดโดยรวมของสายอากาศและทำให้ช่วงกว้างความถี่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ดังนั้นการขยายช่องป้อนสัญญาณจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ไปทางความถี่ต่ำ จึงเลือกขนาดของแผ่นป้อนสัญญาณ $F = 6$ mm เนื่องจากสามารถสร้างได้ง่ายโดยไม่ต้องเพิ่มขนาดโดยรวมของสายอากาศมากเกินไป



รูปที่ 3.19 $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่เมื่อปรับเปลี่ยนความกว้างของแผ่นการป้อนสัญญาณ F

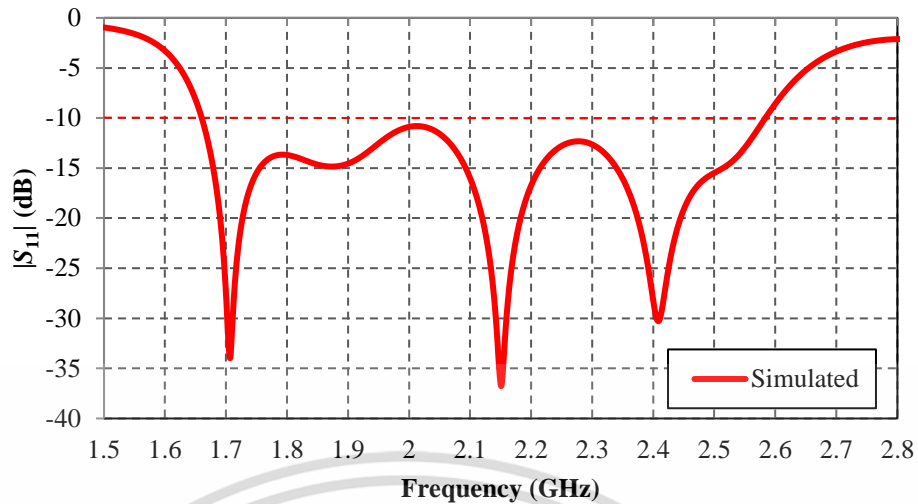
3.7 ผลการจำลองของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่

จากผลการจำลองและพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ดังตารางที่ 3.1 จากผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.20 3.21 และ 3.22 แสดงผลการจำลองของ $|S_{11}|$ อัตราขยายและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ จากนั้นได้นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ทำการออกแบบนี้ไปสร้างสายอากาศต้นแบบและทดสอบคุณสมบัติต่อไปในบทที่ 5

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่

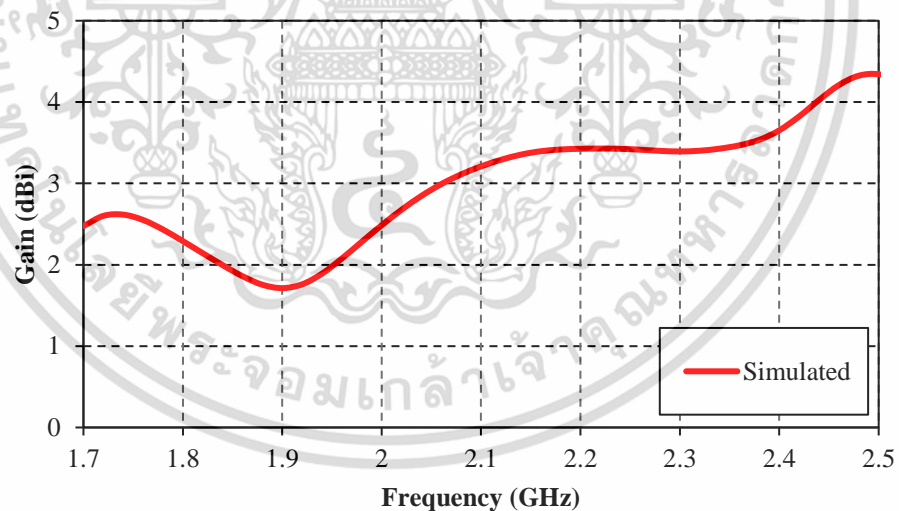
พารามิเตอร์	รายละเอียด	ขนาด (mm)
W	ความกว้างรวมของสายอากาศ	9
L	ความยาวรวมของสายอากาศ	70
W_1	ความกว้างของแขนด้านยาว	4
W_2	ความกว้างของแขนด้านสั้น	4
W_G	ความกว้างของระนาบกราวนด์	1
L_1	ความยาวของแขนด้านยาว	36
L_2	ความยาวของแขนด้านสั้น	22
G_1	ระยะของช่องว่างของแขนด้านยาว	0.5
G_2	ระยะของช่องว่างของแขนด้านสั้น	0.5
G_3	ระยะของช่องว่างระหว่างแขนและระนาบกราวนด์	3
F	ความกว้างของแผ่นป้อนสัญญาณ	6
F_1	ความยาวของแผ่นป้อนสัญญาณที่แขนด้านยาว	9
F_2	ความยาวของแผ่นป้อนสัญญาณที่แขนด้านสั้น	9
C_1	ความกว้างของแผ่นป้อนสัญญาณที่แขนด้านยาว	2
C_2	ความกว้างของแผ่นป้อนสัญญาณที่แขนด้านสั้น	2

ในรูปที่ 3.20 แสดงผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ พบว่าสายอากาศมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ 1.7 GHz ถึง 2.57 GHz มีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 0.8 GHz จะเห็นได้ว่าสายอากาศสามารถที่จะใช้งานได้ที่ความถี่ตั้งแต่ 1.7 GHz ถึง 2.57 GHz หรือสามารถพิจารณาได้ว่าสายอากาศที่นำเสนอนี้มีช่วงกว้างความถี่อิมพีแดนซ์เท่ากับ 40.7% ดังนั้นสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่สามารถทำงานได้ทั้งย่านความถี่ Wi-Fi (2.4 GHz ถึง 2.485 GHz) และที่ระบบการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ 4G (1.7 GHz ถึง 2.2 GHz)



รูปที่ 3.20 $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบแพทช์แบนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่

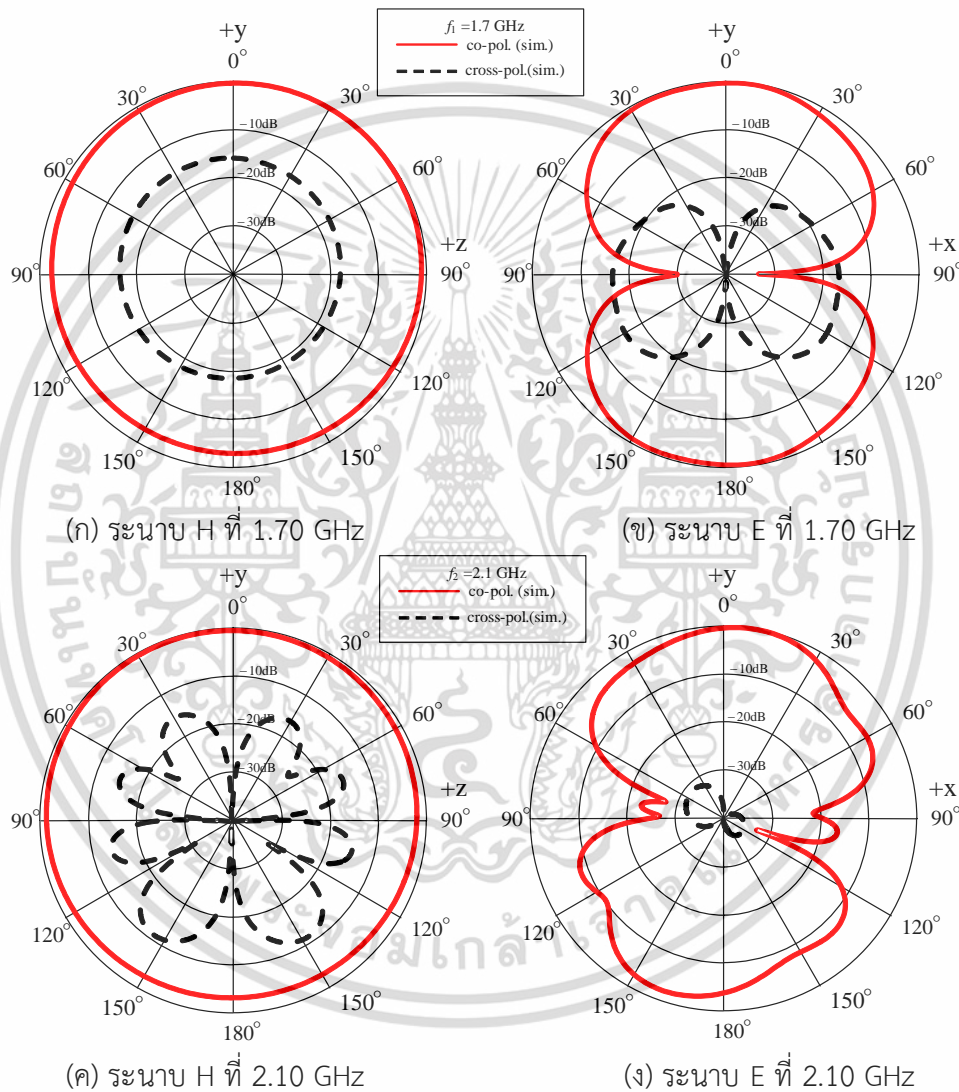
รูปที่ 3.21 แสดงผลการจำลองอัตราการขยายของสายอากาศแบบแพทช์แบนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบต่อความถี่พบว่า อัตราขยายของสายอากาศนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความถี่ใช้งานเพิ่มขึ้นซึ่งค่าอัตราการขยายตลอดช่วงกว้างความถี่ที่พิจารณานั้นมีค่าสูงกว่า 1.7 dBi ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน โดยมีอัตราการขยาย 2.5 dBi 3.2 dBi และ 4.2 dBi ที่ความถี่ 1.7 GHz 2.1 GHz และ 2.45 GHz ตามลำดับ



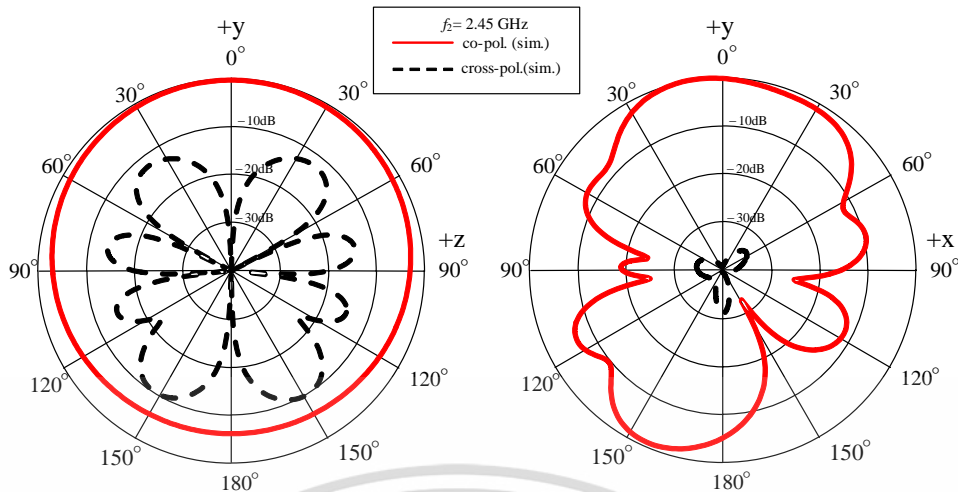
รูปที่ 3.21 อัตราขยาย ณ ความถี่ต่างๆ ของสายอากาศแบบแพทช์แบนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบ

ถัดมาเป็นผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแพทช์แบนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ แสดงดังรูปที่ 3.22 เส้นทึบสีแดงแสดงถึงค่า Co-pol. ในขณะที่สีดำนั้นแสดงค่า Cross-pol. สายอากาศที่นำเสนอมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว (Uni-direction Radiation Pattern) โลกหลักของการแพร่กระจายคลื่นมีความกว้างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ล้าคลื่อนเท่ากับ 75 องศา บนระนาบมุมกวาด ϕ และ 180 องศาบนระนาบมุมยก θ ด้วยโพลาริซิงเส้น จากผลการจำลองที่ความถี่ 1.7 GHz 2.1 GHz และ 2.45 GHz ตามลำดับ พบว่าลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในทั้งสองระนาบมีการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว เมื่อพิจารณาผลการจำลองลักษณะการโพลาริซิงของสายอากาศด้วยผลของโพลาริซิงร่วม (Co-polarized) และโพลาริซิงไขว้ (Cross-polarized) ที่ความถี่ 1.7 GHz 2.1 GHz และ 2.45 GHz ตามลำดับ พบว่าระดับของโพลาริซิงไขว้ของทั้ง 3 ความถี่ นั้นต่ำกว่า -15 dB ซึ่งถือได้ว่าสายอากาศที่นำเสนอมีลักษณะโพลาริซิงเป็นแบบเชิงเส้นที่ดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) ระนาบ H ที่ 2.45 GHz

(ข) ระนาบ E ที่ 2.45 GHz

รูปที่ 3.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อต่อคู่เมื่อปรับเปลี่ยนความกว้างของแผ่นการป้อนสัญญาณ F

3.8 สรุป

จากการออกแบบสายอากาศช่วงความถี่กว้างแบบแผ่นแขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 และระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนี้พบว่า สายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อต่อคู่ สามารถที่จะให้ผลการตอบสนองช่วงกว้างความถี่ที่ดีที่สุดเนื่องจากการทำงานของแขนการแพร่กระจายคลื่นทั้งสองด้าน (ด้านสั้นและด้านยาว) สามารถทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์สองจุดและช่องว่างระหว่างจุดป้อนสัญญาณและแขนการแพร่กระจายคลื่นที่ทำให้เกิดการคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อต่อคู่สามารถที่จะรวมเอาความถี่เรโซแนนซ์ทั้งสองมาทำให้เกิดการตอบสนองช่วงความถี่กว้างได้อย่างเหมาะสม

บทที่ 4

ผลการจำลองและทดสอบ

4.1 บทนำ

ในบทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงการนำเอาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแบบแพทช์แบนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่มาทำการสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบแล้วนำไปทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อเป็นการยืนยันผลการออกแบบในบทที่ 3 ซึ่งในที่นี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศเกี่ยวกับ ค่าอิมพีแดนซ์ ค่า $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โพลาริซั อัตรายาย และช่วงกว้างความถี่ เป็นต้น

4.2 สายอากาศแบบแพทช์แบนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบ

จากผลการออกแบบในบทที่ 3 ได้โครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์แบนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยสายอากาศถูกออกแบบด้วยวัสดุฐานรองชนิด FR4 ที่มีความหนา 0.8 mm มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์เท่ากับ 4.3 เป็นวัสดุฐานรองมีขนาดรวม 70 mm \times 9 mm \times 0.8 mm จุดป้อนสัญญาณรูปตัวที่มีขนาดของแผ่นเท่ากับ $F = 6$ mm $F_1 = F_2 = 9$ mm และ $C_1 = C_2 = 2$ mm ซึ่งอยู่ระหว่างแผ่นแขนการแพร่กระจายคลื่นทั้งสองมีช่องว่าง $G_1 = G_2 = 0.5$ mm ซึ่งในส่วนของแผ่นการแพร่กระจายคลื่นแบบแขนทั้งสองข้างมีขนาด $L_1 \times W_1 = 36$ mm \times 4 mm และ $L_2 \times W_2 = 22$ mm \times 4 mm ตามลำดับ ในส่วนของระนาบกราวด์นั้นมีแผ่นกราวด์ความกว้างเท่ากับ 1 mm วางตัวอยู่ด้านล่างของส่วนการแพร่กระจายคลื่นทั้งสองด้วยระยะห่าง $G_3 = 3$ mm เมื่อทำการสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบได้แสดงดังรูปที่ 4.1 เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศนั้นเป็นลักษณะสมมาตร (Balance) จึงไม่สามารถที่จะเชื่อมต่อกับสายนำสัญญาณแบบโคแอกเซียลซึ่งเป็นสายนำสัญญาณที่มีลักษณะไม่สมมาตร (Unbalance) ได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องสร้างบาลันที่มีความยาว $\lambda/4$ เพื่อเป็นตัวช่วยในการเชื่อมต่อสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของสายอากาศแบบแพทช์แบนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ขั้นตอนการทดสอบสายอากาศ

การทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ และเป็น การตรวจสอบสมรรถนะของสายอากาศที่นำเสนอ จะต้องใช้เครื่องมือที่มีความเที่ยงตรงและแม่นยำ เพื่อทดสอบสายอากาศต้นแบบของสายอากาศแบบ แพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบ เนื่องจากสายอากาศต้นแบบที่ได้ ทำการออกแบบและนำมาทดสอบนั้นครอบคลุมย่านแถบความถี่กว้างโดยใช้เครื่องมือดังนี้

- ห้องไร้การสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟ (Microwave anechoic chamber)
- เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Vector network analyzer Rohde & Schwarz รุ่น ZNLE6)
- สายอากาศฮอร์นมาตรฐาน (Horn Antenna รุ่น A.H. SYSTEMS SAS-571)
- สายนำสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ 50 Ω
- คอนเนคเตอร์

โดยการติดตั้งสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 4.2 เริ่มจากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบสามารถกระทำได้โดยเชื่อมต่อสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิค คัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ เข้ากับสายนำสัญญาณโดยใช้พอร์ตที่ 1 ของเครื่องวิเคราะห์ โครงข่ายยี่ห้อ Rohde & Schwarz รุ่น ZNLE6 และทำการปรับเทียบ (Calibrate) เครื่องวิเคราะห์ โครงข่ายก่อนทำการทดสอบจากนั้นทำการทดสอบโดยสายอากาศจะถูกวางในห้องไร้การสะท้อน ทำ การเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองกับผลการทดสอบสามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 5.3

ในส่วนการทดสอบอัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะต้องกระทำภายในห้องไร้ การสะท้อนคลื่นไมโครเวฟเช่นเดียวกัน โดยจะทำการทดสอบสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิค คัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบ ซึ่งจะทำการทดสอบในแบบสนามระยะไกล (R) โดยการ คำนวณระยะห่างระหว่างสายอากาศภาครับ (สายอากาศต้นแบบ) และสายอากาศภาคส่ง (สายอากาศแบบฮอร์น) จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังสมการที่ 4.1

$$R \geq \frac{2(D^2)}{\lambda} \quad (4.1)$$

โดยที่

- R คือ ระยะของสนามระยะไกล (m)
- D คือ มิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศต้นแบบ (m)
- λ คือ ความยาวคลื่นในอากาศ ณ ที่ความถี่ใช้งาน

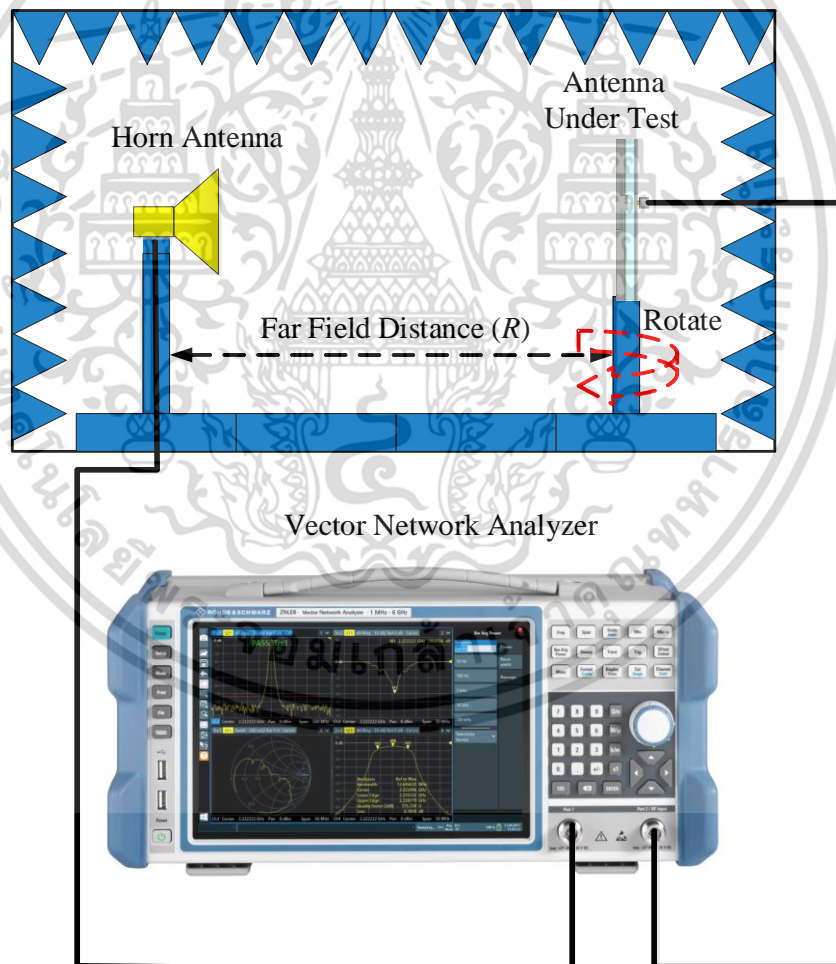
การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบ ข้อศอกคู่ต้นแบบ (สายอากาศภาครับ) สามารถกระทำได้โดยการใช้สายอากาศฮอร์นเป็นสายอากาศ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคส่ง ซึ่งสายอากาศฮอร์นนั้นมีคุณลักษณะโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นและเลือกใช้สายอากาศทั้งภาครับ และภาคส่งแบบโพลาไรซ์ร่วม (Co-polarization) ในการทดสอบอัตราขยาย (G_{rx}) ของสายอากาศ ต้นแบบซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 4.2

$$G_{tx} \text{ (dBic)} + G_{rx} \text{ (dBic)} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rx}}{P_{tx}}\right) \quad (4.2)$$

โดย

- G_{tx} คือ อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง (สายอากาศก้นหอย)
- G_{rx} คือ อัตราขยายของสายอากาศภาครับ (สายอากาศต้นแบบ)
- R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ
- λ คือ ความยาวคลื่น ณ ที่ความถี่ใช้งาน
- P_{tx} คือ กำลังงานของภาคส่ง
- P_{rx} คือ กำลังงานของภาครับ

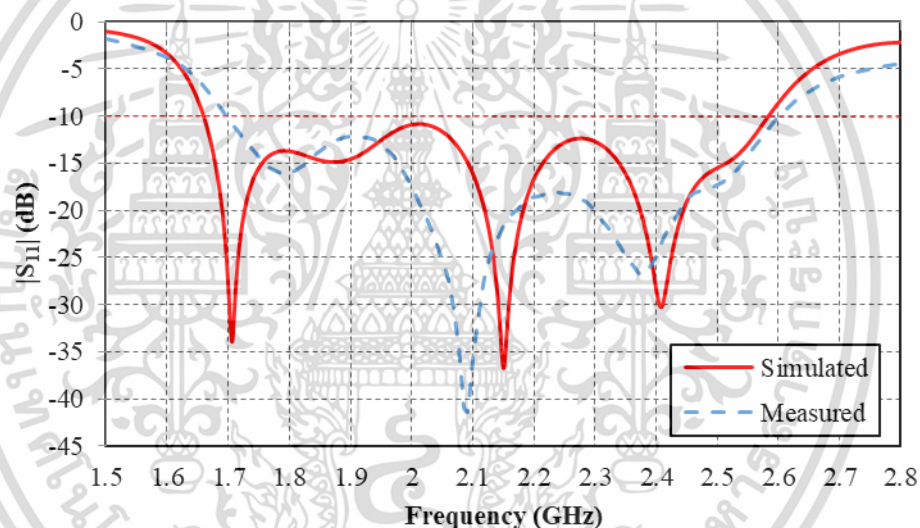


รูปที่ 4.2 การติดตั้งสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้า แบบข้อศอกคู่ต้นแบบในห้องไร้การสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

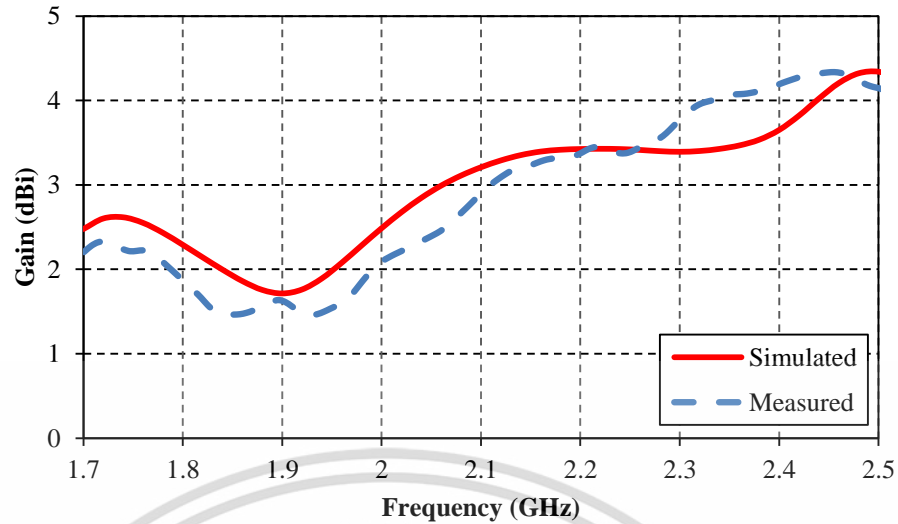
4.4 ผลการจำลองและทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่ง ความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบ

เมื่อได้สายอากาศต้นแบบเรียบร้อยแล้วจึงได้ทำการทดสอบสายอากาศเพื่อพิจารณาคุณลักษณะการแมตซ์และช่วงกว้างความถี่ รูปที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบโดยนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบกับเพื่อให้การพิจารณาผลชัดเจนมากยิ่งขึ้นจากรูปพบว่าสายอากาศมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ 1.7 GHz ถึง 2.57 GHz มีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 0.8 GHz จะเห็นได้ว่าสายอากาศสามารถที่จะใช้งานได้ถึงความถี่ตั้งแต่ 1.7 GHz ถึง 2.57 GHz หรือสามารถพิจารณาได้ว่าสายอากาศต้นแบบนี้มีช่วงกว้างความถี่อิมพีแดนซ์เท่ากับ 40.7% ดังนั้นสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบจะสามารถทำงานได้ทั้งย่านความถี่ Wi-Fi (2.4 GHz ถึง 2.485 GHz) และที่ระบบการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ 4G (1.7 GHz ถึง 2.2 GHz)



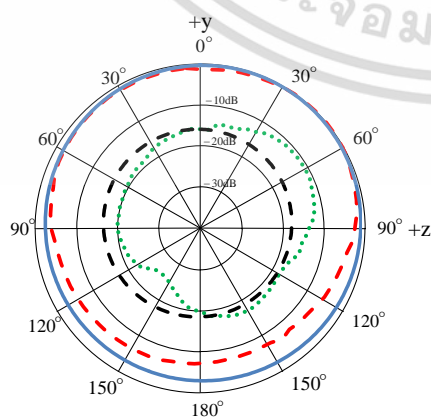
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบ

จากผลของค่า $|S_{11}|$ จะเห็นได้ว่าในแต่ละความถี่นั้นมีค่าที่แตกต่างกันแต่ยังคงต่ำกว่า -10 dB ซึ่งจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของสายอากาศนั้นขึ้นอยู่กับความถี่ รูปที่ 4.4 จึงได้แสดงผลการทดสอบอัตราการขยายของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิ่งความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบต่อความถี่เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองพบว่า อัตราขยายของสายอากาศนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ใช้งานเพิ่มขึ้นซึ่งค่าอัตราขยายตลอดช่วงกว้างความถี่ที่พิจารณานั้นมีค่าสูงกว่า 1.47 dBi ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน โดยมีอัตราขยาย 2.21 dBi 2.94 dBi และ 4.33 dBi ที่ความถี่ 1.7 GHz 2.1 GHz และ 2.45 GHz ตามลำดับ

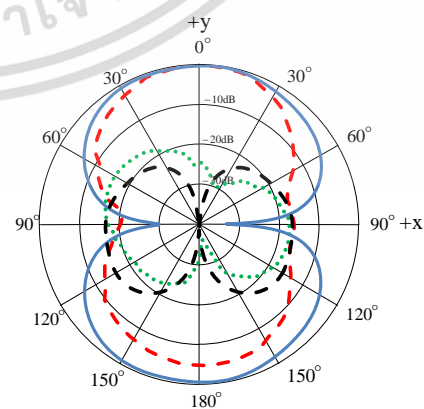


รูปที่ 4.4 อัตราขยาย ณ ความถี่ต่างๆ ของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบ

ถัดมาเป็นผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแพทช์แขนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบแสดงดังรูปที่ 4.5 เส้นทึบแสดงถึงการจำลองในขณะที่เส้นปะแสดงค่าที่วัดได้ สายอากาศที่นำเสนอมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว (Uni-direction Radiation Pattern) โลบลึกของการแพร่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 75 องศา บนระนาบมุมกวาด ϕ และ 180 องศาบนระนาบมุมยก θ ด้วยโพลาริซิงเชิงเส้น จากการทดสอบได้ทำการทดสอบที่ความถี่ 1.7 GHz 2.1 GHz และ 2.45 GHz ตามลำดับ พบว่าลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในทั้งสองระนาบมีการเปลี่ยนแปลงน้อยซึ่งอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ เมื่อพิจารณาผลการทดสอบลักษณะการโพลาริซิงของสายอากาศด้วยผลของโพลาริซิงร่วม (Co-polarized) และโพลาริซิงไขว้ (Cross-polarized) ที่ความถี่ 1.7 GHz 2.1 GHz และ 2.45 GHz ตามลำดับ พบว่าระดับของโพลาริซิงไขว้ของทั้ง 3 ความถี่ นั้นต่ำกว่า -10 dB ซึ่งถือได้ว่าสายอากาศต้นแบบที่นำเสนอมีลักษณะโพลาริซิงเป็นแบบเชิงเส้น

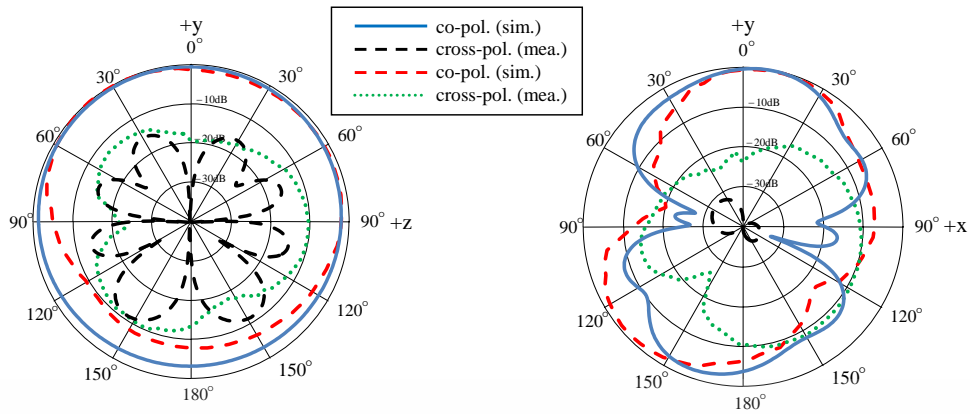


(ก) ระนาบ H ที่ 1.70 GHz



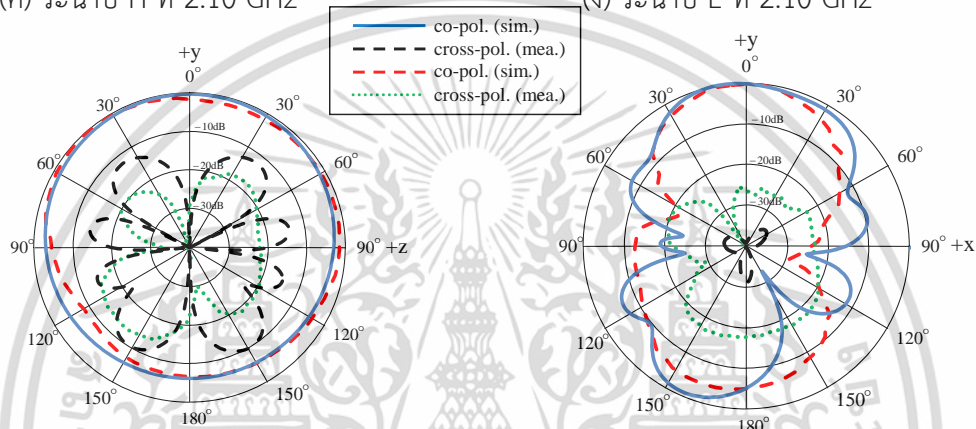
(ข) ระนาบ E ที่ 1.70 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ระนาบ H ที่ 2.10 GHz

(ง) ระนาบ E ที่ 2.10 GHz



(จ) ระนาบ H ที่ 2.45 GHz

(ฉ) ระนาบ E ที่ 2.45 GHz

รูปที่ 4.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแพทช์แชนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบ

4.5 สรุป

จากผลการทดสอบสายอากาศแบบแพทช์แชนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบด้วยขนาดโดยรวมเท่ากับ $70 \text{ mm} \times 9 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ พบว่าสามารถตอบสนองได้ดีในช่วงความถี่ 1.7 GHz ถึง 2.57 GHz มีช่วงกว้างความถี่อิมพีแดนซ์เท่ากับ 40.7% มีอัตราขยายตลอดช่วงกว้างความถี่ที่พิจารณาสูงกว่า 1.47 dBi ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โลกหลักของการแพร่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 75 องศา บนระนาบมุมกวาด ϕ และ 180 องศาบนระนาบมุมยก θ ด้วยโพลาริซเชิงเส้น เหมาะสำหรับการใช้งานในระบบ Wi-Fi และการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ 4G

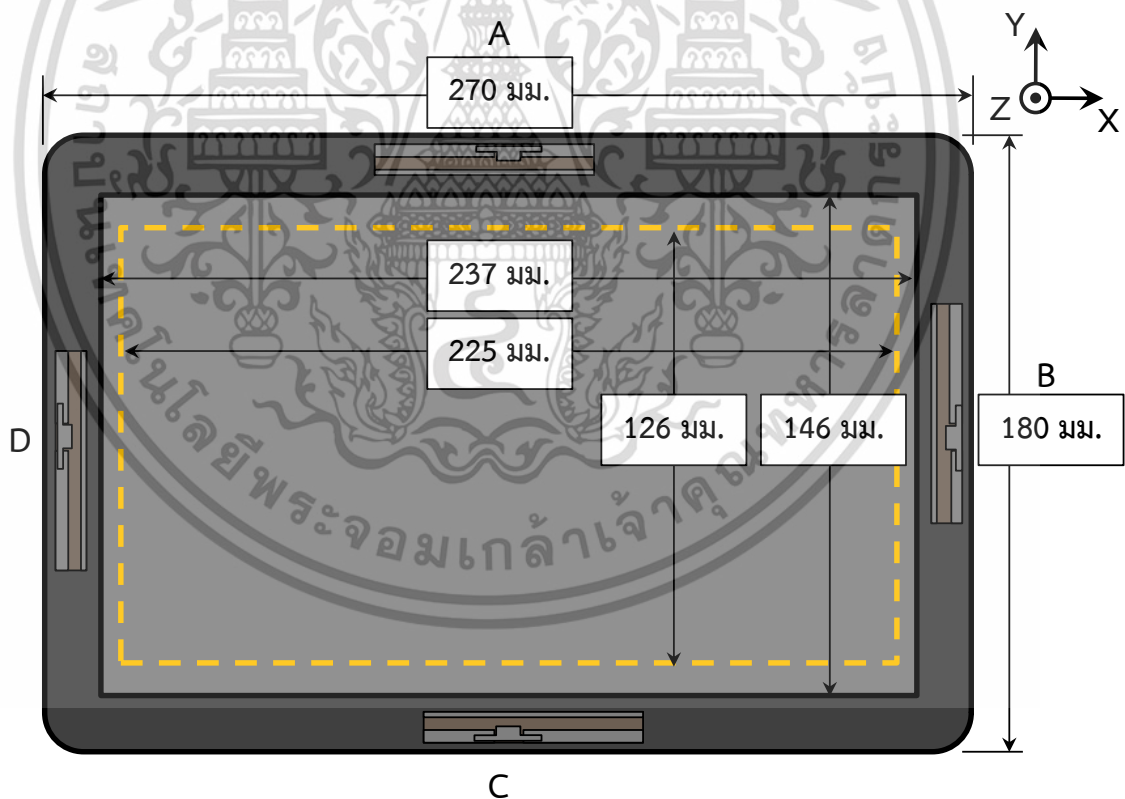
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการจำลองและผลการทดสอบสายอากาศร่วมกับ คอมพิวเตอร์แบบพกพา

5.1 การติดตั้งและศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากองค์ประกอบของคอมพิวเตอร์แบบพกพาที่อยู่ใกล้เคียงกับสายอากาศ

รูปที่ 5.1 แสดงตำแหน่งการจัดวางสายอากาศภายในโปรแกรมจำลองผลตามรูปแบบที่สามารถวางได้จริงเพื่อคำนวณคุณสมบัติของสายอากาศหลังจากถูกนำไปติดตั้งภายในโครงสร้างคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต โดยจำลองโครงสร้างแท็บเล็ตคร่าว ๆ ประกอบด้วยกรอบพลาสติกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2 ขนาด $270 \times 180 \times 10 \text{ mm}^3$ หน้าจอ LCD ที่มีไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3.5 ขนาด $237 \times 146 \times 5 \text{ mm}^3$ และมีกรอบโลหะสำหรับรับค่าจอสัมผัสขนาด $225 \times 126 \text{ mm}^2$ ประกอบอยู่บริเวณด้านหน้าของหน้าจอ

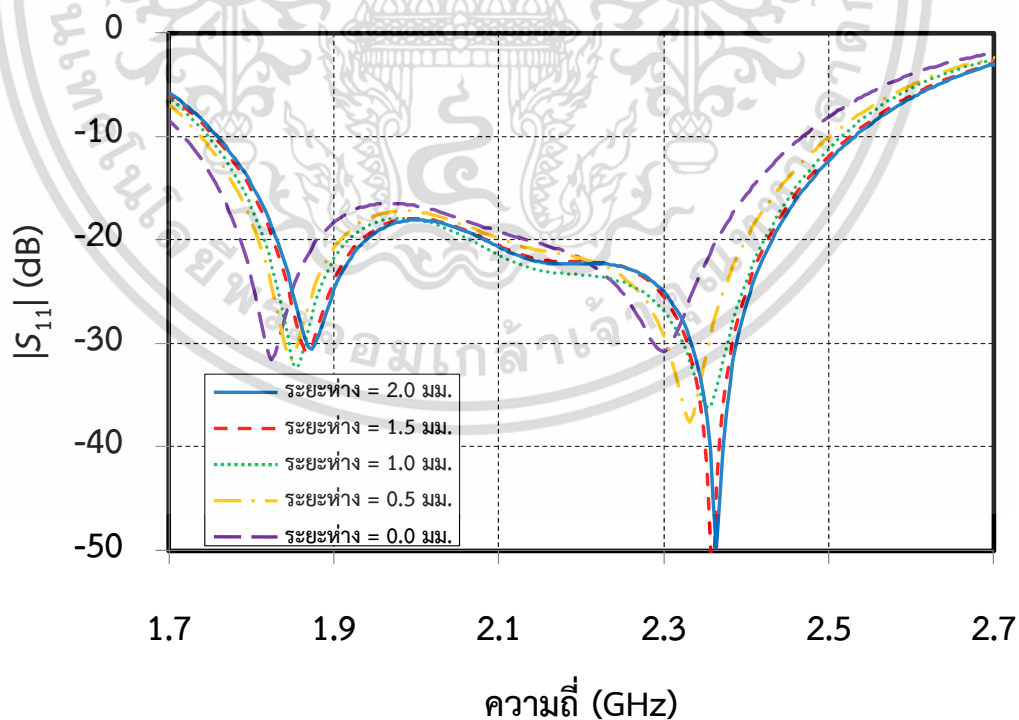


รูปที่ 5.1 แบบจำลองที่นำไปใช้ในการคำนวณผลตอบสนองของสายอากาศ
เมื่อถูกจัดวางภายในโครงสร้างคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบภายนอกที่ตั้งอยู่ใกล้เคียงกับสายอากาศไม่ว่าจะเป็นวัสดุที่เป็นตัวนำหรือไดอิเล็กตริกนั้นล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบต่อสายอากาศทั้งสิ้น รูปที่ 5.2 – รูปที่ 5.7 เป็นการแสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการวางสายอากาศใกล้เคียงกับแผ่นวัสดุชนิดไดอิเล็กตริกขนาด $300 \times 300 \times 2 \text{ mm.}^3$ ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.5 และ 3.5 ตามลำดับ (ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของพลาสติกทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 – 3.5) โดยจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานด้านเข้าของสายอากาศนั้นเปลี่ยนแปลงไปโดยมีแนวโน้มที่จะเลื่อนมาที่ย่านความถี่ต่ำมากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศกับแผ่นไดอิเล็กตริกนั้นมีค่าน้อยลงหรือเมื่อสายอากาศอยู่ใกล้แผ่นวัสดุที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแผ่นไดอิเล็กตริกที่อยู่บริเวณใกล้เคียงนั้นจะทำให้ค่าไดอิเล็กตริกสุทธิของสายอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจึงทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสอดคล้องกับความยาวขององค์ประกอบสายอากาศนั้นมีความถี่ที่น้อยลง

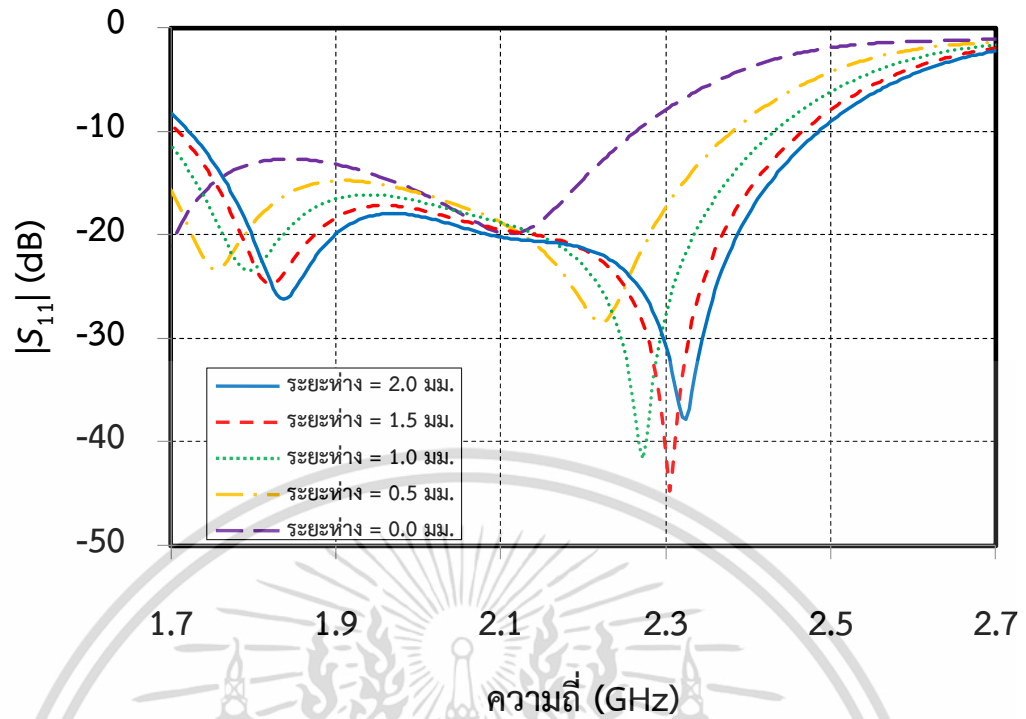
นอกจากนี้เมื่อนำรูปที่ 5.2 และ 5.3 มาเปรียบเทียบกับรูปที่ 5.4 และ 5.5 จะพบว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการวางวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 1.5 -3.5 ไว้ใกล้กับสายอากาศนั้นจะรุนแรงมากกว่าเมื่อวัสดุดังกล่าวตั้งอยู่ด้านเดียวกับปลายทองแดงของสายอากาศ ทั้งนี้เนื่องจากการกระทำเช่นนั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าไดอิเล็กตริกสัมบูรณ์ของสายอากาศมากที่สุด นอกจากนี้รูปที่ 5.6 และ 5.7 ยังแสดงให้เห็นว่ายิ่งมีวัสดุที่ถูกใช้มาวางคั่นที่ด้านหน้าของสายอากาศนั้นมีความถี่ไดอิเล็กตริกที่สูงมากขึ้นเท่าไรค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศก็จะยิ่งแยกลงเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากสายอากาศต้นแบบนั้นถูกออกแบบให้เหมาะสมกับการแพร่กระจายคลื่นออกไปในตัวกลางที่เป็นอากาศ ดังนั้นการเปลี่ยนชนิดตัวกลางที่อยู่ตรงหน้าของสายอากาศนั้นจะส่งผลให้เกิดการสะท้อนกลับของลำคลื่นซึ่งเป็นที่มาของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่แยกลงนั่นเอง



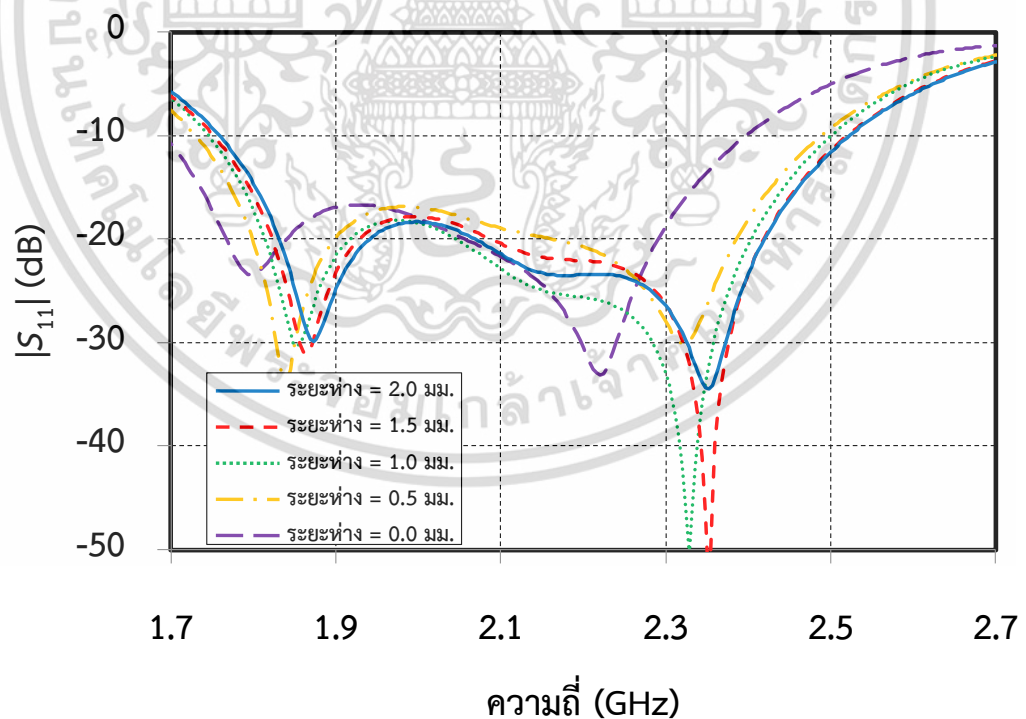
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศเมื่อถูกนำไปวาง

เหนือแผ่นไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

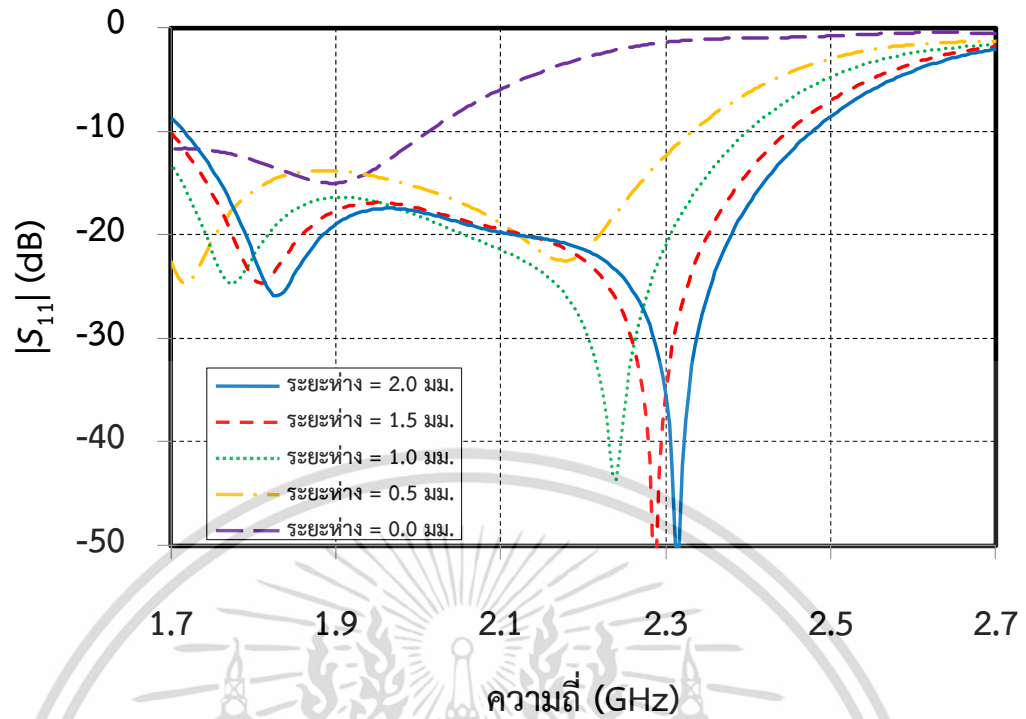


รูปที่ 5.3 กราฟแสดงค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศเมื่อถูกนำไปวางเหนือแผ่นไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3.5

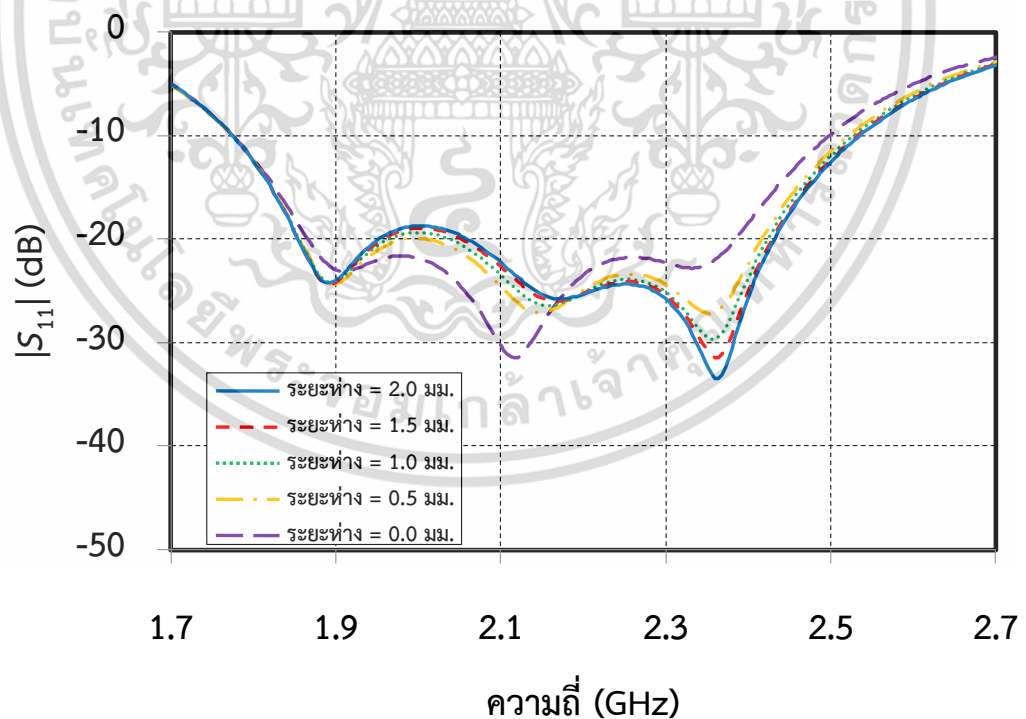


รูปที่ 5.4 กราฟแสดงค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศเมื่อถูกนำไปวางใต้แผ่นไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

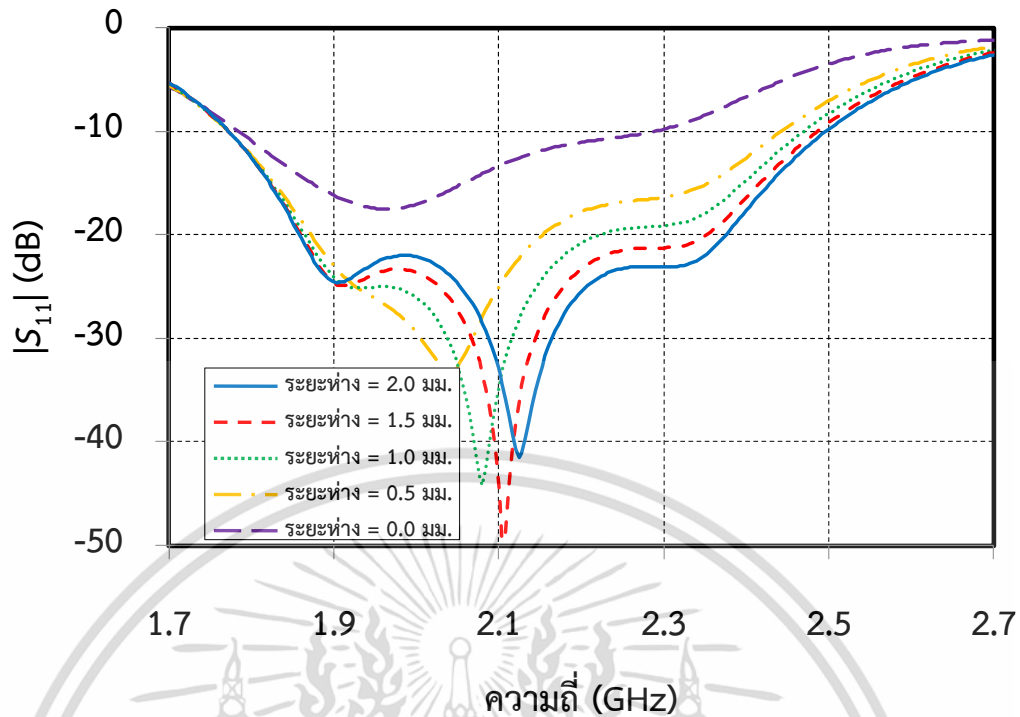


รูปที่ 5.5 กราฟแสดงค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศเมื่อถูกนำไปวาง
ใต้แผ่นไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3.5



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศเมื่อถูกนำไปวาง
หลังแผ่นไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.5

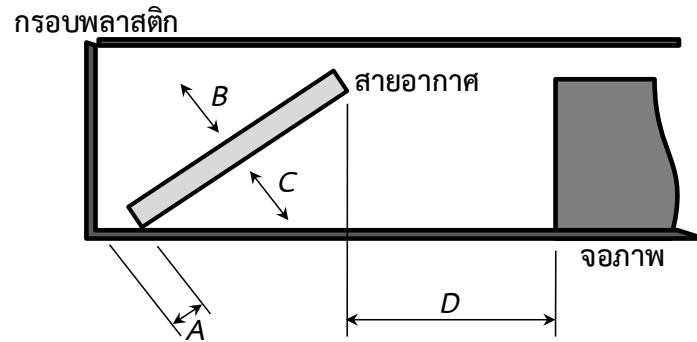
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศเมื่อถูกนำไปวาง
หลังแผ่นไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3.5

5.2 การติดตั้งสายอากาศลงบนโครงสร้างคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต

จากการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากองค์ประกอบแวดล้อมนำมาสู่รูปแบบในการติดตั้งสายอากาศที่จะสามารถทำให้สายอากาศสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด จากที่ได้วิเคราะห์ไปในหัวข้อที่ 5.1 นั้นนำมาสู่รูปแบบการวางสายอากาศดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.8 โดยมีกรวยระยะห่าง $A = 1 \text{ mm}$. ที่ด้านหน้าของสายอากาศซึ่งเป็นระยะห่างที่ทำให้ผลกระทบจากเคสพลาสติกต่อความต้านทานด้านเข้าของสายอากาศนั้นมีค่าน้อยอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ หลังจากนั้นก็ทำการวางสายอากาศให้ด้านล่างสัมผัสลงไปบนกรอบด้านหน้าของสายอากาศพร้อมกับยกให้ทำมุมในระดับที่ทำให้ระยะห่าง B มีค่ามากกว่า C เล็กน้อย เพื่อให้ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกรอบพลาสติกที่ด้านบนและด้านล่างของสายอากาศนั้นมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ระยะ D ที่ถูกเว้นไว้ให้ห่างมากที่สุดเพื่อเป็นการลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากจอภาพและแผงวงจรภายในให้น้อยลงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เช่นเดียวกัน



รูปที่ 5.8 การจัดวางสายอากาศภายในโครงสร้างคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต

5.3 ผลการทดสอบสายอากาศ

รูปที่ 5.9 แสดงตำแหน่งการจัดวางสายอากาศภายในคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตขนาดจอ 10 นิ้ว สายอากาศถูกจัดวางไว้ที่กึ่งกลางทั้งสี่ด้านของโครงสร้างคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตตามลักษณะการจัดวางที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นโดยมีการเว้นระยะห่าง A มากกว่า 1 mm. และ D ประมาณ 5 mm. (ตามความเหมาะสมของลักษณะที่วางตามโครงสร้างของอุปกรณ์จริง) ทั้งทางด้านสั้นและด้านยาว

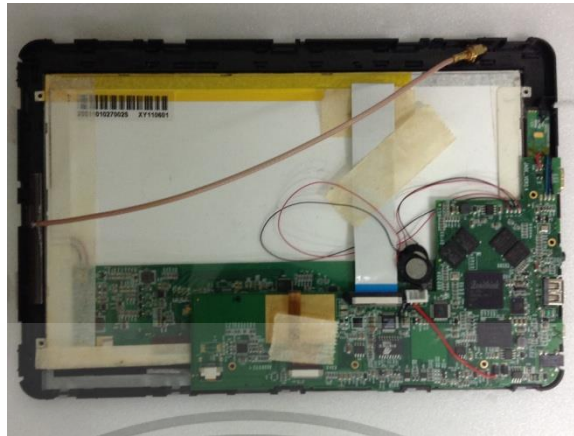


(ก) ด้านหลังของคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต



(ข) ตำแหน่งการจัดวางสายอากาศตามด้านยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



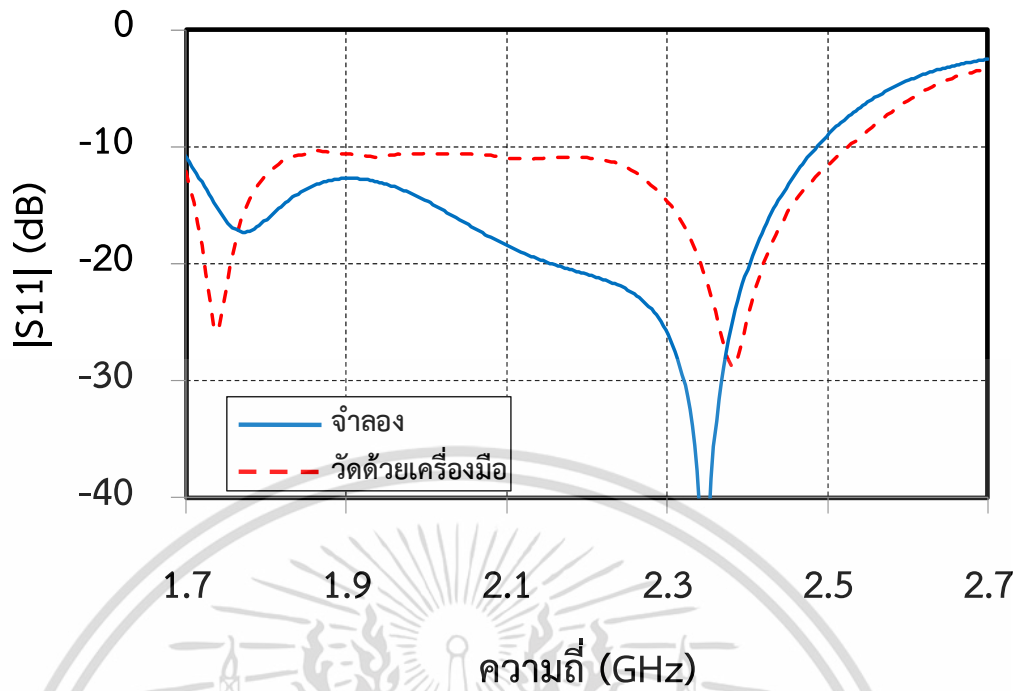
(ค) ตำแหน่งการจัดวางสายอากาศตามด้านกว้าง

รูปที่ 5.9 ตำแหน่งการจัดวางสายอากาศภายในคอมพิวเตอร์แท็บเล็ต

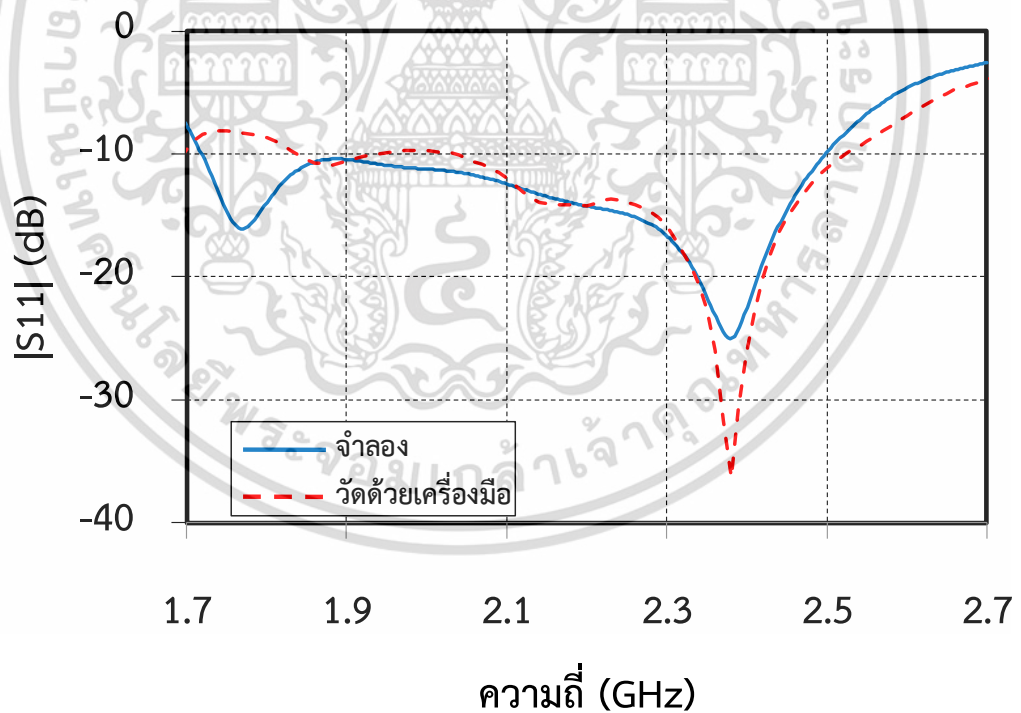
ผลที่ได้จากการจำลองสายอากาศนั้นคำนวณมาจากการใช้เทคนิค finite integration technique in time domain (FIT-TD) ของโปรแกรม CST Microwave Studio

เนื่องจากรูปทรงที่สมมาตรจึงอนุมานว่าผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจากองค์ประกอบที่อยู่ตรงข้ามกันและกัน (A กับ C และ B กับ D) นั้นจะให้ค่าผลตอบสนองต่าง ๆ ที่เหมือนกัน รูปที่ 5.10 และ 5.11 แสดงค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปเมื่อถูกนำไปติดตั้งภายในโครงสร้างของคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตตามด้านกว้าง (ป้อนสัญญาณเข้าที่องค์ประกอบด้าน A) และด้านยาว (ป้อนสัญญาณเข้าที่องค์ประกอบด้าน B) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผลที่วัดได้จากการทดสอบนั้นมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองกล่าวคือย่านความถี่ใช้งานของสายอากาศนั้นลดต่ำลงไปกว่าความถี่ดั้งเดิมของสายอากาศที่เคยได้ออกแบบไว้จากช่วง 1.8 – 2.6 GHz กลายเป็น 1.84 – 2.52 GHz และ 1.69 – 2.52 GHz เมื่อป้อนสัญญาณเข้าที่องค์ประกอบด้าน A และ B ตามลำดับ แต่ถึงกระนั้นสายอากาศก็ยังคงสามารถนำมาใช้งานได้โดยย่านความถี่ที่สนใจ ได้แก่ ย่านความถี่ 3G (1.9 GHz – 2.2 GHz) และ ย่านความถี่ Wi-Fi (2.4 GHz – 2.5 GHz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



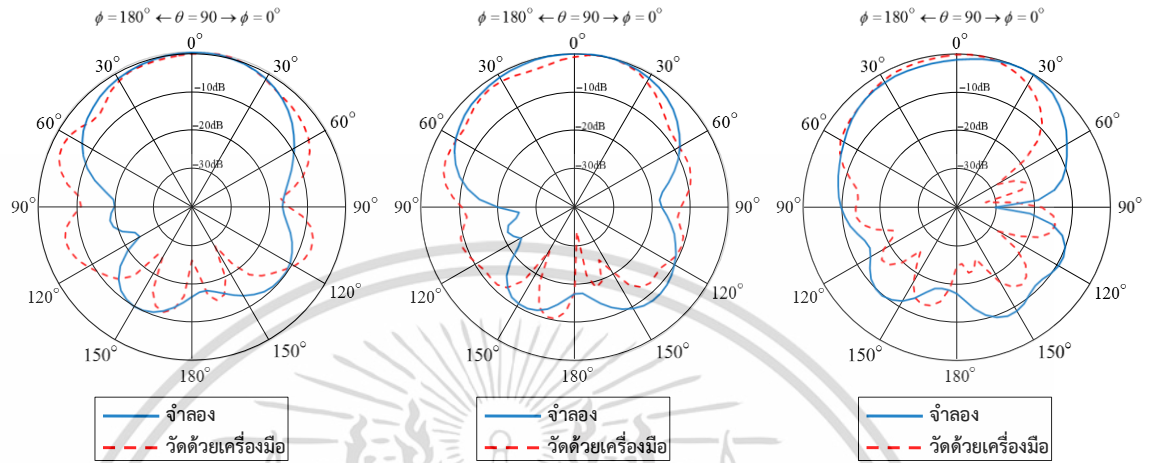
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศเมื่อนำไปติดตั้งภายในโครงสร้างคอมพิวเตอรืแท็บเล็ตตามแนวยาว



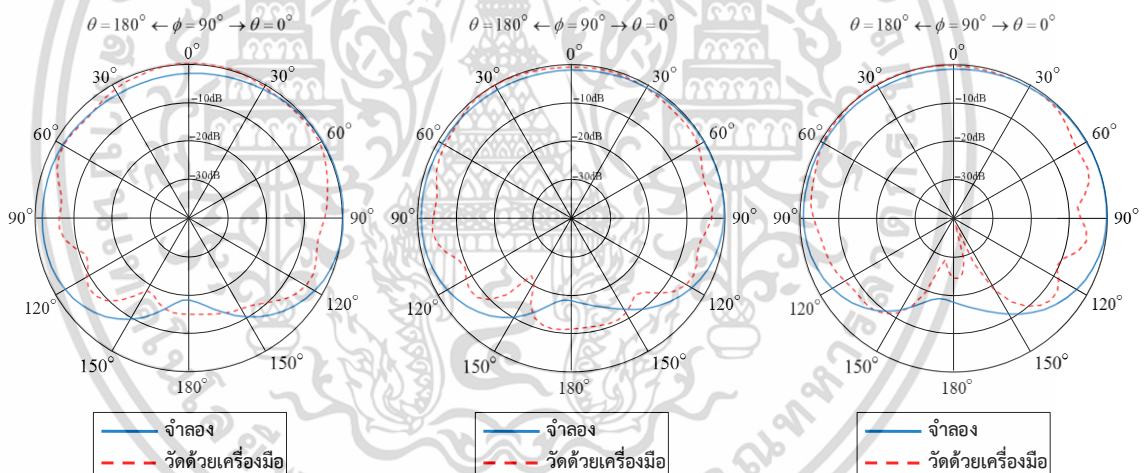
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศเมื่อนำไปติดตั้งภายในโครงสร้างคอมพิวเตอรืแท็บเล็ตตามแนวกว้าง

แบบรูปการแพร่กระจายของคลื่นขององค์ประกอบสายอากาศที่ถูกนำมาติดตั้งอยู่ที่ด้าน A ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.12 สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวโดยลำคลื่นที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นนั้นมีค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งเท่ากับ 65 องศา 70 องศา และ 75 องศาตามแนวแกน ϕ และ 105 องศา 125 องศา และ 145 องศาตามแนวแกน θ และมีอัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 4.6 dBi 4.2 dBi และ 4.2 dBi ที่ความถี่ 1.95 GHz 2.15 GHz และ 2.45 GHz ตามลำดับ



(ก) ระบายตัดขวาง 1.95 GHz (ข) ระบายตัดขวาง 2.15 GHz (ค) ระบายตัดขวาง 2.45 GHz



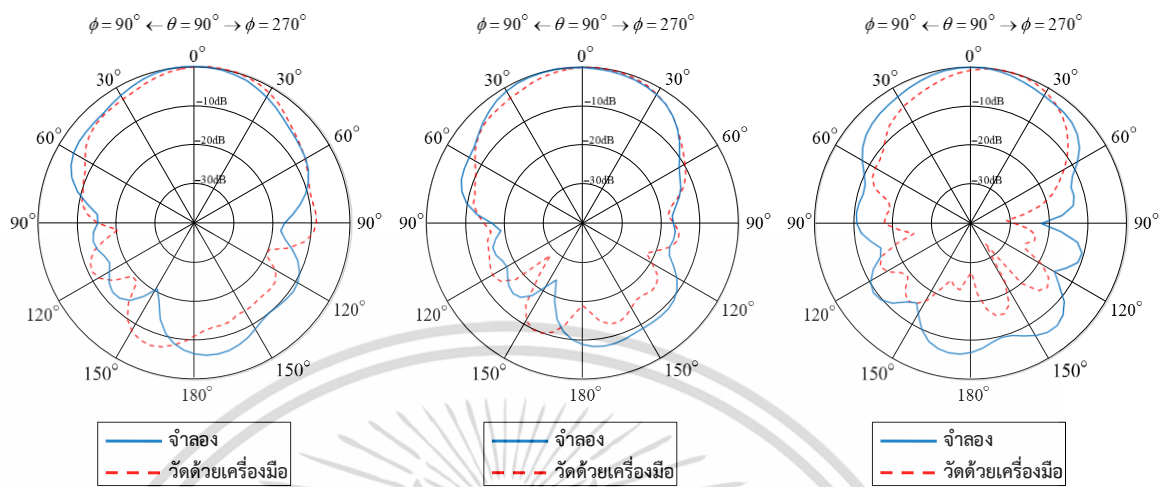
(ง) ระบายตัดแนวตั้ง 1.95 GHz (จ) ระบายตัดแนวตั้ง 2.15 GHz (ฉ) ระบายตัดแนวตั้ง 2.45 GHz

รูปที่ 5.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ถูกนำไปติดตั้งภายในคอมพิวเตอรืแท็บเล็ตตามแนวยาว

ส่วนองค์ประกอบที่ถูกติดตั้งอยู่ตามด้านสั้นของคอมพิวเตอรืแท็บเล็ต (ด้าน B) นั้นเมื่อถูกกระตุ้นจะสร้างลำคลื่นที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.13 กล่าวคือมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในลักษณะทิศทางเดียวโดยมีค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งเท่ากับ 60 องศา 75 องศา และ 50 องศาตามแนวแกน ϕ และ 120 องศา 135 องศา และ 135 องศาตามแนวแกน θ และมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

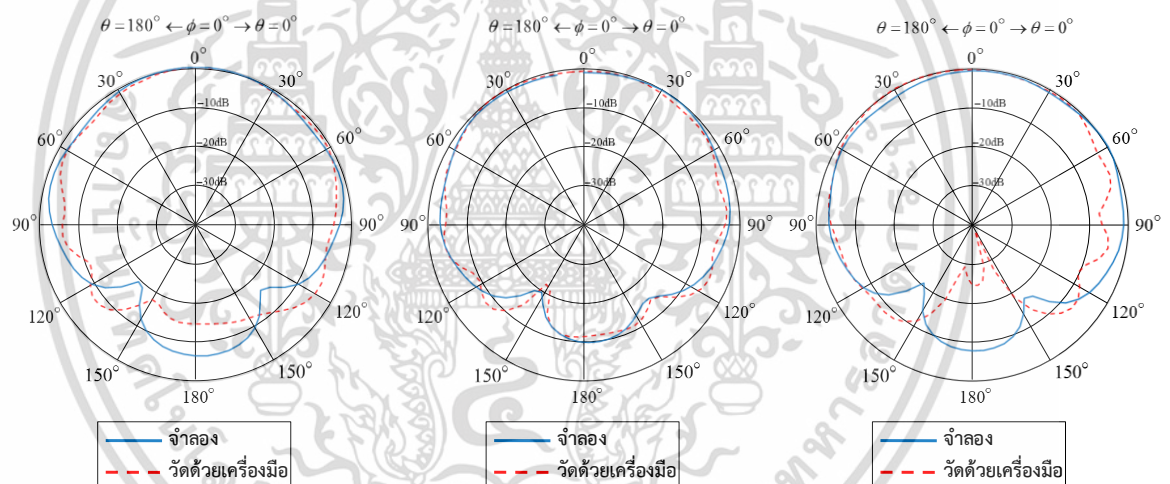
อัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 4.9 dBi 5.4 dBi และ 4.5 dBi ที่ความถี่ 1.95 GHz 2.15 GHz และ 2.45 GHz ตามลำดับ



(ก) ระบายตัดขวาง 1.95 GHz

(ข) ระบายตัดขวาง 2.15 GHz

(ค) ระบายตัดขวาง 2.45 GHz



(ง) ระบายตัดแนวตั้ง 1.95 GHz

(จ) ระบายตัดแนวตั้ง 2.15 GHz

(ฉ) ระบายตัดแนวตั้ง 2.45 GHz

รูปที่ 5.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ถูกนำไปติดตั้ง
ภายในคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตตามแนวกว้าง

5.4 สรุป

สายอากาศแบบแพทช์แบนคู่ด้วยเทคนิคปั๊มปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อคอกคู่ นั้นสามารถนำมาติดตั้งใช้งานร่วมกับคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตได้โดยไม่สูญเสียคุณสมบัติในการทำงานในย่านความถี่ของ Wi-Fi และ 4G (1.7 GHz – 2.5 GHz) ตามที่ได้ออกแบบไว้ ทั้งนี้เมื่อถูกนำไปติดตั้งลงบนโครงสร้างจริงแล้วภาพรวมของย่านความถี่ใช้งานของสายอากาศจะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่ต่ำลง โดยสายอากาศจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งครอบคลุมอาณาเขตมากกว่า 50 องศา ตามทิศทางของแกน ϕ และทำมุมมากกว่า 90 องศา ตามทิศทางของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกน θ และมีค่าอัตราขยายสูงสุดมากกว่า 4.2 dBi ตลอดย่านความถี่ใช้งาน ทั้งนี้ลำคลื่นที่ถูกสร้างขึ้นมาจากสายอากาศนั้นยังคงมีโพลาไรเซชันเชิงเส้นในทิศทางเดียวกับตัวสายอากาศดั้งเดิมก่อนทำการติดตั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลและเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

จากการออกแบบสายอากาศช่วงความถี่กว้างแบบแผ่นแบนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้า สำหรับระบบการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 และระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนี้พบว่า สายอากาศแบบ แพทช์แบนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ สามารถที่จะให้ผลการตอบสนองช่วงกว้าง ความถี่ที่ดีที่สุดเนื่องจากการทำงานของแขนการแพร่กระจายคลื่นทั้งสองด้าน (ด้านสั้นและด้านยาว) สามารถทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์สองจุดและช่องว่างระหว่างจุดบ่อนสัญญาณและแขนการ แพร่กระจายคลื่นที่ทำให้เกิดการคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่สามารถที่จะรวมเอาความถี่ เรโซแนนซ์ทั้งสองมาทำให้เกิดการตอบสนองช่วงความถี่กว้างได้อย่างเหมาะสม

เมื่อทำการสร้างสายอากาศต้นแบบและทำการทดสอบพบว่าจากผลการทดสอบสายอากาศ แบบแพทช์แบนคู่ด้วยเทคนิคคัปปลิงความจุไฟฟ้าแบบข้อศอกคู่ต้นแบบด้วยขนาดโดยรวมเท่ากับ 70 mm x 9 mm x 0.8 mm พบว่าสามารถตอบสนองได้ดีในช่วงความถี่ 1.7 GHz ถึง 2.57 GHz มี ช่วงกว้างความถี่อิมพีแดนซ์เท่ากับ 40.7% มีอัตราขยายตลอดช่วงกว้างความถี่ที่พิจารณาสูงกว่า 1.47 dBi ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โลกหลักของการ แพร่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 75 องศา บนระนาบมุมกวาด ϕ และ 180 องศาบน ระนาบมุมยก θ ด้วยโพลาริซเชิงเส้น เหมาะสำหรับการใช้งานในระบบ Wi-Fi และการสื่อสาร โทรศัพท์เคลื่อนที่ 4G และ 5G

6.2 วิจารณ์ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางในการพัฒนา

จากปัญหาของการออกแบบสายอากาศขนาดเล็กและมีช่วงความถี่กว้างที่สามารถมีลักษณะ โครงสร้างเหมาะกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์สื่อสารประเภทคอมพิวเตอร์แบบพกพานั้น พบว่าสามารถทำได้ยากเนื่องจากมีผลกระทบจากโครงสร้างของอุปกรณ์การสื่อสาร และข้อจำกัดด้าน พื้นที่แต่ละแบบแตกต่างกันดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เริ่มต้นที่การออกแบบด้วยเงื่อนไขของขนาดที่ จำกัดของการจัดวางสายอากาศในอุปกรณ์การสื่อสารก่อนในเบื้องต้น แต่อย่างไรก็ตามในการที่จะนำ สายอากาศไปใช้งานจริงจำเป็นที่จะต้องมีการพิจารณาโครงสร้างและผลกระทบของลักษณะการใ้ งานของอุปกรณ์การสื่อสารแต่ละแบบด้วย

จากปัญหาที่เกิดขึ้นสามารถที่จะแก้ไขและพัฒนาการออกแบบสายอากาศด้วยการจำลอง โครงสร้างของอุปกรณ์การสื่อสารแต่ละแบบรวมเข้าไปด้วยเพื่อให้เกิดความถูกต้องและแม่นยำในการ ประมาณค่ามากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. L. Wong, Planar Antennas for Wireless Communications. New York, NY, USA: Wiley, 2003.
- [2] Y. Song, J. C. Modro, Z. Wu, and P. O’Riordan, “Miniature Multiband and Wideband 3-D Slot Loop Antenna for Mobile Terminals,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 5, pp. 148-151, April 2006.
- [3] K.-L. Wong and C.-Y. Tsai, “Half-Loop Frame Antenna for the LTE Metal-Casing Tablet Device,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 1, pp. 71-81, January 2017.
- [4] Z.-Q. Xu, Q.-Q. Zhou, Y.-L. Ban and S. S. Ang, “Hepta-Band Coupled-Fed Loop Antenna For LTE/WWAN Unbroken Metal-Rimmed Smartphone Applications,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 2, pp. 311-314, February 2018.
- [5] S.-C. Chen, C.-C. Huang and W.-S. Cai, “Integration of a Low-Profile, Long-Term Evolution/Wireless Wide Area Network Monopole Antenna into the Metal Frame of Tablet Computers,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 7, pp. 3726-3731, July 2017.
- [6] L.-W. Zhang, Y.-L. Ban, C.-Y.-D. Sim, J. Guo and Z.-F. Yu, “Parallel Dual-Loop Antenna for WWAN/LTE Metal-Rimmed Smartphone,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 3, pp. 1217-1226, March 2018.
- [7] A. P. Zhao and J. Rahola, “Quarter-wavelength Wideband Slot Antenna for 3-5 GHz Mobile Applications,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 4, pp. 421-424, December 2005.
- [8] C. A. Balanis, “Antenna Theory Analysis and Design,” 3rd, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.
- [9] J. L. Volakis, “Antenna Engineering Handbook,” 4th, Part 2, McGraw-Hill Education, 2007.
- [10] K.-L. Wong, “Compact and Broadband Microstrip Antennas,” John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.
- [11] Y. YANG, Z. ZHAO, W. YANG, Z. Nie and Q.-H. Liu “Compact multimode monopole antenna for metal-rimmed mobile phones,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 5, pp. 2297–2304, March 2017
- [12] S. A. JA’AFREH, Y. HUANG, L. XING, “Low profile and wideband planar inverted-F antenna with polarization and pattern diversities,” *IET Microwave, Antenna and Propagation*, vol. 10, no. 2, p. 152–161, January 2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] Z. N. Chen and M. Y. W. Chia, "Broadband Planar Antennas Design and Applications," John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, 2006.
- [14] Z. N. Chen, "Antennas for Portable Devices," John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, England, 2007.
- [15] *Recommended Practice for Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Head from Wireless Communications Devices: Measurement Techniques*, IEEE 1528:2003, Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2003.
- [16] *Human Exposure to Radio Frequency Fields from Hand-Held and Body-Mounted Wireless Communication Devices – Human Models, Instrumentation, and Procedures – Part 1: Procedure to Determine the Specific Absorption Rate (SAR) for Hand-Held Devices Used in Close Proximity to the Ear (Frequency Range of 300 MHz to 3 GHz)*, IEC 62209-1, International Electrotechnical Commission, Geneva, 2005.
- [17] CST Studio Suite 3D EM Simulation and Analysis Software, Studio, C.P. CST Studio Suite; Simulia: Darmstadt, Germany, 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล : นายสรณ นิยมานนท์
วัน เดือน ปี เกิด : 11 สิงหาคม พ.ศ.2531
ที่อยู่ : 159/388 ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงบางบำหรุ
เขตบางพลัด จังหวัดกรุงเทพฯ 10700
ประวัติการศึกษา : เมษายน พ.ศ. 2553
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พฤศจิกายน พ.ศ. 2555
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์)
Swansea University
ความชำนาญเฉพาะด้าน สายอากาศสำหรับย่านความถี่ Wi-Fi 4G และ 5G
สายอากาศหลายย่านความถี่
เชี่ยวชาญการใช้โปรแกรมจำลองคุณลักษณะของสายอากาศ
เชี่ยวชาญการใช้เครื่องมือทดสอบคุณลักษณะทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
ประสบการณ์การทำงาน ธันวาคม พ.ศ. 2555 ถึงปัจจุบัน
วิศวกร หจก. เอ็น. วาย. อาร์

ผลงานตีพิมพ์ที่ได้รับการเผยแพร่

- [1] S. Niyamanon, P. Janpangngern, and C. Phongcharoenpanich, "Wideband Dual-Arm Capacitively Coupled Patch Antenna for Tablet/Laptop Applications," *RADIOENGINEERING*, vol. 28, pp. 671-678, Dec. 2019.
- [2] S. Niyamanon, R. Senathong, and C. Phongcharoenpanich, "Dual-Frequency Circularly Polarized Truncated Square Aperture Patch Antenna with Slant Strip and L-Shaped Slot for WLAN Applications," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2018, Article ID 7684742, 11 pages, 2018.