

การเพิ่มประสิทธิภาพแบนด์วิดท์ของสายอากาศแบบโมโนโพลระนาบร่วม
สำหรับย่านความถี่แถบกว้างด้วยเทคนิคการเพิ่มสัดับรูปตัวไอและโหลดแผ่นสตริบ

THE BANDWIDTH ENHANCEMENT OF WIDEBAND CPW-FED
MONOPOLE ANTENNA USING I - SHAPED STUB AND STRIP LOAD
TUNING TECHNIQUE

กฤษณะ นิลวิเวก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การเพิ่มประสิทธิภาพแบนด์วิดท์ของสายอากาศแบบโมโนโพลระนาบร่วมสำหรับ
ย่านความถี่แถบกว้างด้วยเทคนิคการเพิ่มสลับรูปตัวไอและโหนดแผ่นสตริบ

กฤษณะ นิลวิเวก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเพิ่มประสิทธิภาพแบนด์วิดท์ของสายอากาศแบบโมโนโพลระนาบร่วมสำหรับ
ย่านความถี่แถบกว้างด้วยเทคนิคการเพิ่มสัดับรูปตัวไอและโหลดแผ่นสตริป
The Bandwidth Enhancement of Wideband CPW-Fed Monopole
Antenna using I – Shaped Stub and Strip Load Tuning Technique

ชื่อ - นามสกุล

นายกฤษณะ นิลวิเวก

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

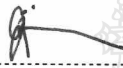
อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์อำนวยการ เรืองวารี, Dr.-Ing.

ปีการศึกษา

2564

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์สมศักดิ์ อรรถทิมากุล, Ph.D.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรี ศรีนนท์ฉัตร, Ph.D.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นรเสฏฐ์ วิชัยพาณิชย์, วศ.ด.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อำนวยการ เรืองวารี, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 16 เดือน กันยายน พ.ศ. 2564

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มประสิทธิภาพแบนด์วิดท์ของสายอากาศแบบโมโนโพลระนาบร่วมสำหรับย่านความถี่แถบกว้างด้วยเทคนิคการเพิ่มสัณฐานรูปตัวไอและโหนดแผ่นสตริป
ชื่อ -นามสกุล	นายกฤษณะ นิลวิเวก
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อำนวยการ เรืองวารี, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

สายอากาศถือเป็นอุปกรณ์ส่วนสำคัญที่ช่วยให้ระบบการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ ส่งผลให้มีความก้าวหน้าและวิจัยด้านสายอากาศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้สามารถครอบคลุมการใช้งานได้หลากหลายย่านความถี่ เช่น ระบบ GSM, 5G LTE และ WLAN แต่ยังคงพบว่าบางกรณีโครงสร้างสายอากาศมีความซับซ้อน มีจุดปรับโครงสร้างเป็นจำนวนมากทำให้ในกระบวนการสร้างสายอากาศมีความยากและอาจเกิดข้อผิดพลาดได้ง่าย

จากปัญหาที่กล่าวมาผู้วิจัยได้ทำการศึกษา วิเคราะห์และพัฒนาเพื่อออกแบบการปรับเพิ่มย่านความถี่ใช้งานให้กับสายอากาศโดยเน้นโครงสร้างแบบไม่ซับซ้อนและมีจุดปรับไม่มาก งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สายอากาศแบบโมโนโพลแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นสายอากาศตั้งต้นมาทำการปรับโครงสร้างเนื่องจากสายอากาศดังกล่าวมีคุณสมบัติตรงความต้องการเบื้องต้นคือมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว การปรับโครงสร้างใช้เทคนิคการเพิ่มสัณฐานรูปตัวไอและโหนดแผ่นสตริป มีวัสดุฐานรองเป็นแผ่นฟิล์มไมลาร์โพลีเอสเตอร์ที่มีลักษณะโค้งงอได้ มีค่าไดอิเล็กตริก $\epsilon_r = 3.2$ และมีค่าความหนา $h = 0.3$ มม. ขั้นตอนการดำเนินการเริ่มจากการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศโมโนโพลแบบระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า พบว่าสายอากาศดังกล่าวรองรับการใช้งานได้เพียงย่านความถี่เดียว จึงทำการปรับโครงสร้างสายอากาศด้วยเทคนิคการเพิ่มสัณฐานรูปตัวไอให้กับตัวสายอากาศเข้าไป 2 ตำแหน่งคือที่บริเวณด้านข้าง ด้านบน และเพิ่มโหนดแผ่นสตริปตรงกลางของตัวสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วม ผลทำให้สายอากาศหลังจากปรับโครงสร้างมีความกว้างของอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้อัตราขยายมีค่ามากขึ้นด้วยการปรับโครงสร้าง 3 ตำแหน่งดังกล่าวทำให้งานวิจัยนี้ได้สายอากาศโมโนโพลแบบระนาบร่วมรูปแบบใหม่ 3 รูปแบบคือรูปตะขอ รูปตัวที และรูปเครื่องหมายบวก

จากการทดสอบพบว่าสายอากาศต้นแบบรูปตะขอสามารถรองรับการใช้งานในช่วงความถี่ตามมาตรฐาน GSM 850 (880 – 960 MHz), GSM 900 (880 – 960 MHz), DCS 1.8 (1.72 – 1.88 GHz), PCS 1.9 (1.85 – 1.99 GHz), 5G LTE band 41 (2.496 – 2.690 GHz) และ WLAN ย่านความถี่ IEEE 802.11b/g 2.4 GHz (2.4 – 2.48 GHz) สายอากาศต้นแบบรูปตัวที่ สามารถรองรับการใช้งาน ย่านความถี่ IEEE 802.11b/g 2.4 GHz และ 5G ย่านความถี่ LTE band 41 (2.496 – 2.690 GHz) และสายอากาศต้นแบบรูปเครื่องหมายบวกสามารถทำงานรองรับการใช้งานในช่วงความถี่ตามมาตรฐาน WLAN ย่านความถี่ IEEE 802.11b/g/n 2.4 GHz, IEEE 802.11a (5.15 – 5.35 GHz), IEEE 802.11ac (5.725 – 5.825 GHz) และ 5G ตามมาตรฐาน LTE band 41 (2.496 – 2.690 GHz) โดยสายอากาศ ทั้งสามรูปแบบจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว และมีอัตราขยายสูงสุด 5.026 dBi, 4.81 dBi, และ 5.12 dBi ตามลำดับ จากนั้นได้นำสายอากาศต้นแบบทั้งสามไปทดสอบ ประยุกต์ใช้งานจริงร่วมกับระบบการสื่อสารไร้สายคืออุปกรณ์แอสเซสซบอยด์รุ่น TP-LINK AX1800 การ ทดสอบแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือการทดสอบรับ-ส่งสัญญาณกับโทรศัพท์มือถือ Samsung รุ่น Galaxy S10 plus แบบมีและไม่มีสิ่งกีดขวาง ผลการทดสอบพบว่าสายอากาศทั้งสามรูปแบบสามารถรับ-ส่ง สัญญาณได้ที่ระยะทางไม่เกิน 50 เมตร มีกำลังงานสูงสุดเท่ากับ -64 dBm กรณีมีสิ่งกีดขวางพบว่า สายอากาศทั้งสามรูปแบบรับ-ส่งสัญญาณได้ระยะทางสูงสุดไม่เกิน 200 เมตร มีกำลังงานสูงสุดเท่ากับ -79 dBm สำหรับกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

คำสำคัญ: สายอากาศโมนโพลระนาบร่วม สตรีบรูปตัวโอ โหลดแบบแผ่นสตรีป การเพิ่มประสิทธิภาพ แบนด์วิดท์

Thesis Title	The Bandwidth Enhancement of Wideband CPW-Fed Monopole Antenna using I - Shaped Stub and Strip Load Tuning Technique
Name - Surname	Mr. Kritsana Ninwivek
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Amnoiy Ruengwaree, Dr.-Ing.
Academic Year	2021

ABSTRACT

Antennas are an essential part of a wireless communication system that works for its intended purpose. As a result, many researchers have interested in developing and researching antennas to maximize efficiency to be able to cover a wide range of frequencies such as GSM, 5G LTE, and WLAN. However, it is also found that in some cases, the antenna structure is complicated. There are many structural tuning points, making the antenna construction process difficult and prone to errors.

For the aforementioned problems, the researcher has analyzed and developed to design a frequency enhancement modulation for the antenna by emphasizing a simple structure and not many tuning points. In this research, a rectangular monopole antenna was chosen as the base antenna for restructuring because the antenna meets the basic requirements of a simple structure and a single-plane omnidirectional radiation pattern. The restructuring was done by using the I-shaped stub and strip load enhancement technique. The base material is a flexible Mylar polyester film with the dielectric value = 3.2 and the thickness $h = 0.3$ mm. The implementation process began with the design and analysis of a rectangular co-planar monopole antenna. It was found that the antenna supports only one frequency band. Therefore, the antenna structure was restructured by adding a double I-shaped stub to the antenna into two positions, namely on the side, top, and adding a strip load on middle of the common plane monopole antenna. As a result, the antenna, after restructuring, has an increased amplitude of impedance bandwidth. It

also results in a more valuable growth rate. Based on the aforementioned three-position restructuring, this research resulted in three new common-plane monopole antennas, namely the hook-shaped, the T-shaped, and the plus-shaped.

From the experiment, the research result revealed that the prototype hook antenna could be used in the standard frequency ranges GSM 850 (880 – 960 MHz), GSM 900 (880 – 960 MHz), DCS 1.8 (1.72 – 1.88 GHz), PCS 1.9 (1.85 – 1.99 GHz), 5G LTE band 41 (2.496 – 2.690 GHz), and WLAN frequency band IEEE 802.11b/g 2.4 GHz (2.4 – 2.48 GHz). A T-shaped prototype antenna can support IEEE 802.11b/g 2.4 GHz and 5G LTE band 41 (2.496 – 2.690 GHz) frequency bands. The plus-shaped prototype antenna can operate in the WLAN frequency range IEEE 802.11b/g/n 2.4 GHz, IEEE 802.11a (5.15 – 5.35 GHz), IEEE 802.11ac (5.725 – 5.825 GHz), and 5G based on LTE band 41 (2.496 – 2.690 GHz). All three antennas are omnidirectional in a single plane and have a maximum gain of 5.026 dBi, 4.81 dBi, and 5.12 dBi, respectively. The three prototype antennas were then put into accurate application testing with the wireless communication system, the TP-LINK AX1800 access point device: Samsung Galaxy S10 plus with and without obstacles. The test results showed that all three antennas can receive and transmit signals at distances up to 50 meters, with a maximum power of -64 dBm. In the case of obstacles, it was found that all three antennas could receive and transmit signals up to a maximum distance of 200 meters, with a maximum power of -79 dBm for an unobstructed case.

Keywords: CPW-fed monopole, I-shaped stub, strip load, bandwidth enhancement

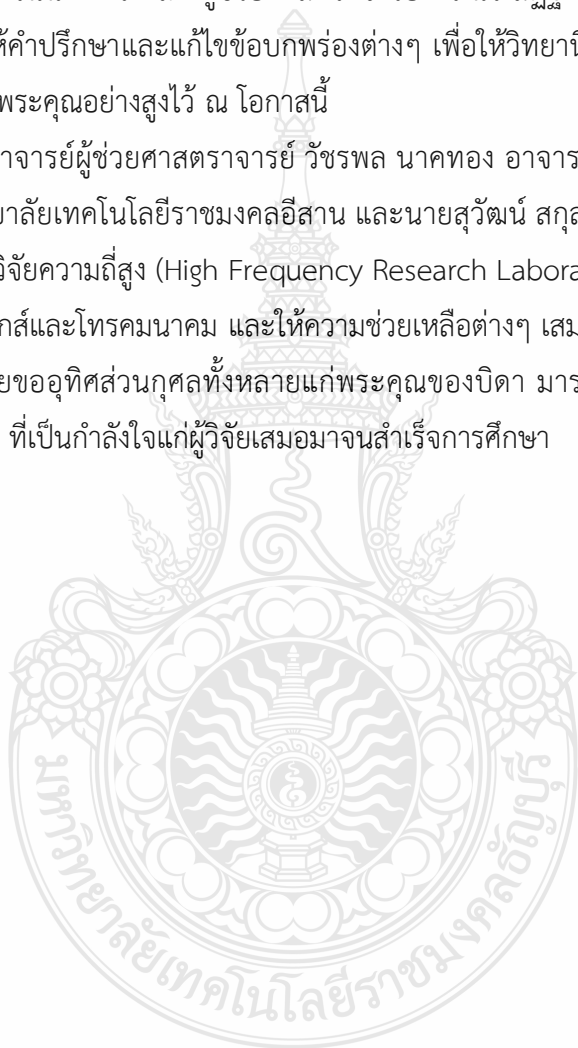
กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีจากความเมตตากรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำนวยการ เรืองวารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และโทรคมนาคม รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ อรรถทิมากุล ผู้ทรงคุณวุฒิประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรเสฏฐ์ วิชัยพาณิชย์ กรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชรพล นาคทอง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และนายสุวัฒน์ สุกุลชาติ นักศึกษาปริญญาเอก ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยความถี่สูง (High Frequency Research Laboratory: HFRL) ที่คอยแนะนำความรู้ด้านอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม และให้ความช่วยเหลือต่างๆ เสมอมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขออุทิศส่วนกุศลทั้งหลายแก่พระคุณของบิดา มารดา และขอบคุณครอบครัวญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ที่เป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

กฤษณะ นิลวิเวก



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(5)
กิตติกรรมประกาศ.....	(7)
สารบัญ.....	(8)
สารบัญตาราง.....	(10)
สารบัญรูป.....	(11)
บทที่ 1 บทนำ.....	16
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	16
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	17
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	17
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	17
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	18
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.1 ทบทวนวรรณกรรม.....	19
2.2 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ.....	23
2.3 ไมโครสตริป.....	30
2.4 สายอากาศแบบโมโนโพลระนาบร่วม.....	38
2.5 มาตรฐาน IEEE	40
บทที่ 3 วิธีการออกแบบ.....	43
3.1 การออกแบบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ความถี่ 2.45 GHz....	43
3.2 การออกแบบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ.....	46
3.3 การออกแบบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวไอที่ความถี่ 2.45 GHz.....	52
3.4 การออกแบบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวที.....	55
3.5 การออกแบบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ความถี่ 2.6 GHz.....	59
3.6 การออกแบบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวก.....	62
3.7 สรุปผลการออกแบบ.....	66

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบและผลการวัดสายอากาศ.....	68
4.1 การทดสอบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ.....	68
4.2 การทดสอบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวที.....	75
4.3 การทดสอบสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวก.....	78
4.4 การทดสอบใช้งาน.....	82
4.4 สรุปผลของการทดสอบวัดสายอากาศ.....	83
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	85
5.1 สรุปผล.....	85
5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาสายอากาศในอนาคต.....	86
บรรณานุกรม.....	88
ภาคผนวก (ก)	91
ภาคผนวก (ข)	96
ประวัติผู้เขียน.....	121



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของวัสดุฐานรองแบบต่างๆ.....	31
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบเทคโนโลยีไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11.....	42
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีความถี่ 2.45 GHz.....	45
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการออกแบบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ..	51
ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวโอที่มีความถี่ 2.45 GHz.....	55
ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการออกแบบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวที....	58
ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีความถี่ 2.6 GHz.....	61
ตารางที่ 3.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการออกแบบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูป เครื่องหมายบวก.....	65
ตารางที่ 3.7 ค่าคุณลักษณะของสายอากาศโมโนโพลทั้ง 3 รูปแบบ.....	66
ตารางที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างผลการจำลองแบบกับผลการวัดสายอากาศ โมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ.....	69
ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างผลการจำลองแบบกับผลการวัดสายอากาศ โมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวที.....	76
ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างผลการจำลองแบบกับผลการวัดสายอากาศ โมโนโพลรูปเครื่องหมายบวก.....	80
ตารางที่ 4.4 การวัดกำลังงานสัญญาณของสายอากาศทั้ง 3 รูปแบบ.....	83

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ผลการได้ออกแบบสายอากาศโมโนโพลช่องรูปตัว L คว่ำแบบ Tri-band ที่นำมา ประยุกต์ใช้กับระบบ WLAN/WiMAX.....	20
รูปที่ 2.2 การพัฒนาสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบรูปลูกข้างบนวัสดุแผ่นฟิล์มไมลาร์ โพลีเอสเตอร์สำหรับเครือข่ายไร้.....	20
รูปที่ 2.3 การศึกษาสายอากาศโมโนโพลรูปตัวยูที่ใช้เทคนิคการเซาะร่องรูปชั้นบันไดสำหรับ ประยุกต์ใช้งาน WLAN/UWB.....	21
รูปที่ 2.4 การศึกษาสายอากาศโมโนโพลรูปตัวโอรวมกับการเพิ่มสัดับรูปตัวไอสำหรับประยุกต์ ใช้งานย่านความถี่คู่.....	22
รูปที่ 2.5 สายอากาศโมโนโพลสำหรับประยุกต์ใช้งานย่านแถบกว้างมากยิ่งขึ้น.....	23
รูปที่ 2.6 สายอากาศในโหมดการส่ง.....	24
รูปที่ 2.7 การแบ่งบริเวณสนามสายอากาศ.....	25
รูปที่ 2.8 Radiation Pattern.....	28
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของไมโครสตริป.....	30
รูปที่ 2.10 รูปแบบการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดกึ่ง TEM.....	32
รูปที่ 2.11 ไมโครสตริปที่มี $w/h \gg 1$ และ $w/h \ll 1$	35
รูปที่ 2.12 โครงสร้างสายอากาศแบบโมโนโพลระนาบร่วม.....	38
รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ความถี่ 2.45 GHz.....	43
รูปที่ 3.2 ผลการจำลองค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูป สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ความถี่ 2.45 GHz.....	46
รูปที่ 3.3 การปรับจูนความยาวของตัวแผ่พลังงาน.....	47
รูปที่ 3.4 ผลการจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เมื่อปรับ L , ของสายอากาศโมโนโพล ระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	47
รูปที่ 3.5 การปรับเพิ่มสัดับที่ด้านบนของตัวแผ่พลังงาน.....	48
รูปที่ 3.6 ผลการจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เมื่อปรับ W , ของสายอากาศโมโนโพล ระนาบร่วมรูปตะขอ.....	48

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.7 การปรับเพิ่มสลับเข้าที่ด้านข้างของตัวสายอากาศ.....	49
รูปที่ 3.8 ผลการจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เมื่อปรับ L_3 ของสายอากาศโมโนโพล ระนาบร่วมรูปตะขอ.....	49
รูปที่ 3.9 ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่เกิดจากการปรับ โครงสร้างของสายอากาศทั้ง 4 รูปแบบ.....	50
รูปที่ 3.10 โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ.....	50
รูปที่ 3.11 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 850 MHz, 900 MHz 1.8 GHz, 1.9 GHz และ 2.45 GHz.....	52
รูปที่ 3.12 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 850 MHz, 900 MHz 1.8 GHz, 1.9 GHz และ 2.45 GHz.....	52
รูปที่ 3.13 สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวโอที่ความถี่ 2.45 GHz.....	53
รูปที่ 3.14 ผลการจำลองค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วม รูปตัวโอที่ความถี่ 2.45 GHz.....	55
รูปที่ 3.15 การปรับเพิ่มสลับที่ด้านบนตัวแผ่พลังงานของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวโอ.....	56
รูปที่ 3.16 ผลการจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ เมื่อปรับ W_3 ของสายอากาศโมโนโพล ระนาบร่วมรูปตัวโอ.....	56
รูปที่ 3.17 การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์จากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง สายอากาศรูปตัวโอ.....	57
รูปที่ 3.18 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวโอ.....	57
รูปที่ 3.19 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz และ 3.5 GHz.....	58
รูปที่ 3.20 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 2.45 GHz และ 3.5 GHz.....	59
รูปที่ 3.21 สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ความถี่ 2.6 GHz.....	59
รูปที่ 3.22 ผลการจำลองค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วม รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ความถี่ 2.6 GHz.....	62

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.23 การปรับเพิ่มสลับที่บริเวณตรงกลางตัวแผ่พลังงานของสายอากาศโมโนโพล ระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวก.....	63
รูปที่ 3.24 ผลการจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ เมื่อปรับ W_r ของสายอากาศโมโนโพล ระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวก.....	63
รูปที่ 3.25 การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์จากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวก.....	64
รูปที่ 3.26 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวก.....	64
รูปที่ 3.27 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 2.6 GHz และ 5.6 GHz.....	65
รูปที่ 3.28 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 2.6 GHz และ 5.6 GHz.....	66
รูปที่ 4.1 การทดสอบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย.....	68
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบของค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของ สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ.....	69
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 850 MHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ.....	70
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 900 MHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ.....	70
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1.8 GHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ.....	71
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1.9 GHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ.....	71
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ.....	72
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ สนามแม่เหล็กที่ความถี่ 850 MHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ.....	72

สารบัญญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ สนามแม่เหล็กที่ความถี่ 2.6 GHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปเครื่องหมายวก...	81
รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ สนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5.6 GHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปเครื่องหมายวก...	82
รูปที่ 4.25 อุปกรณ์ที่ใช้ร่วมการทดสอบใช้งานจริงกับสายอากาศที่นำเสนอในงานวิจัยนี้.....	82



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สำหรับการสื่อสารในระบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) ในประเทศไทยนั้น นิยมนำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีข้อดีต่อภาคธุรกิจหรือหน่วยงานต่างๆ ช่วยในด้านการลดค่าใช้จ่ายในการเดินทางและลดเวลาในการติดต่อสื่อสาร ทำให้เกิดความสะดวกรวดเร็วมากยิ่งขึ้น โดยระบบสื่อสารไร้สายนั้นจะถูกนำมาใช้เป็นเครื่องรับ-ส่งสัญญาณให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ แล็ปท็อป มือถือ แท็บเล็ต ไอแพด และ GPS เป็นต้น อุปกรณ์สำคัญที่ช่วยในการติดต่อสื่อสารอย่างสายอากาศถูกพัฒนาจากนักวิจัยหลายท่าน [1-4] เพื่อให้ครอบคลุมการใช้งานในระบบเครือข่ายไร้สาย และยังสามารถพัฒนาไปใช้กับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งจะมีช่วงความถี่มาตรฐานสำหรับการใช้งานในระบบต่างๆ ดังนี้ ระบบ GSM 850 (0.82 – 0.90 GHz), GSM 900 (880 – 960 MHz), DCS (1.71 – 1.88 GHz), PCS (1.85 – 1.99 GHz), IMT (1.92 – 2.17 MHz), IEEE 802.11b/g (2.40 GHz), LTE band 41 (2.496 – 2.69 GHz), IEEE 802.16e (3.50 GHz), IEEE 802.11j (4.90 – 5.091 GHz), Public Safety Frequency (4.94 – 4.99 GHz), IEEE 802.16a 5.20 GHz (5.13 – 5.35 GHz) และความถี่ 5.80 GHz (5.7 – 5.9 GHz) [5-8] เป็นต้น

จากความสำคัญของตัวสายอากาศนั้น ได้มีผู้สนใจและพัฒนาโครงสร้างสายอากาศให้สามารถรับสัญญาณตามมาตรฐานที่ใช้งานดังกล่าว โดยใช้เทคนิคการเพิ่มสลับและเพิ่มโหนดแผ่นสตริปที่ตัวสายอากาศกับระนาบกราวด์ [9-12] เพื่อช่วยในการปรับเพิ่มช่วงความถี่ใช้งานให้ได้มากยิ่งขึ้น เนื่องจากการออกแบบโครงสร้างสายอากาศแบบพื้นฐานนั้น จะทำให้ได้สายอากาศที่สามารถใช้งานได้ย่านความถี่เดียวตามโครงสร้างที่ออกแบบเท่านั้น จึงต้องอาศัยเทคนิคต่างๆ ในการช่วยเพิ่มช่วงความถี่ให้ได้ช่วงความถี่ตามมาตรฐานที่จะนำมาใช้งาน

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาโครงสร้างสายอากาศโมโนโพล เนื่องจากมีรูปแบบในการปรับจูนได้ง่าย โดยใช้เทคนิคการเพิ่มสลับและเทคนิคการเพิ่มโหนดสตริป [9-12] ซึ่งจะส่งผลต่อการขยายแบนด์วิดท์ให้ครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งานได้เช่นกัน อีกทั้งยังช่วยลดความซับซ้อนและขั้นตอนในด้านการปรับจูนโครงสร้างสายอากาศอีกด้วย โดยโครงสร้างสายอากาศจะจำลองบนโปรแกรม CST เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ใช้งานและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมที่สุดของตัวสายอากาศต้นแบบ โดยการปรับจูนโครงสร้างสายอากาศด้วยเทคนิคการเพิ่มสลับและเทคนิคการเพิ่มโหนดสตริป สามารถทำให้ได้สายอากาศที่ตอบสนองช่วงความถี่ใช้งานในระบบ GSM

850 (880 – 960 MHz), GSM 900 (880 – 960 MHz), DCS (1.72 – 1.88 GHz), PCS (1.85 – 1.99 GHz) และ WLAN IEEE 802.11 2.4 GHz (2.4 – 2.48 GHz) ได้เป็นอย่างดี

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการออกแบบของสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบร่วม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาเทคนิคการเพิ่มสัดและเทคนิคการเพิ่มโหนดสตริป
- 1.2.3 เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศด้วยสัดรูปตัวไอและโหนดสตริป
- 1.2.4 เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบร่วม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบร่วมที่มีการปรับเพิ่มแบนด์วิดท์ด้วยเทคนิคการเพิ่มสัดและเทคนิคการเพิ่มโหนดสตริป
- 1.3.2 สายอากาศสามารถครอบคลุมการใช้งานในระบบ GSM ย่านความถี่ 850 MHz, 900MHz, 1.8 GHz, 1.9 GHz และ WLAN ย่านความถี่ 2.45 GHz
- 1.3.3 วิเคราะห์หาคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศด้วยการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบกับผลการวัดจริง
- 1.3.4 สายอากาศต้นแบบมีค่าอัตราการขยายในย่านความถี่ GSM ไม่น้อยกว่า 2 dBi และความถี่ย่าน WLAN ไม่น้อยกว่า 3 dBi

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศโมโนระนาบร่วม
- 1.4.2 ศึกษาเทคนิคการเพิ่มสัดและเทคนิคการเพิ่มโหนดสตริป
- 1.4.3 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม CST เพื่อใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลอง
- 1.4.4 ออกแบบปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศด้วยสัดรูปตัวไอและโหนดแผ่นสตริป
- 1.4.5 วิเคราะห์ประสิทธิภาพแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบร่วม
- 1.4.6 สร้างสายอากาศระนาบร่วมแถบความถี่กว้างตามที่ได้ออกแบบไว้
- 1.4.7 ทดสอบการทำงานและหาประสิทธิภาพของสายอากาศ
- 1.4.8 ปรับปรุงและแก้ไขข้อผิดพลาด
- 1.4.9 สรุปผลการทดสอบและรายงานผล

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สายอากาศที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้งานสำหรับการสื่อสารในระบบ GSM และ WLAN ได้

1.5.2 มีความรู้ความเข้าใจในการใช้เทคนิคการเพิ่มสลับและเทคนิคการเพิ่มโหลดสตรีป

1.5.3 เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพแบนด์วิดท์ของสายอากาศ

1.5.4 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศระนาบร่วมแถบความถี่กว้าง

1.5.5 สามารถหาแนวทางแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการสร้างสายอากาศได้



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

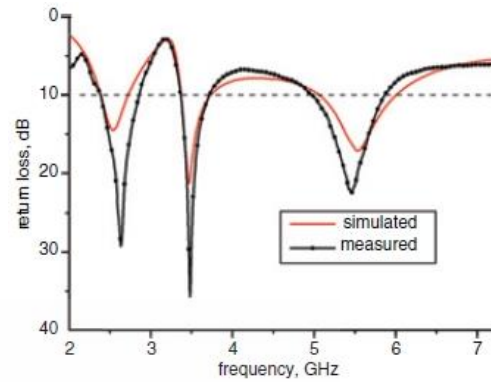
การสื่อสารไร้สายได้รับความนิยมนำมาใช้งานเป็นอย่างมากทำให้มีความต้องการใช้งานย่านความถี่เพิ่มมากขึ้นแต่เนื่องจากความถี่ในช่วงที่ใช้งานมีอยู่ไม่เพียงพอกับความต้องการ จึงจำเป็นต้องเพิ่มการใช้งานไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ดังนั้นสายอากาศที่เคยใช้งานอยู่เดิมจะต้องปรับเปลี่ยนให้สามารถรองรับความถี่ที่สูงขึ้นนั้นได้ จึงต้องทำให้มีขนาดเล็กลงหรือไม่สามารถสร้างให้อยู่ในรูปแบบเดิมได้อีกต่อไป เพราะเทคโนโลยีในปัจจุบันนั้นได้พัฒนาเครื่องมือสื่อสารให้มีขนาดที่เล็กลงมาก จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาโครงสร้างที่เป็นสายอากาศระนาบร่วมแถบความถี่กว้างโดยใช้แผ่นฟิล์มไมลาร์ โพลีเอสเตอร์ที่ทำเป็นสายอากาศ ข้อดีของสายอากาศชนิดนี้คือราคาถูก น้ำหนักเบา ง่ายต่อการสร้าง สามารถยืดหยุ่นและบิดงอได้ ดังนั้นสายอากาศระนาบร่วมแถบความถี่กว้างโดยใช้แผ่นฟิล์มไมลาร์ โพลีเอสเตอร์ จึงถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้งานแทนที่สายอากาศแบบเดิมในย่านความถี่สื่อสาร โดยเนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับ การบัพทพหุวรรณกรรมต่างๆ พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป สายอากาศระนาบร่วม และมาตรฐานการสื่อสาร IEEE

2.1 ทบทวนวรรณกรรม

ในผลงานการวิจัยที่ผ่านมาผู้พัฒนาวิจัยหลายท่านได้เสนอแนวคิดเพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับการลดขนาด ต้นทุนการสร้าง ความยืดหยุ่น ความทนทานของสายอากาศและวัสดุฐานรองที่จะนำมาใช้ร่วมกับสายอากาศเพื่อที่จะรองรับการสื่อสารไร้สายได้หลากหลายย่านความถี่มากขึ้นดังนั้น H. Chen et al. [13] ได้ออกแบบสายอากาศโมนโพล ช่องรูปตัว L คว่ำแบบ Tri-band ที่นำมาประยุกต์ใช้กับระบบ WLAN/WiMAX เป็นสายอากาศรูปตัว L คว่ำ ที่เพิ่มสตัดจ์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าทั้งสองข้างของสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (ก) และได้ทำการวัดผลเปรียบเทียบกับผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 470 MHz (2.38 – 2.85 GHz), 360 MHz (3.36 – 3.72 GHz) และ 890 MHz (4.98 – 5.87 GHz) เพื่อให้ครอบคลุมย่านความถี่ 2.4/5.2/5.8 GHz WLAN และ 2.5/3.5/5.5 GHz WiMAX แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (ข)



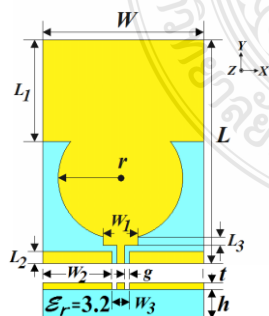
(ก) สายอากาศต้นแบบ



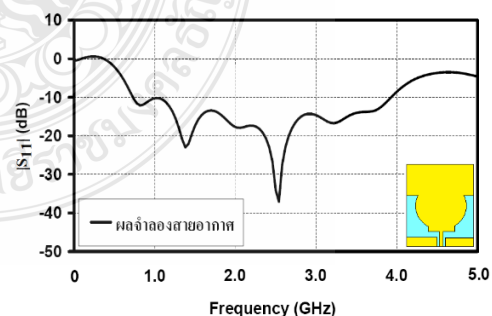
(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

รูปที่ 2.1 ผลการได้ออกแบบสายอากาศโมโนโพลช่องรูปตัว L คว่ำแบบ Tri-band ที่นำมาประยุกต์ใช้กับระบบ WLAN/WiMAX [13]

วัชรพล นาคทอง และ คณะ [14] ได้นำเสนอการศึกษาการปรับจูนโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลระนาบรูปลูกข้าง ที่ใช้วัสดุแผ่นฟิล์มไมลาร์โพลีเอสเตอร์เป็นฐานรองของสายอากาศ และป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม (CPW-Fed) ที่มีขนาด 180 x 210 มม. เพื่อนำไปจำลองร่วมกับเครื่องมือสื่อสารที่มีรูปร่างบางน้ำหนักเบา โดยการปรับจูนโครงสร้างของตัวแผ่พลังงานด้วยเทคนิคการเพิ่มสตัดรูปวงกลมและรูปสี่เหลี่ยมที่ด้านบนแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 (ก) ผลจากการปรับจูนพบว่าทำให้เพิ่มช่วงความถี่ใช้งานกว้างมากยิ่งขึ้น การวิเคราะห์การจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer Science Technology: CST) และพบว่าค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่มีค่าร้อยละ 133.05 (0.80 – 3.98 GHz) แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 (ข) ซึ่งมีรูปลักษณะการแผ่พลังงานเป็นแบบสองทิศทาง



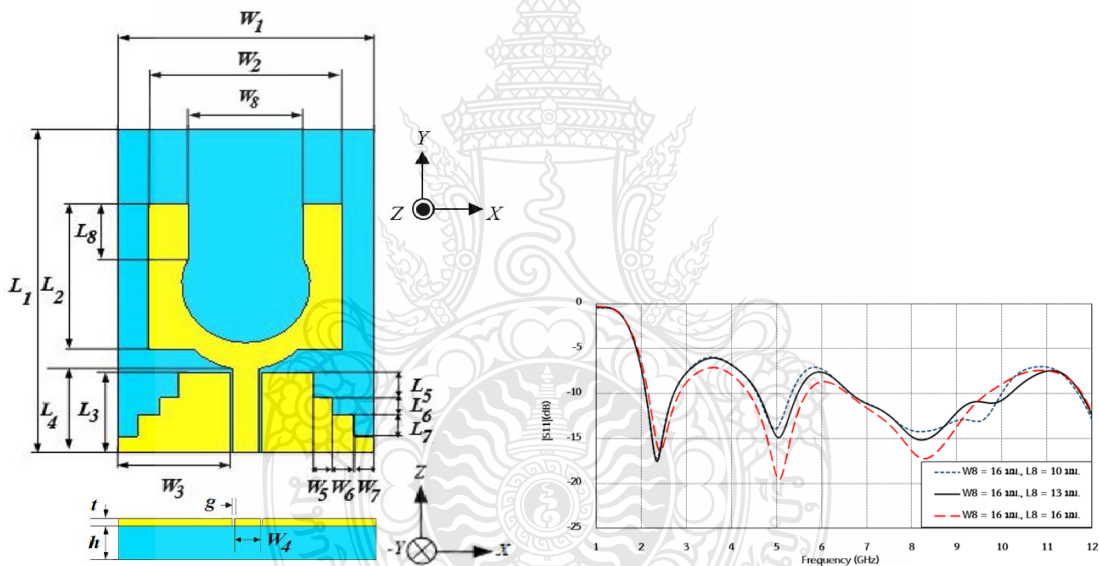
(ก) สายอากาศต้นแบบ



(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

รูปที่ 2.2 การพัฒนาสายอากาศโมโนโพลระนาบรูปลูกข้างบนวัสดุแผ่นฟิล์มไมลาร์โพลีเอสเตอร์สำหรับเครือข่ายไร้สาย [14]

วัชรพล นาคทอง และ คณะ [15] ได้ออกแบบสายอากาศโมโนโพลรูปตัวยู โดยใช้เทคนิคการเจาะร่องแบบชั้นบันไดทั้งสองข้างบนระนาบกราวด์ร่วมและการเพิ่มสัดรูปวงกลมที่ตัวสายอากาศ โดยขนาดสายอากาศที่ได้จากการออกแบบมีขนาด 36×50 มม. สร้างขึ้นจากวัสดุฐานรองชนิดแผ่นวงจรพิมพ์ FR4 ที่มีค่าไดอิเล็กตริก 4.3 และมีค่าความหนา 0.764 มม. แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 (ก) ผลที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศพบว่าในช่วงความถี่ 2.14 – 2.83 GHz, 4.67 – 5.52 GHz และ 6.71 – 10.34 GHz ตามลำดับ ซึ่งครอบคลุมการใช้งานตามมาตรฐาน IEEE 802.11 2.4 GHz (2.4 – 2.48 GHz), 5.20 GHz (5.15 – 5.25 GHz) และระบบ Ultra-Wideband (UWB) IEEE 802.13 (3.1 – 10.6 GHz) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า -10 dB แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 (ข) มีค่าอัตราขยายอยู่ที่ 2.25 dBi, 5.43 dBi และ 3.80 dBi ตามลำดับ และมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทาง



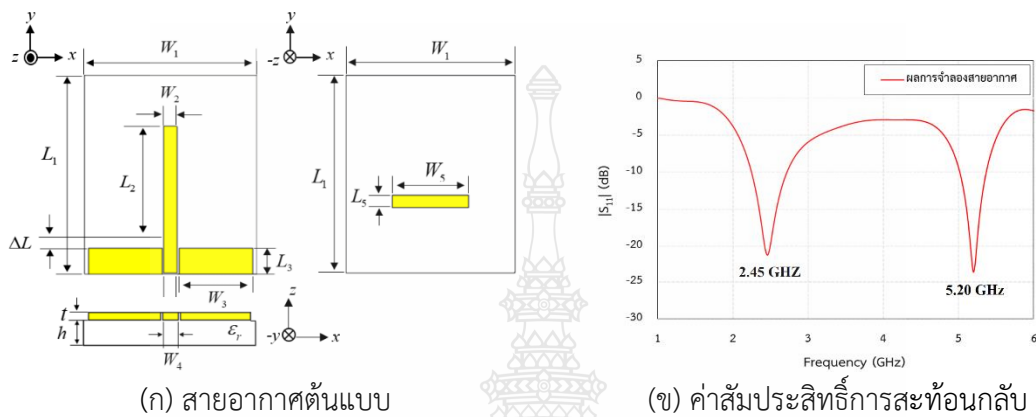
(ก) สายอากาศต้นแบบ

(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

รูปที่ 2.3 การศึกษาสายอากาศโมโนโพลรูปตัวยูที่ใช้เทคนิคการเจาะร่องรูปชั้นบันไดสำหรับประยุกต์ใช้งาน WLAN/UWB [15]

วัชรพล นาคทอง และ คณะ [16] ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปตัวโอสำหรับประยุกต์ใช้งานแถบความถี่คู่ โดยใช้เทคนิคการปรับจูนสายอากาศที่ระนาบกราวด์และการเพิ่มสัดรูปตัวโอที่ด้านหลังของตัวสายอากาศที่ออกแบบ ซึ่งมีขนาด 40×50 มม. ถูกวางอยู่บนวัสดุฐานรองชนิดฟิล์มที่มีความหนา 0.4 มม. และมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 3.2 แสดงได้ดังรูปที่ 2.4 (ก) จากผลการจำลองแบบและผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสายอากาศต้นแบบมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า

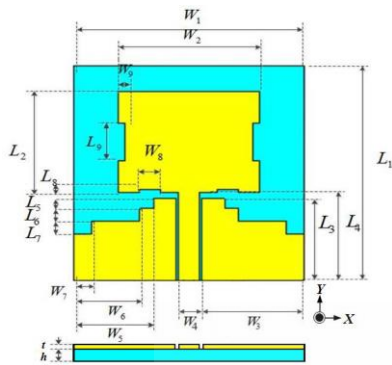
-10 dB ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.20 GHz มีค่า -21.12 dB และ -22.86 dB ตามลำดับแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 (ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.20 GHz มีค่า 1.18:1 และ 1.15:1 ตามลำดับ มีอัตราการขยายที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.20 GHz คือเท่ากับ 1.89 dBi และ 3.25 dBi ตามลำดับ สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทาง



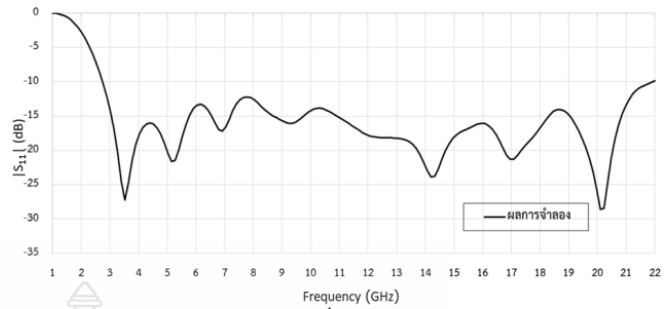
(ก) สายอากาศต้นแบบ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

รูปที่ 2.4 การศึกษาสายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอรวมกับการเพิ่มสตัปรูปตัวไอ สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่คู่ [16]

วัชรพล นาคทอง และ คณะ [17] ได้เสนอการเพิ่มช่วงความถี่ใช้งานให้กับสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้วยการเจาะรูรูปขั้วบันไดและรูปตัวไอที่ตัวสายอากาศ โดยโครงสร้างสายอากาศต้นแบบถูกออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีวัสดุฐานรองชนิด FR4 มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.3 ในส่วนการออกแบบโครงสร้างสายอากาศโมโนโพล เพื่อให้ตอบสนองตามมาตรฐานที่ต้องการคือ Ultra-wideband (UWB) (3.1 – 10.6 GHz), S-band (2 – 4GHz), C-band (4 – 8 GHz), X-band (8 – 12 GHz), Ku-band (12 – 18 GHz), operation, 3G (1.6 – 2 GHz) and 4G (2 – 8 GHz) แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 (ก) การวัดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ต้นแบบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) มีค่าต่ำกว่า -10 dB โดยมีความกว้างของความถี่ใช้งานร้อยละ 154.83 (2.65 – 20.82 GHz) แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 (ข) ซึ่งสายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางตลอดย่านความถี่ที่กว้างมากยิ่งขึ้น สายอากาศมีความถี่ใช้งานครอบคลุมย่านความถี่ (3.1 – 18 GHz) ตามต้องการและมีอัตราการขยายเฉลี่ย 4.17 dBi



(ก) สายอากาศต้นแบบ



(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

รูปที่ 2.5 สายอากาศโมโนโพลสำหรับประยุกต์ใช้งานย่านแถบกว้างมากยิ่งขึ้น [17]

2.2 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ [18]

พารามิเตอร์ที่จะได้กล่าวถึงในส่วนนี้จะเป็นพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ ซึ่งได้จากการคำนวณการจำลองผลและการวัดผลจากชิ้นงาน

2.2.1 อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input impedance: Z_{in})

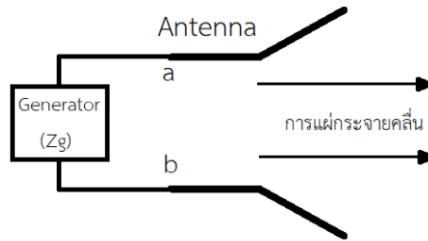
ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Input impedance) ของสายอากาศเป็นค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งเกิดขึ้นที่ขั้วด้านเข้าของสายอากาศหรือเป็นอัตราส่วนของแรงดันกับกระแสที่ขั้วของสายอากาศหรือเป็นอัตราส่วนขององค์ประกอบที่เหมาะสมของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่จุดหนึ่งๆ ซึ่งในหน่วยนี้เราจะสนใจค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ขั้วด้านเข้าของสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 ในที่นี้คือ a-b อัตราส่วนของแรงดันกับกระแสที่ขั้วนี้ขณะไม่มีโหลดใดๆ ต่ออยู่จะทำให้เกิดค่าอิมพีแดนซ์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.1)$$

โดยที่ Z_A = ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ขั้ว a-b (Ω)

R_A = ค่าความต้านทานของสายอากาศที่ขั้ว a-b (Ω)

X_A = ค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศที่ขั้ว a-b (Ω)



รูปที่ 2.6 สายอากาศในโหมดการส่ง [18]

ปกติอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความถี่ในรูปแบบไซน์และจะแมตช์ที่ 50Ω กับสายส่งเฉพาะในช่วงความถี่ช่วงหนึ่งๆ เท่านั้น นอกจากนี้อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศยังขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ต่างๆ อีกได้แก่รูปทรง วิธีการป้อนสัญญาณและสิ่งแวดล้อมข้างเคียงแต่เนื่องจากคำนวณได้ยาก จึงมักจะพบว่าส่วนใหญ่จะหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ได้จากการทดลอง

ในการออกแบบสายอากาศนั้นต้องคำนึงถึงค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ด้วยเนื่องจากสายส่งและตัว SMA Connector ที่ใช้มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50Ω ดังนั้นเราควรออกแบบค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้มีค่าเท่ากับ 50Ω ด้วย

2.2.2 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR)

VSWR คืออัตราส่วนแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุดของคลื่นนิ่งบนสายนำสัญญาณ อัตราส่วนนี้ถูกนำมาวิเคราะห์การแมตช์อิมพีแดนซ์ว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด โดยถ้าค่า VSWR เท่ากับ 1 หมายความว่าคลื่นคลื่นที่ด้วยแรงดันสม่ำเสมอตลอดสายสัญญาณ ซึ่งเป็นสภาวะแมตช์อิมพีแดนซ์พอดี ค่า VSWR สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.2)

$$VSWR = \frac{|V_{\max}|}{|V_{\min}|} = \frac{|I_{\max}|}{|I_{\min}|} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.2)$$

โดยที่ VSWR = อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง

V_{\max} = ค่าแรงดันสูงสุด

V_{\min} = ค่าแรงดันต่ำสุด

I_{\max} = กระแสสูงสุด

I_{\min} = กระแสต่ำสุด

Γ = สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่หัวของสายอากาศ

2.2.3 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

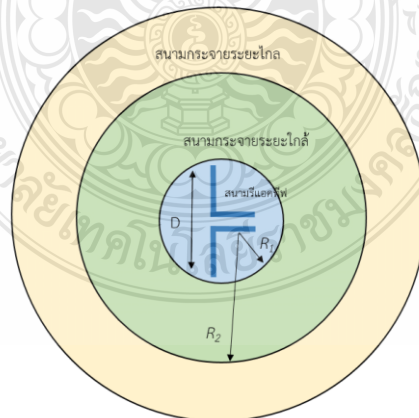
อัตราขยายของสายอากาศเป็นความสามารถของสายอากาศในการรับส่งคลื่นวิทยุของสายอากาศแต่ละแบบที่มีอัตราขยายแตกต่างกัน สายอากาศแบบทิศทางเดียวจะมีอัตราการขยายมากกว่าสายอากาศแบบกึ่งรอบทิศทางและแบบรอบทิศทางโดยลำดับลักษณะการใช้งานจึงแตกต่างกันไป สายอากาศที่มีอัตราขยายสูงจะสามารถรับ-ส่งคลื่นได้ดีมาก ค่าอัตราขยายของสายอากาศที่มีอัตราขยายต่ำ สามารถพิจารณาได้ 2 กรณีคือ

1) อัตราขยายจริง (Absolute gain) ของสายอากาศ (ในทิศทางที่กำหนดให้) หมายถึงอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ต่อความเข้มของการแพร่กระจายกำลังงานที่ได้รับเข้ามา

2) อัตราขยายสัมพัทธ์ (Relative gain) หมายถึงอัตราส่วนของอัตราขยายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ต่ออัตราขยายกำลังงานของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น โดยกำลังงานที่ป้อนให้กับอินพุตของสายอากาศจะต้องเหมือนกันทั้งสองตัว โดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้ในการเปรียบเทียบก็คือสายอากาศที่เป็นแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสีย (Lossless isotropic source) และสายอากาศแบบไดโพล

2.2.4 บริเวณต่างๆ ของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไปมักจะแบ่งบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วนคือสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive near field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating near-field) และสนามระยะไกล (Far field) แสดงได้ดังรูปที่ 2.7 และดังสมการที่ (2.3) – (2.4)



รูปที่ 2.7 การแบ่งบริเวณสนามสายอากาศ [18]

$$R_1 = 0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (2.3)$$

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.4)$$

โดยที่ D = มิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ (m)

λ = ความยาวคลื่นในอากาศว่าง (m)

R_1 = ระยะของสนามระยะใกล้ (m)

R_2 = ระยะของสนามระยะไกล (m)

สนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive-near field) หมายถึงบริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุดเป็นจุดที่กระจายสัญญาณได้รอบทิศทางยกตัวอย่างเช่น เมื่อเรายืนใกล้ลำโพงที่มีกำลังวัตต์มากๆ เราจะไม่สามารถแยกได้ว่าด้านไหนเป็นด้านหน้าลำโพงและตรงบริเวณนี้จะมีสนามชนิดรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ซึ่งบริเวณนี้จะมีระยะทาง $r < R_1$

สนามแผ่กระจายระยะใกล้ (Radiating near-field) คือบริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกลโดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่และการกระจายของสนามตามมุมต่างๆ นั้นแปรผันตามระยะทางจากสายอากาศเมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นสนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้นซึ่งบริเวณนี้จะมีระยะทาง $R_1 \leq r \leq R_2$

บริเวณสนามระยะไกลคือบริเวณที่เราสนใจเพื่อทำการศึกษารื่องของสายอากาศเพราะเป็นบริเวณที่ใช้จัดวางสายอากาศเพื่อทำการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานหรือทำการวัดคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศในกรณีที่ความยาวของสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีขนาดแตกต่างกันจะต้องแทนค่า D ด้วยขนาดของสายอากาศที่มีความยาวสูงสุดเพื่อจะได้มั่นใจว่าเป็นบริเวณสนามระยะไกลที่ถูกต้องซึ่งบริเวณนี้จะมีระยะทาง $r > R_2$

2.2.5 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection coefficient: (S_{11}))

การสูญเสียของสายอากาศเป็นขนาด (Magnitude) ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่บอกถึงสถานะการสะท้อนกลับของคลื่นที่ส่งจากสายนำสัญญาณเข้าไปในสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input impedance) ของสายอากาศและอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศ เมื่อพิจารณาช่วงความถี่ที่ใช้งานสายอากาศนั้น สายอากาศจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเท่ากับหรือต่ำกว่า -10 dB ซึ่งแสดงถึงค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณที่ยอมรับได้มีค่าไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของกำลังงานคลื่นที่ส่งเข้ามายังสายอากาศซึ่งแสดงให้เห็น

เห็นว่าสายอากาศสามารถแปลงกำลังงานจากสายนำสัญญาณเป็นกำลังงานคลื่นมากหรือน้อย ค่าการสูญเสียย้อนกลับนี้ยังมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศด้วย ในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศนั้นสามารถที่จะแสดงด้วยค่าใดค่าหนึ่งระหว่างค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งหรือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศดังสมการที่ (2.5)

$$(S_{11}) = 20 \log_{10} \Gamma \text{ (dB)} \quad (2.5)$$

โดยที่ Γ = สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ขั้วของสายอากาศ

(S_{11}) = ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

สำหรับการแมตช์ที่สมบูรณ์ระหว่างสายส่งและสายอากาศ เมื่อ $\Gamma = 0$ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเป็นค่าอนันต์ ซึ่งแสดงว่าไม่มีกำลังงานที่สะท้อนกลับในทำนองเดียวกัน เมื่อ $\Gamma = 1$ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเป็น 0 dB แสดงว่ากำลังงานสะท้อนกลับหมด

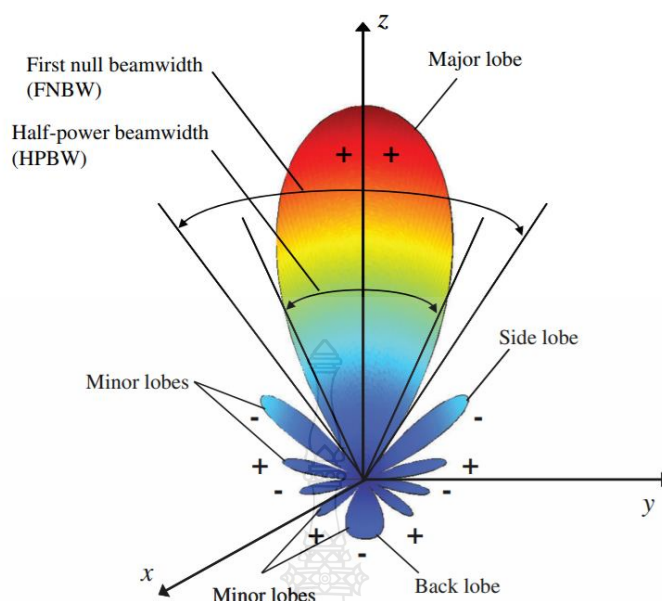
2.2.6 แแถบความถี่ (Bandwidth)

แแถบความถี่ของสายอากาศจะถูกกำหนดอย่างกว้างขวางโดยย่านของความถี่ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสายอากาศนั้นๆ โดยทั่วไปแแถบความถี่จะเป็นอัตราส่วนระหว่างความถี่ด้านสูงกับความถี่ด้านต่ำหรือเปอร์เซ็นต์ของความถี่กลาง (Center frequency) เนื่องจากคุณสมบัติของสายอากาศแต่ละตัวที่ไม่เหมือนกันจึงเป็นการยากที่จะพิจารณาค่าของแแถบความถี่สองวิธีที่นิยมที่สุดในการพิจารณาค่าของแแถบความถี่คือ Pattern bandwidth และ Impedance bandwidth

2.2.7 แพตเทิร์นของการกระจายคลื่น (Radiation pattern)

แพตเทิร์นของการกระจายคลื่นคือรูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งเป็นฟังก์ชันของสเปซโคออดิเนต (Space coordinate) ส่วนใหญ่แพตเทิร์นของการกระจายคลื่นนี้มักจะคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล

การอธิบายคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นจะอาศัยคุณสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้คือความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation intensity) ความเข้มของสนาม (Field strength) เฟส (Phase) หรือโพลาริเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปแบบของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่รัศมีคงที่แสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 Radiation Pattern [14]

- 1) โลบลึก (Major lobe) หรือ (Main lobe) คือปริมส่วนที่มีกำลังคลื่นกระจายออกไปมากที่สุดและโดยทั่วไปจุดสูงสุดของแพทเทิร์นจะอยู่ในเมเนปิมนี้
- 2) โลบรอง (Minor lobe) คือโลบย่อยที่อยู่ติดกับโลบลึก และอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับโลบลึก
- 3) โลบข้าง (Side lobe) คือโลบที่อยู่รอบ ๆ โลบลึก และจะมีมากอยู่ติดกับโลบลึก เพื่อให้สัญญาณชัดเจน ควรทำการลดขนาดของโลบข้างให้น้อยลง
- 4) โลบล้าง (Back lobe) คือลำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจำนวนเล็กน้อยที่พุ่งด้านหลังของสายอากาศ เป็นโลบย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับโลบลึก ปกติแล้วโลบย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสายอากาศที่ดีจะต้องกำจัดโลบเหล่านี้ให้น้อยที่สุด
- 5) ความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเป็นศูนย์จุดแรก (First null Beam Width: FNBW) คือมุมที่เกิดจากการที่ค่าของกำลังในการแพร่เป็นศูนย์ครั้งแรก
- 6) ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beam Width: HPBW) ในระนาบหนึ่งๆ ที่ประกอบด้วยทิศทางที่มีลำคลื่นสูงสุด และมีมุมซึ่งอยู่ระหว่างสองทิศทางในทิศทางที่ซึ่งความเข้มของการแพร่กระจายกำลังงานมีค่ากำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งจากค่าสูงสุดของมัน และคำว่า Beam width มักจะใช้อธิบายถึงความกว้างลำคลื่นที่มีค่า 3 dB เสมอ (3 - dB Beam width)

2.2.8 หน่วยของอัตราขยาย

1) dB ย่อมาจาก (Decibel) ซึ่งส่วนมากที่เคยได้ยินจะเป็นหน่วยวัดความดังของเสียงแต่เดซิเบลที่เราจะพูดถึงเป็นหน่วยวัดอัตราขยายของสายอากาศซึ่งก็มีหลายค่า แต่ที่เราได้พบบ่อยๆ ก็จะมีแค่ 3 ตัวได้แก่ dBi dBd และ dB

2) dBi มาจาก dB (Isotropic) เป็นค่าหน่วยของอัตราขยายของสายอากาศ เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบ Isotropic radiator เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบไดโพล (0 dBd) มีอัตราขยายเท่ากับ 2.15 dBi

3) dBd มาจาก dB (Dipole) เป็นค่าหน่วยของอัตราขยายของสายอากาศ เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบ Half-wave dipole หรือเรียกสั้นๆ ว่าไดโพลซึ่ง $0 \text{ dBd} = 2.15 \text{ dBi}$ ปัจจุบันค่า dBd ผู้ผลิตสายอากาศไม่นิยมนำมาใช้เท่าไรเนื่องจากเป็นค่าที่ไม่สูงมากนัก

4) dBq มาจาก dB (Quarter wave) ค่านี้เราไม่ค่อยเห็น แต่จะถูกนำมาอ้างอิงเป็นค่าหน่วยของอัตราขยายของสายอากาศ เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบ Quarter wave ซึ่ง $0 \text{ dBq} = -0.85 \text{ dBi}$ หรือ $0 \text{ dBi} = 0.85 \text{ dBq}$ และ $0 \text{ dBd} = 3 \text{ dBq}$

สรุปว่าถ้าเทียบกับสายอากาศ Isotropic หน่วยจะเป็น dBi (Decibel over isotropic) ถ้าเทียบกับสายอากาศไดโพลหน่วยจะเป็น dBd (Decibel over Dipole) ค่า dBd จะมากกว่า dBi อยู่ 2.15

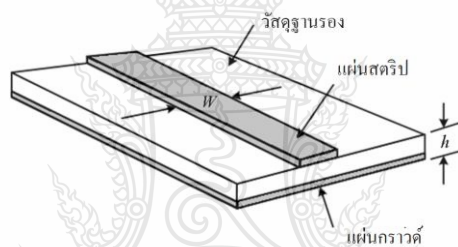
2.2.9 การโพลาไรซ์ของสายอากาศ (Antenna polarization)

การโพลาไรซ์ของสายอากาศจะอธิบายทิศทางของสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศซึ่งถูกส่งออกไปโดยตัวสายอากาศในสนามระยะไกลจริงๆ แล้วก็คือใช้ในการอธิบายทิศทางซึ่งมีความเข้มของสนามสูงสุดสายอากาศส่วนใหญ่จะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น (Linear polarization) นั่นคือในหนึ่งรอบ (Cycle) การขจัดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงในอากาศว่างสายอากาศดังกล่าวจะถูกแบ่งออกเป็นการโพลาไรซ์แนวตั้ง (Vertical polarization) และการโพลาไรซ์แนวนอน (Horizontal polarization) นอกจากนี้ยังมีการโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular) และแบบรูปวงรี (Elliptical) บ่อยครั้งที่การโพลาไรซ์ของสายอากาศจะอ้างอิงจากรูปทรงของตัวมันเองเช่น ในกรณีของสายอากาศแบบเส้นลวดซึ่งอาจจะประกอบด้วยองค์ประกอบเพียงตัวเดียวหรือหลายตัววางขนานกัน (เช่นสายอากาศไดโพลและยาگی) เราสามารถที่จะสมมุติให้สนามไฟฟ้าซึ่งเป็นโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นให้ขนานไปกับองค์ประกอบของตัวสายอากาศซึ่งสายอากาศบางชนิดมีโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นเหมือนกัน แต่ไม่สามารถจะใช้รูปทรงนั้นมาทำการทำนายถึงการโพลาไรซ์ที่จะเกิดขึ้นได้ เช่นสายอากาศปากแตร (Horn) แบบบ่วง (Loop) และแบบร่อง (Slit) เพื่อให้การรับสัญญาณทำได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้สิ่งสำคัญก็คือสายอากาศที่ทำหน้าที่รับสัญญาณจะต้องมีการโพลาไรซ์แบบเดียวกันกับสัญญาณที่ส่งมาและ

เมื่อเกิดการสูญเสียสัญญาณอันเนื่องมาจากการจัดวางการโพลาไรซ์ไม่ถูกต้อง (เช่นสัญญาณที่รับได้เป็นการโพลาไรซ์ทางแนวตั้งแต่สายอากาศที่ใช้ส่งมีการจัดการโพลาไรซ์ทางแนวนอน) เราจะเรียกว่า การโพลาไรซ์ไขว้ (Cross – polarization isolation)

2.3 ไมโครสตริป [18]

ไมโครสตริปที่ใช้งานอยู่โดยทั่วไปนั้นกล่าวคือจะมีรูปร่างเป็นสตริปหรือแถบโลหะแคบๆ อยู่บนวัสดุฐานรอง (Substrate) ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริกและด้านล่างของวัสดุฐานรองเป็นผิวโลหะพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านอยู่ในวัสดุฐานรองบริเวณที่อยู่ระหว่างโลหะแคบๆ กับผิวด้านล่าง ความหนาของวัสดุฐานรองนั้นจะหนาประมาณ 2 มม. หรือต่ำกว่าลงมา ความกว้างของวัสดุฐานรองนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าของอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ต้องการ โครงสร้างของไมโครสตริปแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของไมโครสตริป [18]

สำหรับความหนาของตัวสตริปเองนั้นจะมีค่าประมาณ $5\ \mu\text{m}$ หรือ $10\ \mu\text{m}$ ขึ้นอยู่กับการใช้เทคโนโลยีแบบฟิล์มบาง หรือแบบฟิล์มหนาในการสร้างสตริปนั้น สำหรับวัสดุฐานรองที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไปจะมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ดังตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างวัสดุฐานรองชนิดต่างๆ และคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุฐานรอง ได้แก่ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ หรือค่า $\tan \delta$ ที่ความถี่ 10 GHz

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของวัสดุฐานรองแบบต่างๆ [18]

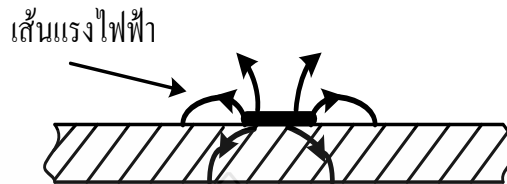
วัสดุ	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ϵ_r	$\tan \delta$ ที่ความถี่ 10 GHz	ค่าคงตัวของการนำความร้อน $W/cm^2/^\circ C$	ความขรุขระของผิว μm	ความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้า (kV/cm)
อะลูมินา 99.5%	10	$1-2 \times 10^{-4}$	0.3	2 - 8	4×10^3
96%	9	6×10^{-4}	0.28	20	4×10^3
แซฟไฟร์	9.4 และ 11.6 (ผลึกเดี่ยว)	1×10^{-4}	0.4	1	4×10^3
แก้ว	5	20×10^{-4}	0.01	1	-
ควอตซ์	3.8	1×10^{-4}	0.01	1	10×10^3
GaAs	13	6×10^{-4}	0.3	1	350
ฟิล์มไม่ล่า	3.2	-	0.01	1	-

ค่าคงตัวของการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของวัสดุ ความขรุขระของพื้นผิว และความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength) ความหมายของคุณสมบัติที่กล่าวมาจะเป็นดังนี้คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์จะบอกถึงคุณสมบัติของการเป็นสารไดอิเล็กตริกโดยเทียบกับอากาศว่าง ค่านี้จะส่งผลทำให้อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของไมโครสตริปเปลี่ยนแปลง ค่า $\tan \delta$ นั้นคือ ค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างกระแสการนำกับกระแสเสียดสเฟลซเมนต์ เมื่อนำสารไดอิเล็กตริกนั้นไปคั่นระหว่างแผ่นโลหะคู่หนึ่ง ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวคาปาซิเตอร์ โดยที่ $\epsilon = \epsilon - j\sigma/\omega$ ค่า $\tan \delta$ ก็จะมีค่าเท่ากับ $\sigma/\omega\epsilon$ ซึ่งค่านี้แสดงให้เห็นว่า สารไดอิเล็กตริกนั้นมีการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสเล็กน้อยเพียงใด

2.3.1 การส่งผ่านของคลื่นในไมโครสตริป

ไมโครสตริปแม้จะมีโครงสร้างง่ายๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น แต่การวิเคราะห์คุณสมบัติของไมโครสตริปโดยละเอียดทางทฤษฎีนั้นเป็นสิ่งที่ยุ่งยากมาก ทั้งนี้ก็เป็นเพราะแกนประสานที่ใช้ และเงื่อนไขขอบเขตของระบบค่อนข้างยุ่งยาก เมื่อเทียบกับท่อนำคลื่นหรือสายนำสัญญาณชนิดอื่นๆ อย่างไรก็ตาม ได้มีผู้ทำการศึกษาทางทฤษฎีและพบว่าคลื่นที่ผ่านไปตามไมโครสตริปนั้นจะมีความใกล้เคียงกันกับโหมด TEM มากแต่ก็ไม่ใช่โหมด TEM เสียทีเดียว จึงนิยมเรียกโหมดดังกล่าวนี้ว่า โหมดกึ่ง TEM (Quasi-Tem Mode) แสดงเส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามแนวขวางของไมโครสตริปการที่มีสนามใน

แนวแกนอยู่ข้างเป็นเพราะโครงสร้างที่มีสารไดอิเล็กตริก และอากาศอยู่ในระนาบเดียวกัน และสภาพที่มีสนามในแนวแกนเกิดอยู่ในโหมดที่ส่งผ่านอยู่นั้นก็จะเป็นไฮบริดโหมดแสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 รูปแบบการแผ่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดกึ่ง TEM [18]

การที่คลื่นส่งผ่านในโหมดกึ่ง TEM ที่อนุโลมให้เป็นโหมด TEM นี้ทำให้สามารถใช้หลักการวงจรกระจายในการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของไมโครสตริปได้กล่าวคือ ถ้าเราสามารถหาค่าอินดักแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวได้ ก็จะนำค่าทั้งหมดนี้ไปคำนวณหาอิมพีแดนซ์คุณลักษณะได้ อย่างไรก็ตามการหาค่าคาปาซิแตนซ์ก็ยังคงยุ่งยากอยู่ เพราะในไมโครสตริปมีทั้งสารไดอิเล็กตริกและอากาศอยู่ในบริเวณที่พลังงานของคลื่นส่งผ่าน สำหรับการหาค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวนั้นจะไม่ถูกรบกวนจากการมีสารไดอิเล็กตริกอยู่

แม้การหาค่าคาปาซิแตนซ์จะยุ่งยากกว่าปกติ แต่ก็มีวิธีที่ทำให้ง่ายขึ้นโดยการใช้วิธีหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant: ϵ_{eff}) ซึ่งจะรวมผลของสารไดอิเล็กตริกและอากาศเข้าด้วยกัน และเนื่องจากสารไดอิเล็กตริกทั้งหลายมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่หรือ มีดิสเพอร์ชันเชิงวัสดุ ดังนั้นค่า ϵ_{eff} ที่ทำได้ก็จะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ตามไปด้วย อย่างไรก็ตามจากการศึกษาทางทฤษฎีและการทดลองพบว่า ช่วงความถี่ต่ำกว่า 2 GHz ลงมาค่า ϵ_{eff} จะเปลี่ยนไปจากกรณีของกระแสไฟฟ้าสถิตน้อยมาก จึงอนุโลมให้ใช้ค่า ϵ_{eff} ของไฟฟ้าสถิตได้ สำหรับในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 2 GHz จะต้องคำนึงถึงค่าดิสเพอร์ชันโดยการปรับแต่งค่า ϵ_{eff} ให้เหมาะสมกับค่าความถี่ที่ใช้งาน

ในการหาค่า ϵ_{eff} ของกรณีไฟฟ้าสถิตนั้น ใช้แนวความคิดของวงจรกระจายดังต่อไปนี้ เมื่อคลื่นที่ส่งผ่านไปไมโครสตริปนั้นเป็นโหมด TEM และอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ Z_0 จะเขียนในรูปของค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว L และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว C ได้ดังสมการที่ (2.6)

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.6)$$

โดยที่ $Z_o =$ ค่าอิมพีแดนซ์ (Ω)
 $L =$ ค่าอินดักแตนซ์
 $C =$ ค่าคาปาซิแตนซ์

ขณะเดียวกันความเร็วเฟส v_p จะเขียนได้ดังสมการที่ (2.7)

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.7) นี้ เขียน Z_c ในรูปของ v_p กับ L หรือ $\frac{1}{L}$ ดังสมการที่ (2.8)

$$Z_c = v_p L = \frac{1}{v_p C} \quad (2.8)$$

โดยที่ $Z_c =$ ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic Impedance) ของสายส่ง (Ω)
 $v_p =$ ค่าความเร็วเฟส

ในขั้นตอนนี้ เราจะพิจารณากรณีวัสดุฐานรองที่สารไดอิเล็กตริกถูกดึงออกไปเหลือแต่
 อากาศเพียงอย่างเดียวที่โอบล้อมไมโครสตริปอยู่ ในสภาพเช่นนี้ความเร็วเฟสของคลื่น TEM ที่ส่งผ่านอยู่
 จะเท่ากับความเร็วแสง และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวจะเปลี่ยนไป ที่ค่าอินดักแตนซ์จะไม่ถูก
 กระทบ ถ้าให้ค่าคาปาซิแตนซ์ที่เปลี่ยนไปนี้มีค่าเป็น C_o จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง C_o กับความเร็วเฟส
 ได้ดังสมการที่ (2.9)

$$C = \frac{1}{\sqrt{LC_o}} \quad (2.9)$$

ในขณะเดียวกัน ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะก็เขียนได้ดังสมการที่ (2.10)

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C_o}} \quad (2.10)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.9) หาดด้วยสมการที่ (2.7) จะได้สมการที่ (2.11)

$$\frac{C}{C_o} = \left(\frac{c}{v_p} \right)^2 \quad (2.11)$$

โดยที่ c = ค่าความเร็วของคลื่นในอากาศ (3×10^8 เมตร/วินาที)

ค่า C/C_o ตามนิยามนี้โดยทั่วไปก็คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของสารไดอิเล็กตริกที่โอบล้อมระบบเก็บประจุอยู่ ในกรณีนี้ที่พิจารณานี้ ค่า C/C_o จะเปรียบเหมือนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของไมโครสตริปที่มีวัสดุฐานรองเป็นสารไดอิเล็กตริกได้ดังสมการที่ (2.12)

$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{c}{v_p} \right)^2 \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.8) ถึงสมการที่ (2.12) จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง Z_c , Z_o และ ϵ_{eff} ได้ดังสมการที่ (2.13)

$$Z_c = \frac{Z_o}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad \text{หรือ} \quad Z_o = Z_c \sqrt{\epsilon_{eff}} \quad \text{หรือ} \quad \epsilon_{eff} = \left(\frac{Z_o}{Z_c} \right)^2 \quad (2.13)$$

ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.13) นี้จะใช้ประโยชน์ในการออกแบบภายหลัง จากผลที่ได้จะเห็นว่า ถ้าเราสามารถทราบค่า ϵ_{eff} ก็จะทำให้สามารถคำนวณหาคุณสมบัติอื่นๆ ตามมาได้ อย่างไรก็ตาม ค่า ϵ_{eff} จะเปลี่ยนแปลงไปตามความกว้างของไมโครสตริป เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดความหนาของวัสดุฐานรองซึ่งจะสามารถแสดงให้เห็นได้โดยพิจารณาจากกรณี 2 กรณีดังต่อไปนี้

กรณีแรก คือ กรณีที่ $w/h \gg 1$ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 (ก) ในกรณีนี้เนื่องจากเส้นแรงไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอยู่ในบริเวณที่มีแถบสตริป หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านในบริเวณดังกล่าวเกือบทั้งหมด สภาพดังกล่าวจะส่งผลให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลมีค่าเข้าใกล้ค่า ϵ_r ของวัสดุฐานรอง หรือ $\epsilon_{eff} \rightarrow \epsilon_r$

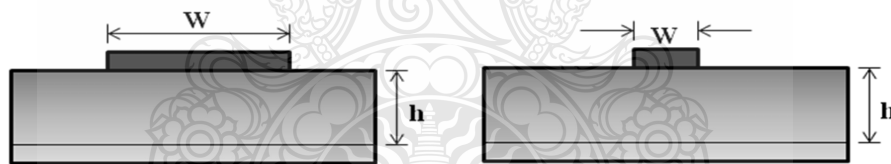
กรณีที่สองคือ $w/h \ll 1$ แสดงได้ดังรูปที่ 2.11 (ข) กรณีนี้เส้นแรงไฟฟ้าจะผ่านวัสดุฐานรองครึ่งหนึ่งและผ่านอากาศครึ่งหนึ่งทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลมีค่าเข้าใกล้ $(\epsilon_r + 1) / 2$ จากที่อธิบายมานี้จะเห็นว่าค่า ϵ_{eff} จะเปลี่ยนแปลงตามค่า w/h ดังสมการที่ (2.14)

$$\frac{1}{2}(\epsilon_r + 1) \leq \epsilon_{eff} \leq \epsilon_r \quad (2.14)$$

เพื่อสะดวกในการคำนวณและการออกแบบ ได้มีการเขียนค่า ϵ_{eff} ในรูปสมการที่ (2.15)

$$\epsilon_{eff} = 1 + q(\epsilon_r - 1); \frac{1}{2} \leq q \leq 1 \quad (2.15)$$

โดยที่ ϵ_{eff} = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์
 ϵ_r = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก
 q = ฟิลลิงแฟกเตอร์ (Filling factor)



(ก) $w/h \gg 1$

(ข) $w/h \ll 1$

รูปที่ 2.11 ไมโครสตริปที่มี $w/h \gg 1$ และ $w/h \ll 1$ [18]

ค่า q ในสมการที่ (2.15) นี้ถูกเรียกว่า ฟิลลิงแฟกเตอร์ (Filling factor) ซึ่งหมายถึงตัวประกอบที่แสดงให้เห็นว่าวัสดุฐานรองที่เป็นสารไดอิเล็กตริกจะมีผลต่อโครงสร้างไมโครสตริปนั้นมากน้อยแค่ไหน เมื่อเขียนค่า ϵ_{eff} ตามสมการที่ (2.15) ค่า q ก็จะเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงตามค่า w/h

ในกรณีที่ความถี่ใช้งานสูงกว่า 2 GHz นั้นดิสเพอร์ชันเชิงวัสดุของวัสดุฐานรองจะมีผลต่อการคำนึงถึงผลกระทบของดิสเพอร์ชันในส่วนนี้ จะทำได้โดยพิจารณาว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปความเร็วเฟสก็จะเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งทำให้ค่า ϵ_{eff} ตามสมการ (2.15) เขียนได้ดังสมการที่ (2.16)

$$\epsilon_{eff}(f) = \left\{ \frac{c}{v_p(f)} \right\}^2 \quad (2.16)$$

โดยที่ $\epsilon_{eff}(f)$ = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ดิสเพอร์ชันเชิง
 $v_p(f)$ = ความเร็วเฟสดิสเพอร์ชันเชิง
 c = ค่าความเร็วของคลื่นในอากาศ (3×10^8 เมตร/วินาที)

ถ้าหากความหนาของสตริบมีค่าใกล้เคียง ($t \rightarrow 0$) ดังนั้นจะได้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ที่มีความผิดพลาดน้อยกว่า 1% สำหรับอัตราส่วน $w/h \leq 1$ ดังสมการที่ (2.17) - (2.18) ตามลำดับ

$$Z_c = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left(\frac{8h}{w} + 0.25 \frac{w}{h} \right) \quad (2.17)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left\{ \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-0.5} + 0.04 \left(1 - \frac{w}{h} \right) \right\}^{-1} \quad (2.18)$$

2.3.2 ค่าความยาวคลื่นบนสตริบ

ค่าคงที่การแผ่กระจาย และค่าความเร็วเฟส เมื่อเราทราบค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์จะทำให้สามารถคำนวณหาความยาวคลื่นบนสตริบ (λ_g) และค่าคงที่การแผ่กระจาย ได้แก่ ค่าคงที่ของการแผ่ (Propagation Constant: γ) และค่าความเร็วเฟส (Phase Velocity: v_p) ดังสมการที่ (2.19)

$$\lambda_g = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.19)$$

เมื่อ λ_o เป็นค่าความยาวคลื่นในอากาศ และหากต้องการทราบค่าความยาวคลื่นบนสตริบในหน่วยมิลลิเมตร สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.20)

$$\lambda_g = \frac{300 \times 10^8}{f(\text{GHz}) \sqrt{\epsilon_{eff}}} \text{ (m)} \quad (2.20)$$

สำหรับค่าคงที่การแผ่และค่าความเร็วเฟส v_p หาได้จากสมการที่ (2.21) และ (2.22)

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} \quad (2.21)$$

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.22)$$

โดยที่ λ_g = ค่าความยาวคลื่นบนสตริป
 v_p คือ ความเร็วเฟส
 C คือ ค่าความเร็วของคลื่นในอากาศ
 β คือ ค่าคงที่เฟส
 ω คือ อัตราเร็วเชิงมุม
 ϵ_{eff} คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล

2.3.3 การสังเคราะห์หาความกว้างต่อความหนา w/h

ในการคำนวณหาความกว้างต่อความหนา w/h ของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป เมื่อทราบค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ Z_c และค่าไดอิเล็กตริกประสิทธิผล ϵ_{eff} สามารถแสดงได้ดังนี้สำหรับที่ $w/h \leq 2$ พิจารณาได้ตั้งสมการที่ (2.23)

$$\frac{w}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \quad (2.23)$$

และสำหรับที่ $w/h \geq 2$ พิจารณาได้ตั้งสมการที่ (2.24)

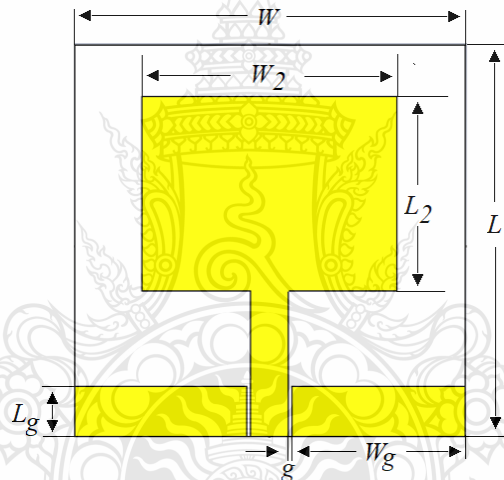
$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ (B-1) - \ln(2B-1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left(\ln(B-1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right) \right\} \quad (2.24)$$

$$\text{เมื่อ } A = \frac{Z_c}{60} \left\{ \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right\}^{0.5} = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left\{ 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right\} \quad (2.25)$$

$$\text{และ } B = \frac{60\pi^2}{Z_c \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.26)$$

2.4 สายอากาศแบบโมนิโพลระนาบร่วม [18]

สายอากาศแบบโมนิโพลระนาบร่วม ได้มีการประยุกต์ใช้งานสำหรับย่านความถี่แถบกว้างยิ่งยวด โดยทำการพัฒนาต่อยอดจากโครงสร้างของสายอากาศแบบโมนิโพลด้วยเทคนิคการปรับจูนและการเซาะร่องเพื่อขยายแบนด์วิดท์สำหรับการสื่อสารย่านความถี่แถบกว้างยิ่งยวดต้นแบบ นำมาปรับจูนโครงสร้างสายอากาศรูปแบบใหม่เพื่อลดขนาดจากเดิม ด้วยการเพิ่มการปรับจูนและการเซาะร่องในรูปแบบต่างๆ เพื่อขยายอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ให้กว้างมากยิ่งขึ้น อีกทั้งเป็นการปรับลดขนาดของสายอากาศให้มีขนาดที่เล็กลง โดยลักษณะโครงสร้างของสายอากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างสายอากาศแบบโมนิโพลระนาบร่วม

คำนวณค่าความกว้างของตัวสายอากาศได้ดังสมการที่ (2.27)

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.27)$$

คำนวณค่าความยาวของตัวสายอากาศได้ดังสมการที่ (2.28)

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (2.28)$$

โดยที่ c = ค่าความเร็วของคลื่นในอากาศ (3×10^8 เมตร/วินาที)

f_r = ความถี่ที่ต้องการออกแบบมีค่าเท่ากับ 2.1 GHz

ϵ_r = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก

ϵ_{eff} = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผล

ΔL = ค่าความยาวการกระจายคลื่นในแนวเส้นสนามไฟฟ้า (m)

คำนวณค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมประสิทธิผล ϵ_{eff} ได้ดังสมการที่ (2.29)

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-1/2} ; \frac{W}{h} > 1 \quad (2.29)$$

คำนวณค่าความยาวการกระจายคลื่นแนวเส้นสนามไฟฟ้า ΔL ได้ดังสมการที่ (2.30)

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.30)$$

คำนวณหาค่าความยาวคลื่นความถี่ 2.45 GHz ได้ดังสมการที่ (2.31)

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.31)$$

คำนวณหาค่าความยาว L_2 ได้ดังสมการที่ (2.32)

$$L_2 = 0.098\lambda \quad (2.32)$$

คำนวณหาค่าความยาว W_2 ได้ดังสมการที่ (2.33)

$$W_2 = 0.028\lambda_g \quad (2.33)$$

ขนาดแผ่นสายอากาศสี่เหลี่ยมผืนผ้า คำนวณหาขนาดด้าน a ได้ดังสมการที่ (2.34)

$$a = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-1/2} \quad (2.34)$$

และสามารถคำนวณหาขนาดด้าน b ได้ดังสมการที่ (2.35)

$$b = 2 \left(\frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) \quad (2.35)$$

ในการออกแบบขนาดทางกายภาพต่างๆ ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมสำหรับการประยุกต์ใช้งานความถี่แถบกว้างยิ่งยวดนั้น ขนาดในส่วนต่างๆ ของสายอากาศที่ใช้เป็นตัวกำหนดให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์มีหลายส่วนและทุกตัวจะนำไปเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นสัมพันธ์ λ_g เพื่อที่จะหาความยาวที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบสายอากาศ ดังนั้นสมการพื้นฐานในการหา λ_g เมื่อทำการออกแบบให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการและใช้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่กำหนดไว้จะได้ความยาวคลื่นสัมพันธ์ λ_g ที่ความถี่ 2.45 GHz ได้สมการที่ (2.36)

$$\lambda_g = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.36)$$

สามารถคำนวณหาความกว้างของ g ได้ดังสมการที่ (2.37)

$$g = 0.0042 \lambda_g \quad (2.37)$$

2.5 มาตรฐาน IEEE [10]

ความถี่ที่ใช้ในการอ้างอิงในงานวิจัยนี้ จะอ้างอิงการใช้งานตามมาตรฐาน IEEE เป็นหลักซึ่งสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์นานาชาติ ชื่อเต็มคือ Institute of Electrical and Electronic Engineers นั้นก่อตั้งขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1963 ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยการรวมตัวของวิศวกรไฟฟ้าและวิศวกรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งได้ดำเนินกิจกรรมการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีด้านโทรคมนาคม ระบบไฟฟ้ากำลัง และระบบแสงร่วมกัน

สถาบัน IEEE เป็นสถาบันที่กำกับ ดูแลมาตรฐานวิจัยและพัฒนาความรู้และงานวิจัยใหม่ๆ ตลอดจนเผยแพร่ความรู้ โดยเน้นด้านไฟฟ้ากำลัง คอมพิวเตอร์ โทรคมนาคม ระบบอิเล็กทรอนิกส์และ

ระบบวัดคุม โดยนักวิจัยเหล่านี้มีอยู่ทั่วโลก และจะแบ่งกลุ่มศึกษาตามความเชี่ยวชาญของแต่ละบุคคล กลุ่มหมายเลข IEEE ที่ได้รับการยอมรับจากองค์กรควบคุมมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับโครงการนี้สามารถแบ่งออกได้ ดังต่อไปนี้

2.5.1 มาตรฐาน IEEE 802.11

มาตรฐาน IEEE จะใช้การกำหนดตัวเลข 802.11 แล้วตามด้วยตัวอักษร เช่น 802.11a, 802.11b, 802.11g และ 802.11n โดย IEEE 802.11 คือมาตรฐานการทำงานของระบบเครือข่ายไร้สายกำหนดขึ้น เป็นมาตรฐานกลาง ที่ได้นำมาปฏิบัติใช้ในมาตรฐานของการรับ-ส่งข้อมูล โดยอาศัยคลื่นความถี่ ตัวอย่างของการใช้งานเช่น Wireless Fidelity (Wi-Fi) เพื่อที่จะทำการเชื่อมโยงอุปกรณ์เครือข่ายไร้สายเข้าด้วยกันบนระบบ

ในทางปกติแล้ว การเชื่อมต่อระบบเครือข่ายไร้สาย จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่รับส่งข้อมูลโดยการอาศัย แอสเซสพอยต์ทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างระบบเครือข่ายแบบใช้สายกับเครื่องคอมพิวเตอร์ลูกข่าย (Client) โดยจะกระจายสัญญาณคลื่นวิทยุเพื่อรับ-ส่งข้อมูลเป็นรัศมีโดยรอบเครื่องคอมพิวเตอร์ที่อยู่ในรัศมีของแอสเซสพอยต์จะกลายเป็นเครือข่ายกลุ่มเดียวกันทันที โดยเครื่องคอมพิวเตอร์จะสามารถติดต่อกันหรือติดต่อกับเซิร์ฟเวอร์ เพื่อแลกเปลี่ยน และค้นหาข้อมูลได้ โดยต้องติดต่อผ่านแอสเซสพอยต์เท่านั้น ซึ่งแอสเซสพอยต์ 1 จุด สามารถให้บริการเครื่องลูกข่ายได้ถึง 15-50 อุปกรณ์ ของเครื่องลูกข่าย

2.5.2 มาตรฐาน IEEE 802.11a

เป็นมาตรฐานที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่เมื่อปี พ.ศ. 2542 โดยใช้เทคโนโลยี OFDM เพื่อพัฒนาให้ผลิตภัณฑ์ไร้สายมีความสามารถในการรับ-ส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็วสูงสุด 54 Mbps โดยใช้คลื่นวิทยุย่านความถี่ 5 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาตให้ใช้งานโดยทั่วไปในประเทศไทย เนื่องจากสงวนไว้สำหรับกิจการทางด้านดาวเทียม

2.5.3 มาตรฐาน IEEE 802.11b

เป็นมาตรฐานที่ถูกตีพิมพ์และเผยแพร่ออกมาพร้อมกับมาตรฐาน IEEE 802.11a เมื่อปี พ.ศ. 2542 มาตรฐาน IEEE 802.11b ได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลายมากใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า CCK (Complimentary Code Keying) ร่วมกับเทคโนโลยี DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) เพื่อให้สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ด้วยอัตราความเร็วสูงสุดที่ 11 Mbps โดยใช้คลื่นสัญญาณวิทยุย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่อนุญาตให้ใช้งานในแบบสาธารณะ ทางด้านวิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรม และการแพทย์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ใช้ความถี่ย่านนี้มีหลายชนิด

2.5.4 มาตรฐาน มาตรฐาน IEEE 802.11g

มาตรฐาน IEEE 802.11g เป็นมาตรฐานที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาทดแทนผลิตภัณฑ์ที่รองรับมาตรฐาน IEEE 802.11b โดยยังคงใช้คลื่นความถี่ 2.4 GHz แต่มีความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นอยู่ที่ระดับ 54 Mbps หรือเท่ากับมาตรฐาน 802.11a โดยใช้เทคโนโลยี OFDM บนคลื่นวิทยุและมีรัศมีการทำงานที่มากกว่า IEEE 802.11a พร้อมความสามารถในการใช้งานร่วมกับมาตรฐาน IEEE 802.11b ได้ (Backward-compatible) เพียงแต่ความถี่ 2.4 GHz ยังคงเป็นคลื่นความถี่สาธารณะอยู่เหมือนเดิม ดังนั้นจึงยังมีปัญหาเรื่องของสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ที่ใช้คลื่นความถี่เดียวกัน

2.5.5 มาตรฐาน IEEE 802.11n

มาตรฐาน IEEE 802.11n เป็นมาตรฐานของผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สายที่คาดหวังกันว่าจะเข้ามาแทนที่มาตรฐาน IEEE 802.11a, IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g ซึ่งมาตรฐาน 802.11n จะมีความเร็วอยู่ที่ 300 Mbps หรือเร็วกว่าแลนแบบมีสายที่มาตรฐาน 100 BASE-TX นอกจากนี้ยังมีระยะพื้นที่ให้บริการกว้างขึ้น โดยเทคโนโลยีที่ 802.11n นำมาใช้ก็คือเทคโนโลยี MIMO ซึ่งเป็นการรับส่งข้อมูลจากเสาสัญญาณหลายๆ ต้น พร้อมๆ กัน ทำให้ได้ความเร็วสูงมากขึ้นและยังใช้คลื่นความถี่แบบ Dual Band คือ ทำงานบนย่านความถี่ทั้ง 2.4 GHz และ 5 GHz

2.5.6 มาตรฐาน IEEE 802.11ac

มาตรฐาน IEEE 802.11ac เป็นมาตรฐาน WLAN ใหม่ ที่ตั้งเป้าว่าจะมาแทน มาตรฐาน IEEE 802.11n ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน เทคโนโลยีที่ 802.11ac นั้นได้มีการปรับปรุงเรื่องของการเข้ารหัสใหม่ และมีการนำเทคโนโลยีใหม่ ๆ เข้ามาใช้ ทำให้สามารถทำความเร็วต่ำสุดต่อ 1 เสาได้ถึง 433 Mbps ซึ่งมีความเร็วใกล้เคียงกับมาตรฐาน 802.11n ที่เป็นแบบ 3 เสา

จากมาตรฐานทั้งหมดของ IEEE 802.11 ได้นำมาเปรียบเทียบอัตราความเร็วและระยะทางการส่งสัญญาณของแต่ละความถี่กับเทคโนโลยีแบบต่างๆ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบเทคโนโลยีไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 [10]

มาตรฐาน	ความถี่ (GHz)	เทคโนโลยี	แบนด์วิดท์ (MHz)	ระยะการรับ-ส่ง	
				ข้างในอาคาร (m)	ข้างนอกอาคาร (m)
802.11a	5	OFDM	5,10,20	35	120
802.11b	2.4	DSSS	22	35	140
802.11g	2.4	OFDM	5,10,20	38	140
802.11n	2.4,5	MIMO	20	70	250
802.11ac	5	MIMO	20	35	170

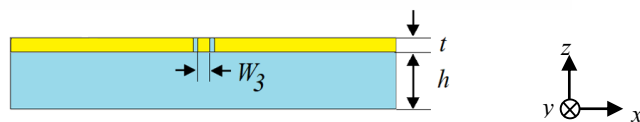
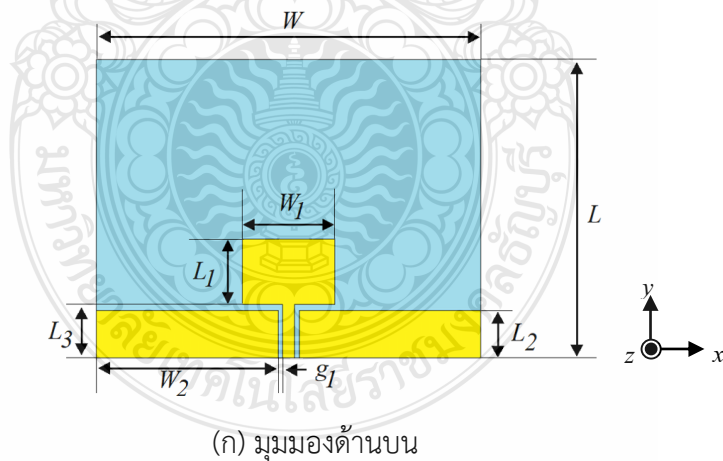
บทที่ 3

วิธีการออกแบบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการและการดำเนินงานออกแบบสายอากาศโมนโพลระนาบร่วม โดยใช้วัสดุฐานรองชนิดแผ่นฟิล์มไมลาร์โพลีเอสเตอร์ ที่มีโครงสร้างสายอากาศไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการออกแบบและสร้าง โดยออกแบบให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศนั้นใกล้เคียง 50Ω โดยการจำลองแบบโครงสร้างของสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองแบบ CST เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

3.1 การออกแบบสายอากาศโมนโพลระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ความถี่ 2.45 GHz

โครงสร้างสายอากาศโมนโพลระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 เลือกใช้โลหะทองแดงที่มีค่าความนำของวัสดุตัวนำทองแดง และค่าความหนาของแผ่นทองแดง $t = 0.05$ มม. ในส่วนของวัสดุฐานรองเลือกใช้วัสดุแผ่นฟิล์มไมลาร์โพลีเอสเตอร์ ที่มีคุณสมบัติของค่าไดอิเล็กตริก $\epsilon_r = 3.2$ ความหนาของวัสดุฐานรอง $h = 0.3$ มม. และออกแบบสายอากาศรองรับความถี่ใช้งานเริ่มต้น 2.45 GHz



รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศโมนโพลระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ความถี่ 2.45 GHz

โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้จากสมการ (3.1) – (3.10)

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.1)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2}(1 + 0.3h) \quad (3.2)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.3)$$

$$L = \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (3.4)$$

$$W_1 = \lambda \left[\frac{(\epsilon_r + 1)}{2} \right]^{-1/2} \quad (3.5)$$

$$L_1 = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} - 2\Delta L \quad (3.6)$$

$$W_2 = \frac{0.75 \times c}{f_r \times \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.7)$$

$$L_2 = \frac{0.43 \times c}{f_r \times \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.8)$$

$$W_3 = \frac{0.04 \times c}{f_r \times \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.9)$$

$$L_3 = \frac{0.19 \times c}{f_r \times \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.10)$$

โดยที่ c = ค่าความเร็วของแสงมีค่าเท่ากับ (3×10^8 เมตร/วินาที)

ϵ_{eff} = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผล

ϵ_r = ค่าไดอิเล็กตริกมีค่าเท่ากับ 3.2

f_r = ค่าความถี่ที่ต้องการออกแบบ

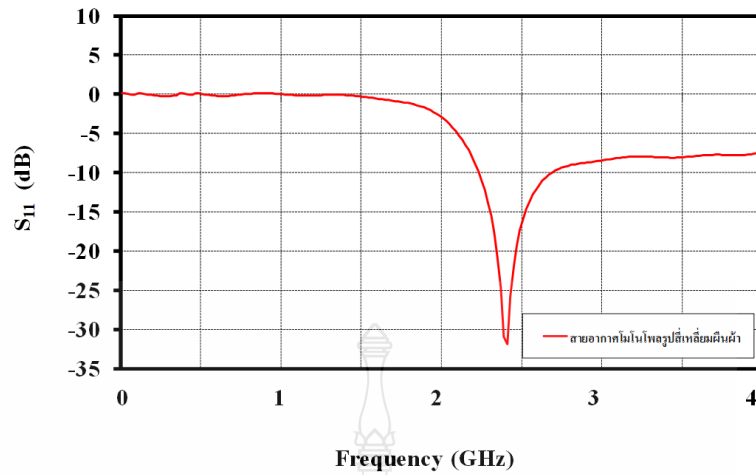
ΔL = ความยาวการกระจายคลื่นในแนวเส้นสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.23

λ = ความยาวคลื่น

ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศนั้นจะนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ มาจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST และใช้วิธีการเชิงประสภการณ์ปรับจูนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จนได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด แสดงได้ดังตารางที่ 3.1 และมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับร้อยละ 15.05 (2.38 – 2.78 GHz) แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งสายอากาศสามารถรองรับการใช้งานได้ความถี่เดียว โดยสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b/g 2.4 GHz (2.4 – 2.48 GHz)

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ความถี่ 2.45 GHz

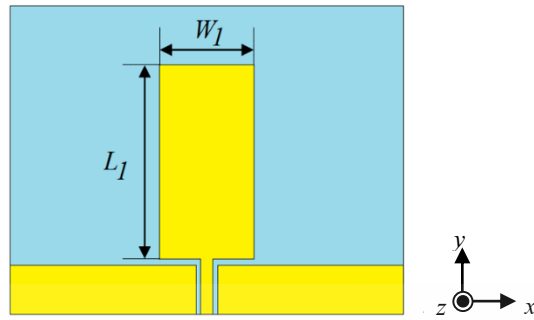
ค่าพารามิเตอร์	ความหมายของค่าพารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
W	ความกว้างของแผ่นสายอากาศ	127.42
W_1	ความกว้างของตัวแผ่พลังงาน	28.8
W_2	ความกว้างของระนาบกราวด์	61.4
W_3	ความกว้างของสายนำสัญญาณ	3.82
L	ความยาวของแผ่นสายอากาศ	100
L_1	ความยาวของตัวแผ่พลังงาน	22.7
L_2	ความยาวของระนาบกราวด์	15.63
L_3	ความยาวของสายนำสัญญาณ	16.5
h	ความหนาของวัสดุฐานรอง	0.3
t	ค่าความหนาของแผ่นทองแดง	0.05
g_1	ค่าความกว้างระหว่างสายนำสัญญาณกับระนาบกราวด์	0.4



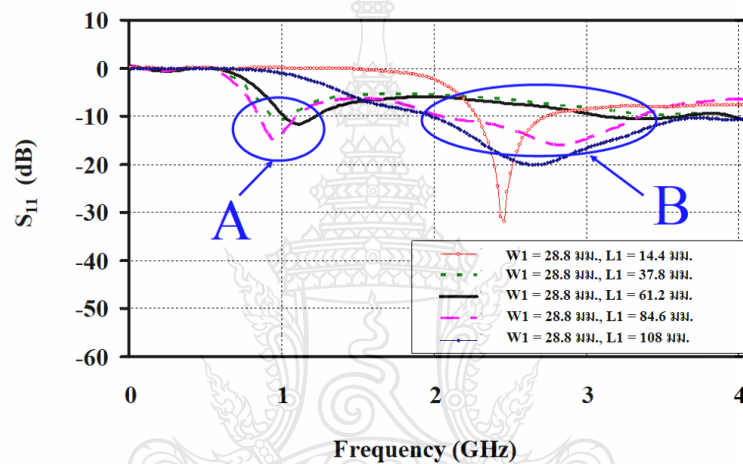
รูปที่ 3.2 ผลการจำลองค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศโมโนโพลระยะนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ความถี่ 2.45 GHz

3.2 การออกแบบสายอากาศโมโนโพลระยะนาบร่วมรูปตะขอ

จากโครงสร้างของโมโนโพลระยะนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ออกแบบด้วยความถี่ 2.45 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ทำให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับร้อยละ 15.05 (2.38 – 2.78 GHz) แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นช่วงความถี่เดียว โดยที่สามารถนำมาปรับปรุงเพิ่มสลับให้สามารถนำไปใช้งานในย่านความถี่แถบคู่ได้ โดยการเพิ่มสลับเข้าไปในตัวสายอากาศ มีขั้นตอนการปรับปรุงหลักโดยการเพิ่มสลับ 2 ส่วนคือ ที่ด้านบนสายอากาศและด้านข้างของสายอากาศ เพื่อเพิ่มช่วงความถี่ใช้งาน และเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศ [9-12] การออกแบบโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลระยะนาบร่วมรูปตะขอ เริ่มออกแบบด้วยโครงสร้างของสายอากาศพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ความถี่กลาง 2.45 GHz จากนั้นเริ่มเข้าสู่ขั้นตอนการปรับปรุงโครงสร้าง โดยในขั้นตอนแรกจะทำการปรับความยาวของสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์ที่ทำการปรับปรุงคือ L , โดยคงค่าความกว้าง W , ไว้ที่ 28.8 มม. และปรับเพิ่มค่าความยาว L , ตั้งแต่ 0.17λ ถึง 1.33λ คือ 14.4, 37.8, 61.2, 84.6 และ 108 มม. ที่ค่าความยาว L , เท่ากับ 61.2 มม. พบว่าส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า -10 dB มากขึ้น ที่ช่วงความถี่ 850 MHz และช่วงความถี่ 2.45 GHz ในจุด A และ B แสดงได้ดังรูปที่ 3.4 โดยมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่ต่ำเท่ากับร้อยละ 21.78 (0.9 – 1.12 GHz) และค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่สูงเท่ากับร้อยละ 45.18 (2.09 – 3.31 GHz) เมื่อพิจารณาภาพรวมทั้งหมด พบว่าสายอากาศที่ทำการปรับโครงสร้างในขั้นตอนแรกยังไม่ตอบสนองต่อย่านความถี่ใช้งานตามมาตรฐานตามที่ต้องการทั้งสองช่วงความถี่

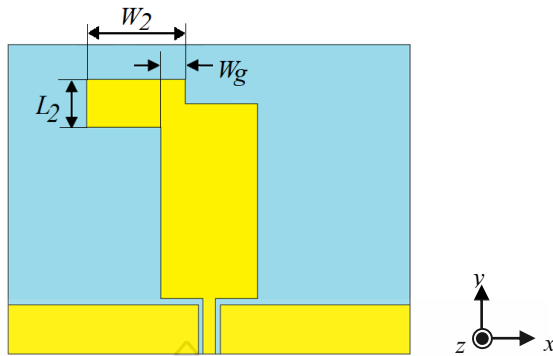


รูปที่ 3.3 การปรับจูนความยาวของตัวแผ่พลังงาน

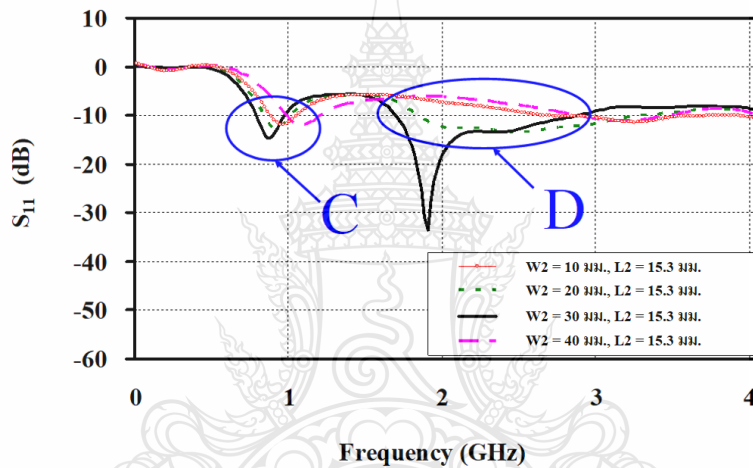


รูปที่ 3.4 ผลการจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เมื่อปรับ L , ของสายอากาศโมโนโพล ระบายร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ขั้นตอนที่สองทำการเพิ่มสัณฐานรูปตัวโอที่ตัวด้านบนตัวแผ่พลังงานเพื่อเพิ่มความยาวให้กับสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 ทำให้ตอบสนองค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่ต่ำที่ความถี่ 850 MHz ดีมากยิ่งขึ้น โดยค่าพารามิเตอร์ที่ทำการปรับจูนคือ W_2 โดยคงค่าความยาว L_2 ไว้ที่ 15.3 มม. และปรับเพิ่มค่าความกว้าง W_2 ตั้งแต่ 0.12λ ถึง 0.49λ คือ 10, 20, 30 และ 40 มม. ที่ค่าความกว้าง W_2 เท่ากับ 30 มม. พบว่าส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า -10 dB มากขึ้น ที่ช่วงความถี่ 850 MHz และช่วงความถี่ 2.45 GHz จุด C และ D แสดงได้ดังรูปที่ 3.6 โดยมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่ต่ำเท่ากับร้อยละ 25.28 (0.76 – 0.98 GHz) และค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่สูงเท่ากับ 48.98 (1.68 – 2.77 GHz) จากการปรับโครงสร้างสายอากาศขั้นตอนที่สอง พบว่ายังไม่ตอบสนองต่อย่านความถี่ใช้งานตามมาตรฐานในช่วงความถี่สูงตามที่ต้องการ

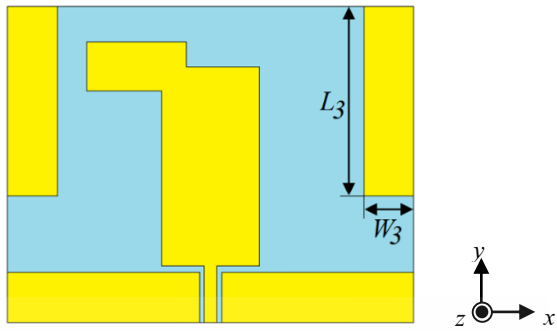


รูปที่ 3.5 การปรับเพิ่มสัดที่ด้านบนของตัวแผ่พลังงาน

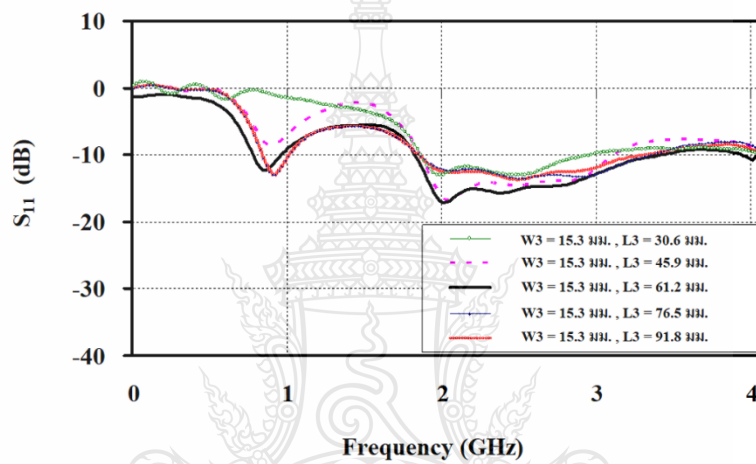


รูปที่ 3.6 ผลการจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เมื่อปรับ W_2 ของสายอากาศโมนโพล ระบายร่วมรูปตะขอ

ขั้นตอนสุดท้ายของการปรับโครงสร้างสายอากาศ คือทำการเพิ่มสัดรูปตัวไอเข้าที่ด้านข้างของตัวสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 เพื่อส่งผลต่อการเพิ่มอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่สูงและอัตราขยายให้กับช่วงความถี่ใช้งาน ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการปรับจูนคือ L_3 และคงค่าความกว้าง W_3 ไว้ที่ 15.3 มม. การปรับเพิ่มค่าความยาว L_3 ทำการปรับความยาวตั้งแต่ 0.37λ ถึง 1.13λ คือ 30.6, 45.9, 61.2, 76.5 และ 91.8 มม. ที่ค่าความยาว L_3 เท่ากับ 61.2 มม. พบว่าส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า -10 dB โดยมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่ต่ำเท่ากับร้อยละ 24.27 (0.76 – 0.97 GHz) และค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่สูงเท่ากับร้อยละ 62.4 (1.72 – 3.28 GHz) แสดงได้ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งทำให้สายอากาศที่ทำการปรับโครงสร้างในขั้นตอนสุดท้ายทำงานรองรับการใช้งานในช่วงความถี่ตามมาตรฐาน GSM 850 (880 – 960 MHz), GSM 900 (880 – 960 MHz), DCS (1.72 – 1.88 GHz) PCS (1.85 – 1.99 GHz) และ WLAN ย่านความถี่ IEEE 802.11b/g 2.4 GHz (2.4 – 2.48 GHz)

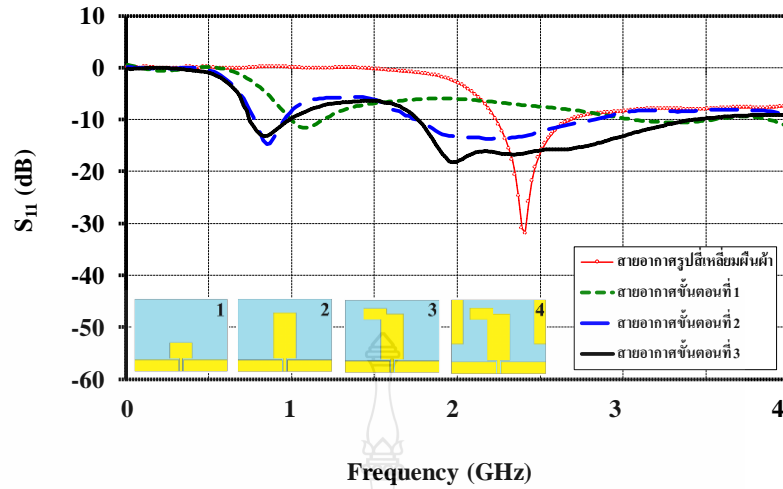


รูปที่ 3.7 การปรับเพิ่มสัดบ้เข้าที่ด้านข้างของตัวสายอากาศ



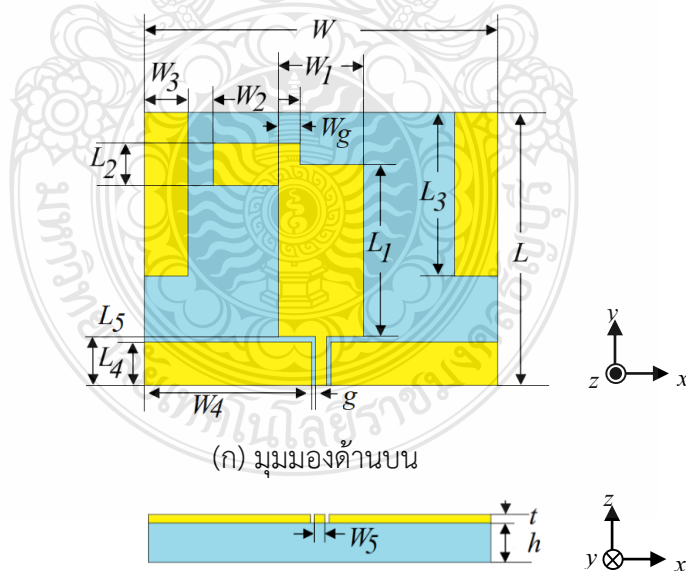
รูปที่ 3.8 ผลการจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เมื่อปรับ L_3 ของสายอากาศโมนโนโพล ระบายร่วมรูปตะขอ

จากที่ผ่านมามีได้ทำการปรับจูนโครงสร้างของสายอากาศรวมทั้งหมด 3 ขั้นตอน โดยเริ่มจากการนำโครงสร้างสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามาทำการเพิ่มสัดบ้ และปรับจูนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งจะได้นำมาเพื่อให้ทราบพัฒนาการที่ส่งผลต่อการตอบสนองความถี่ อันเนื่องจากการปรับโครงสร้างดังกล่าว จึงได้ ทำการเปรียบเทียบเพื่อแสดงให้เห็นช่วงอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่เกิดจากการปรับโครงสร้างของสายอากาศทั้ง 4 รูปแบบ

จากผลการจำลองแบบและปรับจูนโครงสร้างทั้ง 3 ชั้นตอนจนได้สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอที่มีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดโดยโครงสร้างสายอากาศดังกล่าว แสดงได้ดังรูปที่ 3.10 และแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 3.2



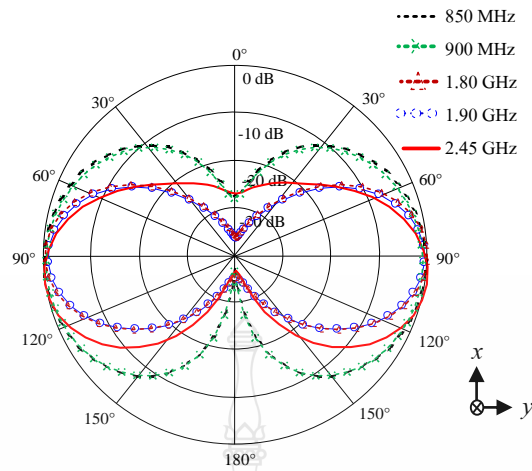
(ข) มุมมองด้านข้างบริเวณจุดป้อนสัญญาณ

รูปที่ 3.10 โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ

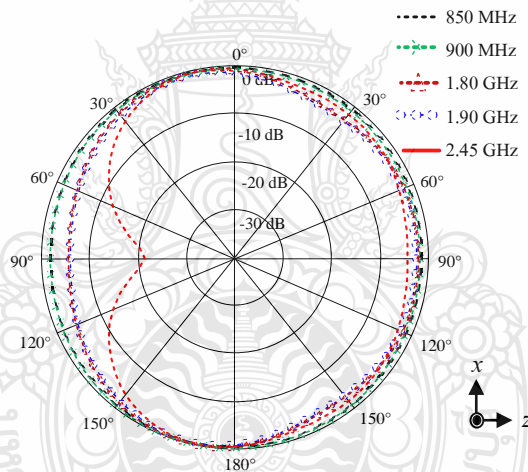
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการออกแบบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ

ค่าพารามิเตอร์	ความหมายของค่าพารามิเตอร์	ขนาดสายอากาศ (มม.)
W	ความกว้างของฐานรอง	127.42
W_1	ความกว้างของตัวแผ่นพลังงาน	28.8
W_2	ความกว้างของสตัดรูปตัวไอด้านบนตัวแผ่นพลังงาน	30
W_3	ความกว้างของสตัดรูปตัวไอด้านข้างของตัวแผ่นพลังงาน	15.3
W_4	ความกว้างของระนาบกราวด์	61.4
W_5	ความกว้างของสายนำสัญญาณ	3.82
W_g	ความกว้างของจุดวางสตัดที่ด้านบนของตัวแผ่นพลังงาน	7.8
L	ความยาวของฐานรอง	100
L_1	ความยาวของตัวแผ่นพลังงาน	61.2
L_2	ความยาวของสตัดรูปตัวไอด้านบนตัวแผ่นพลังงาน	15.3
L_3	ความยาวของสตัดรูปตัวไอด้านข้างของตัวแผ่นพลังงาน	61.2
L_4	ความยาวของระนาบกราวด์	15.63
L_5	ความยาวของสายนำสัญญาณ	16.5
g	ความกว้างของร่องสายนำสัญญาณ	0.4
t	ค่าความหนาของแผ่นทองแดง	0.05
h	ความหนาของวัสดุฐานรอง	0.3

จากนั้นเมื่อทำการพิจารณาผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) ของสายอากาศที่จะทำการจำลองแบบ ณ ความถี่ 850 MHz, 900 MHz, 1.8 GHz, 1.9 GHz และ 2.45 GHz พบว่าสายอากาศต้นแบบ มีแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าในลักษณะสองทิศทางแสดงได้ดังรูปที่ 3.11 และมีแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแบบรอบทิศทางแสดงได้ดังรูปที่ 3.12



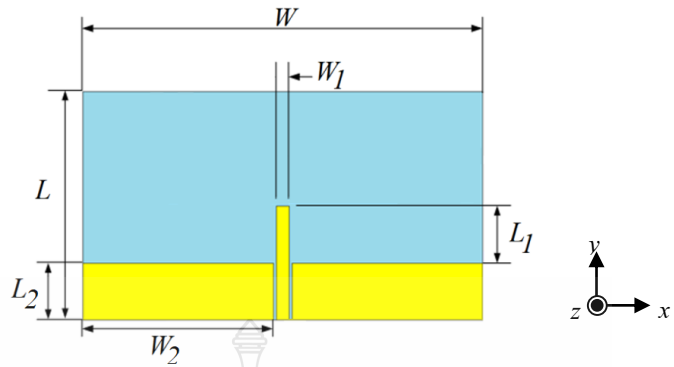
รูปที่ 3.11 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 850 MHz, 900 MHz 1.8 GHz, 1.9 GHz และ 2.45 GHz



รูปที่ 3.12 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 850 MHz, 900 MHz 1.8 GHz, 1.9 GHz และ 2.45 GHz

3.3 การออกแบบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวไอที่ความถี่ 2.45 GHz

โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวไอแสดงได้ดังรูปที่ 3.13 เลือกใช้ โลหะทองแดงที่มีค่าความนำของวัสดุตัวนำทองแดง และค่าความหนาของแผ่นทองแดง $t = 0.05$ มม. ในส่วนของวัสดุฐานรองเลือกใช้วัสดุแผ่นฟิล์มไมลาร์โพลีเอสเตอร์ ที่มีคุณสมบัติของค่าไดอิเล็กตริก $\epsilon_r = 3.2$ ความหนาของวัสดุฐานรอง $h = 0.3$ มม. และออกแบบสายอากาศรองรับความถี่ใช้งานเริ่มต้น 2.45 GHz



(ก) มุมมองด้านบน



(ข) มุมมองด้านข้างบริเวณจุดป้อนสัญญาณ

รูปที่ 3.13 สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวไอที่ความถี่ 2.45 GHz

โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวไอแสดงได้ดังรูปที่ 3.13 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้จากสมการ (3.11) – (3.18)

$$W = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.11)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} (1 + 0.3h) \quad (3.12)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.13)$$

$$L = \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (3.14)$$

$$W_1 = \frac{0.039 \times c}{f_r \times \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.15)$$

$$L_1 = \frac{0.36 \times c}{f_r \times \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.16)$$

$$W_2 = \frac{0.61 \times c}{f_r \times \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.17)$$

$$L_2 = \frac{0.18 \times c}{f_r \times \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.18)$$

โดยที่ c = ค่าความเร็วของแสงมีค่าเท่ากับ $(3 \times 10^8$ เมตร/วินาที)

ϵ_{eff} = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผล

ϵ_r = ค่าไดอิเล็กตริกมีค่าเท่ากับ 3.2

f_r = ค่าความถี่ที่ต้องการออกแบบ

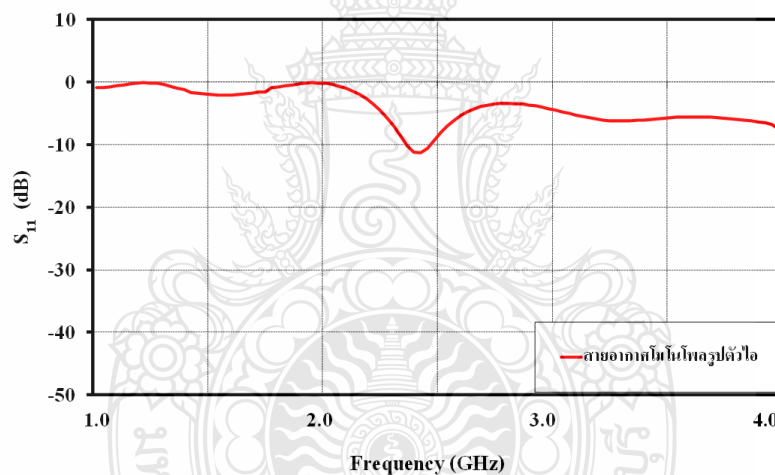
ΔL = ความยาวการกระจายคลื่นในแนวเส้นสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.15

λ = ความยาวคลื่น

ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศนั้นจะนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ มาจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST และใช้วิธีการเชิงประจักษ์ปรับจูนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จนได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด แสดงได้ดังตารางที่ 3.3 และมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับร้อยละ 4.51 (2.38 – 2.49 GHz) แสดงได้ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งสายอากาศสามารถรองรับการใช้งานได้ความถี่เดียว โดยสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b/g 2.4 GHz (2.4 – 2.48 GHz)

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวไอที่ความถี่ 2.45 GHz

ค่าพารามิเตอร์	ความหมายของค่าพารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
W	ความกว้างของแผ่นสายอากาศ	105
W_1	ความกว้างของตัวแผ่นพลังงาน	3.2
W_2	ความกว้างของระนาบกราวด์	50.5
L	ความยาวของแผ่นสายอากาศ	60
L_1	ความยาวของตัวแผ่นพลังงาน	30
L_2	ความยาวของระนาบกราวด์	15
h	ความหนาของวัสดุฐานรอง	0.3
t	ค่าความหนาของแผ่นทองแดง	0.05

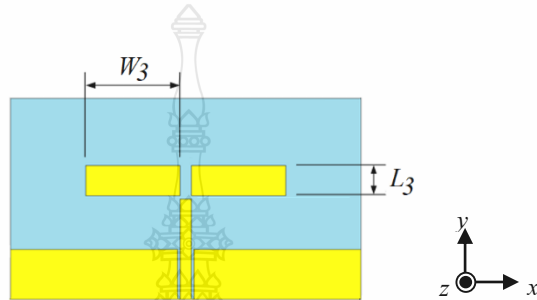


รูปที่ 3.14 ผลการจำลองค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวไอที่ความถี่ 2.45 GHz

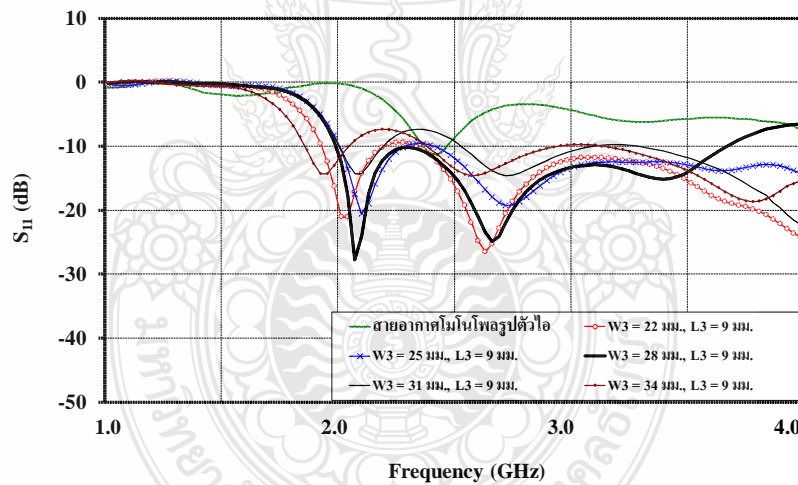
3.4 การออกแบบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวไอ

จากโครงสร้างของโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวไอที่ออกแบบด้วยความถี่ 2.45 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 3.13 ทำให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับร้อยละ 4.51 (2.38 – 2.49 GHz) แสดงได้ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งเป็นช่วงความถี่เดียว โดยที่สามารถนำมาปรับปรุงเพิ่มสลับให้สามารถนำไปใช้งานในย่านความถี่ที่กว้างขึ้นได้ โดยการเพิ่มสลับเข้าไปในตัวสายอากาศ ซึ่งจะมีขั้นตอนการปรับปรุงหลักโดยการเพิ่มสลับที่ด้านบนสายอากาศ เพื่อเพิ่มช่วงความถี่ใช้งานให้กว้างมากขึ้นและเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศ [9-12] โดยจะมีขั้นตอนการปรับปรุงเพิ่มสลับที่ด้านบนตัวแผ่นพลังงานทั้งสองด้านแสดงได้ดังรูปที่ 3.15

ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการปรับจูนคือ W_3 และคงค่าความยาว L_3 ไว้ที่ 9 มม. การปรับเพิ่มค่าความกว้าง W_3 ทำการปรับความกว้างตั้งแต่ $.027\lambda$ ถึง 0.41λ คือ 22, 25, 28, 31 และ 34 มม. ที่ค่าความกว้าง W_3 เท่ากับ 28 มม. พบว่าส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า -10 dB โดยมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับร้อยละ 60.59 (1.99 – 3.72 GHz) แสดงได้ดังรูปที่ 3.16 ซึ่งทำให้สายอากาศทำงานรองรับการใช้งานในช่วงความถี่ตามมาตรฐาน WLAN ย่านความถี่ IEEE 802.11b/g 2.4 GHz (2.4 – 2.48 GHz) และ 5G ย่านความถี่ LTE band 41 (2.496 – 2.690 GHz)

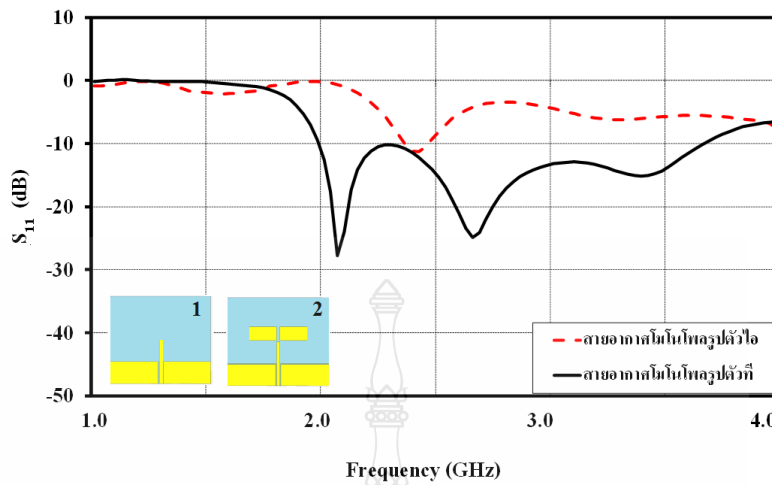


รูปที่ 3.15 การปรับเพิ่มสัดที่ด้านบนตัวแผ่พลังงานของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวที



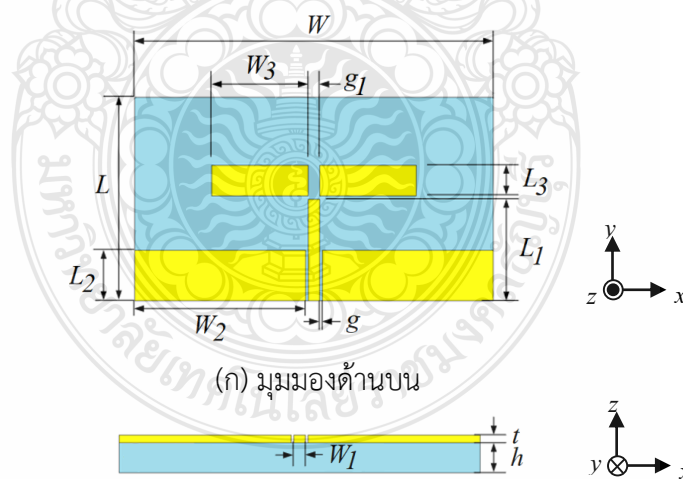
รูปที่ 3.16 ผลการจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ เมื่อปรับ W_3 ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวที

จากการปรับจูนโครงสร้างของสายอากาศ โดยเริ่มจากการนำโครงสร้างสายอากาศรูปตัวโอมาทำการเพิ่มสัด และปรับจูนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งจะได้นำมาเพื่อให้ทราบพัฒนาการที่ส่งผลต่อการตอบสนองความถี่ อันเนื่องจากการปรับโครงสร้างดังกล่าวจึงได้ ทำการเปรียบเทียบเพื่อแสดงให้เห็นช่วงอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์จากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างสายอากาศรูปตัวที

จากผลการจำลองแบบและปรับจูนโครงสร้างจนได้สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวทีที่มีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดโดยโครงสร้างสายอากาศดังกล่าว แสดงได้ดังรูปที่ 3.18 และแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 3.4



(ก) มุมมองด้านบน
(ข) มุมมองด้านข้างบริเวณจุดป้อนสัญญาณ
รูปที่ 3.18 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวที

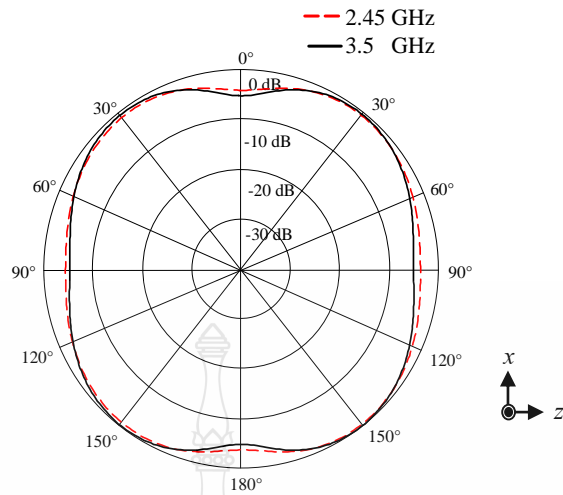
ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการออกแบบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวที

ค่าพารามิเตอร์	ความหมายของค่าพารามิเตอร์	ขนาดสายอากาศ (มม.)
W	ความกว้างของฐานรอง	105
W_1	ความกว้างของตัวแผ่นพลังงาน	3.2
W_2	ความกว้างของระนาบกราวด์	50.5
W_3	ความกว้างของสตัดรูปตัวไอ	28
L	ความยาวของฐานรอง	60
L_1	ความยาวของตัวแผ่นพลังงาน	30
L_2	ความยาวของระนาบกราวด์	15
L_3	ความยาวของสตัดรูปตัวไอ	9
g	ความกว้างของร่องสายนำสัญญาณ	0.3
g_1	ความกว้างระหว่างสตัดรูปตัวไอ	3.2
t	ค่าความหนาของแผ่นทองแดง	0.05
h	ความหนาของวัสดุฐานรอง	0.3

จากนั้นเมื่อทำการพิจารณาผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) ของสายอากาศที่จะทำการจำลองแบบ ณ ความถี่ 2.45 GHz และ 3.5 GHz พบว่าสายอากาศต้นแบบ มีแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าในลักษณะสองทิศทางแสดงได้ดังรูปที่ 3.19 และมีแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแบบรอบทิศทางแสดงได้ดังรูปที่ 3.20



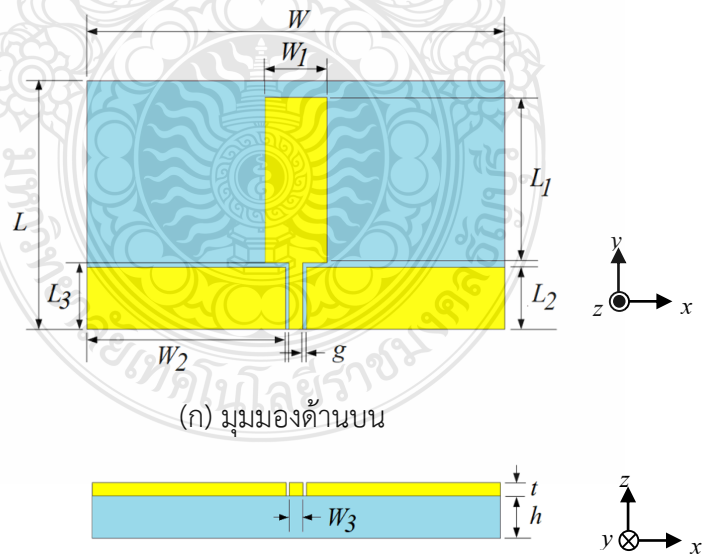
รูปที่ 3.19 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz และ 3.5 GHz



รูปที่ 3.20 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 2.45 GHz และ 3.5 GHz

3.5 การออกแบบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ความถี่ 2.6 GHz

โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวไอแสดงได้ดังรูปที่ 3.21 เลือกใช้โลหะทองแดงที่มีค่าความนำของวัสดุตัวนำทองแดง และค่าความหนาของแผ่นทองแดง $t = 0.05$ มม. ในส่วนของวัสดุฐานรองเลือกใช้วัสดุแผ่นฟิล์มไมลาร์โพลีเอสเตอร์ ที่มีคุณสมบัติของค่าไดอิเล็กตริก $\epsilon_r = 3.2$ ความหนาของวัสดุฐานรอง $h = 0.3$ มม. และออกแบบสายอากาศรองรับความถี่ใช้งานเริ่มต้น 2.6 GHz



(ก) มุมมองด้านบน

(ข) มุมมองด้านข้างบริเวณจุดป้อนสัญญาณ

รูปที่ 3.21 สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ความถี่ 2.6 GHz

โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแสดงได้ดังรูปที่ 3.21 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้จากสมการ (3.19) – (3.28)

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.19)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2}(1 + 0.3h) \quad (3.20)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.21)$$

$$L = \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (3.22)$$

$$W_1 = \lambda \left[\frac{(\epsilon_r + 1)}{2} \right]^{-1/2} \quad (3.23)$$

$$L_1 = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} - 2\Delta L \quad (3.24)$$

$$W_2 = \frac{0.65 \times c}{f_r \times \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.25)$$

$$L_2 = \frac{0.19 \times c}{f_r \times \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.26)$$

$$W_3 = \frac{0.04 \times c}{f_r \times \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.27)$$

$$L_3 = \frac{0.2 \times c}{f_r \times \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.28)$$

โดยที่ c = ค่าความเร็วของแสงมีค่าเท่ากับ (3×10^8 เมตร/วินาที)

ϵ_{eff} = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผล

ϵ_r = ค่าไดอิเล็กตริกมีค่าเท่ากับ 3.2

f_r = ค่าความถี่ที่ต้องการออกแบบ

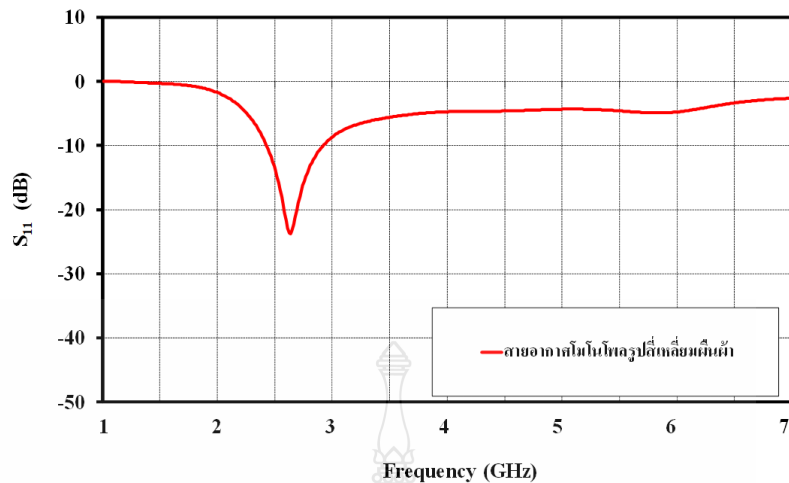
ΔL = ความยาวการกระจายคลื่นในแนวเส้นสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.23

λ = ความยาวคลื่น

ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศนั้นจะนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ มาจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST และใช้วิธีการเชิงประสภการณ์ปรับจูนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จนได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด แสดงได้ดังตารางที่ 3.5 และมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับร้อยละ 16.66 (2.42 – 2.86 GHz) แสดงได้ดังรูปที่ 3.22 ซึ่งสายอากาศสามารถรองรับการใช้งานได้ความถี่เดียว โดยสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ตามมาตรฐาน 5G ย่านความถี่ LTE band 41 (2.496 – 2.690 GHz)

ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ความถี่ 2.6 GHz

ค่าพารามิเตอร์	ความหมายของค่าพารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
W	ความกว้างของแผ่นสายอากาศ	105
W_1	ความกว้างของตัวแผ่นพลังงาน	15
W_2	ความกว้างของระนาบกราวด์	50
W_3	ความกว้างของสายนำสัญญาณ	3.8
L	ความยาวของแผ่นสายอากาศ	60
L_1	ความยาวของตัวแผ่นพลังงาน	40
L_2	ความยาวของระนาบกราวด์	15
L_3	ความยาวของสายนำสัญญาณ	16
h	ความหนาของวัสดุฐานรอง	0.3
t	ค่าความหนาของแผ่นทองแดง	0.05
g	ค่าความกว้างระหว่างสายนำสัญญาณถึงระนาบกราวด์	0.6

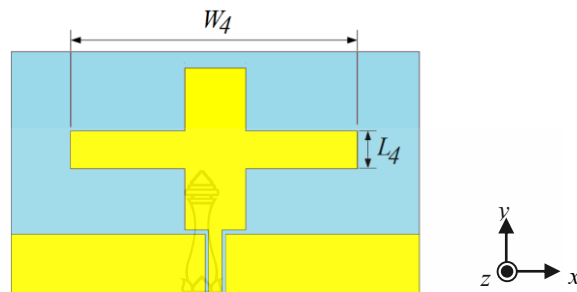


รูปที่ 3.22 ผลการจำลองค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ความถี่ 2.6 GHz

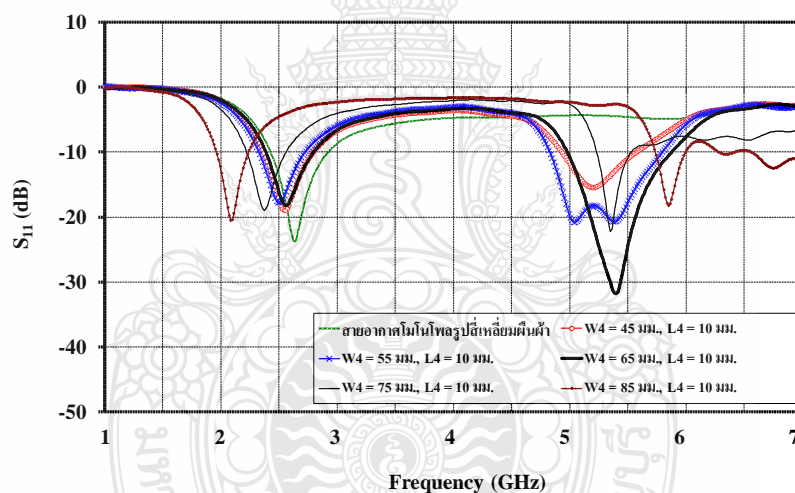
3.6 การออกแบบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวก

จากโครงสร้างของโมโนโพลระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ออกแบบด้วยความถี่ 2.6 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 3.21 ทำให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับร้อยละ 16.66 (2.42 – 2.86 GHz) แสดงได้ดังรูปที่ 3.22 ซึ่งเป็นช่วงความถี่เดียว จากการออกแบบสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.6 GHz เมื่อทำการเพิ่มโหลดแบบแผ่นสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้านข้างทั้งสองของตัวแผ่พลังงานสายอากาศ เปรียบเสมือนเป็นการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำ ความจุ หรืออิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ อาจส่งผลให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่เป็นความถี่ฮาร์โมนิกที่สองเกิดขึ้น ที่ความถี่ประมาณ 5.2 GHz การเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ ความจุ หรืออิมพีแดนซ์ สืบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแส ณ จุดต่างๆ บนตัวแผ่พลังงานในย่านความถี่ที่จำลองแบบ และเมื่อมีการปรับเพิ่มโหลดด้วยแผ่นสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ณ บริเวณที่มีความหนาแน่นสูง จะส่งผลทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงการตอบสนองความถี่ของสายอากาศ ณ ความถี่เรโซแนนซ์ดังกล่าวมากที่สุด โดยจะมีขั้นตอนการปรับจูนเพิ่มโหลดแผ่นสตริปที่บริเวณตรงกลางของตัวแผ่พลังงานแสดงได้ดังรูปที่ 3.23 ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการปรับจูนคือ W_4 และคงค่าความยาว L_4 ไว้ที่ 10 มม. การปรับเพิ่มค่าความกว้าง W_4 ทำการปรับความกว้างตั้งแต่ 0.58λ ถึง 1.11λ คือ 45, 55, 65, 75 และ 85 มม. ที่ค่าความกว้าง W_4 เท่ากับ 65 มม. พบว่าส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า -10 dB โดยมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่ต่ำเท่ากับร้อยละ 14 (2.39 – 2.75 GHz) และค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่สูงเท่ากับร้อยละ 16.23 (4.98 – 5.86 GHz) แสดงได้ดังรูปที่ 3.24 ซึ่งทำให้สายอากาศทำงานรองรับการใช้งานในช่วงความถี่ตามมาตรฐาน WLAN ย่านความถี่ IEEE 802.11b/g/n (2.40 –

2.48 GHz), IEEE 802.11a (5.15 – 5.35 GHz), IEEE 802.11ac (5.725 – 5.825 GHz) และ 5G ตามมาตรฐาน LTE band 41 (2.496 – 2.690 GHz)

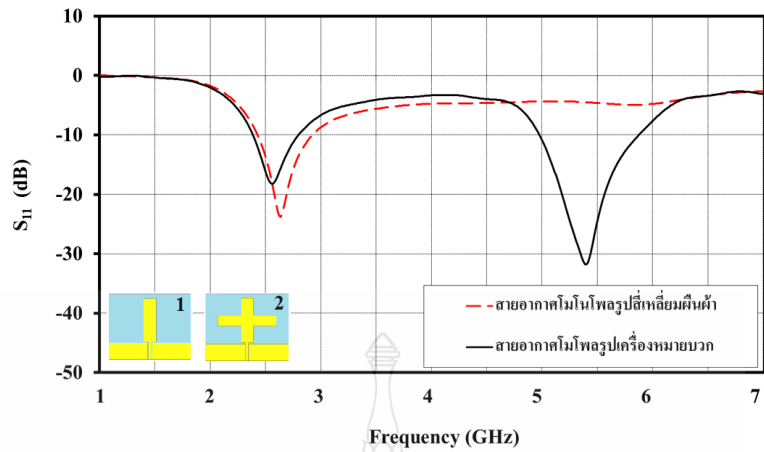


รูปที่ 3.23 การปรับเพิ่มโหนดแผ่นสตริปที่บริเวณตรงกลางตัวแผ่พลังงานของสายอากาศโมโนโพล ระบายร่วมรูปเครื่องหมายบวก



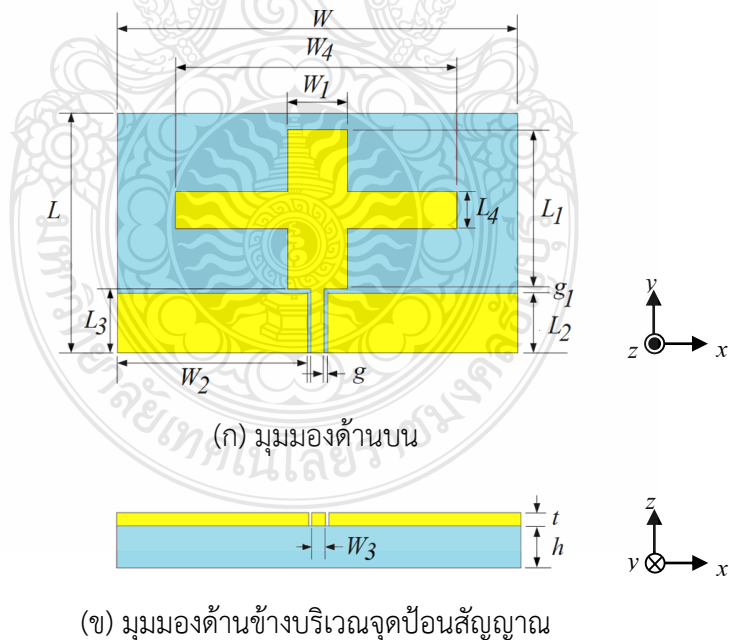
รูปที่ 3.24 ผลการจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ เมื่อปรับ W_4 ของสายอากาศโมโนโพล ระบายร่วมรูปเครื่องหมายบวก

จากการปรับจูนโครงสร้างของสายอากาศ โดยเริ่มจากการนำโครงสร้างสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามาทำการเพิ่มสตัป และปรับจูนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งจะได้นำมาเพื่อให้ทราบพัฒนาการที่ส่งผลต่อการตอบสนองความถี่ อันเนื่องจากการปรับโครงสร้างดังกล่าวจึงได้ ทำการเปรียบเทียบเพื่อแสดงให้เห็นช่วงอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์จากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวก

เมื่อทำการจำลองแบบและปรับจูนโครงสร้างจนได้สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวกจนที่มีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดโดยโครงสร้างสายอากาศดังกล่าว แสดงได้ดังรูปที่ 3.26 และแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 3.6

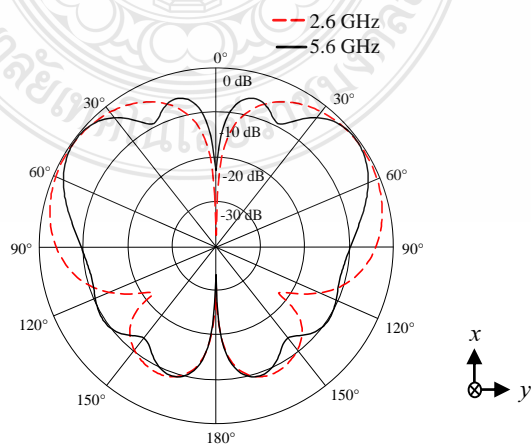


รูปที่ 3.26 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวก

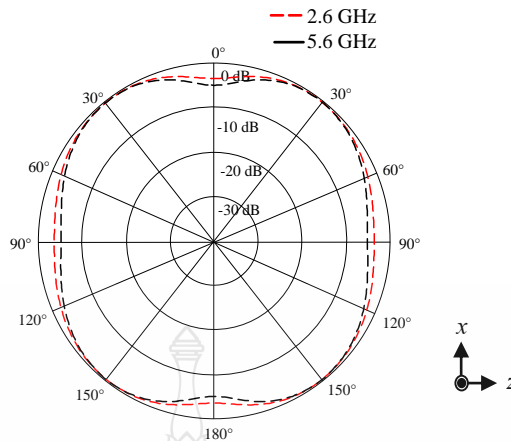
ตารางที่ 3.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการออกแบบอากาศมิโนโพลีระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวก

ค่าพารามิเตอร์	ความหมายของค่าพารามิเตอร์	ขนาดสายอากาศ (มม.)
W	ความกว้างของฐานรอง	105
W_1	ความกว้างของตัวแผ่พลังงาน	15
W_2	ความกว้างของระนาบกราวด์	50
W_3	ความกว้างของสายนำสัญญาณ	3.8
W_4	ความยาวของสตัดรูปตัวโอ W_4	65
L	ความยาวของฐานรอง	60
L_1	ความยาวของตัวแผ่พลังงาน	40
L_2	ความยาวของระนาบกราวด์	15
L_3	ความยาวของสายนำสัญญาณ	16
L_4	ความยาวของสตัดรูปตัวโอ L_4	10
g	ความกว้างของร่องสายนำสัญญาณ	0.6
g_1	ความยาวการกระจายคลื่นในแนวเส้นสนามไฟฟ้า	1
t	ค่าความหนาของแผ่นทองแดง	0.05
h	ความหนาของวัสดุฐานรอง	0.3

จากนั้นเมื่อทำการพิจารณาผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) ของสายอากาศที่จะทำการจำลองแบบ ณ ความถี่ 2.6 GHz และ 5.6 GHz สายอากาศต้นแบบ มีแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าในลักษณะสองทิศทางแสดงได้ดังรูปที่ 3.27 และมีแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามแม่เหล็กเป็นแบบรอบทิศทางแสดงได้ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.27 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 2.6 GHz และ 5.6 GHz



รูปที่ 3.28 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 2.6 GHz และ 5.6 GHz

3.7 สรุปผลการออกแบบ

การออกแบบโครงสร้างของสายอากาศแบบโมโนโพลระนาบร่วมรูปร่างต่างๆ เริ่มต้นออกแบบจากโครงสร้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าพื้นฐาน และทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากนั้นทำการจำลองแบบสายอากาศด้วยโปรแกรม CST ผลจากการจำลองแบบพบว่าสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าพื้นฐานยังไม่รองรับการใช้งานที่กำหนด ทางผู้วิจัยจึงทำการปรับโครงสร้างสายอากาศแบบพื้นฐาน โดยใช้วิธีการเชิงประสบการณ์ปรับจูนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จนได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด จนได้สร้างสายอากาศรูปแบบใหม่ 3 รูปแบบ กล่าวคือสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวที และสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวก โดยใช้เทคนิคการเพิ่มสัดับรูปตัวไอคู่เข้าไปทั้งด้านข้าง ด้านบน และตรงกลางของตัวแผ่พลังงานตามลำดับ เพื่อเพิ่มช่วงความถี่ใช้งานและเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศทั้ง 3 รูปแบบ ทำให้สายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่เพิ่มมากขึ้นและกว้างมากขึ้น โดยสามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่แถบกว้างและความถี่แถบคู่ได้ แสดงได้ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ค่าคุณลักษณะของสายอากาศโมโนโพลทั้ง 3 รูปแบบ

รูปแบบสายอากาศ	ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)	แบนด์วิดท์ (%)	แบนด์วิดท์ (GHz)
สายอากาศรูปตะขอ	0.765	24.27	0.76 – 0.97
	1.98	62.4	1.72 – 3.28
สายอากาศรูปตัวที	2.12	60.59	1.99 – 3.72
สายอากาศรูป	2.57	14	2.39 – 2.75
เครื่องหมายบวก	5.42	16.23	4.98 – 5.86

จากตารางที่ 3.7 แสดงให้เห็นว่าสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอสามารถทำงานรองรับการใช้งานในช่วงความถี่ตามมาตรฐาน GSM 850 (880 – 960 MHz), GSM 900 (880 – 960 MHz), DCS (1.72 – 1.88 GHz) PCS (1.85 – 1.99 GHz) และ WLAN ย่านความถี่ IEEE 802.11b/g 2.4 GHz (2.4 – 2.48 GHz) สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวที่สามารถทำงานรองรับการใช้งานในช่วงความถี่ตามมาตรฐาน WLAN ย่านความถี่ IEEE 802.11b/g 2.4 GHz (2.4 – 2.48 GHz) และ 5G ย่านความถี่ LTE band 41 (2.496 – 2.690 GHz) และ สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวกสามารถทำงานรองรับการใช้งานในช่วงความถี่ตามมาตรฐาน WLAN ย่านความถี่ IEEE 802.11b/g/n (2.40 – 2.48 GHz), IEEE 802.11a (5.15 – 5.35 GHz), IEEE 802.11ac (5.725 – 5.825 GHz) และ 5G ตามมาตรฐาน LTE band 41 (2.496 – 2.690 GHz) ตามที่ออกแบบ



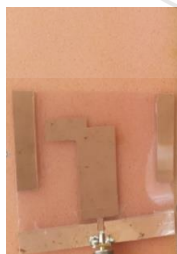
บทที่ 4

ผลการทดสอบและผลการวัดสายอากาศ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดสอบสายอากาศ ที่ออกแบบในบทที่ 3 มาสร้างสายอากาศจริงตามค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) เพื่อวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ อัตราขยาย และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบ เพื่อยืนยันการนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง

4.1 การทดสอบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ

จากสร้างสายอากาศตามขนาดของพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.2 โดยใช้แผ่นวัสดุฐานรองเป็นแผ่นฟิล์มไมลาร์โพลีเอสเตอร์ และในส่วนการทดสอบด้วยการวัดเลือกใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) รุ่น E5071C เพื่อวัดทดสอบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอที่สร้างจริง แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 โดยการทดสอบลำดับแรกทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 จากผลการวัดพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ที่ต่ำกว่า -10 dB แบ่งเป็น 2 ช่วง คือมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่ต่ำเท่ากับร้อยละ 29.21 (0.76 – 1.02 GHz) และค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่สูงเท่ากับร้อยละ 64 (1.70 - 3.30 GHz) เมื่อนำผลการวัดและผลการจำลองแบบของค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์มาเปรียบเทียบกัน พบว่าสายอากาศที่ทำการจำลองแบบและสายอากาศที่สร้างจริงมีผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกัน สามารถทำงานรองรับการใช้งานในช่วงความถี่ตามมาตรฐาน GSM 850 (880 – 960 MHz), GSM 900 (880 – 960 MHz), DCS (1.72 – 1.88 GHz), PCS (1.85 – 1.99 GHz) และ WLAN ย่านความถี่ IEEE 802.11b/g 2.4 GHz (2.4 – 2.48 GHz) ได้ตามที่ออกแบบ โดยรายละเอียดผลการเปรียบเทียบอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

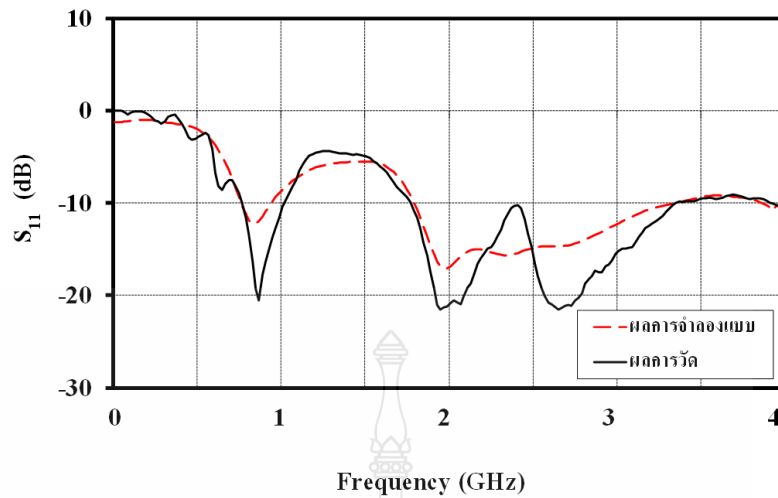


(ก) สายอากาศ



(ข) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย รุ่น E5071C

รูปที่ 4.1 การทดสอบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย



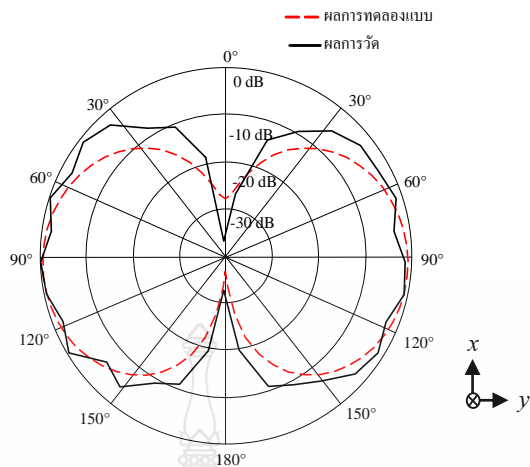
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลกรรวัตและผลกรรจําลองแบบของค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ

จากรูปที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบผลกรรวัตและผลกรรจําลองแบบ การเพิ่มสัดที่ด้านบนของตัวแม่พลังงาน มีข้อดีในด้านการเพิ่มอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ แต่ยังมีข้อเสียตรงช่วงย่านความถี่ 2.43 – 2.45 GHz ถูกหักล้างทำให้เกิดค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์สูงมากขึ้น

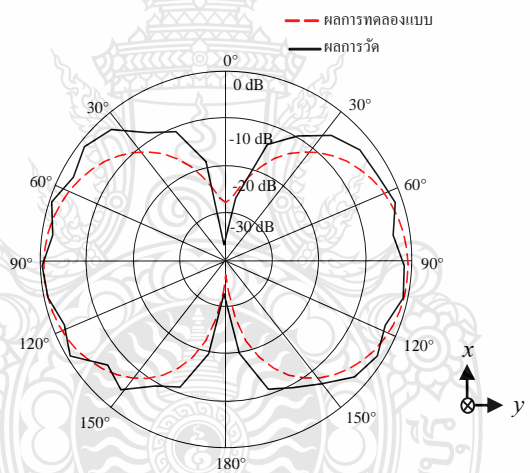
ตารางที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างผลกรรจําลองแบบกับผลกรรวัตสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ

คุณสมบัติสายอากาศ	ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)	สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) (dB)	แบนด์วิดท์ (GHz)	อัตราขยาย (dBi)
ผลกรรจําลองแบบ	0.765	-12.24	0.76 – 0.97	1.484
	1.98	-17.56	1.72 – 3.28	4.813
ผลกรรวัต	0.865	-20.80	0.76 – 1.02	2.136
	1.97	-21.84	1.70 – 3.30	5.026

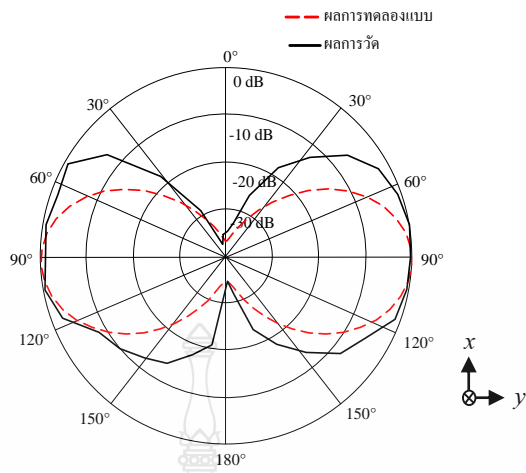
สำหรับผลกรรวัตแบบรูปการแผ่พลังงานสำหรับสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ ที่ความถี่ใช้งาน 850 MHz, 900 MHz, 1.8 GHz, 1.9 GHz และ 2.45 GHz สามารถแสดงตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลกรรจําลองแบบและการวัดจริงของแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 – 4.7 และ ในระนาบสนามแม่เหล็กแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 – 4.12



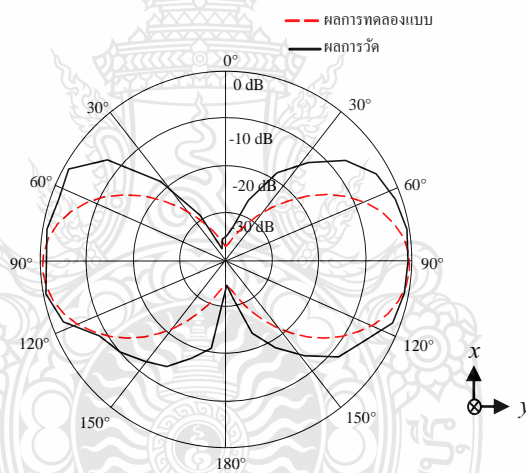
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 850 MHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ



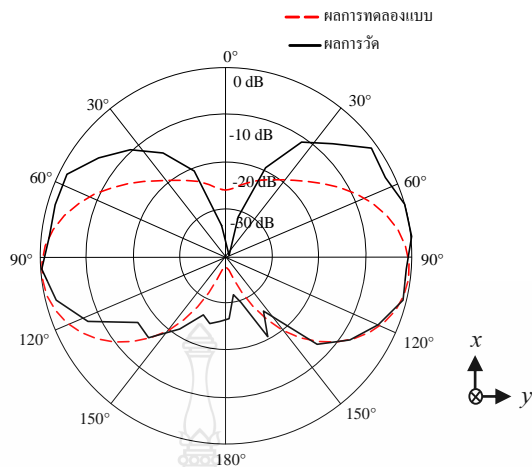
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 900 MHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ



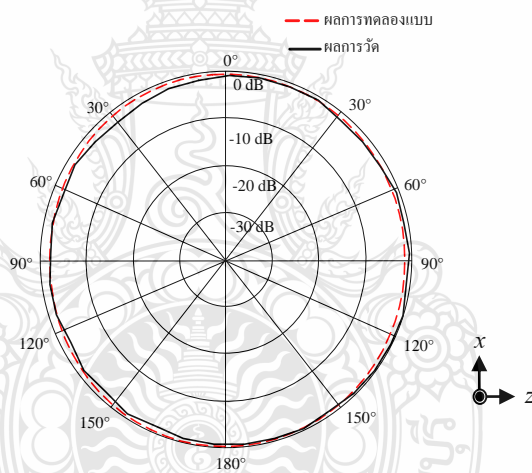
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 1.8 GHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ



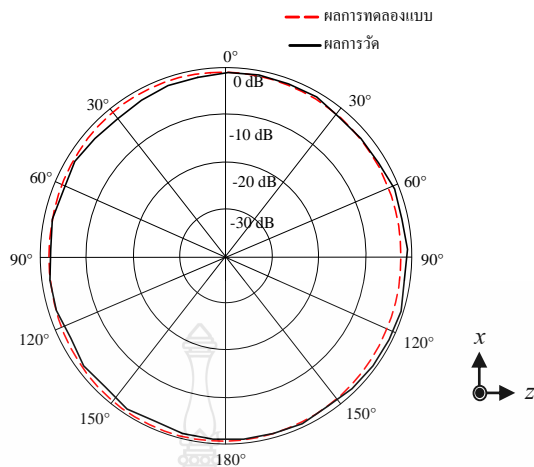
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 1.9 GHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ



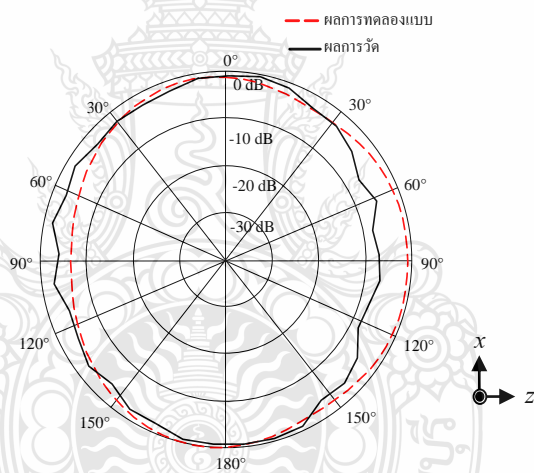
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ



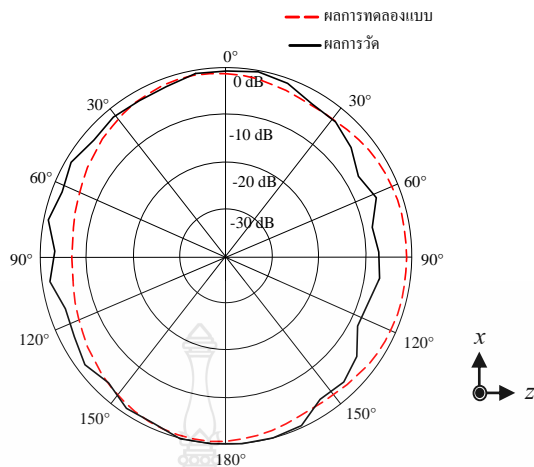
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 850 MHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ



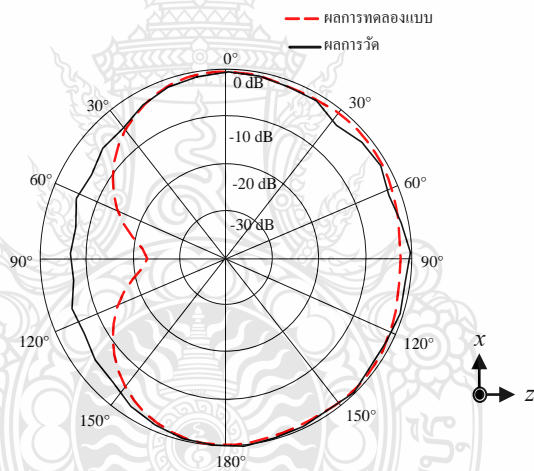
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 900 MHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 1.8 GHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 1.9 GHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ

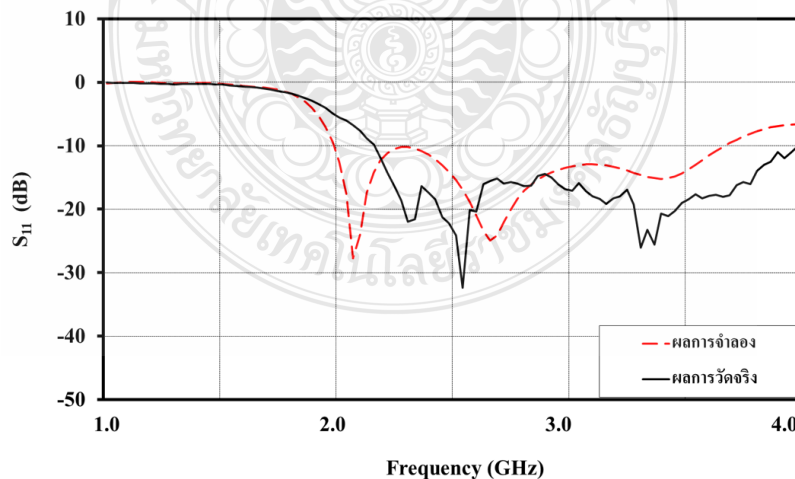
จากผลการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานแสดงให้เห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงานจากผลการจำลองแบบและผลการวัดในระนาบสนามไฟฟ้ามีลักษณะเป็นแบบสองทิศทาง และแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามแม่เหล็กมีลักษณะเป็นแบบรอบทิศทาง และทั้ง 2 กรณีพบว่า มีแนวโน้มที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน

4.2 การทดสอบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวที

จากสร้างสายอากาศตามขนาดของพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.4 โดยใช้แผ่นวัสดุฐานรองเป็นแผ่นฟิล์มไมลาร์โพลีเอสเตอร์ และในส่วนการทดสอบด้วยการวัดเลือกใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) รุ่น E5071C เพื่อวัดทดสอบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวทีที่สร้างจริง แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 โดยการทดสอบลำดับแรกทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) แสดงได้ดังรูปที่ 4.14 จากผลการวัดพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ที่ต่ำกว่า -10 dB คือมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับร้อยละ 58.89 (2.18 – 4.00 GHz) เมื่อนำผลการวัดและผลการจำลองแบบของค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์มาเปรียบเทียบกัน พบว่าสายอากาศที่ทำการจำลองแบบและสายอากาศที่สร้างจริงมีผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกัน สามารถทำงานรองรับการใช้งานในช่วงความถี่ตามมาตรฐาน WLAN ย่านความถี่ IEEE 802.11b/g 2.4 GHz (2.4 – 2.48 GHz) และ 5G ย่านความถี่ LTE band 41 (2.496 – 2.690 GHz) ได้ตามที่ออกแบบ โดยรายละเอียดผลการเปรียบเทียบอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์แสดงได้ดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.13 สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวที



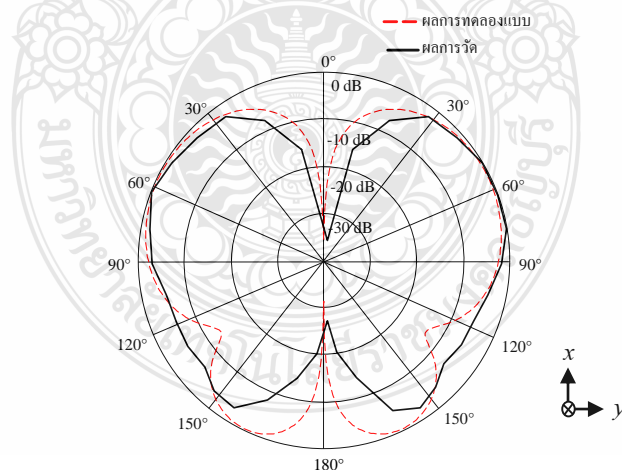
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบของค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวที

จากรูปที่ 4.14 ผลการเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบ ในส่วนของการนำสายอากาศไปวัดจริง จะเกิดผลกระทบในด้านการเชื่อมต่อสัญญาณจากหัว SMA ที่มีความยาว และความหนาของวัสดุเพิ่มขึ้นที่ตัวป้อนสัญญาณ ส่งผลให้ความถี่ที่ได้จากการวัดเกิดการเลื่อนออกไป

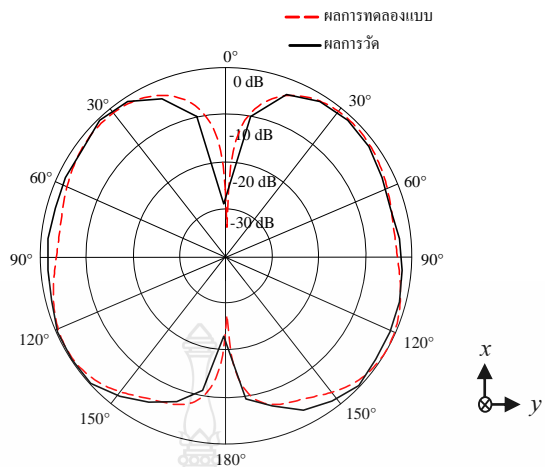
ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างผลการจำลองแบบกับผลการวัดสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวที

คุณสมบัติสายอากาศ	ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)	สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) (dB)	แบนด์วิดท์ (GHz)	อัตราขยาย (dBi)
ผลการจำลองแบบ	2.12	-28.84	1.99 – 3.72	4.96
ผลการวัด	2.68	-32.26	2.18 – 4.00	4.81

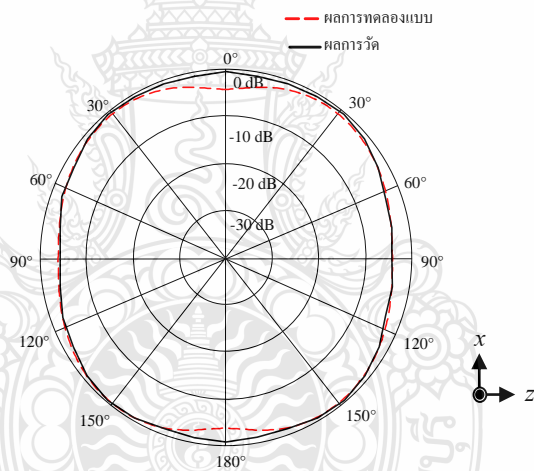
สำหรับผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสำหรับสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวที ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz และ 3.5 GHz สามารถแสดงตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองแบบและการวัดจริงของแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 – 4.16 และ ในระนาบสนามแม่เหล็กแสดงได้ดังรูปที่ 4.17 – 4.18



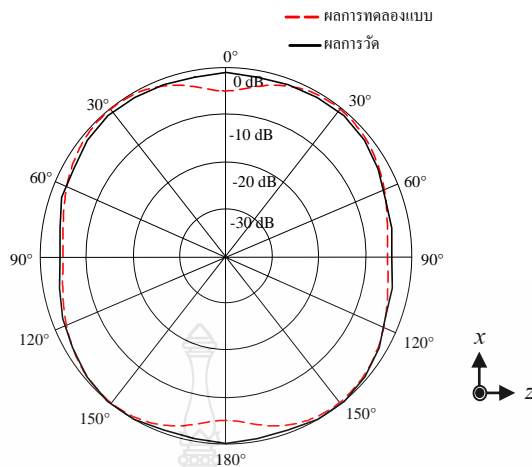
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวที



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 3.5 GHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวที



รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวที



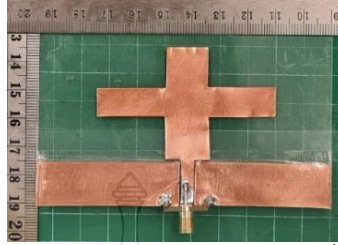
รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 3.5 GHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวที

จากผลการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานแสดงให้เห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงานจากผลการจำลองแบบและผลการวัดในระนาบสนามไฟฟ้ามีลักษณะเป็นแบบสองทิศทาง และแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามแม่เหล็กมีลักษณะเป็นแบบรอบทิศทาง และทั้ง 2 กรณีพบว่ามีแนวโน้มที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน

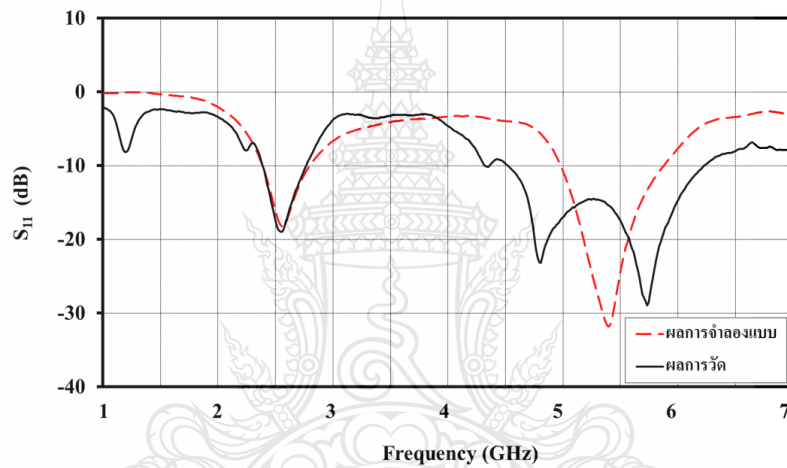
4.3 การทดสอบสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวก

จากสร้างสายอากาศตามขนาดของพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.6 โดยใช้แผ่นวัสดุฐานรองเป็นแผ่นฟิล์มไมลาร์โพลีเอสเตอร์ และในส่วนการทดสอบด้วยการวัดเลือกใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) รุ่น E5071C เพื่อวัดทดสอบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวกที่สร้างจริงแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 โดยการทดสอบลำดับแรกทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) แสดงได้ดังรูปที่ 4.20 จากผลการวัดพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ที่ต่ำกว่า -10 dB แบ่งเป็น 2 ช่วง คือมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่ต่ำเท่ากับร้อยละ 13.64 (2.39 – 2.74 GHz) และค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่สูงเท่ากับร้อยละ 31.01 (4.55 – 6.22 GHz) เมื่อนำผลการวัดและผลการจำลองแบบของค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์มาเปรียบเทียบกัน พบว่าสายอากาศที่ทำการจำลองแบบและสายอากาศที่สร้างจริงมีผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกัน สามารถทำงานรองรับการใช้งานในช่วงความถี่ตามมาตรฐาน WLAN ย่านความถี่ IEEE 802.11b/g/n (2.40 – 2.48 GHz), IEEE 802.11a (5.15 – 5.35 GHz), IEEE 802.11ac (5.725 – 5.825 GHz) และ 5G ตามมาตรฐาน LTE

band 41 (2.496 – 2.690 GHz) ได้ตามที่ออกแบบ โดยรายละเอียดผลการเปรียบเทียบอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์แสดงได้ดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.19 สายอากาศไมโนโพลีระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวก



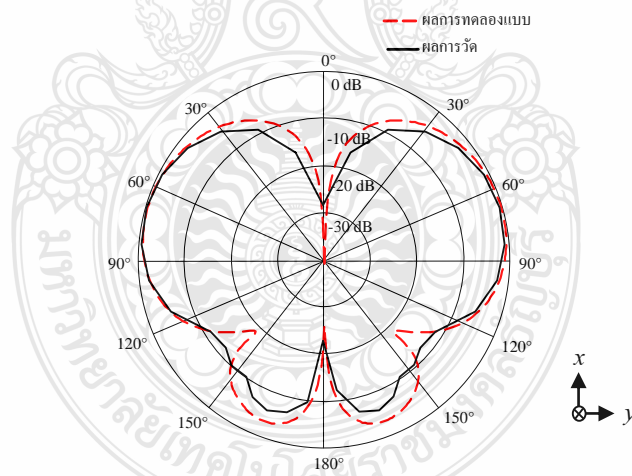
รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบของค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศไมโนโพลีระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวก

จากรูปที่ 4.20 ผลการเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบ ในส่วนของการนำสายอากาศไปวัดจริง จะเกิดผลกระทบในด้านการเชื่อมต่อสัญญาณจากหัว SMA ที่มีความยาว และความหนาของวัสดุเพิ่มขึ้นที่ตัวป้อนสัญญาณ ส่งผลให้ความถี่ที่ได้จากการวัดเกิดการเลื่อนออกไป แต่ส่งผลดีต่อสายอากาศทำให้ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์กว้างมากขึ้น

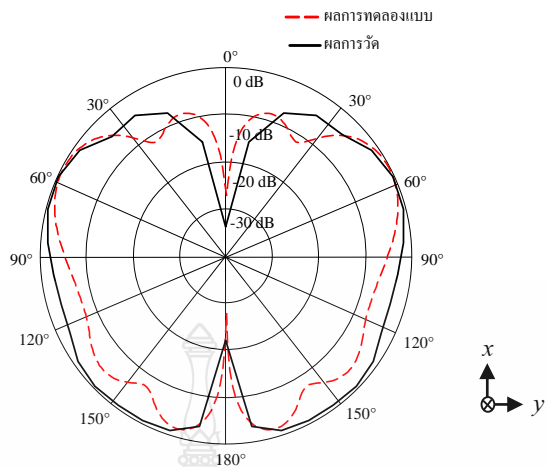
ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างผลการจำลองแบบกับผลการวัดสายอากาศโมโนโพลรูปเครื่องหมายบวก

คุณสมบัติสายอากาศ	ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)	สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) (dB)	แบนด์วิดท์ (GHz)	อัตราขยาย (dBi)
ผลการจำลองแบบ	2.57	-18.24	2.39 – 2.75	3.98
	5.42	-31.61	4.98 – 5.86	5.57
ผลการวัด	2.56	-18.96	2.39 – 2.74	3.54
	5.72	-29.09	4.55 – 6.22	5.12

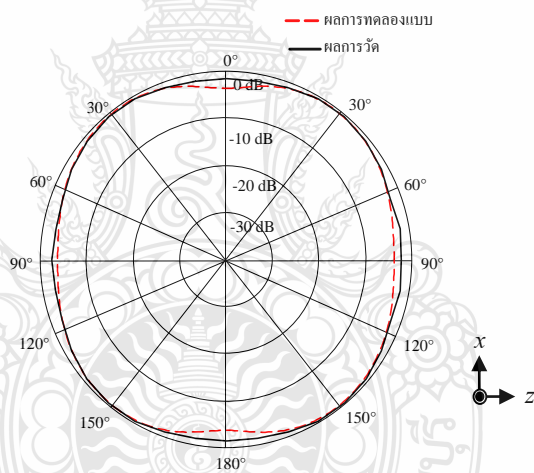
สำหรับผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสำหรับสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวทวิ ที่ความถี่ใช้งาน 2.6 GHz และ 5.6 GHz สามารถแสดงตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองแบบและการวัดจริงของแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 4.21 – 4.22 และ ในระนาบสนามแม่เหล็กแสดงได้ดังรูปที่ 4.23 – 4.24



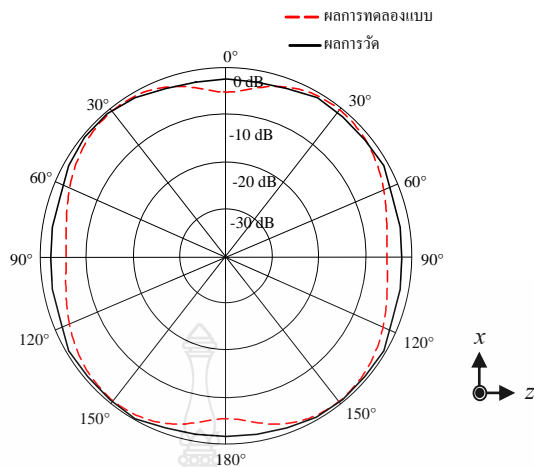
รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 2.6 GHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวก



รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 5.6 GHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวก



รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 2.6 GHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวก



รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 5.6 GHz ของสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวก

จากผลการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานแสดงให้เห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงานจากผลการจำลองแบบและผลการวัดในระนาบสนามไฟฟ้ามีลักษณะเป็นแบบสองทิศทาง และแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามแม่เหล็กมีลักษณะเป็นแบบรอบทิศทาง และทั้ง 2 กรณีพบว่ามีแนวโน้มที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน

4.4 การทดสอบใช้งาน

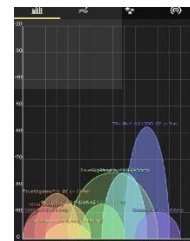
จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนำมาออกแบบจำลองผล สร้างจริง และวัดคุณสมบัติของสายอากาศทั้ง 3 รูปแบบคือ สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอ, สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวที และสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวก จากนั้นนำมาทดสอบใช้งานจริงกับเครื่องแอสเซสพอยต์รุ่น TP-LINK AX1800 การรับสัญญาณโดยใช้โทรศัพท์มือถือ Samsung รุ่น Galaxy S10 plus และใช้โปรแกรม WiFi analyzer ในการวัดผลแสดงได้ดังรูปที่ 4.25



(ก) เครื่องแอสเซสพอยต์



(ข) โทรศัพท์มือถือ



(ค) โปรแกรม WiFi analyzer

รูปที่ 4.25 อุปกรณ์ที่ใช้ร่วมการทดสอบใช้งานจริงกับสายอากาศที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

การทดสอบการส่งสัญญาณของสายอากาศทำการทดสอบที่ย่านความถี่ 2.4 GHz สภาพแวดล้อมในการทดสอบแบ่งลักษณะทางกายภาพออกเป็น 2 รูปแบบ คือแบบมีสิ่งกีดขวาง และแบบไม่มีสิ่งกีดขวาง พบว่าสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอมีการรับ-ส่งสัญญาณที่ระยะไกลที่สุดแบบมีสิ่งกีดขวางที่ระยะทาง 50 เมตร ระยะไกลที่สุดแบบไม่มีสิ่งกีดขวางที่ระยะทาง 200 เมตร สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวทีมีการรับ-ส่งสัญญาณที่ระยะไกลที่สุดแบบมีสิ่งกีดขวางที่ระยะทาง 50 เมตร ระยะไกลที่สุดแบบไม่มีสิ่งกีดขวางที่ระยะทาง 200 เมตร และสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวกมีการรับ-ส่งสัญญาณที่ระยะไกลที่สุดแบบมีสิ่งกีดขวางที่ระยะทาง 50 เมตร ระยะไกลที่สุดแบบไม่มีสิ่งกีดขวางที่ระยะทาง 200 เมตร จากการทดสอบวัดที่ระยะทางมากกว่า 200 เมตร พบว่าสายอากาศมีค่ากำลังงานของสัญญาณเกินกว่า -90 dBm ในระบบจะไม่ทำงาน รายละเอียดผลการทดสอบของสายอากาศทั้ง 3 รูปแบบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การวัดกำลังงานสัญญาณของสายอากาศทั้ง 3 รูปแบบ

ระยะทางในการ วัดกำลังงาน	สายอากาศรูปตะขอ		สายอากาศรูปตัวที		สายอากาศรูป เครื่องหมายบวก	
	มีสิ่งกีด ขวาง	ไม่มีสิ่งกีด ขวาง	มีสิ่งกีด ขวาง	ไม่มีสิ่งกีด ขวาง	มีสิ่งกีด ขวาง	ไม่มีสิ่งกีด ขวาง
	สัญญาณ	สัญญาณ	สัญญาณ	สัญญาณ	สัญญาณ	สัญญาณ
5 เมตร	-19 dBm	-19 dBm	-21 dBm	-21 dBm	-19 dBm	-19 dBm
10 เมตร	-30 dBm	-28 dBm	-35 dBm	-32 dBm	-24 dBm	-22 dBm
50 เมตร	-64 dBm	-48 dBm	-65 dBm	-55 dBm	-69 dBm	-35 dBm
100 เมตร	-	-67 dBm	-	-71 dBm	-	-51 dBm
150 เมตร	-	-71 dBm	-	-86 dBm	-	-65 dBm
200 เมตร	-	-82 dBm	-	-89 dBm	-	-79 dBm

4.5 สรุปผลของการทดสอบวัดสายอากาศ

จากการทดสอบสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบร่วมทั้ง 3 รูปแบบพบว่าค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ สามารถครอบคลุมย่านความถี่ใช้งานตามมาตรฐานตามที่ได้ออกแบบไว้ และมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง โดยที่สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอมีอัตราขยายมากที่สุด 5.026 dBi สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวทีมีอัตราขยายมากที่สุด 4.81 dBi และสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวกมีอัตราขยายมากที่สุด 5.12 dBi โดยการทดสอบใช้งานจริง พบว่าสายอากาศที่ได้ทำการสร้างทั้ง 3 แบบมีการรับ-ส่งสัญญาณแบบมีสิ่งกีดขวางได้ระยะทางไม่เกิน 50 เมตร

และแบบไม่มีสิ่งกีดขวางได้ระยะทางไม่เกิน 200 เมตร ซึ่งจากผลการทดสอบวัดผลสายอากาศจาก
โครงสร้างจริงแสดงให้เห็นว่าผลจากการวัดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการจำลองแบบ



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมสำหรับย่านความถี่แถบกว้าง 2 ย่านความถี่ ด้วยเทคนิคการเพิ่มสัดรูปตัวโอคู และเทคนิคการเพิ่มโหลดแผ่นสตริป ขั้นตอนการดำเนินการเริ่มจากการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศโมโนโพลแบบระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า พบว่าสายอากาศดังกล่าวรองรับการใช้งานได้เพียงย่านความถี่เดียว จึงทำการปรับโครงสร้างสายอากาศด้วยเทคนิคการเพิ่มสัดรูปตัวโอคูให้กับตัวสายอากาศเข้าไป 2 ตำแหน่งคือที่บริเวณด้านข้าง ด้านบน และเพิ่มโหลดแผ่นสตริปตรงกลางของตัวสายอากาศโมโนโพลระนาบร่วม ผลทำให้สายอากาศหลังจากปรับโครงสร้างมีความกว้างของอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้อัตราขยายมีค่ามากขึ้นด้วย จากการปรับโครงสร้าง 3 ตำแหน่งดังกล่าวทำให้งานวิจัยนี้ได้สายอากาศโมโนโพลแบบระนาบร่วม รูปแบบใหม่ 3 รูปแบบคือรูปตะขอ รูปตัวที และรูปเครื่องหมายบวก โดยสายอากาศทั้งสามรูปแบบจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว และมีอัตราขยายสูงสุด 5.026 dBi, 4.81 dBi, และ 5.12 dBi ตามลำดับ จากนั้นได้นำสายอากาศต้นแบบทั้งสามไปทดสอบประยุกต์ใช้งานจริงร่วมกับระบบการสื่อสารไร้คืออุปกรณ์แอสเซสซรอยด์รุ่น TP-LINK AX1800 การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือการทดสอบรับ-ส่งสัญญาณกับโทรศัพท์มือถือ Samsung รุ่น Galaxy S10 plus แบบมีและไม่มีสิ่งกีดขวาง ผลการทดสอบพบว่าสายอากาศทั้งสามรูปแบบสามารถรับ-ส่งสัญญาณได้ที่ระยะทางไม่เกิน 50 เมตร มีกำลังงานสูงสุดเท่ากับ -64 dBm กรณีมีสิ่งกีดขวางและพบว่าสายอากาศทั้งสามรูปแบบรับ-ส่งสัญญาณได้ระยะทางสูงสุดไม่เกิน 200 เมตร มีกำลังงานสูงสุดเท่ากับ -79 dBm สำหรับกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

5.1 สรุปผล

5.1.1 สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตะขอที่มีการเพิ่มสัดรูปตัวโอคูที่ด้านข้างของตัวแผ่พลังงาน จากการสร้างสายอากาศ และทดสอบวัดคุณสมบัติต่างๆ พบว่าสายอากาศรูปตะขอ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการจำลองแบบ โดยที่สายอากาศรูปตะขอที่สร้างจริงมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่ต่ำเท่ากับร้อยละ 29.21 (0.76 – 1.02 GHz) และค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่สูงเท่ากับร้อยละ 64 (1.70 - 3.30 GHz) มีอัตราขยายเท่ากับ 2.136 dBi และ 5.026 dBi และมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง โดยสายอากาศสามารถรองรับการใช้งานในช่วง

ความถี่มาตรฐาน GSM 850 (880 – 960 MHz), GSM 900 (880 – 960 MHz), DCS 1.8 (1.72 – 1.88 GHz), PCS 1.9 (1.85 – 1.99 GHz), 5G LTE band 41 (2.496 – 2.690 GHz) และ WLAN ย่านความถี่ IEEE 802.11b/g 2.4 GHz (2.4 – 2.48 GHz) ได้

5.1.2 สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปตัวทีที่มีการเพิ่มสตัดรูปตัวไอคู่ที่ด้านบนของตัวแผ่พลังงาน จากการสร้างสายอากาศ และทดสอบวัดคุณสมบัติต่างๆ พบว่าสายอากาศรูปตัวที มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการจำลองแบบ โดยที่สายอากาศรูปตัวทีที่สร้างจริงมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับร้อยละ 58.89 (2.18 – 4.00 GHz) มีอัตราการขยายเท่ากับ 4.81 dBi และมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง โดยสายอากาศสามารถรองรับการใช้งานในช่วงความถี่มาตรฐาน WLAN ย่านความถี่ IEEE 802.11b/g 2.4 GHz (2.4 - 2.48 GHz) และ 5G ตามมาตรฐาน LTE band 41 (2.496 – 2.690 GHz) ได้

5.1.3 สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปเครื่องหมายบวกที่มีการเพิ่มโหนดแผ่นสตริปที่ตรงกลางของตัวแผ่พลังงาน จากการสร้างสายอากาศ และทดสอบวัดคุณสมบัติต่างๆ พบว่าสายอากาศรูปเครื่องหมายบวก มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการจำลองแบบ โดยที่สายอากาศรูปเครื่องหมายบวกที่สร้างจริงมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่ต่ำเท่ากับร้อยละ 13.64 (2.39 – 2.74 GHz) และค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่สูงเท่ากับร้อยละ 31.01 (4.55 – 6.22 GHz) มีอัตราขยายเท่ากับ 3.54 dBi และ 5.12 dBi และมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง โดยสายอากาศสามารถรองรับการใช้งานในช่วงความถี่มาตรฐาน WLAN ย่านความถี่ IEEE 802.11b/g/n (2.40 – 2.48 GHz), IEEE 802.11a (5.15 – 5.35 GHz), IEEE 802.11ac (5.725 – 5.825 GHz) และ 5G ตามมาตรฐาน LTE band 41 (2.496 – 2.690 GHz) ได้

5.1.4 สายอากาศแบบโมโนโพลระนาบร่วมสำหรับย่านความถี่กว้างแถบคู่ที่ใช้เทคนิคการเพิ่มสตัดรูปตัวไอคู่และเทคนิคการเพิ่มโหนดสตริป มีขั้นตอนการปรับจูนที่ง่าย น้ำหนักเบา ต้นทุนต่ำ มีโครงสร้างที่บางกะทัดรัด สามารถนำไปพัฒนาให้สามารถครอบคลุมในหลายย่านความถี่ได้ และจากการทดลองใช้งานจริงร่วมกับเครื่องเครื่องแอสเซสพอยด์ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz สามารถรับ-ส่งสัญญาณได้ตามที่ออกแบบไว้

5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาสายอากาศในอนาคต

5.2.1 สายอากาศแบบโมโนโพลระนาบร่วมสำหรับย่านความถี่กว้างแถบคู่ที่ใช้เทคนิคการเพิ่มสตัดรูปตัวไอคู่และเทคนิคการเพิ่มโหนดสตริปที่ใช้วัสดุฐานรองเป็นแผ่นไมลาโพลีเอสเตอร์ จะมีขนาดบางและเล็กทำให้การประกอบเข้ากับแผ่นตัวนำ และแผ่นกราวด์เกิดการคลาดเคลื่อนของ

ตำแหน่งที่เชื่อมต่อ ทำให้ผลที่ได้จากการวัดจริงมีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นควรเลือกใช้เครื่องมือการ
สร้างที่มีความละเอียดสูงสุด

5.2.2 จากการออกแบบสายอากาศแบบโมโนโพลระนาบร่วมสำหรับย่านความถี่กว้างแถบคู่
ที่ใช้เทคนิคการเพิ่มสัดรูปตัวไอคู่และเทคนิคการเพิ่มโหนดสตริป มีการออกแบบที่ไม่ซับซ้อน และปรับ
จูนง่าย

5.2.3 สายอากาศสามารถพัฒนาปรับจูนสัดรูปและเพิ่มโหนดแผ่นสตริปเพื่อปรับปรุง
แบนด์วิดท์ และเกณฑ์การขยายมากยิ่งขึ้นได้ด้วยการปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศในบริเวณที่เกิด
ความหนาแน่นของกระแสเข้มข้น ให้มีการแมตซิ่ง ที่สามารถแผ่พลังงานได้เพิ่มมากขึ้น



บรรณานุกรม

- [1] Amirah Filzah Mat Zaid, Low ChingYu and Muhammad Ramlee Kamarudin “CPW Fed WLAN Monopole Antenna with Gain Improvement” IEECON2016, March 2016
- [2] NisrinSabbar, KhalidHati, HassanAsselman and Abdellah ElHajjaji “A new monopole antenna in the form of double dollar-symbol for WLAN (5.1- 6 GHz) applications” INTER-ENG 2017, October 2017, Tirgu-Mures, Romania
- [3] M.Ali.Dorostkar, R.Azim and M.T.Islam “A Novel L-shape Fractal Antenna for Wideband Communications” International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI 2013)
- [4] Wahaj Abbas Awan, NiamatHussain and Tuan TuLe “Ultra-thin flexible fractal antenna for 2.45 GHz application with wideband harmonic rejection” International Journal of Electronics and Communications Volume 110, October 2019
- [5] Kunturkar G. S. and Zade P. L. “Design of Fork-shaped Multiband Monopole antenna using defected ground structure” Communications and Signal Processing (ICCSP), 2015 International Conference on, pp. 0281 - 0285, 2-4 April 2015.
- [6] Sakulchat S. and Ruengwaree A. Dual Band Microstrip Antenna with Triangular Tuning Stub for WLAN Applications. International Symposium on Antennas Propagation and EM Theory (ISAPE), China, 2008, pp. 546-549.
- [7] ปิยदनัย บุญไมตรี, วัชรพล นาคทอง, อภิญญา อินทร์นอก และ อำนวย เรืองวาริ. “สายอากาศวงแหวนที่มีการป้อนสัญญาณด้วยโพรบรูปวงกลมสำหรับการประยุกต์ใช้งานการสื่อสารแบบไร้สาย” การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 39 (EECON-39), เพชรบุรี, ประเทศไทย, 2-4 พฤศจิกายน 2559.
- [8] Roja Vadlamudi, Sriram Kumar D., “Dual Band, Dual Slant $\pm 45^\circ$ Polarized 2×2 MIMO (8T 8R) Antenna Array with Low Mutual Coupling for A-LTE(4G) Band 41/42/43(5G) BTS Application,” Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET), pp. 97 – 101, 2020.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [9] Boonmaitree P., Naktong W., Kornsing S. and Ruengwaree A. “Rectangular Slot Antenna with Bobbin Shaped Stub Tuning for Wireless Communication Application” 13th International Conference on Electrical Engineering Electronics, Compute Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2016), Chiang Mai, Thailand, 28 June – 1 July 2016.
- [10] Chanramrd, S., Naktong, W., Thongbor, P., Sakulchat, S., Ruengwaree, A., & Namsang, A. (2017). The structure tuning of plugs-shaped monopole antenna for wireless communication applications. In 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 1-2.
- [11] Kornsing S., Innok A., Naktong W. and Ruengwaree A., “The Ring Antenna with Circular Probe Feeding for MIMO Systems” International Symposium on Antennas Propagation (ISAP 2017), Phuket, Thailand, 30 October – 2 November 2017.
- [12] Naktong W., Ruengwaree A. and Kaewchan B. “Development of Top-Shaped Planar monopole antenna on Polyester film material for wireless network” Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017), pp. 447-450, 2-4 May 2017.
- [13] Chen, H., Yang, X., Yin, Y. Z., Wu, J. J., & Cai, Y. M. “Tri-band rectangle-loaded monopole antenna with inverted-L slot for WLAN/WiMAX applications” Electronics Letters, 49(20), 1261-1262.
- [14] วีชรพล นาคทอง อำนวย เรืองวาริ อภิญญา อินทร์นอก สุภาธิณี กรสิงห์ และนุชนาฏ ฝาเพ็ญ “การพัฒนาสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบรูปลูกข้างบนวัสดุแผ่นฟิล์มโพลีเอสเตอร์ สำหรับ เครือข่ายไร้สาย” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9 (EENET-9), จันทบุรี, ไทย, 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2560.
- [15] วีชรพล นาคทอง ธัชชัย พุ่มพวง เทอดอนันต์ จันทอง สมชาติ ดีอุคม และ อำนวย เรืองวาริ “การศึกษาสายอากาศโมโนโพลรูปตัวยูที่ใช้เทคนิคการเซาะร่องรูปขั้นบันไดสำหรับ ประยุกต์ใช้งาน” การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและ สถาปัตยกรรมศาสตร์ (ESTACON 2019) ครั้งที่ 10, นครราชสีมา, ไทย, 30 สิงหาคม 2562.

บรรณานุกรม (ต่อ)


- [16] วีชรพล นาคทอง มงคล คูพิมาย ธีชชัย พุ่มพวง เทอดอนันต์ จันทอง และ อำนวย เรืองวารี “การศึกษาสายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอร่วมกับการเพิ่มสัดรูปตัวไอ สำหรับประยุกต์ใช้งาน ย่านความถี่คู” การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และ สถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 10 วันที่ 30 สิงหาคม 2562 ณ อาคารขวัญแก้ว มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
- [17] วีชรพล นาคทอง เอกจิต คุ่มวงศ์ เสกสรร ผลศรี อุบล สุริพล และ อำนวย เรืองวารี “สายอากาศโมโนโพลสำหรับประยุกต์ใช้งานย่านแถบกว้างมากยิ่งขึ้น” การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 9 วันที่ 7 กันยายน 2561 ณ อาคาร 50 ปี เทคนิคไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
- [18] Balanis, C. A. (1997). Antenna theory and design, John Willey & sons.





ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของข้อต่อแบบ SMA



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

SMA - 50 Ohm Connectors

Specifications

JOHNSON
Components®

INCHES (MILLIMETERS)
CUSTOMER DRAWINGS AVAILABLE UPON REQUEST

ELECTRICAL RATINGS

Impedance: 50 ohms

Frequency Range:

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

VSWR: (f = GHz)

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

Working Voltage: (Vrms maximum)†

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

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

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

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

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

Insertion Loss: (dB maximum)

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

Insulation Resistance: 5000 megohms minimum

Contact Resistance: (milliohms maximum) **Initial** **After Environmental**

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

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

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

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

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

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

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

MECHANICAL RATINGS

Engagement Design: MIL-C-39012, Series SMA

Engagement/Disengagement Force: 2 inch-pounds maximum

Mating Torque: 7 to 10 inch-pounds

Bulkhead Mounting Nut Torque: 15 inch-pounds minimum

Coupling Proof Torque: 15 inch-pounds minimum

Coupling Nut Retention: 60 pounds minimum

Contact Retention:

- 6 lbs. minimum axial force (captivated contacts)
- 4 inch-ounce minimum torque (uncabled receptacles)

Cable Retention:

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

*Or cable breaking strength whichever is less.

Durability: 500 cycles minimum

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

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

Temperature Range: - 65°C to + 165°C

Thermal Shock: MIL-STD-202, Method 107, Condition B

Corrosion: MIL-STD-202, Method 101, Condition B

Shock: MIL-STD-202, Method 213, Condition I

Vibration: MIL-STD-202, Method 204, Condition D

Moisture Resistance: MIL-STD-202, Method 106

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

Johnson Components® • P.O. Box 1732 • Waseca, MN 56093-0832 • 1-800-247-8256 • Fax: 507-835-6287 • www.johnsoncomp.com

MATERIAL SPECIFICATIONS

Bodies: Brass per QQ-B-626, gold plated* per MIL-G-45204 .00001" min. or nickel plated per QQ-N-290

Contacts: Male - brass per QQ-B-626, gold plated per MIL-G-45204 .00003" min.

Female - beryllium copper per QQ-C-530, gold plated per MIL-G-45204 .00003" min.

Nut Retention Spring: Beryllium copper per QQ-C-533. Unplated

Insulators: PTFE fluorocarbon per ASTM D 1710 and ASTM D 1457 or Tefzel per ASTM D 3159

Expansion Caps: Brass per QQ-B-613, gold plated per MIL-G-45204 .00001" min. or nickel plated per QQ-N-290

Crimp Sleeves: Copper per WW-T-799 or brass per QQ-B-613, gold plated per MIL-G-45204 .00001" min. or nickel plated per QQ-N-290

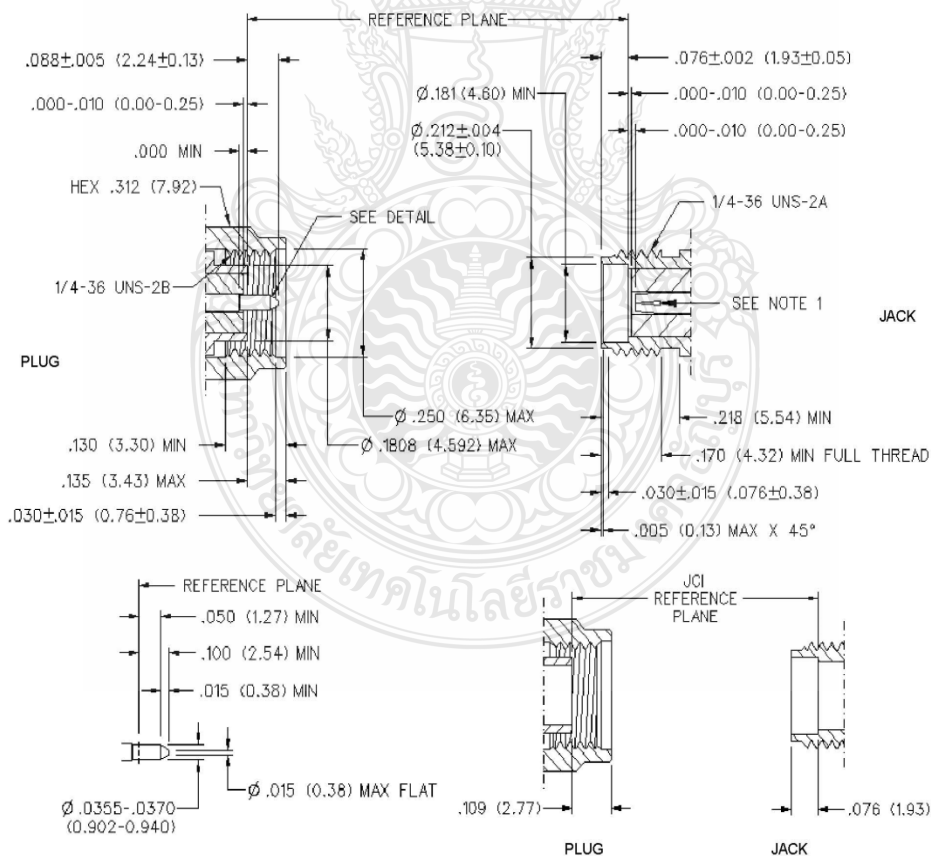
Mounting Hardware: Brass per QQ-B-626 or QQ-B-613, gold plated per MIL-G-45204 .00001" min. or nickel plated per QQ-N-290

Seal Rings: Silicone rubber per ZZ-R-765

EMI Gaskets: Conductive silicone rubber per MIL-G-83528, Type M

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

Mating Engagement for SMA Series per MIL-C-39012



NOTES

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

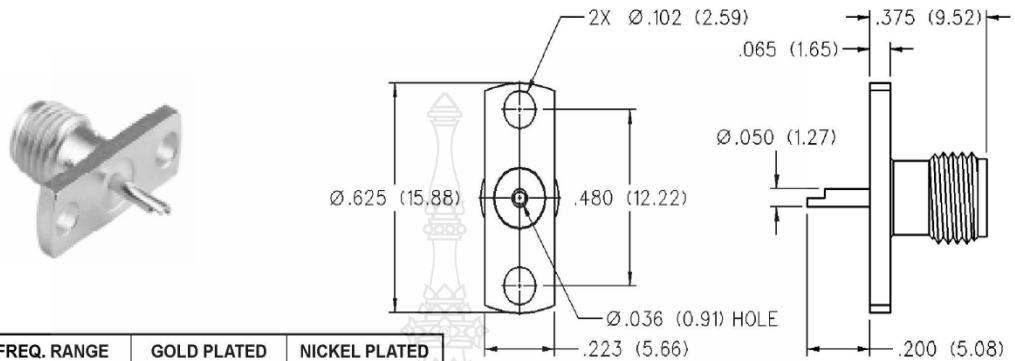
SMA - 50 Ohm Connectors

Panel Mount



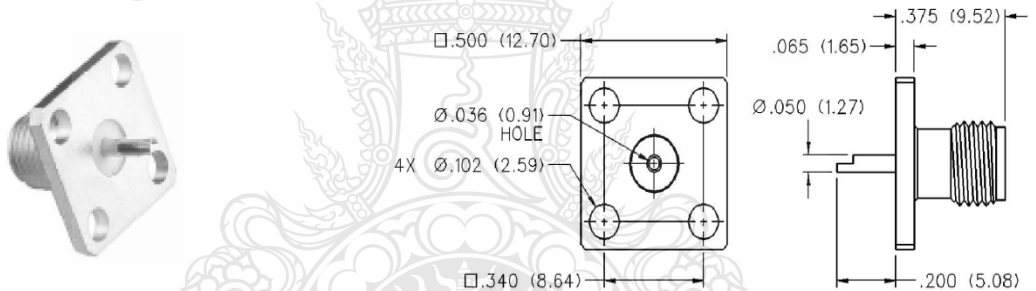
INCHES (MILLIMETERS)
CUSTOMER DRAWINGS AVAILABLE UPON REQUEST

2-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Flush Dielectric



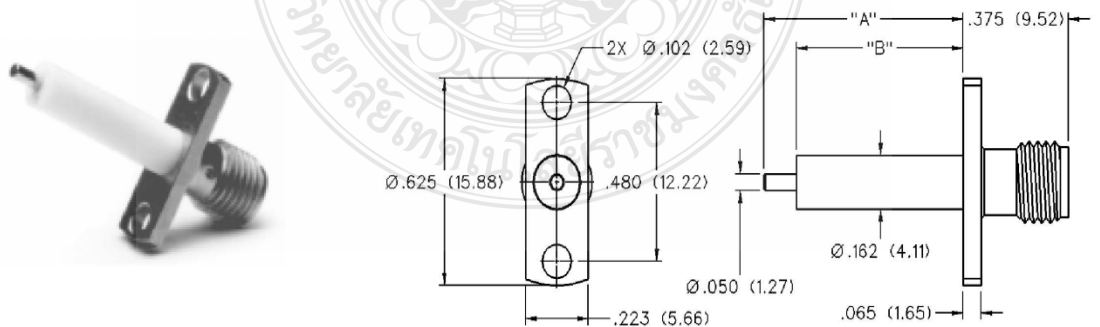
VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
VSWR: N/A 0-18 GHz	142-0701-621	142-0701-626

4-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Flush Dielectric



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

2-Hole Flange Mount Jack Receptacle - Extended Dielectric

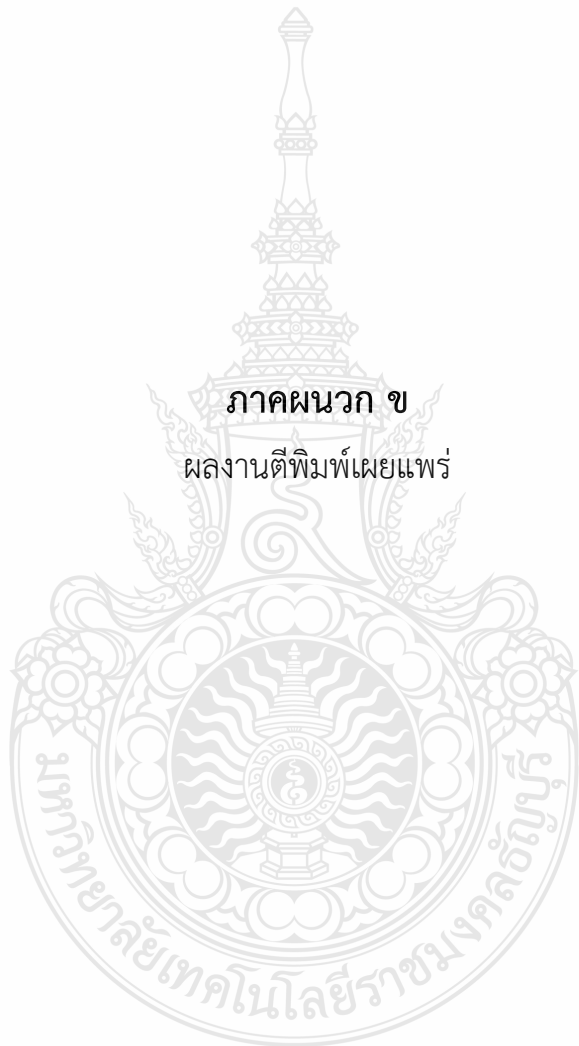


VSWR & FREQ. RANGE	PRODUCT SERIES	GOLD PLATED	NICKEL PLATED	"A"	"B"
VSWR: 1.15 + .02 f (GHz) 0-18 GHz	Brass	142-1701-131	142-1701-136	.705 (17.91)	.590 (14.99)
		142-1701-031	142-1701-036	.240 (6.10)	.180 (4.57)

Johnson Components® • P.O. Box 1732 • Waseca, MN 56093-0832 • 1-800-247-8256 • Fax: 507-835-6287 • www.johnsoncomp.com

ภาคผนวก ข

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] กฤษณะ นิลวิเวก อำนวย เรืองวารีย์ สุวัฒน์ สกกุลชาติ และ วัชรพล นาคทอง “สายอากาศโมโนโพล รูปตัวโอที่ปรับเพิ่มโหลดแบบแผ่นสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้านข้าง 2 ย่านความถี่สำหรับ ประยุกต์ใช้กับระบบ WLAN/5G” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 44 The 44th Electrical Engineering Conference (EECON44) วันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 ณ โรงแรม ดิ อิมเพรส น่าน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน
- [2] กฤษณะ นิลวิเวก สุวัฒน์ สกกุลชาติ วัชรพล นาคทอง และ อำนวย เรืองวารีย์ “สายอากาศโมโนโพล รูปตัวโอที่ใช้เทคนิคการเพิ่มสตริปตัวโอคู่สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบ 4G/5G” การประชุม วิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 12, 20 สิงหาคม 2564 ณ โรงแรมดิอิมพีเรียล ไฮเทล แอนด์ คอนเวนชั่น เซ็นเตอร์โคราช อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา
- [3] วัชรพล นาคทอง รัชชัย พุ่มพวง กชิตติศ กกขุนทด กฤษณะ นิลวิเวก และอำนวย เรืองวารีย์ “สายอากาศไดโพลรูปตะขอสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่านความถี่คู่สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบ GSM/WLAN” การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรม ศาสตร์ ครั้งที่ 9 วันที่ 7 กันยายน 2561 ณ อาคาร 50 ปี เทคนิคไทย-เยอรมัน ขอนแก่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ที่ 1

- [1] กฤษณะ นิลวิเวก อำนวย เรืองวารี สุวัฒน์ สกุลชาติ และ วัชรพล นาคทอง “สายอากาศโมโนโพล รูปตัวไอที่ปรับเพิ่มโหลดแบบแผ่นสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้านข้าง 2 ย่านความถี่สำหรับประยุกต์ใช้กับระบบ WLAN/5G” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 44 The 44th Electrical Engineering Conference (EECON44) วันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 ณ โรงแรม ดิ อิมเพรส น่าน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน





การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 44

The 44th Electrical Engineering Conference (EECON-44)

17-19 พฤศจิกายน 2564

ณ โรงแรม ดิ อิมเพรส น่าน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- ไฟโตนิคส์ (PH)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)
- วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- พลังงานหมุนเวียน (RE)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)



EECON-44
Electrical Engineering Conference





รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
บทความวิจัยสาขา CM ไฟฟ้าสื่อสาร		
CM04	สายอากาศโมโนโพลรูปตัวโอที่ปรับเพิ่มโหลดแบบแผ่นสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้านข้าง 2 ยานความถี่สำหรับประยุกต์ใช้กับระบบ WLAN/5G <i>กฤษณะ นิลวิเวก อำนวย เรืองวาริ สุวัฒน์ สกุลชาติ และ วิชพรพล นาคทอง²</i> <i>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน</i>	254
CM05	PMD Compensation for 50 Gbps in Intensity Modulation and Direct Detection via Constant Modulus Algorithm <i>Kidsanpong Punsri Ampawan Yindeemak and Wannaree Wongtrairat</i> <i>Rajamangala University of Technology Isan, Khon kaen campus</i> <i>Rajamangala University of Technology Isan,</i>	258
CM06	สายอากาศแผ่นระนาบย่านความถี่กว้างขนาดกะทัดรัดสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุค 5G <i>คณะศ พุททะพันธ์ สุทธิชัย เคนตรี และ ชูวงศ์ พงศ์เจริญพามาณชัย</i> <i>มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ</i> <i>สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง</i>	262
CM07	การมอดูเลชันแบบ CPBFSK ด้วยวิธีการประมวลสัญญาณดิจิทัล <i>ประยุทธ อินแบน ราชู พันธฉลาด วุฒิพร เลิศวาสนา</i> <i>มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์</i>	266
CM08	การตรวจจับข้อมูลข่าวสารจากสัญญาณ DPSK ด้วยตัวเพิ่มพูนสายสัญญาณแบบปรับตัว <i>สุรกิจ ทองสุก ราชู พันธฉลาด วุฒิพร เลิศวาสนา</i> <i>มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์</i>	271
CM09	การศึกษาปัจจัยเชิงเวลาที่ส่งผลกระทบต่อความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งด้วย GPS <i>พีรสินธ์ คำสาสีย์ อรรถวิทย์ จันทร์อุบลี และ รุ่งสรศรี วงศ์สรศรี</i> <i>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี</i>	275
CM10	ระบบแจ้งใบสั่งจราจรดิจิทัลผ่านเครือข่ายไร้สายร่วมกับ อาร์เอฟไอดี <i>สุทัศน์ หงษ์คำเนิน วันเฉลิม ชัยวัฒน์พงศ์ และ บุญฤทธิ์ คัมเขต</i> <i>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี</i>	279
CM11	สายอากาศรูปทรงกลายยาเกิ - อูคะ สำหรับบอร์ดอินเตอร์ของสรรพสิ่ง <i>พินิจ เนื่องภิรมย์ วิระชัย ใจคำปุ่น และสมศักดิ์ อรรถทิมากุล</i> <i>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา , มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ</i>	283
CM12	การทดลองระบบการสื่อสารเชิงแสง โดยใช้การกลายสัญญาณ PAM-4 และแก้ไขช่องสัญญาณด้วยวงจรกรองปรับตัวได้แบบค่ากำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดสำหรับระบบคลังข้อมูล <i>อัมพวรรณ อินติมาก และ กฤษณะพงศ์ พันธุ์ศรี</i> <i>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน</i>	287



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส น่าน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน



สายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอที่ปรับเพิ่มโหลดแบบแผ่นสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้านข้าง 2 ย่านความถี่สำหรับ ประยุกต์ใช้กับระบบ WLAN/5G

Dual band I-shape Monopole Antenna with Rectangular Strip Load for WLAN/5G Applications

กฤษณะ นิลวิวก¹ อำนวย เรืองวารี^{1*} สุวัฒน์ สกฤษชาติ¹ และ วัชรพล นากทอง²

¹ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
²สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
kritsana_n@mail.rmUTT.ac.th, amnoiy.r@en.rmUTT.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาสายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอที่ปรับเพิ่ม โหลดแบบแผ่นสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้านข้างที่ป้อนสัญญาณแบบระบบ ร่วม สำหรับประยุกต์ใช้งานสื่อสารไร้สายในระบบ WLAN และ 5G การ ออกแบบโครงสร้างสายอากาศต้นแบบได้น่าเทคนิคการปรับจูนเพิ่มโหลด แผ่นสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามาปรับจูนตัวแผ่พลังงาน เพื่อให้สายอากาศ ใช้งาน ได้ 2 ช่วงความถี่ในระบบ WLAN ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b/g/n (2.40 – 2.48 GHz), IEEE 802.11a (5.15 – 5.35 GHz), IEEE 802.11ac (5.725 – 5.825 GHz) และ 5G ตามมาตรฐาน LTE band 41 (2.496 – 2.690 GHz) โครงสร้างสายอากาศถูกสร้างบนแผ่นวัสดุฐานรองไม่ล้าไฟลัม ที่มีค่าคงตัว ใดอิเล็กทริก (ϵ_r) เท่ากับ 3.2 มีความหนาของวัสดุฐานรอง (h) เท่ากับ 0.3 มม. ค่าความหนาของวัสดุตัวนำทองแดง (t) เท่ากับ 0.05 มม. การวิเคราะห์ และจำลองแบบสายอากาศต้นแบบใช้โปรแกรม Computer Simulation Technology (CST) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ แบบ รูปการแผ่พลังงานและอัตราขยาย จากการวัดผลพบว่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ ช่วงความถี่ต่ำเท่ากับร้อยละ 13.64 (2.39 – 2.74 GHz) และค่า อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่สูงมีค่าเท่ากับร้อยละ 31.01 (4.55 – 6.22 GHz) มีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวและมี อัตราขยายเท่ากับ 3.54 dBi กับ 5.12 dBi ตามลำดับ

คำสำคัญ: โหลดแบบแผ่นสตริป, อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์, รูปตัวไอ, ความถี่ แถบคู่

Abstract

This paper describes an I-shape monopole antenna with rectangular strip loads fed by CPW for wireless communication applications such as WLAN and 5G. A prototype antenna design employs a rectangular strip load tuning technique to increase the antenna's coverage of IEEE 802.11b/g/n (2.40 – 2.48 GHz), IEEE 802.11a (5.15 – 5.35 GHz), IEEE 802.11ac (5.725

– 5.825 GHz), and LTE band 41 (2.496 – 2.690 GHz). The antenna structure is composed of a Mylar polyester film with a dielectric constant (ϵ_r) of 3.2 and a thickness (h) of 0.3 mm, as well as a copper plate with a thickness (t) of 0.05 mm. The Computer Simulation Technology (CST) program optimizes the impedance bandwidth, radiated pattern, and antenna gain parameters. The measurement results indicate that the lower-impedance bandwidth of 13.64 % (2.39 – 2.74 GHz) and the higher-impedance bandwidth of 31.01 % (4.55 – 6.22 GHz) can support the desired dual-bandwidth. The prototype antenna is omnidirectional with a gain of 3.54 dBi and 5.12 dBi, respectively.

Keywords: Strip load, Impedance bandwidth, I-shape, Dual-band

1. บทนำ

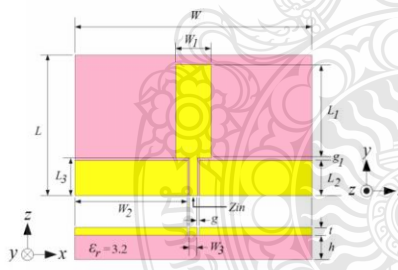
ระบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless Local Area Network : WLAN) นิยม นำมาใช้กันกันอย่างแพร่หลายทั่วโลก จึงถูกนำไปใช้งานในหน่วยงาน ราชการ ภาคเอกชนและตามอาคารบ้านเรือนต่าง ๆ ทำให้อุปกรณ์สำคัญที่ ช่วยในการติดต่อสื่อสารอย่างสายอากาศถูกพัฒนาจากนักวิจัยหลายท่าน เพื่อให้ครอบคลุมการใช้งานในระบบเครือข่ายไร้สาย และยังสามารถพัฒนา ไปใช้กับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งมีช่วงความถี่ต่ำที่นิยมนำมารองรับการ ใช้งานตามมาตรฐาน IEEE 802.11b/g/n (2.40 – 2.48 GHz), LTE band 41 (2.496 – 2.69 GHz) และช่วงความถี่สูง IEEE 802.11a (5.15 – 5.35 GHz), IEEE 802.11ac (5.725 – 5.825 GHz) [1-3] แต่ตัวสายอากาศนั้นยังขึ้นตอน การปรับจูนที่มากและบางกรณีมีรูปร่างซับซ้อนเชิงกายภาพอาจส่งผลให้ เกิดความยุ่งยากในการสร้างตัวสายอากาศ จากปัญหานั้นผู้วิจัยจึง ได้ศึกษาพัฒนาโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าพื้นฐาน [4-5] โดยมีการใช้เทคนิคการปรับเพิ่ม โครงสร้างด้วยรูปตัวแอลและรูป สามเหลี่ยม เพื่อช่วยเพิ่มอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่ช่วงความถี่สูง [6-8] ด้วย โปรแกรม Computer Science Technology (CST) ร่วมกับการใช้เทคนิคการ ปรับจูนเพิ่มโหลดแผ่นสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่บริเวณตรงกลางของตัวแผ่



พลังงานของสายอากาศ ส่งผลให้ขั้นตอนการปรับจูนของโครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอมีไม่มาก เพื่อช่วยลดความซับซ้อนของโครงสร้างสายอากาศ และยังมีข้อดีคือ สายอากาศที่นำเสนอมีมี ต้นทุนต่ำ น้ำหนักเบา และโครงสร้างสามารถปรับโค้งงอได้ โดยขั้นตอนการปรับจูนนั้นจะได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป

2. การออกแบบและผลการจำลองแบบ

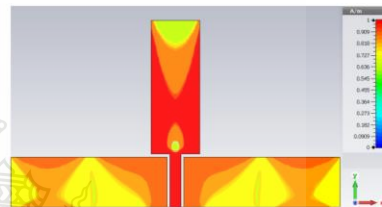
ขั้นตอนในตอนนี้เริ่มจากการออกแบบโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าพื้นฐาน [4-5] ซึ่งปรับจูนโดยใช้โปรแกรม CST ทำการออกแบบที่ความถี่เริ่มต้น 2.60 GHz โดยความหนาของวัสดุฐานรอง (h) เท่ากับ 0.3 มม. ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) เท่ากับ 3.2 [9] ค่าความหนาของวัสดุตัวนำทองแดง (t) เท่ากับ 0.05 มม. แสดงดังรูปที่ 1 โดยมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ร้อยละ 19.06 (2.42 – 2.93 GHz) จากการออกแบบสายอากาศที่มีความถี่ไอเซนเนสซ์ 2.6 GHz เมื่อทำการเพิ่มโพลแบบแผ่นสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้านข้างทั้งสองของตัวแผ่นพลังงานสายอากาศเปรียบเสมือนเป็นการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำ ความจุ หรืออิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ อาจส่งผลให้เกิดความถี่ไอเซนเนสซ์ที่เป็นความถี่ฮาร์โมนิกที่สองเกิดขึ้น ที่ความถี่ประมาณ 5.2 GHz การเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ ความจุ หรืออิมพีแดนซ์ สังกศจาก การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแส ณ จุดต่างๆ บนตัวแผ่นพลังงานในย่านความถี่ที่จำลองแบบ และเมื่อมีการปรับเพิ่มโพลด้วยแผ่นสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า บริเวณที่มีความหนาแน่นสูง จะส่งผลทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงการตอบสนองความถี่ของสายอากาศ ณ ความถี่ไอเซนเนสซ์ดังกล่าวมากที่สุด



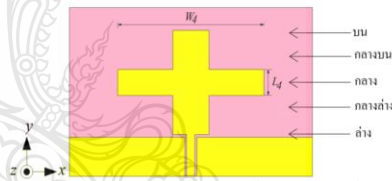
รูปที่ 1 สายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าพื้นฐาน

จากแนวคิดดังกล่าวทางผู้วิจัยพิจารณาผลการจำลองแบบใน ส่วนความหนาแน่นของกระแสที่บริเวณส่วนต่างๆ บนตัวสายอากาศ [10] พบว่าตำแหน่งบริเวณตรงกลางของตัวแผ่นพลังงานรูปตัวไอ มีค่าความหนาแน่นของกระแส มากที่สุดสังเกตจากพื้นที่ที่มีสีแดงเข้ม ดังแสดงในรูปที่ 2 และส่งผลต่อการปรับจูนค่าความยาวคลื่นมากที่สุดที่ความถี่ 5.20 GHz จึงทำการปรับจูนเพิ่มโพลแผ่นสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเข้าไปในจุดดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งมีข้อดีคือช่วยเพิ่มอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่

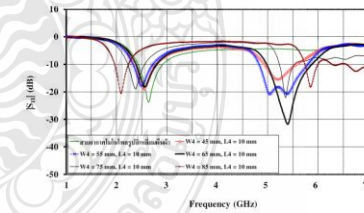
ช่วงความถี่สูง [6-8] โดยทำการเลือกปรับค่าพารามิเตอร์ความกว้าง W_1 ตั้งแต่ 45, 55, 65, 75 และ 85 มม. แต่จะคงค่าความยาว L_1 ไว้ที่ความยาว 10 มม. ผลจากการปรับขนาด W_1 ดังกล่าว พบว่าที่ความกว้าง W_1 เท่ากับ 65 มม. มีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่ใช้งานเพิ่มขึ้นเป็น 2 ช่วงความถี่ คือ ช่วงความถี่ต่ำร้อยละ 14 (2.39 – 2.75 GHz) และช่วงความถี่สูงร้อยละ 16.23 (4.98 – 5.86 GHz) ผลการจำลองแบบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจากการปรับขนาด W_1 แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งมีข้อพิจารณาพบว่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่ W_1 เท่ากับ 65 มม.ค่ามากกว่าโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าพื้นฐานในรูปที่ 1 จากนั้นทำการสรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมที่ได้จากการปรับจูน โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอที่ปรับเพิ่มโพลแบบแผ่นสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 2 ค่าความหนาแน่นของกระแสที่ตรงกลางของตัวแผ่นพลังงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าพื้นฐาน



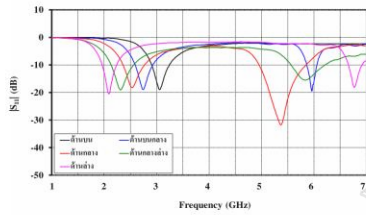
รูปที่ 3 สายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ทำการปรับจูนโครงสร้าง



รูปที่ 4 ผลการจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ เมื่อปรับ W_1 และ L_1

จากการจำลองแบบเพื่อทดลองผลการปรับเลื่อน โพลแบบแผ่นสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่อยู่ด้านข้างซ้ายและขวาของตัวแผ่นพลังงานรูปตัวไอ แนวตั้ง จำนวน 5 ตำแหน่งในแนวทิศทางขึ้นและลงพร้อมกันตามแนวแกน Y กล่าวคือ ตำแหน่งบน กลางบน กลาง กลางล่าง และล่าง แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าการปรับส่งผลทำให้ความถี่ ไอเซนเนสซ์มูลฐานและความถี่ไอเซนเนสซ์

สารโหมกที่สองเกิดการเลื่อนออกห่างจากความถี่ที่ต้องการใช้งาน เนื่องจากการปรับเลื่อนคิงค่าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวสายอากาศ จากการทดลองปรับเลื่อนตำแหน่ง 5 ตำแหน่ง สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 5 จากรูปพบว่าตำแหน่งกลางของตัวแผ่พลังงานรูปตัวไอจะเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดคือมีความถี่เรโซแนนซ์ช่วงความถี่ต่ำเท่ากับร้อยละ 14 (2.39 – 2.75 GHz) และช่วงความถี่สูงเท่ากับร้อยละ 16.23 (4.98 – 5.86 GHz)



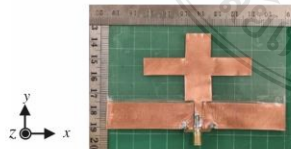
รูปที่ 5 ผลการจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์บนตัววัด เมื่อปรับตำแหน่งโครงสร้างของโพลเด้นสตรีปสี่เหลี่ยมที่ระยะต่างๆ

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอที่เพิ่มโพลเด้นสตรีปสี่เหลี่ยม

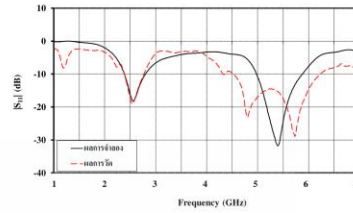
ขนาดความกว้าง		ขนาดความยาว	
ตัวแปร	ขนาด (มม.)	ตัวแปร	ขนาด (มม.)
W	105	L	60
W_1	15	L_1	40
W_2	50	L_2	15
W_3	3.8	L_3	16
W_4	65	L_4	10
g	0.6	t	0.05
g_t	1	h	0.3

3. การสร้างและผลการวัด

เมื่อได้ขนาดของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามตารางที่ 1 จากนั้นทำการสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอที่ปรับเพิ่มโพลเด้นสตรีปสี่เหลี่ยมสี่ด้าน แสดงดังรูปที่ 6 และนำสายอากาศต้นแบบมาวัดผลด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น E5071C พบว่าค่าอิมพีแดนซ์บนตัววัดที่มีความถี่ใช้งานช่วงความถี่ต่ำร้อยละ 13.64 (2.39 – 2.74 GHz) และช่วงความถี่สูงร้อยละ 31.01 (4.55 – 6.22 GHz) นำผลที่ได้จากการวัดมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบ แสดงดังรูปที่ 7 และในส่วนของการเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศนั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบในทิศทางเดียวกัน แสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 6 สายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอที่ปรับเพิ่มโพลเด้นสตรีปสี่เหลี่ยม

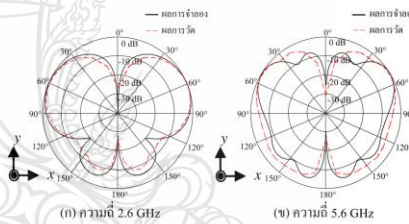


รูปที่ 7 การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์บนตัววัดกับการจำลองแบบกับการวัด

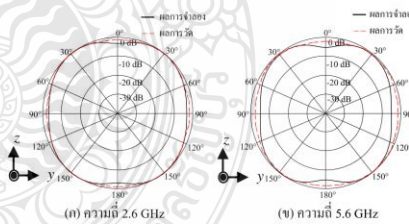
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์บนตัววัดและอัตราขยาย

สายอากาศ	f_r (GHz)	S_{11} (dB)	Bandwidth (GHz)	Gain (dBi)
ผลการจำลอง	2.57	-18.24	2.39 – 2.75	3.98
จำลองแบบ	5.42	-31.61	4.98 – 5.86	5.57
ผลการวัดจริง	2.56	-18.96	2.39 – 2.74	3.54
วัดจริง	5.71	-29.09	4.55 – 6.22	5.12

การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานจากการจำลองแบบและการวัด ในช่วงความถี่ใช้งานที่ 2.60 GHz และ 5.60 GHz ในระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็กแสดงดังรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ ผลจากการเปรียบเทียบพบว่ามีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอนทิศทางที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 8 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 9 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

การนำสายอากาศไปทดสอบใช้งานในระบบ WLAN ร่วมกับอุปกรณ์ Access Point รุ่น TP-Link AX1800 ซึ่งใช้เป็นตัวส่งสัญญาณ โดยทดสอบในย่านความถี่ต่ำ 2.45 GHz และความถี่สูง 5.80 GHz พบว่าการรับสัญญาณด้วยสายอากาศต้นแบบที่ระยะทางไกลที่สุดแบบมีสิ่งกีดขวางคือระยะทาง 70 เมตร และแบบไม่มีสิ่งกีดขวางคือระยะทาง 200 เมตร



4. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างสายอากาศที่รองรับการใช้งานแบบ 2 ย่านความถี่ โดยเริ่มต้นเลือกออกแบบสายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.60 GHz นำมาศึกษาพร้อมกับการปรับเพิ่มโหลดแบบแผ่นสกริปที่เปลี่ยนบริเวณด้านข้างซ้าย-ขวาตำแหน่งตรงกลางของตัวแผ่นพลังงานที่ส่งผลให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ย่านความถี่สูง 5.60 GHz เพิ่มขึ้น สามารถตอบสนองย่านความถี่แถบคู่ตามมาตรฐาน จากผลการวัดพบว่าพบว่า มีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่ต่ำกว่าที่ร้อยละ 13.64 (2.39 – 2.74 GHz) และค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ช่วงความถี่สูงต่ำกว่าร้อยละ 31.01 (4.55 – 6.22 GHz) โดยมีอัตราขยายเท่ากับ 3.54 dBi และ 5.12 dBi ตามลำดับ สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวทั้ง 2 ช่วงความถี่ที่ต้องการและมีข้อดีในด้านการผลิตความซับซ้อนของโครงสร้างสายอากาศได้จริง ครอบคลุมย่านความถี่ในระบบ WLAN และ 5G ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b/g/n (2.40 – 2.48 GHz), IEEE 802.11a (5.15 – 5.35 GHz), IEEE 802.11ac (5.725 – 5.825 GHz) และ LTE band 41 (2.496 – 2.690 GHz) เมื่อนำไปทดลองใช้งานจริงร่วมกับอุปกรณ์ Access Point รุ่น TP-Link AX1800 ทดสอบที่ย่านความถี่ต่ำ 2.40 GHz และย่านความถี่สูง 5.80 GHz สามารถรับ-ส่งสัญญาณได้ในระยะทางใช้งานจริงตามที่ต้องการ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้งานด้านโปรแกรมจำลองแบบ และสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการทดสอบวัดสายอากาศ

เอกสารอ้างอิง

[1] Jing-Feng Ke, Min Chou, Zhi Chao Zhang and Wen-Jiao Liao, "A Dual-Band WLAN Antenna Design for Placement in Hinges of Convertible Notebooks," Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), 2019.

[2] Zhen Yu, Jianguo Yu, Chenhua Zhu, Zhengyi Yang, "An Improved Koch Snowflake Fractal Broadband Antenna for Wireless Applications," Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing), 2017.

[3] Roja Vadlamudi, Sriam Kumar D., "Dual Band, Dual Slant $\pm 45^\circ$ Polarized 2 \times 2 MIMO (8T 8R) Antenna Array with Low Mutual Coupling for A-LTE(4G) Band 41/42/43(5G) BTS Application," Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET), pp. 97 – 101, 2020.

[4] Balanis C. A., (1997) Antenna Theory, John Wiley & Sons, Inc, 1997.

[5] Jou, C. F., Wu, J. W., & Wang, C. J., "Novel broadband monopole antennas with dual-band circular polarization," IEEE transactions on antennas and propagation, vol. 57, no. 4, pp. 1027-1034, 2009.

[6] Ajay Dadhich1, J. K. Deegwal, M. M. Shama, "A Compact Design of Multiband Microstrip Monopole Antenna for WLAN/WiMAX Applications," Test Engineering and Management, vol. 83, pp. 28622 – 28630, 2020.

[7] Krishan Pratap Singh, Dr. Chandan and Gagandeep Bharti., "A Compact Tri Band Monopole Antenna with L Stub for WLAN/WiMAX Applications," Power, Energy and Controls with their impact on Humanity (CIPECH), pp. 249 – 253, 2018.

[8] Akansha Yadav, Dr.Sudhanshu Verma., "Compact Monopole Antenna with Modified Triangular Shape for WLAN, WiMAX and Wi-Fi Applications" International Conference for Convergence in Technology (I2CT), 2019.

[9] วัชรพล นาคทอง, อำนวย เรืองวารี, อภิญา อินทร์นอก และสุภาวณิ กรสิงห์, "สายอากาศโมโนโพลระนาบร่วมรูปกล่องโดยใช้วัสดุฐานรองโพลิเอสเตอร์ สำหรับประยุกต์ใช้งาน ย่านความถี่แถบกว้าง," Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017), 2017.

[10] Ruengwaree, A., Naktong, W., & Namsang, A., "A TE-shaped Monopole Antenna with Semicircle Etching Technique on ground plane for UWB Applications," In 2013 Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation, vol. 1, pp. 95 – 98, 2013.



กฤษฎะ นิลวิภา กำลังศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2560 งานวิจัยที่สนใจ Antenna Design



วัชรพล นาคทอง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจ Antenna Design



สุวัฒน์ สุกตชาติ ปัจจุบันกำลังศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจ Antenna Design



อำนวย เรืองวารี สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาเอก จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีเมื่อปี พ.ศ. 2551 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจ Ultra Wideband Radar System, Ultra-Fast Electrical Pulse Generator, Antenna Design

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ที่ 2

- [2] กฤษณะ นิลวิเวก สุวัฒน์ สกุลชาติ วัชรพล นาคทอง และ อำนวย เรืองวารี “สายอากาศโมโนโพล รูปตัวทีที่ใช้เทคนิคการเพิ่มสัดับรูปตัวไอคู่สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบ 4G/5G” การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 12, 20 สิงหาคม 2564 ณ โรงแรมดิอิมพีเรียล โฮเทล แอนด์ คอนเวนชั่น เซ็นเตอร์โคราช อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา





หนังสือรวมบทความ
การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี
และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 12 ประจำปี 2564

วันที่ 20 สิงหาคม 2564

โดย คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ESTACON 12th

The 12th Engineering, Science, Technology and Architecture Conference 2021 (ESTACON 2021)

วิศวกรรมในอนาคตสู่ชีวิตปกติวิถีใหม่หลังโรคระบาดใหญ่
(Engineering in the Future under the New Normal after PANDEMIC)



สารบัญ

เรื่อง	หน้า
คำนิยม	ก
สารจากอธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	ข
สารจากคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	ค
สารจากคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น	ง
สารจากคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	จ
สารจากคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล	ฉ
สารจากคณบดีคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา	ช
สารจากคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์	ช
สารจากคณบดีคณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	ฎ
วิทยากรบรรยายพิเศษ รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิจัย	ฎ
คณะกรรมการดำเนินการประชุมวิชาการ	ฏ
กำหนดการประชุมวิชาการ ESTACON 2021	ฒ
ตารางการนำเสนอบทความ ESTACON 2021	ณ
กำหนดการนำเสนอผลงานวิจัยแยกตาม Session	ด
ประวัติและผลงานวิทยากรบรรยายพิเศษ	ต
บทความวิจัยกลุ่มวิศวกรรมไฟฟ้า	
EE001 โปรแกรม PVxel สำหรับการประมาณการออกแบบระบบโซลาร์แบบแยกอิสระและแบบผสม	1
EE002 เครื่องแกะสลักเลเซอร์ขนาดเล็ก 2 แกน ควบคุมการทำงานด้วย GRBL Controller Board	6
EE003 เครื่องรดน้ำต้นหอมแบ่งด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์อาคิโน	12
EE004 เครื่องพลิกกลับเมล็ดข้าวอัตโนมัติ	18
EE005 เครื่องคัดแยกขนาดและสีของมะนาวระบบกึ่งอัตโนมัติ	23
EE006 เครื่องควบคุมแสง LED RGB สำหรับการเพาะปลูกผัก	28
EE007 เครื่องควบคุมแผงโซลาร์เซลล์ตามทิศทางแสงอาทิตย์อัตโนมัติ	34
EE008 เครื่องรอกข้าวสารกึ่งอัตโนมัติ	39
EE009 สายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้วยเทคนิคการเจาะร่องและแผ่นสะท้อนสำหรับใช้งานในระบบ WLAN/WIMAX และ UWB	44
EE010 สายอากาศโมโนโพลรูปตัวทีที่ใช้เทคนิคการเพิ่มสลับรูปตัวไอคู่สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบ 4G/5G	50

สายอากาศโมโนโพลรูปร่างตัว T ที่ใช้เทคนิคการเพิ่มสัดปรับรูปตัวโอคู่สำหรับประยุกต์ใช้งาน ในระบบ 4G/5G

Studies of T-Shape Monopole Antenna with Dual I-Shape Stub Tuning Technique for 4G/5G

กฤษณะ นิลวิเวก¹ สุวัฒน์ สกุลชาติ¹ วิชพล นาคทอง² และ อำนวย เรืองวารี¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

² ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
744 ถ.สุรนารายณ์ ต.โนนเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

*ผู้ติดต่อ E-mail : kritsana_n@mail.mut.ac.th, amnoy.r@en.mut.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศโมโนโพลรูปร่างตัว T โดยใช้เทคนิคการปรับจูนเพิ่มสัดปรับรูปตัวโอ
แนวอนที่ด้านบนทั้ง 2 ด้านของตัวสายอากาศพื้นฐาน เพื่อให้ช่วงความถี่ใช้งานกว้างมากยิ่งขึ้น ซึ่งสายอากาศมีขนาด
105 x 60 มม. โดยโครงสร้างสายอากาศถูกสร้างขึ้นวัสดุฐานรองชนิดแผ่นฟิล์มไมลาร์โพลีเอสเตอร์ ที่มีค่าไดอิเล็กตริก 3.2
และมีค่าความหนา 0.3 มม. ผลที่ได้จากการวัดของสายอากาศใกล้เคียงกับผลการจำลองแบบ โดยมีช่วงความถี่ 58.89%
(2.18 – 4.00 GHz) ซึ่งครอบคลุมการใช้งานตามมาตรฐานในระบบ 4G IEEE 802.11b/g/n 2.45 GHz (2.4 – 2.48 GHz)
IEEE 802.16e 3.5 GHz (3.40 – 3.69 GHz) และระบบ 5G IEEE 802.11b/g/n 2.50 GHz (2.4 – 2.69 GHz) โดย
โครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง และมีอัตราขยายเฉลี่ย 4.81 dBi

คำสำคัญ: รูปร่างตัว T สัดปรับรูปตัวโอ ไมลาร์โพลีเอสเตอร์ ระบบ 5G

Abstract

This research presents the design of a T-shape monopole antenna which uses the tuning technique with
horizontal I-shape stub on the top of both sides of a basic antenna to enhance the frequency range more widely. The
antenna size is 105 x 60 mm and the antenna structure is fabricated on a mylar polyester film substrate which has a
dielectric of 3.2 and a thickness of 0.3 mm. The measurement results of the antenna are near to the simulation results.
It has a frequency range of 58.89% (2.18 – 4.00 GHz) which covers the standard frequency in 4G IEEE 802.11b/g/n 2.45
GHz (2.4 – 2.48 GHz), IEEE 802.16e, 3.5 GHz (3.40 – 3.69 GHz), and 5G systems IEEE 802.11b/g/n 2.50 GHz (2.4 – 2.69 GHz).
The proposed antenna is an omnidirectional pattern and an average gain of 4.81 dBi.

Keywords: T-shape, Stub, Mylar polyester, 5G

1. บทนำ

สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในด้านการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย โดยนิยมนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งปัจจุบันได้ถูกพัฒนาให้นำไปใช้งานในระบบ Wi-Fi ในระบบ 4G ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b/g/n 2.45 GHz (2.4 – 2.48 GHz) IEEE 802.16e 3.5 GHz (3.40 – 3.69 GHz) และระบบ 5G ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b/g/n 2.50 GHz (2.4 – 2.69 GHz) [1-3] นักวิจัยจำนวนมากได้ออกแบบและพัฒนาโครงสร้างสายอากาศให้สามารถใช้งานได้ทั้งระบบ 4G และระบบ 5G แต่ก็มีข้อเสียในด้านโครงสร้างที่มีความซับซ้อน มีจุดปรับจูนโครงสร้างเป็นจำนวนมาก [4-7]

จากที่กล่าวมาข้างต้นผู้วิจัยจึงได้ศึกษาพัฒนาโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปตัวโอพื้นฐาน [8-9] มีการเพิ่มสลับรูปตัวโอแนวนอนที่ด้านบนของสายอากาศทั้ง 2 ด้าน [10-14] เพื่อให้สายอากาศครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งานดังกล่าว โดยใช้โปรแกรม Computer Science Technology (CST) และใช้เทคนิคการปรับจูนเพิ่มสลับรูปตัวโอแนวนอนทั้ง 2 ด้าน เพื่อช่วยลดความซับซ้อนของสายอากาศ โดยขั้นตอนการปรับจูนนั้นจะถูกนำเสนอในหัวข้อต่อไป

2. การออกแบบและผลการจำลองแบบ

การออกแบบโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปตัวโอ [8-9] ซึ่งปรับจูนโดยใช้โปรแกรม CST ทำการออกแบบที่ความถี่เริ่มต้น 2.45 GHz [5] โดยความหนาของวัสดุฐานรอง h เท่ากับ 0.3 มม. ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ϵ_r เท่ากับ 3.2 ค่าความหนาของวัสดุตัวนำทองแดง t เท่ากับ 0.05 มม. ดังรูปที่ 1

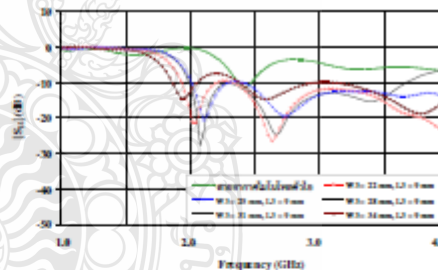


รูปที่ 1 สายอากาศต้นแบบ

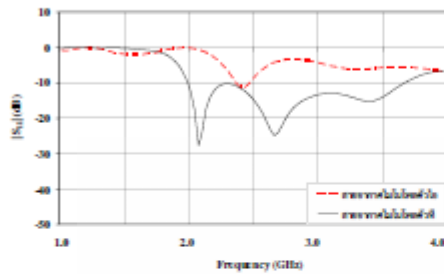
ในขั้นตอนที่สองปรับจูนเพิ่มสลับรูปตัวโอแนวนอนทั้ง 2 ด้าน ที่ด้านบนของตัวแม่เหล็กงาน ดังรูปที่ 2 ซึ่งมีข้อดีคือช่วยเพิ่มช่วงความถี่ใช้งานให้กว้างมากขึ้น [5] ด้วยการเลือกปรับค่าพารามิเตอร์โดยปรับความกว้าง W_3 ตั้งแต่ 22, 25, 28, 31 และ 34 มม. และคงความยาว L_3 ให้มีค่าเท่ากับ 9 มม. โดยพบว่าที่ความกว้าง W_3 เท่ากับ 28 มม. เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด มีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ 60.59% (1.99 – 3.72 GHz) ดังรูปที่ 3 ซึ่งมากกว่าโครงสร้างสายอากาศต้นแบบ 4.53% (2.37 – 2.48 GHz) จากการเปรียบเทียบผลดังรูปที่ 4 มีค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของสายอากาศดังรูปที่ 5 และตารางที่ 1



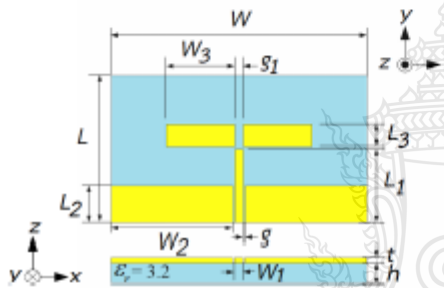
รูปที่ 2 การปรับจูนโครงสร้างสายอากาศต้นแบบ



รูปที่ 3 ผลการจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เมื่อปรับ W_3 และ L_3



รูปที่ 4 ผลการเปรียบเทียบการจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ สายอากาศพื้นฐานกับสายอากาศที่ปรับปรุง



รูปที่ 5 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลต้นแบบ

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

ขนาดความกว้าง		ขนาดความยาว	
ตัวแปร	ขนาด (มม.)	ตัวแปร	ขนาด (มม.)
W	105	L	60
W_1	3.2	L_1	30
W_2	50.5	L_2	15
W_3	28	L_3	9
g	0.3	t	0.05
ϵ_r	3.2	h	0.3

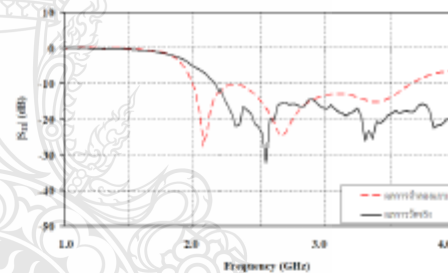
3. การสร้างและผลการวัด

การสร้างสายอากาศตามขนาดของค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 1 ซึ่งจะได้สายอากาศโมโนโพลต้นแบบดังรูปที่ 6 จากนั้นทำการวัดผลด้วยเครื่องวิเคราะห์

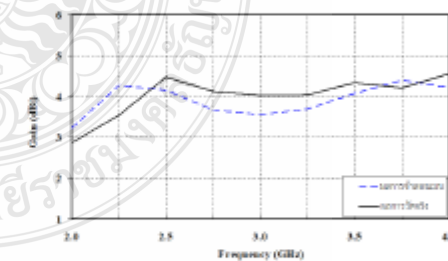
โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น E5071C โดยจากผลการวัดนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบพบว่าสายอากาศต้นแบบมีช่วงความถี่ใช้งาน 58.89% (2.18 – 4.00 GHz) ดังรูปที่ 7 และมีค่าอัตราขยาย (Gain) เฉลี่ย 4.81 dBi ดังรูปที่ 8 และตารางที่ 2 ซึ่งในส่วนของการเปรียบเทียบช่วงความถี่และอัตราขยายนั้น พบว่าได้ผลที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 6 สายอากาศโมโนโพลรูปตัวที



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบช่วงความถี่ใช้งานของผลการจำลองแบบและผลการวัดจริง

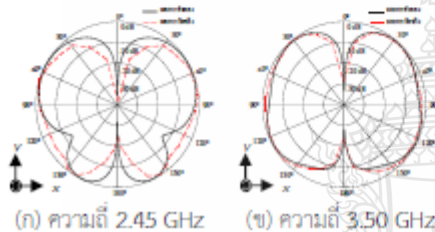


รูปที่ 8 การเปรียบเทียบค่าอัตราขยาย (dBi)

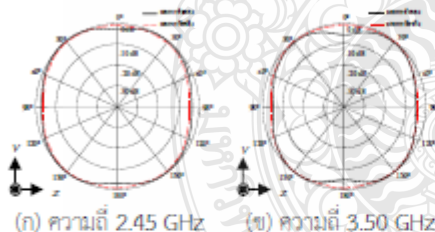
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบแบนด์วิดท์และอัตราขยาย

สายอากาศ	แบนด์วิดท์ (GHz)	อัตราขยาย (dBi)
ผลการจำลองแบบ	60.59% (1.99 – 3.72)	4.96
ผลการวัดจริง	58.89% (2.18 – 4.00)	4.81

การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและผลการวัดจริงของแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามไฟฟ้าตั้งรูปที่ 9 และระนาบสนามแม่เหล็กตั้งรูปที่ 10 ในช่วงความถี่ที่ใช้งาน 2.45GHz และ 3.50 GHz พบว่ามีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทางที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

ในส่วนของการนำสายอากาศไปทดสอบใช้งานในระบบ 4G กับอุปกรณ์ Access Point รุ่น TP-Link WDR7400 โดยทดสอบในย่านความถี่ต่ำ 2.45 GHz พบว่าการรับส่งสัญญาณที่ระยะดีที่สุดในแบบ non-line-of-sight-wireless ระยะ 50 เมตร และแบบ

line-of-sight-wireless ระยะ 150 เมตร โดยแสดงผลการวัดกำลังงานดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การวัดกำลังงานของสัญญาณ

ระยะทางในการวัดกำลังงานสัญญาณ	non-line-of-sight-wireless	line-of-sight-wireless
5 m	-21 dBm	-21 dBm
10 m	-35 dBm	-32 dBm
50 m	-65 dBm	-55 dBm
100 m	-	-71 dBm
150 m	-	-86 dBm
200 m	-	-89 dBm

4. สรุป

จากการออกแบบโครงสร้างสายอากาศ โมโนโพลรูปตัวที โดยใช้เทคนิคการปรับจูนลวดรูปตัวโอแนวมอนที่ด้านบนทั้ง 2 ด้านของตัวแผ่พลังงานทำให้ได้ย่านความถี่เพิ่มมากขึ้นร้อยละ 58.89% (2.18 – 4.00 GHz) ซึ่งมากกว่าร้อยละ 92.30% จากโครงสร้างสายอากาศพื้นฐานรูปตัวโอ 4.53% (2.37 – 2.48GHz) ซึ่งครอบคลุมมาตรฐาน IEEE 802.11b/g/n 2.45 GHz (2.4 – 2.48 GHz) IEEE 802.16e 3.5 GHz (3.40 – 3.69 GHz) และระบบ 5G IEEE 802.11b/g/n 2.50 GHz (2.4 – 2.69 GHz) โดยสายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางและมีอัตราขยายเฉลี่ย 4.81 dBi และเมื่อนำไปใช้งานจริงร่วมกับอุปกรณ์ Access Point รุ่น TP-Link WDR7400 ทดสอบที่ย่านความถี่ต่ำ 2.45 GHz สามารถรับ-ส่งสัญญาณได้ในระยะทางตามที่ต้องการจริง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้งานด้านโปรแกรม CST และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาปัตยกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายในการทดลองและวัดผลงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ban Y. L., Li C., Wu G. and Wong K. L. (2016). 4G/5G multiple antennas for future multi-mode smartphone applications. *IEEE access*, 4, pp. 2981 – 2988.
- [2] Li, Y., Luo, Y., & Yang, G. (2017). 12-port 5G massive MIMO antenna array in sub-6GHz mobile handset for LTE bands 42/ 43/ 46 applications. *IEEE access*, 6, 344-354.
- [3] Wong, K. L., Lin, B. W., & Li, B. W. Y. (2017). Dual-band dual inverted-F/loop antennas as a compact decoupled building block for forming eight 3.5/5.8-GHz MIMO antennas in the future smartphone. *Microwave and Optical Technology Letters*, 59(11), 2715-2721.
- [4] BAN, Y. L., LI, C., CHOW-YEN-DESMOND, S. I. M., WU, G., & WONG, K. L. 4G/5G Multiple Antennas for Future Multi-Mode Smartphone Applications.
- [5] Yassin, M. E., Mohamed, H. A., Abdallah, E. A., & El-Hennawy, H. S. (2019). Single-fed 4G/5G multiband 2.4/ 5.5/ 28 GHz antenna. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 13(3), 286-290.
- [6] Yang, M., Sun, Y., & Li, F. (2019). A compact wideband printed antenna for 4G/5G/WLAN wireless applications. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2019.
- [7] Khalifa, M., Khashan, L., Badawy, H., & Ibrahim, F. (2020). Broadband printed-dipole antenna for 4G/5G smartphones. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1447, No. 1, p. 012049). IOP Publishing.
- [8] Phummiphak, P., Deekaikam, A., & Naktong, W. (2019, March). The Development of Dual-Band Antenna for Applying MIMO Systems. In 2019 7th International Electrical Engineering Congress (IEECON) (pp. 1-4). IEEE.
- [9] Balanis C. A., (1997) *Antenna Theory*, John Wiley & Sons, Inc, 1997.
- [10] Yang M., Su Y. and Li F. (2019). A compact wideband printed antenna for 4G/5G/WLAN wireless applications. *International Journal of Antennas and Propagation*.
- [11] Mao Y., Guo S., and Chen M. (2018). Compact dual-band monopole antenna with defected ground plane for Internet of things. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 12 (8), pp. 1332 – 1338.
- [12] Wang, Y. Y., Ban, Y. L., & Liu, Y. (2019). Sub-6GHz 4G/5G conformal glasses antennas. *IEEE Access*, 7, 182027-182036.
- [13] Masoodi, I. S., Ishteyaq, I., Muzaffar, K., & Magray, M. I. (2020). Low cost substrate based compact antennas for 4g/5g side-edge panel smartphone applications. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 91, 145-152.
- [14] Singh, H., Sohi, B. S., & Gupta, A. (2020). Designing and performance evaluation of metamaterial inspired antenna for 4G and 5G applications. *International Journal of Electronics*, 1-23.

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ที่ 3

- [3] วัชรพล นาคทอง ธีชชัย พุ่มพวง กชิตติศ กกขุนทด กฤษณะ นิลวิเวก และอำนวยการ เรืองวารี “สายอากาศไดโพลรูปตะขอสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่านความถี่คู่สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบ GSM/WLAN” การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 9 วันที่ 7 กันยายน 2561 ณ อาคาร 50 ปี เทคนิคไทย-เยอรมัน ขอนแก่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น





บทความฉบับเต็ม

**การประชุมวิชาการ
วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี
และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 9**

The 9th Engineering Science Technology and Architecture Conference 2018

**9th EST
CON 2018**

**เทคโนโลยีและนวัตกรรม เพื่ออุตสาหกรรมแห่งอนาคต
Technology and Innovation for Future Industry**

7 กันยายน 2561



ณ อาคาร 50 ปี เทคนิค ไทย-เยอรมัน ขอนแก่น
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น



<input type="checkbox"/>	EE195 ระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในสภาวะที่กระแสและแรงดันไฟฟ้าผิดปกติ	268
<input type="checkbox"/>	EE240 โรงเรือนเปิดดอกเห็ดอีแวปแบบมินิพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับชุมชน	272
<input type="checkbox"/>	EE242 การทดสอบบล็อกเซนแพลตฟอร์มสำหรับระบบงานลูกค้ำสัมพันธ์	276
<input type="checkbox"/>	EE273 การพัฒนาหม้อแปลงกระแสสำหรับวัดค่ากระแสความถี่สูงในวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย	282
<input type="checkbox"/>	EE277 การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์กู้ภัยแบบไร้สายที่ควบคุมด้วยระบบเครือข่ายไร้สายแบบInfrastructure เพื่อใช้ในการแข่งขัน	290
<input type="checkbox"/>	EE285 การศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจวัดคุณภาพน้ำด้วยการอ่านค่าความนำไฟฟ้าด้วยตัวตรวจวัดแบบอนาล็อกสื่อสารผ่านระบบ IoT	297
<input type="checkbox"/>	EE287 การออกแบบและสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบอัตโนมัติ 2 แกนสำหรับแผงโซลาร์เซลล์ ที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์	301
<input type="checkbox"/>	EE310 การพัฒนาโรงเรือนปลูกพืชอัจฉริยะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเพาะปลูกแดงเทศ	307
<input type="checkbox"/>	EE339 สายอากาศแพทช์ไมโครสตริปสี่เหลี่ยมสองย่านความถี่โพลาริซ์แบบวงกลม กับเทคนิคโพลีกรองรูปตัววีสำหรับระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย	
บทความวิจัยภาคโปสเตอร์ กลุ่มวิศวกรรมไฟฟ้า		
<input type="checkbox"/>	EE010 ชุดสื่อการสอนวงจรทวีแรงดันชนิดคอคครอยต์-วอลตันสองขั้ว	313
<input type="checkbox"/>	EE014 การศึกษาการประยุกต์ใช้งานโรงไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงในระบบไฟฟ้ากำลัง	319
<input type="checkbox"/>	EE020 การศึกษาเชิงวิเคราะห์อาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดแอลอีดี	327
<input type="checkbox"/>	EE021 ระบบติดตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคการรบกวนและสังเกต	332
<input type="checkbox"/>	EE029 การแยกแยะเสียงที่ถูกเล่นซ้ำโดยใช้การผสมผสานผลการทำนายของ GMM และ SVM	338
<input type="checkbox"/>	EE047 ระบบเรียนรู้อักขระเบรลล์ด้วยตนเองพร้อมโหมดแบบทดสอบอัตโนมัติ	343
<input type="checkbox"/>	EE048 ตัวดูดซับคลื่นไมโครเวฟชนิดแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีสองย่านความถี่ใกล้เคียงกัน โดยใช้เทคนิคแผ่นสตริปเหนี่ยวนำแม่เหล็กและสลับปรับจูน	347
<input type="checkbox"/>	EE070 สายอากาศไมโนโพลสำหรับประยุกต์ใช้งานย่านแถบกว้างมากยิ่งขึ้น	352
<input type="checkbox"/>	EE072 รถเข็นผู้ป่วยอัตโนมัติเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย	358
<input type="checkbox"/>	EE108 สายอากาศโคโพลีรูปตะขอสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่านความถี่คู่สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบ GSM/WLAN	366
<input type="checkbox"/>	EE109 การศึกษาและพัฒนาาระบบการกักเก็บพลังงานจากคลื่นความถี่	371
<input type="checkbox"/>	EE124 การศึกษาและออกแบบสายอากาศวงแหวนสองทิศทางแถบความถี่กว้างยิ่ง กระตุ้น	376

สายอากาศไดโพลรูปตะขอสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่านความถี่คู่สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบ GSM/WLAN

Dual-Band Hook-Rectangular Shape Monopole Antenna for GSM/WLAN Application

วัชรพล นาคทอง^{1*} อิชชัย พุ่มพวง¹ กชิตติศ กกขุนทด¹ กฤษณะ นิลวิเวก² และ อำนวย เรืองวารี²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

*E-mail: watcharaphon.na@rmutt.ac.th โทรศัพท์: 044-233000 ต่อ 3140-5

²ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
E-mail: amnoiy.r@rmutt.ac.th โทรศัพท์: 0-2549-4620

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศไดโพลรูปตะขอสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่านความถี่คู่สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านระบบ GSM และ WLAN จำลองผลบนโปรแกรม CST โดยสายอากาศที่ออกแบบสร้างบนแผ่นแผ่นฟิล์มโพลีเอสเตอร์ ที่มีค่าไดอิเล็กตริก (ϵ_r) เท่ากับ 3.2 และมีค่าความหนา (h) เท่ากับ 0.3 mm. ซึ่งสายอากาศมีขนาดเท่ากับ 61.2 มม. x 127.4 มม. โดยมีการเพิ่มสลับปรับจูนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อช่วยเพิ่มช่วงความถี่ใช้งานและอัตราขยาย จากผลการจำลองแบบพบว่าค่าความถี่ใช้งานมีค่าเท่ากับ 24.27% (0.76 – 0.97 GHz) และ 53.77% (1.89 - 3.28 GHz) มีค่าอัตราขยาย 1.484 dBi and 4.813 dBi. โดยทิศทางการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทาง

คำหลัก: สายอากาศไดโพล, รูปตะขอสี่เหลี่ยมผืนผ้า, ความถี่คู่, อัตราขยาย

Abstract

This research presents the design of spur-rectangular shape monopole antenna for support GSM system and WLAN application which is using CST program for simulate results. The antenna was make-up on polyester film with the dielectric constant (ϵ_r) = 3.2 and thickness (h) = 0.3 mm. The prototype antenna was the dimension of 61.2 mm. x 127.4 mm. with spur-rectangular plate at center on patch and tuning matching impedance both sides on polyester film structure for expand on frequency bandwidth and gain. The Simulation of results of the antenna have the resonance frequencies of 24.27% (0.76 – 0.97 GHz) and 53.77% (1.89 - 3.28 GHz), the gains are between 1.484 dBi and 4.813 dBi. The radiation pattern of the proposed antenna is omni-directional pattern.

Keywords: monopole antenna, Hook-shape, Dual-Band, Gain

1. บทนำ

ระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย (Wireless Local Area Network) ได้ถูกนิยมนำมาใช้งานทั่วโลก นำมาส่งสัญญาณในทางด้านธุรกิจหรือหน่วยงานราชการต่าง ๆ และซึ่งระบบสื่อสารนั้น ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเดินทางลดเวลาการติดต่อสัญญาณทำให้รวดเร็ว สะดวกสบายมากยิ่งขึ้น โดยเครื่องที่ใช้นั้นจะถูกนิยม

ติดต่อสื่อสารด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ มือถือ แท็บเล็ต และไอแพด เป็นต้น แต่ยังมีอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการติดต่อสื่อสารคือ สายอากาศสำหรับรับส่งข้อมูลสื่อสารไร้สาย [1-3] จึงมีการพัฒนาโครงสร้างสายอากาศกันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะนิยมปรับจูนโครงสร้างเพื่อทำให้ตอบสนองช่วงความถี่ตาม GSM (0.9 GHz) DCS (1.72-1.88 GHz) PCS (1.85 - 1.99 GHz) IMT- 2000 (1.92 - 2.17 GHz)

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 9

วันที่ 7 กันยายน 2561 ณ อาคาร 50 ปี เทคนิคไทย-เยอรมัน ขอนแก่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

และ Wireless Fidelity (WiFi) IEEE 802.11 2.4 GHz (2.4 - 2.48 GHz) เป็นต้น

จากการที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น ผู้วิจัยสนใจศึกษาใช้โครงสร้างสายอากาศโมโนโพล ที่มีรูปแบบที่ปรับเปลี่ยนง่ายโดยใช้เทคนิคการเพิ่มสลับ [4-7] และมีฐานรองวัสดุแผ่นฟิล์มไม่ล้าโรสโอสเตอร์ เพื่อสามารถประกอบร่วมกับเครื่องมือสื่อสารความถี่สูงที่มีขนาดบางน้ำหนักเบา โดยโครงสร้างสายอากาศจะจำลองบนโปรแกรม CST เพื่อหาค่าเพิ่มอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ใช้งานและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของตัวสายอากาศต้นแบบ โดยจะอธิบายในเนื้อหาของงานวิจัยต่อไป

2. การออกแบบและการจำลองแบบสายอากาศ

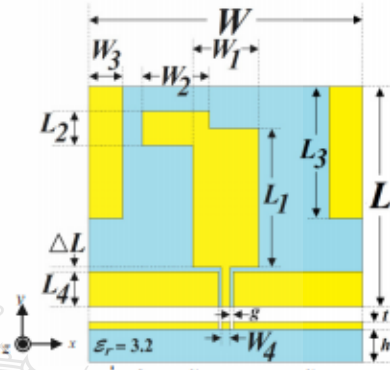
2.1 การออกแบบโครงสร้างของสายอากาศ

การออกแบบโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าพื้นฐาน ดังรูปที่ 1(ก) เลือกใช้โลหะทองแดงที่มีค่าความนำของวัสดุตัวนำทองแดง $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ และค่าความหนาของแผ่นทองแดง $t = 0.01 \text{ มม.}$ ซึ่งการออกแบบสายอากาศที่ความถี่ $f = 2.45 \text{ GHz}$ ในส่วนของฐานรองเลือกใช้วัสดุแผ่นฟิล์มไม่ล้าโรสโอสเตอร์ [7-9] ที่มีคุณสมบัติของค่าไดอิเล็กตริก $\epsilon_r = 3.2$ ความหนาของวัสดุตัวนำ $h = 0.3 \text{ มม.}$ โดยโครงสร้างสายอากาศจะมีขั้นตอนการปรับจูนหลักโดยการเพิ่มสลับ 2 ส่วนคือ ที่ด้านบนสายอากาศและด้านข้างของสายอากาศดังรูปที่ 1 เพื่อเพิ่มช่วงความถี่ใช้งานและเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศ และในส่วนของกาอธิบายผลการปรับจูนจะถูกอธิบายในส่วนต่อไป



รูปที่ 1 การปรับจูนโครงสร้างสายอากาศ

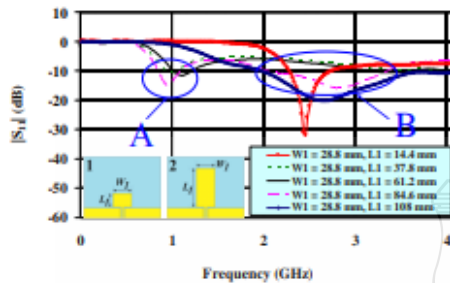
จากการแสดงขั้นตอนการปรับจูนโครงสร้างสายอากาศจนได้สายอากาศต้นแบบ มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยการปรับจูนได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด คือ ความกว้าง $W = 127.425 \text{ มม.}$, $W_1 = 28.8 \text{ มม.}$, $W_2 = 61.2 \text{ มม.}$, $W_3 = 15.3 \text{ มม.}$, $W_4 = 3.825 \text{ มม.}$ และความยาว $L = 100 \text{ มม.}$



รูปที่ 2 โครงสร้างสายอากาศต้นแบบ

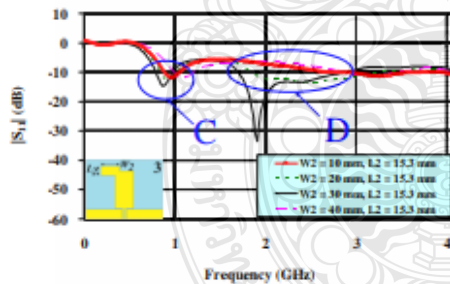
2.2 การจำลองแบบสายอากาศ

โดยการออกแบบโครงสร้างสายอากาศมีขั้นตอนปรับจูนโครงสร้าง 3 ส่วนดังนี้ ส่วนที่หนึ่งทำการปรับเพิ่มขนาดของความยาวสายอากาศ ดังรูปที่ 1(ข) โดยค่าพารามิเตอร์ที่ทำการปรับคือ W_1 และ L_1 พบว่าเมื่อปรับค่าความกว้าง $W_1 = 28.8 \text{ มม.}$ และค่าความยาว L_1 ตั้งแต่ 14.4, 37.8, 61.2, 84.6 และ 108 มม. พบว่าได้ความถี่กว้าง 61.2 มม. ส่งผลให้ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับต่ำกว่า -10 dB มากขึ้น ที่ช่วงความถี่ 850MHz และช่วงความถี่ 2.45GHz ในจุดที่ A และ B รูปที่ 3 โดยมีแบนด์วิดท์ที่กว้างใช้งานอยู่ที่ความถี่เรโซแนนซ์ช่วงค่ามีค่าเท่ากับ 20.68% (0.91 - 1.12 GHz) และความถี่เรโซแนนซ์ช่วงสูงมีค่าเท่ากับ 45.18% (2.09 - 3.31 GHz) แต่ยังไม่ตอบสนองตรงตามที่ต้องการ



รูปที่ 3 ผลการจำลองแบบค่า $|S_{11}|$ (dB) เมื่อปรับ W_1 และ L_1

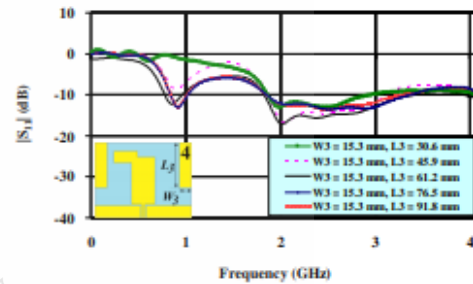
ส่วนที่สองทำการเพิ่มสัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ตัวต้านบนสายอากาศเพื่อเพิ่มความยาวให้กับสายอากาศดังรูปที่ 1 (ค) ทำให้ตอบสนองช่วงความถี่ 850 MHz ดีมากยิ่งขึ้น โดยค่าพารามิเตอร์ที่ทำการปรับคือ W_2 และ L_2 พบว่าเมื่อปรับค่าความกว้าง W_2 ตั้งแต่ 10, 20, 30 และ 40 มม. และค่าความยาว $L_2 = 15.3$ มม. พบว่าได้ความถี่กว้าง 30 มม. ส่งผลให้ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับต่ำกว่า -10 dB มากขึ้น ที่ช่วงความถี่ 850MHz และช่วงความถี่ 2.45GHz จุดที่ C และ D รูปที่ 5 โดยมีแบนด์วิดท์ใช้งานอยู่ที่ความถี่เรโซแนนซ์ช่วงต่ำมีค่าเท่ากับ 25.28% (0.76 - 0.98GHz) และความถี่เรโซแนนซ์ช่วงสูงมีค่าเท่ากับ 48.98 (1.68 - 2.77GHz) ตามที่ต้องการ



รูปที่ 4 ผลการจำลองแบบค่า $|S_{11}|$ (dB) เมื่อปรับ W_2 และ L_2

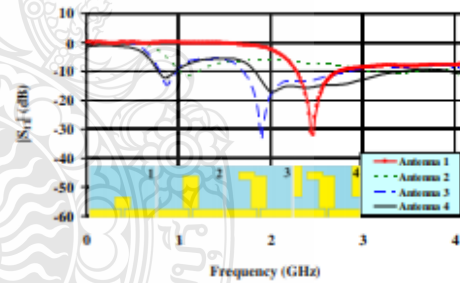
ส่วนที่สามทำการเพิ่มสัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเข้าที่ด้านข้างของสายอากาศบนแผ่นพีซีบีดังรูปที่ 1(ง) เพื่อนำมาเพิ่มอัตราการขยายให้กับช่วงความถี่ใช้งานในระบบมือถือและระบบ WiFi โดยค่าพารามิเตอร์ที่ทำการปรับคือ W_3 และ L_3 พบว่าเมื่อปรับค่าความกว้าง W_3 ตั้งแต่ 30.6,

45.9, 61.2, 76.5 และ 91.8 มม. พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดคือ ค่าความกว้าง 61.2 มม. และค่าความยาว $L_3 = 15.3$ มม. ช่วงทำให้ตอบสนองช่วงความถี่ใช้งาน โดยที่ช่วงความถี่เรโซแนนซ์ช่วงต่ำมีค่าเท่ากับ 24.27% (0.76 - 0.97GHz) และช่วงความถี่เรโซแนนซ์ช่วงสูงมีค่าเท่ากับ 53.77% (1.89 - 3.28GHz) ตามที่ต้องการ



รูปที่ 5 ผลการจำลองแบบค่า $|S_{11}|$ (dB) เมื่อปรับ W_3 และ L_3

จากการปรับจูนโครงสร้างสายอากาศที่ผ่านมานำโครงสร้างเปรียบเทียบเพื่อแสดงให้เห็นช่วงความถี่ใช้งานชัดเจนมากยิ่งขึ้นดังรูปที่ 6 และตารางที่ 1

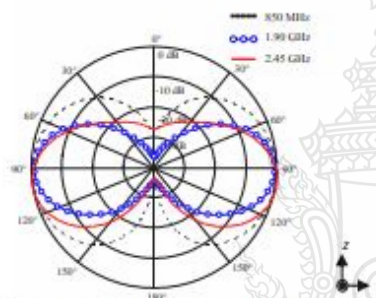


รูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบค่า $|S_{11}|$ (dB) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างสายอากาศทั้ง 3 ขั้นตอน

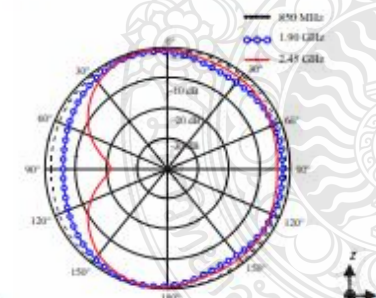
ตารางที่ 1 ผลการจำลองคุณสมบัติของสายอากาศต้นแบบ

Frequency (GHz)	VSWR	Gain ไม่มีตัว	Gain มีตัว	Z_{in} (Ω)
0.85	1.79:1	1.487 dBi	2.136 dBi	29.69 +j20.38
0.9	1.83:1	1.482 dBi	2.650 dBi	48.31 +j28.56
1.8	1.71:1	2.148 dBi	4.467 dBi	45.82 +j18.13
1.9	1.65:1	2.493 dBi	4.947 dBi	42.91 +j12.83
2.45	1.57:1	2.926 dBi	5.026 dBi	59.04 -j18.38

ส่วนสุดท้ายทำการวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) ของสายอากาศสร้างจริงและนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบโดยจะทำการวัดที่ความถี่ 850MHz, 1.9 GHz และ 2.45 GHz พบว่าสายอากาศมีการแผ่พลังงาน ในรูปแบบสนามไฟฟ้า (E-plane) ระนาบ x-z ดังรูปที่ 7 และรูปแบบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ระนาบ y-z ดังรูปที่ 8 โดยมีลักษณะการแผ่พลังงานที่ช่วงความถี่ต่ำ 850MHz ช่วงความถี่กลาง 1.9 GHz มีรูปแบบรอบทิศทาง และที่ช่วงความถี่สูง 2.45GHz มีรูปแบบสองทิศทาง เนื่องจากโครงสร้างสายอากาศตอบสนองต่อช่วงความถี่ต่ำและช่วงความถี่กลางได้ดีกว่าช่วงความถี่สูง



รูปที่ 7 แบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 850MHz, 1.9 GHz และ 2.45 GHz



รูปที่ 8 แบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 850MHz, 1.9 GHz และ 2.45 GHz

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอ การปรับปรุงโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลออกแบบเริ่มต้นที่ความถี่ 2.45GHz ร่วมกับการปรับเพิ่มสลับเพื่อเพิ่มช่วงความถี่ใช้งานมือถือ

และระบบ WiFi 2.45GHz และการเพิ่ม Gain ให้กับสายอากาศ โดยมีแบนด์วิดท์ที่กว้างใช้งานอยู่ที่ความถี่เรโซแนนซ์ช่วงต่ำมีค่าเท่ากับ 24.27%(0.76 - 0.97GHz) และความถี่ เรโซแนนซ์ช่วงสูงมีค่าเท่ากับ 53.77%(1.89 - 3.28GHz) ซึ่งจากการปรับเพิ่มสลับดังกล่าวช่วยให้สายอากาศทำช่วงความถี่ตาม GSM (0.9 GHz) DCS (1.72-1.88 GHz) PCS (1.85 - 1.99 GHz) IMT- 2000 (1.92 - 2.17 GHz)และ Wireless Fidelity (WiFi) IEEE 802.11 2.4 GHz (2.4 - 2.48 GHz) และด้าน Gain เพิ่ม 51% จากการปรับเพิ่มรูปตัวโอทั้งสองด้าน สายอากาศมีลักษณะการแผ่พลังงานแบบสองทิศทาง (Bidirectional) และโครงสร้างสายอากาศที่ได้นำเสนอนั้นมีข้อดีคือ โครงสร้างสายอากาศไม่ซับซ้อนและมีจุดปรับจูนน้อยกว่า

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้งานด้านโปรแกรม CST

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Kunturkar G. S. and Zade P. L., (2015). Design of Fork-shaped Multiband Monopole antenna using defected ground structure. *Communications and Signal Processing (ICCSP), 2015 International Conference on*, pp. 0281 - 0285, 2-4 April 2015.

[2] Sakulchat S. and Ruengwaree A., (2008). Dual Band Microstrip Antenna with Triangular Tuning Stub for WLAN Applications. *International Symposium on Antennas Propagation and EM Theory (ISAPE), China*, 2008, pp. 546-549.

[3] บิณฑ์ บุญไมตรี, วัชรพล นาคทอง, อภิญา อินทร์นอก และ อำนวย เรืองวารี (2559). สายอากาศวงแหวนที่มีการป้อนสัญญาณด้วยโพรบรูปร่างกลมสำหรับการประยุกต์ใช้งานการสื่อสารแบบไร้สาย. *การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 39 (EECON-39), เพชรบุรี, ประเทศไทย, 2-4 พฤศจิกายน 2559.*

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 9 วันที่ 7 กันยายน 2561 ณ อาคาร 50 ปี เทคนิคไทย-เยอรมัน ขอนแก่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

- [4] Boonmaitree P., Naktong W., Kornsing S. and Ruengwaree A. (2016). Rectangular Slot Antenna with Bobbin Shaped Stub Tuning for Wireless Communication Application. *13th International Conference on Electrical Engineering Electronics, Compute Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2016)*, Chiang Mai, Thailand, 28 June – 1 July 2016.
- [5] Chanramard S., Naktong W., Thongbor P. and Ruengwaree A., (2017). The Structure Tuning of Plugs-Shaped Monopole Antenna for Wireless Communication Applications. *International Symposium on Antennas Propagation (ISAP 2017)*, Phuket, Thailand, 30 October – 2 November 2017.
- [6] Kornsing S., Innok A., Naktong W. and Ruengwaree A., (2017). The Ring Antenna with Circular Probe Feeding for MIMO Systems. *International Symposium on Antennas Propagation (ISAP 2017)*, Phuket, Thailand, 30 October – 2 November 2017.
- [7] Naktong W., Ruengwaree A. and Kaewchan B. (2017) Development of Top-Shaped Planar monopole antenna on Polyester film material for wireless network. *Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)*, pp. 447-450, 2-4 May 2017.
- [8] Kai S., Takahashi M. (2016). Investigation of the Film Antenna for Wireless Power Transmission to the Capsular Endoscope. *Antennas and Propagation (ISAP), 2016 International Symposium on*, 24-28 October 2011.
- [9] Rammal M., Huitema, L., Crunteanu, A., Passerieux D., Cros D., Monediere T., Madrangeas V., Dutheil P., Champeaux C., Dumas-Bouchiat F., Marchet P., L., Trupina L., Banciu G. and Cernea M. (2016). BST thin film capacitors integrated within a frequency tunable antenna. *Antenna Technology (iWAT), 2016 International Workshop on* 29 Feb.-2 March 2016

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	กฤษณะ นิลวิเวก
วัน เดือน ปีเกิด	22 ตุลาคม 2535
ที่อยู่	83 ม.8 ต.แม่แฝกใหม่ อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์ (เชียงใหม่)
ประสบการณ์ทำงาน	วิศวกรโครงการควบคุมคุณภาพงานติดตั้งเครือข่ายโทรศัพท์ บริษัท ไทย ฟुरुคาวา ยูนิคอม เอ็นจีเนียริ่ง จำกัด พ.ศ. 2559 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	096-781-1555
อีเมล	kritsana_n@mail.rmutt.ac.th

