

ตัวสะท้อนผิวอภิวัดสองความถี่ โดยใช้เรโซเนเตอร์วงแหวน
ร่วมกับอินเตอร์ดิฟรอกาลาปาซีเตอร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

**A DUAL-BAND METASURFACE USING RING
RESONATOR WITH INTERDIGITAL CAPACITORS**



Kanthika Rakdanklang

**A Thesis submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of master of Engineering in Telecommunication Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2018

ตัวสะท้อนผิวอภิวัดสองความถี่ โดยใช้เรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับ
อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ศ. ดร. ประยูทธ อัครเอกผาลิน)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร. ปิยากรณ์ มีสวัสดิ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล)

กรรมการ



(ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ชกร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กัญจิกา รักด่านกลาง : ตัวสะท้อนผิวอภิวัดสองความถี่ โดยใช้เรโซเนเตอร์วงแหวน
ร่วมกับอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ (A DUAL-BAND METASURFACE USING RING
RESONATOR WITH INTERDIGITAL CAPACITORS) อาจารย์ที่ปรึกษา :
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์, 87 หน้า.

ในปัจจุบันการใช้งานระบบการสื่อสารไร้สายเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีการ
ใช้งานของผู้ให้บริการที่สูงขึ้น ทำให้ต้องการช่องสัญญาณและอัตราขยายของสายอากาศที่เพิ่มขึ้น
เพื่อรองรับการใช้งาน ซึ่งปัจจุบันมักจะพบกับปัญหาของการซ้อนทับกันของสัญญาณหรือรัศมีของ
การแพร่กระจายสัญญาณที่ไปได้ไม่ไกลมากนัก ซึ่งจะทำให้ผู้รับบริการได้รับการใช้งานจาก
สายอากาศอย่างไม่เต็มประสิทธิภาพ เช่น คุณภาพของสัญญาณไม่ดี อัตราการดาวน์โหลด-อัปโหลด
มีคุณภาพต่ำ การแก้ปัญหาดังกล่าวจึงนิยมออกแบบสายอากาศให้ทำงานได้หลายความถี่ และนำ
ตัวสะท้อน (Reflector) มาใช้งานร่วมกับสายอากาศเพื่อให้มีอัตราขยายที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม
ตัวสะท้อนมักมีขนาดใหญ่และสามารถรองรับได้เพียงความถี่เดียว ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงทำการ
ออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดที่มีขนาดเล็กเพื่อรองรับการใช้งานสองความถี่สำหรับระบบ
LTE (1.8GHz) และ WLAN (5.5GHz) โดยใช้เรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับอินเตอร์ดิจิตอล-
คาปาซิเตอร์ เพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ ซึ่งผิวอภิวัดที่ออกแบบจะมีคุณสมบัติของค่า
สภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นลบ (Negative permittivity) โดยตัวสะท้อนผิวอภิวัดมีขนาดเล็กและให้
อัตราขยายที่สูง ในงานวิจัยนี้ให้ความสนใจโครงสร้างพื้นฐานของผิวอภิวัดแบบเรโซเนเตอร์
วงแหวนที่มีการออกแบบให้เป็นอิมพีแดนซ์แบบขั้ว เพื่อให้ความคุมความถี่ทั้งสองได้ง่าย และได้นำ
เทคนิคอินเตอร์ดิจิตอลเข้ามาใช้เพื่อปรับลดขนาดของชิ้นงานให้เล็กลง ในวิทยานิพนธ์นี้จะจำลอง
สายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio 2016 เพื่อวิเคราะห์ผล ในส่วนของการวัด
ทดสอบจะสร้างสายอากาศไดโพลต้นแบบร่วมกับตัวสะท้อนผิวอภิวัด และเปรียบเทียบผลที่ได้
จากการจำลองแบบและการวัดทดสอบ ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้มุ่งหวังให้ตัวสะท้อนผิวอภิวัดสองความถี่
ที่มีขนาดเล็ก และเมื่อประยุกต์ใช้งานกับสายอากาศ จะสามารถเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศให้
สูงขึ้นได้ 8.04 dB และ 9.14 dB ที่ความถี่ 1.8GHz และ 5.5GHz ตามลำดับ

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา กัญจิกา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ปิยาภรณ์

KANTHIKA RAKDANKLANG : A DUAL-BAND METASURFACE
USING RING RESONATOR WITH INTERDIGITAL CAPACITORS.
THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. PIYAPORN MESAOWAD, PH.D.,
87 PP.

METASURFACE REFLECTOR/METASURFACE STRUCTURE/
RING RESONATOR/ INTERDIGITAL CAPACITORS

Nowadays, the usability of wireless communication systems has increased significantly. The use of services has grown exponentially, resulting in the need for additional channel and antenna gain in order to support it. At present, there is often a problem of overlapping signals or low radius of signal propagation. This causes low-quality services resulting from the antenna performance, such as poor signal quality and low download/upload rates. To solve this problem, it is preferable to design an antenna that works on multiple frequencies and use a reflector to work with the antenna for higher gain. However, such a reflector is usually large and not support multiple frequencies. Therefore, this thesis was designed to present a small metasurface reflector to support dual frequencies for the LTE (1.8GHz) and WLAN (5.5GHz) systems by using the ring resonator structure together with the interdigital capacitors. A dual-band metasurface reflector was used to increase the gain of the antenna. The designed metasurface will demonstrate negative permittivity. The metasurface reflector is small and has high gain. In this research, the basic structure of the metasurface reflector was studied and focused on the ring resonator, which uses a step impedance structure for easy control of both frequencies. Subsequently, the interdigital capacitors technique was applied to reduce the size. In this thesis, the antenna was simulated by using CST

Microwave Studio 2016. For the measurement, a dipole antenna prototype was combined with the metasurface reflector for comparison of the simulated and measured results. The purpose of this thesis is to decrease the size of a dual-band metasurface reflector. When applied with an antenna, it will be able to increase the antenna's gain of 8.04 dB and 9.14 dB at 1.8 GHz and 5.5 GHz, respectively.



School of Telecommunication Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature นิรม

Advisor's Signature Dr

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไข วิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พงศธร ชมทอง อาจารย์มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่คอยช่วยเหลือให้คำปรึกษา ช่วยชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ช่วยแนะนำในด้านการค้นคว้าหาเทคนิคต่าง ๆ เพื่อดำเนินงานวิจัยได้ถูกต้อง

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย รองศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐวิทย์ ภูญาษา อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ทางวิชาการ และให้โอกาสในการศึกษา

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้าน ต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ดร.มงคล มีคุณ กรมสอบสวนคดีพิเศษแห่งราชอาณาจักรไทย ที่ให้ความอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ ขอขอบคุณนายรชต แขนคันรัมย์และนายปณิธาน รุ่งเจริญ ที่ช่วยแนะนำในด้านการค้นคว้ารายละเอียดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้ความรักความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างยิ่ง มาโดยตลอด อีกทั้งขอขอบคุณนายอุกฤษฏ์ ไชขุนทดและนายทิวานนท์ อยู่สุข รวมถึงเพื่อน พี่ ในสาขาวิชาโทรคมนาคมที่ช่วยให้คำแนะนำสำหรับเทคนิคการใช้โปรแกรมในการจำลองการทำงานและคอยเป็นกำลังใจให้เสมอมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบ ให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

กัญจิกา รักด่านกลาง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ(ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของเบื้องต้น	4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.7 นวัตกรรมของงานวิจัยนี้	4
1.8 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	5
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 กล่าวนำ	6
2.2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.2.1 ตัวสะท้อน	7
2.2.2 ผิวอภิวัดศุ	8
2.2.2.1 แท่งโลหะประดิษฐ์	8
2.2.2.2 เรโซเนเตอร์วงแหวน	11
2.2.3 โครงสร้างที่รองรับการใช้งานได้หลายความถี่	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.3.1 คุณสมบัติผิวอภิวัดสุ.....	16
2.3.2 เรโซเนเตอร์วงแหวน.....	17
2.3.3 เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น.....	18
2.3.4 โหลดความจุแบบอินเตอร์ดิคิตอล.....	20
2.3.5 ทฤษฎีของสายอากาศ.....	21
2.3.5.1 การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ.....	21
2.3.5.2 แบบรูปการแผ่พลังงาน.....	23
2.4 สรุป.....	24
3 การออกแบบ.....	25
3.1 บทนำ.....	25
3.2 การจำลองแบบสายอากาศไดโพล.....	25
3.3 การออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุโดยพิจารณาชนิดเซลล์.....	31
3.3.1 การออกแบบโดยใช้เรโซเนเตอร์วงแหวน.....	31
3.3.2 ศึกษาการออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุโดยใช้ เรโซเนเตอร์วงแหวน 2 วงแหวน.....	35
3.3.3 ศึกษาการออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุโดยใช้เรโซเนเตอร์ วงแหวนร่วมกับเทคนิคเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น.....	37
3.3.4 ศึกษาการออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุโดยใช้เรโซเนเตอร์ วงแหวนร่วมกับเทคนิคเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น และเทคนิค อินเตอร์ดิคิตอลคาปาซิเตอร์.....	39
3.3.5 สรุปการศึกษาการออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุ.....	40
3.4 การวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์.....	40
3.5 การออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุ.....	42
3.6 การปรับพารามิเตอร์ของตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุ.....	44

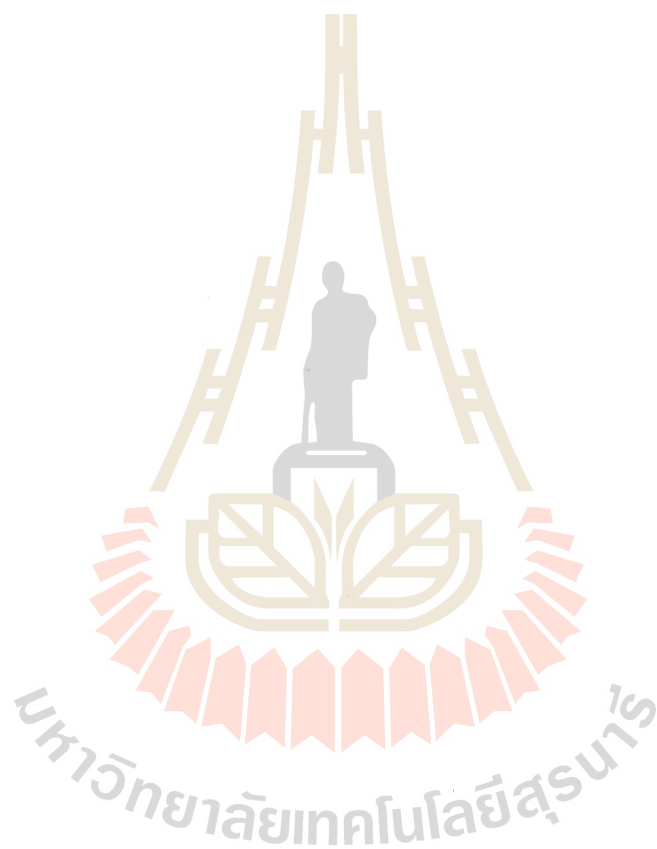
สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6.1	การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ต้นแบบด้วย การปรับขนาดความกว้าง.....	44
3.6.2	การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ต้นแบบด้วย การปรับเพิ่มจำนวนพื้นของอินเตอร์ดิฟรอกาปาซิเตอร์.....	45
3.6.3	การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้าง ของพื้นในอินเตอร์ดิฟรอกาปาซิเตอร์.....	46
3.6.4	การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ต้นแบบด้วยการปรับขนาดความสูง ของพื้นในของพื้นในอินเตอร์ดิฟรอกาปาซิเตอร์.....	48
3.6.5	การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ต้นแบบด้วยการปรับขนาดของแกน ที่รองรับพื้นของ อินเตอร์ดิฟรอกาปาซิเตอร์.....	49
3.6.6	การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ต้นแบบด้วยการปรับระยะห่างของ ช่องว่างระหว่างที่รองรับพื้นของ อินเตอร์ดิฟรอกาปาซิเตอร์.....	51
3.6.7	การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ต้นแบบด้วยการปรับระยะห่าง ระหว่างวัสดุทองแดงกับแผ่นพิมพ์วงจร.....	52
3.7	การจำลองแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่แถวลำดับ.....	59
3.8	สรุป.....	68
4	การสร้างและการวัดทดสอบ.....	69
4.1	การสร้างตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่.....	69
4.2	ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน.....	70
4.2.1	สายอากาศไดโพล.....	70
4.2.2	ตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่.....	72
4.3	ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน.....	74
4.4	ผลการวัดทดสอบอัตราขยาย.....	79
4.5	สรุป.....	80
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	82
5.5	สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	82

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	82
รายการอ้างอิง.....	84
ประวัติผู้เขียน.....	87



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	พารามิเตอร์จากการจำลองแบบสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 1.8 GHz และ 5.5 GHz.....26
3.2	ค่าอัตราขยายจากผลการจำลองสายอากาศไดโพล.....31
3.3	รายละเอียดของแผนผังวงจรและความถี่ที่ต้องการ.....43
3.4	ค่าพารามิเตอร์ของตัวสะท้อนผิวอภิวัด.....43
4.1	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สร้างตัวสะท้อนผิวอภิวัด.....70
4.2	สรุปผลคุณสมบัติของสายอากาศไดโพล.....80



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แบบรูปองค์ประกอบในการจัดวางติดตั้งตัวสะท้อนพาราโบลาโบลิก.....7
2.2	รูปสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานจริง.....7
2.3	โครงสร้างพื้นฐานของแท่งโลหะประดิษฐ์.....9
2.4	การเซาะซับสเตรตเป็นรูปตัวไอ.....10
2.5	การนำแท่งโลหะมาวางเรียงกันคล้ายรั้ว.....10
2.6	การประยุกต์ใช้แท่งโลหะประดิษฐ์วางเอียงที่ 45 องศา.....10
2.7	การกำหนดค่าของสายอากาศที่ใช้ CP ICMS.....11
2.8	การนำโหนดความจุแบบอินเตอร์ดิจิตอลมาปรับใช้กับสายอากาศ.....11
2.9	โครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวนและแท่งโลหะประดิษฐ์.....12
2.10	โครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวนที่ถูกวางซ้อนกัน 4 วง.....13
2.11	โครงสร้างหนึ่งของอภิวัดที่ก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าโดยตรง.....13
2.12	การนำโครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวน มาประยุกต์ใช้งานเพื่อรองรับการใช้งาน 2 ความถี่.....14
2.13	โครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวน รองรับการใช้งานที่ความถี่ต่ำและความถี่สูง.....15
2.14	แสดงคุณสมบัติของฟิวอภิวัด.....16
2.15	เรโซเนเตอร์วงแหวน
	ก. แบบรูปเปิด.....17
	ข. แบบรูปปิด.....17
2.16	โครงสร้างเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์ $K < 1$18
2.17	โครงสร้างเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์ $K > 1$18
2.18	ค่าการเลื่อนและการลดทอนของความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดจากเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น ค่าอัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์ $K < 1$19
2.19	ค่าการเลื่อนและการลดทอนของความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดจากเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น ค่าอัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์ $K > 1$20
2.20	โครงสร้างเรโซเนเตอร์อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์.....21

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.1	โครงสร้างแบบจำลองสายอากาศไดโพล.....	26
3.2	แบบจำลองสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 1.8 GHz	
	ก. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ.....	27
	ข. แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ.....	27
	ค. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	28
	ง. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า.....	28
3.3	แบบจำลองสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 5.5 GHz	
	ก. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ.....	29
	ข. แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ.....	30
	ค. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	30
	ง. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า.....	31
3.4	โครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวนพื้นฐาน 1 วงแหวน.....	34
3.5	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ของเรโซเนเตอร์วงแหวนแบบสี่เหลี่ยม 1 วงแหวน.....	34
3.6	ค่าสภาพยอมไฟฟ้าและค่าซึมซาบแม่เหล็กของเรโซเนเตอร์วงแหวน แบบสี่เหลี่ยม 1 วงแหวน.....	35
3.7	โครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวนแบบสี่เหลี่ยม 2 วงแหวน.....	36
3.8	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ของเรโซเนเตอร์วงแหวนแบบสี่เหลี่ยม 2 วงแหวน.....	36
3.9	ค่าสภาพยอมไฟฟ้าและค่าซึมซาบแม่เหล็กของเรโซเนเตอร์วงแหวน แบบสี่เหลี่ยม 2 วงแหวน.....	37
3.10	โครงสร้างของเรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขึ้น	
	ก. โครงสร้างของเรโซเนเตอร์วงแหวน.....	38
	ข. โครงสร้างของเรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขึ้น.....	38
3.11	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของเรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับ เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขึ้น.....	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 โครงสร้างการใช้เรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น และอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์.....	39
3.13 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ได้จากการปรับเพิ่มจำนวนพื้นของ อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์.....	39
3.14 รูปแบบโครงสร้างของตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุ	
ก. โครงสร้างพื้นฐานเรโซเนเตอร์วงแหวน.....	40
ข. โครงสร้างพื้นฐานเรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับเทคนิค เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น.....	40
ค. โครงสร้างพื้นฐานเรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับเทคนิค เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นและเทคนิคอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์.....	40
3.15 วงจรสมมูล.....	41
3.16 โครงสร้างชิ้นงานของตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุ.....	43
3.17 การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้าง.....	44
3.18 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ได้จากการปรับขนาดความกว้าง.....	45
3.19 การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุต้นแบบด้วยการปรับเพิ่มจำนวนพื้นของ อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์.....	46
3.20 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ได้จากการปรับเพิ่มจำนวนพื้นของ อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์.....	46
3.21 การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้างของ พื้นในอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์.....	47
3.22 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ได้จากการปรับขนาดความกว้างของพื้นใน อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์.....	47
3.23 การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุต้นแบบด้วยการปรับขนาดความสูงของพื้นใน อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์.....	48
3.24 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ได้จากการปรับขนาดความสูงของพื้นใน อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.25 การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ต้นแบบด้วยการปรับขนาดของแกนที่รองรับพื้นของอินเตอร์ดิฟฟราคชันคาปาซิเตอร์.....	50
3.26 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ได้จากการปรับขนาดของแกนที่รองรับพื้นของอินเตอร์ดิฟฟราคชันคาปาซิเตอร์.....	50
3.27 การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ต้นแบบด้วยการปรับระยะห่างของช่องว่างระหว่างพื้นของอินเตอร์ดิฟฟราคชันคาปาซิเตอร์.....	51
3.28 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ได้จากการปรับระยะห่างของช่องว่างระหว่างพื้นของอินเตอร์ดิฟฟราคชันคาปาซิเตอร์.....	52
3.29 การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ต้นแบบด้วยการปรับระยะห่างระหว่างวัสดุทองแดงกับแผ่นพิมพ์วงจร.....	53
3.30 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ได้จากการปรับระยะห่างระหว่างวัสดุทองแดงกับแผ่นพิมพ์วงจร.....	53
3.31 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแบบจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแบบจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่.....	54
3.32 ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าซึมซาบแม่เหล็กของแบบจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่.....	54
3.33 แบบรูปสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่	
ก. สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1.8 GHz.....	55
ข. สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 5.5 GHz.....	56
ค. สนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1.8 GHz.....	56
ง. สนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5.5 GHz.....	57
3.34 กระแสเชิงผิวของตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่	
ก. กระแสเชิงผิวที่ความถี่ 1.8 GHz.....	58
ข. กระแสเชิงผิวที่ความถี่ 5.5 GHz.....	58
3.35 แบบจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่แถวลำดับจำนวน 7×7 อิติเมนต์.....	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.36 ผลจากการจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดดูแถวลำดับจำนวน 7×7 อิลิเมนต์ กับสายอากาศไดโพลความถี่ 1.8 GHz ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST	
ก. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ.....	60
ข. แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ.....	60
ค. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า.....	61
ง. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	61
3.37 ผลจากการจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดดูแถวลำดับจำนวน 7×7 อิลิเมนต์ กับสายอากาศไดโพลความถี่ 5.5 GHz ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST	
ก. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ.....	62
ข. แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ.....	63
ค. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า.....	63
ง. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	64
3.38 การแผ่พลังงานสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก	
ก. สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1.8 GHz.....	65
ข. สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 5.5 GHz.....	65
ค. สนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1.8 GHz.....	66
ง. สนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5.5 GHz.....	66
3.39 กระแสเชิงผิวของตัวสะท้อนผิวอภิวัดดูแถวลำดับจำนวน 7×7 อิลิเมนต์	
ก. กระแสเชิงผิวที่ความถี่ 1.8 GHz.....	67
ข. กระแสเชิงผิวที่ความถี่ 5.5 GHz.....	67
4.1 ตัวสะท้อนผิวอภิวัดดู.....	69
4.2 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับระหว่างผลการจำลองของสายอากาศ ไดโพลและผลวัดทดสอบของสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 1.8 GHz.....	71
4.3 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับระหว่างผลการจำลองของสายอากาศ ไดโพลและผลวัดทดสอบของสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 5.5 GHz.....	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างผลการจำลองของตัวสะท้อนผิว อภิวัด ผลวัดทดสอบของตัวสะท้อนผิวอภิวัดและผลวัดทดสอบของสายอากาศ ไดโพลที่ความถี่ 1.8 GHz.....	73
4.5 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างผลการจำลองของตัวสะท้อนผิว อภิวัด ผลวัดทดสอบของตัวสะท้อนผิวอภิวัดและผลวัดทดสอบของสายอากาศ ไดโพลที่ความถี่ 5.5 GHz.....	74
4.6 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าของตัวสะท้อนผิวอภิวัด ก. แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า.....	75
ข. การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า.....	76
4.7 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กของตัวสะท้อนผิวอภิวัด ก. แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	76
ข. การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	77
4.8 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวสะท้อนผิวอภิวัดที่ความถี่ 1.8 GHz ก. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า.....	77
ข. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	78
4.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวสะท้อนผิวอภิวัดที่ความถี่ 5.5 GHz ก. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า.....	78
ข. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	79

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการใช้งานระบบการสื่อสารไร้สายเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งระบบ LTE (Long Term Evolution) ที่ใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่และ WLAN (Wireless LAN) ที่สามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นโทรศัพท์มือถือในระบบดิจิทัล โน้ตบุ๊ก หรือแท็บเล็ตก็ตาม จะเห็นได้ว่ามีผู้ใช้บริการที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ต้องการอัตราขยายของสายอากาศที่เพิ่มขึ้นเพื่อรองรับการใช้งาน เนื่องจากรัศมีของการแพร่กระจายสัญญาณของสายอากาศที่ไปได้ไม่ไกลมากนัก จึงทำให้ผู้ใช้บริการได้รับการใช้งานจากสายอากาศอย่างไม่เต็มประสิทธิภาพ ซึ่งการที่จะทำให้สัญญาณสามารถแพร่กระจายได้ไกลขึ้นหรือมีอัตราขยายที่เพิ่มขึ้น สามารถทำได้โดยการเพิ่มกำลังของเครื่องส่งหรือการเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศ ซึ่งการใช้ตัวสะท้อนเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจในการช่วยเพิ่มอัตราขยายให้แก่สายอากาศ ในปัจจุบันสายอากาศตัวสะท้อนที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายนั้น ได้แก่ สายอากาศพาราโบลา และ สายอากาศแกลวลาคับ โดยสายอากาศพาราโบลาส่วนใหญ่จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ มีส่วนโค้งและรวมสัญญาณไปที่จุดโฟกัส ในส่วนของสายอากาศแกลวลาคับนั้นจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงระยะห่าง (d) ของแต่ละอิลิเมนต์ เนื่องจากระยะห่างของสายอากาศแต่ละอิลิเมนต์นั้นจะมีผลต่อการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศด้วย ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำแผ่นตัวสะท้อนมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายอากาศ แต่เนื่องจากว่าการที่จะทำให้สายอากาศมีอัตราขยายที่สูง แผ่นตัวสะท้อนนั้นจะมีลักษณะที่ค่อนข้างใหญ่ และสายอากาศโดยทั่วไปที่มีคุณสมบัติเป็นตัวสะท้อนนั้นส่วนใหญ่สามารถทำงานได้ที่ 1 ความถี่ จึงสังเกตเห็นความสำคัญของวัสดุที่มีขนาดเล็ก สามารถเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศและทำงานได้มากกว่า 1 ความถี่ ซึ่งหนึ่งในวัสดุที่นักวิจัยให้ความสนใจในปัจจุบันนี้คืออภิวัดสุหรือวัสดุเมตา (metamaterial) ซึ่งอภิวัดสุเป็นวัสดุที่ไม่สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและสามารถเข้าถึงคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ง่ายกว่าวัสดุทั่วไป เนื่องจากวัสดุทั่วไปจะมีคุณสมบัติส่วนใหญ่ที่มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าและค่าซึมซาบแม่เหล็กเป็นบวก แต่อภิวัดสุนั้นสามารถทำให้เกิดคุณสมบัติที่หลากหลายขึ้นได้ โดยคุณสมบัติเหล่านั้นยังสามารถควบคุมได้จากการปรับลักษณะของโครงสร้างของอภิวัดสุ แต่เนื่องจากลักษณะของโครงสร้างอภิวัดสุนั้นเป็นสามมิติ มีความซับซ้อนของโครงสร้าง ทำให้ยากต่อการออกแบบ จึงมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอภิวัดสุนี้เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวทั้งเรื่องของการขยายของสายอากาศของทั้งสองระบบข้างต้นที่ได้กล่าวมาทั้ง

ขนาดของสายอากาศตัวสะท้อนที่มีขนาดใหญ่ ระยะในการติดตั้ง ที่ต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้ง สายอากาศตัวสะท้อนค่อนข้างมาก รวมถึงสายอากาศตัวสะท้อนทั่วไปที่สามารถรองรับการใช้งาน ได้ 1 ความถี่ จึงได้มีความสนใจในตัวสะท้อนที่เป็นอภิวัด แต่เนื่องจากตัวสะท้อนอภิวัดที่ได้ กล่าวมาข้างต้นนั้น มีลักษณะโครงสร้างที่ซับซ้อนเป็นสามมิติ จึงได้มีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ ตัวสะท้อนอภิวัดซึ่งพบว่านอกจากตัวสะท้อนอภิวัดยังมีวัสดุอื่น ๆ ที่น่าสนใจอยู่อีกคือ ตัวสะท้อนพื้นผิวเมธาหรือตัวสะท้อนผิวอภิวัด (metasurface reflector) ซึ่งตัวสะท้อนผิวอภิวัด นั้นเป็นหนึ่งในชนิดของอภิวัดแต่โครงสร้างจะมีลักษณะเป็นสองมิติ ง่ายต่อการออกแบบ และสามารถควบคุมคลื่นที่มาตกกระทบที่หน้าผิวของอภิวัดได้ โดยงานวิจัยนี้เห็นถึงความสำคัญของการออกแบบขนาดของตัวสะท้อนให้มีขนาดเล็ก และรองรับการใช้งานได้มากกว่าหนึ่งความถี่ โดย ตัวสะท้อน ผิวอภิวัดนั้นจะต้องมีการควบคุมคุณสมบัติโดยการที่ทำให้ค่าสภาพยอมไฟฟ้ามีค่าเป็นลบ เพื่อให้พื้นผิวอภิวัดมีคุณสมบัติเป็นตัวสะท้อนคลื่น

จากปริทัศน์วรรณกรรมที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาคุณสมบัติของพื้นผิวอภิวัด (metasurface) ซึ่งคุณสมบัติหลักของพื้นผิวอภิวัดนั้น แบ่งออกเป็นดังนี้คือ ENG (Epsilon Negative Medium), MNG (Mu Negative Medium) และ NZI (Near-zero refraction Index) โดยนักวิจัยส่วนใหญ่จะใช้ แท่งโลหะประดิษฐ์ (wire) หรือเรโซเนเตอร์วงแหวน (ring resonator) เพื่อควบคุมคุณสมบัติต่าง ๆ ของพื้นผิวอภิวัดตามที่ต้องการ โดยโครงสร้างแท่งโลหะประดิษฐ์ส่วนใหญ่จะทำให้พฤติกรรม ของสนามไฟฟ้าเปลี่ยน ซึ่งสามารถควบคุมให้ค่าสภาพยอมไฟฟ้ามีค่าเป็นลบได้ และโครงสร้าง เรโซเนเตอร์วงแหวนส่วนใหญ่จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนวนรอบ ซึ่งสามารถควบคุม ค่าซึมซาบแม่เหล็กได้ โดยมีนักวิจัยได้นำทั้งแท่งโลหะประดิษฐ์และเรโซเนเตอร์วงแหวนไป ประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น การนำแท่งโลหะประดิษฐ์วางเรียงต่อ ๆ กัน โดยมีการวาง ระยะห่างที่เท่ากัน การตัดแปลงเป็นตัวอักษรต่าง ๆ การนำแท่งโลหะประดิษฐ์มาไขว้กัน หรือแม้แต่ การนำมาหักงอ ขดกันเป็นเส้นลวด เช่น อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ (interdigital capacitor) เพื่อให้ ชิ้นงานมีขนาดเล็กลงและยังมีผลต่อค่าสภาพยอมไฟฟ้าอีกด้วย เป็นต้น ในส่วนของโครงสร้าง เรโซเนเตอร์วงแหวน ได้มีนักวิจัยนำโครงสร้างของเรโซเนเตอร์วงแหวนมาประยุกต์ใช้งานอย่าง หลากหลายด้าน เช่น นำมาขดเป็นวงแหวน หรือนำวงแหวนมาวางซ้อนกันเป็นสองวง เพื่อให้เกิด สนามแม่เหล็กหมุนวนรอบ หรือแม้แต่การทำเรโซเนเตอร์วงแหวนให้เป็น อิมพีแดนซ์แบบขั้นเพื่อ สร้างและควบคุมความถี่ฮาร์มอนิกส์ โดยงานวิจัยนี้ได้สนใจเกี่ยวกับตัวสะท้อนผิวอภิวัดซึ่งมี คุณสมบัติของค่าสภาพยอมไฟฟ้าเป็นลบ จากงานวิจัยที่ผ่านมา นักวิจัยจะใช้โครงสร้างของแท่ง โลหะประดิษฐ์ มาประยุกต์ใช้เพื่อควบคุมค่าสภาพยอมไฟฟ้าเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามคุณสมบัติที่ ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้สนใจเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างของแท่งโลหะประดิษฐ์เป็นอย่างมาก จะเห็นได้ว่าแท่งโลหะประดิษฐ์นั้นได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยที่หลากหลายด้าน เช่น

ในด้านการเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่สายอากาศ ซึ่งบางงานวิจัยได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านของการสะท้อนคลื่นหรือถูกนำไปใช้เพื่อลดขนาดของชิ้นงานให้มีขนาดที่กะทัดรัดขึ้นหรือเล็กลง หรือแม้กระทั่งการเพิ่มอัตรายายให้แก่สายอากาศ

ปัจจุบันสายอากาศแต่ละตัวนั้นรองรับการใช้งานได้มากกว่าหนึ่งความถี่ และเพื่อตอบสนองการใช้งานร่วมกับสายอากาศ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัด ซึ่งรองรับการใช้งานได้มากกว่าหนึ่งความถี่ มีลักษณะโครงสร้างเป็นสองมิติ ง่ายต่อการออกแบบ โดยมีคุณสมบัติเป็นตัวสะท้อนคลื่น ซึ่งเกิดจากค่าสภาพยอมไฟฟ้ามีค่าเป็นลบ โดยประยุกต์ใช้โครงสร้างพื้นฐานเรโซเนเตอร์วงแหวนดั้งเดิมร่วมกับแท่งโลหะประดิษฐ์ โดยจะนำแท่งโลหะประดิษฐ์มาดัดไปมาจนมีรูปแบบเป็นอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์เพื่อให้ชิ้นงานมีขนาดที่เล็กลงและสามารถควบคุมความถี่ที่ต้องการได้ ในส่วนของเรโซเนเตอร์วงแหวนนั้นได้มีการทำเป็นเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นเพื่อควบคุมความถี่ฮาร์มอนิกส์ และรองรับการใช้งานได้สองความถี่สำหรับระบบ LTE และ WLAN เพื่อตอบสนองการใช้งานร่วมกับสายอากาศในปัจจุบัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำตัวสะท้อนผิวอภิวัดไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศไดโพลเพื่อเพิ่มอัตรายายให้กับสายอากาศ โดยวางตัวสะท้อนผิวอภิวัดไว้ที่ด้านหลังของสายอากาศไดโพล ข้อดีของงานนี้คือตัวสะท้อนผิวอภิวัดที่ได้มีขนาดเล็ก โดยได้นำเทคนิคของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์มาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างและควบคุมความถี่จากโครงสร้างของเรโซเนเตอร์วงแหวน โดยออกแบบเป็นเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น (step-impedance resonator) อัตรายายของสายอากาศค่อนข้างสูง รองรับการใช้งานได้สองความถี่ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นมีลักษณะเป็นการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว และชิ้นงานมีขนาดเล็ก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลวิธีออกแบบเชิงทฤษฎีของตัวสะท้อนผิวอภิวัด ที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานในระบบ LTE และ WLAN

1.2.2 เพื่อออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดสำหรับเพิ่มอัตรายายให้กับสายอากาศ

1.2.3 สร้างสายอากาศต้นแบบ และวัดทดสอบ

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 เมื่อนำโครงสร้างพื้นฐานเรโซเนเตอร์วงแหวนมาออกแบบเป็นอิมพีแดนซ์แบบขั้น จะสามารถใช้ประโยชน์จากความถี่ฮาร์มอนิกส์ได้

1.3.2 การนำอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์มาประยุกต์ใช้ในโครงสร้าง จำนวนและขนาดของฟันในอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์สามารถทำให้ชิ้นงานมีขนาดเล็ก

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 สร้างตัวสะท้อนผิวอภิวัดที่มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าเป็นลบและค่าซึมซาบแม่เหล็กที่มีค่าเป็นบวก เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในการสะท้อนคลื่น

1.4.2 ใช้โปรแกรม CST Microwave Studio 2016 ในการจำลองแบบ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ออกแบบโครงสร้างตัวสะท้อนผิวอภิวัด เพื่อรองรับการใช้งานตามวัตถุประสงค์

1.5.2 จำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio 2016 เพื่อรองรับการใช้งานในระบบ LTE และ WLAN

1.5.3 สร้างสายอากาศต้นแบบและวัดทดสอบเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองแบบ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้ตัวสะท้อนผิวอภิวัดที่ทำงานในระบบ LTE และ WLAN โดยชิ้นงานมีขนาดเล็ก กระทบ เหมาะแก่การนำไปใช้เป็นตัวสะท้อนคลื่น มีอัตราขยายในทิศทางด้านหน้าที่สูง

1.6.2 สามารถเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศได้

1.7 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดที่รองรับการใช้งานได้ทั้งระบบ LTE และ WLAN สำหรับการใช้งานร่วมกับสายอากาศไดโพลและเพื่อปรับปรุงอัตราขยายของสายอากาศไดโพล กระบวนการทำงานสำหรับการออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดที่รองรับการใช้งานสองความถี่ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะประกอบไปด้วย 3 ส่วน ดังนี้ ตัวสะท้อนผิวอภิวัดที่ทำการออกแบบมีวัตถุประสงค์ คือ ต้องการความถี่ใช้งานที่ระบบ LTE (1.8GHz) และ WLAN (5.5GHz) เพื่อให้ได้ความถี่ที่รองรับการใช้งานในปัจจุบัน มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบชี้ทิศทางและให้อัตราขยายสูงเมื่อใช้งานร่วมกับสายอากาศ กระบวนการในส่วนที่สอง คือ การนำตัวสะท้อนผิวอภิวัดมาใช้งานร่วมกับสายอากาศไดโพล โดยทำหน้าที่รับคลื่นจากสายอากาศไดโพล และทำการสะท้อนคลื่นออกบริเวณผิวด้านหน้าของตัวสะท้อนผิวอภิวัด และกระบวนการสุดท้าย คือ การประมวลผลประสิทธิภาพของการสะท้อน ซึ่งการสะท้อนที่ได้ให้อัตราขยายที่สูง รองรับการใช้งานได้ทั้งระบบ LTE และ WLAN จากการวัดทดสอบ

1.8 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

เนื้อหาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาค้นคว้า รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์ และสรุปผล สำหรับตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุ ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 5 บทด้วยกัน

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย สมมติฐานของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ นวัตกรรมของงานวิจัยนี้ และการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวสะท้อน โดยทั่วไป และตามด้วยการกล่าวถึงผิวอภิวัดสุ ซึ่งประกอบไปด้วยโครงสร้างและรูปแบบในการประยุกต์ใช้ เรโซเนเตอร์วงแหวน และแท่งโลหะประดิษฐ์ ซึ่งทั้งสองโครงสร้างสามารถควบคุมคุณสมบัติของผิวอภิวัดสุได้ดี และง่ายต่อการออกแบบนำมาประยุกต์ใช้งาน รวมไปถึงโครงสร้างที่มีผลต่อการใช้งานหลายความถี่ สำหรับในส่วนของทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการนำมาประยุกต์ใช้งาน เพื่อให้เกิดตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุที่รองรับการใช้งานได้สองความถี่ และมีขนาดเล็ก ประกอบด้วยทฤษฎีผิวอภิวัดสุ เรโซเนเตอร์วงแหวนเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบชั้น อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์และทฤษฎีของสายอากาศ

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศไดโพล การออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปซีเอสที การจำลองแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุโดยออกแบบเป็นอะเรย์เพื่อรองรับการใช้งานร่วมกับสายอากาศและเพื่อรองรับการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศ โดยพิจารณารูปแบบของการสะท้อนคลื่นจากผิวของตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุและประสิทธิภาพของตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุในการเพิ่มอัตราขยายให้แก่สายอากาศ โดยพิจารณาจากการสะท้อนคลื่นจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน และการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลอง การสร้างสายอากาศไดโพล การวัดค่า S_{11} การวัดแบบรูป การแผ่พลังงานและอัตราขยาย การสร้างแบบจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุ การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานและอัตราขยายเมื่อทดสอบกับสายอากาศไดโพล

บทที่ 5 กล่าวถึงสรุปผลการวิจัย รวมถึงการออกแบบสายอากาศไดโพลและตัวสะท้อนผิวอภิวัดสุ ปัญหาที่เกิดขึ้นข้อเสนอแนะอีกทั้งแนวทางในการแก้ปัญหา และการพัฒนาต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

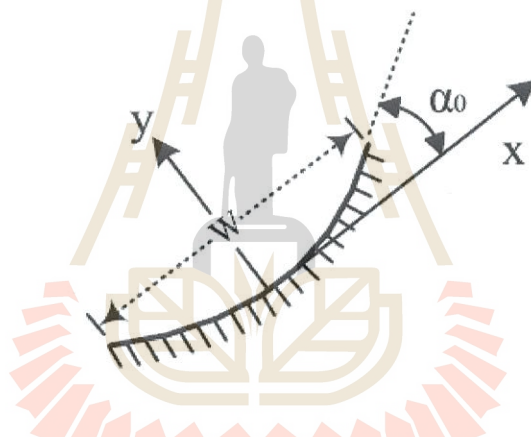
ปัจจุบันการสื่อสารทางโทรคมนาคมนั้นมีอัตราการใช้งานที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ประสิทธิภาพของสายอากาศจึงสำคัญต่อระบบการสื่อสาร โทรคมนาคมและเพื่อรองรับการใช้งานที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายอากาศนั้นนับว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งปัจจุบันนิยมนำตัวสะท้อน (reflector) มาใช้งานร่วมกับสายอากาศเพื่อเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศ แต่จะเห็นว่าตัวสะท้อนส่วนใหญ่รองรับการใช้งานได้ 1 ความถี่ ในงานวิจัยนี้จึงสนใจตัวสะท้อนที่รองรับการใช้งานได้มากกว่า 1 ความถี่ ขนาดเล็ก เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศ และให้อัตราขยายที่สูง โดยในบทนี้จะกล่าวถึงตัวสะท้อนโดยทั่วไปที่นิยมนำมาใช้งาน และหลังจากนั้นจะกล่าวถึงตัวสะท้อนที่เริ่มมีคนให้ความสนใจนั่นก็คือตัวสะท้อนฟิวอภิวัสตุ เนื่องจากฟิวอภิวัสตุมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ขนาดเล็กและง่ายต่อการนำไปใช้งาน ถัดมาจะกล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐานที่นิยมนำมาใช้ในการควบคุมคุณสมบัติของฟิวอภิวัสตุ ได้แก่ แท่งโลหะประดิษฐ์ (wire) และเรโซเนเตอร์วงแหวน (ring resonator) ซึ่งงานวิจัยนี้ต้องการออกแบบตัวสะท้อนฟิวอภิวัสตุที่สามารถทำงานได้ 2 ความถี่ จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างที่สามารถใช้งานได้หลากหลายความถี่และสำหรับทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไปตามลำดับ

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

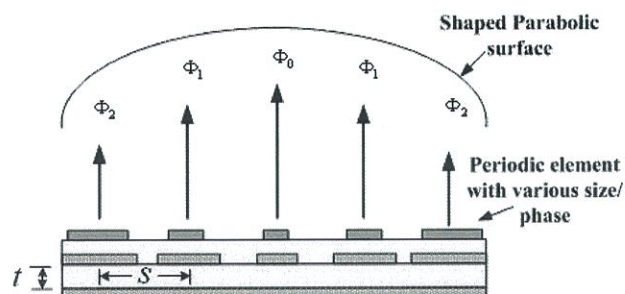
ในปัจจุบันจะเห็นว่า การสื่อสารไร้สายในระบบ LTE และ WLAN มีผู้ใช้บริการที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อัตราขยายของสายอากาศจึงต้องเพิ่มสูงขึ้น เพื่อรองรับการใช้งานของผู้ใช้บริการที่สูงขึ้น ซึ่งในการนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศ วัสดุควรมีขนาดเล็กเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าตัวสะท้อนฟิวอภิวัสตุนั้นมีลักษณะ โครงสร้างเป็นสองมิติ โครงสร้างไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการออกแบบ เป็นอภิวัสตุที่สามารถนำมาใช้ทำเป็นตัวสะท้อนได้โดยจะออกแบบให้สามารถรองรับการใช้งานได้ทั้งสองระบบที่ LTE และ WLAN จากการประยุกต์ใช้เรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับแท่งโลหะประดิษฐ์

2.2.1 ตัวสะท้อน (Reflector)

สายอากาศตัวสะท้อน มีหลากหลายประเภทโดยจะใช้งานต่างกันตามความถี่ต่าง ๆ ซึ่งสายอากาศตัวสะท้อนโดยทั่วไปที่นิยมนำมาใช้งานในการสะท้อนคลื่น คือตัวสะท้อนพาราโบลิก (Parabolic reflectors) ซึ่งตัวสะท้อนพาราโบลิกจะต้องคำนึงถึงขนาดความโค้งของจานเส้นผ่านศูนย์กลาง องศาในการจัดวางติดตั้งตัวสะท้อนพาราโบลิก (S. Momeni, A. Menbari, A. A. Alemrajabi and P. Mohammadi, 2019) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งจะเห็นว่ากรอออกแบบและติดตั้งมีความซับซ้อน โดยทั่วไปสายอากาศตัวสะท้อนนั้นสามารถรองรับการใช้งานได้ 1 ความถี่ ในรูปที่ 2.2 รูปสายอากาศตัวสะท้อนแฉกลำดับ แสดงสายอากาศตัวสะท้อนแฉกลำดับที่หลากหลายขนาด โดยสายอากาศตัวสะท้อนถูกติดตั้งเรียงกันเป็นแฉกลำดับ ซึ่งสายอากาศตัวสะท้อนแต่ละตัวจะถูกวางเป็นระยะห่างที่แตกต่างกันออกไป เป็นต้น



รูปที่ 2.1 แบบรูปองศาในการจัดวางติดตั้งตัวสะท้อนพาราโบลิก
(S. Momeni, A. Menbari, A. A. Alemrajabi and P. Mohammadi, 2019)



รูปที่ 2.2 รูปตัวสะท้อนแฉกลำดับ

(Piyaporn Krachodnok and Rangsarn Wongsan, 2007)

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าสายอากาศตัวสะท้อนมีความยากต่อการออกแบบและการติดตั้ง งานวิจัยนี้จึงสนใจเกี่ยวกับผิวอภิวัดซึ่งมีโครงสร้างเป็น 2 มิติ ไม่ซับซ้อน ขนาดเล็ก รองรับการใช้งานได้หลายความถี่และง่ายต่อการนำมาใช้งานร่วมกับสายอากาศ

2.2.2 ผิวอภิวัด (Metasurface)

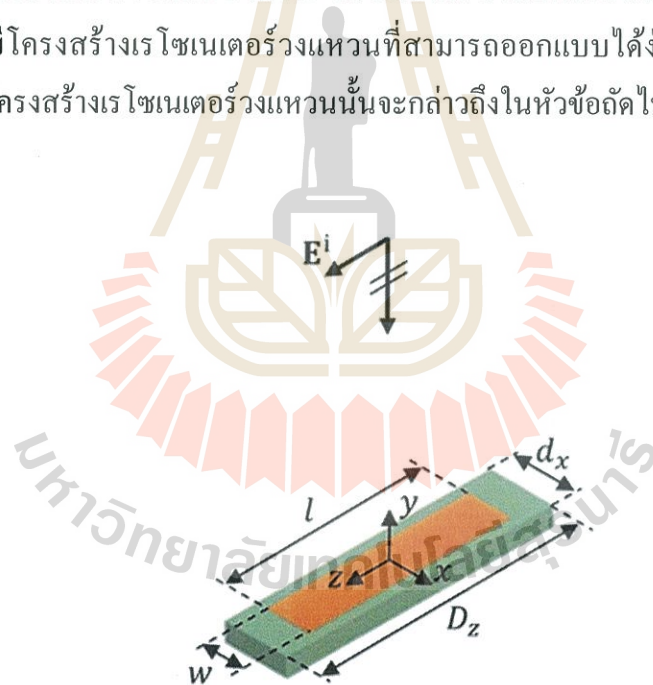
ในปัจจุบันผิวอภิวัดเริ่มมีการนำมาประยุกต์ใช้เกี่ยวกับงานด้านต่าง ๆ เพิ่มขึ้น เช่น ในด้านการสะท้อนหรือการส่งผ่านคลื่น เป็นต้น เนื่องจากโครงสร้างของผิวอภิวัดนั้นมีลักษณะโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน เป็น 2 มิติ ง่ายต่อการออกแบบ ซึ่งคุณสมบัติของผิวอภิวัดนั้นได้แก่ การที่วัสดุมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าหรือค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบหรือเข้าใกล้ศูนย์ หรือมีค่าดัชนีหักเหเป็นลบ ซึ่งโครงสร้างที่นักวิจัยส่วนใหญ่นำมาประยุกต์ใช้เพื่อควบคุมคุณสมบัติของอภิวัดนั้นก็คือ แท่งโลหะประดิษฐ์หรือเรโซเนเตอร์วงแหวน

2.2.2.1 แท่งโลหะประดิษฐ์

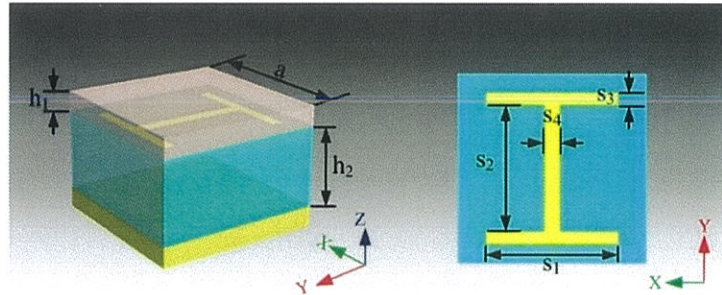
แท่งโลหะประดิษฐ์เป็น โครงสร้างพื้นฐานที่นักวิจัยนิยมนำมาออกแบบและประยุกต์ใช้ในการสะท้อนคลื่น ด้านการเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่สายอากาศและอื่น ๆ เป็นต้น (D. H. Kwon, 2018) ในรูปที่ 2.3 คือการนำโครงสร้างพื้นฐานของแท่งโลหะประดิษฐ์โดยตรงมาใช้ โดยการปรับลดความยาวของ โครงสร้างแท่งโลหะประดิษฐ์ที่อยู่บนชั้นสเตรต นำมาใช้ในการสะท้อนคลื่นที่พื้นผิว (L. Shen, Y. Pang, L. Yan, Q. Li and S. Qu, 2018) ในรูปที่ 2.4 เชาะชั้นสเตรตเป็นรูปตัวไอ (I) ใช้งานในลักษณะเป็นตัวลดการสะท้อนคลื่น ซึ่งทั้ง ๆ ที่ลักษณะโครงสร้างคล้ายเป็นแท่งโลหะประดิษฐ์ แต่เปลี่ยนหลักการออกแบบก็สามารถทำให้ผลลัพธ์มีลักษณะแตกต่างกันออกไปและยังมีหลักการนำแท่งโลหะประดิษฐ์ไปประยุกต์ใช้งานกับสายอากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่สายอากาศ เช่น การนำแท่งโลหะมาวางเรียงกันคล้ายรั้ว (X. Li, J. Yang, Z. Chen, P. Ren and M. Huang, 2018) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เพื่อเพิ่มอัตรายายให้แก่สายอากาศ และยังมีการประยุกต์โดยการนำแท่งโลหะประดิษฐ์มาวางเรียงกัน แต่ลักษณะการวางจะวางเอียงที่ 45 องศาเพื่อใช้ในการเปลี่ยนการโพลาไรท์และการสะท้อนของคลื่น (M. Long, W. Jiang, and S. Gong, 2017) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้เป็นตัวสะท้อนคลื่น ที่แถบความถี่กว้าง มีการวางโครงสร้างในลักษณะเอียงที่ 45 องศา ให้มีการสะท้อนกลับที่ไม่ดีหรือผิดเพี้ยนไปจากเดิม ใช้ในการลดภาพหน้าตัดสัญญาณเรดาร์ (RCS) ซึ่งการนำแท่งโลหะมาประยุกต์ใช้ตามที่กล่าวมาข้างต้นจะมีข้อเสียคือ ขนาดของชิ้นงานค่อนข้างใหญ่ จึงได้มีนักวิจัยนำแท่งโลหะไปทำเป็นหยัก ๆ คัดขึ้นคัดลงไปมาเพื่อลดขนาดชิ้นงาน (I. C. Metasurfaces, T. Yue, S. Member, Z. H. Jiang, and D. H. Werner, 2016) ดังรูปที่ 2.7 เพื่อปรับลดขนาดชิ้นงานให้เล็กลง โดยได้นำหลักการของอินเตอร์ดิคิตอลคาปาซิเตอร์มาปรับใช้ ข้อดีของรูปที่ 2.8 (T. Yue, Z. H. Jiang, and D. H. Werner, 2014) คือ ขนาดของชิ้นงานเล็กลง แต่อัตรายายค่อนข้างต่ำ

นอกจากนี้ก็ยังยมีโครงสร้างอื่น ๆ อีกที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการสะท้อนคลื่นหรือการเพิ่มอัตราขยายให้แก่สายอากาศ

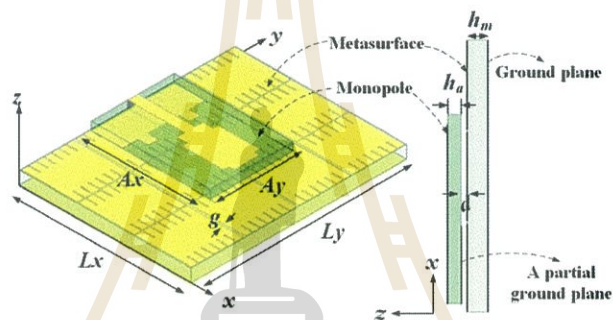
จากที่กล่าวมาข้างต้นเกี่ยวกับแท่งโลหะประติษฐานั้น จะพบว่าแท่งโลหะประติษฐานั้นถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างหลากหลาย จากโครงสร้างพื้นฐานแท่งโลหะประติษฐานั้นสามารถเป็นได้ทั้งตัวสะท้อนคลื่นและลดการสะท้อนคลื่นจากการถูกเจาะชั้นสเตรตปรับเป็นตัวอักษรไอ (I) หรือการนำแท่งโลหะประติษฐานั้นมาวางเรียงใกล้กันเพื่อการสะท้อนคลื่น แต่ทั้งนี้ทั้งนั้น ขนาดที่ได้ก่อนข้างใหญ่ จึงมีนักวิจัยที่นำเทคนิคของอินเตอร์ดิฟรอกาปาซิเตอร์มาปรับใช้ในงาน แต่อัตราขยายค่อนข้างต่ำ และยังมีโครงสร้างอื่น ๆ อีกที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวสะท้อนคลื่นในผิวอภิวัดศู ซึ่งการสะท้อนของ ผิวอภิวัดศูเกิดจากคุณสมบัติของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นลบที่สามารถควบคุมได้จากสนามไฟฟ้า ซึ่งแท่งโลหะประติษฐานั้นนอกจากจะเป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อการออกแบบ ยังสามารถใช้เป็นวัสดุที่ช่วยในการควบคุมค่าสนามไฟฟ้าได้ดีอีกด้วย โครงสร้างสามารถออกแบบได้ง่าย ไม่ซับซ้อน ซึ่งนอกเหนือจากโครงสร้างแท่งโลหะประติษฐานั้นยังมีโครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวนที่สามารถออกแบบได้ง่ายและมีผลต่อคุณสมบัติผิวอภิวัดศูซึ่งโครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวนนั้นจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.3 โครงสร้างพื้นฐานของแท่งโลหะประติษฐานั้น (D. H. Kwon, 2018)

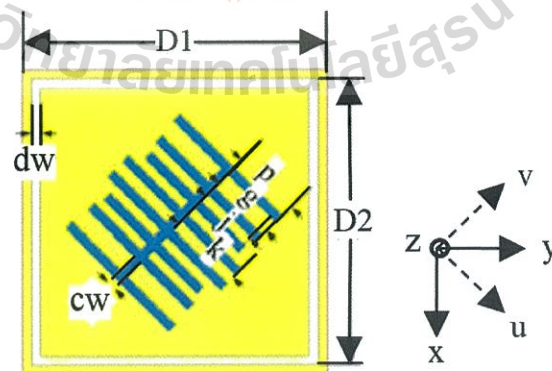


รูปที่ 2.4 การเจาะชั้นสเตรตเป็นรูปตัวไอ (I) (L. Shen, Y. Pang, L. Yan, Q. Li and S. Qu, 2018)



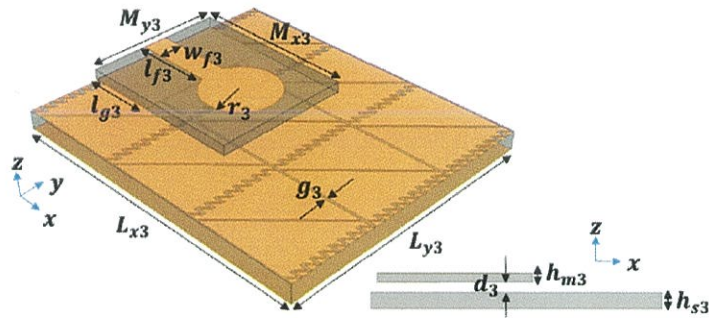
รูปที่ 2.5 การนำแท่งโลหะมาวางเรียงกันคล้ายรั้ว

(X. Li, J. Yang, Z. Chen, P. Ren and M. Huang, 2018)



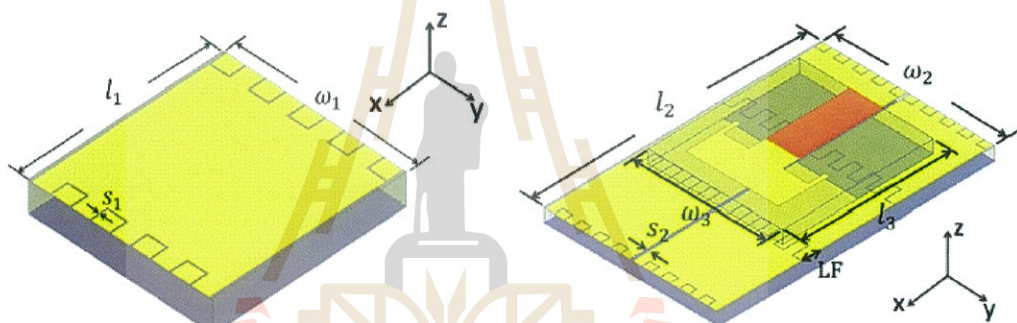
รูปที่ 2.6 การประยุกต์ใช้แท่งโลหะประดิษฐ์วางเอียงที่ 45 องศา

(M. Long, W. Jiang, and S. Gong, 2017)



รูปที่ 2.7 การกำหนดค่าของสายอากาศที่ใช้ CP ICMS

(I. C. Metasurfaces, T. Yue, S. Member, Z. H. Jiang, and D. H. Werner, 2016)



รูปที่ 2.8 การนำโหนดความจุแบบอินเตอร์ดิคัลมาปรับใช้กับสายอากาศ

(T. Yue, Z. H. Jiang, and D. H. Werner, 2014)

2.2.2.2 เรโซเนเตอร์วงแหวน

นักวิจัยส่วนใหญ่นิยมนำโครงสร้างมาประยุกต์ใช้ในการส่งผ่านคลื่น ซึ่งเรโซเนเตอร์วงแหวนสามารถควบคุมค่าซีมชาบแม่เหล็กได้ดี เกิดจากการที่สนามแม่เหล็กหมุนวนรอบขดลวดของเรโซเนเตอร์วงแหวน ทั้งนี้ทั้งนั้นยังขึ้นอยู่กับการป้อนทิศทางของคลื่นให้กับโครงสร้าง ซึ่งบางโครงสร้างของเรโซเนเตอร์วงแหวนก็สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสะท้อนคลื่นหรือควบคุมค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าจากสนามไฟฟ้าภายในโครงสร้างได้เช่นกัน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้งานโครงสร้างของเรโซเนเตอร์วงแหวน (T. Decoopman, O. Vanbésien and D. Lippens, 2004) ในรูปที่ 2.9 เรโซเนเตอร์วงแหวนถูกนำไปใช้ในด้าน การส่งผ่าน โดยโครงสร้างจะประกอบไปด้วยเรโซเนเตอร์วงแหวนและแท่งโลหะประดิษฐ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้

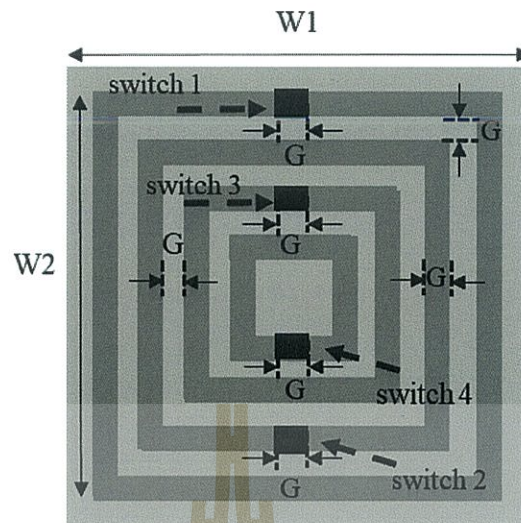
เรโซเนเตอร์วงแหวนจะทำหน้าที่ควบคุมค่าซิมซบแม่เหล็กและแท่งโลหะประดิษฐ์จะทำหน้าที่ควบคุมค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าจะกำหนดให้สนามแม่เหล็กพุ่งเข้าในทิศทางตั้งฉากด้านหน้าของเรโซเนเตอร์วงแหวน ผลลัพธ์คือคุณภาพการส่งผ่านสูง ประสิทธิภาพของการส่งผ่านคลื่นสูงจากด้านหนึ่งไปสู่อีกด้านหนึ่งของวัสดุประดิษฐ์พลังแม่เหล็ก ใช้งานที่ย่านความถี่ X (X-band) (C. Jung, J. Kim, and J. Choi, 2013) ในรูปที่ 2.10 นำเสนอค่าซิมซบแม่เหล็ก ที่เกิดจากการควบคุมโดยเรโซเนเตอร์วงแหวนและค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าที่เกิดจากช่องว่างของเรโซเนเตอร์วงแหวนที่แยกออก จะเห็นว่าโครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวนถูกวางซ้อนกัน 4 วงแหวน โดยจะมีช่องว่างในแต่ละวงแหวนที่ต่างกันออกไป เกิดการสะท้อนและการส่งผ่านได้สี่ความถี่ โดยค่าซิมซบแม่เหล็กจะถูกควบคุมจากโครงสร้างของเรโซเนเตอร์วงแหวนทั้งสี่วงแหวน และค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าจะถูกควบคุมได้จากช่องว่างที่แยกออกของเรโซเนเตอร์วงแหวน และในส่วนของ (H. Shi et al., 2015) รูปที่ 2.11 เป็นโครงสร้างหนึ่งของอภิวัดคู่ที่ก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าโดยตรง (electric field coupled resonators:ELCRs) จากช่องว่างของคู่โลหะตรงกลางวงแหวนซึ่งมีลักษณะคล้ายการนำหลักการของแท่งโลหะประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าบริเวณผิว ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นตัวสะท้อนคลื่น

จากงานวิจัยของเรโซเนเตอร์วงแหวนที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าโครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวนนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการส่งผ่านคลื่น โดยการควบคุมค่าซิมซบแม่เหล็กและยังสามารถควบคุมค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าได้ ซึ่งส่งผลทำให้โครงสร้างมีคุณสมบัติเป็นตัวสะท้อนคลื่น นอกจากนี้ยังพบว่าแท่งโลหะประดิษฐ์ยังสามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับเรโซเนเตอร์วงแหวนซึ่งส่งผลต่อค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเช่นกัน

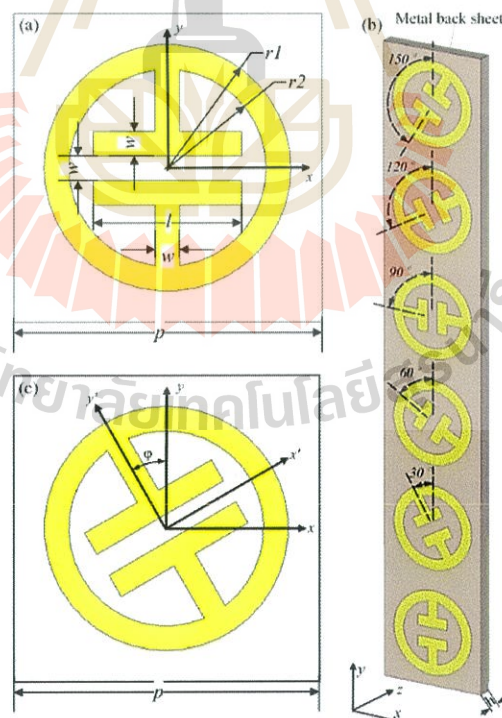


รูปที่ 2.9 โครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวนและแท่งโลหะประดิษฐ์

(T. Decoopman, O. Vanbésien and D. Lippens, 2004)



รูปที่ 2.10 โครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวนที่ถูกวางซ้อนกัน 4 วง
(C. Jung, J. Kim, and J. Choi, 2013)

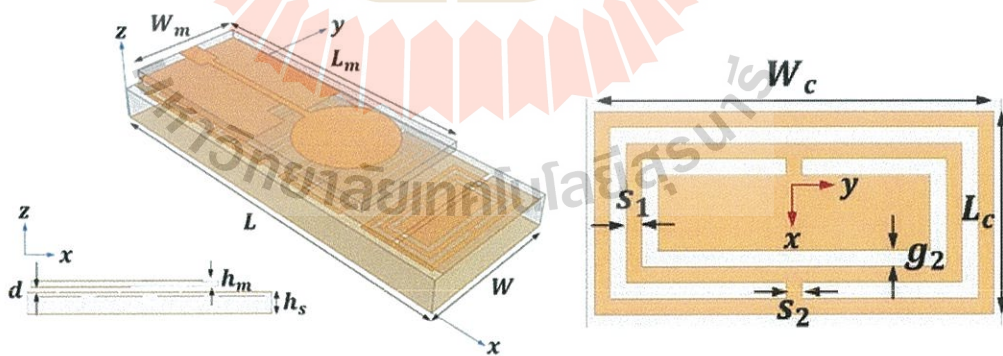


รูปที่ 2.11 โครงสร้างหนึ่งของอิวส์คูล์ที่ก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าโดยตรง
(electric field coupled resonators:ELCRs) (H. Shi et al., 2015)

2.2.3 โครงสร้างที่รองรับการใช้งานได้หลายความถี่ (Multifrequency)

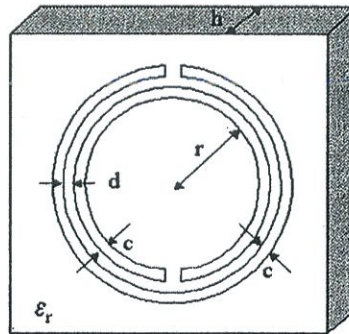
ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารโทรคมนาคมนั้นสามารถใช้งานได้หลายความถี่ จึงจำเป็นที่จะต้องออกแบบชิ้นงานให้รองรับความถี่ใช้งานได้มากกว่า 1 ความถี่ เพื่อทางเลือกในการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งการทำงานหลายความถี่ใช้งานโดยทั่วไป โครงสร้างที่นิยมออกแบบจะเป็นการประยุกต์ใช้โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน เช่น เรโซเนเตอร์วงแหวน (R. Metasurface, A. H. Panaretos and D. H. Werner) ในรูปที่ 2.12 การนำโครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวน มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศโมโนโพล โดยโครงสร้างประกอบด้วยวงแหวน 2 วงแหวน ซึ่งรองรับการใช้งานได้สองความถี่ที่ 1.9 GHz และ 2.5 GHz ตามลำดับ และในรูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างของเรโซเนเตอร์วงแหวนซึ่งประกอบไปด้วยวงแหวน 2 วงแหวน (F. Falcone, F. Martín, J. Bonache, R. Marqués, T. Lopetegui, and M. Sorolla, 2004) เช่นกัน รองรับการใช้งาน 2 ความถี่ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เรโซเนเตอร์วงแหวนขนาดเล็กควบคุมความถี่สูงและวงแหวนขนาดใหญ่ควบคุมความถี่ต่ำ

ข้อสังเกตคืองานวิจัยที่รองรับการใช้งานความถี่ที่มากกว่าหนึ่งความถี่ ส่วนใหญ่จะมีจำนวนของเรโซเนเตอร์วงแหวนตามความถี่ที่รองรับการใช้งานเพื่อช่วยควบคุมค่าซีมซบแม่เหล็กหรือค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าตามความถี่ที่ออกแบบใช้งาน ข้อเสียคือขนาดโครงสร้างของเรโซเนเตอร์วงแหวนค่อนข้างใหญ่ เมื่อนำมาประยุกต์ใช้งานที่ความถี่ต่ำ และจำนวนของเรโซเนเตอร์วงแหวนจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ใช้งาน



รูปที่ 2.12 การนำโครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวน มาประยุกต์ใช้งานเพื่อรองรับการใช้งาน 2 ความถี่

(R. Metasurface, A. H. Panaretos and D. H. Werner, 2017)



รูปที่ 2.13 โครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวน รองรับการใช้งานที่ความถี่ต่ำและความถี่สูง
(F. Falcone, F. Martín, J. Bonache, R. Marqués, T. Lopetegui, and M. Sorolla, 2004)

การออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดสองความถี่ ที่รองรับการใช้งานในระบบ LTE (1.8 GHz) และ WLAN (5.5 GHz) ซึ่งทำงานร่วมกับสายอากาศไดโพล ให้อัตราขยายของสายอากาศที่ค่อนข้างสูง โดยโครงสร้างตัวสะท้อนผิวอภิวัดนั้นประกอบไปด้วย เรโซเนเตอร์วงแหวนและอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ซึ่งการออกแบบเรโซเนเตอร์วงแหวนในงานวิจัยนี้สามารถควบคุมสนามไฟฟ้าได้จากโครงสร้างของตัวสะท้อนผิวอภิวัดจากการวางโครงสร้างในทิศทางที่ขนานกับสนามไฟฟ้า และเพื่อรองรับการใช้งานสองความถี่ การสร้างความถี่ที่สองในวิทยานิพนธ์นี้จะไม่เพิ่มเรโซเนเตอร์วงแหวนวงที่สองมาช่วยในการควบคุมความถี่ฮาร์มอนิกส์เหมือนกับที่นิยมใช้ในงานวิจัยที่ได้กล่าวมา แต่จะควบคุมด้วยเทคนิคการใช้เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นแทน โดยจะเพิ่มโครงสร้างของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์เข้ามาใช้เพื่อทำให้ชิ้นงานมีขนาดเล็กลง และเป็นที่ยอมรับกันว่าโครงสร้างของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์นั้นพื้นฐานมาจากแท่งโลหะประดิษฐ์ ซึ่งสามารถควบคุมค่าสนามไฟฟ้าได้ดี ซึ่งทั้งโครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวนและโครงสร้างของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ในงานวิจัยนี้ทั้งสองโครงสร้างจะถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมค่าสนามไฟฟ้า ซึ่งค่าสนามไฟฟ้ามีผลต่อค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ถ้าหากค่าสภาพยอมทางไฟฟ้ามีค่าเป็นลบ จะทำให้คุณสมบัติของโครงสร้างผิวอภิวัด มีลักษณะเป็นตัวสะท้อนคลื่นที่บริเวณผิว ซึ่งทั้งสองโครงสร้างนี้จึงเหมาะแก่การนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นตัวสะท้อนคลื่นในงานวิจัยนี้ และนอกจากจะสามารถควบคุมค่าสนามไฟฟ้าได้ดี ยังให้อัตราขยายของสายอากาศสูง รองรับการใช้งานได้สองความถี่ที่เกิดจากเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น มีขนาดเล็กลงจากการเพิ่มอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ ซึ่งรายละเอียดทฤษฎีของผิวอภิวัดเรโซเนเตอร์วงแหวน

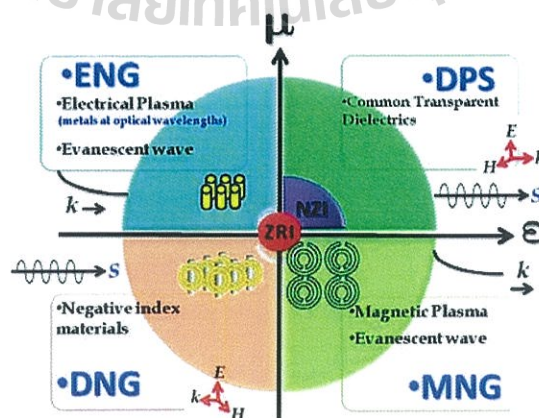
เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น รวมถึงเทคนิคของอินเตอร์ดิฟรอกาปาซิเตอร์ ทฤษฎีแบบรูปการแผ่พลังงานและสายอากาศไดโพล จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.3 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากอุปกรณ์สื่อสารสามารถรองรับการใช้งานได้หลายความถี่ เราจึงได้ออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดที่รองรับการใช้งานได้มากกว่าหนึ่งความถี่ โดยในงานวิจัยนี้ตัวสะท้อนผิวอภิวัดที่ออกแบบจะมีลักษณะที่เล็ก ใช้งานง่าย ให้อัตราขยายที่สูงกว่าแผ่นตัวสะท้อนปกติ เหมาะแก่การนำไปใช้งานร่วมกับสายอากาศมากกว่าแผ่นตัวสะท้อนทั่วไป โดยจากการปรับใช้เทคนิคและทฤษฎีต่าง ๆ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่นำมาใช้ในการออกแบบ ได้แก่ ผิวอภิวัด เรโซเนเตอร์วงแหวน ทฤษฎีเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น โหลดความจุแบบอินเตอร์ดิฟรอกาปาซิเตอร์หรืออินเตอร์ดิฟรอกาปาซิเตอร์และทฤษฎีของสายอากาศ ดังต่อไปนี้

2.3.1 คุณสมบัติผิวอภิวัด

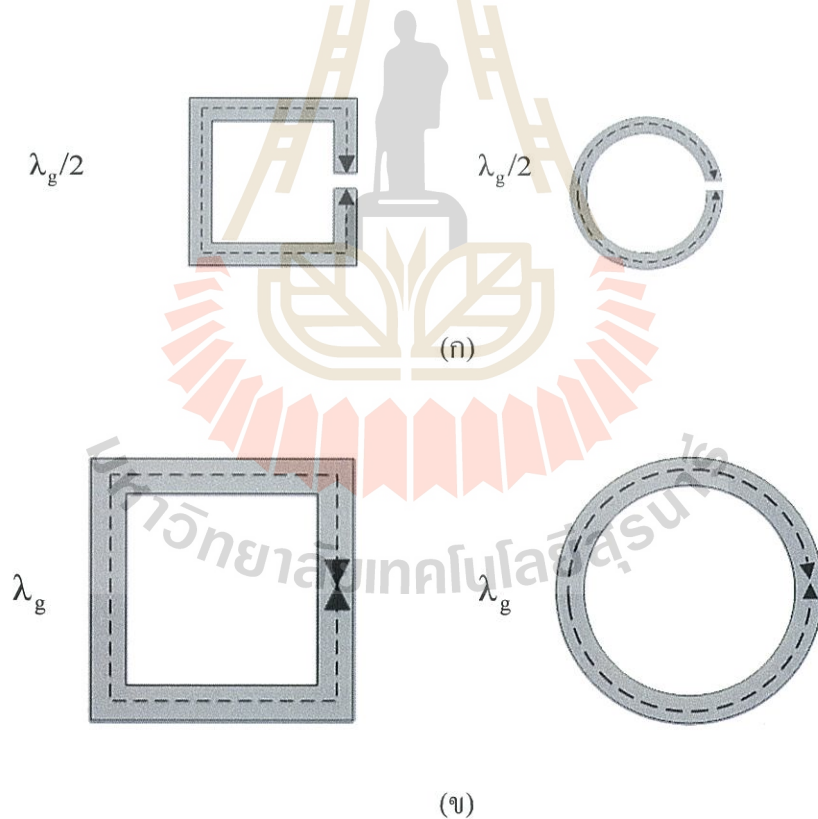
ผิวอภิวัดเป็นหนึ่งในอภิวัด แต่โครงสร้างของผิวอภิวัดนั้นจะมีลักษณะเป็นสองมิติ เป็นวัสดุเทียม มีลักษณะโครงสร้างที่ไม่ตายตัว ขนาดเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวคลื่น โดยผิวอภิวัดจะมีคุณสมบัติหลักดังแสดงในรูปที่ 2.14 คุณสมบัติหลักของผิวอภิวัดแบ่งได้ดังนี้ 1. เมื่อค่าของสภาพยอมเป็นลบและค่าซึมซาบเป็นบวกจะเรียกว่า ENG (Epsilon Negative Medium) 2. เมื่อค่าซึมซาบเป็นลบและค่าของสภาพยอมเป็นบวกจะเรียกว่า MNG (Mu Negative Medium) และนอกจากนี้ยังมีอีกคุณสมบัติที่ไม่ปกติของผิวอภิวัดที่ได้รับความสนใจอย่างมากอีกอย่างคือวัสดุที่มีดัชนีหักเหมีค่าเป็นศูนย์หรือใกล้เคียงศูนย์ (Zero Refractive Index: ZRI or Near Zero Refractive Index: NZI) ซึ่งแต่ละคุณสมบัติของผิวอภิวัดก็จะให้ผลที่แตกต่างกันออกไป



รูปที่ 2.14 แสดงคุณสมบัติของผิวอภิวัด (S. Chaimool and P. Akkaraekthalin, 2011)

2.3.2 เรโซเนเตอร์วงแหวน

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนารูปแบบของเรโซเนเตอร์ออกมามากมาย ซึ่งพบว่าวงจรเหล่านั้นมีลักษณะรูปร่างพื้นฐานอยู่ 5 รูปแบบหลัก (สมบูรณ์ ชีรวิสิฐพงศ์, 2556) ดังนี้ เรโซเนเตอร์เส้นตรง (Straight-line Resonator) เรโซเนเตอร์อินเตอร์ดิจิตอล (Interdigital Resonator) เรโซเนเตอร์รูปปิ่นปักผม (Hairpin Resonator) เรโซเนเตอร์วงแหวน (Ring Resonator) เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น (Stepped-Impedance Resonator) ซึ่งเรโซเนเตอร์วงแหวน เกิดจากการพับ หรือหักงอมาจากเรโซเนเตอร์เส้นตรง ซึ่งเรโซเนเตอร์เส้นตรงนั้นจะมีความยาวคือครึ่งความยาวคลื่น ($\lambda_g/2$) และเรโซเนเตอร์วงแหวนเมื่อพับแล้วก็ยังคงมีความยาวเท่าเดิมเช่นกัน โดยแบบรูปของเรโซเนเตอร์วงแหวนจะมีทั้งเป็นวงแหวนแบบที่เป็นวงกลม และวงแหวนที่เป็นสี่เหลี่ยม โดยจะมีทั้งแบบรูปเปิดและรูปปิด ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งวงแหวนในลักษณะรูปเปิดจะมีขนาดความยาวอยู่ที่ครึ่งความยาวคลื่น ($\lambda_g/2$) แต่วงแหวนในลักษณะที่เป็นรูปปิด จะมีความยาวเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่น



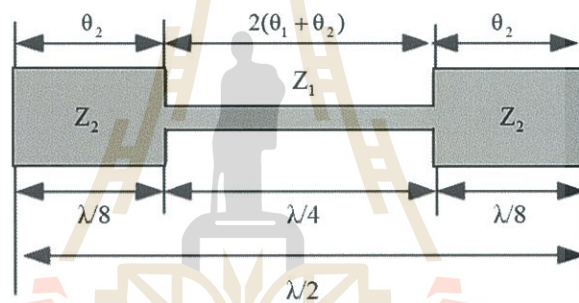
รูปที่ 2.15 เรโซเนเตอร์วงแหวน (สมบูรณ์ ชีรวิสิฐพงศ์, 2556)

(ก) แบบรูปเปิด (Open loop)

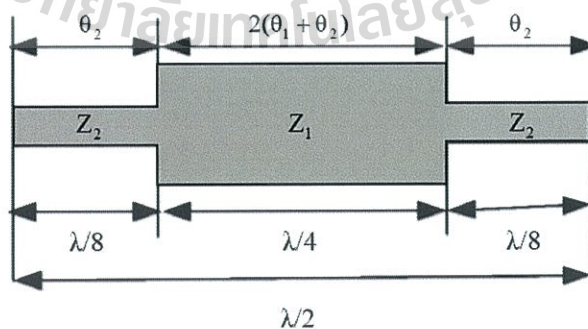
(ข) แบบรูปปิด (Close loop)

2.3.3 เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น

เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น คือ โครงสร้างเรโซเนเตอร์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะแตกต่างกัน ซึ่งอาจจะแตกต่างกันสองส่วนหรืออาจจะแตกต่างกันหลาย ๆ ส่วน (พงศธร ชมทอง, 2554) โดยเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นจะสามารถพิจารณาคุณสมบัติได้ดังนี้ ถ้าค่าของอิมพีแดนซ์ต่ำจะทำให้ขนาดของสายนำสัญญาณมีความกว้างและในทางกลับกัน ถ้าค่าของอิมพีแดนซ์นั้นมีค่าสูงจะทำให้ขนาดของสายนำสัญญาณแคบ ซึ่งจากรูปที่ 2.16 และ รูปที่ 2.17 โครงสร้างเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นจะมี Z_1 และ Z_2 เป็นอิมพีแดนซ์แตกต่างกัน ทำให้เราพิจารณาโครงสร้างเรโซเนเตอร์แบบขั้นจากอัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์ได้คือโครงสร้างเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นที่มีอัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์น้อยกว่าหนึ่งและอัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์แบบขั้นมากกว่าหนึ่ง



รูปที่ 2.16 โครงสร้างเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์ $K < 1$
(พงศธร ชมทอง, 2554)



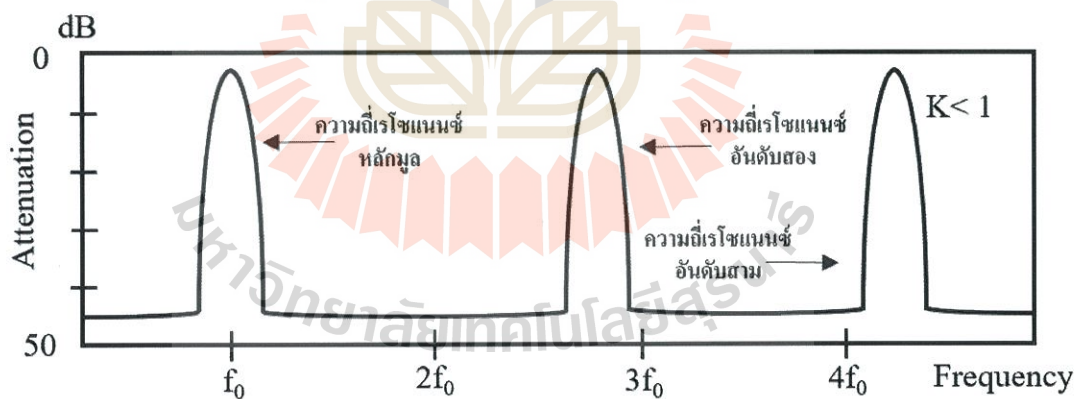
รูปที่ 2.17 โครงสร้างเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์ $K > 1$
(พงศธร ชมทอง, 2554)

โดยจากรูปที่ 2.16 และ รูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นที่มีค่าของอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้สามารถพิจารณาอัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์ K เพื่อทำการควบคุมความถี่เรโซแนนซ์หรือความถี่ฮาร์มอนิกส์ ซึ่งถ้าต้องการให้ความถี่ฮาร์มอนิกส์เลื่อนออกห่างจากความถี่มูลฐานหรือให้ความถี่ฮาร์มอนิกส์เพิ่มขึ้น จะต้องออกแบบโครงสร้างเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นให้มีอัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์ $K < 1$ แต่ถ้าหากต้องการให้ความถี่ฮาร์มอนิกส์เลื่อนเข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์หลักมูลหรือความถี่มูลฐานหรือให้ความถี่ฮาร์มอนิกส์มีค่าลดลงจะต้องออกแบบโครงสร้างเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นให้มีอัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์ $K > 1$ โดยอัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์หาได้จากสมการ 3.1

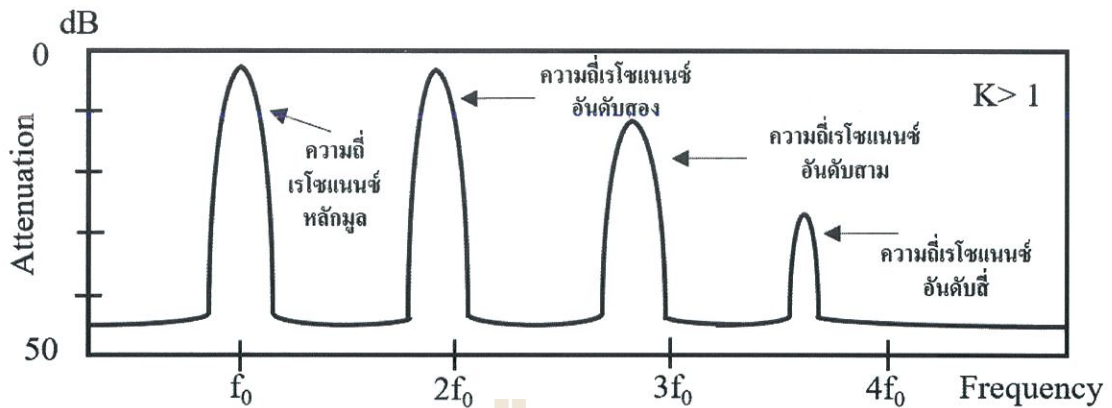
$$K = \frac{Z_2}{Z_1} \tag{2.1}$$

โดยที่

$$K = \tan\theta_1 \tan\theta_2 \tag{2.2}$$



รูปที่ 2.18 ค่าการเลื่อนและการลดทอนของความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดจากเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น ค่าอัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์ $K < 1$ (พงศธร ชมทอง, 2554)



รูปที่ 2.19 ค่าการเลื่อนและการลดทอนของความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดจากรีโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น ค่าอัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์ $K > 1$ (พงศธร ชมทอง, 2554)

จากภาพที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์ $K < 1$ ที่ความถี่มูลฐานจะยังคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยความถี่ฮาร์มอนิกส์จะไม่เกิดเป็นจำนวนเท่าของค่าความถี่มูลฐาน ซึ่งตามปกติแล้วนั้นถ้าหากอัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์เท่ากับหนึ่ง ($K=1$) ความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจะต้องมีค่าเป็นจำนวนเท่าของค่าความถี่มูลฐาน โดยในรูปที่ 2.18 นี้แสดงให้เห็นว่าการที่อัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากันนั้นจะทำให้ความถี่ฮาร์มอนิกส์เลื่อนออกไปไกลจากความถี่มูลฐาน จากรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์ $K > 1$ ที่ความถี่มูลฐานจะยังคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์นั้นจะเลื่อนเข้าใกล้ความถี่มูลฐานและจะเกิดการลดทอนของสัญญาณที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่มีความถี่สูง

2.3.4 โหลดความจุแบบอินเตอร์ดิจิตอล (Interdigital Capacitor)

ปัจจุบัน โหลดความจุแบบอินเตอร์ดิจิตอลหรืออินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ได้ถูกเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย (Lee, Oh and Myung, 2006) (Chomtong, Akkaraekthalin and Vivek, 2013) (Li et al., 2007) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์เข้าไปในโครงสร้างงาน จะทำให้ชิ้นงานมีขนาดเล็กลงและได้ความถี่ที่ตรงตามที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งได้มีงานวิจัยที่ได้เปรียบเทียบขนาดก่อนและหลังใส่อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์เข้าไปแล้วสามารถทำให้ขนาดของชิ้นงานลดลง (Fengliu Xu, et al., 2010) จากการเพิ่มค่าของตัวเก็บประจุ เปรียบเสมือนว่าเราได้เพิ่มค่าของตัวเก็บประจุเข้าไปในวงจร ซึ่งเมื่อ capacitance load $\neq 0$ จะแสดงให้เห็นว่าความถี่จะลดลงจากค่าของตัวเก็บประจุที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการที่เพิ่มอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์เข้าไปก็เหมือนเพิ่มค่าของตัวเก็บประจุให้ความถี่เรโซแนนซ์ลดลง ตามสมการที่ 3.3

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.3)$$

จะเห็นว่ากรณีที่เพิ่มอินเตอร์ดิจิตอลเข้าไปไม่เพียงแต่ควบคุมความถี่ได้ แต่ยังสามารถทำให้ชิ้นงานมีขนาดเล็กลงอีกด้วย ซึ่งทั้งจำนวนของตัวเก็บประจุ ความกว้างของพื้น รวมทั้งความยาวของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ ล้วนแต่มีผลต่อความถี่และขนาดของชิ้นงาน (Quanqi Zhang, Yuanxin Li, Zhixi Liang, Hong-Zhou Tan and Yunliang Long, 2014) (Lung-Hwa Hsieh and Kai Chang, 2002) และพบว่าปรากฏการณ์ของคลื่นช้า (slow wave effect) ที่อยู่ในอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ก็ให้ผลในทำนองเดียวกันกับอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ ดังนั้นอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์สามารถลดขนาดของชิ้นงานลงได้ สำหรับโครงสร้างเรโซเนเตอร์อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ จะแสดงดังในรูป 2.20



รูปที่ 2.20 โครงสร้างเรโซเนเตอร์อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์

2.3.5 ทฤษฎีของสายอากาศ

ในการออกแบบสายอากาศเพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพเราจะต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ค่าของการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss) และแบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) เป็นต้น

2.3.5.1 การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ

การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเป็นการแสดงถึงค่าการสูญเสียเมื่อป้อนพลังงานให้กับสายอากาศและยังสามารถแสดงถึง ช่วงแบนด์วิดท์ของสายอากาศที่สามารถทำงานได้ โดยมีค่าเท่ากับหรือต่ำกว่า -10 dB รวมทั้งแสดงถึงคุณลักษณะของอัตราส่วน คลื่นนิ่ง (Standing

Wave Ratio, SWR) โดยค่า SWR และค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Voltage reflection coefficient)

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} \quad (2.4)$$

เมื่อ Γ คือ สัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับ

V_r คือ แรงดันสะท้อนกลับ

V_i คือ แรงดันตกกระทบ

จากสมการที่ (2.5) ถ้าสัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับมีค่าเป็นบวกแสดงว่าแรงดันสะท้อนกลับมีเฟสตรงกัน (in phase) แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบแสดงว่าแรงดันสะท้อนกลับมีเฟสตรงกันข้าม (out of phase) การหาค่าเปอร์เซ็นต์ของคลื่นแรงดันสะท้อนกลับหาได้ดังนี้

$$\% \text{ แรงดันสะท้อนกลับ} = \Gamma \times 100$$

(2.5)

กำลังงานหาได้จากแรงดันยกกำลังสองหารด้วยอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ Z_C

$$P = \frac{V^2}{Z_C} \quad (2.6)$$

ฉะนั้นสัมประสิทธิ์กำลังงานสะท้อนกลับ (Power reflection coefficient) มีค่าเท่ากับกำลังสองของค่าสัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับ

$$\Gamma^2 = \frac{P_r}{P_i} \quad (2.7)$$

เมื่อ Γ คือ สัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับ

P_r คือ กำลังงานสะท้อนกลับ

P_i คือ กำลังงานตกกระทบ

เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ได้โดย

$$\% \text{ แรงคืนสะท้อนกลับ} = \Gamma^2 \times 100 \quad (2.8)$$

นอกจากนี้สัมประสิทธิ์แรงคืนสะท้อนกลับยังสามารถหาได้จากอัตราส่วนของผลต่างและผลรวมระหว่าง โหลดกับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C} \quad (2.9)$$

โดยที่ Z_C และ Z_L เป็นอิมพีแดนซ์ของสายส่งและอิมพีแดนซ์ของโหลด เนื่องจากอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งเท่ากับ 50 โอห์ม อิมพีแดนซ์โหลด ก็คือสายอากาศที่เราทำการออกแบบ ถ้าสามารถออกแบบให้เท่ากับ 50 โอห์มก็จะไม่เกิดการสะท้อนกลับ แต่ถ้าไม่เท่ากับ 50 โอห์ม ก็จะเกิดการสะท้อนกลับจากโหลดไปยังแหล่งกำเนิด ทำให้เกิดคลื่นนิ่ง (SWR) ในสายส่ง โดยการวัดค่า SWR เป็นอัตราส่วนระหว่างของแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นนิ่งกับแอมพลิจูดต่ำสุดของคลื่นนิ่ง โดยค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ของอัตราส่วนคลื่นนิ่ง คือมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.0 สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.10)

$$SWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.10)$$

ถัดไปเป็นการแสดงสมการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศ โดยมีความสัมพันธ์เหมือนกับค่าของอัตราส่วนคลื่นนิ่ง โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.10)

$$\text{Return Loss} = 10 \log |S_{11}|^2 = -20 \log (|\Gamma|) \quad (2.11)$$

เนื่องจากการแมตช์อิมพีแดนซ์ของสาย อากาศที่ดี ค่าของการสูญเสียย้อนกลับต้องน้อยกว่า 10 dB เมื่อคำนวณย้อนกลับแล้วค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนต้องน้อยกว่า 0.3162 ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง น้อยกว่า 2 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ตั้งแต่แรก (ภาวิณี สุวรรณทา, 2559)

2.3.5.2 แบบรูปการแผ่พลังงาน

แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) คือ รูปภาพที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น โดยแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศสามารถแบ่งออกเป็นดังนี้

แบบรูปไอโซโทรปิก (Isotropci Pattern) จะเป็นแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่มีการแผ่พลังงานออกไปในทุกทิศทางเท่ากันทั้งหมดเสมือนมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม ซึ่งในความเป็นจริงนั้น ไม่มีสายอากาศใดเลยที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานในลักษณะเช่นนี้ทั้งในทฤษฎีและปฏิบัติ จึงถือว่าเป็นแบบรูปที่มีลักษณะที่เป็นอุดมคติมากกว่า บางครั้งเรียกว่าตัวแผ่พลังงานแบบไอโซโทรปิก (Isotropci Pattern) อย่างไรก็ตามมักจะถูกนำมาใช้ในการกำหนดพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ของสายอากาศ

สายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) คือ สายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่พลังงานหรือรับกำลังเข้ามาในทิศทางใดทิศทางหนึ่งอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าทิศทางอื่น โดยคำศัพท์นี้มักจะใช้กับสายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) มากกว่าของสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น (Half-Wavelength Dipola)

สายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omnidirectional Antenna) คือ สายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่พลังงานออกไปรอบตัวในระนาบใดระนาบหนึ่ง ส่วนระนาบอื่นที่ตั้งฉากกันจะมีการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางเดียว ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นคุณสมบัติของสายอากาศชนิดที่ทำจากเส้นลวด (รังสรรค์ วงศ์สรรค์, 2555)

2.4 สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ใช้งานร่วมกับสายอากาศไดโพลซึ่งมีแบบรูปเป็นสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวรองรับการใช้งานในระบบ LTE และ WLAN โดยเริ่มแรกได้ศึกษาเกี่ยวกับตัวสะท้อนทั่วไปซึ่งตัวสะท้อนโดยทั่วไปส่วนใหญ่ทำงานได้ 1 ความถี่ การออกแบบโครงสร้างและติดตั้งมีความซับซ้อน ต่อมาจึงได้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผิวอภิวัดคู่ เนื่องจากผิวอภิวัดคู่มีลักษณะโครงสร้างที่ง่ายต่อการออกแบบ นำไปประยุกต์ใช้งานง่าย มีขนาดเล็ก ซึ่งลักษณะโครงสร้างพื้นฐานที่มีผลต่อคุณสมบัติของตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ คือเรโซเนเตอร์วงแหวนและแท่งโลหะประดิษฐ์ซึ่งทั้งสองมีผลต่อค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าซิมซาบแม่เหล็กโดยได้ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างที่มีผลต่อความถี่ เพื่อให้สามารถรองรับความถี่ใช้งานได้มากกว่า 1 ความถี่สำหรับทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องนั้น หัวข้อที่กล่าวถึงได้แก่ ผิวอภิวัดคู่เรโซเนเตอร์วงแหวน เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบชั้น โหลดความจุแบบอินเตอร์ดิจิตอลหรืออินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ รวมถึงทฤษฎีสายอากาศ เพื่อนำไปปรับใช้ในงานวิจัยนี้ในบทถัดไป

บทที่ 3

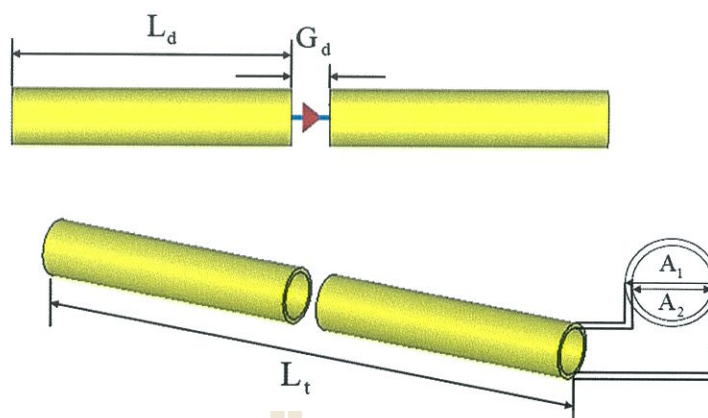
การออกแบบ

3.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์และการออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดศุ โดยเป็นการออกแบบเรโซเนเตอร์วงแหวนแบบขึ้นร่วมกับอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ ในการออกแบบเรโซเนเตอร์วงแหวนแบบขึ้นเป็นการสร้างและควบคุมความถี่ฮาร์มอนิกส์ ซึ่งจากปริทัศน์วรรณกรรมที่ได้ยกตัวอย่างมาก่อนหน้านี้จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของเรโซเนเตอร์วงแหวนซึ่งนักวิจัยส่วนใหญ่นิยมนำไปประยุกต์ใช้นั้น จะใช้เรโซเนเตอร์วงแหวนเพื่อควบคุมค่าซีมซาบแม่เหล็ก แต่ในงานวิจัยนี้จะนำเรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์มาประยุกต์ใช้เพื่อควบคุมค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและใช้เทคนิคแบบขึ้นเพื่อควบคุมความถี่ฮาร์มอนิกส์ ซึ่งการที่เพิ่มอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์เข้ามายังสามารถทำให้ขนาดของชิ้นงานมีขนาดที่เล็กลงอีกด้วย ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบชิ้นงานที่ความถี่ใช้งานเริ่มตั้งแต่ 1.12-2.02 GHz และ 3.45-5.95 GHz สำหรับการประยุกต์ใช้ที่ระบบ LTE และ WLAN ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบเพื่อให้เมื่อทำงานร่วมกับสายอากาศไดโพลจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานในลักษณะเจาะจงทิศทาง (directional radiation) หรือคลื่นมีการแพร่กระจายแบบชี้ทิศทางไปทางด้านหน้า เมื่อทำงานร่วมกับสายอากาศไดโพลจะให้อัตราขยายของสายอากาศที่เพิ่มขึ้น โดยได้ทำการจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดศุร่วมกับสายอากาศไดโพลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของตัวสะท้อนผิวอภิวัดศุที่ใช้งานร่วมกับสายอากาศไดโพล ก่อนที่จะสร้างตัวสะท้อนผิวอภิวัดศุและสายอากาศไดโพลต้นแบบ ในบทถัดไป

3.2 การจำลองแบบสายอากาศไดโพล

เนื่องจากงานวิจัยนี้ทำการออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดศุที่ทำงานร่วมกับสายอากาศไดโพล จึงต้องทำการจำลองสร้างแบบสายอากาศไดโพลขึ้นมาด้วย โดยสายอากาศไดโพลที่ทำการจำลองแบบนั้นจะมี 2 แบบ คือ สายอากาศไดโพลที่สามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 1.8 GHz และสายอากาศไดโพลที่สามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 5.5 GHz ซึ่งจะแสดงโครงสร้างของสายอากาศไดโพลในรูปที่ 3.1 และพารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพลตามตารางที่ 3.1

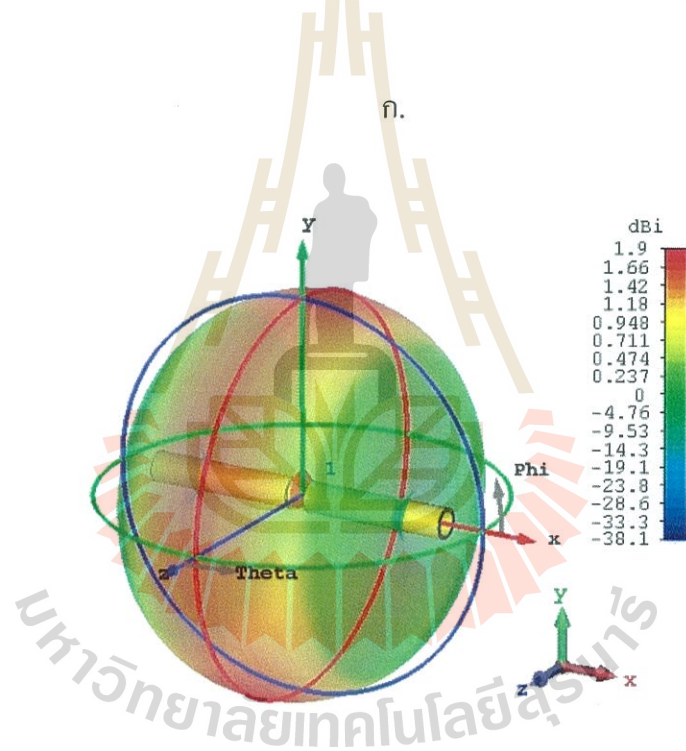
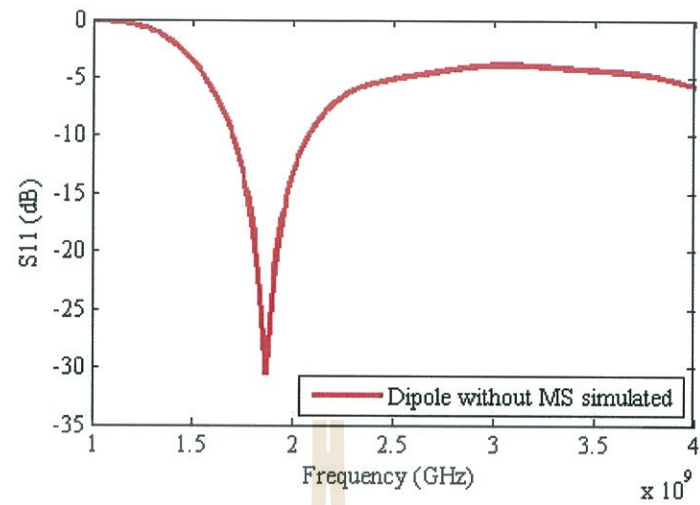


รูปที่ 3.1 โครงสร้างแบบจำลองสายอากาศไดโพล

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์จากการจำลองแบบสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 1.8 GHz และ 5.5 GHz

พารามิเตอร์	ความถี่ 1.8 GHz		ความถี่ 5.5 GHz	
	ขนาด (มิลลิเมตร)	ขนาด (λ)	ขนาด (มิลลิเมตร)	ขนาด (λ)
L_d	29.00	0.17λ	26.50	0.4858λ
L_t	62.00	0.37λ	57.00	1.0450λ
G_d	4.00	0.024λ	4.00	0.0733λ
A_1	6.00	0.036λ	6.00	0.1100λ
A_2	5.00	0.029λ	5.00	0.0917λ

จากรูปที่ 3.2 แบบจำลองสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 1.8 GHz โดยรูปที่ 3.2 ก. จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB จะครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.68 GHz ถึง 2.08 GHz ซึ่งความถี่ที่เราต้องการใช้งานคือ 1.8 GHz รูปที่ 3.2 ข. จะแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ และรูปที่ 3.2 ค. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าจะแสดงในรูปที่ 3.2 ง.



ข.

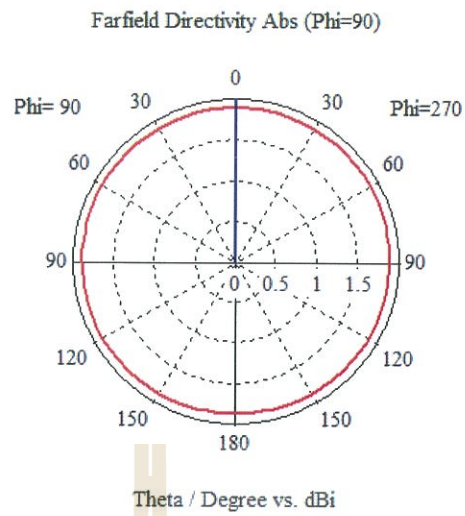
รูปที่ 3.2 แบบจำลองสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 1.8 GHz

ก. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

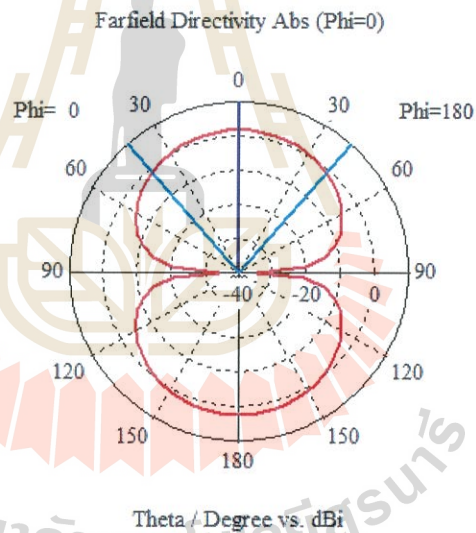
ข. แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ

ค. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

ง. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า



ก.



ง.

รูปที่ 3.2 แบบจำลองสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 1.8 GHz (ต่อ)

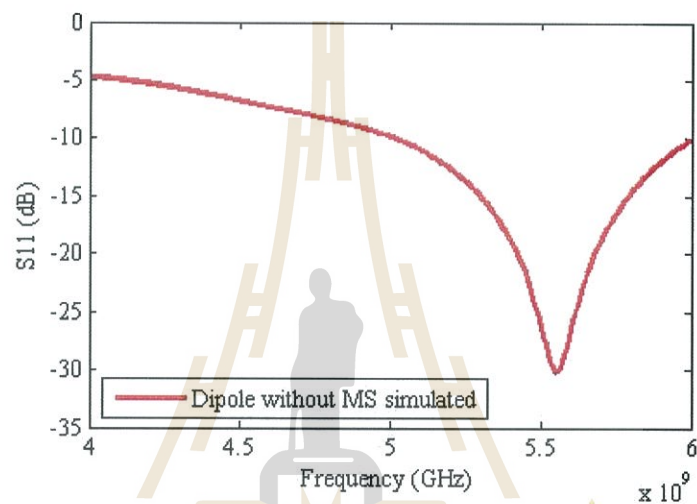
ก. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

ข. แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ

ค. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

ง. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.3 แบบจำลองสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 5.5 GHz โดยรูปที่ 3.3 (ก.) จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB จะครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 5.01 GHz ถึง 5.96 GHz ซึ่งความถี่ที่เราต้องการใช้งานคือ 5.5 GHz รูปที่ 3.3 (ข.) จะแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ และรูปที่ 3.3 (ค.) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าจะแสดงในรูปที่ 3.3 (ง.) และค่าอัตราขยายจะแสดงในตารางที่ 3.2



ก.

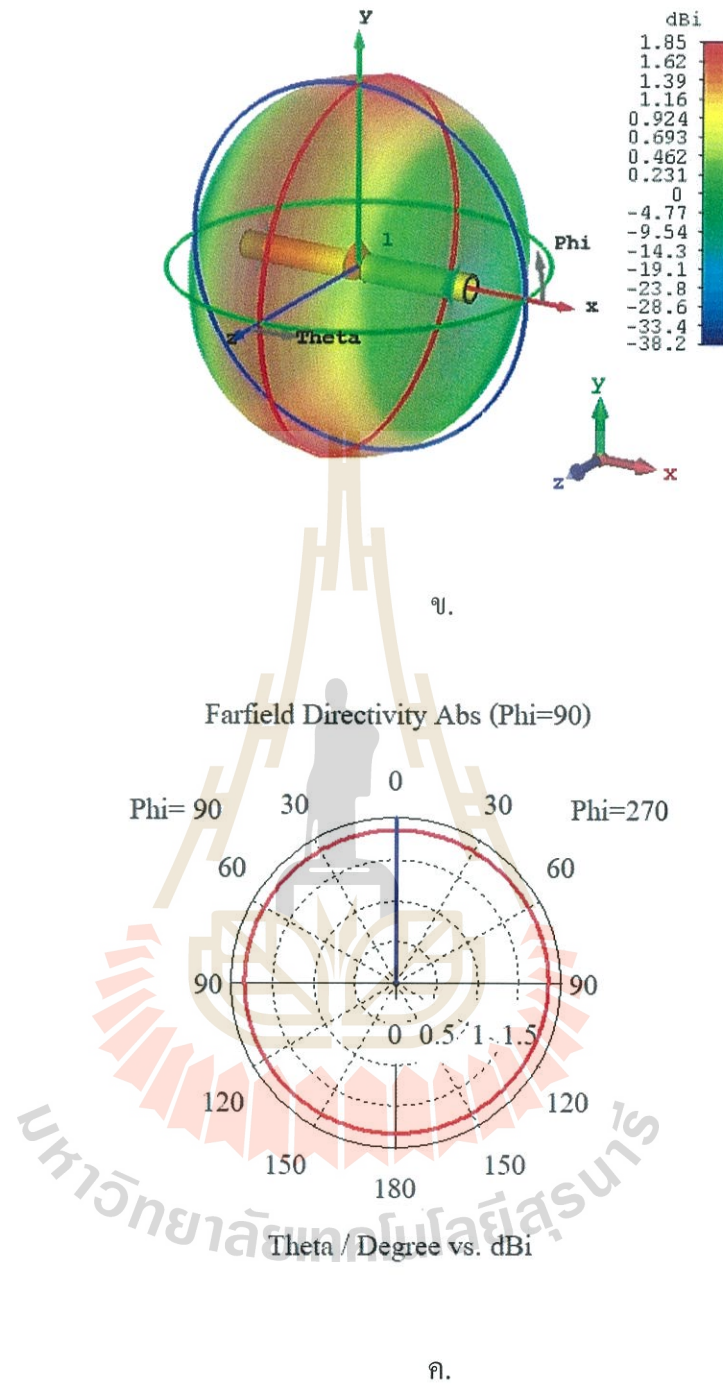
รูปที่ 3.3 แบบจำลองสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 5.5 GHz

ก. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

ข. แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ

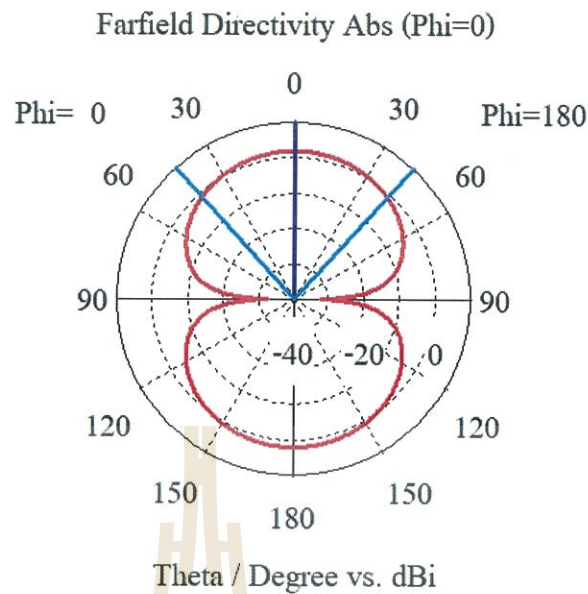
ค. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

ง. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.3 แบบจำลองสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 5.5 GHz (ต่อ)

- ก. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ
- ข. แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ
- ค. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก
- ง. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.3 แบบจำลองสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 5.5 GHz (ต่อ)

- ก. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ
- ข. แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ
- ค. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก
- ง. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

ตารางที่ 3.2 ค่าอัตราขยายจากผลการจำลองสายอากาศไดโพล

ความถี่ (GHz)	อัตราขยาย (dBi)
1.8	1.9
5.5	1.85

3.3 การออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดศุโดยพิจารณาจากยูนิตเซลล์ (Unit cell)

3.3.1 การออกแบบโดยใช้เรโซเนเตอร์วงแหวน

การออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดศุโดยพิจารณาจากยูนิตเซลล์เริ่มจากการออกแบบเรโซเนเตอร์วงแหวนแบบสี่เหลี่ยมขึ้นมา 1 วงแหวน ซึ่งได้กำหนดความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่กลาง $f_0 = 1.8$ GHz โดยใช้วัสดุแผ่นพิมพ์วงจร FR-4 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก $\epsilon_r = 4.3$ และมีความหนา

เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร กำหนดให้พารามิเตอร์ของเรโซเนเตอร์วงแหวนแบบสี่เหลี่ยมดังนี้
 $W = 1.25$ มิลลิเมตร $G = 12$ มิลลิเมตร $R_1 = 32$ มิลลิเมตร $R_2 = 27$ มิลลิเมตร $R_3 = 7.5$ มิลลิเมตร
 $h = 0.035$ มิลลิเมตร $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$ และ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$ โดยจากการกำหนด
 ค่าพารามิเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสามารถนำมาคำนวณหาความถี่เรโซแนนซ์ได้จากสมการ

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

f คือ ความถี่เรโซแนนซ์

L คือ ค่าของตัวเหนี่ยวนำ

C คือ ค่าตัวเก็บประจุ

สามารถหาค่าของตัวเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุได้จากสมการ (Jesús Sánchez Pastor, 2017)

$$L_{\text{tot}} = \frac{\mu_0 R_1 R_2}{h} \quad (3.2)$$

$$C_{\text{surf}} = \frac{\epsilon_0 [(h + 2w) \times (R_2 + 2R_3)]}{\gamma} \quad (3.3)$$

ซึ่งจากสมการ (3.2) จะสามารถคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำได้ดังนี้

$$\begin{aligned} L_{\text{tot}} &= \frac{\mu_0 R_1 R_2}{h} \\ &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \times (32 \times 10^{-3}) \times (27 \times 10^{-3})}{0.035 \times 10^{-3}} \\ &= 31.02 \times 10^{-6} \text{ หรือ } 31.02 \mu\text{H} \end{aligned}$$

จากสมการ (3.3) จะสามารถคำนวณค่าตัวเก็บประจุที่ผิวอ็อกไซด์ได้ดังนี้

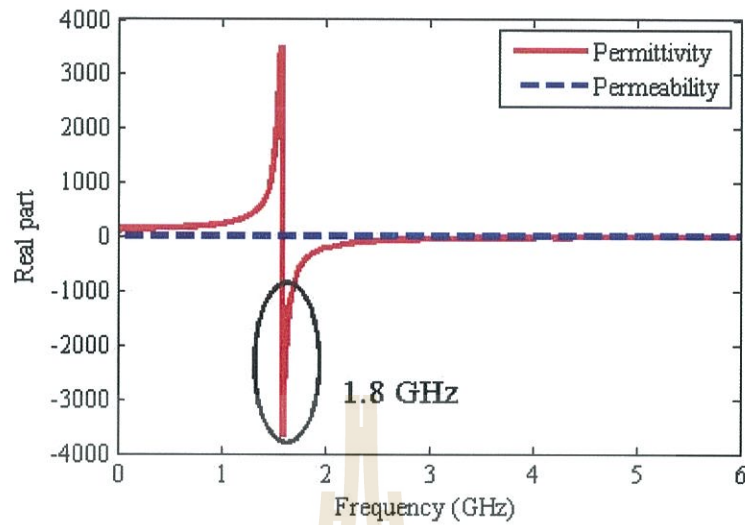
เมื่อ $\gamma = 2.853$ คือค่าคงที่ของเรขาคณิตสี่เหลี่ยม (Nor Muzlifah Mahyuddin and NurLiyana Abdul Latif, 2013)

$$\begin{aligned}
 C_{\text{surf}} &= \frac{\epsilon_0 [(h + 2w) \times (R_2 + 2R_3)]}{\gamma} \\
 &= \frac{8.85 \times 10^{-12} [(0.035 \times 10^{-3} + (2 \times 1.25 \times 10^{-3})) \times (27 \times 10^{-3} + (2 \times 7.5 \times 10^{-3}))]}{2.853} \\
 &= 0.33 \times 10^{-15} \text{ หรือ } 0.33 \text{ fF}
 \end{aligned}$$

เมื่อได้ค่าตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ $31.02 \mu\text{H}$ และค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 0.33 fF จึงสามารถนำค่าของตัวเหนี่ยวนำรวมและค่าตัวเก็บประจรวมที่ได้นั้นไปคำนวณหาความถี่เรโซแนนซ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\text{tot}}C_{\text{tot}}}} \\
 &= \frac{1}{2\pi\sqrt{31.02 \times 10^{-6} \times (0.33 \times 10^{-15})}} \\
 &= 1.57 \times 10^9 \text{ หรือ } 1.57 \text{ GHz}
 \end{aligned}$$

จากนั้นได้นำค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้มาทำการจำลองแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดศู โดยแสดงโครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวนแบบสี่เหลี่ยม 1 วงแหวน ในรูปที่ 3.4 และแสดงผลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านดังรูปที่ 3.5 โดยสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ความถี่ 1.8 GHz นั้นมีค่าเป็นลบ ทำให้ตัวสะท้อนผิวอภิวัดศูส่งผ่านได้ไม่ดี ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนนั้นมีค่าเข้าใกล้ 0 ทำให้ตัวสะท้อนผิวอภิวัดศูเกิดการสะท้อนคลื่นที่ช่วงความถี่ 1.8 GHz จึงวิเคราะห์ได้ว่าเรโซเนเตอร์วงแหวนที่ทำการจำลองนี้จะสะท้อนได้ดีที่ความถี่ 1.8 GHz สำหรับค่าสภาพยอมไฟฟ้าและค่าซึมซาบแม่เหล็กจะแสดงในรูปที่ 3.6

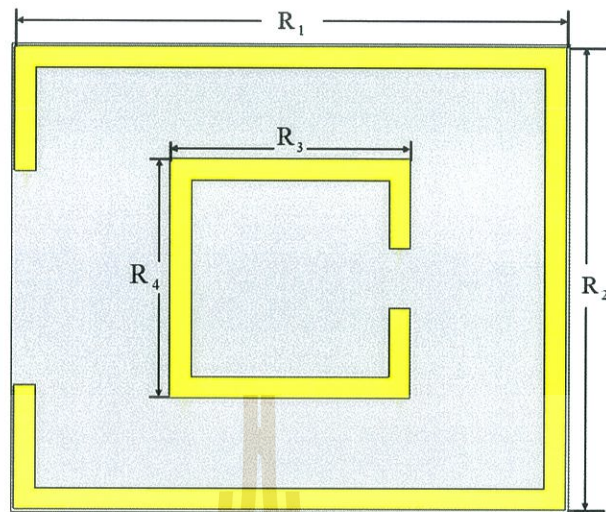


รูปที่ 3.6 ค่าสภาพยอมไฟฟ้าและค่าซึมซาบแม่เหล็กของเรโซเนเตอร์วงแหวน
แบบสี่เหลี่ยม 1 วงแหวน

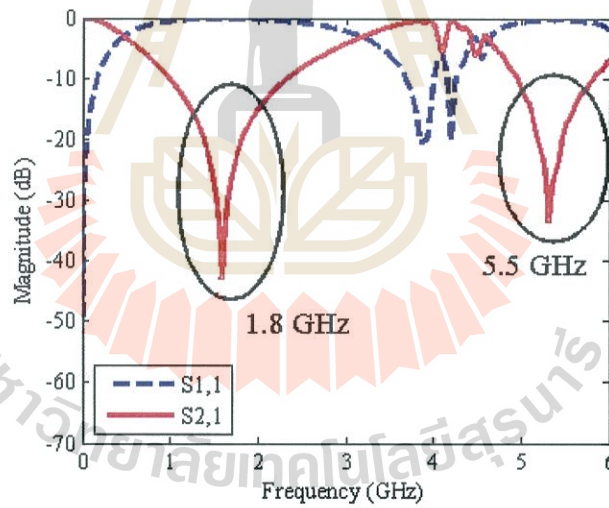
จากการคำนวณหาความถี่เรโซแนนซ์โดยการจำลองเรโซเนเตอร์วงแหวนแบบสี่เหลี่ยม 1 วงแหวน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์นั้นจะเห็นได้ว่าผลที่คำนวณมีความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 1.57 GHz ส่วนผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมจะมีความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 1.59 GHz ซึ่งความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันและครอบคลุมย่านความถี่ 1.8 GHz

3.3.2 ศึกษาการออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดโดยใช้เรโซเนเตอร์วงแหวน 2 วงแหวน

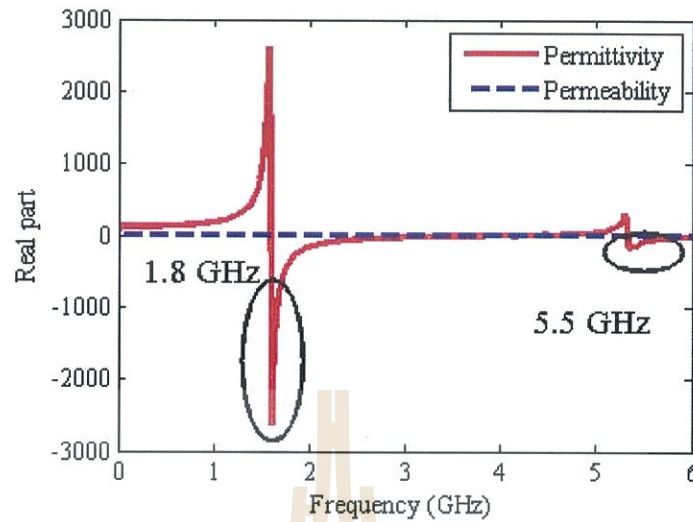
เนื่องจากเรโซเนเตอร์วงแหวน 1 วงแหวน สามารถทำงานได้ 1 ความถี่ ซึ่งงานวิจัยนี้ต้องการที่จะออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดที่สามารถรองรับการใช้งานได้ 2 ความถี่ แต่เนื่องจากว่าเรโซเนเตอร์วงแหวน 1 วงแหวนนั้นสามารถรองรับการใช้งานได้ 1 ความถี่ โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ถ้าต้องการให้ใช้งานได้ 2 ความถี่ จะต้องทำการจำลองเรโซเนเตอร์วงแหวน 2 วง ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จะแสดงโครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวน 2 วงแหวน โดยวงนอกมีขนาดของเรโซเนเตอร์วงแหวน $R_1 = 32$ มิลลิเมตร และ $R_2 = 27$ มิลลิเมตร ส่วนวงในมีขนาดของเรโซเนเตอร์วงแหวน $R_3 = 14$ มิลลิเมตร และ $R_4 = 14$ มิลลิเมตร รูปที่ 3.8 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของเรโซเนเตอร์วงแหวน 2 วงแหวน ซึ่งจะมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าและค่าซึมซาบแม่เหล็กของเรโซเนเตอร์วงแหวน 2 วงแหวน ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.7 โครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวนแบบสี่เหลี่ยม 2 วงแหวน



รูปที่ 3.8 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน
ของเรโซเนเตอร์วงแหวนแบบสี่เหลี่ยม 2 วงแหวน

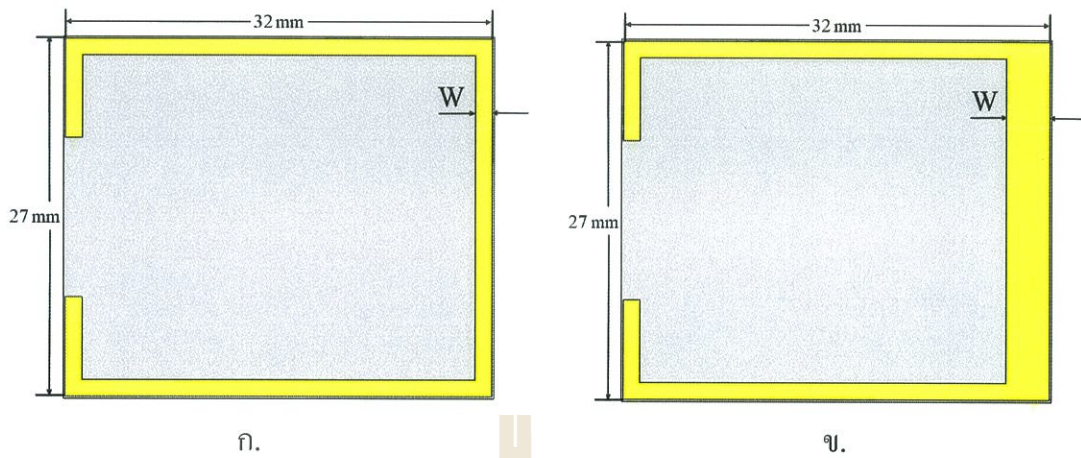


รูปที่ 3.9 ค่าสภาพยอมไฟฟ้าและค่าซึมซาบแม่เหล็กของเรโซเนเตอร์วงแหวนแบบสี่เหลี่ยม 2 วงแหวน

3.3.3 ศึกษาการออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดดูโดยใช้เรโซเนเตอร์

วงแหวนร่วมกับเทคนิคเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น

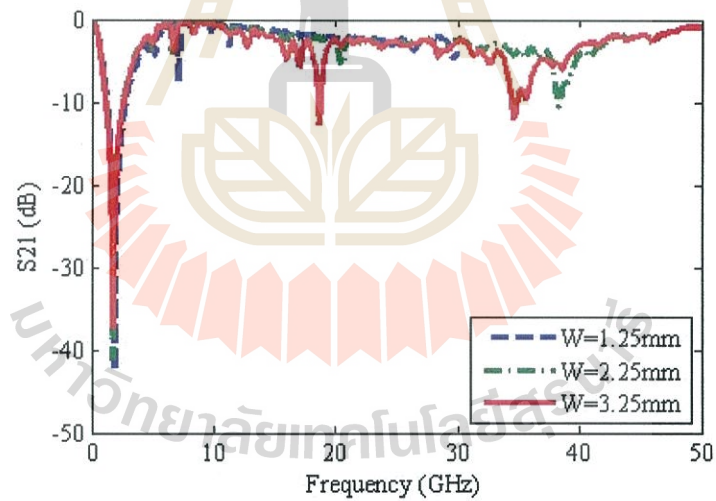
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเพิ่มเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นให้กับเรโซเนเตอร์วงแหวนพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 3.10 ก. เพื่อปรับให้ความถี่ฮาร์มอนิกส์สามารถใช้งานได้ ซึ่งจะแสดงโครงสร้างของเรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นดังรูปที่ 3.10 ข. จากการเพิ่มเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นเมื่อค่า W กว้างขึ้นจะทำให้ความถี่ฮาร์มอนิกส์มีค่าลดลงถ้า W แคบลงจะทำให้ความถี่ฮาร์มอนิกส์มีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 โครงสร้างของเรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบชั้น

ก. โครงสร้างของเรโซเนเตอร์วงแหวน

ข. โครงสร้างของเรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบชั้น

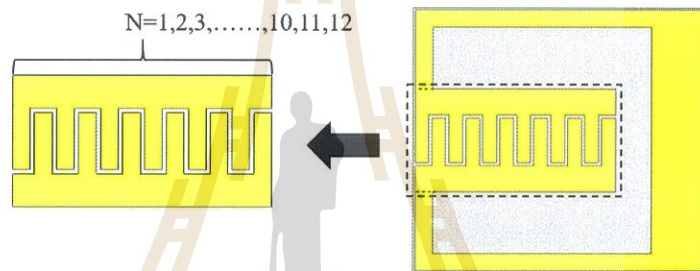


รูปที่ 3.11 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของเรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบชั้น

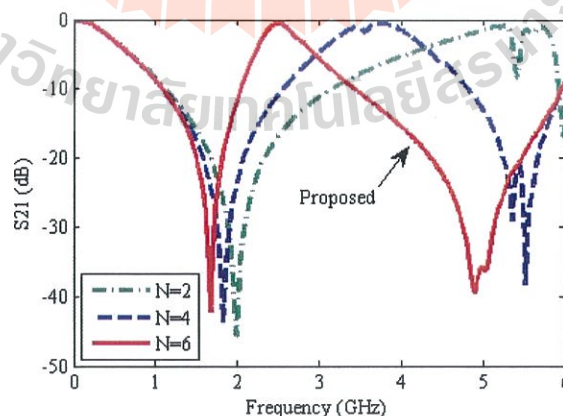
3.3.4 ศึกษาการออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดโดยใช้เรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับ

เทคนิคเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น และเทคนิคอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์

เนื่องจากการใช้เรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับเทคนิคของเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นนั้นยังทำให้ชิ้นงานมีขนาดที่ใหญ่และปรับความถี่ฮาร์มอนิกส์ได้ยาก ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการประยุกต์ใช้อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ เพื่อลดขนาดของเรโซเนเตอร์วงแหวนและใช้เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นทำการปรับควบคุมความถี่ฮาร์มอนิกส์ร่วมกับอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ซึ่งจากรูปที่ 3.12 แสดงโครงสร้างการใช้ เรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น และเพิ่มอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์โดยปรับจำนวนของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์เพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 3.13 จะแสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน



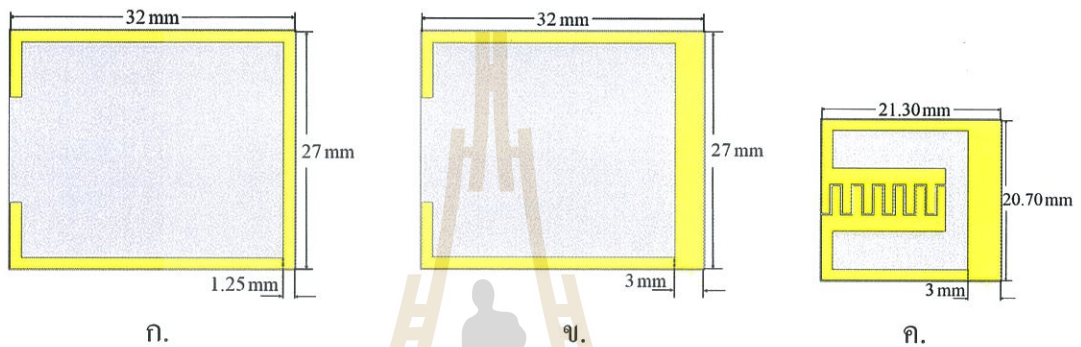
รูปที่ 3.12 โครงสร้างการใช้เรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น และอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์



รูปที่ 3.13 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ที่ได้จากการปรับเพิ่มจำนวนพินของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ (N)

3.3.5 สรุปการศึกษาการออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดดู

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดดู โดยเริ่มจากโครงสร้างพื้นฐานเรโซเนเตอร์วงแหวน รูป 3.14 ก. โดยใช้เทคนิคเพิ่มอิมพีแดนซ์แบบขั้น รูป 3.14 ข. เพื่อช่วยในการปรับและควบคุมความถี่ฮาร์มอนิกส์ ซึ่งจะเห็นว่าในรูป 3.14 ก. และรูป 3.14 ข. ขนาดของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ จึงได้เพิ่มอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์เข้ามาประยุกต์ใช้ในโครงสร้างเพื่อให้ชิ้นงานมีขนาดเล็กลงที่ $(\lambda/4)$ แสดงในรูป 3.14 ค.

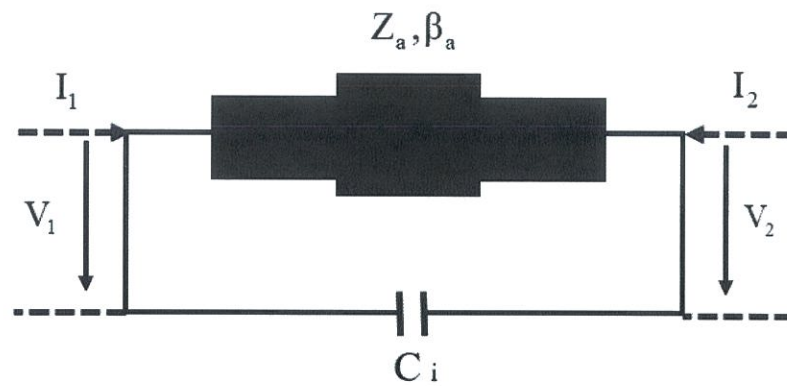


รูปที่ 3.14 รูปแบบโครงสร้างของตัวสะท้อนผิวอภิวัดดู

- ก. โครงสร้างพื้นฐานเรโซเนเตอร์วงแหวน
- ข. โครงสร้างพื้นฐานเรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับเทคนิคเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น
- ค. โครงสร้างพื้นฐานเรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับเทคนิคเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น และเทคนิคอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์

3.4 การวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์

เนื่องจากการออกแบบชิ้นงานตามความถี่ที่ 1.8 GHz โดยใช้โครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวนพื้นฐาน 1 วงแหวน ซึ่งสามารถคำนวณหาความถี่ได้จากสมการที่ (3.1) คำนวณหาค่าของตัวเหนี่ยวนำได้จากสมการที่ (3.2) และคำนวณหาค่าของตัวเก็บประจุได้จากสมการที่ (3.3) แต่เนื่องจากการออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดดูในงานวิจัยนี้ได้ใช้เรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับเทคนิคเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นเพื่อช่วยในการควบคุมความถี่และเทคนิคอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์เพื่อลดขนาดชิ้นงาน โดยการออกแบบสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 3.15 วงจรสมมูล



รูปที่ 3.15 วงจรสมมูล

เมื่อกำหนดให้ (X. Zhang, Y. Wen, and K. Zhou, 2009)

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ -I_2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

และ

$$A = D = \cos\theta_a - \frac{1}{2}\omega C_i Z_a \sin\theta_a \quad (3.5)$$

$$B = jZ_a \sin\theta_a \quad (3.6)$$

$$C = j \left(\omega C_i \cos\theta_a + \frac{1}{Z_a} \sin\theta_a - \frac{1}{4}\omega^2 C_i^2 Z_a \sin\theta_a \right) \quad (3.7)$$

เมื่อค่าของความยาวทางไฟฟ้าของสายนำสัญญาณ $\theta_a = \beta l$ ซึ่งมีผู้ที่ได้ทำการศึกษาและวิจัย (พงศธร ชมทอง, 2554) ได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ภายในสายนำสัญญาณโดยมองให้สายนำสัญญาณมีอิมพีแดนซ์ที่เท่ากัน แล้วพิจารณาความยาวทางไฟฟ้าที่มีความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งจะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ที่ทุกช่วงความถี่ตั้งแต่สองความถี่ขึ้นไปจนถึงลำดับที่ n และได้อธิบายถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วยสมการดังต่อไปนี้ โดยกำหนดให้

C_i คืออินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์

L_3 คือความยาวรวมของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์

L_4 คือความสูงของพื้นที่อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์

Z_a คือค่าของอิมพีแดนซ์สายนำสัญญาณ

β_a คือค่าคงตัวการแพร่กระจาย

θ_a คือความยาวทางไฟฟ้าของสายนำสัญญาณ

l คือความยาวสายนำสัญญาณที่ไม่มีการเชื่อมต่อกับอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์

$$C_i = \frac{(\epsilon_r + 1)}{L_3} L_4 (\epsilon_r + 1) [0.1(n-3) + 0.11] \quad (3.8)$$

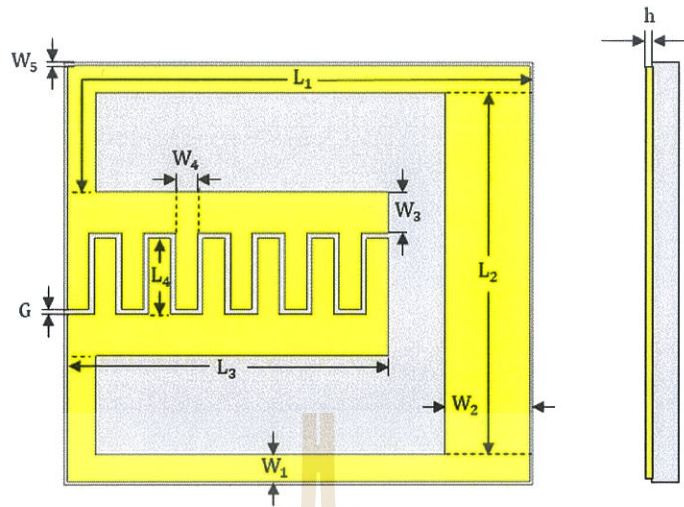
$$\theta_{a0} = 2 \tan^{-1} \frac{1}{\pi f_1 Z_a C_i} \quad (3.9)$$

$$\theta_{a1} = 2\pi - 2 \tan^{-1} (\pi f_2 Z_a C_i) \quad (3.10)$$

จากสมการข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งจะพบว่าค่าของ C_i จะมีผลกระทบต่อความถี่มูลฐานน้อย แต่จะมีผลกระทบต่อความถี่ฮาร์โมนิกส์มากกว่า ทำให้สรุปได้ว่าโครงสร้างของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์จะมีผลกระทบต่อความถี่ฮาร์โมนิกส์มากกว่าความถี่มูลฐานและการนำเทคนิคของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์มาประยุกต์ใช้ยังทำให้ชิ้นงานมีขนาดเล็กลงอีกด้วย

3.5 การออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดดู

จากการศึกษาการออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดดูโดยใช้โครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวนร่วมกับเทคนิคเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขึ้น และเทคนิคอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ ทำให้ได้โครงสร้างชิ้นงานของตัวสะท้อนผิวอภิวัดดู ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ซึ่งในการออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดดู (metasurface) จะเลือกใช้แผ่นพิมพ์วงจรซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ และความถี่ที่ต้องการจะแสดงในตารางที่ 3.3 และมีค่าพารามิเตอร์ของตัวสะท้อนผิวอภิวัดดูตามตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.16 โครงสร้างชิ้นงานของตัวสะท้อนผิวอภิวัดดู

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของแผ่นพิมพ์วงจรและความถี่ที่ต้องการ

แผ่นพิมพ์วงจร	FR-4
ค่าความสูงของชั้นสเตรด	1.6 มิลลิเมตร
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์	4.3
ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย	0.025
ค่าความถี่มูลฐาน	1.8 GHz
ค่าความถี่ฮาร์โมนิกส์	5.5 GHz

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวสะท้อนผิวอภิวัดดู

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)	ขนาด (λ)
W_1	1.25	0.0075λ
W_2	3.00	0.0180λ
W_3	1.80	0.0108λ
W_4	1.00	0.0060λ
W_5	0.15	0.0009λ
L_1	26.72	0.1603λ
L_2	18.20	0.1091λ

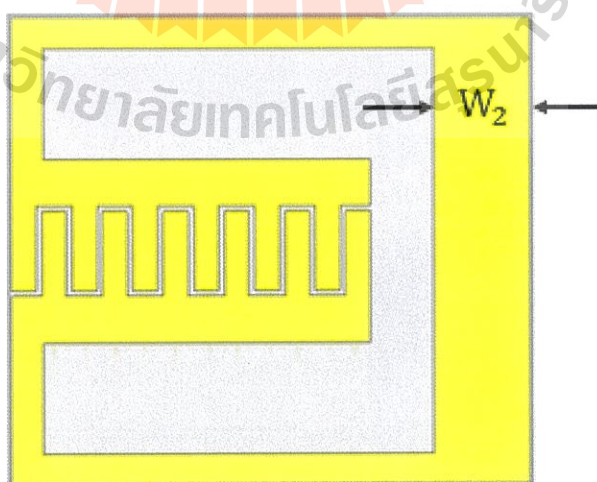
ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวสะท้อนผิวอภิวัดดู (ต่อ)

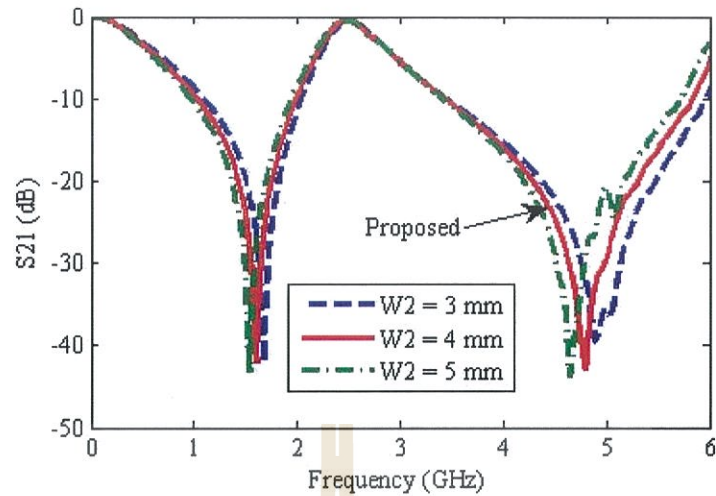
พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)	ขนาด (λ)
L_3	14.75	0.0885λ
L_4	3.50	0.0210λ
G	0.25	0.0015λ
h	0.035	0.0002λ

3.6 การปรับพารามิเตอร์ของตัวสะท้อนผิวอภิวัดดู

3.6.1 การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดดูต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้าง (W_2)

จากพารามิเตอร์ ในตารางที่ 3.3 จึงได้ทำการจำลองเปลี่ยนแปลงค่า W_2 เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยการปรับพารามิเตอร์นี้จะปรับทีละตัว โดยขณะที่พารามิเตอร์ตัวอื่นๆ จะต้องคงที่ จากนั้นจึงทำการจำลองปรับขนาดของ W_2 โดยเริ่มจากขนาด 3 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนแปลงค่า W_2 จะส่งผลกระทบต่อความถี่มูลฐานเล็กน้อย แต่จะส่งผลกระทบต่อความถี่ฮาร์มอนิกส์ โดยถ้า W_2 มีขนาดกว้างจะทำให้ความถี่ฮาร์มอนิกส์เลื่อนเข้าใกล้ความถี่มูลฐานหรือมีค่าลดลง แต่ถ้า W_2 มีขนาดแคบลงจะทำให้ความถี่ฮาร์มอนิกส์เลื่อนออกห่างจากความถี่มูลฐานหรือมีค่าเพิ่มขึ้น สุดท้ายได้พิจารณาความกว้างของ W_2 ที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.17

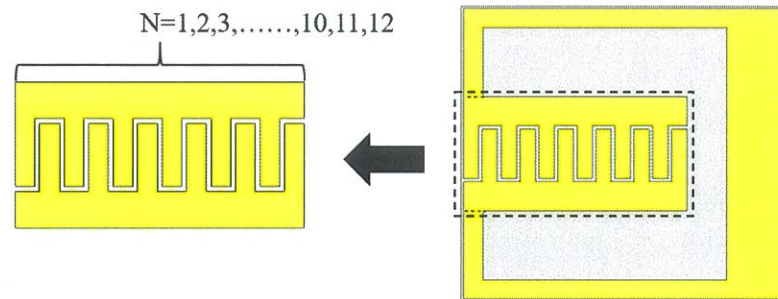
รูปที่ 3.17 การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดดูต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้าง (W_2)



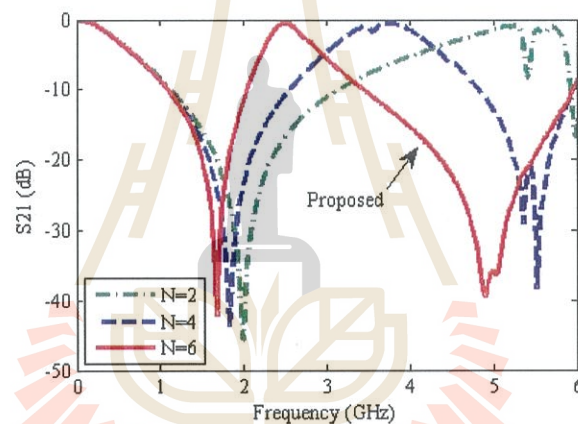
รูปที่ 3.18 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ที่ได้จากการปรับขนาดความกว้าง (W_2)

3.6.2 การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดชุดต้นแบบด้วยการปรับเพิ่มจำนวนพื้นของ อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ (N)

การจำลองปรับเพิ่มจำนวนพื้นของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุด ขณะที่ทำการปรับเพิ่มจำนวนพื้นของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์นี้ พารามิเตอร์ตัวอื่นๆ จะต้องคงที่ จากนั้นจึงทำการเพิ่มจำนวนพื้นของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ เข้าไปที่ละสองคู่ โดยเริ่มจาก 2 คู่ 4 คู่ และ 6 คู่ ตามลำดับ หลังจากการจำลองเพิ่มจำนวนพื้นของ อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แล้วจะเห็นได้ว่าการจำลองนี้ส่งผลต่อความถี่มูลฐานเล็กน้อยแต่ส่งผล กะทบต่อ ความถี่ฮาร์โมนิกส์เป็นอย่างมาก โดยถ้ายิ่งจำนวนพื้นของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ มากก็จะยิ่งทำให้ความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์โมนิกส์มีค่าลดลง สุดท้ายพิจารณาจำนวนพื้นของ อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจะได้เท่ากับ 6 คู่หรือ 12 ชั้น ซึ่งครอบคลุมย่าน ความถี่ที่ 1.8 GHz และ 5.5 GHz ดังแสดงในรูปที่ 3.18 และผลในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ต้นแบบด้วยการปรับเพิ่มจำนวนฟันของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ (N)

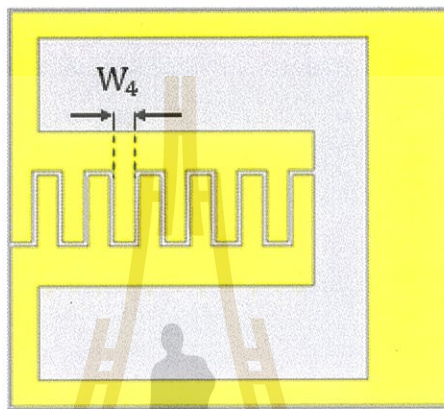


รูปที่ 3.20 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ที่ได้จากการปรับเพิ่มจำนวนฟันของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ (N)

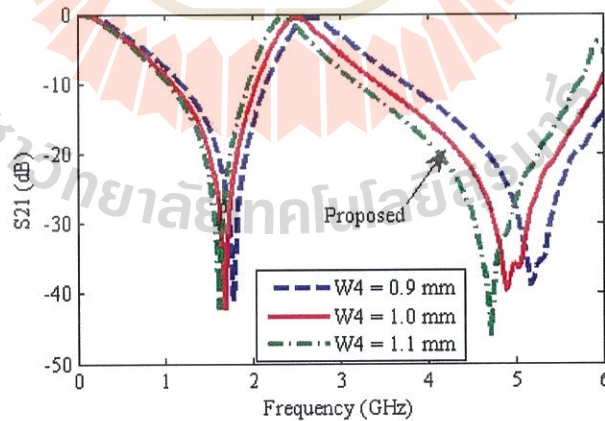
3.6.3 การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้างของฟันในอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ (W_4)

การจำลองปรับขนาดความกว้างของฟันในอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุด ขณะที่ทำการปรับขนาดความกว้างของฟันในอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์นี้ พารามิเตอร์ตัวอื่นๆ จะต้องคงที่ จากนั้นปรับขนาดความกว้างของฟันในอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์เริ่มจาก 0.9 มิลลิเมตร 1.0 มิลลิเมตร และ 1.1 มิลลิเมตร ตามลำดับ หลังทำการจำลองปรับขนาดความกว้างของฟันในอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แล้ว จะเห็นได้ว่าส่งผลกระทบต่อทั้งความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์โมนิกส์ เพราะฟันของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์นั้นมีผลต่อความถี่

ทั้งสอง โดยถ้าปรับขนาดความกว้างของพื้นในอินเตอร์ดิจิตอลปาซีเตอร์ให้มีความกว้างมากขึ้น จะทำให้ความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์โมนิกส์มีค่าลดลง และถ้าปรับขนาดความกว้างของพื้นในอินเตอร์ดิจิตอลปาซีเตอร์ให้แคบลงก็จะทำให้ความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์โมนิกส์มีค่าเพิ่มขึ้น สุดท้ายพิจารณาความกว้างของพื้นในอินเตอร์ดิจิตอลปาซีเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจะได้ขนาดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.20 และผลในรูปที่ 3.21



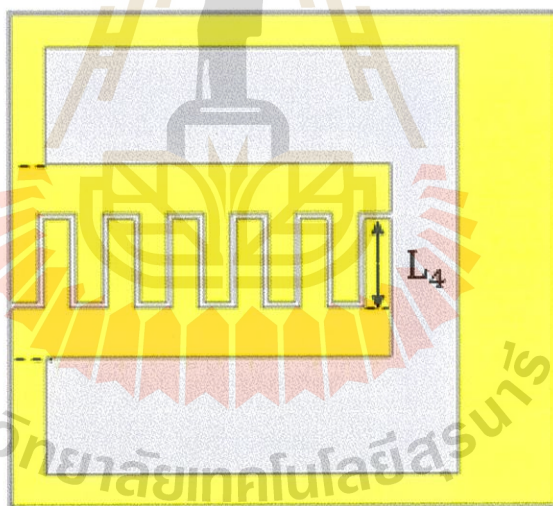
รูปที่ 3.21 การจำลองตัวสะท้อนฟิวอิกวิสต์ดูต้นแบบด้วยการปรับขนาดความกว้างของพื้นในอินเตอร์ดิจิตอลปาซีเตอร์ (W_4)



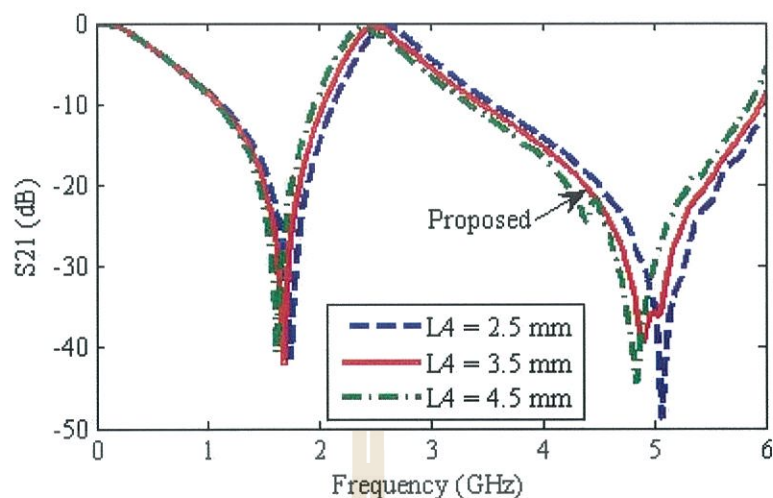
รูปที่ 3.22 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ที่ได้จากการปรับขนาดความกว้างของพื้นในอินเตอร์ดิจิตอลปาซีเตอร์ (W_4)

3.6.4 การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ต้นแบบด้วยการปรับขนาดความสูงของพื้นในอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ (L_4)

การจำลองปรับขนาดความสูงของพื้นในอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุด ขณะที่ทำการปรับขนาดความสูงของพื้นในอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์นี้ พารามิเตอร์ตัวอื่นๆ จะต้องคงที่ จากนั้นทำการเริ่มปรับขนาดความสูงของพื้นในอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์จาก 2.5 มิลลิเมตร 3.5 มิลลิเมตร และ 4.5 มิลลิเมตร หลังจากทำการจำลองปรับขนาดความสูงของพื้นในอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แล้ว จะเห็นได้ว่าส่งผลกระทบต่อความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์โมนิกส์เล็กน้อย โดยถ้าทำการปรับขนาดความสูงของพื้นในอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ให้มีความสูงมากขึ้นจะทำให้ความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์โมนิกส์มีค่าน้อยลง และถ้าทำการปรับขนาดความสูงของพื้นในอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ให้สั้นลงก็จะทำให้ความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์โมนิกส์เพิ่มขึ้น สุดท้ายพิจารณาขนาดความสูงของพื้นในอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจะได้เท่ากับ 3.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.22 และผลในรูปที่ 3.23



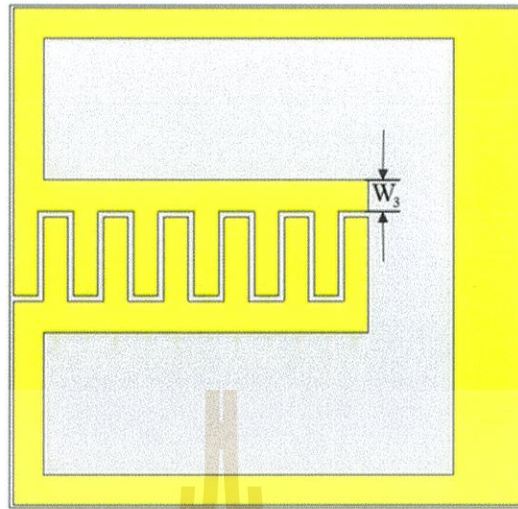
รูปที่ 3.23 การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ต้นแบบด้วยการปรับขนาดความสูงของพื้นในอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ (L_4)



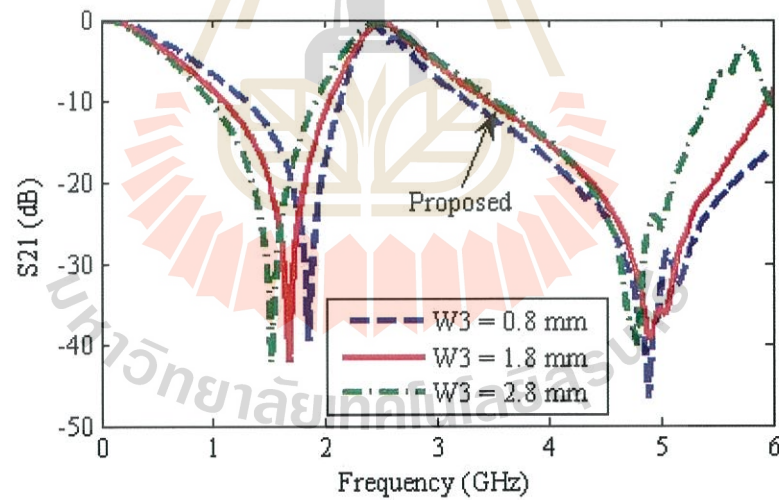
รูปที่ 3.24 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ที่ได้จากการปรับขนาดความสูงของพินใน อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ (L_4)

3.6.5 การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ต้นแบบด้วยการปรับขนาดของแกนที่รองรับพินของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ (W_3)

การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ต้นแบบด้วยการปรับขนาดของแกนที่รองรับพินของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุด ทำการเริ่มปรับขนาดของแกนที่รองรับพินของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์เริ่มจาก 0.8 มิลลิเมตร 1.8 มิลลิเมตร และ 2.8 มิลลิเมตร หลังจากทำการจำลองปรับขนาดของแกนที่รองรับพินของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แล้วจะเห็นได้ว่าส่งผลกระทบต่อความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์โมนิกส์ โดยถ้าทำการปรับขนาดของแกนที่รองรับพินของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ให้มีความกว้างมากขึ้นจะทำให้ความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์โมนิกส์มีค่าลดลง และถ้าทำการปรับขนาดของแกนที่รองรับพินของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ให้แคบลงก็จะทำให้ความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์โมนิกส์มีค่าเพิ่มมากขึ้น สุดท้ายพิจารณาขนาดของแกนที่รองรับพินของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจะได้เท่ากับ 1.8 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.24 และผลแสดงในรูปที่ 3.25



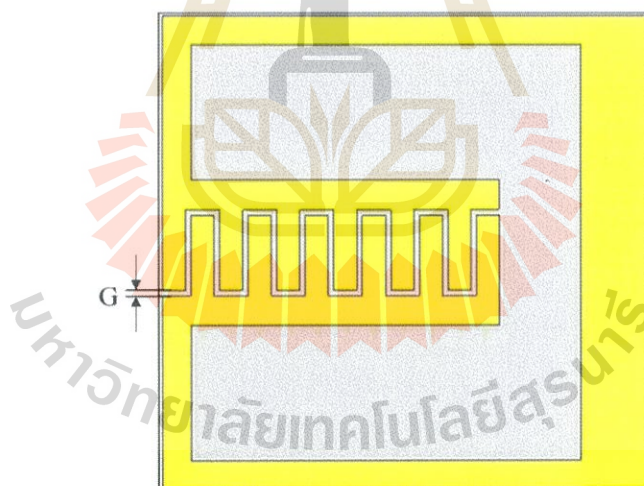
รูปที่ 3.25 การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ต้นแบบด้วยการปรับขนาดของแกนที่รองรับพื้นของ อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ (W_3)



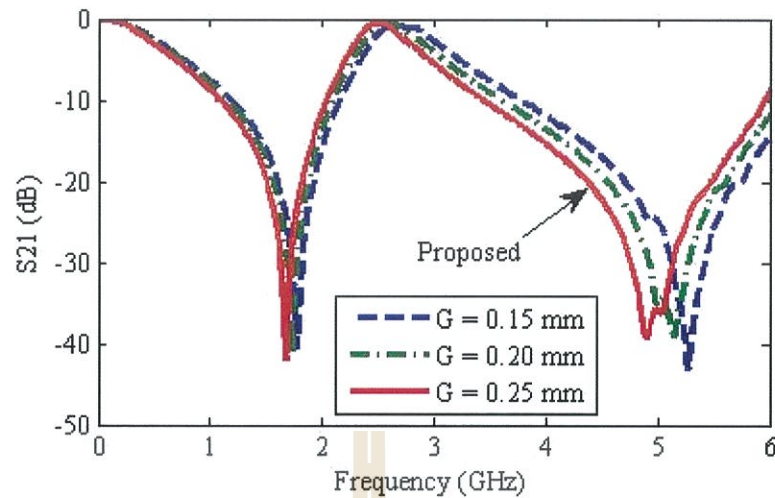
รูปที่ 3.26 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ที่ได้จากการปรับขนาดของแกนที่รองรับพื้นของ อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ (W_3)

3.6.6 การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดชุดต้นแบบด้วยการปรับระยะห่างของช่องว่างระหว่างพื้นของอินเตอร์ดิฟร็กชันคาปาซิเตอร์ (G)

การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดชุดต้นแบบด้วยการปรับระยะห่างของช่องว่างระหว่างพื้นของ อินเตอร์ดิฟร็กชันคาปาซิเตอร์ เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุด ทำการเริ่มปรับระยะห่างของช่องว่างระหว่างพื้นของอินเตอร์ดิฟร็กชันคาปาซิเตอร์ เริ่มจาก 0.15 มิลลิเมตร 0.20 มิลลิเมตร และ 0.25 มิลลิเมตร หลังจากทำการจำลองปรับระยะห่างของช่องว่างระหว่างพื้นของอินเตอร์ดิฟร็กชันคาปาซิเตอร์แล้ว จากรูปที่ 3.27 จะเห็นได้ว่าส่งผลกระทบต่อความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์มอนิกส์ ซึ่งการปรับขนาดเพิ่มช่องว่างมากขึ้นจะทำให้ความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์มอนิกส์มีค่าลดลง หรือถ้าการปรับขนาดให้ช่องว่างลดลงจะทำให้ความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์มอนิกส์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยช่องว่างระหว่างพื้นของอินเตอร์ดิฟร็กชันคาปาซิเตอร์นั้นจะต้องเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดซึ่งจะต้องครอบคลุมย่านความถี่ที่เราต้องการจะออกแบบและสุดท้ายพิจารณาขนาดของช่องว่างระหว่างพื้นของอินเตอร์ดิฟร็กชันคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจะได้เท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.26 และผลแสดงในรูปที่ 3.27



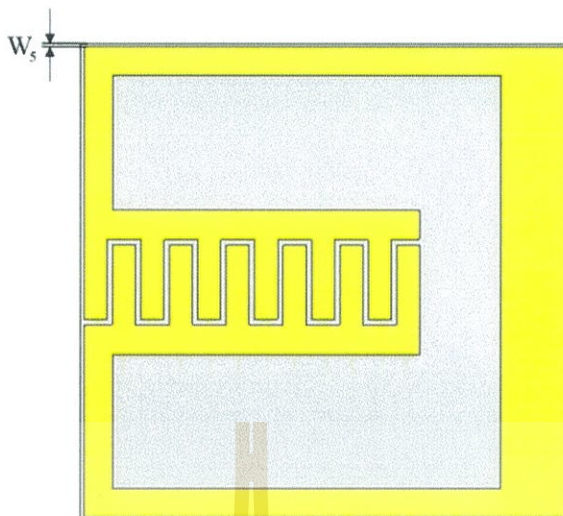
รูปที่ 3.27 การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดชุดต้นแบบด้วยการปรับระยะห่างของช่องว่างระหว่างพื้นของอินเตอร์ดิฟร็กชันคาปาซิเตอร์ G



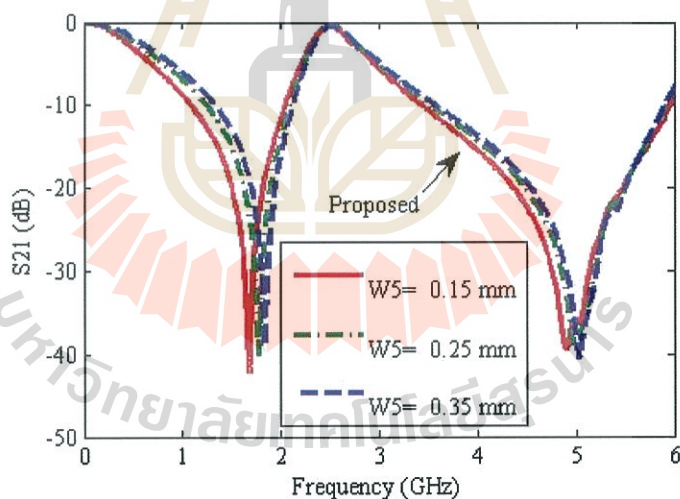
รูปที่ 3.28 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ที่ได้จากการปรับระยะห่างของช่องว่างระหว่างพื้นของ อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ G

3.6.7 การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดูดันแบบด้วยการปรับระยะห่างระหว่างวัสดุทองแดงกับแผ่นพิมพ์วงจร (W_5)

การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดูดันแบบด้วยการปรับระยะห่างระหว่างวัสดุทองแดงกับแผ่นพิมพ์วงจรเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุด ขณะที่ทำการปรับระยะห่างระหว่างวัสดุทองแดงกับแผ่นพิมพ์วงจรนี้ พารามิเตอร์ตัวอื่นๆ จะต้องคงที่ จากนั้นทำการเริ่มปรับระยะห่างระหว่างวัสดุทองแดงกับแผ่นพิมพ์วงจรเริ่มจาก 0.15 มิลลิเมตร 0.25 มิลลิเมตร และ 0.35 มิลลิเมตร หลังจากทำการจำลองปรับระยะห่างระหว่างวัสดุทองแดงกับแผ่นพิมพ์วงจรแล้ว จะเห็นได้ว่าระยะห่างมีผลกระทบต่อความถี่มูลฐานและมีผลกระทบต่อความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยถ้าทำการปรับระยะห่างระหว่างวัสดุทองแดงกับแผ่นพิมพ์วงจรให้มีความกว้างมากขึ้นจะทำให้ความถี่ที่ความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์มอนิกส์มีค่าเพิ่ม และถ้าทำการปรับระยะห่างระหว่างวัสดุทองแดงกับแผ่นพิมพ์วงจรให้แคบลงก็จะทำให้ความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์มอนิกส์ลดลง สุดท้ายพิจารณาหาระยะห่างระหว่างวัสดุทองแดงกับแผ่นพิมพ์วงจรที่เหมาะสมที่สุดจะได้เท่ากับ 0.15 มิลลิเมตร ดังแสดงจากในรูปที่ 3.28 และผลแสดงในรูปที่ 3.29



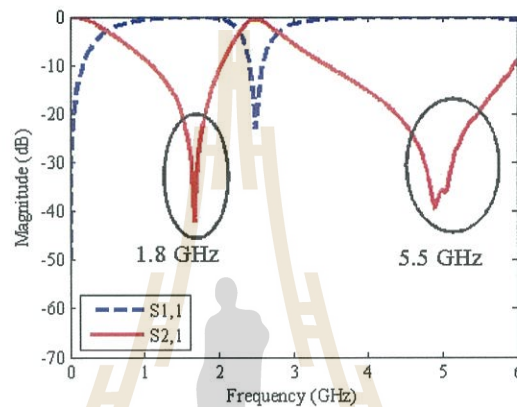
รูปที่ 3.29 การจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ต้นแบบด้วยการปรับระยะห่างระหว่างวัสดุทองแดงกับแผ่นพิมพ์วงจร (W_5)



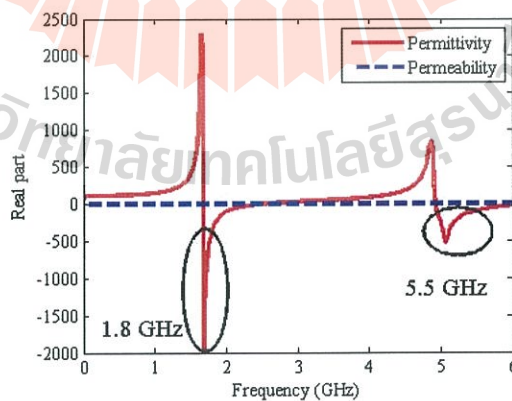
รูปที่ 3.30 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ที่ได้จากการปรับระยะห่างระหว่างวัสดุทองแดงกับแผ่นพิมพ์วงจร (W_5)

จากการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST ในการจำลองสร้างตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จนกระทั่งได้ค่าที่เหมาะสม ทำให้ได้ตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่ครอบคลุมช่วงความถี่ 2 ช่วงความถี่ โดยในรูปที่ 3.30 จะแสดงให้เห็นถึงค่าของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ

แบบจำลองตัวสะท้อนฟิวอริวส์คู่ที่ติดลบ ช่วงความถี่แรกคือตั้งแต่ 1.12 GHz ถึง 2.02 GHz จะอยู่ในย่านความถี่ 1.8 GHz และช่วงความถี่ที่สองคือตั้งแต่ 3.45 GHz ถึง 5.95 GHz จะอยู่ในย่านความถี่ 5.5 GHz จากรูปที่ 3.31 จะแสดงให้เห็นถึงค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าซึมซาบแม่เหล็ก ซึ่งค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลบในช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.67 GHz ถึง 2.48 GHz และช่วงความถี่ 4.92 GHz ถึง 6.21 GHz ซึ่งค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าติดลบที่ได้จากการจำลองของตัวสะท้อนฟิวอริวส์อยู่ในช่วงย่านความถี่ที่เราต้องการใช้งาน

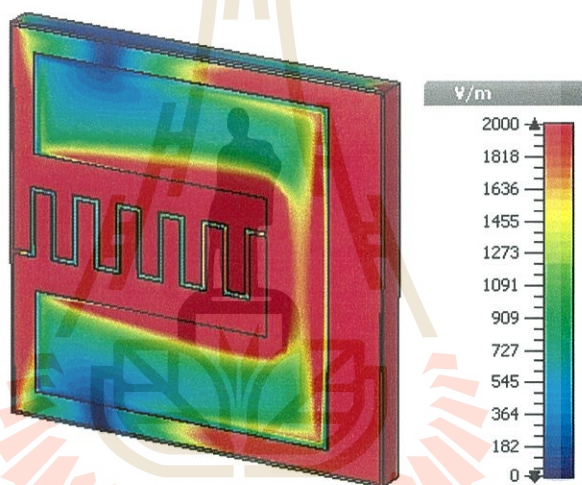


รูปที่ 3.31 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแบบจำลองตัวสะท้อนฟิวอริวส์คู่ ($S_{1,1}$) และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแบบจำลองตัวสะท้อนฟิวอริวส์คู่ ($S_{2,1}$)



รูปที่ 3.32 ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (ϵ_r) และค่าซึมซาบแม่เหล็ก (μ_r) ของแบบจำลองตัวสะท้อนฟิวอริวส์คู่

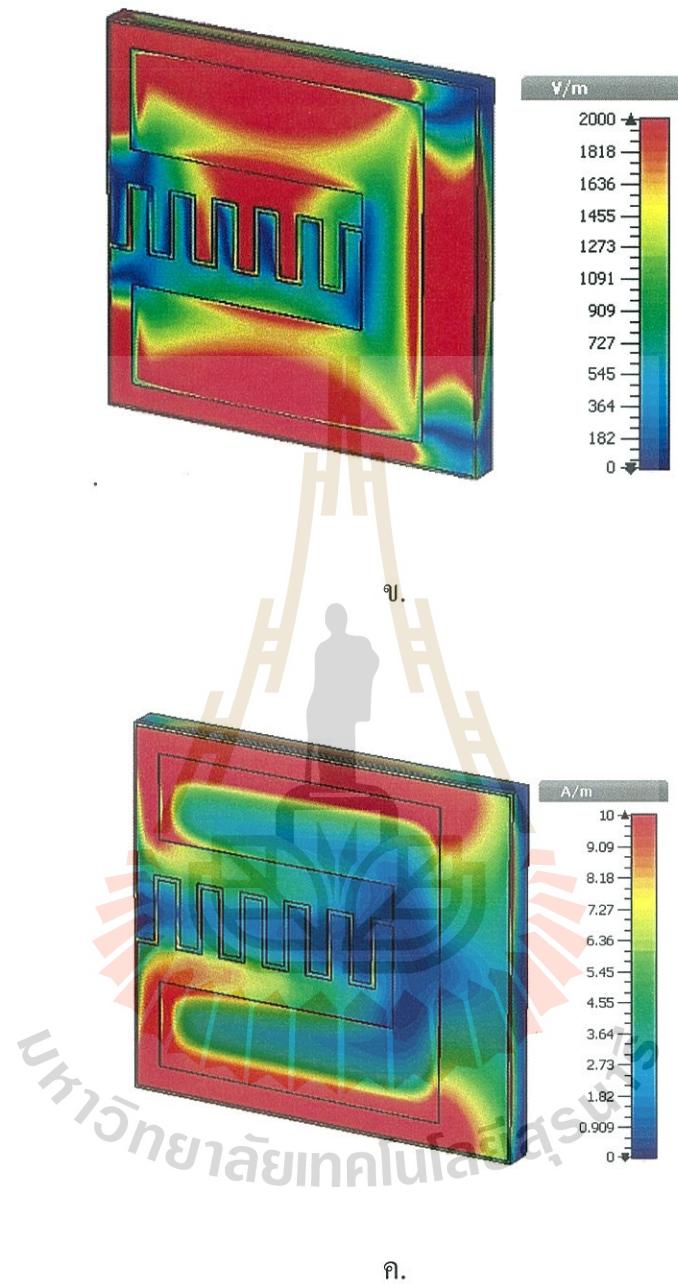
จากรูปที่ 3.32 จะแสดงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแบบรูป 3 มิติ จากรูปที่ 3.32 ก. จะแสดงให้เห็นถึงส่วนของฝั่งขวา ซ้ายของเรโซเนเตอร์วงแหวนและอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ซึ่งจะมีผลต่อสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1.8 GHz จากรูปที่ 3.32 ข. จะแสดงให้เห็นถึงส่วนของขอบบนและขอบล่างของเรโซเนเตอร์วงแหวน รวมไปถึงด้านขวาและซ้ายของเรโซเนเตอร์วงแหวนและอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์เล็กน้อย ที่มีผลต่อสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 5.5 GHz จากรูปที่ 3.32 ค. จะแสดงให้เห็นถึงส่วนของขอบบนและล่างของเรโซเนเตอร์วงแหวนซึ่งจะมีผลต่อสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1.8 GHz และจากรูปที่ 3.32 ง. จะแสดงให้เห็นถึงส่วนของขอบบน ล่างของเรโซเนเตอร์วงแหวนและแกนที่รองรับพื้นของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ซึ่งจะมีผลต่อสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5.5 GHz ตามลำดับ



ก.

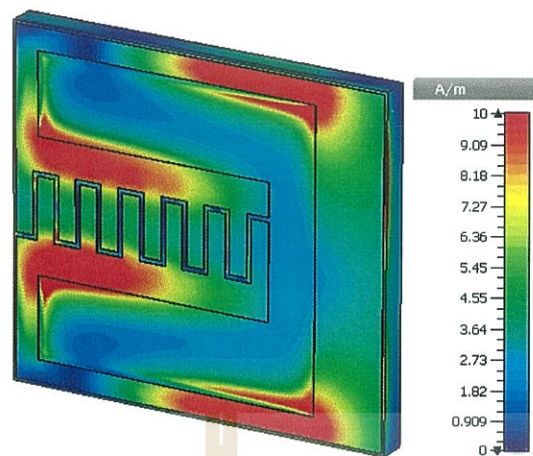
รูปที่ 3.33 แบบรูปสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของตัวสะท้อนผิวอภิวัดดู

- ก. สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1.8 GHz
- ข. สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 5.5 GHz
- ค. สนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1.8 GHz
- ง. สนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5.5 GHz



รูปที่ 3.33 แบบรูปสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของตัวสะท้อนผิวอภิวัดดู (ต่อ)

- ก. สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1.8 GHz
- ข. สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 5.5 GHz
- ค. สนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1.8 GHz
- ง. สนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5.5 GHz

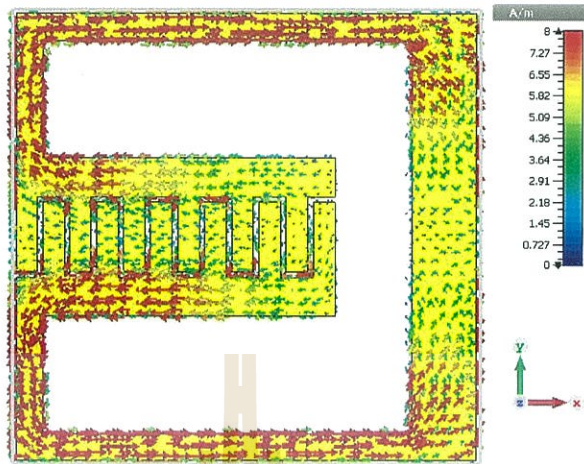


ง.

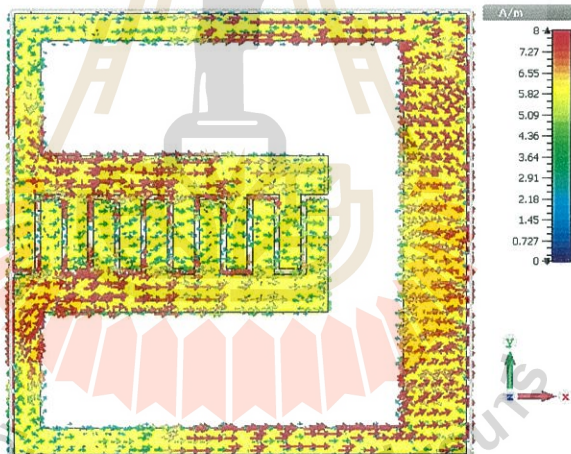
รูปที่ 3.33 แบบรูปสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของตัวสะท้อนผิวอภิวัดดู (ต่อ)

- ก. สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1.8 GHz
- ข. สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 5.5 GHz
- ค. สนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1.8 GHz
- ง. สนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5.5 GHz

จากรูปที่ 3.33 จะแสดงทิศทางของกระแสเชิงผิวที่ตัวสะท้อนผิวอภิวัดดู ซึ่งในรูปที่ 3.33 ก. สำหรับความถี่ 1.8 GHz ทิศทางของกระแสที่ผิวจะเกิดบริเวณด้านบนและด้านล่างของเรโซเนเตอร์วงแหวนและบริเวณของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์เล็กน้อย ในรูปที่ 3.33 ข. สำหรับความถี่ 5.5 GHz ทิศทางของกระแสจะเกิดบริเวณในส่วนของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์และฝั่งทางด้านขวาของเรโซเนเตอร์วงแหวน รวมถึงด้านบนและด้านล่างของเรโซเนเตอร์วงแหวนด้วย



ก.



ข.

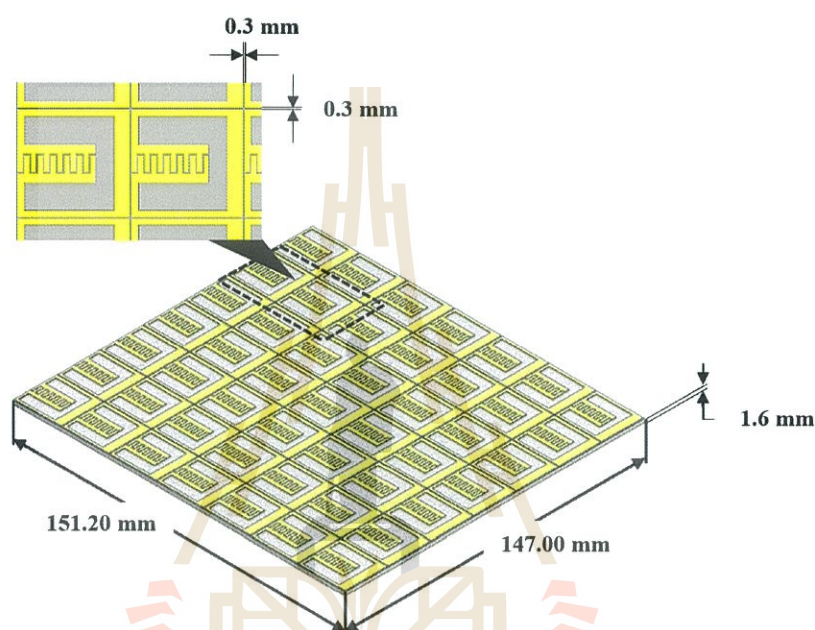
รูปที่ 3.34 กระแสเชิงผิวของตัวสะท้อนผิวอภิวัดดู

ก. กระแสเชิงผิวที่ความถี่ 1.8 GHz

ข. กระแสเชิงผิวที่ความถี่ 5.5 GHz

3.7 การจำลองแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดดูแถวลำดับ

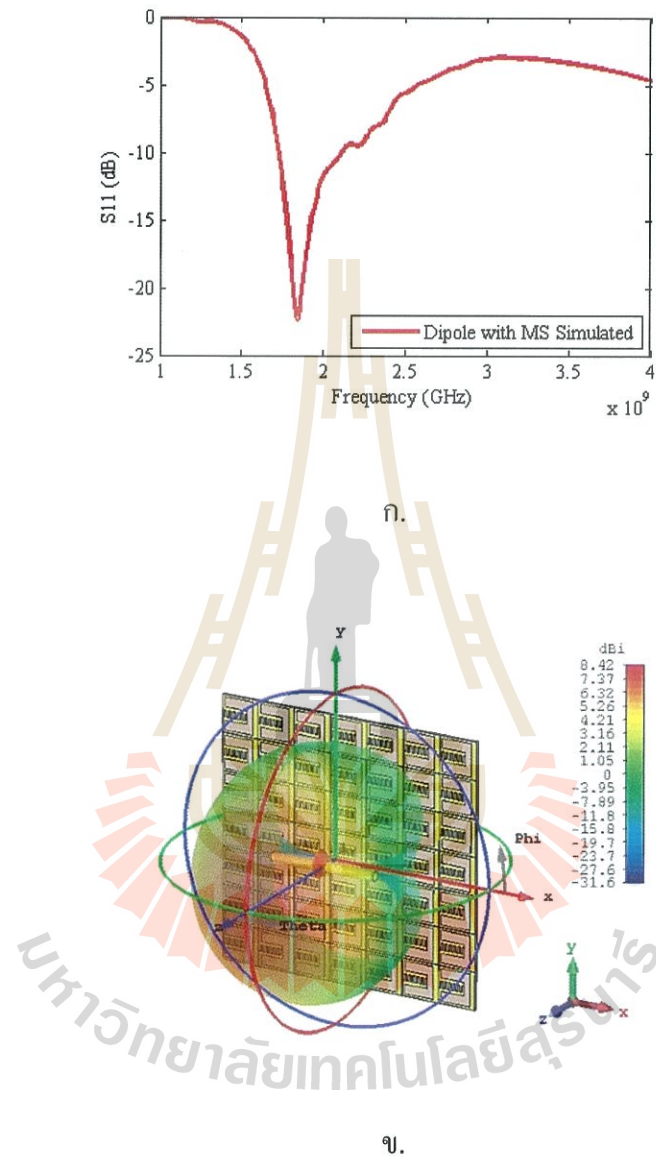
เนื่องจากการออกแบบชิ้นงานในวิทยานิพนธ์นี้มีขนาดชิ้นงานที่เล็กมาก จึงไม่สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุตัวสะท้อนร่วมกับสายอากาศไดโพลได้ทีหนึ่งยูนิต เนื่องจากว่าขนาดของชิ้นงานจะต้องครอบคลุมแบบรูปการแผ่กระจายของสายอากาศไดโพล ดังนั้นเราจึงได้ทำการจำลองสร้างให้เป็นแถวลำดับจำนวน 7×7 อิลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.34



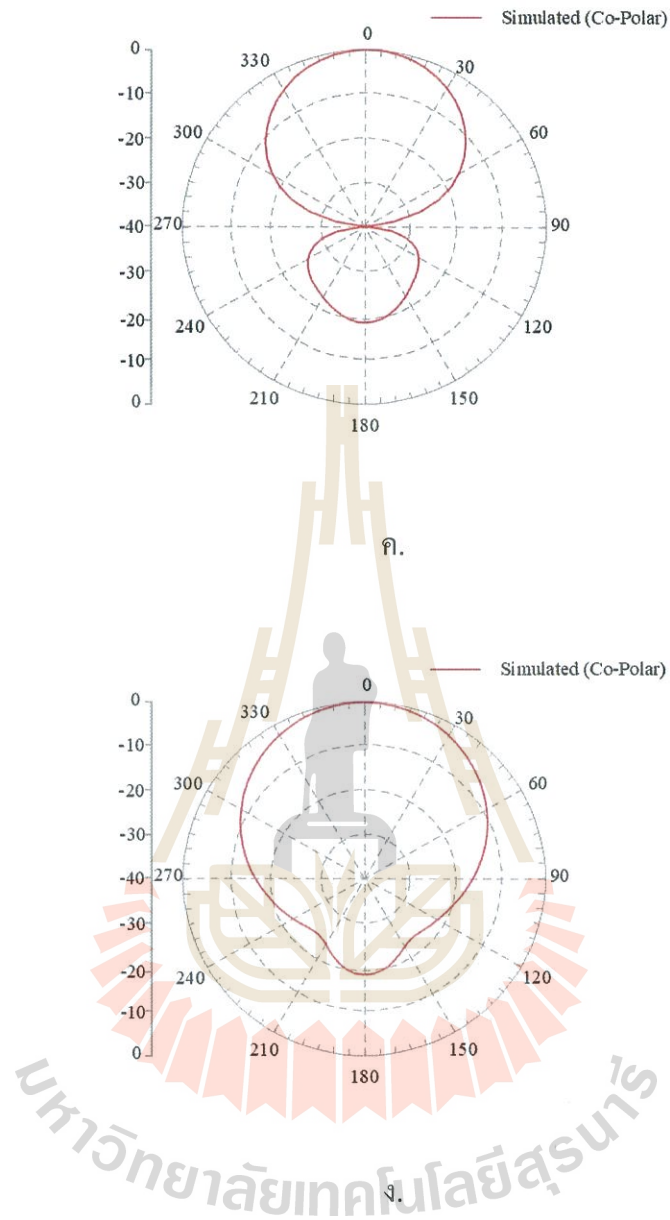
รูปที่ 3.35 แบบจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดดูแถวลำดับจำนวน 7×7 อิลิเมนต์

หลังจากที่ได้ทำการจำลองสายอากาศไดโพลไปในหัวข้อก่อนหน้านี้แล้วจึงนำแบบจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดดูแถวลำดับจำนวน 7×7 อิลิเมนต์ มาทำการทดสอบร่วมกับสายอากาศไดโพลด้วยโปรแกรม CST โดยได้ทำการทดลองกับสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 1.8 GHz และ 5.5 GHz ตามลำดับ เริ่มจากการทดลองแบบจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดดูร่วมกับสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 1.8 GHz โดยจะวางสายอากาศไดโพลไว้ที่จุดกึ่งกลางด้านหน้าของตัวสะท้อนผิวอภิวัดดูซึ่งสายอากาศไดโพลจะวางขนานกับสนามไฟฟ้าหรือในแนวเดียวกันกับอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศไดโพลกับตัวสะท้อนผิวอภิวัดดูจะอยู่ที่ $\lambda/8$ จากรูปที่ 3.35 ก. ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ที่มาจากการนำตัวสะท้อนผิวอภิวัดดูมาทดสอบกับสายอากาศไดโพลความถี่ 1.8 GHz โดยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ค่าต่ำกว่า -10 dB จะครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.72 GHz ถึง 2.11 GHz และรูปที่ 3.35 ข. จะแสดง

แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและในระนาบสนามแม่เหล็กจะแสดงในรูปที่ 3.35 ค. และรูปที่ 3.35 ง. ตามลำดับ

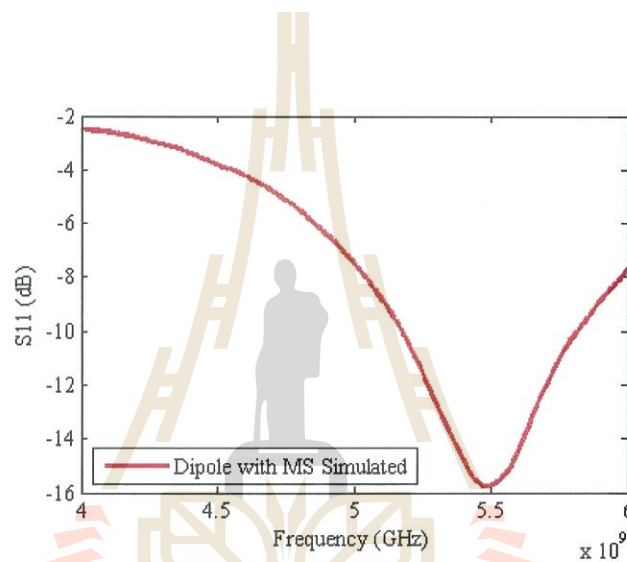


- รูปที่ 3.36 ผลจากการจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดดูแถวลำดับจำนวน 7×7 อิลิเมนต์
กับสายอากาศไดโพลความถี่ 1.8 GHz ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST
- ก. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11})
 - ข. แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ
 - ค. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า
 - ง. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.36 ผลจากการจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่แถวลำดับจำนวน 7×7 อิลิเมนต์
กับสายอากาศไดโพลความถี่ 1.8 GHz ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST (ต่อ)
ก. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11})
ข. แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ
ค. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า
ง. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

จากนั้นได้ทำการนำตัวสะท้อนผิวอภิวัดมาทดสอบร่วมกับสายอากาศไดโพล ความถี่ 5.5 GHz โดยวางสายอากาศไดโพลไว้ที่จุดกึ่งกลางด้านหน้าของตัวสะท้อนผิวอภิวัดซึ่งสายอากาศไดโพลจะวางขนานกับระนาบสนามไฟฟ้าหรือในแนวเดียวกันกับอินเตอร์ดิเจิตอลคาปาซิเตอร์ที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศไดโพลกับตัวสะท้อนผิวอภิวัดจะอยู่ที่ $\lambda/8$ จากรูปที่ 3.36 ก. จะแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ค่าต่ำกว่า -10 dB จะครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 5.17 GHz ถึง 5.80 GHz และรูปที่ 3.36 ข. จะแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กจะแสดงในรูปที่ 3.36 ค. และรูปที่ 3.36 ง.



ก.

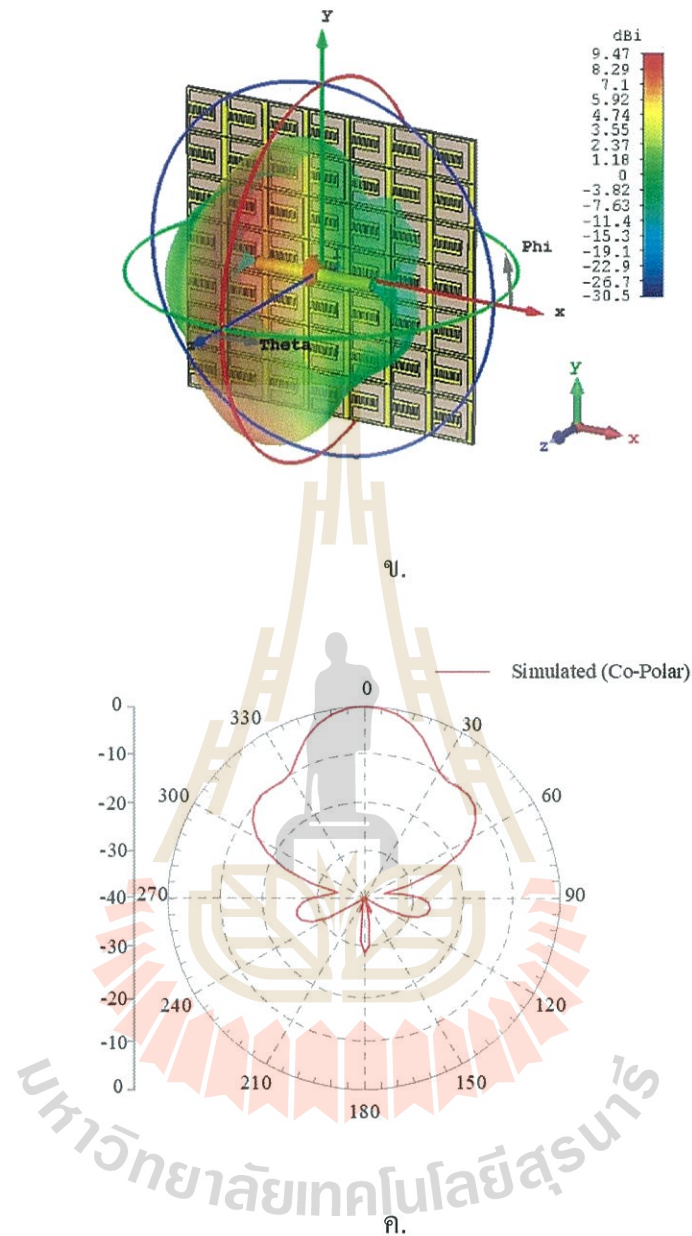
รูปที่ 3.37 ผลจากการจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดแวลวาล์วจำนวน 7×7 อิลิเมนต์ กับสายอากาศไดโพลความถี่ 5.5 GHz ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

ก. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11})

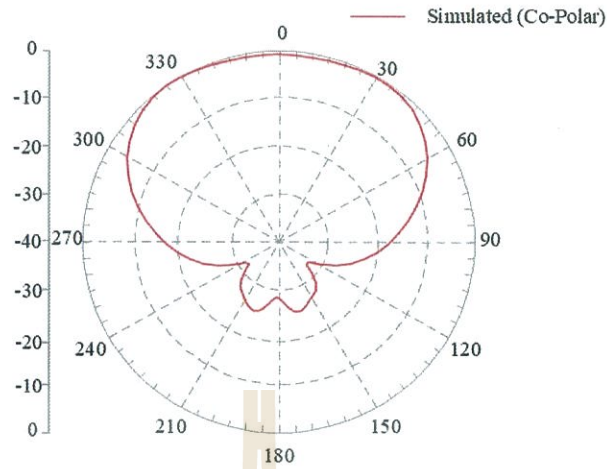
ข. แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ

ค. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

ง. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก



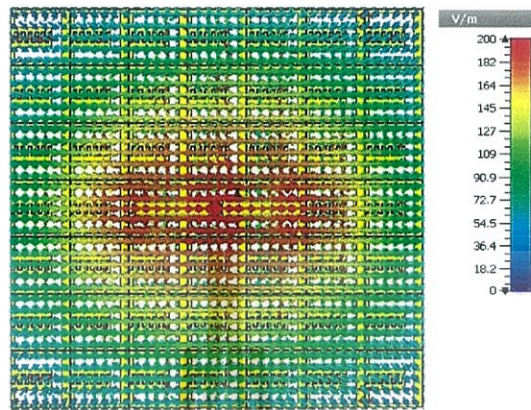
รูปที่ 3.37 ผลจากการจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่แถวลำดับจำนวน 7×7 อิลิเมนต์
กับสายอากาศไดโพลความถี่ 5.5 GHz ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST (ต่อ)
ก. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11})
ข. แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ
ค. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า
ง. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก



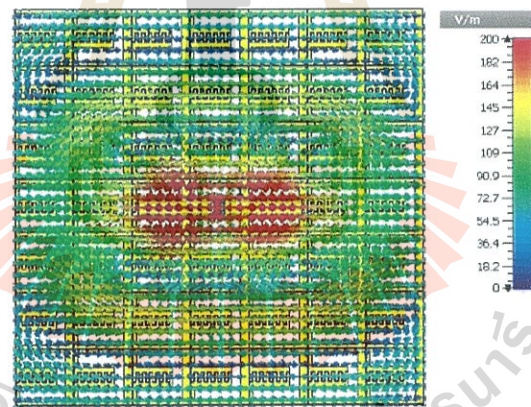
- รูปที่ 3.37 ผลจากการจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่แถวลำดับจำนวน 7×7 อิลิเมนต์
กับสายอากาศไดโพลความถี่ 5.5 GHz ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST (ต่อ)
- ก. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11})
 - ข. แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ
 - ค. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า
 - ง. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 3.37 การแผ่พลังงานสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่
ซึ่งในรูปที่ 3.37 ก. และ 3.37 ข. คือการแผ่พลังงานของสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1.8 GHz และ 5.5 GHz
ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าทิศทางของสนามไฟฟ้าอยู่ในระนาบหรือทิศทางเดียวกันกับ
สายอากาศไดโพล ส่วนในรูปที่ 3.37 ค. และ 3.37 ง. แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กที่
ความถี่ 1.8 GHz และ 5.5 GHz ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าทิศทางของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับ
สายอากาศไดโพล และในรูปสุดท้าย รูปที่ 3.38 คือกระแสเชิงผิวของตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่
รูปที่ 3.38 ก. กระแสเชิงผิวที่ความถี่ 1.8 GHz ซึ่งจะเห็นว่าบริเวณด้านบนและด้านล่างของ
เรโซเนเตอร์วงแหวน รวมถึงด้านซ้ายของเรโซเนเตอร์วงแหวนอีกทั้งบริเวณของอินเตอร์ดิจิตอล-
คาปาซิเตอร์ก็เช่นเดียวกันซึ่งจะมีความหนาแน่นของกระแสอยู่ด้วย ในรูปที่ 3.38 ข. กระแสเชิงผิวที่
ความถี่ 5.5 GHz จะเห็นได้ว่ากระแสมีความหนาแน่นมากบริเวณด้านบน ด้านล่าง และด้านซ้ายของ

เรโซเนเตอร์วงแหวน รวมถึงบริเวณอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ด้วย ซึ่งคล้ายกับกระแสที่ความถี่ที่ 1.8 GHz

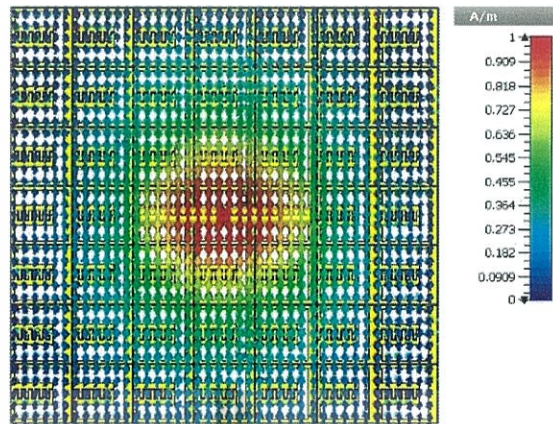


ก.

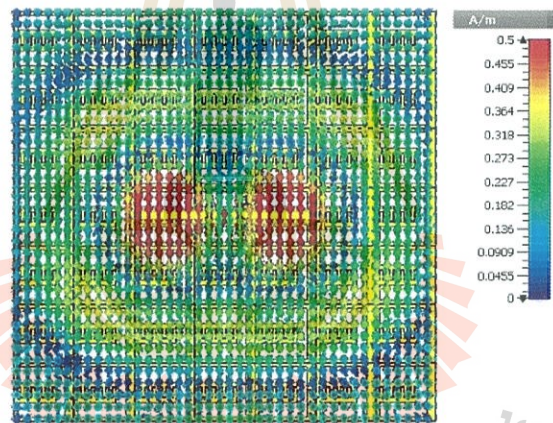


ข.

รูปที่ 3.38 การแผ่พลังงานสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของ
ตัวสะท้อนฟิวรีควอดเรอ์ลำดับจำนวน 7×7 อิลิเมนต์
ก. สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1.8 GHz
ข. สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 5.5 GHz
ค. สนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1.8 GHz
ง. สนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5.5 GHz



ก.



ง.

รูปที่ 3.38 การแผ่พลังงานสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของ
 ตัวสะท้อนผิวอภิวัดคู่แถวลำดับจำนวน 7×7 อิลิเมนต์ (ต่อ)
 ก. สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1.8 GHz
 ข. สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 5.5 GHz
 ค. สนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1.8 GHz
 ง. สนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5.5 GHz



รูปที่ 3.39 กระแสเชิงผิวของตัวสะท้อนผิวอวกาศแถวลำดับจำนวน 7×7 อิลิเมนต์
 ก. กระแสเชิงผิวที่ความถี่ 1.8 GHz
 ข. กระแสเชิงผิวที่ความถี่ 5.5 GHz

3.8 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนในการออกแบบ และวิเคราะห์ ตัวสะท้อนผิวอภิวัดศุ (metasurface) ซึ่งประกอบไปด้วยโครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวน และอินเตอร์ดิคิตอลคาปาซิเตอร์ ซึ่งถูกนำมาใช้งานร่วมกับสายอากาศไดโพลประยุกต์ใช้งานได้ในระบบ LTE และ WLAN โดยถูกนำมาจัดแถวลำดับจำนวน 7×7 อิลิเมนต์ เมื่อใช้งานร่วมกับสายอากาศไดโพล ให้อัตราขยายแก่สายอากาศที่สูงขึ้น ซึ่งได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST ในการทำการจำลองแบบก่อน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของตัวสะท้อนผิวอภิวัดศุร่วมกับสายอากาศไดโพลก่อนนำไปสร้างและวัดทดสอบในบทรัดไป



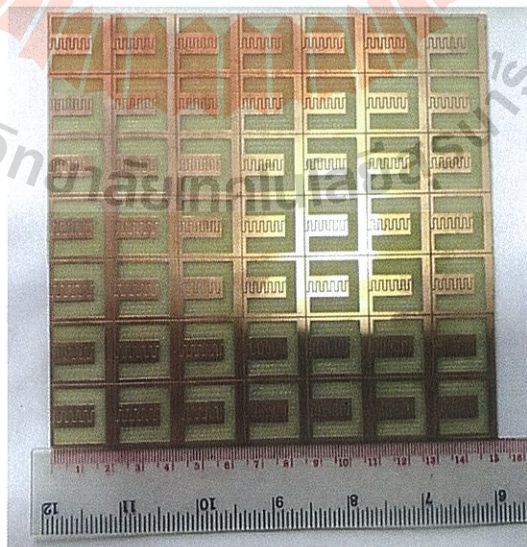
บทที่ 4

การสร้างและการวัดทดสอบ

4.1 การสร้างตัวสะท้อนผิวอภิวัด

จากหลักการและทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ผ่านมา รวมถึงการจำลองการออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดจากบทที่ 3 ซึ่งในบทนี้ จะนำผลการจำลองการสร้างตัวสะท้อนผิวอภิวัดด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio 2016 มาทำการสร้างตัวสะท้อนผิวอภิวัด จากนั้นวัดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ ค่า S_{11} แบบรูปการแผ่พลังงาน และอัตราขยาย โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) จากนั้นเปรียบเทียบผลการจำลองและผลจากการวิเคราะห์พร้อมทั้งอภิปรายผล

โดยขั้นตอนในการสร้างจะเริ่มจากการแปลงไฟล์จาก CST นามสกุล DXF บันทึกเพิ่มข้อมูล เพื่อนำไปเปิดกับ โปรแกรม LPKF Circuit Pro ที่สามารถใช้งานกับเครื่อง LPKF Laser & Electronics ซึ่งสามารถกัดลายตามแบบจำลองที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดยตัวสะท้อนผิวอภิวัดจะสร้างจากแผ่นไมโครสตริปชนิด FR4 ($\epsilon_r = 4.3$) แสดงในรูปที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.1 คือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สร้างตัวสะท้อนผิวอภิวัด



รูปที่ 4.1 ตัวสะท้อนผิวอภิวัด

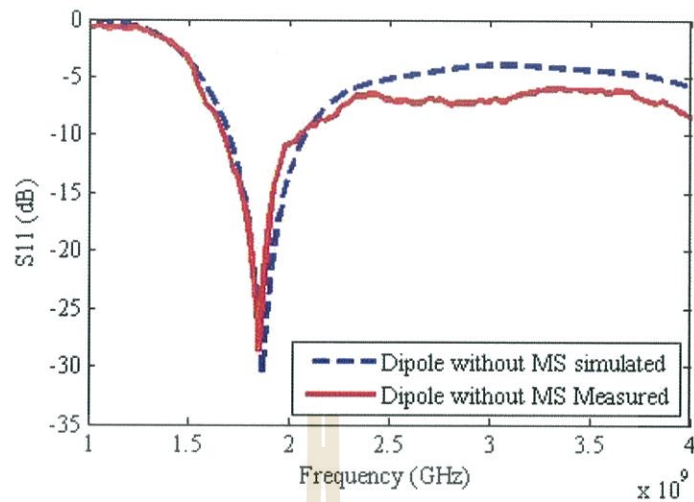
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สร้างตัวสะท้อนผิวอภิวัดดู

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)	ขนาด (λ)
W_1	1.25	0.0075λ
W_2	3.00	0.0180λ
W_3	1.80	0.0108λ
W_4	1.00	0.0060λ
W_5	0.15	0.0009λ
L_1	26.72	0.1603λ
L_2	18.20	0.1091λ
L_3	14.75	0.0885λ
L_4	3.50	0.0210λ
G	0.25	0.0015λ
h	0.035	0.0002λ

4.2 ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน

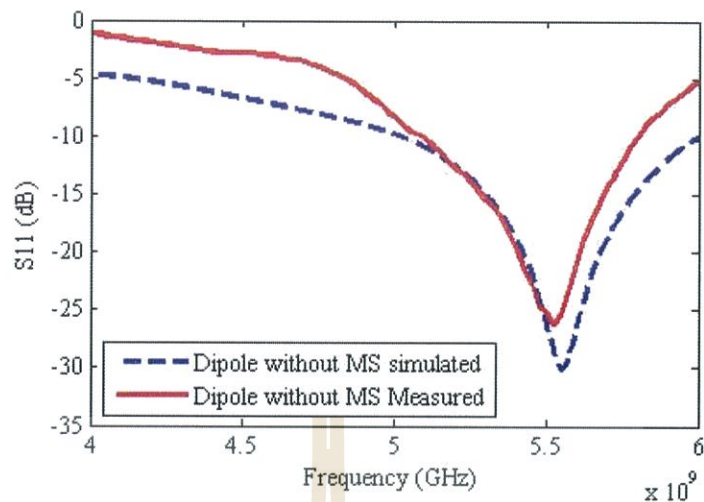
4.2.1 สายอากาศไดโพล

จากการที่ได้จำลองสายอากาศไดโพลในบทที่ 3 เพื่อนำมาเป็นสายอากาศในภาครับ โดยรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับระหว่างผลการจำลองของสายอากาศไดโพลและผลวัดทดสอบของสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 1.8 GHz จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการจำลองของสายอากาศไดโพลที่ต่ำกว่า -10 dB จะครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.68 GHz ถึง 2.08 GHz และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากผลวัดทดสอบของสายอากาศไดโพลที่ต่ำกว่า -10 dB จะครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.67 GHz ถึง 2.00 GHz การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับระหว่างผลการจำลองของสายอากาศไดโพลและผลวัดทดสอบของสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 1.8 GHz จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับระหว่างผลการจำลองของสายอากาศไดโพลและผลวัดทดสอบของสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 1.8 GHz

จากรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับระหว่างผลการจำลองของสายอากาศไดโพลและผลวัดทดสอบของสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 5.5 GHz จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการจำลองของสายอากาศไดโพลที่ต่ำกว่า -10 dB จะครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 5.01 GHz ถึง 5.96 GHz และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากผลวัดทดสอบของสายอากาศไดโพลที่ค่าต่ำกว่า -10 dB จะครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 5.10 GHz ถึง 5.80 GHz การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับระหว่างผลการจำลองของสายอากาศไดโพลและผลวัดทดสอบของสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 5.5 GHz จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

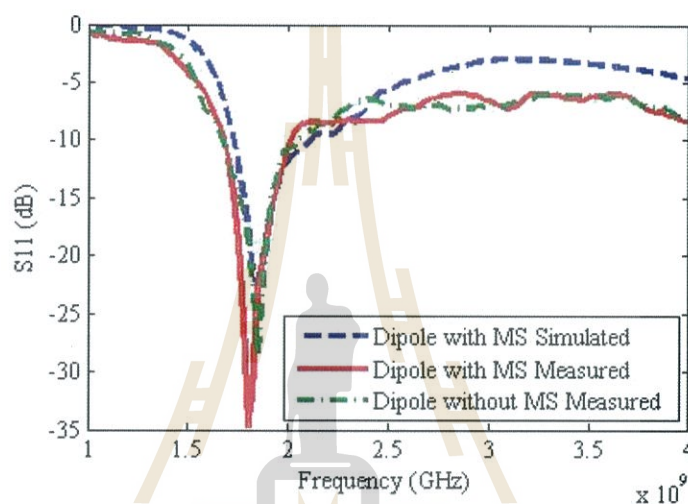


รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับระหว่างผลการจำลองของสายอากาศไดโพลและผลวัดทดสอบของสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 5.5 GHz

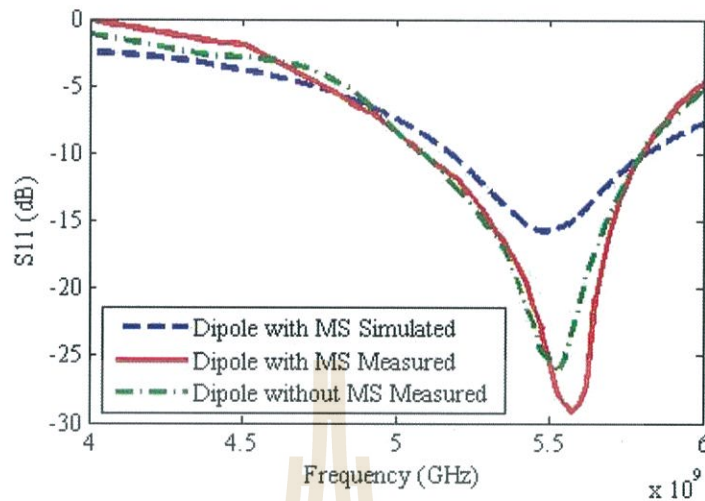
4.2.2 ตัวสะท้อนผิวอภิวัด

เนื่องจากการพิจารณาเพื่อที่จะนำตัวสะท้อนผิวอภิวัด ไปใช้งานได้นั้นจำเป็นต้องอาศัยหลักการการแมทซิงอิมพีแดนซ์ โดยสามารถดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) โดยค่าที่จะสามารถนำไปใช้งานควรมีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB จึงจะทำให้เกิดการแมทซิงอิมพีแดนซ์ที่ดี จากรูปที่ 4.4 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างผลการจำลองของตัวสะท้อนผิวอภิวัด ผลวัดทดสอบของตัวสะท้อนผิวอภิวัดและผลวัดทดสอบของสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 1.8 GHz จะสังเกตได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของการวัดทดสอบตัวสะท้อนผิวอภิวัดจะมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.68 GHz ถึง 2.00 GHz ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของการจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดจะมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.72 GHz ถึง 2.11 GHz และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศไดโพลจะมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.67 GHz ถึง 2.00 GHz จากรูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างผลการจำลองของตัวสะท้อนผิวอภิวัด ผลวัดทดสอบของตัวสะท้อนผิวอภิวัดและผลวัดทดสอบของสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 5.5 GHz จะสังเกตได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของการวัดทดสอบตัวสะท้อนผิวอภิวัดจะมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 4.97 GHz ถึง 5.80 GHz ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของการจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดจะมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 5.17 GHz ถึง 5.80 GHz และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศไดโพลจะมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 5.10 GHz ถึง 5.80 GHz จากกราฟที่แสดงการเปรียบเทียบ

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างผลการจำลองของตัวสะท้อนฟิวอิกวิสต์ ผลวัดทดสอบของตัวสะท้อนฟิวอิกวิสต์และผลวัดทดสอบของสายอากาศไดโพลผลที่ความถี่ 1.8 GHz และ 5.5 GHz ตามลำดับ มีลักษณะที่คล้ายตามกัน ซึ่งผลของการวัดทดสอบตัวสะท้อนฟิวอิกวิสต์จะสังเกตได้ว่า ช่วงความถี่ที่ได้จากการวัดทดสอบนั้นครอบคลุมความถี่ 1.8 GHz และ 5.5 GHz ซึ่งในทางปฏิบัติสายอากาศไดโพลนั้นมีช่วงของความถี่ที่แคบ จึงทำให้ผลการวัดทดสอบมีช่วงความถี่ที่แคบหรือไม่ครอบคลุมความถี่ทั้งหมดตามที่ได้ออกแบบความถี่ใช้งานไว้



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างผลการจำลองของตัวสะท้อนฟิวอิกวิสต์ ผลวัดทดสอบของตัวสะท้อนฟิวอิกวิสต์และผลวัดทดสอบของสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 1.8 GHz

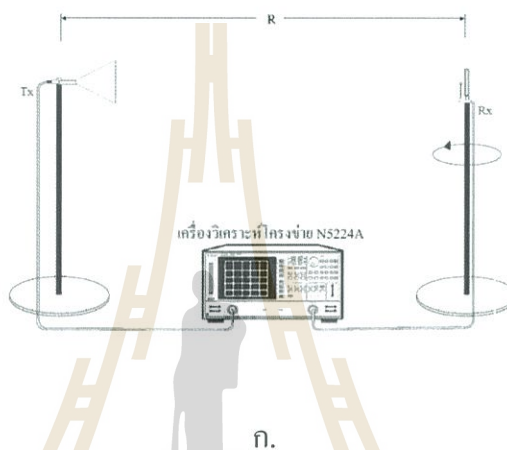


รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างผลการจำลองของตัวสะท้อนผิวอภิวัด ผลวัดทดสอบของตัวสะท้อนผิวอภิวัดและผลวัดทดสอบของสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 5.5 GHz

4.3 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน

วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน ได้ทำการทดสอบที่มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ซึ่งภายในห้องวัด ห้องจะสามารถปิดกั้นคลื่นจากภายนอกและลดการสะท้อนของคลื่นภายในห้อง โดยการติดตั้งตัวสะท้อนผิวอภิวัดและสายอากาศอ้างอิง จะให้ระยะห่าง R เท่ากับสนามระยะไกล จำนวนจาก $R \geq 2D^2 / \lambda$ เมื่อ D คือ ขนาดของสายอากาศที่จะทำการวัดทดสอบ เนื่องจาก ตัวสะท้อนผิวอภิวัดสามารถรองรับการทำงานได้ 2 ความถี่จึงคำนวณระยะสนามไกลได้ ดังนี้ ที่ความถี่ 1.8 GHz $R \geq 1.13$ เมตร และที่ความถี่ 5.5 GHz $R \geq 3.30$ เมตร โดยกำหนดให้ระยะสนามไกลเท่ากับ 4 เมตรทั้งสองความถี่ ซึ่งในรูปที่ 4.6 จะแสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามไฟฟ้า และในรูปที่ 4.7 จะแสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามแม่เหล็ก ซึ่งในการวัดทดสอบครั้งนี้ใช้สายอากาศปากแตรในการทำหน้าที่ของภาคส่งสัญญาณและในส่วนของภาครับจะมีจานหมุนที่สามารถหมุนได้ตั้งแต่มุม 0 องศาจนถึง 360 องศาเพื่อที่จะรับสัญญาณจากภาคส่งให้แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก จากรูปที่ 4.8 จะแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของตัวสะท้อนผิวอภิวัดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1.8 GHz ในกราฟจะแสดงการเปรียบเทียบของรูปการแผ่พลังงานร่วมขั้วและข้ามขั้ว ซึ่งการแผ่พลังงานข้ามขั้วจากการวัดทดสอบ

และการแผ่พลังงานร่วมขั้วจากการจำลองและวัดทดสอบ จากรูปที่ 4.9 จะแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของตัวสะท้อนผิวอภิวัดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กที่มีความถี่ 5.5 GHz ซึ่งกราฟจะแสดงการเปรียบเทียบของรูปการแผ่พลังงานร่วมขั้วและข้ามขั้ว ซึ่งการแผ่พลังงานข้ามขั้วจากการวัดทดสอบและการแผ่พลังงานร่วมขั้วจากการจำลองและวัดทดสอบ โดยจะสังเกตได้ว่าการเปรียบเทียบของกราฟมีรูปการแผ่พลังงานในลักษณะเดียวกัน และเป็นไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 4.6 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าของตัวสะท้อนผิวอภิวัด

- ก. แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า
 ข. การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

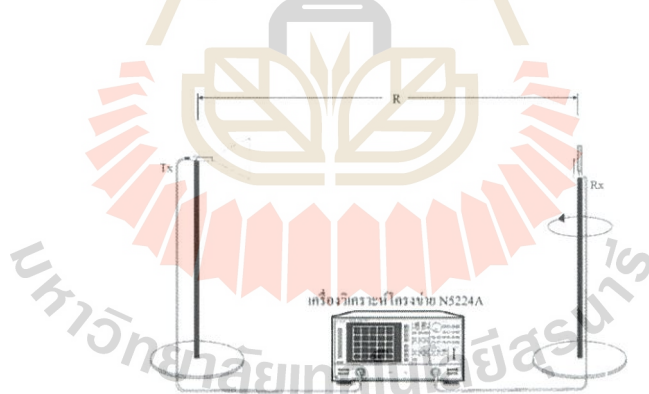


ข.

รูปที่ 4.6 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า
ของตัวสะท้อนผิวอภิวัดดู (ต่อ)

ก. แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

ข. การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ
สนามไฟฟ้า

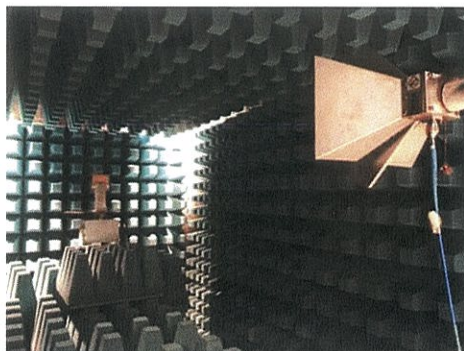


ก.

รูปที่ 4.7 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก
ของตัวสะท้อนผิวอภิวัดดู

ก. แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

ข. การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ
สนามแม่เหล็ก

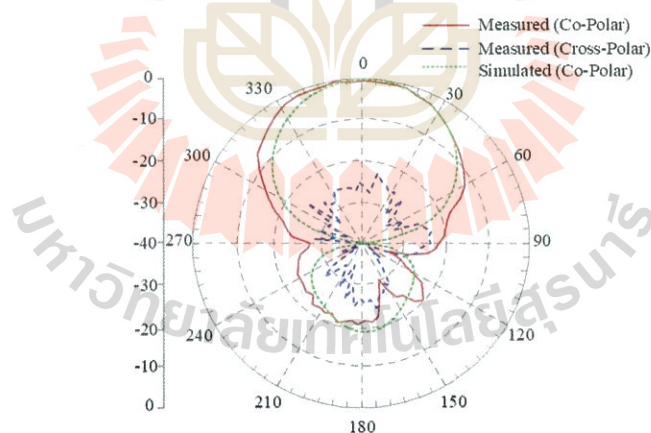


จ.

รูปที่ 4.7 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กของ
ตัวสะท้อนผิวอภิวัด (ต่อ)

ก. แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

ข. การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ
สนามแม่เหล็ก

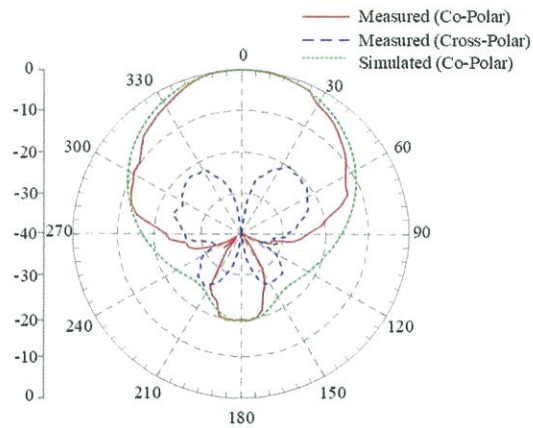


ก.

รูปที่ 4.8 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวสะท้อนผิวอภิวัดที่ความถี่ 1.8 GHz.

ก. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

ข. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

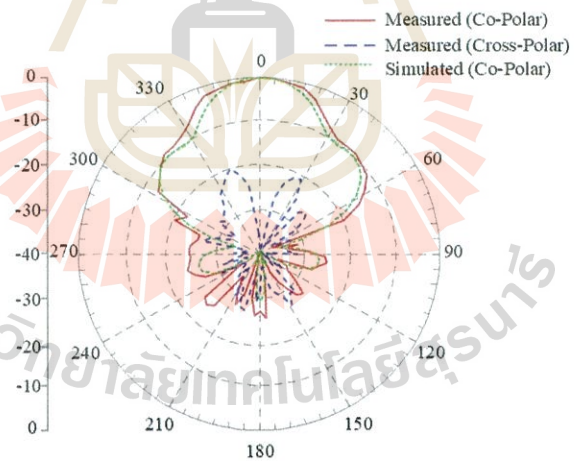


ข.

รูปที่ 4.8 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวสะท้อนผิวอภิวัดที่ความถี่ 1.8 GHz. (ต่อ)

ก. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

ข. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

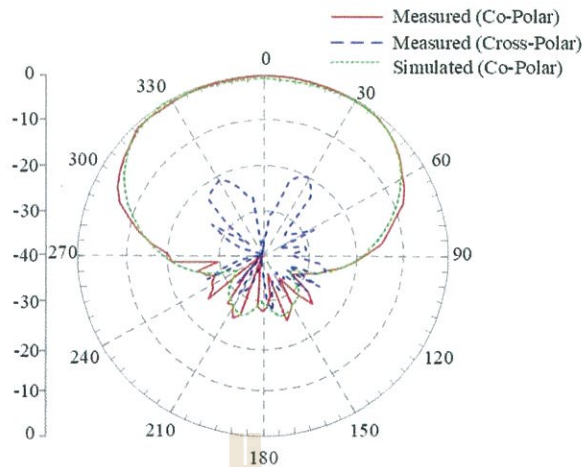


ก.

รูปที่ 4.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวสะท้อนผิวอภิวัดที่ความถี่ 5.5 GHz.

ก. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

ข. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก



ข.

รูปที่ 4.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวสะท้อนผิวอวกาศที่ความถี่ 5.5 GHz.(ต่อ)

ก. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

ข. แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

4.4 ผลการวัดทดสอบอัตรายาย

ในการคำนวณหาค่าอัตรายายของตัวสะท้อนผิวอวกาศแฉวลำดับ 7×7 อิทธิเมนต์ จะใช้สมการการส่งผ่านของฟรีส (Friis transmission equation) เป็นพื้นฐาน โดยสมการการส่งผ่านของฟรีสที่นำมาใช้เท่ากับ

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

$$G_{dB} = \frac{1}{2} \left[20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \frac{P_r}{P_t} \right] \quad (4.2)$$

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

โดยที่ P_t คือ กำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศส่ง (วัตต์)

P_r คือ กำลังที่รับได้ของสายอากาศรับ (วัตต์)

- G_{dB} คือ อัตราขยายรวมของสายอากาศส่งและสายอากาศรับเมื่อสายอากาศทั้งสองตัวมีลักษณะเหมือนกัน
- G_t คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง
- G_r คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ
- R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ (เมตร)

เนื่องจากการวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัดที่รองรับ 2 ความถี่ คือ ความถี่ 1.8 GHz และความถี่ 5.5 GHz ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราขยายของตัวสะท้อนผิวอภิวัดได้จากสมการที่ (4.3) ได้ดังนี้ เมื่อ $(P_{r,dB} - P_{t,dB}) = S_{21}$ ของแต่ละความถี่และ $R = 4$ เมตรที่ความถี่ 1.8 GHz

$$G_{r,dB} = (-35.04 \text{ dB}) - (6.45 \text{ dB}) + 20 \log \left(\frac{4 \times \pi \times (4)}{0.16} \right) = 8.09 \text{ dB}$$

ที่ความถี่ 5.5 GHz

$$G_{r,dB} = (-41.54 \text{ dB}) - (8.6 \text{ dB}) + 20 \log \left(\frac{4 \times \pi \times (4)}{0.0545} \right) = 9.14 \text{ dB}$$

ตารางที่ 4.2 สรุปผลคุณสมบัติของสายอากาศไดโพล

พารามิเตอร์ \ ความถี่ (GHz)	1.8	5.5
ย่านความถี่ใช้งาน (GHz)	1.68-2.00	4.97-5.80
อัตราขยาย (dBi)	8.09	9.14
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (degree)	70	47.5
อิมพีแดนซ์ (ohm)	47.32	52.82

4.5 สรุป

ในบทนี้แสดงถึงการสร้างและการวัดทดสอบคุณสมบัติของตัวสะท้อนผิวอภิวัด และพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบ และการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST ซึ่งได้แก่ค่า

S_{11} แบบรูปการแผ่พลังงาน และอัตราขยาย ว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด และสำหรับความคลาดเคลื่อนของบางส่วนที่มีความแตกต่างกันนั้น สาเหตุอาจจะเกิดจากตัวสะท้อนผิวอภิวัดดูความแม่นยำในการสร้างสายอากาศไดโพล ตลอดจนผลที่เกิดจากการวัดทดสอบ



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

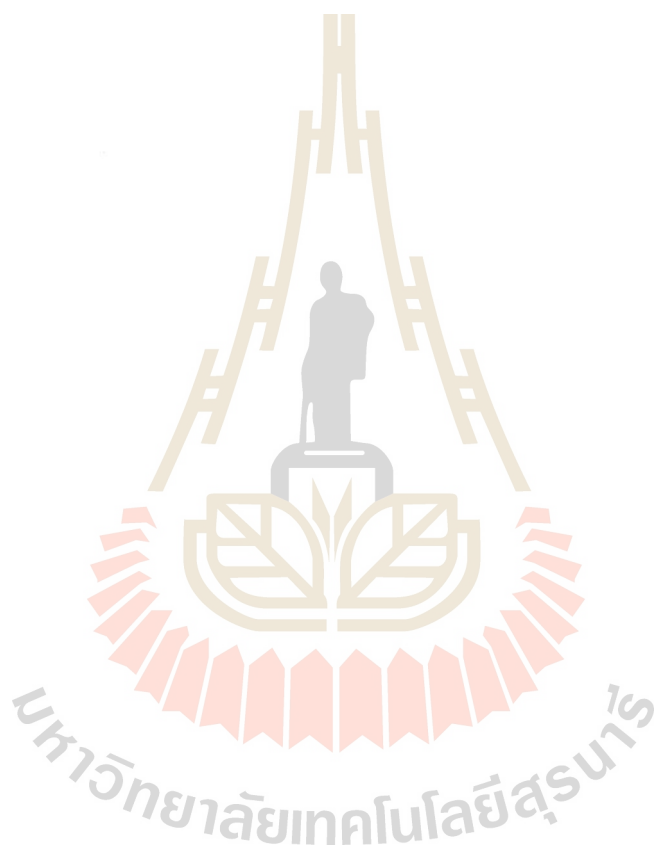
5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบตัวสะท้อนผิวอภิวัด (metasurface reflector) ซึ่งประกอบไปด้วยโครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวนและอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ โดยได้จำลองการออกแบบและวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม CST เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของตัวสะท้อนผิวอภิวัด ซึ่งรองรับการใช้งานได้สองระบบที่ LTE (1.72-1.83 GHz) และ WLAN (5.0-5.85 GHz) ซึ่งเมื่อทำงานร่วมกับสายอากาศไดโพล ได้สร้างตัวสะท้อนผิวอภิวัดเป็นแถวลำดับ 7×7 อิลิเมนต์เพื่อให้ครอบคลุมคลื่นที่แผ่พลังงานออกมาจากสายอากาศ โดยตัวสะท้อนผิวอภิวัดเมื่อทำงานร่วมกับสายอากาศไดโพลให้อัตราขยายที่เพิ่มขึ้น และมีแบบรูปการแผ่พลังงานในลักษณะเจาะจงทิศทาง สุดท้ายนำตัวสะท้อนผิวอภิวัดไปทำการวัดทดสอบและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม CST พบว่าผลที่ได้จากการวัดทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST สอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่ผลจากการวัดทดสอบอาจจะมีผลกระทบเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการกีดขวางแผ่นวงจรพิมพ์ สายอากาศไดโพล การคลาดเคลื่อนจากการตั้งสายอากาศภาครับ-ภาคส่ง หรือแม้กระทั่งเกิดการสูญเสียในสายนำสัญญาณ เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

ในการจำลองตัวสะท้อนผิวอภิวัดนั้นได้ใช้โปรแกรม CST Microwave Studio 2016 ในการออกแบบ เนื่องจากตัวโปรแกรมนี้จะทำให้คอมพิวเตอร์ทำงานหนักมาก เป็นผลทำให้คอมพิวเตอร์มีอาการค้าง สะดุด จอมืด ในขณะที่ใช้งานโปรแกรม CST ทำให้ควรปิดโปรแกรมอื่นที่ไม่จำเป็น โดยให้เปิดใช้งานเพียงโปรแกรม CST โปรแกรมเดียวหรือถ้าจะให้ดีกว่าใช้คอมพิวเตอร์ที่มีคุณสมบัติที่สูง เพื่อให้การทำงานไม่มีอาการค้างและทำงานได้รวดเร็วไม่มีผิดพลาด ซึ่งยังทำให้คอมพิวเตอร์ไม่ทำงานหนักจนเกินไปและส่งผลให้คอมพิวเตอร์เสื่อมสภาพเร็ว ในการสร้างตัวสะท้อนผิวอภิวัดจริงจะเห็นได้ว่าลายของชิ้นงานที่ได้ทำการจำลองได้มีขนาดเล็ก ทำให้ยากต่อการกัดลาย จึงต้องอาศัยเครื่องมือในการกัดเซาะลาย โดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง LPKF Laser & Electronics เพื่อให้การกัดเซาะลายมีความคมชัด ควรเลือกขนาดของเข็มกัดเซาะในการใช้งานของ

เครื่อง LPKF Laser & Electronics ให้มีขนาดเหมาะสมกับชิ้นงาน สิ่งที่ต้องระวังในการใช้เครื่อง LPKF Laser & Electronics นี้ ควรตั้งค่าความลึกเข็มของการกัดเซาะทุกครั้งก่อนที่จะทำการเริ่มใช้งาน เพราะถ้าทำการตั้งค่าลึกเกินไปจะทำให้การกัดเซาะชิ้นงานไปถึงฐานรองของตัววัสดุได้ ดังนั้นจึงควรตั้งค่าให้มีขนาดพอเหมาะกับชิ้นงานในการจำลองและทำการทดสอบเข็มก่อนเริ่มสร้างชิ้นงานทุกครั้งและเนื่องจากว่าวิทยานิพนธ์นี้รองรับการใช้งานได้สองระบบ ในอนาคตสามารถนำไปออกแบบพัฒนาเพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานที่มากกว่าสองระบบ เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้งานได้หลากหลายความถี่ใช้งาน



รายการอ้างอิง

- S. Momeni, A. Menbari, A. A. Alemrajabi, and P. Mohammadi, "Theoretical performance analysis of new class of Fresnel concentrated solar thermal collector based on parabolic reflectors," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 31, no. October 2018, pp. 25–33, 2019.
- Piyaporn Krachodnok and Rangsan Wongsan, "Dual-Frequency Broad-Beam Microstrip Reflectarray," *Proc. Asia-Pacific Conf. Commun.*, Oct. 2007.
- D. H. Kwon, "Lossless scalar metasurfaces for anomalous reflection based on efficient surface field optimization," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 17, no. 7, pp. 1149–1152, 2018.
- L. Shen, Y. Pang, L. Yan, Q. Li, and S. Qu, "Multifunctional sandwich structure designed for broadband reflection reduction," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 96, pp. 75–80, 2018.
- X. Li, J. Yang, Z. Chen, P. Ren, and M. Huang, "Design and Characterization of a Miniaturized Antenna Based on Palisade-Shaped Metasurface," *International Journal of Antennas and Propagation*, pp. 1–9, 2018.
- M. Long, W. Jiang, and S. Gong, "Wideband RCS Reduction Using Polarization Conversion Metasurface and Partially Reflecting Surface," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 2534–2537, 2017. I. C. Metasurfaces, T. Yue, S. Member, Z. H. Jiang, and D. H. Werner, "Compact, Wideband Antennas Enabled by," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 5, pp. 1595–1606, 2016.
- T. Yue, Z. H. Jiang, and D. H. Werner, "A low-profile unidirectional antenna enabled by interdigital capacitor loaded metasurface," *IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp.*, pp. 543–544, 2014.
- T. Decoopman, O. Vanbésien, and D. Lippens, "Demonstration of a backward wave in a single split ring resonator and wire loaded finline," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 14, no. 11, pp. 507–509, 2004.

- C. Jung, J. Kim, and J. Choi, "Double-negative reconfigurable resonator with cross-polarised split rings," *Electron. Lett.*, vol. 49, no. 13, pp. 820–821, 2013.
- H. Shi et al., "Gradient metasurface with both polarization-controlled directional surface wave coupling and anomalous reflection," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 14, no. 3, pp. 104–107, 2015.
- R. Metasurface, A. H. Panaretos, and D. H. Werner, "A Compact Dual-Band Antenna Enabled by a Complementary Split-Ring," vol. 65, no. 12, pp. 6878–6888, 2017.
- F. Falcone, F. Martín, J. Bonache, R. Marqués, T. Lopetegui, and M. Sorolla, "Left Handed Coplanar Waveguide Band Pass Filters Based on Bi-layer Split Ring Resonators," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 14, no. 1, pp. 10–12, 2004.
- S. Chaimool and P. Akkaraekthalin, "Metamaterials for Antenna Applications," *J. KMUTNB*, vol. 21, no. 2, 2011.
- สมบุญ ธีรวิสิฐพงศ์, วงจรกรองความถี่แถบผ่านย่านไมโครเวฟเพื่อการสื่อสารไร้สายสมัยใหม่
วารสารครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2556
- พงศธร ชมทอง, วงจรกรองความถี่ผ่านแถบแบบหลายแถบความถี่โดยใช้เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์
แบบขั้นและโหลดแบบความจุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2554
- J. H. Lee, Y. C. Oh, and N. H. Myung, "A novel compact microstrip bandstop filter based on complementary split-ring resonators," *Asia-Pacific Microw. Conf. Proceedings, APMC*, vol. 3, pp. 1435–1438, 2006.
- P. Chomtung, P. Akkaraekthalin, and V. Vivek, "A monopole antenna with built-in interdigital capacitor and interdigital capacitive feed for wideband response," 2013 10th Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Telecommun. Inf. Technol. ECTI-CON 2013, pp. 1–5, 2013.
- L. Li, F. Xu, K. Wu, S. Delprat, J. Ho, and M. Chaker, "Slow-wave line coupler with interdigital capacitor loading," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 55, no. 11, pp. 2427–2432, 2007.
- Fengliu Xu, et al. "A Compact Dual Mode BPF Base on Interdigital Structure." In *Proceeding of the IEEE Microwave and Millimeter Wave Technology International Conference (ICMMT)*. Suzhou China: Soochow University, 2010 : 1595-1597.
- Q. Zhang, Y. Li, Z. Liang, H. Z. Tan, and Y. Long, "A multiband monopole antenna with the inverted-trapezoidal CPW feeding," *Int. J. Antennas Propag.*, 2014.

Lung-Hwa Hsieh and Kai Chang, "Slow-wave bandpass filters using ring or stepped-impedance hairpin resonators," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 50, no. 7, pp. 1795–1800, 2002.

นางสาวภาวิณี สุวรรณทา, การออกแบบสายอากาศไดอิเล็กทริกเรโซเนเตอร์ย่านไมโครเวฟสำหรับ
ศึกษาวิธีตรวจหามะเร็งเต้านมผ่านแบบจำลอง, 2559

รังสรรค์ วงศ์สรรคร์, วิศวกรรมสายอากาศ (พิมพ์ครั้งที่ 3), ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีการศึกษา,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2555.

Jesús Sánchez Pastor, Sensitivity Analysis of Single Split Ring Resonators and Single
Complementary Split Ring Resonators coupled to Planar Transmission Lines, 2017

Nor MuzlifahMahyuddin and NurLiyana Abdul Latif, "A 10 GHz Low Phase Noise Split-Ring
Resonator Oscillator", *International Journal of Information and Electronics Engineering*,
Vol. 3, No. 6, 584-589, (November 2013)

X. Zhang, Y. Wen, and K. Zhou, "A capacitive loaded quasi-elliptic function microstrip filter on
GSM-R band," *Microwave, Antenna, Propag. EMC Technol. Wirel. Commun.*,
pp. 535–537, 2009.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวกัญจิกา รักด่านกลาง เกิดเมื่อวันที่ 1 ธันวาคม พุทธศักราช 2537 สำเร็จการศึกษา ระดับประถมศึกษาปีที่ 1-6 จากโรงเรียนวัดสระแก้ว และระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1-3 จากโรงเรียน สุรนารีวิทยา ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 4-6 แผนกวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา น้อมเกล้านครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พุทธศักราช 2556 หลังจากสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในปีพุทธศักราช 2560 ได้มีความสนใจ ที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ด้านสายอากาศ จึงได้สมัครเข้าศึกษาต่อ ในสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ระหว่างศึกษาได้เสนอบทความเข้าร่วมประชุมในงานวิชาการนานาชาติ International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2018) ณ Paradise Hotel Busan ประเทศเกาหลีใต้ วันที่ 23-26 ตุลาคม 2561

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี