



การออกแบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นโดยใช้องค์ประกอบพาราซิติกสำหรับ
ความถี่ 2.45 GHz

**A DESIGN OF SWITCHED BEAM ANTENNA USING PARASITIC
ELEMENT FOR 2.45 GHz**

นายกฤตกร นวลจันทร์
นายเกียรติศักดิ์ กลิ่นบัวขาว
นางสาวธนาภรณ์ มหาสมบุรณ์

โครงการวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2557

การออกแบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นโดยใช้องค์ประกอบพาราซิติก
สำหรับความถี่ 2.45 GHz

A Design of Switched Beam Antenna using Parasitic Element for 2.45 GHz



นายกฤตกร นวลจันทร์
นายเกียรติศักดิ์ กลิ่นบัวขาว
นางสาวธนาภรณ์ มหาสมบูรณ์

โครงการวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ปีการศึกษา 2557

หัวข้อโครงการวิศวกรรม สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

เรื่อง การออกแบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่น โดยใช้อุปกรณ์ประกอบพาราเซติกสำหรับความถี่ 2.45 GHz

โดย

นายกฤตกร นวลจันทร์
นายเกียรติศักดิ์ กลิ่นบัวขาว
นางสาวชนาภรณ์ มหาสมบุรณ์

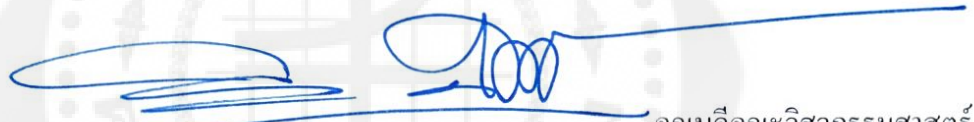
ภาควิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

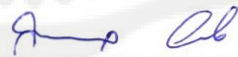
อาจารย์ ดร.พิชญา ชัยปัญญา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อนุมัติให้นับโครงการ วิศวกรรมไฟฟ้า
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต




..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.เวทิน ปิยรัตน์)

คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรม



..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.กำพล วรดิษฐ์)



..... กรรมการ

(อาจารย์สุนิสา คุณารักษ์)



..... กรรมการ

(อาจารย์ชานินทร์ ดวงจันทร์)



..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.พิชญา ชัยปัญญา)

การออกแบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นโดยใช้องค์ประกอบพาราซิติคสำหรับความถี่ 2.45 GHz
ปีการศึกษา 2557

โดย

นายกฤตกร นวลจันทร์

นายเกียรติศักดิ์ กลิ่นบัวขาว

นางสาวธนาภรณ์ มหาสมบูรณ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร. พิชญา ชัยปัญญา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่น โดยใช้สายอากาศเพียงต้นเดียวทำงานร่วมกับสายอากาศพาราซิติค เพื่อประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่ 2.45 GHz โดยสายอากาศสามารถสวิตช์ลำคลื่นในแนวระนาบได้ทั้งหมด 8 ทิศทาง ที่มุม 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° และ 315° สายอากาศสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้โดยการลัดวงจรที่สายอากาศพาราซิติค ทำให้ลำคลื่นหลักหันไปในทิศทางตรงกันข้ามกับสายอากาศพาราซิติคที่ลัดวงจร โดยสายอากาศในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อหาดำแหน่งจุดป้อนสัญญาณ และตำแหน่งของการวางสายอากาศพาราซิติคที่ดีที่สุด ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสายอากาศดังกล่าวมีค่าอัตราขยายสูงสุดที่ 5.6 dBi และมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beamwidth, HPBW) 58°

คำสำคัญ: สายอากาศพาราซิติค/ สายอากาศสวิตช์ลำคลื่น

A Design of Switched Beam Antenna using Parasitic Element for 2.45 GHz**Academic Year 2014****By**

Mr.Krittakorn Nuanjan
Mr.Kaittisak Klinbuakhow
Miss.Thanaphorn Mahasomboon

Project Report Advisor

Pichaya Chaipanya Ph.D.

ABSTRACT

This project presents a design of switched beam antenna using parasitic element for 2.45 GHz. Main beam directions of the antenna are 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° and 315° . Beam switching is controlled by shorted circuit at different positions of parasitic. The antenna is designed in CST Microwave Studio. Positions of pin and feeding point are varied to obtain the best direction and gain. The maximum gain of proposed antenna is 5.6 dBi at all desired direction with a half-power beamwidth of 58° .

Key word: Parasitic antenna/ Switching beam antenna

กิตติกรรมประกาศ

โครงการเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ในด้านวิชาการ จากบุคคลต่าง ๆ ดังนี้

อาจารย์พิชญญา ชัยปัญญา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำ ปรึกษา คอยช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขโครงการเล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนลิขสิทธิ์โปรแกรม CST Microwave Studio ในการจำลองแบบสายอากาศ

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้จัดทำทุกท่าน ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้จัดทำประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากโครงการเล่มนี้ ผู้จัดทำขอมอบให้กับบิดา มารดาและญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนจนครอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้จัดทำทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

	หน้าที
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
รายการสัญลักษณ์	ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตโครงการวิศวกรรม	2
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 สายอากาศเก่ง (Smart Antenna)	3
2.2 สายอากาศไมโครสตริป	5
2.3 สายอากาศพาราซีติก	8
บทที่ 3 การออกแบบสายอากาศ	10
3.1 กล่าวนำ	10
3.2 การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม	10
3.3 การออกแบบสายอากาศในโครงการวิจัย	13
3.4 สรุปผลการออกแบบสายอากาศ	23
3.5 กล่าวสรุป	24
บทที่ 4 ผลการจำลองแบบสายอากาศ	26
4.1 กล่าวนำ	26
4.2 ผลการจำลองแบบ	26

	หน้าที
4.3 กล่าวสรุป	49
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	50
5.1 สรุป	50
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	50
5.3 ข้อเสนอแนะ	51
เอกสารอ้างอิง	52
ประวัติย่อ นิสิตผู้ทำโครงการ	53



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลกระทบของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และความหนาต่อลักษณะสมบัติของ สายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยม	7
2.2 ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศไมโครสตริป	8
4.1 สรุปผลการจำลองแบบ	47
4.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศจากงานวิจัยต่าง ๆ	49



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงการแผ่พลังงานของสายอากาศสวิตช์ลาค์สัน	1
2.1 โครงสร้างของสายอากาศสวิตช์ลาค์สัน	4
2.2 โครงสร้างของสายอากาศแบบปรับตัว	5
2.3 องค์ประกอบพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป	5
2.4 ตัวอย่างแผ่นตัวนำรูปแบบต่าง ๆ	6
2.5 แสดงแถวลำดับขาคือดูอะ	9
3.1 โครงสร้างของสายอากาศจากเอกสารอ้างอิง (พิชญญา ชัยปัญญา./2557)	11
3.2 ผลการทดลองของสายอากาศจาก (พิชญญา ชัยปัญญา./2557)	11
3.3 โครงสร้างของสายอากาศจากเอกสารอ้างอิง (Muzammil Jusoh./2014)	12
3.4 ผลการทดลองของสายอากาศจากเอกสารอ้างอิง (Muzammil Jusoh./2014)	12
3.5 ผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการเพิ่มสายอากาศพาราซีติก	16
3.6 ผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการเพิ่มวงแหวนพาราซีติก	17
3.7 ผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการเพิ่มวงกลมบนวงแหวนพาราซีติก	18
3.8 ผลการจำลองแบบของสายอากาศแบบเมื่อทำการปรับขนาดวงกลมพาราซีติก	19
3.9 ผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการปรับขนาดวงแหวนพาราซีติก	20
3.10 ผลการจำลองแบบของสายอากาศแบบเมื่อทำการปรับขนาดแผ่นกราวนด์ของสายอากาศ	21
3.11 ผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งสายอากาศพาราซีติกวงกลม	22
3.12 สายอากาศที่ออกแบบ	24
4.1 ผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อไม่มีวงแหวนพาราซีติก	27
4.2 ผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อไม่มีการลัดวงจรที่องค์ประกอบพาราซีติก	29
4.3 ผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 1	31
4.4 ผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 2	33
4.5 ผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 3	35
4.6 ผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 4	37
4.7 ผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 5	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 6	41
4.9 ผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 7	43
4.10 ผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 8	45



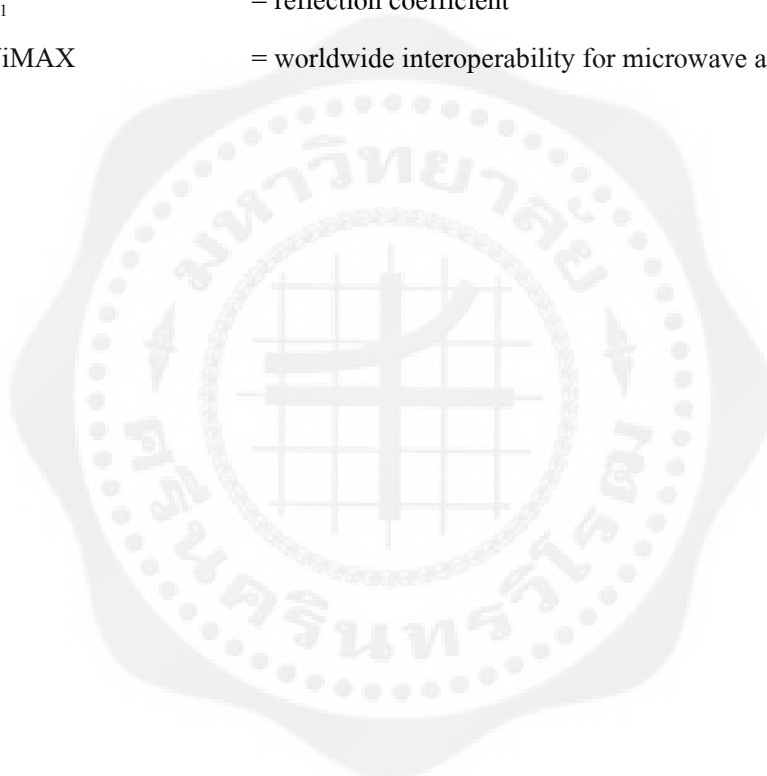
รายการสัญลักษณ์

A	รัศมีแผ่นตัวนำ	mm
C	ความเร็วแสง	m/s
F	ความถี่	GHz
f_r	ความถี่เรโซแนนซ์	GHz
H	ความหนาของฐานรอง	mm
λ	ความยาวคลื่น	m
ϵ_r	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก	ไม่มีหน่วย



ประมวลศัพท์และคำย่อ

dBi	= decibel (isotropic)
GHz	= gigahertz
HPBW	= half power beamwidth
ISM Band	= industrial sciences medicine band
mm	= millimeter
S_{11}	= reflection coefficient
WiMAX	= worldwide interoperability for microwave access



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา ระบบสื่อสารไร้สายได้มีการเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยย่านความถี่ที่นิยมใช้งานได้แก่ย่านความถี่ ISM Band ที่ 2.45 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่สาธารณะที่สามารถใช้กันได้ทั่วไป ทำให้ความถี่ 2.45 GHz มีความสำคัญกับระบบการสื่อสารไร้สายเป็นอย่างมาก โดยการสื่อสารไร้สายนั้นเป็นการสื่อสารที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูง มีอัตราความผิดพลาดน้อย แต่มีสัญญาณแทรกสอดจำนวนมาก เนื่องจากมีตัวกระจายสัญญาณและอุปกรณ์รับสัญญาณหลายจุด ซึ่งระบบสายอากาศเก่งเป็นระบบหนึ่งที่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ เนื่องจากสายอากาศเก่งสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการ และหันจุดศูนย์ไปยังสัญญาณแทรกสอดได้ โดยสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นจัดเป็นสายอากาศประเภทหนึ่งของสายอากาศเก่ง ประกอบด้วยสายอากาศแถวลำดับ (antenna array) และโครงข่ายก่อรูปคลื่น (beamforming network) ซึ่งทำหน้าที่สวิตซ์ลำคลื่นและเล็กลำคลื่นหลักไปยังผู้ใช้งาน หรือหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอด



รูปที่ 1.1 แสดงการแผ่พลังงานของสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่น (Deepak Boppana.//2005:/ออนไลน์)

นอกจากนี้สายอากาศพาราซิติคยังเป็นสายอากาศอีกประเภทหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศได้โดยอาศัยจุดป้อนสัญญาณที่น้อยที่สุด โดยส่วนของสายอากาศพาราซิติคหรือพาราซิติคอีลิเมนต์ เป็นส่วนของสายอากาศที่ไม่ได้ต่อโดยตรงกับจุดป้อนสัญญาณจากเครื่องรับหรือเครื่องส่ง แต่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหรือแรงดันบนตัวพอที่จะทำให้เกิดการเชื่อมต่อยุติกัน (mutual coupling) ได้ ทำให้อัตราขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้น

จากข้อดีของสายอากาศพาราซิติคในการเพิ่มอัตราขยายโดยใช้จุดป้อนสัญญาณที่น้อยที่สุด และข้อดีในการลดปัญหาสัญญาณแทรกสอดของสายอากาศสวิตช์ลาคลิ้นในสายอากาศกึ่งดัดที่ได้กล่าวมานั้น โครงการนี้จึงสนใจการพัฒนาคุณภาพของการสื่อสารไร้สายด้วยการออกแบบสายอากาศสวิตช์ลาคลิ้นเพื่อใช้ในย่านความถี่ 2.45 GHz โดยอาศัยสายอากาศพาราซิติคเป็นตัวช่วยในการสวิตช์ลาคลิ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในระบบสื่อสารไร้สายให้ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อออกแบบสายอากาศสวิตช์ลาคลิ้นแบบไมโครสตริปที่ย่านความถี่ 2.45 GHz ซึ่งอาศัยสายอากาศพาราซิติคในการสวิตช์ลาคลิ้น โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ในการออกแบบสายอากาศเพื่อพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานและอัตราขยายของสายอากาศที่ออกแบบ

1.3 ขอบเขตโครงการวิศวกรรม

1.3.1 ออกแบบสายอากาศสวิตช์ลาคลิ้นแบบไมโครสตริป โดยอาศัยสายอากาศพาราซิติคช่วยในการสวิตช์ลาคลิ้น

1.3.2 ออกแบบสายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio

1.3.3 สายอากาศที่ออกแบบสามารถสวิตช์ลาคลิ้นได้มากกว่า 4 ทิศทาง เมื่อมีการลัดวงจรที่สายอากาศพาราซิติคซึ่งมีทิศทางมากกว่างานวิจัย (Muzammil Jusoh.//2014) เปรียบเทียบจากผลการจำลองแบบ

1.3.4 สายอากาศที่ออกแบบมีอัตราขยายสูงขึ้นเมื่อเทียบกับงานวิจัย (พิชญญา ชัยปัญญา.//2557)

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ

ได้แบบจำลองสายอากาศที่สามารถติดตั้งกับตัวลูกข่าย ซึ่งสามารถนำไปใช้งานกับเครือข่ายท้องถิ่น ไร้สายที่ความถี่ 2.45 GHz

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

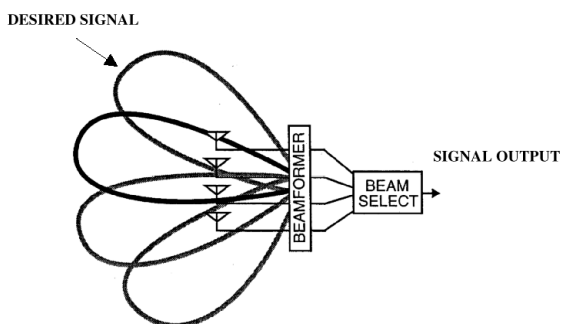
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน ซึ่งประกอบด้วยทฤษฎีสายอากาศ เก่งและสายอากาศไมโครสตริป สายอากาศพาราซิติค โดยทฤษฎีพื้นฐานเหล่านี้จะถูกใช้เป็นพื้นฐาน การออกแบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่น

2.1 สายอากาศเก่ง (Smart Antenna)

ระบบสายอากาศเก่ง (smart antenna systems) เป็นระบบที่ประกอบด้วยสายอากาศแถว ลำดับ (array antennas) และส่วนการประมวลผลสัญญาณ (signal processing unit) ระบบสายอากาศ เก่งนี้สามารถลดสัญญาณแทรกสอด (interference signal) ที่มีความถี่เดียวกับสัญญาณเป้าหมาย (desired signal) ที่มาจากแหล่งกำเนิดอื่นได้ด้วยการหันลำคลื่นหลัก (main beam) ไปยังทิศทาง เป้าหมาย นอกจากนี้ยังสามารถหันจุดศูนย์ (null) หรือพुरुอง (side lobe) ไปยังทิศทางของสัญญาณ แทรกสอดได้อีกด้วย กล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ระบบสายอากาศเก่งสามารถกำหนดอัตราขยายสูงสุด ให้กับสัญญาณที่มาจากทิศทางเป้าหมาย ในเวลาเดียวกันก็สามารถลดอัตราขยายของสัญญาณที่ มาจากแหล่งกำเนิดอื่นได้ กระบวนการที่ได้กล่าวมานั้นเรียกว่า การก่อรูปลำคลื่น (beamforming) ซึ่งความสามารถดังกล่าวทำให้ระบบสามารถใช้ความถี่ซ้ำเดิมได้ในตำแหน่งที่แตกต่างกัน โดย ปราศจากปัญหาจากการแทรกสอดของสัญญาณที่มีช่องสัญญาณร่วมกัน (co-channel interference) จึงทำให้เราสามารถใช้ทรัพยากรความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยทั่วไปสายอากาศเก่งแบ่ง ออกได้เป็นสองประเภท ได้แก่

2.1.1 สายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น (Switched Beam Antenna)

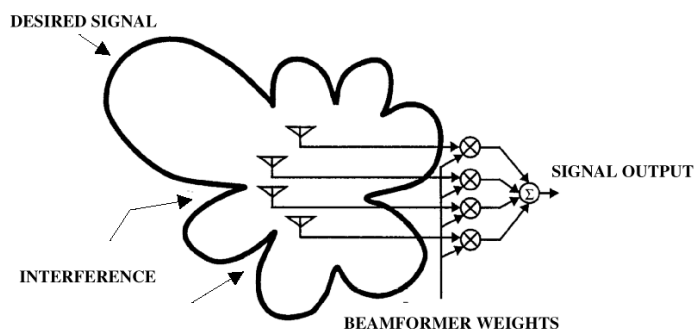
โครงสร้างของสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นประกอบด้วย สายอากาศแถวลำดับจำนวน N ต้น โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น (beamforming network) และตัวเลือกลำคลื่น เมื่อพิจารณาให้ระบบเป็น ภาครับ สัญญาณที่ตกกระทบกับสายอากาศแถวลำดับจะถูกส่งต่อไปยัง โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นเพื่อ ก่อรูปลำคลื่นไปในทิศทางต่าง ๆ ที่ได้กำหนดเอาไว้ก่อนล่วงหน้า หลังจากนั้นตัวเลือกลำคลื่นจะทำ หน้าที่ในการเลือกลำคลื่นที่มีขนาดของสัญญาณแรงที่สุด ตามความเป็นจริงที่ว่าลำคลื่นที่ให้ขนาด ของสัญญาณที่แรงที่สุดนั้น คือลำคลื่นที่ชี้ไปในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการหรือที่เราเรียกว่า ทิศทางเป้าหมาย และเป็นลำคลื่นที่มีผลกระทบจากสัญญาณแทรกสอดน้อยที่สุด



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่น (John./2011:/ออนไลน์)

2.1.2 สายอากาศแบบปรับตัว (Adaptive Antenna)

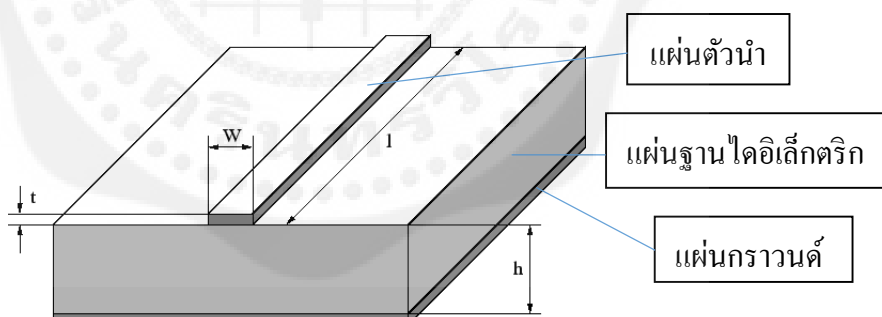
สายอากาศแบบปรับตัวเป็นสายอากาศอีกประเภทหนึ่งของระบบสายอากาศแก่สายอากาศแบบปรับตัwnี้จะมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนลำคลื่นหลักให้หันไปยังทิศทางของเป้าหมายถึงแม้ว่าเป้าหมายจะมีการเคลื่อนที่ก็ตาม ในขณะที่เดียวกันระบบก็สามารถหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่ความถี่เดียวกันได้ การกระทำดังกล่าวกระทำผ่านการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักให้กับสายอากาศแต่ละต้นในสายอากาศแถวลำดับ ซึ่งค่าน้ำหนักดังกล่าวสามารถคำนวณได้จาก อัลกอริทึมที่หลากหลายเช่น Least Mean Square (LMS), Recursive Least Square (RLS) หรือ Bussgang Algorithm ซึ่งต้องอาศัยแผ่นวงจรไฟฟ้าประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัลที่มีความสามารถในการประมวลผลขั้นสูง และยังมีอัตราการประมวลผลสัญญาณที่สูงอีกด้วยเพื่อให้สามารถติดตามผู้ใช้งานที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ซึ่งต่างจากสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นที่ไม่ต้องอาศัยการใช้อัลกอริทึมที่ซับซ้อนแต่อย่างใด จึงกล่าวได้ว่าสายอากาศแบบปรับตัวมีความซับซ้อนมากกว่าสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น แต่ให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนและสัญญาณแทรกสอดสูงกว่าในกรณีที่แหล่งกำเนิดสัญญาณมีการเคลื่อนที่



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของสายอากาศแบบปรับตัว

2.2 สายอากาศไมโครสตริป

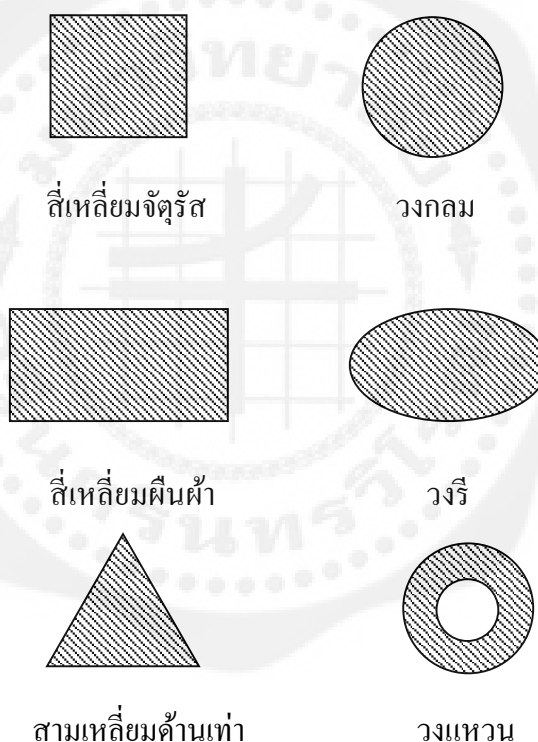
สายอากาศไมโครสตริปประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐาน 4 ประการ คือ แผ่นตัวนำ แผ่นกราวด์ แผ่นฐานไดอิเล็กตริกและระบบป้อนกำลัง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 องค์ประกอบทั้งหมดเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดลักษณะสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป (Stefan Jahn./2007:/ออนไลน์)

2.2.1 แผ่นตัวนำ

ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่พลังงาน วัสดุที่ใช้เป็นแผ่นตัวนำคือ โลหะที่มีค่าความต้านทานต่ำ สามารถยึดติดกับฐานไดอิเล็กตริกได้ดี โดยทั่วไปใช้ทองแดง อลูมิเนียม เป็นต้น โดยวัสดุที่ใช้ทำแผ่นตัวนำส่งผลต่อความสามารถในการนำกระแส ประสิทธิภาพของสายอากาศ และความยากง่ายในการผลิต นอกจากนี้ขนาดและรูปร่างของแผ่นตัวนำก็เป็นปัจจัยที่กำหนดความถี่ที่ใช้งานและส่งผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่พลังงาน อิมพีแดนซ์ขาเข้าและแบนด์วิดท์ของสายอากาศ ในส่วนของรูปร่างของแผ่นตัวนำที่นิยมใช้ได้แก่รูปร่างเรขาคณิตต่าง ๆ เช่น สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า สามเหลี่ยม วงกลม วงรี เป็นต้น โดยแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างแผ่นตัวนำรูปแบบต่าง ๆ

ดังนั้นการพิจารณารูปร่างและขนาดของแผ่นตัวนำจึงขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้งาน ความยากง่ายในการผลิต ในปัจจุบันรูปร่างส่วนใหญ่เป็นแผ่นตัวนำแบบสี่เหลี่ยมและวงกลม เนื่องจากผลิตและปรับแต่งได้ง่าย ลักษณะและสมบัติของสายอากาศไม่แตกต่างจากรูปแบบอื่นมากนัก (วรรณวิสา ดียิ่ง./2552)

2.2.2 แผ่นกราวด์

โดยทั่วไปแผ่นกราวด์ทำมาจากโลหะแต่มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นสายอากาศมาก โดยจะยึดติดอีกด้านหนึ่งของแผ่นตัวนำ ทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น

2.2.3 แผ่นฐาน ไดอิเล็กตริก

เป็นองค์ประกอบสำคัญที่กำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของสายอากาศ โดยค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และความหนาของแผ่นฐานมีผลต่อลักษณะของสายอากาศไมโครสตริป ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลกระทบของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และความหนาต่อลักษณะสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยม (วรรณวิสา ดียิ่ง//2552)

ลักษณะสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยม	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์	ความหนาของแผ่นไดอิเล็กตริก
ประสิทธิภาพในการแผ่พลังงานสูง	ต่ำ	บาง
การสูญเสียของไดอิเล็กตริกต่ำ	ต่ำ	บาง
แบนด์วิดท์กว้าง	ต่ำ	หนา
น้ำหนักเบา	ต่ำ	บาง
ความแข็งแรง	สูง	หนา

2.2.4 ส่วนป้อนสัญญาณ

ใช้สายส่งเป็นตัวป้อนสัญญาณให้แก่สายอากาศ และสามารถปรับค่า ทำการแมตซิ่งให้สายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับอิมพีแดนซ์ของเครื่องส่งหรือรับ นอกจากนี้ยังใช้ในการปรับโพลาริเซชันได้อีกด้วย โดยตำแหน่งและความยาวของส่วนป้อนสัญญาณมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่น วิธีป้อนสัญญาณมีหลายแบบ ซึ่งวิธีที่ง่ายที่สุดคือการป้อนสัญญาณโดยตรงให้กับสายอากาศ โดยใช้สายส่งไมโครสตริปต่อกับตัวกลางโดยตรง สายส่งนี้สามารถปรับแมตซิ่งได้ในตัวเองและยังสามารถสร้างได้ง่ายโดยสามารถทำการสร้างสายส่งดังกล่าวพร้อมกับการสร้างแผ่นตัวนำที่ใช้ส่งคลื่นในเวลาเดียวกัน

อย่างไรก็ตาม การนำไมโครสติปมาออกแบบสายอากาศนั้นมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศไมโครสติป (วรรณวิสา คียิ่ง./2552)

ข้อดี	ข้อเสีย
1. หน้าตัดข้างบางและน้ำหนักเบา	1. ให้อัตราขยายของสายอากาศต่ำ
2. อิมพีแดนซ์ขาเข้าสามารถปรับค่าได้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการป้อนกำลัง	2. แบนด์วิดท์แคบ
3. ต้นทุนการผลิตต่ำและสามารถผลิตได้ง่ายด้วยเทคนิคการทำแผ่นวงจรพิมพ์	3. มีปัญหาในการควบคุมโพลาริเซชัน
4. มีความแข็งแรงเมื่อวางแนบกับผิวระนาบ	4. ต้องการแผ่นฐานไดอิเล็กตริกที่มีคุณภาพสูงและทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

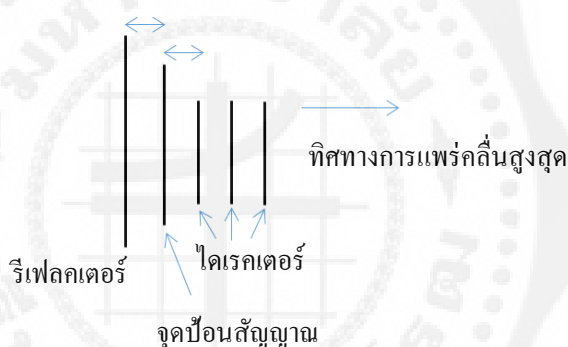
เนื่องจากข้อดีของสายอากาศไมโครสติปตามที่ได้กล่าวมา ทำให้มีการวิจัยและพัฒนาสายอากาศไมโครสติปออกมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ มากมาย ได้แก่

1. นำไปใช้งานขนส่งอวกาศ ร่วมกับระบบนำร่อง ระบบสื่อสาร
2. ระบบระบุพิกัดผ่านดาวเทียมเคลื่อนที่
3. ใช้ในการสื่อสารไร้สายต่าง ๆ

2.3 สายอากาศพาราซิติค

สายอากาศพาราซิติคคือ สายอากาศที่ประกอบด้วยองค์ประกอบของพาราซิติคที่มีจำนวนมากกว่าสองตัว ซึ่งองค์ประกอบพาราซิติคจะถูกสายอากาศที่ถูกป้อนสัญญาณกระตุ้นให้เกิดการเหนี่ยวนำสนามพลังงาน ทำให้สายอากาศมีทิศทางในการรับและส่งสัญญาณได้ไกลมากยิ่งขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มจุดป้อนสัญญาณ จากรูปที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบของสายอากาศยาคีอูคะ ซึ่งเป็นตัวอย่างหนึ่งของสายอากาศพาราซิติค จากรูปองค์ประกอบพาราซิติคจะถูกวางขนานกับจุดป้อนสัญญาณของสายอากาศแบบครึ่งคลื่น ซึ่งตำแหน่งการวางตัวขององค์ประกอบพาราซิติคเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งาน เนื่องจากกระแสที่เกิดขึ้นกับองค์ประกอบพาราซิติค

เกิดจากแรงดันเหนี่ยวนำไฟฟ้า ทำให้ในบางจุดคลื่นจะไม่ถูกสะท้อนโดยองค์ประกอบพาราซีติกที่มีเฟสและทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นที่ตรงกับกับจุดป้อนสัญญาณ โดยรูปแบบทิศทางการแพร่กระจายคลื่นสามารถหาได้โดยการวัดค่าความแรงของสัญญาณที่วัดได้ในทุก ๆ ทิศทาง เมื่อแบบรูปการแผ่พลังงานมีทิศทางตรงข้ามกับองค์ประกอบพาราซีติก เราจะเรียกองค์ประกอบพาราซีติกว่า รีเฟล็คเตอร์ (reflector element) และเมื่อแบบรูปการแผ่พลังงานมีทิศทางเดียวกับองค์ประกอบพาราซีติก และมีความแรงของสัญญาณมากขึ้น เราจะเรียกองค์ประกอบพาราซีติกว่า ไดเรกเตอร์ (director element) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วรีเฟล็คเตอร์มักวางห่างจากสายอากาศที่มีการป้อนสัญญาณ 0.15λ และมีขนาดใหญ่กว่าสายอากาศที่ถูกป้อนสัญญาณเล็กน้อย ในส่วนของไดเรกเตอร์มักวางห่างจากสายอากาศที่ถูกป้อนสัญญาณด้วยระยะห่าง 0.1λ และมีขนาดเล็กกว่าสายอากาศที่ถูกป้อนสัญญาณเล็กน้อย (Stephen C. Harsany.//1997)



รูปที่ 2.5 แสดงแถวลำดับขากิอูตะ

จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน ในส่วนแรกได้กล่าวถึงสายอากาศแก่ง ซึ่งแบ่งออกเป็นสายอากาศสวิทช์ลาคัลลินและสายอากาศปรับตัวได้ โดยจะเห็นว่าสายอากาศแบบสวิทช์ลาคัลลินมีความซับซ้อนที่น้อยกว่าสายอากาศแบบปรับตัวได้ อย่างไรก็ตามเมื่อผู้ใช้งานมีการเคลื่อนที่สายอากาศแบบปรับตัวได้จะมีอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนและสัญญาณแทรกสอดที่ดีกว่าสายอากาศแบบสวิทช์ลาคัลลิน ในส่วนถัดมาได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริปและสายอากาศพาราซีติกซึ่งสามารถนำมาออกแบบสายอากาศสวิทช์ลาคัลลินเพื่อใช้งานสำหรับความถี่ 2.45 GHz โดยทฤษฎีดังกล่าวจะถูกนำไปออกแบบสายอากาศ โดยการออกแบบดังกล่าวสามารถศึกษาได้ในบทถัดไป

บทที่ 3 การออกแบบสายอากาศ

3.1 กล่าวนำ

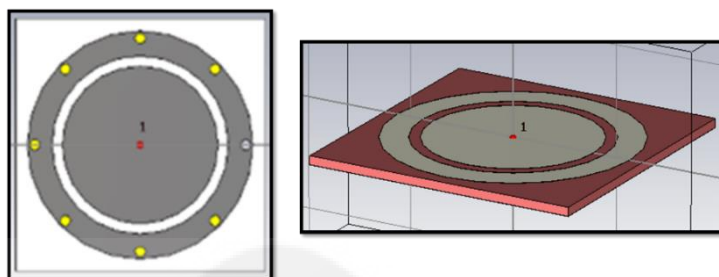
เนื่องจากสายอากาศเก่งที่กล่าวไว้ในบทที่แล้วสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ด้วยสายอากาศพาราซิติค ดังนั้นเราจึงสามารถกำหนดขนาดต่าง ๆ ของสายอากาศเก่ง ขนาดสายอากาศพาราซิติค รวมถึงกำหนดตำแหน่งต่าง ๆ ในการวางสายอากาศ ทั้งตำแหน่งจุดป้อนสัญญาณและตำแหน่งการลัดวงจรได้ โดยเมื่อเราทำการออกแบบได้อย่างสมบูรณ์ให้สายอากาศมีขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสม จะทำให้สายอากาศสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในบทนี้จะกล่าวถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมสำหรับงานที่เกี่ยวข้องกับ โครงงานวิจัย จากนั้นจะกล่าวถึงสายอากาศที่ถูกพัฒนาขึ้นในโครงงานวิจัยชิ้นนี้ โดยเป็นการจำลองการออกแบบลงในโปรแกรม CST Microwave Studio และผลการทดลองจะกล่าวถึงในบทถัดไป

3.2 การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม

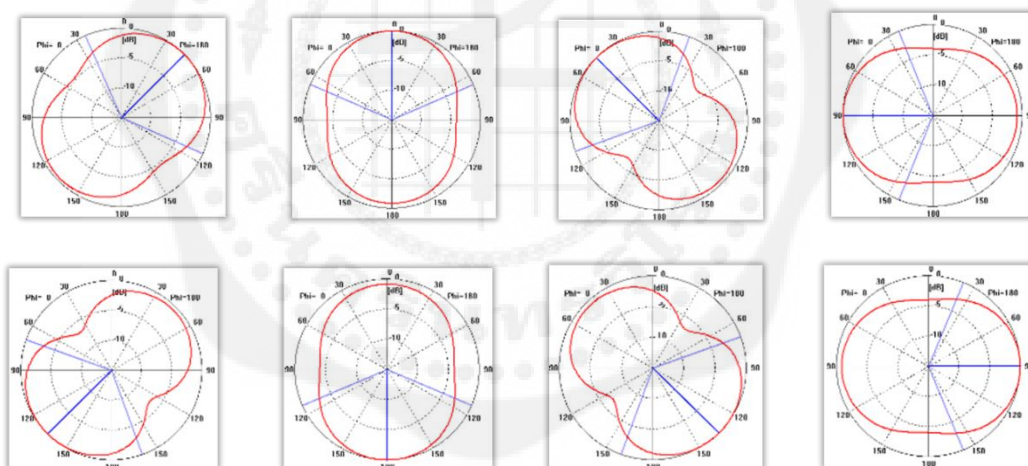
จากการศึกษางานวิจัย (มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล./2550) ได้ทำการสร้างสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นต้นเดียวรูปทรงแปดเหลี่ยม โดยสามารถทำการสวิตช์ลำคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz ได้ด้วยการลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศที่ตำแหน่งที่เหมาะสม ซึ่งสามารถทำการสวิตช์ลำคลื่นได้ทั้งหมด 8 ทิศทาง โดยข้อเสียของงานวิจัยนี้คือต้องทำการลัดวงจรบนตัวสายอากาศและการสวิตช์ลำคลื่นในแต่ละด้านจำเป็นต้องลัดวงจรหลายตำแหน่งบนสายอากาศทำให้เกิดความยุ่งยากซับซ้อนในการสวิตช์ลำคลื่น

งานวิจัย (พิชญา ชัยปัญญา./2557) ได้ทำการออกแบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นเพียงต้นเดียวร่วมกับสายอากาศพาราซิติค ที่ใช้ในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่ความถี่ 2.45 GHz โดยสายอากาศสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ทั้งหมด 8 ทิศทาง ซึ่งอาศัยการลัดวงจรที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของวงแหวนพาราซิติค ทิศทางของลำคลื่นหลักจะตรงกับตำแหน่งของวงแหวนพาราซิติคที่ถูกเปิดวงจร โดยโครงสร้างของสายอากาศ แสดงในรูปแบบที่ 3.1 และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศหลังจกลัดวงจร แสดงในรูปแบบที่ 3.2

อย่างไรก็ตามข้อเสียของงานวิจัยนี้คือมีอัตราขยายของสายอากาศอยู่ที่ 3 dBi ทำให้มีประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลค่อนข้างต่ำ



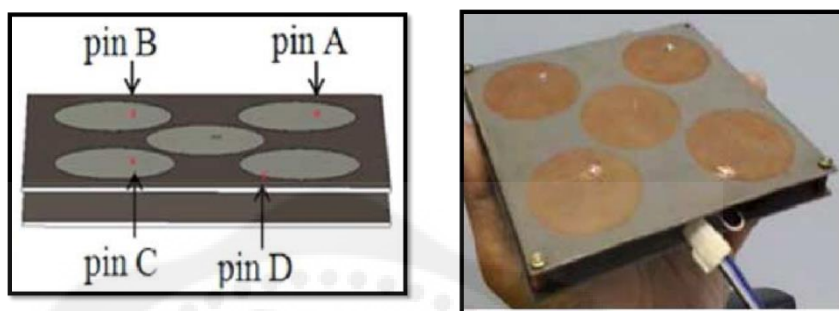
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศจากเอกสารอ้างอิง (พิชญา ชัยปัญญา./2557)



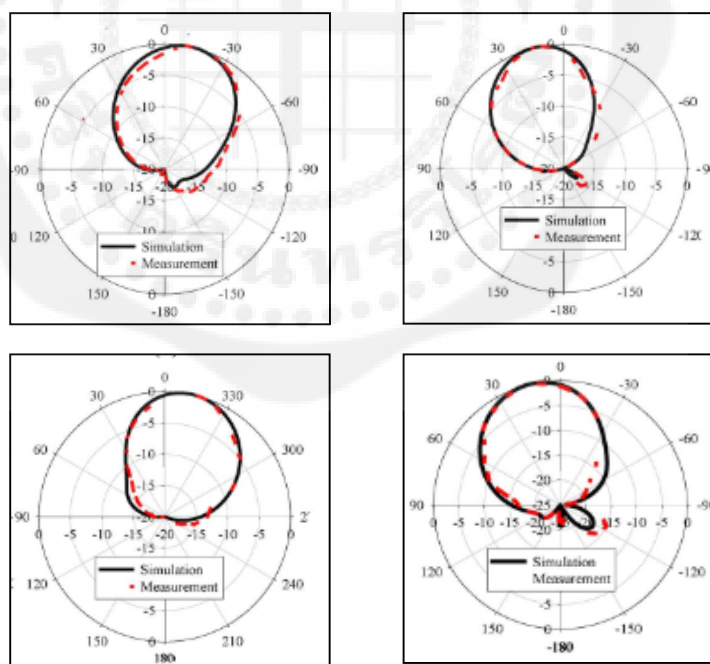
รูปที่ 3.2 ผลการทดลองของสายอากาศจากเอกสารอ้างอิง (พิชญา ชัยปัญญา./2557)

งานวิจัย (Muzammil Jusoh./2014) ได้ทำการออกแบบการสวิตช์ลำคลื่นโดยใช้สายอากาศเพียงต้นเดียวทำงานร่วมกับสายอากาศพาราซิติค เพื่อประยุกต์ใช้กับระบบ WiMAX ที่ความถี่ 2.4 GHz แสดงในรูปที่ 3.3 โดยสายอากาศสามารถสวิตช์ลำคลื่นในแนวระนาบได้ทั้งหมด 4 ทิศทางที่มุม 45° , 135° , 225° และ 315° แสดงในรูปที่ 3.4 สายอากาศสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้โดยการ

ลัดวงจรที่สายอากาศพาราซีติก ทำให้ลาคี่นหลักหันไปในทิศทางเดียวกับสายอากาศพาราซีติกที่ถูกลัดวงจร ข้อเสียของงานวิจัยนี้คือมีทิศทางในการสวิตซ์ลาคี่นก่อนข้างน้อย คือมีเพียง 4 ทิศทาง ซึ่งไม่สามารถรองรับผู้ใช้งานได้รอบทิศทาง



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของสายอากาศจากเอกสารอ้างอิง (Muzammil Jusoh.//2014)



รูปที่ 3.4 ผลการทดลองของสายอากาศจากเอกสารอ้างอิง (Muzammil Jusoh.//2014)

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงเสนอการออกแบบสายอากาศที่สวิตช์ล้าคลื่นได้โดยการลัดวงจรที่พาราซิติค โดยสายอากาศสามารถสวิตช์ล้าคลื่นได้หลายทิศทางและมีอัตราการขยายสูง

3.3 การออกแบบสายอากาศในโครงการวิจัย

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมข้างต้นทำให้สรุปได้ว่า โครงสร้างและขนาดของสายอากาศมีผลต่อทิศทางและอัตราการขยายของสายอากาศ โดยในโครงการวิจัยนี้ทำการออกแบบสายอากาศที่สามารถสวิตช์ล้าคลื่นได้ 8 ทิศทางและมีอัตราการขยายที่สูงขึ้น ผลการออกแบบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สายอากาศถูกออกแบบโดยมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 4.7 และชั้นฐานรองหนา 1.57 มิลลิเมตร ด้านบนของฐานรองประกอบด้วยแผ่นทองแดงวงกลมรัศมี a ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.1

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 \times \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (3.1)$$

เมื่อ

a คือ รัศมีของแผ่นนำสัญญาณ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

h คือ ความหนาของฐานรอง มีค่า 0.157 เซนติเมตร

โดย

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.2)$$

เมื่อ

f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์ มีค่า 2.45 กิกะเฮิรตซ์

ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก มีค่า 4.7

ดังนั้น

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{2.45 \times 10^9 \times \sqrt{4.7}}$$

$$= 1.655$$

จะได้

$$a = \frac{1.655}{\left\{ 1 \times \frac{2 \times 0.157}{\pi \times 4.7 \times 2.419} \left[\ln \left(\frac{\pi \times 2.419}{2 \times 0.157} \right) + 1.7726 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}}$$

$$a = 1.631 \text{ เซนติเมตร}$$

$$a = 16.31 \text{ มิลลิเมตร}$$

ซึ่งตำแหน่งของวงแหวนพาราซิติคต้องอยู่ใกล้กับสายอากาศมากพอที่จะทำให้เกิดการเชื่อมต่อร่วม โดยระยะห่างของวงแหวนพาราซิติคและแผ่นนำสัญญาณต้องมีระยะห่างเท่ากับ 0.1λ ซึ่งอ้างอิงจากทฤษฎีสายอากาศพาราซิติคจากบทที่ 2 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{3.3}$$

โดยที่

λ คือ ความยาวคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร

c คือ ความเร็วแสง มีค่า 3×10^8 เมตรต่อวินาที

f คือ ความถี่ โดยความถี่ใช้งานมีค่า 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์

จะได้

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{2.45 \times 10^9}$$

$$\lambda = 0.12244 \text{ เมตร}$$

แทนค่า

$$0.1\lambda = 0.1 \times 0.12244$$

$$= 0.012244 \text{ เมตร}$$

$$= 12.44 \text{ มิลลิเมตร}$$

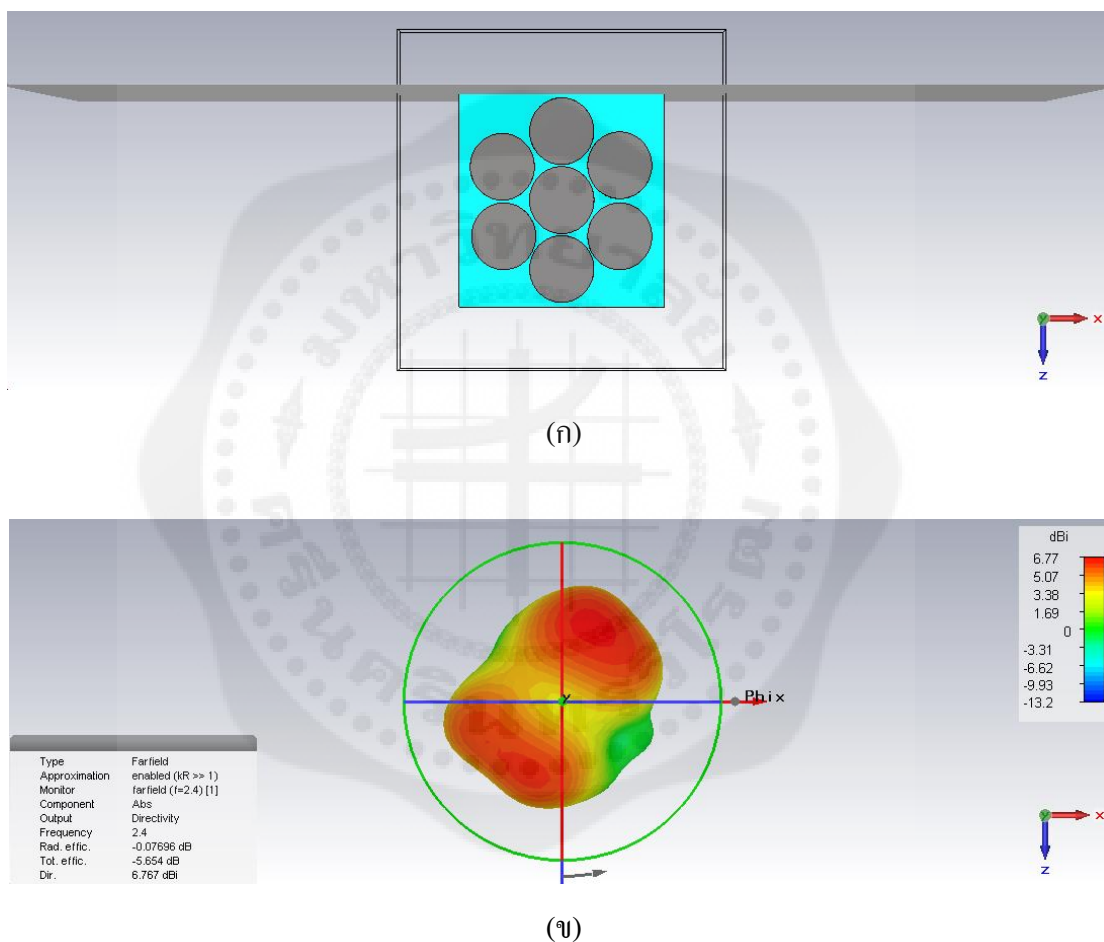
เพราะฉะนั้น ระยะห่างของวงแหวนพาราซิติกและแผ่นนำสัญญาณ ต้องมีระยะห่างไม่เกิน 12.44 มิลลิเมตร

ในการจำลองแบบ เมื่อใช้ขนาดรัศมีของแผ่นนำสัญญาณที่ขนาด a ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 16.31 มิลลิเมตร พบว่าสายอากาศมีอัตราขยายที่ต่ำมาก เนื่องจากแผ่นนำสัญญาณมีขนาดเล็ก ดังนั้นจึงทำการเพิ่มขนาด a ไปที่ละ 0.5 เท่า พบว่าที่ขนาด $2a$ สายอากาศสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้แต่ค่าความกว้างลำคลื่นกำลังมีขนาดกว้างมาก ทำให้สายอากาศมีระยะทางในการส่งที่สั้น และเมื่อพิจารณาที่ขนาด $2.5a$ พบว่าสายอากาศไม่สามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ เนื่องจากระยะห่างระหว่างจุดป้อนสัญญาณกับวงแหวนพาราซิติกมีขนาดกว้างเกินไป ทำให้ไม่สามารถเหนี่ยวนำกระแสได้

จากการจำลองแบบ พบว่าขนาดของแผ่นนำสัญญาณที่สามารถสวิตช์ลำคลื่นได้และมีค่าความกว้างครึ่งกำลังที่สามารถยอมรับได้ คือขนาด $1.5a$ ดังนั้นในโครงการนี้จึงใช้ขนาดแผ่นตัวนำที่มีขนาดรัศมีเท่ากับ 23.6 มิลลิเมตร เป็นขนาดเริ่มต้นในการจำลองแบบ

จากการคำนวณข้างต้น สายอากาศสามารถออกแบบได้ดังต่อไปนี้

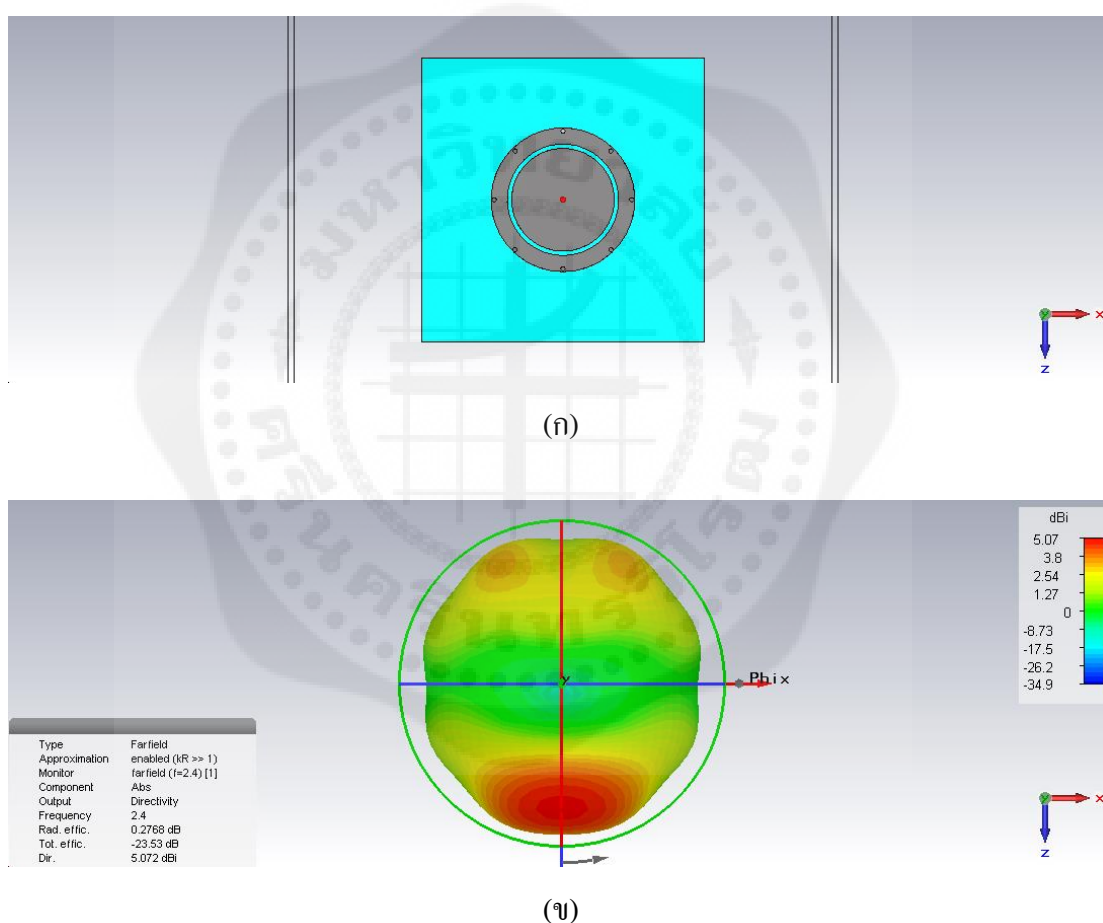
3.3.1 จากงานวิจัย (Muzammil Jusoh./2014) ทำการเพิ่มทิศทางของลำคลื่น โดยเพิ่มสายอากาศพาราซิติค ซึ่งแผ่นนำสัญญาณมีขนาด 23.6 มิลลิเมตร และวางสายอากาศพาราซิติคห่างจากสายอากาศไม่เกิน 12.44 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.5 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการเพิ่มสายอากาศพาราซิติค ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน

ผลการออกแบบ ลำคลื่นที่ออกมาจะมีทิศทางไม่ตรงกับจุดที่ลัดวงจรบนสายอากาศพาราซิติค ทำให้ไม่สามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ตามที่ต้องการ อีกทั้งการเพิ่มจำนวนของสายอากาศพาราซิติค ทำให้สายอากาศมีขนาดใหญ่ทำให้ไม่เหมาะสมกับการใช้งาน

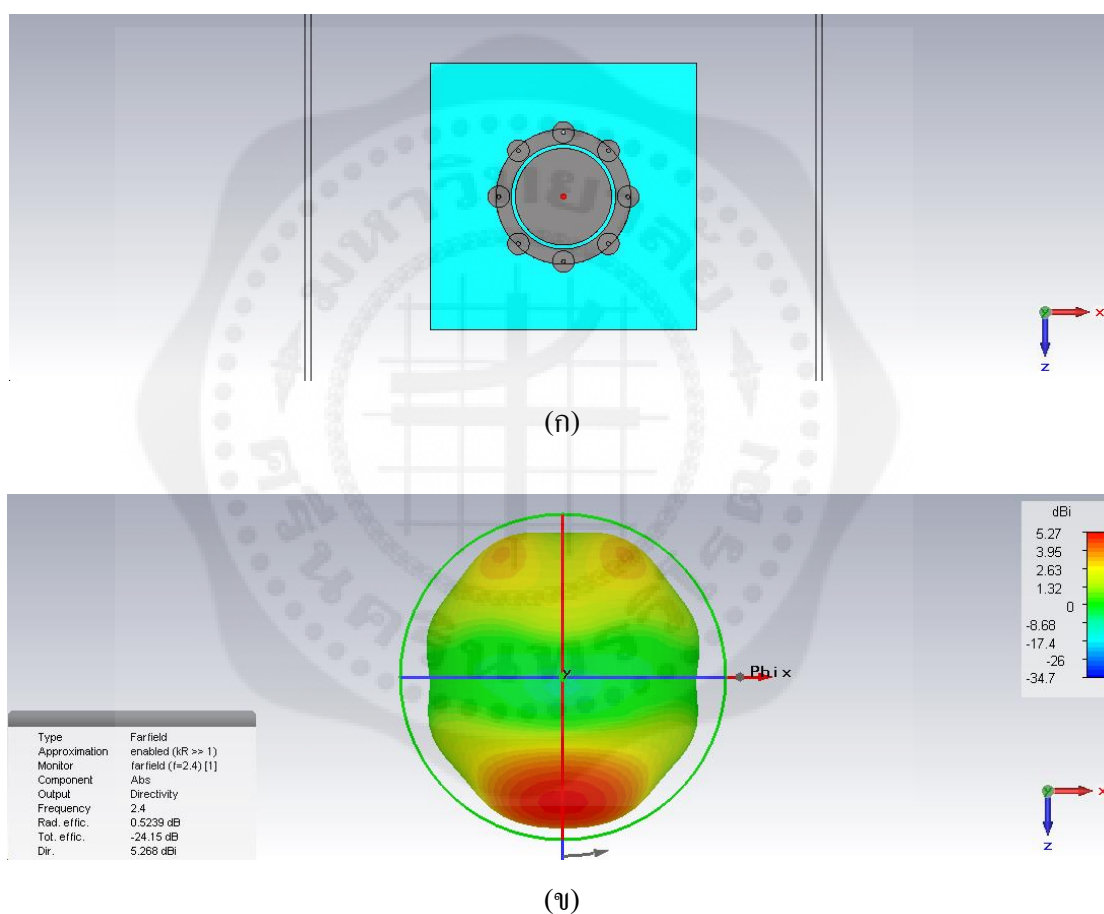
3.3.2 จากงานวิจัย (Muzammil Jusoh.//2014) ทำการเปลี่ยนสายอากาศพาราซิติควงกลมรอบจุดป้อนสัญญาณเป็นวงแหวนพาราซิติคบนสายอากาศ โดยทำการลัดวงจรบนวงแหวนลักษณะเหมือนงานวิจัย (พิชญา ชัยปัญญา.//2557)



รูปที่ 3.6 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการเพิ่มวงแหวนพาราซิติค ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน

ผลการออกแบบ สายอากาศสามารถสวิตซ์ลำคลื่นได้ทุกทิศทาง แต่สายอากาศมีอัตราขยายที่ต่ำ และแบบรูปการแผ่พลังงานยังไม่เป็นไปตามที่ต้องการ เนื่องจากช่วงของลำคลื่นครึ่งกำลังมีความกว้างเกินไป ส่งผลให้ลำคลื่นส่งสัญญาณได้ระยะทางสั้น ใช้งานได้เป็นวงแคบ

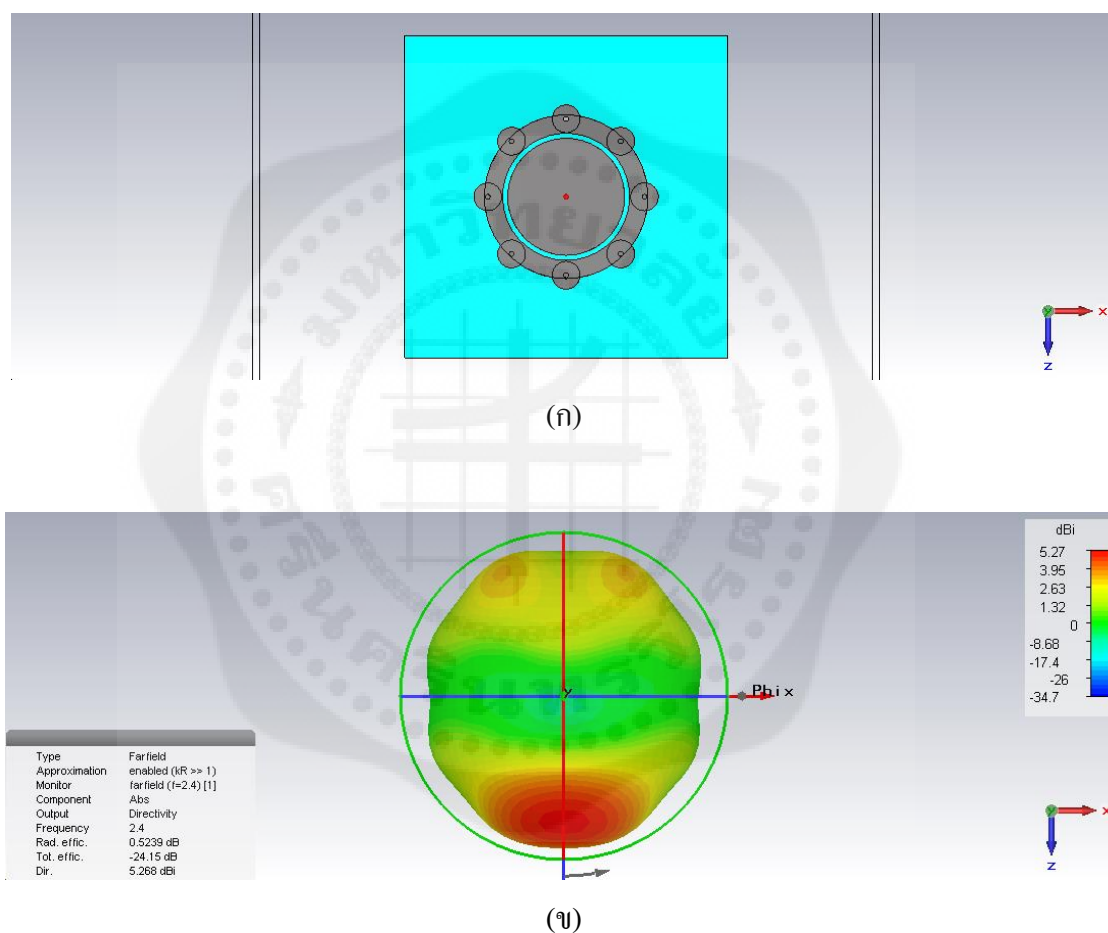
3.3.3 ปรับปรุงอัตราขยายของสายอากาศ โดยเพิ่มวงกลมพาราซิติคบนวงแหวน ณ จุดลัดวงจรตำแหน่งต่าง ๆ เพื่อเพิ่มขนาดแผ่นตัวนำของสายอากาศทำให้อัตราขยายมีอัตราที่สูงขึ้น



รูปที่ 3.7 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการเพิ่มวงกลมบนวงแหวนพาราซิติค ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน

ผลการออกแบบ สายอากาศมีอัตราขยายสูงขึ้น แต่แบบรูปการแผ่พลังงานยังไม่เป็นไปตามที่ต้องการ เนื่องจากช่วงของลำคลื่นครึ่งกำลังมีความกว้างเกินไป ส่งผลให้ลำคลื่นส่งสัญญาณได้ระยะทางสั้น ใช้งานได้เป็นวงแคบ

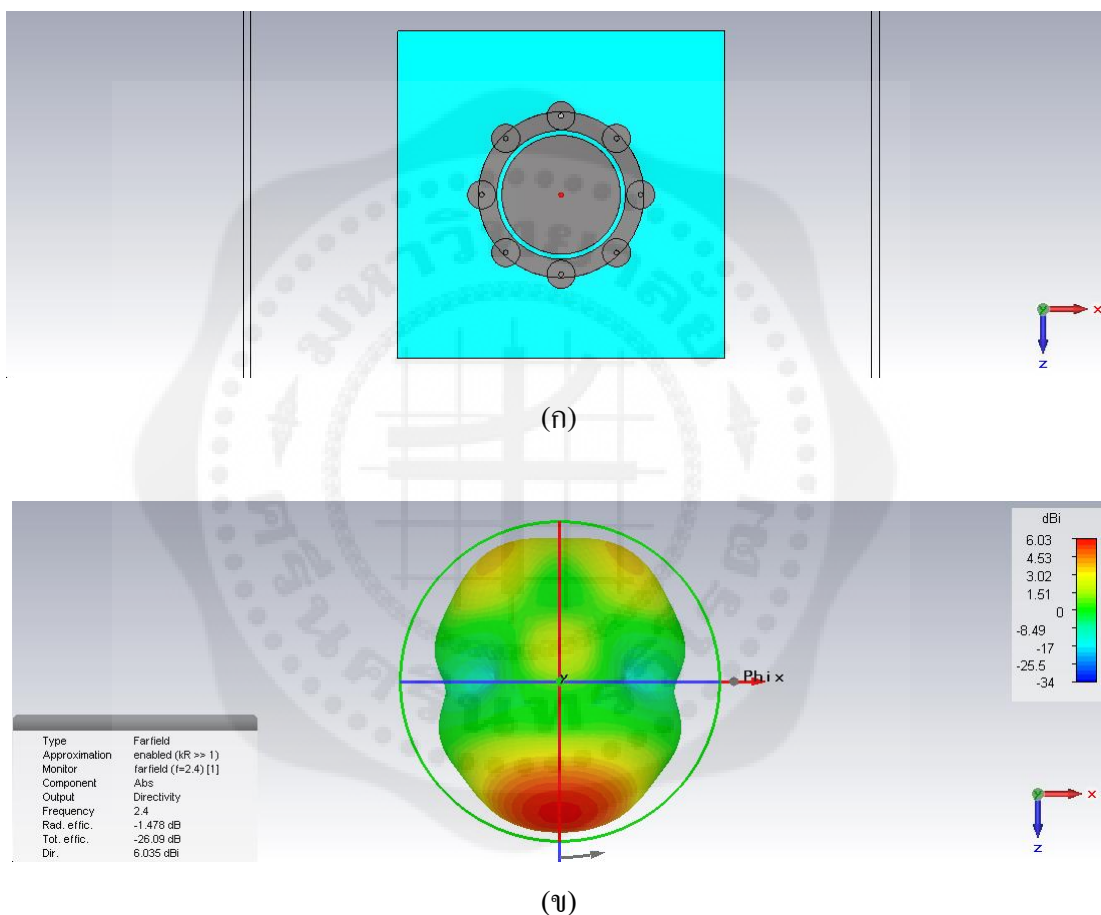
3.3.4 ปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงาน โดยปรับขนาดวงกลมพาราซิติก



รูปที่ 3.8 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศแบบเมื่อทำการปรับขนาดวงกลมพาราซิติก
 ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน

ผลการออกแบบ สายอากาศสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ตามที่ต้องการ แต่แบบรูปการแผ่พลังงานยังไม่เป็นไปตามที่ต้องการ เนื่องจากช่วงของลำคลื่นครึ่งกำลังมีความกว้างเกินไป ส่งผลให้ลำคลื่นส่งสัญญาณได้ระยะทางสั้น ใช้งานได้เป็นวงแคบ

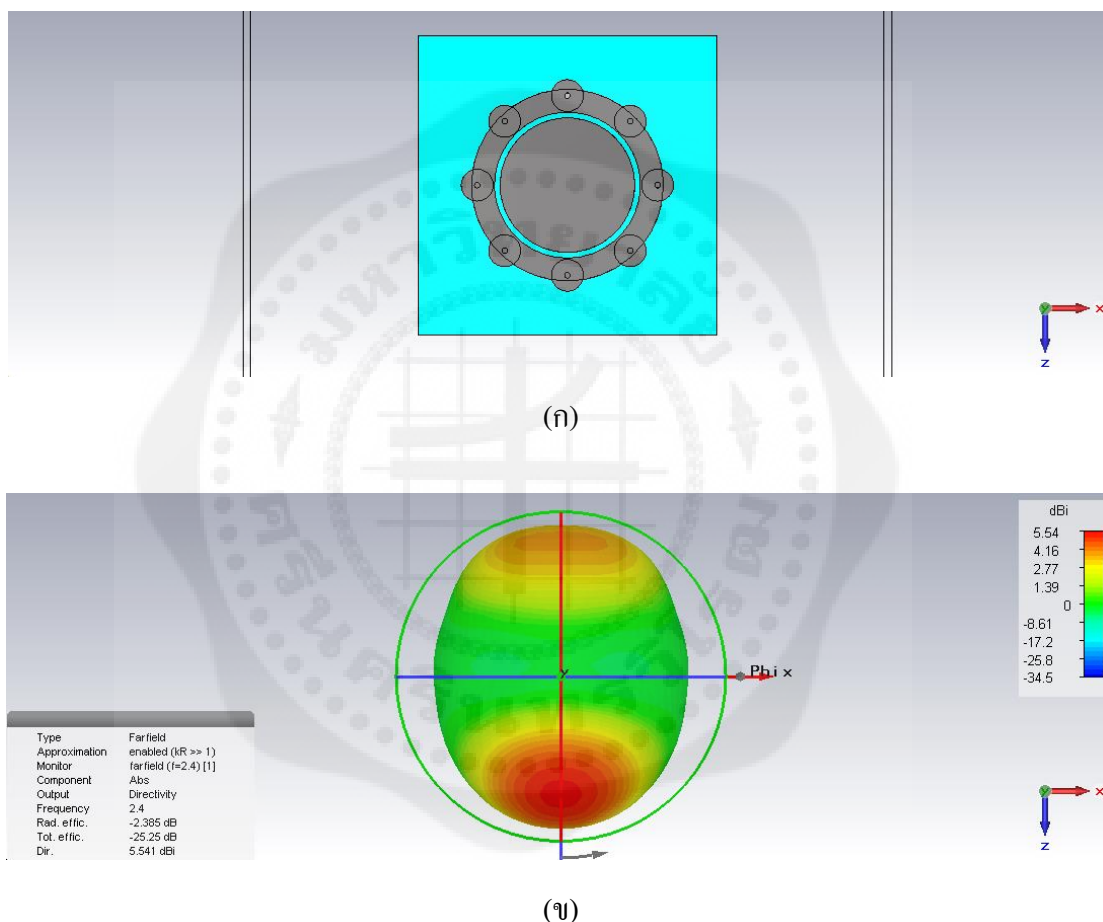
3.3.5 ปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงานโดยปรับขนาดวงแหวนพาราซีติก



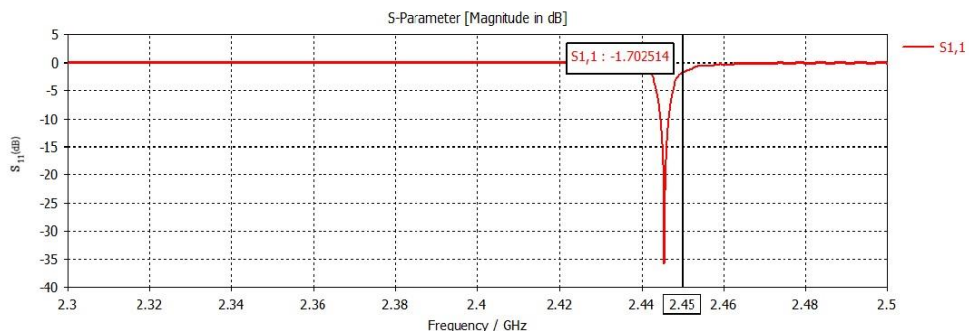
รูปที่ 3.9 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการปรับขนาดวงแหวนพาราซีติก
 ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) รูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน

ผลการออกแบบ สายอากาศสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ตามที่ต้องการ แต่แบบรูปการแผ่พลังงานยังไม่เป็นไปตามที่ต้องการ เนื่องจากช่วงของลำคลื่นครึ่งกำลังมีความกว้างเกินไป ส่งผลให้ลำคลื่นส่งสัญญาณได้ระยะทางสั้น ใช้งานได้เป็นวงแคบ

3.3.6 ปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงานโดยปรับขนาดกราวนด์ของสายอากาศ



รูปที่ 3.10 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการปรับขนาดแผ่นกราวด์ของสายอากาศ ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ค) ค่า S_{11} ของสายอากาศ

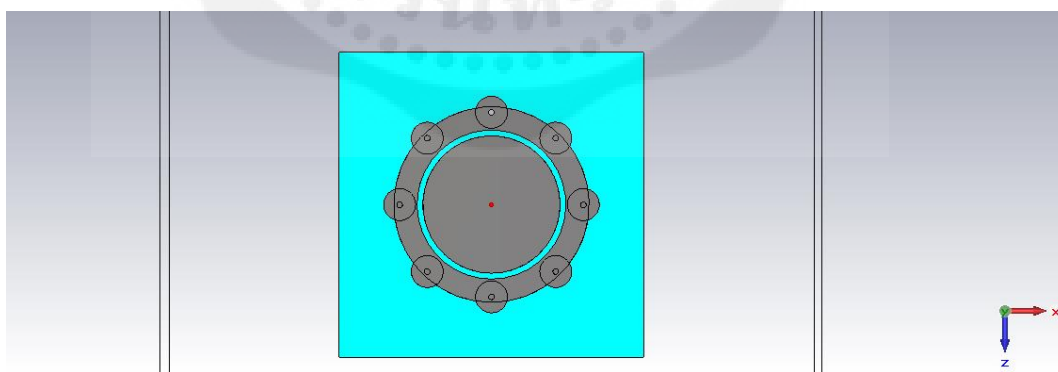


(ค)

รูปที่ 3.10 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศแบบเมื่อทำการปรับขนาดแผ่นกราวด์ของสายอากาศ ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ค) ค่า S₁₁ ของสายอากาศ (ต่อ)

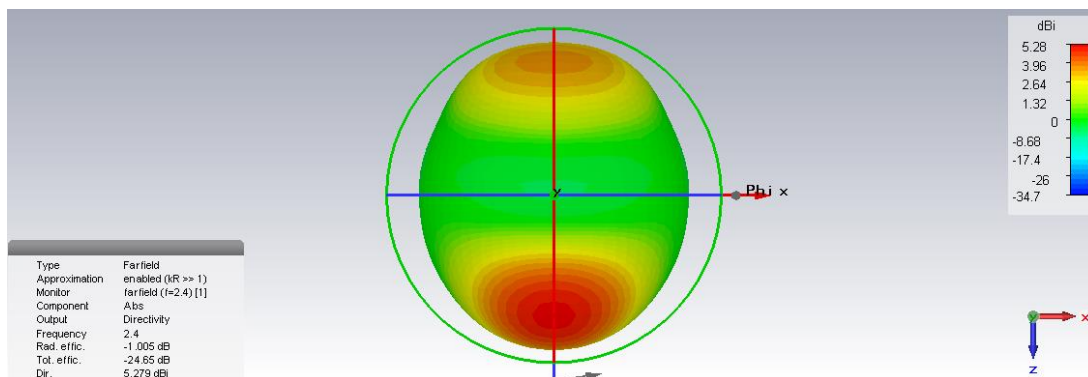
ผลการออกแบบ สายอากาศที่ได้สามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ 8 ทิศทาง มีอัตราการขยายที่สูง และมีลักษณะแบบรูปการแผ่พลังงานแคบเหมาะแก่การใช้งาน แต่ความถี่ที่ได้จากสายอากาศไม่ตรงตามต้องการ เนื่องจาก S₁₁ ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า -1.7025 dB ดังรูปที่ 3.10

3.3.7 ปรับความถี่ของสายอากาศ โดยเปลี่ยนตำแหน่งสายอากาศพาราซิติควงกลม

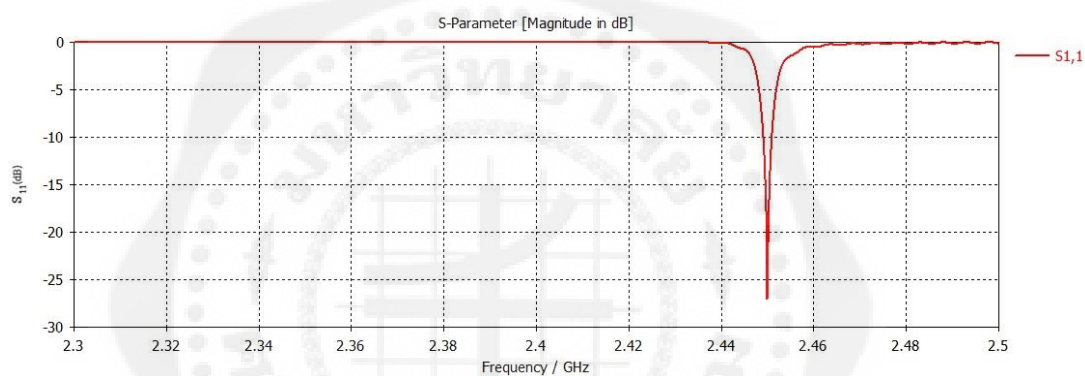


(ก)

รูปที่ 3.11 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งสายอากาศพาราซิติควงกลม ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ค) ค่า s₁₁ ของสายอากาศ



(จ)



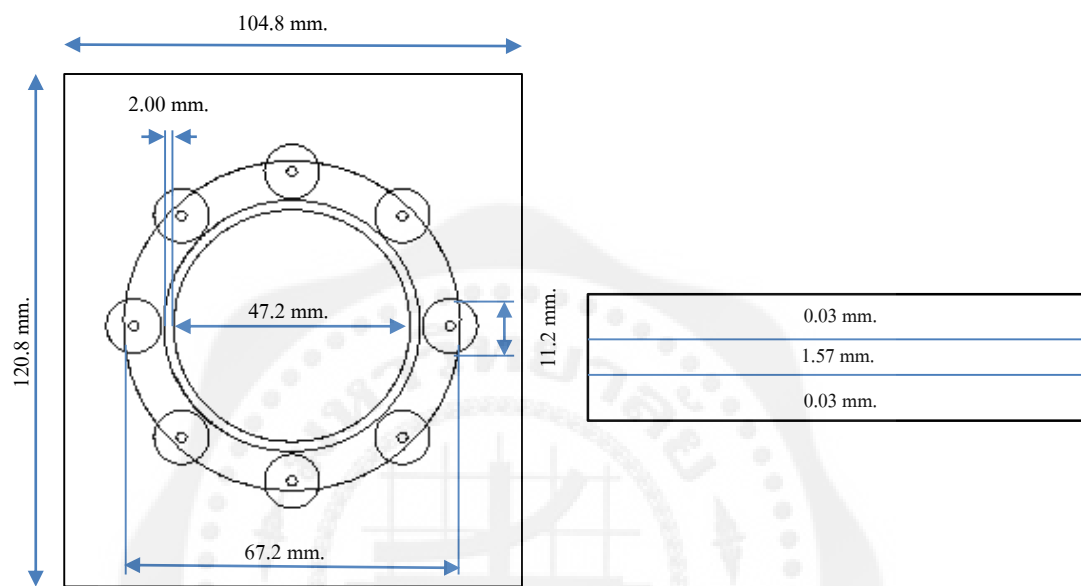
(ค)

รูปที่ 3.11 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งสายอากาศพาราซิติค วงกลม ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมอง จากด้านบน ค) ค่า s_{11} ของสายอากาศ (ต่อ)

ผลการออกแบบ สายอากาศมีความถี่ตรงตามที่ต้องการคือ 2.45 GHz ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ดังนั้นสายอากาศดังกล่าวจึงสามารถนำไปใช้งานได้

3.4 สรุปผลการออกแบบสายอากาศ

สายอากาศที่ออกแบบมีความถี่ 2.45 GHz โดยกำหนดค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของแผ่นไมโครสตริปเท่ากับ 4.7 และมีความหนาเท่ากับ 1.57 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.12 สายอากาศที่ออกแบบ

สายอากาศที่ได้มีลักษณะและโครงสร้างตามรูปที่ 3.12 การลัดวงจรของสายอากาศนี้จะทำการลัดวงจรที่สายอากาศพาราซิติคทุกจุด และเปิดวงจรในตำแหน่งตรงข้ามกับทิศทางลำคลื่นที่ต้องการสวิตช์ โดยจะทำการสวิตช์ลำคลื่นที่ตำแหน่ง 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° และ 315° จากการจำลองแบบที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าสายอากาศที่ออกแบบสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ 8 ทิศทางที่ความถี่ 2.45 GHz โดยขั้นตอนต่อไปจะเป็นการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะแสดงในบทถัดไป

3.5 กล่าวสรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศ ในส่วนแรกเป็นการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีการวิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียของแต่ละงานวิจัย ซึ่งทางผู้จัดทำได้นำข้อเสียของแต่ละงานวิจัย มาปรับปรุงแก้ไข นั่นคือปรับปรุงให้สายอากาศมีอัตราการขยายที่สูงขึ้นและสามารถสวิตช์ลำคลื่น ได้หลายทิศทางมากขึ้น และเพื่อเป็นการยืนยันประสิทธิภาพของสายอากาศที่ได้ จึงทำการจำลอง แบบสายอากาศทุกกรณี โดยจะแสดงผลการจำลองแบบไว้ในบทถัดไป



บทที่ 4

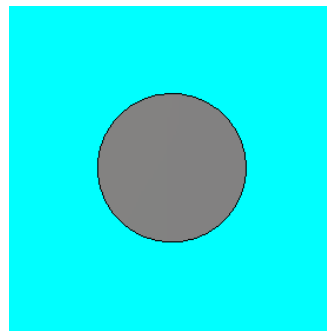
ผลการจำลองแบบสายอากาศ

4.1 กล่าวนำ

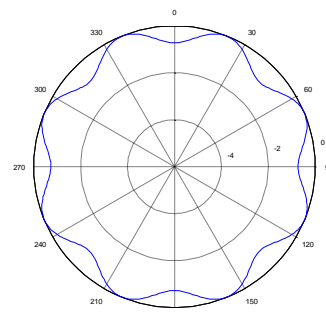
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองจากการจำลองแบบสายอากาศต้นแบบที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่แล้วด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ผลการจำลองแบบเป็นดังต่อไปนี้

4.2 ผลการจำลองแบบ

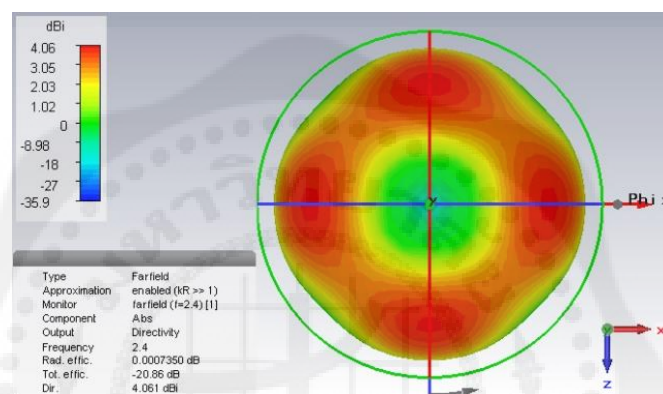
ขั้นแรกจะแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ กรณีที่สายอากาศไม่มีวงแหวนพาราซิติค ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่า สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานในลักษณะทุกทิศทาง และทำงานที่ความถี่ 12.1 GHz ต่อมาทำการเพิ่มวงแหวนพาราซิติคให้กับสายอากาศ แต่ไม่มีการลัดวงจรที่วงแหวนพาราซิติค ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยจะเห็นว่าอัตราขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้น แต่สายอากาศไม่สามารถทำงานได้ในความถี่ที่ต้องการ จากนั้นในรูปที่ 4.3 - 4.10 แสดงให้เห็นถึงสายอากาศที่มีการลัดวงจรที่พาราซิติค โดยจะเห็นได้ว่าพาราซิติคตำแหน่งที่ถูกลัดวงจรทั้งหมดจะทำหน้าที่เป็นตัวนำสัญญาณ ส่วนพาราซิติคตำแหน่งที่ถูกเปิดวงจรจะทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น โดยทิศทางของคลื่นจะหันไปด้านตรงข้ามกับตำแหน่งที่เปิดวงจรและสายอากาศสามารถทำงานได้ที่ความถี่ 2.45 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.1 - 4.10



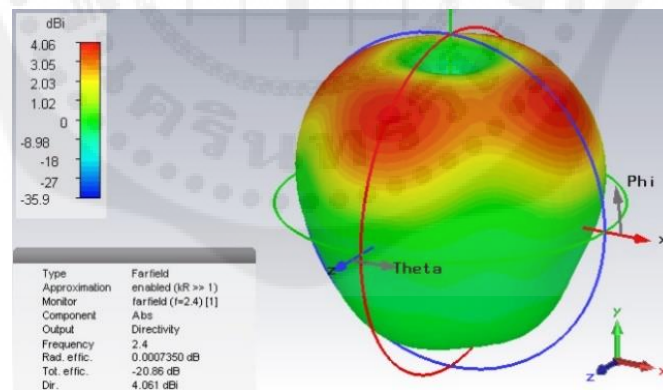
(ก)



(ข)

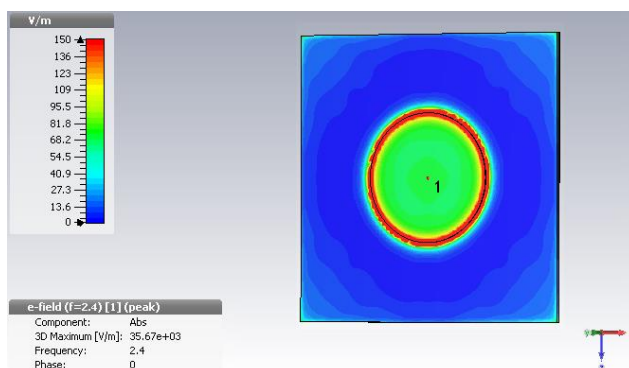


(ค)

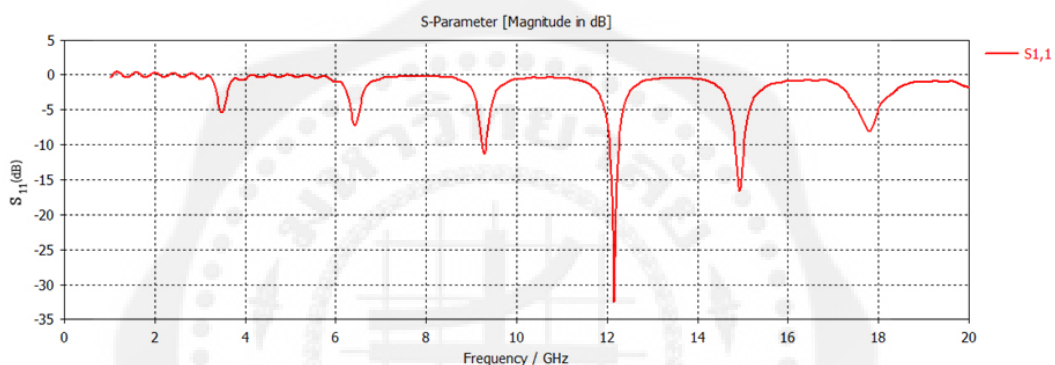


(ง)

รูปที่ 4.1 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อไม่มีวงแหวนพาราซิติค ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 มิติ ค) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ง) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านข้าง จ) ความหนาแน่นของกระแสบนผิวสายอากาศ ฉ) S_{11} ของสายอากาศ



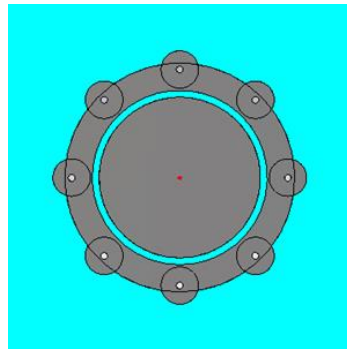
(จ)



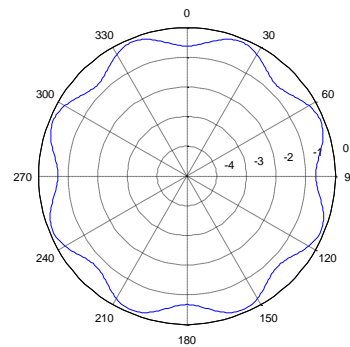
(ข)

รูปที่ 4.1 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อไม่มีวงแหวนพาราซิติค ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 มิติ ค) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ง) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านข้าง จ) ความหนาแน่นของกระแสบนผิวสายอากาศ ฉ) S_{11} ของสายอากาศ (ต่อ)

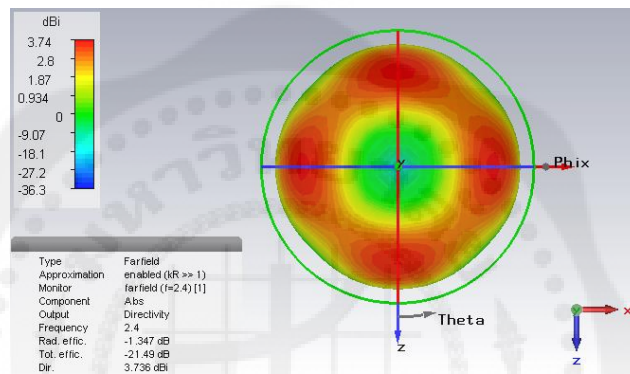
ผลการจำลองแบบ จากรูปที่ 4.1 รูป ข) และ ค) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งลำคลื่นหลักหันไปรอบทิศทาง และมีอัตราขยายเท่ากับ 4.06 dBi โดยแสดงเป็นรูป 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ รูป ฉ) แสดงความหนาแน่นของกระแสบนสายอากาศ มีหน่วยเป็น v/m โดยจะเห็นว่ากระแสจะอยู่รอบแผ่นตัวนำ และรูป จ) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ โดยดูค่าจากตำแหน่งของกราฟที่อยู่ต่ำที่สุด จากภาพที่ความถี่ 12.153 GHz มีค่า S_{11} อยู่ที่ -32.56 dB ทำให้สายอากาศสามารถทำงานได้ที่ความถี่ 12.153 GHz



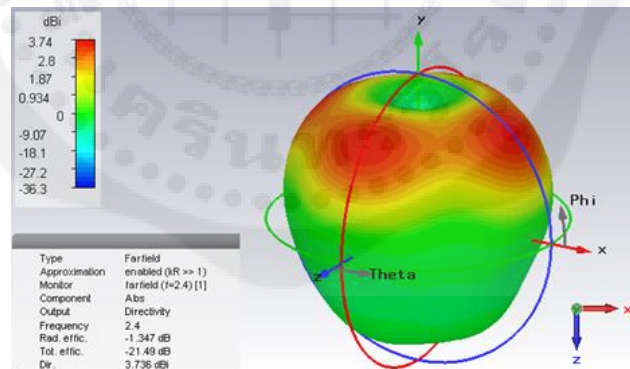
(ก)



(ข)

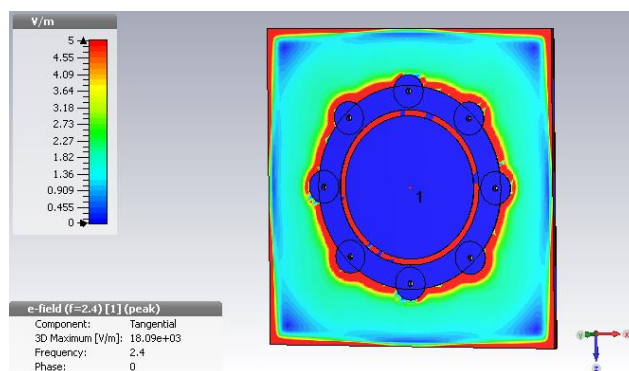


(ค)

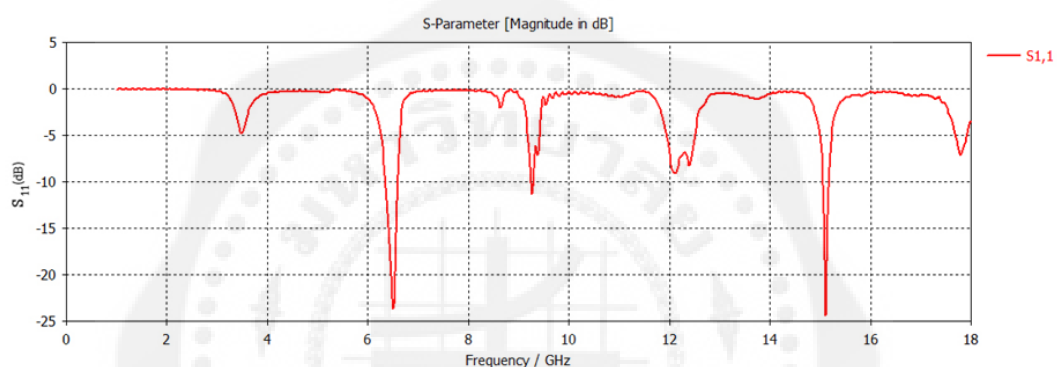


(ง)

รูปที่ 4.2 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อไม่มีการลัดวงจรที่องค์ประกอบพาราซิติค
 ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 มิติ ค) แบบรูปการ
 แผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ง) แบบรูปการแผ่พลังงานของ
 สายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านข้าง จ) ความหนาแน่นของกระแสบนผิวสายอากาศ
 ฉ) S_{11} ของสายอากาศ



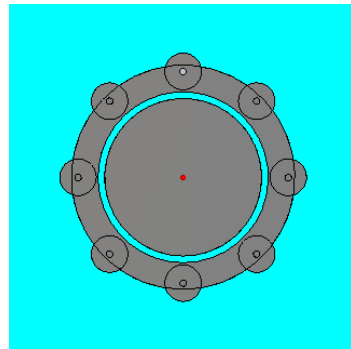
(จ)



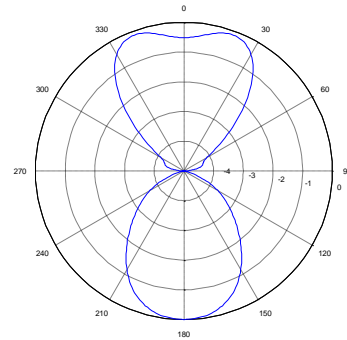
(ข)

รูปที่ 4.2 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อไม่มีการลัดวงจรที่องค์ประกอบพาราซีติก ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 มิติ ค) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ง) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านข้าง จ) ความหนาแน่นของกระแสบนผิวสายอากาศ ฉ) S_{11} ของสายอากาศ (ต่อ)

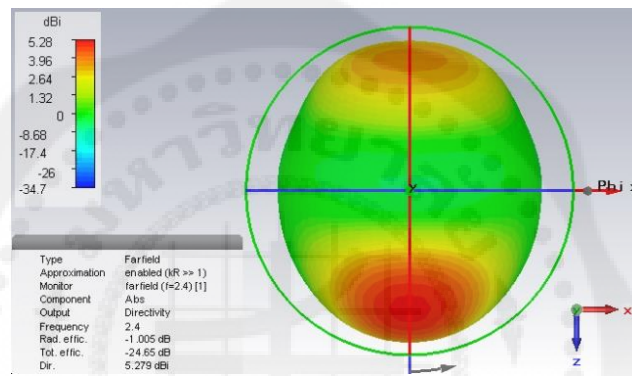
ผลการจำลองแบบ จากรูปที่ 4.2 รูป ข) และ ค) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งลำคลื่นหลักหันไปรอบทิศทาง และมีอัตราขยายเท่ากับ 3.74 dBi โดยแสดงเป็นรูป 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับรูป จ) แสดงความหนาแน่นของกระแสบนสายอากาศ มีหน่วยเป็น v/m โดยจะเห็นว่ากระแสจะอยู่รอบสายอากาศ และรูป ฉ) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ โดยดูค่าจากตำแหน่งของกราฟที่อยู่ต่ำที่สุด จากภาพที่ความถี่ 6.536 GHz และ 15.113 GHz มีค่า S_{11} อยู่ที่ -20.701 dB และ -23.119 dB ทำให้สายอากาศสามารถทำงานได้ที่ความถี่ 6.536 GHz และ 15.113 GHz



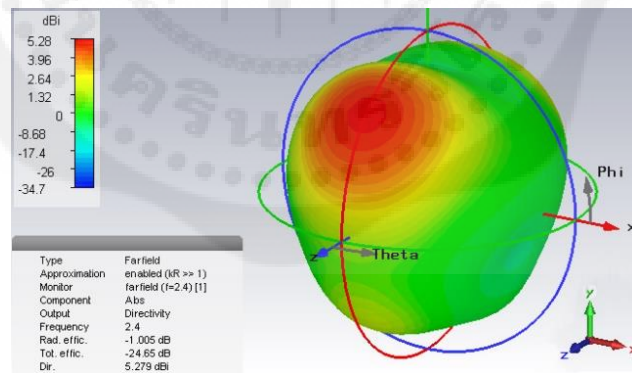
(ก)



(ข)

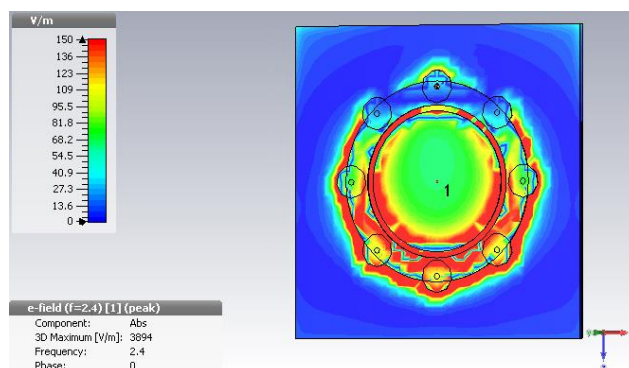


(ค)

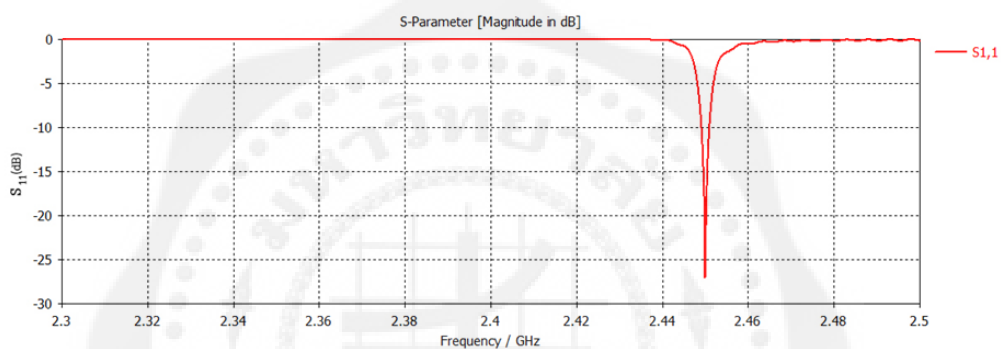


(ง)

รูปที่ 4.3 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 1 ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 มิติ ค) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ง) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านข้าง จ) ความหนาแน่นของกระแสบนผิวสายอากาศ ฉ) S_{11} ของสายอากาศ



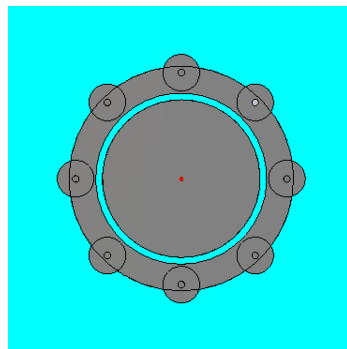
(จ)



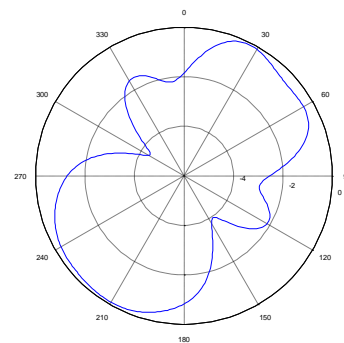
(ข)

รูปที่ 4.3 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 1 ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 มิติ ค) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ง) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านข้าง จ) ความหนาแน่นของกระแสบนผิวสายอากาศ ฉ) S_{11} ของสายอากาศ (ต่อ)

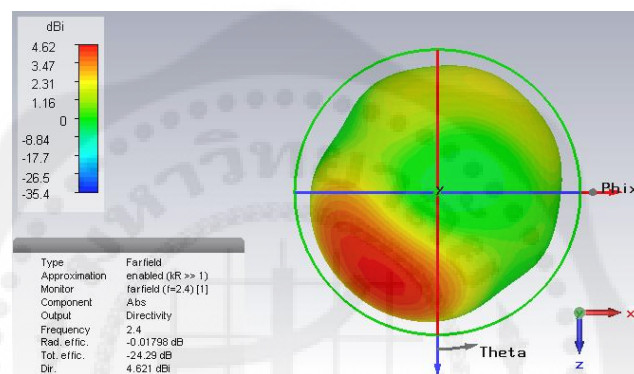
ผลการจำลองแบบ จากรูปที่ 4.3 รูป ข) และ ค) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งลำคลื่นหลักหันไปทิศ 180 องศา และมีอัตราขยายเท่ากับ 5.28 dBi โดยแสดงเป็นรูป 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ รูป จ) แสดงความหนาแน่นของกระแสบนสายอากาศ มีหน่วยเป็น v/m โดยจะเห็นว่ากระแสจะอยู่บริเวณจุดที่ลัดวงจร แสดงให้เห็นว่าจุดที่ลัดวงจรทำหน้าที่เป็นตัวนำสัญญาณ และจุดที่เปิดวงจรทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น และรูป ฉ) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ โดยดูค่าจากตำแหน่งของกราฟที่อยู่ต่ำที่สุด จากภาพที่ความถี่ 2.449 GHz มีค่า S_{11} อยู่ที่ -24.98 dB ทำให้สายอากาศสามารถทำงานได้ที่ความถี่ 2.449 GHz



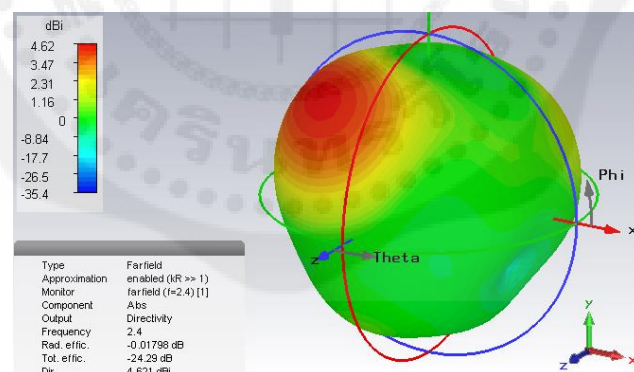
(ก)



(ข)

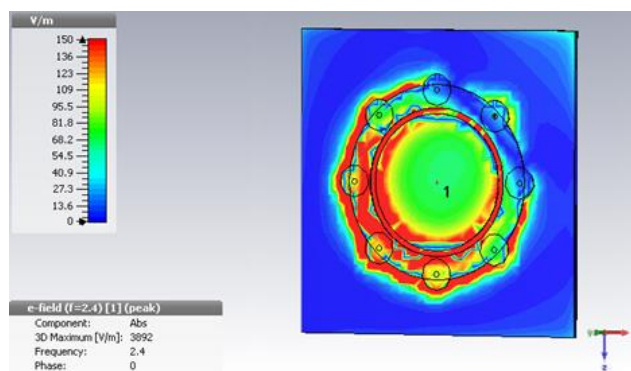


(ค)

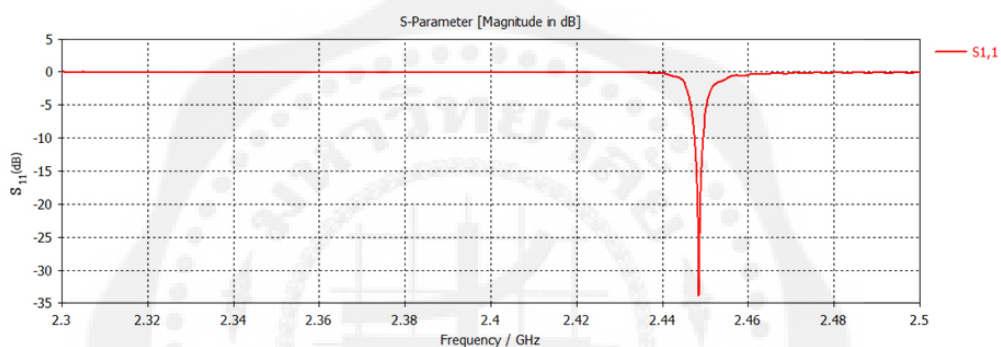


(ง)

รูปที่ 4.4 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 2 ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 มิติ ค) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ง) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านข้าง จ) ความหนาแน่นของกระแสบนผิวสายอากาศ ฉ) S_{11} ของสายอากาศ



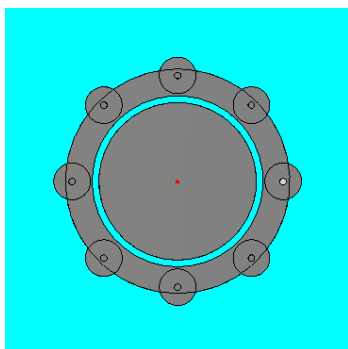
(จ)



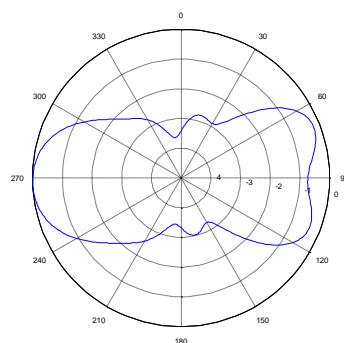
(ข)

รูปที่ 4.4 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 2 ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 มิติ ค) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ง) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านข้าง จ) ความหนาแน่นของกระแสบนผิวสายอากาศ ฉ) S_{11} ของสายอากาศ (ต่อ)

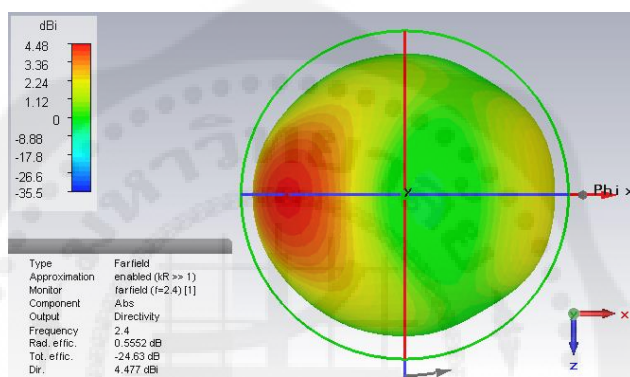
ผลการจำลองแบบ จากรูปที่ 4.4 รูป ข) และ ค) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งลำคลื่นหลักหันไปทิศ 225 องศา และมีอัตราขยายเท่ากับ 4.62 dBi โดยแสดงเป็นรูป 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับรูป จ) แสดงความหนาแน่นของกระแสบนสายอากาศ มีหน่วยเป็น v/m โดยจะเห็นว่ากระแสจะอยู่บริเวณจุดที่ลัดวงจร แสดงให้เห็นว่าจุดที่ลัดวงจรทำหน้าที่เป็นตัวนำสัญญาณ และจุดที่เปิดวงจรทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น และรูป ฉ) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ โดยดูค่าจากตำแหน่งของกราฟที่อยู่ต่ำที่สุด จากภาพที่ความถี่ 2.448 GHz มีค่า S_{11} อยู่ที่ -23.10 dB ทำให้สายอากาศสามารถทำงานได้ที่ความถี่ 2.448 GHz



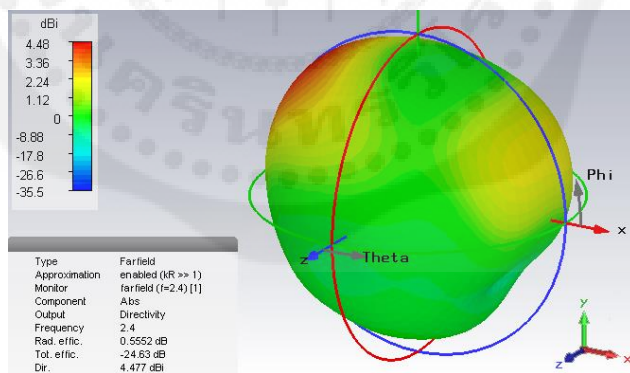
(ก)



(ข)

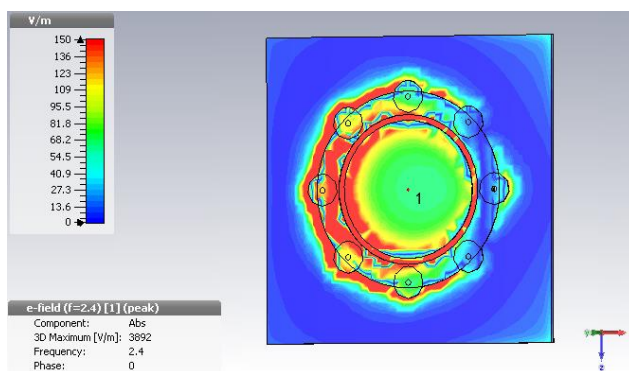


(ค)

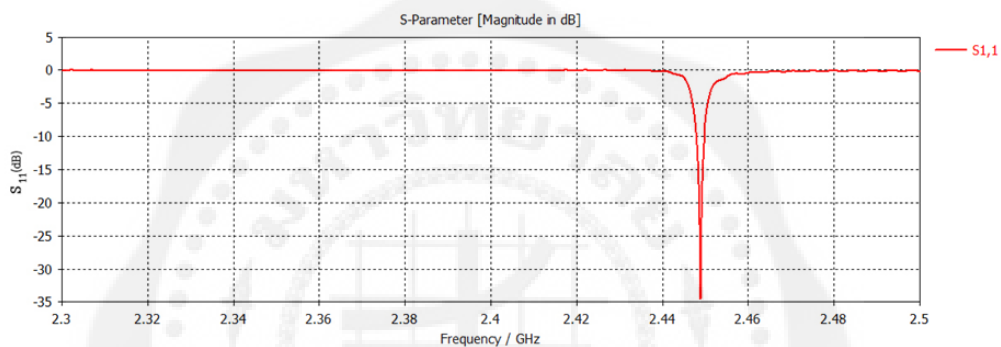


(ง)

รูปที่ 4.5 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 3 ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 มิติ ค) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ง) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านข้าง จ) ความหนาแน่นของกระแสบนผิวสายอากาศ ฉ) S_{11} ของสายอากาศ



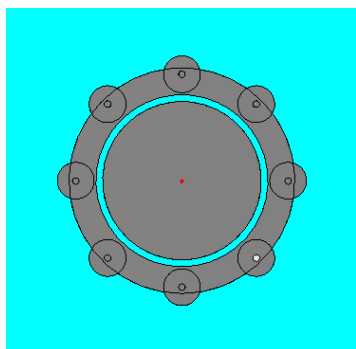
(จ)



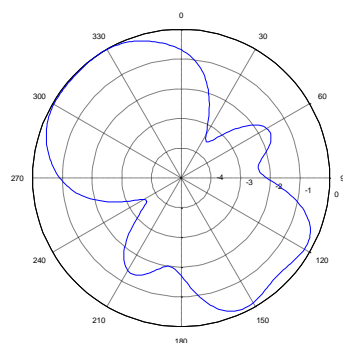
(ข)

รูปที่ 4.5 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 2 ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 มิติ ค) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ง) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านข้าง จ) ความหนาแน่นของกระแสบนผิวสายอากาศ ฉ) S_{11} ของสายอากาศ (ต่อ)

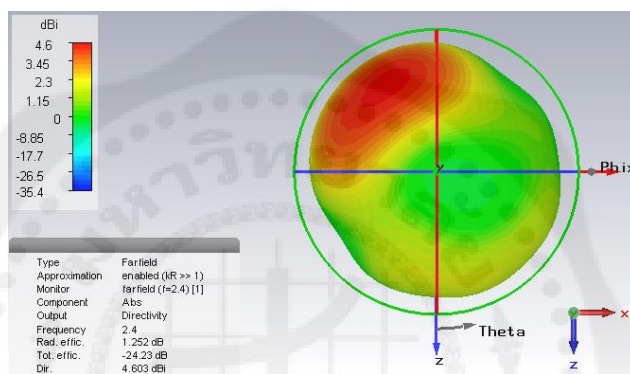
ผลการจำลองแบบ จากรูปที่ 4.5 รูป ข) และ ค) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งลำคลื่นหลักหันไปทิศ 270 องศา และมีอัตราขยายเท่ากับ 4.48 dBi โดยแสดงเป็นรูป 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ รูป จ) แสดงความหนาแน่นของกระแสบนสายอากาศ มีหน่วยเป็น v/m โดยจะเห็นว่ากระแสจะอยู่บริเวณจุดที่ลัดวงจร แสดงให้เห็นว่าจุดที่ลัดวงจรทำหน้าที่เป็นตัวนำสัญญาณ และจุดที่เปิดวงจรทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น และรูป ฉ) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ โดยดูจากตำแหน่งของกราฟที่อยู่ต่ำที่สุด จากภาพที่ความถี่ 2.449 GHz มีค่า S_{11} อยู่ที่ -20.62 dB ทำให้สายอากาศสามารถทำงานได้ที่ความถี่ 2.449 GHz



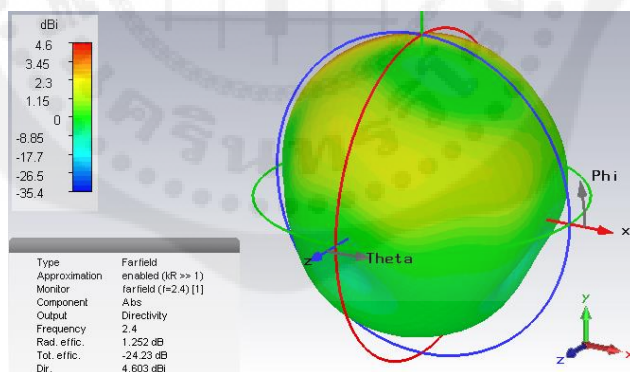
(ก)



(ข)

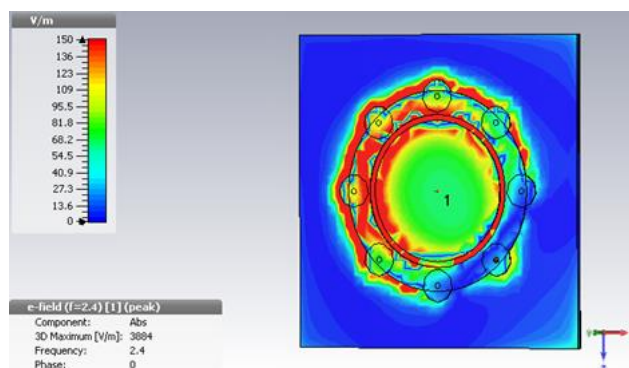


(ค)

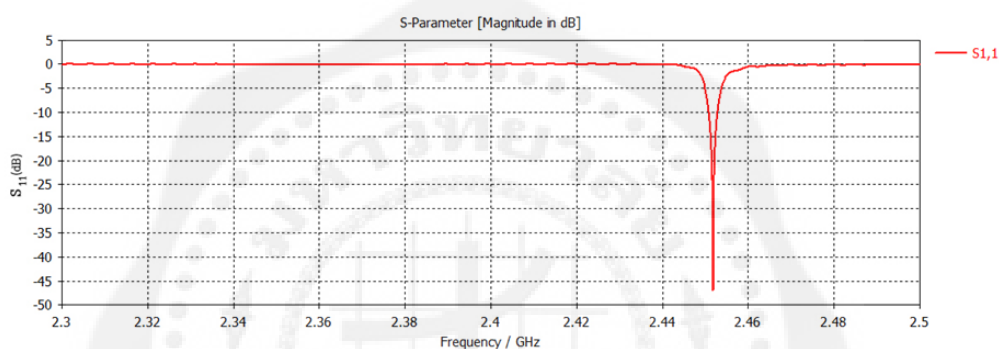


(ง)

รูปที่ 4.6 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 4 ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 มิติ ค) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ง) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านข้าง จ) ความหนาแน่นของกระแสบนผิวสายอากาศ ฉ) S_{11} ของสายอากาศ



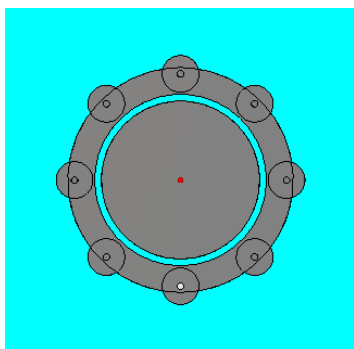
(จ)



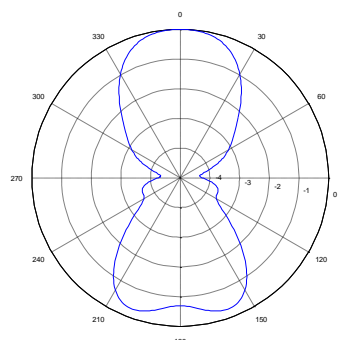
(ข)

รูปที่ 4.6 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 4 ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 มิติ ค) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ง) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านข้าง จ) ความหนาแน่นของกระแสบนผิวสายอากาศ ฉ) S_{11} ของสายอากาศ (ต่อ)

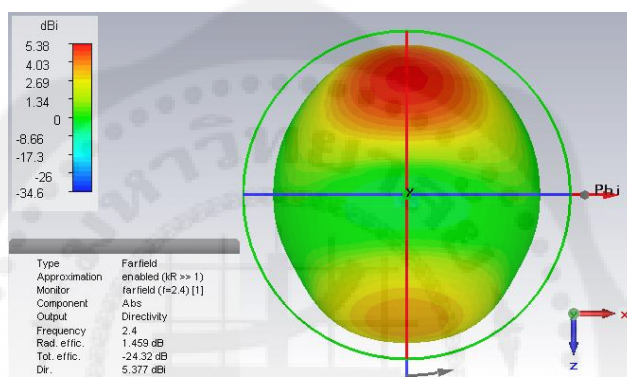
ผลการจำลองแบบ จากรูปที่ 4.6 รูป ข) และ ค) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งลำคลื่นหลักหันไปทิศ 315 องศา และมีอัตราขยายเท่ากับ 4.6 dBi โดยแสดงเป็นรูป 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ รูป จ) แสดงความหนาแน่นของกระแสบนสายอากาศ มีหน่วยเป็น v/m โดยจะเห็นว่ากระแสจะอยู่บริเวณจุดที่ลัดวงจร แสดงให้เห็นว่าจุดที่ลัดวงจรทำหน้าที่เป็นตัวนำสัญญาณ และจุดที่เปิดวงจรทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น และรูป ฉ) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ โดยดูค่าจากตำแหน่งของกราฟที่อยู่ต่ำที่สุด จากภาพที่ความถี่ 2.452 GHz มีค่า S_{11} อยู่ที่ -24.96 dB ทำให้สายอากาศสามารถทำงานได้ที่ความถี่ 2.452 GHz



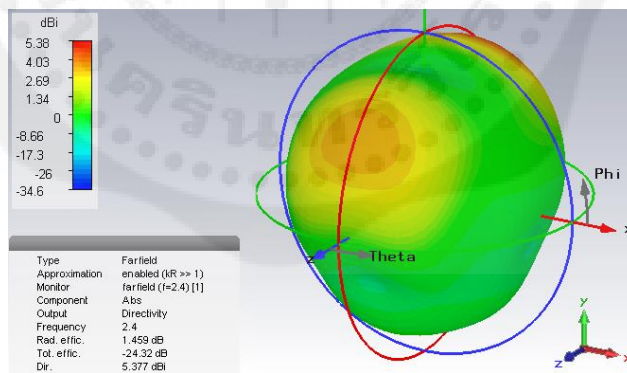
(ก)



(ข)

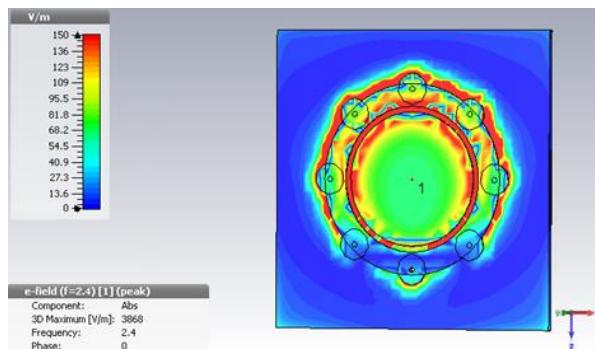


(ค)

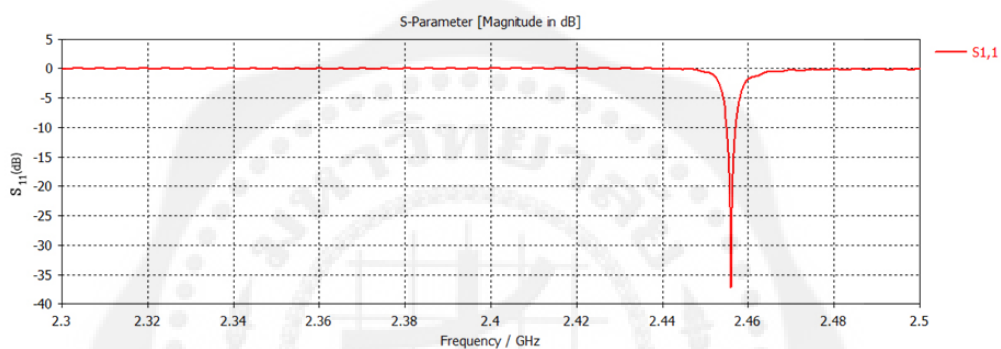


(ง)

รูปที่ 4.7 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 5 ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 มิติ ค) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ง) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านข้าง จ) ความหนาแน่นของกระแสบนผิวสายอากาศ ฉ) S_{11} ของสายอากาศ



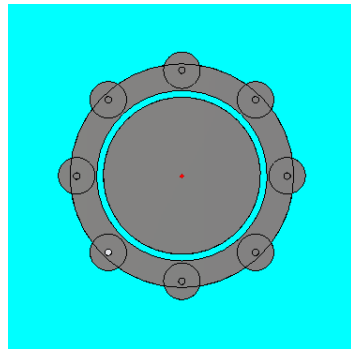
(จ)



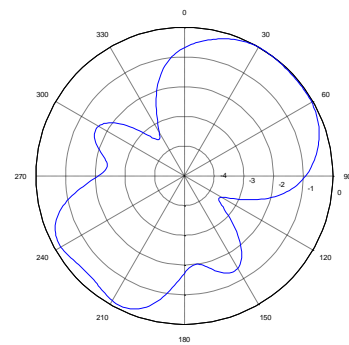
(ข)

รูปที่ 4.7 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 5 ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 มิติ ค) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ง) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านข้าง จ) ความหนาแน่นของกระแสบนผิวสายอากาศ ฉ) S_{11} ของสายอากาศ (ต่อ)

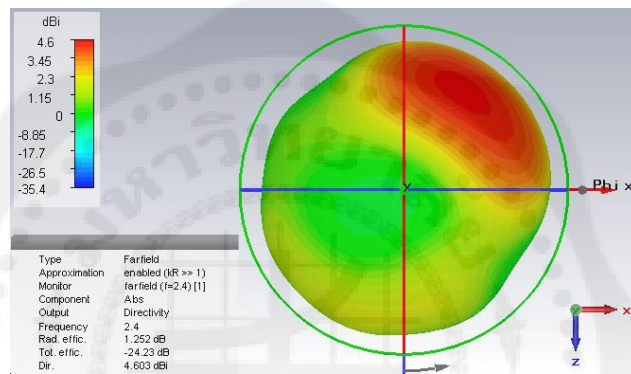
ผลการจำลองแบบ จากรูปที่ 4.7 รูป ข) และ ค) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งลำคลื่นหลักหันไปทิศ 360 องศา และมีอัตราขยายเท่ากับ 5.38 dBi โดยแสดงเป็นรูป 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ รูป จ) แสดงความหนาแน่นของกระแสบนสายอากาศ มีหน่วยเป็น v/m โดยจะเห็นว่ากระแสจะอยู่บริเวณจุดที่ลัดวงจร แสดงให้เห็นว่าจุดที่ลัดวงจรทำหน้าที่เป็นตัวนำสัญญาณ และจุดที่เปิดวงจรทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น และรูป ฉ) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ โดยดูค่าจากตำแหน่งของกราฟที่อยู่ต่ำที่สุด จากภาพที่ความถี่ 2.455 GHz มีค่า S_{11} อยู่ที่ -33.69 dB ทำให้สายอากาศสามารถทำงานได้ที่ 2.455 GHz



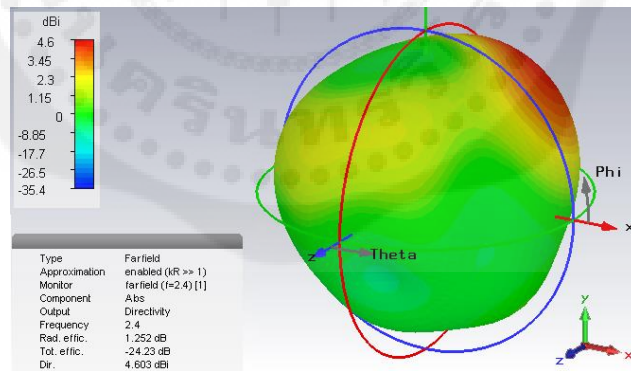
(ก)



(ข)

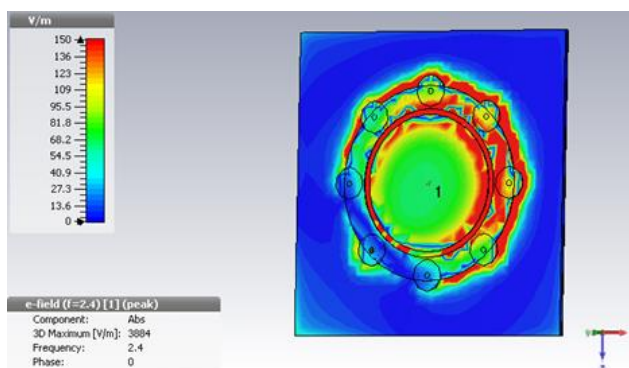


(ค)

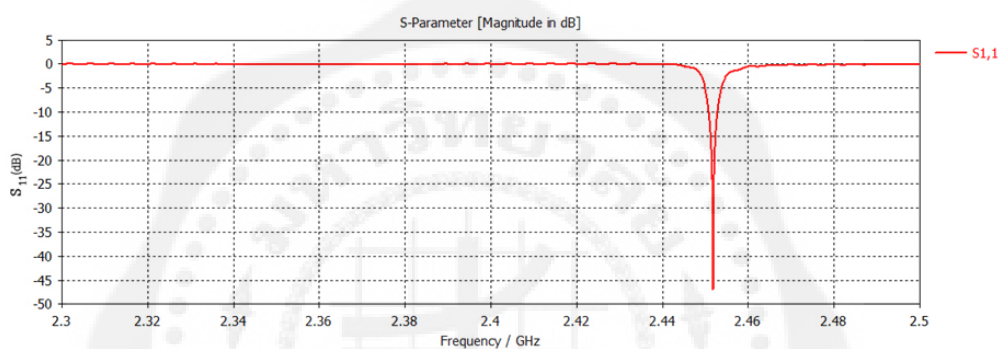


(ง)

รูปที่ 4.8 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 6 ก) โครงสร้าง สายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 มิติ ค) แบบรูปการแผ่พลังงานของ สายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ง) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านข้าง จ) ความหนาแน่นของกระแสบนผิวสายอากาศ ฉ) S_{11} ของสายอากาศ



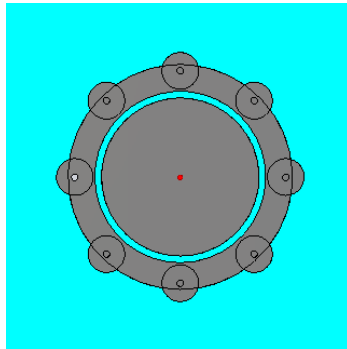
(จ)



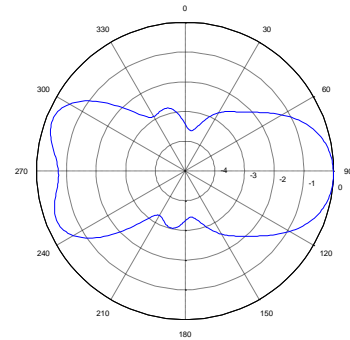
(ข)

รูปที่ 4.8 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 6 ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 มิติ ค) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ง) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านข้าง จ) ความหนาแน่นของกระแสบนผิวสายอากาศ ฉ) S_{11} ของสายอากาศ (ต่อ)

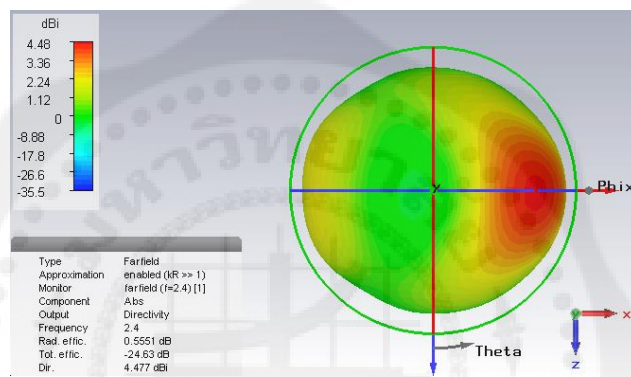
ผลการจำลองแบบ จากรูปที่ 4.8 รูป ข) และ ค) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งลำคลื่นหลักหันไปทิศ 45 องศา และมีอัตราขยายเท่ากับ 4.6 dB_i โดยแสดงเป็นรูป 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ รูป จ) แสดงความหนาแน่นของกระแสบนสายอากาศ มีหน่วยเป็น v/m โดยจะเห็นว่ากระแสจะอยู่บริเวณจุดที่ลัดวงจร แสดงให้เห็นว่าจุดที่ลัดวงจรทำหน้าที่เป็นตัวนำสัญญาณ และจุดที่เปิดวงจรทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น และรูป ฉ) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ โดยดูค่าจากตำแหน่งของกราฟที่อยู่ต่ำที่สุด จากภาพที่ความถี่ 2.452 GHz มีค่า S_{11} อยู่ที่ -24.96 dB ทำให้สายอากาศสามารถทำงานได้ที่ความถี่ 2.452 GHz



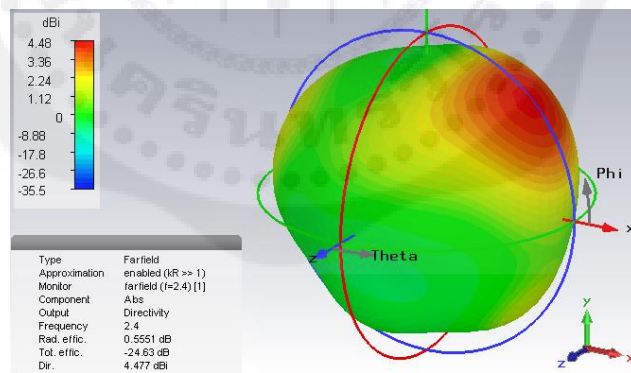
(ก)



(ข)

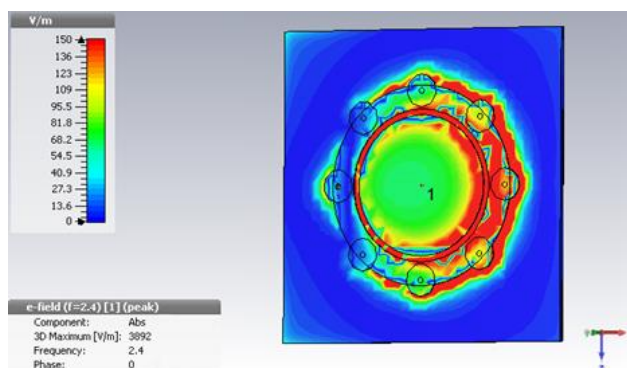


(ค)

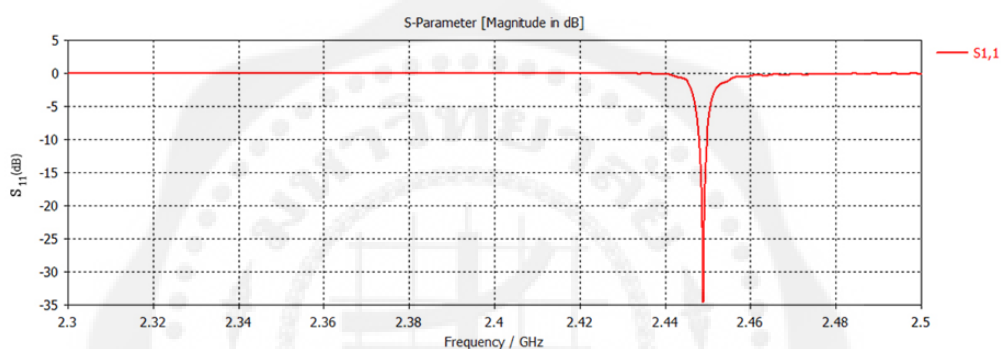


(ง)

รูปที่ 4.9 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ ก) โครงสร้าง สายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 มิติ ค) แบบรูปการแผ่พลังงานของ สายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ง) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านข้าง จ) ความหนาแน่นของกระแสบนผิวสายอากาศ ฉ) S_{11} ของสายอากาศ



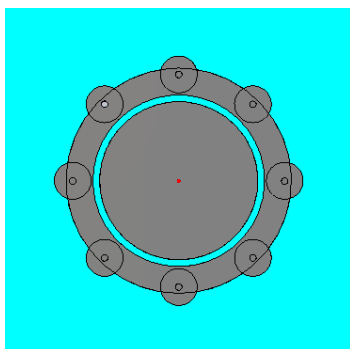
(จ)



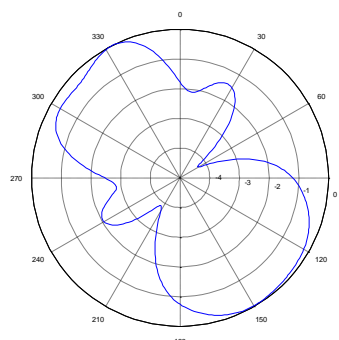
(ข)

รูปที่ 4.9 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 7 ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 มิติ ค) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ง) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านข้าง จ) ความหนาแน่นของกระแสบนผิวสายอากาศ ฉ) S_{11} ของสายอากาศ (ต่อ)

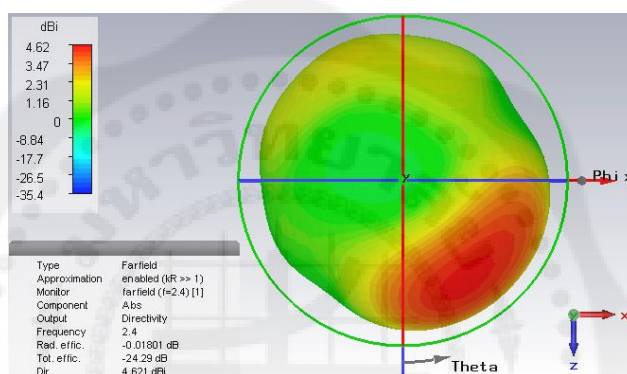
ผลการจำลองแบบ จากรูปที่ 4.9 รูป ข) และ ค) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งลำคลื่นหลักหันไปทิศ 90 องศา และมีอัตราขยายเท่ากับ 4.48 dBi โดยแสดงเป็นรูป 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ รูป จ) แสดงความหนาแน่นของกระแสบนสายอากาศ มีหน่วยเป็น v/m โดยจะเห็นว่ากระแสจะอยู่บริเวณจุดที่ลัดวงจร แสดงให้เห็นว่าจุดที่ลัดวงจรทำหน้าที่เป็นตัวนำสัญญาณ และจุดที่เปิดวงจรทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น และรูป ฉ) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ โดยดูค่าจากตำแหน่งของกราฟที่อยู่ต่ำที่สุด จากภาพที่ความถี่ 2.449 GHz มีค่า S_{11} อยู่ที่ -20.62 dB ทำให้สายอากาศสามารถทำงานได้ที่ความถี่ 2.449 GHz



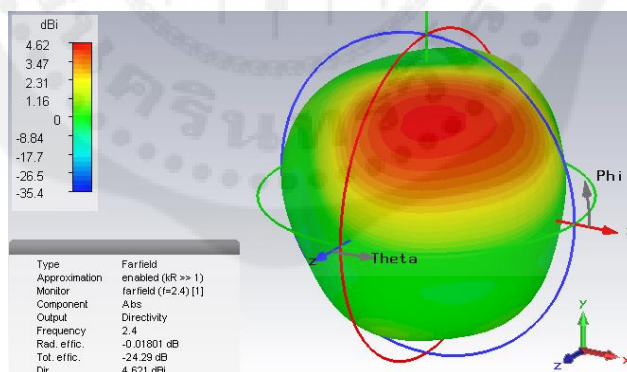
(ก)



(ข)

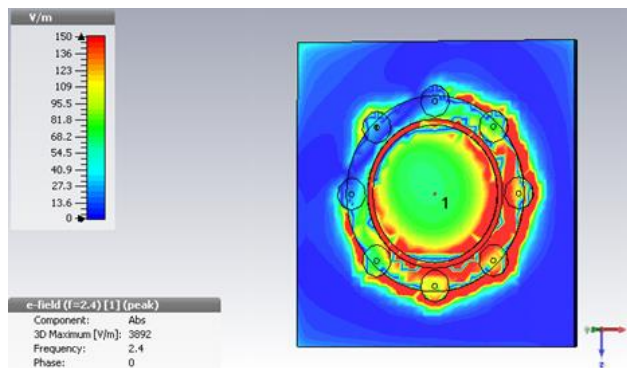


(ค)

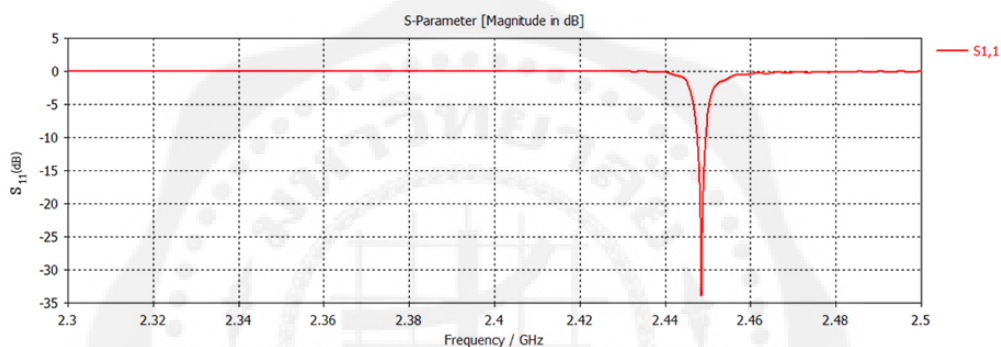


(ง)

รูปที่ 4.10 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 8 ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 มิติ ค) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ง) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านข้าง จ) ความหนาแน่นของกระแสบนผิวของสายอากาศ ฉ) S_{11} ของสายอากาศ



(จ)



(ข)

รูปที่ 4.10 แสดงผลการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อทำการลัดวงจรในกรณีที่ 8 ก) โครงสร้างสายอากาศ ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 มิติ ค) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านบน ง) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 3 มิติ มุมมองจากด้านข้าง จ) ความหนาแน่นของกระแสบนผิวของสายอากาศ ฉ) S_{11} ของสายอากาศ (ต่อ)

ผลการจำลองแบบ จากรูปที่ 4.9 รูป ข) และ ค) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งลำคลื่นหลักหันไปทิศ 135 องศา และมีอัตราขยายเท่ากับ 4.62 dBi โดยแสดงเป็นรูป 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับรูป จ) แสดงความหนาแน่นของกระแสบนสายอากาศ มีหน่วยเป็น v/m โดยจะเห็นว่ากระแสจะอยู่บริเวณจุดที่ลัดวงจร แสดงให้เห็นว่าจุดที่ลัดวงจรทำหน้าที่เป็นตัวนำสัญญาณ และจุดที่เปิดวงจรทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น และรูป ฉ) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ โดยดูค่าจากตำแหน่งของกราฟที่อยู่ต่ำที่สุด จากภาพที่ความถี่ 2.448 GHz มีค่า S_{11} อยู่ที่ -23.10 dB ทำให้สายอากาศสามารถทำงานได้ที่ความถี่ 2.448 GHz

จากผลการจำลองแบบของสายอากาศทั้ง 9 กรณี สามารถสรุปพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศได้ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการจำลองแบบ

จุดที่ลัดวงจร	กรณีที่				
	-	1	2	3	4
1	เปิด	เปิด	ปิด	ปิด	ปิด
2	เปิด	ปิด	เปิด	ปิด	ปิด
3	เปิด	ปิด	ปิด	เปิด	ปิด
4	เปิด	ปิด	ปิด	ปิด	เปิด
5	เปิด	ปิด	ปิด	ปิด	ปิด
6	เปิด	ปิด	ปิด	ปิด	ปิด
7	เปิด	ปิด	ปิด	ปิด	ปิด
8	เปิด	ปิด	ปิด	ปิด	ปิด
มุม(องศา)	-	180	225	270	315
ความถี่ที่ใช้งาน (GHz)	-	2.449	2.448	2.449	2.452
อัตราขยาย (dBi)	3.74	5.28	4.62	4.48	4.6
S_{11} (dB)	-	-24.98	-23.10	-20.62	-24.96

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการจำลองแบบ (ต่อ)

จุดที่ติดตั้งจร	กรณีที่				ค่าเฉลี่ย
	5	6	7	8	
1	ปิด	ปิด	ปิด	ปิด	
2	ปิด	ปิด	ปิด	ปิด	
3	ปิด	ปิด	ปิด	ปิด	
4	ปิด	ปิด	ปิด	ปิด	
5	เปิด	ปิด	ปิด	ปิด	
6	ปิด	เปิด	ปิด	ปิด	
7	ปิด	ปิด	เปิด	ปิด	
8	ปิด	ปิด	ปิด	เปิด	
มุม(องศา)	360	45	90	135	
ความถี่ที่ใช้งาน (GHz)	2.455	2.452	2.449	2.448	2.450
อัตราขยาย (dBi)	5.38	4.6	4.48	4.62	4.758
S_{11} (dB)	-33.69	-24.96	-20.62	-23.10	24.504

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่ได้เกิดจากกรณี 1-8 ซึ่งเป็นกรณีที่สายอากาศถูกติดตั้งรอบนวงแหวนพาราซิติค

จากตารางผลการทดลองสรุปได้ว่า สายอากาศที่ออกแบบสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ถึง 8 ทิศทาง โดยมีความถี่ที่ใช้งานเฉลี่ยอยู่ที่ 2.450 GHz มีอัตราขยายของสายอากาศเฉลี่ยอยู่ที่ 4.758 dBi และมีการสะท้อนเฉลี่ยอยู่ที่ 24.504 dB โดยคุณสมบัติดังกล่าวของสายอากาศสามารถนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัย (พิชญา ชัยปัญญา./2557) และ (Muzammil Jusoh./2014) ได้ตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศจากงานวิจัยต่าง ๆ

ค่าที่ใช้เปรียบเทียบ	งานวิจัย (พิชญา ชัย ปัญญา./2557)	งานวิจัย (Muzammil Jusoh./2014)	สายอากาศที่ ออกแบบ
มุมที่สวิตช์ได้ (องศา)	0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° และ 315°	45°, 135°, 225° และ 315°	0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° และ 315°
จำนวนทิศทางทั้งหมด (ทิศ)	8	4	8
อัตราขยายเฉลี่ย (dBi)	3	8.18	4.758
ความถี่เฉลี่ย (GHz)	2.45	2.382	2.450
สัมประสิทธิ์การสะท้อนเฉลี่ย	-	-	24.504
ขนาดของสายอากาศ (mm.)	110 × 110	130 × 130	104.8 × 120.8

สรุปผลการเปรียบเทียบ จากตารางจะเห็นได้ว่าสายอากาศที่ออกแบบไม่ได้มีรูปร่างแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส เนื่องจากจุดป้อนสัญญาณไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสายอากาศ ทำให้สายอากาศที่ออกแบบมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 104.8 × 120.8 มิลลิเมตร เพื่อทำให้สายอากาศทำงานได้ที่ความถี่ 2.45 GHz และสายอากาศสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ทั้งหมด 8 ทิศทาง ซึ่งมีความสามารถในการสวิตช์ลำคลื่นมากกว่างานวิจัย (Muzammil Jusoh./2014) และมีอัตราขยายและสัมประสิทธิ์การสะท้อนเฉลี่ยมากขึ้นเมื่อเทียบกับงานวิจัย (พิชญา ชัยปัญญา./2557)

4.3 กล่าวสรุป

บทนี้แสดงผลการจำลองแบบสายอากาศที่ได้ออกแบบจากบทที่ 3 ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแบบแสดงให้เห็นว่าสายอากาศมีอัตราขยายและสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่สูงขึ้น ทำให้ความแรงของสัญญาณที่ผู้ใช้งานได้รับแรงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณดีขึ้นและยังสามารถทำการสวิตช์ลำคลื่นได้ถึง 8 ทิศทาง ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าสายอากาศที่ได้ออกแบบนี้มีอัตราขยายมากกว่างานวิจัย (พิชญา ชัยปัญญา./2557) และมีความสามารถในการสวิตช์ลำคลื่นมากกว่างานวิจัย (Muzammil Jusoh./2014)

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

โครงการฉบับนี้ได้นำเสนอการจำลองสายอากาศแบบไมโครสตริปที่ย่านความถี่ 2.45 GHz ซึ่งอาศัยสายอากาศพาราซิติคในการสวิตช์ลำคลื่น จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องนั้นพบว่า มีผู้ที่พัฒนาสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นอยู่ก่อนแล้ว โดยสายอากาศมีรูปแบบและวิธีการสวิตช์ลำคลื่นที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสายอากาศมีทิศทางในการสวิตช์ลำคลื่นที่น้อย และมีอัตราขยายที่ไม่สูง ดังนั้นโครงการนี้จึงทำการออกแบบสายอากาศที่ใช้สายอากาศพาราซิติคช่วยในการสวิตช์ลำคลื่น ที่มีขนาดเล็กเหมาะสมกับการใช้งานที่ตัวลูกข่าย มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้มากกว่างานวิจัย (Muzammil Jusoh./2014) และมีอัตราขยายที่สูงกว่างานวิจัย (พิชญา ชัยปัญญา./2557) โดยโครงการนี้ได้ทำการออกแบบและจำลองผลการทดลองในโปรแกรม CST Microwave Studio จากนั้นนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัย (พิชญา ชัยปัญญา./2557) และ งานวิจัย (Muzammil Jusoh./2014) ซึ่งผลการทดลองนั้นเห็นได้ว่าสายอากาศที่ทำการออกแบบนั้น มีทิศทางในการสวิตช์ลำคลื่นมากกว่างานวิจัย (Muzammil Jusoh./2014) คือสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ทั้งหมด 8 ทิศทาง ที่มุม 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° และ 315° และมีอัตราขยายที่สูงขึ้นกว่างานวิจัย (พิชญา ชัยปัญญา./2557) โดยมีอัตราขยายสูงสุดที่ 4.758 dBi ซึ่งมีแบบรูปการแพร่พลังงานเป็นไปตามที่ต้องการ จึงเป็นการยืนยันว่าสายอากาศที่ได้ออกแบบนี้สามารถทำให้ระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น และสามารถนำไปใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz ได้

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

เนื่องจากจุดป้อนสัญญาณไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสายอากาศ จึงได้ทำการปรับขนาดแผ่นกราวด์ เพื่อหาขนาดของสายอากาศที่ดีที่สุด ทำให้สายอากาศที่ออกแบบมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 104.8×120.8 มิลลิเมตร และนอกจากนี้ยังทำให้จุดที่ลัดวงจรบนวงแหวนพาราซิติคยังไม่สมมาตรกันทุกด้านอีกด้วย

5.3 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากสายอากาศที่ได้ออกแบบนั้น เป็นการสวิตซ์ลำคลื่นด้วยการใช้มือสวิตซ์ โดยทำการ ลัดวงจรในตำแหน่งต่าง ๆ ของสายอากาศ ทำให้สายอากาศไม่สามารถสวิตซ์ลำคลื่นได้อย่าง อัตโนมัติ ซึ่งทำให้ไม่สามารถรองรับการใช้งานกับผู้ใช้งานที่มีการเคลื่อนที่ไปมาได้ ดังนั้นแนวทางการพัฒนาโครงการในอนาคตนั้น ควรพัฒนาสายอากาศให้สามารถวัดและประเมินระดับความแรง ของสัญญาณ และสวิตซ์ลำคลื่นไปหาผู้ใช้งานได้อย่างอัตโนมัติ เพื่อสามารถรองรับกับผู้ใช้งานที่ กำลังเคลื่อนที่อยู่ได้



เอกสารอ้างอิง

- Deepak Boppana and Asif Batada (2005). **How to create beam-forming smart antennas using FPGAS**. <http://www.embedded.com/design/connectivity/4006442/How-to-create-beam-forming-smart-antennas-using-FPGAS> [online: 20 NOV. 2014]
- John (2011). **Smart Antennas**. <http://www.circuitstoday.com/smart-antennas> [online: 20 NOV. 2014]
- Stefan Jahn. (2007). **Single microstrip line**. <http://qucs.sourceforge.net/tech/node75.html> [online: 20 NOV. 2014]
- Muzammil Jusoh, Thennarasan Sabapathy, Mohd Faizal Jamlos, and Muhammad Ramlee Kamarudin. (2014). **Reconfigurable Four-Parasitic-Elements Patch**. VOL. 13. *IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS*.
- Stephen C. Harsany. (1997). **Principles of Microwave Technology**. USA: Prentice-Hall.
- พิชญา ชัยปัญญา. (2557). การสวิตช์ลาคลิ้นโดยใช้สายอากาศต้นเดี่ยวร่วมกับสายอากาศพาราซิติค สำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย. *EECON37*. ขอนแก่น. ประเทศไทย.
- มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล. (2550). การสวิตช์ลาคลิ้นโดยใช้สายอากาศเพียงต้นเดี่ยว. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- วรรณวิสา ดิษฐ์ โสภชัย งามหทัย. (2552). การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมมุมฉาก. *ปริญญานิพนธ์*. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

ประวัติย่อ นิสิตผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นายกฤตกร นวลจันทร์
 วัน เดือน ปีเกิด 26 ธันวาคม พ.ศ. 2535
 สถานที่เกิด จังหวัดกรุงเทพฯ
 สถานที่อยู่ปัจจุบัน 129/80 ต.ปากนคร อ.เมือง
 จ.นครศรีธรรมราช 80000
 โทรศัพท์ 083-1126677



ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2549 มัธยมต้น โรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย จ.ตรัง
 พ.ศ. 2553 มัธยมปลาย โรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย จ.ตรัง
 พ.ศ. 2557 กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ประวัติย่อனிสิตผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล	นายเกียรติศักดิ์ กลิ่นบัวขาว
วัน เดือน ปีเกิด	4 มกราคม พ.ศ. 2536
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพฯ
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	1323 ซ.ประชาสงเคราะห์ 5 ถ.ประชาสงเคราะห์ แขวงดินแดง เขตดินแดง กรุงเทพฯ 10400
โทรศัพท์	083-8511516



ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2549	มัธยมต้น โรงเรียนพิบูลประชาสรรค์ จ.กรุงเทพฯ
พ.ศ. 2553	มัธยมปลาย โรงเรียนพิบูลประชาสรรค์ จ.กรุงเทพฯ
พ.ศ. 2557	กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ประวัติย่อ นิสิตผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล	นางสาวชนาภรณ์ มหาสมบุรณ์
วัน เดือน ปีเกิด	13 กันยายน พ.ศ. 2535
สถานที่เกิด	จังหวัดขอนแก่น
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	619/4 ม.14 ต.ศิลา อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000
โทรศัพท์	082-1237767



ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2549	มัธยมต้น โรงเรียนกัลยาณวัตร จังหวัดขอนแก่น
พ.ศ. 2553	มัธยมปลาย โรงเรียนกัลยาณวัตร จังหวัดขอนแก่น
พ.ศ. 2557	กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ