สายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า
สำหรับการประยุกต์ใช้งานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

VERTICAL STRIP ANTENNA ON RECTANGULAR GROUND PLANE FOR WLAN APPLICATION

สุขุมาล แสนแก้วทอง

SUKUMARN SANKEAWTHONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-010-185

สายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า
สำหรับการประยุกต์ใช้งานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

VERTICAL STRIP ANTENNA ON RECTANGULAR GROUND PLANE

FOR WLAN APPLICATION

สุขุมาล แสนแก้วทอง

SUKUMARN SANKEAWTHONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2558

KMITL-2015-EN-M-010-185

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VERTICAL STRIP ANTENNA ON RECTANGULAR GROUND PLANE FOR WLAN APPLICATION

SUKUMARN SANKEAWTHONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2015

KMITL-2015-EN-M-010-185

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับการประยุกต์ใช้งานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย
Thesis Title Vertical Strip Antenna on Rectangular Ground Plane for WLAN Application
นักศึกษา นางสาวสุขุมาล แสนแก้วทอง
รหัสประจำตัว 54611822
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-010-185

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.สถาพร	พรหมวงศ์	
ผศ.ดร.สุทธิชัย	นพนาคีพงษ์	
ศ.ดร.ประยุทธ	อัครเอกฒาลิน	
ผศ.ดร.พิชญ	สุพรรณกูล	
รศ.ดร.ชูวงศ์	พงศ์เจริญพาณิชย์	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2558 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับการประยุกต์ใช้งานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย
นักศึกษา	นางสาวสุขุมาล แสนแก้วทอง
รหัสนักศึกษา	54611822
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับการประยุกต์ใช้งานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว สายอากาศประกอบด้วยระนาบกราวนด์และแผ่นระนาบขนานเยื้องกัน โดยโครงสร้างจะถูกป้อนโดยโพรบโคแอกเชียล โดยที่ $|S_{11}| \leq -10$ dB ครอบคลุมความถี่ 2.2 ถึง 3.0 GHz และอัตราส่วนแกนไม่เกิน 3 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ 2.35 ถึง 2.90 GHz ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และ yz เป็น 60 องศา และ 120 องศาตามลำดับ อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง(F/B) เท่ากับ 12 dB มีอัตราขยายตั้งแต่ 4.22 ถึง 5.20 dBic และมีความกว้างลำคลื่นอัตราส่วนแกน ในระนาบ xz และ yz เป็น 54 องศา และ 66 องศา ตามลำดับ สายอากาศสามารถรองรับการใช้งานในช่วงความถี่ 2.40 ถึง 2.48 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ตามมาตรฐานของเทคโนโลยีโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายได้ ด้วยโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนทำให้ง่ายต่อการสร้าง และลดผลกระทบที่เกิดจากการสูญเสียเนื่องมาจากการเลือกใช้วัสดุที่เป็นแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Vertical Strip Antenna on Rectangular Ground Plane for WLAN Application
Student	Miss Sukumarn Sankeawthong
Student ID.	54611822
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

ABSTRACT

This thesis presents an elevated strip antenna on rectangular ground plane radiating circularly polarized unidirectional beam for 2.4 GHz. The antenna structure consists of the paralleled-in-echon plate on the reflector. This structure is singly fed by coaxial probe. The $|S_{11}|$ of less than -10 dB and axial ratio (AR) of less than 3 dB cover the frequency range from 2.35 to 2.90 GHz. The pattern of the antenna is unidirectional and the half-power beamwidths (HPBW) are 60 and 120 degrees, respectively. The front-to-back ratio (F/B) is 12 dB. The antenna gains along the frequency range from 2.40 to 2.48 GHz are 4.22 to 5.20 dBic. The AR beamwidths in xz- and yz-planes are 54 and 66 degrees, respectively. This antenna made on a copper plate with simple structure and be able to operate the frequency range from 2.40 to 2.48 GHz.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จขึ้นได้จากการสนับสนุนของ รศ. ดร. ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ อาจารย์ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและองค์ความรู้ต่างๆ รวมทั้งแนวคิดและกระบวนการทางงานวิจัย จนกระทั่งข้อคิดสำหรับการดำเนินชีวิตอย่างดียิ่งเสมอและขอบพระคุณอาจารย์อีกหลายๆท่านที่ผ่านมาอันซึ่งได้ประสิทธิ์ประสาทองค์วิชาความรู้ต่างๆให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณสิทธิชัย เด่นตรี คุณรัศมิทัต แผนสมบูรณ์ คุณอานนท์ สกลคณาพงษ์ คุณธัชชัย พุ่มพวง คุณพิชชานันท์ วงศ์ศิริธร คุณณัฐเศรษฐ์ หมวดทองอ่อน คุณวรางคณา ไชยหงษา และคุณภัทรียา จันทร์อาภาส ซึ่งเป็นผู้ที่ให้องค์ความรู้ในทางเทคนิคและข้อคิดอย่างเป็นระเบียบแบบแผนและกำลังใจซึ่งเป็นแรงผลักดันอย่างแรงยิ่งให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ ทุกท่านในห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายที่ช่วยให้คำปรึกษา และกำลังใจให้กับข้าพเจ้าอย่างดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ผู้ซึ่งมีความสำคัญยิ่งที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจตลอดช่วงชีวิตของข้าพเจ้า จนทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อย่างลุล่วง คุณค่าและองค์ความรู้อันเป็นประโยชน์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้ซึ่งมีพระคุณทุกท่าน

สุขุมาล แสนแก้วทอง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูปภาพ	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตงานวิจัย	2
1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 บทนำ	5
2.2 ความเป็นมาและประเภทของการสื่อสารบนเทคโนโลยีเครือข่ายไร้สาย	5
2.2.1 ประเภทของเครือข่ายไร้สาย	5
2.3 เครือข่ายไร้สายเฉพาะบริเวณ	6
2.3.1 องค์ประกอบของเครือข่ายเฉพาะบริเวณ	6
2.3.2 มาตรฐานของเครือข่ายเฉพาะบริเวณ	7
2.4 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss)	7
2.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern)	8
2.5.1 ลำคลื่นของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern lobes)	9
2.5.2 ระยะของสายอากาศ (Field region)	10
2.5.3 ความกว้างลำคลื่น (Beamwidth)	11
2.5.4 อัตราขยาย (Gain)	12
2.6 การโพลาไรซ์ (Polarization)	12
2.6.1 โพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear polarization)	14
2.6.2 โพลาไรซ์วงกลม (Circular polarization)	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.3 โพลาไรซ์วงรี (Elliptical polarization)........ 14

2.6.4 การสูญเสียตัวประกอบโพลาไรซ์ (Polarization loss factor)........ 15

2.7 แผ่นระนาบแพร่กระจายคลื่นที่เกิดโพลาไรซ์วงกลม........ 16

2.8 ความหลากหลายของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Pattern diversity)........ 21

2.9 ผลงานวิจัยที่มีมาก่อน........ 21

2.10 สรุป........ 25

บทที่ 3 การออกแบบและการจำลองสายอากาศ........ 27

3.1 บทนำ........ 27

3.2 โครงสร้างและการออกแบบสายอากาศ........ 27

3.2.1 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว........ 28

3.2.2 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศ........ 46

3.2.3 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น........ 47

3.2.4 ผลการจำลองอัตราขยาย........ 48

3.2.5 ผลการจำลองการกระจายของกระแสพื้นผิว........ 50

3.3 สรุป........ 51

บทที่ 4 ผลการทดสอบสายอากาศ........ 52

4.1 บทนำ........ 52

4.2 สายอากาศต้นแบบ........ 52

4.3 การทดสอบสายอากาศ........ 54

4.4 ผลการทดสอบสายอากาศ........ 56

4.5 สรุปผลการทดสอบ........ 61

บทที่ 5 การประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น........ 63

5.1 บทนำ........ 63

5.2 การประยุกต์ใช้สายอากาศต้นแบบสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น........ 63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.3 การทดสอบสายอากาศ.. 65

5.4 สรุปผลการทดสอบ... 72

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.. 73

6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์... 73

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา... 75

เอกสารอ้างอิง... 76

ประวัติผู้เขียน... 78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

ตารางที่		หน้า
2.1	มาตรฐานของเครือข่ายเฉพาะบริเวณ (WLAN)	7
2.2	สรุปคุณสมบัติของสายอากาศของผลงานวิจัยที่มีมาก่อน	25
3.1	ขนาดทางกายภาพของสายอากาศตั้งต้น	38
3.2	แสดงค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบ	46
3.3	สรุปคุณลักษณะของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว	50
4.1	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ	53
4.2	สรุปผลการทดสอบสายอากาศต้นแบบ	61
5.1	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ	64
5.2	สรุปผลการทดสอบสำหรับการประยุกต์ใช้สายอากาศสวิตช์ลำคลื่น	71
6.1	สรุปผลการทดสอบสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	(ก) การเชื่อมต่อกันระหว่างจุดสองจุด (ข) การเชื่อมต่อกันแบบจุดหนึ่งไปอีกหลาย ๆ จุด	1
1.2	การเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สายเฉพาะบริเวณ	2
1.3	ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว	3
2.1	ระบบพิกัดสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	8
2.2	(ก) ลำคลื่นและความกว้างลำคลื่นของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (ข) การพล็อตเชิงเส้นของแบบรูปพลังงานและมีความสัมพันธ์กับลำคลื่นและความกว้างลำคลื่น	10
2.3	ระยะสนามของสายอากาศ	10
2.4	แสดงแบบรูปในสองและสามมิติ (ในสเกลเชิงเส้น)	12
2.5	การหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	13
2.6	โพลาไรซ์วงรีที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในระนาบ z=0	15
2.7	หน่วยเวกเตอร์โพลาไรซ์ของคลื่นและสายอากาศ	16
2.8	ตำแหน่งการป้อนของแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมและแผ่นระนาบวงกลมสำหรับการโพลาไรซ์วงกลม	17
2.9	การป้อนแบบจุดเดียวของแผ่นระนาบไมโครสตริปสี่เหลี่ยมสำหรับการโพลาไรซ์วงกลม	18
2.10	การโพลาไรซ์วงกลมสำหรับแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการเจาะช่องบนแผ่นระนาบ	21
2.11	การโพลาไรซ์วงกลมโดยการตัดมุมตรงข้ามของแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสและแผ่นระนาบรูปวงรีที่มีการเพิ่มแถบเข้าไป	21
2.12	สายอากาศที่นำเสนอ	22
2.13	สายอากาศไดโพลแบบงอบนระนาบกราวนด์	23
2.14	สายอากาศ Cross-Moxon (สายอากาศไดโพลแบบงอ)	23
2.15	สายอากาศโพลาไรซ์วงกลมช่วงความถี่กว้างหนึ่งจุดป้อน	24
2.16	สายอากาศโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าแบบโลหะ (Electromagnetic Band Gap (EBG)	24
3.1	โครงสร้างตั้งต้นสำหรับการออกแบบสายอากาศ	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

3.2 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ อิมพีแดนซ์และอัตราส่วนแกนของส่วนตัวแพร่กระจายคลื่นที่วางขนานกันทั้ง 3 ขนาด........ 30

3.3 ทิศทางของกระแสบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ขนาด $\lambda/3$........ 31

3.4 โครงสร้างเมื่อใส่แผ่นระนาบกราวนด์ด้านล่างแผ่นแพร่กระจายคลื่น........ 32

3.5 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนเมื่อโครงสร้างมีแผ่นระนาบกราวนด์........ 32

3.6 ทิศทางของกระแสของสายอากาศเมื่อโครงสร้างมีแผ่นระนาบกราวนด์........ 33

3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อโครงสร้างมีแผ่นระนาบกราวนด์........ 33

3.8 โครงสร้างของสายอากาศเมื่อใส่ผนังเชื่อมต่อกันระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นกับแผ่นระนาบกราวนด์........ 34

3.9 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนของโครงสร้างที่มีส่วนพับของแขน 3 ขนาด... 35

3.10 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนของโครงสร้างสายอากาศทั้ง 3 แบบ........ 36

3.11 ผลการจำลองอิมพีแดนซ์ของโครงสร้างสายอากาศทั้ง 3 แบบ........ 36

3.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากโครงสร้างของสายอากาศที่มีโครงสร้างประกอบกัน 3 ส่วน........ 37

3.13 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศตั้งต้น........ 38

3.14 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนเมื่อมีการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_{pl} ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า........ 39

3.15 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนเมื่อมีการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_{p} ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า........ 40

3.16 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนเมื่อมีการปรับขนาดพารามิเตอร์ h ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า........ 41

3.17 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนเมื่อมีการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_{gw} ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า........ 41

3.18 ผลการจำลองอัตราขยายและอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (F/B) เมื่อมีการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_{gw} ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า........ 42

3.19 ผลการจำลองความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังและระดับสัญญาณลำคลื่นด้านข้าง เมื่อมีการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_{gw} ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า........ 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

3.20 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนเมื่อมีการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_{gl} ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวน์ดสี่เหลี่ยมผืนผ้า........................ 43

3.21 ผลการจำลองอัตราขยายและอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (F/B) เมื่อมีการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_{gl} ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวน์ดสี่เหลี่ยมผืนผ้า........................ 43

3.22 ผลการจำลองความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังและระดับสัญญาณลำคลื่นด้านข้าง เมื่อมีการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_{gl} ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวน์ดสี่เหลี่ยมผืนผ้า........................ 44

3.23 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนเมื่อมีการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_c ความหนาของแผ่นทองแดง........................ 44

3.24 สายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวน์ดสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับการประยุกต์ใช้งานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว........................ 45

3.25 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวน์ดสี่เหลี่ยมผืนผ้า........................ 46

3.26 ผลการจำลองอัตราส่วนแกนของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวน์ดสี่เหลี่ยมผืนผ้า........................ 47

3.27 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ yz และ xz........................ 48

3.28 ผลการจำลองความกว้างอัตราส่วนแกนในระนาบ xz และ yz........................ 48

3.29 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศเทียบกับความถี่........................ 49

3.30 ผลการจำลองประสิทธิภาพรวมของสายอากาศเทียบกับความถี่........................ 49

3.31 ผลการจำลองการกระจายของกระแสบนผิวสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวน์ดสี่เหลี่ยมผืนผ้า........................ 50

4.1 ลักษณะโครงสร้างสายอากาศต้นแบบ........................ 53

4.2 สายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวน์ดสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว........................ 53

4.3 การทดสอบค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวน์ดสี่เหลี่ยมผืนผ้าโพลาไรซ์วงกลมสำหรับความถี่ 2.4 GHz........................ 54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

4.4 การติดตั้งสายอากาศสำหรับการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าโพลาไรซ์วงกลม.. 56

4.5 ผลการจำลองกับผลทดสอบ $|S_{11}|$ กับความถี่ของสายอากาศ.. 56

4.6 ผลการจำลองกับผลทดสอบอัตราส่วนแกนกับความถี่ของสายอากาศ.. 58

4.7 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.. 58

4.8 ผลการจำลองกับผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.. 59

4.9 ผลการจำลองกับผลทดสอบของอัตราส่วนแกนเทียบกับมุมที่ความถี่ 2.4 GHz...... 60

4.10 ผลการจำลองกับผลทดสอบอัตราขยายที่ความถี่ที่ใช้งานของสายอากาศ.. 60

5.1 ลักษณะโครงสร้างการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น.. 63

5.2 สายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าทำมุม 30 องศากับระนาบสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวสำหรับการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น.. 64

5.3 การทดสอบค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{22}|$ ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าโพลาไรซ์วงกลมสำหรับความถี่ 2.4 GHz สำหรับการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น.. 65

5.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายของสายอากาศ.. 66

5.5 ผลการจำลองกับผลทดสอบ $|S_{11}|$ และ $|S_{22}|$ กับความถี่ของสายอากาศ.. 67

5.6 ผลการจำลองกับผลทดสอบอัตราส่วนแกนกับความถี่ของสายอากาศ.. 68

5.7 ผลการจำลองกับผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสำหรับการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น.. 70

5.8 ผลการจำลองกับผลทดสอบอัตราขยายที่ความถี่ที่ใช้งานของสายอากาศสำหรับการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น.. 71

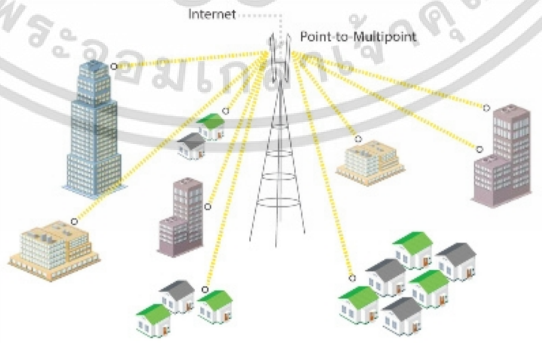
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

การสื่อสารไร้สายในปัจจุบันมีอิทธิพลอย่างมากต่อชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะเป็นการใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่หรือแทปเล็ตซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาอย่างมากเพื่อตอบสนองต่อการใช้งานของผู้บริโภคเปรียบเสมือนมีคอมพิวเตอร์พกพาขนาดเล็กไปในตัว ประกอบกับราคาที่ไม่สูงเหมือนในอดีตเนื่องจากมีการพัฒนาเทคโนโลยีอย่างต่อเนื่องและมีการแข่งขันทางการตลาดสูงทำให้ผู้บริโภคสามารถเข้าถึงได้ง่ายมากขึ้น หรือแม้แต่คอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊ค ซึ่งสามารถตอบสนองต่อการทำงานในยุคปัจจุบันที่ต้องการความคล่องตัว สะดวกและรวดเร็วได้เป็นอย่างดีเช่นกันด้วย ซึ่งระบบไร้สายนั้นจัดเป็นระบบหนึ่งซึ่งอยู่ในคอมพิวเตอร์แบบพกพาที่มีความสำคัญอย่างมาก ซึ่งการสื่อสารแบบไร้สายนั้น สามารถแบ่งออกเป็นการเชื่อมต่อระหว่างจุดสองจุดดังแสดงในรูปที่ 1.1(ก) หรือหนึ่งจุดไปยังอีกหลาย ๆ จุดดังแสดงในรูปที่ 1.1(ข) โดยไม่ได้เชื่อมต่อกันด้วยตัวนำไฟฟ้า

(ก) การเชื่อมต่อกันระหว่างจุดสองจุด (Point to point) [1]



(ข) การเชื่อมต่อกันแบบจุดหนึ่งไปอีกหลาย ๆ จุด (Point to multipoint) [2]

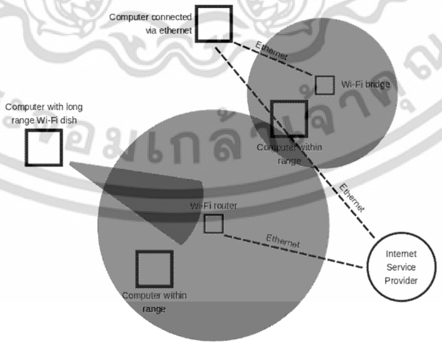
รูปที่ 1.1 ลักษณะการเชื่อมต่อกันของการสื่อสารไร้สาย

การสื่อสารไร้สายมีการใช้งานหลากหลายชนิดการใช้งาน เช่น การใช้งานอยู่กับที่หรือการใช้งานเคลื่อนที่และแบบพกพา เทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายเฉพาะบริเวณ (Wireless local area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

network : WLAN) จัดเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีของการสื่อสารไร้สาย ซึ่ง WLAN เป็นเทคโนโลยีที่เชื่อมอุปกรณ์ตั้งแต่สองตัวขึ้นไปเข้าด้วยกัน โดยใช้วิธีการกระจายแบบไร้สาย (ส่วนใหญ่แล้ว จะใช้คลื่นวิทยุแบบกระจายความถี่) ภายในพื้นที่ที่จำกัด เช่น บ้าน โรงเรียนหรือสำนักงาน เป็นต้น และโดยปกติแล้วจะมีการเชื่อมต่อผ่านทาง Access point : AP เพื่อเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยี WLAN ถือว่าได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากคุณสมบัติในด้านของประโยชน์ที่มีอยู่มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสร้างความสะดวกและอิสระในการใช้งานและการติดตั้ง เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้สายนำสัญญาณให้ยุ่งยาก อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ทั้งแบบตั้งโต๊ะหรือพกพาสามารถเชื่อมต่อถึงกันหรือเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายจากตำแหน่งต่าง ๆ ที่อยู่ในรัศมีของสัญญาณได้อย่างอิสระ ซึ่งในการเชื่อมต่อจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง สิ่งหนึ่งที่มีความจำเป็นในการส่งสัญญาณ คือ สายอากาศ ซึ่งโดยทั่วไปสายอากาศของภาครับมักจะถูกออกแบบให้มีการโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear polarization) ซึ่งอาจจะถูกปรับให้อยู่ในแนวตั้งหรือแนวนอนได้ในลักษณะใดลักษณะหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้ภาคส่งและภาครับสามารถเชื่อมต่อกันได้ จึงทำการใช้สายอากาศภาคส่งให้มีการโพลาไรซ์วงกลม (Circular polarization) ซึ่งการโพลาไรซ์ของคลื่นที่เดินทางเข้ามายังสายอากาศของเครื่องรับจะมีลักษณะหมุนเป็นวงกลมคล้ายเข็มนาฬิกา ซึ่งจะทำให้สามารถเชื่อมต่อกันได้ไม่ว่าภาครับจะวางตัวในแนวตั้งหรือแนวนอนก็ตาม

เทคโนโลยีสำหรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ผ่านสื่อไร้สายที่รู้จักกันมีอยู่หลายเทคโนโลยี เช่น Bluetooth IEEE 802.11 และ GPRS เป็นต้น แต่เทคโนโลยีที่นิยมกันอย่างแพร่หลายมากที่สุดสำหรับ WLAN คือ เทคโนโลยีตามมาตรฐาน IEEE 802.11 เนื่องจากอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN มีราคาไม่แพงและยังมีแนวโน้มของราคาที่ถูกลง อีกทั้งยังมีสมรรถนะในการรับส่งข้อมูลค่อนข้างสูง ง่ายต่อการติดตั้ง และได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างการเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สายเฉพาะบริเวณ (WLAN) [3]

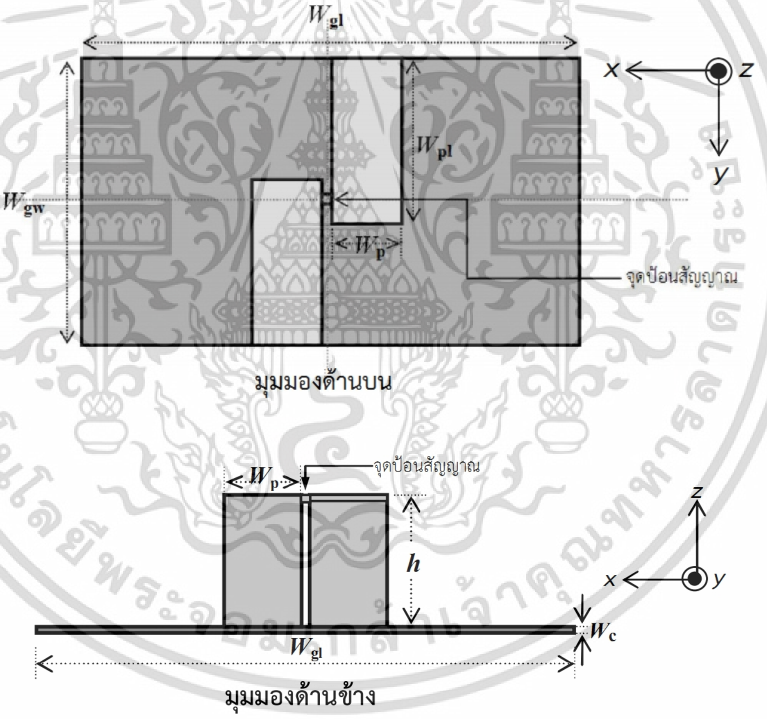
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับการประยุกต์ใช้งานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางเดียว โครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยระนาบกราวนด์และแผ่นระนาบขนานที่เยื้องกัน โดยโครงสร้างจะถูกป้อนโดยโพรบโคแอกเชียล และใช้คอนเนคเตอร์ชนิด SMA เป็นตัวเชื่อมต่อสัญญาณให้กับสายอากาศ โดยโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอแสดงได้ดังรูปที่ 1.3 ซึ่งจะนำสายอากาศดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่ 2.4 GHz ตามมาตรฐานของ WLAN

ในส่วนของการจำลองสายอากาศแผ่นพับสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและ มีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว จะใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® เพื่อที่จะศึกษาถึงผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ รวมทั้งการหาค่าคุณลักษณะของสายอากาศให้เหมาะสม โดยการพิจารณาจากผลของ $|S_{11}|$ อัตรส่วนแกน (Axial ratio : AR) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) การกระจายของกระแส (Current distribution) และอัตราขยาย (Gain) จากนั้นจะทำการยืนยันค่าคุณลักษณะของสายอากาศจากผลการทดสอบ ซึ่งได้จากการทดสอบสายอากาศต้นแบบร่วมกับสายอากาศตัวส่งและบันทึกผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย



รูปที่ 1.3 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ก็เพื่อทำการศึกษาสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยจะศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศเพื่อพัฒนาให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศมีคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน และพยายามทำการปรับปรุงให้สายอากาศมีโครงสร้างที่เรียบง่ายและไม่ซับซ้อน

1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย วัตถุประสงค์การศึกษาขอบเขตการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของ WLAN รวมทั้งระบบคุณสมบัติต่าง ๆ ของ WLAN

บทที่ 3 กล่าวถึงการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศเพื่อที่จะทำการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะต่าง ๆ สำหรับสายอากาศต้นแบบ โดยเริ่มจากการคำนวณหาความยาวของสายอากาศเริ่มต้น เพื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® พร้อมทั้งศึกษาผลกระทบต่าง ๆ ของพารามิเตอร์ และทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสายอากาศ เพื่อให้สายอากาศมีช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานที่ความถี่ 2.4 GHz ได้และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวตามที่ต้องการ

บทที่ 4 กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลของการจำลองสายอากาศที่ได้นำเสนอ โดยมีการสังเกตจากการนำค่าพารามิเตอร์มาจำลองแบบ เพื่อดูผลกระทบและสมรรถนะของสายอากาศ ได้แก่ $|S_{11}|$ อัตราส่วนแกน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยายของสายอากาศ

บทที่ 5 การทดสอบสมรรถนะของสายอากาศ เมื่อนำไปประยุกต์เป็นแบบโค้ง

บทที่ 6 กล่าวถึงข้อสรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ ตลอดจนวิจารณ์ปัญหาที่เกิดขึ้น รวมไปถึงการแนะนำแนวทางสำหรับการพัฒนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและหลักการทั่วไปของการสื่อสารไร้สาย โดยเฉพาะเครือข่ายไร้สายเฉพาะบริเวณ หรือเรียกว่า WLAN (Wireless local area network : WLAN) พารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการวิเคราะห์สายอากาศ และการโพลาไรซ์ (Polarization) โดยจะเริ่มจากความเป็นมารวมทั้งระบบและสัญญาณของการสื่อสารไร้สาย เครือข่ายไร้สายเฉพาะบริเวณ จากนั้นกล่าวถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) พารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการวิเคราะห์สายอากาศ การโพลาไรซ์ และการศึกษางานวิจัยที่มีมาก่อน

2.2 ความเป็นมาและประเภทของการสื่อสารบนเทคโนโลยีเครือข่ายไร้สาย (Wireless network)

เครือข่ายไร้สาย (Wireless network) หมายถึง ระบบเครือข่ายใดๆ ที่เชื่อมต่อหรือแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันโดยใช้สื่อกลางแบบไร้สาย ได้แก่ คลื่นวิทยุหรือคลื่นไมโครเวฟในช่วงความถี่ต่าง ๆ เครือข่ายไร้สายได้รับการพัฒนาให้มีความสามารถและมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคที่เปลี่ยนแปลงไปตามยุคสมัย วิวัฒนาการของเทคโนโลยีไร้สายเริ่มขึ้นในปี ค.ศ.1896 โดยนำมาใช้ในการสื่อสารครั้งแรกเพื่อส่งโทรเลขแบบไร้สาย ต่อมาได้รับการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารและการส่งข้อมูลแบบไร้สายในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การสื่อสารด้วยคลื่นความถี่ของวิทยุ การติดต่อสื่อสารผ่านทางดาวเทียม โทรศัพท์ไร้สายและการแลกเปลี่ยนข้อมูลด้วยบลูทูธ เป็นต้น ส่งผลให้มีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย และได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเป็นเครือข่ายไร้สายในปัจจุบัน

2.2.1 ประเภทของเครือข่ายไร้สาย

- เครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless personal area network : WPAN) เป็นเครือข่ายขนาดเล็กแบบส่วนตัว โดยมีรัศมีการรับส่งข้อมูลครอบคลุมพื้นที่ขนาดเล็กในระยะทางไม่กี่เมตร ส่วนใหญ่จะเป็นการติดต่อระหว่างอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ด้วยกันเอง เช่น เมาส์ จอคอมพิวเตอร์ คีย์บอร์ด และเครื่องพิมพ์ เป็นต้น

- เครือข่ายไร้สายเฉพาะบริเวณ (Wireless local area network : WLAN) เป็นเครือข่ายไร้สาย ที่มีรัศมีในการรับส่งข้อมูลครอบคลุมพื้นที่ในขอบเขตที่ไม่กว้างนัก แต่จะมีขนาดใหญ่กว่า WPAN โดยสามารถนำไปใช้ภายในบริเวณอาคาร สำนักงาน และบ้านพักอาศัยได้ นอกจากนี้ยังเชื่อมต่อและแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครือข่ายไร้สายแบบขนาดกลาง (Wireless metropolitan area network : WMAN) เป็นเครือข่ายไร้สายที่มีขนาดใหญ่กว่า WLAN และมีบริเวณการเชื่อมต่อระหว่างเครือข่ายที่กว้างขึ้น ภายในเครือข่ายประกอบด้วยเครือข่ายขนาดเล็กจำนวนมาก ที่เชื่อมต่อระหว่างกันในระยะไกลด้วยจานรับสัญญาณ ซึ่งอาจใช้สื่อกลางในการส่งข้อมูลด้วยคลื่นวิทยุหรือคลื่นไมโครเวฟ ขึ้นอยู่กับความต้องการของการจัดตั้งระบบ โดย WMAN เป็นมาตรฐานจาก IEEE 802.16 ที่ปัจจุบันรู้จักกันในชื่อ WiMAX (Worldwide interoperability for microwave access) ซึ่งเป็นวิวัฒนาการของเทคโนโลยีไร้สายในยุค 4G (Fourth generation)

- เครือข่ายไร้สายขนาดใหญ่ (Wireless wide area network : WWAN) เป็นเครือข่ายไร้สายที่มีรัศมีในการรับส่งข้อมูลครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่มาก มีบริเวณกว้างเป็นระยะทางหลายกิโลเมตร โดยทั่วไปเครือข่ายประเภทนี้จะเป็นเครือข่ายสาธารณะที่มีทั้งภาครัฐและเอกชนทำหน้าที่เป็นผู้ให้บริการ เช่น เครือข่ายของโทรศัพท์เคลื่อนที่ เครือข่ายวิทยุ เครือข่ายโทรทัศน์ เครือข่ายการส่งข้อมูลผ่านดาวเทียม และ Broadband wireless เป็นต้น [4]

2.3 เครือข่ายไร้สายเฉพาะบริเวณ (Wireless local area network : WLAN)

WLAN เป็นเครือข่ายเฉพาะบริเวณ ซึ่งเป็น LAN ประเภทหนึ่ง ที่ใช้คลื่นวิทยุหรืออินฟาเรดเป็นสื่อกลางในการรับส่งข้อมูล โดยมาตรฐานของ WLAN เรียกว่า IEEE 802.11 ในช่วงเริ่มแรกมีความเร็วในการส่งข้อมูลเพียง 2 Mbps แต่ในปัจจุบันได้พัฒนาให้มีความเร็วมากขึ้นเรื่อยๆ

2.3.1 องค์ประกอบของเครือข่ายเฉพาะบริเวณ (WLAN)

องค์ประกอบที่สำคัญของ WLAN มี 2 ส่วน ได้แก่

- Access point (AP) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวกลางในการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ ที่ติดตั้งการ์ดหรือเครือข่ายไร้สายให้สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ ลักษณะการทำงานจะเหมือนกับ Hub ที่ใช้กับระบบเครือข่ายทั่วไป โดยเป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับเครือข่ายไร้สายเพื่อให้สามารถสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลกันได้

- Wireless network interface card (Wireless NIC) ใช้สำหรับเครือข่ายไร้สายโดยเฉพาะ มีหน้าที่ควบคุมการรับส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ แต่จะใช้วิธีรับส่งแบบไร้สาย โดยจะแปลงข้อมูลดิจิตอลจากเครื่องผู้ใช้ไปเป็นคลื่นวิทยุ เพื่อส่งไปยังปลายทางโดยใช้เสาอากาศเป็นสื่อกลางในการรับส่งข้อมูลในลักษณะกระจาย เมื่อได้รับคลื่นวิทยุก็จะทำหน้าที่แปลงกลับให้เป็นข้อมูลดิจิตอลที่เครื่องคอมพิวเตอร์สามารถเข้าใจได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 มาตรฐานของเครือข่ายเฉพาะบริเวณ (WLAN)

ตารางที่ 2.1 แสดงมาตรฐานของเครือข่ายเฉพาะบริเวณ (WLAN) [5]

มาตรฐาน	ความถี่	อัตราการส่งข้อมูลสูงสุด	รัศมีการส่งข้อมูล
802.11a	5 GHz	54 Mbps	ไม่เกิน 50 เมตร
802.11b	2.4 GHz	11 Mbps	ไม่เกิน 100 เมตร
802.11g	2.4 GHz	54 Mbps	ไม่เกิน 100 เมตร
802.11n	2.4 GHz หรือ 5 GHz	600 Mbps	ไม่เกิน 250 เมตร

สายอากาศเป็นหนึ่งอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการสื่อสารแบบไร้สาย โดยสายอากาศจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สำหรับรับและส่งคลื่นความถี่วิทยุ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และในทางกลับกัน ก็เปลี่ยนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานไฟฟ้าเช่นกัน สายอากาศมีหลายขนาดและรูปแบบ ขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น สายอากาศสำหรับเครื่องรับโทรทัศน์ในบ้าน ส่วนใหญ่เป็นสายอากาศชนิด ยากิ-อุดะ มักติดตั้งไว้บนหลังคา ทำด้วยอะลูมิเนียม เพราะน้ำหนักเบาและทนต่อสภาพอากาศได้ดีกว่าโลหะทั่วไป สายอากาศของไมค์ลอย เป็นเพียงสายไฟสั้นๆ หรือสายอากาศของโทรศัพท์มือถือ เป็นเพียงจุดเชื่อมต่อเล็ก ๆ เท่านั้น

ในการวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติการใช้งานของสายอากาศ ต้องมีการพิจารณาถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญหลายพารามิเตอร์ ดังต่อไปนี้

2.4 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss)

การพิจารณาว่าสายอากาศจะมีคุณลักษณะที่เพียงพอต่อการใช้งานได้หรือไม่นั้น นอกจากจะพิจารณาเฉพาะ $|S_{11}|$ แล้วยังสามารถที่จะพิจาณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage standing wave ratio : VSWR) ได้เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นการใช้หลักการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสองตัวกลาง ซึ่งหากว่าทั้งสองตัวกลางมีอิมพีแดนซ์เท่ากัน จะส่งให้คลื่นมีการส่งผ่านได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่มีการสูญเสีย ในทางกลับกันหากสองตัวกลางมีค่าอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันมาก ๆ จะส่งผลให้การส่งผ่านของคลื่นมีการสูญเสียหรือเกิดการสะท้อนกลับ ซึ่งหมายความว่ากำลังงานส่วนใหญ่ที่ส่งให้สายอากาศ ไม่สามารถที่จะแพร่ออกไปในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ซึ่งกรณีส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้น เมื่ออิมพีแดนซ์ระหว่างสองตัวกลางมีค่าที่ไม่เท่ากันหรือมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งในกรณีดังกล่าวนี้จะส่งผลให้ไม่มีการส่งผ่านอย่างสมบูรณ์หรือเกิดการสะท้อนกลับทั้งหมด จะเป็นผลให้เกิดการสะสมพลังงานไว้บางส่วน ซึ่งสามารถพิจารณาการสะท้อนได้จากสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) ได้จากสมการที่ 2.9 และ 2.10

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o} \tag{2.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Z_{in} คือ อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ

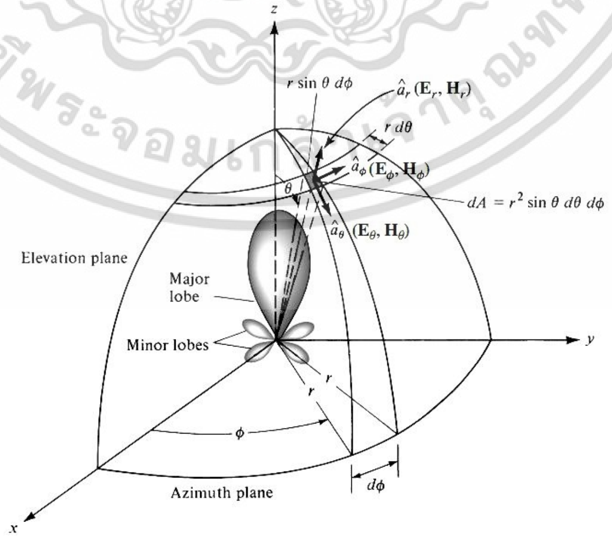
Z_o คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณ

$$\mathrm{RL}(\mathrm{dB}) = -20\log|\Gamma| \tag{2.2}$$

2.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศหรือแบบรูปของสายอากาศ จะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์หรือรูปที่ใช้แสดงค่าของความหนาแน่นของกำลังการแพร่กระจายคลื่น (Power density) ส่วนใหญ่แบบรูปการแผ่พลังงานจะถูกกำหนดในย่านสนามไกล (Far-field) และถูกแสดงในรูปของฟังก์ชั่นพิกัดทิศทาง คุณสมบัติการแพร่กระจายรวมทั้งความหนาแน่นของฟลักซ์ (Power flux density) ความเข้มของการแพร่กระจาย กำลังของสนาม ทิศทาง เฟสหรือโพลาไรซ์ คุณสมบัติของการแพร่กระจายที่ส่วนใหญ่ที่สนใจ คือ การแพร่กระจายใน 2 หรือ 3 มิติของพลังงานคลื่น ในรูปฟังก์ชั่นของผู้สังเกตตามเส้นการเดินทางของคลื่น หรือพื้นผิวของรัศมีที่คงที่พิกัดที่เหมาะสมที่สุดแสดงในรูปที่ 2.1 การหาสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กที่ได้รับที่รัศมีคงที่เรียกว่ารูปแบบความกว้างของสนาม (Amplitude field pattern) ในทางกลับกันกราฟการเปลี่ยนแปลงในเชิงพื้นที่ของความหนาแน่นพลังงาน บนรัศมีคงที่ เรียกว่ารูปแบบความกว้างของพลังงาน

โดยทั่วไปแบบรูปของสนามและพลังงาน มักจะยอมรับค่าสูงสุด สนามและรูปแบบของพลังงาน นอกจากนี้แบบรูปของพลังงานมักจะถูกพลอตในรูปแบบของลอการิทึมสเกล หรือในรูปของเดซิเบล (dB) สเกลนี้เป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากลอการิทึมสเกลสามารถที่จะเน้นรายละเอียดได้มากกว่าในส่วนของรูปแบบที่มีค่าที่ต่ำมาก ต่อมาจะอ้างถึง ลำคลื่นย่อย (Minor lobes) ของสายอากาศ



รูปที่ 2.1 ระบบพิกัดสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

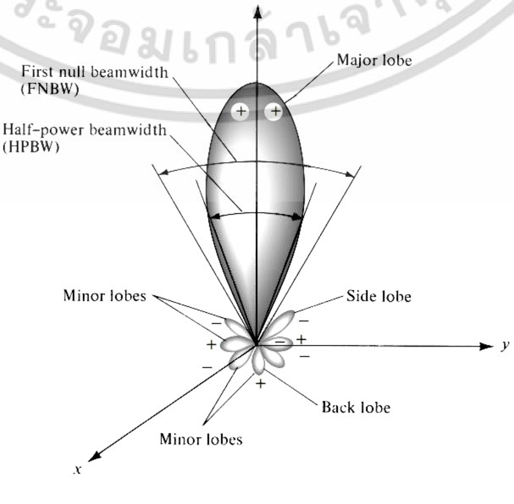
2.5.1 ลำคลื่นของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern lobes)

ในส่วนที่ต่างๆ กันของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะถูกเรียกว่าลำคลื่น (Lobes) แบ่งเป็นส่วนย่อย ๆ เป็น ลำคลื่นหลัก (Main or major lobes) ลำคลื่นย่อย (Minor lobes) ลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side lobes) และลำคลื่นย่อยด้านหลัง (Back lobes)

ลำคลื่นของการแพร่กระจาย เป็นส่วนขอบเขตของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยความสัมพันธ์ของบริเวณต่างๆ ของความเข้มการแพ่กระจาย รูปที่ 2.2(ก) แสดงถึงความสมมาตรของแบบรูปโพลาสามมิติกับค่าการแพร่กระจายลำคลื่น บางค่าจะมีค่าความเข้มการแพร่กระจายดีกว่าตัวอื่น แต่ทั้งหมดจะถูกจัดเป็นลำคลื่น ส่วนในรูปที่ 2.2(ข) แสดงแบบรูปเชิงเส้นในสองมิติ เมื่อถูกระบุในคุณลักษณะเดียวกัน

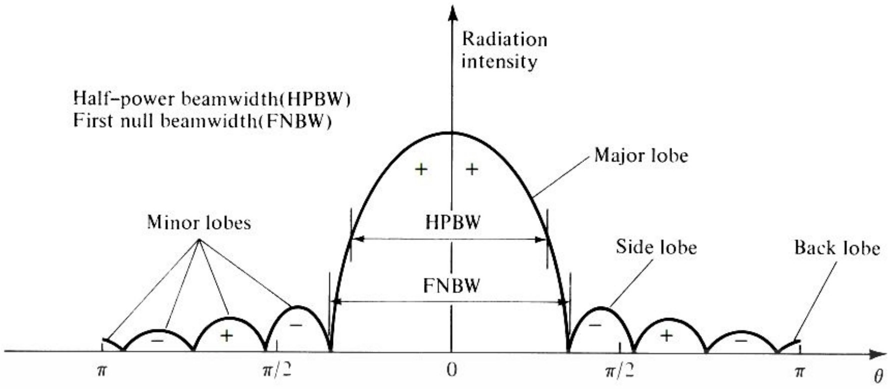
ลำคลื่นหลัก ถูกนิยามเป็นลำคลื่นการแพร่กระจายคลื่น ประกอบด้วยทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นสูงสุด ในรูปที่ 2.2 ลำคลื่นหลักชี้ไปในทิศทางที่ $\theta=0$ ในสายอากาศบางชนิด เช่น สายอากาศลำคลื่นแยก (Split-beam antenna) อาจจะมีลำคลื่นหลักมากกว่าหนึ่ง ลำคลื่นย่อยคือลำคลื่นอื่น ๆ นอกเหนือไปจากลำคลื่นหลัก ในรูปที่ 2.2(ก) และ (ข) ลำคลื่นทุก ๆ ลำคลื่นยกเว้นลำคลื่นหลัก สามารถถูกจัดให้เป็นลำคลื่นย่อยได้ ลำคลื่นย่อยด้านข้าง คือ ลำคลื่นที่แผ่ออกไปในทิศทางได้ก็ตาม นอกเหนือจากลำคลื่นที่ตั้งทิศทางไว้ (โดยทั่วไปลำคลื่นย่อยด้านข้างจะอยู่ถัดไปจากลำคลื่นหลักครอบคลุมถึงอีกครึ่งหนึ่งของทิศทางของบีมหลัก) ลำคลื่นย่อยด้านหลังคือ "ลำคลื่นการแพร่กระจายคลื่นที่มีแกนทำมุมประมาณ 180 องศา กับบีมของสายอากาศ" โดยทั่วไปจะหมายถึงลำคลื่นย่อยครอบคลุมถึงอีกครึ่งหนึ่งของทิศทางตรงกันข้ามของบีมหลัก

ลำคลื่นย่อย โดยทั่วไปจะแสดงการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ได้ต้องการและควรที่จะทำการออกแบบให้มีค่าน้อยที่สุด เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน ระดับของลำคลื่นย่อยโดยปกติจะแสดงในรูปอัตราส่วนของความหนาแน่นพลังงานและจะมีระดับประมาณ ลำคลื่นย่อยด้านข้าง -20 dB หรือมีค่าที่น้อยกว่าโดยทั่วไปจะไม่เป็นที่ต้องการในการใช้งานทั่วไป



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



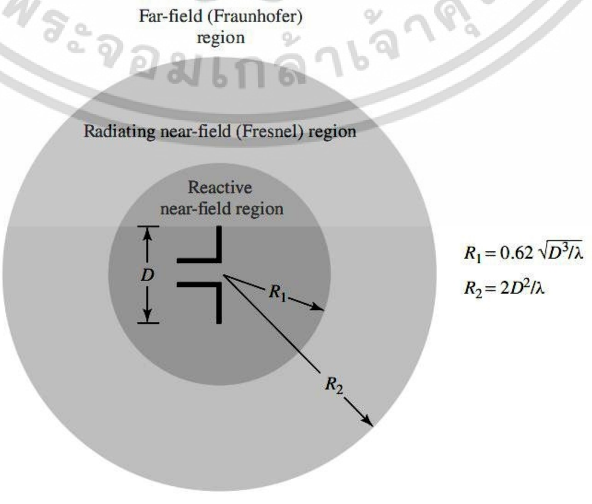
(ข)

รูปที่ 2.2 (ก) ลำคลื่นการแพร่กระจายคลื่นและความกว้างลำคลื่นของแบบรูปสายอากาศ (ข) การพล็อตเชิงเส้นของแบบรูปพลังงานและความสัมพันธ์ระหว่างลำคลื่นและความกว้างลำคลื่น [6]

โดยปกติแล้วระดับลำคลื่นด้านข้างจะมีค่าที่ต่ำกว่า -30 dB เมื่อมีการนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบเรดาร์ เนื่องจาก จะช่วยลดความผิดพลาดในการระบุเป้าหมายผ่านลำคลื่นย่อย

2.5.2 ระยะของสายอากาศ (Field region)

พื้นที่รอบๆ สายอากาศจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ระยะด้วยกัน คือ ก) สนามรีแอกทีฟระยะใกล้ ข) การแผ่พลังงานในสนามระยะใกล้ และ ค) สนามระยะไกล (Fraunhofer) ระยะของสนามสามารถแสดงดังรูปที่ 2.3 ระยะของสนามเหล่านี้ถูกกำหนดขึ้นเพื่อที่จะแสดงถึงรูปแบบของสนามในแต่ละระยะ ถึงแม้ว่าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดในรูปแบบของสนาม แต่จะมีความแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างระยะสนามของสายอากาศ



รูปที่ 2.3 ระยะสนามของสายอากาศ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณที่สนามล้อมรอบสายอากาศมากที่สุด ขอบเขตภายนอกของสนามระยะนี้มีค่าเท่ากับ $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ จากพื้นผิวของสายอากาศ เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่น และ D เป็นส่วนที่ยาวที่สุดของสายอากาศ สำหรับไดโพลที่สั้นมาก ๆ หรือเท่ากับรัศมีขอบเขตภายนอกของระยะสนามนี้มีค่าอยู่ที่ระยะ $\lambda/2\pi$ จากพื้นผิวของสายอากาศ

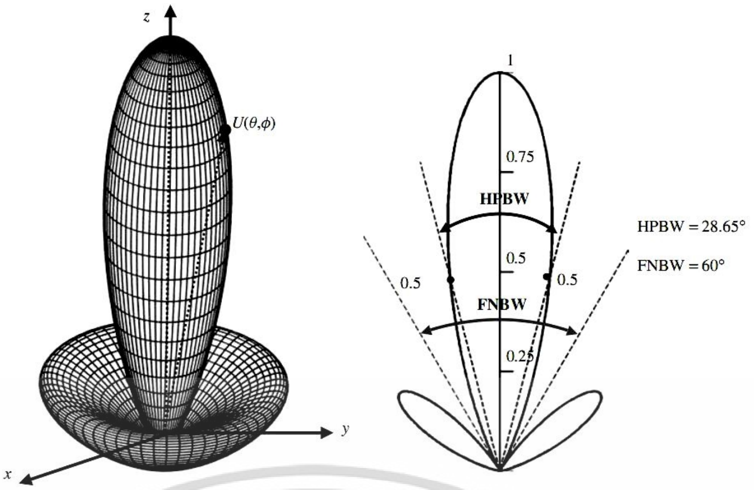
การแผ่พลังงานในสนามระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามของสายอากาศ ซึ่งอยู่ระหว่างสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับสนามระยะไกล โดยมีสนามกระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่ และการกระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ นั้น จะแปรผันตามระยะห่างจากสายอากาศ เมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้นซึ่งในบริเวณดังกล่าวนี้อาจมีระยะทาง $\lambda/2\pi \le R \le 2D^2/\lambda$

บริเวณสนามระยะไกล เป็นสนามของสายอากาศ ซึ่งการแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติที่ใหญ่เท่ากับ D บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง R มากกว่า $2D^2/\lambda$ จากสายอากาศ

2.5.3 ความกว้างลำคลื่น (Beamwidth)

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศที่มีความสำคัญอีกพารามิเตอร์หนึ่ง คือ ความกว้างลำคลื่น ความกว้างลำคลื่นของแบบรูป จะเป็นมุมระหว่างจุดสองจุดที่ถูกกำหนดในด้านตรงข้ามกันของค่าสูงสุดของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างลำคลื่นที่ถูกใช้มากที่สุดและมีความสำคัญ คือ ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-power beamwidth : HPBW) ซึ่งเป็นระนาบที่ประกอบด้วยลำคลื่นที่มีค่ามากที่สุด ในทิศทางที่แน่นอน ซึ่งเป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลักมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของบีมของกำลัง อีกหนึ่งความกว้างลำคลื่นที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ มุมที่แบบรูปเป็นศูนย์ครั้งแรก เรียกว่า ความกว้างลำคลื่นจุดศูนย์คู่แรก (First null beamwidth : FNBW) ทั้งสองชนิดจะถูกแสดงในรูปที่ 2.4 ความกว้างลำคลื่นตัวอื่น ๆ ก็มีจุดที่แบบรูปมีค่าเท่ากับ -10 dB จากจุดสูงสุดหรือค่าอื่น ๆ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติถ้ากล่าวถึงความกว้างลำคลื่น โดยทั่วไปจะหมายถึง ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงแบบรูปในสองและสามมิติ (ในสเกลเชิงเส้น) ของ $U(\theta)=\cos^2(\theta)\cos^2(3\theta)$ [6]

ความกว้างลำคลื่น เป็นส่วนสำคัญของสายอากาศและมักจะใช้เป็นตัวเปรียบเทียบระหว่างความกว้างและระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side-lobe level) นั่นคือ เมื่อความกว้างลำคลื่นลดลงระดับลำคลื่นย่อยด้านข้างจะเพิ่มขึ้นและกลับกันในทำนองเดียวกัน นอกจากนี้ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศยังถูกใช้เพื่ออธิบายถึงความสามารถโดยละเอียดของสายอากาศอีกด้วย เพื่อที่แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างการแพร่กระจายของแหล่งกำเนิดหรือเป้าหมายในเรดาร์ที่อยู่ติดกัน

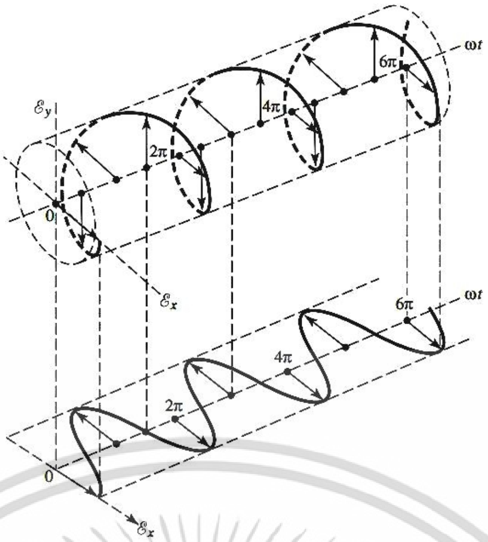
2.5.4 อัตราขยาย (Gain)

อัตราขยายของสายอากาศ คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ในทิศทางที่ต้องการต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไอโซทรอปิก โดยที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นมีความสัมพันธ์กับกำลังงานในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไอโซทรอปิกและมีค่าเท่ากับกำลังงานที่สายอากาศได้รับ (P_{in}) หารด้วย 4π อัตราขยายของสายอากาศทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ อัตราขยายที่ไม่ได้คิดผลของการสูญเสียจากการสะท้อนและความไม่แมตช์กันของโพลาไรซ์ของสายอากาศ และอัตราขยายที่คิดผลรวมของการสูญเสียจากการสะท้อนและความไม่แมตช์กันของโพลาไรซ์ของสายอากาศ ในการวัดอัตราขยายของสายอากาศหน่วยที่วัดจะเป็น dBi สำหรับสายอากาศที่เป็นแบบ linear และเป็น dBic สำหรับสายอากาศที่เป็น circular

2.6 การโพลาไรซ์ (Polarization)

โพลาไรซ์ของลำคลื่นที่แพร่กระจายนั้น เป็นการแสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกและเป็นการ ที่อธิบายทิศทางและขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า ซึ่งแปรผันตามเวลา โพลาไรซ์จะแสดงการกวาดของยอดเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ ที่ตำแหน่งสังเกต ซึ่งคงที่และการสังเกตนี้จะทำได้โดยมองตามหลังคลื่นที่เดินทาง แสดงดังรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [6]

สำหรับโพลาไรซ์ของสายอากาศในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง จะเป็นโพลาไรซ์ของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้นจากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังที่ขั้วของสายอากาศมากสุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาจะให้หมายถึง ทิศทางที่สายอากาศมีค่าการขยายมากที่สุด ดังนั้นโพลาไรซ์ของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกัน จะต่างกัน การแบ่งชนิดของโพลาไรซ์อาจแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ

1. โพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear polarization)
2. โพลาไรซ์วงกลม (Circular polarization)
3. โพลาไรซ์วงรี (Elliptical polarization)

ถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจะเรียกว่า โพลาไรซ์หมุนขวา ในขณะที่หากสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจะเป็นโพลาไรซ์หมุนซ้าย ซึ่งสามารถแสดงสนามชั่วขณะเวลานั้นของคลื่นระนาบ ที่เดินทางในทิศทาง -z ได้ว่า

$$\mathcal{E}(z;t) = \hat{a}_x \mathcal{E}_x(z;t) + \hat{a}_y \mathcal{E}_y(z;t) \tag{2.3}$$

เมื่อส่วนประกอบของสนามชั่วขณะเวลานั้น สัมพันธ์กับค่าเชิงซ้อนของสนามนั้นดังนี้

$$\mathcal{E}_x(z;t) = E_{xo}\cos(\omega t + kz + \phi_x) \tag{2.4}$$

$$\mathcal{E}_y(z;t) = E_{yo}\cos(\omega t + kz + \phi_y) \tag{2.5}$$

เมื่อ E_{xo} และ E_{yo} เป็นขนาดของสนามค่าสูงสุด ในทิศทาง x และ y ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 โพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear polarization)

คลื่นซึ่งเป็นโพลาไรซ์เชิงเส้น ความแตกต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบทั้งสองของสนาม จะมีค่าดังนี้

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi, \quad n = 0, 1, 2, 3, \ldots \tag{2.6}$$

2.6.2 โพลาไรซ์วงกลม (Circular polarization)

การที่จะสามารถเกิดการโพลาไรซ์วงกลมได้นั้น ก็ต่อเมื่อขนาดของส่วนประกอบของสนามทั้งสองมีค่าเท่ากันและความต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบของสนามทั้งสองเป็นจำนวนคี่เท่าของ $\frac{\pi}{2}$ นั่นคือ

$$E_{xo} = E_{yo} \tag{2.7}$$

เมื่อ

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\frac{(1+4\text{n})\pi}{2}; \text{n} = 0,1,2,\ldots\text{cw} \tag{2.8}$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = -\frac{(1+4\text{n})\pi}{2}; \text{n} = 0,1,2,\ldots\text{ccw} \tag{2.9}$$

เมื่อ CW (Clockwise) คือ สนามหมุนตามเข็มนาฬิกา

CCW (Counter clockwise) คือ สนามหมุนทวนเข็มนาฬิกา

ถ้าคลื่นเดินทางในทิศทางตรงกันข้าม (คือทิศทาง +z) เฟสในสมการ (2.4) ที่ทำให้เกิด CW และ CWW จะต้องสลับกัน

2.6.3 โพลาไรซ์วงรี (Elliptical polarization)

โพลาไรซ์วงรี จะเกิดขึ้น เมื่อความต่างเฟสเป็นจำนวนคี่เท่าของ $\frac{\pi}{2}$ แต่ขนาดของสนามไฟฟ้าจะไม่เท่ากัน หรือความต่างเฟสเป็นจำนวนคี่ของ $\frac{\pi}{2}$ นั่นคือ

$$E_{xo} \neq E_{yo} \tag{2.10}$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\frac{(1+4\text{n})\pi}{2}; n = 0,1,2,\ldots\text{CW} \tag{2.11}$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = -\frac{(1+4\text{n})\pi}{2}; n = 0,1,2,\ldots\text{CCW} \tag{2.12}$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm\frac{n\pi}{2} > 0\ldots\ldots\text{CW} \tag{2.13}$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm\frac{n\pi}{2} < 0\ldots\ldots\text{CCW} \tag{2.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $n = 0,1,2,...$

ในกรณีของโพลาไรซ์แบบวงรีนั้น การกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งใด ๆ จะเป็นวงรีเอียง อัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนรอง จะเรียกว่าอัตราส่วนแกน (Axial ratio : AR) ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

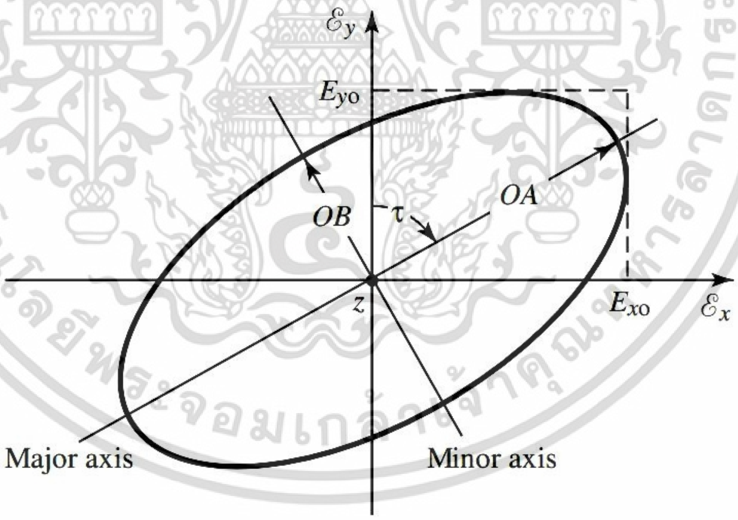
$$AR = \frac{OA}{OB}, \quad 1 \le AR \le \infty \tag{2.15}$$

เมื่อ OA = แกนหลัก และ OB = แกนย่อยดังรูป (2.6)

การเอียงของวงรีเทียบแกน y สามารถแสดงได้ด้วยมุมเอียงดังนี้ คือ

$$\tau = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}\tan^{-1}\left[\frac{2E_x E_y}{E^2_x + E^2_y}\cos(\Delta\phi)\right] \tag{2.16}$$

เมื่อ วงรีตามแนวแกนหลัก $\tau = \frac{n\pi}{2}, n = 0,1,2,...$ แกนหลัก (ย่อย) เท่ากับ $E_x(E_y)$ หรือ $E_y(E_x)$ หรือ อัตราส่วนแกน มีค่าเท่ากับ $\frac{E_x}{E_y}$ หรือ $\frac{E_y}{E_x}$



รูปที่ 2.6 โพลาไรซ์วงรีที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในระนาบ z=0 [6]

2.6.4 การสูญเสียตัวประกอบโพลาไรซ์ (Polarization loss factor : PLF)

โดยทั่วไปแล้วโพลาไรซ์ของสายอากาศจะไม่เหมือนกับโพลาไรซ์ของคลื่นที่เดินทางมายังสายอากาศ ซึ่งเรียกว่า เกิดโพลาไรซ์ไม่แมตช์ (Polarization mismatch) ทำให้สายอากาศไม่สามารถดึงเอากำลังงานออกจากคลื่นสูงสุด เนื่องจากเกิดการสูญเสียจากโพลาไรซ์ (Polarization loss) สมมติว่า สนามไฟฟ้าของคลื่นที่เดินทางเข้ามายังสายอากาศนั้นเขียนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathrm{E}_i = \hat{\rho}_w E_i \tag{2.17}$$

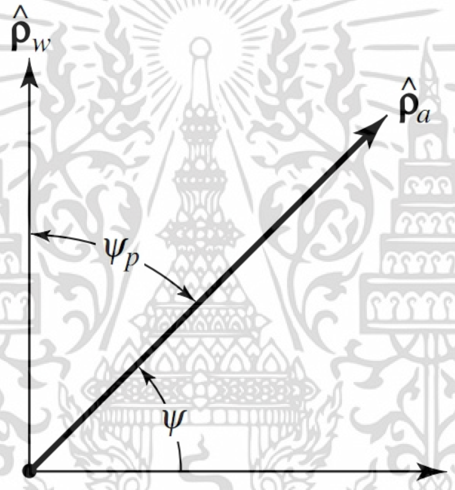
เมื่อ $\hat{\rho}_{\mathrm{w}}$ เป็นหน่วยเวกเตอร์ของคลื่น และโพลาไรซ์ของสนามไฟฟ้าของสายอากาศรับ มีค่าดังนี้

$$\mathrm{E}_a = \hat{\rho}_a E_a \tag{2.18}$$

เมื่อ $\hat{\rho}_a$ เป็นหน่วยเวกเตอร์ของสายอากาศ
จะสามารถกำหนดให้การสูญเสียตัวประกอบโพลาไรซ์ มีค่าดังนี้

$$\mathrm{PLF} = |\hat{\rho}_w \cdot \hat{\rho}_a|^2 = |\cos\psi_p|^2 \tag{2.19}$$

เมื่อ ψ_p เป็นมุมระหว่างหน่วยเวกเตอร์ทั้งสอง ดังแสดงในรูป 2.7



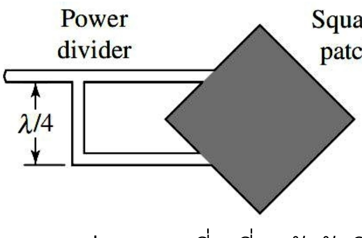
รูปที่ 2.7 หน่วยเวกเตอร์โพลาไรซ์ของคลื่นและสายอากาศ [6]

2.7 แผ่นระนาบแพร่กระจายคลื่นที่เกิดโพลาไรซ์วงกลม

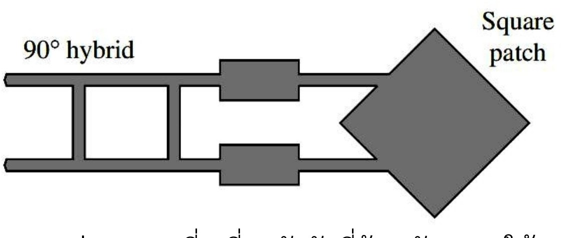
องค์ประกอบแบบแผ่นระนาบทั้งแบบสี่เหลี่ยมและวงกลม ส่วนใหญ่จะมีการแพร่กระจายคลื่นแบบเส้นตรง ถ้าจุดป้อนไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ อย่างไรก็ตามการโพลาไรซ์วงกลมและวงรีสามารถใช้การป้อนรูปแบบต่าง ๆ หรือการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบเพียงเล็กน้อย ซึ่งจะอธิบายต่อไป

การโพลาไรซ์วงกลมสามารถเกิดได้จากการตั้งฉากกันและต่างเฟสกันเป็นมุม 90 องศา ซึ่งจะทำให้สำเร็จได้ โดยการปรับเปลี่ยนขนาดทางกายภาพขององค์ประกอบแบบแผ่นระนาบ โดยใช้การป้อนแบบหนึ่งจุด สองจุดหรือมากกว่านั้น บางงานวิจัยแนะนำให้ใช้การป้อนเพียงหนึ่งจุด สำหรับองค์ประกอบแบบแผ่นระนาบที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส วิธีการที่ง่ายที่สุดที่จะทำให้เกิดการโพลาไรซ์วงกลม คือ การป้อนให้กับองค์ประกอบที่มีขอบติดกัน ซึ่งอธิบายในรูปที่ 2.8(ก) และ 2.8(ข) การทำให้เกิดความต่างเฟสทำได้จากการป้อนแบบแบ่งกำลัง 90 องศา หรือ แบบไฮบริด 90 องศา

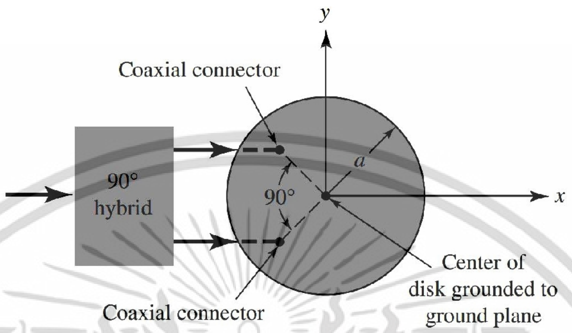
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) แผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ป้อนสัญญาณขอบที่ติดกันแบบแบ่งกำลัง



(ข) แผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ป้อนสัญญาณให้ขอบที่ติดกันแบบไฮบริด 90 องศา



(ค) แผ่นระนาบวงกลมที่ป้อนด้วยโคแอกเชียล

รูปที่ 2.8 ตำแหน่งการป้อนของแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมและแผ่นระนาบวงกลม สำหรับการโพลาไรซ์วงกลม [6]

สำหรับแพตช์วงกลมที่มีการโพลาไรซ์วงกลม จะเกิดได้จากการป้อนสองจุดที่มีการแบ่งมุมที่เหมาะสม ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.8(ค) คือการป้อนสองจุดโดยแบ่งมุมไป 90 องศา ซึ่งจะสร้างสนามที่ตั้งฉากกันภายในแผ่นระนาบรวมทั้งภายนอกแผ่นระนาบ โดยการวางของจุดวัดแต่ละจุดต้องวางในตำแหน่งที่มีการสร้างสนามโดยจุดวัดอื่นไม่นำมาพิจารณา ดังนั้นระหว่างจุดทดสอบทั้งสองจึงมีการเชื่อมต่อกันเพียงเล็กน้อย เพื่อที่จะทำให้เกิดการโพลาไรซ์วงกลมและการป้อนที่ต้องมีความต่างเฟสกัน 90 องศา ระหว่างสนามทั้งสอง ในที่นี้เกิดได้โดยการใช้การป้อนแบบไฮบริด ซึ่งแสดงดังรูป 2.8(ค) โดยขาของจุดวัดวางในตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแผ่นระนาบที่วางอยู่บนระนาบกราวนด์ ซึ่งระนาบกราวนด์ไม่มีความจำเป็นสำหรับการโพลาไรซ์วงกลม แต่ถูกใช้เพื่อไม่ให้เกิดตัวแปร ϕ และอาจเพิ่มคุณภาพให้กับการโพลาไรซ์วงกลมอีกด้วย

เพื่อที่จะลดความซับซ้อนในการป้อนแบบคู่การโพลาไรซ์วงกลมสามารถเกิดจากการป้อนแบบเดี่ยวได้เช่นกัน แต่การป้อนแบบเดี่ยวสำหรับบางความถี่ของขนาดในอุดมคติ จะกระตุ้นการโพลาไรซ์ที่แย่ลง ระหว่างสองโหมดจะมีความถี่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการออกแบบสนามโดยสามารถมีเฟสนำไป 45 องศา หรือมีเฟสตาม 45 องศา ก็ได้ ซึ่งทำให้มีความต่างเฟสกัน 90 องศา ซึ่งจำเป็นในการเกิดโพลาไรซ์วงกลม

เพื่อที่จะอธิบายวิธีการดังกล่าวจะทำการพิจารณาที่แผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังรูปที่ 2.9(ก) ขั้นแรกสมมติว่าขนาดของ L และ W เกือบจะเท่ากับขนาดที่ความถี่ของโหมด TM_{010}^{x} และ TM_{001}^{x}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

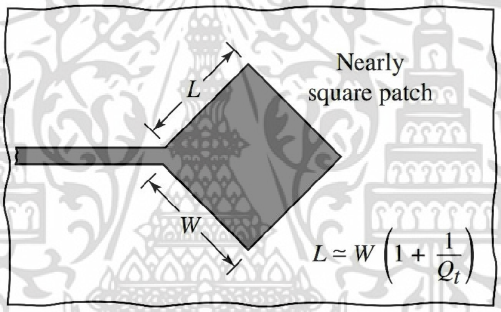
ทิศทางด้านข้างของแผ่นระนาบ ที่โหมด TM_{010}^{x} จะสร้างสนามไฟฟ้า E_y ซึ่งมีการโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวแกน y และที่โหมด TM_{001}^{x} จะสร้างสนามไฟฟ้า E_z ซึ่งมีการโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวแกน z ซึ่งแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$E_y = c\frac{\sin\left(\frac{\pi}{L}y'\right)}{k^2\left(1-j/Q_t\right)-\left(k_y\right)^2} \tag{2.20}$$

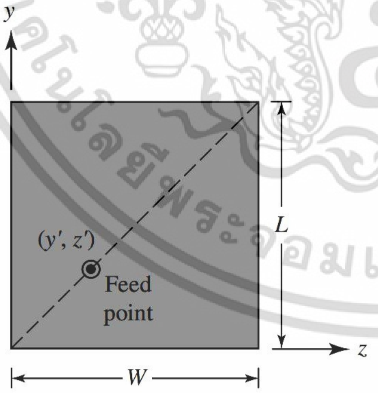
$$E_z = c\frac{\sin\left(\frac{\pi}{W}z'\right)}{k^2\left(1-j/Q_t\right)-\left(k_z\right)^2} \tag{2.21}$$

$$k_y = \frac{\pi}{L} \tag{2.22}$$

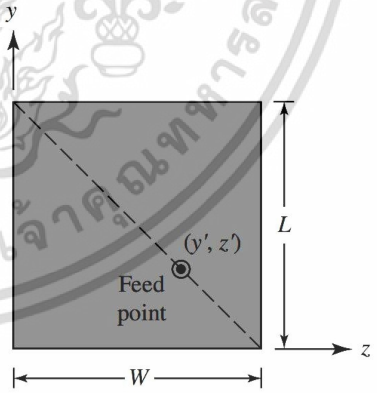
$$k_z = \frac{\pi}{W} \tag{2.23}$$



(ก) ขนาดใกล้เคียงแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส



(ข) โพลาไรซ์หมุนซ้าย



(ค) โพลาไรซ์หมุนขวา

รูปที่ 2.9 การป้อนแบบจุดเดียวของแผ่นระนาบไมโครสตริปสี่เหลี่ยมสำหรับการโพลาไรซ์วงกลม [6]

ที่ c และ $Q_t\ (Q_t = 1/\tan\delta_{eff})$ มีค่าเท่ากันในทิศทางด้านข้างสำหรับการโพลาไรซ์ทั้งสอง ถ้าจุดป้อน (y', z') อยู่บนเส้นทแยงมุมจะใช้สมการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{y'}{L} = \frac{z'}{W} \tag{2.24}$$

ต่อมาอัตราส่วนแกนที่ด้านข้างของสนาม E_y และ E_z สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{E_y}{E_z} = \frac{k(1-\frac{j}{2Q_1}) - k_y}{k(1-\frac{j}{2Q_1}) - k_z} \tag{2.25}$$

เพื่อที่จะทำให้เกิดการโพลาไรซ์วงกลม ขนาดของอัตราส่วนแกนจะต้องมีค่าที่เท่ากัน ในขณะที่เฟสต้องมีค่าเท่ากับ ± 90 องศา จะเกิดขึ้นเมื่อเฟสทั้งสองมีตัวเศษและตัวส่วนเท่ากัน และอยู่นอกเฟสไป 90 องศา ในกรณีนี้เกิดขึ้นเมื่อ

$$k_y - k_z = \frac{k}{Q_t} \tag{2.26}$$

และที่ความถี่ที่ต้องการ ที่ตรงกลางระหว่างความถี่ของโหมด TM_{010}^x และ TM_{001}^x สมการนี้จะนำมาใช้ได้ เมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขสมการ (2.26)

$$L = W\left(1+\frac{1}{Q_t}\right) \tag{2.27}$$

จาก 2.27 ความถี่ f_1 และ f_2 ของช่วงกว้างแถบความถี่ มีความสัมพันธ์กับความยาวของ L และ W ของไมโครสตริปสี่เหลี่ยมคือ

$$f_1 = \frac{f_0}{\sqrt{1+1/Q_t}} \tag{2.28}$$

$$f_2 = f_0\sqrt{1+1/Q_t} \tag{2.29}$$

ที่ f_0 คือ ความถี่กลาง

การป้อนองค์ประกอบบนแนวเส้นทแยงมุมเริ่มจากมุมล่างซ้ายไปจนถึงมุมบนขวา ดังแสดงในรูปที่ 2.9(ข) ทำให้เกิดเป็นโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้าย ส่วนการโพลาไรซ์วงกลมหมุนขวาสามารถทำให้เกิดได้จากการการป้อนบนแนวเส้นทแยงมุมจากมุมล่างขวาไปจนถึงมุมบนซ้าย ดังแสดงในรูปที่ 2.9(ค) แทนที่จะย้ายจุดการป้อนในแต่ละครั้ง เพื่อเปลี่ยนชนิดของการโพลาไรซ์วงกลม วาแร็คเตอร์ไดโอด สามารถใช้ในการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุและค่าไบอัส ที่มีการเลื่อนอย่างมีประสิทธิภาพ โดยทางไฟฟ้าส่งผลกับตำแหน่งทางกายภาพของการป้อนอย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของการป้อนนี้ ทำให้เกิดการโพลาไรซ์วงกลมดังแสดงในการทดลอง เพื่อแสดงขอบเขตที่กว้างที่สุดของมุม อย่างไรก็ตามแบนด์วิดธ์ทั้งหมดของการโพลาไรซ์แบบวงกลมต้องคงไว้ แม้ว่าบริเวณด้านข้างจะแคบมาก สมการในการคำนวณเปอร์เซ็นต์ของช่วงกว้างแถบความถี่หาได้ดังสมการ

$$BW(\%) = 12\frac{AR}{Q_t} \tag{2.30}$$

ที่อัตราส่วนแกน มีหน่วยเป็น dB สมการที่ (2.27) และ (2.30) จะได้ค่า Q ที่ดีที่สุด คือน้อยกว่า 10 แต่การออกแบบที่ดีขึ้น จะทำให้ได้ค่า Q ที่มากกว่า 10

การโพลาไรซ์วงกลมสามารถทำให้เกิดได้จากการป้อนนอกเหนือจากการป้อนบนเส้นทแยงมุม จะทำให้สำเร็จได้โดย ถ้าขนาดของแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมเป็นดังสมการดังต่อไปนี้

$$L = W\left(1+\frac{A+\frac{1}{A}}{2Q_t}\right) \tag{2.31}$$

เมื่อ

$$A = \frac{\cos\left(\pi\frac{y'}{L}\right)}{\cos\left(\pi\frac{z'}{W}\right)} \tag{2.32}$$

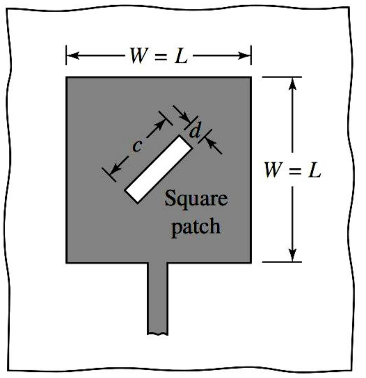
ในทางปฏิบัติการทำให้เกิดการโพลาไรซ์วงกลมสำหรับแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสสามารถทำได้โดยการเจาะเป็นช่องเล็ก ๆ ดังแสดงในรูป 2.10(ก) และ 2.10(ข) ดังสมการต่อไปนี้

$$c = \frac{L}{2.72} = \frac{W}{2.72} \tag{2.33}$$

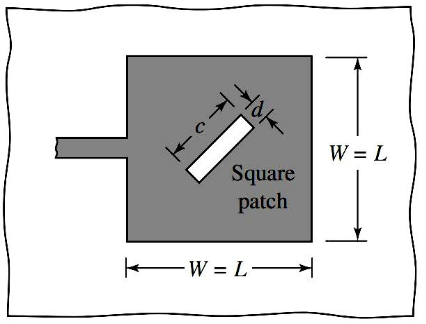
$$d = \frac{c}{10} = \frac{L}{27.2} = \frac{W}{27.2} \tag{2.34}$$

ในอีกทางหนึ่งทำได้โดยการตัดมุมตรงกันข้ามของแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสและป้อนสัญญาณที่จุด 1 หรือ 3 ดังแสดงในรูป 2.11(ก) สำหรับโพลาไรซ์วงกลมสามารถทำให้เกิดได้โดยแผ่นระนาบวงกลมโดยทำให้เป็นวงรีหรือเพิ่มแถบเข้าไปดังแสดงในรูป 2.11(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

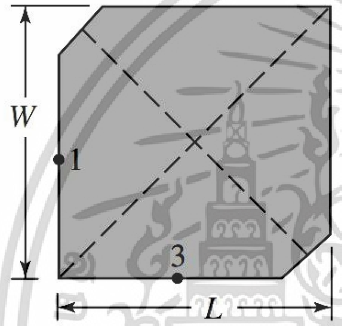


(ก) การโพลาไรซ์วงกลมหมุนขวา

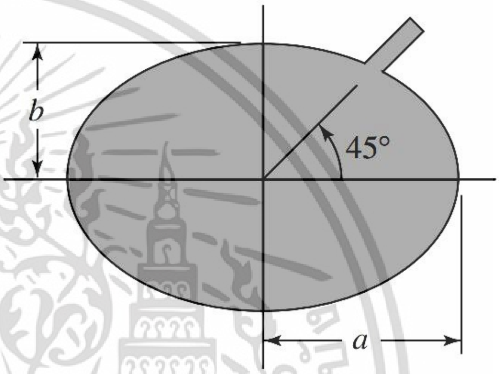


(ข) การโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้าย

รูปที่ 2.10 การโพลาไรซ์วงกลมสำหรับแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการเจาะช่องบนแผ่นระนาบ [4]



(ก) ตัดมุมตรงข้ามของแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส



(ข) แผ่นระนาบรูปวงรีที่มีการเพิ่มแถบเข้าไป

รูปที่ 2.11 การโพลาไรซ์วงกลมโดยการตัดมุมตรงข้ามของแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส และแผ่นระนาบรูปวงรีที่มีการเพิ่มแถบเข้าไป [6]

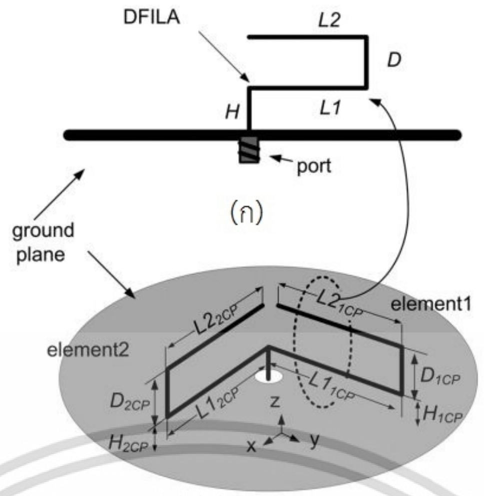
2.8 ความหลากหลายของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Pattern diversity)

ประกอบไปด้วยหนึ่งหรือมากกว่าสายอากาศชนิดเดียวกัน โดยที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ต่างกัน รูปแบบความแตกต่างประเภทนี้ทำให้การใช้งานของคำสั่งสายอากาศ ซึ่งโดยปกติจะแบ่งจากทางกายภาพของระยะห่าง

2.9 ผลงานวิจัยที่มีมาก่อน

งานวิจัยแรกเป็นสายอากาศโพลาไรซ์วงกลมแบบกลับด้านตัว L ที่มีการพับแขนสองชั้น [7] ซึ่งเป็นผลงานของ Xi Yang และคณะ ที่ได้สร้างขึ้นในปี ค.ศ. 2010 โดยสายอากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 โดยที่โครงสร้างของสายอากาศที่ Xi Yang และคณะ ได้นำเสนอมีลักษณะของส่วนแพร่กระจายคลื่นเป็นอลูมิเนียมที่ถูกพับให้มีลักษณะเป็นรูปตัว L กลับด้านและมีสองชั้น และส่วนของกราวนด์ซึ่งเป็นเป็นแผ่นอลูมิเนียมรูปวงกลมวางด้านล่างของสายอากาสดังแสดงในรูปที่ 2.12(ข) โดยสายอากาศที่นำเสนอนี้จะมีความถี่กลางที่ 2.4 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



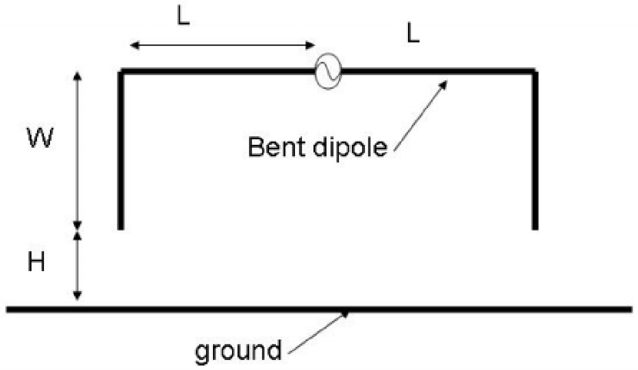
(ข)

รูปที่ 2.12 สายอากาศที่นำเสนอ (ก) แสดงส่วนประกอบการกลับด้านตัว L ที่มีการพับแขนสองชั้น (ข) สายอากาศโพลาไรซ์วงกลม [7]

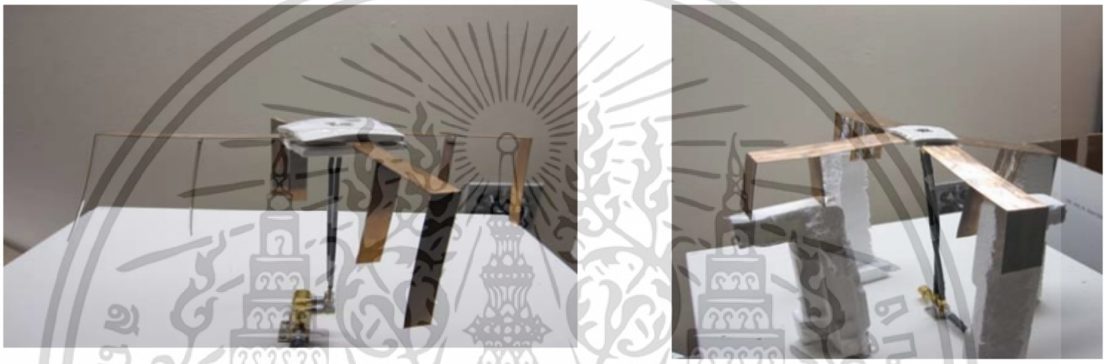
ซึ่งผลจากการทดสอบสายอากาศแสดงให้เห็นว่าสายอากาศมี $|S_{11}|$ ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.3 GHz จนถึงที่มากกว่า 2.4 GHz เล็กน้อย และที่ 2.4 GHz $|S_{11}|$ จะมีค่าเป็น -15 dB และมีอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.38 - 2.45 GHz ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการจำลอง คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพลาไรซ์วงกลมที่นำเสนอในระนาบ xz และ yz ที่ความถี่ 2.4 GHz ตามลำดับ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าความกว้างลำคลื่นของอัตราขยายที่ 3 dB จะอยู่ที่ประมาณ 76 องศา และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังที่ได้ประมาณ 15 dB

สายอากาศโพลาไรซ์วงกลมช่วงความถี่กว้างสำหรับการสื่อสารดาวเทียมย่านความถี่ UHF [8] ซึ่งเป็นผลงานของ Ibrahim Tekin และคณะ ที่ได้สร้างขึ้นในปี ค.ศ. 2011 โดยสายอากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.13 และรูปที่ 2.14 โดยที่โครงสร้างของสายอากาศที่ Ibrahim Tekin และคณะ ได้นำเสนอมีโครงสร้างพื้นฐานมากจากส่วนประกอบของไดโพลแบบงอบนระนาบกราวนด์ (ชนิดของสายอากาศ Moxon) โครงสร้างใช้แผ่นทองแดงที่ประกอบด้วยส่วนของแขนในแนวตั้งสองแขนตั้งอยู่บนระนาบกราวนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 สายอากาศไดโพลแบบงอบนระนาบกราวนด์



(ก) โครงสร้างต้นแบบที่มีส่วนประกอบแนวตั้งคู่แบบแคบ (ข) โครงสร้างต้นแบบที่มีส่วนประกอบแนวตั้งคู่ที่กว้างขึ้น

รูปที่ 2.14 สายอากาศ Cross-Moxon (สายอากาศไดโพลแบบงอ) [8]

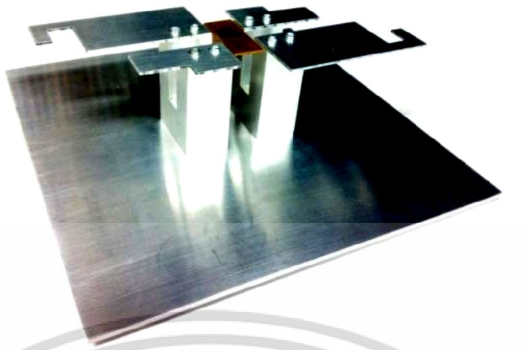
ในการจำลองสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นทาง Ibrahim Tekin และคณะ ใช้ซอฟต์แวร์ HFSS (สำหรับสายอากาศ) และ ADS (สำหรับการแมตชิ่งวงจร) และในรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นผลจากการทดลองซึ่งแสดงให้เห็นว่า $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB มีความถี่กลางที่ 300 MHz

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสำหรับโพลาไรซ์หมุนซ้ายและหมุนขวาที่ได้ มีลักษณะเป็นหูกระต่าย ในส่วนของการโพลาไรซ์วงกลมหมุนขวาจะไม่เกิน 60 องศา สายอากาศมีอัตราขยายที่ครอบคลุมช่วยความถี่ 300-400 MHz เป็น 7.4 dB และ 9.5 dB ตามลำดับ

สายอากาศโพลาไรซ์วงกลมช่วงความถี่กว้างป้อนจุดเดียว [9] ซึ่งเป็นผลงานของ Mingjian LI และ Kwai-Man ที่ได้สร้างขึ้นในปี ค.ศ. 2013 สายอากาศสร้างขึ้นบนพื้นฐานของไดโพลสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กพาดผ่านกัน โครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.15 สายอากาศถูกสร้างด้วยแผ่นอะลูมิเนียมและเชื่อมตรงกลางด้วยแผ่นทองแดง ป้อนด้วยคอนเนกเตอร์ชนิด SMA โดยผลจากการทดสอบสายอากาศนี้ มีความกว้างอัตราส่วนแกนเป็น 47.7% ความกว้างอิมพีแดนซ์เป็น 73.3% และ 46.6% ที่ SWR 2 และ 1.5 ตามลำดับ สายอากาศนี้มีอัตราส่วนแกนที่ครอบคุม 3 dB เกือบทั้งหมดของช่วงความถี่ที่ใช้งานโดยครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.69 GHz - 2.75 GHz แบบรูปการ

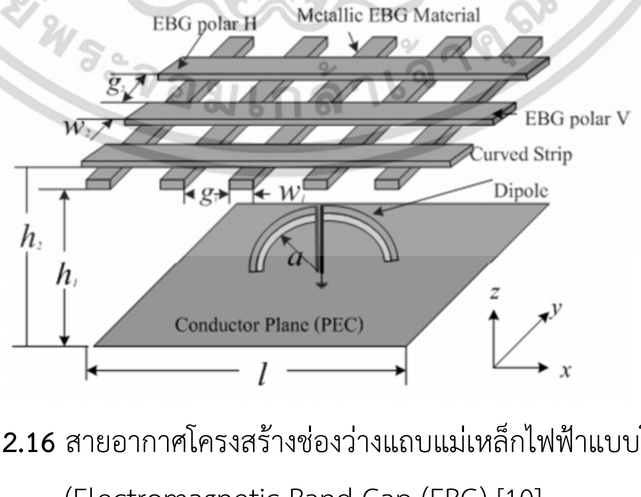
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวซึ่งมีผลจากการจำลองและการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 2.15 สายอากาศต้นแบบของ Mingjian LI และ Kwai-Man[9]

สายอากาศตัวสะท้อนโพลาไรซ์วงกลมโดยใช้โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าแบบโลหะ (Electromagnetic Band Gap (EBG) [10] ซึ่งเป็นผลงานของ N. Fhafhiem และคณะ ที่ได้สร้างขึ้นในปี ค.ศ. 2012 โครงสร้างของสายอากาศวางอยู่บนแผ่นระนาบกราวนด์ โดยมีแผ่นโลหะ EBG ขนาด 591x13.3x10 mm^3 วางตัวแบบพาดกันในแนวแกน y โดยมีช่องว่างระหว่างกันเป็น 29.8 mm และขนาด 8.4x591x10 mm^3 วางตัวแบบพาดกันในแนวแกน x โดยมีช่องว่างระหว่างกันเป็น 34.6 mm ดังแสดงในรูป 2.16 สายอากาศของ N. Fhafhiem นี้ สามารถทำงานได้ครอบคลุมช่วงความถี่ 2.43 - 2.61 GHz โดยมีอัตราขยายเท่ากับ 19.04 dB ที่ความถี่ 2.45 GHz โดยมีอัตราส่วนแกนต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.43 - 2.61 GHz แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว โดยมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังประมาณ 18.0 และ 18.5 องศา ในระนาบสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ตามลำดับ



รูปที่ 2.16 สายอากาศโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าแบบโลหะ (Electromagnetic Band Gap (EBG) [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สรุปคุณสมบัติของสายอากาศผลงานวิจัยที่มีมาก่อน

งานวิจัยที่มีมาก่อน	ขนาดของสายอากาศ	ช่วงความถี่ใช้งาน	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น
สายอากาศโพลาไรซ์วงกลมแบบกลับด้านตัว L ที่มีการพับแขนสองชั้น	สายอากาศยาว 34.5 mm. และสูงจากกราวนด์ 18 mm	2.38 GHz ถึง 2.45 GHz	ทิศทางเดียว
สายอากาศไดโพลแบบงอบนระนาบกราวนด์	ไดโพลกว้าง 1.25 cm สูง 18 cm และยาว 24 cm	225 MHz ถึง 400 MHz	ทิศทางเดียว
สายอากาศโพลาไรซ์วงกลมช่วงความถี่กว้างที่มีจุดป้อนจุดเดียว	ตัวสายอากาศมีขนาด 160mm x 160mm x40mm	1.69 GHz ถึง 2.75 GHz	ทิศทางเดียว
สายอากาศโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าแบบโลหะ (Electromagnetic Band Gap (EBG)	โลหะ EBG 591mm x 13.3mm x 10mm วางตัวแบบพาดกันในแนวแกน y และขนาด 8.4x591x10 mm^3 วางตัวแบบพาดกันในแนวแกน x	2.43 GHz ถึง 2.61 GHz	ทิศทางเดียว

2.10 สรุป

ในบทนี้ได้เสนอทฤษฎีและหลักการของเครือข่ายไร้สาย โดยจากประวัติความเป็นมาและประเภทของการสื่อสารไร้สาย โดยเฉพาะในส่วนของ WLAN ซึ่งเป็นเครือข่ายเฉพาะบริเวณการทำงานและองค์ประกอบของ WLAN รวมถึงมาตรฐานความถี่ของ WLAN นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานในการออกแบบสายอากาศโพลาไรซ์วงกลมที่ใช้กัน รวมถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์คุณลักษณะและประสิทธิภาพของสายอากาศ เช่น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ลำคลื่นของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างลำคลื่น อัตราขยาย การโพลาไรซ์ โดยเฉพาะในส่วนของการโพลาไรซ์วงกลม เป็นต้น

สืบเนื่องมาจากการออกแบบสายอากาศแบบแผ่นพับแบบใช้อลูมิเนียมหรือแผ่นทองแดง ที่มีการนำเสนอมาก่อน โดยมากจะมีโครงสร้างค่อนข้างซับซ้อนและมีองค์ประกอบหลายส่วน ดังนั้นสายอากาศที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้มีการออกแบบรูปลักษณ์ของสายอากาศที่ง่าย เพื่อลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ได้จากการทดสอบ และมีความแข็งแรง เพื่อง่ายสำหรับการนำไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประยุกต์ติดตั้งในอุปกรณ์อื่นๆ โดยสายอากาศจะออกแบบบนแผ่นทองแดงที่มีราคาไม่สูงมากและสามารถที่จะหาซื้อได้ง่าย ดังที่จะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบและการจำลองสายอากาศ

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการออกแบบสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอนี้จะมีการโพลาไรซ์แบบวงกลม เพื่อให้สามารถนำไปใช้กับตัวรับที่มีลักษณะการวางตัวหลากหลายรูปแบบได้ โดยใช้ทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 และนำมาออกแบบด้วยโปรแกรมการจำลอง เพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะและผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยจะมุ่งเน้นพิจารณาคุณสมบัติของสายอากาศ ซึ่งจะประกอบด้วย $|S_{11}|$ อัตราส่วนแกน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยาย เพื่อที่จะศึกษาถึงผลกระทบต่อสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบ แล้วทำการปรับค่าพารามิเตอร์ เพื่อปรับปรุงค่าคุณลักษณะของสายอากาศให้ดีขึ้นสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคโนโลยี WLAN ให้ได้ตามมาตรฐานที่ได้กำหนดเอาไว้ โดยการจำลองสายอากาศและปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศด้วยการจำลองด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® [9] โดยในการออกแบบสายอากาศที่นำเสนอนี้จะประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคโนโลยี WLAN โดยต้องการให้มีการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวเพื่อการนำไปประยุกต์ใช้แบบจุดต่อจุด (เช่น อาคารหนึ่งไปยังอาคารหนึ่ง) เพื่อต้องการอัตราขยายที่สูง โดยรายละเอียดต่าง ๆ ของสายอากาศจะนำเสนอดังหัวข้อต่อไปนี้

3.2 โครงสร้างและการออกแบบสายอากาศ

การออกแบบโครงสร้างของสายอากาศเบื้องต้นจะใช้ทฤษฎีของสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์เป็นวงกลมเป็นเงื่อนไขตั้งต้น สำหรับใช้ในการออกแบบและการคำนวณหาโครงสร้างทั้งหมดของสายอากาศ ซึ่งโดยการออกแบบโครงสร้างสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยในที่นี้สายอากาศต้นแบบจะถูกสร้างด้วยแผ่นทองแดง โดยการออกแบบสายอากาศในแต่ละโครงสร้างนั้น จะใช้โปรแกรมในการจำลอง และศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ โดยจะพิจารณา $|S_{11}| \leq -10$ dB และมีอัตราส่วนแกนต่ำกว่า 3 dB จึงจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ โดยการจำลองศึกษาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ได้ออกแบบนั้นจะใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO®

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว

สำหรับการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศตั้งต้นโดยออกแบบให้ความยาวทั้งหมดซึ่งจากโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอนี้ จะเป็นส่วนความยาวของระนาบกราวนด์ด้านล่าง ซึ่งจะคำนวณความยาวโดยประมาณจาก

$$\lambda = \frac{C}{f} = \left(\frac{3\times10^{8}}{2.45\times10^{6}} \right) = 122.45 \text{ mm} \quad (3.1)$$

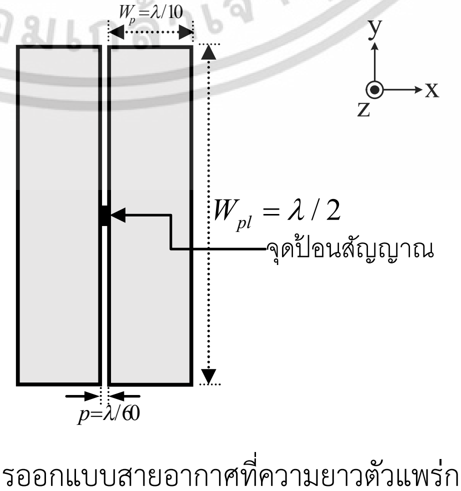
โดยที่

C คือ ความเร็วแสงในช่องว่างอิสระ ($C = 3\times10^{8}$ m/s)

λ คือ ค่าความยาวคลื่น

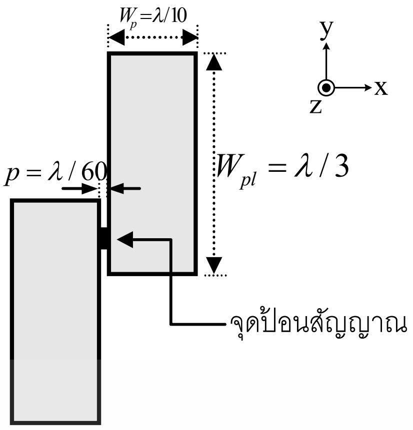
f คือ ความถี่ที่ใช้งาน (2.45 GHz)

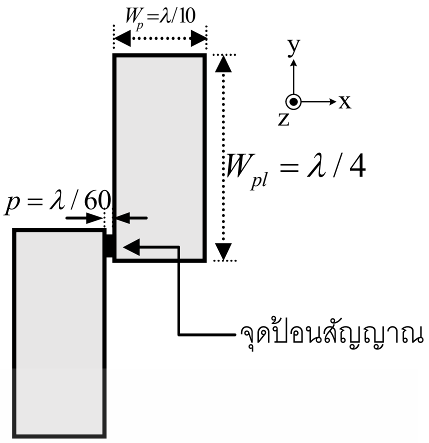
ดังนั้นทำให้ได้ความยาวของระนาบกราวนด์ตั้งต้นที่ประมาณ 122 มิลลิเมตร โดยในการออกแบบโดยการใช้ซอฟต์แวร์ CST MICROWAVE STUDIO® จะเลือกใช้วัสดุเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ (Perfect electric conductor : PEC) โดยในการจำลองจะเริ่มจากการออกแบบในส่วนของตัวแพร่กระจายคลื่นที่วางขนานกัน โดยจะเริ่มที่ความยาวประมาณ $\lambda/2$ ซึ่งจะเริ่มที่ 61 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ก) สังเกตความเปลี่ยนแปลงของ $|S_{11}|$ และผลของอิมพีแดนซ์ในสมิตชาร์ต (Smith chart) เพื่อตรวจสอบว่าโครงสร้างนี้มีแนวโน้มที่จะสามารถใช้งานในความถี่ที่ต้องการได้ จากนั้นจึงทำการปรับลดขนาดลงมาเป็น $\lambda/3$ และ $\lambda/4$ ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ข) และ (ค) ตามลำดับ เพื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลงของ $|S_{11}|$ และผลของอิมพีแดนซ์ เพื่อตรวจสอบว่าโครงสร้างนี้ มีแนวโน้มที่จะสามารถใช้งานได้ในความถี่ที่ต้องการ โดยผลของ $|S_{11}|$ ที่ได้แสดงตามรูปที่ 3.2(ก) และผลของอิมพีแดนซ์ในสมิตชาร์ต แสดงตามรูปที่ 3.2(ข)



(ก) โครงสร้างตั้งต้นสำหรับการออกแบบสายอากาศที่ความยาวตัวแพร่กระจาย $\lambda/2$

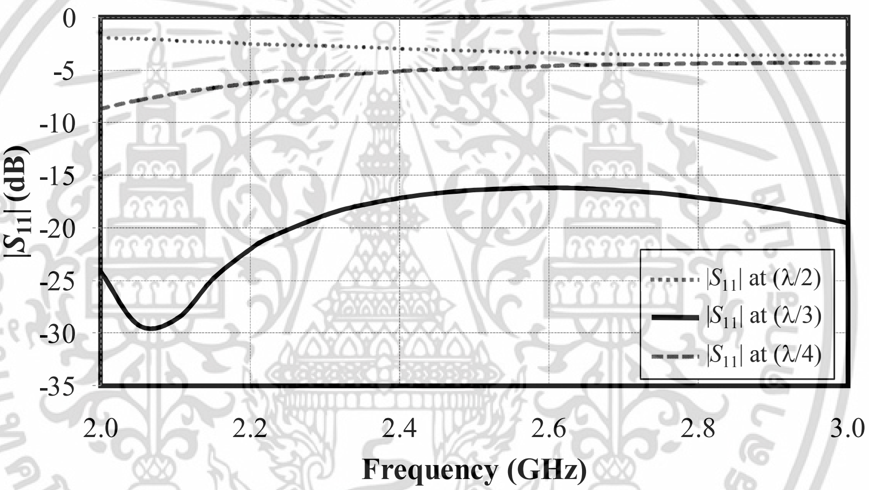
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



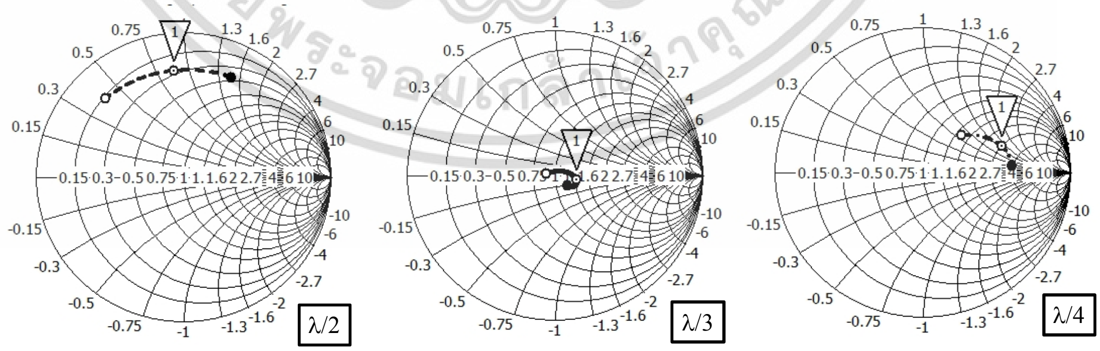


(ข) โครงสร้างตั้งต้นที่ความยาวแขน $\lambda/3$ (ค) โครงสร้างตั้งต้นที่ความยาวแขน $\lambda/4$

รูปที่ 3.1 โครงสร้างตั้งต้นสำหรับการออกแบบสายอากาศ

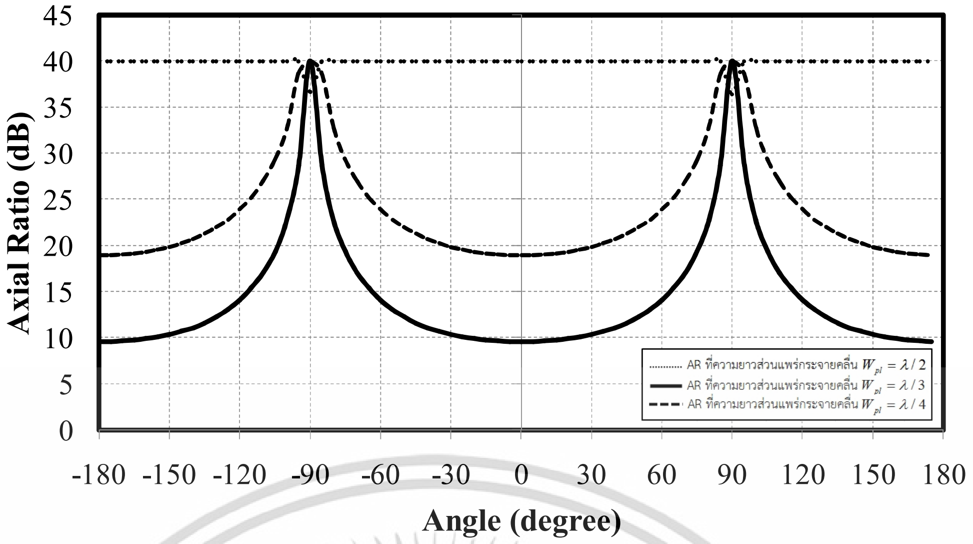


(ก) ผลการจำลอง $|S_{11}|$ จากโครงสร้างของส่วนตัวแพร่กระจายคลื่นที่วางขนานกันใน 3 ขนาด



(ข) ผลการจำลองอิมพีแดนซ์จากโครงสร้างของตัวแพร่กระจายคลื่นที่วางขนานกัน 3 ขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



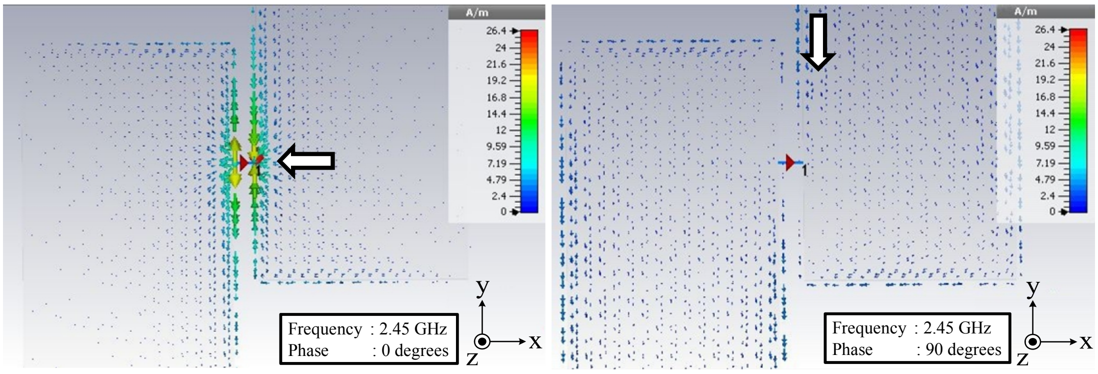
(ค) ผลการจำลองอัตราส่วนแกนของการปรับตัวแพร่กระจายคลื่น 3 ขนาด

รูปที่ 3.2 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ อิมพีแดนซ์และอัตราส่วนแกนของส่วนตัวแพร่กระจายคลื่นที่วางขนานกันทั้ง 3 ขนาด

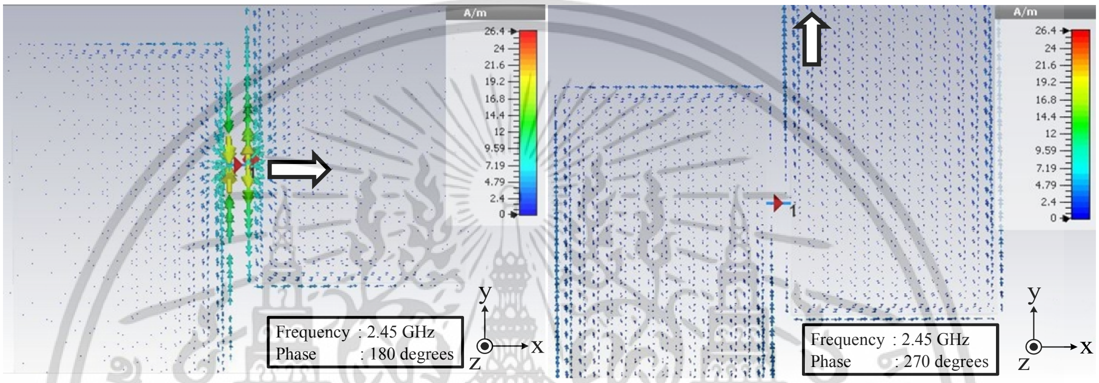
จากผลการจำลองในรูปที่ 3.2(ก) 3.2(ข) และ 3.2(ค) จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของแผ่นตัวกระจายคลื่นที่วางขนานกันเมื่อลองปรับลดขนาดความยาวในส่วนปลายของแต่ละด้าน โดยเริ่มตั้งแต่ $\lambda / 2$ จนถึงที่ $\lambda / 4$ จะสังเกตเห็นว่าผลของ $|S_{11}|$ ของโครงสร้างในส่วนของตัวแพร่กระจายคลื่นที่วางในระนาบขนานนี้มีแนวโน้มที่จะสามารถใช้งานในความถี่ที่ต้องการได้ โดยที่ความยาวที่น่าจะมีแนวโน้มใช้งานในความช่วงความถี่ที่ต้องการได้มากที่สุดจะเป็นที่ความยาว $\lambda / 3$ และถ้าพิจารณาการปรับอิมพีแดนซ์ที่แสดงในสมิตชาร์ต ดังแสดงในรูปที่ 3.2(ข) จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มที่อิมพีแดนซ์จะสามารถปรับค่าจนเข้าใกล้ที่ 50 โอห์มได้ โดยที่เข้าใกล้ที่สุดจะอยู่ที่ความยาวประมาณ $\lambda / 3$ โดยที่อิมพีแดนซ์จะอยู่ที่ประมาณ 66 โอห์มซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของผลอัตราส่วนแกน ดังแสดงในรูปที่ 3.2(ค) ซึ่งที่ $\lambda / 3$ ผลอัตราส่วนแกนที่ 0 องศา มีแนวโน้มที่ลดลงเช่นกัน

จากรูปที่ 3.3 แสดงกระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ขนาด $\lambda / 3$ ที่เฟสต่างกัน พบว่ากระแสบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นที่ 0 องศา มีทิศทางการไหลของกระแสที่ผิวในทิศทางแกน -x ในขณะที่ 180 องศา กระแสที่ผิวไหลในทิศทาง +x และกระแสบริเวณผิวที่ 90 และ 270 องศา จะมีทิศทางการไหลของกระแสพุ่งลงและพุ่งขึ้นตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



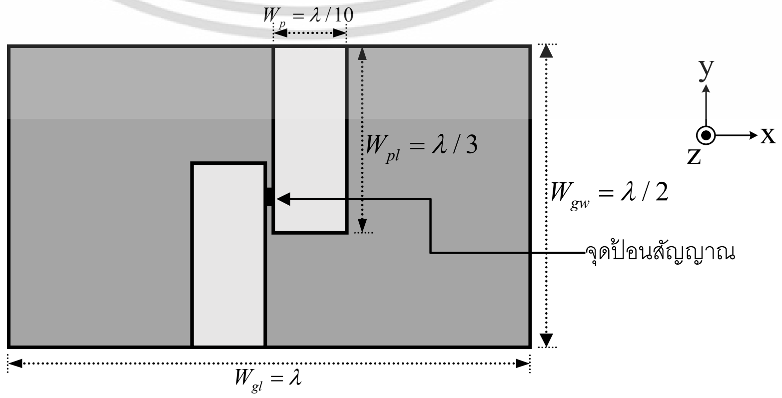
(ก) 0 องศา (ข) 90 องศา



(ค) 180 องศา (ง) 270 องศา

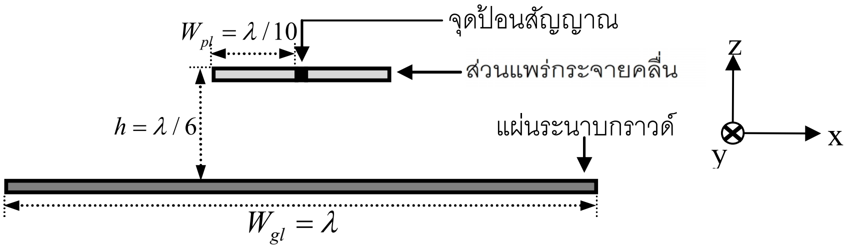
รูปที่ 3.3 ทิศทางของกระแสบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ขนาด $\lambda/3$

จากผลการทดสอบทำให้เห็นว่าโครงสร้างของตัวแพร่กระจายที่วางในระนาบเดียวกันและขนานกันมีแนวโน้มที่จะสามารถใช้งานในย่านความถี่ที่ต้องการ แต่ในโครงสร้างที่มีเฉพาะตัวแพร่กระจายคลื่นนี้ แบบรูปที่ได้จะไม่ได้เป็นแบบทิศทางเดียว (Unidirectional) แน่นอน ซึ่งในขั้นตอนต่อไปจะทำการออกแบบในส่วนของแผ่นระนาบกราวนด์ด้านล่าง เพื่อที่จะทำให้เกิดโครงสร้างสายอากาศที่มีการแพร่กระจายแบบทิศทางเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยได้ลองใส่แผ่นระนาบกราวนด์ไว้ด้านล่างของสายแผ่นตัวแพร่กระจายที่ได้จากการจำลองข้างต้น



(ก) มุมมองด้านบน

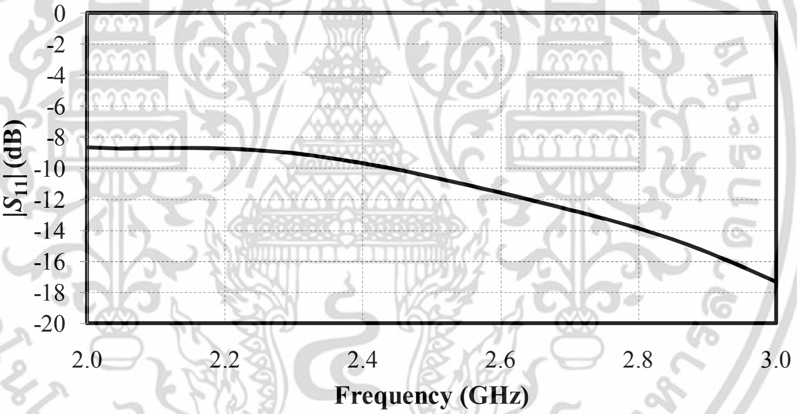
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



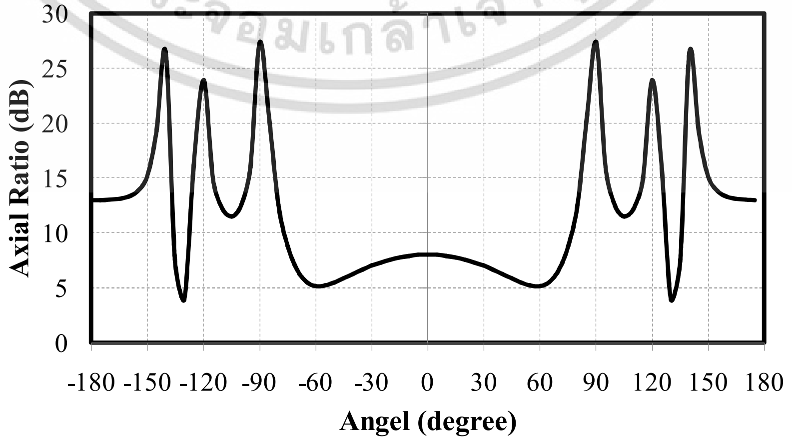
(ข) มุมมองด้านข้าง

รูปที่ 3.4 โครงสร้างเมื่อใส่แผ่นระนาบกราวนด์ด้านล่างแผ่นแพร่กระจายคลื่น

ผลของ $|S_{11}|$ ที่ได้จากการจำลองสายอากาศตั้งต้นเมื่อโครงสร้างของสายอากาศมีการเพิ่มโครงสร้างส่วนของแผ่นระนาบกราวนด์ลงไปไว้ที่ตำแหน่งบริเวณด้านล่างของตัวแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการจำลองข้างต้น ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.5(ก) จะเห็นได้ว่า $|S_{11}|$ มีแนวโน้มที่จะสามารถใช้งานได้ในความถี่ที่ต้องการ โดยอัตราส่วนแกนที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.5(ข) แสดงให้เห็นโครงสร้างของสายอากาศตั้งต้นนี้มีแนวโน้มที่จะสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการ



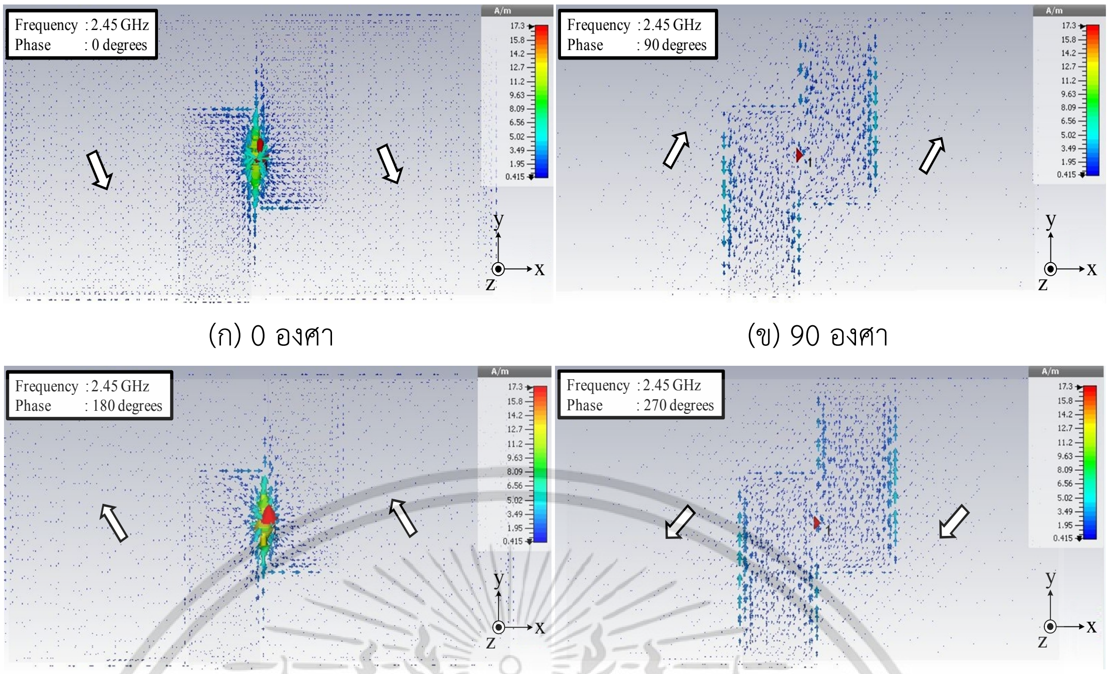
(ก) ผลการจำลอง $|S_{11}|$ เมื่อโครงสร้างสายอากาศตั้งต้นมีแผ่นระนาบกราวนด์



(ข) ผลการจำลองอัตราส่วนแกนเมื่อโครงสร้างสายอากาศตั้งต้นมีแผ่นระนาบกราวนด์

รูปที่ 3.5 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนเมื่อโครงสร้างสายอากาศมีแผ่นระนาบกราวนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

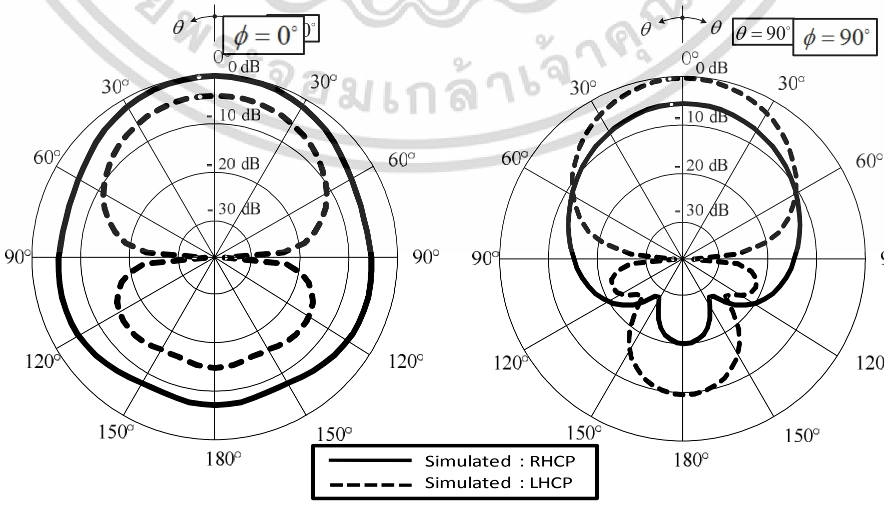


(ก) 0 องศา (ข) 90 องศา

(ค) 180 องศา (ง) 270 องศา

รูปที่ 3.6 ทิศทางของกระแสของสายอากาศเมื่อโครงสร้างมีแผ่นระนาบกราวนด์

ในส่วนของการไหลของกระแสดังแสดงในรูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่าที่ 0 องศา กระแสบริเวณแผ่นระนาบกราวนด์จะมีทิศทางการไหลลงเฉียงไปทางแกน +x ต่อมาที่ 90 องศา กระแสจะไหลกลับขึ้นในทิศทางเฉียงขึ้นไปทางแกน +x และที่ 180 องศา และ 270 องศา กระแสจะมีทิศทางการไหลขึ้นเฉียงไปทางแกน -x และจะไหลกลับลงในทิศทางเฉียงลงไปทางแกน -x ตามลำดับ ซึ่งผลจากการใส่ระนาบกราวนด์บริเวณด้านล่างของโครงสร้างสายอากาศจะทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้มีแนวโน้มที่การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตั้งต้นนี้จะเป็นแบบการแพร่กระจายทิศทางเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ทั้งในระนาบ xz และ yz

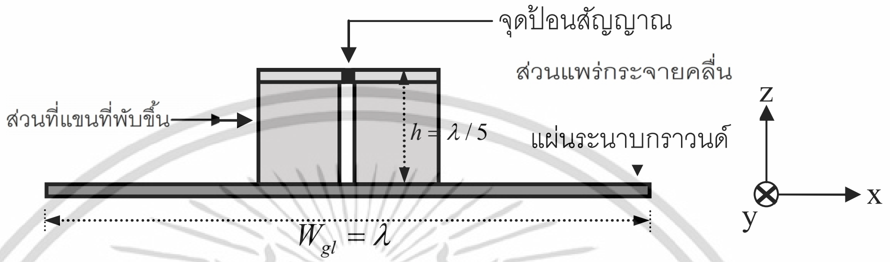


(ก) ระนาบ xz (ข) ระนาบ yz

รูปที่ 3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อโครงสร้างสายอากาศมีแผ่นระนาบกราวนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

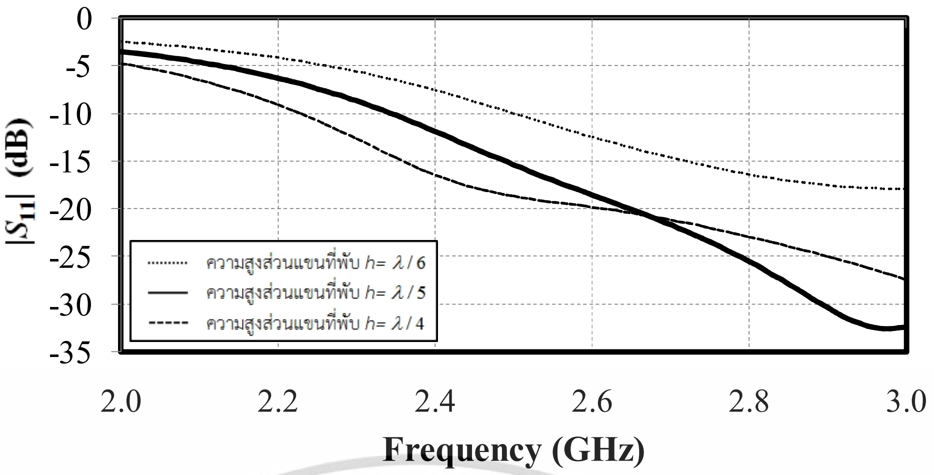
เมื่อโครงสร้างของสายอากาศตั้งต้นมีแนวโน้มที่จะสามารถใช้งานได้ในความถี่ที่ต้องการและมีแนวโน้มของการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวแล้ว ต่อไปต้องการที่จะให้สายอากาศเกิดการโพลาไรซ์วงกลม จึงต้องมีการเพิ่มในส่วนของโครงสร้างเพิ่มเติมโดยจะลองใส่ในส่วนของผนังที่เชื่อมต่อระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นด้านบนและแผ่นระนาบกราวนด์ด้านล่างเข้าติดกันดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งคือส่วนแขนที่ถูกพับขึ้น



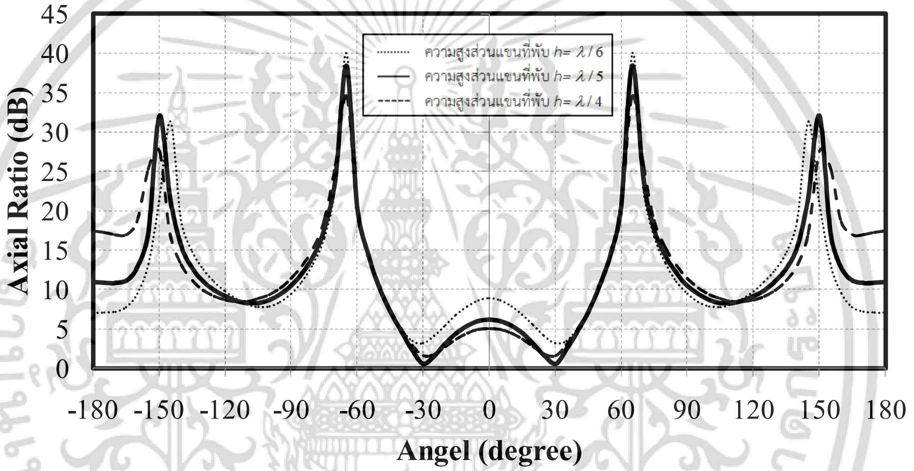
รูปที่ 3.8 โครงสร้างของสายอากาศเมื่อใส่ผนังเชื่อมต่อกันระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นกับแผ่นระนาบกราวนด์

โดยเริ่มต้นความสูงของผนังที่มีค่าเท่ากับ $\lambda / 4$ จากนั้นจึงทำการปรับเพิ่มลดเพื่อสังเกตดูความเปลี่ยนแปลงและแนวโน้มของ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนเพื่อให้ได้ช่วงความสูงของสายอากาศที่มีแนวโน้มที่จะใช้งานได้ในความถี่ที่ต้องการ โดยที่นี้จะปรับค่าความสูงโดยเริ่มที่ $\lambda / 4$ จากนั้นจึงค่อยปรับลดลงประมาณ 3 ค่าที่ $\lambda / 5$ และ $\lambda / 6$ ตามลำดับจากนั้นจึงสังเกตความเปลี่ยนแปลงและแนวโน้มความสูงที่จะใช้สำหรับสร้างสายอากาศที่ต้องการโดยผลจากการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนแสดงดังรูปที่ 3.9(ก) และ 3.9(ข) ตามลำดับ จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าช่วงความสูงที่สายอากาศนี้มีแนวโน้มที่จะใช้งานได้ในความถี่ที่ต้องการจะมีค่าระหว่าง $\lambda / 4$ กับ $\lambda / 5$ ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าที่ความสูงที่ต่ำที่สุดจากผลการจำลองคือที่ $\lambda / 6$ อีกทั้งผลการจำลองของ $|S_{11}|$ มีแนวโน้มที่สูงกว่า -10 dB และอัตราส่วนแกนมีแนวโน้มที่จะสูงกว่า 3 dB ในช่วงความถี่ที่ต้องการ ดังนั้นสายอากาศตั้งต้นนี้จึงจะเริ่มต้นความสูงของส่วนแขนที่พับขึ้น ซึ่งก็จะเป็นความสูงของสายอากาศนั่นเองให้เริ่มต้นเป็น $\lambda / 5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผลการจำลอง $|S_{11}|$ จากโครงสร้างที่มีส่วนพับของแขน 3 ขนาด



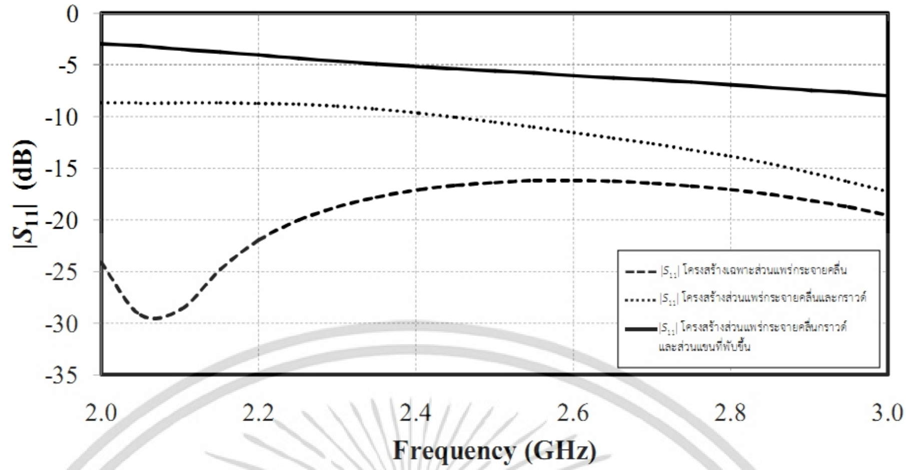
(ข) ผลการจำลองอัตราส่วนแกนจากโครงสร้างสายอากาศที่มีส่วนพับของแขน 3 ขนาด

รูปที่ 3.9 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนของโครงสร้างสายอากาศที่มีส่วนพับของแขน 3 ขนาด

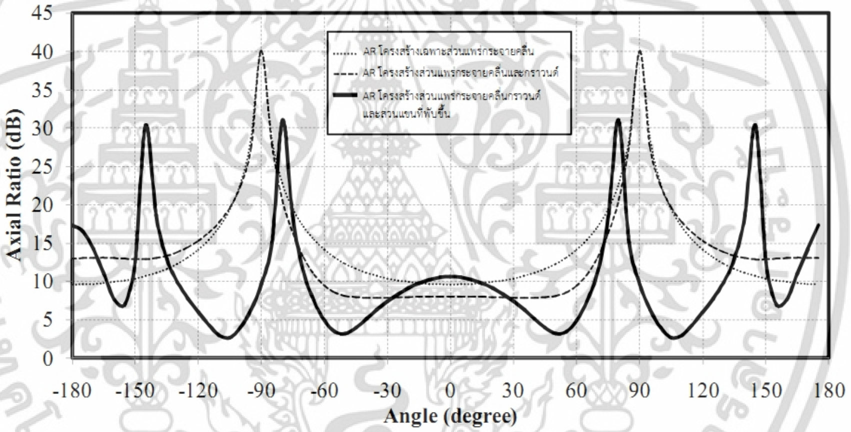
เมื่อได้ส่วนประกอบของสายอากาศที่ทำการออกแบบตั้งต้นครบแล้ว จะทำการวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยจะแสดงให้เห็นถึงผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของส่วนประกอบของสายอากาศตั้งต้นแบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.9(ก) แสดงผลของ $|S_{11}|$ โดยเปรียบเทียบกันให้เห็นผลของ $|S_{11}|$ ในโครงสร้างที่แตกต่างกันดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่าจากโครงสร้างตั้งต้นที่กล่าวมาผลการจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศมีแนวโน้มที่ต่ำกว่า -10 dB ในความถี่ที่ต้องการเช่นเดียวกันกับผลของอัตราส่วนแกนดังแสดงในรูปที่ 3.9(ข) เมื่อมีการปรับโครงสร้างผลของอัตราส่วนแกนมีแนวโน้มที่จะต่ำกว่า 3 dB ซึ่งจะทำให้สายอากาศสามารถใช้งานได้ในความถี่ที่ต้องการ และในรูปที่ 3.10 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ในรูปของสมิตชาร์ต ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอิมพีแดนซ์มีความเปลี่ยนแปลงและสามารถที่จะปรับให้มีค่าเข้าใกล้ที่ 50 โอห์ม เมื่อมีการเพิ่มโครงสร้างสายอากาศดังแสดงไว้ข้างต้น ซึ่งผลของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ดังกล่าวจะช่วยยืนยันว่าโครงสร้างของสายอากาศมีแนวโน้มที่จะสามารถใช้งานในความถี่ที่ต้องการได้

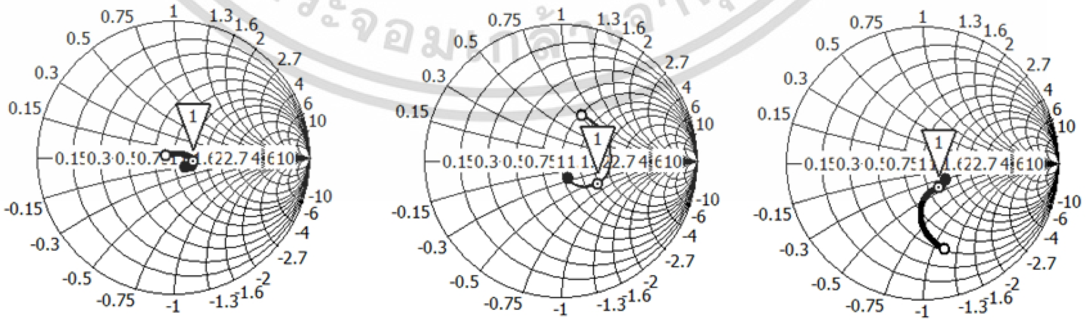


(ก) ผลการจำลอง $|S_{11}|$ จากโครงสร้างของสายอากาศ 3 แบบ



(ข) ผลอัตรส่วนแกนจากโครงสร้างของสายอากาศ 3 แบบ

รูปที่ 3.10 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนของโครงสร้างสายอากาศทั้ง 3 แบบ

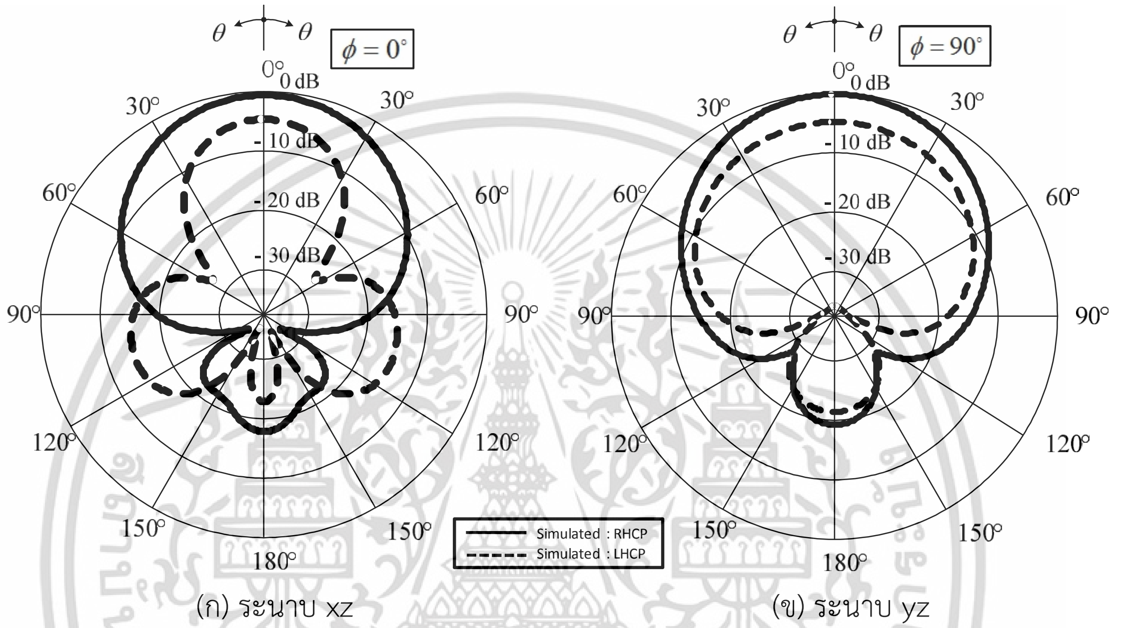


(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 3.11 ผลการจำลองอิมพีแดนซ์ของโครงสร้างสายอากาศทั้ง 3 แบบ (ก) อิมพีแดนซ์สายอากาศที่มีเฉพาะแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่น (ข) อิมพีแดนซ์สายอากาศที่มีแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นและแผ่นระนาบกราวนด์ (ค) อิมพีแดนซ์สายอากาศที่มีทั้ง 3 องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

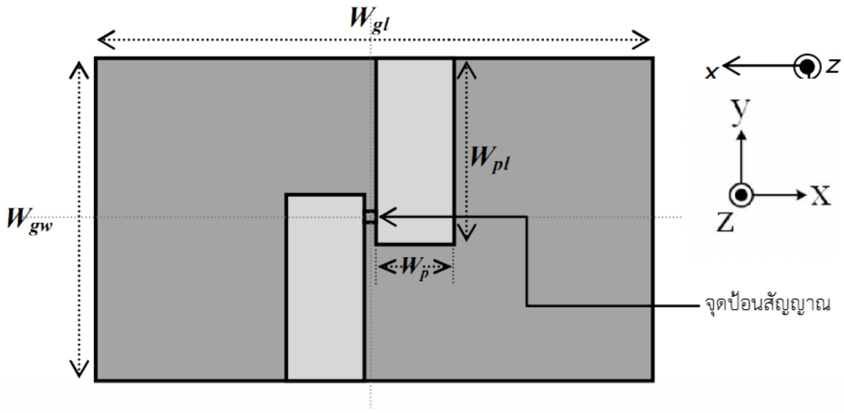
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการเพิ่มโครงสร้างของสายอากาศตั้งต้นในส่วนของแขนที่เป็นผนังในแกน z ดังแสดงในรูปที่ 3.8 แบบรูปที่ได้แสดงดังในรูปที่ 3.12 ทั้งในระนาบ xz และ yz จากผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแสดงให้เห็นว่าสายอากาศมีแนวโน้มที่จะสามารถเกิดการโพลาไรซ์วงกลม มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวได้และสามารถนำมาใช้งานในช่วงความถี่ที่ต้องการได้ เมื่อสายอากาศมีโครงสร้างที่ประกอบกันครบทั้งสามส่วนดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



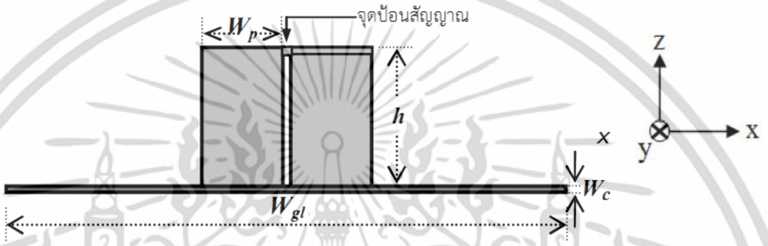
รูปที่ 3.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากโครงสร้างของสายอากาศที่มีโครงสร้างประกอบกัน 3 ส่วน

จากโครงสร้างตั้งต้นของสายอากาศที่ประกอบกันครบทั้ง 3 ส่วนดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นและผลจากการจำลองด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ แล้ว จะทำให้สามารถมีแนวทางในการกำหนดขนาดของสายอากาศต้นแบบได้ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์จะทำการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และขนาดทางกายภาพของสายอากาศตั้งต้นแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) มุมมองด้านบน



(ข) มุมมองด้านข้าง

รูปที่ 3.13 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศตั้งต้น

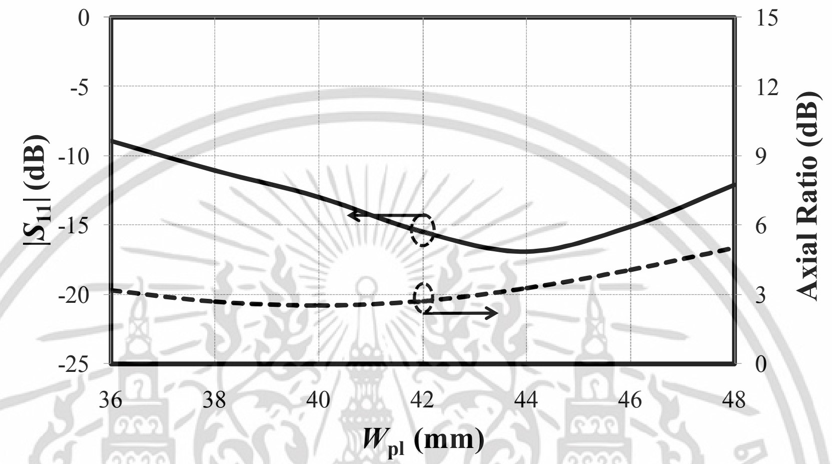
ตารางที่ 3.1 ขนาดทางกายภาพของสายอากาศตั้งต้น

พารามิเตอร์ของสายอากาศ	ขนาดทางกายภาพจากการจำลอง (mm)	ขนาดทางไฟฟ้า
ความกว้างระนาบกราวนด์ (*W_{gw}*)	60	$\lambda/2$
ความยาวระนาบกราวนด์ (*W_{gl}*)	91	$3\lambda/4$
ความกว้างของแผ่นที่พับ (*W_p*)	12	$\lambda/10$
ความยาวของแผ่นที่พับ (*W_{pl}*)	41	$\lambda/3$
ความหนาของแผ่นทองแดง (*W_c*)	1	-
ความสูงระหว่างระนาบกราวนด์กับแผ่นที่พับ (*h*)	20	$\lambda/6$

จากโครงสร้างของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบข้างต้น ทำให้ได้โครงสร้างของสายอากาศตั้งต้นดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งโครงสร้างจะเป็นแผ่นพับแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าและส่วนของแผ่นกระจายคลื่นซึ่งเป็นแขนสองข้างวางในลักษณะเยื้องกันแบบขนานและถูกพับเข้าหากัน โดยจุดป้อนสัญญาณหนึ่งจุดที่ตรงกลางระหว่างแขนทั้งสองที่ถูกวางขนานกัน ซึ่งจากลักษณะโครงสร้างของสายอากาศข้างต้นนี้ จะทำการหาค่าความยาวในส่วนต่าง ๆ ของสายอากาศที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไป ซึ่งพารามิเตอร์ตัวแรกที่จะเริ่มทำการวิเคราะห์ คือ ความยาวส่วนแขนที่ถูกพับของสายอากาศ (W_{pl}) โดยทำการปรับความยาวส่วนแขนให้มีขนาดต่าง ๆ ที่ความถี่กลาง 2.45 GHz โดยแต่ละขนาดที่ทำการปรับค่าจะต่างกัน 2 mm จึงจะสังเกตเห็นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลง โดยที่พารามิเตอร์ความกว้างตั้งต้นที่ทำการวิเคราะห์จะเริ่มที่ความกว้างเท่ากับ 36 mm จากนั้นจึงทำการเพิ่มความกว้างขึ้นจนถึงที่ 48 mm สำหรับการจำลองผลเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความความยาวส่วนแขนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.14

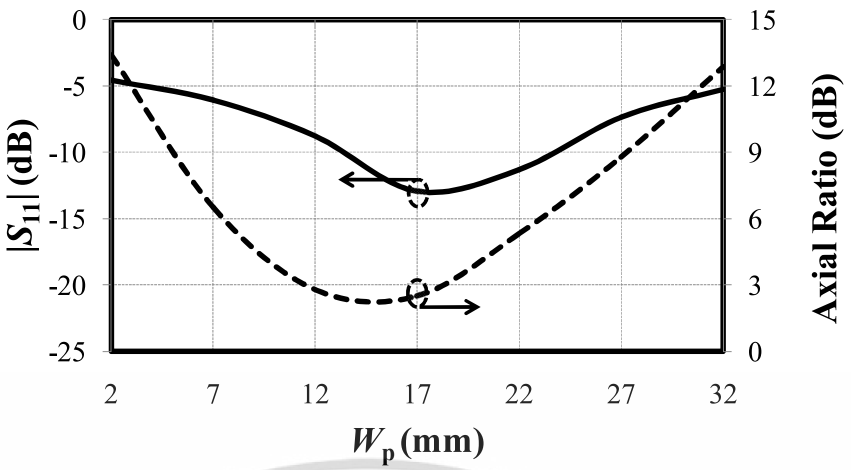


รูปที่ 3.14 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน เมื่อมีการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_{pl} ของสายอากาศแผ่นพับโพลาไรซ์วงกลม

จากรูปที่ 3.14 ได้ศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนแขน จะสังเกตได้ว่า เมื่อทำการปรับขนาดความความยาวส่วนแขนของสายอากาศ (W_{pl}) จะเห็นว่า เมื่อความยาวส่วนแขนมีความยาวมากขึ้น จะส่งผลให้ช่วงตกที่ค่าต่ำสุดของ $|S_{11}|$ มีแนวโน้มที่จะไม่อยู่ในช่วงความถี่ที่ใช้งาน และอัตราส่วนแกนก็มีแนวโน้มที่จะสูงกว่า 3 dB ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ดังนั้นจากการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนแขนของสายอากาศจะส่งผลกระทบต่อ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเป็นส่วนที่มีการแพร่กระจายของกระแสอย่างหนาแน่น โดยเฉพาะบริเวณใกล้กับจุดป้อนสัญญาณ ซึ่งหากสายอากาศมีขนาดความยาวของส่วนแขนสายอากาศเกินไปจากช่วงประมาณ 38 - 42 mm อาจทำให้สายอากาศมีแนวโน้มที่จะไม่สามารถใช้งานได้ในความถี่ที่เราต้องการ

จากนั้นได้ทำการศึกษาผลกระทบของส่วนแพร่กระจายคลื่นอีกหนึ่งตัวคือ พารามิเตอร์ความกว้างส่วนแขนที่ถูกพับของสายอากาศ (W_p) โดยทำการปรับให้มีขนาดต่าง ๆ โดยแต่ละขนาดที่ทำการปรับค่าจะต่างกัน 5 mm จึงจะสังเกตเห็นถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากเปลี่ยนแปลง โดยที่พารามิเตอร์ความกว้างส่วนแขนที่เริ่มสังเกตมีความยาวเท่ากับ 2 mm สำหรับการจำลองศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความกว้างส่วนแขนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

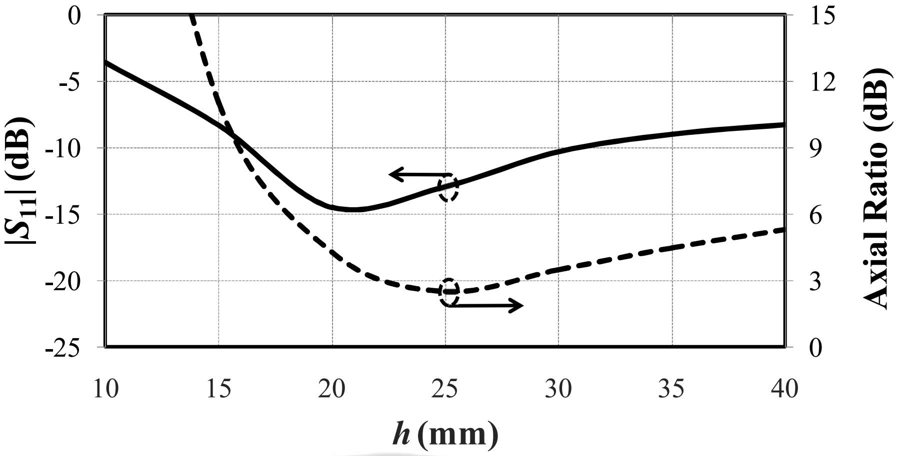


รูปที่ 3.15 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน เมื่อมีการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_p ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากรูปที่ 3.15 จะสังเกตได้ว่า เมื่อทำการปรับขนาดความกว้างส่วนแขนของสายอากาศ (W_p) จะเห็นว่าเมื่อความกว้างส่วนแขนมีความกว้างที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ช่วงตกที่ค่าต่ำสุดของ $|S_{11}|$ มีแนวโน้มที่จะไม่อยู่ในช่วงความถี่ที่ใช้งาน และอัตราส่วนแกนก็มีแนวโน้มที่จะสูงกว่า 3 dB ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ดังนั้นผลจากการเปลี่ยนแปลงความกว้างส่วนแขนของสายอากาศจะส่งผลกระทบต่อ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนอย่างเห็นได้ชัดเจนเช่นเดียวกับความยาวส่วนแขนดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งหากสายอากาศมีขนาดความกว้างส่วนแขนของสายอากาศเกินไปจากช่วงประมาณ 10 - 20 mm อาจทำให้สายอากาศมีแนวโน้มที่จะไม่สามารถใช้งานได้ในความถี่ที่เราต้องการ

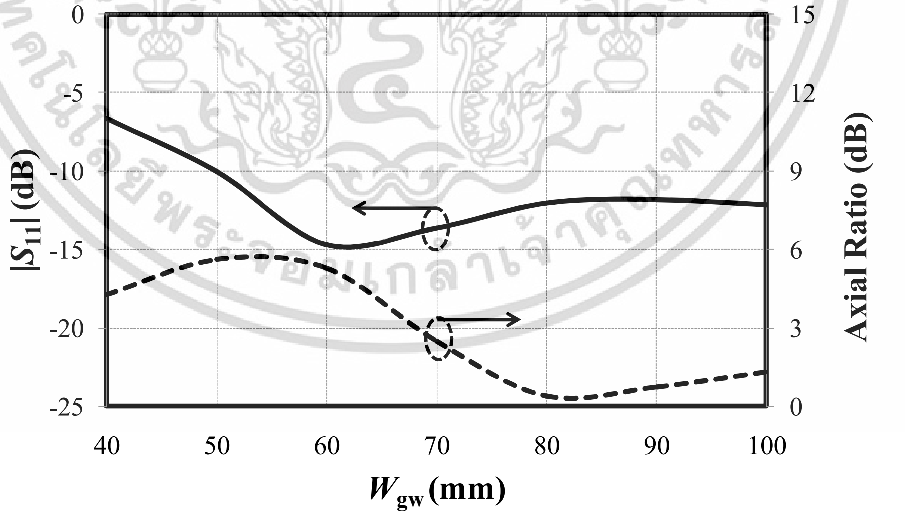
พารามิเตอร์ตัวต่อไปที่จะทำการสังเกตที่ความสูง (h) ของสายอากาศโดยความสูงจะวัดจากขอบล่างของแผ่นกราวนด์จนถึงขอบบนของแขน โดยทำการปรับให้มีขนาดต่าง ๆ โดยแต่ละขนาดที่ทำการปรับค่าจะต่างกัน 5 mm จึงจะสังเกตเห็นผลกระทบจากเปลี่ยนแปลง โดยที่พารามิเตอร์ความสูงที่เริ่มสังเกตมีความยาวเท่ากับ 15 mm สำหรับการจำลองศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความสูงของสายอากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.16 จะสังเกตได้ว่า เมื่อทำการปรับขนาดความสูงของสายอากาศ (h) พบว่าเมื่อสายอากาศมีความสูงเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ $|S_{11}|$ มีแนวโน้มที่สูงขึ้นจนกระทั่งไม่อยู่ในช่วงความถี่ที่ใช้งาน และอัตราส่วนแกนก็มีแนวโน้มที่จะสูงกว่า 3 dB ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ในขณะเดียวกันถ้าลดความสูงลง $|S_{11}|$ ที่ได้ก็จะมีแนวโน้มที่สูงกว่า -10 dB เช่นกันกับอัตราส่วนแกนที่จะสูงกว่า 3 dB เช่นกัน ดังนั้นการเลือกค่าความสูงในช่วงกลางที่ประมาณ 22 - 28 mm เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดจากผลการจำลองนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน เมื่อมีการปรับขนาดพารามิเตอร์ h ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากนั้นได้ทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ความกว้างของแผ่นระนาบกราวนด์ของสายอากาศ (W_{gw}) ดังแสดงในรูปที่ 3.17 จะสังเกตได้ว่า เมื่อทำการปรับขนาดความกว้างของแผ่นระนาบกราวนด์ของสายอากาศ (W_{gw}) ให้มีค่าที่แตกต่างกัน เมื่อปรับความกว้างของแผ่นระนาบกราวนด์ให้มีความกว้างลดลง $|S_{11}|$ มีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงกว่า -10 dB แต่เมื่อเพิ่มความกว้างของแผ่นระนาบกราวนด์ให้เพิ่มมากขึ้นแนวโน้มค่า $|S_{11}|$ จะต่ำลง แต่จะสังเกตเห็นว่าช่วงปลายของความกว้างที่สูงขึ้นจะมีแนวโน้มค่า $|S_{11}|$ ที่สูงขึ้นด้วย ขณะที่อัตราส่วนแกนมีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงกว่า 3 dB เช่นกัน ในช่วงแรกที่ความกว้างแคบลง และจะต่ำลงกว่า 3 dB เมื่อเพิ่มความกว้างมากขึ้น

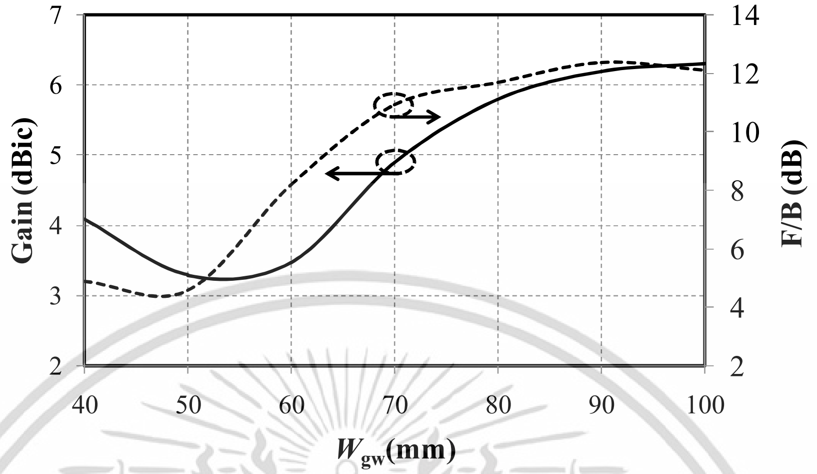


รูปที่ 3.17 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนเมื่อมีการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_{gw} ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากนั้นได้ศึกษาผลของอัตราขยายและอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (F/B) การเปลี่ยนแปลงความกว้างของแผ่นระนาบกราวนด์ (W_{gw}) ในรูปที่ 3.18 จะสังเกตได้ว่าเมื่อปรับความ

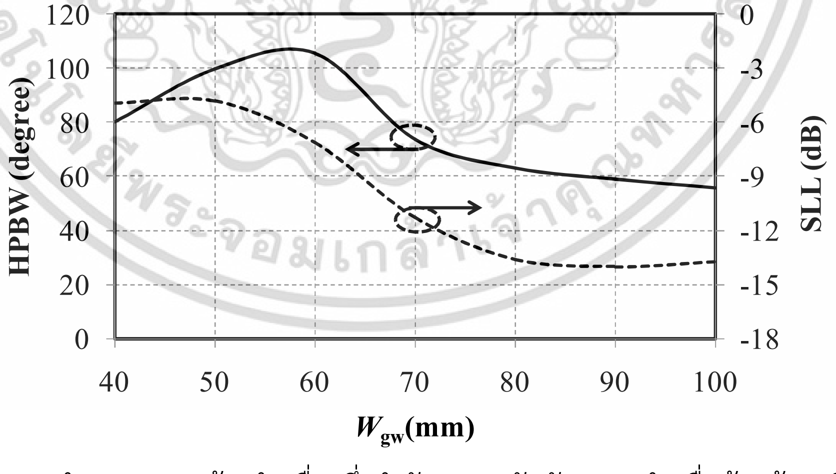
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว้างของแผ่นระนาบกราวนด์ให้มีความกว้างลดลงอัตราขยายและอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังมีแนวโน้มลดลง ขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มความกว้างของแผ่นระนาบกราวนด์ให้มีค่าเพิ่มมากขึ้นแนวโน้มอัตราขยายและอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังจะสูงขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 3.18 ผลการจำลองอัตราขยายและอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (F/B) เมื่อมีการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_{gw} ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากนั้นได้ศึกษาผลของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) และระดับสัญญาณลำคลื่นด้านข้าง (SLL) การเปลี่ยนแปลงความกว้างของแผ่นระนาบกราวนด์ (W_{gw}) ในรูปที่ 3.19 จะสังเกตได้ว่าเมื่อปรับความกว้างของแผ่นระนาบกราวนด์ให้มีความกว้างมากขึ้นความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังและระดับสัญญาณลำคลื่นด้านข้างมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน

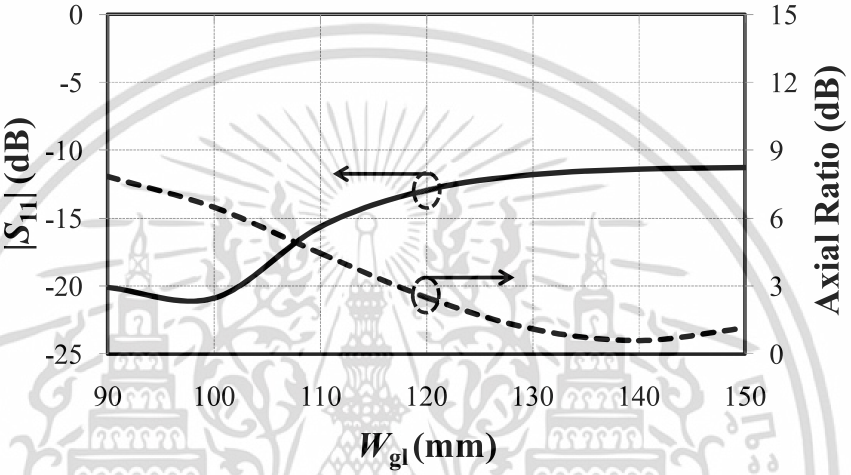


รูปที่ 3.19 ผลการจำลองความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังและระดับสัญญาณลำคลื่นด้านข้าง เมื่อมีการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_{gw} ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า

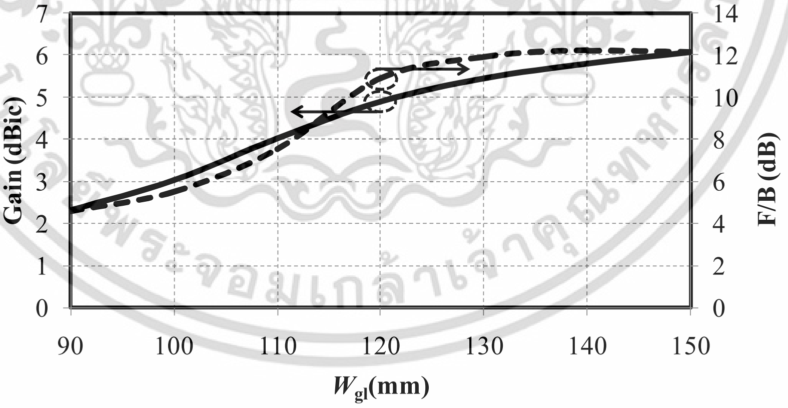
พารามิเตอร์ต่อไปที่จะวิเคราะห์ คือ ความยาวของแผ่นระนาบกราวนด์ จากรูปที่ 3.20 จะสังเกตได้ว่า เมื่อทำการปรับขนาดความยาวของระนาบกราวนด์ของสายอากาศ (W_{gl}) ให้มีค่าแตกต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัน จะเห็นว่าเมื่อความยาวของระนาบกราวนด์มีความยาวที่เพิ่มมากขึ้น แนวโน้มของค่า $|S_{11}|$ มีแนวโน้มสูงขึ้นและมีแนวโน้มว่าจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนระดับที่สูงกว่า -10 dB ซึ่งจะทำให้สูงกว่าเกณฑ์ที่สายอากาศจะทำงานในความถี่ที่ต้องการได้ ในขณะที่เมื่อ W_{gl} สูงขึ้นอัตราส่วนแกนก็มีแนวโน้มที่ต่ำลงและช่วงปลายก็มีแนวโน้มที่จะสูงกว่า 3 dB ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ดังนั้นจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของระนาบกราวนด์จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่า $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนซึ่งหาก W_{gl} มีความยาวของแผ่นระนาบกราวนด์เกินไปจากช่วง 110 - 150 mm อาจทำให้สายอากาศมีแนวโน้มที่จะไม่สามารถใช้งานได้ในความถี่ที่เราต้องการ



รูปที่ 3.20 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน เมื่อมีการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_{gl} ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า

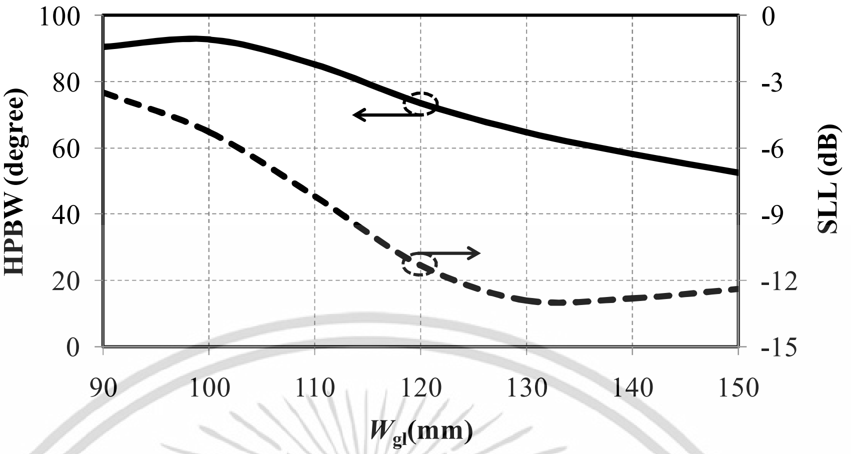


รูปที่ 3.21 ผลการจำลองอัตราขยายและอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (F/B) เมื่อมีการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_{gl} ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากนั้นได้ศึกษาผลของอัตราขยายและอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง การเปลี่ยนแปลงความยาวของแผ่นระนาบกราวนด์ (W_{gl}) ในรูปที่ 3.21 จะสังเกตได้ว่า เมื่อปรับความยาวของแผ่นระนาบกราวนด์ให้มีความยาวลดลงอัตราขยายและอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังมีแนวโน้มที่ลดลงและไปในทิศทางเดียวกัน และขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มความยาวของแผ่นระนาบ

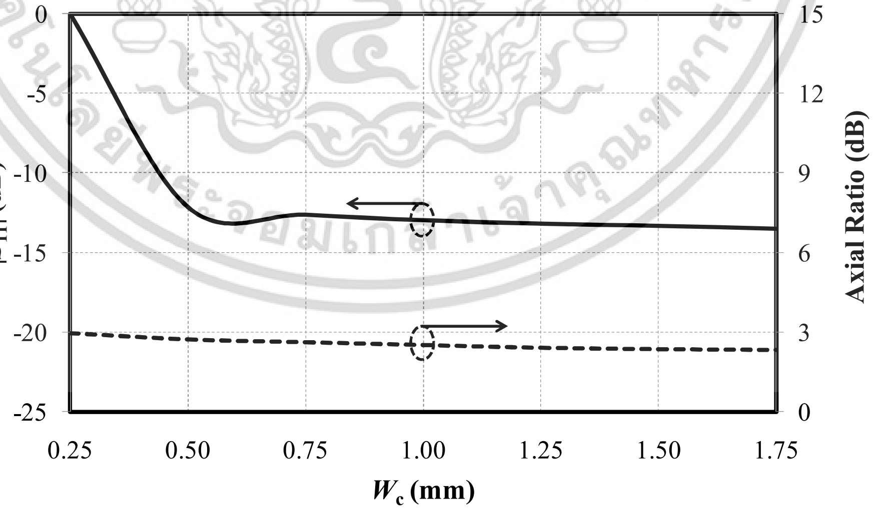
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราวนด์ให้มีค่าที่เพิ่มมากขึ้นแนวโน้มอัตราขยายและอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังจะสูงขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 3.22 ผลการจำลองความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังและระดับสัญญาณลำคลื่นด้านข้าง เมื่อมีการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_{gl} ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากนั้นได้ศึกษาผลของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) และระดับสัญญาณลำคลื่นด้านข้าง (SLL) การเปลี่ยนแปลงความยาวของแผ่นระนาบกราวนด์ (W_{gl}) ในรูปที่ 3.22 จะสังเกตได้ว่าเมื่อปรับความยาวของแผ่นระนาบกราวนด์ให้มีความยาวเพิ่มขึ้นความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังและระดับสัญญาณลำคลื่นด้านข้างมีแนวโน้มลดลงและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 3.23 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน เมื่อมีการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_c ความหนาของแผ่นทองแดง

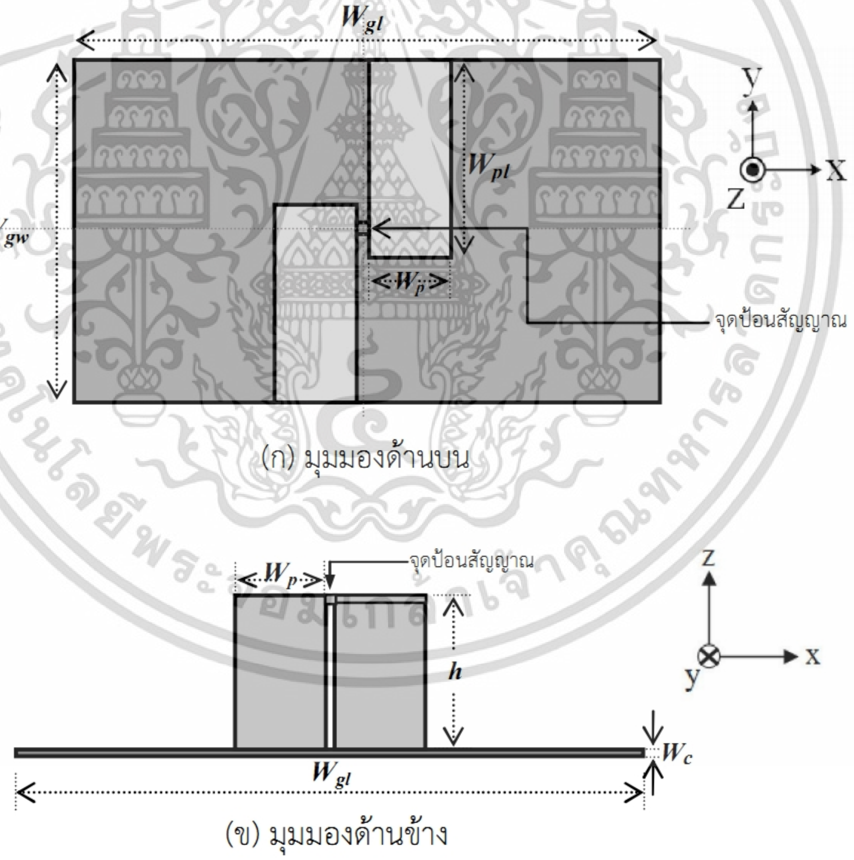
จากผลการจำลองเมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ W_c คือ ความหนาของแผ่นทองแดงดังแสดงในรูปที่ 3.23 ผลจากการจำลองจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นทองแดง ไม่ได้ส่งผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระทบต่อการทำงานของสายอากาศในช่วงความถี่ที่ต้องการมากนัก ทั้งผลของ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน จะเห็นได้ว่าผลจากการจำลองทั้งสองพารามิเตอร์มีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นทองแดงไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของสายอากาศ

จากผลการจำลองโครงสร้าง และผลการจำลองผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศนี้ ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์และกำหนดโครงสร้างทางกายภาพของสายอากาศต้นแบบ ที่จะทำการสร้างเพื่อทำการทดสอบได้ดังต่อไปนี้

สายอากาศที่ออกแบบมีลักษณะเป็นแผ่นพับที่มีโครงสร้างด้านบนเป็นแขน ซึ่งจะอยู่ในระนาบที่ขนานกัน จะถูกพับเข้าหากันและเพื่อทำให้เกิดการโพลาไรซ์วงกลมได้จะเกิดได้จากการตั้งฉากกันและต่างเฟสกันเป็นมุม 90 องศา ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งจะทำได้โดยการปรับเปลี่ยนขนาดทางกายภาพของสายอากาศ โดยในส่วนแขนจะต้องถูกทำให้อยู่ในระนาบขนานที่เยื้องกันเพื่อที่จะทำให้เกิดการโพลาไรซ์แบบวงกลมขึ้นและจะป้อนสัญญาณที่จุดป้อนที่เชื่อมต่อกันระหว่างแขนทั้งสอง ซึ่งสายอากาศที่ทำการจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 สายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับการประยุกต์ใช้งานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว

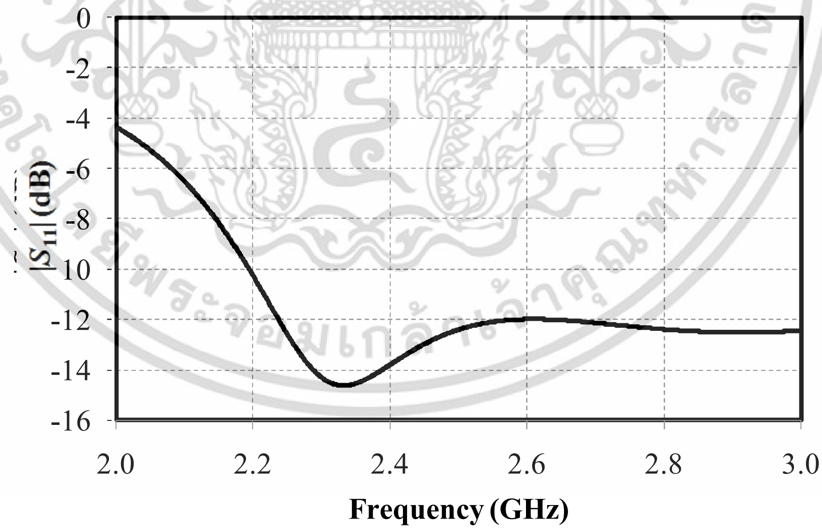
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์ของสายอากาศ	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 2.4 GHz (mm)
ความกว้างระนาบกราวนด์ (W_{gw})	70.0
ความยาวระนาบกราวนด์ (W_{gl})	120.0
ความกว้างของแผ่นที่พับ (W_p)	17.0
ความยาวของแผ่นที่พับ (W_{pl})	40.0
ความหนาของแผ่นอลูมิเนียม (W_c)	1.0
ความสูงระหว่างระนาบกราวนด์กับแผ่นที่พับ (h)	25.0

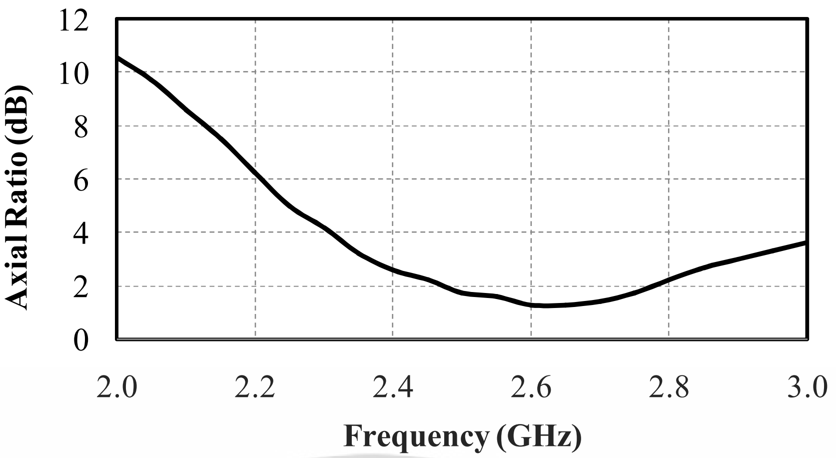
3.2.2 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศ

จากการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ ดังที่กล่าวมาแล้วจะทำให้สามารถกำหนดขนาดทางกายภาพของสายอากาศต้นแบบที่จะทำการสร้างได้ดังตารางที่ 3.2 ซึ่งเมื่อนำโครงสร้างดังรูปที่ 3.24 และขนาดทางกายภาพของสายอากาศต้นแบบมาทำการจำลองลงในโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® เพื่อใช้สำหรับออกแบบสายอากาศที่ความถี่ 2.4 GHz ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่มาตรฐานของเทคโนโลยี WLAN โดยผลการจำลอง $|S_{11}|$ แสดงได้ดังรูปที่ 3.25 และอัตราส่วนแกนที่ได้จากการจำลองสายอากาศต้นแบบแสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.25 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



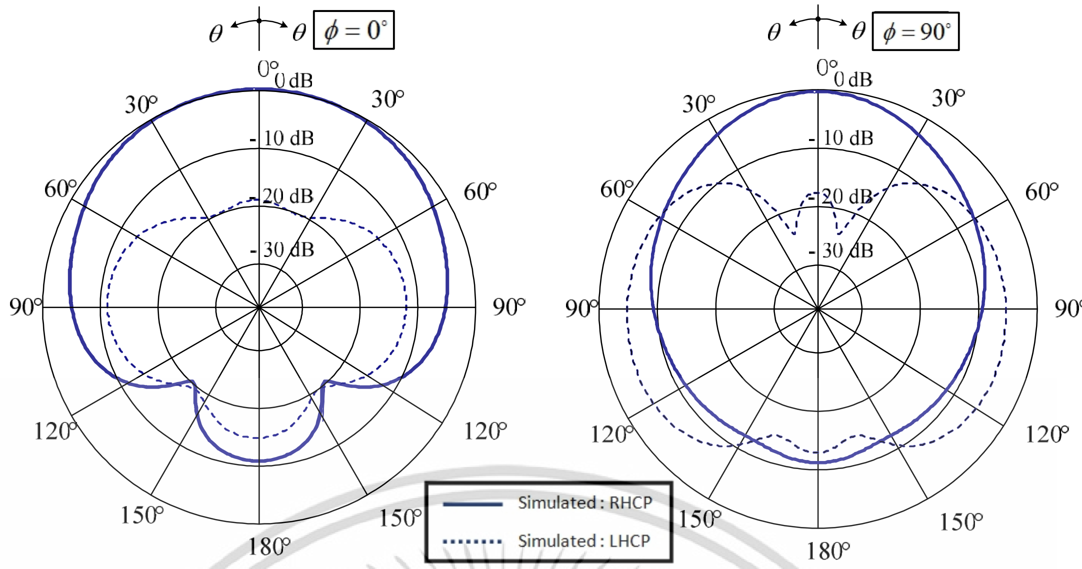
รูปที่ 3.26 ผลการจำลองอัตราส่วนแกนของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากรูปที่ 3.25 และรูปที่ 3.26 สามารถกล่าวได้ว่าจากขนาดของสายอากาศข้างต้น มีแนวโน้มที่สายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว จะสามารถใช้งานบนเทคโนโลยี WLAN โดยพิจารณาที่ $|S_{11}| \leq -10$ dB และพิจารณาอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ในช่วงความถี่ที่ใช้งาน พบว่าสายอากาศที่นำเสนอสามารถทำงานได้โดยครอบคลุมตั้งแต่ 2.2 GHz ขึ้นไปจนถึง 3.0 GHz ซึ่งอยู่ในช่วงของมาตรฐานความถี่ของเทคโนโลยี WLAN ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

3.2.3 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

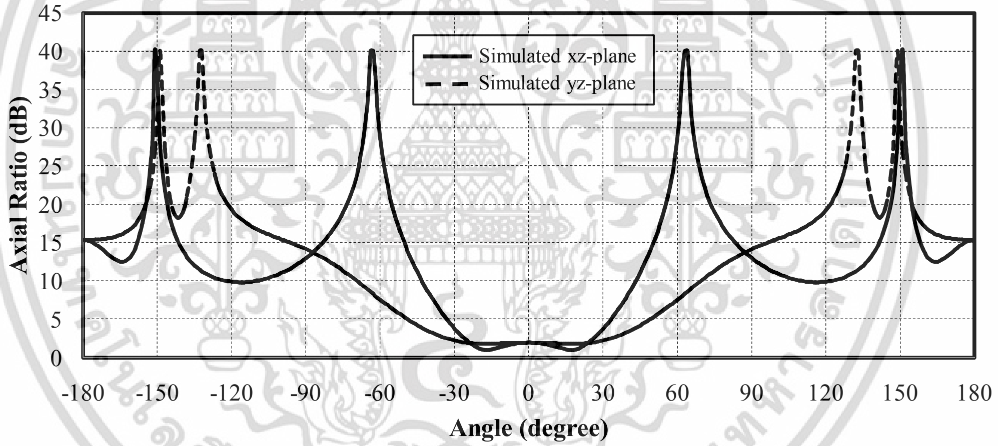
การจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำเสนอ จะพิจารณาที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งสามารถแสดงจากรูปที่ 3.27 โดยในรูปที่ 3.27 ซึ่งพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น แบบโพลาไรซ์หมุนขวา (RHCP) ดังแสดงเป็นเส้นทึบ และโพลาไรซ์หมุนซ้าย (LHCP) ดังแสดงเป็นเส้นประ ที่ระนาบ yz และ xz ตามลำดับ ในขณะที่สายอากาศที่นำเสนอเป็นแบบโพลาไรซ์หมุนขวา ดังแสดงในรูปที่ 3.27 เส้นทึบโดยจะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำเสนอจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว โดยมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-power beamwidth) ในระนาบ xz และ yz เป็น 60 และ 120 องศา ตามลำดับ ระดับลำคลื่นย่อยด้านข้างเป็น -11.3 dB และ -10.5 dB ตามลำดับ และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (Front to back ratio) เท่ากับ 12 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ระนาบ yz (ข) ระนาบ xz

รูปที่ 3.27 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ yz และ xz ตามลำดับ



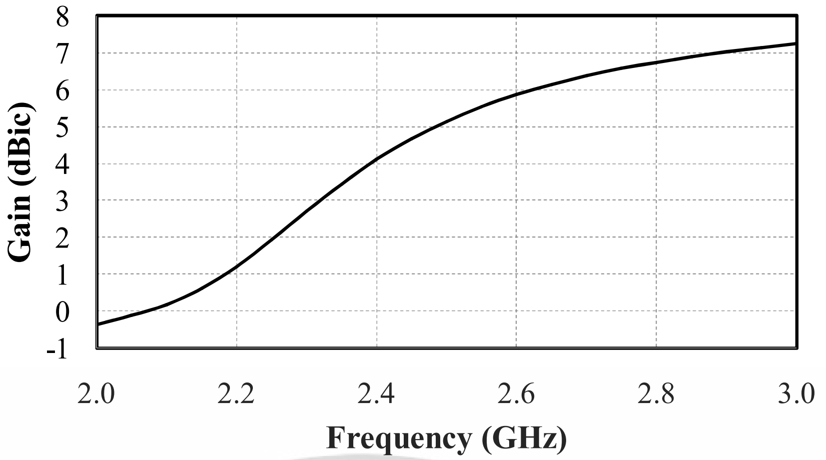
รูปที่ 3.28 ผลการจำลองความกว้างอัตราส่วนแกนในระนาบ xz และ yz

รูปที่ 3.28 แสดงผลการจำลองความกว้างอัตราส่วนแกนในระนาบ xz และ yz จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB จะครอบคลุมมุมตั้งแต่ -20 ถึง 20 องศา ในระนาบ xz และครอบคลุมตั้งแต่ -30 ถึง 30 องศา ในระนาบ yz

3.2.4 ผลการจำลองอัตราขยาย (Gain)

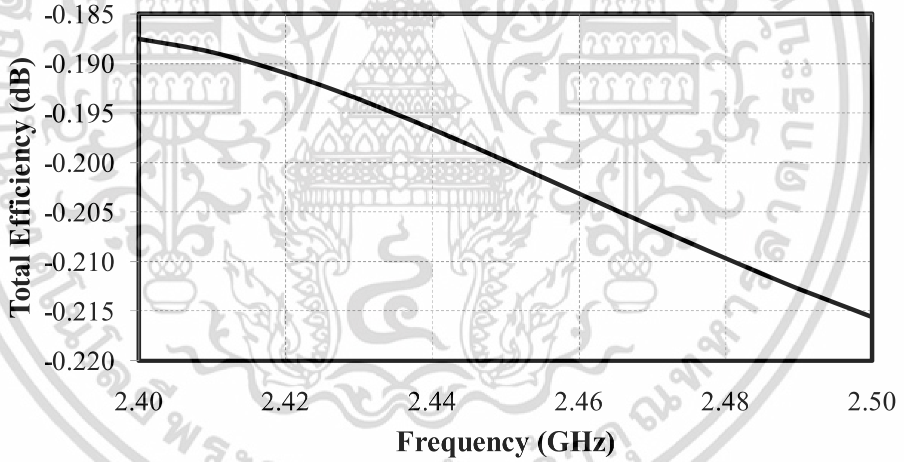
ในหัวข้อนี้นำเสนอผลจำลองอัตราขยายของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศเทียบกับความถี่

จากรูปที่ 3.29 แสดงผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าเมื่อความถี่มากขึ้น แนวโน้มของอัตราขยายของสายอากาศก็จะมากขึ้นตามไปด้วย โดยมีอัตราขยายของสายอากาศที่ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.40 ถึง 2.48 GHz ซึ่งเป็นมาตรฐานความถี่ของเทคโนโลยี WLAN จะมีอัตราขยายเท่ากับ 4.22 ถึง 5.20 dBic ตามลำดับ

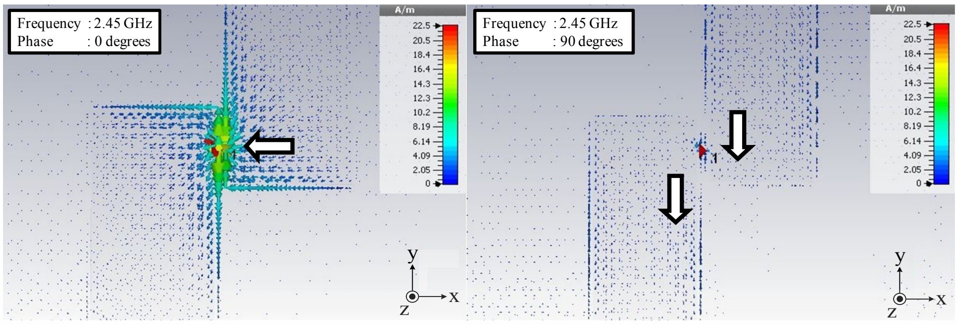


รูปที่ 3.30 ผลการจำลองประสิทธิภาพรวมของสายอากาศเทียบกับความถี่

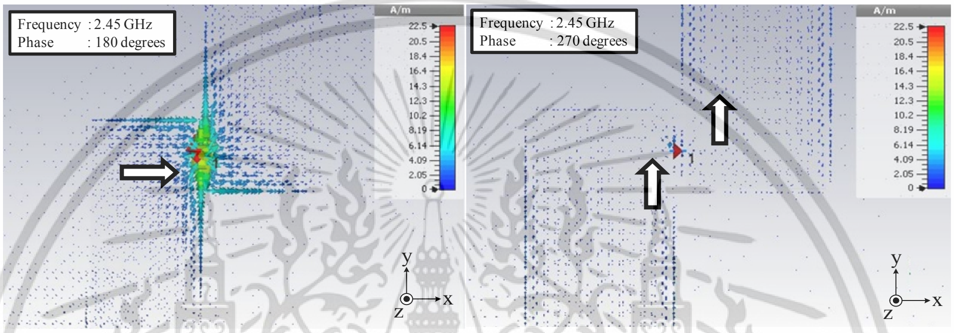
รูปที่ 3.30 แสดงการจำลองประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศต้นแบบ ซึ่งในช่วงความถี่ที่ใช้งานที่ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.40 - 2.48 GHz ค่าประสิทธิภาพททั้งหมดจะมีค่า -0.183 dB ลดลงมาเรื่อย ๆ ตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นจนถึงที่ 2.48 GHz ค่าประสิทธิภาพทรวมจะมีค่าเท่ากับ -0.210 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 ผลการจำลองการกระจายของกระแส



(ก) 0 องศา (ข) 90 องศา



(ค) 180 องศา (ง) 270 องศา

รูปที่ 3.31 ผลการจำลองการกระจายของกระแสบนผิวสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากรูปที่ 3.31 แสดงการจำลองการกระจายของกระแสของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า จะสังเกตได้ว่ามีการกระจายของกระแสที่ผิวของสายอากาศที่หนาแน่นที่บริเวณขอบแขนด้านบนทั้งสองที่วางขนานกัน โดยเฉพาะตรงจุดที่ใกล้กับจุดป้อนสัญญาณโดยที่ 0 องศา ทิศทางการไหลของกระแสจะเป็น ↙ เมื่อกระแสไหลไปเป็นมุม 90 องศา ทิศทางจะเป็นชี้ลงด้านล่าง ⬇ และเมื่อกระแสไหลไปทำมุม 180 องศา และ 270 องศาทิศทางการไหลของกระแสจะเป็น ↗ และ ⬆ ตามลำดับ และจะกระจายโดยทั่วไปในบริเวณแผ่นระนาบกราวนด์ด้านล่าง โดยมีทิศทางการไหลที่ผิวในทิศทางแกน +x และ -x ตามลำดับ และด้วยผลการจำลองทิศทางของกระแสที่กล่าวข้างต้นกระแสจะต่างเฟสกันเป็นมุม 90 องศาพอดีจึงทำให้เกิดเป็นการโพลาไรซ์แบบวงกลม อันเนื่องมาจากโครงสร้างของสายอากาศดังกล่าวถูกออกแบบมาให้มีการโพลาไรซ์แบบหมุนขวา (RHCP)

ตารางที่ 3.3 สรุปคุณลักษณะของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว

คุณลักษณะของสายอากาศ	ผลที่ได้
ความกว้างแถบความถี่ของ $\|S_{11}\|$ < -10 dB	2.2-3.0 GHz
ความกว้างแถบความถี่ของอัตราส่วนแกน < 3 dB	2.15-3.0 GHz
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	ทิศทางเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงวันเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

คุณลักษณะของสายอากาศ	ผลที่ได้
การโพลาไรซ์	โพลาไรซ์วงกลม
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW)	60 องศา (ระนาบ xz) 120 องศา (ระนาบ yz)
อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (F/B)	12 dB
ระดับสัญญาณลำคลื่นด้านข้าง (co pol.)	-11.3 dB (ระนาบ xz) -10.3 dB (ระนาบ yz)
อัตราขยาย (2.40 - 2.48 GHz)	4.2 - 5.2 dBic

3.3 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบและการจำลองของสายอากาศ โดยได้เริ่มจากการคำนวณตามทฤษฎีเพื่อหาขนาดของสายอากาศตั้งต้น และทำการปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศให้มีคุณลักษณะที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้บนเทคโนโลยี WLAN ตามมาตรฐานความถี่ของ IEEE ซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ทำการจำลองประกอบไปด้วย $|S_{11}| \leq -10$ dB ตลอดช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน และมีอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน ที่ทำให้สายอากาศที่ออกแบบสามารถแพร่กระจายคลื่นออกไปได้ โดยจากผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศแผ่นพับโพลาไรซ์วงกลมจะสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 2.40 GHz ถึง 2.48 GHz แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำเสนอจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว โดยมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-power beamwidth) ในระนาบ xz และ yz เป็น 60 และ 120 องศาตามลำดับ อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (Front to back ratio) เท่ากับ 12 dB และมีการกระจายกระแสที่ผิวของสายอากาศมีความหนาแน่นที่บริเวณขอบแขนด้านบนทั้งสองที่วางขนานกันโดยเฉพาะตรงจุดที่ใกล้กับจุดป้อนสัญญาณและจะกระจายโดยทั่วไปในบริเวณแผ่นระนาบกราวนด์ด้านล่างโดย มีทิศทางการไหลที่ผิวในทิศทางแกน +x และ -x ตามลำดับ อันเนื่องมาจากโครงสร้างของสายอากาศดังกล่าวถูกออกแบบมาให้มีการโพลาไรซ์แบบหมุนขวา (RHCP) ส่วนอัตราขยายของสายอากาศที่นำเสนอมีอัตราขยายของสายอากาศที่ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.40 ถึง 2.48 GHz ซึ่งเป็นมาตรฐานความถี่ของเทคโนโลยี WLAN จะมีอัตราขยายเท่ากับ 4.22 ถึง 5.20 dBic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

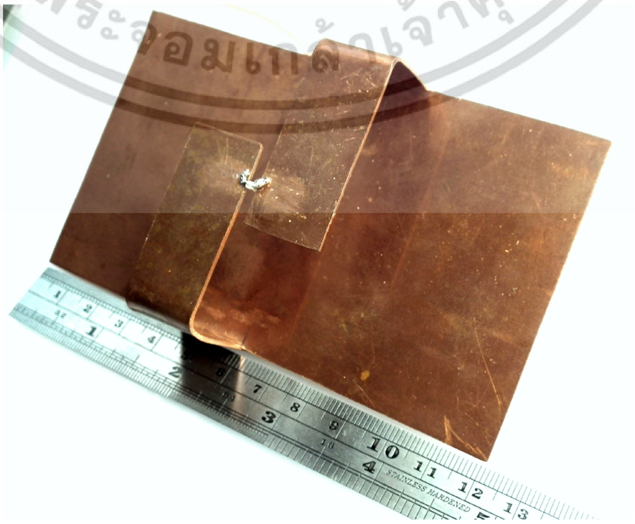
บทที่ 4
ผลการทดสอบสายอากาศ

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการทดสอบและผลการทดสอบสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ซึ่งจะพิจารณาถึงผลของค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าอัตราส่วนแกน ค่าอัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยจะนำผลที่ได้จากการทดสอบมาทำเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลอง ซึ่งผลจากการจำลองนั้นได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลอง โดยในส่วนของรายะละเอียดต่างๆ นั้นจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

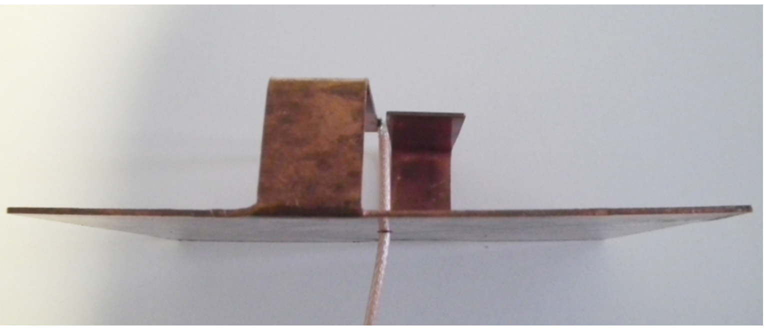
4.2 สายอากาศต้นแบบ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอต้นแบบของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว สำหรับใช้ในการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้อง โดยสายอากาศที่นำเสนอนี้จะถูกใช้งานที่ความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นมาตรฐานความถี่ของเทคโนโลยี WLAN โดยวัสดุที่เลือกนำมาใช้สำหรับการสร้างสายอากาศต้นแบบนี้ คือ ทองแดงที่มีความหนา 1 mm โดยพิจารณาจากคุณสมบัติในด้านความแข็งแรงทนทาน และมีราคาไม่แพงมาก โดยที่ลักษณะของสายอากาศต้นแบบแสดงดังรูปที่ 4.1 และในส่วนของโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 4.2 และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ แสดงได้ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งได้มาจากการจำลองในบทที่ 3



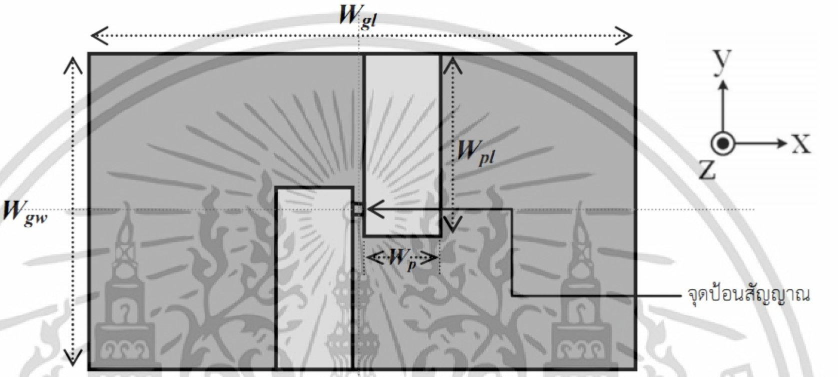
(ก) มุมมองด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

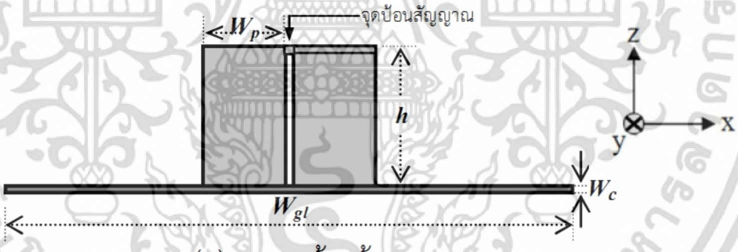


(ข) มุมมองด้านข้าง

รูปที่ 4.1 ลักษณะโครงสร้างสายอากาศต้นแบบ



(ก) มุมมองด้านบน



(ข) มุมมองด้านข้าง

รูปที่ 4.2 สายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์ของสายอากาศ	**ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 2.4 GHz (mm)**
ความกว้างระนาบกราวนด์ (W_{gw})	70.0
ความยาวระนาบกราวนด์ (W_{gl})	120.0
ความกว้างของแผ่นที่พับ (W_p)	17.0
ความยาวของแผ่นที่พับ (W_{pl})	40.0
ความหนาของแผ่นอลูมิเนียม (W_c)	1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

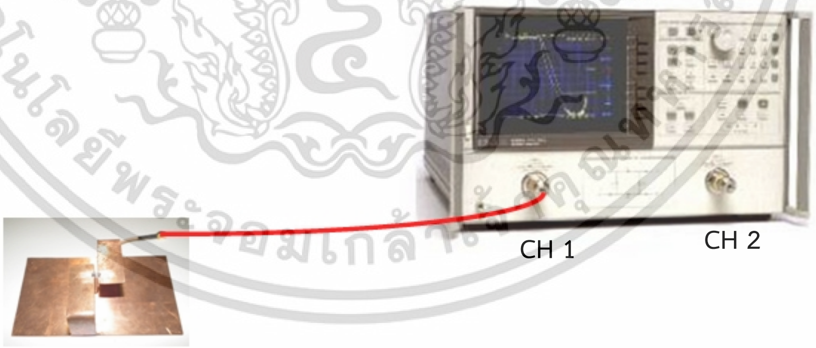
พารามิเตอร์ของสายอากาศ	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 2.4 GHz (mm)
ความสูงระหว่างระนาบกราวน์ดกับแผ่นที่พับ (*h*)	24.0
ระยะจากขอบระนาบกราวน์ดถึงแผ่นที่พับ	42.0
ตำแหน่งพอร์ต (x_1,x_2)	1,-1
ตำแหน่งพอร์ต (y_1,y_2)	0,0

4.3 การทดสอบสายอากาศ

ในขั้นตอนการทดสอบนี้จะประกอบด้วยการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศ เช่น ทดสอบค่า $|S_{11}|$ ค่าอัตราส่วนแกน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยาย และนำผลจากการทดสอบที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ในบทที่ 3

สำหรับในการทดสอบจะทำการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer HP 8720C) ร่วมกับอุปกรณ์และเครื่องมืออื่น ๆ ได้แก่ สายนำสัญญาณ และสายอากาศแบบเกลียว

การทดสอบสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวน์ดสี่เหลี่ยมผืนผ้าโพลาไรซ์วงกลมสำหรับความถี่ 2.4 GHz การทดสอบค่า $|S_{11}|$ ซึ่งจะอยู่ในหน่วย dB จะทำการทดสอบโดยการต่อสายนำสัญญาณที่ต่อกับขั้วของสายอากาศทดสอบกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การทดสอบค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวน์ดสี่เหลี่ยมผืนผ้าโพลาไรซ์วงกลมสำหรับความถี่ 2.4 GHz

การทดสอบเพื่อที่จะให้ได้ค่าอัตราขยายของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวน์ดสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ในการทดสอบนั้นจะใช้สายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวน์ดสี่เหลี่ยมผืนผ้าโพลาไรซ์วงกลมที่ได้ทำการออกแบบทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านรับและใช้สายอากาศแบบเกลียวที่มีการโพลาไรซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมุนขวา (RHCP) และการโพลาไรซ์หมุนซ้าย (LHCP) ทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านส่ง โดยที่การทดสอบสายอากาศที่ออกแบบนี้จะต้องทำภายในสนามระยะไกล ดังนั้นระยะห่างระหว่างสายอากาศทางด้านส่งและด้านรับต้องเป็นไปตามเงื่อนไข

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

เมื่อ R คือ ระยะสนามระยะไกล

D คือ ขนาดของสายอากาศที่มีความยาวที่สุด

λ คือ ความยาวคลื่นในอากาศ(พิจารณาที่ความถี่ใช้งาน)

ดังนั้นจึงกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งและตัวรับมีค่าเท่ากับ 1.65 m

การทดสอบอัตราขยายและการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าโพลาไรซ์วงกลมในการทดสอบนั้น จะใช้สายอากาศโพลาไรซ์วงกลมที่ได้ทำการออกแบบทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านรับและใช้สายอากาศแบบเกลียวที่มีการโพลาไรซ์หมุนขวา และการโพลาไรซ์หมุน ทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านส่ง ด้วยระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งกับตัวรับมีค่าเท่ากับ 1.65 m ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบจะต้องนำมาคำนวณหาค่าอัตราส่วนแกนซึ่งจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.2

$$Axial\ Ratio = 20\log\left[\frac{|E_{co}|+|E_{xp}|}{|E_{co}|-|E_{xp}|}\right] \tag{4.2}$$

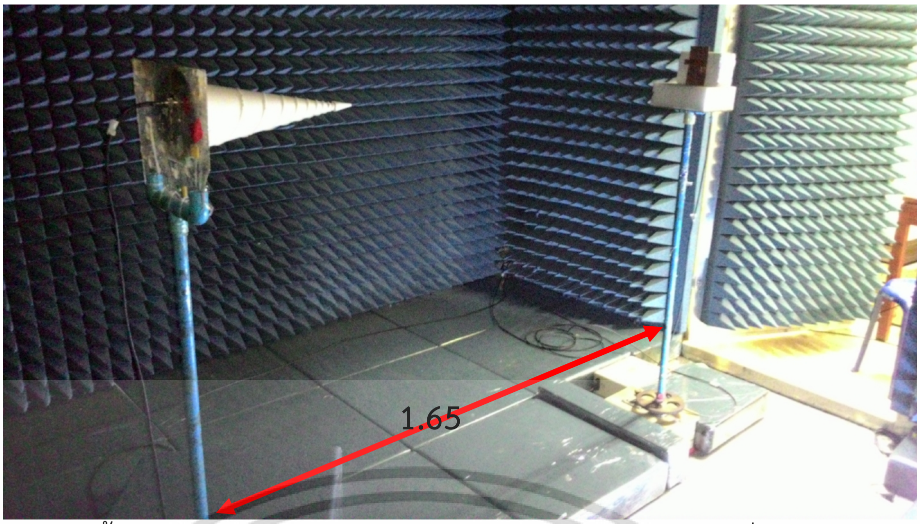
เมื่อ

$|E_{co}|$ คือ ขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์แบบเดียวกันกับการโพลาไรซ์ของสายอากาศตัวรับ

$|E_{xp}|$ คือ ขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์ตรงข้ามกันกับการโพลาไรซ์ของสายอากาศตัวรับ

สำหรับการทดสอบเพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้น สามารถทำได้โดยส่งสัญญาณด้วยสายอากาศตัวส่งแบบเกลียวทั้งแบบโพลาไรซ์แบบเดียวกับสายอากาศตัวรับและที่มีการโพลาไรซ์ตรงข้ามกันกับการโพลาไรซ์ของสายอากาศตัวรับ วางห่างกันด้วยระยะห่าง 1.65 m จากนั้นต้องทำการหมุนสายอากาศที่ต้องการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและบันทึกค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบผ่านพารามิเตอร์ $|S_{21}|$ ที่มุมต่าง ๆ ตั้งแต่ 0 องศา จนถึง 360 องศา พอดี โดยทำการทดสอบทั้งในระนาบ xz และ yz ของสายอากาศตัวรับ โดยการติดตั้งสายอากาศสำหรับการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายแสดงดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

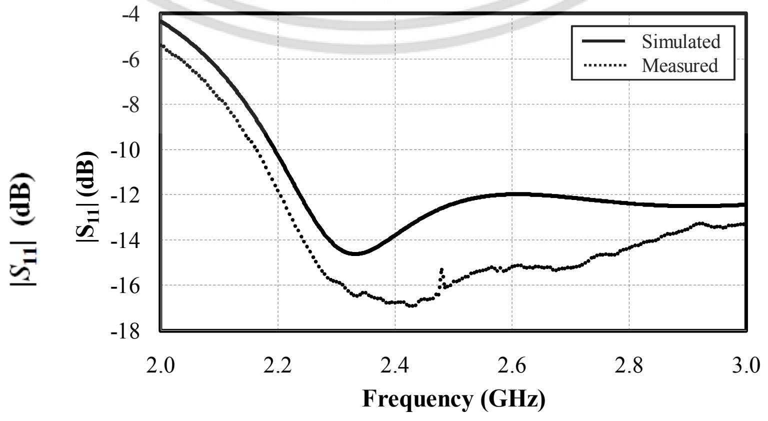


รูปที่ 4.4 การติดตั้งสายอากาศสำหรับการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีโพลาไรซ์วงกลม

4.4 ผลการทดสอบสายอากาศ

4.4.1 การทดสอบการสูญเสียย้อนกลับ ($|S_{11}|$) ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว

ผลจากการทดสอบสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวพบว่า $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับ $|S_{11}|$ ที่ได้จากการจำลองจากบทที่ 3 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นการทดสอบที่ความถี่ใช้งานในการทดสอบและการจำลองจะทดสอบที่ความถี่ 2.45 GHz โดยผลที่ได้จะแสดงให้เห็นว่า ผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง $|S_{11}|$ จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยพบว่า $|S_{11}|$ จากการทดสอบของสายอากาศที่ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.2 - 3.0 GHz แต่จากผลการจำลองและผลการทดสอบซึ่งเห็นว่ามีการเคลื่อนกันอยู่นั้นสามารถอธิบายได้



รูปที่4.5 ผลการจำลองกับผลทดสอบ $|S_{11}|$ กับความถี่ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

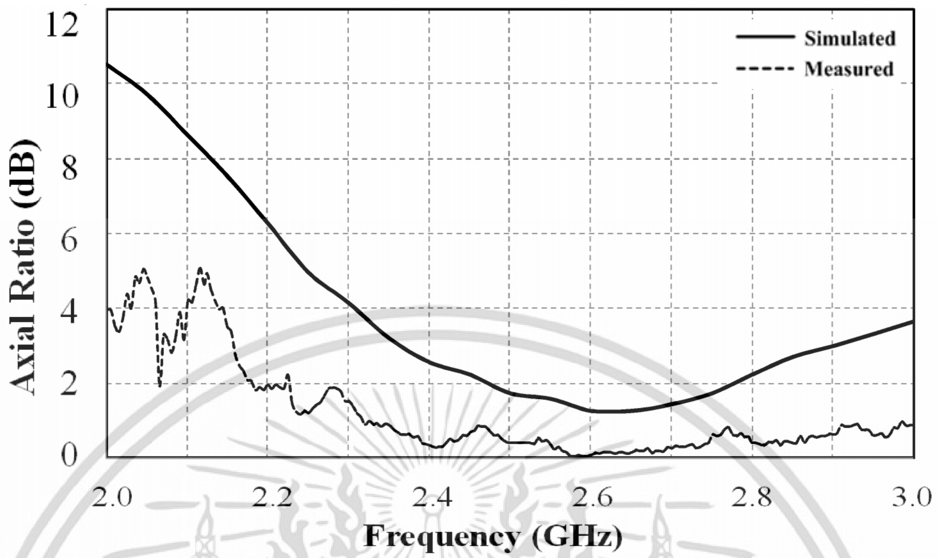
โดย $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าที่ต่ำกว่าผลของ $|S_{11}|$ ที่ได้จากการจำลอง ซึ่งในการจำลองส่วนโครงสร้างของสายอากาศเมื่อมองจากด้านข้างจะเห็นว่าส่วนที่พับของแผ่นทองแดงจะทำมุมเป็นมุมฉากกันอย่างพอดีแต่ในทางปฏิบัติแล้วการที่จะขึ้นรูปแผ่นทองแดงให้ได้มุมฉากกันอย่างพอดีเป็นไปได้ค่อนข้างยาก รวมถึงจุดป้อนสัญญาณซึ่งมีผลอย่างมากต่อผลการทดสอบโดยในการจำลองนั้นจุดป้อนสัญญาณจะสัมผัสกับตัวแผ่นทองแดงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นแต่ในทางปฏิบัติการบัดกรีจุดป้อนสัญญาณให้มีหน้าสัมผัสกับแผ่นทองแดงเพียงเล็กน้อยนั้นอาจมีการคลาดเคลื่อนไปบ้าง แต่อย่างไรก็ตามค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศจากผลการจำลองต่างจากผลการทดสอบที่ประมาณ 2 dB เท่านั้นซึ่งถือว่าไม่มาก และสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าโพลาไรซ์วงกลม ก็ยังมีค่า $|S_{11}|$ ในช่วงความถี่ที่ใช้งานที่มีค่าดีกว่า -10 dB โดย $|S_{11}|$ ต่ำสุดจากการทดสอบจะอยู่ที่ความถี่ 2.42 GHz มีค่าเท่ากับ -16.75 dB จากผลการทดสอบนี้ทำให้ยืนยันได้ว่าสายอากาศสามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการ

4.4.2 การทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว

ผลจากที่ได้จากการทดสอบสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยอัตราส่วนแกน ที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับอัตราส่วนแกนที่ได้จากการจำลองจากบทที่ 3 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นการทดสอบที่ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 3 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่ต้องการสำหรับการใช้งานสายอากาศ โดยผลจากการทดสอบและผลจากการจำลองพบว่า ผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองอัตราส่วนแกน จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยพบว่าอัตราส่วนแกนจากการทดสอบของสายอากาศที่ต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.2 - 3.0 GHz โดยอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าที่ต่ำกว่าผลของอัตราส่วนแกนที่ได้จากการจำลอง ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกันกับผลความคลาดเคลื่อนของ $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบและผลการจำลองอันเนื่องมาจากโครงสร้างของสายอากาศเมื่อมองจากด้านข้างจะเห็นว่าส่วนที่พับของแผ่นทองแดงจะทำมุมเป็นมุมฉากกันอย่างพอดีแต่ในทางปฏิบัติแล้วการที่จะขึ้นรูปแผ่นทองแดงให้ได้มุมฉากกันอย่างพอดีเป็นไปได้ค่อนข้างยาก รวมถึงจุดป้อนสัญญาณซึ่งมีผลอย่างมากต่อผลการทดสอบโดยในการจำลองนั้นจุดป้อนสัญญาณจะสัมผัสกับตัวแผ่นทองแดงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นแต่ในทางปฏิบัติการบัดกรีจุดป้อนสัญญาณให้มีหน้าสัมผัสกับแผ่นทองแดงเพียงเล็กน้อยนั้นอาจมีการคลาดเคลื่อนไปบ้าง แต่อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศจากผลการจำลองต่างจากผลการทดสอบที่ประมาณ 2 dB เท่านั้นซึ่งถือว่าไม่มาก และสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าโพลาไรซ์วงกลม ก็ยังมีค่าอัตราส่วนแกนในช่วงความถี่ที่ใช้งานที่มีค่าดีกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

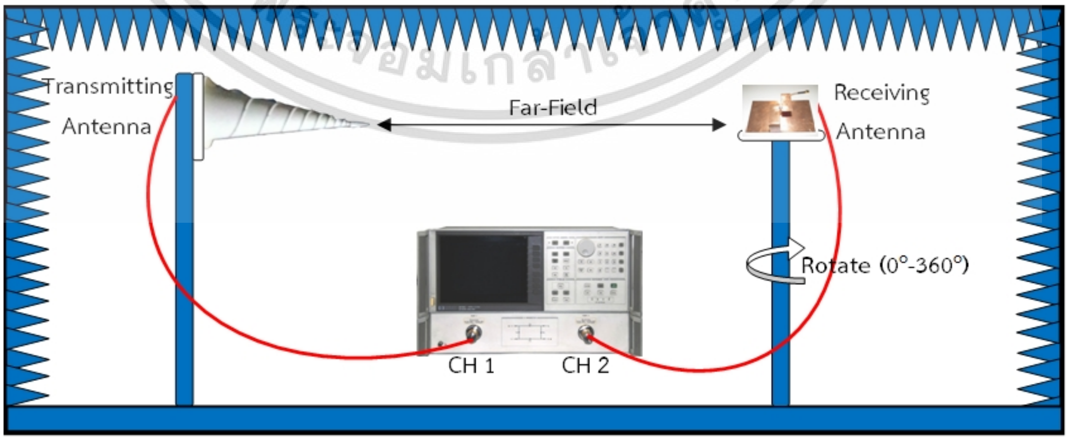
3 dB โดย อัตราส่วนแกนต่ำสุดจากการทดสอบที่ความถี่ 2.484 GHz มีค่าเท่ากับ 0.9 dB จากผลการทดสอบนี้ทำให้ยืนยันได้ว่าสายอากาศสามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการ



รูปที่ 4.6 ผลการจำลองกับผลทดสอบอัตราส่วนแกนกับความถี่ของสายอากาศ

4.4.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวน์ด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว

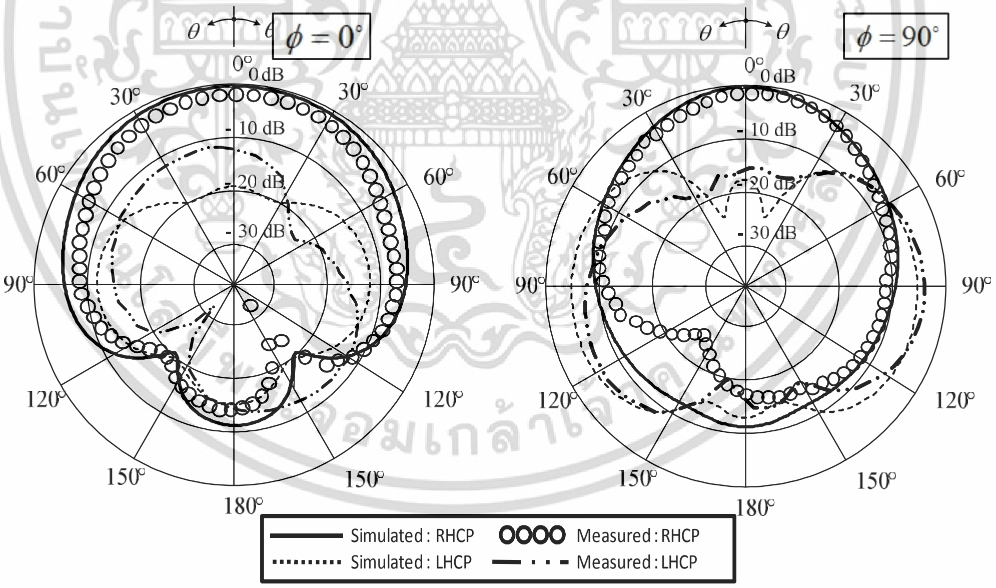
ในการทดสอบเพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้น ต้องมีการต่อสายนำสัญญาณที่สายอากาศตัวส่งและรับ โดยสายอากาศตัวส่งต่อเข้ากับ CH1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายและสายอากาศตัวรับต่อเข้ากับ CH2 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย จากนั้นจะทำการหมุนด้านสายอากาศตัวรับ คือ สายอากาศที่สร้างขึ้น ตั้งแต่ 0 องศา จนครบรอบที่ 360 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

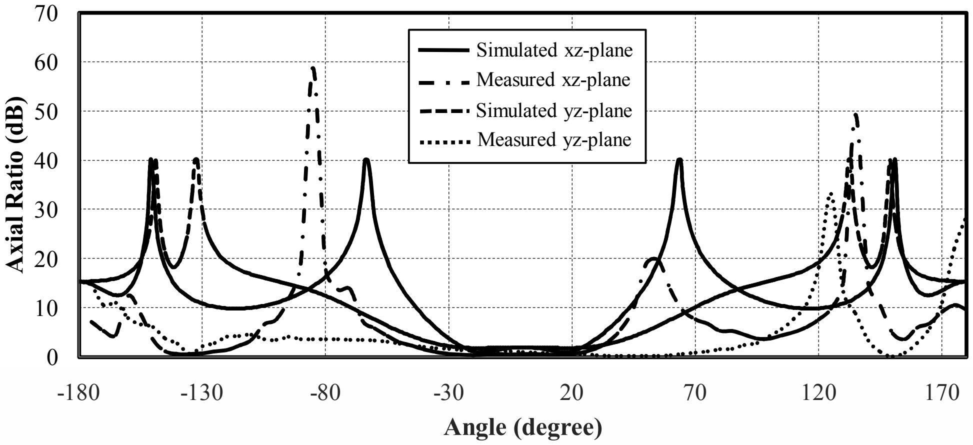
ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.8 ผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดสอบทั้งในระนาบ yz และ xz ทั้งในด้านโพลาไรซ์หมุนขวา (RHCP) และโพลาไรซ์หมุนซ้าย (LHCP) ซึ่งจากการผลการทดสอบจะสังเกตได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ปรากฎของโพลาไรซ์หมุนขวาจะเป็นแบบทิศทางเดียวทั้งในระนาบ yz และ xz ซึ่งผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้ค่อนข้างมีความสอดคล้องกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการจำลอง แต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนกันอยู่ ซึ่งผลการคลาดเคลื่อนจากการทดสอบและการจำลองวิเคราะห์ว่าอาจจะเกิดขึ้นอันเนื่องมาจาก ในการทดสอบเพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นต้องมีการป้อนสัญญาณด้วย SMA เข้าไปพร้อมกันกับสายนำสัญญาณซึ่งต้องเกิดการสูญเสียขึ้นและในการหมุนสายอากาศในการทดสอบเพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นตั้งแต่ 0 องศา ถึง 360 องศา โดยที่ตัวสายอากาศจะต้องถูกหมุนไปพร้อมกันกับสายนำสัญญาณ ซึ่งจะส่งผลต่อสนามในแนวระนาบสนามไฟฟ้า ซึ่งอาจทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบเกิดความคลาดเคลื่อนไปจากการจำลอง ซึ่งไม่มีสายนำสัญญาณเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยผลการจำลองกับผลทดสอบของอัตราส่วนแกนเทียบกับมุมที่ความถี่ 2.4 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 4.9 โดยผลจากการทดสอบที่ได้พบว่าสายอากาศมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และ yz เป็น 60 และ 120 องศา ตามลำดับ และมีอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (F/B) เท่ากับ 12 dB



(ก) ระนาบ yz (ข) ระนาบ xz

รูปที่ 4.8 ผลการจำลองกับผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

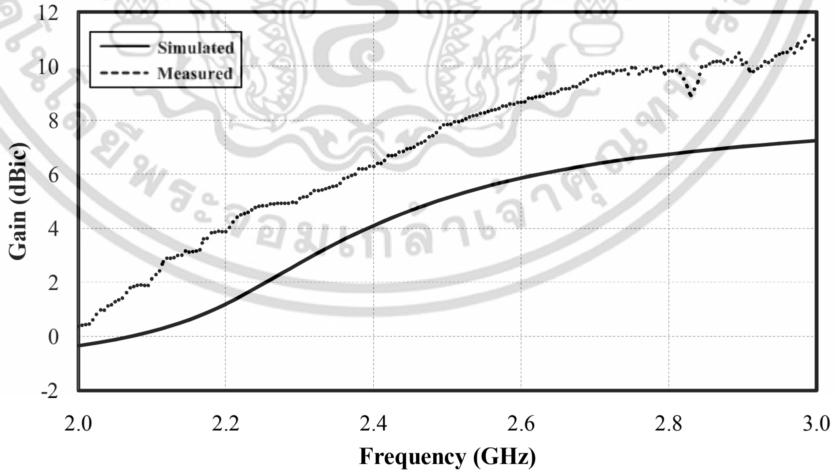
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองกับผลทดสอบของอัตราส่วนแกนเทียบกับมุมที่ความถี่ 2.4 GHz

4.4.4 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว

พารามิเตอร์สุดท้ายที่ได้จากการทดสอบได้แก่อัตราขยายของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 แสดงอัตราขยายของสายอากาศในย่านความถี่ที่ใช้งานเปรียบเทียบกันกับผลของอัตราขยายที่ได้จากการจำลองจะเห็นได้ว่า อัตราขยายที่ได้จากผลการทดสอบและที่ได้จากผลการจำลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าอัตราขยายที่ได้จากผลการทดสอบจะสูงกว่าอัตราขยายที่ได้จากผลการจำลองในย่านความถี่ที่ใช้งาน ซึ่งผลจากการคลาดเคลื่อนนี้สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกันกับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นกับผลการจำลองและผลการทดสอบของ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนโดย



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองกับผลทดสอบอัตราขยายที่ความถี่ที่ใช้งานของสายอากาศ

ส่วนที่พับของแผ่นทองแดงจะทำมุมเป็นมุมฉากกันอย่างพอดีแต่ในทางปฏิบัติแล้วการที่จะขึ้นรูปแผ่นทองแดงให้ได้มุมฉากกันอย่างพอดีเป็นไปได้ค่อนข้างยาก รวมถึงจุดป้อนสัญญาณซึ่งมีผลอย่างมากต่อผลการทดสอบโดยในการจำลองนั้นจุดป้อนสัญญาณจะสัมผัสกับตัวแผ่นทองแดงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในทางปฏิบัติการบัดกรีจุดป้อนสัญญาณให้มีหน้าสัมผัสกับแผ่นทองแดงเพียงเล็กน้อยนั้นอาจมีการคลาดเคลื่อนไปบ้าง โดยผลการทดสอบและผลการจำลองต่างกันที่ประมาณ 2 dBic และจากผลการทดสอบพบว่าสายอากาศต้นแบบโดยสายอากาศที่ช่วงความถี่ 2.40 ถึง 2.48 GHz จะมีอัตราขยายเท่ากับ 7.0 ถึง 8.9 dBic ตามลำดับ โดยผลที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศต้นแบบสามารถสรุปคุณลักษณะได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดสอบสายอากาศ

คุณลักษณะของสายอากาศ	ผลที่ได้
ความกว้างแถบความถี่ของ $\|S_{11}\|$ < -10 dB	2.2-3.0 GHz
ความกว้างแถบความถี่ของอัตราส่วนแกน < 3 dB	2.15-3.0 GHz
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	ทิศทางเดียว
การโพลาไรซ์	โพลาไรซ์วงกลม
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW)	60 องศา (ระนาบ xz) 120 องศา (ระนาบ yz)
อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (F/B)	12 dB
ระดับสัญญาณลำคลื่นด้านข้าง (co pol.)	-11.3 dB (ระนาบ xz) -10.3 dB (ระนาบ yz)
อัตราขยาย (2.40 - 2.48 GHz)	7.0-8.9 dBic

4.5 สรุปผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึง โครงสร้างของสายอากาศที่ทำการสร้างขึ้นจากแผ่นทองแดง ความหนา 1 mm เพื่อการทดสอบและยืนยันผลที่ได้จากการทดสอบทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองเพื่อนำมาวิเคราะห์ ซึ่งเป็นการนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น ค่าการสูญเสียย้อนกลับ อัตราส่วนแกน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ทั้งในระนาบ yz และระนาบ xz และอัตราขยาย ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบในทางปฏิบัติสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งได้แสดงคุณสมบัติและลักษณะของสายอากาศ โดยผลที่ได้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศ ผลของ $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB จะครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.2 GHz จนถึง 3.0 GHz

2. ผลจากการทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ต่ำกว่า 3 dB จะครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.15 GHz จนถึง 3.00 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้เป็นแบบทิศทางเดียว โดยมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และ yz เป็น 60 และ 120 องศา ตามลำดับ และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (F/B) เท่ากับ 12 dB

4. ผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศที่นำเสนอนั้นที่ช่วงความถี่ 2.40 ถึง 2.48 GHz จะมีอัตราขยายเท่ากับ 7.0 ถึง 8.9 dBic ตามลำดับ

จากผลการทดสอบข้างต้นนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสายอากาศที่ได้นำเสนอและทำการออกแบบสามารถใช้งานได้ในย่านความถี่ที่ต้องการคือ 2.40 GHz ถึง 2.48 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ตามมาตรฐานของเทคโนโลยี WLAN ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอนี้สามารถนำไปติดตั้งเป็นตัวแพร่กระจายสัญญาณ โดยสายอากาศมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวจะมีอัตราขยายค่อนข้างสูง และอาจนำไปใช้ในส่งแบบอาคารต่ออาคารได้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น

5.1 บทนำ

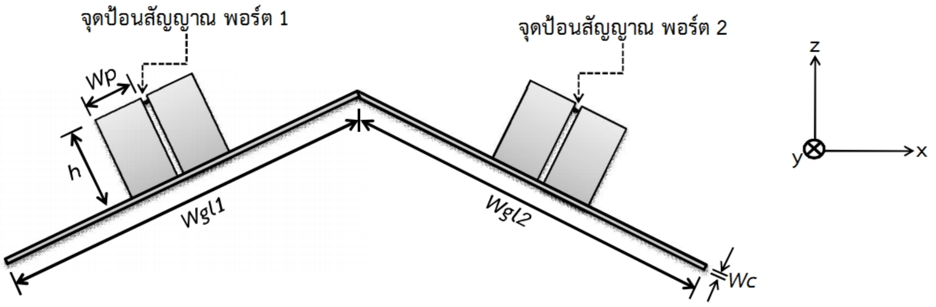
จากในบทที่ 4 ที่ได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลอง และจากการทดสอบสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อหาสมรรถนะของสายอากาศมาแล้ว ในบทนี้จะนำสายอากาศที่ได้ทำการทดสอบมาประยุกต์โดยจะเป็นการนำสายอากาศมาต่อกัน 2 ตัวและทำให้ระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าโค้งลงโดยจะทำมุม 30 องศา จากแนวระนาบเพื่อที่จะศึกษาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นและสมรรถนะของสายอากาศ โดยการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศต้นแบบมีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

5.2 การประยุกต์ใช้สายอากาศต้นแบบสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น

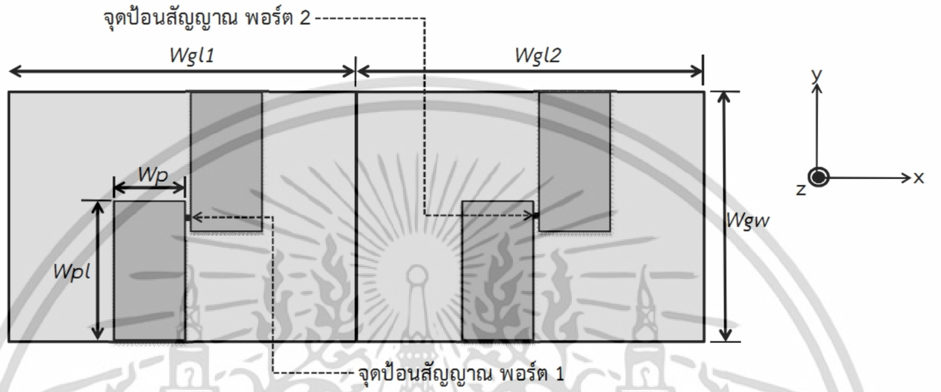
ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอต้นแบบของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยที่ลักษณะของสายอากาศต้นแบบแสดงดังรูปที่ 5.1 และในส่วนของโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 5.2 และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 ซึ่งได้มาจากการจำลองและการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศในบทที่ 3 และบทที่ 4 ตามลำดับ

รูปที่ 5.1 ลักษณะโครงสร้างการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) มุมมองด้านข้าง



(ข) มุมมองด้านบน

รูปที่ 5.2 สายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าทำมุม 30 องศากับระนาบสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวสำหรับการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศสำหรับการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น

พารามิเตอร์ของสายอากาศ	**ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 2.4 GHz (mm)**
ความกว้างระนาบกราวนด์ (W_{gw})	70.0
ความยาวระนาบกราวนด์ (W_{gl1})	120.0
ความยาวระนาบกราวนด์ (W_{gl2})	120.0
ความกว้างของแผ่นที่พับ (W_p)	17.0
ความยาวของแผ่นที่พับ (W_{pl})	40.0
ความหนาของแผ่นอลูมิเนียม (W_c)	1.0
ความสูงระหว่างระนาบกราวนด์กับแผ่นที่พับ (h)	24.0
ระยะจากขอบระนาบกราวนด์ถึงแผ่นที่พับ	42.0
ตำแหน่งพอร์ต 1 (x_1,x_2), (y_1,y_2)	(1,-1),(0,0)
ตำแหน่งพอร์ต 2 (x_1,x_2), (y_1,y_2)	(-1,1),(0,0)

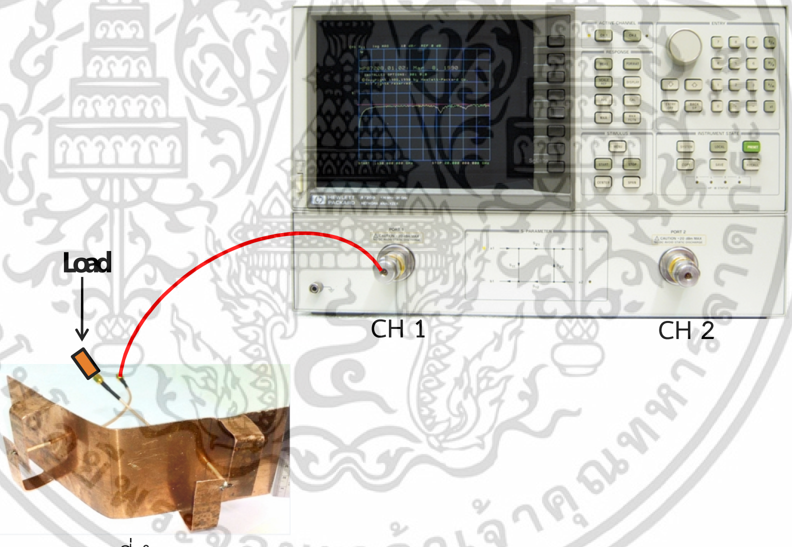
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การทดสอบสายอากาศ

ในขั้นตอนการทดสอบนี้จะประกอบด้วยการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศ เช่น ทดสอบค่า $|S_{11}|$ $|S_{22}|$ ค่าอัตราส่วนแกน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยาย จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดสอบไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO®

สำหรับในการทดสอบจะทำการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer HP 8720C) ร่วมกับอุปกรณ์และเครื่องมืออื่น ๆ ได้แก่ สายนำสัญญาณ และสายอากาศแบบเกลียว

การทดสอบสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าโพลาไรซ์วงกลมสำหรับความถี่ 2.4 GHz สำหรับการการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น การทดสอบค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{22}|$ ซึ่งจะอยู่ในหน่วย dB จะทำการทดสอบโดยการต่อสายนำสัญญาณที่ต่อกับขั้วของสายอากาศทดสอบกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ดังแสดงในรูปที่ 5.3 โดยเมื่อทำการวัดค่า $|S_{11}|$ พอร์ต ที่ 2 จะต้องต่อโหลดไว้เช่นเดียวกันเมื่อ จะวัดค่า $|S_{22}|$ พอร์ต 1 จะต้องต่อโหลดไว้เช่นกัน



รูปที่ 5.3 การทดสอบค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{22}|$ ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าโพลาไรซ์วงกลมสำหรับความถี่ 2.4 GHz สำหรับการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น

การทดสอบเพื่อที่จะให้ได้ค่าอัตราขยายของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ทำมุมกัน 30 องศา สำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวสำหรับการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น ในการทดสอบนั้นจะใช้สายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์โพลาไรซ์วงกลมที่ได้ทำการออกแบบ ทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านรับและใช้สายอากาศแบบเกลียวที่มีการโพลาไรซ์หมุนขวา (RHCP) และการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

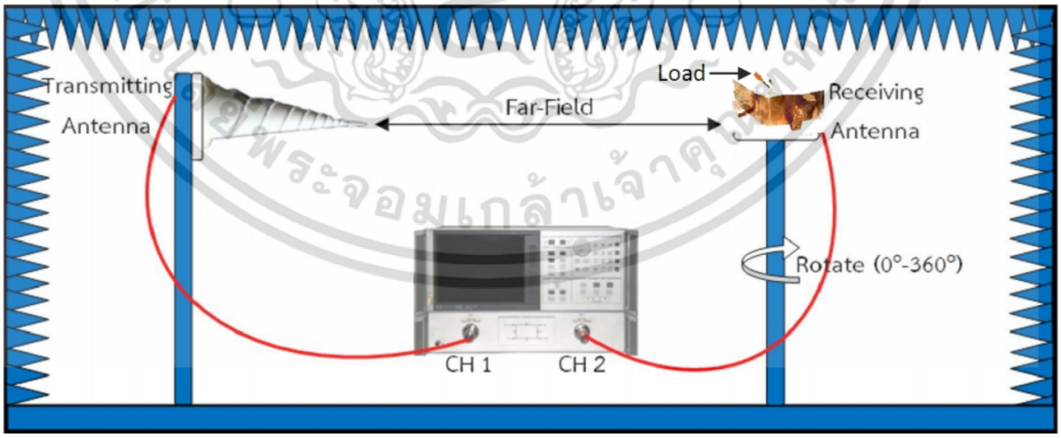
โพลาไรซ์หมุนซ้าย (LHCP) ทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านส่ง ดังแสดงในรูปที่ 5.4 โดยที่การทดสอบสายอากาศที่ออกแบบนี้ จะต้องทำภายในสนามระยะไกล ดังนั้นระยะห่างระหว่างสายอากาศทางด้านส่งและด้านรับต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของระยะสนามไกล ที่ได้จากการคำนวณเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 สมการที่ (4.1) โดยในการทดสอบนั้นจะทำการทดสอบสายอากาศต้นแบบที่เป็นสายอากาศตัวรับทั้งจุดป้อนสัญญาณจุดที่ 1 และ 2 โดยเมื่อทำการทดสอบจุดป้อนสัญญาณ port 1 จุดป้อนสัญญาณ port 2 จะต้องต่อกับโหลดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 5.4 อัตราขยายและการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ทำมุมกัน 30 องศา โพลาไรซ์วงกลมในการทดสอบนั้น จะใช้สายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์โพลาไรซ์วงกลมที่ได้ทำการออกแบบ ทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านรับ และใช้สายอากาศแบบเกลียวที่มีการโพลาไรซ์หมุนขวา และการโพลาไรซ์หมุนซ้าย ทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านส่ง ด้วยระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งกับตัวรับมีค่าเท่ากับ 1.65 m ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบจะต้องนำมาคำนวณหาค่าอัตราส่วนแกน ซึ่งจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.2

$$Axial\ Ratio = 20\log\left[\frac{|E_{co}|+|E_{xp}|}{|E_{co}|-|E_{xp}|}\right] \tag{5.2}$$

เมื่อ

$|E_{co}|$ คือ ขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์แบบเดียวกันกับการโพลาไรซ์ของสายอากาศตัวรับ

$|E_{xp}|$ คือ ขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์ตรงข้ามกันกับการโพลาไรซ์ของสายอากาศตัวรับ



รูปที่ 5.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

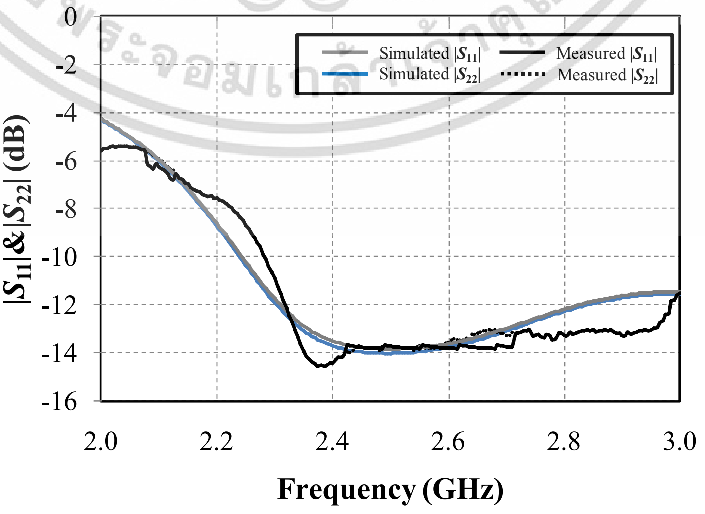
สำหรับการทดสอบเพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้น สามารถทำได้โดยส่งสัญญาณด้วยสายอากาศตัวส่งแบบเกลียวทั้งแบบโพลาไรซ์แบบเดียวกับสายอากาศตัวรับและที่มีการโพลาไรซ์ตรงข้ามกันกับการโพลาไรซ์ของสายอากาศตัวรับ วางห่างกันด้วยระยะห่าง 1.65 m จากนั้นต้องทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหมุนสายอากาศที่ต้องการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและบันทึกค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบผ่านพารามิเตอร์ $|S_{21}|$ และ $|S_{12}|$ ที่มุมต่าง ๆ ตั้งแต่ 0 องศา จนถึง 360 องศา พอดี โดยทำการทดสอบทั้งในระนาบ xz และ yz ของสายอากาศตัวรับ เช่นเดียวกันเมื่อจะทำการวัดค่า $|S_{21}|$ อีกพอร์ตหนึ่งจะต้องต่อโหลดไว้เพื่อทำการวัดค่า

5.3.1 การทดสอบการสูญเสียย้อนกลับ ($|S_{11}|$, $|S_{22}|$) ของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว สำหรับการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น

ผลจากที่ได้จากการทดสอบสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว สำหรับการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น โดย $|S_{11}|$ และ $|S_{22}|$ ที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จำลองด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 ซึ่งเป็นการทดสอบที่ความถี่ใช้งาน ในการทดสอบและการจำลองจะทดสอบที่ช่วงความถี่ 2 - 3 GHz โดยผลที่ได้จะแสดงให้เห็นว่า ผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง $|S_{11}|$ และ $|S_{22}|$ จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยพบว่าผลจากการทดสอบของสายอากาศที่ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.25 - 2.90 GHz โดย $|S_{11}|$ และ $|S_{22}|$ ที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าที่ต่ำกว่าผลของ $|S_{11}|$ และ $|S_{22}|$ ที่ได้จากการจำลองเล็กน้อย ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากขนาดทางกายภาพและการขึ้นรูปทรงของสายอากาศที่อาจเกิดการคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อยจากการจำลองลักษณะของสายอากาศด้วยโปรแกรม รวมถึงผลของวัสดุที่นำมาใช้ในการสร้างสายอากาศ แต่อย่างไรก็ตามค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{22}|$ ของสายอากาศต้นแบบก็ยังมีค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{22}|$ ในช่วงความถี่ที่ใช้งานที่มีค่าดีกว่า -10 dB โดย $|S_{11}|$ ต่ำสุดจากการทดสอบจะอยู่ที่ความถี่ 2.38 GHz มีค่าเท่ากับ -14.5 dB จากผลการทดสอบนี้ทำให้ยืนยันได้ว่าสายอากาศสามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการ

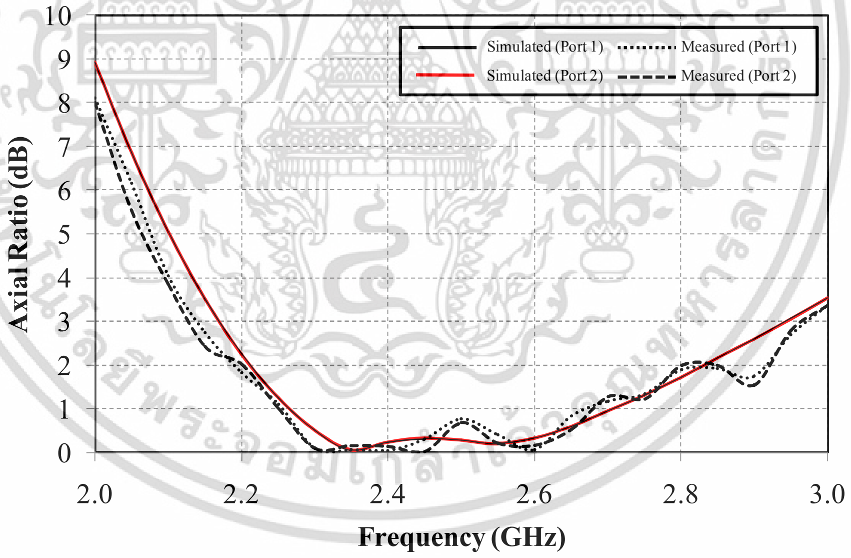


รูปที่ 5.5 ผลการจำลองกับผลทดสอบ $|S_{11}|$ และ $|S_{22}|$ กับความถี่ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 การทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว สำหรับการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น

ผลจากที่ได้จากการทดสอบสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวสำหรับการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น โดยอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับอัตราส่วนแกนที่ได้จากการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.6 ซึ่งเป็นการทดสอบที่ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 3 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่ต้องการสำหรับการใช้งานสายอากาศ โดยในการทดสอบและการจำลองจะทดสอบแสดงให้เห็นว่า ผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองอัตราส่วนแกน มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยพบว่าอัตราส่วนแกนจากการทดสอบของสายอากาศที่ต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.2 - 3.0 GHz โดยอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าที่ต่ำกว่าผลของอัตราส่วนแกนที่ได้จากการจำลอง ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากขนาดทางกายภาพและการขึ้นรูปทรงของสายอากาศอาจคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อยจากการจำลองลักษณะของสายอากาศด้วยโปรแกรมเช่นเดียวกันกับผลการทดสอบค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{22}|$



รูปที่ 5.6 ผลการจำลองกับผลทดสอบอัตราส่วนแกนกับความถี่ของสายอากาศ

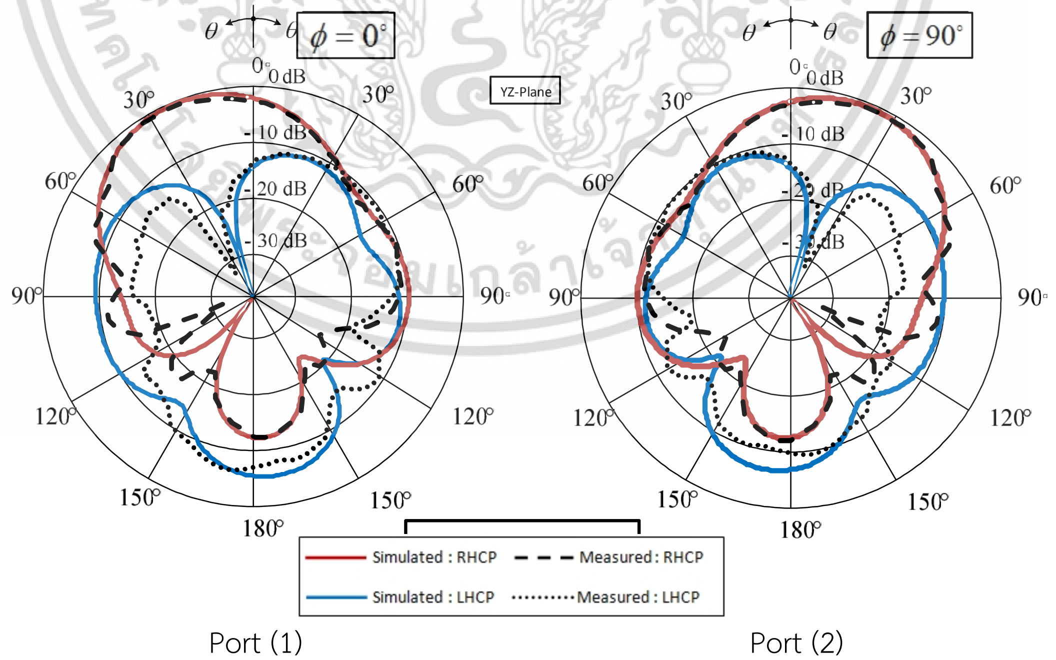
5.3.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว สำหรับการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น

ในการทดสอบเพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นต้องมีการต่อสายนำสัญญาณที่สายอากาศตัวส่งและรับ โดยสายอากาศตัวส่งต่อเข้ากับ CH1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายและสายอากาศตัวรับต่อเข้ากับ CH2 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โดยเมื่อทดสอบพอร์ต 1 พอร์ตที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

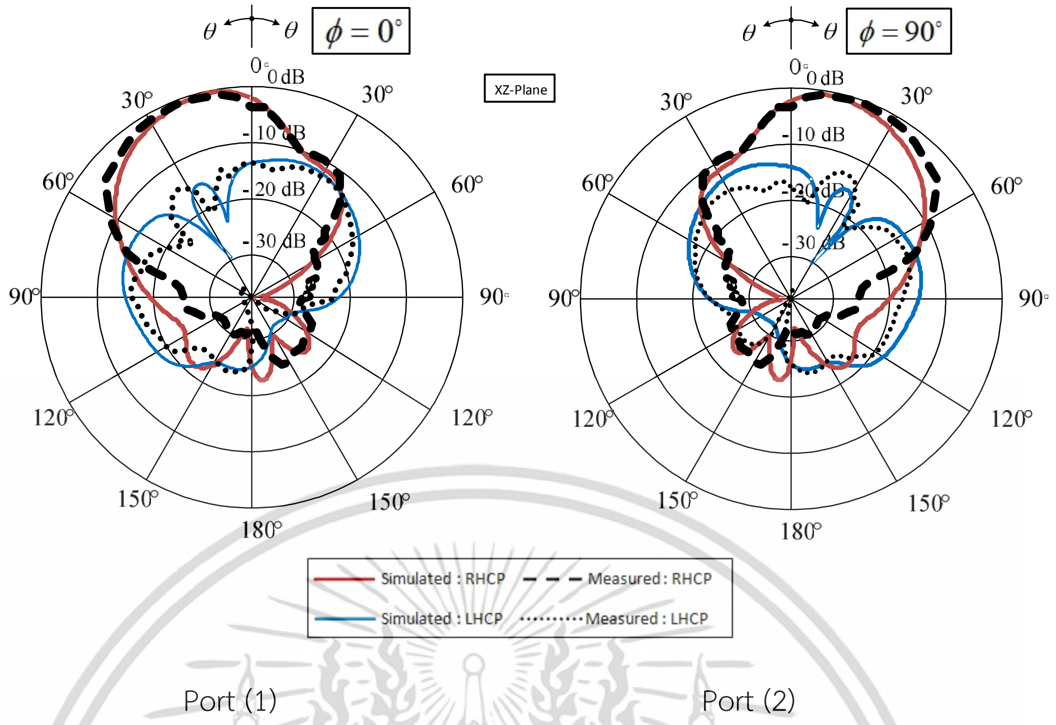
ของสายอากาศทดสอบจะต้องต่อโหลดไว้เช่นเดียวกัน จากนั้นจะทำการหมุนด้านสายอากาศตัวรับคือสายอากาศที่สร้างขึ้น ตั้งแต่ 0 องศา จนครบรอบที่ 360 องศา เช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วในการทดสอบในบทที่ 4

ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.6 ผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดสอบทั้งในระนาบ yz และ xz ทั้งในด้านโพลาไรซ์หมุนขวา (RHCP) และโพลาไรซ์หมุนซ้าย (LHCP) และพอร์ต 1 และพอร์ต 2 ซึ่งผลจากการทดสอบจะสังเกตได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ปรากฏของโพลาไรซ์หมุนขวาจะเป็นแบบทิศทางเดียวทั้งในระนาบ yz และ xz โดยในพอร์ต 1 ซึ่งตามโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบมุมของตัวแพร่กระจายคลื่นจะทำมุมไปทางซ้ายประมาณ 30 องศา โดยจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าการแพร่กระจายคลื่นจะทำมุมเบี่ยงไปทางซ้ายเช่นกัน เช่นเดียวกันกับพอร์ตที่ 2 ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นจะเบี่ยงไปทางขวาเช่นกัน ซึ่งผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้ค่อนข้างมีความสอดคล้องกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการจำลองแต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนกันอยู่ ซึ่งผลการคลาดเคลื่อนจากการทดสอบและการจำลอง วิเคราะห์ว่าอาจจะเกิดขึ้นอันเนื่องมาจาก ในการทดสอบเพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้น ต้องมีการป้อนสัญญาณด้วย SMA เข้าไปพร้อมกันกับสายนำสัญญาณซึ่งต้องเกิดการสูญเสียขึ้น และในการหมุนสายอากาศในการทดสอบเพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นตั้งแต่ 0 องศาถึง 360 องศา โดยที่ตัวสายอากาศจะต้องถูกหมุนไปพร้อมกันกับสายนำสัญญาณ ซึ่งจะส่งผลต่อสนามในแนวระนาบสนามไฟฟ้า ซึ่งอาจทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบเกิดความคลาดเคลื่อนไปจากการจำลอง ซึ่งไม่มีสายนำสัญญาณเข้ามาเกี่ยวข้อง



(ก) ผลการจำลองกับผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ YZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



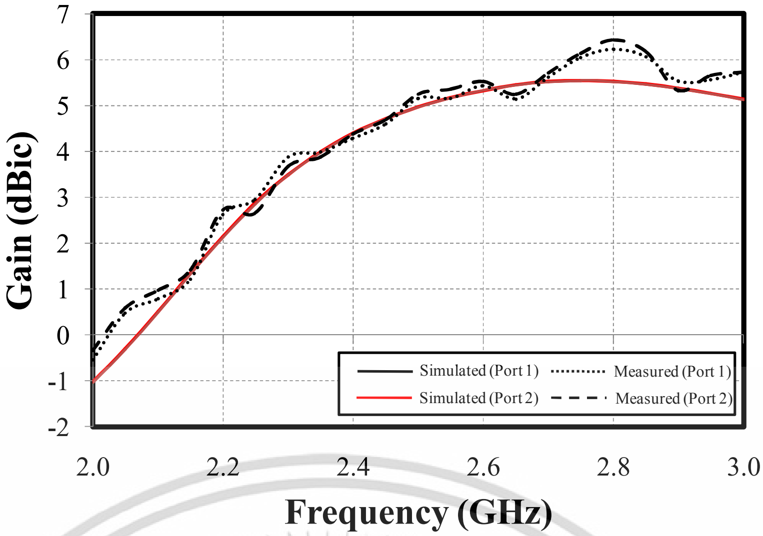
(ข) ผลการจำลองกับผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ XZ

รูปที่ 5.7 ผลการจำลองกับผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสำหรับการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น

5.3.4 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับความถี่ 2.4 GHz ที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว สำหรับการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น

พารามิเตอร์สุดท้ายที่ได้จากการทดสอบได้แก่อัตราขยายของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 5.8 แสดงอัตราขยายของสายอากาศในย่านความถี่ที่ใช้งานเปรียบเทียบกันกับผลของอัตราขยายที่ได้จากการจำลองจะเห็นได้ว่าอัตราขยายที่ได้จากผลการทดสอบและที่ได้จากผลการจำลองจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าอัตราขยายที่ได้จากผลการทดสอบจะสูงกว่าอัตราขยายที่ได้จากผลการจำลองในย่านความถี่ที่ใช้งาน ซึ่งผลจากการคลาดเคลื่อนนี้อาจจะเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากเหตุผลทางกายภาพดังที่ได้กล่าวในผลจากการทดสอบพารามิเตอร์อื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 ผลการจำลองกับผลทดสอบอัตราขยายที่ความถี่ที่ใช้งานของสายอากาศสำหรับการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น

ผลของอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบจะสูงกว่าอัตราขยายที่ได้จากการจำลอง ผลจากการคลาดเคลื่อนนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจาก ผลทางกายภาพของสายอากาศ เช่น ขนาดที่อาจจะเกิดการคลาดเคลื่อนเล็กน้อย และการขึ้นรูปอาจคลาดเคลื่อนไปจากการจำลองด้วยโปรแกรม และอีกปัจจัยหนึ่ง อาจเกิดขึ้นเนื่องจากในการจำลองที่ไม่ได้มีการรวมสายโคแอกเชียลและ SMA เข้าไปด้วย ซึ่งในการทดสอบจำเป็นต้องมีการเจาะรูด้านล่าง บนแผ่นระนาบกราวนด์เพื่อที่จะล๊อคสายโคแอกเชียลเนื่องมาจากในระหว่างการทดสอบต้องมีการเคลื่อนที่ตัวสายอากาศและสายโคแอกเชียลซึ่งจะส่งผลอย่างมากต่อผลการทดสอบสายอากาศ โดยจากผลการทดสอบพบว่าสายอากาศต้นแบบ โดยสายอากาศที่ช่วงความถี่ 2.40 ถึง 2.48 GHz จะมีอัตราขยายเท่ากับ 4.2 ถึง 5.9 dBic ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อนำสายอากาศต้นแบบมาประยุกต์ใช้เป็นแบบสวิตซ์ลำคลื่นจะมีอัตราขยายที่ลดลงโดยสามารถอธิบายได้ว่า ทิศทางของลำคลื่นได้มีการแยกเป็นสองทิศทาง SLL และ F/B มากขึ้น ทำให้ส่งผลให้อัตราขยายลดลงแต่ลดลงประมาณ 2 dB โดยผลที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศต้นแบบสามารถสรุปคุณลักษณะได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สรุปผลการทดสอบสำหรับการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น

คุณลักษณะของสายอากาศ	ผลที่ได้
ความกว้างแถบความถี่ของ $\|S_{11}\|$ & $\|S_{22}\|$ < -10 dB	2.28-3.00 GHz
ความกว้างแถบความถี่ของอัตราส่วนแกน < 3 dB	2.20-2.95 GHz
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	ทิศทางเดียว
การโพลาไรซ์	โพลาไรซ์วงกลม
อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (F/B)	20 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

คุณลักษณะของสายอากาศ	ผลที่ได้
ระดับสัญญาณลำคลื่นด้านข้าง (co pol.)	-6.8 dB (ระนาบ xz) -1.5 dB (ระนาบ yz)
อัตราขยาย (2.40 - 2.48 GHz)	4.2-5.9 dBic

5.4 สรุปผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึง โครงสร้างของสายอากาศที่ทำการสร้างขึ้นจากแผ่นทองแดง ความหนา 1 mm โดยใช้โครงสร้างเดิมจากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 โดยที่ระนาบกราวนด์จะทำมุม 30 องศากับระนาบ เพื่อการทดสอบเพื่อยืนยันผลที่ได้จากการทดสอบนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลอง เพื่อนำมาวิเคราะห์ ซึ่งเป็นการนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น ค่าการสูญเสียย้อนกลับ อัตราส่วนแกน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ทั้งในระนาบ yz และระนาบ xz และอัตราขยาย ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบในทางปฏิบัติสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.2 ซึ่งได้แสดงคุณสมบัติและลักษณะของสายอากาศ โดยผลที่ได้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ผลการทดสอบ $|S_{11}|$ และ $|S_{22}|$ ของสายอากาศที่ต่ำกว่า -10 dB จะครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.28 GHz จนถึง 3.00 GHz

2. ผลจากการทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ต่ำกว่า 3 dB จะครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.20 GHz จนถึง 2.95 GHz

3. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้เป็นแบบทิศทางเดียว โดยมีอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (F/B) เท่ากับ 20 dB และระดับสัญญาณลำคลื่นด้านข้างเป็น -6.8 dB และ -1.5 (dB) ในระนาบ xz และ yz ตามลำดับ

4. ผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศที่นำเสนอนั้น ที่ช่วงความถี่ 2.40 ถึง 2.48 GHz จะมีอัตราขยายเท่ากับ 4.2 ถึง 5.9 dBic ตามลำดับ

จากผลการทดสอบข้างต้นนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าสายอากาศที่ได้นำเสนอและทำการออกแบบสามารถใช้งานได้ในย่านความถี่ที่ต้องการคือ 2.40 GHz ถึง 2.48 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ตามมาตรฐานของเทคโนโลยี WLAN ซึ่งสายอากาศที่นำสเนอนี้สามารถนำไปติดตั้งเป็นตัวแพร่กระจายสัญญาณโดยสายอากาศมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวและมุมของการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศที่ทำมุม 30 องศา กับระนาบนี้สามารถนำไปใช้งานในลักษณะที่อาจมีการส่งสัญญาณใช้งานจากมุมที่ต่างกัน เช่น การใช้งานจากอาคารที่อยู่ในมุมที่ต่างกัน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวซึ่งมีจุดประสงค์ในการออกแบบสายอากาศเพื่อให้พารามิเตอร์ต่าง ๆ มีความเหมาะสมมากที่สุดที่จะทำให้สายอากาศมีการโพลาไรซ์วงกลมมีการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว มีโครงสร้างเหมาะสมเพื่อประยุกต์ใช้งานในเทคโนโลยี WLAN ที่ความถี่ 2.4 GHz โดยสายอากาศต้องมี $|S_{11}|$ ที่มีค่าต่ำกว่า -10dB ครอบคลุมความถี่ที่ต้องการอัตราส่วนแกนต้องต่ำ 3 dB ครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการและมีอัตราขยายที่สูง

ในหัวข้อที่6.1 จะกล่าวถึงผลสรุปโดยรวมของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งจะประกอบไปด้วยผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวผลที่ได้จากการจำลองของสายอากาศและผลที่ได้จากการทดสอบสำหรับการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่นในส่วนหัวข้อที่ 6.2 กล่าวถึงข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

6.1สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อธิบายถึงความเป็นมาและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย และอธิบายทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีไร้สาย และทฤษพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อนำไปสู่การหาขนาดของพารามิเตอร์ของสายอากาศจากนั้นนำพารามิเตอร์ต่างๆ ไปจำลองหาขนาดที่เหมาะสมด้วยโปรแกรมCST MICROWAVE STUDIO®และเมื่อได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดแล้ว นำค่าที่ได้ไปสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบและทดสอบสายอากาศเพื่อยืนยันผลการคำนวณและผลการจำลองโดยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของสายอากาศดังแสดงตามตารางที่ 4.1และตารางที่ 5.1 สำหรับการประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสวิตซ์ลำคลื่น

อ้างอิงพารามิเตอร์จากตารางที่ 4.1 สายอากาศต้นแบบถูกสร้างและทดสอบ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบบ่งบอกว่าสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวมี $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB ตลอดช่วงความถี่ใช้งานที่ 2.2 - 3.0 GHz มีอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งานที่ 2.15 - 3.00 GHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใกล้เคียงรอบทิศทางและมีผลของอัตราขยายที่แนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกับผลจากการจำลองโดยผลจากการทดสอบอัตราขยายครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.40 - 2.48 GHz มีอัตราขยายที่ 7.0 - 8.9 dBicโดยจากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 สรุปผลการทดสอบสายอากาศแผ่นบางแนวตั้งบนระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีโพลาไรซ์วงกลมและมีการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว

คุณลักษณะของสายอากาศ	ผลที่ได้
ความกว้างแถบความถี่ของ$\|S_{11}\|$ ≤-10 dB	2.2-3.0 GHz
ความกว้างแถบความถี่ของอัตราส่วนแกน < 3 dB	2.15-3.0 GHz
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	ทิศทางเดียว
การโพลาไรซ์	โพลาไรซ์วงกลม
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW)	60 องศา (ระนาบ xz) 120 องศา (ระนาบ yz)
อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (F/B)	12 dB
ระดับสัญญาณของพูด้านข้าง (co-pol.)	-11.3 dB(ระนาบ xz) -10.3 dB(ระนาบ yz)
อัตราขยาย (2.40-2.48 GHz)	7.0-8.9 dBic

จากการออกแบบ การจำลองและจากผลการทดสอบสายอากาศที่นำเสนอนี้ทำให้สามารถสรุปข้อดีของสายอากาศได้ดังนี้

1. สายอากาศสามารถรองรับการใช้งานในช่วงความถี่ 2.2 - 3.0 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ตามมาตรฐานของเทคโนโลยี WLAN ได้

2. การออกแบบสายอากาศมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ทำให้ง่ายต่อการสร้าง

3. ลดผลกระทบที่เกิดจากการสูญเสียเนื่องมาจากการเลือกใช้วัสดุที่เป็นแผ่นทองแดงแทนแผ่นปริ้นท์

4. สายอากาศถูกออกแบบให้มีการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวทำให้เอื้อต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานแบบที่เป็นการส่งแบบจุดต่อจุดเนื่องจากอัตราขยายที่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากการออกแบบ การจำลองและผลการทดสอบสายอากาศมีข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนาดังต่อไปนี้

1. เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบสายอากาศที่นำเสนอนี้ การเริ่มจะมีการเริ่มจากการออกแบบในส่วนของแขนที่วางขนานกันด้านบนซึ่งเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นเพื่อดูแนวโน้มว่าสายอากาศนี้มีแนวโน้มที่จะสามารถใช้งานในความถี่ที่ต้องการได้หรือไม่ จากนั้นทำการออกแบบในส่วนของโครงสร้างที่จะทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวตามที่ต้องการโดยการใส่แผ่นระนาบกราวนด์ด้านล่างเพื่อดูแนวโน้มของแบบรูปว่าจะมีแนวโน้มเป็นแบบใด และส่วนสุดท้ายคือการใส่โครงสร้างในส่วนที่จะทำให้เกิดการโพลาไรซ์วงกลมซึ่งจะใส่ในส่วนของส่วนเชื่อมระหว่างแขนและแผ่นระนาบกราวนด์และดูแนวโน้มที่ได้จากการจำลอง เมื่อมีทิศทางของโครงสร้างสายอากาศแล้วจึงทำการจำลองและวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมในการสร้างสายอากาศต้นแบบต่อไป

2. ในการสร้างสายอากาศเนื่องจากเป็นโครงสร้างที่ทำจากแผ่นทองแดงซึ่งในการสร้างต้องมีความระมัดระวังเพื่อให้ได้ขนาดตามขนาดในการจำลองด้วยโปรแกรม และในการขึ้นรูปต้องพยายามขึ้นรูปให้ใกล้เคียงกับการจำลองด้วยโปรแกรมมากที่สุดเช่นกัน ซึ่งทั้งสองปัจจัยนี้จะส่งผลกระทบต่อผลการทดสอบของสายอากาศโดยตรง

3. ในการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศในส่วนของจุดป้อนสัญญาณเนื่องจากต้องการเชื่อมและต่อด้วยสายโคแอกเชียลซึ่งหากมีการขยับสายโดยตรงจะส่งผลต่อผลการทดสอบเป็นอย่างมาก จึงมีความจำเป็นต้องออกแบบเพื่อหาวิธีล๊อคสายโคแอกเชียลเพื่อให้สายป้อนมีความมั่นคงและส่งผลต่อผลการทดสอบน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศพร้อมการจำลองและได้ทำการทดสอบสายอากาศเพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ที่สนใจสามารถนำไปพัฒนาและปรับปรุงโครงสร้างสายอากาศให้มีรูปแบบที่ง่ายขึ้นหรือหลากหลายมากขึ้นเพื่อการนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลากหลายขึ้นในด้านต่าง ๆ ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Antennas [Online]. Available: http://www.feng521.com

[2] Antennas [Online]. Available: http://dpcs.me/images/Wireless-Point-to-Multipoint-Solutions

[3] Antennas [Online]. Available: http://upload.wikimedia.org

[4] รศ.ดร.ประสิทธิ์ ทีฆพุฒิ และ ประพจน์ จิระสกุลพร. **ไมโครเวฟพื้นฐานและการประยุกต์ใช้งาน**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ดอกหญ้ากรุ๊ป. 2549.

[5] Antennas [Online]. Available: http:// wikipedia.org/wiki/Wireless_LAN

[6] C.A. Balanis. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 3nd ed. New Jourzy: John Wiley & Son, Inc., 2005.

[7] X. Yang, Y.Z Yin, W. Hu and S.L. Zuo "Low Profile, Small Circularly Polarized Inverted - L Antenna with Double - Folded Arms," **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, vol. 9, Aug. 2010. pp. 767-770

[8] I. Tekin, O. Manzhura and E. Niver "Broadband Circularly Polarized Antennas for UHF SATCOM," **Proc. URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)**, Aug 2011. pp. 1-4

[9] M. Li and K.-M. Luk "A New Wideband Single-Fed Circularly Polarized Antenna," **Proc. IEEE MTTS International Wireless Symposium (IWS)**, Apr. 2013. pp. 14-18

[10] N. Fhafhiem, P. Krachodnok and R. Wongsan "The Circularly Polarized Resonator Antenna using Double Polarizing Metallic EBG," **Proc. IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)**, Aug. 2012. pp. 27-29

[11] CST-Microwave Studio, User's Manual, 2006.

[12] S.A. Rezaeieh, A. Abbosh and M.A. Antoniadas "Broadband Planar Circularly Polarized Antenna for Ultra-High Frequency Applications," **IET Microwaves, Antennas & Propagation**, vol. 8 Mar. 2014. pp. 263-271

[13] K.-l. Wong. **Compact and Broadband Microstrip Antennas.** New York: JohnWiley & Sons, Inc., 2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[14] Nasimuddin, Z.N. Chen, X. Qing, "Slotted Microstrip Antennas for Circular Polarization with Compact Size," **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, vol.55 Apr. 2013. pp. 124-137

[15] D.V.N. Mendez, L.F.C. Suarez and M.B. Escudero "Circular Polarization Patch Antenna with Low Axial Ratio in a Large Beamwidth," **Proc. European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)**, Apr. 2013. pp. 3330 - 3333

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวสุขุมาล แสนแก้วทอง
วัน เดือน ปีเกิด	27 กุมภาพันธ์ 2531
ที่อยู่	100 หมู่ที่ 5 ตำบลดอนขวาง อำเภอเมืองอุทัยธานี จังหวัดอุทัยธานี 61000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2554 สำเร็จการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] S. Sankeawthong S. Dentri and C. Phongcharoenpanich, “Circularly-Polarized Unidirectional Antenna using Paralleled-in-echon Plate on the Reflector,” Thailand-Japan Microwave, Bangkok, Thailand, Nov. 2014.

[2] S. Dentri S. Sankeawthong and C. Phongcharoenpanich, “Elevated Strip Antenna on Rectangular Ground Plane for WLAN Applications,” Proc. International Conference on Embedded Systems and Intelligent Technology (ICESIT 2015), Phitsanulok, Thailand, June, 2015.

[3] S. Sankeawthong S. Dentri and C. Phongcharoenpanich, “Pattern Diversity Unidirectional Antenna Using Elevated Strip on Rectangular Ground Plane for WLAN Applications,” Proc. Thailand-Japan Microwave, Bangkok, Thailand, Aug. 2015.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้