

สายอากาศแผ่นพับที่แพร่กระจายคลื่นสองทิศทางมีโพลาไรซ์วงกลม
สำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz

FOLDED PLATE ANTENNA RADIATING CIRCULARLY POLARIZED BIDIRECTIONAL
PATTERN FOR 2.4 GHz BAND

พัทธรียา จันทร์อากาศ
PATTHAREEYA CHAN-ARPAS

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-010-010

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศแผ่นพับที่แพร่กระจายคลื่นสองทิศทางมีโพลาไรซ์วงกลม
สำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz

FOLDED PLATE ANTENNA RADIATING CIRCULARLY POLARIZED BIDIRECTIONAL
PATTERN FOR 2.4 GHz BAND



ภัทรียา จันทร์อากาศ

PATTHAREEYA CHAN-ARPAS

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 138520
วันเดือนปี 28 ต.ค. 2558

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2558

KMITL-2015-EN-M-010-010

FOLDED PLATE ANTENNA RADIATING CIRCULARLY POLARIZED BIDIRECTIONAL
PATTERN FOR 2.4 GHz BAND

PATTHAREEYA CHAN-ARPAS

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-010-010

COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สายอากาศแผ่นพับที่แพร่กระจายคลื่นสองทิศทางมีโพลาไรซ์วงกลมสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz

Thesis Title Folded Plate Antenna Radiating Circularly Polarized Bidirectional Pattern for 2.4 GHz Band

นักศึกษา นางสาวภัทริยา จันทร์อากาศ






รหัสประจำตัว 56601272

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-010-010

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | | ลายมือชื่อ |
|-------------------------------|-------------|--|
| ดร.สถาพร พรหมวงศ์ | |  |
| รศ.ดร.สุวิพล | สิทธิชีวภาค |  |
| ศ.ดร.ประยูทธ อัครเอกพาลิน | |  |
| ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาศิพงษ์ | |  |
| รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ | |  |

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558 เวลา 10.00-12.00 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 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558

| | |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | สายอากาศแผ่นพับที่แพร่กระจายคลื่นสองทิศทางมีโพลาริเซชันวงกลมสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz |
| นักศึกษา | นางสาวภัทริยา จันทร์อากาศ |
| รหัสนักศึกษา | 56601272 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมโทรคมนาคม |
| พ.ศ. | 2558 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | รศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ |

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศเอียงแบบพับที่แพร่กระจายคลื่นสองทิศทางมีโพลาริเซชันวงกลมสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้แนะนำให้นำไปประยุกต์ใช้งานในระบบ WLAN ที่ความถี่มาตรฐาน 2.4 GHz (2.4–2.48 GHz) ซึ่งมีความถี่กลาง 2.45 GHz โดยโครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยแผ่นทองแดงพับสองระนาบที่มีการป้อนสัญญาณแบบเดี่ยว สายอากาศที่นำเสนอมีคุณลักษณะ $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ตั้งแต่ 2.09–2.58 GHz มีค่าอัตราส่วนแกนที่น้อยกว่า 3 dB ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 2–2.57 GHz อัตราขยายของสายอากาศ เท่ากับ 4.82 dBic และ 4.15 dBic มีการโพลาริเซชันวงกลม และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง โดยสายอากาศที่นำเสนอมีความกว้างลำคลื่นอัตราส่วนแกนเท่ากับ 60° และ 80° บนระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ และมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังบนระนาบ xz และระนาบ yz เท่ากับ 60° และ 55° ตามลำดับ

| | |
|----------------|--|
| Thesis Title | Folded Plate Antenna Radiating Circularly Polarized Bidirectional Pattern for 2.4 GHz Band |
| Student | Ms. Patthareeya Chan-arpas |
| Student ID. | 56601272 |
| Degree | Master of Engineering |
| Program | Telecommunications Engineering |
| Year | 2015 |
| Thesis Advisor | Assoc. Prof. Dr. Chuwong Phongcharoenpanich |

ABSTRACT

This thesis proposes a folded echelon antenna radiating circularly polarized bidirectional pattern for 2.4 GHz band. The proposed antenna is designed for WLAN standards of the 2.4 GHz (2.4–2.48 GHz) with 2.45 GHz of center frequency. Antenna structure consists of two folded plates with single feed. The $|S_{11}| \leq -10$ dB can cover the frequency range from 2.09 to 2.58 GHz, and axial ratio < 3 dB can cover the frequency range from 2.00 to 2.57 GHz. The achieved gains are 4.82 dBic for left-handed circularly polarization and 4.15 dBic for right-handed circularly polarization. The proposed antenna radiates circularly polarize with bidirectional pattern. The axial ratio beamwidths in xz- and yz-planes are 60 and 80 degrees, respectively. The half-power beamwidths in xz- and yz-planes are 60 and 55 degrees, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากการสนับสนุนของอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ. ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ที่ได้มอบความเมตตา การใส่ใจดูแลและให้คำปรึกษาต่างๆ รวมทั้งให้คำแนะนำด้านวิชาความรู้ แนวคิดและกระบวนการทางงานวิจัย จนกระทั่งข้อคิดสำหรับการดำเนินชีวิตอย่างดียิ่งเสมอมา ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกๆ ท่านตลอดช่วงการศึกษาที่ผ่านมาอันซึ่งได้ประสิทธิ์ประสาทองค์วิชาความรู้ต่างๆ ให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณคุณสุทธิชัย เต็นตรี ผู้ให้แนวคิดในการวิจัยและเป็นผู้ที่ให้องค์ความรู้ในทางเทคนิคและข้อคิดอย่างเป็นระเบียบแบบแผนแก่ข้าพเจ้า และขอขอบคุณคุณคุณธีรพล ภัทรชัยสกุล ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านต่อข้าพเจ้าเสมอมา

ขอขอบคุณสมาชิกทุกท่านในห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายที่ช่วยให้คำปรึกษา คำแนะนำที่ดี มอบความช่วยเหลือต่างๆ ตลอดช่วงเวลาที่ผ่านไปและให้กำลังใจข้าพเจ้าอย่างดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่รักยิ่งของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งมีความสำคัญยิ่งที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจตลอดช่วงชีวิตที่ผ่านมา จนทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อย่างลุล่วง คุณค่าและองค์ความรู้อันเป็นประโยชน์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอมอบแต่บิดา มารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง รวมทั้งครูอาจารย์และผู้มีพระคุณที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

ภัทธรียา จันทร์อาภาส

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..... | 3 |
| 1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์..... | 3 |
| | |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ..... | 5 |
| 2.1 บทนำ..... | 5 |
| 2.2 ประวัติความเป็นมาเครือข่ายไร้สาย..... | 5 |
| 2.3 หลักการ และทฤษฎีของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN)..... | 6 |
| 2.3.1 เทคโนโลยีแบบใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency)..... | 6 |
| 2.3.1.1 แบบคลื่นความถี่แคบ (Narrow Band) | 6 |
| 2.3.1.2 คลื่นความถี่วิทยุแบบสเปกตรัมเปิด..... | 6 |
| 2.3.2 เทคโนโลยีแบบใช้สัญญาณอินฟราเรด (Infrared)..... | 7 |
| 2.3.3 ลักษณะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์..... | 7 |
| 2.3.3.1 แบบ Ad-Hoc หรือ Peer-to-Peer..... | 7 |
| 2.3.3.2 แบบ Infrastructure..... | 7 |
| 2.4 ประวัติและมาตรฐานที่ใช้กับเทคโนโลยี WLAN | 8 |
| 2.4.1 มาตรฐานเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11..... | 9 |
| 2.4.2 วิวัฒนาการของมาตรฐานเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11..... | 10 |
| 2.5 พารามิเตอร์สำคัญในการใช้งานสายอากาศ..... | 11 |
| 2.5.1 บริเวณต่างๆ ของสนามจากสายอากาศ..... | 12 |
| 2.5.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)..... | 12 |
| 2.5.2.1 แบบรูปการแพร่กระจายแบบไอโซทรอปิก แบบชี้ทิศทาง และแบบทิศทางรอบตัว | 13 |
| 2.5.2.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก (Principal Pattern)..... | 14 |
| 2.5.2.3 ลำคลื่นของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)..... | 15 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 2.5.3 แบนด์วิดธ์ของสายอากาศ (Antenna Bandwidth)..... | 17 |
| 2.5.4 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)..... | 17 |
| 2.5.5 อัตราขยาย (Gain)..... | 18 |
| 2.5.6 การโพลาไรซ์ (Polarization)..... | 19 |
| 2.5.6.1 โพลาไรซ์เชิงเส้น..... | 21 |
| 2.5.6.2 โพลาไรซ์วงกลม..... | 21 |
| 2.5.6.3 โพลาไรซ์วงรี..... | 22 |
| 2.6 กลไกหรือเทคนิคการแพร่กระจายคลื่นที่ทำให้เกิดโพลาไรซ์วงกลม..... | 25 |
| 2.7 งานวิจัยที่มีมาก่อน..... | 30 |
| 2.8 สรุป..... | 37 |
| | |
| บทที่ 3 การออกแบบและการจำลองสายอากาศ..... | 39 |
| 3.1 บทนำ..... | 39 |
| 3.2 สายอากาศ 3 มิติที่มีโพลาไรซ์วงกลมสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz..... | 39 |
| 3.3 การออกแบบสายอากาศ 3 มิติที่มีโพลาไรซ์วงกลมสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz | 40 |
| 3.3.1 การกำหนดขนาดเริ่มต้นของสายอากาศ..... | 41 |
| 3.3.2 การออกแบบสายอากาศ..... | 41 |
| 3.4 การปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศ..... | 52 |
| 3.4.1 สายอากาศเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ W | 53 |
| 3.4.2 สายอากาศเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ L | 53 |
| 3.4.3 สายอากาศเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ W_f | 54 |
| 3.4.4 สายอากาศเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ W_b | 55 |
| 3.4.5 สายอากาศเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ L_f | 55 |
| 3.4.6 สายอากาศเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ h_o | 56 |
| 3.4.7 สายอากาศเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ h | 56 |
| 3.5 ผลการจำลองสายอากาศต้นแบบ..... | 57 |
| 3.5.1 ผลการจำลอง $ S_{11} $ | 58 |
| 3.5.2 ผลการจำลองอัตราส่วนแกนเทียบกับความถี่ของสายอากาศต้นแบบ..... | 58 |
| 3.5.3 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ..... | 59 |
| 3.5.4 ผลการจำลองอัตราส่วนแกนเทียบกับมุมของสายอากาศต้นแบบ..... | 60 |
| 3.5.5 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ..... | 60 |
| 3.5.6 ผลการจำลอง Total Efficiency ของสายอากาศต้นแบบ..... | 61 |
| 3.5.7 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าของสายอากาศต้นแบบ..... | 61 |
| 3.6 สรุป..... | 63 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 4 ผลการทดสอบ..... | 65 |
| 4.1 บทนำ..... | 65 |
| 4.2 สายอากาศต้นแบบ..... | 65 |
| 4.3 การทดสอบสายอากาศ..... | 66 |
| 4.4 ผลการทดสอบสายอากาศ..... | 69 |
| 4.4.1 ผลการจำลอง $ S_{11} $ | 70 |
| 4.4.2 ผลการจำลองอัตราส่วนแกนเทียบกับความถี่ของสายอากาศ..... | 70 |
| 4.4.3 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ..... | 71 |
| 4.4.4 ผลการจำลองอัตราส่วนแกนเทียบกับมุมของสายอากาศ..... | 72 |
| 4.4.5 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศ..... | 73 |
| 4.5 สรุป..... | 74 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 76 |
| 5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์..... | 76 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา..... | 78 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 79 |
| ภาคผนวก..... | 81 |
| ภาคผนวก ก..... | 82 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 83 |
| บทความที่ได้รับการตีพิมพ์..... | 84 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|--|------|
| 2.1 | เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเครือข่ายมีสายกับเครือข่ายไร้สาย..... | 5 |
| 2.2 | มุมมองการป้อนของโหมดต่างๆ สำหรับการโพลาริซวงกลม..... | 26 |
| 3.1 | พารามิเตอร์ของสายอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์และการออกแบบ..... | 41 |
| 3.2 | พารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศ..... | 42 |
| 3.3 | พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงของสายอากาศ..... | 43 |
| 3.4 | พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงของสายอากาศ..... | 45 |
| 3.5 | พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงของสายอากาศโดยการพับแผ่นแพร่กระจายคลื่นให้เป็นรูปตัวแอล..... | 47 |
| 3.6 | พารามิเตอร์โครงสร้างสายอากาศที่ทำการเพิ่มโครงสร้างด้านล่าง..... | 49 |
| 3.7 | พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ..... | 57 |
| 3.8 | สรุปคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบ..... | 63 |
| 4.1 | พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ..... | 66 |
| 4.2 | สรุปคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบ..... | 74 |
| 5.1 | พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ..... | 77 |

สารบัญญรูปภาพ

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 1.1 | ระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย..... | 1 |
| 1.2 | สถานะแวดล้อมแบบหลากหลายวิถีและจางหาย (Multipath and Fading)..... | 2 |
| 2.1 | เครือข่ายไร้สายประเภทต่างๆ ตามมาตรฐาน IEEE802.11..... | 5 |
| 2.2 | การเชื่อมต่อแบบ Ad-Hoc..... | 7 |
| 2.3 | BSS และ ESS..... | 8 |
| 2.4 | การแบ่งบริเวณสนามจากสายอากาศ..... | 12 |
| 2.5 | ระบบโคออร์ดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ..... | 13 |
| 2.6 | รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบทิศทางรอบตัว..... | 14 |
| 2.7 | แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ของสายอากาศปากแตร..... | 15 |
| 2.8 | แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น..... | 16 |
| 2.9 | การหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแนวระนาบที่เป็นฟังก์ชันของเวลาที่ $z=0$ | 20 |
| 2.10 | การโพลาไรซ์วงกลมหมุนขวา (Right-handed CP) | 22 |
| 2.11 | การโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้าย (Left-handed CP) | 22 |
| 2.12 | โพลาไรซ์วงรีที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในระนาบ $Z=0$ | 24 |
| 2.13 | ตำแหน่งการป้อนของแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมและแผ่นระนาบวงกลมสำหรับการโพลาไรซ์วงกลม..... | 25 |
| 2.14 | การป้อนแบบจุดเดียวของแผ่นระนาบไมโครสตริปสี่เหลี่ยมสำหรับการโพลาไรซ์วงกลม..... | 27 |
| 2.15 | การโพลาไรซ์วงกลมสำหรับแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการเจาะช่องบนแผ่นระนาบ..... | 29 |
| 2.16 | การโพลาไรซ์วงกลมโดยการตัดมุมตรงข้ามของแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสและแผ่นระนาบรูปวงรีที่มีการเพิ่มแถบเข้าไป..... | 30 |
| 2.17 | โครงสร้างสายอากาศแผ่นย่านความถี่กว้างที่มีการป้อนแบบโพลาไรซ์วงกลมที่แนะนำเสนอ..... | 30 |
| 2.18 | สายอากาศเซอร์เฟสเมทาทีลูปคู่สำหรับการทำงานในระบบ WLAN ที่แนะนำเสนอ... .. | 31 |
| 2.19 | โครงสร้างสายอากาศไดโพลพับแบบแถวลำดับที่แนะนำเสนอ..... | 32 |
| 2.20 | สายอากาศช่องมุมฉากที่มีโพลาไรซ์วงกลมที่แนะนำเสนอ..... | 33 |
| 2.21 | สายอากาศสองย่านความถี่ที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางที่แนะนำเสนอ | 34 |
| 2.22 | โครงสร้างสายอากาศแผ่นความถี่กว้างที่มีโพลาไรซ์วงกลมที่แนะนำเสนอ..... | 34 |
| 2.23 | โครงสร้างสายอากาศแผ่นที่ออกแบบสำหรับระบบ WLAN ที่แนะนำเสนอ..... | 35 |
| 2.24 | โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลสองย่านความถี่ที่มีโพลาไรซ์วงกลมที่แนะนำเสนอ.... | 36 |
| 2.25 | โครงสร้างสายอากาศแผ่นรูปตัววีช่วงความถี่กว้างที่มีการโพลาไรซ์วงกลมที่แนะนำเสนอ..... | 36 |
| 3.1 | โครงสร้างสายอากาศ 3 มิติที่มีโพลาไรซ์วงกลมสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz..... | 40 |

สารบัญรูปลูกภาพ(ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 3.2 | โครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศ..... | 41 |
| 3.3 | $ S_{11} $ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศเริ่มต้น..... | 42 |
| 3.4 | โครงสร้างของสายอากาศที่มีการเพิ่มขนาดสายอากาศ..... | 43 |
| 3.5 | $ S_{11} $ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่มีความกว้างเท่ากับ $\lambda/4$ | 43 |
| 3.6 | การกระจายตัวของกระแสบนพื้นผิวสายอากาศที่มุม 0° 90° 180° และ 270° | 44 |
| 3.7 | โครงสร้างของสายอากาศที่ทำการเปลี่ยนตำแหน่ง..... | 44 |
| 3.8 | $ S_{11} $ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ทำการเปลี่ยนตำแหน่ง..... | 45 |
| 3.9 | การกระจายตัวของกระแสบนพื้นผิวสายอากาศที่มุม 0° 90° 180° และ 270° | 45 |
| 3.10 | โครงสร้างของสายอากาศที่ทำการพับแผ่นแพร์กระจายคลื่นให้เป็นรูปตัวแอล..... | 47 |
| 3.11 | $ S_{11} $ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ปรับปรุง..... | 48 |
| 3.12 | $ S_{11} $ ของสายอากาศที่ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ L_s | 48 |
| 3.13 | $ S_{11} $ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ L_s | 49 |
| 3.14 | โครงสร้างสายอากาศที่ทำการเพิ่มโครงสร้างด้านล่าง..... | 49 |
| 3.15 | $ S_{11} $ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศหลังเพิ่มโครงสร้างด้านล่าง..... | 50 |
| 3.16 | $ S_{11} $ ของสายอากาศขณะที่ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ W | 50 |
| 3.17 | $ S_{11} $ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศหลังจากปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ W | 51 |
| 3.18 | $ S_{11} $ ของสายอากาศขณะที่ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ h_o | 51 |
| 3.19 | อัตราส่วนแกนของสายอากาศตามการปรับค่าพารามิเตอร์ h_o | 52 |
| 3.20 | $ S_{11} $ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศหลังจากปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ h_o | 52 |
| 3.21 | $ S_{11} $ ของสายอากาศขณะที่ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ W | 53 |
| 3.22 | $ S_{11} $ ของสายอากาศขณะที่ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ L | 53 |
| 3.23 | $ S_{11} $ ของสายอากาศขณะที่ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ W_f | 54 |
| 3.24 | อัตราส่วนแกนของสายอากาศขณะที่ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ W_f | 54 |
| 3.25 | $ S_{11} $ ของสายอากาศขณะที่ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ W_{fb} | 55 |
| 3.26 | $ S_{11} $ ของสายอากาศขณะที่ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ L_f | 55 |
| 3.27 | $ S_{11} $ ของสายอากาศขณะที่ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ h_o | 56 |
| 3.28 | $ S_{11} $ ของสายอากาศขณะที่ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ h | 57 |
| 3.29 | ผลจำลอง $ S_{11} $ ของสายอากาศต้นแบบ..... | 58 |
| 3.30 | อัตราส่วนแกนเทียบกับความถี่ของสายอากาศต้นแบบ..... | 58 |
| 3.31 | แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ xz..... | 59 |
| 3.32 | แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ yz..... | 59 |
| 3.33 | อัตราส่วนแกนเทียบกับมุมของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz..... | 60 |
| 3.34 | อัตราขยายของสายอากาศเทียบกับความถี่..... | 60 |
| 3.35 | Total Efficiency ของสายอากาศต้นแบบ..... | 61 |

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

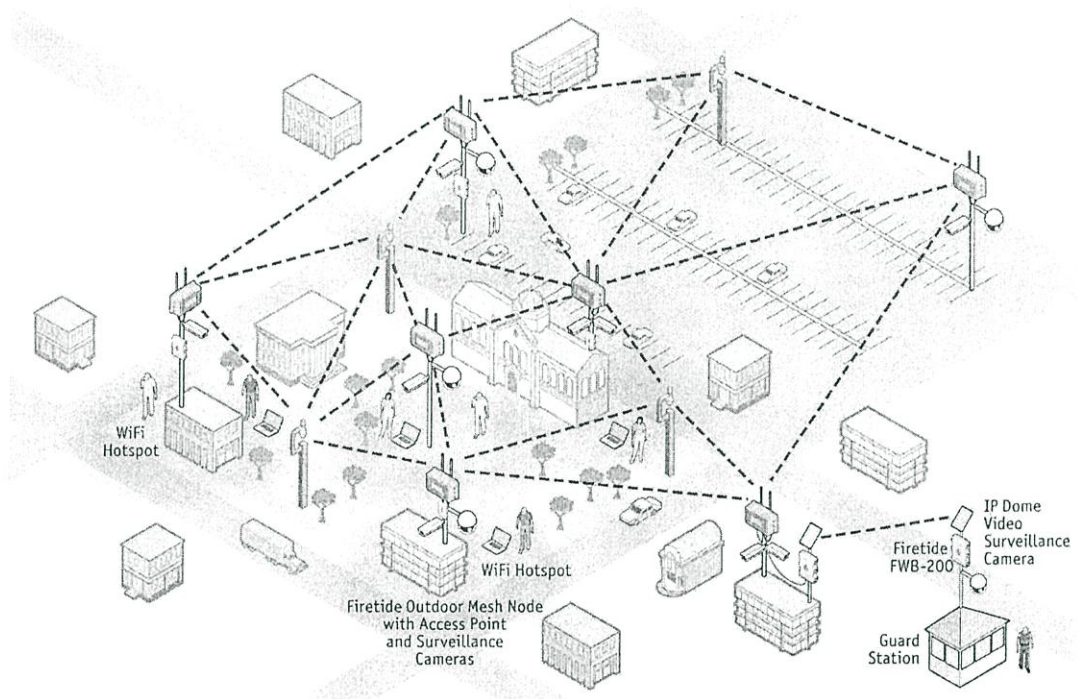
| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 3.36 | สนามไฟฟ้าของสายอากาศต้นแบบที่มุม 0° 90° 180° และ 270° | 62 |
| 4.1 | โครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอ..... | 65 |
| 4.2 | การทดสอบ $ S_{11} $ ของสายอากาศ..... | 67 |
| 4.3 | การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ..... | 68 |
| 4.4 | การติดตั้งการทดสอบสายอากาศต้นแบบ..... | 69 |
| 4.5 | ภาพถ่ายสายอากาศต้นแบบ..... | 69 |
| 4.6 | ผลการจำลองและผลการทดสอบ $ S_{11} $ ของสายอากาศ..... | 70 |
| 4.7 | ผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราส่วนแกนเทียบกับความถี่ของสายอากาศ... | 71 |
| 4.8 | ผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ xz | 71 |
| 4.9 | ผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ yz | 72 |
| 4.10 | ผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราส่วนแกนเทียบกับมุมที่ความถี่ 2.45 GHz.. | 73 |
| 4.11 | ผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศเทียบกับความถี่..... | 73 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในโลกปัจจุบันเป็นยุคแห่งการติดต่อสื่อสารและเทคโนโลยีต่างๆ ซึ่งเทคโนโลยีที่นำมาใช้เพื่อตอบสนองความต้องการมีหลากหลาย เช่น คอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์พกพา แท็บเล็ต และ โทรศัพท์มือถือสมาร์ทโฟน ซึ่งได้ถูกนำมาใช้ในชีวิตประจำวันในด้านต่างๆ มากมาย เช่น สำหรับด้านธุรกิจ นักธุรกิจต้องการรับข้อมูลข่าวสารต่างๆ เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในด้านธุรกิจ รวมทั้งด้านการศึกษา ด้านการแพทย์ ด้านอุตสาหกรรมและการขนส่งต่างๆ เป็นต้น เทคโนโลยีเหล่านี้ก็เข้ามามีบทบาทอย่างมากเช่นกัน



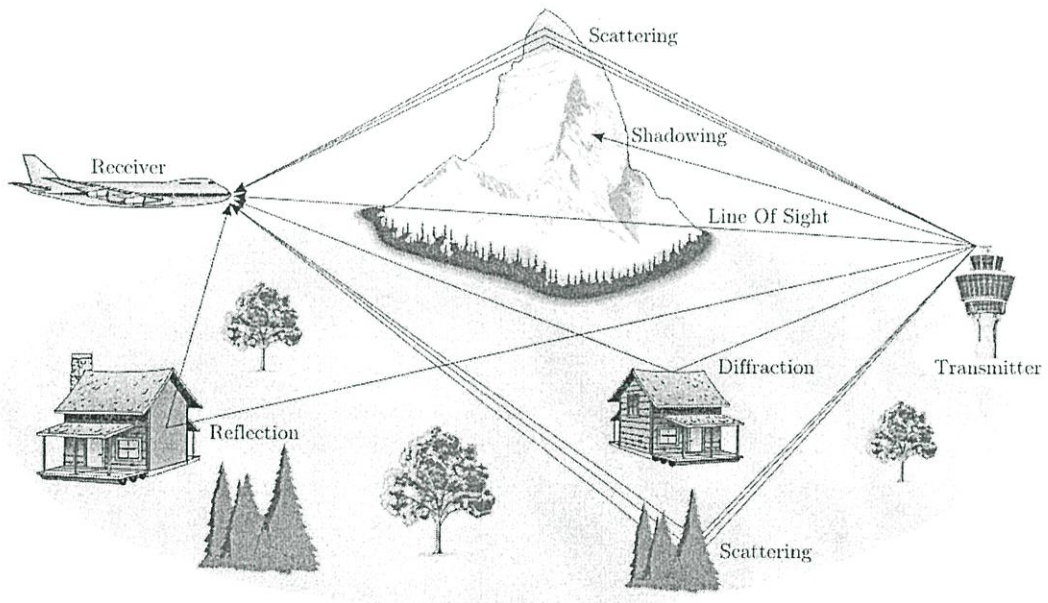
รูปที่ 1.1 ระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย [1]

โดยเทคโนโลยีที่นิยมนำมาใช้กันคือระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ดังแสดงดังรูปที่ 1.1 ซึ่งระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย WLAN (Wireless Local Area Network) คือระบบการสื่อสารข้อมูลที่นำมาใช้ทดแทน หรือเพิ่มต่อกับระบบเครือข่าย LAN แบบใช้สายแบบดั้งเดิมโดยใช้การส่งคลื่นความถี่วิทยุในย่านวิทยุ RF และคลื่นอินฟราเรดในการรับและส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องผ่านทางอากาศ ทะลุกำแพง เพดาน หรือสิ่งก่อสร้างอื่นๆ โดยปราศจากความต้องการของการเดินสาย และนอกจากนั้นระบบเครือข่ายไร้สายก็ยังมีคุณสมบัติครอบคลุมทุกอย่างเหมือนกับระบบ LAN ใช้สาย โดยข้อเด่นของระบบ WLAN คือไม่ต้องใช้สายในการเชื่อมต่อระบบ ทำให้การเคลื่อนย้ายการใช้งานทำได้โดยสะดวก ซึ่งต่างจากระบบ LAN แบบใช้สายที่ต้องใช้เวลาและการลงทุนในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งการใช้งานเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยการเชื่อมต่อ WLAN มีทั้งแบบเชื่อมต่อระหว่าง

เครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยกัน และเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านอุปกรณ์กระจายสัญญาณ (Access Point) นอกจากนี้ยังสามารถใช้กับอุปกรณ์ไร้สายอื่นๆได้ เช่น คอมพิวเตอร์พกพา แท็บเล็ต และโทรศัพท์มือถือสมาร์ทโฟน ดังนั้นระบบ WLAN จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

ระบบ WLAN มีข้อดีคือเป็นระบบที่มีความเสถียร เข้าถึงข้อมูลสื่อสารได้อย่างรวดเร็ว และความสะดวกกับการใช้งานในทุกๆที่ โดยได้รับความนิยมในการใช้ตามบ้านเรือนอันเนื่องมาจากความง่ายในการติดตั้ง และมีการใช้กันมากในย่านธุรกิจและในอาคารขนาดใหญ่ เพื่อให้บริการลูกค้าซึ่งปกติจะให้บริการฟรีเพื่อการเข้าถึงข้อมูลต่างๆผ่านอินเทอร์เน็ต รวมทั้งยังใช้ใน ในบริษัทหรือองค์กร หรือในมหาวิทยาลัยและสถานศึกษาต่างๆอีกด้วย ซึ่งเมืองใหญ่ๆ ในโลกนั้นล้วนแต่มีระบบ WLAN ให้บริการฟรีรวมถึงกรุงเทพมหานคร ซึ่งความถี่ของระบบ WLAN ที่ใช้งานกันในปัจจุบันได้แก่ 2.4 GHz (2.400 GHz ถึง 2.484 GHz) 5.8 GHz (5.725 GHz ถึง 5.825 GHz) และระบบ WiMAX 5.5 GHz

ระบบ WLAN หรือ โครงข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย มาตรฐานความเร็วที่ใช้ในการสื่อสารหรือเชื่อมต่อกัน มีมาตรฐานรองรับ คือ IEEE 802.1a IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g ซึ่งแต่ละมาตรฐานจะบอกถึงความเร็ว และ ความถี่ที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารกัน ในประเทศไทยอนุญาตให้ใช้ช่องคลื่นความถี่ 2.4 GHz เป็นคลื่นความถี่เสรี ที่ทุกคนสามารถติดตั้งและใช้งานได้ จึงทำให้ในประเทศไทยจะมีอุปกรณ์กระจายสัญญาณ (Access Point) ที่จำหน่ายเพียงสองมาตรฐานคือ IEEE 802.11b และ 802.11g เท่านั้น



รูปที่ 1.2 สภาวะแวดล้อมแบบหลายวิถีและจางหาย (Multipath and Fading) [2]

สายอากาศจึงเป็นส่วนสำคัญในระบบสื่อสารไร้สายระบบต่างๆ โดยสายอากาศโพลาริซวงกลมเป็นที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการสื่อสารไร้สาย รวมถึงระบบ WLAN โดยเฉพาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานในสภาวะแวดล้อมแบบหลายวิถีและจางหาย (Multipath and Fading) ซึ่งเป็นสภาวะแวดล้อมที่มีวัตถุต่างๆ เป็นสิ่งกีดขวาง ซึ่งทำให้สัญญาณที่ส่งมาเกิดการสะท้อน การหักเห เกิดการกระเจิงในหลายทิศทาง และมีการจางหายของสัญญาณเกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1.2 จากสภาวะแวดล้อมดังกล่าวทำให้การโพลาริซวงกลมของสัญญาณมีความไม่แน่นอนเมื่อไปถึงเครื่องรับหรือไม่

สามารถรับสัญญาณได้ ดังนั้นการใช้สายอากาศที่มีโพลาริซวงกลมจึงสามารถแก้ปัญหาเรื่องนี้ได้ ข้อดีของสายอากาศโพลาริซวงกลมคือ สามารถรับส่งข้อมูลแม้สายอากาศไม่มีการจัดวางในทิศทางที่แน่นอน ทำให้สายอากาศโพลาริซวงกลมจึงถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้นำเสนอสายอากาศเยื้องแบบพับที่แพร่กระจายคลื่นสองทิศทางมีโพลาริซวงกลมสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในระบบ WLAN โดยอาศัยทฤษฎีและวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศและทำการศึกษาวิจัยถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ของสายอากาศ เพื่อพัฒนาให้ได้สายอากาศที่มีค่าเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบ WLAN มากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบสายอากาศสำหรับระบบ WLAN ซึ่งมีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลม และมีประสิทธิภาพการทำงานที่เหมาะสมกับระบบ WLAN การศึกษาและวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการศึกษาและวิเคราะห์อิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศที่มีผลต่อระบบ WLAN เช่น ขนาดของแผ่นแพร่กระจายคลื่น ความสูงระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นและระนาบกราวด์ ขนาดของสายอากาศ เป็นต้น ซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้มีผลทำให้สายอากาศมีคุณสมบัติและคุณลักษณะเปลี่ยนไป จึงต้องทำการออกแบบสายอากาศที่ต้องการ โดยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อสายอากาศ โดยอาศัยโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ปัญหาทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบสามมิติในการจำลองผลและการสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศ ดังนั้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาสายอากาศสำหรับระบบ WLAN ที่มีโพลาริซวงกลมและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง

1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย วัตถุประสงค์การศึกษาขอบเขตการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงพื้นฐานของระบบ WLAN รวมถึงมาตรฐานที่ใช้ในระบบ หลักการและทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งจะถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 3 กล่าวถึงการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสายอากาศที่จะทำการสร้าง เริ่มต้นจากการวิเคราะห์โดยการคำนวณหาความกว้างและความยาวของตัวแพร่กระจายคลื่น อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ จากนั้นนำค่าที่ได้จากการคำนวณไปวิเคราะห์ในโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® และทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของสายอากาศเพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ |S11| ที่ใช้งานได้ทั้งย่านความถี่ตั้งแต่ 2.4 GHz ถึง 2.48 GHz อัตราส่วนแกน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยายของสายอากาศ โดยการออกแบบและวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสายอากาศเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณลักษณะตามที่ต้องการและเหมาะสมกับความต้องการของระบบ WLAN มากที่สุด

บทที่ 4 กล่าวถึงผลจากการทดสอบสายอากาศที่ได้ทำการวิเคราะห์มาในขั้นต้นแล้วนำมาสร้างสายอากาศจำลอง จากนั้นนำผลจากการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลในทางปฏิบัติ โดยแสดงถึง $|S_{11}|$ อัตราส่วนแกน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยายของสายอากาศ โดยนำผลทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3

บทที่ 5 กล่าวถึงข้อสรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ ผลกระทบต่างๆในการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ผลทดสอบของสายอากาศทั้งหมดที่ได้ทำการสร้างขึ้นพร้อมด้วย ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศ ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาสายอากาศต่อไป

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

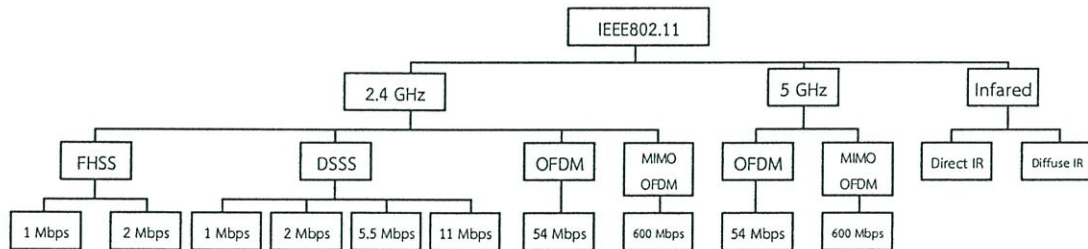
ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมา ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการทั่วไปของระบบ WLAN ที่ความถี่ 2.4 GHz มาตรฐานของระบบ WLAN ชนิดของสายอากาศที่ทำการศึกษา ทฤษฎีพื้นฐานในการออกแบบสายอากาศสำหรับระบบ WLAN และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศซึ่งนำมาใช้ในระบบ WLAN ที่ความถี่ 2.4 GHz

2.2 ประวัติความเป็นมาเครือข่ายไร้สาย

ระบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless LAN) [3] เกิดขึ้นครั้งแรก ในปี ค.ศ. 1971 บนเกาะฮาวายโดยโปรเจกต์ของนักศึกษาของมหาวิทยาลัยฮาวาย ที่ชื่อว่า "ALOHNET" ขณะนั้นลักษณะการส่งข้อมูลเป็นแบบ Bi-directional ส่งไป-กลับง่าย ๆ ผ่านคลื่นวิทยุ สื่อสารกันระหว่างคอมพิวเตอร์ 7 เครื่องซึ่งตั้งอยู่บนเกาะ 4 เกาะโดยรอบ และมีศูนย์กลางการเชื่อมต่ออยู่ที่เกาะ ๑ แห่ง ที่ชื่อว่า Oahu

ในปี 1990 เครือข่ายไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ได้พัฒนาขึ้นใหม่อีก พร้อมกันนั้นได้พัฒนาเครื่องส่งและเครื่องรับ แต่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับการผลิตอุปกรณ์ ทำให้บางประเทศไม่ค่อยนิยมใช้

ในปี 1992 องค์กร IEEE ได้เข้ามาทำหน้าที่กำหนดมาตรฐานเครือข่ายไร้สาย โดยกำหนดมาตรฐาน 802.11 เพื่อใช้ระบุมาตรฐานเครือข่ายไร้สายในรุ่นต่างๆ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เครือข่ายไร้สายประเภทต่างๆ ตามมาตรฐาน IEEE802.11

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเครือข่ายมีสายกับเครือข่ายไร้สาย

| ลำดับ | เครือข่ายมีสาย (Wired) | เครือข่ายไร้สาย (Wireless) |
|-------|--|--|
| 1 | ไม่ต้องแชร์ความถี่กันใช้ สายสัญญาณแต่ละเส้นสามารถใช้ช่องสัญญาณความถี่เดียวกันได้ | ต้องแชร์กันใช้ช่องสัญญาณคลื่นความถี่เดียวกัน |
| 2 | มีอัตราการลดทอนสัญญาณต่ำ สามารถส่งได้ไกล | มีอัตราการลดทอนสัญญาณสูงส่งสัญญาณได้ระยะสั้น |
| 3 | มีสัญญาณรบกวนต่ำ | มีสัญญาณรบกวนสูง |
| 4 | มีความคล่องตัวต่ำ | มีความคล่องตัวสูง เนื่องจากไม่ต้องเดินสาย |

2.3 หลักการ และทฤษฎีของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN)

โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย หรือ WLAN คือระบบที่เชื่อมโยงคอมพิวเตอร์เข้าด้วยกันเป็นเครือข่ายภายในพื้นที่แบบไร้สาย โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุในการเชื่อมต่อหรือสื่อสารกัน การเชื่อมต่อแบบไร้สายมีทั้งแบบเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยกัน และเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านอุปกรณ์กระจายสัญญาณ การส่งข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายแบบไร้สายนั้นมีอยู่ 2 เทคโนโลยี คือ

2.3.1 เทคโนโลยีแบบใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency)

ระบบคลื่นความถี่วิทยุเป็นการสื่อสารระยะไกล ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการทะลุผ่านสิ่งกีดขวาง อีกทั้งยังเป็นการส่งแบบรอบทิศทางซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- แปลงข้อมูลจากดิจิทัลไปเป็นแบบอนาล็อก โดยจะมีการดัดแปลงข้อมูลไบนารีไปเป็นคลื่นความถี่วิทยุโดยคลื่นนี้จะถูกส่งไปยังเครื่องส่งความถี่วิทยุ
- เครื่องส่งสัญญาณวิทยุจะส่งคลื่นวิทยุในชุดความถี่ที่สุ่มอัตรา 0.4 วินาทีต่อช่อง เรียกว่าสเปกตรัมแปรกระโดดข้ามความถี่ (Frequency-hopping Spread Spectrum)
- ฝ่ายรับจะทำการรับโดยข้ามความถี่ตามตัวส่งและทำการประมวลผลสัญญาณที่ได้รับ พร้อมทั้งกระจายคลื่นวิทยุกลับอีกครั้ง
- เมื่อได้รับสัญญาณแล้วเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เป็นตัวรับจะทำการแปลงคลื่นความถี่วิทยุเหล่านี้ไปเป็นข้อมูลไบนารีอีกครั้ง

การรับส่งโดยใช้เทคโนโลยีแบบใช้คลื่นความถี่วิทยุมี 2 ประเภท

2.3.1.1 แบบคลื่นความถี่แคบ (Narrow Band) มีความถี่แบ่งเป็น 3 ช่วงสำหรับใช้กับวงการอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ ได้แก่ ความถี่ 902 MHz ถึง 928 MHz ความถี่ 2.14 GHz ถึง 2.484 GHz และความถี่ 5.725 GHz ถึง 5.850 GHz โดยการใช้งานต้องมีการขออนุญาตก่อนจาก FCC (Federal Communication Committee)

2.3.1.2 คลื่นความถี่วิทยุแบบสเปกตรัมแปรกระโดด เป็นการวิธีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณข้อมูลเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ความถี่วิทยุมากกว่าความต้องการเพื่อป้องกันคลื่นรบกวนและการ ดักฟังที่มีความถี่แบ่งเป็น 2 ช่วง ได้แก่ความถี่ 902 MHz ถึง 928 MHz และความถี่ 2.4 GHz ถึง 2.484 GHz ซึ่งไม่ต้องได้รับอนุญาตจาก FCC โดยการส่งแบบ สเปกตรัมแปรกระโดด ที่ใช้กันโดยทั่วไปมีอยู่ 2 แบบ คือ

- แบบ Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)

การส่งสัญญาณรูปแบบนี้จะใช้ความถี่พาหะเพียงความถี่เดียว และจะเปลี่ยนแปลงไปมาอย่างต่อเนื่องในลักษณะหรือรูปแบบที่เป็นที่เข้าใจตรงกันระหว่างผู้ส่งกับผู้รับ ซึ่งเมื่อทางด้านผู้ส่งกับผู้รับสามารถทำงานประสานกันได้แล้ว จะทำให้วิธีการส่งแบบนี้ป้องกันสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่ข้างเคียงได้เป็นอย่างดี นอกจากนั้นแล้วรูปแบบที่ตกลงกันไว้ระหว่างผู้ส่งกับผู้รับก็สามารถที่จะปรับเปลี่ยนไปได้ตลอดเวลาทำให้เกิดความปลอดภัยของข้อมูลสูง

- แบบ Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

รูปแบบนี้จะใช้การเข้ารหัส โดยการแปลงเลขฐานสองแต่ละบิตในข้อมูลเดิมจะส่ง ไปให้อยู่ในรูปแบบเลขฐานสองที่มีความยาวเพิ่มมากขึ้น ข้อมูลที่แปลงแล้วนี้จะถูกส่งไปพร้อมๆกัน ในลักษณะขนาน ซึ่งหากผู้รับสามารถจดจำรูปแบบการแปลงข้อมูลได้ก็จะได้รับข้อมูลที่ส่งไป โดยที่

สัญญาณรบกวนไม่สามารถทำให้ข้อมูลเสียหายไปได้ หรือหากรูปแบบที่ส่งไปเกิดผิดพลาด ทางฝ่ายรับก็สามารถที่จะใช้เทคนิคในทางสถิติเพื่อกู้ข้อมูลให้กลับคืนมาได้

2.3.2 เทคโนโลยีแบบใช้สัญญาณอินฟราเรด (Infrared)

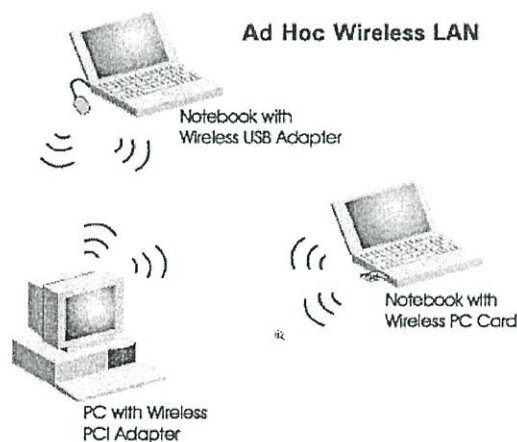
อินฟราเรดเป็นของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่เหนือคลื่นวิทยุและต่ำกว่าแสงที่มองเห็น โดยแสงอินฟราเรดสามารถใช้ส่งข้อมูลได้ถึงแม้ว่าการส่งจะถูกจำกัดให้เป็นแนวตรง และต้องต่อเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลเข้ากับเครื่องพิมพ์หรือคอมพิวเตอร์เครื่องอื่นเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลได้โดยไร้สาย หลักการทำงานของอินฟราเรด คือ การส่งพัลส์ของแสงอินฟราเรดจะถูกส่งไปกลับระหว่างอุปกรณ์สองตัวเพื่อขนถ่ายแพ็คเกจของข้อมูล ที่ประกอบกันเป็นแพ็คเกจจะถูกสื่อสารด้วยพัลส์เปิด/ปิดของแสงอินฟราเรด โดยพัลส์จะถูกอ่านในรูปของรหัสไบนารี ฝ่ายรับโฟโตไดโอดของเครื่องปลายทางจะรับแพ็คเกจซึ่งจะถูกแปลงกลับไปเป็นข้อมูลอีกครั้ง ถ้ามีวัตถุมาขัดขวางของพัลส์ของอินฟราเรดขณะที่ข้อมูลกำลังถูกส่ง สัญญาณจะถูกบล็อกข้อมูลที่ส่งก็จะเกิดข้อผิดพลาดและต้องทำการส่งข้อมูลที่ขาดหายไปใหม่

2.3.3 ลักษณะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์

ระบบ WLAN ได้กำหนดลักษณะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ภายในเครือข่าย WLAN ไว้ 2 ลักษณะคือ แบบ Ad-Hoc หรือ Peer-to-Peer และ แบบ Infrastructure

2.3.3.1 แบบ Ad-Hoc หรือ Peer-to-Peer

มาตรฐาน WLAN ในแบบ Ad-Hoc หรือ Peer-to-Peer เป็นเครือข่ายที่ไม่มีสถานีแม่ข่ายและไม่มี การเชื่อมต่อกับเครือข่ายอื่นในบริเวณ WLAN ในแบบ Ad-Hoc จะถูกเรียกว่า Independent Basic Service Set (IBSS) ซึ่งสถานีผู้ใช้หนึ่งสามารถติดต่อสื่อสารข้อมูลกับสถานีผู้ใช้อื่นๆในเซต IBSS เดียวกันได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านสถานีแม่ข่ายแต่สถานีผู้ใช้จะไม่สามารถรับส่งข้อมูลกับเครือข่ายอื่นๆ ได้ ดังรูปที่ 2.2

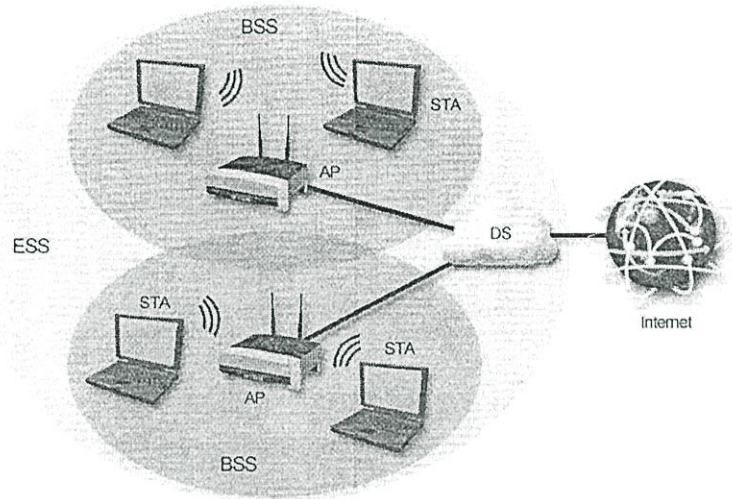


รูปที่ 2.2 การเชื่อมต่อแบบ Ad-Hoc [4]

2.3.3.2 แบบ Infrastructure

โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ในเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN จะเชื่อมต่อกันในลักษณะของโหมด Infrastructure ซึ่งเป็นโหมดที่อนุญาตให้อุปกรณ์ภายใน WLAN สามารถเชื่อมต่อกับเครือข่าย

อื่นได้ ในโหมด Infrastructure นี้เครือข่าย IEEE 802.11 WLAN จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ 2 ประเภทได้แก่ สถานีผู้ใช้ (Client Station) ซึ่งก็คืออุปกรณ์คอมพิวเตอร์ (Desktop, Laptop, หรือ PDA ต่างๆ) ที่มีอุปกรณ์ Client Adapter เพื่อใช้รับส่งข้อมูลผ่าน IEEE 802.11 WLAN และสถานีแม่ข่าย (Access Point) ซึ่งทำหน้าที่ต่อเชื่อมสถานีผู้ใช้เข้ากับเครือข่ายอื่น (ซึ่งโดยปกติจะเป็นเครือข่าย IEEE 802.3 Ethernet LAN) การทำงานในโหมด Infrastructure มีพื้นฐานมาจากระบบเครือข่ายโทรศัพท์มือถือ กล่าวคือสถานีผู้ใช้จะสามารถรับส่งข้อมูลโดยตรงกับสถานีแม่ข่ายที่ให้บริการแก่สถานีผู้ใช้นั้นอยู่เท่านั้น ส่วนสถานีแม่ข่ายจะทำหน้าที่ส่งต่อ (forward) ข้อมูลที่ได้รับจากสถานีผู้ใช้ไปยังจุดหมายปลายทางหรือส่งต่อข้อมูลที่ได้รับจากเครือข่ายอื่นมายังสถานีผู้ใช้



รูปที่ 2.3 BSS และ ESS [5]

- Basic Service Set (BSS)

Basic Service Set (BSS) หมายถึงบริเวณของเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN ที่มีสถานีแม่ข่าย 1 สถานี ซึ่งสถานีผู้ใช้อยู่ภายในขอบเขตของ BSS นี้ทุกสถานีจะต้องสื่อสารข้อมูลผ่านสถานีแม่ข่ายดังกล่าวเท่านั้น

- Extended Service Set (ESS)

Extended Service Set (ESS) หมายถึงบริเวณของเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN ที่ประกอบด้วย BSS มากกว่า 1 BSS ซึ่งได้รับการเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน สถานีผู้ใช้สามารถเคลื่อนย้ายจาก BSS หนึ่งไปอยู่ในอีก BSS หนึ่งได้โดย BSS เหล่านี้จะทำการ Roaming หรือติดต่อสื่อสารกันเพื่อทำการโอนย้ายการให้บริการสำหรับสถานีผู้ใช้อย่างกล่าว ซึ่งแสดงรูปที่ 2.3

2.4 ประวัติและมาตรฐานที่ใช้กับเทคโนโลยี WLAN

การใช้งานเครือข่ายไร้สายมีอัตราการเติบโตเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วนับตั้งแต่มาตรฐาน IEEE 802.11 เกิดขึ้น เครือข่ายไร้สายก็ได้รับการปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งปัจจุบันเครือข่ายไร้สายสามารถใช้งานได้ด้วยความสะดวก และมีความปลอดภัยสูงชันมาก นอกจากนี้ก็ยังให้อัตราความเร็วของการสื่อสารที่เพิ่มสูงขึ้นจนสามารถรองรับกับการใช้งานในด้านต่างๆ ได้อย่างดี ไม่ว่าจะเป็นการใช้งานอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง การใช้งานวิดีโอสตรีมมิ่งมัลติมีเดียและการใช้งาน

ด้านความบันเทิงต่างๆ สำหรับการประยุกต์ใช้งานเครือข่ายไร้สายนับว่ามีอย่างหลากหลาย ซึ่งยกตัวอย่างได้ต่อไปนี้

- ผู้ใช้งานตามบ้านเรือนที่พัก สามารถนำระบบเครือข่ายไร้สายมาใช้งานทั้งการแชร์การใช้งานอินเทอร์เน็ตร่วมกับสมาชิกในครอบครัว รับฟังและรับชมสื่อบันเทิงบนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตผ่านผลิตภัณฑ์ไร้สายแบบต่างๆ ได้จากทุกๆ ที่ภายในบริเวณบ้านโดยไม่ต้องเดินสายนำสัญญาณให้ยากลำบาก

- ผู้ใช้งานภายในองค์กร สามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มผลผลิตของการทำงานของพนักงาน ลดค่าใช้จ่ายของการวางสายนำสัญญาณลง ใช้ขยายขอบเขตการใช้งานเครือข่ายเดิมให้มีความยืดหยุ่น ในกิจการโรงแรมสามารถให้บริการแก่แขกผู้มาเข้าพักได้โดยสะดวก ร้านอาหารสามารถนำมาให้บริการกับลูกค้าที่เข้ามาสั่งอาหาร, ผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเดินสายสัญญาณให้เข้าถึงจุดบริการต่างๆ มากขึ้น และสามารถให้บริการในจุดบริการที่สายสัญญาณไม่สามารถเข้าถึงได้เช่นกัน, ผู้บริหารระบบเครือข่ายสามารถเฝ้าตรวจสอบระบบ และปรับเปลี่ยนแก้ไขปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับระบบเครือข่ายจากจุดใดก็ได้ ทำให้สะดวกและรวดเร็วต่อการจัดการมากขึ้น

- ผู้ใช้งานภายในสถานศึกษา สถานศึกษาสามารถใช้เครือข่ายไร้สายโดยให้นักศึกษาสามารถเข้าเรียนในแบบออนไลน์ได้ สามารถสืบค้นข้อมูลบนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตจากจุดใดจุดหนึ่งของสถาบันได้ ช่วยให้นักศึกษาสามารถใช้งานได้สะดวกและรวดเร็วมากขึ้น

2.4.1 มาตรฐานเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11 [6]

มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้รับการตีพิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2540 โดย IEEE (The Institute of Electronics and Electrical Engineers) และเป็นเทคโนโลยีสำหรับ WLAN ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด คือข้อกำหนดสำหรับอุปกรณ์ WLAN ในส่วนของ Physical (PHY) Layer และ Media Access Control (MAC) Layer โดยในส่วนของ PHY Layer มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้กำหนดให้อุปกรณ์มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 1 Mbps 2 Mbps 5.5 Mbps 11 Mbps และ 54 Mbps โดยมีสื่อ 3 ประเภทให้เลือกใช้ได้แก่ คลื่นวิทยุที่ความถี่สาธารณะ 2.4 GHz 5 GHz และ อินฟราเรด (1 และ 2 Mbps เท่านั้น) สำหรับในส่วนของ MAC Layer มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้ กำหนดให้มีกลไกการทำงานที่เรียกว่า CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับหลักการ CSMA/CD (Collision Detection) ของมาตรฐาน IEEE 802.3 Ethernet ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปในเครือข่าย LAN แบบใช้สายนำสัญญาณ นอกจากนี้ในมาตรฐาน IEEE802.11 ยังกำหนดให้มีทางเลือกสำหรับสร้างความปลอดภัยให้กับเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN โดยกลไกการเข้ารหัสข้อมูลและการตรวจสอบผู้ใช้ ที่มีชื่อเรียกว่า WEP (Wired Equivalent Privacy) อีกด้วย

เนื่องจากมาตรฐาน IEEE 802.11 ในยุคเริ่มแรกนั้นให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ค่อนข้างต่ำ ทั้งไม่มีการรับรองคุณภาพของการให้บริการที่เรียกว่า QoS (Quality of Service) ซึ่งมีความสำคัญในสภาพแวดล้อมที่มีแอปพลิเคชันหลากหลายประเภทให้ใช้งาน นอกจากนั้นกลไกในเรื่องการรักษาความปลอดภัยที่นำมาใช้ก็ยังมีช่องโหว่จำนวนมาก IEEE จึงได้จัดตั้งคณะกรรมการขึ้นมาหลายชุดด้วยกัน เพื่อทำการพัฒนาและปรับปรุงมาตรฐานให้มีศักยภาพเพิ่มสูงขึ้นได้แก่ IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11e IEEE 802.11f IEEE 802.11h IEEE 802.11i IEEE 802.11k IEEE 802.11n และ IEEE 802.1x

2.4.2 วิวัฒนาการของมาตรฐานเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11

- IEEE 802.11a เป็นมาตรฐานที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่เมื่อปี พ.ศ. 2542 โดยใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 54 Mbps แต่จะใช้คลื่นวิทยุที่มีความถี่ 5 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่สาธารณะสำหรับใช้งานในประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์อื่นน้อยกว่าในย่านความถี่ 2.4 GHz อย่างไรก็ตามข้อเสียหนึ่งของมาตรฐาน IEEE 802.11a ที่ใช้คลื่นวิทยุที่มีความถี่ 5 GHz ก็คือในบางประเทศย่านความถี่ดังกล่าวไม่สามารถนำมาใช้งานได้อย่างสาธารณะ ตัวอย่างเช่น ประเทศไทยไม่อนุญาตให้มีการใช้งานอุปกรณ์ IEEE 802.11a เนื่องจากความถี่ย่าน 5 GHz ได้ถูกจัดสรรสำหรับกิจการอื่นอยู่ก่อนแล้ว นอกจากนี้ข้อเสียอีกอย่างหนึ่งของอุปกรณ์ IEEE 802.11a WLAN ก็คือรัศมีของสัญญาณมีขนาดค่อนข้างสั้น (ประมาณ 30 เมตร ซึ่งสั้นกว่ารัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11b WLAN ที่มีขนาดประมาณ 100 เมตร สำหรับการใช้งานภายในอาคาร) อีกทั้งอุปกรณ์ IEEE 802.11a WLAN ยังมีราคาสูงกว่า IEEE 802.11b WLAN ด้วย ดังนั้นอุปกรณ์ IEEE 802.11a WLAN จึงได้รับความนิยมน้อยกว่า IEEE 802.11b WLAN มาก

- IEEE 802.11b เป็นมาตรฐานที่ถูกตีพิมพ์และเผยแพร่ออกมาพร้อมกับมาตรฐาน IEEE 802.11a เมื่อปี พ.ศ. 2542 ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีและได้รับความนิยมในการใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด ผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบมาให้รองรับมาตรฐาน IEEE 802.11b ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า CCK (Complimentary Code Keying) ร่วมกับเทคโนโลยี DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) เพื่อให้สามารถรับส่งข้อมูลได้ด้วยอัตราความเร็วสูงสุดที่ 11 เมกะบิตต่อวินาที โดยใช้คลื่นสัญญาณวิทยุย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่อนุญาตให้ใช้งานในแบบสาธารณะทางด้านวิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรม และการแพทย์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ใช้ความถี่ย่านนี้มีชนิด ทั้งผลิตภัณฑ์ที่รองรับเทคโนโลยี Bluetooth, โทรศัพท์ไร้สายและเตาไมโครเวฟ จึงทำให้การใช้งานนั้นมีปัญหาในเรื่องของสัญญาณรบกวนของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ข้อดีของมาตรฐาน IEEE 802.11b ก็คือสนับสนุนการใช้งานเป็นบริเวณกว้างกว่ามาตรฐาน IEEE 802.11a ผลิตภัณฑ์มาตรฐาน IEEE 802.11b เป็นที่รู้จักในเครื่องหมายการค้า Wi-Fi ซึ่งกำหนดขึ้นโดย WECA (Wireless Ethernet Compatability Alliance) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้รับเครื่องหมาย Wi-Fi ได้ผ่านการตรวจสอบและรับรองว่าเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE 802.11b ซึ่งสามารถใช้งานร่วมกันกับผลิตภัณฑ์ของผู้ผลิตรายอื่นๆ ได้

- IEEE 802.11g ได้นำเทคโนโลยี OFDM มาประยุกต์ใช้ในช่องสัญญาณวิทยุความถี่ 2.4 GHz ซึ่งอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุดที่ 54 Mbps ส่วนรัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN จะอยู่ระหว่างรัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11a และ IEEE 802.11b เนื่องจากความถี่ 2.4 GHz เป็นย่านความถี่สาธารณะสากล อีกทั้งอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ IEEE 802.11b WLAN ได้ (Backward Compatible) ดังนั้นจึงมีแนวโน้มสูงกว่าอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN จะได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายหากมีราคาไม่แพงจนเกินไปและน่าจะมาแทนที่ IEEE 802.11b ในที่สุด ตามแผนการแล้วมาตรฐาน IEEE 802.11g ได้รับการตีพิมพ์ประมาณช่วงกลางปี พ.ศ. 2546

- IEEE 802.11e ได้ปรับปรุง MAC Layer ของ IEEE 802.11 เพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานหลักการ QoS สำหรับการประยุกต์ใช้เกี่ยวกับมัลติมีเดีย เนื่องจาก IEEE 802.11e เป็นการปรับปรุง MAC Layer ดังนั้นมาตรฐานเพิ่มเติมนี้จึงสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN

ทุกเวอร์ชันได้ โดย IEEE 802.11e เป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาสำหรับการใช้งานแอปพลิเคชันทางด้านมัลติมีเดียอย่าง VoIP (Voice over IP) เพื่อควบคุมและรับประกันคุณภาพของการใช้งานตามหลักการ QoS (Quality of Service) โดยการปรับปรุง MAC Layer ให้มีคุณสมบัติในการรับรองการใช้งานให้มีประสิทธิภาพ

- IEEE 802.11f มาตรฐานนี้เป็นที่รู้จักกันในนาม IAPP (Inter Access Point Protocol) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาสำหรับจัดการกับผู้ใช้งานที่เคลื่อนที่ข้ามเขตการให้บริการของ Access Point ตัวหนึ่งไปยัง Access Point เพื่อให้บริการในแบบโรมมิ่งสัญญาณระหว่างกัน

- IEEE 802.11h มาตรฐานที่ออกแบบมาสำหรับผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สายที่ใช้งานย่านความถี่ 5 กิกะเฮิรตซ์ ให้ทำงานถูกต้องตามข้อกำหนดการใช้ความถี่ของประเทศในทวีปยุโรป

- IEEE 802.11i เป็นมาตรฐานในด้านการรักษาความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สาย โดยการปรับปรุง MAC Layer เนื่องจากระบบเครือข่ายไร้สายมีช่องโหว่มากมายในการใช้งาน โดยเฉพาะฟังก์ชันการเข้ารหัสแบบ WEP 64/128-bit ซึ่งใช้คีย์ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับสภาพการใช้งานที่ต้องการความมั่นใจในการรักษาความปลอดภัยของการสื่อสารระดับสูง มาตรฐาน IEEE 802.11i จึงกำหนดเทคนิคการเข้ารหัสที่ใช้คีย์ชั่วคราวด้วย WPA, WPA2 และการเข้ารหัสในแบบ AES (Advanced Encryption Standard) ซึ่งมีความน่าเชื่อถือสูง โดยการนำเอาเทคนิคขั้นสูงมาใช้ในการเข้ารหัสข้อมูลด้วย key ที่มีการเปลี่ยนค่าอยู่เสมอและการตรวจสอบผู้ใช้ที่มีความปลอดภัยสูง มาตรฐานเพิ่มเติมนี้จึงสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN ทุกเวอร์ชันได้

- IEEE 802.11k เป็นมาตรฐานที่ใช้จัดการการทำงานของระบบเครือข่ายไร้สาย ทั้งจัดการการใช้งานคลื่นวิทยุให้มีประสิทธิภาพ มีฟังก์ชันการเลือกช่องสัญญาณ, การโรมมิ่งและการควบคุมกำลังส่ง นอกจากนี้ก็ยังมีฟังก์ชันการร้องขอและ ปรับแต่งค่าให้เหมาะสมกับการทำงาน การหารหัสมีการใช้งานสำหรับเครื่องโคลเอนต์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ระบบจัดการสามารถทำงานจากศูนย์กลางได้

- IEEE 802.11n เป็นมาตรฐานของผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สายที่คาดการณ์กันว่า จะเข้ามาแทนที่มาตรฐาน IEEE 802.11a, IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน โดยให้อัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลในระดับ 100 เมกะบิตต่อวินาที

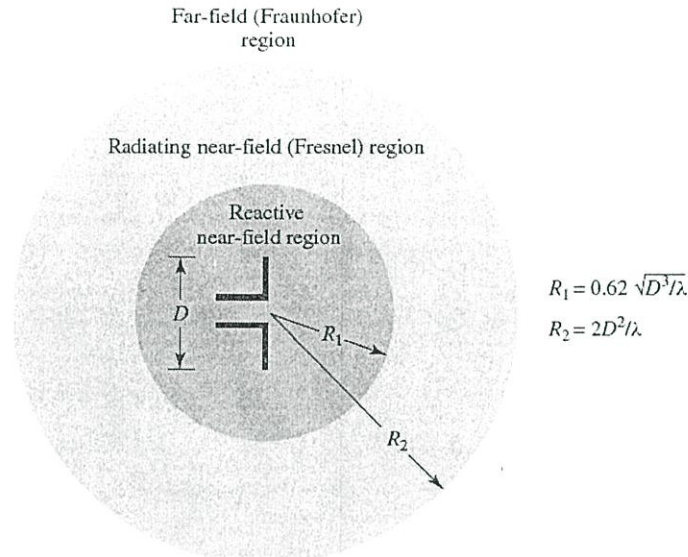
- IEEE 802.1x เป็นมาตรฐานที่ใช้งานกับระบบรักษาความปลอดภัย ซึ่งก่อนเข้าใช้งานระบบเครือข่ายไร้สายจะต้องตรวจสอบสิทธิ์ในการใช้งานก่อน โดย IEEE 802.1x จะใช้โพรโตคอลอย่าง LEAP, PEAP, EAP-TLS, EAP-FAST ซึ่งรองรับการตรวจสอบผ่านเซิร์ฟเวอร์ เช่น RADIUS, Kerberos เป็นต้น

2.5 พารามิเตอร์สำคัญในการใช้งานสายอากาศ

ในการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศ ต้องอาศัยหลักการและทฤษฎีพื้นฐานสำหรับสายอากาศ โดยคำนึงถึงพารามิเตอร์สำหรับการใช้งาน ซึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้งานสายอากาศ ได้แก่ บริเวณต่างๆ ของสนามสายอากาศ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) อัตราขยาย (Gain) การโพลาไรซ์ (Polarization) รวมถึงอัตราส่วนแกนของสายอากาศ เป็นต้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศที่น่าเสนอ โดยจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.5.1 บริเวณต่างๆ ของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไปมักจะเป็นบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive-Near Field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating - Near Field) และสนามกระจายระยะไกล ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การแบ่งบริเวณสนามจากสายอากาศ [7]

บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุดและมีสนามเป็นชนิดแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่บริเวณนี้จะมีระยะทาง $R < 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$ จากผิวของสายอากาศเมื่อ λ เป็นความยาวคลื่นและ D เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ บริเวณสนามกระจายระยะใกล้เป็นบริเวณของสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกลโดยมีสนามที่แพร่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่

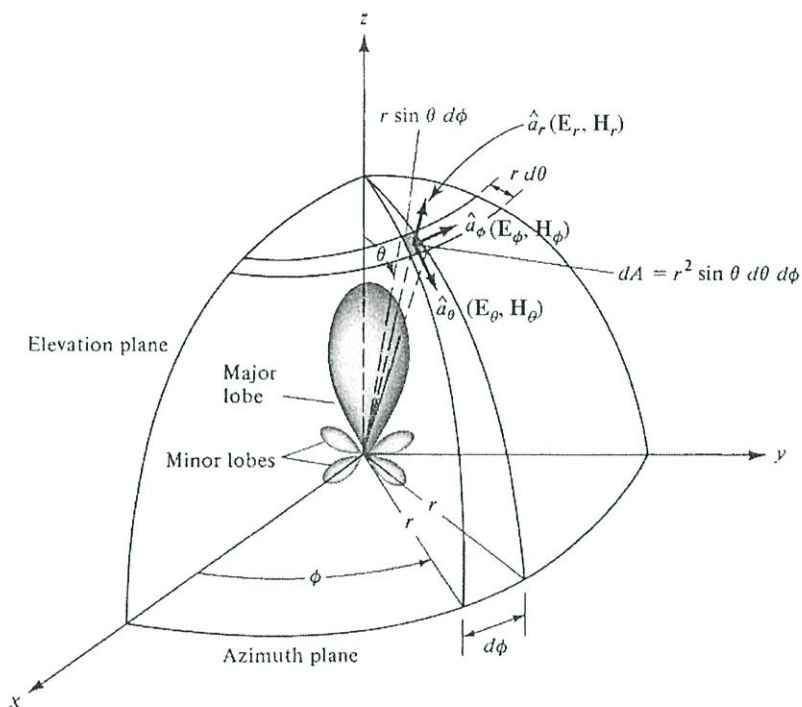
การกระจายของสนามตามมุมต่างๆนั้นแปรผันตามระยะทางจากสายอากาศ เมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้น ในบริเวณนี้จะมีระยะทาง $0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq R \leq \frac{2D^2}{\lambda}$

บริเวณสนามระยะไกลเป็นบริเวณสนามของสายอากาศ ซึ่งการแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศถ้าสายอากาศมีมิติที่ใหญ่ที่สุดเท่ากับ D บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง R มากกว่า $\frac{2D^2}{\lambda}$ จากสายอากาศ ในบริเวณนี้สามารถมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse Field) และการแพร่กระจายของสนามตามมุมต่างๆไม่ขึ้นกับระยะทางขอบในบริเวณดังกล่าวมีค่า R เท่ากับ $\frac{2D^2}{\lambda}$ และขอบนอกมีค่าเป็นอนันต์

2.5.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศหรือแบบรูปสายอากาศมีความหมายคือฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ หรือ แสดงโดยเส้นที่สามารถแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติการแพร่กระจายของสายอากาศ

ตามฟังก์ชันของสเปซโคออร์ดิเนต (Space Coordinates) ส่วนมากในกรณีของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนี้จะกำหนดการคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far-field) และแสดงให้เห็นเช่นเดียวกับฟังก์ชันตามทิศทางของโคออร์ดิเนต คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วยกำลังความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็ก (Flux) ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity) ความเข้มของสนาม (Field Strength) เฟส (Phase) หรือโพลาไรซ์ (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่

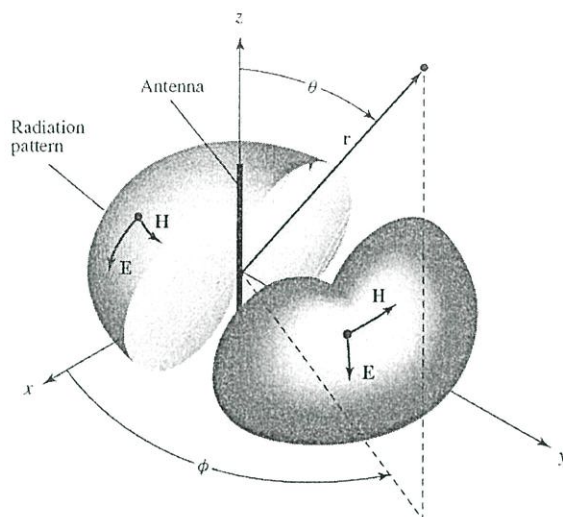


รูปที่ 2.5 ระบบโคออร์ดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ [7]

จากรูป 2.5 จะเป็นการแสดงระบบโคออร์ดิเนตที่ใช้ในการแสดงคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นสำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่า แบบรูปกำลังงาน (Power Pattern) ของสายอากาศและกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆ ที่มีรัศมีคงที่เรียกว่า สนามการแพร่กระจายคลื่น (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น

2.5.2.1 แบบรูปการแพร่กระจายแบบไอโซทรอปิก แบบชี้ทิศทางและแบบทิศทางรอบตัว (Isotropic, Directional and Omni-directional Pattern)

ตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก (Isotropic Radiation) คือสายอากาศที่ถูกสมมติขึ้นให้มีการแพร่กระจายคลื่นเท่าๆกันในทุกทิศทาง แม้ว่ามันจะเป็นแค่แนวความคิด แต่ก็มักจะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติและทิศทางของสายอากาศ



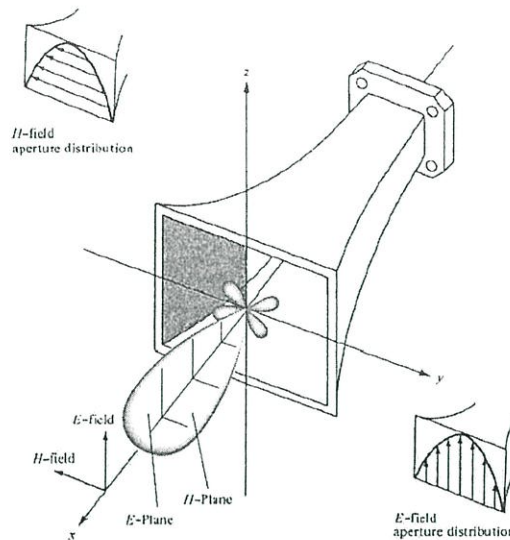
รูปที่ 2.6 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบทิศทางรอบตัว [7]

สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional Antenna) คือสายอากาศที่มีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นหรือรองรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ สายอากาศแบบทิศทางรอบตัว (Omni-directional Antenna) คุณสมบัติของสายอากาศแบบนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.6

จากรูปจะเห็นได้ว่ารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบนี้ ไม่มีทิศทางในระนาบแอสิมัทหรือระนาบมุมกวาด (Azimuth Plane) [$f(\phi), \theta = \pi/2$] แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบเอเลเวชันหรือมุมยก (Elevation Plane) [$g(\theta), \phi = \text{ค่าคงที่}$] รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวนี้เป็นกรณีพิเศษของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบชี้ทิศทาง

2.5.2.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก (Principal Pattern)

การอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศ ในเทอมของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลักของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก สำหรับสายอากาศโพลาริซิงเส้น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าจะเป็นระนาบที่บรรจุมุมเดออร์สนามไฟฟ้า และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก จะเป็นระนาบที่บรรจุมุมเดออร์สนามแม่เหล็กและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด



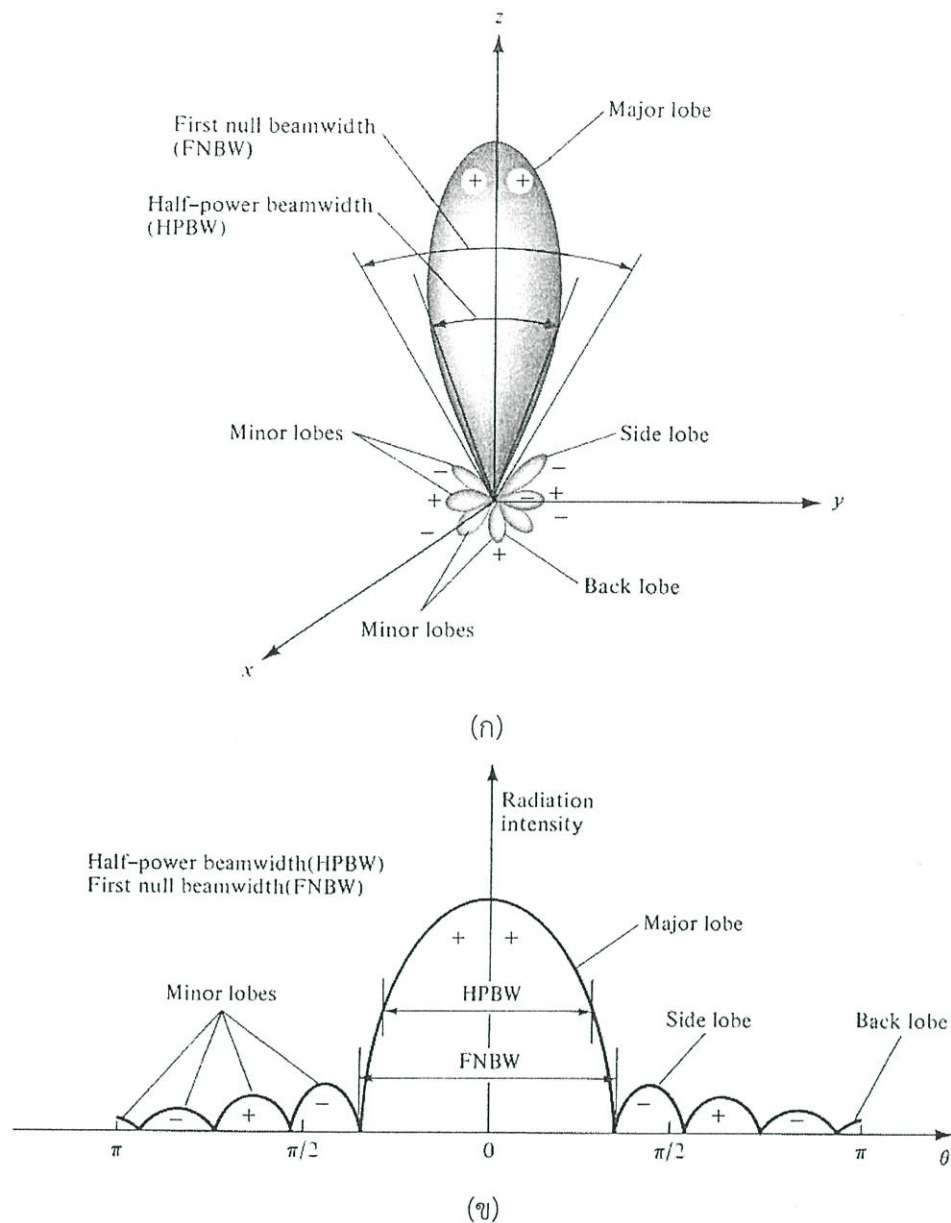
รูปที่ 2.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ของสายอากาศปากแตร [7]

จากรูป 2.7 เป็นการแสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นหลัก โดยมีระนาบ xz (ระนาบเอเลเวชัน; $\phi = 0$) เป็นระนาบสนามไฟฟ้า หลักและมีระนาบ xy (ระนาบอาซิมุท; $\theta = \pi/2$) เป็นระนาบสนามแม่เหล็กหลัก

2.5.2.3 ลำคลื่นของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)

ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นเป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณโดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำรูปที่ 2.5 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบสามมิติ ซึ่งสามารถแบ่งลำคลื่นเป็นแบบต่างๆ ดังนี้

ลำคลื่นหลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นที่อยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุดตามรูปที่ 2.8 มีลำคลื่นหลักอยู่ในทิศทาง $\theta = 0$ สำหรับสายอากาศบางชนิดอาจมีลำคลื่นหลักมากกว่าหนึ่งลำคลื่น เช่น สายอากาศแยกลำคลื่น ลำคลื่นย่อย คือลำคลื่นอื่นที่นอกเหนือจากลำคลื่นหลัก ลำคลื่นข้าง (Side Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่ติดอยู่กับลำคลื่นหลักและอยู่ในทิศทางของครึ่งวงกลมซีกเดียวกับลำคลื่นหลัก ลำคลื่นด้านหลัง (Back Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับลำคลื่นหลัก ปกติแล้วลำคลื่นย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสายอากาศที่ดีจึงต้องกำจัดลำคลื่นเหล่านี้ให้เหลือน้อยที่สุด ระดับของคลื่นย่อยมักจะแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นพลังงานในลำคลื่นที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นพลังงานในลำคลื่นหลัก ซึ่งเรียกว่าระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Level : SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของลำคลื่นคลื่อนน้อยกว่า -20 dB



รูปที่ 2.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (ต่อ)

(ก) ลำคลื่นต่างๆ และความกว้างลำคลื่นสัญญาณของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

(ข) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในแบบเชิงเส้น [7]

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยทั่วไปนั้นมีหลากหลายแบบด้วยกัน ซึ่งในที่นี้จะอ้างอิงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์และการออกแบบสายอากาศ ซึ่งในขั้นตอนของการออกแบบจะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่แตกต่างกันตามองค์ประกอบของสายอากาศ โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีด้วยกัน 3 แบบคือ

- แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรอบตัว (Omni-Directional)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Omni-Directional หรือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางมีการแพร่กระจายคลื่นออกรอบตัวสายอากาศ โดยข้อดีของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางคือ สามารถตอบสนองการใช้งานได้รอบทิศทางที่ความแรงของสัญญาณสม่ำเสมอ และข้อเสียของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางคือมีอัตราขยายต่ำ

- แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสองทิศทาง (Bi-Directional)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Bi-Directional หรือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางจะมีการแพร่กระจายคลื่นออกทางด้านหน้าและด้านหลังของสายอากาศ โดยข้อดีของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางคือ มีอัตราขยายสูงกว่าแบบรูปการกระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง และข้อเสียของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางคือสามารถตอบสนองการใช้งานได้ดีเฉพาะด้านหน้าและด้านหลังของสายอากาศ

- แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว (Uni-Directional)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Uni-Directional หรือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวจะมีการแพร่กระจายคลื่นออกทางด้านหน้าหรือด้านหลังของสายอากาศ โดยข้อดีของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวคือ มีอัตราขยายสูงกว่าแบบรูปการแพร่กระจายแบบรอบทิศทางและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง และข้อเสียของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวคือสามารถตอบสนองการใช้งานได้ดีเฉพาะด้านหน้าหรือด้านหลังของสายอากาศเท่านั้น

2.5.3 แบนด์วิธของสายอากาศ (Antenna Bandwidth)

แบนด์วิธของสายอากาศได้ถูกนิยามเอาไว้ว่า แบนด์วิธ คือช่วงของความถี่ของสายอากาศที่มีคุณลักษณะบางอย่างที่สอดคล้องกับมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งโดยปกติแบนด์วิธนั้นจะถูกแสดงในอัตราส่วนของแถบความถี่สูงต่อแถบความถี่ต่ำซึ่งเป็นขั้นตอนที่เป็นที่ยอมรับได้ ในกรณีของสายอากาศที่มีช่วงความถี่แคบการแสดงความถี่ของสายอากาศนั้นจะถูกแสดงด้วยเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความถี่ (Percentage of the Frequency Difference) ต่อความถี่กลางของแบนด์วิธทั้งหมด ซึ่งในเทคโนโลยี UWB การที่จะหาแบนด์วิธของสายอากาศนั้นจะพิจารณาจากช่วงความถี่ของ $|S_{11}| \leq -10$ dB ลงมา หรือมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2:1 โดยขอบแถบความถี่สูงของสายอากาศนั้นจะถูกอธิบายด้วยตัวแปร (f_H) และขอบแถบความถี่ต่ำของสายอากาศนั้นจะถูกอธิบายด้วยตัวแปร (f_L) ซึ่งการคำนวณเพื่อที่จะหาความถี่กลาง (f_C) ของแบนด์วิธของสายอากาศนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

$$f_C = \frac{f_L + f_H}{2} \quad (2.1)$$

2.5.4 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

การพิจารณาว่าสายอากาศจะมีคุณลักษณะที่เพียงพอต่อการใช้งานได้หรือไม่นั้นนอกจากจะพิจารณาเฉพาะ $|S_{11}|$ แล้วยังสามารถที่จะพิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio : VSWR) ได้เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นการใช้หลักการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสองตัวกลาง ซึ่งหากว่าทั้งสองตัวกลางมีอิมพีแดนซ์เท่ากันจะส่งให้คลื่นมีการส่งผ่านได้อย่างสมบูรณ์ โดยไม่มีการสูญเสีย ในทางกลับกันหากสองตัวกลางมีค่าอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันมากๆ จะส่งผลให้การส่งผ่านของคลื่นมีการสูญเสียหรือเกิดการสะท้อนกลับ ซึ่งหมายความว่ากำลังงานส่วนใหญ่ที่ส่งให้สายอากาศไม่สามารถที่จะแพร่ออกไปในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ซึ่งกรณีส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้นเมื่ออิมพีแดนซ์ระหว่างสองตัวกลางมีค่าที่ไม่เท่ากันหรือมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งในกรณีดังกล่าวนี้ จะส่งผลให้ไม่มีการส่งผ่านอย่างสมบูรณ์หรือเกิดการสะท้อนกลับทั้งหมด จะเป็นผลให้เกิดการสะสม

พลังงานไว้บางส่วน ซึ่งสามารถพิจารณาการสะท้อนได้จากสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) ได้จากสมการที่ 2.2 และ 2.3

$$\Gamma = \frac{Z_m - Z_o}{Z_m + Z_o} \quad (2.2)$$

เมื่อ Z_m คือ อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ
 Z_o คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณ

$$RL(\text{dB}) = -20 \log|\Gamma| \quad (2.3)$$

2.5.5 อัตราขยาย (Gain)

ค่าอัตราขยายของสายอากาศ สามารถพิจารณาได้ 2 กรณีคือ

1. อัตราขยายจริง (Absolute Gain) ของสายอากาศ (ในทิศทางที่กำหนดให้) หมายถึง อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางที่กำหนดให้ ต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นที่ได้รับเข้ามา

2. อัตราขยายสัมพัทธ์ (Relative Gain) หมายถึง อัตราส่วนของอัตราขยายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่ออัตราขยายกำลังงานของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น โดยกำลังงานที่ป้อนให้กับอินพุตของสายอากาศจะต้องเหมือนกันทั้งสองตัว โดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ก็คือ สายอากาศที่เป็นแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสีย (Lossless Isotropic Source) และสายอากาศแบบไดโพล

อัตราขยายเป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าสภาพเจาะจงทิศทางโดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วยในขณะที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางอธิบายคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

อัตราการขยายกำลัง (Power Gain) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้ นั้นมีค่าเท่ากับ 4π คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อทิศทางกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่ง เมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้โดยเฉพาะ โดยทั่วไปแล้วจะคิดค่ากำลังขยายในทิศทางที่มีการแผ่กระจายคลื่นแรงที่สุด ดังนั้น

$$Gain = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.4)$$

เมื่อ $U(\theta, \phi)$ = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น
 P_{in} = กำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ

โดยทั่วไปแล้วมักจะพูดถึงอัตราขยายสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของอัตราการขยายกำลังในทิศทางที่กำหนดให้ต่ออัตราการขยายกำลังของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศนั้นต้องเท่ากับสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบอาจจะเป็นสายอากาศไดโพล

สายอากาศปากแตร แต่โดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบกับเป็นไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้น

$$G_g = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.5)$$

กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด P_{rad} สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ P_{in} ดังนั้น

$$P_{rad} = e_r P_{in} \quad (2.6)$$

เมื่อ e_r เป็นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ(ไม่มีหน่วย) จะได้

$$G(\theta, \phi) = e_r \left[4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (2.7)$$

ซึ่งสัมพันธ์กับค่าการชี้ทิศทางดังนี้

$$G_g(\theta, \phi) = e_r D_g(\theta, \phi) \quad (2.8)$$

ในการทำงานเดียวกัน ค่าสูงสุดของอัตราขยายจะสัมพันธ์กับค่าการชี้ทิศทางสูงสุดโดย

$$G_0 = D_g(\theta, \phi)_{max} = e_r D_g(\theta, \phi)_{max} \quad (2.9)$$

ดังนั้นค่าประมาณของอัตราขยายจะได้

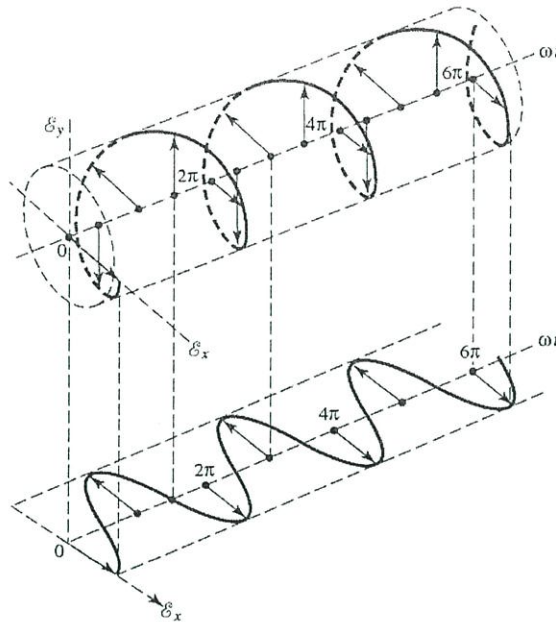
$$G_0 = \frac{30000}{\Theta_{1r} \Theta_{2r}} \quad (2.10)$$

เมื่อ Θ_{1r} = HPBW ในระนาบใดๆ (องศา)

Θ_{2r} = HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (องศา)

2.5.6 การโพลาไรซ์ (Polarization)

โพลาไรซ์ของลำคลื่นที่แพร่กระจายนั้น เป็นรูปแสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไป ที่อธิบายทิศทางและขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลา โพลาไรซ์จะแสดงการกวาดของยอดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เวลาต่างๆที่ ตำแหน่งทำการสังเกตซึ่งคงที่และการสังเกตนี้จะทำโดยมองตามหลังคลื่นที่เดินทางไป แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแนวระนาบที่เป็นฟังก์ชันของเวลาที่ $z=0$ [7]

สำหรับโพลาไรซ์ของสายอากาศในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง จะเป็นโพลาไรซ์ของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้นจากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังที่ชี้ของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาจะให้หมายถึง ทิศทางที่สายอากาศมีค่าการขยายมากที่สุด ดังนั้นโพลาไรซ์ของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกัน จะต่างกัน การแบ่งชนิดของโพลาไรซ์อาจแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ

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

ถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจะเรียกว่า โพลาไรซ์หมุนขวา ในขณะที่หากสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจะเป็นโพลาไรซ์หมุนซ้าย ซึ่งจะเขียนสนามชั่วขณะเวลานั้นของคลื่นระนาบ ที่เดินทางในทิศ $-z$ ได้ว่า

$$\mathcal{E}(z;t) = \hat{a}_x \mathcal{E}_x(z;t) + \hat{a}_y \mathcal{E}_y(z;t) \quad (2.11)$$

เมื่อส่วนประกอบของสนามชั่วขณะเวลานั้น สัมพันธ์กับค่าเชิงซ้อนของสนามนั้นดังนี้

$$\mathcal{E}_x(z;t) = E_{x0} \cos(\omega t + kz + \phi_x) \quad (2.12)$$

$$\mathcal{E}_y(z;t) = E_{y0} \cos(\omega t + kz + \phi_y) \quad (2.13)$$

เมื่อ E_{x0} และ E_{y0} เป็นขนาดของสนามค่าสูงสุด ในทิศทาง x และ y ตามลำดับ

2.5.6.1 โพลาริซ์เชิงเส้น

การโพลาริซ์เชิงเส้นคือทิศทางของสนามไฟฟ้า (\bar{E}) คงที่ตลอดการเดินทางของคลื่น สำหรับคลื่นที่มีการโพลาริซ์เชิงเส้น ซึ่งจะมีความแตกต่างของเฟสระหว่างองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\bar{E}) ในแนวตั้งและแนวนอน เป็นดังนี้

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.14)$$

สามารถแบ่งชนิดของการโพลาริซ์ได้เป็น 3 ชนิดคือ

การโพลาริซ์เชิงเส้นแนวตั้ง (Vertical Polarization: VP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า (\bar{E}) คงที่ในแนวตั้งตลอดการเดินทางของคลื่น

การโพลาริซ์เชิงเส้นแนวนอน (Horizontal Polarization: HP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า (\bar{E}) คงที่ในแนวนอนตลอดการเดินทางของคลื่น

การโพลาริซ์เชิงเส้นแนวเฉียง (Slant Polarization: SP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า (\bar{E}) คงที่ในแนวเฉียงตลอดการเดินทางของคลื่น

2.5.6.2 โพลาริซ์วงกลม

การโพลาริซ์วงกลมคือทิศทางของสนามไฟฟ้า (\bar{E}) จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาซึ่งจะมีลักษณะเป็นวงกลมที่เป็นฟังก์ชันของเวลา โดยมีเงื่อนไขที่จำเป็นในการเกิดโพลาริซ์วงกลมดังนี้

- ต้องมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\bar{E}) แบบเชิงเส้น 2 องค์ประกอบ
- องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\bar{E}) ทั้งสองต้องมีขนาดที่เท่ากัน
- องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\bar{E}) ทั้งสองต้องมีเฟสต่างกันเป็นจำนวนเท่าของ $\frac{\pi}{2}$

ถ้าคลื่นแพร่กระจายไปในทิศทาง $-z$ จะสามารถหาค่าความต่างของเฟสของสนามไฟฟ้า (\bar{E}) ในแนวตั้งและแนวนอน ได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$E_{x_0} = E_{y_0} \quad (2.15)$$

เมื่อ

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\frac{(1+4n)\pi}{2}; n = 0, 1, 2, \dots \text{cw} \quad (2.16)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = -\frac{(1+4n)\pi}{2}; n = 0, 1, 2, \dots \text{ccw} \quad (2.17)$$

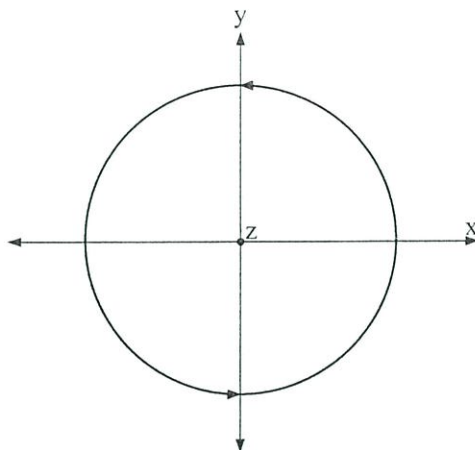
เมื่อ

CW (Clockwise) คือ สนามหมุนตามเข็มนาฬิกา

CWW (Counter Clockwise) คือ สนามหมุนทวนเข็มนาฬิกา

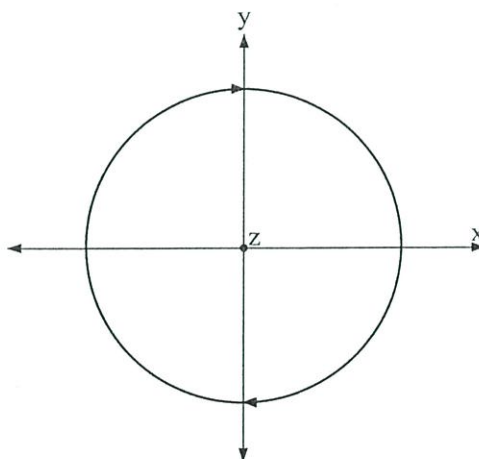
จากสมการ (2.6) และ (2.7) พบว่าสามารถแบ่งการโพลาริซ์วงกลมออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

- การโพลาริซซ์วงกลมหมุนขวา (Right-handed CP) คือทิศทางของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) จะหมุนตามเข็มนาฬิกา (Clockwise: CW) เมื่อมองไปในทิศทางที่แพร่กระจายคลื่น (ทิศทาง z) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การโพลาริซซ์วงกลมหมุนขวา (Right-handed CP)

- การโพลาริซซ์วงกลมหมุนซ้าย (Left-handed CP) คือทิศทางของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา (Counter Clockwise: CCW) เมื่อมองไปในทิศทางที่แพร่กระจายคลื่น (ทิศทาง z) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การโพลาริซซ์วงกลมหมุนซ้าย (Left-handed CP)

2.5.6.3 โพลาริซซ์วงรี

การโพลาริซซ์วงรีคือทิศทางของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เงื่อนไขที่จำเป็นในการเกิดโพลาริซซ์วงรีสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณีคือ

กรณีที่ 1

- ต้องมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) แบบเชิงเส้น 2 องค์ประกอบ
- ถ้าองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) ทั้งสองต้องมีขนาดที่เท่ากันแล้ว องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) ทั้งสองต้องมีเฟสต่างกันไม่เท่ากับจำนวน $\frac{\pi}{2}$

$$E_{x_0} = E_{y_0} \quad (2.18)$$

เมื่อ

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \pm \frac{n}{2}\pi > 0 \quad ; n = 0, 1, 2, \dots \text{cw} \quad (2.19)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \pm \frac{n}{2}\pi < 0 \quad ; n = 0, 1, 2, \dots \text{ccw} \quad (2.20)$$

กรณีที่ 2

- ต้องมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\bar{E}) แบบเชิงเส้น 2 องค์ประกอบ
- ถ้าองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\bar{E}) ทั้งสองต้องมีขนาดที่ไม่เท่ากันแล้ว องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\bar{E}) ทั้งสองต้องมีเฟสต่างกันไม่เท่ากับจำนวน π

$$E_{x_0} \neq E_{y_0} \quad (2.21)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi \quad ; n = 0, 1, 2, \dots \text{cw} \quad (2.22)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi \quad ; n = 0, 1, 2, \dots \text{ccw} \quad (2.23)$$

ในกรณีของโพลาริซแบบวงรีนั้นจะมีการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยทั่วไปจะแสดงในรูปของวงรีที่มีมุมเอียง (Tilted Ellipse) โดยอัตราส่วนของแกนหลัก (Major Axis) ต่อแกนย่อย (Minor Axis) จะเรียกว่าอัตราส่วนแกน (Axial Ratio : AR) ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

$$AR = \frac{\text{Major axis}}{\text{Minor axis}} = \frac{OA}{OB} = \frac{|E|_{\max}}{|E|_{\min}} \quad (2.24)$$

$$OA = \left[\frac{1}{2} \left\{ E_{x_0}^2 + E_{y_0}^2 + \left[E_{x_0}^4 + E_{y_0}^4 + 2E_{x_0}^2 E_{y_0}^2 \cos(2\Delta\phi) \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.25)$$

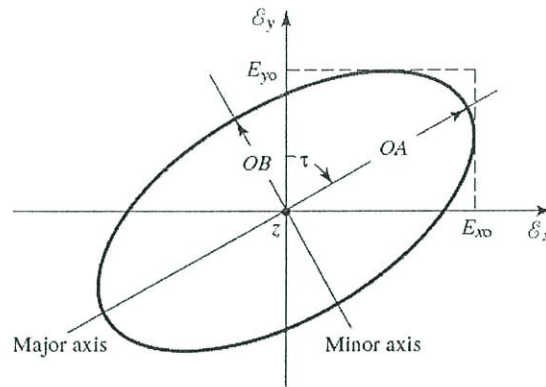
$$OB = \left[\frac{1}{2} \left\{ E_{x_0}^2 + E_{y_0}^2 - \left[E_{x_0}^4 + E_{y_0}^4 + 2E_{x_0}^2 E_{y_0}^2 \cos(2\Delta\phi) \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.26)$$

เมื่อ OA = แกนหลัก และ OB = แกนย่อย ดังรูปที่ 2.12

มุมเอียงของวงรีเมื่อเทียบกับแกน y จะแทนด้วยมุม τ ซึ่งแสดงดังสมการต่อไปนี้คือ

$$\tau = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2E_x E_y}{E_x^2 + E_y^2} \cos(\Delta\phi) \right] \quad (2.27)$$

เมื่อวงรีตามแนวแกนหลัก $\tau = \frac{n\pi}{2}$, $n = 0, 1, 2, \dots$ แกนหลัก(ย่อย) เท่ากับ $E_x(E_y)$ หรือ $E_y(E_x)$ หรืออัตราส่วนของแกนมีค่าเท่ากับ $\frac{E_x}{E_y}$ หรือ $\frac{E_y}{E_x}$



รูปที่ 2.12 โพลาริซวงรีที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในระนาบ $Z=0$ [7]

การจำแนกชนิดของการโพลาริซจะพิจารณาได้จากค่าอัตราส่วนแกน (Axial Ratio : AR) ที่แสดงดังสมการที่ 2.24

ผลที่ได้จากสมการที่ 2.24 สามารถแบ่งชนิดของการโพลาริซออกได้เป็น 3 กรณีดังนี้
กรณีที่ 1 โพลาริซเชิงเส้น (LP) ซึ่งจะมีเฉพาะค่า $|E|_{\max}$ ($|E|_{\min} = 0$) นั่นคือ

$$AR = \frac{|E|_{\max}}{0} = \infty \quad (2.28)$$

กรณีที่ 2 โพลาริซวงกลม (CP) ซึ่งจะมีค่า $|E|_{\max} = |E|_{\min}$ นั่นคือ

$$AR = \frac{|E|_{\max}}{|E|_{\min}} = 1 \quad (2.29)$$

กรณีที่ 3 โพลาริซวงรี (EP) ซึ่งจะมีค่า $|E|_{\max} > |E|_{\min}$ นั่นคือ

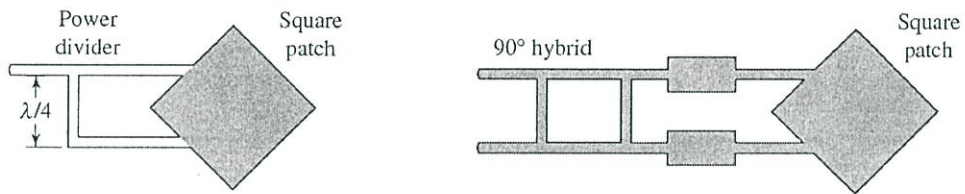
$$1 < AR < \infty \quad (2.30)$$

โดยสายอากาศที่มีการโพลาริซวงกลม มีข้อดีคือ การสูญเสียที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโพลาริซมีค่าต่ำ และสามารถรับส่งข้อมูลแม้สายอากาศไม่มีการจัดวางในทิศทางที่แน่นอน ทำให้ระหว่างการรับส่งข้อมูลมีช่วงจังหวะที่ทำให้เกิดการตรงกันของโพลาริซ (Polarized Matching) อย่างแน่นอน

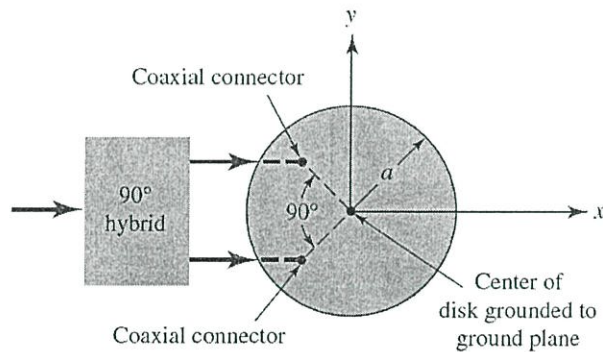
2.6 กลไกหรือเทคนิคการแพร่กระจายคลื่นที่ทำให้เกิดโพลาริซวงกลม [7]

องค์ประกอบแบบแผ่นระนาบทั้งแบบสี่เหลี่ยมและวงกลมส่วนใหญ่จะมีการแพร่กระจายคลื่นแบบเส้นตรงถ้าจุดป้อนไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆอย่างใดก็ตามการโพลาริซวงกลมและวงรีสามารถใช้ในการป้อนรูปแบบต่างๆ หรือการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบเพียงเล็กน้อย ซึ่งจะอธิบายต่อไป

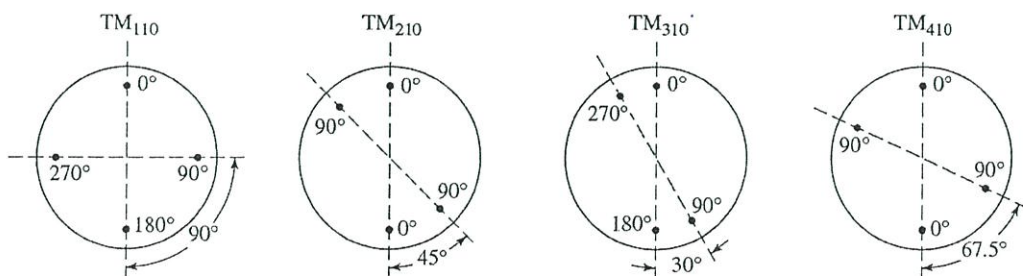
โพลาริซวงกลมสามารถเกิดได้จากการตั้งฉากกันและต่างเฟสกันเป็นมุม 90 องศา ซึ่งจะทำให้สำเร็จได้โดยการปรับเปลี่ยนขนาดทางกายภาพขององค์ประกอบแบบแผ่นระนาบโดยใช้การป้อนแบบหนึ่งจุด สองจุดหรือมากกว่านั้น บางงานวิจัยแนะนำให้ใช้การป้อนเพียงหนึ่งจุด สำหรับองค์ประกอบแบบแผ่นระนาบที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ทางที่ง่ายที่สุดที่จะทำให้เกิดการโพลาริซวงกลมคือป้อนให้กับองค์ประกอบที่มีขอบติดกัน ซึ่งอธิบายในรูปที่ 2.13 (ก) และ 2.13 (ข) เพื่อกระตุ้นโหมดที่ตั้งฉากกัน TM_{010}^x ป้อนที่จุดหนึ่ง และ TM_{001}^x ป้อนที่อีกจุดหนึ่ง การทำให้เกิดความต่างเฟสทำได้จากการป้อนแบบแบ่งกำลัง 90 องศา หรือ แบบไฮบริด 90 องศา



(ก) แผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ป้อนสัญญาณให้ขอบที่ติดกันแบบแบ่งกำลัง (ข) แผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ป้อนสัญญาณให้ขอบที่ติดกันแบบไฮบริด 90 องศา



(ค) แผ่นระนาบวงกลมที่ป้อนด้วยโคแอกเซียล



(ง) ตำแหน่งการป้อนของแผ่นระนาบวงกลมสำหรับโหมด TM_{110}^x และโหมดที่สูงขึ้น รูปที่ 2.13 ตำแหน่งการป้อนของแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมและแผ่นระนาบวงกลม สำหรับการโพลาริซวงกลม [7]

สำหรับแพทท้วงกลมที่มีการโปลาไรซ์วงกลมสำหรับ TM_{110}^x จะเกิดได้จากการการป้อนสองจุดที่มีการแบ่งมุมที่เหมาะสม ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.13 (ค) ใช้การป้อนสองจุดโดยแบ่งมุมไป 90 องศา ซึ่งจะสร้างสนามที่ตั้งฉากกันภายในแผ่นระนาบรวมทั้งภายนอกแผ่นระนาบ โดยการวางของหัววัดแต่ละหัวต้องวางในตำแหน่งที่มีการสร้างสนามโดยหัววัดอื่นไม่นำมาพิจารณา ดังนั้นระหว่างหัวทดสอบทั้งสองจึงมีการเชื่อมต่อกันเพียงเล็กน้อย เพื่อที่จะทำให้เกิดการโปลาไรซ์วงกลมการป้อนจึงต้องมีความต่างเฟสกัน 90 องศาระหว่างสนามทั้งสอง ในที่นี้เกิดได้โดยการป้อนแบบไฮบริด ซึ่งแสดงดังรูป 2.13 (ค) โดยขาของหัววัดวางในตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแผ่นระนาบที่วางอยู่บนระนาบกราวนด์ ซึ่งระนาบกราวนด์ไม่มีความจำเป็นสำหรับการโปลาไรซ์วงกลมแต่ถูกใช้เพื่อไม่ให้เกิดมุม ϕ และอาจเพิ่มคุณภาพให้การโปลาไรซ์วงกลมอีกด้วย

ตารางที่ 2.2 มุมการป้อนของโหนดต่างๆ สำหรับการโปลาไรซ์วงกลม

| | TM_{110} | TM_{210} | TM_{310} | TM_{410} | TM_{510} | TM_{610} |
|----------|------------|---------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| α | 90° | 45° หรือ 135° | 30° หรือ 90° | 22.5° หรือ 67.5° | 18°, 54° หรือ 90° | 15°, 45° หรือ 75° |

สำหรับโหนดอื่นๆที่สูงขึ้นมีช่องว่างระหว่างการป้อนทั้งสองเพื่อที่จะให้เกิดการโปลาไรซ์วงกลมที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งแสดงในรูป 2.13 (ง) และแสดงในตาราง 2.2 สำหรับโหนด TM_{110}^z , TM_{210}^z , TM_{310}^z และ TM_{410}^z อย่างไรก็ตามเพื่อทำให้สมมาตรและมีโปลาไรซ์ตรงข้ามน้อยที่สุด โดยเฉพาะตัวกลางที่มีความหนาแน่นมาก หัวทดสอบทั้งสองที่เพิ่มเข้าไปมักจะแนะนำให้ตั้งอยู่ตรงข้ามกัน หัวทดสอบที่เพิ่มเข้าไปถูกใช้เพื่อไม่ให้เกิดโหนดข้างเคียงซึ่งโดยปกติจะมีขนาดสูงสุด สำหรับบางโหนด TM_{210}^z และ TM_{410}^z การป้อน 4 จุดควรจะมีเฟส 0 องศา 90 องศา 0 องศา และ 90 องศา ขณะที่ TM_{110}^z และ TM_{310}^z ควรจะมีเฟส 0 องศา 90 องศา 180 องศา และ 270 องศา ดังแสดงในรูป 2.13 (ง)

เพื่อที่จะลดความซับซ้อนในการป้อนแบบคู่ การโปลาไรซ์วงกลมสามารถเกิดจากการป้อนแบบเดี่ยวได้เช่นกัน แต่การป้อนแบบเดี่ยวสำหรับบางความถี่ของขนาดในอุดมคติจะกระตุ้นการโปลาไรซ์แย่ง ระหว่างสองโหนดจะมีความถี่แตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากการออกแบบสนาม โดยสามารถมีเฟสนำไป 45 องศา หรือมีเฟสตาม 45 องศาก็ได้ ซึ่งทำให้มีความต่างเฟสกัน 90 องศาซึ่งจำเป็นในการเกิดโปลาไรซ์วงกลม

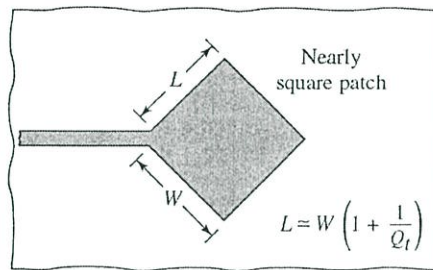
เพื่อแสดงขั้นตอนจะพิจารณาที่แผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังรูปที่ 2.14 (ก) ชั้นแรกสมมติว่าขนาดของ L และ W เกือบจะเท่ากับขนาดที่ความถี่ของโหนด TM_{010}^x และ TM_{001}^x ทิศทางด้านข้างของแผ่นระนาบ โหนด TM_{010}^x จะสร้างสนามไฟฟ้า E_y ซึ่งมีการโปลาไรซ์เชิงเส้นในแนวแกน y และ TM_{001}^x จะสร้างสนามไฟฟ้า E_z ซึ่งมีการโปลาไรซ์เชิงเส้นในแนวแกน z ซึ่งแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$E_y = c \frac{\sin\left(\frac{\pi}{L} y'\right)}{k^2(1-j/Q_t) - (k_y)^2} \quad (2.31)$$

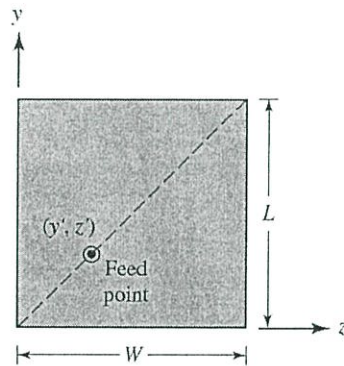
$$E_z = c \frac{\sin\left(\frac{\pi}{W} z'\right)}{k^2(1-j/Q_t) - (k_z)^2} \quad (2.32)$$

$$k_y = \frac{\pi}{L} \quad (2.33)$$

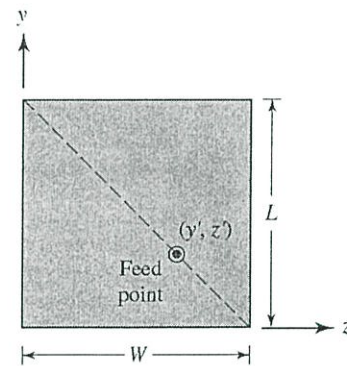
$$k_z = \frac{\pi}{W} \quad (2.34)$$



(ก) ขนาดใกล้เคียงแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส



(ข) โพลาริซชันหมุนซ้าย



(ค) โพลาริซชันหมุนขวา

รูปที่ 2.14 การป้อนแบบจุดเดียวของแผ่นระนาบไมโครสตริบสี่เหลี่ยมสำหรับการโพลาริซชันวงกลม [7]

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

$$\frac{y'}{L} = \frac{z'}{W} \quad (2.35)$$

ต่อมาอัตราส่วนแกนที่ด้านข้างของสนาม E_y และ E_z สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{E_y}{E_z} = \frac{k(1-j/2Q_t) - k_y}{k(1-j/2Q_t) - k_z} \quad (2.36)$$

เพื่อที่จะทำให้เกิดการโพลาไรซ์วงกลม ขนาดของอัตราส่วนแกนเท่ากัน และขณะที่เฟสต้องเป็น $\pm 90^\circ$ จะเกิดขึ้นเมื่อเฟสทั้งสองมีตัวเศษและตัวส่วนมีค่าเท่ากัน และอยู่นอกเฟสไป 90° ในกรณีนี้เกิดขึ้นเมื่อ

$$k_y - k_z = \frac{k}{Q_t} \quad (2.37)$$

และที่ความถี่ที่ต้องการ ที่ตรงกลางระหว่างความถี่ของโหมด TM_{010}^x และ TM_{001}^x สมการนี้ จะนำมาใช้ได้เมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขสมการ (2.37)

$$L = W \left(1 + \frac{1}{Q_t} \right) \quad (2.38)$$

จาก 2.38 ความถี่ f_1 และ f_2 ของแบนด์วิดธ์มีความสัมพันธ์กับความยาวของ L และ W ของไมโครสตริปสี่เหลี่ยมคือ

$$f_1 = \frac{f_0}{\sqrt{1+1/Q_t}} \quad (2.39)$$

$$f_2 = f_0 \sqrt{1+1/Q_t} \quad (2.40)$$

ที่ f_0 คือ ความถี่กลาง

การป้อนองค์ประกอบบนแนวเส้นทแยงมุมเริ่มจากมุมล่างซ้ายไปจนถึงมุมบนขวาดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ข) ทำให้เกิดเป็นการโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้าย ส่วนการโพลาไรซ์วงกลมหมุนขวาสามารถทำให้เกิดได้จากการการป้อนบนแนวเส้นทแยงมุมจากมุมล่างขวาไปจนถึงมุมบนซ้าย ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ค) แทนที่จะย้ายจุดการป้อนในแต่ละครั้งเพื่อเปลี่ยนชนิดของการโพลาไรซ์วงกลม วา แร็คเตอร์ไดโอดสามารถใช้ในการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุและค่าไบอัส ที่มีการเลื่อนอย่างมีประสิทธิภาพโดยทางไฟฟ้าส่งผลกับตำแหน่งทางกายภาพของการป้อนอย่างชัดเจน

ชนิดของการป้อนนี้ทำให้เกิดการโพลาไรซ์วงกลมดังแสดงในการทดลองเพื่อแสดงขอบเขตที่กว้างที่สุดของมุม อย่างไรก็ตามแบนด์วิดธ์ทั้งหมดของการโพลาไรซ์แบบวงกลมต้องคงไว้ แม้ว่าที่ด้านข้างจะแคบมาก สมการในการคำนวณเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์ทำได้ดังสมการ

$$BW(\%) = 12 \frac{AR}{Q_t} \quad (2.41)$$

ที่อัตราส่วนแกนมีหน่วยเป็น dB สมการที่ (2.38) และ (2.41) จะได้ค่า Q_t ที่ดีที่สุดคือน้อยกว่า 10

โพลาริซวงกลมสามารถทำให้เกิดได้จากการป้อนนอกเหนือจากการป้อนบนเส้นทแยงมุม จะทำให้สำเร็จโดยถ้าขนาดของแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมเป็นดังสมการดังต่อไปนี้

$$L = W \left(1 + \frac{A + \frac{1}{A}}{2Q_t} \right) \quad (2.42)$$

เมื่อ

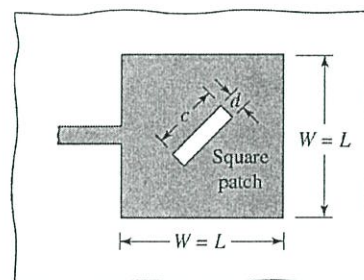
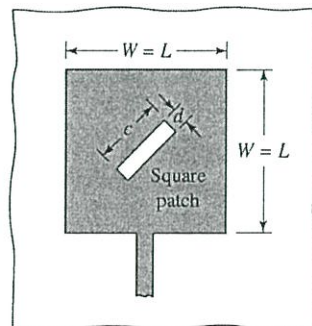
$$A = \frac{\cos\left(\pi \frac{y'}{L}\right)}{\cos\left(\pi \frac{z'}{W}\right)} \quad (2.43)$$

ในทางปฏิบัติในการทำให้เกิดการโพลาริซวงกลมสำหรับแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสทำให้สำเร็จโดยการเจาะช่องเล็กๆดังแสดงในรูป 2.15 (ก) และ 2.15 (ข) ด้วยขนาดดังสมการต่อไปนี้

$$c = \frac{L}{2.72} = \frac{W}{2.72} \quad (2.44)$$

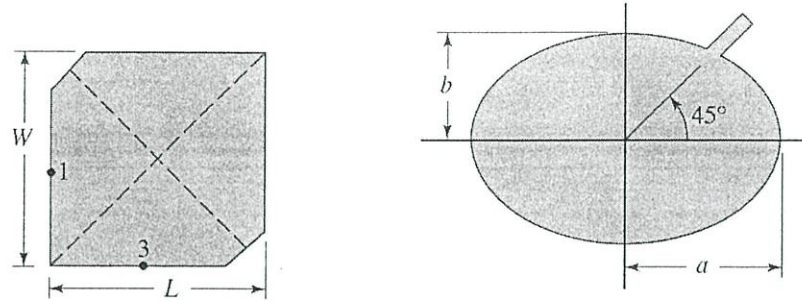
$$d = \frac{c}{10} = \frac{L}{27.2} = \frac{W}{27.2} \quad (2.45)$$

ในอีกทางหนึ่งทำได้โดยการตัดมุมตรงกันข้ามของแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสและป้อนสัญญาณที่จุด 1 หรือ 3 ดังแสดงในรูป 2.16 (ก) สำหรับโพลาริซวงกลมสามารถทำให้เกิดได้โดยแผ่นระนาบวงกลมโดยทำให้เป็นวงรีหรือเพิ่มแถบเข้าไปดังแสดงในรูป 2.16 (ข)



(ก) การโพลาริซวงกลมหมุนขวา (ข) การโพลาริซวงกลมหมุนซ้าย

รูปที่ 2.15 การโพลาริซวงกลมสำหรับแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการเจาะช่องบนแผ่นระนาบ [7]



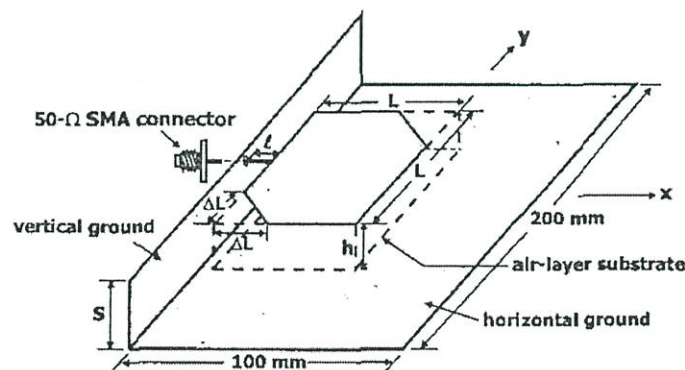
(ก) ตัดมุมตรงข้ามของแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ข) แผ่นระนาบรูปวงรีที่มีการเพิ่มแถบเข้าไป
รูปที่ 2.16 การโพลาริเซชันวงกลมโดยการตัดมุมตรงข้ามของแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส
และแผ่นระนาบรูปวงรีที่มีการเพิ่มแถบเข้าไป [7]

2.7 งานวิจัยที่มีมาก่อน

สายอากาศที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานกับระบบ WLAN นั้น ได้รับความนิยมในการศึกษาและวิจัยเป็นอย่างมาก และมีเทคนิคการสร้างที่แตกต่างกันออกไป แต่สิ่งที่แต่ละงานวิจัยต่างให้มุ่งให้ความสนใจเป็นหลักนั้น นั่นก็คือสายอากาศต้องมีการออกแบบที่ง่าย ต้นทุนต่ำ สามารถทำงานครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการ ซึ่งแต่ละงานวิจัยนั้นจะกล่าวในลำดับต่อไป

2.7.1 สายอากาศแผ่นย่านความถี่กว้างที่มีการป้อนแบบโพลาริเซชันวงกลมและใช้ต้นทุนต่ำสำหรับติดตั้งที่สถานีเครือข่ายไร้สาย [8]

สายอากาศแผ่นย่านความถี่กว้างที่มีการป้อนแบบโพลาริเซชันวงกลมและใช้ต้นทุนต่ำสำหรับติดตั้งที่สถานีเครือข่ายไร้สาย นำเสนอโดย Kin-Lu Wong Fa-Shian Chang และ Tzung-Wem Chiou ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.17



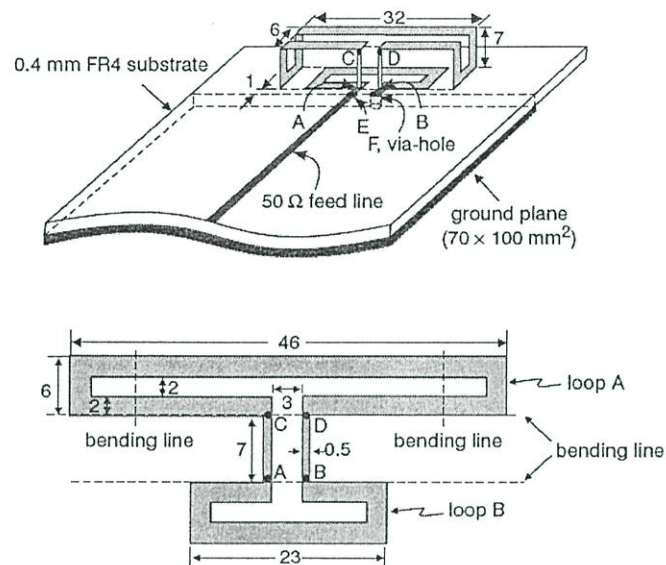
รูปที่ 2.17 โครงสร้างสายอากาศแผ่นย่านความถี่กว้างที่มีการป้อนแบบโพลาริเซชันวงกลมที่ถูกนำเสนอ

โดยโครงสร้างของสายอากาศแผ่นย่านความถี่กว้างที่มีการป้อนแบบโพลาริเซชันวงกลมและใช้ต้นทุนต่ำสำหรับติดตั้งที่สถานีเครือข่ายไร้สายที่นำเสนอในรูปที่ 2.17 ประกอบด้วยระนาบกราวด์เป็นแผ่นรูปตัวแอลและมีสายอากาศแผ่นระนาบที่มีการตัดมุมอยู่ระหว่างแผ่นรูปตัวแอล โดยความสูงระหว่างแผ่นระนาบกราวด์แนวนอนกับแผ่นแพร่กระจายคลื่นมีช่องว่างเป็นอากาศ พบว่าผลทดสอบช่วงความถี่ $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ 2.27-3.01 GHz ซึ่งครอบคลุมตลอดย่าน

ความถี่สำหรับระบบ WLAN ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอในรูปที่ 2.17 มีอัตราขยาย 8.5 dBic และมีโพลาริซวงกลม

2.7.2 สายอากาศเซอร์เฟสเมทัลลูปคู่สำหรับการทำงานในระบบ WLAN ย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz [9]

สายอากาศเซอร์เฟสเมทัลลูปคู่สำหรับการทำงานในระบบ WLAN ย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz นำเสนอโดย Chia-Ching Lin Gwo-Yun Lee และ Kin-Lu Wong ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.18

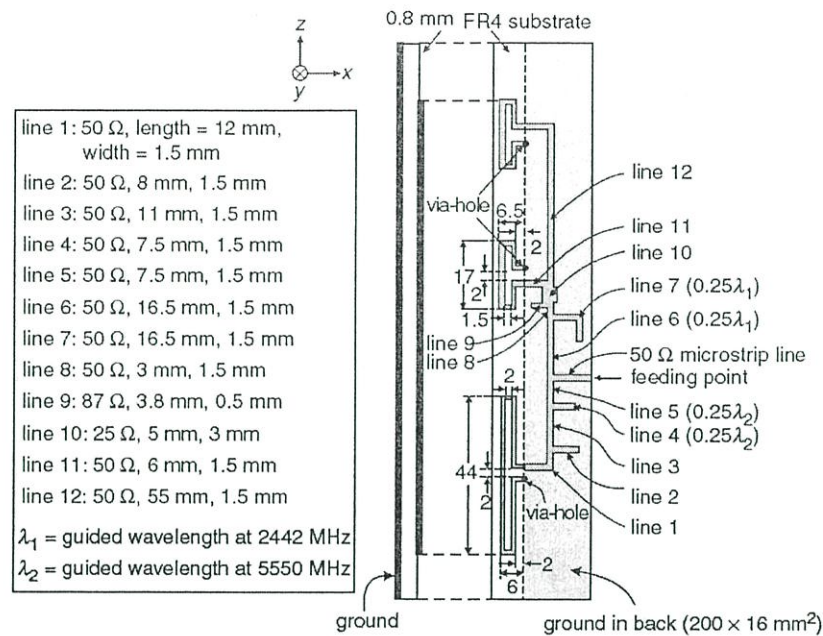


รูปที่ 2.18 สายอากาศเซอร์เฟสเมทัลลูปคู่สำหรับการทำงานในระบบ WLAN ที่ถูกนำเสนอ

โดยโครงสร้างของสายอากาศเซอร์เฟสเมทัลลูปคู่สำหรับการทำงานในระบบ WLAN ย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz ที่นำเสนอในรูปที่ 2.18 ประกอบด้วยแผ่นโลหะพับแบบคู่วางบนแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นจากนั้นนำโครงสร้างวางลงบนแผ่นโพลีเอทิลีนชั้นหนึ่ง พบว่าผลทดสอบของช่วงความถี่ $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 2.39-2.557 GHz สำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz และ 4.808-5.897 GHz สำหรับย่านความถี่ 5 GHz ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอในรูปที่ 2.18 มีอัตราขยายอยู่ในช่วง 4 dBic และ 5 dBic สำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz ตามลำดับ โดยมีแบบรูปการแพร่กระจายเป็นแบบมีทิศทาง

2.7.3 สายอากาศไดโพลพับแบบแถวลำดับที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบมีทิศทางสำหรับการทำงานในระบบ WLAN ย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz [10]

สายอากาศไดโพลพับแบบแถวลำดับที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบมีทิศทางสำหรับการทำงานในระบบ WLAN ย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz นำเสนอโดย Chia-Ching Lin Chih-Ming Su Fu-Ren Hsiao และ Kin-Lu Wong ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.19

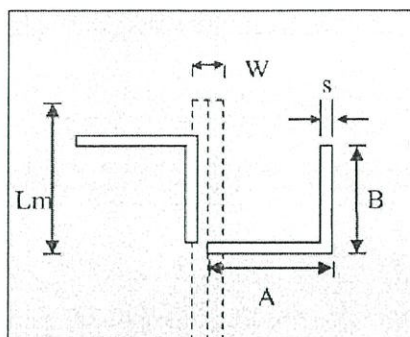


รูปที่ 2.19 โครงสร้างสายอากาศไดโพลพับแบบแถวลำดับที่ถูกลำเลียง

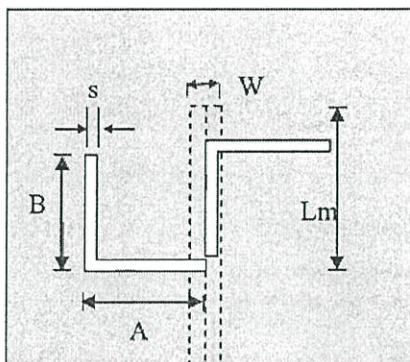
โครงสร้างของสายอากาศไดโพลพับแบบแถวลำดับที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง สำหรับการทำงานในระบบ WLAN ย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz ที่นำเสนอในรูปที่ 2.19 ประกอบด้วยสายอากาศแบบแถวลำดับขนาด 1x3 ซึ่งออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ โดยสายอากาศไดโพลพับขนาดครึ่งความยาวคลื่นสองส่วนแรกทำงานในย่านความถี่ 5 GHz และส่วนที่สามทำงานในย่านความถี่ 2.4 GHz พบว่าผลทดสอบช่วงความถี่ $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ 2.34-2.51 GHz สำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5.14-6.68 GHz สำหรับย่านความถี่ 5 GHz ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอในรูปที่ 2.19 มีอัตราขยาย 3.5-3.7 dBic และ 4.5-5.0 dBic สำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz ตามลำดับ โดยมีแบบรูปการแพร่กระจายเป็นแบบมีทิศทางและมีโพลาริเซชันเชิงเส้น

2.7.4 สายอากาศช่องมุมฉากที่มีโพลาริเซชันวงกลมสำหรับระบบ WLAN มาตรฐาน IEEE 802.11b/g [11]

สายอากาศช่องมุมฉากที่มีโพลาริเซชันวงกลมสำหรับระบบ WLAN มาตรฐาน IEEE 802.11b/g นำเสนอโดย A. Pomsathit C. Benjangkprasert N. Anantrasirichail V. Chutchavong และ T. Wakabayashi ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.20



(a) Right-hand circularly polarized antenna.



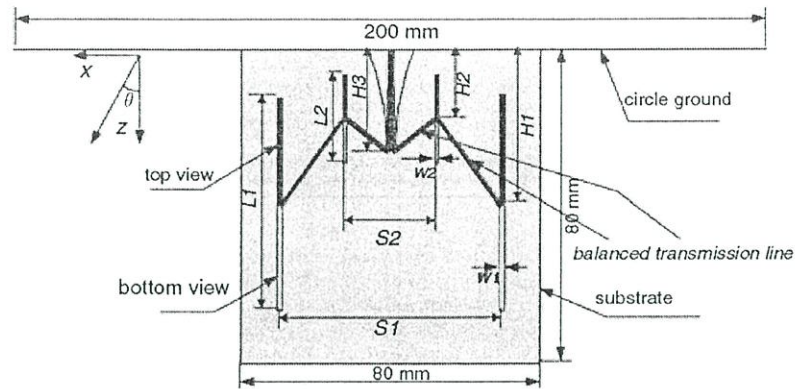
(b) Left-hand circularly polarized antenna.

รูปที่ 2.20 สายอากาศช่องมุมฉากที่มีโพลาริซวงกลมที่ถูกนำเสนอ

โครงสร้างของสายอากาศช่องมุมฉากที่มีโพลาริซวงกลมสำหรับระบบ WLAN มาตรฐาน IEEE 802.11b/g ที่นำเสนอในรูปที่ 2.20 ประกอบด้วยสายอากาศแบบช่องตั้งฉากกันซึ่งออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ โดยลักษณะของการเกิดโพลาริซวงกลมนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการตั้งฉากของช่องทั้งสอง พบว่าผลทดสอบช่วงความถี่ $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ 2.36-2.6 GHz สำหรับโพลาริซวงกลมหมุนขวา และ 2.34-2.58 GHz สำหรับโพลาริซวงกลมหมุนซ้าย ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่สำหรับระบบ WLAN มาตรฐาน IEEE 802.11b/g

2.7.5 สายอากาศสองย่านความถี่ที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางและมีอัตราขยายสูงสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบ WLAN 2.4/5.8 GHz [12]

สายอากาศสองย่านความถี่ที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางและมีอัตราขยายสูงสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบ WLAN 2.4/5.8 GHz นำเสนอโดย J. Zhang X.-M. Zhang J.-S. Liu Q.-F. Wu T. Ying และ H. Jin ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.21

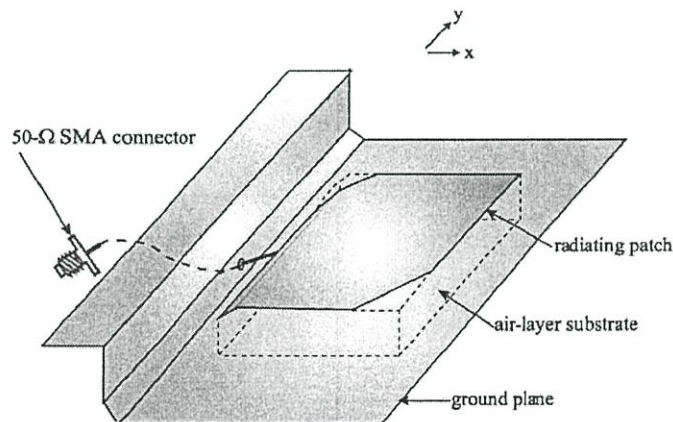


รูปที่ 2.21 สายอากาศสองย่านความถี่ที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางที่ถูกลำเสนอ

โครงสร้างของสายอากาศสองย่านความถี่ที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางและมีอัตราขยายสูงสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบ WLAN 2.4/5.8 GHz ที่นำเสนอในรูปที่ 2.21 ประกอบด้วยสายอากาศแถวลำดับซึ่งออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ โดยมีส่วนประกอบสี่ส่วน สองส่วนแรกเป็นไดโพลแบบยาวและสองส่วนที่เหลือเป็นไดโพลที่สั้นกว่าสองส่วนแรก ไดโพลแบบยาวจะทำงานในย่านความถี่ 2.4 GHz และไดโพลแบบสั้นจะทำงานในย่านความถี่ 5 GHz พบว่าผลทดสอบของช่วงความถี่ $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ 2.22-2.636 GHz และ 5.25-6.408 GHz สำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอในรูปที่ 2.21 มีอัตราขยาย 6 dBic และ 8.8 dBic สำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz ตามลำดับ โดยมีแบบรูปการแพร่กระจายเป็นแบบสองทิศทาง

2.7.6 สายอากาศแผ่นความถี่กว้างที่มีโพลาริซวงกลม [13]

สายอากาศแผ่นความถี่กว้างที่มีโพลาริซวงกลม นำเสนอโดย Chin-Ying Hung Kuo-Chien Chao Saou-Wen Su และ Fa-Shian Chang ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.22



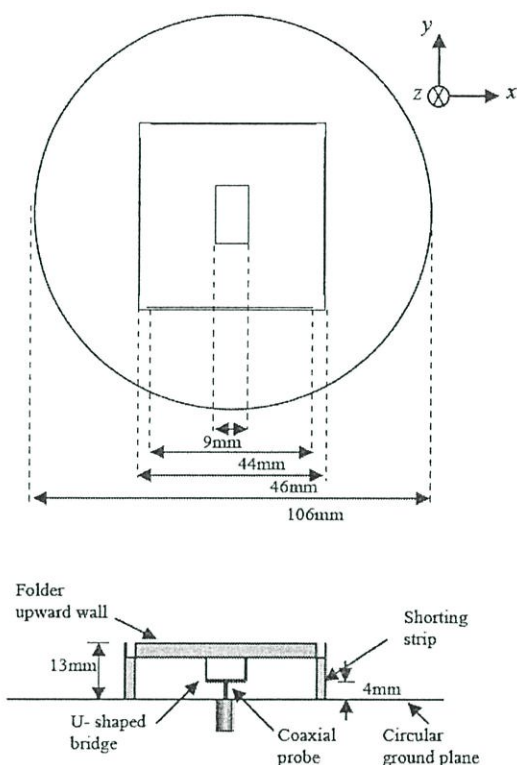
รูปที่ 2.22 โครงสร้างสายอากาศแผ่นความถี่กว้างที่มีโพลาริซวงกลมที่ถูกลำเสนอ

โครงสร้างของสายอากาศแผ่นความถี่กว้างที่มีโพลาริซวงกลมที่นำเสนอในรูปที่ 2.22 ประกอบด้วยระนาบกราวด์ที่พับเป็นสามชั้นซึ่งประกอบด้วยสี่ส่วน (สองแผ่นแนวนอน หนึ่งแผ่นแนวตั้ง และอีกแผ่นเป็นระนาบเอียง) และมีสายอากาศแผ่นตัดมุมเป็นแผ่นแพร่กระจายคลื่น โดยระยะระหว่างสายอากาศแผ่นแนวนอนกับแผ่นแพร่กระจายคือช่องว่างอากาศ พบว่าผลทดสอบช่วง

ความถี่ $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ 2.01-2.6 GHz ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอในรูปที่ 2.22 มีอัตราขยาย 10.5 dBic

2.7.7 สายอากาศแผ่นที่ออกแบบสำหรับระบบ WLAN [14]

สายอากาศแผ่นที่ออกแบบสำหรับระบบ WLAN นำเสนอโดย Mohammed Nazmus Shakib Mohammad Tariqul Islam และ Norbahiah Misran ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.23

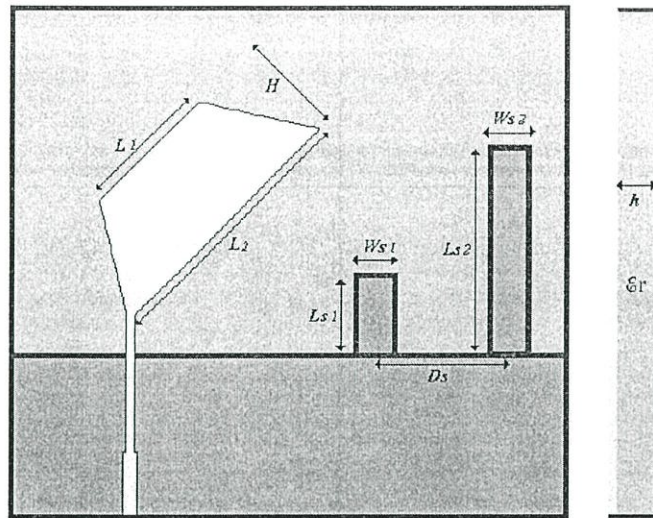


รูปที่ 2.23 โครงสร้างสายอากาศแผ่นที่ออกแบบสำหรับระบบ WLAN ที่ถูกนำเสนอ

โครงสร้างของสายอากาศแผ่นที่ออกแบบสำหรับระบบ WLAN ที่นำเสนอในรูปที่ 2.23 ประกอบด้วยสะพานรูปตัวแอลที่ป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลที่ติดอยู่กับระนาบกราวด์รูปวงกลม โดยมีสายอากาศแผ่นขนาด 11 มม. สี่ด้านและมีกำแพงที่พับขึ้นซึ่งทั้งหมดยึดติดอยู่กับระนาบกราวด์รูปวงกลมเช่นกัน พบว่าผลทดสอบช่วงความถี่ $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ 2.22-2.75 GHz และ 5.06-6.76 GHz สำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz ตามลำดับ ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอในรูปที่ 2.23 มีอัตราขยาย 2 dBic สำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz และ 8 dBic สำหรับย่านความถี่ 5 GHz

2.7.8 สายอากาศโมโนโพลสองย่านความถี่ที่มีโพลาริเซชันวงกลมเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในระบบ WLAN [15]

สายอากาศโมโนโพลสองย่านความถี่ที่มีโพลาริเซชันวงกลมเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในระบบ WLAN นำเสนอโดย S. Esfandiarpour H. R. Hassani และ A. Frotanpour ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.24

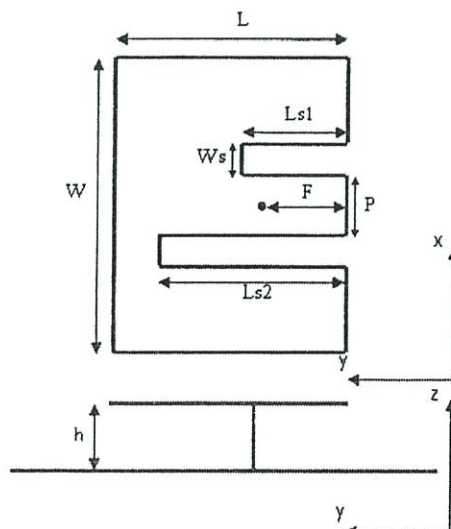


รูปที่ 2.24 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลสองย่านความถี่ที่มีโพลาริซวงกลมที่แนะนำเสนอ

โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลสองย่านความถี่ที่มีโพลาริซวงกลมเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในระบบ WLAN ที่นำเสนอในรูปที่ 2.24 ประกอบด้วยสี่ส่วนหลักคือแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู การป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริป ระบายกราวนด์ และขั้วสำหรับปรับค่า พบว่าผลทดสอบช่วงความถี่ $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB สามารถทำงานได้ทั้งย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอในรูปที่ 2.24 มีอัตราขยาย 2 dBic และ 0.1 dBic สำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz ตามลำดับ โดยสายอากาศที่แนะนำเสนอมีการโพลาริซวงกลมหมุนซ้ายและหมุนขวาในทั้งสองย่านความถี่

2.7.9 สายอากาศแผ่นรูปตัววีช่วงความถี่กว้างที่มีการโพลาริซวงกลมสำหรับการประยุกต์ใช้งาน Wireless [16]

สายอากาศแผ่นรูปตัววีช่วงความถี่กว้างที่มีการโพลาริซวงกลมสำหรับการประยุกต์ใช้งาน Wireless นำเสนอโดย Ahmed Khidre Kai Fang Lee Fan Yang และ Atef Eisherbeni ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 โครงสร้างสายอากาศแผ่นรูปตัววีช่วงความถี่กว้างที่มีการโพลาริซวงกลมที่แนะนำเสนอ

โครงสร้างของสายอากาศแผ่นรูปตัววีช่วงความถี่กว้างที่มีการโพลาไรซ์วงกลมสำหรับการประยุกต์ใช้งาน Wireless ที่นำเสนอในรูปที่ 2.25 ประกอบด้วยสายอากาศรูปตัววีที่ออกแบบบนแผ่นทองแดงแบบบาง พบว่าผลทดสอบช่วงความถี่ $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ 2.34-2.57 GHz ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอในรูปที่ 2.25 มีอัตราขยาย 8.3 dBic โดยสายอากาศที่ถูกนำเสนอมีการโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้าย

จากงานวิจัยที่มีมาก่อนพบว่ามียุทธศาสตร์หลายเทคนิคที่ใช้ในการสร้างสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบ WLAN และบางโครงสร้างยังมีโครงสร้างที่ซับซ้อน แต่คุณลักษณะที่สนใจในการศึกษาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้คือสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์วงกลม เนื่องจากสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์วงกลมมีข้อดีคือตำแหน่งของสายอากาศไม่จำเป็นต้องวางในแนวระดับ สามารถลดการสูญเสียในการส่งข้อมูลระหว่างสายอากาศของสถานีส่งและตัวรับข้อมูล และประสิทธิภาพการทำงานในระบบเหมาะสมมากกว่าโพลาไรซ์เชิงเส้น โดยคุณสมบัติของสายอากาศในงานวิจัยที่มีมาก่อนสรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สรุปคุณสมบัติของสายอากาศในงานวิจัยที่มีมาก่อน

| ลำดับงานวิจัย | ความถี่ | การโพลาไรซ์ | แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น | อัตราขยาย |
|---------------|---|------------------|--------------------------|----------------------------|
| 1 | 2.27-3.01 GHz | โพลาไรซ์วงกลม | แบบทิศทางเดียว | 8.5 dBic |
| 2 | 2.39-2.557 GHz 4.808-5.897 GHz | - | แบบทิศทางเดียว | 4 dBic 5 dBic |
| 3 | 2.34-2.51 GHz 5.14-6.68 GHz | โพลาไรซ์เชิงเส้น | แบบทิศทางเดียว | 3.5-3.7 dBic 4.5-5 dBic |
| 4 | 2.36-2.6 GHz 2.34-2.58 GHz | โพลาไรซ์วงกลม | แบบสองทิศทาง | - |
| 5 | 2.22-2.636 GHz 5.25-6.408 GHz | - | แบบสองทิศทาง | 6 dBic 8.8 dBic |
| 6 | 2.01-2.6 GHz | โพลาไรซ์วงกลม | - | 10.5 dBic |
| 7 | 2.22-2.75 GHz 5.06-6.76 GHz | - | แบบสองทิศทาง | 2 dBic 8 dBic |
| 8 | ทำงานทั้งย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz | โพลาไรซ์วงกลม | แบบรอบตัว | 2 dBic 0.1 dBic |
| 9 | 2.34-2.57 GHz | โพลาไรซ์วงกลม | แบบทิศทางเดียว | 8.3 dBic |

2.8 สรุป

ในบทนี้แนะนำทฤษฎีและหลักการของระบบ WLAN มาตรฐานที่ใช้งานในระบบ WLAN และวิวัฒนาการของมาตรฐานเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11 จากนั้นกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องในการออกแบบสายอากาศ รวมถึงงานวิจัยที่มีมาก่อนในการออกแบบสายอากาศสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบ WLAN ในปัจจุบัน

โดยสายอากาศสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบ WLAN ที่ความถี่ 2.4 GHz มีการใช้งานอย่างแพร่หลายและเป็นที่ยอมรับอย่างมากในปัจจุบัน ซึ่งช่วงความถี่ดังกล่าวจะนำมาใช้ในการออกแบบสายอากาศ ให้มีคุณลักษณะเหมาะสมกับระบบ WLAN มากที่สุด โดยเบื้องต้นจะทำการออกแบบโดยการคำนวณขนาดของสายอากาศโดยการจำลองสายอากาศ ซึ่งต้องคำนึงถึง ค่า $|S_{11}|$ ที่สามารถทำงานครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 2.4-2.48 GHz ค่าอัตราส่วนแกน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยายของสายอากาศ ซึ่งการออกแบบสายอากาศให้มีคุณลักษณะดังกล่าวที่เหมาะสมจะนำเสนอในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

การออกแบบและการจำลองสายอากาศ

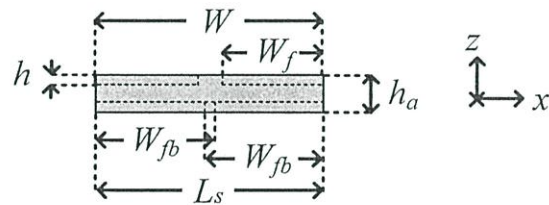
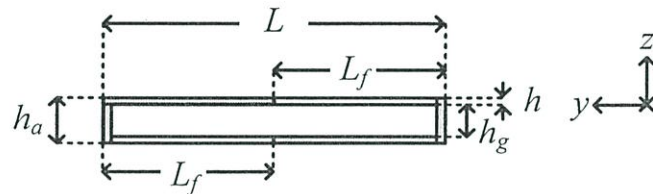
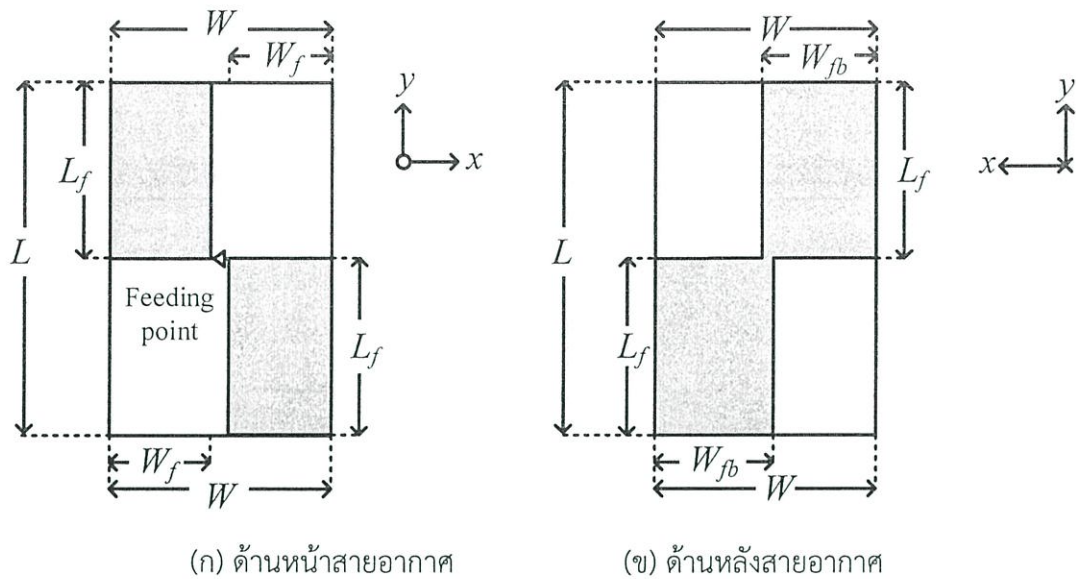
3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบสายอากาศเยื้องแบบพับที่แพร่กระจายคลื่นสองทิศทางมีโพลาไรซ์วงกลมสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz โดยสายอากาศที่นำเสนอมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง มีโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้ายและโพลาไรซ์วงกลมหมุนขวา ตามลำดับ โดยออกแบบเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในระบบ WLAN ซึ่งในบทนี้ได้ทำการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับสายอากาศ และศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อการทำงานของสายอากาศ จากนั้นจะนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมไปใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ โดยพิจารณาค่า $|S_{11}|$ ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูด และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในย่านความถี่ที่ต้องการ ซึ่งเริ่มด้วยการกำหนดขนาดเริ่มต้นของสายอากาศโดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานในการสร้างสายอากาศและสมการที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 จากนั้นจึงจำลองสายอากาศและทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO[®] เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ที่มีต่อสายอากาศ รวมทั้งหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz

3.2 สายอากาศเยื้องแบบพับที่แพร่กระจายคลื่นสองทิศทางมีโพลาไรซ์วงกลมสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz

สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายแบบสองทิศทาง ซึ่งมีโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้ายและโพลาไรซ์วงกลมหมุนขวา โดยข้อดีของการโพลาไรซ์วงกลมคือการสูญเสียที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์มีค่าต่ำ และสามารถรับส่งข้อมูลแม้สายอากาศไม่มีการจัดวางในทิศทางที่แน่นอนทำให้ระหว่างการรับส่งข้อมูลมีช่วงจังหวะที่ทำให้เกิดการตรงกันของโพลาไรซ์ (Polarized Matching) อย่างแน่นอน ซึ่งเป็นการเพิ่มความแน่นอนในการรับส่งข้อมูล โดยเทคนิคที่นำมาใช้ในการออกแบบสายอากาศให้มีโพลาไรซ์แบบวงกลมมีหลายหลากเทคนิคด้วยกัน ในงานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคการพับและการป้อนแบบเดี่ยวในการออกแบบสายอากาศ

รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอ ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอใช้แผ่นทองแดงที่นำมาพับเป็นรูปตัวแอล และใช้วัสดุฐานรองอากาศเพื่อให้ได้อัตราขยายที่สูงขึ้นและทำให้แบนด์วิดท์กว้างขึ้น แผ่นทองแดงที่นำมาใช้มีความหนา (h) 1 mm จุดป้อนสัญญาณจะถูกป้อนที่ตำแหน่ง p_x เท่ากับ (-1,1) p_y เท่ากับ (0,0) และใช้คอนเน็คเตอร์ชนิด SMA เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศและสายนำสัญญาณ โดยขั้นตอนการออกแบบและการปรับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศจะอธิบายในหัวข้อต่อไป



(ค) ด้านข้างสายอากาศ

รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศเยื้องแบบพับที่มีแพร์กระจายคลื่นสองทิศทางมีโพลาริซวงกลมสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz

3.3 การออกแบบสายอากาศเยื้องแบบพับที่มีแพร์กระจายคลื่นสองทิศทางมีโพลาริซวงกลมสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz

สำหรับการออกแบบเยื้องแบบพับที่มีโพลาริซวงกลมและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางนั้นเริ่มต้นจากการออกแบบสายอากาศให้สามารถทำงานในย่านความถี่ที่ต้องการคือ 2.4-2.48 GHz และมีอัตราส่วนแค้นต่ำกว่า 3 dB สำหรับโพลาริซวงกลม โดยสายอากาศที่นำเสนอใช้วัสดุฐานรองเป็นอากาศสำหรับการวิเคราะห์และการออกแบบ โดยกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์และการออกแบบ

| สัญลักษณ์ | พารามิเตอร์ |
|-----------|--|
| W | ความกว้างของสายอากาศ |
| L | ความยาวของสายอากาศ |
| W_f | ความกว้างของแผ่นแพรกระจายคลื่นด้านหน้า |
| W_{fb} | ความกว้างของแผ่นแพรกระจายคลื่นด้านหลัง |
| L_f | ความยาวของแผ่นแพรกระจายคลื่น |
| h | ความสูงของสายอากาศ |
| h_g | ความสูงของช่องว่างอากาศ |
| h | ความหนาของแผ่นทองแดง |

3.3.1 การกำหนดขนาดเริ่มต้นของสายอากาศ

เริ่มจากกำหนดความถี่ที่ใช้งานคือย่านความถี่ 2.4-2.48 GHz โดยมีค่าความถี่กลางเท่ากับ 2.45 GHz จากนั้นคำนวณหาค่าความยาวคลื่นที่ความถี่กลาง 2.45 GHz ตามสมการที่ 3.1

λ_0 คือ ความยาวคลื่นในช่องว่างอิสระ

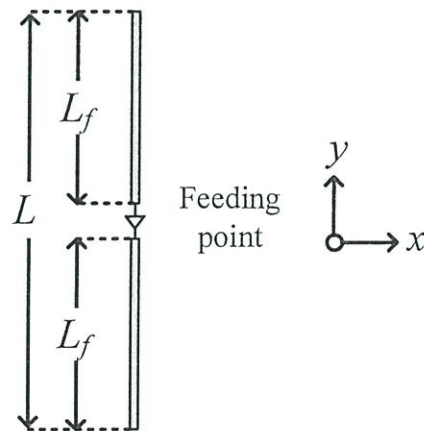
c คือ ความเร็วแสงในช่องว่างอิสระ

ดังนั้น

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \left(\frac{3 \times 10^8}{2.45 \times 10^9} \right) = 0.1224 \text{ m} \quad (3.1)$$

ดังนั้นที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 122.4 mm และมีค่าความยาวคลื่นส่วนสองเท่ากับ 61.2 mm ซึ่งกำหนดให้เป็นความยาวของสายอากาศเริ่มต้น

3.3.2 การออกแบบสายอากาศ



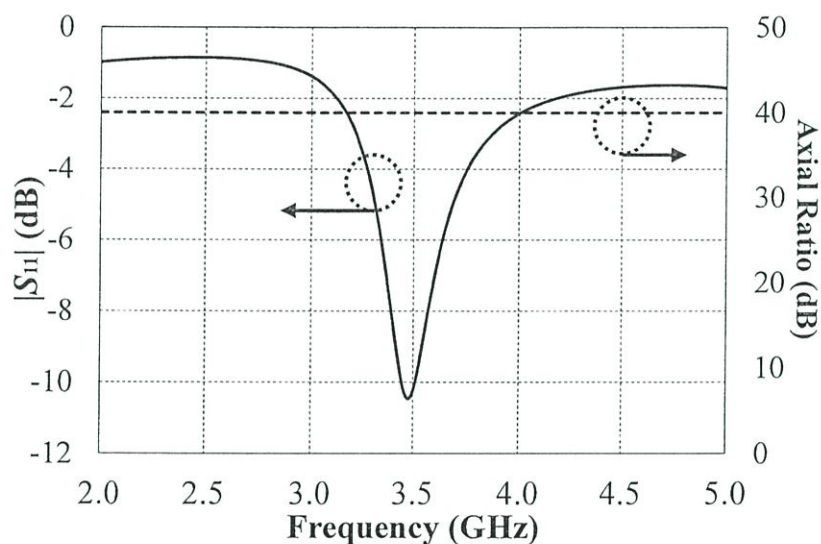
รูปที่ 3.2 โครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศ

จากการคำนวณจึงได้พารามิเตอร์สายอากาศเริ่มต้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.2 และพารามิเตอร์เริ่มต้นต่างๆของสายอากาศแสดงดังตารางที่ 3.2 การออกแบบสายอากาศเริ่มต้นจากการออกแบบสายอากาศไดโพลโดยกำหนดขนาดความยาวของสายอากาศ (L) เท่ากับ 122.4 mm ซึ่งมีความยาวเท่ากับ λ

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศ

| พารามิเตอร์ | ขนาดทางภาพของสายอากาศ |
|-------------|-----------------------|
| W | 1 mm |
| L | 122 mm |
| L_f | 61 mm |
| h | 1 mm |
| p_y | (-1,1) |

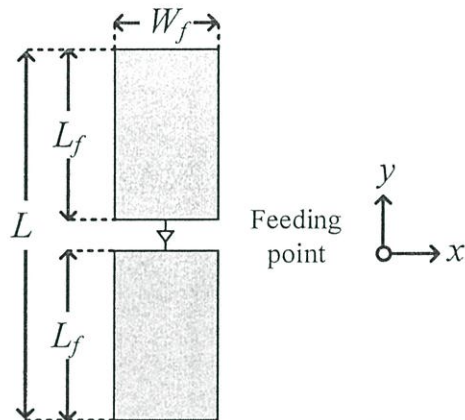
หลังจากนั้นนำค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศดังตารางที่ 3.2 ไปจำลองสร้างสายอากาศตามรูปที่ 3.2 เพื่อวิเคราะห์ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศ โดย $|S_{11}|$ จะแสดงถึงความสามารถใช้งานได้ซึ่งต้องมีค่าต่ำกว่า -10 dB และค่าอัตราส่วนแกนที่เหมาะสมสำหรับโพลาริซวงกลมคือมีค่าต่ำกว่า 3 dB

รูปที่ 3.3 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศเริ่มต้น

จากรูปที่ 3.3 สายอากาศที่การตอบสนองที่ความถี่ 3.44-3.51 GHz และมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำสุดที่ความถี่ 3.47 เท่ากับ -10.47 dB ซึ่งตอบสนองกับความถี่ที่สูงกว่าความถี่ที่ใช้งานจึงต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์ เช่น ความกว้างหรือความยาวของสายอากาศ โดยจากสมการที่ 3.1 หากต้องการให้สายอากาศตอบสนองความถี่ที่ต่ำลง ต้องปรับขนาดสายอากาศให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และที่ความถี่ 2.45 GHz อัตราส่วนแกนเท่ากับ 40 dB ดังนั้นจึงทำการปรับความกว้างของสายอากาศให้มีความกว้างเท่ากับค่าความยาวคลื่นส่วนสี่ ($\lambda/4$) ซึ่งเท่ากับ 30.6 mm ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.3

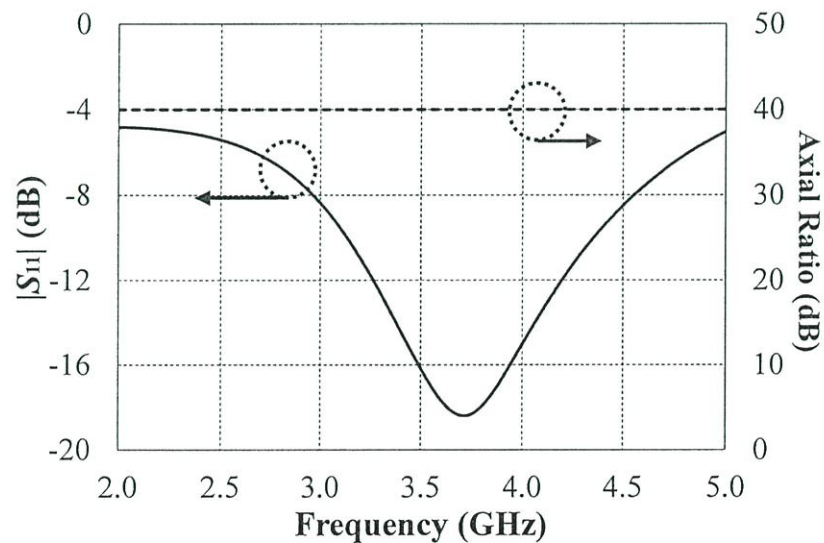
ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงของสายอากาศ

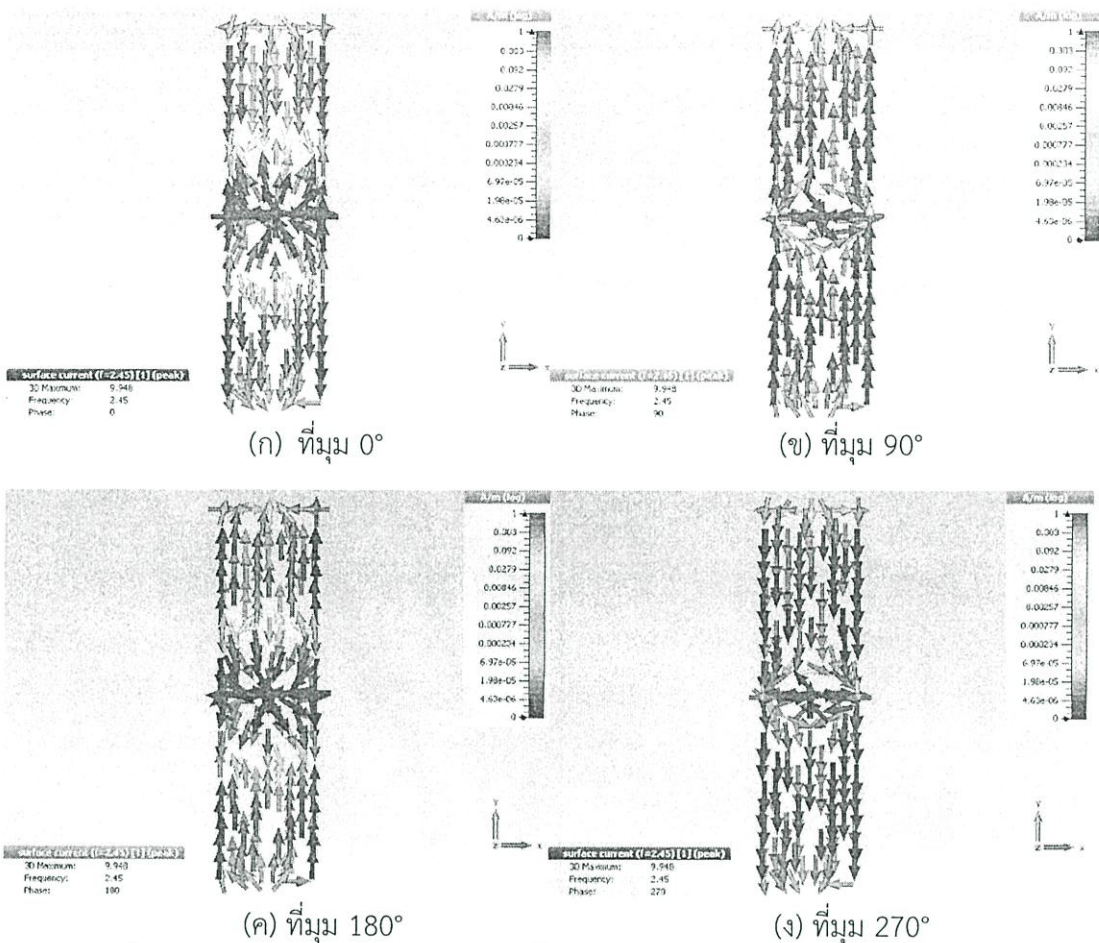
| พารามิเตอร์ | ขนาดทางภาพของสายอากาศ |
|-------------|-----------------------|
| W | 30 mm |
| L | 122 mm |
| L_f | 61 mm |
| h | 1 mm |
| p_y | (-1,1) |



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของสายอากาศที่มีการเพิ่มขนาดสายอากาศ

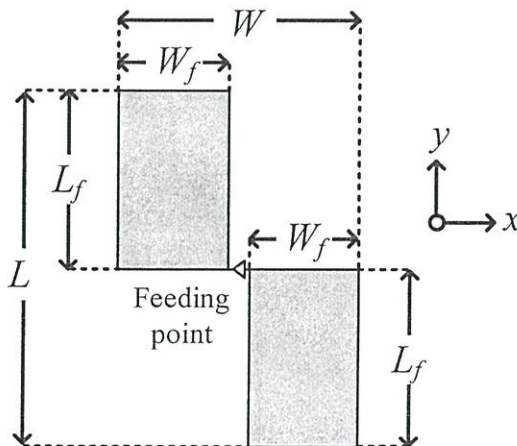
เมื่อจำลองสายอากาศดังรูปที่ 3.4 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการปรับปรุงดังตารางที่ 3.3 จะได้ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแฉกดังรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแฉกของสายอากาศที่มีความกว้างเท่ากับ $\lambda/4$



รูปที่ 3.6 การกระจายตัวของกระแสบนพื้นผิวสายอากาศที่มุม 0° 90° 180° และ 270°

จากรูปที่ 3.5 พบว่าสายอากาศที่การตอบสนองที่ความถี่ 3.13-4.35 GHz และมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำสุดที่ความถี่ 3.71 เท่ากับ -18.4 dB และที่ความถี่ 2.45 GHz อัตราส่วนแกนเท่ากับ 40 dB ซึ่งยังคงตอบสนองกับความถี่ที่สูงกว่าความถี่ที่ใช้งานและค่าอัตราส่วนแกนยังไม่ต่ำกว่า 3 dB และจากรูปที่ 3.6 การกระจายตัวของกระแสบนพื้นผิวสายอากาศมีทิศ +y และ -y เท่านั้น ซึ่งคาดเดาได้ว่าการโพลาไรซ์เป็นโพลาไรซ์เชิงเส้น จึงทำปรับตำแหน่งของแผ่นแพร่กระจายคลื่น เพื่อทำให้เกิดการต่างเฟส 90° ดังรูปที่ 3.7

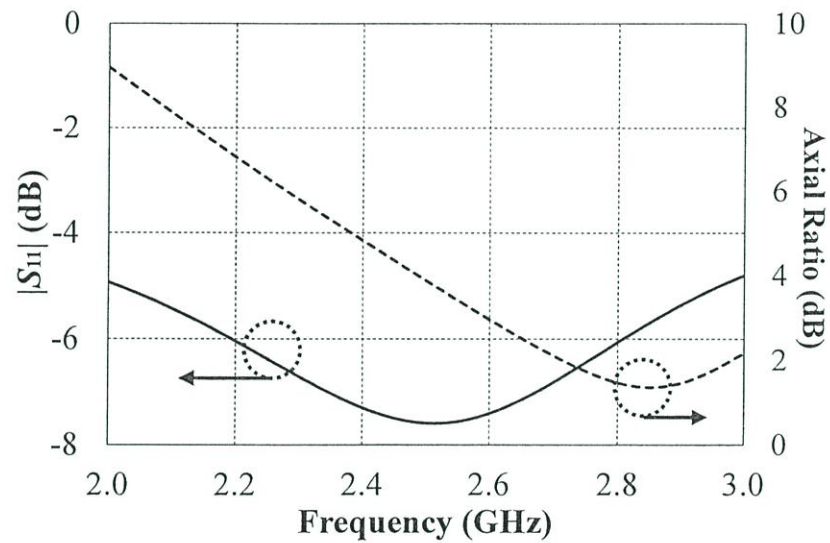
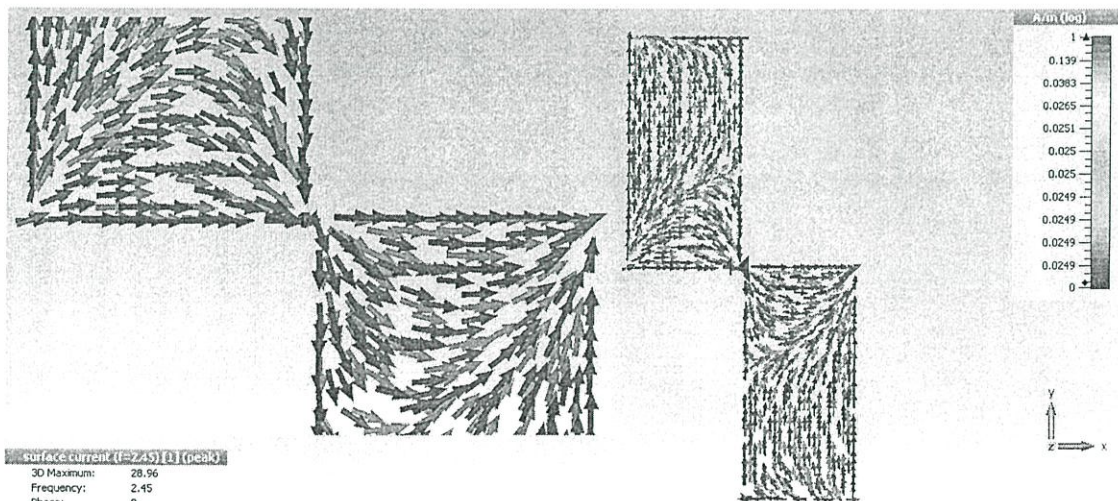


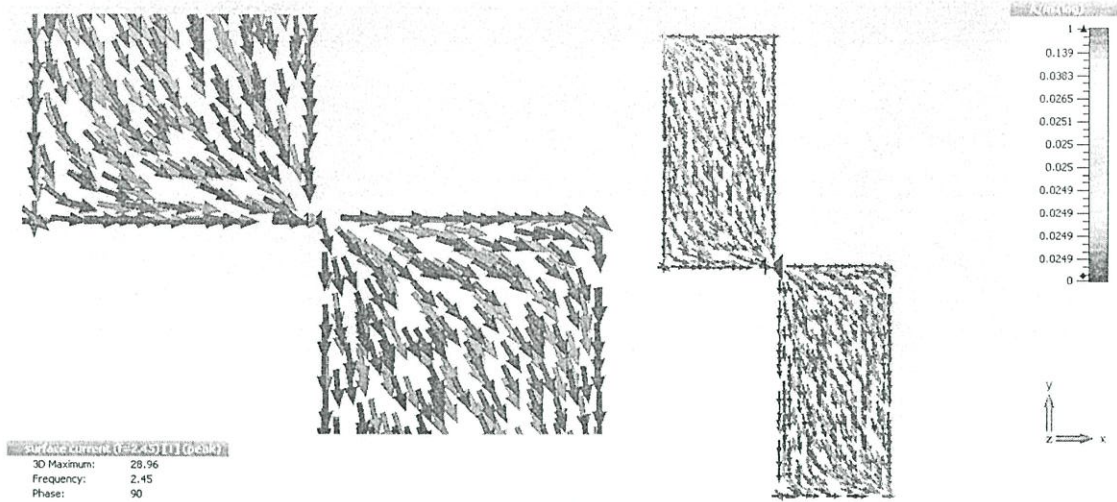
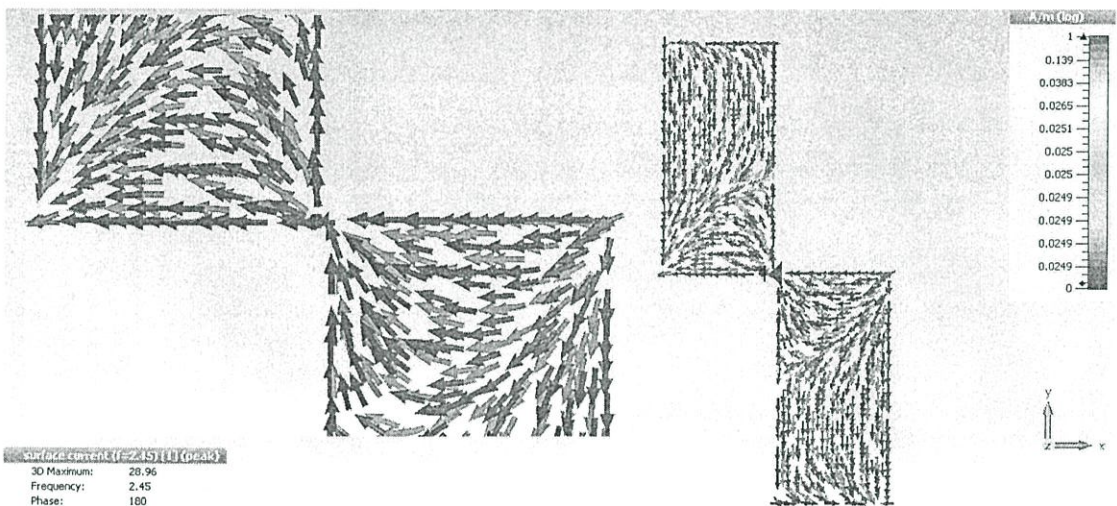
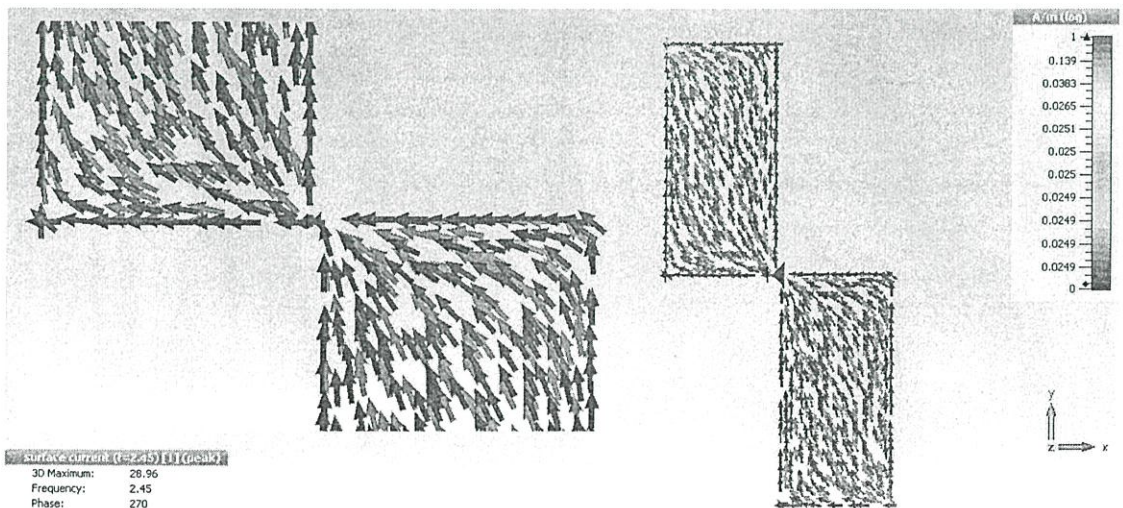
รูปที่ 3.7 โครงสร้างของสายอากาศที่ทำการเปลี่ยนตำแหน่ง

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงของสายอากาศ

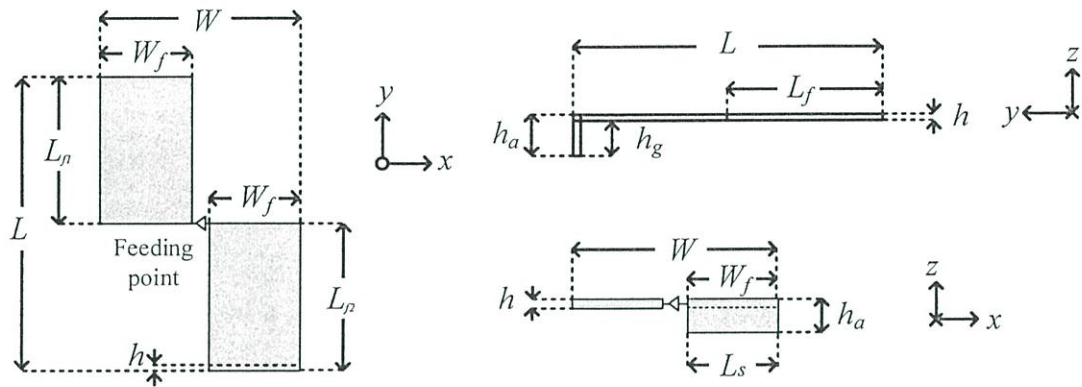
| พารามิเตอร์ | ขนาดทางภาพของสายอากาศ |
|-------------|-----------------------|
| W | 30 mm |
| L | 122 mm |
| L_f | 61 mm |
| h | 1 mm |
| p_x | (-1,1) |

เมื่อจำลองสายอากาศดังรูปที่ 3.7 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการปรับปรุงดังตารางที่ 3.4 จะได้ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนดังรูปที่ 3.8

รูปที่ 3.8 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ทำการเปลี่ยนตำแหน่ง(ก) ที่มุม 0° รูปที่ 3.9 การกระจายตัวของกระแสบนพื้นผิวสายอากาศที่มุม 0° 90° 180° และ 270°

(ข) ที่มุม 90° (ค) ที่มุม 180° (ง) ที่มุม 270° รูปที่ 3.9 การกระจายตัวของกระแสบนพื้นผิวสายอากาศที่มุม 0° 90° 180° และ 270° (ต่อ)

จากรูปที่ 3.8 พบว่าสายอากาศที่การตอบสนองที่ความถี่ที่ต่ำลงและค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศมีแนวโน้มที่ตรงกับความถี่ที่ใช้งาน และที่ความถี่ 2.45 GHz อัตราส่วนเกินเท่ากับ 4.33 dB ซึ่งยังมีค่ามากกว่า 3 dB แต่มีค่ามากกว่าเพียงเล็กน้อย และจากรูปที่ 3.9 พบว่าการกระจายของกระแสบนพื้นผิวสายอากาศมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางตลอดเวลา ประกอบกับค่าอัตราส่วนเกินเข้าใกล้ 3 dB มากขึ้นจึงคาดเดาได้ว่าอาจทำให้เกิดโพลาไรซ์วงกลม แต่คุณลักษณะของสายอากาศยังไม่ตรงตามที่ต้องการจึงต้องทำการปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศโดยการพับแผ่นแพร่กระจายคลื่นให้เป็นรูปตัวแอล ซึ่งเทคนิคการพับเป็นรูปตัวแอลเป็นเทคนิคหนึ่งที่ทำให้เกิดโพลาไรซ์วงกลม โดยการพับจะพับแผ่นแพร่กระจายคลื่นเป็นความยาวเท่ากับ $\lambda / 12$ โครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 3.10



(ก) ด้านหน้าสายอากาศ

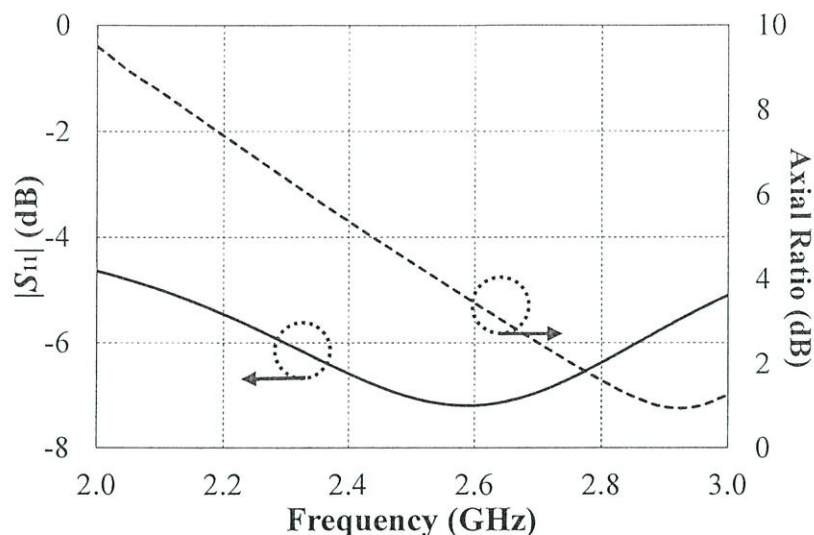
(ข) ด้านข้างสายอากาศ

รูปที่ 3.10 โครงสร้างของสายอากาศที่ทำการพับแผ่นแพร่กระจายคลื่นให้เป็นรูปตัวแอล

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงของสายอากาศโดยการพับแผ่นแพร่กระจายคลื่นให้เป็นรูปตัวแอล

| พารามิเตอร์ | ขนาดทางภาพของสายอากาศ |
|-------------|-----------------------|
| W | 61.0 mm |
| L | 122.0 mm |
| W_f | 29.5 mm |
| L_{f1} | 61.0 mm |
| L_{f2} | 50.0 mm |
| L_s | 30.0 mm |
| h_a | 11.0 mm |
| h | 1.0 mm |
| p_x | (-1,1) |
| p_y | (0,0) |

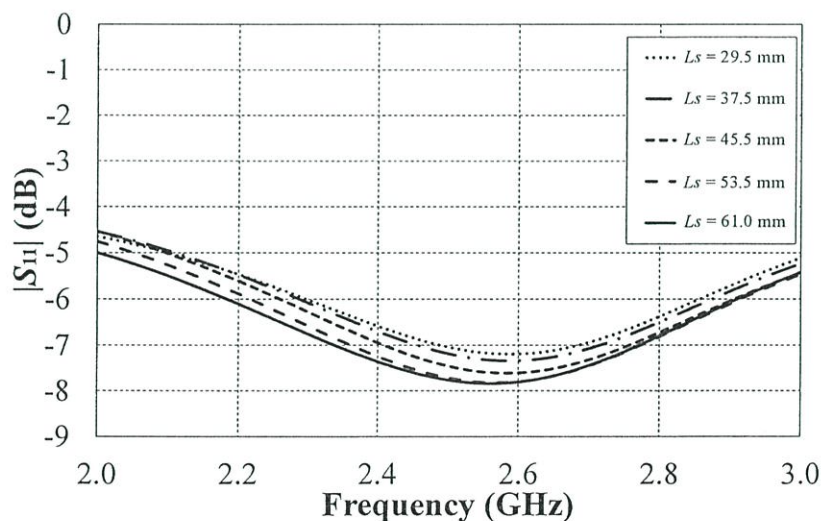
เมื่อจำลองสายอากาศดังรูปที่ 3.10 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการปรับปรุงดังตารางที่ 3.5 จะได้ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนเกินดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ปรับปรุง

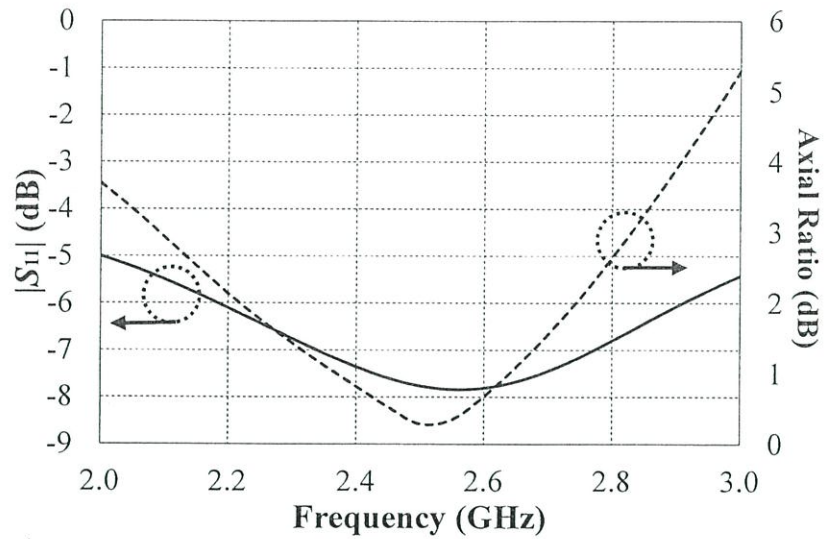
จากรูปที่ 3.11 พบว่าสายอากาศมีค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับความถี่ที่ใช้งาน และสายอากาศมีอัตราส่วนแกนที่ความถี่ 2.45 GHz เท่ากับ 4.88 dB ซึ่งมีค่าสูงกว่าอัตราส่วนที่ยอมรับได้สำหรับโพลาริซวงกลมคือต้องมีอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB แต่ค่าที่ได้จากการจำลองมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยจึงทำการปรับโครงสร้างของสายอากาศโดยเริ่มจากการปรับค่าความยาวที่เหมาะสมของแผ่นแพร่กระจายคลื่นที่ถูกพาดังโครงสร้างที่แสดงดังรูปที่ 3.10

เมื่อจำลองสายอากาศดังรูปที่ 3.10 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการปรับปรุงดังตารางที่ 3.5 จะได้ผลจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศจากการปรับค่าพารามิเตอร์ L_s นั้นแสดงดังรูปที่ 3.12



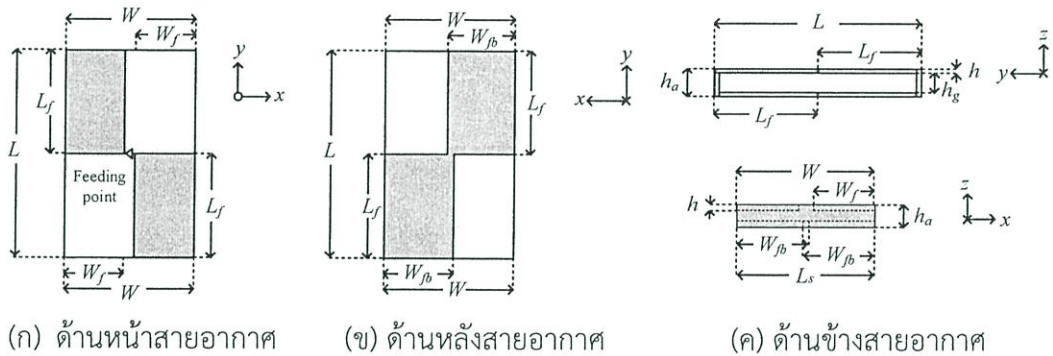
รูปที่ 3.12 $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ L_s

จากรูปที่ 3.12 พบว่า ค่า $L_s = 61$ mm มีค่า $|S_{11}|$ ที่ต่ำที่สุด และมีขนาดเท่ากับ ความยาวของสายอากาศ W จากนั้นจึงจำลองค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศ ซึ่งผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนแสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ L_s

จากรูปที่ 3.13 พบว่าสายอากาศมีค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับความถี่ที่ใช้ งาน และสายอากาศมีอัตราส่วนแกนที่ความถี่ 2.45 เท่ากับ 0.52 dB ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนที่ยอมรับได้สำหรับโพลาไรซ์วงกลม แต่ค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศยังมีค่าไม่ถึง -10 dB จึงต้องทำการเพิ่มโครงสร้างสายอากาศโดยการเพิ่มโครงสร้างที่คล้ายกันเข้าไปด้านล่างของสายอากาศดังรูปที่ 3.14



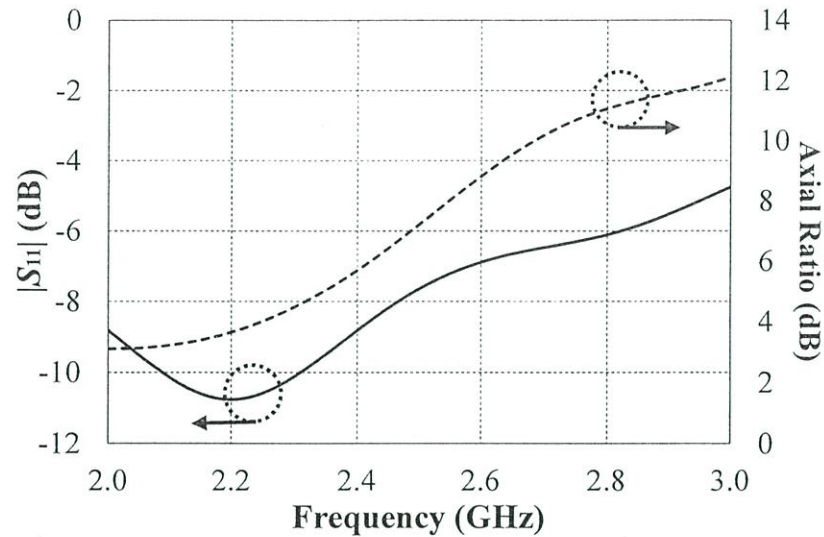
(ก) ด้านหน้าสายอากาศ (ข) ด้านหลังสายอากาศ (ค) ด้านข้างสายอากาศ

รูปที่ 3.14 โครงสร้างสายอากาศที่ทำการเพิ่มโครงสร้างด้านล่าง

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์โครงสร้างสายอากาศที่ทำการเพิ่มโครงสร้างด้านล่าง

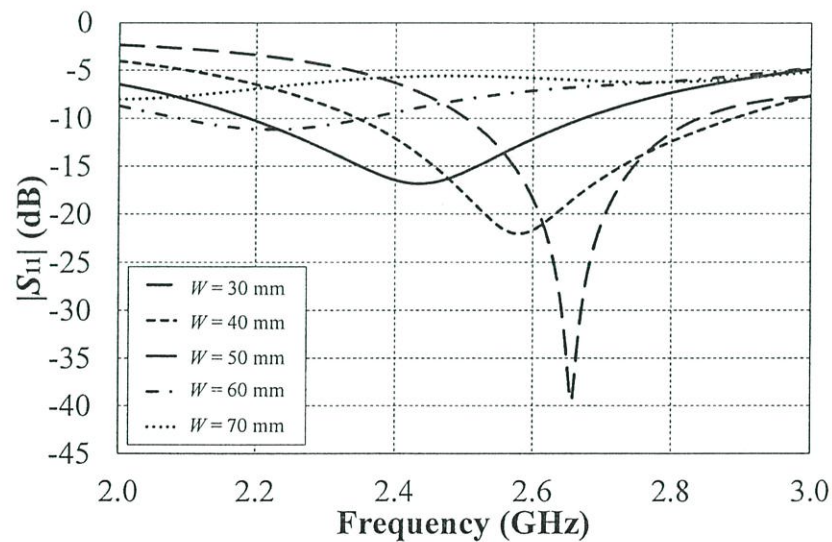
| พารามิเตอร์ | ขนาดทางภาพของสายอากาศ |
|-------------|-----------------------|
| W | 61.0 mm |
| L | 100.0 mm |
| W_f | 29.5 mm |
| W_{fb} | 31.5 mm |
| L_f | 50.0 mm |
| L_s | 61.0 mm |
| h_a | 11.0 mm |
| h | 1.0 mm |
| p_x | (-1,1) |
| p_y | (0,0) |

เมื่อจำลองสายอากาศดังรูปที่ 3.14 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.6 จะได้ผลจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 3.15



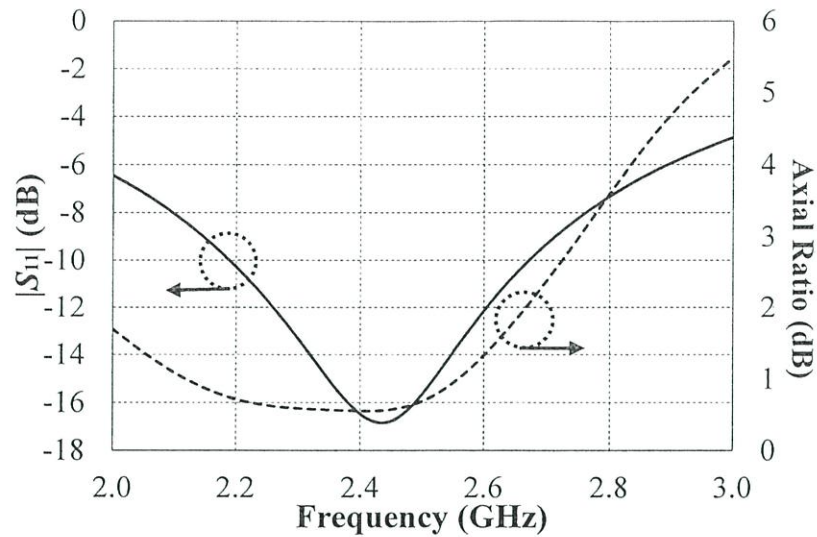
รูปที่ 3.15 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศหลังเพิ่มโครงสร้างด้านล่าง

จากรูปที่ 3.15 พบว่าสายอากาศที่การตอบสนองที่ความถี่ 2.08-2.31 GHz และมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำสุดที่ความถี่ 2.19 เท่ากับ -10.76 dB และสายอากาศมีอัตราส่วนแกนที่ความถี่ 2.45 เท่ากับ 6.42 dB ซึ่งยังไม่ตอบสนองช่วงความถี่ที่ใช้งานจึงทำการปรับความกว้างของสายอากาศ W โดยผลจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศจากการปรับค่าพารามิเตอร์ W นั้นแสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 $|S_{11}|$ ของสายอากาศขณะที่ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ W

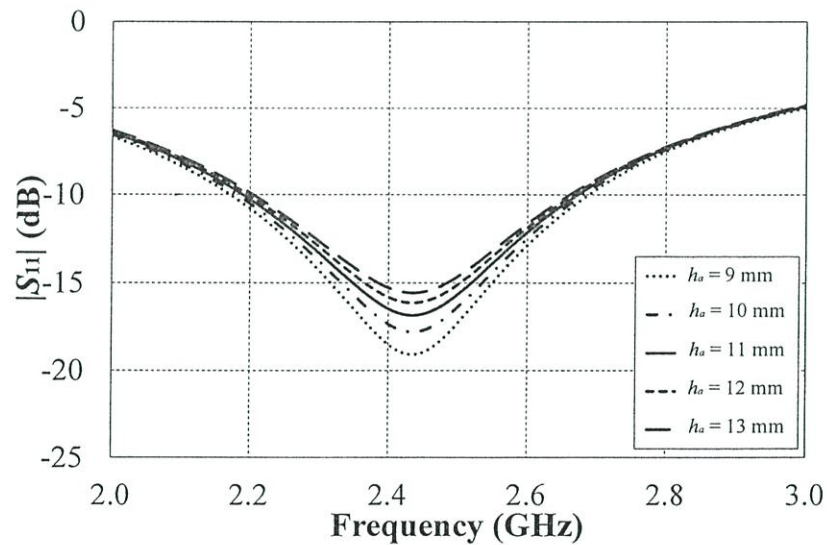
จากรูปที่ 3.16 พบว่า ค่า $W = 50$ mm มีค่า $|S_{11}|$ ที่ตรงกับย่านความถี่ที่ใช้งานมากที่สุดจึงเลือกค่าความกว้างของสายอากาศเท่ากับ 50 mm



รูปที่ 3.17 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศหลังจากปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ W

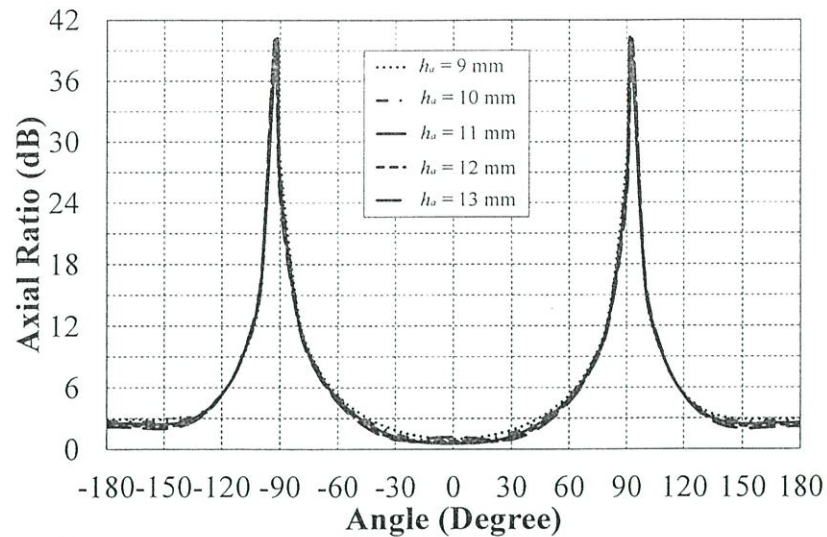
จากรูปที่ 3.17 พบว่าสายอากาศตอบสนองตั้งแต่ความถี่ 2.18-2.67 GHz โดยมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำที่สุดที่ความถี่ 2.435 GHz ซึ่งมีค่า $|S_{11}|$ เท่ากับ -16.84 dB และที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า $|S_{11}|$ เท่ากับ -16.777 dB และสายอากาศมีอัตราส่วนแกนที่ความถี่ 2.45 เท่ากับ 0.56 dB

จากนั้นจึงหาค่าความสูงที่เหมาะสมที่สุดของสายอากาศโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ h_o โดยผลจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศจากการปรับค่าพารามิเตอร์ h_o แสดงดังรูปที่ 3.18



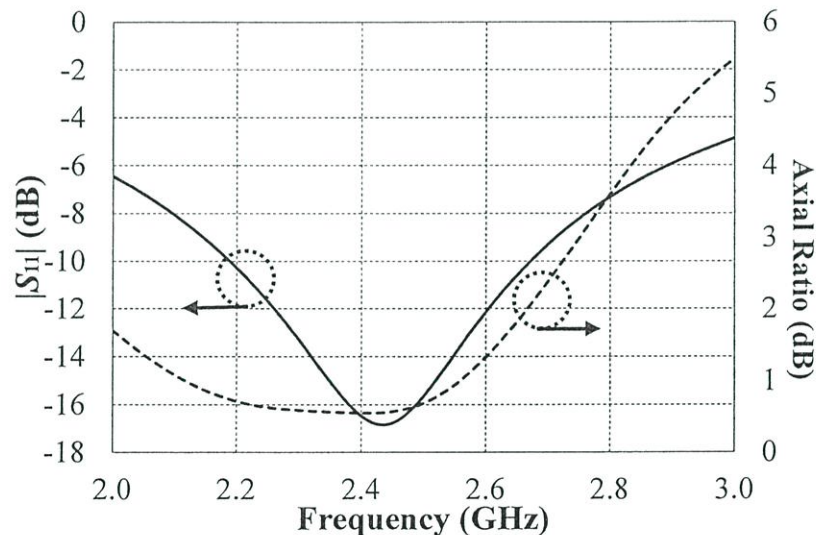
รูปที่ 3.18 $|S_{11}|$ ของสายอากาศขณะที่ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ h_o

เมื่อจำลองค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศตามการปรับค่าพารามิเตอร์ h_o ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 อัตราส่วนแกนของสายอากาศตามการปรับค่าพารามิเตอร์ h_o

จากรูปที่ 3.18 พบว่าสายอากาศที่มีค่าพารามิเตอร์ $h_o = 9$ mm มีค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศต่ำที่สุด แต่เนื่องจากเมื่อสังเกตค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ขนาดต่างๆ ในรูปที่ 3.19 พบว่าสายอากาศที่มีค่าพารามิเตอร์ $h_o = 11$ mm มีค่าอัตราส่วนแกนที่มุม 0° ที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.56 dB ดังนั้นจึงเลือกค่าพารามิเตอร์ $h_o = 11$ mm เป็นค่าความสูงของสายอากาศ



รูปที่ 3.20 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศหลังจากปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ h_o

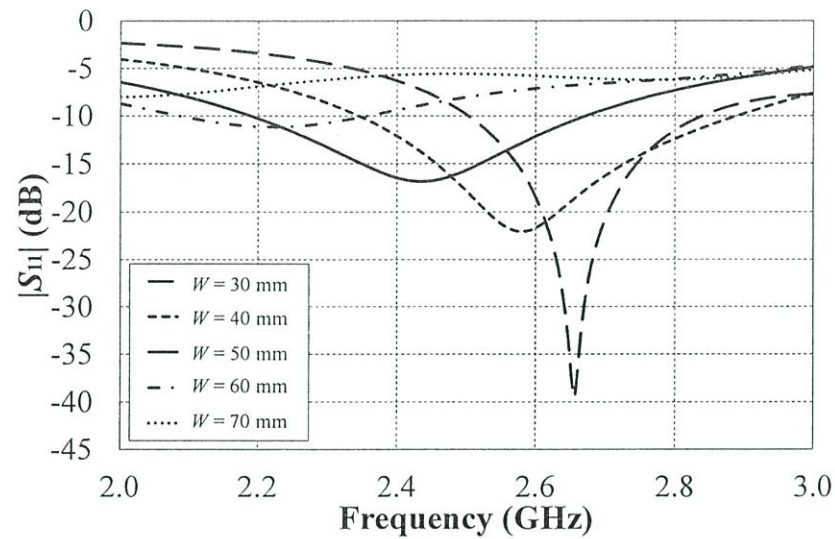
จากรูปที่ 3.20 พบว่าสายอากาศตอบสนองตั้งแต่ความถี่ 2.18-2.67 GHz โดยมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำที่สุดที่ความถี่ 2.435 GHz ซึ่งมีค่า $|S_{11}|$ เท่ากับ -16.84 dB และที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า $|S_{11}|$ เท่ากับ -16.777 dB และสายอากาศมีอัตราส่วนแกนที่ความถี่ 2.45 เท่ากับ 0.56 dB

3.4 การปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของสายอากาศจะกล่าวดังหัวข้อต่อไปนี้

3.4.1 สายอากาศเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ W

เมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ W ซึ่งคือความกว้างทั้งหมดของสายอากาศ โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตั้งแต่ 30-70 mm ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.21

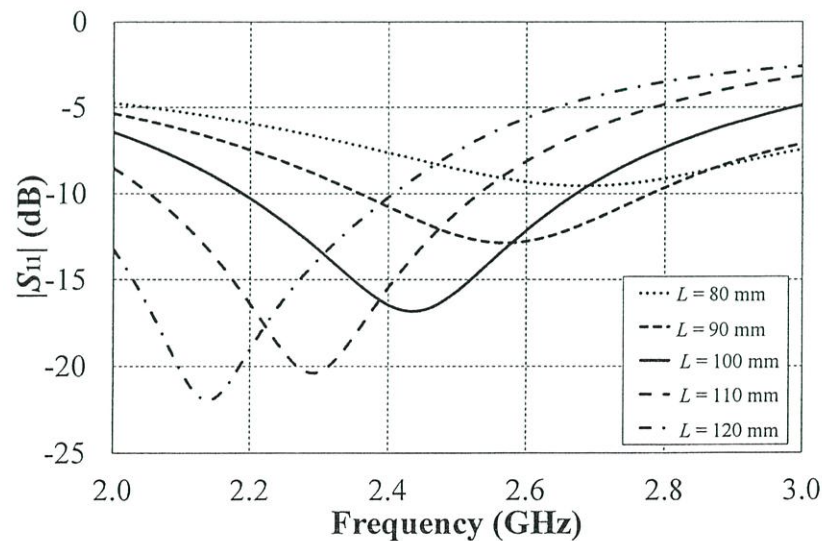


รูปที่ 3.21 $|S_{11}|$ ของสายอากาศขณะที่ปรับปรุ่ค่าพารามิเตอร์ W

จากรูปที่ 3.21 พบว่า ค่า $W = 50$ mm มีค่า $|S_{11}|$ ครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานมากที่สุดจึงเลือกค่าความกว้างของสายอากาศเท่ากับ 50 mm โดยครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 2.18-2.67 GHz และมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำสุดที่ 2.435 เท่ากับ 16.84

3.4.2 สายอากาศเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ L

เมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ L ซึ่งคือความยาวทั้งหมดของสายอากาศ โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตั้งแต่ 80-120 mm ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.22

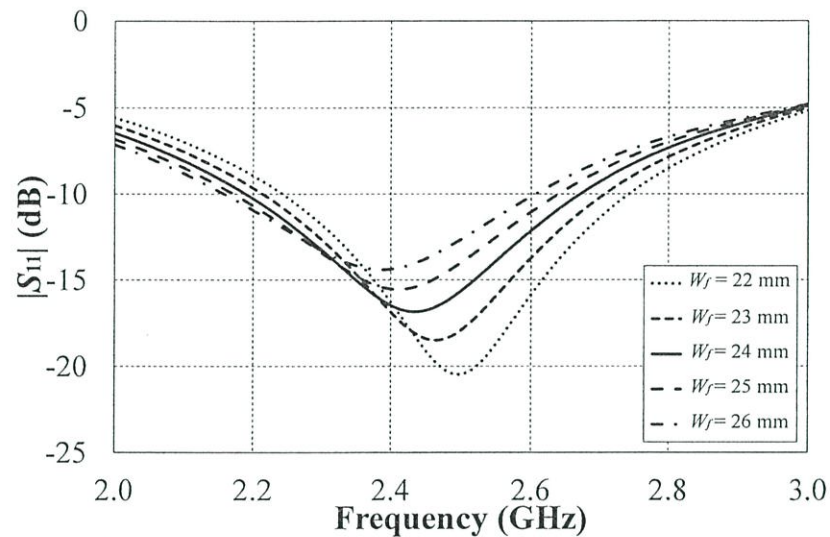


รูปที่ 3.22 $|S_{11}|$ ของสายอากาศขณะที่ปรับปรุ่ค่าพารามิเตอร์ L

จากรูปที่ 3.22 พบว่า ค่า $L = 100$ mm มีค่า $|S_{11}|$ ครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานมากที่สุดจึงเลือกค่าความยาวของสายอากาศเท่ากับ 100 mm โดยครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 2.18-2.67 GHz และมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำสุดที่ 2.435 เท่ากับ 16.84

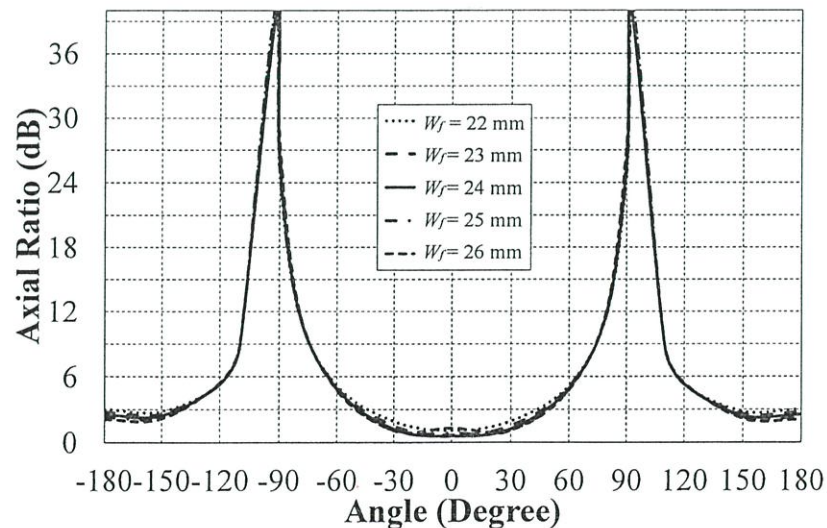
3.4.3 สายอากาศเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ W_f

เมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ W_f ซึ่งคือความกว้างของแผ่นแพรกระจายคลื่นด้านหน้า โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตั้งแต่ 22-26 mm ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 $|S_{11}|$ ของสายอากาศขณะที่ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ W_f

จากรูป 3.23 พบว่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่ขนาดพารามิเตอร์ W_f ต่างๆ มีแนวโน้มทำงานในย่านความถี่ที่ใช้งานและมีค่าใกล้เคียงกัน จึงทำการจำลองอัตราส่วนแกนของสายอากาศ ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.24



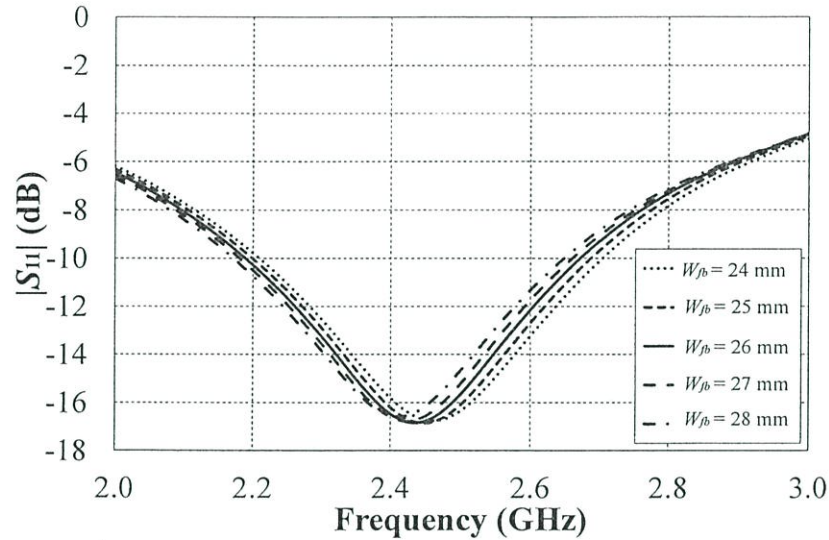
รูปที่ 3.24 อัตราส่วนแกนของสายอากาศขณะที่ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ W_f

จากรูปที่ 3.23 พบว่าสายอากาศที่มีค่าพารามิเตอร์ $W_f = 26$ mm มีค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศต่ำที่สุด แต่เนื่องจากเมื่อสังเกตค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ขนาดต่างๆ ในรูปที่ 3.24 ดังที่ได้กล่าว

มาแล้ว จะพบว่าสายอากาศที่มีค่าพารามิเตอร์ $W_f = 24$ mm มีค่าอัตราส่วนแกนที่มุม 0° ที่ต่ำที่สุด ดังนั้นจึงเลือกค่าพารามิเตอร์ $W_f = 24$ mm เป็นความกว้างของแผ่นแพร่กระจายคลื่นด้านหน้า

3.4.4 สายอากาศเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ W_{fb}

เมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ W_{fb} ซึ่งคือความกว้างของแผ่นแพร่กระจายคลื่นด้านหลัง โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตั้งแต่ 24-28 mm ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.25

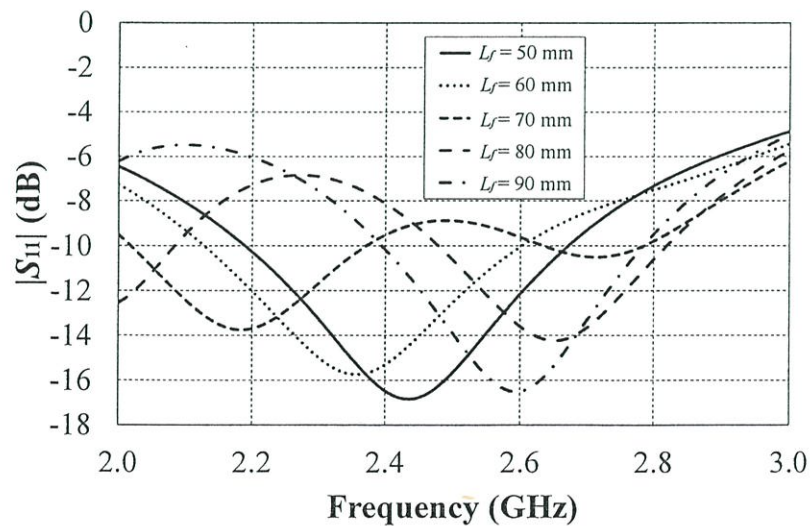


รูปที่ 3.25 $|S_{11}|$ ของสายอากาศขณะที่ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ W_{fb}

จากรูปที่ 3.25 พบว่าการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ W_{fb} ที่ขนาดต่างๆ มีผลใกล้เคียงกันและจะสังเกตได้ว่าส่งผลกระทบน้อยมากต่อค่าคุณลักษณะ $|S_{11}|$ ของสายอากาศ

3.4.5 สายอากาศเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ L_f

เมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ L_f ซึ่งคือความยาวของแผ่นแพร่กระจายคลื่นด้านหลัง โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตั้งแต่ 50-90 mm ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.26

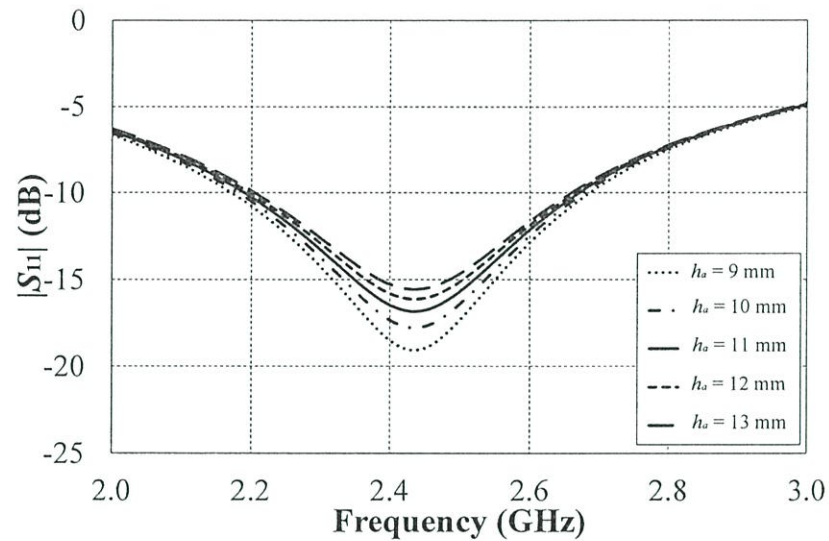


รูปที่ 3.26 $|S_{11}|$ ของสายอากาศขณะที่ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ L_f

จากรูปที่ 3.26 พบว่า ค่า $L_f = 50$ mm มีค่า $|S_{11}|$ ครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานมากที่สุดจึงเลือกค่าความยาวของแผ่นแพร่กระจายคลื่นด้านหลังเท่ากับ 50 mm โดยครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 2.18-2.67 GHz และมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำสุดที่ 2.435 เท่ากับ 16.84

3.4.6 สายอากาศเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ h_o

เมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ h_o ซึ่งคือความหนาของสายอากาศ โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตั้งแต่ 9-13 mm ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.27

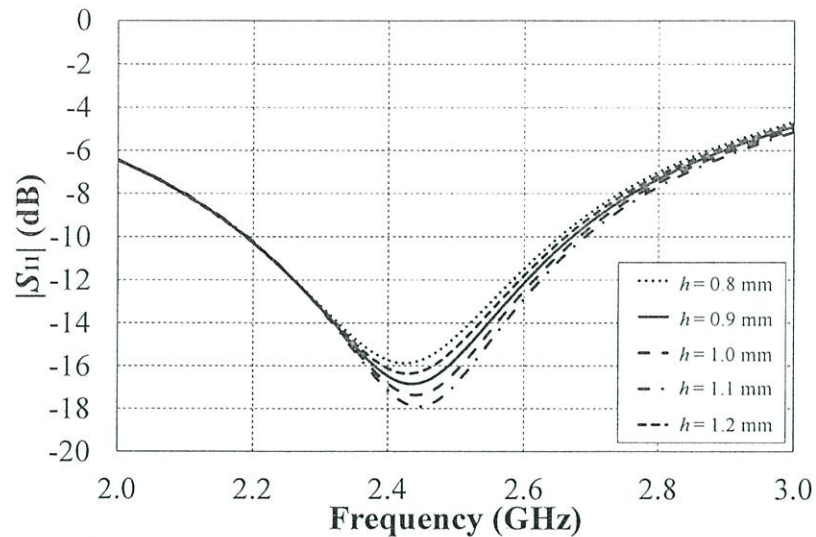


รูปที่ 3.27 $|S_{11}|$ ของสายอากาศขณะที่ปรับค่าพารามิเตอร์ h_o

จากรูปที่ 3.27 พบว่าสายอากาศที่มีค่าพารามิเตอร์ $h_o = 9$ mm มีค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศต่ำที่สุด แต่เนื่องจากเมื่อสังเกตค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ขนาดต่างๆ ในรูปที่ 3.19 ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จะพบว่าสายอากาศที่มีค่าพารามิเตอร์ $h_o = 11$ mm มีค่าอัตราส่วนแกนที่มุม 0° ที่ต่ำที่สุด ดังนั้นจึงเลือกค่าพารามิเตอร์ $h_o = 11$ mm เป็นค่าความสูงของสายอากาศ

3.4.7 สายอากาศเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ h

เมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ h ซึ่งคือความหนาของแผ่นทองแดง โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตั้งแต่ 0.8-1.2 mm ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 $|S_{11}|$ ของสายอากาศขณะปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ h

จากรูปที่ 3.28 พบว่าการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ h ที่ขนาดต่างๆ มีผลใกล้เคียงกันและจะสังเกตได้ว่าส่งผลกระทบต่อค่าคุณลักษณะ $|S_{11}|$ ของสายอากาศ จึงเลือกความหนาของแผ่นทองแดง เท่ากับ 1 mm เพื่อเป็นการง่ายต่อการหาวัสดุที่จะนำมาสร้างสายอากาศ

3.5 ผลการจำลองสายอากาศต้นแบบ

จากการจำลองการทำงานของสายอากาศที่กล่าวมาข้างต้น รวมถึงการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ ทำให้ได้ขนาดทางกายภาพของสายอากาศต้นแบบดังตารางที่ 3.7

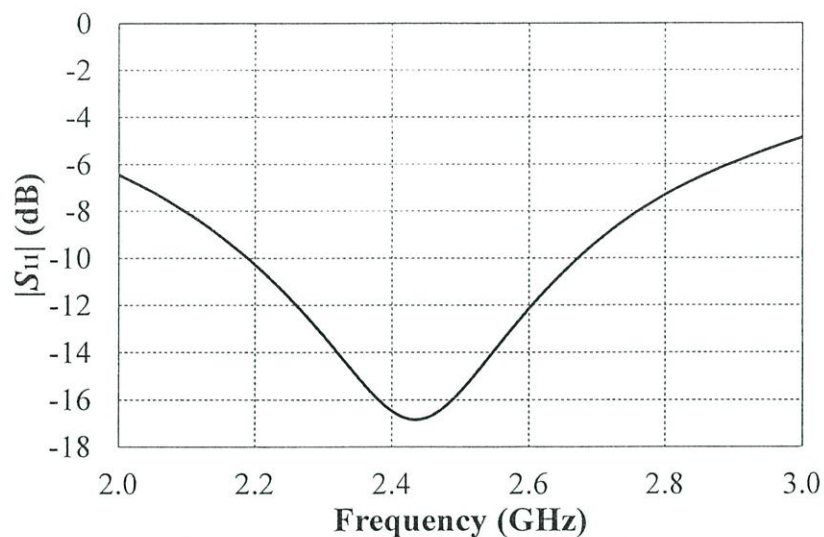
ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

| พารามิเตอร์ | ขนาดทางกายภาพของสายอากาศ | ขนาดทางไฟฟ้าของสายอากาศ |
|-------------|--------------------------|-------------------------|
| W | 50 mm | 0.408λ |
| L | 100 mm | 0.816λ |
| W_f | 24 mm | 0.196λ |
| W_{fb} | 26 mm | 0.212λ |
| L_f | 50 mm | 0.408λ |
| L_s | 50 mm | 0.408λ |
| h_a | 11 mm | 0.089λ |
| h_g | 9 mm | 0.073λ |
| h | 1 mm | 0.008λ |
| p_x | (-1,1) | - |
| p_y | (0,0) | - |

ในหัวข้อนี้เป็นการสรุปผลการจำลองคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบหลังจากได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้ว โดยแบ่งเป็นหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.5.1 ผลการจำลอง $|S_{11}|$

สำหรับการพิจารณา $|S_{11}|$ ของสายอากาศ จะพิจารณาที่ $|S_{11}| \leq -10$ dB ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน ซึ่งผลการจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบแสดงดังรูปที่ 3.29

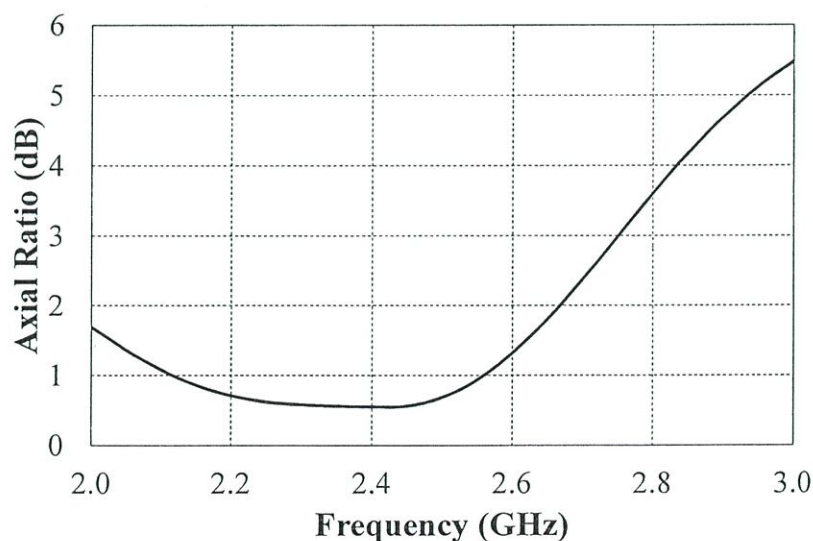


รูปที่ 3.29 ผลจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบ

จากรูปที่ 3.29 พบว่า $|S_{11}|$ มีการตอบสนองย่านความถี่ตั้งแต่ 2.18-2.67 GHz มีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 0.49 GHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ เท่ากับ 20% โดยมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำที่สุดที่ความถี่ 2.435 GHz ซึ่งมีค่า $|S_{11}|$ เท่ากับ -16.84 dB และที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า $|S_{11}|$ เท่ากับ -16.777 dB ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานคือ 2.4-2.48 GHz

3.5.2 ผลการจำลองอัตราส่วนแกนเทียบกับความถี่ของสายอากาศต้นแบบ

สำหรับการพิจารณาอัตราส่วนแกนของสายอากาศ จะพิจารณาที่อัตราส่วนแกนน้อยกว่า 3 dB ซึ่งผลการจำลองอัตราส่วนแกนเทียบกับความถี่ของสายอากาศต้นแบบแสดงดังรูปที่ 3.30

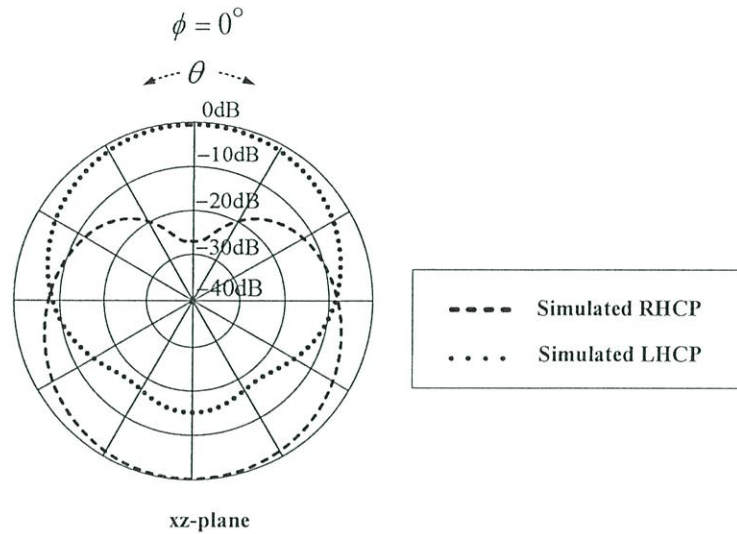


รูปที่ 3.30 อัตราส่วนแกนเทียบกับความถี่ของสายอากาศต้นแบบ

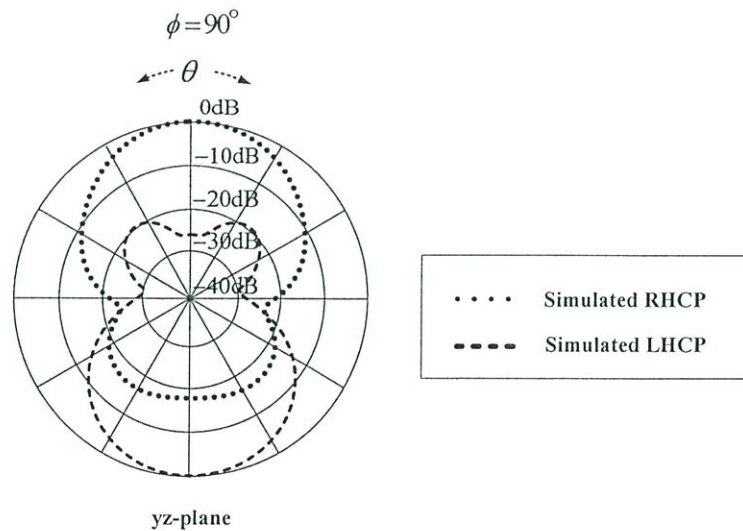
จากรูป 3.30 พบว่าอัตราส่วนแคนที่ต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมความถี่ 2-2.75 MHz มีช่วงกว้างความถี่ 0.75 MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ เท่ากับ 30.6%

3.5.3 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ

การจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำเสนอ จะพิจารณาที่ความถี่ 2.45 GHz โดยผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบบนระนาบ xz และระนาบ yz แสดงดังรูปที่ 3.31 และ 3.32



รูปที่ 3.31 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ xz

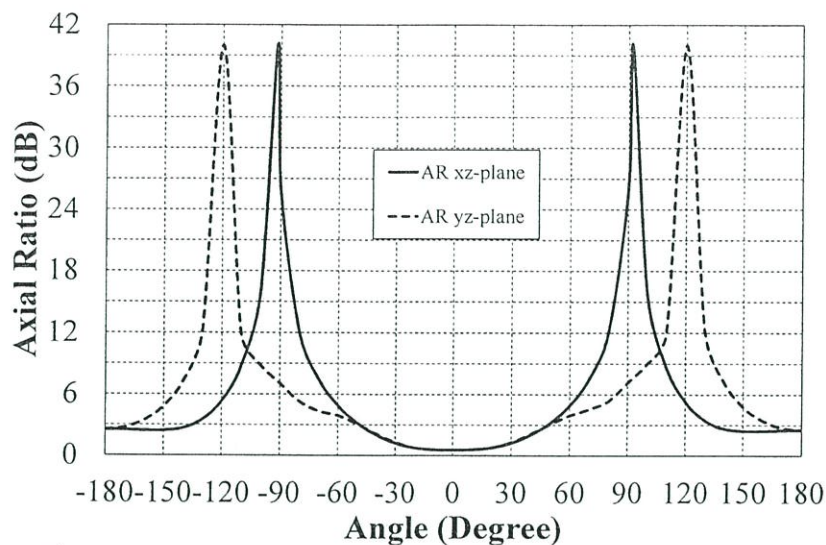


รูปที่ 3.32 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ yz

จากรูปที่ 3.31 แสดงผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ xz ที่ความถี่กลาง 2.45 GHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง โดยสายอากาศมีความกว้างลำคลื่นกำลังในระนาบ xz เท่ากับ 87.7° และจากรูปที่ 3.32 แสดงผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ yz ที่ความถี่กลาง 2.45 GHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางเช่นเดียวกัน และสายอากาศมีความกว้างลำคลื่นกำลังในระนาบ yz เท่ากับ 51.8°

3.5.4 ผลการจำลองอัตราส่วนแแกนเทียบกับมุมของสายอากาศต้นแบบ

สำหรับการพิจารณาอัตราส่วนแแกนของสายอากาศ จะพิจารณาที่อัตราส่วนแแกนน้อยกว่า 3 dB เช่นกัน โดยผลการจำลองอัตราส่วนแแกนเทียบกับมุมของสายอากาศต้นแบบแสดงดังรูปที่ 3.33

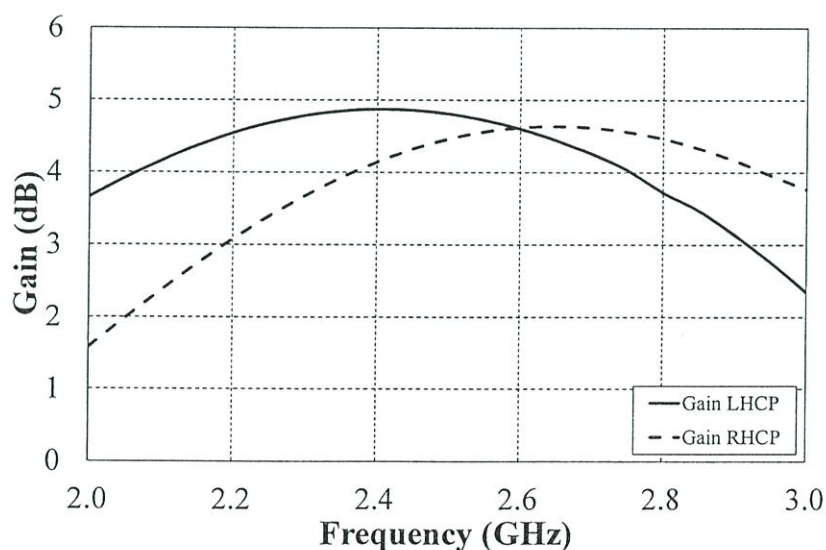


รูปที่ 3.33 อัตราส่วนแแกนเทียบกับมุมของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz

จากรูปที่ 3.33 พบว่าค่าอัตราส่วนแแกนที่มุม 0° มีค่าต่ำที่สุด เท่ากับ 0.56 dB ทั้งบนระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ จากการจำลองบนระนาบ xz อัตราส่วนแแกนที่ต่ำกว่า 3 dB มีค่า 96° ตั้งแต่มุม -48° ถึงมุม 48° และบนระนาบ xy อัตราส่วนแแกนที่ต่ำกว่า 3 dB มีค่า 98° ตั้งแต่มุม -49° ถึงมุม 49°

3.5.5 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลจำลองอัตราขยาย ซึ่งผลการจำลองอัตราขยายและค่าเจาะจงทิศทางของสายอากาศต้นแบบแสดงดังรูปที่ 3.34

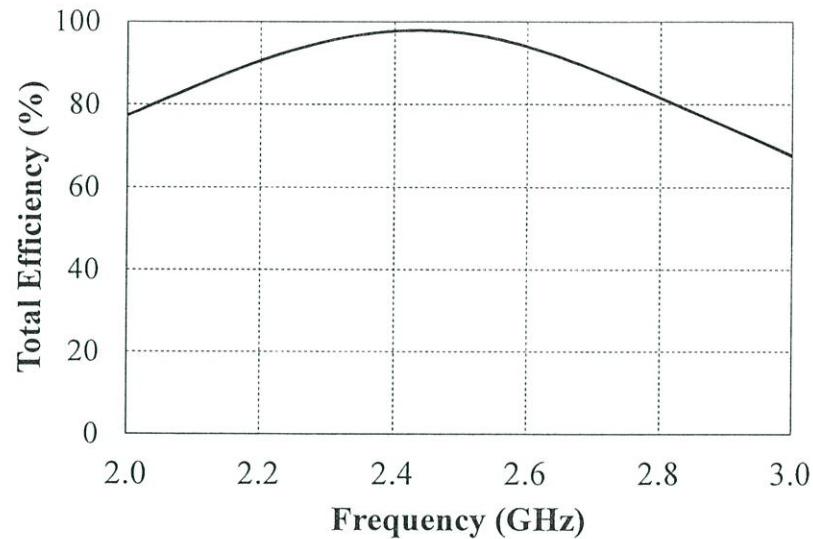


รูปที่ 3.34 อัตราขยายของสายอากาศเทียบกับความถี่

จากรูปที่ 3.34 พบว่าสายอากาศมีอัตราขยายในช่วงความถี่ที่ใช้งานตั้งแต่ 4.871-4.828 dBic สำหรับการโพลาไรซ์หมุนซ้าย และตั้งแต่ 4.142-4.419 dBic สำหรับการโพลาไรซ์หมุนขวา โดยที่ความถี่ 2.45 GHz สายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 4.85 dBic และ 4.32 dBic

3.5.6 ผลการจำลอง Total Efficiency ของสายอากาศต้นแบบ

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการจำลองค่า Total Efficiency ซึ่งผลการจำลองค่า Total Efficiency ของสายอากาศต้นแบบแสดงดังรูปที่ 3.35

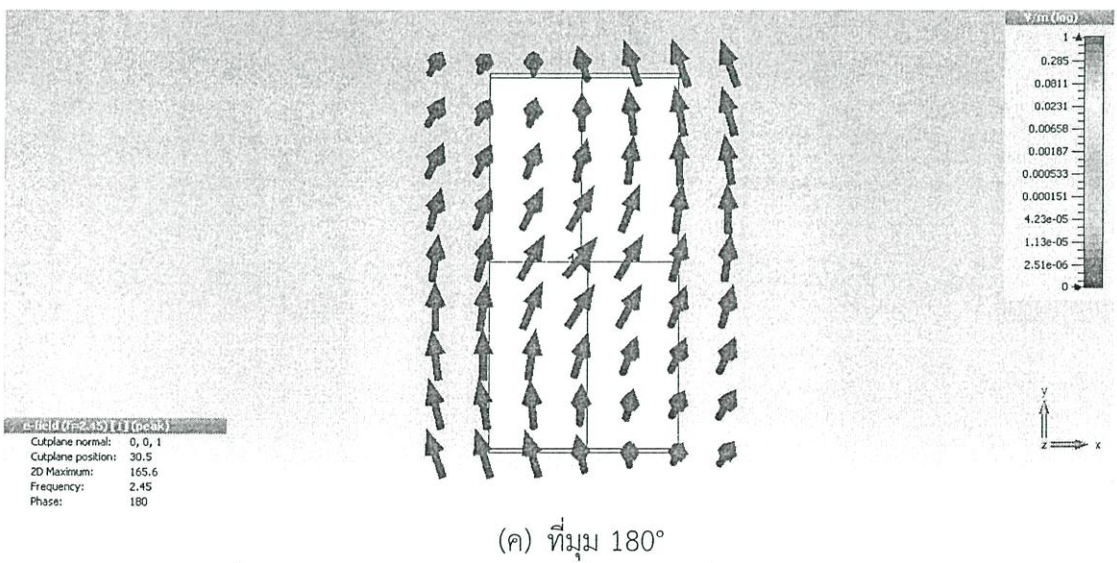
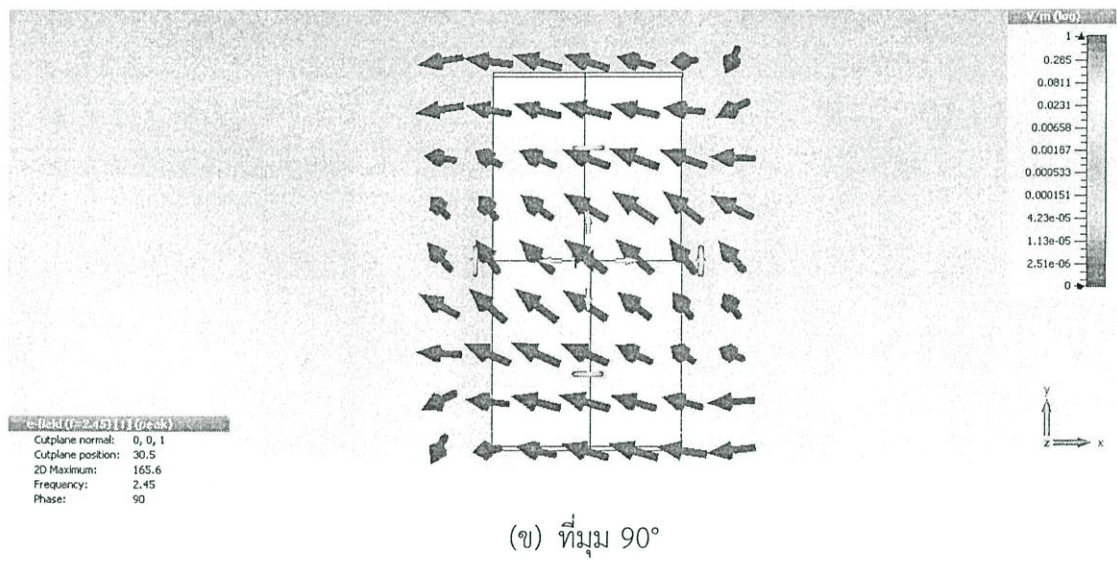
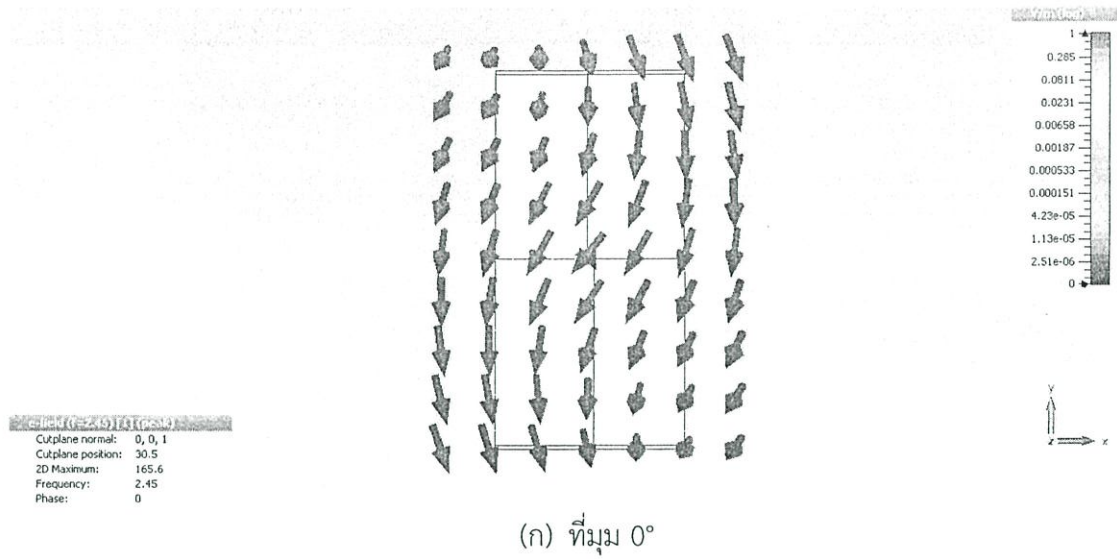


รูปที่ 3.35 Total Efficiency ของสายอากาศต้นแบบ

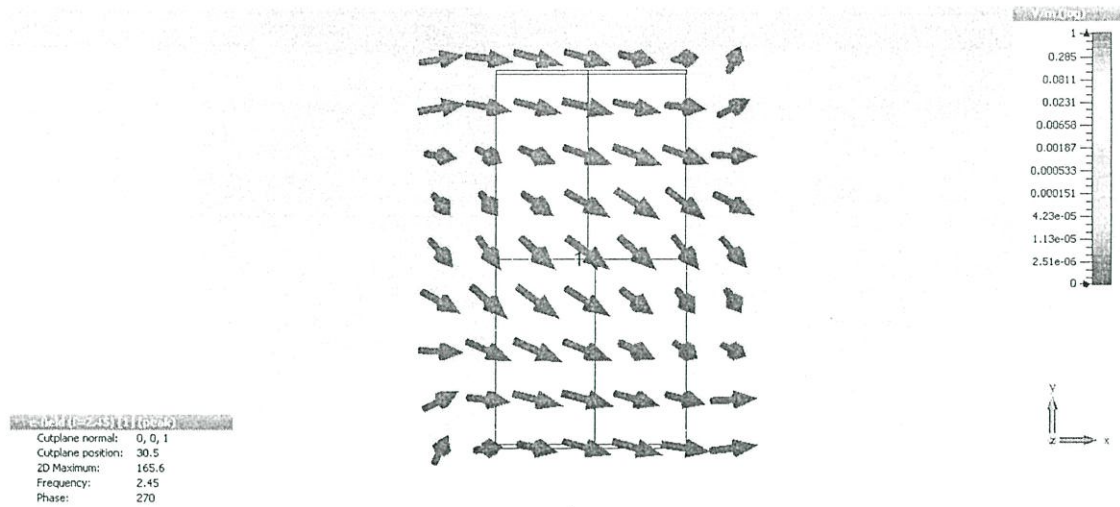
จากรูปที่ 3.35 พบว่าสายอากาศ ที่ความถี่ 2.45 GHz สายอากาศมีค่า Total Efficiency คิดเป็น 97.91%

3.5.7 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าของสายอากาศต้นแบบ

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการจำลองสนามไฟฟ้าของสายอากาศต้นแบบที่มุม 0° 90° 180° และ 270° ซึ่งการจำลองผลสนามไฟฟ้าของสายอากาศต้นแบบจะพิจารณาที่ระยะ Far-field ของสายอากาศคือต้องมีระยะมากกว่า $\frac{2D^2}{\lambda}$ ซึ่งค่าเท่ากับ 20.42 cm ดังนั้นในที่นี้จึงพิจารณาที่ระยะ 30 cm ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.36 สนามไฟฟ้าของสายอากาศต้นแบบที่มุม 0° 90° 180° และ 270°



(ง) ที่มุม 270°

รูปที่ 3.36 สนามไฟฟ้าของสายอากาศต้นแบบที่มุม 0° 90° 180° และ 270° (ต่อ)

จากรูปที่ 3.36 พบว่าทิศทางของสนามไฟฟ้าที่มุม 0° 90° 180° และ 270° มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องโดยมีการหมุนเป็นวงกลมด้วยขนาดที่เท่ากันซึ่งเงื่อนไขนี้สามารถทำให้เกิดโพลาไรซ์วงกลมได้

ตารางที่ 3.8 สรุปคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบ

| คุณลักษณะของสายอากาศ | ค่าที่ได้จากการจำลอง |
|--|---|
| $ S_{11} $ | 20% (2.18-2.67 GHz) |
| อัตราส่วนแอมพลิจูด | 30.6% (2-2.75 GHz) |
| แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น | แบบสองทิศทาง |
| การโพลาไรซ์ | ด้านหน้าสายอากาศ - โพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้าย ด้านหลังสายอากาศ - โพลาไรซ์วงกลมหมุนขวา |
| อัตราขยาย | 4.85 dBic และ 4.32 dBic |
| ความกว้างลำคลื่นอัตราส่วนแกนบนระนาบ xz | 96° |
| ความกว้างลำคลื่นอัตราส่วนแกนบนระนาบ yz | 98° |
| ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังบนระนาบ xz | 87.7° |
| ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังบนระนาบ yz | 51.8° |

3.6 สรุป

ผลจากการจำลองพบว่าสายอากาศเอียงแบบพับที่แพร่กระจายคลื่นสองทิศทางมีโพลาไรซ์วงกลมสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง โดยค่า $|S_{11}|$ สามารถทำงานครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการ โดยครอบคลุมความถี่ 2.18-2.67 GHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์ 20% มีค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดที่ต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมความถี่ 2-2.75 GHz คิดเป็น 30.6% โดยสายอากาศมีการโพลาไรซ์วงกลมทั้งสองชนิดคือโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้ายที่ด้านหน้าสายอากาศและโพลาไรซ์วงกลมหมุนขวาที่ด้านหลังของสายอากาศ โดยที่สายอากาศมีอัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz เท่ากับ 4.85 dBic และ 4.32 dBic ตามการโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้ายและการ

โพลาริซ์วงกลมหมุนขวา ตามลำดับ มีความกว้างอัตราส่วนแกนบนระนาบ xz และระนาบ yz เท่ากับ 96° และ 98° ตามลำดับ และมีค่าความกว้างลำคลื่นกำลังบนระนาบ xz และระนาบ yz เท่ากับ 87.7° และ 51.8° ตามลำดับ ผลที่ได้จากการจำลองคุณลักษณะของสายอากาศแสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่ออกแบบสามารถนำไปประยุกต์ในการใช้งานในย่านความถี่ 2.4 GHz ได้ โดยบทต่อไปจะเป็นการการสร้างและทดสอบสายอากาศต้นแบบ หลังจากนั้นจะนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองในบทที่ 3 เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลการจำลองต่อไป

บทที่ 4

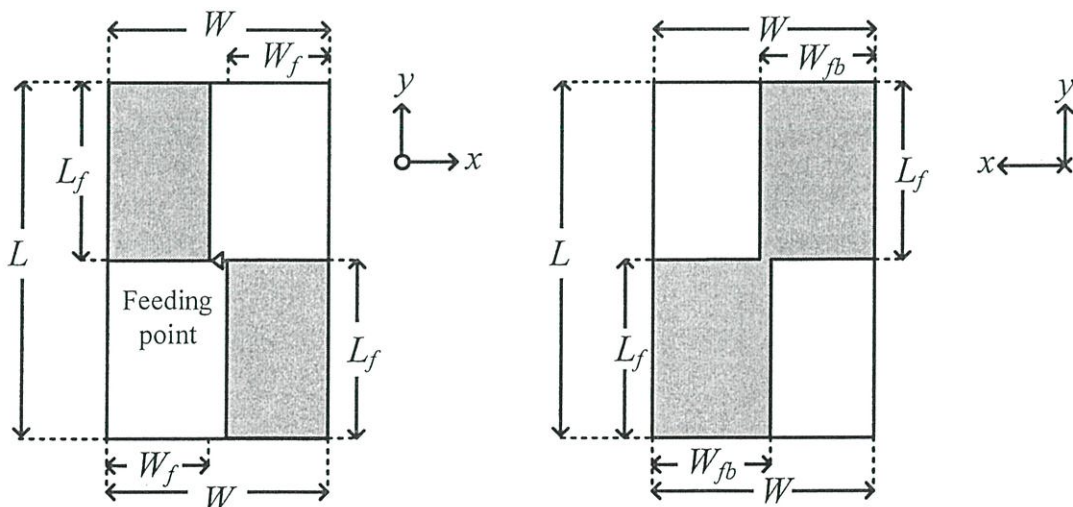
ผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบและผลการทดสอบสายอากาศเยื้องแบบพับที่แพร่กระจายคลื่นสองทิศทางมีโพลาริซวงกลมสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งในการทดสอบจะพิจารณาถึง $|S_{11}|$ อัตราส่วนแกน อัตราขยายและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในย่านความถี่ที่ต้องการ โดยจะนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองซึ่งได้นำเสนอในบทที่ 3 โดยทำการทดสอบทั้งในห้องปราศจากการสะท้อน (Anechoic Chamber) โดยรายละเอียดต่างๆ จะกล่าวไว้ในหัวข้อถัดไป

4.2 สายอากาศต้นแบบ

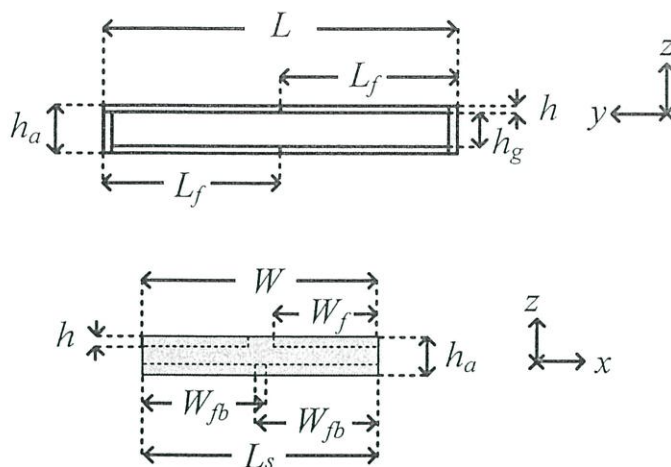
ในหัวข้อนี้แนะนำเสนอสายอากาศต้นแบบสำหรับการทดสอบ โดยสายอากาศที่นำเสนอนี้ ออกแบบมาเพื่อใช้งานในย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งวัสดุที่นำมาสร้างสายอากาศต้นแบบเป็นแผ่นทองแดง เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาง่าย มีความแข็งแรงทนทาน มีน้ำหนักเบา และมีราคาถูก โดยใช้วัสดุฐานรองเป็นอากาศ จุดป้อนสัญญาณจะถูกป้อนที่ตำแหน่ง p_x เท่ากับ $(-1,1)$ p_y เท่ากับ $(0,0)$ และใช้คอนเน็คเตอร์ชนิด SMA เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศและสายนำสัญญาณ โครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 4.1 และพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยค่าพารามิเตอร์ในตารางเป็นค่าที่ได้จากการจำลองในบทที่ 3



(ก) ด้านหน้าสายอากาศ

(ข) ด้านหลังสายอากาศ

รูปที่ 4.1 โครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอ



(ค) ด้านข้างสายอากาศ

รูปที่ 4.1 โครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอ (ต่อ)

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

| พารามิเตอร์ | ขนาดทางภาพของสายอากาศ | ขนาดทางไฟฟ้าของสายอากาศ |
|-------------|-----------------------|-------------------------|
| W | 50 mm | 0.408λ |
| L | 100 mm | 0.816λ |
| W_f | 24 mm | 0.196λ |
| W_{fb} | 26 mm | 0.212λ |
| L_f | 50 mm | 0.408λ |
| L_s | 50 mm | 0.408λ |
| h_a | 11 mm | 0.089λ |
| h_g | 9 mm | 0.073λ |
| h | 1 mm | 0.008λ |
| p_x | (-1,1) | - |
| p_y | (0,0) | - |

4.3 การทดสอบสายอากาศ

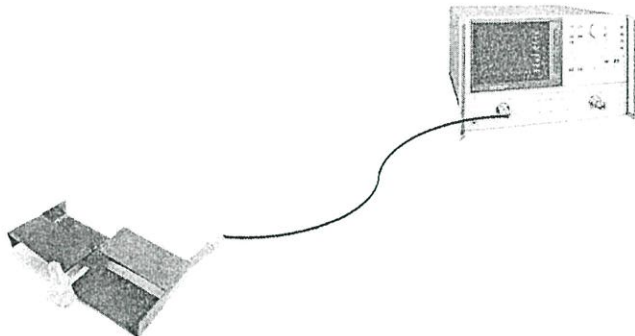
จากบทที่ 3 ที่ได้ทำการวิเคราะห์สายอากาศรวมทั้งหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO[®] จากนั้นจึงนำค่าพารามิเตอร์มาสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นเพื่อนำมาทดสอบคุณลักษณะต่างๆทางสายอากาศ เช่น $|S_{11}|$ อัตราส่วนแอมป์ อัตราขยายและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสายอากาศมีดังต่อไปนี้

1. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer HP 8720C)
2. สายนำสัญญาณ
3. สายอากาศแบบเกลียว

4. สายอากาศต้นแบบ

การทดสอบสายอากาศเบื้องต้นแบบพับที่แพร่กระจายคลื่นสองทิศทางมีโพลาริซิงกลมสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz เพื่อหา $|S_{11}|$ ทำได้โดยนำสายอากาศที่ต้องการทำการทดสอบมาต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ดังรูปที่ 4.2 เพื่อวิเคราะห์ $|S_{11}|$ ของสายอากาศ



รูปที่ 4.2 การทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศ

การทดสอบเพื่อหาอัตราขยายของสายอากาศ จะทำการทดสอบอัตราขยายสมบูรณ์ของสายอากาศโดยใช้สายอากาศคู่เหมือนในการทดสอบเพื่อหาอัตราขยายที่แท้จริง โดยใช้สายอากาศแบบเกลียวเป็นสายอากาศทางด้านส่งและใช้สายอากาศต้นแบบเป็นสายอากาศทางด้านรับ จากนั้นทำการคำนวณหาอัตราขยายสมบูรณ์ได้จากสมการของฟรีส ในหน่วย dB ดังสมการที่ 4.1

$$(G_{ot})_{dB} + (G_{or})_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_t} \right) \quad (4.1)$$

การทดสอบสายอากาศจะใช้สนามระยะไกล (R) ระหว่างสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับต้องเป็นไปตามเงื่อนไขในสมการที่ 4.2

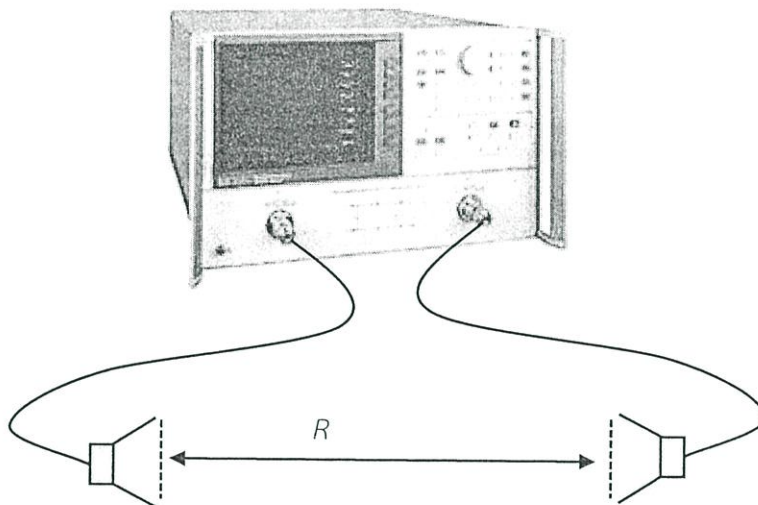
$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.2)$$

โดย D คือขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศ แต่ถ้ากรณีทีพิจารณาการทดสอบสายอากาศส่งและรับพร้อมกัน ค่า D แสดงดังสมการที่ (4.3)

$$D = D_T + D_R \quad (4.3)$$

โดย D_T คือขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศส่ง
 D_R คือขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศรับ

ทำการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายผ่านทางพารามิเตอร์การส่งผ่าน S_{21} โดยที่พารามิเตอร์ S_{21} คือพารามิเตอร์ในรูปของฟังก์ชันคลื่น คืออัตราส่วนของสัมประสิทธิ์ของคลื่นที่ส่งผ่านเครือข่ายไปยังโหลดต่อสัมประสิทธิ์ของคลื่นที่ส่งเข้าไปในเครือข่าย พิจารณาได้ว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังทางด้านรับที่ช่อง 2 (P_r) ต่อกำลังส่งที่ช่องที่ 1 (P_t) ภายใต้เงื่อนไขแมตซ์โพลาร์ไรซ์และมีระยะห่างระหว่างสายอากาศที่มีระยะมากกว่าหรือเท่ากับขอบเขตของสนามระยะไกล



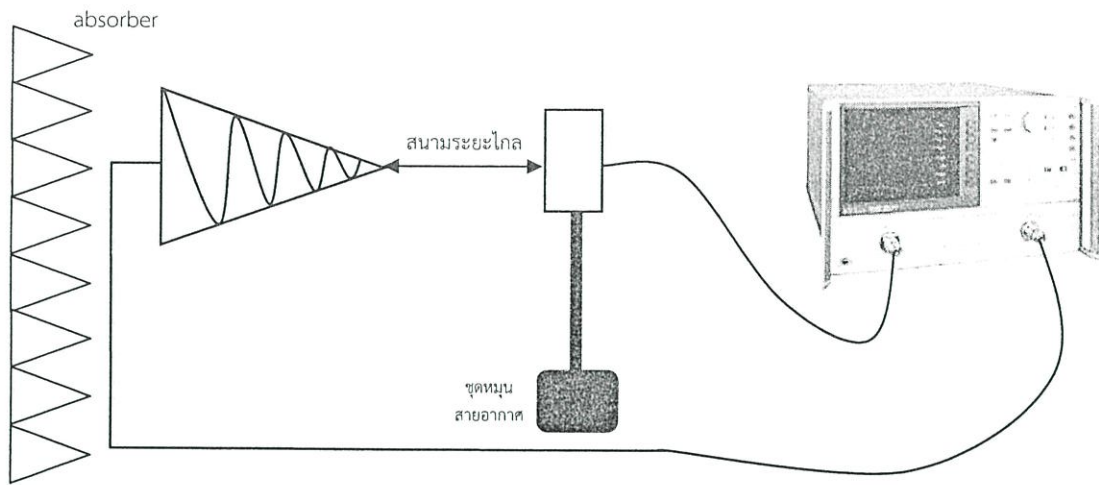
รูปที่ 4.3 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ

การทดสอบอัตราขยายส่วนแกนและการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในการทดสอบนั้นจะใช้สายอากาศแบบเกลียวจำนวนสองตัว ตัวแรกเป็นเกลียวหมุนซ้ายและตัวที่สองเป็นเกลียวหมุนขวา โดยนำสายอากาศมาใช้เป็นสายอากาศด้านส่ง โดยทำการทดสอบทีละตัวและใช้สายอากาศต้นแบบเป็นสายอากาศด้านรับ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีค่าเท่ากับ 2.2 เมตร ซึ่งผลจากการทดสอบที่ได้สามารถคำนวณค่าอัตราส่วนแกนได้จากสมการที่ (4.4)

$$Axial Ratio (dB) = 20 \log \left[\frac{|E_{co}| + |E_{xp}|}{|E_{co}| - |E_{xp}|} \right] \quad (4.4)$$

โดย $|E_{co}|$ คือ ขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์เดียวกับโพลาไรซ์ของสายอากาศ
 $|E_{xp}|$ คือ ขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์ตั้งฉากกับโพลาไรซ์ของสายอากาศ

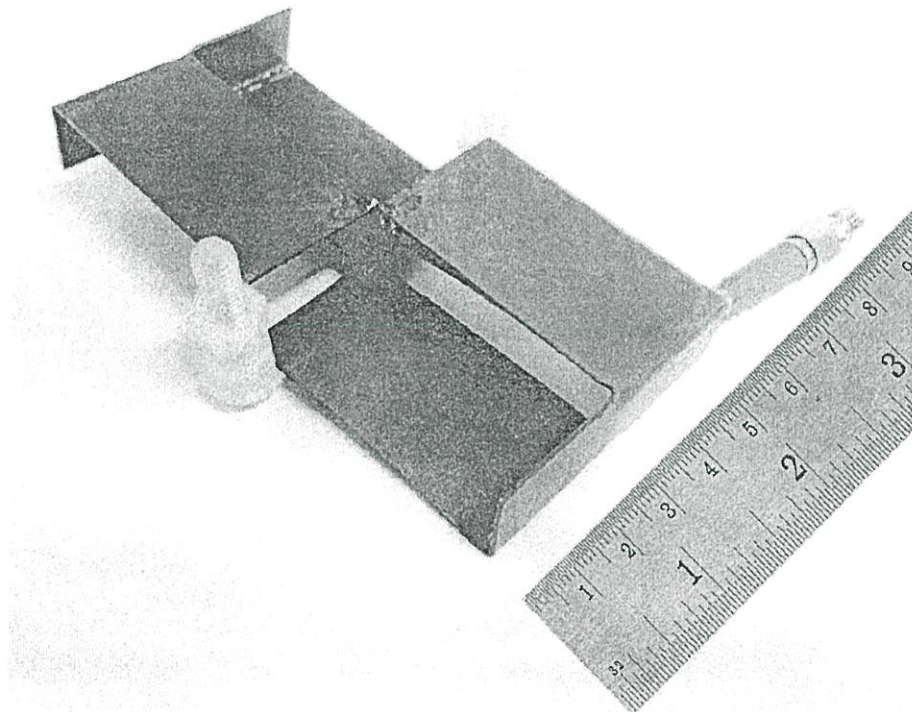
การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศและอัตราขยายของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 4.4 โดยวางสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับห่างกันเป็นระยะ R จากนั้นจะทำการหมุนสายอากาศต้นแบบในระนาบ xz และ yz และบันทึกค่าระดับสัญญาณผ่านพารามิเตอร์ S_{21} โดยหมุนสายอากาศต้นแบบทีละ 5° จนครบ 360° เพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราส่วนแกนของสายอากาศทั้งสองระนาบ ในการทดสอบจะทดสอบสายอากาศต้นแบบกับสายอากาศแบบเกลียวหมุนซ้ายและสายอากาศแบบเกลียวหมุนขวาทีละตัว



รูปที่ 4.4 การติดตั้งการทดสอบสายอากาศต้นแบบ

4.4 ผลการทดสอบสายอากาศ

การสร้างสายอากาศต้นแบบนั้นจะสร้างตามโครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1 และตามขนาดพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศดังตารางที่ 4.1 โดยสายอากาศต้นแบบแสดงดังรูปที่ 4.5

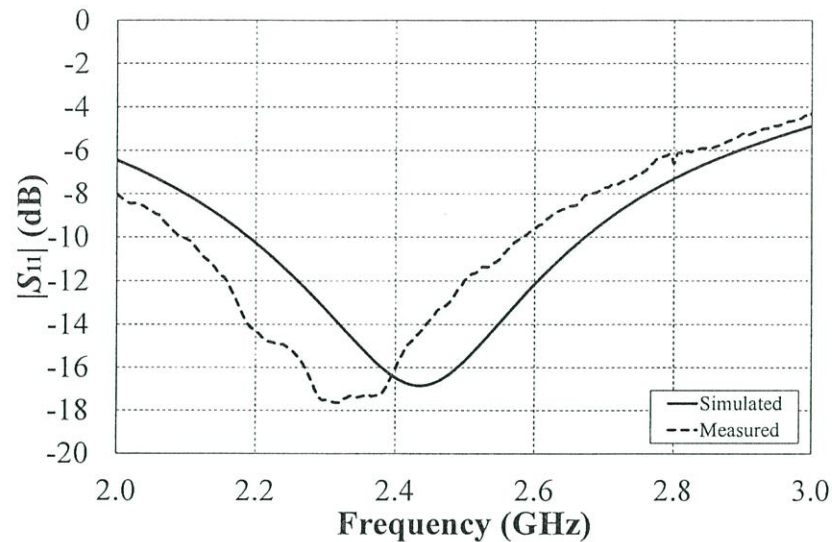


รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายสายอากาศต้นแบบ

ในการทดสอบสายอากาศจะนำสายอากาศต้นแบบมาทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศ จากนั้นจะนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองจากบทที่ โดยผลการทดสอบแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

4.4.1 ผลการจำลอง $|S_{11}|$

สำหรับการพิจารณา $|S_{11}|$ ของสายอากาศ จะพิจารณาที่ $|S_{11}| \leq -10$ dB ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้ งาน ซึ่งผลการจำลองเทียบกับผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบแสดงดังรูปที่ 4.6

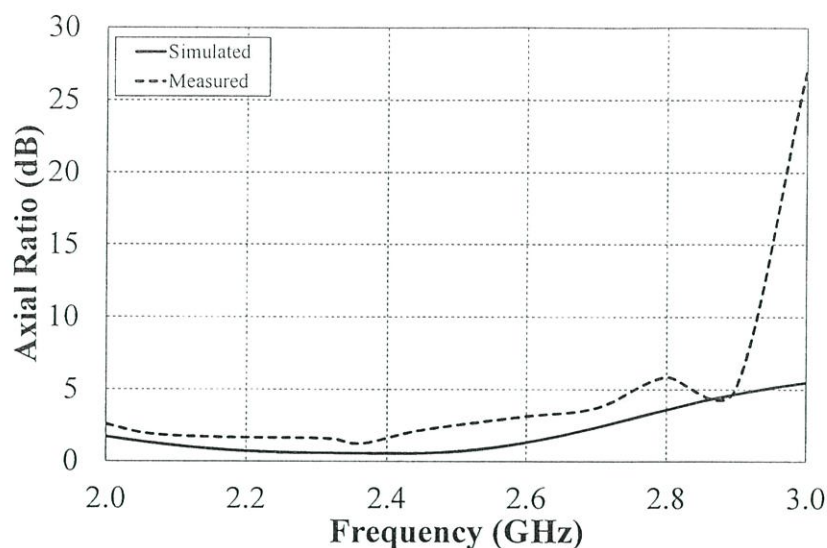


รูปที่ 4.6 ผลการจำลองและผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศ

จากรูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศ พบว่า $|S_{11}|$ จากการทดสอบและผลจากการจำลองมีความสอดคล้องกันแต่มีความคลาดเคลื่อน โดยที่ $|S_{11}|$ จากการทดสอบจะมีช่วงกว้างความถี่ 0.49 GHz ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 2.09-2.58 GHz ซึ่ง $|S_{11}|$ มีค่าต่ำที่สุดที่ความถี่ 2.315 GHz เท่ากับ -17.63 dB และที่ความถี่ 2.45 GHz สายอากาศต้นแบบมีค่า $|S_{11}|$ เท่ากับ -13.792 dB ในขณะที่ผลจากการจำลอง $|S_{11}|$ มีช่วงกว้างความถี่ 0.49 GHz เช่นกัน แต่ผลจากการจำลองครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 2.18-2.67 GHz ค่า $|S_{11}|$ มีค่าต่ำที่สุดที่ความถี่ 2.435 GHz ซึ่งมีค่า $|S_{11}|$ เท่ากับ -16.84 dB และที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า $|S_{11}|$ เท่ากับ -16.777 dB จากรูปที่ 4.6 สังเกตได้ว่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบมีการคลาดเคลื่อนโดยเคลื่อนไปทางความถี่ต่ำกว่าผลจากการจำลอง แต่ผลการทดสอบยังคงครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานคือตั้งแต่ 2.4-2.48 GHz และมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า 10 dB และที่ความถี่ 2.45 GHz สายอากาศต้นแบบมีค่า $|S_{11}|$ เท่ากับ -13.792 dB ดังนั้นสายอากาศจึงสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ที่ต้องการ

4.4.2 ผลการจำลองอัตราส่วนแอมพลิจูดเทียบกับความถี่ของสายอากาศ

สำหรับการพิจารณาอัตราส่วนแอมพลิจูดของสายอากาศ จะพิจารณาที่อัตราส่วนแอมพลิจูดน้อยกว่า 3 dB ซึ่งผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราส่วนแอมพลิจูดเทียบกับความถี่ของสายอากาศต้นแบบแสดงดังรูปที่ 4.7

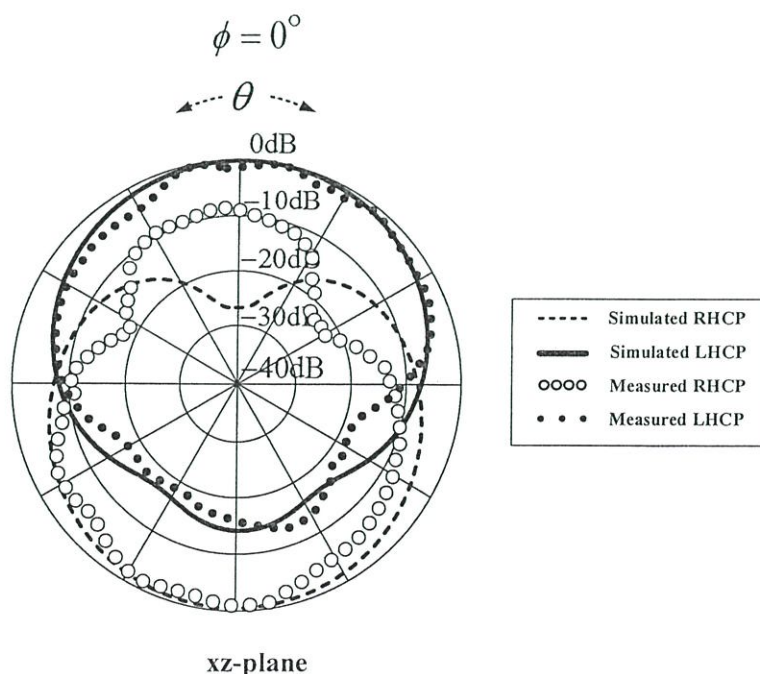


รูปที่ 4.7 ผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราส่วนแกนเทียบกับความถี่ของสายอากาศ

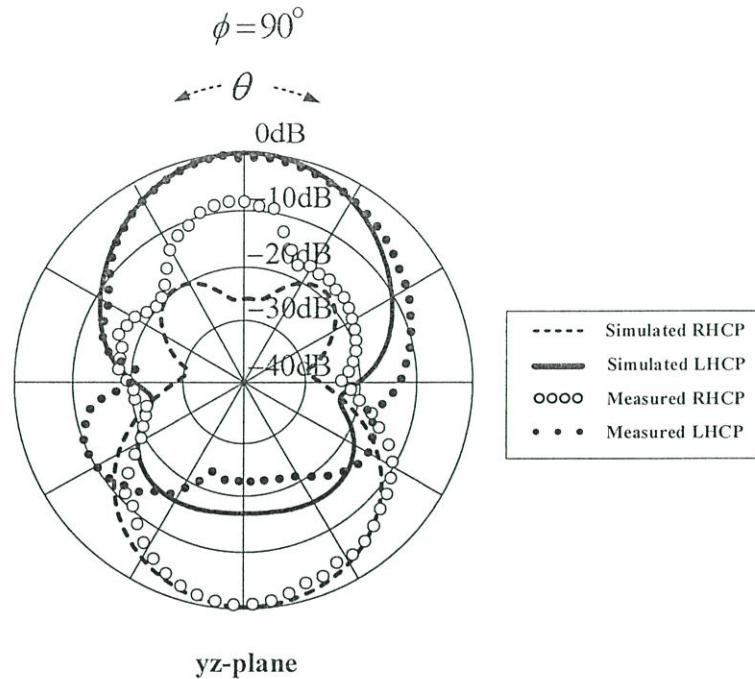
จากรูป 4.7 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราส่วนแกนเทียบกับความถี่ของสายอากาศ ซึ่งสังเกตได้ว่ามีความสอดคล้องกัน โดยจากผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB มีช่วงกว้างความถี่ 0.57 GHz ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 2-2.57 GHz ส่วนผลจากการจำลองค่าอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB มีช่วงกว้างความถี่ 0.75 GHz ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 2-2.75 GHz

4.4.3 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

การจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่น่าเสนอ จะพิจารณาที่ความถี่ 2.45 GHz โดยผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบบนระนาบ xz และระนาบ yz แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ xz



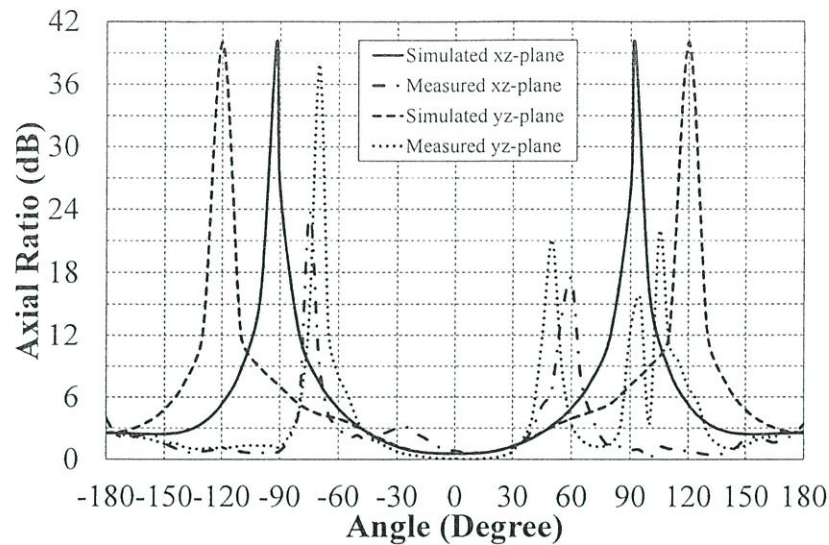
รูปที่ 4.9 ผลการจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ yz

จากรูปที่ 4.8 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz บนระนาบ xz จากการทดสอบพบว่าสายอากาศต้นแบบมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง โดยมีความกว้างลำคลื่นกำลังในระนาบ xz เท่ากับ 60° ในขณะที่ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ xz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางเช่นกัน และสายอากาศมีความกว้างลำคลื่นกำลังในระนาบ xz เท่ากับ 87.7°

จากรูปที่ 4.9 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz บนระนาบ yz จากการทดสอบพบว่าสายอากาศต้นแบบมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง โดยมีความกว้างลำคลื่นกำลังในระนาบ yz เท่ากับ 55° ในขณะที่ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ yz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางเช่นกัน และสายอากาศมีความกว้างลำคลื่นกำลังในระนาบ yz เท่ากับ 51.8°

4.4.4 ผลการจำลองอัตราส่วนแกนเทียบกับมุมของสายอากาศ

สำหรับการพิจารณาอัตราส่วนแกนของสายอากาศ จะพิจารณาที่อัตราส่วนแกนน้อยกว่า 3 dB เช่นกัน โดยผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราส่วนแกนเทียบกับมุมของสายอากาศต้นแบบแสดงดังรูปที่ 4.10

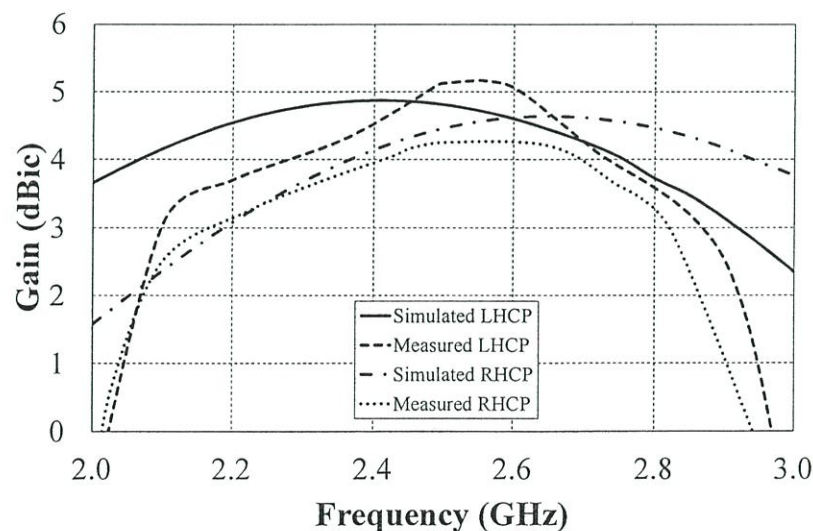


รูปที่ 4.10 ผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราส่วนแกนเทียบกับมุมที่ความถี่ 2.45 GHz

จากรูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราส่วนแกนเทียบกับมุมของสายอากาศที่ความถี่กลางบนทั้งระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ พบว่าผลจากการทดสอบและผลจากการจำลองมีแนวโน้มเดียวกัน แต่ยังคงพบความคลาดเคลื่อนระหว่างผลจากการทดสอบและผลจากการจำลอง อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่พบว่าบนระนาบ xz อัตราส่วนแกนของสายอากาศที่มีค่าต่ำกว่า 3 dB เท่ากับ 60° ตั้งแต่มุม -20° ถึงมุม 40° และบนระนาบ yz อัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB มีค่า 80° ตั้งแต่มุม -45° ถึงมุม 35° และผลจากการทดสอบมีอัตราส่วนแกนที่มุม 0° มีค่าต่ำที่สุด เท่ากับ 0.82 dB 0.03 dB บนระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าอัตราส่วนแกนที่มุม 0° มีค่าต่ำที่สุด เท่ากับ 0.56 dB ทั้งบนระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ

4.4.5 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศเทียบกับความถี่

จากรูปที่ 4.11 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายเทียบกับความถี่ของสายอากาศ ซึ่งสังเกตได้ว่ามีความสอดคล้องกัน โดยสายอากาศต้นแบบมีอัตราขยายที่ความถี่กลาง เท่ากับ 4.82 dBic และ 4.15 dBic และจากผลจากการจำลองสายอากาศมีอัตราขยาย เท่ากับ 4.85 dBic และ 4.32 dBic ตามการโพลาริซวงกลมหมุนซ้ายและการโพลาริซวงกลมหมุนขวา ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 สรุปคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบ

| คุณลักษณะของสายอากาศ | ค่าที่ได้จากการจำลอง |
|---------------------------------|---|
| $ S_{11} $ | 2.09-2.58 GHz |
| อัตราส่วนแกน | 2-2.57 GHz |
| แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น | แบบสองทิศทาง |
| การโพลาริซ | ด้านหน้าสายอากาศ – โพลาริซวงกลมหมุนซ้าย ด้านหลังสายอากาศ – โพลาริซวงกลมหมุนขวา |
| อัตราขยาย | 4.82 dBic และ 4.15 dBic |
| ความกว้างอัตราส่วนแกนบนระนาบ xz | 60° |
| ความกว้างอัตราส่วนแกนบนระนาบ yz | 80° |
| ความกว้างลำคลื่นกำลังบนระนาบ xz | 60° |
| ความกว้างลำคลื่นกำลังบนระนาบ yz | 55° |

4.5 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงการสร้างและการทดสอบสายอากาศต้นแบบ โดยทำการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศ อัตราส่วนแกนเทียบกับมุม อัตราส่วนแกนเทียบกับความถี่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz และระนาบ yz รวมทั้งอัตราขยายของสายอากาศ จากนั้นนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 3 มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบ เช่น เปอร์เซนต์แบนด์วิดธ์ ช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้ ความกว้างสูงสุดของลำคลื่นที่มีการแพร่กระจายคลื่น โดยสามารถสรุปผลต่างๆ ได้ดังนี้

- ผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB สามารถครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.09-2.58 GHz คิดเป็นเปอร์เซนต์แบนด์วิดธ์เท่ากับ 20%

- ผลการทดสอบอัตราส่วนแกนเทียบกับมุม พบว่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่มีค่าต่ำกว่า 3 dB เท่ากับ 60° และ 80° บนระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ

- ผลการทดสอบอัตราส่วนแกนเทียบกับความถี่ พบว่าอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 2-2.57 GHz คิดเป็นเปอร์เซนต์แบนด์วิดธ์เท่ากับ 23%

- ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบเป็นการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง

- ผลการทดสอบอัตราขยายที่ความถี่กลางเท่ากับ 4.82 dBic และ 4.15 dBic

โดยที่ด้านหน้าของสายอากาศสายอากาศต้นแบบมีการโพลาริซวงกลมหมุนซ้าย และที่ด้านหลังของสายอากาศสายอากาศต้นแบบมีการโพลาริซวงกลมหมุนขวา ซึ่งผลจากการทดสอบและผลจากการวิเคราะห์ในบทที่ 3 มีความสอดคล้องกันแต่อาจมีความคลาดเคลื่อน สาเหตุอาจเนื่องมาจากขนาด

ของสายอากาศที่สร้างมีความคลาดเคลื่อนไปจากการจำลอง หรือมาจากการสูญเสียระหว่างสายนำสัญญาณ

ซึ่งจากการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศข้างต้นแสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่นำเสนอสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในย่าน 2.4 GHz ได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอสายอากาศเยื้องแบบพับที่แพร่กระจายคลื่นสองทิศทางมีโพลาริซั วงกลมสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz โดยมีจุดประสงค์เพื่อสร้างสายอากาศที่มีพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ที่สุดที่ทำให้เกิดโพลาริซั วงกลมหมุนซ้ายและโพลาริซั วงกลมหมุนขวา โดยสายอากาศมีแบบรูปการ แพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง และมีอัตราขยายสูง พร้อมทั้งสามารถนำสายอากาศมาประยุกต์ใช้ งานในย่านความถี่ 2.4 GHz

โดยบทที่ 5 นี้ จะกล่าวถึงผลสรุปโดยรวมของวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบไปด้วยผลการหา ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากสายอากาศ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์และการจำลองสายอากาศ และ ผลจากการทดสอบคุณลักษณะทางสายอากาศ และส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงข้อเสนอแนะและแนว ทิศทางการพัฒนาต่อไป

5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อธิบายถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ในการ ออกแบบสายอากาศ ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องของระบบ WLAN ทฤษฎีพื้นฐานในการออกแบบ และการสร้างสายอากาศ โดยทำการวิเคราะห์การออกแบบและการจำลองสายอากาศ เพื่อหา พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างสายอากาศต้นแบบ รวมทั้งการทดสอบคุณลักษณะทาง สายอากาศของสายอากาศที่นำเสนอ

จากการวิเคราะห์การออกแบบและการจำลองสายอากาศเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ เหมาะสมที่ทำให้สายอากาศมีคุณลักษณะตามที่ต้องการ เช่น มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ สองทิศทาง มีอัตราขยายสูง รวมทั้งมีการโพลาริซั วงกลมหมุนซ้ายและโพลาริซั วงกลมหมุนขวา โดย กระบวนการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศจะอาศัยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO[®] เพื่อจำลองและสังเกตคุณลักษณะในด้านต่างๆ ของสายอากาศ และนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อ นำไปทดสอบต่อไป

ผลการจำลองสายอากาศพบว่าสายอากาศสามารถทำงานในย่านความถี่ 2.4 GHz โดยค่า $|S_{11}|$ สามารถทำงานครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการ โดยครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 2.18-2.67 GHz มี ช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 0.49 GHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์ 20% ซึ่ง $|S_{11}|$ มีค่าต่ำที่สุดที่ความถี่ 2.435 GHz เท่ากับ -16.84 dB และที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า $|S_{11}|$ เท่ากับ -16.777 dB

อัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมความถี่ 2-2.75 มีช่วงกว้างความถี่ 0.75 GHz คิดเป็น เปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์ 30.6%

ความกว้างลำคลื่นอัตราส่วนแกนบนระนาบ xz และระนาบ yz เท่ากับ 96° และ 98° ตามลำดับ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง โดยมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังบน ระนาบ xz และระนาบ yz เท่ากับ 87.7° และ 51.8° ตามลำดับ

สายอากาศมีการโพลาริซั วงกลมทั้งสองชนิดคือโพลาริซั วงกลมหมุนซ้ายที่ด้านหน้าสายอากาศ และโพลาริซั วงกลมหมุนขวาที่ด้านหลังของสายอากาศ และสายอากาศมีอัตราขยายในช่วงความถี่ที่

ใช้งานตั้งแต่ 4.871-4.828 dBic สำหรับการโพลาริซชันหมุนซ้าย และตั้งแต่ 4.142-4.419 dBic สำหรับการโพลาริซชันหมุนขวา โดยที่ความถี่ 2.45 GHz สายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 4.85 dBic และ 4.32 dBic

จากนั้นนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์และศึกษาพฤติกรรมของพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ ซึ่งได้จากการจำลองไปสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อทดสอบคุณลักษณะในด้านต่างๆ โดยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างสายอากาศต้นแบบ แสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

| พารามิเตอร์ | ขนาดทางภาพของสายอากาศ | ขนาดทางไฟฟ้าของสายอากาศ |
|-------------|-----------------------|-------------------------|
| W | 50 mm | 0.408λ |
| L | 100 mm | 0.816λ |
| W_f | 24 mm | 0.196λ |
| W_{fb} | 26 mm | 0.212λ |
| L_f | 50 mm | 0.408λ |
| L_s | 50 mm | 0.408λ |
| h_a | 11 mm | 0.089λ |
| h_g | 9 mm | 0.073λ |
| h | 1 mm | 0.008λ |
| p_x | (-1,1) | - |
| p_y | (0,0) | - |

เมื่อทำการสร้างสายอากาศต้นแบบโดยมีขนาดดังตารางที่ 5.1 แล้วจึงนำสายอากาศไปทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศเพื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลอง

พบว่าสายอากาศสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ 2.4 GHz คือสามารถทำงานครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.4-2.48 GHz โดย $|S_{11}|$ จากการทดสอบครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 2.09-2.58 GHz มีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 0.49 GHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์เท่ากับ 20% ซึ่ง $|S_{11}|$ มีค่าต่ำที่สุดที่ความถี่ 2.315 GHz เท่ากับ -17.63 dB และที่ความถี่ 2.45 GHz สายอากาศต้นแบบมีค่า $|S_{11}|$ เท่ากับ -13.792 dB

อัตราส่วนแอมป์เทียบกับความถี่ พบว่าอัตราส่วนแอมป์ที่ต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 2-2.57 GHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์เท่ากับ 23%

ความกว้างลำคลื่นอัตราส่วนแอมป์บนระนาบ xz และระนาบ yz เท่ากับ 60° และ 80° ตามลำดับ โดยอัตราส่วนแอมป์ที่มุม 0° มีค่าต่ำที่สุด เท่ากับ 0.82 dB และ 0.03 dB ตามลำดับ สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง โดยมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังบนระนาบ xz และระนาบ yz เท่ากับ 60° และ 55° ตามลำดับ

สายอากาศมีการโพลาริซชันวงกลมทั้งสองชนิดคือโพลาริซชันวงกลมหมุนซ้ายที่ด้านหน้าสายอากาศ และโพลาริซชันวงกลมหมุนขวาที่ด้านหลังของสายอากาศ และสายอากาศมีอัตราขยายในช่วงความถี่ที่ใช้งานตั้งแต่ 4.52-5.05 dBic สำหรับการโพลาริซชันหมุนซ้าย และตั้งแต่ 3.92-4.23 dBic สำหรับ

การโพลาไรซ์หมุนขวา โดยที่ความถี่ 2.45 GHz สายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 4.82 dBic และ 4.15 dBic

จากการทดสอบสายอากาศต้นแบบพบว่าผลการทดสอบกับผลการจำลองมีความสอดคล้องกัน แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อน สาเหตุอาจเนื่องมาจากขนาดของสายอากาศที่สร้างมีความคลาดเคลื่อนไปจากการจำลอง หรือมาจากการสูญเสียระหว่างสายนำสัญญาณ แต่สายอากาศยังคงสามารถทำงานครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการได้ ดังนั้นสายอากาศที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบ WLAN ได้

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากผลการวิเคราะห์และการทดสอบสายอากาศเบื้องต้นแบบพับที่แพร่กระจายคลื่นสองทิศทางมีโพลาไรซ์วงกลมสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะเห็นว่าสายอากาศมีการโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้ายและวงกลมหมุนขวาเท่านั้น ในการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตควรมีการออกแบบให้สายอากาศสามารถสวิตซ์การโพลาไรซ์ได้ทั้งโพลาไรซ์วงกลมและโพลาไรซ์เชิงเส้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบและทดสอบสายอากาศเพื่อเป็นแนวทางให้ผู้สนใจนำไปออกแบบสายอากาศเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] WLAN. [Online]. Available: <https://kseniacoffman.wordpress.com/category/wireless/wlan/>
- [2] Multipath and Fading. [Online]. Available: <http://www.cs.nccu.edu.tw/~lien/NIISlide/WirelessTech/hardcopy.htm>
- [3] ระบบเครือข่ายแลนไร้สาย IEEE 802.11 (Wireless LAN). [Online]. Available: <http://docs.com/OIRT>
- [4] การเชื่อมต่อแบบ Ad-Hoc. [Online]. Available: <http://www.ixbt.com/comm/wireless/smc-80211b>
- [5] Wireless infrastructure. [Online]. Available: <https://www.gotoknow.org/posts/318260>
- [6] มาตรฐาน IEEE 802.11 WLAN: ความรู้เบื้องต้น ช่องโหว่ และการรักษาความปลอดภัย. [Online]. Available: <http://hospital.moph.go.th/sapphaya/Download>
- [7] Constantine A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design", John Wiley & Son, Inc., 2005.
- [8] K. L. Wong, F. S. Chang and T. W. Chiou, "Low-Cost Broadband Circularly Polarized Probe-Fed Patch Antenna for WLAN Base Station," *Antennas and Propagation Society International Symposium.*, 2002, pp. 526-529.
- [9] C. C. Lin, G. Y. Lee and K. L. Wong, "Surface-mount dual-loop antenna for 2.4/5 GHz WLAN operation," *Electronics Letters Online*, Vol. 39, No. 18, Sep 2003.
- [10] C. C. Lin, C. M. Su, F. R. Hsiao and K. L. Wong, "Printed folded dipole array antenna with directional radiation for 2.4/5 GHz WLAN operation," *Electronics Letters Online*, Nov 2003, Vol. 39, No. 24.
- [11] A. Pomsathit, C. Benjangkprasert, N. Anantrasirichail, V. Chutchavong and T. Wakabayashi, "Circularly Polarized Right Angle Slot Antennas for WLAN of IEEE 802.11b/g," *2008 International Symposium on Communications and Information Technologies*, 2008, pp. 46-50.
- [12] J. Zhang, X. M. Zhang, J. S. Liu, Q. F. Wu, T. Ying and H. Jin, "Dual-band bidirectional high gain antenna for WLAN 2.4/5.8 GHz applications," *Electronics Letters Online*, Jan 2009, Vol. 45, No. 1.
- [13] C. Y. Hungl, K. C. Chaol, S. W. Su and F. S. Chang, "Broadband Circularly Polarized Patch Antenna," *Antennas and Propagation Society International Symposium*, Jun 2009.
- [14] M. N. Shakib, M. T. Islam and N. Misran, "Patch Antenna Design for WLAN System," *Microwave Conference APMC 2009*, Dec 2009, pp. 2785-2787.

- [15] S. Esfandiarpour, H. R. Hassani and A. Frotanpour, "A Dual-Band Circularly Polarized Monopole Antenna for WLAN Application," *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation*, Apr 2011, pp. 346-349.
- [16] A. Khidre, K. F. Lee, F. Yang and A. Eisherbeni, "Wideband Circularly Polarized E-Shaped Patch Antenna for Wireless Applications," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 52, No.5, Oct 2010, pp 219-229.
- [17] CST-Microwave Studio, User's Manual, 2006.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

ประวัติผู้เขียน

| | |
|------------------|---|
| ชื่อ - นามสกุล | นางสาวภัทรียา จันทร์อภาส |
| วัน เดือน ปีเกิด | 23 กุมภาพันธ์ 2534 |
| ที่อยู่ | 79 หมู่ 2 ถนนบุรีรัมย์-พุทไธสง ตำบลชุมเห็ด อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ 31000 |
| ประวัติการศึกษา | พ.ศ. 2555 สำเร็จการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] P. Chan-arpas, S. Denti and C. Phongcharoenpanich, "A Circularly Polarized Unidirectional Antenna Using Folded Plate for UHF-RFID Reader," *2013 Thailand-Japan Microwave (TJMW2013)*, Bangkok, Thailand, December 2-4, 2013.
- [2] P. Chan-arpas, S. Denti and C. Phongcharoenpanich, "Dual-band Dual-pattern Truncated-corners Microstrip Antenna for GPS and WiFi Applications," *The 20th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC2014)*, Pattaya, Thailand, October 1-3, 2014.
- [3] P. Chan-arpas, S. Denti and C. Phongcharoenpanich, "A Novel 3D Antenna Radiating Circularly Polarized Bidirectional Pattern," *2014 Thailand-Japan Microwave (TJMW2014)*, Bangkok, Thailand, November 26-28, 2014.

Thailand – Japan MicroWave 2014



TJMW2014

November 26 – 28, 2014

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)

Bangkok, Thailand



THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

A Novel 3D Antenna Radiating Circularly Polarized Bidirectional Pattern

Patthareeya CHAN-ARPAS, Sitthichai DENTRI, and Chuwong PHONGCHAROENPANICH

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

E-mail: patthareeya.ch@gmail.com, sitthichai.d@live.com, kpchuwon@kmitl.ac.th

Abstract This paper proposes a novel 3D antenna radiating circularly polarized bidirectional pattern for 2.45 GHz band. Its structure consists of two folded plates with single feed. The $|S_{11}| \leq -10$ dB can cover the frequency range from 2.09 to 2.58 GHz, and AR < 3 dB at 0 and 180 degrees can cover the frequency range from 2.00 to 2.57 GHz. The achieved gains is 4.82 dBic. The AR beamwidths in xz- and yz-planes are 60 and 75 degrees, respectively. The half-power beamwidths in two principal planes are 65 and 45 degrees, respectively.

Keyword Folded plates, Circular polarization, Bidirectional pattern

I. INTRODUCTIONS

Wireless Local Area Network (WLAN) systems are widely used and dramatically developed in worldwide. To satisfy the requirement of WLAN Application, IEEE 802.11 WLAN standards of the 2.4 GHz (2400–2484 MHz) with 2.45 GHz of center frequency band is regulated.

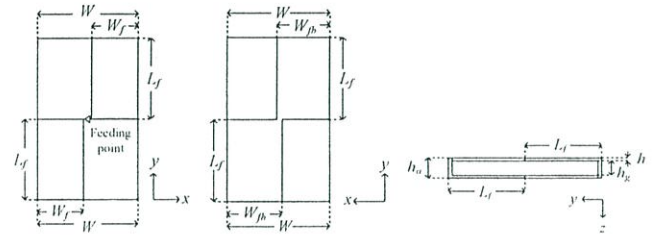
The advantages of microstrip antenna are low profile, light weight, ease of manufacture and low cost which has more attractive and apply for commercial and communication systems. Various designs of antennas are applied to WLAN application. The well-known methods to achieve circular polarization are investigated such as using folded plate in [1], truncated corner of the antenna element in [2], using slot and slit patch in [3], and others.

A novel 3D antenna radiating circularly polarized bidirectional pattern for 2.45 GHz band has proposed in this paper. The advantages of the proposed antenna are high gain, high quality circular polarization characteristics and easy to design. The antenna configuration will be described in section II. The simulated and measured results are provided in section III and a conclusion is drawn in the last section.

2. PROPOSED ANTENNA CONFIGURATION

The proposed antenna consists of two folded plates with single feed. The width of the antenna is W . The length and the width of folded plates are L_f and W_f , respectively. The width of folded plates on back is W_{fb} . The height the antenna is h_a . The gap between the opposite elements is h_g , and h is

thickness of substrate. The feeding line position are p_x and p_z in x and z directions.



(a) Front view. (b) Back view. (c) Side view.

Fig.1 Geometry of the proposed antenna.

The geometry of the proposed antenna is shown in Fig.1. In order to verify the frequency response of various characteristics of the proposed antenna, antenna parameters are varied to determine the optimized dimensions to receive desired antenna characteristics such as $|S_{11}|$, gain, axial ratio, half-power beamwidth and radiation pattern. The antenna dimensions optimized at the center frequency of 2.45 GHz are tabulated in Table 1.

TABLE I
PROPOSED ANTENNA GEOMETRICAL DIMENSIONS

| Parameter | Physical size | Electrical size |
|-----------|---------------|-----------------|
| W | 50 mm | 0.408λ |
| W_f | 24 mm | 0.196λ |
| L_f | 50 mm | 0.408λ |
| W_{fb} | 26 mm | 0.212λ |
| h_a | 14 mm | 0.114λ |
| h_g | 12 mm | 0.098λ |
| h | 1 mm | 0.008λ |
| p_x | (-1,1) | - |
| p_z | (6.5,6.5) | - |

3. SIMULATED AND MEASURED RESULTS

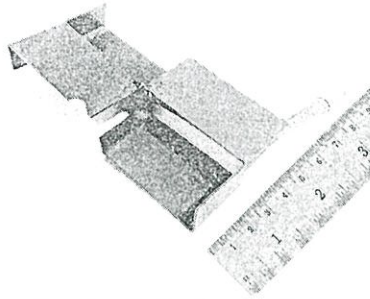


Fig.2 Photographs of the fabricated prototype of the proposed antenna

Fig.2 depicts the photograph of the fabricated prototype antenna which was designed on copper plate and fed by SMA connector with 50-Ω characteristic impedance. The antenna characteristics based on the geometrical dimensions are tabulated in Table I. Fig.3 illustrates the $|S_{11}|$ and AR versus frequency. Fig.4 illustrates AR versus angle in xz- and yz-planes, respectively. Fig.5 illustrates radiation patterns in the xz- and yz-planes at the center frequency. Fig.6 illustrates gain versus frequency at the center frequency. The bidirectional pattern with circular polarization is achieved.

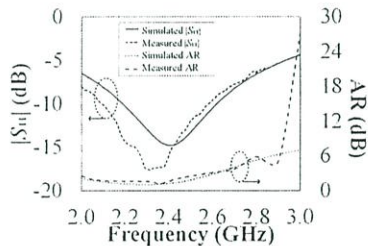


Fig.3 Simulated and measured $|S_{11}|$ and AR as function of frequency.

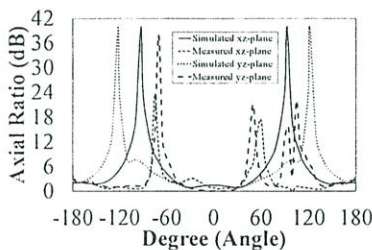


Fig.4 Simulated and measured AR at the center frequency.

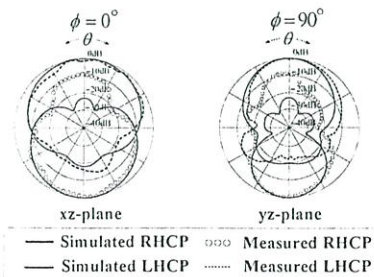


Fig.5 Radiation patterns in the xz- and yz-planes at the center frequency.

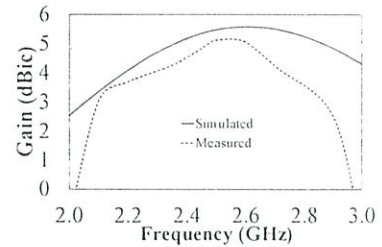


Fig.6 Simulated and measured gains as function of frequency.

The values of proposed antenna characteristic are tabulated in Table 2.

TABLE II
PROPOSED ANTENNA CHARACTERISTICS

| Characteristic | Values |
|----------------------------|--|
| $ S_{11} $ bandwidth | 20% (2.09 - 2.58 GHz) |
| AR bandwidth | 23% (2.00 - 2.57 GHz) |
| Pattern | Bidirectional |
| Polarization | Circular polarization (Left-handed rotation) |
| Gain | 2.75 - 5.15 dBic |
| AR beamwidths in xz-plane | 60 degree |
| AR beamwidths in yz- plane | 75 degree |
| HPBW in xz-plane | 60 degree |
| HPBW in yz-plane | 45 degree |

4. CONCLUSIONS

A novel 3D antenna radiating circularly polarized bidirectional pattern for 2.45 GHz band has been characterized. Measured results shows that $|S_{11}| \leq -10$ dB is ranged from 2.09 GHz to 2.58 GHz, and AR bandwidth (AR < 3) is ranged from 2 GHz to 2.57 GHz. The AR beamwidths in xz- and yz-planes are 60 and 75 degrees, respectively. The HPBW in two principal planes are 60 and 45 degrees, respectively. The achieved gains is 4.82 dBic. The proposed antenna can operate at 2.45 GHz and ease of manufacture and configuration.

References

[1] C. H. K. Chin, Q. Xue and H. Wong, "Broadband patch antenna with a folded plated pair as a differential feeding scheme," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 9, pp. 2461-2467, Sep. 2007.

[2] K. L. Chung and A. S. Mohan, "A systematic design method to obtain broadband characteristics for singly-fed electromagnetically coupled patch antennas for circular polarization," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.51, no. 12, pp. 3239-3247, Dec. 2003.

[3] Nasimuddin, Z. N. Chen and X. M. Qing, "A compact circularly polarized slotted-slit-microstrip patch antenna," in *Proc. Asia-Pacific Microw. Conf.*, pp. 582-585, 2011.