

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศไมโครสตริปย่านความถี่คู่สำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย
Dual Band Microstrip Antenna for Wireless Local Area Network System



โดย

นายชัชชัย อ้อมคล้าย

นายเอกสิทธิ์ คุณวัตร

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 62685
วัน,เดือน,ปี..... 21 ส.ค. 2549

b..... 11628431
i.....

ปฏิญานិพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว

(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว

(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ในเชิงพาณิชย์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกแห่งในการนำไปใช้

สายอากาศไมโครสตริปย่านความถี่คู่สำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย
Dual Band Microstrip Antenna for Wireless Local Area Network System

โดย

นายชัชชัย อ้อมคล้าย 46015007

นายเอกสิทธิ์ คุณวัตร 46015042

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

รศ.ดร. จเร สุรวัดน์ปัญญา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศไมโครสตริปย่านความถี่คู่สำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

Dual Band Microstrip Antenna for Wireless Local Area Network System

ผู้จัดทำ

1. นายชัยชัย อ้อมคล้าย 46015007

2. นายเอกสิทธิ์ ฤกษ์วัตร 46015042


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร. ชuwong พงศ์เจริญพาณิชย์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร. จเร สุรวัตน์ปัญญา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศไมโครสตริปย่านความถี่คู่สำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย
Dual Band Microstrip Antenna for Wireless Local Area Network System

โดย นาย ชัชชัย อ้อมคล้าย 46015007
นาย เอกสิทธิ์ คุณวัตร 46015042

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์
รศ.ดร. จเร สุรวัฒน์ปัญญา

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษา ออกแบบ สร้างและทดสอบสายอากาศไมโครสตริป 2 ความถี่โดยจะรองรับการใช้งานย่านความถี่ 2.4 GHz และย่านความถี่ 5.2 GHz ซึ่งจะทำให้ครอบคลุมการใช้งานในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยข้อดีของสายอากาศไมโครสตริปคือ มีน้ำหนักเบา ขนาดกะทัดรัด ทำให้ง่ายต่อการออกแบบและติดตั้ง และในโครงการนี้จะศึกษาคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งได้แก่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างของลำคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง การโพลาไรซ์ คุณลักษณะอิมพีแดนซ์ ค่าการสูญเสียย้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริป

Abstract

This project presents the study, design, fabrication and measurement of microstrip patch antenna. A novel dual-frequency microstrip patch antenna for Wireless Local Area Network (WLAN) applications in the 2.4 GHz and 5.2 GHz bands. The merit of the microstrip patch antenna is that it possesses lightweight, compact size, simple design and fabrication. Additionally, this project will analyse the radiation characteristics such as radiation pattern, beamwidth, directivity, polarization as well as impedance characteristics such as input impedance, return loss and standing wave ratio of microstrip antenna.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับคำแนะนำและดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดี คีตลอคจนแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น ทั้งหมดนี้เกิดขึ้นได้เพราะข้าพเจ้ามีอาจารย์ที่ปรึกษา ประกอบด้วย

ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

รศ.ดร. จเร สุรวัดณ์ปัญญา

รวมถึงบุคคลที่ได้ให้คำชี้แนะ ความรู้ สถานที่ และอุปกรณ์ต่างๆ อีกทั้งยังคอยตรวจรายงานของ ข้าพเจ้าเสมอมา คือ

ผศ.ดร. ทองทศ วานิชศรี

คุณ คำหริ อ้อมคล้าย

คุณ จารึก จันทร์ตรี

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ประยูทธ อัครเอกตลาลิน หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่เอื้อเฟื้อโปรแกรม Zeland Software ในการทำปริญญาานิพนธ์ ฉบับนี้ และที่ขาดไม่ได้ก็คือเพื่อนๆกลุ่มสายอากาศที่คอยช่วยเหลือและร่วมกันทำงาน จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 กล่าวนำ | 1 |
| 1.2 ขอบเขตของโครงการ | 2 |
| 1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการ | 3 |
| 2.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป | 3 |
| 2.2 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแบบต่างๆ | 3 |
| 2.2.1 สายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น (Patch) | 4 |
| 2.2.2 สายอากาศไมโครสตริปแบบ Travelling-Wave | 4 |
| 2.2.3 สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบสล롯 (Slot) | 5 |
| 2.3 รูปแบบการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปด้วยวิธีต่างๆ | 5 |
| 2.3.1 การป้อนสัญญาณด้วยสายส่งไมโครสตริป (Microstrip Line) | 5 |
| 2.3.2 การป้อนสัญญาณด้วยโคแอกเซียล (Coaxial Cable) | 6 |
| 2.3.3 การป้อนสัญญาณผ่านช่องเปิด (Aperture) | 7 |
| 2.3.4 การป้อนสัญญาณด้วยการวางไว้ใกล้กัน (Proximity) | 8 |
| 2.4 หลักการกระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป | 8 |
| 2.5 การส่งผ่านคลื่นในสายส่งไมโครสตริป | 15 |
| 2.6 การลดทอนกำลังสัญญาณของไมโครสตริป | 19 |
| 2.7 อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input impedance) | 21 |
| 2.7.1 อินพุตอิมพีแดนซ์ของการป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริป | 21 |
| 2.7.2 อินพุตอิมพีแดนซ์ของการป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียล | 24 |
| 2.8 โพลาริเซชัน (Polarization) | 26 |
| 2.9 พารามิเตอร์ของสายอากาศ (Antenna Parameter) | 26 |
| 2.9.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) | 26 |
| 2.9.2 โลบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe) | 27 |
| 2.9.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity) | 28 |
| 2.9.4 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) | 29 |
| 2.9.5 บีมวิดท์ (Beamwidth) | 29 |
| 2.9.6 แบนด์วิดท์ (Bandwidth : BW) | 30 |
| 2.9.7 อัตรายาย (Gain) | 31 |
| 2.9.8 ประสิทธิภาพของสายอากาศ | 31 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง | 32 |
| 3.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป | 32 |
| 3.1.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม | 32 |
| 3.1.2 การออกแบบหาจุดป้อนสัญญาณด้วยสายส่งไมโครสตริป | 35 |
| 3.1.3 การออกแบบหาค่าความกว้างของสายส่ง (Strip Line) | 36 |
| 3.2 การออกแบบและคำนวณสายอากาศไมโครสตริป 2 ความถี่ | 37 |
| 3.2.1 การออกแบบหาความกว้างและความยาวของสายส่งไมโครสตริป 2 ความถี่ | 37 |
| 3.2.1.1 การคำนวณหาความกว้างของสายส่ง (Strip Line) | 37 |
| 3.2.1.2 การคำนวณหาความยาวของสายส่ง (Strip Line) | 37 |
| 3.2.2 การออกแบบส่วนแพร่กระจายคลื่น | 38 |
| 3.2.2.1 การออกแบบส่วนแพร่กระจายที่มีส่วนแพร่กระจายคลื่นแยกเป็น 2 ส่วน | 39 |
| 3.2.2.2 การออกแบบส่วนแพร่กระจายที่มีส่วนแพร่กระจายคลื่นรวมเป็นส่วนเดียว | 42 |
| 3.3 สายอากาศไมโครสตริปที่นำมาทำเป็นจันงานมีสารไดอิเล็กตริกเป็นแบบอีพ็อกซี | 44 |
| 3.4 การสร้างสายอากาศไมโครสตริป | 45 |
| 3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศไมโครสตริป | 45 |
| 3.4.2 ขั้นตอนการออกแบบและการสร้างสายอากาศไมโครสตริป | 46 |
| บทที่ 4 การวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์ | 47 |
| 4.1 พิจารณาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Impedance) | 47 |
| 4.2 พิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) | 48 |
| 4.3 พิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) | 48 |
| 4.4 พิจารณาค่าอัตราขยายของสายอากาศ (Gain) | 49 |
| 4.5 พิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป 2 ย่านความถี่ | 50 |
| 4.6 พิจารณาค่าเพอร์มิตติวิตีของสารตัวกลาง (ϵ_r) | 52 |
| บทที่ 5 ผลการทดสอบและผลการทดลอง | 53 |
| 5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ | 54 |
| 5.2 ขั้นตอนการทดสอบ | 54 |
| 5.3 ผลการทดสอบ | 55 |
| 5.3.1 การทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Impedance) | 55 |
| 5.3.2 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) | 56 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 5.3.3 การวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) | 57 |
| 5.3.4 การทดสอบหาค่าแบนด์วิดท์ (Bandwidth : BW) | 58 |
| 5.3.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Pattern) | 60 |
| 5.3.6 การวัดโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศ (Polarization) | 64 |
| 5.3.7 การทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศ (Gain) | 65 |
| 5.3.8 การทดสอบส่งสัญญาณของสายอากาศในการใช้งานจริง | 68 |
| 5.4 วิเคราะห์ผลทดสอบ | 70 |
| บทที่ 6 สรุปวิจารณ์และแนวทางการพัฒนา | 71 |
| 6.1 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการ | 71 |
| 6.2 ปัญหา และแนวทางแก้ไข | 71 |
| 6.2.1 ปัญหา | 71 |
| 6.2.2 แนวทางแก้ไข | 72 |
| 6.3 แนวทางการพัฒนา | 73 |
| กิตติกรรมประกาศ | 74 |
| เอกสารอ้างอิง | 75 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 1.1 การสื่อสารแบบไร้สาย | 1 |
| รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป | 3 |
| รูปที่ 2.2 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ | 4 |
| รูปที่ 2.3 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแบบทราเวอร์ริงเวฟ | 5 |
| รูปที่ 2.4 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแบบสลีต | 5 |
| รูปที่ 2.5 การป้อนสัญญาณด้วยวิธีสายส่งไมโครสตริป | 6 |
| รูปที่ 2.6 การป้อนสัญญาณด้วยโคแอกเซียล | 7 |
| รูปที่ 2.7 การป้อนสัญญาณด้วยวิธีผ่านช่องเปิด | 8 |
| รูปที่ 2.8 การป้อนสัญญาณด้วยวิธีวางไว้ใกล้กัน | 8 |
| รูปที่ 2.9 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป | 9 |
| รูปที่ 2.10 ลักษณะของสนามไฟฟ้าภายใต้แผ่นและบริเวณของสายอากาศไมโครสตริป | 9 |
| รูปที่ 2.11 ลักษณะการเกิดสลีต | 10 |
| รูปที่ 2.12 แหล่งจ่ายกระแสแบบที่ทำให้เกิดสนามในระนาบใกล้เคียงกัน | 11 |
| รูปที่ 2.13 แหล่งจ่ายกระแสเชิงผิวอีกแบบหนึ่ง ที่ทำให้เกิดสนามในระนาบใกล้เคียงกัน | 12 |
| รูปที่ 2.14 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และสนามที่แพร่กระจายบริเวณขอบของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป | 13 |
| รูปที่ 2.15 เส้นแรงไฟฟ้าในราบตามขวางของไมโครสตริป | 16 |
| รูปที่ 2.16 ไมโครสตริปที่มี $w/h \gg 1$ และ $w/h \ll 1$ | 18 |
| รูปที่ 2.17 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล | 19 |
| รูปที่ 2.18 การส่งผ่านของคลื่น TEM แบบอุดมคติในไมโครสตริป | 20 |
| รูปที่ 2.19 โครงสร้างทางกายภาพของสายส่งไมโครสตริป | 21 |
| รูปที่ 2.20 อัตราส่วนค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ต่อค่าคงที่สัมพัทธ์ของฉนวน | 23 |
| รูปที่ 2.21 คุณสมบัติดิสเพอร์ชัน $\epsilon_r(f)$ ในไมโครสตริป | 24 |
| รูปที่ 2.22 แสดงระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ | 27 |
| รูปที่ 2.23 โลบต่างๆและบีมวิดท์ของแบบรูปสายอากาศ | 27 |
| รูปที่ 2.24 แบบรูปในแบบเชิงเส้น | 28 |
| รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม | 33 |
| รูปที่ 3.2 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม | 34 |
| รูปที่ 3.3 ส่วนแพร่กระจายคลื่นแยกเป็น 2 ส่วน | 38 |
| รูปที่ 3.4 ส่วนแพร่กระจายคลื่นรวมเป็นส่วนเดียว | 39 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|----|
| รูปที่ 3.5 แสดงส่วนการแพร่กระจายคลื่นรูปตัว L | 39 |
| รูปที่ 3.6 แสดงส่วนการแพร่กระจายคลื่นรูปตัว L แยกเป็น 2 ส่วน | 40 |
| รูปที่ 3.7 ส่วนการแพร่กระจายคลื่น 2.4 GHz | 41 |
| รูปที่ 3.8 ส่วนการแพร่กระจายคลื่น 5.2 GHz | 41 |
| รูปที่ 3.9 ส่วนแพร่กระจายคลื่นที่รวมกัน | 42 |
| รูปที่ 3.10 แสดงส่วนการแพร่กระจายคลื่นด้าน a | 43 |
| รูปที่ 3.11 แสดงส่วนการแพร่กระจายคลื่นด้าน b | 43 |
| รูปที่ 3.12 แสดงส่วนการแพร่กระจายคลื่นทั้ง 2 ด้าน | 44 |
| รูปที่ 3.13 แสดงขนาดของสายส่งและส่วนแพร่กระจายคลื่นที่คำนวณ | 45 |
| รูปที่ 4.1 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Impedance) ที่ได้จากโปรแกรม IE3D | 47 |
| รูปที่ 4.2 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ที่ได้จากโปรแกรม IE3D | 48 |
| รูปที่ 4.3 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) ที่ได้จากโปรแกรม IE3D | 49 |
| รูปที่ 4.4 ค่าอัตราขยายของสายอากาศ (Gain) ที่ได้จากโปรแกรม IE3D | 49 |
| รูปที่ 4.5 แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz | 50 |
| รูปที่ 4.6 แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.25 GHz | 51 |
| รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าเพอร์มิตติวิตีของสารตัวกลาง (ϵ_r) มีค่า 3.0 | 52 |
| รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ค่าเพอร์มิตติวิตีของสารตัวกลาง (ϵ_r) มีค่า 5.0 | 52 |
| รูปที่ 5.1 สายอากาศไมโครสตริปที่ใช้ในการทดสอบ | 53 |
| รูปที่ 5.2 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Impedance) ที่ได้จากการทดสอบ | 55 |
| รูปที่ 5.3 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) ที่ได้จากการทดสอบ | 56 |
| รูปที่ 5.4 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ที่ได้จากการทดสอบ | 57 |
| รูปที่ 5.5 ค่าแบนด์วิดท์ที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 2.45 GHz | 58 |
| รูปที่ 5.6 ค่าแบนด์วิดท์ที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 5.25 GHz | 59 |
| รูปที่ 5.7 การจัดวางสายอากาศภายในห้องเพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น | 61 |
| รูปที่ 5.8 การจัดวางสายอากาศเพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆ | 61 |
| รูปที่ 5.9 แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz | 62 |
| รูปที่ 5.10 แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.25 GHz | 63 |
| รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบการวัดโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศ | 65 |
| รูปที่ 5.12 ผลการทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศ | 66 |
| รูปที่ 5.13 ผลการทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศที่ย่านความถี่ 2.45 GHz | 66 |
| รูปที่ 5.14 ผลการทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศที่ย่านความถี่ 5.25 GHz | 67 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 5.15 สายอากาศไมโครสตริปที่บรรจุกล่องแล้วนำมาทดสอบใช้งานจริง | 68 |
| รูปที่ 5.16 สายอากาศไมโครสตริปที่ติดตั้งกับ Access Point ในการทดสอบใช้งานจริง | 69 |
| รูปที่ 5.17 ผลการทดสอบส่งสัญญาณของสายอากาศในการใช้งานจริง | 69 |
| รูปที่ 5.18 สายอากาศที่ใช้ทดสอบการใช้งานจริง | 70 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

| | |
|--|----|
| ตารางที่ 5.1 ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป | 55 |
| ตารางที่ 5.2 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริป | 56 |
| ตารางที่ 5.3 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป | 57 |
| ตารางที่ 5.4 ค่าแบนด์วิคท์ของสายอากาศไมโครสตริป ที่ความถี่ 2.45 GHz | 58 |
| ตารางที่ 5.5 ค่าแบนด์วิคท์ของสายอากาศไมโครสตริปที่ความถี่ 5.25 GHz | 59 |
| ตารางที่ 5.6 แสดง HPBW ที่ได้จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ของสายอากาศ | 64 |
| ตารางที่ 5.7 แสดงค่าไดเรกทิวิตี จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ | 64 |
| ตารางที่ 5.8 ค่าอัตราขยายของสายอากาศ ที่ได้จากการทดสอบ | 67 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ในระบบสื่อสาร (Communication System) สายอากาศมีความสำคัญอย่างยิ่งในระบบการสื่อสารที่ใช้คลื่น เพราะสายอากาศที่ดีและมีประสิทธิภาพสูงจะทำให้สามารถประหยัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องส่งและทำให้สามารถติดต่อกันได้ในระยะที่ไกลขึ้น สายอากาศจึงได้รับการคิดค้นและพัฒนาให้เหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะต่างๆ ดังจะเห็นได้ว่าสายอากาศที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันมีมากมายหลายแบบด้วยกัน เมื่อพิจารณากันอย่างกว้างๆ แล้วสายอากาศอาจจะมีโครงสร้างได้มากมายหลายรูปแบบเพราะเนื่องจากถ้าเรากำหนดให้กระแสไฟฟ้าความถี่สูงไหลบนโลหะอย่างเหมาะสมแล้วก็จะมีการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กส่งผ่านไปได้อย่างไร้ที่ติตามในทางปฏิบัติ นั้น สายอากาศที่ถูกนำมาใช้งานนั้นนอกจากจะต้องมีประสิทธิภาพสูง มีคุณสมบัติในการกระจายคลื่นตามต้องการแล้วยังต้องมีรูปร่างที่สะดวกต่อการสร้าง มีความแข็งแรง และมีราคาถูกด้วย ด้วยเหตุนี้สายอากาศที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันจึงมีจำนวนรูปแบบที่จำกัด และในจำนวนนี้จะมีสายอากาศที่เป็นพื้นฐานที่มีโครงสร้างง่ายๆ และมีคุณสมบัติในการกระจายคลื่นอยู่ในเกณฑ์ดี

ถึงแม้สายอากาศจะได้รับการคิดค้นและพัฒนากันมาหลาย 10 ปีแล้วก็ตาม ในปัจจุบันนี้ก็ยังมี การวิจัยและพัฒนาสายอากาศรูปแบบใหม่ๆ ขึ้นเสมอ ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าความต้องการของการสื่อสารที่ใช้คลื่นนั้นได้แผ่กว้างออกไป และได้มีความต้องการในลักษณะเฉพาะต่างๆ เกิดขึ้นเสมอ ยกตัวอย่างเช่นในระบบสื่อสารดาวเทียมภายในประเทศ (Domestic Satellite Communication System) สายอากาศบนดาวเทียมจะต้องส่งคลื่นลงมาตรงบริเวณที่ต้องการเท่านั้น โดยไม่ล้ำเข้าเขตของประเทศที่ไม่ต้องการคลื่นนั้น ในลักษณะเช่นนี้สายอากาศบนดาวเทียมก็จำเป็นต้องได้รับการออกแบบพิเศษให้มีคุณสมบัติในการกระจายคลื่นตามต้องการนั้น

ในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless Communication System) โดยในปัจจุบันการสื่อสารในย่านความถี่ไมโครเวฟมีบทบาทสำคัญมาก สายอากาศในย่านความถี่ไมโครเวฟนั้น มีการนำเอามาใช้ในการสื่อสารโทรคมนาคมมากยิ่งขึ้น สายอากาศไมโครเวฟแบบไมโครสตริปเป็นที่นิยมใช้ เพราะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางไฟฟ้าที่ดี หลายอย่าง เช่น เป็นแผ่นแบนเรียบ ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูก (ในกรณีเป็น FR4) ง่ายต่อการปรับเมซซิ่ง และสร้างได้ง่ายโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์



รูปที่ 1.1 การสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless Communication System)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless Communication System) ในปัจจุบัน จะมีมาตรฐานการใช้งานที่แพร่หลายอยู่ 3 มาตรฐาน คือ มาตรฐาน IEEE 802.11b และมาตรฐาน IEEE 802.11g โดยจะใช้งานในย่านความถี่ 2.4 GHz ส่วนมาตรฐาน IEEE 802.11a โดยจะใช้งานในย่านความถี่ 5.2 GHz ซึ่งเมื่อเราทำการออกแบบและสร้างสายอากาศไมโครสตริปให้สามารถใช้งานได้ทั้ง 2 ย่านความถี่นี้แล้ว ก็จะทำให้สามารถครอบคลุมการใช้งานเกี่ยวกับเครือข่ายไร้สาย ทั้ง 3 มาตรฐานด้วยเช่นกัน

1.2 ขอบเขตโครงการ

สามารถออกแบบ สร้างและทดสอบสายอากาศไมโครสตริปให้สามารถใช้งานได้ 2 ย่านความถี่ คือ ย่านความถี่ 2.4 GHz และย่านความถี่ 5.2 GHz

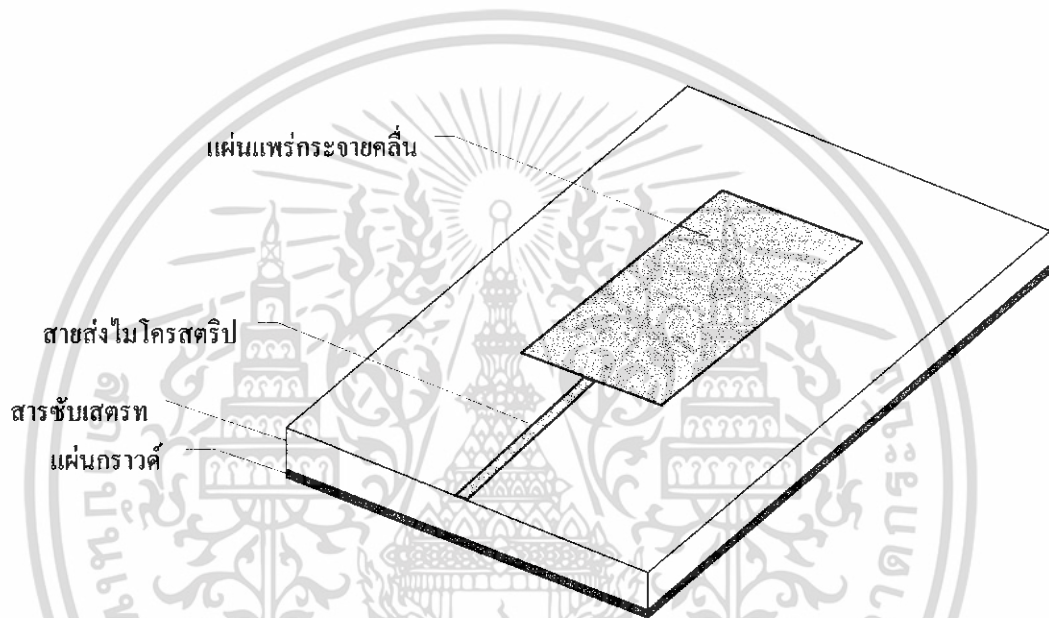
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. สามารถสร้างสายอากาศไมโครสตริปที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานที่ความถี่ 2.4 GHz และความถี่ 5.2 GHz ได้
2. สามารถวิเคราะห์สายอากาศแบบไมโครสตริปและเข้าใจหลักการในการทำงาน การวัด และการทดสอบของสายอากาศ

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

สายอากาศไมโครสตริปนั้นสามารถมีรูปร่างได้หลายรูปแบบ ทำให้วิธีการคำนวณเพื่อให้ได้ความถี่ตามที่ต้องการ โดยในบทนี้จะอธิบายถึงโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปและวิธีการคำนวณแบบต่างๆ

2.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปจะประกอบด้วย แผ่นตัวนำ 2 แผ่นวางขนานกัน โดยมีแผ่นตัวนำที่อยู่ด้านบนซึ่งมีรูปร่างต่างๆ เช่น รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปวงกลม วงรี ฯลฯ เรียกว่า ตัวแพร่กระจายคลื่น (Radiation Patch) โดยทั่วไปมักจะเป็นแผ่นทองแดงหรือทองคำ แผ่นตัวนำที่อยู่ด้านล่างจะเป็นลักษณะเป็นแผ่นตัวนำทั้งแผ่น โดยในอุดมคติจะต้องมีขนาดใหญ่กว่าตัวแพร่กระจายคลื่นอย่างมาก เรียกว่า แผ่นกราวด์ (Ground Plane) และมีวัสดุที่ไม่เป็นสื่อกลางทางไฟฟ้า (Dielectric Substrate) กั้นกลางระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง

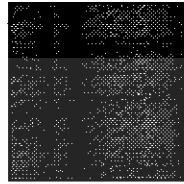
2.2 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแบบต่างๆ

สายอากาศไมโครสตริปจะมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆทางฟิสิกส์มากกว่าสายอากาศชนิดอื่นๆในย่านไมโครเวฟ

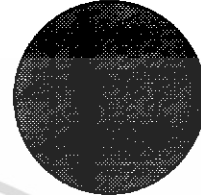
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 สายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น (Patch)

สายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น Patch ประกอบด้วยแผ่นตัวนำบางๆ ที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตอยู่บนแผ่นสารตัวกลาง และอีกด้านหนึ่งของสารตัวกลางจะเป็นพื้นกราวด์ แผ่นตัวนำจะเป็นตัวกำหนดการแพร่กระจายรังสี ซึ่งหาได้จากกรคำนวณตามรูปร่างลักษณะต่างๆ ดังรูปที่ 2.2



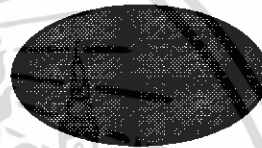
สี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square)



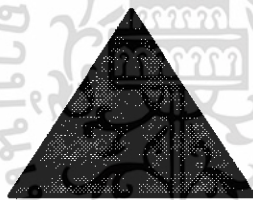
วงกลม (Disk)



สี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular)



วงรี (Ellipse)



สามเหลี่ยม (Equilateral Triangle)

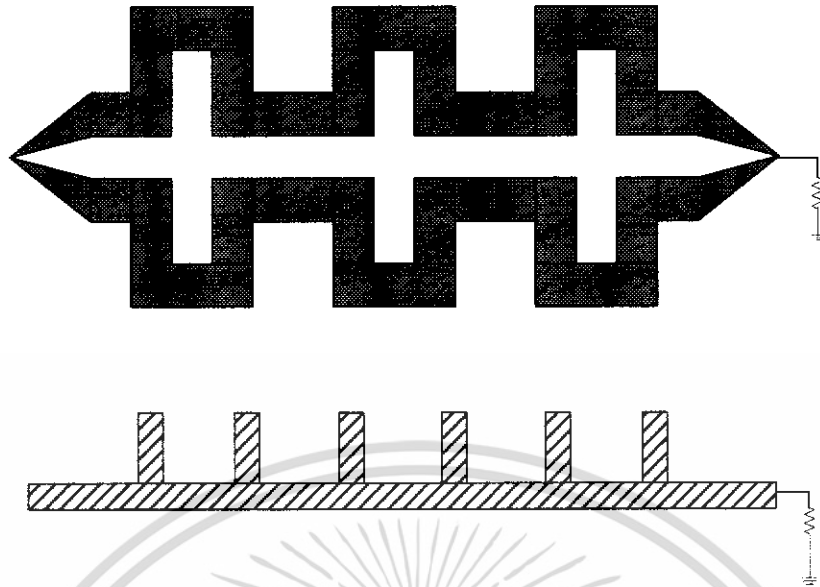


วงแหวน (Ring)

รูปที่ 2.2 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์

2.2.2 สายอากาศไมโครสตริปแบบ Travelling-Wave

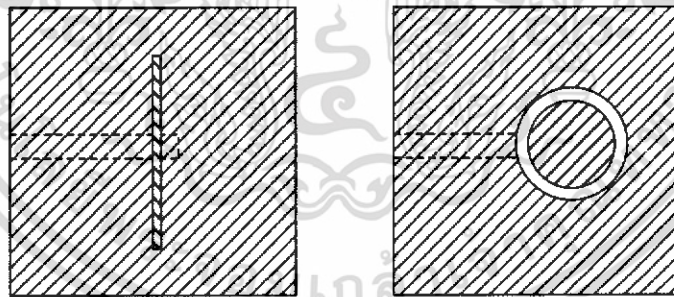
สายอากาศไมโครสตริปแบบ Travelling-Wave ประกอบด้วยตัวนำลักษณะเป็นคาน หรือมีความยาวตามเส้น TEM โดยที่ปลายเปิดของเส้น TEM จะต่อกับตัวภาระที่ทำการแมทซ์แล้ว โดยที่จะมีรูปร่างแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแบบทราเวอริงเวฟ

2.2.3 สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบสล็อต (Slot)

สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบสล็อต มีลักษณะคือ มีช่องที่พื้นกราวด์ และทำการป้อนสัญญาณโดยใช้เส้นไมโครสตริปที่เป็นช่อง รูปร่างของสล็อตจะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า วงกลม หรือวงแหวน ที่แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแบบสล็อต

2.3 รูปแบบการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปด้วยวิธีต่างๆ

2.3.1 การป้อนสัญญาณด้วยสายส่งไมโครสตริป (Microstrip Line)

การป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับสายอากาศไมโครสตริป เป็นการป้อนกำลังงานไฟฟ้าไปยังขอบตัวนำของสายอากาศด้านบน โดยพื้นกราวด์เป็นกราวด์ร่วมกันกับตัวสายอากาศ และสำหรับสายส่งไมโครสตริปนี้จะต้องคำนึงถึงการแมทซ์อิมพีแดนซ์ ระหว่างสายป้อนสัญญาณกับด้านสายอากาศไมโครสตริป การป้อนสัญญาณที่แนวศูนย์กลางของสายอากาศ ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการป้อนสัญญาณ ก็คือการเอกสตรนเป็นเอกสตรนที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

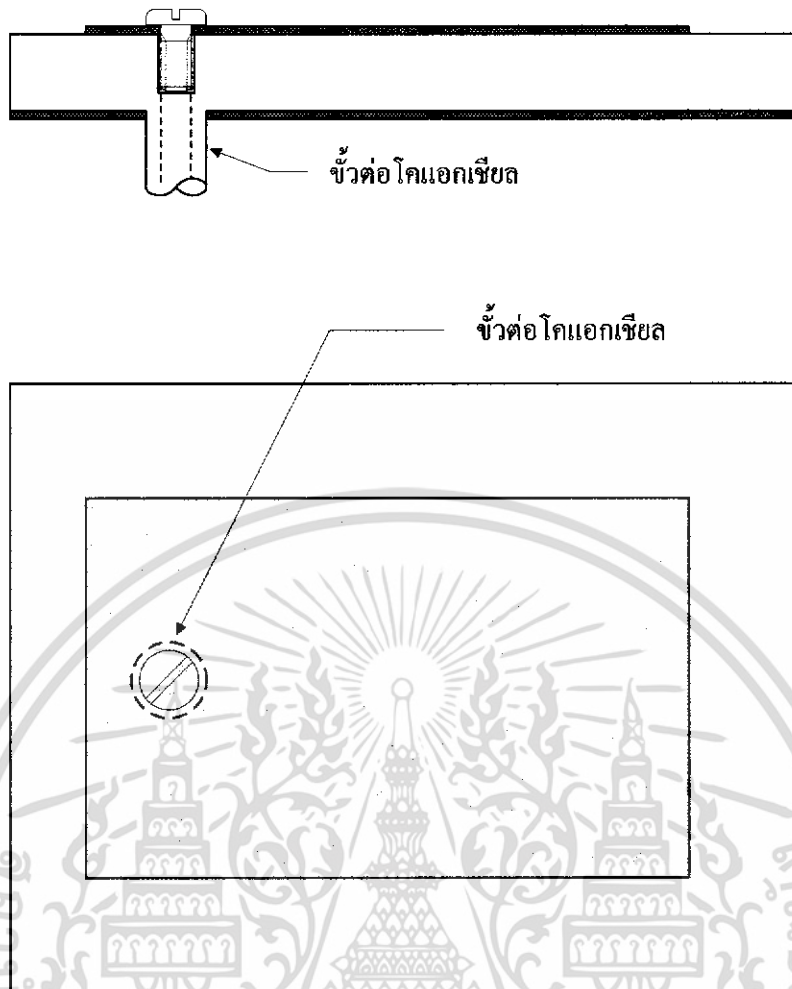
ใช้แผ่นไมโครสตริป และสายส่งไมโครสตริปต่อกับตัวกลางโดยตรงแต่วิธีนี้จะได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติไม่ค่อยดีนักเพราะโครงสร้างของสายอากาศและสายส่งไมโครสตริปจะไม่สอดคล้องกัน กล่าวคือ สายอากาศนี้จะส่งคลื่นได้ไม่ดีนัก เนื่องจากมีผิวโลหะที่ไม่ต่อเนื่องกัน ทำให้ระดับของคลื่นในทิศทางด้านข้างทิศทางหลัก (Side Lobe Level) มีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะไปลดคุณภาพของสายอากาศ นอกจากนี้ ช่วงความถี่ที่ใช้งานจะกว้างขึ้นด้วย เนื่องจากมีพลังงานจำนวนมากสะสมอยู่ภายใต้แผ่นตัวนำ (Cavity Effect) แต่สายส่งชนิดนี้สามารถปรับเมทซ์ซึ่งในตัวเองได้และยังสามารถสร้างได้ง่ายโดยทำการสร้างไปพร้อมกับแผ่นตัวนำที่ใช้ในการส่งคลื่นได้เลย ที่แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การป้อนสัญญาณด้วยวิธีสายส่งไมโครสตริป

2.3.2 การป้อนสัญญาณด้วยโคแอกเซียล (Coaxial Cable)

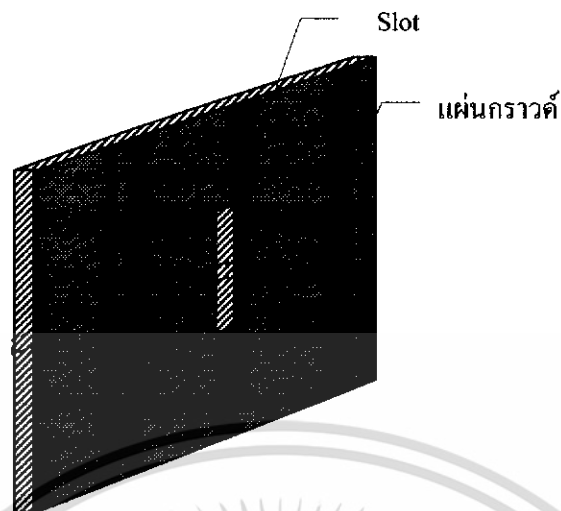
เป็นการป้อนกำลังงานโดยการเจาะทะลุจากกราวด์ทางด้านล่างต่อตัวนำด้านในของสายส่ง เข้ากับตัวสายอากาศ และตัวนำจะเชื่อมต่อเข้ากับแผ่นกราวด์ การป้อนกำลังงานจะทำการป้อนโดยที่จะต้องคำนึงว่าจุดที่เราป้อนเข้าไปนั้นว่า เมทซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างสายป้อนสัญญาณกับสายอากาศไมโครสตริปหรือไม่ ในการใช้สายเคเบิลแกนร่วมเป็นตัวป้อนสัญญาณจะต้องต่อสายนำสัญญาณให้ตั้งฉากกับแผ่นตัวนำโดยตัวนำด้านในจะต่ออยู่กับตัวนำด้านบนและตัวนำด้านนอกจะต่ออยู่กับแผ่นระนาบตัวนำ ซึ่งจากการศึกษาจะพบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า (สัญญาณ) ผ่านเข้าไปยังสายอากาศ สายอากาศจะมีการแผ่กระจายคลื่นเป็นปริมาณน้อยมาก เมื่อใช้ตัวกลางที่มีขนาดบาง แต่จะมีการแผ่กระจายคลื่นมากขึ้นถ้าต่อกับตัวกลางที่หนาขึ้น นอกจากนี้สายสัญญาณแกนคู่ยังสามารถต่อกับสายนำสัญญาณชนิดอื่นได้อีกด้วย ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การป้อนสัญญาณด้วยโครแอทเซียม

2.3.3 การป้อนสัญญาณผ่านช่องเปิด (Aperture)

การป้อนสัญญาณประเภทนี้จะนำเอาข้อบกพร่องของการป้อนสัญญาณในแบบที่ 1 และ 2 เนื่องจากทั้ง 2 แบบโดยธรรมชาติแล้วจะไม่สมมาตรกัน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดโหมด ในอันดับที่สูงขึ้นกว่า (Higher Order Mode) ทำให้เกิดการแพร่กระจายที่โพลาไรซ์เซชันไขว้ (Cross Polarization) จึงได้มีการคิดวิธีการป้อนสัญญาณ โดยการคัปปลิงผ่านช่องเปิด แต่วิธีการนี้จะมีการสร้างฮาทที่สุด และมีแบนด์วิดท์แคบ แต่การแพร่กระจายคลื่นประเภทนี้จะช่วยลดการกระจายคลื่นปลอมปนได้ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การป้องกันสัญญาณด้วยวิธีผ่านช่องเปิด

2.3.4 การป้องกันสัญญาณด้วยการวางไว้ใกล้กัน (Proximity)

การป้องกันสัญญาณประเภทนี้ มีลักษณะเช่นเดียวกับการป้องกันสัญญาณประเภทที่ 3 โดยลักษณะโครงสร้างจะประกอบด้วยวัสดุฐานรอง 2 ชั้นที่ถูกแยกออกจากกันด้วยระยะห่างระหว่างด้านข้างของวัสดุฐานรองแผ่นล่างสุด จะเป็นวัสดุที่มีค่าคงที่สารตัวกลางต่ำกว่าระยะห่างที่แบ่งวัสดุฐานรองทั้งสองออกจากกัน จะช่วยป้องกันการแพร่กระจายคลื่นออกจากส่วนป้องกันสัญญาณ ซึ่งจะช่วยลดการแพร่กระจายคลื่นปลอมปน และทำให้ได้โพลาริเซชันที่บริสุทธิ์ขึ้น ซึ่งการป้องกันสัญญาณโดยการวางไว้ใกล้ๆกัน นั้น จะมีแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุด และยังง่ายต่อการสร้างแบบจำลองและมีการปลอมปนของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ แต่การสร้างยังทำได้ยากอยู่ ดังรูปที่ 2.8

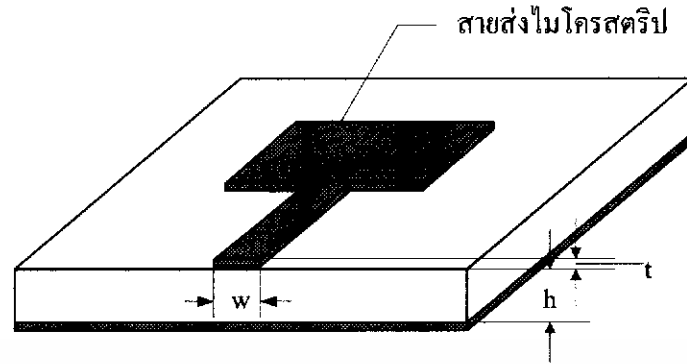


รูปที่ 2.8 การป้องกันสัญญาณด้วยวิธีวางไว้ใกล้กัน

2.4 หลักการกระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป

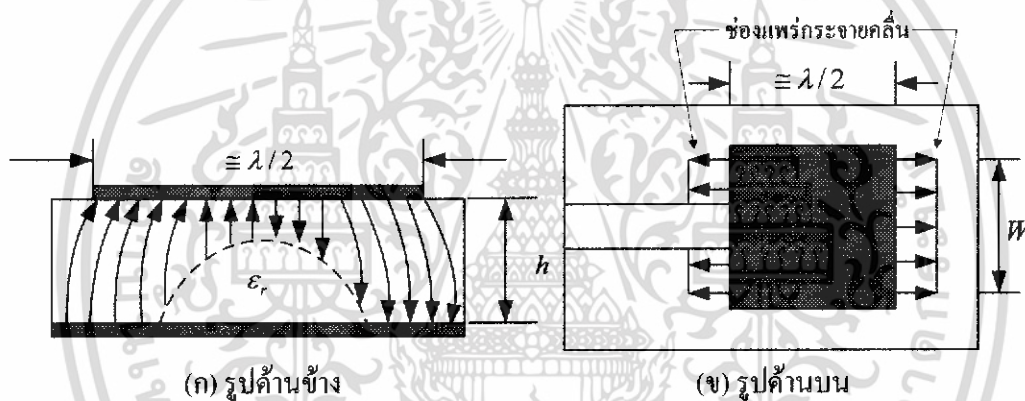
การแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศไมโครสตริปสามารถทำได้ง่ายขึ้น โดยจะให้ส่วนแพร่กระจายคลื่นเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นดังแสดงในรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



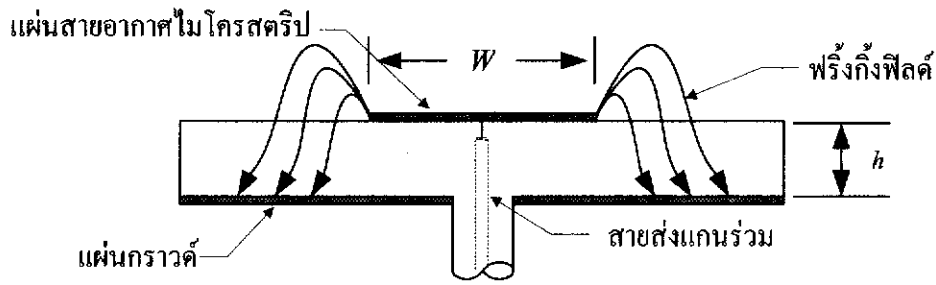
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

สมมติให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าตามแนวความกว้าง และความหนาแน่นของสายอากาศไมโครสตริปสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะของสนามไฟฟ้าภายใต้แผ่นและบริเวณของสายอากาศไมโครสตริป

สนามไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามแนวความยาวของส่วนกระจายคลื่น ซึ่งเท่ากับ $\lambda/2$ การแพร่กระจายคลื่น สามารถอธิบายได้จากสนามบริเวณขอบที่บิดงอจรของแผ่นแพร่กระจายคลื่น โดยจะแยกพิจารณาสนามไฟฟ้าที่ขอบเป็นส่วนประกอบแนวตั้งฉาก และส่วนประกอบแนวสัมผัส ส่วนประกอบตั้งฉากจะมีการกลับเฟส 180 องศา เพราะส่วนการการแพร่กระจายคลื่นมีความยาว $\lambda/2$ ดังนั้น สนามระลอกที่เกิดขึ้นจะไม่มีการแพร่กระจายสูงสุด โดยตั้งฉากกับผิวของส่วนกระจายคลื่นแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะการเกิดสลอต

ในกรณีสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง สายอากาศแผ่นไมโครสตริปจะเกิดเป็นสลอตซึ่งจะเรียกแต่ละสลอตว่า เซลล์สนาม (Field-Cell) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งเซลล์ของแต่ละสนามมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ

$$Z_i = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = Z_o \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

$$Z_c = \frac{Z_o}{n\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{377}{10\sqrt{2}} = 26.7 \quad (2.2)$$

ถ้าเป็นสายอากาศ $\mu_r = \epsilon_r = 1$ และ $Z_i = Z_o = 377$ โอห์ม ดังนั้น ถ้ามีจำนวนเซลล์สนามค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปมีค่า

$$Z_c = \frac{Z_o}{\sqrt{N\epsilon_r}} \quad (2.3)$$

โดย $N = \frac{W}{t}$ เพราะฉะนั้น

$$Z_c = \frac{Z_o}{\sqrt{W\epsilon_r}} t \quad (2.4)$$

ในรูปจะตัดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากขอบทั้งสองข้างทิ้งไป แต่ถ้าต้องการค่าที่ละเอียดจะเขียนได้ว่า

$$Z_c = \frac{Z_o}{\sqrt{\epsilon_r} [(W/t) + 2]} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าความยาว L ไม่ใช่ $\lambda/2$ แต่มีค่าเท่ากับ λ โดย $\lambda = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r}$ เซลล์สนามทั้งสองข้างของขอบของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปจะมีผลต่อการกระจายคลื่นทันที สมมติ $\epsilon_r = 1$ จะได้ว่า

$$Z_c = \frac{Z_0^2}{4Z_d} \quad (2.6)$$

เมื่อ Z_0 คือ ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของวัสดุที่ใช้ทำสายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่อยู่ในสูญญากาศ ซึ่งเท่ากับ 377 โอห์ม

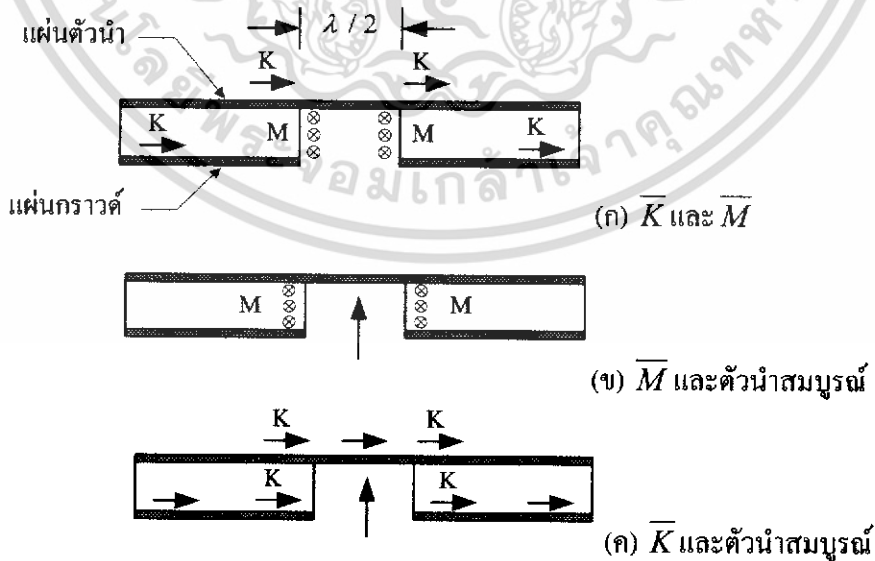
Z_d คือ ค่า Impedance Complementary Dipole (โอห์ม)

ซึ่งสามารถหาค่าสภาพเจาะจงของทิศทางได้โดยใช้สูตร

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad (2.7)$$

เมื่อ Ω_A คือ มุมที่กระจายคลื่น (Beam Area)

การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป สนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากแผ่นไมโครสตริป สามารถหาได้จากการสมมติสภาวะและการจ่ายกระแสให้แก่สายอากาศ แหล่งจ่ายกระแสที่สมมติขึ้นนี้มีอยู่ 3 แบบดังรูปที่ 2.12 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากกระแสเชิงผิวสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.12 (ก) สนามระยะไกลสามารถคำนวณได้จากสนามแม่เหล็ก (\bar{M}) ร่วมกับสภาวะตัวนำสมบูรณ์ ดังรูปที่ 2.12 (ข) ความหนาแน่นกระแสของสนามไฟฟ้าแนวสัมผัสจะทำให้สนามระยะไกลเป็นศูนย์ กระแสไฟฟ้า (\bar{K}) ร่วมกับสภาวะตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ พิจารณาได้จากรูปที่ 2.12 (ค)



รูปที่ 2.12 แหล่งจ่ายกระแสแบบที่ทำให้เกิดสนามในระยะไกลเหมือนกัน

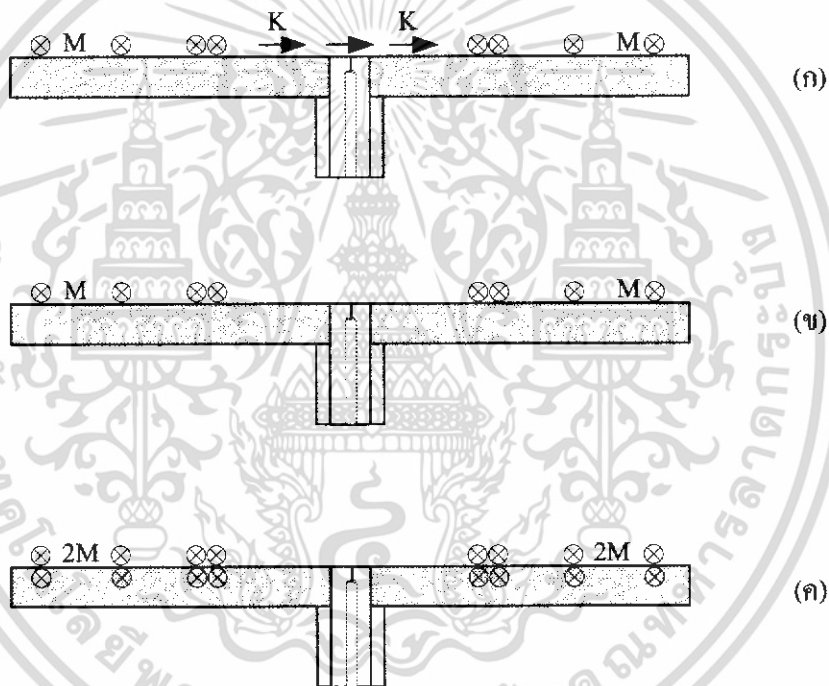
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีต่อไป การกำหนดสมการจะใช้พื้นฐานของขอบเขตเงื่อนไข คือ

$$\left. \begin{aligned} \bar{E} \times \bar{a}_n &= 0 \\ \bar{a}_n \times \bar{H} &= \bar{K} \end{aligned} \right\} \text{บนแผ่นแพร่กระจายคลื่นและพื้นกราวด์} \quad (2.8)$$

เมื่อ \bar{a}_n คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ขนานกับพื้นผิว \bar{E} กับ \bar{H} คือสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
ในแนว สัมผัสภายในสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

ซึ่งแหล่งจ่ายจะทำให้เกิดสนามในระนาบใกล้เคียงแผ่นแพร่กระจายคลื่น สนามไฟฟ้าที่อยู่ใต้พื้น
กราวด์จะเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.13 (ก) แสดงกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กในระนาบ ดังรูปที่ 2.13 (ข)
แสดงกระแสแม่เหล็ก และตัวนำกระแสเชิงผิวจะเพิ่มเป็น 2 เท่า



รูปที่ 2.13 แหล่งจ่ายกระแสเชิงผิวอีกแบบหนึ่ง ที่ทำให้เกิดสนามในระนาบใกล้เคียงกัน

สภาวะดังกล่าวทั้ง 6 อย่างจะต้องมีการกระจายกระแสที่เที่ยงตรง เนื่องจากสามารถคำนวณหา
สนามในระนาบใกล้เคียงได้ถูกต้อง ถ้าวัสดุฐานรองเป็นเนื้อเดียวกัน ตามคุณสมบัติ (Isotropic)

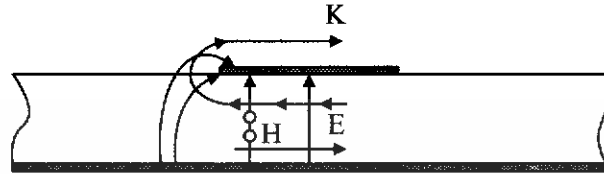
การเหมือนกัน (Homogeneous) และมีการสูญเสียค่าความนำของตัวนำของส่วนแพร่กระจายคลื่น
และพื้นกราวด์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปมีค่าเป็นอนันต์ กระแสเชิงผิวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ
สนามไฟฟ้าแนวสัมผัส \bar{M} เป็น

$$\bar{K} = \bar{a}_n \times \bar{H} \quad (2.9)$$

$$\bar{M} = \bar{E} \times \bar{a}_n \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการทั้งสองแสดงความสัมพันธ์ของสนามภายในสายอากาศแผ่นไมโครสตริปกับกระแสเชิงผิว ดังรูปที่ 2.14 เพื่อความรวดเร็วในทางปฏิบัติ จะพิจารณาเพียงกระแสด้านบนและด้านล่างของส่วนกระจายคลื่น ฟังก์ชันของศักย์ไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะทำให้ทราบส่วนที่แพร่กระจายที่เกิดจากกระแสเชิงผิวง่ายขึ้น ในขั้นแรกจะสมมติให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่จุดใดๆ ซึ่งอยู่นอกสายอากาศแผ่นไมโครสตริป สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.9 และ 2.10



รูปที่ 2.14 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และสนามที่แพร่กระจายบริเวณขอบของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

ในขั้นแรก สมมติให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่จุดใด $P(r, \theta, \phi)$ ซึ่งอยู่นอกสายอากาศแผ่นไมโครสตริป สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.11 และ 2.12

$$\vec{E}_e(r) = \frac{-j}{\omega\mu\epsilon} \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - j\omega\vec{A} \quad (2.11)$$

$$\vec{H}_e(r) = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \quad (2.12)$$

โดยที่ตัวห้อย e ที่ \vec{E} และ \vec{H} แสดงถึงสนามที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้า

- เมื่อ μ คือ เพอร์มิบิลิตี (Permeability)
 ϵ คือ เพอร์มิททิวิตี (Permittivity)
 ω คือ ความถี่เชิงมุม (Angular Frequency)
 \vec{A} คือ เวกเตอร์ศักย์แม่เหล็ก (Vector Magnetic Potential)

\vec{A} สามารถหาได้จาก

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iint_s \vec{M}(r') \frac{e^{-jk_0|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} ds' \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ k_0 คือ จำนวนของคลื่นในอวกาศ
 $\bar{M}(r')$ คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเชิงผิว ที่ห่างจากจุดกำเนิด

ในทำนองเดียวกัน โดยใช้เวกเตอร์ศักย์ไฟฟ้า (\bar{F}) สนามเนื่องจากสนามแม่เหล็ก สามารถแสดงได้ดังสมการที่

$$\bar{E}_m(r) = -\frac{1}{\epsilon} \nabla \times \bar{F} \quad (2.14)$$

$$\bar{H}_m(r) = \frac{-j}{\omega \mu \epsilon} \nabla (\nabla \cdot \bar{F}) - j\omega \bar{F} \quad (2.13)$$

โดยที่ตัวห้อย m ที่ \bar{E} และ \bar{H} แสดงสนามที่เกิดจากสนามแม่เหล็กและเวกเตอร์ศักย์ไฟฟ้า สามารถหาได้จาก

$$\bar{F} = \frac{\epsilon}{4\pi} \int_s \bar{M}(r') \frac{e^{-jk_0|\bar{r}-\bar{r}'|}}{|\bar{r}-\bar{r}'|} \quad (2.15)$$

เพื่อความสะดวกจะตัดเทอม $e^{-j\omega t}$ ซึ่งเกิดจากสนามที่เปลี่ยนแปลงตามสนามของเวลา (Time Varing Field) ดังนั้นสนามรวม คือ

$$\bar{E}(r) = \bar{E}_e + \bar{E}_m = \frac{-j\nabla(\nabla \cdot \bar{A})}{\omega \mu \epsilon} - j\omega \bar{A} - \frac{\nabla \times \bar{F}}{\epsilon} \quad (2.16)$$

$$\bar{H}(r) = \bar{H}_e + \bar{H}_m = \frac{\nabla \times \bar{A}}{\mu \epsilon} - \frac{j\nabla(\nabla \cdot \bar{F})}{\omega \mu \epsilon} - j\omega \bar{F} \quad (2.17)$$

ทั้งเวกเตอร์ศักย์ไฟฟ้าและเวกเตอร์ศักย์แม่เหล็กที่นำไปใช้แก้ปัญหาสมการ 2 สมการ คือ

$$\nabla^2 \bar{A} + \omega^2 \mu \epsilon \bar{A} = 0 \quad (2.17)$$

$$\nabla^2 \bar{F} + \omega^2 \mu \epsilon \bar{F} = 0 \quad (2.18)$$

เมื่อพิจารณาสนามที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้า สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\bar{H}(r) = \frac{\bar{E}(r)}{\eta_0} \quad (2.19)$$

$$\bar{E}(r) = -j\omega \bar{A} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสำหรับสนามกระแสที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก คือ

$$\bar{H}(r) = -j\omega\bar{F} \quad (2.21)$$

$$\bar{E}(r) = \bar{H}(r)\eta \quad (2.22)$$

เมื่อ η คือ ค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 120π

สนามระยะไกลจะพิจารณาภายใต้เงื่อนไข หรือเป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดของช่องเปิดคั้งนั้นจากสมการที่ 2.12 และ 2.19 จะได้

$$\bar{E} = \frac{-j\omega\epsilon e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \iint_s K(r') [e^{-jk_0 r' \cos\phi}] ds' \quad (2.23)$$

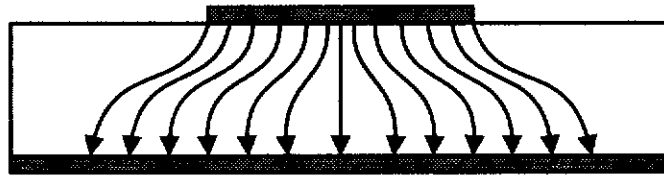
จากสมการ ที่

$$\bar{H} = \frac{-j\omega\epsilon e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \iint_s M(r') [e^{-jk_0 r' \cos\phi}] ds' \quad (2.24)$$

เมื่อ ϕ คือ มุมระหว่าง r กับ r'

2.5 การส่งผ่านคลื่นในสายส่งไมโครสตริป

ไมโครสตริปถึงแม้จะมีโครงสร้างง่าย ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น แต่การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปโดยละเอียดทางทฤษฎีนั้นเป็นสิ่งยุ่งยากมาก ทั้งนี้เป็นเพราะระบบแกนประสานที่ใช้และเงื่อนไขของขอบเขตของระบบค่อนข้างยุ่งยากเมื่อเทียบกับท่อนำคลื่นหรือสายนำสัญญาณชนิดอื่นๆ อย่างไรก็ตามได้มีผู้ทำการศึกษาทางทฤษฎีและพบว่าคลื่นที่ส่งผ่านไปตามไมโครสตริปนั้นจะใกล้เคียงกับโหมด TEM มากแต่จะไม่ใช้โหมด TEM เสียทีเดียว เพราะมีสนามในแนวแกนร่วมอยู่ด้วย จึงนิยมเรียกโหมดดังกล่าวนี้ว่าโหมดกึ่ง TEM (Quasi TEM mode) ดังรูปที่ 2.15 แสดงเส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวาง ซึ่งไมโครสตริปที่มีสนามในแนวแกนอยู่ข้างนั้นเป็นเพราะมีโครงสร้างที่มีสารไดอิเล็กตริกและอากาศอยู่ในระบบเดียวกัน และในสภาพที่มีสนามแนวแกนเกิดอยู่โหมดนั้นจะเกิดเป็นไฮบริดโหมด



รูปที่ 2.15 เส้นแรงไฟฟ้าในราบตามขวางของไมโครสตริป

การที่คลื่นส่งผ่านไปโมโหมคกึ่ง TEM ซึ่งอนุโลมให้โมโหมคกึ่ง TEM นี้ ทำให้สามารถใช้หลักการวงกระจายในการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของไมโครสตริปได้ กล่าวคือ ถ้าสามารถหาค่าอินดักแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวได้ จะนำค่าทั้งสองนี้ไปคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติได้ อย่างไรก็ตามการหาค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของไมโครสตริปจะยุ่งยากกว่าสายอากาศคู่ขนานหรือสายอากาศโคแอกเซียล เพราะไมโครสตริปมีทั้งสารตัวกลางและอากาศอยู่ในบริเวณที่พลังงานของคลื่นส่งผ่าน สำหรับการหาค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวนั้น จะไม่ถูกรบกวนจากการที่มีสารไดอิเล็กตริก

ถึงแม้ว่าการหาค่าคาปาซิแตนซ์จะยุ่งยากกว่าปกติ แต่มีวิธีทำให้ง่ายขึ้น โดยใช้วิธีหาค่าคงตัวของไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant: ϵ_{eff}) ของระบบซึ่งจะรวมผลของสารตัวกลาง และอากาศเข้าด้วยกัน และเนื่องจากสารตัวกลางทั้งหลายมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่หรือดิสเพอร์ชันเชิงวัสดุ ดังนั้น ϵ_{eff} ที่หาได้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ไปด้วย อย่างไรก็ตามจากการศึกษาทางทฤษฎี และการทดลองของผู้เชี่ยวชาญพบว่า ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 2 GHz ลงมา ค่า ϵ_{eff} จะเปลี่ยนแปลงไปจากกรณีของไฟฟ้าสถิตน้อยมาก จึงสามารถอนุโลมให้ใช้ค่า ϵ_{eff} ของไฟฟ้าสถิตได้ สำหรับช่วงความถี่สูงกว่า 2 GHz ต้องคำนึงถึงค่าดิสเพอร์ชัน โคนทำการปรับแต่งค่า ϵ_{eff} ให้เหมาะสมกับความถี่ที่จะใช้งาน

ในการหาค่า ϵ_{eff} ของกรณีไฟฟ้าสถิตนั้นจะใช้แนวความคิดของวงจรกระจายดังต่อไปนี้เมื่อคลื่นที่ส่งผ่านไปโมโหมคกึ่ง TEM อิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติ Z_c จะเขียนในรูปของค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว L และหาค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว C ได้ในรูปต่อไปนี้

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.25)$$

ในขณะที่เดียวกันกับความเร็วเฟส V_p จะเขียนได้ดังนี้

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.26 ทำให้อยู่ในรูปของ V_p กับ L และ C ได้ดังนี้

$$Z_c = V_p L = \frac{1}{V_p C} \quad (2.27)$$

ในขั้นต่อไป พิจารณาที่วัสดุฐานรองรับที่เป็นสารตัวกลางถูกคูดออกไป เหลือแต่อากาศเพียงอย่างเดียวที่โอบล้อมไมโครสตริปอยู่ ในสภาพเช่นนี้ค่าความเร็วเฟสของคลื่น TEM ที่ส่งผ่านจะเท่ากับความเร็วแสง และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวจะเปลี่ยนแปลง โดยที่ค่าอินดักแตนซ์จะไม่ถูกกระทบ ถ้าให้ค่าคาปาซิแตนซ์เปลี่ยนไปนั้นมีค่าเป็น C_0 กับความเร็วเฟสในรูปต่อไปนี้

$$c = \frac{1}{\sqrt{LC_0}} \quad (2.28)$$

ในขณะที่เดียวกันกับค่าอินดักแตนซ์ลักษณะสมบัติ จะเขียนได้ดังนี้

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C_0}} \quad (2.29)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.28) หาคด้วยสมการ (2.26) จะได้ผลดังนี้

$$\frac{C}{C_0} = \left(\frac{c}{V_p}\right)^2 \quad (2.30)$$

ค่า C/C_0 นี้ตามนิยาม โดยทั่วไปคือค่าคงตัวของสาร ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของสาร ไดอิเล็กตริก ที่โอบล้อมระบบเก็บประจุอยู่ ในกรณีที่เราพิจารณาอยู่นี้ ค่านี้จะเปรียบเสมือนค่าคงตัวไดอิเล็กตริก สัมพัทธ์ ประสิทธิภาพของระบบ ไมโครสตริปที่มีฉาบสเตรตเป็นสาร ไดอิเล็กตริก และด้านบนเป็นอากาศอยู่ นั่นคือ

$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{c}{V_p}\right)^2 \quad (2.31)$$

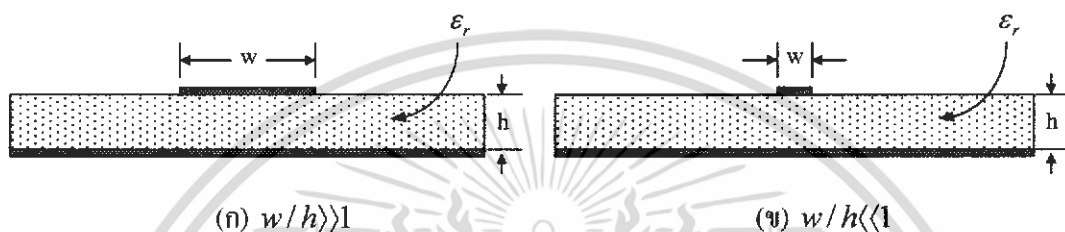
จากสมการที่ (2.27) ถึงสมการที่ (2.31) จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง Z_c , Z_o และ ϵ_{eff} ได้ดังนี้

$$Z_c = \frac{Z_o}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad \text{หรือ} \quad Z_o = Z_c \sqrt{\epsilon_{eff}} \quad \text{หรือ} \quad \epsilon_{eff} = \left(\frac{Z_o}{Z_c}\right)^2 \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ตามสมการ 2.32 นี้จะใช้ประโยชน์ในการออกแบบภายหลัง

จากผลที่ได้นี้จะเห็นได้ว่า ถ้าเราสามารถรู้ค่า ϵ_{eff} ได้ก็จะทำให้สามารถคำนวณคุณสมบัติอื่นตามมาได้ อย่างไรก็ตามค่า ϵ_{eff} จะเปลี่ยนแปลงไปตามความกว้างของไมโครสตริปเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของชั้นสเตรท ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้โดยพิจารณา 2 กรณีต่อไปนี้ กรณีแรกคือ กรณีที่ $w/h \gg 1$ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.16 (ก) ในกรณีนี้เนื่องจากเส้นแรงไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอยู่ในบริเวณที่มีแถบสตริปหรือกล่าวอีกในหนึ่งพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านอยู่ในบริเวณดังกล่าวเกือบทั้งหมด สภาพดังกล่าวจะส่งผลให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลมีค่าใกล้เคียง ϵ_r ของชั้นสเตรท หรือ $\epsilon_{eff} \rightarrow \epsilon_r$ สำหรับกรณีนี้ส่วนกรณีที่สองคือกรณีที่ $w/h \ll 1$ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.16 (ข)



รูปที่ 2.16 ไมโครสตริปที่มี $w/h \gg 1$ และ $w/h \ll 1$

ในกรณีนี้เส้นแรงไฟฟ้าจะผ่านชั้นสเตรทครึ่งหนึ่งและผ่านอากาศอีกครึ่งหนึ่ง ซึ่งจะทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลมีค่าเข้าใกล้ $(\epsilon_r + 1)/2$ จากที่อธิบายมานี้จะเห็นได้ว่า ค่า ϵ_{eff} จะเปลี่ยนแปลงตามค่า w/h และจะมีขอบบนและขอบล่างตามค่าที่ได้ดังนี้

$$\frac{1}{2}(\epsilon_r + 1) \leq \epsilon_{eff} \leq \epsilon_r \quad (2.33)$$

และเพื่อความสะดวกในการคำนวณและการออกแบบต่อไป ได้มีการเขียนค่า ϵ_{eff} ในรูปต่อไปนี้

$$\epsilon_{eff} = 1 + q(\epsilon_r - 1), \quad \frac{1}{2} \leq q \leq 1 \quad (2.34)$$

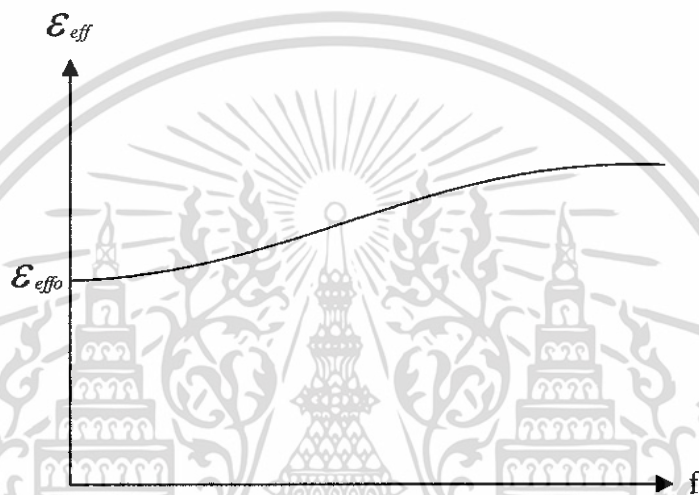
ค่า q ในสมการ (2.34) นี้ถูกเรียกว่าฟิลลิงแฟกเตอร์ (filling factor) ซึ่งหมายถึงตัวประกอบที่แสดงให้เห็นว่าชั้นสเตรทที่เป็นสารไดอิเล็กตริกจะมีผลต่อโครงสร้างไมโครสตริปนั้นมากน้อยแค่ไหน เมื่อเขียนค่า ϵ_{eff} ตามสมการ (2.34) นี้ ค่า q ก็จะเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงตามค่า w/h

ในกรณีที่ความถี่ใช้งานสูงขึ้นไปกว่า 2 GHz นั้นคิสเพอร์ชันเชิงวัสดุของชั้นสเตรทจะมีผลมากการคำนึงถึงผลกระทบของคิสเพอร์ชันในส่วนนี้จะทำได้โดยพิจารณาว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปความเร็วเฟสก็เปลี่ยนไปด้วย ซึ่งทำให้ค่า ϵ_{eff} ตามสมการ (2.31) เขียนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon_{eff}(f) = \left\{ \frac{c}{V_p(f)} \right\}^2 \quad (2.35)$$

เมื่อพิจารณาค่า $\varepsilon_{eh}(f)$ ตามสมการ (2.35) นี้จะพบว่าในช่วงความถี่ต่ำที่ $f \rightarrow 0$ นั้น ค่า $\varepsilon_{eff}(f)$ ก็จะเข้าหาค่า ε_{eff} ของกรณีไฟฟ้าสถิต และเมื่อ f มีค่าสูงขึ้นเข้าหา ∞ ค่า $\varepsilon_{eff}(f)$ ก็จะเข้าสู่หาค่า ε_r ของฉนวน เพราะความเร็วเฟสจะเข้าสู่หาความเร็วของแสงในสารไดอิเล็กตริกที่เป็นฉนวน ดังนั้นโดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงของค่า $\varepsilon_{eff}(f)$ ตามความถี่จะเป็นดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.17 ซึ่งค่า $\varepsilon_{eff}(f)$ จะสูงขึ้นตามความถี่



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล

2.6 การลดทอนกำลังสัญญาณของไมโครสตริป

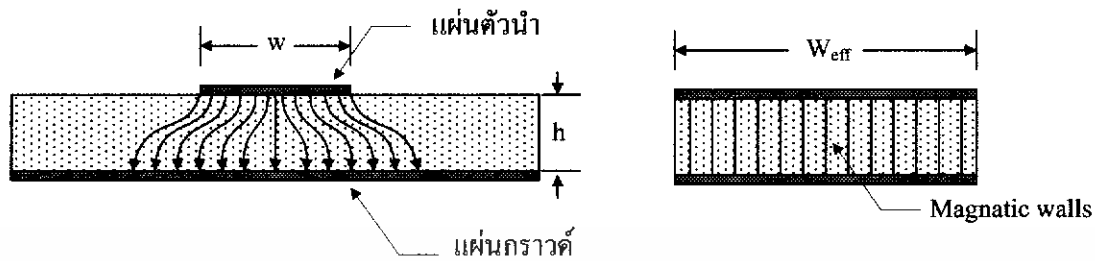
เนื่องจากไมโครสตริปทำด้วยโลหะที่ไม่สมบูรณ์แบบ และมีสายไดอิเล็กตริกคั่นในบริเวณที่คลื่นส่งผ่าน ดังนั้นการลดทอนสัญญาณจึงเกิดจากทั้งสองสาเหตุนี้ เมื่อพิจารณาว่าไมโครสตริปส่งผ่านคลื่นในโหมด TEM เราจะสามารถเขียนค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณได้ในสมการต่อไปนี้

$$\alpha = \frac{R}{2Z_c} + \frac{GZ_c}{2} \equiv \alpha_m + \alpha_d \quad (2.36)$$

โดยที่ α_m และ α_d เป็นค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณที่เกิดจากโลหะและสารไดอิเล็กตริกตามลำดับ การหาค่า α_m โดยการวิเคราะห์ให้ละเอียดตามทฤษฎีจะทำได้ลำบากมากเพราะการกระจายของสนาม โดยการวิเคราะห์ให้ละเอียดตามทฤษฎีจะทำได้ลำบากมากเพราะการกระจายของสนามแม่เหล็กบนผิวโลหะมีความสลับซับซ้อนมากเช่นเดียวกับการกระจายของสนามไฟฟ้า และจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่า w/h และความหนาของแถบสตริป t อีกด้วย ในทางปฏิบัตินั้นจึงมักใช้วิธีคิดที่ง่ายขึ้นโดยสมมุติให้คลื่น TEM ส่งผ่านอยู่ภายในบริเวณข้างใต้แถบสตริปเท่านั้นดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.18 เสร็จแล้วคำนวณการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูญเสียในเนื้อโลหะในสภาพดังกล่าว แล้วจึงนำผลที่ได้นั้น ไปคูณกับค่าคงที่ค่าหนึ่งเพื่อทำการชดเชยให้มีความถูกต้องมากขึ้น เมื่อให้ค่าคงที่ดังกล่าวเป็น K จะได้ α_m ในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.18 การส่งผ่านของคลื่น TEM แบบอุดมคติในไมโครสตริป

$$\alpha_m = \frac{KR}{2Z_c} = \frac{KR_s}{wZ_c} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}} \cdot \sqrt{\frac{K}{wZ_c}} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2 \times 5.8 \times 10^7 \sigma}} \cdot \frac{K}{wZ_c} \quad \text{Nep/m} \quad (2.37)$$

โดยที่ σ_r คือค่าคงตัวของ การนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ (relative conductivity) ที่เทียบกับทองแดง ซึ่งมี $\alpha = 5.8 \times 10^7$ S/m ค่า K นั้นจะขึ้นอยู่กับค่า w/h และความถี่ โดยที่ในกรณีที่ค่า w/h มีค่าใหญ่ มากๆ ซึ่งหมายถึงคลื่น TEM จะเข้าใกล้แบบอุดมคติที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.18 ค่า K ก็จะเข้าหา 1 ในกรณีกลับกัน คือ $w/h \ll 1$ ค่า K ก็จะเข้าหา 0.5 ในทางปฏิบัตินั้นพบว่ากรณีที่ออกแบบให้มีอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติเป็น 50Ω โดยที่ $\epsilon_r = 10$ จะได้ค่า $K \cong 0.63$

สำหรับการหาค่า α_d ก็จะอาศัยหลักการคิดค่า ϵ_{eff} ขึ้นมาใหม่ดังรายละเอียดต่อไปนี้

$$\alpha_d = \frac{GZ_c}{2} = \frac{Z_c}{2} (\omega C \tan \delta_{eff}) = \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{2cC} (\omega C \tan \delta_{eff}) = \frac{\pi f \sqrt{\epsilon_{eff}}}{c} \tan \delta_{eff} \quad \text{Nep/m} \quad (2.38)$$

โดยที่ค่า $\tan \delta_{eff}$ นั้นเปรียบเหมือนค่า $\tan \delta$ ประสิทธิภาพ ซึ่งจะสัมพันธ์กับ $\tan \delta$ ในรูปต่อไปนี้

$$\frac{\tan \delta_{eff}}{\tan \delta} = \frac{1 - (1/\epsilon_{eff})}{1 - (1/\epsilon_r)} \quad (2.39)$$

ความสัมพันธ์ตามสมการ (2.39) นี้เป็นสิ่งที่สมเหตุสมผลเพราะเมื่อแทนค่า ϵ_{eff} ด้วย 1 ซึ่งหมายถึงตัวกลางเป็นอวกาศค่า $\tan \delta_{eff}$ จะเท่ากับ 0 และเมื่อแทนค่า $\epsilon_{eff} = \epsilon_r$ ซึ่งหมายถึงตัวกลางจะเป็นสารไดอิเล็กตริกทั้งหมด ค่า $\tan \delta_{eff}$ จะเท่ากับ $\tan \delta$

เมื่อนำค่า α_m และ α_d ในสมการ (2.37) และสมการ (2.38) แทนกลับเข้าไปในสมการ (2.36) ก็จะได้ค่า α ผลรวมออกมา และเนื่องจากเรานิยมเขียนค่า α ให้มีหน่วยเป็น dB/m เขียนความถี่ที่ใช้งาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้มีหน่วยเป็น GHz และเขียนความกว้างของแถบสตริปให้มีหน่วยเป็น mm ดังนั้น α จะเขียนสมการได้ในรูปต่อไปนี้

$$\alpha = \frac{72K}{wZ_c} \sqrt{\frac{f}{\sigma_r} + 91f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \cdot \frac{1 - (1/\epsilon_{eff})}{1 - (1/\epsilon_r)} \tan \delta \quad \text{dB/m} \quad (2.40)$$

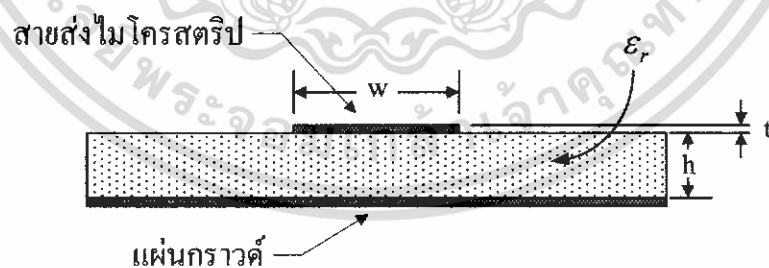
จากผลที่ได้นี้จะเห็นได้ว่า α_m แปรตาม \sqrt{f} ในขณะที่ α_d แปรตาม f ซึ่งทำให้ดูเหมือนว่า α_d จะมีค่าสูงกว่า α_m อย่างไรก็ตามในระยะหลังนี้ได้มีการพัฒนาซบสเตรทที่มีคุณสมบัติดีขึ้นคือมีค่า $\tan \delta$ ต่ำกว่า ทำให้ในช่วงความถี่ที่ $f < 10$ GHz ค่า α_m จะใหญ่กว่าค่า α_d และเป็นค่าสูญเสียหลักของไมโครสตริป

2.7 อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input impedance)

อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศใดๆ จะเป็นอิมพีแดนซ์ที่ขั้วสายอากาศนั้นๆ ส่วนอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม จะขึ้นอยู่กับ การป้อนสัญญาณของสายอากาศกล่าวคือ อินพุตอิมพีแดนซ์ของการป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริป และแบบโคแอกเซียล ที่จะมีสมการในการคำนวณที่แตกต่างกัน การหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์จะต้องกำหนดขนาดความกว้างของสัญญาณให้เหมาะสมเสียก่อน

2.7.1 อินพุตอิมพีแดนซ์ของการป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริป

การป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริป ความกว้างของสายส่งไมโครสตริป (w) จะเป็นตัวที่กำหนดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งวิธีการป้อนจะใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบ



รูปที่ 2.19 โครงสร้างทางกายภาพของสายส่งไมโครสตริป

แถบตัวนำกว้าง w หนา t ถูกวางอยู่บนสารซบสเตรทไดอิเล็กตริก ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์เป็น ϵ_r สารซบสเตรทที่ใช้มีอยู่หลายชนิด เช่น อลูมินาไดออกไซด์ ซึ่งมีค่า ϵ_r แปรเปลี่ยนตั้งแต่ 2 ไปจนถึง 12 ซ้ำบนสารไดอิเล็กตริกจะเป็นอากาศที่มีค่า $\epsilon_r = 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายส่งแบบไมโครสตริปถูกใช้เป็นส่วนประกอบของวงจรรวมในระบบไมโครเวฟ เนื่องจากราคาถูกและอุปกรณ์พิมพ์แบบพาสซีฟ สามารถนำไปสร้างอยู่บนชั้นเดียวกันได้จําอุปกรณ์แอคทีฟ และจําพวกชิพต่างๆ ก็สามารถเชื่อมต่อกับแถบโลหะได้โดยตรง ค่าอิมพีแดนซ์และคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปที่มีค่าความกว้าง (w) สูง (h) และโลหะมีความหนาแน่นมาก ($t/w \leq 0.005$)

กรณี $w/h \leq 1$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln\left(\frac{8h}{w'} + 0.25 \frac{w'}{h}\right) \quad (2.41)$$

$w/h \geq 1$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e}} \left[\frac{w'}{h} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{w'}{h} + 1.444\right) \right]^{-1} \quad (2.42)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot F(w/h) - C \quad (2.43)$$

เมื่อ

$$C = \frac{\epsilon_r - 1}{4.6} \cdot \frac{t/h}{\sqrt{w/h}} \quad (2.44)$$

ที่ $w/h \leq 1$

$$F(w/h) = \left(1 + \frac{12h}{w}\right)^{\frac{1}{2}} + 0.04 \left(1 - \frac{w}{h}\right)^2 \quad (2.45)$$

ที่ $w/h \geq 1$

$$F(w/h) = \left(1 + \frac{12h}{w}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.46)$$

เมื่อ $w/h \leq 2$

$$w/h = \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 2} \quad (2.47)$$

เมื่อ $w/h \geq 2$

$$w/h = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \cdot \left(\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right) \right] \quad (2.48)$$

$$A = \frac{Z_0}{60} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_r - 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)} \quad (2.49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.50)$$

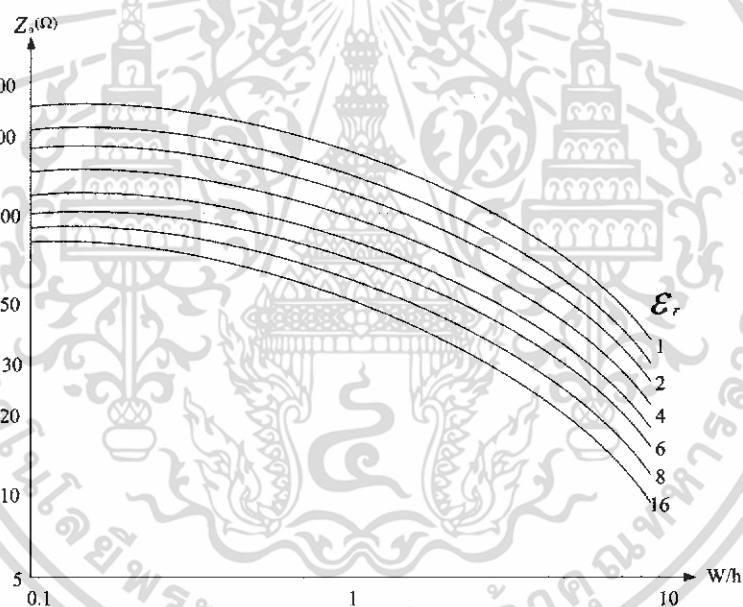
เมื่อแถบ w มีความหนา ค่า w'/h ในสูตรจะถูกแทนดังนี้

เมื่อ $w/h \geq \pi/2$

$$\frac{w'}{h} = \frac{w}{h} + \frac{1.25}{\pi} \cdot \frac{t}{h} \cdot \left(1 + \ln \frac{2h}{t}\right) \quad (2.51)$$

เมื่อ $w/h \leq \pi/2$

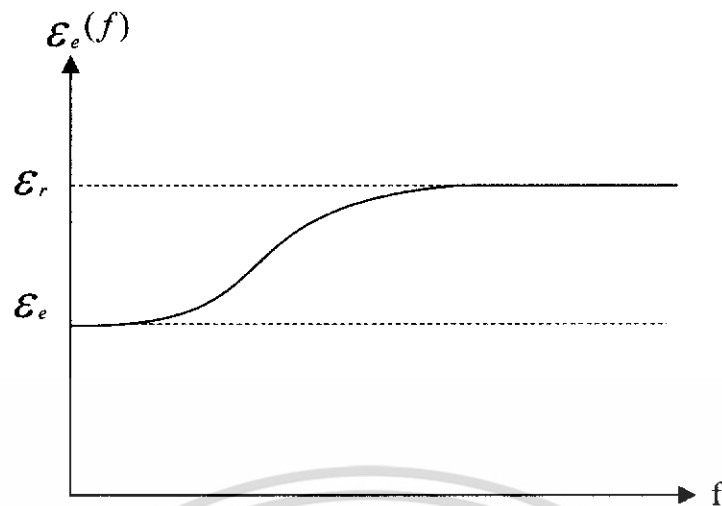
$$\frac{w'}{h} = \frac{w}{h} + \frac{1.25}{\pi} \cdot \frac{t}{h} \cdot \left(1 + \ln \frac{4\pi w}{t}\right) \quad (2.52)$$



รูปที่ 2.20 อัตราส่วนค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ต่อค่าคงที่ลักษณะของฉนวน

สายส่งไมโครสตริปจะมีคุณสมบัติ dispersive โดยธรรมชาติ นั่นคือการที่ ϵ_e แปรค่าตามความถี่ ดังรูปที่ 2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 คุณสมบัติดิสเพอร์ชัน $\epsilon_e(f)$ ในไมโครสตริป

โครงสร้างของสายส่งไมโครสตริปเป็นลักษณะกึ่ง TEM ดังนั้นสมการพื้นฐานเกี่ยวกับความยาวคลื่นในสายส่งไมโครสตริป คือ

$$\lambda_g = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\epsilon_e}} \quad (2.53)$$

เมื่อ

λ_g คือ ความยาวคลื่นในไมโครสตริป
 c คือ ความเร็วแสง
 ϵ_e คือ effective dielectric constant
 f คือ ความถี่

ความเร็วเฟสในสายส่งไมโครสตริป คือ

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.54)$$

การสูญเสียทางไฟฟ้าของสายส่งไมโครสตริป คือการสูญเสียในตัวนำ และสูญเสียในสารไดอิเล็กตริก ตามปกติแล้วค่าการสูญเสียในตัวนำมีค่าเท่าใด ขึ้นอยู่กับสารนั้นๆ เช่น อลูมิเนียม ที่ความถี่สูง ค่าการสูญเสียในสารไดอิเล็กตริก จะมีค่ามากกว่าค่าการสูญเสียในตัวนำ

2.7.2 อินพุตอิมพีแดนซ์ของการป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียล

อินพุตอิมพีแดนซ์ของการป้อนแบบนี้ ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ต้องการจะขึ้นอยู่กับจุดที่ป้อนสัญญาณ (p_0) โดยสมการในการคำนวณหาเป็นดังนี้ (Bahl et.al,1982)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = \frac{V^2}{2P_T} = \frac{h^2 J_n^2(kp_0)}{2P_T} \quad (2.55)$$

เมื่อ

P_T คือ กำลังการสูญเสียรวม (W)

P_0 คือ จุดป้อนสัญญาณ (m)

สำหรับ P_T ประกอบไปด้วย กำลังการแพร่กระจายคลื่น (P_γ) กำลังการสูญเสียจากแผ่นตัวนำ (P_0) และกำลังการสูญเสียจากวัสดุที่ไม่เป็นสื่อทางไฟฟ้า (P_d) ซึ่งสามารถเขียนสมการของการสูญเสียรวมได้ดังนี้

$$P_T = P_\gamma + P_0 + P_d \quad (2.56)$$

กำลังการแพร่กระจายคลื่นสามารถคำนวณได้จาก

$$P_\gamma = \frac{(hE_0 J_n(k_a) a k_0)^2}{1920} \cdot I_1 \quad (2.57)$$

$$I_1 = \int_0^\pi \left[\frac{[J_{n+1}(k_0 a \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a \sin \theta)]^2 + \cos^2 \theta [J_{n+1}(k_0 a \sin \theta) + J_{n-1}(k_0 a \sin \theta)]^2}{2} \right] \cdot \sin \theta d\theta \quad (2.58)$$

สำหรับค่ากำลังการสูญเสียของแผ่นตัวนำนั้น จะเกิดจากแผ่นตัวนำแบบวงกลมหรือแผ่นตัวนำแบบสี่เหลี่ยมกับแผ่นกราวด์ ซึ่งมีสมการดังนี้

$$P_c = 1.68 \times 10^{-10} f^{-3/2} \quad (2.59)$$

เมื่อ

f คือ ความถี่ (GHz)

ส่วนค่ากำลังการสูญเสียที่เป็นวัสดุที่ไม่เป็นสื่อทางไฟฟ้า จะมีสมการดังนี้

$$P_d = 0.805 \times 10^{-4} \cdot \frac{h \cdot \tan \delta}{f} \quad (2.60)$$

โดยที่ $\tan \delta$ เป็นค่า Loss Tangent ของสาร ไดอิเล็กทริก ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กทริกนั้น มีการสูญเสียเนื่องมาจากการนำกระแสเล็กน้อยเพียงใด โดยที่ยิ่งต่ำก็ยิ่งดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นก็นำเอาสมการที่ 2.57 – 2.60 แทนลงในสมการที่ 2.56 เพื่อหาจุดบ่อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปแบบโคแอกเซียลในสมการที่ 2.55

2.8 โพลาริเซชัน (Polarization)

โพลาริเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายเป็นรูปซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไปในทิศทาง และขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลาสำหรับโพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง จะเป็นโพลาริเซชันที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศนั้น ถ้าเป็นสายอากาศส่ง หรือถ้าเป็นสายอากาศทางด้านรับจะมีโพลาริเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้นมาแทน ในทิศทางที่สายอากาศมีอัตราการขยายมากที่สุด ดังนั้น โพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางที่แตกต่างกัน ก็จะแตกต่างกันออกไปด้วย

ในการแบ่งชนิดของโพลาริเซชันอาจแบ่งตามลักษณะการหมุนของยอดเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า สามารถแบ่งได้เป็นแบบ

1. โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น (Linear Polarization) มีเวกเตอร์ที่แสดงสนามไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา ณ จุดใดๆ ในอวกาศเป็นเส้นตรงเสมอ เช่น โพลาริเซชันแบบเวอร์ติคัล (Vertical) และฮอริซอนทอล (Horizontal)
2. โพลาริเซชันแบบวงกลม (Circularly Polarization) มีเวกเตอร์ที่แสดงสนามไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา ณ จุดใดๆ ในอวกาศหมุนเป็นรูปวงกลม
3. โพลาริเซชันแบบวงรี (Elliptically Polarization) มีเวกเตอร์ที่แสดงสนามไฟฟ้าที่แปรผันตามเวลา ณ จุดใดๆ ในอวกาศหมุนเป็นรูปแบบวงรี

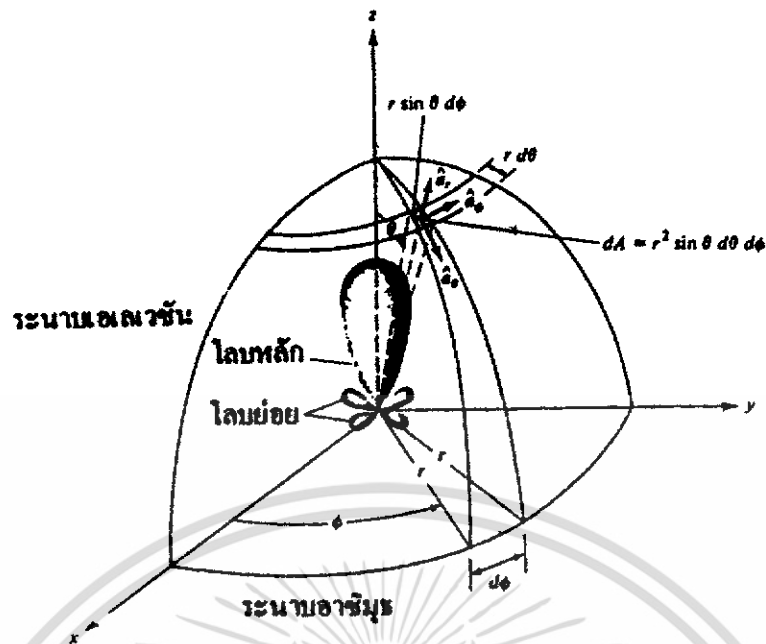
2.9 พารามิเตอร์ของสายอากาศ (Antenna Parameter)

2.9.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสเปซโคออดิเนต (Space Coordinate) ส่วนใหญ่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนี้มักจะคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far Field)

การอธิบายคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่างๆดังต่อไปนี้ คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity) ความเข้มของสนาม (Field Strength) เฟส (Phase) หรือโพลาริเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่

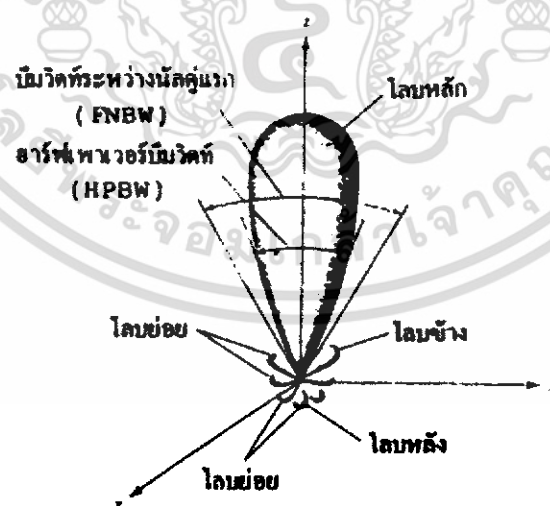
รูปที่ 2.21 แสดงระบบโคออดิเนตที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น เพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่า แบบรูปกำลังงาน (Power Pattern) ของสายอากาศและกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆ ที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่า แบบรูปสนาม (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น



รูปที่ 2.22 แสดงระบบ โคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

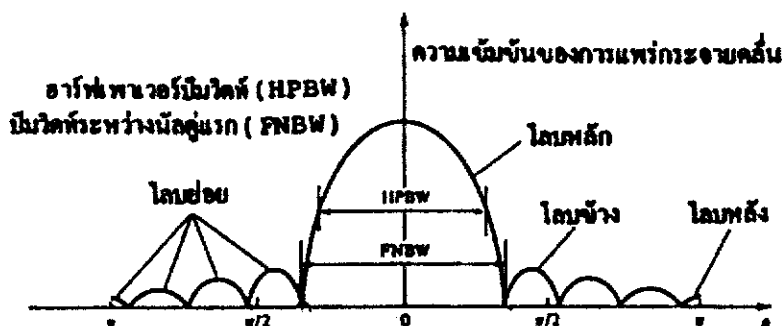
2.9.2 โลบของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)

โลบของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe) เป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ รูป 2.22 แสดงแบบรูปแบบโพลาร์ (Polar Pattern) แบบสามมิติ ซึ่งแบ่งเป็น โลบต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 2.23 โลบต่างๆและเบีมวิทของแบบรูปสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 แบบรูปในแบบเชิงเส้น

โลบหลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นโลบของการแผ่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแผ่กระจายคลื่นแรงที่สุด ตามรูป 2.23 มีโลบหลักอยู่ในทิศทาง $\theta=0$ สำหรับสายอากาศบางชนิด อาจมีโลบหลักมากกว่าหนึ่งโลบ เช่น สายอากาศแยก빔 (Split Beam Antenna)

โลบย่อย (Minor Lobe) ได้แก่โลบอื่นๆนอกเหนือไปจากโลบหลัก

โลบข้างหรือไซด์โลบ (Side Lobe) เป็นโลบย่อยที่อยู่ติดกับโลบหลัก และอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับโลบหลัก

โลบหลัง (Back Lobe) เป็นโลบย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับโลบหลัก ปกติแล้วโลบย่อยจะเกิดจากการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ

ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่คิดจะต้องกำจัดโลบเหล่านี้ให้น้อยที่สุด ระดับของโลบย่อยมักแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในโลบที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นของพลังงานในโลบหลัก ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนของไซด์โลบ (Side Lobe Ratio) หรือระดับของไซด์โลบ (Side Lobe Level : SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของไซด์โลบน้อยกว่า -20 dB

2.9.3 ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)

คำจำกัดความของคำว่าความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางที่กำหนดให้คือ กำลังงานที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เกี่ยวกับสนามระยะไกล ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น และผลจากการกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.61)$$

เมื่อ U = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W / หน่วยมุมตัน)

W_{rad} = ความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น (W / m²)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศ ในระยะไกลได้คือ

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2 \cdot \eta} \cdot \left[|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right] \quad (2.62)$$

เมื่อ E_θ, E_ϕ = ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล
 N = อินทริเนสิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้นแบบรูปของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึงความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นได้เช่นกัน กำลังงานทั้งหมดนี้ หาได้โดยอินทิเกรตความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นตาม (2.61) และ (2.62) ตลอดมุมตัน 4π ทั้งหมดซึ่งจะได้

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.63)$$

2.9.4 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในทิศทางต่างๆ เทียบกับสายอากาศไอโซทรอปิก ซึ่งวัดในหน่วยของ dBi เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_0(\text{dBi}) = 10 \cdot \log \left(\frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} \right) \approx 10 \cdot \log \left(\frac{4\pi (180/\pi)^2}{\theta_E \theta_H} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{41253}{\theta_E \theta_H} \right) \quad (2.64)$$

เมื่อ U_{\max} = ค่าสูงสุดของความเข้มการแพร่กระจายคลื่น
 P_{rad} = กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (2.65)$$

2.9.5 บีมวิทท์ (Beamwidth)

บีมวิทท์ คือ จัดเป็นการวัดความกว้างของลำคลื่น เพื่ออธิบายถึงโคเร็คทีวิตีของสายอากาศได้ดี โดยกำหนดให้มีหน่วยเป็นมุมที่คิดจากกรณีดังนี้

- ที่จุดซึ่งกำลังงานในการแพร่คลื่นลดลงเหลือครึ่งหนึ่งจากค่าสูงสุด
- หรือจุดที่ค่าความเข้มสนามเหลือ $1/\sqrt{2}$ หรือ 0.707 เท่าของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด
- หรือจุด 3 dB บนรูปแบบการแพร่คลื่น

จะได้สมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta_{BH} = 2 \cos^{-1} \left(\frac{1}{2 \left(1 + \frac{k_0 w}{2} \right)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.66)$$

$$\theta_{BE} = 2 \cos^{-1} \left(\frac{7.03}{(3k_0^2 L^2 + k_0 h^2)} \right)^{-1} \quad (2.67)$$

เมื่อ

θ_{BH} คือ มุมที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของบีมหลักในแนวระนาบของสนามแม่เหล็ก

θ_{BE} คือ มุมที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของบีมหลักในแนวระนาบของสนามไฟฟ้า

บีมวัดของสายอากาศไมโครสตริปตัวหนึ่งสามารถเพิ่มได้ โดยเลือกขนาดของสายอากาศที่เล็กลง ดังนั้นขนาดความกว้างของสายอากาศ และความยาวของสายอากาศจึงเล็กลงด้วย สำหรับที่ความถี่เรโซแนนซ์อาจจะต้องเลือกใหม่ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันความกว้างของบีมหลักจะต้องเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นก็เป็นผลทำให้อัตราการขยายลดลงแต่จะไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของสายอากาศแต่อย่างใด

2.9.6 แบนด์วิดท์ (Bandwidth : BW)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศถูกกำหนดให้เป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศในมาตรฐานที่กำหนดให้อาจคิดว่าเป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพของการแพร่พลังงาน อัตราการขยาย อิมพีแดนซ์ รูปแบบการแพร่พลังงาน ความกว้างลำ (Beamwidth) การโพลาไรซ์เซชัน และระดับพลู้อย (Side Lobe) เป็นต้น ให้อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ในช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติที่ความถี่ที่ออกแบบไว้ จนทำให้คุณสมบัติเหล่านั้นผิดไปจากข้อกำหนด หรือมาตรฐาน สำหรับสายอากาศแบนด์กว้าง มักจะคิดเป็นอัตราส่วนของความถี่ใช้งานได้ทางด้านสูงต่อความถี่ที่ใช้งานทางด้านต่ำ แบนด์วิดท์มักจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของความถี่ (ความถี่ด้านสูงลบด้วยความถี่ด้านต่ำ)หารด้วยความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้นดังสมการ

$$\%BW = \left(\frac{f_H - f_L}{f_r} \right) \times 100 \quad (2.68)$$

เมื่อ

BW คือ แบนด์วิดท์ของสายอากาศ

f_H คือ ความถี่ที่ใช้งานได้ทางด้านสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

f_L คือ ความถี่ที่ใช้งานได้ทางด้านต่ำ
 f_r คือ ความถี่กลางของแบนด์วิดท์

ข้อจำกัดเรื่องแบนด์วิดท์ ก็เป็นข้อเสียอย่างหนึ่งของสายอากาศไมโครสตริปเพราะมีค่าประมาณ 5-10 เปอร์เซนต์ แต่ก็สามารถที่จะเพิ่มแบนด์วิดท์ได้โดยเพิ่มความเป็นตัวนำให้กับสายอากาศอาจจะทำเป็นช่องในตัวของสายอากาศ หรือเพิ่มอุปกรณ์ที่เป็นตัวนำเข้าไปเพื่อทำให้การแผ่รังสีของตัวการแพร่กระจายคลื่นกับสายนำสัญญาณดีขึ้น

2.9.7 อัตราขยาย (Gain)

เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากอีกตัวหนึ่งของสายอากาศ อัตราขยายของสายอากาศจะขึ้นอยู่กับสภาพเจาะจงทิศทาง และค่าประสิทธิภาพของสายอากาศ แต่สภาพเจาะจงทิศทางเป็นค่าที่อธิบายถึงคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น และถ้าค่าประสิทธิภาพไม่ถึง 100% อัตราขยายจะน้อยกว่าสภาพเจาะจงทิศทาง คำนึง จะได้ความสัมพันธ์ที่สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$G = \eta D \quad (2.69)$$

เมื่อ

G คือ อัตราการขยาย

η คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศ

D คือ สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ

2.9.8 ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริป ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่างอัตราขยายของสายอากาศต่อไครเรคิตีวีตี้ จะได้ค่าประสิทธิภาพดังนี้คือ

$$\eta = \frac{G}{D} \times 100\% \quad (2.70)$$

บทที่ 3

การออกแบบและการสร้าง

3.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปนี้ได้ออกแบบใช้งานที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz โดยใช้สารแบบอีพ็อกซี (Epoxy) และ ดรอยด์ (Droid) เป็นสารตัวกลาง ซึ่งอีพ็อกซีมีค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารตัวกลางของวัสดุที่นำมาทำแผ่นรองรับ (ϵ_r) มีค่าเท่ากับ 4.4 และความหนาแน่นของสารที่เป็นสารตัวกลาง (h) มีค่าประมาณ 1.6 มิลลิเมตร โดยในการเชื่อมต่อสัญญาณให้กับแผ่นแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป จะใช้การป้อนสัญญาณแบบใช้สายส่งไมโครสตริป (Strip Line)

3.1.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมจะคำนวณหาความกว้าง (w) และความยาว (L) ของแผ่นแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งแสดงแผนผังการทำงานดังรูปที่ 3.1 โดยสิ่งที่สำคัญในการออกแบบคือ

- ค่าเพอร์มิตติวิตีของสารตัวกลาง (ϵ_r)
- ความหนาของสารตัวกลาง (h)

คำนวณหาความกว้างจะอาศัยสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$\lambda_0 = \frac{C_0}{f_0} \quad (3.1)$$

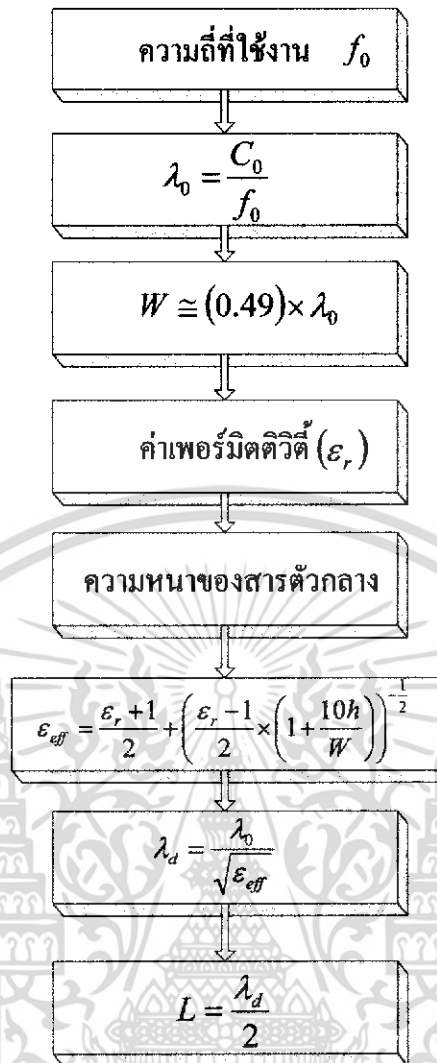
- เมื่อ λ_0 คือ ความยาวคลื่นที่ใช้งาน (เซนติเมตร)
 C_0 คือ ความเร็วคลื่นในสุญญากาศ (3×10^8 เมตร/วินาที)
 f_0 คือ ความถี่คลื่นใช้งาน (GHz)

แทนค่า λ_0 ลงสมการที่ 3.2

$$W = \frac{\lambda_0}{2} \quad (3.2)$$

- เมื่อ W คือ ความกว้างของส่วนการแพร่กระจายคลื่น (เซนติเมตร)
 λ_0 คือ ความยาวคลื่นที่ใช้งาน (เซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

แต่ในการออกแบบจริงๆ ค่าของ W จะเท่ากับ

$$W \cong (0.49) \times \lambda_0 \quad (3.3)$$

เมื่อทราบค่าเพอร์มิตติวิตีของสารตัวกลาง (ϵ_r) และความหนาของสารตัวกลาง (h) นำมาหาค่าความยาวของแผ่นการแพร่กระจายคลื่น (L) โดยอาศัยสมการที่ 3.4 ถึง 3.6

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \left(1 + \frac{10h}{W} \right) \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ ϵ_{eff} คือ ค่าคงที่ตัวประสิทธิผล
 ϵ_r คือ ค่าเพอร์มิตติวิตีของสารตัวกลาง
 h คือ ความหนาของสารตัวกลาง (เซนติเมตร)
 W คือ ความกว้างของส่วนการแพร่กระจายคลื่น (เซนติเมตร)

แทนค่า ϵ_{eff} ลงในสมการที่ 3.5

$$\lambda_d = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.5)$$

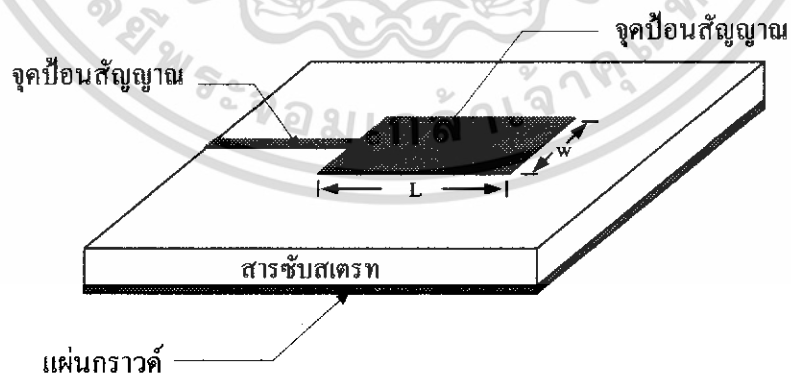
- เมื่อ λ_d คือ ความยาวคลื่นของสารที่เป็นตัวกลาง (เซนติเมตร)
 ϵ_{eff} คือ ค่าคงที่ตัวประสิทธิผล

แทนค่า λ_d ลงในสมการที่ 3.5

$$L = \frac{\lambda_d}{2} \quad (3.6)$$

- เมื่อ L คือ ความยาวของสายอากาศ (เซนติเมตร)
 λ_d คือ ความยาวคลื่นของสารที่เป็นตัวกลาง (เซนติเมตร)

ซึ่งลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมจะเป็นดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การออกแบบหาจุดป้อนสัญญาณด้วยสายส่งไมโครสตริป

การออกแบบจะต้องคำนึงถึงตำแหน่งของจุดป้อนสัญญาณที่เหมาะสม เพื่อให้จะมีอิมพีแดนซ์เท่ากับระบบที่ใช้งาน โดยในการออกแบบจะออกแบบให้สายอากาศไมโครสตริปมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50Ω ดังนั้นในการคำนวณหาตำแหน่งของจุดป้อน สัญญาณของตัวสายอากาศสามารถหาได้จากสมการที่ 3.7

$$Z(in) = Rin(y=0) \cos^2 \left(\frac{\pi}{L} y_0 \right) \quad (3.7)$$

โดยที่ y_0 คือ ระยะห่างจากขอบแผ่นตัวนำถึงขอบของช่องว่าง (Slot)

R_m คือ ค่าความต้านทานด้านอินพุตที่แมทซ์กับกับ y_0

และหาได้จากสมการที่ 3.7

$$R_m = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \quad (3.8)$$

โดยที่

G_1 และ G_{12} คือ ค่าความนำ

$$G_1 = \frac{W}{120\lambda} \left[1 - \frac{1}{24} (k_0 h)^2 \right] \quad (3.9)$$

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin \left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta \right)}{\cos \theta} \right] J_0(k_0 L \sin \theta) \sin^3 \theta d\theta \quad (3.10)$$

นำค่า W, L และ k_0 แทนลงในสมการที่ 3.9 และ 3.10 โดยที่ k_0 หาได้จากสมการที่ 3.11

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.11)$$

$$G_1 = 1.006 \times 10^{-3} \quad \text{ซีเมนต์}$$

$$G_{12} = 5.793 \times 10^{-4} \quad \text{ซีเมนต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนเครื่องหมายจะเป็นบวกหรือเป็นลบนั้นขึ้นอยู่กับ Dominate Mode ว่าเป็นคี่หรือคู่ ถ้าเป็นคี่จะได้เป็นเครื่องหมาย (+) แต่ถ้าเป็นคู่จะได้เครื่องหมายเป็นลบ (-) นำค่า G_1 และ G_{12} แทนลงในสมการที่ 3.8

$$R_{in} = 315.428 \ \Omega$$

3.1.3 การออกแบบหาค่าความกว้างของสายส่ง (Strip Line)

จะใช้แถบตัวนำเป็นทองแดงร่วมกับสาร ไดอิเล็กตริกชั้นสเตรท (Substrate) โดยแถบทองแดงที่ใช้จะวางตัวอยู่บนสาร ไดอิเล็กตริกชั้นสเตรท (Substrate) และพิจารณาหาค่าความกว้างของสายส่งจากค่าอิมพีแดนซ์

คุณลักษณะ (Z_0)

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \ln \left[\frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right] \quad ; \frac{W_0}{h} \leq 1 \quad (3.12)$$

และ

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \left[\frac{W_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1.444 \right) \right] \quad ; \frac{W_0}{h} > 1 \quad (3.13)$$

โดยที่

W_0 คือ ค่าความกว้างของสายส่ง (Strip Line)

ϵ_{reff} คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลสัมพัทธ์

และหาได้จากสมการที่ 3.14

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.14)$$

แทนค่า W , ϵ_r และ h ลงในสมการที่ 3.14

$$\epsilon_{\text{reff}} = 3.248 \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบและคำนวณสายอากาศไมโครสตริป 2 ความถี่

ในส่วนนี้จะเป็นการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่สามารถใช้งานได้ 2 ความถี่ โดยในโครงการนี้ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับ WLAN โดยจะรองรับย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz

3.2.1 การออกแบบหาความกว้างและความยาวของสายส่งไมโครสตริป 2 ความถี่

3.2.1.1 การคำนวณหาความกว้างของสายส่ง (Strip Line)

จากสมการ (3.15) นำไปแทนค่าในสมการที่ (3.13) โดยกำหนดค่าให้ $Z_0 = 50\Omega$ และ $h = 1.6$ มิลลิเมตร จะได้

$$W_0 = 2.8$$

ดังนั้น ค่าความกว้างสายส่ง (Strip Line) มีค่าเท่ากับ 2.8 มิลลิเมตร

3.2.1.2 การคำนวณหาความยาวของสายส่ง (Strip Line)

$$L_0 = \frac{\lambda_g}{2} \quad (3.16)$$

ซึ่ง λ_g สามารถหาค่าได้จาก

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (3.17)$$

เมื่อ λ_0 คือ ความยาวคลื่นของสายอากาศ

ϵ_{reff} คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิภาพลดสัมพัทธ์

- ทำการหาค่า λ_g ที่ความถี่ 2.4 GHz

$$\lambda_{g(2.4\text{GHz})} = \frac{0.125}{\sqrt{3.248}} = 69.35 \text{ มิลลิเมตร}$$

นำค่า λ_g ไปแทนค่าลงในสมการ (3.16) เพื่อหาค่า L_0

$$L_{0(2.4\text{GHz})} = \frac{\lambda_g}{2} = \frac{69.35}{2} = 34.67 \text{ มิลลิเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการหาค่า λ_g ที่ความถี่ 5.2 GHz

$$\lambda_{g(5.2GHz)} = \frac{0.0571}{\sqrt{3.248}} = 31.68 \text{ มิลลิเมตร}$$

นำค่า λ_g ไปแทนค่าลงในสมการ (3.16) เพื่อหาค่า L_0

$$L_{0(5.2GHz)} = \frac{\lambda_g}{2} = \frac{31.68}{2} = 15.841 \text{ มิลลิเมตร}$$

ทำการหาค่าประมาณความยาวสายส่ง (Strip Line) ทั้งสองโดยจะได้

$$L_0 = \frac{L_{0(2.4GHz)} + L_{0(5.2GHz)}}{2} = \frac{34.67 + 15.841}{2} = 26 \text{ มิลลิเมตร}$$

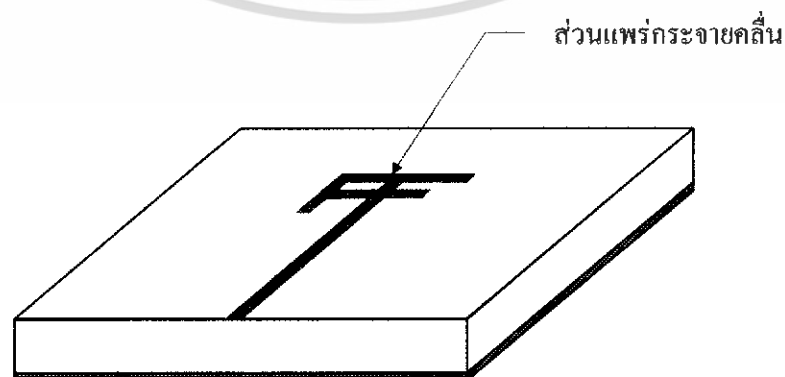
ดังนั้นจะได้ความยาวสายส่งมีค่า 26 มิลลิเมตร

3.2.2 การออกแบบส่วนแพร่กระจายคลื่น

ส่วนการแพร่กระจายคลื่น โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน

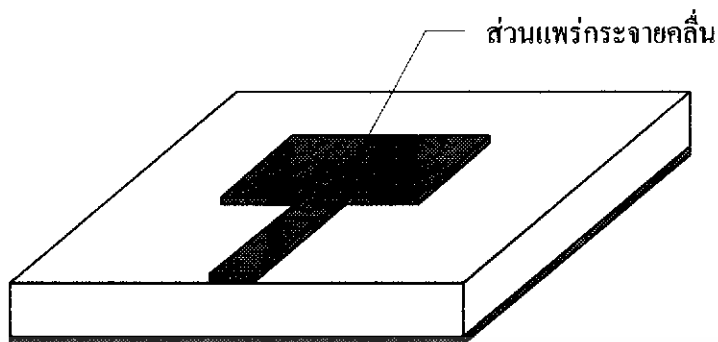
- ด้านที่ตอบสนองย่านความถี่ 2.4 GHz
- ด้านที่ตอบสนองย่านความถี่ 5.2 GHz

โดยการออกแบบจะใช้การพิจารณาค่าความยาวคลื่นในแต่ละความถี่ใช้งานมาเป็นตัวพิจารณาในการออกแบบ โดยส่วนใหญ่จะพิจารณาในช่วงความยาวคลื่น $\lambda/4$ ของความถี่ที่ต้องการ โดยในการออกแบบการแพร่กระจายคลื่นสามารถออกแบบได้หลายวิธี เช่น การแยกส่วนแพร่กระจายคลื่นออกเป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 3.3 และการรวมส่วนแพร่กระจายคลื่นเป็นส่วนเดียว ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ส่วนแพร่กระจายคลื่นแยกเป็น 2 ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ส่วนแพร่กระจายคลื่นรวมเป็นส่วนเดียว

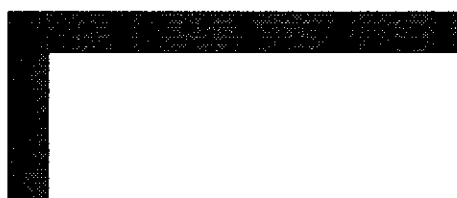
3.2.2.1 การออกแบบส่วนแพร่กระจายที่มีส่วนแพร่กระจายคลื่นแยกเป็น 2 ส่วน

ในวิธีนี้ การออกแบบจะพิจารณาความยาวคลื่น $\lambda/4$ หรือ 25 % ของความยาวคลื่น แล้วทำการคำนวณหาความยาวคลื่นที่ $\lambda/4$ ทั้งสองข้างความถี่ใช้งาน แล้วนำมาพิจารณาออกแบบสร้างเป็นส่วนแพร่กระจายคลื่น โดยจะทำการออกแบบให้ทั้งสองส่วนมีความสัมพันธ์กัน โดยจะทำการออกแบบส่วนแพร่กระจายคลื่นนี้ให้มีลักษณะเป็นรูปตัว L เพื่อที่จะได้นำส่วนแพร่กระจายคลื่นทั้ง 2 ความถี่ มารวมกัน โดยในการออกแบบจะมีรูปร่าง ดังนี้



รูปที่ 3.5 แสดงส่วนการแพร่กระจายคลื่นรูปตัว L

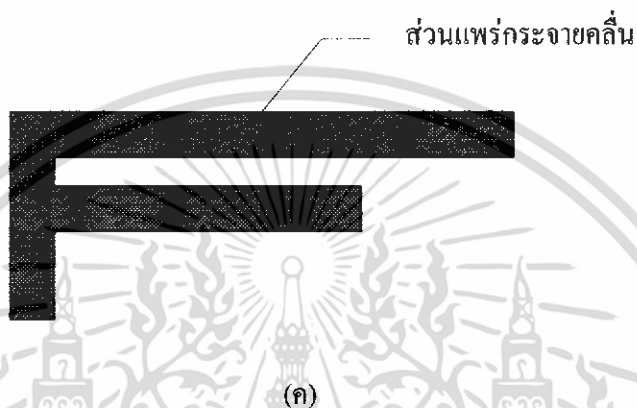
โดยในการออกแบบด้วยวิธีนี้ความยาวของผลรวมระหว่าง h และ t จะต้องมีค่ายาวเท่ากันหรือใกล้เคียงกับ 25 % ของความยาวคลื่น หรือ $\lambda/4$ ของความถี่ที่ใช้งาน และในการหาค่าความสูง h นั้นจะต้องมีค่าน้อยกว่า 10 % ของความยาวคลื่นที่ใช้งานเมื่อได้ส่วนแพร่กระจายคลื่นทั้ง 2 ส่วนนี้แล้ว ก็จะทำการนำสองด้านนี้มาต่อกันดังรูป



(ก)



(ข)



รูปที่ 3.6 แสดงส่วนการแพร่กระจายคลื่นรูปตัว L แยกเป็น 2 ส่วน

โดยรูป (ก) จะเป็นการออกแบบที่ความถี่ที่ใช้งานในช่วงความถี่ต่ำ จากรูป (ข) จะเป็นการออกแบบที่ความถี่ใช้งานในช่วงความถี่สูง และรูป (ค) เป็นการนำส่วนการแพร่กระจายคลื่นทั้ง 2 ส่วนรวมเข้าด้วยกัน

เมื่อพิจารณาจากรูปเปรียบเทียบระหว่างรูป (ก) และ (ข) จะเห็นว่าเมื่อความถี่ที่ใช้งานมีค่าสูงขึ้นทำให้ความยาวคลื่นสั้นลง ทำให้ขนาดของส่วนแพร่กระจายคลื่นที่ออกแบบนั้น มีขนาดเล็กลงด้วยเช่นกัน

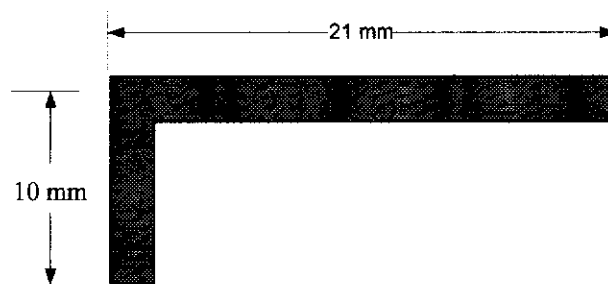
- ที่ความถี่ 2.4 GHz

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{2.4 \times 10^9} = 0.125 \quad \text{เมตร}$$

ที่ $\frac{\lambda}{4}$

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{0.125}{4} = 31 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



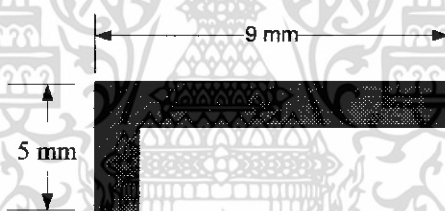
รูปที่ 3.7 ส่วนการแพร่กระจายคลื่น 2.4 GHz

- ที่ความถี่ 5.2 GHz

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{5.2 \times 10^9} = 0.0571 \text{ เมตร}$$

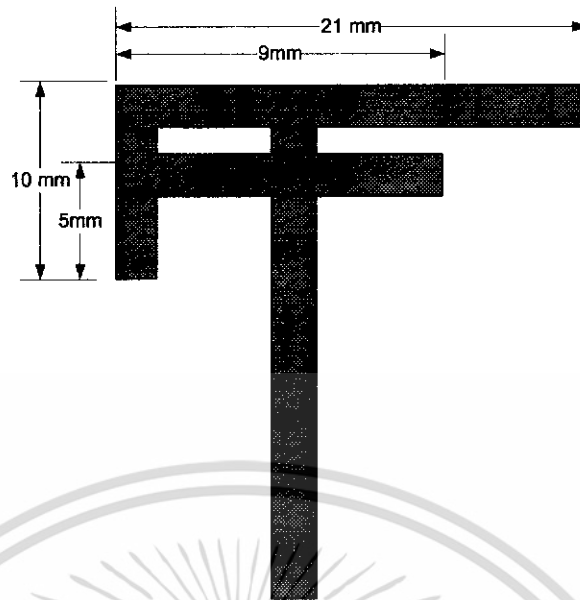
ที่ $\frac{\lambda}{4}$

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{0.0571}{4} = 14 \text{ มิลลิเมตร}$$



รูปที่ 3.8 ส่วนการแพร่กระจายคลื่น 5.2 GHz

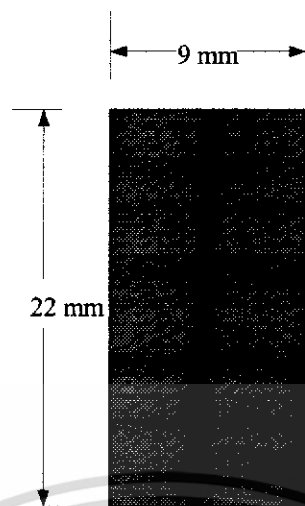
เมื่อทำการออกแบบส่วนการแพร่กระจายคลื่นทั้ง 2 ส่วนแล้วเราก็นำทั้ง 2 ส่วนมาประกอบเข้าด้วยกันซึ่งจะได้ส่วนแพร่กระจายคลื่นที่รวมกันแล้วดังรูป



รูปที่ 3.9 ส่วนแพร่กระจายคลื่นที่รวมกัน

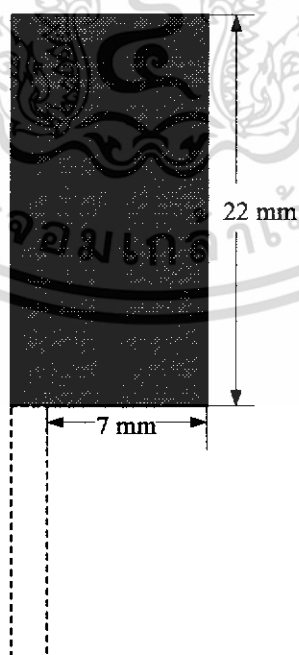
3.2.2.2 การออกแบบส่วนแพร่กระจายที่มีส่วนแพร่กระจายคลื่นรวมเป็นส่วนเดียว

ในวิธีการนี้เป็นการออกแบบที่ส่วน โดยเป็นการออกแบบส่วนแพร่กระจายคลื่นโดยคิดความยาวคลื่นที่ $\lambda/4$ และ $\lambda/2$ ซึ่งในการออกแบบจะทำการออกแบบให้สายส่งไมโครสตริปจัดอยู่ริมด้านใดด้านหนึ่ง เพื่อที่จะลดขั้นตอนการหาระยะการต่อจุดป้อนสัญญาณแล้วจากนั้นก็ทำการออกแบบส่วนแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.4 GHz โดยคิดที่ $\lambda/4$ ก็จะได้ 31 มิลลิเมตร จากนั้นก็จะทำการออกแบบส่วนการแพร่กระจายคลื่นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมให้มีความกว้างและความยาวได้เท่ากับความถี่ที่กำหนดได้ (31 มิลลิเมตร) โดยจะกำหนดด้านนี้ให้เป็นด้าน a ดังรูป



รูปที่ 3.10 แสดงส่วนการแพร่กระจายคลื่นด้าน a

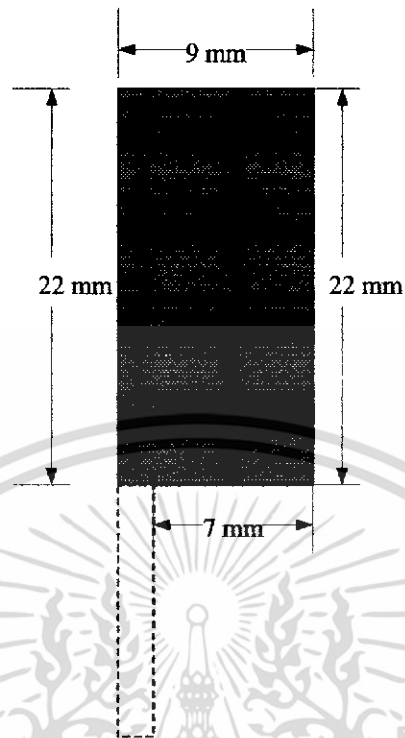
จากนั้นจะพบว่าอีกด้านหนึ่งของส่วนการแพร่กระจายคลื่นสั้นส่วนที่สั้นกว่าอีกด้านหนึ่งคือด้าน b ซึ่งจะเห็นว่าในส่วนนี้จะมีความยาวที่สั้นกว่าในด้าน a ซึ่งในส่วนนี้เราจะทำการออกแบบให้ตอบสนองที่ย่านความถี่ 5.2 GHz โดยเราจะพิจารณาความยาวคลื่นที่ความถี่ 5.2 GHz โดยจะคิดที่ $\lambda/2$ จึงจะมีค่าเท่ากับ 29 มิลลิเมตร ก็จะได้ดังรูป



รูปที่ 3.11 แสดงส่วนการแพร่กระจายคลื่นด้าน b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเมื่อนำขนาดของด้านทั้ง 2 มารวมกันก็จะมีขนาดดังรูป



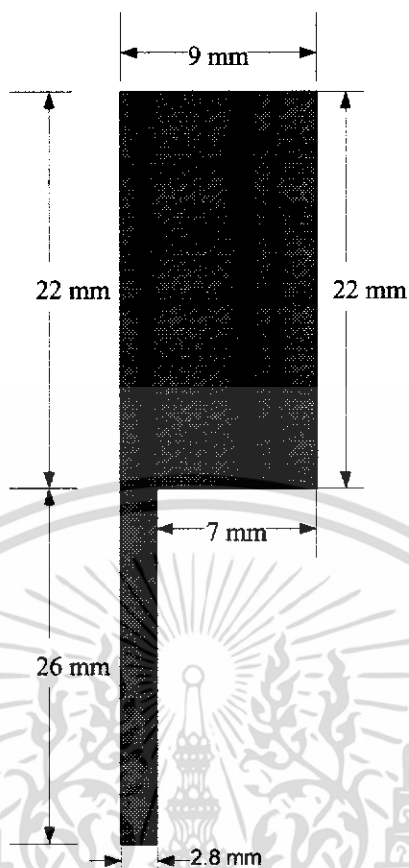
รูปที่ 3.12 แสดงส่วนการแพร่กระจายคลื่นทั้ง 2 ด้าน

จากการออกแบบจะเห็นว่าเหตุที่ความถี่ 5.2 GHz ต้องคิดที่ความยาวคลื่น $\lambda/2$ เนื่องจากต้องการให้มีความยาวคลื่นทั้ง 2 ความถี่ที่นำมาพิจารณามีความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกัน เพื่อที่จะได้สามารถนำมาออกแบบและนำมารวมกันเป็นส่วนการแพร่กระจายคลื่นแบบ 4 เหลี่ยมได้

3.3 สายอากาศไมโครสตริปที่นำมาทำเป็นชิ้นงานมีสารไดอิเล็กตริกเป็นแบบอีพ็อกซี

| | |
|--|-----------------|
| ค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารตัวกลาง (ϵ_r) | = 4.4 |
| ความหนาของสารตัวกลาง (h) | = 1.6 มิลลิเมตร |
| ส่วนแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.4 GHz (a) | = 31 มิลลิเมตร |
| ส่วนแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.2 GHz (b) | = 29 มิลลิเมตร |
| ค่าความกว้างสายส่ง (Strip Line) (W_0) | = 2.8 มิลลิเมตร |
| ความยาวสายส่ง (Strip Line) (L_0) | = 26 มิลลิเมตร |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แสดงขนาดของสายส่งและส่วนแพร่กระจายคลื่นที่คำนวณ

3.4 การสร้างสายอากาศไมโครสตริป

การสร้างสายอากาศไมโครสตริปนั้นจะใช้โปรแกรม IE3D ในการออกแบบรูปร่างและขนาดแล้วทำการ Simulation เพื่อให้ได้ความถี่ที่เราต้องการที่เป็น Dual-Band คือ 2.4 GHz และ 5.2 GHz ซึ่งเราจะต้องปรับแต่งรูปร่างและขนาดให้มีค่าที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงมากที่สุด จากนั้นเราก็นำขนาดจริงไปวาดลงที่โปรแกรม Auto Cad แล้ววาดขนาดจริงเพื่อที่จะนำไปทำชิ้นงาน

3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศไมโครสตริป

1. แผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้สารตัวกลางกันกลางเป็นอีพ็อกซี่
2. ขั้วต่อ SMA
3. เลื่อยถูล
4. กระดาษทราย (แบบหยาบและละเอียด)
5. แผ่นครายฟิล์ม (Dry Film)
6. กรดกัดแผ่นวงจรพิมพ์
7. หัวเร่ง
8. ตะกั่ว
9. หลอดไฟหรือเครื่องฉายแผ่นครายฟิล์ม (Dry Film)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 ขั้นตอนการออกแบบและการสร้างสายอากาศไมโครสตริป

1. ศึกษาการใช้โปรแกรม IE3D และ Auto Cad
2. ทำการวาดรูปร่างใน โปรแกรม IE3D
3. จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม
4. ปรับแต่งรูปร่างเพื่อให้ค่าที่ได้ดีที่สุดหรือใกล้เคียงมากที่สุดที่ยอมรับได้
5. นำขนาดที่วาดในโปรแกรม IE3D มาวาดลงในโปรแกรม Auto Cad
6. พิมพ์ขนาดจริงลงกระดาษ A4 แล้วนำไปถ่ายลงกระดาษไขหรือแผ่นใส
7. ทำการฉายแสงลงแผ่นทรายฟิล์ม (Dry Film)
8. นำแผ่นวงจรพิมพ์ไปกัดกับกรดกัดแผ่นวงจรพิมพ์
9. นำมาต่อกับขั้วต่อ SMA



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

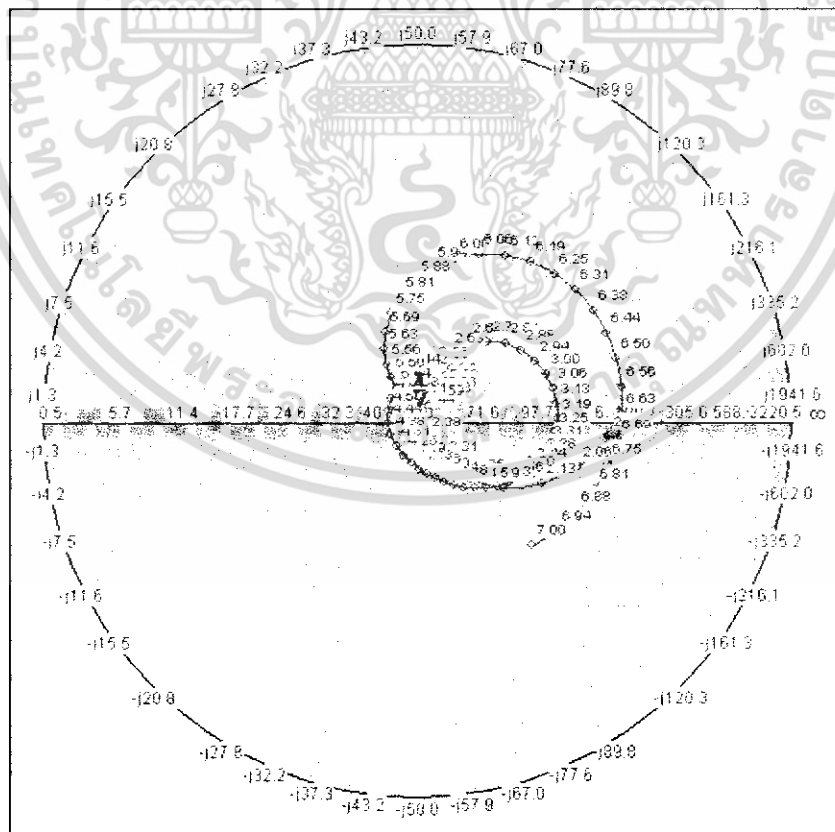
การวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศนั้น จะมีพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากในการที่จะต้องนำมาพิจารณา เช่น อิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ (Impedance) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio) ค่าการสูญเสียเนื่องมาจากการย้อนกลับ (Return Loss) และค่าความกว้างของความถี่ที่ใช้งาน (Bandwidth) ของสายอากาศ

โดยในการวิเคราะห์จะนำขนาดของสายอากาศไมโครสตริป 2 ย่านความถี่ที่กำหนดได้ในบทที่แล้วมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ด้วยโปรแกรม IE3D แล้วทำการปรับแต่งขนาดเพื่อให้ได้ผลที่ดีที่สุด (Optimum) แล้วนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์โปรแกรม IE3D มาวิเคราะห์เพื่อใช้ในการสร้างและพัฒนาสายอากาศต่อไป

4.1 พิจารณาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Impedance)

สายอากาศไมโครสตริปจะมีส่วนที่สายส่งไมโครสตริป (Strip Line) ซึ่งค่าความกว้างและความยาวของสายส่งนี้ จะมีผลต่ออิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ โดยอิมพีแดนซ์ที่ต้องการสำหรับการออกแบบสายอากาศนั้นมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม IE3D นั้นต้องพิจารณาอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ความถี่ใช้งานทั้ง 2 ความถี่คือ 2.45 GHz และ 5.25 GHz



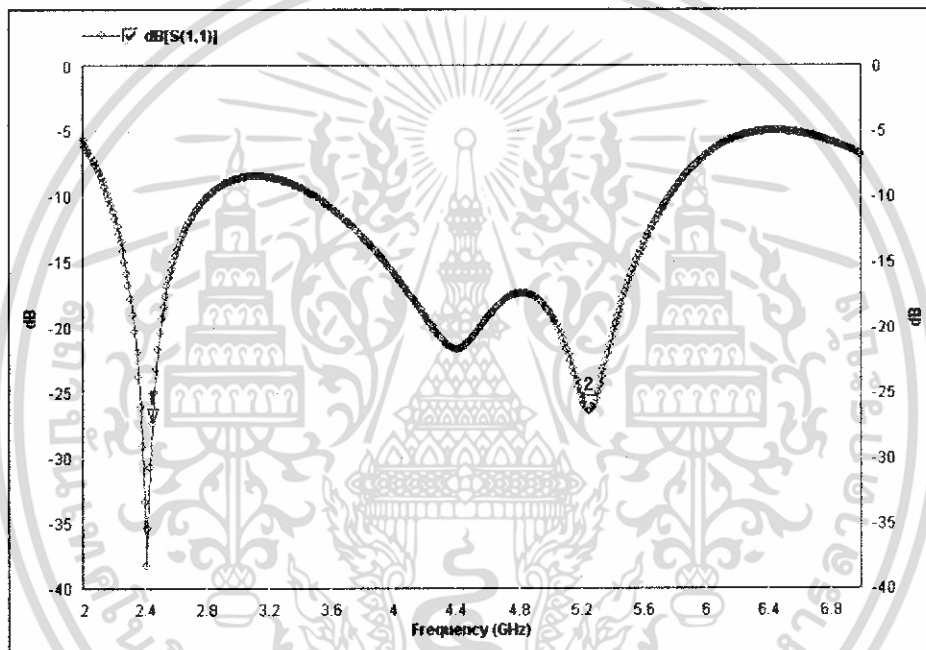
รูปที่ 4.1 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Impedance) ที่ได้จากโปรแกรม IE3D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป จะเห็นว่าที่ Maker 1 จะสามารถอ่านค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ได้ประมาณ 50.6 โอห์ม ซึ่งเป็นอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 2.45 GHz ส่วนที่ Maker 2 จะสามารถอ่านค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ได้ประมาณ 50.4 โอห์ม ซึ่งเป็นอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 5.25 GHz ซึ่งจะเห็นว่าอินพุตอิมพีแดนซ์ทั้ง 2 ค่าที่ได้นี้มีค่าใกล้เคียง 50 โอห์ม ตามที่เราต้องการ

4.2 พิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์อินพุตของสายอากาศจนได้ค่าตามต้องการแล้ว ส่วนต่อไปที่เราจะพิจารณาก็คือการพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ซึ่งในการพิจารณาค่าดังกล่าวก็ต้องพิจารณาที่ความถี่ใช้งานทั้ง 2 ความถี่เช่นกัน ซึ่งค่าการสูญเสียย้อนกลับที่สามารถยอมรับได้ จะต้องมีย่านน้อยกว่า -9.54 dB หรือประมาณ -10 dB ขึ้นไป



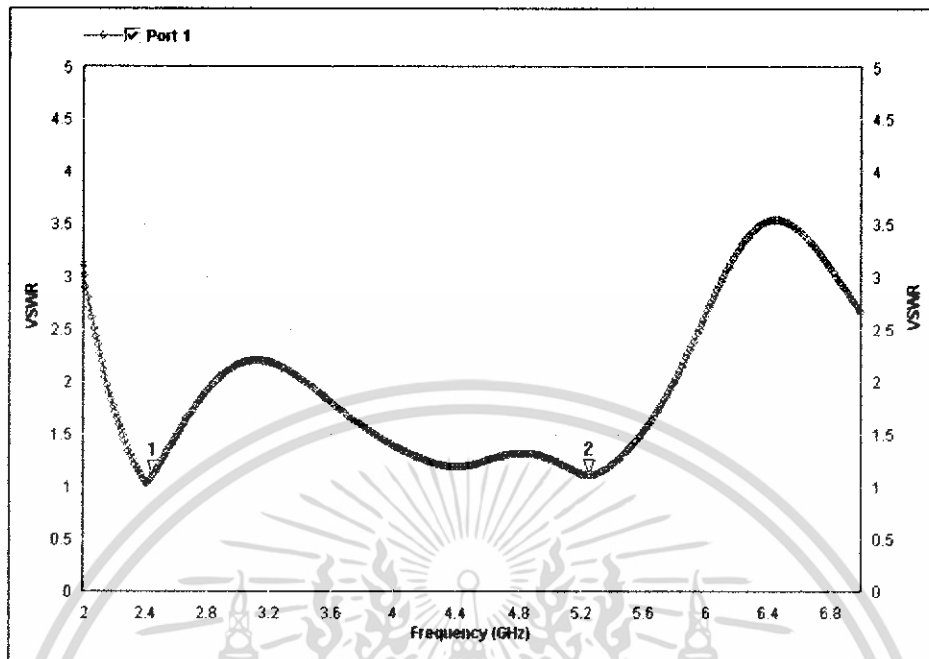
รูปที่ 4.2 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ที่ได้จากโปรแกรม IE3D

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม IE3D จะทำให้ได้กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งจากกราฟจะพบว่าที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่า -27.48 dB และที่ความถี่ 5.25 GHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ -26.42 dB ซึ่งค่าการสูญเสียย้อนกลับทั้ง 2 ความถี่นี้มีค่าน้อยกว่า -9.54 dB ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดข้างต้นที่สามารถยอมรับนำไปใช้งานได้

4.3 พิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR)

อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio) คือค่าแรงดัน V_{max} ของคลื่นนิ่ง และแรงดัน V_{min} ของคลื่นที่ได้มาจากการบวกกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนที่มีเฟสตรงกัน และตรงกันข้ามกันตามลำดับ โดยการนำอัตราส่วนของแรงดันสูงสุดต่อแรงดันต่ำสุด ก็จะเรียกว่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน โดยการพิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันนี้ ไม่ควรมีค่าเกิน 2 หรือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องต่ำกว่า 2 นั่นเองที่สามารถยอมรับนำไปใช้งานได้ แต่ถ้าจะให้ดีก็ควรอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 1.5 จะดีกว่า

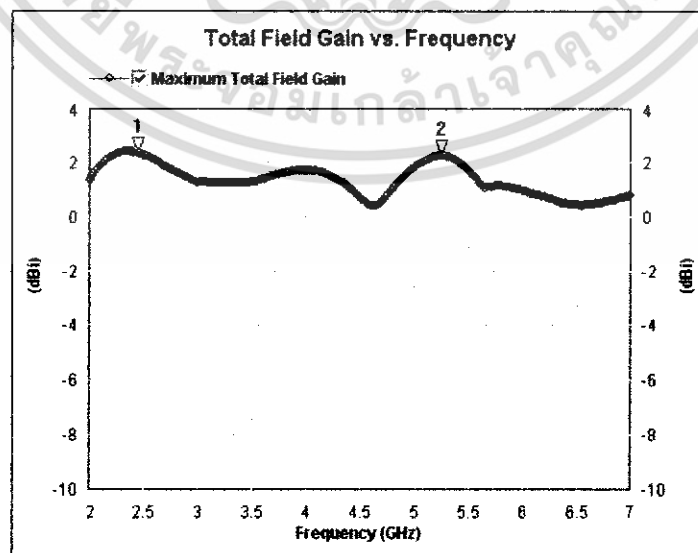


รูปที่ 4.3 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) ที่ได้จากโปรแกรม IE3D

จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม IE3D นั้น จะพบว่าค่า VSWR ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า VSWR ประมาณ 1.08 และ ที่ความถี่ 5.25 GHz มีค่า VSWR ประมาณ 1.1 เช่นกัน ซึ่งเมื่อนำมาพิจารณากับหลักการเบื้องต้นที่ว่าค่า VSWR ต้องมีค่าต่ำกว่า 2 ก็ถือว่าค่า VSWR ที่ได้จากการวิเคราะห์นี้สามารถนำไปสร้างได้

4.4 พิจารณาค่าอัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

ในการพิจารณาค่าอัตราขยายของสายอากาศนั้น จะพิจารณาอัตราขยายที่ 2 ความถี่เช่นกัน



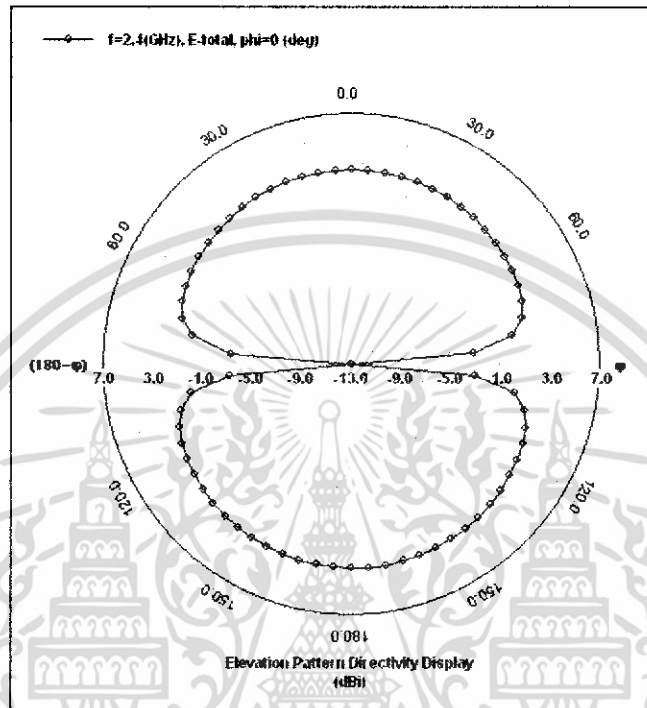
รูปที่ 4.4 ค่าอัตราขยายของสายอากาศ (Gain) ที่ได้จากโปรแกรม IE3D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

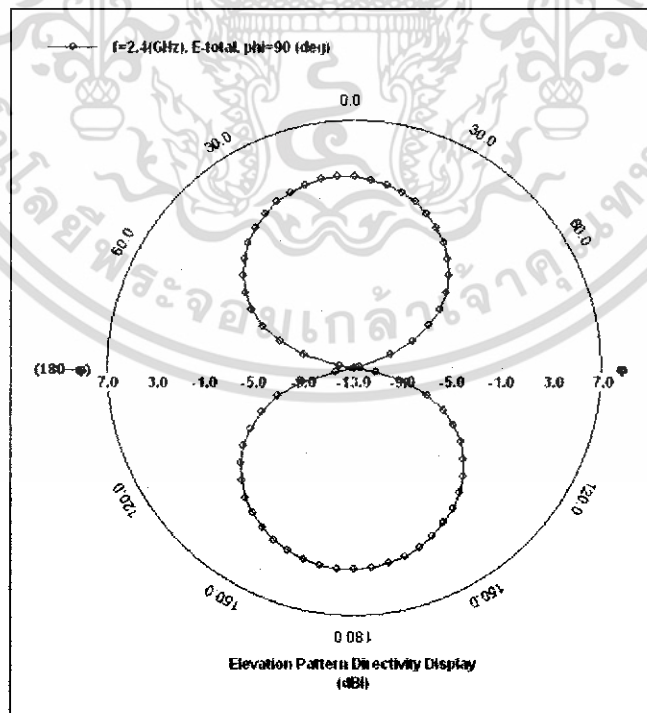
ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม IE3D แล้วจะพบว่าอัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าประมาณ 2.315 dBi และอัตราขยายที่ความถี่ 5.25 GHz มีค่าประมาณ 2.219 dBi

4.5 พิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (ผลจำลองจากโปรแกรม IE3D)

- ที่ความถี่ 2.45 GHz



(ก) ในระนาบสนามไฟฟ้า

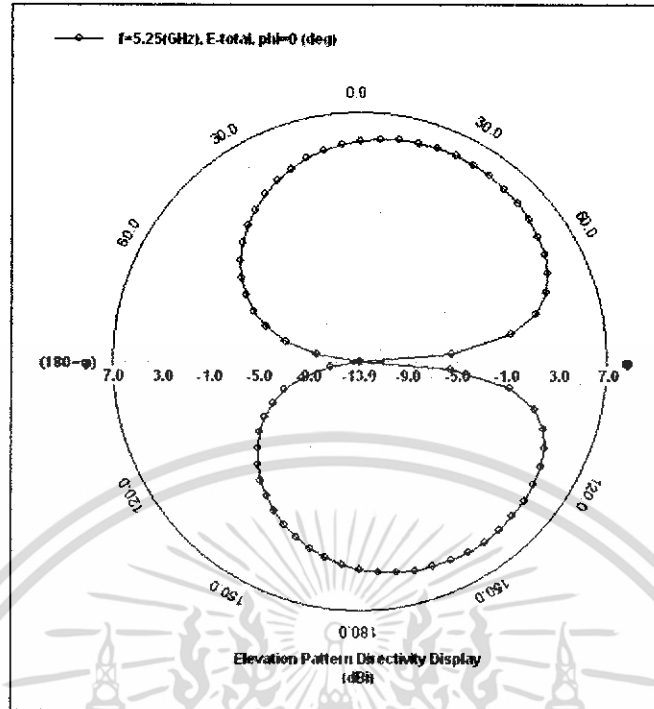


(ข) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

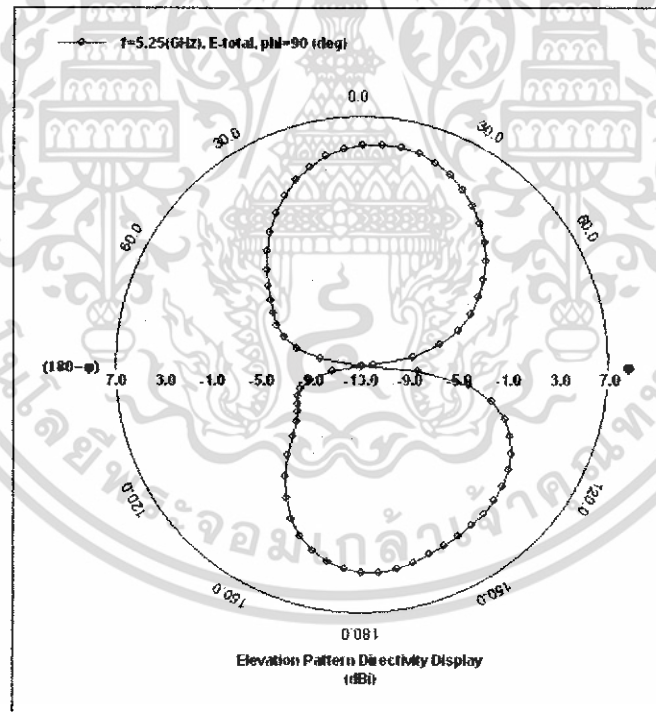
รูปที่ 4.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ความถี่ 5.25 GHz



(ก) ในระนาบสนามไฟฟ้า



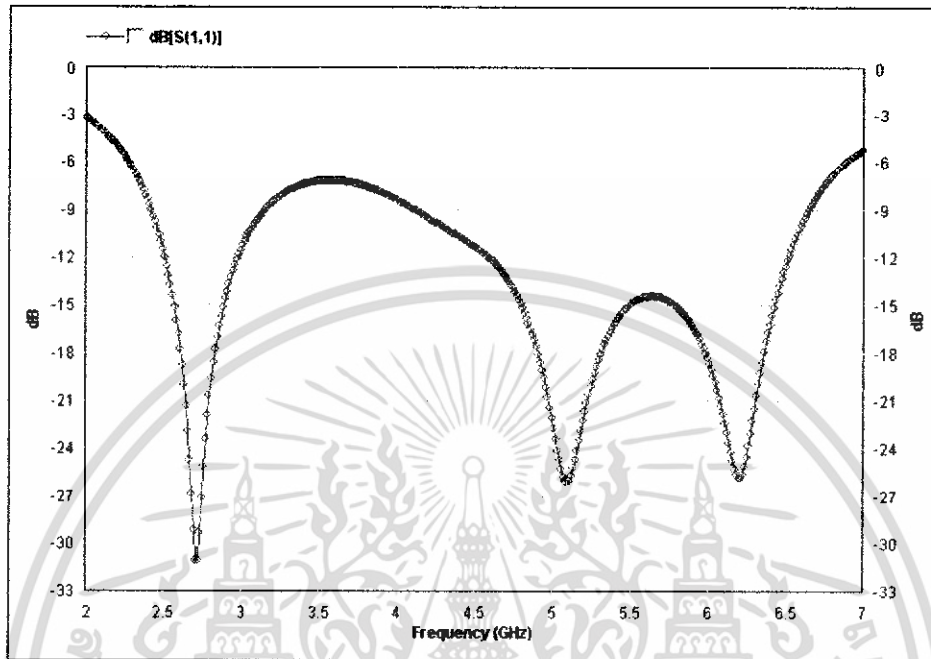
(ข) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.6 แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.25 GHz

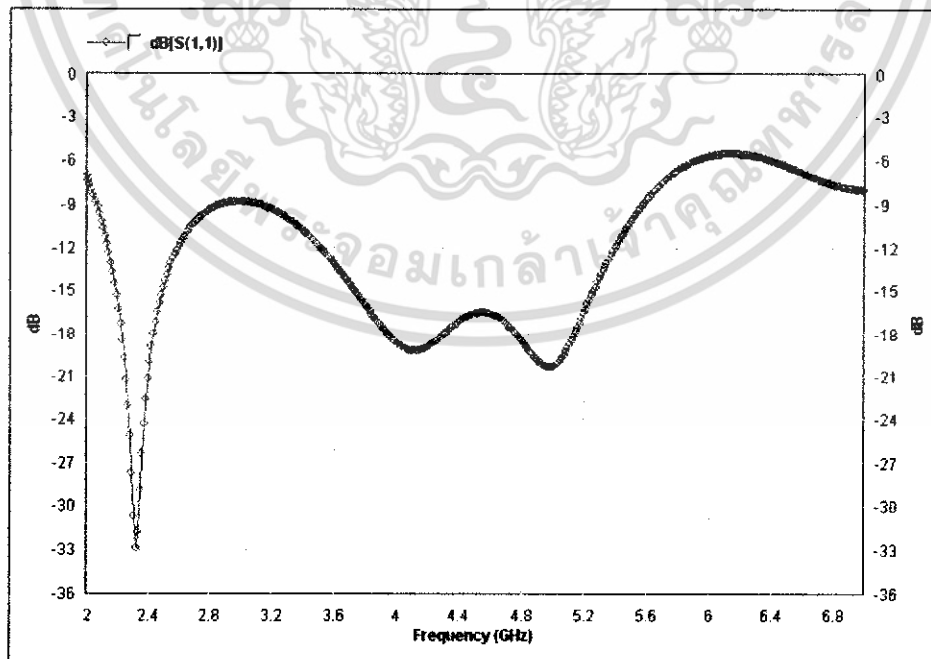
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 พิจารณาค่าเพอร์มิตติวิตีของสารตัวกลาง (ϵ_r)

เมื่อทำการจำลองผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม IE3D ในการลองปรับค่าพารามิเตอร์ (ϵ_r) จาก 4.4 เป็น 3.0 และ 5.0 ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้นั้นจะทำให้ช่วงความถี่ที่เราต้องการไปใช้งานนั้นคลาดเคลื่อนไป



รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าเพอร์มิตติวิตีของสารตัวกลาง (ϵ_r) มีค่า 3.0



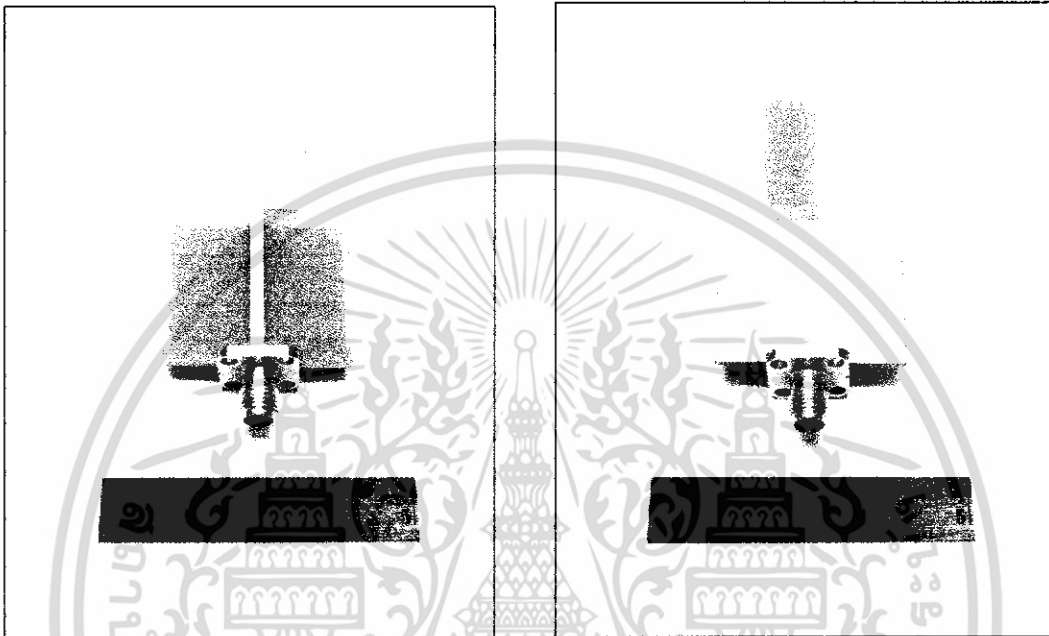
รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ค่าเพอร์มิตติวิตีของสารตัวกลาง (ϵ_r) มีค่า 5.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดสอบและผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ การออกแบบ และการสร้าง ทำให้เราทราบถึงขนาดและส่วนประกอบต่างๆ โดยให้ทำงานที่ 2 ความถี่ คือ 2.45 GHz และ 5.25 GHz ซึ่งเมื่อนำมาสร้างก็จะได้ชิ้นงานออกมาดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 สายอากาศไมโครสตริปที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับการวัดและการทดสอบค่าต่างๆ ในการทดลองนี้จะใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายวิทยุ (Network Analyzer : รุ่น HP 8720C 50 MHz – 20 GHz) การวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายวิทยุนี้ สามารถวัดและแสดงรูปสัญญาณพร้อมทั้งค่าต่างๆ ออกมาโดยละเอียด ส่วนอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ได้แก่ ตัวเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศกับเครื่องวัดจะใช้หัวต่อเป็นแบบ SMA

การทดลองจะประกอบไปด้วย การวัดและทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ คือ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป 2 ย่านความถี่ ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้นี้จะนำมาวิเคราะห์หาความผิดพลาดของการคำนวณว่าได้ใกล้เคียงกับการทดลองหรือไม่อย่างไร เพื่อนำมาปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่อง Network Analyzer : รุ่น HP 8720C 50 MHz – 20 GHz
2. ชุดคาร์ิเบรท 85022 B. 3.5 mm
3. สายอากาศไมโครสตริป
4. เครื่องส่งสัญญาณ Access Point
5. Computer Notebook

5.2 ขั้นตอนการทดสอบ

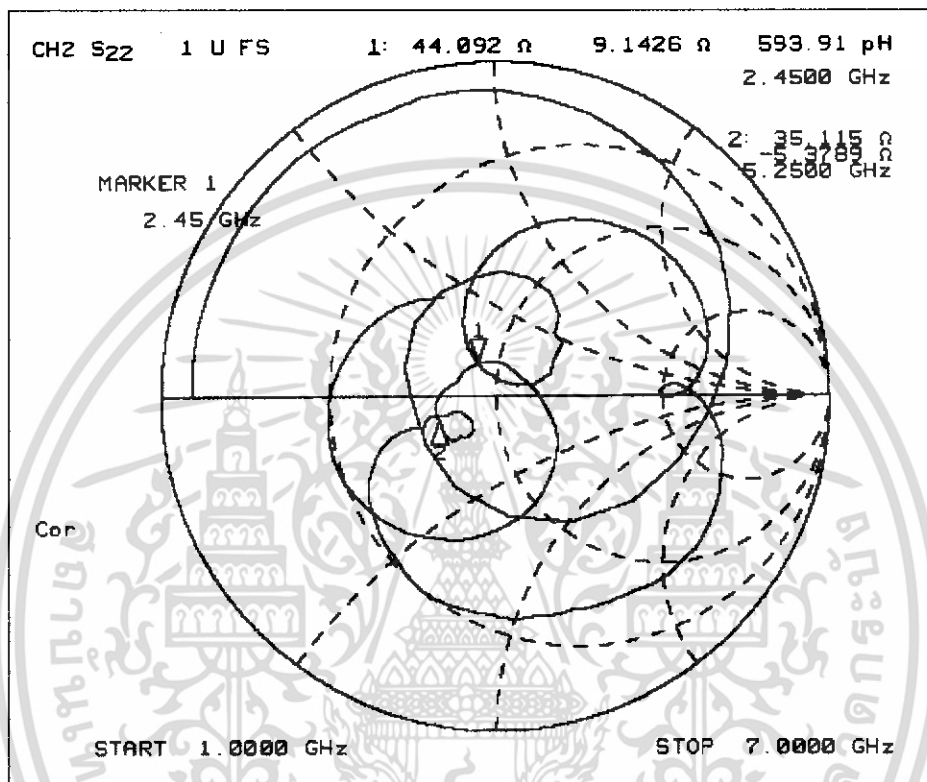
1. ทำการคาร์ิเบรทเครื่อง Network Analyzer ด้วยชุดคาร์ิเบรท 85022 B. 3.5 mm
2. เลือกความถี่เริ่มต้น 1 GHz และความถี่สุดท้าย 7 GHz
3. ทำการต่อสายอากาศไมโครสตริป เข้ากับเครื่อง Network Analyzer
4. ทดสอบการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปด้วยเครื่อง Network Analyzer
5. ทดสอบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Return Loss)
6. ทดสอบการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริป (VSWR)
7. ทดสอบการวัดค่าแบนด์วิดท์ (Bandwidth : BW)
8. ทดสอบการวัดค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Pattern)
9. ทดสอบการวัดค่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศ (Polarization)
10. ทดสอบการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ (Gain)
11. ทดสอบการวัดค่าการส่งสัญญาณของสายอากาศในการใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลการทดสอบ

5.3.1 การทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

ในการทดสอบ หาค่าอิมพีแดนซ์อินพุตของสายอากาศไมโครสตริปนี้ โดยการอ่านค่า Smithchart จากเครื่อง Network Analyzer โดยกำหนดให้ Marker 1 เป็นความถี่ Center ที่ 2.45 GHz และ Marker 2 เป็นความถี่ Center ที่ 5.25 GHz ซึ่งผลการทดสอบจะได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Impedance) ที่ได้จากการทดสอบ

ตารางที่ 5.1 ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป

| Maker | ความถี่ที่ใช้งาน | ค่าอิมพีแดนซ์ (Ω) |
|-------|------------------|----------------------------|
| 1 | 2.45 GHz | 44.092 |
| 2 | 5.25 GHz | 35.115 |

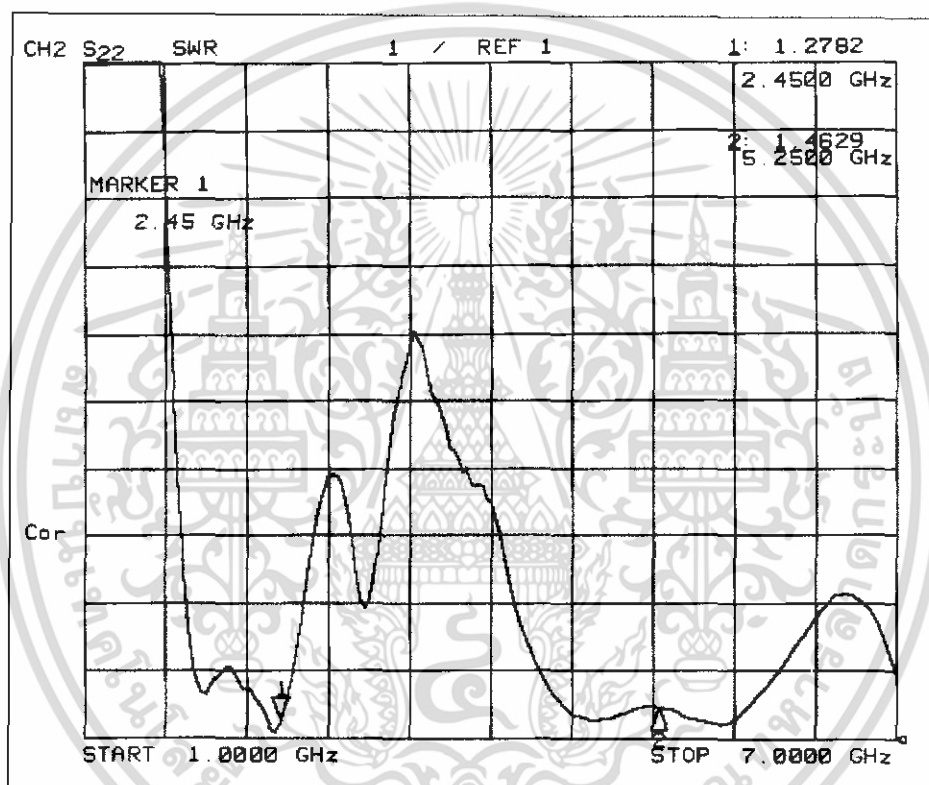
ซึ่งในการวัดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์นี้เราจะต้องทำให้ค่าจินตภาพของสายอากาศเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุดเพื่อนำเอาจะได้เฉพาะค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นค่าจริง โดยจากผลการทดสอบจะพบว่า ที่ Marker 1 ความถี่ 2.45 GHz มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ 44.092 โอห์ม และที่ Marker 2 ความถี่ 5.25 GHz มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ 35.115 โอห์ม จะเห็นว่าทั้ง 2 ความถี่ มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่เราต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ 50 โอห์ม ซึ่งค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ได้นี้ก็จะมีผลต่อค่า Return Loss และค่า VSWR ในการทดสอบต่อไป

5.3.2 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR)

ในการทดสอบหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปนี้ ก็จะทำการทดสอบคล้ายๆกับการหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์คือ จะดูค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ความถี่ใช้งานทั้ง 2 ความถี่โดยให้ Marker 1 คือ ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz และ Marker 2 คือ ความถี่ใช้งาน 5.25 GHz ซึ่งทำการทดสอบจะได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) ที่ได้จากการทดสอบ

ตารางที่ 5.2 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริป

| Maker | ความถี่ที่ใช้งาน | ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง |
|-------|------------------|-----------------------|
| 1 | 2.45 GHz | 1.2782 : 1 |
| 2 | 5.25 GHz | 1.4629 : 1 |

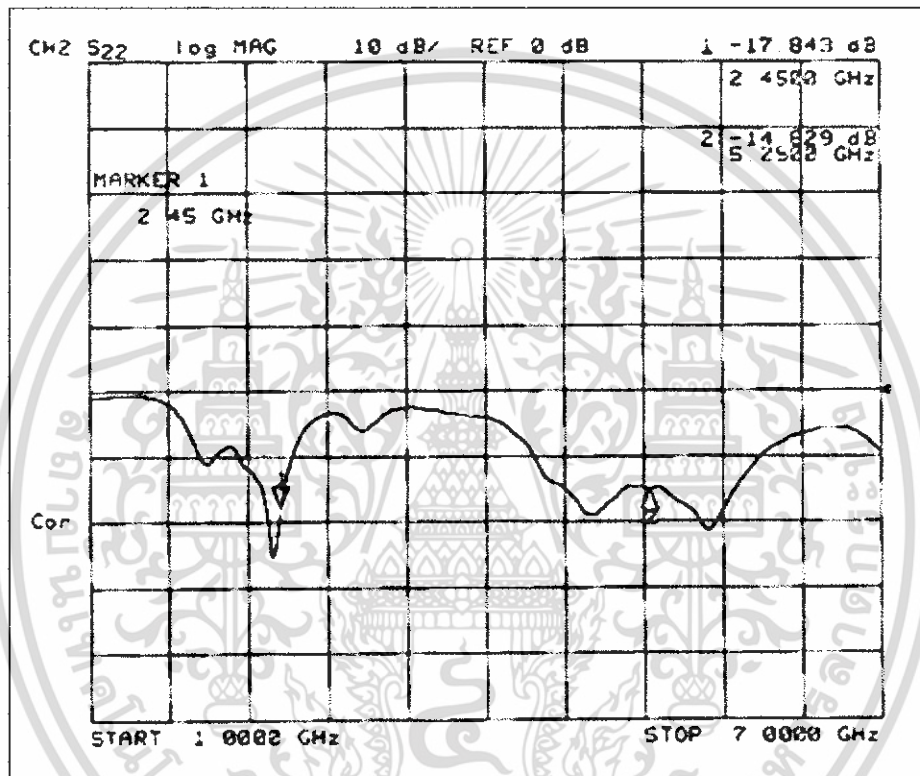
จากการทดสอบที่ได้จะเห็นว่าที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.2782 : 1 และที่ความถี่ 5.25 GHz มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.4629 : 1 โดยค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้นี้จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถใช้งานได้นั้นต้องมีค่าต่ำกว่า 2 : 1 แต่ถ้าจะให้ใช้งานได้ดีก็ต้องให้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งนั้นต่ำกว่า 1.5 : 1 ซึ่งจากการทดสอบนี้จะพบว่าทั้ง 2 ความถี่นั้นสามารถนำมาใช้งานได้

5.3.3 การวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

ในการทดสอบหาค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป 2 ย่านความถี่ จะทำการวัดโดยดูที่ความถี่ใช้งานทั้ง 2 ความถี่เช่นกัน คือที่ Marker 1 จะอยู่ที่ 2.45 GHz และที่ Marker 2 จะอยู่ที่ 5.25 GHz ซึ่งผลการทดลองจะได้ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ที่ได้จากการทดสอบ

ตารางที่ 5.3 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป

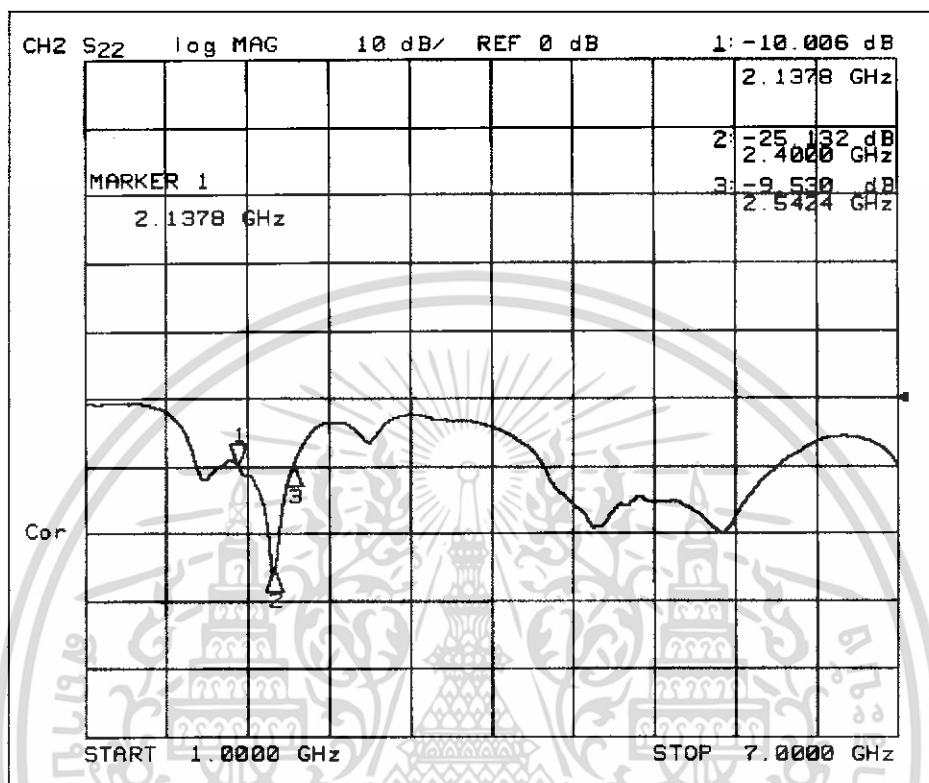
| Maker | ความถี่ที่ใช้งาน | ค่าการสูญเสียย้อนกลับ |
|-------|------------------|-----------------------|
| 1 | 2.45 GHz | -17.843 dB |
| 2 | 5.25 GHz | -14.829 dB |

จากผลการทดสอบหาค่าการสูญเสียย้อนกลับนี้จะพบว่าที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ -17.843 dB และที่ความถี่ 5.25 GHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ -14.829 dB โดยในการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับนี้ค่าที่สามารถใช้งานได้ดีต้องมีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ซึ่งก็จะพบว่าทั้ง 2 ความถี่ นั้นสามารถนำไปใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4 การทดสอบหาค่าแบนด์วิดท์

ในการทดสอบหาค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศไมโครสตริป 2 ย่านความถี่ จะทำการวัด โดยดูที่ ช่วงความถี่ที่ใช้งานทั้ง 2 ความถี่ ดังรูปที่ 5.5 กับ รูปที่ 5.6



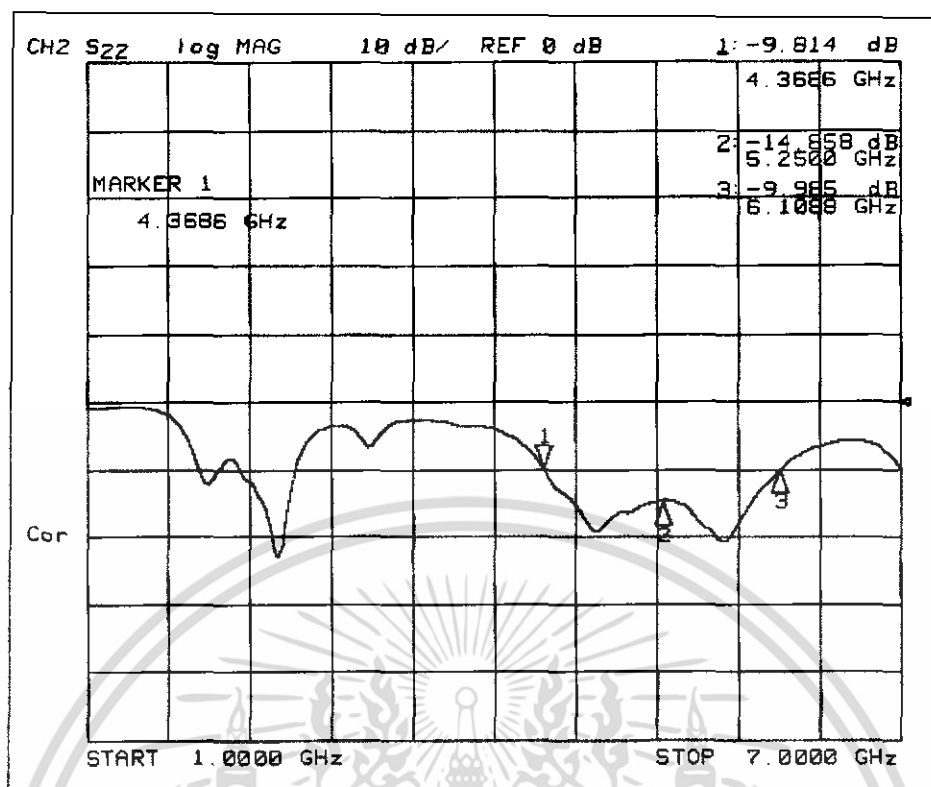
รูปที่ 5.5 ค่าแบนด์วิดท์ที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 2.45 GHz

ตารางที่ 5.4 ค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศไมโครสตริปที่ความถี่ 2.45 GHz

| Maker | ความถี่ | ค่าการสูญเสียย้อนกลับ |
|-------|------------|-----------------------|
| 1 | 2.1378 GHz | -10.000 dB |
| 2 | 2.4000 GHz | -25.132 dB |
| 3 | 2.5424 GHz | -10.000 dB |

จากการทดสอบหาค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศไมโครสตริปย่านความถี่ 2.45 GHz ซึ่งจะพิจารณาหาค่าแบนด์วิดท์ โดยดูจากช่วงของความถี่ที่มีการสูญเสียย้อนกลับจึงจะต้องมีค่าน้อยกว่า -10 dB ก็จะได้พบว่าที่ความถี่ 2.45 GHz มีแบนด์วิดท์อยู่ในช่วงความถี่ 2.1378 GHz – 2.5424 GHz ซึ่งตามมาตรฐานในการใช้งานตามมาตรฐาน IEEE 802.11b และมาตรฐาน IEEE 802.11g ที่ความถี่ 2.45 GHz จะมีช่วงความถี่อยู่ในช่วง 2.400 GHz – 2.483 GHz ซึ่งจะเห็นว่าสายอากาศไมโครสตริปย่านความถี่นี้สามารถรองรับการใช้งานตามมาตรฐาน IEEE 802.11b และมาตรฐาน IEEE 802.11g ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 ค่าแบนด์วิดท์ที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 5.25 GHz

ตารางที่ 5.5 ค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศไมโครสตริปที่ความถี่ 5.25 GHz

| Maker | ความถี่ | ค่าการสูญเสียย้อนกลับ |
|-------|------------|-----------------------|
| 1 | 4.3686 GHz | -10.000 dB |
| 2 | 5.2500 GHz | -14.858 dB |
| 3 | 6.1088 GHz | -10.000 dB |

จากการทดสอบหาค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศไมโครสตริปย่านความถี่ 5.25 GHz ซึ่งจะพิจารณาค่าแบนด์วิดท์ โดยดูจากช่วงของความถี่ที่มีการสูญเสียย้อนกลับจึงจะต้องมีค่าน้อยกว่า -10 dB ก็พบว่าที่ความถี่ 5.25 GHz มีแบนด์วิดท์อยู่ในช่วงความถี่ 4.3686 GHz – 6.1088 GHz ซึ่งตามมาตรฐานในการใช้งานตามมาตรฐาน IEEE 802.11a ที่ความถี่ 5.25 GHz จะมีช่วงความถี่อยู่ในช่วง 5.15 GHz – 5.35 GHz ซึ่งจะเห็นว่าสายอากาศไมโครสตริปย่านความถี่นี้สามารถรองรับการใช้งานตามมาตรฐาน IEEE 802.11 a ได้

5.3.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Pattern)

ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ การทดสอบนั้นจะทำในห้องที่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมน้อยที่สุด สามารถทำได้ในห้องไร้คลื่นสะท้อนซึ่งเป็นห้องที่สร้างขึ้นเพื่อไม่ให้มีคลื่นสะท้อนกลับออกจากผนังทุกด้านของห้อง ส่วนของระยะที่ใช้ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะใช้บริเวณสนามระยะไกลซึ่งเป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่การแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ บริเวณสนามระยะไกล

$$\text{Far Field Distance}(R) = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (5.1)$$

โดยที่ R = ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับ กับสายอากาศส่ง (เมตร)

D = มิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศ (เมตร)

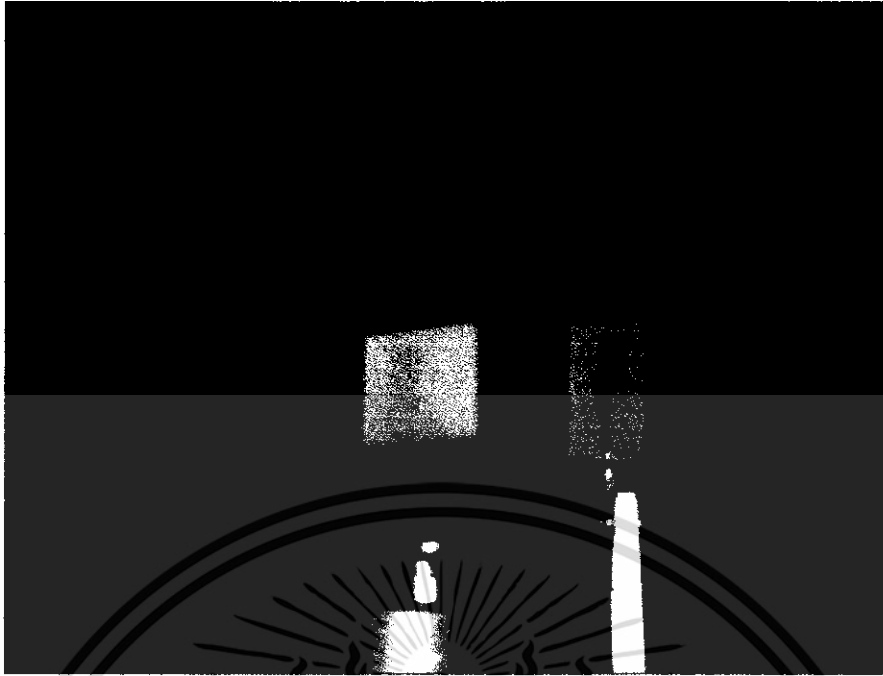
ระยะที่ใช้ในการทดสอบ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

โดยที่ D = 0.06 เมตร

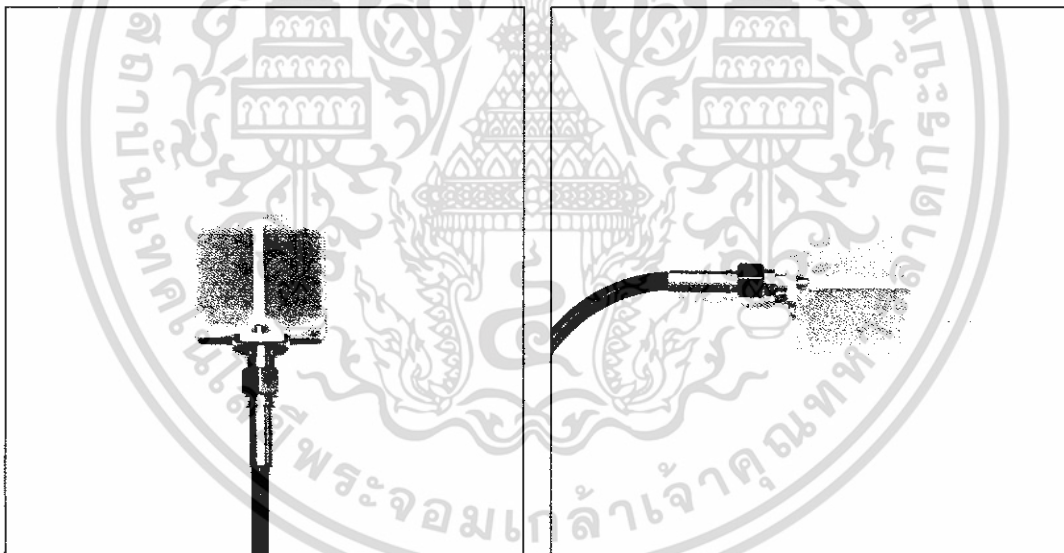
λ = 0.12245 เมตร

$$\text{Far Field Distance}(R) = \frac{2(0.06)^2}{0.12245} = 0.058 \text{ m}$$

ในการทดสอบนี้จะใช้ระยะ Far Field ที่มากกว่า 0.058 m. ในระนาบ E – Plane โดยติดตั้งสายอากาศที่ใช้รับและส่ง ให้โพรบตั้งฉากกับพื้นระนาบโดยนำสายอากาศ ไปติดตั้งที่แทนหมุนซึ่งจะหมุนด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ ครั้งละ 5 องศา แล้ววัดค่ากำลังสนามที่องศาต่างๆ จนครบ 360 องศา โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ระบบโครงข่าย (Network Analyzer) เป็นตัวส่งและรับ ส่วนการวัดค่ากำลังสนามในระนาบ H- Plane นั้น ต้องติดตั้งสายอากาศที่ใช้รับและส่ง ให้โพรบขนานกับพื้นระนาบแล้วทำการทดลองเช่นเดียวกันกับ E – Plane



รูปที่ 5.7 การจัดวางสายอากาศภายในห้องเพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

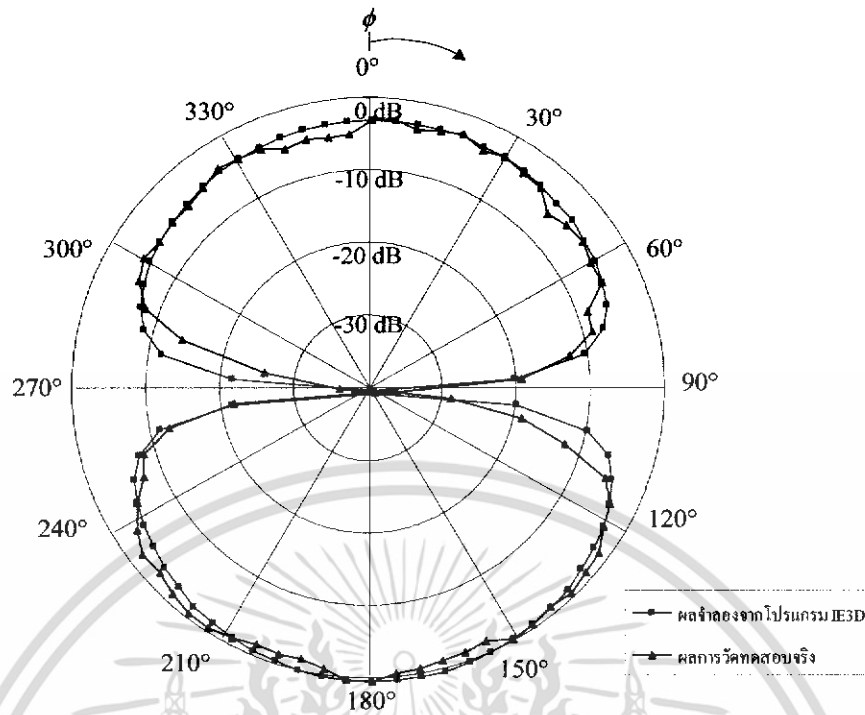


(ก) ในระนาบสนามไฟฟ้า

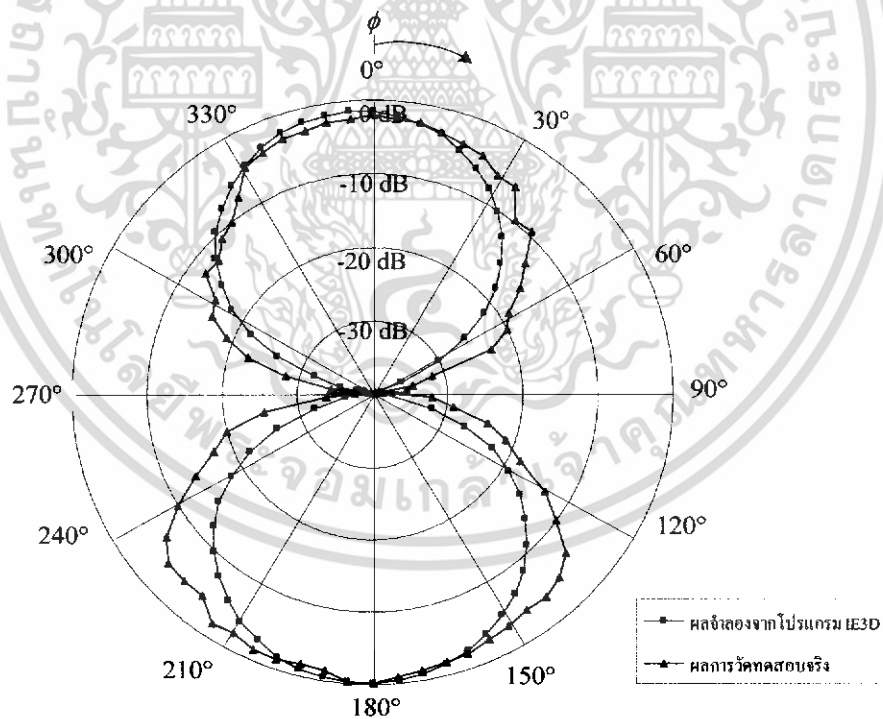
(ข) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.8 การจัดวางสายอากาศเพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



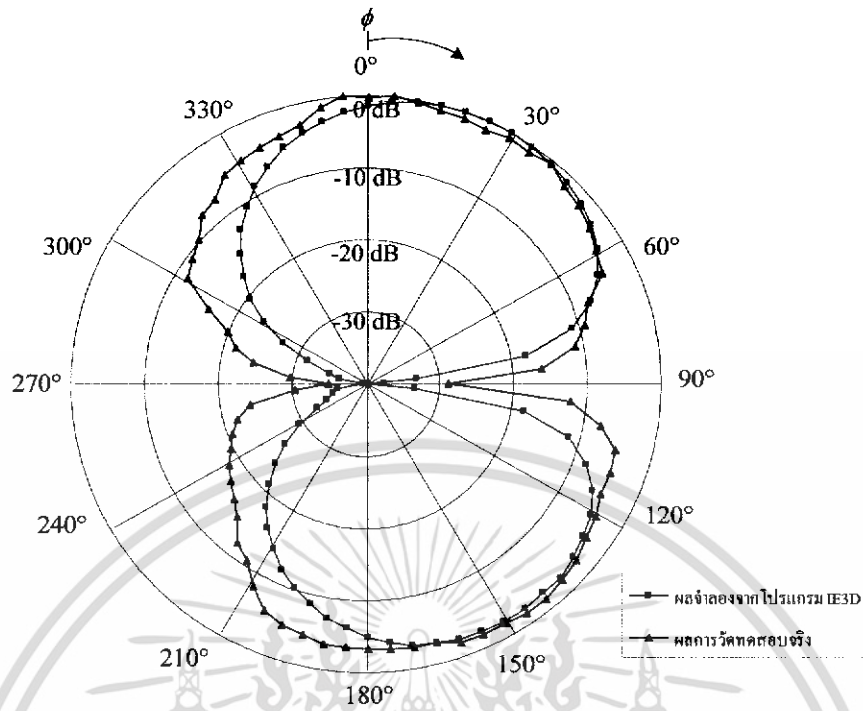
(ก) ในระนาบสนามไฟฟ้า



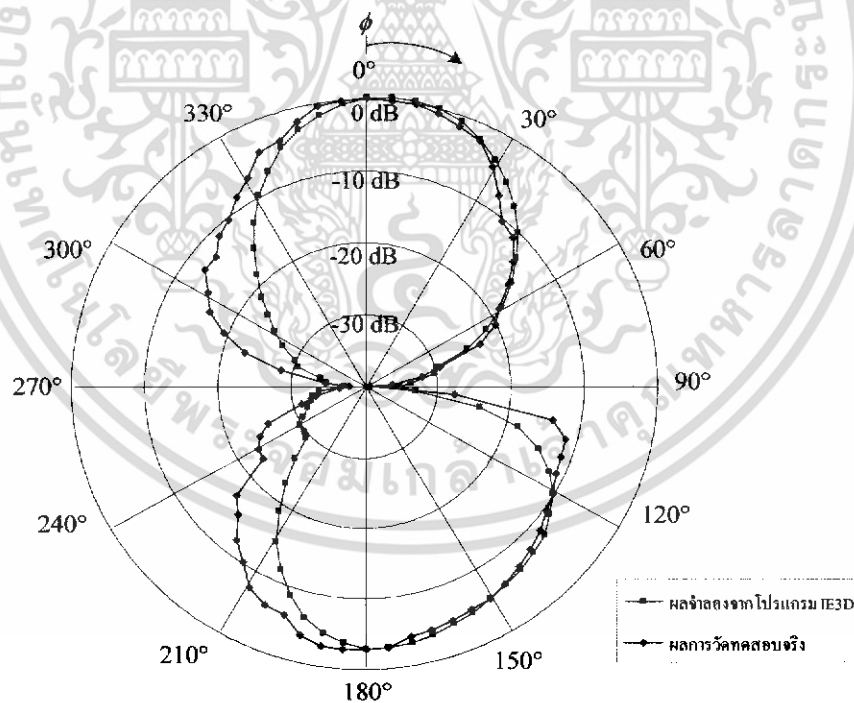
(ข) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.9 แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ในระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.10 แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.25 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถที่จะหาค่า HPBW และค่าไดเรกทิวิตี้ได้จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งแสดงดังตารางที่ 5.6 และ 5.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.6 แสดง HPBW ที่ได้จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ของสายอากาศ

| ความถี่ของสายอากาศ | มุม HPBW (องศา) ของสายอากาศในระนาบ | |
|--------------------|------------------------------------|--------------|
| | สนามไฟฟ้า | สนามแม่เหล็ก |
| 2.45 GHz | 82 | 51 |
| 5.25 GHz | 83 | 52 |

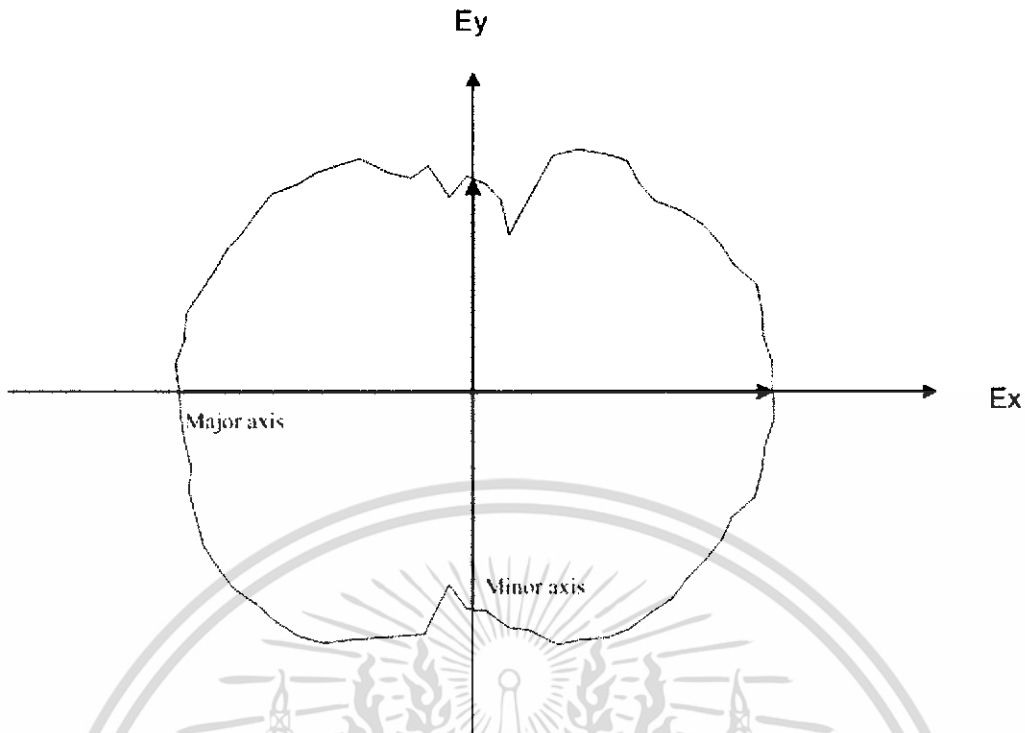
ตารางที่ 5.7 แสดงค่าไดเรกทิวิตี้ จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

| ความถี่ของสายอากาศ | ค่าไดเรกทิวิตี้ (dBi) |
|--------------------|-----------------------|
| 2.45 GHz | 2.3 |
| 5.25 GHz | 2.2 |

5.3.6 การวัดโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศ (Polarization)

การวัดโพลาไรซ์เซชันนั้นนับว่าเป็นสิ่งจำเป็นในกรณีที่เราต้องการส่งคลื่นที่มีโพลาไรซ์เซชันอย่างใดอย่างหนึ่งออกจากสายอากาศ แล้วทำการตรวจสอบจากการวัดว่าได้คลื่นที่มีโพลาไรซ์เซชันตามที่ต้องการหรือไม่ การวัดโพลาไรซ์เซชันของคลื่นส่วนใหญ่จะเป็นการตรวจสอบอัตราส่วนของการโพลาไรซ์เซชันนี้ ซึ่งจะเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่บ่งบอกคุณสมบัติของสายอากาศในเชิงการสร้างโพลาไรซ์เซชัน วิธีการวัดโพลาไรซ์เซชันของคลื่นนี้จะทำได้โดยใช้สายอากาศที่รับคลื่นที่มีโพลาไรซ์เซชันแบบเส้นตรง เช่น สายอากาศแบบไดโพล และสายอากาศไมโครสตริป การวัดโพลาไรซ์เซชันก็จะทำได้โดยนำสายอากาศดังกล่าวรับคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ามา แล้วหมุนสายอากาศนั้นรอบตัวเอง ขนาดของสนามไฟฟ้าที่วัดได้ที่มีมุมต่างๆจะขึ้นอยู่กับโพลาไรซ์เซชันของคลื่น

ผลการทดสอบการวัดโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศ จากรูปที่ 5.11 จะเห็นได้ว่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศนั้นมีรูปแบบโพลาไรซ์เซชัน เป็นวงรี



รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบการวัดโพลาไรเซชันของสายอากาศ

5.3.7 การทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

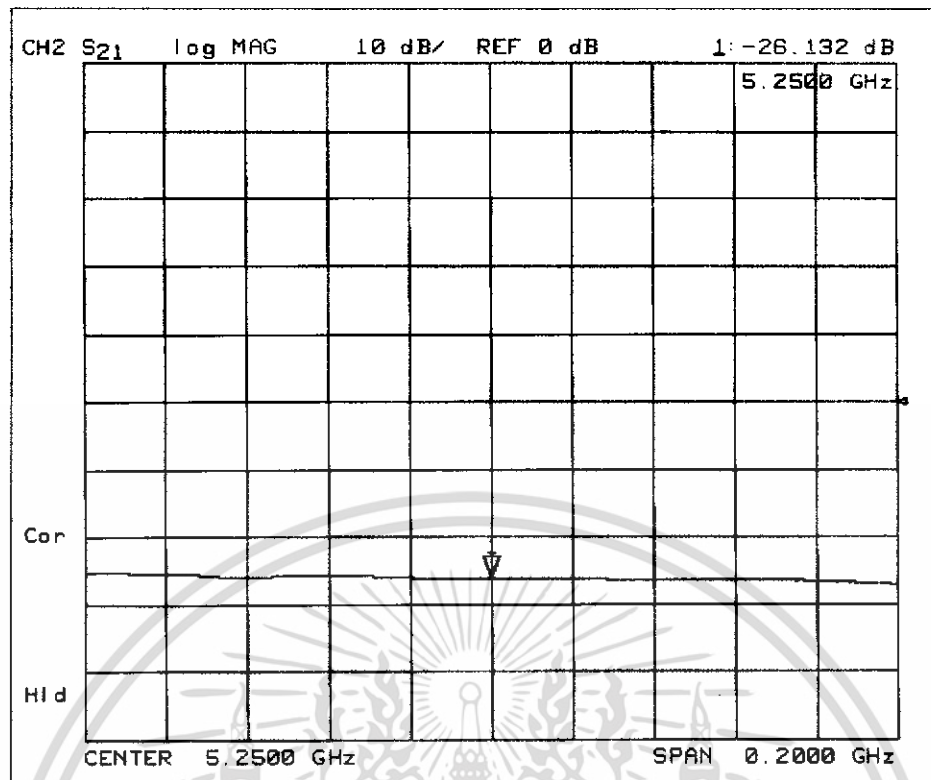
การทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศจะใช้สายอากาศทั้งตัวส่งและตัวรับที่มีโครงสร้างและคุณลักษณะเหมือนกันวางห่างกันด้วยระยะทางที่มากกว่าหรือเท่ากับบริเวณสนามระยะไกลและใช้เครื่องเนทเวิร์คอะนาไลเซอร์ (Network Analyzer) เป็นตัวส่งและรับ สัญญาณที่รับได้จากเครื่องเนทเวิร์คอะนาไลเซอร์จะมีค่าเท่ากับ $10 \log(P_r/P_t)$ เมื่อนำไปแทนในสมการ (5.2) ซึ่งเป็นสมการการส่งคลื่นของ ฟรีส จะได้ค่าอัตราขยายของสายอากาศ

$$10 \log \left(\frac{P_r}{P_t} \right) = G_t(\text{dB}) + G_r(\text{dB}) - 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (5.2)$$

- เมื่อ
- G_t = เกนของสายอากาศส่ง (dB)
 - G_r = เกนของสายอากาศรับ (dB)
 - P_t = กำลังงานด้านส่ง (W)
 - P_r = กำลังงานด้านรับ (W)
 - R = ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่ง และรับที่มากกว่าหรือเท่ากับบริเวณสนามระยะไกล (m)

โดยเทอมของ $20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)$ เป็นการสูญเสียในอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 ผลการทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศที่ย่านความถี่ 5.25 GHz

เมื่อเราทราบค่าอัตราขยายของสายอากาศตัวใดตัวหนึ่งจะสามารถหาค่าอัตราขยายของสายอากาศตัวอื่นๆ ได้ทั้งหมดซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$G_t(dB) + G_r(dB) = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log \left(\frac{P_r}{P_t} \right) \quad (5.3)$$

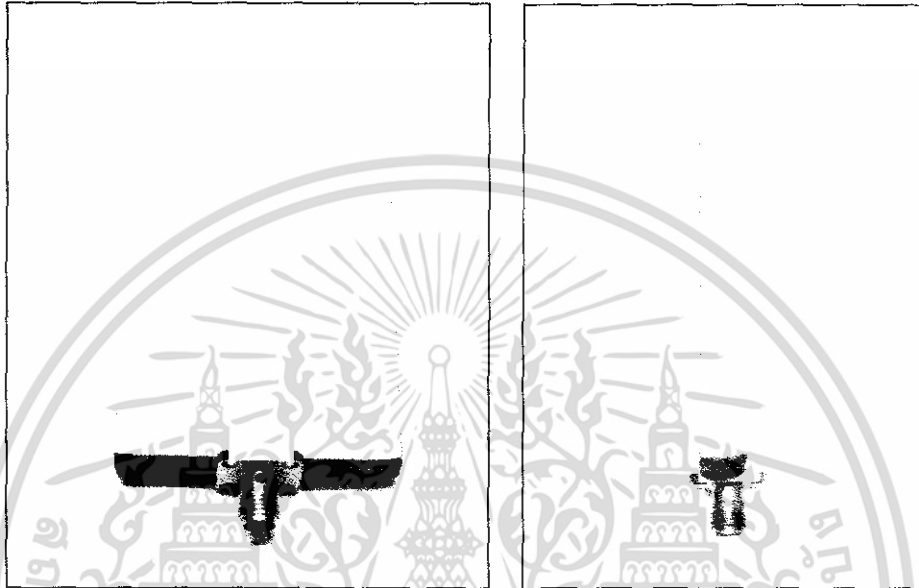
ตารางที่ 5.8 ค่าอัตราการขยายของสายอากาศ ที่ได้จากการทดสอบ

| ความถี่ของสายอากาศ | อัตราการขยาย (dBi) |
|--------------------|--------------------|
| 2.45 GHz | 2.118 |
| 5.25 GHz | 2.114 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.8 การทดสอบส่งสัญญาณของสายอากาศในการใช้งานจริง

เนื่องจากช่วงความถี่ที่ใช้งานคือ 2.45 GHz กับ 5.25 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ในการใช้งานในระบบ Wireless Lan ดังนั้น การทดสอบการรับและส่งสัญญาณของสายอากาศจะทำโดยการต่อสายอากาศเข้ากับ Access Point ในระบบ Wireless Lan และใช้คอมพิวเตอร์แบบพกพาทำการหาระยะที่สายอากาศสามารถส่งสัญญาณได้

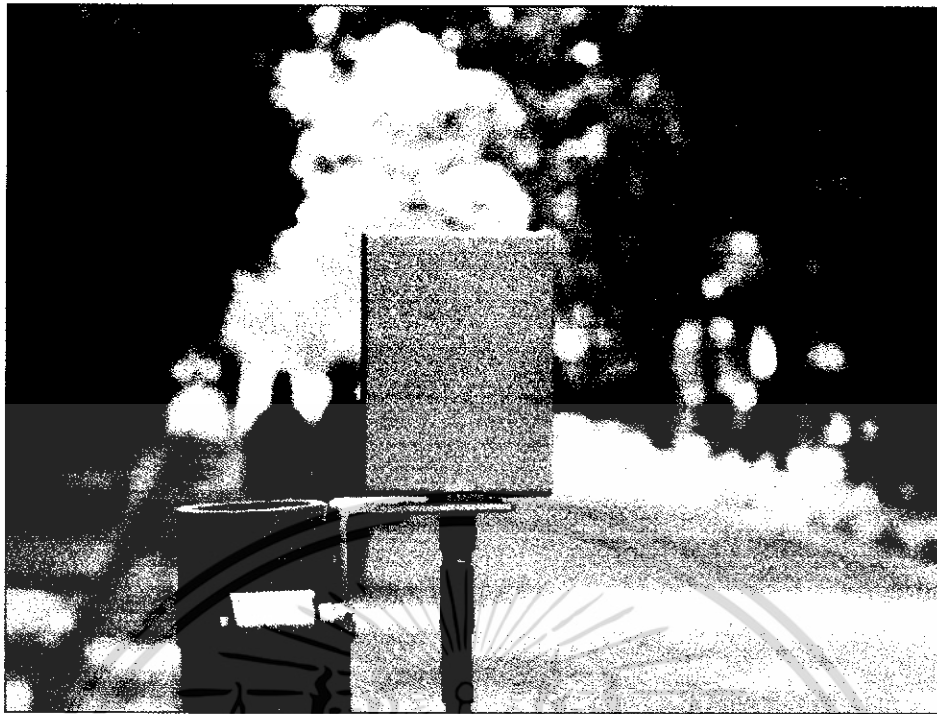


รูปที่ 5.15 สายอากาศไมโครสตริปที่บรรจุกล่องแล้วนำมาทดสอบใช้งานจริง



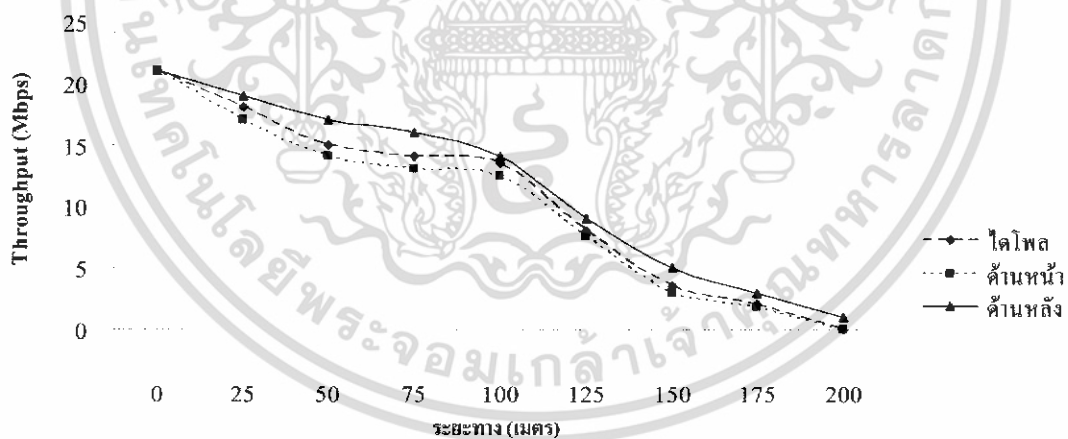
(ก) การติดตั้งสายอากาศเข้ากับ Access point

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) การติดตั้งสายอากาศในการทดสอบใช้งานจริง

รูปที่ 5.16 สายอากาศไมโครสตริปที่ติดตั้งกับ Access Point ในการทดสอบใช้งานจริง



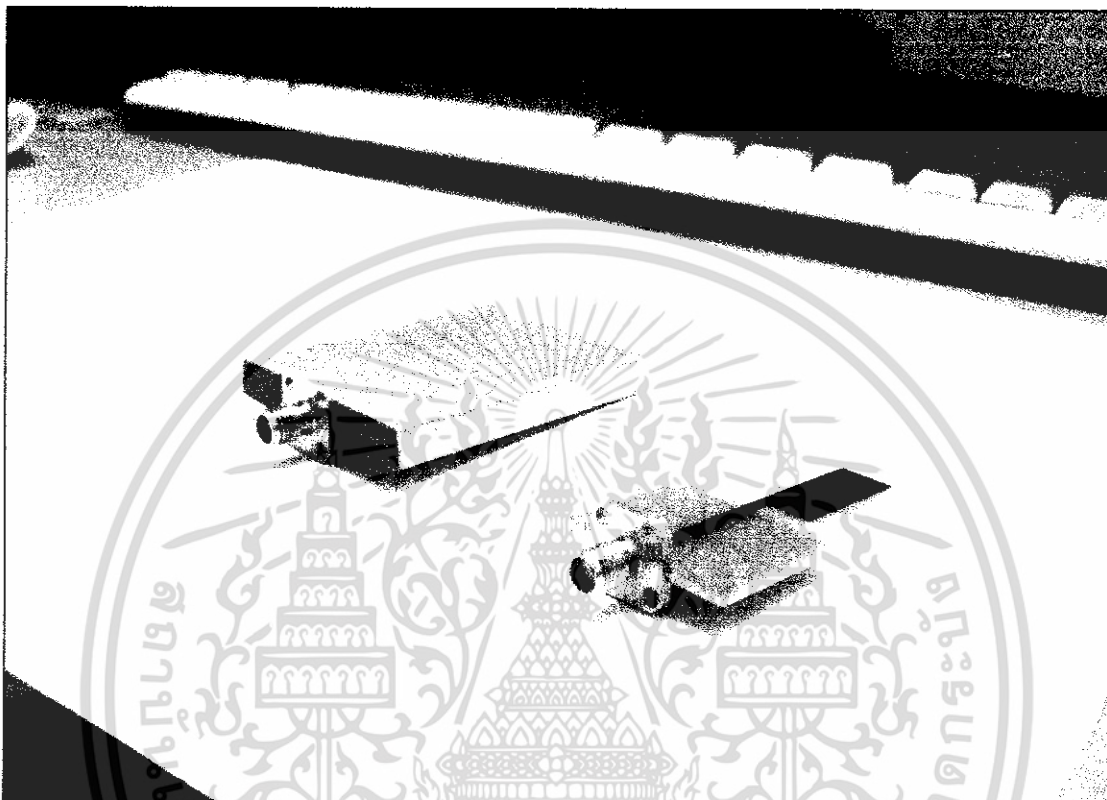
รูปที่ 5.17 ผลการทดสอบส่งสัญญาณของสายอากาศในการใช้งานจริง

ซึ่งจากผลการทดสอบการใช้งานจริงที่ได้จะเห็นว่า ความเร็วในการรับส่งข้อมูลนั้นขึ้นอยู่กับระยะทาง โดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น และจากกราฟก็จะเห็นว่าสายอากาศไมโครสตริปนี้มีระยะทำการที่ใกล้เคียงกับสายอากาศใต้โพลที่มีอัตราขยายสายอากาศที่ใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 วิเคราะห์ผลทดสอบ

จากการทดสอบที่ผ่านมาทั้งหมด เป็นการทดสอบหาคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศไมโครสตริป 2 ย่านความถี่ ที่ความถี่ 2.45 GHz และที่ความถี่ 5.25 GHz นั้นมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการทดสอบ เป็นไปตามความต้องการซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้



รูปที่ 5.18 สายอากาศที่ใช้ทดสอบการใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปวิจารณ์ และแนวทางการพัฒนา

สายอากาศไมโครสตริปได้ทำการออกแบบการสร้าง และทดลองเป็นลักษณะของสายอากาศแบบแผ่นที่มีรูปร่าง ของส่วนที่ใช้แพร่กระจายคลื่นเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยสายอากาศไมโครสตริปตัวนี้จะสร้างจากวัสดุฐานรองที่เป็นแบบอีพ็อกซี สายอากาศไมโครสตริปที่สร้างขึ้นจะเป็น สายอากาศไมโครสตริป 2 ความถี่โดยจะรองรับการใช้งานย่านความถี่ 2.4 GHz และผ่านความถี่ 5.2 GHz ซึ่งจะทำให้ครอบคลุมการใช้งานในระบบ โครงข่ายท้องถิ่น ไร้สายทั้งหมด ซึ่งได้แสดงทฤษฎีการออกแบบ การสร้าง และการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ โดยจะทำการทดสอบวัดค่ากำลังงานสูญเสีย (Return Loss) การหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และการแพร่กระจายคลื่น และทำการเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศจากที่ทดลองทางทฤษฎี ว่ามีความสอดคล้องหรือมีความแตกต่างกันอย่างไร และสามารถยอมรับนำไปใช้งานได้ ซึ่งจากทฤษฎีการออกแบบ การสร้างสายอากาศไมโครสตริปสามารถนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบ การสร้างสายอากาศไมโครสตริป และสายอากาศย่านความถี่สูงในรูปแบบอื่น ๆ ต่อไป

6.1 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการ

1. สามารถออกแบบ และสร้างสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม โดยมีความถี่ใช้งานในช่วง 2.4 GHz และ 5.2 GHz
2. สามารถนำสายอากาศไมโครสตริปที่สร้างขึ้น ไปทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศได้
3. นำทฤษฎีการสร้าง ออกแบบ ทดลอง และผลการทดลอง ประยุกต์ใช้สร้าง สายอากาศในย่านความถี่สูง รูปแบบอื่น ๆ ได้
4. สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศที่สร้าง กับที่ออกแบบคำนวณทางทฤษฎีได้

6.2 ปัญหา และแนวทางแก้ไข

6.2.1 ปัญหา

ในการจัดทำโครงการชุดนี้ สามารถสรุปปัญหาที่เกิดขึ้น ดังนี้

1. ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำให้แผ่นตัวนำที่ใช้ทำเป็นกราวด์เพลนมีขนาดที่ไม่จำกัด และเป็นตัวนำที่สมบูรณ์ได้
2. ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปเมื่อนำมาทดลอง และออกแบบสร้างผลที่ได้ไม่เป็นไปตามทฤษฎีที่ใช้คำนวณได้
3. การสร้างแผ่นแพร่กระจายคลื่นให้มีขนาดตรงตามที่คำนวณทำได้ยาก เพราะมีความละเอียดมาก จึงไม่สามารถสร้างตามการคำนวณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ในการวัด และทดสอบค่าการสูญเสียกับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง จะมีค่าไม่สอดคล้องกัน คือ ถ้าค่าสะท้อนกลับมีมากเป็นผลที่ไม่ดี แต่ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่วัดได้พร้อมกันจะมีค่าที่ดี
5. ในการวัด และทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ไม่สามารถทำการทดลองสายอากาศโดยเฉพาะ ดังนั้น ในการทดลองจึงเกิดความคลาดเคลื่อน
6. การบัดกรี เพื่อทำการเชื่อมต่อตัวเชื่อมต่อแบบ SMA กับสายส่งไมโครสตริปนั้นทำได้ยาก เพราะว่าจุดเชื่อมต้อมีขนาดเล็ก และแผ่นทองแดงสามารถหลุดจากส่วนที่เป็นฉนวนได้ถ้าการบัดกรีใช้ความร้อนสูงเกินไป
7. เกิดคราบออกไซด์บนแผ่นแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป ทำให้มีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

6.2.2 แนวทางแก้ไข

1. ออกแบบสายอากาศให้แผ่นตัวนำที่ใช้ทำเป็นกราวด์เพลนมีขนาดใหญ่มากที่สุดเท่าที่สามารถจะทำได้
2. ในการออกแบบสายอากาศ ค่าคงตัวของสารที่ใช้เป็นฉนวน ต้องกำหนดให้ได้ตรงตามค่าของสารนั้น และถูกต้องมากที่สุด
3. ในส่วนของการสร้างสายอากาศไมโครสตริป ต้องสร้างให้ได้ขนาดตามที่คำนวณให้มากที่สุด คือต้องออกแบบขนาดโดยใช้เครื่องมือที่สามารถกำหนด และวัดขนาดของแผ่นแพร่กระจายคลื่นที่มีความละเอียดสูง และให้เกิดค่าที่คลาดเคลื่อนจากการออกแบบที่น้อยที่สุด
4. การวัด และทดสอบถ้าจะให้ ได้ค่าต่าง ๆ มีความถูกต้องและสอดคล้องกันต้องสร้างสายอากาศให้มีขนาดที่ถูกต้อง และมีความละเอียดในการสร้างให้สูงมากขึ้น
5. ในการวัด และทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น ต้องใช้เครื่องมือ และชุดทดสอบมีความเที่ยงตรงและผิดพลาดน้อยที่สุด รวมทั้งห้องที่ทำการทดสอบ ต้องจัดตำแหน่งของสายอากาศเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในห้อง ไม่ให้เกิดการรบกวน
6. การบัดกรี ต้องใช้เครื่องมือบัดกรีที่ควบคุมอุณหภูมิได้อย่างสม่ำเสมอ เพื่อที่จะสามารถควบคุมอุณหภูมิขณะทำการเชื่อมต่อ ไม่ให้มีความร้อนสูงเกินไป
7. การขจัดคราบออกไซด์ทำได้โดยกรดทำความสะอาดแผ่นแพร่กระจายคลื่น และทำการเคลือบด้วยแล็คเกอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 แนวทางการพัฒนา

1. การสร้างสายอากาศให้มีขนาดเล็กลง ทำได้โดยการเพิ่มความถี่ใช้งานสูงขึ้น
2. ในส่วนของทฤษฎีการออกแบบคำนวณสามารถออกแบบคำนวณสามารถออกแบบ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบเพื่อเพิ่มความถูกต้องให้มากขึ้น
3. ในการสร้างสายอากาศ สามารถสร้างสายอากาศให้มีอัตราขยายของสายอากาศเพิ่มมากขึ้น โดยออกแบบให้สายอากาศเชื่อมต่อกันหลายๆ ตัว (Array) ซึ่งอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์เดียวกัน
4. การใช้เครื่องมือที่ใช้ในการตัดแผ่นวงจรพิมพ์ ที่สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ จะทำให้การสร้าง และออกแบบส่วนของ แผ่นแพร่กระจายคลื่นให้มีความละเอียดได้สูง สะดวก และรวดเร็วยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. บัณฑิต รัตน์อารยานนท์ “วิศวกรรมสายอากาศ”, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , พ.ศ.2536
2. พิชัย ภักดีพานิชเจริญ “ทฤษฎีและการใช้งานความถี่ย่านไมโครเวฟ”, สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์ , พ.ศ.2536
3. โมไนย ไกรฤกษ์ “ทฤษฎีสายอากาศ”, สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์ , พ.ศ.2541
4. A.W. Rudge W.Miline and A.D. Olver P.Wnight, “Handbook Of Antenna Design” ,Volume 1
Peregrinus LTD., London, UW, 1982
5. C.A. Balanis, “ Antenna Theory Analysis and Design,” 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., 1997
6. Edward A. Wolf, “Antenna Analysis” ,John Wiley and Sons Inc, 1966
7. Kin - lu Wong “Planar Antennas for Wireless Communications”, John Wiley and Sons Inc, 2003
8. Robert E. Collin, “Antenna and Radiowave Propagation” ,McGraw-Hill Book Company, New York, 1985
9. Thomas A. Milligan, Martin Marietta Denver Aerospace, “Modern Antenna Design” ,McGraw-Hill, New York, 1985

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้