

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศขนาดเล็กสำหรับระบบตรวจจับไร้สาย

Small antenna for wireless detection system

โดย

นายวรพจน์ ทิริยะไพศาลศรี

นายขวัญชัย บัวลอย

๒๗.
๗๒๒๕๐
๒๕๕๐

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 83276
วัน,เดือน,ปี... 11.1.๒๕๕1

b. 11๑ ๖๖๐๖๓
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๐

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศขนาดเล็กสำหรับระบบตรวจจับไร้สาย

Small antenna for wireless detection system

โดย

นายวรพจน์ พิริยะไพศาลศรี 48015031

นายขวัญชัย บัวลอย 48015048

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศต.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

รศ.ดร.จเร สุรวัดณ์ปัญญา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

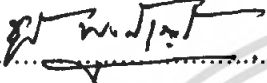
เรื่อง **สายอากาศขนาดเล็กสำหรับระบบตรวจจับไร้สาย**

Small antenna for wireless detection system

ผู้จัดทำ

1. นายวรพจน์ พิริยะไพศาลศรี 48015031

2. นายขวัญชัย บัวดอย 48015048


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.จเร สุรวัดน์ปัญญา)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศขนาดเล็กสำหรับระบบตรวจจับไร้สาย
Small antenna for wireless detection system

โดย นายวรพจน์ พิริยะไพศาลศรี 48015031
นายขวัญชัย บัวลอย 48015048

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

บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศขนาดเล็กสำหรับระบบตรวจจับไร้สายที่ความถี่ย่านยูเอชเอฟ โดยจะทำการวิเคราะห์คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่น อิมพีแดนซ์แมชชิง โพลารไรซ์ และแบนด์วิดท์ ซึ่งเป็นการศึกษาผลกระทบของแต่ละพารามิเตอร์ จากนั้นได้นำเทคนิคการลดขนาดของสายอากาศมาใช้ร่วมกับการปรับพารามิเตอร์เพื่อออกแบบสายอากาศให้มีขนาดเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับระบบตรวจจับแบบไร้สายต่อไป

Abstract

This project presents the design of small antenna for wireless detection system at UHF frequency. The antenna properties such as radiation characteristics, impedance matching, polarization and bandwidth will be analyzed to examine the effect of each parameter. Subsequently, the miniaturization technique is applied together with varying antenna parameters to determine the suitable parameters for the application of wireless detection system.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจาก ศศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพามาณิชย์ และ รศ.ดร.จเร สุรวัฒน์ปัญญา ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาผู้ให้ความช่วยเหลือคำแนะนำแนวทางการศึกษา แนวทางในการแก้ไขปัญหาดังๆ ที่เกิดขึ้น และดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดี ตลอดจนคอยอบรมสั่งสอนให้คำแนะนำเทคนิคต่างๆ ในการทดลอง ขอขอบคุณพี่ๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายที่ได้รับคำแนะนำ และความรู้ด้านต่างๆ ตลอดจนเพื่อนๆ ทุกคนที่ได้แลกเปลี่ยนความรู้ความคิดเห็น ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ท้ายสุดนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ความรัก ความห่วงใย กำลังใจที่ดี รวมทั้งกำลังทรัพย์ และให้ทุกสิ่งทุกอย่างกับผู้จัดทำ



คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

| | | |
|----------------|--|----|
| บทที่ 1 | บทนำ | 1 |
| | 1.1 กล่าวนำ | 1 |
| | 1.2 ขอบเขตของโครงการ | 1 |
| | 1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ | 2 |
| บทที่ 2 | ทฤษฎีและหลักการ | 3 |
| | 2.1 ลักษณะโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป | 3 |
| | 2.2 ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป | 9 |
| | 2.3 สนามที่แพร่กระจายของสายอากาศไมโครสตริป | 9 |
| | 2.4 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริป | 10 |
| | 2.4.1 แบบจำลองสายส่ง (Transmission Line Model) | 10 |
| | 2.4.2 แบบจำลองคาวิตี | 15 |
| | 2.5 การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปที่มีแผ่นตัวนำเป็นรูปสี่เหลี่ยม | 19 |
| | 2.5.1 การหาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก | 19 |
| | 2.5.2 ความถี่เรโซแนนซ์ | 21 |
| | 2.5.3 การแพร่กระจายคลื่นและสภาพเจาะจงทิศทาง | 21 |
| | 2.6 พารามิเตอร์ของสายอากาศ (Antenna Parameter) | 22 |
| | 2.6.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) | 22 |
| | 2.6.2 โลบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe) | 22 |
| | 2.6.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity) | 24 |
| | 2.6.4 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) | 24 |
| | 2.6.5 บีมวิดท์ (Beamwidth) | 25 |
| | 2.6.6 แบนด์วิดท์ (Bandwidth : BW) | 25 |
| | 2.6.7 อัตราขยาย (Gain) | 26 |
| | 2.6.8 ประสิทธิภาพสายอากาศ | 26 |
| บทที่ 3 | การออกแบบและการสร้าง | 27 |
| | 3.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป | 27 |
| | 3.2 เทคนิคการลดขนาดสายอากาศ | 27 |
| | 3.2.1 การใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบที่มีค่ามาก ๆ (High permittivity substrates) | 27 |
| | 3.2.2 การใช้วัสดุประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก (Magnetic substrates) | 30 |
| | 3.2.3 การเพิ่มขนาดทางไฟฟ้า (Increasing electrical length) | 34 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|---|----|
| 3.2.4 การลัดวงจร (Shorted circuits) | 36 |
| 3.2.5 การใช้วัสดุไดอิเล็กทริกวางซ้อนทับด้านบน (Superstrates) | 37 |
| 3.2.6 การรวมเทคนิคต่างๆข้างต้นเข้าด้วยกัน (Combined techniques) | 39 |
| 3.2.6.1 การเลือกรูปร่างของสายอากาศ | 40 |
| 3.2.6.2 การเลือกวิธีป้อน | 41 |
| 3.2.6.3 การเลือกวัสดุฐานรอง | 41 |
| 3.2.6.4 การลัดวงจร (Shorted circuits) | 41 |
| 3.3 การคำนวณและการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม | 41 |
| 3.4 การสร้างสายอากาศไมโครสตริป | 44 |
| 3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศไมโครสตริป | 44 |
| 3.4.2 ขั้นตอนการออกแบบและการสร้างสายอากาศไมโครสตริป | 44 |
| บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง | 45 |
| 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ | 46 |
| 4.2 ขั้นตอนการทดสอบ | 46 |
| 4.3 ผลการทดสอบสายอากาศความถี่ 433 MHz | 46 |
| 4.3.1 ผลการทดสอบวัดหาค่าการสูญเสียย้อนกลับ | 46 |
| 4.3.2 ผลการทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ | 47 |
| 4.3.3 ผลการทดสอบวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ (VSWR) | 47 |
| 4.3.4 ผลการทดสอบการวัดค่าแบนด์วิดท์ | 48 |
| 4.3.5 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ | 49 |
| 4.3.6 ผลการทดสอบการหาอัตราขยายของสายอากาศ | 52 |
| 4.3.7 ผลการทดสอบหาระยะรับ-ส่งของสายอากาศกับระบบเซนเซอร์ | 52 |
| บทที่ 5 บทวิจารณ์และบทสรุป | 54 |
| 5.1 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการนี้ | 54 |
| 5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข | 54 |
| 5.2.1 ปัญหา | 54 |
| 5.2.2 แนวทางแก้ไข | 55 |
| กิตติกรรมประกาศ | |
| หนังสืออ้างอิง | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

| | |
|--|----|
| รูปที่ 2.1 รูปแบบลักษณะโครงสร้างทั่วไปของสายอากาศแบบไมโครสตริป | 3 |
| รูปที่ 2.2 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นตัวนำ (Patch) | 4 |
| รูปที่ 2.3 ส่วนที่ป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริป | 5 |
| รูปที่ 2.4 ส่วนที่ป้อนสัญญาณแบบเฟอร์เรอร์จอร์คัลบ์เปิดเฟด | 6 |
| รูปที่ 2.5 ส่วนที่ป้อนสัญญาณแบบพรีคิมิตีคัลบ์เปิดเฟด | 7 |
| รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของสายอากาศไมโครสตริปแบบต่างๆ | 8 |
| รูปที่ 2.7 ลักษณะการสะท้อนคลื่นของกราวด์เพลน (Ground Plane) | 9 |
| รูปที่ 2.8 ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ | 9 |
| รูปที่ 2.9 ลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองสายส่ง | 10 |
| รูปที่ 2.10 กราฟการเพิ่มขึ้นของ (ϵ_r) เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น | 12 |
| รูปที่ 2.11 ผลจากความยาวของสายอากาศไมโครสตริป | 12 |
| รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของสายอากาศไมโครสตริป | 13 |
| รูปที่ 2.13 การเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความนำไฟฟ้า | 15 |
| รูปที่ 2.14 แบบจำลองควาตี | 15 |
| รูปที่ 2.15 รูปแบบของสนามในโหมดต่างๆ | 17 |
| รูปที่ 2.16 ความหนาแน่นของกระแสที่บริเวณด้านทั้งสี่ | 18 |
| รูปที่ 2.17 รูปแบบของสายอากาศไมโครสตริปชนิดสี่เหลี่ยม | 19 |
| รูปที่ 2.18 แสดงระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ | 22 |
| รูปที่ 2.19 โลบต่างๆและบีมวิคท์ของแบบสายอากาศ | 23 |
| รูปที่ 2.20 แบบรูปในแบบเชิงเส้น | 23 |
| รูปที่ 3.1 สายอากาศไมโครสตริป | 27 |
| รูปที่ 3.2 ข้อจำกัดของค่าเศษส่วนช่วงกว้างความถี่และประสิทธิภาพของสายอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดความสูงของวัสดุฐานรองของสายอากาศ | 30 |
| รูปที่ 3.3 สายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่ใช้วัสดุประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กและเส้นขด | 31 |
| รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบระหว่างสาร ไดอิเล็กตริกและสารที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก | 32 |
| รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงค่าของ μ_r และ ϵ_r | 32 |
| รูปที่ 3.6 (ก) แบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (ข) ค่า GBP ของสายอากาศ | 33 |
| รูปที่ 3.7 (ก) โครงสร้างของสายอากาศ (ข) ขนาดของสายอากาศกับค่าอัตราขยายของสายอากาศ | 35 |
| รูปที่ 3.8 (ก) โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปที่ถูกัดวงจรในรูปแบบต่างๆ (ข) ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ | 36 |
| รูปที่ 3.9 โครงสร้างของสายอากาศที่มีการวางซ้อนทับด้วยไดอิเล็กตริก | 37 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|----|
| รูปที่ 3.10 การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective dielectric constant : ϵ_{reff}) | 38 |
| รูปที่ 3.11 การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล ϵ_{reff} เมื่อค่าความสูงของไดอิเล็กตริกที่วางซ้อนทับเปลี่ยนไป | 39 |
| รูปที่ 3.12 (ก) โครงสร้างของสายอากาศที่มีการใช้เทคนิคต่างๆรวมเข้าด้วยกัน (ข) การป้อนด้วย Coaxial Connector | 40 |
| รูปที่ 3.13 รูปแบบสายอากาศที่ออกแบบด้วยโปรแกรม CST | 42 |
| รูปที่ 3.14 ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 433 MHz ที่ได้จากโปรแกรม CST | 42 |
| รูปที่ 3.15 อิมพีแดนซ์ที่ได้จากโปรแกรม CST | 43 |
| รูปที่ 3.16 การแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม CST | 43 |
| รูปที่ 4.1 สายอากาศใช้งานที่ความถี่ 433 MHz | 45 |
| รูปที่ 4.2 ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบ | 46 |
| รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ | 47 |
| รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบวัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ (VSWR) | 48 |
| รูปที่ 4.5 ค่าแบนด์วิดท์ที่ได้จากการทดสอบ | 48 |
| รูปที่ 4.6 การจัดวางสายอากาศเพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น | 50 |
| รูปที่ 4.7 การจัดวางสายอากาศเพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆ | 50 |
| รูปที่ 4.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก | 51 |
| รูปที่ 4.9 การจัดวางสายอากาศเพื่อหาระยะรับ-ส่งของสายอากาศ | 52 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 1 ค่าอัตราขยายและช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลง μ_r/ϵ_r | 34 |
| ตารางที่ 2 ค่าความถี่เรโซแนนซ์กับการลัดวงจรแบบต่าง ๆ | 37 |
| ตารางที่ 3 ขนาดของสายอากาศ | 40 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ในระบบสื่อสาร (Communication System) สายอากาศมีความสำคัญอย่างยิ่งในระบบการสื่อสารที่ใช้คลื่น เพราะสายอากาศที่ดีและมีประสิทธิภาพสูงจะทำให้สามารถประหยัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องส่ง และสามารถติดต่อกันได้ในระยะไกลขึ้น สายอากาศจึงได้รับการคิดค้นและพัฒนาให้เหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะต่าง ๆ ดังจะเห็นได้ว่าสายอากาศที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันมีมากมายหลายแบบด้วยกัน เมื่อพิจารณากันอย่างกว้าง ๆ แล้วสายอากาศอาจจะมีโครงสร้างได้มากมายหลายรูปแบบ เพราะเนื่องจากเรากำหนดให้กระแสไฟฟ้าความถี่สูงไหลบนโลหะอย่างเหมาะสมแล้วก็จะมีการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กส่งผ่านออกไปได้อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัตินั้น สายอากาศที่ถูกนำมาใช้งานนั้นนอกจากจะต้องมีประสิทธิภาพสูง มีคุณสมบัติในการกระจายคลื่นตามต้องการแล้วยังต้องมีรูปร่างที่สะดวกต่อการสร้าง มีความแข็งแรง และราคาถูกลงด้วย ด้วยเหตุนี้สายอากาศที่ใช้งานในปัจจุบันจึงมีจำนวนรูปแบบที่จำกัด และในจำนวนนี้จะมีสายอากาศที่เป็นพื้นฐานที่มีโครงสร้างง่าย ๆ และมีคุณสมบัติในการกระจายคลื่นอยู่ในเกณฑ์ดี

ถึงแม้สายอากาศจะได้รับการคิดค้นและพัฒนากันมาหลาย 10 ปีแล้วก็ตาม ในปัจจุบันนี้ก็มีการวิจัยและพัฒนาสายอากาศรูปแบบใหม่ขึ้นเสมอ ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าความต้องการของการสื่อสารที่ใช้คลื่นนั้นได้แผ่กว้างออกไป และได้มีความต้องการในลักษณะเฉพาะต่าง ๆ เกิดขึ้นเสมอ ยกตัวอย่างเช่นในระบบสื่อสารดาวเทียมภายในประเทศ (Domestic Satellite Communication System) สายอากาศบนดาวเทียมจะต้องส่งคลื่นลงมาตรงบริเวณที่ต้องการเท่านั้น โดยไม่ล้ำเข้าเขตของประเทศที่ไม่ต้องการคลื่นนั้น ในลักษณะเช่นนี้สายอากาศบนดาวเทียมก็จำเป็นต้องได้รับการออกแบบพิเศษให้มีคุณสมบัติในการกระจายคลื่นตามต้องการนั้น

ในระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless sensor network) ที่ใช้งานในย่านความถี่ 433 MHz นั้นในปัจจุบันได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีความเหมาะสมกับการใช้งานในยุคปัจจุบัน โดยมีความเร็วในการส่งข้อมูลที่เพียงพอต่อการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการการส่งข้อมูลที่มีจำนวนข้อมูลไม่มากนักและปัจจุบันอุปกรณ์ต่าง ๆ ถูกพัฒนาให้มีขนาดเล็กลง เพราะฉะนั้นสายอากาศในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ย่านความถี่ 433 MHz จึงต้องมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับสายอากาศทั่วไปที่ใช้งานในย่านความถี่เดียวกัน

1.2 ขอบเขตของโครงการ

สามารถออกแบบสายอากาศขนาดเล็กสำหรับระบบตรวจจับ ไร้สายที่ความถี่ย่านยูเอชเอฟ โดยจะทำการวิเคราะห์คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่น อิมพีแดนซ์แมชชิง โพลาริไรซ์ และแบนด์วิดธ์ซึ่งเป็นการศึกษาผลกระทบของแต่ละพารามิเตอร์

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. สามารถลดขนาดสายอากาศในย่านยูเอชเอฟ ที่ความถี่ 433MHz
2. สามารถนำสายอากาศมาประยุกต์ใช้กับระบบตรวจจับไร้สายที่ความถี่ย่านยูเอชเอฟ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

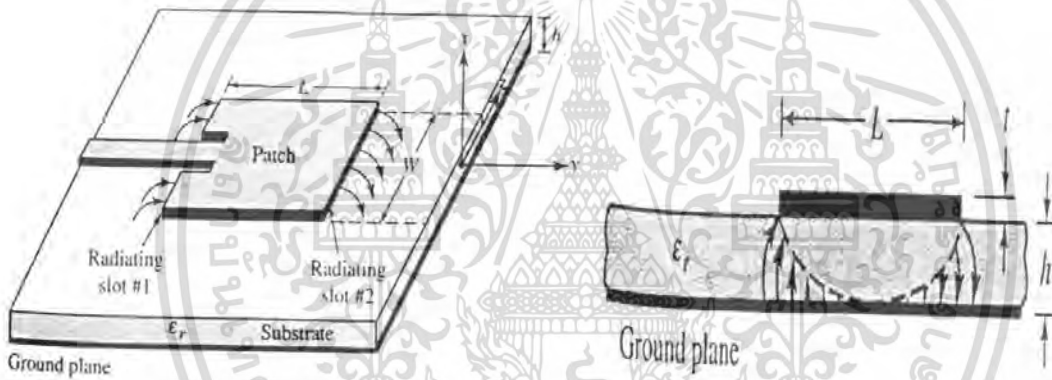
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna)

สายอากาศไมโครสตริปนั้นได้เริ่มจากแนวคิด ในการใช้งานไมโครสตริปซึ่งมีรูปร่างสี่เหลี่ยมขนาดเล็กในการแพร่กระจายคลื่น ได้ถูกเสนอครั้งแรกโดย Deschamps ค.ศ. 1953 และหลังจากนั้นอีก 20 ปี จึงได้มีการสร้างสายอากาศใช้งานจริง โดยมีการพัฒนาแบบจำลองทางทฤษฎี และเทคนิค Photo-etch ของฐานรองที่เป็น ทองแดงหรือ ทองคำ และมีคุณสมบัติทางอุณหภูมิต่างกันและทางกลศาสตร์ที่ดีขึ้นมีค่า Loss ที่ต่ำ สายอากาศไมโครสตริปถูกสร้างขึ้นมาครั้งแรกในปี ค.ศ. 1970 โดย Howell , Munsun จากนั้นมีการวิจัยและพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วและนำไปใช้อย่างกว้างขวางในหลายๆสายงาน

2.1 ลักษณะโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป



รูปที่ 2.1 รูปแบบลักษณะ โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศแบบไมโครสตริป

โครงสร้างสายอากาศแบบไมโครสตริป จะประกอบไปด้วยแผ่นตัวนำ 2 แผ่นวางขนานกันอยู่ โดยมีแผ่นตัวนำ (Patch) ที่อยู่ด้านบนซึ่งมีรูปร่างต่างๆ เช่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular) รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square) รูปวงกลม (Circle) รูปวงรี (Elliptical) ฯลฯ เรียกว่าตัวแพร่กระจายคลื่น (Radiation Patch) โดยทั่วไปมักจะเป็นแผ่นทองแดง หรือทองคำ แผ่นตัวนำที่อยู่ด้านล่างจะเป็นลักษณะแผ่นตัวนำทั้งแผ่น โดยในอุดมคติจะต้องมีขนาดใหญ่กว่าตัวแพร่กระจายคลื่นอย่างมาก โดยเรียกแผ่นนี้ว่า แผ่นกราวด์ (Ground plane) และมีวัสดุที่ไม่เป็นสื่อกลางทางไฟฟ้าที่เรียกว่าไดอิเล็กตริก (Dielectric Substrate) มากั้นกลางระหว่างตัวนำทั้งสอง ขนาดของตัวแพร่กระจายจะมีขนาดตามความเหมาะสมกับงานหรือความถี่ที่จะนำไปใช้งาน ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบตัวแพร่กระจายคลื่นให้มีขนาดตามความต้องการ แผ่นกราวด์ตามทฤษฎีจะต้องมีขนาดที่ไม่จำกัด แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถที่จะทำให้แผ่นกราวด์มีขนาดจนถึงอนันต์ได้ ดังนั้นในการออกแบบจึงไม่มีข้อจำกัดของแผ่นกราวด์ ว่าควรมีขนาดเท่าไรเพียงแต่จะต้องมีขนาดที่

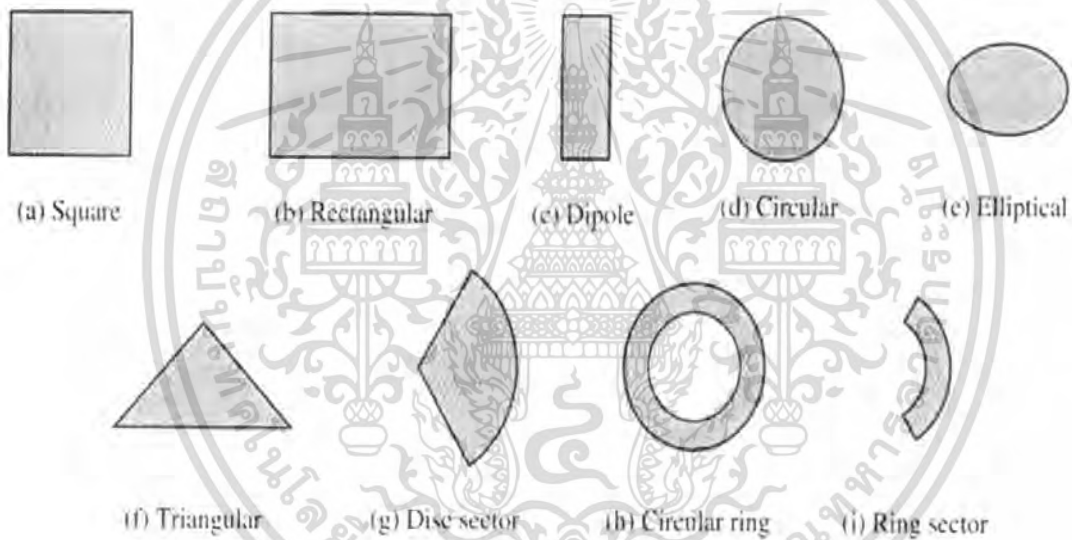
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใหญ่กว่าตัวแพร่กระจายคลื่น ซึ่งปกติสามารถแบ่งออกได้หลายแบบ ในแต่ละแบบจะมีส่วนประกอบที่เหมือนกัน 4 ส่วนคือ

- แผ่นตัวนำ (Patch)
- สารตัวกลาง (Dielectric Substrate)
- ส่วนป้อนสัญญาณ (Feed Line)
- กราวด์เพลน (Ground Plane)

แผ่นตัวนำ (Patch)

เป็นแผ่นโลหะที่ทำการออกแบบ ตามรูปแบบของการกระจายคลื่นตามที่ต้องการ โดยแผ่นโลหะจะต้องมีความหนาน้อยกว่าความยาวคลื่นที่ได้ทำการออกแบบไว้มาก เราสามารถออกแบบแผ่นตัวนำได้หลายรูปแบบ เช่น ดังรูปที่ 2.2 ส่วนใหญ่ในการสร้างมักใช้แบบสี่เหลี่ยม แบบวงกลม และแบบสามเหลี่ยม เพราะสามารถสร้างได้ง่าย



รูปที่ 2.2 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นตัวนำ (Patch)

สารตัวกลาง (Dielectric Substrate)

ในสายอากาศไมโครสตริป จะมีค่าสารไดอิเล็กตริกอยู่ระหว่าง 2.2 ถึง 12 ค่าดังกล่าวนี้คือค่า ϵ_r (Relative Permittivity) โดยค่า ϵ_r จะขึ้นอยู่กับชนิดและความหนาของสารตัวนำนั้นๆ ถ้าสารมีความหนามากค่า ϵ_r ก็จะต่ำลง ทำให้มีประสิทธิภาพดีในช่วงความถี่ที่ใช้งานแต่ในทางกลับกันถ้าค่า ϵ_r มีค่าสูงขึ้นมีความหนาแน่นน้อย ก็จะทำให้ประสิทธิภาพลดลง เกิดความสูญเสียทำให้ใช้งานได้ในช่วงความถี่ที่แคบเหมาะสำหรับงานทางด้านไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนป้อนสัญญาณ (Feed Line)

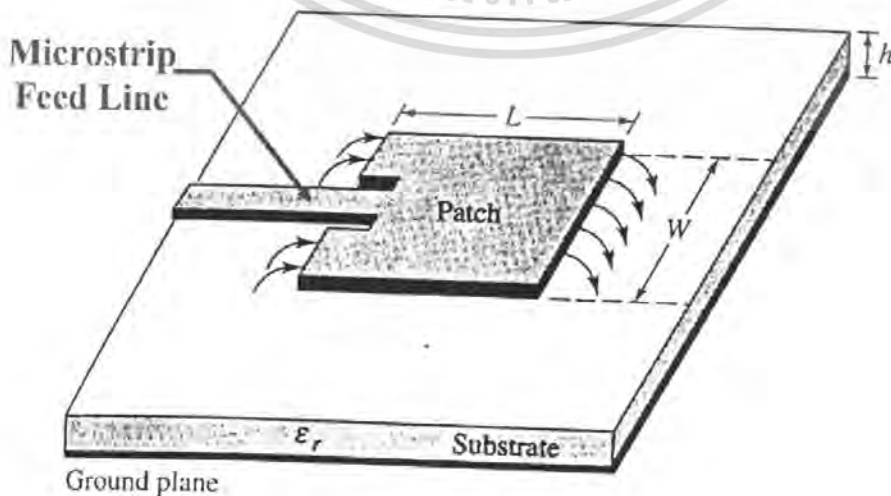
ส่วนป้อนกลับจะทำหน้าที่ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศ จุดนี้จะเป็นส่วนสำคัญมากเนื่องจากมีผลต่อการปรับ โพลาริเซชัน ของสายอากาศ และการปรับค่าแมทซิ่ง โดยตำแหน่งและความยาวส่วนที่ป้อนสัญญาณจะมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นด้วย

ในสายอากาศไมโครสตริปมีรูปแบบการป้อนสัญญาณหลายรูปแบบแต่มีอยู่ 4 รูปแบบที่เป็นที่นิยม คือ แบบไมโครสตริป (Microstrip Line Feed) , แบบเคเบิลแกนร่วม (Probe Feed) , แบบอเพอร์เจอร์คัปเปิลเป็ดฟีค (Aperture-Couple-Feed) และแบบพร็อกซิมิตีคัปเปิลเป็ดฟีค (Proximity-Coupled Feed) สามารถแสดงได้ดังนี้

การป้อนแบบไมโครสตริป (Microstrip Line Feed)

เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการป้อนสัญญาณ โดยการใช้แผ่นไมโครสตริปและสายส่งต่อเข้ากับตัวกลาง โดยตรงแต่วิธีนี้สายอากาศที่ได้จะมีคุณสมบัติไม่ค่อยดี เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศและสายส่งไม่สอดคล้องกัน โดยสายอากาศนี้จะส่งคลื่นได้ไม่ดีนัก เพราะบริเวณผิวโลหะที่ไม่ต่อเนื่องกัน ทำให้การแพร่กระจายคลื่นมีระดับของลำคลื่นในทิศทางด้านข้าง (Side Lobe) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้ไปลดคุณภาพของสายอากาศลง และจะมีพลังงานที่ยังไม่ได้แพร่กระจายสะสมอยู่จำนวนมาก ภายใต้อันตัวนำ แต่ก็พอมีข้อดีอยู่บ้าง โดยวิธีป้อนสัญญาณแบบนี้สามารถปรับการแมทซิ่งในตัวเองได้และยังสามารถสร้างได้ง่าย โดยทำการสร้างไปพร้อมกับแผ่นตัวนำที่ใช้ในการส่งคลื่นเลย เราสามารถเขียนเป็นคุณสมบัติของการป้อนแบบไมโครสตริปได้ดังนี้

1. ง่ายต่อการสร้างและออกแบบ
2. ง่ายต่อการทำแมทซิ่งอินพีแดนซ์
3. สัญญาณรบกวนต่ำ ($\approx -20\text{dB}$)
4. แบนด์วิดท์แคบ (2-5%)
5. ถ้าขนาดของ Substrate เพิ่มขึ้นก็จะทำให้ค่าสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นด้วย

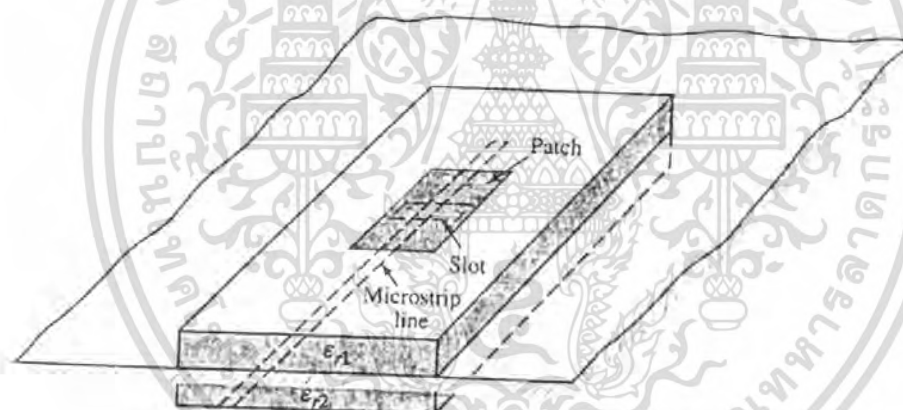


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ที่ 2.3 ส่วนที่ป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริป อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การป้อนแบบเอपर्เจอร์คัปเปิลด์ (Aperture-Coupled Feed)

ในวิธีนี้เป็นกรนำเอาแผ่นระนาบกรวดคลื่นมาขึ้นไว้ระหว่างสารตัวกลาง 2 ตัวและต้องกำหนดให้สารตัวกลางที่อยู่ด้านบนต้องมีค่า ϵ_r ที่น้อยกว่าสารตัวกลางที่อยู่ด้านล่างซึ่งทำเพื่อปรับการแพร่กระจายของคลื่นทางด้านบนให้มีช่วงความถี่กว้างขึ้นวิธีการนี้สามารถแยกการแพร่กระจายคลื่นจากแผ่นตัวนำ (Patch) กับส่วนป้อนสัญญาณไม่ให้รบกวนกันอย่างสิ้นเชิง สามารถเขียนเป็นข้อได้ดังนี้

1. การออกแบบรูปร่างง่ายมาก
2. ระดับสัญญาณรบกวนพอประมาณ ($\approx -20\text{dB}$)
3. การที่มีแผ่น Ground Plane มากั้นระหว่าง Substrate ทั้ง 2 ทำให้ลดระดับของสัญญาณรบกวนลงได้
4. มีอิสระในการแพร่กระจายคลื่น
5. สร้างยาก
6. แบนควิดท์แถบ (1-4%)
7. สารไดอิเล็กตริก ที่มีค่ามากจะเอาไว้ใช้ด้านล่าง ส่วนไดอิเล็กตริก ที่มีค่าน้อยจะเอาไว้ด้านบน



รูปที่ 2.4 ส่วนที่ป้อนสัญญาณแบบเอपर्เจอร์คัปเปิลด์

การป้อนแบบพร็อกซิมิตีคัปเปิลด์ (Proximity-Coupled Feed)

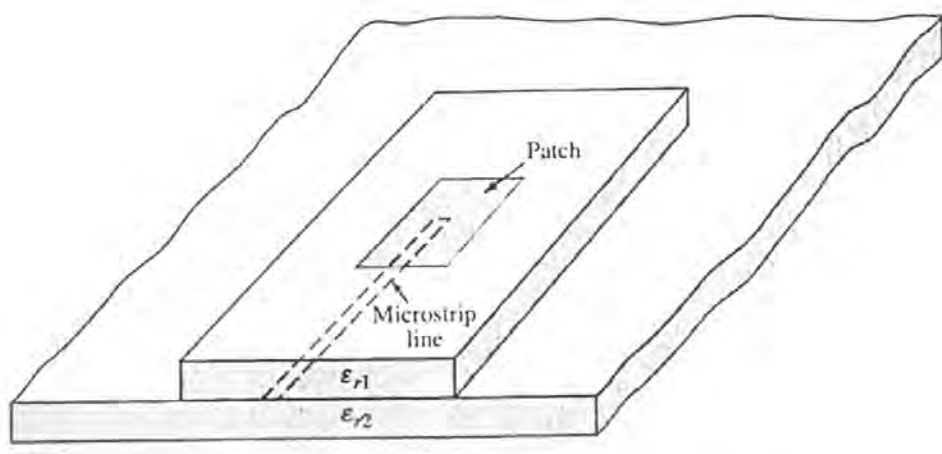
สำหรับวิธีนี้จะใช้สำหรับการทำสายอากาศไมโครสตริปแบบมัลติเลเยอร์ (Multi Layer) โดยใช้ไดอิเล็กตริกซัพสเตรต (Dielectric Substrate) 2 ตัวมาวางทับกันโดยไม่มีขนาดต่างกันและค่า ϵ_r ก็ต้องต่างกันด้วย โดยการทำให้ผลที่ออกมาจะทำให้การแพร่กระจายของสัญญาณมีช่วงความถี่ใช้งานกว้างสุด โดยจะเป็นในลักษณะไฮบริดโหมด ดังรูปที่ 2.5 สามารถเขียนเป็นข้อได้ดังนี้

1. มีขนาดแบนควิดท์กว้าง ($\leq 13\%$)
2. ง่ายในการคำนวณ
3. สัญญาณรบกวนต่ำ
4. แต่ยากในการสร้าง

5. อัตราส่วนความยาวและความกว้างของ Patch สามารถกำหนดการแมทซิ่งได้

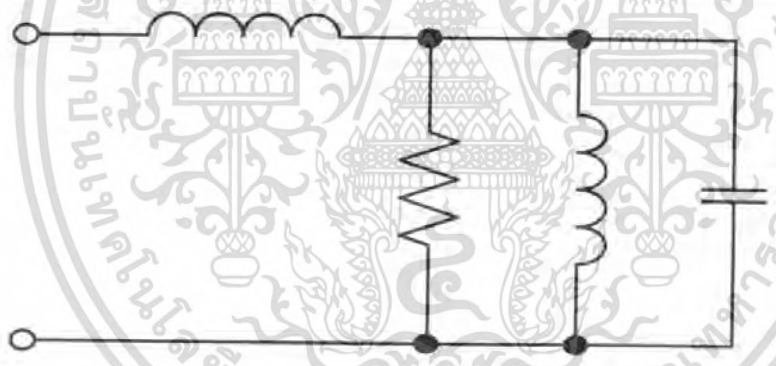
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

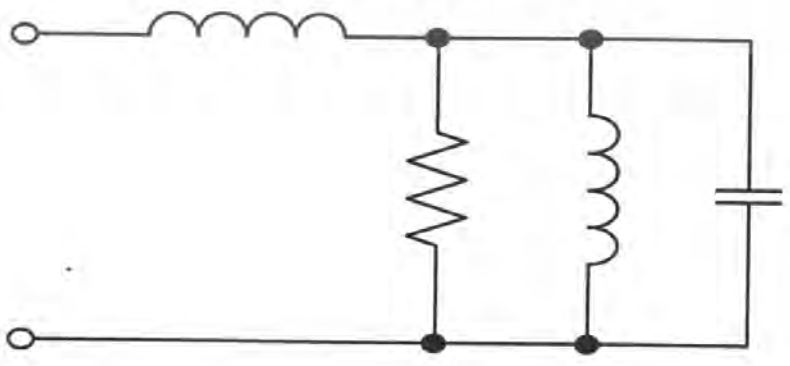


รูปที่ 2.5 ส่วนที่ป้อนสัญญาณแบบพริคซึมิต์กลับเปิดพีค

ดังนั้นจากรูปจะเห็นได้ว่าสายอากาศไมโครสตริปมีรูปแบบการป้อนสัญญาณหลายแบบจากรูปแบบต่างๆเหล่านี้เราสามารถนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังนี้

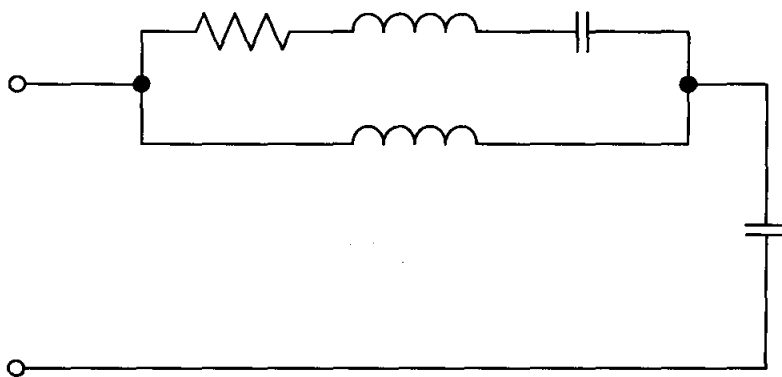


(ก) รูปวงจรสมมูลของสายอากาศไมโครสตริป แบบไมโครสตริป (Microstrip Line Feed)

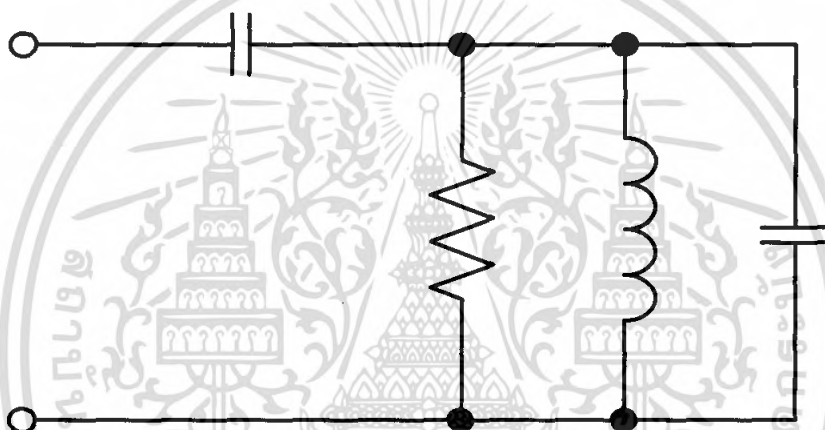


(ข) รูปวงจรสมมูลของสายอากาศไมโครสตริป แบบเคเบิลแกนร่วม (Probe Feed)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) รูปวงจรสมมูลของสายอากาศไมโครสตริป แบบพอเจอร์เจอร์คัลบ์เปิดฟิลด์ (Aperture-Couple Feed)



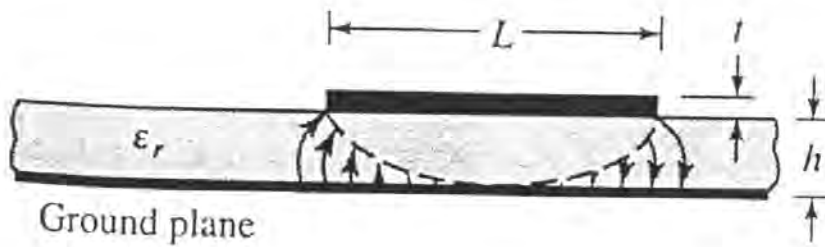
(ง) รูปวงจรสมมูลของสายอากาศไมโครสตริปแบบพรีคัมมิคัลบ์เปิดฟิลด์ (Proximity-Coupled Feed)

รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของสายอากาศไมโครสตริปแบบต่างๆ

กราวด์เพลน (Ground Plane)

แผ่นกราวด์เพลน (Ground Plane) ที่ใช้ส่วนใหญ่จะทำมาจากโลหะทองแดง ซึ่งแผ่นโลหะนั้นจะต้องมีขนาดใหญ่กว่าแผ่นตัวนำมาก ซึ่งตามทฤษฎีนั้นบอกว่า ขอบเขตของกราวด์เพลน (Ground Plane) คือ ค่าในทิศทาง x, y, z ที่มีค่าอนันต์ โดยการแพร่กระจายคลื่นสนามของสายอากาศจะเกิดขึ้นที่สนามรอบระหว่างขอบของแผ่นตัวนำของสายอากาศและแผ่นกราวด์ (Ground Plane) แผ่นตัวนำที่เป็นสายอากาศจะมีขนาดขึ้นอยู่กับความต้องการที่จะใช้งาน ที่จะออกแบบให้เหมาะสมกับงานนั้นๆ โดยหน้าที่ของกราวด์เพลนจะทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ลักษณะการสะท้อนคลื่นของกราวด์เพลน (Ground Plane)

2.2 ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป

การแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป เกิดจากสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขอบของตัวนำของสายอากาศไมโครสตริป กับแผ่นกราวด์ การแพร่กระจายคลื่นอย่างไม่ต่อเนื่องของสายอากาศไมโครสตริป ถูกทดสอบโดย Levin การวิเคราะห์ของเขาจะพิจารณากระแสที่ไหลในตัวนำ วิธีนี้จะเป็นการหาค่า Q ของความถี่ที่สายอากาศไมโครสตริปตอบสนอง ถ้าพิจารณาสนามในรูปแบบช่องเปิด โดยเปิดให้สายอากาศไมโครสตริปแยกจากกราวด์ ใช้ในการหาค่า Q ทั้งหมด ค่า Q ในที่นี้จะเป็นฟังก์ชันที่เกิดจากความถี่ที่สายอากาศไมโครสตริปตอบสนองค่าความเป็นฉนวนและความหนาของฐานรอง ผลที่ได้ทั้งจากทางทฤษฎี และจากการปฏิบัติจะแสดงว่าที่ความถี่สูง การสูญเสียอันเนื่องมาจากการแพร่กระจายคลื่นจะมีค่ามากกว่าการสูญเสียอันเนื่องมาจากแผ่นตัวนำและความเป็นฉนวน

2.3 สนามที่แพร่กระจายของสายอากาศไมโครสตริป

การแพร่กระจายสนามของสายอากาศ จะเกิดขึ้นที่สนามรอบนอก ระหว่างขอบ ของแผ่นตัวนำของสายอากาศและแผ่นกราวด์ (Ground Plane) ซึ่งสายอากาศไมโครสตริปจะมีลักษณะ โครงสร้าง ตามที่ได้กล่าวมาแล้วนำแผ่นตัวนำ (Patch) ที่เป็นสายอากาศจะมีขนาดขึ้นอยู่กับ ความต้องการที่จะใช้งานที่จะออกแบบให้เหมาะสมกับงานนั้นๆ แผ่นกราวด์ที่ใช้เป็นลักษณะเป็นแผ่นทองแดงกว้างทั้งแผ่น ในส่วนของตัวนำจะมองขอบของตัวนำ โดยจะมองเหมือนสายอากาศปากเปิด (Aperture Antenna) ซึ่งถ้าเป็นสายอากาศไมโครสตริป แบบสี่เหลี่ยมหนึ่งอิลเมนต์ จะมีสายอากาศปากเปิดสองช่องเปิด ซึ่งทั้งสองช่องเปิดนี้จะถูกแยกออกจากกัน โดยความยาวของตัวสายอากาศ ซึ่งจะมีความยาวครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นของแผ่นไดอิเล็กตริก ซึ่งทั้งสองช่องเปิดจะวางตัวเป็นแบบอาร์เรย์



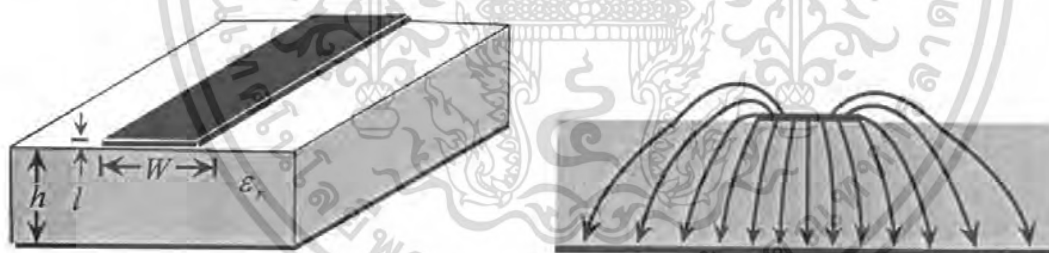
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.8 ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริป

การวิเคราะห์ลักษณะและคุณสมบัติของสายอากาศ เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการออกแบบสายอากาศ เนื่องจากการวิเคราะห์สายอากาศที่มีประสิทธิภาพ สามารถประหยัดเวลาในการออกแบบ และช่วยลดต้นทุนในการออกแบบและผลิตสายอากาศได้เป็นอย่างมาก ในการวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปนั้น เพื่อคำนวณหาคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศไมโครสตริป สามารถทำได้หลายวิธี แต่มีอยู่ 3 วิธี ที่ใช้กัน คือ วิธีแบบจำลองสายส่ง (Transmission Line Model) วิธีแบบจำลองคาวิตี (Cavity Model) และวิธีแบบจำลองคลื่นเต็ม (Full Wave Model) ในวิธีนี้เริ่มต้นด้วยการใช้ทฤษฎีสนามในการวิเคราะห์ จากนั้นเขียนสมการแสดงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ในรูปของตัวแปรที่เหมาะสม แล้วจึงใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแก้ปัญหา และยังมีข้อย่อยในการวิเคราะห์ลงไปอีกหลายแบบ สำหรับในวิธีนี้ จะยังไม่กล่าวถึงเนื่องจากมีความซับซ้อนมากและยากต่อการคำนวณ แต่วิธีนี้ก็จะมีข้อดีเหมือนกัน คือ มีความแม่นยำสูงมาก

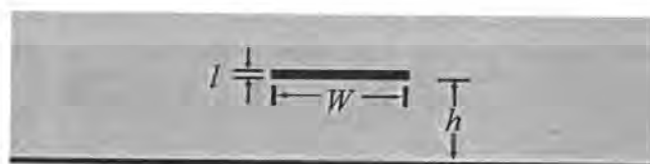
2.4.1 แบบจำลองสายส่ง (Transmission Line Model)

สำหรับในการจำลองแบบสายส่งนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดเพราะไม่ต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยากนัก สามารถคำนวณได้ง่ายและผลที่ได้ก็น่าพอใจ แต่มีความแม่นยำน้อย และ ไม่มีความยืดหยุ่นเลย คือ สามารถใช้คำนวณได้เฉพาะ แบบสายอากาศที่มีแผ่นตัวนำ เป็นรูปสี่เหลี่ยมและวงกลมเท่านั้น ความแม่นยำของผลการวิเคราะห์แบบนี้ขึ้นอยู่กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ของชั้น Substrate ซึ่งต้องมีค่าสูงและความหนาของชั้น Substrate ต้องน้อยกว่า $0.02 \lambda_0$



(ก) Microstrip Line

(ข) Electronic Field Line



(ค) Effective Dielectric Constant

รูปที่ 2.9 ลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ฟริงกิง (Fringing Effects)

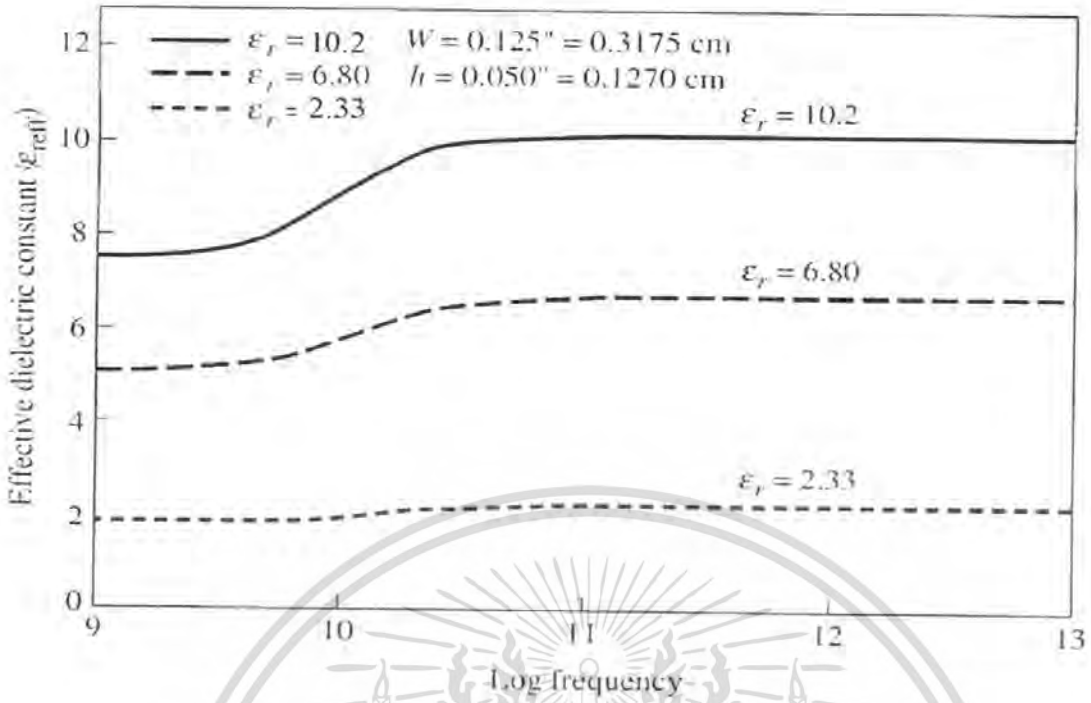
เนื่องจากมิติของแผ่นตัวนำประกอบไปด้วยความยาวและความกว้าง ดังนั้นสนามที่ขอบของแผ่นตัวนำจะเกิดฟริงกิงผลรวมของฟริงกิงเป็นฟังก์ชันของความกว้างและความยาวของแผ่นตัวนำและความหนาของสารตัวกลางสำหรับระนาบไฟฟ้า (E-Plane หรือระนาบ x-y) ส่วนใหญ่ฟริงกิงเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนระหว่างความยาวของแผ่นตัวนำ (L) ต่อความยาวของสารตัวกลาง (H) และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์

สำหรับสายส่งไมโครสตริปในรูปที่ 2.9 เส้นแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบทั่วไปแสดงดังรูป เส้นแรงแบบนี้เกิดจากเนื้อสาร ไดอิเล็กตริกสองชนิดไม่เหมือนกัน (Non Homogeneous) ซึ่งสารไดอิเล็กตริกสองชนิดนี้ มักจะเป็นสารตัวกลางกับอากาศ สนามไฟฟ้าส่วนใหญ่อยู่ในสารตัวกลาง และบางส่วนของปรากฏในอากาศเมื่อ L/h มีค่ามากกว่า 1 มาก ๆ และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์มากกว่า 1 มาก ๆ สนามไฟฟ้าจะอยู่อย่างหนาแน่นในตัวกลาง ในกรณีนี้ ฟริงกิง จะทำให้สายส่งไมโครสตริป มีขนาดในทางไฟฟ้าดูมากกว่าขนาดจริง เนื่องจากคลื่นบางส่วนเคลื่อนที่ในสารตัวกลางและบางส่วนเคลื่อนที่ในอากาศ จึงจะมีการนำ Effective Dielectric Constant (ϵ_{reff}) มาคิดสำหรับการแพร่กระจายคลื่น

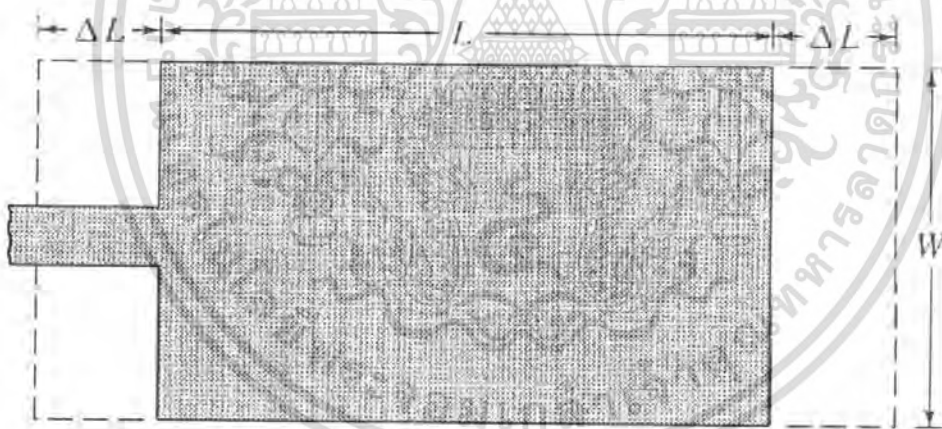
ในการนำ ϵ_{reff} มาคิดจะสมมติให้สายส่งไมโครสตริป ที่มีขนาดและความหนาเท่าเดิมฝังลงในตัวกลางดังรูปที่ 2.9 ϵ_{reff} จะถูกนิยามว่าเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุที่สมำเสมอ ดังนั้นสายส่งไมโครสตริป จะมีลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้า แบบเดียวและค่าคงที่การกระจายคลื่นโดยเฉพาะเหมือนกับสายส่งไมโครสตริป ของจริงในรูปที่ 2.9 สำหรับสายส่งไมโครสตริป ที่มีอากาศเหนืออยู่สารตัวกลางค่า ϵ_{reff} จะมีค่าระหว่าง 1 ถึง Permittivity สำหรับการใช้งานทั่วไปที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารตัวกลางมีค่ามากกว่า 1 มาก ๆ ϵ_{reff} จะใกล้เคียงกับค่าคงที่ (ϵ_r) จริงของสารตัวกลางนั้นๆ

ϵ_{reff} เป็นฟังก์ชันของความถี่ ถ้าความถี่เพิ่มขึ้นสนามไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอยู่หนาแน่นในสารตัวกลาง เพราะฉะนั้นสายส่งไมโครสตริปจะทำตัวเป็นสารเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) มีไดอิเล็กตริกตัวเดียว (ไดอิเล็กตริกในที่นี้หมายถึงสารตัวกลาง) และ ϵ_{reff} จะมีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารตัวกลางสำหรับความถี่ต่ำ ϵ_{reff} จำเป็นที่จะต้องมีค่าคงที่ ที่มีความถี่กลางของมัน ϵ_{reff} จะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างสมำเสมอและจะเพิ่มจนถึงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารตัวกลางในท้ายที่สุดค่าเริ่มต้น (ที่มีความถี่ต่ำ) ϵ_{reff} จะถูกเรียกว่า Static Value แสดงได้ดังนี้

$$\text{เมื่อ } w/h > 1 \quad \epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{-1/2} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.10 กราฟการเพิ่มขึ้นของ (ϵ_r) เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น



(ก) ด้านบน



(ข) ด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับควรใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่มียุอาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.11 ผลจากความยาวของสายอากาศไมโครสตริบ
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปเราสามารถคำนวณหาค่า ϵ_{reff} จากค่าความยาว (L) ของแผ่นตัวนำ และอัตราส่วนของความกว้างต่อความยาวได้ วิธีนี้ก็นิยมใช้กันมากดังนี้

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.2)$$

โดยที่ความยาวของแผ่นตัวนำคือ

$$L_{\text{eff}} = L + 2\Delta L \quad (2.3)$$

สำหรับการหาความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปโดยจะหาในโหมด TM_{010}

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2L\sqrt{\epsilon_r}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = \frac{v_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.4)$$

จากสมการ (2.4) เรายังไม่ได้อะไรมาเอาผลจากฟังก์ชันเราสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

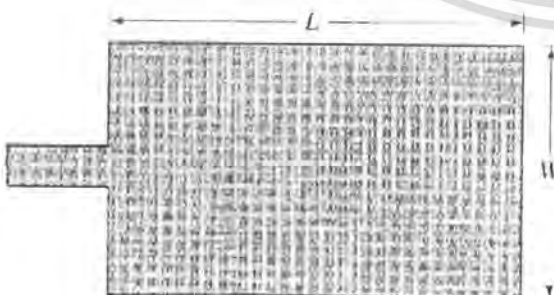
$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2L\sqrt{\epsilon_r}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = \frac{1}{2(L+2\Delta L)\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \quad (2.5)$$

$$= q \frac{1}{2L\sqrt{\epsilon_r}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = q \frac{v_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.6)$$

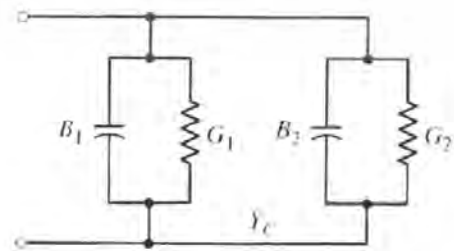
เมื่อ

$$q = \frac{(f_r)_{010}}{(f_r)_{010}} \quad (2.7)$$

การนำไฟฟ้าและความต้านทานของไมโครสตริป



(ก) Rectangular patch



(ข) Transmission model equivalent

รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของสายอากาศไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.12 แสดงวงจรสมมูลของแบบจำลองสายส่งกับสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาว L ความกว้าง W และความหนา h โดยจะแผ่คลื่นออกมาจากขอบด้านทั้งสองข้างของแผ่นตัวนำ ซึ่งเปรียบเสมือนว่าเป็นช่องว่างที่มีความยาวเท่ากับ W และความหนา h ดังนั้นจึงให้ช่องว่างทั้งสองมีความยาวด้านทานเท่ากับ $G + jB$ เท่ากับทั้งสองช่อง ส่วนความต้านทานของแผ่นตัวนำจะมีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) เป็น Z_0 และค่าคงที่การแพร่กระจายของคลื่น (Propagation) เท่ากับ β_g ดังนั้นเพื่อจะหา อินพุตแอดมิตแตนซ์จะได้ว่า

$$Y_{in} = G_r + Y_0 \frac{(G + jB) + jY \tan(\beta_g L)}{Y_0 + j(G + jB) \tan(\beta_g L)} \quad (2.8)$$

ดังนั้น เพื่อให้มีแต่ค่าจำนวนจริงไม่มีจำนวนจินตภาพเพื่อจะได้ปรับแมตซิ่งได้ง่าย จึงต้องให้

$$\text{Im}(Y_m) = 0 \quad (2.9)$$

นั่นคือ
$$\tan(\beta_g L) = \frac{2Y_0 B}{G_r^2 + B^2 - Y_0^2} \quad (2.10)$$

หรือ
$$\tan(\beta_g L) = \frac{Y_0}{B} \quad (2.11)$$

โดยเมื่อ
$$\tan(\beta_g L) = \frac{2Y_0 B}{G_r^2 + B^2 - Y_0^2} \quad (2.12)$$

แล้วนำไปแทนในสมการ Y_m จะได้ $Y_m = 2G$

ส่วนเมื่อ
$$Y_{in} = G_r + \frac{Y_0}{B} + \frac{B^3}{G_r} + \frac{Y^2}{G_r} \quad (2.13)$$

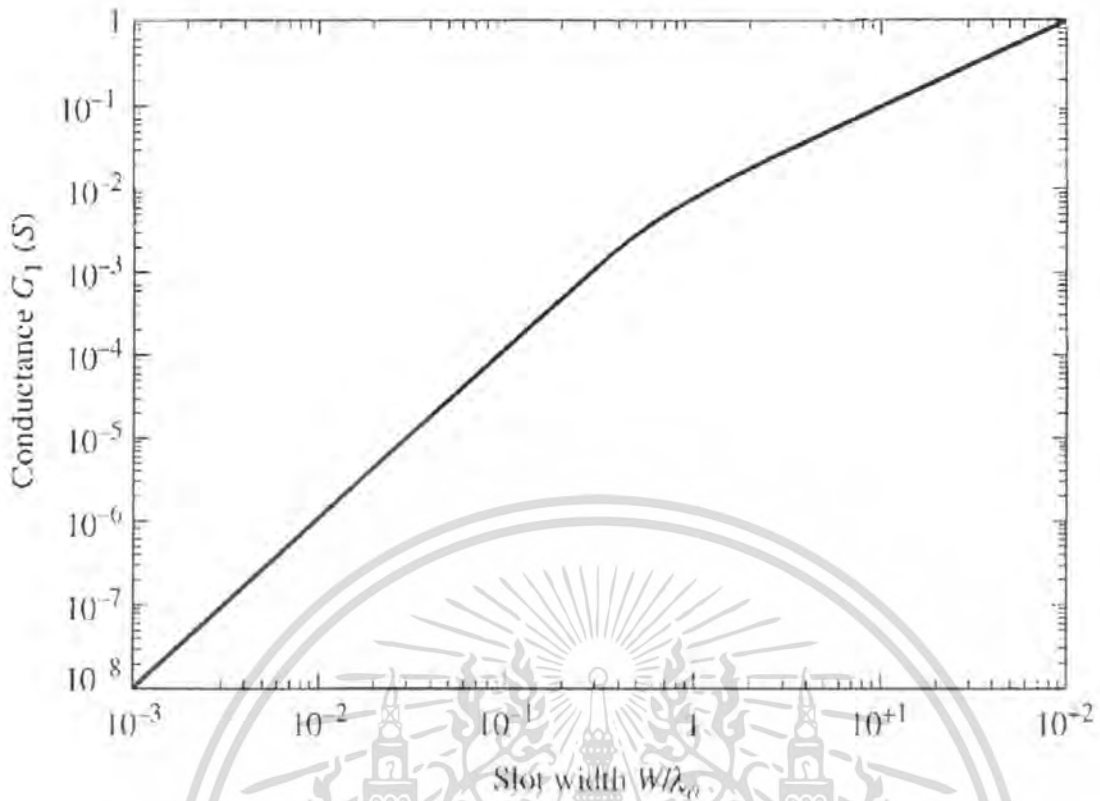
$$G = \frac{2P_{rad}}{|V_0|^2} = \frac{1}{120\pi^2} I$$

$$I = \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{kw}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 \sin^3 \theta d\theta$$

$$G \cong \frac{1}{90} \left(\frac{w}{\lambda}\right)^2; w \ll \lambda$$

$$G \cong \frac{1}{120} \left(\frac{w}{\lambda}\right)^2; w \ll \lambda \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 การเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความนำไฟฟ้า

การหาค่าไดเรกทิวิตี (Directivity) ของสายอากาศไมโครสตริปแต่ละตัว

$$D_0 = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{\text{rad}}} = \left(\frac{2\pi w}{\lambda}\right)^2 \frac{1}{I} \tag{2.15}$$

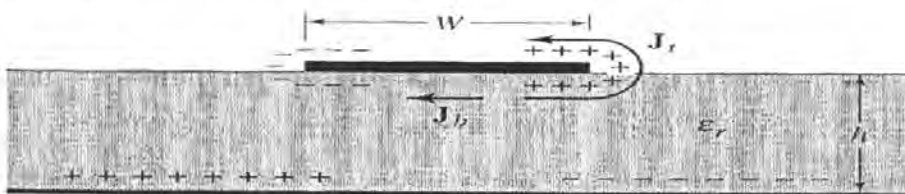
โดยที่

$$D_0 \cong 3 \cong 4.77 \text{ dB}; w \ll \lambda$$

$$D_0 \cong 4(w/\lambda); w \gg \lambda$$

2.4.2 แบบจำลองควาวิตี

แบบจำลองชนิดนี้มีความสามารถในการวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศ ที่มีรูปร่างพื้นฐานต่างๆ ได้ดีกว่าแบบจำลองชนิดสายส่ง แบบจำลองนี้มีข้อจำกัดในเรื่องความแม่นยำอยู่ที่ขนาดความหนาของชั้น Substrate ที่ $0.02 \lambda_0$ แบบจำลองนี้ค่อนข้างได้รับความนิยมกว่าแบบชนิดสายส่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.14 แบบจำลองควาวิตีนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

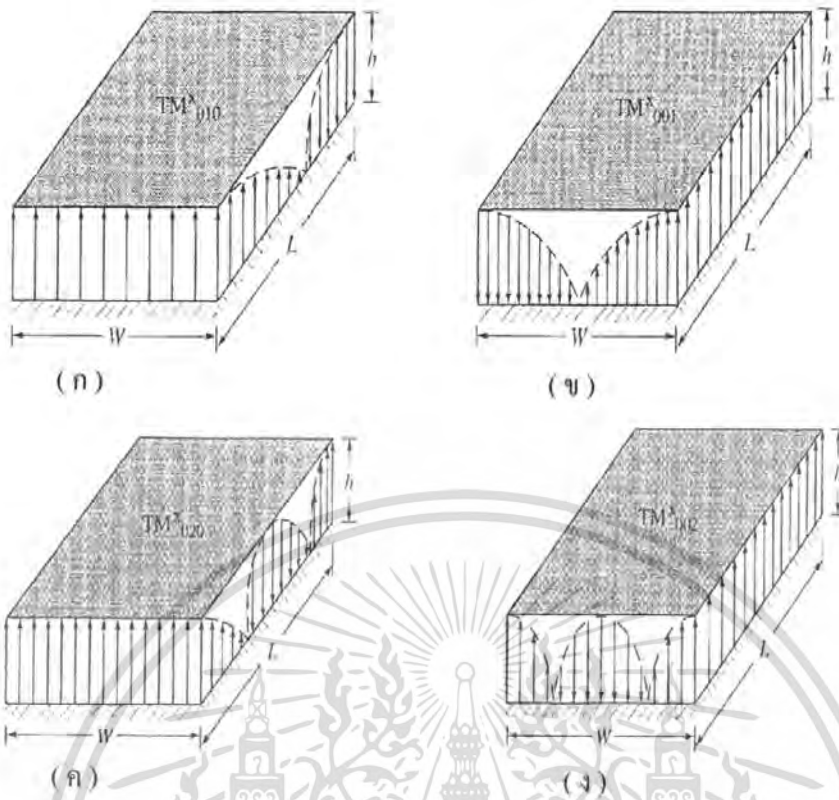
ในการจำลองชนิดนี้ มีความซับซ้อนมากกว่าแต่ความแม่นยำสูงขึ้นกว่าแบบแรกและจะมองสายอากาศไมโครสตริปให้มีลักษณะเหมือนโพรงที่มีสารไดอิเล็กตริก อยู่ภายในซึ่งการมองในลักษณะนี้ จะให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์อันดับสูงขึ้นไป (High Order Resonance) แต่เพื่อให้สามารถเข้าใจสนามพลังงาน (สนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า) ภายในสารไดอิเล็กตริกจึงคิดเสมือนว่าโพรงไดอิเล็กตริกนี้ถูกปิดล้อมด้วยแผ่นตัวนำไฟฟ้า (ด้านบนและด้านล่าง) และกำแพงสนามแม่เหล็ก (คิดเสมือนว่าเปิดวงจรอยู่) ที่อยู่ตามขอบของแผ่นตัวนำแต่แบบจำลองลักษณะนี้จะทำให้ไม่มีการส่งคลื่นออกไปอย่างไรก็ตาม สมมติให้จำลองอย่างนี้ทำให้สามารถคำนวณ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น อินพุตแอดมิตแดนซ์ และความถี่ตอบสนองได้ใกล้เคียงค่าที่เกิดขึ้นจากการวัดซึ่งจำลองลักษณะนี้คล้ายกับวิธีเพอร์เทอร์เบชัน (Perturbation Method) ที่นิยมกันในการคำนวณท่อเวฟไกด์ (Waveguide) สำหรับการสร้างสนามพลังงานภายในโพรงไดอิเล็กตริกและการแพร่กระจายคลื่นผ่านสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นดังนี้ เมื่อป้อนพลังงานเข้าไปในแผ่นตัวนำไมโครสตริป จะเกิดการกระจายของประจุผิวทั้งด้านบนและด้านล่างของแผ่นตัวนำรวมไปจนถึงเกิดการกระจายของประจุบนกรวด์เพลนด้วย ซึ่งการกระจายของประจุเหล่านี้เกิดจากกระบวนการ 2 ชนิด คือ

1. จากแรงดึงดูดระหว่างประจุต่างชนิดกันของประจุบนพื้นผิวด้านล่างแผ่นตัวนำกับประจุบนกรวด์เพลน ซึ่งจะทำให้เกิดมีจำนวนประจุหนาแน่นขึ้นบริเวณแผ่นตัวนำด้านล่าง
2. เกิดจากแรงผลักระหว่างวัตถุชนิดเดียวกันของประจุบนผิวด้านล่างแผ่นตัวนำซึ่งจากแรงผลักนี้จะทำให้ที่บริเวณขอบของตัวนำ มีประจุบางส่วนขึ้นไปอยู่ที่พื้นผิวด้านบนของแผ่นตัวนำกระบวนการทั้งสองชนิดนี้ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส J_b และ J_t (b ย่อมาจาก bottom และ t ย่อมาจาก top)

สำหรับที่ทำจากวัสดุบางๆ แรกผลึกชนิดแรกจะมีมากกว่าชนิดหลัง ทำให้ประจุส่วนใหญ่ไปอยู่ที่ผิวด้านล่างของผิวตัวนำ เป็นผลให้กระแสส่วนใหญ่ไหลอยู่ที่ผิวได้แต่ตัวนำ จะมีกระแสปริมาณเล็กน้อยเท่ากับกระแสที่ไหลรอบๆ ของด้านบนของแผ่นตัวนำและปริมาณของกระแสที่ว่านี้จะมีค่าลดลง ถ้าวัสดุมีขนาดบางลงด้วยสำหรับในทางอุดมคติแล้ว กระแสที่ไหลอยู่ด้านบนของแผ่นตัวนำจะมีค่าเป็นศูนย์เป็นผลให้สนามแม่เหล็ก (ที่เกิดจากกระแสนี้) ที่บริเวณของขอบตัวนำมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ด้วย จึงสามารถสมมติได้ว่า มีพื้นผิวที่เป็นตัวนำในอุดมคติปิดอยู่ที่บริเวณขอบทั้งสองด้านของแผ่นตัวนำ (ทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์) แต่ทางปฏิบัติแล้วของแผ่นตัวนำจะมีสนามแม่เหล็กอยู่เล็กน้อยเสมอ ดังนั้น ข้อสมมตินี้อาจไม่ถูกต้องนัก แต่การสมมติจะทำให้ง่ายต่อการหาโหมด ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กอยู่ใต้แผ่นตัวนำ ผลจากการให้สายอากาศแบบไมโครสตริปมีขนาดบางมาก (น้อยกว่าความยาวคลื่นมาก)

1. พลังงานที่อยู่ใต้แผ่นตัวนำและอยู่ภายใต้สารไดอิเล็กตริกจะเกิดการสะท้อนกลับขึ้นที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำ และมีแค่ส่วนน้อยเท่านั้นที่หลุดออกไปเป็นพลังงานแผ่คลื่น ดังนั้นสายอากาศแบบไมโครสตริป จึงมีประสิทธิภาพไม่สูงนัก
2. พลังงานที่อยู่ใต้แผ่นตัวนำจะทำให้เกิดคลื่นนิ่ง ซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชันโคไซน์
3. การเปลี่ยนแปลงของสนามตามความสูงของสารไดอิเล็กตริกจะเป็นค่าคงที่
4. ปรากฏการณ์ฟรินกิงที่บริเวณของแผ่นตัวนำจะมีค่าน้อยมาก

ดังนั้นจึงมีแต่สนาม TM_z เท่านั้นอยู่ในโพรงไดอิเล็กตริก

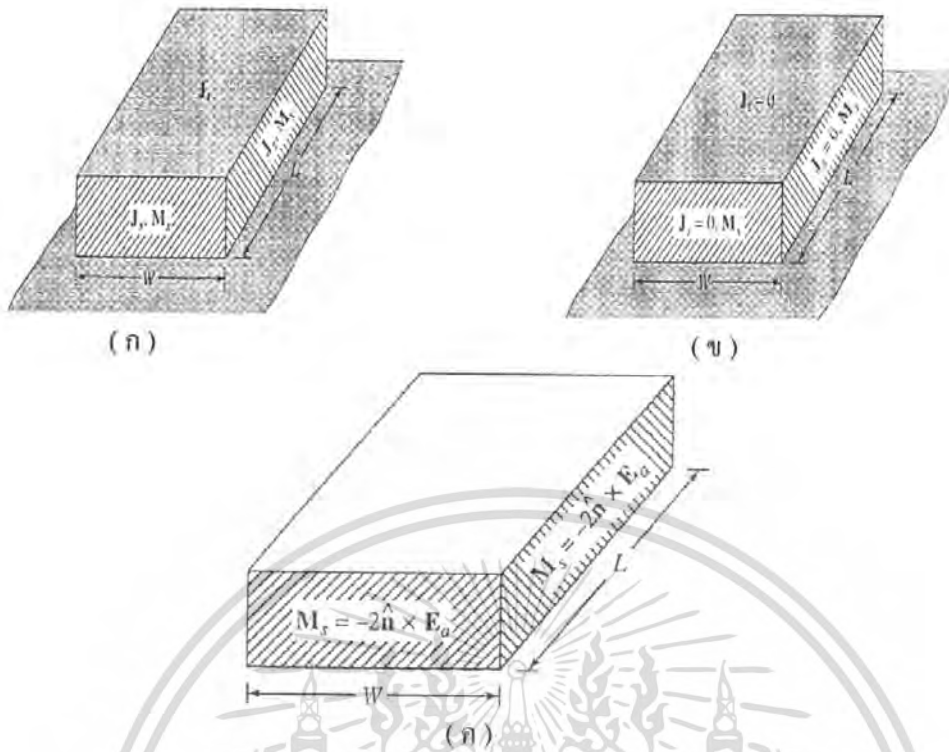


รูปที่ 2.15 รูปแบบของสนามในโหมดต่างๆ

นอกจากนี้ยังต้องสมมติให้สิ่งที่ปิดล้อมทุกด้านของโพรงโคอีเล็กทริก (แผ่นตัวนำสนามแม่เหล็ก) ไม่มีการสูญเสียพลังงานโพรงโคอีเล็กทริกไม่สามารถแพร่กระจายคลื่นได้และอิมพีแดนซ์มีแค่ส่วนจริงเท่านั้น แต่ในความจริงแล้วอิมพีแดนซ์จะต้องมีส่วนจินตภาพด้วยเสมอ เช่นเกิดจากความต้านทานการแผ่คลื่น (R_r) ความต้านทานความสูญเสีย (R_L) และการสูญเสียเนื่องจากสารโคอีเล็กทริก ซึ่งความสูญเสียทั้งหมดจะอยู่ในรูป δ_{eff} และสำหรับสายอากาศแล้วจะได้ว่า $(1/Q = \delta_{eff})$ ความหนาแน่นกระแสสมมูล (Equivalent Current Densities)

ในแบบจำลองควาดีจะมองสายอากาศแบบไมโครสตริป ว่าเป็นสารโคอีเล็กทริกที่มีกำแพงสนามไฟฟ้าที่สมบูรณ์แบบปิดอยู่ที่ด้านบนและด้านล่าง ส่วน 4 ด้านที่เหลือซึ่งอยู่ด้านข้างจะถูกปิดล้อมด้วยกำแพงสนามแม่เหล็ก ซึ่งบริเวณนี้เองเป็นตัวทำให้แผ่คลื่น ดังนั้นการจะหาความหนาแน่นกระแสจะต้องคิดเสมือนว่าสารตัวกลางมีอยู่เฉพาะแต่แผ่นตัวนำบนเสมอ จากการที่ใช้หลักการของฮอยเกน (Huygen's Principle) จะสามารถแทนแผ่นตัวนำที่อยู่ด้านบนด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_s ที่ผิวด้านบนของแผ่นตัวนำ (โดยปกติมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_s อยู่ข้างใต้แผ่นตัวนำด้วย แต่ในที่นี้จะไม่กล่าวถึง) และด้านข้างทั้งสอง จะแสดงได้ด้วย ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_s และความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก M_s ดังรูปที่ 2.15 โดยที่ $\vec{J}_s = \hat{n} \times \vec{H}_a$ และ $\vec{M}_s = -\hat{n} \times \vec{E}_a$ เมื่อ \vec{E}_a, \vec{H}_a เป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่บริเวณด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ความหนาแน่นของกระแสที่บริเวณด้านทั้งสี่

เนื่องจากสายอากาศแบบไมโครสตริปจะมีอัตราต่อความสูงกับความกว้างน้อย ดังนั้น J_c ที่อยู่ด้านบนจะมีค่ามาก เมื่อเทียบกับ J_s ที่อยู่ด้านล่างจึงสามารถสมมติได้ว่า J_c มีค่าเป็นศูนย์ และจะไม่นำมาคิด จึงทำให้สนามแม่เหล็กที่บริเวณขอบ ซึ่งเกิดจาก J_c นี้มีค่าเป็นศูนย์ด้วย ส่งผลให้ J_c บริเวณด้านข้างซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กอันนี้มีค่าเป็นศูนย์อีก ดังนั้นจะเหลือเฉพาะ \overline{M}_s ที่อยู่ด้านข้างโดยรอบของแบบจำลอง ช่องว่างเท่านั้นที่ไม่เป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 จากการใช้ทฤษฎีเงา (Image Theory) จะได้ว่า

$$\overline{M}_s = -2\hat{n} \times \overline{E}_a$$

ในแบบจำลองควาวิดีจะมองสายอากาศแบบไมโครสตริป ว่าเปรียบเสมือนมีช่องว่างอยู่ด้านข้าง โคนรอบทั้งสี่ด้านของโพรง โดยที่ช่องว่างเหล่านี้จะเป็นตัวแผ่คลื่นออกไป แต่ช่องว่างทั้งสี่ช่องนี้จะไม่แผ่คลื่นได้ทั้งสี่ช่องมีเพียงสองช่องเท่านั้นที่สามารถแผ่คลื่นได้ ส่วนอีกสองช่องจะเกิดการหักล้างกันเอง โดยสองช่องที่หักล้างกันคือช่องที่อยู่ห่างกันเป็นระยะ W ส่วนอีกสองช่องที่สามารถแผ่คลื่นได้จะอยู่ห่างกัน L ซึ่งเรียกสองช่องนี้ว่า ร่องแผ่คลื่น (Radiating Slot) โดยที่ระหว่างสองช่องนี้มีแผ่นตัวนำคู่ขนานซึ่งแสดงตัวเหมือนเป็นหม้อแปลง (Transformer) ที่มีความต้านทานต่ำ ความยาวของ L ประมาณได้ว่าเท่ากับ $\lambda_g/2$ เมื่อ λ_g หมายถึง ความยาวคลื่นที่เดินทางในสารตัวกลาง เพื่อให้สนามช่องว่างทั้งสอง มีทิศทางตรงข้ามกันดังแสดงในรูปที่ 2.15 จากช่องว่างทั้งสองที่เป็นตัวแผ่คลื่นจะทำตัวเสมือนเป็นแถวลำดับ 2 อิติเมนต์ ที่มีระยะห่างเท่ากันเป็น $\lambda_g/2$ สมมติให้โหมดพื้นฐาน (Dominant Mode) เป็น Tm_{010} จะได้สมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

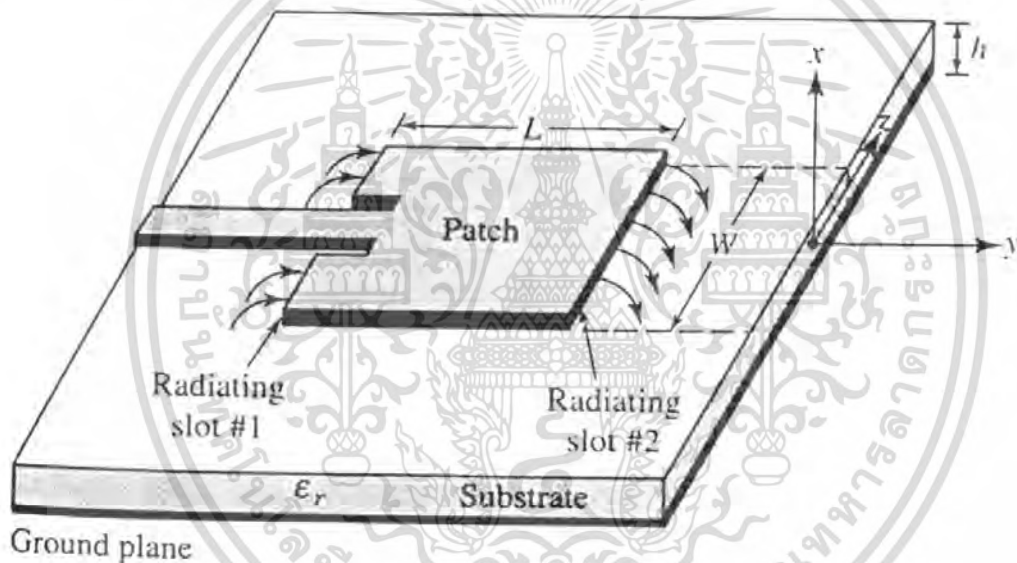
$$E_x = E_0 \cos\left(\frac{\pi y'}{L}\right)$$

$$H_z = H_0 \sin\left(\frac{\pi y'}{L}\right)$$

$$E_y = E_x = H_x = H_y = H_0$$

เมื่อ $E_0 = -j\omega A_{010}$ และ $H_0 = (\pi / \mu L) A_{010}$ จากรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสตามความยาว L แต่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามความกว้าง W ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเฟสนี้จะมีผลอย่างมากในการออกแบบสายอากาศแบบบรอดไซด์ (Broadside)

2.5 การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปที่มีแผ่นตัวนำเป็นรูปสี่เหลี่ยม



รูปที่ 2.17 รูปแบบของสายอากาศไมโครสตริปชนิดสี่เหลี่ยม

การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปที่มีแผ่นตัวนำเป็นรูปสี่เหลี่ยม นั้นสามารถใช้วิธีแบบจำลองการวิเคราะห์ได้ ตามที่กล่าวมาในขั้นต้น

2.5.1 การหาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

การหาสนามภายในควิวิตี้สำหรับอันดับแรกเราต้องหาฟังก์ชันศักย์ช่วยแม่เหล็ก A_z ที่มีสมการดังนี้

$$\nabla^2 A_z + k^2 A_z = 0 \quad (2.16)$$

$$A_z = [A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x)][A_2 \cos(k_y y) + B_2 \sin(k_y y)][A_3 e^{-jk_z z} + B_3 e^{jk_z z}] \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ k_x, k_y, k_z คือเลขคลื่น (Wave Number) ที่อยู่ตามแกน x, y, z ตามลำดับ ซึ่งสามารถหาได้จากเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) หลังจากนั้นจะได้ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่อยู่ในรูปของ A_z เป็นดังนี้

$$E_x = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x \partial z} \quad (2.18)$$

$$E_y = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x \partial z} \quad (2.19)$$

$$E_z = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) A_z \quad (2.20)$$

$$H_x = \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \quad (2.21)$$

$$H_y = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \quad (2.22)$$

$$H_z = 0 \quad (2.23)$$

นำมาใช้กับเงื่อนไขขอบเขตที่ว่า

$$E_x = (0 \leq x' \leq L, 0 \leq y' \leq W, z' = 0) = E_x (0 \leq x' \leq L, 0 \leq y' \leq W, z' = h) = 0 \quad (2.24)$$

$$H_x = (0 \leq x' \leq L, y = 0, z' \leq h) = H_x (0 \leq x' \leq L, y' = W, 0 \leq z' \leq h) = 0 \quad (2.25)$$

$$H_y = (x' = 0, 0 \leq y' \leq W, 0 \leq z' \leq h) = H_y (x' = L, 0 \leq y' \leq W, 0 \leq z' \leq h) = 0 \quad (2.26)$$

สัญลักษณ์ x', y', z' มีไว้เพื่อแสดงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ภายในช่องโคอีเล็กทริกจากสมการเงื่อนไขที่ว่า

$$E_x = (0 \leq x' \leq L, 0 \leq y' \leq W, z' = 0) = E_x (0 \leq x' \leq L, 0 \leq y' \leq W, z' = h) = 0$$

จะได้ว่า $B_z = 0$

$$k_z \frac{m\pi}{h} \quad m = 1, 2, 3 \quad (2.27)$$

จากสมการเงื่อนไขที่ว่า

$$H_x = (0 \leq x' \leq L, y = 0, z' \leq h) = H_x (0 \leq x' \leq L, y' = W, 0 \leq z' \leq h) = 0$$

จะได้ว่า $B_x = 0$

$$k_y \frac{p\pi}{w} \quad p = 1, 2, 3 \quad (2.28)$$

จากสมการเงื่อนไขที่ว่า

$$H_y = (x' = 0, 0 \leq y' \leq W, 0 \leq z' \leq h) = H_y (x' = L, 0 \leq y' \leq W, 0 \leq z' \leq h) = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_x = \frac{n\pi}{L} \quad n = 1, 2, 3 \quad (2.29)$$

ในที่สุดจะได้ว่า A_z ที่อยู่ภายใต้ช่องโคอีเล็กทริกซ์เท่ากับ

$$A_z = A_{mnp} \cos(k_x x') \cos(k_y y') \cos(k_z z') \quad (2.30)$$

เมื่อ A_{mnp} เท่ากับสัมประสิทธิ์ของแอมพลิจูดในแต่ละโหมด mnp และ m, n, p เป็นตัวเลขที่แสดง ความกว้าง ความยาวและสูงในแนวแกน x, y, z มีค่าเป็นจำนวนเท่าของ $\frac{\lambda}{2}$

2.5.2 ความถี่เรโซแนนซ์

$$(f_r)_{mnp}^{TM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\eta}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{W}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2} \quad (2.31)$$

โดยที่ $m = 0, 1, 2, \dots$ $n = 0, 1, 2, \dots$ $p = 0, 1, 2, \dots$ และ $m = n = p \neq 0$.

โดยพิจารณาให้ $L > W > h$ เพื่อให้เกิดโหมดพื้นฐาน (Dominant Mode) ที่ $TM_{(100)}^z$ และมีความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ

$$(f_r)_{100} = \frac{1}{2L\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.32)$$

เมื่อ L คือ ความยาวของสายอากาศ
 ϵ_r คือ ค่าโคอีเล็กทริกสัมพัทธ์ของตัวกลาง
 c คือ ความเร็วแสง

2.5.3 การแพร่กระจายคลื่นและสภาพเจาะงทิสทาง

จากแบบจำลองควาวิตีเร้าสามารถหาค่าพลังงานการแพร่กระจายคลื่นได้จาก

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} (|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2) \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.33)$$

และสามารถหาค่าสภาพเจาะงทิสทางได้จาก

$$D_0 = 4\pi \frac{(|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2)_{\max}}{P_{rad}} \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

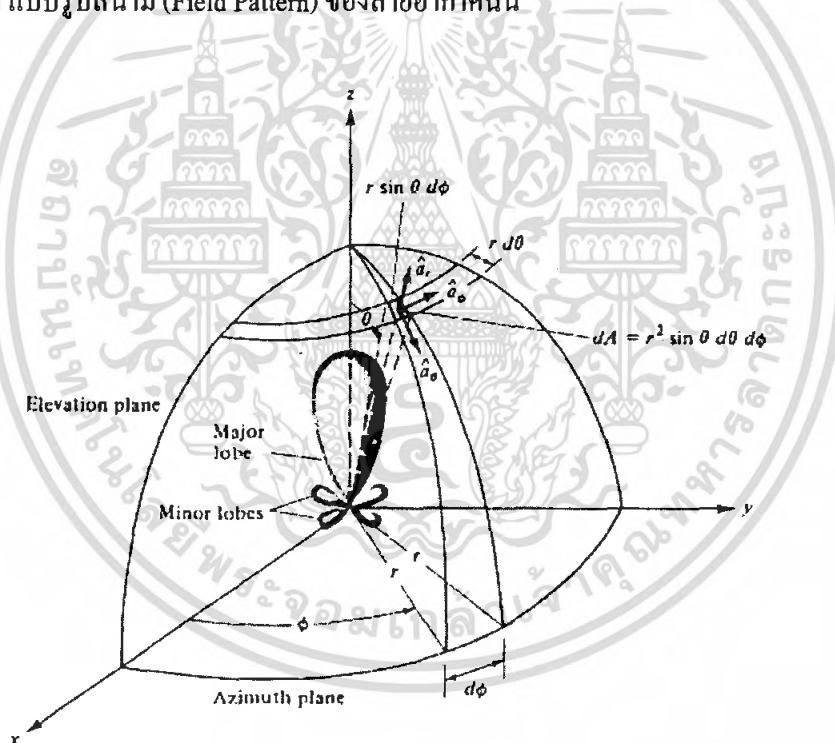
2.6 พารามิเตอร์ของสายอากาศ (Antenna Parameter)

2.6.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

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

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

รูปที่ 2.17 แสดงระบบโคออดิเนตที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น เพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่า แบบรูปกำลังงาน (Power Pattern) ของสายอากาศและกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่า แบบรูปสนาม (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น

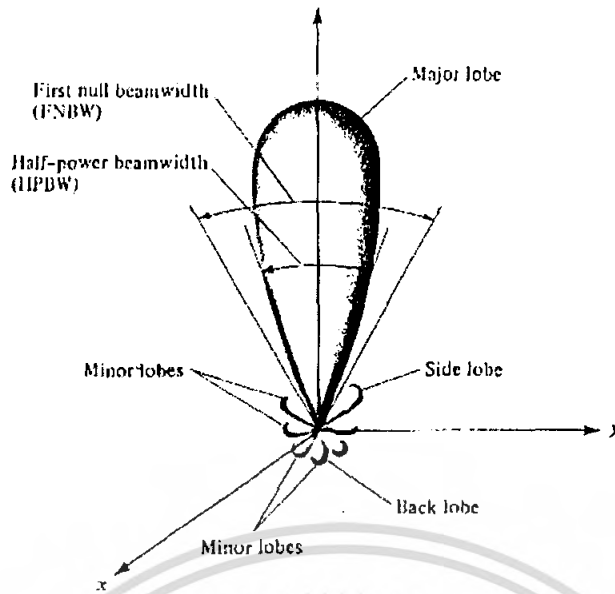


รูปที่ 2.18 แสดงระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

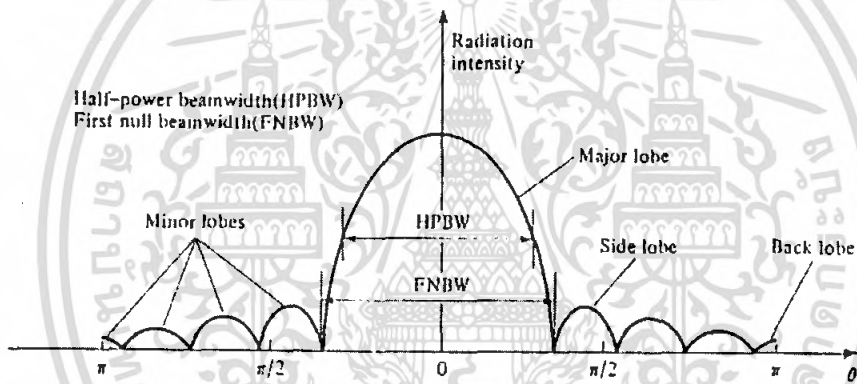
2.6.2 โลบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)

โอบของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe) เป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ รูปที่ 2.18 แสดงแบบรูปโพลาร์ (Polar Pattern) แบบสามมิติ ซึ่งแบ่งเป็นโอบต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 โลบต่างๆและบีมวิทท์ของแบบสายอากาศ



รูปที่ 2.20 แบบรูปในแบบเชิงเส้น

โลบหลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นโลบของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่น ตามรูปที่ 2.18 มีโลบหลักอยู่ในทิศทาง $\theta = 0$ สำหรับสายอากาศบางชนิด อาจมีโลบหลักมากกว่าหนึ่งโลบ เช่น สายอากาศแยกบีม (Split Beam Antenna)

โลบย่อย (Minor Lobe) ได้แก่โลบอื่นๆนอกเหนือไปจากโลบหลัก

โลบข้างหรือไซด์โลบ (Side Lobe) เป็นโลบย่อยที่อยู่ติดกับโลบหลัก และอยู่บนทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับโลบหลัก

โลบหลัง (Back Lobe) เป็นโลบย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับโลบหลัก ปกติแล้วโลบย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ

ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่จำเป็นต้องกำจัดโลบเหล่านี้ให้น้อยที่สุด ระดับโลบย่อยมักแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในโลบที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นของพลังงานในโลบหลัก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.6.3 ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)

คำจำกัดความของคำว่าความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางที่กำหนดให้คือ กำลังงานที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เกี่ยวกับสนามระยะไกล ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น และผลจากการกำลังสองของสนามระยะไกล ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.35)$$

เมื่อ U = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

W_{rad} = ความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น (W/m²)

ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้คือ

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2\eta} \cdot [E_\theta(\theta, \phi)^2 + E_\phi(\theta, \phi)^2] \quad (2.36)$$

เมื่อ E_θ, E_ϕ = ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

N = อินทริเนสิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้นแบบรูปของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึง ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นได้เช่นกัน กำลังงานทั้งหมดนี้ หาได้โดยอินทิเกรตความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นตาม (2.35) และ (2.36) ตลอดมุมตัน 4π ทั้งหมดซึ่งจะได้

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.37)$$

2.6.4 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในทิศทางต่างๆ เทียบกับสายอากาศไอโซทรอปิก ซึ่งวัดในหน่วยของ dBi เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_0(dBi) = 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}}\right) \approx 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi(180/\pi)^2}{\theta_E \theta_H}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{41253}{\theta_E \theta_H}\right) \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.6.5 บีมวิทท์ (Beamwidth)

บีมวิทท์ คือจัดเป็นการวัดความกว้างของลำคลื่น เพื่ออธิบายถึง ใดอิเล็กทริวิตีของสายอากาศได้ดี โดยกำหนดให้มีหน่วยเป็นมุมที่คิดจากกรณีดังนี้

- ที่จุดซึ่งค่าพลังงานในการแพร่คลื่นลดลงเหลือครึ่งหนึ่งจากค่าสูงสุด
- จุดที่ค่าความเข้มสนามเหลือ $1/\sqrt{2}$ หรือ 0.707 เท่าของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด
- จุด 3 dB บนรูปแบบการแพร่คลื่น

จะได้สมการดังนี้

$$\theta_{BH} = 2 \cos^{-1} \left(\frac{1}{2 \left(1 + \frac{k_0 w}{2} \right)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.39)$$

$$\theta_{BE} = 2 \cos^{-1} \left(\frac{7.03}{3k_0^2 L^2 + k_0 h^2} \right)^{-1} \quad (2.40)$$

เมื่อ θ_{BH} คือ มุมที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของบีมหลักในแนวระนาบของสนามแม่เหล็ก
 θ_{BE} คือ มุมที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของบีมหลักในแนวระนาบของสนามไฟฟ้า

บีมวิทท์ของสายอากาศไมโครสตริปตัวหนึ่งสามารถเพิ่มได้ โดยเลือกขนาดของสายอากาศที่เล็กลง ดังนั้นขนาดความกว้างของสายอากาศ และความยาวของสายอากาศจึงเล็กลงด้วย สำหรับที่ความถี่เรโซแนนซ์อาจจะต้องเลือกใหม่ให้ค่าคงที่ใดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันความกว้างของบีมหลักจะต้องเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นก็เป็นผลทำให้อัตราการขยายลดลงแต่จะไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของสายอากาศแต่อย่างใด

2.6.6 แบนด์วิทท์ (Bandwidth : BW)

แบนด์วิทท์ของสายอากาศถูกกำหนดให้เป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศในมาตรฐานที่กำหนดให้อาจคิดว่าเป็นช่วงของความถี่สายอากาศมีคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพของการแพร่พลังงาน อัตราการขยาย อิมพีแดนซ์ รูปแบบการแพร่พลังงาน ความกว้างลำ (Beamwidth) การโพลาไรซ์เซชัน และระดับพลู้อย (Side Lobe) เป็นต้น ให้อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ในช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติที่ความถี่ที่ออกแบบไว้ จนทำให้คุณสมบัติเหล่านั้นผิดไปจากข้อกำหนด หรือมาตรฐาน สำหรับสายอากาศแบนด์กว้าง มักจะคิดเป็นอัตราส่วนของความถี่ใช้งานได้ทางด้านสูงต่อความถี่ที่ใช้งานทางด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำ แบนด์วิดท์มักจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของความถี่ (ความถี่ด้านสูงลบด้วยความถี่ด้านต่ำ) หารด้วยความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้นดังสมการ

$$\%BW = \left(\frac{f_H - f_L}{f_r} \right) \times 100 \quad (2.41)$$

| | | |
|-------|-------|-----------------------------------|
| เมื่อ | BW | คือ แบนด์วิดท์ของสายอากาศ |
| | f_H | คือ ความถี่ที่ใช้งานได้ทางด้านสูง |
| | f_L | คือ ความถี่ที่ใช้งานได้ทางด้านต่ำ |
| | f_r | คือ ความถี่กลางของแบนด์วิดท์ |

ข้อจำกัดเรื่องแบนด์วิดท์ ก็เป็นข้อเสียอย่างหนึ่งของสายอากาศไมโครสตริปเพราะมีค่าประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ แต่ก็สามารถที่จะเพิ่มแบนด์วิดท์ได้โดยเพิ่มความเป็นตัวนำให้กับสายอากาศ อาจจะทำเป็นช่องในตัวของสายอากาศ หรือเพิ่มอุปกรณ์ที่เป็นตัวนำเข้าไปเพื่อทำให้การแผ่รังสีของตัวการแผ่กระจายคลี่คลายกับสายนำสัญญาณดีขึ้น

2.6.7 อัตราขยาย (Gain)

เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากอีกตัวหนึ่งของสายอากาศ อัตราขยายสายอากาศจะขึ้นอยู่กับสภาพเจาะจงทิศทาง และค่าประสิทธิภาพของสายอากาศ แต่สภาพเจาะจงทิศทางเป็นค่าที่อธิบายถึงคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น และถ้าค่าประสิทธิภาพไม่ถึง 100% อัตราขยายจะน้อยกว่าสภาพเจาะจงทิศทาง ดังนั้นจะ ได้ความสัมพันธ์ที่สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$G = \eta D \quad (2.42)$$

| | | |
|-------|--------|---------------------------------|
| เมื่อ | G | คือ อัตราการขยาย |
| | η | คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศ |
| | D | คือ สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ |

2.6.8 ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริป ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่างอัตราขยายของสายอากาศต่อไดเล็กทวิตี จะได้ค่าประสิทธิภาพดังนี้คือ

$$\eta = \frac{G}{D} \times 100\% \quad (2.43)$$

บทที่ 3

การคำนวณและการสร้าง

3.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

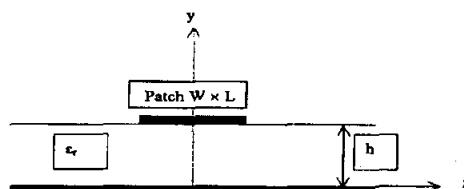
สายอากาศไมโครสตริปนี้ได้ออกแบบใช้งานที่ย่านความถี่ UHF ที่ความถี่ 433 MHz โดยใช้สารแบบอีพ็อกซี (Epoxy) เป็นสารตัวกลาง ซึ่งอีพ็อกซีมีค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารตัวกลางของวัสดุที่นำมาทำแผ่นรองรับ (ϵ_r) มีค่าเท่ากับ 4.36 และความหนาของสารที่เป็นสารตัวกลาง (h) มีค่าประมาณ 0.6522 มิลลิเมตร โดยในการเชื่อมต่อสัญญาณให้กับแผ่นแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป จะใช้การป้อนสัญญาณแบบใช้สายส่งไมโครสตริป (Strip Line)

3.2 เทคนิคการลดขนาดสายอากาศ

การศึกษาลดขนาดสายอากาศโดยทั่วไปจะใช้สายอากาศไมโครสตริปเป็นพื้นฐานในการศึกษาเนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปมีลักษณะเป็นแผ่นราบ ขนาดของสายอากาศมีขนาดเล็กกว่าสายอากาศชนิดอื่น ๆ เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองของสายอากาศ เพราะฉะนั้นจึงมีการศึกษาวิธีอื่นๆ ที่ใช้ในการลดขนาดสายอากาศไมโครสตริปและในเรื่องการปรับปรุงประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เทคนิคในการลดขนาดโดยทั่วไปผู้ที่ทำการศึกษามาก่อนหน้านี้แล้วนั้นสามารถแบ่งออกเป็นวิธีการต่างๆ ได้ดังนี้

- 3.2.1 การใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบที่มีค่ามาก (High permittivity substrates)
- 3.2.2 การใช้วัสดุประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก (Magnetic substrates)
- 3.2.3 การเพิ่มขนาดทางไฟฟ้า (Increasing electrical length)
- 3.2.4 การลัดวงจร (Shorted circuits)
- 3.2.5 การใช้วัสดุไดอิเล็กตริกวางซ้อนทับด้านบน (Superstrates)
- 3.2.6 การรวมเทคนิคต่างๆข้างต้นเข้าด้วยกัน (Combined techniques)

3.2.1 การใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบที่มีค่ามาก (High permittivity substrates)



รูปที่ 3.1 สายอากาศไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้วัสดุฐานรองของตัวกลางที่มีค่าไดอิเล็กตริกมากนั้นสามารถที่จะลดขนาดของสายอากาศลงได้ด้วยสัดส่วน ($\sqrt{\epsilon_r}$) แต่มีปัญหาหลักที่พบอย่างแรกก็คือเกิดการกระตุ้นในรูปแบบสนามไฟฟ้าของคลื่นผิว (Surface wave mode) เป็นสาเหตุให้เกิดการลดประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของคลื่นผิวของสายอากาศไมโครสตริป ยิ่งกว่านั้นวัสดุฐานรองที่มีขนาดจำกัด ยังทำให้เกิดสนามไฟฟ้าเลี้ยวเบนที่ขอบของวัสดุฐานรอง ส่งผลต่อการลดทอนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและเกิดการเพิ่มขึ้นของระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Level) รวมทั้งเกิดการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าไขว้ (Cross polarization) ในกรณีของการนำไปใช้เป็นสายอากาศแบบแถวลำดับเกิดการเชื่อมต่อกันมากขึ้นเนื่องจากคลื่นผิวซึ่ง เกิดเป็นข้อจำกัดของการเปลี่ยนแปลงทิศทางของลำคลื่นของการสวิตซ์ลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับ รวมถึงช่วงกว้างความถี่ที่แคบของสายอากาศ จากที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว การใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบที่มีค่ามากๆ (High permittivity substrates) จึงไม่ได้รับความนิยมในการใช้

ตัวประกอบเชิงคุณภาพ ช่วงกว้างความถี่และประสิทธิภาพของสายอากาศที่มีขนาดทางไฟฟ้าสั้น

ตัวประกอบเชิงคุณภาพก็คือตัวเลขเชิงคุณภาพ (Figure-of-merit) ที่เป็นตัวแทนของค่าการสูญเสียของสายอากาศโดยทั่วไปก็คือในส่วนของ การแพร่กระจายคลื่น ในตัวนำไดอิเล็กตริก และการสูญเสียของคลื่นผิว ดังนั้นตัวประกอบเชิงคุณภาพ Q , จึงได้รับอิทธิพลมาจากค่าการสูญเสียทั้งหมด เขียนได้เป็นดังนี้

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{sw}} \quad (3.1)$$

| | | |
|-------|-----------|---|
| เมื่อ | Q_t | คือ ตัวประกอบคุณภาพรวม |
| | Q_{rad} | คือ ตัวประกอบคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่น |
| | Q_c | คือ ตัวประกอบคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียจากตัวนำ |
| | Q_d | คือ ตัวประกอบคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียไดอิเล็กตริก |
| | Q_{sw} | คือ ตัวประกอบคุณภาพเนื่องจากคลื่นผิว |

โดยเมื่อวัสดุฐานรองที่มีขนาดบางมาก ๆ ค่าการสูญเสียเนื่องจากคลื่นผิวจะมีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งไปได้ อย่างไรก็ตามเมื่อวัสดุฐานรองมีความหนาจะต้องนำมาพิจารณาและไม่สามารถตัดทิ้งไปได้

สำหรับวัสดุฐานรองที่มีความบางมาก ($h \ll \lambda_0$) กรณีนี้ของสายอากาศไมโครสตริปที่มีรูปร่างใดๆ (รวมถึงสี่เหลี่ยมผืนผ้าและวงกลม) สามารถใช้สูตรประมาณสำหรับค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพของการสูญเสียต่างๆดังต่อไปนี้

$$Q_c = h\sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \quad (3.3)$$

$$Q_{rad} = \frac{2\pi\epsilon_r}{hG_r/l} K \quad (3.4)$$

เมื่อ h คือความสูงของวัสดุฐานรองของสายอากาศไมโครสตริป σ คือค่าความนำไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้า G_r/l คือค่าความนำไฟฟ้ารวมต่อหน่วยความยาวของช่องเปิดตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับช่องเปิดทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำงานที่โหมดเป็นใหญ่ TM_{010}

$$K = \frac{L}{4} \quad (3.5)$$

$$G_r/l = \frac{G_{rad}}{W} \quad (3.6)$$

จากสมการด้านบนจะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพ Q_d และ Q_{rad} จะมีค่าขึ้นกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกด้วย ซึ่งเศษส่วนช่วงกว้างความถี่สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{Q_t} \quad (3.7)$$

เมื่อกำหนดรวมกับค่าการแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ที่เข้าของสายอากาศแล้วสามารถเขียนเป็นสมการดังนี้

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{VSWR - 1}{Q_t \sqrt{VSWR}} \quad (3.8)$$

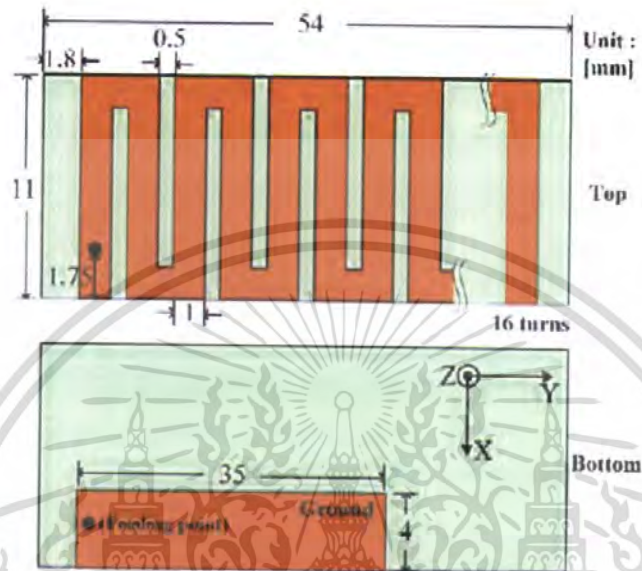
e_{cdsw} คือค่าประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสำหรับสายอากาศไมโครสตริปเขียนได้เป็น

$$e_{cdsw} = \frac{Q_t}{Q_{rad}} \quad (3.9)$$

โดยปกติแล้วการเปลี่ยนแปลงของค่าประสิทธิภาพของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความสูงวัสดุฐานรองของสายอากาศไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่มีการลดขนาดโดยวัสดุประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก (Miniaturization of antenna using magneto-dielectric materials) สายอากาศถูกออกแบบที่ความถี่ 433.92 MHz ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omnidirectional radiation pattern) สายอากาศมีขนาด $(0.078\lambda_0 \times 0.016\lambda_0)$ โดยมีลักษณะเป็นขดลวด (Meander line)



รูปที่ 3.3 สายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่ใช้วัสดุประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กและเส้นขด

โดยทั่วไปสายอากาศไมโครสตริปจะมีโครงสร้างประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นทำงานที่โหมดต่ำสุด TM_{01}, TM_{10} ค่าประมาณความถี่เรโซแนนซ์สามารถเขียนได้ตามสมการด้านล่าง

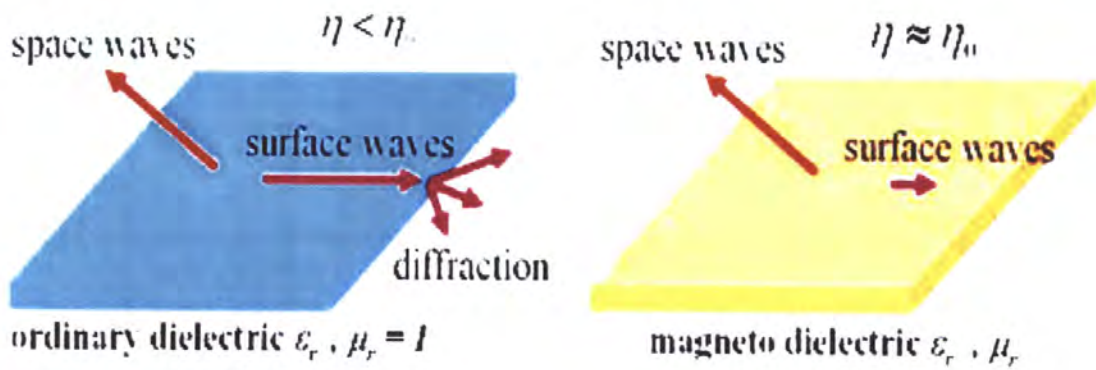
$$f = \frac{c}{2Ln} \quad (3.12)$$

เมื่อ $n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r}$ เรียกว่าตัวประกอบการลดขนาดของขนาดหรือค่าดัชนีการหักเห (Refractive Index)

สารไดอิเล็กทริกโดยทั่วไปจะมีค่า $\mu_r = 1$ เมื่อมีการใช้สารไดอิเล็กทริกที่มีค่า ϵ_r ที่มีค่ามาก ๆ นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าประกอบการลดขนาดของขนาดหรือค่าดัชนีการหักเห ในกรณีที่ใช้สารที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก เราสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพและลดขนาดของสายอากาศโดยใช้ค่า n เท่าเดิมแต่สามารถลดค่า ϵ_r ลงได้โดยการเพิ่มขึ้น μ_r และเมื่อ η_0 คือค่าความต้านทานอินทรีนสิกของช่องว่างอิสระและ η คือค่าความต้านทานอินทรีนสิกของวัสดุฐานรอง ข้อดีของการใช้สารที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก สามารถอธิบายอย่างง่ายจากรูปด้านล่างนี้

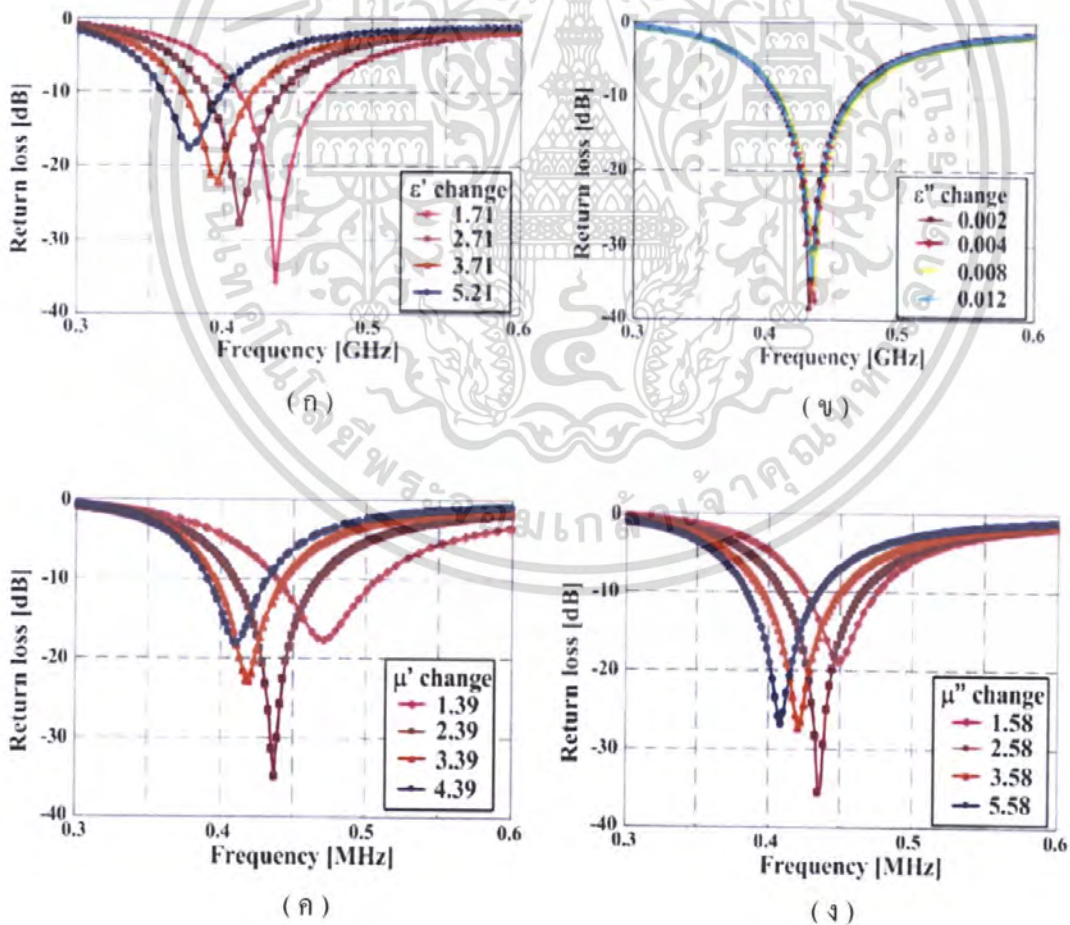
$$\eta = \eta_0 \sqrt{\mu_r / \epsilon_r} \quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบระหว่างสารไดอิเล็กตริกและสารที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก

ถ้าอัตราส่วนระหว่าง $(\mu_r/\epsilon_r) = 1$ จะเกิดการแมตชิ่งระหว่างวัสดุฐานรองกับอากาศเกิดการหักเห น้อยลงและคลื่นผิวก็ลดน้อยลงอย่างมาก ประสิทธิภาพของสายอากาศจะเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงค่าของ μ_r และ ϵ_r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

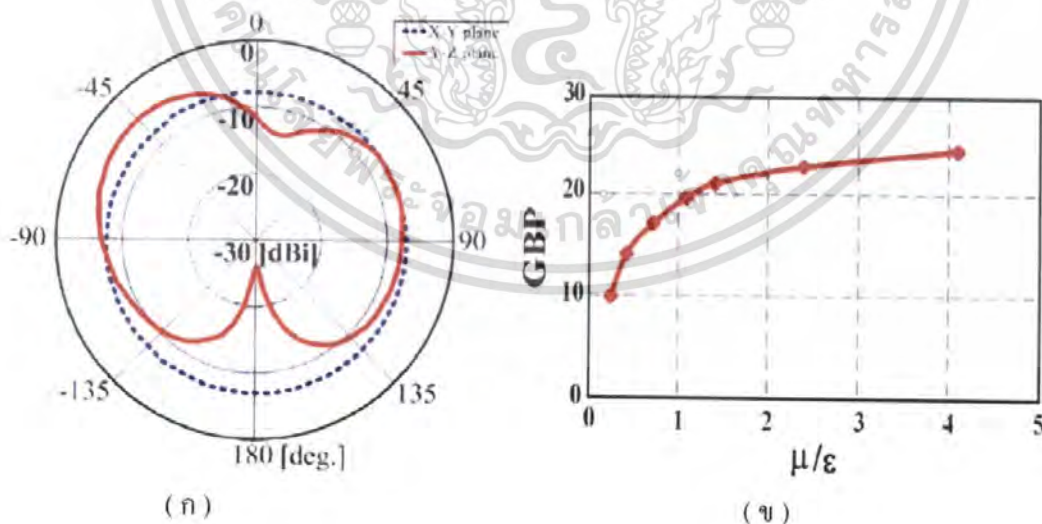
ในรูปที่ 3.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าของ μ_r และ ϵ_r ที่มีผลต่อค่าความถี่เรโซแนนซ์ รูปที่ 3.5 (ก) ϵ_r' คือส่วนจริงของ ϵ_r มีผลมากต่อค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศโดยเมื่อค่า ϵ_r' มากขึ้น ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศจะน้อยลง รูปที่ 3.5 (ข) ϵ_r'' คือค่าเชิงซ้อนของ ϵ_r มีผลน้อยต่อค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศเนื่องจากค่า ϵ_r'' มีค่าน้อยมากๆ รูปที่ 3.5 (ค) μ_r' คือส่วนจริงของ μ_r มีผลมากต่อค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศโดยเมื่อค่า μ_r' มากขึ้นค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศจะน้อยลง รูปที่ 3.5 (ง) μ_r'' คือค่าเชิงซ้อนของ μ_r มีผลมากต่อค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศโดยเมื่อค่า μ_r'' มากขึ้นค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศจะน้อยลง เนื่องจากค่า $n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r}$ คือตัวประกอบการลดลงของขนาดหรือค่าดัชนีการหักเห (Refractive Index)

การบอกถึงประสิทธิภาพของสายอากาศในงานวิจัยนี้จะบอกในรูปของค่าอัตราขยายของสายอากาศคูณกับค่าช่วงกว้างความถี่ (Gain-bandwidth product: GBP)

$$GBP = \text{Gain (Dimensionless)} \times \text{Bandwidth}$$

ค่าอัตราขยายของสายอากาศนี้เป็นค่าอัตราขยายสัมบูรณ์และค่าช่วงกว้างความถี่หาได้จากสูตรประมาณด้านล่าง

$$BW = \frac{96\sqrt{\mu_r/\epsilon_r}}{\lambda_0} \frac{1}{\sqrt{2[4+17\sqrt{\mu_r\epsilon_r}]}} \quad (3.14)$$



รูปที่ 3.6 (ก) แบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

(ข) ค่า GBP ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ค่าอัตราการขยายและช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลง μ_r/ϵ_r

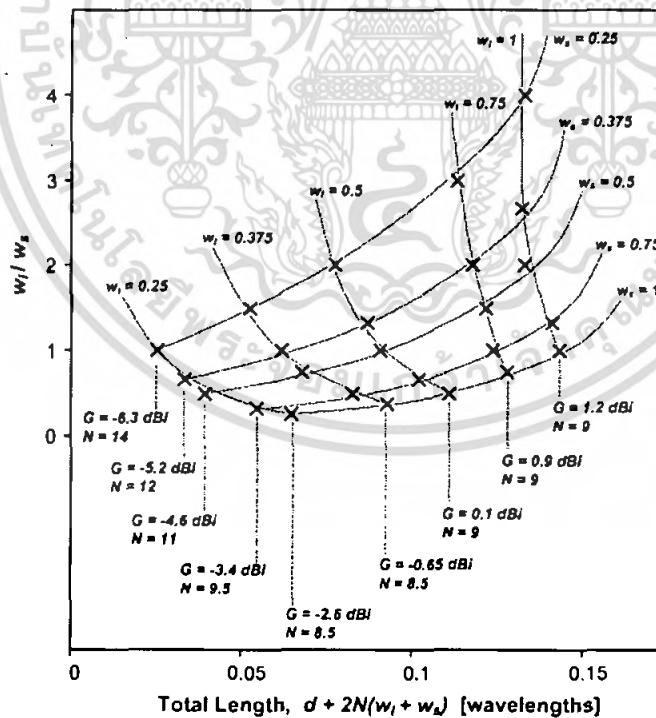
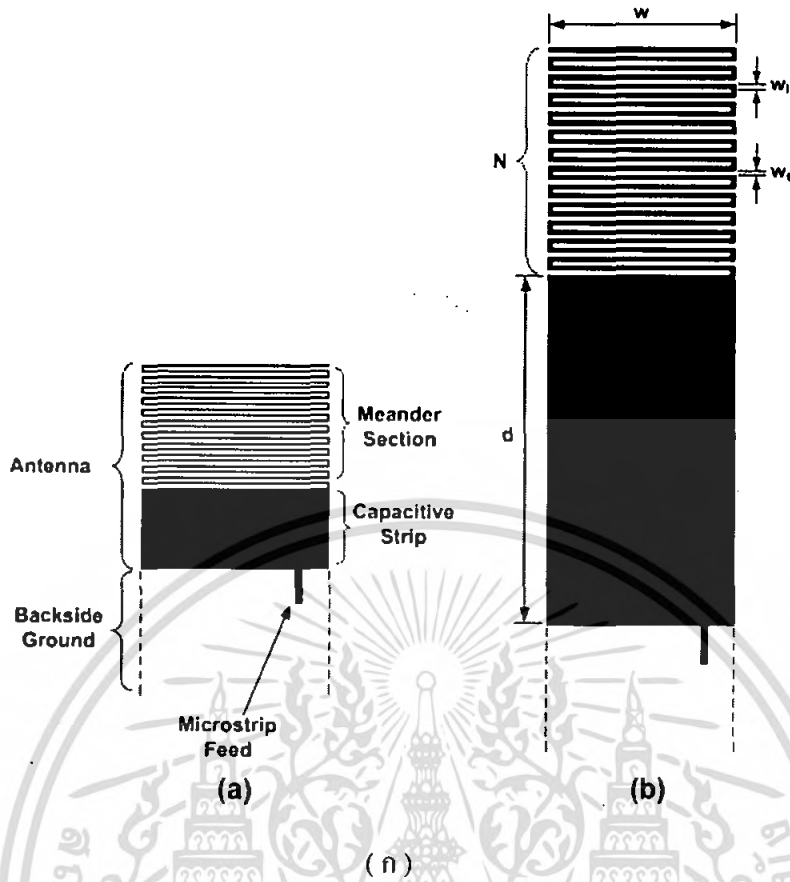
Gain – Bandwidth Product Analysis

| Material | μ_r/ϵ_r | Gain (dB) | Gain | BW (MHz) | GBP |
|----------|--------------------|-----------|-------|----------|--------|
| 1 | 4.087 | -2.70 | 0.537 | 46 | 24.702 |
| 2 | 2.382 | -3.45 | 0.452 | 51 | 23.052 |
| 3 | 1.398 | -4.34 | 0.368 | 58 | 21.351 |
| 4 | 1.089 | -4.71 | 0.338 | 59 | 19.942 |
| 5 | 0.715 | -5.39 | 0.289 | 60 | 17.344 |
| 6 | 0.420 | -6.10 | 0.245 | 58 | 14.210 |
| 7 | 0.245 | -6.52 | 0.223 | 45 | 10.035 |

3.2.3 การเพิ่มขนาดทางไฟฟ้า (Increasing electrical length)

การเพิ่มขนาดทางไฟฟ้าเป็นวิธีการที่ใช้ในการลดขนาดของสายอากาศที่ได้รับความนิยมและศึกษาวิจัยกันมานานเนื่องจากวัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ของตัวกลางสูงๆจะมีราคาแพงอีกทั้งประสิทธิภาพที่ต่ำลงเนื่องจากอิทธิพลของคลื่นผิวและสนามเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นไมโครสตริป จากการศึกษาพบว่าการใช้วัสดุฐานรองที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กช่วยลดการเกิดของสนามเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นสายอากาศไมโครสตริปเนื่องจากเกิดการแมตซ์ระหว่างอากาศกับวัสดุฐานรองของสายอากาศ แต่เมื่อเราพิจารณาถึงต้นทุนการผลิตแล้วการใช้วัสดุที่มีค่าคงที่ตัวกลางสูงๆและวัสดุฐานรองที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กมีราคาก่อนข้างสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับลดขนาดสายอากาศโดยใช้วิธีการเพิ่มขนาดทางไฟฟ้า โดยที่ประสิทธิภาพของสายอากาศที่ออกแบบด้วยวิธีการเพิ่มขนาดทางไฟฟ้าก็ไม่ได้ด้อยไปกว่าสายอากาศที่ออกแบบด้วยวัสดุฐานรองที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก ตัวอย่างสายอากาศที่มีการเพิ่มขนาดทางไฟฟ้าได้แก่การออกแบบสายอากาศขดเกลียว (Helical Antenna) สายอากาศแบบบ่วงวงกลมขนาดเล็ก (Small Circular Loop Antenna) เป็นต้น สำหรับการใช้งานสายอากาศที่มีลักษณะแผ่นเรียบมักออกแบบบนแผ่นวัสดุฐานรองเป็นแบบสายอากาศแบบไมโครสตริป ตัวอย่างงานวิจัยที่มีมาก่อน เช่นงานวิจัยของ Christopher T.Rodenbeck เรื่อง Planer Miniature RFID Antenna Suitable for Integration With Batteries สายอากาศใช้วิธีการขด (Meander line) ร่วมกับแผ่นเก็บประจุ (Capacitive Strip) ออกแบบที่ความถี่ 433 MHz ขนาดของสายอากาศขึ้นอยู่กับจำนวนขดของสายอากาศ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบตัว (Omnidirectional)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

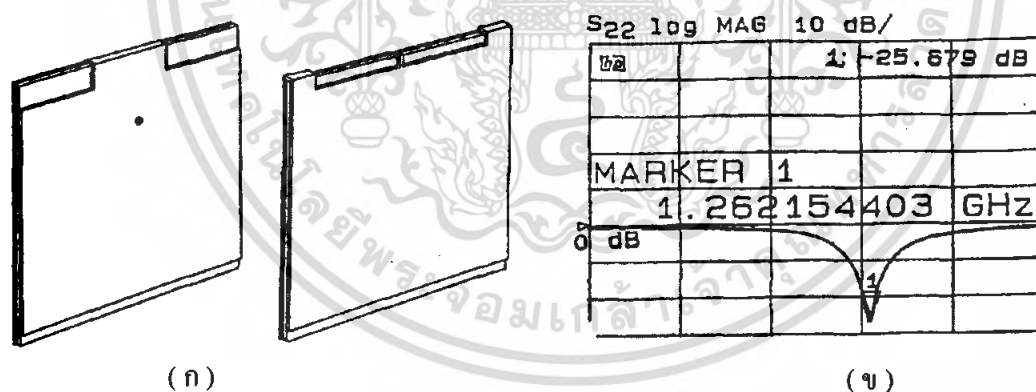
รูปที่ 3.7 (ก) โครงสร้างของสายอากาศ (ข) ขนาดของสายอากาศกับค่าอัตราขยายของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.7 (ก) โครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยส่วนที่เป็นขด (Meander line) ด้วยจำนวน N ขดต่อกับส่วนของแผ่นเก็บประจุ (Capacitive Strip) โดยไม่มีแผ่นระนาบกราวด์ด้านหลัง รูปที่ 3.7 (ข) การออกแบบสายอากาศที่มีขนาดต่างๆกันเทียบกับอัตราขยายในแต่ละโครงสร้างเพื่อแสดงถึงการหาค่าที่เหมาะสมของขนาดต่างๆที่ทำให้ได้อัตราขยายที่ดีที่สุด

3.2.4 การลัดวงจร (Shorted circuits)

การลัดวงจรเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการลดขนาดของสายอากาศโดยนิยมนำมาใช้กับสายอากาศแบบไมโครสตริป โดยทั่วไปสายอากาศไมโครสตริปจะถูกการลัดวงจรบริเวณกลางระนาบสัณฐานเป็นศูนย์ (Zero-potential plane) เพื่อไม่ให้มีผลกระทบกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยวงจรสมมูลของการลัดวงจรเปรียบเทียบกับวงจรอนุกรมของค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance :L) กับค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance :C) การลดขนาดสายอากาศด้วยวิธีนี้สามารถทำได้ง่ายโดยการเชื่อมต่อด้านเสาทรงกระบอกที่มีรัศมีขนาดเล็กหรือแผ่นสตริปขนาดเล็กระหว่างตัวแพร่กระจายคลื่นกับระนาบกราวด์ของสายอากาศ การลดขนาดด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่ค่อยได้รับความนิยมมากนักเนื่องจากอัตราขยายของสายอากาศลดลงอย่างมากจากค่าความต้านทานของสายอากาศ ส่วนจริงมีค่าต่ำลงส่งผลต่อประสิทธิภาพที่ต่ำลงของสายอากาศ นอกจากนี้ยังทำให้ระดับโพลาริไซซ์ไวซ์ของสายอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้นในระนาบสนามแม่เหล็กและยากในการหาจุดป้อนที่เหมาะสมในการสร้างขึ้นจริง ตัวอย่างงานวิจัยที่ผ่านมาคืองานวิจัยของ Mohamed Sanad เรื่อง A Small Size Microstrip Antenna Having a Partial Short Circuit



รูปที่ 3.8 (ก) โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปที่ถูกลัดวงจรในรูปแบบต่างๆ

(ข) ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ

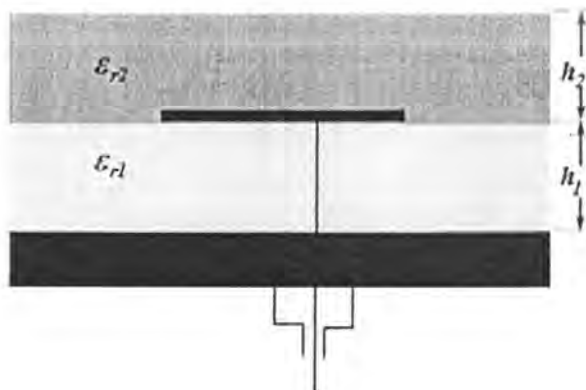
สายอากาศออกแบบด้วยพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป เรโซแนนซ์ที่ 1262 MHz ก่อนการลดขนาดดังในรูปที่ 3.6 (ข) ตัวแพร่กระจายคลื่นมีขนาด 4×4 ตารางเซนติเมตรดังในรูปที่ 3.6 (ก) สายอากาศใช้วัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ $\epsilon_r = 2.2$ จุดป้อนอยู่ตรงกลางแผ่นห่างจากขอบด้านหนึ่งประมาณ 0.65 เซนติเมตร ลัดวงจรที่บริเวณด้านหลังของจุดป้อนด้วยแผ่นสตริปและเสาซึ่งเป็นระนาบที่ไม่มีกระแสกระจายคลื่น ทำการศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของความกว้างของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ทำการลัดวงจรต่อความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ จากตารางที่ 2 ค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ลดลงของสายอากาศเปลี่ยนไปตามขนาดความกว้างของส่วนที่ทำการลัดวงจร โดยที่ความกว้างของส่วนที่ทำการลัดวงจรลดลงจนมีขนาดที่เหมาะสมจะทำให้ได้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ต่ำสุด จากการเปรียบเทียบทั้ง 3 แบบของการลัดวงจรพบว่า การลัดวงจรด้วยแผ่นสตริปให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ต่ำสุด

ตารางที่ 2 ค่าความถี่เรโซแนนซ์กับการลัดวงจรแบบต่าง ๆ

| Width of the shorted section | Resonant Frequency | | |
|------------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|
| | Continuous short circuit | 3 shorting ports | 5 shorting ports |
| 4 cm (100%) | 1262 MHz (100%) | 1064 MHz (84.3%) | 1137 MHz (90.1%) |
| 3 cm (75%) | 1200 MHz (95%) | 1106 MHz (87.6%) | 1178 MHz (93.3%) |
| 2 cm (50%) | 1108 MHz (87.8%) | 1095 MHz (86.8%) | 1132 MHz (89.7%) |
| 1 cm (25%) | 967 MHz (76.6%) | 988 MHz (78.3%) | 1006 MHz (79.7%) |
| 0.3 cm (7.5%) | 823 MHz (65%) | not possible | not possible |

3.2.5 การใช้วัสดุไดอิเล็กทริกวางซ้อนทับด้านบน (Superstrates)



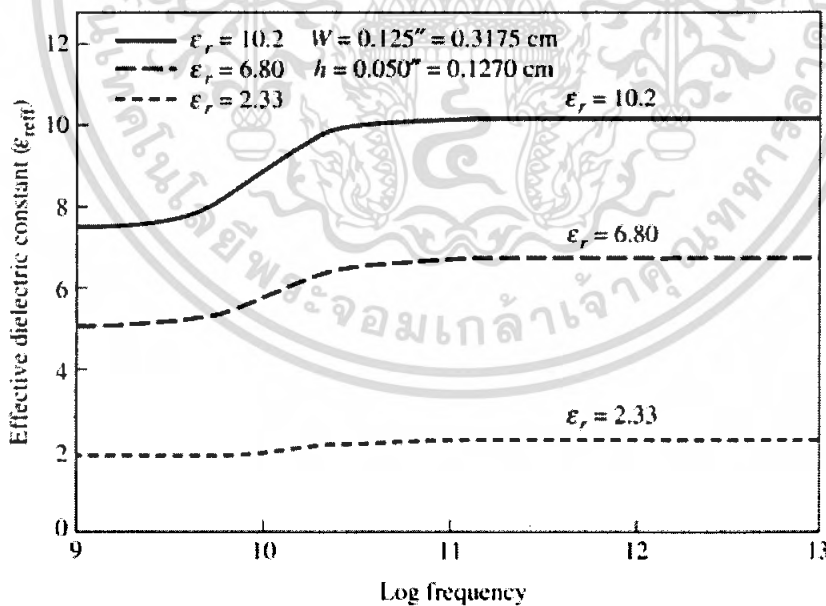
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.9 โครงสร้างของสายอากาศที่มีการวางซ้อนทับด้วยไดอิเล็กทริก
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ผลของงาน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้วัสดุไดอิเล็กตริกวางซ้อนทับด้านบน (Superstrates) ดังในรูปที่ 3.8 เป็นวิธีที่ใช้ในการลดขนาดของสายอากาศ ซึ่งสามารถเพิ่มอัตราขยายโดยการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศให้มากขึ้น การวางวัสดุไดอิเล็กตริกวางซ้อนทับด้านบนช่วยในการปรับปรุงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective dielectric constant : ϵ_{reff}) ของวัสดุฐานรอง เนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปโดยทั่วไปที่ด้านบนของตัวแพร่กระจายคลื่นจะเป็นอากาศส่วนด้านล่างเป็นวัสดุฐานรองที่เป็นไดอิเล็กตริก เพราะฉะนั้นเส้นสนามไฟฟ้าจึงมีส่วนที่ผ่านอากาศและผ่านวัสดุฐานรองที่เป็นไดอิเล็กตริก จึงเกิดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective dielectric constant : ϵ_{reff}) ขึ้นโดยที่ $1 < \epsilon_{\text{reff}} < \epsilon_r$ และเมื่อความถี่สูงขึ้นค่า ϵ_{reff} จะมีค่าเข้าใกล้ค่า ϵ_r ของวัสดุฐานรอง ดังในรูปที่ 3.8 จากสมการที่ 3.15 สายอากาศไมโครสตริปขนาดประมาณ

$$L \approx \frac{c}{2f\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \quad (3.15)$$

สมการข้างต้นไม่คำนึงถึงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective dielectric constant : ϵ_{reff}) แต่เมื่อต้องการความถูกต้องจะต้องคำนวณค่า ϵ_{reff} ร่วมด้วยคือ

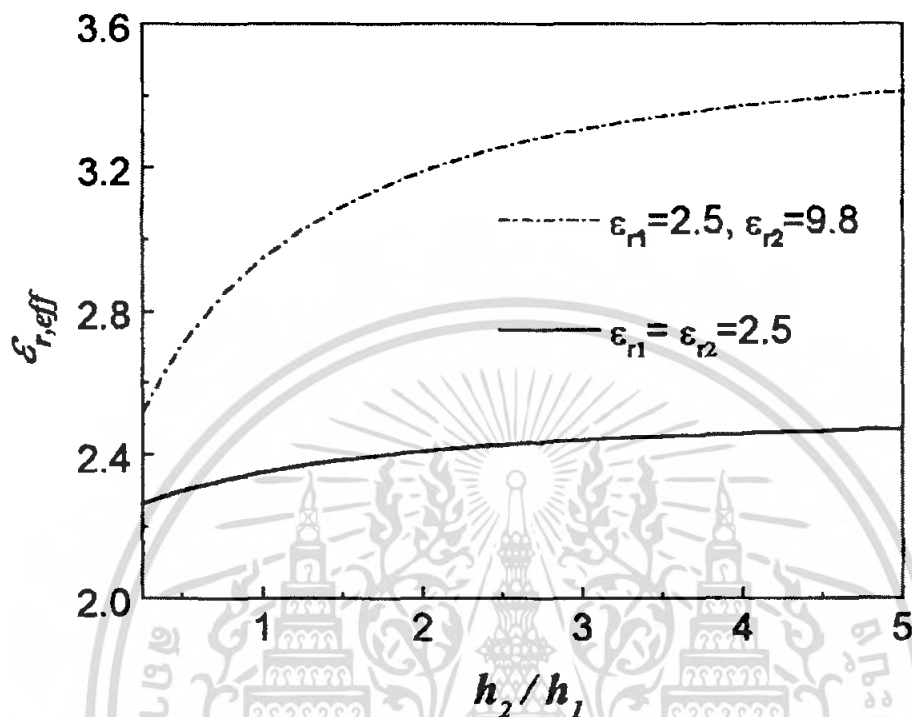
$$L_{\text{eff}} \approx \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}\mu_r}} \quad (3.16)$$



รูปที่ 3.10 การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective dielectric constant : ϵ_{reff})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

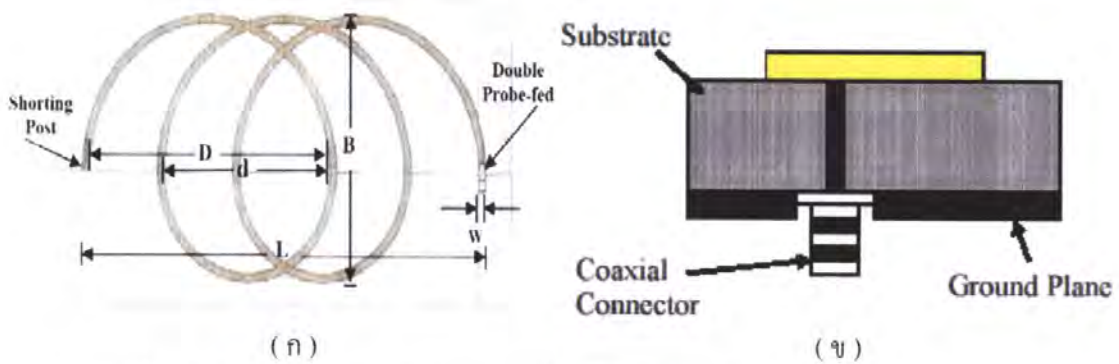
จากรูปที่ 3.10 เมื่อออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่มีความถี่ต่ำค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective dielectric constant : $\epsilon_{r,eff}$) จะมีค่าน้อยกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง ϵ_r การลดลงของขนาดสายอากาศนั้นจะน้อยลง



รูปที่ 3.11 การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล $\epsilon_{r,eff}$ เมื่อค่าความสูงของไดอิเล็กตริกที่วางซ้อนทับเปลี่ยนไป

3.2.6 การรวมเทคนิคต่าง ๆ เข้าด้วยกัน (Combined techniques)

การรวมเทคนิคต่าง ๆ ข้างต้นเข้าด้วยกัน (Combined techniques) เป็นวิธีการลดขนาดของสายอากาศอย่างหนึ่ง เนื่องจากในบางความต้องการที่จำกัดในเรื่องของขนาดสายอากาศทำให้วิธีต่าง ๆ ข้างต้นไม่เพียงพอที่จะสามารถลดขนาดของสายอากาศลงได้ ในบางความต้องการสายอากาศที่มีขนาดเล็กแต่มีสมรรถนะที่ดีก็ต้องใช้เทคนิคที่จะเพิ่มอัตราการขยายของสายอากาศ เพราะฉะนั้นการรวมเทคนิคต่าง ๆ ข้างต้นเข้าด้วยกัน (Combined techniques) เป็นการรวมเอาข้อดีในแต่ละวิธีเข้ามาใช้ แต่ในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของวิธีต่าง ๆ ที่นำมาใช้ร่วมกันและความต้องการในเรื่องสมรรถนะของสายอากาศนั้นด้วย



รูปที่ 3.12 (ก) โครงสร้างของสายอากาศที่มีการใช้เทคนิคต่าง ๆ รวมเข้าด้วยกัน

(ข) การป้อนด้วย Coaxial Connector

ตัวอย่างของการใช้เทคนิคต่างๆรวมเข้าด้วยกันคืองานวิจัยของ Manish Kumar เรื่อง Design of a wideband Reduced Size Microstrip Antenna VHF/lower UHF Range สายอากาศถูกออกแบบด้วยความถี่ 421.25 MHz มีช่วงกว้างความถี่ 183.5 MHz สายอากาศถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม IE3D การคำนวณด้วยวิธี โมเมนต์ (Method of Moment) เทคนิคต่าง ๆ ที่นำมาใช้คือ

ตารางที่ 3 ขนาดของสายอากาศ

| | | |
|---------------------------|------------------------------------|--------------|
| L | (total length of patch) | 270 mm |
| B | (breadth of patch) | 145 mm |
| W | (width of patch) | 5 mm |
| D | (diameter of bigger loop) | 180 mm |
| d | (diameter of smaller loop) | 120 mm |
| n | (number of loops) | 2 |
| h | (height of substrate) | 4.6 mm |
| ϵ | (dielectric constant of substrate) | 2.2 |
| Loss tangent of substrate | | 0.001 |
| First feeding point | | (3 mm, 0 mm) |
| Second feeding point | | (3 mm, 5mm) |

3.2.6.1 การเลือกรูปร่างของสายอากาศ

เนื่องจากสายอากาศในงานวิจัยนี้ไม่ได้จำกัดขนาดของสายอากาศทำให้สามารถเลือกรูปร่างของสายอากาศได้อย่างกว้างขวาง โดยสายอากาศถูกออกแบบที่ความถี่ 321.25 MHz โครงสร้างที่เหมาะสมที่สามารถใช้ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศที่กว้างก็คือสายอากาศแบบขดเกลียว ถูกเลือกนำมาใช้เป็นสายอากาศไมโครสตริปดังในรูปที่ 3.11 (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6.2 การเลือกวิธีป้อน

การป้อนด้วยโพรบหรือสายโคแอกเซียล (Co-axial or probe feed techniques) ถูกนำมาใช้ เนื่องจากสามารถป้อนได้ในทุก ๆ ที่ของสายอากาศ เพื่อให้เกิดการแมตซ์กับสายอากาศ (โดยปกติจะมีความต้านทาน 50 โอห์ม)

3.2.6.3 การเลือกวัสดุฐานรอง

เมื่อพิจารณาความเหมาะสมระหว่างขนาดของสายอากาศกับสมรรถนะของสายอากาศแล้ว วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกที่เหมาะสมสมควรจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่มีค่าน้อย สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกค่าคงที่ไดอิเล็กตริก $\epsilon_r = 2.2$ มีความหนา $h = 1.6$ mm

3.2.6.4 การัดวงจร (Shorted circuits)

การัดวงจรถูกเลือกใช้ร่วมในการลดขนาดสายอากาศไมโครสตริปในงานวิจัยนี้ โดยทั่วไปสายอากาศไมโครสตริปจะถูกทำการัดวงจรบริเวณกลางระนาบศักย์เป็นศูนย์ (Zero - potential plane) เพื่อไม่ให้มีผลกระทบกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยวงจรสมมูลของการัดวงจรเปรียบเทียบกับวงจรอนุกรมของค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance : L) กับความจุไฟฟ้า (Capacitance : C)

3.3 การคำนวณและการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

ในการคำนวณและออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมจะมีองค์ประกอบที่สำคัญในการออกแบบคือ

- ค่าเพอร์มิตติวิตีของสารตัวกลาง (ϵ_r)
- ความหนาของสารตัวกลาง (h)

ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีความสำคัญในการคำนวณหาความกว้าง (w) และความยาว (L) ของแผ่นแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริปจากรูปที่ 3.13 เป็นการแสดงขั้นตอนในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

การคำนวณหาความกว้างของสายอากาศจาก $ka < 1$ เมื่อค่า a ความกว้างของสายอากาศที่ยาวที่สุดซึ่งค่า k หาได้จาก

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (3.17)$$

$$\lambda_0 = \frac{C_0}{f_0} \quad (3.18)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้นสายอากาศจะกว้างได้มากที่สุดเท่ากับ

$$\lambda_0 = \frac{3 \times 10^8}{433 \times 10^6} = 69.2 \text{ cm}$$

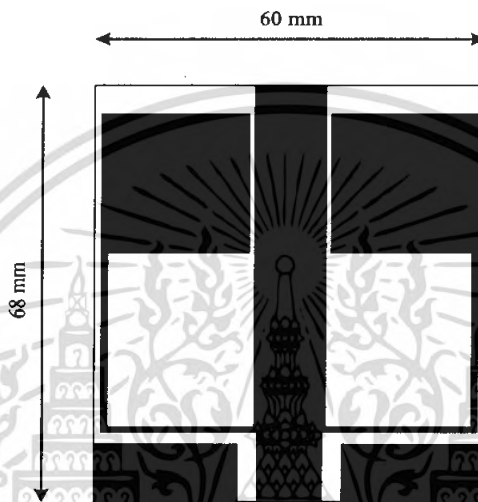
$$k = \frac{2\pi}{0.692} = 9.079$$

เมื่อ $a < \frac{1}{k}$ จะได้

$$\frac{1}{9.079} = 11.01 \text{ cm}$$

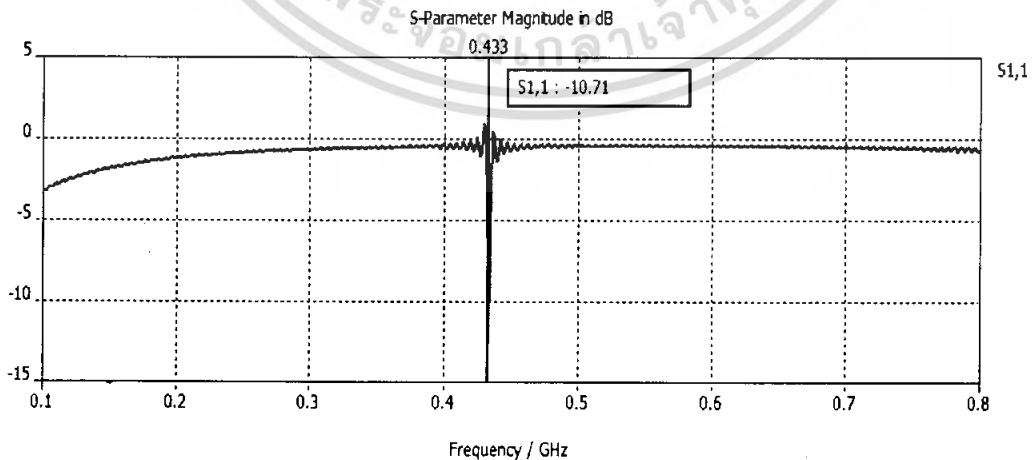
เพราะฉะนั้นสายอากาศมีขนาดกว้างมากที่สุดได้ 11.01 cm

สายอากาศที่ออกแบบนั้นมีขนาด $60 \times 68 \text{ mm}$ ซึ่งแสดงตามรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 รูปแบบสายอากาศที่ออกแบบด้วยโปรแกรม CST

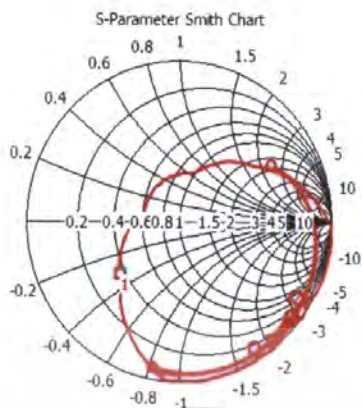
เมื่อทำการจำลองผลในโปรแกรม CST จะได้ค่าต่าง ๆ ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.14 ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 433 MHz ที่ได้จากโปรแกรม CST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

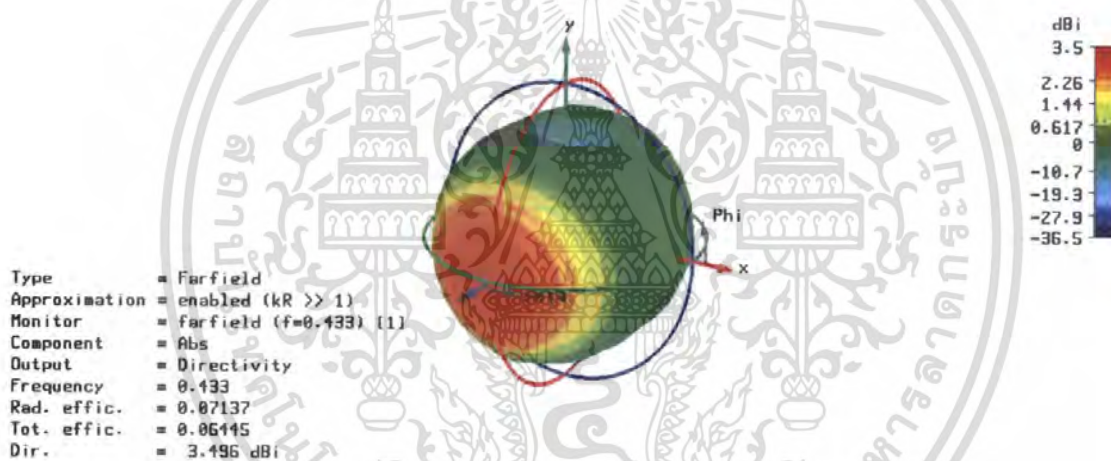
- 0.1000 (92.45, 129.3) Ohm
- 0.4325 (19.17, -16.98) Ohm
- 0.8000 (3.309, -42.93) Ohm



S1,1 (51.85 Ohm)

Parameter = Frequency / GHz

รูปที่ 3.15 อิมพีแดนซ์ที่ได้จากโปรแกรม CST



รูปที่ 3.16 การแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม CST

จากการจำลองผลในโปรแกรม CST จะได้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ 433 MHz ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้นี้มีค่า Return Loss อยู่ที่ -10.71 dB ซึ่งต่ำกว่า -10 dB ถือว่าสายอากาศที่ออกแบบมาใช้งานได้ รูปที่ 3.15 อิมพีแดนซ์ที่ได้จากโปรแกรม CST ได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 51.85 Ω ซึ่งใกล้เคียงกับค่าแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ที่ 50 Ω รูปที่ 3.16 การแพร่กระจายคลื่นของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม CST ซึ่งเป็นการจำลองในระยะ Far field .ทั้งระนาบสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า จะเห็นว่าที่ความถี่ 433 MHz ได้ค่า Directivity เท่ากับ 3.496 dBi และจากรูปยังอธิบายได้อีกว่าแถบสีแดงของผลการจำลองได้แสดงถึงทิศทางการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งคลื่นที่แพร่กระจายออกมาเป็นเส้นตรงหรือการโพลาไรซ์แบบ Linear ส่วนแถบสีเขียวของผลการจำลองส่วนนี้ จะไม่มีการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การสร้างสายอากาศไมโครสตริป

การสร้างสายอากาศไมโครสตริปนั้นจะใช้โปรแกรม CST ในการออกแบบรูปร่างและขนาดแล้วทำการ Simulation เพื่อให้ได้ความถี่ตามที่เราต้องการคือ 433 MHz โดยรูปแบบของสายอากาศนั้นได้ถูกคัดแปลงจากสายอากาศไดโพลและ โมโน โพลเข้าด้วยกัน จากนั้นทำการปรับแต่งรูปร่างและขนาดให้มีค่าที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงมากที่สุด แล้วจึงนำขนาดจริงไปวาดลงโปรแกรม Microsoft visio แล้ววาดขนาดจริงเพื่อที่จะนำไปทำชิ้นงาน

3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศไมโครสตริป

1. แผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้สารตัวกลางกึ่งกลางเป็นอีพ็อกซี่
2. ขั้วต่อ SMA
3. เลื่อยฉลุ
4. สติกเกอร์
5. กรดกัดแผ่นวงจรพิมพ์
6. หัวแร้ง
7. ตะกั่ว

3.4.2 ขั้นตอนการออกแบบและการสร้างสายอากาศไมโครสตริป

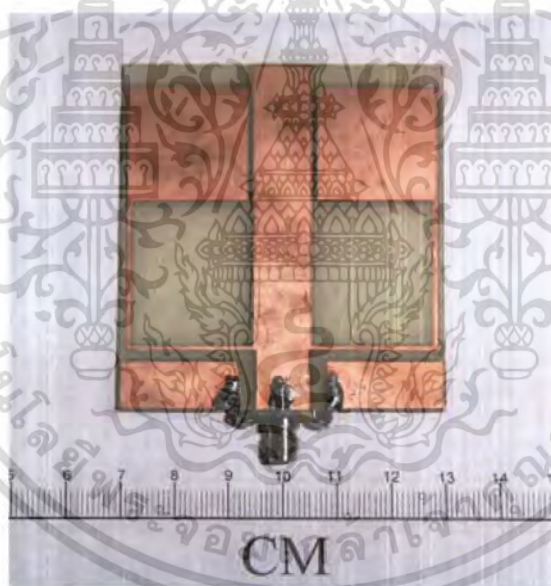
1. ศึกษาการใช้โปรแกรม CST
2. ทำการวาดรูปร่างในโปรแกรม CST
3. จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST
4. ปรับแต่งรูปร่างเพื่อให้ค่าที่ได้ดีที่สุดหรือใกล้เคียงมากที่สุด
5. นำขนาดที่วาดในโปรแกรม CST มาวาดลงในโปรแกรม Microsoft Visio
6. พิมพ์ขนาดจริงลงกระดาษ A4
7. ทำการแกะสติกเกอร์ลายวงจร
8. นำแผ่นวงจรพิมพ์ไปกัดกับกรดกัดแผ่นวงจรพิมพ์
9. นำมาต่อกับขั้วต่อ SMA พร้อมใช้งาน

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในการวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศที่ถูกสร้างขึ้นมานั้น จะมีพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากในการที่จะต้องนำมาพิจารณา เช่น อิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ (Impedance) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio) ค่าการสูญเสียเนื่องมาจากการย้อนกลับ (Return Loss) ค่าความกว้างของความถี่ที่ใช้งาน (Bandwidth) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) และค่าอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศ

โดยในการวิเคราะห์จะนำขนาด สายอากาศไมโครสตริป ย่านความถี่ที่ใช้งานในบทที่แล้วมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม CST แล้วทำการปรับแต่งขนาดเพื่อให้ได้ผลที่ดีที่สุด (Optimum) แล้วนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์โปรแกรม CST มาวิเคราะห์เพื่อใช้ในการสร้างและพัฒนาสายอากาศต่อไป



รูปที่ 4.1 สายอากาศใช้งานที่ความถี่ 433 MHz

รูปที่ 4.1 สายอากาศใช้งานที่ความถี่ 433 MHz ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม CST และถูกสร้างออกมาเพื่อทำการทดสอบ

สำหรับการวัดและการทดลองค่าต่าง ๆ ในการทดลองนี้จะใช้ เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายวิทยุ (Network Analyzer : รุ่น HP 8720c 50 MHz – 20 GHz) การวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายวิทยุนี้สามารถวัดและแสดงรูปสัญญาณพร้อมทั้งค่าต่าง ๆ ออกมาโดยละเอียด ส่วนอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ได้แก่ ตัวเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศกับเครื่องวัดจะใช้ขั้วต่อแบบ SMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

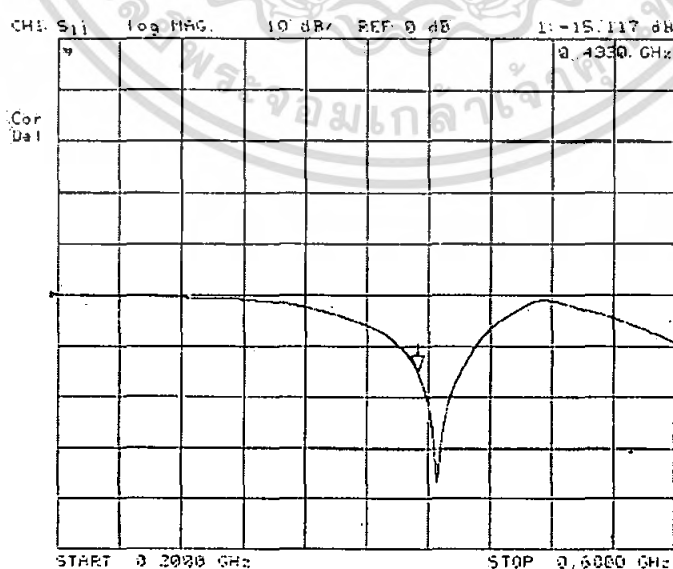
1. เครื่อง Network Analyzer
2. ชุด Calibrate
3. คอมพิวเตอร์ Notebook
4. สายอากาศไมโครสตริปที่ใช้ทดลอง
5. วงจรเซนเซอร์

4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการปรับเทียบเครื่อง Network Analyzer ด้วยชุด Calibrate
2. เลือกความถี่ที่เริ่มต้น 0 – 1 GHz
3. ทำการต่อสายอากาศไมโครสตริป เข้ากับเครื่อง Network Analyzer
4. ทดสอบวัดหาค่าการสูญเสียย้อนกลับ
5. ทดสอบวัดหาค่าอิมพีแดนซ์ของไมโครสตริปด้วยเครื่อง Network Analyzer
6. ทดสอบวัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริป
7. ทดสอบการวัดค่าเบนดิวคิต
8. ทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ
9. ทดสอบการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ
10. ทดสอบหาระยะรับ-ส่งของสายอากาศเข้ากับระบบเซนเซอร์

4.3 ผลการทดสอบสายอากาศความถี่ 433 MHz

4.3.1 ผลการทดสอบวัดหาค่าการสูญเสียย้อนกลับ

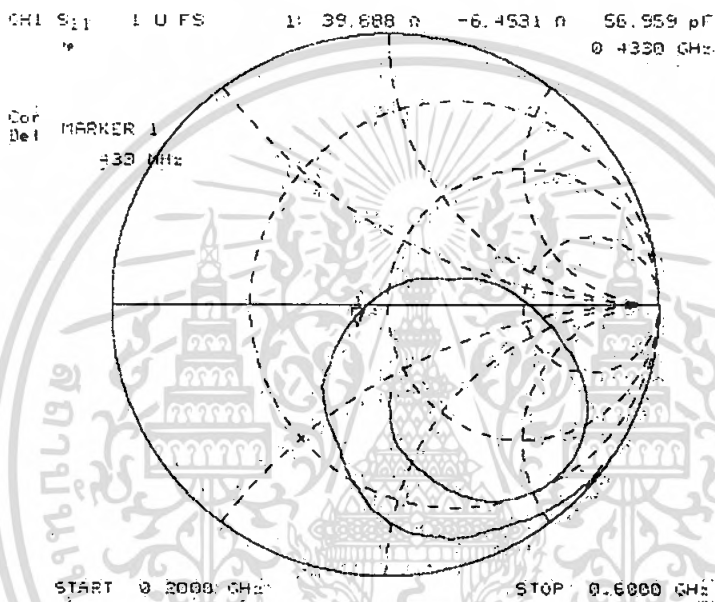


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 4.2 ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบทดลองให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ซึ่งการพิจารณาดังกล่าวจะต้องพิจารณาที่ความถี่ใช้งาน ซึ่งค่าการสูญเสียย้อนกลับที่สามารถยอมรับได้ จะต้องมีย่านน้อยกว่า -10 dB ขึ้นไป ซึ่งแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.2

จากผลการทดสอบหาค่าการสูญเสียย้อนกลับนี้จะพบว่าความถี่ 433 MHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -15.117 dB โดยในการวัดค่าพบว่าเมื่อหาค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า -10 dB สามารถนำไปใช้งานได้

4.3.2 ผลการทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ



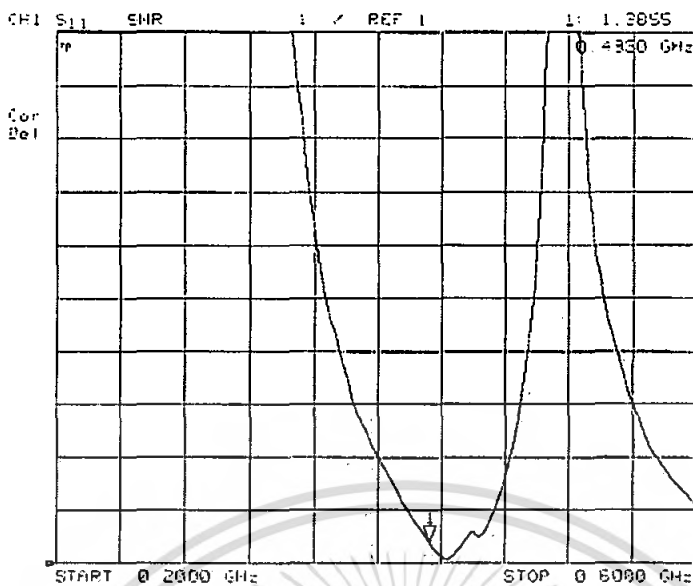
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

ในการทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปนี้ โดยการอ่านค่า Smithchart จากเครื่อง Network Analyzer โดยกำหนดให้ Marker 1 เป็นความถี่ Center ที่ 433 MHz ซึ่งผลการทดสอบจะได้ดังรูปที่ 4.3

ซึ่งในการวัดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์นี้เราจะต้องทำให้ได้ค่าเท่ากับ 50 โอห์ม แต่จากผลการทดลองที่ความถี่ 433 MHz จะพบว่าค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ 39.688 - j6.4531 โอห์ม ซึ่งค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ได้นี้จะมีย่านต่อค่าในการทดสอบต่อไป ซึ่งจะส่งผลให้การส่งกำลังงานออกสายอากาศ

4.3.3 ผลการทดสอบวัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ (VSWR)

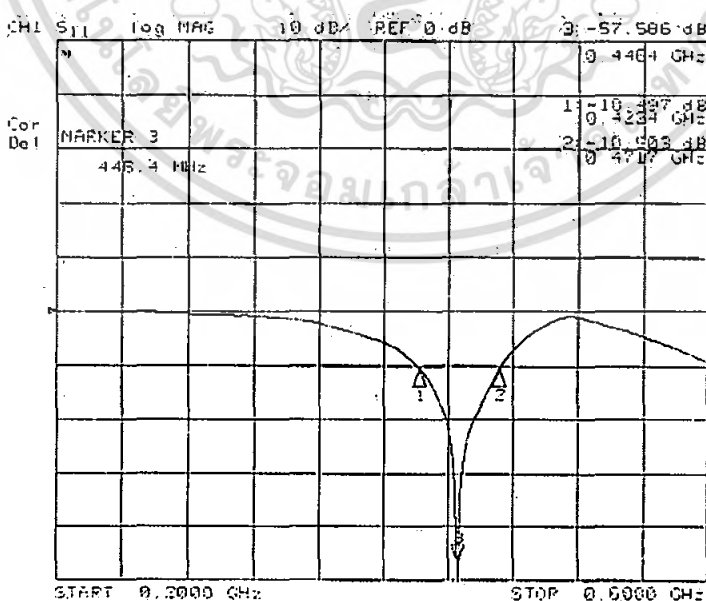
ในการทดสอบหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปนี้ ก็จะทำการทดสอบคล้ายกับการหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์คือ จะดูค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ความถี่ใช้งานที่ 433 MHz ซึ่งทำการสอบจะได้ดังรูปที่ 4.4 เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ (VSWR)

จากการทดลองที่ได้จะเห็นว่าความถี่จะมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ต่ำกว่า 2:1 โดยอัตราคลื่นนิ่งที่ทำการทดลองนี้ได้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง 1.3855:1 ซึ่งต่ำกว่า 2:1 จากการทดสอบนี้จะพบว่าความถี่นี้สามารถใช้งานได้

4.3.4 ผลการทดสอบการวัดค่าแบนด์วิดท์



รูปที่ 4.5 ค่าแบนด์วิดท์ที่ได้จากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบหาค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศไมโครสตริปของความถี่ที่ทำการทดสอบ จะวัดค่าความถี่ที่มีการสูญเสียย้อนกลับน้อยกว่า -10 dB และกำหนด 3 Marker โดยจะกำหนด Marker 1 เป็นความถี่ต่ำ Marker 2 เป็นความถี่สูง Marker 3 เป็นความถี่กลาง ดังแสดงในรูปที่ 4.5

จากการทดสอบหาค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศไมโครสตริปที่ย่านความถี่ 433 MHz ก็จะพบว่า Marker 1 ความถี่ 422 MHz Marker 2 ความถี่ 471 MHz Marker 3 ความถี่ 446.4 MHz จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าแบนด์วิดท์จะเท่ากับ 11.04 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5

4.3.5 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ การทดสอบนั้นจะทำในห้องที่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมน้อยที่สุด สามารถทำได้ในห้องไร้คลื่นสะท้อนซึ่งเป็นห้องที่สร้างขึ้นเพื่อไม่ให้มีคลื่นสะท้อนกลับออกจากผนังทุกด้านของห้องส่วนของระยะที่ใช้ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะใช้บริเวณสนามระยะไกลซึ่งเป็นบริเวณสนามของสายอากาศ ที่การแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่างๆไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศบริเวณสนามระยะไกล

$$\text{Far Field Distance (R)} = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.1)$$

โดยที่ R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับกับสายอากาศส่ง (เมตร)

D คือ มิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศ (เมตร)

ระยะที่ใช้ในการทดสอบ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

โดยที่ D = 0.090 เมตร

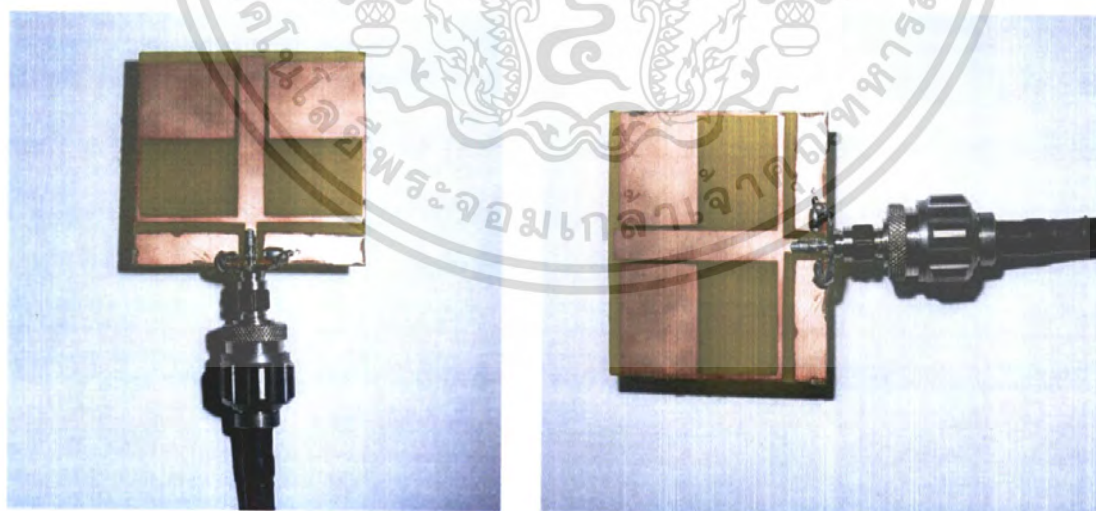
λ = 0.692 เมตร

$$\text{Far Field Distance (R)} = \frac{2(0.090)^2}{0.692} = 0.023 \text{ เมตร}$$

ในการทดสอบนี้จะใช้ระยะ Far Field ที่มากกว่า 0.023 เมตร ในระนาบ E-Plane โดยติดตั้งสายอากาศที่ใช้รับและส่ง ให้โพรบตั้งฉากกับพื้นระนาบโดยนำสายอากาศ ไปติดตั้งที่แท่นหมุนซึ่งจะหมุนครั้งละ 10 องศา แล้ววัดค่ากำลังสนามที่องศาต่างๆจนครบ 360 องศา โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ระบบเครือข่าย (Network Analyzer) เป็นตัวส่งและรับ ส่วนการวัดค่ากำลังสนามในระนาบ H-Plane นั้น ต้องติดตั้งสายอากาศที่ใช้รับและส่ง ให้โพรบขนานกับพื้นระนาบแล้วทำการทดลองเช่นเดียวกันกับ E-Plane



รูปที่ 4.6 การจัดวางสายอากาศเพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

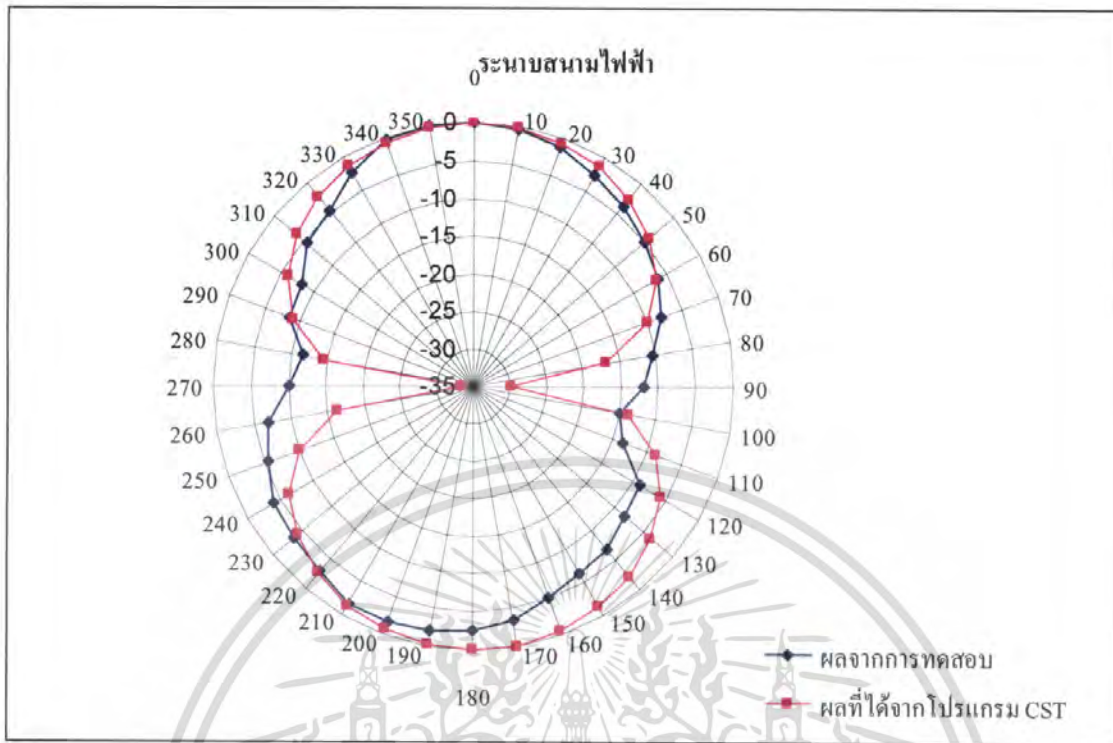


(ก) ในระนาบสนามไฟฟ้า

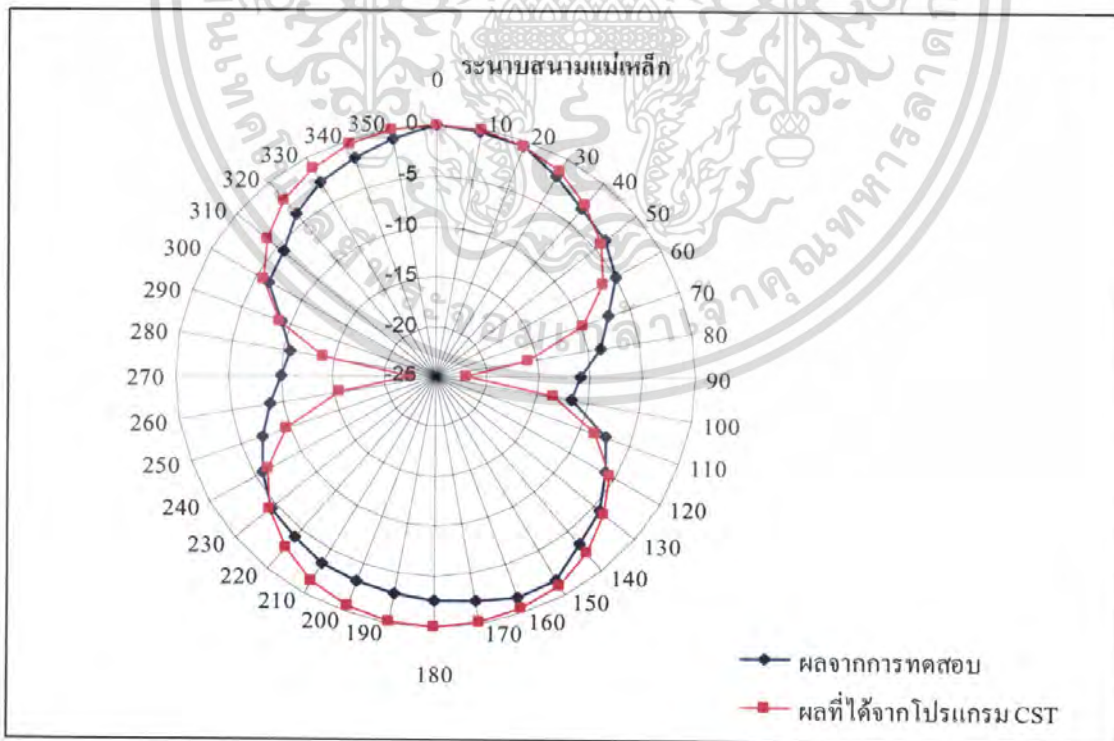
(ข) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.7 การจัดวางสายอากาศเพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ 4.8 มีนบุรีการแพร่กระจายคลื่น (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

4.3.6 ผลการทดสอบการหาอัตราขยายของสายอากาศ

การทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศจะใช้สายอากาศทั้งตัวส่งและตัวรับที่โครงสร้างและคุณลักษณะเหมือนกันวางห่างกันด้วยระยะทางที่มากกว่าหรือเท่ากับบริเวณสนามระยะไกลและใช้เครื่องวิเคราะห์ระบบเครือข่ายเป็นตัวรับและตัวส่ง สัญญาณที่ได้รับจากเครื่องวิเคราะห์ระบบเครือข่ายจะหาค่าได้จากสมการที่ 4.2

$$\begin{aligned} Pr(\text{dBm}) = & Pt(\text{dBm}) + Gt(\text{dBi}) - Lt(\text{dB}) - 32.4 - 20\log f(\text{MHz}) \\ & - 20\log d(\text{km}) + Gr(\text{dBi}) - Lr(\text{dB}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

เมื่อ Gt = อัตราขยายของสายอากาศส่ง (dBi)
 Gr = อัตราขยายของสายอากาศรับ (dBi)
 Lt = ค่าการสูญเสียของสายอากาศส่ง (dB)
 Lr = ค่าการสูญเสียของสายอากาศรับ (dB)
 Pt = กำลังงานด้านส่ง (dBm)
 Pr = กำลังงานด้านรับ (dBm)
 d = ระยะทางใช้ในการทดสอบ
 f = ความถี่ที่ใช้การทดสอบ

จากการทดสอบจะพบว่าค่าอัตราขยายของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจะมีค่าอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ -3.05 dBi ซึ่งสายอากาศทางด้านส่งและสายอากาศทางด้านรับจะมีอัตราขยายของสายอากาศเท่ากัน

4.3.7 ผลการทดสอบการหาระยะรับ-ส่งของสายอากาศกับระบบเซนเซอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.9 การจัดวางสายอากาศเพื่อหาระยะรับ-ส่งของสายอากาศนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบการหาระยะรับ-ส่งของสายอากาศกับระบบเซนเซอร์ ซึ่งใช้สายอากาศแบบเดียวกัน 2 ตัว หันหน้าเข้าหากัน จากนั้นทำการหาระยะรับ-ส่งของสายอากาศที่ส่งกำลังงานออกมาได้ ระยะทางประมาณ 150 เมตร โดยวัดในบริเวณที่โล่ง ไม่มีสิ่งกีดขวาง การจัดวางสายอากาศเพื่อวัดระยะรับ-ส่งของสายอากาศกับระบบเซนเซอร์ ดังรูปที่ 4.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 บทวิจารณ์และบทสรุป

ทำการออกแบบการสร้าง และทดลองให้สายอากาศไมโครสตริปตัวนี้จะสร้างจากวัสดุฐานรองที่เป็นแบบอีพ็อกซี่ สายอากาศไมโครสตริปที่สร้างขึ้นจะเป็น สายอากาศไมโครสตริปที่ใช้งานได้ที่ความถี่ 433 MHz ซึ่งจะใช้งานในระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยออกแบบสายอากาศแบบแผ่น ที่มีรูปร่างของส่วนที่ใช้แพร่กระจายคลื่น เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่ละส่วนที่ใช้แพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต้องการมาประกอบเข้าด้วยกัน จึงทำการซิมูเลทโดยโปรแกรม CST ซึ่งได้แสดงทฤษฎี การออกแบบ การสร้าง การทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ โดยจะทำการทดสอบวัดค่ากำลังสูญเสีย การหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และการแพร่กระจายคลื่น และทำการเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศจากที่ทดลองทางทฤษฎี ว่ามีความสอดคล้องหรือความแตกต่างกันอย่างไร

5.1 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการนี้

1. สามารถออกแบบและสร้างสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม โดยมีคุณสมบัติใช้งานที่ความถี่ 433 MHz ได้
2. สามารถนำสายอากาศไมโครสตริปที่สร้างขึ้นไปทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศได้
3. สามารถนำคุณสมบัติของสายอากาศที่สร้างขึ้นมาไปประยุกต์ใช้งานตามความเหมาะสม
4. เป็นแนวทางการศึกษาเพื่อพัฒนาสายอากาศให้คุณลักษณะที่ดีขึ้น

5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

5.2.1 ปัญหา

ในการจัดทำโครงการชุดนี้ สามารถสรุปปัญหาที่เกิดขึ้นดังนี้

1. ในการออกแบบให้สายอากาศไมโครสตริปให้มีขนาดเล็กลงทำได้ยาก
2. ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปเมื่อนำมาทดลอง และออกแบบสร้างผลที่ได้ไม่เหมือนกับทฤษฎีที่นำมาอ้างอิง
3. การสร้างแผ่นแพร่กระจายคลื่นให้มีขนาดตรงตามที่คำนวณทำได้ยาก เพราะว่ามีมวลอะตอมมาก ยากต่อการสร้าง
4. ในการวัด และทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ไม่สามารถทำการทดลองสายอากาศเฉพาะ ดังนั้นในการทดลองจึงเกิดความคลาดเคลื่อน
5. การบัดกรี เพื่อทำการเชื่อมต่อแบบ SMA กับสายอากาศไมโครสตริปนั้นทำได้ยาก เพราะจุดเชื่อมต้อมีขนาดเล็ก และแผ่นทองแดงสามารถหลุดจากส่วนที่เป็นฉนวนได้ถ้าบัดกรีใช้ความร้อนสูงเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 แนวทางแก้ไข

1. ในการออกแบบสายอากาศ ค่าคงตัวของสารที่ใช้เป็นฉนวน ต้องกำหนดให้ได้ตรงตามค่าของสารนั้น และถูกต้องมากที่สุด
2. ในส่วนของการสร้างสายอากาศไมโครสตริป ต้องสร้างให้ได้ขนาดตามที่คำนวณให้มากที่สุด คือต้องออกแบบขนาดโดยใช้เครื่องมือที่สามารถกำหนด และวัดขนาดของแผ่นแพร่กระจายคลื่นที่มีความละเอียดสูง และให้เกิดค่าที่คลาดเคลื่อนจากการออกแบบที่น้อยที่สุด
3. การวัดและทดสอบ ถ้าจะให้ค่าต่าง ๆ มีความถูกต้องและสอดคล้องกันต้องสร้างสายอากาศให้มีขนาดที่ถูกต้อง และมีความละเอียดในการสร้างให้สูงมากขึ้น
4. ในการวัดและทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น ต้องใช้เครื่องมือ และชุดทดสอบมีความเที่ยงตรงและผิดพลาดน้อยที่สุด รวมทั้งห้องที่ทำการทดสอบ ต้องจัดตำแหน่งของสายอากาศเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ภายในห้อง ไม่ให้เกิดการรบกวน
5. การบัดกรี ต้องใช้เครื่องมือที่ควบคุมอุณหภูมิได้อย่างสม่ำเสมอ เพื่อที่จะสามารถควบคุมอุณหภูมิขณะทำการเชื่อมต่อ ไม่ให้ความร้อนสูงเกินไป



หนังสืออ้างอิง

- [1] โมนอย ไกรฤกษ์ “ทฤษฎีสายอากาศ” สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, พ.ศ.2541
- [2] C. A. Balanis. *Antenna Theory: Analysis & Design*, John Wiley & Sons. Inc., 1995.
- [3] C.S.Lee and P.W Chen, “Electrically Small Microstrip Antenna.” *IEEE. Antennas and Propagation Society International Symposium*, Vol. 2, pp. 778-781, 2000.
- [4] C. T. Rodenbeck, “Planer Miniature RFID Antennas Suitable for Integration With Batteries,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.54, no.12, pp. 3700-3706, December 2006.
- [5] D. Guha, J. Y. Siddiqui, “Resonant Frequency of Circular Microstrip Antenna Covered With Dielectric Superstrate,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.51, no. 7, pp.1649-1652, July 2003.
- [6] D.M. Pozar, D.H. Schaubert, *Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays*. New York: IEEE Press, 1995.
- [7] H. A. Wheeler “Fundamental Limitations of Small Antennas,” *Proc. IRE*, Vol. 35, Dec, 1947, pp.1479-1484
- [8] H. A. Wheeler “Small Antennas,” *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. AP-23, No.4, July, 1975, pp.462-469
- [9] J. Anguera, L. Boada, C. Puente, C. Borla, and J. Soler, “Stacked H-Shaped Microstrip Patch Antenna,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.52, no. 4, pp. 983-993, April 2004.
- [10] J. S. McLean, “The radiative properties of electrically-small antennas,” *IEEE International Symp. on Electromagnetic Compatibility*, 22-26, August 1994, pp.320-324.
- [11] K.F. Lee, *Advances in Microstrip and Printed Antennas*. New York: John Wiley & Sons. Inc., 1997.
- [12] K. S. Min, T. V. Hong, “Miniaturization of Antenna Using Magneto-Dielectric Materials” *Asia-Pacific Conference on Communications*, pp. 1-5, August 2006.
- [13] M. Sanad, “A Small Size Microstrip Antenna Having a Partial Short Circuit,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.54, no.407, pp. 282-285, April 2006.
- [14] N. G. Alexopoulos, “Fundamental Superstrate (Cover) Effects on Printed Circuit Antennas,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.AP-32, no. 8, pp.807-816, August 1984.
- [15] R. C. Hansen, “Fundamental Limitations in Antennas”, *Proc. of IEEE*, vol. 69, no. 2, pp. 170-182, Feb. 1981.
- [16] S.Xiao, Z. Shao, B.Z. Wang, M.T. Zhou, and M. Fujise, “Design of Low-Profile Microstrip Antenna with Enhanced Bandwidth and Reduced Size,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.54, no.5, pp. 1594-1599, May 2006.

หนังสืออ้างอิง (ต่อ)

- [17] W. G, "A method for the evaluation of small antenna Q," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. 51, No.8, August 2003, pp.2124-2129.
- [18] X.Chen, S.S. Naeini, and Y.Liu, "A Down-Sized Printed Hilbert Antenna of UHF Band," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol.2, pp. 518-584, 2003.
- [19] Dsign of A Wideband Reduced Size Microstrip Antenna in VHF/ Lower UHF Range, [Online]: Available: [http://www.ursi.org/Proceedings/ ProcGA05/pdf/ B04P.12\(0770\).pdf](http://www.ursi.org/Proceedings/ ProcGA05/pdf/ B04P.12(0770).pdf)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้