สายอากาศแบบไมโครสตริป

MICROSTRIP ANTENNA

โดย

นายปรเมษฐ วิสุทธิธรรม

นายรัชพงษ์ พรวิริยางกูร

วัน เดือน ปี 17 ธค 2541

เลขทะเบียน 039020

เลขเรียกหนังสือ โ 40261 ป171ส

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

039020

สายอากาศแบบไมโครสตริป

MICROSTRIP ANTENNA

โดย

นายปรเมษฐ วิสุทธิธรรม 37014230

นายรัชพงษ์ พรวิริยางกูร 37014355

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ณรงค์ เหมกรณ์

ผศ. นิภา ลีลารุจิ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2540

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

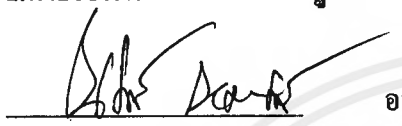
เรื่อง สายอากาศแบบไมโครสตริป

MICROSTRIP ANTENNA

ผู้จัดทำ

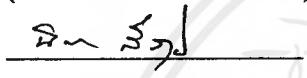
1.นายปรเมษฐ วิสุทธิธรรม 37014230

2.นายรัชพงษ์ พรวิริยางกูร 37014355



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. ณรงค์ เหมกรณ์)



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. นิภา ลีลารุจิ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแบบไมโครสตริป

Microstrip Antenna

โดย นายปรเมษฐ วิสุทธิธรรม 37014230
นายรัชพงษ์ พรวิริยางกูร 37014355

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ฉรงค์ เหมกรณ์
ผศ. นิภา ลีลารุจิ

บทคัดย่อ

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ แสดงวิธีออกแบบสายอากาศแบบไมโครสตริป อิลิเมนต์เดี่ยว ที่มีรูปลักษณะของแพทช์เป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า 2 อัน โดยทำงานที่ความถี่ต่างกันคือ 5 GHz กับ 10 GHz และ แบบวงกลม 2 อัน โดยทำงานที่ความถี่ 5 GHz กับ 10 GHz และมีส่วนป้อนสัญญาณเป็น สายส่งไมโครสตริป ในส่วนของการทดลองจะแสดงผลของ Return Loss และ SWR ที่ความถี่ซึ่งได้ออกแบบไว้ นอกจากนี้ยังแสดงค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ และรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศอีกด้วย

ABSTRACT

This thesis show how to design the single element microstrip antennas and we design them in 2 configurations of the patch. The first is square type which response at 5 and 10 GHz and the second is circular type which response at 5 and 10 Ghz. Their feeders are microstrip-line

In the experiment, it shows the value of return loss and SWR at the designed frequency and it also show the value of the input impedance and pattern of these antennas

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ 1
บทที่ 2 ทฤษฎีหรือหลักการ 3
2.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป 3
2.1.1 แผ่นตัวนำ (Patch) 3
2.1.2 สารตัวกลาง 4
2.1.3 กราวด์เพลน (Ground Plane) 4
2.1.4 ส่วนป้อนสัญญาณ (Feeder) 4
2.2 การแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปรูปทรงสี่เหลี่ยม 6
2.3 แบบจำลองของสายอากาศไมโครสตริป 8
2.3.1 แบบจำลองสายส่ง 8
2.3.2 แบบจำลองคาวิตี้ (Cavity Model) 9
2.4 ปรากฏการณ์ฟริงกิง (Fringing Effects) 15
2.5 วิธีการทำให้สายอากาศมีช่วงความถี่ใช้งานกว้างขึ้น 16
2.6 สายอากาศแบบอาร์เรย์ (Periodic Array) 18
2.7 ลักษณะของสายอากาศแบบอาร์เรย์ 19
2.8 สรุปลักษณะของสารตัวกลางชนิดต่างๆ 20
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง 21
3.1 การคำนวณ 21
3.1.1 การออกแบบส่วนที่ใช้ส่งคลื่น หรือแผ่นตัวนำรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า 21
3.1.2 การคำนวณหาอินพุทแอดมิทแทนซ์ของแผ่นตัวนำรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า 24
3.1.3 การออกแบบส่วนที่ใช้ส่งคลื่น หรือแผ่นตัวนำรูปทรงวงกลม 25
3.1.4 การคำนวณหาอินพุทแอดมิทแทนซ์ของแผ่นตัวนำรูปทรงวงกลม 26
3.1.5 การคำนวณหาขนาดของตัวป้อนสัญญาณ 27
3.2 การสร้าง 33
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้สร้างสายอากาศแบบไมโครสตริป 33
3.2.2 ขั้นตอนการสร้างชิ้นงาน (Process) 33
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง 39
4.1 การทดลอง 42
4.1.2 การทดลองวัด S-พารามิเตอร์, SWR และอินพุทอิมพีแดนซ์ 42
4.1.2 การทดลองวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่น 43
4.2 ผลการทดลอง 45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ผลการทดลองของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยม....45
4.2.2 .ผลการทดลองของสายอากาศรูปทรงวงกลม....50
บทที่ 5 บทวิจารณ์และบทสรุป....55
ภาคผนวก....56
กิตติกรรมประกาศ....58
หนังสืออ้างอิง....59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2. 1 โครงสร้างโดยทั่วไปของสายอากาศแบบไมโครสตริป....3
รูปที่ 2. 2 แผ่นตัวนำรูปแบบต่างๆ....3
รูปที่ 2. 3 สายส่งสัญญาณแบบต่างๆ....4
รูปที่ 2. 4 การกระจายคลื่นออกจากช่องว่าง....6
รูปที่ 2. 5 สายอากาศแบบสี่เหลี่ยม และวงจรสมมูลย์....8
รูปที่ 2. 6 การกระจายของประจุที่แผ่นตัวนำด้านบน....9
รูปที่ 2. 7 .ลักษณะของไมโครสตริปชนิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า....11
รูปที่ 2. 8 โหมดต่างๆ ภายในไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม....13
รูปที่ 2. 9 ความหนาแน่นกระแสที่บริเวณด้านทั้งสี่....14
รูปที่ 2. 10 สายส่งไมโครสตริปและลักษณะเส้นแรงสนามไฟฟ้า....16
รูปที่ 2. 11 สายอากาศแบบโฟลไดโพล....17
รูปที่ 2. 12 สายอากาศแบบพาราซิทิค....17
รูปที่ 2. 13 สายอากาศแบบ SSFIP....18
รูปที่ 2. 14 สายอากาศแบบอาร์เรย์....19
รูปที่ 3. 1 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป....21
รูปที่ 3. 2 บล็อคแสดงขั้นตอนการคำนวณความกว้าง และยาวของแผ่นตัวนำรูปทรงสี่เหลี่ยม....22
รูปที่ 3. 3 บล็อคแสดงขั้นตอนการคำนวณรัศมี ของแผ่นตัวนำรูปทรงวงกลม....25
รูปที่ 3. 4 การป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งไมโครสตริปสองตอน....27
รูปที่ 3. 5 ขนาดของไมโครสตริปรูปทรงสี่เหลี่ยมทำงานที่ 5 กิกะเฮิร์ท โดยใช้สายส่งสองตอน....29
รูปที่ 3. 6 ขนาดของไมโครสตริปรูปทรงสี่เหลียมทำงานที่ 10 กิกะเฮิร์ท โดยใช้สายส่งสองตอน....30
รูปที่ 3. 7 การป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งไมโครสตริปสามตอน....30
รูปที่ 3. 8 ขนาดของไมโครสตริปรูปทรงวงกลมทำงานที่ 5 กิกะเฮิร์ท โดยใช้สายส่งสามตอน....32
รูปที่ 3. 9 ขนาดของไมโครสตริปรูปทรงวงกลมทำงานที่ 10 กิกะเฮิร์ท โดยใช้สายส่งสามตอน....32
รูปที่ 4. 1 คอนเนคเตอร์ SMA....40
รูปที่ 4. 2 สายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ออกแบบให้ทำงานที่ 5 GHz....40
รูปที่ 4. 3 สายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ออกแบบให้ทำงานที่ 10 GHz....41
รูปที่ 4. 4 สายอากาศรูปทรงวงกลมที่ออกแบบให้ทำงานที่ 5 GHz....41
รูปที่ 4. 5 สายอากาศรูปทรงวงกลมที่ออกแบบให้ทำงานที่ 10 GHz....42
รูปที่ 4. 6 เครื่องเนตเวอร์ค อนาไลเซอร์และเครื่องกำเนิดความถี่....43
รูปที่ 4. 7 แสดงการทดลองวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่น....44
รูปที่ 4. 8 ผลการวัด S-พารามิเตอร์ของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ออกแบบที่ความถี่ 5 GHz....45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 4. 9 ผลการวัดอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ออกแบบที่ความถี่ 5 GHz.....45
รูปที่ 4. 10 ผลการวัด SWR ของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ออกแบบที่ความถี่ 5 GHz.....46
รูปที่ 4. 11 ผลการวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า ของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยม ที่ออกแบบที่ความถี่ 5 GHz.....46
รูปที่ 4. 12 ผลการวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก ของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยม ที่ออกแบบที่ความถี่ 5 GHz.....47
รูปที่ 4. 13 ผลการวัด S-พารามิเตอร์ของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz.....47
รูปที่ 4. 14 ผลการวัดอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz.....48
รูปที่ 4. 15 ผลการวัด SWR ของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz.....48
รูปที่ 4. 16 ผลการวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า ของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยม ที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz.....49
รูปที่ 4. 17 ผลการวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก ของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยม ที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz.....49
รูปที่ 4. 18 ผลการวัด S-พารามิเตอร์ของสายอากาศรูปทรงวงกลมที่ออกแบบที่ความถี่ 5 GHz.....50
รูปที่ 4. 19 ผลการวัดอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศรูปทรงวงกลมที่ออกแบบที่ความถี่ 5 GHz.....50
รูปที่ 4. 20 ผลการวัด SWR ของสายอากาศรูปทรงวงกลมที่ออกแบบที่ความถี่ 5 GHz.....51
รูปที่ 4. 21 ผลการวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า ของสายอากาศรูปทรงวงกลม ที่ออกแบบที่ความถี่ 5 GHz.....51
รูปที่ 4. 22 ผลการวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก ของสายอากาศรูปทรงวงกลม ที่ออกแบบที่ความถี่ 5 GHz.....52
รูปที่ 4. 23 ผลการวัด S-พารามิเตอร์ของสายอากาศรูปทรงวงกลมที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz.....52
รูปที่ 4. 24 ผลการวัดอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศรูปทรงวงกลมที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz.....53
รูปที่ 4. 25 ผลการวัด SWR ของสายอากาศรูปทรงวงกลมที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz.....53
รูปที่ 4. 26 ผลการวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า ของสายอากาศรูปทรงวงกลม ที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz.....54
รูปที่ 4. 27 ผลการวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก ของสายอากาศรูปทรงวงกลม ที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz.....54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4. 1 การเปรียบเทียบลักษณะของสายอากาศ.....39
ตารางที่ 4. 2 การเปรียบเทียบขนาดของสายอากาศ.....39
ตารางที่ 5. 1 สรุปผลการทดลอง.....55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip) ได้ถูกกล่าวถึงโดย นายเดสแชมป์ (Deschamps) มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1953 และถูกจดทะเบียนสิทธิบัตรในปี ค.ศ. 1953 แต่ยังไม่มีผู้ใดสนใจอย่างจริงจังนัก จนกระทั่ง 20 ปีหลังจากนั้น เมื่อมีการพัฒนาวิธีการสร้างสารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริค (Dielectric) ที่แน่นอนและยังสามารถทำให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริคได้หลายค่าตามที่ต้องการ สายอากาศชนิดนี้จึงได้ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็ว ซึ่งเริ่มตั้งแต่การประชุมกันในประเทศสหรัฐอเมริกา และหลังจากนั้น จึงได้มีการตีพิมพ์หนังสือที่เกี่ยวกับสายอากาศไมโครสตริปขึ้น

ในปี ค.ศ. 1970 สายอากาศไมโครสตริปอันแรกได้ถูกสร้างขึ้นโดย นายโฮเวล (Howell) และนายมันสัน (Munson) โดยในระยะแรกๆ นั้น สายอากาศไมโครสตริปถูกทำขึ้นจากแผ่นวัสดุที่มีขนาดบาง และสารตัวกลาง (Substate) มีค่าเพอร์มิททิวิตี้ (Permittivity) สูงมาก ทำให้มีช่วงความถี่ใช้งานแคบ ซึ่งค่าที่ได้เหล่านี้สามารถคำนวณได้จากสมการทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาเป็นแบบ อาร์เรย์ (Array) เพื่อให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น

สายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่เหมาะกับการใช้ในอุปกรณ์ที่เกี่ยวกับเครื่องบิน, จรวด, ดาวเทียม หรืออุปกรณ์อื่นๆ ที่ต้องอาศัยหลักอากาศพลศาสตร์ เนื่องจากสายอากาศแบบนี้มีน้ำหนักเบา, ขนาดบาง และง่ายต่อการติดตั้ง ทำให้เป็นผลดีต่อทฤษฎีทางอากาศพลศาสตร์ นอกจากนี้ยังสามารถเปลี่ยนรูปร่างให้ โค้งงอได้ตามวัสดุที่จะนำไปติดตั้ง เช่น ให้โค้งงอตามลำตัวของจรวด ซึ่งจะไม่ต้านลมมากนักเมื่อจรวดเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง สามารถสรุปข้อดีของสายอากาศไมโครสตริปไว้ได้ดังนี้

1. สามารถผลิตได้ง่ายและมีราคาถูก เพราะใช้เทคนิคการทำลายวงจร
2. สามารถออกแบบให้มีรูปร่างได้หลายแบบ และมีทิศทางการส่งคลื่นได้หลายทิศทาง ขึ้นอยู่กับการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศและรูปร่างของแผ่นตัวนำที่ใช้
3. มีขนาดบางทำให้เข้ารูปกับพื้นผิวที่ไม่ราบเรียบได้ จึงทำให้มีคุณลักษณะที่ไม่ต้านลม
4. เหมาะกับวิธีการป้อนสัญญาณหลายแบบ เช่น ใช้สายนำสัญญาณ (Transmission Line)หรือ ใช้สายแกนคู่ (Coaxial)
5. สามารถติดตั้งกับอุปกรณ์ต่างๆ ได้ง่ายเพราะสามารถโค้งงอได้
6. น้ำหนักเบา, ปริมาตรน้อย และมีลักษณะแบน
7. สามารถเปลี่ยนให้โพลาไรซ์เซชัน (Polarization) ได้หลายแบบ ทั้งวงกลม และเส้นตรง โดยแค่เพียงเปลี่ยนวิธีการป้อนสัญญาณ

ในปัจจุบันนี้ สายอากาศไมโครสตริป ได้มีบทบาทอย่างมากในงานด้านการสื่อสาร เช่น เป็นสายอากาศสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ เนื่องจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ในปัจจุบันนี้จะมีขนาดเล็กมาก จึงต้องการสายอากาศที่มีน้ำหนักเบา และมีขนาดเล็กด้วย

แต่สายอากาศไมโครสตริป ก็ยังมีข้อเสียอีกหลายประการด้วยกัน เช่น มีประสิทธิภาพต่ำ ส่งพลังงานได้น้อย หรือมีช่วงความถี่ใช้งาน (Bandwidth) แคบ อย่างไรก็ตามยังมีวิธีที่จะเพิ่มประสิทธิภาพ และช่วงความถี่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานได้ โดยการเพิ่มความหนาของสายอากาศไมโครสตริป แต่ถ้าเพิ่มความหนามากเกินไปจะทำให้รูปแบบการกระจายคลื่น (Pattern) และโพลาไรซ์เซชันมีค่าไม่ดีนัก ซึ่งสามารถรวบรวมข้อเสียไว้ได้ดังนี้

1. มีการสูญเสียมาก ทำให้อัตราการขยาย (Gain) ต่ำ
2. การกักเก็บพลังงานมีได้น้อย ทำให้ไม่สามารถส่งพลังงานออกไปได้มากนัก
3. ช่วงกว้างความถี่มีค่าน้อย
4. ส่วนมากจะแผ่กระจายคลื่น (Radiate) ในทิศทางระนาบเดียว คือ ไม่แผ่กระจายรอบทิศทาง
5. มีการสูญเสียเป็นอย่างมากระหว่างส่วนป้อนสัญญาณ และส่วนที่แผ่กระจายคลื่น

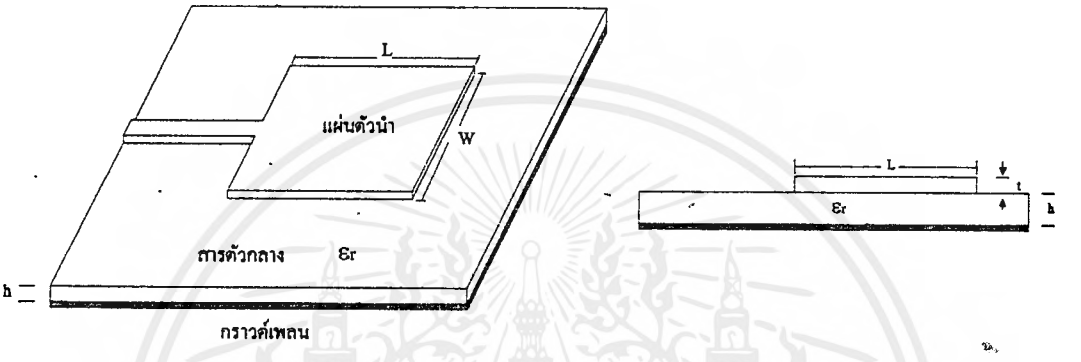
ถ้าแผ่นตัวนำอยู่ใกล้ๆ กันจะทำให้คลื่นที่แผ่กระจายออกมาหักล้างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่2
ทฤษฎีหรือหลักการ

สายอากาศไมโครสตริปนั้น สามารถมีรูปร่างได้หลายอย่าง ทำให้วิธีการคำนวณเพื่อให้ได้ความถี่ตามที่ต้องการจึงมีหลายรูปแบบด้วย ซึ่งแต่ละรูปแบบก็มีความเหมาะสมกับแต่ละรูปร่างของสายอากาศ แตกต่างกันไป สำหรับในบทที่ 2 นี้จะอธิบายถึงโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป และวิธีการคำนวณแบบต่างๆ

2.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

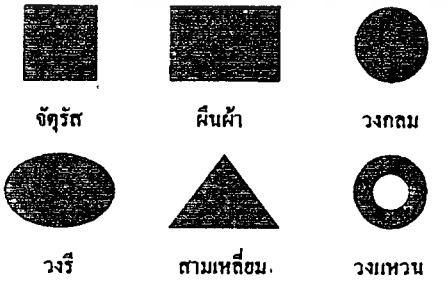


รูปที่ 2. 1 โครงสร้างโดยทั่วไปของสายอากาศแบบไมโครสตริป

ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งปกติแล้วสามารถออกแบบได้หลากหลายรูปแบบ แต่ลักษณะโดยทั่วไปแล้วจะต้องประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 4 ส่วนด้วยกัน คือ

2.1.1 แผ่นตัวนำ (Patch)

เป็นแผ่นโลหะที่บางมาก โดยปกติแล้วความหนาจะมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่นที่อยู่ในอากาศมาก(ความยาวคลื่นของความถี่ที่ออกแบบ) ซึ่งการออกแบบรูปร่างและขนาดของแผ่นตัวนำ จะทำให้ได้รูปแบบการกระจายคลื่นที่ต้องการ และรูปร่างของแผ่นตัวนำก็มีด้วยกันหลายอย่าง เช่น สี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจตุรัส, สามเหลี่ยม, วงกลม, วงรี หรือเป็นรูปวงแหวน ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2. 2 แผ่นตัวนำรูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับแผ่นตัวนำแบบ สี่เหลี่ยมผืนผ้า, สี่เหลี่ยมจตุรัส และวงกลม จะเป็นรูปแบบที่พบได้บ่อยเพราะสามารถสร้างและคำนวณได้ง่ายกว่ารูปร่างแบบอื่น

2.1.2 สารตัวกลาง

มีลักษณะเป็นไดอิเล็กทริค จะใช้สารที่มีค่า เพอร์มิททิวิตี้อยู่ระหว่าง 2.2 ถึง 12 ซึ่งสารที่มีความหนามากกว่าจะมีค่าเพอร์มิททิวิตี้ต่ำกว่า, ให้ช่วงความถี่ใช้งานมากกว่า และให้ประสิทธิภาพมากกว่า แต่จะทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนสารที่มีค่าเพอร์มิททิวิตี้มาก จะมีขนาดเล็ก แต่จะมีความสูญเสียมากกว่า ทำให้ประสิทธิภาพด้อยกว่า และให้ช่วงความถี่ใช้งานน้อยกว่า แต่จะเหมาะกับอุปกรณ์ที่เกี่ยวกับคลื่นความถี่ไมโครเวฟ

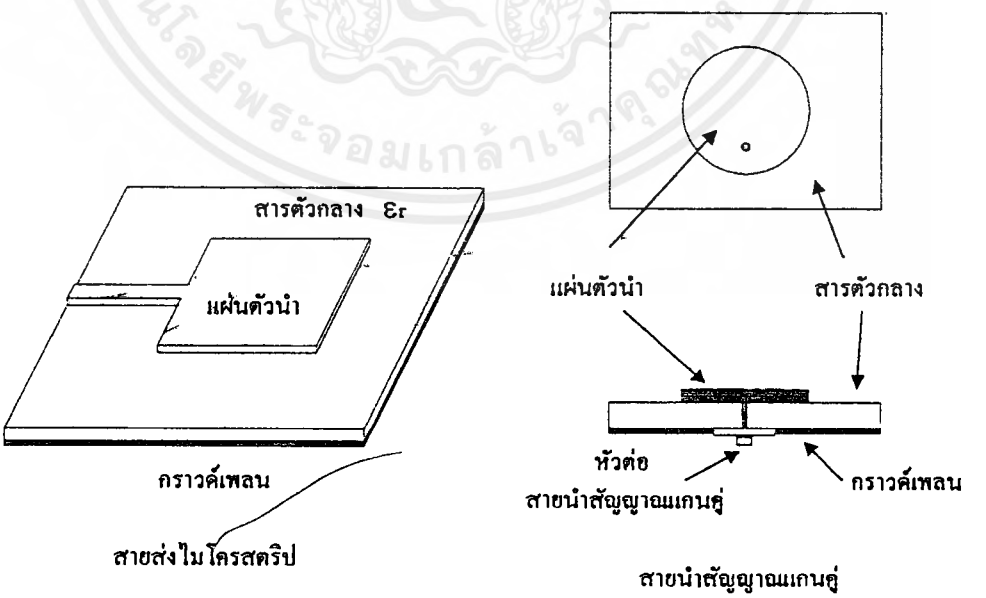
สารตัวกลางที่ใช้กันโดยทั่วไป คือ PTFE ซึ่งถูกสร้างอยู่ในโครงสร้างเสริมไฟเบอร์กลาส จะมีค่าเพอร์-มิททิวิตี้ประมาณ 2.5 บางครั้งอาจใช้สารที่คล้ายรวงผึ้งมีความหนาแน่นต่ำแทน ซึ่งจะมีค่าเข้าใกล้ 1 และทำให้ได้ประสิทธิภาพดีกว่า สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กทริคของสารต่างๆ สามารถดูได้จากภาคผนวก

2.1.3 กราวด์เพลน (Ground Plane)

กราวด์เพลนจะต้องกว้างกว่าแผ่นตัวนำมาก โดยจะติดอยู่อีกด้านหนึ่งของสารตัวกลาง (คนละด้านกับแผ่นตัวนำ) และทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น

2.1.4 ส่วนป้อนสัญญาณ (Feeder)

จะใช้สายส่งสัญญาณชนิดต่างๆ เป็นตัวป้อนสัญญาณให้แก่สายอากาศ และสามารถปรับค่า แมทชิ่ง (Matching) เพื่อให้สายอากาศมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม นอกจากนี้ยังใช้ปรับการโพลาไรซ์เซชั่นได้อีกด้วย โดยตำแหน่งและความยาวของส่วนป้อนสัญญาณจะมีผลต่อการแผ่กระจายคลื่น วิธีการป้อนสัญญาณมีได้หลายรูปแบบ เช่น



รูปที่ 2. 3 สายส่งสัญญาณแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายส่งไมโครสตริป (Microstrip Line Feed)

วิธีที่ง่ายที่สุดในการป้อนสัญญาณ ก็คือการใช้แผ่นไมโครสตริป และสายส่งไมโครสตริปต่อกับตัวกลางโดยตรงเลย แต่วิธีนี้จะได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติไม่ค่อยดีนัก เพราะโครงสร้างของสายอากาศ และสายส่งไมโครสตริป จะไม่สอดคล้องกัน กล่าวคือ สายอากาศแบบนี้จะส่งคลื่นได้ไม่ดีนัก เนื่องจากมีผิวโลหะที่ไม่ต่อเนื่องกัน ทำให้ระดับของคลื่นในทิศทางด้านข้างทิศทางหลัก (Side Lobe Level) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะไปลดคุณภาพของสายอากาศ นอกจากนี้ ช่วงความถี่ใช้งานจะกว้างขึ้นด้วย เนื่องจากมีพลังงานจำนวนมากที่สะสมอยู่ภายใต้แผ่นตัวนำ (Cavity Effect) แต่สายส่งชนิดนี้สามารถปรับแมทชิ่งได้ในตัวเอง และยังสามารถสร้างได้ง่าย โดยทำการสร้างไปพร้อมกับการสร้างแผ่นตัวนำที่ใช้ส่งคลื่นได้เลย

สายนำสัญญาณแกนคู่ (Coaxial Feed)

ในการใช้สายนำสัญญาณแกนคู่เป็นตัวป้อนสัญญาณจะต้องต่อสายนำสัญญาณ ให้ตั้งฉากกับแผ่นตัวนำ โดยตัวนำด้านในจะต่ออยู่กับแผ่นตัวนำข้างบน และตัวนำด้านนอกจะต่ออยู่กับ กราวด์เพลน ซึ่งจากการศึกษาจะพบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟ (สัญญาณ) ผ่านเข้าไปยังสายอากาศ สายอากาศจะมีการแผ่กระจายคลื่นเป็นปริมาณน้อยมาก เมื่อใช้ตัวกลางที่มีขนาดบาง แต่จะมีการแผ่กระจายคลื่นมากขึ้นถ้าต่อกับตัวกลางที่หนาขึ้น นอกจากนี้สายนำสัญญาณแกนคู่ยังสามารถ ต่อกับสายนำสัญญาณชนิดอื่นได้อีกด้วย

อย่างไรก็ตาม การใช้สายนำสัญญาณแกนคู่จะมีผลทำให้การคำนวณยุ่งยากมากขึ้น เนื่องจากจะเกิด "รู" ขึ้นในแผ่นตัวนำด้านบน ซึ่งเป็นสิ่งที่ควรจะหลีกเลี่ยง ส่วนสายนำสัญญาณที่อยู่ข้างได้สายอากาศจะถูกป้องกันสัญญาณรบกวนได้ด้วย กราวด์เพลน

สายส่งสัญญาณแบบฝัง (Burried Feed)

คือ การป้อนสัญญาณ โดยให้สายส่งสัญญาณกับแผ่นตัวนำอยู่บนตัวกลางคนละชนิดกัน ซึ่งตัวกลางแต่ละชนิดจะอยู่ต่างระดับกันด้วย และทำให้มีการลดการแผ่กระจายคลื่นของสายส่ง ได้จากการให้สารตัวกลางมีค่าเพอร์มิททิวิตี้ไม่เท่ากัน แต่วิธีการนี้ไม่เหมาะกับการออกแบบสายอากาศแบบง่าย

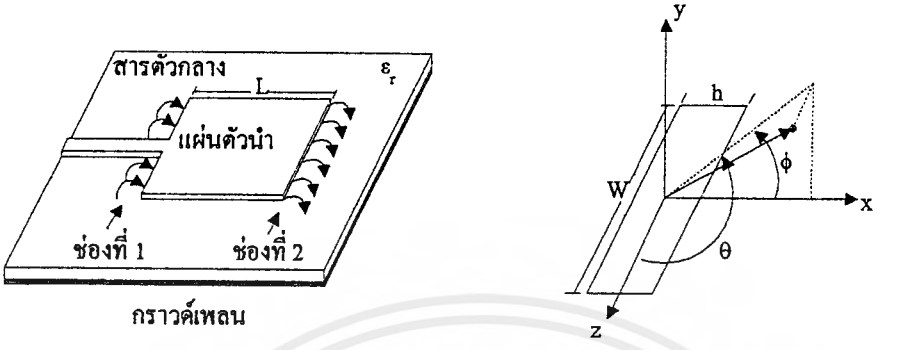
สายส่งแบบผ่านช่องว่าง (Slot Feed)

เป็นวิธีป้อนสัญญาณที่สามารถแยกการแผ่กระจายคลื่นของสายส่ง กับแผ่นตัวนำไม่ให้กวนกันได้โดยสิ้นเชิง โดยการใช้กราวด์เพลนเป็นตัวป้องกันคลื่นจากสายส่งที่จะมารบกวนคลื่น ที่ต้องการส่งจากแผ่นตัวนำ และทำการเชื่อมต่อระหว่างกราวด์เพลน กับสารตัวกลางโดยใช้ช่องว่างเพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวน นอกจากนี้ขนาดของช่องว่างจะต้องไม่มีความถี่ตรงกับความถี่ที่ใช้งาน และวางอยู่ไกลจากแผ่นตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปรูปทรงสี่เหลี่ยม

เนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม จะมีการแผ่กระจายคลื่นจากบริเวณด้านข้างของแผ่นตัวนำด้านบน ดังนั้น จึงสามารถพิจารณาว่าสมการคลื่นที่ส่งออกมานั้นมาจากช่องว่างทั้ง 2 ช่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2. 4 การกระจายคลื่นออกจากช่องว่าง

จากรูปที่ 2.4 ช่องว่างทั้ง 2 จะมีความยาวช่องละ W และอยู่ห่างกันเท่ากับ L และแต่ละช่องว่างมีความกว้าง h ในระนาบ x-y โดยที่แต่ละช่องว่างจะแผ่กระจายคลื่นที่มีสนามเหมือนกับ สนามที่ได้จากกระแสแม่เหล็กดังนี้

$$\hat{M} = 2E_x\hat{z} = 2\frac{V_o}{h}\hat{z}$$

เมื่อพจน์ "2" เกิดจากสนามซึ่งอยู่ใกล้กราวด์เพลน และ V_o คือ ศักดาไฟฟ้าที่คร่อมช่องว่างซึ่งไม่แปรเปลี่ยนตามความกว้าง หรือไม่เปลี่ยนตามแกน x

สำหรับกรณีช่องว่างเดี่ยว สนามไฟฟ้าที่ระยะไกล ณ ตำแหน่ง r ห่างจากจุดกำเนิดคือ

$$E_\phi = -j2V_o W k_o \frac{e^{-jk_o r}}{4\pi r} F(\theta,\phi)$$

$$E_\theta = 0$$

เมื่อ $$F(\theta,\phi) = \frac{\sin(\frac{k_o h}{2}\sin\theta\cos\phi)}{\frac{k_o h}{2}\sin\theta\cos\phi} \frac{\sin(\frac{k_o W}{2}\cos\theta)}{\frac{k_o W}{2}\cos\theta}\sin\theta$$

สำหรับ $\theta=\frac{\pi}{2}$ หรือระนาบสนามไฟฟ้า จะได้ว่า

$$F(\theta,\phi) = \frac{\sin(\frac{k_o h}{2}\cos\phi)}{\frac{k_o h}{2}\cos\phi}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสำหรับ $\phi=\frac{\pi}{2}$ หรือระนาบสนามแม่เหล็ก จะได้ว่า

$$F(\theta,\phi) = \frac{\sin(\frac{k_o W}{2}\cos\theta)}{\frac{k_o W}{2}\cos\theta}\sin\theta$$

ดังนั้นสำหรับระนาบสนามไฟฟ้าซึ่งเกิดที่ระนาบ x-y จะเกิดขึ้นเนื่องจาก ช่องว่าง 2 ช่องที่วางห่างกัน L จึงได้ว่า

$$F(\theta,\phi) = \frac{\sin(\frac{k_o h}{2}\cos\phi)}{\frac{k_o h}{2}\cos\phi}\cos(\frac{k_o L}{2}\cos\phi)$$

$$E_\phi = -j2V_o W k_o \frac{e^{-jk.r}}{4\pi r}\frac{\sin(\frac{k_o h}{2}\cos\phi)}{\frac{k_o h}{2}\cos\phi}\cos(\frac{k_o L}{2}\cos\phi)$$

แต่ระนาบสนามแม่เหล็ก ซึ่งเกิดที่ระนาบ x-y จะขึ้นจากช่องว่างเพียงช่องเดียว จึงได้ว่า

$$F(\theta,\phi) = \frac{\sin(\frac{k_o W}{2}\cos\theta)}{\frac{k_o W}{2}\cos\theta}\sin\theta$$

$$E_\phi = -j2V_o W k_o \frac{e^{-jk.r}}{4\pi r}\frac{\sin(\frac{k_o W}{2}\cos\theta)}{\frac{k_o W}{2}\cos\theta}\sin\theta$$

ค่าพลังงานที่แผ่กระจายสามารถหาได้จากการอินทิเกรตแต่เฉพาะส่วนจริงอย่างเดียว ดังนั้น ถ้า h มีค่าน้อยกว่า ความยาวคลื่นในอากาศมากๆ จะได้ว่า

$$P_r = \frac{V_o^2 I_1}{240\pi^2}$$

เมื่อ

$$I_1 = \int_0^\pi \sin^2(\frac{k_o W\cos\theta}{2})\tan^2\theta\sin\theta d\theta$$

และจะได้ความต้านทานเท่ากับ

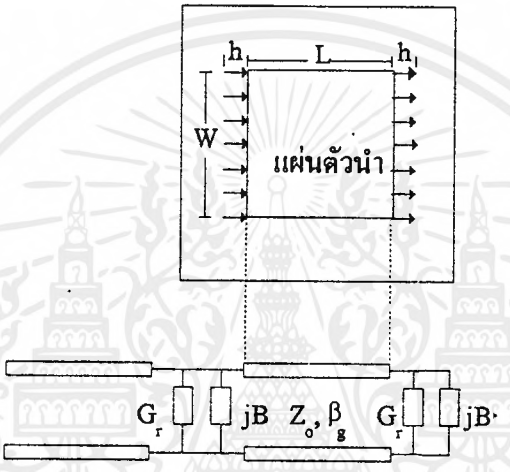
$$R_r = \frac{V_o^2}{2P_r} = \frac{120\pi^2}{I_1^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 แบบจำลองของสายอากาศไมโครสตริป

ในการคำนวณเพื่อหาคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศไมโครสตริปสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่เป็นที่นิยมได้แก่ วิธีแบบจำลองสายส่ง (Transmission Line Model) และ วิธีแบบจำลองคาวิตี้ (Cavity Model) สำหรับแบบจำลองสายส่งนั้นจะมีข้อดีคือ ในขั้นตอนการคำนวณจะสามารถทำได้ง่ายเพราะไม่ต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยากนัก และได้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่เป็นแบบจำลองที่ไม่ยืดหยุ่นนัก คือสามารถใช้คำนวณแต่เฉพาะสายอากาศที่มีแผ่นตัวนำด้านบนเป็นรูปสี่เหลี่ยมเท่านั้น (อาจจะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือไม่ก็ได้) ส่วนวิธีแบบจำลองคาวิตี้จะมีความถูกต้องมากกว่าแบบจำลองสายส่ง และสามารถใช้ได้ยืดหยุ่นกว่า แต่จะต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยากกว่ามาก

2.3.1 แบบจำลองสายส่ง



รูปที่ 2. 5 สายอากาศแบบสี่เหลี่ยม และวงจรสมมูลย์

จากรูปที่ 2.5 แสดงวงจรสมมูลย์ของแบบจำลองสายส่ง กับสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาว L กว้าง W และหนา h โดยจะแผ่กระจายคลื่นออกมาจากขอบด้านข้างทั้งสองข้างของแผ่นตัวนำ ซึ่งเปรียบเสมือนว่าเป็นช่องว่างที่มีความยาวเท่ากับ W และกว้าง h ดังนั้นจึงให้ช่องว่างทั้งสองมีค่าความต้านทานเท่ากับ $G_r + jB$ เท่ากันทั้งสองช่อง ส่วนความต้านทานของแผ่นตัวนำจะมีค่า ความต้านทานคาแรคเตอร์ริสติค (Characteristic Impedance) เป็น Z_o และค่าคงที่การกระจายคลื่น (Propagation) เท่ากับ β_g ดังนั้นเพื่อจะหา อินพุทแอดมิทแทนซ์จะได้ว่า

$$Y_{in} = G_r + jB + Y_o \frac{(G_r + jB) + jY_o \tan(\beta_g L)}{Y_o + j(G_r + jB)\tan(\beta_g L)}$$

ดังนั้นเพื่อให้มีแต่ค่าจำนวนจริง ไม่มีจำนวนจินตภาพเพื่อจะได้ปรับ แมทชิ่งได้ง่าย จึงต้องให้

$$\mathrm{Im}(Y_{in}) = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือ

$$\tan(\beta_r L) = \frac{2Y_o B}{G_r^2 + B^2 - Y_o^2}$$

หรือ

$$\tan(\beta_r L) = \frac{Y_o}{B}$$

โดยที่เมื่อ $\tan(\beta_r L) = \frac{2Y_o B}{G_r^2 + B^2 - Y_o^2}$ แล้วนำไปแทนในสมการ Y_{in} จะได้ $Y_{in} = 2G_r$

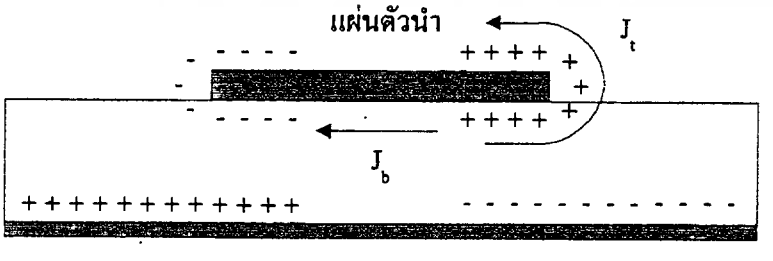
ส่วนเมื่อ $\tan(\beta_r L) = \frac{Y_o}{B}$ จะได้ว่า $Y_{in} = G_r + \frac{B^3}{G_r} + \frac{Y_o^2}{G_r}$

2.3.2 แบบจำลองคาวิตี้ (Cavity Model)

ในแบบจำลองชนิดนี้จะมองสายอากาศแบบไมโครสตริปให้มีลักษณะเหมือนโพรงที่มีสารไดอิเล็กทริค-อยู่ภายใน ซึ่งการมองในลักษณะนี้จะทำให้เกิดความถี่พ้องอันดับสูงขึ้นได้ (High Order Resonance)แต่เพื่อให้สามารถเข้าใจสนามพลังงาน (สนามแม่เหล็ก และ สนามไฟฟ้า) ภายในสารไดอิเล็กทริค จึงคิดเสมือนว่าโพรงไดอิเล็กทริคนี้ถูกปิดล้อมด้วยแผ่นตัวนำไฟฟ้า (ด้านบน และ ด้านล่าง) และ กำแพงสนามแม่เหล็ก (คิดเสมือนว่าเปิดวงจรอยู่) ที่อยู่ตามขอบของแผ่นตัวนำ แต่แบบจำลองลักษณะนี้จะทำให้ไม่มี อินพุทอิมพีแดนซ์ในรูปของส่วนจินตภาพ ซึ่งส่งผลให้ไม่มีการส่งคลื่นออกไป อย่างไรก็ตาม การสมมติให้มีแบบจำลองอย่างนี้ทำให้สามารถคำนวณ รูปแบบการแผ่กระจายคลื่น, อินพุทอิมพีแดนซ์ และ ความถี่ตอบสนองได้ใกล้เคียงกับค่าที่เกิดจากการวัด ซึ่งแบบจำลองชนิดนี้มีลักษณะคล้ายกับวิธีเพอร์เทอร์เบชั่น (Perturbation Method) ที่เป็นที่นิยมกันในการคำนวณ ท่อเวฟไกด์ (Waveguide)

สำหรับการสร้างสนามพลังงานภายในโพรงไดอิเล็กทริคและการแผ่กระจายคลื่นผ่านกำแพงสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นได้ดังนี้

เมื่อป้อนพลังงานเข้าไปยังแผ่นตัวนำไมโครสตริป จะเกิดการกระจายของประจุบนผิวทั้งด้านบน และด้านล่างของแผ่นตัวนำ รวมไปจนถึงเกิดการกระจายของประจุบนกราวด์เพลนด้วย ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2. 6 การกระจายของประจุที่แผ่นตัวนำด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งการกระจายของประจุเหล่านี้เกิดจากกระบวนการสองชนิดคือ

1. จากแรงดึงดูดระหว่างประจุต่างชนิดกัน ของประจุบนพื้นผิวด้านล่างแผ่นตัวนำกับประจุบน กราวด์-เพลน ซึ่งจะทำให้เกิดมีจำนวนประจุหนาแน่นขึ้นที่บริเวณแผ่นตัวนำด้านล่าง

2. เกิดจากแรงผลักระหว่างประจุชนิดเดียวกัน ของประจุบนพื้นผิวด้านล่างแผ่นตัวนำ ซึ่งจากแรงผลักนี้จะทำให้ที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำมีประจุบางส่วนขึ้นไปอยู่ที่พื้นผิวด้านบนของแผ่นตัวนำ

กระบวนการทั้งสองชนิดนี้ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส J_b และ J_t (b ย่อมาจาก bottom และ t ย่อมาจาก top) ดังรูปที่ 2.6

สำหรับสายอากาศที่ทำจากวัสดุบางๆ แรงผลักชนิดแรกจะมีมากกว่าชนิดหลัง ทำให้ประจุส่วนใหญ่ไปอยู่ที่ผิวด้านล่างของแผ่นตัวนำ เป็นผลให้กระแสส่วนใหญ่ไหลอยู่ที่ผิวใต้แผ่นตัวนำ จะมีกระแสปริมาณเล็กน้อยเท่านั้นที่ไหลรอบๆ ขอบด้านบนของแผ่นตัวนำ และปริมาณของกระแสที่ว่านี้จะมีค่าลดลงถ้าวัสดุมีขนาดบางลงด้วย สำหรับในทางอุดมคติแล้ว กระแสที่ไหลอยู่ด้านบนของแผ่นตัวนำจะมีค่าเป็นศูนย์ เป็นผลให้สนามแม่เหล็ก (ที่เกิดจากกระแสอันนี้) ที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ด้วย จึงสามารถสมมติได้ว่ามีพื้นผิวที่เป็นตัวนำแม่เหล็กในอุดมคติปิดอยู่ที่บริเวณขอบทั้งสี่ด้านของแผ่นตัวนำ (ทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์) แต่ในทางปฏิบัติแล้วที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำจะมีสนามแม่เหล็กเหลืออยู่เล็กน้อยเสมอ ดังนั้น ข้อสมมตินี้อาจไม่ถูกต้องนัก แต่การสมมติอย่างนี้จะทำให้ง่ายต่อการหา โหมดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (โหมด) ที่อยู่ใต้แผ่นตัวนำ

ผลจากการให้สายอากาศแบบไมโครสตริปมีขนาดบางมาก (น้อยกว่าความยาวคลื่นมากๆ)

1. พลังงานที่อยู่ใต้แผ่นตัวนำและอยู่ภายในสารไดอิเล็กทริคจะเกิดการสะท้อนกลับขึ้นที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำ และมีแค่ส่วนน้อยเท่านั้นที่หลุดออกไปเป็นพลังงานแผ่กระจายคลื่น ดังนั้น สายอากาศแบบไมโครสตริปจึงมีประสิทธิภาพที่ไม่สูงนัก

2. พลังงานที่อยู่ใต้แผ่นตัวนำจะทำให้เกิดคลื่นนิ่ง ซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์

3. การเปลี่ยนแปลงของสนามตามความสูงของสารไดเล็กทริคจะเป็นค่าคงที่

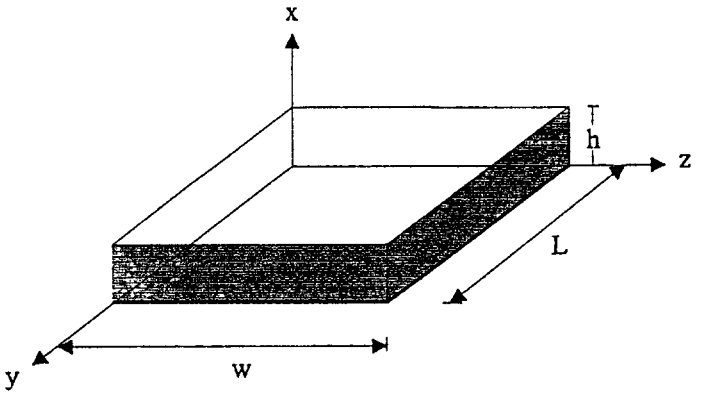
4. ปรากฏการณ์ฟริงกิงที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำจะมีค่าน้อยมาก

ดังนั้นจึงมีแต่สนาม TM^z เท่านั้นที่อยู่ในโพรงไดอิเล็กทริค

นอกจากนี้ยังต้องสมมติให้สิ่งที่ปิดล้อมทุกด้านของโพรงไดอิเล็กทริค (แผ่นตัวนำ และ กำแพงสนามแม่เหล็ก) ไม่มีการสูญเสียพลังงาน, โพรงไดเล็กทริคไม่สามารถแผ่กระจายคลื่นได้ และ อิมพีแดนซ์มีแต่ส่วนจริงเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแล้วค่าอิมพีแดนซ์จะต้องมีส่วนจินตภาพด้วยเสมอ เช่น เกิดจากความต้านทานการแผ่กระจายคลื่น (R_r), ความต้านทานการสูญเสีย (R_L) และ การสูญเสียเนื่องจากสารไดอิเล็กทริค ซึ่งความสูญเสียทั้งหมดนี้จะอยู่ในรูป δ_{eff} และสำหรับสายอากาศแล้วจะได้ว่า $\frac{1}{Q} = \delta_{eff}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหมดของคลื่น TM^x



รูปที่ 2. 7 ลักษณะของไมโครสตริปชนิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ในรูปที่ 2.7 วัสดุที่อยู่ภายในโพรงระหว่างแผ่นตัวนำ (บน และ ล่าง) เป็นสารไดอิเล็กทริคที่มีค่าเพอร์-มิททิวิตี้ ε_r และมีอยู่เฉพาะบริเวณใต้แผ่นตัวนำด้านบนเท่านั้น จากการใช้ A_x จะได้สมการคลื่นดังนี้

$$\nabla^2 A_x + k^2 A_x = 0$$

จากนั้นจะได้ผลเฉลยของ A_x ดังนี้

$$A_x = \left[A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x)\right]\left[A_2 \cos(k_y y) + B_2 \sin(k_y y)\right]$$
$$\left[A_3 \cos(k_z z) + B_3 \sin(k_z z)\right]$$

เมื่อ k_x, k_y, k_z คือจำนวนเท่าของคลื่น (Wavenumber) ที่อยู่ตามแกน x, y, z ตามลำดับ ซึ่งสามารถหาได้จาก บาวน์คารี่คอนดิชั่น (Boundary Condition) หลังจากนั้นจะได้ว่า สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่อยู่ในรูปของ A_x เป็นดังนี้

$$E_x = -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_2\right)A_x$$

$$E_y = -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial y}\right)$$

$$E_z = -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial z}\right)$$

$$H_x = 0$$

$$H_y = \frac{1}{\mu}\frac{\partial A_x}{\partial z}$$

$$H_z = \frac{1}{\mu}\frac{\partial A_x}{\partial y}$$

นำมาใช้กับสมการ บาวน์คารี่คอนดิชั่น ที่ว่า

$$E_y(x' = 0, 0 \le y' \le L, 0 \le z' \le W) = E_y(x' = h, 0 \le y' \le L, 0 \le z' \le W) = 0$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_z(0 \le x' \le h, y' = 0, 0 \le z' \le W) = H_z(0 \le x' \le h, y' = L, 0 \le z' \le W) = 0$$

สัญลักษณ์ (′) เช่น x', y', z' เพื่อแสดงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ภายในช่องไดอิเล็กทริค

จากสมการบาวน์ดารี่ คอนดิชั่น ที่ว่า $E_y(x' = 0, 0 \le y' \le L, 0 \le z' \le W) = 0$ และ $E_y(x' = h, 0 \le y' \le L, 0 \le z' \le W) = 0$ จะได้ว่า $B_1 = 0$ และ

$$k_x = \frac{m\pi}{h} \quad m = 0, 1, 2, \ldots$$

จากสมการบาวน์ดารี่ คอนดิชั่น ที่ว่า $H_y(0 \le x' \le h, 0 \le y' \le L, z' = 0) = 0$ และ $H_y(0 \le x' \le h, 0 \le y' \le L, z' = W) = 0$ จะได้ว่า $B_3 = 0$ และ

$$k_z = \frac{p\pi}{h} \quad p = 0, 1, 2, \ldots$$

จากสมการบาวน์ดารี่ คอนดิชั่น ที่ว่า $H_z(0 \le x' \le h, y' = 0, 0 \le z' \le W) = 0$ และ $H_z(0 \le x' \le h, y' = L, 0 \le z' \le W) = 0$ จะได้ว่า $B_2 = 0$ และ

$$k_y = \frac{m\pi}{h} \quad n = 0, 1, 2, \ldots$$

ในที่สุดจะได้ว่า A_x ที่อยู่ภายในโพรงไดอิเล็กทริคมีค่าเท่ากับ

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

เมื่อ

A_{mnp} = สัมประสิทธ์ของแอมปลิจูดในแต่ละโหมด mnp

$$k_x = \frac{m\pi}{h} \quad m = 0, 1, 2, \ldots$$

$$k_y = \frac{m\pi}{h} \quad n = 0, 1, 2, \ldots$$

$$k_z = \frac{p\pi}{h} \quad p = 0, 1, 2, \ldots$$

และ m, n, p เป็นตัวเลขที่แสดงว่าความกว้าง, ยาว, สูง ในแนวแกน x, y, z มีค่าเป็นจำนวนเท่าของ $\frac{\lambda}{2}$

นอกจากนี้ k_x, k_y, k_z ยังสามารถทำให้อยู่ในรูป

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2 = k_r^2 = \omega_r^2 \mu\varepsilon$$

และมีความถี่ห้อง (Resonant Frequency) เท่ากับ

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

หลังจากนั้นแทนค่าของ A_x ลงในสมการ E_x, E_y, E_z จะได้ว่า

$$E_x = -j \frac{\left(k^2 - k_x^2\right)}{\omega\mu\varepsilon} A_{mnp} \cos(k_x x') \cos(k_y y') \cos(k_z z')$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_y = -j\frac{k_x k_y}{\omega\mu\varepsilon} A_{mnp} \sin(k_x x')\sin(k_y y')\cos(k_z z')$$

$$E_z = -j\frac{k_x k_z}{\omega\mu\varepsilon} A_{mnp} \sin(k_x x')\cos(k_y y')\sin(k_z z')$$

$$H_x = 0$$

$$H_y = -\frac{k_z}{\mu} A_{mnp} \cos(k_x x')\cos(k_y y')\sin(k_z z')$$

$$H_z = \frac{k_y}{\mu} A_{mnp} \cos(k_x x')\sin(k_y y')\cos(k_z z')$$

การหาโหมดสำคัญ (Dominant Mode)

โหมดสำคัญ คือ โหมดที่มีความถี่ต่ำสุดที่เกิดการตอบสนองได้ โดยทั่วไปแล้ว ในสายอากาศแบบไมโครสตริป $h \le L, h \le W$ ดังนั้น การหาโหมดสำคัญมีได้ 2 แบบ คือ

1. เมื่อ $L > W$ จะได้ว่า โหมดสำคัญ คือ TM^x_{010} และ มีความถี่พ้องเท่ากับ

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2L\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{v_o}{2L\sqrt{\varepsilon_r}}$$

และความถี่พ้องอันดับต่อไป ถ้า $L > W > L/2 > h$ จะได้ว่า

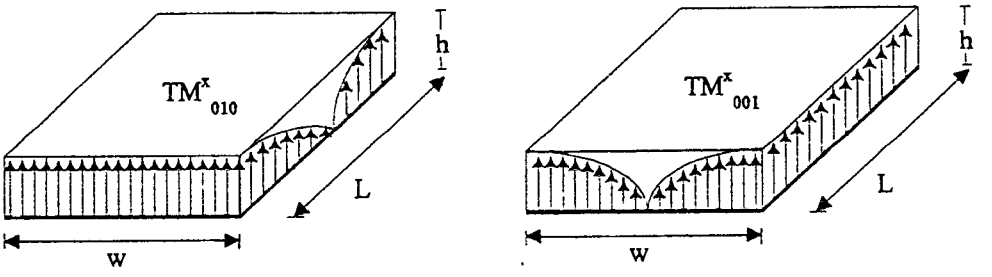
$$(f_r)_{001} = \frac{1}{2W\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{v_o}{2W\sqrt{\varepsilon_r}}$$

แต่ถ้า $L > L/2 > W > h$ จะได้ความถี่พ้องอันดับต่อไปคือ

$$(f_r)_{020} = \frac{1}{L\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{v_o}{L\sqrt{\varepsilon_r}}$$

2. เมื่อ $W > L$ จะได้ว่าโหมดสำคัญ คือ TM^x_{001} และ มีความถี่พ้องเท่ากับ $(f_r)_{001}$ สำหรับความถี่พ้องอันดับต่อไปถ้า $W > W/2 > L > h$ จะเป็น $(f_r)_{002}$

ในรูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของคลื่นที่อยู่ภายใน ของ TM^x_{010}, TM^x_{001} ทั้งนี้ทั้งนั้น สมการทั้งหมดไม่ได้คิดถึงผลกระทบเนื่องจาก ปรากฏการณ์ฟริงกิง



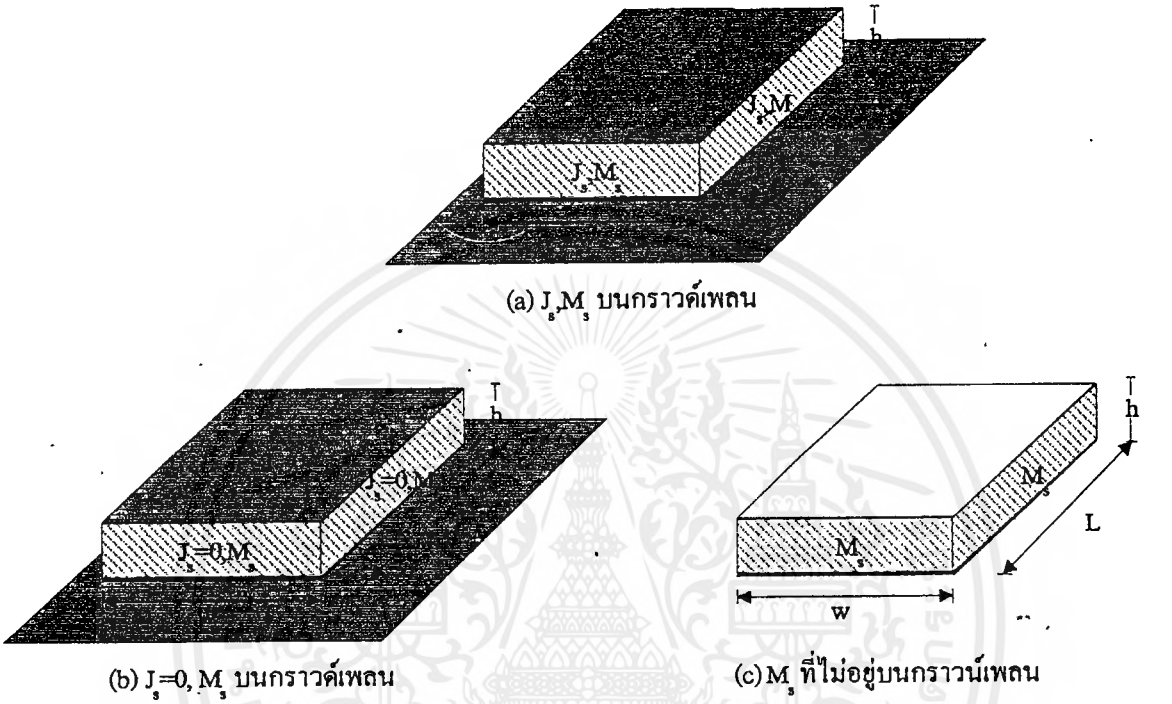
(a) TM^x_{010} (b) TM^x_{001}

รูปที่ 2. 8 โหมดต่างๆ ภายในไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองความหนาแน่นกระแส (Equivalent Current Densities)

ในแบบจำลองคาวิตี้จะมองสายอากาศแบบไมโครสตริปว่าเป็น สารไดอิเลคทริคที่มีกำแพงสนามไฟฟ้าที่สมบูรณ์แบบปิดอยู่ที่ด้านบนและล่าง ส่วน 4 ด้านที่เหลือซึ่งอยู่ด้านข้างจะถูกปิดล้อมด้วยกำแพงสนามแม่เหล็ก ซึ่งบริเวณนี้เองที่เป็นตัวการทำให้เกิดการแผ่กระจายคลื่น ดังนั้นการจะหาความหนาแน่นกระแส จะต้องคิดเสมือนว่าสารตัวกลางมีอยู่แต่เฉพาะภายใต้แผ่นตัวนำบนเสมอ



(a) $J_s M_s$ บนกราวด์เพลน

(b) $J_s=0, M_s$ บนกราวด์เพลน

(c) M_s ที่ไม่อยู่บนกราวน์เพลน

รูปที่ 2. 9 ความหนาแน่นกระแสที่บริเวณด้านทั้งสี่

จากการใช้ ทฤษฎีสนามแม่เหล็ก (Huygens' Theory) จะสามารถแทนแผ่นตัวนำที่อยู่ด้านบนด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_t ที่ผิวด้านบนของแผ่นตัวนำ (โดยปกติมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_b อยู่ข้างให้แผ่นตัวนำด้วย แต่ในที่นี้จะไม่กล่าวถึง) และที่ด้านข้างทั้ง 4 จะแสดงได้ด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_s และความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก M_s ดังรูปที่ 2.9 (a) โดยที่ $J_s = \hat{n} \times H_a$ และ $M_s = -\hat{n} \times H_a$ เมื่อ E_a, H_a เป็นสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กที่บริเวณด้านข้าง

เนื่องจากสายอากาศแบบไมโครสตริปจะมีอัตราส่วนของ ความสูง ต่อ ความกว้าง น้อย ดังนั้น J_t ที่อยู่ด้านบน จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ J_b ที่อยู่ด้านล่าง จึงสามารถสมมติได้ว่า J_t มีค่าเป็นศูนย์ และจะไม่นำมาคิด จึงทำให้สนามแม่เหล็กที่บริเวณขอบ ซึ่งเกิดจาก J_t นี้มีค่าเป็นศูนย์ (หรือน้อย) ด้วย ส่งผลให้ J_s ที่บริเวณด้านข้าง ซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กอันนี้มีค่าเป็นศูนย์อีก ดังนั้น จะเหลือเฉพาะ M_s ที่อยู่ด้านข้างโดยรอบของแบบจำลองช่องว่าง เท่านั้นที่ไม่เป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.9 (b) จากการใช้ทฤษฎีอิมเมจ (Image Theory) จะได้ว่า $M_s = -2\hat{n} \times E_a$ ดังรูปที่ 2.9 (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแบบจำลองคาวิตี้จะมองสายอากาศแบบไมโครสตริป ว่าเปรียบเสมือนมีช่องว่างอยู่ด้านข้างโดยรอบทั้งสี่ด้านของโพรง โดยที่ช่องว่างเหล่านี้จะเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นออกไป แต่ช่องว่างทั้งสี่ช่องนี้ไม่ได้แผ่กระจายคลื่นได้ทั้งสี่ช่อง จะมีเพียงสองช่องเท่านั้นที่สามารถแผ่กระจายคลื่นได้ ส่วนอีกสองช่องจะเกิดการหักล้างกันเอง โดยสองช่องที่เกิดการหักล้างคือช่องที่อยู่ห่างกัน เป็นระยะ W ส่วนอีกสองช่องที่สามารถแผ่กระจายคลื่นได้จะอยู่ห่างกัน L ซึ่งเรียกสองช่องนี้ว่า ช่องแผ่กระจายคลื่น (Radiating Slot) โดยที่ระหว่างสองช่องนี้จะมีแผ่นตัวนำคู่ขนานซึ่งแสดงตัวเหมือนเป็น หม้อแปลง (Tranformer) ที่มีความต้านทานต่ำ ความยาวของ L ประมาณได้ว่าเท่ากับ $\lambda_g/2$ เมื่อ λ_g หมายถึง ความยาวคลื่นที่เดินทางในสารตัวกลาง เพื่อให้สนามของช่องว่างทั้งสอง มีทิศทางตรงข้ามกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.8(a) จากช่องว่างทั้งสองที่เป็นตัวแผ่กระจายคลื่นจะทำตัวเสมือนเป็น อาร์เรย์ 2 อิลิเมนต์ ที่มีระยะห่างกันเป็น $\lambda_g/2$

สมมติให้ Dominant Mode เป็น TM^{x}_{010} จะได้สมการดังนี้

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

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

$$E_y = E_z = H_x = H_y = 0$$

เมื่อ $E_o = -j\omega A_{010}$ และ $H_o = (\pi/\mu L)A_{010}$ จากรูปที่ 2.8(a) จะเห็นได้ว่าคลื่นจะมีการเปลี่ยนเฟสตามความยาว L แต่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามความกว้าง W ซึ่งการเปลี่ยนเฟสนี้จะมีผลอย่างมากในการออกแบบสายอากาศแบบบรอดไซด์ (Broadside)

2.4 ปรากฏการณ์ฟริงกิง (Fringing Effects)

เนื่องจากมิติของแผ่นตัวนำถูกจำกัดด้วยความยาวและความกว้าง ดังนั้นสนามที่ขอบของแผ่นตัวนำจะเกิดฟริงกิง ผลรวมของฟริงกิงเป็นฟังก์ชันของความกว้าง, ยาวของแผ่นตัวนำและความหนาของสารตัวกลาง สำหรับ ระนาบไฟฟ้า (E-Plane หรือ ระนาบ x-y) ส่วนใหญ่ฟริงกิง เป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนระหว่างความยาวของแผ่นตัวนำ (L) ต่อความหนาของสารตัวกลาง (h) และค่าเพอร์มิททิวิตี้ของสารตัวกลาง

สำหรับสายส่งไมโครสตริปในรูปที่ 2.10 (a) เส้นแรงสนามไฟฟ้าแบบทั่วไปแสดงดังรูป 2.10 (b) เส้นแรงแบบนี้เกิดจากเนื้อสารของไดอิเล็กทริคสองชนิดไม่เหมือนกัน (Nonhomogeneous) ซึ่งสารไดอิเล็กทริคสองชนิดนี้มักจะเป็นสารตัวกลางกับอากาศ สนามไฟฟ้าส่วนใหญ่อยู่ในสารตัวกลาง และบางส่วนจะปรากฏในอากาศ เมื่อ L/h มีค่ามากกว่า 1 มากๆ และ เพอร์มิททิวิตี้มากกว่า 1 มากๆ สนามไฟฟ้าจะอยู่อย่างหนาแน่นในสารตัวกลาง ในกรณีนี้ ฟริงกิง จะทำให้ สายส่งไมโครสตริปมีขนาดในทางไฟฟ้าดูมากกว่าขนาดจริง เนื่องจากคลื่นบางส่วนเคลื่อนที่ในสารตัวกลางและบางส่วนเคลื่อนที่ในอากาศจึงมีการนำ Effective Dielectric Constant (ε_{re}) มาคิด สำหรับ ฟริงกิง และการแผ่กระจายของคลื่น

ในการนำ ε_{re} มาคิด จะสมมติให้ตัวนำของสายส่งไมโครสตริปที่มีขนาดและความหนาเท่าเดิม ฝังลงในสารตัวกลาง ดังรูป 2.10 (c) ค่า ε_{re} จะถูกนิยามว่าเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริค ของวัสดุไดอิเล็กทริคที่สม่ำเสมอ ดังนั้น สายส่งไมโครสตริปในรูป 2.10 (c) จะมีลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าแบบเดียว และ ค่าคงที่การกระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

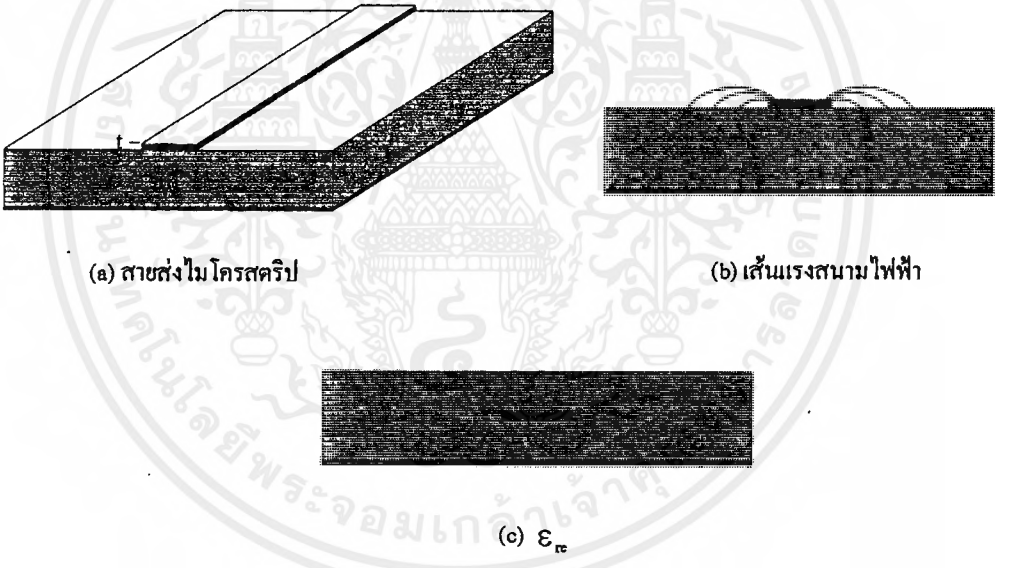
โดยเฉพาะ เหมือนกับสายส่งไมโครสตริปของจริงในรูป 2.10 (a) สำหรับสายส่งไมโครสตริปที่มีอากาศอยู่เหนือสารตัวกลางค่า ε_{re} จะมีค่าระหว่าง 1 ถึง เพอร์มิททิวิตี้ สำหรับการใช้งานทั่วไปที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริคของสารตัวกลางมีค่ามากกว่า 1 มากๆ ค่า ε_{re} จะใกล้กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริค (ε_r) จริงๆ ของสารตัวกลางนั้นๆ

ε_{re} เป็นฟังก์ชันของความถี่ ถ้าความถี่เพิ่มขึ้น สนามไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอยู่อย่างหนาแน่นในสารตัวกลาง เพราะฉะนั้น สายส่งไมโครสตริปจะทำตัวเหมือนเป็นสารเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) มีไดอิเล็กทริคตัวเดียว (ไดอิเล็กทริค ในที่นี้ หมายถึงสารตัวกลาง) และ ε_{re} จะมีค่าเข้าใกล้ เพอร์มิททิวิตี้ ของสารตัวกลาง

สำหรับความถี่ต่ำ ε_{re} จำเป็นที่จะต้องมีค่าคงที่ ที่ความถี่กลางค่าของมัน ε_{re} จะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และจะเพิ่มจนถึงค่า เพอร์มิททิวิตี้ของสารตัวกลางในท้ายที่สุด ค่าเริ่มต้น (ที่ความถี่ต่ำ) ของ ε_{re} จะถูกเรียกว่า Static Value แสดงได้ดังนี้

เมื่อ $\frac{W}{h} > 1$

$$\varepsilon_{re} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left(1 + 12\frac{h}{W}\right)^{-\frac{1}{2}}$$



(a) สายส่งไมโครสตริป (b) เส้นแรงสนามไฟฟ้า

(c) ε_{re}

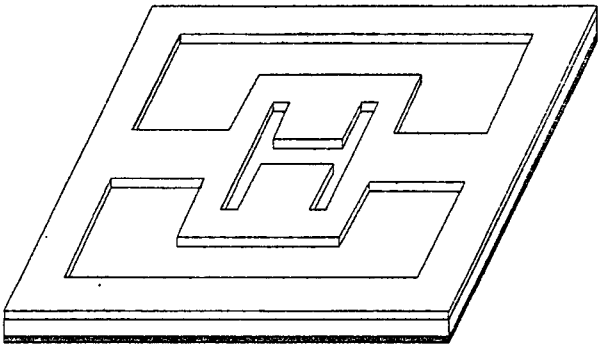
รูปที่ 2. 10 สายส่งไมโครสตริปและลักษณะเส้นแรงสนามไฟฟ้า

2.5 วิธีการทำให้สายอากาศมีช่วงความถี่ใช้งานกว้างขึ้น

สายอากาศแบบโฟลไดโพล (The Folded Dipole Antenna)

ช่วงความถี่ใช้งานของสายอากาศสามารถทำให้กว้างขึ้นได้โดยการรวมสายอากาศที่มีความถี่ใช้งาน (Resonance) ที่ใกล้เคียงกันหลายๆ อันให้มาใช้งานร่วมกัน อย่างในสายอากาศชนิดโฟลไดโพล แต่วิธีนี้จะทำให้เกิดทิศทางการแผ่กระจายคลื่นที่เอียง (Squint angle) ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาเมื่อมีการทำสายอากาศเป็นแบบอาร์เรย์ สำหรับสายอากาศแบบนี้จะดูได้ดังรูปที่ 2.11

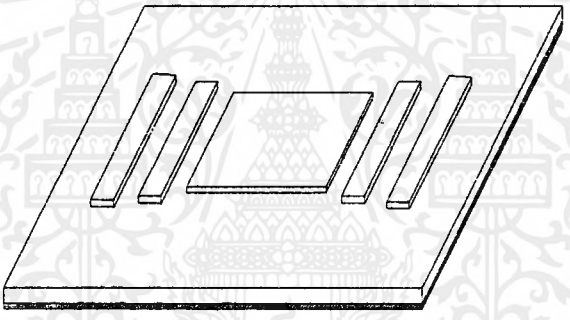
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2. 11 สายอากาศแบบโฟลไดโพล

สายอากาศแบบพาราซิทิค (Parasitic Elements)

ช่วงความถี่ใช้งาน ของสายอากาศสามารถขยายได้โดยเพิ่มชิ้นส่วนบางส่วน (Parasitic Elements) **ที่มีขนาดต่างกันกับแผ่นตัวนำหลักเล็กน้อย และด้วยการปรับขนาดของชิ้นส่วนที่เพิ่มขึ้นมานี้ จะช่วยให้รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นดีขึ้น สำหรับสายอากาศแบบนี้จะดูได้ดังรูปที่** 2.12



รูปที่ 2. 12 สายอากาศแบบพาราซิทิค

สายอากาศแบบ SSFIP

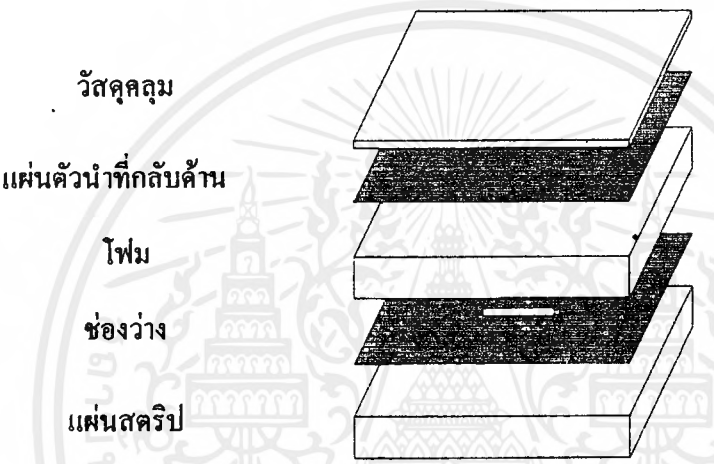
ในการสร้างสายอากาศ ให้มีประสิทธิภาพดีจะต้องสร้างบนสารตัวกลางที่มีค่าเพอร์มิททิวิตี้ต่ำ และมีขนาดหนา ซึ่งสายอากาศในอุดมคติจะใช้อากาศเป็นตัวกลาง เพราะมีค่า $\varepsilon_r = 1$ **แต่ในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถทำได้ จึงใช้โฟม** (Foam) **ที่มีค่า** $\varepsilon_r = 1.07$ **แทน ซึ่งการใช้สารที่มีค่า เพอร์มิททิวิตี้ ต่ำและหนา จะช่วยเพิ่ม ช่วงความถี่ใช้งานให้กว้างขึ้น และเนื่องจากคลื่นที่อยู่บนผิวหน้า** (Surface Wave) **จะมีค่าน้อยเมื่อใช้วัสดุที่มีค่า เพอร์มิททิวิตี้ต่ำ ดังนั้นรอยต่อระหว่างแผ่นตัวนำกับโฟม จะไม่มีความสำคัญในการคำนวณ แต่การวางแผ่นตัวนำบนโฟม ต้องมีแผ่นพลาสติกบางๆ ปิดทับอีกทีเพื่อป้องกันความชื้น และสภาพแวดล้อมอื่นๆ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเชื่อมสายส่งไมโครสตริปกับสายอากาศจะเชื่อมต่อผ่าน "ช่องว่าง" ไปยังแผ่นกราวด์เพลน และช่องว่าง จะต้องไม่มีความถี่ตรงกับความถี่ที่ใช้งาน ซึ่งสายสายส่งไมโครสตริปนี้จะเชื่อมต่อกับ สายอากาศ ตามแบบปกติ ผลจากการนำวัสดุต่างๆ มาวางเรียงกันเป็นชั้นๆ นี้เรียกว่า Strip-Slot-Foam-Inverted Patch Antenna (SSFIP)

คุณสมบัติและประสิทธิภาพของสายอากาศแบบนี้จะได้จากการออกแบบ เพอร์มิททิวิตี้, ความหนาของสายส่งไมโครสตริป, ความหนาของโฟม,.ขนาดของช่องว่าง และ วัสดุที่นำมาปิดที่ชั้นบน (ในที่นี้แนะนำให้ใช้พลาสติก)

สายอากาศแบบนี้จะไม่มีการเจาะรู เพราะไม่ต้องต่อกับสายนำสัญญาณแกนคู่ และไม่มีการเชื่อมต่อระหว่างแต่ละชั้นของวัสดุที่ใช้ นอกจากนี้ เนื่องจาก SSFIP บาง และไม่มีส่วนใดที่เป็นจุดสังเกตุ จึงสามารถนำไปติดกับกำแพงตึก หรือบริเวณอื่นที่สายอากาศชนิดอื่นไม่สามารถทำได้ สายอากาศชนิดนี้ดูได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2. 13 สายอากาศแบบ SSFIP

2.6 สายอากาศแบบอาร์เรย์ (Periodic Array)

เนื่องจากในการใช้งานสายอากาศจำเป็นต้องได้สายอากาศที่มีค่าการส่งพลังงานในทิศที่ต้องการ (Directivity) สูง จึงนำสายอากาศไมโครสตริปหลายตัว มาวางรวมกันเป็นกลุ่มในลักษณะอาร์เรย์ เพื่อให้มีการเสริมกันของคลื่นในทิศทางที่ต้องการ และหักล้างกันในทิศทางที่ไม่ต้องการ โดยการทำเช่นนี้ได้ต้องขึ้นอยู่กับการออกแบบตำแหน่งของสายอากาศไมโครสตริปแต่ละอัน ซึ่งรูปแบบของอาร์เรย์มีได้หลายหลาก เช่น สี่-เหลี่ยม, วงกลม หรือสามเหลี่ยม

สำหรับรูปแบบการแผ่กระจายคลื่น ที่สายอากาศแบบนี้ส่งออกมา จะเกิดจากการรวมกันของคลื่นที่สายอากาศแต่ละตัวปล่อยออกมาและผลกระทบจากแผ่นตัวนำที่อยู่ติดกัน ซึ่งรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นและอิมพีแดนซ์ จะขึ้นอยู่กับแผ่นตัวนำที่อยู่ข้างเคียง และตำแหน่งของแผ่นตัวนำแต่ละตัว สำหรับการคำนวณอย่างง่ายๆ อาจจะไม่คิดผลกระทบที่เกิดจากแผ่นตัวที่อยู่ใกล้กันก็ได้ แต่จะไม่ได้ค่าที่แท้จริง โดยเฉพาะในสายอากาศแบบที่มีการป้อนสัญญาณให้แต่ละชิ้นส่วน มีเฟสไม่เหมือนกัน (Phased Arrays)

แผ่นตัวนำแต่ละอันจะต้องอยู่ใกล้กัน พอที่จะทำให้มีการรวมคลื่นไปในทิศทางเดียวกัน แต่ถ้าในแต่ละแผ่นตัวนำถูกป้อนสัญญาณในลักษณะเฟสเดียวกัน (In-Phase) ขนาดของสายอากาศอาร์เรย์ ไม่ควรเกิน 1 ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาวคลื่น เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากการป้อนสัญญาณที่มีเฟสต่างกัน นั่นก็คือ จะเกิดคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ (Grating Lobes) แทนที่จะเกิดในทิศทางหลัก (Main Beam) ที่ต้องการ

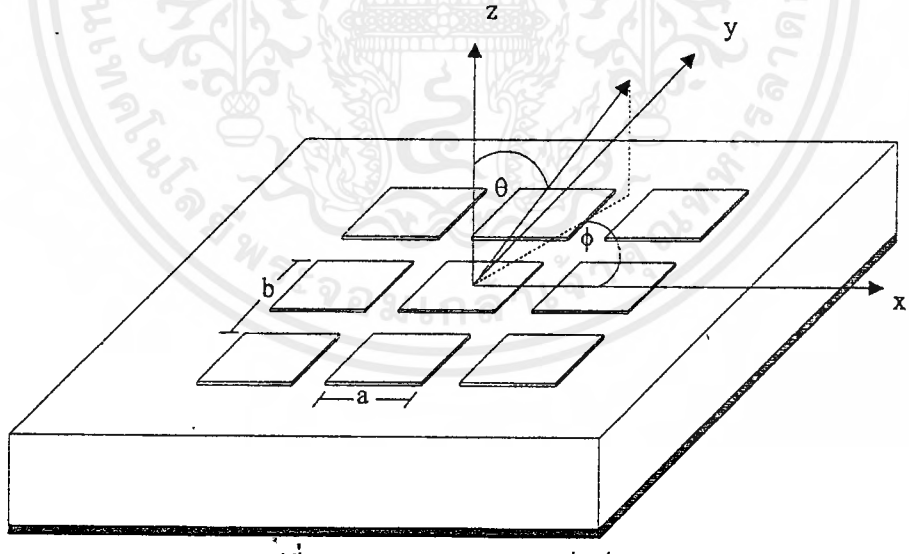
ถ้าสายอากาศแบบอาร์เรย์ มีขนาดเป็นอนันต์ได้ จะมีการส่งคลื่นไปในทิศทางเดียวเท่านั้น และไม่มีคลื่นในทิศทางอื่นที่ไม่ต้องการ แต่ในทางปฏิบัติแล้วสายอากาศต้องมีขนาดจำกัด ซึ่งทำให้คลื่นในทิศที่ต้องการ, อัตราส่วนของพลังงานเข้ากับพลังงานที่ส่งออกไป , บีมวิดธ์ (Beamwidth) และ คลื่นในทิศทางด้านข้าง (Side-Lobes) จะขึ้นอยู่กับขนาดของสายอากาศ

2.7 ลักษณะของสายอากาศแบบอาร์เรย์

สายอากาศชนิดนี้ คือสายอากาศแบบอาร์เรย์ ซึ่งทุกๆ ส่วนจะถูกป้อนด้วยสัญญาณที่มีเฟสเหมือนกัน และถ้าแอมปลิจูด ของสัญญาณที่ป้อนยังมีค่าเท่ากันหมดในทุกๆ ส่วนด้วย จะทำให้ได้คลื่นในทิศทางด้านข้างมีค่าลดลงตามมุมที่เพิ่มขึ้นจากคลื่นในทิศทางหลัก และ คลื่นในทิศทางด้านข้าง ที่มีความสำคัญมากที่สุดจะเป็นคลื่นในทิศทางด้านข้างอันแรก แต่ถ้าใช้การป้อนสัญญาณแบบเทปเปอร์ (Tapering) จะทำให้คลื่นในทิศทางด้านข้าง มีระดับเดียวกันหมด ไม่ว่าจะวัดที่มุมใด ซึ่งวิธีเทปเปอร์นี้ เป็นวิธีที่ไม่ต้องเปลี่ยนขนาดของอาร์เรย์ แต่ยังมีอีกวิธีหนึ่งแทนการเทปเปอร์ คือการเอาแผ่นตัวนำชิ้นที่อยู่รอบนอกออกไปบางส่วน ก็จะได้ผลเช่นเดียวกัน

การปรับรูปร่างของคลื่น

คือการให้สัญญาณที่ทั้ง เฟส และ แอมปลิจูด มีค่าไม่เท่ากันเลยในแต่ละส่วนของอาร์เรย์ วิธีการนี้จะช่วยให้ทิศทางของคลื่น และรูปร่างของคลื่นเป็นไปตามที่ต้องการมากขึ้น



รูปที่ 2. 14 สายอากาศแบบอาร์เรย์

การปรับเฟส

ในเรดาร์ (Radar) จะต้องมีการปรับมุมเพื่อหาตำแหน่งของสิ่งกีดขวาง หรือยานพาหนะ ดังนั้น การปรับมุมจะใช้หลักการทางเครื่องจักรกล โดยการ หมุน หรือ เอียงมุมของสายอากาศ แต่วิธีการปรับเฟส คือการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิค โดยการเปลี่ยน เฟส ระหว่างอาร์เรย์ แต่ละชิ้น ซึ่งวิธีนี้จะทำให้การเปลี่ยนทิศทางที่ต้อง-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
039020

การ เป็นไปได้ง่ายขึ้น เพราะไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศ จากรูปที่ 2.14 ตำแหน่งของอาร์เรย์ แต่ละชิ้นหาได้จาก $x_m = x_0 + ma$, $y_n = y_0 + nb$ เมื่อ a และ b คือช่วงห่างของแต่ละชิ้นส่วน (Element)ในแนว x และ y จุด (x_0,y_0) คือโคออดิเนทของจุดอ้างอิง (0,0) และเพื่อให้ทิศทางของคลื่นหันไปยังทิศ θ,ϕ (ตามรูปที่ 12.12) จะต้องป้อนสัญญาณไปยังอาร์เรย์ ชิ้นที่ (m,n) ตามสมการ $\psi = -\omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}\sin\theta$ ($ma\cos\phi + nb\sin\phi$)

แต่สมการนี้จะไม่คิดถึงผลกระทบของสัญญาณ ที่เกิดจากชิ้นส่วนข้างเคียง จึงอาจทำให้ได้ค่าที่ไม่ถูกต้องนัก ดังนั้นเพื่อความถูกต้องที่มากขึ้นจึงต้องมีการคิดถึงผลกระทบจากชิ้นส่วนข้างเคียงด้วย

สายอากาศที่มีขนาดไม่จำกัด (Infinite)

คุณสมบัติของสายอากาศที่มีขนาดใหญ่ สามารถแทนได้ด้วยสายอากาศชนิดอาร์เรย์ ที่มีจำนวนชิ้นส่วนเป็นอนันต์ แล้วสมมติว่าชิ้นส่วนแต่ละชิ้นมีขนาด และ ระยะห่างเท่ากันหมด ทำให้สามารถใช้สมการผลรวมของพัวซอง (Poisson) แทนสมการของซอมเมอร์เฟล (Sommer Feld) ในการหาอินพุทอิมพีแดนซ์ และรูปแบบการกระจายคลื่นได้

จากการศึกษาสายอากาศแบบอาร์เรย์ ที่มีจำนวนชิ้นส่วนเป็นอนันต์จะพบว่ามีบางมุมที่ สัมประสิทธ์การสะท้อน (Reflection Factor) มีค่าเป็นหนึ่ง ซึ่งทำให้พลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศถูกสะท้อนกลับหมด จึงไม่มีพลังงานที่จะส่งออกอากาศ เหตุการณ์นี้ถ้าเกิดในสายอากาศ ไมโครสตริป จะถูกเรียกว่า "Scan Blindness" แต่จะเกิดเฉพาะในอาร์เรย์ ที่มีจำนวนชิ้นส่วนเป็นอนันต์ หรือ อาจมีผลบ้างในสายอากาศที่มีขนาดใหญ่

สายอากาศที่มีขนาดจำกัด (Finite)

สายอากาศขนาดเล็ก แบบปรับเฟสได้ สามารถพิจารณาจากการนำเอาสายอากาศชิ้นเดียว มาเชื่อมระหว่างชิ้นส่วนแต่ละชิ้นเข้าด้วยกัน

ในสายอากาศอาร์เรย์ที่มีขนาดใหญ่สามารถแทนได้ด้วยสายอากาศที่มีขนาดเป็นอนันต์ แต่วิธีนี้จะใช้ไม่ได้เมื่อคิดถึงผลกระทบของชิ้นส่วนที่บริเวณใกล้ๆ ขอบ และความถูกต้องของการคำนวณแบบนี้จะลดลง เมื่อขนาดของสายอากาศเล็กลง

สมการอินทิเกรต เป็นสมการที่จะใช้ได้กับกราวด์เพลน และสารตัวกลางที่มีมีขนาดเป็นอนันต์แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ไม่สามารถเป็นไปได้ ซึ่งทำให้เกิดผลของคลื่นที่สายอากาศสะท้อนกลับไปด้านหลัง และจะมีผลต่อลักษณะ และทิศทางหลักของคลื่น

2.8 สรุปลักษณะของสารตัวกลางชนิดต่างๆ

การใช้แผ่นปรินท์ทำเป็นสายอากาศจะใช้เทคโนโลยีที่ไม่สูงนัก แต่ก็ยังมีราคาแพงเกินไปอยู่ดี เนื่องจากราคาของสารที่ใช้ทำตัวกลาง และขนาดที่ใหญ่ของสายอากาศ และจะมีการสูญเสียสัญญาณมากเมื่อใช้ที่ย่านความถี่ย่านไมโครเวฟ

โพลีโพไพลีน (Polypropylene) เป็นสารตัวกลางที่มีการสูญเสียสัญญาณต่ำ และมีราคาถูก แต่จะละลายเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิต่ำ

โฟม เป็นสารตัวกลางที่มีค่า เพอร์มิททิวิตี้ต่ำ แต่จะมีผลเสียเมื่อมีความชื้นมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

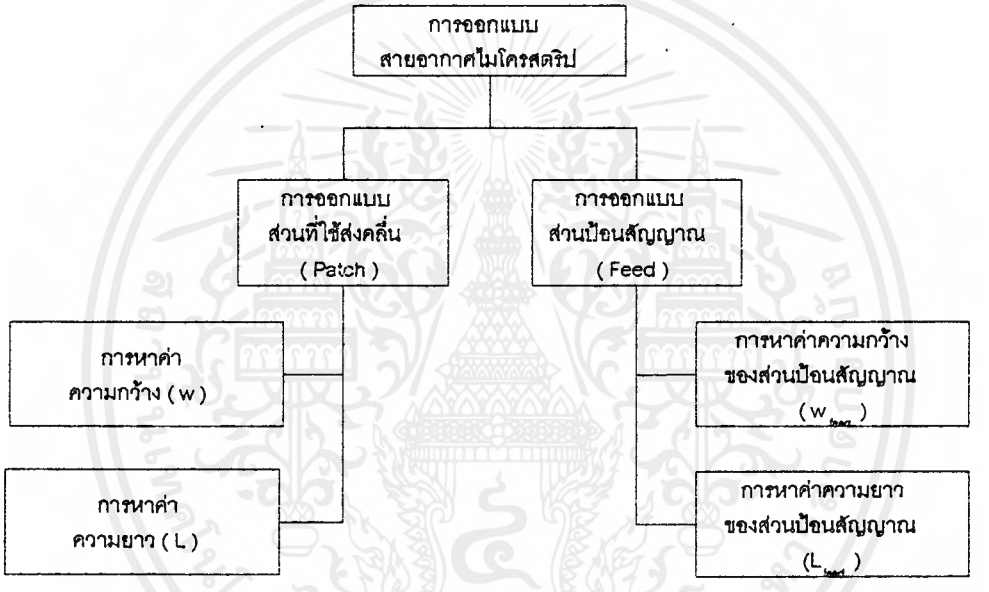
บทที่3

การคำนวณและการสร้าง

3.1 การคำนวณ

ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ ก็คือ การออกแบบส่วนที่ใช้ส่งคลื่น กับ การออกแบบส่วนที่ใช้ป้อนสัญญาณ ดังรูปที่ 3.1

สำหรับการคำนวณต่างๆ ที่จะใช้ในการออกแบบสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในที่นี้จะใช้วิธีการคำนวณแบบจำลองสายส่ง เพราะเป็นแบบจำลองที่เหมาะกับการออกแบบสายอากาศชนิดนี้ และสามารถคำนวณได้ง่าย แต่ในการออกแบบสายอากาศแบบวงกลมจะใช้วิธีการคำนวณแบบจำลองคาวิตี้ เนื่องจากการคำนวณแบบจำลองสายส่งไม่สามารถทำได้



รูปที่ 3. 1 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

3.1.1 การออกแบบส่วนที่ใช้ส่งคลื่น หรือแผ่นตัวนำรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

สำหรับขั้นตอนของการคำนวณหาค่า ความกว้าง (W) ความยาว (L) ของแผ่นตัวนำด้านบนสามารถเขียนเป็นบล็อคไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.2

ความกว้างของแผ่นตัวนำ

ขั้นตอนแรกของการออกแบบคือ การเลือกสารตัวกลางที่มีค่าไดอิเลคทริคให้เหมาะสม และมีความหนาพอเหมาะ หลังจากนั้นจึงนำค่าคงที่ต่างๆ มาคำนวณหาความกว้างโดยใช้สมการ

$$W = \frac{\lambda_o}{2}\left(\frac{2}{\varepsilon_r + 1}\right)^{\frac{1}{2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

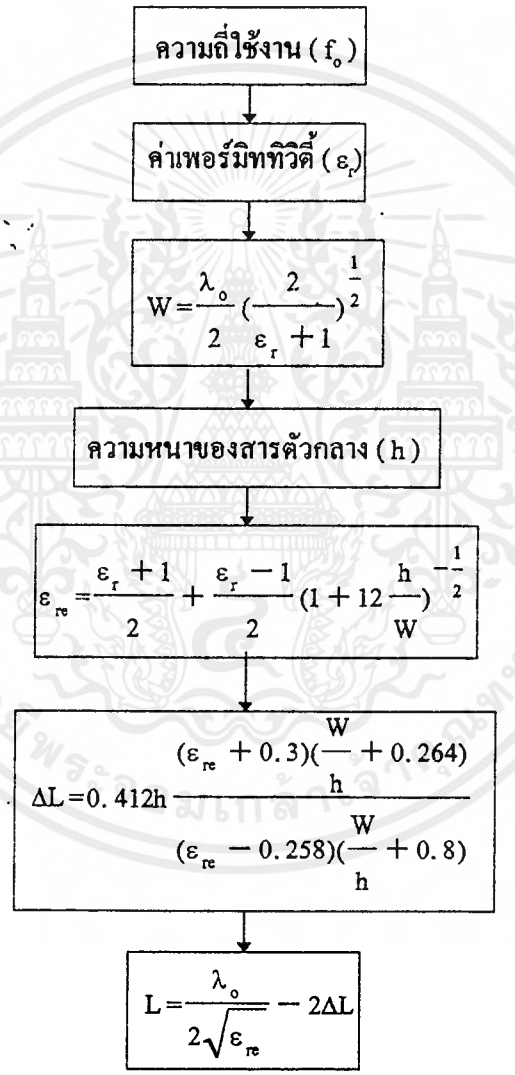
เมื่อ

W = ความกว้างของแผ่นตัวนำ

λ_o = ความยาวคลื่นที่ใช้งาน โดยที่ $\lambda_o = \frac{c}{f_o}$

ε_r = เพอร์มิททิวิตี้ของสารตัวกลาง

เราอาจใช้ค่าความกว้างอื่นก็ได้ แต่ค่าความกว้างที่กว้างน้อยกว่านี้ จะทำให้การแพร่กระจายคลื่นมีประสิทธิภาพต่ำ แต่ถ้ากว้างกว่านี้แม้จะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้สัญญาณที่ความถี่สูงค่าอื่นๆ ซึ่งส่งผลทำให้สนามเกิดการบิดเบือนได้



รูปที่ 3. 2 บล็อคแสดงขั้นตอนการคำนวณความกว้าง และยาวของแผ่นตัวนำรูปทรงสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในที่นี้ใช้สาร อีพ็อกซี (Epoxy) เป็นสารตัวกลางซึ่งมีค่า เพอร์มิททิวิตี้ เท่ากับ 4.735 (ดูได้จากตารางในภาคผนวก) และออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ท กับที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ท มีความหนาเท่ากับ 0.808×10^{-3} เมตร ดังนั้น

$\lambda_o = \frac{3\times10^8}{5\times10^9} = 0.06$ เมตร สำหรับความถี่ 5 กิกะเฮิร์ท

$\lambda_o = \frac{3\times10^8}{10\times10^9} = 0.03$ เมตร สำหรับความถี่ 10 กิกะเฮิร์ท

$\varepsilon_r = 4.735$

$h = 0.808\times10^{-3}$ เมตร

และคำนวณค่า W ได้เท่ากับ 0.0177161579 เมตร ที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ท

W ได้เท่ากับ 0.0088580789 เมตร ที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ท

ความยาวของแผ่นตัวนำ

เมื่อเรารู้ความกว้างของแผ่นตัวนำแล้ว เราจะสามารถหาค่า ε_{re} และค่าความยาวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์ฟริงกิงได้ จากนั้นความยาวของแผ่นตัวนำที่ความถี่ใช้งานจะหาได้จาก

$$L = \frac{\lambda_o}{2\sqrt{\varepsilon_{re}}} - 2\Delta L$$

โดยที่ค่า ε_{re} และ ΔL ได้มาจาก

$$\varepsilon_{re} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left(1 + 12\frac{h}{W}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\Delta L = 0.412h\frac{(\varepsilon_{re} + 0.3)\left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\varepsilon_{re} - 0.258)\left(\frac{W}{h} + 0.8\right)}$$

นำค่าต่างๆ มาแทนได้ดังนี้

$\varepsilon_{re} = 4.3686339825$ ที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ท

$\varepsilon_{re} = 4.1576210040$ ที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ท

$\Delta L = 3.6942283722\times10^{-4}$ ที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ท

$\Delta L = 3.3634362582\times10^{-4}$ ที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ท

และนำค่าทั้งสองไปหาค่า L ได้

$L = 0.013614344$ เมตร ที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ท

$L = 0.006629586$ เมตร ที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การคำนวณหาอินพุทแอดมิทแทนซ์ของแผ่นตัวนำรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การหาอินพุทแอดมิทแทนซ์ของไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมนี้ได้จาก การหาอินพุทแอดมิทแทนซ์ทั้งหมดที่ช่องว่างที่ 1 โดยจะรับอินพุทแอดมิทแทนซ์มาจากช่องว่างที่ 2 ด้วย แต่เนื่องจากการออกแบบให้ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าเป็น $\frac{\lambda_g}{2}$ เมื่อ λ_g คือความยาวคลื่นที่อยู่ในสารตัวกลาง ทำให้ช่องว่างที่ 1 และช่องว่างที่ 2 อยู่ห่างกัน $\frac{\lambda_g}{2}$ ด้วย จึงส่งผลให้อินพุทแอดมิทแทนซ์จากช่องว่างที่ 2 เมื่อคิดที่ช่องว่างที่ 1 มีค่าของส่วนจินตภาพเท่ากับ ส่วนจินตภาพของ ช่องว่างที่ 1 แต่มีเครื่องหมายต่างกันดังนี้

$$\widetilde{Y}_2 = \widetilde{G}_2 + j\widetilde{B}_2 = G_1 - jB_1$$

เมื่อ

$\widetilde{Y}_2$ คือ อินพุทแอดมิทแทนซ์จากช่องว่างที่ 2 เมื่อคิดที่ช่องว่างที่ 1

$\widetilde{G}_2$ คือ ค่าความนำจากช่องว่างที่ 2 เมื่อคิดที่ช่องว่างที่ 1

$\widetilde{B}_2$ คือ ค่าซับเซฟแทนซ์จากช่องว่างที่ 2 เมื่อคิดที่ช่องว่างที่ 1

ดังนั้น อินพุทแอดมิทแทนซ์ทั้งหมดที่ช่องว่างที่ 1 จะเท่ากับ $2G_1$ แต่ถ้าต้องคิดถึง มิวชวลอิมพีแดนซ์ (Mutual) ด้วย จะได้ว่า อินพุทแอดมิทแทนซ์ มีค่าเป็น $2(G_1 \pm G_{12})$ โดยที่

$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2}$$

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2}\int_0^{\pi}\left(\sin\left(\frac{k_o W}{2}\cos\theta\right)\right)^2 J_o(k_o L\sin\theta)\sin\theta\tan^2\theta\, d\theta$$

โดยที่ J_o คือค่าเบสเซลที่อันดับ 0 (Bessel Function order zero)

$$I_1 = \int_0^{\pi}\left(\sin\left(\frac{k_o W}{2}\cos\theta\right)\right)^2 \sin\theta\tan^2\theta\, d\theta$$

$$k_o = \frac{2\pi}{\lambda_o}$$

ที่ความถี่ 5 กิกะเฮร์ท นำค่า W และ L ที่หาได้มาแทนลงไปได้ดังนี้

$k_o = 104.719755119$ $\quad I_1 = 1.084608840$

$G_1 = 9.15782\times10^{-4}$ $\quad G_2 = 5.7703646\times10^{-4}$

ดังนั้น อินพุทแอดมิทแทนซ์ เท่ากับ 0.0029856 และ

อินพุทอิมพีแดนซ์จะมีค่าเท่ากับ 334.93688498 โอห์ม

สำหรับที่ความถี่ 10 กิกะเฮร์ท นำค่า W และ L ที่หาได้มาแทนลงไปได้ดังนี้

$k_o = 209.439510239$ $\quad I_1 = 1.084608840$

$G_1 = 9.15782\times10^{-4}$ $\quad G_2 = 5.9264196\times10^{-4}$

ดังนั้น อินพุทแอดมิทแทนซ์ เท่ากับ 0.003016848 และ

อินพุทอิมพีแดนซ์จะมีค่าเท่ากับ 331.4717742585907 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การออกแบบส่วนที่ใช้ส่งคลื่น หรือแผ่นตัวนำรูปทรงวงกลม

ในการออกแบบสายอากาศที่มีแผ่นตัวนำเป็นรูปทรงวงกลมมีขั้นตอนดังรูปที่ 3.3 ในที่นี้จะแสดงวิธีการหารัศมีของวงกลมที่ โหมด TM_{110} โดยสามารถหาได้จากสูตร

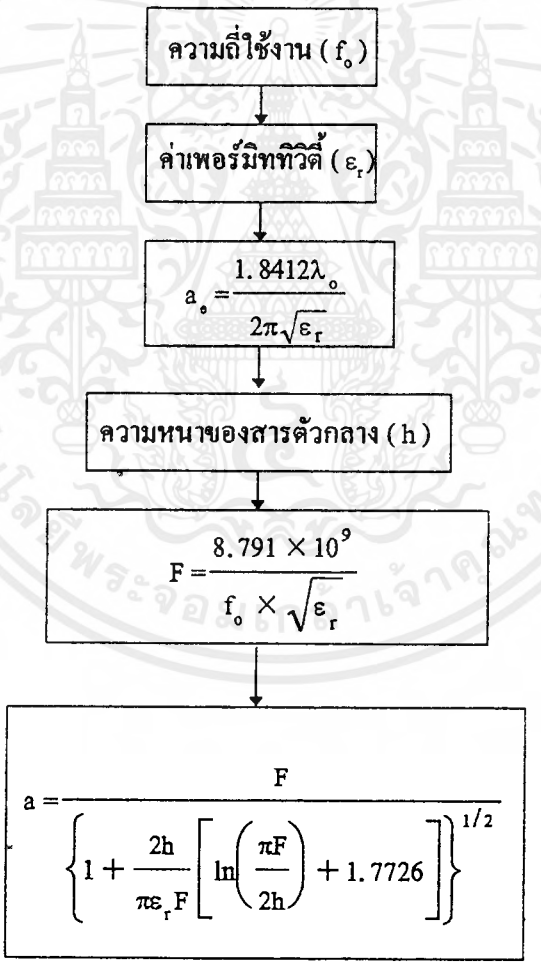
$$a = \frac{F}{\left\{1+\frac{2h}{\pi\varepsilon_r F}\left[\ln\left(\frac{\pi F}{2h}\right)+1.7726\right]\right\}^{1/2}}$$

เมื่อ

a = รัศมีของวงกลม (เซนติเมตร)

$$F = \frac{8.791\times10^{9}}{f_o\times\sqrt{\varepsilon_r}}$$

h = ความหนาของวัสดุ (เซนติเมตร)



รูปที่ 3.3 บล็อคแสดงขั้นตอนการคำนวณรัศมี ของแผ่นตัวนำรูปทรงวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ท นำค่าต่างๆ มาแทนในสมการได้ดังนี้

$f_o = 5\times10^9$ กิกะเฮิร์ท

$h = 0.808\times10^{-1}$ เซนติเมตร

$\varepsilon_r = 4.735$

ดังนั้นจะได้ a เท่ากับ 0.784461879 เซนติเมตร

สำหรับที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ท นำค่าต่างๆ มาแทนในสมการได้ดังนี้

$f_o = 10\times10^9$ กิกะเฮิร์ท

$h = 0.808\times10^{-1}$ เซนติเมตร

$\varepsilon_r = 4.735$

ดังนั้นจะได้ a เท่ากับ 0.3846474955 เซนติเมตร

3.1.4 การคำนวณหาอินพุทแอดมิทแทนซ์ของแผ่นตัวนำรูปทรงวงกลม

จากสมการ พลังงานที่แผ่กระจายของคลื่นจะได้ว่า

$$G_r = \frac{2\times P_r}{V_o^{\,2}}$$

เมื่อ

$$P_r = \frac{\left(V_o a_e k_o\right)^2}{16\eta_o}\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}\left\{\left[\cos(\phi)(J'_{02})\right]^2+\left[\cos(\phi)\sin(\phi)J_{02}\right]^2\right\}\sin(\theta)\,d\theta d\phi$$

V_o = ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นตัวนำ

$\eta_o = 120\pi$ โอห์ม

$J'_{02} = J_o(k_o a_e \sin\theta) - J_2(k_o a_e \sin\theta)$

$J_{02} = J_o(k_o a_e \sin\theta) + J_2(k_o a_e \sin\theta)$

ที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ท นำค่าต่างๆ มาแทนในสมการได้ดังนี้

$P_r = 7.167208944\times10^{-4}$

$G_r = 0.00143344$

นั่นคือได้ อินพุทแอดมิทแทนซ์เท่ากับ 0.00143344 และ

อินพุทอิมพีแดนซ์เท่ากับ 697.62163186802 โอห์ม

สำหรับที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ท นำค่าต่างๆ มาแทนในสมการได้ดังนี้

$P_r = 7.17725745496\times10^{-4}$

$G_r = 0.00143545149$

นั่นคือได้ อินพุทแอดมิทแทนซ์เท่ากับ 0.00143545149 และ

อินพุทอิมพีแดนซ์เท่ากับ 696.644927589011 โอห์ม

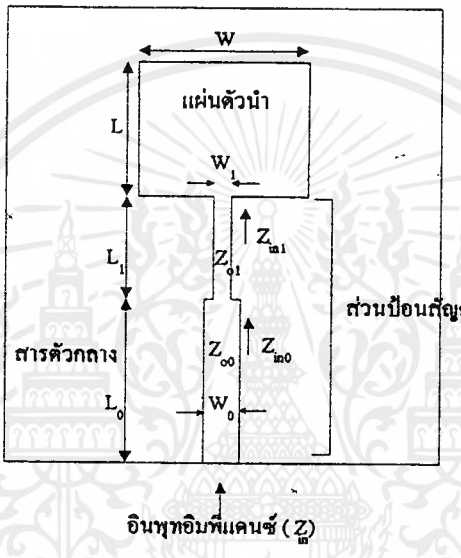
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 การคำนวณหาขนาดของตัวป้อนสัญญาณ

เนื่องจากในที่นี้ใช้ตัวป้อนสัญญาณเป็น "สายส่งไมโครสตริป" โดยจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกันในแต่ละตอน โดยสามารถแบ่งออกได้เป็นแบบสองตอน และแบบสามตอน ซึ่งสายส่งแบบสองตอนนี้จะใช้สำหรับรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ส่วนสายส่งแบบสามตอนจะใช้สำหรับรูปทรงวงกลม

สายส่งไมโครสตริปแบบสองตอน

โดยตอนแรกมีความยาวประมาณ $\frac{\lambda_g}{4}$ และตอนที่สอง มีความยาวประมาณ $\frac{\lambda_g}{2}$ (เมื่อ λ_g คือความยาวของคลื่นที่อยู่ในสารตัวกลาง ดังรูปที่ 3.4 เนื่องจากการทำให้เป็น 2 ตอนเช่นนี้ จะเป็นการปรับค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ให้มีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม



รูปที่ 3. 4 การป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งไมโครสตริปสองตอน

จากรูปที่ 3.4 จะกำหนดให้ L_1ยาวเท่ากับ $\frac{\lambda_g}{4}$ และ L_0 ยาวเท่ากับ $\frac{\lambda_g}{2}$ และจากสมการของสายส่งสัญญาณจะได้ว่า

$$Z_{in} = Z_o \frac{Z_r + jZ_o \tan(\beta_g L)}{Z_o + jZ_r \tan(\beta_g L)}$$

เนื่องจาก L_1 ยาวเท่ากับ $\frac{\lambda_g}{4}$ และ β_g มีค่าเท่ากับ $\frac{2\pi}{\lambda_g}$ ดังนั้น

$$Z_{in0} = Z_{o1} \frac{Z_{in1} + jZ_{o1} \tan(\pi/2)}{Z_{o1} + jZ_{in1} \tan(\pi/2)}$$

และ $\tan(\pi/2) = \infty$

$$Z_{in0} = \frac{Z_{o1}^2}{Z_{in1}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ L_0 มีความยาวเท่ากับ $\frac{\lambda_g}{2}$ และ β_g มีค่าเท่ากับ $\frac{2\pi}{\lambda_g}$ จะได้

$$Z_{in} = Z_{\infty 0} \frac{Z_{in0} + jZ_{\infty 0} \tan(\pi)}{Z_{\infty 0} + jZ_{in0} \tan(\pi)}$$

และ $\tan(\pi) = 0$

$$Z_{in} = Z_{in0}$$

ดังนั้น เพื่อให้ Z_{in} มีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม จึงต้องปรับให้ Z_{in0} มีค่าเท่ากับ 50 โอห์มด้วย และเป็นผลให้ค่า Z_{01} มีค่าเท่ากับ

$$Z_{01} = \sqrt{Z_{in0} \times Z_{in1}}$$

เมื่อ Z_{in1} คือ อินพุทอิมพีแดนซ์ของแผ่นตัวนำ และ Z_{in0} เท่ากับ 50 โอห์มจะได้ว่าที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ท มีอินพุทอิมพีแดนซ์เท่ากับ 334.93688498 โอห์ม ดังนั้นจะได้ว่า

$$Z_{01} = \sqrt{50 \times 334.93688498}$$
$$= 129.4095987529615 \text{ โอห์ม}$$

แต่สำหรับที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ท มีอินพุทอิมพีแดนซ์เท่ากับ 331.4717742585907 โอห์ม ดังนั้นจะได้ค่า Z_{01} เป็น

$$Z_{01} = \sqrt{50 \times 331.4717742585907}$$
$$= 128.738450794351 \text{ โอห์ม}$$

และเพื่อให้มีค่า VSWR ที่ดีจะต้องทำให้ Z_{∞} มีค่าเท่ากับ 50 โอห์มด้วย

ดังนั้นจึงเหลือสิ่งที่ต้องการหาก็คือ W_1 และ W_0 โดยหาจากค่า Z_{∞} และ Z_{01} สามารถหาได้ดังนี้

$$A = \frac{Z_o}{60}\left(\sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}}\right) + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1}\left(0.23 + \frac{0.11}{\varepsilon_r}\right)$$

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_o\sqrt{\varepsilon_r}}$$

เมื่อ A มีค่ามากกว่า 1.52 และ $Z_o\sqrt{\varepsilon_{re}}$ มีค่ามากกว่า 89.91

$$W = h\frac{8\exp(A)}{\exp(2A) - 2}$$

เมื่อ A มีค่าน้อยกว่า 1.52 และ $Z_o\sqrt{\varepsilon_{re}}$ มีค่าน้อยกว่า 89.91

$$W = \frac{2h}{\pi}\left(B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r}\left(\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\varepsilon_r}\right)\right)$$

ที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ท นำค่า ε_r, h, Z_{01} และ Z_{∞} มาแทนจะได้ค่าต่างๆ ดังนี้

$W_0 =$ 0.001462717553347 เมตร $W_1 =$ $1.423734174788466 \times 10^{-4}$ เมตร

ส่วนที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ท นำค่า ε_r, h, Z_{01} และ Z_{∞} มาแทนจะได้ค่าต่างๆ ดังนี้

$W_0 =$ 0.001462717553347 เมตร $W_1 =$ $1.451013364267531 \times 10^{-4}$ เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเนื่องจากคลื่นที่เดินทางเข้ามายังไมโครสตริปจะมีความยาวคลื่นเท่ากับ

$$\lambda_g = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\varepsilon_{re}}}$$

เมื่อ λ_o = ความยาวคลื่นในอากาศ

ε_{re} = 4.3686339825 ที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ท

ε_{re} = 4.1576210040 ที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ท

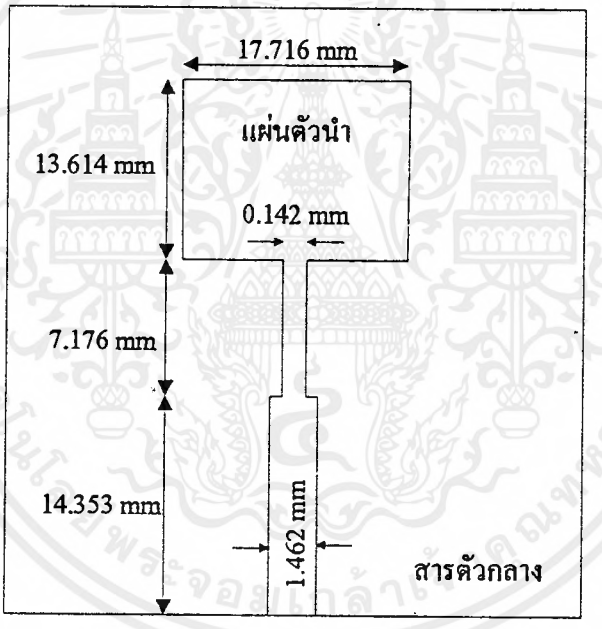
ดังนั้นที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ทจะได้ว่า

λ_g = 0.0287063794 เมตร

$L_0 = \frac{\lambda_g}{2}$ = 0.014353189 เมตร

$L_1 = \frac{\lambda_g}{4}$ = 0.007176594851 เมตร

ดังนั้นจะได้ขนาดของสายอากาศดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3. 5 ขนาดของไมโครสตริปรูปทรงสี่เหลี่ยมทำงานที่ 5 กิกะเฮิร์ท โดยใช้สายส่งสองตอน

สำหรับที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ท จะได้ว่า

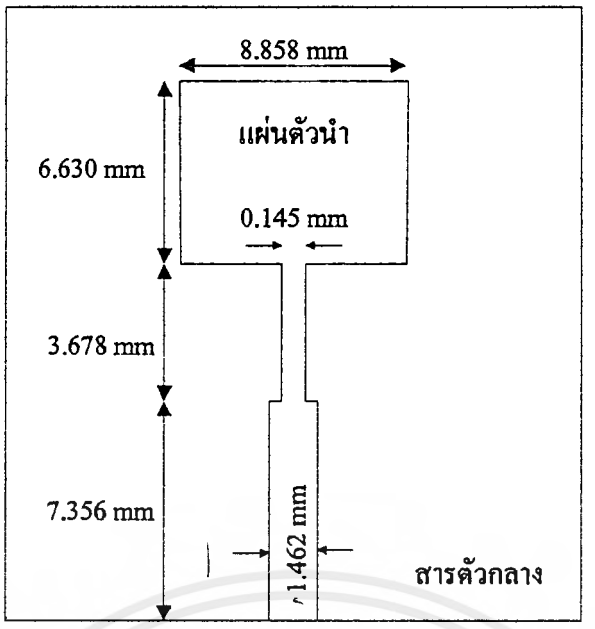
λ_g = 0.014712917704 เมตร

$L_0 = \frac{\lambda_g}{2}$ = 0.007356458852402 เมตร

$L_1 = \frac{\lambda_g}{4}$ = 0.003678229426201 เมตร

ดังนั้นจะได้ขนาดของสายอากาศดังรูปที่ 3.6

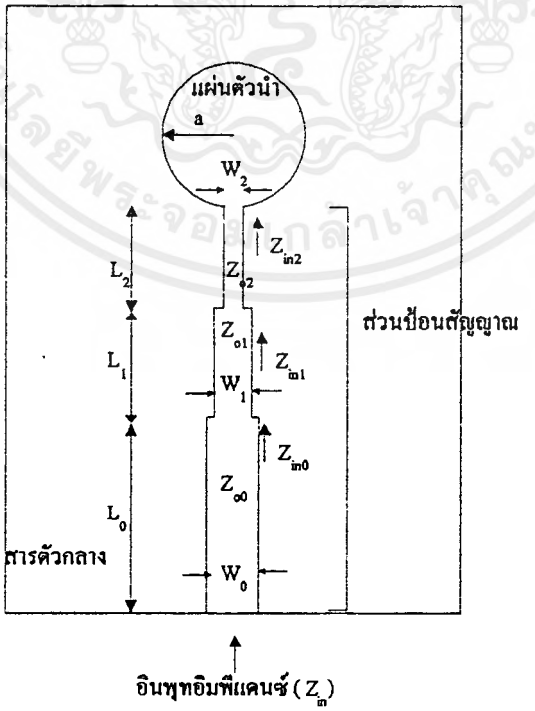
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3. 6 ขนาดของไมโครสตริปรูปทรงสี่เหลี่ยมทำงานที่ 10 กิกะเฮิร์ท โดยใช้สายส่งสองตอน

สายส่งไมโครสตริปแบบสามตอน

โดยตอนแรกมีความยาวประมาณ $\frac{\lambda_g}{4}$ และตอนที่สอง มีความยาวประมาณ $\frac{\lambda_g}{4}$ ส่วนตอนสุดท้ายยาว $\frac{\lambda_g}{2}$ (เมื่อ λ_g คือความยาวของคลื่นที่อยู่ในสารตัวกลาง) ดังรูปที่ 3.7 เนื่องจากการทำให้เป็นสามตอนเช่นนี้ จะเป็นการปรับค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ให้มีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม พร้อมทั้งปรับค่า VSWR ไปในตัวด้วย



รูปที่ 3. 7 การป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งไมโครสตริปสามตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.7 ถ้าให้ความยาว L_2 เท่ากับ L_1 และ ทั้งคู่ยาว $\frac{\lambda_g}{4}$ และเนื่องจาก Z_{in} ต้องการปรับให้ได้เท่ากับ 50 โอห์ม จึงได้ว่า

$$Z_{in1}=\frac{Z_{o2}^{\ 2}}{Z_{in2}} \text{ และ } Z_{in0}=\frac{Z_{o1}^{\ 2}}{Z_{in1}}$$

เนื่องจาก Z_{in2} เท่ากับอินพุทอิมพีแดนซ์ของแผ่นตัวนำ ดังนั้นจึงเท่ากับ 697.62163186802 โอห์ม สำหรับที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ท และเท่ากับ 696.644927589011 โอห์ม ที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ท เนื่องจากต้องการค่า Z_{in} ให้ได้ 50 โอห์มจึงได้ว่า

ที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ท

$$Z_{in1}=\frac{Z_{o2}^{\ 2}}{697.621}$$

ในที่นี้ต้องการให้ Z_{in0} เท่ากับ 50 โอห์ม ดังนั้นจะได้ $Z_{in0}=\frac{Z_{o1}^{\ 2}}{Z_{in1}}=50$ และนำทั้งสองสมการมารวมกันได้

$$\frac{Z_{o1}}{Z_{o2}}=\sqrt{\frac{50}{697.621}}=0.267$$

จะเห็นได้ว่าเราสามารถปรับค่า Z_{o1} และ Z_{o2} ให้ได้ค่าตามที่ต้องการได้ เพื่อให้ความกว้างของแต่ละช่วงมีค่าที่พอเหมาะ เช่นในที่นี้ให้ค่า Z_{o2}เท่ากับ 102.3 โอห์ม ดังนั้นจะได้ค่า Z_{o1} ประมาณ 71.5 โอห์ม โดยนำค่าทั้งสองมาหาความกว้างของแต่ละช่วงได้ผลดังนี้ (ใช้สมการเหมือนกับที่ใช้ก่อนหน้านี้)

W_2 = $3.07110139395\times10^{-4}$ เมตร

W_1 = $7.477555307446\times10^{-4}$ เมตร

L_2 = L_1 = 0.007968552994142 เมตร

ส่วน W_0 จะหาได้จากการปรับให้มีค่า Z_{o2} เท่ากับ 50 โอห์ม ดังนั้นจึงสามารถใช้วิธีเดียวกับที่ใช้ในสายส่งไมโครสตริปสองตอน ดังนั้นจะได้

W_0 = 0.001462717553347 เมตร

L_0 = 0.015937105988284 เมตร

รูปที่ 3.8 แสดงขนาดของสายอากาศที่คำนวณที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ท

สำหรับที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ท จะได้ว่า

W_2 = $3.07110139395\times10^{-4}$ เมตร

W_1 = $7.477555307446\times10^{-4}$ เมตร

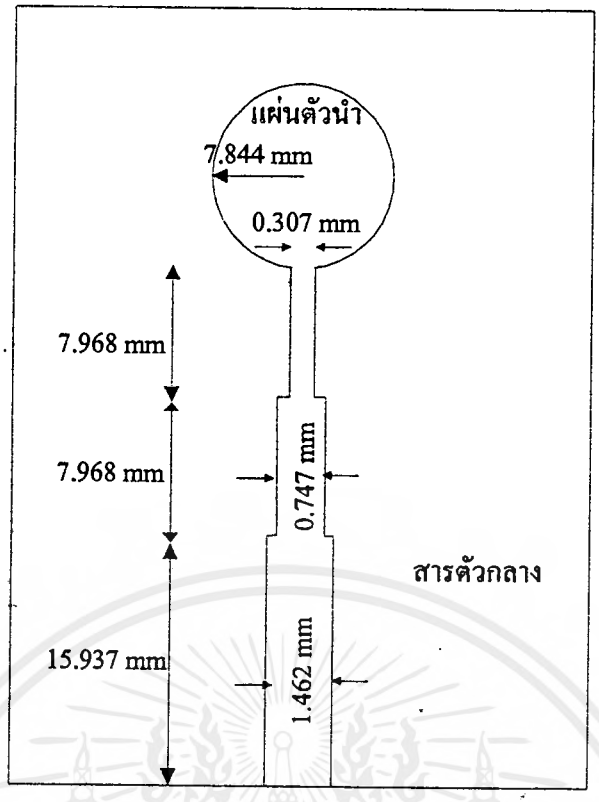
W_0 = 0.001462717553347 เมตร

L_2 = L_1 = 0.007968552994142 เมตร

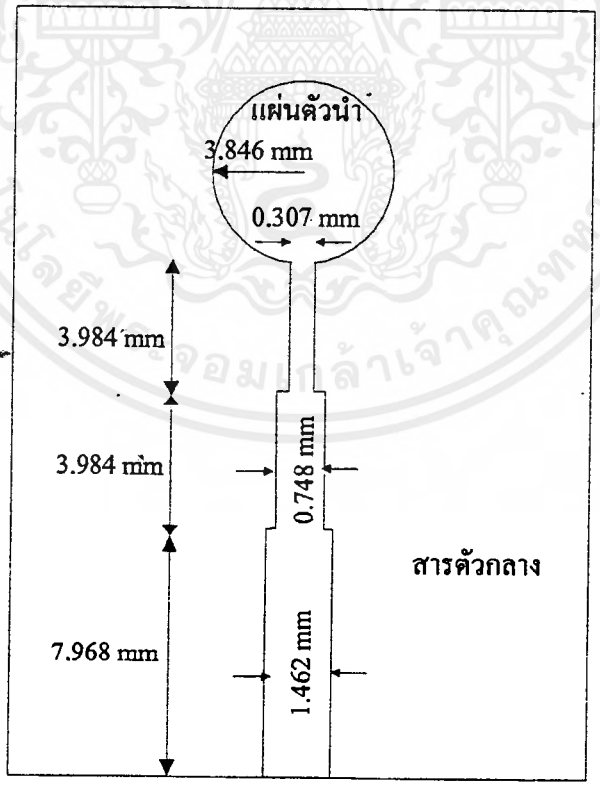
L_0 = 0.015937105988284 เมตร

ดังนั้นจะได้ขนาดของสายอากาศดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3. 8 ขนาดของไมโครสตริปรูปทรงวงกลมทำงานที่ 5 กิกะเฮิร์ท โดยใช้สายส่งสามตอน



รูปที่ 3. 9 ขนาดของไมโครสตริปรูปทรงวงกลมทำงานที่ 10 กิกะเฮิร์ท โดยใช้สายส่งสามตอน

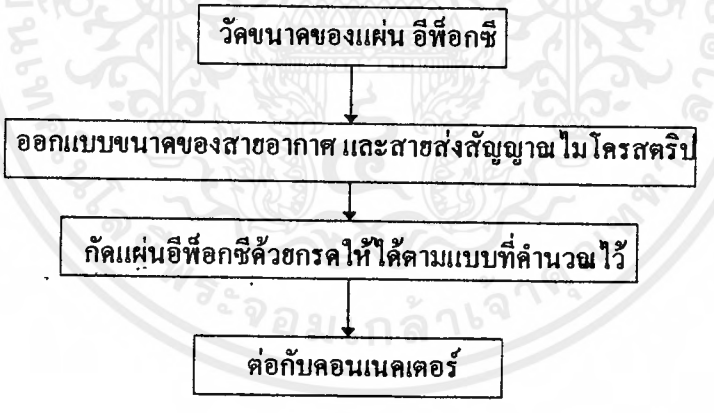
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การสร้าง

เนื่องจากการสร้างสายอากาศแบบไมโครสตริปที่ทำงานที่ความถี่สูง (5 กิกะเฮิร์ท และ 10 กิกะเฮิร์ท) จะต้องใช้ความละเอียดเป็นอย่างมาก ในการทำขนาดของแผ่นตัวนำให้เท่ากับค่าที่คำนวณไว้ ดังนั้น สารทุกอย่างที่ใช้ในการสร้างจะต้องมีความเข้มข้นมากเพื่อให้เวลาที่ใช้น้อยลง และจะลดความผิดพลาดลงได้

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้สร้างสายอากาศแบบไมโครสตริป

1. แผ่นอีพ็อกซี
2. อะซีโตน (Acetone) หรือ แอลกอฮอล์
3. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)
4. แผ่นดรายฟิล์ม (Dry Film)
5. กรดกัดแผ่นปรินท์
6. คอนเนคเตอร์ SMA
7. โซดาไฟ หรือ ทินเนอร์
8. กระดาษทรายอย่างหยาบ
9. หลอดไฟ 100 วัตต์
10. เตารีด
11. ผ้าหรือกระดาษหนาๆ



รูปที่ 3. 10 แสดงขั้นตอนการสร้างสายอากาศไมโครสตริป

3.2.2 ขั้นตอนการสร้างชิ้นงาน (Process)

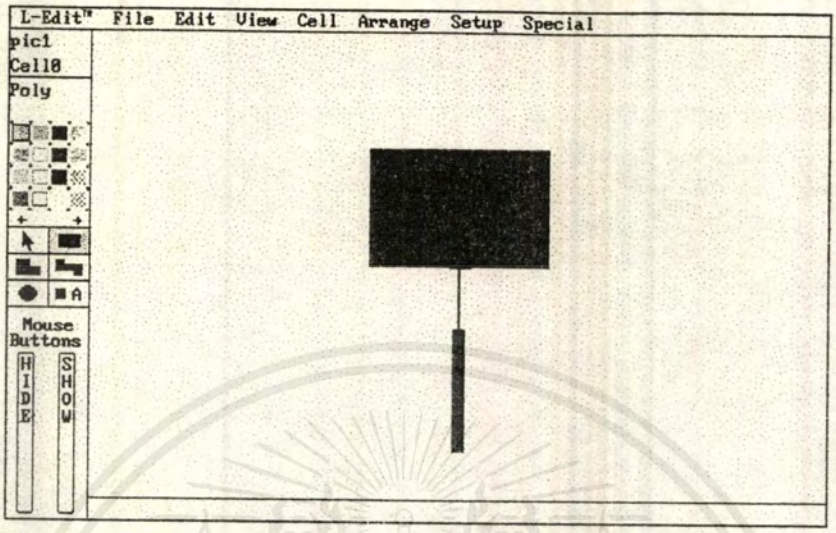
เนื่องจากในที่นี้ใช้ แผ่นอีพ็อกซี ซึ่งไม่บอกความหนามา ดังนั้นขั้นตอนแรกจึงต้องทำการวัดความหนาของอีพ็อกซี ก่อน และทำการป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป

1. วัดขนาดความหนาของวัสดุที่จะทำ โดยใช้ไมโครมิเตอร์วัด
2. นำค่าความหนาและ ε_r ไปคำนวณหาขนาดของแผ่นตัวนำด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คำนวณขนาดของสายส่งสัญญาณไมโครสตริป

4. นำค่าที่ได้จากการออกแบบ มาทำการ Lay-out ชิ้นงานด้วยโปรแกรม L-Edit ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีความละเอียดสูงมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ในที่นี้ใช้ความละเอียด 1 นาโนเมตร



รูปที่ 3. 11 โปรแกรม L-Edit

5. ที่ Menu - Cell เลือก Fabricate แล้ว สร้าง Cell0

6. ในโปรแกรม L-Edit ให้เก็บไฟล์เป็นนามสกุล "CIF" เช่น เก็บเป็นไฟล์ชื่อ "TEST.CIF"

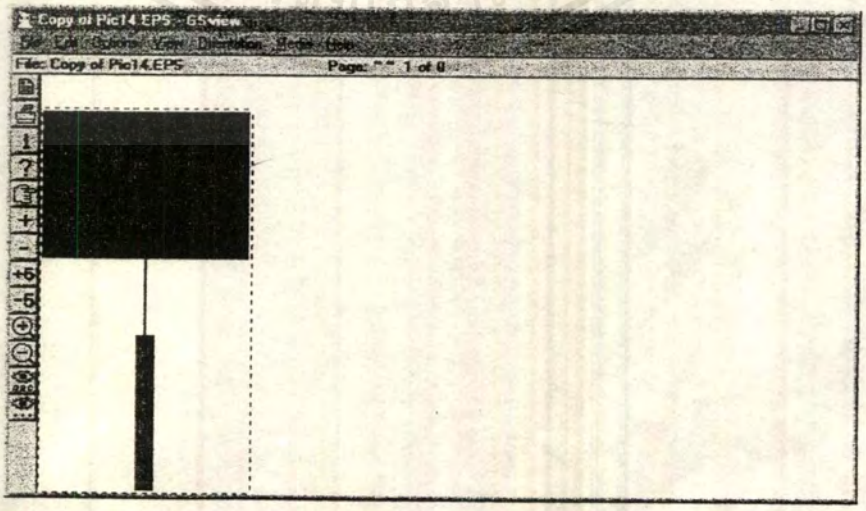
7. ก๊อปปี้ไฟล์นามสกุล "CIF" (เช่น TEST.CIF) ไปไว้บน UNIX

8. ใช้โปรแกรม psmask ซึ่งรันบน UNIX

9. พิมพ์ $ psmask < *.CIF (หมายเหตุ psmask ตัวเล็กหมด และ *.CIF หมายถึง ไฟล์นามสกุล "CIF" เช่น TEST.CIF)

10.จากนั้นจะได้ ไฟล์ชื่อ CCP, CCA หรือ CCE แล้วแต่ Layer ที่ใช้

11.เปลี่ยนชื่อไฟล์ที่ได้ให้เป็นนามสกุล "PS" เช่น TEST.PS



รูปที่ 3. 12 โปรแกรม Gsview

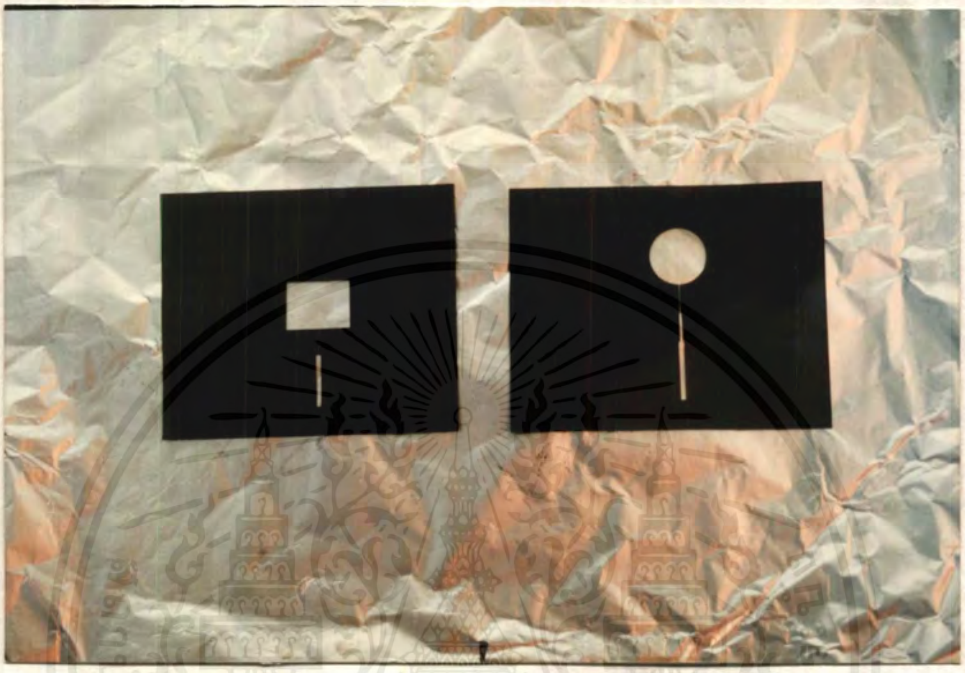
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12.นำไฟล์นามสกุล “PS” มาเปิดบนโปรแกรม Gsview

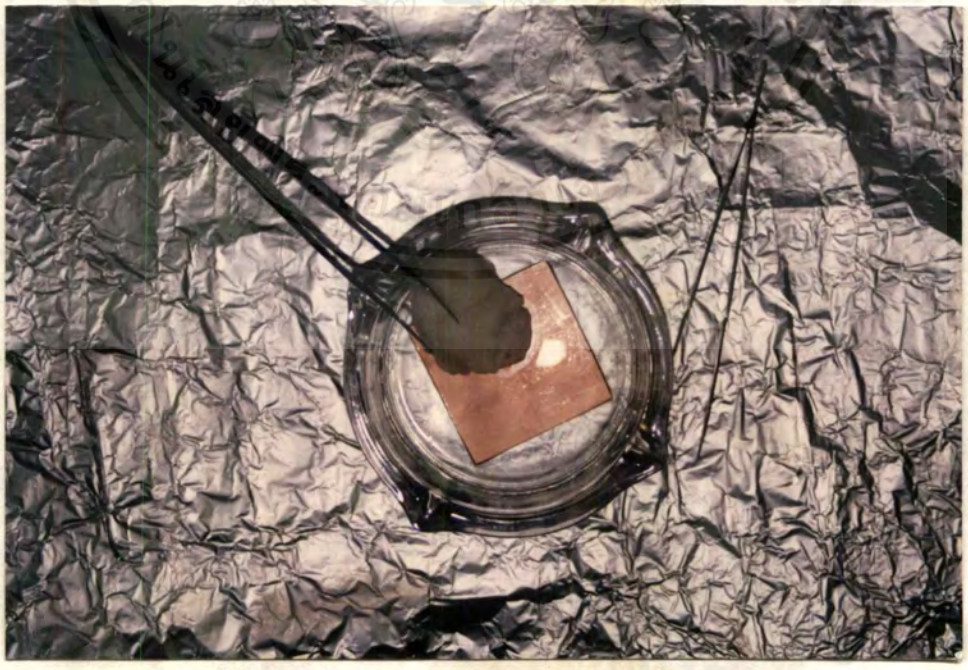
13.เปลี่ยนไฟล์นามสกุล “PS” ให้เป็นนามสกุล “EPS” โดยใช้คำสั่ง PS to EPS ในเมนู File

14.สุดท้ายได้ไฟล์ที่มีนามสกุลเป็น “EPS” เช่น TEST.EPS

15.นำไปทำแผ่นฟิลม์อาร์ทเวิร์ค (Proscript File) แบบ Negative ที่ร้านรับทำแผ่น Output ซึ่งมีเครื่องยิงฟิลม์ความละเอียดสูง ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3. 13 แผ่นฟิลม์อาร์ทเวิร์ค



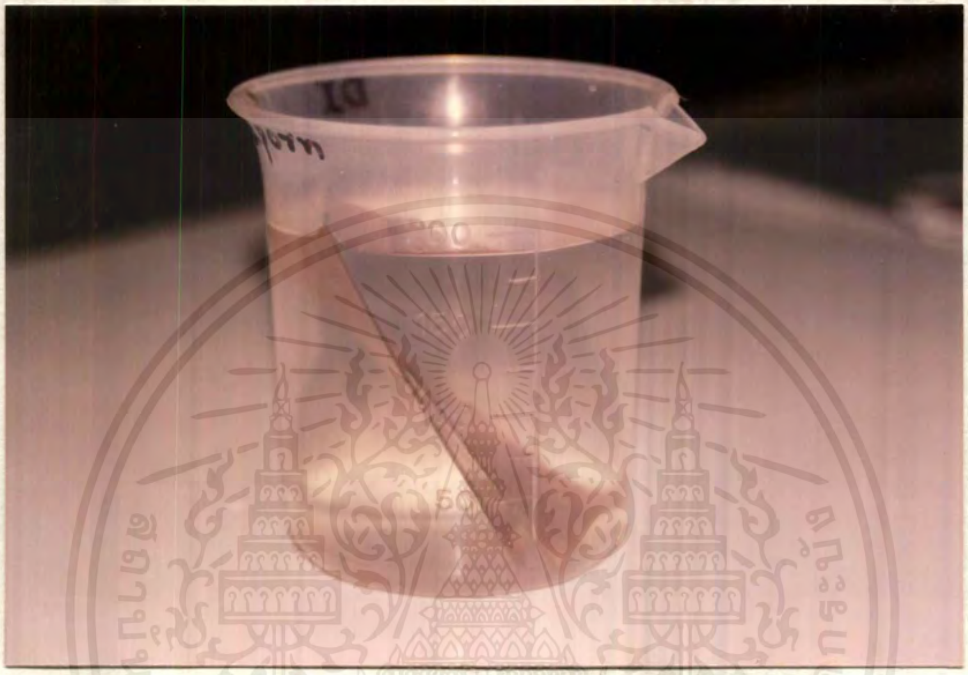
รูปที่ 3. 14 การทำความสะอาดด้วย อะซีโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16.ตัดแผ่น อีพ็อกซี และ ดรายฟิล์ม ตามขนาดที่ต้องการ โดยให้มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของแผ่นตัวนำด้านบนที่ได้ออกแบบไว้

17.เนื่องจากการตัดแผ่น อีพ็อกซี จะทำให้บริเวณขอบเกิดร่องรอยของการตัด ซึ่งจะมีผลเมื่อติดแผ่นดรายฟิลม์ จึงต้องขัดขอบโดยรอบของแผ่น อีพ็อกซี ให้เรียบด้วยกระดาษทรายชนิดหยาบ

18.ทำความสะอาดผิวทองแดงทั้งสองด้าน ด้วยอะซีโตน หรือ แอลกอฮอล์ เพื่อขจัดออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3. 15 ล้างด้วยน้ำที่ไม่มีประจุ

รูปที่ 3. 16 การเป่าแผ่นทองแดงให้แห้ง

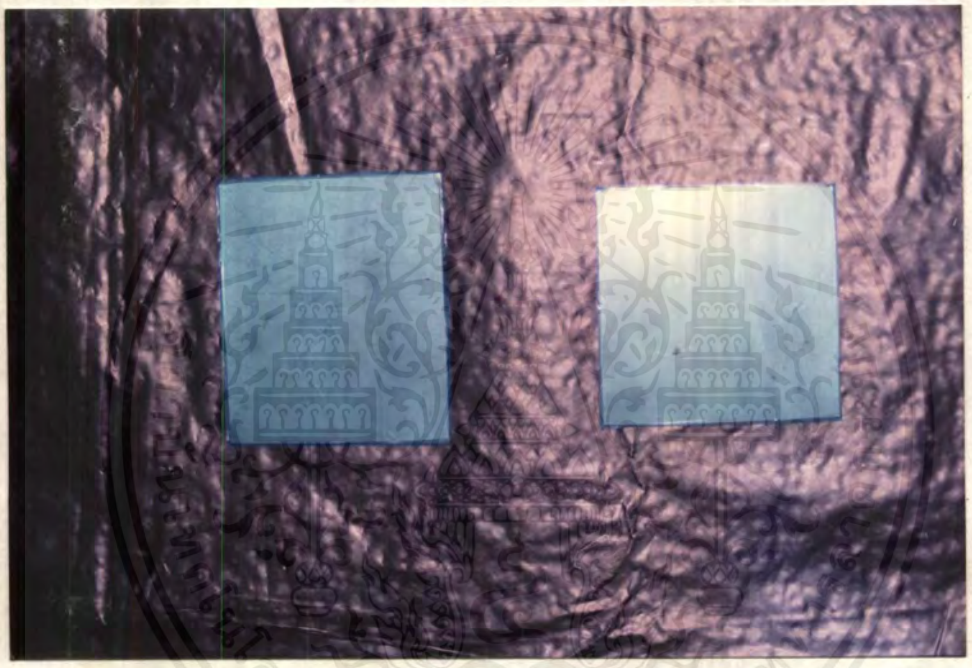
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19.นำไปล้างด้วยน้ำที่ไม่มีประจุ (DI) หรือน้ำกลั่น ดังรูปที่ 3.15

20.เป่าแผ่นทองแดงให้แห้ง โดยไม่ใช้มือจับเพราะอาจเกิดออกไซด์ขึ้นได้ ดังรูปที่ 3.16

21.ลอกแผ่นพลาสติก (Cover Sheet) ที่ติดอยู่กับแผ่นดรายฟิล์มด้านใดด้านหนึ่งออก แล้วนำไปติดกับแผ่น อีพ็อกซี ที่เตรียมไว้ (ระวังอย่าให้มีฟองอากาศ)

22.ใช้ผ้าวางทับบน อีพ็อกซี จากนั้นนำเตารีดไฟฟ้าปรับความร้อนปานกลาง หรือ โดยประมาณ 110 องศาเซลเซียส รีดทับบนแผ่นผ้าให้ทั่ว (ระวังอย่าใช้ความร้อนสูงเกินไป เพราะ ดรายฟิล์มอาจละลายได้) จากนั้นตรวจสอบดูว่าดรายฟิล์มที่ติดบนแผ่น อีพ็อกซี มีฟองอากาศแทรกอยู่หรือไม่ ถ้ามีอยู่ต้องทำการลอกแผ่นดรายฟิล์มออก แล้วติดใหม่ เพราะฟองอากาศนี้ทำให้ดรายฟิล์มไม่เกาะติดแผ่น อีพ็อกซี ซึ่งเป็นเหตุให้ลายเส้นที่จุดนี้ขาดได้ แล้วจะได้ผลดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3. 17 แผ่น อีพ็อกซี ที่ติดแผ่นดรายฟิลม์แล้ว

23.เมื่อได้แผ่น อีพ็อกซี ที่ติดดรายฟิล์มเรียบร้อยแล้วนั่นคือ พร้อมที่จะขึ้นลายได้ ให้นำหลอดไฟฟ้า (หลอดไส้) ขนาด 100 วัตต์ แขวนไว้เหนือแผ่น อีพ็อกซี ห่างประมาณ 5 นิ้ว

24.นำฟิล์มอาร์ทเวิร์คแบบ Negative ที่มีขนาดเท่าแบบทับบนแผ่น อีพ็อกซี แล้วนำกระจกใสมาวางทับอีกที เพื่อให้ฟิล์มอาร์ทเวิร์คแนบติดกับแผ่น อีพ็อกซี แน่นขึ้นอีก จากนั้นเปิดไฟให้กับหลอดไฟเพื่อทำการถ่ายขึ้นลายใช้เวลาถ่ายประมาณ 25 นาที โดยในการวางฟิล์มอาร์ทเวิร์คจะต้องให้มีระยะห่างของลายกับขอบของแผ่นอีพ็อกซีเท่ากับความยาวของส่วนป้อนสัญญาณใน SMA ที่ใช้

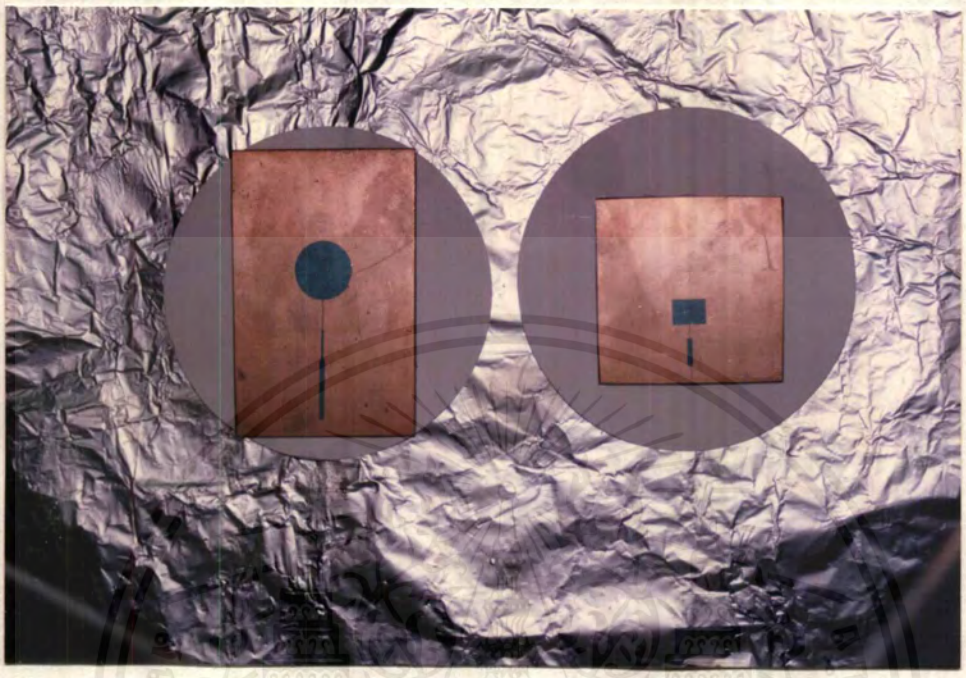
25.นำแผ่นที่ทำการขึ้นลายแล้วมาลอกแผ่นพลาสติกที่ติดอยู่บนแผ่น ดรายฟิล์ม อีกชั้นหนึ่งออก โดยลอกออกเพียงด้านเดียว ส่วนด้านกราวน์เพลนไม่ต้องลอกออก

26.นำแผ่นอีพ็อกซี ที่ได้มาทำการเอาดรายฟิล์มออก (Remove Dry Film) ออกด้วยน้ำยา Developer (โซเดียมคาร์บอเนต) ซึ่งจะทำให้แผ่นอีพ็อกซีเหลือแต่ลายที่เราต้องการ ดังรูปที่ 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

27.นำแผ่นอีพ็อกซี ที่ได้มากัดด้วยน้ำยากัดทองแดงเพื่อให้ได้ลายเส้นตามต้องการ แล้วนำไปทำการเอาแผ่นครายฟิล์มออก โดยใช้ทินเนอร์หรือโซดาไฟ

28.นำไปทำความสะอาด และนำ SMA มาบัดกรีกับแผ่นอีพ็อกซี ที่ตัวป้อนสัญญาณ ก็จะได้สายอากาศไมโครสตริปตามที่เราต้องการ



รูปที่ 3. 18 แผ่นอีพ็อกซี ที่เหลือแต่ลายที่ต้องการ

รูปที่ 3. 19 การกัดแผ่นอีพ็อกซีด้วย กรดกัดปรินท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้ลองสร้างสายอากาศแบบไมโครสตริป 4 อัน ทำงานที่ความถี่ต่างๆ กัน และมีลักษณะของแผ่นตัวนำไม่เหมือนกันด้วย ซึ่งแต่ละอันมีส่วนป้อนสัญญาณเป็นสายส่งสัญญาณไมโครสตริป โดยทั้งหมดนี้สร้างขึ้นบนสารตัวกลางอีพ็อกซี ในตารางที่ 4.1 ได้แสดงลักษณะต่างๆ ของสายอากาศทั้ง 4 ที่ได้สร้างขึ้น ส่วนในตารางที่ 4.2 จะแสดงความแตกต่างของขนาดในสายอากาศทั้ง 4

ตารางที่ 4. 1 การเปรียบเทียบลักษณะของสายอากาศ

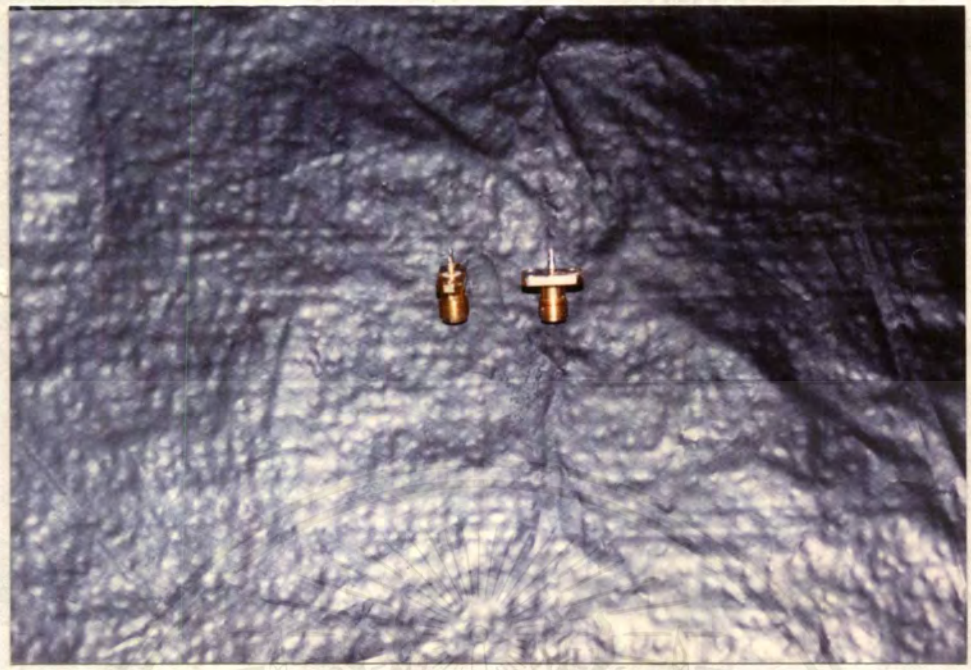
ชิ้นงาน	ลักษณะแผ่นตัวนำ	ความถี่ที่ออกแบบ	สายส่งสัญญาณ
1.	สี่เหลี่ยมผืนผ้า	5 GHz	สองตอน
2.	สี่เหลี่ยมผืนผ้า	10 GHz	สองตอน
3.	วงกลม	5 GHz	สามตอน
4.	วงกลม	10 GHz	สามตอน

ตารางที่ 4. 2 การเปรียบเทียบขนาดของสายอากาศ

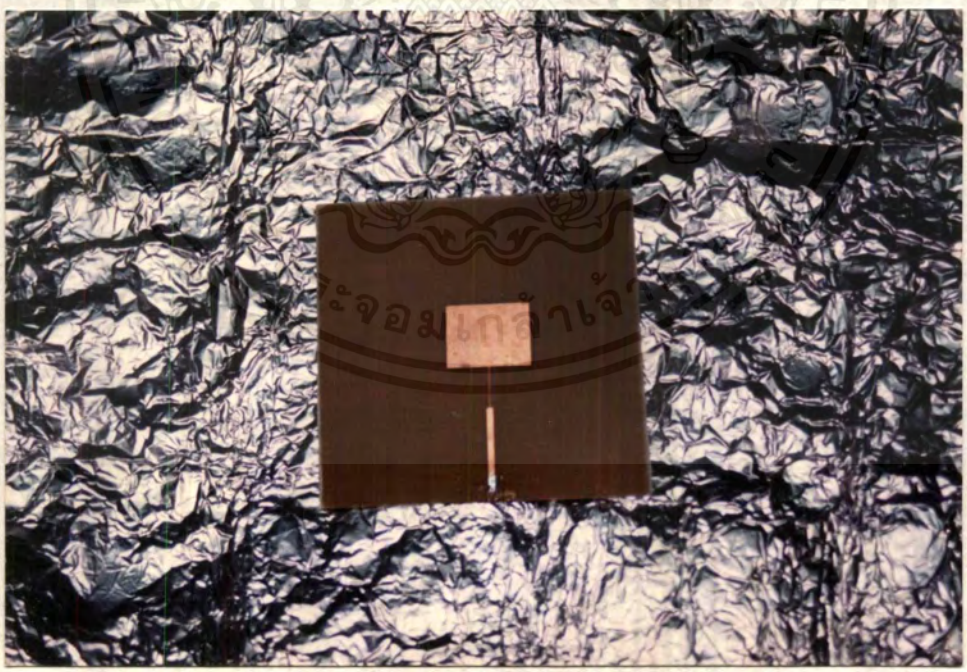
	ชิ้นงาน 1	ชิ้นงาน 2	ชิ้นงาน 3	ชิ้นงาน 4
ความกว้างของแผ่นตัวนำ (mm)	17.716	8.858	ไม่มี	ไม่มี
ความยาวของแผ่นตัวนำ (mm)	13.614	6.630	ไม่มี	ไม่มี
รัศมีของแผ่นตัวนำ (mm)	ไม่มี	ไม่มี	7.844	3.846
ความยาวของสายส่งตอนแรก (mm)	7.176	3.678	7.968	3.984
ความยาวของสายส่งตอนสอง (mm)	14.353	7.356	7.968	3.984
ความยาวของสายส่งตอนสาม (mm)	ไม่มี	ไม่มี	15.937	7.968
ความกว้างของสายส่งตอนแรก (mm)	0.142	0.145	0.307	0.307
ความกว้างของสายส่งตอนสอง (mm)	1.462	1.462	0.747	0.748
ความกว้างของสายส่งตอนสาม (mm)	ไม่มี	ไม่มี	1.462	1.462

สำหรับรูปที่ 4.1 จะแสดงลักษณะของคอนเนคเตอร์ SMA ส่วนรูปที่ 4.2 ถึง 4.5 จะแสดงภาพจริงของสายอากาศแบบไมโครสตริปทั้ง 4 อัน โดยเรียงตามลำดับชิ้นงานตามตารางที่ 4.1 คือ รูปที่ 4.2 แสดงสายอากาศที่ออกแบบให้ทำงานที่ 5 GHz และมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า, รูปที่ 4.3 แสดงสายอากาศที่ออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ 10 GHz และมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า, รูปที่ 4.4 แสดงสายอากาศที่ออกแบบให้ทำงานที่ 5 GHz และมีลักษณะเป็นวงกลม, รูปที่ 4.5 แสดงสายอากาศที่ออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ 10 GHz และมีลักษณะเป็นวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

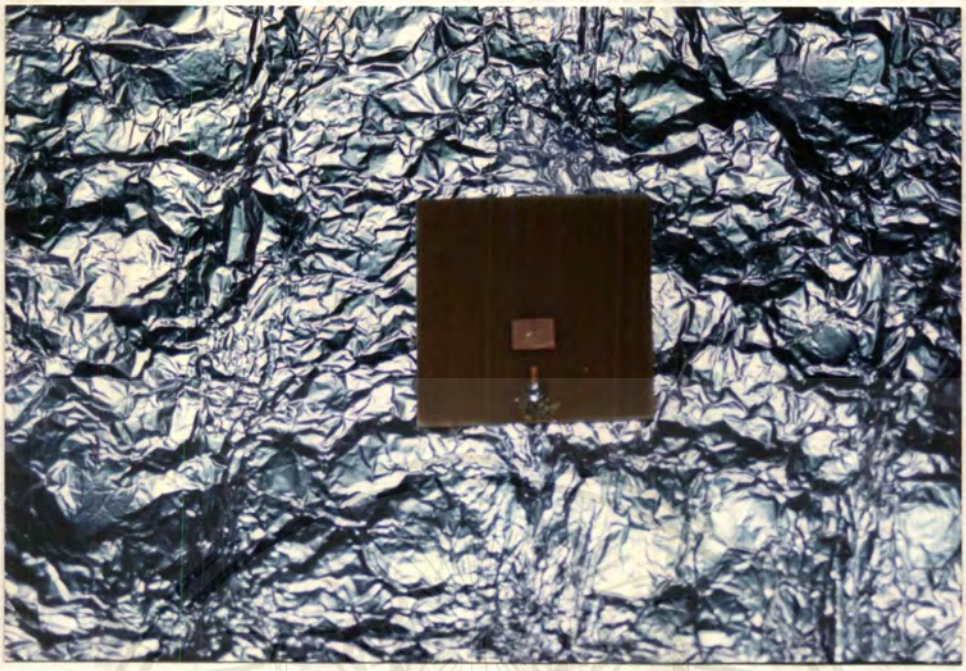


รูปที่ 4. 1 คอนเนคเตอร์ SMA

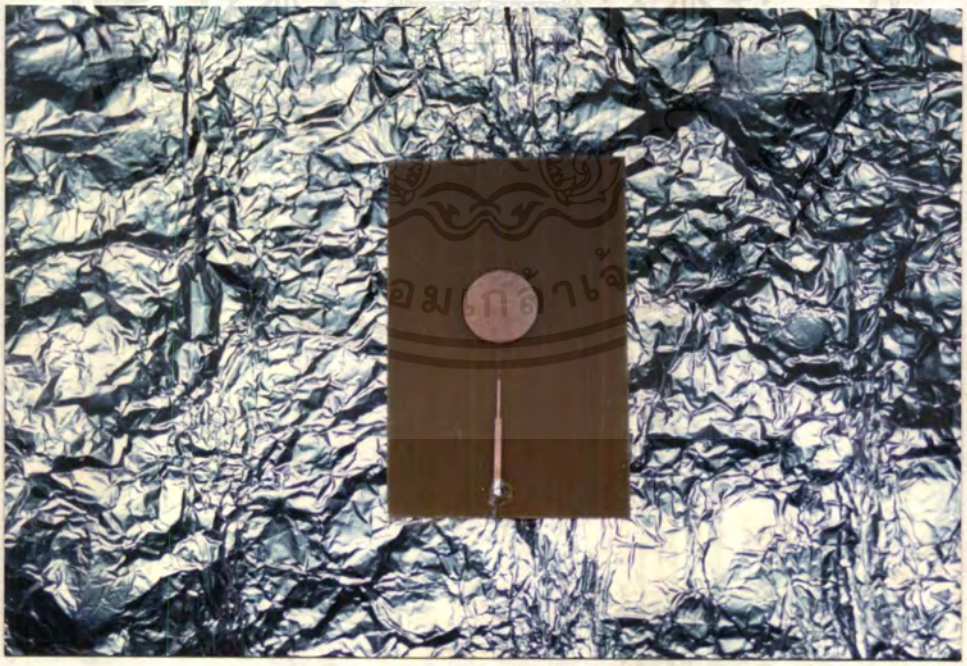


รูปที่ 4. 2 สายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ออกแบบให้ทำงานที่ 5 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

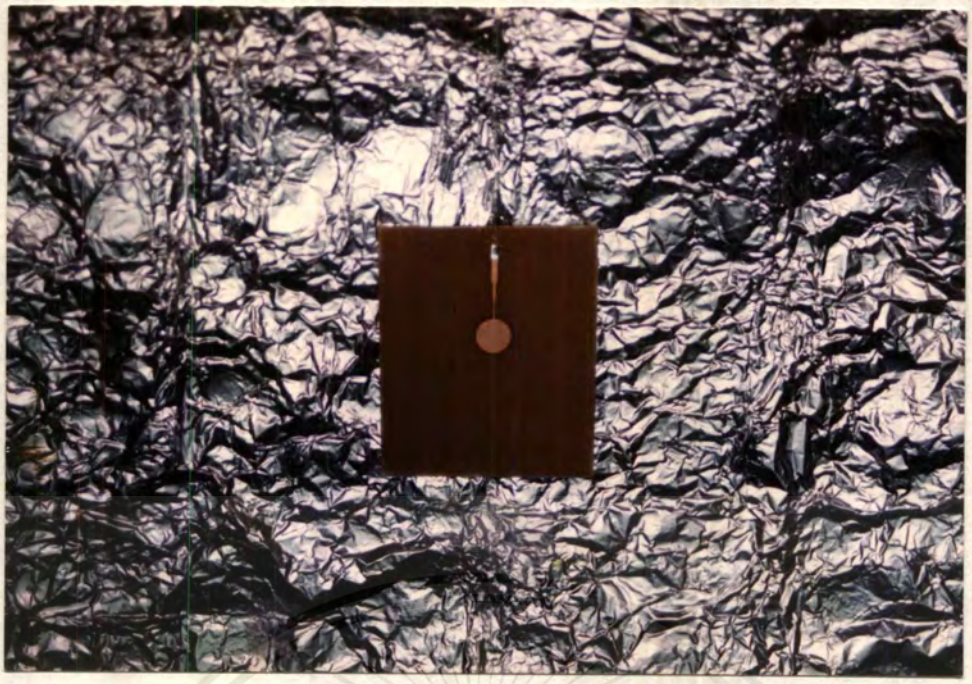


รูปที่ 4. 3 สายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ออกแบบให้ทำงานที่ 10 GHz



รูปที่ 4. 4 สายอากาศรูปทรงวงกลมที่ออกแบบให้ทำงานที่ 5 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4. 5 สายอากาศรูปทรงวงกลมที่ออกแบบให้ทำงานที่ 10 GHz

4.1 การทดลอง

ในการทดลองวัดผลของสายอากาศ ได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน คือ ในส่วนแรกเป็นการทดลองวัดค่า S-พารามิเตอร์ (หน่วยเป็น dB), SWR (หน่วยเป็น dB) และ อินพุทอิมพีแดนซ์ (หน่วยเป็นโอห์ม) โดยจะกวาดความถี่ให้ครอบคลุมความถี่ที่ออกแบบไว้ ส่วนการทดลองส่วนที่สองเป็นการวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่น

4.1.2 การทดลองวัด S-พารามิเตอร์, SWR และอินพุทอิมพีแดนซ์

การทดลองวัด S-พารามิเตอร์, SWR และอินพุทอิมพีแดนซ์นี้จะใช้เครื่องเนตเวอร์ค อนาไลเซอร์เป็นเครื่องวัด และใช้เครื่องกำเนิดความถี่เป็นเครื่องกำหนดความถี่ของสัญญาณดังรูปที่ 4.6

อุปกรณ์ที่ใช้วัดผลการทดลอง

1. เครื่องเนตเวอร์ค อนาไลเซอร์ (Network Analyzer)
2. เครื่องกำเนิดความถี่
3. สายนำสัญญาณ
4. คอนเนคเตอร์ชนิด Open, Short, Load

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการปรับเครื่องเนตเวอร์ค อนาไลเซอร์ให้ใช้งานได้ตามมาตรฐาน โดยใช้คอนเนคเตอร์ชนิด Open, Short, Load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สำหรับการวัดที่ความถี่ 5 GHz จะต้องปรับเนตเวอร์คอนาไลเซอร์ให้มีการกวาดความถี่ที่ระหว่าง 3 GHz ถึง 7 GHz และให้มีการกวาดความถี่ระหว่าง 8 GHz ถึง 12 GHz สำหรับการวัดที่ความถี่ 10 GHz
3. ต่อสายอากาศไมโครสตริปเข้ากับเครื่อง เนตเวอร์ค อนาไลเซอร์
4. ทำการวัด โดยเริ่มจากการวัดค่า S-พารามิเตอร์ แล้วทำการเก็บข้อมูลเป็นไฟล์
5. วัดค่า SWR ที่ความถี่ 3 GHz ถึง 7 GHz แล้วทำการเก็บข้อมูลเป็นไฟล์
6. วัดค่า อินพุทอิมพีแดนซ์ และสมิทชาร์ต

รูปที่ 4. 6 เครื่องเนตเวอร์ค อนาไลเซอร์และเครื่องกำเนิดความถี่

4.1.2 การทดลองวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่น

สำหรับการวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไมโครสตริปนี้จะใช้สายอากาศแบบปากแตรเป็นตัวส่งสัญญาณ และใช้สายอากาศแบบไมโครสตริปที่ต้องการวัดเป็นตัวรับสัญญาณ โดยให้มีระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบปากแตร กับสายอากาศแบบไมโครสตริปประมาณ 1.5 เมตร ดังรูปที่ 4.7 และทำการทดลองวัดทั้งระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก โดยให้มีการหมุนทีละ 5 องศา จนครบ 180 องศา

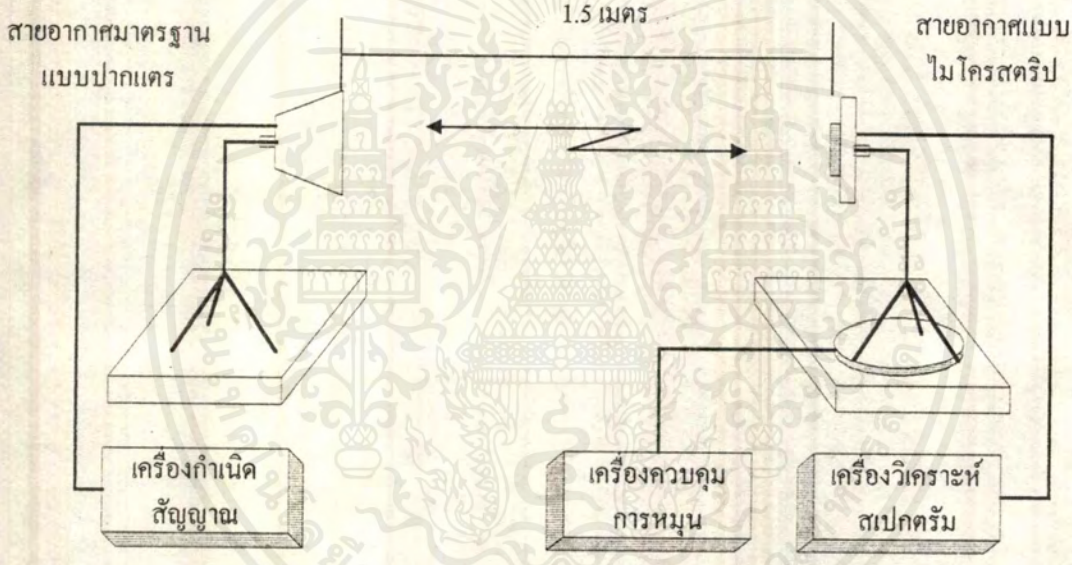
อุปกรณ์ที่ใช้วัดผลการทดลอง

1. เครื่องกำเนิดสัญญาณ
2. สายอากาศมาตรฐานแบบปากแตร (Horn)
3. เครื่องควบคุมการหมุน
4. เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer)
5. สายนำสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดลอง

1. นำสายอากาศแบบปากแตรติดตั้งที่เสาสำหรับส่งสัญญาณ
2. นำสายอากาศแบบไมโครสตริปที่ต้องการจะวัดไปติดตั้งที่เสาสำหรับรับสัญญาณ ซึ่งมีเครื่องหมุนติดอยู่ด้วย
3. ต่อเครื่องกำเนิดสัญญาณเข้ากับสายอากาศแบบปากแตร โดยผ่านสายนำสัญญาณ
4. ต่อเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเข้ากับสายอากาศแบบไมโครสตริป โดยผ่านสายนำสัญญาณ โดยเริ่มที่การวัดระนาบสนามไฟฟ้า
5. กำหนดให้เครื่องควบคุมการหมุน หมุนทีละ 5 องศา
6. เปิดเครื่องกำเนิดสัญญาณ และเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม
7. สังเกตุดูค่าพลังงานที่รับได้ที่ความถี่ของสายอากาศนั้นได้ออกแบบไว้
8. เปลี่ยนองศาการหมุนของสายอากาศ แล้วจดบันทึกค่าที่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม จนครบ 180 องศา
9. เปลี่ยนระนาบการหมุนเป็นระนาบสนามแม่เหล็ก

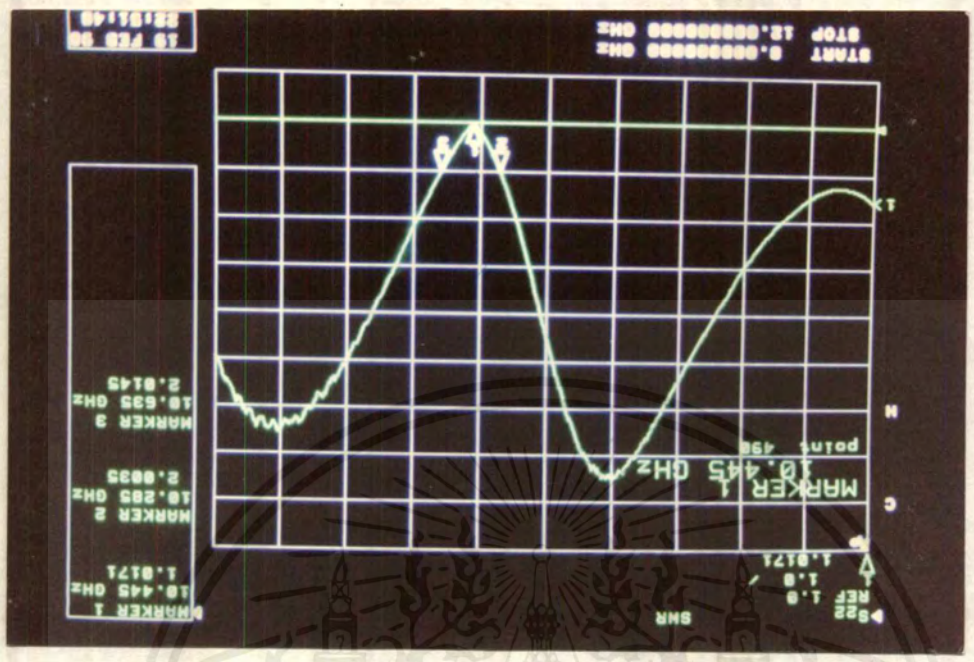


รูปที่ 4. 7 แสดงการทดลองวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่น

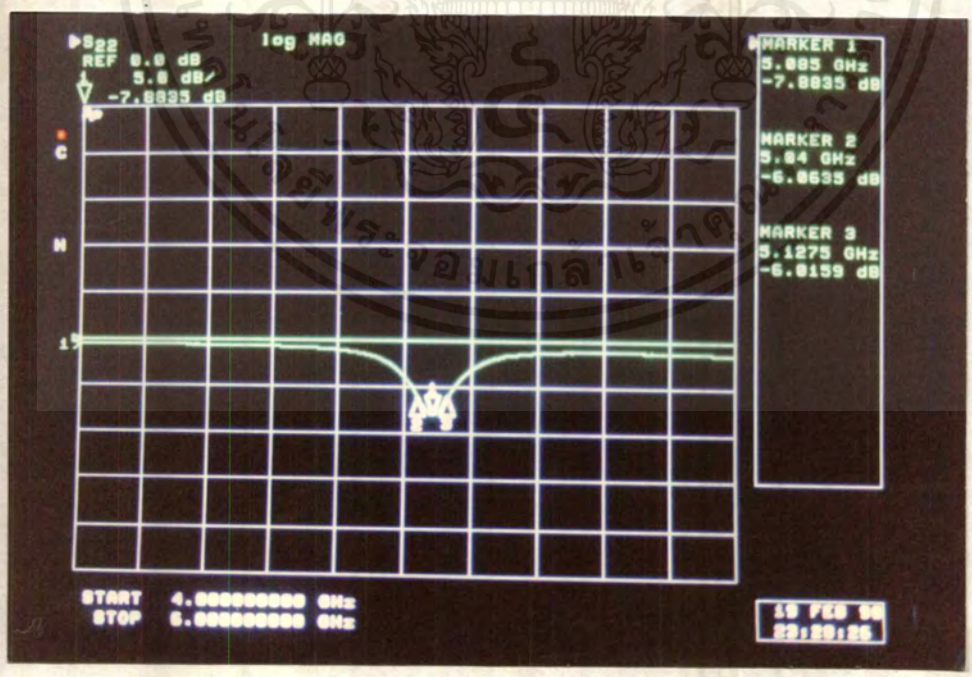
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลอง

4.2.1 ผลการทดลองของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยม

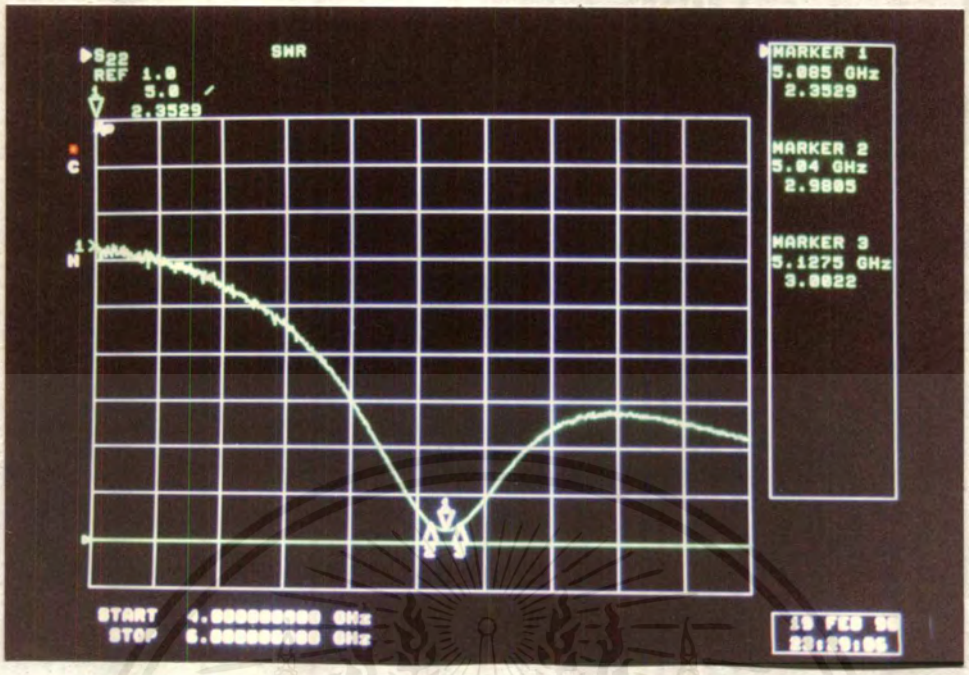


รูปที่ 4. 8 ผลการวัด S-พารามิเตอร์ของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ออกแบบที่ความถี่ 5 GHz

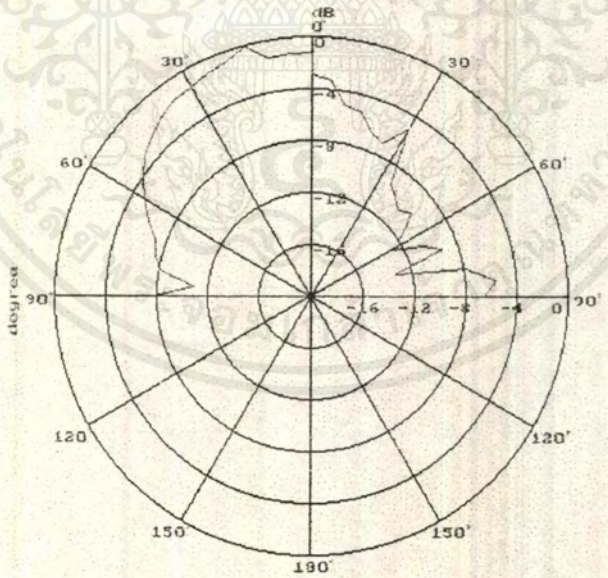


รูปที่ 4. 9 ผลการวัดอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ออกแบบที่ความถี่ 5 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

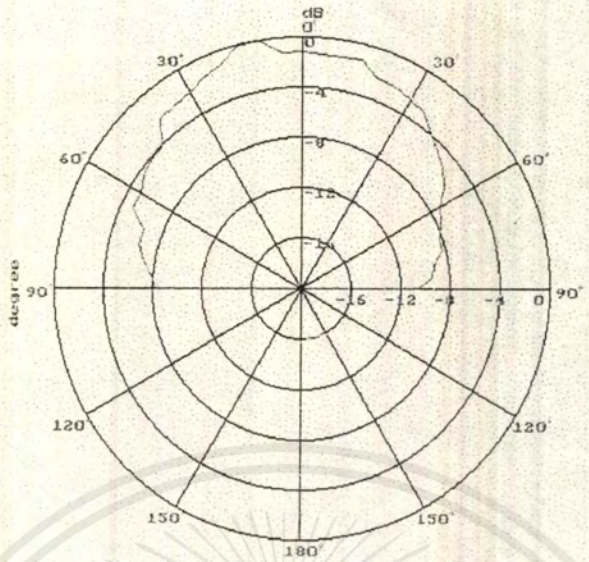


รูปที่ 4. 10 ผลการวัด SWR ของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ออกแบบที่ความถี่ 5 GHz

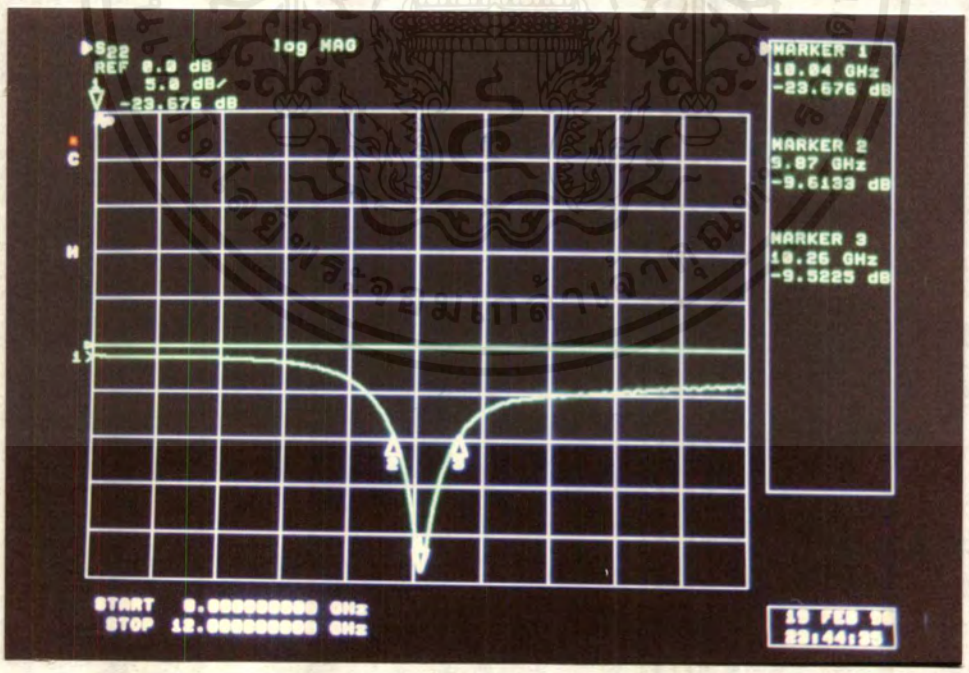


รูปที่ 4. 11 ผลการวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า ของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ออกแบบที่ความถี่ 5 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



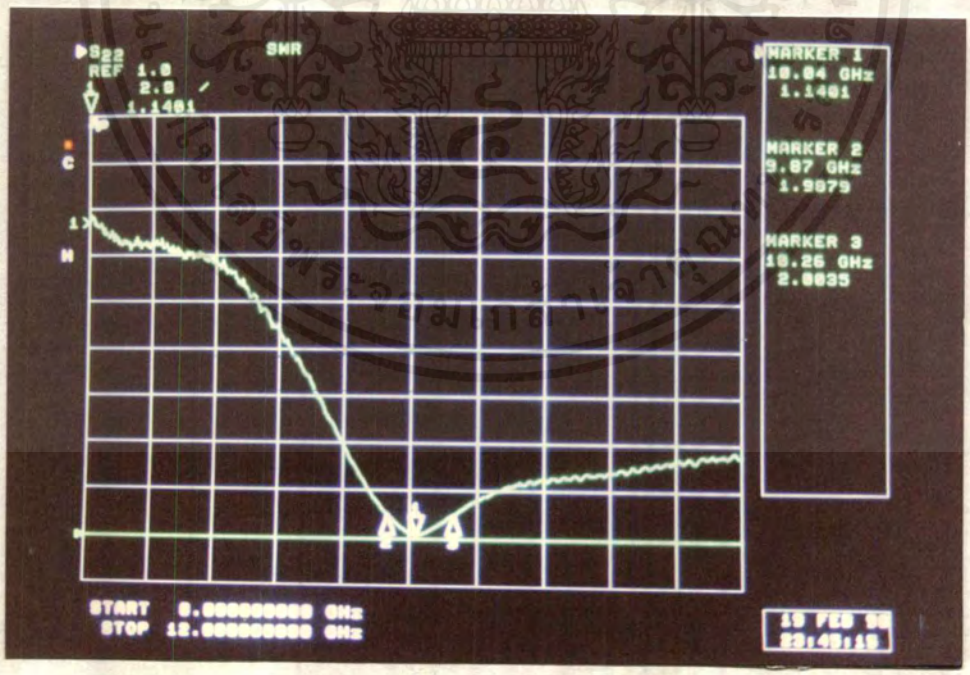
รูปที่ 4. 12 ผลการวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก ของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ออกแบบที่ความถี่ 5 GHz



รูปที่ 4. 13 ผลการวัด S-พารามิเตอร์ของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz

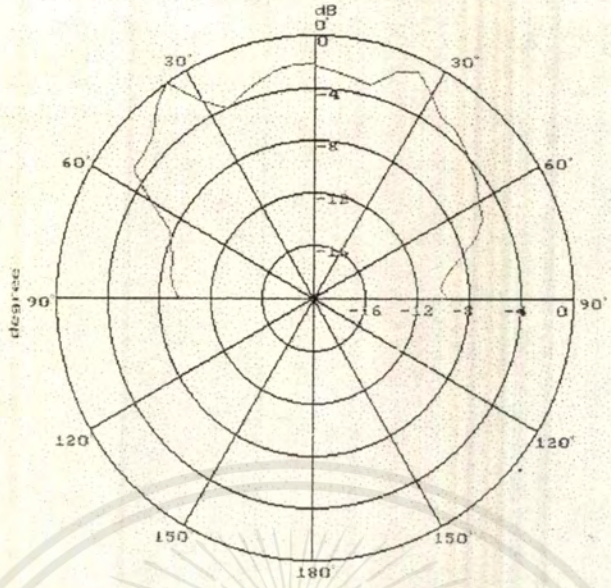
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4. 14 ผลการวัดอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz

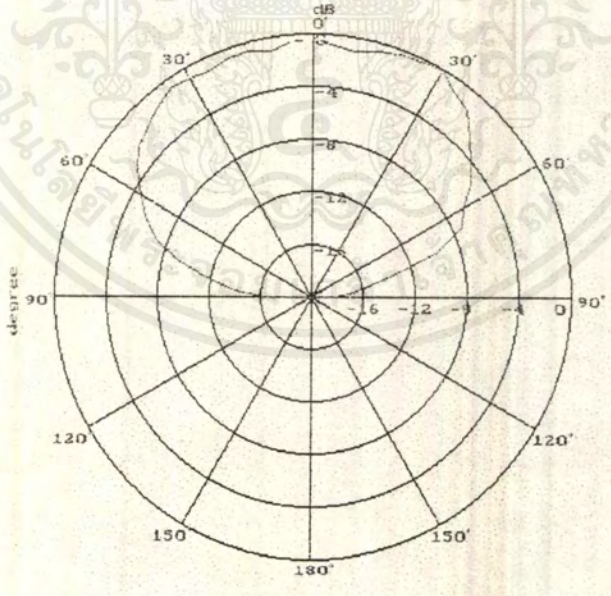


รูปที่ 4. 15 ผลการวัด SWR ของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช



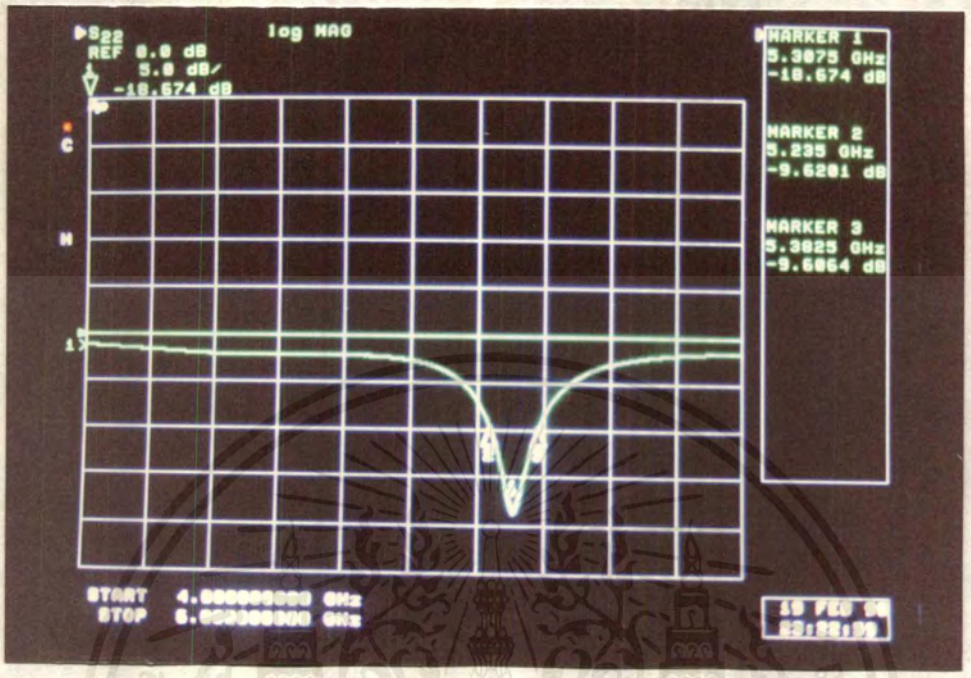
รูปที่ 4. 16 ผลการวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า ของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz



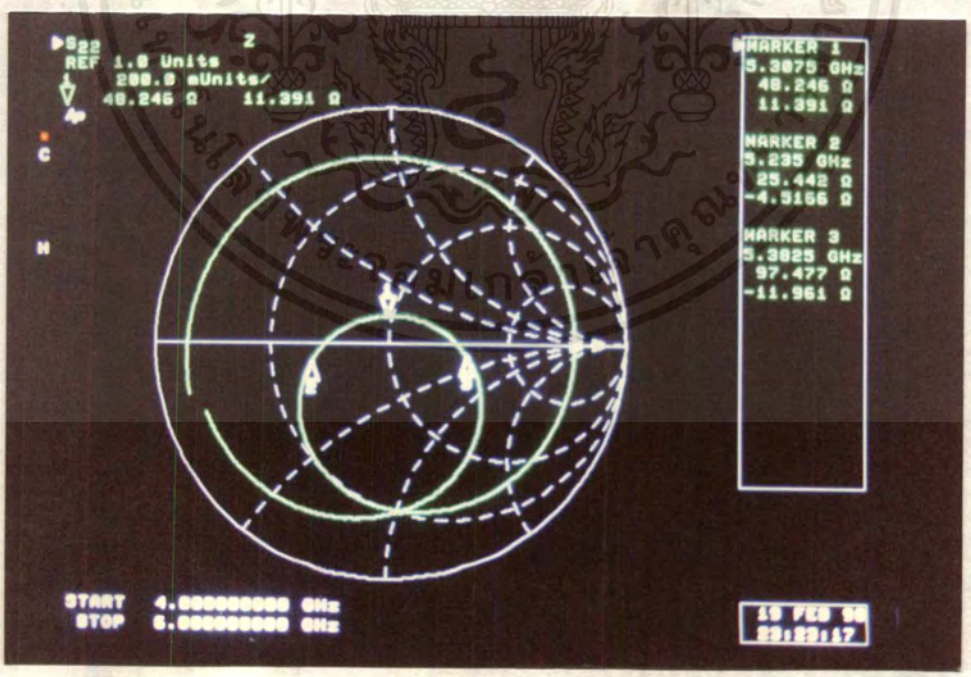
รูปที่ 4. 17 ผลการวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก ของสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช

4.2.2 ผลการทดลองของสายอากาศรูปทรงวงกลม

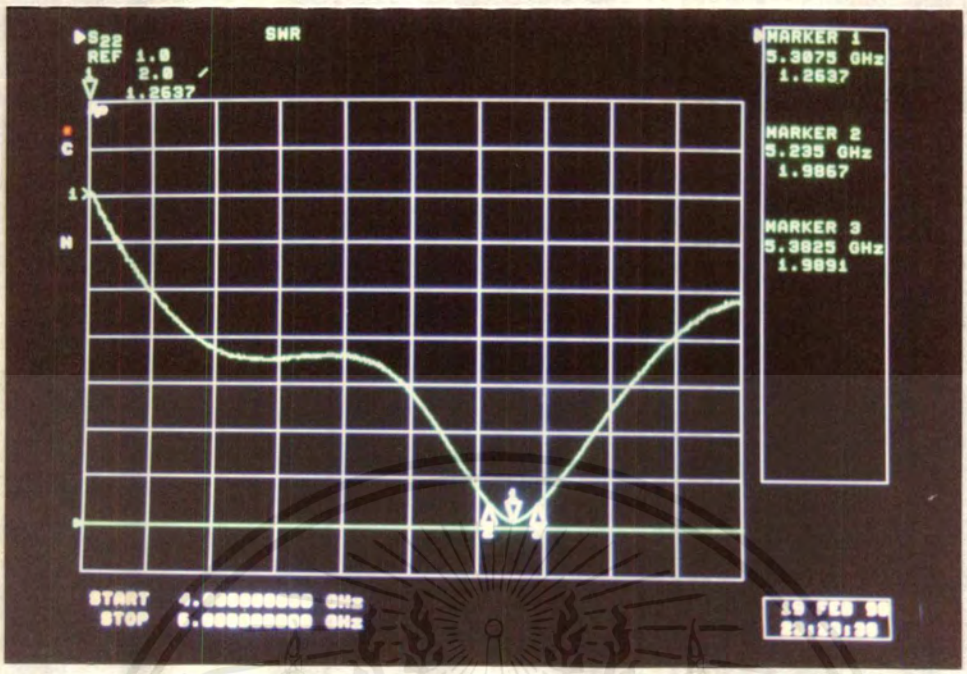


รูปที่ 4. 18 ผลการวัด S-พารามิเตอร์ของสายอากาศรูปทรงวงกลมที่ออกแบบที่ความถี่ 5 GHz

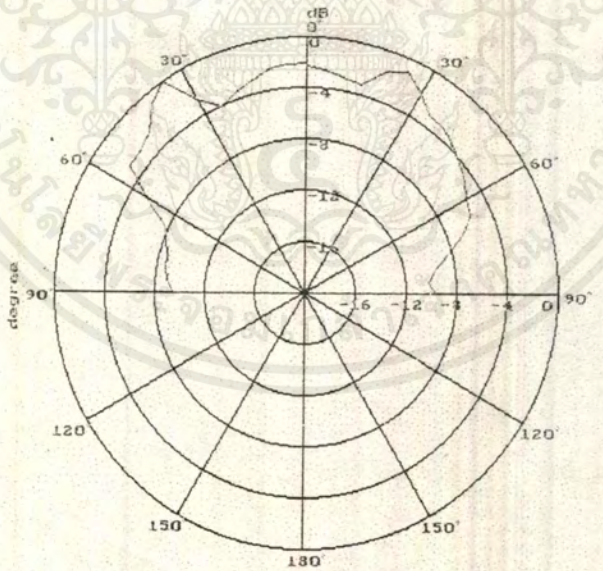


รูปที่ 4. 19 ผลการวัดอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศรูปทรงวงกลมที่ออกแบบที่ความถี่ 5 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

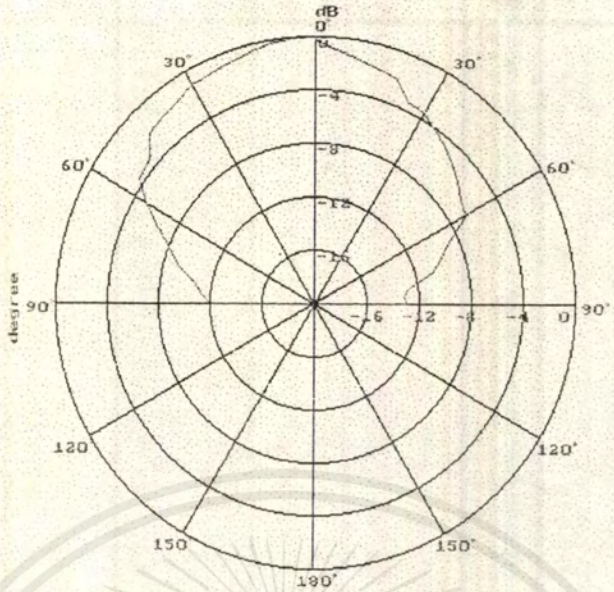


รูปที่ 4. 20 ผลการวัด SWR ของสายอากาศรูปทรงวงกลมที่ออกแบบที่ความถี่ 5 GHz

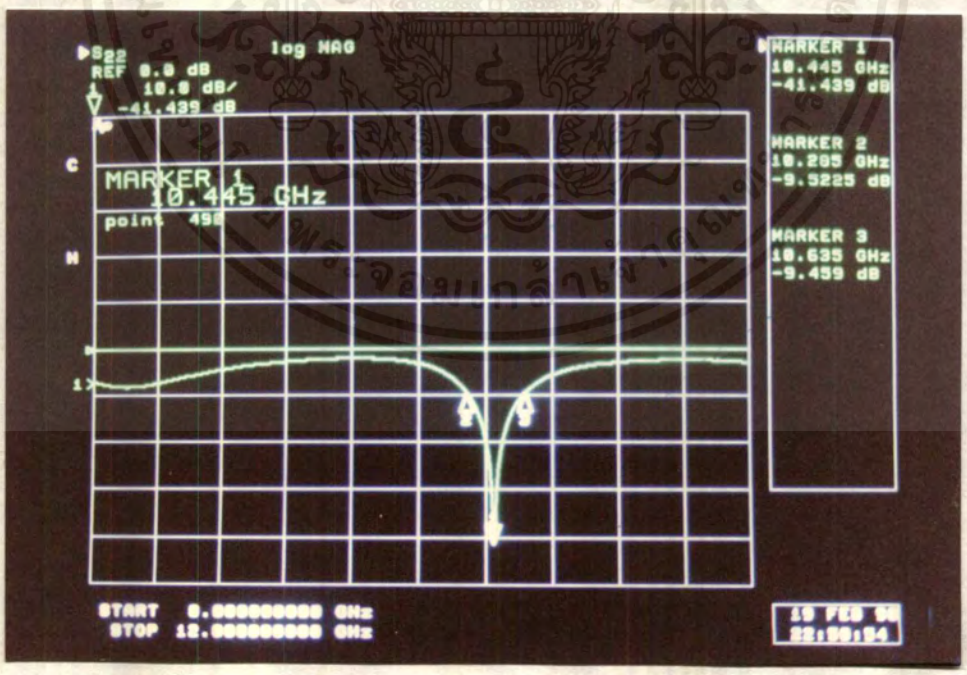


รูปที่ 4. 21 ผลการวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า ของสายอากาศรูปทรงวงกลม ที่ออกแบบที่ความถี่ 5 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

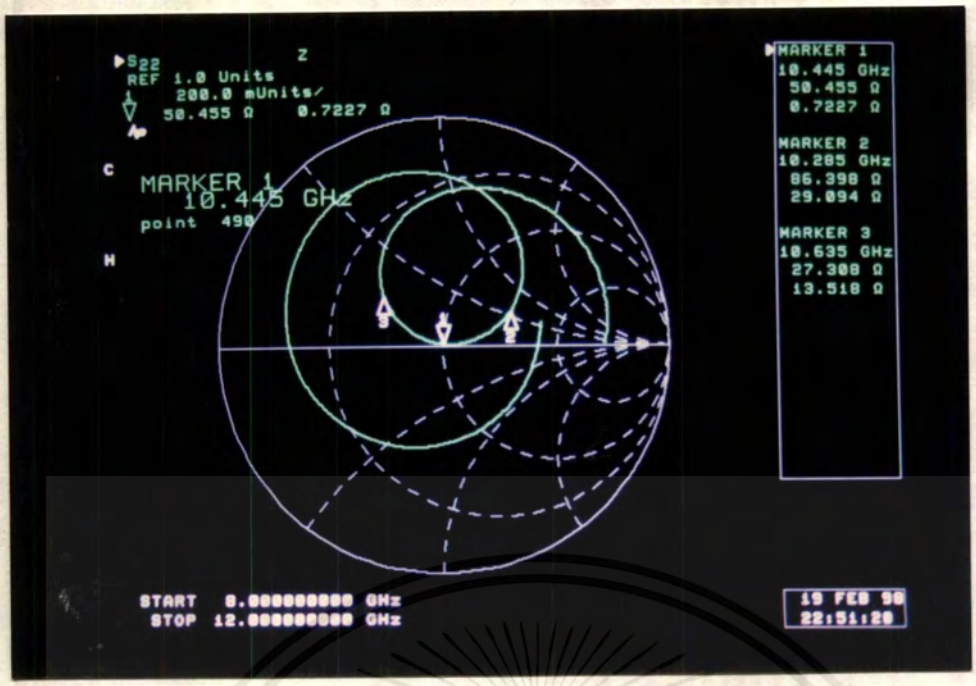


รูปที่ 4. 22 ผลการวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก ของสายอากาศรูปทรงวงกลมที่ออกแบบที่ความถี่ 5 GHz

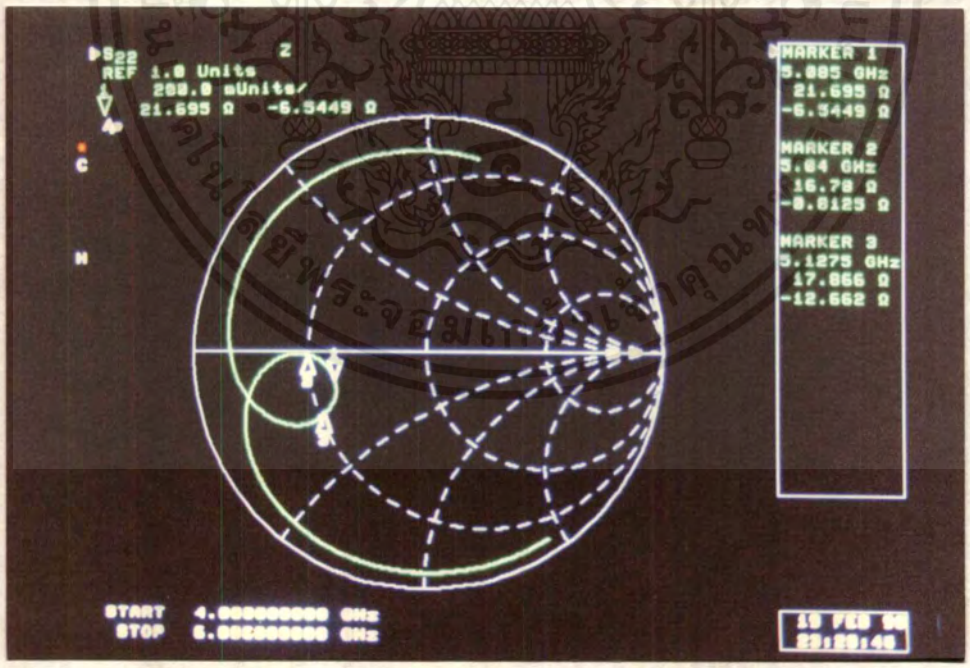


รูปที่ 4. 23 ผลการวัด S-พารามิเตอร์ของสายอากาศรูปทรงวงกลมที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

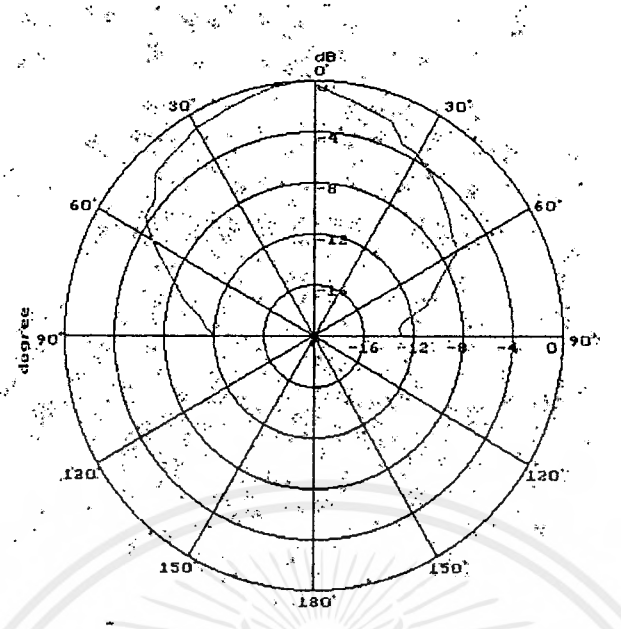


รูปที่ 4. 24 ผลการวัดอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศรูปทรงวงกลมที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz

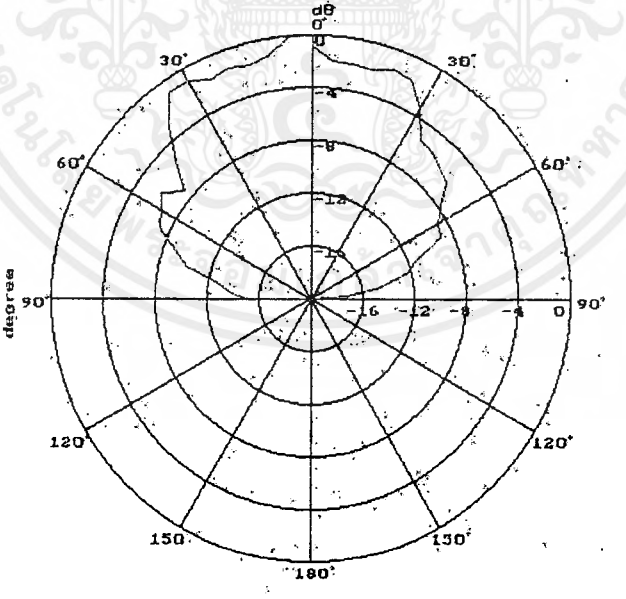


รูปที่ 4. 25 ผลการวัด SWR ของสายอากาศรูปทรงวงกลมที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4. 26 ผลการวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า ของสายอากาศรูปทรงวงกลม ที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz



รูปที่ 4. 27 ผลการวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก ของสายอากาศรูปทรงวงกลม ที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทวิจารณ์และบทสรุป

ในการสร้างสายอากาศไมโครสตริปทั้ง 4 อัน เพื่อเรียนรู้ถึงลักษณะการตอบสนองความถี่ ค่า SWR และค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ และนำผลที่ได้จากการทดลองมาสรุปเป็นตารางไว้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่5. 1 สรุปผลการทดลอง

	ชิ้นงาน 1	ชิ้นงาน 2	ชิ้นงาน 3	ชิ้นงาน 4
ลักษณะแผ่นตัวนำ	สี่เหลี่ยมผืนผ้า	สี่เหลี่ยมผืนผ้า	วงกลม	วงกลม
สายส่งสัญญาณ	สองตอน	สองตอน	สามตอน	สามตอน
ความถี่ที่ออกแบบ (GHz)	5	10	5	10
ความถี่ตอบสนอง (GHz)	5.085	10.04	5.3075	10.445
S_{22} (dB)	-7.8835	-23.676	-18.674	-41.439
SWR (dB)	2.3529	1.1401	1.2637	1.0171
อินพุทอิมพีแดนซ์ (Ω)	21.695-j6.5449	56.668+j2.084	48.246+j11.391	50.455+j0.7227
ไดเรคทิวิตี้	3.571	3.136	4.167	4.170

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่า ความถี่ที่ตอบสนองจริงของชิ้นงาน 1 และ ชิ้นงาน 2 จะใกล้เคียงกับความถี่ที่ออกแบบไว้มากกว่า ชิ้นงาน 3 และ ชิ้นงาน 4 ทั้งนี้เป็นเพราะค่าเพอร์มิททิวิตี้ที่ใช้ในการออกแบบ (เท่ากับ 4.735) ได้มาจากการทดลองสร้างสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า แล้วปรับสูตรที่ใช้เพื่อให้หาค่าเพอร์มิททิวิตี้ที่ถูกต้องมากขึ้น แต่เนื่องจากสูตรที่ใช้สร้างสายอากาศแบบวงกลมไม่เหมือนกับแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังนั้น การใช้ค่าเพอร์มิททิวิตี้เดียวกันจึงทำให้ได้ความถี่ตอบสนองของสายอากาศแบบวงกลมไม่ค่อยตรงกับความถี่ที่ออกแบบไว้

ในการพิจารณาค่า S-พารามิเตอร์จะพบว่า ชิ้นงานที่ 3 มีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ 1 และชิ้นงานที่ 4 มีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ 2 ทำให้สรุปได้ว่าการใช้แบบจำลองคาวิตี้จะได้ค่า S-พารามิเตอร์ต่ำกว่าการใช้แบบจำลองสายส่ง ซึ่งจะส่งผลให้มีประสิทธิภาพดีกว่าด้วย

สำหรับปัญหาที่พบในการสร้างสายอากาศไมโครสตริปก็คือ เมื่อมีการคำนวณออกมาได้แต่ว่าขนาดที่คำนวณนั้นเล็กเกินไปที่จะใช้กรดกัดได้ จึงต้องหาทางออกแบบให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เช่น ในที่นี้ที่ออกแบบให้มีขนาดของสายส่งไมโครสตริปแตกต่างกัน (แบบสองส่วนกับแบบสามส่วน) ก็เพราะว่าเมื่อได้ลองออกแบบสายส่งไมโครสตริปแบบสองส่วนกับ สายอากาศแบบวงกลม จะได้ว่าความกว้างของส่วน $\frac{\lambda}{4}$ จะมีขนาดเพียง 2.828948×10^{-5} เมตร ซึ่งมีขนาดเล็กมาก อาจจะเกิดการผิดพลาดได้ถ้าการกัดแผ่นอีพ็อกซีไม่แน่นอนเพียงพอ

แต่เมื่อมีการออกแบบให้สายส่งไมโครสตริปมีสามส่วน จะได้ขนาดความกว้างของตอนแรก $\frac{\lambda}{4}$ มีค่าเท่ากับ 3.08×10^{-4} เมตร ซึ่งจะมีขนาดใหญ่กว่า และมีขนาดเพียงพอสำหรับการกัดแผ่นอีพ็อกซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงคุณสมบัติของสารตัวกลางบางชนิด (1)

Material	ε_r (Approx.)	$\tan\delta \times 10^{-4}$ at 10 GHz	Surface roughness (μm)	Thermal conductivity,K (W/cm/ °C)
RT-duroid 5880	2.16 - 2.24	5 - 15	0.75 - 1.0 * 4.25 - 8.75 **	0.0026
RT-duroid 6010	10.2 - 10.7	10 - 60	- do -	0.0041
Epsilam - 10	10 - 13	20	—	0.0037
Alumina 99.5 %	9.6 - 10.4	0.5 3	0.05 - 0.25	0.37
Fused quartz 99.9%	3.75 - 3.8	1	0.006 0.025	0.01
Beryllia (BeO)	6.6	1	0.05 - 1.25	2.5
Glass	5	20	0.025	0.01
Kapton	3 - 3.5	—	—	—
Cu-flon	2.1	4.5	—	—
Rutile (TiO_2)	100	4	0.25 - 2.5	0.02
Ferrite/garnet	13 - 16	2	0.25	0.03
Sapphire(single crystal)	$\in r_{\perp} = 9.4$ $\in r_{\perp} = 11.6$	0.4 - 0.7	0.005 - 0.025	0.4
Pyrolytic boron nitride	$\in r_{\perp} = 3.4$ $\in r_{\perp} = 5.12$	—	—	—

*Average peak to valley difference in height (rolled copper).

** Average peak to valley difference in height (electro - deposited copper).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงคุณสมบัติของสารตัวกลางบางชนิด (2)

Material	Relative Permittivity (ε_r) at 10 GHz	Loss Factor (tan δ) at 10 GHz	Material	Relative Permittivity (ε_r) at 10 GHz	Loss Factor (tan δ) at 10 GHz
Alumina99.5% Al_2O_3	9.5 - 10	0.0003	RT/Duroid 5870	2.33±0.02	0.0012
Alumina96% Al_2O_3	8.9	0.0006	RT/Duroid 5880	2.2	0.0009
Alumina85% Al_2O_3	8.0	0.0015	RT/Duroid 6002	2.94	0.0012
Beryllia BeO	6.4	0.0003	RT/Duroid 6006	6.0 ±0.15	0.0019
			RT/Duroid6010.5	10.5 ±0.25	0.0024
(Zr,Sn)TiO4	38	< 0.0001	Ultralam 2000	2.5 ± 0.05	0.0022
BaO—PbO— Nd_2O_3— TiO_4	88	< 0.0001			
DI-MIC CF	21.6 ± 0.6	0.0003	TMM-3	3.25	0.0016
DI-MIC CB	29.0 ± 0.7	0.0004	TMM-4	4.5	0.0017
DI-MIC CD	37.0 ± 1	0.0004	TMM-6	6.5	0.0018
DI-MIC CG	67.5 ± 2	0.0008	TMM-10	9.8	0.0017
DI-MIC NR	152.0 ± 5	0.0010	TMM-13	12.85	0.0019
Trans-Tech D-MAT	8.9 - 14	< 0.0002			
Trans-Tech D-450	4.5	< 0.0004	Arlon DiClad 527	2.5±0.04	0.0019
Trans-Tech S-145	10.0	< 0.0002	Arlon DiClad 870	2.33±0.04	0.0012
Trans-Tech S8400	10.5	< 0.0001	Arlon DiClad 880	2.20±0.04	0.0009
Trans-Tech S8500	38.0	< 0.0001	Arlon DiClad 810	10.5±0.25	0.0015
Trans-Tech S8600	80.0	< 0.0003	Arlon Epsilam -10	10.2±0.25	0.0020
			Arlon CuClad 250	2.4 -2.6	0.0018
Polypropylene	2.18 ±0.05	0.0003	Arlon CuClad 233	2.33±0.02	0.0014
			Arlon CuClad 217	2.17±0.02	0.0008
Silicon Si (10^3 Ω-m)	11.9	0.0004	Arlon IsoClad 917	2.17±0.02	0.0011
GaAs (>10^3 Ω-m)	13.0	0.0006	Arlon IsoClad 933	2.33±0.02	0.0014
Ferrite	9.6-16.0	≈ 0.0010	Epoxy FR4 GE313	4.4	≈0.0100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือของ รองศาสตราจารย์ ฉรงค์ เหมกรณ์ ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นที่ปรึกษาในโครงงาน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นิภา ลีลารุจิ ที่ช่วยในด้านเอกสารข้อมูลในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ อาจารย์ สถาพร พรหมวงศ์ ที่เป็นผู้อำนวยสถานที่, อุปกรณ์ และข้อมูลในการทำโครงงานวิจัยจนสำเร็จ อาจารย์ มนต์ชัย แช่มช้อย ที่เป็นผู้เพิ่มเติมข้อมูลจนสมบูรณ์ ซึ่งทางคณะผู้จัดทำขอขอบคุณเป็นอย่างสูง ณ ที่นี้

นายปรเมษฐ วิสุทธิธรรม

นายรัชพงษ์ พรวิริยางกูร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. Feed Gardiol, "Microstrip Circuits", A Wiley-Interscience Publication, pp.199-212, 1992
2. Kazuhiro Hirasawa, Misao Haneishi, "Analysis, Design, And Measurement Of Small And Lowprofile Antennas", Artech House, pp.53-82, 1992
3. P. B Wartia, K.V.S. Rao, R.S. Tomar, "Millimeter-wave Microstrip And Printed Circuit Antennas", Artech House, pp. 1-7, 1991
4. K.C. Gupta, Ramesh Garg, Inder Bahl, Prakash Bhartia, "Microstrip Lines And Slotlines", Artech House, pp. 61-152, 1991
5. A.W. Rudge, K milne, A.D. Oliver, P.Knight , "The Hand Book Of Antenna Design", England By Page Bros, pp. 527-543, 1992
6. Harlan Howe,JR., "Stripline Circuit Design", Artech House, pp. 69-75, 1991
7. Brian C. Wadell, "Transmission Line Design Handbook", Artech House, pp.93-105, 1991

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้