



การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป
Analysis of Microstrip Antenna Properties

โดย

นาย ธนวิทย์ ทิพย์เสวต

นาย วิชัย มโนศิลป์กร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

พ.ศ.
ค.ศ.
๒๕๔๗

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....50085

วัน,เดือน,ปี 2 1 เม.ย. 2547

b.....11374318
i.....

การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป

Analysis of Microstrip Antenna Properties

โดย

นาย ธนวิทย์ ทิพย์เสวต 43015068

นาย วิชัย มโนศิลป์กร 43015084

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

รศ.ดร. จเร สุรวัดณ์ปัญญา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

ปริญญาโทปีการศึกษา 2545

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

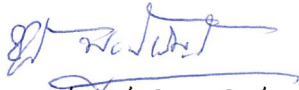
เรื่อง การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป

Analysis of Microstrip Antenna Properties

ผู้จัดทำ

1: นาย ธนวิทย์ ทิพย์เสวต 43015068

2: นาย วิชัย มโนศิลป์กร 43015084


(ดร. ชuwong พงศ์เจริญพาณิชย์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.จเร สุรวัฒน์ปัญญา)

อาจารย์ที่ปรึกษา

การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป

Analysis of Microstrip Antenna Properties

โดย 1 นาย ธนวิทย์ ทิพย์เสวต 43015068

2 นาย วิชัย มโนศิลป์กร 43015084

อาจารย์ที่ปรึกษา คร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

รศ.ดร. จเร สุรวัฒน์ปัญญา

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นกรนำการศึกษา คำนวณ วิเคราะห์ ออกแบบ สร้างและทดสอบสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งสายอากาศชนิดนี้มีข้อดีคือ สามารถสร้างได้ง่าย ราคาถูก และมีลักษณะแบนราบกับโครงสร้างที่ติดตั้งโดยในโครงการนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นความกว้างของลำคลื่นค่าสภาพเจาะจงทิศทาง การโพลาไรซ์ คุณลักษณะอิมพีแดนซ์ ค่าการสูญเสียย้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปรูปแบบต่างๆที่องค์ประกอบเดียวกันก่อนและพัฒนาเป็นสายอากาศแถวลำดับ โดยสายอากาศที่วิเคราะห์มีประโยชน์ในการใช้เป็นสายอากาศที่มีอัตราการขยายสูงสำหรับการสื่อสารจุดต่อจุดระยะไกล

Abstract

This project presents the study, calculation, analysis, design, fabrication and measurement of microstrip antenna. The merit of this antenna is simple structure, low cost and low profile configuration. This project analyses the radiation characteristics such as radiation pattern, beamwidth, directivity as well as impedance characteristics such as input impedance, return loss and standing wave ratio for various geometries of microstrip antennas. The analysis is done for single element and subsequently array arrangement. The analysis results are very useful for the application of high gain antennas for far distance point to point communications.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
สารบัญ	II
สารบัญภาพ	III
สารบัญตาราง	IX
บทที่1 บทนำ	1
บทที่2 ทฤษฎีและหลักการ	2
2.1 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป	2
2.2 รูปแบบการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศด้วยวิธีต่างๆ	3
2.3 แบบจำลองของสายส่งไมโครสตริป	4
2.4 ปรากฏการณ์ฟริงกิง (Fringing Effect)	8
2.5 การวิเคราะห์สายอากาศที่มีแผ่นแพร่กระจายคลื่นป็นรูปสี่เหลี่ยม	9
2.6 การวิเคราะห์สายอากาศที่มีแผ่นแพร่กระจายคลื่นป็นรูปวงกลม	11
2.7 วงจรป้อนสัญญาณแถวลำดับ	14
2.8 สายอากาศแถวลำดับ (Antenna Array)	19
บทที่3 การคำนวณและการออกแบบ	21
3.1 การคำนวณและการออกแบบสายอากาศที่มีแผ่นแพร่กระจายคลื่นป็นรูปสี่เหลี่ยม	21
3.2 การคำนวณและการออกแบบสายอากาศที่มีแผ่นแพร่กระจายคลื่นป็นรูปวงกลม	32
3.3 การออกแบบควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์	42
3.4 การออกแบบวงจรแบ่งกำลังสี่ทิศทางด้วยวงจรแบ่งกำลังแบบวิลคินสัน	43
บทที่4 การสร้างการทดสอบและผลการทดสอบ	46
4.1 การทดสอบวัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ	47
4.2 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	54
บทที่5 สรุปและวิจารณ์	60
ภาคผนวก	63
การทดลองหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของแผ่นปริ้นซ์	64
การเลือกสารขับสเตรท	66
วิธีการใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	68
สัญลักษณ์	70
กิตติกรรมประกาศ	72
เอกสารอ้างอิง	73

สารบัญภาพ

	หน้า	
รูปที่ 2.1	โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศแบบไมโครสตริป	2
รูปที่ 2.2	แผ่นตัวนำรูปแบบต่าง ๆ	2
รูปที่ 2.3	สายส่งสัญญาณแบบต่าง ๆ	3
รูปที่ 2.4	สายอากาศแบบรูปสี่เหลี่ยมและวงจรมุมลู่	4
รูปที่ 2.5	ความหนาแน่นกระแสที่บริเวณด้านทั้งสี่	7
รูปที่ 2.6	สายส่งไมโครสตริปและลักษณะเส้นแรงสนามไฟฟ้า	9
รูปที่ 2.7	ลักษณะของไมโครสตริปชนิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก	9
รูปที่ 2.8	ลักษณะของไมโครสตริปชนิดวงกลม	11
รูปที่ 2.9	ส่วนป้อนสัญญาณให้สายอากาศแถวลำดับ (a) แบบอนุกรม (b) แบบขนาน	15
รูปที่ 2.10	วงจrab่งกำลังสองทางแบบ (a) ตัวที่ (b) วงจrab่งกำลังแบบวิลคินสัน	16
รูปที่ 2.11	(a) วงจrab่งกำลังวินคินสัน (b) วงจรในโหมดคี่ (c) วงจรโหมดคู่	18
รูปที่ 2.12	วงจrab่งกำลัง N ทางแบบวิลคินสัน	19
รูปที่ 2.13	การจัดเรียงสายอากาศแถวลำดับแบบระนาบ	20
รูปที่ 3.1	สายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก 1 องค์ประกอบ	23
รูปที่ 3.2	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมในระนาบไฟฟ้า	24
รูปที่ 3.3	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมในระนาบสนามแม่เหล็ก	24
รูปที่ 3.4	ความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยม	24
รูปที่ 3.5	ความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยม	25
รูปที่ 3.6	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยม 2 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน x	25
รูปที่ 3.7	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยม 2 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน x	25
รูปที่ 3.8	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยม 2 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน x	26
รูปที่ 3.9	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยม 4 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน x	26
รูปที่ 3.10	ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเมื่อมีการจัดเรียงสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมในแนวแกน x ในแนวแกน x ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์ประกอบ	26
รูปที่ 3.11	ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อมีการจัดเรียงสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมในแนวแกน x ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์ประกอบ	27

สารบัญญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.28	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมในระนาบสนามไฟฟ้า	33
รูปที่ 3.29	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมในระนาบสนามแม่เหล็ก	33
รูปที่ 3.30	ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้า ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม	34
รูปที่ 3.31	ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบสนามแม่เหล็ก ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม	34
รูปที่ 3.32	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปวงกลม 2 องค์กรประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน x	34
รูปที่ 3.33	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปวงกลม 2 องค์กรประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน x	35
รูปที่ 3.34	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปวงกลม 4 องค์กรประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน x	35
รูปที่ 3.35	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปวงกลม 4 องค์กรประกอบ มาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน x	35
รูปที่ 3.36	ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเมื่อมีการจัดเรียงสายอากาศไมโครสตริปวงกลม ในแนวแกน x ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์กรประกอบ	36
รูปที่ 3.37	ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อมีการจัดเรียง สายอากาศไมโครสตริปวงกลมในแนวแกน x ตั้งแต่ 2 ถึง 10 ตัว	36
รูปที่ 3.38	ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงต่ำสุดครั้งแรกเมื่อมีการจัดเรียง สายอากาศไมโครสตริปวงกลมในแนวแกน x ตั้งแต่ 2 ถึง 10 ตัว	36
รูปที่ 3.39	ค่าอัตราส่วนกำลังคลื่นหลักต่อกำลังคลื่นย่อยเมื่อมีการจัดเรียง สายอากาศไมโครสตริปวงกลมในแนวแกน x ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์กรประกอบ	37
รูปที่ 3.40	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปวงกลม 2 องค์กรประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน y	37
รูปที่ 3.41	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปวงกลม 2 องค์กรประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน y	37
รูปที่ 3.42	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปวงกลม 4 องค์กรประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน y	38
รูปที่ 3.43	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปวงกลม 4 องค์กรประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน y	38
รูปที่ 3.44	ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเมื่อมีการจัดเรียงสายอากาศไมโครสตริปวงกลม ในแนวแกน y ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์กรประกอบ	38

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.45 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อมีการจัดเรียง สายอากาศไมโครสตริปวงกลมในแนวแกน y ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์กรประกอบ	39
รูปที่ 3.46 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงต่ำสุดครั้งแรกเมื่อมีการจัดเรียง สายอากาศไมโครสตริปในแนว แกน y ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์กรประกอบ	39
รูปที่ 3.47 ค่าอัตราส่วนกำลังคลื่นหลักต่อกำลังคลื่นย่อยเมื่อมีการจัดเรียง สายอากาศไมโครสตริปวงกลมในแนวแกน y ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์กรประกอบ	39
รูปที่ 3.48 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบจำนวน 4 องค์กรประกอบ	40
รูปที่ 3.49 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบจำนวน 4 องค์กรประกอบ	40
รูปที่ 3.50 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบจำนวน 9 องค์กรประกอบ	40
รูปที่ 3.51 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบจำนวน 9 องค์กรประกอบ	41
รูปที่ 3.52 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบจำนวน 16 องค์กรประกอบ	41
รูปที่ 3.53 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบจำนวน 16 องค์กรประกอบ	41
รูปที่ 3.54 สายควอเตอร์เวฟทรานฟอร์มเมอร์ซึ่งต่ออยู่กับสายไมโครสตริป 50 โอห์ม	43
รูปที่ 3.55 โครงสร้างของวงจรแบ่งกำลังวิลคินสัน 2 ทิศทาง	44
รูปที่ 3.56 แสดงวงจรแบ่งแยกกำลังแบบ 4 เอด์พุท	44
รูปที่ 3.57 แสดงวงจรแบ่งแยกกำลังแบบ 4 เอด์พุทที่ใช้งานจริง	44
รูปที่ 4.1 สายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมและสายอากาศไมโครสตริปวงกลม	46
รูปที่ 4.2 สายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมและสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแถวลำดับแบบระนาบ	46
รูปที่ 4.3 แสดงการเชื่อมต่อในการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและอิมพีแดนซ์ด้วย เครื่อง โครงข่ายวิเคราะห์	47
รูปที่ 4.4 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมตัวที่ 1	47
รูปที่ 4.5 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมตัวที่ 2	47
รูปที่ 4.6 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมตัวที่ 1	48
รูปที่ 4.7 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมตัวที่ 2	48
รูปที่ 4.8 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมตัวที่ 1	49
รูปที่ 4.9 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมตัวที่ 2	49
รูปที่ 4.10 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมตัวที่ 1	49

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.33 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม
แถวลำดับเชิงระนาบจำนวน 4 องค์ประกอบในระนาบสนามแม่เหล็ก

58

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่า X_{mn} ที่โหนดต่างๆ	12
ตารางที่ 5.1 ค่าคุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	60
ตารางที่ 5.1 ค่าคุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	60

บทที่ 1

บทนำ

สายอากาศไมโครสตริป คือ สายอากาศชนิดแผ่นที่มีแผ่นตัวนำรูปแบบต่างๆ เรียกว่า Patch ติดอยู่บนสารไดอิเล็กตริกที่เรียกว่า Substrate ซึ่งวางอยู่บนแผ่นตัวนำที่เรียกว่า Ground Plane โดยสายอากาศไมโครสตริปอันแรกถูกสร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1970 โดยนายโฮเวล (Howell) และนายมุนสัน (Munson) โดยสายอากาศไมโครสตริปในระยะแรกถูกสร้างขึ้นจากแผ่นวัสดุที่มีขนาดบาง และสารตัวกลางมีค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารไดอิเล็กตริกสูงมากทำให้มีช่วงความถี่ใช้งานแคบ ซึ่งค่าที่ได้เหล่านี้สามารถคำนวณได้จากสมการทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายได้ต่อมาได้มีการพัฒนาเป็นแบบ แถวลำดับ (Array) เพื่อให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น

สายอากาศไมโครสตริปถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในระยะหลัง เนื่องจากมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์และไฟฟ้าที่ดีหลายอย่าง เช่น เป็นแผ่นแบนเรียบ ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูก ง่ายต่อการปรับการแมชชิง สามารถดัดแปลงโพลาริเซชันได้ง่าย และสร้างได้ง่ายโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ เนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปมีขนาดเล็กจึงเหมาะสำหรับทำวงจรรวมของไมโครเวฟ (microwave integrated circuit: MIC) แต่มีข้อจำกัดที่สามารถรับกำลังงานได้ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับท่อนำคลื่น นอกจากนี้ยังมีค่าการลดทอนค่อนข้างสูงขึ้นจึงใช้ในการส่งผ่านและจัดการกับสัญญาณที่มีระดับต่ำและในบริเวณจำกัดหรืออุปกรณ์ที่มีพื้นที่จำกัดในการติดตั้งสายอากาศ เช่น ใช้เป็นสายส่งภายในแผ่นวงจรพิมพ์เดียวกัน ติดตั้งในโทรศัพท์เคลื่อนที่

ถึงแม้สายอากาศไมโครสตริปจะมีข้อเสียหลายอย่าง คือ

1. มีการสูญเสียมาก ทำให้อัตราการขยายต่ำ
2. การเก็บพลังงานได้น้อยทำให้ไม่สามารถส่งพลังงานไปได้มากนัก
3. ช่วงความถี่ใช้งานแคบ
4. ส่วนมากแพร่กระจายคลื่นในทิศทางระนาบเดียว คือไม่แพร่กระจายรอบทิศทาง
5. มีการสูญเสียอย่างมากระหว่างส่วนป้อนสัญญาณ และส่วนที่แพร่กระจายคลื่น

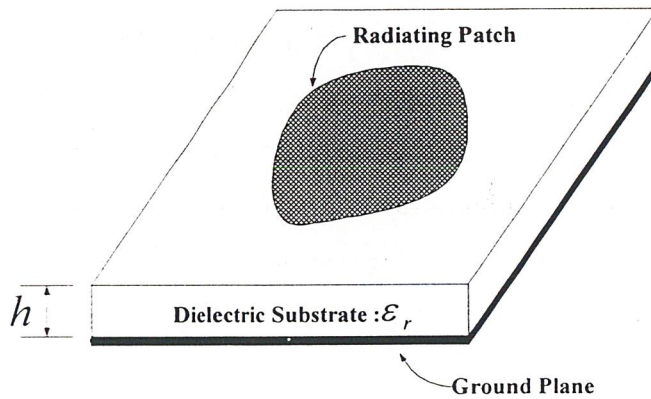
แต่สายอากาศไมโครสตริปก็ยังสามารถได้รับความนิยมในด้านโทรคมนาคม เนื่องจากคุณสมบัติในด้านขนาดที่มีขนาดเล็กไม่ต้านลมน้ำหนักเบา และยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานจริงด้วยการนำสายอากาศมาจัดเรียงกันเป็นแถวลำดับ

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

สายอากาศไมโครสตริปนั้นสามารถมีรูปร่างได้หลายรูปแบบทำให้วิธีการคำนวณเพื่อให้ได้ความถี่ตามที่ต้องการมีหลายรูปแบบด้วยกันซึ่งแต่ละรูปแบบก็มีความเหมาะสมกับสายอากาศแต่ละแบบของสายอากาศแตกต่างกันไป สำหรับในบทที่ 2 นี้จะอธิบายถึงโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปและวิธีในการคำนวณแบบต่างๆ

2.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

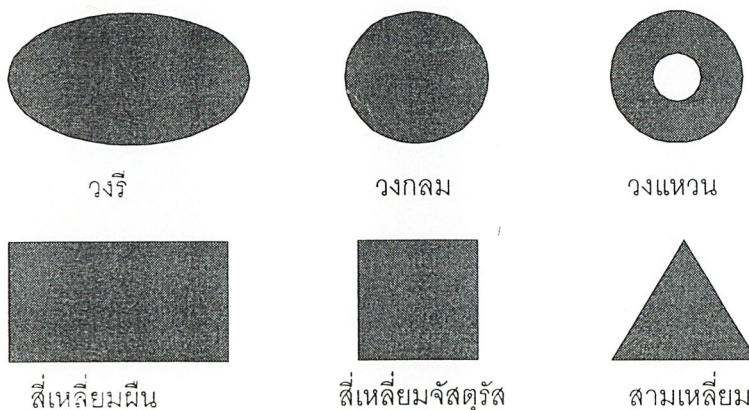


รูปที่ 2.1 โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศแบบไมโครสตริป

ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งปกติแล้วสามารถออกแบบได้หลากหลายรูปแบบแต่ลักษณะโดยทั่วไปแล้วจะต้องประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 4 ส่วนด้วยกัน คือ

2.1.1 แผ่นตัวนำ (patch)

เป็นแผ่นโลหะที่บางมากโดยปกติแล้วความหนาจะมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่นที่อยู่ในอากาศมาก (ความยาวคลื่นของความถี่ที่ออกแบบ) ซึ่งการออกแบบรูปร่างและขนาดของแผ่นตัวนำ จะทำให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ต้องการและรูปร่างของแผ่นตัวนำก็มีด้วยกันหลายอย่าง เช่น สี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัส สามเหลี่ยม วงกลม วงรี หรือรูปวงแหวนดังรูปที่ 2.2 สำหรับตัวนำแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัสและวงกลม จะเป็นรูปแบบที่พบได้บ่อยเพราะเป็นรูปแบบที่สามารถสร้างและคำนวณได้ง่ายกว่ารูปแบบอื่น



รูปที่ 2.2 แผ่นตัวนำรูปแบบต่างๆ

2.1.2 สารตัวกลาง (medium)

มีลักษณะเป็นไดอิเล็กตริกมีค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารไดอิเล็กตริกมีอยู่ระหว่าง 2.2 ถึง 12 ซึ่งสารที่มีความหนา มากกว่าค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารไดอิเล็กตริกต่ำ ให้ช่วงความถี่ใช้งานมากกว่าและให้ประสิทธิภาพมากกว่า แต่จะทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนสารที่ค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารไดอิเล็กตริกสูงจะมีความหนาน้อยแต่จะมีค่าความสูญเสีย มากกว่า ทำให้ประสิทธิภาพด้อยกว่าและให้ช่วงความถี่ใช้งานน้อยกว่า แต่จะเหมาะกับอุปกรณ์ที่เกี่ยวกับคลื่น ความถี่ไมโครเวฟ

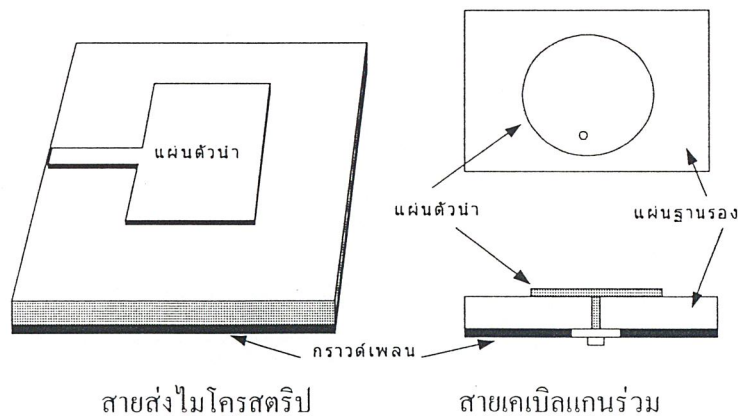
สารตัวกลางที่ใช้กันโดยทั่วไปคือ PTEF ซึ่งถูกสร้างด้วยโครงสร้างเสริมไฟเบอร์กลาสจะค่าคงที่สัมพัทธ์ ของสารไดอิเล็กตริกมีประมาณ 2.5 บางครั้งอาจใช้สารคล้ายรวงผึ้งที่มีความหนาแน่นต่ำแทนซึ่งจะมีค่าเข้าใกล้ 1 และ ทำให้ได้ประสิทธิภาพดีกว่า

2.1.3 แผ่นระนาบตัวนำ (Ground Plane)

แผ่นระนาบตัวนำจะต้องกว้างกว่าแผ่นตัวนำมากโดยจะติดอยู่อีกด้านหนึ่งของสารตัวกลาง(คนละด้านกับ - แผ่นตัวนำ) และทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น

2.1.4 ส่วนป้อนสัญญาณ (Feeder)

จะใช้สายส่งสัญญาณชนิดต่างๆ เป็นตัวป้อนสัญญาณแก่สายอากาศ และสามารถปรับค่าแมทซิ่ง(Matching) เพื่อให้สายอากาศมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม นอกจากนั้นยังใช้ปรับการโพลาไรซ์ได้อีกด้วย โดยตำแหน่งและความยาวของ ส่วนป้อนสัญญาณจะมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่น วิธีการป้อนสัญญาณมีได้หลายรูปแบบ เช่น



รูปที่ 2.3 สายส่งสัญญาณแบบต่าง ๆ

2.2 รูปแบบการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศด้วยวิธีต่าง ๆ

สายส่งไมโครสตริป (Microstrip Line Feed)

วิธีที่ง่ายที่สุดในการป้อนสัญญาณ ก็คือการใช้แผ่นไมโครสตริป และสายส่งไมโครสตริปต่อกับตัวกลาง โดยตรงแต่วิธีนี้จะได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติไม่ค่อยดีนักเพราะ โครงสร้างของสายอากาศและสายส่งไมโครสตริป จะไม่สอดคล้องกันกล่าวคือ สายอากาศแบบนี้จะส่งคลื่นได้ไม่ดีนัก เนื่องจากมีผิวโลหะที่ไม่ต่อเนื่องกัน ทำให้ระดับ ของคลื่นในทิศทางด้านข้างทิศทางหลัก (Side Lobe Level) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะไปลดคุณภาพของสายอากาศ นอกจากนี้ ช่วงความถี่ที่ใช้งานจะกว้างขึ้นด้วย เนื่องจากมีพลังงานจำนวนมากสะสมอยู่ ภายใต้อันตัวนำ (Cavity Effect) แต่สายส่งชนิดนี้สามารถปรับแมทซิ่งในตัวเองได้และยังสามารถสร้างได้ง่ายโดยทำการสร้างไปพร้อมกับแผ่นตัวนำ ที่ใช้ในการส่งคลื่นได้เลย

สายเคเบิลแกนร่วม (Coaxial Feed)

ในการใช้สายเคเบิลแกนร่วมเป็นตัวป้อนสัญญาณจะต้องต่อสายนำสัญญาณให้ตั้งฉากกับแผ่นตัวนำโดยตัวนำด้านในจะต่ออยู่กับตัวนำด้านบนและตัวนำด้านนอกจะต่ออยู่กับแผ่นระนาบตัวนำ ซึ่งจากการศึกษาจะพบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟ (สัญญาณ) ผ่านเข้าไปยังสายอากาศ สายอากาศจะมีการแพร่กระจายคลื่นเป็นปริมาณน้อยมาก เมื่อใช้ตัวกลางที่มีขนาดบาง แต่จะมีการแพร่กระจายคลื่นมากขึ้นถ้าต่อกับตัวกลางที่หนาขึ้น นอกจากนี้สายสัญญาณแกนคู่ยังสามารถต่อกับสายนำสัญญาณชนิดอื่นได้อีกด้วย

สายส่งสัญญาณแบบฝัง (Buried Feed)

คือ การป้อนสัญญาณโดยให้สายส่งสัญญาณกับแผ่นตัวนำอยู่บนตัวกลางคนละชนิด ซึ่งตัวกลางแต่ละชนิดจะอยู่ต่างระดับกันด้วยและทำให้มีการลดการแผ่กระจายคลื่นของสายส่งได้จากการให้สารตัวกลางมีค่าค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารไดอิเล็กตริกไม่เท่ากัน แต่วิธีการนี้ไม่เหมาะสำหรับการออกแบบสายอากาศแบบง่าย

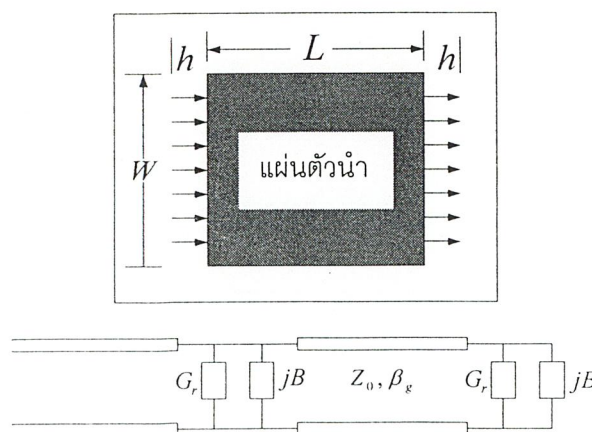
สายส่งแบบผ่านช่องว่าง (Slot Feed)

เป็นวิธีป้อนสัญญาณที่สามารถแผ่กระจายคลื่นของสายส่ง กับแผ่นตัวนำไม่ให้รบกวนกันได้โดยสิ้นเชิง โดยการใช้แผ่นระนาบตัวนำเป็นตัวป้องกันคลื่นจากสายส่งที่จะมารบกวนคลื่นที่ต้องการส่งจากแผ่นตัวนำและทำการเชื่อมต่อระหว่างแผ่นระนาบตัวนำกับสารตัวกลางโดยใช้ช่องว่างเพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวน นอกจากนี้ขนาดของช่องว่างจะต้องไม่มีความถี่ตรงกับความถี่ที่ใช้งานและวางอยู่ไกลจากแผ่นตัวนำ

2.3 แบบจำลองของสายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Model)

ในการคำนวณเพื่อหาคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศไมโครสตริปสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่เป็นที่นิยมได้แก่ วิธีแบบจำลองสายส่ง (Transmission Line Model) และวิธีแบบจำลองคavity (Cavity Model) สำหรับแบบจำลองสายส่งนั้นจะมีข้อดีคือ ในขั้นตอนการคำนวณจะสามารถทำได้ง่ายเพราะไม่ต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยากนักและได้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่เป็นแบบจำลองที่ไม่ยืดหยุ่นนัก คือ สามารถใช้คำนวณเฉพาะสายอากาศที่มีแผ่นตัวนำด้านบนเป็นรูปสี่เหลี่ยมเท่านั้น(อาจจะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือไมก็ได้) ส่วนวิธีแบบจำลองคavityจะมีความถูกต้องมากกว่าแบบจำลองสายส่งและสามารถใช้งานได้ยืดหยุ่นกว่าแต่จะต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยากกว่า

2.3.1 แบบจำลองสายส่ง



รูปที่ 2.4 สายอากาศแบบสี่เหลี่ยม และวงจรสมมูลย์

จากรูปที่ 2.4 แสดงวงจรสมมูลของแบบจำลองสายส่ง กับสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาว L ความกว้าง W และความหนา h โดยจะแผ่กระจายคลื่นออกมาจากขอบด้านทั้งสองข้างของแผ่นตัวนำ ซึ่งเปรียบเสมือนว่าเป็นช่องว่างที่มีความยาวเท่ากับ W และความหนา h ดังนั้น จึงให้ช่องว่างทั้งสองมีความต้านทานเท่ากับ $G + jB$ เท่ากับทั้งสองช่อง ส่วนความต้านทานของแผ่นตัวนำจะมีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) เป็น Z_0 และค่าคงที่การแผ่กระจายคลื่น (Propagation) เท่ากับ β_g ดังนั้นเพื่อจะหา อินพุตแอดมิตแดนซ์จะได้ว่า

$$Y_m = G_r + jB + Y_0 \frac{(G + jB) + jY \tan(\beta_g L)}{Y_0 + j(G + jB) \tan(\beta_g L)} \quad (2.1)$$

ดังนั้นเพื่อให้มีแต่ค่าจำนวนจริง ไม่มีจำนวนจินตภาพเพื่อจะได้ปรับแมทซ์ได้ง่าย จึงต้องให้

$$\text{Im}(Y_m) = 0 \quad (2.2)$$

นั่นคือ

$$\tan(\beta_g L) = \frac{2Y_0 B}{G_r^2 + B^2 - Y_0^2} \quad (2.3)$$

หรือ

$$\tan(\beta_g L) = \frac{Y_0}{B} \quad (2.4)$$

โดยที่เมื่อ

$$\tan(\beta_g L) = \frac{2Y_0 B}{G_r^2 + B^2 - Y_0^2} \quad (2.5)$$

แล้วนำไปแทนในสมการ Y_m จะได้ $Y_m = 2G$

ส่วนเมื่อ

$$Y_m = G_r + \frac{Y_0}{B} + \frac{B^3}{G_r} + \frac{Y^2}{G_r} \quad (2.6)$$

2.3.2 แบบจำลองควาวิตี (Cavity Model)

ในการจำลองชนิดนี้จะมองสายอากาศโครสตริปให้มีลักษณะเหมือนโพรงที่มีสารไดอิเล็กตริก อยู่ภายใน ซึ่งการมองในลักษณะนี้จะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์อันดับสูงขึ้นไป (High Order Resonance) แต่เพื่อให้สามารถเข้าใจสนามพลังงาน (สนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า) ภายในสาร ไดอิเล็กตริก จึงคิดเสมือนว่าโพรงไดอิเล็กตริกนี้ ถูกปิดล้อมด้วยแผ่นตัวนำไฟฟ้า (ด้านบน และด้านล่าง) และกำแพงสนามแม่เหล็ก (คิดเสมือนว่าเปิดวงจรอยู่) ที่อยู่ตามขอบของแผ่นตัวนำแต่แบบจำลองลักษณะนี้จะทำให้ไม่มีการส่งคลื่นออกไปอย่างไรก็ตาม การสมมติให้แบบจำลองอย่างนี้ทำให้สามารถคำนวณ รูปบแผ่กระจายคลื่น อินพุตอิมพีแดนซ์ และความถี่ตอบสนองได้ใกล้เคียงค่าที่เกิดขึ้นจากการวัดซึ่งแบบจำลองลักษณะนี้คล้ายกับวิธีเพอร์เทอร์เบชัน (Perturbation Method) ที่นิยมกันในการคำนวณท่อเวฟไกด์ (Waveguide)

สำหรับการสร้างสนามพลังงานภายในโพรงไดอิเล็กตริกและการแผ่กระจายคลื่นผ่านสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นได้ดังนี้

เมื่อป้อนพลังงานเข้าไปยังแผ่นตัวนำไมโครสตริป จะเกิดการกระจายของประจุบนผิวทั้งด้านบนและด้านล่างของแผ่นตัวนำรวมไปจนถึงเกิดการกระจายของประจุบนกราวด์เพลนด้วยซึ่งการกระจายของประจุเหล่านี้เกิดจากกระบวนการสองชนิด คือ

1. จากแรงดึงดูดระหว่างประจุต่างชนิดกัน ของประจุบนพื้นผิว ด้านล่างแผ่นตัวนำกับประจุบนกราวด์เพลน ซึ่งจะทำให้เกิดมีจำนวนประจุหนาแน่นขึ้นบริเวณแผ่นตัวนำด้านล่าง

2. เกิดจากแรงผลักระหว่างประจุชนิดเดียวกัน ของประจุบนผิวด้านล่างแผ่นตัวนำ ซึ่งจากแรงผลักรนี้จะทำให้ที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำ มีประจุบางส่วนขึ้นไปอยู่ที่พื้นผิวด้านบนของแผ่นตัวนำกระบวนการทั้งสองชนิดนี้ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส J_b และ J_t (b ย่อมาจาก bottom และ t ย่อมาจาก top)

สำหรับสายอากาศที่ทำจากวัสดุบาง ๆ แรงผลักรชนิดแรกจะมีมากกว่าชนิดหลัง ทำให้ประจุส่วนใหญ่ไปอยู่ที่ผิวด้านล่างของแผ่นตัวนำ เป็นผลให้กระแสส่วนใหญ่ไหลอยู่ที่ผิวได้แผ่นตัวนำ จะมีกระแสปริมาณเล็กน้อยเท่านั้นที่ไหลรอบ ๆ ขอบด้านบนของแผ่นตัวนำ และปริมาณของกระแสที่ว่านี้ จะมีค่าลดลง ถ้าวัสดุมีขนาดบางลงด้วย สำหรับในทางอุดมคติแล้ว กระแสที่ไหลอยู่ด้านบนของแผ่นตัวนำจะมีค่าเป็นศูนย์เป็นผลให้สนามแม่เหล็ก (ที่เกิดจากกระแสอันนี้) ที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ด้วย จึงสามารถสมมติได้ว่า มีพื้นผิวที่เป็นตัวนำในอุดมคติปิดอยู่ที่บริเวณขอบทั้งสี่ด้านของแผ่นตัวนำ (ทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์) แต่ในทางปฏิบัติแล้วที่บริเวณขอบขอบแผ่นตัวนำจะมีสนามแม่เหล็กเหลืออยู่เล็กน้อยเสมอ ดังนั้น ข้อสมมตินี้อาจไม่ถูกต้องนัก แต่การสมมติอย่างนี้จะทำให้ง่ายต่อการหาโหมคของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่อยู่ใต้แผ่นตัวนำ ผลจากการให้สายอากาศแบบไมโคร สตริปมีขนาดบางมาก (น้อยกว่าความยาวคลื่นมาก ๆ)

1. พลังงานที่อยู่ใต้แผ่นตัวนำและอยู่ในสารไดอิเล็กตริก จะเกิดการสะท้อนกลับขึ้นที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำ และมีแค่ส่วนน้อยเท่านั้นที่หลุดออกไปเป็นพลังงานแผ่กระจายคลื่น ดังนั้น สายอากาศแบบไมโคร สตริป จึงมีประสิทธิภาพที่ไม่สูงนัก

2. พลังงานที่อยู่ใต้แผ่นตัวนำจะทำให้เกิดคลื่นนิ่ง ซึ่งอยู่ในรูปฟังก์ชันไซน์

3. การเปลี่ยนแปลงของสนามตามความสูงของสาร ไดอิเล็กตริกจะเป็นค่าคงที่

4. ปรากฏการณ์ฟริงกิงที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำจะมีค่าน้อยมาก

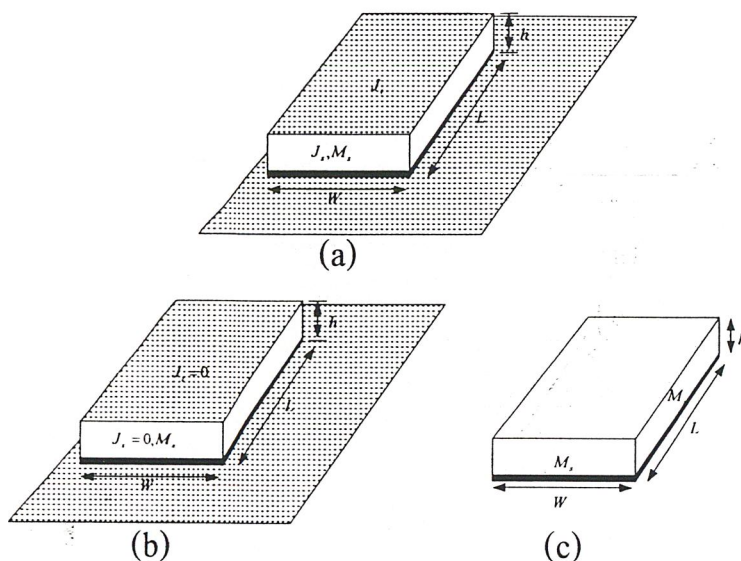
ดังนั้นจึงมีแต่สนาม TM_z เท่านั้นที่อยู่ในโพรงไดอิเล็กตริก

นอกจากนี้ยังต้องสมมติให้สิ่งที่ปิดล้อมทุกด้านของโพรงไดอิเล็กตริก(แผ่นตัวนำและกำแพงสนามแม่เหล็ก) ไม่มีการสูญเสียพลังงาน , โพรงไดอิเล็กตริกไม่สามารถแผ่กระจายคลื่นได้ และอิมพีแดนซ์มีแต่ส่วนจริงเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแล้วค่าอิมพีแดนซ์จะต้องมีส่วนจินตภาพด้วยเสมอ เช่น เกิดจากความต้านทานการแผ่กระจายคลื่น (R_r), ความต้านทานการสูญเสีย (R_l) และการสูญเสียเนื่องจากสารไดอิเล็กตริก ซึ่งความสูญเสียทั้งหมดนี้จะอยู่ในรูป δ_{eff} และสำหรับสายอากาศแล้วจะได้ว่า $(1/Q) = \delta_{eff}$

ความหนาแน่นกระแสสมมูล (Equivalent Current Densities)

ในแบบจำลองควิตี้จะมองสายอากาศแบบไมโครสตริปว่าเป็น สารไดอิเล็กตริกที่มีกำแพงสนามไฟฟ้าที่สมบูรณ์แบบปิดอยู่ที่ด้านบนและล่าง ส่วน 4 ด้านที่เหลือซึ่งอยู่ด้านข้างจะถูกปิดล้อมด้วยกำแพงสนามแม่เหล็ก ซึ่งบริเวณนี้เองที่เป็นตัวทำให้เกิดการแผ่กระจายคลื่น ดังนั้นการจะหาความหนาแน่นกระแส จะต้องคิดเสมือนว่าสารตัวกลางมีอยู่แต่เฉพาะภายใต้แผ่นตัวนำบนเสมอ จากการใช้ ทฤษฎีฮอยเกนส์ (Huygens' Theory) จะสามารถแทนแผ่นตัวนำที่อยู่ด้านบนด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_t ที่ผิวด้านบนของแผ่นตัวนำ (โดยปกติมี

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_b อยู่ข้างใต้แผ่นตัวนำด้วย แต่ในที่นี้จะไม่กล่าวถึง) และที่ด้านข้างทั้งสี่ จะแสดงได้ด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_s และความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก M_s ดังรูปที่ 2.5 (a) โดยที่ $J_s = \hat{n} \times H_a$ และ $M_s = -\hat{n} \times E_a$ เมื่อ E_a, H_a เป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่บริเวณด้านข้าง



รูปที่ 2.5 ความหนาแน่นกระแสที่บริเวณด้านทั้งสี่

เนื่องจากสายอากาศแบบไมโครสตริปจะมีอัตราส่วนของความสูงต่อความกว้างน้อย ดังนั้น J_t ที่อยู่ด้านบน จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ J_b ที่อยู่ด้านล่าง จึงสามารถสมมติได้ว่า J_t มีค่าเป็นศูนย์ และจะไม่นำมาคิด จึงทำให้สนามแม่เหล็กที่บริเวณขอบ ซึ่งเกิดจาก J_t นี้มีค่าเป็นศูนย์ด้วย ส่งผลให้ J_t ที่บริเวณด้านข้างซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กอันนี้มีค่าเป็นศูนย์อีก ดังนั้น จะเหลือเฉพาะ M_s ที่อยู่ด้านข้างโดยรอบของแบบจำลองช่องว่างเท่านั้นที่ไม่เป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.5 (b) จากการใช้ทฤษฎีเงา (Image Theory) จะได้ว่า $M_s = -2\hat{n} \times E_a$ ดังรูปที่ 2.5 (c)

ในแบบจำลองควิตีจะมองสายอากาศแบบไมโครสตริป ว่าเปรียบเสมือนมีช่องว่างอยู่ด้านข้างโดยรอบทั้งสี่ด้านของโพรง โดยที่ช่องว่างเหล่านี้จะเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นออกไป แต่ช่องว่างทั้งสี่ช่องนี้ไม่ได้แผ่กระจายคลื่นได้ทั้งสี่ช่องจะมีเพียงสองช่องเท่านั้นที่สามารถแผ่กระจายคลื่นได้ ส่วนอีกสองช่องจะเกิดการหักล้างกันเอง โดยสองช่องที่เกิดการหักล้างคือช่องที่อยู่ห่างกัน เป็นระยะ W ส่วนอีกสองช่องที่สามารถแผ่กระจายคลื่นได้จะอยู่ห่างกัน L ซึ่งเรียกสองช่องนี้ว่า ร่องแผ่กระจายคลื่น (Radiating Slot) โดยที่ระหว่างสองช่องนี้จะมีแผ่นตัวนำคู่ขนานซึ่งแสดงตัวเหมือนเป็น หม้อแปลง (Transformer) ที่มีความต้านทานต่ำ ความยาวของ L ประมาณได้ว่าเท่ากับ $\lambda_g/2$ เมื่อ λ_g หมายถึง ความยาวคลื่นที่เดินทางในสารตัวกลาง เพื่อให้สนามของช่องว่างทั้งสอง มีทิศทางตรงข้ามกันดังแสดงในรูปที่ 2.5 (a) จากช่องว่างทั้งสองที่เป็นตัวแผ่กระจายคลื่นจะทำตัวเสมือนเป็นแถวลำดับ 2 อิลิเมนต์ ที่มีระยะห่างกันเป็น $\lambda_g/2$ สมมติให้ โหมดพื้นฐาน (Dominant Mode) เป็น TM_{010}^z จะได้สมการดังนี้

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

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

$$E_y = E_x = H_x = H_y = 0$$

เมื่อ $E_0 = -j\omega A_{010}$ และ $H_0 = (\pi/\mu L) A_{010}$ จากรูปที่ 2.5 (a) จะเห็นได้ว่าคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาว L แต่จะไม่มี การเปลี่ยนแปลงตามความกว้าง W ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเฟสนี้จะมีผลอย่างมากในการออกแบบสายอากาศแบบบรอดไซด์ (Broadside)

2.4 ปรากฏการณ์ฟริงกิง (Fringing Effects)

เนื่องจากมิติของแผ่นตัวนำถูกจำกัดด้วยความยาวและความกว้าง ดังนั้นสนามที่ขอบของแผ่นตัวนำจะเกิดฟริงกิง ผลรวมของฟริงกิงเป็นฟังก์ชันของความกว้างความยาวของแผ่นตัวนำและความหนาของสารตัวกลาง สำหรับระนาบไฟฟ้า (E-Plane หรือ ระนาบ x-y) ส่วนใหญ่ฟริงกิง เป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนระหว่างความยาวของแผ่นตัวนำ (L) ต่อความหนาของสารตัวกลาง (h) และค่าคงที่สัมพัทธ์ไดอิเล็กตริกของสารตัวกลาง

สำหรับสายส่งไมโครสตริปในรูปที่ 2.6(a) เส้นแรงสนามไฟฟ้าแบบทั่วไปแสดงดังรูป 2.6 (b) เส้นแรงแบบนี้เกิดจากเนื้อสารของไดอิเล็กตริกสองชนิดไม่เหมือนกัน (Nonhomogeneous) ซึ่งสารไดอิเล็กตริกสองชนิดนี้มักจะเป็นสารตัวกลางกับอากาศ สนามไฟฟ้าส่วนใหญ่อยู่ในสารตัวกลางและบางส่วนจะปรากฏในอากาศ เมื่อ L/h มีค่ามากกว่า 1 มาก ๆ และค่าคงที่สัมพัทธ์ไดอิเล็กตริกมากกว่า 1 มาก ๆ สนามไฟฟ้าจะอยู่อย่างหนาแน่นในสารตัวกลาง ในกรณีนี้ ฟริงกิง จะทำให้สายส่งไมโครสตริปมีขนาดในทางไฟฟ้าดูมากกว่าขนาดจริง เนื่องจากคลื่นบางส่วนเคลื่อนที่ในสารตัวกลางและบางส่วนเคลื่อนที่ในอากาศจึงมีการนำ Effective Dielectric Constant (ϵ_{re}) มาคิดสำหรับฟริงกิงและการแผ่กระจายคลื่น

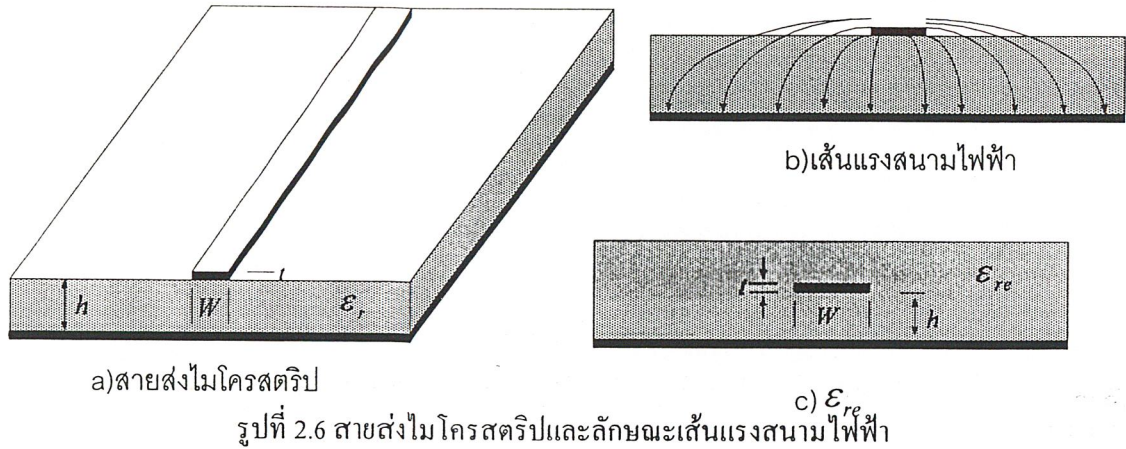
ในการนำ ϵ_{re} มาคิดจะสมมุติให้ตัวนำของสายส่งไมโครสตริปที่มีขนาดและความหนาเท่าเดิม ผิงลงในสารตัวกลางดังรูป 2.6(c) ค่า ϵ_{re} จะถูกนิยามว่าเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุที่สมมาเสมอ ดังนั้นสายส่งไมโครสตริป ในรูป 2.6(c) จะมีลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าแบบเดียว และค่าคงที่การกระจายคลื่นโดยเฉพาะเหมือนกับสายส่งไมโครสตริปของจริงในรูป 2.6(a) สำหรับสายส่งไมโครสตริปที่มีอากาศอยู่เหนือสารตัวกลาง ค่า ϵ_{re} จะมีค่าระหว่าง 1 ถึงเพอร์-มิตติวิตี สำหรับการใช้งานทั่วไปที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารตัวกลางมีค่ามากกว่า 1 มาก ๆ ค่า ϵ_{re} จะใกล้เคียงกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) จริงๆ ของสารตั้งกลางนั้นๆ

ϵ_{re} เป็นฟังก์ชันของความถี่ถ้าความถี่เพิ่มขึ้นสนามไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอยู่หนาแน่นในสารตัวกลาง เพราะฉะนั้นสายส่งไมโครสตริปจะทำตัวเหมือนเป็นสารเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) มีไดอิเล็กตริกตัวเดียว (ไดอิเล็กตริกในที่นี้หมายถึงสารตัวกลาง) และ ϵ_{re} จะมีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารตัวกลาง

สำหรับความถี่ต่ำ ϵ_{re} จำเป็นที่ต้องมีค่าคงที่ ที่ความถี่กลางของมัน ϵ_{re} จะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างสมมาเสมอ และจะเพิ่มจนถึงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารตัวกลางในท้ายที่สุด ค่าเริ่มต้น (ที่ความถี่ต่ำ) ของ ϵ_{re} จะถูกเรียกว่า Static Value แสดงได้ดังนี้

เมื่อ $W/h > 1$

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-1/2} \quad (2.8)$$



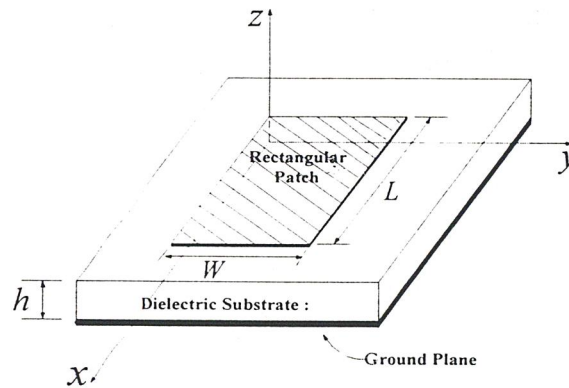
a) สายส่งไมโครสตริป

b) เส้นแรงสนามไฟฟ้า

c) ϵ_{reff}

รูปที่ 2.6 สายส่งไมโครสตริปและลักษณะเส้นแรงสนามไฟฟ้า

2.5 การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปที่มีแผ่นตัวนำบนเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก



รูปที่ 2.7 ลักษณะของไมโครสตริปชนิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก

การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปที่มีแผ่นตัวนำบนเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากนั้นสามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองควิวิตี ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

2.5.1 การหาสนามไฟฟ้าและแม่เหล็ก

การหาสนามภายใน ควิวิตี สำหรับ TM^z อันดับแรกเราต้องหา ฟังก์ชันศักย์ช่วยแม่เหล็ก A_z ที่มีสมการคลื่นดังนี้

$$\nabla^2 A_z + k^2 A_z = 0 \tag{2.9}$$

$$A_z = [A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x)] [A_2 \cos(k_y y) + B_2 \sin(k_y y)] [A_3 e^{-jk_z z} + B_3 e^{jk_z z}] \tag{2.10}$$

เมื่อ k_x, k_y, k_z คือ จำนวนเท่าของคลื่น(Wave number) ที่อยู่กันตามแกน x,y,z ตามลำดับซึ่งสามารถหาได้จากเงื่อนไขขอบเขต(Boundary Condition) หลังจากนั้นจะได้คำว่า สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่อยู่ในรูปของ A_z เป็นดังนี้

$$E_x = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x \partial z} \tag{2.11}$$

$$E_y = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_z}{\partial y \partial z} \tag{2.12}$$

$$E_z = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) A_z \quad (2.13)$$

$$H_x = \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \quad (2.14)$$

$$H_y = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \quad (2.15)$$

$$H_z = 0 \quad (2.16)$$

นำมาใช้กับเงื่อนไขขอบเขตที่ว่า

$$E_x = (0 \leq x' \leq L, 0 \leq y' \leq W, z' = 0) = E_x(0 \leq x' \leq L, 0 \leq y' \leq W, z' = h) = 0 \quad (2.17)$$

$$H_x = (0 \leq x' \leq L, y' = 0, 0 \leq z' \leq h) = H_x(0 \leq x' \leq L, y' = W, 0 \leq z' \leq h) = 0 \quad (2.18)$$

$$H_y = (x' = 0, 0 \leq y' \leq W, 0 \leq z' \leq h) = H_y(x' = L, 0 \leq y' \leq W, 0 \leq z' \leq h) = 0 \quad (2.19)$$

สัญลักษณ์ (') เช่น x', y', z' เพื่อแสดงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ภายในช่องไดอิเล็กตริกจากสมการเงื่อนไขที่ว่า

$$E_x = (0 \leq x' \leq L, 0 \leq y' \leq W, z' = 0) = E_y(0 \leq x' \leq L, 0 \leq y' \leq W, z' = h) = 0 \quad \text{จะได้ว่า } B_3 = 0$$

$$k_z = \frac{m\pi}{h} \quad m = 0, 1, 2 \quad (2.20)$$

จากสมการเงื่อนไขที่ว่า $H_x = (0 \leq x' \leq L, y' = 0, 0 \leq z' \leq h) = H_x(0 \leq x' \leq L, y' = W, 0 \leq z' \leq h) = 0$
จะได้ว่า $B_2 = 0$

$$k_y = \frac{p\pi}{W} \quad p = 0, 1, 2 \quad (2.21)$$

จากสมการเงื่อนไขที่ว่า $H_y = (x' = 0, 0 \leq y' \leq W, 0 \leq z' \leq h) = H_y(x' = L, 0 \leq y' \leq W, 0 \leq z' \leq h) = 0$
จะได้ว่า $B_1 = 0$

$$k_x = \frac{n\pi}{L} \quad n = 0, 1, 2 \quad (2.22)$$

ในที่สุดจะได้ว่า A_z ที่อยู่ภายในช่องไดอิเล็กตริกเท่ากับ

$$A_z = A_{mnp} \cos(k_x x') \cos(k_y y') \cos(k_z z') \quad (2.23)$$

เมื่อ A_{mnp} เท่ากับสัมประสิทธิ์ของแอมพลิจูดในแต่ละโหมด mnp และ m, n, p เป็นตัวเลข ที่แสดง

ความกว้าง, ความยาว และสูงในแนวแกน y, x, z มีค่าเป็นจำนวนเท่าของ $\frac{\lambda}{2}$

2.5.3 ความถี่เรโซแนนซ์

$$(f_r)_{mnp}^{TM} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\mu \epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{W}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2} \quad (2.24)$$

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

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

$$(f_r)_{100} = \frac{1}{2L\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.25)$$

โดยที่

L คือ ความยาวของสายอากาศ

ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของตัวกลาง

c คือ ค่าความเร็วแสง ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

2.5.4 การแผ่กระจายคลื่น และสภาพเจาะจงทิศทาง

จากแบบจำลองควาวิตี้ เราสามารถหาค่าพลังงานการแผ่กระจายคลื่นได้จาก

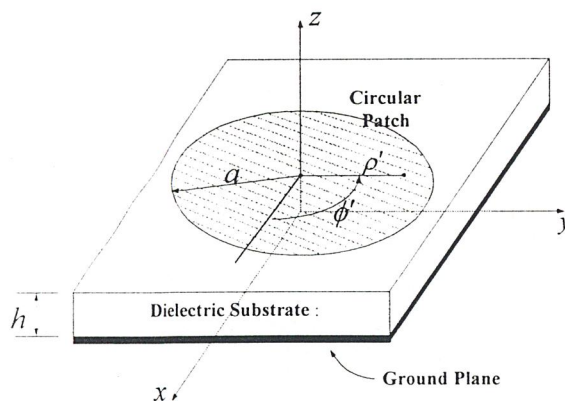
$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2) \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.26)$$

และสามารถหาสภาพเจาะจงทิศทางได้จาก

$$D_0 = 4\pi \frac{(|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2)_{\max}}{P_{rad}} \quad (2.27)$$

2.6 การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปที่มีแผ่นแผ่กระจายคลื่นเป็นรูปวงกลม

การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปที่มีแผ่นแผ่กระจายคลื่นเป็นรูปวงกลมนั้นสามารถทำได้ง่ายขึ้นด้วยการใช้แบบจำลองควาวิตี้ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 2.8 ลักษณะของไมโครสตริปชนิดวงกลม

2.6.1 การหาสนามไฟฟ้าและแม่เหล็ก

การหาสนามภายใน ควาวิตี้ สำหรับ TM^z อันดับแรกเราต้องหา ฟังก์ชันศักย์ช่วยแม่เหล็ก A_z ที่มีสมการคลื่นดังนี้

$$\nabla^2 A_z + k^2 A_z = 0 \quad (2.28)$$

$$A_z = B_{mnp} J_m(k_p \rho') [A_2 \cos(m\phi') + B_2 \sin(m\phi')] \cos k_z z' \quad (2.29)$$

โดยที่

$$(k_p)^2 + (k_z)^2 = k_r^2 = \omega\epsilon\mu \quad (2.30)$$

$$k_p = \frac{x_{mn}}{a} \quad (2.31)$$

$$k_z = \frac{p\pi}{h}$$

$$m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.32)$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.33)$$

$$p = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.34)$$

โดย พิกัดทรงกระบอก p', ϕ', z' ถูกใช้เพื่อแสดงสนามใน คาร์ทีเซียน ขณะที่ J_m คือฟังก์ชันเบสเซล

x_{mn} คือ ค่า zero ลำดับที่ n ของอนุพันธ์ของฟังก์ชันเบสเซลลำดับที่ m (“ m ” หมายถึง โหมดเชิงมุม และ “ n ” หมายถึง โหมดเชิงรัศมี) ซึ่งค่า x_{mn} นี้ได้ถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 2.1

Mode	TM11	TM21	TM31	TM41	TM51	TM61
X_{m1}	1.842	3.054	4.201	5.317	6.415	7.501

ตารางที่ 2.1 ค่า x_{mn} ที่โหมดต่าง ๆ

เมื่อหาค่า A_z ได้แล้วก็สามารถหาค่าสนามที่มีความสัมพันธ์กับค่า A_z ได้ดังนี้

$$E_p = -j \frac{\partial^2 A_z}{\omega \pi \mu \rho \partial z} \quad (2.35)$$

$$H_p = \frac{\partial A_z}{\mu p \partial \phi} \quad (2.36)$$

$$E_\phi = -j \frac{\partial^2 A_z}{\omega \pi \mu \rho \phi \partial z} \quad (2.37)$$

$$H_\phi = -\frac{\partial A_z}{\mu \partial p} \quad (2.38)$$

$$E_z = -j \frac{1}{\omega \epsilon \mu} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) A_z \quad (2.39)$$

$$H_z = 0 \quad (2.40)$$

โดยมีสมการเงื่อนไขขอบเขต

$$E_p (0 \leq p' \leq a, 0 \leq \phi' \leq 2\pi, z' = 0) = 0 \quad (2.41)$$

$$E_p (0 \leq p' \leq a, 0 \leq \phi' \leq 2\pi, z' = h) = 0 \quad (2.42)$$

$$H_\phi (p' = a, 0 \leq \phi' \leq 2\pi, 0 \leq z \leq h) = 0 \quad (2.43)$$

2.6.2 ความถี่เรโซแนนซ์

$$f_{mn0} = \frac{x_{mn} c}{2\pi a \sqrt{\epsilon \mu}} \quad (H_z) \quad (2.44)$$

โดยที่

$$a_c = a \left\{ 1 + \frac{2h}{a\pi\epsilon_r} \left[\ln \left(\frac{a\pi}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.45)$$

เมื่อ

a คือ รัศมีของแผ่นตัวนำวงกลม (m)

c คือ ความเร็วแสง (m/s)

ϵ_r คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของตัวกลาง

a_e คือ รัศมีประสิทธิผลของ แผ่นตัวนำวงกลม (มีค่าใกล้เคียงกับค่า a)

2.6.3 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสมมูลและการแผ่กระจายสนาม

สนามที่แผ่กระจายด้วยแผ่นตัวนำวงกลมสามารถหาได้ด้วยการใช้หลักการสมมูลโดยระยะโดยรอบกำแพงของ คาวิตี ถูกแทนที่โดยกระแสแม่เหล็กสมมูลที่แผ่กระจายในช่องว่างอิสระ จากสมการและการสมมติให้เป็นโหมด TM_{10} สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กนอร์มัลไลซ์ ภายในคาวิตีสำหรับการผันแปรทางโคไซน์อะซิมูทสามารถเขียนได้เป็น

$$E_r = E_\phi = H_z = 0 \quad (2.46)$$

$$E_z = E_0 J_1(kp') \cos \phi' \quad (2.47)$$

$$H_p = j \frac{E_0}{p\omega\mu_0} J_1(kp') \sin \phi' \quad (2.48)$$

$$H_\phi = j \frac{E_0}{\omega\mu_0} J_1'(kp') \cos \phi' \quad (2.49)$$

ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก

$$M = -2n \times E_a|_{p'=a_e} = 2aE_0 J_1(ka_e) \cos \phi' \quad (2.5)$$

จากสมการข้างต้นเราสามารถปฏิบัติกับสายอากาศไมโครสตริปโดยใช้วิธีของสายอากาศแบบวงกลม จะมีสูตรดังนี้

$$E_r = 0 \quad (2.51)$$

$$E_\theta = -j \frac{k_0 a_e V_0 e^{-jk_0 r}}{2r} \{ \cos \theta J_{02}' \} \quad (2.52)$$

$$E_\phi = j \frac{k_0 a_e V_0 e^{-jk_0 r}}{2r} \{ \cos \theta \sin \phi J_{02} \} \quad (2.53)$$

$$J_{02}' = J_0(k_0 a_e \sin \theta) - J_2(k_0 a_e \sin \theta) \quad (2.54)$$

$$J_{02} = J_0(k_0 a_e \sin \theta) + J_2(k_0 a_e \sin \theta) \quad (2.55)$$

2.6.4 กระแสเหนี่ยวนำ และสภาพเจาะจงทิศทาง

จากแบบจำลองคาวิตี เราสามารถหาค่าพลังงานการแผ่กระจายคลื่นได้จาก

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2) \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.56)$$

หรือจากสมการ

$$P_{rad} = |V_0|^2 \frac{(k_0 a_e)^2}{960} \int_0^{\frac{\pi}{2}} [J_{02}'^2 + \cos^2 \theta J_{02}^2] \sin \theta d\theta \quad (2.57)$$

กระแสเหนี่ยวนำผ่านช่องระหว่างแผ่นตัวนำกับกราวด์เพลนที่ $\phi' = 0^\circ$ เขียนได้ว่า

$$G_{rad} = \frac{(k_0 a_e)^2}{480} \int_0^{\frac{\pi}{2}} [J_{02}'^2 + \cos^2 \theta J_{02}^2] \sin \theta d\theta \quad (2.58)$$

ค่ากระแสเหนี่ยวนำที่อธิบาย การเหนี่ยวนำและไดอิเล็กทริกคลอสันนั้น หากจาก

$$G_c = \frac{\epsilon_{m0}\pi(\pi\mu_0 f_r)^{-3/2}}{4h\sqrt{\sigma}} \left[(ka_e)^2 - m^2 \right] \quad (2.59)$$

$$G_d = \frac{\epsilon_{m0} \tan \delta}{4h\mu_0 f_r} \left[(ka_e)^2 - m^2 \right] \quad (2.60)$$

โดย ϵ คือ ความถี่เรโซแนนซ์ โหมด m no ดังนั้นค่ากระแสเหนี่ยวนำทั้งหมดเท่ากับ

$$G_t = G_{rad} + G_c + G_d \quad (2.61)$$

เราสามารถที่จะหาค่า สภาพเจาะจงทิศทางได้จาก

$$D_0 = 4\pi \frac{(|E_\theta|^2 + |E_\phi|_{\max}^2)}{P_{rad}} \quad (2.62)$$

หรือจากการพิจารณาสมการที่และจะสามารถหาสภาพเจาะจงทิศทางได้จาก

$$D_0 = \frac{(k_0 a_e)^2}{120G_{rad}} \quad (2.63)$$

2.6.5 ความต้านทานอินพุตที่ความถี่เรโซแนนซ์

ค่าความต้านทานอินพุตของสายอากาศแผ่นวงกลมที่ความถี่เรโซแนนซ์จะเป็นค่าจริงโดยกำลังงานอินพุตจะไม่ขึ้นกับตำแหน่งการป้อนสัญญาณตามเส้นรอบวงสมมุติให้สัญญาณที่ $\phi' = 0^\circ$ ค่าความต้านทานอินพุตในตำแหน่งใดที่รัศมี $\rho' = \rho_0$ จากจุดศูนย์กลางของแผ่นสตริปสามารถเขียนได้เป็น เป็นดังนี้

$$R_m(\rho' = \rho_0) = \frac{J_m^2(k\rho_0)}{G_t J_m^2(ka_e)} \quad (2.64)$$

เมื่อเป็นค่าตัวนำทั้งหมดซึ่งเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นเมื่อค่าความต้านทานอินพุตของสายอากาศไมโครสตริปแผ่นวงกลมที่จุดป้อนสัญญาณจากสมการ (2.64) สามารถเขียนได้เป็น

$$R_m(\rho' = \rho_0) = R_m(\rho' = a_e) \frac{J_m^2(k\rho_0)}{J_m^2(ka_e)} \quad (2.65)$$

เมื่อ

$$R_m(\rho' = a_e) = \frac{1}{G_t} \quad (2.66)$$

2.7 วงจรป้อนสัญญาณแถวลำดับ

วงจรป้อนสัญญาณ (Feed Networks) เป็นส่วนหนึ่งของสายอากาศแบบแถวลำดับ ทำหน้าที่ในการป้อนสัญญาณไปยังสายอากาศเดี่ยวที่เป็นองค์ประกอบในแถวลำดับแต่ละตัว เพื่อให้ได้ระดับสัญญาณ เฟส และอิมพีแดนซ์ที่ถูกต้องเพื่อให้สายอากาศแถวลำดับได้คุณสมบัติตรงตามการออกแบบ สำหรับสายอากาศแถวลำดับที่ประกอบไปด้วยองค์ประกอบเดี่ยว N องค์ประกอบส่วนของวงจรป้อนสัญญาณจะประกอบไปด้วยพอร์ตจำนวน $N+1$ พอร์ต โดย N พอร์ตจะเป็นพอร์ตซึ่งต่ออยู่กับส่วนแพร่กระจายคลื่น ส่วนอีกหนึ่งพอร์ตที่เหลือจะต่ออยู่กับด้านอินพุตหรือเอาต์พุตของระบบซึ่งขึ้นอยู่กับว่า ระบบนั้นเป็นภาครับ หรือภาคลส่ง

2.7.1 วงจรป้อนสัญญาณโดยตรง

ระบบการป้อนสัญญาณโดยตรงหรือ Constrained Feed เป็นระบบป้อนสัญญาณที่นิยมใช้ในการป้อนสัญญาณให้สายอากาศแถวลำดับสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

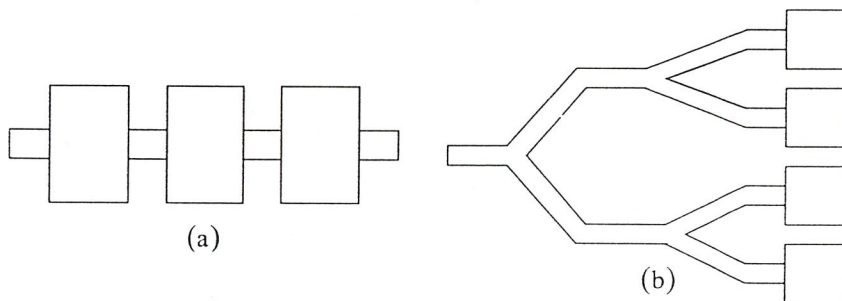
2.7.2 การป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณเส้นเดียว หรือการป้อนสัญญาณแบบอนุกรม (Series-Feed Network)

เป็นการป้อนสัญญาณด้วยการต่อองค์ประกอบเดี่ยวแต่ละตัวในแบบอนุกรม ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่

2.9(a) โครงสร้างมีเพียงสายนำสัญญาณเดี่ยวต่อโดยตรงกับส่วนแพร่กระจายคลื่นแต่ละตัวในส่วนปลายของสายนำสัญญาณจะต่อไว้ด้วยโหนด การจัดวางตัวจะเป็นไปตามละลำดับโดยไม่มีส่วนของวงจรแยกกำลัง หรือจุดเชื่อมต่อต่างๆ ทำให้ง่ายต่อการจัดสร้างและมีขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามส่วนของสายนำสัญญาณระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นจะเกิดการเลื่อนเฟสที่ขึ้นอยู่กับความถี่ ซึ่งจะทำให้ทิศทางของลำคลื่นของสายอากาศขึ้นอยู่กับความถี่ด้วย นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบแต่ละตัวจะมีผลกระทบต่อกรป้อนสัญญาณทั้งหมดซึ่งเป็นข้อเสียของการป้อนสัญญาณด้วยวิธีนี้

2.7.3 การป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณหลายเส้น หรือการป้อนสัญญาณร่วม (Corporate-feed Network)

เป็นการแยกสัญญาณอินพุทหลายส่วนเพื่อป้อนไปยังองค์ประกอบเดี่ยวแต่ละตัวโดยอิสระดังแสดงในรูปที่ 2.9(b) ทำให้สามารถควบคุมการป้อนสัญญาณได้ง่าย (แอมพลิจูดหรือเฟส) ซึ่งเหมาะสมกับการเป็นส่วนป้อนสัญญาณให้สายอากาศแถวลำดับปรับเฟส (Scanning Phase Array) แถวลำดับหลายลำคลื่น (Multibeam Array) หรือแถวลำดับที่กำหนดรูปร่างคลื่น (Shaped-Beam Array) โดยส่วนของเฟสที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบเดี่ยวสามารถควบคุมได้ด้วยวงจรเลื่อนเฟส ในขณะที่แอมพลิจูดสามารถปรับได้ด้วยการใช้วงจรขยายสัญญาณหรือวงจรลดทอนสัญญาณในแต่ละองค์ประกอบเดี่ยว



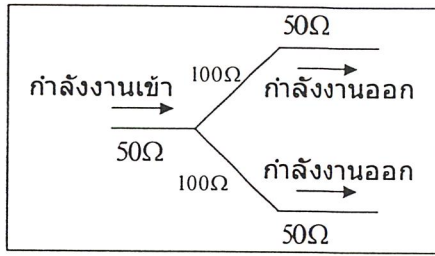
รูปที่ 2.9 ส่วนป้อนสัญญาณให้สายอากาศแถวลำดับ (a) แบบอนุกรม (b) แบบขนาน

จากข้อดีของการป้อนสัญญาณแบบรวมทำให้เกิดความยืดหยุ่นในการออกแบบ ดังนั้นโครงงานนี้จึงเลือกใช้การป้อนสัญญาณแบบรวมสำหรับสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับที่ออกแบบ โดยการออกแบบวงจรรวม/แยกกำลังสำหรับการป้อนสัญญาณสามารถออกแบบวงจรได้หลายประเภทขึ้นอยู่กับช่วงกว้างแถบความถี่, กำลังงานรวม และขนาดของวงจร รวมไปถึงความยากง่ายในการประกอบอุปกรณ์

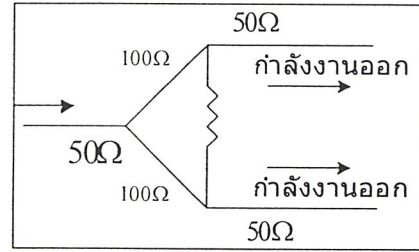
2.7.4 วงจรแบ่งกำลังหลายทางของวิลคินสัน

วงจรแบ่งกำลังพื้นฐานในระบบสายอากาศแถวลำดับได้แก่ วงจรแบ่งกำลังรูปตัว T ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.10 (a) เกิดปัญหาเรื่องการมีสมมาตรขึ้นทางด้านอาร์พุทของวงจรแบ่งกำลังแบบรอยต่อตัวที่ สามารถลดทอนได้ด้วยการเพิ่มส่วนของวงจรแมชซึ่งก่อนหน้าที่จะไปต่อเชื่อมกับวงจรอื่นหรืออาจทำได้อีกวิธีหนึ่งคือ การต่อตัวต้านทานระหว่าง

เอาต์พุตในตำแหน่งที่เหมาะสมซึ่งเราเรียกว่า วงจรแบ่งกำลังแบบวิลคินสัน หรือ Wilkinson Divider โดยวงจรแบ่งกำลังแบบวิลคินสันแบบสองทางสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10(b)



(a) วงจรแบบตัวที่



(b) วงจรแบ่งกำลังวิลคินสัน

รูปที่ 2.10 วงจรแบ่งกำลังสองทางแบบ (a) ตัวที่ (b) วงจรแบ่งกำลังแบบวิลคินสัน

เราสามารถวิเคราะห์ห้วงจรแบ่งกำลังของวิลคินสันได้ด้วยวิธีทางเมตริกซ์ ด้วยการกำหนดเมตริกซ์ทั่วไปซึ่งมีความสมมาตรตามที่คุณสมบัติของวงจรแบ่งกำลังของวิลคินสันได้ดังนี้ [4]

$$\begin{bmatrix} s_{11} & s_{21} & s_{31} \\ s_{12} & s_{22} & s_{32} \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} \end{bmatrix} \tag{2.67}$$

เพื่อที่จะทำความเข้าใจเราจะกำหนดวงจรให้เป็นสองโหมดคือ โหมดคู่ และโหมดคี่ด้วยการใช้กำแพงแม่เหล็ก และไฟฟ้าไว้ในแนวของระนาบสมมาตรเราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของวงจรเมื่อมีเฟสตรงกันที่พอร์ต 2 และ 3 ได้เป็น

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{21} & s_{31} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \tag{2.68}$$

เราจะได้สมการ

$$b_2 = (s_{22} + s_{23})l \tag{2.69}$$

$$b_3 = (s_{23} + s_{22})l \tag{2.70}$$

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของสองสมการซึ่งแสดงว่า เราสามารถจะกำหนดสัมประสิทธิ์การสะท้อนของโหมดคู่ที่แต่ละพอร์ตได้เป็น

$$P_{even} = \frac{b_2}{a_2} = \frac{b_3}{a_3} = s_{22} + s_{23} \tag{2.71}$$

ในส่วนของสัญญาณที่ต่างเฟสที่พอร์ดเดียวกันนั้น เราสามารถจะกำหนดสัมประสิทธิ์การสะท้อนของ โหมดคู่ที่แต่ละพอร์ดได้เป็น

$$P_{even} = \frac{b_2}{a_2} = \frac{b_3}{a_3} = S_{22} - S_{23} \tag{2.72}$$

เมื่อรวมสองสมการหลังสุดเข้าด้วยกันจะเห็นว่า S_{22} และ S_{23} จะเป็นผลรวมที่เป็นเชิงเส้นแบบง่าย ๆ ของ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของโหมดคู่และโหมดคี่ เป็น

$$S_{22} = \frac{P_{even} + P_{odd}}{2} \tag{2.73}$$

$$S_{23} = \frac{P_{even} - P_{odd}}{2} \tag{2.74}$$

โดยปกติ S_{11} จะสามารถกำหนดได้เมื่อ $I_2 = I_3$ ดังนั้นจะทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่านตัวต้านทานขนานที่แสดงใน รูปที่ 2.10 ค่าอินทิกรัลอิมพีแดนซ์ของวงจรจะเท่ากันกับวงจรในโหมดคู่

$$Z_{in} = Z_{even} \tag{2.75}$$

เมื่อ Z_{in} อยู่ในรูปแบบของ Z_{even} จะทำให้เราได้

$$S_{11} = P_{even} \tag{2.76}$$

ซึ่งเราสามารถกำหนด S_{21} เป็น

$$|S_{21}| = 0.70 |\tau_{even}| \tag{2.77}$$

พารามิเตอร์แบบส่งผ่าน S_{21} ในโหมดคู่จะไม่ถูกกำหนดดังนั้นในโหมดคู่จะเป็นวงจรแบบรีแอคแตนซ์ (Reactance) ของโครงข่าย 2-port

$$\tau^2_{even} = l - p^2_{even} \tag{2.78}$$

ค่าของแต่ละส่วนประกอบในวงจรแบ่งกำลังของวิลคินสันจะหาได้จากสัมประสิทธิ์ของโหมดคู่และคี่ ซึ่งแสดง ค่าเป็นศูนย์

$$P_{even} = 0 \tag{2.79}$$

$$P_{odd} = 0 \tag{2.80}$$

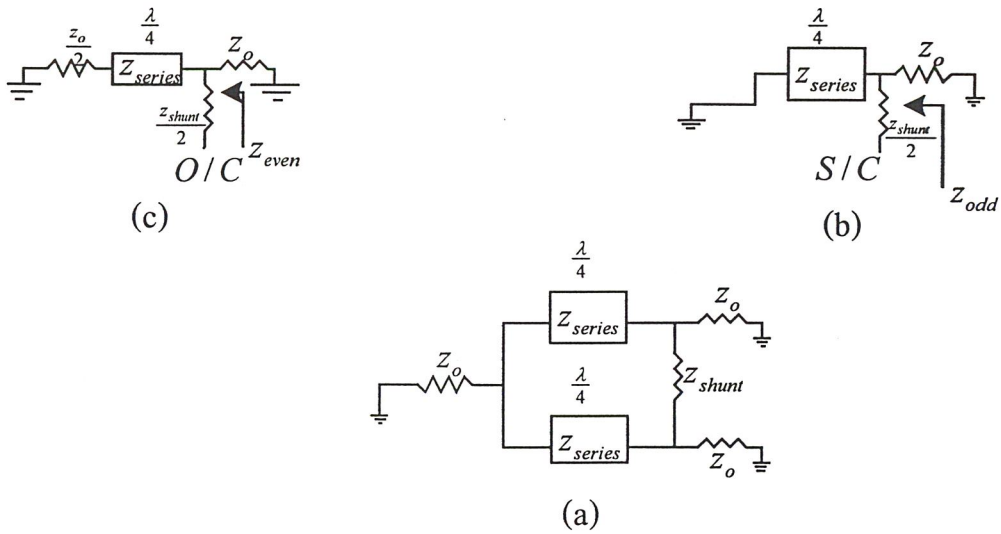
เมื่อสองสถานะเกิดขึ้นพร้อมกัน จะทำให้วงจรในโหมดคู่ และโหมดคี่ต่างก็จะแมตช์กับสายนำสัญญาณที่ เสมอกัน (Uniform Transmission Line)

$$Z_{even} = 0 \tag{2.81}$$

$$Z_{odd} = 0 \tag{2.82}$$

เราสามารถแสดงวงจรแบ่งกำลังของวิลคินสันในรูปของวงจร 2-port ได้ด้วยรูปที่ เมื่ออิมพีแดนซ์ของโหมดคู่ ที่ความถี่กลางจะสามารถกำหนดได้เป็น

$$Z_{even} = \frac{z^2_{series}}{2z_o} \tag{2.83}$$



รูปที่ 2.11 (a) วงจรแบ่งกำลังวิลคินสัน (b) วงจรในโหมดคี่ (c) วงจรโหมดคู่

ในส่วนของอิมพีแดนซ์ของโหมดคี่ที่ความถี่กลางจะแยกคำนวณด้วยการให้สถานะวงจรปิดที่พอร์ต 1 จะแปลงมาเป็นสถานะวงจรเปิดที่โหมดคี่ จะ ได้ผลเป็น

$$Z_{\text{odd}} = \frac{Z_{\text{shunt}}}{2} \quad (2.84)$$

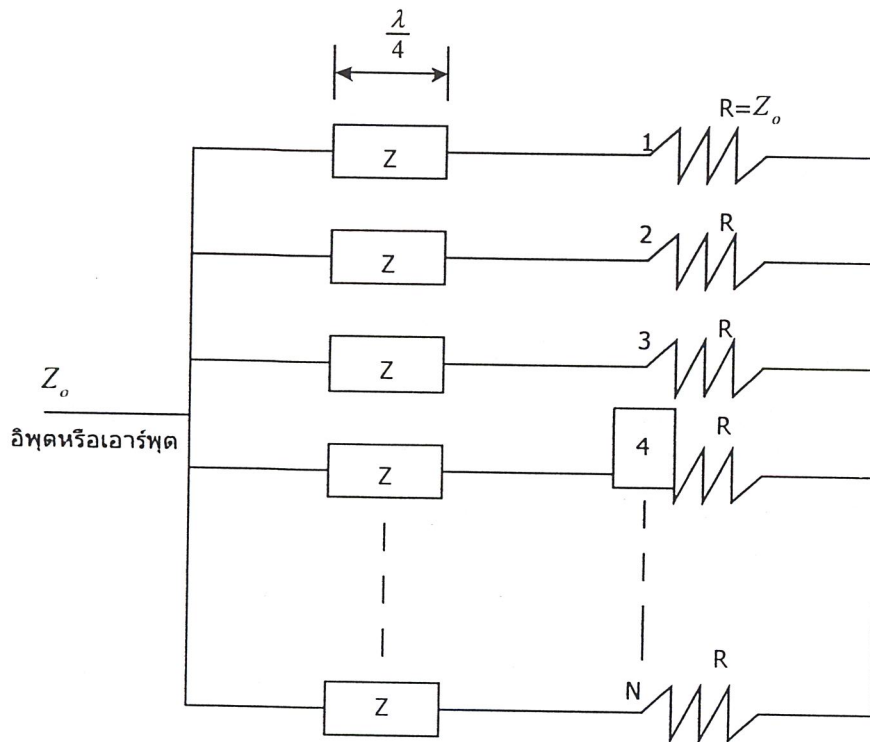
เมื่อรวมขั้นตอนทั้งสองด้วยกันพร้อมเงื่อนไขขอบเขตของวงจรแบ่งกำลังของวิลคินสันจะทำให้ได้คำตอบของรูปที่ 2.11 เป็น

$$Z_{\text{series}} = \sqrt{2}Z_0 \quad (2.85)$$

$$Z_{\text{shunt}} = 2Z_0 \quad (2.86)$$

วงจรแบ่งกำลังแบบวิลคินสันให้ช่วงกว้างแถบความถี่ที่หนึ่งออกเทพ (Octave) เราสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของวงจรแบ่งกำลังของวิลคินสันได้ด้วยวิธีการเพิ่มส่วนของวงจรแปลงอิมพีแดนซ์แบบคอแอดเรเตอร์เวฟไกต์ในส่วนอินพุตซึ่งจะทำให้อัตราส่วนของคลื่นนิ่งมีค่าลดลงและเราสามารถวงจรแบ่งกำลังของวิลคินสันนี้มีขยายช่วงกว้างแถบความถี่ให้กว้างขึ้นได้ด้วยดัดแปลงวงจรให้เป็นแบบหลายส่วน (Multi-Section)

วงจรแบ่งกำลังแบบวิลคินสันแบบ N พอร์ตซึ่งเป็นวงจรแบ่งกำลังที่ไม่เรโซแนนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โครงสร้างจะเป็นส่วนอินพุตพอร์ตซึ่งมีอิมพีแดนซ์ Z_0 ป้อนสัญญาณให้แก่อาร์พูทจำนวน N พอร์ตซึ่งมีอิมพีแดนซ์คุณสมบัติเป็น $\sqrt{N}Z_0$ ซึ่งขนาดกันมีความยาวเท่ากับหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น การแยกวงจรทางด้านอาร์พูทจำนวน N พอร์ตนั้นเกิดจากการเชื่อมต่อของตัวต้านทานในแบบสตาร์ไปยังทุก N พอร์ต ซึ่งวงจรแบ่งกำลังแบบนี้จะมีการสูญเสียค่าช่วงกว้างแถบความถี่ปานกลางและมีความสมมาตรของเฟสและแอมปริจูด แต่จะมีข้อด้อยอยู่ตรงที่การต่อเชื่อมกันของตัวต้านทานดังแสดงในรูปนั้นไม่เป็นไปได้ยากในวงจรเชิงระนาบ



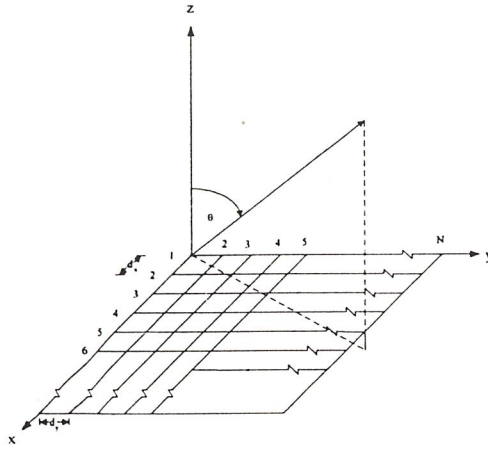
รูปที่ 2.12 วงจรแบ่งกำลัง N ทางแบบวิลคินสัน

2.8 สายอากาศแถวลำดับ (Antenna Array)

เนื่องจากรูปแบบของสายอากาศเพียงตัวเดียว ไม่สามารถจะให้ค่าการชี้ทิศทางและค่าอัตราขยาย (gain) ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบสายอากาศให้มีค่ามาก ๆ ได้ ดังนั้น วิธีการหนึ่งที่จะทำให้ค่าการชี้ทิศทางและค่าอัตราขยายให้มีค่ามากขึ้นได้ คือ การจัดรูปแบบของสายอากาศให้เป็นแถวลำดับ (Array) ซึ่งเป็นการนำสายอากาศตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปมาจัดเรียงในรูปแบบต่าง ๆ แต่รูปแบบที่ได้นั้นจะต้องมีความเข้าใจที่จะทำให้สนามที่แผ่กระจายออกจากตัวสายอากาศแต่ละตัวเกิดการเสริมกัน ในทิศทางที่ต้องการและหักล้างกันไปในทิศทางที่ไม่ต้องการ ซึ่งการทำแถวลำดับนั้นมีหลายแบบด้วยกัน แต่ที่จะนำมาใช้ในโครงการนี้จะเป็นการจัดเรียงแถวลำดับเชิงระนาบ (Planar Array)

2.8.1. แถวลำดับเชิงระนาบ (Planar Array)

คือ การรวมกันระหว่างแถวลำดับในแนวแกน x และแถวลำดับในแนวแกน y โดยให้สายอากาศแต่ละตัวในแนวแกน x มีจำนวนทั้งหมด M ตัว แต่ละตัวห่างกัน dx และเฟสเป็น β_x และให้สายอากาศแต่ละตัวในแนวแกน y มีจำนวนทั้งหมด N ตัว แต่ละตัวห่างกัน dy และเฟสเป็น β_y สามารถแสดงการจัดเรียงสายอากาศแบบระนาบ ได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การจัดเรียงสายอากาศแถวลำดับแบบระนาบ

ดังนั้น อาร์เรย์แฟคเตอร์ที่ได้สำหรับแถวลำดับแบบระนาบ คือ การคูณกันระหว่างอาร์เรย์แฟคเตอร์ในแนวแกน x กับอาร์เรย์แฟคเตอร์ในแนวแกน y ได้ว่า

$$AF = AF_x \times AF_y \quad (2.87)$$

$$AF = e^{j\left(\frac{M-1}{2}\right)\psi_x} \left[\frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right] e^{j\left(\frac{N-1}{2}\right)\psi_y} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right] \quad (2.88)$$

เมื่อพิจารณากรณีที่อยู่กึ่งกลางของสายอากาศแต่ละตัว จะได้ว่า

$$AF = \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right) \sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right) \sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \quad (2.89)$$

เมื่อ M คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน x

N คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน y

บทที่ 3

การคำนวณและการออกแบบ

การคำนวณและการออกแบบรูปแบบของสายอากาศไมโครสตริป จะทำการคำนวณและออกแบบแผ่นตัวนำแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากและแผ่นตัวนำแบบวงกลม โดยจะใช้ความถี่ที่ 2.45 จิกะเฮิร์ต และใช้สารไดอิเล็กตริกแบบอิพ็อกซี่ ซึ่งมีค่าคงที่สัมพัทธ์ไดอิเล็กตริกของวัสดุที่นำมาทำซบสเตรท มีค่าประมาณ 4.3 และความหนาของสารไดอิเล็กตริก มีค่าประมาณ 0.15 เซนติเมตร รูปแบบของสายอากาศไมโครสตริปที่ใช้ในการวิเคราะห์จะเป็นสายอากาศไมโครสตริป 1 องค์กรประกอบ

3.1 การคำนวณและการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก

รูปแบบของการวิเคราะห์ สายอากาศไมโครสตริป แผ่นสี่เหลี่ยมมุมฉากด้วยวิธีสร้างแบบ จำลองควาวิที่ตั้งได้กล่าวในทฤษฎีข้างต้น ส่วนแรกของการออกแบบ คือ จะต้องเลือกความหนาของสารไดอิเล็กตริก ที่เหมาะสม สิ่งที่เป็นและปัจจัยที่จะต้องพิจารณาต่อมาคือ รายละเอียดต่างๆ เช่น ค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารไดอิเล็กตริก เลือกความถี่ใช้งานความกว้างของตัวแพร่กระจายคลื่นในทางปฏิบัติ สามารถได้จาก สมการที่(3.1)

$$W = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad \text{เซนติเมตร} \quad (3.1)$$

โดยที่ ϵ_r คือ ค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารไดอิเล็กตริก = 4.3

λ ค่าของความยาวคลื่น

$$\lambda = \frac{c}{f_r} \quad \text{เมตร} \quad (3.2)$$

โดยที่

c คือ ค่าความเร็วแสง = $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

f_r คือ ค่าความถี่ใช้งาน = $2.45 \times 10^9 \text{ Hz}$

แทนค่า c และ f_r ลงในสมการที่(3.2)

$$\lambda = 0.122 \text{ เมตร}$$

แทนค่า ϵ_r และ λ ลงในสมการที่(3.1)

$$W = 3.8 \text{ เซนติเมตร} = 0.32 \lambda$$

สำหรับค่า ความยาว (L) หาได้จากสมการที่ (3.3)

$$L = \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{เซนติเมตร} \quad (3.3)$$

แทนค่า ϵ_r และ λ ลงในสมการที่(3.3)

$$L = 3 \text{ เซนติเมตร} = 0.245 \lambda$$

3.1.1 การออกแบบหาจุดป้อนสัญญาณ ด้วยสายส่งไมโครสตริป (microstrip line)

การออกแบบจะต้องคำนึงถึงตำแหน่งของจุดป้อนสัญญาณที่เหมาะสม เพื่อที่จะให้มีอิมพีแดนซ์ เท่ากับ ระบบที่ใช้งาน โดยในการออกแบบจะออกแบบให้สายอากาศไมโครสตริปมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ดังนั้น ในการคำนวณหาตำแหน่งของจุดป้อน สัญญาณของตัวสายอากาศสามารถหาได้จากสมการที่(3.4)

$$Z(in) = R_{in}(y=0) \cos^2\left(\frac{\pi}{L} y_0\right) \quad (3.4)$$

โดยที่

Y_0 คือ ระยะห่างจากขอบแผ่นตัวนำถึงขอบของช่องว่าง(Slot)

R_{in} คือ ค่าความต้านทานด้านอินพุทที่แมทซ์กับ Y_0

และหาได้จากสมการที่(3.5)

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \quad \text{โอห์ม} \quad (3.5)$$

โดยที่

G_1 และ G_{12} คือ ค่าความนำ ซีเมนต์

$$G_1 = \frac{W}{120\lambda} \left[1 - \frac{1}{24} (k_0 h)^2 \right] \quad (3.6)$$

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right] J_0(k_0 L \sin \theta) \sin^3 \theta d\theta \quad (3.7)$$

นำค่า W , L และ k_0 แทนลงในสมการที่(3.6)และ(3.7)โดยที่ k_0 หาได้จากสมการที่(3.8)

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.8)$$

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

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

ส่วนเครื่องหมายจะเป็นบวกหรือเป็นลบนั้นขึ้นอยู่กับ Dominate Mode ว่าเป็นคี่หรือคู่ ถ้าเป็นคี่ จะได้เป็นเครื่องหมาย (+) แต่ถ้าเป็นคู่จะได้เครื่องหมายเป็น (-) นำค่า G_1 และ G_{12} แทนลงในสมการที่(3.5)

$$R_{in} = 315.428 \quad \text{โอห์ม}$$

นำค่า R_{in} และค่า L แทนลงในสมการที่(3.4) และเมื่อใช้โปรแกรม Mathcad 2001 วิเคราะห์

จะได้ค่า $Z(in) = 50$ โอห์ม ที่ $Y_0 = 1.035$ เซ็นติเมตร

3.1.2 การออกแบบหาค่าความกว้างของสายส่ง(Stip Line)

จะใช้แถบตัวนำเป็นทองแดงร่วมกับสารไดอิเล็กตริกชั้นสเตรท(Sustrate) โดยแถบทองแดงที่ใช้จะวางตัวอยู่บนสารไดอิเล็กตริกชั้นสเตรท(Sustrate) และ พิจารณาค่าความกว้างของสายส่งจากค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Z_0)

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \ln \left[\frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right] ; \frac{W_0}{h} \leq 1 \tag{3.9}$$

และ

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{reff}} \left[\frac{W_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1.444 \right) \right]} ; \frac{W_0}{h} > 1 \tag{3.10}$$

โดยที่

W_0 คือ ค่าความกว้างของสายส่ง(Stip Line)

ϵ_{reff} คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลสัมพัทธ์

และหาได้จากสมการที่(3.11)

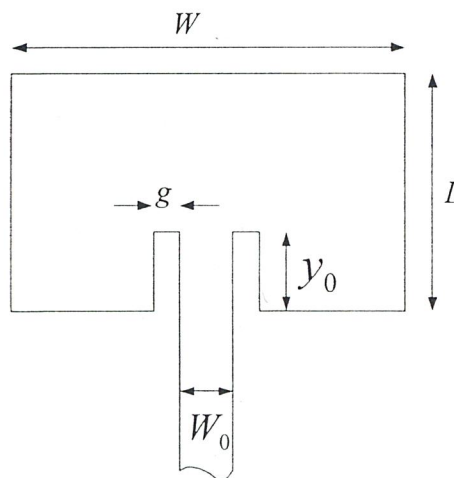
$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1} \tag{3.11}$$

แทนค่า W, ϵ_r และ h ลงในสมการที่ (3.11)

$$\epsilon_{reff} = 3.884$$

และเมื่อใช้โปรแกรม Mathcad 2001 วิเคราะห์ จะได้ค่า $Z_0 = 50$ โอห์ม ที่

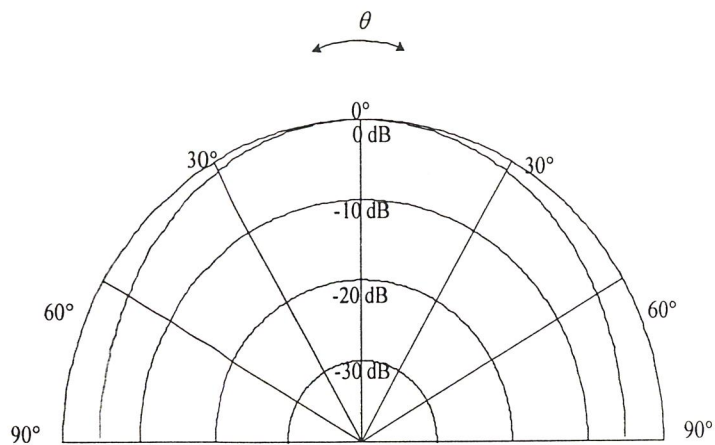
$$W_0 = 2.49 \text{ มิลิเมตร โดยที่ } g \text{ จะมีค่าอยู่ในระหว่าง } 0.1 \text{ ถึง } 0.5 W_0$$



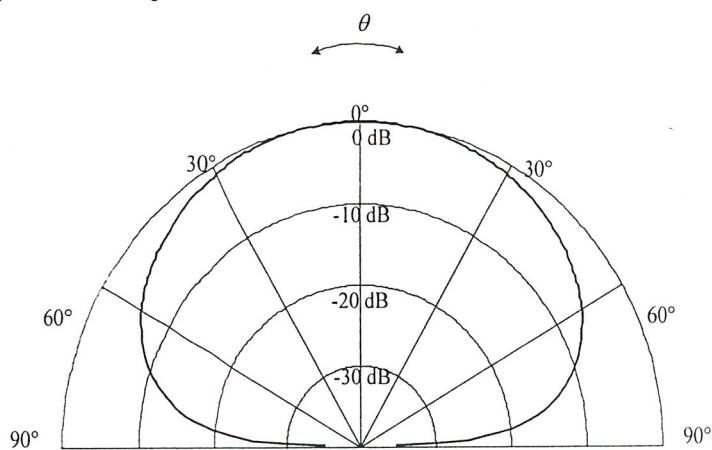
รูปที่ 3.1 สายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก 1 องค์ประกอบ

การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเป็นแบบทิศทางเดียวแสดงได้ดังรูป



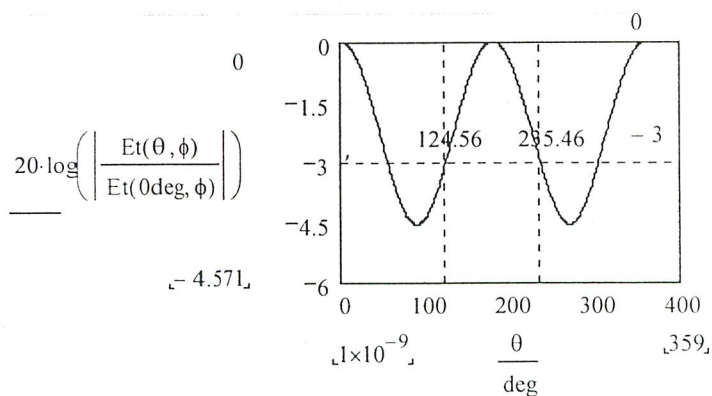
รูปที่ 3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบไฟฟ้า



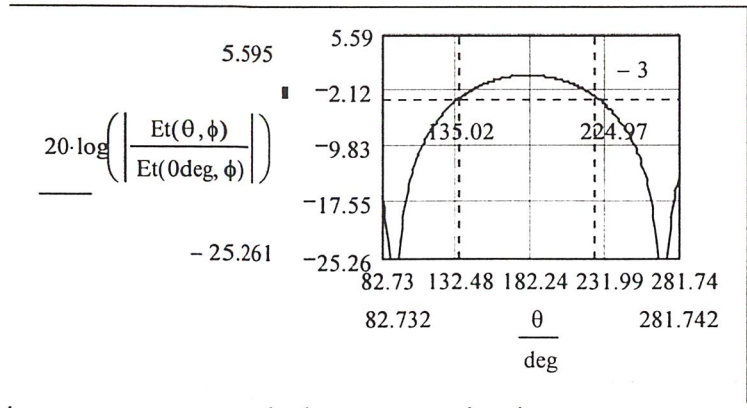
รูปที่ 3.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็ก

การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

การพิจารณาค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่ง

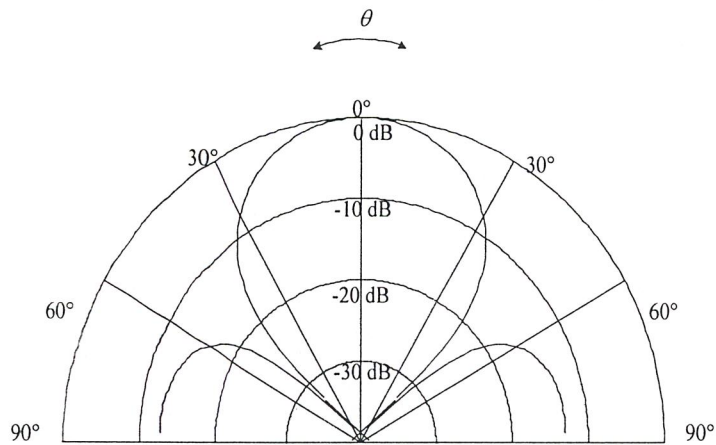


รูปที่ 3.4 ความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้า

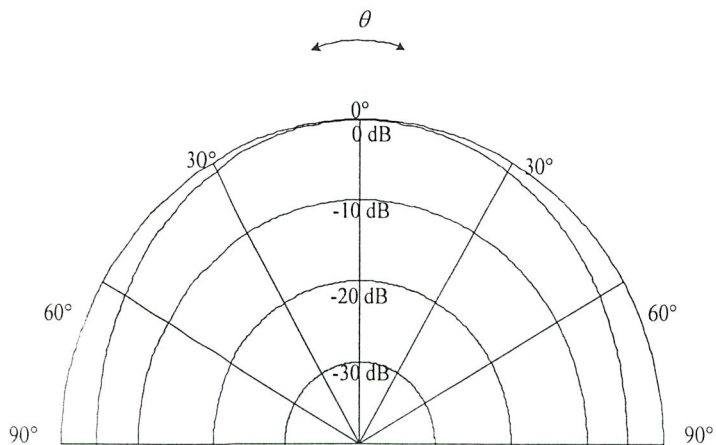


รูปที่ 3.5 ความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบสนามแม่เหล็ก

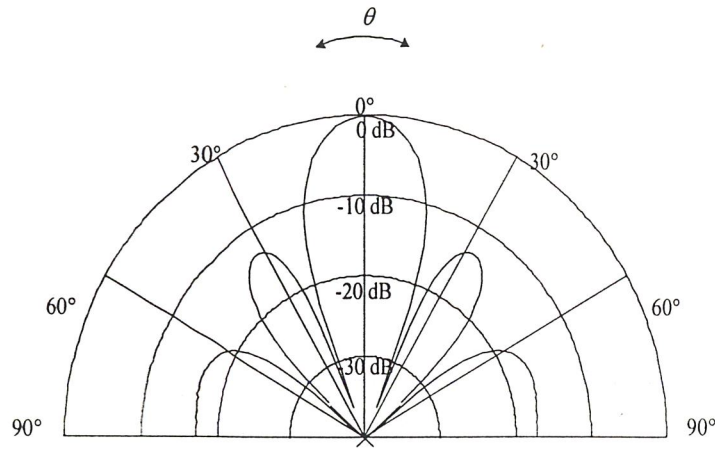
การพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆเมื่อนำมาจัดเรียงแถวลำดับเมื่อจัดเรียงในแนวแกน x สามารถแสดงค่าต่างๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้



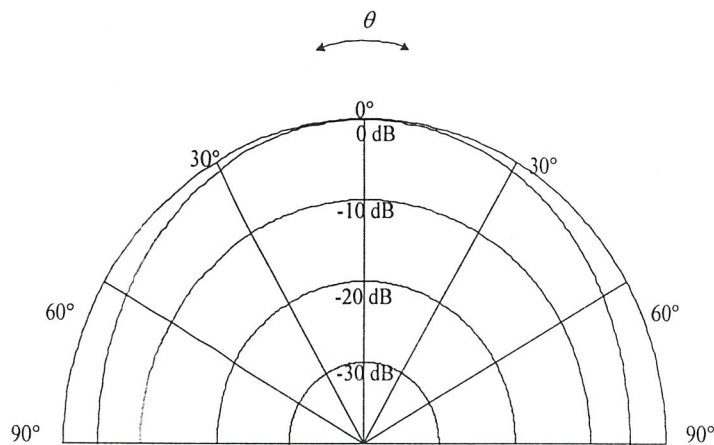
รูปที่ 3.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อนำสายอากาศ 2 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน x



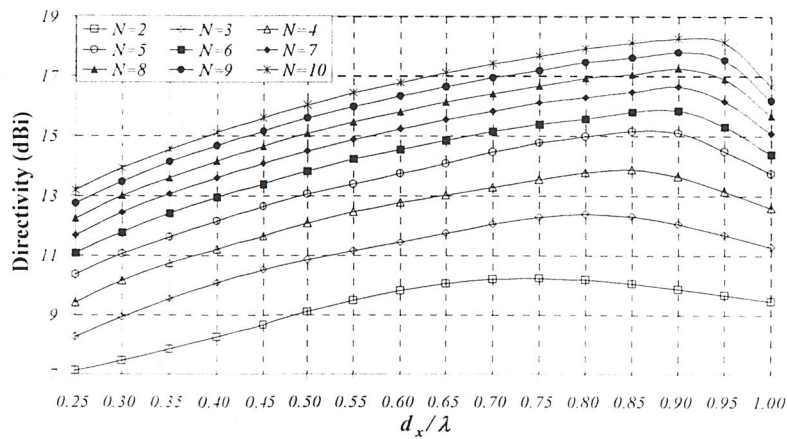
รูปที่ 3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศ 2 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน x



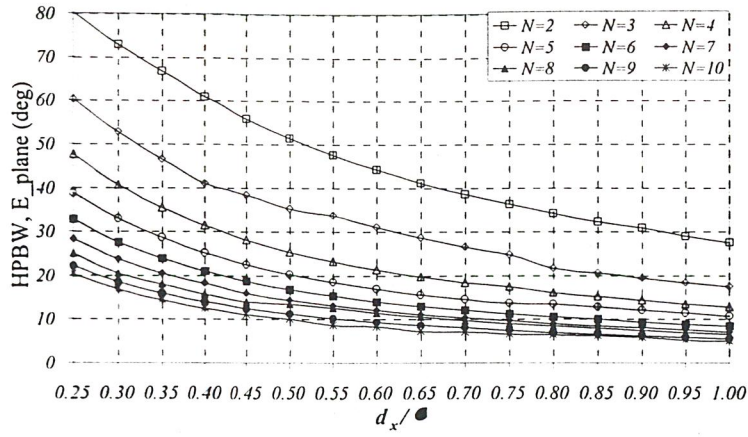
รูปที่ 3.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อนำสายอากาศ 4 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถว ลำดับในแนวแกน x



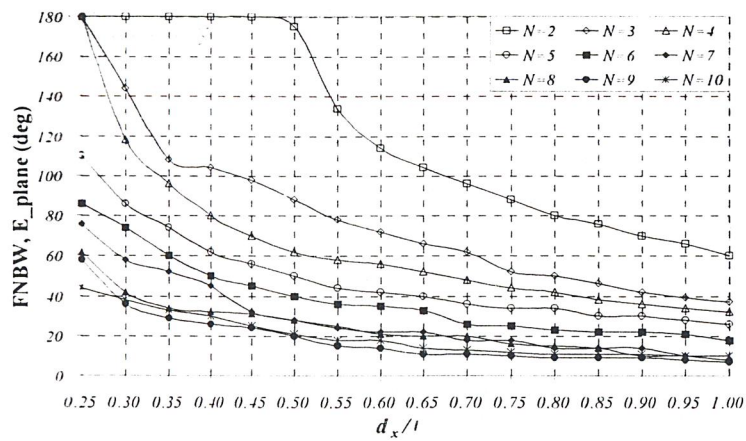
รูปที่ 3.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศ 4 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถว ลำดับในแนวแกน x



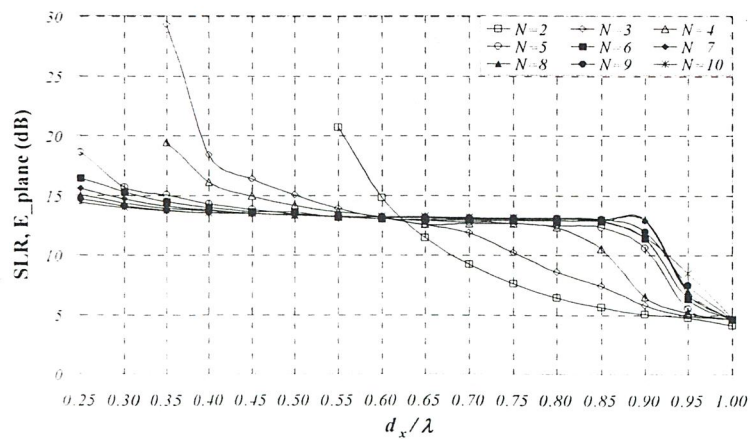
รูปที่ 3.10 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเมื่อมีการจัดเรียงสายอากาศในแนวแกน x ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์ประกอบ



รูปที่ 3.11 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อมีการจัดเรียงสายอากาศในแนวแกน x ตั้งแต่ 2 - 10 องค์ประกอบ

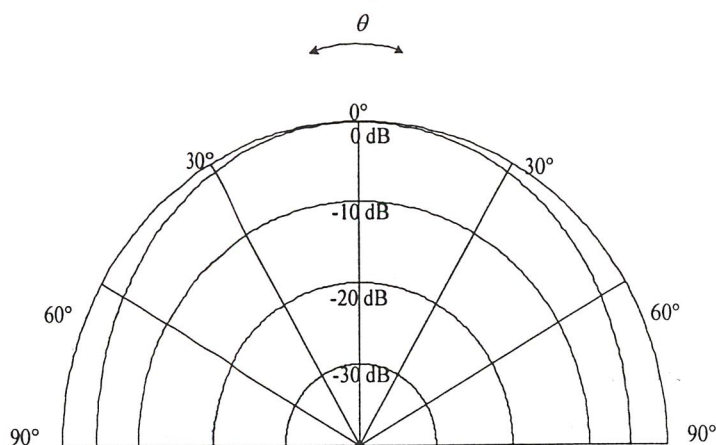


รูปที่ 3.12 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีกำลังลดลงต่ำสุดครั้งแรกเมื่อมีการจัดเรียงสายอากาศในแนวแกน x ตั้งแต่ 2 - 10 องค์ประกอบ

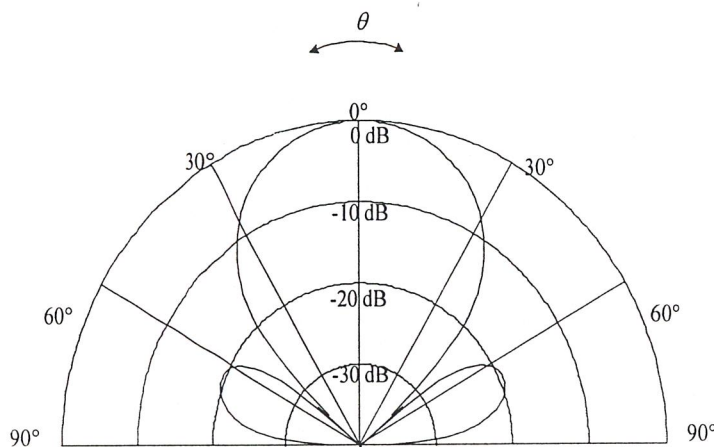


รูปที่ 3.13 ค่าอัตราส่วนกำลังคลื่นหลักต่อกำลังคลื่นย่อยเมื่อมีการจัดเรียงสายอากาศในแนวแกน x ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์ประกอบ

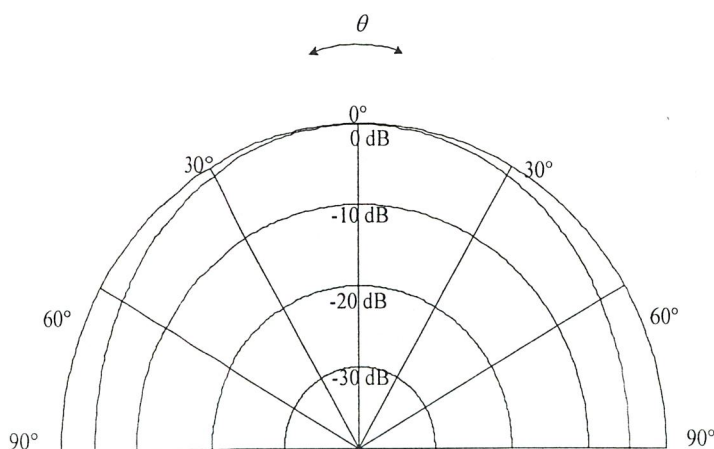
เมื่อนำสายอากาศตั้งแต่ 2 ถึง 10 ตัวเมื่อจัดเรียงในแนวแกน y สามารถแสดงค่าต่างๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้



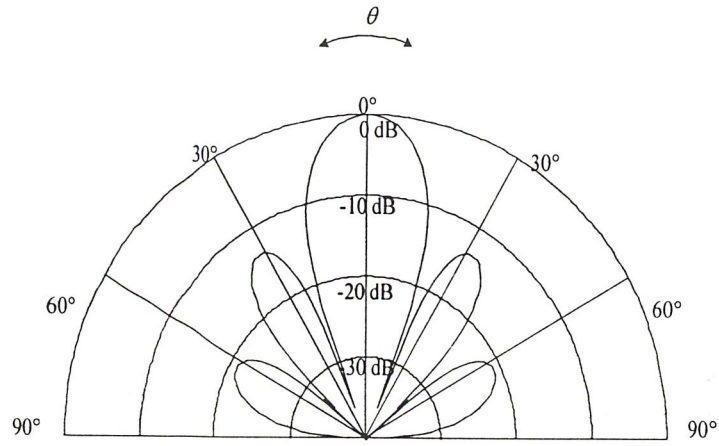
รูปที่ 3.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อนำสายอากาศ 2 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน y



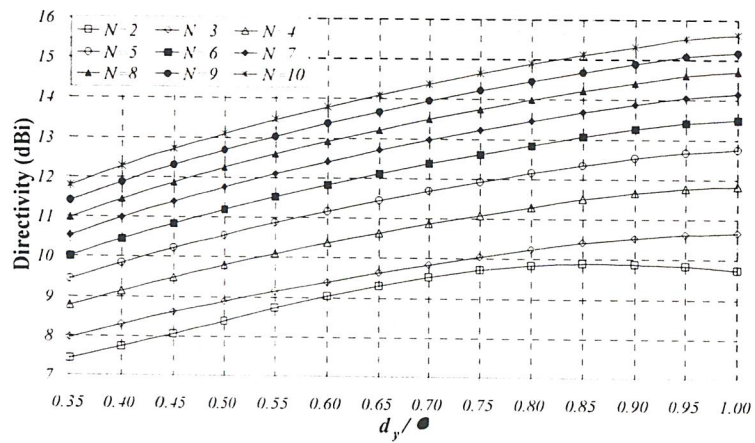
รูปที่ 3.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศ 2 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน y



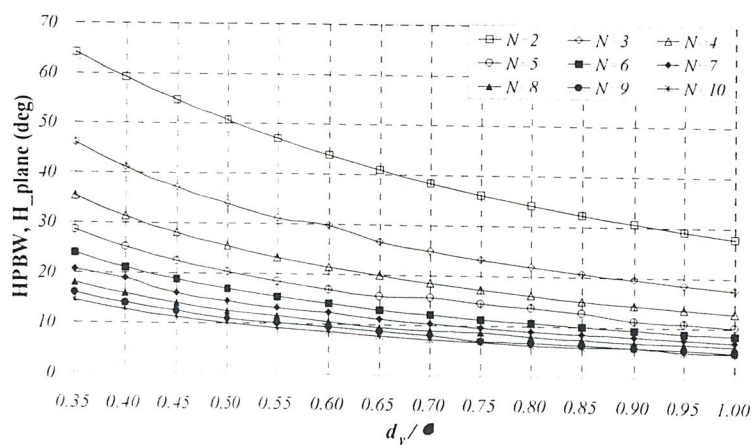
รูปที่ 3.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อนำสายอากาศ 4 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน y



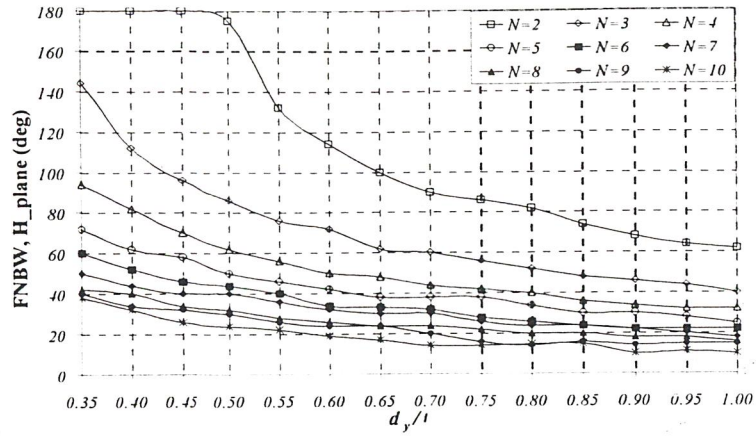
รูปที่ 3.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศ 4 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน y



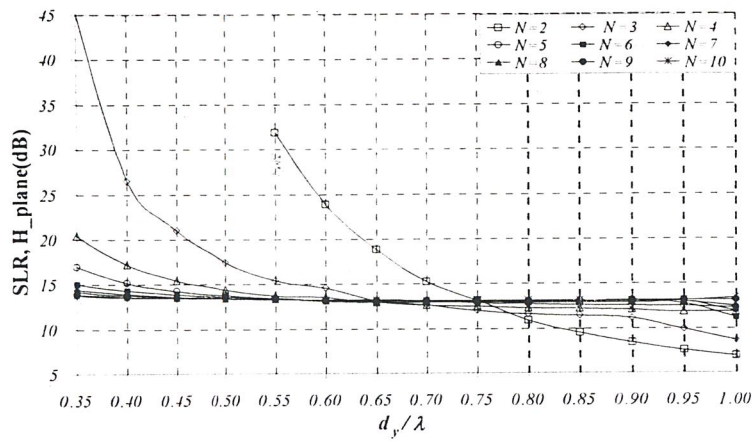
รูปที่ 3.18 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเมื่อมีการจัดเรียงสายอากาศในแนวแกน y ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์ประกอบ



รูปที่ 3.19 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อมีการจัดเรียงสายอากาศในแนวแกน y ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์ประกอบ

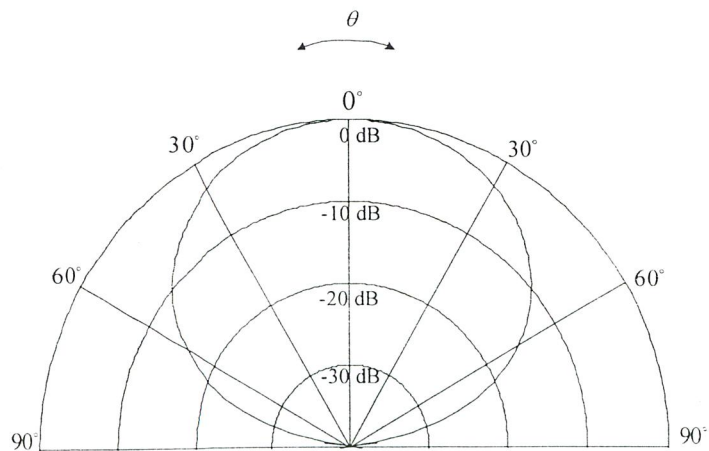


รูปที่ 3.20 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงต่ำสุดครั้งแรกเมื่อมีการจัดเรียงสายอากาศในแนวแกน y ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์ประกอบ

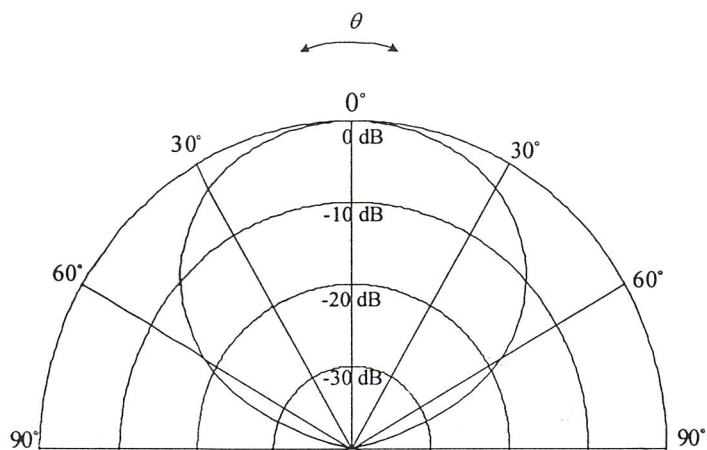


รูปที่ 3.21 ค่าอัตราส่วนกำลังคลื่นหลักต่อกำลังคลื่นย่อยเมื่อมีการจัดเรียงสายอากาศในแนวแกน y ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์ประกอบ

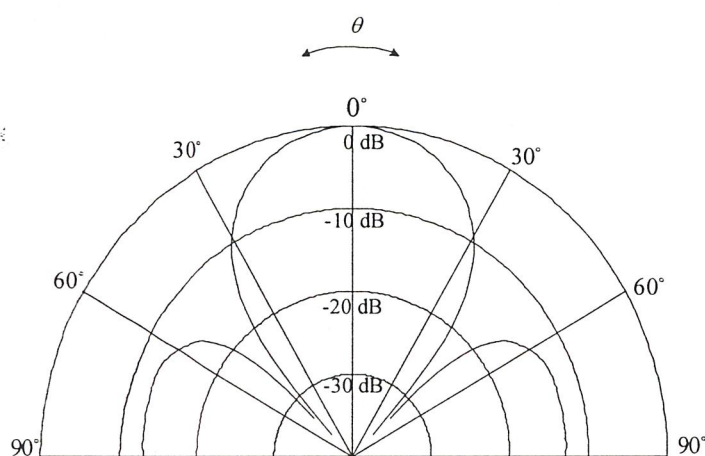
ลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่วางแถวลำดับเชิงระนาบโดยระยะห่างระหว่างแต่ละองค์ประกอบเท่ากับ 0.5λ



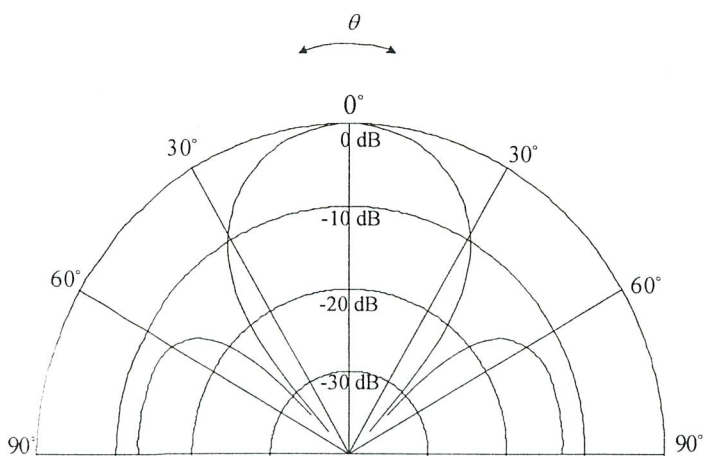
รูปที่ 3.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศสี่เหลี่ยมจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบจำนวน 4 องค์ประกอบ



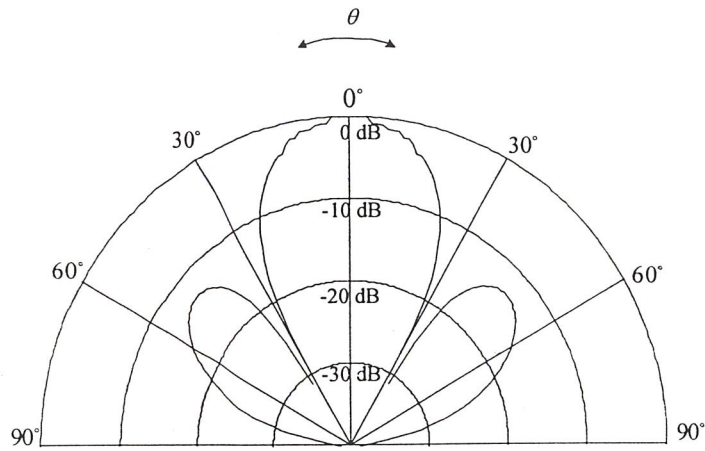
รูปที่ 3.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กของสายสายอากาศสี่เหลี่ยมจัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบระนาบจำนวน 4 องค์ประกอบ



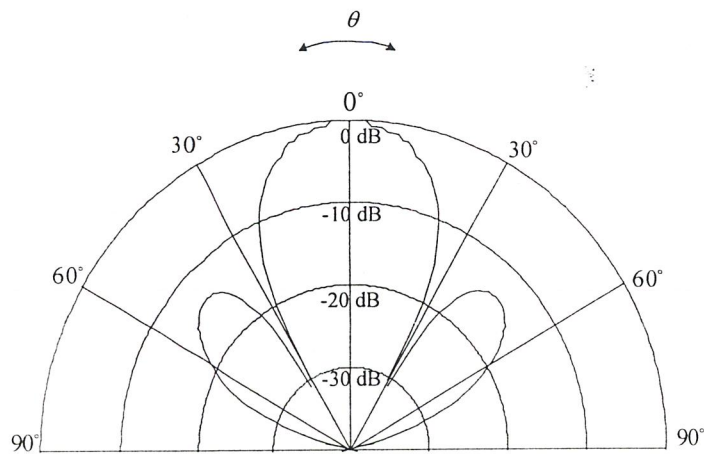
รูปที่ 3.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศสี่เหลี่ยม จัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบระนาบจำนวน 9 องค์ประกอบ



รูปที่ 3.25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศสี่เหลี่ยมจัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบระนาบจำนวน 9 องค์ประกอบ



รูปที่ 3.26 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศ สี่เหลี่ยมจัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบ ระนาบ 16 องค์ประกอบ



รูปที่ 3.27 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศสี่เหลี่ยมจัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบ ระนาบจำนวน 16 องค์ประกอบ

3.2. การคำนวณและการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแผ่นวงกลม

รูปแบบของการวิเคราะห์ สายอากาศไมโครสตริป แผ่นวงกลมด้วยวิธีสร้างแบบจำลองควาวิตี้ดังได้กล่าวใน ทฤษฎีข้างต้น เราสามารถคำนวณหาสายอากาศไมโครสตริปแผ่นวงกลมสำหรับโหมดพื้นฐาน(Dominant Mode) TM₁₁₀เนื่องด้วยเป็น โหมดที่สายอากาศที่ออกแบบมามีขนาดเล็กที่สุดและจะเกิดจากการเรโซแนนซ์เฉพาะความถี่ที่ ออกแบบด้วย

จะสามารถหาค่ารัศมีของสายอากาศ(a)ได้จากสมการ

$$f_{mn0} = \frac{x_{mn}c}{2\pi a\sqrt{\epsilon\mu}} \quad \text{เซนติเมตร} \quad (3.12)$$

$$a = \frac{1.8412c}{2\pi f_{110}\sqrt{\epsilon_r}} = 1.751 \quad \text{เซนติเมตร}$$

และหาค่ารัศมีประสิทธิผลของสายอากาศด้วยการใช้สมการ

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{a\pi\epsilon_r} \left[\ln \left(\frac{a\pi}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \text{ เซนติเมตร} \tag{3.13}$$

เมื่อแทนค่า a ลงในสมการจะได้

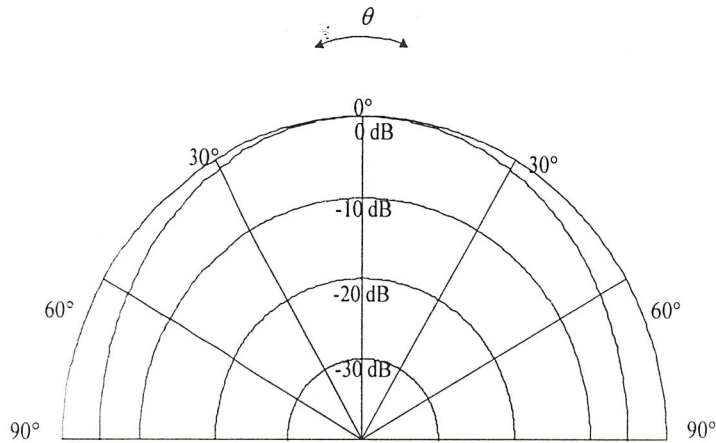
$$a_e = 1.803 \text{ เซนติเมตร}$$

จากสมการที่สายอากาศไมโครสตริปที่จัดสร้างขึ้นทำมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีวัสดุฐานรองประเภทอีพ็อกซี่ ซึ่งมีค่าประมาณ 4.3 มีความหนาของวัสดุฐานรอง $h = 0.15$ เซนติเมตรและความถี่ที่ใช้ในการออกแบบเป็น 2.45 กิกะเฮิร์ตทำการออกแบบให้อยู่ในโหมดพื้นฐาน

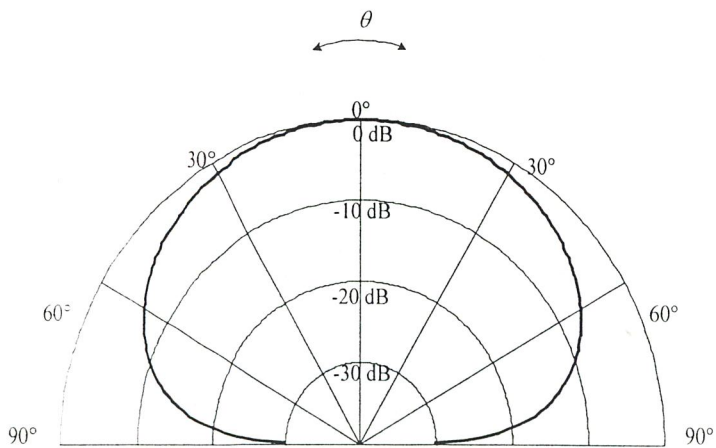
พิจารณาถึงตำแหน่งในการป้อนสัญญาณให้แก่สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมโดยใช้สมการที่(2.64)-(2.66)ในการพิจารณาค่าตำแหน่งจุดป้อนสัญญาณที่มีอินพุทอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์มซึ่งคำนวณโดยใช้โปรแกรม CPATCT ช่วยในการคำนวณได้ตำแหน่งการป้อนสัญญาณที่ระยะ 0.67เซนติเมตรจากจุดศูนย์กลางของสายอากาศ

การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเป็นแบบทิศทางเดียวแสดงได้ดังรูป



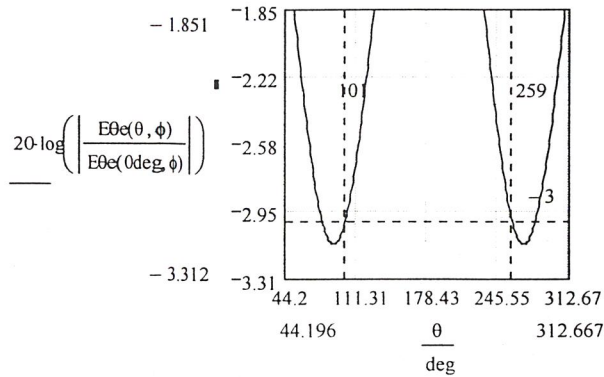
รูปที่ 3.28 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า



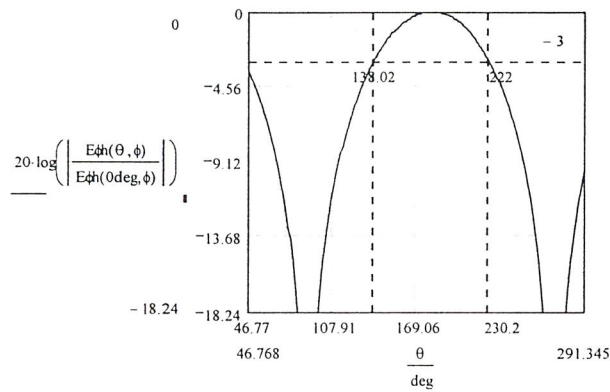
รูปที่ 3.29 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็ก

การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

การพิจารณาค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่ง



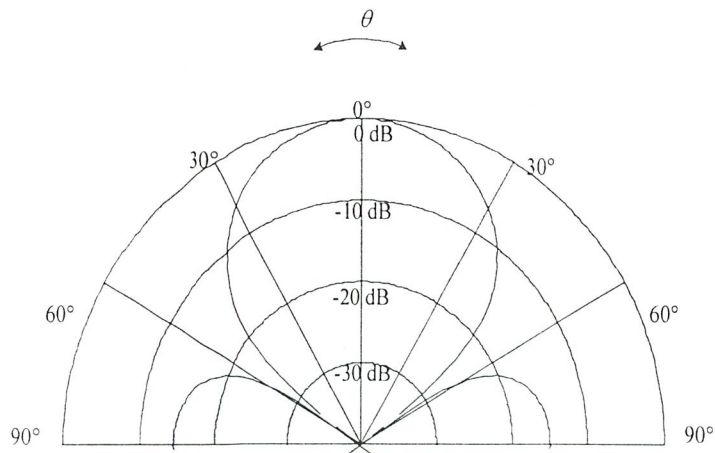
รูปที่ 3.30 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้า



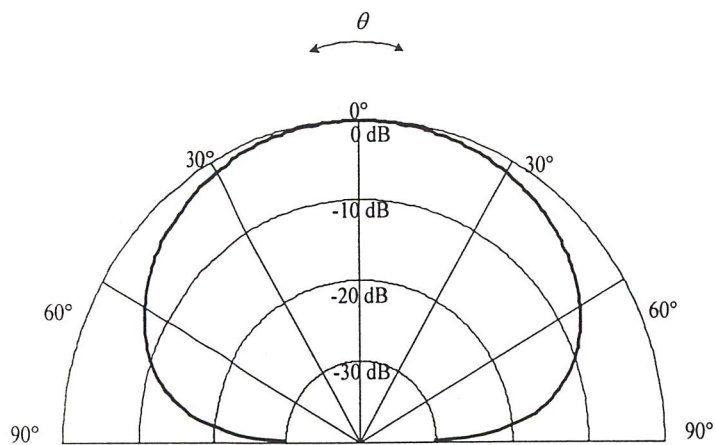
รูปที่ 3.31 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบสนามแม่เหล็ก

การพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆเมื่อนำมาจัดเรียงแถวลำดับ

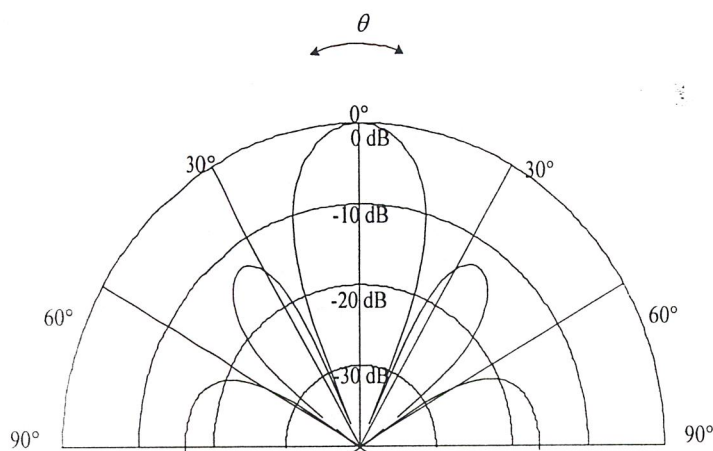
เมื่อจัดเรียงในแนวแกน x สามารถแสดงค่าต่างๆได้ดังรูปต่อไปนี้



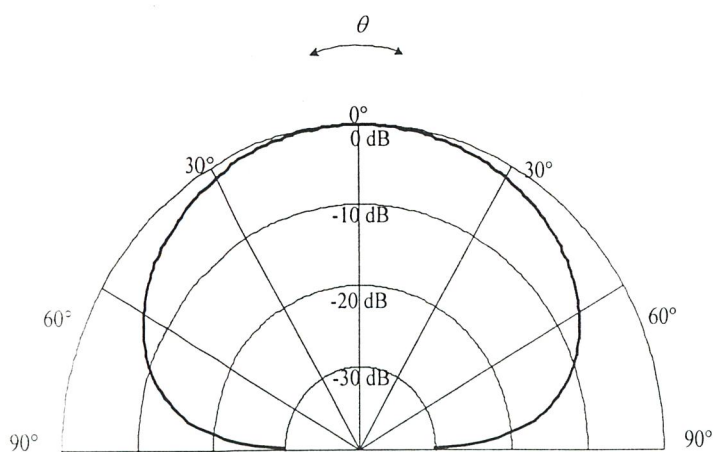
รูปที่ 3.32 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อนำสายอากาศ 2 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน x



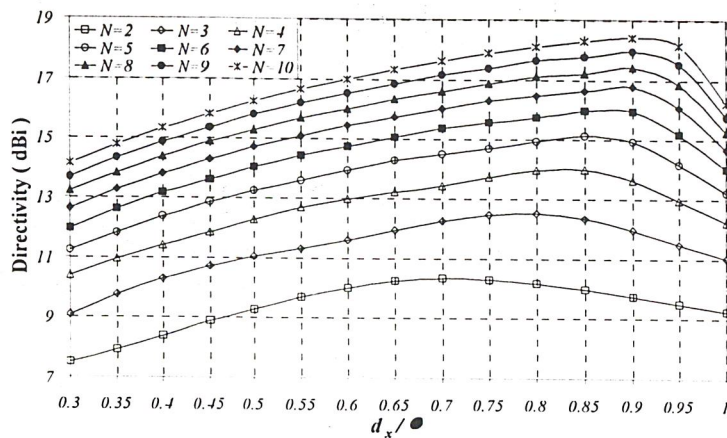
รูปที่ 3.33 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศ 2 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน x



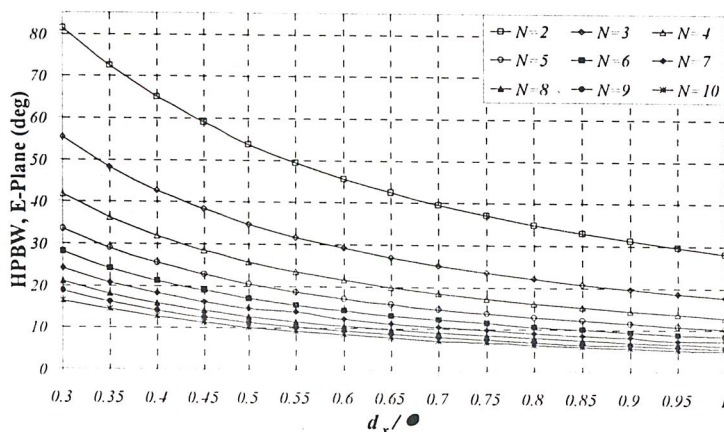
รูปที่ 3.34 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อนำสายอากาศ 4 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน x



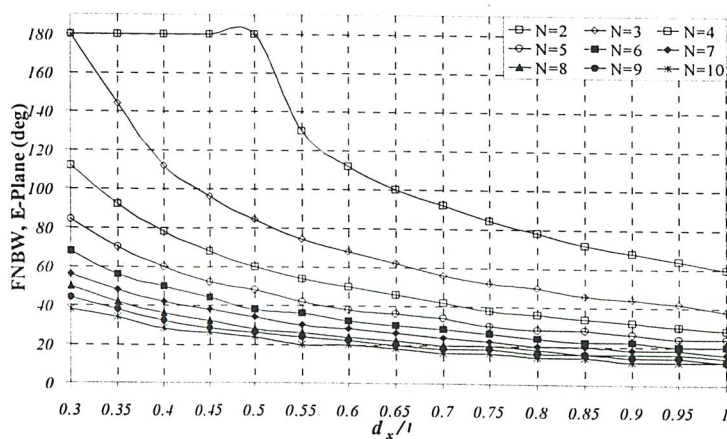
รูปที่ 3.35 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศ 4 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน x



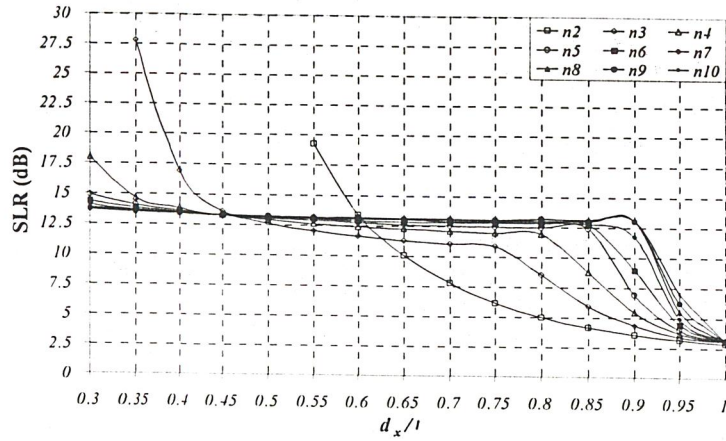
รูปที่ 3.36 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเมื่อมีการจัดเรียงสายอากาศในแนวแกน x ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์ประกอบ



รูปที่ 3.37 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อมีการจัดเรียงสายอากาศในแนวแกน x ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์ประกอบ

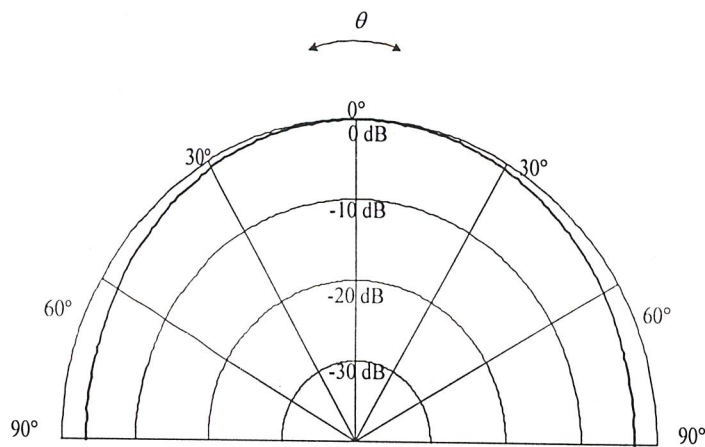


รูปที่ 3.38 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงต่ำสุดครั้งแรกเมื่อมีการจัดเรียงสายอากาศในแนวแกน x ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์ประกอบ

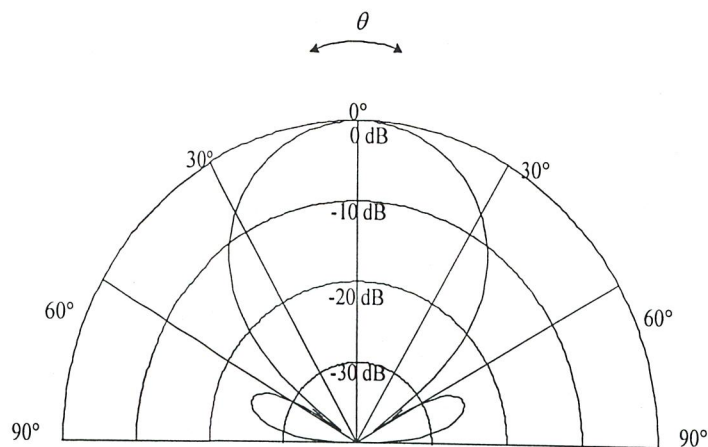


รูปที่ 3.39 ค่าอัตราส่วนกำลังคลื่นหลักต่อกำลังคลื่นย่อยเมื่อมีการจัดเรียงสายอากาศในแนวแกน x ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์ประกอบ

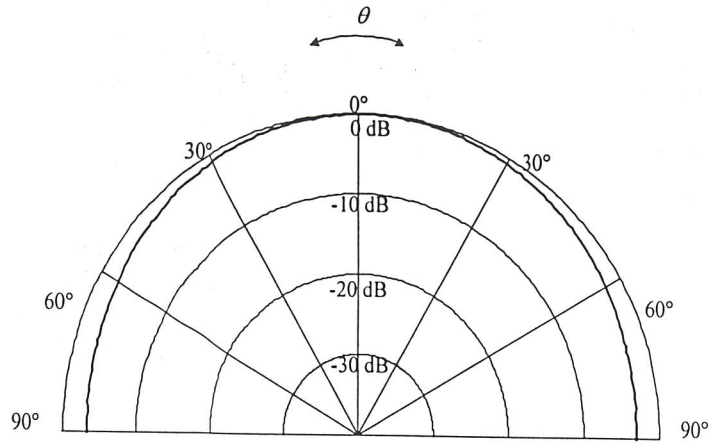
เมื่อจัดเรียงในแนวแกน y สามารถแสดงค่าต่างๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้



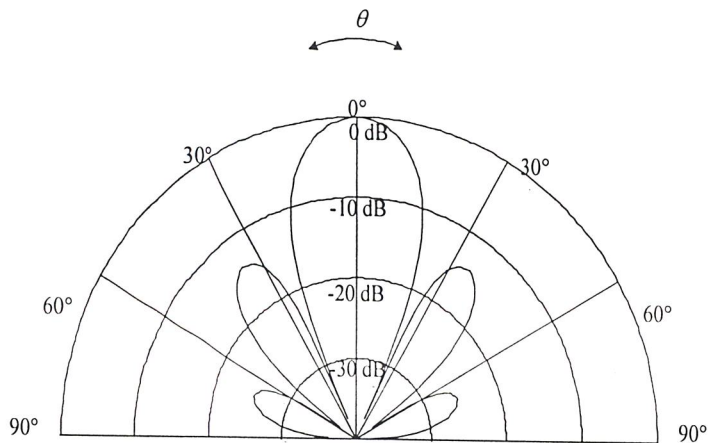
รูปที่ 3.40 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อนำสายอากาศ 2 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถว ลำดับในแนวแกน y



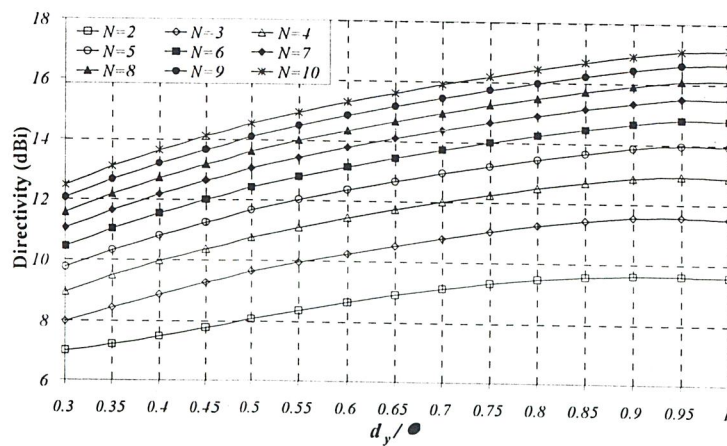
รูปที่ 3.41 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศ 2 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน y



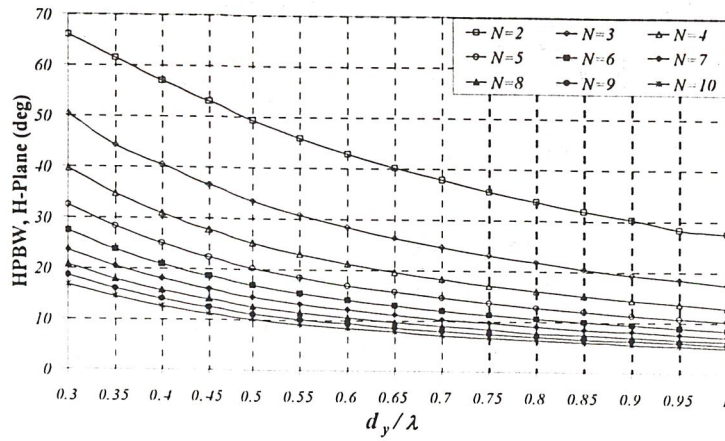
รูปที่ 3.42 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อนำสายอากาศ 4 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถว ลำดับในแนวแกน y



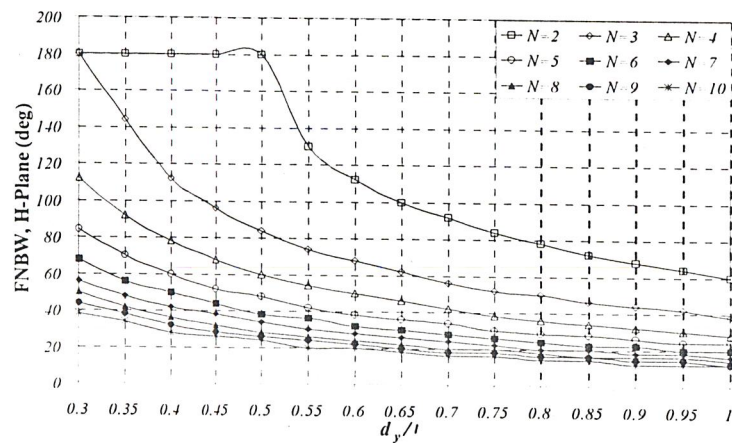
รูปที่ 3.43 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศ 4 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถว ลำดับในแนวแกน y



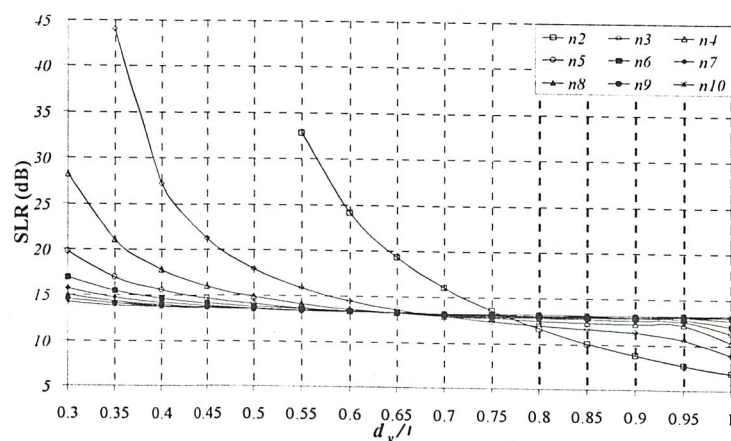
รูปที่ 3.44 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเมื่อมีการจัดเรียงสายอากาศในแนวแกน y ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์ประกอบ



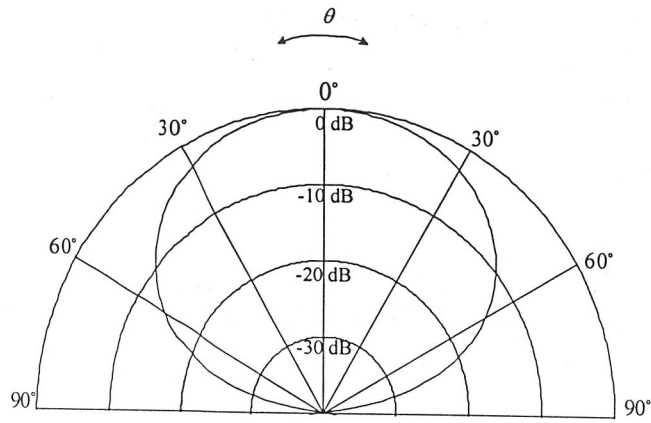
รูปที่ 3.45 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อมีการจัดเรียงสายอากาศในแนวแกน y ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์ประกอบ



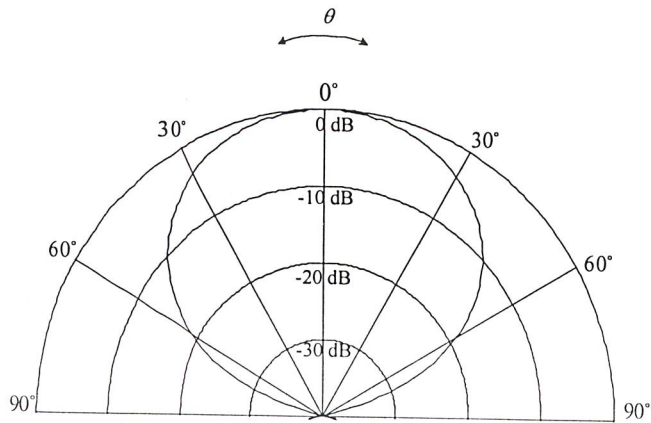
รูปที่ 3.46 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงต่ำสุดครั้งแรกเมื่อมีการจัดเรียงสายอากาศในแนวแกน y ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์ประกอบ



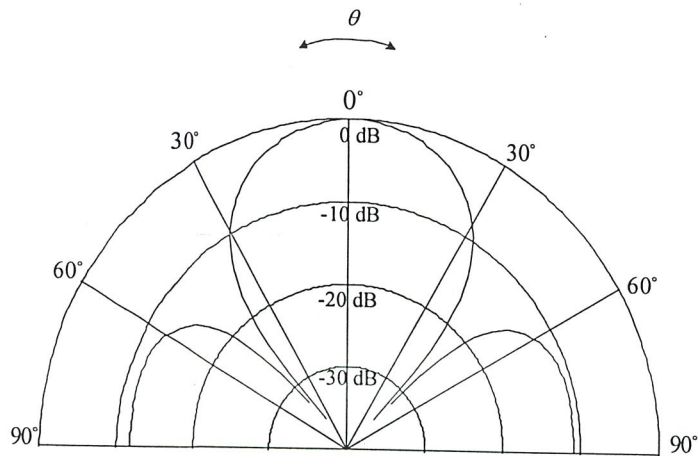
รูปที่ 3.47 ค่าอัตราส่วนกำลังคลื่นหลักต่อกำลังคลื่นย่อยเมื่อมีการจัดเรียงสายอากาศในแนวแกน y ตั้งแต่ 2 ถึง 10 องค์ประกอบ



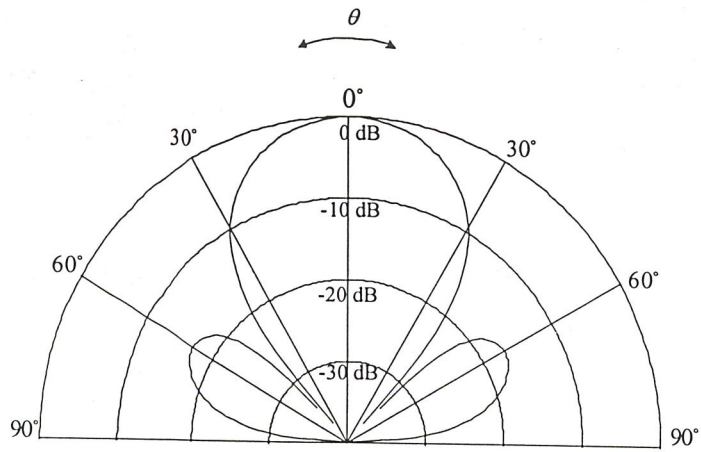
รูปที่ 3.48 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าของอากาศไมโครสตริปวงกลมจัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบระนาบจำนวน 4 องค์ประกอบ



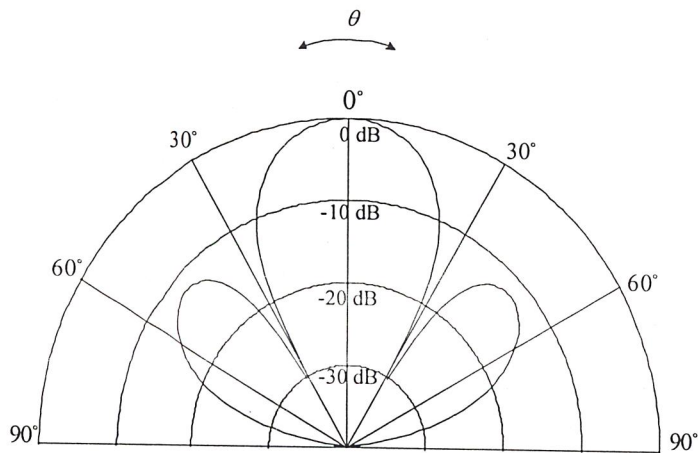
รูปที่ 3.49 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมจัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบระนาบจำนวน 4 องค์ประกอบ



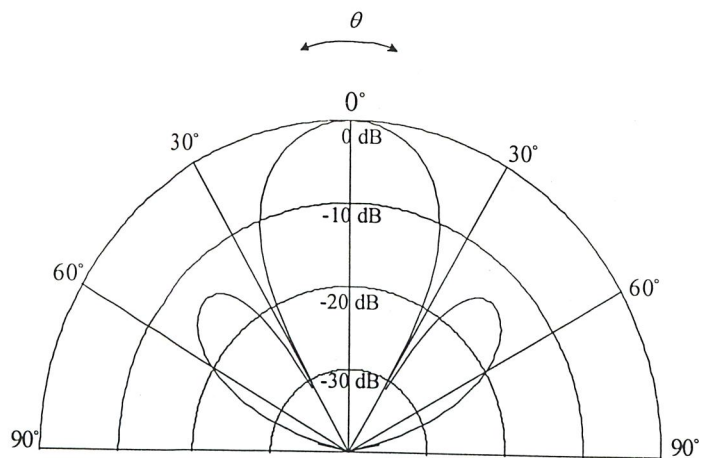
รูปที่ 3.50 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมจัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบระนาบจำนวน 9 องค์ประกอบ



รูปที่ 3.51 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมจัดเรียงเป็นแถว
ลำดับแบบระนาบจำนวน 9 องค์ประกอบ



รูปที่ 3.52 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมจัดเรียงเป็นแถว
ลำดับแบบระนาบจำนวน 16 องค์ประกอบ



รูปที่ 3.53 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมจัดเรียงเป็นแถว
ลำดับแบบระนาบจำนวน 16 องค์ประกอบ

3.3 การออกแบบควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์(Quarterwave transformer)

ในการนำสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมมาวางแถวลำดับเรียงกันเป็นแบบ Planar Array จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าเปลี่ยนไปตั้งนั้นจึงได้มีการนำหลักการของ ควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์(Quarterwave transformer) เข้ามาเพื่อปรับเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้ได้ตามต้องการ ในการออกแบบสายอากาศไมโคร-สตริปในแต่ละองค์ประกอบจะออกแบบให้มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์มซึ่งเมื่อนำสายอากาศมารวมกันจำนวน 2 องค์ประกอบจะทำให้อิมพีแดนซ์รวมของสายอากาศซึ่งจะพิจารณาเหมือนมีค่าความต้านทานสองตัวขนานกัน ทำให้ได้ค่าความต้านทานรวมของสายอากาศเท่ากับ 25 โอห์ม

ดังนั้นอิมพีแดนซ์ของควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์สามารถหาได้จาก

$$Z_T = \sqrt{Z_{in} Z_L} \quad (3.14)$$

เมื่อ

Z_T = อิมพีแดนซ์ของควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์

Z_{in} = อิมพีแดนซ์รวมของสายอากาศ

Z_L = อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายแต่ละองค์ประกอบ

แทนค่าในสมการที่ (3.14)

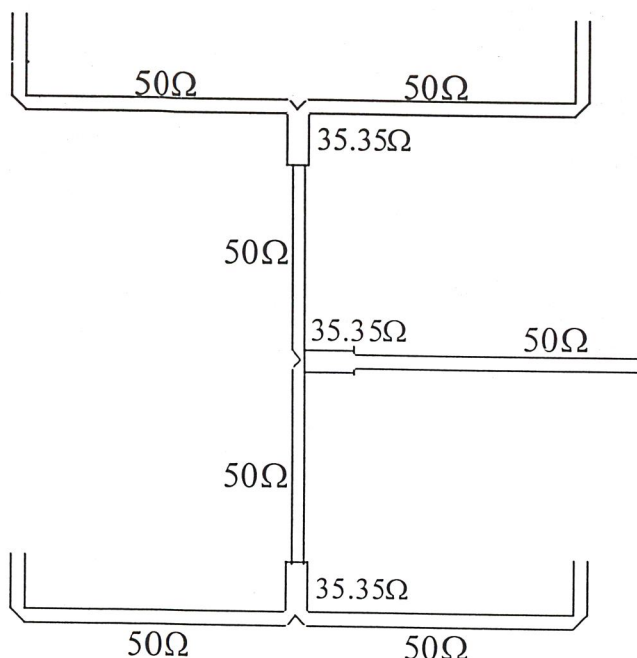
จะได้ $Z_T = 35.35$ โอห์ม

ในการออกแบบควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์ความยาวจะมีค่าเท่ากับ $\frac{\lambda_d}{4}$ ซึ่งเท่ากับ 1.53 เซนติเมตรและความกว้างของควอเตอร์ทรานส์ฟอร์มเมอร์สามารถได้จาก

$$Z_T = \frac{\eta}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \left(\frac{W_e}{h} + 1.303 + 0.667 \ln \left(\frac{W_e}{h} + 1.444 \right) \right)^{-1} \quad (3.15)$$

จะได้

$$W_e = 0.434 \text{ เซนติเมตร}$$



รูปที่ 3.54 แสดงสายควอเตอร์เวฟทรานฟอร์มเมอร์ซึ่งต่ออยู่กับสายไมโครสตริป 50 โอห์ม

3.4 การออกแบบวงจรแบ่งกำลังสี่ทิศทางแบบแบ่งกำลังแบบวิลคินสัน

ในการออกแบบวงจรแบ่งกำลังที่ต้องการพื้นที่ที่จำกัดสามารถเลือกใช่วงจรแบ่งกำลังแบบวิลคินสันซึ่งมีขนาดเล็กและโครงสร้างไมโครสตริปออกแบบกำหนดให้อิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุต และเอาต์พุตเป็น 50 โอห์มและ เป็นวงจรแบ่งกำลัง 2 ทาง เราสามารถคำนวณองค์ประกอบของวงจรได้ดังนี้

- ความต้านทานขนานระหว่างสาขาเป็น 50 โอห์ม
- อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสาขาได้จากสมการ

$$Z_p = \sqrt{NZ_o} \quad (3.16)$$

เมื่อ N เป็นจำนวนของเอาต์พุตพอร์ตซึ่งเท่ากับ 2 และ Z_o เป็นอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของเส้นไมโครสตริป ทางด้านอินพุต และเอาต์พุตเท่ากับ 50 โอห์ม ดังนั้นจะได้

$$Z_p = \sqrt{2 \times 50} = 70.7 \text{ โอห์ม}$$

วงจรมีลักษณะเป็นไมโครสตริป ซึ่งสามารถคำนวณองค์ประกอบแต่ละส่วนได้จากสมการที่เมื่อวงจรมีการแบ่งกำลังจากวัสดุฐานรองประเภท Glass - อีพ็อกซี่ ซึ่งมีค่า ϵ_r ประมาณ 4.3 มีความหนาของวัสดุฐานรอง $d=0.145$ เซนติเมตร และความถี่กลางในการออกแบบอยู่ที่ความถี่ 2.45 GHz

ค่าความต้านทานคุณสมบัติของไมโครสตริปเป็น 50 โอห์ม แทนค่าลงในสมการที่ (3.9)-(3.11) จะได้

$$W/h = 2.2 \text{ เมื่อ } h=1.5 \text{ มิลลิเมตร จะได้ } W = 2.85 \text{ มิลลิเมตร}$$

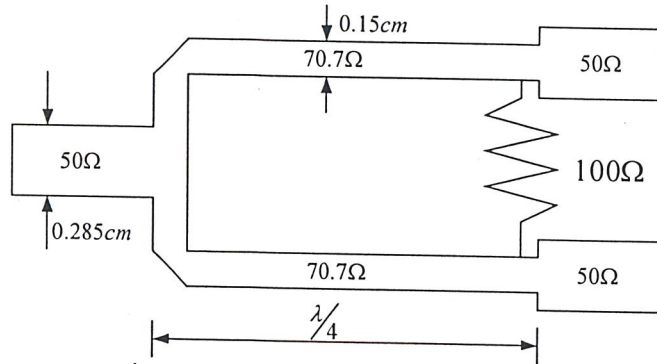
ความต้านทานคุณสมบัติไมโครสตริปเป็น 70.7 โอห์ม แทนค่าลงในสมการที่ (3.9)-(3.11) จะได้

$W/h = 1$ เมื่อ $h = 1.5$ มิลลิเมตร จะได้ $W = 1.5$ มิลลิเมตร

ความยาว $\frac{\lambda}{4}$ ของสาขาจากสมการที่ (3.9) - (3.11) จะได้

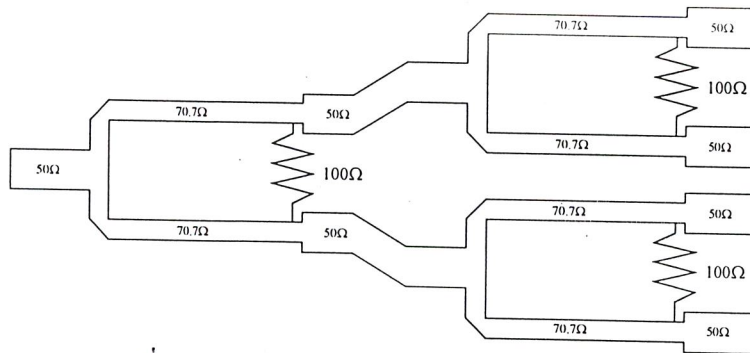
$$\lambda_0 = 12.244 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\frac{\lambda_0}{4} = 3.06 \text{ เซนติเมตร}$$

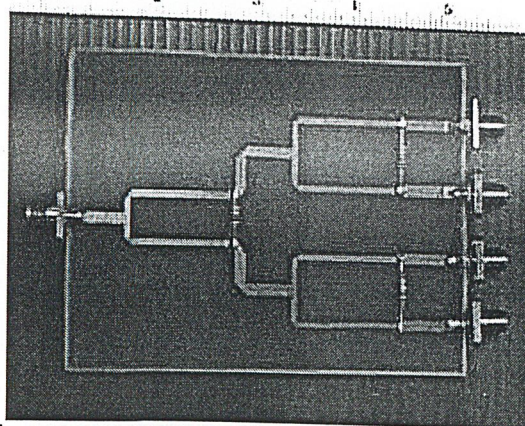


รูปที่ 3.55 โครงสร้างของวงจรแบ่งกำลังวัตินสัน 2 ทิศทาง

สำหรับโครงการนี้ต้องใช้วงจรแบ่งแยกกำลังเพื่อป้องกันเสากับสายอากาศไมโครสตริปวงกลม 4 ตัวที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบระนาบจึงได้นำเอาหลักการของวัตินสันมาประยุกต์ใช้ โดยเพิ่มจำนวนวงจรแบ่งแยกกำลังให้มากขึ้นดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.56



รูปที่ 3.56 แสดงวงจรแบ่งแยกกำลังแบบ 4 เอาต์พุต



รูปที่ 3.57 แสดงวงจรแบ่งแยกกำลังแบบ 4 เอาต์พุตที่ใช้งาน

จากการศึกษาคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมและวงกลมโดยใช้โปรแกรม Mathcad ในการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางแถวลำดับกันจะพบว่า

เมื่อวางสายอากาศเป็นแถวลำดับแบบเชิงเส้นในแนวแกน x แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กไม่มีการเปลี่ยนแปลงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะมีการเปลี่ยนแปลงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเพียงระนาบเดียวซึ่งความกว้างของลำคลื่นหลักจะมีความกว้างแคบลงและจำนวนลำคลื่นด้านข้างจะเพิ่มจำนวนขึ้นเมื่อจำนวนสายอากาศที่วางแถวลำดับกันเพิ่มมากขึ้น

เมื่อวางสายอากาศเป็นแถวลำดับแบบเชิงเส้นในแนวแกน y แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะมีการเปลี่ยนแปลงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเพียงระนาบเดียวซึ่งความกว้างของลำคลื่นหลักจะมีความกว้างแคบลงและจำนวนลำคลื่นด้านข้างจะเพิ่มจำนวนขึ้นเมื่อจำนวนสายอากาศที่วางแถวลำดับกันเพิ่มมากขึ้น

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศจะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงขึ้นเมื่อจำนวนของสายอากาศเพิ่มขึ้น และระยะห่างระหว่างสายอากาศที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้สภาพการเจาะจงทิศทางสูงขึ้นด้วยจนกระทั่งถึงระยะห่างค่าหนึ่งสภาพการเจาะจงทิศทางก็จะลดลงมาอีกครั้ง

ระยะห่างของสายอากาศที่วางห่างกันมากจะทำให้อัตราการเกิดลำคลื่นด้านข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างสายอากาศที่มีระยะทางใกล้กว่า

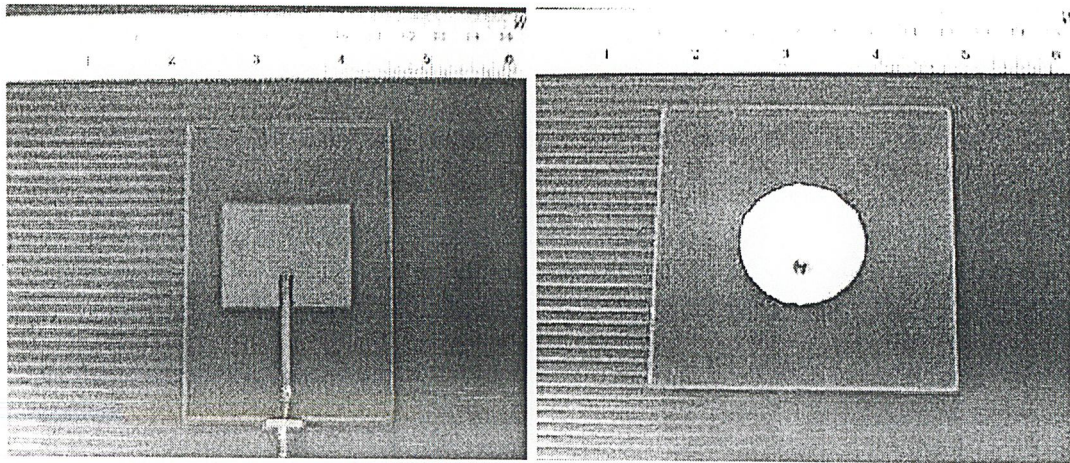
เมื่อวางสายอากาศแถวลำดับแบบระนาบที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากันในแนวแกน x และแกน y จะพบว่าลำคลื่นของสายอากาศในระนาบทั้ง 2 จะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ใกล้เคียงกัน

บทที่ 4

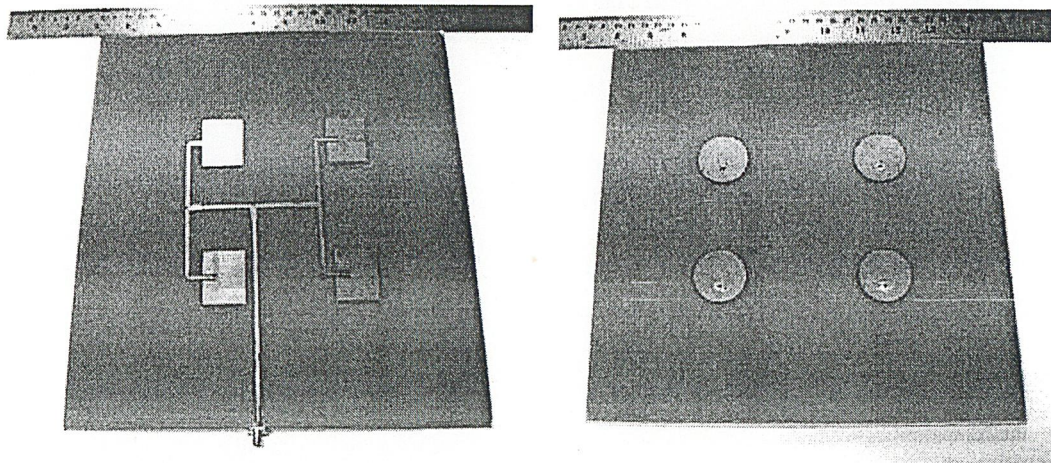
การสร้าง การทดสอบและผลการทดสอบ

จากการศึกษาและออกแบบได้ทำการสร้างสายอากาศไมโครสตริปขึ้นมาทำการทดสอบ 4 รูปแบบ

- สายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยม 1 องค์ประกอบ จำนวน 2 ชิ้นงาน
- สายอากาศไมโครสตริปวงกลม 1 องค์ประกอบ จำนวน 2 ชิ้นงาน
- สายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมแถวลำดับแบบระนาบ 4 องค์ประกอบ จำนวน 1 ชิ้นงาน
- สายอากาศไมโครสตริปวงกลมแถวลำดับแบบระนาบ 4 องค์ประกอบ จำนวน 1 ชิ้นงาน



รูปที่4.1 สายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมและสายอากาศไมโครสตริปวงกลม

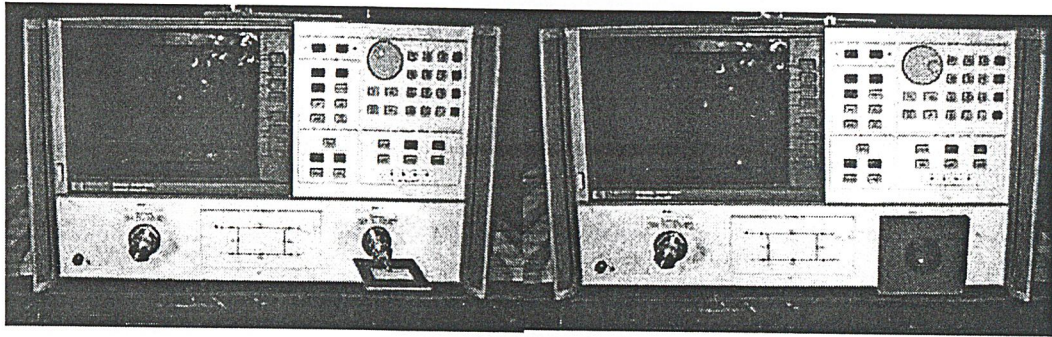


รูปที่4.2 สายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมและสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแถวลำดับแบบระนาบ

การทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศที่ออกแบบและสร้างขึ้นโดยคุณสมบัติที่จะทำการทดสอบในโครงการนี้ได้แก่ อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ (SWR), อินพุทอิมพีแดนซ์ (Z_{in}), ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ถือว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการช่วยในการตัดสินใจให้แก่ผู้ที่จะนำสายอากาศไปใช้งานในด้านต่างๆต่อไป

4.1 การทดสอบวัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง,ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์และค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ

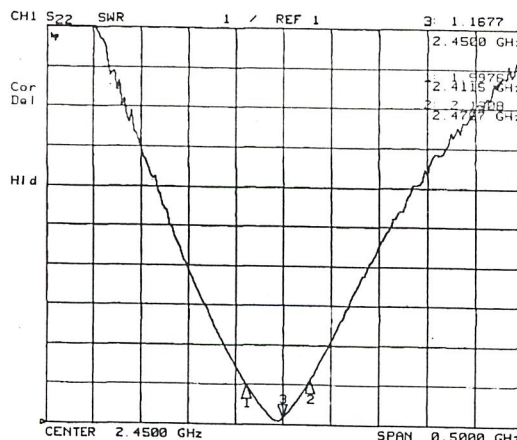
จากการทดลองโดยใช้เครื่อง Network Analyzer วัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง(SWR), ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์(Z_{in})และค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป



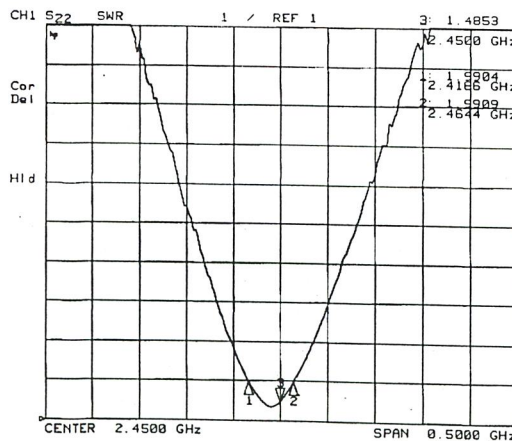
รูปที่ 4.3 แสดงการเชื่อมต่อในการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง อิมพีแดนซ์และค่าการสูญเสียย้อนกลับด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

โดยทั่วไปแล้วค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง(SWR)ที่ดีที่สุดที่ยอมรับได้ในการใช้งานจะมีค่าเท่ากับ 1.5 : 1 และมีค่าไม่เกิน 2 : 1

4.1.1 การทดสอบวัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป 1 องค์ประกอบ



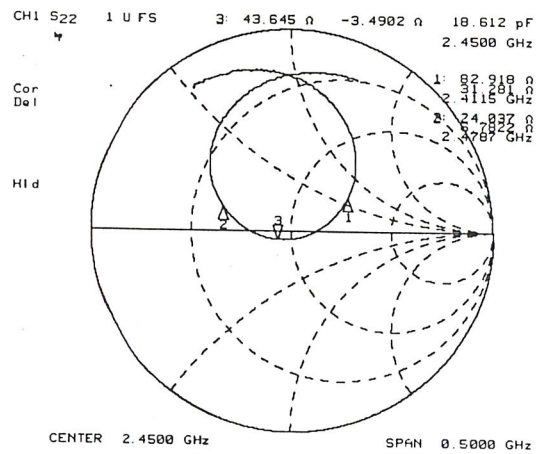
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่า SWR ของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมตัวที่ 1



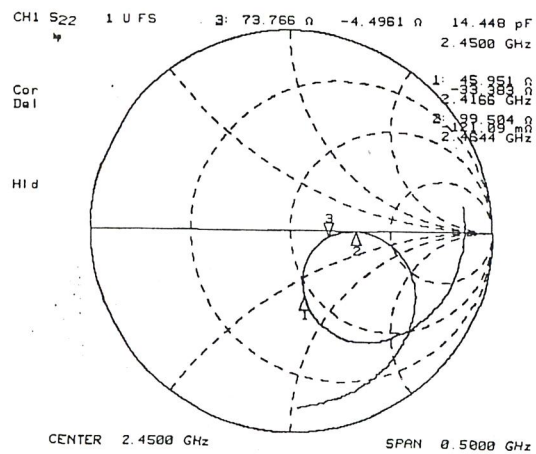
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่า SWR ของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมตัวที่ 2

ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมตัวที่ 1 มีค่าเท่ากับ 1.1677:1 และสายอากาศตัวที่ 2 มีค่าเท่ากับ 1.4853:1 ซึ่งถือว่าสายอากาศทั้ง 2 ตัวที่ทำการทดสอบมีค่า SWR ที่มีค่าต่ำกว่า 1.5:1

จากกราฟแสดงค่า SWR ในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ของสายอากาศสามารถหาค่าความกว้างของแบนด์วิดท์ของสายอากาศโดยกำหนดจากจุดที่ค่า SWR ของสายอากาศเท่ากับ 2:1 ซึ่งสำหรับสายอากาศตัวที่ 1 จะมีค่าแบนด์วิดท์เท่ากับ 67.2 MHz คิดเป็น 2.7% ของความถี่กลางการทดสอบ และสายอากาศตัวที่ 2 มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 47.8 MHz คิดเป็น 2% ของความถี่กลางการทดสอบ (ความถี่กลางการทดสอบเท่ากับ 2.45 GHz)

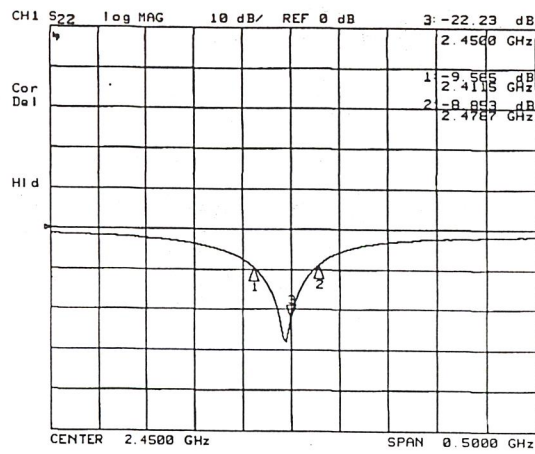


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมตัวที่ 1

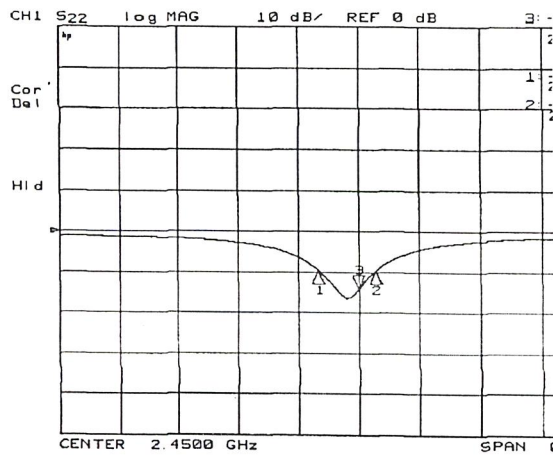


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมตัวที่ 2

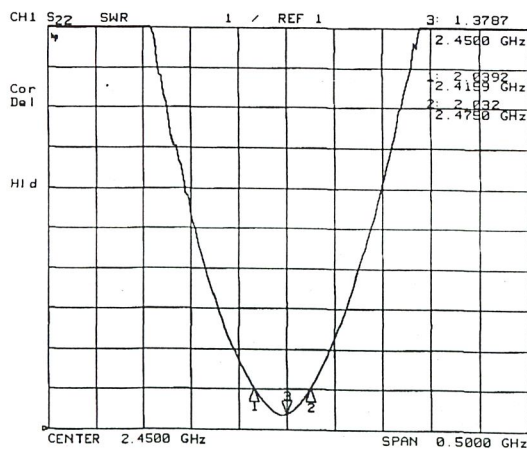
จากกราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสายอากาศตัวแรกมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 43.645 โอห์ม ส่วนสายอากาศตัวที่ 2 มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 73.766 โอห์มซึ่งมีค่าสูงกว่าอิมพีแดนซ์ของสายที่เท่ากับ 50 โอห์มมาก สำหรับสายอากาศตัวที่ 2 ได้ใช้สตัปไลน์ทำการแมชซึ่งที่สายส่งไมโครสตริปเพื่อให้สายอากาศและสายส่งไมโครสตริปแมชกัน



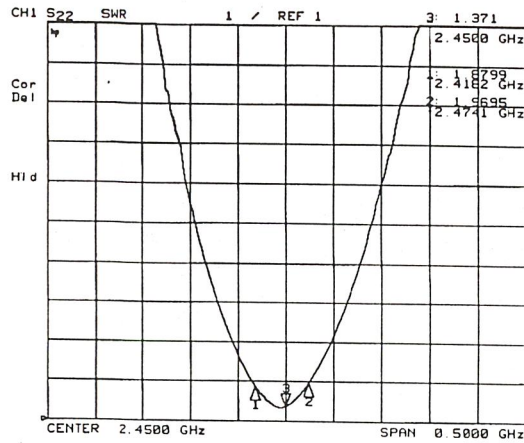
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมตัวที่ 1



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมตัวที่ 2 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่า -20 เดซิเบล



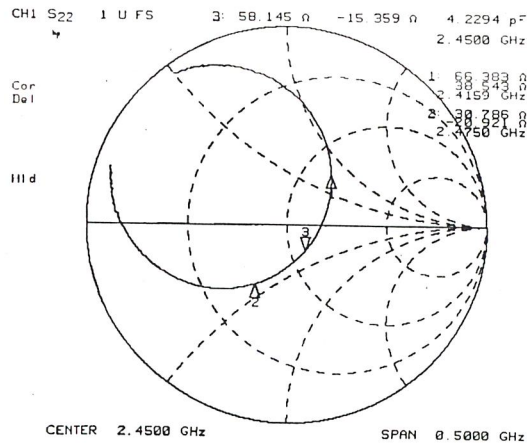
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่า SWR ของสายอากาศไมโครสตริปสี่วงกลมตัวที่ 1



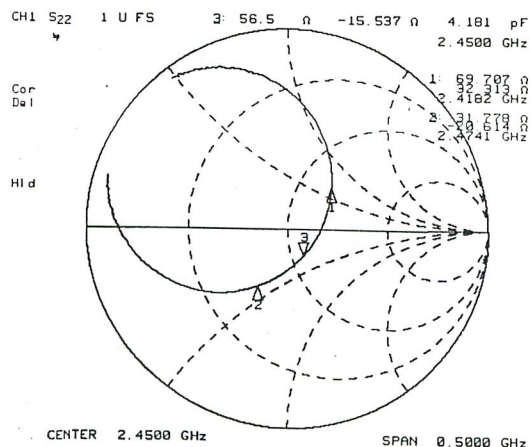
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่า SWR ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมตัวที่ 2

ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมตัวที่ 1 มีค่าเท่ากับ 1.378:1 และสายอากาศตัวที่ 2 มีค่าเท่ากับ 1.371:1 ซึ่งถือว่าสายอากาศทั้ง 2 ตัวที่ทำการทดสอบมีค่า SWR ที่ดีมีค่าต่ำกว่า 1.5:1

จากกราฟแสดงค่า SWR. ในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ของสายอากาศสามารถหาค่าความกว้างของแบนด์วิดท์ของสายอากาศโดยกำหนดจากจุดที่ค่า SWR ของสายอากาศเท่ากับ 2:1 ซึ่งสำหรับสายอากาศตัวที่ 1 จะมีค่าแบนด์วิดท์เท่ากับ 60 MHz คิดเป็น 2.4% ของความถี่กลางการทดสอบ และสายอากาศตัวที่ 2 มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 56 MHz คิดเป็น 2.3% ของความถี่กลางการทดสอบ (ความถี่กลางการทดสอบเท่ากับ 2.45 GHz)

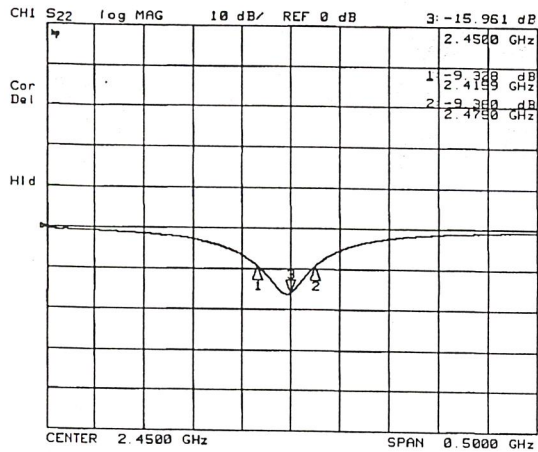


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมตัวที่ 1

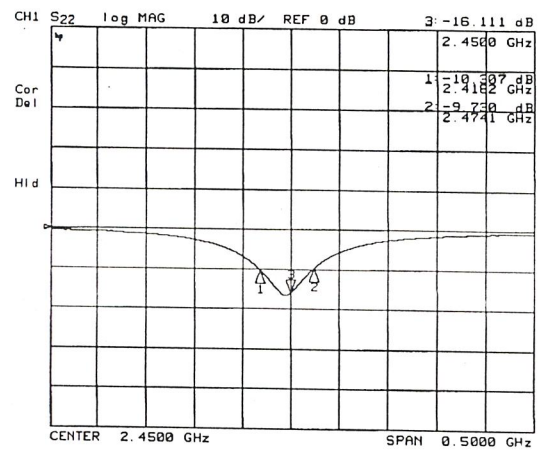


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมตัวที่ 2

จากกราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงกลมพบว่าสายอากาศทั้ง 2 ตัวมีค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกัน คือสายอากาศตัวที่ 1 มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 58.145 โอห์ม สายอากาศตัวที่มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 56.5 โอห์ม ซึ่งสายอากาศทั้ง 2 ตัวมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ใกล้เคียงกับสายส่งสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์มมาก



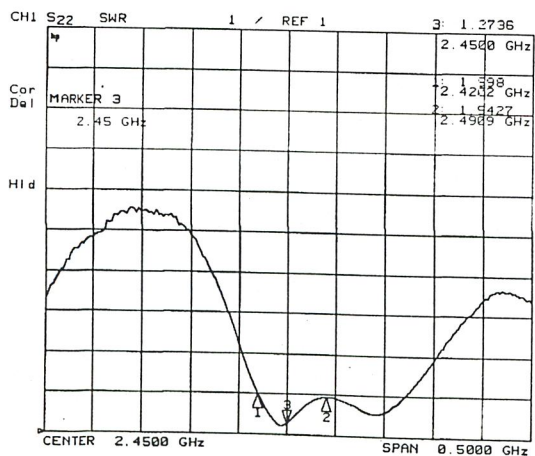
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมตัวที่ 1



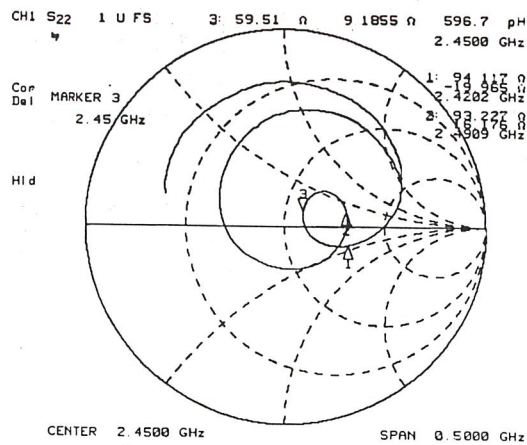
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมตัวที่ 2

จากกราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศวงกลมพบว่าสายอากาศทั้ง 2 ตัวมีค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศอยู่ในช่วง -15 เดซิเบลและ -16 เดซิเบล

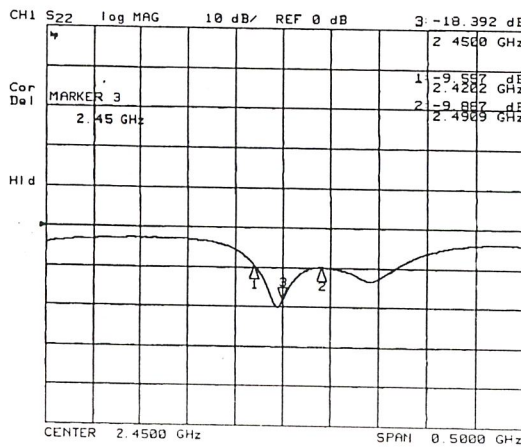
4.1.2 การทดสอบวัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับแบบระนาบ 4 องค์ประกอบ



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่า SWR ของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมแถวลำดับแบบระนาบ 4 องค์ประกอบ

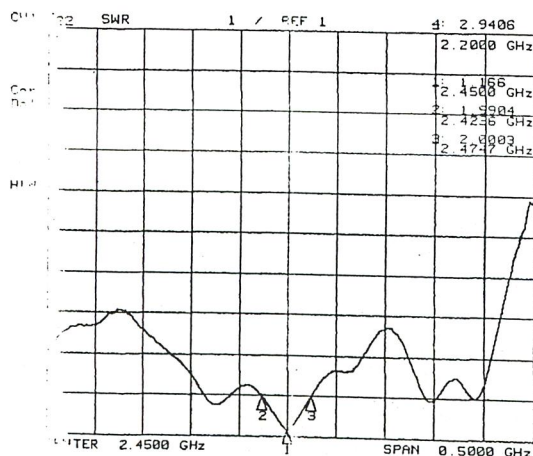


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมแฉวลำดับแบบระนาบ 4 องค์ประกอบ

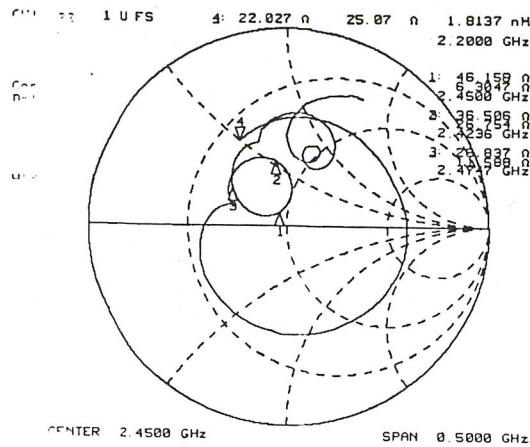


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมแฉวลำดับแบบระนาบ 4 องค์ประกอบ

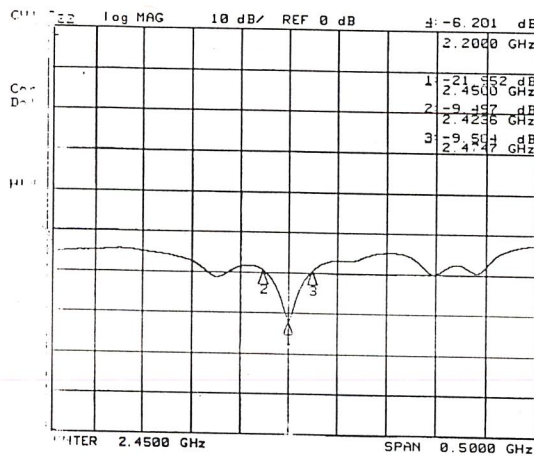
จากกราฟแสดงค่า SWR และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมแฉวลำดับแบบระนาบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศเท่ากับ 1.2736:1 ซึ่งถือว่าสายอากาศที่ออกแบบสร้างและนำมาทดสอบมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ดีมีค่าต่ำกว่า 1.5:1 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ มีค่าเท่ากับ 59.51 โอห์มแบนด์วิดท์ของสายอากาศมีความกว้างเท่ากับ 70MHz เมื่อเทียบกับความถี่กลางที่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 2.9% และค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศมีค่าเท่ากับ -18.392 เดซิเบล



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่า SWR ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแฉวลำดับแบบระนาบ 4 องค์ประกอบ



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแถวลำดับแบบระนาบ 4 องค์ประกอบ



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแถวลำดับแบบระนาบ 4 องค์ประกอบ

จากกราฟแสดงค่า SWR และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแถวลำดับแบบระนาบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศเท่ากับ 1.166:1 ซึ่งถือว่าสายอากาศที่ออกแบบสร้างและนำมาทดสอบมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ดีมีค่าต่ำกว่า 1.5:1 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ มีค่าเท่ากับ 46.158 โอห์มแบนด์วิดท์ของสายอากาศมีความกว้างเท่ากับ 51.1MHz เมื่อเทียบกับความถี่กลางที่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 2.1% และค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศมีค่าเท่ากับ -21.952 เดซิเบล

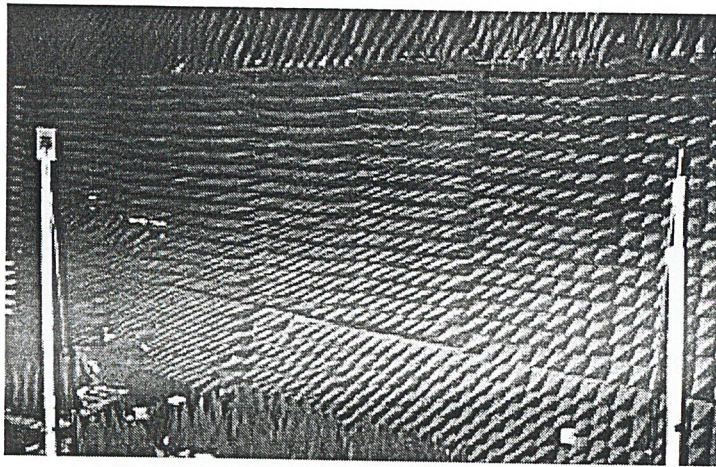
จากการทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่ง, อิมพีแดนซ์ และค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปที่ผ่านมาพบว่าสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบสร้างมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งอยู่ในมาตรฐานที่ดีคือมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งน้อยกว่า 1.5:1 และอิม-พีแดนซ์ของสายอากาศใกล้เคียงกับ 50 โอห์ม เพียงแต่แบนด์วิดท์ของสายอากาศที่ได้ยังมีแบนด์วิดท์ที่แคบอยู่ ส่วนค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศทั้งหมดที่ทำการทดสอบมีค่าต่ำกว่า -15 เดซิเบล

4.2 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป

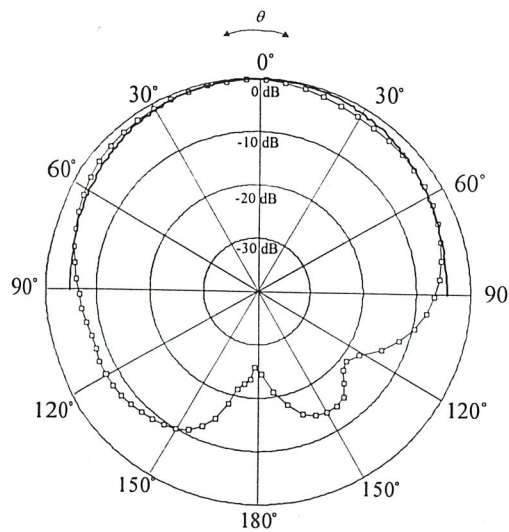
การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในโครงการนี้จะทำการทดสอบในห้องทดสอบการสะท้อนต่ำเพื่อป้องกันผลกระทบจากสภาพแวดล้อม ในการวัดจะทำการหมุนสายอากาศด้านรับรอบตัวเองด้วยมอเตอร์ที่มี step การหมุนครั้งละ 5 องศา ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระยะของสนามระยะไกล $R = 2D^2 / \lambda$ โดย D คือมิติที่กว้างที่สุดของสายอากาศด้านส่งกับด้านรับรวมกัน

4.2.1 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมและวงกลม 1 องค์ประกอบ

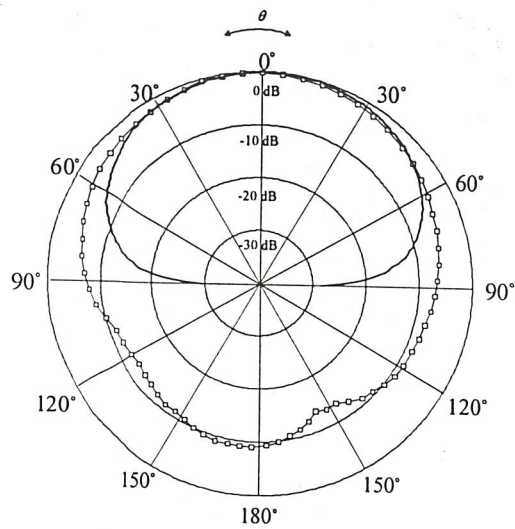
ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะใช้สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมเป็นสายอากาศส่งและสายอากาศรับโดยระยะห่างของสายอากาศส่งและรับเท่ากับ 85 เซนติเมตร ($R = 65.338$ เซนติเมตรในสายอากาศสี่เหลี่ยมและ $R = 79.059$) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.22



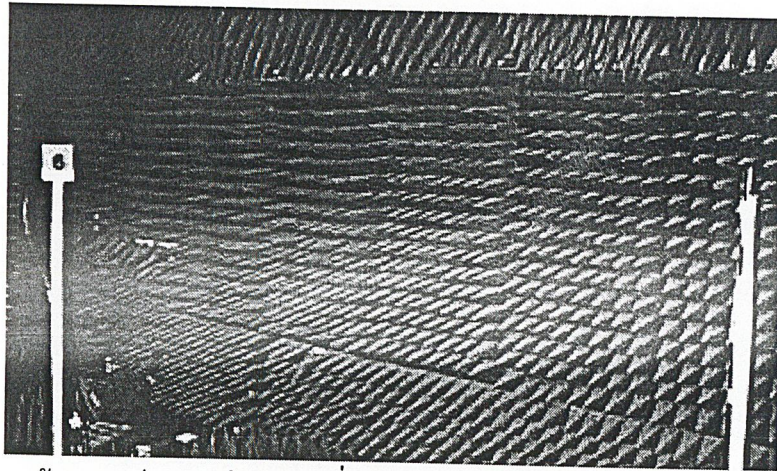
รูปที่ 4.22 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยม 1 องค์ประกอบ



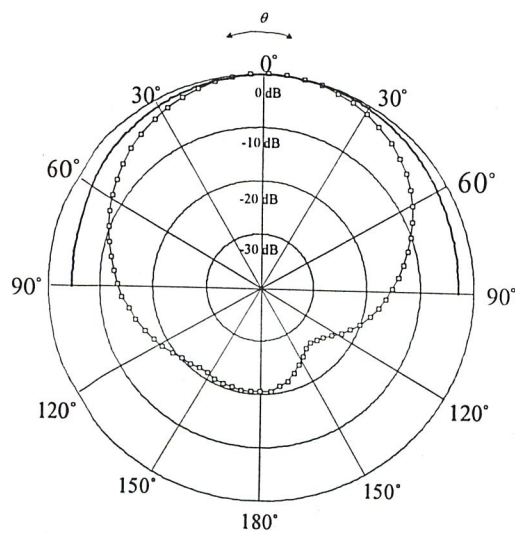
รูปที่ 4.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมในระนาบสนามไฟฟ้าที่วัดได้เปรียบเทียบกับทฤษฎี



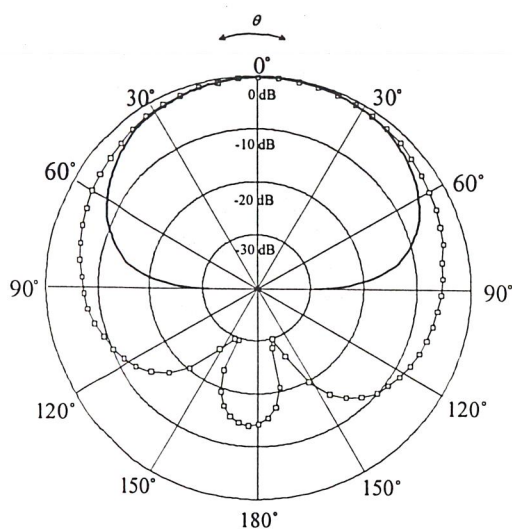
รูปที่ 4.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมในระนาบสนามแม่เหล็กที่วัดได้เปรียบเทียบกับทฤษฎี



รูปที่ 4.25 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม 1 องค์ประกอบ



รูปที่ 4.26 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมในระนาบสนามไฟฟ้าที่วัดได้เปรียบเทียบกับทฤษฎี

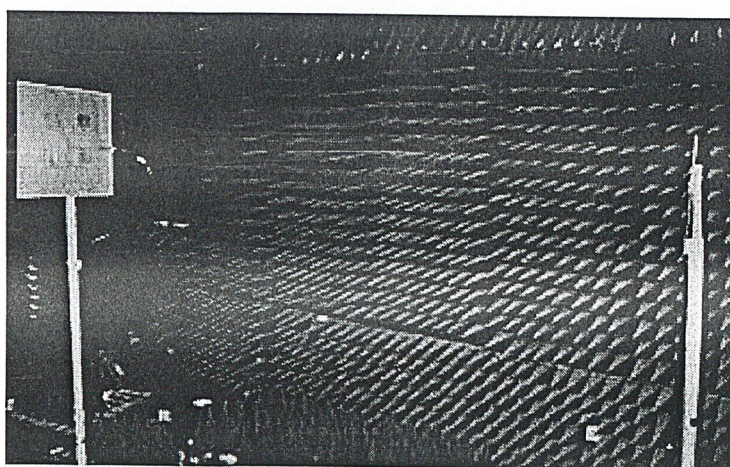


รูปที่ 4.27 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมในระนาบสนามแม่เหล็กที่วัดได้เปรียบเทียบกับทฤษฎี

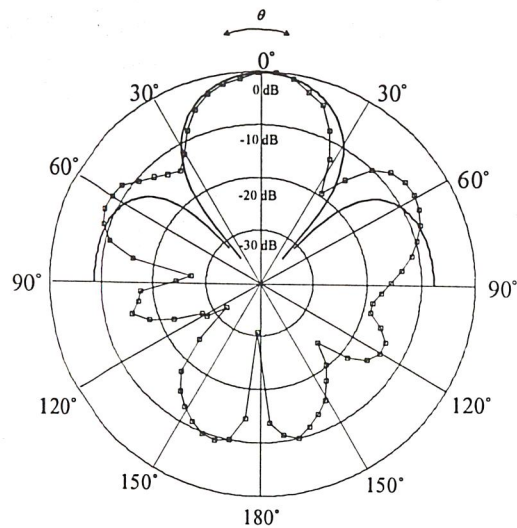
จากการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมและวงกลม 1 องค์ประกอบ และนำมาเปรียบเทียบกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในทางทฤษฎีพบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะเป็นไปในแนวทางเดียวกับทฤษฎีแต่สายอากาศที่ทดสอบจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทางด้านหลังปรากฏขึ้นมาด้วย ซึ่งในทางทฤษฎีไม่มี

4.2.2 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมและวงกลมแถวลำดับแบบระนาบจำนวน 4 องค์ประกอบ

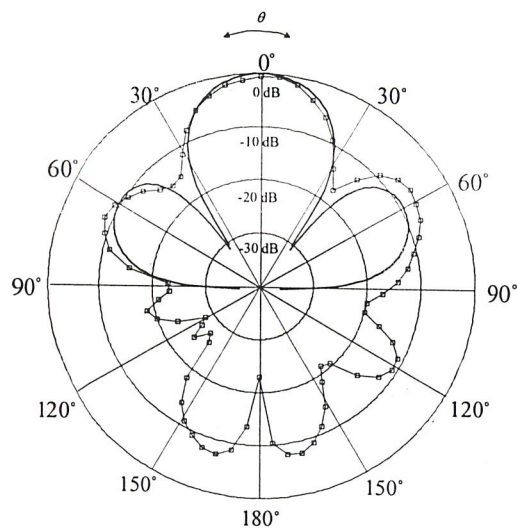
การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมแถวลำดับจะใช้สายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยม 1 องค์ประกอบเป็นสายอากาศส่ง ซึ่งระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 5 เมตร ($R=4.25$ เมตร)



รูปที่ 4.28 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมแถวลำดับแบบระนาบจำนวน 4 องค์ประกอบ



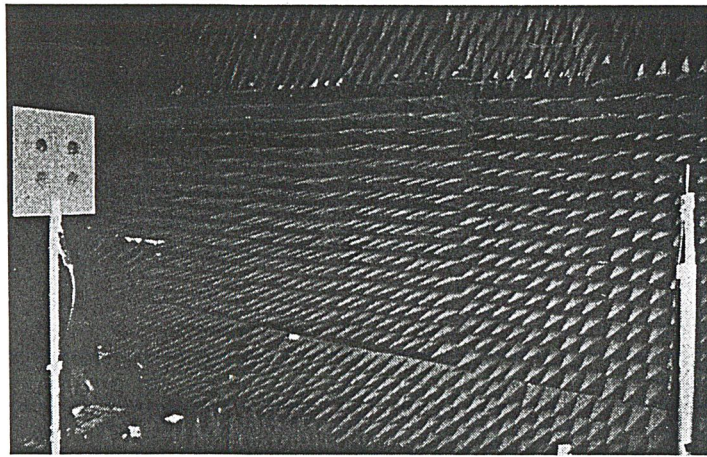
รูปที่ 4.29 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมแถวลำดับเบบระนาบจำนวน 4 องค์ประกอบในระนาบสนามไฟฟ้า



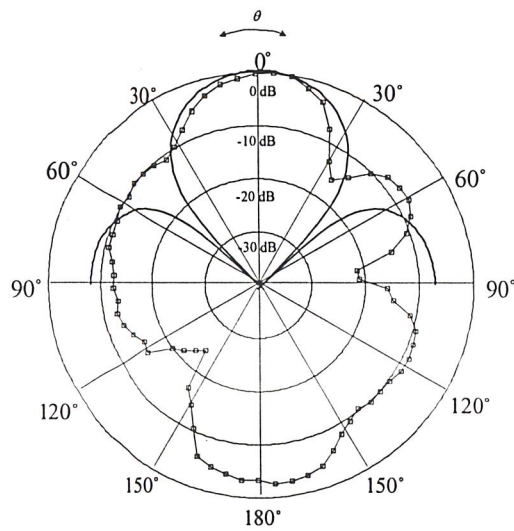
รูปที่ 4.30 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมแถวลำดับเบบระนาบจำนวน 4 องค์ประกอบในระนาบสนามแม่เหล็ก

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมแถวลำดับที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในทางทฤษฎีมากและมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นด้านด้านหลังเกิดขึ้นซึ่งในทฤษฎีไม่มีส่วนนี้เกิดขึ้น

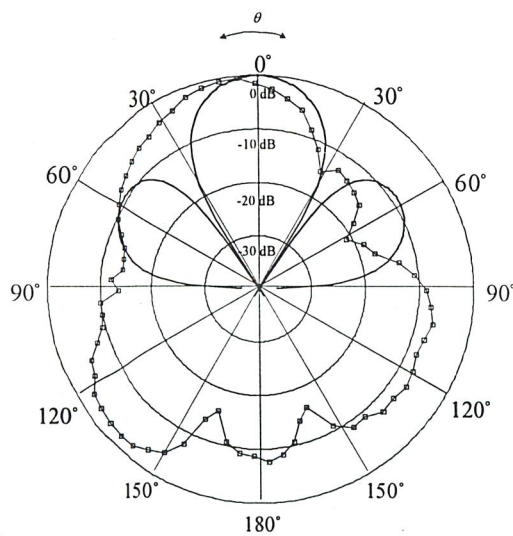
ในการวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแถวลำดับจะใช้สายอากาศไมโครสตริปวงกลม 1 องค์ประกอบเป็นสายอากาศส่ง ซึ่งระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 4 เมตร ($R=3.6$ เมตร)



รูปที่ 4.31 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแถวลำดับแบบระนาบจำนวน 4 องค์ประกอบ



รูปที่ 4.32 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแถวลำดับแบบระนาบจำนวน 4 องค์ประกอบในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 4.33 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแถวลำดับแบบระนาบจำนวน 4 องค์ประกอบในระนาบสนามแม่เหล็ก

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแถวลำดับที่วัดได้มีค่าแตกต่างกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในทางทฤษฎีไปพอสมควร โดยจะมีการแพร่กระจายคลื่นด้านหน้าออกไปกว้างกว่าในทางทฤษฎีมากและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้านด้านหลังเกิดขึ้นซึ่งในทฤษฎีไม่มีส่วนนี้เกิดขึ้น

ในการทดสอบสายอากาศที่ผ่านมาพบว่าคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ทำการทดสอบไปทั้งหมดมีแนวโน้มของคุณลักษณะของสายอากาศใกล้เคียงกับทฤษฎีของสายอากาศไมโครสตริปที่ได้ศึกษามาข้างต้น มีความแตกต่างไปจากทฤษฎีไม่มากนักคุณสมบัติบางประการของสายอากาศที่ออกแบบจัดว่าอยู่ในระดับที่ดีเช่นค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ทดสอบมีค่าต่ำกว่า 1.5:1

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการจัดสร้างสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมและแบบวงกลมองค์ประกอบและได้นำมาจัดเรียงแถวเป็นลำดับเชิงระนาบ 4 องค์ประกอบทั้งแบบสี่เหลี่ยมและแบบวงกลม ความถี่ที่ใช้ในการศึกษาเท่ากับ 2.45GHz โดยได้ทำการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปที่จัดสร้างขึ้นผลสรุปในการทดสอบได้แสดงดังตารางที่ 5.1 และ 5.2

สายอากาศสี่เหลี่ยม 1 องค์ประกอบ (ลำดับที่)	VSWR	Impedance (Ω)	Return Loss (dB)	Directivity (dB)	Gain (dBi)
1	1.1677	43.645-j 3.4902	-22.23	5.200	4.252
2	1.4853	73.766-j 4.4961	-20.34	5.200	4.252
จัดเรียงเชิงระนาบ 4 องค์ประกอบ	1.2736	59.51+j 9.1855	-18.392	13.611	9.672

ตารางที่ 5.1 ค่าคุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

สายอากาศสี่เหลี่ยม 1 องค์ประกอบ (ลำดับที่)	VSWR	Impedance (Ω)	Return Loss (dB)	Directivity (dB)	Gain (dBi)
1	1.3787	58.145-j 15.359	-15.961	6.2540	5.802
2	1.371	56.5-j 15.537	-16.111	6.2540	5.802
จัดเรียงเชิงระนาบ 4 องค์ประกอบ	1.166	22.027+j 25.07	-6.201	13.926	11.032

ตารางที่ 5.2 ค่าคุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

จากตาราง 5.1 และ 5.2 จะเห็นว่าสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าแบบสี่เหลี่ยมและแบบวงกลมนิยมนำไปประยุกต์ในการจัดเรียงแถวลำดับเพราะด้วยโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นวงกลมทำให้มีความเหมาะสมในการออกแบบการวางตัวมากกว่าแบบสี่เหลี่ยม

อีกประการหนึ่งคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปที่ได้ศึกษาทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัตินั้นผลที่ได้ยังไม่ตรงกันบางประการ ซึ่งข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้อาจเป็นไปได้ทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ โดยทางทฤษฎีนั้นเกิดจากการที่สมมติต้นกำเนิดสนามขึ้นมา และกำหนดการแปรผันของสนามให้คงที่ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลที่ได้ก็เพียงพอต่อการยอมรับและนำมาสร้างสายอากาศไมโครสตริปได้ สำหรับข้อผิดพลาดในทางปฏิบัติที่เกิดขึ้นได้หลายประการ เช่น

1. ผลการวัดค่า (ε_r) ที่ได้ อาจเกิดการผิดพลาดได้เนื่องจากสาเหตุดังนี้

- การใช้แผ่นพอลิเอทิลีนของเรโซเนเตอร์อาจทำให้ขนาดของเรโซเนเตอร์คลาดเคลื่อนได้- การอ่านค่าความถี่ที่แอมพลิฟายด์ของการสะท้อนตกลงมาอาจผิดพลาดได้

- การไล่โหมดคลื่นที่เกิดจากค่าโหมดต่ำไปยังโหมดสูงแล้วนำมาคำนวณหาค่า (ε_r) ที่อยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกับค่าจากตารางของอีพ็อกซี่ (4.3) อาจเกิดการผิดพลาดได้เนื่องจาก อีพ็อกซี่ ที่ใช้อาจมีสารผสมอย่างอื่นที่ทำให้ค่าผิดไปจากค่าที่คลาดหมายได้

2. การสร้างสายอากาศไม่สามารถทำให้มีขนาดให้ตรงตามทฤษฎีที่ต้องการได้ เช่นกราวด์เพลนไม่สามารถทำให้เป็นแผ่นตัวนำที่สมบูรณ์และมีขนาดที่ไม่จำกัดได้

3. ค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนอาจเป็นเพราะว่าค่าที่คลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมาจากการปฏิบัติงานในการสร้างและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ทำสายอากาศมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไม่เป็นไปตามที่ต้องการที่สำคัญทางเทคโนโลยีการผลิตเรายังไม่ดีพอที่จะทำสายอากาศไมโครสตริปให้มีค่าตามต้องการได้เพราะจากการคำนวณวิธีทางคณิตศาสตร์จุดทศนิยมมีค่ามากกว่าสามตำแหน่งแต่เครื่องมือที่เราใช้นั้นมีความละเอียดไม่มากพอ ซึ่งในทางปฏิบัติค่าที่เกินกว่าสามตำแหน่งเราจะตัดทิ้งไปซึ่งทำให้ค่าเหล่านี้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

4. ค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารที่ใช้ทำสายอากาศ ในการทดลองได้ใช้สารไดอิเล็กตริกที่เป็นอีพ็อกซี่ซึ่งประมาณให้มีค่าคงที่สัมพัทธ์เท่ากับ 4.3 แต่ในการทดลอง เราไม่สามารถที่จะทราบค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารไดอิเล็กตริกที่แท้จริงได้ เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือวัด

5. การป้อนสัญญาณให้กับตัวสายอากาศ จากในบทที่ 3 ตำแหน่งที่ต้องการของจุดป้อนสัญญาณจะต้องห่างจากขอบของตัวสายอากาศ 1.035 เซนติเมตรแต่ในการทดลองตำแหน่งของจุดป้อนสัญญาณอาจเกิดการคลาดเคลื่อนไปบ้าง ซึ่งมีผลอย่างมากกับอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ทำให้เกิดการสะท้อนกลับของพลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศ จึงได้แก้ไข โดยการทดลองเลียนแบบการปรับแมทซ์ โดยการนำวัสดุตัวนำซึ่งเป็นแผ่นทองแดงมาใช้ ซึ่งใช้หลักการของสตาปแมทซ์ซึ่ง

6. ในการวัดการแพร่กระจายของคลื่นของสายอากาศ ไม่สามารถวัดได้ตามเงื่อนไขทางทฤษฎีที่ต้องการได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านสถานที่และเครื่องมือทดลอง ซึ่งอาจทำให้เกิดการสะท้อนกลับของพลังงานมายังสายอากาศได้

ในทางปฏิบัตินั้นยังมีข้อผิดพลาดอีกหลายประการที่จะต้องนำมาพิจารณา ซึ่งถ้าสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดที่กล่าวถึงในเบื้องต้นให้ดีขึ้น ก็อาจจะได้สายอากาศที่มีประสิทธิภาพและมีคุณสมบัติที่ดีพอต่อการนำไปใช้งาน

จากผลการศึกษาที่ผ่านมาทำให้ทราบถึงข้อจำกัดในทางปฏิบัติหลายประการซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้สายอากาศมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจึงเป็นแนวทางที่จะต้องปรับปรุงสายอากาศให้มีคุณสมบัติดีขึ้น

แนวทางในการปรับปรุงสายอากาศ

1. วัสดุในการสร้างถ้าต้องการให้การสูญเสียที่เกิดจากส่วนของไมโครสตริปน้อยลงอาจทำได้โดยเปลี่ยนแผ่นวงจรพิมพ์จากสารอีพ็อกซี่ เป็น Duroid หรือ Teflon ที่มีการสูญเสียของไดอิเล็กตริกต่ำในย่านความถี่สูงแต่ราคาของสายอากาศก็จะสูงตามไปด้วย

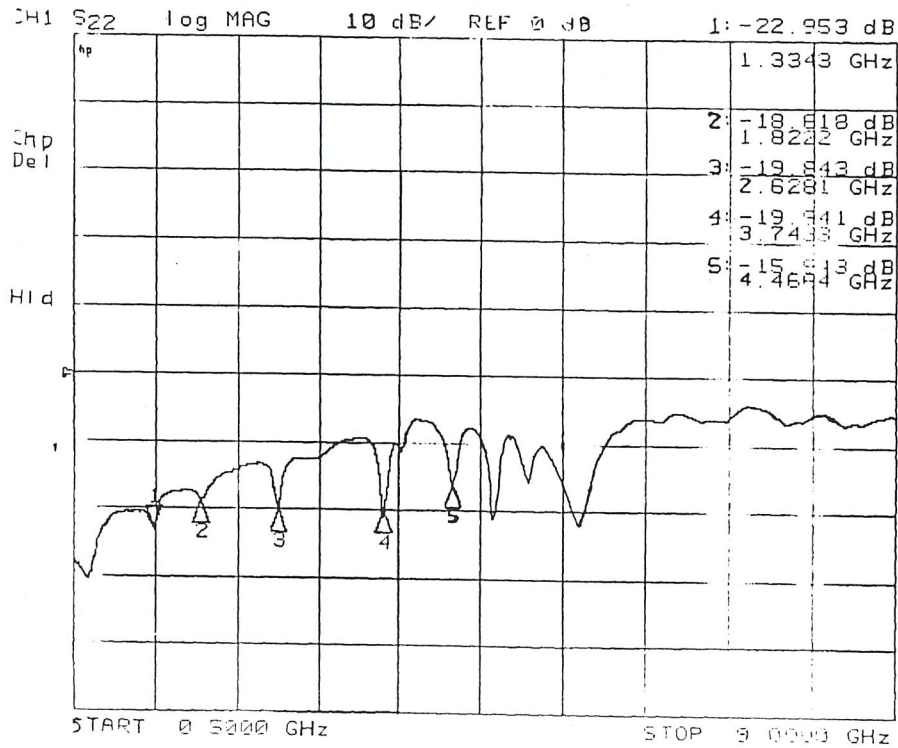
2. วงจรแบ่งกำลังที่ออกแบบในโครงการนี้เป็นแบบวิลคินสัน ผู้สนใจสามารถเลือกวงจรแบ่งกำลังแบบอื่นๆได้อีกตามแต่เป้าหมายของการออกแบบ เช่น เราถ้าต้องการออกแบบที่ช่วงกว้างความถี่ไม่ถึงหนึ่งออกเทพ เราสามารถใช้วงจรแบ่งกำลังแบบตัว T ในการออกแบบได้ซึ่งทำให้เราสามารถลดจำนวนความต้องการค่าความต้านทานที่ใช้สำหรับวงจรวิลคินสันและทำให้สายอากาศมีโครงสร้างไมโครสตริปเป็นส่วนใหญ่โดยมีอุปกรณ์ประกอบน้อยที่สุดเป็นต้น

3. การวางสายอากาศไมโครสตริปแบบแถวลำดับเชิงระนาบ(Planar Array) ทั้งแบบสี่เหลี่ยมและแบบวงกลมยังไม่สามารถนำไปใช้ได้จริงเนื่องจากช่วงความกว้างของความถี่ยังไม่เพียงพอ การนำไปใช้งานได้จริงนั้นต้องมีการเพิ่มช่วงความกว้างของความถี่ซึ่งทำได้โดยการใช้วงจรเลื่อนเฟส(Phase Shifter)

ภาคผนวก

การทดลองหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของแผ่นปริ้นท์

จับสเตรทที่ใช้เป็นอิมพีแดนซ์ที่มีความหนาประมาณ 1.50 mm. นำแผ่นปริ้นท์ที่จะทำสายอากาศนี้มาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด $58 \times 58 \text{ mm}^2$ แล้วทำการหุ้ม(Shield)ขอบทั้งสองด้านที่ขนานกัน จากนั้นจึงเชื่อมต่อ SMA - Connector เข้ากับแผ่นปริ้นท์แล้วทำการวัด Return Loss (S22)



รูปที่ 1 กราฟแสดง Return Los ของแผ่นปริ้นท์ขนาด $58 \times 58 \text{ mm}^2$

เลือกค่าความถี่รีโซแนนซ์ (f_r) ที่จุดต่างๆ ซึ่งได้จากกราฟ Return Loss มาหาค่าจากสมการแสดงโหมดคลื่นของแผ่นไมโครสตริป

$$(f_r)_{mn} = ((1/2\pi\sqrt{\epsilon_r})\sqrt{(m\pi/l)^2 + (n\pi/w)^2}) \tag{1}$$

ลดรูปสมการเป็น

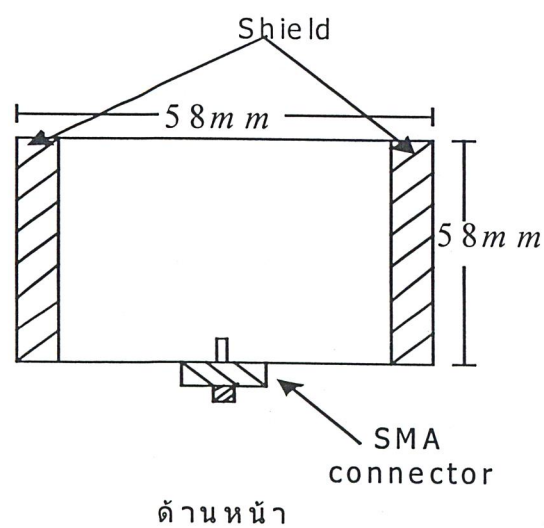
$$(f_r) = (c/2l\sqrt{\epsilon_r})\sqrt{m^2 + n^2} \quad ; \quad l = w \tag{2}$$

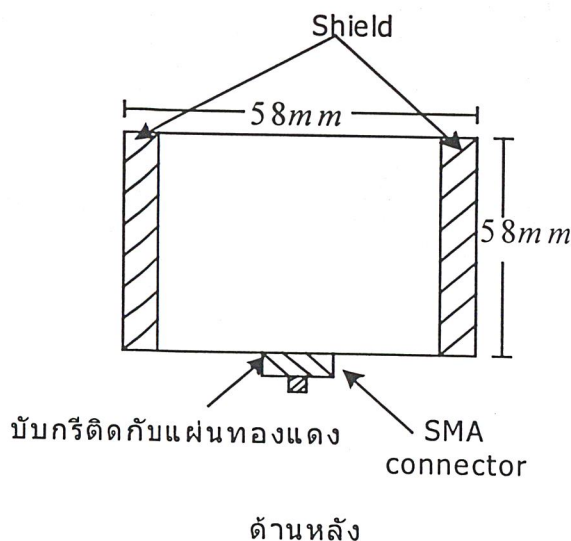
$$\epsilon_r = ((c/2l(f_r)_{mn})\sqrt{m^2 + n^2})^2 \tag{3}$$

สมการที่ (3) ใช้สำหรับหาค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ จากรูปที่ 1

position	fr(GHz)	Mode(m,n)	ϵ_r
1	1.3343	1,0	3.757
2	1.8222	1,1	4.03
3	2.6281	1,2	4.842
4	3.7433	1,3	4.773
5	4.4664	2,3	4.359
6	4.9197	4,0	4.421
7	5.2561	4,1	4.116
8	5.7447	4,2	4.053
9	6.6320	5,2	4.41
10	6.9508	5,3	4.708

ตารางที่ 1 แสดงการหาค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ ในโหมดคลื่นต่างๆ จากตารางที่ 1 จะหาค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 4.347 ซึ่งจะนำค่านี้ไปใช้ในการออกแบบ





รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างการทดลองหาค่าเพอร์มิติวิตีสัมพัทธ์

การเลือกสารสับเสตรท

ข้อควรพิจารณาในการเลือกสารสับเสตรท

1. ความเป็นไปได้ในการเกิดคลื่นตามผิว
2. ผลคิสเพอซันของค่าคงตัวไดอิเล็กตริก และ ออสแทนเจนท์
3. ขนาดของการสูญเสีย
4. การมีคุณสมบัติไม่เหมือนกันตลอดเนื้อสารของสารสับเสตรท หรือ แอนไอโซโทรปี (anisotropy)
5. ปัจจัยทางด้านเชิงกล เช่น การเข้ารูปได้
6. ราคา

1. ผลของคิสเพอซัน

ผลของคิสเพอซันเกิดจากการที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก และ ค่าออสแทนเจนท์ของสับเสตรทขึ้นกับความถี่ โดยปกติค่าออสแทนเจนท์จะเพิ่มขึ้นตามความถี่ และค่าออสแทนเจนท์ที่เปลี่ยนไปนี้จะสังเกตเห็นได้ง่ายว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางไฟฟ้าตามความถี่ เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอย่างมากในการออกแบบสายอากาศที่ทำงานที่แถบความถี่กว้าง เราต้องดูว่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสายอากาศอยู่ภายใต้ขอบเขตการทำงานที่เรายอมรับได้หรือไม่ เช่น

$$\frac{\Delta f_r}{f_r} = -\frac{\Delta \epsilon_r}{2\epsilon_r} \quad (1)$$

เมื่อ

Δf_r คือค่าการเปลี่ยนแปลงของความถี่เรโซแนนท์

f_r คือค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริก

2. ข้อพิจารณาทางสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ

สิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริก และค่าลอสแทนเจนท์ คือ อุณหภูมิ ความชื้น อายุการใช้งาน และคุณสมบัติเชิงกลของสารสับเสทรทสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อสายอากาศมากที่สุดก็คือ อุณหภูมิ ดังนั้นผู้ออกแบบจึงต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

- 2.1 ต้องเลือกสับเสทรทที่สามารถทนช่วงอุณหภูมิที่จะใช้งานได้ โดยไม่ทำให้สายอากาศบิดงอ หรือผิดรูปไป
- 2.2 โดยสับเสทรทที่ใช้ต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงการเปลี่ยนค่าตามอุณหภูมิของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและลอสแทนเจนท์ต่ำ
- 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนและค่าความนำความร้อนต้องต่ำ

3. ข้อพิจารณาทางด้านคุณสมบัติเชิงกล

ด้านคุณสมบัติเชิงกลเราต้องพิจารณาถึง คุณสมบัติการเข้ารูปได้ และคุณสมบัติด้านการทำได้ (machinability) นอกจากนี้ยังต้องดูคุณสมบัติการบัดกรีได้ ความมีเสถียรภาพของขนาด และความสามารถในการทนแรงสั่นสะเทือนได้

4. ข้อแนะนำในการเลือกสารสับเสทรท

- 4.1 เลือกสับเสทรทที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกน้อย และค่าลอสแทนเจนท์ต่ำ และต้องดูว่าเรามีข้อมูลที่ถูกต้องของสับเสทรทตัวนั้นอยู่หรือไม่
- 4.2 ผลของดิสเพนชัน และค่าความแตกต่างระหว่างชั้นตัวอย่างต้องมีค่าน้อย
- 4.3 คุณสมบัติที่ไม่ใช่ทางไฟฟ้า เช่น สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางอุณหภูมิ ความมีเสถียรภาพของขนาด ค่าความนำความร้อน ต้องมีค่าเหมาะสม
- 4.4 ตรวจสอบลักษณะแอนไอโทรปีของสารไม่ควรมีมาก
- 4.5 ควรเลือกสับเสทรทให้มีความหนา

$$h \leq \frac{c}{4f_u(\epsilon_r - 1)}$$

เมื่อ

c คือ ความเร็วของแสง

f_u คือ ความถี่สูงสุดที่ต้องการให้สายอากาศทำงาน

4.6 ข้อพิจารณาด้านราคา

Material	Dielectric Constant	Loss Tangent	Reference
Unreinforced PTFE. Cutlun	2.10	0.0004	[1]
Rein forced PTFE. RT Duroid5880	2.20 (1.5%)	0.0009	[1]
Fused Quanz	3.78	0.0001	[2]
96% Alumina	9.40 (5%)	0.0010	[2]
99.5% Alumina	9.80 (5%)	0.0001	[2]
Sapphire	9.41	0.0001	[2]
Semi-Insulating GaAs	12.9	0.0020	[2]

ตาราง คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนที่ใช้ในไมโครสตริป

การใช้เครื่อง Network Analyzer

เครื่องมือ Network Analyze เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โครงข่ายไม่ว่าจะเป็น Active หรือ Passive ก็ตาม ซึ่งการทำงานของเครื่องมือนี้จะทำงานในลักษณะของ Port Network โดยจะแบ่งเป็น Port ที่ 1 และ Port ที่ 2 ดังนั้นก่อนการใช้งานจึงจำเป็นต้องทำการปรับสภาวะของเครื่อง (Calibrate) ทั้งกรณีทั้ง 1-Port และ 2-Port เสียก่อน เพื่อให้เครื่องมือนี้ใช้จุดอ้างอิง ณ ตำแหน่งของปลายสายสัญญาณที่ต่ออยู่เป็นจุดอ้างอิง ดังนั้นเมื่อนำอุปกรณ์มาต่อทำการวัดค่าตอบที่ได้จะมีความแม่นยำขึ้น

การ Calibrate

การ Calibrate Port ที่ 1 หรือ Port 2 การวัดแบบนี้จะเป็นการวัดแบบสะท้อนกลับ $(S_{11}), (S_{22})$ มีวิธีการดังนี้

1. กดปุ่ม Start ใส่ความถี่เริ่มต้นตามด้วยหน่วยของความถี่
2. กดปุ่ม Stop ใส่ความถี่สุดท้ายตามด้วยหน่วยของความถี่
3. กดปุ่ม CAL เมื่อกดปุ่มนี้จะปรากฏเมนูต่างๆ ทางด้านขวามือของหน้าจอ
4. กดปุ่มตรงกับเมนู Calibrate Menu
5. กดปุ่มที่ตรงกับเมนู (S_{11}) หรือ (S_{22}) หลังจากนั้นหน้าจอจะปรากฏข้อความว่าให้นำชุด Calibrate kit มาทำการ Calibrate ตามขั้นตอนดังนี้

5.1 นำตัว Calibrate แบบ Open มาต่อกับสายนำสัญญาณแล้วกดปุ่ม Open แล้วถอดตัว

5.2 นำตัว Calibrate แบบ Short มาต่อกับสายนำสัญญาณแล้วกดปุ่ม Short แล้วถอดตัว

5.3 นำตัว Calibrate แบบ Broadband Load มาต่อกับสายนำสัญญาณแล้วกดปุ่ม Load แล้วกดปุ่ม Done Load แล้วกด Done Load ซ้ำอีกครั้งหนึ่ง

ในขณะที่หน้าจอปรากฏคำว่า Coefficient Computing เป็นตัวกระพริบซึ่งแสดงว่าเครื่องกำลัง Calibrate อยู่แล้ว
ทำการ Calibrate เสร็จแล้วให้สังเกตที่หน้าจอซึ่งจะปรากฏคำว่า Cor ที่ด้านซ้ายของหน้าจอ

LIST OF SYMBOLS

E_x, E_y, E_z E_ρ, E_θ, E_ϕ	Components of \overline{E}
F_x, F_y, F_z F_r, F_θ, F_ϕ	Components of \overline{F}
f_c	Cut off frequency
f_r	Resonant frequency
$f(\theta, \phi)$	Element Pattern
G	Conductance
	Gain
	Green's function
H	Magnetic field
H_x, H_y, H_z, H_r $H_\theta, H_\phi, H_\rho, H_\eta$	Components of \overline{H}
h	Substrate thickness
$I, \overline{I}, \overline{I}_l$ I_o, I_z, I_{mn}	Electric currents
J, \overline{J}, J_s $J_o(x), J_n(x)$	Electric current densities
	Bessel functions
L	Length of the microstip antenna
	Inductance
$\lambda, \lambda_1, \lambda_2$	Lengths of transmission line

M, \overline{M}	Inducted magnetic current densities
M_x, M_y	Components of \overline{M}
Q	Quality factor
ϵ_{ef}	Frequency dependent ϵ_e
ϵ_r	Relative permittivity
ϵ_o	Free-space permittivity
γ	Propagation constnt
η	Ellipticncy
	Efficiency
	Impedance
η_o	Free-sapce impedance=(120π ohms)
λ	Wavelength in microstrip
λ_o	Free-space Wavelength
u	permeability
u_r	Relative permeability
u_o	Free-space permeability
Ω	ohms
π	A constant(=3.1416)
ϕ	Electrostatic Potentail
	Azimuth angle
ϕ_{mn}	Modal Function
θ_m	Beam direction

กิตติกรรมประกาศ

ความดีอันบังเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้แก่ บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่านของข้าพเจ้า

พร้อมกันนี้ขอขอบคุณ อาจารย์ รศ.ดร.จเร สุรวัดน์ปัญญา และ ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพานิชย์ ที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำตลอดจนให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ มาโดยตลอดรวมทั้งตรวจทานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ คุณ ไพโรจน์ วุ่นชุม และ คุณ สุธาสิณี ละมุลตรี ที่ช่วยเหลือในการสอนการใช้เครื่องมือการทดลองต่างๆ ตลอดจนให้คำแนะนำในทุกด้าน

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ เพื่อนๆและน้องของข้าพเจ้าที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ

เอกสารอ้างอิง

- [1] อ.โมไนย ไกรฤกษ์ , "ทฤษฎีสายอากาศ", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , หจก. สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2537
- [2] Balanis, Constantine A., "Antennas Theory Analysis and Design" , Newyork , Jone Wiley & Sons, 1982
- [3] Bahl,I.J. and P . Bharitia, "Microstip Antennas" the 2nd printing , USA, Artech House , 1982
- [4] S.Y. Liao , Microwave Circuits Analysis and Amplifier Design , New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1987
- [5] Robert A.Sainati, "CAD of Microstip Antennas for Wireless Applications", Artech House.,1992