

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ชุดการสอนสายอากาศไมโครสตริปสองความถี่สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

**DUAL FREQUENCY MICROSTRIP ANTENNA TRAINING
FOR WIRELESS LOCAL AREA NETWORK**



โดย
นายอภิรักษ์ บุญปาน
นายอารยะ ประกอบชัย

๒/๙๙
๙ ๙/๙ ๒๕
๙/๙๙

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **83151**
วัน,เดือน,ปี..... - 6 ส.ค. 2551

b. 11๙๖๑๘๘๐
i.

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DUAL FREQUENCY MICROSTRIP ANTENNA TRAINING
FOR WIRELESS LOCAL AREA NETWORK**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR IN DEPARTMENT OF INFORMATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ ชุดการสอนสายอากาศไมโครสตริปสองความถี่สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย
(Dual Frequency Microstrip Antenna Training for Wireless Local Area Network)

ชื่อนักศึกษา นายอภิรักษ์ บุญปาน รหัสนักศึกษา 47010936
นายอารยะ ประกอบชัย รหัสนักศึกษา 47010985

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. นภพินท์ อนันตรศิริชัย

ระดับการศึกษา ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

ภาควิชา วิศวกรรมสารสนเทศ

ปีการศึกษา 2550

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการอนุมัติเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



(รศ. นภพินท์ อนันตรศิริชัย)

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THESIS TITLE Dual Frequency Microstrip Antenna Training
for Wireless Local Area Network

STUDENT Mr. Aphinan Boonpan ID. 47010936
Mr. Araya Prakobchai ID. 47010985

GRADUATE LEVEL Bachelor of Information Engineering

DEPARTMENT Information Engineering

YEAR 2007

ADVISOR Assoc. Prof. Noppin Anantrasirichai

ABSTRACT

This thesis presents Dual Frequency Microstrip Antenna Training for Wireless Local Area Network (WLAN). The Microstrip slot antenna is designed for dual resonance frequency coverage standard of IEEE 802.11 b/g (2.4-2.4835 GHz) and IEEE 802.11 a (5.15-5.35 GHz) by using FR4 substrate. After that, design the set-up elements for clip the antenna onto it, which can adjust the antenna position, rotate angle and direction for received the signal. This project included the manual to explain the measurement of antenna in laboratory. As a result, the proposed microstrip antenna is suitable for experiment with low cost.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี เนื่องด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์อย่างสูงในการทำปริญญานิพนธ์และโครงการนี้จาก รศ. นภพินท์ อนันตรศิริชัย ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ ทางคณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ที่ดีเยี่ยมจากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ReCCIT สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวัดผลงาน

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คลอง 6 ที่ให้ความอนุเคราะห์โปรแกรม IE3D ที่ใช้ในการจำลองและออกแบบสายอากาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ รวมทั้งให้โอกาสในการทำปริญญานิพนธ์นี้ขึ้นมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ผู้เป็นผู้ให้ทุกสิ่งทุกอย่างเสมอมา . คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ทางคณะผู้จัดทำขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ไว้ ณ โอกาสนี้

คณะผู้จัดทำปริญญานิพนธ์

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานในโครงการ	3
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสายอากาศ	4
2.1 บทนำ	4
2.2 การแพร่สัญญาณจากสายอากาศ	4
2.3 ชนิดของสายอากาศ	7
2.4 พารามิเตอร์ของสายอากาศ	11
2.5 สายอากาศไมโครสตริป	24
2.6 โครงสร้างและคุณสมบัติทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นปะ	29
2.7 คุณลักษณะสายอากาศแบบช่องเปิด	30
2.8 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป	33
บทที่ 3 การออกแบบและวิเคราะห์ผล	39
3.1 บทนำ	39
3.2 ขั้นตอนการออกแบบ	39
3.3 การศึกษาถึงผลกระทบกรณีปรับขนาดของพารามิเตอร์	42
3.4 ผลการออกแบบ	47
3.5 การออกแบบชุดประกอบการทดลอง	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	52
4.1 บทนำ	52
4.2 การสร้างสายอากาศ	52
4.3 ผลการวัดและทดสอบสายอากาศ	53
บทที่ 5 บทสรุปและแนวทางการพัฒนาต่อ	55
5.1 สรุปผลการออกแบบและวิเคราะห์	55
5.2 แนวทางการพัฒนาต่อ	56
บรรณานุกรม	57
ภาคผนวก คู่มือประกอบการทดลอง	58



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศ	5
2.2	วงจรมีอนเทนาของสายอากาศในโหมดการส่ง	6
2.3	สายอากาศแบบเส้นลวด	7
2.4	สายอากาศแบบช่องเปิด	8
2.5	สายอากาศแบบไมโครสตริปแบบแผ่น	9
2.6	สายอากาศแบบแฉวลำดับ	10
2.7	สายอากาศแบบสะท้อนคลื่น	11
2.8	สายอากาศแบบเลนส์	12
2.9	ระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	13
2.10	แบบรูปของสายอากาศแบบอิมนิไดเรกชันแนล (Omnidirectional)	14
2.11	แบบรูปหลักสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร	15
2.12	ลำคลื่น (Lobe) ของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	16
2.13	การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ	17
2.14	บีมวิท (BeamWidth)	19
2.15	ข้ออ้างอิงและการสูญเสียของสายอากาศ	20
2.16	สายอากาศไมโครสตริป	25
2.17	ลักษณะของคลื่นที่แพร่กระจายในไมโครสตริป	27
2.18	การเกิดคลื่นนำทาง	27
2.19	ลักษณะคลื่นที่แพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กงาน	28
2.20	การเกิดคลื่นรั่ว	28
2.21	แสดงลักษณะการเกิดคลื่นผิว	29
2.22	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นปะ	30
2.23	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด	31
2.24	การแพร่กระจายคลื่นจากไมโครสตริปแบบช่องเปิด	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.25	สนามไฟฟ้าในระนาบทรงกระบอก	32
2.26	ลักษณะการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าในช่องเปิด	33
2.27	โครงสร้างทางกายภาพของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป	33
2.28	เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในระนาบตามขวางของสายส่งอากาศแบบไมโครสตริป	34
2.29	การปิดวงจรปลายสายส่งไมโครสตริป	35
2.30	การเปิดวงจรปลายสายส่งไมโครสตริป	36
2.31	การกระจายคลื่นและการเกิดคลื่นผิวนอกจากปลายสายไมโครสตริปและวงจร สมมูล	36
3.1	โครงสร้างและพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบช่องเปิด	41
3.2	ค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ (S_{11}) ในการปรับค่าพารามิเตอร์ (A) ใน แนวแกน X	43
3.3	ค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ (S_{11}) ในการปรับค่าพารามิเตอร์ (E) ใน แนวแกน X	44
3.4	ค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ (S_{11}) ในการปรับค่าพารามิเตอร์ (F) ใน แนวแกน Y	45
3.5	ค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ (S_{11}) ที่ได้จากผลการจำลอง	47
3.6	ผลการจำลองค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR)	47
3.7	ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Pattern)	48
3.8	ผลการจำลองค่าอัตราขยาย (Gain)	48
3.9	ส่วนฐานของชุดทดลอง	49
3.10	ส่วนหมุนปรับทิศทางรับคลื่นของชุดทดลอง	49
3.11	ส่วนเสาขีดยของชุดทดลอง	50
3.12	ส่วนยึดจับสายอากาศของชุดทดลอง	50
3.13	วิธีใช้งานส่วนยึดจับสายอากาศของชุดทดลอง	50
3.14	ชุดทดลองประกอบสำเร็จ	51
4.1	ภาพด้านหน้าของสายอากาศที่สร้าง	52
4.2	ภาพด้านหลังของสายอากาศที่สร้าง	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.3	ผลการวัดค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ (S_{11})	53
4.4	แสดงการวัดและทดสอบสายอากาศ	53
4.5	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้า (E-plane) ที่ความถี่ 2.45 GHz	54
4.6	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้า (E-plane) ที่ความถี่ 5.25 GHz	54



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ค่าคุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิด กรณีปรับเปลี่ยนความกว้างพารามิเตอร์ (A)	43
3.2	ค่าคุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิด กรณีปรับเปลี่ยนความกว้างพารามิเตอร์ (E)	44
3.3	ค่าคุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิด กรณีปรับเปลี่ยนความยาวของสายส่ง สัญญาณไมโครสตริป (F)	46



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ในปัจจุบันนี้ระบบการสื่อสารข้อมูลข่าวสารได้มีการพัฒนาและเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วไม่ว่าจะเป็นการสื่อสารดาวเทียม ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ และโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) เหล่านี้ เป็นต้น ซึ่งการสื่อสารข้อมูลเหล่านี้ล้วนแล้วแต่ใช้ความถี่ในย่านความถี่ไมโครเวฟในการรับ-ส่งข้อมูลทั้งสิ้น สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) นับเป็นการสื่อสารหนึ่งในปัจจุบันมีการใช้กันแพร่หลายมากขึ้นเป็นลำดับ เนื่องจากระบบมีความยืดหยุ่นสูง เพราะเป็นระบบที่ใช้คลื่นวิทยุในการรับส่งข้อมูล และย่านความถี่สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายนี้มีการกำหนดอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.11 a/b/g ตามลำดับ

ในการรับและส่งข้อมูลข่าวสารนั้น สายอากาศนับได้ว่าเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่มีความสำคัญในการรองรับกับการสื่อสารข้อมูลข่าวสารในปัจจุบันซึ่งมีความเป็นมัลติมีเดียมากขึ้น โดยสายอากาศชนิดหนึ่งที่มีการใช้กับการรับ-ส่งข้อมูลข่าวสารในย่านความถี่ไมโครเวฟ ก็คือสายอากาศแบบไมโครสตริป ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศชนิดอื่น ๆ

สายอากาศแบบช่องเปิดนับได้ว่าเป็นสายอากาศชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยมเนื่องจากเป็นสายอากาศที่ออกแบบง่าย แบบรูปของการแผ่สนามระยะไกลสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งแบบทิศทางเดียว (Uni-directional) และสองทิศทาง (bi-directional) ขึ้นอยู่กับความต้องการใช้งานเช่นเดียวกัน สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ใช้รูปแบบการป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริปก็มีข้อดีต่าง ๆ เช่น สามารถออกแบบง่ายเพราะมีรูปร่างไม่ซับซ้อน ราคาถูกและทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ได้ง่าย

การศึกษาเรื่องสายอากาศและการสื่อสารไร้สาย นอกจากจะศึกษาในทางทฤษฎีแล้วจำเป็นต้องศึกษาด้วยอุปกรณ์จริง เพื่อศึกษาในสภาพที่เป็นจริง ทำให้การค้นคว้ามีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โครงการนี้จึงสร้างชุดการสอนสายอากาศไมโครสตริปสองความถี่สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ที่ประกอบด้วยสายอากาศไมโครสตริป ชุดทดลอง และคู่มือประกอบการทดลอง เพื่ออำนวยความสะดวกในการเรียนการสอนเกี่ยวกับสายอากาศและการสื่อสารไร้สาย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ปฏิญานិพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอชุดการสอนสายอากาศไมโครสตริปสองความถี่ สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด ที่มีโครงสร้างพื้นฐานแบบง่าย สามารถรองรับกับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายซึ่งมีการกำหนดย่านความถี่ที่ใช้งานอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.11 a/b/g และสร้างชุดประกอบการสอนพร้อมทั้งคู่มือที่ใช้ในการทดลอง โดยมีวัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสายอากาศ และศึกษาระบบการสื่อสารไร้สายโดยใช้สายอากาศไมโครสตริป
2. เพื่อฝึกหัดการออกแบบ สร้าง และวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปสองความถี่
3. เพื่อฝึกหัดการเขียนคู่มือการใช้งานประกอบการทดลองสายอากาศ
4. เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาการพัฒนาออกแบบสายอากาศสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายเพื่อประโยชน์ในการใช้งานที่มีประสิทธิภาพ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

สำหรับปฏิญานิพนธ์นี้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสองความถี่ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.11b/g (2.4-2.4835 GHz) และ IEEE 802.11a (5.150-5.350 GHz) ตามลำดับ เพื่อใช้ในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) จำนวน 1 ตัว พร้อมชุดประกอบการทดลองที่สามารถปรับทิศทาง และระบะการรับคลื่นได้ อีกทั้งเขียนคู่มือการใช้งานประกอบการทดลอง

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในการออกแบบสายอากาศเพื่อใช้ในระบบการสื่อสารไร้สาย
2. มีความรู้ในการสร้างชุดทดลองและคู่มือการทดลอง เพื่อประกอบการเรียนการสอน
3. สามารถสร้างสายอากาศไมโครสตริปที่ใช้งานได้จริง ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 a/b/g
4. เกิดทักษะในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนของการคำนวณทางทฤษฎี แล้วนำมาปฏิบัติหรือสร้างสายอากาศตามที่ได้ออกแบบนั้น
5. ก่อให้เกิดแนวคิดในการสร้างสรรค์สิ่งใหม่ๆ เพื่อให้ทันกับการนำมาใช้ในเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายพร้อมทั้งรองรับการพัฒนาที่กว้างไกลในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการ

1. ศึกษาความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสายอากาศและวิธีการใช้โปรแกรมออกแบบสายอากาศ
2. ออกแบบสายอากาศ และทดลองสร้างด้วยการจำลองสถานการณ์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
3. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ของสายอากาศที่ได้ออกแบบ
4. สร้างสายอากาศโดยการใช้วัสดุฐานรองตามที่ได้ออกแบบไว้
5. สร้างชุดประกอบการทดลอง
5. เขียนคู่มือประกอบการทดลอง
6. สรุปผลและเขียนรายงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสายอากาศ

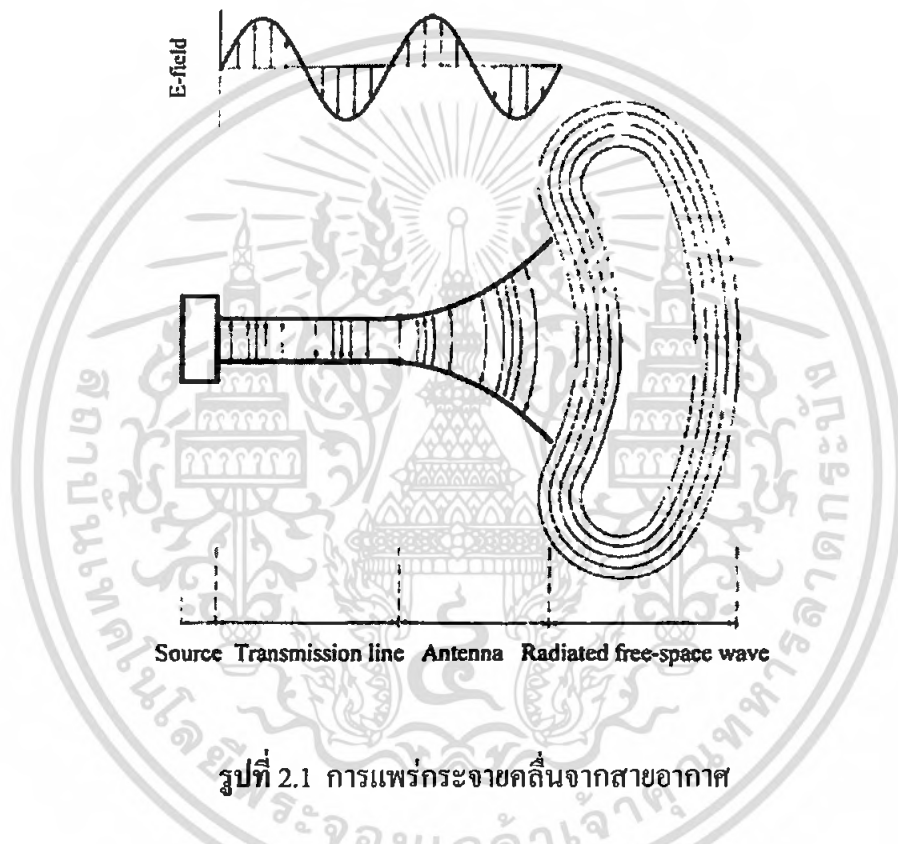
2.1 บทนำ

การติดต่อสื่อสารในปัจจุบันประกอบไปด้วย เครื่องส่งสัญญาณ ส่วนนำสัญญาณ และ เครื่องรับสัญญาณ สำหรับส่วนนำสัญญาณที่ทำหน้าที่ติดต่อระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับจะ แบ่งเป็น 3 แบบ คือ สายนำสัญญาณชนิดโลหะ สายนำสัญญาณชนิดฉนวน และสายอากาศ ซึ่งสายอากาศเป็นส่วนนำสัญญาณที่มีการใช้มากตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน หน้าที่ของสายอากาศคือ ส่งผ่านสัญญาณออกไปในอวกาศและขณะเดียวกันก็จะใช้สายอากาศทำหน้าที่ในการ รับสัญญาณที่ผ่านอากาศส่งไปยังเครื่องรับ โดยสายอากาศที่ใช้สามารถออกแบบรองรับกับการใช้ งานในย่านความถี่ต่าง ๆ ตามที่ต้องการได้ สายอากาศเป็นส่วนสำคัญของทั้งทางเครื่องส่งและ เครื่องรับ สายอากาศส่วนใหญ่ทำจากลวดตัวนำเป็นท่อกลวงหรือตัน โครงสร้างเป็นเส้นตรงหรือ โค้งงอ แล้วแต่ชนิดของสายอากาศ สายอากาศที่ยังสามารถแบ่งเป็นชนิดต่าง ๆ ได้หลายชนิด ขึ้นอยู่กับรูปแบบและวัสดุที่ใช้ในการสร้าง สายอากาศชนิดหนึ่งที่มีความนิยมสูงที่ใช้กับ ความถี่สูงในย่านไมโครเวฟ คือ สายอากาศไมโครสตริป ซึ่งเป็นสายอากาศที่สร้างจากวัสดุที่มีชั้น ของฉนวนและตัวนำที่ดี และเป็นสายอากาศที่สร้างเองได้ไม่ยากนักมีประสิทธิภาพในระดับดีที่ สามารถออกแบบมา เพื่อให้มีรูปร่างและขนาดที่จะแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมี ประสิทธิภาพ ในบทนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสายอากาศ และเพื่อให้สอดคล้องกับ รูปแบบสายอากาศที่ออกแบบ ในปริยญาณิพนธ์ฉบับจึงเน้นและให้ความสำคัญที่ทฤษฎี สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งไมโครสตริป รวมทั้งการออกแบบ สายส่งสัญญาณไมโครสตริป ซึ่งจะเสนอตามลำดับดังนี้

2.2 การแพร่กระจายสัญญาณจากสายอากาศ

เมื่อมีกระแสไหลผ่านตัวนำ จะเกิดสนามแม่เหล็กรอบตัวนำนั้น ซึ่งจะมีทิศทางตามทิศทาง ของกระแส ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของกระแสเกิดขึ้น สนามแม่เหล็กก็จะเปลี่ยนตามไปด้วย และ จากการทดลองพบว่า สนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงจะสร้างสนามไฟฟ้าให้เกิดขึ้น (ซึ่งถ้าไม่มี การเปลี่ยนแปลงในสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้าก็จะไม่เกิดขึ้น)

ส่วนทิศทางของสนามไฟฟ้าพิจารณาได้จากกฎของเลนส์ (Len's Law) หรือกฎมือขวานั้นเอง ทำนองเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น ทำให้พิจารณาได้ว่าถ้าป้อนกำลังงานผ่านตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าขึ้น โดยที่สนามทั้งสองจะแพร่ออกจากตัวนำหรือสายอากาศด้วยความเร็วประมาณเท่ากับความเร็วแสงในอากาศว่าง (ประมาณ 3×10^8 เมตร/วินาที) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศ

พลังงานที่แพร่กระจายจากสายอากาศเรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่าสนามพลังงานที่แพร่กระจาย ซึ่งจะอยู่ในรูปของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จากการวิเคราะห์พบว่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน รวมทั้งยังทำมุมฉากกับทิศทางการแพร่กระจายคลื่นอีกด้วย

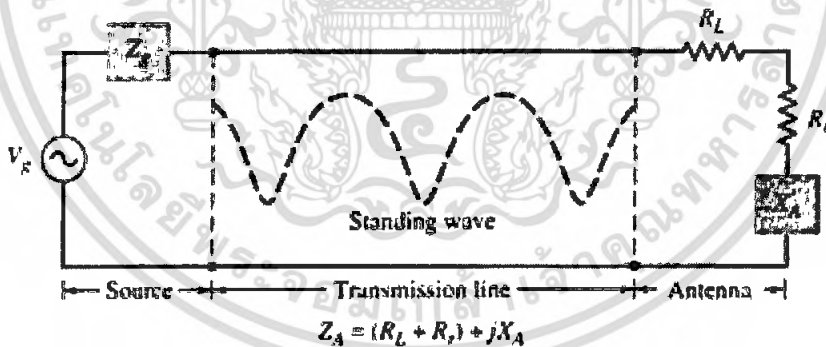
เมื่อวิเคราะห์จะพบได้ว่าสายอากาศมีพลังงาน 2 พลังงานเกิดขึ้นดังนี้

- สนามพลังงานเหนี่ยวนำ แทนพลังงานส่วนที่ไหลอยู่ภายในสายอากาศและไม่แพร่กระจายออกไป
- สนามพลังงานที่แพร่กระจาย แทนพลังงานส่วนที่แพร่ออกจากสายอากาศที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ของคลื่น และเป็นสัดส่วนตรงข้ามกับระยะทางที่ออกจากสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระยะเวลาที่ใกล้กับสายอากาศมาก ๆ จะมีปริมาณสนามพลังงานเหนี่ยวนำเกิดขึ้นมากกว่า แต่เมื่อระยะที่ไกลกว่า $\lambda/2$ จากสายอากาศค่าสนามที่แพร่กระจายจะมีมากกว่า

จากรูปที่ 2.1 สามารถที่จะเขียนเป็นวงจรเสมือนเทวินิน (Thevenin Equivalent Circuit) ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งแหล่งกำเนิดแทนด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในอุดมคติและสายส่งแทนด้วย เส้นซิด โดยมีอิมพีแดนซ์ลักษณะ (Characteristic Impedance) เป็น Z_c และสายอากาศแทนด้วย Load Z_A [$Z_A = (R_L + R_r) + jX_A$] ต่ออยู่กับสายส่ง สำหรับความต้านทานของโหลด (Load Resistance; R_L) ใช้เพื่อแทนการสูญเสียเนื่องจากตัวนำและฉนวนที่สัมพันธ์กับ โครงสร้างของ สายอากาศ โดยที่ R_r คือความต้านทานในการแพร่กระจาย (Radiation Resistance) ใช้แทนการ แพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ขณะที่รีแอกแตนซ์ (Reactance: X_A) ใช้แทนค่าอิมพีแดนซ์ ในทางจินตภาพที่สัมพันธ์กับการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศภายใต้กรณีที่เป็นอุดมคติ พลังงานที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดควรจะเป็นพลังงานรวมทั้งที่ส่งผ่านไปยังความต้านทานในการ แพร่กระจาย (R_r) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสียในตัวนำและฉนวนอันเนื่องมาจาก ธรรมชาติในสายส่งและสายอากาศเกิดขึ้น เช่นเดียวกันก็จะมี การสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ ของคลื่นบางส่วนที่เกิดขึ้นระหว่างสายส่งกับสายอากาศ ซึ่งเป็นผลมาจากค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง กับสายอากาศไม่สอดคล้องกัน (Mismatch Impedance) ด้วย



รูปที่ 2.2 วงจรเสมือนเทวินินของสายอากาศในโหมดการส่ง

คลื่นสะท้อน (Reflected Waves) ที่เกิดขึ้นจะวิ่งไปตามทางพร้อม ๆ กับคลื่นเดินทาง (Traveling Wave) ที่มาจากแหล่งกำเนิดตรงไปยังสายอากาศ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นคลื่นนิ่ง (Standing Wave) และภายในสายส่งจะมีพลังงานสะสมอยู่ ซึ่งถือว่าสายส่งเป็นอุปกรณ์เรโซแนนซ์ ซึ่งคลื่น นิ่งแสดงด้วยเส้นประตามที่แสดงในรูปที่ 2.2 ถ้าระบบสายอากาศไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ นั่นคือในสายส่งจะมีการเก็บพลังงานของเอเลเมนต์ไว้เป็นจำนวนมาก ดังนั้นแทนที่จะเป็นการนำ คลื่น (Wave Guiding) ก็จะกลายเป็นอุปกรณ์ในการส่งพลังงานออกไป ถ้าค่าสูงสุดของความเข้ม

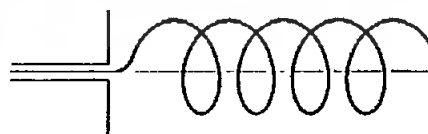
สนามของคลื่นนิ่งถูกทำให้มีค่ามาก ก็จะสามารถเป็นมูลเหตุให้เกิดคลื่นนิ่ง ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในการส่งสัญญาณ

การสูญเสียอันเนื่องมาจากสายส่ง สายอากาศ และการเกิดคลื่นนิ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ การสูญเสียในสายส่งสามารถทำให้ลดน้อยลงได้ โดยการเลือกใช้สายส่งที่มีการสูญเสียต่ำ ขณะที่สายอากาศสามารถลดการสูญเสียลงได้โดยการลดค่าความต้านทานการสูญเสีย ซึ่งแทนด้วย R_L ดังแสดงในรูปที่ 2.2 สำหรับคลื่นนิ่งสามารถลดลงได้และพลังงานที่สะสมอยู่ในสายส่งก็ทำให้ต่ำสุดได้ โดยการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Load) ให้มีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่ง

2.3 ชนิดของสายอากาศ

2.3.1 สายอากาศแบบเส้นลวด (Wire Antenna)

เป็นสายอากาศที่นิยมใช้กันมาก สามารถมองเห็นได้ทั่วทุกหนแห่ง เช่น รถยนต์ เรือ เครื่องบิน และอื่น ๆ อีกมาก มีรูปร่างลักษณะหลากหลาย เช่น แบบไดโพล แบบวงรอบ และแบบขดชนิดเกลียว แสดงดังรูปที่ 2.3 สายอากาศแบบวงรอบไม่จำเป็นต้องเป็นวงกลมอย่างเดียวน่าจะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือรูปทรงอื่น ๆ ก็ได้ สำหรับสายอากาศแบบวงรอบกลมจะเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะเป็นรูปทรงพื้นฐาน



(ค) สายอากาศขดเกลียว (Helix)

รูปที่ 2.3 สายอากาศแบบเส้นลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 สายอากาศแบบช่องเปิด (Aperture Antenna)

สายอากาศแบบช่องเปิดอาจจะเป็นที่นิยมใช้กันมากขึ้นกว่าในอดีต เพราะความต้องการในด้านรูปแบบที่ทันสมัยและการนำไปใช้ประโยชน์ด้านความถี่สูง ๆ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



(ก) ฮอร์นทรงปิระมิด (Pyramidal horn)



(ข) ฮอร์นทรงกรวย (Conical horn)



(ค) ท่อนำคลื่น (Waveguide)

รูปที่ 2.4 สายอากาศแบบช่องเปิด

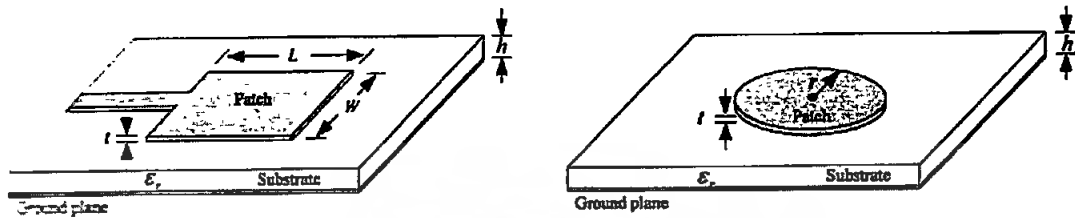
สายอากาศชนิดนี้มีประโยชน์สำหรับการนำไปใช้ในเครื่องบิน และอากาศยานอวกาศ เพราะสามารถติดตั้งให้ปากเสมอกับผิวของเครื่องบินหรือยานอวกาศได้ โดยที่จะต้องเคลือบสายอากาศด้วยสารที่เป็นฉนวน (Dielectric) เพื่อป้องกันสายอากาศกรณีอันตรายที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดล้อม

2.3.3 สายอากาศแบบไมโครสตริป (Microstrip Antenna)

สายอากาศแบบนี้กำลังเป็นที่นิยมกันมาก โดยในปัจจุบันนี้ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในภาครัฐบาลและเอกชน สายอากาศนี้ประกอบด้วยโลหะเป็นแผ่นตัวนำ (Patch) วางอยู่บนฐานรองที่เรียกว่าซับสเตรท (Substrate) โดยรูปทรงของแผ่นตัวนำนั้นสามารถมีได้หลายรูปแบบ แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นรูปร่างที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เพราะสร้างและวิเคราะห์ได้ง่าย และมีคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นที่ดึงดูดความสนใจได้ดี เพราะมีครอสโพลารไรซ์ต่ำ (Low-cross-polarized) สายอากาศไมโครสตริปมีรูปร่างไม่ซับซ้อน (Low-profile) เหมาะกับผิวที่เป็นแผ่นระนาบ (Planar) และไม่ระนาบ (Non-planar) การสร้างง่ายและราคาไม่แพงมาก สามารถสร้างได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

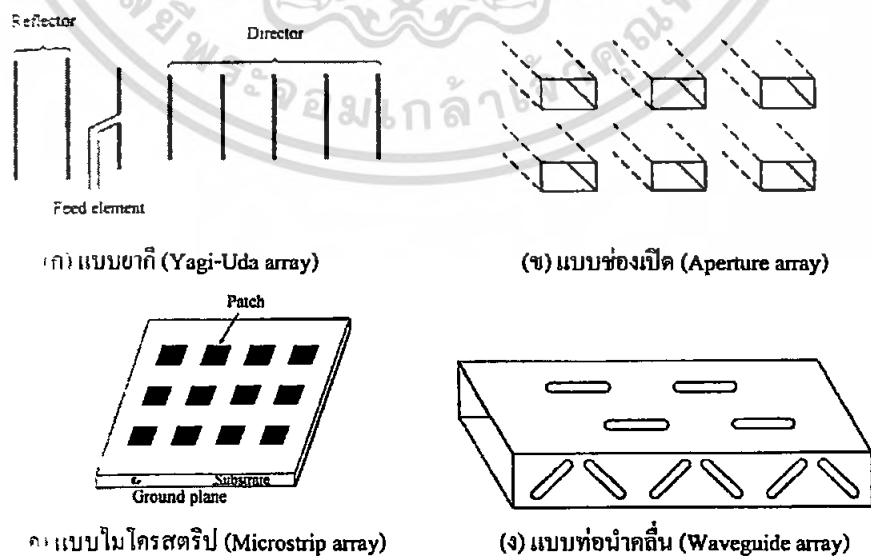
ด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ที่ทันสมัย สายอากาศชนิดนี้สามารถติดตั้งให้เสมอผิวของเครื่องบิน ยานอวกาศ ดาวเทียม จรวด รถยนต์ และแม้แต่โทรศัพท์มือถือได้ง่าย



รูปที่ 2.5 สายอากาศแบบไมโครสตริปแบบแผ่น

2.3.4 สายอากาศแบบแถวลำดับ (Array Antenna)

เนื่องจากการนำสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว ไปใช้งานจะไม่สามารถให้คุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นตามความต้องการได้ ดังนั้นสิ่งที่เป็นไปได้ก็คือ การรวมองค์ประกอบจำนวน N องค์ประกอบ เพื่อให้สายอากาศทำการแพร่กระจายคลื่นออกไป โดยการจัดวางในเชิงไฟฟ้าและเชิงเรขาคณิต (ให้เรียงลำดับกัน) และจะให้ผลลัพธ์ออกมาตามคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นที่ต้องการ เมื่อมีการจัดวางเรียงลำดับกันเพื่อให้การแพร่กระจายคลื่นจากองค์ประกอบที่นำมารวมเพิ่มขึ้น ก็จะสามารถทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นได้สูงสุดในทิศทางเฉพาะหรือในทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นนั้น โดยปกติความหมายของแถวลำดับ (Array) จะใช้กับการจัดวางตัวแพร่กระจายคลื่นแยกตามชนิดของสายอากาศดังรูปที่ 2.6



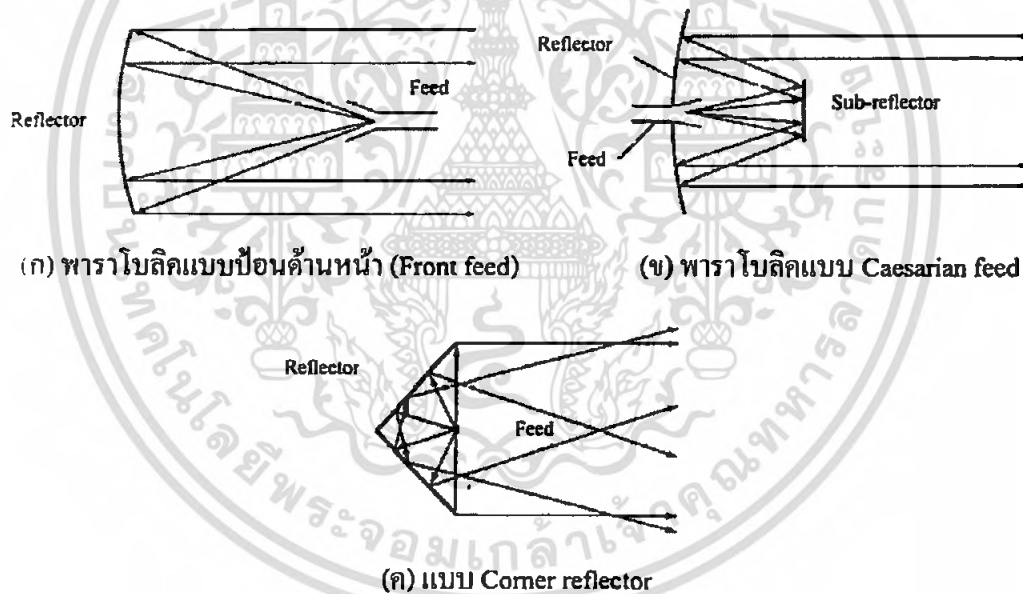
รูปที่ 2.6 สายอากาศแบบแถวลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 สายอากาศแบบสะท้อนคลื่น (Reflector Antenna)

เนื่องจากความต้องการในการสื่อสารในที่ห่างไกลกันมาก ๆ บางครั้งไม่สามารถทำได้เมื่อใช้สายอากาศชนิดที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นจึงมีความต้องการในการออกแบบเพื่อให้ได้สายอากาศที่จะสามารถส่งและรับสัญญาณได้ โดยมีการเดินทางเป็นระยะล้านไมล์

สายอากาศชนิดที่ได้รับการออกแบบให้ใช้งานได้ดีคือ สายอากาศที่มีรูปทรงเป็นแบบพาราโบลิก (Parabolic Reflector) แสดงดังรูปที่ 2.7 (ก) และ (ข) สายอากาศชนิดนี้จะถูกสร้างให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่มาก ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่จะทำให้ได้รับอัตราขยายสูง ซึ่งก็ตรงตามความต้องการของการส่งและรับสัญญาณในที่ระยะไกลมากกว่าล้านไมล์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบสายอากาศ ให้มีรูปร่างเป็นแบบที่ให้สัญญาณสามารถสะท้อนกลับไปได้ รูปทรงแบบอื่นของตัวสะท้อนกลับที่ไม่เป็นพาราโบลิกก็คือแบบ Conner Reflector แสดงดังรูปที่ 2.7 (ค)



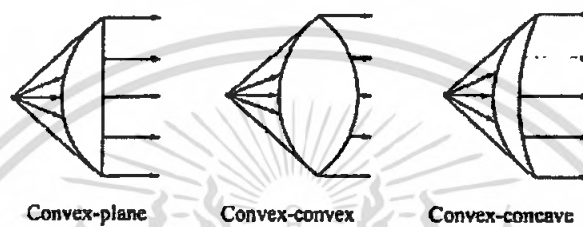
รูปที่ 2.7 สายอากาศแบบสะท้อนคลื่น

2.3.6 สายอากาศแบบเลนส์ (Lens Antennas)

เป็นสายอากาศที่ไม่ทำให้สัญญาณแตกกระจายไปในทิศทางที่ไม่ต้องการ รูปร่างเป็นแบบเลนส์ สายอากาศชนิดนี้มีการใช้กันน้อยกว่าสายอากาศชนิดอื่น ๆ อันเนื่องจากคุณสมบัติของรูปทรงทางเรขาคณิต รวมทั้งการใช้วัสดุที่จะนำมาทำเป็นเลนส์ให้เหมาะสม การที่ใช้รูปร่างแบบเลนส์เพื่อให้สามารถแปรรูปทรงต่าง ๆ ของพลังงานที่อยู่บริเวณใกล้เคียงสายอากาศให้หักเหเข้ามา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นคลื่นระนาบ สายอากาศชนิดนี้ใช้เหมือนสายอากาศแบบสะท้อนกลับ ซึ่งใช้ได้ดีในย่านความถี่สูง ๆ ขึ้นไป เนื่องจากขนาดความกว้างและน้ำหนักซึ่งใหญ่มากเกินไป จึงไม่สามารถแพร่กระจายพลังงานทั้งหมดออกไปในทิศทางที่ต้องการเพียงทิศเดียว หรือหลายทิศ ซึ่งสายอากาศในอุดมคติต้องการให้มีการแพร่กำลังงานไปในทิศทางที่ต้องการ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้ สิ่งที่ทำได้คือ พยายามให้ใกล้เคียงกับความต้องการให้มากที่สุด



(ก) สายอากาศแบบเลนส์ที่มีดัชนีหักเห $n > 1$



(ข) สายอากาศแบบเลนส์ที่มีดัชนีหักเห $n < 1$

รูปที่ 2.8 สายอากาศแบบเลนส์

2.4 พารามิเตอร์ของสายอากาศ

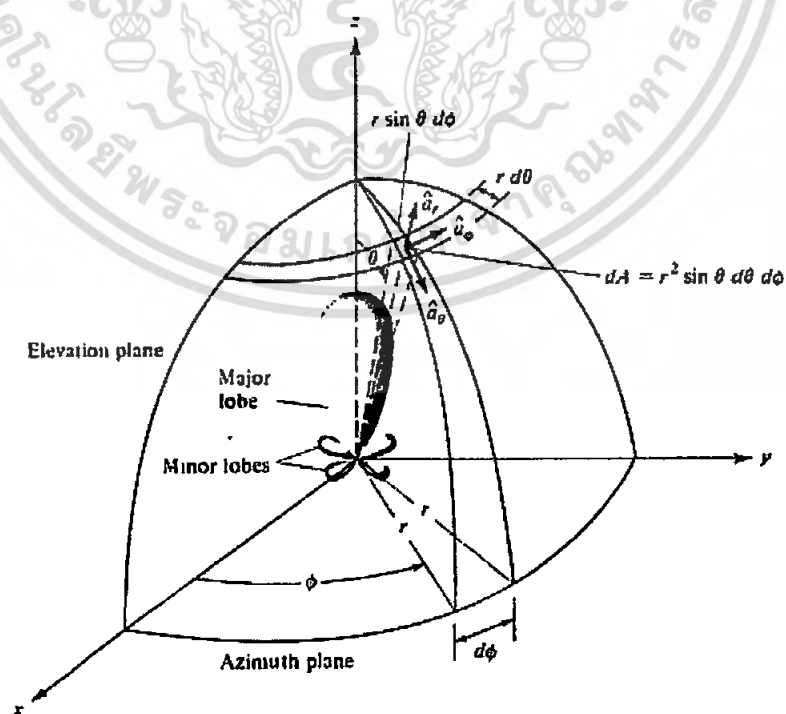
ในการอธิบายถึงสมรรถนะของสายอากาศจะต้องพิจารณาที่พารามิเตอร์ของสายอากาศ ซึ่งมีหลายพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องและจำเป็น บางพารามิเตอร์จะเกี่ยวข้องโดยตรงและบางพารามิเตอร์ไม่ได้เกี่ยวข้องโดยตรงแต่จะต้องทำความเข้าใจเพื่อนำมาใช้ประกอบการพิจารณาถึงคุณสมบัติที่ดีของสายอากาศ สำหรับพารามิเตอร์ที่จะนำมาอธิบายและให้คำจำกัดความนี้จะใช้มาตรฐานจาก IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas (IEEE Std 145-1983) ซึ่งได้ปรับปรุงมาจากมาตรฐานเดิม คือ IEEE Std 145-1973

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ของสายอากาศ หรือแบบรูปของสายอากาศ (Antenna Pattern) คือ “ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์หรือภาพ ที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของโคออดิเนทในอากาศ (Space Coordinate) โดยส่วนใหญ่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนี้มักจะหาได้จากบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far-Field) และใช้แสดงเหมือนกับเป็นฟังก์ชันของโคออดิเนททิศทาง (Directional Coordinates) คุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นจะ เกี่ยวข้องกับ ความหนาแน่นของกำลังงาน (Power Flux Density) ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity) ความเข้มของสนาม (Field Strength) การชี้ทิศทาง (Directivity) เฟส (Phase) หรือ โพลาริเซชัน (Polarization)” ซึ่งคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปของพลังงานที่แพร่กระจายเป็นแบบสองมิติและสามมิติ โดยเป็นไปตามฟังก์ชันของตำแหน่งที่สังเกตตามทางเดินของคลื่นหรือที่ตำแหน่งผิวที่มีรัศมีคงที่

รูปที่ 2.9 แสดงระบบ โคออดิเนทที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น เส้นที่แสดงทางเดินสนามไฟฟ้า (แม่เหล็ก) ที่รับได้ในแนวรัศมีคงที่ จะถูกเรียกว่า แบบรูปสนาม (Field Pattern) และกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของกำลังงานที่ไปตามแนวรัศมีคงที่ จะถูกเรียกว่า แบบรูปกำลังงาน (Power Pattern)



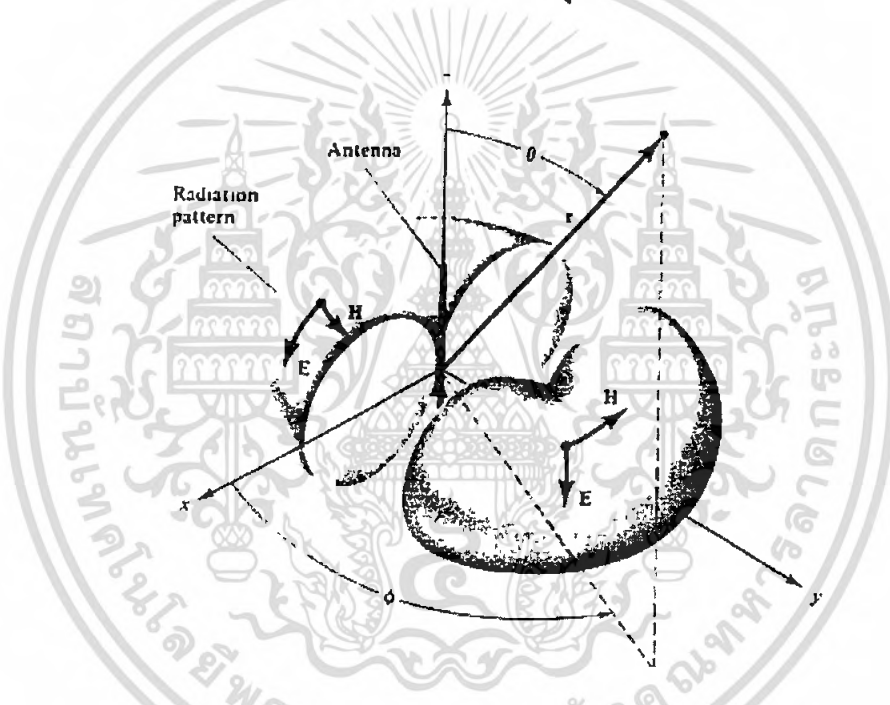
รูปที่ 2.9 ระบบ โคออดิเนทสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแบบรูปสนามและแบบรูปกำลังงานจะถูกลบเมอร์ไลต์ด้วยค่าสูงสุดของมันเอง ดังนั้นแบบรูปสนามและแบบรูปกำลังงานจึงแสดงค่าเป็นเดซิเบลที่ได้นอลเมอร์ไลต์แล้ว

2.4.1.1 ไอโซโทรปิก ไดเรกชันแนล และแบบรูปออมนิไดเรกชันแนล (Isotropic, Directional and Omnidirectional Patterns)

ตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซโทรปิก (Isotropic Radiator) คือสายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้น เป็นสายอากาศที่ไม่มีการสูญเสีย มีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นเท่ากันในทุกทิศทางด้วยความเข้มสนามที่เท่ากัน โดยจะเป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างได้จริง แต่มักจะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศที่สร้างจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติการชี้ (เจาะจง) ทิศทาง



รูปที่ 2.10 แบบรูปของสายอากาศแบบออมนิไดเรกชันแนล (Omnidirectional)

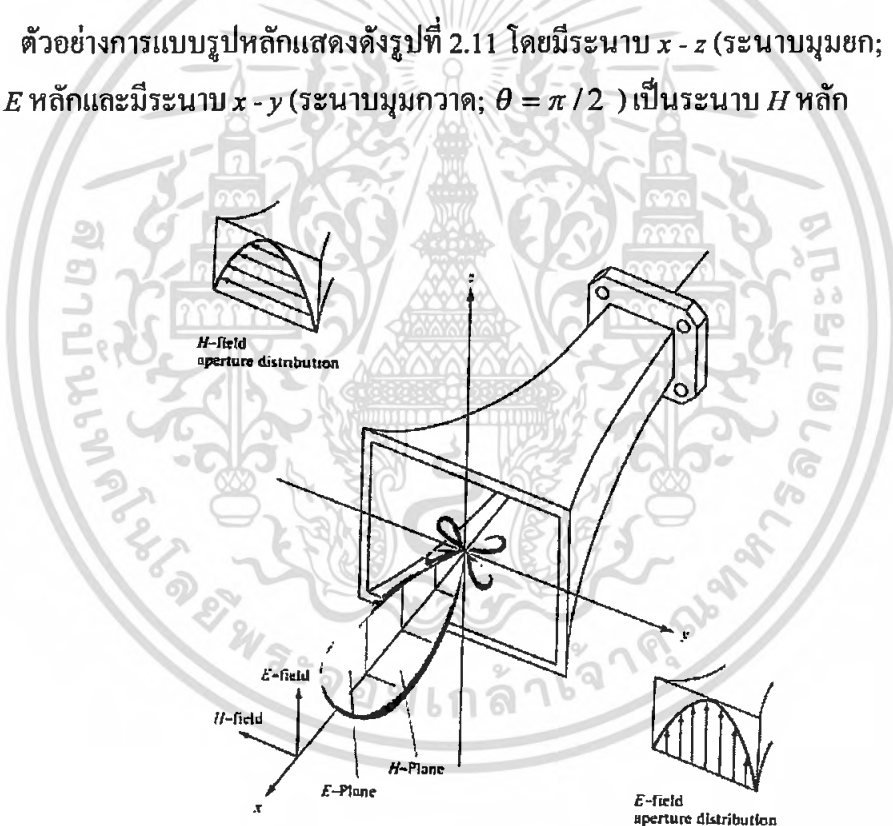
สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional Antenna) คือสายอากาศที่มีคุณสมบัติของการส่งหรือการรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น สายอากาศชนิดนี้จะมีการชี้ทิศทางสูงสุดที่มากกว่าสายอากาศแบบไดโพลครึ่งคลื่น ตัวอย่างหนึ่งของสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบชี้ทิศทางแสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งดูเหมือนกับว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะเป็นแบบไม่ชี้ทิศทางในระนาบมุมกวาด (Azimuth Plane) และจะมีการชี้ทิศทางในระนาบมุมยก (Elevation Plane) ดังนั้นชนิดของแบบรูปที่ถูกออกแบบเป็นแบบรอบทิศทาง (Omni-directional Antenna) จึงถูกกำหนดว่าเป็นเสมือนแบบรูปที่ไม่มีการชี้ทิศทางในระนาบที่กำหนด (ในกรณีนี้คือระนาบมุมกวาด) และจะมีแบบรูปที่ชี้ทิศทางในอีกระนาบที่ตั้งฉาก (ในกรณีนี้คือ ระนาบมุมยก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นแบบรูปแบบรอบทิศทาง (omnidirectional pattern) จึงเป็นแบบรูปชนิดพิเศษของแบบรูปแบบชี้ทิศทาง

2.4.1.2 แบบรูปหลัก (Principle Pattern)

สำหรับสายอากาศแบบโพลาไรซ์เส้นตรง (Linearly Polarization antenna) มักจะเป็นการอธิบายถึงสมรรถนะหรือคุณสมบัติในการทำงานของสายอากาศในเทอมของแบบรูปหลัก (Principle Pattern) ของสนามไฟฟ้า (Electric Field) และสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) ซึ่งระนาบ E จะเป็นระนาบที่มีเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และมีทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนระนาบ H จะเป็นระนาบที่มีเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก และมีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ตัวอย่างการแบบรูปหลักแสดงดังรูปที่ 2.11 โดยมีระนาบ $x-z$ (ระนาบมุมยก; $\phi = 0$) เป็นระนาบ E หลักและมีระนาบ $x-y$ (ระนาบมุมกวาด; $\theta = \pi/2$) เป็นระนาบ H หลัก



รูปที่ 2.11 แบบรูปหลักสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร

2.4.1.3 ลำคลื่น (Lobe) ของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ลำคลื่นที่แพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe) เป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณ โดยถูกปิดล้อมด้วยส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ ดังรูปที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12(ก) แสดงแบบรูปเชิงขั้ว (Polar Pattern) แบบสามมิติ ซึ่งแบ่งเป็นลำคลื่นต่าง ๆ ดังนี้

ลำคลื่นหลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe)

คือลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ตามรูปที่ 12 มีลำคลื่นหลักอยู่ในทิศทาง $\theta = 0$ สำหรับสายอากาศบางชนิดอาจมีลำคลื่นหลักมากกว่าหนึ่งลำคลื่น เช่น สายอากาศแบบแยก빔 (Split Beam Antenna)

ลำคลื่นย่อย (Minor Lobe)

คือ ลำคลื่นอื่น ๆ นอกเหนือจากลำคลื่นหลัก

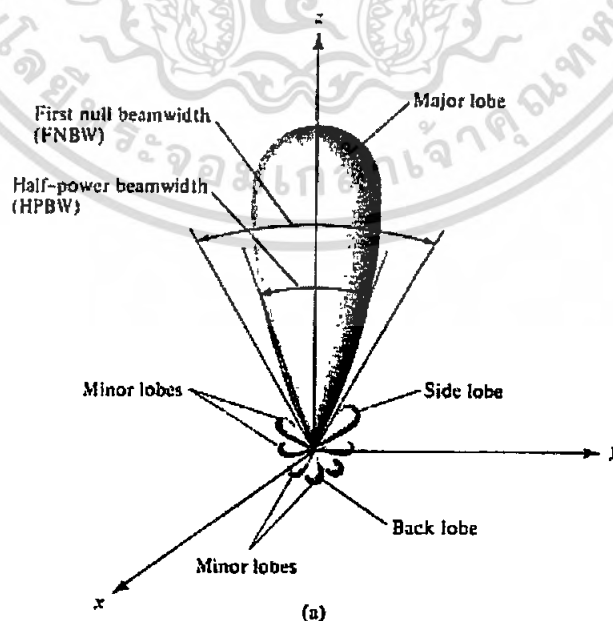
ลำคลื่นข้าง (Side Lobe)

คือ ลำคลื่นย่อยที่อยู่ติดกับลำคลื่นหลัก และอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นหลัง (Back Lobe)

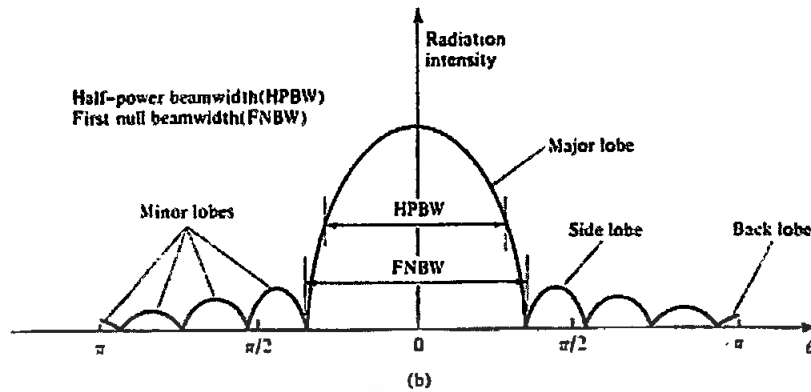
คือ ลำคลื่นย่อยที่อยู่บนครึ่งวงกลมตรงข้ามกับลำคลื่นหลัก

โดยปกติแล้วลำคลื่นย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ สำหรับสายอากาศที่ดีจะต้องกำจัดลำคลื่นเหล่านี้ให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ระดับของลำคลื่นย่อยมักแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในลำคลื่นที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นของพลังงานในลำคลื่นหลัก ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนของลำคลื่นด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของลำคลื่นด้านข้างน้อยกว่า -20 dB



(ก) ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นเชิงขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นเชิงเส้น

รูปที่ 2.12 ลำคลื่น (Lobe) ของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

2.4.1.4 บริเวณต่างๆ ของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไปแล้วมักจะแบ่งบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือ สนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive-Near Field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating-Near Field) และสนามระยะไกล (Far Field) ดังแสดงในรูปที่ 2.13

บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด และมีสนามชนิดรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ บริเวณนี้จะมีระยะทาง $R < 0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$ จากผิวของสายอากาศ เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่น และ D เป็นมิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ สำหรับสายอากาศไดโพลสั้น ๆ หรือตัวแพร่กระจายสมมูล (equivalent radiator) จะมีระยะขอบเขตสนามอยู่ที่ระยะ $\lambda/2\pi$ จากผิวสายอากาศ

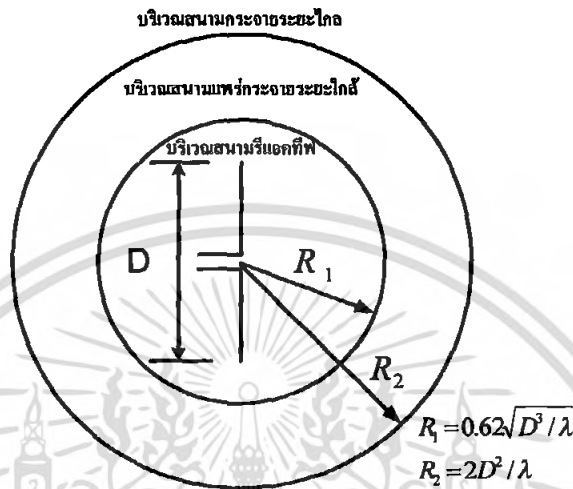
บริเวณสนามแพร่กระจายระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ กับบริเวณสนามระยะไกล โดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่ และการกระจายของสนามตามมุมต่างๆ นั้นแปรผันตามระยะทางจากสายอากาศ ถ้าขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศมีขนาดเล็กมาก ๆ เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สนามในบริเวณนี้อาจจะไม่เกิดขึ้น ขอบเขตภายในของสนามในบริเวณนี้จะมีระยะทาง $R \geq 0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$ จนถึงระยะ $R < 2D^2/\lambda$ โดยที่ D เป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ

บริเวณสนามระยะไกล เป็นบริเวณสนามของสายอากาศซึ่งการแพร่กระจายของสนามของสายอากาศตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติใหญ่ที่สุดเท่ากับ D

บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทางห่างจากสายอากาศที่ตำแหน่ง $R > \frac{2D^2}{\lambda}$ สนามใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณนี้มีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse Field) และการแพร่กระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทาง ขอบในของบริเวณดังกล่าวมีค่า $R > \frac{2D^2}{\lambda}$ และขอบนอกเป็นอนันต์



รูปที่ 2.13 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ

2.4.2 ความหนาแน่นของกำลังงานที่แพร่กระจาย (Radiation Power Density)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกใช้ในการส่งข้อมูลข่าวสารผ่านตัวกลางไร้สาย (อากาศ) หรือผ่านไปในโครงสร้างแบบนำคลื่น (waveguide) จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ ดังนั้นจึงสมมติว่ากำลังงานและพลังงานสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งปริมาณที่ใช้ในการอธิบายถึงกำลังงานที่สัมพันธ์กับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศก็คือ ความหนาแน่นของกำลังงานที่แพร่กระจาย และจะสามารถหาค่าความหนาแน่นของกำลังงานเฉลี่ยในสนามระยะไกลได้จากครึ่งหนึ่งของค่าที่เป็นจริงของสนาม แม่เหล็กไฟฟ้า ดังสมการ

$$W_{av} = \frac{1}{2} \text{Re} [\vec{E} \times \vec{H}] = W_{rad} \tag{2-1}$$

โดยที่ W_{av} และ W_{rad} เป็นความหนาแน่นของกำลังงานเฉลี่ยและที่แพร่กระจาย ตามลำดับ

จากความหนาแน่นกำลังงานที่แพร่กระจายหรือก็คือความหนาแน่นกำลังงานเฉลี่ยที่แพร่ออกจากสายอากาศ จะสามารถนำไปสู่การหาค่ากำลังงานที่แพร่กระจาย (P_{rad}) ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

$$P_{rad} = P_{av} = \iint_s W_{rad} ds = \frac{1}{2} \iint_s \text{Re}(\bar{E} \times \bar{H}) ds \quad (2-2)$$

แบบรูป (pattern) กำลังงานของสายอากาศที่ได้จากการวัด จะเป็นฟังก์ชันของทิศทาง ของความหนาแน่นกำลังงานเฉลี่ยที่ถูกระบายโดยสายอากาศ โดยจะทำการวัดด้วยการทำกับทรงกลมใหญ่ที่มีรัศมีคงที่ซึ่งจะเป็นการนำไปสู่สนามระยะไกล แต่ถ้าเป็นสมรรถนะของสายอากาศจะเป็นการวัดในเทอมของแกนและในเทอมของแบบรูปกำลังงานสัมพัทธ์ (relative power patterns) สำหรับแบบรูปสามมิติจะไม่สามารถวัดได้ แต่สามารถจะสร้างขึ้นมาด้วยการนำเอารูปสองมิติจำนวนหนึ่งมาทำการตัดต่อ

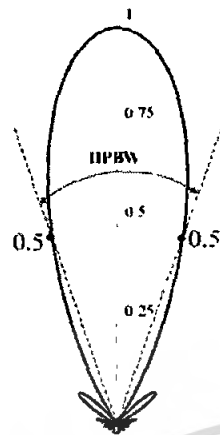
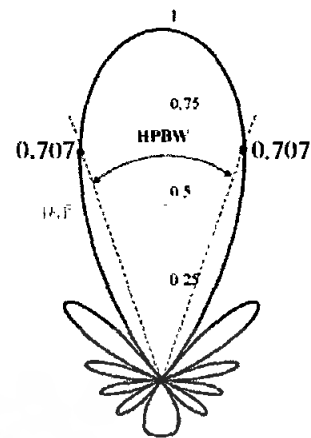
2.4.3 ความเข้มในการแผ่กระจาย (Radiation Intensity)

ความเข้มในการแผ่กระจายคลื่น (U) ในทิศทางที่กำหนด คือ กำลังงานที่แผ่กระจายจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน (per unit solid angle) ความเข้มในการแผ่กระจายเป็นพารามิเตอร์ในสนามระยะไกลที่สามารถหาได้ด้วยการคูณความหนาแน่นของกำลังงานที่แผ่กระจายเข้ากับระยะทาง (r) ยกกำลังสอง

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2-3)$$

2.4.4 บีมวิดท์และฮาล์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ (Beam Width, Half Power Beam Width)

บีมวิดท์จะสัมพันธ์กับแบบรูปในการแผ่กระจาย (pattern) ของสายอากาศ ซึ่งจะเป็นพารามิเตอร์ที่ถูกออกแบบให้เป็นความกว้างของลำคลื่น โดยบีมวิดท์ของแพทเทิร์นจะเป็นมุมที่อยู่ระหว่างจุดสองจุดบนด้านที่ตรงข้ามกันของแบบรูปที่มีการแผ่กระจายสูงสุด โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะนิยมใช้คำว่าฮาล์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ (Half-Power Beamwidth: HPBW) แทน ซึ่งจะเป็นมุมที่วัดระหว่างจุดสองจุดของความเข้มการแผ่กระจายคลื่นที่มีค่าสูงสุด โดยจะอยู่ระหว่างสองทิศทางที่จุดความเข้มในการแผ่กระจายมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด ซึ่งก็คือตำแหน่งที่ 3 dB บนแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น หรืออีกกรณีหนึ่งจะพิจารณาจุดที่ความเข้มสนามเหลือ $1/\sqrt{2}$ หรือ 0.707 เท่าของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

(ก) 2-D Normalized Power $|\bar{E}_n|^2$ Pattern(ข) 2-D Normalized Field $|\bar{E}_n|$ Pattern

รูปที่ 2.14 BeamWidth

2.4.5 การชี้ทิศทาง (Directivity)

ไดเรกตีวิตีของสายอากาศ คือ อัตราส่วนของความเข้มในการแพร่กระจายที่ออกจากสายอากาศในทิศทางที่กำหนดหารด้วยความเข้มในการแพร่กระจายเฉลี่ยตลอดทุกทิศทาง โดยที่ความเข้มในการแพร่กระจายเฉลี่ย จะมีค่าเท่ากับผลรวมทั้งหมดของกำลังงานที่แพร่กระจายจากสายอากาศหารด้วย 4π

$$D = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2-4)$$

โดยที่ D คือ ไดเรกตีวิตี และ P_{rad} คือ กำลังงานที่แพร่กระจาย

แบบรูปการชี้ทิศทาง (Directional Patterns) เป็นภาพที่แสดงถึงแบบรูปการแพร่กำลังงานของสายอากาศในทิศทางที่มีกำลังงานสูงสุด ซึ่งก็คือลำคลื่น (lobe) ดังนั้นการหาค่าโดยประมาณของไดเรกตีวิตีของสายอากาศจะสามารถทำได้จากการวัดมุมตันของลำคลื่น (beam solid angle) สำหรับสายอากาศที่มีลำคลื่นเดี่ยวที่มีการตัดลำคลื่นย่อยเล็กทิ้งไปด้วยการไม่นำมาคำนวณ จะมีค่ามุมตันโดยประมาณเท่ากับ ผลคูณของความกว้างลำคลื่นที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของกำลังงานในสองระนาบที่ตั้งฉากกัน สมการโดยประมาณเป็นดังนี้

$$D_0 = \frac{4\pi}{\Omega_A} = \frac{4\pi}{\theta_{1r}\theta_{2r}} \quad (2-5)$$

มุมตันของลำคลื่น Ω_A จะประมาณค่าได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Omega_A = \theta_{1r} \theta_{2r} \quad (2-6)$$

ซึ่ง θ_{1r} = ความกว้างลำคลื่นที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของกำลังงานในระนาบหนึ่ง (rad)

θ_{2r} = ความกว้างลำคลื่นที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของกำลังงานในอีกระนาบหนึ่ง (rad)

ถ้าคิดมุมลำคลื่นเป็นองศา จะเป็นดังนี้

$$D_0 = \frac{4\pi(180/\pi)^2}{\theta_{1d}\theta_{2d}} = \frac{41,253}{\theta_{1d}\theta_{2d}} \quad (2-7)$$

ซึ่ง θ_{1d} = ความกว้างลำคลื่นที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของกำลังงานในระนาบหนึ่ง (degrees)

θ_{2d} = ความกว้างลำคลื่นที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของกำลังงานในอีกระนาบหนึ่ง (degrees)

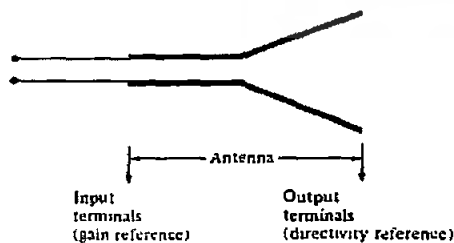
สำหรับไดเรกทิวิตี้จะเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย ดังนั้นจึงมักจะใช้แทนด้วยเดซิเบล (dB) ซึ่งทำได้ดังนี้

$$D(\text{dB}) = 10 \log_{10}[D(\text{dimensionless})] \quad (2-8)$$

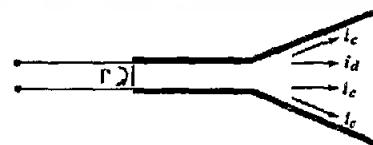
2.4.6 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency)

ประสิทธิภาพของสายอากาศ จะเป็นสิ่งที่บอถึงความสามารถของสายอากาศ โดยจะคิดจากการสูญเสียที่ขั้วต่อระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณที่รวมกับการสูญเสียภายในโครงสร้างสายอากาศ การสูญเสียที่กล่าวถึงนี้จะอ้างอิงได้จากรูปที่ 2.15 ซึ่งการสูญเสียที่อ้างอิงจากรูป (ก) คือ

1. การสะท้อนกลับอันเนื่องจากการไม่สมพจน์ (mismatch) กันระหว่างสายนำสัญญาณกับสายอากาศ
2. การสูญเสียจากการเป็นตัวนำและฉนวน คือ I^2R



(ก) ขั้วอ้างอิง



(ข) การสูญเสียของสายอากาศ

รูปที่ 2.15 ขั้วอ้างอิงและการสูญเสียของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปจะหาประสิทธิภาพรวมทั้งหมดได้จากสมการ

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (2-9)$$

โดยที่ e_0 = ประสิทธิภาพรวม (ไม่มีหน่วย)

e_r = ประสิทธิภาพจากการสะท้อนกลับ $= (1-|\Gamma|^2)$ (ไม่มีหน่วย)

e_c = ประสิทธิภาพของตัวนำ (ไม่มีหน่วย)

e_d = ประสิทธิภาพของฉนวน (ไม่มีหน่วย)

Γ = สัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับที่ขั้วต่อของสายอากาศ

$$\text{ซึ่ง } \Gamma = (Z_m - Z_0) / (Z_m + Z_0)$$

โดยที่ Z_m = อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และ Z_0 = อิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ

นอกจากนี้หาค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ได้ ดังนี้

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (2-10)$$

และเนื่องจากการยากที่จะคำนวณหา e_c และ e_d แต่ก็จะสามารถหาได้ด้วยการทดลอง ดังนั้นในการคำนวณจึงรวมค่าประสิทธิภาพทั้งสองเข้าด้วยกันเป็นค่าเดียวคือ e_{cd} ดังนี้

$$e_0 = e_r e_{cd} = e_{cd} (1-|\Gamma|^2) \quad (2-11)$$

โดยที่ $e_{cd} = e_c e_d$ = ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งจะถูกนำไปเกี่ยวข้องกับเกนและไดเรคตีวิตี

2.4.7 เกน (Gain)

เกนจะเป็นการวัดสมรรถนะของสายอากาศ ซึ่งเกนของสายอากาศนั้นจะมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับไดเรคตีวิตีหรือก็คือการชี้ทิศทางมาก โดยจะเป็นการรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้าด้วยกันกับไดเรคตีวิตี ในขณะที่ไดเรคตีวิตีเป็นเพียงการแสดงคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศและนำไปใช้ในการควบคุมแบบรูปในการแพร่กระจายคลื่นเท่านั้น การคิดค่าเกนของสายอากาศจะวัดเทียบกับสายอากาศอ้างอิง โดยเกนของสายอากาศ คือ “อัตราส่วนของความเข้มในการแพร่กระจายในทิศทางที่กำหนดหารด้วยความเข้มในการแพร่กระจายที่ได้จากกำลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหมดที่ยอมรับได้ที่มีการแพร่กระจายแบบไอโซโทรปิก หรือก็คือแพร่กระจายได้ทุกทิศทาง โดยที่ความเข้มในการแพร่กระจายที่สอดคล้องกับกำลังงานที่มีการแพร่กระจายแบบไอโซโทรปิก จะเท่ากับกำลังงาน (input) ที่สายอากาศรับได้ หากด้วย 4π ” ดังสมการ

$$Gain = 4\pi \frac{\text{radiation intensity}}{\text{total input (accepted) power}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (\text{dimensionless}) \quad (2-12)$$

ในทุกกรณีจะใช้เกนสัมพัทธ์ (relative gain) ซึ่งถูกกำหนดว่า “เป็นอัตราส่วนของเกน กำลังงาน (power gain) ในทิศทางที่กำหนด หากด้วยเกนกำลังงานของสายอากาศอ้างอิงในทิศทางที่อ้างอิง” กำลังงานขาเข้า (input) ของสายอากาศทั้งสองจะต้องเท่ากัน ซึ่งสายอากาศที่อ้างอิง มักจะเป็น สายอากาศไดโพล สายอากาศแบบปากแตร (horn) หรือเป็นสายอากาศแบบอื่น ๆ ที่สามารถคำนวณหาเกนได้หรือรู้ค่าเกน อย่างไรก็ตามในทุกกรณีสายอากาศอ้างอิงจะเป็น สายอากาศที่ไม่มีการสูญเสียที่มีการแพร่กระจายคลื่นทุกทิศทาง ฉะนั้นเกนสัมพัทธ์จะหาได้ ดังนี้

$$G = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in} (\text{lossless isotropic source})} \quad (\text{dimensionless}) \quad (2-13)$$

เมื่อไม่ได้กำหนดทิศทาง เกนกำลังงาน จึงมักจะใช้จากทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่น แรงสุด ดังนั้นการหาผลรวมของกำลังงานที่แพร่กระจาย (P_{rad}) จึงสัมพันธ์กับผลรวมของกำลังงาน ขาเข้า (P_{in}) ดังนี้

$$P_{rad} = e_{cd} P_{in} \quad (2-14)$$

โดยที่เกนจะไม่มีการรวมเอาการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับและการสูญเสียจากการ ที่โพลาไรซ์ไม่สมพ้องกัน (Polarization mismatches) แต่จะรวมเฉพาะการสูญเสียจาก ตัวนำ- ฉนวน (e_{cd}) เท่านั้น ดังนั้นเกนที่แท้จริงจึงเป็นดังนี้

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} \left[4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (2-15)$$

ซึ่งจะสัมพันธ์กับไดเรคตีวิตี ดังนี้

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} D(\theta, \phi) \quad (2-16)$$

สำหรับค่าสูงสุดของเกนที่สัมพันธ์กับไดเรคตีวิตี จะเป็นไปดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_0 = e_{cd} D_0 \quad (2-17)$$

ซึ่ง

$$G_0 = G_\theta + G_\phi \quad (2-18)$$

โดยที่ ส่วนของเกน (partial gains) คือ G_θ และ G_ϕ ถูกแทนด้วย

$$G_\theta = \frac{4\pi U_\theta}{P_m} \quad (2-19)$$

$$G_\phi = \frac{4\pi U_\phi}{P_m} \quad (2-20)$$

ซึ่ง U_θ = ความเข้มในการแพร่กระจายในทิศทางที่มีส่วนประกอบของสนาม E_θ

U_ϕ = ความเข้มในการแพร่กระจายในทิศทางที่มีส่วนประกอบของสนาม E_ϕ

P_m = ผลรวมของกำลังงานที่รับได้

ในทางปฏิบัติที่ใช้สำหรับสายอากาศทั้งหมดเพื่อหาค่าเกน จะทำได้โดยใช้สมการประมาณค่าที่หาผ่านแบบรูปจำลองที่เกี่ยวข้องกับมุมตัน ดังนี้

$$G_0 = \frac{30,000}{\theta_{1d} \theta_{2d}} \quad (2-21)$$

ในทางปฏิบัติแล้วเมื่อก้าวถึงเกนจะหมายถึงเกนที่มีค่าสูงสุด และจะอยู่ในเทอมของปริมาณเดซิเบลแทนปริมาณที่ไม่มีหน่วย ดังนี้

$$G_0(dB) = 10 \log_{10} [e_{cd} D_0] \quad (2-22)$$

ดังนั้นสายอากาศที่ไม่มีการสูญเสีย เกนและโคเรคทีวิตีจะมีค่าเท่ากัน

2.4.8 แบนด์วิดท์

แบนด์วิดท์ของสายอากาศถูกกำหนดให้เป็นช่วงของความถี่ ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้ อาจคิดว่าเป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่าง ๆ อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ คุณสมบัติดังกล่าว ได้แก่ อินพุตอิมพีแดนซ์ แพทเทิร์น บีมวิดท์ โพลาริเซชัน ระดับของไซด์โลบ เกน ประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่น ฯลฯ สำหรับสายอากาศแบนด์กว้าง มักจะคิดเป็นอัตราส่วนของความถี่ที่ใช้งานได้ ด้านสูงต่อความถี่ใช้งานได้ด้านต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยกตัวอย่างเช่น แบนด์วิดท์ 10:1 แสดงว่าความถี่ที่ใช้งานในด้านสูง มีค่าแบนด์วิดท์มากกว่าความถี่ใช้งานด้านต่ำอยู่ 10 เท่า สำหรับสายอากาศแบนด์แคบ แบนด์วิดท์จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของความถี่ (ความถี่ด้านสูงลบด้วยความถี่ด้านต่ำ)หารด้วยความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น เช่น แบนด์วิดท์ 5% แสดงว่าผลต่างของความถี่ของช่วงการทำงานของสายอากาศเป็น 5 % ของความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น

$$BW(\%) = \frac{f_H - f_L}{f_0} \times 100 \quad (2-23)$$

เมื่อ	BW	คือ ค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศ
	f_H	คือ ขอบเขตความถี่สูงของย่านความถี่
	f_L	คือ ขอบเขตความถี่ต่ำของย่านความถี่
	f_0	คือ ความถี่กลางของย่านความถี่

เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ (ได้แก่ อินพุตอิมพีแดนซ์ แพทเทอร์น เคนโพลาไรเซชัน ฯลฯ) ไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่สามารถกำหนดแบนด์วิดท์ตามคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียวได้ จึงต้องมีการกำหนดข้อบังคับให้เป็นไปตามการประยุกต์ใช้งานแต่ละอย่างไป ปกติแล้วแพทเทอร์นแบนด์วิดท์กับอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์จะถูกใช้เป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ของสายอากาศ

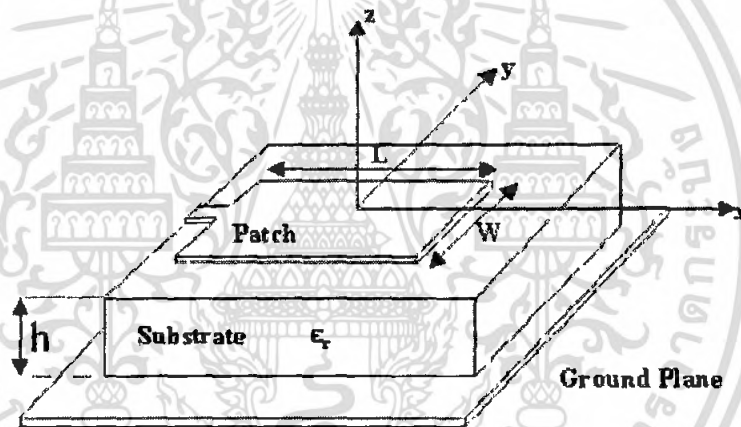
2.5 สายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่ได้รับการศึกษา และพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 เป็นต้นมา สายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูก ดังนั้นจึงได้มีการทำวิจัย และพัฒนาสายอากาศไมโครสตริปมาอย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปแล้วรูปร่างพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริปที่นิยมนำมาใช้งานโดยหลัก ๆ จะแบ่งเป็นแบบแผ่นปะและแบบช่องเปิด ข้อได้เปรียบทางโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปคือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และมีความหลากหลายของรูปร่างของตัวแพร่กระจายคลื่น นอกจากนี้ยังมีข้อดีอื่น ๆ เช่น ผลิตด้วยเทคโนโลยีการผลิตวงจรมินิ ซึ่งทำให้สร้างได้ง่าย ราคาถูก และตัวสายอากาศมีความแข็งแรงทนทาน นอกจากนี้ สายอากาศชนิดนี้ยังเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานในโครงสร้างวงจรรวมไมโครเวฟ (Monolithic Microwave Integrated Circuit : MMIC) ด้วยคุณสมบัติของสายอากาศ

ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารต่าง ๆ ได้หลากหลาย เช่น การสื่อสารในระบบเครือข่ายไร้สาย ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ และการสื่อสารผ่านดาวเทียม เป็นต้น

2.5.1 โครงสร้างและคุณสมบัติทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป

ไมโครสตริปเป็นแผ่นวงจรที่ใช้กันอย่างมากในย่านความถี่ไมโครเวฟ โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปจะสร้างมาจากแผ่นฉนวน (Dielectric) ที่มีการสูญเสียต่ำ ซึ่งเรียกว่าวัสดุฐานรองที่เป็นสารไดอิเล็กตริก (Dielectric Substrate) ด้านหนึ่งจะเป็นส่วนของตัวนำทั้งหมดเรียกว่า พื้นกราวด์ (Ground Plane) ส่วนอีกด้านเป็นส่วนของวงจรหรือสายอากาศที่ถูกสร้างลงไป โครงสร้างที่สำคัญของสายอากาศไมโครสตริปประกอบด้วยแผ่นตัวนำ ชั้นวัสดุฐานรอง ระบายกราวด์ และระบบป้อนกำลัง ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 สายอากาศไมโครสตริป

2.5.1.1 แผ่นปะตัวนำ (Patch)

แผ่นปะตัวนำมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะบาง ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่พลังงาน และมีความต้านทานต่ำ ทนต่อสภาวะแวดล้อมและการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ได้ดี สามารถยึดติดกับผิวของชั้นวัสดุฐานรองได้เป็นอย่างดี โดยทั่วไปทำจากทองแดง ทองคำหรือ อลูมิเนียม แผ่นปะตัวนำอาจมีรูปร่างต่างๆ เช่น สี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัส วงกลม วงรี ฯลฯ วัสดุที่นำมาทำแผ่นปะตัวนำนี้จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของสายอากาศและความยากง่ายในการผลิต นอกจากนี้แล้วขนาดและรูปร่างของแผ่นปะตัวนำยังเป็นปัจจัยที่กำหนดความถี่ใช้งานและส่งผลกระทบต่อรูปแบบการแผ่พลังงาน และค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ ปัจจุบันแผ่นปะตัวนำที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นแผ่นปะตัวนำรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงกลมและสี่เหลี่ยม เนื่องจากการผลิตและปรับแต่งสามารถทำได้ง่ายและมีคุณสมบัติไม่ต่างไปจากแผ่นตัวนำรูปอื่น ๆ มากนัก

2.5.1.2 ชั้นวัสดุฐานรอง (Substrate)

ชนิดและขนาดของชั้นวัสดุฐานรองเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการออกแบบ และเป็นองค์ประกอบสำคัญที่กำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของสายอากาศไมโครสตริป การแผ่พลังงานของสายอากาศจะลดลงเมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาของวัสดุฐานรองมีค่าคงที่ การแผ่พลังงานของสายอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของชั้นวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้น จนกระทั่งความหนาคือความยาวคลื่นมีค่าประมาณ 0.05 การแผ่พลังงานจะมีปริมาณลดลง และเมื่อพลังงานที่สะสมในชั้นวัสดุฐานรองมีค่าเกือบคงที่ (ประมาณ 0.02%) ก็จะสามารถละเว้นได้

การเลือกวัสดุเพื่อใช้เป็นวัสดุฐานรองนั้น จะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางเคมี ความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ความสามารถในการยึดติดกับผิวได้ดี ความเรียบของผิวซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดกับโลหะ และสามารถผลิตเป็นชั้นวัสดุฐานรองขนาดใหญ่สำหรับแผงสายอากาศได้ นอกจากนี้สมบัติทางไฟฟ้ายังเป็นตัวแปรสำคัญในการเลือกวัสดุ โดยมีค่าปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงต่อไปนี้

2.5.1.3 ระนาบกราวด์ (Ground Plane)

เป็นแผ่นโลหะขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับแผ่นตัวนำ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะทำด้วยโลหะชนิดเดียวกัน โดยขนาดของระนาบกราวด์นี้จะส่งผลกระทบต่อรูปแบบการแผ่พลังงานเนื่องจากคลื่นจะเลี้ยวเบนที่บริเวณขอบของระนาบกราวด์ นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศอีกด้วย เนื่องจากในการวิเคราะห์สายอากาศส่วนใหญ่มีข้อสมมุติว่าแผ่นระนาบกราวด์มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นตัวนำมาก จนสามารถประมาณได้ว่าเป็นอนันต์ ขนาดที่จำกัดของแผ่นระนาบกราวด์จะมีผลกระทบต่อลำคลื่นหลัก (Main lobe) น้อยมาก แต่จะทำให้เกิดลำคลื่นด้านหลังของแบบรูปการแผ่พลังงาน การรวมผลของระนาบกราวด์จะมีความจำเป็นก็ต่อเมื่อผู้ออกแบบสนใจลำคลื่นด้านหลัง (Back lobe) ของแบบรูปการแผ่พลังงานเท่านั้น

2.5.1.4 ระบบป้อนกำลัง (Feed)

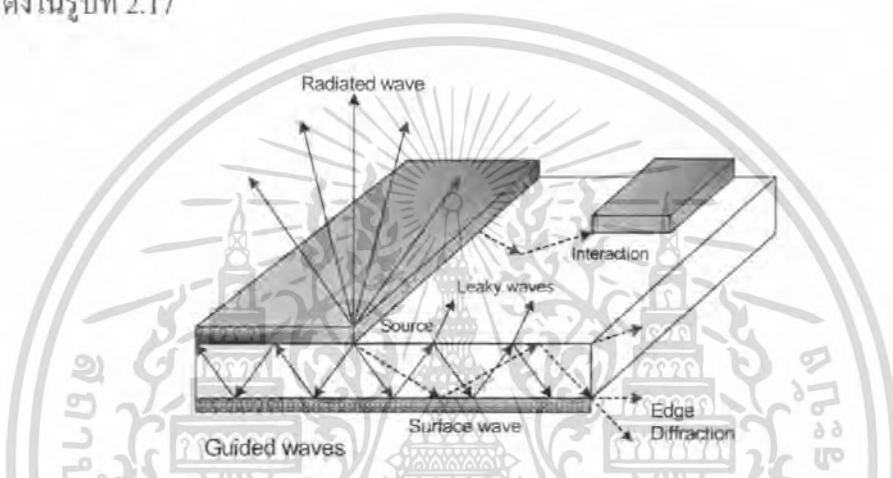
ตัวป้อนกำลัง (feed) ทำหน้าที่ในการจ่ายกำลังความถี่คลื่นวิทยุ (RF power) ให้แก่สายอากาศไมโครสตริป ระบบการป้อนสัญญาณภายในโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความยากง่ายในการสร้างและคุณสมบัติของสายอากาศโดยเฉพาะเนื่องจากการจัดวางระบบป้อนกำลัง พลังงานที่สูญเสียในระบบป้อนกำลัง การผิพื่นของกระแสกระตุ้น และปรากฏการณ์ควมกำลัคลื่นร่วมระหว่างระบบป้อนกำลังกับแผ่นตัวนำ จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลต่อค่าคุณสมบัติของสายอากาศ ไม่ว่าจะเป็นรูปแบบการแผ่พลังงาน โพลาริเซชัน และประสิทธิภาพของสายอากาศ ระบบป้อนกำลังนี้สามารถทำได้หลายลักษณะ เช่น การกระจายกระแสผ่านสายป้อนที่ต่อจากแผ่นตัวนำโดยการใช้กรรมวิธีทำแผ่นวงจรพิมพ์

2.5.2 คลื่นที่แพร่กระจายในไมโครสตริป

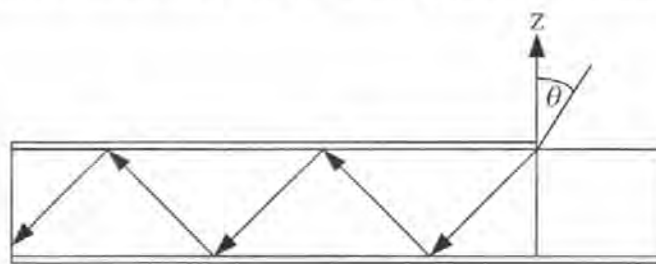
สายอากาศไมโครสตริปจะมีคลื่นที่แพร่กระจายอยู่หลายแบบ เช่น คลื่นนำทาง (Guided Wave) คลื่นแผ่พลังงาน (Radiated Wave) คลื่นรั่ว (Leaky Wave) คลื่นผิว (Surface Wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ลักษณะของคลื่นที่แพร่กระจายในไมโครสตริป

2.5.2.1 คลื่นถูกนำทาง (Guided Wave)

สำหรับทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของคลื่นถูกนำทางนั้นจะมีลักษณะมุมของการแพร่กระจายทำมุมอยู่ระหว่างช่วง 6 ถึง 9 นาทีกา (ทิศตามเข็มนาฬิกา) โดยลักษณะการแพร่กระจายคลื่นนั้นจะแพร่กระจายอยู่เฉพาะในวัสดุฐานรอง และคลื่นจะสะท้อนไปมาระหว่างตัวนำสองตัว คลื่นถูกนำทางนี้จะนำไปใช้อย่างมากกับสายอากาศส่งสัญญาณ สำหรับคลื่นแบบนี้มีส่วนในการสะสมพลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ต้องการในสายอากาศแบบแผ่นปะ เมื่อเลือกใช้วัสดุฐานรองที่บางและมีสภาพยอมทางไฟฟ้า (permittivity) สูงจะทำให้คลื่นแบบนี้มีอิทธิพลสูง

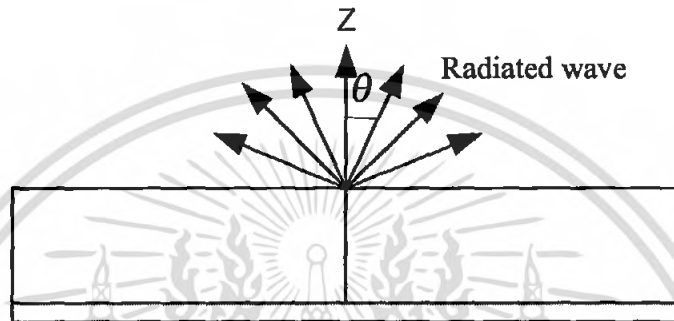


รูปที่ 2.18 แสดงการเกิดคลื่นนำทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.2 คลื่นแผ่พลังงาน (Radiated Wave)

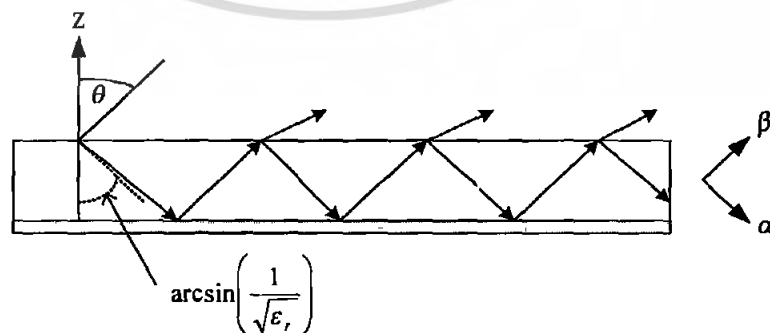
คลื่นแบบนี้จะมีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นเป็นมุมที่อยู่ระหว่างช่วง 9 ถึง 3 นาฬิกาโดยจะมีทิศทางที่แพร่ขึ้นไปบนอากาศที่ไม่มีการปิดกั้นของขอบเขตใด ๆ ลักษณะของคลื่นแบบนี้จะใช้กันมากในงานเกี่ยวกับสายอากาศ คลื่นแบบนี้จะมีอิทธิพลสูงเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่หนา (เปรียบเทียบกับความยาวคลื่น) และค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าต่ำ



รูปที่ 2.19 ลักษณะคลื่นที่แพร่กระจายของคลื่นแผ่พลังงาน

2.5.2.3 คลื่นรั่ว (Leaky Wave)

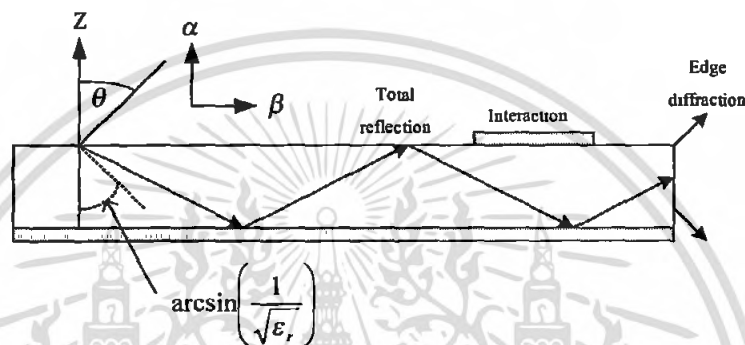
ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นจะอยู่ในช่วง 3 ถึง 6 นาฬิกา โดยคลื่นรั่วนั้นจะแพร่กระจายมาจากคลื่นที่สะท้อนมาจากระนาบกราวด์ และไปยังจุดเชื่อมต่อระหว่างอากาศกับสารไดอิเล็กตริก เมื่อคลื่นที่สะท้อนมาถึงตำแหน่งนี้จะทำให้เกิดคลื่นที่ถูกส่งไปในอากาศ นั่นคือคลื่นรั่วออกจากคลื่นที่สะท้อนกลับลงไปในวัสดุฐานรอง (Surface Wave) ลักษณะของคลื่นรั่วที่เกิดขึ้นนี้จะนำไปช่วยในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งจะอยู่ในเงื่อนไขของความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในแต่ละสายอากาศ เช่น ทำให้มีสภาพการชี้ทิศทางหรือเจาะจงทิศทาง (Directivity) ที่สูง



รูปที่ 2.20 แสดงการเกิดคลื่นรั่ว

2.5.2.4 คลื่นผิว (Surface Wave)

มุมในการแพร่กระจายที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าของคลื่นร่ว จึงทำให้เกิดคลื่นที่สะท้อนกลับมายังวัสดุฐานรอง จึงเรียกคลื่นแบบนี้ว่าคลื่นผิว เมื่อคลื่นผิวถูกส่งมาที่ขอบของโครงสร้างดั่งรูป จะทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นออกมาจากโครงสร้าง คลื่นที่แพร่กระจายออกมานี้ทำให้เกิดผลเสียต่อแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ คือทำให้พลังงานในการส่งหรือรับน้อยลง ลักษณะของคลื่นแบบนี้จะมีความสำคัญ เมื่อใช้วัสดุฐานรองที่หนาและสภาพยอมทางไฟฟ้ามีค่าสูง



รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นผิว

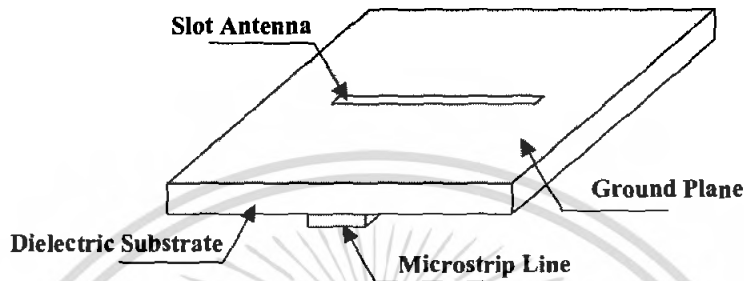
2.5.2.5 ความต้องการคลื่นในสายส่งสัญญาณและสายอากาศ

ในการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่งสัญญาณนั้น คลื่นถูกนำทางจะถูกกระด้วนมากที่สุด ขณะที่จะต้องหลีกเลี่ยงคลื่นแผ่พลังงาน คลื่นร่ว และคลื่นผิว ในทางตรงกันข้ามถ้าเป็นสายอากาศจะต้องการให้เกิดคลื่นแผ่พลังงานมากที่สุด และจะต้องป้องกันการเกิดคลื่นนำทางในแผ่นตัวนำและคลื่นผิว

2.6 โครงสร้างและคุณสมบัติทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นปะ

สายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นปะ ที่ประกอบด้วยแผ่นตัวนำบาง ๆ ซึ่งเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นเรียกว่า สายอากาศแผ่นปะ (Patch Antenna) วางบนผิวของวัสดุฐานรอง อีกด้านของวัสดุฐานรองเป็นระนาบกราวด์ (Ground plane) โดยความหนาของส่วนโลหะจะมีขนาดน้อยกว่าความยาวคลื่นของอากาศมาก ๆ ($t \ll \lambda_0$) เช่นเดียวกันกับความหนาของวัสดุฐานรอง ซึ่ง $h \ll \lambda_0$ และโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$

สัญญาณผ่านสายนำสัญญาณที่อาจจะออกแบบให้อยู่ระนาบเดียวกันกับสายอากาศช่องเปิด หรือ อาจจะอยู่คนละระนาบกัน ขึ้นอยู่กับความต้องการในการออกแบบใช้งาน แนววิธีการออกแบบ เพื่อนำไปใช้งานจะมีลักษณะคล้ายกันกับสายอากาศแบบแผ่นปะ ต่างกันที่วิธีการแผ่กระจายคลื่น



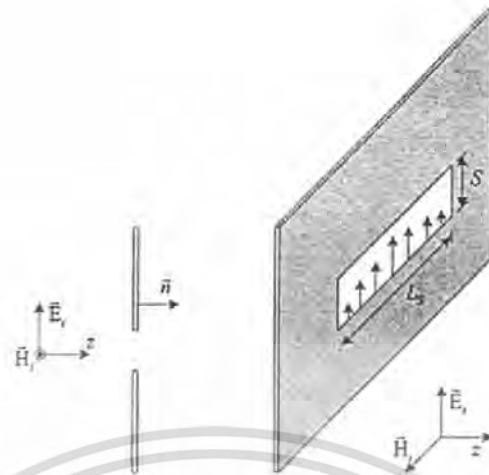
รูปที่ 2.23 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริบแบบช่องเปิด

2.7.1 การแผ่กระจายคลื่นออกจากสายอากาศช่องเปิด

การแผ่กระจายคลื่นออกจากสายอากาศแบบช่องเปิดเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะกับ แผ่นตัวนำสมมูลแบบช่องเปิดแคบ โดยที่สนามไฟฟ้ามีทิศตั้งฉากกับแนวของช่องเปิด จะเห็นว่าตรงช่องเปิดจะมีสนามไฟฟ้าความเข้มสูงมากเกิดขึ้น ทำให้เกิดการแผ่กระจายคลื่นออกไปยัง บริเวณที่อยู่อีกด้านหนึ่งในกรณีช่องเปิดแคบมาก ๆ กระแสไฟฟ้าสมมูลคือ $\vec{J} = \vec{n} \times \vec{H}'$ จะมีขนาดจำกัด และเมื่อคิดว่าความกว้างของช่องเปิดซึ่งอ้างอิงจากรูปคือ S เข้าหาศูนย์ กระแสไฟฟ้า สมมูลส่วนนี้จะติดทั้งได้เพราะมีขนาดเล็ก แต่ส่วนที่เป็นกระแสแม่เหล็กสมมูลคือ $\vec{M} = -\vec{n} \times \vec{E}'$ นั้นไม่สามารถตัดทิ้งได้ เพราะเมื่อ S เข้าหาศูนย์สนามแม่เหล็กที่ช่องเปิดก็จะเข้าหอนันต์จึงไม่สามารถตัดทิ้งได้

ถ้าให้ E_s เป็นสนามไฟฟ้าที่ช่องเปิด และช่องเปิดยาว L_s เนื่องจากปลายทั้งสองของช่องเปิดสนามไฟฟ้าจะต้องเป็นศูนย์ เพราะฉะนั้นการกระจายของสนามไฟฟ้าบนช่องเปิดจะเขียนได้ดังรูปที่ 2.24

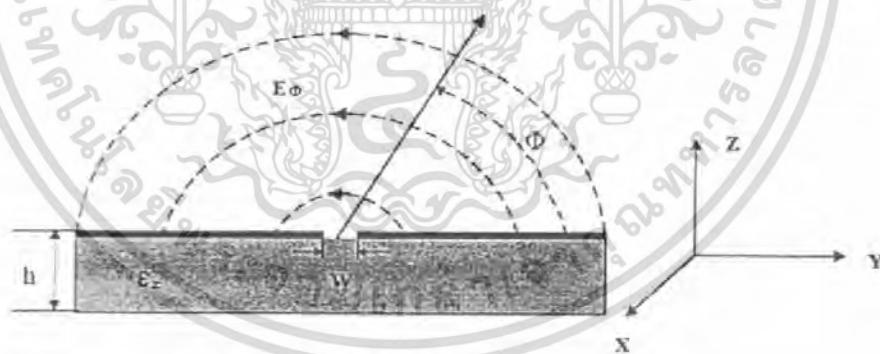
กระแสแม่เหล็กสมมูลที่เกิดขึ้นนี้เนื่องจากแผ่นตัวนำมีความหนาจำกัด จะเกิดขึ้นที่ทางด้านหน้าและด้านหลังโดยมีขนาดเท่ากัน



รูปที่ 2.24 การแพร่กระจายคลื่นจากไมโครสตริปแบบช่องเปิด

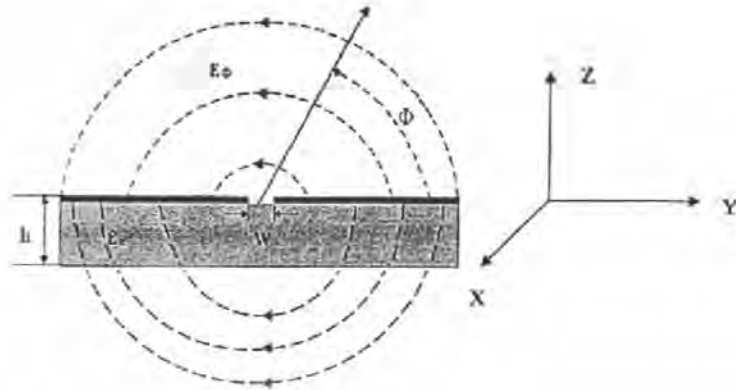
2.7.2 การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าในช่องเปิด (Slot line)

สนามไฟฟ้าในช่องเปิดจะประกอบด้วยสามส่วน อย่างไรก็ตามในสนามระยะไกลจะเหลือเพียงแต่ส่วนเดียวในทิศทาง θ ดังแสดงในรูปที่ 2.25 สนามไฟฟ้าหลักของคลื่นที่เคลื่อนที่ในช่องเปิดจะมีทิศทางที่พุ่งเข้ามาออกจากช่องเปิดไปในทิศทางตามระนาบแผ่น โลหะที่วางอยู่บนวัสดุฐานรอง



รูปที่ 2.25 สนามไฟฟ้าในระนาบทรงกระบอก

ลักษณะการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าของช่องเปิด ในด้านของวัสดุฐานรองแถบโลหะ และในอากาศแสดงดังรูปที่ 2.26

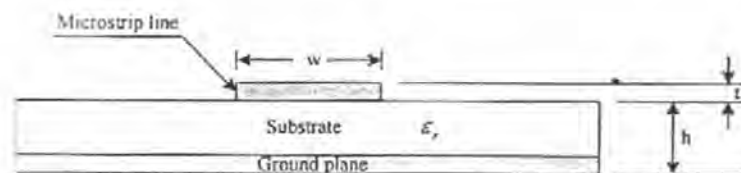


รูปที่ 2.26 ลักษณะการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าในช่องเปิด

2.8 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป (Microstrip Line)

2.8.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายส่งสัญญาณไมโครสตริป

สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป ได้รับความนิยมนำมาใช้งานกับความถี่ในย่านไมโครเวฟ เพราะมีข้อดีคือ ง่ายต่อการเชื่อมต่อ อีกทั้งยังมีขนาดเล็ก รูปที่ 2.27 แสดงโครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป โดยจะมีรูปร่างเป็นสตริปหรือแถบตัวนำแคบ ๆ วางอยู่บนวัสดุฐานรอง (Substrate) ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริก (ฉนวน) และด้านล่างของวัสดุฐานรองจะเป็นระนาบกราวด์ (ground plane) ซึ่งมีลักษณะเป็นผิวโลหะ พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านอยู่ในวัสดุฐานรอง (Substrate) บริเวณที่อยู่ระหว่างแถบตัวนำแคบ ๆ กับผิวโลหะระนาบกราวด์ด้านล่าง ความหนาของวัสดุฐานรองนั้น โดยส่วนใหญ่แล้วจะประมาณ 2 มิลลิเมตร หรือต่ำกว่าลงมา สายส่งแบบไมโครสตริปไม่มีการชิดที่จะกันสัญญาณที่ดี เนื่องจากไม่มีระนาบกราวด์ปิดด้านบนเหมือนสายส่งแบบสตริปไลน์ที่ป้องกันกับสวอของอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นปะที่มีระนาบกราวด์อยู่อีกด้านหนึ่ง จึงทำให้มี Radiation loss ค่อนข้างสูง เนื่องจากไม่มีระนาบกราวด์ด้านบนกันเอาไว้ และการที่แถบตัวนำของไมโครสตริปมีด้านบนสัมผัสกับอากาศ และด้านล่างสัมผัสไดอิเล็กตริก สนามไฟฟ้า E จึงแยกไปในอากาศส่วนหนึ่ง และส่วนที่เหลือผ่านไปในสารไดอิเล็กตริก



รูปที่ 2.27 โครงสร้างทางกายภาพของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถบตัวนำกว้าง w หนา t ถูกวางอยู่บนวัสดุฐานรอง (Substrate) โดยที่ความกว้างของสตริปนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ต้องการ สำหรับความหนาของตัวสตริปนั้นจะมีค่าประมาณ 5 ไมโครเมตร หรือ 10 ไมโครเมตร ขึ้นอยู่กับการใช้เทคโนโลยีแผ่นฟิล์มบางหรือแผ่นฟิล์มหนาของการสร้างสตริปนั้น สำหรับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเป็น ϵ_r วัสดุฐานรองที่ใช้งานมีการใช้งานอยู่มาหลายชนิด เช่น อลูมินา แซฟไฟร์ แก้ว ควอตซ์ ซึ่งมีค่า ϵ_r ตั้งแต่ 2 ถึง 12 ส่วนบนสารตัวนำจะเป็นอากาศที่มี $\epsilon_r = 1$

2.8.2 การส่งผ่านคลื่นในสายส่งไมโครสตริป

การส่งผ่านคลื่นในสายส่งสัญญาณไมโครสตริปนั้นจะใกล้เคียงกับโหมด TEM มากแต่จะไม่ใช้โหมด TEM เสียทีเดียว เพราะมีสนามในแนวแกนอยู่ด้วย จึงนิยมเรียกโหมดดังกล่าวนี้ว่า โหมดกึ่ง TEM (quasi-TEM mode) รูปที่ 2.28 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวระนาบตามขวางของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป การที่มีสนามในแนวแกนอยู่บ้างนั้นเป็นเพราะ โครงสร้างที่มีสารไดอิเล็กตริก และอากาศอยู่ในระนาบเดียวกัน และในสภาพที่มีสนามในแนวแกนเกิดขึ้นอยู่นี้ โหมดที่ส่งผ่านอยู่นั้นก็จะเห็น ไซบริดโหมด

การที่คลื่นส่งผ่านในโหมดกึ่ง TEM ซึ่งพออนุโลมให้เป็นโหมด TEM นี้ทำให้สามารถใช้หลักการวงจรกระจายในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของไมโครสตริปได้ โดยวิธีการหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (effective dielectric constant: ϵ_{eff}) ของระบบ ซึ่งจะรวมผลของสาร ไดอิเล็กตริกและอากาศเข้าด้วยกัน



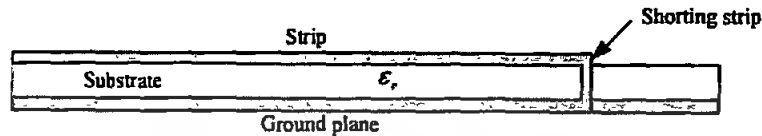
รูปที่ 2.28 เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวระนาบตามขวางของสายส่งอากาศแบบไมโครสตริป

2.8.3 การปิดวงจรและการเปิดวงจรปลายสายส่งไมโครสตริป

การปิดวงจรและการเปิดวงจรปลายสายไมโครสตริปนั้นมีความจำเป็นเช่นเดียวกับสายนำสัญญาณทั่วไป เช่น ใช้ในการทำสวิตช์สำหรับการแมตซ์อิมพีแดนซ์ เป็นต้น ซึ่งในที่นี้ก่อนอื่นจะกล่าวถึงการปิดวงจร และการเปิดวงจรตามลำดับ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปิดวงจรปลายสายของไมโครสตริปในย่านความถี่ใช้งานที่ต่ำกว่า 2 GHz นั้น ส่วนใหญ่จะใช้วิธีเจาะรูที่ปลายสายและร้อยเส้นลวดพร้อมทั้งบัดกรีเข้ากับแถบสตริปด้านบนและแผ่นกราวด์ด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 2.29

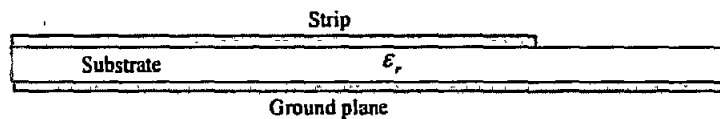


รูปที่ 2.29 การเปิดวงจรปลายสายส่งไมโครสตริป

สำหรับการเปิดวงจรสายส่งสัญญาณไมโครสตริปนี้จะพบว่าจะใช้งานได้ดีถึงความถี่ประมาณ 2 GHz เท่านั้น เมื่อความถี่สูงขึ้นกว่านี้ ค่ารีแอกแตนซ์ของส่วนที่เป็นเส้นลวดเปิดวงจรจะเริ่มมีปัญหา คือค่ารีแอกแตนซ์จะสูงจนไม่สามารถตัดทิ้งได้ และที่เป็นปัญหามากก็คือค่ารีแอกแตนซ์ที่เกิดขึ้นนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ซึ่งทำให้ใช้งานได้ยาก

สำหรับกรณีที่มี $Z_c = 50 \Omega$ นั้น รูที่เจาะจะมีขนาดเล็กมากจะไม่สามารถเจาะด้วยวิธีทางกลธรรมดา จะทำได้ก็ต่อเมื่อใช้แสงเลเซอร์เท่านั้น และปัญหาที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของการเปิดวงจรปลายสายไมโครสตริป คือ ตำแหน่งรูเจาะนั้นมีโอกาสคลาดเคลื่อนไปตามขนาดของแผ่นวงจรพิมพ์ซึ่งแตกต่างกันอยู่บ้างเล็กน้อย นอกจากนั้นก็อาจจะคลาดเคลื่อนไปเนื่องจากกรรมวิธีในการเจาะไม่ละเอียดพอ การคลาดเคลื่อนของตำแหน่งดังกล่าวนี้จะส่งผลกระทบทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ไม่ลดต่ำลงตามที่ต้องการ ดังนั้นการเปิดวงจรปลายสายไมโครสตริปจึงทำได้ยากกว่าการเปิดวงจรปลายสายที่จะกล่าวต่อไปนี้

การเปิดวงจรปลายสายไมโครสตริปนั้นตามโครงสร้างก็จะเป็นดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.30 ตามโครงสร้างที่แสดงนี้โดยปกติจะมีปรากฏการณ์ต่าง ๆ ต่อไปนี้เกิดอยู่ ซึ่งทำให้การเปิดวงจรไม่สมบูรณ์แบบตามต้องการ



(ก) การเปิดวงจรปลายสายส่งไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



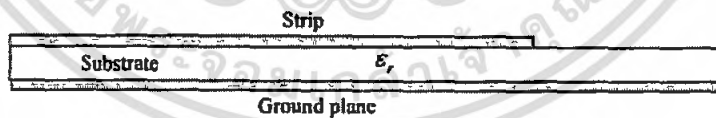
(ข) การเกิดฟริงกิง (Fringing)



(ค) วงจรสมมูลผลกระทบของฟริงกิง

รูปที่ 2.30 การเปิดวงจรปลายสายส่งไมโครสตริป

- เส้นแรงไฟฟ้าที่ปลายสายของไมโครสตริปสามารถแผ่เลยปลายสายไปได้ ซึ่งเรียกว่าการเกิดฟริงกิง (Fringing) ดังแสดงในรูปที่ 2.30(ข) โดยผลกระทบของฟริงกิงนี้จะสามารถแทนด้วยค่าคาปาซิแตนซ์ (C_f) ที่ต่อไว้ที่ปลายสายดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.30 (ค)
- พลังงานบางส่วนอาจจะสูญเสียออกไปในรูปแบบของการแพร่กระจายคลื่น
- มีการจับให้เกิดคลื่นผิว (Surface wave) ส่งผ่านออกไปจากปลายสายไมโครสตริปนั้น ซึ่งนั่นก็หมายความว่ามีการสูญเสียกำลังที่ปลายสายเกิดขึ้น และเมื่อคิดเป็นวงจรสมมูลก็จะเหมือนกับมีขั้วต่อคอนดักแตนซ์ต่ออยู่ที่ปลายสายดังรูปที่ 2.31 แต่ผลกระทบดังกล่าวนี้มีผลน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบการเกิดฟริงกิง (Fringing) ที่ปลายสายจึงสามารถตัดทิ้งไปได้



(ก) การเกิดคลื่นผิว



(ข) วงจรสมมูลการเกิดคลื่นผิว

รูปที่ 2.31 การกระจายคลื่นและการเกิดคลื่นผิวออกจากปลายสายไมโครสตริปและวงจรสมมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.4 การออกแบบสายส่งสัญญาณไมโครสตริป

สายส่งแบบไมโครสตริปได้รับความนิยม เนื่องจากทำได้ด้วยราคาถูก ซึ่งอุปกรณ์ลัมพ์แบบพาสซีฟก็สามารถจะถูกสร้างอยู่บนวัสดุฐานรองชนิดเดียวกันได้ ขาอุปกรณ์แอกทีฟ และพวงซีพต่าง ๆ ก็สามารถเชื่อมต่อกับแถบโลหะได้โดยตรง โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปที่มีความกว้าง w สูง h และโลหะมีความหนาน้อยมาก ($t/h \leq 0.005$) จะหาได้ดังนี้

$$\text{กรณี } \frac{w}{h} \leq 1$$

$$Z_0 = 60 \left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right) / (\epsilon_{eff})^{1/2} \quad (2-24)$$

เมื่อ

$$\epsilon_{eff} = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + 0.5(\epsilon_r - 1) \left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{1/2} \quad (2-25)$$

$$\text{กรณี } \frac{w}{h} \geq 1$$

$$Z_0 = \frac{120\pi / (\epsilon_{eff})^{1/2}}{w/h + 1.393 + 0.667 \ln(w/h + 1.44)} \quad (2-26)$$

$$\text{กรณี } \frac{w}{h} \leq 2$$

$$Z_0 = \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 2} \quad (2-27)$$

$$\text{กรณี } \frac{w}{h} \geq 2$$

$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad (2-28)$$

เมื่อ

$$A = \frac{Z_0}{60} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2} \right)^{1/2} = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (2-29)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\epsilon_r^{1/2}} \quad (2-30)$$

เมื่อแถบ w มีความหนาด้วย ทำให้ค่า w ในสูตรแทนด้วย w_e

$$\text{กรณี } \frac{w}{h} \geq \frac{\pi}{2}$$

$$w_e = w + \frac{t}{\pi} \left(1 + \ln \frac{2h}{t} \right) \quad (2-31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{กรณี } \frac{w}{h} \leq \frac{\pi}{2}$$

$$w_e = w + \frac{t}{\pi} \left(1 + \ln \frac{4\pi w}{t} \right) \quad (2-32)$$

สายส่งไมโครสตริปจะมีคุณสมบัติ Dispersive โดยธรรมชาติ นั่นคือการที่ ϵ_{eff} เปลี่ยนตามค่าความถี่และโครงสร้างของสายส่งไมโครสตริปเป็นลักษณะกึ่ง TEM ดังนั้นสมการพื้นฐานเกี่ยวกับความยาวคลื่นในสายส่งไมโครสตริปคือ

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2-33)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (2-34)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (2-35)$$

- เมื่อ
- λ_g คือ ความยาวคลื่นในวัสดุฐานรอง
 - λ_0 คือ ความยาวคลื่นในอากาศ
 - c คือ ความเร็วแสง (3×10^8 m/s)
 - f คือ ความถี่ (GHz)
 - ϵ_{eff} คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective dielectric constant)
 - ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง
 - W คือ ความกว้างของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป
 - h คือ ความหนาของวัสดุฐานรอง

ค่าความเร็วเฟสในสายส่งไมโครสตริป คือ

$$V_p = \frac{c}{(\epsilon_{eff})^{1/2}} \quad (2-36)$$

เมื่อ V_p คือ ความเร็วเฟส

บทที่ 3

การออกแบบและวิเคราะห์ผล

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดสองความถี่ สำหรับการสื่อสารในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยใช้ทฤษฎีสายอากาศในบทที่ 2 มาช่วยในการออกแบบและทำการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ IE3D จากซีแลนต์ ซึ่งจะได้อธิบายขั้นตอนการออกแบบและจำลองผลในลำดับต่อไป สำหรับโครงสร้างของสายอากาศที่นำมาออกแบบนั้น จะเป็นการออกแบบสายอากาศช่องเปิดที่สร้างอยู่บนวัสดุฐานรอง โดยลักษณะโครงสร้างของสายอากาศที่ออกแบบจะเป็นเส้นช่องเปิดทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าสองผืนที่ต่อดัดกันในแนวตั้งคล้ายเลขแปด และการศึกษาต่อมาจะทำการปรับแต่งพารามิเตอร์ทางขนาดเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการ คือ ให้ได้สองความถี่และมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีที่สุด ซึ่งความถี่ที่ต้องการคือความถี่ใช้งานในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 a/b/g

3.2 ขั้นตอนการออกแบบ

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ใช้รูปแบบการป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปนั้น สิ่งที่จะต้องทำเป็นอันดับแรก คือ การเลือกชนิดของวัสดุฐานรอง (Substrate) เพื่อนำเอาค่าคุณสมบัติต่างๆ มาใช้ในการคำนวณหาความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป (W) และหาค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g) เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดขนาดความกว้างความยาวของสายอากาศให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ตามที่ต้องการ

ในโครงงานนี้จะเลือกใช้วัสดุฐานรอง FR4 ซึ่งมีราคาถูกและมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดสองความถี่ ซึ่ง FR4 จะมีคุณสมบัติดังนี้

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก	$\epsilon_r = 4.5$
ความหนาของวัสดุฐานรอง	$h = 1.6 \text{ mm}$
ค่าความนำของวัสดุตัวนำ	$\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ s/m}$
ความหนาของวัสดุตัวนำ	$t = 0.035 \text{ mm}$
ค่าตัวประกอบการกระจาย	$\tan \delta = 0.02$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การออกแบบสายส่งสัญญาณไมโครสตริป

ความกว้างของสายส่งสัญญาณไมโครสตริป (W) จะขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ความหนาหรือความสูงของวัสดุฐานรอง (h) และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณ (Characteristics Impedance) ซึ่งสามารถคำนวณหาความกว้างของสายส่งสัญญาณได้ด้วยการใช้สมการที่ (3.1a) และ (3.1b) และในโครงการนี้ได้เลือกใช้วิธีการต่อสายส่งสัญญาณไมโครสตริปเข้ากับสายอากาศไมโครสตริปในแบบเปิดวงจร (Open circuit) ด้วยการออกแบบสายส่งสัญญาณให้มีอิมพีแดนซ์แมตซ์กับ 50 โอห์ม (Z_0)

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} [\ln(B - 1)] + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \quad (3-1a)$$

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3-1b)$$

เมื่อ

W คือ ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป
 h คือ ความหนาของวัสดุฐานรอง
 ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง
 Z_0 คือ ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณ

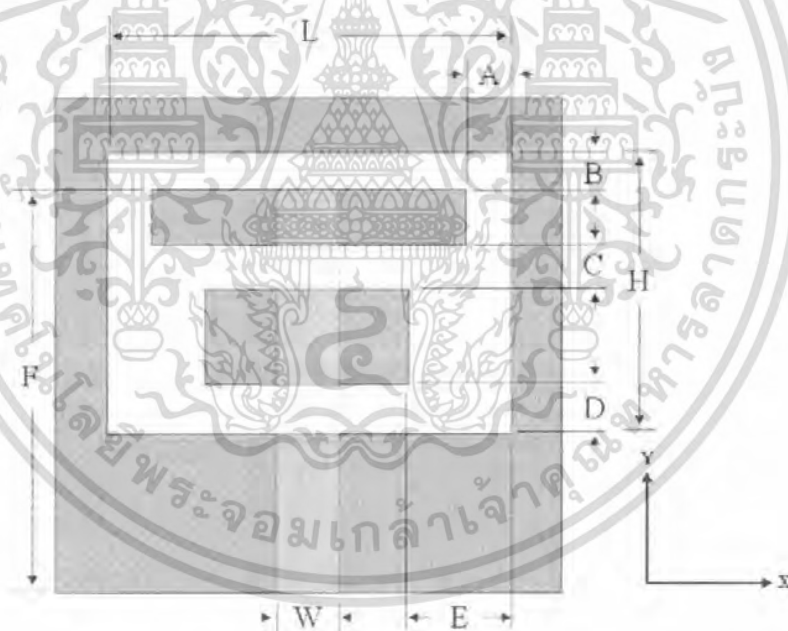
3.2.2 การคำนวณหาค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g)

โดยทั่วไปการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป จะต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ทางขนาดที่สัมพันธ์หรืออ้างอิงกับความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g) เป็นตัวกำหนดความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการพารามิเตอร์หลักได้แก่ ความกว้างและความยาวของสายอากาศช่องเปิด ซึ่งการออกแบบสายอากาศในโครงการนี้ จะเป็นการศึกษาออกแบบสายอากาศที่ความถี่กึ่งกลางของแถบความถี่แรกที่ใช้ในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ได้แก่ ความถี่ 2.44 GHz จากนั้นจะต้องพยายามหาทางปรับแต่งพารามิเตอร์บางตัวได้ความถี่ที่สองเท่ากับ 5.25 GHz โดยสมการที่ใช้ในการหาค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g) แสดงดังสมการที่ (2-33) - (2-35)

จากสมการที่ (2-33) - (2-35) เมื่อทำการแทนค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการออกแบบคือ 2.44 GHz และแทนค่าคุณสมบัติของวัสดุฐานรองที่เลือกใช้ คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิภาพ (ϵ_{eff}) ประมาณ 3.36 ลงในสมการจะได้ผลดังนี้

- ความยาวคลื่นสัมพัทธ์ (λ_g) ประมาณ 66.98 มิลลิเมตร

เมื่อทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นสำหรับการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งประกอบไปด้วย ความกว้างของสายส่งสัญญาณไมโครสตริป (W) และความยาวคลื่นสัมพัทธ์ (λ_g) แล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือ การนำเอาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มาทำการกำหนดในโครงสร้างสายอากาศที่ต้องการศึกษา ซึ่งในเบื้องต้นได้ศึกษาและออกแบบสายอากาศช่องเปิด โดยกำหนดให้สายอากาศมีความยาวในแนวนอน (L) เป็น 25.5 มม. ($0.38\lambda_g$) และความยาวในแนวตั้ง (H) เป็น 12 มม. ($0.18\lambda_g$) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างและพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบช่องเปิด

พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศที่แสดงดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย

- A คือ ความกว้างของช่องเปิดในแนวตั้งบน
- B คือ ความกว้างของช่องเปิดในแนวนอนบน
- C คือ ความกว้างของช่องเปิดในแนวนอนกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- D คือ ความกว้างของช่องเปิดในแนวนอนล่าง
- E คือ ความกว้างของช่องเปิดในแนวตั้งล่าง
- H คือ ความกว้างของสายอากาศในแนวแกน Y
- L คือ ความยาวของสายอากาศในแนวแกน X
- F คือ ความยาวของสายส่งสัญญาณไมโครสตริป
- W คือ ความกว้างของสายส่งสัญญาณไมโครสตริป

ได้ทำการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด โดยลักษณะ โครงสร้างของสายอากาศที่ออกแบบจะเป็นเส้นช่องเปิดทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าสองผืนที่ต่อติดกัน ในแนวตั้งคล้ายเลขแปด โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้

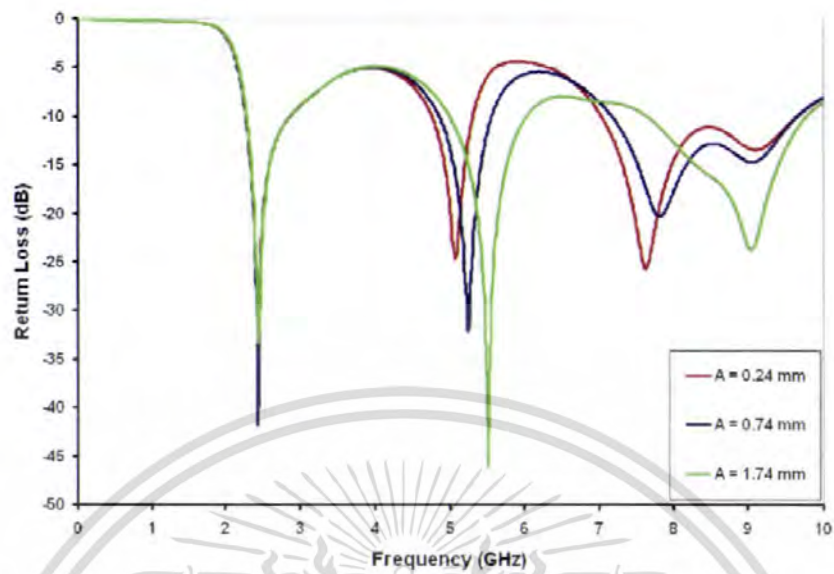
- A = 0.74 มิลลิเมตร
- B = 2.2 มิลลิเมตร
- C = 1.0 มิลลิเมตร
- D = 1.0 มิลลิเมตร
- E = 7.07 มิลลิเมตร
- H = 12 มิลลิเมตร
- L = 25.5 มิลลิเมตร
- W = 2.8 มิลลิเมตร
- F = 27.7 มิลลิเมตร

3.3 การศึกษาถึงผลกระทบกรณีปรับขนาดของพารามิเตอร์

3.3.1 กรณีปรับความกว้างของพารามิเตอร์ (A)

การศึกษากการปรับแอมเพดซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศในกรณีต่อไปนี้ การปรับความกว้างพารามิเตอร์ (A) โดยในการศึกษาได้กำหนดความกว้างพารามิเตอร์ (E) ให้มีความกว้างคงที่ ส่วนพารามิเตอร์ (A) ให้มีค่าความกว้างเริ่มต้นที่ 0.74 มิลลิเมตร แล้วทำการปรับโดยจะมีการปรับความกว้างในแนวแกน X โดยขยายความกว้างออกและลดความกว้างลงจากความกว้างเริ่มต้น เพื่อเปรียบเทียบความถี่เรโซแนนซ์ และ S_{11} โดยมีค่าความกว้างพารามิเตอร์ (A) เท่ากับ 0.24, 0.74 และ 1.74 มิลลิเมตร ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ (S_{11}) ในการปรับค่าพารามิเตอร์ (A) ในแนวแกน X

ตารางที่ 3.1 ค่าคุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิด กรณีปรับเปลี่ยนความกว้างพารามิเตอร์ (A)

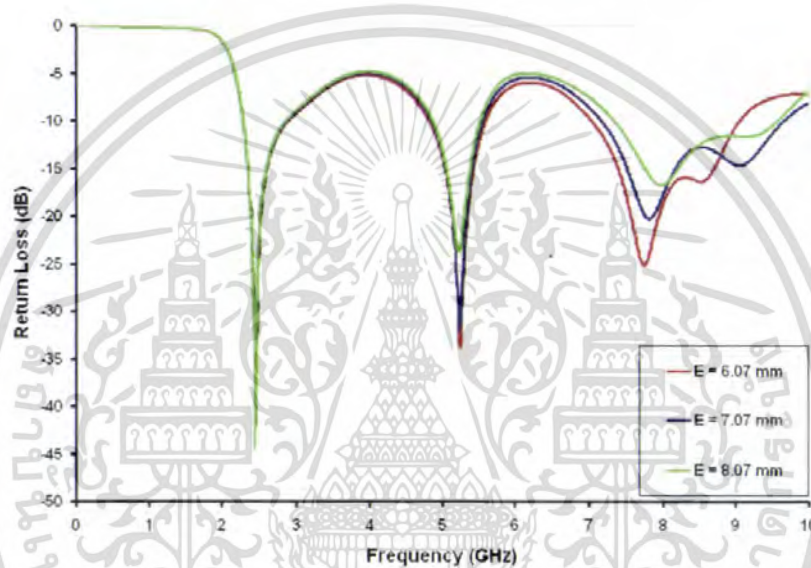
ความกว้างของช่องเปิด(มิลลิเมตร)		ความถี่เรโซแนนซ์	S_{11} พารามิเตอร์
E	A	(GHz)	(dB)
7.07	0.24	2.44	-31.39
		5.08	-24.71
	0.74	2.44	-41.72
		5.25	-32.11
	1.74	2.45	-33.35
		5.52	-45.94

จากกราฟทำให้ทราบว่าเมื่อปรับความกว้างพารามิเตอร์ (A) เพิ่มมากขึ้นความถี่เรโซแนนซ์แรกซึ่งเกิดจากขนาดของสายอากาศจะไม่เปลี่ยน แต่ความถี่ที่ 2 และความถี่ที่ 3 จะเพิ่มสูงขึ้นตามค่าความกว้างที่เพิ่มมากขึ้น หากปรับลดความกว้างพารามิเตอร์ (A) ลง ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2 จะเลื่อนไปทางความถี่ต่ำ ดังนั้นพารามิเตอร์ (A) นี้จึงเป็นตัวปรับความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2 ให้อยู่ในความถี่ที่ต้องการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 กรณีปรับความกว้างของพารามิเตอร์ (E)

การศึกษาการปรับแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศในกรณีต่อไปนี้ การปรับความกว้างพารามิเตอร์ (E) โดยในการศึกษาได้กำหนดความกว้างพารามิเตอร์ (A) ให้มีความกว้างคงที่ ส่วนพารามิเตอร์ (E) ให้มีค่าความกว้างเริ่มต้นที่ 7.07 มิลลิเมตร โดยขยายความกว้างออกและลดความกว้างลงจากความกว้างเริ่มต้นในแนวแกน X เพื่อเปรียบเทียบความถี่เรโซแนนซ์ และ S_{11} โดยมีค่าความกว้างพารามิเตอร์ (E) เท่ากับ 6.07, 7.07 และ 8.07 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 ค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ (S_{11}) ในการปรับค่าพารามิเตอร์ (E) ในแนวแกน X

ตารางที่ 3.2 ค่าคุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิด กรณีปรับเปลี่ยนความกว้างพารามิเตอร์ (E)

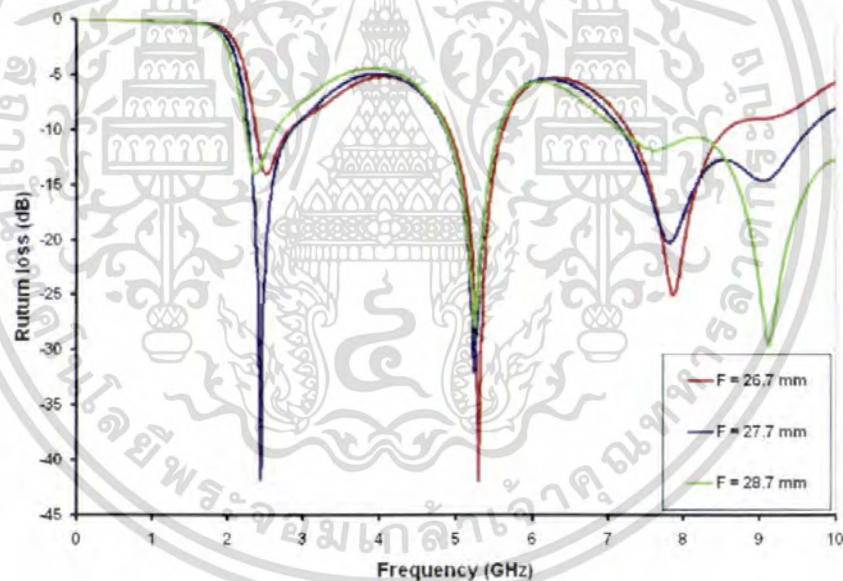
ความกว้างของช่องเปิด(มิลลิเมตร)		ความถี่เรโซแนนซ์	S_{11} พารามิเตอร์
A	E	(GHz)	(dB)
0.74	6.07	2.45	-42.02
		5.26	-33.75
	7.07	2.44	-41.72
		5.25	-32.11
	8.07	2.44	-44.44
		5.24	-23.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟทำให้ทราบว่าเมื่อปรับลดหรือเพิ่มความกว้างของพารามิเตอร์ (E) ลง แทนจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ทั้งความถี่ที่ 1 และความถี่ที่ 2 แต่จะมีผลกับความถี่ที่ 3 โดยเมื่อปรับความกว้างพารามิเตอร์ (E) เพิ่มมากขึ้น ความถี่เรโซแนนซ์ของความถี่ที่ 3 จะเลื่อนไปเกิดที่ความถี่ที่สูงขึ้น ดังนั้นพารามิเตอร์ (E) นี้จึงเป็นตัวปรับความถี่เรโซแนนซ์ที่ 3 ให้อยู่ในความถี่ที่ต้องการได้

3.3.3 กรณีปรับความยาวของสายส่งสัญญาณไมโครสตริป

การศึกษาการปรับแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศในกรณีต่อไปนี้ การปรับความยาวของสายส่งสัญญาณไมโครสตริป (F) โดยในการศึกษาได้กำหนดความยาวของสายส่งสัญญาณไมโครสตริปเริ่มต้นที่ 27.7 มิลลิเมตร จากนั้นทำการปรับสายส่งสัญญาณให้ยาวขึ้นและลดสั้นลงจากความยาวเริ่มต้นเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อน (S_{11}) โดยให้ค่าความยาวของสายส่งสัญญาณไมโครสตริป (F) เท่ากับ 26.7, 27.7 และ 28.7 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 ค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ (S_{11}) ในการปรับค่าพารามิเตอร์ (F) ในแนวแกน Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

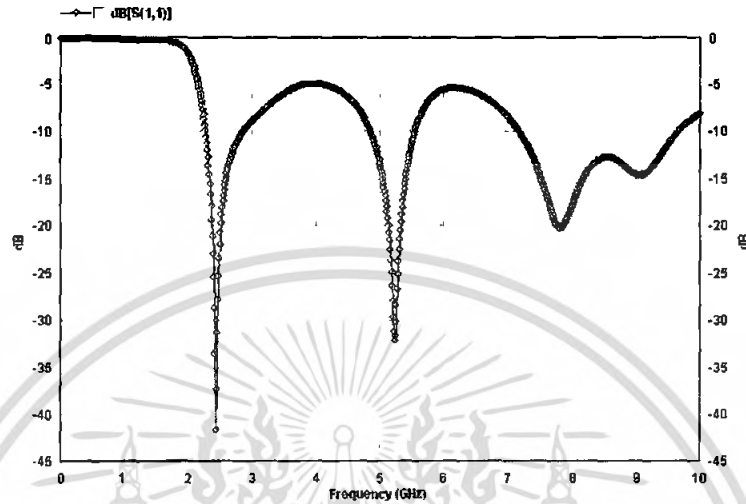
ตารางที่ 3.3 ค่าคุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิด กรณีปรับเปลี่ยนความยาวของสายส่งสัญญาณ ไมโครสตริป (F)

ความยาวของสายส่งไมโครสตริป (มิลลิเมตร)		ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)	S ₁₁ พารามิเตอร์ (dB)
W	F		
2.80	26.70	2.52	-14.09
		5.31	-41.87
	27.70	2.44	-41.72
		5.25	-32.11
	28.70	2.38	-14.07
		5.25	-27.76

จากกราฟทำให้ทราบว่าเมื่อปรับลดความยาวของสายส่งไมโครสตริป (F) ลง แมตซ์อิมพีแดนซ์ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 1 จะลดต่ำลง หากปรับความยาวของสายส่งไมโครสตริป (F) เพิ่มมากขึ้น แมตซ์อิมพีแดนซ์ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 1 จะลดลงมากขึ้น ความยาวของสายส่งไมโครสตริป (F) นี้จึงเป็นตัวทำให้เกิดการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่สำคัญเป็นอันดับแรก ดังนั้นจึงสามารถทำการปรับให้แมตซ์อิมพีแดนซ์ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 1 ให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้

3.4 ผลการออกแบบ

3.4.1 ผลการจำลองค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ (S_{11})

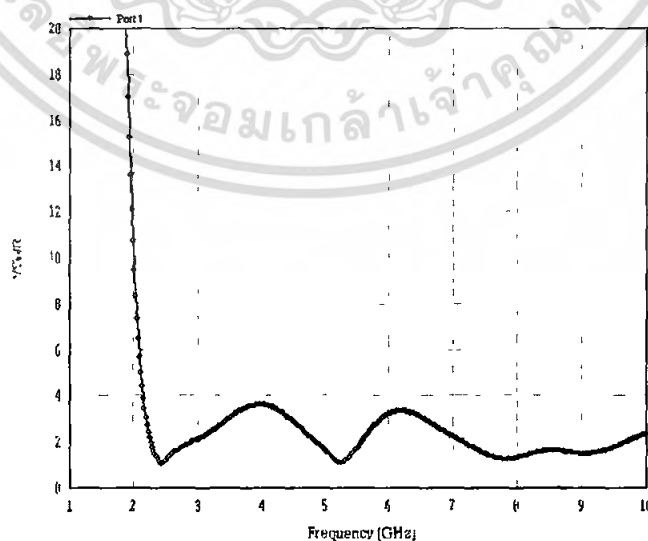


รูปที่ 3.5 ค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ (S_{11}) ที่ได้จากการจำลอง

ผลที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วย โปรแกรม IE3D จาก ซีแลนด

- ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 1 คือ 2.44 GHz ที่ -41.72 dB , Bandwidth อยู่ในช่วง (2.29 – 2.78 GHz)
- ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2 คือ 5.25 GHz ที่ -32.11 dB , Bandwidth อยู่ในช่วง (4.87 – 5.53 GHz)

3.4.2 ผลการจำลองค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR)

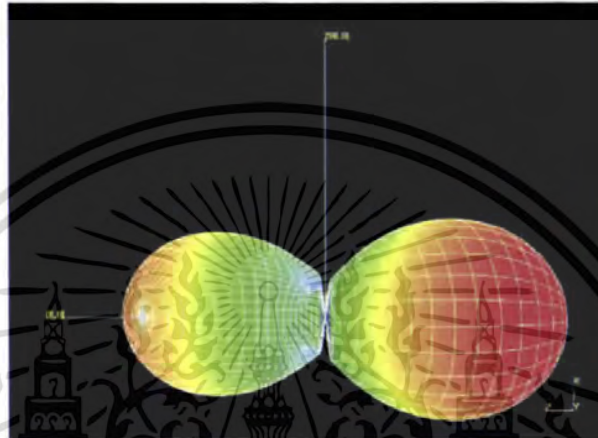


รูปที่ 3.6 ผลการจำลองค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) จะเห็นว่าที่ความถี่ที่ออกแบบนั้น (2.44 GHz และ 5.25 GHz) จะมีค่า VSWR ใกล้เคียงกับ 1 ซึ่งถือได้ว่าสายส่งสัญญาณที่ออกแบบนั้นมีประสิทธิภาพที่สามารถใช้งานได้

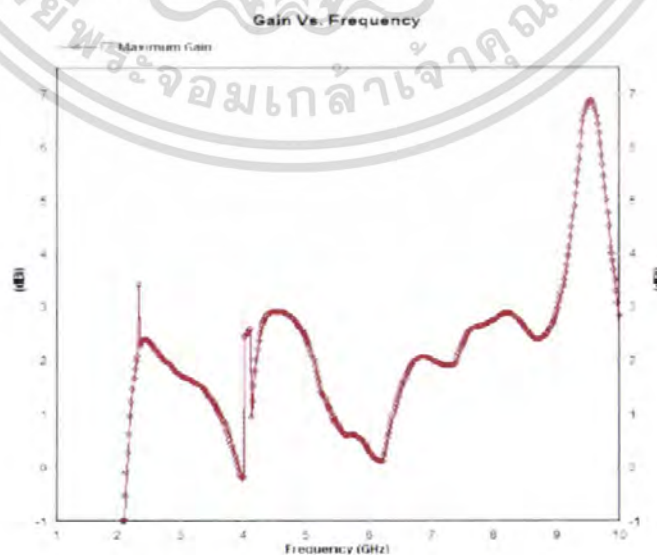
3.4.3 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Pattern)



รูปที่ 3.7 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Pattern)

จากผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Pattern) จะเห็นได้ว่าคลื่นสามารถแพร่กระจายได้ทั้งสองด้านของสายอากาศ โดยที่คลื่นสามารถแพร่ได้ดีจากทางด้านหลังของสายอากาศ (ด้านสายส่งสัญญาณ)

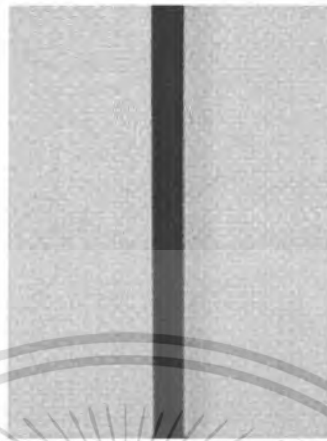
3.4.4 ผลการจำลองค่าอัตราขยาย (Gain)



รูปที่ 3.8 ผลการจำลองค่าอัตราขยาย (Gain)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูาตใหนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ส่วนเสายึด ทำด้วยท่อ PVC

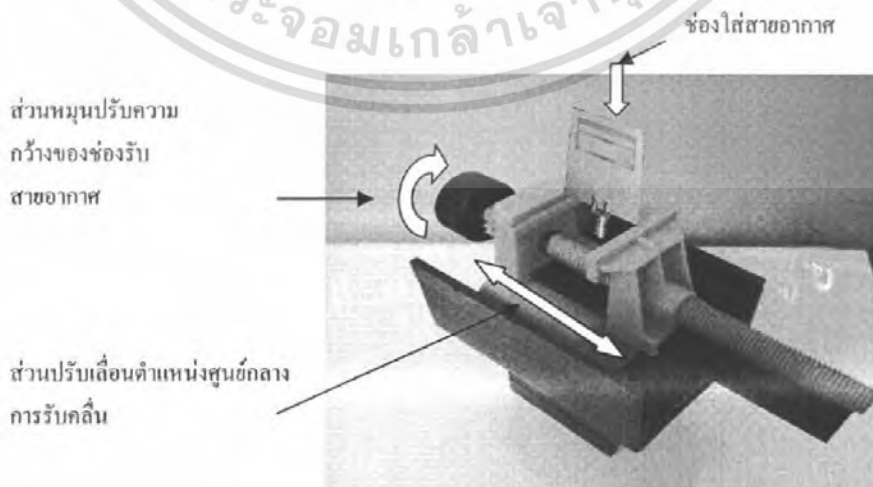


รูปที่ 3.11 ส่วนเสายึดของชุดทดลอง

4. ส่วนยึดจับสายอากาศ สามารถรองรับสายอากาศขนาดสูงสุด 10 เซนติเมตร โดยสามารถปรับให้สายอากาศอยู่ในตำแหน่งศูนย์กลางการรับคลื่นได้



รูปที่ 3.12 ส่วนยึดจับสายอากาศของชุดทดลอง



รูปที่ 3.13 วิธีใช้งานส่วนยึดจับสายอากาศของชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 การติดตั้งและใช้งานชุดทดลอง

1. นำส่วนฐานวางไว้ด้านล่างสุด
2. นำส่วนหมุนปรับทิศทางรับคลื่นวางลงบนฐาน
3. นำส่วนเสายึดใส่ลงในส่วนหมุนปรับทิศทางรับคลื่น
4. นำส่วนยึดจับสายอากาศใส่ลงส่วนเสายึด
5. คลายเกลียวตัวจับสายอากาศออกให้มีช่องพอเหมาะกับขนาดสายอากาศ
6. ใส่สายอากาศที่ต่อกับสายนำสัญญาณแล้ว ลงในช่องยึดจับสายอากาศพร้อมยึดให้แน่น
7. ขยับฐานจับสายอากาศให้สายอากาศอยู่ในตำแหน่งตรงกลางกับทิศทางการรับคลื่น
8. ใช้ชุดทดลองนี้วัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยหมุนที่ส่วนหมุนปรับทิศทางรับคลื่น ซึ่งสามารถหมุนได้ 360 องศา



รูปที่ 3.14 ชุดทดลองประกอบสำเร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

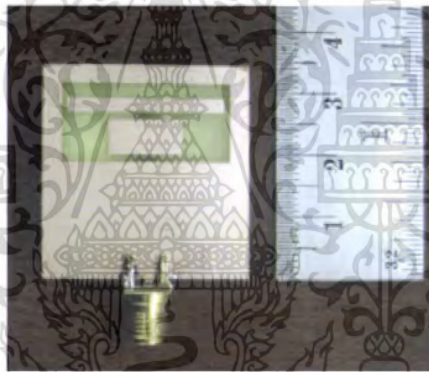
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 บทนำ

จากบทที่ผ่านมา เป็นการออกแบบและวิเคราะห์เพื่อนำข้อมูลที่ออกแบบไว้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบสายอากาศที่ได้ สร้างขึ้นตามที่ออกแบบไว้ นั้น โดยประกอบด้วยผลการวัดค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

4.2 การสร้างสายอากาศ



รูปที่ 4.1 ภาพด้านหน้าของสายอากาศที่สร้าง

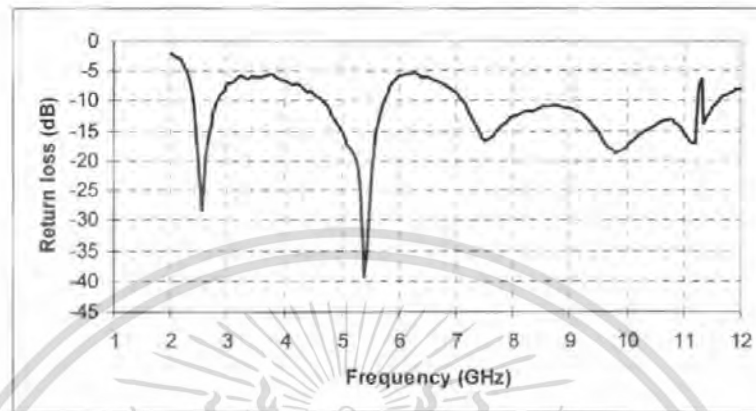


รูปที่ 4.2 ภาพด้านหลังของสายอากาศที่สร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการวัดและทดสอบสายอากาศ

4.3.1 ผลการวัดค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ (S_{11})

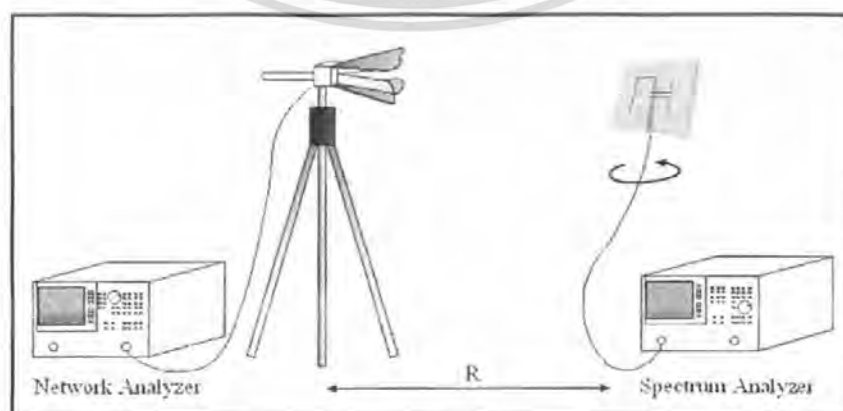


รูปที่ 4.3 ผลการวัดค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ (S_{11})

- ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 1 = 2.55 GHz ที่ -28.4802 dB , Bandwidth อยู่ในช่วง 2.40 – 2.80 GHz
- ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2 = 5.40 GHz ที่ -39.1496 dB , Bandwidth อยู่ในช่วง 4.70 – 5.70 GHz

4.3.2 ผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Pattern)

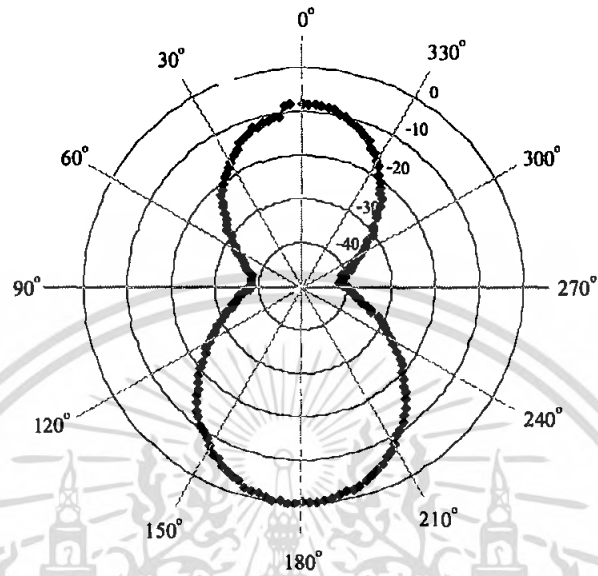
การวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิด เครื่องมือที่สำคัญคือ Network Analyzer และ Spectrum Analyzer การวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจะใช้ Network Analyzer ทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณความถี่ 2.45 GHz กับส่งสัญญาณความถี่ 5.25 GHz โดยให้กำลังส่งเป็น 0 dBm และใช้ Spectrum Analyzer เป็นเป็นตัววัดสัญญาณที่ด้านรับ โดยทำการปรับระนาบที่ด้านรับเพื่อดูความแตกต่างของสัญญาณที่สายอากาศสามารถรับได้ในแต่ละระนาบ



รูปที่ 4.4 แสดงการวัดและทดสอบสายอากาศ

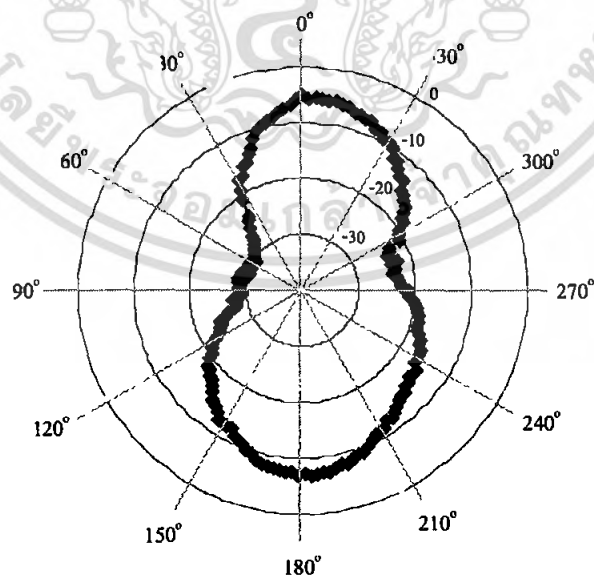
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญาติเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้า (E-plane) ที่ความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 4.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้า (E-plane) ที่ความถี่ 2.45 GHz

- แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้า (E-plane) ที่ความถี่ 5.25 GHz



รูปที่ 4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้า (E-plane) ที่ความถี่ 5.25 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุปและแนวทางการพัฒนาต่อ

5.1 สรุปผลการออกแบบและวิเคราะห์

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำเสนอชุดการสอนสายอากาศไมโครสตริปสองความถี่ สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ประกอบด้วยสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด ชุดอุปกรณ์การทดลองที่สามารถปรับระดับความสูง มุม และระยะการรับคลื่นได้ อีกทั้งจัดทำคู่มือประกอบการทดลองเพื่อสามารถนำไปใช้ได้จริง สายอากาศที่ออกแบบนั้นเป็นสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด ที่ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริปแบบเปิดวงจร พร้อมทั้งทำการศึกษการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของสายอากาศที่มีผลต่อคุณลักษณะต่าง ๆ เช่นค่าความถี่เรโซแนนซ์ การแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศกับสายส่งขนาด 50 โอห์ม โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อออกแบบสายอากาศให้มีคุณสมบัติเรโซแนนซ์ที่สองย่านความถี่ คือ ความถี่ 2.44 GHz และ 5.25 GHz สำหรับใช้กับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 a/b/g

ในการออกแบบสายอากาศช่องเปิด ที่มีการป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป เริ่มต้นด้วยการเลือกวัสดุฐานรองที่ต้องการออกแบบ และนำค่าคุณสมบัติมาคำนวณค่าความกว้างของสายส่งสัญญาณไมโครสตริป และคำนวณค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ เพื่อนำค่าที่ได้มากำหนดค่าความยาวของวงรอบช่องเปิด (Perimeter) ของสายอากาศช่องเปิด ซึ่งมีขนาดความยาวรอบรูป λ_g จากนั้นได้ทำการปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อค่าคุณลักษณะของสายอากาศ และจากการจำลองทำให้ได้ผลซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

1. การปรับแต่งความกว้างของช่องเปิดในแนวตั้งบน จะเป็นการปรับความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2 ให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ โดยที่ถ้าช่องเปิดนี้มีความกว้างมากขึ้น ความถี่เรโซแนนซ์แรกซึ่งเกิดจากขนาดของสายอากาศจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ความถี่ที่ 2 และความถี่ที่ 3 จะเพิ่มสูงขึ้น หากปรับลดความกว้างของช่องเปิดนี้ลง ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2 จะเลื่อนไปทางความถี่ต่ำ ดังนั้นความกว้างของช่องเปิดนี้ จึงเป็นตัวปรับความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2 ให้อยู่ในความถี่ที่ต้องการได้

2. การปรับแต่งความยาวของสายส่งไมโครสตริป จะเป็นการปรับแมตซ์อิมพีแดนซ์ความถี่ที่ 1 ให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้ โดยที่ความยาวของสายส่งไมโครสตริปจะเป็นตัวทำให้เกิดการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่สำคัญเป็นอันดับแรก

ผลที่ได้จากการจำลอง กับผลที่ได้จากการวัดมีความคลาดเคลื่อนกันอยู่ สาเหตุน่าจะมาจาก

- ขนาดของสายอากาศที่สร้างจริงนั้น อาจไม่เท่ากับขนาดที่ได้ออกแบบไว้ เนื่องจากใช้โปรแกรม protel ในการวาดรูป การวาดนั้นอาจมีความผิดพลาดเพี้ยนไปจากที่ออกแบบไว้ในโปรแกรม Zealnd อยู่บ้าง

- ในขั้นตอนการสร้าง ใช้แผ่นฟิล์มไวแสงเป็นตัวป้องกันการกัดกร่อนของน้ำยาในส่วนที่ต้องการให้คงสภาพความเป็นโลหะไว้ และในส่วนที่ต้องการให้น้ำยากัดโลหะออกไปให้คงเหลือแต่วัสดุฐานรองก็จะไม่มีฟิล์มปิดกั้น ในกระบวนการทำนั้นขอบหรือมุมอาจไม่เรียบคมพอ ทำให้ลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นเปลี่ยนแปลงไป

ในส่วนของคุณสมบัติการทดลอง ได้ออกแบบและสร้างขึ้นด้วยวัสดุที่ไม่มีส่วนประกอบของโลหะ เพื่อหลีกเลี่ยงการสะท้อนของคลื่นที่เกิดขึ้นในการทดลอง ชุดการทดลองที่สร้างขึ้นนี้สามารถรองรับสายอากาศขนาดสูงสุดได้ถึง 10 เซนติเมตร โดยสามารถหมุนปรับมุมรับคลื่นได้ 360 องศา อีกทั้งถอดแยกส่วนประกอบได้ เพื่อสะดวกในการเก็บรักษาและขนย้าย

5.2 แนวทางการพัฒนาต่อ

ในส่วนของสายอากาศนั้น ควรเลือกวัสดุฐานรองที่ได้มาตรฐาน มีคุณภาพ และสมบูรณ์ในส่วนของการสร้างให้ได้ขนาดตามที่ออกแบบ และการกัดปรินท์ให้ขอบของอิลูเมนต์ต่างๆของสายอากาศเรียบคมนั้น ต้องอาศัยฝีมือมากยิ่งขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนอาจจะหายไปหรือลดน้อยลง

ในส่วนของคุณสมบัติการทดลอง อาจจะใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ามาช่วยในการปรับทิศทางารับคลื่น ก็จะทำให้สะดวกยิ่งขึ้น เมื่อต้องการวัดที่กำลังงานสูง ๆ

บรรณานุกรม

- [1] Constantine A. Balanis, “Antenna Theory Analysis and Design”, John Wiley & Sons, Inc., 1997
- [2] โมไนย ไกรฤกษ์ และ วิวัฒน์ กิรานนท์. ทฤษฎีสายอากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรกฎาคม 2540
- [3] บัณฑิต โรจน์อารยานนท์. วิศวกรรมไมโครเวฟ. พิมพ์ครั้งที่ 2 . กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2534
- [4] ไพฑูรย์ รักเหลือ. “การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดโดยวิธี FDTD.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ บัณฑิต วิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [5] นรินทร์ คำประเสริฐ. วิศวกรรมแม่เหล็กไฟฟ้าและวิศวกรรมไมโครเวฟ เล่ม 3. กรุงเทพฯ ศูนย์สื่อส่งเสริมกรุงเทพ. 2545



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่มือประกอบการทดลอง การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Pattern) ของสายอากาศไมโครสตริป

คู่มือการใช้งานชุดทดลอง

ชุดทดลองประกอบด้วย

1. ส่วนฐาน มีสเกลบอกมุม 360 องศา



รูปที่ 1 ส่วนฐานของชุดทดลอง

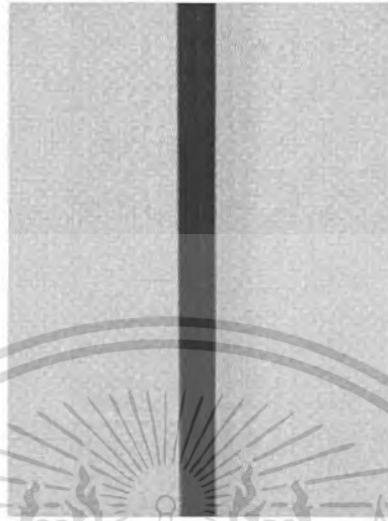
2. ส่วนหมุนปรับทิศทางรับคลื่น 360 องศา มีเข็มชี้สเกลบอกมุมที่ปรับเปลี่ยนไป



รูปที่ 2 ส่วนหมุนปรับทิศทางรับคลื่นของชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ส่วนเสายึด

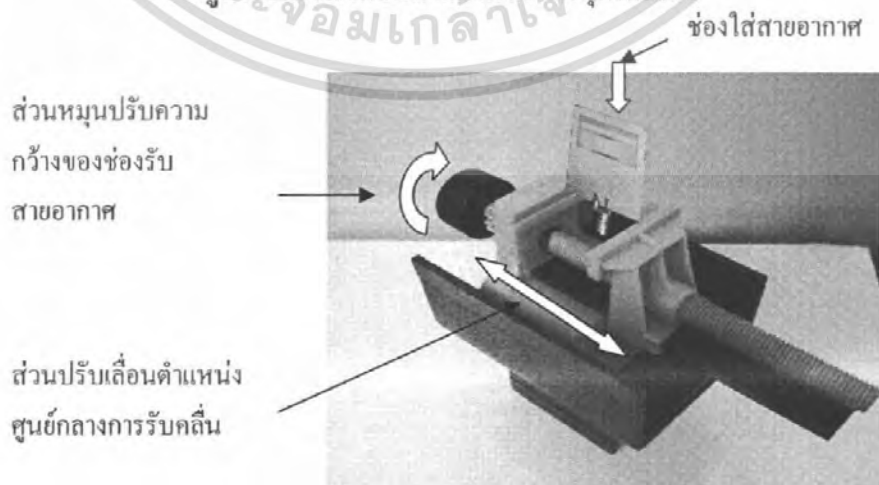


รูปที่ 3 ส่วนเสายึดของชุดทดลอง

4. ส่วนยึดจับสายอากาศ สามารถรองรับสายอากาศขนาดสูงสุด 10 เซนติเมตร โดยสามารถปรับให้สายอากาศอยู่ในตำแหน่งศูนย์กลางการรับคลื่นได้



รูปที่ 4 ส่วนยึดจับสายอากาศของชุดทดลอง



รูปที่ 5 วิธีใช้งานส่วนยึดจับสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดตั้งและใช้งานชุดทดลอง

1. นำส่วนฐานวางไว้ด้านล่างสุด
2. นำส่วนหมุนปรับทิศทางรับคลื่นวางลงบนฐาน
3. นำส่วนเสายึดใส่ลงในส่วนหมุนปรับทิศทางรับคลื่น
4. นำส่วนยึดจับสายอากาศใส่ลงส่วนเสายึด
5. คลายเกลียวตัวจับสายอากาศออกให้มีช่องพอเหมาะกับขนาดสายอากาศ
6. ใส่สายอากาศที่ต่อกับสายนำสัญญาณแล้ว ลงในช่องยึดจับสายอากาศพร้อมยึดให้แน่น
7. ขยับฐานจับสายอากาศให้สายอากาศอยู่ในตำแหน่งตรงกลางกับทิศทาง การรับคลื่น
8. ใช้ชุดทดลองนี้วัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยหมุนที่ส่วนหมุนปรับทิศทางรับคลื่น ซึ่งสามารถหมุนได้ 360 องศา



รูปที่ 6 ชุดทดลองประกอบสำเร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Pattern) ของสายอากาศไมโครสตริป

จุดประสงค์การทดลอง

เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Pattern) ของสายอากาศไมโครสตริป การแผ่สนามระยะไกลของสนามไฟฟ้า (ระนาบ E) และสนามแม่เหล็ก (ระนาบ H) และรู้วิธีวัดสายอากาศ

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ทำการคำนวณค่าสนามระยะไกลของสายอากาศ เพื่อกำหนดระยะห่างของสายอากาศส่ง และสายอากาศรับ โดยมีสูตรดังนี้ $R \geq \frac{2D^2}{\lambda}$

เมื่อ R คือระยะของสนามระยะไกล

D คือค่าของไดมิเตอร์ที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ (เส้นผ่าศูนย์กลาง)

$$\lambda = c/f$$

เมื่อ f คือความถี่ออกแบบ

ตัวอย่าง สายอากาศขนาด 15 cm แพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.25 GHz

$$\text{จะได้ } \lambda = (3.0 \times 10^8) / (5.25 \times 10^9) = 5.7 \text{ cm}$$

$$R \geq 2(15)^2 / 5.7 = 79 \text{ cm}$$

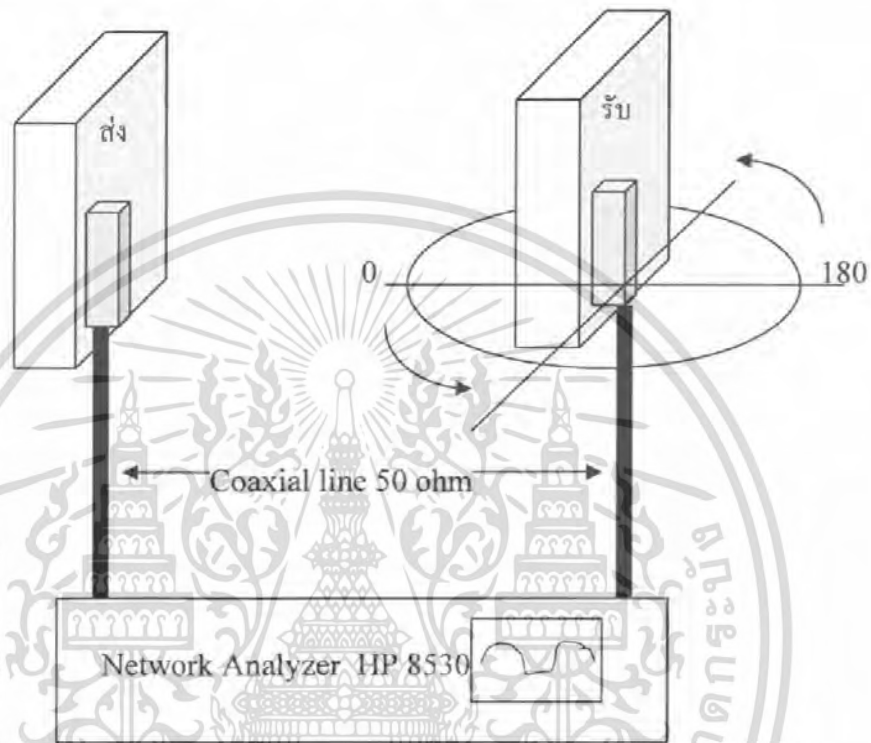
เพราะฉะนั้น จะตั้งสายอากาศทั้งสองห่างกันไม่น้อยกว่า 79 เซนติเมตร

(โดยทั่วไปความเหมาะสมของระยะห่างจะอยู่ประมาณ 1-2 เมตร)



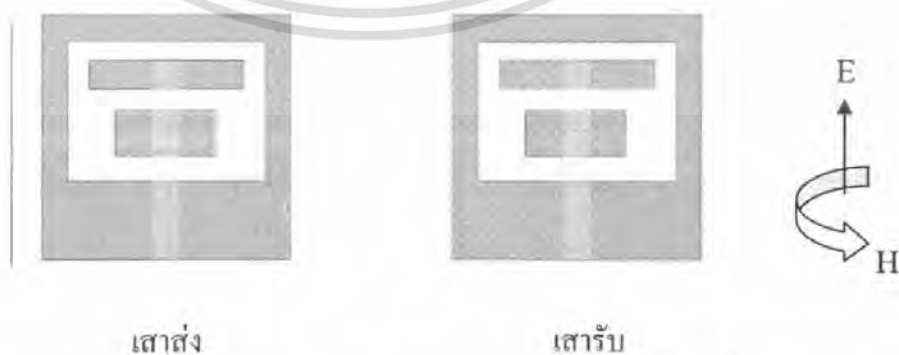
รูปที่ 1 ตัวอย่างสายอากาศไมโครสตริป

2. เมื่อทราบระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับแล้ว ก็นำสายอากาศทั้งสองไปตั้งในห้องไร้การสะท้อน หรือที่โล่งกว้าง แล้วทำการต่อสายนำสัญญาณ coaxial CFD200-E 50ohm จากทั้งสายอากาศส่งและสายอากาศรับมายังเครื่อง Network Analyzer



รูปที่ 8 แสดงการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Pattern)

ลักษณะการตั้งสายอากาศในกรวัด



รูปที่ 2 แสดงลักษณะการวางสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่หันเข้าหากัน เพื่อวัดค่าสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ลักษณะการติดตั้งรูปที่ 2 นี้ คือการวัดสนามไฟฟ้า โดยตั้งสายอากาศอยู่ในตำแหน่งมุม 0 องศา โดยมีการส่งคลื่นจากสายอากาศส่งมายังสายอากาศรับ แล้ววัดค่ากำลังงานที่รับได้ จากนั้นหมุนสายอากาศรับทีละ 5 องศา ทำการบันทึกผลทั้งหมดลงในตารางท้ายบท



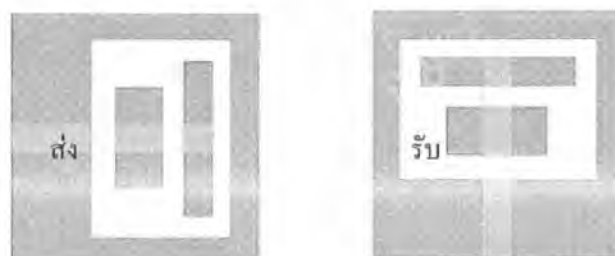
รูปที่ 3 แสดงลักษณะการวางสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่หันเข้าหากัน เพื่อวัดค่าสนามแม่เหล็ก

4. ลักษณะการติดตั้งรูปที่ 3 นี้ คือการวัดสนามแม่เหล็ก โดยตั้งสายอากาศอยู่ในตำแหน่งมุม 0 องศา โดยมีการส่งคลื่นจากสายอากาศส่งมายังสายอากาศรับ แล้ววัดค่ากำลังงานที่รับได้ จากนั้นหมุนสายอากาศรับทีละ 5 องศา ทำการบันทึกผลทั้งหมดลงในตารางท้ายบท

ลักษณะการวัด Co and Cross

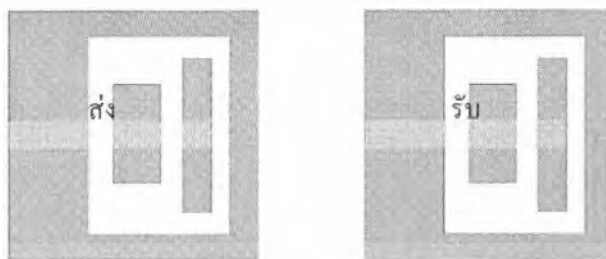


รูปที่ 4 การวัด Co-polarize ในระนาบ E-plane



รูปที่ 5 การวัด Cross-polarize ในระนาบ E-plane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 การวัด Co-polarize ในระนาบ H-plane



รูปที่ 7 การวัด Cross-polarize ในระนาบ H-plane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดลอง

มุม (องศา)	กำลังงานของ สนามไฟฟ้าที่รับได้	กำลังงานของ สนามแม่เหล็กที่รับได้	มุม (องศา)	กำลังงานของ สนามไฟฟ้าที่รับได้	กำลังงานของ สนามแม่เหล็กที่รับได้
0			185		
5			190		
10			195		
15			200		
20			205		
25			210		
30			215		
35			220		
40			225		
45			230		
50			235		
55			240		
60			245		
65			250		
70			255		
75			260		
80			265		
85			270		
90			275		
95			280		
100			285		
105			290		
110			295		
115			300		
120			305		
125			310		
130			315		
135			320		
140			325		
145			330		
150			335		
155			340		
160			345		
165			350		
170			355		
175			360		
180					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้