สายอากาศสำหรับสถานีทวนสัญญาณวิทยุสื่อสาร
ANTENNAS FOR RADIO REPEATER STATION

โดย

นายบารมี สิทธิกิจ

นายอัครพล อัคนิตย์

นายวรปรัชญ์ พงศ์ติวัฒนากุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศสำหรับสถานีทวนสัญญาณวิทยุสื่อสาร
ANTENNAS FOR RADIO REPEATER STATION

โดย

นายบารมี	สิทธิกิจ	52010629
นายอัครพล	อัคนิตย์	52011432
นายวรปรัชญ์	พงศ์ติวัฒนากุล	50011361

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.สถาพร พรหมวงศ์

ผศ.ดร.พิชญ สุพรรณกูล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555

ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว

(.....)
อาจารย์ที่ปรึกษา
...../...../.....

KMITL วิศวกรรมโทรคมนาคม Telecommunications Engineering

ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว

(.....)
กรรมการผู้ตรวจชิ้นงาน
...../...../.....

KMITL วิศวกรรมโทรคมนาคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2555
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง สายอากาศสำหรับสถานีทวนสัญญาณวิทยุสื่อสาร
ANTENNAS FOR RADIO REPEATER STATION

ผู้จัดทำ

1.	นายบารมี	สิทธิกิจ	52010629
2.	นายอัครพล	อัคนิตย์	52011432
3.	นายวรปรัชญ์	พงศ์ติวัฒนากุล	50011361

..... **อาจารย์ที่ปรึกษา**
(ดร.สถาพร พรหมวงศ์)

..... **อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม**
(ผศ.ดร.พิชญ สุพรรณกูล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้รับความช่วยเหลือให้คำแนะนำข้อมูลอย่างดีจากอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์คือ ดร.สถาพร พรหมวงศ์ และ ผศ.ดร.พิชญ สุพรรณกูล ซึ่งได้ให้คำแนะนำสนับสนุนการวิจัยมาด้วยดีและขอบคุณสถานที่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ให้ทางคณะผู้จัดทำได้ใช้สร้างชิ้นงานและทดลองชิ้นงาน จึงต้องกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ บิดา มารดา ที่ช่วยให้กำลังใจและให้การสนับสนุน ตลอดจนทุนทรัพย์ระหว่างทำโครงการและขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาโทที่ให้คำแนะนำมาโดยตลอดและเพื่อนๆ ทุกคน

นายบารมี สิทธิกิจ
นายอัครพล อัคนิตย์
นายวรปรัชญ์ พงศ์ติวัฒนากุล

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศสำหรับสถานีทวนสัญญาณวิทยุสื่อสาร
ANTENNAS FOR RADIO REPEATER STATION

โดย นายบารมี สิทธิกิจ 52010629
นายอัครพล อัคนิตย์ 52011432
นายวรปรัชญ์ พงศ์ติวัฒนากุล 50011361

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สถาพร พรหมวงศ์
ผศ.ดร.พิชญ สุพรรณกูล

บทคัดย่อ

ปัจจุบันได้นำเอาวิทยุสื่อสารเข้ามาใช้กันมากขึ้น และมีความสำคัญอย่างยิ่งในสื่อสารทางการท่องเที่ยว การทหาร และอื่นๆ เมื่อมีการสื่อสารในระยะไกลขึ้นก็จะทำให้สัญญาณส่งไปไม่ถึง ดังนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาถึงการสูญเสียในการส่งผ่านระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ และประสิทธิภาพของสัญญาณการส่งผ่าน ปริญญานิพนธ์นี้ได้เล็งเห็นความสำคัญในวิทยุสื่อสาร จึงได้ออกแบบ และสร้างสายอากาศสำหรับสถานีทวนสัญญาณวิทยุ เพื่อทำให้การสื่อสารวิทยุรับ-ส่งได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ABSTRACT

Nowadays, wireless two-way radio is very useful for communication such as traveling, military and other activity. The problem of two-way radio can not communicate long distance. This thesis is improved and designed antennas for two-way radio. An advantage of antennas, it can be increased the performance and the distance of two-way radio communication.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

		หน้า
กิตติกรรมประกาศ		I
บทคัดย่อ		II
สารบัญ		III
สารบัญรูป		VII
สารบัญตาราง		X
บทที่ 1	**บทนำ**	**1**
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	1
	1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	2
	1.4 วิธีการที่ใช้ในปริญญานิพนธ์	2
	1.5 แผนการดำเนินปริญญานิพนธ์	2
	1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	2
บทที่ 2	**ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง**	**3**
	2.1 คลื่นวิทยุแม่เหล็กไฟฟ้า	3
	2.1.1 ความเร็วของคลื่นวิทยุ	4
	2.1.2 ความยาวคลื่นของคลื่นวิทยุ	4
	2.1.3 คลื่นวิทยุในอากาศ	6
	2.2 การแพร่กระจายสัญญาณจากสายอากาศ	6
	2.2.1 การแผ่กระจายและสนามการเหนี่ยวนำ	8
	2.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern)	9
	2.3.1 แบบรูปการแพร่กระจายแบบทุกทิศทางและรอบตัว	10
	2.3.2 แบบรูปการแพร่กระจายหลัก	10
	2.3.3 โลบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	11
	2.4 บริเวณต่างๆของสนามจากสายอากาศ	16
	2.5 ความหนาแน่นของกำลังงานที่แพร่กระจาย	18
	2.6 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 รูปแบบทิศทางของขั้ว (Polar directivity pattern)	19
2.8 สายอากาศฮาร์มอนิก (Harmonic antennas)	20
2.9 คุณสมบัติของสายอากาศ (Antenna characteristics)	21
2.10 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	21
2.11 คุณลักษณะและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ	22
2.11.1 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage standing wave ratio)	22
2.11.2 การสูญเสียย้อนกลับ (Return loss)	24
2.11.3 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna efficiency)	24
2.11.4 ประสิทธิภาพของบีม (Beam efficiency : BE)	25
2.11.5 ทิศทาง (Directivity)	26
2.11.6 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain)	26
2.11.7 อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input impedance)	28
2.11.8 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)	29
2.12 การโพลาไรซ์ของสายอากาศ (Antenna polarization)	30
2.13 สายอากาศไดโพล (Dipole antenna)	31
2.13.1 สายอากาศไดโพลและไดโพลอุดมคติ	31
2.14 สายอากาศขั้วคู่พับ (Folder dipole antenna)	32
2.15 สายนำสัญญาณ (Transmission lines)	32
2.15.1 Balance line	32
2.15.2 Unbalance line	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
	2.15.3 ค่าความเร็วของคลื่นวิทยุในสายนำสัญญาณ (Velocity factor)	34
	2.16 เทคนิคการแมตซ์ชิง (Matching techniques)	37
	2.16.1 การเอาสายนำสัญญาณมาต่อเข้ากับสายอากาศ	38
	2.17 สถานีทวนสัญญาณ	39
	2.17.1 การทวนสัญญาณสำหรับสายส่ง	40
	2.17.2 การปรับค่าให้เท่ากันและการรักษาระดับโดยอัตโนมัติ (Equalization and automatic level regulation)	40
	2.17.3 การทวนสัญญาณสำหรับคลื่นวิทยุ	40
	2.17.4 หน้าที่ของสถานีทวนสัญญาณ	44
	2.17.5 ประเภทของสถานีทวนสัญญาณ	44
	2.18 ระบบทวนสัญญาณวิทยุ	48
	2.18.1 สถานีทวนสัญญาณแบบ duplex	50
	2.18.2 สถานีทวนสัญญาณแบบ simplex	51
	2.19 ICOM IC-3FGX	53
	2.20 SWR & POWER METER SX-400	54
บทที่ 3	**การออกแบบและวิธีการวัดผล**	**56**
	3.1 กล่าวนำ	56
	3.2 การออกแบบสายอากาศโฟลเด็ดไดโพล	56
	3.2.1 การออกแบบคำนวณตัวสายอากาศโฟลเด็ดไดโพล	56
	3.3 การเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศ	62
	3.3.1 การแมตซ์ชิงอิมพีแดนซ์สายอากาศ	63
	3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองวัดค่าพารามิเตอร์สายอากาศ	64
	3.4.1 ชุดวัดค่าพารามิเตอร์สายอากาศ	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
	3.4.2 การวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น	66
บทที่ 4	**ผลการวัด**	**67**
	4.1 ผลจากการวัดค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับ	67
	4.2 ผลจากการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing wave ratio: SWR)	68
	4.3 ผลจากการวัดค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ (Input impedance)	69
	4.4 ผลจากการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ	70
	4.5 ผลจากการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น	70
บทที่ 5	**บทวิจารณ์และบทสรุป**	**73**
	5.1 บทวิจารณ์และบทสรุป	73
	5.2 ปัญหาที่พบในการทดลอง	73
บรรณานุกรม		**74**
ภาคผนวก		**75**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบของคลื่นวิทยุแม่เหล็กไฟฟ้าและการแพร่ขยายในอากาศ	4
2.2	ความเข้มสนามของการแผ่กระจายคลื่นกับการแพร่ขยายคลื่น	6
2.3	การแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศ	7
2.4	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	7
2.5	ระบบโคออดิเนทสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	9
2.6	แบบรูปการแพร่กระจายของสายอากาศรอบทิศทาง	10
2.7	แบบรูปการแพร่กระจายหลักของระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร	11
2.8	โลบต่างๆ และบีมวิดท์ของแบบรูปการแพร่กระจายของสายอากาศ	12
2.9	แบบรูปการแพร่กระจายในแบบเชิงเส้น	12
2.10	การแพร่กระจายคลื่นในแนวราบ	13
2.11	การแพร่กระจายคลื่นในแนวดิ่ง	14
2.12	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไดโพลอุดมคติตามทฤษฎีระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane)	14
2.13	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไดโพลอุดมคติตามทฤษฎีระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane)	15
2.14	การกระจายของกระแสในไดโพล $\lambda/2$	15
2.15	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) ของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ (เส้นทึบ) และไดโพลอุดมคติ (เส้นประ)	16
2.16	การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ	17
2.17	รูปแบบทิศทางของโพลาไรเซชั่นคู่ครึ่งคลื่นของสายอากาศ	19
2.18	รูปแบบทิศทางขั้วคู่ที่ป้อนสัญญาณตรงกลางที่ความถี่ฮาร์มอนิกพื้นฐาน	20
2.19	สายอากาศที่มีจุดฟีด (Feed point) ตรงกลาง	22
2.20	การเกิดรูปคลื่นนิ่ง	23
2.21	สายอากาศ	29
2.22	การโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล	30
2.23	สายอากาศไดโพล	31
2.24	สายอากาศขั้วคู่พับ	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.25	สายนำสัญญาณแบบบัลลานซ์ไลน์	32
2.26	สายนำสัญญาณแบบอันบัลลานซ์ไลน์	33
2.27	เครื่องทวนสัญญาณอย่างง่าย	41
2.28	การใช้สัญญาณเสียงโทนในระบบทวนสัญญาณ	41
2.29	การติดต่อสื่อสารผ่านเครื่องทวนสัญญาณ	42
2.30	ระบบสื่อสารโมบายล์ธรรมดาและการใช้ทวนสัญญาณช่วยให้โมบายล์ติดต่อกันได้ไกลขึ้น	43
2.31	รัศมีทำการขึ้นอยู่กับความสูงของสายอากาศของเครื่องทวนสัญญาณ	43
2.32	ระบบทวนสัญญาณที่ใช้ร่วมกับข่ายวิทยุลิงค์ซึ่งเป็นข่ายหลัก (Backbone)	44
2.33	บล็อกไดอะแกรมสถานีทวนสัญญาณเบสแบนด์	45
2.34	บล็อกไดอะแกรมสถานีทวนสัญญาณ IF เฮเทอโรดายน์	46
2.35	บล็อกไดอะแกรมสถานีทวนสัญญาณ RF เฮเทอโรดายน์	47
2.36	ผลกระทบของความโค้งของพื้นโลก	49
2.37	ภูเขาสูงเป็นที่ติดตั้งสถานี	49
2.38	สถานีทวนสัญญาณแบบ Duplex	50
2.39	Duplexer	51
2.40	สถานีทวนสัญญาณแบบ Simplex	52
2.41	วิทยุสื่อสาร ICOM IC-3FGX	53
2.42	SWR & POWER METER SX-400	54
3.1	ห่วงโฟลเด็ดไดโพลขนาด 54.6 เซนติเมตร	57
3.2	ค่า S_{11} สายอากาศโฟลเด็ดไดโพล 8 ห่วงที่ความถี่ 245 MHz	58
3.3	ค่า VSWR ของสายอากาศโฟลเด็ดไดโพล 8 ห่วงที่ความถี่ 245 MHz	58
3.4	ค่าอิมพีแดนซ์สายอากาศโฟลเด็ดไดโพล 8 ห่วงที่ความถี่ 245 MHz	59
3.5	ค่าอัตราขยายของสายอากาศโฟลเด็ดไดโพล 8 ห่วงที่ความถี่ 245 MHz	59
3.6	รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-Plane ของสายอากาศ	60
3.7	รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-Plane ของสายอากาศ	60
3.8	ระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศโฟลเด็ดไดโพลกับบูมเสากลาง	61
3.9	ระยะห่างระหว่างห่วงโฟลเด็ดไดโพลแต่ละห่วง	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.10	ความยาวสายนำสัญญาณของสายอากาศโพลเด็ดไดโพลที่ความถี่ 245 MHz	64
3.11	ชุดวัดค่าพารามิเตอร์สายอากาศ	65
4.1	ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับที่วัดได้	67
4.2	การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับ	68
4.3	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่วัดได้	69
4.4	ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ที่วัดได้	70
4.5	รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-Plane ของสายอากาศ	71
4.6	รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-Plane ของสายอากาศ	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แถบความถี่ต่าง ๆ	5
2.2	ความถี่วิทยุสมัครเล่น	5
2.3	คุณสมบัติสายโคแอกเชียลที่นิยมใช้งาน	34
2.4	เบอร์สายและอัตราการสูญเสีย (dB) ต่อ 100 ฟุต	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โลกของเรามีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เทคโนโลยีและระบบเครือข่ายต่างๆ ก้าวหน้าอย่างรวดเร็วซึ่งในทางการสื่อสารก็มีความสำคัญควบคู่ไปด้วยทั้งใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างกันใช้ในการสำรวจทรัพยากรต่างๆ ค้นหาแหล่งข้อมูลยิ่งมีการพัฒนาการสื่อสารให้ก้าวไกลมากขึ้นเท่าใดคนบนโลกใบนี้ไม่ว่าอยู่จุดไหนก็เหมือนอยู่ใกล้กันมากขึ้นจึงทำให้ระบบโทรคมนาคมมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพื่อส่งต่อความสำเร็จสู่การพัฒนาต่อไป

สถานีทวนสัญญาณเป็นส่วนที่สำคัญมากในระบบการสื่อสารระยะไกล เนื่องจากเป็นส่วนที่ทำให้การติดต่อสื่อสารสามารถไปได้ไกลหรือครอบคลุมมากกว่าเดิมมีความชัดเจนของสัญญาณในจุดที่ถูกบดบังหรือในพื้นที่ที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการสื่อสารมากขึ้น เป็นระบบที่ช่วยเพิ่มระยะการติดต่อสื่อสาร สถานีที่ไม่สามารถ QSO กันได้ หากพื้นที่นั้นมีสถานีทวนสัญญาณตั้งอยู่ก็สามารถ QSO กันได้โดยผ่านระบบทวนสัญญาณ (Repeater) การใช้งานเราอาจจะตั้งสถานีทวนสัญญาณไว้บนที่สูง เช่น ยอดตึก ยอดภูเขา หรือที่สูง ๆ จะทำให้สามารถติดต่อได้ไกลขึ้น หรือในกรณีที่พื้นที่ต่างพื้นที่ซึ่งถูกภูเขาสูงบัง จนไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ เมื่อตั้งสถานีทวนสัญญาณไว้บนยอดเขาก็จะสามารถติดต่อกันได้โดยผ่านระบบทวนสัญญาณนี้เช่นกัน

โดยในระบบทวนสัญญาณนี้เราเลือกใช้สายอากาศโฟลเด็ดไดโพลมาเป็นสายอากาศที่ใช้ในระบบทวนสัญญาณเพราะสายอากาศแบบโฟลเด็ดไดโพลจะเป็นสายอากาศที่มีการกระจายคลื่นแบบกึ่งทิศทางลักษณะคล้ายๆ รูปไข่ หรือรูปดอกบัวครับ โดยจะมีความแรงของสัญญาณทางด้านหน้าห่วงมากที่สุด ส่วนด้านข้างจะน้อยลงและด้านหลังห่วงน้อยที่สุดแต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ยังขึ้นอยู่กับสูตรและวิธีการทำของแต่ละคนด้วยเพราะถ้าเราทำให้ห่วงไดโพลอยู่ห่างจากเสากลางมากก็จะมีคุณสมบัติรอบตัวมากขึ้น แต่ถ้าเราทำให้ห่วงอยู่ชิดกับเสากลางมากก็จะมีคุณสมบัติเป็นทิศทางมากขึ้น (ด้านหน้ามีเกนขยายมากขึ้นส่วนด้านหลังมีเกนขยายน้อยลงมาก)

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. สร้างสายอากาศเพื่อใช้งานได้จริง
2. เพื่อศึกษาระบบสถานีทวนสัญญาณเครื่องทวนสัญญาณและสร้างสายอากาศ
3. เพื่อพัฒนาทักษะผู้ศึกษาและต่อยอดองค์ความรู้ให้พัฒนาดีกว่าเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์นี้จะทำการสร้างสายอากาศขึ้นมาใช้ในความถี่ 245 MHz โดยสร้างสายอากาศมาใช้ร่วมกันเครื่องทวนสัญญาณโดยใช้สายอากาศโฟลเด็ดไดโพล

1.4 วิธีการที่ใช้ในปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาค้นคว้าเนื้อหาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสายอากาศ การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ การเลือกใช้สายอากาศ เป็นต้น
2. ออกแบบสายอากาศเพื่อใช้งานได้จริง
3. วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากสายอากาศ

1.5 แผนการดำเนินปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาค้นคว้าเนื้อหา และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับปริญญานิพนธ์
2. ออกแบบและทดสอบสายอากาศ จัดหาอุปกรณ์
3. สรุปผลการทำปริญญานิพนธ์และนำเสนอวิธีการ

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. สามารถวิเคราะห์ถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจากผลที่ได้รับและสามารถปรับปรุงแก้ไขได้
2. วิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากระยะต่างๆ ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในระบบสื่อสารวิทยุ หรือระบบกระจายเสียง และสัญญาณโทรทัศน์ มีหลักคล้ายกันอยู่ คือ การรวมสัญญาณคลื่นพาห์เข้ากับสัญญาณเดิม เพื่อให้เกิดรูปแบบสัญญาณที่เหมาะในการส่งไปในชั้นบรรยากาศได้ (ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) โดยใช้สายอากาศส่ง และในการรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเราใช้สายอากาศรับ

นอกจากนี้สายอากาศส่งต้องมีคุณสมบัติสำคัญคือแมชช์ (Match) กับสายนำสัญญาณ เพื่อให้กำลังงานมากที่สุดผ่านเข้าสายอากาศ ส่วนในสายอากาศรับต้องมีค่าอัตราขยายให้มากที่สุด (รวมทั้งค่าไดเร็คติวิตี้ (Directivity))

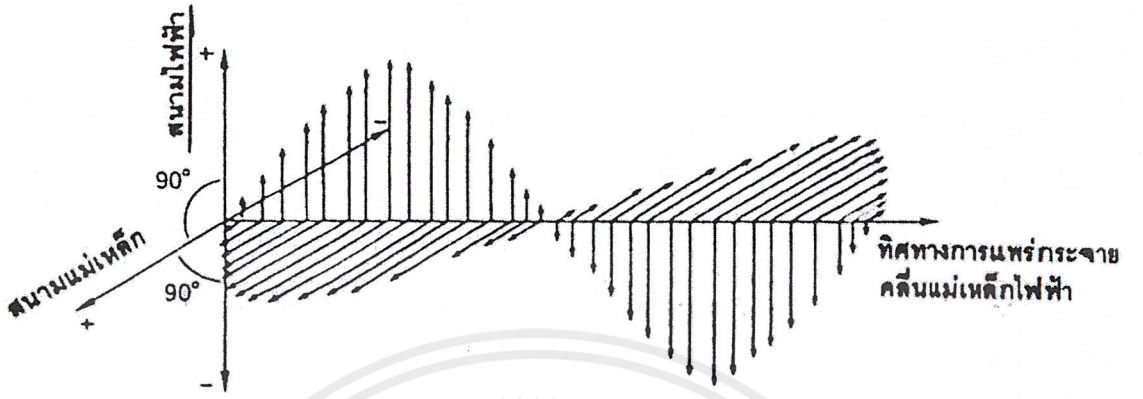
2.1 คลื่นวิทยุแม่เหล็กไฟฟ้า

สายอากาศ คือ ตัวนำซึ่งออกแบบมาเพื่อแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือรับการแผ่กระจายที่อยู่ในอากาศหรืออวกาศ สายอากาศที่ถูกสร้างขึ้นจะมีมากมายหลายขนาด และหลายรูปร่างเพื่อรองรับการใช้งานแบบต่าง ๆ

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน สายอากาศจะมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกับสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่รอบ ๆ ตัว เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กเปลี่ยน หรือสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้น ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้จะสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกับสนามไฟฟ้า ผลลัพธ์ของทั้งสองสนามนี้คือหนึ่งเกิดฟลักซ์แม่เหล็ก และสองเกิดแรงจากเส้นแรงไฟฟ้า

แท้จริงแล้ว สนามทั้ง 2 มีความสำคัญมากกว่าตัวนำ การเปลี่ยนแปลงต่างๆของสนามแม่เหล็กจะมีผลต่อการสร้างสนามไฟฟ้าเช่นกัน การเปลี่ยนแปลงต่างๆของสนามไฟฟ้าจะมีผลต่อการสร้างสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของคลื่นวิทยุแม่เหล็กไฟฟ้าและการแพร่ขยายในอากาศ [5]

สนามไฟฟ้าใช้สัญลักษณ์ E สนามแม่เหล็กใช้สัญลักษณ์ H ทั้ง 2 สนามจะเปลี่ยนแปลงผันแปรตามความแรงในขณะที่เคลื่อนที่ไปในทิศทางของการแพร่ขยาย P จากการมองเห็นภาพ ลูกศรในสามมิติสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะตั้งฉากซึ่งกันและ กัน มุมทางขวาจะเป็นทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น

รูปแบบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดการแพร่ขยายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไหลไปในอากาศ พลังงานการเคลื่อนที่ของคลื่นคือการแบ่งเท่า ๆ กันระหว่างองค์ประกอบของไฟฟ้าและแม่เหล็ก

2.1.1 ความเร็วของคลื่นวิทยุ

โดยทั่ว ๆ ไป คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ รูปแบบของการแผ่ ซึ่งส่งพลังงานออกไปในอากาศ การแผ่ของแสง, การแผ่ความร้อน, รังสีเอ็กซ์และคลื่นวิทยุ เหล่านี้เป็นตัวอย่างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ขยายไปในอากาศกับความเร็วของแสงมีสัญลักษณ์ C ความเร็วคือ C = 300,000,000 เมตร / วินาที

หรือ $C = 3 \times 10^{8}$ เมตร / วินาที

หรือ $C = 3 \times 10^{10}$ เซนติเมตร / วินาที

ความเร็วนี้จะพิจารณาในอวกาศหรือสุญญากาศจะมีค่าเท่ากัน ในคลื่นวิทยุ ความถี่ของการแปรผันในความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จะเป็นเหมือนกับความถี่ของการแปรผันในสายอากาศกระแสไฟฟ้าซึ่งจะสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือกล่าวง่าย ๆ ว่าความถี่ของสนาม คือ ความถี่ของแหล่งกำเนิดซึ่งทำให้เกิดสนามนั้น

2.1.2 ความยาวคลื่นของคลื่นวิทยุ

สามารถหาได้จากความยาวของคลื่นแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ไปในอากาศ ใช้สัญลักษณ์ตัวอักษรกรีกคือแลมบ์ดา λ หนึ่งความยาวคลื่นคือระยะทางระหว่างจุดสองจุดซึ่งไปพร้อมกันในทิศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางการแพร่ขยายเมื่อสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้มซ้ำๆกัน ความยาวคลื่น λ , ความถี่ f , และความเร็วของแสง C มีความสัมพันธ์กันตามสูตรนี้

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ เมตร} \qquad (2.1)$$

ยิ่งความถี่สูงขึ้นไป ความยาวคลื่นจะสั้นลง เช่น ความถี่ของวิทยุประชาชน(CB) 27 MHz จะมีความยาวคลื่น 11.11 เมตร ซึ่งสั้นกว่าสถานีวิทยุกระจายเสียง AM ที่ 1600 kHz ที่มีความยาวคลื่น 187.5 เมตร

ตารางที่ 2.1 แถบความถี่ต่างๆ [4]

ชื่อเรียก	ความถี่	ความยาวคลื่น
ความถี่ต่ำมาก VLF	3 – 30 kHz	100 – 10 กิโลเมตร
ความถี่ต่ำ LF	30 – 300 kHz	10 – 1 กิโลเมตร
ความถี่ปานกลาง MF	300 – 3,000 kHz	1,000 – 100 เมตร
ความถี่สูง HF	3 – 30 MHz	100 – 10 เมตร
ความถี่สูงมาก VHF	30 – 300 MHz	10 – 1 เมตร
ความถี่สูงยิ่ง UHF	300 – 3,000 MHz	100 – 10 เซนติเมตร
ความถี่สูงสุด SHF	3,000 – 30,000 MHz	10 – 1 เซนติเมตร
ความถี่สูงพิเศษ EHF	30,000 – 300,000 MHz	10 – 1 มิลลิเมตร

ตารางที่ 2.2 ความถี่วิทยุสมัครเล่น [4]

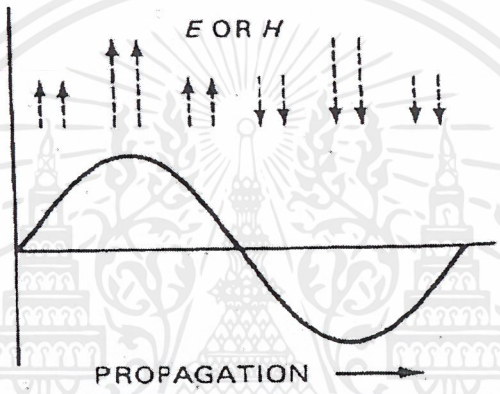
ความถี่	ความยาวคลื่น
1.8 – 2 MHz	160 เมตร
3.5 – 4 MHz	80 เมตร
5.3 – 5.4 MHz	60 เมตร
7 – 7.3 MHz	40 เมตร
10.1 – 10.15 MHz	30 เมตร
14 – 14.35 MHz	20 เมตร
21 – 21.45 MHz	15 เมตร
24.89 – 24.99 MHz	12 เมตร
28 – 29.7 MHz	10 เมตร
50 – 54 MHz	6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ความถี่วิทยุสมัครเล่น (ต่อ)

ความถี่	ความยาวคลื่น
144 – 148 MHz	2 เมตร
430 – 440 MHz	0.7 เมตร
1240 – 1300 MHz	0.23 เมตร

2.1.3 คลื่นวิทยุในอากาศ



รูปที่ 2.2 ความเข้มสนามของการแผ่กระจายคลื่นกับการแพร่ขยายคลื่น [2]

ในรูปที่ 7 แสดงถึงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านเป็นรอบ ๆ ของการแปรผันซึ่งการแพร่ขยายไปทางด้านนอกจากตัวนำสายอากาศ ซึ่งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีมุม 90° จากเฟส ในเวลาต่าง ๆ กัน เช่นกัน เส้นแรงสนามอยู่ที่มุมขวา สุดท้ายการแพร่ขยายคือทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงสนาม ถ้าดูตามระนาบสามมิติในอากาศ ทิศทางการแพร่ขยายคือที่มุมขวาของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า

สนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ การแผ่ขยายไปในอากาศ คลื่นวิทยุอยู่ด้านซ้ายของสายอากาศ เพื่อแพร่ขยายในทิศทางทั้งหมด จากตัวนำสายอากาศ พลังงานคือการแผ่ขยายในทิศทางจากชนิดของสายอากาศตัวนำอื่น ๆ กับกระแสสามารถสร้างการแผ่ขยายได้บ้าง ในทางปฏิบัติ ความถี่วิทยุสูงกว่า 30 kHz จะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้มีประสิทธิผล ยิ่งความถี่สูงขึ้นจะมีประสิทธิภาพการแผ่กระจายที่ความถี่ต่ำกว่า 30 kHz สายอากาศจะมีความยาวมาก การแปรผันในความเข้มของสนามจะไม่รวดเร็ว เพื่อที่จะสร้างการแผ่กระจายคลื่นจากสายอากาศ

2.2 การแพร่กระจายสัญญาณจากสายอากาศ

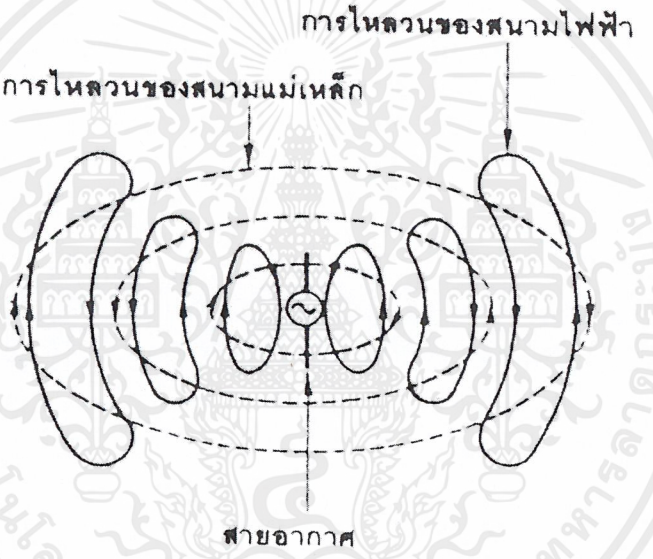
เมื่อมีกระแสไหลผ่านลวดตัวนำ จะเกิดสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำที่มีทิศทางตามทิศทางของกระแส ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของกระแสเกิดขึ้น สนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนตามไปด้วยและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่า สนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงจะสร้างสนามไฟฟ้าให้มีขึ้นมา (ซึ่งถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงในสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้าจะไม่เกิดขึ้น)

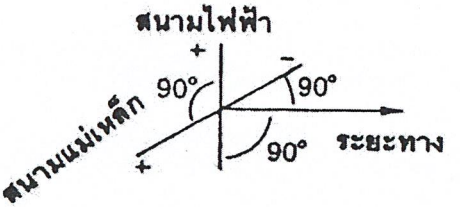
ส่วนทิศทางของสนามไฟฟ้า พิจารณาจากกฎของเลนซ์ (Lenz's Law) หรือกฎมือขวานั่นเอง ทำนองเดียวกันการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ทำให้พิจารณาได้ว่า ถ้าป้อนกระแสไฟสลับ (A.C.) ผ่านลวดตัวนำจะทำให้เกิดทั้งสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กขึ้น

กำหนดให้ใช้กระแสรูปสัญญาณไซน์ผ่านเข้าลวดตัวนำ พบว่าทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามคลื่นไซน์ด้วย โดยทั้งสองสนามแพร่ออกมาจากลวดตัวนำด้วยความเร็วแสง (ประมาณ 3×10^8 เมตร/วินาที) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศ [5]

พลังงานที่แพร่กระจายไปมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มในค่าความถี่ เราเรียกพลังงานส่วนนี้ว่าสนามพลังงานที่แพร่กระจาย ซึ่งอยู่ในรูปสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อวิเคราะห์แล้วพบว่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าทำมุมฉากซึ่งกันและกัน รวมทั้งยังทำมุมฉากกับทิศทางการแพร่กระจายดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบที่มีสนามไฟฟ้าและมีทิศตามการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเรียกว่าระนาบโพลาไรเซชั่นของคลื่น

ตัวอย่างเช่น ถ้าสนามไฟฟ้าอยู่ในระนาบแนวดิ่ง (หรือแนวตั้ง) สนามแม่เหล็กอยู่ในระนาบแนวราบ กล่าวได้ว่าคลื่นมีโพลาไรเซชั่นในแนวดิ่ง

ส่วนคลื่นในโพลาไรเซชั่นแนวดิ่งจะเหนี่ยวนำให้ลวดตัวนำที่อยู่แนวดิ่งเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้น เพราะว่ามีสนามแม่เหล็กตัวผ่านลวดตัวนำ และไม่มีผลต่อลวดตัวนำในแนวราบ

เมื่อวิเคราะห์ถึงภายในสายอากาศพบว่ามีสนามพลังงานเกิดขึ้น 2 อย่างดังนี้

- **สนามพลังเหนี่ยวนำ** แทนพลังงานส่วนที่ไหลอยู่ภายในสายอากาศและไม่แพร่กระจายออกไป

- **สนามพลังที่แพร่กระจาย** แทนส่วนที่แพร่จากสายอากาศไป ที่มีปริมาณเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ของคลื่น และเป็นสัดส่วนกลับกันของระยะทางที่ไกลจากสายอากาศออกไปพบว่าในระยะใกล้กับสายอากาศมาก ๆ มีปริมาณของสนามพลังเหนี่ยวนำมากกว่า แต่ที่ระยะทางไกลกว่า $\frac{\lambda}{2\pi}$ จากสายอากาศนั้น ค่าสนามพลังที่แพร่กระจายมีมากกว่า (λ แทนความยาวคลื่นของสัญญาณจากสายอากาศ)

เราแทนขนาดหรือแอมปลิจูดของสนามไฟฟ้า โดยใช้อักษร E

ขนาดหรือแอมปลิจูดของสนามแม่เหล็ก โดยใช้อักษร H

และค่าอัตราส่วนระหว่างความเข้มของสนามไฟฟ้าต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กว่าค่าอิมพีแดนซ์ของภาวะสุญญากาศ คิดจากสูตรคำนวณนี้

$$\frac{E(V/m)}{H(At/m)} = 120\pi = 377\ \Omega \qquad (2.2)$$

โดยทั่วไป เราหาขนาดของคลื่นวิทยุในเทอมของความเข้มสนามไฟฟ้า

2.2.1 การแผ่กระจายและสนามการเหนี่ยวนำ

การแผ่กระจายคลื่นใดๆ จะถูกรับได้โดยสายอากาศ ซึ่งไม่ได้ต้องการสัญญาณที่คำนึงถึงการแทรกสอด การแทรกสอดเกิดจากสนามการแผ่กระจายคลื่น, สนามการเหนี่ยวนำหรือทั้งสอง ตัวอย่างเช่นอาศัยอยู่ใกล้กับทางด่วน รถยนต์ที่วิ่งผ่านสามารถสร้างการแทรกสอดในวิทยุหรือโทรทัศน์ พลังงานซึ่งส่งถึงสายอากาศ คือ สนามแผ่กระจายของระบบจุดระเบิดในรถยนต์ สนามการเหนี่ยวนำเฉพาะของขดลวดจุดระเบิดสามารถสร้างการแทรกสอด แต่เกิดขึ้นในเวลารวดเร็ว ทำให้โทรทัศน์เกิดเส้นสีดำแนวนอน และมีเสียงปะทุในลำโพง ตัวอย่างอื่นๆ อีก เช่นการสตาร์ทรถจักรยานยนต์ หรือขณะหลอดฟลูออเรสเซ็นต์กำลังจะติดสว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

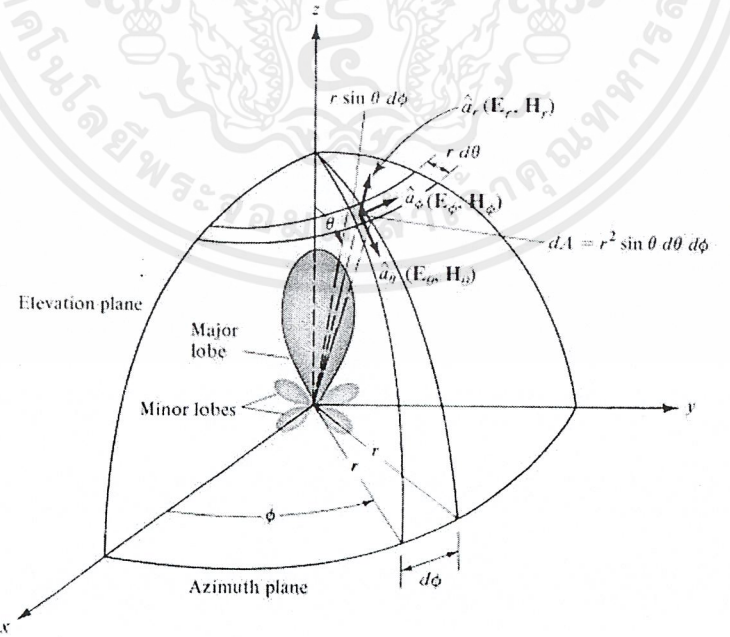
ปรากฏการณ์การแทรกสอดอื่นๆ ที่ได้รับ สามารถลดได้โดยลดความแรงของสัญญาณเครื่องรับ ตัวนำโลหะอื่นๆ ที่ใช้ทำสายอากาศ เมื่อโครงสร้างโลหะใกล้กับสายอากาศรับสามารถลดความเข้มสนามได้ โลหะจะทำหน้าที่ลัดวงจรสำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นี่คือเหตุผลว่าทำไมจึงเป็นการยากที่จะรับสัญญาณวิทยุที่ดีในโลหะที่ปิดผนึกหรืออยู่ใกล้กับโครงสร้างโลหะขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามไม่มีผลกระทบต่อคลื่นวิทยุแม่เหล็กไฟฟ้า

2.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern)

คือรูปที่ใช้เพื่อแสดง คุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสเปส-โคออดิเนท (Space coordinate) ส่วนใหญ่แพทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่นนี้มักจะคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far field)

การอธิบายคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation intensity) ความเข้มของสนาม (Field strength) เฟส (Phase) หรือโพลาไรเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจงรูปของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่

รูปที่ 2.5 ระบบโคออดิเนทที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นสำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่าแบบรูปการแพร่กระจายกำลังงานของสายอากาศ และกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆ ที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่าแบบรูปการแพร่กระจายสนาม (Field pattern) ของสายอากาศนั้น



รูปที่ 2.5 ระบบโคออดิเนทสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ [1]

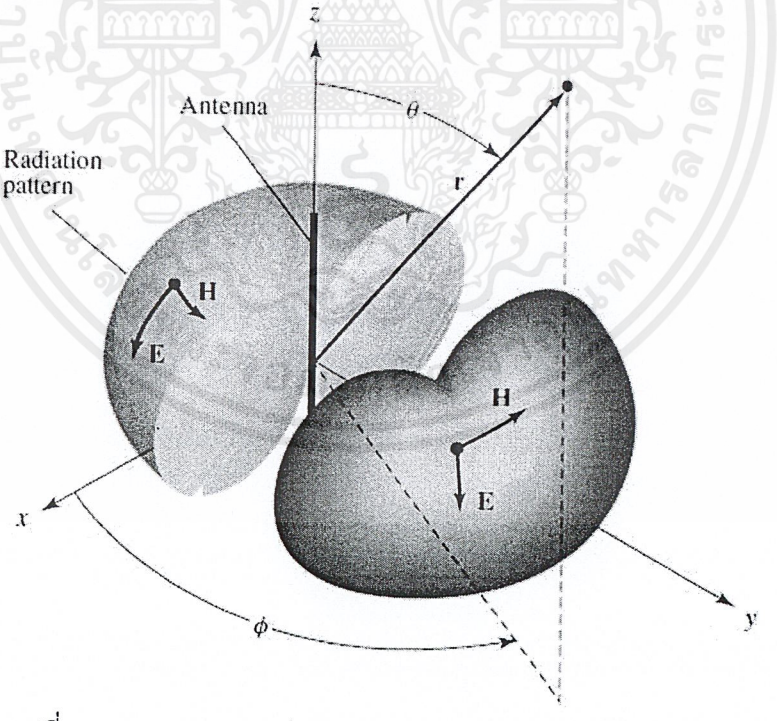
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 แบบรูปการแพร่กระจายแบบทุกทิศทางและรอบตัว

แบบรูปการแพร่กระจายแบบททุกทิศทาง (Isotropic radiator) คือสายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้นโดยมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นเท่ากันในทุกทิศทาง สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional antenna) เป็นสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างหนึ่งของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ สายอากาศแบบรอบตัว (Omni directional antenna) คุณสมบัติของสายอากาศแบบนี้มีดังแสดงดังรูปที่ 2.6

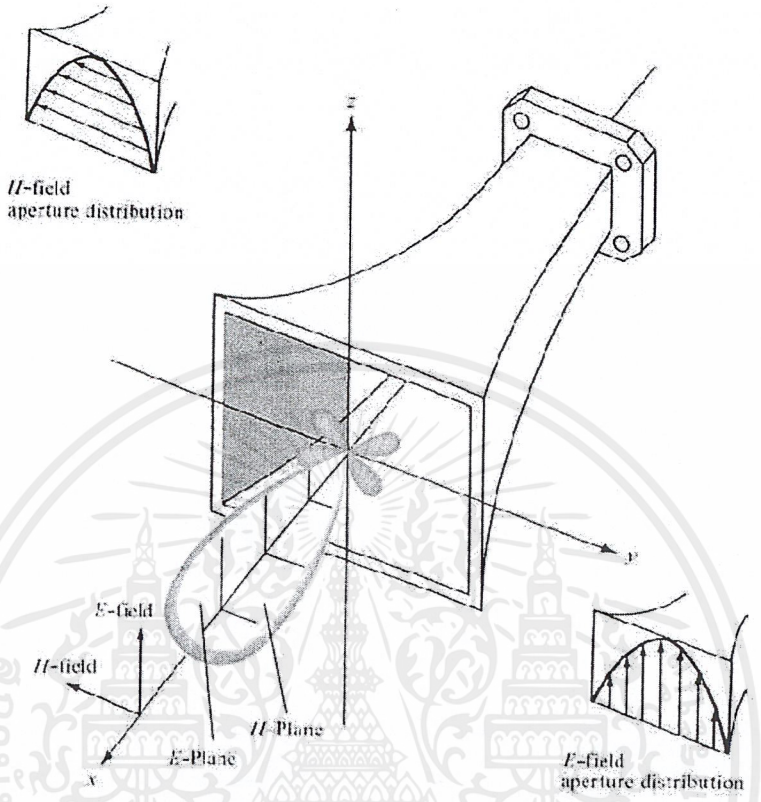
2.3.2 แบบรูปการแพร่กระจายหลัก

โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศในเทอมของแบบรูปการแพร่กระจายหลัก (Principal pattern) ของสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก H สำหรับสายอากาศลิเนียร์ลิโพลาไรเซชัน (Linearly polarization) แบบรูปการแพร่กระจายในระนาบ E จะเป็นระนาบที่บรรจุเวคเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายในระนาบ H จะเป็นระนาบที่บรรจุเวคเตอร์สนามแม่เหล็ก และทิศทางการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ตัวอย่างการแสดงแบบรูปการแพร่กระจายหลักมีดังรูปที่ 2.7 โดยมีระนาบ XZ (ระนาบเอเลเวชัน; $\phi = 0$) เป็นระนาบ E หลัก และมีระนาบ XY (ระนาบอาซิมุธ; $\theta = \frac{\pi}{2}$) เป็นระนาบ H หลัก



รูปที่ 2.6 แบบรูปการแพร่กระจายของสายอากาศรอบทิศทาง [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แบบรูปการแพร่กระจายหลักของระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร [1]

2.3.3 โลบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

โลบของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation lobe) เป็นส่วนหนึ่งของแพทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ รูปที่ 2.8 แสดงโพลาร์แพทเทอร์น (Polar pattern) แบบสามมิติ ซึ่งแบ่งเป็นโลบต่างๆดังนี้

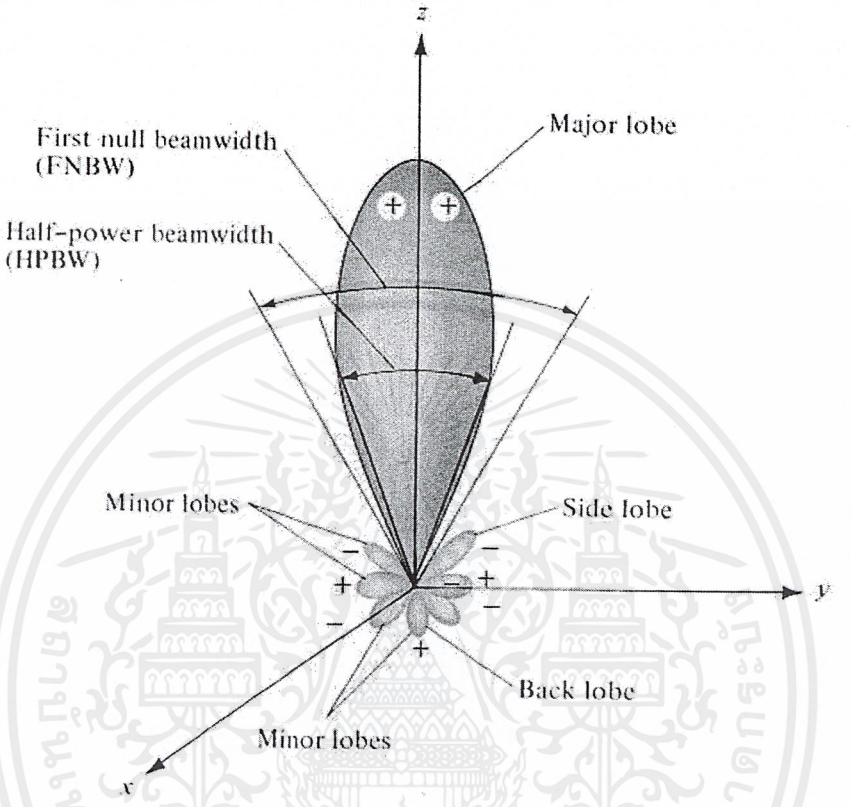
(ก) โลบหลัก (Major lobe หรือ Main lobe) เป็นโลบของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงสุด รูปที่ 2.8 นั้นมีโลบหลักอยู่ในทิศทาง $\theta = 0$ สำหรับสายอากาศบางชนิด อาจมีโลบหลักมากกว่าหนึ่งโลบ

(ข) โลบย่อย (Minor lobe) ได้แก่โลบอื่นๆ นอกเหนือไปจากโลบหลัก

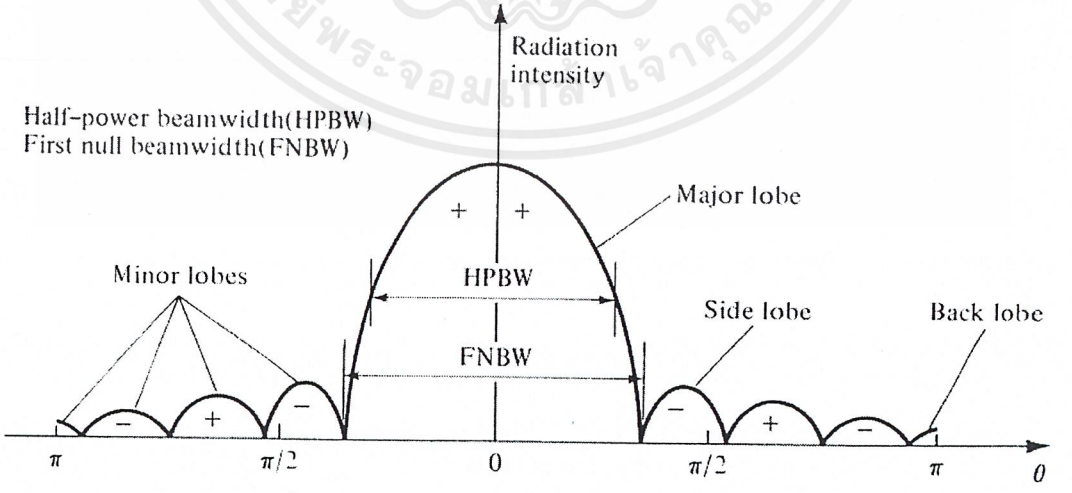
(ค) โลบข้างหรือไซด์โลบ (Side lobe) เป็นโลบย่อยที่อยู่ติดกับโลบหลักและอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับโลบหลัก

(ง) โลบหลัง (Back lobe) เป็นโลบย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับโลบหลัก โดยปกติแล้วโลบย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสายอากาศที่ดีจะต้องจำกัดโลบเหล่านี้ให้น้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



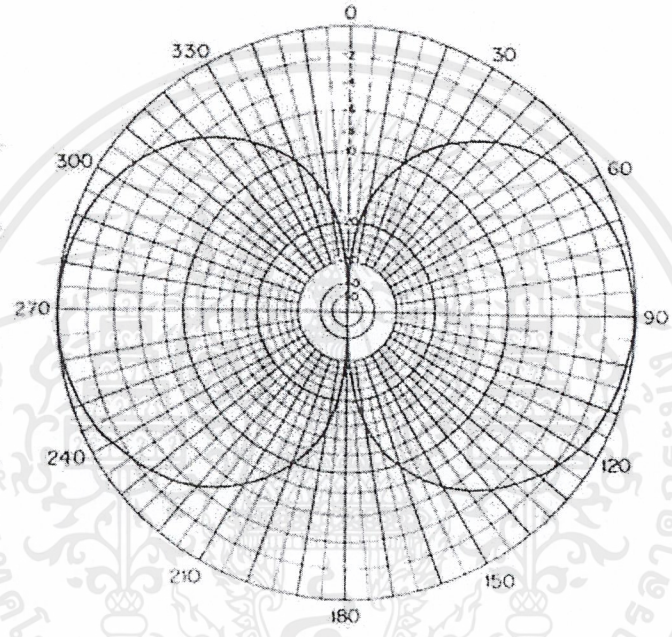
รูปที่ 2.8 โลบต่างๆ และบีมวิดท์ของแบบรูปการแพร่กระจายของสายอากาศ [1]



รูปที่ 2.9 แบบรูปการแพร่กระจายในแบบเชิงเส้น [1]

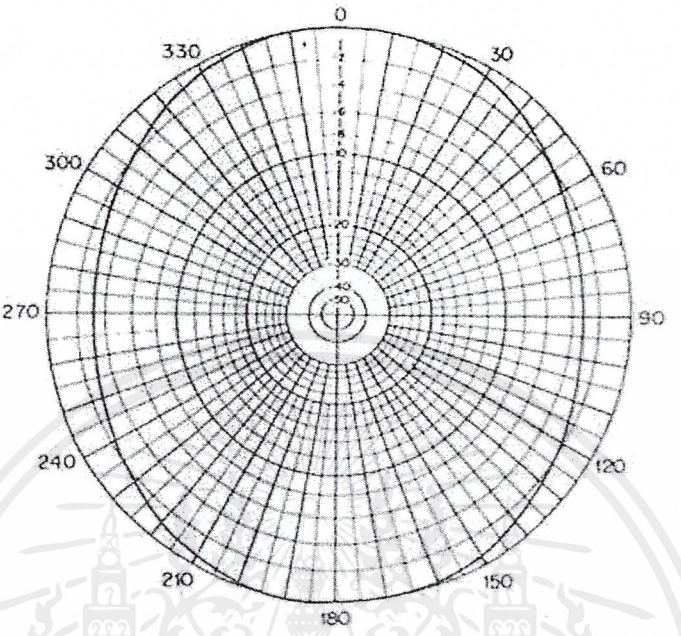
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแบบ Loop ทั้งหมดที่กล่าวมา มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นคล้ายกับสายอากาศไดโพลแบบ Halfwave Dipole จะแตกต่างกันตรงที่มุมการแพร่กระจายคลื่นในแนวราบจะกว้างกว่าไดโพล ทั้งนี้ก็เพราะว่าอีลีเมนต์ส่วนที่อยู่ในแนวราบของมันจะสั้นกว่า ส่วนการแพร่กระจายคลื่นในแนวดิ่งจะแคบกว่า มากจึงทำให้มีอัตราการขยายมากกว่าไดโพล



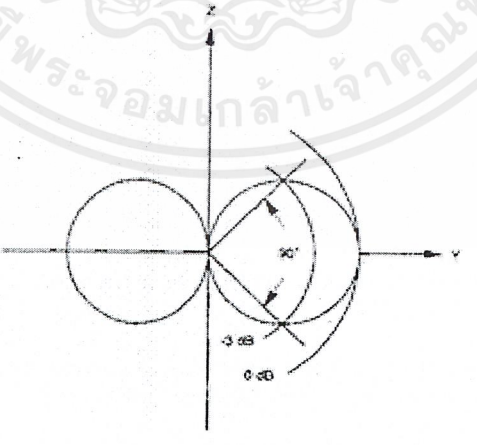
รูปที่ 2.10 การแพร่กระจายคลื่นในแนวราบ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



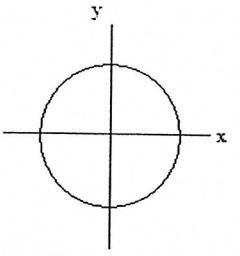
รูปที่ 2.11 การแพร่กระจายคลื่นในแนวดิ่ง [3]

รูปที่ 2.12 ได้แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) ของไดโพลอุดมคติ ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าไดโพลอุดมคตินั้นมีทิศทางด้วยเหมือนกัน เพราะว่าการแพร่กระจายคลื่นจะมีความแรงของสัญญาณ สูงในบางทิศทางเมื่อเทียบกับทิศทางอื่น ๆ



รูปที่ 2.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไดโพลอุดมคติตามทฤษฎีระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



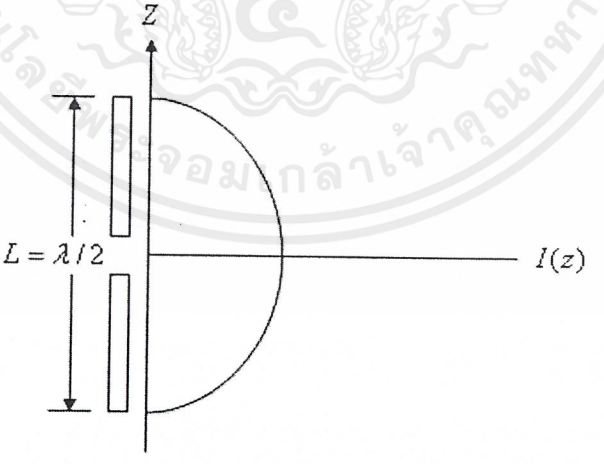
รูปที่ 2.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไดโพลอุดมคติตามทฤษฎีระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane)

ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (Half-Power Beamwidth: HPBW) ของสายอากาศคือการแยกมุมต่างๆ ในลำคลื่นหลัก โดยคิดที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB) ของกำลังงานที่แพร่ออกในทิศทางของกำลังงานสูงสุด

$$HPBW = | \Theta_{HPBW,left} - \Theta_{HPBW,right} | \quad (2.3)$$

ค่า HPBW ของไดโพลอุดมคติในระนาบสนามไฟฟ้า E-Plane จะเท่ากับ 90° ซึ่งดูได้จากรูปที่ 2.12

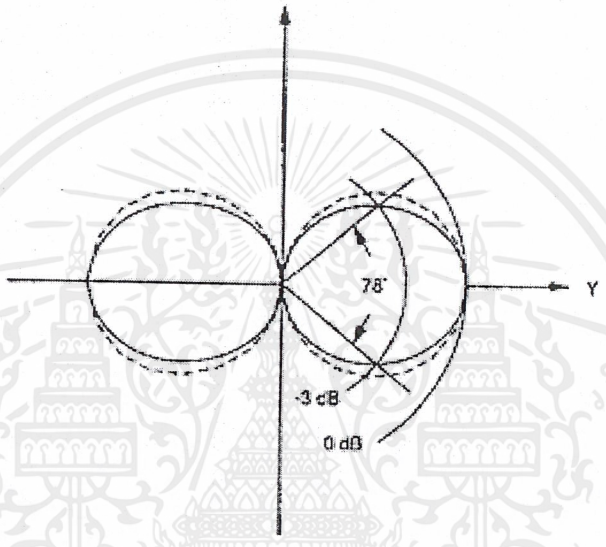
สำหรับสายอากาศไดโพลในทางปฏิบัติที่มีความยาว L ซึ่งได้ใช้กันทั่วไปซึ่งจะมีขนาดความยาว $\lambda/2$, λ และ $3\lambda/2$ ค่า λ เป็นค่าความยาวคลื่นของสัญญาณ กระแสที่กระจายบนไดโพล $\lambda/2$ จะมีรูปร่างของสัญญาณเป็นรูปไซน์ครึ่งเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยกระแสนี้จะมีค่าสูงสุดที่จุดกึ่งกลางและมีค่าศูนย์ที่จุดปลายสุด



รูปที่ 2.14 การกระจายของกระแสในไดโพล $\lambda/2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.15 ได้แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งจากสายอากาศไดโพลแบบ $\lambda/2$ ในระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) และในไดโพลอุดมคติโดยสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ มี HPBW 78 องศา ในระนาบสนามไฟฟ้า (E- Plane) และให้ผลที่แคบและบางกว่าลักษณะของสายอากาศไดโพลอุดมคติ ส่วนการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) ของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ จะมีลักษณะเป็นวงกลมดังรูป

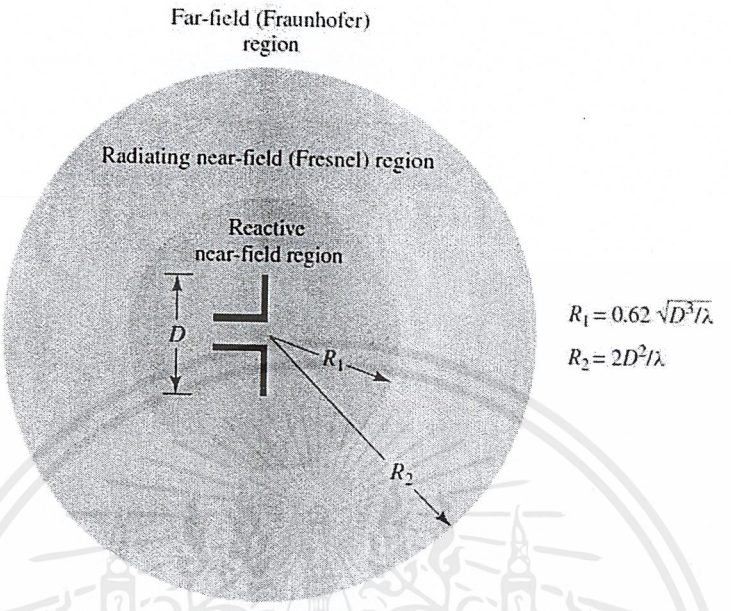


รูปที่ 2.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) ของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ (เส้นทึบ) และไดโพลอุดมคติ (เส้นประ) [3]

2.4 บริเวณต่างๆของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไปมักจะแบ่งบริเวณที่ล้อมสายอากาศเป็น 3 ส่วน คือสนามรีแอคทีฟระยะใกล้ (Reactive-near-field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating-near-field) และสนามระยะไกล (Far-field) แสดงดังรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ [2]

การจำลองแบบสนามไฟฟ้าของสายอากาศเพื่อที่จะต้องการหาลักษณะรูปแบบทิศทางของสนามไฟฟ้าบนสายอากาศแบบไมโครสตริปสำหรับระยะการแพร่กระจายสนามไฟฟ้าโดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะซึ่งได้แก่ ระยะแรกคือระยะสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจินตภาพ (Reactive-field) เป็นบริเวณที่อยู่รอบๆสายอากาศ ในระยะนี้ยังไม่มีการแพร่กระจายของคลื่นใน 3 ส่วนประกอบของพิกัดทรงกลม (R,θ,ϕ)

$$0 < R < \frac{\lambda}{2\pi} \tag{2.4}$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่น ระยะที่ 2 คือบริเวณแผ่พลังงานสนามใกล้ (Radiating-Near-field)

$$\frac{\lambda}{2\pi} < R < \frac{2D^2}{\lambda} \tag{2.5}$$

เมื่อ D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นทรงกลม 2 มิติของขนาดสายอากาศด้านที่กว้างที่สุดและระยะสุดท้ายคือบริเวณแผ่พลังงานสนามไกล (Radiating-far-field)

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \tag{2.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะนี้ทิศทางของสนามไฟฟ้ามีเฉพาะ 2 ส่วนประกอบของพิกัดทรงกลม (θ,ϕ) ในการวิเคราะห์ขอบเขตของสนามไฟฟ้าได้แสดงดังรูปที่ 2.16 บริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจินตภาพคือ $0 < R < R_1$ สนามไฟฟ้าบริเวณแผ่พลังงานสนามใกล้คือ $R_1 < R < R_2$ และสุดท้ายสนามไฟฟ้าบริเวณแผ่พลังงานสนามไกลคือ $R_2 < R$ การหาระยะบริเวณสนามไฟฟ้าเพื่อเป็นประโยชน์ในการหาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ออกแบบ

2.5 ความหนาแน่นของกำลังงานที่แพร่กระจาย

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการส่งข่าวสารผ่านตัวกลางถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับพลังงานและกำลังงานไฟฟ้า โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวได้แก่ พอร์ยติงเวคเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น (Instantaneous Poynting Vector) ซึ่งมีสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$W = E \times \mathrm{H} \tag{2.7}$$

เมื่อ W = พอร์ยติงเวคเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น $\left(W/m^2\right)$

E = ความเข้มสนามไฟฟ้าชั่วขณะเวลานั้น $\left(V/m\right)$

H = ความเข้มสนามแม่เหล็กชั่วขณะเวลานั้น $\left(A/m\right)$

เนื่องจากพอร์ยติงเวคเตอร์มีความหมายแสดงถึงความหนาแน่นของกำลังงาน ดังนั้นกำลังงานทั้งหมดที่พุ่งตัดผ่านพื้นผิวปิดจะสามารถหาได้โดยอินทิเกรทส่วนของพอร์ยติงเวคเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิวทั้งหมด ซึ่งเมื่อเขียนเป็นสมการจะได้

$$\mathrm{P} = \oiint_s W \cdot ds = \oiint_s W \cdot n da \tag{2.8}$$

เมื่อ P = กำลังงานทั้งหมดซึ่งขณะเวลานั้น

da = พื้นที่จิ๋วบนพื้นที่ปิด

2.6 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น

คำจำกัดความของคำว่าความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ในทิศทางที่กำหนดให้คือกำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เกี่ยวกับสนามระยะไกลความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นสามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่นและผลจากการกำลังสองของระยะทาง เขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$U = r^2 W_{rad} \tag{2.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $U =$ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (*W*/หน่วยมุมตัน)

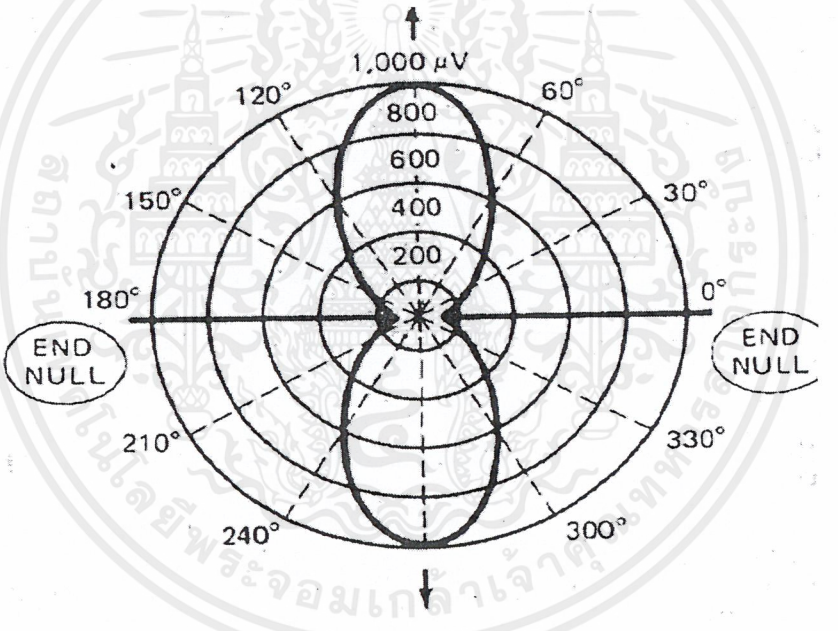
$W_{rad} =$ ความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น $\left(W/m^2\right)$

กำลังงานทั้งหมดนี้หาได้โดยการอินทิเกรทความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นตลอดมุมตัน 4π ทั้งหมด ซึ่งจะได้

$$\mathrm{P}rad = \oiint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U \sin\theta d\theta d\phi \qquad (2.10)$$

2.7 รูปแบบทิศทางของโพลาไรเซชั่น (Polar directivity pattern)

ทิศทางซึ่งสายอากาศจะรับหรือส่งที่ดีที่สุด แสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 รูปแบบทิศทางของโพลาไรเซชั่นคู่ครึ่งคลื่นของสายอากาศ [2]

รูปแบบคือโพลาไรเซชั่นคู่ครึ่งคลื่นติดตั้งตามแนวนอน อย่างไรก็ตามผลตอบสนองสายอากาศแนวตั้งจะเท่ากันในทุกทิศทางในระบบแนวนอน

กราฟแสดงความแรงของสัญญาณในพิกัดโพลาไรเซชั่นสำหรับขนาดและทิศทาง มุมจะแสดงถึงทิศทางและความยาวของวงรัศมี คือ จำนวนของแรงดันสัญญาณ รูปแบบของสายอากาศส่งแสดงทิศทางต่างๆ ที่สายอากาศแผ่กระจายสัญญาณส่วนใหญ่ รูปแบบของสายอากาศรับแสดงทิศทาง

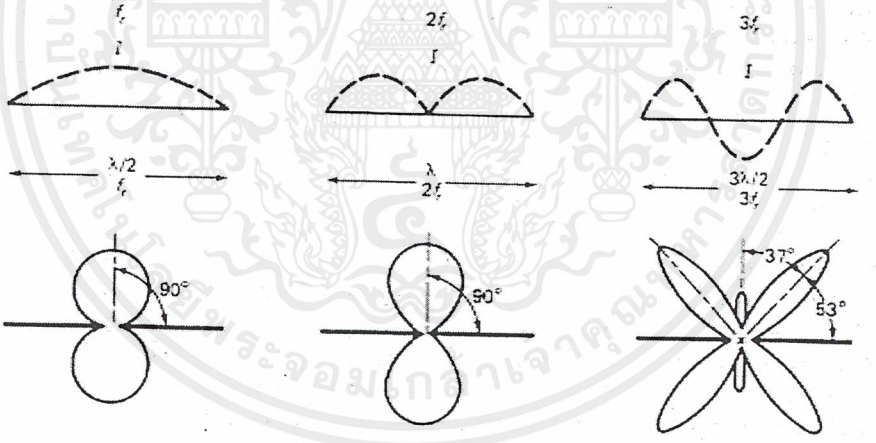
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างๆ ที่สัญญาณส่วนใหญ่ถูกเหนี่ยวนำ การหมุนสายอากาศเพื่อให้ได้สัญญาณที่ดีที่สุดเรียกว่าการวางหรือหันให้ถูกทิศทาง โดยหันไปทางตะวันออก

โพลาไรเซชั่นคู่ครึ่งคลื่นความถี่รีโซแนนซ์พื้นฐานจะมี 2 กลีบ (Lobe) แสดงในรูปที่ 2.17 สายอากาศรับได้ดีจากทิศทางด้านข้างที่กว้างก็คือ ด้านหน้าและด้านหลังกับสัญญาณเลิกที่ปลายที่เครื่องส่งโพลาไรเซชั่นคู่ที่ข้ามกันหลายๆ คู่ สามารถแผ่กระจายในทุกทิศทาง

2.8 สายอากาศฮาร์มอนิก (Harmonic antennas)

คือ สายอากาศซึ่งสามารถใช้ความถี่ฮาร์มอนิกของเรโซแนนซ์ครึ่งคลื่นพื้นฐาน อย่างไรก็ตามรูปแบบทิศทางจะเลื่อนไปเป็นจำนวนคี่คูณความถี่รีโซแนนซ์ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.18 โพลาไรเซชั่นคู่ครึ่งคลื่น ในรูปที่ 2.18 (ก) จะมีรูปแบบธรรมดาเหมือนเลข 8 ที่ความยาวเดียวกันของความถี่ 2 เท่า หรือ 2f รูปที่ 2.18 (ข) จะเป็นโพลาไรเซชั่นคู่เต็มคลื่น ซึ่งจะมีผลตอบสนองเหมือนกัน แต่จะมีความกว้างของกลีบมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโพลาไรเซชั่นคู่ครึ่งคลื่น เช่นกันจึงมีสัญญาณมากกว่าโพลาไรเซชั่นคู่ครึ่งคลื่น เพราะว่ามีตัวนำที่ใช้มากกว่า สุดท้ายความถี่ฮาร์มอนิกที่ 3 หรือ 3f รูปแบบทิศทางจะแยกในด้านข้างกลีบ แสดงในรูปที่ 2.18 (ค) สายอากาศจะรับหรือส่งได้น้อยในทิศทางด้านข้างที่กว้างแต่จะได้ผลดีที่มุม 37°



(ก) รูปเลข 8 ของเรโซแนนซ์ครึ่งคลื่นพื้นฐาน
(ข) เต็มคลื่นที่ฮาร์มอนิกที่ 2
(ค) กลีบแยกเพื่อเปลี่ยนรูปแบบทิศทางที่ฮาร์มอนิกที่ 3 ที่ความยาว $3\lambda/2$

รูปที่ 2.18 รูปแบบทิศทางของโพลาไรเซชั่นคู่ที่ป้อนสัญญาณตรงกลางที่ความถี่ฮาร์มอนิกพื้นฐาน [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 คุณสมบัติของสายอากาศ (Antenna characteristics)

การเลือกชนิดของสายอากาศต่าง ๆ เพื่อใช้งานกับความถี่ใช้งาน ความถี่ที่สูงกว่า ตัวนำสายอากาศที่มีความยาวพอเหมาะ ไม่ยาวจนเกินไป สายอากาศสามารถเรโซแนนซ์หรือไม่รีโซแนนซ์ สายอากาศรีโซแนนซ์จะมีความยาวเฉพาะเจาะจงสำหรับความถี่ใช้งาน โดยเฉพาะแถบความถี่สูงมาก (VHF) 30 ถึง 300 MHz จะใช้สายอากาศครึ่งคลื่น (Half-wave) ในทางปฏิบัติสายอากาศของโทรทัศน์ คือ ตัวอย่างของโพลาไรเซชั่นคู่ครึ่งคลื่น (Half-wave dipole) มีความยาวประมาณ 240 เซนติเมตร เช่นนั้น สายอากาศนี้ใช้สำหรับโทรทัศน์และแถบความถี่วิทยุเอฟเอ็ม (FM)

โดยทั่วๆ ไป สายอากาศที่มีความยาวมากจะมีพลังงานมากที่จะแผ่กระจายสำหรับเครื่องส่งหรือรับสัญญาณสำหรับเครื่องรับ ความยาวเรโซแนนซ์สายอากาศ อย่างไรก็ตามก็ต้องใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

2.10 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

จากคำอธิบายเบื้องต้นเกี่ยวกับการแพร่กระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในสายอากาศในตอนแรกนั้นได้ระบุว่า แรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟ(หรือในอีกแง่คือ กระแสมีค่ามากที่สุด)

แต่ถ้าเจาะลึกไปมากกว่านี้ กล่าวได้ว่าระดับแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยที่สุด(เข้าใกล้ศูนย์) เพราะถ้าค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์จริง แสดงถึงวงจรนั้นไม่มีค่าความต้านทานเลยแม้แต่น้อย นั่นคือจะไม่มีพลังงานแพร่กระจายมาจากสายอากาศได้ เพราะวงจรที่ไม่มีความต้านทานอยู่จะเป็นเพียงการส่งผ่านพลังงานเท่านั้น

สายอากาศ เราสามารถ เราสามารถเปรียบเป็นวงจรไฟฟ้าได้ ที่มีคุณสมบัติคือต้องใช้พลังงานดังนั้นกระแสที่ไหลอยู่ภายในสายอากาศควรถูกจ่ายด้วยระดับแรงดันไฟฟ้าที่ค่าหนึ่ง

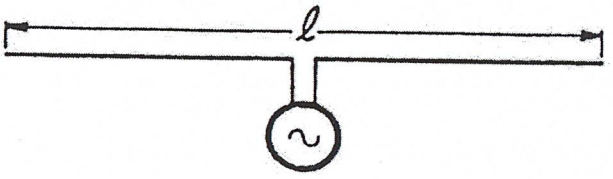
คิดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศอย่างง่าย คือ เท่ากับระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายผ่านโพลาไรเซชั่นต่อหารด้วยปริมาณกระแสที่ไหลผ่านโพลาไรเซชั่นเช่นกัน

โดยถ้ากระแสและแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะเฟสเหมือนกันทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับค่าความต้านทานจัดเป็นกรณีที่สายอากาศรีโซแนนซ์

แต่กรณีที่กระแสและแรงดันไฟฟ้ามีเฟสต่างกัน ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่ารีแอ็กแตนซ์เพิ่มขึ้นมาจากค่าความต้านทานด้วย ทำให้สายอากาศไม่รีโซแนนซ์

ลองสมมุติให้ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่นำบริเวณจุดกึ่งกลางของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แสดงสายอากาศที่มีจุดฟีด (Feed point) ตรงกลาง

หมายเหตุ คำว่า ฟีด (Feed) หมายถึง การจ่ายสัญญาณอินพุทให้วงจร, สายนำสัญญาณหรือสายอากาศ

ส่วนฟีดเดอร์ (Feeder) หมายถึง สายนำสัญญาณที่ใช้ระหว่างเครื่องส่งกับสายอากาศ

การเลือกจุดต่อแหล่งจ่ายสัญญาณต่างกัน จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์แตกต่างกันด้วย แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้ากับกระแส (คือค่าอิมพีแดนซ์) มีค่าแตกต่างกันตามจุดต่างๆ บนสายอากาศ ดังนั้นเพื่อป้อนกันมิให้สับสนมาก เราจึงเลือกจุดกึ่งกลางของสายอากาศเป็นการอ้างอิง

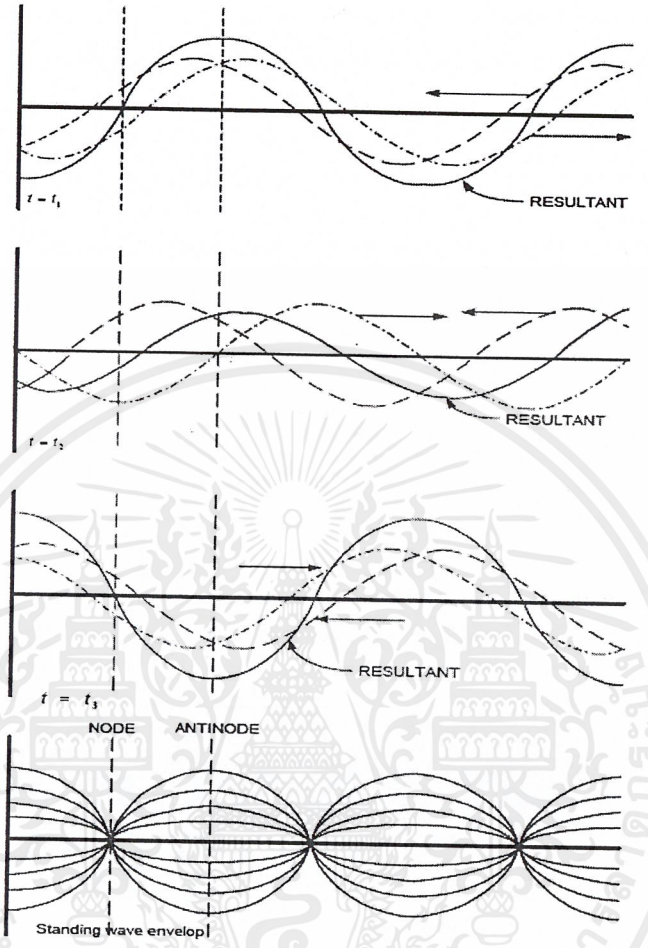
2.11 คุณลักษณะและพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ

สายอากาศชนิดต่างๆ ที่มีการใช้งานอยู่ทั่วไปมีคุณลักษณะและพารามิเตอร์ต่าง ๆ [9],[10] ที่จำเป็นต้องพิจารณาประกอบการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศเพื่อช่วยในการตัดสินใจและประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานต่าง ๆ มากมาย โดยมีส่วนสำคัญ ดังนี้

2.11.1 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage standing wave ratio)

ถ้าคลื่นที่มีแอมปลิจูดและความถี่เท่ากันสองคลื่นเคลื่อนที่ในสายส่งในทิศทางตรงกันข้ามคลื่นทั้งสองจะรวมตัวและหักล้างซึ่งกันและกันสลับกันไป ผลที่ได้จะเป็นคลื่นนิ่ง (Standing wave) รูปที่ 2.20 แสดงให้เห็นว่าคลื่นทั้งสองคลื่นรวมตัวเป็นคลื่นนิ่งได้อย่างไร สังเกตว่าจุดที่เกิดแรงดันสูงสุด และแรงดันต่ำสุดอยู่ที่เดิมเมื่อเทียบกับเวลา จุดที่คลื่นผ่านศูนย์ (Zero crossing) เรียกว่าปม (Node) และตำแหน่งที่เกิดแอมปลิจูดสูงสุดเรียกว่า ยอดโย่ง (Antinode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 การเกิดรูปคลื่นนิ่ง [2]

อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage standing wave ratio เขียนย่อว่า VSWR) ในสายส่งที่มีการสูญเสียพลังงานน้อยมีคำจำกัดความเป็นอัตราส่วนของแรงดันที่มากที่สุดต่อแรงดันที่น้อยที่สุด เมื่อเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์

$$VSWR = \frac{|V_{max}|}{|V_{min}|} \tag{2.11}$$

เมื่อ V_{max} = แรงดันที่มากที่สุด

V_{min} = แรงดันที่น้อยที่สุด

เราสามารถให้คำจำกัดความ VSWR ให้เป็นค่าที่จุดๆ หนึ่งในสายโดยใช้ความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์การสะท้อนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \tag{2.12}$$

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_O}{Z_L + Z_O} \tag{2.13}$$

Γ = สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน (Voltage reflection coefficients) สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน ยังสามารถหาได้จากอัตราส่วนผลต่างและผลรวมระหว่างโหลดกับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

V_r = แรงดันสะท้อนกลับ

V_i = แรงดันตกกระทบ

Z_L = โหลดอิมพีแดนซ์

Z_O = อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

จะพบว่า ถ้า $Z_L = Z_0$ จะทำให้ $\Gamma = 0$ นั่นคือจะไม่เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นซึ่งส่งผลให้ค่า VSWR = 1 ซึ่งก็คือการแมตช์ซึ่งกันระหว่างสายส่งกับสายอากาศนั่นเอง แต่ถ้า $Z_L \neq Z_0$ จะทำให้ $\Gamma \neq 0$ ก็จะส่งผลทำให้ค่า VSWR $\neq 1$ นั่นคือจะเกิดการไม่แมตช์กันระหว่างสายส่งกับสายอากาศ ซึ่งถ้าค่า VSWR มีค่ามากๆ ก็อาจส่งผลกระทบต่อเครื่องส่งทำให้เครื่องส่งเกิดความเสียหายได้ สำหรับค่า VSWR ที่สามารถยอมรับได้ในทางปฏิบัตินั้นจะต้องมีค่าไม่เกิน 1.5

2.11.2 การสูญเสียย้อนกลับ (Return loss)

การสูญเสียเนื่องย้อนกลับของสายอากาศแสดงค่ากำลังที่สูญเสียที่โหลด เมื่ออิมพีแดนซ์ของสายส่งและสายอากาศไม่แมตช์กัน การสูญเสียย้อนกลับมีความสัมพันธ์กับ VSWR ซึ่งเป็นการแสดงการแมตช์อิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งกับสายอากาศตามสมการ

$$S_{11} = -20\log_{10}|\Gamma| \quad \text{(dB)} \tag{2.14}$$

สำหรับการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่สมบูรณ์ระหว่างสายส่งและสายอากาศ เมื่อ $\Gamma = 0$ ค่าความสูญเสียย้อนกลับเป็นอนันต์ แสดงว่าไม่มีกำลังงานสะท้อนกลับ ในทำนองเดียวกัน เมื่อ $\Gamma = 1$ ค่าความสูญเสียย้อนกลับจะเป็น 0 dB ซึ่งแสดงว่ากำลังงานสะท้อนกลับหมด

2.11.3 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna efficiency)

ประสิทธิภาพของสายอากาศเป็นพารามิเตอร์ที่รวมประสิทธิภาพการสูญเสียที่สายอากาศและในโครงสร้างของสายอากาศ การสูญเสียต่าง ๆ หาได้จาก

- การสะท้อนกลับเนื่องจากการไม่แมตช์กันระหว่างสายส่งกับสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การสูญเสียจากตัวนำและฉนวน

ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$e_t = e_r e_c e_d \tag{2.15}$$

เมื่อ e_t = ประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ

$e_r = \left(1 - \left|\Gamma^2\right|\right)$ ประสิทธิภาพการสะท้อนกลับเนื่องจากการไม่แมตช์กัน

e_c = ประสิทธิภาพของตัวนำ

e_d = ประสิทธิภาพของฉนวน (Dielectric)

โดยทั่วไป e_c และ e_d จะรวมเป็นตัวเดียวกันจะได้

$$e_{cd} = e_c e_d = \frac{R_r}{R_r + R_L} \tag{2.16}$$

เมื่อ R_r = ความต้านทานจากการแผ่พลังงานคลื่นออกไป

R_L = ความต้านทานที่โหลด

2.11.4 ประสิทธิภาพของบีม (Beam efficiency : BE)

พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่จะใช้ในการตัดสินว่าสายอากาศมีรูปแบบของการส่งหรือรับคลื่นดีเพียงใดนั้น ได้แก่ประสิทธิภาพของบีม สำหรับสายอากาศซึ่งมีโลบหลักอยู่ในทิศทางแกน Z $(\theta = 0)$ แสดงดังรูปที่ 2.10 ประสิทธิภาพของบีมจะกำหนดได้ดังนี้คือ

$$\text{BE} = \frac{\text{กำลังที่ส่ง (หรือรับ) ภายในกรวยซึ่งทำมุม } \theta_1}{\text{กำลังงานที่ส่ง (หรือรับ) ทั้งหมดด้วยสายอากาศนั้น}} \text{ (ไม่มีหน่วย)} \tag{2.17}$$

เมื่อ θ_1 เป็นมุมที่มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของมุมของกรวยที่ต้องการจะหาเปอร์เซ็นต์ของกำลังงานทั้งหมดในนั้น สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\text{BE} = \frac{\int_0^{2\pi}\int_0^{\theta_1} U(\theta,\phi)\sin\theta\, d\theta\, d\phi}{\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} U(\theta,\phi)\sin\theta\, d\theta\, d\phi} \tag{2.18}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ θ_1 เป็นมุมที่เกิดนัล (Null) คือจุดตำแหน่งที่กำลังมีค่าเป็นศูนย์เป็นคู่แรก ดังนั้นประสิทธิภาพของบีมจะเป็นปริมาณที่แสดงถึงอัตราส่วนของจำนวนกำลังงานในโลบหลักต่อกำลังงานที่มีทั้งหมด

2.11.5 ทิศทาง (Directivity: D_0)

เราจำเป็นจะต้องรู้จักไดเรคทีฟเกน (Directive gain) ไว้ก่อน ไดเรคทีฟเกนในทิศทางที่กำหนด คืออัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ไดเรคติวิตีคือค่าของไดเรคทีฟเกน ในทิศทางที่มีค่ามากที่สุด หรือกล่าวง่ายๆ ว่าไดเรคติวิตีของต้นกำเนิด (สายอากาศ) ที่ไม่เป็นไอโซโทรปิกคืออัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุด ต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_g = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{\Pr ad} \tag{2.19}$$

$$D_0 = \frac{U\max}{U_0} = \frac{4\pi U\max}{\Pr ad} \tag{2.20}$$

เมื่อ D_g = ไดเรคทีฟเกน (ไม่มีหน่วย)

D_0 = ทิศทาง (ไม่มีหน่วย)

U = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (วัตต์/มุมตัน)

$U_{\max}$ = ค่าสูงสุดของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (วัตต์/มุมตัน)

U_0 = ความเข้มการแพร่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (วัตต์/มุมตัน)

$\Pr ad$ = กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (วัตต์)

จากสมการข้างต้น เราจะทราบว่า ไดเรคทีฟเกนและไดเรคติวิตีของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สมีค่าเป็นหนึ่ง ทั้งนี้เพราะว่า U , $U_{\max}$ และ U_0 ต่างมีค่าเท่ากัน

2.11.6 อัตราขยายของสายอากาศ (Antenna gain)

อัตราขยายของสายอากาศเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากไดเรคติวิตี โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่ไดเรคติวิตีแสดงคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้นการคิดอัตราขยายของสายอากาศ วัดเทียบกับสายอากาศอ้างอิง โดยอัตราขยายของสายอากาศส่ง คือกำลังสองของอัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามตามทิศที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มสนามที่จุดเดียวกันของสายอากาศอ้างอิง หรือแสดงในรูปของอัตราส่วนของค่าพลังงานที่ต้องใช้ในการส่งของสายอากาศทั้งสอง เพื่อให้เกิดความเข้มสนามขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากัน (ณ จุดเดียวกัน) ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุดหรืออัตราขยายของสายอากาศรับ คืออัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มการแผ่พลังงานของสายอากาศทดสอบกับสายอากาศอ้างอิง ณ จุดตั้งสายอากาศที่เดียวกัน

การใช้สายอากาศอ้างอิงมักเป็นแบบไดโพลขนาด $\lambda/2$ หรือแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) ซึ่งมีลักษณะพิเศษ คือ กระจายคลื่นได้รอบตัวทุกทิศในปริมาณที่เท่ากัน อัตราขยายกำลัง (Power gain) ของสายอากาศ ในทิศทางที่กำหนดให้นั้นมีค่าเท่ากับ 4π คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากโพลาไรเซชั่นต่อของเครื่องส่งเมื่อไม่กำหนดทิศทางไว้ โดยทั่วไปคิดอัตราขยายกำลังในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด

$$\text{Gain} = \frac{4\pi U_{(\theta,\phi)}}{P_{in}} \tag{2.21}$$

โดยทั่วไป อัตราขยายสัมพัทธ์เป็นอัตราส่วนของอัตราขยายกำลังในทิศทางที่กำหนดให้ต่ออัตราขยายกำลังของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้นโดยกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศทั้งสองนั้นต้องเท่ากัน สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบเป็นสายอากาศไดโพล สายอากาศปากแตรหรือสายอากาศอื่น ๆ ซึ่งคำนวณอัตราขยายได้ง่ายหรือรู้ค่าอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบเป็นไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้นจึงได้

$$G_g = \frac{4\pi U(\theta,\phi)}{P_{in}} \tag{2.22}$$

เมื่อ P_{in} คือกำลังงานที่ป้อนให้กับไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย

กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (P_{rad}) สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ (P_{in}) ดังสมการ

$$P_{rad} = e_t P_{in} \tag{2.23}$$

เมื่อ e_t คือประสิทธิผลรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย) ทำให้สมการข้างต้นมีความสัมพันธ์กันตามสมการ

$$G_g(\theta,\phi) = \frac{[4\pi U(\theta,\phi)]}{P_{rad}} \tag{2.24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีความสัมพันธ์กับอัตราขยายไดเรคทีฟ ตามสมการ

$$G_g(\theta,\phi) = e_t D_g(\theta,\phi) \tag{2.25}$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าสูงสุดของอัตราขยายจะสัมพันธ์กับไดเรคติวิตี ดังสมการ

$$\begin{aligned} G_0 &= G_g(\theta,\phi)\big|_{\max} \\ &= e_t D_g(\theta,\phi)\big|_{\max} \\ &= e_t D_0 \end{aligned} \tag{2.26}$$

ในทางปฏิบัติอัตราขยายหมายถึงอัตราขยายกำลังที่มีค่าสูงสุดแสดงดังสมการ

$$G_0(dB) = 10\log_{10}[e_t D_0] \tag{2.27}$$

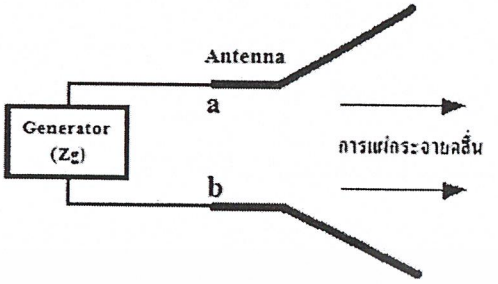
2.11.7 อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input impedance)

อิมพีแดนซ์อินพุตของสายอากาศคือเป็นค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งเกิดขึ้นที่โพลาไรเซชั่นด้านเข้าของสายอากาศ หรือเป็นอัตราส่วนของแรงดันกับกระแสที่โพลาไรเซชั่นของสายอากาศ หรือเป็นอัตราส่วนขององค์ประกอบที่เหมาะสมของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่จุดหนึ่งๆ (ซึ่งในหน่วยนี้เราจะสนใจค่าอิมพิแดนซ์อินพุตที่โพลาไรเซชั่นด้านเข้าของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.21) ในที่นี้คือ a-b อัตราส่วนของแรงดันกับกระแสที่โพลาไรเซชั่นนี้ขณะไม่มีโหลดใดๆ ต่ออยู่จะทำให้เกิดค่าอิมพิแดนซ์เท่ากับ

$$Z_A = R_A + jX_A \tag{2.28}$$

โดยที่ Z_A = ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่โพลาไรเซชั่น a-b (โอห์ม)
R_A = ค่าความต้านทานของสายอากาศที่โพลาไรเซชั่น a-b (โอห์ม)
X_A = ค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศที่โพลาไรเซชั่น a-b (โอห์ม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 สายอากาศ [5]

ปกติอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความถี่ และจะแมตช์กับสายส่งเฉพาะในช่วงความถี่ช่วงหนึ่งๆเท่านั้น นอกจากนี้อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศยังขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ต่างๆอีก ได้แก่ รูปทรง วิธีการป้อนสัญญาณ และสิ่งแวดล้อมข้างเคียง เนื่องจากคำนวณได้ยากจึงมักจะพบว่า ส่วนใหญ่จะหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ได้จากการทดลอง

ในการออกแบบสายอากาศนั้นต้องคำนึงถึงค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ด้วย เนื่องจากสายส่งและตัว SMA Connector ที่ใช้มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ดังนั้นเราควรออกแบบค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้มีค่าเท่ากับ 50 โอห์มด้วย

2.11.8 แบนด์วิดธ์ (Bandwidth)

จัดเป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศทำงานได้น่าพอใจ ซึ่งในหนังสือเล่มนี้พิจารณาโลบหลักของรูปแบบการแพร่คลื่น ซึ่งคิดจากกราฟว่าแถบความถี่คือ ช่วงความถี่ที่ค่าพลังงานของสายอากาศที่แพร่ออกอากาศในทิศทางโลบหลักมีค่าไม่ต่ำกว่า 3 dB แบนด์วิดธ์ของสายอากาศเป็นช่วงของความถี่ที่สามารถนำไปใช้งานได้ดี ซึ่งช่วงความถี่ถูกกำหนดโดย VSWR $\cong$ 2 หรือพิจารณาจากการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ระดับ -10 dB ดังสมการ

$$BW_{narrowband}\left(\%\right) \doteq \frac{f_u - f_l}{f_c} \times 100 \tag{2.29}$$

$$BW_{broadband}\left(\%\right) = \frac{f_u}{f_l} \times 100 \tag{2.30}$$

เมื่อ BW คือ แบนด์วิดธ์ของสายอากาศ

f_u คือ ขอบความถี่สูงของย่านความถี่

f_l คือ ขอบความถี่ต่ำของย่านความถี่

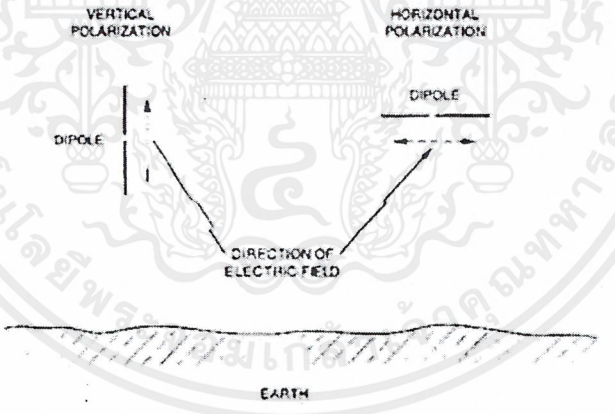
f_c คือ ความถี่กลางของย่านความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 การโพลาไรซ์ของสายอากาศ (Antenna polarization)

การโพลาไรซ์ของสายอากาศจะอธิบายทิศทางของสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศซึ่งถูกส่งออกไปโดยตัวสายอากาศในสนามระยะไกลจริงๆ แล้วก็คือ ใช้ในการอธิบายทิศทางซึ่งมีความเข้มของสนามสูงสุด สายอากาศส่วนใหญ่จะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น (Linear polarization) นั่นคือในหนึ่งรอบ (Cycle) การขจัดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงในอากาศว่าง สายอากาศดังกล่าวจะถูกแบ่งออกเป็นการโพลาไรซ์แนวตั้ง (Vertical polarization) และการโพลาไรซ์แนวนอน (Horizontal polarization) นอกจากนี้ยังมีการโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular) และแบบรูปวงรี (Elliptical)

บ่อยครั้งที่การโพลาไรซ์ของสายอากาศ จะอ้างอิงจากรูปทรงของตัวมันเอง เช่น ในกรณีของสายอากาศแบบเส้นลวด ซึ่งอาจจะประกอบด้วยองค์ประกอบเพียงตัวเดียว หรือหลายตัววางขนานกัน (เช่นสายอากาศไดโพลและยากิ) เราสามารถที่จะสมมุติให้สนามไฟฟ้าซึ่งเป็นโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นให้ขนานไปกับองค์ประกอบของตัวสายอากาศ ซึ่งสายอากาศบางชนิดมีโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นเหมือนกัน แต่ไม่สามารถจะใช้รูปทรงของมันมาทำการทำนายถึงการโพลาไรซ์ของมันได้ได้แก่ สายอากาศปากแตร (Horn) แบบบ่วง (Loop) และแบบร่อง (Slot) เป็นต้น



รูปที่ 2.22 การโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล [2]

เพื่อให้การรับสัญญาณทำได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ สิ่งสำคัญก็คือสายอากาศที่ทำหน้าที่รับสัญญาณจะต้องมีการโพลาไรซ์แบบเดียวกันกับสัญญาณที่ส่งมา และเมื่อเกิดการสูญเสียสัญญาณอันเนื่องมาจากการจัดวางการโพลาไรซ์ไม่ถูกต้อง (เช่น สัญญาณที่รับได้เป็นของการโพลาไรซ์ทางแนวตั้ง แต่สายอากาศที่ใช้มีการจัดการโพลาไรเซชั่นทางแนวนอน) เราจะเรียกว่าการแยกการโพลาไรซ์ไขว้ (Cross–polarization isolation)

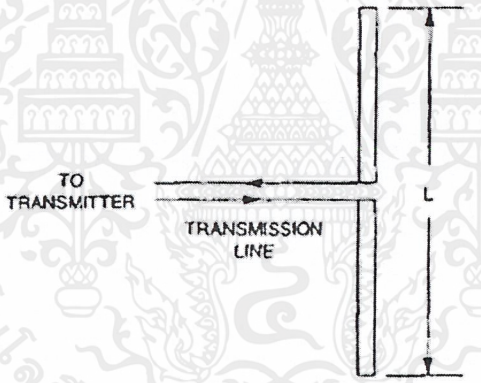
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 สายอากาศไดโพล (Dipole antenna)

2.13.1 สายอากาศไดโพลและไดโพลอุดมคติ

สายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศอย่างง่าย ที่มีองค์ประกอบเป็นแท่งโลหะ 2 แท่ง วางเป็นแนวเส้นตรงที่มีความยาว L ดังรูปที่ 2.23 โดยจุดกึ่งกลางของตัวไดโพลจะต่อเข้ากับเครื่องส่ง โดยใช้สายส่งเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อเครื่องส่งจะจ่ายสัญญาณเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับไปยังสายอากาศ กระแสของสัญญาณนี้จะไหลไปยังโพลาไรเซชั่นหนึ่งของไดโพลและไหลกลับมายังอีกโพลาไรเซชั่นหนึ่งของไดโพลดังแสดงในรูปที่ 2.23 ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของกระแสที่ส่งไปยังโพลาไรเซชั่นแรกของไดโพล

การกระจายของกระแส (Current distribution) จะแสดงให้เห็นขนาดแมกนิจูด (Magnitude) ของสัญญาณกระแสสลับที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของสายอากาศไดโพลจะมีค่าไม่เท่ากันโดยจะเป็นศูนย์ที่ปลายทั้งสอง แต่จะมีค่าสูงสุดที่จุดกึ่งกลางหรือที่จุดอื่นๆ บนตัวไดโพล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวของไดโพลและความถี่ของสัญญาณที่มาจากเครื่องส่ง

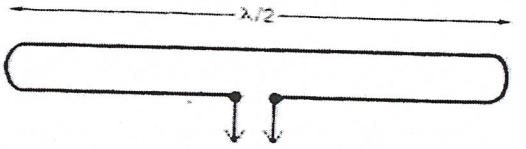


รูปที่ 2.23 สายอากาศไดโพล [2]

ไดโพลอุดมคติ (Ideal dipole) เป็นสายอากาศสมมติซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษาสายอากาศชนิดอื่นๆ สามารถพิจารณาให้เป็นองค์ประกอบเล็กๆ ของความยาวไดโพล (Infinitesimal dipole) ที่มีการแจกแจงกระแสที่มีลักษณะที่เท่ากันตลอด คุณลักษณะทางทฤษฎีของไดโพลอุดมคติจะประมาณให้มีค่าทางไฟฟ้าเท่ากับสายอากาศไดโพลที่มีขนาดเล็กๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14 สายอากาศโพลาไรเซชั่นคู่พับ (Folder dipole antenna)



รูปที่ 2.24 สายอากาศโพลาไรเซชั่นคู่พับ

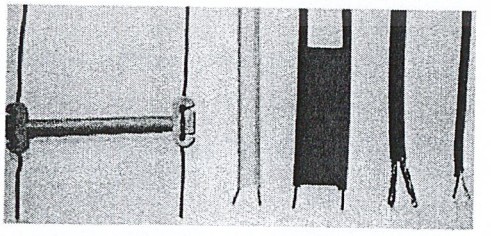
สายอากาศโพลาไรเซชั่นคู่พับเป็นสายอากาศพื้นฐานที่ประกอบด้วย สายอากาศครึ่งคลื่น (half-wavelength) จำนวน 2 ชิ้นมาต่อเข้าด้วยกัน (Shorted) และมีการป้อนสัญญาณที่จุดกึ่งกลางของตัวนำ 1 ด้าน

ส่วนมากตัวนำที่ใช้เป็นโพลาไรเซชั่นคู่ตรง แต่จะล่างจะพับกลับมาพันเศษ 1 ส่วน 4 คลื่น โพลาไรเซชั่นคู่ที่พบยังคงเป็นครึ่งคลื่น คุณสมบัติของสายอากาศมีความสำคัญที่ยังคงเป็นโพลาไรเซชั่นคู่ตรง ยกเว้นค่าความต้านทานคือ 4 x 72 = 288 Ω สายอากาศแบบนี้จะมีค่าอิมพีแดนซ์ประมาณ 300 โอห์ม ซึ่งจะให้กับสายนำสัญญาณแบบพันเกลียวคู่ (Twin-lead) สายอากาศแบบนี้จะมีข้อดีคือแบนวิดท์กว้าง (Wide-bandwidth)

2.15 สายนำสัญญาณ (Transmission lines)

ในการรับส่งสัญญาณวิทยุนั้น สายนำสัญญาณก็มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าสายอากาศ เลยการจะเลือกใช้สายนำสัญญาณให้เหมาะสมกับงานนั้น ต้องศึกษาเรื่องของสายนำสัญญาณให้ดีก่อน สายนำสัญญาณสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

2.15.1 บัลลานซ์ไลน์ (Balance line) คือสายนำสัญญาณที่มีตัวนำ 2 เส้น ที่มีลักษณะเหมือนกันนำมาต่อขนานกัน โดยมีตัวกลางกั้นไว้อาจจะเป็นอากาศก็ได้ เช่น สายอากาศเปลือย (Open wire) จะมีฉนวนยึดสายเอาไว้เป็นระยะเพื่อความแข็งแรงและคงลักษณะการขนานกันเอาไว้



รูปที่ 2.25 สายนำสัญญาณแบบบัลลานซ์ไลน์ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณแบบบัลลานซ์ไลน์

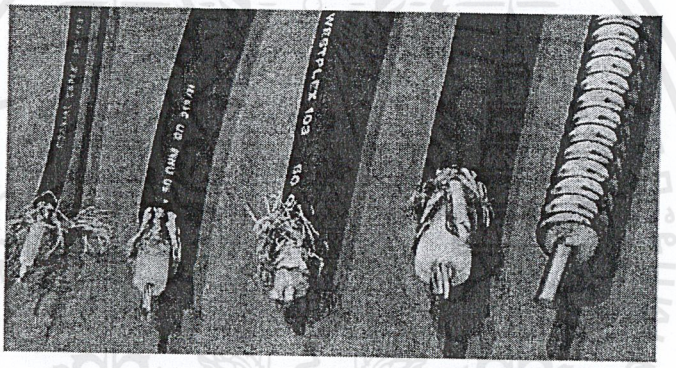
$$Z_0 = 276 \log_{10} \frac{2S}{d} \quad (2.31)$$

เมื่อ Z_o = ค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณแบบบัลลานซ์ไลน์

S = ระยะห่างระหว่างตัวนำทั้งสอง (วัดจากแกนกลางของตัวนำ)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำ (ใช้หน่วยเดียวกับ S)

2.15.2 อันบัลลานซ์ไลน์ (Unbalance line) คือสายนำสัญญาณที่มีตัวนำ 2 เส้น มีลักษณะต่างกันหรือที่เรารู้จักกันดีในนามสายโคแอคเชียล (Coaxial cable) สายนำสัญญาณแบบนี้ถูกสร้างขึ้นมาทดแทนสายสัญญาณแบบบัลลานซ์ไลน์ เพื่อลดการแพร่กระจายคลื่นออกจากสายนำสัญญาณและป้องกันสัญญาณรบกวนได้ดีกว่าสามารถติดตั้งใกล้ๆ โลหะได้



รูปที่ 2.26 สายนำสัญญาณแบบอันบัลลานซ์ไลน์ [4]

สูตรการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณแบบอันบัลลานซ์ไลน์

$$Z_0 = 138 \log_{10}\left(\frac{b}{a}\right) \quad (2.32)$$

เมื่อ Z_o = ค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณแบบอันบัลลานซ์ไลน์

b = เส้นผ่านศูนย์กลางของชีลด์

a = เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำที่อยู่ตรงกลาง (ใช้หน่วยเดียวกับ b)

ในการติดตั้งสายแบบบัลลานซ์ไลน์ เราต้องป้องกันไม่ให้ความชื้นเกิดขึ้นบนสาย เพราะความชื้นทำให้ค่าไดอิเล็คตริกเปลี่ยนแปลงไป จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายเปลี่ยนแปลงไปด้วย นอกจากนี้การติดตั้งสายนำสัญญาณต้องห่างจากตัวนำหรือว่าโลหะอื่นๆ โดยระยะห่างจากตัวนำอื่นประมาณ 2-3 เท่าของระยะห่างระหว่างตัวนำทั้งสอง สำหรับสายโคแอคเชียลนั้นจะมีชีลด์ (Shield) ต่อลงกราวด์ ฉะนั้นการติดตั้งจึงไม่ค่อยมีปัญหาติดตั้งใกล้โลหะได้ ปัญหาเรื่องความชื้นน้อยกว่าเว้นแต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นจะเข้าไปในสาย สรุปได้ว่าสายแบบบัลลานซ์ไลน์จะมีการสูญเสียน้อยแต่สายโคแอคเชียล ซึ่งจะติดตั้งง่ายกว่า

2.15.3 ค่าความเร็วของคลื่นวิทยุในสายนำสัญญาณ (Velocity factor) ในสายนำสัญญาณนั้น คลื่นวิทยุเดินทางได้ช้ากว่าในบรรยากาศและช้ากว่าความเร็วของแสง ซึ่งค่าความเร็วของคลื่นในสายนำสัญญาณนี้สัมพันธ์กับค่าคงที่ของวัสดุที่นำมาทำเป็นค่าคงที่ไดอิเล็คตริก (Dielectric constant) โดยทั่วไปแล้วค่าความเร็วของคลื่นในสายเราเรียกว่า ตัวคูณความเร็วของสาย เช่น สายเบอร์ RG-58 A/U มีตัวคูณความเร็วเท่ากับ 0.66 ดังนั้นความเร็วของคลื่นในสายคือ 0.66X300 ล้านเมตร/วินาทีเท่ากับ 1.98 ล้านเมตร/วินาที ซึ่งรายละเอียดของสายนำสัญญาณเบอร์ต่างๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติสายโคแอกเชียลที่นิยมใช้งาน [4]

	ค่าอิมพีแดนซ์ (Ohm)	ตัวคูณความเร็ว (Velocity Factor)	ค่าความจุไฟฟ้า (pF/ฟุต)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (นิ้ว)	วัสดุที่ใช้ทำไดอิเล็กทริก	แรงดันใช้งานสูงสุด (Vrms)
RG - 6	75	0.75	18.6	0.266	Foam PE	400
RG - 8X	52	0.75	26	0.242	Foam PE	300
RG - 8	52	0.66	29.5	0.405	PE	4000
RG - 8 foam	50	0.80	25.4	0.405	Foam PE	1500
RG - 8A	52	0.66	29.5	0.405	PE	5000
RG - 9	51	0.66	30	0.42	PE	4000
RG - 9A	51	0.66	30	0.42	PE	4000
RG - 9B	50	0.66	30.8	0.42	PE	5000
RG - 11	75	0.66	20.6	0.405	PE	4000
RG - 11 foam	75	0.80	16.9	0.405	Foam PE	1600
RG - 11A	75	0.66	20.6	0.405	PE	5000
RG - 12	75	0.66	20.6	0.475	PE	4000
RG - 12A	75	0.66	20.6	0.475	PE	5000
RG -17	52	0.66	29.5	0.87	PE	11000
RG - 17A	52	0.66	29.5	0.87	PE	11000
RG - 55	53.5	0.66	28.5	0.216	PE	1900

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติสายโคแอกเชียลที่นิยมใช้งาน (ต่อ)

	ค่าอิมพีแดนซ์	ตัวคูณความเร็ว	ค่าความจุไฟฟ้า	เส้นผ่าศูนย์กลาง	วัสดุที่ใช้ทำไดอิเล็กทริก	แรงดันใช้งานสูงสุด
	(Ohm)	(Velocity Factor)	(pF/ฟุต)	(นิ้ว)		(Vrms)
RG - 55A	50	0.66	30.8	0.216	PE	1900
RG - 55B	53.5	0.66	28.5	0.216	PE	1900
RG - 58	53.5	0.66	28.5	0.195	PE	1900
RG - 58 foam	53.5	0.79	28.5	0.195	Foam PE	600
RG - 58A	53.5	0.66	28.5	0.195	PE	1900
RG - 58B	53.5	0.66	28.5	0.195	PE	1900
RG - 58C	50	0.66	30.8	0.195	PE	1900
RG - 59	73	0.66	21	0.242	PE	2300
RG - 59 foam	75	0.79	16.9	0.242	Foam PE	800
RG - 59A	73	0.66	21	0.242	PE	2300
RG - 62	93	0.86	13.5	0.242	Air Space PE	750
RG - 62A	93	0.86	13.5	0.242	Air Space PE	750
RG - 62B	93	0.86	13.5	0.242	Air Space PE	750
RG - 133A	95	0.66	16.2	0.405	PE	4000
RG - 141	50	0.70	29.4	0.19	PTFE	1900
RG - 141A	50	0.70	29.4	0.19	PTFE	1900
RG - 142	50	0.70	29.4	0.206	PTFE	1900
RG - 142A	50	0.70	29.4	0.206	PTFE	1900
RG - 142B	50	0.70	29.4	0.195	PTFE	1900
RG - 174	50	0.66	30.8	0.1	PE	1500
RG - 213	50	0.66	30.8	0.405	PE	5000
RG - 214	50	0.66	30.8	0.425	PE	5000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติสายโคแอกเชียลที่นิยมใช้งาน (ต่อ)

	ค่าอิมพีแดนซ์	ตัวคูณความเร็ว	ค่าความจุไฟฟ้า	เส้นผ่าศูนย์กลาง	วัสดุที่ใช้ทำไดอิเล็กทริก	แรงดันใช้งานสูงสุด
	(Ohm)	(Velocity Factor)	(pF/ฟุต)	(นิ้ว)		(Vrms)
RG - 215	50	0.66	30.8	0.475	PE	5000
RG - 216	75	0.66	20.6	0.425	PE	5000
RG - 223	50	0.66	30.8	0.212	PE	1900
9913 (Belden)	50	0.84	24	0.405	Air Space PE	N/A
9914 (Belden)	50	0.78	26	0.405	Foam PE	N/A

#หมายเหตุ ความหมายของตัวย่อของสารที่ทำเป็นไดอิเล็กทริก

PE โพลีเอททีลีน อุณหภูมิใช้งาน (C) -65 ถึง +80

Foam PE โฟมโพลีเอททีลีน อุณหภูมิใช้งาน (C) -65 ถึง +80

PTFE เทฟล่อน อุณหภูมิใช้งาน (C) -250 ถึง +25

สูตรการคำนวณค่าความเร็วของคลื่นวิทยุในสายมีหน่วยเป็นฟุต เมื่อสายนำสัญญาณนำมาใช้ปกติตัวคูณความเร็วของสายแทบไม่ต้องสนใจ แต่ถ้านำสายสัญญาณมาต่อเพื่อขนานกับสายอากาศหลายๆ ต้นเข้าเป็นชุด เช่น การสายอากาศยากิหลายๆ สแต็กหรือสายอากาศไดโพลหลายๆ ห่วง (สายเฟสชิ่งไลน์ (Phasing line)) เราต้องนำความเร็วตัวนี้มาเกี่ยวข้องด้วย

ในการใช้สายนำสัญญาณส่งผ่านกำลังส่งจากเครื่องส่งวิทยุไปยังสายอากาศ และนำสัญญาณที่รับได้กลับเข้าสู่เครื่องรับ ในเครื่องรับวิทยุสื่อสาร สายนำสัญญาณจะยาวเท่าไร ก็ไม่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์เราจะตัดที่ความยาวเท่าไรก็ได้ สายอากาศที่แมตซ์ชิ่งไม่ดีค่า SWR สูง ไม่ได้หมายความว่า สายนำสัญญาณที่ต่อเข้าเครื่องไม่ลงตัวกับความยาวคลื่นผิดกับสายเฟสชิ่งไลน์ที่ต้องคำนึงถึงความยาวของสายเป็นพิเศษในการใช้งานธรรมดา ความยาวของสายมีผลคือสูญเสียกำลังส่งไปในสาย (Losses in transmission lines) สายที่ยาวมากๆ จะลดทอนกำลังส่งมาก ตัวอย่างเช่น สายอากาศสูง 30 เมตร ใช้สายนำสัญญาณ RG 58/U ถ้าส่งด้วยความถี่ 150 MHz จะสูญเสีย 6 dB ถ้าเราส่งด้วยกำลังส่ง 10 วัตต์ กำลังจะถูกลดทอนไปถึง 7.49 วัตต์ กำลังส่งที่ออกไปถึงสายอากาศเพียง 2.51 วัตต์เท่านั้น แต่ถ้าเราเปลี่ยนมาใช้สายนำสัญญาณเบอร์ RG-8 แบบโฟม จะมีการสูญเสียเพียง 2.1 dB ที่ 30 เมตร กำลังส่งที่ปลายสายจะได้ถึง 6.17 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 เบอร์สายและอัตราการสูญเสีย (dB) ต่อ 100 ฟุต [3]

RG or Type	Part Number	Nom. Z_0 Ω	VF %	Matched Loss (dB/100') 1 MHz	10	100	1000
RG-6	Belden 1694A	75	82	0.2	.7	1.8	5.9
RG-6	Belden 8215	75	66	0.4	0.8	2.7	9.8
RG-8	Belden 7810A	50	86	0.1	0.4	1.2	4.0
RG-8	TMS LMR400	50	85	0.1	0.4	1.3	4.1
RG-8	Belden 9913	50	84	0.1	0.4	1.3	4.5
RG-8	CXP1318FX	50	84	0.1	0.4	1.3	4.5
RG-8	Belden 9913F7	50	83	0.2	0.6	1.5	4.8
RG-8	Belden 9914	50	82	0.2	0.5	1.5	4.8
RG-8	TMS LMR400UF	50	85	0.1	0.4	1.4	4.9
RG-8	DRF-BF	50	84	0.1	0.5	1.6	5.2
RG-8	WM CQ106	50	84	0.2	0.6	1.8	5.3
RG-8	CXP008	50	78	0.1	0.5	1.8	7.1
RG-8	Belden 8237	52	66	0.2	0.6	1.9	7.4
RG-8X	Belden 7808A	50	86	0.2	0.7	2.3	7.4
RG-8X	TMS LMR240	50	84	0.2	0.8	2.5	8.0
RG-8X	WM CQ118	50	82	0.3	0.9	2.8	8.4
RG-8X	TMS LMR240UF	50	84	0.2	0.8	2.8	9.6
RG-8X	Belden 9258	50	82	0.3	0.9	3.1	11.2
RG-8X	CXP08XB	50	80	0.3	0.9	3.1	14.0
RG-9	Belden 8242	51	66	0.2	0.6	2.1	8.2
RG-11	Belden 8213	75	84	0.2	0.4	1.3	5.2
RG-11	Belden 8238	75	66	0.2	0.7	2.0	7.1
RG-58	Belden 7807A	50	85	0.3	1.0	3.0	9.7
RG-58	TMS LMR200	50	83	0.3	1.0	3.2	10.5
RG-58	WM CQ124	52	66	0.4	1.3	4.3	14.3
RG-58	Belden 8240	52	66	0.3	1.1	3.8	14.5
RG-58A	Belden 8219	53	73	0.4	1.3	4.5	18.1
RG-58C	Belden 8262	50	66	0.4	1.4	4.9	21.5
RG-58A	Belden 8259	50	66	0.4	1.5	5.4	22.8

2.16 เทคนิคการแมตช์ชิง (Matching techniques)

การทำงานของระบบสายอากาศที่ช่วงความถี่หนึ่ง จะไม่ขึ้นอยู่กับผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency response) ขององค์ประกอบของตัวมันเองโดยสมบูรณ์ แต่จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางความถี่ของทั้งสายอากาศและสายส่ง ในทางปฏิบัติอิมพีแดนซ์สายส่งเป็นค่าจำนวนจริง ในขณะที่อิมพีแดนซ์ขององค์ประกอบสายอากาศเป็นค่าเชิงซ้อน ซึ่งจะมีความเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทางด้านความถี่จะไม่เหมือนกัน ดังนั้นการคัปปลิ้งแมตช์ชิงของระบบจะต้องถูกออกแบบให้มีความแมตช์ชิงกับคุณสมบัติของอุปกรณ์ทั้งสองในช่วงความถี่นั้นๆ

การแมตช์ชิงของระบบทำได้หลายวิธีโดยสามารถใช้สายส่งต่อเข้ากับส่วนประกอบของสายอากาศซึ่งสามารถออกแบบให้มีคุณลักษณะทางความถี่ที่เหมาะสมซึ่งกันและกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.16.1 การเอาสายนำสัญญาณมาต่อเข้ากับสายอากาศ

จะทำให้มีผลต่อความต้านทานใน 2 ลักษณะคือ

1. ถ้าตัดสายนำสัญญาณ (ที่มีความต้านทาน 50 ถึง 100 โอห์ม) ให้ได้ความยาวลงแลมบ์ด้าของความยาวคลื่น เช่น 1 แลมบ์ด้า , 2 แลมบ์ด้า ลักษณะนี้จะทำให้ความต้านทานที่ต้นสายกับความต้านทานที่ปลายสายไม่เปลี่ยนแปลง

2. ถ้าเราตัดสายนำสัญญาณให้ความยาวเป็นเศษส่วนเลขคี่ของแลมบ์ด้า เช่น 1/4 แลมบ์ด้า , 3/4 แลมบ์ด้า , 5/4 แลมบ์ด้า , 7/4 แลมบ์ด้า ลักษณะแบบนี้จะทำให้ความต้านทานที่ปลายสายเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้านทานสายอากาศและความต้านทานสายนำสัญญาณที่เอามาต่อ

ค่าทั้งหมดที่ต้องทราบมีด้วยกัน 3 ค่าคือ ความต้านทานต้นสาย, ความต้านทานสายนำสัญญาณ, และความต้านทานปลายสาย ทั้งสามค่านี้รู้เพียง 2 ค่าก็ได้ ส่วนอีกหนึ่งค่าที่เหลือก็จะสามารถใช้สมการเหล่านี้คำนวณออกมา

$$\text{ความต้านทานปลายสาย} = \frac{(\text{ความต้านทานสาย})^2}{\text{ความต้านทานต้นสาย}} \qquad (2.33)$$

2.16.1.1 ทฤษฎี

โดยสรุปคือ การนำเอาสายนำสัญญาณที่ตัดลงความยาวเป็นเศษส่วนเลขคี่ของแลมบ์ด้ามาใช้งาน ถ้าความต้านทานต้นสายมีค่ามากกว่าความต้านทานของสายนำสัญญาณค่าความต้านทานที่ปลายสายจะมีค่าลดลง ถ้าความต้านทานต้นสายมีค่าน้อยกว่าความต้านทานของสายนำสัญญาณ ค่าความต้านทานที่ปลายสายจะมีค่าเพิ่มขึ้น

เครื่องวิทยุสื่อสารซึ่งมันมีความต้านทาน ณ จุดต่อสายอากาศเป็น 50 โอห์ม จะทำให้เกิดความไม่แมตช์กัน เพราะสายอากาศ 100 โอห์ม แต่ความต้านทานเครื่อง 50 โอห์ม ถ้าต่อเข้าไปก็จะทำให้ค่า SWR สูงมากจนเป็นผลเสียต่อเครื่องวิทยุ ดังนั้นก่อนที่จะต่อสายอากาศเข้ากับเครื่องวิทยุเราต้องทำการปรับค่าความต้านทานของสายอากาศให้ลดลงเป็น 50 โอห์มเสียก่อนในที่นี้ใช้วิธีการเอาสายนำสัญญาณมาลดความต้านทาน

2.16.1.1.1 การเอาโฟลเด็ดไดโพล 2 อันมาสแต็กกัน

ซึ่งการสแต็กกันก็คล้ายกับเราเอาสายอากาศ 2 อันมาขนานกัน ซึ่งการขนานกันจะทำให้ความต้านทานลดลงไปครึ่งหนึ่ง (ตามหลักการของวงจรขนาน) แต่เนื่องจากเราต้องมีระยะห่างระหว่างห่วงแต่ละห่วงเพื่อให้เกิดเกนขยาย เราจำเป็นต้องเอาสายนำสัญญาณมาต่อจากห่วงโฟลเด็ดไดโพลแต่ล่ะอันก่อน แล้วจึงเอาปลายสายนำสัญญาณนั้นมาขนานกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉะนั้นเราจะต้องปรับระยะห่างต่าง ๆ ของห่วงโฟลเด็ดไดโพลที่ติดตั้งบนบูมและเสากลางให้ได้ความต้านทานเป็น 112.5 โอห์ม แล้วนำเอาสายนำสัญญาณ 75 โอห์ม มาตัดให้ได้ความยาว 1 แลมบ์ด้า เอามาต่อจากปลายห่วงถ้าตัดความยาวลง 1 แลมบ์ด้า จะทำให้ค่าโอห์มไม่เปลี่ยนแปลง จากนั้นเราก็เอาปลายสายนำสัญญาณทั้ง 2 เส้นมาต่อขนานกัน ก็จะได้ความต้านทานแต่ละปลายสายเป็น 56.25 โอห์ม

2.17 สถานีทวนสัญญาณ

ในระบบไมโครเวฟนั้นอาจจะอาศัยการกระจายคลื่นด้วยคลื่นชี้ทิศทาง (Direct wave) ซึ่งถูกจำกัดระยะการใช้งานไว้ใกล้เคียงกับระดับสายตา (Line of sight) เนื่องจากส่วนโค้งของโลกซึ่งระยะทางที่ใช้ในการส่งนั้นสามารถหาได้จากสูตร

$$D = 1.41\left(\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}\right) \tag{2.34}$$

เมื่อ D = ระยะทางเป็นไมล์
h_t = ความสูงของเสาอากาศส่ง เป็นฟุต
h_r = ความสูงของเสาอากาศรับ เป็นฟุต

$$D = 4.12\left(\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}\right) \tag{2.35}$$

เมื่อ D = ระยะทางที่เป็นกิโลเมตร
h_t, h_r = เป็นเมตร

การรับส่งสัญญาณไมโครเวฟระหว่างสถานี 2 แห่ง ซึ่งห่างกันมากๆเสาอากาศที่ใช้งานต้องมีความสูงมากเพื่อให้การรับส่งอยู่ในระดับสายตาเพื่อให้พ้นจากการบังของส่วนโค้งโลก ถ้าระยะไกลมากขึ้น เสาอากาศก็จะต้องสูงมากขึ้นซึ่งไม่ถูกต้องในการปฏิบัติเช่นระยะทางประมาณ 120 กิโลเมตร จะต้องใช้เสาอากาศสูงประมาณ 212 เมตร นั่นคือเสาอากาศจะต้องติดตั้งอยู่บนที่สูงมากๆ หรือมิฉะนั้นก็ต้องเสียค่าใช้จ่ายที่แพงมาก นอกจากนั้นแล้วยังมีปัญหาอื่นอีกด้วยเช่น กำลังส่งออกการสูญเสียพลังงานในสายอากาศซึ่งจำเป็นต้องมีสถานีทวนสัญญาณซึ่งสถานีทวนสัญญาณนี้จะทำการถ่ายทอดสัญญาณจากสถานีต้นทางไปยังสถานีปลายทางที่ต้องการให้ได้ดีที่สุดและจะต้องทำหน้าที่คือขยายสัญญาณและกำหนดทิศทางของการรับส่งตามที่เราต้องการโดยปกติแล้วสถานีทวนสัญญาณจะประกอบไปด้วยเครื่องรับกับเครื่องส่งแต่ละสถานีทวนสัญญาณคุณภาพของสัญญาณจะเลวลงทุกๆ ครั้งที่มีการส่งสัญญาณต่อไป กล่าวคือสถานีทวนสัญญาณจะทำให้สัญญาณเพี้ยนรูปไปความเพี้ยนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นจะสะสมกันมากขึ้นตามลำดับของสถานีทวนสัญญาณที่สัญญาณผ่านไป ดังนั้นระยะทางระบบไมโครเวฟจึงถูกจำกัดด้วยจำนวนสถานีทวนสัญญาณของระบบนั้นๆ เป็นสำคัญ

2.17.1 การทวนสัญญาณสำหรับสายส่ง

- อุปกรณ์ทวนสัญญาณหรือรีพีทเตอร์ (Repeater equipment) อุปกรณ์ทวนสัญญาณประกอบด้วยแอมปลิไฟเออร์และอีควอไลเซอร์ (Equalizer) สำหรับชดเชยการลดระดับสัญญาณลดทอน (Attenuation) และการบิดเบือน (Distortion) ที่เกิดขึ้นในส่วนอุปกรณ์ทวนสัญญาณระหว่างการส่งสัญญาณ

- อุปกรณ์ทวนสัญญาณปลายทาง (Terminal repeater equipment) อุปกรณ์ทวนสัญญาณปลายทาง เป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ปลายทางและประกอบด้วยแอมปลิไฟเออร์รับสัญญาณและมีอีควอไลเซอร์ด้วย

- อุปกรณ์ทวนสัญญาณกลางทาง (Intermediate repeater equipment) อุปกรณ์ทวนสัญญาณกลางทางติดตั้งอยู่เป็นระยะๆ บนสายส่งระหว่างอุปกรณ์ปลายทางด้านส่ง และอุปกรณ์ปลายทางด้านรับ เพื่อทำหน้าที่ปรับและขยายกระแสในสายส่งที่ลดระดับลงจนเกิดการบิดเบือนขึ้นในช่วงสายนั้นๆ อุปกรณ์ทวนสัญญาณบางเครื่องที่ปรับระดับกระแสอย่างอัตโนมัติ (Automatic level regulation) จะติดตั้งห่างกันออกไปอีก

อุปกรณ์ทวนสัญญาณกลางทางติดตั้งในบ่อคนลง (Manhole) ใต้ดินหรือในตู้เครื่องทวนสัญญาณบนดิน และโดยทั่วไปรับกำลังไฟฟ้าจากชุมสายที่มีพนักงานควบคุม

2.17.2 การปรับค่าให้เท่ากันและการรักษาระดับโดยอัตโนมัติ (Equalization and automatic level regulation)

กระแสที่ความถี่ของสายส่งประกอบขึ้นด้วยองค์ประกอบของความถี่จำนวนมาก เนื่องด้วยองค์ประกอบที่ความถี่สูงจะถูกลดระดับลงมากระหว่างการส่งสัญญาณ กระแสที่ได้รับจากสายส่งอาจจะมีคุณสมบัติของการลดระดับสัญญาณกับความถี่ เพื่อชดเชยการลดระดับสัญญาณกับความถี่เราใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณและติดตั้งอีควอไรเซอร์ที่มีคุณสมบัติชดเชยการสูญเสียหรือมีคุณสมบัติเพิ่มค่าตามความถี่ไว้ทางด้านรับสัญญาณเข้าและเราเรียกการออกแบบชนิดนี้ว่า “การปรับค่าให้เท่ากัน” (equalization)

นอกจากนั้น ผลการสูญเสียในสายส่งซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ จะถูกหักเหให้หมดไป ด้วยการปรับระดับสัญญาณออกของอุปกรณ์ทวนสัญญาณอย่างอัตโนมัติตามระดับของกระแสควบคุมที่ตรวจพบการสูญเสียในสายส่ง

2.17.3 การทวนสัญญาณสำหรับคลื่นวิทยุ

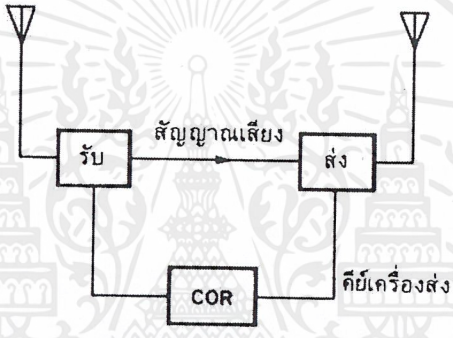
สถานีทวนสัญญาณจะใช้ในการสื่อสารในระดับสายตา บ่อยครั้งในระบบดิสแพตซ์เราต้องติดตั้งสถานีทวนสัญญาณร่วมในข่ายเพื่อช่วยขยายรัศมีทำการให้ไปได้ไกลขึ้น โดยเฉพาะใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

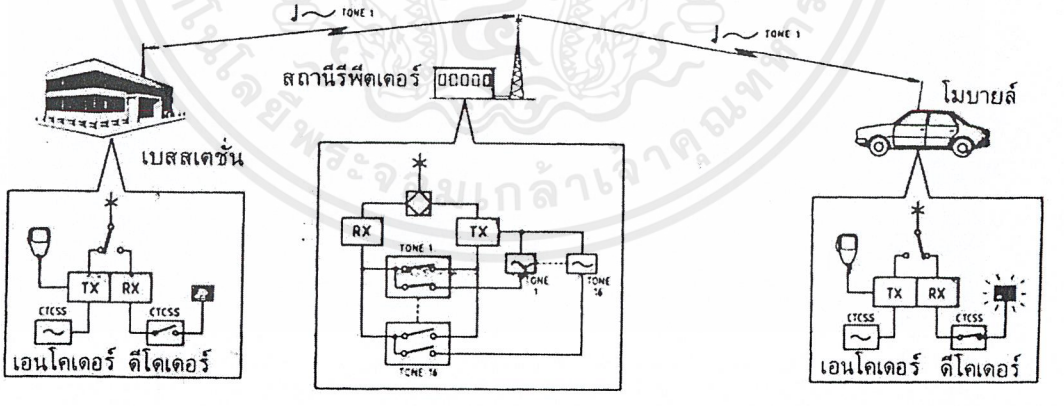
กรณีพื้นที่ใช้งานที่มีลักษณะทางภูมิศาสตร์หรือรูปร่างพื้นที่แปลกๆ (ไม่ใกล้เคียงกับรูปทรงเรขาคณิต) หรือในพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางการเดินทางของคลื่นวิทยุ

เครื่องทวนสัญญาณประกอบด้วยเครื่องรับและเครื่องส่งต่อร่วมกันดังรูปที่ 2.27 เมื่อเครื่องรับรับคลื่นวิทยุ รีเลย์จะทำงานและคีย์เครื่องส่งให้ส่งคลื่นออกไป เมื่อคลื่นวิทยุที่เครื่องรับหายไป เครื่องส่งจะหยุดทำงาน ความถี่ของเครื่องรับและเครื่องส่งจะต้องอยู่ห่างกันพอสมควรเพื่อมิให้คลื่นแปลกปลอมจากเครื่องส่งย้อนกลับไปยังเครื่องรับ ทำให้ทวนสัญญาณล็อกค้าง(ให้ทำงานที่สภาวะเดิม)

ในปัจจุบันวงจรรีเลย์ที่ทำงานด้วยพาหะ (Carrier operated relay หรือ COR) จะเป็นสวิตชิ่งแบบอิเล็กทรอนิกส์ แต่ก็นิยมเรียกชื่อเดิมว่า COR



รูปที่ 2.27 เครื่องทวนสัญญาณอย่างง่าย [3]



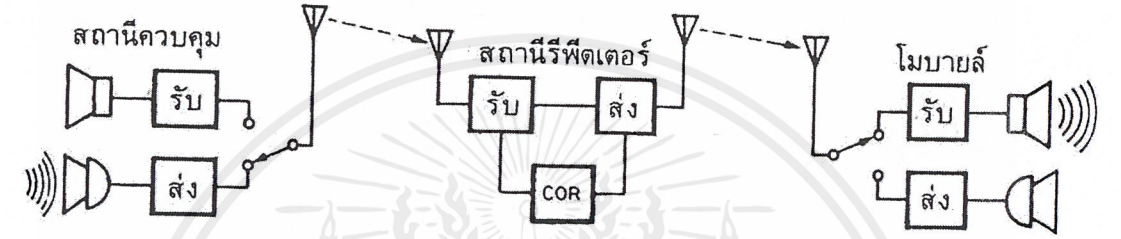
รูปที่ 2.28 การใช้สัญญาณเสียงโทนในระบบทวนสัญญาณ [3]

นอกจากนี้ทวนสัญญาณส่วนใหญ่มักจะมีวงจรดีโคเดอร์พิเศษเพื่อตรวจสอบว่าสัญญาณที่รับได้มีรหัสโทนที่ถูกต้องส่งมาหรือไม่ ถ้าหากไม่ใช่รหัสที่ถูกต้องเครื่องส่งจะไม่ถูกคีย์

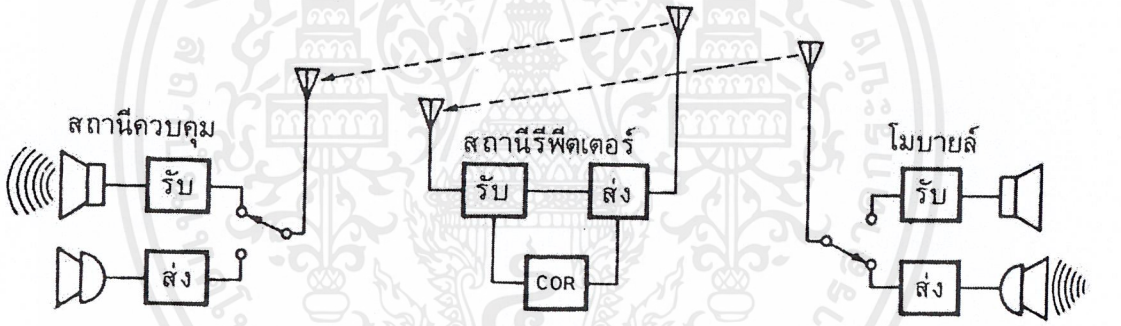
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(รูปที่ 2.28) วิธีการตรวจสอบโทนนี้ ช่วยป้องกันมิให้เกิดการรบกวนจากคลื่นแปลกปลอมและจำกัดเฉพาะผู้ใช้ที่ส่งรหัสแทนที่ถูกต้องเท่านั้น

ในการคีย์เครื่องส่งของทวนสัญญาณ นอกจากจะต้องตรวจสอบโทนแล้ว เครื่องทวนสัญญาณที่ดีจะต้องควบคุมเวลาในการคีย์ด้วย เช่น ยืดเวลาคีย์ให้นานขึ้นเพื่อป้องกันและช่วยในกรณีที่ทวนสัญญาณรับสัญญาณอ่อนหรือจางหาย และจำกัดเวลาคีย์มิให้นานเกินไป เพื่อให้ทวนสัญญาณว่างและป้องกันเครื่องส่งทำงานหนักเกินไป



(ก) เรียกไป



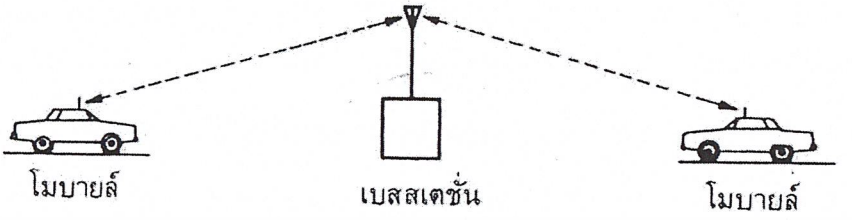
(ข) ตอบกลับ

รูปที่ 2.29 การติดต่อสื่อสารผ่านเครื่องทวนสัญญาณ [3]

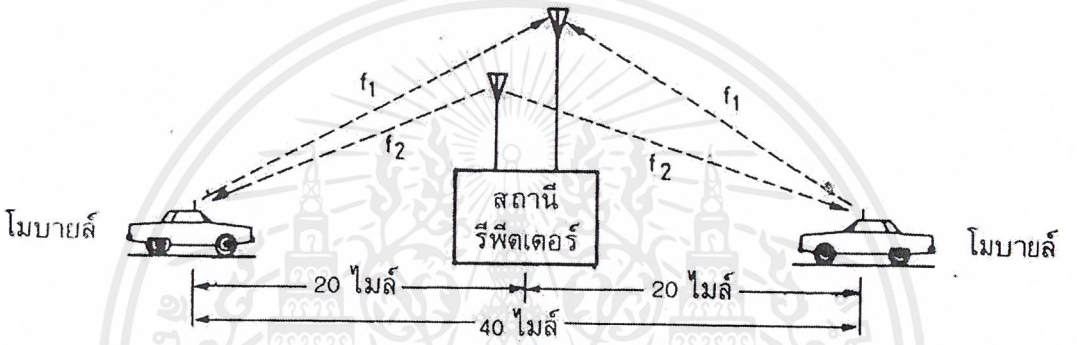
เครื่องทวนสัญญาณในรูปที่ 2.29 จะทำงานแบบซิมเพล็กซ์ 2 ความถี่ คือรับความถี่ f_1 แล้วส่งออกความถี่ f_2 ในที่นี้ทวนสัญญาณจะรับสัญญาณที่ได้มาจากเครื่องโมบายล์หรือศูนย์ (Control station) แล้วคีย์เครื่องส่งให้ส่งสัญญาณออกไปในกรณีเช่นนี้ การติดต่อสื่อสารจะต้องผ่านเครื่องทวนสัญญาณเสมอ

เราสามารถใช้ทวนสัญญาณในการขยายพื้นที่ใช้งานได้ในรูปที่ 2.30 (ก) เป็นการติดต่อสื่อสารแบบธรรมดา ส่วนในรูปที่ 2.30 (ข) เป็นการใช้ทวนสัญญาณซึ่งช่วยขยายรัศมีทำการทำให้โมบายล์กับโมบายล์ติดต่อกันได้ไกลมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



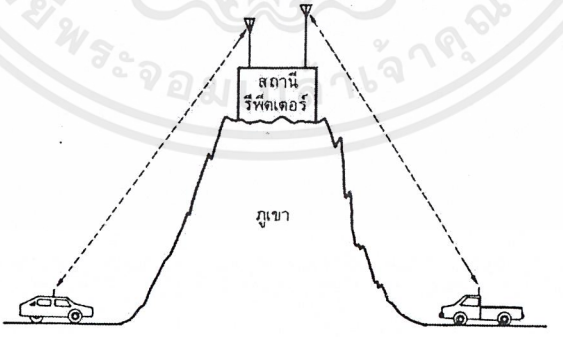
(ก) ระบบสื่อสารโมบายล์ธรรมดา



(ข) การใช้ทวนสัญญาณช่วยให้โมบายล์ติดต่อกันได้ไกลขึ้น

รูปที่ 2.30 ระบบสื่อสารโมบายล์ธรรมดากับการใช้ทวนสัญญาณช่วยให้โมบายล์ติดต่อกันได้ไกลขึ้น [3]

ในกรณีที่เราติดตั้งสายอากาศของสถานีทวนสัญญาณให้สูงขึ้นดังรูปที่ 2.31 เช่น บนภูเขาจะยิ่งช่วยให้เราสามารถครอบคลุมพื้นที่ใช้งานได้กว้างขวางขึ้น

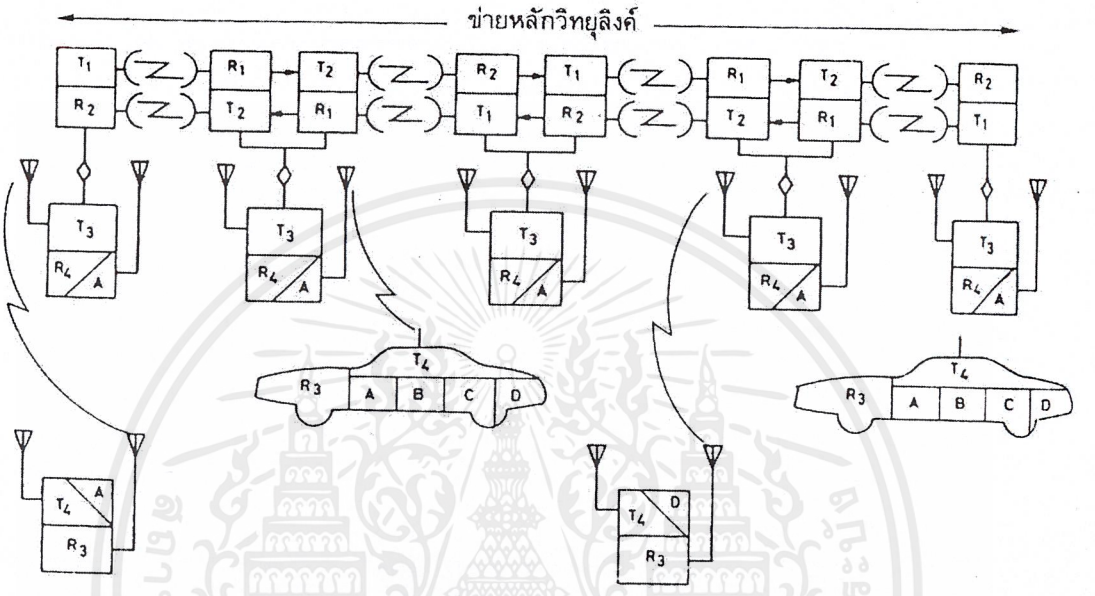


รูปที่ 2.31 รัศมีทำการขึ้นอยู่กับความสูงของสายอากาศของเครื่องทวนสัญญาณ [3]

ดูตัวอย่างระบบทวนสัญญาณในรูปที่ 2.32 ซึ่งเหมาะสมกับพื้นที่ใช้งานตามแนวถนนหรือทางรถไฟ โมบายล์จะเลือกรหัสโทนที่ตรงกับทวนสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียง ข่าวสารจะส่งผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปยังวิทยุลิงค์ ระบบทวนสัญญาณซึ่งออกแบบใช้ร่วมกับข่ายวิทยุจะช่วยเสริมให้การสื่อสารมีประสิทธิภาพสูงมากขึ้น



รูปที่ 2.32 ระบบทวนสัญญาณที่ใช้ร่วมกับข่ายวิทยุลิงค์ซึ่งเป็นข่ายหลัก (Backbone) [3]

2.17.4 หน้าที่ของสถานีทวนสัญญาณ

1. ทำการขยายสัญญาณ โดยปกติสถานีทวนสัญญาณทั่วๆ ไป จะให้กำลังด้านออกสูงกว่าที่รับเข้ามาประมาณ 55 ถึง 105 dB

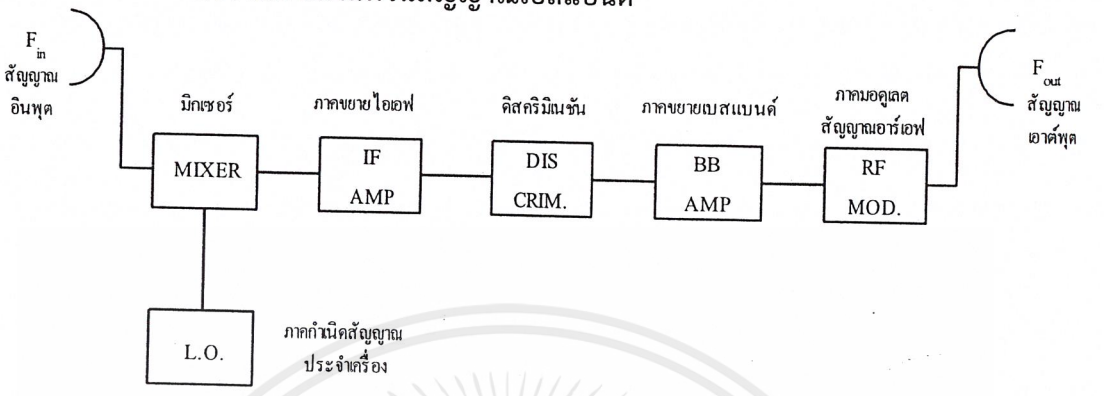
2. ทำการเปลี่ยนความถี่กล่าวคือความถี่ที่ส่งออกจะต้องต่างกับความถี่ที่รับเข้ามาเพื่อลดทอนการรบกวนของสัญญาณซึ่งกันและกัน โดยทั่วๆ ไปความถี่ทั้งสองนี้จะต่างกันประมาณ 252 MHz. ในย่านความถี่ 6 GHz. ตัวอย่าง เช่น ที่สถานีบางกรวย รับสัญญาณจากกรุงเทพฯ ที่ความถี่ 5945.198 MHz แล้วส่งต่อไปสระบุรี ด้วยความถี่ 6197.239 MHz. ซึ่งจะมีความถี่ต่างกัน 252.041 MHz.

2.17.5 ประเภทของสถานีทวนสัญญาณ

ได้มีการแบ่งประเภทของสถานีทวนสัญญาณในระบบไมโครเวฟไว้ ตามลักษณะของการขยายสัญญาณและจุดต่อระหว่างเครื่องรับกับเครื่องส่งว่าได้มุ่งกระทำที่ขนาดความถี่ไหน เช่น RF หรือ IF หรือเบสแบนด์ (Baseband) แล้วตั้งชื่อตามนั้น ซึ่งมีทั้งหมด 3 ชนิดคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.17.5.1 สถานีทวนสัญญาณเบสแบนด์



รูปที่ 2.33 บล็อกไดอะแกรมสถานีทวนสัญญาณเบสแบนด์ [3]

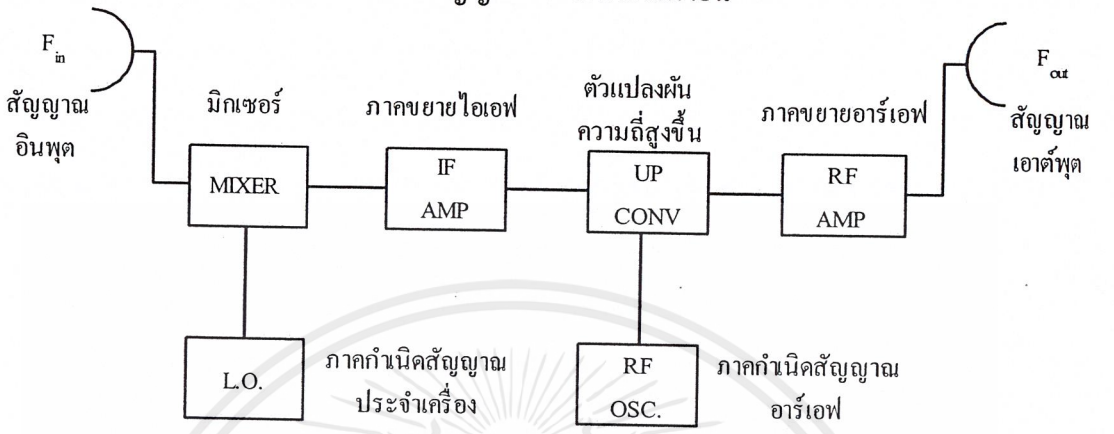
สถานีทวนสัญญาณชนิดนี้จะประกอบด้วยเครื่องรับและเครื่องส่งที่สมบูรณ์แบบหันหลังชนกันโดยมีจุดต่อร่วมที่ระดับความถี่เบสแบนด์ .การจัดวิธีนี้สัญญาณที่รับเข้ามาจะถูกเปลี่ยนเป็นความถี่ IF ได้รับการขยายแล้วทำการดีมอดูเลตให้เป็นเบสแบนด์ซึ่งเป็นสัญญาณเริ่มต้นใหม่ ทำการขยายอีกครั้งหนึ่ง ต่อจากนั้น ก็จะทำการมอดูเลตใหม่ ให้เป็นสัญญาณไมโครเวฟเพื่อส่งออกอากาศต่อไป โดยมีความถี่ต่างกับที่รับเข้ามาประมาณ 252 MHzสถานีทวนสัญญาณแบบนี้มีชื่อเรียกอย่างอื่นอีกว่า สถานีทวนสัญญาณดีมอดูเลต (Demodulation repeater) หรือสถานีทวนสัญญาณแบ็คทูแบ็ค (Back to back repeater) สถานีทวนสัญญาณแบบนี้ มีข้อดี ข้อเสีย ดังนี้คือ

- **ข้อดี** สามารถดร็อปหรือแทรกสัญญาณโทรศัพท์จากเบสแบนด์ได้ง่ายโดยใช้ตัวกรองความถี่ที่เหมาะสมเลือกช่องสัญญาณที่ต้องการ สามารถดร็อปช่องสัญญาณจากเบสแบนด์ที่รับเข้ามา เพื่อการติดต่อกับสถานีต้นทาง ขณะเดียวกัน เราสามารถแทรกสัญญาณที่ต้องการติดต่อกับสถานีปลายทางในช่องสัญญาณเดิมหรือช่องสัญญาณอื่นในเบสแบนด์ที่ว่างได้

- **ข้อเสีย** มีสัญญาณรบกวนจากการมอดูเลตระหว่างกันมาก เพราะว่าทุกๆ ครั้งที่มีการมอดูเลตและดีมอดูเลตจะมีสัญญาณรบกวนจากการมอดูเลตระหว่างกัน (Inter modulation noise) เกิดขึ้นเสมอ มีเสถียรภาพไม่สู้ดี เพราะว่าทุกครั้งที่มีกระบวนการมอดูเลตและการดีมอดูเลต ย่อมจะทำให้ระดับของเบสแบนด์เปลี่ยนแปลง ตามความถี่เกิดขึ้นเสมอ และสะสมกันมากขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.17.5.2 สถานีทวนสัญญาณ IF เฮเทอโรดายน์



รูปที่ 2.34 บล็อกไดอะแกรมสถานีทวนสัญญาณ IF เฮเทอโรดายน์ [3]

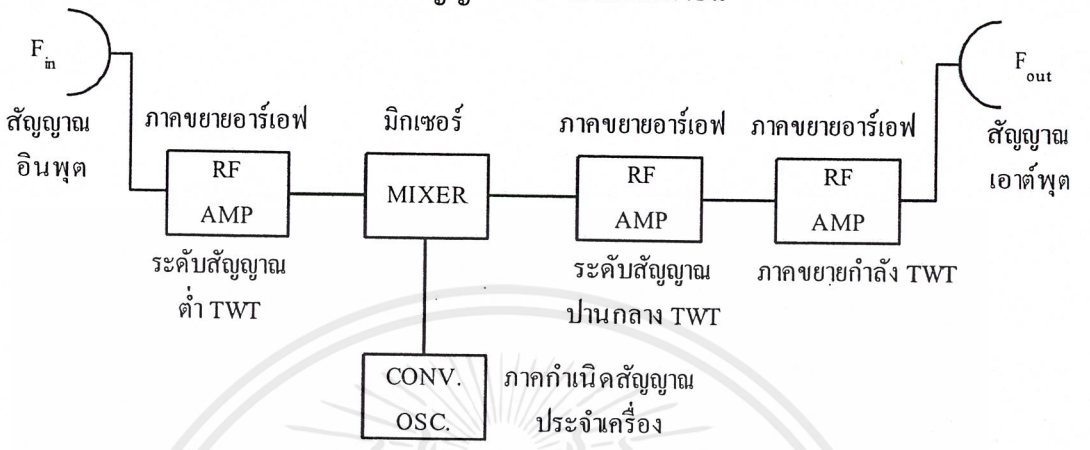
สถานีทวนสัญญาณชนิดนี้จะประกอบด้วยเครื่องรับและเครื่องส่ง ที่ตัดเอาภาคมอดูเลตและดีมอดูเลตออกไปโดยมีจุดต่อร่วมกันที่ระดับความถี่ IF ด้วยการจัดวิธีนี้ สัญญาณความถี่ไมโครเวฟที่เข้ามาจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณ IF ทำการขยายให้ระดับสัญญาณสูงขึ้น ต่อจากนั้นก็ทำการเปลี่ยนให้สัญญาณไมโครเวฟอีกครั้งหนึ่ง เพื่อส่งออกอากาศต่อไป โดยสัญญาณรับ-ส่งนี้จะมีความถี่แตกต่างกัน 252 MHz เช่นเดียวกับสถานีทวนสัญญาณเบสแบนด์ สถานีทวนสัญญาณแบบนี้มี ข้อดี ข้อเสีย ดังนี้ คือ

- **ข้อดี** มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio) ดีกว่าแบบสถานีทวนสัญญาณเบสแบนด์เนื่องจาก ไม่มีการเพิ่มสัญญาณรบกวนการมอดูเลชั่นและดีมอดูเลชั่นที่สถานีมีเสถียรภาพดีกว่า แบบสถานีทวนสัญญาณเบสแบนด์

- **ข้อเสีย** ราคาแพงเนื่องจากการใช้ภาคขยายสัญญาณ RF หลายภาคการออกแบบวงจรกรองความถี่เพื่อเลือกความถี่ที่ต้องการและตัดความถี่ที่ไม่ต้องการทำได้ยุ่งยากมาก โดยจะต้องให้อยู่ในแบนด์วิดพอดีไม่อย่างนั้นจะเกิดการเพี้ยนไม่สามารถดร็อปหรือแทรกสัญญาณโทรศัพท์ได้เนื่องจากไม่มีภาคมอดูเลเตอร์และดีมอดูเลตนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.17.5.3 สถานีทวนสัญญาณ RF เฮเทอโรดายน์



รูปที่ 2.35 บล็อกไดอะแกรมสถานีทวนสัญญาณ RF เฮเทอโรดายน์ [3]

สถานีทวนสัญญาณชนิดนี้จะไม่มีการเปลี่ยนความถี่ให้ต่ำลงมาถึง IF ดังนั้น การขยายระดับสัญญาณจะกระทำที่ย่านความถี่ไมโครเวฟโดยตลอดด้วยการจัดวิธีนี้สัญญาณไมโครเวฟ (RF) ที่รับเข้ามาจะได้รับการขยายทันทีแล้วทำการเปลี่ยนความถี่ให้เท่ากับที่ต้องการส่งออกอากาศซึ่งจะแตกต่างกันไม่น้อยกว่า 100 MHz ต่อจากนั้นจึงทำการขยายสัญญาณให้มีระดับสูงขึ้นอีกตามที่ต้องการ ซึ่งอาจจะต้องใช้วงจรขยาย RF ถึง 2 ภาคซึ่งสถานีทวนสัญญาณแบบ RF เฮเทอโรดายน์ จะไม่ค่อยนิยมใช้กันเนื่องด้วยเหตุผลหลายประการดังนี้

1. ราคาของที่ใช้ในการขยายสัญญาณที่ความถี่ไมโครเวฟ ทั้ง 3 ภาคไม่ว่าใช้หลอด T.W.T (Traveling wave tube) ตลอดหรือว่าจะใช้วงจรขยายพาราเมตริกตามด้วยหลอด T.W.T ก็ตาม จะเห็นได้ว่ามีราคาแพงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับแบบที่ใช้ขยายด้วยทรานซิสเตอร์หลายๆ วงจรที่ระดับสัญญาณ IF

2. แหล่งจ่ายไฟที่ใช้จะต้องสูงและมีจำนวนเท่ากับหลอด T.W.T. ที่ใช้ทำให้ราคาสูงขึ้นไปอีก

3. ปัญหาเกี่ยวกับตัวกรองสัญญาณ RF จะต้องสร้างให้พอดีกับที่กำหนดเพื่อเลือกความถี่ที่ต้องการ อย่างไรก็ตามการเพี้ยนอาจจะเกิดขึ้นได้มากถ้ามีจำนวนหลายตัวปัญหาเหล่านี้ไม่สามารถแก้ไขได้ จะเห็นว่าในการเลือกสถานีทวนสัญญาณที่เหมาะสมจะเป็นการเลือกระหว่างสถานีทวนสัญญาณ IF เฮเทอโรดายน์กับสถานีทวนสัญญาณเบสแบนด์และถ้าเราพิจารณาคุณสมบัติของสัญญาณที่ได้ ณ จุดปลายทางแล้ว จะเห็นได้ว่าสถานีทวนสัญญาณแบบ IF เฮเทอโร-ดายน์ ซึ่งมีราคาถูกกว่าจะให้คุณภาพที่ดีกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.17.5.4 สถานีทวนสัญญาณพาสซีฟ (Passive repeater)

บางครั้งเสาอากาศที่ใช้ไม่สามารถจะขจัดปัญหาเกี่ยวกับสิ่งกีดขวางที่เกิดขึ้นได้ ตัวอย่างเช่นถ้ามีภูเขากั้นอยู่ระหว่างสถานีทั้งสองจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนแนวทางการเคลื่อนที่ของคลื่นที่จุดจุดหนึ่งหรือมากกว่านั้นเพื่อให้เคลื่อนที่ข้ามหรืออ้อมภูเขาไปยังจุดที่ต้องการได้ ซึ่งอาจตั้งสถานีทวนสัญญาณขึ้นบริเวณภูเขานี้เพื่อทำการขยายสัญญาณแล้วส่งต่อไปยังทิศทางที่ต้องการ ถ้าเป็นระยะทางใกล้ๆ เราไม่นิยมกันเนื่องจากสิ้นเปลืองมากเกินไปเช่นการสร้างสถานีที่ถาวรการบำรุงรักษาเราสามารถใช้สถานีทวนสัญญาณพาสซีฟเปลี่ยนทิศทางการรับ-ส่งได้โดยปราศจากการขยายสัญญาณสถานีทวนสัญญาณพาสซีฟเหล่านี้ ไม่มีส่วนช่วยในการขยายสัญญาณใดๆ จึงไม่ต้องการพลังงานไฟฟ้ามาใช้และการบำรุงรักษาก็น้อยมาก ดังนั้นมันจะติดตั้ง ณ สถานที่เข้าไปติดตั้งอย่างอื่นทำได้ลำบากมาก

แบบหนึ่งของสถานีทวนสัญญาณพาสซีฟ ก็คือใช้สายอากาศพาราโบลิก 2 อัน ต่อหันหลังชนกันโดยให้สัญญาณผ่านเวฟไกด์ช่วงสั้นๆ ด้วยการจัดทำแบบนี้ สามารถเปลี่ยนแนวทางของคลื่นได้อย่างง่ายๆ โดยใช้เวฟไกด์โค้งไปตามที่ต้องการ อย่างไรก็ดีสถานีทวนสัญญาณพาสซีฟแบบนี้ไม่ค่อยนิยมใช้อย่างกว้างขวางนัก เนื่องจากการสูญเสียที่เกิดขึ้น เช่นประสิทธิภาพของสายอากาศพาราโบลิก แต่ละอันมีเพียงประมาณ 55% เท่านั้น และไม่อาจจะหลีกเลี่ยงการสูญเสียกับการสะท้อนภายในเวฟไกด์ ผลลัพธ์ก็คือทำให้สัญญาณลดลง

สถานีทวนสัญญาณพาสซีฟ ที่ใช้กันมากสำหรับการติดตั้งเพื่อใช้งานแบบนี้เรียกกันว่า “บิลบอร์ด” (Billboard) เป็นแผ่นโลหะขนาดใหญ่, แบน, ผิวเรียบ ซึ่งจะทำหน้าที่ง่าย ๆ ก็คือเป็นตัว “สะท้อน” ในระบบการใช้งานแผ่นบิลบอร์ดมักจะติดตั้งตรงมุมซึ่งกันและกัน ซึ่งมีผลทำให้ลำคลื่นโค้งอ้อมไปยังจุดหมายปลายทางแผ่นสะท้อนนี้อาจจะรับสัญญาณมาจากระบบสายอากาศแบบเพริสโคปก็ได้และอาจจะสะท้อนสัญญาณไปยังสายอากาศแบบเพริสโคป อีกอันหนึ่งก็ได้ ผลก็คือเหมือนกับใช้กระจกบานใหญ่บานหนึ่งนั่นเอง

ขนาดของแผ่นบิลบอร์ดไม่มีปัญหาในเรื่องขีดจำกัดของขนาดที่ใช้ซึ่งไม่เหมือนกับแผ่นสะท้อนที่ใช้ในระบบสายอากาศแบบเพริสโคปเพราะว่าตามปกติสถานีทวนสัญญาณแบบพาสซีฟจะติดตั้งอยู่ไกลจากเครื่องส่งพอที่จะทำให้สัญญาณที่รับได้ทั้งหมดอยู่ในเฟสเดียวกัน แผ่นสะท้อนที่ใช้กันทั่วๆ ไป จะมีขนาดประมาณ 6´8 ฟุต ถึง 24´30 ฟุตการลดทอนพลังงาน (Attenuation) จากการใช้แผ่นบิลบอร์ด

2.18 ระบบทวนสัญญาณวิทยุ

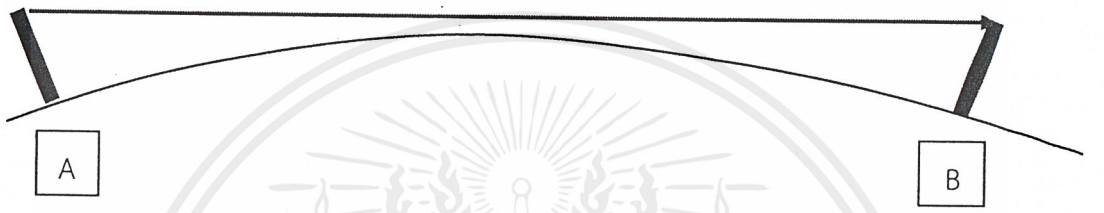
การใช้วิทยุสื่อสารในระบบ VHF/FM หรือ UHF/FM ติดต่อกันแบบจุดต่อจุดธรรมดาประสิทธิภาพในการติดต่อขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการได้แก่

- กำลังส่งของภาคส่งวิทยุสื่อสาร
- ความไวในการรับสัญญาณของภาครับและความสามารถในการเลือกรับของภาครับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

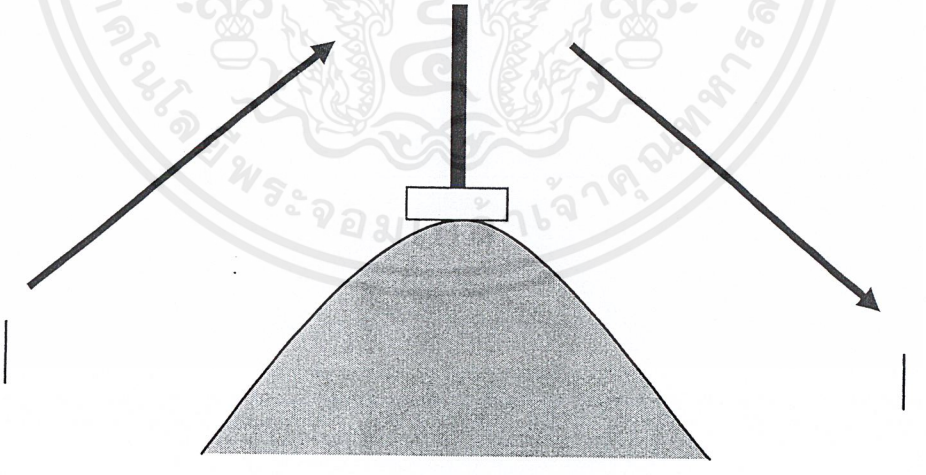
- อัตราขยายของสายอากาศของคู่สถานี
- ความสูงของสายอากาศหรือความสูงของสถานี

เนื่องจากความถี่วิทยุในย่าน VHF และ UHF นั้นเดินทางในลักษณะเส้นตรงหากมีสิ่งก่อสร้าง ภูเขา ป่าไม้กีดขวางอาจทำให้สัญญาณถูกลดทอนลงและทำให้ระยะติดต่อสื่อสารสั้นลง และอุปสรรคสำคัญประการหนึ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ก็คือการติดต่อระยะไกลได้รับผลกระทบของความโค้งของพื้นโลก



รูปที่ 2.36 ผลกระทบของความโค้งของพื้นโลก

ดังนั้นการติดต่อสื่อสารความถี่ย่านนี้ความสูงของสายอากาศจึงเป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดระยะการสื่อสาร เทคนิคที่นิยมมาใช้ช่วยเพิ่มระยะการติดต่อแบบหนึ่งได้แก่การจัดทำสถานีทวนสัญญาณวิทยุ โดยส่วนใหญ่จะเลือกสถานที่ติดตั้งสถานีทวนสัญญาณในที่สูง ซึ่งแต่เดิมเคยเป็นอุปสรรคในการสื่อสาร เช่น ภูเขาสูง ตึกสูงเป็นที่ติดตั้งสถานี

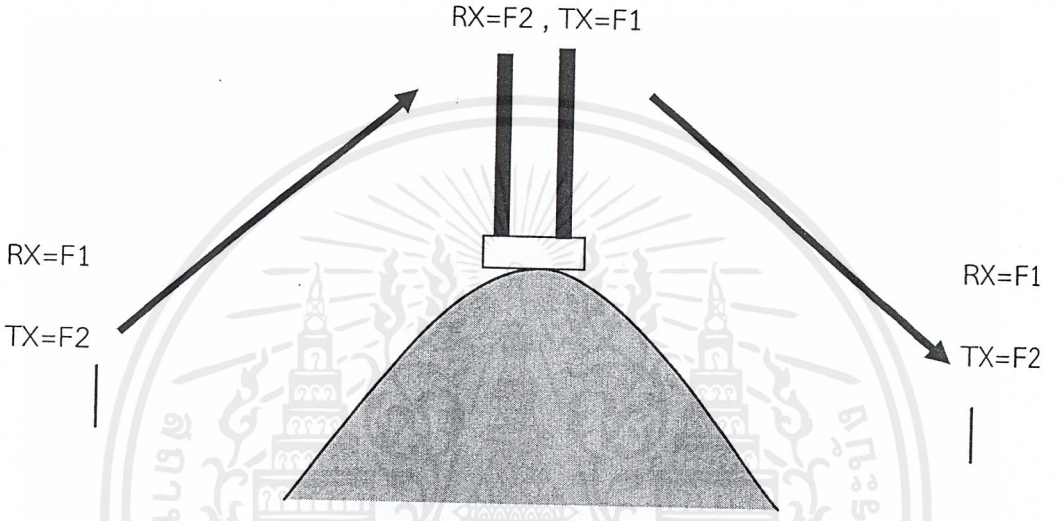


รูปที่ 2.37 ภูเขาสูงเป็นที่ติดตั้งสถานี

การจัดทำสถานีทวนสัญญาณวิทยุสามารถทำได้ 2 ลักษณะได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.18.1 สถานีทวนสัญญาณแบบดูแพล็ค (Duplex) หมายถึงสถานีทวนสัญญาณที่มีการรับสัญญาณมาจากผู้ใช้และส่งต่อออกไปอีกความถี่หนึ่งซึ่งต่างจากความถี่รับในเวลาเดียวกัน การจัดทำทวนสัญญาณแบบนี้จำเป็นต้องใช้ความถี่อย่างน้อย 2 ความถี่ ภาครับ 1 ความถี่และส่ง 1 ความถี่

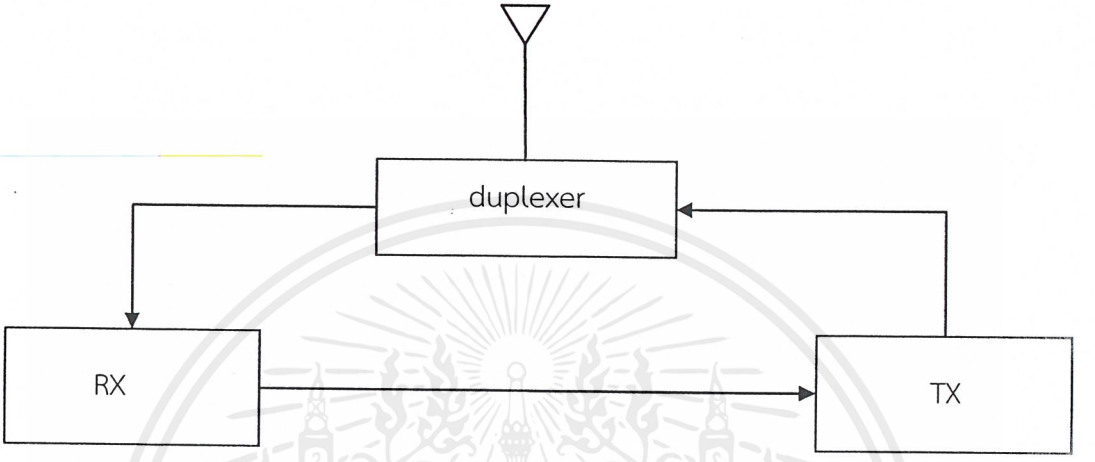


รูปที่ 2.38 สถานีทวนสัญญาณแบบ Duplex

จากภาพจะเห็นว่าผู้ใช้ต้องตั้งความถี่ภาครับ (RX) และภาคส่ง (TX) ตรงกันข้ามกับสถานีทวนสัญญาณ เมื่อผู้ใช้สถานีใดสถานีหนึ่งกดคีย์ส่งที่ความถี่ F2 ทวนสัญญาณจะรับสัญญาณที่ความถี่ F2 แล้วส่งต่อสัญญาณออกไปที่ความถี่ F1 ในเวลาเดียวกัน ซึ่งการทำงานของทวนสัญญาณในลักษะนี้จะเป็นฟลูดูแพล็ค (full duplex) ส่วนสถานีของผู้ใช้จะมีลักษณะผลัดกันรับผลัดกันส่ง ไม่สามารถรับและส่งในเครื่องเดียวในเวลาเดียวกันได้ เรียกการทำงานของสถานีผู้ใช้ว่าเซมิดูแพล็ค (Semi duplex) โดยทั่วไปแล้วเครื่องทวนสัญญาณจะประกอบไปด้วยเครื่องรับและเครื่องส่งซึ่งอาจใช้สายอากาศคนละต้นในการรับและส่งสัญญาณ แต่การที่เครื่องรับและส่งที่ทำงานในเวลาเดียวกันอาจจะรบกวนซึ่งกันและกันได้ ดังนั้นสายอากาศภาครับและส่งจะต้องติดตั้งให้ห่างกันทั้งในแนวตั้งและแนวนอน พอที่จะไม่รบกวนกัน โดยเฉพาะการเลือกใช้ความถี่ภาครับและส่งมีความถี่ใกล้มันมากๆ (โดยปกติความถี่ภาครับและภาคส่งควรห่างกันไม่น้อยกว่า 600 KHz) จำเป็นต้องพิถีพิถันในการติดตั้งสายอากาศไม่ให้รบกวนกัน มิเช่นนั้นแล้วความถี่ภาคส่งอาจไปกดภาครับ ทำให้ภาครับสูญเสียประสิทธิภาพในการรับได้ หากสถานีทวนสัญญาณไม่สามารถติดตั้งสายอากาศอย่างเหมาะสมได้ เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องการติดตั้งสายอากาศ หรือติดตั้งแล้วไม่มีประสิทธิภาพพอเพียง อาจเลือกวิธีใช้สายอากาศต้นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งรับและส่งสัญญาณในเวลาเดียวกันก็ได้ แต่ต้องมีดูแพล็คเซอร์ (duplexer) เป็นอุปกรณ์แยกสัญญาณวิทยุด้านรับและด้านส่งไม่ให้รบกวนซึ่งกันและกัน

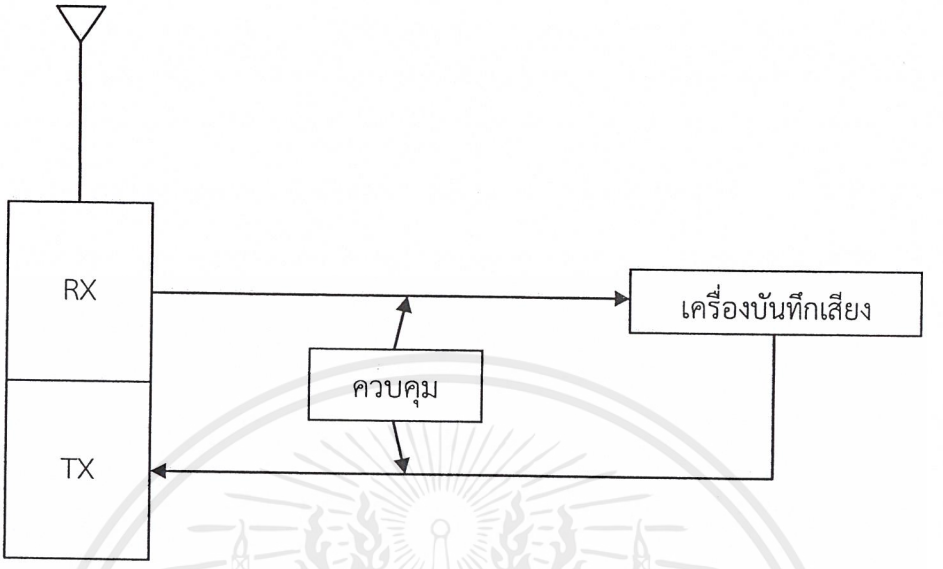


รูปที่ 2.39 Duplexer

โดยปกติแล้วการติดตั้งสายอากาศภาครับและส่งจะต้องติดตั้งให้ห่างกันทั้งแนวตั้งและแนวนอน เพื่อให้มีการแยกสัญญาณกันอยู่ระหว่าง 80-100 dB ค่าการแยกจากกันนี้ก็อาจมีอิทธิพลถึงสายอากาศอื่นๆ ที่ติดตั้งอยู่ใกล้เคียงด้วย ซึ่งบางครั้งค่าการแยกกันของสัญญาณนี้อาจเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาตามสภาพแวดล้อมซึ่งบางครั้งอยู่นอกเหนือที่จะสามารถการควบคุมได้ ดังนั้นการเลือกใช้ดูแพล็คเซอร์และเลือกใช้สายอากาศต้นเดียวอาจได้สถานีทวนสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเนื่องจากมีค่าการแยกสัญญาณที่ค่อนข้างแน่นอนและมีค่าการแยกสัญญาณสูง

2.18.2 สถานีทวนสัญญาณแบบซิมแพล็ค (simplex) ในบางกรณีที่ไม่สามารถจัดทำสถานีทวนสัญญาณแบบดูแพล็คได้ เนื่องจากไม่มีช่องความถี่สำหรับการจัดทำ (แบบดูแพล็คต้องมีความถี่อย่างน้อย 2 ความถี่และต้องมีความถี่ห่างกันไม่น้อยกว่า 600 KHz) เช่น ได้รับอนุญาตให้ใช้ความถี่เพียงช่องเดียวหรือไม่ได้รับอนุญาตให้ใช้งานแบบดูแพล็ค สถานีทวนสัญญาณแบบซิมแพล็คเป็นทางเลือกหนึ่งซึ่งจะช่วยเพิ่มระยะการติดต่อได้ไม่แพ้กัน หรือบางครั้งอาจมีประสิทธิภาพสูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.40 สถานีทวนสัญญาณแบบ Simplex

สถานีทวนสัญญาณแบบซิมแพล็ค ใช้เครื่องรับส่งวิทยุธรรมดาซึ่งตั้งช่องความถี่เดียวกันทั้งภาครับและภาคส่ง เพียงแต่ช่วงเวลารับและส่งจะเกิดขึ้นต่างช่วงเวลากัน เมื่อมีผู้ใช้กดคีย์ออกอากาศ ภาครับของทวนสัญญาณจะรับสัญญาณและนำสัญญาณเสียงที่รับได้ป้อนให้เครื่องบันทึกเสียง ขณะเดียวกันระบบควบคุมส่งสัญญาณควบคุมให้เครื่องบันทึกเสียงเริ่มบันทึก หลังจากผู้ใช้ปล่อยคีย์ส่งแล้ว ระบบควบคุมจะสั่งให้เครื่องบันทึกเสียงเล่นกลับเสียงที่บันทึกไว้ได้ พร้อมทั้งสั่งให้ภาคส่งคีย์ออกอากาศ เป็นการทวนข้อความของผู้ใช้ที่คีย์ออกอากาศก่อนหน้านี้

จะเห็นได้ว่าสถานีทวนสัญญาณแบบซิมแพล็ค ต้องการทรัพยากรน้อยกว่าแบบดูแพล็คทั้งความถี่และอุปกรณ์ประกอบ แต่การใช้งานผู้ใช้จะต้องทำความคุ้นเคยกับระบบเนื่องจากจะต้องรอฟังเสียงของคู่สถานีนานกว่าแบบดูแพล็ค การใช้งานผู้ใช้จึงควรออกอากาศให้สั้นที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.19 ICOM IC-3FGX

รูปที่ 2.41 วิทยุสื่อสาร ICOM IC-3FGX

- ขนาดเล็กกะทัดรัด น้ำหนักเบาเพียง 370 กรัม(พร้อมถ่าน 1100 MAH.)
- 80 ช่องความถี่
- ช่องย่อยมากกว่า 20000 ช่อง มากมายจนเกินพอ CTCSS (Tone squelch) 51 โทน หรือ 2040 ช่องย่อย DTCS (Digital tone code squelch) 512 โทน หรืออีกกว่า 20000 ช่องย่อย (สองหมื่นช่องย่อย)
- โครงสร้างแข็งแกร่งสุดด้วยมาตรฐาน MILL SDT 810E
- วงจรถนอมเครื่อง (Time out timer (TOT)) ป้องกันการคีย์ค้างหรือการกดส่งนานเกินไป (เลือกตั้งเวลาตัดได้)
- แบตเตอรี่พลังสูง เพียงพอกับการใช้งานต่อเนื่องได้ตลอดวัน ถ่าน STD. 1100 MAH, ถ่านพิเศษ NI MH, LITIUM 1600 MAH. ให้เลือก
- ประหยัดพลังงานเมื่อเปิดเครื่องทิ้งไว้ ถ้าไม่มีการกดส่งและไม่ได้รับสัญญาณใน 1 นาที เครื่องจะปรับเข้าสู่วงจรประหยัดพลังงาน
- 2 TONE, 5 TONE(UT-96) การตั้งรหัสเฉพาะตัวของแต่ละเครื่องและกลุ่ม เพื่อความสะดวกในการเรียกแต่ละเครื่อง หรือเรียกเป็นกลุ่มจะสามารถเรียกได้เฉพาะในกลุ่มที่ตั้งรหัสกลุ่มเดียวกันเท่านั้น
- Battery recycle ผลิตจากวัสดุที่มารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้จึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Scrambler function เฉพาะผู้มี Scrambler unit เท่านั้นจึงจะรับฟังได้ สำหรับความปลอดภัยในการรับส่ง การใช้ Scrambler ทำให้ผู้ที่ไม่มีหน่วย ดังกล่าว รับฟังได้เป็นเสียงที่เพี้ยนออกไปจับความไม่ได้ : UT-109 มี 32 รหัส : UT-110 มี 1020 รหัส (UT-109 ไม่สามารถใช้ร่วมกับ UT-110 เนื่องจากรหัสไม่เหมือนกัน)

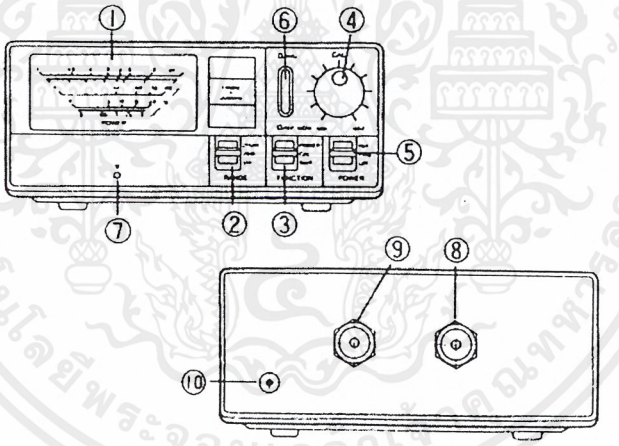
- DTMF / PAGER / Code squelch (UT-108 DTMF decoder) ลักษณะการใช้งานแบบ PAGER เป็นการตั้งรหัสส่วนตัวของแต่ละเครื่องในการรับส่งอีกแบบหนึ่งโดยใช้ DTMF Code

- สามารถโปรแกรม ชื่อ, ช่องความถี่ ได้ทั้งตัวเลข และตัวอักษรตามแต่ผู้ใช้ต้องการได้ 5 ตัวอักษร

- ปุ่มใช้งาน P0, P1, P2, P3, ปุ่มพิเศษสีแดงม ปุ่มพิเศษสีดำ สามารถโปรแกรมเป็นฟังก์ชั่นตามที่ต้องการ เลือกจากฟังก์ชั่น List ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

- Digital S-meter แสดงระดับสัญญาณละเอียดยิบตั้งแต่ ระดับ 0 ถึง 9

2.20 SWR & POWER METER SX-400



รูปที่ 2.42 SWR & POWER METER SX-400

1. มิเตอร์เป็นสเกลที่แสดงค่าต่างๆในการวัด

2. Meter adjust เป็นจุดปรับเข็มมิเตอร์ให้ชี้อยู่ที่ตำแหน่ง 0

3. Range switch เป็น switch ใช้ในการเลือกวัดกำลังส่งของเครื่องรับ-ส่งโดยใช้ร่วมกับ Function switch และ Power switch มีอยู่ด้วยกัน 3 ระดับคือ

3.1 5W (5 วัตต์) ใช้ในการวัดกำลังส่งของเครื่องวิทยุรับ-ส่งที่มีกำลังส่งไม่เกิน 5 วัตต์ ส่วนมากจะเป็นวิทยุประเภทมือถือทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 10W (10 วัตต์) ใช้ในการวัดกำลังส่งของเครื่องวิทยุรับ-ส่งที่มีกำลังส่งไม่เกิน 10 วัตต์ ส่วนมากจะเป็นวิทยุประเภท Mobile

3.3 200W (200 วัตต์) ใช้ในการวัดกำลังส่งของเครื่องวิทยุรับ-ส่งที่มีกำลังส่งไม่เกิน 200 วัตต์ ส่วนมากจะเป็นวิทยุประเภท Mobile, Base station

4. Function switch เป็น switch เลือกการใช้งานของ VSWR มี 3 อย่างคือ

4.1 SWR ใช้ในการวัดค่าของ VSWR (Voltage standing wave ratio) ของสายอากาศชนิดต่าง ๆ

4.2 CAL ใช้ในการปรับเข็มมิเตอร์ให้ชี้อยู่ในตำแหน่ง CAL บนสเกลของมิเตอร์โดยใช้ร่วมกับปุ่ม CAL ก่อนที่ไปทำการวัดค่า SWR

4.3 Power ใช้ในการวัดกำส่ง (Power output) ของเครื่องวิทยุรับ-ส่งโดยใช้ร่วมกับ Range switch

5. Power switch เป็น switch ที่ใช้ในการวัดกำลังส่งของเครื่องรับ-ส่งวิทยุโดยใช้ร่วมกับ Range switch และ Function switch มี 3 อย่างคือ

5.1 OFF คือการปิดเข็มมิเตอร์ๆจะไม่ขึ้น

5.2 FWD (For word) ใช้วัดกำลังส่งของเครื่องส่งในการส่งออกอากาศ (PF)

5.3 REF (Reflect) ใช้ในการวัดกำลังส่งสะท้อนกลับของเครื่องส่ง (PR)

6. AVG switch เป็น switch ใช้ในการหน่วงเข็มมิเตอร์ไม่ให้ขึ้นและลงเร็วเกินไป และใช้กับเครื่อง SSB โดยกด AVG switch ให้อยู่ในตำแหน่งต่ำ (PEP MONI)

7. CAL (Calibrated) เป็นปุ่มปรับเข็มมิเตอร์ให้ขึ้นเต็มสเกลโดยให้ชี้อยู่ในตำแหน่ง CAL ก่อนที่จะทำการวัดค่า SWR ปกติจุดสีแดงของปุ่ม CAL จะอยู่ที่ตำแหน่ง MIN เสมอ ปุ่มนี้ใช้งานร่วมกับ Function switch – CAL

8. ANT (Antenna) เป็นโพลาไรเซชั่นที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อสายนำสัญญาณไปยังสายอากาศหรือ Dammy load (อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แทนสายอากาศ)

9. TX (Transmitt) เป็นโพลาไรเซชั่นที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อสายนำสัญญาณไปยังเครื่องวิทยุ รับ-ส่ง

10. DC-IN เป็นจุดต่อไฟ DC 11-15 volt สำหรับส่องหน้าปัดมิเตอร์เมื่อใช้งานในที่มืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและวิธีการวัดผล

3.1 กล่าวนำ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบสายอากาศโฟลเด็ดไดโพลโดยเลือกใช้สายอากาศโฟลเด็ดไดโพล 8 ห่วง ที่ย่านความถี่ 245 MHz ซึ่งอยู่ในระนาบเดียวกัน การสร้างจะให้ความสนใจในส่วนของค่าความยาวของโฟลเด็ดไดโพล และความยาวของสายเฟสโดยค่าดังกล่าว จะเป็นตัวกำหนดอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ และค่าความกว้างของช่วงความถี่ที่ใช้งานของสายอากาศ

3.2 การออกแบบสายอากาศโฟลเด็ดไดโพล

3.2.1 การออกแบบคำนวณตัวสายอากาศโฟลเด็ดไดโพล

การออกแบบสายอากาศโฟลเด็ดไดโพล 8 ห่วง ที่ย่านความถี่ 245 MHz ซึ่งให้ห่วงทั้ง 8 ห่วงอยู่ในระนาบเดียวกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราขยายของสัญญาณในการออกแบบสายอากาศโฟลเด็ดไดโพล 8 ห่วง ที่ย่านความถี่ 245 MHz มีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

1) คำนวณความยาวห่วงโฟลเด็ดไดโพล ที่ย่านความถี่ 245 MHz จำนวน 8 ห่วง
2) คำนวณระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศโฟลเด็ดไดโพลกับบูมเสากลาง
3) คำนวณระยะห่างระหว่างห่วงโฟลเด็ดไดโพลแต่ละห่วง

3.2.1.1 คำนวณความยาวห่วงโฟลเด็ดไดโพล ที่ย่านความถี่ 245 MHz

จากทฤษฎีในบทที่ 2 หัวข้อ 2.14 ค่าความยาวห่วงโฟลเด็ดไดโพลที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้ความยาวคลื่นครบพอดี ค่าความยาวห่วงโฟลเด็ดไดโพลจะต้องมีค่าครึ่งความยาวคลื่น และกรณีที่ใช้อลูมิเนียมทำสายอากาศโฟลเด็ดไดโพลขนาด 1/2 นิ้ว จะใช้ค่า Velocity factor ของอลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 0.911 ในที่นี้เลือกใช้ที่ความถี่ 245 MHz

คำนวณหาความยาวคลื่นของสายอากาศโดยใช้สูตร

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{3.1}$$

เมื่อ C คือ ค่าความเร็วคลื่นแสงที่ค่าเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที

f คือ ค่าความถี่ซึ่งจะกำหนดใช้ที่ความถี่ 245 MHz

จะได้

$$\lambda = \frac{3\times10^8}{245\times10^6} = 1.224 \text{ เมตร}$$

ตามหลักการออกแบบพื้นฐานที่นิยมคือไดโพลครึ่งคลื่น จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{1.224}{2} = 0.612 \text{ เมตร}$$

จากค่า Velocity Factor ของอลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 0.911 จะได้

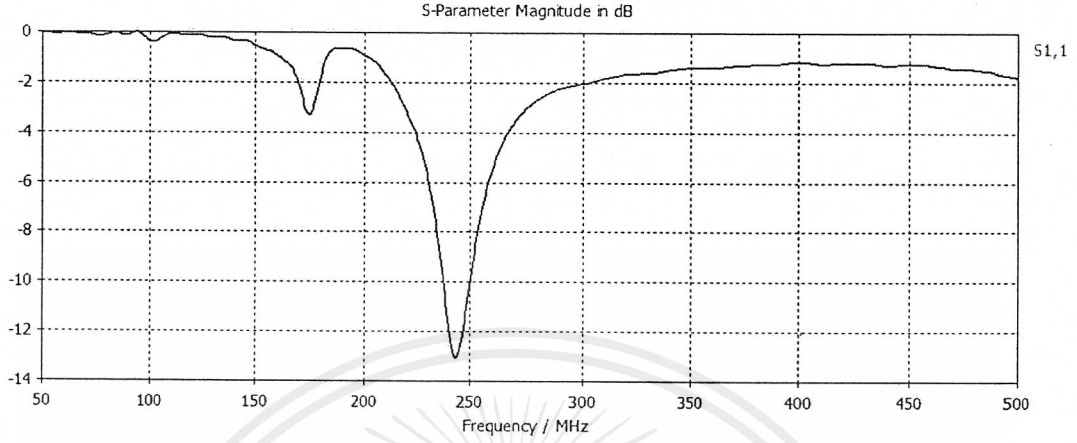
$$0.612 \times 0.911 = 0.557 \text{ เมตร}$$

เพื่อให้ระบบเรโซแนนซ์(มีค่ารีแอกแตนซ์เป็นศูนย์) ดังนั้นความยาวของห่วงโฟลเด็ดไดโพลจะต้องน้อยกว่า 1/2 แลมบ์ด้าเล็กน้อยประมาณ 1 - 2 % เพราะฉะนั้นความยาวของห่วงโฟลเด็ดไดโพลจะอยู่ที่ขนาด 55.1 - 54.6 เซนติเมตร

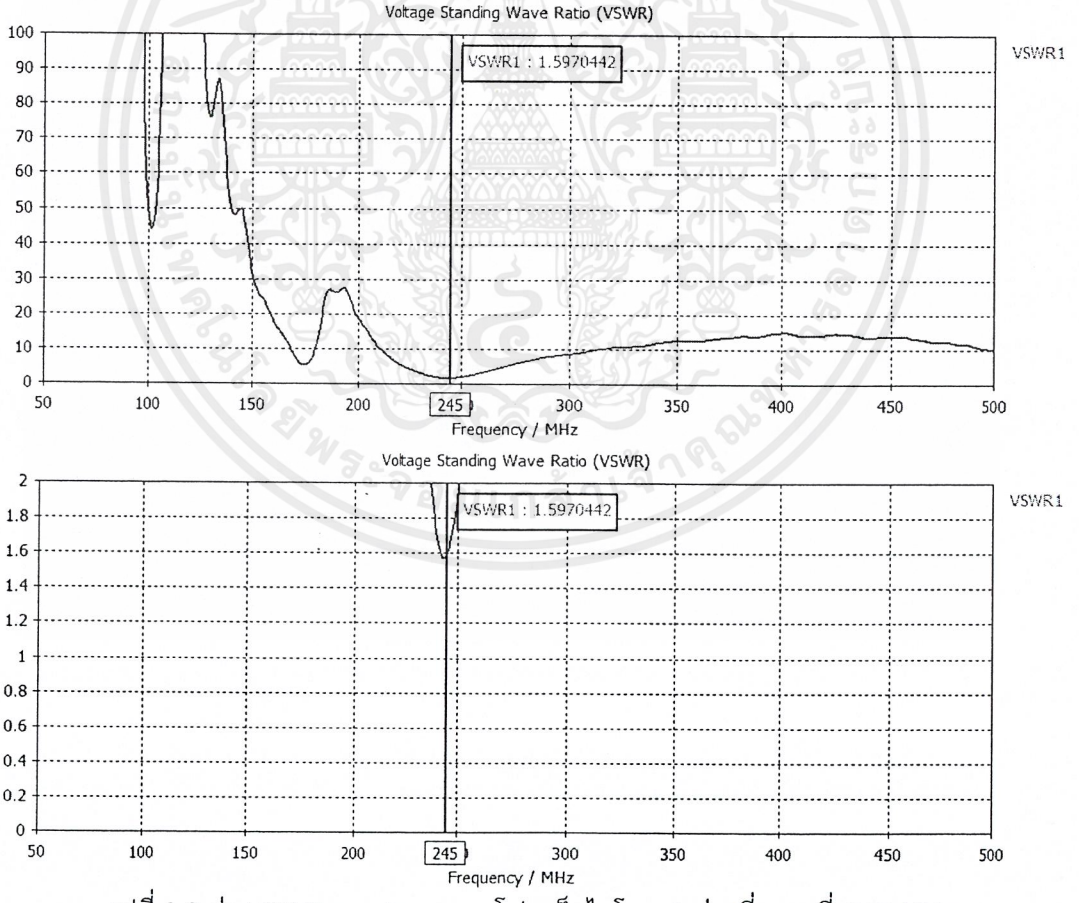
รูปที่ 3.1 ห่วงโฟลเด็ดไดโพลขนาด 54.6 เซนติเมตร

โดยมีค่าพารามิเตอร์ S_{11}, VSWR และ Impedance ดังรูปที่ 3.2 – 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

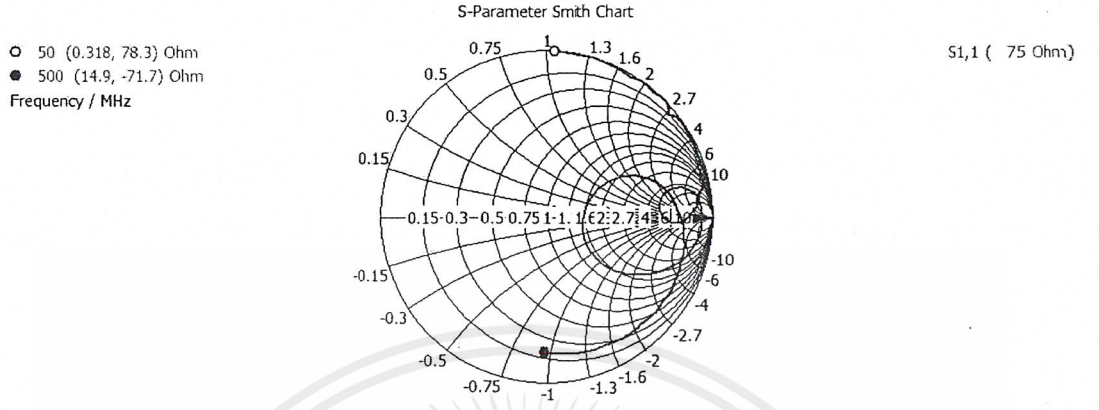


รูปที่ 3.2 ค่า S_{11} สายอากาศโฟลเด็ดไดโพล 8 ห่วงที่ความถี่ 245 MHz

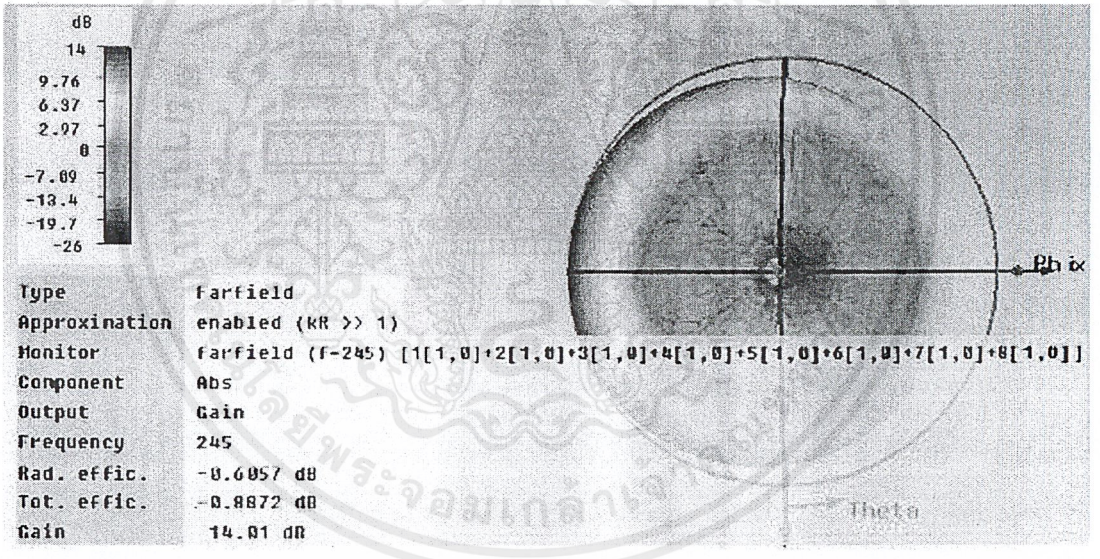


รูปที่ 3.3 ค่า VSWR ของสายอากาศโฟลเด็ดไดโพล 8 ห่วงที่ความถี่ 245 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

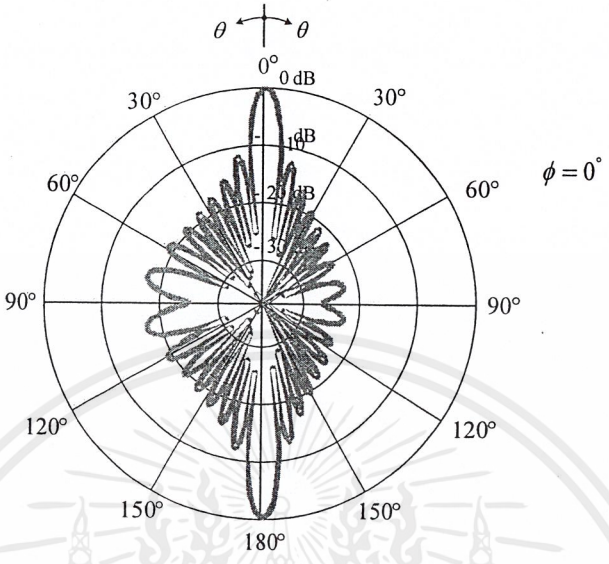


รูปที่ 3.4 ค่าอิมพีแดนซ์สายอากาศโฟลเด็ดไดโพล 8 ห่วงที่ความถี่ 245 MHz

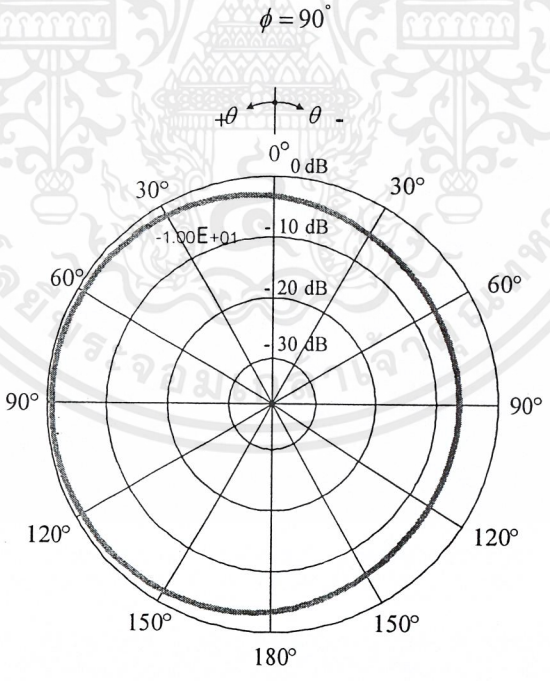


รูปที่ 3.5 ค่าอัตราขยายของสายอากาศโฟลเด็ดไดโพล 8 ห่วงที่ความถี่ 245 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-Plane ของสายอากาศ



รูปที่ 3.7 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-Plane ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

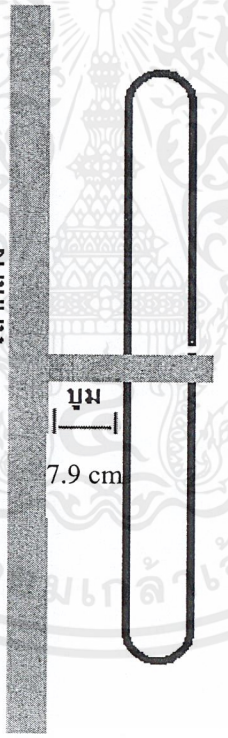
3.2.1.2 คำนวณระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศโฟลเด็ดไดโพลกับบูมเสากลาง

จากทฤษฎีบทที่ 2 หัวข้อ 2.14 ปกติสายอากาศโฟลเด็ดไดโพลถ้าลอยอยู่ในอากาศจะมีความต้านทานที่ขั้วประมาณ 300 โอห์ม เมื่อเราเอามาวางลงบนบูมและวางใกล้ๆ เสากลางจะทำให้ความต้านทานลดลงมาเหลือประมาณ 100 - 120 โอห์ม(ขึ้นอยู่กับขนาดท่อและระยะห่างต่างๆ) ในที่นี่เราจะต้องการให้ความต้านทานลดลงมาเหลือประมาณ 100 โอห์ม โดยระยะห่างระหว่างห่วงไดโพลกับเสากลางที่เหมาะสม เราจะใช้ที่ระยะ 1/14 แลมบ์ด้า ซึ่งจะได้

$$\frac{\lambda}{14} = \frac{1.224}{14} = 0.087 \text{ เมตร}$$

จากค่า Velocity factor ของอลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 0.911 จะได้

$$0.087 \times 0.911 = 0.079 \text{ เมตร}$$

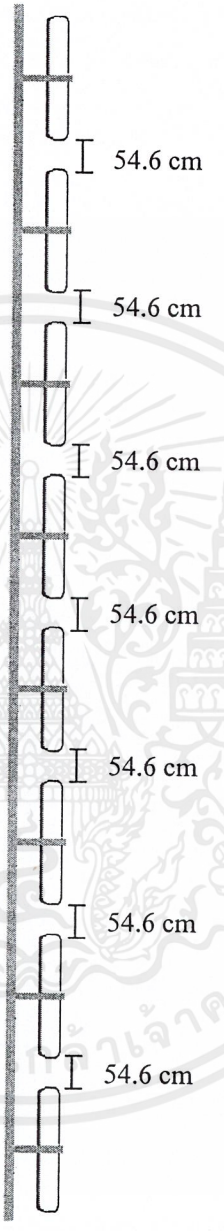


รูปที่ 3.8 ระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศโฟลเด็ดไดโพลกับบูมเสากลาง

3.2.1.3 คำนวณระยะห่างระหว่างห่วงโฟลเด็ดไดโพลแต่ละห่วง

ระยะห่างระหว่างห่วงโฟลเด็ดไดโพลแต่ละห่วงจะเท่ากับความยาวห่วงที่ได้จากการคำนวณครึ่งความยาวคลื่นที่ความถี่ 245 MHz จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ระยะห่างระหว่างห่วงโฟลเด็ดไดโพลแต่ละห่วง

3.3 การเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศ

จากการสร้างสายอากาศโฟลเด็ดไดโพลพบว่าคุณสมบัติที่ใช้งานได้จริงที่ความถี่ 245 MHz แต่ค่า S_{11} ที่ได้ยังอยู่ในเกณฑ์ที่พอยอมรับได้เท่านั้นดังนั้นจึงได้หาวิธีการปรับปรุงสายอากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การแมตช์ชิงอิมพีแดนซ์สายอากาศ

การสร้างสายอากาศโฟลเด็ดไดโพลต้องแมตช์ชิงอิมพีแดนซ์ให้ลงที่ความถี่ 245 MHz ให้มากที่สุด

3.3.1.1 การเอาโฟลเด็ดไดโพล 2 อันที่สแต็กกันแล้วมาสแต็กกันอีก 2 ครั้ง เพื่อให้เป็น 8 ห่วง

ปลายสายทั้งสองของโฟลเด็ดไดโพลที่ขนานกันแล้วจะมีความต้านทานอยู่ที่ 56.25 โอห์ม นำมาต่อกับสายนำสัญญาณที่มีความต้านทาน 75 โอห์มมาตัดให้ได้ความยาว 5/4 แลมบ์ด้า แล้วขนานกันก่อน และนำมาต่อกับสายนำสัญญาณที่มีความต้านทาน 75 โอห์มมาตัดให้ได้ความยาว 9/4 แลมบ์ด้า จะได้ปลายสายมีความต้านทานเท่ากับ 100 โอห์มเมื่อขนานกันความต้านทานจะลดลงเหลือ 50 โอห์ม

เพื่อความสะดวกในการนำไปติดตั้งใช้งานเราก็เอาสายนำสัญญาณ 50 โอห์ม อีกเส้นหนึ่งที่ตัดความยาวลงแลมบ์ด้ามาต่อจากจุดที่เราทำการขนานกัน แล้วเข้าหัว PL258 ไว้ที่ปลายสายเพื่อสำหรับต่อสายนำสัญญาณที่เราลากไปจากเครื่องวิทยุอีกทอดหนึ่ง

3.3.1.2 การคำนวณความยาวสายนำสัญญาณของสายอากาศโฟลเด็ดไดโพลที่ความถี่ 245 MHz

1) คำนวณความยาวสาย A, B, C, D, E, F, G, H และ O ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1λ

$\lambda = 1.224$ เมตร

จากค่า Velocity Factor ของสายนำสัญญาณมีค่าเท่ากับ 0.66 จะได้

ความยาวสาย $= 1.224 \times 0.66 = 0.808$ เมตร

2) คำนวณความยาวสาย I, J, K และ L ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5/4λ โดยที่

$$\frac{5\lambda}{4} = \frac{5 \times 1.224}{4} = 1.53 \text{ เมตร}$$

จากค่า Velocity Factor ของสายนำสัญญาณมีค่าเท่ากับ 0.66 จะได้

ความยาวสาย $= 1.53 \times 0.66 = 1.009$ เมตร

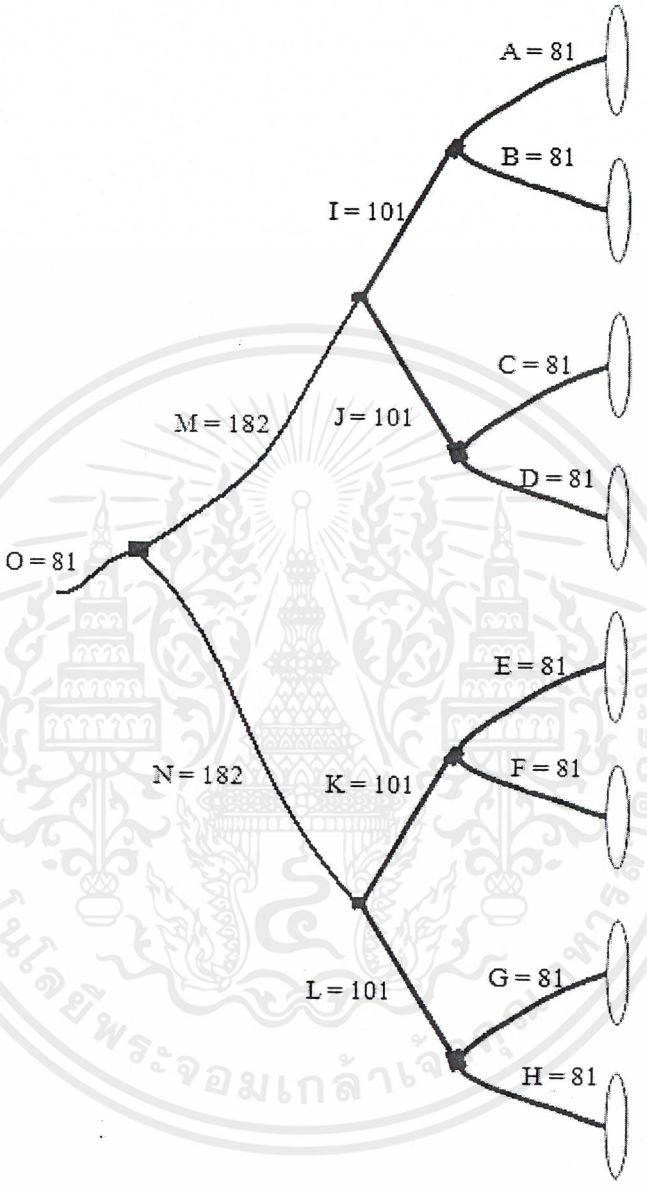
3) คำนวณความยาวสาย M และ N ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9/4λ โดยที่

$$\frac{9\lambda}{4} = \frac{9 \times 1.224}{4} = 2.754 \text{ เมตร}$$

จากค่า Velocity Factor ของสายนำสัญญาณมีค่าเท่ากับ 0.66 จะได้

ความยาวสาย $= 2.754 \times 0.66 = 1.817$ เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ความยาวสายนำสัญญาณของสายอากาศโพลเด็ดไดโพลที่ความถี่ 245 MHz

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองวัดค่าพารามิเตอร์สายอากาศ

3.4.1 ชุดวัดค่าพารามิเตอร์สายอากาศ สามารถวัดเอส-พารามิเตอร์ (S-parameter) เพื่อหาค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss: S_{11} (dB)) วัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) และวัดค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ (Input impedance) ของสายอากาศ ซึ่งประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) เครื่อง 8150C Network analyzer

2) เครื่อง 8514B S-parameter test set (45 MHz – 20 GHz)

3) เครื่อง 8360 series Synthesized sweeper (10 MHz – 20 GHz)

4) ชุดคาลิเบรท 85052B (Calibration kit 85052B 35 mm.)

5) สายโคแอคเชียล (Coaxial cable) และหัวต่อ (SMA F-PL 259 connector) ชนิดที่มีความสูญเสียต่ำ

6) สายอากาศที่ต้องการวัด

3.4.1.1 ขั้นตอนการทดลอง

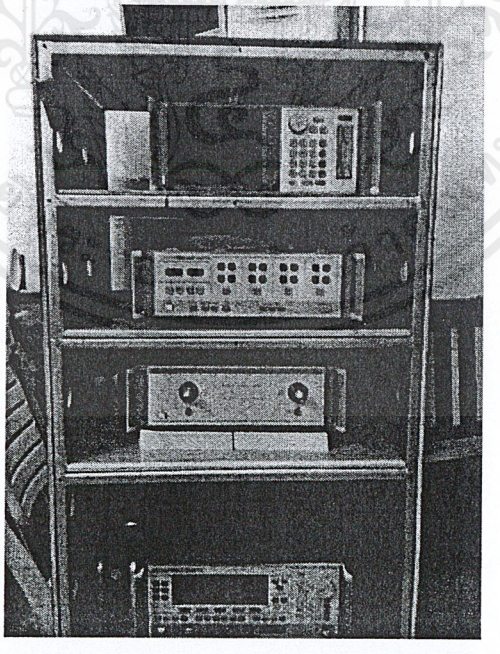
1) เปิดเครื่องของชุดวัดความถี่เรโซแนนซ์ทุกตัว

2) ทำการคาลิเบรทเครื่องด้วยชุดคาลิเบรท ซึ่งประกอบไปด้วยตัวลัดวงจร (Short circuit) ตัวเปิดวงจร (Open circuit) และโหลดบอร์ดแบนด์ (Load broadband) เพื่อต้องการให้เครื่องคำนวณค่า noise ในเครื่องและสายนำสัญญาณ

3) ต่อสายอากาศที่ต้องการวัดเข้ากับชุดวัดค่าพารามิเตอร์สายอากาศ

4) เลือกเมนูวัดค่าเอส-พารามิเตอร์, ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่อแรงดันและค่าอิมพุทอิมพีแดนซ์

5) บันทึกผลการทดลองและทำซ้ำทั้งสี่ข้อใหม่อีกครั้ง



รูปที่ 3.11 ชุดวัดค่าพารามิเตอร์สายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น

การวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นการวัดคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในมุมต่างๆ ซึ่งจะเป็นตัวบอกให้รู้ว่าสายอากาศรับคลื่นได้ดีในทิศทางใดและรับคลื่นได้ไม่ดีในทิศทางใดบ้าง อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1) เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal generator) ที่ความถี่ 245 MHz

2) สายโคแอคเชียลและหัวต่อ (SMA F-PL 259 Connector) ชนิดความสูญเสียต่ำ (Low loss)

3) สายอากาศโฟลเด็ดไดโพล 8 ห่วง ที่จะนำมาทดสอบ

4) อุปกรณ์หมุนสายอากาศเพื่อวัดแพทเทิร์น

3.4.2.1 ขั้นตอนการทดลอง

1) จัดเตรียมอุปกรณ์ให้เรียบร้อย

2) คำนวณค่าระยะของสนามระยะไกลในความถี่ 245 MHz

3) ตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณให้ส่งความถี่ที่จะวัดแล้วต่อกับสายอากาศตัวส่ง

4) ติดตั้งสายอากาศให้ส่งคลื่นในแนวตั้งเพื่อวัดสนามไฟฟ้า และติดตั้งสายอากาศให้ส่งคลื่นในแนวนอนเพื่อวัดสนามแม่เหล็ก

5) ติดตั้งสายอากาศที่จะวัดบนตัวหมุนและวางห่างจากสายอากาศตัวส่งที่สนามระยะไกล

6) ต่อสายสัญญาณ สายควบคุม รวมทั้งตรวจสอบอุปกรณ์ และจุดต่อต่างๆ ให้ถูกต้อง

7) ทำการส่งสัญญาณที่ความถี่ที่จะวัด

8) วัดสัญญาณที่รับได้แล้วบันทึกผล และควบคุมตัวหมุนให้หมุนไปครั้งละ 5 องศา โดยใช้เวลาองศาละ 5 วินาที

9) นำสัญญาณที่วัดได้มาพลอตกราฟแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่น

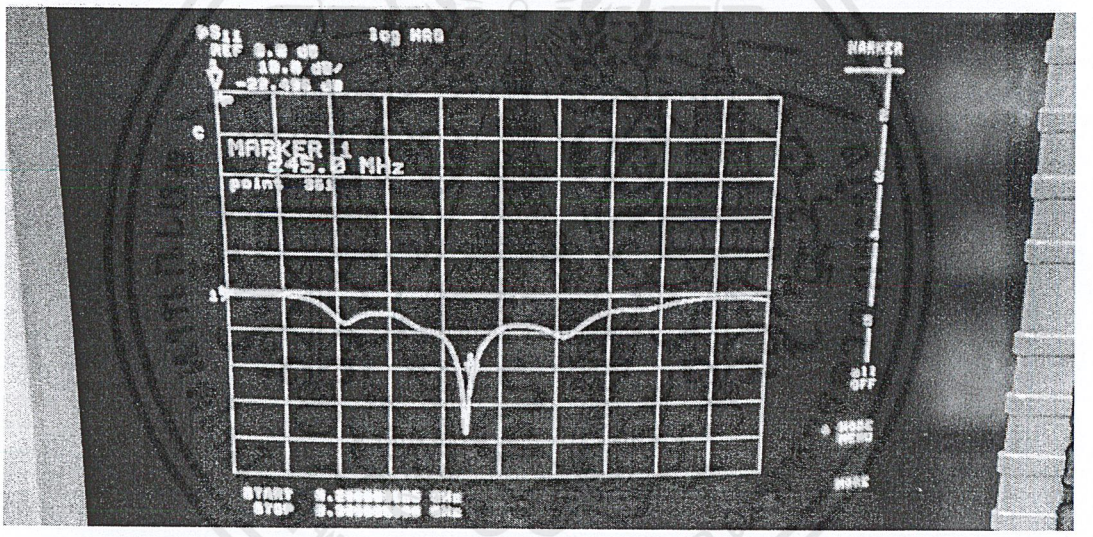
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวัด

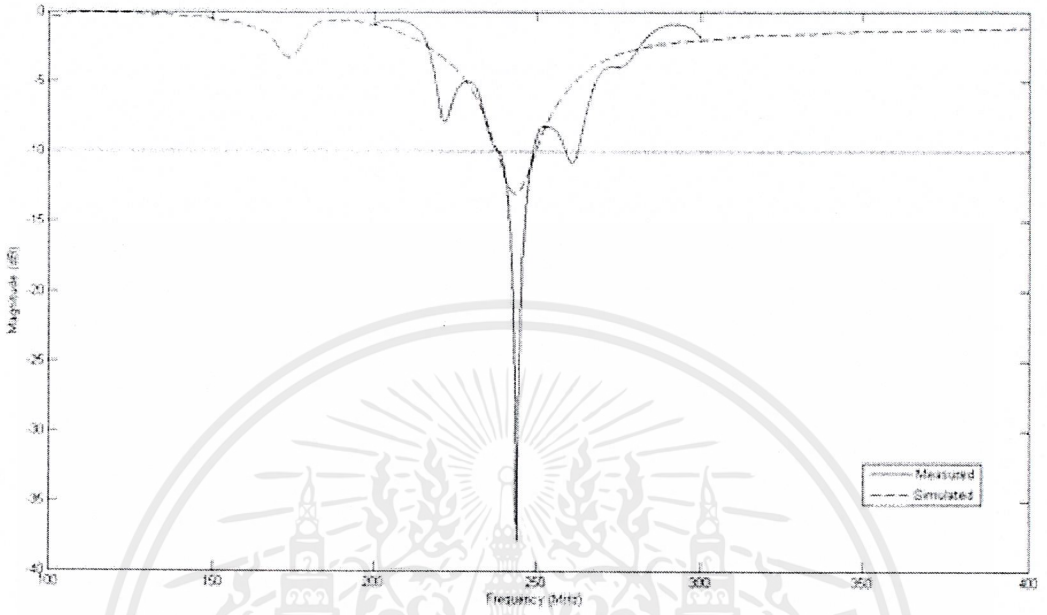
4.1 ผลจากการวัดค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับ

เป็นค่าที่บ่งบอกถึงการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับของคลื่นที่ส่งออกไป โดยค่านี้ยิ่งมีค่าน้อย สายอากาศตัวนั้นยิ่งมีคุณสมบัติดี ซึ่งค่าการสูญเสียที่วัดได้จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ -22.496 dB ที่ความถี่ 245 MHz โดยค่าที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับ

4.2 ผลจากการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing wave ratio: SWR)

เป็นค่าที่แสดงอัตราส่วนของคลื่นที่สะท้อนกลับมายังสายอากาศ โดยปกติในการส่งสัญญาณนั้นก็จะมีการสะท้อนกลับของคลื่นเป็นปกติอยู่แล้ว เพราะฉะนั้นค่า SWR ที่ดีที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 1 โดยในการทดลองสายอากาศที่ออกแบบมีค่า SWR เท่ากับ 1.2 ที่ความถี่ 245 MHz โดยค่าที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

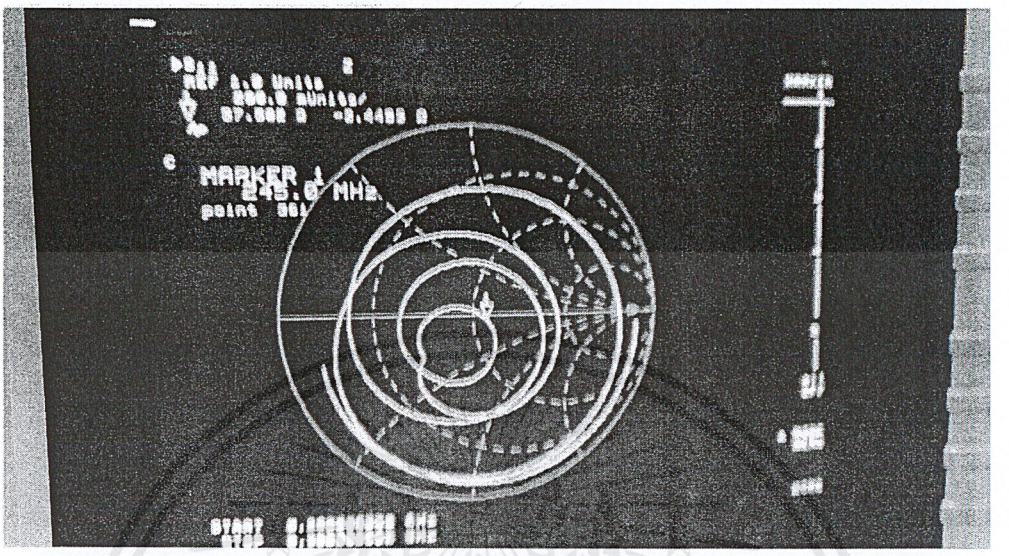
รูปที่ 4.3 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่วัดได้

4.3 ผลจากการวัดค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ (Input impedance)

โดยค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่เราต้องการนั้นเท่ากับ 50 Ω โดยค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโฟลเด็ดไดโพลนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าความยาวของสายนำสัญญาณ ซึ่งจากการคำนวณในบทที่ผ่านมา แต่ในทางปฏิบัตินั้นที่ความยาวนั้นค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศอาจจะไม่เท่ากับ 50 Ω ซึ่งเราสามารถปรับให้เท่ากับ 50 Ω ได้ด้วยการลดหรือเพิ่มความยาวของสายนำสัญญาณเล็กน้อย

ผลจากการวัดค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศค่าที่ได้จะเท่ากับ 57.592 - 3.445j Ω ที่ความถี่ 245 MHz โดยค่าที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ที่วัดได้

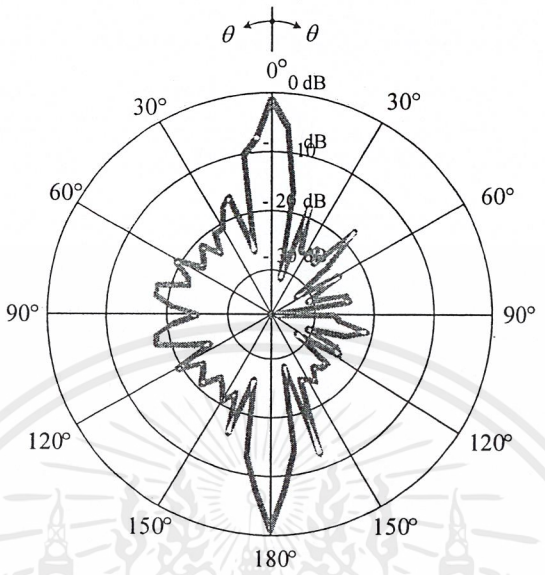
4.4 ผลจากการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ

การวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศก็คือ การแสดงผลของค่าการชี้ทิศทางนั้นเอง เพราะจากสูตร $G = e_tD$ เมื่อ e_t เป็นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ โดยเมื่อกำหนดให้สายอากาศไม่มีการสูญเสียจะได้ค่า e_t เท่ากับ 1 เพราะฉะนั้นจะได้ว่า ค่าการชี้ทิศทาง = ค่าอัตราขยาย โดยในการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 13.01 dB นั้น เราหันสายอากาศที่มีการรับสัญญาณได้แรงที่สุดเข้าหากัน

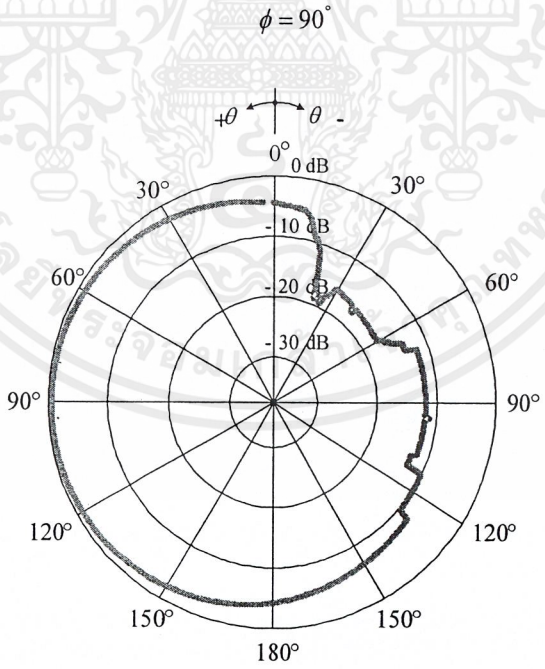
4.5 ผลจากการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น

การวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นทำได้โดยใช้สมการการส่งคลื่นของฟริสในการวิเคราะห์ ซึ่งใช้สายอากาศสองตัววัดโดยตัวหนึ่งเป็นตัวส่งซึ่งจะอยู่กับที่ และอีกตัวเป็นตัวรับซึ่งจะหมุนรอบตัวเอง โดยการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจะแบ่งเป็นในระนาบ E-Plane และ H-Plane โดยระนาบ E-Plane จะวางสายอากาศให้มีโพราไรเซชันที่ตรงกันในแนวตั้ง ส่วนระนาบ H-Plane จะวางสายอากาศให้มีโพราไรเซชันที่ตรงกันในแนวนอน ในการวัดจะวางสายอากาศให้มีระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสองต้องมากกว่าระยะ Far-field ซึ่งได้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-Plane ของสายอากาศ



รูปที่ 4.6 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-Plane ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าถ้าค่าอัตราขยาย, ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับ, ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) มีค่าที่มีคุณสมบัติที่ดีก็จะทำให้สายอากาศตัวนั้น สามารถที่จะใช้งานได้ในความถี่ 245 MHz ก็คือสายอากาศที่ได้มีความถี่ที่กำหนดนั้นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และบทสรุป

ในระบบทวนสัญญาณนี้เราเลือกใช้สายอากาศโฟลเด็ดไดโพลมาเป็นสายอากาศที่ใช้ในระบบทวนสัญญาณเพราะสายอากาศแบบโฟลเด็ดไดโพลจะเป็นสายอากาศที่มีการกระจายคลื่นแบบกึ่งทิศทางลักษณะคล้ายๆ รูปไข หรือรูปดอกบัวครับ โดยจะมีความแรงของสัญญาณทางด้านหน้าห่วงมากที่สุด ส่วนด้านข้างจะน้อยลงและด้านหลังห่วงน้อยที่สุดแต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ยังขึ้นอยู่กับสูตรและวิธีการทำของแต่ละคนด้วยเพราะถ้าเราทำให้ห่วงไดโพลอยู่ห่างจากเสากลางมากก็จะมีคุณสมบัติรอบตัวมากขึ้น แต่ถ้าเราทำให้ห่วงอยู่ชิดกับเสากลางมากก็มีคุณสมบัติเป็นทิศทางมากขึ้น(ด้านหน้ามีเกนขยายมากขึ้นส่วนด้านหลังมีเกนขยายน้อยลงมาก)

5.1 บทวิจารณ์และบทสรุป

จากผลการทดลองทำการออกแบบและสร้างสายอากาศสำหรับสถานีทวนสัญญาณ ได้ว่าค่าการสูญเสียจากการสะท้อนของสายอากาศแบบโฟลเด็ดไดโพลที่วัดได้นั้น สามารถที่จะนำไปใช้งานได้ในความถี่ 245 MHz โดยจะใช้ได้ดีที่สุดสำหรับสายอากาศนี้อยู่ที่ความถี่ 244.125 MHz

ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศยังขึ้นอยู่กับค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับของสายอากาศ ผลจากการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งคือมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่า SWR ตามทฤษฎี ซึ่งจะต้องมีค่าเท่ากับ 1 : 1 เพื่อไม่ให้เกิดการสะท้อนกลับภายในสายอากาศทำให้เกิดการสูญเสีย

ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดนั้นถือได้ว่ามีค่าที่ใกล้เคียง 50 โอห์ม ซึ่งได้จากทฤษฎี เพื่อให้แมตซ์ชิงกันกับสายนำสัญญาณที่ต่อเข้ากับสายอากาศ ไม่ให้เกิดการสูญเสีย

ค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ได้จากการวัดเท่ากับ 13.01 dB ซึ่งคาดเคลื่อนจากทฤษฎีเพียงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมที่ใช้ทดสอบสายอากาศ หรืออาจเกิดจากการคาลิเบรทเครื่องวัดไม่ดีพอทำให้เกิดการสูญเสีย หรืออาจเกิดจากความผิดพลาดของผู้ทำทดลองเอง

5.2 ปัญหาที่พบในการทดลอง

จากการทดลองสายอากาศโฟลเด็ดไดโพล 8 ห่วงที่ได้ทำการออกแบบนั้นต้องมีการจำลองแบบหลายครั้งเนื่องจากขนาดความยาวห่วงโฟลเด็ดไดโพลถ้าเกิดความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยจะทำให้ความถี่ที่เราต้องการเกิดคลาดเคลื่อนได้จึงต้องระมัดระวังเป็นอย่างมาก เช่นเดียวกันกับความยาวของสายนำสัญญาณที่ใช้ต้องได้ขนาดตามที่คำนวณเพื่อไม่ให้สัญญาณเกิดความผิดเพี้ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] Constantine A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design", 2nd Edition, John Wiley & Son. Inc., 1997

[2] W.L. Stutzman and G.A. Thiele, "Antenna and Theory and Design", 2nd Edition, John Wiley & Son. Inc., 1998

[3] เมธี ฉัตรทอง, สมชาย สุขสวัสดิ์ คู่มือวิทยุคมนาคม พิมพ์ครั้งที่ 1: โรงพิมพ์ภัทราการพิมพ์ กรุงเทพมหานคร, 2534

[4] ทะนง โชติสรยุทธ์, วิทยุสมัครเล่น พิมพ์ครั้งที่ 1: โรงพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด(มหาชน) กรุงเทพมหานคร, 2537

[5] โมไนย ไกรฤกษ์ และ วิวัฒน์ กิรานนท์ , "ทฤษฎีสายอากาศ" , วศ.สจล. 123 , คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CDR500/CDR700 Repeaters

Capability Expansion*

Your CDR repeater's capabilities can be expanded through the addition of special options:

Community Repeater Capability—lets multiple groups share the same radio channel.

Telephone Interconnect—lets radio users access a local landline telephone network, further expanding your communications reach.

SmarTrunk II™ Trunking—provides faster access to channels, security, privacy, and telephone access.

Standard CDR500 Repeater Includes:

- Metal Housing with Temperature Controlled Fan Assembly
- Mounting Bracket
- Interconnection Cables
- Service Manual
- Power Supply with Switchable Primary Voltage

Standard CDR700 Repeater Includes:

- Metal Enclosure with Fan Assembly
- Interconnection Cables
- Service Manual

R.I.C.K. Module Features (Repeater Interface Communications Kit)

- Programmable Dip Switch
- Hang Time 0, 1.5 or 3 seconds
- Audio Path Capability
- Bi-Directional or Uni-Directional Operation
- Front Panel "Repeater Enable Control"
- Variable Level Repeat Audio Path
- Compatible with RapidCall Signaling

Complete Package Requires the Addition of:

- 2 PRO Series Mobile Radios
- Duplexer

General		CDR500	CDR700
Dimensions HxWxD	inches cm	7.4 x 17.4 x 13.5 18.8 x 44.2 x 34	12.2 x 8.3 x 12.5 31 x 21.1 x 31.7
Weight	kilo pounds	19.4 42.7	12.7 28
Duty Cycle to Duplexer	Low Power Mode High Power Mode	100% (40 W LB / 25 W UHF, VHF) 50% (60 W LB / 40 W UHF / 45 W VHF)	
Model Number		HKLN4060, HK1008	HKLN4056, HK1009
Primary Input (Selectable)		115 / 230 50-60 Hz	

Specifications subject to change without notice. All electrical specifications and methods refer to EIA/TIA 603 standards. For additional radio specifications reference Professional Series Specification Sheet.

*Note: Some features may require additional options or equipment.

CDR Repeaters Features

- Lockable Wall Mount
- Field Programmable
- Supports UHF, VHF, and Lowband Frequencies
- Internal Mounting for Duplexer and Preselector
- Crossband Capable

Alternatives to Standard Configuration:

- ZR310 Multiple Tone Panel
- i20R On-site Repeater
- ZR340 Interconnect with Selective Calling
- Enhanced SmarTrunk II™ Repeater
- Zetron™ Model 42

Contact your Motorola Representative today for more information.

MOTOROLA

MOTOROLA, Ⓜ and all other trademarks indicated as such herein are trademarks of Motorola, Inc. ® Reg. U.S. Pat. & Tm. Off.
SmarTrunk is a trademark owned by SmarTrunk Systems, Inc. Zetron is a trademark of Zetron, Inc.
All other product or service names are the property of their respective owners.
© 2001 Motorola, Inc. All rights reserved. Printed in the U.S.A.

LE-CDR57-PS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS

GENERAL

• Frequency range	: 245 MHz, CB 80 Channels		
• Type of emission	: FM (8K50F3E)		
• Antenna connector	: BNC (50 Ω)		
• Frequency stability	: ± 5 ppm (± 0.0005%)		
• Operation temp.range	: - 10 °C to + 60 °C		
• Power supply voltage	: 7.2 V DC Supplied battery pack; negative groud		
• Current drain	: Transmit	at 5 W	1.7 A
		at 1 W	0.7 A
	Receive	stand-by	70 mA
		rated audio	250 mA
• Dimensions (proj. not incl.)	: 54 (W) x 132 (H) x 35 (D) mm		
• Weight (incl. Battery and ant.)	: 370 g ; 13.1 oz		

All stated specifications are subject to change without notice or obligation.

TRANSMITTER

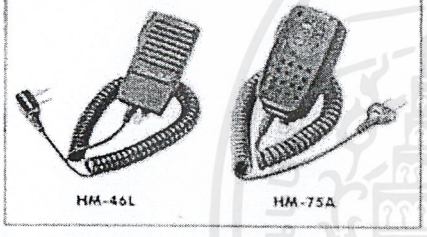
• Output power	: High 5 W Low 1 W
• Modulation system	: Variable reactance freq. modulation
• Maximum deviation	: ± 2.5 kHz
• Spurious emissions	: 70 dB
• Adjacent channel power	: 60 dB
• External MIC connector	: 3-conductor 2.5 (d) mm/2 kΩ

RECEIVER

• Receive system	: Double conversion superheterodyne system
• Intermediate frequencies	: 1 st 31.050 MHz 2nd 450 kHz
• Sensitivity (12 dB SINAD)	: 0.25 µV
• Squelch sensitivity (threshold)	: 0.25 µV
• Adjacent channel selectivity	: 65 dB
• Spurious response	: 70 dB
• Intermodulation rejection ratio	: 70 dB
• Audio output power (at 7.2 V DC)	: 500 mW at 5 % distortion with an 8 Ω load
• External SP connector	: 3-conductor 3.5 (d) mm/8 Ω

OPTIONS

SPEAKER-MICROPHONES

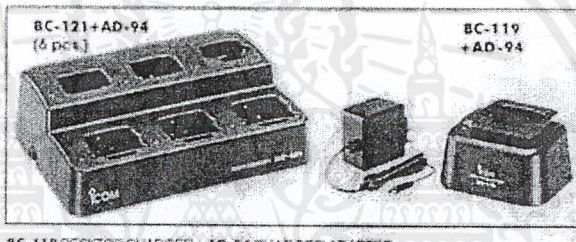


HM-46L HM-75A

HM-75A : Allows you remote control capabilities; the [▼], [▲], [A] and [B] switches act as the [▼], [▲], [P0] and [P1] switches of the transceiver, respectively.

HM-46L : Slim dimensions. Equipped with an earphone jack and a transmit indicator.

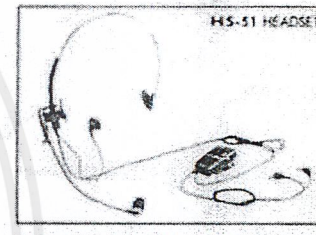
BC-121+AD-94 (6 pcs.) / BC-119 +AD-94



BC-119 DESKTOP CHARGER + **AD-94** CHARGER ADAPTER
For rapid charging of battery pack, BP-209 or BP-210. An AC adapter is supplied with the charger. Charging time: 1.5 to 2 hours.

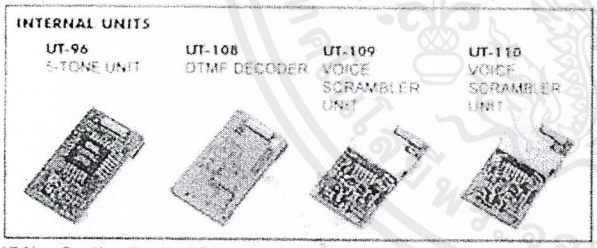
BC-121 MULTI-CHARGER+ **AD-94** CHARGER ADAPTER + **BC-124** AC ADAPTER
For rapid charging of up to 6 battery packs (six AD-94s are required.), BP-209 or BP-210. The BC-124 outputs 12 V DC and has 7 A capacity for the BC-121. Charging time: 1.5 to 2 hours.

HS-51 HEADSET



For hands-free operation. Includes VOX, PTT and "one-touch" PTT with a time-out timer.

INTERNAL UNITS



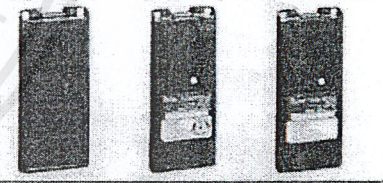
UT-96 5-TONE UNIT
UT-108 DTMF DECODER
UT-109 VOICE SCRAMBLER UNIT
UT-110 VOICE SCRAMBLER UNIT

UT-96 : Provides either the 2/5 tone encode/decode and ANI capabilities.
UT-108 : Provides DTMF decode and ANI capabilities.
UT-109 : Provides operating security. Up to 32 scrambling codes are available. The scrambling system is not compatible with the UT-110, therefore, cannot operate with the scrambled signals by UT-110.
UT-110 : Provides higher operating security. Up to 1020 (255 codes x 4 groups) scrambling codes are available. The Scrambling system is not compatible with the UT-109, therefore, cannot operate with the scrambled signals by UT-109.
UT-113 : Allows man down function.

SP-13 EARPHONE

Provides clear audio in noisy environment.

BATTERY PACKS AND CASE



BP-208 AA (R6) batteries x 6
BP-209 Ni-Cd 7.2 V/1100 mAh
BP-210 Ni-MH 7.2 V/1650 mAh

Approx. output power and operating times (Tx (1/4): Rx: standby=5:5:90

BATTERY PACK	OUTPUT POWER	BATTERY LIFE (approx.)
BP-208	5 W typ.	—
BP-209	5 W typ.	6 hours
BP-210	5 W typ.	11 hours

Icom Inc. 6-9-16, Kamihigashi, Hirano-ku, Osaka 547 Japan Phone: 06 793 5302 Fax: 06 793 0013

Count on us!

Icom America Inc.
<Corporate Headquarters>
3380 116th Avenue N.E., Bellevue, WA 98004 U.S.A.
Phone: (206) 454-8155 Fax: (206) 454-1509
Telex: 152210 ICOM AMER BVUE
<Customer Service>
Phone: (206) 454-7619

Icom Canada
A Division of Icom American Inc.
3071 #5 Road, Unit 9 Richmond, B.C., V6X 2T4, Canada
Phone: (604) 273-7400 Fax: (604) 273-1900

Icom (Europe) GmbH
Communication Equipment
Himmelgeister Str. 100, D-40225 Duesseldorf, Germany
Phone: 0211/346047 Fax: 0211/333639

Icom (Australia) Pty. Ltd.
A.C.N. 006 092 575
7 Duke Street, Windsor, Victoria 3181, Australia
Phone: 03 9529 7582 Fax: 03 9529 8485

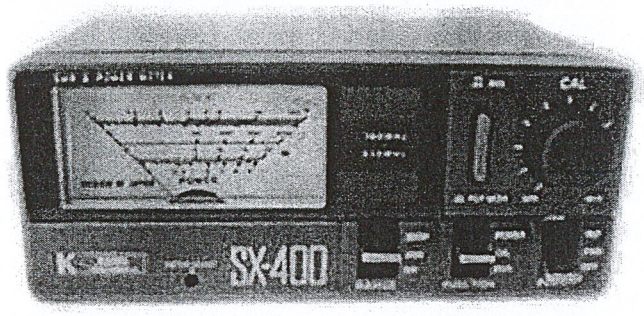
Icom (UK) Ltd.
Unit 9, Sea St., Herne Bay, Kent, CT6 8LD, U.K.
Phone: 01227 741741 Fax: 01227 741742
Telex: 317210 BUREAU G

Icom France S.a
Zac de la Plaine, Rue Brindejonc des Moulinais
BP 5804, 31505 Toulouse Cedex, France
Phone: 61.36.03.03 Fax: 61.36.03.00
Telex: 521515 ICOM FRA

Your local distributor/dealer:

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Printed in Thailand



Specifications

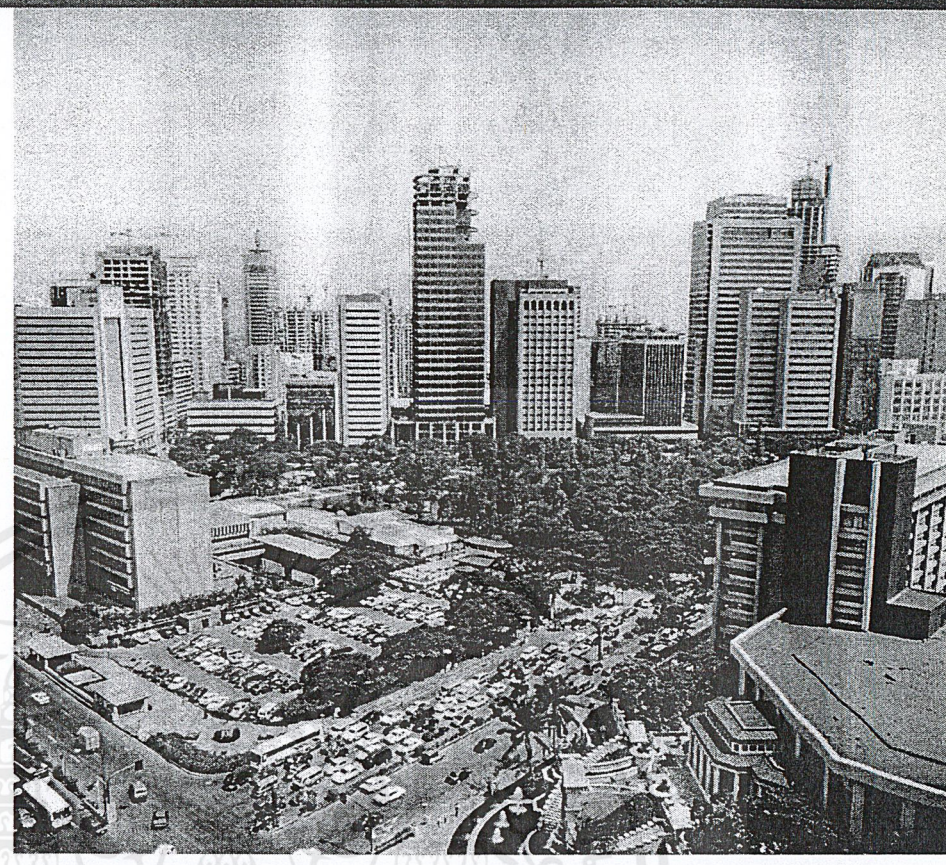
	SX-200	SX-400
Frequency range	1.8—200MHz	140—525MHz
Power measurement range	0~200W (intermittent measurement)	
Power range	5W/20W/200W	5W/20W/200W
Accuracy of full scale	5W RANGE ±5% 20W RANGE ±7.5% 200W RANGE ±5% Add 15% of full scale at 160 to 200MHz.	5W RANGE ±10% 20W RANGE ±5% 200W RANGE ±5% Subtract 10% of full scale at 220 to 420MHz and add 10% of full scale at 450 to 525MHz.
Minimum power at swr measurement	1W	4W
Measurement range at swr measurement	1.0~∞	1.0~∞
Insertion loss	0.15dB maximum 1.8—3.5MHz and 150—200MHz 0.2dB maximum	140—250MHz 0.1dB maximum 400—470MHz 0.2dB maximum 470—525MHz 0.3dB maximum
Impedance	50 ohms	50 ohms
Connectors	UHF femle	UHF female
Dimentions	155×63×103 mm (W/H/D) (6.1"×2.4"×4.1")	
Weight	540g (1.19lbs.)	540g (1.19lbs.)
Accessories	Operation instructions DC power cable	

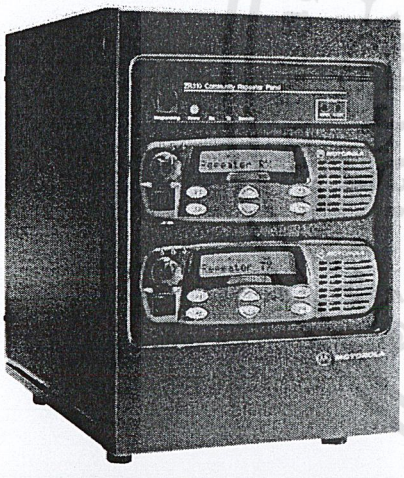
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

intelligence everywhere™

MOTOROLA

Motorola continues to develop integrated systems to provide the extended communication your business needs to succeed.





Every day your business grows and adapts to meet new challenges. You demand more speed, flexibility, and more range from your communication tools. To provide the extended coverage your business requires, Motorola engineered the CDR500 and CDR700 repeaters.

The CDR500 and CDR700 repeaters offer the increased functionality, power and range necessary to enhance the capabilities of the PRO Series mobile radios. Having clear communication over an extended range translates into superior customer service, giving you the advantage of reaching your people in more places, with more information and better solutions for your customers.

CDR500 Wall Mount Repeater

The CDR500 repeater is easy to install and offers a compact design that allows more flexibility when choosing a location. Its remarkable flexibility lets you choose the specific frequency and power levels you need.

CDR700 Desktop Repeater

The CDR700 repeater can be used as a base station or as a remote repeater. The quiet performance and the attractive design gives you the option of installing the CDR700 model on your desktop or any other accessible area.

Range Extension

In addition to the standard repeater operation which extends the range of your radio fleet, other modes of operation allow an UHF frequency radio to talk to a VHF frequency radio within your fleet. It also lets you monitor transmissions on frequencies in another band and allows you to link separate coverage areas.

www.motorola.com/radiosolutions

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน
ไม่อนุญาตให้นำไปใช้

CDR500/CDR700

Repeaters