



ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อ สายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม
Amateur Radio Antenna For Satellite Communication

ชื่อนักศึกษา 1. นายธนาวิทย์ พุทธพฤษ รหัสนประจำตัว 48035271
2. นายมี้ง ปานสวัสดิ์ รหัสนประจำตัว 48035285
3. นายสุภฤกษ์ ปิ่นเกตุ รหัสนประจำตัว 48035351

หลักสูตร ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.ประเสริฐ เคนพันค้อ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.วิสุทธิ สุนทรกนกพงศ์

คณะกรรมการสอบปริญญาโท	ลายมือชื่อ
1. อ.สุขสันต์ พาณิชพาพิบูล	
2. อ.ประเสริฐ เคนพันค้อ	
3. รศ.วิสุทธิ สุนทรกนกพงศ์	
4. อ.อมรชัย ชัยชนะ	
5. รศ.สุรสิทธิ์ รัตรี	

วัน/เดือน/ปีที่สอบ วันอังคารที่ 8 เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2550 เวลา 10.00 น.

สถานที่สอบ ห้อง ค.310 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล.

ภาควิชารับรองแล้ว

ลงนาม.....

(รศ.สุรสิทธิ์ รัตรี)

หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม
วันที่ 30 เดือน พ.ค. พ.ศ. 50



<BT492532>

สายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา
กระทรวงมหาดไทย

ปริญญาบัตร

สายอาชีวศึกษาสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม

AMATEUR RADIO ANTENNA FOR SATELLITE COMMUNICATION



รพ.
ร ๑๕๒๔
๒๕๔๙

เลขามู.....
เลขทะเบียน.....**75138**.....
วัน,เดือน,ปี...**24**...**๓.๑**...**2550**

b. 11816235
i.

ปริญญาบัตรฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท

เรื่อง สายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม

Amateur Radio Antenna For Satellite Communication

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาเกี่ยวกับสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม
2. เพื่อออกแบบสร้างสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม
3. เพื่อสร้างสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม
4. เพื่อทดลองสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม
5. เพื่อนำสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียมไปใช้งานจริง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้เกี่ยวกับสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม
2. ได้รูปแบบสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม
3. ได้สายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม
4. ได้ผลการทดลองสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียมเพื่อการปรับปรุง
5. ได้สายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียมไปใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อหัวข้อ	สายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม	
นักศึกษา	นายชนาวิทย์	พุทธิพฤกษ์
	นายมี้ง	ปานสวัสดิ์
	นายสุภฤกษ์	ปิ่นเกตุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ประเสริฐ	เคนพันธ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์วิสุทธิ์	สุนทรกนกพงศ์
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวิทยุ	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม	
ปีการศึกษา	2549	

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำเสนอการศึกษา การคำนวณ การสร้าง และการทดสอบสายอากาศวิทยุสมัครเล่น สำหรับรับสัญญาณจากดาวเทียม โดยจะทำการวิเคราะห์คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่น เช่น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างของลำคลื่น การโพลาไรซ์ของคลื่น ค่าการสูญเสีย และประสิทธิภาพ โดยสายอากาศที่ออกแบบสามารถใช้งานความถี่ วีเอชเอฟ , ยูเอชเอฟ ข้อดีของสายอากาศที่นำเสนอคือมีอัตราการขยายและประสิทธิภาพสูง มีค่าอิมพีแดนซ์ที่แมตช์กันระหว่างสายอากาศและสายนำสัญญาณสายอากาศและสายนำสัญญาณสายอากาศที่สร้างจริงจะถูกนำไปทดสอบรับสัญญาณดาวเทียมจริง โดยใช้วิทยุสื่อสารภาครับเป็นย่านยูเอชเอฟ และ ภาคส่งที่ย่านวีเอชเอฟ ปรากฏว่าสามารถสื่อสารกันได้ กับคู่สนทนาที่อยู่ต่างจังหวัดโดยรับสัญญาณจากดาวเทียม Ao-51

Thesis Title	Amateur Radio Antenna For Satellite Communication	
Students	Mr. Tanawit	Puttapruk
	Mr. Mink	Pansawat
	Mr. Suppareak	Pinkate
Advisor	Mr. Prasert	Kenpankho
Co-Advisor	Assoc. Prof. Wisuit	Sunthonkanokpong
Education Level	Bachelor of Science in Industrial Education	
Program in	Telecommunication Engineering	
Academic Year	2006	

ABSTRACT

This thesis presents the study, calculation, creation and testing of the Amateur Radio Antenna For Satellite Communication, We analyzed the radiation characteristics, radiation pattern, beamwidth, polarization, loss and efficiency of the antenna. The antenna was designed to operate in VHF 144.00-146.00 MHz and UHF 435.80-435.90 MHz. The benefit of this antenna type is to provide high gain and high efficiency as well as the well-matching between the antenna and the transmission line. The antenna was constructed and tested to receive the signal from satellite. The results of antenna experiment Can Communicate to the AO-51 satellite by using UHF as receiver and VHF as transmitter.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ลุส่งไปด้วยดี เนื่องมาจากความร่วมมือของสมาชิกภายในกลุ่มทุกท่าน ขอขอบคุณท่านอาจารย์ประเสริฐ เคนพันค้อ และคณาจารย์คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการวัด และทดสอบรวมทั้งยังให้คำแนะนำ แนวความคิด แนวทางการแก้ไขปัญหา และความรู้ต่างๆ ในการจัดทำปริญญานิพนธ์ ขอขอบคุณห้องสมุดคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ สำนักหอสมุดกลาง ที่ช่วยอำนวยความสะดวก และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการค้นคว้าข้อมูล สุดท้ายที่ควรระลึกถึงอย่างยิ่ง บิดา และมารดา ที่เป็นผู้ให้ความสนับสนุนด้านการศึกษา และเป็นผู้ที่กำลังใจด้วยดีตลอดมา ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์	2
1.2 จุดมุ่งหมายของโครงการ	2
1.3 สมมุติฐานของการจัดทำโครงการ	2
1.4 ขีดความสามารถของโครงการ	2
1.5 ขั้นตอนของการทำโครงการ	2
1.6 เนื้อหาโดยสังเขป	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 ความรู้พื้นฐาน	4
2.1.1 แถบสเปกตรัมความถี่	4
2.1.2 สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กแปรเปลี่ยนตามเวลา	6
2.1.3 ความถี่	10
2.1.4 ความยาวคลื่น และความเร็วคลื่น	11
2.1.5 ค่าอิมพีแดนซ์จริง ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	12
2.1.6 เดซิเบล	12
2.1.7 สัญญาณรบกวน	15
2.2 ทฤษฎีสายนำสัญญาณ	16
2.2.1 ความแตกต่างในการวิเคราะห์วงจรที่ใช้สัญญาณความถี่ต่ำและสูง	16
2.2.2 สายนำสัญญาณปลาย	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น	48
2.4 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง	49
2.5 อัตราการขยาย	49
2.6 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	50
2.6.1 อินพุตอิมพีแดนซ์	50
2.6.2 อิมพีแดนซ์ของการแพร่กระจายคลื่น	50
2.7 โพลาริเซชัน	50
2.7.1 ลิเนียร์โพลาริเซชัน	51
2.7.2 โพลาริเซชันลอสเฟคเตอร์	53
2.8 ท่อนำคลื่นแบบกลม	54
2.8.1 รูปแบบของคลื่นที่ส่งในท่อนำคลื่นแบบกลม	54
2.8.2 ความยาวคลื่นคัทออฟ สำหรับท่อนำคลื่นแบบกลม	56
2.8.3 สนามของท่อนำคลื่น	58
2.8.4 การเดินทางของคลื่นในท่อนำคลื่น	59
2.9 การสื่อสารดาวเทียม	60
2.10 การคำนวณข่ายสื่อสารดาวเทียม	61
บทที่ 3 การออกแบบ การสร้าง และการทำงาน	64
3.1 หลักการออกแบบสายอากาศย่านวีเอชเอฟ (VHF)	64
3.2 การออกแบบสายอากาศย่านยูเอชเอฟ (UHF)	67
3.2.1 ขั้นตอนการจัดเตรียมอุปกรณ์การประกอบสายอากาศ	67
3.2.2 วิธีประกอบสายอากาศยาคี 7 อิลีเมนต์	68
3.3 เครื่องมือที่ใช้ประกอบสายอากาศ	70
3.4 ขั้นตอนในการปรับแต่งสายอากาศ	70

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	72
4.1 กล่าวนำ	72
4.2 การวัดและทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน	72
4.2.1 ลำดับชั้นการทดลอง	72
4.2.2 ผลการทดลอง	73
4.3 การวัดและการทดสอบหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ	74
4.3.1 ลำดับชั้นการทดลอง	74
4.3.2 ผลการทดลอง	74
4.4 การวัดและทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	76
4.4.1 ลำดับชั้นการทดลอง	76
4.4.2 ผลการทดลอง	77
4.5 การทดสอบค่าคุณสมบัติของสายอากาศโดยการวางวัสดุต่างๆบนสายอากาศ	77
4.5.1 ลำดับชั้นการทดลอง	77
4.5.2 ผลการทดลอง	78
บทที่ 5 บทสรุป	81
5.1 สรุป	81
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข	81
5.3 แนวทางการพัฒนา	82
บรรณานุกรม	83
ภาคผนวก ก รูปเครื่องต้นแบบสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม	84
ภาคผนวก ข โครงสร้างของสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม	87
ภาคผนวก ค รายการอุปกรณ์	89
ภาคผนวก ง รายละเอียดและคุณสมบัติของดาวเทียม AO- 51	91
ภาคผนวก จ คู่มือการใช้งานโปรแกรม NOVA	99
ภาคผนวก ฉ คู่มือการใช้งานสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม	118
ประวัติผู้แต่ง	123

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คำเรียกแถบความถี่ที่ใช้กันทั่วไป	4
2.2 คำเรียกแถบความถี่ย่านไมโครเวฟ	5
2.3 การแบ่งความถี่ย่อย	5
2.4 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วน	14
2.5 การเปรียบเทียบค่ากำลังวัตต์กับค่ากำลัง dBm	16
2.6 คุณสมบัติของแผ่นรองรับแบบต่าง ๆ	32
2.7 ค่า E_r และ G/WE ของสารชนิดต่าง ๆ	33
2.8 ค่า E_r และ G/WE ของสารชนิดต่าง ๆ (ต่อ)	34
2.9 ค่ารากของเบสเซล	57
3.1 อลูมิเนียมที่จัดทำสายอากาศ	67
3.2 ระยะเวลาเจาะรูอลูมิเนียม	68
3.3 ระยะห่างของแต่ละอีลิเมนต์	69
4.1 ค่าการสะท้อนกลับของสายอากาศ	74
4.2 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ	76
4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	78
4.4 ผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนกลับ	79
4.5 ผลการทดลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง	80
4.6 ผลการทดลองค่าอิมพีแดนซ์	80

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก	6
2.2 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่ระยะไกลจากสายอากาศ	7
2.3 การรวม P (dBm) เข้ากับ P (dB)	15
2.4 สายนำสัญญาณที่แบ่งออกเป็นส่วน ๆ	18
2.5 แบบจำลองของตัวแปรรวมกลุ่มก่อน	18
2.6 การประจุของตัวเก็บประจุในแต่ละหนึ่งหน่วยความยาว	18
2.7 การป้อนแรงดันไฟตรงให้แก่สายนำสัญญาณ	19
2.8 วงจรสมมูลรูปคลื่นแรงดัน และกระแสที่เกิดในสาย	21
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร	27
2.10 หนึ่งรอบ หรือหนึ่งคาบเวลาของคลื่นโดยใช้หน่วยวัด	27
2.11 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสายนำสัญญาณหนึ่งส่วนสี่คลื่น	28
2.12 การลดทอนของคลื่นแรงดันเนื่องจากความสูญเสียในสาย	30
2.13 การลดทอนของความหนาแน่นกระแสเนื่องจากความลึกของผิว	31
2.14 โครงสร้างของสายอากาศยาคี	32
2.15 สายอากาศยาคี 4 อีลิเมนต์	35
2.16 วงจรสมมูลย์สายส่ง	36
2.17 วงจรสมมูลย์ที่หน้าคลื่นของสายอากาศยาคี	38
2.18 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศโดยใช้วงจรสมมูลย์	40
2.19 รูปแบบสายอากาศยาคี	41
2.20 เส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของสายอากาศ	41
2.21 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของค่าฉนวนสัมพัทธ์	44
2.22 การส่งผ่านของคลื่น TEM แบบอุดมคติในสายอากาศยาคี	45
2.23 การหมุนของคลื่นแม่เหล็กฟ้าระนาบ	50
2.24 หน่วยของเวกเตอร์โพลาไรเซชันของคลื่น	54
2.25 ความหมายของเอ็มและเอ็นในหน้าคลื่น	55
2.26 โหมด TE และ TEM ของหน้าคลื่น	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

การส่งข่าวหรือข้อความจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง อาจทำได้ 2 วิธีด้วยกันคือ การส่งสัญญาณทางไฟฟ้าไปตามสายส่งวิธีหนึ่ง และการส่งโดยไม่ต้องใช้สายส่ง แต่ใช้สายอากาศกระจายคลื่นวิทยุหรือที่เรียกกันว่า เคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นอีกวิธีหนึ่ง เราอาจกล่าวได้ว่าสายอากาศคือ ตัวเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าจากเครื่องส่งให้เป็นคลื่นวิทยุ (สายอากาศส่ง) หรือ คือตัวเปลี่ยนคลื่นวิทยุให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าเข้าเครื่องรับ (สายอากาศรับ) นั่นเอง

ในระบบสื่อสารใดๆ เราต้องการให้สัญญาณที่รับได้ปลายทางมีความแรงมาก ๆ อย่างน้อยที่สุดต้องแรงพอที่จะเอาชนะสัญญาณรบกวนในใด ๆ ได้ และอยู่ในเกณฑ์ที่ความไวของเครื่องรับจะทำงานได้ ความแรงของสัญญาณที่สถานีรับปลายทางจะมีค่าสูง หรือต่ำเพียงไรนั้นขึ้นอยู่กับตัวประกอบที่สำคัญคือ ถ้าเป็นการส่งสัญญาณไปตามสายส่ง สัญญาณส่วนมากจะสูญเสียไปในรูปของความร้อนในสายส่ง เนื่องจากความต้านทานของขดลวดที่ใช้ทำสายส่ง และเนื่องจากฉนวนที่นำมาทำสายส่งไม่ได้เป็นฉนวนที่ดีสมบูรณ์จริง สำหรับการสูญเสียของสัญญาณในกรณีที่เป็นคลื่นวิทยุกระจายออกจากสายอากาศนั้นก็เกิดการคล้ายคลึงกับเรื่องของสายส่ง กล่าวคือ คลื่นวิทยุบางส่วนจะถูกลดทอนกำลังลง ในตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่านไป เช่น ถ้าเป็นการส่งคลื่นวิทยุความถี่ต่ำ (LF หรือ Low Frequency) ซึ่งใช้ในกิจการสื่อสารระหว่างสถานีบนฝั่งกับเรือ คลื่นจะเดินไปตามผิวน้ำทะเลและสูญเสียไป เนื่องจากความต้านทานของน้ำทะเล ถ้าเป็นการส่งคลื่นวิทยุความถี่กลาง (MF หรือ Medium Frequency) เช่น ที่ใช้กันในย่านวิทยุกระจายเสียง คลื่นวิทยุบางส่วนจะเดินทางไปตามผิวโลก ในกรณีนี้คลื่นวิทยุจะสูญเสียไปในรูปของความร้อน เนื่องจากความต้านทานของดินหรือของน้ำทะเล ทั้งนี้แล้วแต่ลักษณะของผิวโลกที่คลื่นผ่านไป การสื่อสารในย่านความถี่สูง (HF หรือ High Frequency) นั้นต้องอาศัยการสะท้อนคลื่นจากเพดานไฟฟ้า (Ionosphere) กลับมายังสถานีบนพื้นโลก เพดานไฟฟ้าหรือชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นี้อยู่สูงจากพื้นโลกประมาณ 350 กิโลเมตรมีลักษณะเป็นตัวกลางที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอน อนุภาคซึ่งมีประจุไฟฟ้าบวกและอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าก็ต่อ เมื่อคลื่นวิทยุเดินทางไปสะท้อนเพดานไฟฟ้าคลื่นบางส่วนก็จะถูกดูดกลืนโดยเพดานไฟฟ้าแต่สำหรับการสื่อสารโดยใช้คลื่นความถี่สูงมากคือที่ (VHF หรือ Very High Frequency) เช่น การติดต่อของหน่วยทหารลาดตระเวนในป่า การสื่อสารจะไปได้ไม่ไกล ทั้งนี้เพราะต้นไม้ใบไม้ในป่าจะดูดกลืนวิทยุไว้เป็นส่วนมากทีเดียว ในกรณีของการสื่อสารโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) เชื่อมโยงระหว่างสถานีถ่ายทอดทวนสัญญาณจากการสูญเสียของคลื่นวิทยุจะเนื่องมาจากบรรยากาศ เม็ดฝน ฝุ่นละออง หรือ อนุของออกซิเจนดูดกลืนไว้

1.2 จุดมุ่งหมายของโครงการงาน

1. เพื่อศึกษาเกี่ยวกับสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม
2. เพื่อออกแบบสร้างสายอากาศสำหรับรับและส่งสัญญาณดาวเทียมย่านวิทยุสมัครเล่น
3. เพื่อสร้างสายอากาศสำหรับรับและส่งสัญญาณดาวเทียมย่านวิทยุสมัครเล่น
4. เพื่อทดลองรับและส่งสัญญาณดาวเทียมย่านวิทยุสมัครเล่น
5. เพื่อนำสายอากาศสำหรับรับและส่งสัญญาณดาวเทียมย่านวิทยุสมัครเล่นไปใช้งานจริง

1.3 สมมุติฐานของการจัดทำโครงการงาน

1. สามารถรับและส่งสัญญาณวิทยุผ่านดาวเทียมในย่านวิทยุสมัครเล่นได้หรือไม่
2. สายอากาศส่งแบบยาก็ย่านวิทยุสมัครเล่นความถี่ VHF ความถี่ 144.00-146.00 MHz ได้หรือไม่
3. สายอากาศรับแบบยาก็ย่านวิทยุสมัครเล่นความถี่ UHF ความถี่ 435.80-435.90 MHz ได้หรือไม่
4. มีอัตราการขยายสัญญาณ 6.9 dB จริงหรือไม่

1.4 ขีดความสามารถของโครงการงาน

1. สามารถรับและส่งสัญญาณวิทยุผ่านดาวเทียมในย่านวิทยุสมัครเล่นได้
2. สายอากาศส่งแบบยาก็ย่านวิทยุสมัครเล่นความถี่ VHF ความถี่ 144.00-146.00 MHz ได้
3. สายอากาศรับแบบยาก็ย่านวิทยุสมัครเล่นความถี่ UHF ความถี่ 435.80-435.90 MHz ได้
4. มีอัตราการขยายสัญญาณ 6.9 dB

1.5 ขั้นตอนของการทำโครงการงาน

1. ค้นคว้าและศึกษาข้อมูล
2. รวบรวมข้อมูลทั้งหมด
3. จัดเตรียมอุปกรณ์ในการทำสายอากาศ
4. เริ่มทำสายรับ-ส่งสัญญาณผ่านดาวเทียม
5. ทดสอบการรับและส่งสัญญาณผ่านดาวเทียม
6. ทำการแก้ไขส่วนที่ผิดพลาด
7. สรุปและประเมิน
8. ทำปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 เนื้อหาโดยสังเขป

เนื้อหาภายในปฏิญญาฉบับนี้ แบ่งออกเป็นบทต่าง ๆ เพื่อความสะดวกต่อการศึกษาและทำความเข้าใจในแต่ละบทจะประกอบด้วยเนื้อหาที่สำคัญดังนี้

บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการ ประกอบด้วยเนื้อหาในทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งทำให้ผู้อ่านได้มีความรู้ ความเข้าใจเป็นพื้นฐานก่อน อันเป็นประโยชน์ต่อการทำการทำความเข้าใจกับการใช้งานจริงต่อไป

บทที่ 3 การออกแบบ และการสร้าง โดยกล่าวถึงการสร้างชิ้นงาน และงานทั้งหลักการออกแบบในส่วนต่าง ๆ ของชิ้นงาน ทำให้ผู้อ่านมีความเข้าใจการออกแบบชิ้นงานของโครงการนี้

บทที่ 4 การทดลอง และผลการทดลอง กล่าวถึงขั้นตอนการทดลอง การทดสอบประสิทธิภาพและคุณสมบัติของชิ้นงาน ในโครงการนี้ เพื่อตรวจสอบว่าโครงการนี้สามารถทำได้ตรงตามวัตถุประสงค์หรือไม่

บทที่ 5 บทสรุป ปัญหา แนวทางแก้ไข และพัฒนา เป็นการสรุปผลการทำงาน และได้เสนอแนะแนวทางในการแก้ไข และแนวทางในการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพ และการใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากขึ้น

ภาคผนวก ก รูปเครื่องต้นแบบสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียมภาคผนวก

ภาคผนวก ข โครงสร้างและรูปแบบของสายอากาศ

ภาคผนวก ค รายการอุปกรณ์

ภาคผนวก ง รายละเอียดและคุณสมบัติของดาวเทียม AO- 51

ภาคผนวก จ คู่มือการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี และ หลักการ

2.1 ความรู้พื้นฐาน

2.1.1 แถบสเปกตรัมความถี่

แถบความถี่ (Spectrum) ของความถี่เริ่มตั้งแต่ 30 เฮิรตซ์ (Hz) ในย่านต่ำกว่าความถี่เสียงขึ้นไปถึง 1×10^{28} เฮิรตซ์ ในย่านรังสีคอสมิก

ตารางที่ 2.1 คำเรียกแถบความถี่แต่ละย่านที่ใช้กันทั่วไป

ความถี่	ชื่อเรียกความถี่
3-30 Hz	VLF (Very Low Frequency)
3-30 kHz	LF (Low Frequency)
300kHz-3 MHz	MF (Medium Frequency)
3-30 MHz	HF (High Frequency)
30-300 MHz	VHF (Very High Frequency)
300 MHz-3 GHz	UHF (Ultra High Frequency)
3-30 GHz	SHF (Super High /Frequency)
30-300	EHF (Extremely High Frequency)

กรณีแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กันตามบ้านเรือนทั่วไป ซึ่งส่งมาจากโรงจักรผลิตกระแสไฟฟ้ามีความถี่ระหว่าง 50 ถึง 60 เฮิรตซ์ ตามสภาพความเหมาะสมของแต่ละประเทศ จัดอยู่ในแถบความถี่แสง (AF) ซึ่งกำหนดช่วงความถี่ตั้งแต่ 15 เฮิรตซ์ ถึง 20 กิโลเฮิรตซ์ สำหรับวิทยุระบบเอเอ็ม (AM) อยู่ในช่วง 550 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1.6 เมกะเฮิรตซ์ จัดอยู่ในย่านความถี่ปานกลาง (MF) แต่ความถี่วิทยุ เอฟเอ็ม (FM) อยู่ในช่วงตั้งแต่ 88 ถึง 108 เมกะเฮิรตซ์ และความถี่วิทยุโทรทัศน์ที่ใช้ความถี่ตั้งแต่ 54 ถึง 210 เมกะเฮิรตซ์ จัดอยู่ในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) ตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นแถบความถี่ที่เรียกว่า ความถี่ย่านไมโครเวฟ แต่เดิมกำหนดให้เริ่มตั้งแต่ 1.12 ถึง 40 เมกะเฮิรตซ์ (GHz) แบ่งออกเป็น 12 แถบความถี่ย่อยจากซ้ายไปขวา หรือจากความถี่ต่ำสุดไปจนถึงความถี่สูงสุดของย่านไมโครเวฟโดยมีการกำหนดชื่อเรียกแต่ละแถบความถี่ย่อยที่นี้ด้วย แต่ปัจจุบันนี้ได้มีการกำหนดย่านความถี่ไมโครเวฟขึ้นใหม่ เพื่อให้เห็นขอบเขตได้ชัดเจน และสะดวกต่อการอ้างถึงมากยิ่งขึ้น โดยกำหนดให้เริ่มจาก 1 ไปจนถึง 100 หรือมากกว่า 100 กิกะเฮิรตซ์ขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 คำเรียกแถบความถี่ย่านไมโครเวฟเมื่อเริ่มแรก

ชื่อเรียกแถบความถี่	ช่วงความถี่, (กิกะเฮิรตซ์)
L	1.12 – 2.7
S	2.6 – 3.95
G	3.95 – 5.85
C	4.9 – 7.05
J	5.85 – 8.2
H	7.05 – 10.0
X	8.2 – 12.4
M	10.0 – 15.0
P	12.4 – 18.0
N	15.0 – 22.0
K	18.0 – 26.5
R	26.5 – 40.0

สำหรับตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงการจัดแถบสเปกตรัมความถี่ตามมาตรฐานของ IEEE (International of Electrical and Electrical Engineering) ในปัจจุบัน มีชื่อเรียกแถบความถี่ย่อยจาก L ถึง Ka สำหรับความถี่ตั้งแต่ 300 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 40 กิกะเฮิรตซ์

ตารางที่ 2.3 การแบ่งความถี่ย่อยของ IEEE

แถบความถี่	ความถี่ของ IEEE (กิกะเฮิรตซ์)
HF	0.003 – 0.03
VHF	0.030 – 0.300
UHF	0.300 – 1.00
L	1.00 + 2.00
S	2.00 + 4.00
C	4.00 + 8.00
X	8.00 + 12.0
Ku	12.0 -8.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

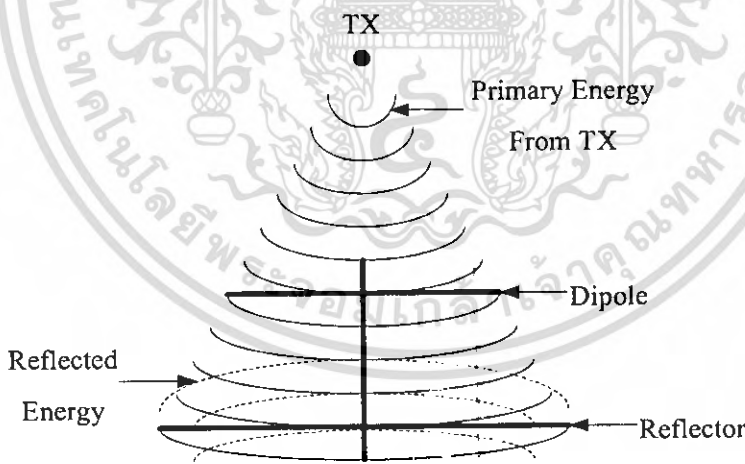
ความถี่ที่อยู่เหนือขึ้นไปจากย่านไมโครเวฟมีชื่อเรียกว่า แอมป์ลิความร้อน หรือเรียกว่า แอมป์ความถี่ ย่านอินฟราเรด มีแถบสเปคตรัมความถี่ตั้งแต่ 0.3 – 4.30 เทราเฮิร์ตซ์ (THz:เทรา มีค่าเท่ากับ 1×10^{12}) ความถี่ย่านแสงที่มนุษย์มองเห็นได้ (Visible Light) เป็นแถบความถี่ที่อยู่เหนือย่านอินฟราเรดมีแถบความถี่ ตั้งแต่ 430 เทราเฮิร์ตซ์ จนถึง 1 เพนตะเฮิร์ตซ์ (PHz:เพนตะ มีค่าเท่ากับ 1×10^{15}) ซึ่งย่านความถี่ที่กล่าวนี้ ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานด้านเลเซอร์ (Laser) และเส้นใยแสง (Fiber Optic)

2.1.2 สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กแปรเปลี่ยนตามเวลา

การเปลี่ยนแปลงจากสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กในสภาวะคงที่ไปเป็นสภาวะที่แพร่กระจายออก อธิบายได้โดยพิจารณาจากการแพร่กระจายของพลังงาน

จุดพิจารณาที่สำคัญจะอธิบายการแพร่กระจายของทั้งสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กเทียบกับเวลา ให้เข้าใจได้ คือ ทำการต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟสลับเข้ากับแท่งสายอากาศ และ พิจารณาที่เวลาชั่วขณะหนึ่งใน คาบเวลาใดๆจะพบว่าปลายด้านบนสุดของสายอากาศจะมีประจุไฟฟ้าชนิดหนึ่งอยู่มากที่สุด

ในขณะที่เวลาเดียวกันที่ปลายด้านล่างสุดของสายอากาศจะมีประจุไฟฟ้าชนิดตรงข้ามอยู่มากที่สุดเช่นกัน ในที่นี้สมมติให้ปลายด้านบนสุดของสายอากาศในเวลาชั่วขณะที่พิจารณานี้เป็นบวกมากที่สุดที่จะเกิดจากการที่ และ ปลายด้านล่างสุดของสายอากาศมีประจุลบอยู่มากที่สุด ดังนั้น สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางพุ่งออก จากประจุบวกเข้าสู่ประจุลบ ขณะเดียวกันทิศทางของกระแสไฟฟ้าจะเคลื่อนที่จากประจุบวกไปยังประจุลบ เป็นผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ แท่งสายอากาศ โดยมีทิศทางตามกำมือขวา



รูปที่ 2.1 ลักษณะการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กรอบ ๆ สายอากาศ

เมื่อพิจารณาว่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้เป็นแรงดันไฟสลับปรากฏการณ์ดังกล่าวข้างต้นในช่วงเวลานั้น เวลาใด ๆ การแพร่กระจาย หรือการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้ามีทิศทางกลับไปกลับมา การกลับทิศทางไปมานี้ เป็นไปตามความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้แท่งสายอากาศมีผลให้ทิศทางของสนามไฟฟ้าและ ที่ตรงบริเวณ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำสลับทิศทางตามไปด้วยการอธิบายการเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

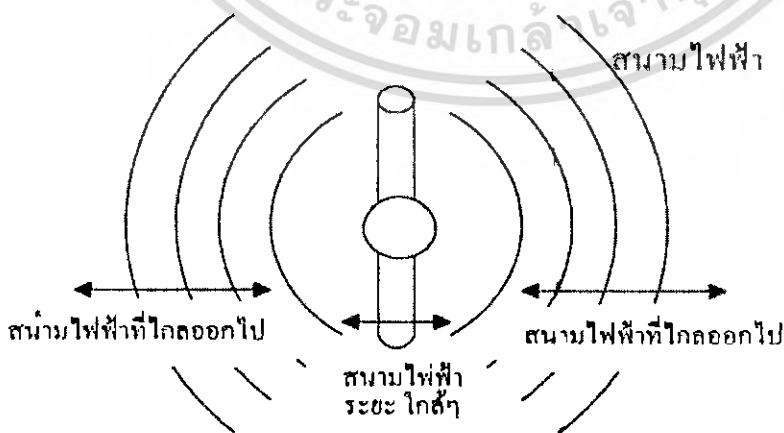
สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าดังกล่าวจะใช้ในกรณีของสนามที่เกิดรอบๆแท่งสายอากาศเท่านั้นแต่ที่ระยะไกลออกไปจากตัวสายอากาศมากๆ เรียกว่า สนามระยะไกล (Far field) ไม่สามารถอธิบายการคงสภาพของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กด้วยการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในแท่งสายอากาศต่อไปได้

การเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำ สนามไฟฟ้าแปรเปลี่ยนตามเวลาในสุญญากาศจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนตามเวลาหรือในทางกลับกัน สนามไฟฟ้าจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนตามเวลา ซึ่งสนามที่ถูกให้เหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นนี้อยู่รอบ ๆ ไกลล้กับสนามที่เป็นตัวเหนี่ยวนำ สามารถอธิบายให้เห็นภาพของสนามเหล่านี้ได้อย่างง่่าย ๆ โดยเทียบกับท่วงโซ่คล้องกันไว้ การแปรเปลี่ยนตามเวลาสามารถอธิบายในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ หรือสมการของเวกเตอร์ ดังสมการที่ 2.1

ในสมการที่ 2.1 การ \times (คูณ หรือ cross) ระหว่าง v และ E หรือระหว่าง v และ H แสดงให้ทราบว่าสมการทั้งสองนี้ คือ Cross Products หรือ Vector Products โดยที่ผลคูณของเวกเตอร์ทั้งสองให้ผลลัพธ์เป็นเวกเตอร์ด้วย และทิศทางของเวกเตอร์จะตั้งฉากกับระนาบที่ผ่านเวกเตอร์ทั้งสอง ดังนั้น เวกเตอร์ v , E และ H จึงทำมุมฉากซึ่งกันและกัน ทิศทางของเวกเตอร์ลัพธ์หาได้จากกฎมือขวา

$$H = \mathcal{E}(v \times E) \quad (2.1)$$

โดยที่ H = ความเข้มสนามแม่เหล็ก (แอมป์แปร์/เมตร)
 E = ความเข้มสนามไฟฟ้า (โวลต์/เมตร)
 v = ความเร็วของรูปคลื่น (เมตร/วินาที)
 \mathcal{E} = ค่าเพอิมิตติวิตี (ฟารัด/เมตร)



รูปที่ 2.2 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่ระยะไกลจากสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = -\mu(v \times H) \quad (2.2)$$

โดยที่	H	= ความเข้มสนามแม่เหล็ก	(แอมป์เปร์/เมตร)
	E	= ความเข้มสนามไฟฟ้า	(โวลต์/เมตร)
	v	= ความเร็วของรูปคลื่น	(เมตร/วินาที)
	μ	= ค่าเพอมีอับิลิตี	(เฮนรี/เมตร)

รูปคลื่นสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าที่ได้จากสมการที่ 2.1 และ 2.2 เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กหรือในทางกลับกันมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับสนามแม่เหล็กทำให้มีการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า โดยจะเกิดการเหนี่ยวนำกลับไปกลับมา และมีการถ่ายเทพลังงานระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเช่นนี้ตลอดไปไม่มีที่สิ้นสุดเกิดขึ้น ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะแผ่ออกไปเป็นรูปคลื่นรวม เรียกว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางด้วยความเร็วเท่ากับแสงในที่ว่าง คือ 3×10^8 เมตรต่อวินาที และจะแผ่ขยายคลื่นออกไปอย่างต่อเนื่องจนกว่าพลังงานของคลื่นจะลดทอนไปจนหมดสิ้น ทั้งรูปคลื่นสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า โดยจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ไปทางขวาเป็นไปตามสมการที่ 2.1 และ 2.2

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีชื่อเรียกต่างกันหลายแบบด้วยกันก็จะพิจารณาจากการจัดหรือการวางตัวของตัวสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กเทียบกับทิศทางการเดินทาง หรือการแพร่กระจายของคลื่น ถ้าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กถูกจัดวางในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น คลื่นนี้เรียกว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวขวาง (Transverse Electromagnetic Wave : TEM) ถ้าสนามไฟฟ้าทำมุมฉากกับทิศทางการแพร่กระจายคลื่นโดยมีเพียงส่วนหนึ่งของสนามแม่เหล็กทำมุมฉากและอีกส่วนประกอบที่เหลืออยู่ในทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้เรียกว่า คลื่นไฟฟ้าในแนวขวาง (Transverse Electric Wave : TE) พิจารณาได้ตามรูปที่นี้ กรณีสนามแม่เหล็กทำมุมฉากกับทิศทางการแพร่กระจายของคลื่น และมีส่วนประกอบ หรือเวกเตอร์ย่อย 2 เวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าทำมุมฉาก และอยู่ในแนวการเคลื่อนที่ของคลื่นเรียกคลื่นในลักษณะนี้ว่า คลื่นแม่เหล็กในแนวขวาง (Transverse Magnetic Wave : TM)

ในการพิจารณาการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากตัวสายอากาศ ที่เวลาชั่วขณะใดๆ ณ จุดซึ่งอยู่ห่างออกมาเป็นระยะทางคงที่ค่าหนึ่งจะสามารถกำหนดรูปทรงกลม ซึ่งเสมือนเป็นตัวแทนของการมีเฟสของสนามไฟฟ้าเดียวกัน (In Phase) ตลอดทั่วทั้งผิวของรูปทรงกลม และรูปผิวทรงกลมและเฟสที่เสมือนกันนี้จะเคลื่อนที่ขยายตัวออกจากสายอากาศด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสงด้วยทิศทางที่หาจากเวกเตอร์ทิศทางที่พื้นผิวทรงกลมนี้ เรียกว่า หน้าคลื่น (Wave Front) เมื่อพิจารณาที่ระยะห่างจากตัวสายอากาศออกไปที่ส่วนเล็ก ๆ ส่วนหนึ่งของพื้นผิวจะไม่นับระยะนับอีกแล้วนั้น จะได้สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กทำมุมตั้งฉากต่อกันจะเรียกคลื่นระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อที่จะนิยาม หรือระบุลักษณะของหน้าคลื่น (Wave front) วิธีหนึ่งที่ใช้ คือ อ้างอิงจากการจัดวางตัวของสนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็ก มีชื่อเรียกว่า การจัดขั้วคลื่น โดยวิธีที่นิยมใช้ และเป็นหลักการปฏิบัติทั่วไปจะอ้างอิงทิศทางของสนามไฟฟ้า ถ้าคลื่นระนาบที่พิจารณา มีสนามไฟฟ้าในแกน y หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งสนามมีทิศตั้งขึ้น เรียกคลื่นลักษณะนี้ว่า การจัดขั้วคลื่นแบบแนวตั้ง (Vertical Polarization) แต่กรณีสนามไฟฟ้าวางตัวอยู่ในแนวแกน x หรือสนามไฟฟ้ามีทิศทางขนานไปกับแนวระนาบ เรียกคลื่นลักษณะนี้ว่า ขั้วคลื่นแนวนอน (Horizontal Polarization)

เพื่อให้สายอากาศส่ง และสายอากาศรับทำงานได้ผลดีที่สุด คือ สามารถรับส่งได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด สายอากาศทั้งสอง และรับจำเป็นต้องมีการจัดวางขั้วคลื่นเหมือนกันถ้าสายอากาศส่งทำการส่งขั้วคลื่นแบบแนวนอนใน ทิศด้านสายอากาศรับก็จะต้องวางตัวในแนวที่รับขั้วคลื่นแบบแนวนอนด้วย หรือถ้าสายอากาศส่งทำการส่งขั้วคลื่นแบบแนวตั้งจาก ทิศด้านสายอากาศรับจะต้องวางตัวในแนวที่รับขั้วคลื่นแบบแนวตั้งด้วย สัญญาณวิทยุที่ใช้การผสมคลื่นทางแอมพลิจูด (Amplitude Modulation) จะมีการจัดวางขั้วคลื่นแบบแนวตั้งส่วนสัญญาณโทรทัศน์ที่ส่งออกอากาศจากสถานีต่างๆจะมีการจัดขั้วคลื่นเป็นแบบแนวนอน. เพื่อความเข้าใจในเรื่องการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าการแพร่กระจาย ของ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณ (Transmission Line) และการก่อตัว หรือจัดเรียงตัวของคลื่นไฟฟ้า และคลื่นแม่เหล็กในท่อนำคลื่น (Wave Guide) ต้องศึกษาเกี่ยวกับสมภาวะสนามไฟฟ้า และ สนามแม่เหล็กที่รอยต่อ ซึ่งเชื่อมระหว่างสัญญาณกับพื้นผิวตัวนำ ถ้าให้สนามไฟฟ้าทำมุมตั้งฉากกับพื้นผิวของตัวนำเวกเตอร์ สนามไฟฟ้า นี้ต้องเชื่อมต่อกับประจุไฟฟ้าบนพื้นผิว ดังนั้น เวกเตอร์สนามไฟฟ้า จึงไม่สามารถ จะทำแนวขนาน ไปกับพื้นผิวของตัวนำได้เงื่อนไขของสนามไฟฟ้า ที่พื้นผิวของตัวนำ สรุปได้ดังนี้

1. สนามไฟฟ้า ที่พื้นผิวของตัวนำมีได้เฉพาะสนามไฟฟ้าที่ทำมุมฉากกับพื้นผิวของตัวนำเท่านั้น
2. สนามไฟฟ้าที่ขนานกับพื้นผิวตัวนำต้องมีค่าเท่ากับศูนย์

สำหรับกรณีสนามแม่เหล็กที่พื้นผิวตัวนำจะมีได้กรณีเดียว คือ สนามที่มีทิศทางขนานไปกับพื้นผิวตัวนำ เพราะว่าสนามแม่เหล็กจะเกิดล้อมรอบกระแสที่ไหลผ่านตัวนำจึงเป็นไปไม่ได้ที่สนามแม่เหล็กจะทำมุมฉากกับพื้นผิวตัวนำเหนือหน้าเงื่อนไขดังนี้

1. สนามแม่เหล็กมีได้กรณีเดียวเท่านั้น คือ มีทิศทางขนานเป็นวงล้อมรอบพื้นผิวของตัวนำ
2. สนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวตัวนำจะต้องเท่ากับศูนย์ คือ ไม่เกิดขึ้นเลย

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางผ่านสุญญากาศกรณีดังกล่าว โดยที่พลังงานทั้งหมดของคลื่นแบ่งอยู่ในสนามไฟฟ้าครึ่งหนึ่งด้วย และในสนามแม่เหล็กอีกครึ่งหนึ่งถ้าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีทิศทางพุ่งเข้าสู่พื้นผิวของตัวนำพลังงานทั้งหมดจะสะท้อนกลับที่พื้นผิวนั้นกรณี เนื่องจากพื้นผิวที่เป็นตัวนำไม่มีความต้านทานพลังงาน จึงไม่มีการสูญเสียพิจารณาการสะท้อนกลับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่พื้นผิวซึ่งเป็นตัวนำจากเงื่อนไขที่รอยต่อของสนามไฟฟ้าที่กล่าวไว้ว่ากรณีของ สนามไฟฟ้าขนานที่พื้นผิวของตัวนำต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ ตามรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชั้นคลื่นเป็นแบบแนวตั้ง ดังนั้นมีเพียงวิธีเดียวเท่านั้นที่สนามไฟฟ้าขนานจะมีค่าเท่ากับศูนย์ที่พื้นผิวตัวนำ คือ คลื่นสะท้อนที่สะท้อนออกมาจากพื้นผิวตัวนำจะต้องกลับเฟสตรงข้ามกับเฟสของคลื่นตก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระทบ ผลรวมของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนซึ่งกลับเฟสตรงข้ามกับเฟสของคลื่นตกกระทบ ผลรวมของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนซึ่งกลบเฟส ทำให้สนามไฟฟ้าที่พื้นผิวของตัวนำมีค่าเป็นศูนย์ และเวกเตอร์ทิศทางแสดงให้เห็นว่าทิศทางของคลื่นตกกระทบพุ่งเข้าหาพื้นผิวตัวนำส่วนคลื่นสะท้อนมีทิศทางพุ่งออกจากพื้นผิวตัวนำ

เมื่อไรก็ตามที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางจากตัวกลางหนึ่งไปยังตัวกลางอีกแห่งหนึ่ง ซึ่งมีค่าเพอมีตติวิตีที่แตกต่างกันพลังงานบางส่วนถูกส่งผ่านไปยังตัวกลางใหม่ และพลังงานบางส่วนจะถูกสะท้อนกลับมายังตัวกลางเดิมได้ พลังงานรวมทั้งหมดของคลื่นตกกระทบมีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานที่สะท้อนกลับ และพลังงานส่วนที่ส่งผ่านไปยังตัวกลางใหม่

สำหรับการวัดความถี่ไมโครเวฟใช้คลื่นแรงดัน คลื่นกระแส และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอยู่ในรูปที่แปรเปลี่ยนตามเวลา และในรูปสัญญาณไซน์ โดยที่ความถี่ต่ำ การวัดจะออกมาในรูปของแรงดัน และกระแส ที่ความถี่ไมโครเวฟจะใช้การวัดออกมาในรูป หรือในเทอมของความถี่ ความยาวคลื่น และกำลังงาน ซึ่งมีความหมาย และประโยชน์ในการใช้งานมากกว่า

2.1.3 ความถี่

ความถี่ หมายถึง จำนวนลูกคลื่นต่อวินาทีในหน่วยเฮิรตซ์ ความเร็ว และความยาวคลื่นของคลื่นมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่าน แต่ความถี่จะมีค่าคงที่เสมอ คาบเวลาของคลื่น ซึ่งเป็นเวลาของหนึ่งลูกคลื่นนั้นมีค่าแปรเปลี่ยนผกผันกับความถี่

$$T = \frac{1}{f} \quad (2.3)$$

โดยที่ T = คาบเวลา, วินาที (1 ลูกคลื่น)

f = ความถี่, เฮิรตซ์

2.1.4 ความยาวคลื่น และความเร็วคลื่น

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางในอากาศว่าง ความเร็วเท่ากับ 299, 792, 462 เมตรต่อวินาทีหรือประมาณ 300,000,000 เมตรต่อวินาที จะใช้ค่าประมาณนี้ในการคำนวณต่อไปความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแปรโดยตรงกับความเร็วของคลื่นและแปรผกผันกับความถี่

ในการคำนวณจะพบว่าที่ความถี่เดียวกัน ค่าความยาวคลื่นในตัวกลางที่เป็นฉนวนจะสั้นกว่าเสมอ สำหรับวิธีแสดงค่าความยาวคลื่นมีดังนี้

ค่าความยาวคลื่นของคลื่นแรงดัน และกระแสสามารถแสดงได้คือ

1. แสดงด้วยค่าระยะทาง ซึ่งมีเฟสเปลี่ยนไป 2π เรเดียน หรือ 360 องศา (Phase Scale)
2. แสดงด้วยค่าความยาวจริงในหน่วยที่ใช้วัดกันทั่วไป (Physical Length Scale)
3. แสดงด้วยค่าความยาวทางไฟฟ้า (Wavelength Scale)

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.4)$$

โดยที่ λ = ความยาวคลื่น, เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

c = ความเร็วของคลื่น, เมตร/วินาที

สำหรับข้อได้เปรียบของการแสดงค่าความยาวคลื่นในหน่วยของความยาวคลื่นเอง คือ เป็นอิสระไม่ขึ้นต่อความถี่ใช้งาน ซึ่งอธิบายการเปลี่ยนแปลงรูปไซน์ของลูกคลื่นเรียกว่าค่าคงตัวของเฟส (B) ความเร็วของเฟสซึ่งเดินทางไปในสุญญากาศเป็นสัดส่วนกับความเร็วเชิงมุมของคลื่น (ω) และเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าคงตัวของเฟส (B) ดังนั้นได้ว่า

$$v = \frac{\omega}{B}$$

เพราะว่า $\omega = 2\pi f$ ดังนั้น ความเร็ว v จะเท่ากับ

$$v = \frac{2\pi f}{B}$$

ความถี่ (f) สัมพันธ์กับความเร็ว และความยาวคลื่นตามสมการที่ 2.4 สมการ v จะเป็น

$$v = \frac{2\pi v}{\lambda}$$

ค่าคงตัวของเฟสจะเป็น

$$B = \frac{2\pi}{\lambda}$$

(2.5)

โดยที่ B = เรเดียนต่อความยาวคลื่น

λ = ความยาวคลื่น, เมตร

สำหรับความเร็วคลื่นตามที่ได้กล่าวไว้ ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที ความยาวคลื่นในตัวกลางที่เป็นฉนวนสั้นกว่าในสุญญากาศและโดยข้อเท็จจริงนี้เอง เป็นผลให้ความเร็วคลื่นในตัวกลางที่เป็นฉนวนลดลงด้วยความเร็วของคลื่นนั้นขึ้นกับค่าเพอมีตติวิตี้ (Permittivity) และค่าเพอมีอับิลิตี้ (Permiability) ของตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่านความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางใด ๆ เป็นตามสมการต่อไปนี้

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ v = ความเร็วของคลื่น, เมตร/วินาที
 μ = ค่าเพอมีเอเบิลิตี, เฮนรี/เมตร
 ϵ = ค่าเพอมีตติวิตี, ฟารัด/เมตร

ในการคำนวณหาความเร็วของคลื่นในตัวกลางใด ๆ ค่า μ และ ϵ จะหามาจากค่า μ' และ ϵ' ในสุญญากาศกับค่า μ และ ϵ สัมพัทธ์ของตัวกลางที่พิจารณา นั้นจากสมการที่ 2.6 จะได้ค่า เพอมีตติวิตี $\epsilon = \epsilon' \epsilon_0$ และจากสมการที่ 2.6 จะได้ค่าเพอมีเอเบิลิตี $\mu = \mu' \mu_0$ ดังนั้น สมการที่ 2.6 จะเป็น

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu' \mu_0 \epsilon' \epsilon_0}} \quad (2.7)$$

2.1.5 ค่าอิมพีแดนซ์จริงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

อัตราส่วนของสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กมีชื่อเรียกว่า ค่าอิมพีแดนซ์จริง (Intrinsic Impedance) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเมตร ส่วนสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นแอมป์แปร์ต่อเมตร ค่าอัตราส่วนจะอยู่ในรูปโวลต์ต่อแอมป์แปร์หรือโอห์มนั่นเอง สำหรับคลื่นระนาบในตัวกลางฉนวน ค่าอิมพีแดนซ์จริง กำหนดได้ตามสมการที่ 2.8

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.8)$$

โดยที่ η = ค่าอิมพีแดนซ์จริงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, โอห์ม
 μ = ค่าเพอมีเอเบิลิตี, เฮนรี/เมตร
 ϵ = ค่าเพอมีตติวิตี, ฟารัด/เมตร

2.1.6 เดซิเบล

เดซิเบล (Decible) เป็นค่าที่กำหนดมาจาก 10 เท่าของค่าลอการิทึมฐาน 10 ของอัตราส่วนของกำลังในเรื่องไมโครเวฟต้องมีความเกี่ยวข้องกับเรื่องล็อกการิทึมและค่าส่วนกลับของล็อกการิทึม เพราะวาลอกการิทึมมีประโยชน์ในการลดรูปการคูณ และหารให้เป็นการบวกและลบแทน และนำมาทำการเปรียบเทียบได้ง่ายกว่าสะดวกกว่า กำลังไฟฟ้าแสดงในหน่วยเดซิเบล

กำลังไฟในหน่วยเดซิเบลหาได้ตามสมการ

$$P = 10 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $P =$ ค่าอัตราส่วนอยู่ในหน่วยเดซิเบล (dB)

$P1 =$ กำลังไฟฟ้าอินพุต

$P2 =$ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต

ในสมการที่ 2.9 $P1$ และ $P2$ เป็นค่ากำลังไฟฟ้านำมาเปรียบเทียบกัน โดยค่าอัตราส่วน $\frac{P2}{P1}$ ออกมาเป็นตัวเลขซึ่งไม่มีหน่วย ดังนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าในหน่วย dB จะแสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าค่าใดจะมีค่าน้อยกว่ากัน ถ้า $\frac{P2}{P1}$ มีค่ามากกว่า 1 ผลจะได้เป็นบวก แต่ถ้า $\frac{P2}{P1}$ มีค่าน้อยกว่า 1 ผลเดซิเบลจะได้เป็นลบ แต่ต้องจำไว้ว่า $P1$ และ $P2$ จะต้องแปลงให้อยู่ในหน่วยเดียวกันด้วย ส่วนกรณีค่ากำลังไฟฟ้าในหน่วยเดซิเบลเป็นศูนย์ แสดงว่ากำลังไฟฟ้าทั้งสองมีค่าเท่ากัน

2.1.6.1 แรงดันแสดงในหน่วยเดซิเบล

ค่าอัตราส่วนของแรงดัน 2 ค่า เปรียบเทียบกัน แสดงออกมาในรูปเดซิเบล โดยการแทนสมการกำลังไฟฟ้าในสมการที่ 2.9

ทำการแทนสมการ $P = \frac{V^2}{R}$ ลงในสมการที่ 2.9 ได้เป็น

$$P = 10 \log \frac{(V_2)^2 / R_2}{(V_1)^2 / R_1}$$

กรณีตัวความต้านทานทั้งสองมีค่าเท่ากัน สมการจะเป็น

$$P = 10 \log \left| \frac{P2}{P1} \right|$$

เพราะว่าตัวแปรทุกตัวเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า ดังนั้น สมการจึงเปลี่ยนรูปเป็น

$$V = 20 \log \frac{V_2}{V_1} \quad (2.10)$$

โดยที่ V คือ อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้า (dB) และ V_1, V_2 ต้องเป็นหน่วยเดียวกัน

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนในรูป V (dB) และ P (dB)

$P(\text{dB}) = 10 \log P_2/P_1$	Numerical Ratio	$V(\text{dB}) = 10 \log V_2/V_1$
60	10^6	120
50	10^5	100
40	10^4	80
30	10^3	60
20	10^2	40
10	10	20
0	1	0
-10	10^{-1}	-20
-20	10^{-2}	-40
-30	10^{-3}	-60
-40	10^{-4}	-80

ค่ากำลังไฟฟ้าที่อ้างอิงกับระดับกำลังไฟฟ้า 0.001 วัตต์ หรือ 1 มิลลิวัตต์ เรียกว่า dBm และแสดงได้ตามสมการดังนี้

$$P(\text{dBm}) = 10 \log \frac{P}{0.001} \quad (2.11)$$

โดยที่ P = กำลังไฟฟ้าในหน่วยวัตต์ (W)

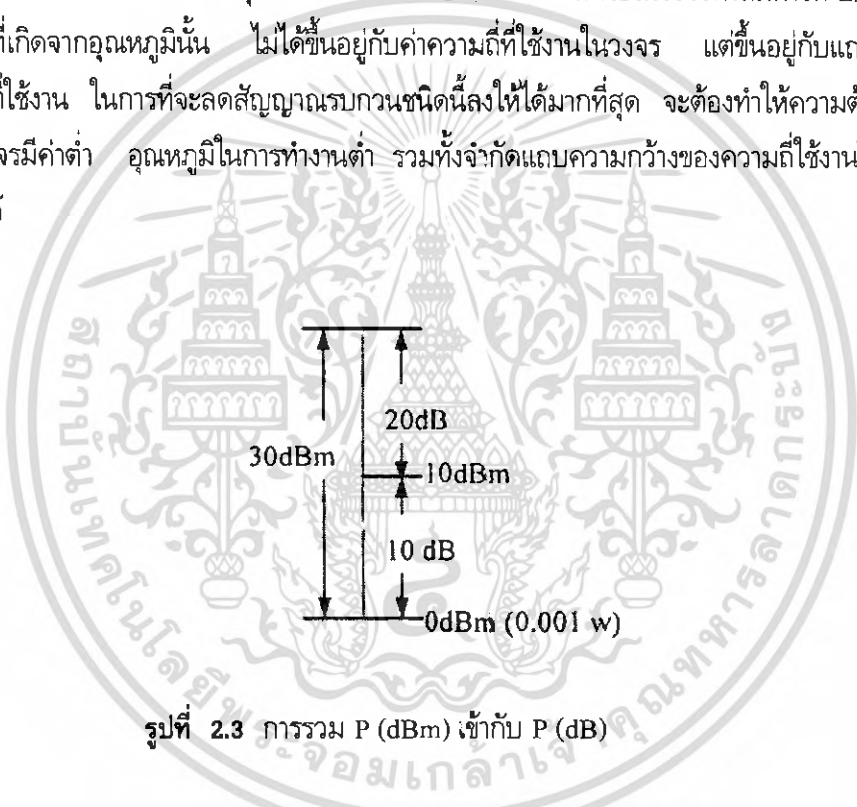
กำลังไฟฟ้าที่คิดเทียบกับระดับกำลังไฟฟ้า 1 มิลลิวัตต์ ในหน่วย dBm นี้ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าวัตต์ (watt) ซึ่งทั้งสองตัวแปรนี้สามารถแปลงกลับไปกลับมาได้ถ้าทราบค่าตัวแปร P สามารถหาค่าในรูป $P(\text{dBm})$ ได้ หรือในทางกลับกัน เมื่อทราบ $P(\text{dBm})$ สามารถหาค่า P ได้เช่นกันโดยใช้สมการที่ 2.11 นี้ การเปรียบเทียบค่ากำลังเป็นวัตต์กับค่ากำลังในหน่วย dBm แสดงกันในตารางที่ 2.6

เนื่องจากค่า dBm เป็นค่าที่อ้างอิงกับค่า 0.001 วัตต์ การรวมค่าเดซิเบลที่เป็นบวก หรือลบจะเป็นผลให้ค่าเดซิเบลที่ได้เป็น dBm ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งตามรูปนี้ 20 dB นำมารวมเข้ากับ 10 dBm ผลออกมาได้เป็น 30 dBm จะเห็นว่าการรวมหรือเพิ่มค่าเดซิเบลเข้าไปในเทอม dBm ผลที่ได้จะเป็นหน่วย dBm เสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.7 สัญญาณรบกวน

ในที่นี้จะกล่าวถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุณหภูมิ ที่ส่วนหน้าสุด (Front End) ของวงจรซึ่งจะมีผลต่อการทำงานในระดับสัญญาณต่ำ โดยมีค่ารูปร่างของสัญญาณรบกวน (Noise Figure) และสิ่งทีก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise Factor) เป็นตัวกำหนดระดับการวัดของสัญญาณรบกวนด้วยความเร็วและทิศทางที่ไม่แน่นอน แต่ความเร็วในการเคลื่อนที่นั้นขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute Temperature) ของสภาวะแวดล้อมรอบ ซึ่งเราจะเรียกสัญญาณรบกวนในลักษณะนี้ว่า สัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุณหภูมิ (Thermal Noise) หรือ Jonson Noise) โดยค่าสัญญาณรบกวนที่จะเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุโลหะโดยปราศจากการไหลของกระแสผ่านเลย ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (Root Mean Square) ของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิ ความต้านทานของเนื้อวัสดุ และความกว้างของแถบความถี่ที่ใช้ในวงจรดังสมการที่ 2.12 ค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุณหภูมินั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าความถี่ที่ใช้งานในวงจร แต่ขึ้นอยู่กับแถบความถี่กว้างของความถี่ที่ใช้งาน ในการที่จะลดสัญญาณรบกวนชนิดนี้ลงให้ได้มากที่สุด จะต้องทำให้ความต้านทานที่ส่วนหน้าของวงจรมีค่าต่ำ อุณหภูมิในการทำงานต่ำ รวมทั้งจำกัดแถบความถี่ของความถี่ใช้งานให้แคบที่สุดเท่าที่จะทำได้



รูปที่ 2.3 การรวม P (dBm) เข้ากับ P (dB)

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบค่ากำลังวัตต์กับค่ากำลัง dBm

กำลังในหน่วยวัตต์	กำลังเทียบเท่าในหน่วย dBm
1 kW	60 dBm
100 W	50 dBm
10 W	40 dBm
1 W	30 dBm
100 mW	20 dBm
กำลังในหน่วยวัตต์	กำลังเทียบเท่าในหน่วย dBm

$$V_{\text{อุณหภูมิ}} = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad (2.12)$$

โดย $V_{\text{อุณหภูมิ}} \text{ (rms)}$ = ค่า root mean square ของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น

k = ค่าคงตัวของ Boltzmann, 1.38×10^{-23} จูล/เคลวิน

R = ค่าความต้านทานของวัสดุ, โอห์ม

Δf = แถบความถี่ในวงจร, เฮิรตซ์

T = ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์, เคลวิน

ในสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับวงจร หรืออุปกรณ์อื่นใดก็ตามมักจะกำหนด หรือวัดค่าออกมาในรูปอัตราส่วนของกำลังอินพุตสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเทียบกับกำลังเอาต์พุตสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่อุณหภูมิปกติ (25 องศาเซลเซียส) ค่าอัตราส่วนที่ได้จะเป็นค่ารูปร่างของสัญญาณรบกวน มีรูปสมการดังนี้

$$F = \frac{S_{\text{กำลังอินพุต}}/N_{\text{กำลังอินพุต}}}{S_{\text{กำลังอินพุต}}/N_{\text{กำลังอินพุต}}} \quad (2.13)$$

สำหรับค่าส่วนประกอบสัญญาณรบกวนวัดออกมาในหน่วยของเดซิเบล มีรูปสมการดังนี้

$$NF = 10 \log_{10} |F| \quad (2.14)$$

โดยที่ S/N เป็นอัตราส่วนระหว่างสัญญาณเสียงกับสัญญาณรบกวน

2.2 ทฤษฎีสายนำสัญญาณ

2.2.1 ความแตกต่างในการวิเคราะห์วงจรที่ใช้สัญญาณความถี่ต่ำและสูง

เมื่อพิจารณาในเรื่องความถี่ของสัญญาณที่ป้อนให้วงจรที่ความถี่ต่ำคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเหมือนกันในทุกส่วนของวงจรที่เวลาชั่วขณะหนึ่งขณะใดทำให้การพิจารณาอุปกรณ์จำพวกตัวความต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำคิดเป็นอุปกรณ์กลุ่มก้อน (Lumped Device) ประกอบกันเป็นวงจรขึ้นมาได้ แต่เมื่อความถี่สูงๆ ขึ้นไปการวิเคราะห์แบบอุปกรณ์กลุ่มก้อน (Analysis Based on Lumped-Parameter Assumption) ไม่สามารถนำมาอธิบายการทำงานของวงจรได้ ฉะนั้น ที่ความถี่ของสัญญาณสูง ๆ จึงไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สามารถนำตัวแปรต่าง ๆ (R, L, C หรือตัวแปรอื่น) มารวมกันเป็นกลุ่มก้อนอีกต่อไป ณ ความถี่ย่านไมโครเวฟใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครเวฟ คลื่นแรงดัน และกระแสจะไม่มีผลต่อทั้งวงจรพร้อมกันที่เวลาชั่วขณะใด ขณะหนึ่งๆ ที่ความถี่สูง วงจรถูกแบ่งออกเป็น ส่วน ๆ คือ ตัวแปรต่าง ๆ ในวงจรจะรวมกลุ่มก่อนเป็นส่วนย่อย ๆ ประกอบเป็นวงจร ความแตกต่างในการแพร่กระจายของคลื่นที่ความถี่สูง และความถี่ต่ำพิจารณาได้จากตัวอย่างความถี่ที่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่ป้อนให้วงจรเดียวกัน ในขั้นแรกหาค่าความยาวคลื่นมาประกอบการพิจารณาก่อน

$$\lambda \text{ (เมตร/วินาที)} = \frac{3 \times 10^8}{f}$$

ที่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์, $f = 1 \times 10^6$ เฮิร์ตซ์ จะได้

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^6} = 300 \text{ เมตร}$$

ที่ 1 กิกะเฮิร์ตซ์, $f = 1 \times 10^9$ เฮิร์ตซ์ จะได้

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^9} = 0.30 \text{ เมตร}$$

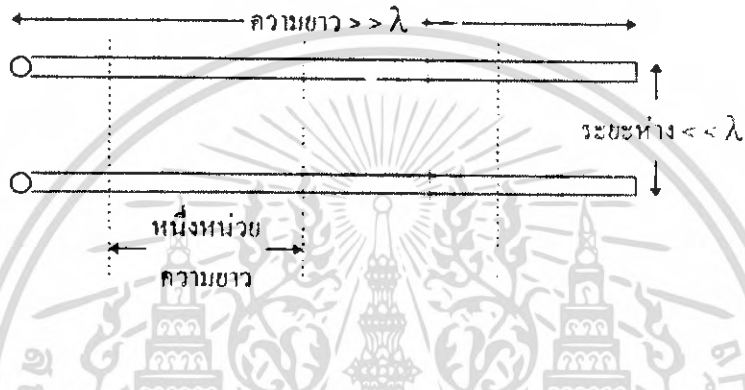
พิจารณาที่วงจรเดียวกันพบว่าค่าความยาวคลื่น 300 เมตร ของความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์จะยาวมาก และการพิจารณาค่าแรงดันทั้งวงจรที่เวลาขณะหนึ่งมีค่าเดียวกันตลอด ส่วนที่ 1 กิกะเฮิร์ตซ์ ค่าความยาวคลื่นเป็น 0.300 เมตร พบว่าค่าของแรงดันตลอดทั้งวงจรไม่เท่ากัน ณ เวลาชั่วขณะหนึ่ง ความแตกต่างของค่าแรงดันนี้ เป็นผลให้ไม่สามารถนำตัวแปรต่าง ๆ มา รวมกลุ่มก่อนประกอบขึ้นเป็นวงจรได้ ดังเช่นปรากฏที่ความถี่ที่ต่ำๆ

2.2.2 สายนำสัญญาณ

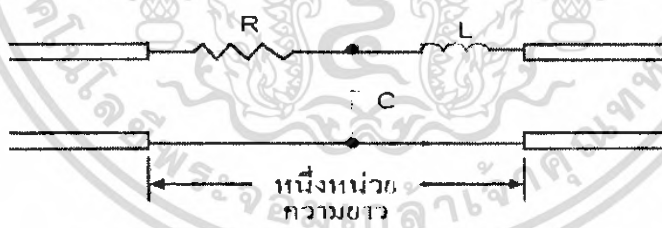
เพื่อทำการป้อนคลื่นแรงดัน หรือกระแสให้กับสายนำสัญญาณด้วยความถี่สูง โดยจัดให้สายนำสัญญาณแบบแท่งตัวนำขนานอยู่ใกล้กันมากๆ จนกระทั่งสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าสามารถเหนี่ยวนำ แท่งตัวนำซึ่งกันและกันได้ สามารถพิจารณาสายนำสัญญาณซึ่งยาวหนึ่งหน่วย (Unit Length) ดังรูปที่ 2.4 และในความยาวหนึ่งหน่วยนี้ด้วยการป้อนสัญญาณ ความถี่สูง รูปคลื่นแรงดัน และกระแสจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ณ เวลาขณะใดขณะหนึ่งที่พิจารณา ดังนั้น ตัวความต้านทาน (R), ตัวความเหนี่ยวนำ (L), ตัวเก็บประจุ (C) และความนำไฟฟ้า (G) ในแต่ละหนึ่งหน่วยความยาวสามารถจัดรวมกลุ่มกันกันได้

ถ้าให้ค่าความต้านทานของสายมีค่าเป็นศูนย์ และไม่มีการรั่วไหลเกิดขึ้นระหว่างแท่งตัวนำทั้งสอง จะได้สายนำสัญญาณที่ประกอบด้วยชุดตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุต่อกันโดยแต่ละชุด หรือแต่ละหนึ่งหน่วย ความยาวนี้จะมีค่าคงตัวของเวลา (Time Constant) ที่เกิดจากค่าของตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ดังนั้น ค่าของตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำนี้จะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการเดินทาง หรือถ่ายเทพลังงานในสายนำสัญญาณเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

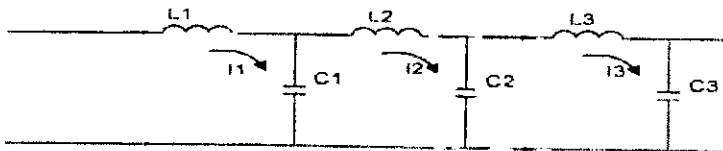
ถ้าทำการต่อแบตเตอรี่เข้ากับสายนำสัญญาณ เมื่อเปิดสวิตช์จะเกิดกระแสไหลไปทำการประจุให้ตัวเก็บประจุใช้เวลาเท่ากับค่าคงตัวเวลาในการประจุให้ค่าแรงดันตกคร่อมและ ตัวเก็บประจุเท่ากับแรงดันของตัวแบตเตอรี่และค่าคงตัวเวลานี้จะมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับค่าคงตัวของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ใช้ประกอบขึ้นมา ทิศทางของกระแสจะพุ่งเข้าไปในแท่งตัวนำบน และมีทิศพุ่งออกในแท่งตัวนำข้างล่าง ส่วนทิศทางการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กหาได้จากเวกเตอร์ทิศทาง



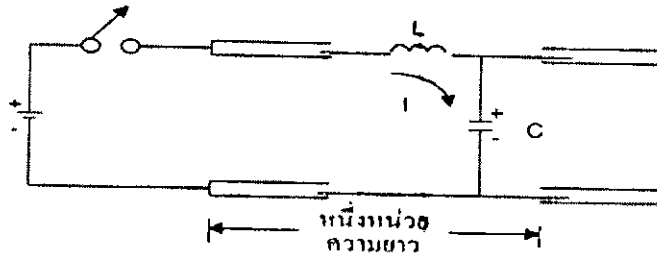
รูปที่ 2.4 สายนำสัญญาณที่แบ่งออกเป็นส่วนๆ



รูปที่ 2.5 แบบจำลองของตัวแปรแบบรวมกลุ่มก้อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.6 การประจุของตัวเก็บประจุในแต่ละหนึ่งหน่วยความยาว
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การป้อนแรงดันไฟตรงให้แก่สายนำสัญญาณ

เวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่นคิดต่อความยาวหนึ่งหน่วยหาได้จาก

$$T = \sqrt{LC} \quad \text{วินาที} \quad (2.15)$$

ดังนั้น เวลาที่ใช้ในการที่คลื่นเดินทางในสายนำสัญญาณของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับค่าคาปาซิแตนซ์ และอินดักแตนซ์เท่านั้น เมื่อไม่คำนึงถึงความต้านทาน และสภาพการนำของสาย ส่วนความเร็วของคลื่นในสายหาได้จากสมการ

$$v = \frac{1}{T} \quad \text{วินาที} \quad (2.16)$$

แทนค่าสมการที่ 2.15 ลงในสมการที่ 2.16 จะได้ความเร็วคลื่นต่อหนึ่งหน่วยความยาวขึ้นอยู่กับค่าอินดักแตนซ์ และคาปาซิแตนซ์

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{เมตร/วินาที} \quad (2.17)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งใดๆบนสายนำสัญญาณหาได้โดยใช้ค่าแรงดันรวมทั้งจุดนั้นหารด้วยบริเวณค่ากระแสรวมที่จุดเดียวกันนั้น

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางไปตามสายนำสัญญาณด้วยความเร็วที่คิดต่อหนึ่งหน่วยความยาวเท่านั้น ณ เวลาชั่วขณะนั้น ดังนั้น อิมพีแดนซ์ที่ได้จึงเป็นอิมพีแดนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณนั้น และมีค่าตามสมการ

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{โอห์ม} \quad (2.18)$$

ค่าอัตราส่วนจากสูตรมีความสำคัญต่อสายนำสัญญาณไม่ว่าจะมีความยาวเพียงใดที่เวลาหนึ่งๆ คลื่นที่ผ่านจะมีผลต่อความยาวหนึ่งหน่วยเท่านั้น และแต่ละหนึ่งหน่วยความยาวสามารถคำนวณค่าความต้านทานได้จากสมการที่ 2.18 โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้ ณ ตำแหน่งใดก็ตามบนสายนำสัญญาณ เรียกว่า ค่าของอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ (Characteristic Impedance) สัญลักษณ์ใช้แทน คือ Z_0 ดังนั้น ค่าของอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ ของสายนำสัญญาณแบบแท่งตัวนำคู่ขนานแสดงได้ด้วยสมการ

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{โอห์ม} \quad (2.19)$$

ถ้าที่ปลายสายนำสัญญาณถูกต่อด้วยตัวความต้านทานค่าเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของตัวสายนำสัญญาณ การต่อปลายด้วยค่าของอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายนั้นจะเป็นผลให้แรงดัน และกระแสเกิดขึ้นพร้อมกัน หรือตรงกัน ทำให้ไม่มีการสะท้อนกลับพลังงานของคลื่นจะเสียให้ตัวภาวะในรูปของความร้อน คลื่นแรงดัน และกระแสปรากฏที่จุดต่อ หรือตัวความต้านทาน ซึ่งต่อปลายสายนำสัญญาณในลักษณะตรงกัน หรือมีเฟสเดียวกันตลอด

ถ้าที่ปลายสายนำสัญญาณถูกลัดวงจร หรือตัวภาวะมีค่าเป็นศูนย์ จะให้ค่าแรงดันที่ตรงบริเวณปลายปิด หรือจุดลัดวงจรเท่ากับผลคูณของกระแส และความต้านทาน

$$\begin{aligned} V &= IR \\ &= I(0) = 0 \quad \text{โวลต์} \end{aligned}$$

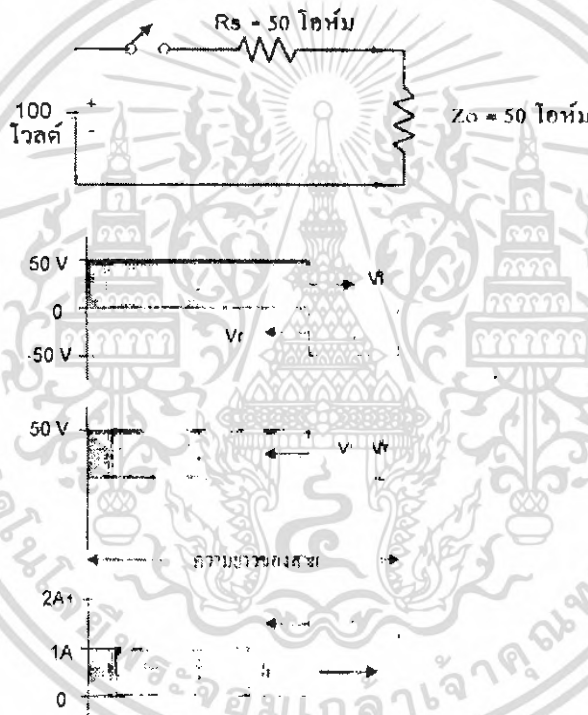
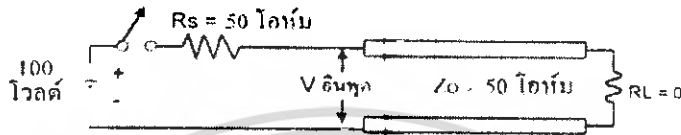
จากการที่ไม่มีค่าความต้านทาน ทำให้กำลังงานคลื่นที่ป้อนเข้ามาในสายไม่มีการสูญเสียขึ้น หรือสิ้นเปลืองที่จุดปลายสายเลย คลื่นที่มากระทบจุดปลายสายจะสะท้อนกลับเพื่อทำให้ลัดวงจรปลายสายมีค่าแรงดันเท่ากับศูนย์ และจากการที่คลื่นสะท้อนกลับมีการกลับเฟสตรงข้ามกัน 180° กับคลื่นทางด้านอินพุต จึงเป็นผลให้คลื่นรวมมีค่าแรงดันเป็นศูนย์ส่วนคลื่นกระแสจะสะท้อนกลับที่ปลายปิดของสายให้คลื่นที่มีเฟสเดิม กรณีปลายสายนำสัญญาณข้างหนึ่งถูกเปิดวงจรไว้ ส่งผลให้ความต้านทานที่ตำแหน่งปลายเปิดมีค่าเป็นอนันต์ ดังนั้น กระแสที่ตำแหน่งปลายเปิดนี้มีค่าเป็นศูนย์ คือ ไม่มีกระแสไหล แสดงว่าคลื่นกระแสสะท้อนกลับที่ตำแหน่งปลายเปิดมีเฟสตรงกันข้ามกับคลื่นกระแสที่ตกกระทบ

$$I_i - I_r = 0 \quad \text{แอมป์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนคลื่นแรงดันตกกระทบจะรวมเข้ากับคลื่นแรงดันสะท้อนกลับที่มีเฟสตรงกันได้คลื่นแรงดันรวมเป็นสองเท่าของคลื่นตกกระทบ

$$V_i + V_r = 2V_i$$



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลรูปคลื่นแรงดัน และกระแสที่เกิดขึ้นในสาย

จากหัวข้อที่กล่าวมาแล้วนั้น การต่อปลายสายนำสัญญาณด้วยภาระที่มีค่าของอิมพีแดนซ์เท่ากับค่าของอิมพีแดนซ์คุณสมบัติทำให้เกิดการสมดุลทางอิมพีแดนซ์ จึงไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่นสัญญาณ และกำลังงานสูญเสียเป็นความร้อนที่ตัวภาระ ส่วนการต่อปลายแบบปิด (ลัดวงจร) หรือแบบเปิด (เปิดวงจร) จะเกิดการสะท้อนกลับของกำลังงานทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับหัวข้อนี้กล่าวถึงการต่อปลายสายด้วยภาวะตัวความต้านทานซึ่งไม่ใช่ค่าของอิมพีแดนซ์ คุณสมบัติของสาย ผลที่ได้ คือ กำลังงานจะถูกแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับมาตามสาย อีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียที่ตัวภาวะเป็นความร้อน ในส่วนกำลังงานที่สะท้อนกลับจะมีปริมาณเล็กน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน

จากสมการที่ 2.20 ถ้าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดันมีค่าเป็นบวก แสดงว่าแรงดันสะท้อนกลับมีเฟสตรงกัน แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบแรงดันสะท้อนกลับจะกลับเฟสเป็นตรงกันข้าม

$$r = \frac{V_r}{V_i} \quad (2.20)$$

เมื่อ r = สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน

V_r = แรงดันสะท้อนกลับ, โวลต์

V_i = แรงดันตกกระทบ, โวลต์

การหาค่าเปอร์เซ็นต์ของคลื่นแรงดันสะท้อนกลับได้เท่ากับ

$$\text{เปอร์เซ็นต์แรงดันสะท้อนกลับ} = r \times 100 \quad (\%) \quad (2.21)$$

กำลังงานหาได้จากแรงดันยกกำลังสองหารด้วยค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของ Z_0

$$P = \frac{V^2}{Z_0}$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับกำลังงาน (Power Reflection Coefficient) มีค่าเท่ากับกำลังสองของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน

$$r^2 = \frac{P_r}{P_i} \quad (2.22)$$

เมื่อ r^2 = สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับกำลังงาน

P_r = แรงดันสะท้อนกลับ, โวลต์

P_i = แรงดันตกกระทบ, โวลต์

เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ได้โดย

$$\text{เปอร์เซ็นต์กำลังงานสะท้อนกลับ} = r^2 \times 100 \quad (\%) \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดันยังสามารถหาได้จากอัตราส่วนของผลต่าง และผลรวมระหว่างตัวภาวะกับค่าของอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสาย

$$r = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.24)$$

เมื่อ r = สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

Z_L = อิมพีแดนซ์ของตัวภาวะ, โอห์ม

Z_0 = ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายสัญญาณ, โอห์ม

การสะท้อนกลับที่เกิดขึ้นในสายนำสัญญาณสามารถปรากฏได้ที่ต้นทาง คือ อินพุตและปลายทาง คือ เอาต์พุต การสะท้อนกลับที่ปลายสายเนื่องจากการต่อภาวะแบบไม่สมดุลเช่นเดียวกันถ้าเกิดคลื่นสะท้อนกลับไปยังอินพุต และพบว่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณต้นทางเกิดความไม่สมดุลกับค่าของอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายนำสัญญาณแล้วทำให้เกิดการสะท้อนกลับอีกครั้ง และเป็นเช่นนั้นจนกระทั่งเข้าสู่สมดุล

2.2.3 คลื่นนิ่ง

ด้วยคุณสมบัติเช่นเดียวกับคลื่นไฟฟ้ากระแสตรง คลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้กับสายนำสัญญาณจะสูญเสียและสิ้นเปลืองพลังงานทั้งหมดเป็นความร้อนที่ตัวภาวะความต้านทาน มีค่าเท่ากับค่าที่ได้ค่าของอิมพีแดนซ์ คุณสมบัติของสายนั้น และเกิดการสะท้อนกลับเมื่อมีการต่อปลายแบบเปิดและแบบปิด สำหรับการใส่ค่าตัวความต้านทานอื่น ที่ไม่ใช่ค่าของอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ สัญญาณคลื่นส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืน หรือสิ้นเปลืองที่ตัวภาวะความต้านทาน อีกส่วนหนึ่งที่เหลือจะสะท้อนกลับไปตามสาย และเนื่องจากค่าแอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับจะแปรเปลี่ยนตามสาย และเนื่องจากค่าแอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับจะแปรเปลี่ยนตามเวลา คลื่นรวม หรือคลื่นผลลัพธ์จะได้อาจมาจากการรวมแอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับนี้เรียกว่า คลื่นนิ่ง

ค่าแรงดันสูงสุด V_{max} ของคลื่นนิ่งได้มาจากการบวกกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับที่มีเฟสตรงกัน

$$V_{max} = V_i + V_r \quad (V) \quad (2.25)$$

ค่าแรงดันต่ำสุด V_{min} ของคลื่นนิ่งได้มาจากการบอกรันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับที่มีเฟสตรงกัน

$$V_{min} = V_i - V_r \quad (V) \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนของแรงดันสูงสุดต่อแรงดันต่ำสุดเรียกว่า อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (2.27)$$

อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน ($VSWR$) แสดงในหน่วย dB จะมีชื่อว่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio : SWR)

$$VSWR (dB) = 20 \log (VSWR) \quad (2.28)$$

ค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้บนสายสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$$

ค่ากระแสสูงสุด I_{\max} มาจากกระแสตกกระทบ I_i และกระแสสะท้อนกลับ I_r ที่มีเฟสตรงกัน นำมารวมกัน ดังนั้น

$$VSMR = \frac{I_i + I_r}{I_{\min}}$$

จากกฎของโอห์ม

$$I = \frac{V}{R}$$

จะได้

$$VSWR = \frac{V_i / Z_0 + V_r / Z_0}{I_{\min}}$$

$$VSWR = \frac{V_i + V_r}{Z_0 I_{\min}}$$

$$VSWR = \frac{V_{\min}}{Z_0 I_{\min}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ที่อิมพีแดนซ์มีค่าสูงสุดได้จะต้องใช้ค่าแรงดันสูงสุด และค่ากระแสต่ำสุดดังนี้

$$Z_{\max} = \frac{V_{\min}}{I_{\min}}$$

จะได้ดังสมการที่ 2.29

$$Z_{\max} \text{ (โอห์ม)} = (\text{VSWR}) Z_0 \quad (2.29)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) และสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดันสามารถคำนวณโดยเริ่มจากสมการที่ 2.30

$$\text{VSWR} = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$$

แทนค่าของ V_{\max} และ V_{\min} ลงในสมการ

$$\text{VSWR} = \frac{V_i + V_r}{V_i - V_r}$$

ทำการหารเศษ และส่วนด้วย V_i

$$\text{VSWR} = \frac{1 + V_r / V_i}{1 - V_r / V_i} \quad (2.30)$$

หาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

$$r = \frac{V_r}{V_i}$$

แทนค่าในสมการ VSWR

$$\text{VSWR} = \frac{1 + |r|}{1 - |r|} \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ค่า r เป็น

$$r = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \quad (2.32)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน (VSWR), Z_L และ Z_0

กรณี Z_L มากกว่า Z_0 แทนในสมการที่ 2.32



$$VSWR = \frac{1 + \frac{|Z_L - Z_0|}{Z_L + Z_0}}{1 - \frac{|Z_L - Z_0|}{Z_L + Z_0}}$$

ทำการคูณทั้งเศษและส่วนด้วย $Z_L + Z_0$

$$VSWR = \frac{Z_L + Z_0 + Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0 - Z_L + Z_0} \quad (2.33)$$

$$VSWR = \frac{2Z_L}{2Z_0}$$

$$VSWR = \frac{Z_0}{Z_L} \text{ เมื่อ } Z_0 < Z_L$$

กรณี Z_L น้อยกว่า Z_0 เทอมของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจะมีค่าเป็นลบ ดังนั้น ค่า VSWR จะ
ได้เป็นดังสมการที่ 2.34

$$VSWR = \frac{Z_0}{Z_L} \text{ เมื่อ } Z_0 < Z_L \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณที่ระยะห่าง (L) จากค่าการอิมพีแดนซ์ Z_L โดยที่สายนำสัญญาณมีค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ Z_0

$$Z_{\text{อินพุต}} = Z_0 \frac{Z_L + j Z_0 \tan \beta L}{Z_0 + j Z_L \tan \beta L} \quad (2.35)$$

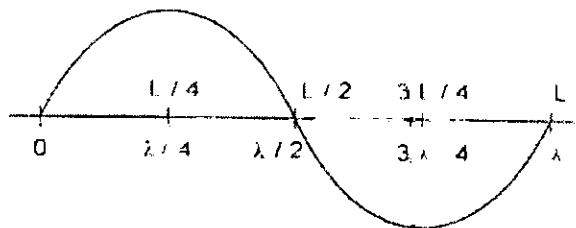


รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในสมการที่ 2.35

ค่า β ในสมการมีชื่อเรียกว่า ค่าคงตัวของเฟส (Phase Constant) หรือค่าคงตัวของความยาวคลื่น (Wavelength Constant) มีค่าดังนี้

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.36)$$

สายนำสัญญาณนั้นวัดหน่วยความยาวเป็นเมตร หรือเป็นหน่วยของความยาวคลื่นหน่วยของความยาวคลื่นได้จากการเทียบค่า (Normalized) ความถี่ที่ใช้งานในขณะนั้น หน่วยเมตรนั้น ไม่มีการเทียบค่าสามารถเทียบทั้งสองวิธีได้ตามรูป



รูปที่ 2.10 หนึ่งรอบหรือหนึ่งคาบเวลาของคลื่นโดยใช้หน่วยวัดทั้งสองแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาด้านนี้ เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ของอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณครึ่งคลื่น ซึ่งต่อปลายสายไว้ด้วยตัวภาระที่มีค่าอิมพีแดนซ์ค่าหนึ่ง

$$\beta L = \frac{2\pi}{\lambda} \left| \frac{\lambda}{2} \right|$$

$$\beta = \pi \text{ เรเดียน}$$

$$\beta = 180 \text{ องศา}$$

ดังนั้น

$$\tan \beta L = \tan 180^\circ = 0$$

หาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ

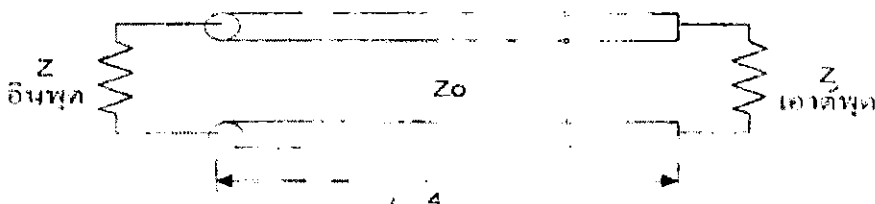
$$Z_{\text{อินพุต}} = Z_0 \left(\frac{Z_L + j Z_0 \tan \beta L}{Z_0 + j Z_L \tan \beta L} \right)$$

$$Z_{\text{อินพุต}} = Z_0 \left(\frac{Z_L}{Z_0} \right)$$

$$Z_{\text{อินพุต}} = Z_L \quad (\text{โอห์ม}) \tag{2.37}$$

ดังนั้น สายนำสัญญาณใด ๆ ที่มีความยาวเท่ากับ $\lambda / 2$ ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสาย จะมีค่าเท่ากับค่าภาระอิมพีแดนซ์ที่ปลายสาย

สายนำสัญญาณที่หนึ่งส่วนที่คลื่น คุณสมบัติพิเศษที่มีประโยชน์มาก คือ ใช้ทำการปรับสมดุล (Matching) ของสายนำสัญญาณที่มีค่าคุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ต่างกัน 2 สาย เข้าด้วยกัน ความสัมพันธ์ค่าอินพุต และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์แสดงดังรูปที่ 2.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเพื่อจุดประสงค์เฉพาะเท่านั้น ไม่สามารถให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.11 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสายนำสัญญาณหนึ่งส่วนสี่คลื่น
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของ Z_0 , $Z_{อินพุต}$ และ $Z_{เอาต์พุต}$ สามารถหาได้ดังนี้

$$Z_{อินพุต} = Z_0 \left(\frac{Z_L + j Z_0 \tan \beta L}{Z_0 + j Z_L \tan \beta L} \right)$$

เพราะว่า $\beta L = 1.5$ เรเดียน หรือ 90 องศา ดังนั้นได้ว่า

$$Z_{อินพุต} = Z_0 \left(\frac{Z_{output} + j Z_0 \tan 90^\circ}{Z_0 + j Z_L \tan 90^\circ} \right) \quad (2.38)$$

ทำการทั้งตัวเศษ และส่วนด้วย $\tan 90^\circ$

$$Z_{อินพุต} = Z_0 \left(\frac{Z_{output} / \tan 90^\circ + j Z_0}{Z_0 / \tan 90^\circ + Z_{output}} \right)$$

เพราะว่า $\tan 90^\circ = \infty$ ดังนั้น จะได้

$$Z_{อินพุต} = Z_0 \left(\frac{j Z_0}{j Z_{output}} \right)$$

$$Z_{อินพุต} = \frac{Z_0^2}{Z_{output}} \quad (\text{โอห์ม}) \quad (2.39)$$

เพราะว่าค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายนำสัญญาณนั้นมีค่าคงที่ ค่าอินพุต และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของสายจึงแปรผกผันกันตามสมการที่ 2.38

$$Z_{อินพุต} = \text{ค่าคงที่} \frac{(\text{โอห์ม})}{Z_{เอาต์พุต}} \quad (2.40)$$

หาความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์คุณสมบัติกับอินพุต และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ได้ โดยการแก้สมการได้ว่า

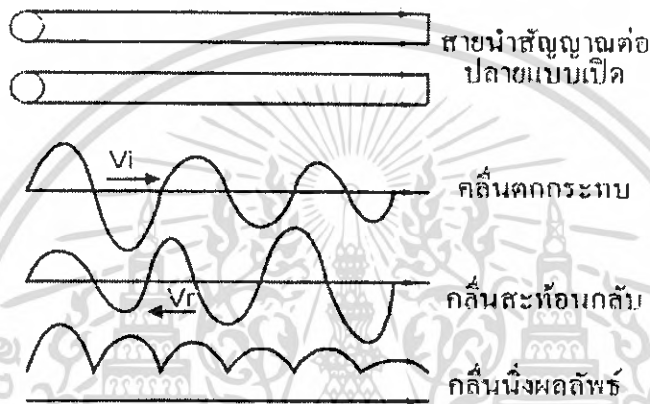
$$Z_0^2 = Z_{อินพุต} Z_{เอาต์พุต}$$

$$Z_{อินพุต} = \sqrt{Z_{input} Z_{output}} \quad (\text{โอห์ม}) \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานของสายนำสัญญาณจะทำให้แอมพลิจูดของคลื่นแรงดัน และกระแสทั้งที่ตกกระทบ และสะท้อนกลับถูกลดทอนลงอย่างต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2.12

เมื่อความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่แท่งตัวนำเพิ่มขึ้นนั้น ความลึกของกระแสที่ผ่านที่ผิวตัวนำจะลดลง ความลึกของกระแสที่ผิวตัวนำเรียกว่า ความลึกพื้นผิวตัวนำ (Skin Depth) ที่ขึ้นความถี่หรือระยะความลึกจากพื้นผิวตัวนำซึ่งมีความหนาแน่นของกระแสลดลงเป็น $1/e$ ของกระแสที่พื้นผิว 2.718 แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 การลดทอนของคลื่นแรงดันเนื่องจากความสูญเสียในสาย

$$\text{Skin-depth} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \gamma}} \quad (\text{เมตร}) \quad (2.42)$$

โดยที่ f = ความถี่, เฮิรตซ์

μ = ค่าเพอมีเอเบิลิตี, เฮนรี/เมตร

γ = สภาพความเป็นตัวนำ (Conductivity), ซีเมนต์/เมตร

เพราะว่าสภาพความต้านทานเป็นส่วนกลับ หรือแปรผกผันกับสภาพความเป็นตัวนำ

$$R = \frac{1}{\gamma}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ Skin depth จะได้

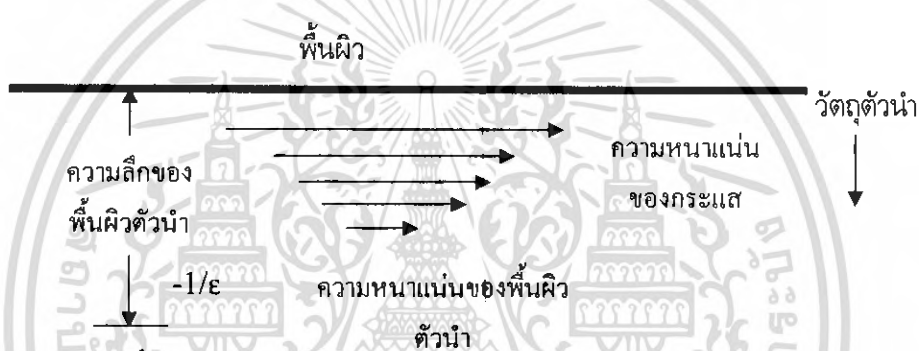
$$\text{Skin depth} = \sqrt{\frac{R}{\pi f \mu}} \quad (\text{เมตร}) \quad (2.43)$$

โดยที่ f = ความถี่, เฮิรตซ์

μ = ค่าเพอมีเอเบิลิตี, เฮนรี/เมตร

R = ความต้านทาน, โอห์ม/เมตร

การที่ระยะความลึกถูกลดลงที่ความถี่สูงขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของกระแสที่บริเวณพื้นผิวดำนำเพิ่มขึ้น



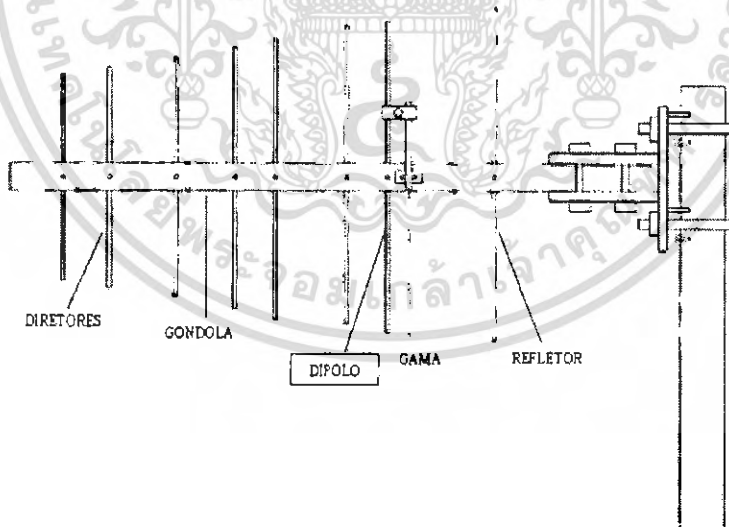
รูปที่ 2.13 การลดทอนของความหนาแน่นกระแสเนื่องจากความลึกของพื้นผิว

ในการใช้งานสามารถลดผลจากความสูญเสียเนื่องจากผิวของตัวนำ ได้ด้วยการชุบหรือเคลือบผิวด้วยโลหะ ซึ่งมีค่าความต้านทานต่ำ และมีราคาสูง วิธีการนี้นิยมใช้กันในอุปกรณ์ หรือเครื่องมือใช้งานที่ความถี่สูง เช่น การฉาบผิวดำนำในของท่อนำคลื่นด้วยทอง หรือเงินเพื่อลดความต้านทานที่ผิวดำนำเป็นต้น

เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติต่างๆ ของแผ่นรองรับ ตามตารางที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าแผ่นรองรับแบบอลูมิเนียมมีคุณสมบัติในหลายๆ ข้อ ถึงแม้จะมีความขรุขระไม่ต่ำมากนัก ดังนั้น อลูมิเนียมจึงเป็นแผ่นรองรับที่ใช้กันมาก

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของแผ่นรองรับแบบต่างๆ คือ

วัสดุ	ค่าคงตัวจนวนสัมพันธ์	Tan σ ที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์	ค่าคงตัวของการนำความร้อนวัตต์/ม ² /องศาเซลเซียส	ความขรุขระของผิว (ไมคอนเมตร)	ความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้า (กิโลโวลต์/ซม.)
อลูมินา (Alumina)99.5%,96%	10	$1 \sim 2 \times 10^{-4}$	0.3	2- 8	4×10^3
	9	6×10^{-4}	0.28	20	4×10^3
แซฟไฟร์ (Sapphire)	9.4 และ 11.6 (ผลึกเดี่ยว)	1×10^{-4}	0.40	1	4×10^3
แก้ว	5	20×10^{-4}	0.01	1	0
ควอตซ์	3.8	1×10^{-4}	0.01	1	10×10^3
GaAs	13	6×10^{-4}	0.30	1	350



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของสายอากาศแบบยาก็

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 ค่า ϵ_r และ $\sigma/\omega\epsilon$ ของสารชนิดต่างๆ

สาร หรือวัสดุ	ϵ_r	$\sigma/\omega\epsilon$
Air	1.0005	0
Alcohol, ethyl	25	0.1
Aluminum oxide	8.8	0.0006
Amber	2.7	0.002
Bakelite	4.74	0.022
Barium titanate	1200	0.013
Carbon dioxide	1.001	0
Ferrite (NiZn)	12.4	0.00025
Germanium	16	0
Glass	4-7	0.002
Ice	4.2	0.05
Mica	5.4	0.0006
Neoprene	6.6	0.011
Nylon	3.5	0.02
Peper	3	0.008
Plexiglas	3.45	0.03
Polyethylene	2.26	0.0002
PolyPropylene	2.25	0.0003
Polystyrene	2.56	0.00005
Porcelain (dry process)	6	0.014
Pyranol	4.4	0.0005
Pyrex glass	4	0.0006
Quartz (Fused)	3.8	0.00075
Rubber	2.5-3	0.002
Silica or SiO ₂ (Fused)	3.8	0.00075

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 (ต่อ) ค่า ϵ_r และ $\sigma/\omega\epsilon$ ของสารชนิดต่าง ๆ

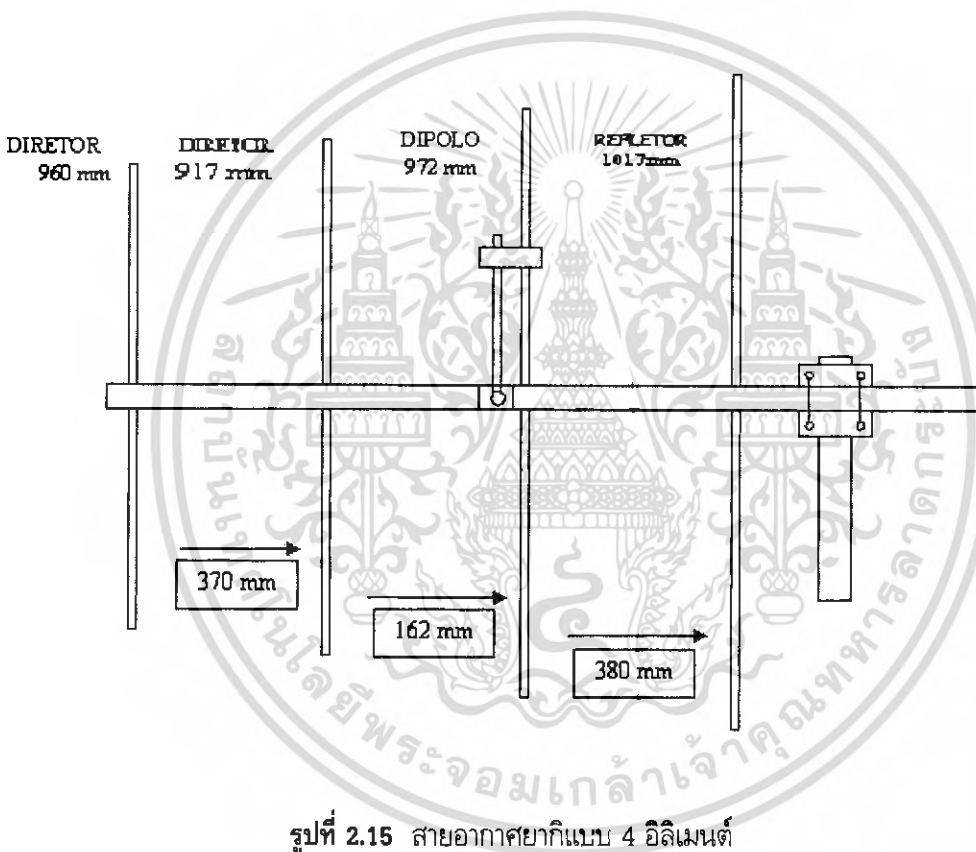
สาร หรือวัสดุ	ϵ_r	$\sigma/\omega\epsilon$
Silicon	11.8	0
Snow	3.3	0.05
Sodium chloride	5.9	0.001
Soil (dry)	2.8	0.05
Steatite	5.8	0.003
Styrofoam	1.03	0.0001
Teflon	2.1	0.0003
Titanium dioxide	100	0.0015
Water (distilled)	80	0.04
Water (sea)	0	4
Water (dehydrated)	1	0
Wood (dry)	1.5-4	0.01

ส่วนตารางที่ 2.8 แสดงค่า ϵ_r และค่าของ $\sigma/\omega\epsilon$ ของสารชนิดต่าง ๆ ที่จะสามารถนำมาเป็น
 จนวนได้ตามความเหมาะสม

ทฤษฎีสำหรับการออกแบบอุปกรณ์สายอากาศวิทยามีมากมายหลายระดับ ทั้งด้านความถูกต้อง
 แม่นยำ และความซับซ้อนที่แตกต่างกันออกไป ในทฤษฎีเหล่านี้ วงจรสมมูลทางกายภาพที่เหมาะสม และ
 ดีที่สุด มี 2 แบบ คือ

1. วงจรสมมูลท่อนำคลื่น (Cavity Model) วงจรสมมูลสายส่ง (Transmission Line Model)
2. วงจรสมมูลท่อนำคลื่น (Cavity Model)

ส่วนของแถบโลหะในรูปที่ 2.15 สามารถเห็นรูปแบบอย่างกว้างๆ ความหมายของสายส่งความยาว L บริเวณระหว่างขอบของแถบโลหะ (Patch) และกราวด์เพลน (Ground Plane) ที่ปลายสุดทั้งสองด้านของสายสามารถมองเห็นช่องของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งคล้ายสายอากาศแบบร่อง (Slot Antennas) ดังนั้นสายอากาศที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำสามารถส่งผ่านกำลังงานไปสู่โหมดที่ปลายสุดทั้งสองด้าน เปรียบเสมือนเปิดวงจรอยู่ (Open Circuit) แต่ความจริงไม่ได้เป็นการเปิดวงจร (Not Open Circuit) เพราะว่ามันมองเห็นเป็นการที่มีอิมพีแดนซ์สูงต่ออยู่ทำให้เกิดการส่งผ่านสัญญาณระหว่างร่อง หรือช่อง (Slot) ทั้งสอง แรงดัน และกระแสที่ขั้วบนสายสามารถผ่านการต่อเชื่อม (Coupled) ผ่านวงจรเชื่อมต่อแบบสองทิศทาง (Two-Port Network)

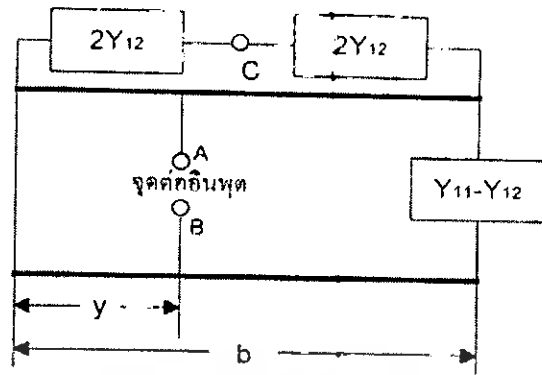


รูปที่ 2.15 สายอากาศยาคีแบบ 4 อิลิเมนต์

ถ้าตัวแปรของวงจรเชื่อมต่อสองทิศทาง คือ Y_{11} และ Y_{12} ลัดวงจร (Short Circuit) แล้ววงจรสมมูลแบบไพร์ (Pi : π model) ของวงจรขั้ว สามารถใช้กับสายอากาศยาคีแสดงดังรูป 2.16 (ก) ค่าแอดมิตแตนซ์ของตัวภาวะ คือ $Y_{11} = G_{11} + jB_{11}$ ค่าชั้บเซสแตนซ์ B_{11} สามารถอธิบายการขยายความยาว b ของสายส่ง ซึ่งจะถูกจำกัดทางกายภาพโดยผิวของแถบโลหะ

$$\Delta L = 0.412t \frac{(\epsilon_{eff} + 0.33)(a/b + 0.262)}{(\epsilon_{eff} - 0.258)(a/b - 0.813)} \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) แผนผังแบบร่างสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม



(ข) ตัวอย่างวงจร สำหรับโหม่งสมมูล



(ค) ตัวอย่างวงจร สำหรับโหม่งที่ไม่สมมูล

รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลสายส่ง

ค่า ϵ_{eff} คือ ค่าคงตัวประสิทธิผลของฉนวน และค่าคงตัวประสิทธิผลของวัสดุฐานรองรับฉนวนจะเป็นดังนี้

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2(1 + 10t/\omega)^{1/2}} \tag{2.45}$$

สามารถประมาณค่าความนำของตัวเอง (Self conductance) G_{11} ได้เป็น

$$G_{11} = \frac{a}{120\lambda_0} \left(1 - \frac{\pi^2}{6} (t/\lambda_0) \right) \tag{2.46}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการข้างต้นเป็นสมการที่แสดงถึงการหาค่าความนำพื้นฐาน ของสายอากาศแบบร่องความยาวอนันต์ ซึ่งสามารถประยุกต์โดยใช้ความเกี่ยวข้องพหุคูณของร่อง หรือช่องทั้งสอง คือสายอากาศยาก็ สำหรับค่าความนำสามารถหาได้นอกเหนือจากสมการด้านบน เป็นดังนี้

$$G_{11} \begin{cases} (a_{eff})^2 (90\lambda_0) & ; a_{eff} < 0.35\lambda_0 \\ w_{eff} / (120\lambda_0) - 1 / (60\pi^2) & ; 0.35\lambda_0 < a_{eff} < 2\lambda_0 \\ w_{eff} / (120\lambda_0) & ; 2\lambda_0 < a_{eff} \end{cases} \quad (2.47)$$

ความกว้างประสิทธิผล (Effective Wide) ของสายอากาศยาก็ คือ

$$a_{eff} = \frac{120\pi t}{Z_m \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.48)$$

โดยที่

$$Z_m = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \left(\frac{a}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} + 0.411 + \frac{1.451}{\pi} + \ln\left(\frac{a}{2t}\right) + 0.94 \right)^{-1} \quad (2.49)$$

ค่าความนำร่วม (Mutual conductance) G_{12} สามารถหาได้โดยการอินทิเกรต

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi} \int_0^\pi \sin^2 \left[\frac{(\pi a_{eff} \cos \theta) / \lambda_0}{\cos^2 \theta} \right] \sin^3 \theta j_0 \left([2\pi b \sin \theta] / \lambda_0 \right) d\theta$$

ซึ่ง J_0 คือเบสเซลฟังก์ชัน (Bessel Function)

ค่าสหสัมพันธ์ร่วม โดยทั่วไปไม่ต้องนำมาคำนวณ เพราะว่ามีผลกระทบต่อความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์เพียงเล็กน้อย

เข้าสู่อุปกรณ์ ประจุจะกระจายและเกิดขึ้นบนผิวของกราวด์เพลน และพื้นผิวด้านบน และด้านล่างของแถบโลหะ (Patch) แสดง ดังรูป 2.17 (ก) ซึ่งรูปร่างของประจุจะกระจายเป็นสองรูปแบบ คือ

1. ประจุต่างชนิดกันจะดึงดูดกันระหว่างด้านล่างของแถบโลหะ และบนกราวด์เพลนแรงดึงดูดนี้จะส่งผลให้ประจุเข้ามารวมกันตรงส่วนด้านล่างของแถบโลหะ

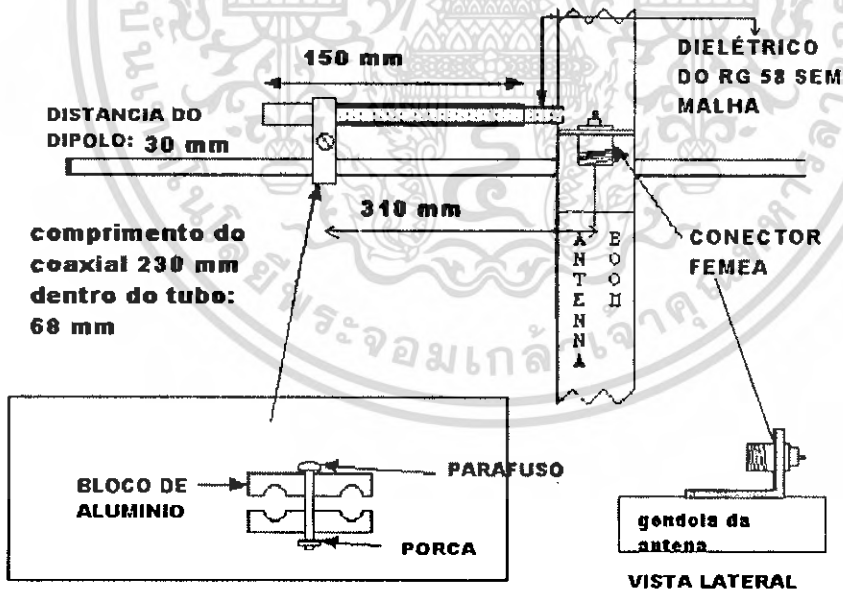
2. เกิดการผลักกันระหว่างประจุชนิดเดียวกันที่ด้านล่างของแถบโลหะ การผลักนี้ส่งผลให้ประจุที่อยู่ตรงขอบด้านข้างแถบโลหะขึ้นไปอยู่บนพื้นผิวด้านบนของแถบโลหะ เมื่ออุปกรณ์บางมาก ประจุทั้งหมดบนแถบโลหะจะอยู่ที่แถบด้านล่างของแถบโลหะเหมือนกระแสน้ำมากจะไหลที่ด้านล่างของแผ่นโลหะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนน้อยที่จะไหลรอบขอบด้านข้างขึ้นสู่ผิวด้านบนผลที่ตามมา คือ ส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กจะสัมพันธ์กับขอบของแถบโลหะน้อยเกือบจะเป็นศูนย์

ในระนาบระหว่างขอบของแถบโลหะ และกราวด์เพลน โดยปราศจากผลกระทบจากสนามภายใน แถบโลหะ สามารถแทนสายอากาศ โดยแสดงดังในรูป 2.17 (ก) ด้วยเหตุผลนี้จากการกระจายของสนามแม่เหล็ก รูปร่างของการกระจายของสนามไฟฟ้าหาได้เหมือนกัน ความแตกต่างระหว่างขนาดรูปร่างของสนามภายในแถบโลหะ ไม่สามารถหาได้โดยใช้การวิเคราะห์ที่ท่อนำคลื่น (Cavity) เพียงอย่างเดียว สำหรับตัวอย่างที่ง่ายที่สุดที่เป็นฉนวนและส่วนของแถบโลหะภายในที่ท่อนำคลื่น สมมติให้มีการสูญเสียเพียงเล็กน้อย

การวิเคราะห์ที่ท่อนำคลื่น คือ จะให้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เป็นรีแอคทีฟบริสุทธิ์ (Purely Reactive) อินพุตอิมพีแดนซ์ของการตอบสนองของสายอากาศยากิ ด้วยเหตุนี้ จึงไม่เป็นรีแอคทีฟที่บริสุทธิ์จะมีส่วนของค่าความต้านทาน สำหรับการแพร่กระจายกำลังด้วยสายอากาศที่บริสุทธิ์จะมีส่วนของค่าความต้านทาน สำหรับการแพร่กระจายกำลังด้วยสายอากาศที่มีอิมพีแดนซ์เหมือนกับชิ้นส่วนจริงของท่อนำคลื่นในอุดมคติที่รู้เท่านั้น ฟังก์ชันสำหรับการตอบสนองของสายอากาศมีโพลเชิงซ้อน (Complex Poles) ส่วนจินตภาพของโพล (Poles) ในการแพร่กระจายของคลื่นนั้น และโพลของสายอากาศของคลื่นจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของการกระจายสนามใหม่ และผลที่เกิดขึ้นเหมือนกับอุปกรณ์ที่มีขนาดบาง ๆ



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลย์ท่อนำคลื่นของสายอากาศยากิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำท่อจะเปรียบเสมือนสายอากาศ คือ สมมติแบบจำลอง หรือวงจรสมมูลย์ อื่นจะสามารถเพิ่ม การสูญเสียด้วยท่อฉนวนที่เป็นโพรง โดยการปรับ การสัมผัสการสูญเสีย (Loss Tangent) ของท่อฉนวน (Cavity Dielectric) ส่วนจินตภาพของโพลของท่อที่เติมไปด้วยการสูญเสียที่เป็นฉนวนที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ถ้าจะหาว่าการสูญเสียมากเท่าไร ต้องเพิ่มท่อที่เป็นโพรงดังนั้น ส่วนจินตภาพของโพลจะใกล้เคียงความถี่สมดุล (Match) ที่ต้องการ ของการตอบสนองของสายอากาศ

ถ้าภายในท่อที่เป็นฉนวน ซึ่งฉนวนนี้จะมี ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของฉนวน (Dielectric Loss Tangent) δ_{eff} ที่ความถี่เรโซแนนซ์ จะมีตัวประกอบ Q เกี่ยวข้องอยู่ด้วย

$$Q = \frac{2pf \text{ พลังงานเฉลี่ยสะสม (Average total stored energy)}}{\text{กำลังงานสูญเสียเฉลี่ย (Average power dissipated)}} \quad (2.50)$$

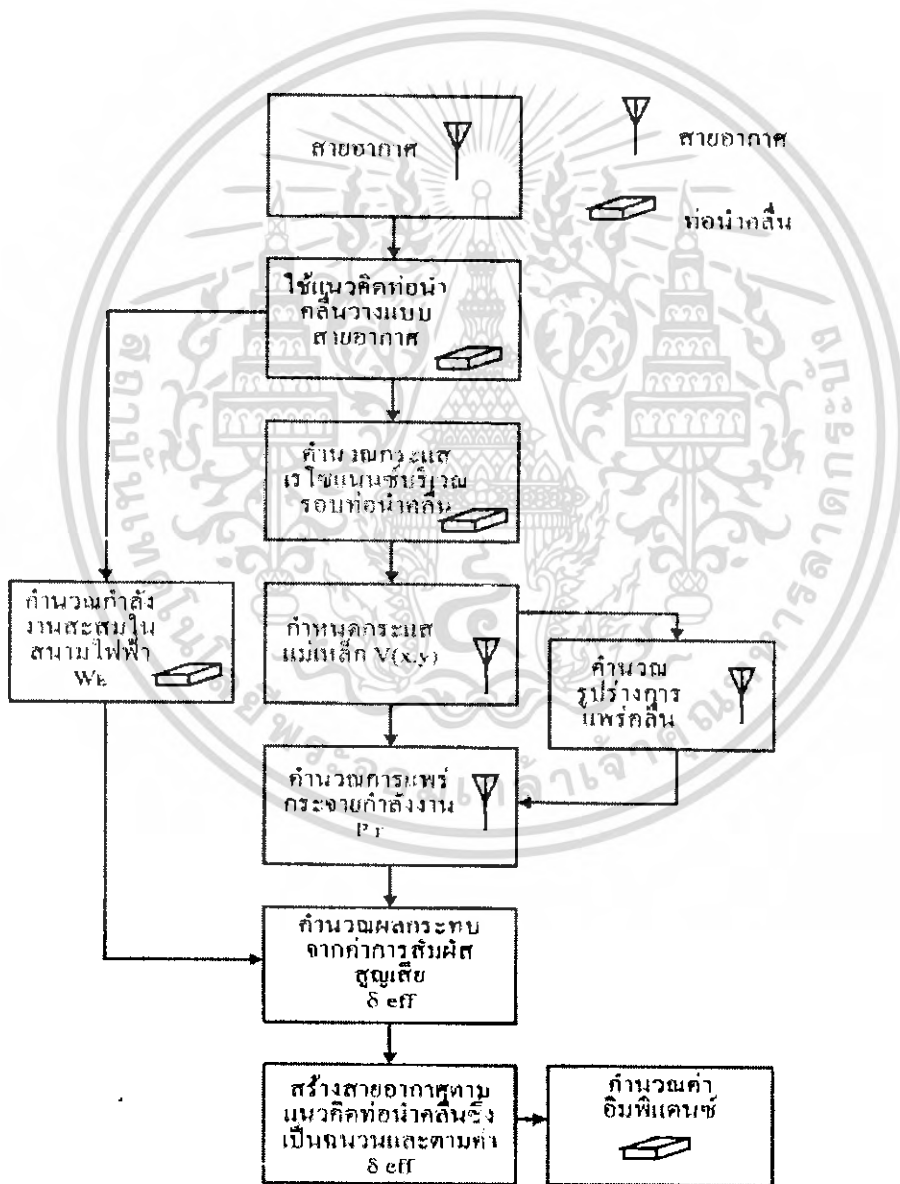
$$Q = \frac{1}{2} \frac{\omega_{re}}{\omega_{im}} = \frac{1}{\delta_{eff}}$$

โดย ω_{re} และ ω_{im} คือ ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของโพลตามลำดับ ในการเลือกสัมประสิทธิ์การสูญเสียของท่อที่เป็นฉนวน δ_{eff} การที่จะทำท่อ (Cavity) ให้คล้ายสายอากาศจะต้องทำให้ตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) ให้มีค่าใกล้เคียงกับตัวสายอากาศ

โดยทั่วไปแถบโลหะตอบสนองท่อที่มีการแยกทางเรขาคณิตเพิ่มเติมในการวิเคราะห์อย่างง่าย ในการวิเคราะห์ จะมีรูปร่างแผนผังการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งเป็นรายละเอียดในการวิเคราะห์เป็นขั้นตอนในการวิเคราะห์จะใช้โปรแกรมฟอร์แทรน (Fortran) และโปรแกรมเบสิก รูปแบบของสายอากาศจะประกอบไปด้วย สายอากาศแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular) จานทรงกลม (Circular – Disk) ส่วนทรงกลม (Circular – Sector) รูปวงแหวน (Annular) และส่วนของวงแหวน (Annular – Sector)

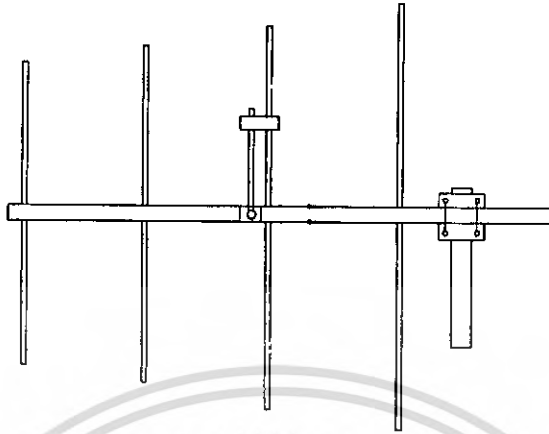
สำหรับตัวอย่างรูปแบบโครงสร้างสายอากาศแบบต่าง ๆ ที่นิยมใช้กัน แสดงให้เห็นดังในรูปที่ 2.19 ซึ่งโดยจะประกอบไปด้วยรูปแบบสี่เหลี่ยม, รูปวงกลม, รูปเพชร, รูปสามเหลี่ยมและรูปสี่เหลี่ยมหลายรูปต่อมามีร่วมกัน

ยาสูบจะมีโครงสร้างง่าย ๆ ดังกล่าวข้างต้น แต่การวิเคราะห์คุณสมบัติของยาสูบโดยละเอียดทางทฤษฎีนั้นเป็นสิ่งที่ยุ่งยากมาก ทั้งนี้ คือ เป็นเพราะระบบแกนประสานที่ใช้ และเงื่อนไขขอบเขตของระบบค่อนข้างยุ่งยากเมื่อเทียบกับท่อนำคลื่น หรือสายนำสัญญาณชนิดอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม ได้มีการศึกษาทางทฤษฎี และพบว่าคลื่นที่ส่งผ่านไปตามยาสูบจะใกล้เคียงกับลักษณะ TEM มาก แต่จะไม่ใช่ TEM เสียทีเดียว เพราะมีสนามในแนวแกนอยู่ด้วย เรียกลักษณะดังกล่าวว่า ลักษณะกึ่ง TEM (Quasi-TEM) รูปที่ 2.20 แสดงเส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของยาสูบที่มีการที่มีสนามในแนวแกนอยู่เป็นเพราะโครงสร้างที่มีฉนวนและอากาศอยู่ในระบบเดียวกัน และในสภาพที่มีสนามในแนวแกนเกิดอยู่ที่ลักษณะที่ส่งผ่านไปอยู่นั้นจะเป็นลักษณะแบบผสม



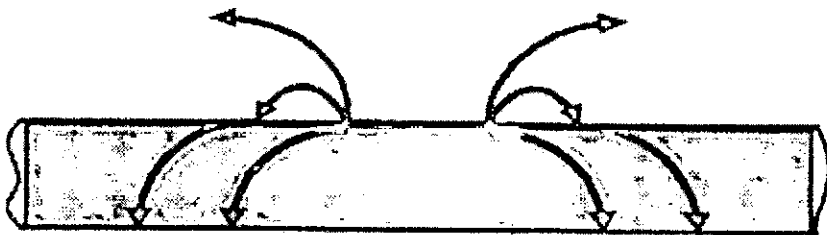
รูปที่ 2.18 ขั้นตอนในการออกแบบสายอากาศโดยใช้วงจรสมมูลย์ท่อนำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 รูปแบบโครงสร้างสายอากาศยาก็

ในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของไมโครสตริปของไมโครสตริปได้ กล่าวคือ ถ้าสามารถหาค่าอินดักแตนซ์ และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวได้ จะนำค่าทั้งสองไปคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติได้ อย่างไรก็ตาม การหาค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของยาก็จะยุ่งยากกว่าของสายคู่ขนาดหรือสายโคแอกเซียล เพราะว่าไมโครสตริปมีทั้งสายที่เป็นฉนวน และอากาศอยู่ในบริเวณที่พลังงานของคลื่นส่งผ่าน สำหรับการหาค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวนั้นจะไม่ถูกรบกวนจากการที่มีสารที่เป็นฉนวน การหาค่าคาปาซิแตนซ์จะยุ่งยากกว่าปกติ แต่มีวิธีที่ทำได้ง่ายขึ้น โดยใช้วิธีหาค่าคงตัวของฉนวนสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant : ϵ_{eff}) ของระบบซึ่งจะรวมผลของสารที่เป็นฉนวนและอากาศเข้าด้วยกัน และเนื่องจากสารที่เป็นฉนวนทั้งหลายมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ หรือมีการแพร่กระจายเชิงวัสดุ ดังนั้น ϵ_{eff} ที่ทำได้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาทางทฤษฎีและการทดลองพบว่า ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 2 กิกะเฮิรตซ์ ลงมา ค่า ϵ_{eff} จะเปลี่ยนแปลงไปจากกรณีของไฟฟ้าสถิตได้ สำหรับช่วงความถี่ที่สูงกว่า 2 กิกะเฮิรตซ์ ต้องคำนึงถึงค่าการแพร่กระจายโดยการปรับแต่งค่า ϵ_{eff} ให้เหมาะสมกับความถี่ใช้งาน



รูปที่ 2.20 เส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของสายอากาศยาก็

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหาค่า z_{eff} ของกรณีไฟฟ้าสถิตินั้นจะใช้แนวคิดของวงจรกระจาย เมื่อคลื่นส่งผ่านไป
ลักษณะแบบ TEM อิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติ Z_c จะเขียนในรูปของค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว
 L และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว C ได้ในสมการที่ 2.49

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.49)$$

ในขณะเดียวกัน ความเร็วเฟส v_p จะเขียนได้ดังนี้

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.50)$$

จากสมการที่ 2.50 นี้ทำให้เขียน Z_c ในรูปของ v_p กับ L หรือ C ได้ ดังนี้

$$Z_c = v_p L = \frac{1}{v_p C} \quad (2.51)$$

ในขั้นต่อไปจะพิจารณากรณีแผ่นรองรับที่เป็นฉนวนถูกดึงออกไป เหลือแต่อากาศเพียงอย่างเดียวที่
ครอบคลุมอยู่ ค่าความเร็วเฟสของคลื่น TEM ที่ส่งผ่านอยู่จะเท่ากับความเร็วแสง และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อ
หนึ่งหน่วยความยาวจะเปลี่ยนไป ค่าอินดักแตนซ์จะไม่ถูกกระทบ ซึ่งได้ความสัมพันธ์ระหว่าง C_0 กับ
ความเร็วเฟสในสมการที่ 2.52 คือ

$$c = \frac{1}{\sqrt{LC_0}} \quad (2.52)$$

ในขณะเดียวกันค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติก็จะเขียนได้ ดังนี้

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C_0}} \quad (2.53)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.52 ทหารด้วยสมการที่ 2.50 จะได้ผลดังนี้

$$\frac{C}{C_0} = \left(\frac{c}{v_p} \right)^2 \quad (2.54)$$

ค่า c/c_0 นี้ตามนิยามโดยทั่วไป คือ ค่าคงตัวฉนวนสัมพัทธ์ที่ครอบคลุมระบบเก็บประจุอยู่ในกรณีที่พิจารณาอยู่ ค่านี้เปรียบเสมือนค่าคงตัวฉนวนสัมพัทธ์ประสิทธิผลของไมโครสตริป ที่มีแผ่นรองรับเป็นฉนวน และด้านบนเป็นอากาศอยู่ จะได้ตามสมการที่ 2.55

$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{c}{v_p} \right)^2 \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.55)$$

จากสมการที่ 2.51 ถึงสมการที่ 2.55 จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง Z_c , Z_0 และ ϵ_{eff} ได้ดังนี้

$$Z_c = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad \text{หรือ} \quad Z_0 = Z_c \sqrt{\epsilon_{eff}} \quad \text{หรือ} \quad \epsilon_{eff} = \left(\frac{Z_0}{Z_c} \right)^2 \quad (2.56)$$

จากผลที่ได้นี้จะเห็นได้ว่า ถ้าสามารถหาค่า ϵ_{eff} ได้ทำให้สามารถคำนวณคุณสมบัติอื่นตามมาได้อย่างไรก็ตามค่า ϵ_{eff} จะเปลี่ยนแปลงตามความกว้างของไมโครสตริป เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของแผ่นรองรับ ซึ่งสามารถเห็นได้โดยพิจารณากรณีสุด ๆ 2 กรณี ดังต่อไปนี้กรณีแรกคือกรณีที่ $w/h \gg 1$ แสดงไว้ในรูปที่ 2.21 (ก) ในกรณีนี้เนื่องจากเส้นแรงไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอยู่ในบริเวณที่มีแถบสตริป หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านอยู่ในบริเวณดังกล่าวเกือบทั้งหมด สภาวะดังกล่าวจะส่งผลให้ค่าคงตัวฉนวนสัมพัทธ์ประสิทธิผลมีค่าเข้าใกล้ค่า ϵ_r ของแผ่นรองรับหรือ $\epsilon_{eff} \rightarrow \epsilon_r$ สำหรับกรณีสุด ๆ กรณีที่สองคือ กรณีที่ $w/h \ll 1$ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.21 (ข)

ในกรณีนี้ เส้นแรงจะผ่านแผ่นรองรับครึ่งหนึ่ง และผ่านอากาศครึ่งหนึ่ง ซึ่งทำให้ค่าคงตัวฉนวนสัมพัทธ์ประสิทธิผลมีค่าเข้าใกล้ $(\epsilon_r + 1/2)$ จากที่อธิบายมาจะเห็นว่าค่า ϵ_{eff} จะเปลี่ยนแปลงตามค่า w/h และจะมีขอบบน และขอบล่างตามค่าที่ได้จากกรณีสุด ๆ ดังสมการที่ 2.56

$$\frac{1}{2} (\epsilon_r + 1) \leq \epsilon_{eff} \leq \epsilon_r \quad (2.57)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อความสะดวกในการคำนวณ และการออกแบบได้มีการเขียนค่า ϵ_{eff} ในรูปสมการต่อไปนี้

$$\epsilon_{eff} = 1 + q(\epsilon_r - 1); \frac{1}{2} \leq q \leq 1 \quad (2.58)$$

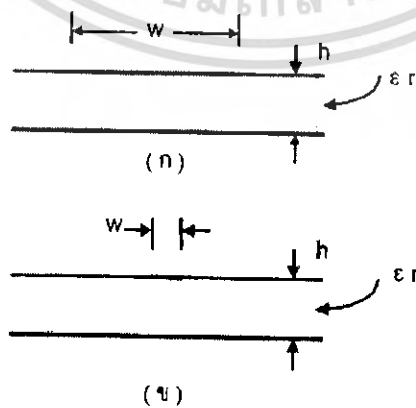
ค่า q ในสมการที่ 2.58 เรียกว่าตัวกรองย่อยด(Filting Factor) หมายถึงตัวประกอบที่แสดงให้รู้ว่าแผ่นรองรับที่เป็นสารที่เป็นฉนวน จะมีผลต่อโครงสร้างสายอากาศมากน้อยแค่ไหน เมื่อเขียนค่า ϵ_{eff} ตามสมการที่ 2.8 นี้ ค่า q จะเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงตามค่า w/h

ในกรณีที่มีความถี่ใช้งานสูงขึ้นไปกว่า 2 กิกะเฮิรตซ์ นั้น การแพร่กระจายเชิงวัสดุของแผ่นรองรับมีผลมาก การคำนึงถึงผลกระทบของการแพร่กระจายในส่วนนี้จะทำโดยพิจารณาว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งทำให้ค่า ϵ_{eff} ตามสมการที่ 2.58 เขียนได้ดังนี้

$$\epsilon_{eff}(f) = \left(\frac{c}{v_p(f)} \right)^2 \quad (2.59)$$

จากรูปที่ 2.21 ยากีที่มีค่า $w/h \gg 1$ และ $w/h \ll 1$

เมื่อพิจารณาค่า $\epsilon_{eff}(f)$ ตามสมการที่ 2.59 จะพบว่าในช่วงความถี่ต่ำที่ความถี่เข้าใกล้ศูนย์นั้น ค่า ϵ_{eff} ของกรณีไฟฟ้าสถิต และเมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นเข้าหา ∞ ค่า $\epsilon_{eff}(f)$ ก็จะลู่เข้าหาค่า ϵ_r ของแผ่นรองรับ เพราะความเร็วเฟสจะลู่เข้าหาความเร็วของแสงในสารฉนวนที่เป็นแผ่นรองรับ ดังนั้น โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงค่า $\epsilon_{eff}(f)$ ตามความถี่จะเป็นดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.22 ซึ่งค่า $\epsilon_{eff}(f)$ จะสูงขึ้นตามความถี่



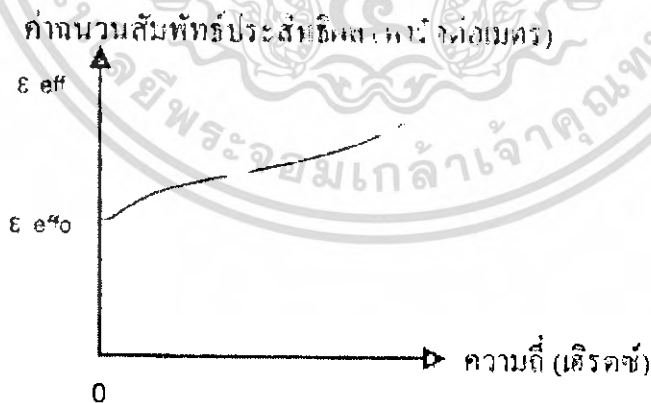
เอกสารนี้เป็นรูปที่ 2.21 ที่ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของค่าฉนวนสัมพัทธ์ประสิทธิผลใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสายอากาศทำด้วยโลหะที่ไม่สมบูรณ์แบบ และมีสารที่เป็นฉนวนกันในบริเวณที่คลื่นส่งผ่าน ดังนั้น การลดทอนสัญญาณจึงเกิดจากทั้งสองสาเหตุนี้ สามารถเขียนค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณได้ตามสมการที่ 2.60

$$\alpha = \frac{R}{2Z_c} + \frac{GZ_c}{2} = \alpha_m + \alpha_d \quad (2.60)$$

โดยที่ α_m และ α_d เป็นค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณที่เกิดจากโลหะ และสารที่เป็นฉนวนตามลำดับ การหาค่า α_m โดยการวิเคราะห์ให้ละเอียดตามทฤษฎีจะทำได้ลำบากเพราะการกระจายของสนามแม่เหล็กบนผิวโลหะมีความซับซ้อนมาก และจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่า w/h และความหนาของแถบสตริป (i) ด้วย ในทางปฏิบัตินั้นจะวิธีคิดที่ง่ายขึ้น โดยสมมติให้คลื่น TEM ส่งผ่านอยู่ภายในบริเวณข้างใต้แถบสตริปเท่านั้น ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.23 เสร็จแล้วคำนวณการสูญเสียในเนื้อโลหะในสภาพดังกล่าว แล้วจึงนำผลที่ได้นั้นไปคูณกับค่าคงที่ค่าหนึ่งเพื่อทำการชดเชยให้มีความถูกต้องมากขึ้น เพื่อให้ค่าคงที่ดังกล่าวเป็น K จะได้ α_m ดังในสมการที่ 2.61

$$\alpha_m = \frac{KR}{2Z_c} = \frac{KR}{wZ_c} = \frac{\sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}}}{\sqrt{wZ_c}} \sqrt{\frac{K}{wZ_c}} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2 \times 5.8 \times 10^7 \sigma}} \cdot \frac{K}{wZ_c} \text{ Nep/ เมตร} \quad (2.61)$$



รูปที่ 2.22 การส่งผ่านของคลื่น TEM แบบอุดมคติในสายอากาศสายกึ่ง

โดยที่ σ_0 คือ ค่าคงตัวของ การนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative Conductivity) ที่เทียบกับทองแดง ซึ่งมี $\sigma = 2.5 \times 10^7$ ซีเมนต์/เมตร ค่า K จะขึ้นอยู่กับค่า w/h และความถี่โดยที่ในกรณีนี้ค่า w/h มีค่าใหญ่มาก ๆ หมายถึง คลื่น TEM จะเข้าใกล้แบบอุดมคติที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.23 ค่า K จะลู่เข้าหา 1 ในกรณีกลับกัน ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ $w/h \ll 1$ ค่า K จะเข้าใกล้ 0.5 ในทางปฏิบัตินั้นพบว่ากรณีนี้ออกแบบให้มีอิมพีแดนซ์คุณสมบัติเป็น 50 โอห์มโดยที่ $\epsilon_r = 10$ จะได้ค่า $K \sim 0.63$

สำหรับการหาค่า α_d อาศัยหลักการคิดค่า ϵ_{eff} ขึ้นมาใหม่ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

$$\alpha_d = \frac{GZ_c}{2} = \frac{Z_c}{2} (\omega C \tan \delta_{eff}) = \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{2_c C} (\omega C \tan \delta_{eff})$$

$$\alpha_d = \pi f \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{c} \tan \delta_{eff} \quad (2.62)$$

โดยที่ค่า $\tan \delta_{eff}$ นั้นเปรียบเหมือนค่า $\tan \delta$ ประสิทธิภาพ ซึ่งสัมพันธ์กับ $\tan \delta$ ในรูปสมการต่อไปนี้

$$\frac{\tan \delta_{eff}}{\tan \delta} = \frac{1 - (1/\epsilon_{eff})}{1 - \epsilon_r} \quad (2.63)$$

ความสัมพันธ์ตามสมการ 2.63 เป็นสิ่งที่เหมาะสม เพราะเมื่อแทนค่า ϵ_{eff} ด้วย 1 หมายถึงตัวกลางเป็นอากาศ ค่า $\tan \delta_{eff}$ จะเท่ากับ 0 และเมื่อแทนค่า $\epsilon_{eff} = \epsilon_r$ หมายถึงตัวกลางเป็นฉนวนทั้งหมด ค่า $\tan \delta_{eff}$ จะเท่ากับ ค่า $\tan \delta$

เมื่อนำค่า α_m และ α_n ในสมการที่ 2.61 และสมการ 2.62 แทนกลับเข้าไปในสมการ 2.59 จะได้ค่า α ผลรวมออกมา และเนื่องจากนิยามเขียนค่า α มีหน่วยเป็น dB/เมตร ดังนั้น α จะเขียนได้ในรูปต่อไปนี้

$$a = \frac{72K}{wZ_c} \sqrt{\frac{f}{\sigma_r}} + 91f \sqrt{\epsilon_{eff}} \frac{1 - (1 - 1/\epsilon_{eff})}{1 - (1/\epsilon_r)} \tan \delta \quad \text{dB/เมตร} \quad (2.64)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลที่ได้จะเห็นว่า α_m แปรตาม \sqrt{f} ในขณะที่ α_d แปรตามความถี่ทำให้เหมือนว่า α_d มีค่าสูงกว่า α_m อย่างไรก็ตาม ในระยะต่อมามีการพัฒนาแผ่นรองรับที่มีคุณสมบัติดีขึ้น คือ มีค่า $\tan \delta$ ต่ำมาก ทำให้ช่วงความถี่ที่ความถี่น้อยกว่า 10 กิกะเฮิร์ตซ์ ค่า α_m จะใหญ่กว่าค่า α_d จะใหญ่กว่าค่า α_d และเป็นค่าสูญเสียหลักของสายอากาศ

2.3 ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)

คำจำกัดความของคำว่าความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางที่กำหนดให้ คือ กำลังแผ่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติ ของสายอากาศเกี่ยวกับ สนามระยะไกลความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น และผลจากการกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมได้ดังนี้คือ

$$U = r^2 W_{rad}$$

เมื่อ U = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W /หน่วยมุมตัน)

W_{rad} = ความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น (W/m^2)

ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้คือ

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2\eta} \left[|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right]$$

เมื่อ E_θ, E_ϕ = ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

η = อินทริเนสิคิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้นแบบรูปของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึง ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นได้เช่นกัน กำลังงานทั้งหมดนี้ หากได้โดยอินทิเกรตความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นตาม (2.2) และ (2.3) ตลอดมุมตัน 4π ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางคือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในทิศทางต่างๆ เทียบกับสายอากาศไอโซทรอปิก ซึ่งวัดในหน่วยของ dBi เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$P_0(dBi) = 10 \log \left(\frac{4\pi U_{\max}}{P_{\text{rad}}} \right) \approx 10 \log \left(\frac{4\pi(180/\pi)^2}{\theta_E \theta_H} \right) = 10 \log \left(\frac{41253}{\theta_E \theta_H} \right) \quad (2.65)$$

เมื่อ U_{\max} = ค่าสูงสุดของความเข้มการแผ่กระจายคลื่น

P_{rad} = กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด

$$P_{\text{rad}} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.66)$$

2.5 อัตราขยาย (Gain)

คือความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าสภาพเจาะจงทิศทางโดยคูณประสิทธิภาพของ สายอากาศเข้ามาด้วย ประสิทธิภาพของสายอากาศจะประกอบไปด้วยประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนกลับ ประสิทธิภาพของตัวนำ และประสิทธิภาพของฉนวน

$$G(dB) + gr(dB) = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log \left(\frac{Pr}{Pt} \right) \quad (2.67)$$

$$Gt(dB) = 10 \log \left[\left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right]; \eta \cong 0.6 \quad (2.68)$$

ช่วงกว้างความถี่ที่ใช้งาน (Bandwidth : Δf)

$$\Delta f(\text{Hz}) = f_H(H_z) - f_L(H_z) \quad (2.69)$$

$$\Delta f(\%) = \frac{f_H - f_L}{f_c} \times 100 \quad (2.70)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

2.6.1 อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)

อินพุตอิมพีแดนซ์ คือ อิมพีแดนซ์ที่มีนิยามเหมือนในวงจรไฟฟ้าที่ทั่วๆ ไป คือ อัตราส่วนของโวลเตจและกระแสที่จุดป้อนของสายอากาศดังนี้ คือ

$$Z_m = R + jX \quad (2.71)$$

โดยปกติแล้ว Z_m นี้จะมีทั้งส่วนที่เป็นความต้านทานและส่วนที่เป็นรีเอกแตนซ์ (Reactance) นั่นคือ เมื่อนำสายสัญญาณ ซึ่งมีอิมพีแดนซ์เป็นความต้านทานอย่างเดียวกับสายอากาศส่วนใหญ่ จะเกิดการไม่แมตซ์ขึ้น คือ พลังงานของคลื่นส่งบางส่วนจะถูกสะท้อนกลับทางเครื่องส่ง ในทางปฏิบัติส่วนมากจึงต้องใช้วงจรแมตซ์ซิง (Matching Circuit) มาต่อไว้ระหว่างสายส่งกับสายอากาศเพื่อเป็นการลดพลังงานส่วนนี้ให้น้อยลง

2.6.2 อิมพีแดนซ์ของการกระจายคลื่น

อิมพีแดนซ์ของการกระจายคลื่น เป็นอิมพีแดนซ์ที่มีค่านิยามเหมือนกับการนิยามอิมพีแดนซ์จากกำลังไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าธรรมดา กล่าวคือ ถ้ามีกระแส $I [A]$ ไหล ผ่านความต้านทาน $R [\Omega]$ จะมีการใช้กำลังไฟฟ้าที่ R เท่ากับ $R [I]^2 [W]$ ในกรณีของสายอากาศเราให้นิยามของความต้านทานของการกระจายคลื่น ในทำนองเดียวกันว่า ถ้ากระแสที่จุดป้อนเป็น I และกำลังคลื่นที่กระจายออกไปจากสายอากาศ (Radiation Power) เป็น $W_r [W]$ เราให้ความต้านทานของการกระจายคลื่นเป็นดังนี้

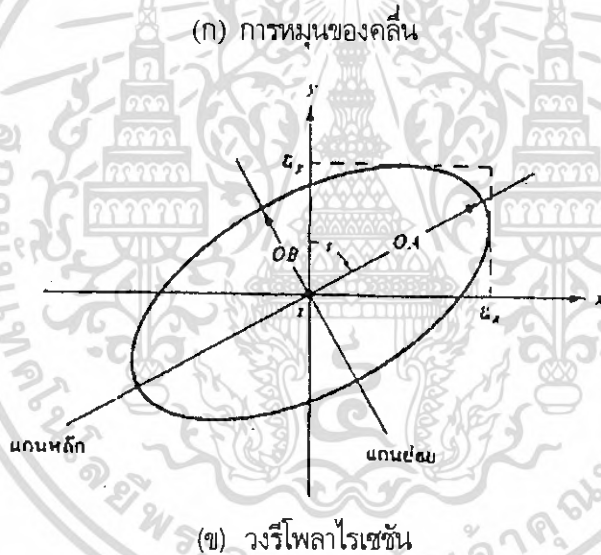
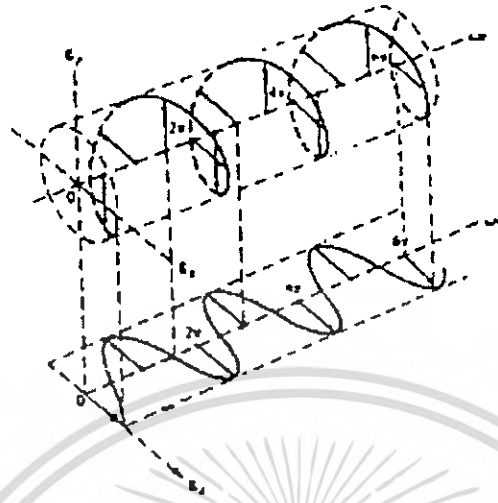
$$R_r = \frac{W_r}{|I|^2} \quad (2.72)$$

กำลังคลื่นที่กระจายออกไปจากสายอากาศนั้น เมื่อคิดเปรียบเทียบกับในกรณีของวงจรไฟฟ้าธรรมดา ก็เหมือนกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในความต้านทาน ในความเป็นจริงแล้วกำลังคลื่นที่ออกจากผิวของสายอากาศไม่ได้มีแต่กำลังคลื่นที่กระจายออกไปอย่างเดียว ยังมีกำลังคลื่นส่วนที่ไม่ได้กระจายออกไปอยู่ด้วย ซึ่งกำลังคลื่นส่วนนี้จะเป็นพลังงานที่สะสมอยู่ใกล้ ๆ ตัวสายอากาศในลักษณะเดียวกับพลังงาน ส่วนที่สะสมอยู่ใน L และ C ในวงจรไฟฟ้าธรรมดา นั่นคือกำลังคลื่นที่ออกจากผิวของสายอากาศจะเป็นกำลังคลื่นเชิงซ้อนเสถียร (Complex Power) ซึ่งจากอันนี้เราจะได้นิยามของอิมพีแดนซ์ของการกระจายคลื่นเป็นดังสมการที่ 2.13 โดยที่ W_s เป็นกำลังคลื่นที่เก็บสะสมอยู่ในตัวกลางรอบ ๆ สายอากาศ

$$Z_r = R_r + jX_r = \frac{W_r + jW_s}{|I|^2} \quad (2.73)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 โพลาริเซชัน



รูปที่ 2.23 การหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระนาบ และวงรีโพลาริเซชัน
ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในระนาบ $Z = 0$

ก่อนที่จะกล่าวถึงความหมาของโพลาริเซชัน (Polarization) ของสายอากาศ จะกล่าวถึงความหมายของ โพลาริเซชันของคลื่นเสียก่อน

โพลาริเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายนั้น เป็นรูปแสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดการแพร่กระจายออกไป ที่อธิบายทิศทางและขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลา รูปแสดงโพลาริเซชันจะแสดงการกวาดของยอดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ ณ ตำแหน่งที่ทำการสังเกตซึ่งคงที่ และการสังเกตที่จะทำให้โดยมองตามหลังคลื่นที่เดินทางไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับโพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางหนึ่งทางใด จะเป็นโพลาริเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศนั้น (เมื่อเป็นสายอากาศส่ง) หรือเป็นโพลาริเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้น จากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังงานที่ขั้วของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาให้จะหมายถึงทิศทางที่สายอากาศมีแกนมากที่สุด ดังนั้น โพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกัน จะแตกต่างกัน

การแบ่งชนิดของโพลาริเซชัน อาจแบ่งเป็นแบบลิเนียร์โพลาริเซชัน (Linearly Polarization) โพลาริเซชันแบบวงกลม (Circularly Polarization) และโพลาริเซชันแบบวงรี (Elliptically Polarization) ขึ้นอยู่กับลักษณะของการหมุนของยอดของเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า ถ้าเวกเตอร์ที่แสดงสนามไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา ณ จุดใด ๆ ในสเปซชี้เป็นเส้นตรงเสมอ จะเรียกว่าเป็นโพลาริเซชันแบบเส้นตรง หรือลิเนียร์โพลาริเซชัน แต่ถ้าสนามไฟฟ้ามีการหมุนรูปวงรี จะเรียกว่าสนามแบบนั้นว่าเป็นโพลาริเซชันแบบวงรี ทั้งลิเนียร์ลิโพลาริเซชัน และโพลาริเซชันแบบวงกลมต่างก็เป็นกรณีพิเศษของโพลาริเซชันแบบวงรี

ถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (คือเมื่อมองตามหลังคลื่นแล้วจะเห็นมีการหมุนตามเข็มนาฬิกา) จะเรียกว่าเป็นโพลาริเซชันมือขวา ในขณะที่หากสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจะเป็นโพลาริเซชันมือซ้าย

2.7.1 ลิเนียร์โพลาริเซชัน, โพลาริเซชันแบบวงกลม และโพลาริเซชันแบบวงรี

จะเขียนสนามชั่วขณะเวลานั้นของคลื่นระนาบ ที่เดินทางในทิศทาง $-z$ ได้ว่า

$$E'(z;t) = \hat{a}_x E'_x(z;t) + \hat{a}_y E'_y(z;t)$$

จาก
$$E'(x, y, z; t) = \text{Re}[E(x, y, z) e^{j\omega t}] \quad (2.74)$$

ส่วนประกอบของสนามชั่วขณะเวลานั้น สัมพันธ์กับค่าเชิงซ้อนของสนามนั้นดังนี้

$$E'_x(z;t) = \text{Re}[E_x^- e^{j(\omega t + kz)}] = \text{Re}[E_x e^{j(\omega t + \phi_x)}]$$

$$= E_x \cos(\omega t + kz + \phi_x) \quad (2.75)$$

$$E'_y(z;t) = \text{Re}[E_y^- e^{j(\omega t + kz)}] = \text{Re}[E_y e^{j(\omega t + Kz + \phi_y)}]$$

$$= E_y \cos(\omega t + kz + \phi_y) \quad (2.76)$$

เมื่อ E_x และ E_y เป็นขนาดของสนามค่าสูงสุด ในทิศทาง x และ y ตามลำดับ

ก. ลิเนียร์โพลาไรเซชัน

คลื่นซึ่งเป็นลิเนียร์โพลาไรเซชัน ความต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบทั้งสองของสนาม
จะมีค่าดังนี้

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi \quad ; \quad n=0,1,2,3,\dots \quad (2.77)$$

ข. โพลาไรเซชันแบบวงกลม

จะเกิดโพลาไรเซชันแบบวงกลมได้ก็ต่อเมื่อขนาดของส่วนประกอบของสนามทั้งสองมีค่า
เท่ากัน และความต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบทั้งสองเป็นจำนวนคี่เท่าของ $\pi/2$ นั่นคือ

$$|E'_x| = |E'_y| \Rightarrow E_x = E_y \quad (2.78)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \quad (2.79)$$

$$= +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, n=0,1,2,\dots \text{ for CW} \quad (2.80)$$

ถ้าคลื่นเดินทางในทิศทางตรงกันข้าม (คือทิศทาง $+z$) เฟสใน (2.19) และ (2.20) ที่ทำให้เกิด CW
(Clockwise) และ CCW (Counter Clockwise) จะต้องสลับกัน

ค. โพลาไรเซชันแบบวงรี

โพลาไรเซชันแบบวงรีจะเกิดขึ้นเมื่อ ความต่างเฟสเป็นจำนวนคี่ของ $\pi/2$ แต่ขนาด
ของสนามไฟฟ้าไม่เท่ากัน หรือความต่างเฟสไม่เป็นจำนวนคี่ของ $\pi/2$ นั่นคือ

$$|E'_x| \neq |E'_y| \Rightarrow E_x \neq E_y$$

$$\text{เมื่อ} \quad \Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, n=0,1,2,\dots \text{ for CW} \quad (2.81)$$

กับ

$$\text{หรือ} \quad \Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm\frac{n}{2}\pi \quad (2.82)$$

(2.83)

$$\text{กับ} \quad \Rightarrow 0, n=0,1,2,3,\dots \quad \text{for CCW}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของโพลาริเซชันแบบวงรี รูปแสดงการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งใด ๆ จะเป็นวงรีเอียง ดังแสดงในรูป 2.5 (ข) . อัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนย่อย จะเรียกว่าเป็นอัตราส่วนของแกน (Axial Ratio : AR) ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

$$AR = \frac{\text{major axis}}{\text{minor axis}} = \frac{OA}{OB}, \quad 1 \leq AR \leq \infty \quad (2.85)$$

$$OA = \left[\frac{1}{2} \left\{ E_x^2 + E_y^2 + [E_x^4 + E_y^4 + 2E_x^2 E_y^2 \cos(2\Delta\phi)]^{1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad (2.86)$$

$$OB = \left[\frac{1}{2} \left\{ E_x^2 + E_y^2 + [E_x^4 + E_y^4 + 2E_x^2 E_y^2 \cos(2\Delta\phi)]^{1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad (2.87)$$

การเอียงของวงรีเทียบกับแกน y สามารถแสดงด้วยมุมเอียง ดังนี้ คือ

$$\tau = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2E_x E_y}{E_x^2 - E_y^2} \cos(\Delta\phi) \right] \quad (2.88)$$

เมื่อบริเวณตามแนวแกนหลัก $[\tau = n\pi/2, n = 0, 1, 2, \dots]$ แกนหลัก (ย่อย) เท่ากับ $E_x(E_y)$ หรือ $E_y(E_x)$ และอัตราส่วนของแกนมีค่าเท่ากับ E_x/E_y หรือ E_y/E_x

2.7.2 โพลาริเซชันลอสเฟคเตอร์

โดยทั่วไปแล้วโพลาริเซชันของสายอากาศอาจไม่เหมือนกับโพลาริเซชัน ของคลื่นที่เดินทางมายังสายอากาศ ซึ่งเรียกว่าเกิดโพลาริเซชันมิสแมทช์ (Polarization Mismatch) ทำให้สายอากาศไม่สามารถดึงเอากำลังงานออกมาจากคลื่นได้สูงสุด เนื่องจากเกิดการสูญเสีย จากโพลาริเซชัน (Polarization Loss) สมมติว่าสนามไฟฟ้าของคลื่นที่เดินทางเข้ามายังสายอากาศเขียนได้ดังนี้

$$\vec{E}_i = \hat{\rho}_w E_i \quad (2.89)$$

เมื่อ $\hat{\rho}_w$ เป็นหน่วยเวกเตอร์ของคลื่น และโพลาริเซชันของสนามไฟฟ้าของสายอากาศรับมีค่า ดังนี้คือ

$$\vec{E}_a = \hat{\rho}_a E_a \quad (2.90)$$

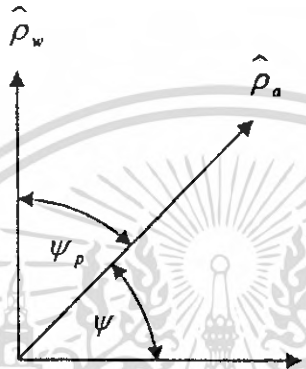
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\hat{\rho}_o$ เป็นหน่วยเวกเตอร์ของสายอากาศ

จะกำหนดให้โพลาไรเซชันลอสแฟคเตอร์ (Polarization Loss Factor : PLF) มีค่าดังนี้

$$PLF = |\hat{\rho}_w \cdot \hat{\rho}_a|^2 = |\cos \psi_p|^2 \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.91)$$

เมื่อ ψ_p เป็นมุมระหว่างหน่วยเวกเตอร์ทั้งสอง ดังแสดงในรูป 2.6



รูปที่ 2.24 หน่วยเวกเตอร์โพลาไรเซชันของคลื่นและของสายอากาศ

2.8 ท่อนำคลื่นแบบกลม (Circular Waveguide)

ท่อนำคลื่นแบบกลมเป็นท่อนำคลื่นอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กัน ท่อนำคลื่นนั้นจะเป็นรูปทรงลักษณะใดก็ได้ แต่ที่เลือกใช้เป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือกลม เพราะการคำนวณวิเคราะห์เกี่ยวกับโหมดการส่งคลื่นและรูปแบบของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กทำได้ง่ายกว่า ท่อนำคลื่นรูปทรงอื่น จึงไม่มีใครเป็นที่นิยมกัน

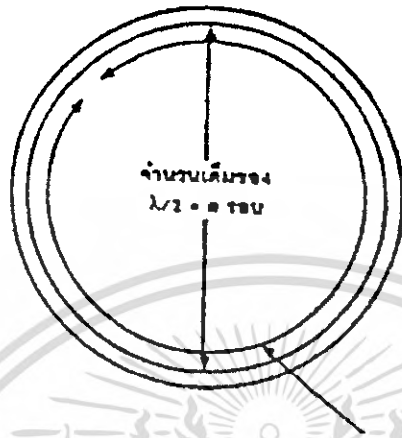
2.8.1 รูปแบบของคลื่นที่ส่งในท่อนำคลื่นแบบกลม

เนื่องจากท่อนำคลื่นเป็นรูปแบบทรงกลมนั้นขึ้น จึงทำให้มีความสลับซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในการวิเคราะห์คำนวณ แก่ปัญหาต่าง ๆ จึงต้องใช้เบสเซลฟังก์ชัน (Bessel Function) มาช่วยคำนวณแทนที่จะใช้ฟังก์ชันตรีโกณมิติธรรมดาที่ใช้กัน การคำนวณทางคณิตศาสตร์ในการหาสูตรหารูปแบบสนาม E และ H ในท่อนำคลื่นต่าง ๆ เหล่านี้เป็นเรื่องยุ่งยากอยู่ จะนำสูตรหรือผลการวิเคราะห์มาใช้งานเลย

โหมดการส่งคลื่นในท่อนำคลื่นแบบวงกลมจะเหมือนกับโหมดของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า เนื่องไขขอบเขตที่รอยต่อก็เหมือนกันสามารถนำมาใช้ได้โหมดการส่งคลื่นที่ใช้ก็มีโหมด TE_{mn} และ TM_{mn} โดยที่ m จะแสดงถึงจำนวนเต็มของความยาวคลื่นรอบท่อนำคลื่นแบบกลม (เวกเตอร์ ย่อยในแนวรัศมีของสนามไฟฟ้า) n จะแสดงถึง จำนวนเท่าของครึ่งความยาว คลื่นที่เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำคลื่นแบบกลม

m = จำนวนเต็มของความยาวคลื่นที่วนรอบด้านในของท่อนำคลื่นแบบกลม

n = จำนวนเต็มของครึ่งความยาวคลื่นบนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำคลื่นแบบกลม



รูปที่ 2.25 ความหมายของ m และ n ในท่อนำคลื่นแบบกลม

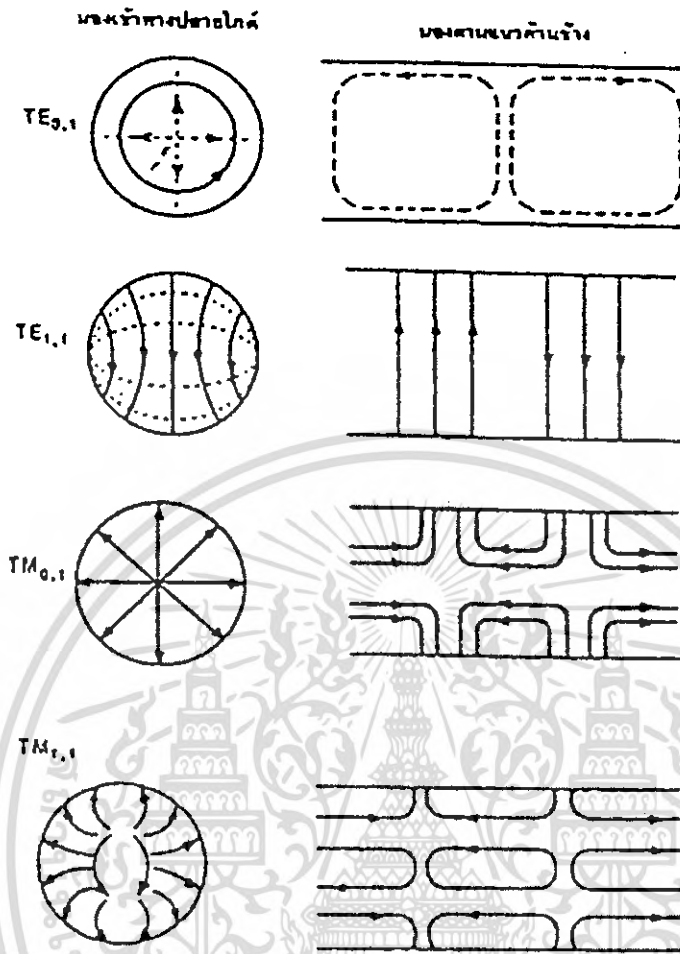
ความสัมพันธ์ของ m และ n แสดงไว้ในภาพตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบกลม ดังรูปที่ 2.7 รูปแบบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (Electric and Magnetic Pattern) ที่ใช้งานกันในโหมด TE_{mn} และ TM_{mn} ของท่อนำคลื่นแบบกลมแสดงให้เห็นในรูป การคำนวณค่าความแรงของสัญญาณที่เชื่อมต่อกันระหว่างภาครับและส่ง นั้นให้ประเมินว่าในระหว่างภาคส่งมีความแรงของสัญญาณดีเพียงใด หากค่านี้มีค่าน้อยเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบ สื่อสารก็จะทำให้การสื่อสารล้มเหลวลงได้ หากค่านี้มีค่ามากก็แสดงถึงโอกาสที่จะรับสัญญาณได้ชัดเจนมีมากขึ้น และมีโอกาสที่คลื่นจะเดินทางได้ไกลขึ้น ค่านี้มีตัวแปรที่มีผลกระทบดังต่อไปนี้

กำลังส่งของคลื่นวิทยุ (Transmit Power)

1. อัตราขยายของเสาอากาศภาคส่ง (Transmit antenna gain)
2. อัตราการลดทอนของสายนำสัญญาณภาคส่ง (Transmit cable loss)
3. อัตราการลดทอนของสายนำสัญญาณภาครับ (Receive antenna gain)
4. ความแรงของสัญญาณต่ำสุดที่ภาครับจะทำงานได้ (Minimum received signal level)
5. อัตราการลดทอนของสายนำสัญญาณภาครับ (Receive cable loss)

รูปแบบการคำนวณค่าความแรงของสัญญาณวิทยุส่วนใหญ่จะให้หน่วยเป็นเดซิเบล เพราะสะดวกกว่าวิธีอื่น หากต้องคำนวณด้วยตัวเลขธรรมดาจะต้องเป็นค่าจุดทศนิยมและมีสูตรต่างๆตามมามากมาย ดังนั้น ก่อนทำการคำนวณจึงต้องแปลงค่าต่างๆ ให้อยู่ในรูปเดซิเบลก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 แสดงโหมด TE และ TM ของท่อนำคลื่น

2.8.2 ความยาวคลื่นคัตออฟ สำหรับท่อนำคลื่นแบบกลม

ในท่อนำคลื่นแบบกลม ความถี่ต่ำสุดที่สามารถส่งผ่านท่อนำคลื่นได้ คือ โหมด $TE_{1,1}$ ซึ่งถือว่าเป็นโหมดหลักในการส่งคลื่น (Principle Mode) โหมดหลัก $TE_{1,1}$ ของท่อนำคลื่นแบบกลมเทียบได้กับโหมด $TE_{0,1}$ ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ถ้าเปรียบเทียบรูปแบบของสนาม (Field Pattern) จากโหมด $TE_{0,1}$ กับโหมด $TE_{1,1}$ ในรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าไม่มีความคล้ายคลึงกันเลย แต่เมื่อท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าถูกส่งด้วยคลื่นในโหมด และท่อนำคลื่นนี้นำไปต่อเข้ากับท่อนำคลื่นแบบกลมด้วยการเชื่อมต่อที่ดีไม่เกิดการมีสมัทซ์คลื่นที่ผ่านเข้าไปในท่อนำคลื่นแบบกลมจะได้เป็น Mode $TE_{1,1}$ เนื่องจากทั้งคู่เป็นโหมดหลักนั่นเอง การหาความยาวคลื่นคัตออฟของท่อนำคลื่นแบบกลม โดยต้องใช้ค่ารากของเบสเซลฟังก์ชัน (Roots of Bessel Functions) ซึ่งที่ความยาวคลื่นคัตออฟของโหมด TE_{mn} มีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ $\lambda_{cutoff} = \frac{2\pi r}{u_{mn}}$ ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ปร (2.92) ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ λ_{cutoff} = ค่าความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดในท่อนำคลื่นในโหมดที่กำหนด (cm)

r = รัศมีด้านในของท่อนำคลื่นแบบกลม

u_{mn} = ค่ารากของสมการเบสเซล (มาจากตารางที่ 2.1 (ก.))

ส่วนความยาวคลื่นคัทออฟของโหมด TM_{mn} มีค่าเท่ากับ

$$\lambda_{cutoff} = \frac{2\pi r}{u_{mn}} \quad (2.93)$$

โดยที่ λ_{cutoff} = ค่าความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดในท่อนำคลื่นในโหมดที่กำหนด (cm)

r = รัศมีด้านในของท่อนำคลื่นแบบกลม

u_{mn} = ค่ารากของสมการเบสเซล (มาจากตารางที่ 2.1 (ก.))

ตารางที่ 2.9 ค่ารากของเบสเซล

ค่ารากเบสเซลสำหรับโหมด TE

$$\mu'_{01} = 3.8821$$

$$\mu'_{02} = 7.016$$

$$\mu'_{11} = 1.841$$

$$\mu'_{12} = 5.332$$

$$\mu'_{21} = 3.054$$

$$\mu'_{22} = 6.706$$

$$\mu'_{31} = 4.201$$

$$\mu'_{32} = 8.031$$

ค่ารากเบสเซลสำหรับโหมด TM

$$\mu'_{01} = 2.405$$

$$\mu'_{02} = 5.520$$

$$\mu'_{03} = 8.654$$

$$\mu'_{11} = 3.832$$

$$\mu'_{12} = 7.016$$

$$\mu'_{22} = 5.136$$

(ข)

จากตารางที่ 2.1(ก) จะพบว่า μ'_{mn} มีค่าน้อยที่สุดซึ่งดำเนินไปแทนลงในสมการที่ 2.32 และทราบค่า r มากกว่าใช้ค่า μ'_{mn} หมายความว่าต้องใช้ท่อนำคลื่นแบบกลมขนาดใหญ่ขึ้นด้วยเหตุนี้โหมด TE_{11} จึงถือว่าเป็นโหมดหลัก และเช่นเดียวกันในตารางที่ 2.1 (ข) โหมด TM_{01} จะเป็นโหมดหลักสำหรับคลื่น TM เนื่องจากท่อนำคลื่นแบบกลมนั้นจะมีความสมมาตรในทุกด้านทุกมุม การหมุนท่อนำคลื่นไปในลักษณะใดจึงไม่มีผลต่อการส่งคลื่น ผิดกับท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งเมื่อทำการหมุนจะเกิดเสียความสมมาตรและส่งผลกระทบต่อคลื่นที่ส่งผ่านท่อนำคลื่นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 สนามของท่อนำคลื่นแบบกลม

จากรูป 2.9 โหมดหลักทำงานในแบบ TE_{11} mode ซึ่งสนามไฟฟ้าจะกระจายทั่วพื้นที่หน้าตัด

$$E_\rho = \frac{2 \sin \phi}{\rho} J_1 \left(1.84 \frac{\rho}{a} \right) \quad (2.94)$$

$$E_\rho = \frac{2a \cos \phi}{1.84} \frac{d}{d\rho} \left(\frac{1.84 \rho}{a} \right) \quad (2.95)$$

เมื่อ a = รัศมี

J_1 = เมสเซลฟังก์ชันแบบที่ 1 Order

ρ = รัศมีของโคออติเนตทรงกระบอก

ดังรูปที่ 2.9 ในโคออติเนตทรงสี่เหลี่ยม แสดงการกระจายของสนามดังนี้

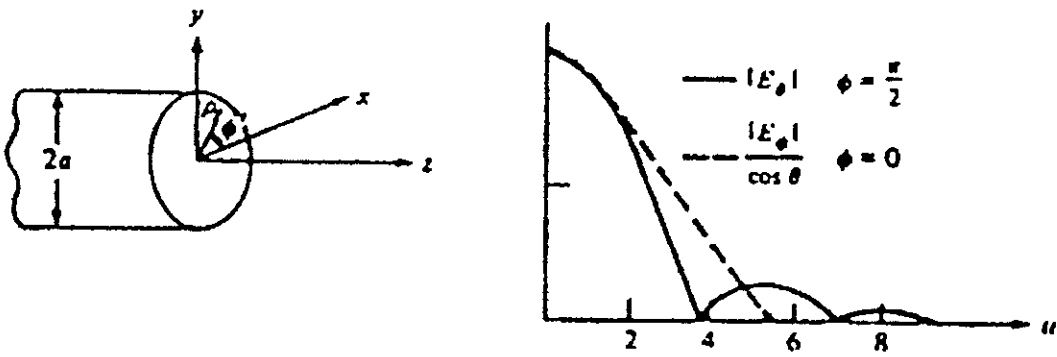
$$E_x = E_\rho \cos \phi - E_\phi \sin \phi \quad (2.96)$$

$$E_x = E_\rho \sin \phi - E_\phi \sin \phi \quad (2.97)$$

สำหรับ E_0, E_ϕ สามารถใช้ความสัมพันธ์ของรีเคอร์เรนซ์ (Recurrence Relations) ดังนี้

$$\frac{dJ(u)}{du} = \frac{1}{2} [J_{m-1}(u) - J_{m+1}(u)] \quad (2.98)$$

$$\frac{m}{u} J_m(u) = \frac{1}{2} [J_{m-1}(u) + J_{m+1}(u)] \quad (2.99)$$



รูปที่ 2.27 ท่อนำคลื่นแบบกลมและแบบรูป

เราจะได้ว่าดังนี้

$$E_x = J_2 \left(1.84 \frac{\rho}{a} \right) \sin 2\phi \quad (2.100)$$

$$E = JI \quad (2.101)$$

ถ้าเราสมมติว่าสนามที่ปากเปิดก็สามารถหาค่าสนามที่แพร่กระจายได้ในส่วนของกราฟ E_x และ E_y โดยการอินทิเกรตตลอดปากเปิด

$$\begin{aligned} k_x x' + k_y y &= k_0 \rho \sin \phi (\cos \phi \cos \phi' + \sin \phi \sin \phi') \quad (2.102) \\ &= k_0 \rho \sin \phi \cos(\theta - \phi') \end{aligned}$$

โดยใช้การกระจายฟังก์ชัน $\exp(jk_0 \rho \sin \theta \cos(\phi - \phi'))$ แล้วใช้สูตร Lommel Integral

ดังนี้

เมื่อ $u = k_0 a \sin \theta$ ในระนาบ $\phi = \pi/2$ เป็นระนาบของแบบรูปสนามไฟฟ้า E ในระนาบ $\phi = 0$ เป็นระนาบของแพทเทอร์สนามแม่เหล็ก H เราจะหาค่าได้เรดิคัลได้โดย

$$\text{เมื่อ } \beta = \left[k_0^2 - \left(\frac{1.84}{a} \right)^2 \right]^{1/2} \text{ ซึ่งเป็นค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น (Propagation$$

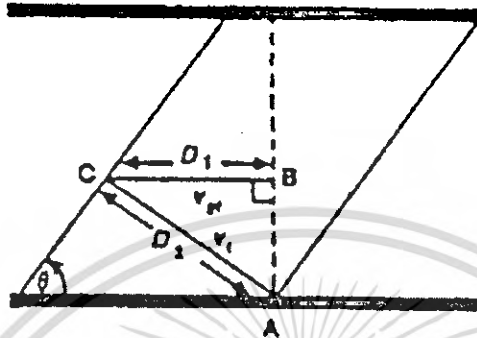
Constant) สำหรับคลื่น TE_{11} โหมด

2.8.4 การเดินทางของคลื่นในท่อนำคลื่น

คลื่น 2 ชุดเดินทางไปตามท่อนำคลื่น แบบซิกแซกเป็นรูปฟันปลา ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วที่ของแสงเมื่อคิดคลื่นลัพธ์ (Resultant) ออกมาจะมีทิศทางของเวกเตอร์ชี้ไปตามแนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่น ความเร็วของคลื่นลัพธ์ นี้ที่เดินทางไปในแนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่นนี้ขึ้นอยู่กับระยะทางรูปฟันปลาลัพธ์ จะมีค่าน้อยกว่าความเร็วแสงเสมอ และเรียกว่า ความเร็วคลื่นกลุ่ม V_g (Group Velocity) ความสัมพันธ์ของคลื่น ความเร็วคลื่นตกกระทบ และความเร็วคลื่นกลุ่ม V_g ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งจะเห็นว่าหน้าคลื่นของคลื่นตก ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระทบผนังด้านข้าง ของหน้าคลื่นด้วยมุม θ และสะท้อนออกไปด้วยมุมที่เท่ากันระยะทางของคลื่นลัพธ์ ที่เดินทางไปตามกึ่งกลางของหน้าคลื่นในเวลาที่กำหนด t มีค่าเป็น

$$\text{ระยะทาง} = \text{ความเร็ว} \cdot \text{เวลา}$$



รูปที่ 2.28 แสดงความสัมพันธ์ของ v และ V_g ในหน้าคลื่น

2.9 การสื่อสารดาวเทียม

ดาวเทียมที่มนุษย์ส่งขึ้นไปโคจรเหนือผิวโลก ขณะนี้มีประมาณมากกว่า 200 ดวง อยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดาวเทียมที่ส่งขึ้นไปโคจรเหนือผิวโลกนี้ แบ่งออกได้เป็น 3 แบบ

1. ดาวเทียมแบบโคจรตามฤดูกาล

เป็นดาวเทียมรุ่นแรก ๆ ที่มนุษย์ส่งขึ้นไปโคจรเหนือพื้นผิวโลก สมัยนั้นระบบการส่ง และการควบคุมยังไม่ได้เท่าที่ควร ดาวเทียมแบบนี้แต่ละดวงมีวงโคจรของตัวเองแตกต่างจากดวงอื่น ๆ ระดับความสูงแต่ละดวงจะแตกต่างกัน เป็นดาวเทียมที่บังคับวงโคจรและระดับความสูงไม่ได้

2. ดาวเทียมแบบเฟส

เป็นดาวเทียมที่มีแนวทางโคจรแตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ที่จะให้ดาวเทียมโคจรผ่านตำแหน่งไหน เช่น โคจรตามแนวเส้นศูนย์สูตร โคจรเอียงเป็นมุม 30 องศา กับเส้นศูนย์สูตร โคจรผ่านขั้วโลก เป็นต้น ดาวเทียมแบบนี้เป็นระบบดาวเทียมที่บังคับเส้นทางโคจรได้ เช่น ดาวเทียมสำรวจทรัพยากร ดาวเทียมทำจารกรรม เป็นต้น

3. ดาวเทียมแบบโคจรอยู่กับที่

เป็นดาวเทียมที่ใช้เพื่อการสื่อสาร โดยส่งขึ้นไปให้มีระดับความสูงประมาณ 35,860 กิโลเมตร โคจรตามแนวเส้นศูนย์สูตรไปทางทิศตะวันออก มีความเร็วในการโคจรรอบโลกครบหนึ่งรอบเท่ากับที่โลกหมุนรอบตัวเองหนึ่งรอบ ดังนั้นเมื่อสังเกตดูดาวเทียมจากพื้นโลก ณ จุดใดจุดหนึ่ง จึงดูเหมือนว่าดาวเทียมลอยนิ่งอยู่กับที่ดาวเทียมแบบนี้เป็นดาวเทียมที่ใช้เพื่อการสื่อสาร ถ้ามีดาวเทียมเพียง 3 ดวง ณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งเหนือมหาสมุทรแอตแลนติก มหาสมุทรแปซิฟิก และมหาสมุทรอินเดียก็สามารถถ่ายทอดระบบการสื่อสารครอบคลุมได้ทั่วโลกแต่ในทางปฏิบัติแล้วจะต้องมีดาวเทียมสำรองไว้อีกแห่งละ 1 ดวง ดังนั้นจะต้องส่งดาวเทียมขึ้นไปอยู่เหนือมหาสมุทร แต่ละแห่งอย่างน้อย 2 ดวง และตำแหน่งเหนือมหาสมุทรแอตแลนติกอาจมีถึง 3-4 ดวงเพราะข่ายการสื่อสารมีมาก

อายุการใช้งานของดาวเทียมปกติแล้ว จะขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงที่บรรจุอยู่ในดาวเทียมเพื่อการควบคุมตำแหน่ง แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นตัวจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ในดาวเทียม อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในดาวเทียม และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง Traveling wave tube (TWT) ที่ใช้เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณ

ดาวเทียมที่จะส่งเข้าสู่วงโคจรส่งได้ 2 วิธี คือ

1. ส่งโดยใช้จรวด
2. ส่งโดยใช้ยานขนส่งอวกาศ

ดาวเทียมขณะที่ส่งเข้าสู่วงโคจร หรือ เมื่ออยู่ในวงจรรโคจรแล้วจะต้องอยู่ในความควบคุมดูแลของสถานีติดตามและบังคับควบคุมดาวเทียมตลอดเวลา สถานีติดตามและบังคับควบคุมดาวเทียม TT & C (Tracking, Telemetry And Command) จะกระจายอยู่ตามภูมิภาคต่าง ๆ ของโลกเช่น Paumalu (อเมริกา) Andover (อเมริกา) Fucino (อิตาลี) Camarvon (ออสเตรเลีย) Yamaguchi (ญี่ปุ่น) ฯลฯ สถานีเหล่านี้จะต้องควบคุมดูแลให้ดาวเทียมอยู่ตำแหน่งที่ต้องการ และส่งข้อมูลตำแหน่งของดาวเทียมไปที่สถานีภาคพื้นดินต่าง ๆ ทรานส์ponder ถ้าดาวเทียมเคลื่อนที่ผิดตำแหน่งมากเกินไป สถานีติดตามและบังคับควบคุมดาวเทียมจะส่งสัญญาณไปบังคับให้ดาวเทียมกลับมาอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ

2.10 การคำนวณข่ายสื่อสารดาวเทียม

ขณะนี้การทดลองรับสัญญาณจากดาวเทียมเป็นไปอย่างแพร่หลายมาก มีนักศึกษา นักวิจัยจากหลายสถาบันการศึกษาได้ทำการสร้างงานสายอากาศพาราโบลาขึ้นมา และทำการทดลองรับสัญญาณโทรทัศน์จากดาวเทียมบางดวง ซึ่งบางรายก็ประสบผลสำเร็จเป็นที่น่าพอใจ สัญญาณภาพชัดเจนพอใช้ได้ซึ่งอยู่กับขนาดของงานสายอากาศ คุณภาพของอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่มีอุณหภูมิลดลง (LNA) อุปกรณ์เปลี่ยนความถี่ (Down Converter) และอุปกรณ์เครื่องรับ

ความสำคัญประการหนึ่งในการรับสัญญาณจากดาวเทียมให้ได้ผลดีก็คือ จำเป็นต้องตั้งงานสายอากาศรับให้ทิศทางของงานสายอากาศชี้ไปยังดาวเทียมได้ถูกต้องแม่นยำเนื่องจากงานสายอากาศพาราโบลาที่มีลำที่คลื่น Main Beam ที่แคบมากยิ่งงานขนาดใหญ่ลำคลื่นก็ยิ่งแคบลงไปอีก ถ้าทิศทางที่ชี้ไปยังดาวเทียมดวงที่ต้องการจะรับผิดพลาดไปเพียงหนึ่งหรือสององศา สัญญาณที่รับได้จะมีระดับต่ำลงอย่างมาก ดังนั้นต้องมีการคำนวณมุมเงยและมุมอาซิมูทอย่างละเอียดถูกต้อง

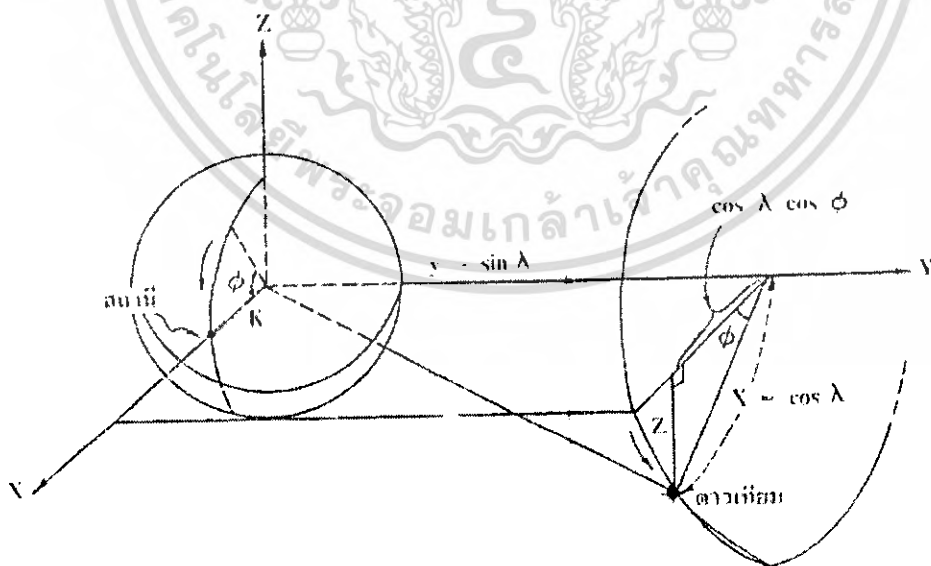
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นอีควาเตอร์ และดาวเทียมอยู่บนแนวระนาบ $x-y$ งานสายอากาศรับสัญญาณจากดาวเทียมอยู่บนแนวระนาบ $x-z$ ค่า ϕ เป็นค่าเส้นรุ้งของตำแหน่งที่ตั้งงานสายอากาศ ให้ K เป็นอัตราส่วนระหว่างรัศมีของโลกกับรัศมีวงโคจรของ ดาวเทียม ซึ่งจะได้ค่า $K = 6370 \times 10^3 / (6370 + 35860) \times 10^3 = 0.15084$

สมมติให้ระยะทางจากใจกลางของโลกไปยังดาวเทียมมีค่าเท่ากับ 1 รัศมีของโลกจะสามารถเขียนได้ในรูปเท่ากับ K และให้ λ เป็นความแตกต่างของเส้นแวงระหว่างจุดที่ตั้งงานสายอากาศและดาวเทียม



รูปที่ 2.29 โคออร์ดิเนตของสถานีรับสัญญาณดาวเทียม



รูปที่ 2.30 โคออร์ดิเนตใหม่ของสถานีรับสัญญาณดาวเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถแสดงโคออร์ดิเนตของจุดที่ตั้งงานสายอากาศและดาวเทียมได้ดังนี้

โคออร์ดิเนตของจุดที่ตั้งงานสายอากาศ : $(K \cos \phi, 0, K \sin \phi)$

โคออร์ดิเนตของดาวเทียม : $(\cos \lambda, \sin \lambda, 0)$

ต่อไปถ้าเราหมุนโลกไปเป็นมุม ϕ ทางระนาบ $x-z$ ดังนั้นจากรูปที่ 2.2 เขียนได้เป็นรูปที่ 2.3 ซึ่งตำแหน่งที่ตั้งของงานสายอากาศจะมีโคออร์ดิเนตบนแกน x ทางเดียว

โคออร์ดิเนตของจุดที่ตั้งงานสายอากาศ : $(k, 0, 0)$

โคออร์ดิเนตของดาวเทียม : $(\cos \lambda \cos \phi, \sin \lambda, -\cos \lambda \sin \phi)$

ในรูปที่ 2.32 ระนาบที่สัมผัสโลกตรงจุดที่ตั้งงานสายอากาศจะขนานกับระนาบ $y-z$ ดังนั้นมุมเงยและมุมอาซิมุทจากงานสายอากาศหาได้ดังนี้

$$\text{มุมเงย} : \tan \alpha = \frac{\cos \lambda \cos \phi - 0.1508}{\sqrt{\sin^2 \lambda + \cos^2 \lambda \sin^2 \phi}}$$

$$= \frac{\cos \lambda \cos \phi - 0.1508}{\sqrt{1 - \cos^2 \lambda + \cos^2 \phi}}$$

$$\text{มุมอาซิมุท} : \tan A = \frac{Y \text{ โคออร์ดิเนตของดาวเทียม}}{(Z \text{ โคออร์ดิเนตของดาวเทียม})}$$

$$= \frac{\sin \lambda}{\cos \lambda \sin \phi}$$

$$= \frac{\tan \lambda}{\sin \phi}$$

ตัวอย่าง ถ้าต้องการตั้งงานสายอากาศรับสัญญาณดาวเทียมที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งอยู่ ณ ตำแหน่งเส้นรุ้ง $13^{\circ} 45' 37''$ เหนือ เส้นแวง $100^{\circ} 48' 19''$ ตะวันออกรับสัญญาณจากดาวเทียมอินเทลแซท V ซึ่งอยู่ ณ ตำแหน่งเส้นแวง 60° ตะวันออก จะต้องตั้ง งานสายอากาศมีมุมเงยและมุมอาซิมุทเท่าไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \text{วิธีทำ} \quad \text{เส้นรุ้ง } 13^{\circ} \quad 45' \quad 37'' &= 13.76 \text{ องศา} \\
 \text{เส้นแวง } 100^{\circ} \quad 48' \quad 19'' &= 100.80 \text{ องศา} \\
 \Lambda = 100.80^{\circ} - 60^{\circ} &= 40.80^{\circ}
 \end{aligned}$$

คำนวณหามุมเงย

$$\begin{aligned}
 \tan \alpha &= \frac{\cos \lambda \cos \phi - 0.1508}{\sqrt{1 - \cos^2 \lambda + \cos^2 \phi}} \\
 &= \frac{\cos 40.8^{\circ} \cos 13.76^{\circ} - 0.1508}{\sqrt{1 - \cos^2 40.8^{\circ} + \cos^2 13.76^{\circ}}} \\
 &= \frac{(0.757 \times 0.971) - 0.1508}{\sqrt{1 - (0.573 \times 0.943)}} \\
 &= \frac{0.5842}{0.678} = 0.8617
 \end{aligned}$$

$$\therefore \text{มุมเงย } \alpha = \tan^{-1} 0.8617 = 40.75 \text{ องศา}$$

คำนวณหามุมอาซิมูท

$$\begin{aligned}
 \tan A &= \frac{\tan \lambda}{\sin \phi} \\
 &= \frac{\tan 40.80^{\circ}}{\sin 13.76} \\
 &= \frac{0.863}{0.238} \\
 &= 3.626
 \end{aligned}$$

$$\therefore \text{มุมอาซิมูท } A = \tan^{-1} 3.626 = 74.58 \text{ องศาเทียบกันทิศใต้}$$

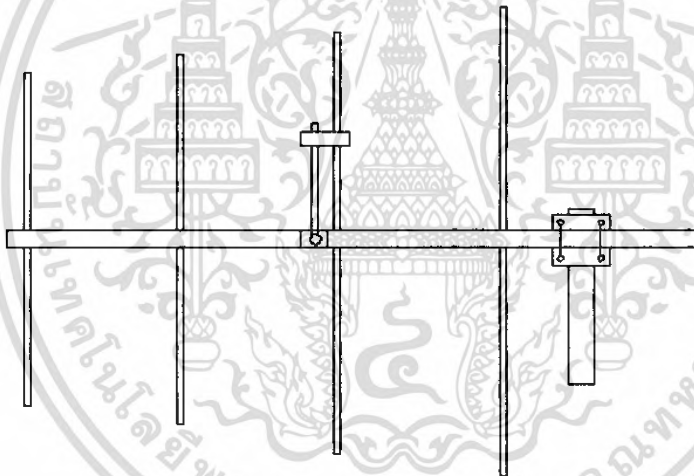
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบ การสร้าง และการทำงาน

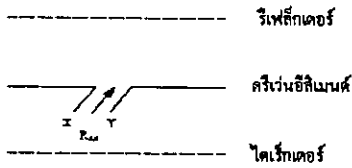
3.1 การออกแบบสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม

สายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียมที่ใช้ในการศึกษานี้จะสามารถออกแบบในลักษณะสายอากาศยาคีที่นำเอาสายอากาศในย่าน VHF และ UHF มาอยู่ในต้นเดียวกันที่สามารถใช้ซึ่งขนาดของสายอากาศต้นนี้ จะมีอิมพีแดนซ์ในย่าน VHF 4 อิมพีแดนซ์ โดยมีแกมมาแมตช์ (Gamma Match) เป็นตัวปรับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ แสดงตามรูป 3.1

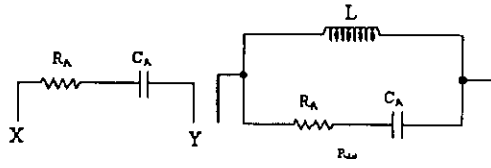


รูปที่ 3.1 ลักษณะโครงสร้างสายอากาศแบบ 4 อิมพีแดนซ์

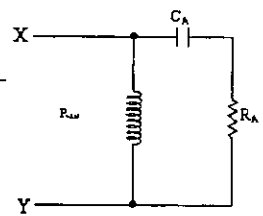
สายอากาศ 4 อิมพีแดนซ์จะใช้ในย่านความถี่ VHF 144.000-146.00Mz เป็นลักษณะ (Gamma Match) ซึ่งง่ายต่อการแมตช์และปรับค่าอิมพีแดนซ์ ให้ได้ค่า SWR ต่ำที่สุดดูลักษณะการแมตช์ตามรูป 3.2



รูป ก.



รูป ข.

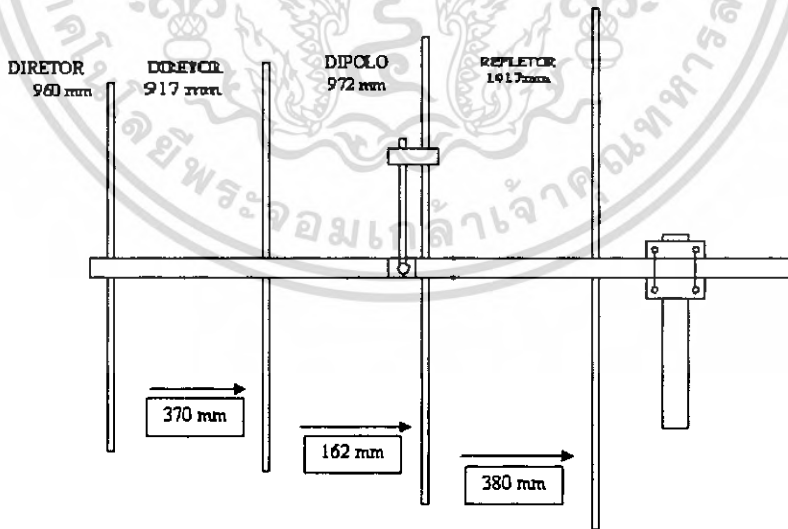


รูป ค.

รูป ง.

รูป 3.2 วงจรการแมตช์สายอากาศแบบต่างๆ

ตามรูป 3.2 ก) คือสายอากาศแบบยาก็ ข) คืออิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ณ ที่ความถี่ใช้งาน จะประกอบไปด้วย R_a และ C_a ถ้าครีเวนอิลิเมนต์สั้นกว่าระยะเรโซแนนซ์ (อิมพีแดนซ์ขงที่ยังไม่มี L จะต่ำมาก ดังนั้นจึงเอา L มาต่อคร่อมดังรูป ค) จึงทำให้มีค่าอิมพีแดนซ์สูงขึ้นเป็น 200 โอห์ม ส่วนรูป ง) เป็นการจัดรูปวงจรเสียใหม่ให้เป็นรูป L-network

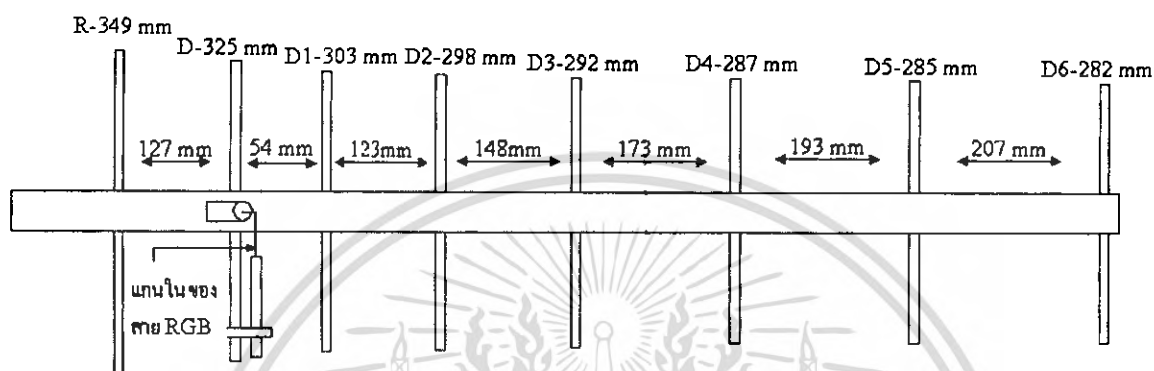


รูปที่ 3.3 โครงสร้างของสายอากาศยาก็ในย่าน VHF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ออกแบบสายอากาศย่าน UHF แบบ 7 อีลีเมนต์

สายอากาศย่าน UHF แบบ 7 อีลีเมนต์ เป็นสายอากาศประเภททิศทาง (ยาก็) มีความถี่ในการใช้งาน 435.800 – 435.900 MHz แสดงลักษณะดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โครงสร้างและส่วนประกอบของสายอากาศยาก็ในย่าน UHF แบบ 8 อีลีเมนต์

3.2.1 ขั้นตอนการจัดเตรียมอุปกรณ์ในการประกอบสายอากาศ

เมื่อเราจัดเตรียมอุปกรณ์พร้อมแล้ว มาเริ่มต้นการจัดสร้างสายอากาศ เริ่มต้นนำอลูมิเนียมทั้งหมดที่จัดเตรียมไว้ตัดตามตารางด้านล่าง

ตารางที่ 3.1 อลูมิเนียมที่จัดทำสายอากาศ

ตำแหน่งอุปกรณ์	ความยาวที่ต้องตัด
บูม	275 ซม.
Reflector	103.2 ซม.
Diven	97.5 ซม.
Director1	95.9 ซม.
Director 2	92.5 ซม.
Director 3	89.3 ซม.
Director 4	90.5 ซม.
Director 5	86.4 ซม.
ชุดเมตซ์	22 ซม.(2 ท่อน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. นำอลูมิเนียม 3/4 นิ้ว (6 ทุน) ที่เลื่อยไว้สำหรับทำเป็นมุม 275 ซ.ม. มาเจาะรูด้วยสว่านรู 3/16 นิ้ว (1.5 ทุน) ตามระยะที่กำหนดไว้ในตาราง

ตารางที่ 3.2 ระยะการเจาะอลูมิเนียม

REF-DIV	DIV - DIR 1	DIR 1-DIR 2	DIR 2-DIR 3	DIR 3-DIR 4	DIR 4-DIR 5
20.5ซ.ม.	12.1 ซ.ม.	39.8 ซ.ม.	65.8 ซ.ม.	68.3 ซ.ม.	59.2 ซ.ม.

2. นำอลูมิเนียมกลม 3/8 นิ้ว (3 ทุน) กลวงที่เลื่อยเตรียมไว้มาเจาะรูตรงกลางด้วยสว่านรู 3/16 นิ้ว (1.5 ทุน) ให้ได้ตรงกลาง เพราะมีผลต่ออิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย

3. นำอลูมิเนียมแผ่นหนา 1 mm ขนาด I - 1.5 ซ.ม. ยาว 12 ซ.ม. ที่เตรียมไว้มาตัดเป็นห่วงเพื่อใช้แมตซ์ซึ่งสายอากาศ

4. นำอลูมิเนียมแผ่นหนา 1mm ขนาด 2.5 นิ้ว ยาว 4 นิ้ว มาพับเพื่อใช้เป็นเพลตยึดขั้ว พร้อมเจาะรูขนาดที่เท่ากับขั้ว SO 239

5. นำขั้ว So 239 ประกอบกับเพลตที่เตรียมไว้

6. นำสายนำสัญญาณ RG 8 มาตัดตามสูตรเพื่อใช้ทำสายบาลัน จะได้ความยาวสาย 68.2 ซ.ม.

3.2.2 วิธีประกอบสายอากาศ ยากิ 8 อิลิเมนต์

1. นำอิลิเมนต์ที่เตรียมไว้ประกอบใส่ตัวมุมอลูมิเนียม ด้วยตัวยึดอิลิเมนต์แบบจนวนที่เตรียมไว้ที่แล้วขันน็อตให้แน่น อย่าลืมที่จะใช้แหวนรองสปริงและน็อตตัวเมียขันล็อกไว้เพื่อไม่ให้ตัวอิลิเมนต์คลายออกตัวยึดอิลิเมนต์

2. นำส่วนที่ใช้จัดทำชุดแมตซ์ซึ่ง มาประกอบเข้ากับตัวสายอากาศ ให้ห่างจาก DIVEN ประมาณที่ 3.5 ซ.ม. เพื่อความแข็งแรงให้ใช้ปอกปากกาที่เตรียมไว้ช่วยยึดในฝั่งที่ไม่ได้ใส่สตั๊บบแมตซ์ซึ่งพร้อมใช้สายรัดที่เตรียมไว้รัดปอกปากกาให้แน่น

3. นำสายนำสัญญาณที่ตัดเพื่อเป็นบาลันมาประกบกับขั้วต่อสาย PL 259 แล้วนำมาใส่ที่เพลตแมตซ์ซึ่ง พร้อมใช้เทปละลายที่เตรียมไว้รัดให้สายบาลันยึดติดกับมุมอลูมิเนียม

3.2.3 วิธีการสร้างสายอากาศ

1. จะใช้มุมแบบกลมหรือแบบสี่เหลี่ยมแล้ว ประมาณเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว ยาวตามขนาดที่กำหนดไว้ การเจาะรูก็เจาะให้พอดีกับขนาดของอิลิเมนต์ที่เตรียมไว้จะช่วยให้การสัมผัสมั่นคงแข็งแรงแล้วยึดตรงกลางด้วยสกรูเกลียวปล่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

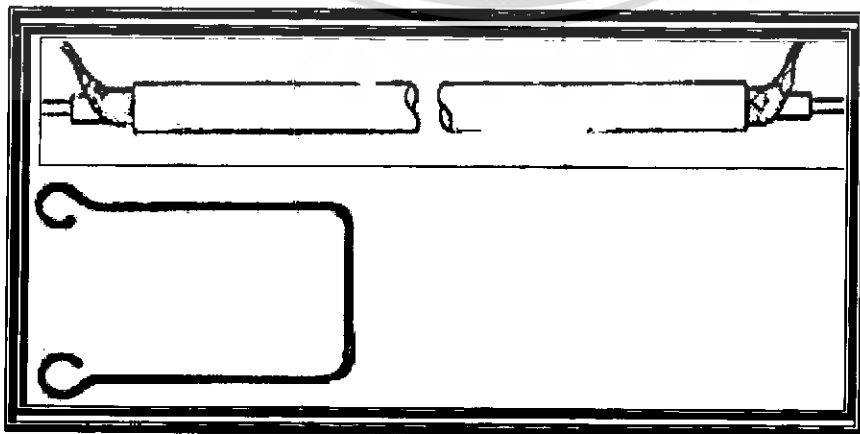
ตารางที่ 3.3 ระยะห่างของแต่ละอิลีเมนต์

ความยาวบวม	รีเฟกเตอร์	ดริเวณอิลีเมนต์	ไดเรกเตอร์ 1	ไดเรกเตอร์ 2
1004	1006	440	936	960

หน่วยวัดเป็นมิลลิเมตร

- ขนาดของดริเวณอิลีเมนต์ ควรจะให้ยาวกว่าขนาดที่กำหนดให้ไว้สัก 20 มม. เพื่อไว้ปรับแต่งเส้นผ่าศูนย์กลาง ซึ่งอาจจะใช้ขนาด 1/2 นิ้วก็ได้
- ฉนวนที่ใช้รองรับดริเวณอิลีเมนต์นั้นอาจจะตัดแปลงใช้อย่างอื่นที่มีคุณภาพทัดเทียมกับของนี้ ต้นแบบก็ได้ ในแบบใช้เป็นทูปเปอร์เรน
- ตัวบาลันใช้สายโคแอคเซียล 50 โอห์ม ยาว 1/2 ช่วงคลื่นคูณด้วยค่าความเร็วคงที่ในสายถึง เช่นสายRG58 แทนหุ้มเป็นฉนวนพลาสติกคูณด้วย0.66หากเป็นฉนวนโฟมคูณด้วย0.80 (วัดจากจุดปอกที่สาย)แล้วเอาซีลมารวมกันใส่ตาไก่ยึดติดกลางบวมตามรูปที่ 2 ส่วนแกนในตรงกลางแต่ละข้างใส่ตาไก่แล้วนั้นนำไปยึดติดกับดริเวณอิลีเมนต์ข้างละด้าน
- สายนำสัญญาณด้านซีลต่อรวมกับซีลของบาลัน ส่วลวดแกนนำตรงกลางยึดติดกับดริเวณอิลีเมนต์ด้านในด้านหนึ่ง
- แฮร์พินจะใช้ลวดอลูมิเนียมหรือทองแดงอบน้ำยา ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง1/8 นิ้ว ตรงปลายที่ขดเป็นห่วงสำหรับใช้ยึดติดดริเวณอิลีเมนต์ ความยาวตามในรูป
- เมื่อประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว ควรหาทางป้องกันน้ำไม่ให้ซึมเข้าไปในสายบาลันและสายนำที่สัญญาณให้ดีโดยอาจใช้ซิลิโคนรับเบอร์หรือเทปพันสายไฟ เทปละลาย พันไว้โดยรอบ

รูปสายอากาศ YAKI 4E ต้นแบบ แสดงบริเวณที่ต่อแฮร์พินและสายบาลัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับแคว้นที่ควรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูป 3.5 รูปแบบการทำแฮร์พินและการต่อสายบาลัน
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การปรับแต่งค่า SWR

การปรับแต่งค่าที่วากี้คือการทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เข้าใกล้ 50 โอห์มมากที่สุดเครื่องมือที่ใช้ของเราชาวนักที่วิทยุสมัครเล่นก็คงจะเป็นเครื่องวัด VSWR เมื่อวัดดูแล้วค่า SWR อยู่ในช่วงไม่เกิน 1.5 : 1 ก็ประมาณได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ใกล้ 50 โอห์มแล้ว เมื่อได้ทดสอบทำตามทีกล่าวมาแล้วทุกประการ ค่า SWR ยังสูงเกินกว่า 1.5 : 1 ณ ความถี่ที่ใช้งานตามตำราว่าให้ลอง

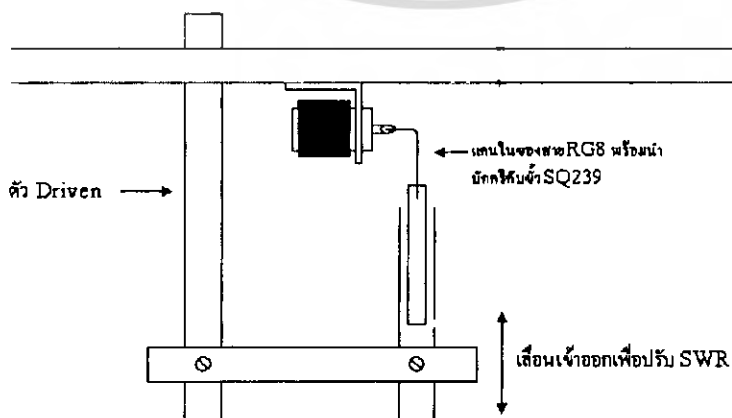
1. ให้ทำแฮร์พินเป็นรูปโป่งออก (ขยายออกทางกว้าง) หาก SWR ทำท่าจะลดแปลว่าแฮร์พินยาวเกินไป
2. ให้ทดลองบีบแฮร์พินให้เล็กลง (ขยายออกทางยาว) หาก SWR ทำท่าจะลดแสดงว่าแฮร์พินสั้นเกินไป
3. อีกวิธีหนึ่งก็คือ ลองเปลี่ยนความถี่ดูหาก SWR ต่ำที่ความถี่สูงกว่าที่ใช้แสดงว่าแฮร์พินสั้นเกินไปตรงกันข้าม หากดีที่ความถี่ต่ำกว่าแสดงว่าแฮร์พินยาวเกินไป
4. เมื่อทำตามข้อ 1-3 แล้วลองมาปรับตรีแวนอิลิเมนต์ โดยลองตัดออกทีละ 5 มม. จนได้ค่าที่ต่ำที่สุด

3.3 ขั้นตอนการปรับแต่งสายอากาศ

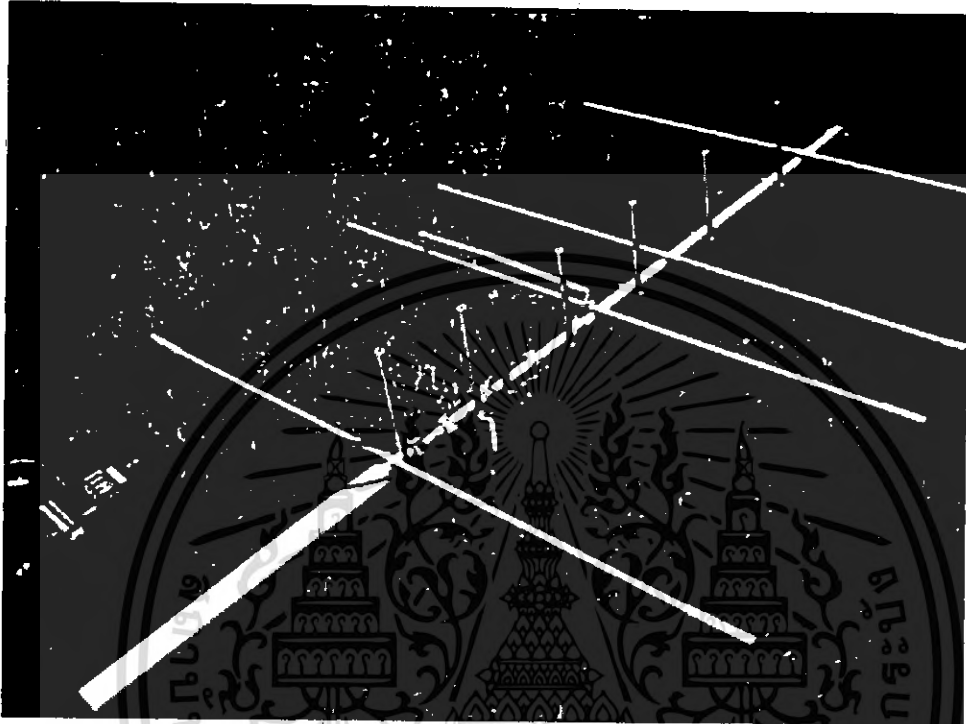
เนื่องจากสายอากาศที่นำมาแนะนำในครั้งนี้ เป็นสายอากาศที่ได้รับการออกแบบมาจากคอมพิวเตอร์ วิธีการเมตซ์เราก็เลือกวิธีแบบเกมมาเมตซ์ ซึ่งจะคล้ายกับการเมตซ์สายอากาศยาก็ของ CUSHCRAFT คือแบบ ที่เมตซ์ที่เคยกล่าวถึงในเรื่องของสายอากาศยาก็ 13 อิลิเมนต์ ดังนั้นเราจึงต้องใจเย็น ๆ ค่อย ๆ ปรับแต่งระยะห่างของชุดเมตซ์ซึ่งกับมุมกลาง วิธีการเมตซ์ก็เหมือนเดิมคือควรที่จะให้มีระยะที่โล่งด้านหน้าสัก 20 เมตรขึ้นไป ในส่วนระยะห่างจากพื้นควรจะมีระยะห่างสัก 2 เมตร วิธีการวัดก็จากเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (VSWR) ในส่วนนี้เพื่อน ๆ คงจะต้องทำใจเย็น ๆ สักกะหน่อยนะครับหลังจากได้ค่าอิมพีแดนซ์เป็นที่น่าพอใจแล้วก็ควรใช้ไขควงยึดน็อตที่แผ่นเมตซ์ซึ่งให้แน่นหนาเมื่อ หลังจากนั้นก็สามารถนำไปใช้ออกอากาศให้สมกับที่เราได้จัดสร้างขึ้นมา

3.4 การปรับค่า (VSWR) ของสายอากาศ

การปรับค่า VSWR ของสายอากาศในโครงงานนี้ สายอากาศแบบมีทิศทางจะสามารถปรับ VSWR ได้โดยการปรับค่า C ที่เกิดขึ้นจากแกนในของสายนำสัญญาณ RG8 ดังรูปที่ 3.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 3.6 การปรับค่า (VSWR) ของสายอากาศยาก็ ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 สายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียมหลังทำการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลอง และ ผลการทดลอง

4.1 กล่าวนำ

จากที่ทำการคำนวณ และออกแบบสร้างสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม VHF 4 อีลีเมนต์ ที่ย่านความถี่ 144.00 – 146.00 MHz และ UHF 7 อีลีเมนต์ที่ย่านความถี่ 435.80-435.90MHz ขั้นตอนต่อไปเป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการออกแบบและตรวจสอบถึงค่าของคุณสมบัติของ สายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม โดยการทดลองจะประกอบไปด้วยการวัดและทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และการทดสอบหาอิมพีแดนซ์

สำหรับการวัด และทดสอบค่าต่าง ๆ ในการทดลองนี้ จะใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF Network Analyzers : รุ่น HP 8741C) ในการวัด โดยเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุสามารถวัดและแสดงรูปสัญญาณ พร้อมทั้งค่าต่าง ๆ ออกมาโดยละเอียดส่วนอุปกรณ์อื่น ๆ ได้แก่ ตัวเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศกับเครื่องวัดจะใช้สายเชื่อมต่อแบบRG-8 ในการทดลองจะมีผลการทดลองของสายอากาศที่ทำการออกแบบจากค่าคงที่สัมพัทธ์ของฉนวน (ϵ_r ค่าต่าง ๆ เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองของสายอากาศทั้งหมดที่ออกแบบว่ามีความเหมาะสมที่จะออกแบบที่ค่าใด

4.2 การวัด และทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม

4.2.1 ลำดับขั้นตอนการทดลอง

1. ใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเปิดสวิตช์จ่ายกำลังงานไปที่ตำแหน่ง ON

2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศวิทยุสมัครเล่นที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบRG-8 เข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง MESA

3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยกดปุ่ม MEAS1

4. เลือกการวัดสะท้อนกลับ Reflection โดยเลือกที่ Reflection

5. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด กดปุ่ม FREQ เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Start ป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สุดท้ายที่ 3 กิกะเฮิรตซ์โดยเลือก Stop ป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์

6. สังเกตรูปสัญญาณที่ได้จากจอภาพแสดงผลทำการปรับมุมมองการแสดงผลขนาดรูสัญญาณให้สามารถเห็นภาพได้ชัดเจนขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วตั้งความถี่ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์ , ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์ , ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ

8. สังเกตผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 7

4.2.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่าการสะท้อนกลับของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยม คือรูปสัญญาณในช่วงความถี่ 1-3 กิกะเฮิรตซ์ ของการวัดหาค่าการสะท้อนกลับของสายอากาศที่ออกแบบโดยใช้ค่าคงที่สัมพัทธ์ของฉนวน 3 และ 4.45 ดังนี้

1. การสะท้อนกลับของสายอากาศที่ค่า $\epsilon_r = 3$ ความถี่ใช้งาน 144.000 – 146.000 MHz, 435.800-435.900 MHz



รูปที่ 4.1 สัญญาณการสะท้อนกลับของสายอากาศ วิชยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม

2. ค่าสะท้อนกลับของสายอากาศที่ค่า $\epsilon_r = 4.45$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ตารางที่ 4.1 ค่าการสะท้อนกลับของสายอากาศออกแบบที่ความถี่ใช้งาน

ความถี่ที่ทดสอบ	การสะท้อนกลับ (dB) ที่ค่า ϵ_r ต่าง ๆ	
	$\epsilon_r = 3$	$\epsilon_r = 4.45$
1 กิกะเฮิรตซ์	-0.518	-0.401
1.5 กิกะเฮิรตซ์	-1.572	-0.792
2 กิกะเฮิรตซ์	-15.890	-8.694
2.5 กิกะเฮิรตซ์	1.552	-0.854
3 กิกะเฮิรตซ์	-2.320	-1.659

4.3 การวัดและทดสอบหาค่าอัตราคลื่นนิ่งของสายอากาศวิทยุสมัครเล่น

4.3.1 ลำดับขั้นตอนการทดลอง

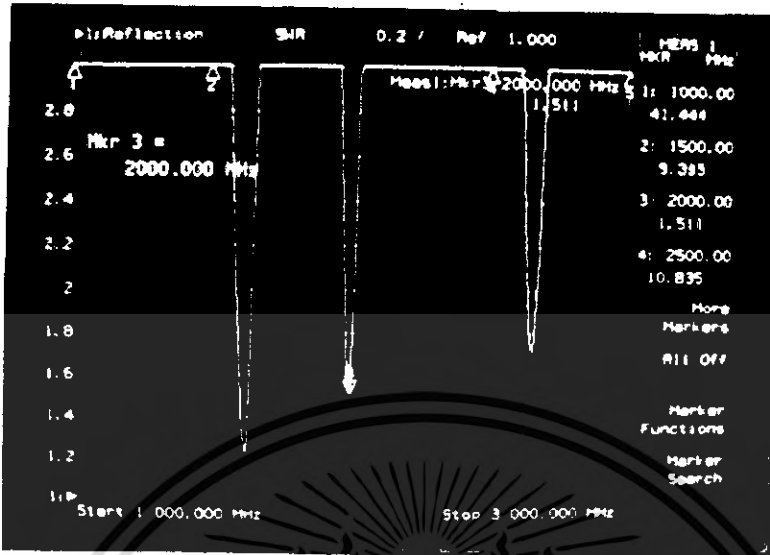
1. ใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ ในการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง เปิดสวิตช์จ่ายกำลังงานไปที่ตำแหน่ง ON
2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศวิทยุสมัครเล่นที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัดโดยใช้สายเชื่อมต่อแบบRG-8เอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง MESA 1
3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่งโดยกดปุ่ม MESA 1 แล้วเลือก Reflection
4. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด เริ่มจากกดปุ่ม FREQ เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Start แล้วป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สิ้นสุดที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Stop แล้วป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์
5. เลือกการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง SWR โดยกดปุ่ม FORMAT จากนั้นกดปุ่มเลือกการวัดที่ SWR
6. ตั้งตำแหน่งอ่านค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันที่ความถี่ต่าง ๆ โดยกดปุ่ม MARKER โดยตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ
7. สังเกตผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 6

4.3.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองของการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน คือ รูปสัญญาณแสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันที่อ่านได้มีดังนี้

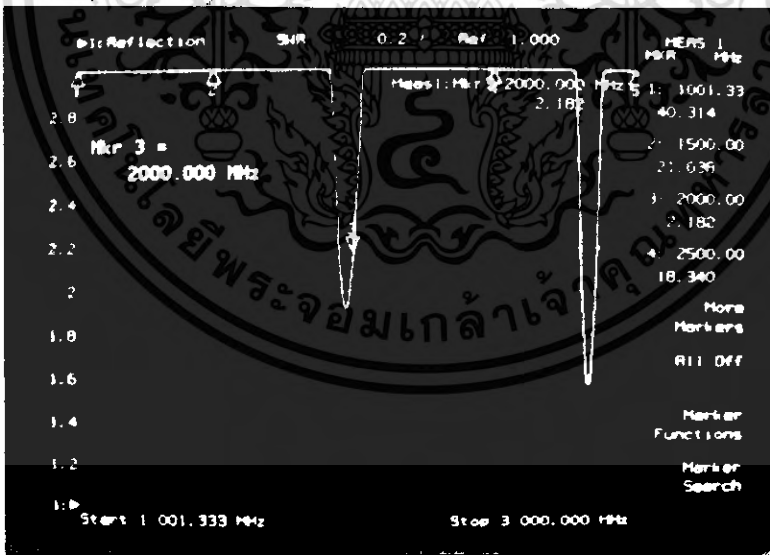
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ค่า $\epsilon_r = 3$



รูปที่ 4.3 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ค่า $\epsilon_r = 3$

2. ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ค่า $\epsilon_r = 4.45$



รูปที่ 4.4 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ค่า $\epsilon_r = 4.45$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ

ความถี่ที่ทดสอบ	การสะท้อนกลับ (dB) ที่ค่า ϵ_r ต่าง ๆ	
	$\epsilon_r = 3$	$\epsilon_r = 4.45$
1 กิกะเฮิรตซ์	34.219	42.816
1.5 กิกะเฮิรตซ์	11.202	22.016
2 กิกะเฮิรตซ์	1.546	2.136
2.5 กิกะเฮิรตซ์	10.704	21.095
3 กิกะเฮิรตซ์	7.076	10.270

4.4 การวัด และทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวิทยุสมัครเล่น

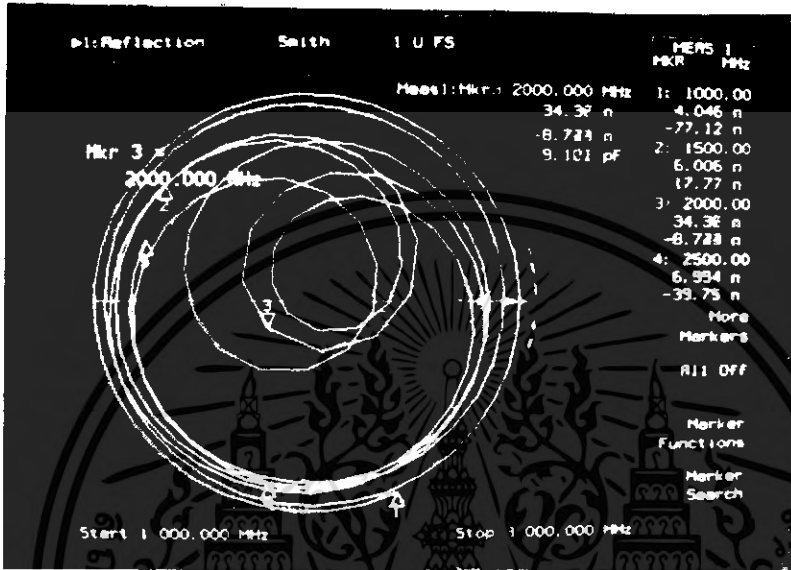
4.4.1 ลำดับขั้นตอนการทดลอง

1. ใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ ในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ เปิดสวิตช์จ่ายกำลังงานไปที่ตำแหน่ง ON
2. เชื่อมต่อสายอากาศที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบ เอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง MEAS 1
3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยกดปุ่ม MESA 1 แล้วเลือก Reflection
4. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด เริ่มจากกดปุ่ม FREQ เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Start แล้วป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สิ้นสุดที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Stop แล้วป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์
5. เลือกการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยกดปุ่ม FORMAT จากนั้นกดปุ่มเลือกการวัดที่ Smithchart
6. ตั้งตำแหน่งอ่านค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ โดยกดปุ่ม MARKER โดยตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ
7. สังเกตค่าที่ได้จากการทดลองในข้อ 6

4.4.2 ผลการทดลอง

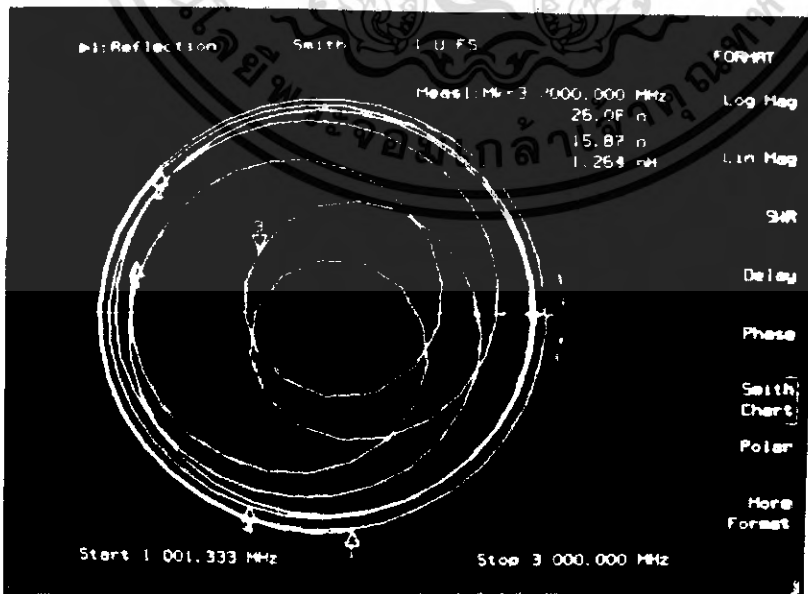
ผลการทดลองของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ คือ รูปแผนภาพสมิตชาร์ต และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่อ่านได้ ดังนี้

1. แผนภาพสมิตชาร์ตของสายอากาศที่ค่า $\epsilon_r = 3$



รูปที่ 4.5 แผนภาพสมิตชาร์ตของสายอากาศที่มีค่า $\epsilon_r = 3$

2. แผนภาพสมิตชาร์ตของสายอากาศที่ค่า $\epsilon_r = 4.45$



รูปที่ 4.6 แผนภาพสมิตชาร์ตของสายอากาศที่มีค่า $\epsilon_r = 4.45$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

ความถี่ที่ทดสอบ	การสะท้อนกลับ (dB) ที่ค่า E_r ต่าง ๆ	
	$E_r = 3$	$E_r = 4.45$
1 กิกะเฮิรตซ์	4.795	2.746
1.5 กิกะเฮิรตซ์	5.230	2.692
2 กิกะเฮิรตซ์	37.04	25.91
2.5 กิกะเฮิรตซ์	7.817	3.770
3 กิกะเฮิรตซ์	7.489	4.964

4.5 การทดสอบค่าคุณสมบัติของสายอากาศวิทยุสมัครเล่นโดยการทดสอบวางวัสดุต่าง ๆ บนสายอากาศ

การทำสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งใช้สายอากาศที่ได้ทำการทดสอบแล้ว ว่ามีคุณสมบัติของค่าการสะท้อนกลับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอิมพีแดนซ์ที่ถูกต้อง และสมบูรณ์แบบเพียง 1 ตัวเท่านั้น โดยจะใช้สายอากาศที่ออกแบบด้วยค่าคงที่สัมพัทธ์ของฉนวนเท่ากับ 2 ความถี่ที่ใช้ในการออกแบบ 2 กิกะเฮิรตซ์ ในการทดสอบจะใช้วัสดุอื่น ๆ มาวางอยู่บนสายอากาศวัสดุที่ใช้เป็นกระดาษ แก้ว อีพอกซี (Epoxy) และพลาสติก วางอยู่บนสายอากาศ และมีการปรับระยะความสูงจากวัสดุถึงตัวสายอากาศที่นำมาทดสอบ ซึ่งค่าระยะความสูงนี้จะมีค่าตามค่าความยาวคลื่นที่ขนาดต่าง ๆ แล้วทำการวัดค่าต่าง ๆ ของสายอากาศที่จุดระยะห่างนั้น ๆ ต่อไป

4.5.1 ลำดับขั้นการทดลอง

1. ใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุในการวัดค่าคุณสมบัติ เปิดสวิตช์จ่ายกำลังงานไปที่ตำแหน่ง ON
2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศวิทยุสมัครเล่นที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง MEAS 1
3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยกดปุ่ม MESA 1 แล้วเลือก Reflector
4. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด เริ่มจากกดปุ่ม FREQ เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Start แล้วป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สิ้นสุดที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Stop แล้วป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์
5. เลือกการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยกด FORMAT จากนั้นกดปุ่มเลือกการวัดที่ Smithchart
6. ตั้งตำแหน่งอ่านค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ โดยกดปุ่ม MARKER โดยตั้งความถี่ ตำแหน่งที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ

7. นำแทนปรับเลื่อนที่มีวัสดุที่ต้องการทดสอบมาวางทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จากนั้นทำการเลื่อนปรับระยะห่างตามค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยที่เริ่มจากค่า $\lambda/1$ จนถึง $\lambda/8$ ตามลำดับ ($\lambda = 15$ เซนติเมตร)

8. สังเกตค่าที่ได้จากการทดลองในข้อ 6 และข้อ 7 ที่ตำแหน่งระยะห่างต่าง ๆ

4.5.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองในส่วนของการทดสอบนี้คือผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับค่าของค่ามีอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ทดสอบโดยกระดาษ ($\epsilon_r = 3$), แก้ว ($\epsilon_r = 5$), พลาสติก ($\epsilon_r = 2.26$) และอีพอกซี ($\epsilon_r = 3$), มีดังนี้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

ระยะความห่างของวัสดุ (ซม.)	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพอกซี
15	-13.487	-13.642	-13.426	-14.296
7.5	-13.541	-13.71	-13.623	14.320
5	-13.520	-13.794	-13.546	-14.335
3.75	-13.584	-13.752	-13.610	-14.351
3	-13.645	-13.725	-13.646	-14.382
2.5	-13.674	-13.746	-13.652	-14.435
2.14	-13.654	-13.775	-13.774	-14.612
1.9	-13.691	-14.735	-13.751	-14.812

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

ระยะความห่างของวัสดุ (ซม.)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพอกซี
15	1.537	1.535	1.536	1.477
7.5	1.542	1.532	1.535	1.475
5	1.539	1.528	1.539	1.475
3.75	1.539	1.529	1.539	1.472
3	1.538	1.532	1.538	1.472

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองค่าอิมพีแดนซ์

ระยะความห่างของวัสดุ (ซม.)	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพอกซี
15	35.21	35.30	35.02	36.78
7.5	35.25	35.57	35.42	36.82
5	35.34	35.55	35.47	36.75
3.75	35.49	35.27	35.32	36.67
3	35.37	34.98	35.26	36.64
2.5	35.37	34.72	35.17	36.51
2.14	35.14	34.30	35.12	36.47
1.9	35.16	34.72	34.92	36.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุป

สายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียมที่ทำการออกแบบการสร้างและทดลองเป็นของลักษณะของสายอากาศแบบยากิ ซึ่งมีลักษณะเป็น 4 อีลีเมนต์ในย่าน VHF และ 7 อีลีเมนต์ ในย่าน UHF มีรูปแบบแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวมีสภาพเจาะจงทิศทางนำไปประยุกต์ใช้ในความถี่ VHF 144.00-146.00Mz ของสัญญาณส่ง และใช้ความถี่ UHF 435.80-435.90 MHz ของทางสายอากาศรับ เพื่อใช้ในการรับ-ส่งสัญญาณจากดาวเทียม ซึ่งได้แสดงทฤษฎีการออกแบบ การสร้างและการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศ ได้แก่ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง, อินพุตอิมพีแดนซ์ และการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อที่จะทำการปรับปรุงสายอากาศให้มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีมากที่สุดจากผลการทดสอบจะมีค่าที่คุณสมบัติของสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียมนี้ จะเห็นว่ากรออกแบบสายอากาศให้แบบ 4 อีลีเมนต์ และ 7 อีลีเมนต์ให้อยู่ในต้นเดียวกันไม่มีผลกับการเมตซ์ของสายอากาศมากนัก

จากกระบวนการทดสอบนั้นจะพบว่า สายอากาศชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้งานที่ติดต่อกันแบบจุดต่อจุดที่อยู่ห่างกันมาก หรือต้องการแม่นยำสูง เพราะสายอากาศชนิดนี้มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางทำให้สามารถใช้งานการติดต่อกันได้ที่ระยะไกล ๆ

5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

ปัญหา

ในการจัดทำโครงงานชุดนี้ สามารถสรุปปัญหาที่เกิดขึ้น ดังนี้

1. ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียมเมื่อนำมาทดลองนี้ และออกแบบสร้างผลที่ได้ไม่เป็นไปตามทฤษฎีที่ใช้คำนวณ
2. การคำนวณออกแบบสร้างสายอากาศต้องเสียเวลามาก เพราะค่าคงตัวของสารที่เป็นฉนวนมีหลายค่า ทำให้ต้องออกแบบโดยใช้ค่าคงตัวของฉนวนแต่ละค่าหลายครั้งอย่างละเอียด ก่อนที่จะทำการทดสอบ
3. ในการวัด และทดสอบค่าการสูญเสียกับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง จะมีค่าไม่สอดคล้องกัน คือ ถ้าค่าสะท้อนกลับมีมากเป็นผลที่ไม่ดี แต่ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่วัดได้พร้อมกับจะมีค่าที่ดี
4. ในการวัด และทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ไม่สามารถทำการทดลองในห้องทดลองสายอากาศโดยเฉพาะ ดังนั้นในการทดลองจึงเกิดความคลาดเคลื่อน
5. การทดลองต้องอาศัยการรับสัญญาณจากดาวเทียม ซึ่งไม่สามารถกำหนดเวลาทดลองที่แน่นอนจนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวทางแก้ไข

1. ในการออกแบบสายอากาศ ค่าคงตัวของสารที่เป็นฉนวนต้องกำหนดให้ได้ตรงตามค่าของสารนั้นจริง และถูกต้อง
2. ในส่วนของการสร้างสายอากาศวิทยุสมัครเล่น จะต้องสร้างให้ได้ขนาดเท่ากับที่ กำหนดให้มากที่สุด คือต้องออกแบบขนาดโดยใช้เครื่องมือที่สามารถกำหนด และวัดการแพร่กระจายคลื่นที่มีความละเอียดสูง
3. การวัด และทดสอบถ้าจะให้ค่าต่าง ๆ มีความถูกต้องและสอดคล้องกัน ต้องสร้างสายอากาศให้มีขนาดที่ถูกต้องและมีความละเอียดในการสร้างให้สูงมากขึ้น
4. ในการวัด และทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น ต้องใช้เครื่องมือ และชุดทดสอบมีความเที่ยงตรงและผิดพลาดน้อยที่สุด รวมทั้งห้องที่ทำการทดสอบ ต้องจัดตำแหน่งของสายอากาศ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในห้องไม่ให้เกิดการรบกวน
5. ทำการบันทึกวิดีโอ ในขณะที่ทำการทดลองสื่อสารวิทยุสมัครเล่นระหว่างกันและจัดทำคู่มือการใช้งาน

5.3 แนวทางการพัฒนาโครงการ

1. การออกแบบสามารถคำนวณการออกแบบ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในการออกแบบเพื่อเพิ่มความถูกต้องให้มากขึ้น
2. สร้างสายอากาศให้มีอัตราขยาย และประสิทธิภาพมีเพิ่มมากขึ้นโดยออกแบบสายอากาศเพิ่มย่าน VHF และ UHF ให้มีอิมพีแดนซ์มากขึ้น
3. เพิ่มอุปกรณ์ที่สามารถค้นหาสัญญาณดาวเทียมโดยอัตโนมัติ

บรรณานุกรม

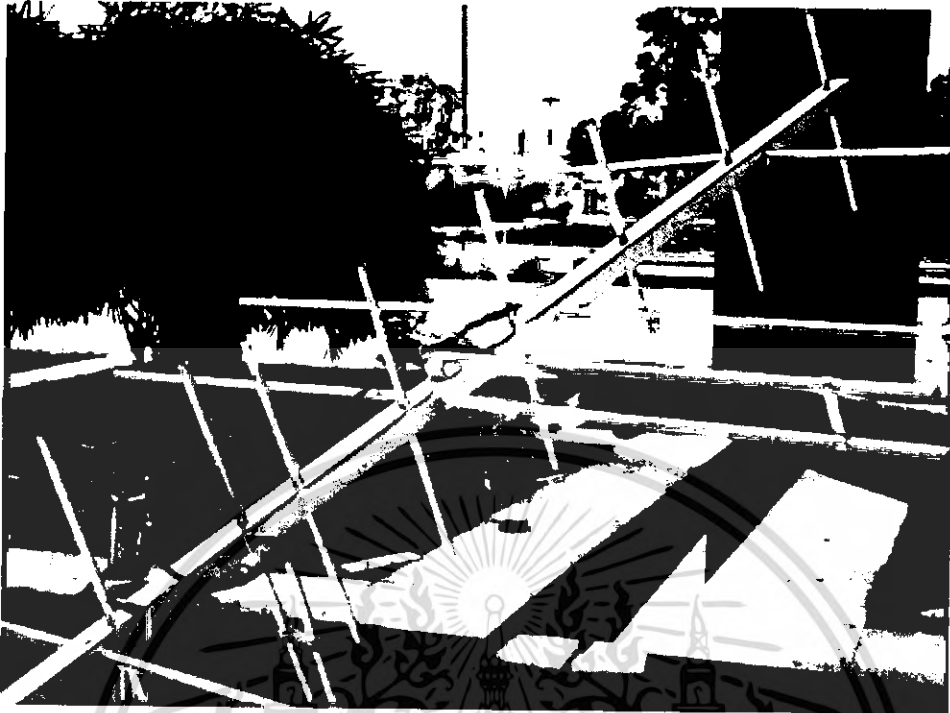
- เจนวิทย์ ณ สุวรรณ และอดิเรก เม่งเตียน. 2542. **สายอากาศไมโครสตริป**. ปรินซ์นิพนธ์ ครุศาสตร์
อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม.
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ณรงค์ เหมกรณ์. 2533. **การสื่อสารดาวเทียม**. กรุงเทพฯ (JICA)
- บัณฑิต โรจน์อารยานนท์. 2536. **วิศวกรรมสายอากาศ**. กรุงเทพฯ. ภัทรการพิมพ์
- ประเสริฐ เคนพันธ์. ม.ป.ป. **การสื่อสารดาวเทียม**. เอกสารประกอบการสอน. คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- วิสุทธิ์ สุนทรกนกพงศ์. 2546. **วิศวกรรมสายอากาศ**. กรุงเทพฯ. โครงการตำราสถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- เส็งยม เผ่าทองสุข. 2526. **คู่มือวิทยุสมัครเล่น**. กรุงเทพฯ. อิเล็กทรอนิกส์เวิลด์
- สุชาติ กังวารจิตต์. 2536. **เครื่องรับส่งวิทยุและระบบวิทยุสื่อสาร**. กรุงเทพฯ. ซีเอ็ดยูเคชั่น
- สมชาย สุขสวัสดิ์. 2534. **วิทยุคมนาคม**. กรุงเทพฯ. ภัทรการพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

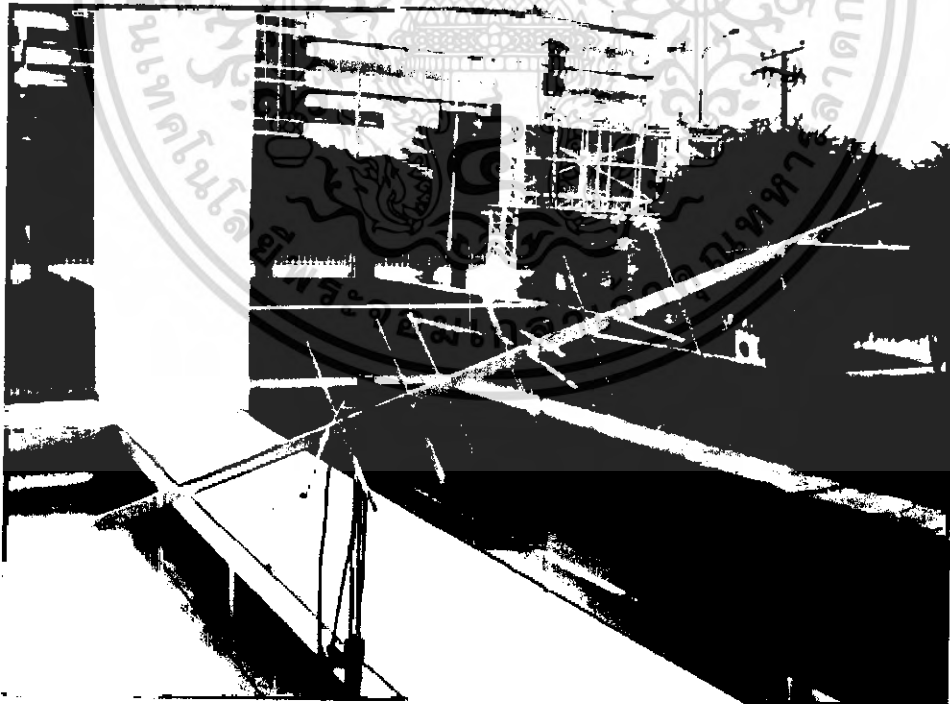


ภาคผนวก ก
รูปเครื่องต้นแบบสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

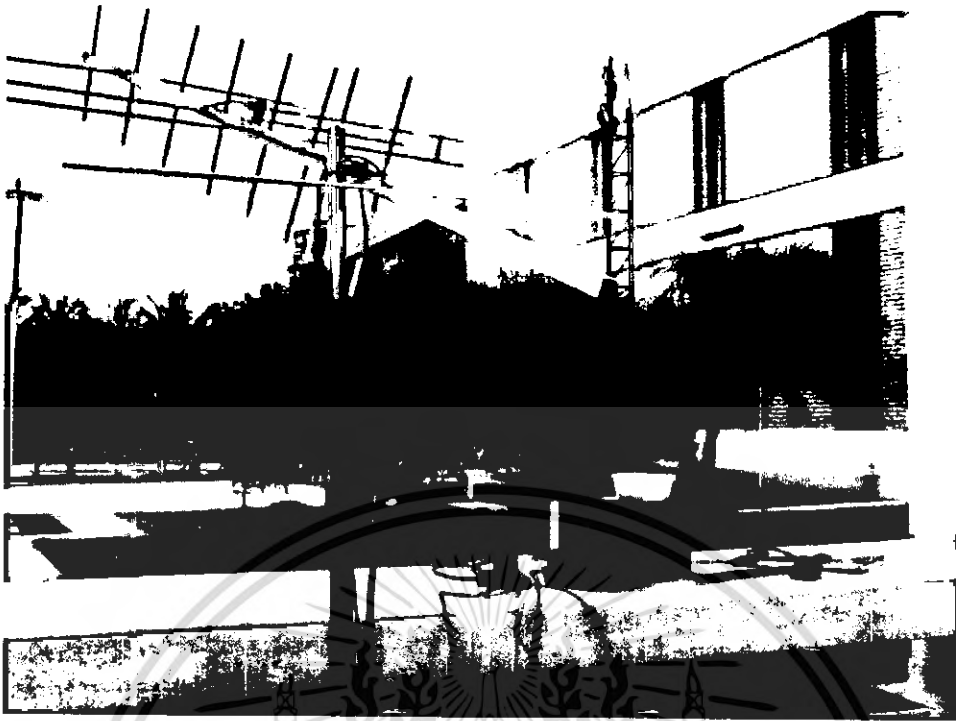


รูปที่ ก.1 สายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม



รูปที่ ก.2 ด้านข้างของสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 การต่อใช้งานสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม



รูปที่ ก.4 การทดลองสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม

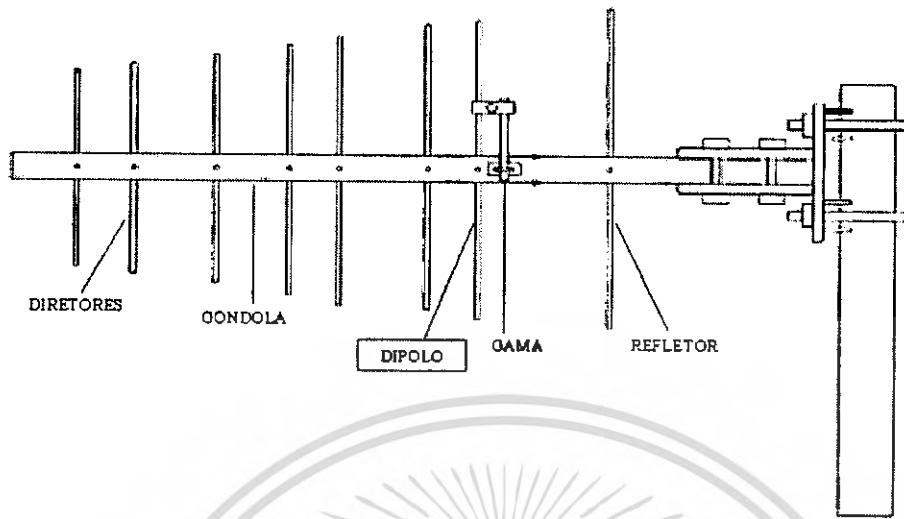
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



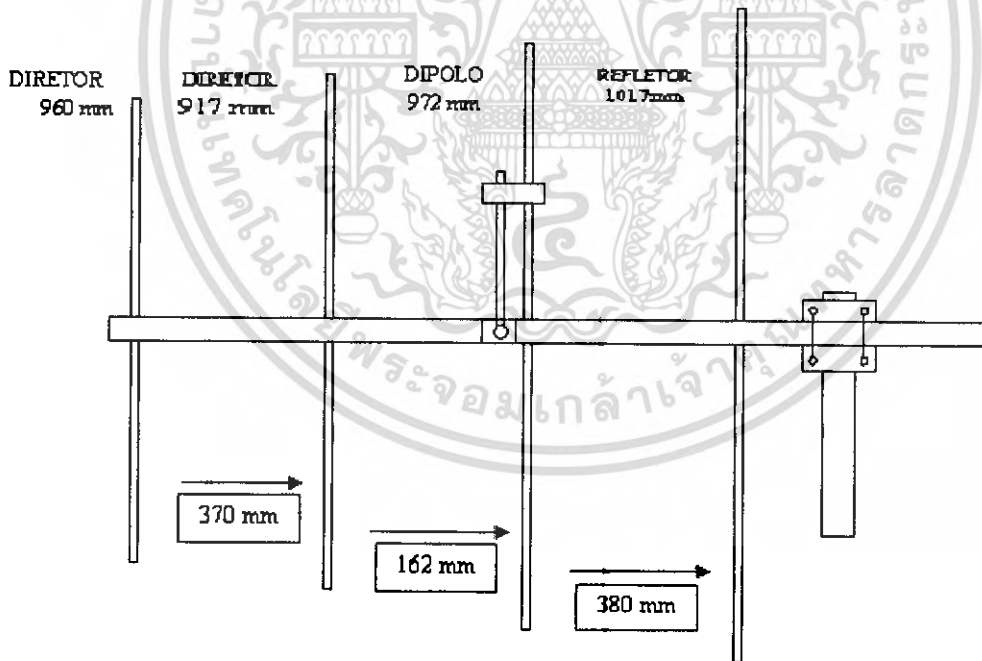
ภาคผนวก ข

โครงสร้างของสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของสายอากาศยาคิโนยาน UHF แบบ 7 อีลีเมนต์



รูปที่ ข.2 โครงสร้างและส่วนประกอบของสายอากาศยาคิโนยาน VHF แบบ 4 อีลีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 รายการอุปกรณ์ของสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม

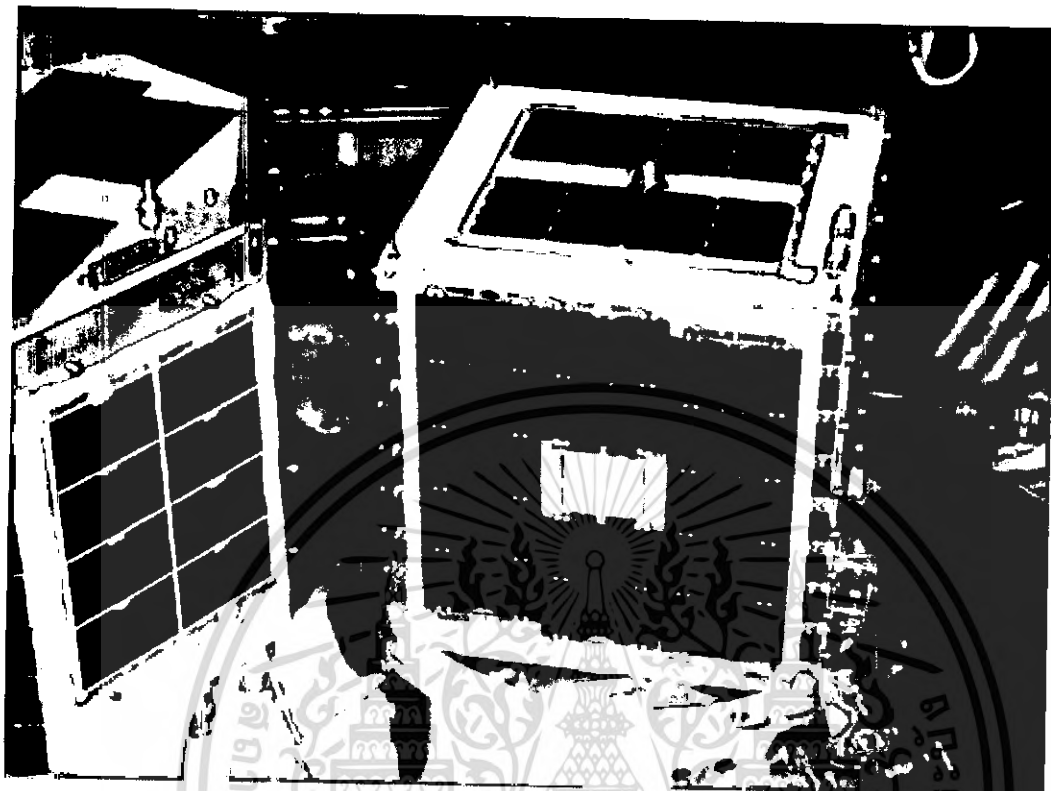
ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด	จำนวน
อลูมิเนียมกลม	ขนาด 3/8 นิ้ว	4 เส้น
สาย RG-58	CFD200-E Low Loss 50 Ohm Coaxial Cable Commate/PEWC	1 เมตร
RF-CONNECTOR		
BNC	Male Crimp	1 ตัว
	Female	1 ตัว
N-TYPE	Male Clamp	1 ตัว
	Female Panel	1 ตัว
SMA	RP-SMA Male Crimp	1 ตัว
อลูมิเนียม เหลี่ยม	ขนาด 3/4 นิ้ว	1 เส้น
เครื่องเล่นวิทยุ	ภาครับ ยูเอชเอฟ ภาคส่ง วีเอชเอฟ	2 เครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง
รายละเอียดและคุณสมบัติของดาวเทียม AO- 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปดาวเทียม AO-51 SAT-OSCAR 51
(Echo)

Spacecraft Summary

OSCAR Designation: AMSAT-OSCAR 51	Oscar Number: AO-51
International Designator: 2004-025K	Norad Number: 28375
Common Name: Echo	Alternate Name: OSCAR-E
Satellite Type: Microsatellite	Launch Date: 28 June, 2004
Launch Location: Baikonur Cosmodrome	Launch Vehicle: Dnepr
Apogee: 818.00	Perigee: 696.00
Inclination: 99.97	Period: 99.97
Dimensions: 25 x 25 x 25 cube	Weight: 11.140 Kg

Organization: AMSAT-NA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

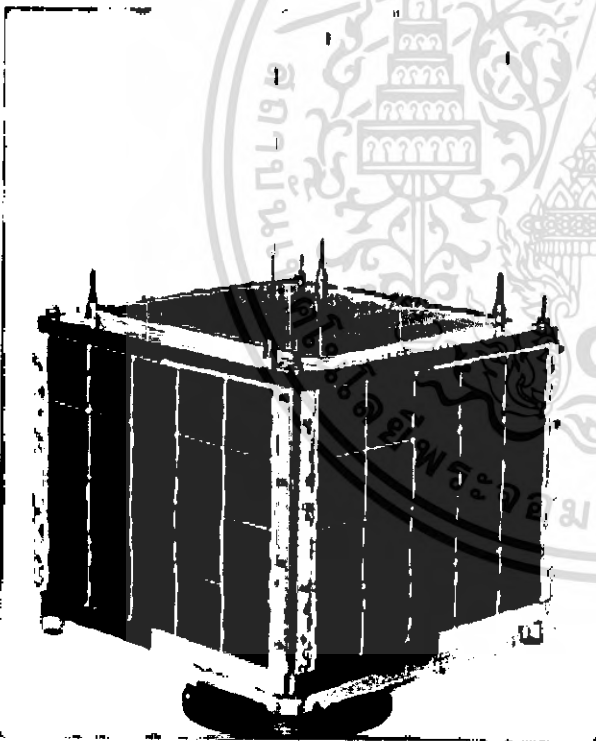
AO-51 Monthly Schedule

	Channel A		Beacon	Channel B	
	Uplink	Downlink		Uplink	Downlink
1	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	Off 9k6
2	145.920 FM	435.300 FM	Off	145.880 QRP FM	435.150 QRP FM
3	145.920 FM	435.300 FM	Off	145.880 QRP FM	435.150 QRP FM
4	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
5	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
6	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
7	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
8	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
9	145.920 FM	435.300 FM	Off	1268.700 FM	435.150 FM
10	145.920 FM	435.300 FM	Off	1268.700 FM	435.150 FM
11	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
12	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
13	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
14	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
15	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
16	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
17	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
18	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
19	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
20	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
21	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
22	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
23	145.880 FM	2401.200 FM	Off	Off	Off
24	145.880 FM	2401.200 FM	Off	Off	Off
25	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
26	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
27	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
28	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6
29	145.920 FM	435.300 FM	435.150 FM	Off	435.150 PBP 9k6

AMSAT OSCAR-E AO-51

AMSAT OSCAR-E wurde am 28.06.2004 erfolgreich mit einer Dnepr-1 Rakete vom Baikonour Kosmodrome in Kasachstan gestartet. Der erste Kontakt fand um 1452UTC statt und es wurden erste wichtige Telemetriedaten gesendet. Die Batterien waren voll geladen und die Solarpaneele lieferten genügend Strom. In den nächsten Tagen wurde die Software geladen und die Telemetrie zeigte gute Werte an.

Der 25 cm große Würfel wiegt etwa 10kg. AO-51 besitzt 4 VHF Empfänger und 2 UHF-Sender, einen Multi-Mode Receiver und einen 2,4 GHz Sender. Er umkreist die Erde auf einem 850km hohen, sonnensynchronen Orbit. Die Inklination beträgt $98,2^\circ$.



Orbital Parameter

Name AO-51

NORAD # 28375

COSPAR Bezeichnung 2004-025-K

Inklination (Grad) 98.214

RAAN 257.170

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Excentrizität 0.0084104

ARGP 147.287

Umläufe pro Tag 14.40467899

Periode 1h 39m 58s (99.97 Min)

Semi-major axis 7135 km

Perigäum x Apogäum 697 x 817 km

Bstar (drag Faktor) 0.000032586 1/ER

Mean Anomaly 213.357

Downlink

435,225 MHz FM analog Voice

435.150 MHz FSK 9600 bps, AX.25 (TX A)

435.300 MHz FSK 9600 bps, AX.25 (TX B)

Uplink

145.920 MHz FM + 67 Hz PL

145.860 MHz FSK 9600 bps, AX.25

Call

Broadcast callsign PECHO-11

Status

aktiv

Seit dem 10.11.2005 arbeitet AO-51 im V/U-Mode - 145.880 MHz Uplink **USB** und 435.300 MHz Downlink **FM**.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AMSAT-OSCAR 51

Launch Date: 28 June, 2004

Dimensions: 25 x 25 x 25 cube

Weight: 11.140 Kg

Frequency Information

Mode V/U (J) FM Voice Repeater (QRP)

Uplink: 145.8800 MHz FM

Downlink 435.1500 MHz FM

Mode V/U (J) FM Voice Repeater

Uplink: 145.9200 MHz FM, PL 67.0 Hz.

Downlink 435.3000 MHz FM

Mode V/U (J) PacSat BBS

Uplink: 145.8600 MHz AFSK 9600 BPS

Downlink 435.1500 MHz AFSK 9600 BPS

Mode V/S FM Voice Repeater

Uplink: 145.9200 MHz FM, PL 67.0 Hz.

Downlink 2401.2000 MHz FM

Mode L/U FM Voice Repeater

Uplink: 1268.7000 MHz FM, PL 67.0 Hz.

Downlink 435.3000 MHz FM

Mode L/U PacSat BBS

Uplink: 1268.7000 MHz AFSK

Downlink 435.1500 MHz AFSK

Mode L/S FM Voice Repeater

Uplink: 1268.7000 MHz FM, PL 67.0 Hz.

Downlink 2401.2000 MHz FM

Mode L/S PacSat BBS

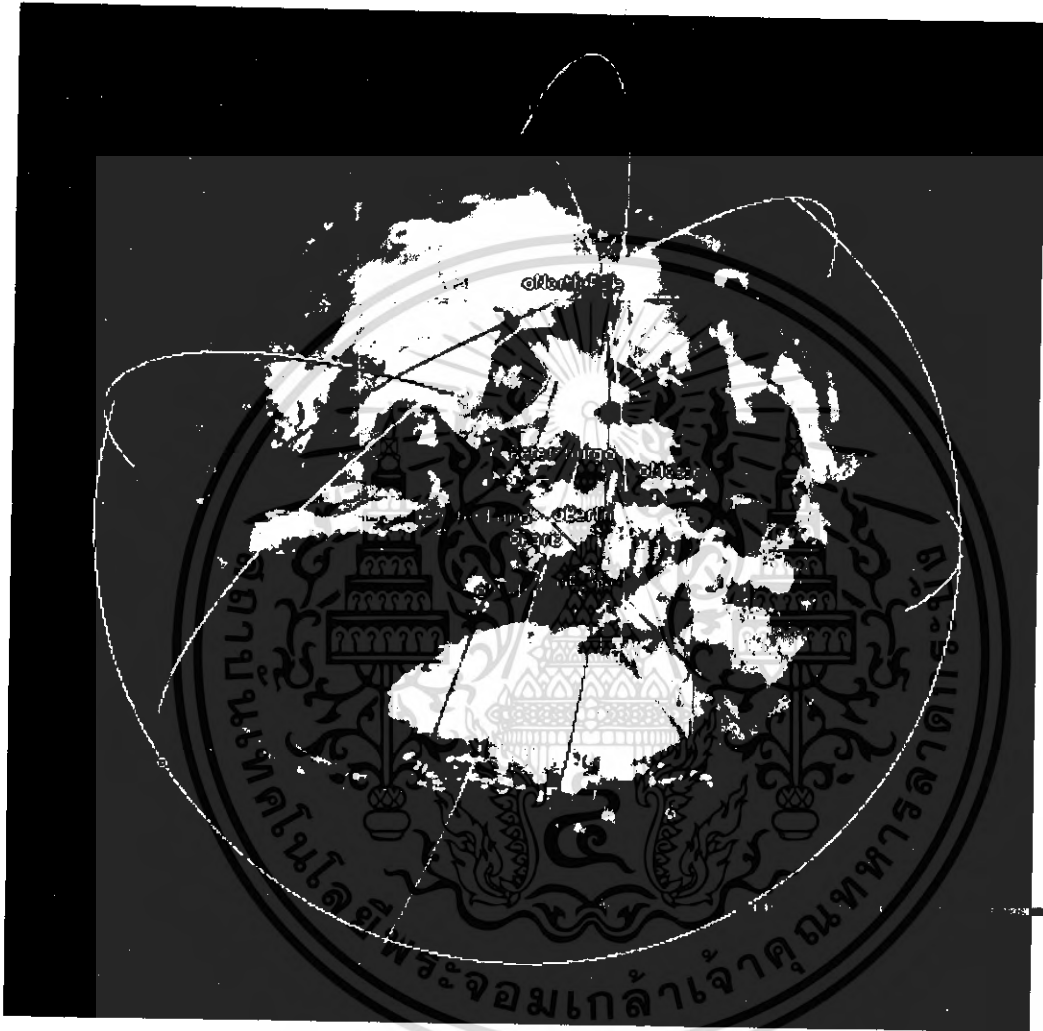
Uplink: 1268.7000 MHz AFSK 9600 BPS

Downlink 2401.2000 MHz AFSK 9600 BPS

Mode A/U Digital

Uplink: 28.1400 MHz PSK 31 BPS





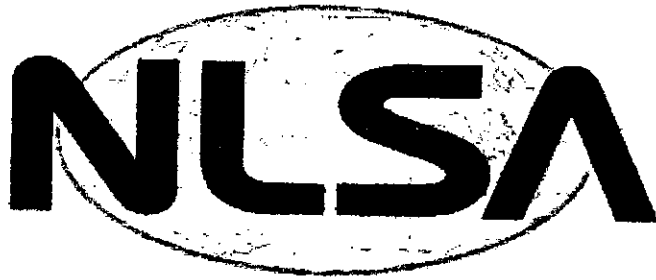
การโคจรของดาวเทียม AO- 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ
คู่มือการใช้งานโปรแกรม NOVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

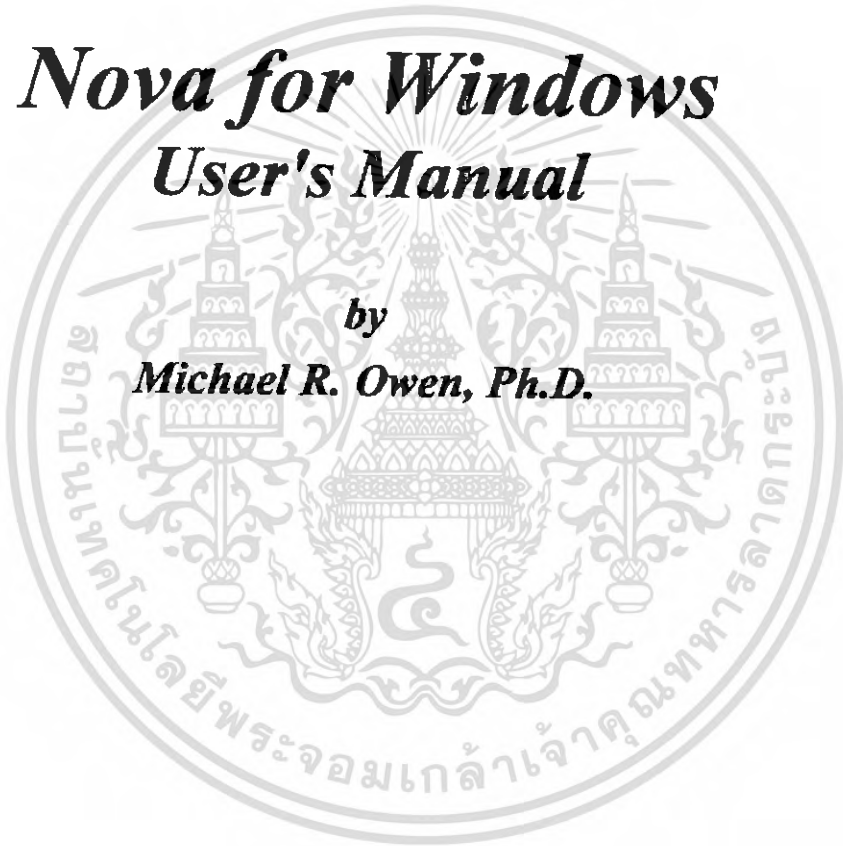


Northern Lights Software Associates

***Nova for Windows
User's Manual***

by

Michael R. Owen, Ph.D.



draft 10, 4-2-00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nova for Windows

User's Manual

Table of Contents

Introduction	1
• Features.....	1
• System requirements	1
• Installing Nova for Windows.....	1
Nova for Windows' Views	2
• Text.....	2
• Maps	2
• Rectangular	2
• View from Space.....	3
• Radar.....	4
• Sky Temperature.....	4
• Configuring Views	5
Setup	
• General	6
• Time	8
• Satellites	9
• Mode schedule	10
• Updating Keplerian elements	11
• Groups.....	14
• Satellite selector	14
• Observers	16
• Antenna rotator	17
• Interface	17
• General	18
• Calibration.....	19
• Advanced.....	20
• ToolBar	20
Views	
• Configure Current View	21
• View Style	23
• Map Configuration.....	23
• Rectangular Map	23
• Footprint elevation contours	24
• View from Space.....	25
• Radar Map	26
• Sky Noise	27
• Horizon Table.....	29
• Satellite Script Tracking.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Utilities	
• Listing	32
• Two-satellite mutual visibility	33
• Eclipses	34
• Moon graphs.....	36
• Quick visibility check.....	38
AutoTracking	39
• AutoTracking Status Box.....	40
• Additional AutoTracking Information	41
Nova's ToolBar	41
Sound Alarms	42
Star Display	42
Interesting Activities	43
Frequently Asked Questions	44
Getting Help	44

Nova for Windows Copyright

Entire contents copyright 1997, 1998, 1999, 2000 by Northern Lights Software Associates.

Nova for Windows and its accompanying programs and files are protected by copyright ©1997, 1998, 1999, 2000 Northern Lights Software Associates. No portion of these programs or files may be sold, given away, reproduced, or otherwise distributed without written permission from Northern Lights Software Associates. Licensees have the non-exclusive right to use these programs and files but you do not own them; title to the programs and files is retained by Northern Lights Software Associates.

Northern Lights Software Associates License Agreement

Nova for Windows (the SOFTWARE, including images and data included into or with the program) is owned by Northern Lights Software Associates (NLSA) and is protected by United States copyright laws and international treaty provisions. Therefore, you must treat the SOFTWARE like any other copyrighted material (e.g. a book or musical recording) except that you may either (a) make one copy of the SOFTWARE for backup or archival purposes, or (b) transfer the SOFTWARE to a single hard disk provided you keep the original solely for backup or archival purposes. Any other reproduction or distribution of this program without written permission from Northern Lights Software Associates is prohibited.

• Limited Warranty

Northern Lights Software Associates warrants that the SOFTWARE will perform substantially in accordance with authorized written claims for a period of thirty (30) days from the date of receipt. NLSA's entire liability and your exclusive remedy shall be, at NLSA's option, (a) return of the price paid, or (b) repair or replacement of the SOFTWARE.

• No Other Warranties

To the maximum extent permitted by applicable law, Northern Lights Software Associates disclaims all other warranties, either expressed or implied, but not limited to, implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose, with regard to the SOFTWARE.

• U.S. Government Restricted Rights

The SOFTWARE and documentation are provided with RESTRICTED RIGHTS. Use, duplication, or disclosure by the Government is subject to restrictions as set forth in subparagraph (c)(ii) of the Rights in Technical Data and Computer Software clause at DFARS 52.227-7013 or subparagraphs (c)(1) and (2) of the Commercial Computer Software-Restricted Rights at 48 CFR 52.227-19, as applicable. Manufacturer is Northern Lights Software Associates/P.O. Box 321/Canton, NY 13617.

If you acquired this product in the United States, this Agreement is governed by the State of New York.

© 1997, 1998, 1999, 2000 Northern Lights Software Associates

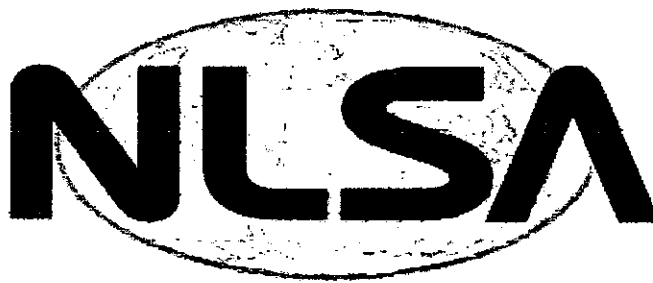
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Introduction

Nova for Windows is an innovative map-based satellite tracking system. It features over 150 realistic 256-color and 16-bit color maps, unlimited numbers of satellites, observers, and views, as well as real-time control of antennas through several popular hardware interfaces.

Features:

- Visually stunning maps, multiple sizes
- Unlimited numbers of satellites, observers, and views simultaneously
- Tracks all artificial satellites, Moon, Sun, planets, and celestial noise sources
- Fast, accurate, clear satellite positions
- Built-in AutoTracking support for all popular antenna control interfaces including Kansas City Tracker, SASI Sat Tracker, AEA ST-1, Orbit Electronic RIF-PC, Uni-Trac, and the M²RC-2800P
- Floating/docking toolbar for easy access to common functions
- Context-sensitive online help
- Multi-level configuration setup screens
- Text listings to screen, printer, or disk file
- Configurable Satellite Script for priority tracking
- Two-satellite mutual visibility, including 1- and 2-observer 2-satellite mutual windows
- Satellite eclipse predictions
- Full Moon data for EME
- 2,000-city, DXCC, and EME databases included
- Fully Year 2000 (Y2K) compliant



Northern Lights Software Associates

- Sound alarms for AOS & LOS
- Built-in FTP for download of Keplerian elements
- 1,600 stars and constellations included

In this manual, "Nova" and "NfW" refer to *Nova for Windows*.

System requirements:

- Pentium® or similar fast processor (a '386 or '486 will work, but slowly)
- Microsoft® Windows '95, '98 or Windows NT
- Video: 640x480, 256 colors required; 1024x768, 16-bit color preferred
- At least 12 MB hard disk drive storage for full installation

Installing Nova for Windows

- ◆ Insert the Nova for Windows CD into the CD-ROM drive of your computer.
- ◆ If the setup program doesn't start automatically, click on the *Start* button (lower left corner of the desktop).
- ◆ Click on *Run*.
- ◆ In the file name box, type **Setup.EXE**.
- ◆ Follow the directions in the Nova for Windows Setup.

Important:


- ◆ Be sure to enter the serial number carefully.
- ◆ Serial number *must* include the NLD- prefix.

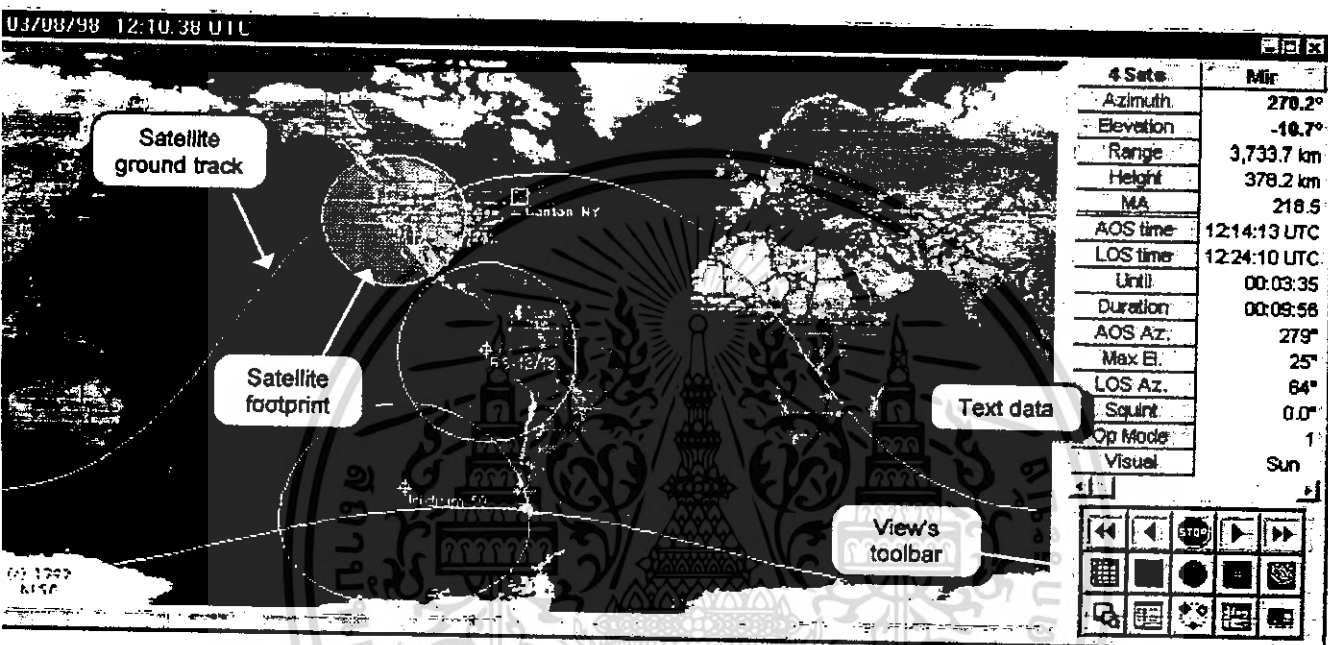
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nova for Windows' Views

Nova for Windows displays satellite tracking information in "Views." A View consists of a map, columnar text data, or both together. One or more Views may be visible simultaneously. Each View is completely independent of the others; different Views may contain different satellites, observers, and time/date. A View may include a map, text data, or both at once. NfW may have as many Views active as you desire.

In normal use, two or three Views is usually sufficient, but there is no practical limit to the number of Views that may be open simultaneously. Each View can track an unlimited number of satellites and observers.

Views are created by double-clicking anywhere on the NfW "desktop," by choosing **Views/Create new View** from the main menu, or by clicking on the  **New View** button on the ToolBar.



*Nova for Windows' Views may contain text, map, or both.
This View shows a Rectangular-style map and one column of text data.*

Text

The text portion of Views displays each satellite's current position as well as a summary of the next pass.

The layout of the text display is dependent on the number of observers currently active in the View. The text displays the greatest amount of information if one observer is specified. Two observers' data are summarized in a format similar to that of one observer but with fewer lines of data for each observer. If more than two observers are included in the View's list then each satellite's current position is listed for each observer.

Maps

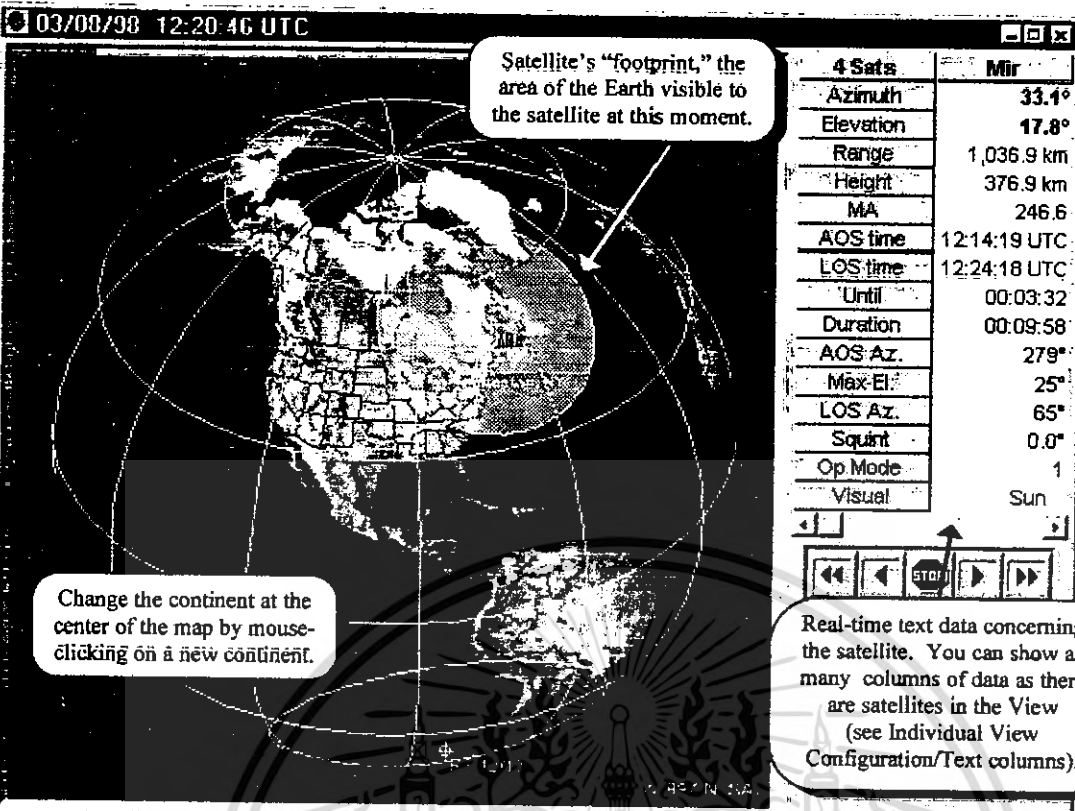
Nova for Windows contains four major map types with many user-modifiable attributes in each map:

- Rectangular (modified Miller projection)
- View from Space (Orthographic projection)
- Radar (upper hemisphere stereographic projection)
- Sky Noise (rectilinear RA/Dec projection)

The **Rectangular** map covers most of the Earth; only the poles are omitted. It is convenient for showing the positions of several satellites at once and for displaying satellite footprints for intercontinental communication. The rectangular map can be set to display any longitude at the center. Individual continents can be "zoomed in" for greater detail. On a 1024*768 pixel display, the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

03/08/98 12:20:46 UTC



4 Sats	Mir
Azimuth	33.1°
Elevation	17.8°
Range	1,036.9 km
Height	376.9 km
MA	246.6
AOS time	12:14:19 UTC
LOS time	12:24:18 UTC
Until	00:03:32
Duration	00:09:58
AOS Az.	279°
Max-El.	25°
LOS Az.	65°
Squint	0.0°
Op Mode	1
Visual	Sun


Real-time text data concerning the satellite. You can show as many columns of data as there are satellites in the View (see Individual View Configuration/Text columns).

The View from Space presents the Earth in a 3-dimensional perspective. You may configure the map to show ground tracks, orbits, and satellite footprints.

A single-continent rectangular map displays a resolution of about 10 km per pixel. Land and water are accurately shaded to illustrate elevation and depth, respectively.

The View from Space map shows a realistic perspective of the Earth from a position out in space. The land surface is rendered to show topography and the oceans are shaded to indicate water depth. The position is centered over one of the continents. You may change the center continent is one of two ways:

Left-mouse click directly on the map, on the continent that you want to turn to;

In the Map Configuration screen (from the  Configure Maps button on the ToolBar or the View's pop-up which is activated from the right mouse button).

In addition, you can easily change the "distance" from which the Earth is viewed by clicking the left mouse button out in space, away from the Earth's image.

Information about any satellite visible on the View from Space maps may be displayed by clicking the left mouse button on the satellite's image.

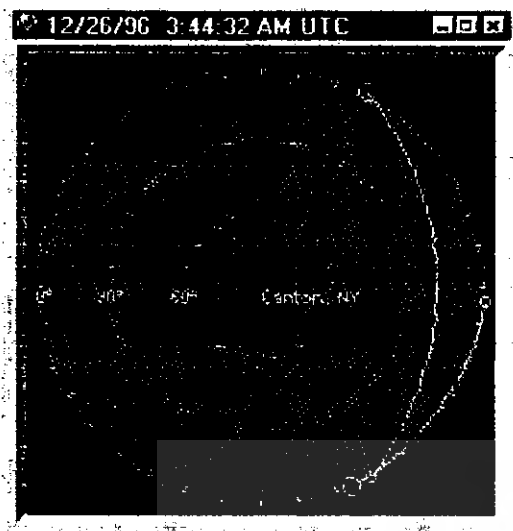
STS-83

Azimuth	: 224.0°
Elevation	: -20.8°
SSP Lat	: 5.5°N
SSP Lon	: 105.9°W
Range	: 5,260.4 km
Height	: 302.4 km
Next AOS	: 13:36:33 Loc
Next LOS	: 13:40:11 Loc
Until	: 03:19:19
Duration	: 00:03:37

Make AutoTracking Sat

Pop-up information about a satellite is available simply by clicking on its name.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

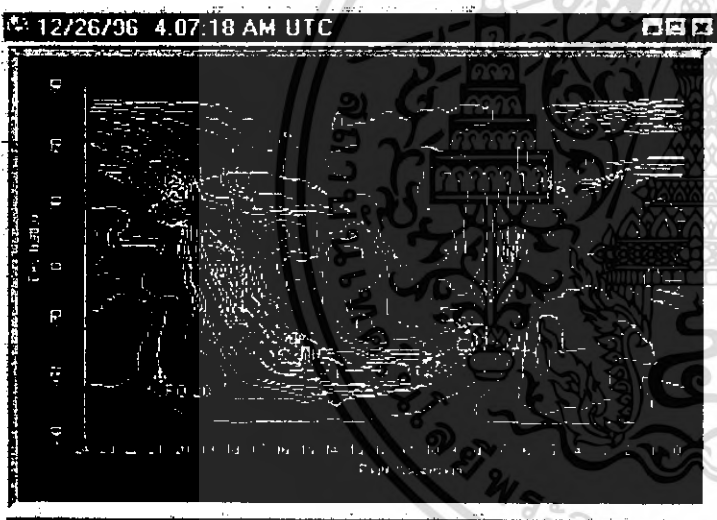


Nova's Radar map shows a full view of the Observer's sky. Overhead is in the center of the Radar map.

The **Radar Map** is a Northern Lights Software innovation. It displays a view of the sky with the observer at the center, similar to a radar station. North is at the top of the map, east to the right, etc., just like a compass. The outer perimeter of the Radar Map represents the observer's horizon and the center of the Radar Map is directly overhead. As a satellite becomes visible, it appears on the map's perimeter and passes inside the circle. The higher the satellite gets in the sky, the closer to the center of the map it appears.

Like all maps, the Radar Map is configured in the Map Configuration screen. Upcoming passes can be displayed as arcs across the map. The rise-point of a pass is shown as a larger circle and the set-point is a smaller circle; this permits you to easily visualize the direction that the pass will travel across the sky.

You have control over its appearance, display of upcoming passes, antenna position, as well as the size of the Radar Map itself.



The Sky Temperature map shows noise sources across the sky. It is especially useful for E.M.E. (moonbounce) because sky noise can obscure weak signals.

This information is useful in situations where desired signals from space are extremely weak. If the source of the signals (for example, an artificial satellite or moonbounce signal) is "in front of" noisy areas, then the signals are much more difficult to detect.

Nova for Windows includes Sky Temperature maps derived from IEEE measurements at three frequencies: 50, 137, and 400 MHz; these correspond well to the amateur 6-meter, 2-meter, and 70 cm bands.

The axes of the Sky Temperature map are familiar to astronomers but perhaps not to satellite users. The vertical axis is Declination, which is the angle between the item of interest and the celestial equator (the imaginary extension of the Earth's equator into space). The horizontal axis is in Right Ascension. This represents the angle measured in hours (1 hour =

15°) between the item of interest and 0° longitude at Greenwich, England.

The **Sky Temperature Map** portrays the sky's "equivalent noise temperature." Random noise, generated by the billions of stars in the universe, is more concentrated in some parts of the sky than others. The lines on the Sky Temperature map are contours (similar to contour lines on a topographic map) that show areas of higher and lower amounts of sky noise.

Configuring Views

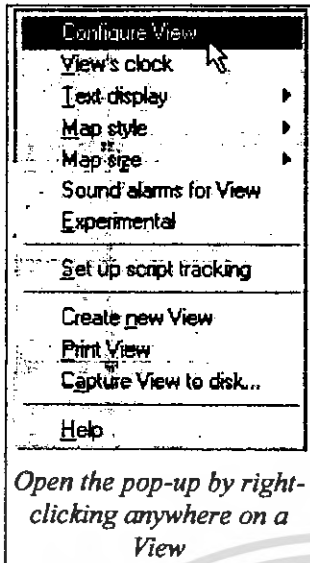
The appearance of Nova for Windows is determined by the Views that you have launched. Views are configured separately from one another. Changes made to one View do not affect others.

Initial configuration of Views may be challenging at first, but it quickly becomes easy once you are familiar with the View pop-up menu. To bring up the View pop-up menu and configure a View, position the mouse over the View and press the right mouse button.

For detailed configuration, such as choosing satellites and observers, select **Configure View** from the pop-up. This will display the *Individual View Configuration* screen. Page 19 explains the Individual View Configuration screen.

View's Clock sets the time for the View. This time can be the same as for the overall Nova for Windows program or it can be entirely different. By default, View time is the same as Nova's time. To set the View's time to a different value, click the **Stop** button and enter the desired values in the spin boxes. To set the View's time to Nova's time, click **Reset**.

Small steps and *Large Steps* indicate the time jumps when the time-stepping buttons on the View's toolbar are pushed.



Open the pop-up by right-clicking anywhere on a View

Text Display determines whether the View's text is normal (one column of text data for each satellite, placed to the right of the map), Script tracking (automatically changing as each satellite in the Script becomes visible), or no text at all.

Map Style set the kind of map that will be displayed in the View's map section. The map may be Rectangular, View from Space, Radar, Sky Temperature, or no map.

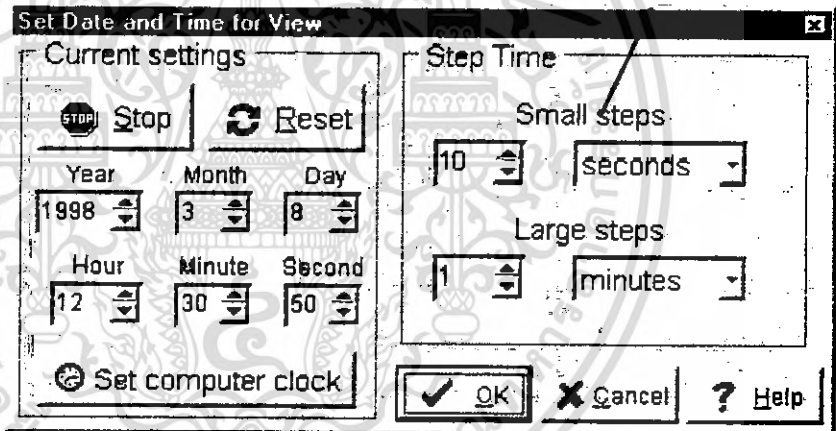
Map Size: Nova for Windows accommodates several screen resolutions. Views may be sized to fit the screen that you have. Small is appropriate for 640*480 pixel screens, medium for 800*600, and large for 1024*768.

Sound alarms for View are explained on page 40.

Experimental is explained on the following page.

Set up script tracking is described on page 27.

Nova for Windows' quick time-step buttons appear on each View. Their step size is set in the View's Clock screen



Each View's internal time can be set independently from that of other Views'

Note: The *Set Date and Time for View* screen (shown here) is *not* the place to set Nova's time or, typically, the computer clock. To set Nova's overall time, use *Setup/Time* from the Main Menu.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Experimental mode is a tool for examining the effects of changes in Keplerian elements on satellite orbits. Using the Experimental Mode, orbits can be adjusted in real time and the effect on an orbit can be seen immediately. For example, what would the orbit of the Russian "Mir" space station look like if its inclination was 10° higher and its eccentricity was 0.1?

Experimental Mode is entered via the View pop-up menu described on the previous page. The satellite used in this mode is the first satellite on the View's satellite list. Buttons at the bottom of the Experimental Mode screen allow you to retrieve different satellites or to save the results of changes made in this screen.

Experimental elements	
Satellite name	Feng Yun1-2
Catalog number	20788
Epoch time	97079.18868160
Element set	284
Inclination	98.8200
RA Asc Node	81.2144
Eccentricity	0.0015085
Arg. of perigee	85.3838
Mean anomaly	274.9477
Mean motion	14.01410822
Decay rate	0.00000109
Epoch orbit #	33475
<input type="button" value="Save"/> <input checked="" type="checkbox"/> Derived <input type="button" value="Restore"/>	
<input type="button" value="Close"/> <input type="button" value="Help"/>	

The **Derived** button enables examination of several values such as apogee and perigee altitude, period, etc. A more visual approach is to configure the parent View to display the View from Space with an orbit displayed. Then, as changes are made in Keplerian elements, the orbit's shape changes immediately.

The key to a satellite's identity is its *catalog number*. Changes made to the satellite's catalog will permanently change its identity and prevent Nova from updating its Keplerian elements from an external file.

Entries in the *Element set* and *epoch orbit #* fields have no effect on a satellite's orbit calculations.

Setup/General (picture on following page)

The **General** setup screen provides access to settings that concern all of the Nova program. These settings will affect the overall Nova screen display as well as performance. Settings are retained between sessions.

Tracking Algorithm The Plan-13 algorithm by James Miller is a simplified version of SGP4 which is very fast and sufficiently accurate for most applications. SGP4/SDP4 uses the two-part (near-Earth and deep-space) model presented in SpaceTrack Report #3 and coded from the original FORTRAN by Lt. Col. T.S. Wells, Ph.D. of the U.S. Air Force. SGP4/SDP4 employs general perturbation theory to provide highly accurate prediction of orbital positions. SGP4/SDP4 is more time-consuming and should be used only if high accuracy is needed. SGP4/SDP4 is also useful if Keplerian elements are old because it more accurately accounts for long-term effects of gravitational and drag forces.

Instance units: select between English, metric, or nautical units. These units will be used throughout Nova for Windows.

View style: "Free-floating views" may be placed anywhere on the Windows desktop. A thin Main Menu bar for NfW will remain, providing access to control functions. This option permits fast switching of focus between NfW and other programs but it may result in a cluttered screen. "Contained views" means that all Views are confined to the Nova screen, which may be minimized if desired. This option generally results in the most pleasing screen display if Nova is the only program being run.

Show hints in setups controls whether small pop-up hints appear when the mouse rests on a button or other control for more than two seconds. These hints are useful when you are first learning to use Nova but you may want to turn them off after you are familiar with the program.

Include refraction correction instructs Nova whether to correct satellite elevation angles for the effects of atmospheric refraction. This effect is always small, becoming entirely insignificant above about 5° elevation. There is a slight speed penalty for including refraction correction.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The image shows a screenshot of the 'Setup/General' dialog box for Nova. The dialog has several sections:

- Tracking algorithm:** Radio buttons for 'G3RUH Plan-13' (selected) and 'SGP4/SDP4'. Callouts explain that G3RUH is 'Fast and accurate, best for general-purpose tracking' and SGP4 is 'Somewhat slower but extremely accurate.'
- Distance units:** Radio buttons for 'kilometers' (selected), 'miles', 'nautical miles', and 'radar miles'. A callout states: 'This choice affects all distances displayed in Nova for Windows.'
- Color depth:** Radio buttons for '8-bit (256 color)' (selected) and '24-bit (millions)'. A callout notes: '8-bit (256 color) maps are quicker to load but their colors are not as diverse as 24-bit maps.'
- View style:** Radio buttons for 'Free-floating outside Nova form' and 'Contained inside Nova form' (selected). A callout asks: 'Should NfW32 minimize to the taskbar or to the system tray?' and another says: 'Select whether you want separate, independent Views or all Nova's Views contained inside the main Nova form.'
- Update interval:** A spin box set to '150 ms'. A callout asks: 'How often should Nova update satellite positions?' and another says: 'Check this box to correct positions for atmospheric refraction' (pointing to the 'Include refraction correction' checkbox).
- Optical visibility limit:** A spin box set to '-10 degrees'. A callout asks: 'How far below the horizon must the Sun be for the sky to be considered "dark?" (default=-10)'. Another callout says: 'This selects the density of the pattern that fills satellite footprints on maps' (pointing to the 'Footprint fill density' dropdown).
- Footprint fill density:** A dropdown menu set to '12%'. A callout says: 'This selects the density of the pattern that fills satellite footprints on maps'.

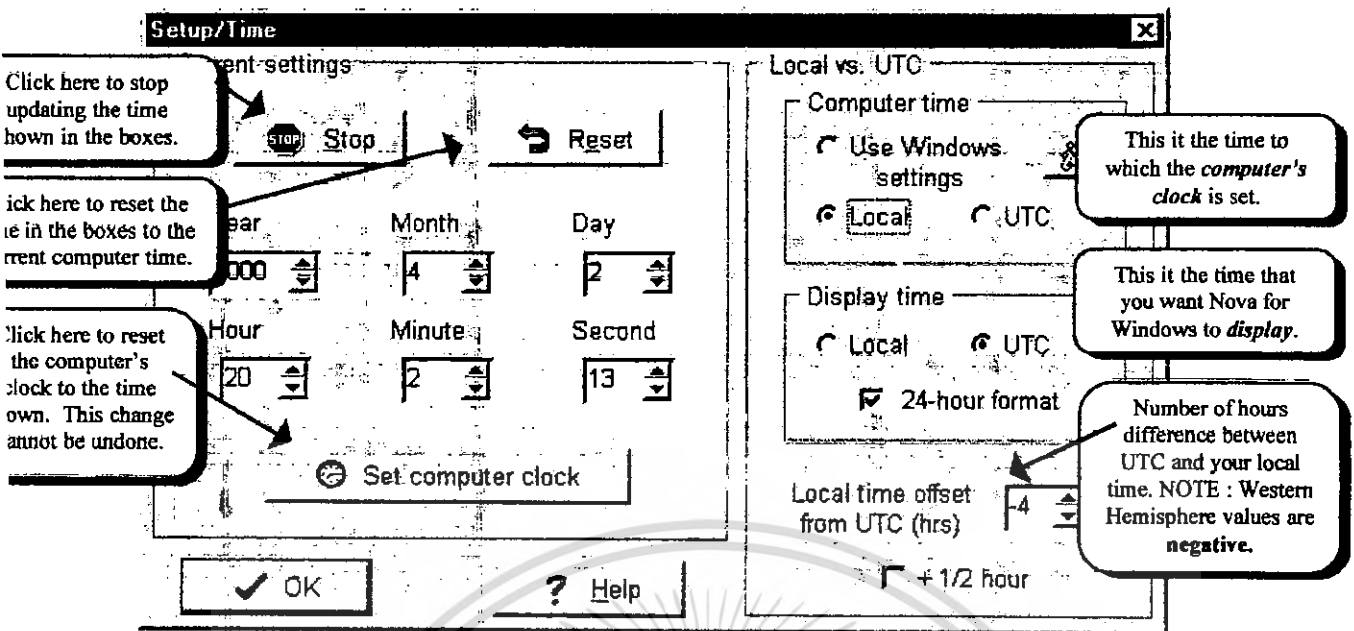
Buttons at the bottom include 'OK', 'Cancel', and 'Help'.

Use Setup/General for items that apply throughout Nova for Windows.

Update interval controls how often Nova updates its on-screen display. A small value results in faster updates but may consume more computer CPU time than desired. A value of 150, which results in 4-6 updates/second on a Pentium-120 MHz, is a reasonable compromise between speed and CPU loading. Use a larger number if other programs appear to run sluggishly.

Footprint fill density selects the density of the fill pattern used for satellite footprints. A high density is easier to see but it may obscure features on the map underneath. A value of 25% is usually good.

Optical visibility Limit determines how far below the observer's horizon the sun must be for conditions to be "dark." This adjustment is necessary because nightfall does not occur exactly at the moment of sunset. A larger value for this setting means that the sky will be darker before NfW consider it to be "night." This setting only affects calculations related to visual observation of satellites.



*Correct timekeeping is essential for accurate satellite predictions.
 Make sure that Nova for Windows is correctly configured for your system.*

Setup/Time

This selection provides access to your computer's date/time clock. Every computer has an internal clock that keeps track of the date and time. This clock is the basis for all of Nova's satellite predictions so it must be set accurately. It is wise to check the clock at least once a week to make sure that it remains accurate; some computer clocks drift many seconds per day.

The **Current Settings** display shows the current date and time as reported by the computer to the Windows operating system. To change the displayed values, first click on the Stop button to prevent continued updates. Then enter new values in the appropriate boxes. If you want to reset the computer's clock to the new values, press the Set Computer Clock button. To reset the

Current Settings display to the computer clock (after making changes but before setting the computer clock), click on the Reset button.

The **Local vs. UTC** box tells Nova how to interpret the time and date that it retrieves from Windows. Check the appropriate boxes to tell Nova whether your computer clock is set to local time or UTC, and whether you wish Nova's display to be in local time or UTC.

If "Local" is selected for either the computer clock or Nova's display, a "Local time offset from UTC" value must be entered in the lower box. This value represents the number of hours difference between your local time and UTC. If your local time is behind UTC, then the offset is negative.

Satellite Editor

Keplerian elements

Satellite name: MIR

Catalog number: 16609

Epoch time: 55.2350496400

Element set: 382

Inclination: 51.652

RA Asc. Node: 123.682

Eccentricity: 0.00044680

Arg. of perigee: 344.40110000

Mean anomaly: 15.68470000

Mean motion: 15.73737679

Decay rate: 0.00047916

Epoch orbit #: 80119

ALat: 0 ALon: 0

Buttons: Derived Add Sched Update Kep. elements Config. extra

303 available satellites. Last updated

- METEOR 3-5 ORBCOMM FM 12
- METEOR 3-6 ORBCOMM FM 13
- MINISAT 01 ORBCOMM FM 14
- MIR ORBCOMM FM 15
- MO-30 ORBCOMM FM 16
- NOAA 10 ORBCOMM FM 17
- NOAA 15 ORBCOMM FM 18
- NOAA 9 ORBCOMM FM 19
- OCS ORBCOMM FM 20
- OPAL ORBCOMM FM 21
- ORBCOMM A ORBCOMM FM 22
- ORBCOMM B ORBCOMM FM 23
- ORBCOMM C ORBCOMM FM 24
- ORBCOMM D ORBCOMM FM 2
- ORBCOMM E ORBCOMM FM 2
- ORBCOMM F ORBCOMM FM 2
- ORBCOMM FM 1 ORBCOMM FM 3

Callouts:

- Blue-checked satellites are currently above the main Observer's horizon.
- Click on a satellite name to select it. Then you may view or edit its Keplerian elements manually.
- Click here to update Keplerian elements
- Derived shows information derived from the currently-selected satellite's Keplerian elements.
- Click Add after manually entering a new satellite.
- Sched opens an editing window to enter/change the satellite's operating mode schedule
- Config Extra sets the Right Ascension and declination for the "Extra" satellite at the end of the list

Setup/Satellites is the place to update Keplerian Elements

Setup/Satellites

The **Setup/Satellites** display consists of two "pages," Keplerian Elements and Groups. These will be described separately although they share a common main Database.

The **Setup/Satellites/Keplerian Elements** page in Nova or Windows provides a means to update Keplerian elements smoothly and easily. The large list on the right of the screen contains all of the satellites in Nova's database. There is no practical limit to the size of this database but a large number of satellites requires longer time to load and process.

The **Keplerian Element** page contains edit boxes on the left side of the Setup/Satellites page. These boxes provide the option of manually changing individual Keplerian elements. Select the satellite whose elements are to be edited by clicking on the satellite's name in the main

database list. Be cautious when manually editing these values because some values may cause the satellite to "crash" or its calculations to make Nova unstable.

NOTE: Each satellite's Catalog Number is unique and is used to identify the satellite internally within Nova. If the Catalog Number is changed, the satellite will be treated as a new satellite and added to the Nova database.

A very small number of satellites are positioned by ground controllers so that the satellite's antenna points in a particular direction relative to the satellite's orbital plane. For these satellites, values of **ALat** and **ALon** describe the "attitude" (orientation) of the satellite's antennas. **ALat** and **ALon** are not provided in standard Keplerian Element sets so their values must be entered manually. Most satellites need no **ALat/ALon** entries.

The **Derived** button displays a pop-up box containing values calculated from the selected satellite's Keplerian Elements. **Period** is the time required for one orbit. **Apogee height** is the maximum altitude that the satellites achieves and **perigee height** is the minimum altitude.

The **Add** button should be pressed after entering new Keplerian elements in the edit boxes above it.

The **Sched** button presents a multi-page dialog box containing a database of the selected satellite's operating mode schedule. Most satellites remain in the same mode all the time so this function is not needed. However, some satellites such as phase 3D, change their modes of operation periodically. Different modes are

used at different points in the satellite orbit so they are specified in terms of MA or "phase" (a form of Mean anomaly that ranges from 0-255). Up to 12 different modes may be specified on separate pages in this dialog box. This information is used by Nova to determine the "Mode" value in the text display in each View. A graphical summary of the operating modes vs. MA is so provided in this dialog box.

to update the Keplerian elements in Nova's satellite database, Note: The Sun, Moon, planets, and celestial noise sources do not require Keplerian elements. They are included in the "Naturals" group and cannot be added or removed from Nova's database.

you wish to add one or two satellites from a NASA 2-line format file, you may use the **New** button.

The satellite mode schedule is used by only a small number of satellites

It will prompt you for the file name, read the file, and add the satellites to Nova's database.

The **Delete** button removes selected satellites from the database. If the database is later Updated from a file that contains the removed satellites, they will be added back to the database.

The **Timed** button opens a setup screen where

you may configure NfW's **timed update** function. When it is enabled, NfW reads a specified Keplerian Element disk file at a regular interval. If the file has been updated with new Keplerian elements, then NfW automatically updates its internal database without human intervention. This feature is useful if the host computer has an automatic means of acquiring Keplerian elements. For example, some systems receive Keplerian elements in e-mail; if those data can be placed in a disk file automatically, then NfW will update itself without assistance.

Who's Up? scans through the satellites in the main database and highlights all satellites that are currently above the AutoTracking Observer's horizon.

Config.extra presents a form in which the Right Ascension and Declination of a celestial object may be entered.

Note: The "extra sat" is not appropriate for tracking artificial satellites. The "extra sat." might be a comet or some other distant object that is not in Earth orbit.

Set up FTP download of Keplerian elements

Last download: 11/29/99 6:39:08 PM

FTP settings

Remote host: ftp.celestrak.com

Remote file(s): pub/elements/amate

User name: anonymous

Password: *****

Remote Port: 21

Reset

OK Cancel Download ?

Drag and Drop is an easy method of updating Keplerian elements if you have already acquired an ASCII text file containing new elements. With Nova for Windows running, simply drag the file from the Windows desktop or Windows Explorer onto the Nova screen. Nova will automatically recognize the file and attempt to update its internal database.

Select remote files

pub/elements/iridium.txt

pub/elements/orbcomm.txt

pub/elements/science.txt

pub/elements/geodetic.txt

pub/elements/engineering.txt

pub/elements/other.txt

pub/elements/intelsat.txt

pub/elements/molinya.txt

pub/elements/globalstar.txt

pub/elements/military.txt

pub/elements/dmsp.txt

pub/elements/goes.txt

Remote file name: pub/elements/amateur.txt

Add Replace Delete

OK Cancel Help

Remote Host is the FTP site which will supply files containing new Keplerian elements. We recommend ftp.celestrak.com because the files are up to date, accurate, and reasonably sized. Other sites are also available.

Nova for Windows can download multiple files from an FTP site and build a single local file from the separate FTP files. **Remote files** contains a list of the files that will be downloaded. These are the files whose names are checked in the **Select remote files** window (below). File names must contain the full directory path and complete file name for each file. Case is important for FTP.

Clicking on the **Select files** button opens another window where files may be selected for download. Elements that are checked will be downloaded. You can add, delete, and edit file names in this list.

To edit an entry, click on it and make changes in the **Remote file name** box. After making changes, click the **Replace** button.

User name, **Password**, and **Remote port** are usually not needed and can safely be ignored. A few sites may require you to enter your e-mail address and a password, but this is almost never required.

Setup/Satellites method

This screen is presented when you press the **Update Keplerian elements** button from the Setup/ Satellites or Setup/Groups screen.

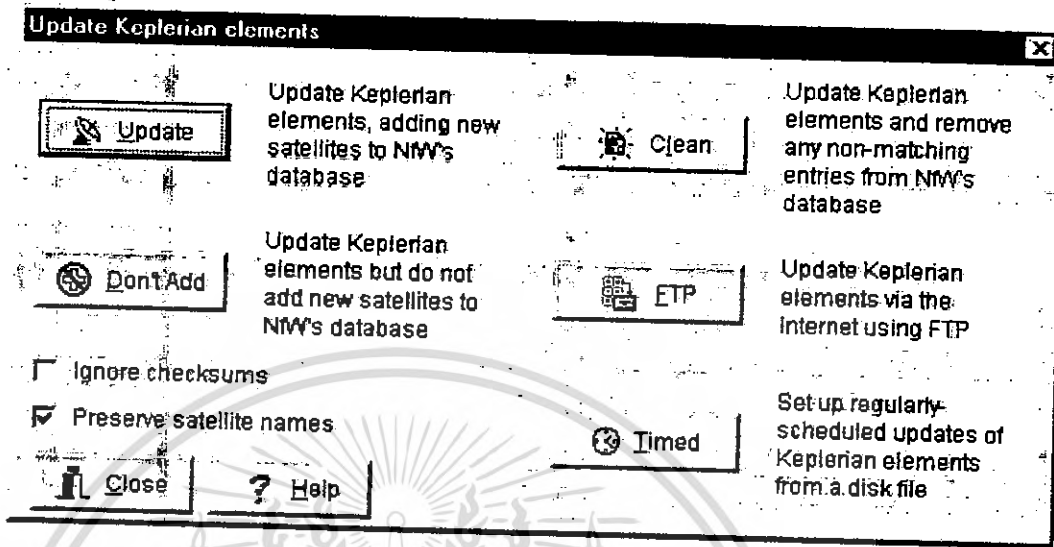
Don't Add If the new database contains data for satellites that are not already in your NfW database, the new satellites are NOT added automatically. No satellites are removed from, or added to, your existing NfW database.

Update If the new database contains data for satellites that are not already in your NfW database, the new satellites are added automatically.

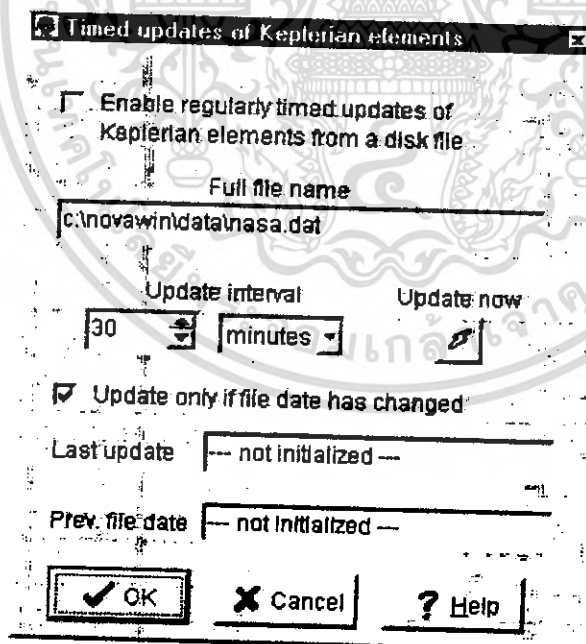
A pop-up dialog box will prompt you for the name of the computer file containing new elements. This file may be in either the "NASA" or "AMSAT" format. Nova will read the file and

automatically determine its format. Header text, which often accompanies files downloaded from the Internet, is ignored. Nova reads the new file and updates the Keplerian elements for all satellites in its database that match entries in the new file. For example, if Nova contains entries for satellites A, B, and C but the new file only contains elements for A and B, then C's elements will remain unchanged.

On the other hand, if the new file contains elements for additional satellites, then they are automatically added to Nova's database. In the preceding example, the new Keplerian element data file contained entries for A, B, and D, then D would be added automatically. This may be useful if you have access to a variety of elements in small files but may lead to an accumulation of unneeded satellites after some time



Clean The Clean button acts the Update button except that any satellites in your existing database that are absent from the new database will be removed. In other words, after a Clean operation, there should be a one-to-one relationship between the main NfW Database and the satellites in the new Keplerian Element file.



FTP The FTP button opens another window where you can configure and begin down-loading of new Keplerian elements via the Internet. This function uses "FTP" protocol. You must have an internet connection for this function to operate.

Timed The Timed Update function automatically reads a specified text file at a regular interval and attempts to update Nova for Windows' Keplerian element database. This function is useful if you have new Keplerian elements

Automatic updates of Keplerian elements from a disk file are configured with this screen

delivered automatically and if they are copied into the same file name each time.

Ignore checksums means that Keplerian elements will be accepted even if the checksum digit is incorrect. Checksums are used to indicate errors in data sets, so use this option with caution.

Checking **Preserve satellite names** will tell Nova for Windows to keep any existing satellite names even if the new Keplerian element file contains different names. For example, if you like the name "Oscar 10" but the new Keplerian element file calls it "AO-10," then checking this box will let the name remain as "Oscar 10."

Setup/Groups

Groups are collections of satellites that have something in common. You create and edit your groups in Setup/Groups

Nova's *Groups* are user-defined associations of satellites. They are provided as a convenience for accessing similar satellites together. For example, all weather-related or amateur-related satellites might be placed in a Group. You may have as many Groups as desired and each group may contain an unlimited number of satellites. For the sake of practicality, however, we recommend that groups contain fewer than 25 or 30 satellites.

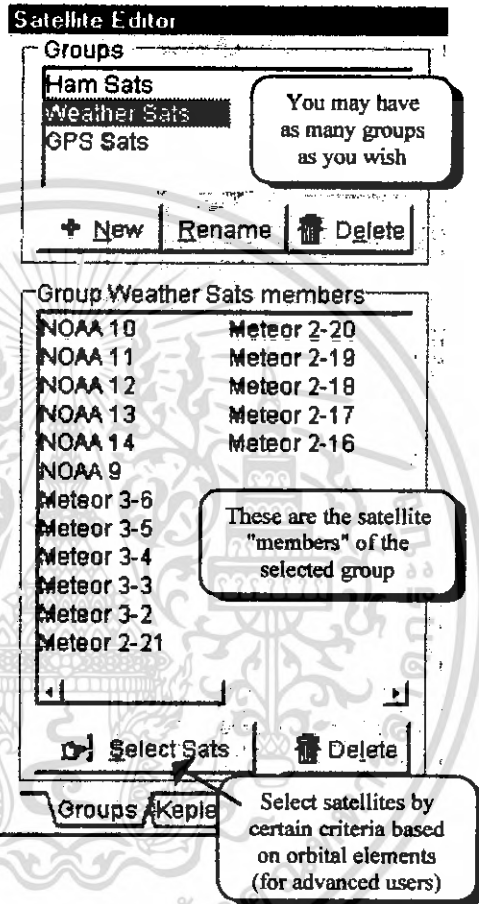
This page shares its Main Database with the Keplerian elements page.

The Groups page of Setup/Satellites creates and edits groups. Groups are collections of satellites that are defined by the user. They have no direct connection with any View but are merely a convenient way to "grab" similar satellites at one time. Clicking on a name in the Groups box will display the members of the Group in the box below.

Groups are created with the **Add** button. The group is named and at first it contains no satellites. Select the satellites of interest with the mouse and drag them to the Group members box. Entries in the Group members box may be deleted or rearranged with the mouse as well.

To delete satellites from a Group, select the satellite name with the mouse and then click the **Delete** button. You may rearrange the members of a Group by dragging their names with the mouse.

The **Select Sats** button opens the **Satellite Selector** shown on the following page. This feature permits advanced users to sort through Nova's entire satellites database and extract satellites meeting certain criteria. For



example, a particular application may require selection of all satellites with, say, certain eccentricity or mean motion. Use the tabs across the bottom of the page to choose which rule to modify (Eccentricity, Inclination, Period...). For each rule, select whether you want

Any value to be all right or if the value must fall **Between**, **More than**, or **Less than** the limits that you set in the edit boxes.

To effectively ignore the value of any quantity, select **ANY** as the rule. For example, choosing **ANY Inclination** means that **ANY** is ignored in selection when inclination is evaluated.

Finally, in the **Relations** box, select whether you want all the rules to be met simultaneously (**AND**) or whether meeting any rule (**OR**) will be satisfactory. For example, saying "Eccentricity Greater than 0.01 **AND** Inclination Greater than 50°" means that a satellite must

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

meet both criteria, whereas OR means that if it meets either the Eccentricity OR the Inclination criterion, the pass will be selected.

Note: If **OR** is used as the Relations operator, then setting any rule to **ANY** will mean that all satellites in the list will qualify for selection

It may require some experimentation to learn to use the Satellite Selection facility. After you have become familiar with it, you may want to use it to select satellites for a Group. Pressing the **New Group** button will cause the selected satellites to become a new group, just as if you had dragged each satellite from the master database list manually.

The screenshot shows the 'Satellite Selector' window with the following components and annotations:

- Summary Panel:** Lists orbital parameters and their selected values:
 - Eccentricity: between 0.010000 and 0.040000
 - Inclination: Any
 - Period: Any
 - Next AOS: Any
 - Duration: between 5.0 and 15.0 min.
 - Apogee: Any
 - Perigee: Any
- Satellite List:** Shows 5 satellites: FO-29, MACSAT 2, OFEQ 3, SAMPEX, and Starlette.
- Rules Section:**
 - Duration:** Set to 'Between' with 'More than...' at 5.0 and 'Less than...' at 15.0 minutes.
 - Relations:** Set to 'AND'.
- Buttons:** 'Select sats', 'OK', 'Cancel', 'New Group', and 'Help'.

Annotations include:

- 'Summary of selection rules' pointing to the Summary panel.
- 'These satellites fit the rules' pointing to the satellite list.
- 'Choose between AND & OR for relations between limits' pointing to the Relations dropdown.
- 'Set selection rules and limits' pointing to the Rules section.
- 'Select which rule to modify' pointing to the 'Eccentricity' tab.
- 'Create a new Group from the satellites selected here' pointing to the 'New Group' button.
- 'Start the selection based on current rules & limits.' pointing to the 'Select sats' button.

Nova's Satellite Selector is used to build groups based on their orbital characteristics.

Cities

Observers list:

- Albany, GA
- Amarillo, TX
- Birmingham, England
- Canton, NY
- Cincinnati, OH
- Dayton, OH
- Lima, OH
- London, England
- Montreal, PQ
- Rochester, NY
- Salt Lake City, UT
- San Francisco, CA
- Syracuse, NY
- Toronto, ON

Main Database:

- Aberdeen, ID
- Acapulco, Mexico
- Accra, Ghana
- Ada, MN
- Adak, AK
- Adams, MA
- Adelaide, Australia
- Afton, OK
- Afton, WV
- Ahwahnee, CA
- Alamogordo, NM
- Albany, GA
- Albany, NY
- Albany, OR
- Albion, ID
- Albuquerque, NM
- Alcoa, TN
- Almston, England
- Alert, NWT
- Alexander City, AL
- Alexandria, LA
- Alexandria, VA
- Algiers, Algeria
- Alhambra, CA
- Allen AAF, AK
- Allentown, PA
- Alliance, NE
- Alpharetta, GA
- Altoona, PA
- Amarillo, TX
- Ambler, AK
- Amchitka, AK

Edit Location:

Location	Temporary	Elevation	Location
Latitude deg.	45	Longitude deg.	75
Latitude min.	0	Longitude min.	0
Latitude sec.	0.00	Longitude sec.	0.00
North or South	North	East or West	West

Location: Albany, GA
Latitude: 31.58° North
Longitude: 84.16° West

Buttons: OK, Cancel, ? Help

Buttons: Add to Observers List, Make AutoTracking Obs.

Callout 1: Build your personalized "short list" of Observers by dragging locations from the Main Database of 2,000 cities to the Observers List

Callout 2: Edit the latitude & longitude of locations by dragging them to the Edit Location box. After making changes, click on Add to Observers List to save.

Callout 3: To add an unlisted Observer, enter data in the Edit Location box, then click on Add to Observers List to save the new location

Callout 4: If you want to make the new Observer become the autoTracking Observer, click on Make AutoTracking Obs.

Use *Setup/Observers* to build your personalized "short list" of observer locations. Each View's observers are set in the Individual View Configuration Screen by selecting from the "short list."

Setup/Observers

The Setup/Observers screen presents Nova's database of observer locations. Nova's observer database is maintained in two parts: the *Main Database* which contains thousands of cities, hundreds of countries, and hundreds of moonbounce entries, and a short *Observers List* of observers that are user-selected. The short list is shown on the left of the Setup/Observers screen. The *Observers List* is used in configuring Views instead of presenting the entire Master Database.

Customize the Observers List to suit your needs. Observers may be taken from any of the four Main Databases or you may manually enter latitude/longitude data in the edit space in the lower left of the screen. Add or delete Observers to/from the Observers list by

drag-and-drop. Search for locations in the Main database by using the Find First and Find Next speed buttons (with the flashlight icons).

To enter new locations, mouse-click on individual lines in the editing region (lower left) and enter the appropriate values. When the entry is complete, press the **Add to Observer List** button to place the new location in the Observers Box. If you wish to make the newly-entered Observer become the Observer used for AutoTracking calculations, press the **Make AutoTracking Observer** button. It is essential that the AutoTracking Observer accurately reflects your exact position. Make sure that your location is entered carefully and then transferred to the AutoTracking Observer.

The screenshot shows the 'Setup/Antenna Rotator' dialog box. It has several sections:

- Rotator Interface:** A list of interfaces including 'SASI Sat Tracker', 'No interface>', 'Kansas City Tracker', 'SASI Sat Tracker', 'AEA ST-1', 'Orbit Elect. RIF-PC', 'M2 RC2800P', 'TrakBox / RAC805', 'EasyComm I', 'FODTrack', 'NovaComm 1', and 'DDE only'. A 'Serial port' dropdown is set to '2' with '(1-8)' in parentheses.
- Azimuth rotator:** Two radio buttons for 'Range 180-0-180°' and 'Range 0-360°'. The 'Range 0-360°' is selected. Below are 'Maximum' (360) and 'Minimum' (0) spinners.
- Elevation rotator:** Two radio buttons for 'Range 0° - 90°' and 'Range 0° - 180°'. The 'Range 0° - 180°' is selected. Below are 'Maximum' (180) and 'Minimum' (0) spinners.
- Buttons:** 'OK', 'Cancel', and 'Help' buttons at the bottom.

 Callouts provide the following explanations:

- 'Select *No interface* if you have not installed one.' (points to 'No interface>')
- 'Select the type of interface that you have installed.' (points to 'SASI Sat Tracker')
- 'This means that the antenna goes from South, through North, to South (Yaesu G-5400).' (points to 'Range 180-0-180°')
- 'This means that the antenna goes from North through South, to North (Emoto).' (points to 'Range 0-360°')
- 'Select the elevation range that your antenna rotator can cover. Selecting 0-180° enables flip mode' (points to 'Range 0° - 180°')
- 'Enter the highest and lowest elevation permitted by your antennas.' (points to the elevation maximum and minimum spinners)

Accurate and reliable AutoTracking depends on proper setup and calibration in the Setup/Antenna rotator screen.

Setup/Antenna rotator

Nova for Windows is capable of working with a hardware interface to control azimuth-elevation antennas rotators. Currently, Nova contains drivers for several interfaces. The SASI Sat Tracker and ST-1 communicate with the computer via a parallel ("printer") port whereas the Kansas City Tracker is an internal card. The RIF-PC is an internal card with 10-bit precision.

The Setup/Antenna rotator contains four pages. The Interface page tells NfW what sort of hardware interface you have, if any. For the SASI Sat Tracker, AEA ST-1, and RIF-PC, you should also select the appropriate port number (1-4). If your computer has the parallel port at a non-standard base address, enter it in the Base Address box.

The Azimuth rotator box contains selections of north-breaking or south-breaking antennas. "0-360" means that the azimuth antenna travels from 0-360 degrees; the antenna points north at either end of the rotator's travel. "180-0-180" means that the antenna travels from south, through north, to south; north is halfway through the antenna's travel. Emoto and several other brands of rotators are north-breaking whereas the Yaesu G-5400/5600 series antenna rotators are south-breaking.

Important

As supplied from their manufacturers, some interfaces are accompanied by "TSR" software to establish communication between a DOS computer program and the interface. *Nova for Windows does not need, and will not use, these software "drivers."* Instead, NfW communicates directly to the interface and does not use the TSRs at all. Therefore you should ignore the TSR software drivers that are supplied with the interfaces. Do not install them and do not use them. If TSR drivers are already installed on your system (perhaps inherited from a previous tracking program), they should be removed because they might conflict with NfW's communication with the antenna controller interface.

In the Elevation Rotator box, select whether the elevation rotator and the antenna which it controls are capable of elevation angles greater than 90°. If the antennas can elevate to 180°, Nova will automatically use "flip-mode" during passes that require it.



ภาคผนวก จ
คู่มือการใช้งานสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่มือการใช้งาน
 สายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม



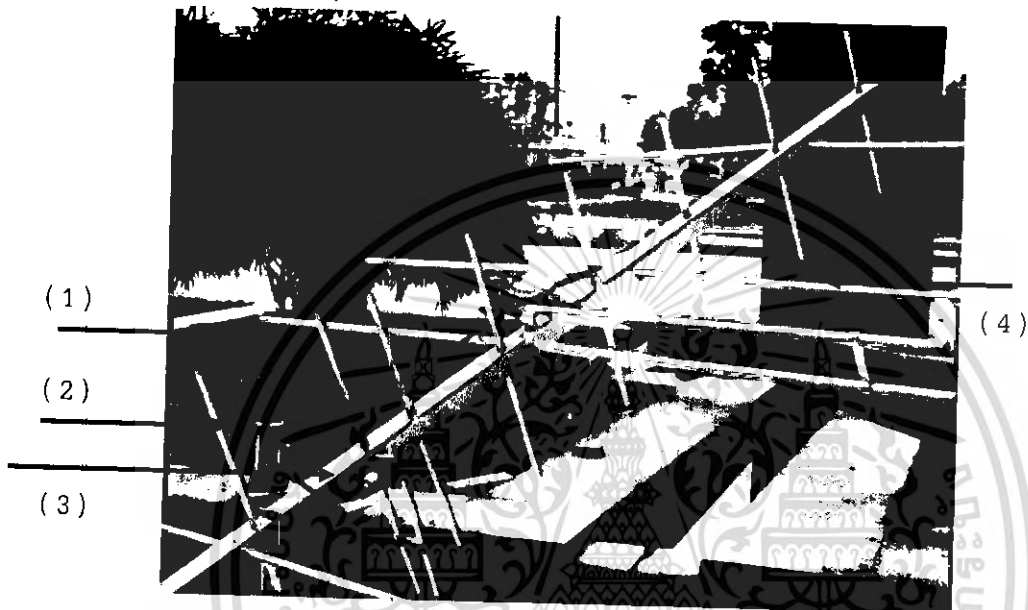
ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม
 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. คำแนะนำเบื้องต้น

สายอากาศยาก็ที่ทางคณะผู้จัดทำโครงการสร้างขึ้นเป็นสายอากาศชนิดทิศทางที่ใช้สำหรับการติดต่อระหว่างวิทยุสมัครเล่นกับดาวเทียม เพื่อเพิ่มระยะทางในการสื่อสารระหว่างประเทศของนักวิทยุสมัครเล่น การที่จะรับสัญญาณได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับความแรงของสัญญาณที่ส่งมายังสายอากาศ การโคจรของดาวเทียมในขณะทดลอง

2. ส่วนประกอบและปุ่มควบคุม



รูปที่ ๑.1 ส่วนประกอบต่างๆของสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม



รูปที่ ๑.2 อุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการเชื่อมต่อกับสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ จ.1 และ จ.2 มีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

- (1) สายอากาศยาก็ภาครับสัญญาณย่าน ยูเอชเอฟ
- (2) ฐานสำหรับปรับทิศทาง
- (3) ขั้วต่อแบบ BNC
- (4) สายอากาศยาก็ภาคส่งสัญญาณย่าน วีเอชเอฟ
- (5) สาย RG-8
- (6) เครื่องเล่นวิทยุย่าน ยูเอชเอฟ
- (7) POWER SUPPLY
- (8) เครื่องเล่นวิทยุย่าน วีเอชเอฟ

3. การติดตั้งและการใช้งานสายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม

1. ทำการเตรียมอุปกรณ์ให้พร้อม
2. นำสายสัญญาณไปต่อกับสายอากาศยาก็ทั้งย่าน วีเอชเอฟ และ ยูเอชเอฟ และนำส่วนปลายของสายสัญญาณไปต่อกับเครื่องวิทยุสื่อสาร
3. ทำการตั้งความถี่ที่เครื่องวิทยุสื่อสารย่าน วีเอชเอฟ ที่ความถี่ 145.92 MHz และเครื่องวิทยุสื่อสารย่าน ยูเอชเอฟ ความถี่ 435.30 MHz
4. ทำการติดต่อด้วยวิทยุสื่อสารแบบไม่เจาะจงสถานี
5. เมื่อวิทยุสื่อสารสามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมได้แล้ว ก็สามารถติดต่อสื่อสารกันได้

4. การแก้ไขปัญหาเบื้องต้น

เมื่อท่านประสบปัญหาการใช้สายอากาศวิทยุสมัครเล่นสำหรับการสื่อสารดาวเทียม สามารถตรวจสอบแนวทางแก้ไขปัญหาเบื้องต้นได้จากตารางต่อไปนี้

ตารางที่ จ.1 แก้ไขปัญหาเบื้องต้น

อาการ	สาเหตุและ/หรือวิธีแก้ไข
การรับสัญญาณไม่ดี	1. ดาวเทียมไม่ได้โคจรอยู่ในตำแหน่งที่ติดต่อได้ 2. อาจอยู่ในจุดอับสัญญาณการแก้ไขควรย้ายไปหาตำแหน่งในการรับสัญญาณใหม่
รับสัญญาณไม่ได้	เนื่องจากสภาพภูมิอากาศไม่ปลอดโปร่ง ควรทำการทดลองในวันอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การดูแลรักษาและข้อควรระวัง

5.1 การดูแลรักษา

1. บริเวณขั้วต่อ ควรใช้เทปพันเพื่อป้องกันน้ำเข้าสาย
2. ตรวจสอบขั้วต่อสายนำสัญญาณ และสายสัญญาณให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งานเสมอ
3. ควรมีการตรวจสอบบำรุงสายอากาศบริเวณแกมมาแมตที่ให้อยู่ในสภาพเดิมเพื่อให้ใช้งานตัวสายอากาศเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 ข้อควรระวัง

1. ควรศึกษาคู่มือการใช้งานของสายอากาศยาก่อนการใช้งานจริง
2. การเคลื่อนย้ายควรระมัดระวังอย่าให้มีการกระแทกเพื่อป้องกันความเสียหายกับสายอากาศ
3. ไม่ควรให้สายอากาศยากเปียกน้ำ
4. ควรใช้สายอากาศยากในการติดต่อสื่อสารอย่างระมัดระวังที่สุด

6. ข้อมูลจำเพาะ

ตารางที่ จ.2 ข้อมูลจำเพาะ

คุณสมบัติ	รายละเอียด
อัตราการส่งข้อมูล	ขึ้นอยู่กับระยะทาง ตำแหน่ง และความแรงของสัญญาณที่ถูกส่งกลับมา
สายนำสัญญาณ	สาย RG-8 50 โอห์ม
การเชื่อมต่อกับเครื่องวิทยุสื่อสาร	ย่าน วีเอชเอฟ 1 เครื่อง ย่าน ยูเอชเอฟ 1 เครื่อง
แหล่งจ่ายพลังงาน	ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์
โปรแกรมค้นหาดาวเทียม (NOVA)	สามารถค้นหาดาวเทียมและตำแหน่งพิกัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อ-สกุล	นายธนวิทย์ พุทธิพฤษ์
วัน เดือน ปีเกิด	14 มกราคม 2527
ภูมิลำเนา	274 หมู่ 3 ตำบลกำแพงเขา อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280 โทรศัพท์ 089-5947901
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนบ้านหวดทอง จังหวัดนครศรีธรรมราช
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนศรีธรรมราชศึกษา จังหวัดนครศรีธรรมราช
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยเทคนิคนครศรีธรรมราช
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเทคนิคนครศรีธรรมราช
ปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล.
ผลงานที่ได้รับ	-
คติพจน์	ชนะความชั่วด้วยความดี ชนะความตระหนี่ด้วยการให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อ-สกุล	นายมิ่ง ปานสวัสดิ์
วัน เดือน ปีเกิด	26 พฤษภาคม 2527
ภูมิลำเนา	249/812 หมู่ที่ 2 ตำบลชลศกดิ์ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 10520 โทรศัพท์ 085-9913729
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนอักษรเทคโนโลยีวิทยา
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนโพธิสัมพันธ์พิทยาคาร
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยอักษรเทคโนโลยีวิทยา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยอักษรเทคโนโลยีวิทยา
ปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล. คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล.
ผลงานที่ได้รับ	ใบประกาศนียบัตรเหรียญทองวิทยุภาครับ เอเอ็ม
คติพจน์	บินไปไกลยังโลกกว้าง มองอย่างกว้างไกลแล้วไม่ให้อึด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อ-สกุล	นายสุกฤกษ์ ปิ่นเกตุ
วัน เดือน ปีเกิด	9 กันยายน 2525
ภูมิลำเนา	14-3-10-7 ซอยนวมินทร์ 74 แขวงคันทนายาว เขตคันทนายาว จังหวัด กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 089-6096496
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนอัสสัมชัญศรีราชา
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนบดินทร์เดชา (สิงห์ สิงหเสนี)
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	โรงเรียนช่างฝีมือทหาร
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	โรงเรียนช่างฝีมือทหาร
ปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผลงานที่ได้รับ	โครงการอุปการณช่วยเหลือสังคมดีเด่น
คติพจน์	สู้ สู้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้