

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



สายอากาศไดโพลแบบเลื่อนรับสัญญาณโทรทัศน์ย่านความถี่เอชเอฟ  
SWITCHED DIPOLE ANTENNA  
FOR BROADCASTING TV RECEPTION IN UHF BAND



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 61435  
วัน,เดือน,ปี..17 ก.ค. 2549

b.....  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศไดโพลแบบเล็กรับสัญญาณโทรทัศน์ย่านความถี่ยูเอชเอฟ

SWITCHED DIPOLE ANTENNA

FOR BROADCASTING TV RECEPTION IN UHF BAND



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

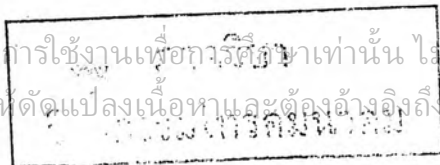
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

HW

นางสาว...  
[Signature]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ปริญญาโทปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

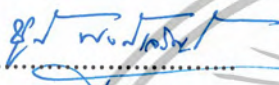
เรื่อง สายอากาศไดโพลแบบเลือกรับสัญญาณโทรทัศน์ย่านความถี่ยูเอชเอฟ

**Switched Dipole Antenna for Broadcasting TV Reception in UHF Band**

ผู้จัดทำ

1. นาย สุรศักดิ์ เปรมชัยปราการ 44010560

2. นาย สุรสิทธิ์ สีแดงเดช 44010561

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.ชวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศ.ดร.โรมไนย์ ไกรฤกษ์)



สายอากาศไดโพลแบบเลือกรับสัญญาณโทรทัศน์ย่านความถี่ยูเอชเอฟ  
Switched Dipole Antenna for Broadcasting TV Reception in UHF Band

โดย นายสุรศักดิ์ เปรมชัยปราการ 44010560

นายสุรสิทธิ์ สีแดงเดช 44010561

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์  
ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาออกแบบสายอากาศชนิดไดโพลแบบเลือกรับสัญญาณโทรทัศน์ที่ความถี่ 537.5 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยสายอากาศในโครงการนี้จะออกแบบสำหรับประยุกต์ใช้ติดตั้งบนหลังคารถยนต์ เพราะฉะนั้นในการวิเคราะห์สายอากาศจะพิจารณาการวางตำแหน่งของสายอากาศให้อยู่เหนือแผ่นระนาบตัวนำเพื่อให้มีสภาพใกล้เคียงกับการประยุกต์ใช้งานจริง โดยสายอากาศที่ออกแบบจะเลือกเป็นชนิดไดโพลแบบไขว้ สำหรับการวิเคราะห์จะทำการคำนวณหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง และการโพลาไรซ์ และจะมีระบบเปรียบเทียบสัญญาณจากสายอากาศเพื่อเลือกสัญญาณที่ดีที่สุดมาใช้งาน

ABSTRACT

This project describes the design of the switched dipole antenna for the broadcasting television reception at the operation frequency of 537.5 MHz. This antenna will be designed to install on the rooftop of the car. Therefore, the antenna investigation will be done in the presence of the ground plane.

The cross-dipole antenna will be selected for this application. The antenna properties such as the radiation pattern, directivity and polarization are clarified. The received signal will be compared and chosen to achieve the strongest signal for the practical use.

## สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ	3
2.1.1 แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่น	3
2.1.1.1 แพทเทิร์นหลัก	4
2.1.1.2 โลบของแพทเทิร์นการแพร่กระจาย	4
2.1.2 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์	6
2.1.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น	6
2.1.4 ไครคริตวิตี	6
2.1.5 ค่าทวิกำลัง	7
2.1.6 ประสิทธิภาพของสายอากาศ	9
2.1.7 อินพุทอิมพีแดนซ์	10
2.1.8 แบนด์วิดท์	15
2.2 คุณลักษณะของสายอากาศไดโพล	15
2.2.1 การแจกแจงรูปกระแสของสายอากาศไดโพล	15
2.2.2 ไดโพลจิว	17
2.2.3 ไดโพลขนาดเล็ก	18
2.2.4 ไดโพลที่มีความยาวจำกัด	19
2.2.5 สนามที่แพร่กระจายจากสายอากาศไดโพล	19
2.2.6 สนามที่แพร่กระจายจากไดโพลจิว	20
2.2.7 สนามที่แพร่กระจายจากไดโพลขนาดเล็ก	21
2.2.8 สนามที่แพร่กระจายจากไดโพลที่มีความยาวจำกัด	22
2.2.9 อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพล	24
2.2.10 ความต้านทานอินพุท	25
2.2.11 ไดโพลเมื่อวางตัวในแนวอนชนานกับแผ่นตัวนำ	26
2.3 การคำนวณค่าลดทอนจากการแพร่กระจายคลื่นในระบบวิทยุเคลื่อนที่	33
2.3.1 ค่าลดทอนการแพร่กระจายคลื่นระหว่างสายอากาศไอโซทรอปิก	34
2.3.2 ค่าลดทอนและเส้นโค้งการคาดคะเนของโอคูมูระ	35
2.3.3 สูตรสำหรับการหาค่าลดทอนการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดลอง	35
2.3.4 การหาแฟคเตอร์การแก้ไข (Correction factor)	38
2.3.4.1 แฟคเตอร์การแก้ไขสำหรับเมืองขนาดกลางและขนาดเล็ก	39

	หน้า
2.3.4.2 แฟกเตอร์การแก้ไขสำหรับเมืองขนาดใหญ่	40
บทที่ 3 ผลการวิเคราะห์การเลือกความยาวของสายอากาศและความสูงของสายอากาศ	42
3.1 สมการการหมุนแกน	42
3.2 สมการสนามไฟฟ้าที่แผ่นกราวด์	45
3.3 สมการไดเรกทิวิตี ที่มีแผ่นกราวด์	45
3.4 สมการอิมพีแดนซ์	46
3.5 การหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์	46
3.6 การหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง	47
3.7 การหาค่าความสูงของสายอากาศจากแผ่น กราวด์	48
บทที่ 4 การออกแบบสร้างและทดสอบ	56
4.1 การสร้างสายอากาศ	56
4.2 การหาระยะห่างของสายอากาศในการทดสอบ	57
4.3 การทดสอบหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	60
4.4 สายอากาศต้นแบบ	61
4.5 การสร้างเครื่องเลือกรับสัญญาณภาพ	62
4.5.1 แนวคิดเบื้องต้น	62
4.6 การออกแบบและการสร้าง	62
4.7 การทดลองและผลการทดลอง	65
4.7.1 ผลการทดลองเปรียบเทียบสายอากาศ 2 ต้น	65
4.7.2 ผลการทดลองเปรียบเทียบระดับแรงดันอ้างอิงกับสัญญาณ(ขาที่ 12)	66
4.7.3 ผลการทดลองเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากการจูนเนอร์(ขาที่24)	66
4.7.4 ผลการทดลองเปรียบเทียบสัญญาณทีวี(Video out)	67
4.7.5 ผลการเปรียบเทียบสายอากาศแบบ ไดโพล ไขว้กับ ไดโพลธรรมดา	68
บทที่ 5 ผลทดสอบและการคำนวณ	69
5.1 การวัดและพล็อตกราฟแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	69
5.2 การวัดและพล็อตกราฟค่าอินพุทอิมพีแดนซ์และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ความสูง 0.525λ	75
5.3 การวัดอัตราขยายของสายอากาศ	76
5.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาอัตราขยายสายอากาศ	76
5.3.2 วิธีการทดสอบ	76
5.4 การหาอัตราขยายของสายอากาศ	77
บทที่ 6 บทวิจารณ์และสรุป	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1 บทวิจารณ์

หน้า

80

6.2 บทสรุป

80



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แบบจำลองสายอากาศ	1
รูปที่ 2.1 ระบบโคออร์ดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	3
รูปที่ 2.2 แพทเทอร์นหลักระนาบสนามไฟฟ้า แบนระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร	4
รูปที่ 2.3 โลบต่าง ๆ และมีมิตช์ของแพทเทอร์นสายอากาศ	5
รูปที่ 2.4 แพทเทอร์นในแบบลิเนียร์	5
รูปที่ 2.5 ขั้วอ้างอิง และการสูญเสียของสายอากาศ	8
รูปที่ 2.6 สายอากาศส่งและวงจรสมมูลย์	13
รูปที่ 2.7 สายอากาศรับ และวงจรสมมูลย์	14
รูปที่ 2.8 การแจกแจงกระแสบนสายส่งสัญญาณคู่ที่ไม่มีการสูญเสียสายส่งสัญญาณที่ทางออก และสายอากาศไดโพล	16
รูปที่ 2.9 การแจกแจงกระแสของสายอากาศไดโพลที่มีขนาดความยาวต่าง ๆ	17
รูปที่ 2.10 ลักษณะการจัดวางของไดโพลจิว	18
รูปที่ 2.11 การแจกแจงกระแสของไดโพลขนาดเล็ก	19
รูปที่ 2.12 ทิศทางของส่วนประกอบสนามไฟฟ้า	20
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลที่มีความยาวจำกัด	22
รูปที่ 2.14 กราฟของค่า $R$ ที่เป็นฟังก์ชันของความยาวของสายอากาศไดโพล	25
รูปที่ 2.15 อิเล็กทริกไดโพลซึ่งวางแนวขนานกับแผ่นตัวนำสมบูรณ์ขนาดอนันต์	26
รูปที่ 2.16 ไดโพลวางตัวแนวขนานเหมือนแผ่นตัวนำสมบูรณ์ขนาดอนันต์	27
รูปที่ 2.17 ความแรง (Amplitude) ของรูปแบบความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ $\phi = 90^\circ$ เมื่อไดโพลอยู่สูงเหนือแผ่นกราวด์เพลนในระดับต่างกัน	29
รูปที่ 2.18 รูปแบบของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ เมื่อไดโพลอยู่สูงเหนือแผ่นกราวด์เพลนเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่น ( $h = \lambda$ )	30
รูปที่ 2.19 ความแรงของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ $\phi = 90^\circ$ เมื่อไดโพลอยู่สูงเหนือแผ่นกราวด์เพลน $2\lambda$ และ $5\lambda$	30
รูปที่ 2.20 ค่าความต้านทานของการแพร่กระจายคลื่นและโคเรคทีวิตีของไดโพลที่วางตัวในแนวขนานสูงเหนือแผ่นกราวด์เพลนขนาดอนันต์	32
รูปที่ 2.21 ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของไดโพลครึ่งความยาวคลื่นที่อยู่เหนือแผ่นตัวนำ	33
รูปที่ 2.22 เส้นโค้งความแรงของสัญญาณที่วัดได้ในตัวกลางพื้นฐานในย่านความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์	34
รูปที่ 2.23 กราฟของค่า $A$	37
รูปที่ 2.24 กราฟของค่า $B$	37
รูปที่ 2.25 เส้นโค้งการคาดคะเนสำหรับอัตราขยายกำลังสองของสายอากาศเคลื่อนที่เมื่ออยู่ในตัวเมือง	38

	หน้า
รูปที่ 2.26 แฟกเตอร์การแก้ไขในเมืองขนาดกลางและเล็ก (1)	39
รูปที่ 2.27 ค่าสัมประสิทธิ์ $\xi(f_c)$ และ $\eta(f_c)$	39
รูปที่ 2.28 แฟกเตอร์การแก้ไขในเมืองขนาดใหญ่ (1)	41
รูปที่ 2.29 แฟกเตอร์การแก้ไขในเมืองขนาดใหญ่ (2)	41
รูปที่ 3.1(ก) สายอากาศวางอยู่ตามแนวแกน z	42
รูปที่ 3.1(ข) สายอากาศวางอยู่ตามแนวแกน y	42
รูปที่ 3.2 ค่าไดเรคทีวิตี เมื่อมีแผ่นกรวดที่สายอากาศความยาวต่าง ๆ	45
รูปที่ 3.3 ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ที่ค่าความยาวสายอากาศต่างๆ	47
รูปที่ 3.4 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่สายอากาศความยาวต่างๆ	48
รูปที่ 3.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ $0.5\lambda$ (H-plane)	49
รูปที่ 3.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ $0.525\lambda$ (H-plane)	49
รูปที่ 3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ $0.55\lambda$ (H-plane)	50
รูปที่ 3.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ $0.575\lambda$ (H-plane)	50
รูปที่ 3.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ $0.5\lambda$	51
รูปที่ 3.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ $0.525\lambda$	51
รูปที่ 3.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ $0.55\lambda$	52
รูปที่ 3.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ $0.575\lambda$	52
รูปที่ 3.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ $0.5\lambda$ (E-plane)	53
รูปที่ 3.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ $0.525\lambda$ (E-plane)	53
รูปที่ 3.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ $0.55\lambda$ (E-plane)	54
รูปที่ 3.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ $0.575\lambda$ (E-plane)	54
รูปที่ 3.17 ค่ารีซิสแตนซ์ และ ค่ารีแอกแตนซ์	55
รูปที่ 3.18 กราฟอัตราส่วนคลื่นนิ่ง	55
รูปที่ 4.1 สายอากาศไดโพลที่ป้อนสัญญาณตรงกลาง	56
รูปที่ 4.2 สายโคแอกเซียล	56
รูปที่ 4.3 สายอากาศไดโพลยาวครึ่งความยาวคลื่นแบบไขว้	57
รูปที่ 4.4 สายอากาศส่ง	58
รูปที่ 4.5 สายอากาศรับ	58
รูปที่ 4.6 ระยะห่างการตั้งสายอากาศ	59
รูปที่ 4.7 ระยะห่างการตั้งสายอากาศ	59
รูปที่ 4.8 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแนวตั้ง (E-plane)	60
รูปที่ 4.9 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแนวนอน (H-plane)	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 4.10 สายอากาศส่ง	61
รูปที่ 4.11 สายอากาศรับในแนวตั้ง	61
รูปที่ 4.12 สายอากาศรับในแนวนอน	61
รูปที่ 4.13 บล็อกการทำงานโดยรวม	62
รูปที่ 4.14 วงจรเครื่องเลือกรับสัญญาณภาพ	63
รูปที่ 4.15 วงจรล็อกความถี่	64
รูปที่ 4.16 วงจรเปรียบเทียบและวงจรถุนเนอร์	64
รูปที่ 4.17 วงจรสวิตซ์เลือกสายอากาศ	64
รูปที่ 4.18 การต่อเครื่องเลือกรับสัญญาณภาพกับชุดสายอากาศและเครื่องรับโทรทัศน์	65
รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบสัญญาณจากสายอากาศ 2 ดัน	65
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบสัญญาณจากขาที่ 12 ของไอซี	66
รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบสัญญาณจากขาที่ 24 ของไอซี	66
รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบสัญญาณเทวี	67
รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบสัญญาณภาพเมื่อวางสายอากาศตามแนวแกน x	68
รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบสัญญาณภาพเมื่อวางสายอากาศตามแนวแกน y	68
รูปที่ 5.1 การจัดตั้งสายอากาศส่ง และรับ ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	69
รูปที่ 5.2 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในแนวตั้ง และแนวนอน	70
รูปที่ 5.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความสูง $0.4\lambda$ ในแนวนอน (H-plane)	71
รูปที่ 5.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความสูง $0.4\lambda$ ในแนวตั้ง (E-plane)	71
รูปที่ 5.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความสูง $0.5\lambda$ ในแนวนอน (H-plane)	72
รูปที่ 5.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความสูง $0.5\lambda$ ในแนวตั้ง (E-plane)	72
รูปที่ 5.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความสูง $0.525\lambda$ ในแนวนอน (H-plane)	73
รูปที่ 5.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความสูง $0.525\lambda$ ในแนวตั้ง (E-plane)	73
รูปที่ 5.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความสูง $0.525\lambda$ ในแนวนอน (H-plane)	74
รูปที่ 5.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความสูง $0.525\lambda$ ในแนวตั้ง (E-plane)	74
รูปที่ 5.11 ค่ารีซิสแตนซ์ และ ค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศที่ความสูง $0.525\lambda$	75
รูปที่ 5.12 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ความสูง $0.525\lambda$	75
รูปที่ 5.13 รูปการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ	76
รูปที่ 5.14 อัตราการขยายของสายอากาศไดโพล	77
รูปที่ 5.15 ค่าการสูญเสียของสายนำสัญญาณตัวรับ	77
รูปที่ 5.16 ค่าการสูญเสียของสายนำสัญญาณตัวส่ง	78
รูปที่ 5.17 กำลังงานของสายอากาศตัวรับ	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าของ <i>A</i>	36
ตารางที่ 2.2 ค่าของ <i>B</i>	36

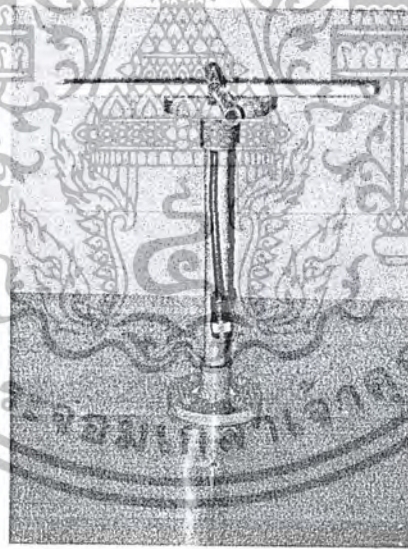


## บทที่ 1

### บทนำ

ในโครงการนี้มีจุดประสงค์เพื่อแก้ไขปัญหาของการรับสัญญาณโทรทัศน์ย่านความถี่เอชเอฟ (UHF) ที่ติดตั้งในรถยนต์ เนื่องจากรถยนต์มีการเคลื่อนที่ไปทุกทิศทางทำให้สัญญาณที่รับได้จากสายอากาศที่ติดตั้งไปกับรถยนต์รับสัญญาณได้ดีไม่ตลอด โดยเฉพาะเมื่อรถยนต์ถูกแวดล้อมไปด้วย ตึก อาคาร หรือสิ่งก่อสร้างสูง ๆ ทำให้ไม่สามารถรับสัญญาณได้ จึงแก้ไขโดยการใช้สายอากาศไดโพลแบบครึ่งความยาวคลื่นสองชุดวางไขว้กัน (กากบาท) เพื่อให้สามารถรับสัญญาณได้ครอบคลุมทิศทางมากขึ้น และเป็นการสะดวกต่อการออกแบบและสร้างในการใช้งานจริง

ในปฏิญานีพนธ์นี้ จะกล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ของสายอากาศแบบไดโพล พารามิเตอร์(Parameter) ต่าง ๆ ของสายอากาศไดโพล สายอากาศไดโพลเมื่ออยู่บนสนามตัวนำ(Reflector Plane) การออกแบบ และการสร้างสายอากาศไดโพลแบบไขว้ และการหาตำแหน่งในการติดตั้งสายอากาศ เนื่องจากหลังการรถยนต์ก็ถือเป็นตัวนำชนิดหนึ่ง จึงทำให้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศไดโพลเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งการหาตำแหน่งในการติดตั้งต้องคำนึงถึงระดับความสูงของสายอากาศที่อยู่บนหลังการรถยนต์ ต้องมีความสูงที่พอเหมาะต่อการติดตั้ง และต้องคำนึงถึงทิศทางการรับคลื่นสัญญาณ(Directivity) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) และค่าอินพุทอิมพีแดนซ์(Input Impedance)



รูปที่ 1.1 แบบจำลองสายอากาศ

ในการทดลองหาตำแหน่งในการติดตั้งสายอากาศจะเริ่มจากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม ซูปเปอร์เนค(SNEC) ในการจำลองสายอากาศไดโพลแบบไขว้ และพล็อตกราฟค่าของทิศทางการรับคลื่นของสายอากาศในระดับความสูงต่างๆ เพื่อทำการเลือกหาระดับความสูงที่ต่ำที่สุดเมื่อติดตั้งสายอากาศบนสนามตัวนำ โดยที่ทิศทางการรับคลื่นของสายอากาศยังคงมีทิศทางที่ดีอยู่ จากนั้นจะทำการ

วัดคำอินพุมพิณพีแคนซ์ และคำอัคราส่วนคลื่นนิ่ง เพื่อหาตำแหน่งที่คำอัคราส่วนคลื่นนิ่ง และคำอินพุมพิณพีแคนซ์ที่ดีที่สุด โดยให้ความสูงอยู่ในระดับที่เลือกมามากที่สุด

ในส่วนของวงจรที่ทำการสลบสัญญาณ เพื่อเลือกสัญญาณที่ชัดเจนมาใช้งาน จะมีสวิทช์เลือกให้เครื่องทำงานกับสายอากาศสองชุด และในการเลือกสัญญาณตัวเครื่องจะใช้สัญญาณภาพ มาทำการเปรียบเทียบกับระดับอ้างอิง เมื่อสัญญาณมีค่าความแรงน้อยกว่าระดับอ้างอิง เครื่องจะสลับไปใช้สายอากาศที่รับสัญญาณได้ดีกว่ามาใช้งาน

ส่วนสุดท้ายจะเป็นการทดสอบการทำงานของเครื่องเลือกรับสัญญาณภาพกับตัวสายอากาศ ซึ่งในการทดสอบจะใช้สายอากาศสองชุดแบบไขว้ ในการทดลอง



## บทที่ 2

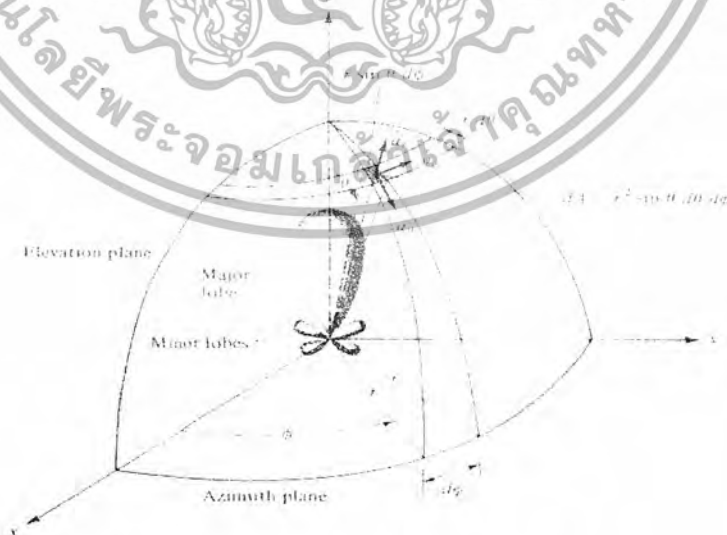
### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ

ในการศึกษาเรื่องสายอากาศนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ เพราะพารามิเตอร์จะเป็นตัวที่บอกให้เราทราบถึงประสิทธิภาพของสายอากาศ ซึ่งพารามิเตอร์ของสายอากาศนั้นจะมีอยู่มากมาย แต่ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะพารามิเตอร์ที่เป็นพื้นฐานและถูกนำมาใช้บ่อยๆ ในการกล่าวอ้างอิงเพื่อศึกษาเรื่องสายอากาศ ดังนี้

##### 2.1.1 แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่น ( Radiation Pattern )

คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันสเปซโคออร์ดิเนต (Space Coordinate) ส่วนใหญ่แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นนี้มักจะคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far Field) การอธิบายคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นจะอาศัยคุณสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity), ความเข้มของสนาม (Field Strength), เฟส (Phase), หรือ โพลาไรเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่ใช้สังเกตที่มีรัศมีคงที่ รูปที่ 2.1 แสดงระบบโคออร์ดิเนตที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นสำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่า แพทเทิร์นกำลังงาน (Power Pattern) ของสายอากาศ และกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก หรือสนามไฟฟ้าในทิศต่างๆที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่า แพทเทิร์นสนาม (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น



รูปที่ 2.1 ระบบโคออร์ดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

### 2.1.1.1 แพทเทิร์นหลัก

เราจะอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศในเทอมของแพทเทิร์นหลัก(Principle Pattern) ของสนามไฟฟ้า(Electric Field - E) และสนามแม่เหล็ก(Magnetic Field - H) สำหรับสายอากาศลิเนียร์โพลาไรเซชัน(Linear Polarization) แพทเทิร์นในระนาบ E จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแพทเทิร์นในระนาบ H จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่คี่ที่สุด ซึ่งในรูป 2.2 จะแสดงตัวอย่างแพทเทิร์นหลักโดยมีระนาบ xz (ระนาบเอเวเลชัน;  $\phi = 0$ ) เป็นระนาบสนามไฟฟ้าหลัก และมีระนาบ xy (ระนาบอาซีมูธ;  $\theta = \frac{\pi}{2}$ ) เป็นระนาบสนามแม่เหล็กหลัก



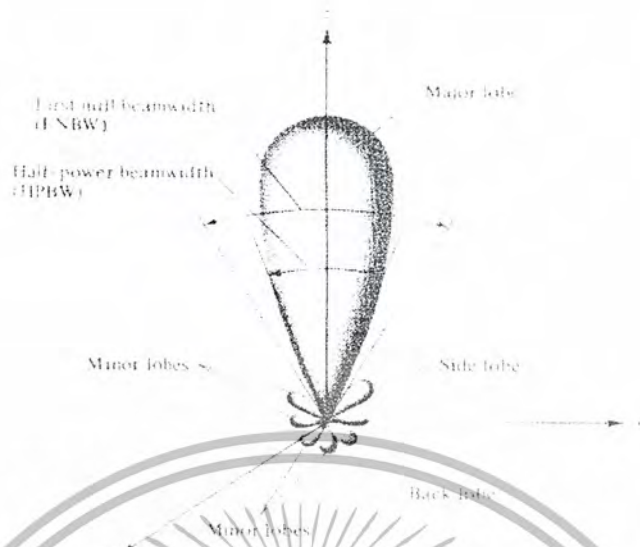
รูปที่ 2.2 แพทเทิร์นหลักระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร

### 2.1.1.2 โลบของแพทเทิร์นการแพร่กระจาย

โอบของแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่น(Radiator Lobe) เป็นส่วนหนึ่งของแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำดังรูปที่ 2.3 แสดงโพลาร์แพทเทิร์น(Polar Pattern) แบบสามมิติ ซึ่งมีโอบแบบต่างๆดังนี้

โอบหลัก(Major Lobe, Main Lobe) เป็นโอบของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ตามรูปที่ 2.4 มีโอบหลักอยู่ในทิศทาง  $\theta = 0$  สำหรับสายอากาศบางชนิดอาจมีโอบหลักมากกว่าหนึ่งโอบ เช่น สายอากาศแยกบีบ (Splitbeam)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

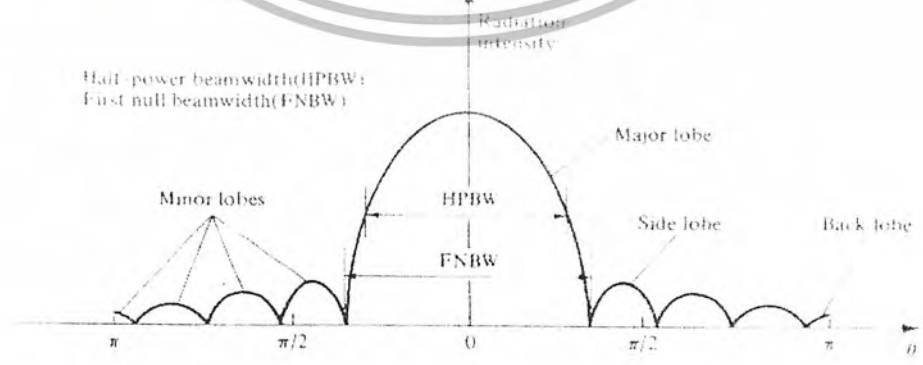


รูปที่ 2.3 โลบต่างๆ และบีมวิดท์(Beam width) ของแพทเทิร์นสายอากาศ

โlobย่อย(Minor Lobe) ได้แก่ โlobอื่นๆเหนือ ไปจากโlobหลัก

โlobข้างหรือไซด์โlob(Side Lobe) เป็นโlobย่อยที่อยู่ติดกับโlobหลักและอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับโlobหลัก

โlobหลัง(Back Lobe) ซึ่งเป็นโlobย่อยที่อยู่ในทิศทางตรงข้ามกับโlobหลัก ปกติแล้วโlobย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ดีจะต้องกำจัดโlobนี้ให้เหลือน้อยที่สุด ระดับของโlobย่อยมักจะเป็นอัตราส่วนของ ความหนาแน่นของกำลังงานในโlobหลัก ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนของไซด์โlob(Sidelobe Ratio) หรือระดับของไซด์โlob(Side Lobe Level: SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของไซด์โlobน้อยกว่า -20 เดซิเบล (dB)



รูปที่ 2.4 แพทเทิร์นในแบบลิเนียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิทท์

ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิทท์ (Half Power Beamwidth: HPBW) เป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในโลบหลัก มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดสองจุด ดังแสดงในรูป 2.4 โดยส่วนมากจะใช้คำย่อว่า HPBW แทน

### 2.1.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)

คำจำกัดความของคำว่า ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ในทิศทางที่กำหนดให้ คือกำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นนี้ เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศเกี่ยวกับสนามระยะไกล ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น และผลจากการยกกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$U$  = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

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

ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้ คือ

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2\eta} |E(r, \theta, \phi)|^2$$

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

$$\approx \frac{1}{2\eta} \left[ |E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right] \quad (2.2)$$

เมื่อ

$E$  = ความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

$E_\theta, E_\phi$  = ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

$\eta$  = อินทริเนสิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้น แพทเทิร์นของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึงความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นได้เช่นกัน

### 2.1.4 ไคเรคติวิตี (Directivity)

ก่อนที่จะศึกษาเรื่องไคเรคติวิตี เราจะต้องมีความรู้เรื่องไคเรคติฟเกน (Directive Gain) เป็นพื้นฐานก่อน

ไคเรคติฟเกนในทิศทางที่กำหนด คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้น ต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งใช้สำหรับอ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศสำหรับใช้อ้างอิงนี้ จะเป็นไอโซทรอปิก พอยท์ซอร์ส (Isotropic Point Source)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งโคเรคทีวิตี ก็คือ ค่าโคเรคทีฟเกนในทิศทางที่มากที่สุด หรือกล่าวได้ว่า โคเรคทีวิตีของต้นกำเนิด (สายอากาศ) ที่ไม่เป็นไอโซทรอปิก คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของ ไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์ส

สมการของโคเรคทีฟเกน และโคเรคทีวิตี แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.3)$$

$$D_{max} = D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.4)$$

เมื่อ

$D$  = โคเรคทีฟเกน (ไม่มีหน่วย)

$D_0$  = โคเรคทีวิตี (ไม่มีหน่วย)

$U$  = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

$U_{max}$  = ค่าสูงสุดของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

$U_0$  = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของ ไอโซทรอปิก พอยท์ซอร์ส (W/หน่วยมุมตัน)

$P_{rad}$  = กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (W)

จากสมการที่ 2.3 และ 2.4 เราจะทราบว่าโคเรคทีฟเกนและโคเรคทีวิตีของไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สมีค่าเป็นหนึ่ง ทั้งนี้เพราะว่า  $U, U_{max}$  และ  $U_0$  ต่างมีค่าเท่ากัน โคเรคทีวิตีของไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สมีค่าเท่ากับหนึ่ง เพราะว่ามันแพร่กระจายกำลังออกไปทุกทิศทางด้วยค่าที่เท่ากัน แต่สำหรับต้นกำเนิด (สายอากาศ) แบบอื่น ๆ นั้นย่อมมีโคเรคทีวิตีมากกว่าหนึ่งเสมอ

ข้อสรุปอีกอย่างหนึ่งที่สามารถสรุปได้คือ ค่าของโคเรคทีฟเกนจะมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ และน้อยกว่าหรือเท่ากับโคเรคทีวิตี ( $0 \leq D \leq D_0$ )

โดยทั่วไปมักจะแสดงค่าโคเรคทีฟเกนและโคเรคทีวิตีเป็น เดซิเบล

$$D(dB) = 10 \log_{10} D$$

$$D_0(dB) = 10 \log_{10} D_0$$

### 2.1.5 ค่าทวีกำลัง (Gain)

ค่าทวีกำลัง หรือ เกน เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของสายอากาศ ซึ่งค่าทวีกำลังนี้เป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากโคเรคทีวิตี โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่โคเรคทีวิตีอธิบายคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

เพาเวอร์เกน (Power Gain) ของสายอากาศ ในทิศทางที่กำหนดให้ นั้น สามารถหาค่าได้โดยใช้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$Gain = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_m} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.5)$$

โดย

$U(\theta, \phi)$  คือ ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้น

$P_m$  คือ กำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่ง

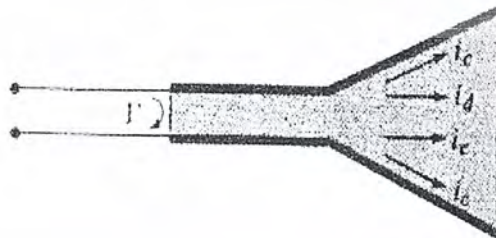
ถ้าไม่มีการกำหนดทิศทางไว้โดยเฉพาะ โดยทั่วไปแล้วเราจะคิดเพาเวอร์เกนในทิศทางที่มีการแผ่กระจายคลื่นแรงที่สุด

โดยนัยทั่วไปแล้วเรามักจะพูดถึงเกนสัมพัทธ์ (Relative Gain) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของเพาเวอร์เกนในทิศทางที่กำหนดให้ต่อเพาเวอร์เกนของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศทั้งสองนั้นเท่ากัน สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบอาจจะใช้ สายอากาศไดโพล สายอากาศปากแตร (Horn) หรือสายอากาศอื่นๆ ซึ่งคำนวณเกนได้ง่าย หรือรู้ค่าอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่ สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็น ไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย (Lossless Isotropic) ดังนั้น

$$G_g = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_m (\text{lossless isotropic source})} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.6)$$



(ก) ขั้วอ้างอิงของสายอากาศ



(ข) การสูญเสียจากการสะท้อนตัวนำและไดอิเล็กทริก

รูปที่ 2.5 ขั้วอ้างอิง และการสูญเสียของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.5(ก) เราสามารถเขียนได้ว่า กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด ( $P_{rad}$ ) สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ ( $P_{in}$ ) ด้ว

$$P_{rad} = e_r P_{in} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $e_r$  เป็นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ(ไม่มีหน่วย) ใช้สมการที่ 2.7 จะทำให้สมการ 2.6 มีความสัมพันธ์ง่ายขึ้นเป็น

$$G_g(\theta, \phi) = e_r \left[ 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (2.8)$$

ซึ่งสัมพันธ์กับสมการ ไดเรกทิฟเอนในสมการที่ 2.3 คือ

$$G_g(\theta, \phi) = e_r D(\theta, \phi) \quad (2.9)$$

ในทำนองเดียวกันค่าสูงสุดของเกน จะสัมพันธ์กับไดเรกทิวิตี โดย

$$\begin{aligned} G_0 &= G_g(\theta, \phi) \Big|_{\max} = e_r D(\theta, \phi) \Big|_{\max} \\ G_0 &= e_r D_0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

ดังนั้นค่าประมาณของเกนจะมีค่าเป็น

$$G_0 \approx \frac{30,000}{\Theta_{1d} \Theta_{2d}} \quad (2.10a)$$

ในทางปฏิบัติ เมื่อกำลังเกนมักจะหมายถึงเพาเวอร์เกนที่มีค่าสูงสุด ดังแสดงในสมการที่ 2.10

$$G_0(\text{dB}) = 10 \log[e_r D_0] \quad (2.11)$$

### 2.1.6 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency)

ประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ  $e_r$  จะใช้เมื่อเรากำลังพิจารณาการสูญเสียต่างๆที่ขั้ว และภายในโครงสร้างของสายอากาศ การสูญเสียต่างๆของสายอากาศ ดังรูปที่ 2.5(ข) นั้น อาจมีสาเหตุมาจาก

1. การสะท้อนกลับเนื่องจากความไม่สมพจน์ (Mismatch) กันระหว่าง สายส่ง (Transmission Line) กับสายอากาศ
2. การสูญเสียทั้งในตัวนำ (Conductor) และฉนวน (Dielectric) (DR)

โดยทั่วไป ค่าประสิทธิภาพทั้งหมด คำนวณได้จาก

$$e_r = e_r e_c e_d \quad (2.12)$$

เมื่อ

$e_r$  = ประสิทธิภาพทั้งหมด (ไม่มีหน่วย)

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

$e_c$  = ประสิทธิภาพของตัวนำ (ไม่มีหน่วย)

$e_d$  = ประสิทธิภาพของฉนวน (ไม่มีหน่วย)

$\Gamma$  = สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ขั้วตัดคาของสายอากาศ

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}$$

เมื่อ

$Z_m$  = อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

$Z_0$  = อิมพีแดนซ์คุณสมบัติ (Characteristic Impedance) ของสายส่ง

ปกติ  $e_c$  และ  $e_d$  คำนวณได้ลำบากส่วนมากมักหาได้จากการทดลอง แต่ก็ยังแยก  $e_c$  จาก  $e_d$  ไม่ออก ดังนั้นเพื่อความสะดวกมักจะเขียน สมการที่ 2.12 ใหม่ได้คือ

$$e_t = e_r e_{cd} = e_{cd} (1 - |\Gamma|^2) \quad (2.13)$$

เมื่อ

$e_{cd} = e_c e_d$  = ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

### 2.1.7 อินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)

อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศใดๆ จะเป็นอิมพีแดนซ์ที่ขั้วสายอากาศนั้นๆ อาจเป็นอัตราส่วนของศักดาไฟฟ้าต่อกระแสที่ขั้วของสายอากาศนั้น หรือเป็นอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่จุดใดๆ ดังในรูปที่ 2.6(ก) โดยที่ a-b เป็นขั้วของสายอากาศ อัตราส่วนของศักดาไฟฟ้าต่อกระแสที่ขั้วนี้เมื่อไม่ได้ต่อโหลดจะเป็นอิมพีแดนซ์ของสายอากาศซึ่งมีค่า

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.14)$$

เมื่อ

$Z_A$  = อิมพีแดนซ์ที่ขั้ว a-b ของสายอากาศ (โอห์ม)

$R_A$  = ความต้านทานที่ขั้ว a-b สายอากาศ (โอห์ม)

$X_A$  = รีแอกแตนซ์ที่ขั้ว a-b ของสายอากาศ (โอห์ม)

โดยทั่วไปความต้านทานในสมการที่ 2.14 จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ดังนี้

$$R_A = R_r + R_L \quad (2.15)$$

เมื่อ

$R_r$  = ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

$R_L$  = ความต้านทานการสูญเสียของสายอากาศ

ถ้าหากว่าสายอากาศถูกต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ภายในเป็นดังนี้

$$Z_g = R_g + jX_g \quad (2.16)$$

เมื่อ

$R_g$  = ความต้านทานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ (โอห์ม)

$X_g$  = รีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ (โอห์ม)

สายอากาศที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง จะแสดงวงจรสมมูลย์ได้ดังรูปที่ 2.6(ข) ในการหาปริมาณกำลังงานที่ถูกนำมาสู่ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นเพื่อแพร่กระจายออก กับกำลังงานที่สูญเสียในความต้านทานการสูญเสีย  $R_L$  ที่กลายเป็นความร้อน ( $I^2 R_L / 2$ ) นั้นเราจะหากระแสที่ไหลภายในลูป (loop) ได้ดังนี้

$$I_g = \frac{V_g}{Z_i} = \frac{V_g}{(R_r + R_L + R_g)^2 + j(X_A + X_g)} \quad (\text{หน่วย Amp.}) \quad (2.17)$$

และขนาดของกระแสจะมีค่าดังนี้ คือ

$$|I_g| = \frac{|V_g|}{\left[ (R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.17ก)$$

เมื่อ  $V_g$  เป็นศักย์ไฟฟ้าค่าสูงสุดของเครื่องกำเนิดสัญญาณ กำลังงานที่ถูกนำมายังสายอากาศเพื่อการแพร่กระจายคลื่น จะมีค่าดังนี้คือ

$$P_r = \frac{|I_g|^2 R_r}{2} = \frac{|V_g|^2}{2} \left[ \frac{R_r}{(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \right] \quad (\text{Watt.}) \quad (2.18)$$

และกำลังงานที่สูญเสียกลายเป็นความร้อน จะมีค่าดังนี้

$$P_L = \frac{|I_g|^2 R_L}{2} = \frac{|V_g|^2}{2} \left[ \frac{R_L}{(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \right] \quad (\text{Watt.}) \quad (2.19)$$

กำลังงานส่วนที่เหลือจะเป็นส่วนที่สูญเสียเป็นความร้อนในความต้านทานที่ขั้ว  $R_g$  ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ ซึ่งมีค่าดังนี้

$$P_g = \frac{|V_g|^2}{2} \left[ \frac{R_g}{(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \right] \quad (\text{Watt.}) \quad (2.20)$$

กำลังงานที่ถูกนำมายังสายอากาศ จะมีค่ามากที่สุด เมื่อเกิดคอนจูเกตแมทช์ (Conjugate Match) นั่นคือจะเกิดเมื่อ

$$R_r + R_L = R_g \quad (2.21)$$

และ  $X_A = -X_g \quad (2.22)$

ในกรณีนี้ สมการที่ 2.18, 2.19 และ 2.20 จะกลายเป็นดังนี้

$$P_r = \frac{|V_g|^2}{2} \left[ \frac{R_r}{4(R_r + R_L)^2} \right] = \frac{|V_g|^2}{8} \left[ \frac{R_r}{(R_r + R_L)^2} \right] \quad (2.23)$$

$$P_L = \frac{|V_g|^2}{8} \left[ \frac{R_L}{(R_r + R_L)^2} \right] \quad (2.24)$$

$$P_g = \frac{|V_g|^2}{8} \left[ \frac{R_g}{(R_r + R_L)^2} \right] = \frac{|V_g|^2}{8} \left[ \frac{1}{R_r + R_L} \right] = \frac{|V_g|^2}{8R_g} \quad (2.25)$$

จากสมการที่ 2.23 ถึง 2.25 พบว่า

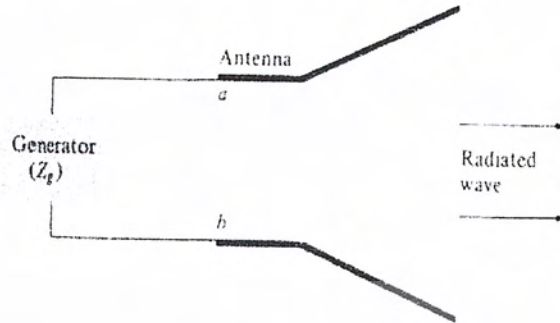
$$P_g = P_r + P_L = \frac{|V_g|^2}{8} \left[ \frac{R_g}{(R_r + R_L)^2} \right] = \frac{|V_g|^2}{8} \left[ \frac{R_r + R_L}{(R_r + R_L)^2} \right] \quad (2.26)$$

ดังนั้นกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณ จะต้องจ่ายเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทซ์ จะมีค่าดังนี้

$$P_s = \frac{1}{2} V_g I_g^* = \frac{1}{2} V_g \left[ \frac{V_g^*}{2(R_r + R_L)} \right] = \frac{|V_g|^2}{4} \left[ \frac{1}{R_r + R_L} \right] \quad (2.27)$$

ในจำนวนกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่ายออกมาทั้งหมด ครึ่งหนึ่งจะสูญเสียเป็นความร้อนภายใน ( $R_g$ ) ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ และอีกครึ่งหนึ่งจะถูกนำมายังสายอากาศ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทซ์เท่านั้น ในส่วนของกำลังงานซึ่งมายังสายอากาศ ส่วนหนึ่งจะแพร่กระจายออกไป โดยผ่านกลไกที่เกิดจากความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น อีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียเป็นความร้อน ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ ถ้าสายอากาศไม่มีการสูญเสีย ( $e_{ca} = 1$ ) ครึ่งหนึ่งของกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่าย จะแพร่กระจายออกเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทซ์ ในตอนนี้สมมติว่าเป็นการแมทซ์ที่สมบูรณ์ระหว่างสายอากาศกับสายส่ง ( $e_r = 1$ ) ถ้ามีการสูญเสียเนื่องจากไม่แมทซ์แล้ว จะทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศลดลง ในรูปที่ 2.6(ก) แสดงวงจรสมมูลย์นอร์ตันของสายอากาศ กับค่านำเนิดสัญญาณเมื่อสายอากาศเป็นสายอากาศส่ง สำหรับการให้สายอากาศเป็นสายอากาศรับ ดังแสดงในรูป 2.7(ก) ถ้ามีคลื่นตกกระทบเข้ามายังสายอากาศ จะเหนี่ยวนำให้เกิดศักดาไฟฟ้า ( $V_r$ ) ซึ่งเทียบได้กับ  $V_g$  ในโหมคการส่งได้มีการแสดงวงจรสมมูลย์เทวินินไว้ในรูปที่ 2.7(ข) ส่วนวงจรสมมูลย์นอร์ตันได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7(ค)

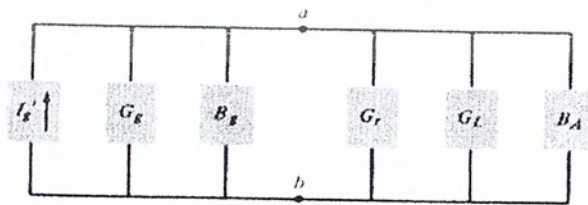
ปกติอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความถี่ และจะแมทซ์กับสายส่งเฉพาะในช่วงหนึ่งๆเท่านั้น นอกจากนี้อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศยังขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆอีก ได้แก่ รูปทรง วิธีการป้อนสัญญาณ และสิ่งแวดล้อมข้างเคียง เนื่องจากคำนวณได้ยากจึงมักพบว่า ส่วนใหญ่จะหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ได้จากการทดลอง



(ก) สายอากาศในโหมดการส่ง



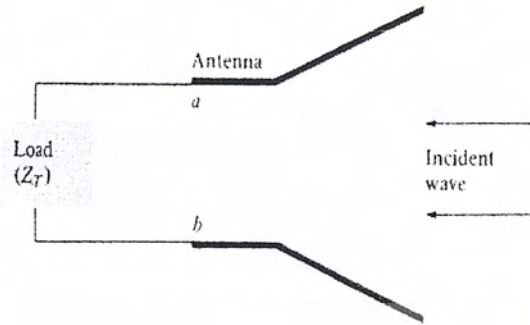
(ข) วงจรสมมูลยเทวินิน



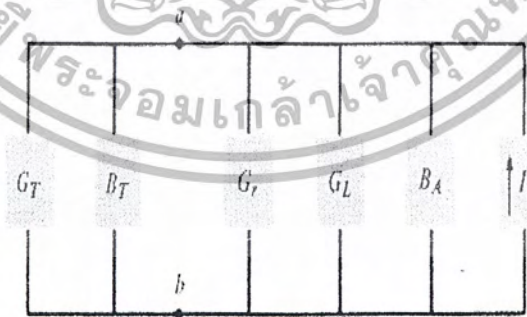
(ค) วงจรสมมูลยเนอร์ตัน

รูปที่ 2.6 สายอากาศส่งและวงจรสมมูลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สายอากาศในโหมดการรับ



รูปที่ 2.7 สายอากาศรับ และวงจรสมมูลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.8 แบนด์วิดท์ (Band width)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศ ถูกกำหนดให้เป็นช่วงของความถี่ ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้ อาจเป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ อินพุทอิมพีแดนซ์, แพทเทอร์น, บีมวิดท์, โพลาริเซชัน, ระดับของไซด์โลบ, เกน, ประสิทธิภาพของการแพร่กระจาย ฯลฯ อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ คือ ไม่ต่างจากคุณสมบัติที่วัดที่ความถี่ตรงกลางที่ออกแบบ จนทำให้คุณสมบัติเหล่านี้เสียไปจากข้อกำหนด หรือมาตรฐาน สำหรับสายอากาศแบนด์กว้างมักจะคิดเป็น อัตราส่วนของความถี่ที่ใช้งานได้ด้านสูงต่อความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำอยู่ 10 เท่า สำหรับสายอากาศแบนด์แคบ แบนด์วิดท์จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของความถี่ (ความถี่ด้านสูงลบด้วยความถี่ด้านต่ำ) หารด้วยความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น เช่น แบนด์วิดท์ 5 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าผลต่างของความถี่ของช่วงการทำงานของสายอากาศเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ของความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น

เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆของสายอากาศ(ได้แก่ อินพุทอิมพีแดนซ์, แพทเทอร์น, เกน, โพลาริเซชัน ฯลฯ) ไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่สามารถกำหนดแบนด์วิดท์ตามคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งได้ จึงต้องมีการกำหนดขอบบังคับให้เป็นไปตามการประยุกต์ใช้งานแต่ละอย่างไป ปกติแล้วคุณสมบัติของแพทเทอร์นกับอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ จึงมักถูกใช้เป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ของสายอากาศ นอกจากนี้แบนด์วิดท์ของเกน, ระดับไซด์โลบ, บีมวิดท์, โพลาริเซชัน จะมีแบนด์วิดท์ค่าเดียวกับแพทเทอร์นแบนด์วิดท์ ในขณะที่แบนด์วิดท์ของอินพุทอิมพีแดนซ์ และประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่นจะเป็นค่าเดียวกับอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์

## 2.2 คุณลักษณะของสายอากาศไดโพล

### 2.2.1 การแจกแจงรูปกระแสของสายอากาศไดโพล

ในหัวข้อนี้จะบรรยายการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระบนตัวนำที่แสดงตัวเป็นสายส่งสัญญาณและสายอากาศ เพื่อที่จะแสดงค่าการแจกแจงกระแส และการแพร่กระจายของสายอากาศไดโพล

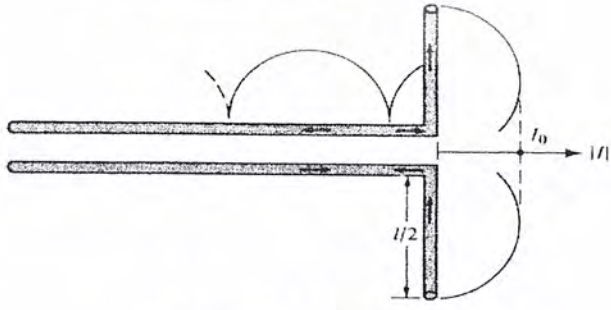
โดยเราเริ่มจากการพิจารณาสายส่งสัญญาณคู่ที่ไม่มี การสูญเสีย การเคลื่อนที่ของประจุจะสร้างคลื่นกระแสเดินทางที่มีขนาด  $I_0/2$  ตามเส้นลวด เมื่อกระแสเดินทางมาถึงปลายของลวดแต่ละเส้นมันจะเกิดการสะท้อนกลับอย่างสมบูรณ์(ขนาดเท่าเดิมและเฟสกลับเท่ากับ  $180^\circ$ ) เมื่อคลื่นสะท้อนรวมกับคลื่นตกกระทบในเส้นลวดแต่ละเส้น จะเกิดคลื่นนิ่งซึ่งมีรูปคลื่นเป็นสัญญาณลักษณะไซน์(Sinusoidal) ซึ่งมีลักษณะตามรูป 2.8 (ก) จะเห็นได้ว่ากระแสในแต่ละเส้นลวดจะกลับเฟส  $180^\circ$  ทุกๆ ครึ่งรอบ

สำหรับสายส่งสัญญาณคู่ที่สมดุลหรือสมมาตรกับกระแสในครึ่งรอบของลวดเส้นหนึ่งจะมีขนาดเท่ากันแต่เฟสต่างกัน  $180^\circ$  กับกระแสในครึ่งรอบของเส้นลวดอีกเส้นหนึ่ง

นอกจากนี้ ถ้าช่องว่างระหว่างเส้นลวดทั้งสองมีค่าน้อยมากๆ ( $S \ll \lambda$ ) สนามที่แพร่กระจายโดยกระแสของแต่ละเส้นลวดจะถูกหักล้างกันเองระหว่างเส้นลวดสองเส้น ผลลัพธ์สุดท้ายตามอุดมคติคือ จะไม่มีการแพร่กระจายของสายส่งสัญญาณ

และเมื่อสายส่งสัญญาณระหว่าง  $0 \leq z \leq l/2$  เริ่มที่จะกางออกดังรูป 2.8(ข) เราสามารถที่จะสมมติได้ว่าการกระจายกระแสไม่เหมือนเดิมอย่างแท้จริงในแต่ละเส้นลวด อย่างไรก็ตามเพราะว่าส่วนที่กางออกของแต่ละเส้นลวดไม่ได้มีผลอย่างใกล้ชิดเท่ากับลวดอีกอันนั่นคือสนามที่แพร่กระจายโดยเส้นลวดเส้นหนึ่งจะไม่ไปหักล้างกับเส้นลวดอีกเส้นหนึ่ง ดังนั้นจะมีการกระจายสุทธิของระบบเกิดขึ้น

และในที่สุดส่วนที่ถูกกางออกของสายส่งจะเป็นดังรูป 2.8(ค) ซึ่งเป็นโครงสร้างของสายอากาศไดโพลทั่วไป เพราะว่ารูปแบบกระแสคลื่นนิ่งถูกจัดอยู่ในประเภทสายอากาศคลื่นนิ่ง ถ้า  $l \leq \lambda$  เฟสของรูปแบบกระแสคลื่นนิ่งในแต่ละแขนจะเหมือนกันตลอดความยาวของสายอากาศ นอกจากนี้จะเห็นในทิศทางเดียวกันในแต่ละแขนตามรูป 2.8(ค) ดังนั้นสนามที่แพร่กระจายโดยแขนทั้งสองของไดโพล(ส่วนตั้งของสายส่งสัญญาณที่ถูกกางออก) จะเสริมกันในแต่ละอันและมุ่งไปยังจุดสังเกต (เฟสเนื่องจากความสัมพันธ์ทางตำแหน่งของแต่ละส่วนเล็กๆของแต่ละแขนต้องถูกรวมด้วย เพื่อที่จะได้รูปแบบของการกระจายคลื่นที่สมบูรณ์)



(ค) สายอากาศไดโพล

รูปที่ 2.8 การแจกแจงกระแสบนสายส่งสัญญาณคู่ที่ไม่มีการสูญเสีย,

สายส่งสัญญาณที่กางออก และสายอากาศไดโพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเส้นผ่าศูนย์กลางของแต่ละลวดเล็กมาก  $d \leq \lambda$  รูปแบบกระแสคลื่นนิ่งตามอุดมคติบนแกนของไดโพล จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ ซึ่งจะเป็น Null (กระแสเป็นศูนย์ที่ปลายสายอากาศ) อย่างไรก็ตามมันขึ้นกับความยาวของสายอากาศ สำหรับการป้อน ณ กลางสายอากาศไดโพลซึ่งมีความยาว  $l \leq \lambda, l = \lambda, \lambda/2 < l < \lambda$  และ  $\lambda < l < 3\lambda/2$  รูปแบบการกระจายกระแสจะเป็นดังรูป 2.9 รูปแบบของกระแสของสายอากาศที่มีขนาดเล็ก ( $\lambda/50 < l < 10$ ) สามารถประมาณได้เป็นรูปสามเหลี่ยม เพราะว่า  $\sin(kl/2) \approx kl/2$  เมื่อ  $kl/2$  เล็กมากๆ ซึ่งมันแสดงได้ดังรูป



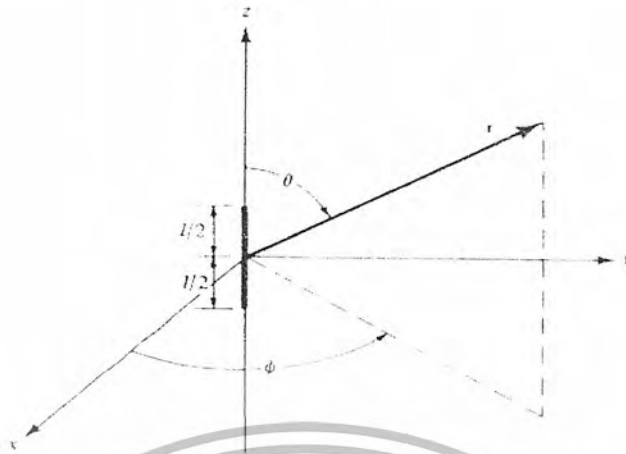
รูปที่ 2.9 การแจกแจงรูปกระแสของสายอากาศไดโพลที่มีขนาดความยาวต่างๆ

2.2.2 ไดโพลจิ๋ว (Infinitesimal Dipole)

สมมติว่าเราวางเส้นลวดตรงซึ่งมีความยาว  $l \leq \lambda$  อย่างสมมาตรที่จุดกำเนิดตามแกน z ดังรูป 2.10 ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถสร้างได้ในทางปฏิบัติ แต่มันจะใช้เป็นส่วนย่อยของสายอากาศที่มีรูปทรงที่ยุ่งยาก นอกจากจะมีความยาวน้อยมากแล้วยังต้องพอมมากด้วย ซึ่งจะสมมติว่ากระแสที่ไหลในลวดนี้มีค่าคงที่ได้คือ

$$\vec{I}(z) = \vec{a}_z I_0 \tag{2.28}$$

เมื่อ  $I_0$  มีค่าคงที่



รูปที่ 2.10 ลักษณะการจัดวางของไดโพลจิว

เพราะว่าต้นกำเนิดนำเฉพาะกระแสไฟฟ้า  $I_e$  เท่านั้น ดังนั้น  $I_m I_m$  และ  $\vec{F}$  จะมีค่าเป็นศูนย์ และ  $\vec{A}$  จะมีค่า

$$\vec{A}(x, y, z) = \frac{\mu}{4\pi c} \int \vec{I}_e(x', y', z') \frac{e^{-j\beta R}}{R} dl' \quad (2.29)$$

เมื่อ  $(x, y, z)$  แทนโคออร์ดิเนตของจุดที่สังเกต ในขณะที่  $(x', y', z')$  แสดงโคออร์ดิเนตของต้นกำเนิด  $R$  เป็นระยะทางจากจุดใดๆบนต้นกำเนิดไปยังจุดสังเกต และ  $C$  เป็นเส้นทางเดินตามความยาวของต้นกำเนิด

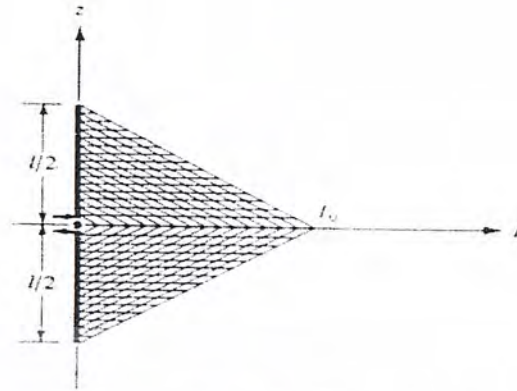
### 2.2.3 ไดโพลขนาดเล็ก (Small Dipole)

ในสายอากาศไดโพลจิวซึ่งมีความยาว  $l \leq \lambda/50$  จะมีการแจกแจงรูปกระแสที่ตลอดความยาวของไดโพลจิว แม้ว่าเราจะสร้างสายอากาศให้มีการแจกแจงรูปกระแสที่ไม่ได้ก็ตาม แต่ก็ใช้ไดโพลจิวเป็นเครื่องช่วยในการคำนวณการแจกแจงรูปกระแสของสายอากาศที่ใช้งานจริงๆ หากจะประมาณสายอากาศแบบเส้นลวดซึ่งมีความยาว  $\lambda/50 \leq l \leq \lambda/10$  ได้ดีแล้ว จะสมมุติให้มีการแจกแจงกระแสเป็นรูปสามเหลี่ยม ดังแสดงในรูป 2.11 สำหรับสายอากาศที่มีความยาวใดๆ จะมีการแจกแจงกระแสเป็นสัญญาณลักษณะไซน์

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าสายอากาศไดโพลขนาดเล็กจะมีการแจกแจงกระแสเป็นรูปสามเหลี่ยม ซึ่งจะกำหนดด้วยสมการดังนี้

$$I_e(x', y', z') = \begin{cases} \vec{a}_z I_0 \left(1 - \frac{2}{l} z'\right) \Rightarrow 0 \leq z' \leq +\frac{l}{2} \\ \vec{a}_z I_0 \left(1 + \frac{2}{l} z'\right) \Rightarrow -\frac{l}{2} \leq z' \leq 0 \end{cases} \quad (2.30)$$

เมื่อ  $I_0$  มีค่าคงที่



รูปที่ 2.11 การแจกแจงรูปกระแสของไดโพลขนาดเล็ก

### 2.2.4 ไดโพลที่มีความยาวจำกัด (Finite Length Dipole)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสายอากาศไดโพลที่มีความยาวจำกัด ซึ่งจะเป็นสายอากาศที่ใช้งานจริงเพื่อลดความยุ่งยากของสมการ จะสมมติว่าไดโพลมีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กมากๆ ซึ่งจะมีการแจกแจงรูปกระแสเป็นแบบสัญญาณลักษณะไซน์ดังนี้

$$I_e(x', y', z') = \begin{cases} \bar{a}_z I_0 \left( k \frac{l}{2} - z' \right) \Rightarrow 0 \leq z' \leq +\frac{l}{2} \\ \bar{a}_z I_0 \left( k \frac{l}{2} + z' \right) \Rightarrow -\frac{l}{2} \leq z' \leq 0 \end{cases} \quad (2.31)$$

ในที่นี้จะสมมติว่าการป้อนกระแสตรงกึ่งกลางของสายอากาศไดโพลและกระแสจะต้องเป็นศูนย์ ณ ตำแหน่งปลายสายอากาศ ซึ่งจะมีการแจกแจงรูปกระแสเป็นแบบสัญญาณลักษณะไซน์ดังรูป 2.9

### 2.2.5 สนามที่แพร่กระจายจากสายอากาศไดโพล

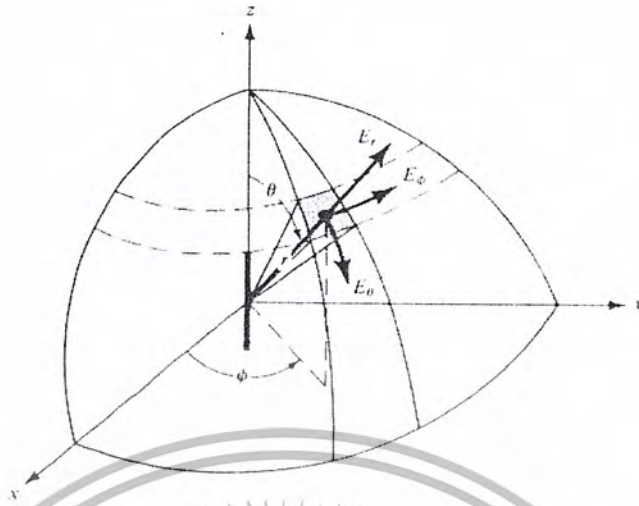
ในการหาสนามที่แพร่กระจายจากสายอากาศไดโพล จะใช้วิธีหาศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก (Magnetic Vector Potential)  $\bar{A}$  และศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้า (Electric vector potential)  $\bar{F}$  จากนั้นจะหาสนามไฟฟ้า  $\bar{E}$  และสนามแม่เหล็ก  $\bar{H}$  ตามสมการ

$$\bar{A}(x, y, z) = \frac{\mu}{4\pi} \int_C \bar{I}_e(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dl' \quad (2.32)$$

$$\bar{F}(x, y, z) = \frac{\varepsilon}{4\pi} \int_C \bar{I}_m(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dl' \quad (2.33)$$

เมื่อ  $(x, y, z)$  แทนระบบพิกัดของจุดที่สังเกต ในขณะที่  $(x', y', z')$  แสดงระบบพิกัดของจุดกำเนิด โดยที่  $R$  เป็นระยะทางจากจุดใดๆ บนจุดกำเนิดไปยังจุดสังเกต และ  $C$  เป็นเส้นทางเดินตามความยาวของจุดกำเนิดดังรูป 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ทิศทางของส่วนประกอบสนามไฟฟ้า

### 2.2.6 สนามที่แพร่กระจายจากไดโพลจົ

เนื่องจากไดโพลจົมีขนาดเล็กและความยาวน้อยมากๆ เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น ดังนั้นจะประมาณได้ว่า

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \\ &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ &= r \text{ (ค่าคงที่)} \end{aligned} \quad (2.34)$$

และเนื่องจากไดโพลจົมีการแจกแจงรูปกระแสดวงที่ และมีเฉพาะกระแสไฟฟ้า  $\vec{I}_c$  เท่านั้นซึ่งกำหนดโดยสมการที่ 2.8 ดังนั้นจากสมการที่ 2.12 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \vec{A}(x, y, z) &= \vec{a}_z \frac{\mu I_0 l}{4\pi r} e^{-jkr} \int_{-l/2}^{+l/2} dz' \\ &= \vec{a}_z \frac{\mu I_0 l}{4\pi r} e^{-jkr} \end{aligned} \quad (2.35)$$

โดยการแปลงระบบพิกัดคาร์ทีเซียนไปยังระบบพิกัดทรงกลมโดยอาศัยเมตริกซ์(Matrix) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} A_r \\ A_\theta \\ A_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \phi & \sin \theta \sin \phi & \cos \theta \\ \cos \theta \cos \phi & \cos \theta \sin \phi & -\sin \theta \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$A_r = A_z \cos \theta = \frac{\mu I_0 l}{4\pi r} e^{-jkr} \cos \theta \quad (2.37ก)$$

$$A_\theta = -A_z \sin \theta = -\frac{\mu I_0 l}{4\pi r} e^{-jkr} \sin \theta \quad (2.37ข)$$

$$A_\phi = 0 \quad (2.37ค)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $\vec{H}$  และ  $\vec{A}$  คือ

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \quad (2.38)$$

จะได้ว่า

$$\vec{H} = \vec{a}_\phi \frac{1}{\mu r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} (rA_\theta) - \frac{\partial A_r}{\partial \theta} \right] \quad (2.39)$$

เมื่อแทนสมการที่ 2.37ก และ 2.37ข ลงในสมการที่ 2.39 จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$H_r = 0 \quad (2.40ก)$$

$$H_\theta = 0 \quad (2.40ข)$$

$$H_\phi = j \frac{kI_0 l \sin \theta}{4\pi r} \left[ 1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr} \quad (2.40ค)$$

และหาสนาม  $\vec{E}$  ได้จาก

$$\vec{E} = -j\omega \vec{A} - j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) = \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times \vec{H} \quad (2.41)$$

เมื่อแทนสมการที่ 2.40ก ถึง 2.40ค ลงในสมการที่ 2.41 จะได้ว่า

$$E_r = \eta \frac{I_0 l \cos \theta}{2\pi r^2} \left[ 1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr} \quad (2.42ก)$$

$$E_\theta = j\eta \frac{kI_0 l \sin \theta}{4\pi r} \left[ 1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{(kr)^2} \right] e^{-jkr} \quad (2.42ข)$$

$$E_\phi = 0 \quad (2.42ค)$$

### 2.2.7 สนามที่แพร่กระจายจากไดโพลขนาดเล็ก

ในสายอากาศไดโพลขนาดเล็กจะมีการแจกแจงกระแสเป็นรูปสามเหลี่ยมซึ่งกำหนดดังสมการที่ 2.30 ดังนั้นจากสมการที่ 2.32 จะคำนวณค่าศักย์ เวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\vec{A}(x, y, z) = \frac{\mu}{4\pi} \left[ \vec{a}_z \int_{-l/2}^0 I_0 \left( 1 + \frac{2}{l} z' \right) \frac{e^{-jkr}}{R} dz' + \vec{a}_z \int_0^{l/2} I_0 \left( 1 - \frac{2}{l} z' \right) \frac{e^{-jkr}}{R} dz' \right] \quad (2.43)$$

เนื่องจากไดโพลขนาดเล็ก มีความยาวน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น  $\left( L \leq \frac{\lambda}{10} \right)$  ทำให้สามารถประมาณได้ว่า  $R \approx r$  ซึ่งมีความผิดพลาดมากที่สุดของเฟสเท่ากับ  $\frac{\pi}{10}$  เรเดียน หรือ 18 องศา ซึ่งมีค่าน้อยจนตัดทิ้งได้ และมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นน้อยมาก ฉะนั้นเมื่ออินทิเกรตสมการที่ 2.43 จะได้

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \bar{a}_z A_z \\ &= \bar{a}_z \frac{1}{2} \left[ \frac{\mu I_0 l}{4\pi r} e^{-jkr} \right] \end{aligned} \tag{2.44}$$

ซึ่งมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่า  $\bar{A}$  ของไดโพลจิว ดังนั้นค่าของ  $\bar{E}$  และ  $\bar{H}$  ที่แพร่กระจายจากสายอากาศไดโพลสั้นจากสมการที่ 2.40(ก) ถึงสมการที่ 2.40(ค) และ สมการที่ 2.42(ก) ถึงสมการที่ 2.42(ค) เมื่อประมาณเป็นสนามระยะไกล ( $kr \gg 1$ ) จะเป็นดังสมการ

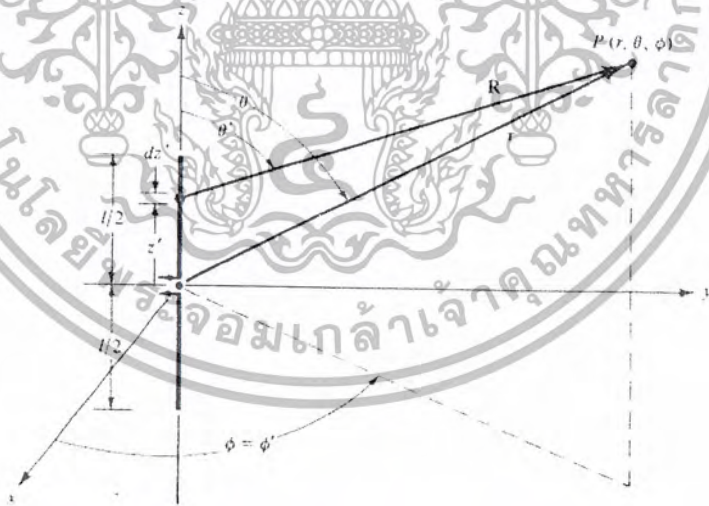
$$E_\theta \approx j\eta \frac{kI_0 l \sin \theta}{8\pi r} e^{-jkr} \tag{2.45ก}$$

$$E_r \approx E_\phi = H_r = H_\theta = 0 \tag{2.45ข}$$

$$H_\phi \approx j \frac{kI_0 l \sin \theta}{8\pi r} e^{-jkr} \tag{2.45ค}$$

### 2.2.8 สนามที่แพร่กระจายจากไดโพลที่มีความยาวจำกัด

สายอากาศไดโพลหุ้ม (ซึ่งตามปกติจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นศูนย์) จะมีการแจกแจงกระแสเป็นลักษณะรูปไซน์ตามสมการที่ 2.31 ซึ่งจะนำไปสู่การหาค่า  $\bar{E}$  และ  $\bar{H}$  ในระยะต่างๆ ซึ่งจะแสดงในบทการคำนวณ แต่เนื่องจากวิธีดังกล่าวมีความยุ่งยากในการหาคำตอบของ  $\bar{A}$  เพื่อให้ง่ายขึ้นในที่นี้จะสนใจเฉพาะสนามระยะไกล



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลที่มีความยาวจำกัด

สายอากาศไดโพลที่มีความยาวจำกัด ถูกแสดงไว้ดังรูป 2.13 สายอากาศดังกล่าวถูกแบ่งเป็นไดโพลจิวจำนวนมากมายที่มีความยาว  $\Delta z'$  ชั่งแบ่งเป็นส่วนย่อยๆ มากขึ้น ความยาวจะลดลงเป็น  $dz'$  จากสมการที่ 2.40 และสมการที่ 2.42 จะแสดงสนาม เมื่อประมาณให้เป็นสนามระยะไกลที่แพร่จากไดโพลจิว ซึ่งเป็นส่วนย่อยของไดโพลที่มีความยาวจำกัด ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$dE_\theta \approx j\eta \frac{kI_e(x', y', z')e^{-jkR}}{4\pi R} \sin\theta dz' \quad (2.46ก)$$

$$dE_r \approx dE_\phi = dH_r = dH_\theta = 0 \quad (2.46ข)$$

$$dH_\phi \approx j \frac{kI_e(x', y', z')e^{-jkR}}{4\pi R} \sin\theta dz' \quad (2.46ค)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \\ &= \sqrt{x^2 + y^2 + (z-z')^2} \end{aligned} \quad (2.47)$$

ซึ่งกระจายได้ว่า

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2) + (-2zz' + z'^2)} \\ R &= \sqrt{r^2 + (-2rz' \cos\theta + z'^2)} \end{aligned} \quad (2.48)$$

เมื่อเป็นสนามระยะไกล จะประมาณได้ว่า

$$\begin{aligned} R &\approx r - z' \cos\theta && \text{สำหรับเทอมของเฟส} \\ R &\approx r && \text{สำหรับเทอมของขนาด} \end{aligned} \quad (2.49)$$

ซึ่งทำให้เขียนสมการที่ 2.46(ก) ใหม่ได้ว่า

$$E_\theta \approx j\eta \frac{kI_e(x', y', z')e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta e^{+jkz' \cos\theta} dz' \quad (2.50)$$

จากนั้นทำการรวมผลจากโดโพล์จิวแต่ละตัวโดยทำการอินทิเกรตตลอดความยาว ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} E_\theta &= \int_{-l/2}^{l/2} dE_\theta \\ &= j\eta \frac{ke^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta \left[ \int_{-l/2}^{l/2} I_e(x', y', z') e^{+jkz' \cos\theta} dz' \right] \end{aligned} \quad (2.51)$$

เรียกพจน์นอกวงเล็บว่า เอลเมนต์แฟกเตอร์ (Element Factor) และพจน์ภายในวงเล็บเป็นสเปซแฟกเตอร์ (Space Factor) ในกรณีนี้เอลเมนต์แฟกเตอร์มีค่าเท่ากับสนามของโดโพล์จิวหนึ่งหน่วยความยาวที่วางอยู่ที่จุดกำเนิด โดยทั่วไปเอลเมนต์แฟกเตอร์มีค่าขึ้นอยู่กับชนิด และทิศทางของกระแส ในขณะที่สเปซแฟกเตอร์เป็นฟังก์ชันของการแจกแจงกระแสบนสายอากาศ

สนามรวมของสายอากาศจะมีค่าเท่ากับผลคูณของเอลเมนต์แฟกเตอร์กับสเปซแฟกเตอร์ วิธีนี้เรียกว่า การคูณแพทเทอร์นสำหรับแหล่งกำเนิดที่มีการแจกแจงอย่างต่อเนื่อง จะเขียนได้ว่า

$$\text{สนามรวม} = (\text{เอลเมนต์แฟกเตอร์}) \times (\text{สเปซแฟกเตอร์}) \quad (2.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.9 อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพล

จากสมการแสดงกำลังที่แพร่กระจายของสายอากาศไดโพล จะได้ว่า

$$\begin{aligned} P_{rad} &= \iint \bar{W}_{av} \cdot d\bar{s} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \bar{a}_r W_{av} \cdot \bar{a}_r r^2 \sin\theta d\theta d\phi \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} W_{av} r^2 \sin\theta d\theta d\phi \end{aligned} \quad (2.53)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} P_{rad} &= \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \int_0^{\pi} \frac{\left[ \cos\left(\frac{kl}{2} \cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right) \right]^2}{\sin\theta} d\theta \\ &= \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \left\{ C + \ln(kl) - C_i(kl) + \frac{1}{2} \sin(kl) [S_i(2kl) - 2S_i(kl)] \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \cos(kl) \left[ C + \ln\left(\frac{kl}{2}\right) + C_i(2kl) - 2C_i(kl) \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.54)$$

โดยที่  $C = 0.5772$  (ค่าคงที่ของออยเลอร์)

$C_i(x), S_i(x)$  เป็นโคไซน์และไซน์อินทิกรัลตามลำดับ มีค่า

$$C_i(x) = -\int_x^{\infty} \frac{\cos y}{y} dy = \int_{\infty}^x \frac{\cos y}{y} dy \quad (2.55)$$

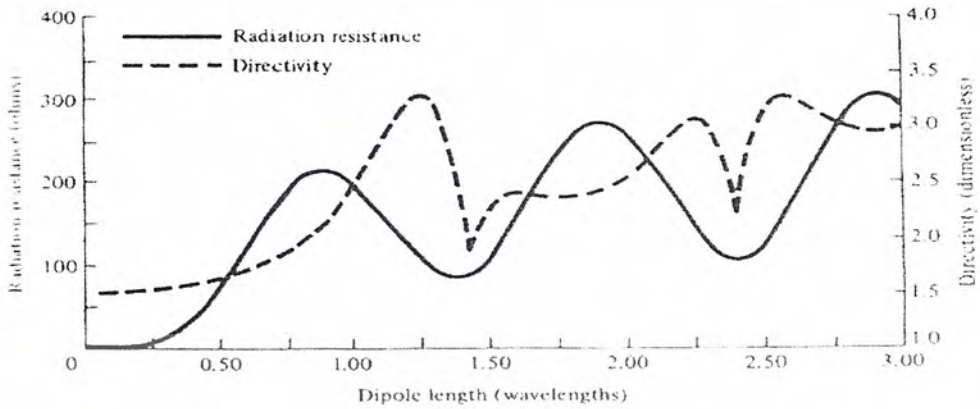
$$S_i(x) = \int_0^x \frac{\sin y}{y} dy \quad (2.56)$$

$$\begin{aligned} C_{in}(x) &= \ln(\gamma x) - C_i(x) \\ &= \ln(\gamma) + \ln(x) - C_i(x) \\ &= 0.5772 + \ln(x) - C_i(x) \end{aligned} \quad (2.57)$$

เมื่อ  $C_{in}(x) = \int_0^x \left( \frac{1 - \cos y}{y} \right) dy \quad (2.58)$

และความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นจะมีค่าดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} R_r = \frac{2P_{rad}}{|I_0|^2} &= \frac{\eta}{2\pi} \left\{ C + \ln(kl) - C_i(kl) + \frac{1}{2} \sin(kl) [S_i(2kl) - 2S_i(kl)] \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \cos(kl) \left[ C + \ln\left(\frac{kl}{2}\right) + C_i(2kl) - 2C_i(kl) \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.59)$$



รูปที่ 2.14 กราฟของค่า  $R_r$  ที่เป็นฟังก์ชันของความยาวของสายอากาศไดโพล

2.2.10 ความต้านทานอินพุท

สมการที่ 2.60 เป็นค่าความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น ณ ตำแหน่งซึ่งกระแสมีค่าสูงสุด มิได้เป็นค่าความต้านทานที่ขั้วของสายอากาศ ดังนั้นถ้าสมมติว่าไม่มีการสูญเสีย ( $R_L = 0$ ) จะหาความต้านทานอินพุทได้ดังนี้

$$\frac{|I_m|^2}{2} R_m = \frac{|I_0|^2}{2} R_r \tag{2.60}$$

หรือ

$$R_{in} = \left[ \frac{I_0}{I_m} \right]^2 R_r \tag{2.61}$$

เมื่อ

$R_{in}$  = ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นที่อินพุท (จุดป้อนกระแส)

$R_r$  = ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นที่กระแสมีค่าสูงสุด

$I_0$  = ค่ากระแสสูงสุด

$I_m$  = กระแสที่ขั้วอินพุท

สำหรับไดโพลที่ยาว  $l$  ถ้า  $I_m$  จะสัมพันธ์กับ  $I_0$  ดังนี้

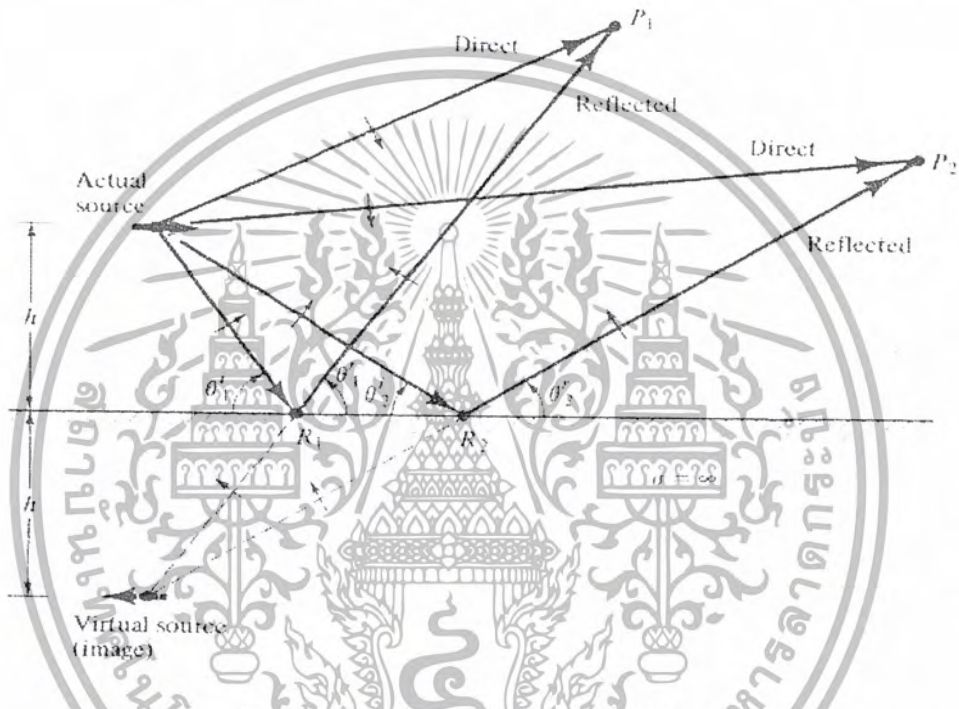
$$I_m = I_0 \sin(kl/2) \tag{2.62}$$

จะได้ความต้านทานอินพุทเป็น

$$R_{in} = R_r / \sin^2(kl/2) \tag{2.63}$$

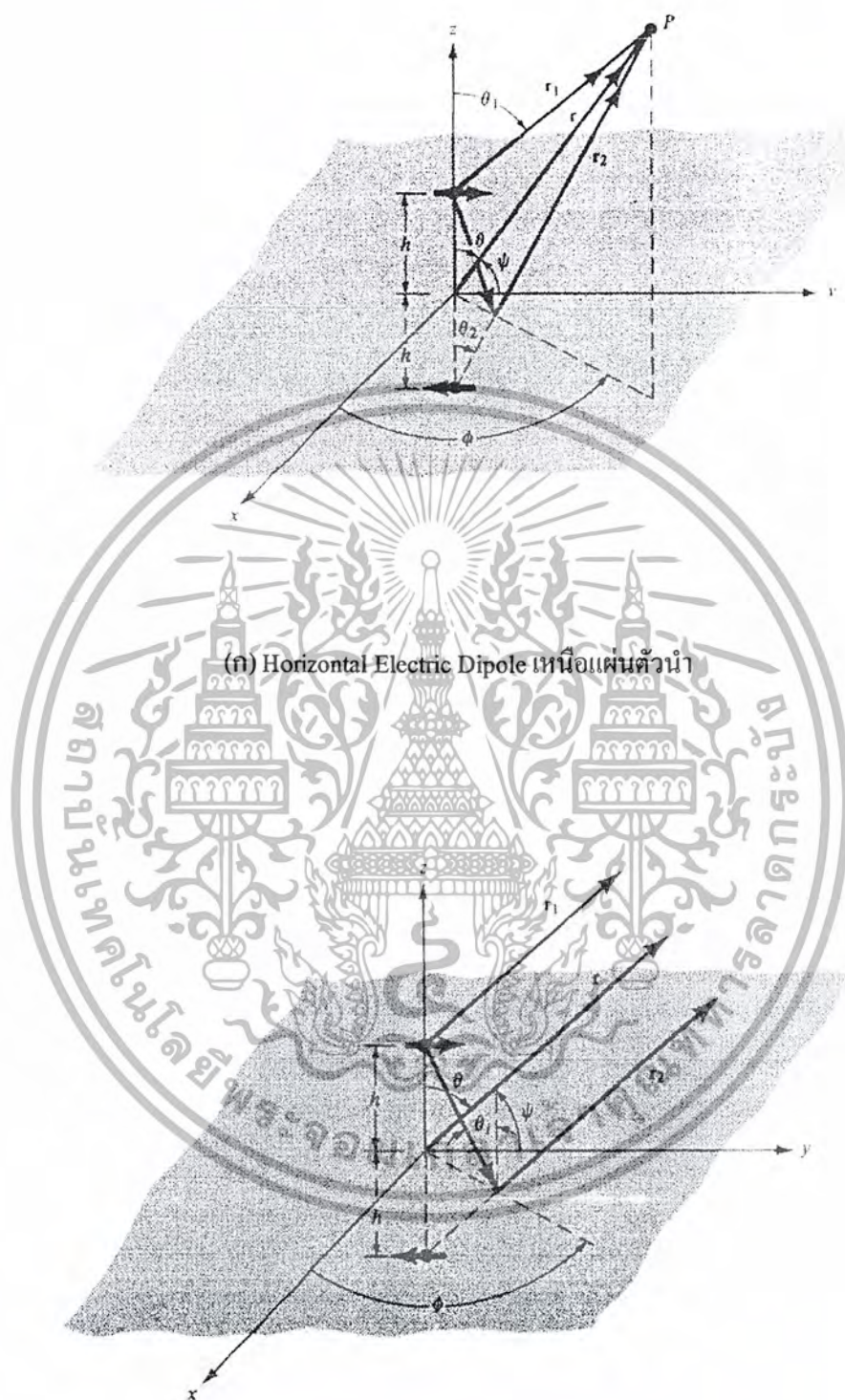
### 2.2.11 ไดโพลเมื่อวางตัวในแนวอนขานานกับแผ่นตัวนำ

ลักษณะของไดโพลเมื่อวางตัวในแนวอนขานานอยู่เหนือแผ่นตัวนำขนาดอนันต์ (Infinite electric ground plane) ซึ่งแผ่นตัวนำนี้จะเป็นตัวนำที่สมบูรณ์ และมีลักษณะแบนเรียบ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 อิเล็กตริกไดโพลซึ่งวางแนวอนขานานกับแผ่นตัวนำสมบูรณ์ขนาดอนันต์

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของไดโพลที่วางตัวแบบนี้ เราจะใช้วิธีการสังเกตแบบสนามระยะไกล (Far field observation) ดังรูปที่ 2.16



(ข) การวิเคราะห์โดยใช้การสังกตสนามระยะไกล

รูปที่ 2.16 โคโพลวางตัวแนวอนเหมือนแผ่นตัวนำสมบูรณ์ขนาดอนันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวทงตรง (Direct Component) จะเขียนได้ว่า

$$E_{\psi}^d = j\eta \frac{kI_0 e^{-jkr_1}}{4\pi r_1} \sin \psi \quad (2.64)$$

และองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวสะท้อน (Reflect Component) เขียนได้ดังนี้

$$E_{\psi}^r = jR_h \eta \frac{kI_0 e^{-jkr_2}}{4\pi r_2} \sin \psi \quad (2.65)$$

หรือ

$$E_{\psi}^r = -j\eta \frac{kI_0 e^{-jkr_2}}{4\pi r_2} \sin \psi \quad \text{เมื่อ} \quad R_h = -1 \quad (2.65ก)$$

$R_h$  คือ reflection coefficient

มุม  $\psi$  เป็นมุมวัดจากแกน Y เข้าสู่จุดสังเกต ในการหามุม  $\psi$  นั้น ในตอนแรกจะดูจาก

$$\cos \psi = \hat{a}_y \cdot \hat{a}_r = \hat{a}_y \cdot (\hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta) = \sin \theta \sin \phi$$

ซึ่งจะเขียนได้ว่า

$$\sin \psi = \sqrt{1 - \cos^2 \psi} = \sqrt{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \phi} \quad (2.66)$$

จากการสังเกตแบบสนามระยะไกล จะได้ว่า

$$\left. \begin{aligned} r_1 &\approx r - h \cdot \cos \theta \\ r_2 &\approx r + h \cdot \cos \theta \end{aligned} \right\} \text{สำหรับการปรับเปลี่ยนเฟส} \quad (2.67ก)$$

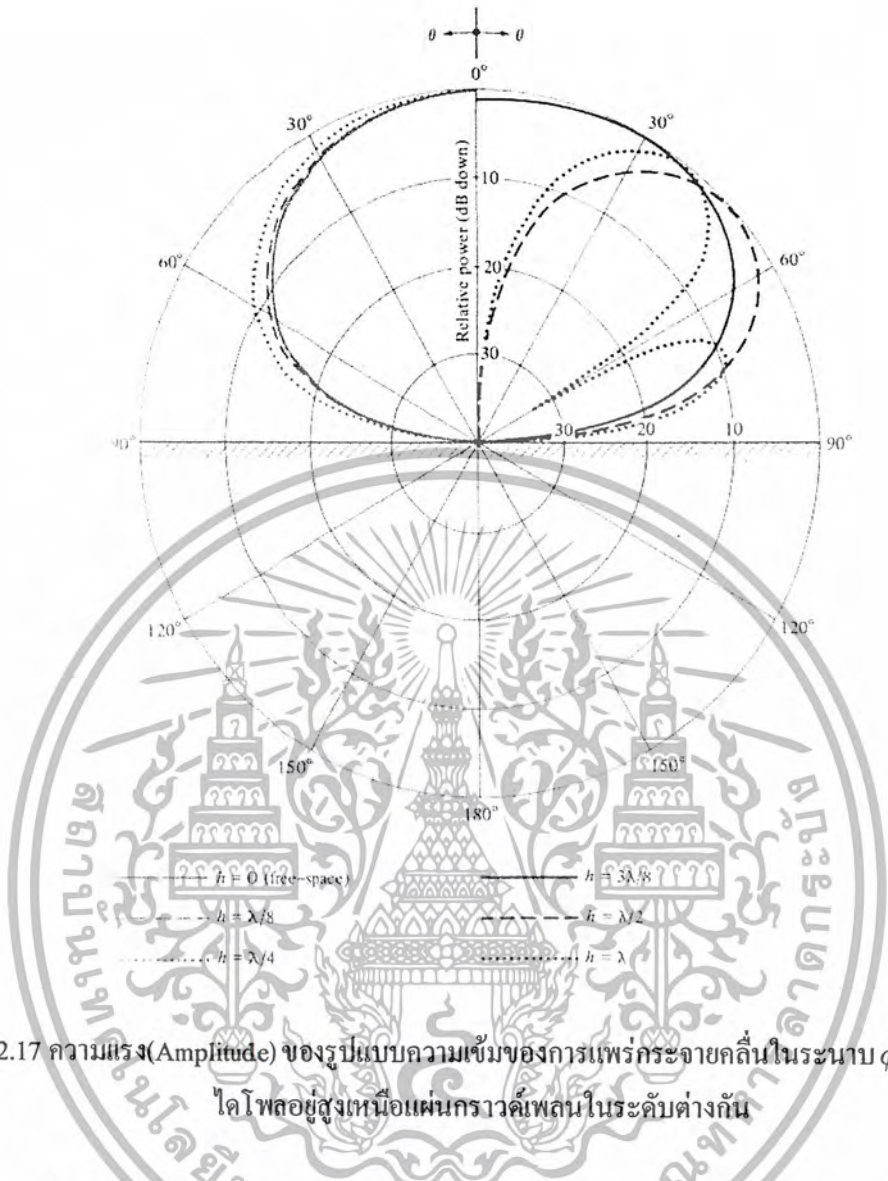
$$r_1 \approx r_2 \approx r \quad \text{สำหรับการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด} \quad (2.67ข)$$

สนามรวมที่ปรากฏขึ้นเหนือแผ่นกราวด์เพลน (โดย  $z \geq 0; 0 \leq \theta \leq \pi/2; 0 \leq \phi \leq 2\pi$ ) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_{\psi} = E_{\psi}^d + E_{\psi}^r = j\eta \frac{kI_0 e^{-jkr}}{4\pi r} \sqrt{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \phi} \cdot [2j \sin(kh \cdot \cos \theta)] \quad (2.68)$$

สมการที่ 2.68 จะประกอบด้วย ผลคูณของสนามไฟฟ้าของเอเลเมนต์แบบเดี่ยว ที่ตั้งห่างจากจุดกำเนิด (origin) อย่างสมมาตรกันกับค่าอาร์เรย์แฟคเตอร์ที่อยู่ในวงเล็บใหญ่ การเปลี่ยนแปลงของสนามรวมเหนือแผ่นกราวด์เพลนนั้น จะขึ้นอยู่กับระยะความสูงของไดโพลเหนือแผ่นกราวด์เพลน ซึ่งเราสามารถดูรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่แสดงเป็น 2 มิติในระนาบ  $\phi = 90^\circ$  ได้ดังรูปที่ 2.17 โดยจะแสดงความสูง ( $h$ ) ต่างๆ ได้แก่  $h = 0, \lambda/8, \lambda/4, 3\lambda/8, \lambda/2$  และ  $\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



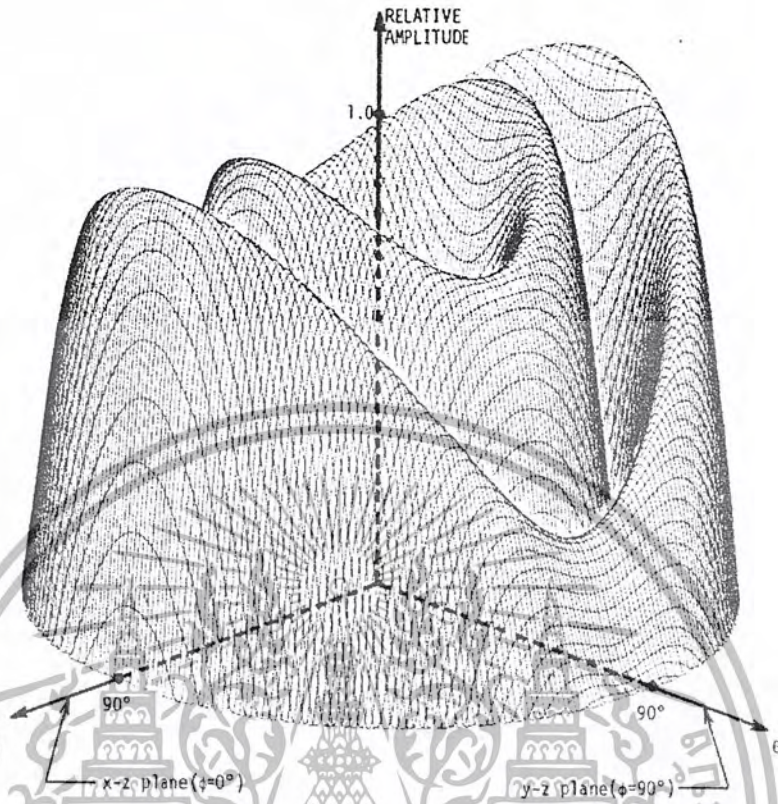
รูปที่ 2.17 ความแรงแรง(Amplitude) ของรูปแบบความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $\phi = 90^\circ$  เมื่อโคโพลอยู่สูงเหนือแผ่นกราวด์เพลนในระดับต่างกัน

เพื่อจะแสดงลักษณะของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นให้เห็นได้อย่างเด่นชัด จะทำการแสดงแบบ 3 มิติ ดังรูปที่ 2.18 ซึ่งเป็นรูปที่แสดงรูปแบบความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น เมื่อโคโพลอยู่สูงเหนือแผ่นกราวด์เพลน เท่ากับหนึ่งความยาวคลื่น ( $h = \lambda$ ) โดยมุมเงย ( $\theta$ ) จะมีมุมเริ่มจาก  $0^\circ$  ถึง  $90^\circ$  และแกน  $z$  จะแทนความแรงของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่นอร์มอลไลต์แล้วมีค่าจาก 0 ถึง 1 และมุมกวาด (Azimuth:  $\phi$ ) จะมีมุมเริ่มจาก 0 ถึง  $2\pi$  ซึ่งวัดจากแกน  $x$  ไปยังแกน  $y$

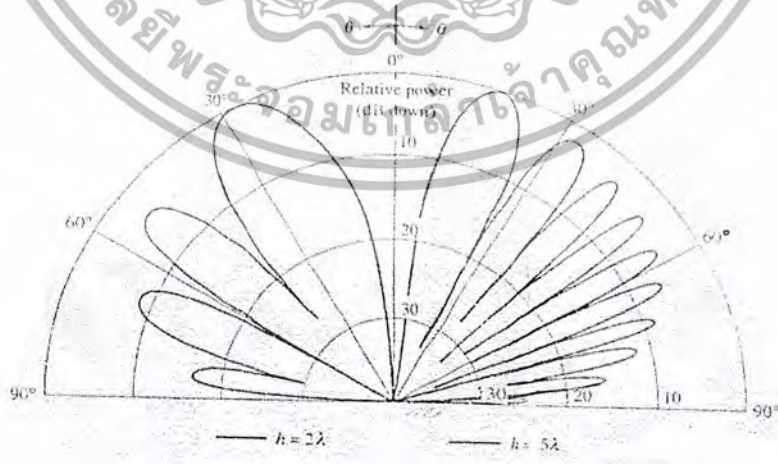
ถ้าเราเพิ่มความสูงของโคโพลจนมากกว่าความยาวคลื่น ( $h > \lambda$ ) ก็จะทำให้เกิดมีโลบ(Lobe) เพิ่มขึ้นมาเหมือนรูปที่ 2.19 คือเมื่อโคโพลสูงเป็น 2 เท่า และ 5 เท่าของความยาวคลื่น โดยโลบที่เพิ่มขึ้นมา จะเกิดซ้อนกันคล้ายกับเปลือกหอย จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Scalloping Effect การหาจำนวนของโลบจะสามารถหาได้โดยใช้สมการที่ 2.69

$$\text{จำนวนของโลบ(number of lobes)} \cong 2 \left( \frac{h}{\lambda} \right) \tag{2.69}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 รูปแบบของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ เมื่อโคโพลอยู่สูงเหนือแผ่นกราวด์  
 เทลนเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่น ( $h = \lambda$ )



รูปที่ 2.19 ความแรงของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $\phi = 90^\circ$  เมื่อโคโพลอยู่สูงเหนือ  
 แผ่นกราวด์เทลน  $2\lambda$  และ  $5\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหาค่ากำลังการแผ่กระจายคลื่น(Radiation Power) หาได้โดยใช้สมการที่ 2.70 ดังนี้

$$P_{rad} = \eta \frac{\pi}{2} \left| \frac{I_0 l}{\lambda} \right|^2 \left[ \frac{2}{3} - \frac{\sin(2kh)}{2kh} - \frac{\cos(2kh)}{(2kh)^2} + \frac{\sin(2kh)}{(2kh)^3} \right] \quad (2.70)$$

และหาความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นได้จาก

$$R_r = \eta \pi \left( \frac{l}{\lambda} \right)^2 \left[ \frac{2}{3} - \frac{\sin(2kh)}{2kh} - \frac{\cos(2kh)}{(2kh)^2} + \frac{\sin(2kh)}{(2kh)^3} \right] \quad (2.71)$$

เมื่อทำการแปลงฟังก์ชัน Sine และ Cosine จากสมการที่ 2.71 ให้อยู่ในรูปอนุกรมแล้วให้ค่า  $kh$  เข้าใกล้ศูนย์ จะได้ว่า

$$R_r^{kh \rightarrow 0} = \eta \pi \left( \frac{l}{\lambda} \right)^2 \left[ \frac{2}{3} - \frac{2}{3} + \frac{8}{15} \left( \frac{2\pi h}{\lambda} \right)^2 \right] = \eta \frac{32\pi^3}{15} \left( \frac{l}{\lambda} \right) \left( \frac{h}{\lambda} \right)^2 \quad (2.72)$$

ค่าความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นที่ได้จากการใช้สมการที่ 2.71 นั้น ถูกนำไปเขียนเป็นกราฟ แสดงได้ดังรูปที่ 2.20 ซึ่งจะให้เห็นว่าค่าของ  $R_r$  เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตั้งแต่  $0$  ถึง  $5$  เท่าของความยาวคลื่น ( $0 \leq h \leq 5\lambda$ ) เมื่อ  $l = \lambda/50$  และให้ค่า  $\eta = 120\pi$

ค่าความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ได้มาจาก

$$U \cong \frac{r^2}{2\eta} |E_\theta|^2 = \frac{\eta}{2} \left| \frac{I_0 l}{\lambda} \right| (1 - \sin^2 \theta \sin^2 \phi) \sin^2(kh \cos \theta) \quad (2.73)$$

ค่าสูงสุดของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในสมการที่ 2.73 นั้น จะขึ้นกับค่า  $kh$  ซึ่งจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไข 2 แบบคือ เมื่อ  $kh \leq \pi/2, h \leq \lambda/4$  หรือเมื่อ  $kh > \pi/2, h > \lambda/4$  สามารถแสดงค่าสูงสุดจากเงื่อนไขทั้งสองได้ดังนี้

$$U_{\max} = \frac{\eta}{2} \left| \frac{I_0 l}{\lambda} \right|^2 \sin^2(kh) \quad \text{เมื่อ } kh \leq \lambda/2 (h \leq \lambda/4); (\theta = 0^\circ) \quad (2.74ก)$$

$$U_{\max} = \frac{\eta}{2} \left| \frac{I_0 l}{\lambda} \right|^2 \quad \text{เมื่อ } \left[ \phi = 0^\circ \text{ and } \dots \sin(kh \cdot \cos \theta_{\max}) = 1 \right. \\ \left. \text{or } \dots \theta_{\max} = \cos^{-1}(\pi/2kh) \right] \quad (2.74ข)$$

หาค่าไดเรกทิวิตีโดยใช้สมการที่ 2.70 และสมการที่ 2.74(ก) , สมการที่ 2.74(ข) จะ ได้ดังนี้

$$D_0 = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} = \frac{4 \sin^2(kh)}{R(kh)} \quad \text{เมื่อ } kh \leq \pi/2, h \leq \lambda/4 \quad (2.75ก)$$

$$D_0 = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} = \frac{4}{R(kh)} \quad \text{เมื่อ } kh > \pi/2, h > \lambda/4 \quad (2.75ข)$$

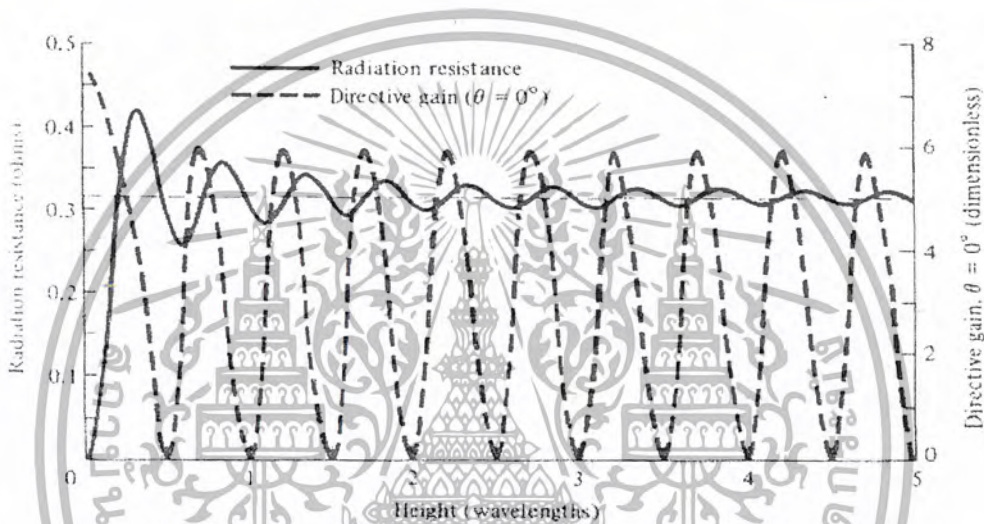
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$R(kh) = \left[ \frac{2}{3} - \frac{\sin(2kh)}{2kh} - \frac{\cos(2kh)}{(2kh)^2} + \frac{\sin(2kh)}{(2kh)^3} \right] \quad (2.75ก)$$

เมื่อค่า  $kh$  มีค่าน้อยมาก(เข้าใกล้ศูนย์) จะทำให้สมการที่ 2.75(ก) กลายเป็น

$$D_0^{kh \rightarrow 0} = \frac{4 \sin^2(kh)}{\left[ \frac{2}{3} - \frac{2}{3} + \frac{8}{15}(kh)^2 \right]} = 7.5 \left( \frac{\sin kh}{kh} \right)^2 \quad (2.76)$$

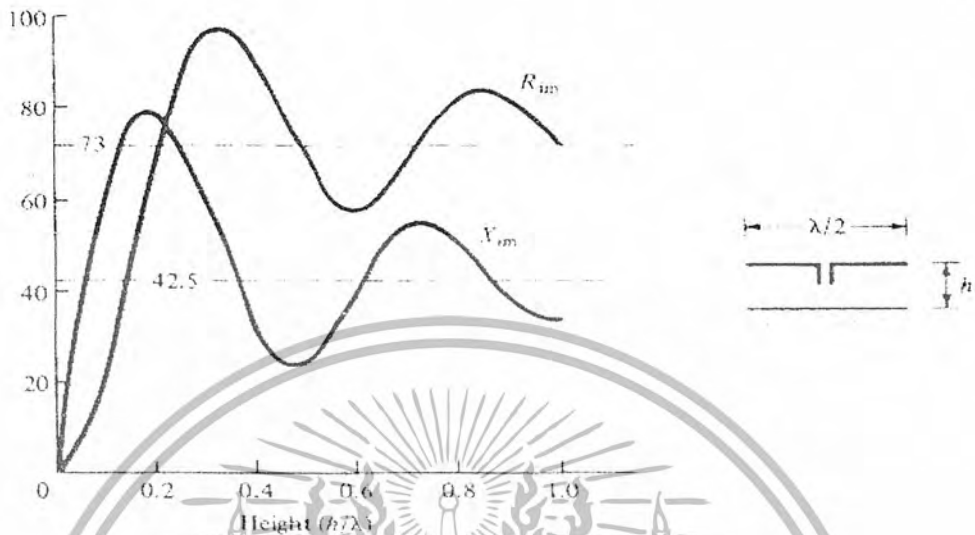


รูปที่ 2.20 ค่าความต้านทานของการแพร่กระจายคลื่น และ ไดเรกทิวิตีของไดโพลที่วางตัวในแนวขนานสูงเหนือแผ่นกราวด์เพลนขนาดอนันต์

เมื่อความสูงเป็นศูนย์ ( $h=0$ ) ก็จะไม่มีการแพร่กระจายคลื่นเลย ในรูปที่ 2.20 จะมีการแสดงค่าของไดเรกทิวิตีด้วย และจากรูปจะเห็นว่า เมื่อค่า  $h$  น้อยๆ ค่าไดเรกทิวิตีจะมีค่าประมาณ 7.5 และจะมีค่าประมาณ 6 เมื่อ  $h \cong (0.725 + n/2)\lambda, n = 0, 1, 2, 3, \dots$

รูปที่ 2.21 นั้นแสดงค่าอินพุทอิมพีแดนซ์(Input Impedance)  $Z_{im} = R_{im} + jX_{im}$  ของไดโพลครึ่งความยาวคลื่นที่อยู่เหนือแผ่นตัวนำที่มีค่าความนำ(Conductivities) ต่างๆกัน ได้แก่  $10^{-2}, 10^{-1}, 10$  S/m และค่าความนำเป็นอนันต์ โดยจะเปลี่ยนความสูงของไดโพลให้อยู่ในช่วง 0 ถึง  $\lambda$

จากรูปที่ 2.21 จะเห็นว่าเมื่อความสูงของไดโพลเหนือแผ่นตัวนำเพิ่มมากขึ้น ค่ารีซิสแตนซ์จะเริ่มมีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่คือ 73 โอห์ม และค่ารีแอกแตนซ์ก็จะเข้าใกล้ค่า 42.5 โอห์ม



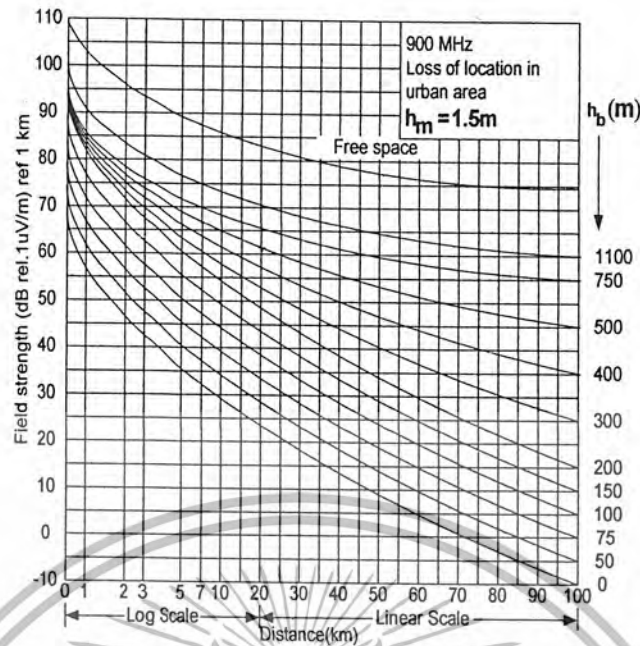
รูปที่ 2.21 ค่าอินพุทิมพีแดนซ์ของไดโพลครึ่งความยาวคลื่นที่อยู่เหนือแผ่นตัวนำ

### 2.3 การคำนวณค่าลดทอนจากการแพร่กระจายคลื่นในระบบวิทยุเคลื่อนที่

#### (Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services)

ในการวางแผนออกแบบระบบวิทยุเคลื่อนที่ภาคพื้นดินนั้น จำเป็นต้องทราบถึง ลักษณะสมบัติ การแพร่กระจายคลื่น โดยวิธีการนั้นจะใช้ผลการทดลองหลายๆครั้ง และใช้การจัดการข้อมูลทางสถิติ ซึ่งมี ผู้ที่ทำการพัฒนาวิธีการต่างๆที่จะใช้คำนวณหาความแรงของสัญญาณจากเครื่องส่ง ไปถึงเครื่องรับที่อยู่ห่าง กันและแสดงให้เห็นว่าค่าลดทอนการแพร่กระจายคลื่นมีความสัมพันธ์แบบลอการิทึม (logarithm) กับ ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ จากผลการศึกษาทั้งหมดพบว่า ผลการศึกษาของโอกูมูระ (Y.Okumura) จะเหมาะกับการใช้งานจริงมากที่สุด เพราะสามารถหาความแรงของสัญญาณ (Field strength) และขอบเขตของพื้นที่บริการ ได้ด้วย นอกจากนี้วิธีการคำนวณค่าคาดคะเน (propagation prediction) การแพร่กระจายคลื่นของโอกูมูระนี้ ถูกใช้เป็นมาตรฐานในการออกแบบระบบการสื่อสาร เคลื่อนที่ (land mobile systems) ของญี่ปุ่นด้วย

ในวิธีการคาดคะเนของโอกูมูระ จะมีการใช้ตัวแปรที่สำคัญในการสร้างเส้นโค้งความแรงของ สัญญาณที่วัดได้ในตัวแปรพื้นฐาน (Basic median field strength curve) ได้แก่ ความสูงประสิทธิภาพของ สายอากาศส่งที่สถานีฐาน ( $h_b$ ), ความถี่ ( $f_c$ ) และความสูงของสายอากาศเคลื่อนที่ ( $h_m$ )



รูปที่ 2.22 เส้นโค้งความแรงของสัญญาณที่วัดได้ในตัวกลางพื้นฐานในย่านความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์

จากรูปที่ 2.22 แสดงเส้นโค้งความแรงของสัญญาณที่วัดได้ในตัวกลางพื้นฐานของความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ ในการที่จะวางแผนระบบโดยใช้วิธีนี้จำเป็นต้องเลือกเส้นโค้งที่สอดคล้องกับ  $(f_c)$ ,  $(h_b)$  และ  $(h_m)$  แต่วิธีการคาดคะเนของ โอคุมูระนี้จะมีผลที่ได้อยู่ในลักษณะของเส้นโค้ง ซึ่งจะยุ่งยากมากในการนำมาวิเคราะห์ ซึ่งต่อมา มาซาฮารุ ฮาตะ (Masaharu Hata) ก็ได้ทำการแก้ไขค่าต่างๆจากเส้นโค้งให้อยู่ในรูปของสมการ โดยกำหนดสภาพพื้นฐานไว้ดังนี้

การลดทอนของสัญญาณจากการแพร่กระจายคลื่น จะพิจารณาจากสายอากาศแบบไอโซทรอปิก สมมติให้เป็นพื้นที่ราบเรียบ และจะไม่นำการลดทอนที่เกิดจากสิ่งกีดขวางมาคิด

สมการพื้นฐานหลักจะคำนวณจากสภาพแวดล้อมในเขตตัวเมือง สำหรับในพื้นที่อื่นจะใช้แฟคเตอร์ในการแก้ไขจากสมการพื้นฐาน

### 2.3.1 ค่าลดทอนการแพร่กระจายคลื่นระหว่างสายอากาศไอโซทรอปิก

(Propagation Loss between Isotropic Antenna)

เมื่อให้กำลังงานประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไอโซทรอปิก เป็น  $P_t$  (dBW : EIRP) และความแรงของสัญญาณที่รับได้โดยสายอากาศไอโซทรอปิก เป็น  $E$  (dBμV / m) ค่าลดทอนจากการแพร่กระจายคลื่น  $L_p$  (dB) ระหว่างสายอากาศไอโซทรอปิกทั้งสองสามารถหาได้ดังต่อไปนี้

ถ้า  $A_{eff}$  คือระนาบตัดการตั้งฉากของสายอากาศไอโซทรอปิก และ  $P_u$  คือ ความหนาแน่นของกำลังงานที่รับได้ ดังนั้นเราจะหากำลังงานที่รับได้ ( $P_r$ ) ได้คือ

$$P_r(dBm) = P_u(dBm/m^2) + 10 \log_{10}(A_{eff}) \tag{2.77}$$

$$A_{eff} = \lambda^2/4\pi ; \lambda \text{ คือ ความยาวคลื่น (เมตร)}$$

$$P_u (dBm/m^2) = E (dB\mu V/m) - 10 \log_{10}(120\pi) - 90$$

ขณะที่ค่าการลดทอนการแพร่กระจายคลื่นคือ ค่าความแตกต่างระหว่างกำลังงานที่แพร่กระจายออกไป กับกำลังงานที่รับได้ โดยการใช้สมการที่ 2.77 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} L_p (dB) &= P_t - P_r \\ &= P_t (dBW) - E (dB\mu V/m) - 10 \log_{10}(\lambda^2/4\pi) + 145.8 \end{aligned} \quad (2.78)$$

### 2.3.2 ค่าลดทอนและเส้นโค้งการคาดคะเนของโอกูมูระ

#### (Okumura's Prediction Curve and Propagation Loss)

เส้นโค้งการคาดคะเนของโอกูมูระ ได้จากการรับสัญญาณที่ถูกส่งที่  $1kW \cdot EIRP/dipole$  จึงจำเป็นต้องแปลงจาก  $ERP/dipole$  ให้เป็น  $EIRP$  โดยการแปลงนั้นจะทำได้โดยบวกค่าความแตกต่างของอัตราขยายกำลังระหว่างสายอากาศไอโซทรอปิกและสายอากาศไดโพล ก็คือ บวกด้วย 2.2 dB เข้าไป

$$P_t (dBW \cdot EIRP) = P_t (dBW \cdot ERP/dipole) + 2.2 (dB) \quad (2.79)$$

เมื่อ  $P_t$  คือ  $1kW (ERP/dipole)$  ดังนั้น  $P_t (dBW \cdot EIRP)$  จึงมีค่าเท่ากับ 32.2 dB

จากสมการที่ 2.78 และ 2.79 จะหาค่าการลดทอนการแพร่กระจายคลื่น  $L_p (dB)$  ระหว่างสายอากาศไอโซทรอปิก โดยการใช้เส้นโค้งการคาดคะเน และได้ตั้งสมการต่อไปนี้

$$L_p (dB) = 178 - 10 \log_{10}(\lambda^2/4\pi) - E (dB\mu V/m) \quad (2.80)$$

### 2.3.3 สูตรสำหรับการหาค่าลดทอนการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดลอง

#### (Empirical Formula for Propagation Loss)

สูตรพื้นฐานของการหาค่าการลดทอนการแพร่กระจายคลื่นในพื้นที่ตัวเมือง ที่มีลักษณะเป็นที่ราบ จะหาได้โดยการใช้เส้นโค้งความแรงของสัญญาณที่วัดได้ในตัวกลางพื้นฐาน (Basic median field strength curve) และจากการทดสอบเส้นโค้งนี้ จะเห็นว่า ความแรงของสัญญาณ  $E (dB\mu V/m)$  นั้นจะเป็นฟังก์ชันของระยะทาง  $R (km)$  คือ

$$E (dB\mu V/m) = \gamma + \beta \log_{10} R \quad (2.81)$$

เมื่อ  $\gamma$  และ  $\beta$  เป็นค่าคงที่ หาได้จาก  $h_b (m)$  และ  $f_c (MHz)$  ดังนั้นค่าการลดทอนการแพร่กระจายคลื่นจะกำหนดได้จากการแทนสมการที่ 2.80 ลงใน 2.81

$$L_p (dB) = A + B \log_{10} R \quad (2.82)$$

$$A = 178 - 10 \log_{10}(\lambda^2/4\pi) - \gamma + a(h_m) \quad (2.83)$$

$$B = -\beta \quad (2.84)$$

เมื่อ  $a(h_m)$  เป็นแฟกเตอร์สำหรับการแก้ไขของความสูงของสายอากาศที่เคลื่อนที่  $h_m(m)$  ซึ่งในเส้นโค้งมาตรฐานนั้นจะใช้  $h_m = 1.5$  เมตร ดังนั้นเราจะให้  $a = 0$  dB เมื่อ  $h_m = 1.5$  เมตร และค่า  $a(h_m)$  จะเป็นค่าอื่นเมื่อ  $h_m$  เปลี่ยนไป

ในการใช้สมการที่ 2.81 และ 2.82 ค่า  $A$  ได้จากการที่ให้ความแรงของสัญญาณ  $E(\text{dB}\mu\text{V}/\text{m})$  ที่  $R = 1$  กิโลเมตร และ  $B$  หาได้จากความชันของเส้นโค้งความแรงของสัญญาณ

ตาราง I	$f_c(\text{MHz})$			
$h_b(m)$	150	450	900	1500
30	105.5	117.0	124.5	132.0
50	103.0	114.0	122.5	129.5
70	101.0	112.0	120.5	127.0
100	98.5	110.0	118.5	125.0
150	96.5	108.0	116.5	123.0
200	94.5	106.0	114.5	121.0

ตารางที่ 2.1 ค่าของ  $A$

ตาราง II	$f_c(\text{MHz})$			
$h_b(m)$	150	450	900	1500
30	35.0	35.0	35.7	35.7
50	33.4	34.1	33.8	34.1
70	33.2	32.5	32.2	33.4
100	31.5	31.3	32.5	32.2
150	30.4	30.4	31.1	30.9
200	29.9	29.4	29.9	20.9

ตารางที่ 2.2 ค่าของ  $B$

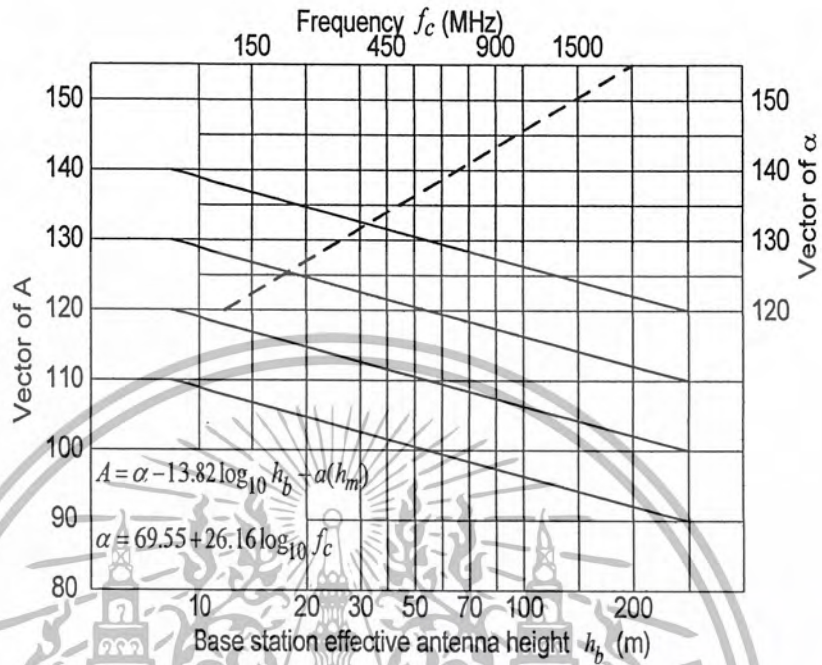
ค่า  $A$  และ  $B$  หาได้จากการใช้เส้นโค้งความแรงของสัญญาณในตัวกลางพื้นฐานซึ่งได้ค่าดังตารางที่ 2.1 และ 2.2 โดยตารางที่ 2.1 นั้นเป็นตารางแสดงค่าของ  $A$  ซึ่งมีลักษณะที่สังเกตได้คือที่แต่ละความถี่  $f_c(\text{MHz})$  นั้นค่า  $A$  จะลดลงเมื่อความสูงของสายอากาศที่สถานีฐาน  $h_b(m)$  เพิ่มขึ้น เมื่อให้  $h_b$  คงที่แล้วเปลี่ยนค่า  $f_c$  ไปโดยการคูณค่า  $n$  จะได้ว่า ค่า  $A$  จะเพิ่มขึ้นเป็นแบบ  $\log(n)$  ซึ่งค่า  $A$  แสดงไว้ในรูปที่ 2.23 จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

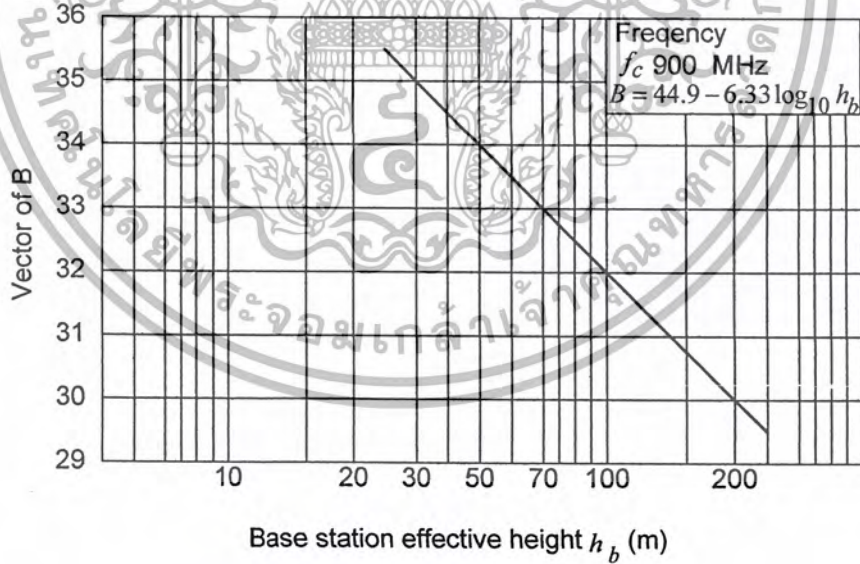
$$A = \alpha - 13.82 \log_{10} h_b - a(h_m)$$

$$\alpha = 69.55 + 26.16 \log_{10} f_c$$

(2.85)



รูปที่ 2.23 กราฟของค่า A



รูปที่ 2.24 กราฟของค่า B

ตารางที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของค่า B ก็จะมีลักษณะที่สังเกตได้ คือ

B จะไม่ขึ้นอยู่กับ  $f_c$

เมื่อ  $h_b$  เพิ่มขึ้น ค่า B ก็จะลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า  $B$  แสดงไว้ในรูปที่ 2.23 แล้ว เมื่อเรลากเส้นในรูปที่ 2.23 เชื่อมต่อระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละค่า  $h_b$  เราจะได้เป็นกราฟเส้นตรง ซึ่งก็แสดงได้ดังรูป และจะได้

$$B = 44.9 - 6.55 \log_{10} h_b \quad (2.86)$$

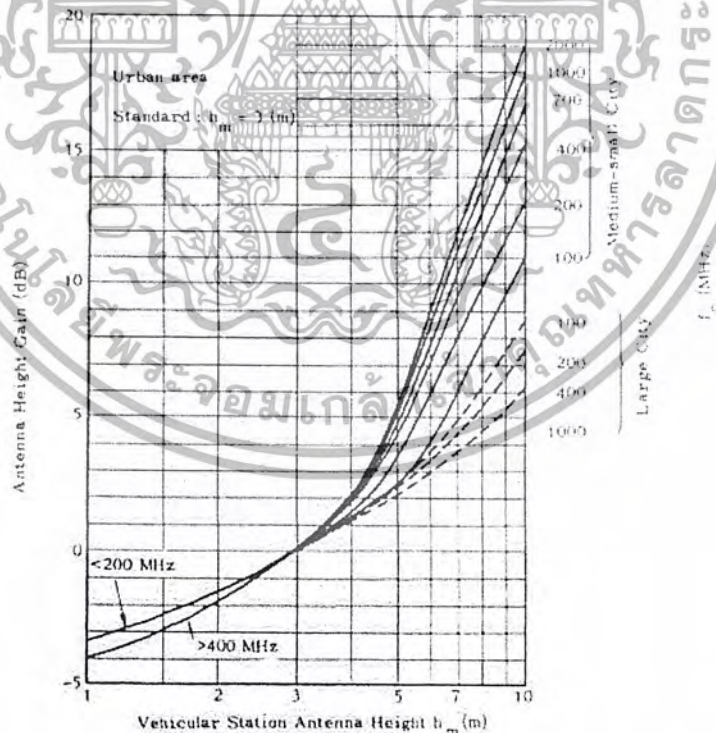
เมื่อเราแทนสมการที่ 2.85 และ 2.86 ลงในสมการที่ 2.82 สูตรพื้นฐานของค่าการลดทอน การแพร่กระจายคลื่น จะประกอบด้วย

$$L_p(\text{dB}) = 69.55 + 26.16 \log_{10} f_c - 13.82 \log_{10} h_b - a(h_m) \\ + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_b) \log_{10} R \quad (2.87)$$

เมื่อ  $f_c = 150 - 1,500$  เมกะเฮิรตซ์,  $h_b = 30 - 200$  เมตร และ  $R = 1 - 20$  กิโลเมตร และ  $a(h_m)$  คือ แฟกเตอร์การแก้ไข (Correction factor) ของ  $h_m$  ซึ่ง  $a = 0$  dB เมื่อ  $h_m = 1.5$  เมตร

### 2.3.4 การหาแฟกเตอร์การแก้ไข (Correction factor)

ในรูปที่ 2.25 จะมีการแสดงเส้นโค้งการแก้ไข (Correction curve) สำหรับความสูงของสายอากาศเคลื่อนที่  $h_m$  เมื่อใช้  $h_m = 3$  เมตร ในพื้นที่ราบในตัวเมือง



รูปที่ 2.25 เส้นโค้งการคาดคะเนสำหรับอัตราการขยายกำลังสองของสายอากาศเคลื่อนที่เมื่ออยู่ในตัวเมือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4.1 แฟกเตอร์การแก้ไขสำหรับเมืองขนาดกลางและขนาดเล็ก

ค่าแฟกเตอร์การแก้ไขที่ใช้สำหรับเมืองที่มีขนาดกลางและขนาดเล็กนั้น ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.25 ซึ่งจะมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง

จากสมการที่ 2.87 ค่า  $h_m$  ที่ใช้คิดในสมการนี้ คือ  $h_m = 1.5$  เมตร ซึ่งก็จะมี  $a = 0$  dB และอาจเขียนแฟกเตอร์การแก้ไขในรูปใหม่ได้เป็น

$$a_{1.5} = \xi(f_c) \cdot h_m - \eta(f_c) \tag{2.88}$$



รูปที่ 2.26 แฟกเตอร์การแก้ไขในเมืองขนาดกลางและเล็ก (1)

รูปที่ 2.27 ค่าสัมประสิทธิ์  $\xi(f_c)$  และ  $\eta(f_c)$

$$\left. \begin{aligned} \xi(f_c) &= 1.1 \log_{10}(f_c) - 0.7 \\ \eta(f_c) &= 1.56 \log_{10}(f_c) - 0.8 \end{aligned} \right\} \tag{2.89}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ 2.89 ลงใน 2.88 จะได้ค่า  $a(h_m)$  ของความสูงของสายอากาศเคลื่อนที่ในเมืองขนาดกลาง และเล็กเป็น

$$a(h_m) = (1.1 \log_{10} f_c - 0.7) \cdot h_m - (1.56 \log_{10} f_c - 0.8) \quad (2.90)$$

เมื่อ

$$h_m = 1 - 10 \text{ เมตร}$$

$$f_c = 150 - 1,500 \text{ เมกะเฮิร์ตซ์}$$

ค่าความผิดพลาด (Error) ในการเขียนกราฟเส้นตรงในรูปที่ 2.26 นั้น จะเป็นสัดส่วนกับความถี่ ซึ่งมี  $f_c = 1,500$  เมกะเฮิร์ตซ์ จะเกิดค่าความผิดพลาดประมาณ 1.0 เดซิเบล เมื่อเรารูปร่างที่ 2.25 จะเห็นว่า ช่วงที่กราฟมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด คือ ช่วงที่  $h_m$  ประมาณ 4 - 5 เมตร ซึ่งเมื่อทำการปรับกราฟให้เป็นกราฟเชิงเส้น (Linear) ดังรูปที่ 2.25 ก็จะทำให้เกิดความผิดพลาดที่บริเวณนี้มากกว่าบริเวณอื่นด้วย ดังนั้นจึงสามารถประมาณได้ว่า ความผิดพลาดจะเกิดขึ้นมากที่สุดที่  $f_c = 1,500$  เมกะเฮิร์ตซ์ และ  $h_m$  ประมาณ 4 - 5 เมตร

#### 2.3.4.2 แฟกเตอร์การแก้ไขสำหรับเมืองขนาดใหญ่

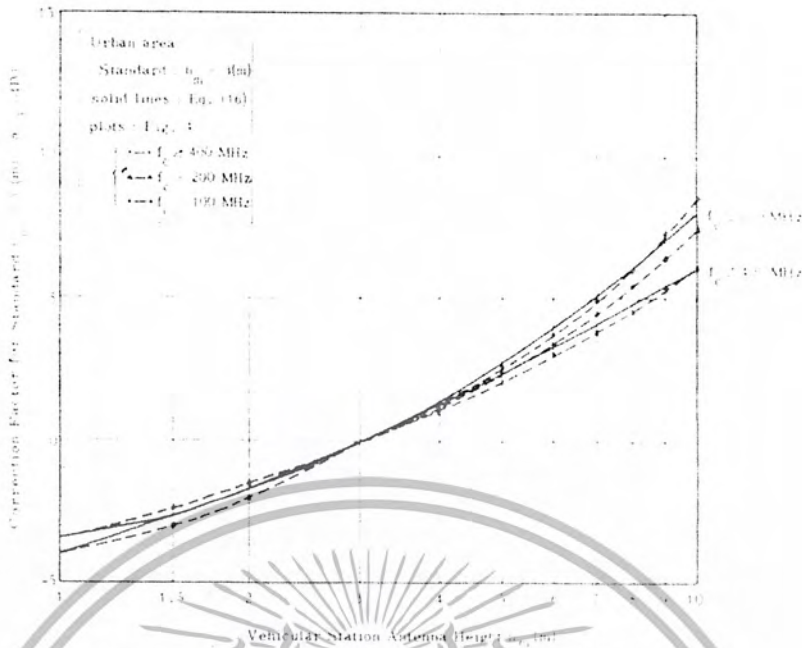
ค่าแฟกเตอร์การแก้ไขสำหรับเมืองใหญ่นี้ แสดงเป็นเส้นประ ในรูปที่ 2.24 ซึ่งเส้นโค้งนี้จะมีลักษณะเป็นพาราโบลา และสมการต่อไปนี้เป็นสมการประมาณค่าของเส้นโค้งเหล่านี้

$$\begin{aligned} a_3 &= 8.29 \cdot (\log_{10} 1.54 \cdot h_m)^2 - 3.69 \text{ (dB)} & ; f_c \leq 200 \text{ เมกะเฮิร์ตซ์} \\ &= 3.2 \cdot (\log_{10} 11.75 \cdot h_m)^2 - 7.63 \text{ (dB)} & ; f_c \geq 400 \text{ เมกะเฮิร์ตซ์} \end{aligned} \quad (2.91)$$

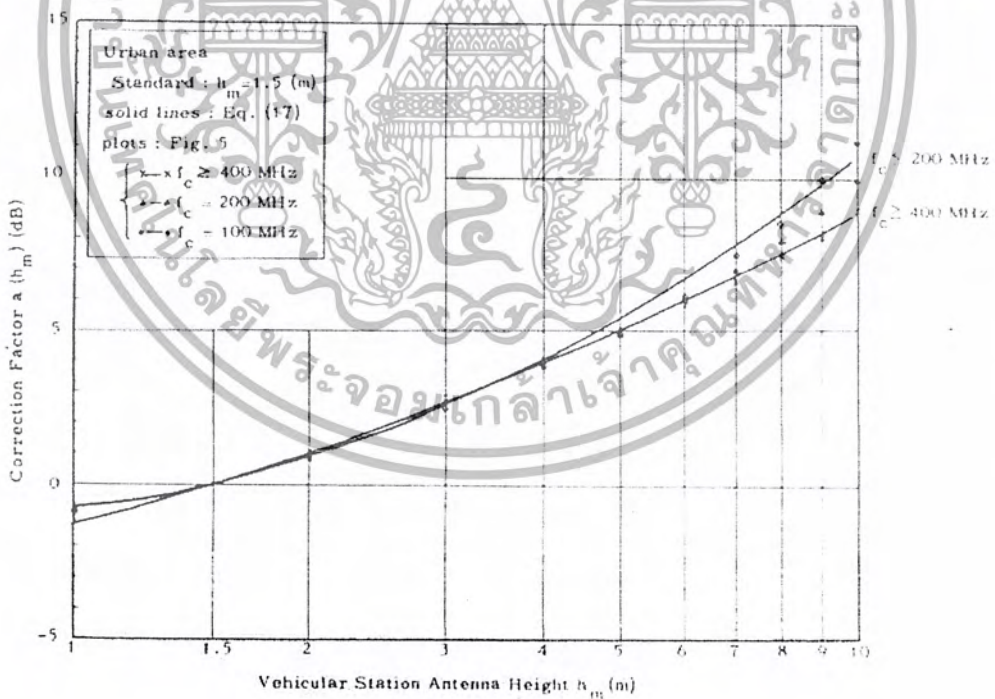
ต้องทำการแปลงสมการที่ 2.91 ให้เป็นไปตามเงื่อนไข เมื่อ ดังนั้นจะได้ค่าแฟกเตอร์การแก้ไข สำหรับความสูงของสายอากาศเคลื่อนที่ ดังนี้

$$\begin{aligned} a(h_m) &= 8.29 \cdot (\log_{10} 1.54 h_m)^2 - 1.1 \text{ (dB)} & ; f_c \leq 200 \text{ เมกะเฮิร์ตซ์} \\ a(h_m) &= 3.2 \cdot (\log_{10} 11.75 h_m)^2 - 4.97 \text{ (dB)} & ; f_c \geq 400 \text{ เมกะเฮิร์ตซ์} \end{aligned} \quad (2.92)$$

จากรูปที่ 2.28 เส้นโค้งของ กับ 100 เมกะเฮิร์ตซ์ นั้นมีค่าความผิดพลาดเพียง 0.5 เดซิเบล เท่านั้น จากรูปที่ 2.29 ค่าที่ได้จากสมการที่ 2.92 และรูปที่ 2.25 นั้น จะใช้ได้คือเมื่อ และจะเกิดค่าความผิดพลาดมากที่สุดในช่วง และ ซึ่งมีค่าประมาณ 1 เดซิเบล เพราะฉะนั้นสมการที่ 2.92 จะใช้ในการหาแฟกเตอร์การแก้ไข สำหรับความสูงของสายอากาศเคลื่อนที่ในเมืองขนาดใหญ่ ที่มีความสูงเฉลี่ยของสิ่งปลูกสร้างโดยรอบมากกว่า 15 เมตร



รูปที่ 2.28 แฟกเตอร์การแก้ไขในเมืองขนาดใหญ่ (1)



รูปที่ 2.29 แฟกเตอร์การแก้ไขในเมืองขนาดใหญ่ (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### ผลการวิเคราะห์การเลือกความยาวของสายอากาศและความสูงของสายอากาศ

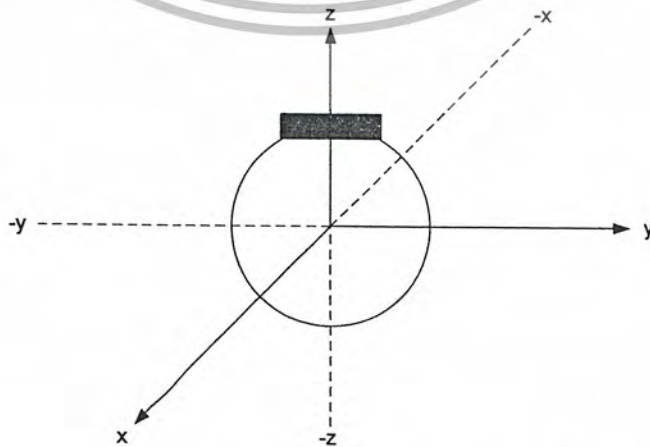
##### 3.1 สมการการหมุนแกน

เนื่องจากสมการการแพร่กระจายคลื่นพื้นฐานของไดโพลที่วิเคราะห์ใน เซิงเส้นวางตามแนวแกน  $z$  และคลื่นจะเดินทางในทิศทาง  $y$  และ  $-y$  ตามสมการที่ 3.1 แต่เนื่องจากในโครงการนี้ต้องการให้สายอากาศไดโพลวางตามแนวแกน  $y$  และคลื่นเดินทางในทิศทาง  $x$  และ  $-x$  ดังนั้นจึงต้องทำการหมุนแกนโดยมีวิธีการหมุนแกนดังนี้

$$E_\theta = j\eta \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[ \frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos(\theta)\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin(\theta)} \right] \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.1(ก) สายอากาศวางอยู่ตามแนวแกน  $z$



รูปที่ 3.1(ข) สายอากาศวางอยู่ตามแนวแกน  $y$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากรูป 3.1(ก) เราจะทำการหมุนแกน  $z$  โดยที่แกน  $y$  และแกน  $x$  อยู่กับที่ จะได้เป็นการหมุนแกน  $z$  ด้วยมุม  $\gamma = \gamma$  ให้ไปอยู่ที่แกน  $y$  เดิม

ซึ่งจากรูป 3.1(ข) สายอากาศไดโพลจะวางตามแนวแกน  $y$  และคลื่นเดินทางในทิศทาง  $x$  และ  $-x$  ตามที่เราต้องการ

จากสมการการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลเดิม โดยเราจะทำการเปลี่ยนมุม  $\theta$  และมุม  $\phi$  ทุกตัวเป็นมุม  $\theta^*$  และมุม  $\phi^*$  แทนลงในสมการที่ 3.1

$$E_{\theta^*} = j\eta \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[ \frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos(\theta^*)\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin(\theta^*)} \right] \quad (3.2)$$

โดยกำหนดให้

$$\cos \theta^* = \cos \gamma \sin \alpha \sin \theta \cos(\phi - \beta) - \sin \gamma \sin \theta \sin(\phi - \beta) + \cos \gamma \cos \alpha \cos \theta \quad (3.3)$$

$$\sin \theta^* = \sin(\cos^{-1}(\cos \theta^*)) \quad (3.4)$$

$$\cos \phi^* = \frac{\cos \alpha \sin \theta \cos(\phi - \beta) - \sin \alpha \cos \theta}{\sin \theta^*} \quad (3.5)$$

$$\sin \phi^* = \frac{1}{\sin \theta^*} [\sin \gamma \sin \alpha \sin \theta \cos(\phi - \beta) + \cos \gamma \sin \theta \sin(\phi - \beta) + \sin \gamma \cos \alpha \cos \theta] \quad (3.6)$$

และค่าของ  $\beta = 0^\circ$   $\alpha = 0^\circ$   $\gamma = \gamma$  แทนค่าของ  $\beta$   $\alpha$   $\gamma$  ลงในสมการที่ 3.3 ถึง 3.6 จะได้ค่าดังนี้

$$\cos \theta^* = -\sin \gamma \sin \theta \sin \phi + \cos \gamma \cos \theta \quad (3.7)$$

$$\sin \theta^* = \sin(\cos^{-1}(-\sin \gamma \sin \theta \sin \phi + \cos \gamma \cos \theta)) \quad (3.8)$$

$$\cos \phi^* = \frac{\sin \theta \cos \phi}{\sin(\cos^{-1}(-\sin \gamma \sin \theta \sin \phi + \cos \gamma \cos \theta))} \quad (3.9)$$

$$\sin \phi^* = \cos \gamma \sin \theta \sin \phi + \sin \gamma \cos \theta \quad (3.10)$$

นำค่าที่ได้จากสมการที่ 3.7 ถึงสมการที่ 3.10 แทนลงในสมการที่ 3.2 ได้ดังนี้

$$E_{\theta^*} = \left[ \frac{\cos\left(\frac{kl}{2}(-\sin \gamma \sin \theta \sin \phi + \cos \gamma \cos \theta)\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin(\cos^{-1}(-\sin \gamma \sin \theta \sin \phi + \cos \gamma \cos \theta))} \right] \quad (3.11)$$

และจากการแปลงเวกเตอร์หน่วย

$$\hat{\theta}^* = a\hat{\theta} + b\hat{\phi} \quad (3.12)$$

$$\hat{\phi}^* = c\hat{\theta} + d\hat{\phi} \quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดให้

$$a = \frac{1}{\sin \theta^*} [\cos \gamma \cos \alpha \sin \theta + \sin \gamma \cos \theta \sin(\phi - \beta) - \cos \gamma \sin \alpha \cos \theta \cos(\phi - \beta)] \quad (3.14)$$

$$b = \frac{1}{\sin \theta^*} [\cos \gamma \sin \alpha \sin(\phi - \beta) + \sin \gamma \cos(\phi - \beta)] \quad (3.15)$$

$$a = d$$

$$b = -c$$

แทนสมการที่ 3.14 และ 3.15 ด้วยค่า  $\beta = 0^\circ$   $\alpha = 0^\circ$   $\gamma = \gamma$

$$a = \frac{\cos \gamma \sin \theta + \sin \gamma \cos \theta \sin \phi}{\sin(\cos^{-1}(-\sin \gamma \sin \theta \sin \phi + \cos \gamma \cos \theta))} \quad (3.16)$$

$$b = \frac{\sin \gamma \cos \phi}{\sin(\cos^{-1}(-\sin \gamma \sin \theta \sin \phi + \cos \gamma \cos \theta))} \quad (3.17)$$

แทนสมการที่ 3.17 และ 3.18 ลงในสมการที่ 3.13 และ 3.14

$$\hat{\theta}^* = \frac{\cos \gamma \sin \theta + \sin \gamma \cos \theta \sin \phi}{\sin(\cos^{-1}(-\sin \gamma \sin \theta \sin \phi + \cos \gamma \cos \theta))} \hat{\theta} + \frac{\sin \gamma \cos \phi}{\sin(\cos^{-1}(-\sin \gamma \sin \theta \sin \phi + \cos \gamma \cos \theta))} \hat{\phi} \quad (3.18)$$

$$\hat{\phi}^* = \frac{\cos \gamma \sin \theta + \sin \gamma \cos \theta \sin \phi}{\sin(\cos^{-1}(-\sin \gamma \sin \theta \sin \phi + \cos \gamma \cos \theta))} \hat{\phi} - \frac{\sin \gamma \cos \phi}{\sin(\cos^{-1}(-\sin \gamma \sin \theta \sin \phi + \cos \gamma \cos \theta))} \hat{\theta} \quad (3.19)$$

เนื่องจาก

$$E = E_{\theta^*} \times \hat{\theta}^* + E_{\phi^*} \times \hat{\phi}^* \quad (3.20)$$

เนื่องจากสายอากาศวางอยู่ในแนวแกน y จึงไม่มีค่า  $E_{\theta}$

แทนสมการที่ 3.18 และ 3.19 ลงในสมการที่ 3.20 จะได้สนาม

$$E_{\theta} = \left[ \frac{\cos(\frac{kl}{2}(-\sin \gamma \sin \theta \sin \phi + \cos \gamma \cos \theta)) - \cos \frac{kl}{2}}{\sin(\cos^{-1}(-\sin \gamma \sin \theta \sin \phi + \cos \gamma \cos \theta))} \right] \times \frac{\cos \gamma \sin \theta + \sin \gamma \cos \theta \sin \phi}{\sin(\cos^{-1}(-\sin \gamma \sin \theta \sin \phi + \cos \gamma \cos \theta))} \quad (3.21)$$

$$E_{\phi} = \left[ \frac{\cos(\frac{kl}{2}(-\sin \gamma \sin \theta \sin \phi + \cos \gamma \cos \theta)) - \cos \frac{kl}{2}}{\sin(\cos^{-1}(-\sin \gamma \sin \theta \sin \phi + \cos \gamma \cos \theta))} \right] \times \frac{\sin \gamma \cos \phi}{\sin(\cos^{-1}(-\sin \gamma \sin \theta \sin \phi + \cos \gamma \cos \theta))} \quad (3.22)$$

สมการสนามไฟฟ้ารวม

$$E = \sqrt{|E_{\theta}|^2 + |E_{\phi}|^2} \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 สมการสนามไฟฟ้าที่แผ่นกราวด์(ground plane)

จากสมการสนามไฟฟ้าที่มีอยู่แล้วเอามาทำการใส่แผ่นกราวด์

$$E_{\theta_{ground}} = E_{\theta} \times 2j \sin(kh \cos \theta) \tag{3.24}$$

$$E_{\phi_{ground}} = E_{\phi} \times 2j \sin(kh \cos \theta) \tag{3.25}$$

$$E_{ground} = \sqrt{|E_{\theta_{ground}}|^2 + |E_{\phi_{ground}}|^2}$$

### 3.3 สมการไดเรกทิวิตี(Directivity) ที่มีแผ่นกราวด์

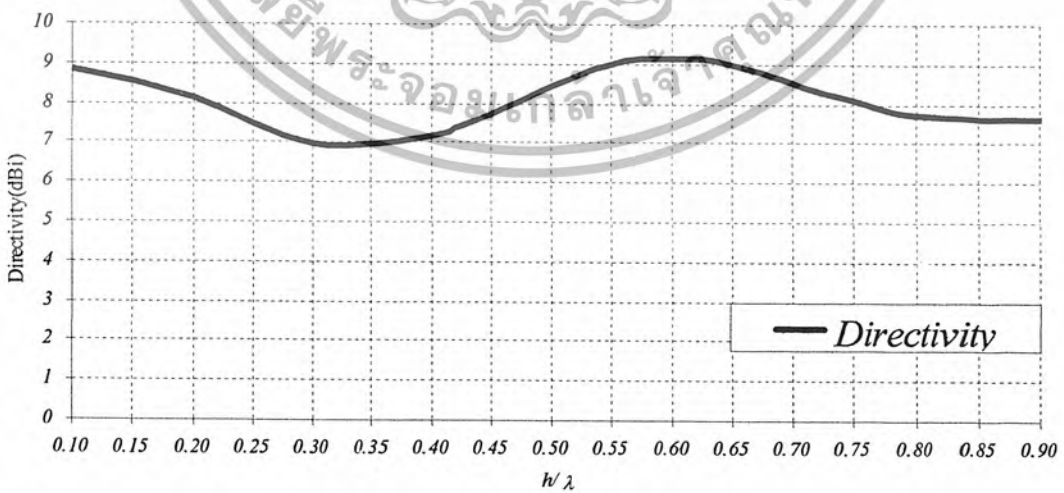
นำสมการที่ 3.24 และ 3.25 มาหา ค่าไดเรกทิวิตีที่มีแผ่นกราวด์

$$U = \frac{1}{2\eta} \left[ |E_{\theta_{ground}}|^2 + |E_{\phi_{ground}}|^2 \right] \tag{3.26}$$

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U \sin \theta d\theta d\phi \tag{3.27}$$

$$D = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \tag{3.28}$$

เมื่อนำสมการที่ 3.28 ไปทำการเปลี่ยนแปลงความสูงจาก  $0.1\lambda$  ถึง  $0.9\lambda$  และนำ ค่าไดเรกทิวิตี ที่ได้มาทำกราฟดังนี้



รูปที่ 3.2 ค่าไดเรกทิวิตี เมื่อมีแผ่นกราวด์ที่สายอากาศความยาวต่าง ๆ

### 3.4 สมการอิมพีแดนซ์ (Impedance)

พิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ที่ค่าความยาวต่างๆ

$$R_s = \frac{\eta}{2\pi} \left\{ C + \ln(kl) - C_i(kl) + \frac{1}{2} \sin(kl) [S_i(2kl) - 2S_i(kl)] \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \cos(kl) \left[ C + \ln\left(\frac{kl}{2}\right) + C_i(2kl) - 2C_i(kl) \right] \right\} \quad (3.29)$$

$$X_s = \frac{\eta}{4\pi} \left\{ 2S_i(kl) + \cos(kl) [2S_i(kl) - S_i(2kl)] \right. \\ \left. - \sin(kl) \left[ 2C_i(kl) - C_i(2kl) - C_i\left(\frac{2ka^2}{l}\right) \right] \right\} \quad (3.30)$$

$$S_i(x) = \int_0^x \frac{\sin(\tau)}{\tau} d\tau \quad (3.31)$$

$$C_i(x) = -\int_x^\infty \frac{\cos(\tau)}{\tau} d\tau \quad (3.32)$$

$$C = 0.577$$

$$\eta = 120\pi \text{ โอห์ม}$$

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

$\alpha$  = อัตราส่วนระหว่างความยาวสายอากาศกับรัศมีของสายอากาศ

นำค่าคงที่และสมการที่ 3.31 และ 3.32 แทนค่าลงในสมการที่ 3.29 และ 3.30 จะได้ค่าของอิมพีแดนซ์

$$Z_s = R_s + X_s \quad (3.33)$$

### 3.5 การหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)

#### 1. อินพุท อิมพีแดนซ์ (Input Impedance)

คือ อิมพีแดนซ์ที่บริเวณที่ต่อเข้ากับสายนำสัญญาณ

#### 2. อิมพีแดนซ์ที่จุดขับ (Driving point Impedance)

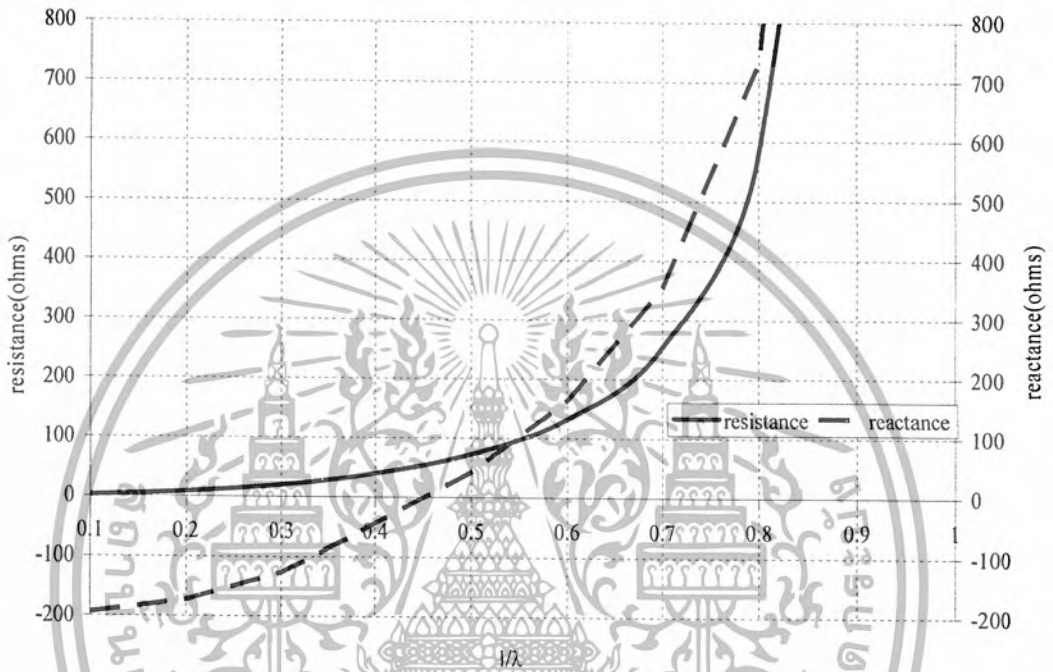
คือ อิมพีแดนซ์ที่บริเวณที่กระแสที่ป้อนมีค่าสูงสุด (maximum current)

ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์หาได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_m = \frac{Z_s}{\sin^2\left(\frac{\beta l}{2}\right)} \tag{3.34}$$

เมื่อนำค่าสมการที่ 3.34 ไปทำการเปลี่ยนแปลงความยาวแล้วนำค่า อินพุทอิมพีแดนซ์ ที่ได้มาทำกราฟดังนี้



รูปที่ 3.3 ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ที่ค่าความยาวสายอากาศต่างๆ

เมื่อพิจารณาจากกราฟ ที่ความยาวสายอากาศ เท่ากับ  $0.5\lambda$  จะเห็นว่า อินพุทอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศ มีค่าเท่ากับ  $73.127+42.545i$  โอห์ม ซึ่งมีค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศใกล้เคียงกับค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของทรานส์คือ 75 โอห์ม

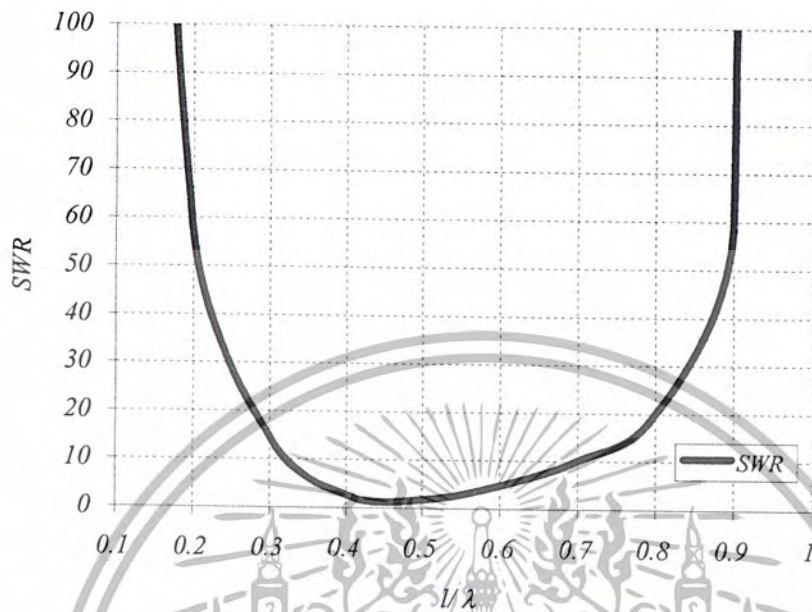
### 3.6 การหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง(Standing Wave Ratio:SWR)

โดยค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งหาได้จากสมการดังนี้

$$\Gamma = \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} \tag{3.35}$$

$$SWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \tag{3.36}$$

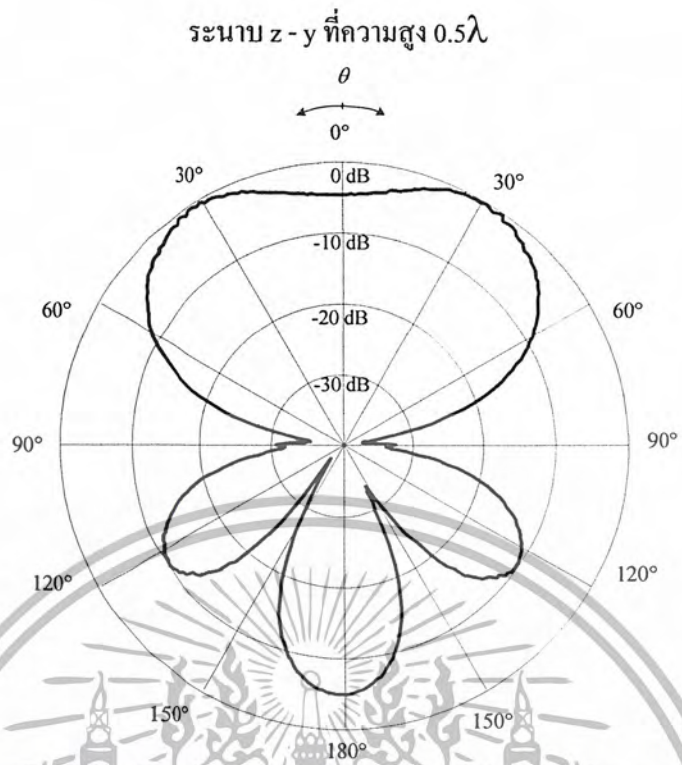
เมื่อนำค่าสมการที่ 3.36 ไปทำการเปลี่ยนแปลงความยาวแล้วนำค่า อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ที่ได้มาทำกราฟดังนี้



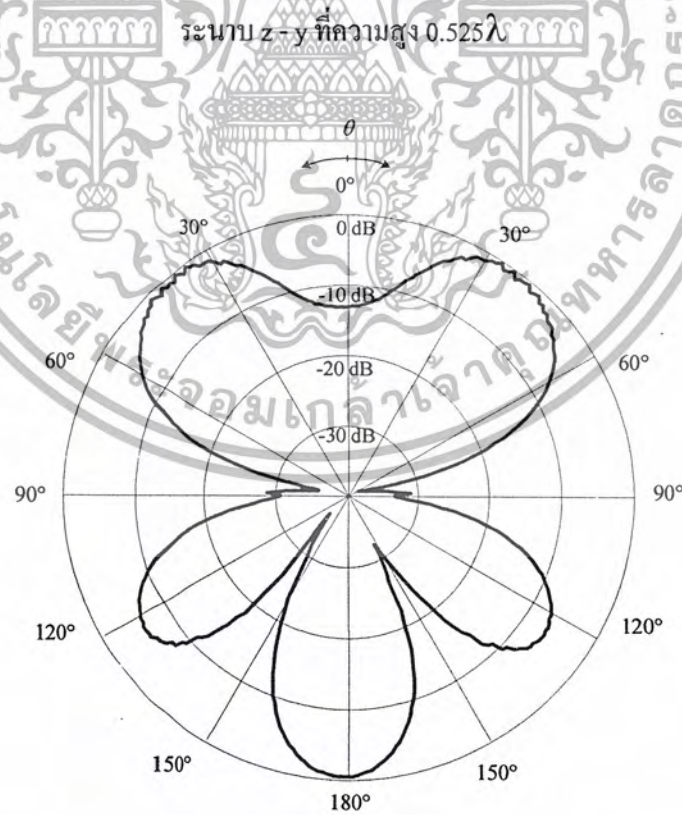
รูปที่ 3.4 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่สายอากาศความยาวต่างๆ  
เมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นว่า ที่ความยาวสายอากาศ  $0.5\lambda$  มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.764  
ซึ่งเป็นค่าที่เรายอมรับได้

### 3.7 การหาค่าความสูงของสายอากาศจากแผ่นกราวด์

เราจะพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบต่างๆ โดยสายอากาศวางตามแนวแกน  $y$  โดยการใช้โปรแกรม SNEC ในการพิจารณา โดยเราต้องการมุมแบบรูปของสายอากาศที่มีการขึ้น  $30^\circ$



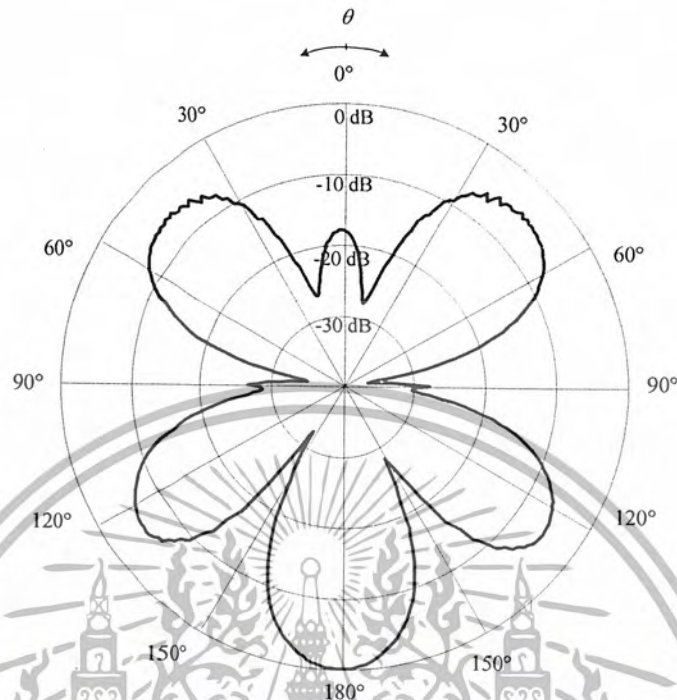
รูปที่ 3.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ 0.5 λ (H-plane)



รูปที่ 3.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ 0.525 λ (H-plane)

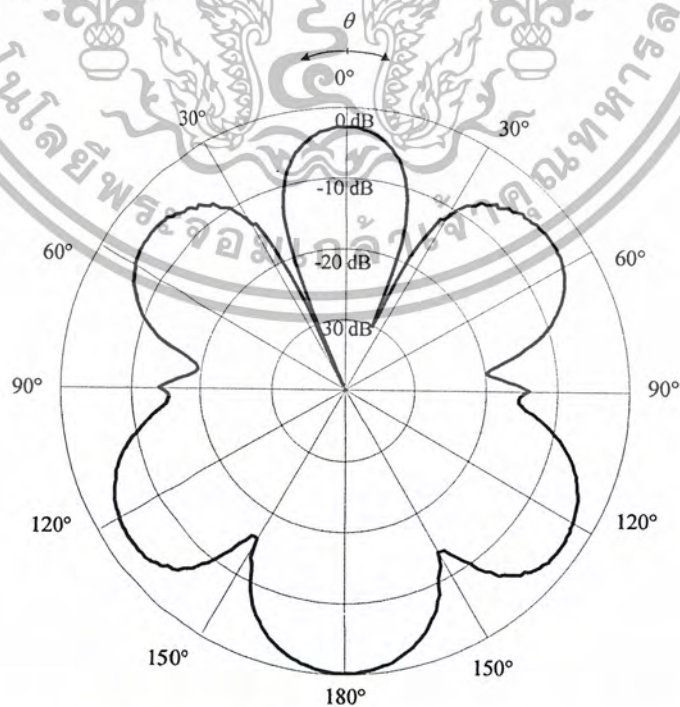
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบ  $z-y$  ที่ความสูง  $0.55\lambda$



รูปที่ 3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ  $0.55\lambda$  (H-plane)

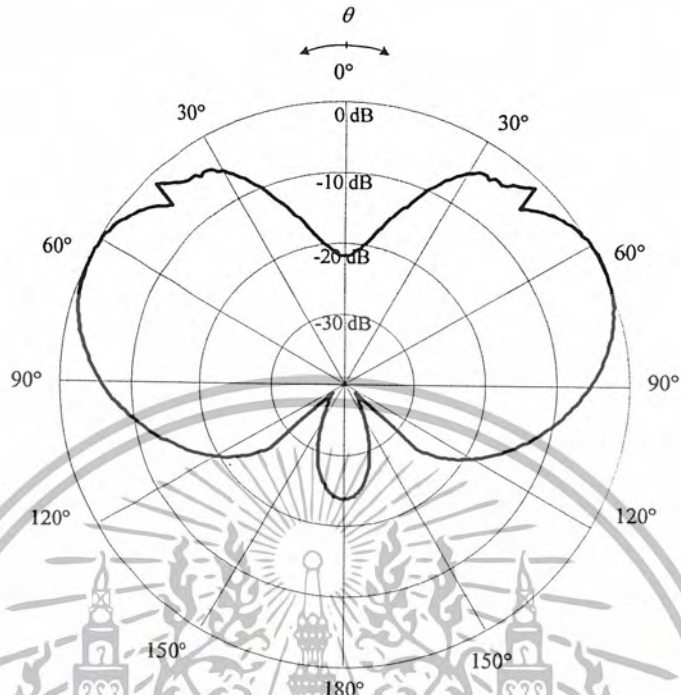
ระนาบ  $z-y$  ที่ความสูง  $0.575\lambda$



รูปที่ 3.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ  $0.575\lambda$  (H-plane)

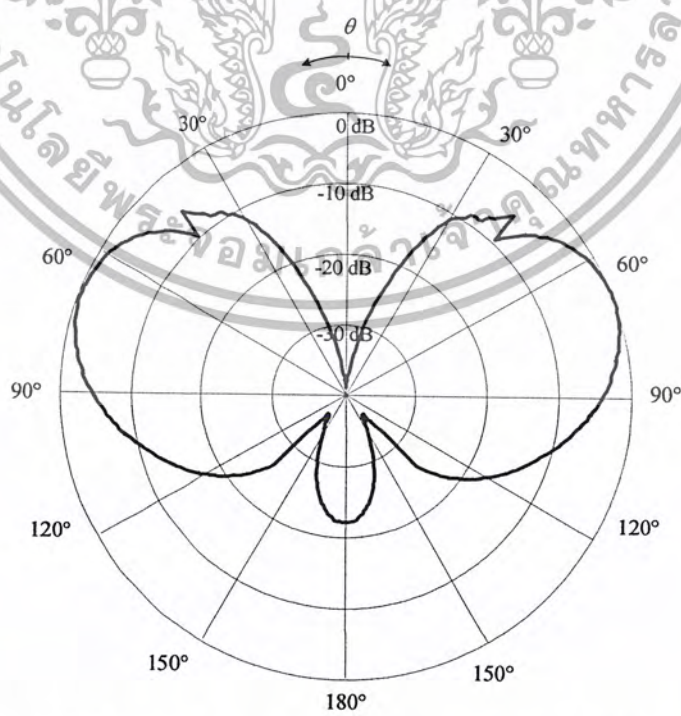
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบ z - x ที่ความสูง 0.5λ



รูปที่ 3.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ 0.5 λ

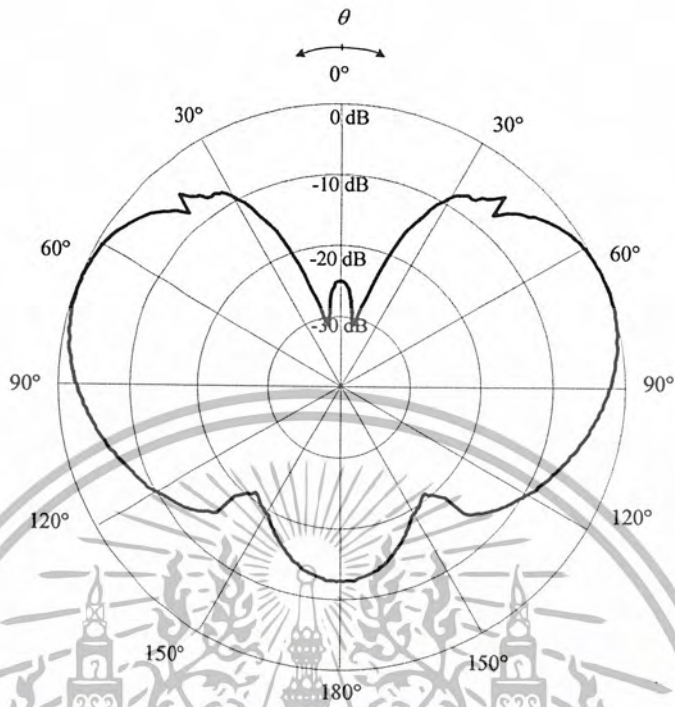
ระนาบ z - x ที่ความสูง 0.525λ



รูปที่ 3.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ 0.525 λ

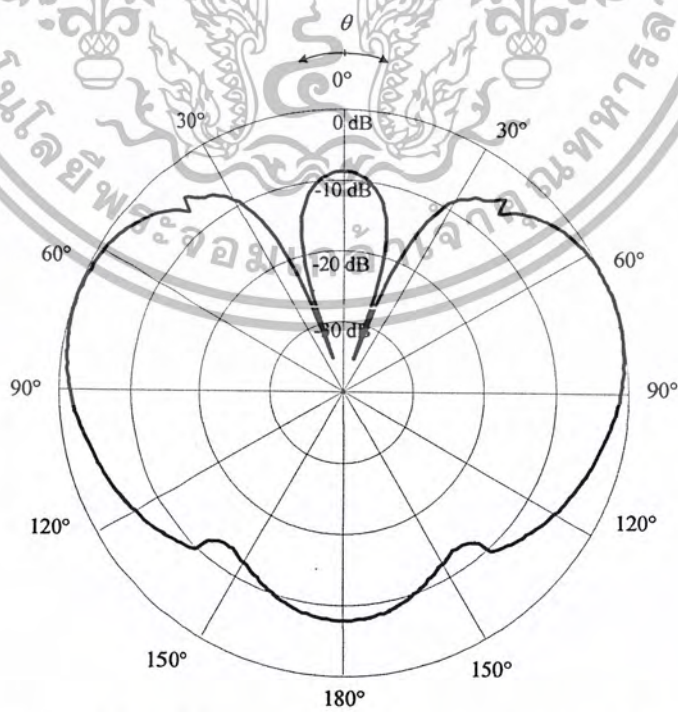
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบ z - x ที่ความสูง 0.55λ



รูปที่ 3.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ 0.55 λ

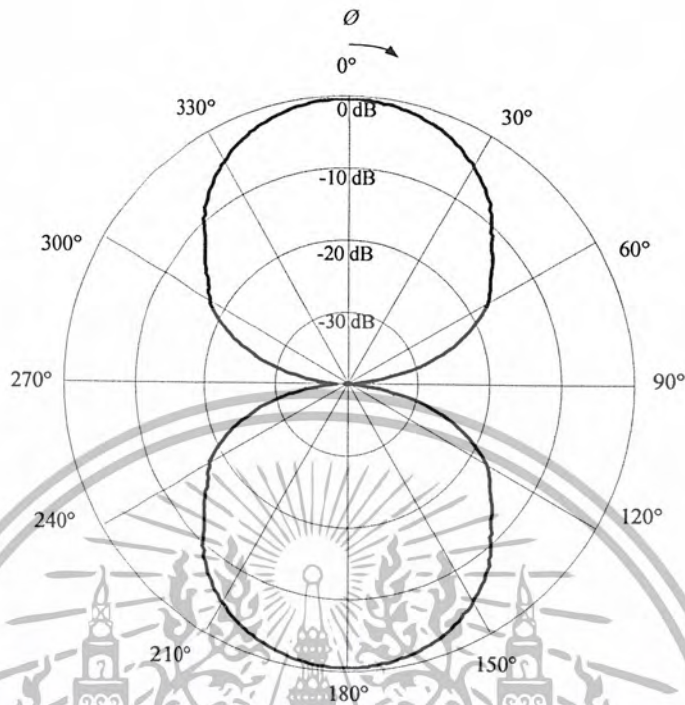
ระนาบ z - x ที่ความสูง 0.575λ



รูปที่ 3.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ 0.575 λ

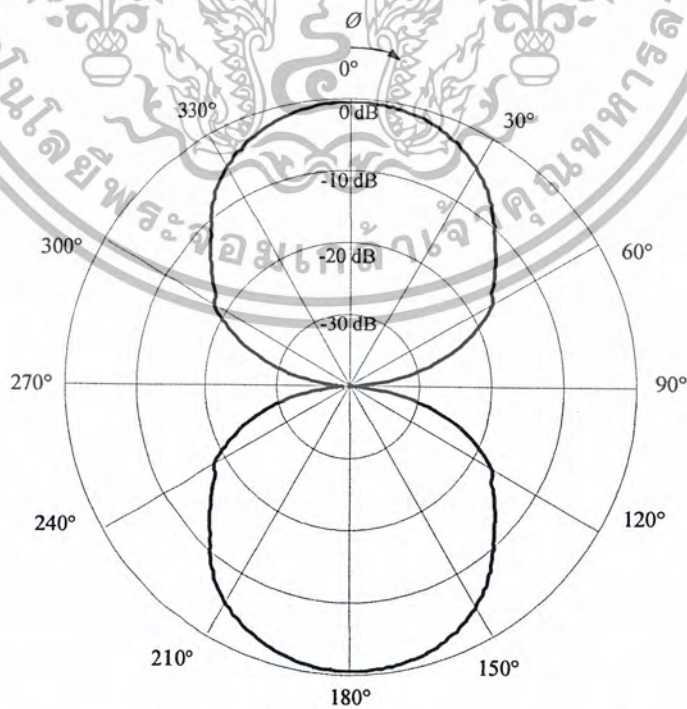
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบ x-y ที่ความสูง  $0.5\lambda$



รูปที่ 3.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ  $0.5 \lambda$  (E-plane)

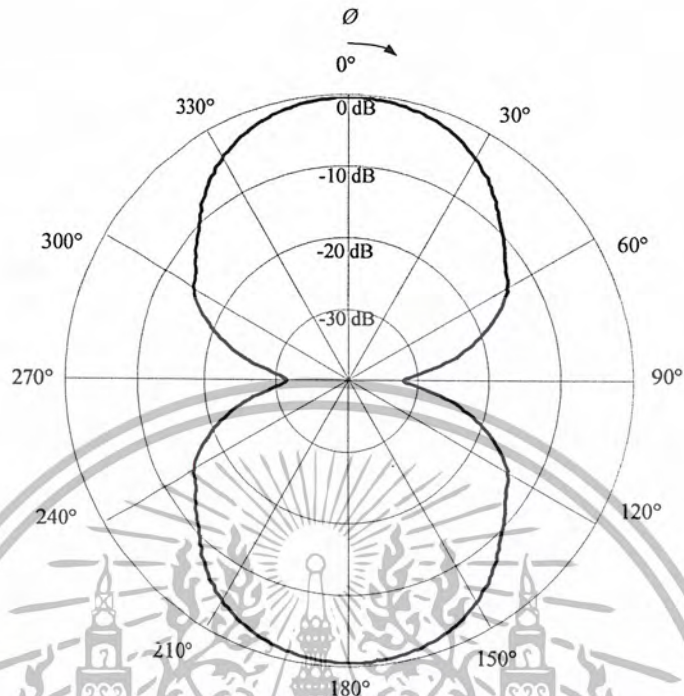
ระนาบ x-y ที่ความสูง  $0.525\lambda$



รูปที่ 3.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ  $0.525 \lambda$  (E-plane)

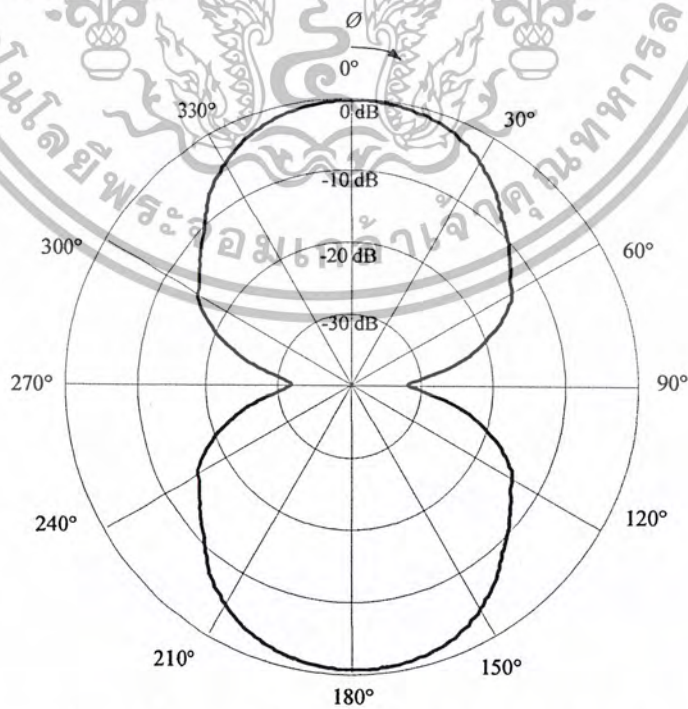
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบ x-y ที่ความสูง 0.55λ



รูปที่ 3.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ 0.55 λ (E-plane)

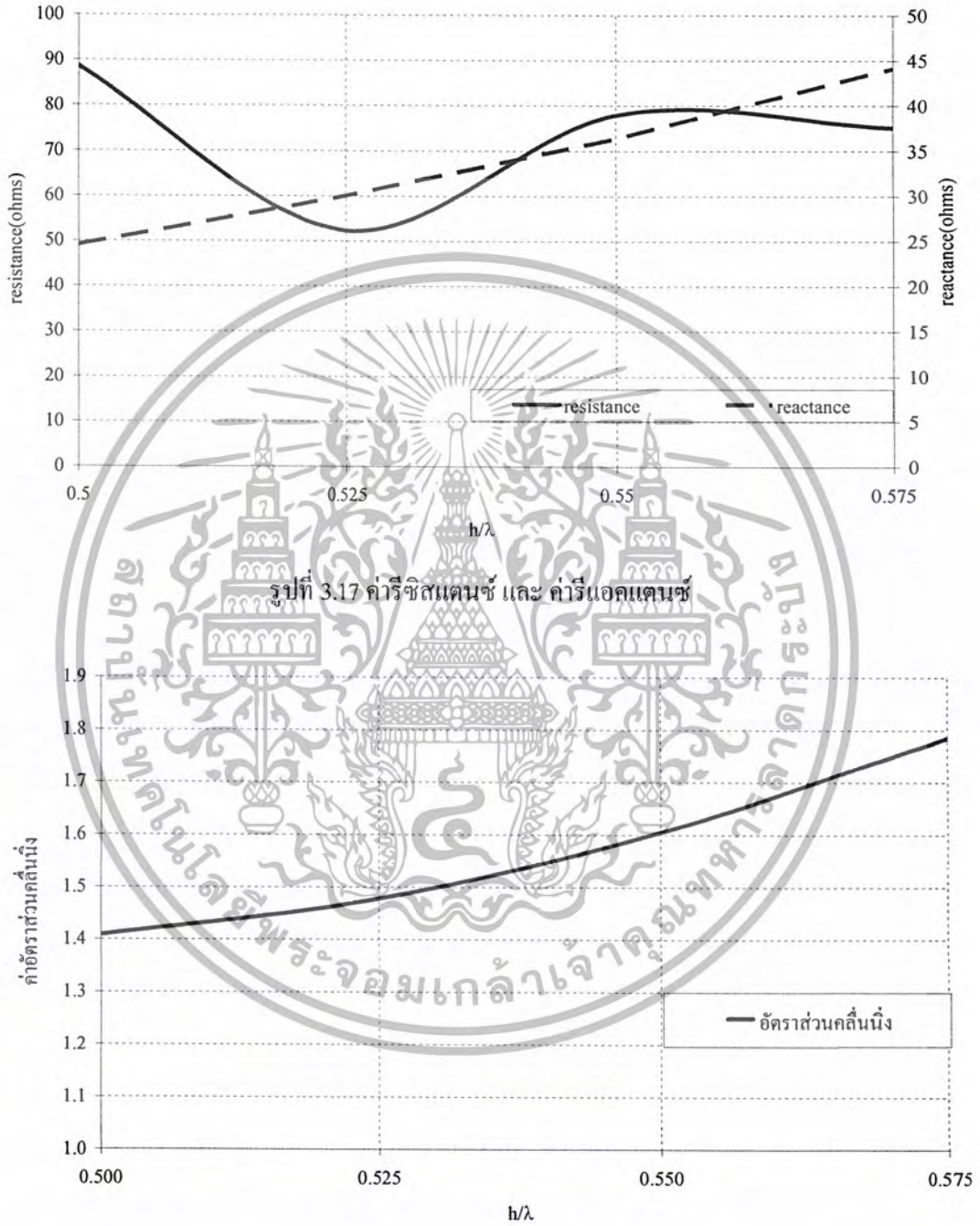
ระนาบ x-y ที่ความสูง 0.575λ



รูปที่ 3.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความสูงของสายอากาศเท่ากับ 0.575 λ (E-plane)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาจากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะเห็นว่าความสูงที่ต่ำที่สุดของสายอากาศที่ระยะ  $0.525\lambda$  เป็นช่วงความสูงที่ต่ำสุดที่ทิศทางการรับคลื่นของสายอากาศยังคงมีทิศทางที่ได้อยู่ตรงตามที่เราต้องการ



รูปที่ 3.18 กราฟอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

เมื่อพิจารณาจากกราฟอัตราส่วนคลื่นนิ่ง จะเห็นว่าค่าไม่เกิน 2 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้เมื่อพิจารณาทั้งแบบรูปการรับคลื่นและค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งรวมกันแล้ว เราจึงเลือกสายอากาศที่มีความสูง  $0.525\lambda$  จากแผ่นกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การออกแบบสร้างและทดสอบ

#### 4.1 การสร้างสายอากาศ

ในการสร้างสายอากาศนี้ได้ทำการออกแบบให้สายอากาศทำงานที่ความถี่ 537.5 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) เท่ากับ 55.814 เซนติเมตร โดยใช้ท่อลูมิเนียมกลมกลวงเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 เซนติเมตร เป็นสายอากาศ แต่เนื่องจากใช้ท่อลูมิเนียมเป็นสายอากาศทำให้ความเร็วสัญญาณลดลงเหลือ 0.95 เท่าของความเร็วคลื่น เพราะฉะนั้นความยาวคลื่นในการทำสายอากาศจะเท่ากับ 53.023 เซนติเมตร

เนื่องจากเป็นสายอากาศแบบไดโพลครึ่งความยาวคลื่น (half wave dipole) ฉะนั้นจะได้ความยาวสายอากาศเท่ากับ 26.511 เซนติเมตร และทำการป้อนสัญญาณ (feed) ตรงกลางสายอากาศในแบบแรงดันระหว่างช่องว่าง (delta-gap voltage) โดยทำการแบ่งสายอากาศเป็น 2 ท่อน เพื่อทำการเชื่อมต่อเข้ากับสายโคแอกเซียลเป็นสายนำสัญญาณ



รูปที่ 4.1 สายอากาศไดโพลที่ป้อนสัญญาณตรงกลาง

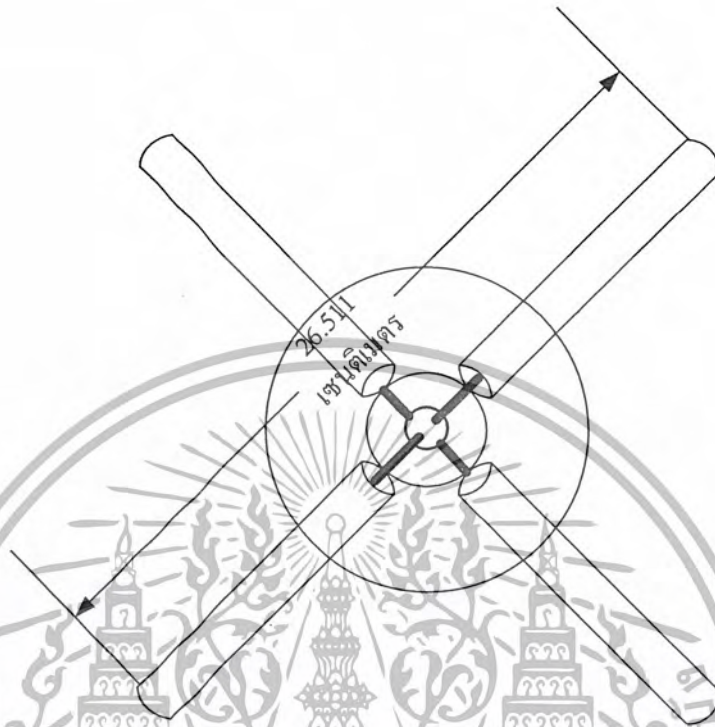
โดยความยาวสายโคแอกเซียลนี้ จะเท่ากับ  $\frac{n\lambda}{2}$  โดยสายโคแอกเซียล(RG-6) มีความเร็วเท่ากับ 0.77 เท่าของความเร็วคลื่น ดังนั้นสายโคแอกเซียลมีความยาวเท่ากับ 21.486 เซนติเมตร



รูปที่ 4.2 สายโคแอกเซียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวสายอากาศจะต้องคิดจากปลายด้านหนึ่ง ถึงปลายอีกด้านหนึ่ง โดยรวมความยาวส่วนที่เป็นช่องว่างของสายอากาศด้วย



รูปที่ 4.3 สายอากาศไดโพลยาวครึ่งความยาวคลื่นแบบไขว้

#### 4.2 การหาระยะห่างของสายอากาศในการทดสอบ

ทำการสร้างสายอากาศ 2 ตัว

1. เป็นสายอากาศไดโพลเป็นตัวส่ง
2. เป็นสายอากาศไดโพลแบบไขว้เป็นตัวรับ

คำนวณหาระยะการแพร่กระจายคลื่นที่ต้องวางสายอากาศ 2 ตัว ซึ่งระยะทางนี้จะเป็นระยะทางที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการทดลอง โดยคำนวณจากสมการดังนี้

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.1)$$

D คือ มิติของสายอากาศที่ยาวที่สุด

เนื่องจากสายอากาศมีความยาวไม่เท่ากัน ดังนั้นจะต้องนำ D ของทั้งตัวรับและตัวส่งมาบวกกันเป็น  $D_{รวม}$  แล้วค่อยเอาค่า  $D_{รวม}$  ไปคำนวณหาระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D ของสายอากาศส่งเท่ากับ 26.511 เซนติเมตร

D ของสายอากาศรับเท่ากับ 78.93 เซนติเมตร

$D_{รวม}$  เท่ากับ  $26.511+78.93 = 105.441$  เซนติเมตร



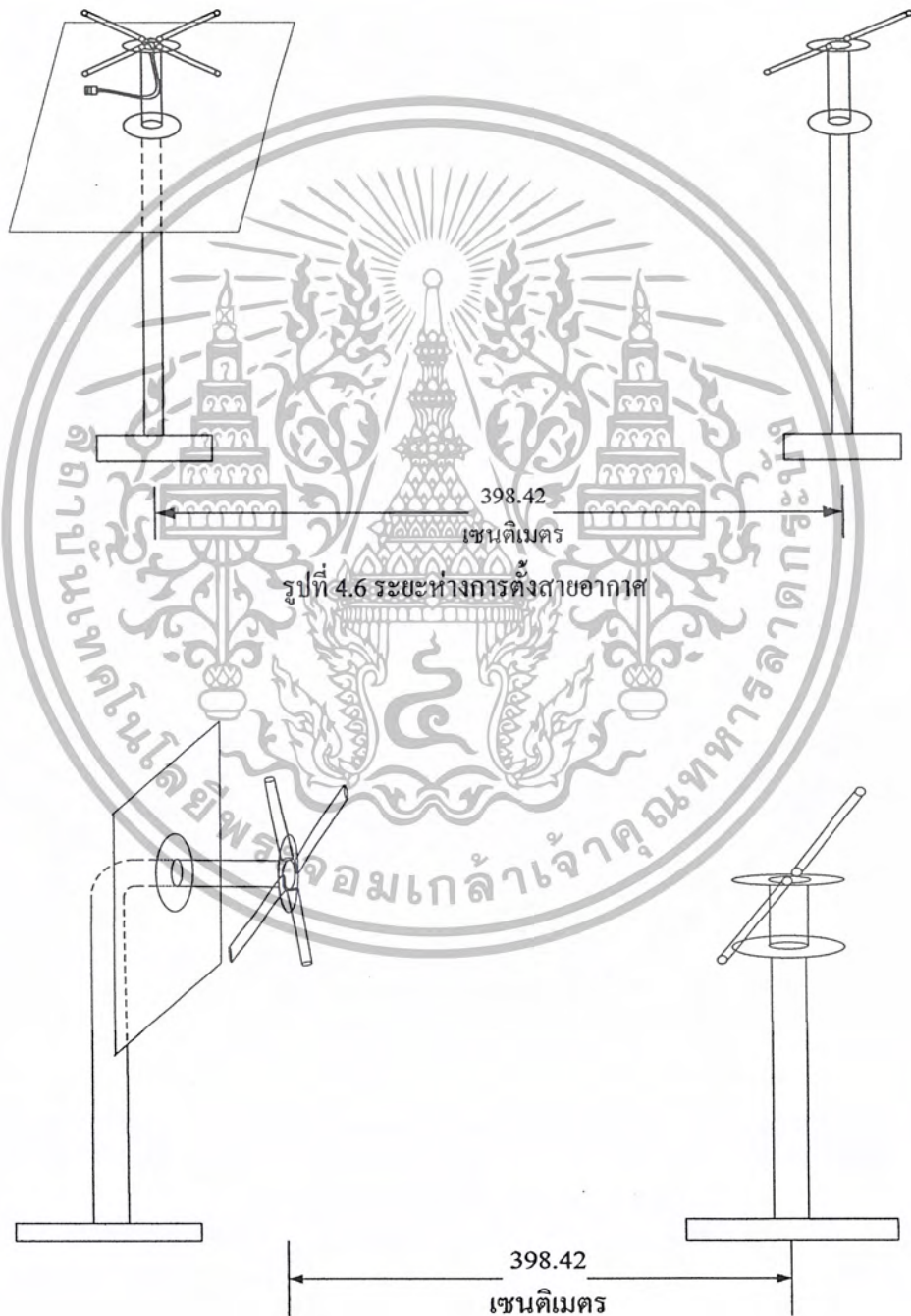
รูปที่ 4.5 สายอากาศรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่า  $D_{รวม}$  แทนค่าในสมการที่ 4.1

$$\text{ระยะทางที่น้อยที่สุด} = \frac{2(105.411)^2}{55.81} \text{ เซนติเมตร}$$

$$\text{ระยะทางที่น้อยที่สุด} = 398.416215 \text{ เซนติเมตร}$$

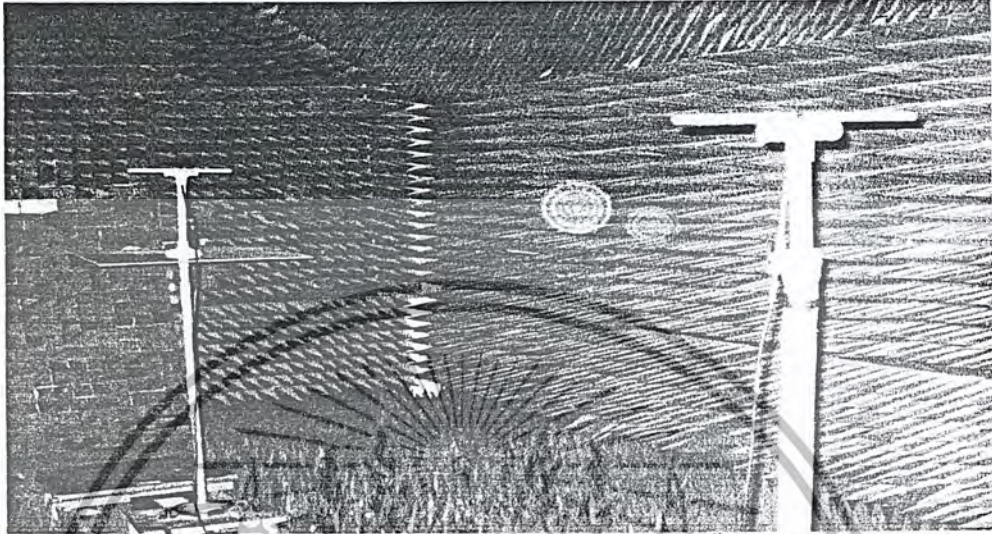


รูปที่ 4.7 ระยะห่างการตั้งสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

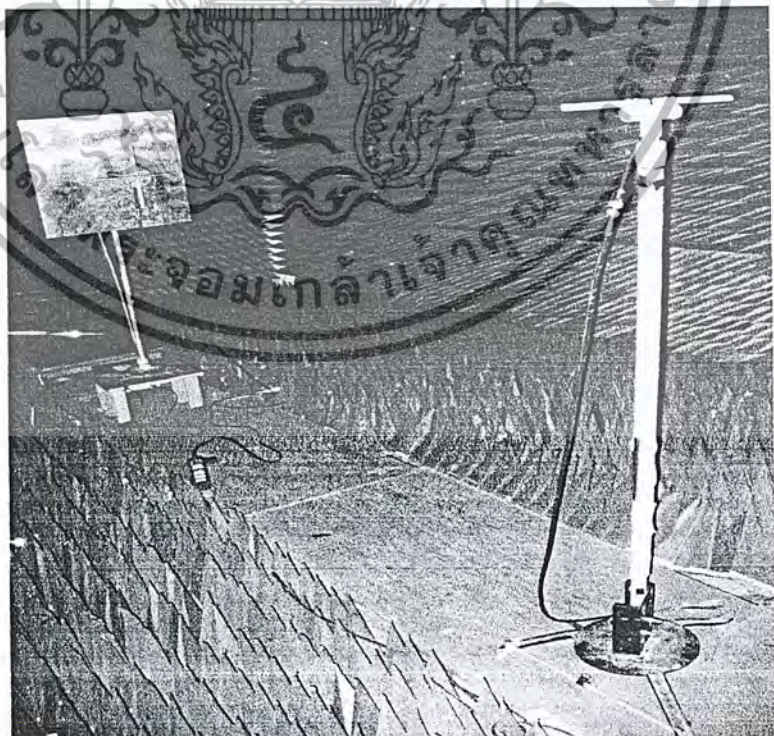
### 4.3 การทดลองหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

วัดการแพร่กระจายคลื่นในแนวตั้ง (E-plane) โดยการวางตัวรับให้แผ่นสะท้อนขนานกับพื้นที่ทำการทดลอง โดยความสูงของทั้งตัวรับและส่งจะต้องมีความสูงเท่ากัน แล้วทำการวัดโดยการหมุนสายอากาศรับ เริ่มตั้งแต่ 0 องศาไปจนถึง 360



รูปที่ 4.8 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแนวตั้ง (E-plane)

วัดการแพร่กระจายคลื่นในแนวนอน (H-plane) โดยการวางตัวรับให้แผ่นสะท้อนตั้งฉากกับพื้นที่ทำการทดลอง โดยความสูงของทั้งตัวรับและส่งจะต้องมีความสูงเท่ากัน แล้วทำการวัดโดยการหมุนสายอากาศรับ เริ่มตั้งแต่ 0 องศาไปจนถึง 360



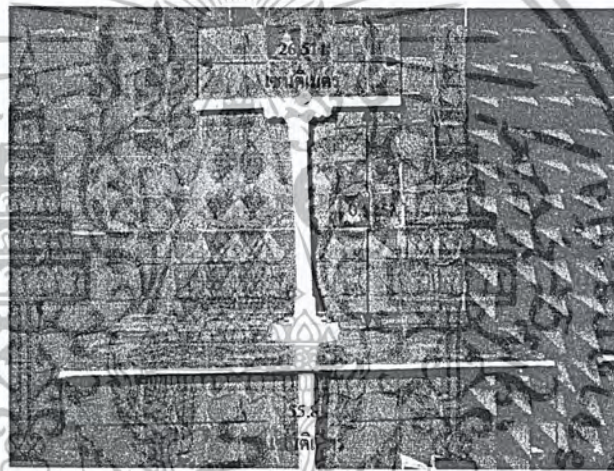
รูปที่ 4.9 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแนวนอน (H-plane)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

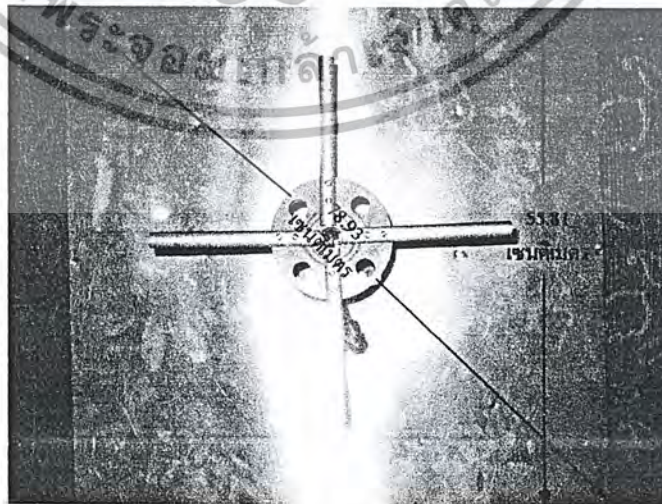
## 4.4 สายอากาศต้นแบบ



รูปที่ 4.10 สายอากาศส่ง



รูปที่ 4.11 สายอากาศรับในแนวตั้ง



รูปที่ 4.12 สายอากาศรับในแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การสร้างเครื่องเลือกรับสัญญาณภาพ

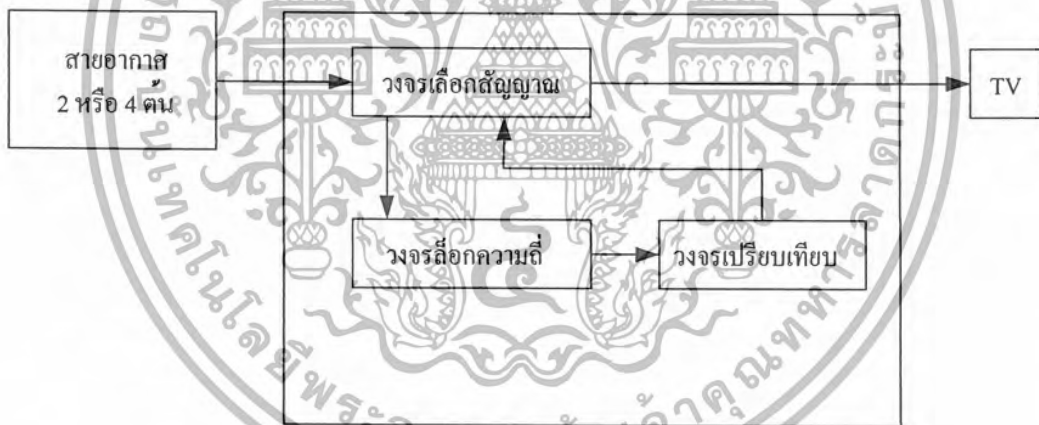
##### 4.5.1 แนวคิดเบื้องต้น

จากพฤติกรรมของสัญญาณภาพโทรทัศน์บนรถที่ไม่สามารถให้ประสิทธิภาพของการรับชมได้ดี เนื่องจาก

1. สัญญาณภาพไม่คมชัด เกิดสัญญาณรบกวน ภาพเกิดสโนว์ สัญญาณภาพบางครั้งชัดบ้างไม่ชัดบ้าง
2. มีการเลื่อนขึ้นของสัญญาณภาพ
3. เกิดเงาซ้อนของภาพจากสาเหตุดังกล่าวได้ทำการพิจารณาถึงสาเหตุของอาการต่าง ๆ และทำการทดลอง

#### 4.6 การออกแบบและการสร้าง

จากเหตุที่ว่าทิศทางสายอากาศเปลี่ยนแปลงมีผลต่อการรับสัญญาณภาพบนจอเครื่องรับแนวคิดการทำโครงงานก็เกิดขึ้นที่ว่า จะรักษาทิศทางของสายอากาศให้เป็นไปในทิศทางเดิมแม้ว่าหากทิศของรถเปลี่ยนไป ซึ่งจำเป็นต้องใช้สายอากาศจำนวน 2 หรือ 4 ต้น เพียงพอกับทิศทางของสัญญาณทั้ง 4 หรือ 8 ทิศ จากแนวความคิดก็สามารถที่จะเขียนแทนวงจรต่าง ๆ โดยบล็อกการทำงานโดยรวมได้ดังรูป



รูปที่ 4.13 บล็อกการทำงาน โดยรวม

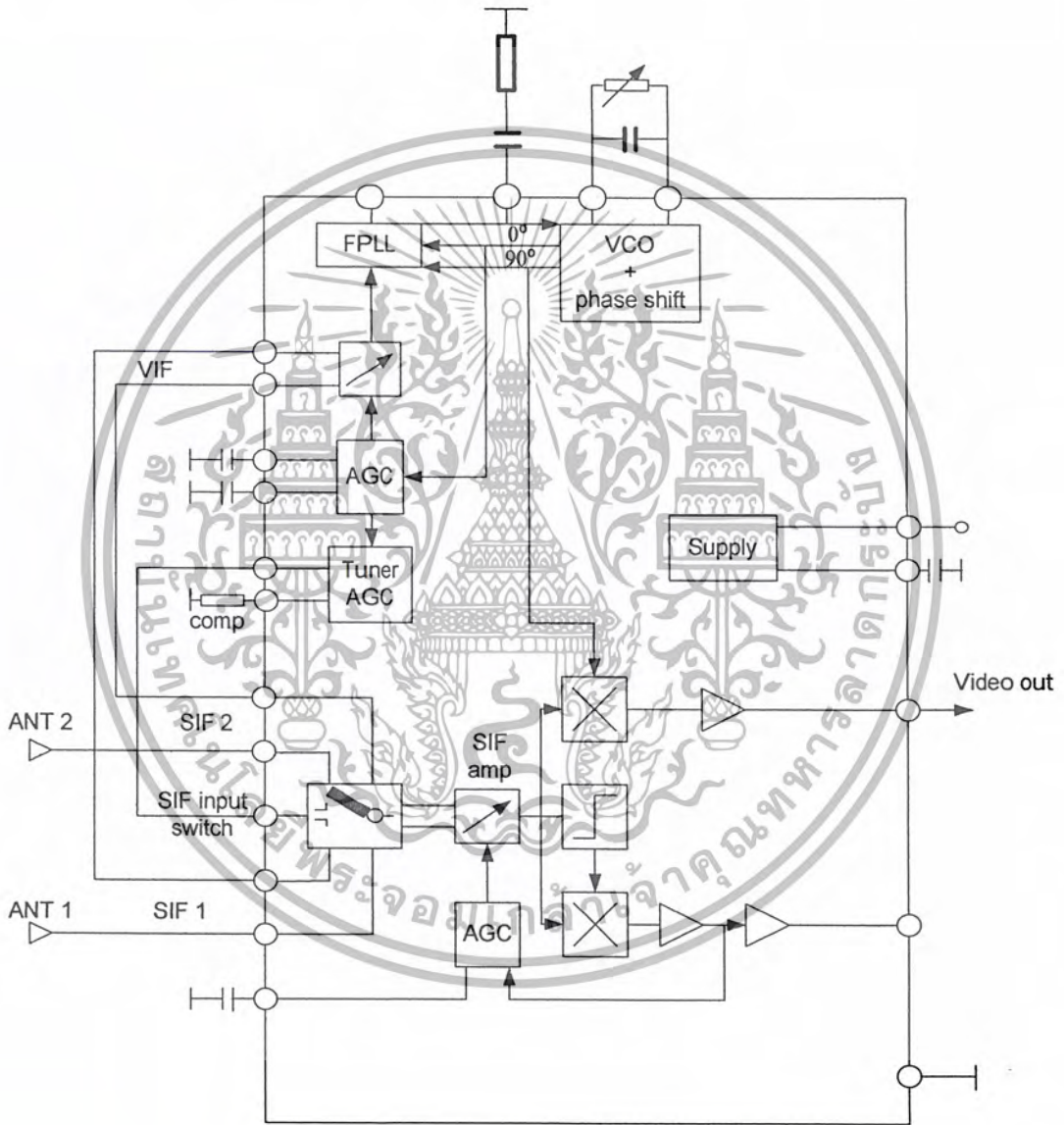
จากบล็อกแสดงการทำงานโดยรวม สามารถที่จะอธิบายการทำงานเป็นส่วนใหญ่ ๆ ดังต่อไปนี้

1. ชุดสายอากาศ ชุดนี้จะประกอบขึ้นด้วยสายอากาศจำนวน 2 หรือ 4 ต้น เพื่อครอบคลุมทิศทางการรับทั้ง 4 หรือ 8 ทิศ สายอากาศทั้ง 2 หรือ 4 ต้น จะเป็นตัวรักษาทิศทางการรับให้คงที่ในกรณีที่สัญญาณที่รับได้มีคุณภาพ แต่ลดเกิดการเปลี่ยนทิศทางเคลื่อนที่ สัญญาณจากสายอากาศเพียงหนึ่งต้นที่ได้รับในชุดนี้จะถูกส่งไปยังชุดต่อไป
2. ชุดเลือกสัญญาณ ชุดนี้จะทำหน้าที่เลือกรับสัญญาณ จากสายอากาศต้นใดต้นหนึ่งเท่านั้น ที่จะส่งให้กับชุดต่อสายอากาศของเครื่องรับโทรทัศน์
3. ชุดถ่วงความถี่ ชุดนี้จะทำหน้าที่ถ่วงความถี่ใดความถี่หนึ่งมาใช้งาน ในการเลือกรับและก็นำสัญญาณมาเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

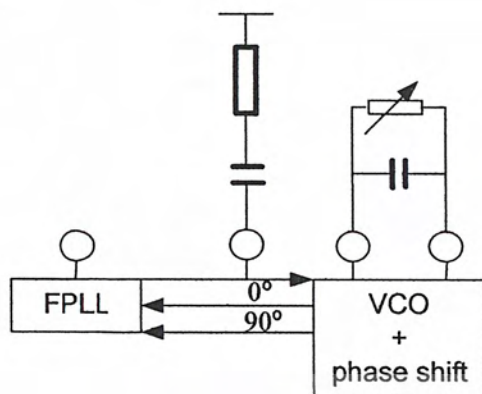
4. ชุดเปรียบเทียบสัญญาณ ชุดนี้จะเป็นชุดที่นำเอาสัญญาณที่ได้จากชุดลอกความถี่มาใช้ โดยจะผ่านวงจรถนูนเนอร์(tuner) ซึ่งจะมีสัญญาณอ้างอิง(AGC) เป็นสัญญาณที่ไว้ในการเปรียบเทียบสัญญาณ (comparator) โดยจะทำการเปรียบเทียบระดับแรงดันที่รับได้กับระดับแรงดันอ้างอิง หลังจากนั้นจะทำการสวิตซ์(switching)

5. เครื่องรับโทรทัศน์ จะใช้กับเครื่องรับที่มีจุดต่อออกของสัญญาณ Video out เนื่องจากจะมีการนำสัญญาณภาพรวม (Composite video) ไปใช้งาน



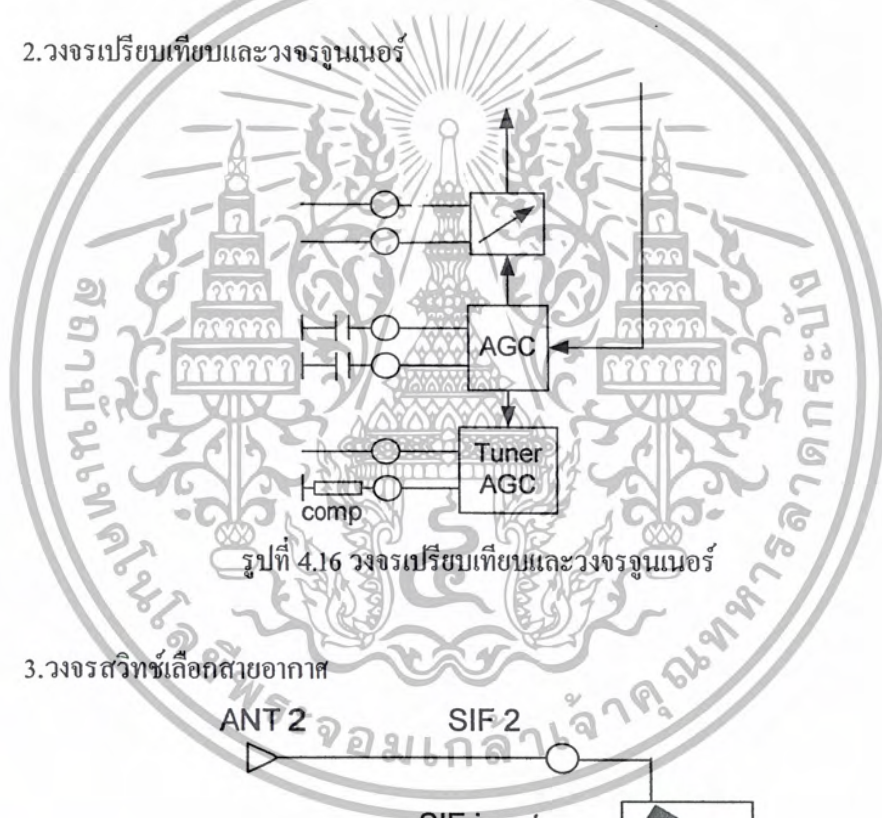
รูปที่ 4.14 วงจรเครื่องเลือกรับสัญญาณภาพ

## 1. วงจรล็อกความถี่



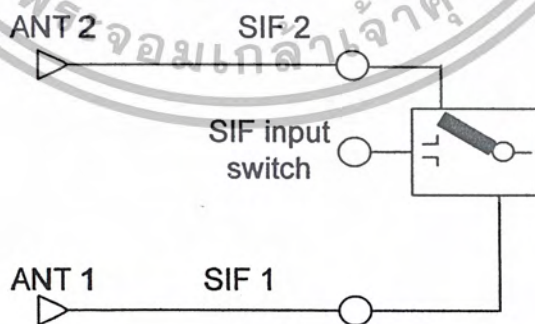
รูปที่ 4.15 วงจรล็อกความถี่

## 2. วงจรเปรียบเทียบและวงจรถูจูนเนอร์



รูปที่ 4.16 วงจรเปรียบเทียบและวงจรถูจูนเนอร์

## 3. วงจรสวิตช์เลือกสายอากาศ

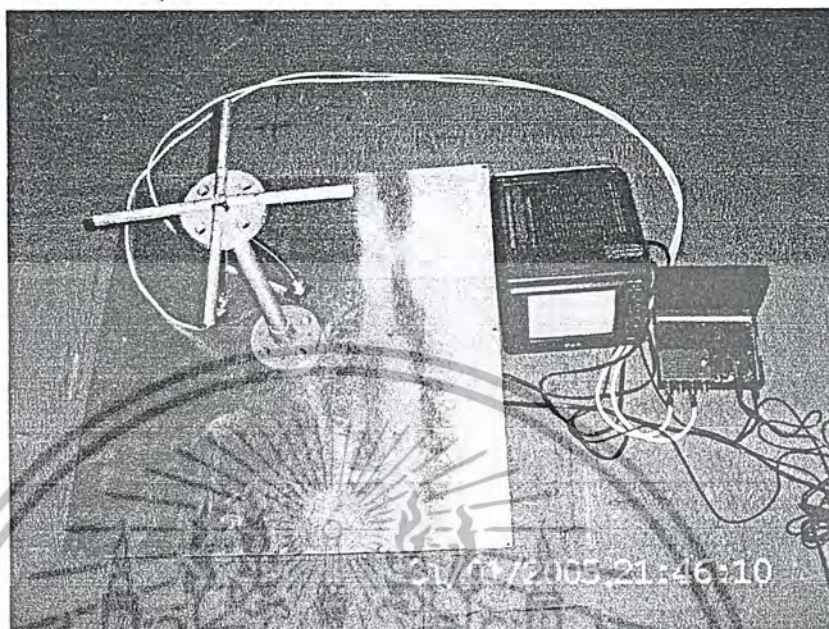


รูปที่ 4.17 วงสวิตช์เลือกสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 การทดลองและผลการทดลอง

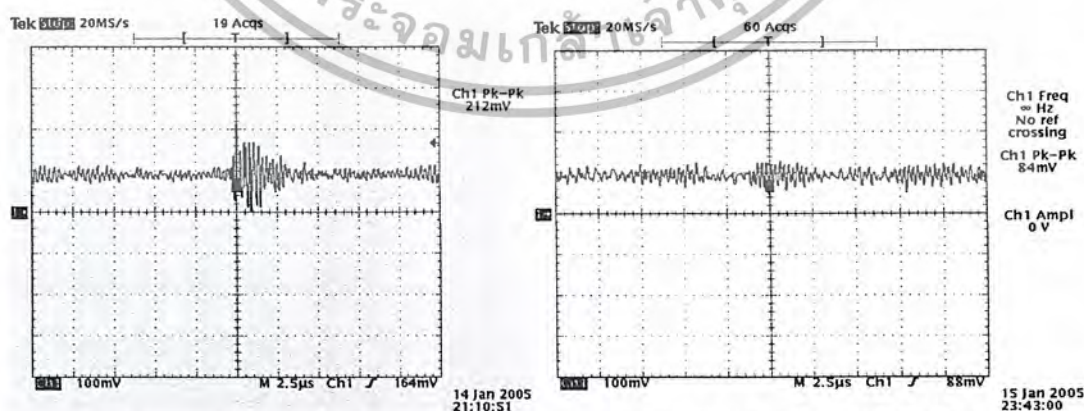
การทดลองนี้จะนำเครื่องเลือกรับสัญญาณภาพมาต่อกับโทรทัศน์และชุดสายอากาศ กรณีนี้จะใช้สายอากาศ 2 ต้น วางในตำแหน่งมุมที่แตกต่างกัน 90 องศา



รูปที่ 4.18 การต่อเครื่องเลือกรับสัญญาณภาพกับชุดสายอากาศและเครื่องรับโทรทัศน์

##### 4.7.1 ผลการทดลองเปรียบเทียบสายอากาศ 2 ต้น

หลังจากทำการต่อเครื่องเลือกรับสัญญาณภาพกับชุดสายอากาศและเครื่องรับโทรทัศน์ในหัวข้อนี้ จะทำการวัดสัญญาณเปรียบเทียบระหว่างสายอากาศ 2 ต้น โดยจะทำการวัดผลใน 2 กรณี กรณีที่สัญญาณภาพจากโทรทัศน์ปกติ(สัญญาณภาพจากจุด Video out ของโทรทัศน์คมชัด) และกรณีที่สัญญาณภาพจากโทรทัศน์ไม่เป็นปกติ(สัญญาณภาพจากจุด Video out ของโทรทัศน์มีสโนว์)



สัญญาณโทรทัศน์ปกติ

สัญญาณที่โทรทัศน์ไม่ปกติ(มีสโนว์)

รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบสัญญาณจากสายอากาศ 2 ต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการทดลองในหัวข้อนี้ ผลที่ได้ออกมาจะแสดงให้เห็นว่า เมื่อสัญญาณภาพของเครื่องรับโทรทัศน์ที่เป็นปกติ จะมีสัญญาณโทรทัศน์ที่แรงกว่า สัญญาณภาพของเครื่องรับโทรทัศน์ที่ไม่ปกติ (มีสโนว์)

#### 4.7.2 ผลการทดลองเปรียบเทียบระดับแรงดันอ้างอิงกับสัญญาณ(ขาที่ 12)

ในหัวข้อนี้ จะทำการวัดสัญญาณ โดยทำการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิง ที่ขา 12 ของไอซี โดยจะทำการวัดผลใน 2 กรณี กรณีที่สัญญาณภาพจากโทรทัศน์ปกติ(สัญญาณภาพจากจุด Video out ของโทรทัศน์คมชัด) และกรณีที่สัญญาณภาพจากโทรทัศน์ไม่เป็นปกติ(สัญญาณภาพจากจุด Video out ของโทรทัศน์มีสโนว์)

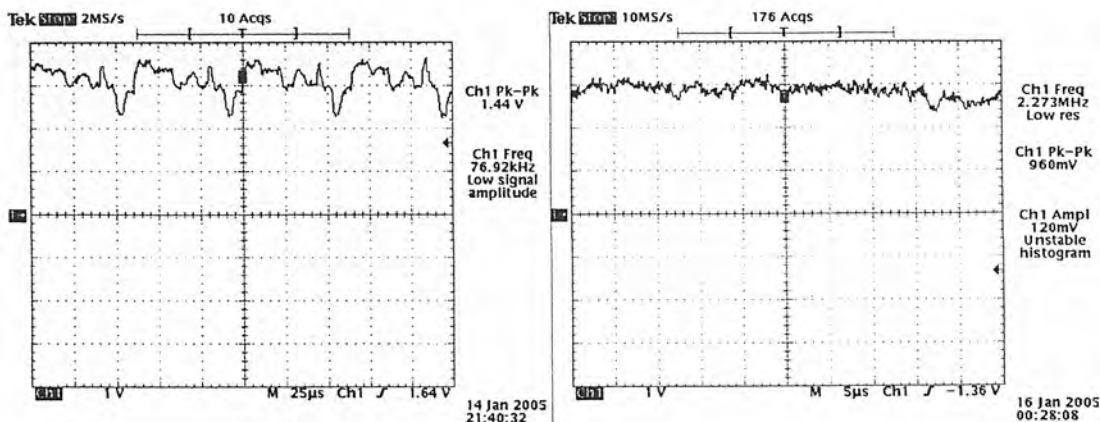


รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบสัญญาณจากขาที่ 12 ของไอซี

ผลจากการทดลองในหัวข้อนี้ ผลที่ได้ออกมาจะแสดงให้เห็นว่า เมื่อสัญญาณภาพของเครื่องรับโทรทัศน์ที่เป็นปกติ จะมีระดับสัญญาณที่แรงกว่า สัญญาณภาพของเครื่องรับโทรทัศน์ที่ไม่ปกติ(มีสโนว์)

#### 4.7.3 ผลการทดลองเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากการจูนเนอร์(ขาที่ 24)

ในหัวข้อนี้ จะทำการวัดสัญญาณ โดยทำการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิง ที่ขา 24 ของไอซี โดยจะทำการวัดผลใน 2 กรณี กรณีที่สัญญาณภาพจากโทรทัศน์ปกติ(สัญญาณภาพจากจุด Video out ของโทรทัศน์คมชัด) และกรณีที่สัญญาณภาพจากโทรทัศน์ไม่เป็นปกติ(สัญญาณภาพจากจุด Video out ของโทรทัศน์มีสโนว์)



สัญญาณโทรทัศนปกติ

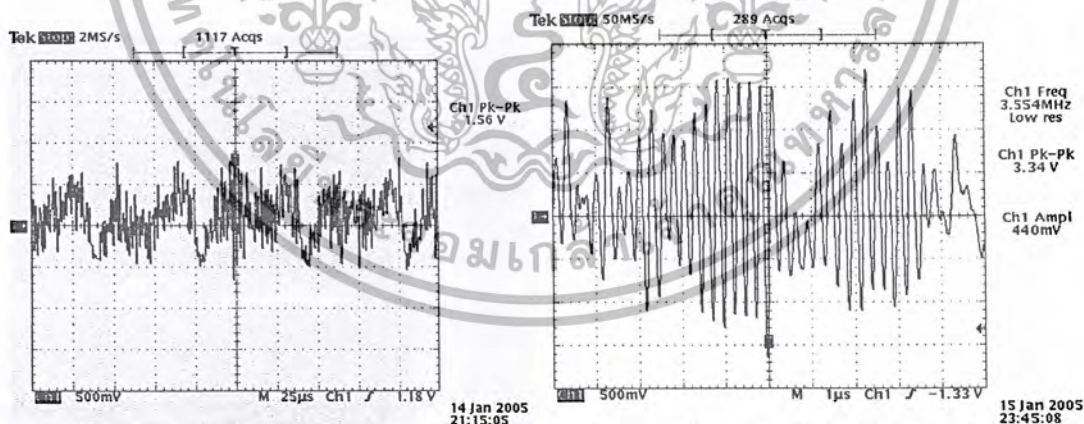
สัญญาณที่โทรทัศนไม่ปกติ(มีสโนว์)

รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบสัญญาณจากขาที่ 24 ของไอซี

ผลจากการทดลองในหัวข้อนี้ ผลที่ได้ออกมาจะแสดงให้เห็นว่า เมื่อสัญญาณภาพของเครื่องรับโทรทัศนที่เป็นปกติ จะมีสัญญาณภาพที่แสดงออกมาเป็นคาบอย่างเห็นได้ชัดกว่า สัญญาณภาพของเครื่องรับโทรทัศนที่ไม่ปกติ(มีสโนว์)

4.7.4 ผลการทดลองเปรียบเทียบสัญญาณทีวี(Video out)

หลังจากทำการต่อเครื่องเล็กรับสัญญาณภาพกับชุดสายอากาศและเครื่องรับโทรทัศนในหัวข้อนี้ จะทำการวัดสัญญาณเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณทีวี โดยจะทำการวัดผลใน 2 กรณี กรณีที่สัญญาณภาพจากโทรทัศนปกติ(สัญญาณภาพจากจุด Video out ของโทรทัศนคมชัด) และกรณีที่สัญญาณภาพจากโทรทัศนไม่เป็นปกติ(สัญญาณภาพจากจุด Video out ของโทรทัศนมีสโนว์)



สัญญาณโทรทัศนปกติ

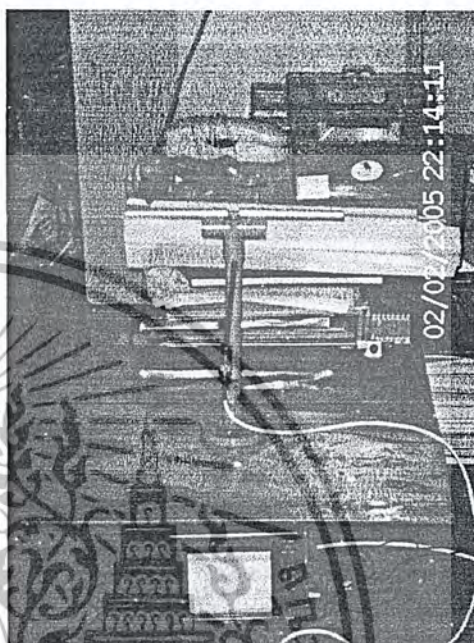
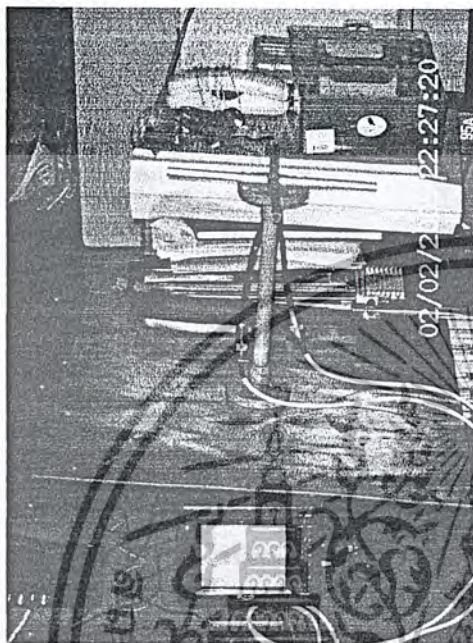
สัญญาณที่โทรทัศนไม่ปกติ(มีสโนว์)

รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบสัญญาณทีวี

ผลจากการทดลองในหัวข้อนี้ ผลที่ได้ออกมาจะแสดงให้เห็นว่า เมื่อสัญญาณภาพของเครื่องรับโทรทัศนที่เป็นปกติ จะมีระดับสัญญาณภาพที่แสดงออกมาเป็นคาบอย่างเห็นได้ชัดกว่า สัญญาณภาพของเครื่องรับโทรทัศนที่ไม่ปกติ(มีสโนว์)

### 4.7.5 ผลการเปรียบเทียบสายอากาศแบบไดโพลไขว้กับไดโพลธรรมดา

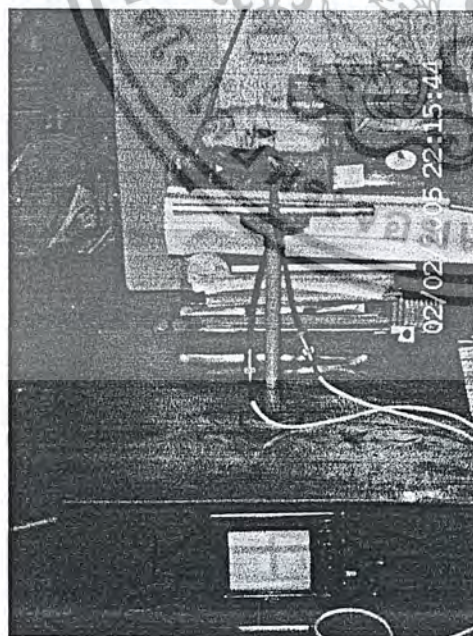
หลังจากทำการต่อเครื่องเลือกรับสัญญาณภาพกับชุดสายอากาศและเครื่องรับโทรทัศน์ ก็ทำการหมุนสายอากาศไปที่ละ 45 องศา เพื่อทำการเปรียบเทียบสัญญาณโทรทัศน์ที่เครื่องรับเมื่อทำการใช้สายอากาศที่แตกต่างกัน



สัญญาณภาพปกติ

สัญญาณภาพปกติ

รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบสัญญาณภาพเมื่อวางสายอากาศตามแนวแกน x



สัญญาณภาพปกติ

สัญญาณภาพที่ไม่ปกติ(มีสโนว์)

รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบสัญญาณภาพเมื่อวางสายอากาศตามแนวแกน y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

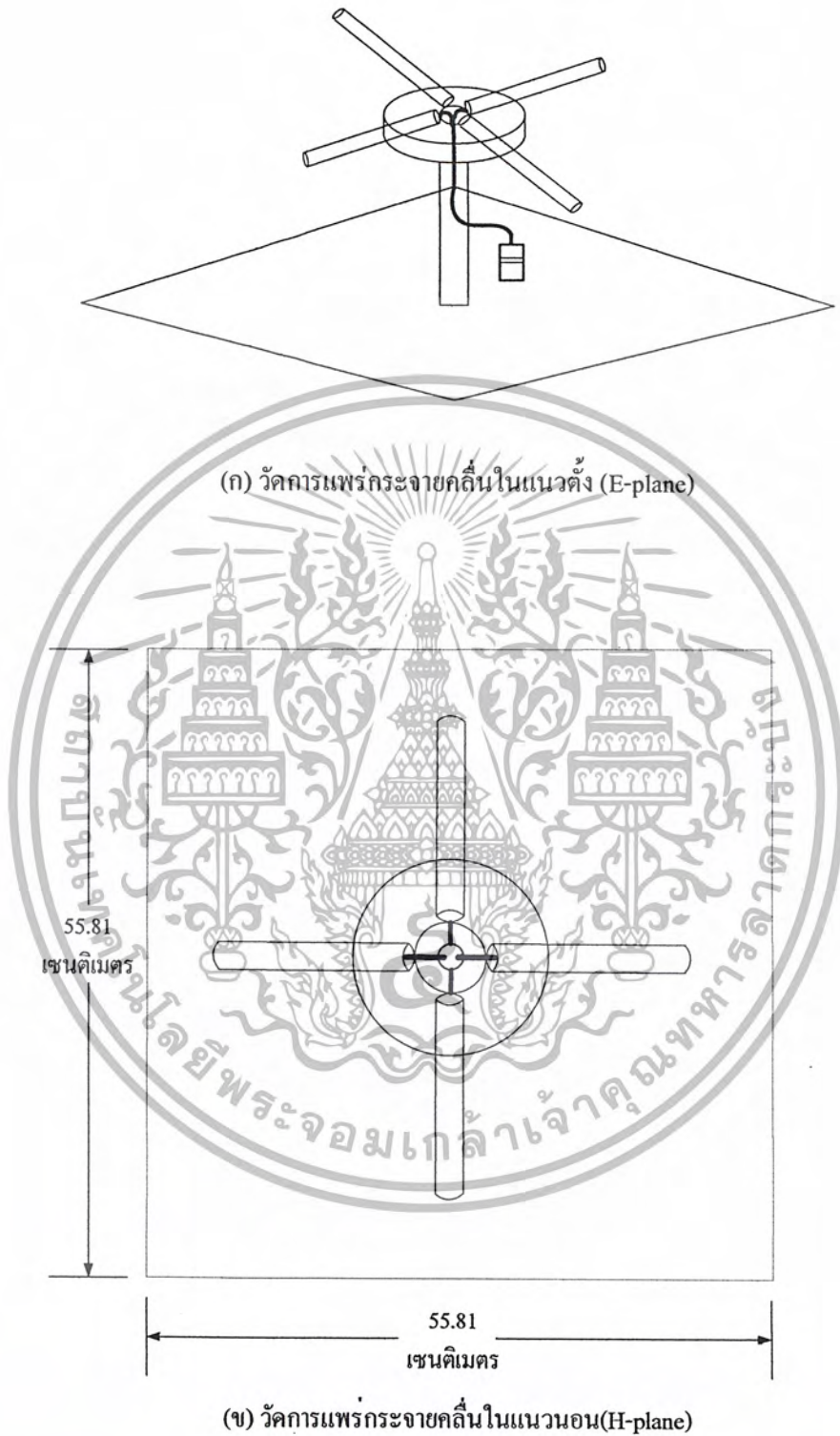
### ผลทดสอบและการคำนวณ

#### 5.1 การวัดและพล็อตกราฟแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ทำการวัด และพล็อตกราฟแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ในระดับความสูง  $0.4\lambda$   $0.5\lambda$  และ  $0.525\lambda$  เพื่อดูผลการทดลอง และทำการพล็อตกราฟแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระดับดังกล่าว



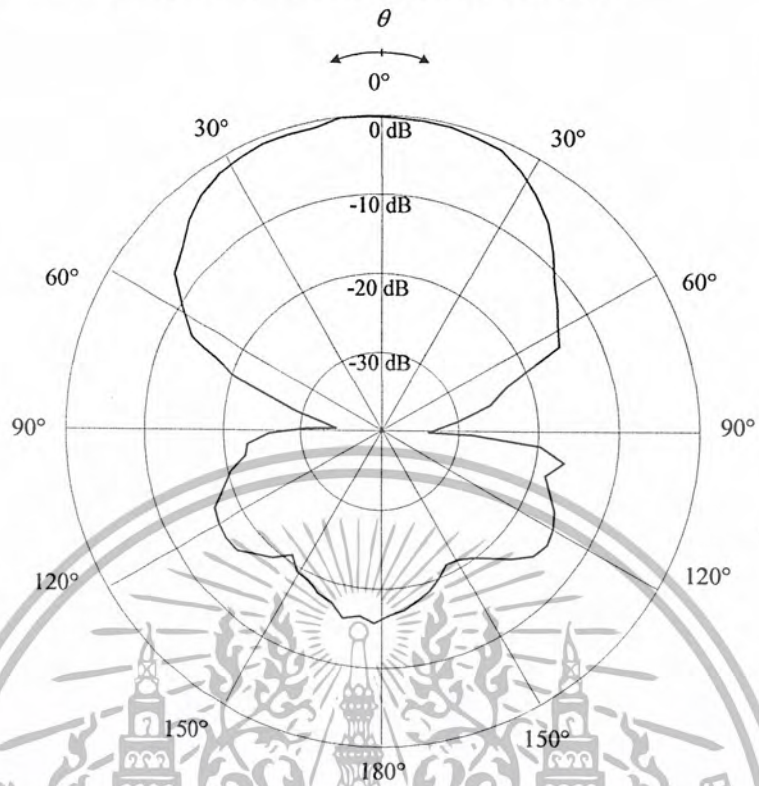
รูปที่ 5.1 การจัดตั้งสายอากาศส่ง และรับในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น



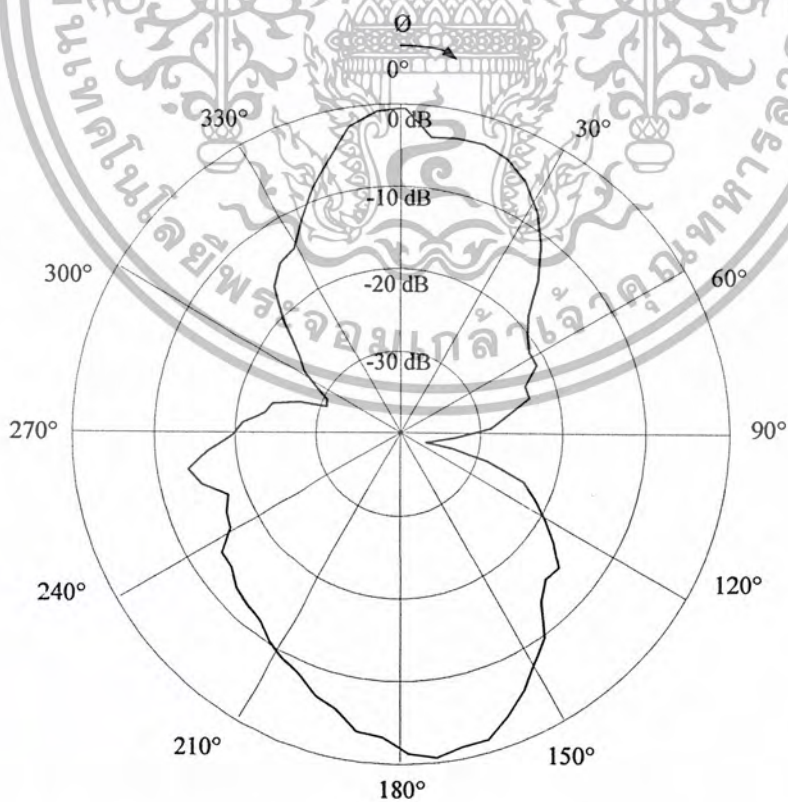
รูปที่ 5.2 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในแนวตั้ง และแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวัดและพล็อตกราฟแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีดังนี้

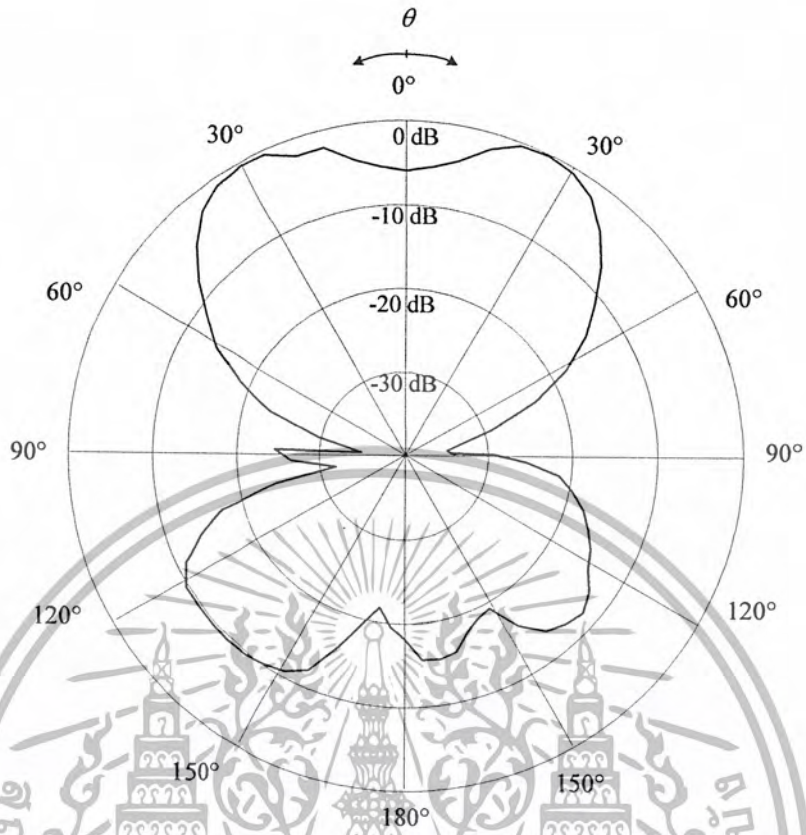


รูปที่ 5.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความสูง  $0.4\lambda$  ในแนวนอน (H-plane)

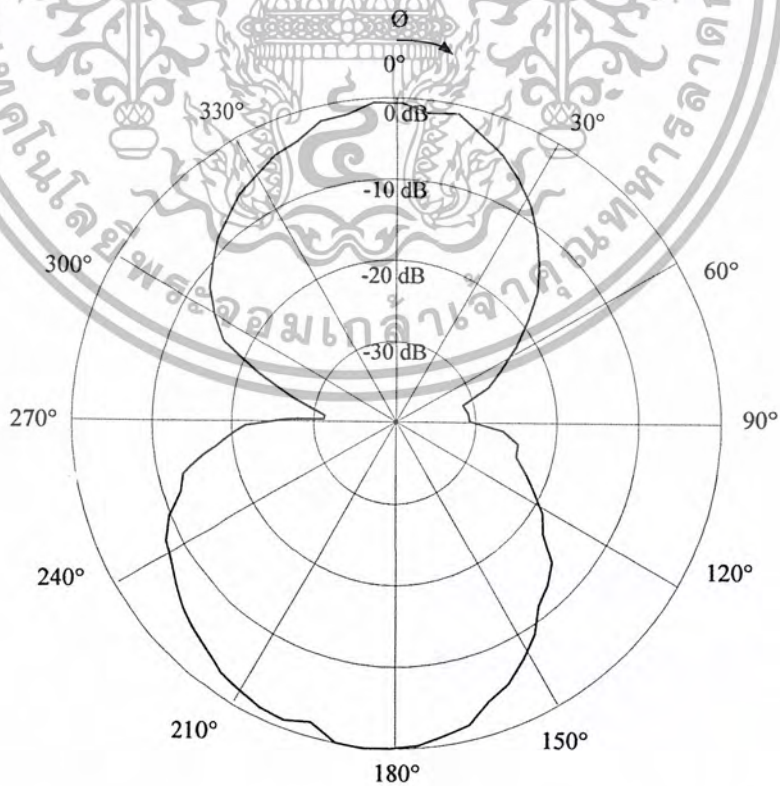


รูปที่ 5.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความสูง  $0.4\lambda$  ในแนวตั้ง (E-plane)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

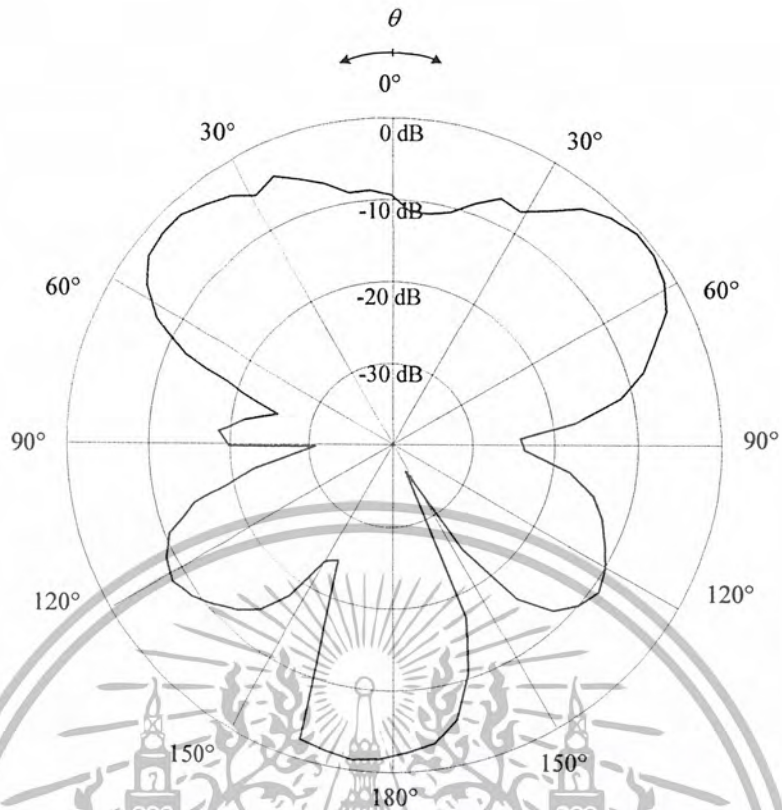


รูปที่ 5.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความสูง  $0.5\lambda$  ในแนวอน (H-plane)

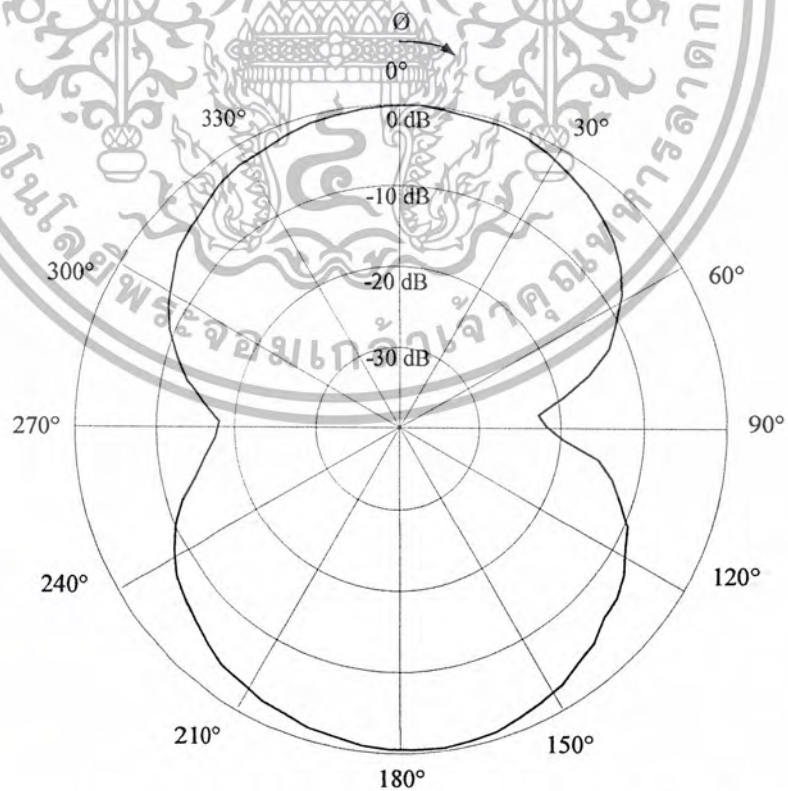


รูปที่ 5.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความสูง  $0.5\lambda$  ในแนวตั้ง (E-plane)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



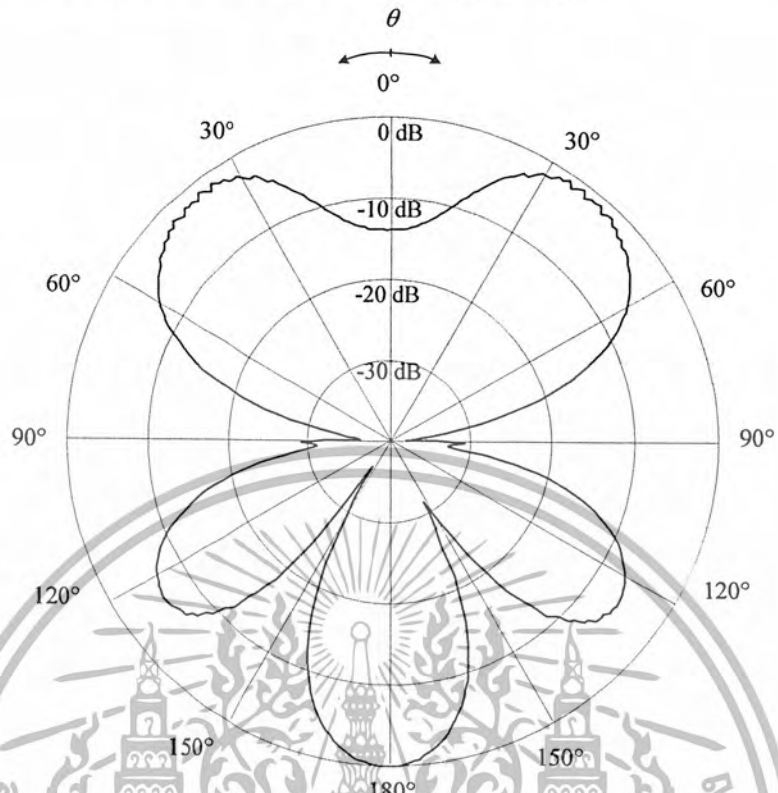
รูปที่ 5.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความสูง  $0.525\lambda$  ในแนวนอน (H-plane)



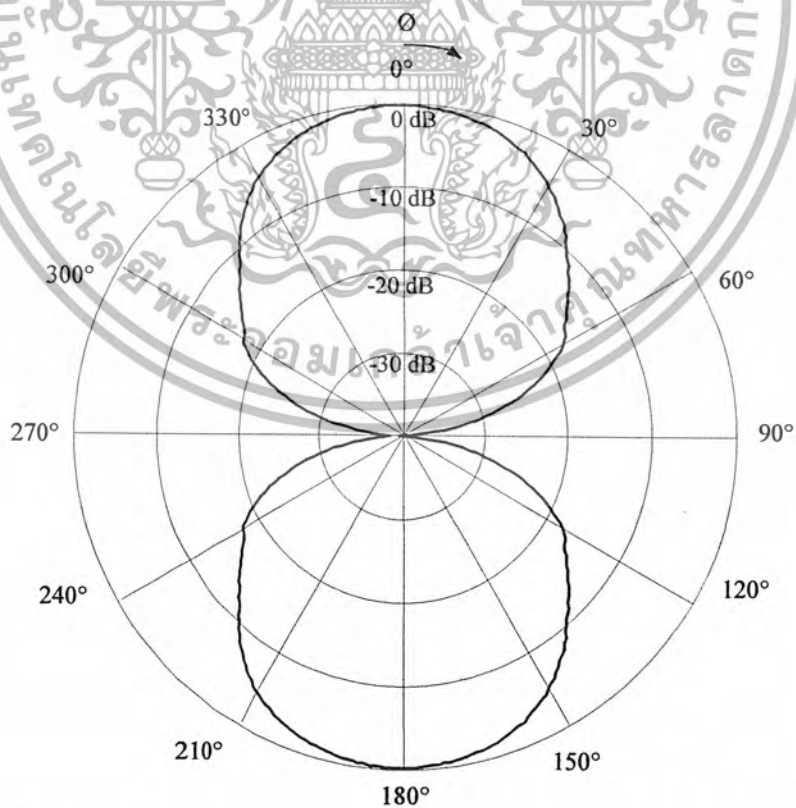
รูปที่ 5.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความสูง  $0.525\lambda$  ในแนวตั้ง (E-plane)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อใช้โปรแกรม SNEC



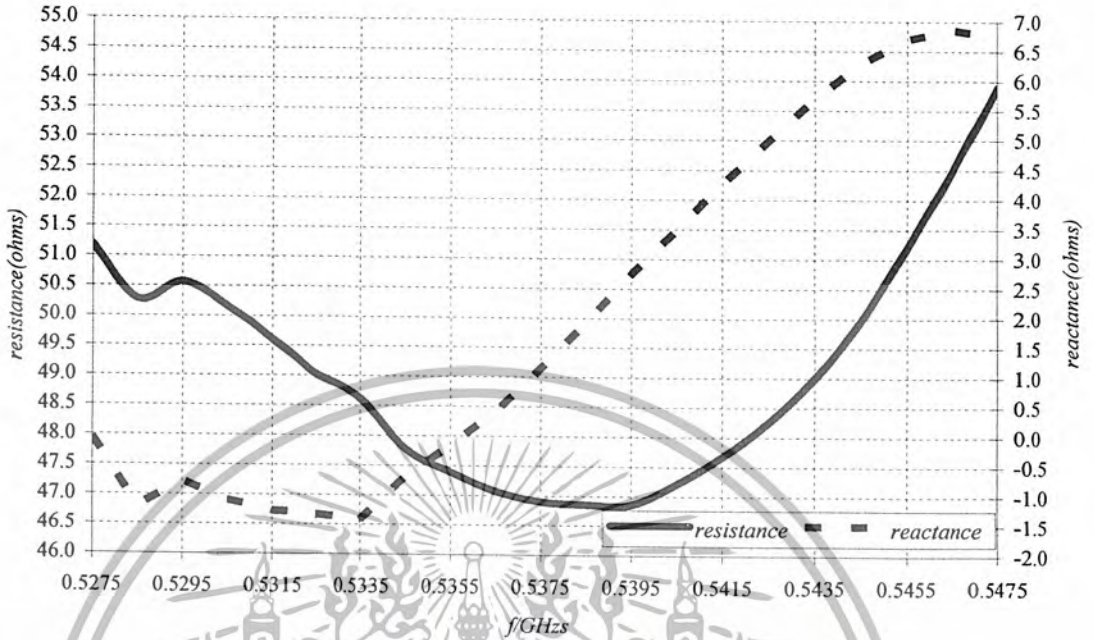
รูปที่ 5.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความสูง  $0.525\lambda$  ในแนวนอน (H-plane)



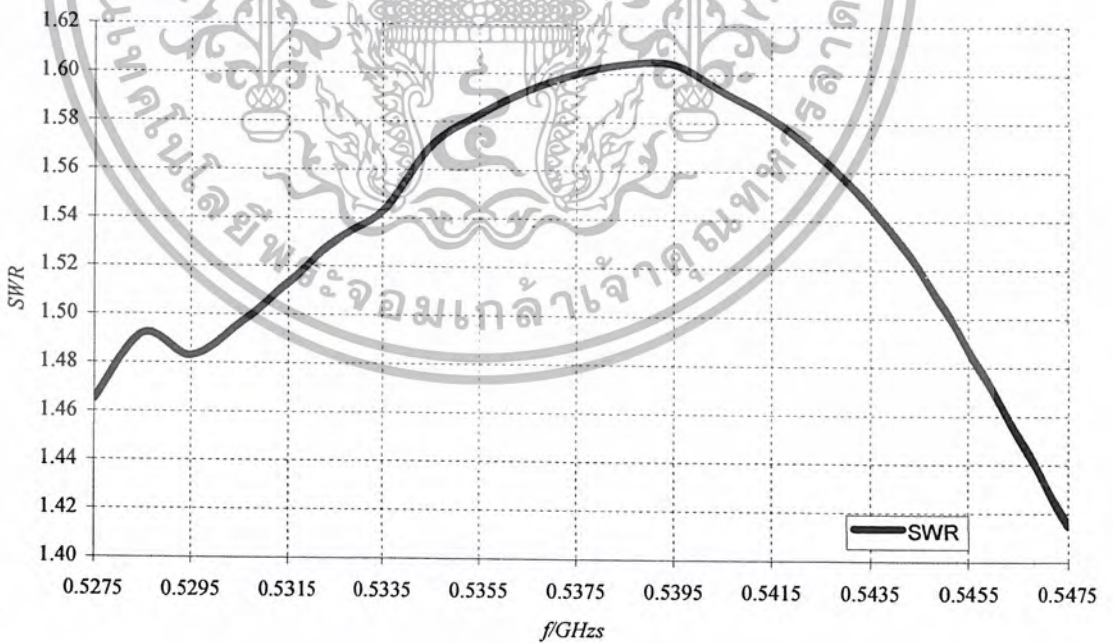
รูปที่ 5.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความสูง  $0.525\lambda$  ในแนวตั้ง (E-plane)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2 การวัดและพล็อตกราฟค่าอินพุทอิมพีแดนซ์และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ความสูง 0.525λ



รูปที่ 5.11 ค่าริซิสแตนซ์ และ ค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศที่ความสูง 0.525λ



รูปที่ 5.12 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ความสูง 0.525λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 การวัดอัตราขยายของสายอากาศ

#### 5.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาอัตราขยายสายอากาศ

1. เครื่อง Spectrum Analyzer
2. เครื่อง Signal Generater
3. สายอากาศแบบไดโพล
4. สายวัดสัญญาณ RG223 50 โอห์ม SUHNER SWITZERLAND
5. สายอากาศที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน 2 ตัว

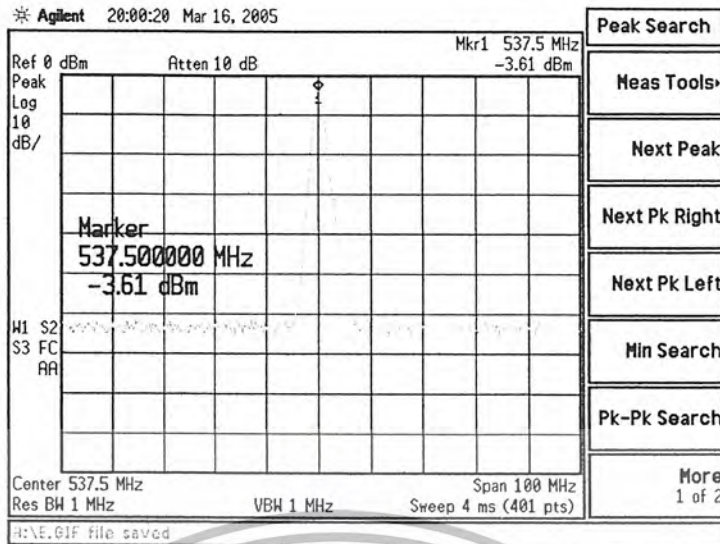
#### 5.3.2 วิธีการทดสอบ

1. ทำการตั้งสายอากาศส่งและรับให้มีระยะห่างมากกว่าขนาดสนามระยะไกล
2. ทำการป้อนแหล่งจ่าย Signal Generater โดยตั้งความถี่ที่ 537.5 MHz ตั้งขนาด Amplitude ที่ 0.0 dBm
3. ตั้งค่าที่จะอ่านที่เครื่อง Spectrum Analyzer โดยตั้งความถี่ที่ 537.5 MHz ตั้ง Band ที่อ่าน Span 100 MHz
4. เมื่อจะทำการป้อนแหล่งจ่ายให้สายอากาศตัวส่งกด RF On แล้วทำการอ่านค่าที่ได้จากเครื่อง Spectrum Analyzer โดยที่กดปุ่ม Peak Search



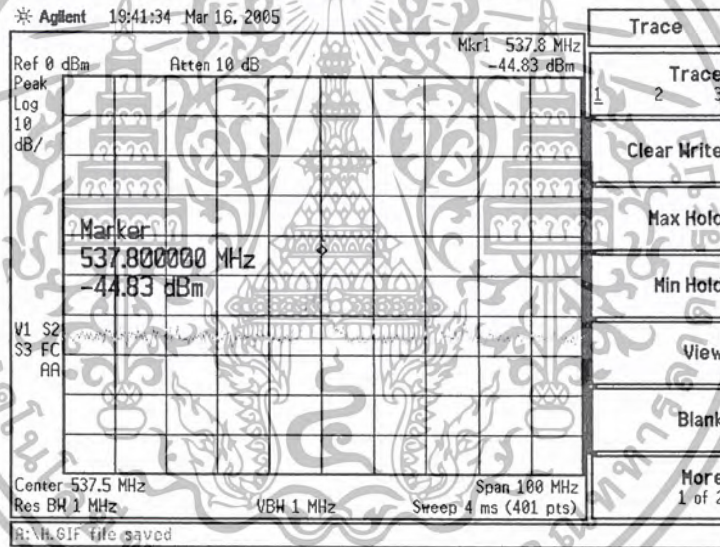
รูปที่ 5.13 รูปการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ





รูปที่ 5.16 ค่าการสูญเสียของสายนำสัญญาณตัวส่ง

จากการทดสอบวัดค่ากำลังงานที่อ่านได้จากเครื่อง Spectrum Analyzer



รูปที่ 5.17 กำลังงานของสายอากาศตัวรับ

จะหาอัตราการขยายของสายอากาศได้จากสมการต่อไปนี้

$$P_r(\text{dBm}) = P_t(\text{dBm}) + G_t(\text{dBi}) + G_r(\text{dBi}) - L_t(\text{dBm}) - L_r(\text{dBm}) - L_s(\text{dB})$$

โดยที่

$P_t(\text{dBm})$  คือ กำลังของสายอากาศตัวส่ง

$P_r(\text{dBm})$  คือ กำลังของสายอากาศตัวรับ

$G_t(\text{dBi})$  คือ อัตราการขยายของสายอากาศตัวส่ง

$G_r(\text{dBi})$  คือ อัตราการขยายของสายอากาศตัวรับ

$L_t(\text{dBm})$  คือ ค่าการสูญเสียของสายนำสัญญาณทางค้ำส่ง

$L_r(\text{dBm})$  คือ ค่าการสูญเสียของสายนำสัญญาณทางค้ำรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$L_s$  (dB) คือ ค่าการสูญเสียในที่ว่าง (Free Space Loss) มีค่าเท่ากับ  $20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)$

$d$  (m) = ระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวรับกับสายอากาศตัวส่ง

องค์ประกอบที่ใช้ในการหาอัตราการขยายของสาย ในทางปฏิบัติจะต้องมีปัจจัยดังต่อไปนี้

1. ต้องสร้างสายอากาศ 2 ตัว

1.1 สายอากาศ ด้านส่งจะต้องรู้อัตราการขยายของสายอากาศ

2. ต้องทำการวัดที่สนามระยะไกล

$d$  ที่ใช้ในการทดลองใช้ที่ค่า 8 เมตร

สายอากาศทางด้านส่งมีค่าอัตราการขยายของสายอากาศ = 1.67 dBi

$$P_r = -44.83 \text{ dBm}$$

$$P_t = 0 \text{ dBm}$$

$$L_s = 20 \log \left[ \frac{4\pi(8)}{0.5581} \right]$$

$$= 45.111 \text{ dB}$$

จากสมการ

$$P_r \text{ (dBm)} = P_t \text{ (dBm)} + G_t \text{ (dBi)} + G_r \text{ (dBi)} - L_t \text{ (dBm)} - L_r \text{ (dBm)} - L_s \text{ (dB)}$$

$$-44.83 = 0 + 1.67 + G_r \text{ (dBi)} - 3.61 - 2.006 - 45.111$$

$$G_r \text{ (dBi)} = 4.226$$

## บทที่ 6 บทวิจารณ์และสรุป

### 6.1 บทวิจารณ์

จากการทดลองในขั้นตอนต่าง ๆ ผลที่ได้เมื่อเทียบกับทฤษฎีแล้วมีลักษณะที่สอดคล้องกับทฤษฎี แต่จะมีความแตกต่าง และข้อผิดพลาดเกิดขึ้นพอสมควร ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความผิดพลาดจากหลายสาเหตุคือ

1. ความผิดพลาดจากคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้สร้างสายอากาศไม่เป็นไปตามเงื่อนไขในทางทฤษฎี เนื่องจาก เงื่อนไขของการคำนวณนั้น สายอากาศไดโพลต้องมีลักษณะเป็นตัวนำสมบูรณ์ แต่ในการสร้างชิ้นงานเพื่อทดสอบได้ใช้ท่ออลูมิเนียม ซึ่งอาจมีความนำไม่เพียงพอต่อเงื่อนไขในทางทฤษฎี
2. ความผิดพลาดจากความไม่ละเอียด และสมบูรณ์ของตัวโครงงานที่สร้างขึ้นมา ทั้งตัวสายอากาศเอง สายนำสัญญาณที่ต่อกับสายอากาศ และแผ่นสนามตัวนำ
3. ความผิดพลาดจากอุปกรณ์กรวัด และวิธีการวัด ซึ่งในการวัดคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศนั้น อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้วัดจะไม่สมบูรณ์ 100% และยังจะเกิดการสะท้อนของคลื่นกับวัตถุต่างๆ ไปรบกวนสายอากาศ
4. ความผิดพลาดจากประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณภาพ และสภาพแวดล้อมในบางตำแหน่ง ทำให้ภาพที่รับได้มีความไม่ชัดเจน

### 6.2 บทสรุป

จากการคำนวณและการทดลองตามขั้นตอนในโครงงาน แสดงให้เห็นว่าเมื่อสายอากาศแบบไดโพลวางอยู่เหนือสนามตัวนำ ทำให้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากคลื่นเกิดการสะท้อนกับสนามตัวนำ และเกิด ไดโพลสมมติขึ้นด้านหลังสนามตัวนำตามทฤษฎีภาพเสมือน

ในการทดลองขั้นแรก ผลจากกราฟ จะเห็นว่าทิศทางการรับคลื่นของสายอากาศเปลี่ยนแปลงตามความสูงของสายอากาศ เมื่อความสูงอยู่ที่  $0.4\lambda$  ทิศทางการรับคลื่นจะมีทิศพุ่งขึ้นมาก เนื่องจากมีการสะท้อนกลับมาก เมื่อความสูงอยู่ที่  $0.5\lambda$  ทิศทางการรับคลื่น จะเปลี่ยนไปอยู่ในช่วงที่ใช้งานได้แต่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นจะค่อนข้างต่ำ เมื่อความสูงอยู่ที่  $0.525\lambda$  ทิศทางการรับคลื่นอยู่ในช่วงที่ใช้งานได้ และความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นพอใช้

จากการทดลองดังกล่าวจึงเลือกใช้ความสูงที่  $0.525\lambda$  เนื่องจากมีทิศทางการรับคลื่นที่ดี ถึงแม้จะมีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในขนาดปานกลาง แต่จะให้ความสำคัญที่ทิศทางการรับคลื่นเป็นอันดับแรก

ขั้นตอนที่สอง จะทำการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ที่ดีที่สุดในช่วงความสูงที่หามาในขั้นตอนแรก เพื่อหาความสูงของสายอากาศที่ใช้งานจริง โดยใช้ทดลองทำการปรับระยะความสูงแล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ซึ่งในการ

ทดลองเปลี่ยนความสูงในระยะที่ความสูง 0.525λ มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะไม่เปลี่ยนแปลงไปมาก ฉะนั้นจึงได้เลือกใช้ความสูงที่ 0.525λ เป็นความสูงที่ใช้งานจริง

ขั้นตอนนี้สุดท้าย ผลจากการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะมีทิศทางไปตามแบบของทฤษฎี

ในส่วนของการเลือกรับสัญญาณภาพ จากการทดลองจะเห็นว่าเครื่องเลือกรับสัญญาณภาพสามารถเลือกสลับสัญญาณไปที่สายอากาศที่รับสัญญาณได้ดี โดยเครื่องจะเปรียบเทียบระดับความแรงสัญญาณกับระดับแรงคั่นอ้างอิง ถ้าสัญญาณมีระดับแรงคั่นน้อยกว่า เครื่องจะทำการเลือกสัญญาณจากสายอากาศใหม่



## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาจาก ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ และ ผศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ที่ได้ช่วยเหลือในการให้คำแนะนำชี้แนวทางในการแก้ปัญหา ตลอดจนความรู้ความเข้าใจในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนช่วยในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ กล่าวคือ

- คุณไพโรจน์ วุ่นชุม
- คุณสุธาสนี ละมุลตรี
- คุณชวาลธวัช หมั่นทรัพย์
- คุณสุภชัย เกรียงธนสาร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] โมไนย ไกรฤกษ์ และ วิวัฒน์ กิรานนท์, “ทฤษฎีสายอากาศ,” สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2536
- [2] ถวิล พึ่งมา, “ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบเซลลูลาร์,” สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2541
- [3] C.A.Balanis, “Antenna Theory Analysis and Design,” Harper and Row Publishers, New York, 1982
- [4] Masaharu Hata, “Empirical Formular for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services,” IEEE Transaction on Vehicular Technology, Vol. VT-29, No.3, P.317-322, August 1980

