

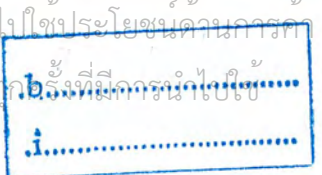


สายอากาศแถวลำดับของโมนโพลยากิบนแผ่นระนาบกราวด์
Monopole Yagi Array Antenna On the Ground Plane



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปแจ้งประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี..... - 4 พ.ย. 2548



สายอากาศแถวลำดับของโมนโพลยากิบนแผ่นระนาบกราวด์

Monopole Yagi Array Antenna On the Ground Plane



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2546

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

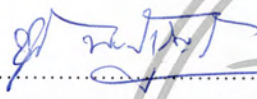
เรื่อง สายอากาศแถวลำดับของโมโนโพลยาคิบนแผ่นระนาบกราวด์

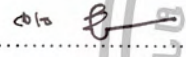
Monopole Yagi Array Antenna On the Ground Plane

ผู้จัดทำ

1. นาย พูนเพิ่ม สิทธิเขตต์การ 44015022

2. นาย เสกสรรค์ สุตะคาน 44015042


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพานิชย์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.จเร สุรวัฒน์ปัญญา)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแฉกลำดับของโมโนโพลยาคิบบนแผ่นระนาบกราวด์
Monopole Yagi Array Antenna on the Ground Plane

โดย นายพูนเพิ่ม สิริเชตต์การ 4015022
นายเสกสรรค์ สุตะคาน 4015042

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ชวงค์ พงษ์เจริญพาณิชย์
รศ.ดร.จร สุรวัฒน์ปัญญา

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการนำเสนอสายอากาศแฉกลำดับของโมโนโพลยาคิบบนแผ่นระนาบกราวด์ โดยทำการวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวก่อนอันได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างของลำคลื่นและค่าสภาพเจาะจงทิศทางและคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์คืออิมพีแดนซ์ด้านเข้า ค่าการสูญเสียย้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่ง จากนั้นวิเคราะห์แฉกลำดับของสายอากาศที่วางอยู่บนแผ่นระนาบกราวด์ เพื่อทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและผลการทดสอบจากสายอากาศที่สร้างขึ้นจริง ในโครงการนี้ สายอากาศแฉกลำดับโมโนโพลยาคิบบนระนาบกราวด์ที่ได้ศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศเซกเตอร์สำหรับสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อลดการรบกวนในช่องสัญญาณเดียวกัน และยังสามารถเลือกทิศทางการรับส่งสัญญาณในทิศทางที่ต้องการได้อีกด้วย

Abstract

This project proposes the monopole Yagi array antenna on the conducting ground plane. The analysis procedure is starting with investigation of radiation characteristics such as radiation pattern, beamwidth and directivity, and impedance characteristics such as input impedance, return loss and standing wave ratio. Then, compare the results from the theoretical calculations and measured results. In this project, the Monopole Yagi array antenna on the conducting ground plane can be applied as the sector antenna for mobile base station to reduce co-channel interference and can select the direction of transmitted and received signals.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการ	3
2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)	3
2.2 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์	7
2.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น	7
2.4 ค่าการชี้ทิศทางสูงสุด (Directivity)	8
2.5 ค่าการขยาย (Gain)	12
2.6 ประสิทธิภาพของสายอากาศ	13
2.7 ประสิทธิภาพของลำคลื่น (Beam Efficiency : BE)	14
2.8 โพลาริเซชัน (Polarization)	15
2.9 อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)	18
2.10 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)	22
2.11 ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	23
2.12 สายอากาศแบบยาคี (Yagi antenna)	24
2.13 ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่	31
2.14 การวางเซลล์ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลล์ลาร์	34
บทที่ 3 หลักการคำนวณ และออกแบบ	39
3.1 หลักในการออกแบบสายอากาศแบบยาคี	39
3.2 การออกแบบสายอากาศแถวลำดับของโมโนโพลยาคีบนแผ่นระนาบกราวด์	42
3.3 การออกแบบสายอากาศแถวลำดับของโมโนโพลยาคีบนแผ่นระนาบกราวด์ โดยวิธีการ Optimizer จากโปรแกรม NEC	54
บทที่ 4 การทดลอง และผลการทดลอง	61
4.1 การสร้างสายอากาศจากการเลือกค่าความยาวของแต่ละองค์ประกอบ	61
4.2 การสร้างสายอากาศจากการ Optimizer โดยใช้โปรแกรม NEC 2	75
4.3 ช่วงกว้างแถบความถี่ใช้งาน	87
4.4 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	88
4.5 การวัดอัตราขยายของสายอากาศ (Gain)	105
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	107
ภาคผนวก	108
กิตติกรรมประกาศ	113
เอกสารอ้างอิง	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	3
รูปที่ 2.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบชี้ทิศทางรอบตัว	4
รูปที่ 2.3 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นหลัก ระบาย E และ H ของสายอากาศปากแตร	5
รูปที่ 2.4 ลำคลื่นต่างๆ, บีบวิตซ์ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเชิงเส้นของสายอากาศ	6
รูปที่ 2.5 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ	7
รูปที่ 2.6 มุมตันของลำคลื่นซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่สมมาตรและสมมาตรกัน	11
รูปที่ 2.7 ขั้วอ้างอิง และการสูญเสียของสายอากาศ	13
รูปที่ 2.8 การหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระบายและวงรีโพลาริเซชันที่เป็นฟังก์ชัน ของเวลาในระนาบ $z=0$	15
รูปที่ 2.9 หน่วยเวกเตอร์โพลาริเซชันของคลื่นและสายอากาศ	18
รูปที่ 2.10 สายอากาศส่งและวงจรสมมูลย์	19
รูปที่ 2.11 สายอากาศรับและวงจรสมมูลย์	22
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของสายอากาศแบบยาคีโคโพล	25
รูปที่ 2.13 อัตราขยายของสายอากาศแบบยาคีโคโพลที่มี 2 ตัวประกอบ	28
รูปที่ 2.14 เฟสเซอร์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากตัวประกอบแต่ละตัวในสายอากาศแบบยาคีโคโพล	29
รูปที่ 2.15 การเพิ่มขึ้นของอัตราขยายเมื่อจำนวนตัวประกอบมากขึ้น	29
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างโครงสร้างของสายอากาศแบบยาคีโคโพลที่มีอินพุตอิมพีแดนซ์เป็น 50Ω	31
รูปที่ 2.17 โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่	31
รูปที่ 2.18 โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ในพื้นที่ที่ห่างกัน	32
รูปที่ 2.19 โครงสร้างของสถานีฐาน	33
รูปที่ 2.20 อัตราส่วนของ D/R	35
รูปที่ 2.21 แพทเทิร์นแบบต่างๆ ในการนำเอาความถี่มาใช้ใหม่	36
รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบต่างๆของสายอากาศแบบยาคี	39
รูปที่ 3.2 การกำหนดค่าต่างๆ ให้กับโปรแกรม NEC	42
รูปที่ 3.3 แบบรูปของสายอากาศที่ออกแบบด้วยโปรแกรม NEC	43
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการ Generate รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น	43
รูปที่ 3.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการ Generate ด้วยโปรแกรม NEC	44
รูปที่ 3.6 สายอากาศโมโนโพลยาคี บนแผ่นระนาบกราวด์ที่มีการป้อนเพียงหนึ่งด้าน	45
รูปที่ 3.7(ก) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นและ Gain ที่ความถี่ 1885MHz	46
รูปที่ 3.7(ข) HPBW ที่ความถี่ 1885MHz	47
รูปที่ 3.7(ค) Smith chart ที่ความถี่ 1885MHz	47
รูปที่ 3.8(ก) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นและ Gain ที่ความถี่ 1900MHz	48

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.8(ข) HPBW ที่ความถี่ 1900MHz	49
รูปที่ 3.8(ค) Smith Chart ที่ความถี่ 1900MHz	49
รูปที่ 3.9(ก) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นและ Gain ที่ความถี่ 1965MHz	50
รูปที่ 3.9(ข) HPBW ที่ความถี่ 1965MHz	51
รูปที่ 3.9(ค) Smith Chart ที่ความถี่ 1965MHz	51
รูปที่ 3.10(ก) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นและ Gain ที่ความถี่ 1980MHz	52
รูปที่ 3.10(ข) HPBW ที่ความถี่ 1980MHz	53
รูปที่ 3.10(ค) Smith Chart ที่ความถี่ 1980MHz	53
รูปที่ 3.11 วิธีการ Optimizer จากโปรแกรม NEC	54
รูปที่ 3.12 รูปแบบของสายอากาศที่ออกแบบด้วยวิธี Optimizer จากโปรแกรม NEC	55
รูปที่ 3.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดย วิธีการ Optimizer จากโปรแกรม NEC	55
รูปที่ 3.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและ Directivity จากการ Optimizer ที่ความถี่ 1885 MHz	56
รูปที่ 3.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและ Directivity จากการ Optimizer ที่ความถี่ 1900 MHz	57
รูปที่ 3.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและ Directivity จากการ Optimizer ที่ความถี่ 1965 MHz	58
รูปที่ 3.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและ Directivity จากการ Optimizer ที่ความถี่ 1980 MHz	59
รูปที่ 4.1 ระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบเทียบกับตัวสะท้อนคลื่น	61
รูปที่ 4.2 รูปแบบของสายอากาศที่จะนำไปทดสอบ	62
รูปที่ 4.3 ค่า SWR ด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	63
รูปที่ 4.4 ค่า SWR ด้านที่ 2 ที่มุม 90 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	64
รูปที่ 4.5 ค่า SWR ด้านที่ 3 ที่มุม 180 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	65
รูปที่ 4.6 ค่า SWR ด้านที่ 4 ที่มุม 270 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	66
รูปที่ 4.7 ค่า อิมพีแดนซ์ ด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	67
รูปที่ 4.8 ค่า อิมพีแดนซ์ ด้านที่ 2 ที่มุม 90 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	68
รูปที่ 4.9 ค่า อิมพีแดนซ์ ด้านที่ 3 ที่มุม 180 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	69
รูปที่ 4.10 ค่า อิมพีแดนซ์ ด้านที่ 4 ที่มุม 270 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	70
รูปที่ 4.11 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	71
รูปที่ 4.11 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	72
รูปที่ 4.13 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ด้านที่ 3 ที่มุม 180 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.14 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ด้านที่ 4 ที่มุม 270 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	74
รูปที่ 4.15 รูปแบบของสายอากาศจากการ Optimizer โดยใช้โปรแกรม NEC 2	75
รูปที่ 4.16 ค่า SWR ด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศาโดยวิธีการOptimizer	76
รูปที่ 4.17 ค่า SWR ด้านที่ 2 ที่มุม 90 องศา โดยวิธีการOptimizer	77
รูปที่ 4.18 ค่า SWR ด้านที่ 3 ที่มุม 180 องศา โดยวิธีการOptimizer	78
รูปที่ 4.19 ค่า SWR ด้านที่ 4 ที่มุม 270 องศาโดยวิธีการOptimizer	79
รูปที่ 4.20 ค่า อิมพีแดนซ์ ด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา โดยวิธีการOptimizer	80
รูปที่ 4.21 ค่า อิมพีแดนซ์ ด้านที่ 2 ที่มุม 90 องศา โดยวิธีการOptimizer	81
รูปที่ 4.22 ค่า อิมพีแดนซ์ ด้านที่ 3 ที่มุม 180 องศา โดยวิธีการOptimizer	82
รูปที่ 4.23 ค่า อิมพีแดนซ์ ด้านที่ 4 ที่มุม 270 องศา โดยวิธีการOptimizer	83
รูปที่ 4.24 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา โดยวิธีการOptimizer	84
รูปที่ 4.25 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ด้านที่ 2 ที่มุม 90 องศา โดยวิธีการOptimizer	85
รูปที่ 4.26 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ด้านที่ 3 ที่มุม 180 องศา โดยวิธีการOptimizer	86
รูปที่ 4.27 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ด้านที่ 4 ที่มุม 270 องศา โดยวิธีการOptimizer	87
รูปที่ 4.28 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด	88
รูปที่ 4.29 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยค	89
รูปที่ 4.30 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา ความถี่ 1885MHz	89
รูปที่ 4.31 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 2 ที่มุม 90 องศา ความถี่ 1885MHz	90
รูปที่ 4.32 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 3 ที่มุม 180 องศา ความถี่ 1885MHz	91
รูปที่ 4.33 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 4 ที่มุม 270 องศา ความถี่ 1885MHz	92
รูปที่ 4.34 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา ความถี่ 1900MHz	93
รูปที่ 4.35 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 2 ที่มุม 90 องศา ความถี่ 1900MHz	94
รูปที่ 4.36 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 3 ที่มุม 180 องศา ความถี่ 1900MHz	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.37 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 4 ที่มีมุม 270 องศา ความถี่ 1900MHz	96
รูปที่ 4.38 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 1 ที่มีมุม 0 องศา ความถี่ 1965MHz	97
รูปที่ 4.39 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 2 ที่มีมุม 90 องศา ความถี่ 1965MHz	98
รูปที่ 4.40 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 3 ที่มีมุม 180 องศา ความถี่ 1965MHz	99
รูปที่ 4.41 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 4 ที่มีมุม 270 องศา ความถี่ 1965MHz	100
รูปที่ 4.42 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 1 ที่มีมุม 0 องศา ความถี่ 1980MHz	101
รูปที่ 4.43 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 2 ที่มีมุม 90 องศา ความถี่ 1980MHz	102
รูปที่ 4.44 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 3 ที่มีมุม 180 องศา ความถี่ 1980MHz	103
รูปที่ 4.45 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 4 ที่มีมุม 270 องศา ความถี่ 1980MHz	104
รูปที่ 4.46 การวัดอัตราขยายของสายอากาศ	105

บทที่ 1

บทนำ

โลกในปัจจุบันนี้ได้พัฒนาเข้าสู่ยุคการติดต่อสื่อสารซึ่งทำให้นานาประเทศในแต่ละทวีปทั่วโลกสามารถติดต่อเชื่อมโยงข้อมูลข่าวสารระหว่างกันและกันได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว มีความถูกต้องของข้อมูลสูงขึ้น โดยการติดต่อสื่อสารที่สำคัญในยุคปัจจุบันนี้ก็คือ การติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless communication) เพราะการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายมีความสะดวกในการใช้งาน มีความคล่องตัวใช้งานได้ทุกที่ทุกเวลา สามารถติดต่อสื่อสารได้ในระยะทางที่ไกลขึ้น และยังมีแนวโน้มที่จะมีการพัฒนาอีกต่อไปในอนาคต ซึ่งในปัจจุบันจะเห็นได้ในรูปแบบของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile)

ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลล์ลู่ค่า มีสถานีฐาน(Base station) ที่ใช้รูปแบบของการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional pattern) ครอบคลุมพื้นที่ ที่ต้องการใช้งาน ซึ่งในปัจจุบัน ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ มีความต้องการในการใช้งานมากขึ้นทุกขณะ แต่ความถี่ช่วงที่ใช้งาน มีไม่เพียงพอที่จะรองรับความต้องการของผู้ใช้งาน โดยความถี่ถูกจัดเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด จึงต้องจัดสรรความถี่ที่นำมาใช้งานให้เกิดประโยชน์สูงสุด ดังนั้นในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ จึงได้นำความถี่เดิมที่มีการนำไปใช้งานแล้ว กลับมาใช้ใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ความถี่ โดยการนำเซลล์ที่มีความถี่เดียวกัน วางให้มีระยะทางที่ห่างกัน โดยกำหนดให้ความถี่อื่นที่ใช้เป็นความถี่ข้างเคียงทำงานในพื้นที่คั่นระหว่างความถี่ดังกล่าว แต่ข้อเสียจากการนำเซลล์ที่มีความถี่เดิมกลับมาใช้ใหม่ ก็คือจะเกิดการรบกวนกันในช่องสัญญาณที่มีความถี่เดียวกัน หรือที่เรียกว่า การเกิด "Co-channel interference" ซึ่งอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพในการติดต่อสื่อสารลดลง

ดังนั้นในโครงการนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ห้ออกแบบสายอากาศที่ใช้เป็นสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อให้การนำเซลล์ที่มีความถี่เดิม กลับมาใช้ใหม่เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยหาวิธีลดการเกิดการรบกวนกันของช่องสัญญาณที่มีความถี่เดียวกัน หรือ Co-channel interference โดยจัดวางเซลล์ที่มีความถี่เดียวกันไม่ให้เกิดการรบกวนกัน จากการออกแบบ ให้เซลล์ความถี่เดียวกันอยู่ห่างกันและลดจำนวนทิศทางของเซลล์ความถี่เดียวกันที่มีทิศทางเข้ามารบกวนทำให้เกิดการอินเตอร์เฟียร์เรนซ์ โดยใช้คุณสมบัติของสายอากาศ ยากิ (Yagi antenna) ที่มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว (Directional pattern) มาจัดวางเรียงกันโดยมีทิศทาง 4 ทิศทางตรงข้ามกัน มีลักษณะเป็นสายอากาศแบบเซกเตอร์(sector) และมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบ 4 ทิศทาง โดยคุณสมบัติของสายอากาศแบบ ยากิ จะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) และอัตราขยาย(Gain)ที่สูงขึ้น ทำให้เกิดระยะห่างของเซลล์ที่ช่องความถี่เดียวกันมากขึ้น และเพิ่มอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน(Signal-to-Noise Ratio) จากการลดจำนวนทิศทางเซลล์ที่เข้ามารบกวน และการติดตั้งสถานีฐาน(Base station) ในสถานที่ ที่มีความแตกต่างกันของสภาพภูมิประเทศ เช่น ภูเขา ทะเล ป่าไม้ และจำนวนผู้ต้องการ ใช้ในแต่ละพื้นที่แตกต่างกัน ทำให้ความต้องการในการติดต่อสื่อสารมากขึ้น แตกต่างกัน หรือเมื่อนำไปใช้งานแล้วเกิดประสิทธิภาพของการใช้งานน้อยมากไม่คุ้มค่ากับการติดตั้งสถานีฐาน ดังนั้นสายอากาศที่มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบ 4 ทิศทางสามารถออกแบบให้เลือกการแพร่กระจายคลื่น ในทิศทางที่มีความจำเป็นต่อการใช้งานในพื้นที่ต่างๆ เพื่อการใช้งานที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

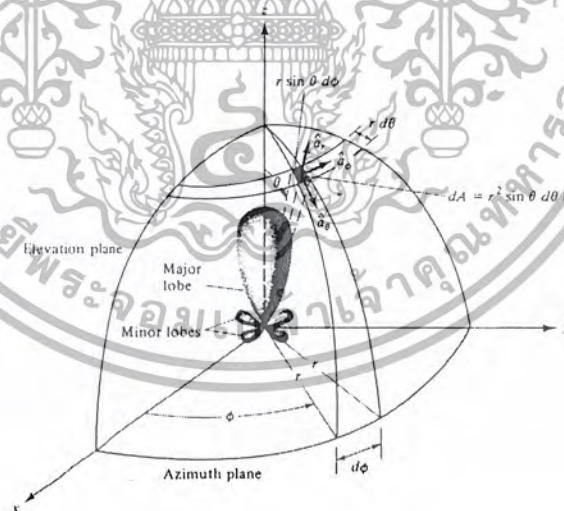
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสเปซโคออดิเนต (Space Coordinate) ส่วนใหญ่แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นนี้มักคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far Field)

การอธิบายคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Intensity), ความเข้มของสนาม (Field Strength), เฟส (Phase) และโพลาไรเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกต ที่มีรัศมีคงที่

รูปที่ 2.1 แสดงระบบโคออดิเนตที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่น สำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่า “แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเชิงกำลังงาน” (Power Pattern) ของสายอากาศ และกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆ ที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่า “แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเชิงสนาม” (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น



รูปที่ 2.1 ระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

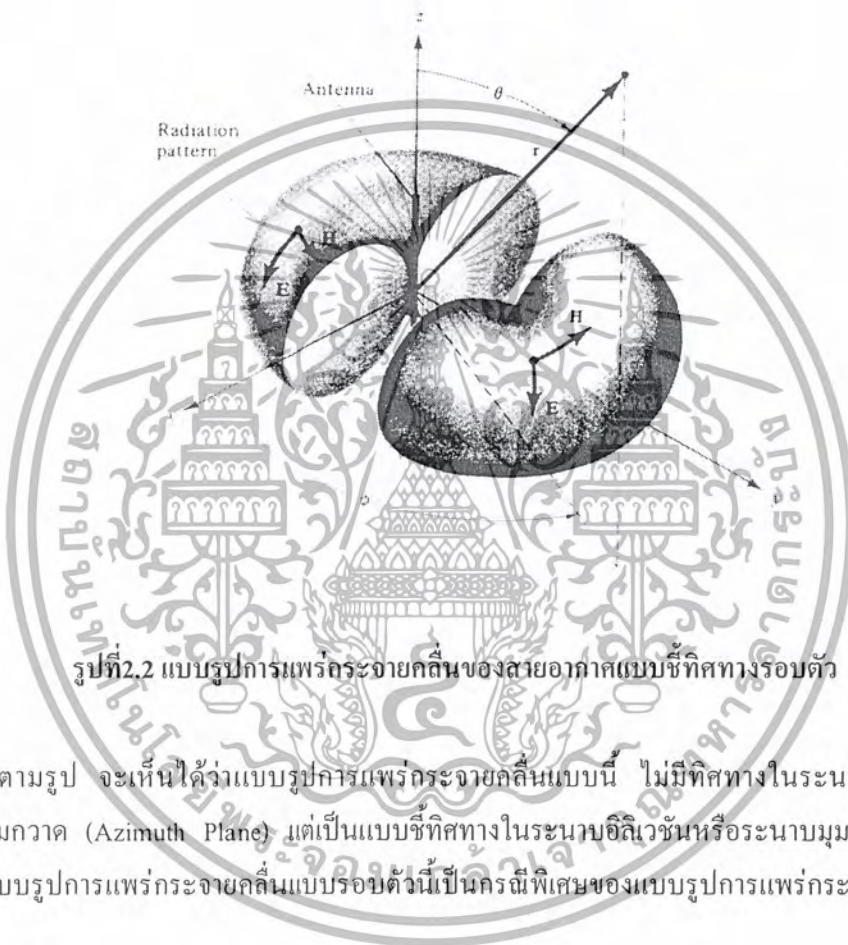
2.1.1 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบไอโซโทรปิก,แบบชี้ทิศทางและแบบทิศทางรอบตัว

ตัวแผ่กระจายคลื่นแบบไอโซโทรปิก (Isotropic Radiator) คือ สายอากาศที่ถูกสมมติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่นเท่ากันในทุกทิศทาง ยกตัวอย่าง เช่น พอยท์ซอร์ส (Point Source) เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างได้จริง แต่มักจะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริง เกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติและทิศทางของสายอากาศ

สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional Antenna) เป็นสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ สายอากาศแบบทิศทางรอบตัว (Omnidirectional Antenna) คุณสมบัติของสายอากาศแบบนี้มีดังแสดงในรูปที่ 2.2



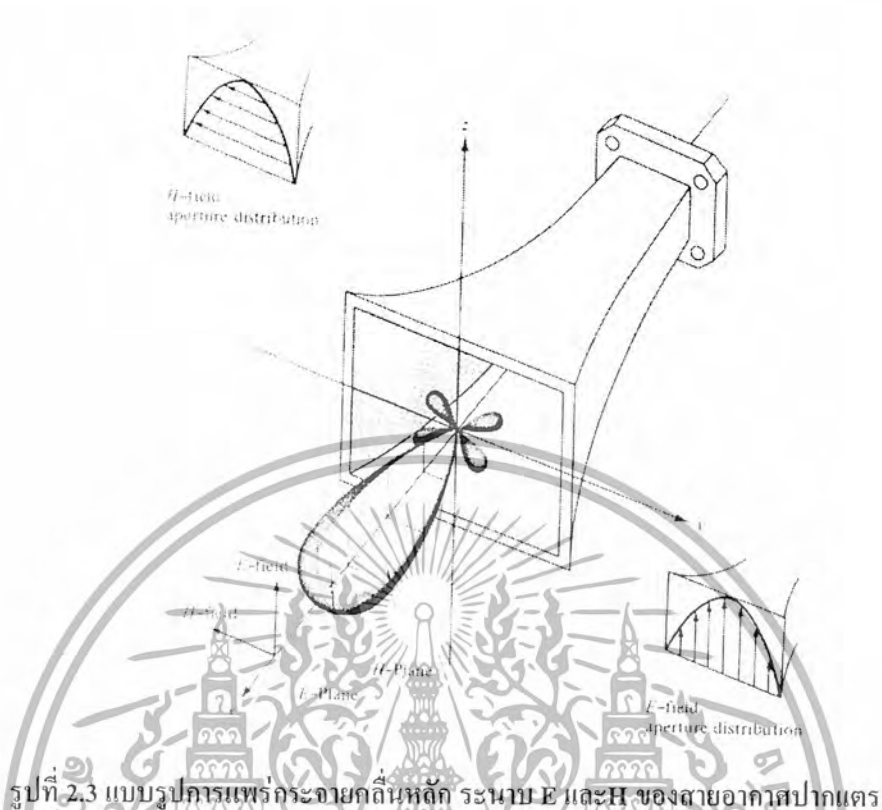
รูปที่ 2.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบชี้ทิศทางรอบตัว

ตามรูป จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนี้ ไม่มีทิศทางในระนาบอาซิมุทหรือระนาบมุมกวาด (Azimuth Plane) แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบอิลิวชันหรือระนาบมุมยก (Elevation Plane) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวนี้เป็นกรณีพิเศษของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบชี้ทิศทาง

2.1.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก (Principle Pattern)

เรามักอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศ ในเทอมของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลักของสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก H สำหรับสายอากาศที่มีโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ตัวอย่างการแสดงผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลักมีดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยมีระนาบ xz เป็นระนาบ E หลัก และมีระนาบ xy เป็นระนาบ H หลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร

2.1.3 ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)

ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น เป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่เกิดเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ รูป 2.4 แสดงลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นแบบตามมิติ ซึ่งแบ่งลำคลื่นเป็นแบบต่างๆ ได้ดังนี้

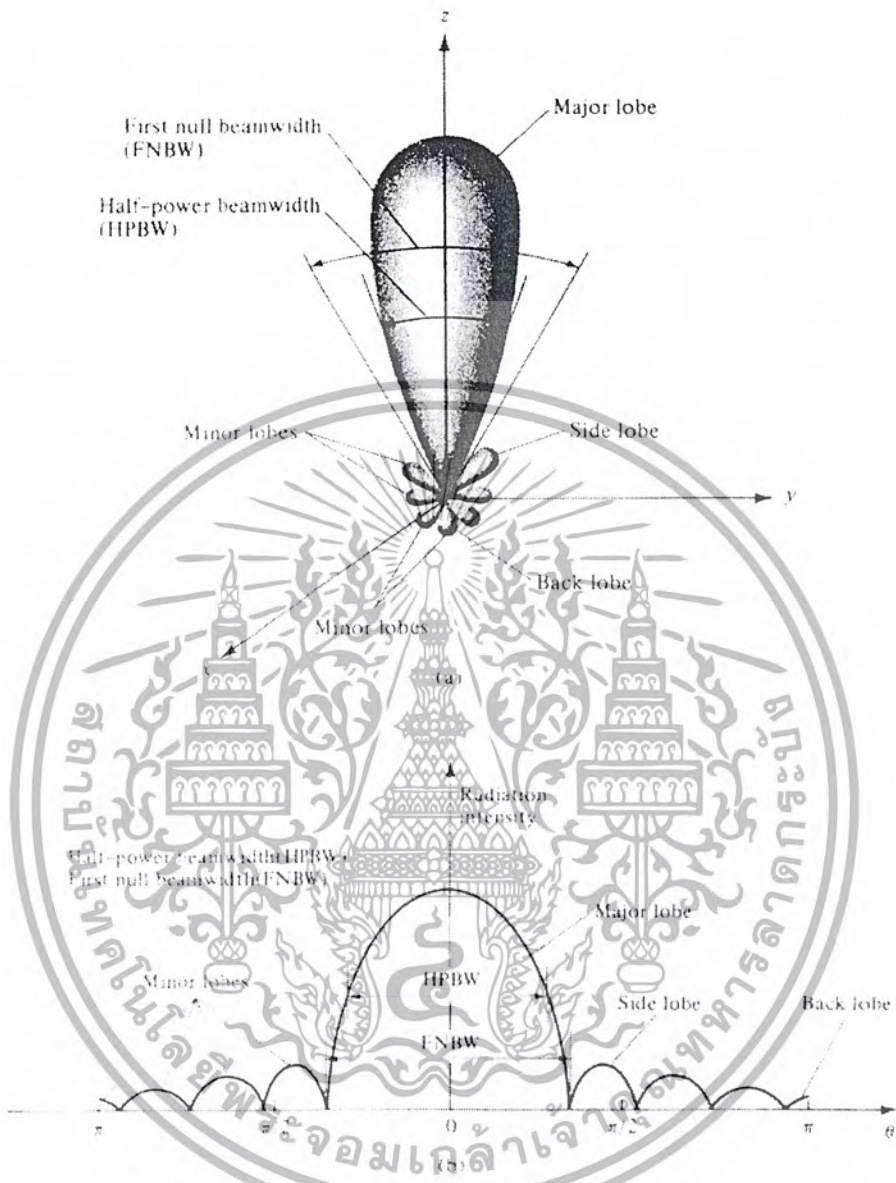
ลำคลื่นหลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ตามรูปที่ 2.4 มีลำคลื่นหลักอยู่ในทิศทาง θ เท่ากับศูนย์ สำหรับสายอากาศบางชนิด อาจมีลำคลื่นหลักมากกว่าหนึ่งลำคลื่น เช่น สายอากาศแยกลำคลื่น (Split-Beam Antenna)

ลำคลื่นย่อย (Minor Lobe) ได้แก่ ลำคลื่นอื่นๆ นอกเหนือไปจากลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นด้านข้าง (Side Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ติดกับลำคลื่นหลัก และอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นด้านหลัง (Back Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับลำคลื่นหลัก ปกติแล้วลำคลื่นย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่จำเป็นต้องกำจัดลำคลื่นเหล่านี้ให้เหลือน้อยที่สุด ระดับของลำคลื่นย่อยมักแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในลำคลื่นที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นของพลังงานในลำคลื่นหลัก ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนของลำคลื่นย่อย (Side Lobe Ratio) หรือระดับของไซด์โลบ (Side Lobe Level : SLL) ในทางปฏิบัติ โดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของไซด์โลบน้อยกว่า -20 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

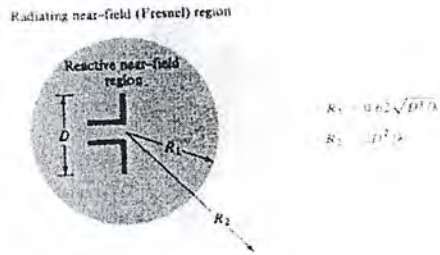


รูปที่ 2.4 ล้อคลื่นต่างๆ, บีมวิดท์ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเชิงเส้นของสายอากาศ

2.1.4 บริเวณต่างๆ ของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไป มักจะแบ่งบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือ สนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive – Near Field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating – Near Field) และสนามระยะไกล (Far Field) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ

บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด และมีสนามเป็นชนิดรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ บริเวณนี้จะมีระยะทาง $R < 0.62 \sqrt{D^3 / \lambda}$ จากผิวของสายอากาศ เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่น และ D เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ

บริเวณสนามกระจายระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับสนามระยะไกล โดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่ และการกระจายของสนามตามมุมต่างๆ นั้นแปรผันตามระยะทางจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้น ในบริเวณนี้จะมีระยะทาง $0.62 \sqrt{D^3 / \lambda} \leq R \leq 2D^2 / \lambda$

บริเวณสนามระยะไกล เป็นบริเวณสนามของสายอากาศซึ่งการแพร่ของสายอากาศตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติที่ใหญ่ที่สุดเท่ากับ D บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง $R > 2D^2 / \lambda$ จากสายอากาศ

ในบริเวณนี้ สนามมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse Field) และการแพร่กระจายของสนามตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทาง ขอบในของบริเวณดังกล่าวมีค่า R เท่ากับ $2D^2 / \lambda$ และขอบนอกมีค่าเป็นอนันต์

2.2 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิทซ์

ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิทซ์ (Half - Power Beamwidth : HPBW) เป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลัก มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดสองจุด ดังแสดงในรูปที่ 2.4

2.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น

คำจำกัดความของคำว่า ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ในทิศทางที่กำหนดให้ คือ กำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เกี่ยวกับสนามระยะไกล ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น และผลจากการยกกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในวงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ U คือ ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

w_{rad} คือ ความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น (W/M²)

ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศ ในระยะไกลได้ คือ

$$\begin{aligned} U(\theta, \phi) &= \frac{r^2}{2\eta} |\bar{E}(r, \theta, \phi)|^2 \\ &= \frac{r^2}{2\eta} [|E(r, \theta, \phi)|^2 + |E(r, \theta, \phi)|^2] \\ &= \frac{1}{2\eta} [|E(\theta, \phi)|^2 + |E(\theta, \phi)|^2] \end{aligned} \quad (2.2a)$$

เมื่อ \bar{E} คือความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

E_θ, E_ϕ คือ ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

η คือ อินทริเนสิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้น แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึงความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นได้เช่นกัน

กำลังงานทั้งหมดนี้ หาได้โดยการอินทิเกรตความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ตามสมการ(2.3) ตลอดมุมตัน 4π ทั้งหมด ซึ่งจะได้

$$P_{rad} = \iiint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.3)$$

2.4 ค่าการชี้ทิศทางสูงสุด (Directivity)

ค่าการชี้ทิศทางในทิศทางที่กำหนด คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้น ต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งใช้สำหรับอ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศสำหรับใช้อ้างอิงนี้จะใช้ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (Isotropic Point Source)

ส่วนค่าการชี้ทิศทางสูงสุด คือ ค่าการชี้ทิศทางในทิศทางที่มีค่ามากที่สุด หรือกล่าวง่าย ๆ ว่าค่าการชี้ทิศทางสูงสุดของต้นกำเนิด (สายอากาศ) ที่ไม่เป็นไอโซโทรปิก คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นที่มากที่สุด ต่อ ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส เขียนเป็นสมการได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_g = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.4)$$

$$D_g = \frac{U_{max}}{U_o} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.5)$$

เมื่อ	D_g	คือ ค่าการชี้ทิศทาง (ไม่มีหน่วย)
	D_o	คือ ค่าการชี้ทิศทางสูงสุด
	U	คือ ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)
	U_{max}	คือ ค่าสูงสุดของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)
	U_o	คือ ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของ ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (W/หน่วยมุมตัน)
	P_{rad}	คือ กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด (W)

จากสมการ (2.4) และ (2.5) เราจะทราบว่า ค่าการชี้ทิศทางและค่าการชี้ทิศทางสูงสุดของ ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สมีค่าเป็นหนึ่ง ทั้งนี้เพราะว่า U , U_{max} และ U_o ต่างมีค่าเท่ากัน

ค่าการชี้ทิศทางสูงสุดของ ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส มีค่าเท่ากับหนึ่ง เพราะว่ามันแผ่กระจายกำลังงานออกไปใน ทุกทิศทางด้วยค่าที่เท่ากัน แต่สำหรับต้นกำเนิด (สายอากาศ) แบบอื่น ๆ นั้นย่อมมีค่าการชี้ทิศทางเท่ากับค่าการชี้ทิศทางสูงสุดมากกว่าหนึ่งเสมอ

ข้อสรุปอีกอย่างหนึ่งในที่นี้ก็คือ ค่าของการชี้ทิศทางจะมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์และน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าการชี้ทิศทางสูงสุด ($0 \leq D_g \leq D_o$)

โดยทั่วไปสูตรของค่าการชี้ทิศทางและค่าการชี้ทิศทางสูงสุด อาจจะเป็นฟังก์ชันของทั้งมุม θ และ ϕ ด้วย

ต่อไปลองสมมติให้ ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นอยู่ในลักษณะดังต่อไปนี้คือ

$$U = B_o F(\theta, \phi) \approx \frac{1}{2\eta} \left[|E(\theta, \phi)|^2 + |E(\theta, \phi)|^2 \right] \quad (2.6)$$

เมื่อ B เป็นค่าคงที่และ E_θ และ E_ϕ เป็นส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าที่ระยะไกล ค่าสูงสุดของสมการ(2.6) หาได้คือ

$$U_{max} = B_o F(\theta, \phi)|_{max} = B_o F_{max}(\theta, \phi) \quad (2.7)$$

กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด หาได้จาก

$$P_{rad} = \int \int_{\Omega} U(\theta, \phi) d\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น จะได้สูตรทั่วไปของค่าการชี้ทิศทางและค่าการชี้ทิศทางสูงสุดเป็นดังนี้คือ

$$D_g(\theta, \phi) = \frac{4\pi F(\theta, \phi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2.9)$$

$$D_o(\theta, \phi) = \frac{4\pi F(\theta, \phi)|_{\max}}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2.10)$$

หรือเขียนสมการ(2.10)ใหม่ได้เป็น

$$D_o(\theta, \phi) = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} / F(\theta, \phi)|_{\max} \quad (2.11)$$

เมื่อ Ω_A เป็นมุมตันของลำคลื่น ซึ่งหาได้จาก

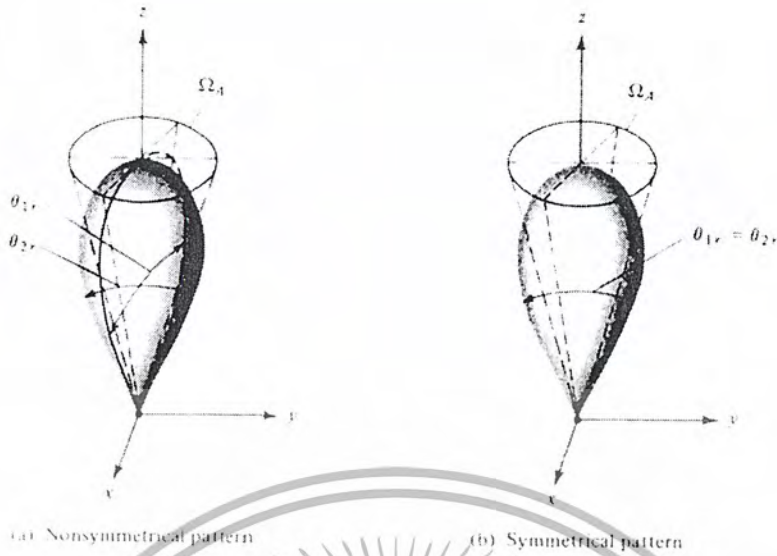
$$\Omega_A = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}{F(\theta, \phi)|_{\max}} \quad (2.12)$$

$$F_n(\theta, \phi) = \frac{F(\theta, \phi)}{F(\theta, \phi)|_{\max}} \quad (2.13)$$

$F(\theta, \phi)|_{\max}$ นำมาหารในสมการ (2.13) เพื่อนอร์มอลไลซ์ (Normalize) ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น $F(\theta, \phi)$ ให้มีค่าสูงสุดเป็นหนึ่ง

มุมตันของลำคลื่น Ω_A มีจำกัดความว่า คือ มุมตันซึ่งกำลังงานทั้งหมดของสายอากาศ จะไหลผ่านเมื่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นมีค่าคงที่ (และมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดของ F) ที่ทุกมุมภายใน Ω_A สายอากาศซึ่งมีลำคลื่นหลักแคบๆ เพียงลำคลื่นเดียว และมีลำคลื่นย่อยที่มีขนาดเล็กจนสามารถตัดทิ้งได้ มุมตันของลำคลื่น จะมีค่าประมาณเท่ากับผลของ HPBW ใน 2 ระนาบ ซึ่งตั้งฉากกัน ดังแสดงในรูป 2.6(a) สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่หมุมแล้วสมมาตรกันโดยรอบ HPBW ในระนาบใดๆ จะเท่ากัน ดังแสดงในรูป 2.6(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 มุมตันของลำคลื่นซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่สมมาตรและสมมาตรกัน

โดยอาศัยการประมาณนี้ สมการ (2.11) จะเขียนใหม่ได้เป็นดังต่อไปนี้

$$D_o \approx \frac{4\pi}{\Omega_A} \approx \frac{4\pi}{\theta_{1r}\theta_{2r}} \tag{2.14}$$

มุมตันของลำคลื่น Ω_A ประมาณได้จาก

$$\Omega_A \approx \theta_{1r}\theta_{2r} \tag{2.15}$$

เมื่อ θ_{1r} คือ HPBW ในระนาบใด ๆ (เรเดียน)

θ_{2r} คือ HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (เรเดียน)

เมื่อรู้ความกว้างของลำคลื่นเป็นองศา สมการ (2.14) จะดัดแปลงให้เหมาะสมที่จะแทนค่าความกว้างของลำคลื่นนั้นโดยตรง ได้เป็น

$$D_o \approx \frac{4\pi(180\pi)^2}{\theta_{1d}\theta_{2d}} = \frac{41253}{\theta_{1d}\theta_{2d}} \tag{2.16}$$

เมื่อ θ_{1d} คือ HPBW ในระนาบใด ๆ (องศา)

θ_{2d} คือ HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (องศา)

สำหรับแถวลำดับเชิงระนาบ (Planar Array) จะประมาณสมการ (2.17) ได้เป็นดังนี้คือ

$$D_o \approx \frac{32400}{\Omega_A^2(\text{degree})} = \frac{32400}{\theta_{1d}\theta_{2d}} \tag{2.16a}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ(2.14) และ (2.16) จะใช้ได้ผลดี เมื่อรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นมีเพียงลำคลื่นหลักเพียงลำคลื่นเดียว และลำคลื่นย่อยจะต้องมีขนาดเล็กมากๆ เท่านั้น สำหรับแบบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นซึ่งมี 2 ลำคลื่นหลักที่เหมือนกัน ค่าของค่าการชี้ทิศทางสูงสุดที่หาจากสมการ (2.14)หรือ (2.16) จะเป็น 2 เท่าของค่าจริง ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีลำคลื่นย่อยที่มีระดับสูง การหาค่าการชี้ทิศทางโดยใช้สมการ (2.14) หรือ (2.16) ซึ่งตัดลำคลื่นย่อยทิ้ง จะมีค่าสูงเกินความจริง

2.5 ค่าการขยาย (Gain)

ค่าการขยาย เป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าการชี้ทิศทาง โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่ค่าการชี้ทิศทาง จะอธิบายคุณสมบัติ ในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

ค่าการขยายกำลัง (Power Gain) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้ นั้น มีค่าเท่ากับ 4π คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้น ต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่ง เมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้โดยเฉพาะ โดยทั่วไปแล้ว เราจะคิดค่าการขยายกำลังในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ดังนั้น

$$Gain \approx \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.17)$$

โดยนัยทั่วไปแล้ว เรามักจะพูดถึงค่าการขยายสัมพันธ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าการขยายกำลังในทิศทางที่กำหนดให้ ต่อค่าการขยายกำลังของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศทั้งสองนั้นต้องเท่ากัน สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบอาจจะเป็นสายอากาศไดโพล, สายอากาศปากแตร หรือสายอากาศอื่นๆ ซึ่งคำนวณค่าการขยายได้ง่าย หรือรู้ค่าอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตาม โดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็นไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้น

$$G_g = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}(\text{lossless isotropic source})} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.18)$$

จากรูปที่ 2.7(a) เราสามารถเขียนได้ว่า กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด(P_{rad}) สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ (P_{in}) ด้วย

$$P_{rad} = e_r P_{in} \quad (2.19)$$

เมื่อ e_r เป็นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย) ใช้สมการ (2.20)จะทำให้สมการ (2.19) มีความสัมพันธ์ง่ายขึ้นเป็น

$$G_g(\theta, \phi) = e_r \left[\frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (2.20)$$

ซึ่งสัมพันธ์กับค่าการชี้ทิศทางในสมการ (2.10) คือ

$$G_g(\theta, \phi) = e_r D_g(\theta, \phi) \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การคัดลอกหรือการนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกัน ค่าสูงสุดของค่าการขยายจะสัมพันธ์กับค่าการชี้ทิศทางสูงสุด โดย

$$\begin{aligned} G_o &= G_g(\theta, \phi)|_{\max} = e_r D_g(\theta, \phi)|_{\max} \\ &= e_r D_g \end{aligned} \quad (2.22)$$

ดังนั้น ค่าประมาณของค่าการขยาย จะมีค่าเป็น

$$G_o \approx \frac{30000}{\theta_{1d} \theta_{2d}} \quad (2.22a)$$

ในทางปฏิบัติ เมื่อกล่าวถึงค่าการขยายมักจะหมายถึง ค่าการขยายกำลังที่มีค่าสูงสุด ดังแสดงในสมการ (2.23)

$$G_o(\text{dB}) = 10 \log_{10} [e_r D_o] \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.7 ขั้วอ้างอิง และการสูญเสียของสายอากาศ

2.6 ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ e_t จะใช้เมื่อเรากำลังพิจารณาการสูญเสียต่าง ๆ ที่ขั้วและภายใน โครงสร้างของสายอากาศด้วย การสูญเสียต่าง ๆ เมื่ออ้างอิงตามรูปที่ 2.7(a) อาจเนื่องมาจาก

- 1) การสะท้อนกลับ เนื่องจากความไม่สมพจน์ (Mismatch) กันระหว่างสายส่งกับสายอากาศ
- 2) การสูญเสียทั้งในตัวนำและฉนวน (I^2R)

โดยทั่วไปแล้ว ประสิทธิภาพทั้งหมด คำนวณได้จาก

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ e_t คือประสิทธิภาพทั้งหมด (ไม่มีหน่วย)
 e_r คือประสิทธิภาพที่เกี่ยวกับการสะท้อนกลับ มีค่าเท่ากับ (ไม่มีหน่วย)
 e_c คือประสิทธิภาพของตัวนำ (ไม่มีหน่วย)
 e_d คือ ประสิทธิภาพของฉนวน (ไม่มีหน่วย)
 Γ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศ

โดยที่

$$\Gamma = \frac{Z_m - Z_o}{Z_m + Z_o}$$

- เมื่อ Z_m คืออินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ
 Z_o คืออิมพีแดนซ์คุณสมบัติ (Characteristic Impedance) ของสายส่ง
 ปกติ e_c และ e_d คำนวณหาได้ลำบาก ส่วนมากมักหาได้จากการทดลอง แต่ถึงกระนั้นก็แยก e_c จาก e_d ไม่ออก ดังนั้นเพื่อความสะดวก มักจะเขียนสมการ (2.26) ใหม่เป็น

$$e_t = e_r e_{cd} = (1 - |\Gamma|^2) \quad (2.25)$$

- เมื่อ $e_{cd} = e_c e_d$ คือประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

2.7 ประสิทธิภาพของลำคลื่น (Beam Efficiency : BE)

พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่ง ที่จะใช้ในการตัดสินว่าสายอากาศมีคุณภาพของการส่งหรือรับคลื่นดีเพียงใดนั้น ได้แก่ ประสิทธิภาพของลำคลื่น สำหรับสายอากาศ ซึ่งมีลำคลื่นหลักอยู่ในทิศทางแกน z ($\theta = 0$) ดังแสดงในรูปที่ 2.4(a) ประสิทธิภาพของลำคลื่นจะกำหนดได้ดังนี้คือ

$$BE = \frac{\text{power transmitted (received) within cone angle } \theta_1}{\text{power transmitted (received) by the antenna}} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.26)$$

เมื่อ θ_1 เป็นมุมที่มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของมุมของกรวย ที่เราต้องการจะหาเปอร์เซ็นต์ของกำลังงานทั้งหมดในนั้น ดังนั้น จะเขียนสมการ(2.27) ได้เป็นดังนี้

$$BE = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_1} U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2.27)$$

เมื่อให้ θ_1 เป็นมุมที่เกิดมินัต (Null) คือ จุดตำแหน่งที่ค่ากำลังเป็นศูนย์เป็นคู่แรก ดังนั้น ประสิทธิภาพของลำคลื่นจะเป็นปริมาณที่แสดงถึงอัตราส่วนของจำนวนกำลังงานในลำคลื่นหลัก ต่อ กำลังงานที่มีทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 โพล่าไรเซชัน (Polarization)

ก่อนที่จะกล่าวถึงความหมายของโพล่าไรเซชันของสายอากาศ จะกล่าวถึงความหมายของโพล่าไรเซชัน ของคลื่นเสียก่อน

โพล่าไรเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายนั้น เป็นรูปแสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไป ที่อธิบายทิศทางและขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลา รูปแสดงโพล่าไรเซชันจะแสดงการกวาดของยอดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ ณ ตำแหน่งที่ ทำการสังเกตซึ่งคงที่ และการสังเกตนี้จะทำโดยมองตามหลังคลื่นที่เดินทางไป ดูรูปที่ 2.8 ประกอบ



รูปที่ 2.8 การหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระนาบและวงรีโพล่าไรเซชันที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในระนาบ $z=0$

สำหรับโพล่าไรเซชันของสายอากาศ ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง จะเป็นโพล่าไรเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้นจากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังงานที่ขั้วของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาให้จะหมายถึง ทิศทางที่สายอากาศมีค่าการขยายมากที่สุด ดังนั้นโพล่าไรเซชันของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกัน จะต่างกัน การแบ่งชนิดของโพล่าไรเซชันอาจแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ

- 1) โพล่าไรเซชันเชิงเส้น (Linearly Polarization)
- 2) โพล่าไรเซชันวงกลม (Circularly Polarization)
- 3) โพล่าไรเซชันวงรี (Elliptically Polarization)

ถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (คือเมื่อมองตามหลังคลื่นแล้ว จะเห็นมีการหมุนตามเข็มนาฬิกา) จะเรียกว่า เป็นโพล่าไรเซชันมือขวา ในขณะที่ หากสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา จะเรียกว่า เป็นโพล่าไรเซชันมือซ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเขียนสนามชั่วขณะเวลานั้นของคลื่นระนาบ ที่เดินทางในทิศทาง - z ได้ว่า

$$E(z;t) = \widehat{a}_x E_x(z;t) + \widehat{a}_y E_y(z;t) \quad (2.28)$$

เมื่อส่วนประกอบของสนามชั่วขณะเวลานั้น สัมพันธ์กับค่าเชิงซ้อนของสนามนั้นดังนี้

$$E_x(z;t) = E_x \cos(\omega t + kz + \phi_x) \quad (2.29)$$

$$E_y(z;t) = E_y \cos(\omega t + kz + \phi_y) \quad (2.30)$$

เมื่อ E_x และ E_y เป็น ขนาดของสนามค่าสูงสุด ในทิศทาง x และ y ตามลำดับ

2.8.1 โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น

คลื่นซึ่งเป็นโพลาริเซชันเชิงเส้น ความแตกต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบทั้งสองของสนาม จะมีค่าดังนี้

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi; n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.31)$$

2.8.2 โพลาริเซชันแบบวงกลม

จะเกิดโพลาริเซชันแบบวงกลมได้ ก็ต่อเมื่อ ขนาดของส่วนประกอบของสนามทั้งสองมีค่าเท่ากัน และความต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง เป็นจำนวนคี่เท่าของ $\frac{\pi}{2}$ นั่นคือ

$$|E_x| = |E_y| \rightarrow E_x = E_y \quad (2.32)$$

เมื่อ

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\frac{(1+2n)}{2}\pi; n = 0, 1, 2, \dots \quad cw \quad (2.33)$$

$$= -\frac{(1+2n)}{2}\pi; n = 0, 1, 2, \dots \quad cw \quad (2.34)$$

เมื่อ CW (Clockwise) คือ สนามหมุนตามเข็มนาฬิกา

CCW (Counter Clockwise) คือ สนามหมุนทวนเข็มนาฬิกา

ถ้าคลื่นเดินทางในทิศทางตรงกันข้าม (คือทิศทาง +z) เฟสในสมการ (2.33) และ (2.34) ที่ทำให้เกิด CW และ CCW จะต้องสลับกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 โพลาริเซชันแบบวงรี

โพลาริเซชันแบบวงรี จะเกิดขึ้นเมื่อ ความต่างเฟสเป็นจำนวนคี่ของ $\frac{\pi}{2}$ แต่ขนาดของสนามไฟฟ้าไม่เท่ากัน หรือความแตกต่างของเฟส เป็นจำนวนคี่ของ $\frac{\pi}{2}$ นั่นคือ

$$|E_x| \neq |E_y| \rightarrow E_x \neq E_y$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = + \frac{(1 + 2n)}{2} \pi; n = 0, 1, 2, \dots \text{ cw} \tag{2.35a}$$

$$= - \frac{(1 + 2n)}{2} \pi; n = 0, 1, 2, \dots \text{ ccw} \tag{2.35b}$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm \frac{n}{2} \pi \rangle 0 \rightarrow \text{cw} \tag{2.36}$$

$$\text{แต่ถ้า} \langle 0 \rightarrow \text{cw} \tag{2.37}$$

โดยที่ $n = 0, 1, 2, \dots$

ในกรณีของโพลาริเซชันแบบวงรีนั้น รูปแสดงการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดจะเป็นวงรีเอียง ดังแสดงในรูปที่ 2.8b อัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนย่อย จะเรียกว่าเป็นอัตราส่วนของแกน (Axial Ratio: AR) ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

$$AR = \frac{\text{แกนหลัก}}{\text{แกนย่อย}} = \frac{OA}{OB} \quad \text{โดยที่ } 1 \leq AR \leq \infty \tag{2.38}$$

การเอียงของวงรีเทียบแกน y สามารถแสดงด้วยมุมเอียงดังนี้คือ

$$\tau = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2E_x E_y}{E_x^2 - E_y^2} \cos(\Delta\phi) \right] \tag{2.39}$$

เมื่อวงรีวางตามแนวแกนหลัก $\tau = \frac{n\pi}{2}, n = 0, 1, 2, \dots$ แกนหลัก(ย่อย) เท่ากับ $E_x(E_y)$ หรือ $E_y(E_x)$ และอัตราส่วนของแกน มีค่าเท่ากับ $\frac{E_x}{E_y}$ หรือ $\frac{E_y}{E_x}$

2.8.4 โพลาริเซชันลอสแฟกเตอร์ (Polarization Loss Factor : PLF)

โดยทั่วไปแล้ว โพลาริเซชันของสายอากาศจะไม่เหมือนกับโพลาริเซชันของคลื่นที่เดินทางมายังสายอากาศ ซึ่งเรียกว่า เกิดโพลาริเซชันมismatch (Polarization Mismatch) ทำให้สายอากาศไม่สามารถดึงเอากำลังงานออกจากคลื่นได้สูงสุด เนื่องจากเกิดการสูญเสียจากโพลาริเซชัน (Polarization Loss) สมมติว่า สนามไฟฟ้าของคลื่นที่เดินทางเข้ามายังสายอากาศ เขียนได้ดังนี้

$$\vec{E}_i = \hat{P}_w E_i \tag{2.40}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\bar{\rho}_w$ เป็นหน่วยเวกเตอร์ของคลื่น และโพลาริเซชันของสนามไฟฟ้าของสายอากาศรับ มีค่าดังนี้

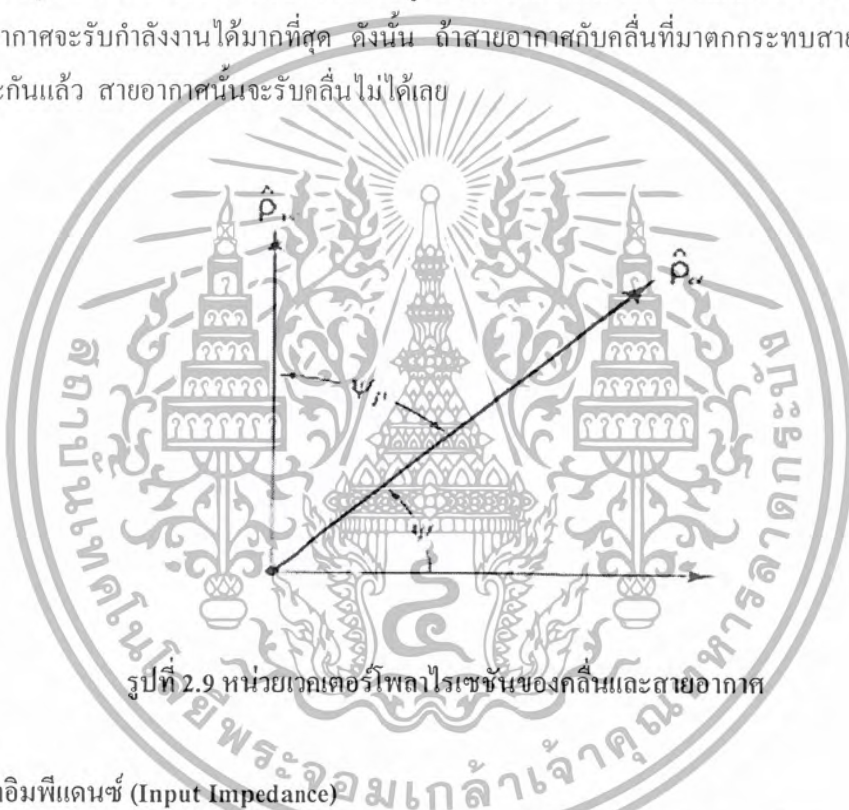
$$\bar{E}_a = \hat{P}_a E_a \quad (2.41)$$

เมื่อ $\bar{\rho}_w$ เป็นหน่วยเวกเตอร์ของสายอากาศ

จะกำหนดให้โพลาริเซชันลอสแฟกเตอร์ มีค่าดังนี้

$$PLF = |\hat{\rho}_w \hat{\rho}_a|^2 = |\cos \psi_p|^2 \quad (2.42)$$

เมื่อ ψ_p เป็นมุมระหว่างหน่วยเวกเตอร์ทั้งสอง ดังรูปที่ 2.9 ถ้าเกิดโพลาริเซชันแมตช์ ค่า PLF จะเป็นหนึ่ง และสายอากาศจะรับกำลังงานได้มากที่สุด ดังนั้น ถ้าสายอากาศกับคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศตั้งฉากซึ่งกันและกันแล้ว สายอากาศนั้นจะรับคลื่นไม่ได้เลย



รูปที่ 2.9 หน่วยเวกเตอร์โพลาริเซชันของคลื่นและสายอากาศ

2.9 อินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)

อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่ขั้วของสายอากาศนั้น อาจเป็นอัตราส่วนระหว่างศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศนั้น หรือเป็นอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่จุดใดๆ ในรูปที่ 2.10(a) (a) - (b) เป็นขั้วของสายอากาศ อัตราส่วนของศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วนี้ เมื่อไม่ได้ต่อโหลด (Load) จะเป็นอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งมีค่า

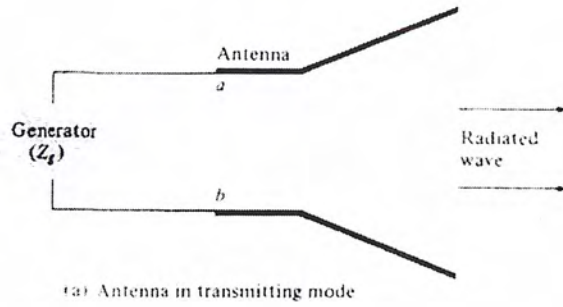
$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.43)$$

เมื่อ Z_A คือ อิมพีแดนซ์ที่ขั้ว a - b ของสายอากาศ (โอห์ม)

R_A คือ ความต้านทานที่ขั้วสายอากาศ (โอห์ม)

X_A คือ รีแอกแตนซ์ที่ขั้วสายอากาศ (โอห์ม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 สายอากาศส่งและวงจรสุมมูลย์

โดยทั่วไป ความต้านทานในสมการ(2.43) จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

$$R_A = R_r + R_L \tag{2.44}$$

เมื่อ R_r คือ ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

R_L คือ ความต้านทานการสูญเสียของสายอากาศ

ถ้าสมมติว่า สายอากาศต่อกับเครื่องกำเนิดสัญญาณที่มี อิมพีแดนซ์ภายใน เป็นดังนี้

$$Z_g = R_g + jX_g \tag{2.45}$$

เมื่อ R_g คือ ความต้านทานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ (โอห์ม)

X_g คือ รีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ (โอห์ม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารของศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสายอากาศทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง จะแสดงวงจรสมมูลย์ได้ดังรูปที่ 2.10b ในการหาปริมาณกำลังงานที่ถูกนำมาสู่ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นเพื่อแพร่กระจายออก กับกำลังงานที่สูญเสียในความต้านทานการสูญเสีย ที่กลายเป็นความร้อน ($I^2 R_L / 2$) นั้น เราจะหากระแสที่ไหลภายในลูป (Loop) ได้ว่ามีค่าดังนี้

$$I_g = \frac{V_g}{Z_l} = \frac{V_g}{Z_A + Z_g} = \frac{V_g}{(R_r + R_L + R_g) + j(X_A + X_g)} \quad (2.46)$$

และขนาดของกระแส จะมีค่าดังนี้

$$|I_g| = \frac{|V_g|}{[(R_r + R_L + R_g) + j(X_A + X_g)]^{1/2}} \quad (2.46a)$$

เมื่อ V_g เป็นศักดาไฟฟ้าค่าสูงสุดของเครื่องกำเนิดสัญญาณ กำลังงานที่ถูกนำมาในสายอากาศเพื่อการแพร่กระจายคลื่น จะมีค่าดังนี้

$$P_r = \frac{1}{2} |I_g|^2 R_r = \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_r}{(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \right] \quad (2.47)$$

และกำลังงานที่สูญเสียกลายเป็นความร้อน จะมีค่าดังนี้

$$P_r = \frac{1}{2} |I_g|^2 R_L = \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_L}{(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \right] \quad (2.48)$$

กำลังงานส่วนที่เหลือ จะเป็นส่วนที่สูญเสียเป็นความร้อนในความต้านทานที่ขั้ว R_g ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ ซึ่งมีค่า

$$P_r = \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_g}{(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \right] \quad (2.49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังงานที่ถูกลำมายังสายอากาศ จะมีค่ามากที่สุด เมื่อเกิดการคอนจูเกตแมทซ์ (Conjugate Match) นั่นคือ จะเกิดเมื่อ

$$R_r + R_l = R_g \quad (2.50)$$

และ
$$X_g = -X_g \quad (2.51)$$

ในกรณีนี้ สมการ (2.48), (2.49) และ (2.50) จะกลายเป็นดังต่อไปนี้ คือ

$$P_r = \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_r}{4(R_r + R_l)^2} \right] = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_r}{(R_r + R_l)^2} \right] \quad (2.52)$$

$$P_l = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_l}{(R_r + R_l)^2} \right] \quad (2.53)$$

$$P_g = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_g}{(R_r + R_l)^2} \right] = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{1}{(R_r + R_l)} \right] \quad (2.54)$$

จากสมการ (2.52) ถึง (2.54) พบว่า

$$\begin{aligned} P_g &= P_r + P_l = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_g}{(R_r + R_l)^2} \right] \\ &= \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_r + R_l}{(R_r + R_l)^2} \right] \end{aligned} \quad (2.55)$$

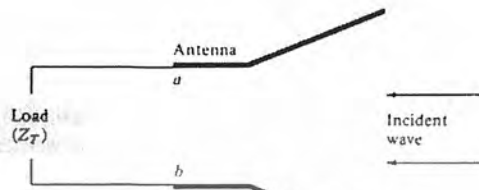
ดังนั้น กำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณ จะต้องจ่ายเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทซ์ จะมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{1}{2} V_g I_g' = \frac{1}{2} V_g \left[\frac{V_g}{2(R_r + R_l)} \right] \\ &= \frac{|V_g|^2}{4} \left[\frac{1}{(R_r + R_l)} \right] \quad (W) \end{aligned} \quad (2.56)$$

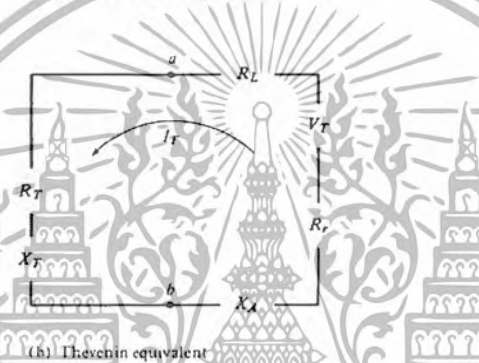
ในจำนวนกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่ายทั้งหมด ครึ่งหนึ่งจะสูญเสียเป็นความร้อนภายในความต้านทานภายใน (R_g) ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ และอีกครึ่งหนึ่งจะถูกนำมายังสายอากาศซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทซ์เท่านั้น ในส่วนของกำลังงานที่มายังสายอากาศส่วนหนึ่งจะแพร่กระจายออกไป โดยผ่านกำลังงานที่เกิดจากความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น อีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียเป็นความร้อน ซึ่งมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ ซึ่งถ้าสายอากาศไม่มีการสูญเสีย ($e_{sd} = 1$) ครึ่งหนึ่ง ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

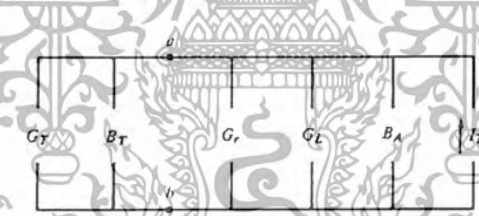
กำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่าย จะแพร่กระจายออกเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทซ์ ถ้าสมมติว่าเป็นการแมทซ์ที่สมบูรณ์ระหว่างสายอากาศกับสายส่ง ($e_r = 1$) ถ้ามีการสูญเสียเนื่องจากไม่สมพงษ์หรือไม่แมทซ์กันแล้ว จะทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศลดลง สำหรับการใส่สายอากาศเป็นสายอากาศรับ ดังรูปที่ 2.12 ถ้าที่คลื่นตกกระทบเข้ามายังสายอากาศ จะเหนี่ยวนำให้เกิดศักดาไฟฟ้า V_r ซึ่งเทียบได้กับ V_g ในโหมดการส่ง



(a) Antenna in receiving mode



(b) Thevenin equivalent



(c) Norton equivalent

รูปที่ 2.11 สายอากาศรับและวงจรสมมูล

โดยปกติอินพุทอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความถี่ และจะเหมาะสมกับสายส่งเฉพาะในช่วงความถี่หนึ่ง ๆ เท่านั้น นอกจากนี้ อินพุทอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศยังขึ้นกับแฟลคเตอร์ต่างๆ อีก ได้แก่ รูปทรง วิธีการป้อนสัญญาณ และสิ่งแวดลอมข้างเคียง เนื่องจากคำนวณได้ยากจึงมักจะหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ได้จากการทดลองวัด

2.10 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศ ถูกกำหนดให้เป็นช่วงความถี่ ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้ อาจเป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่างๆ เช่น อินพุทอิมพีแดนซ์, แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น, ความกว้างของลำคลื่น, โพลาริเซชัน, ระดับของไซด์โลบ, ค่าการขยาย, ประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่น ฯลฯ อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ คือ ไม่ต่างจากคุณสมบัติที่วัดที่ความถี่ตรงกลางที่ออกแบบ

งานทำให้คุณสมบัติเหล่านี้เสียไปจากข้อกำหนดหรือมาตรฐาน สำหรับสายอากาศแบนด์กว้างมักจะคิดเป็น

อัตราส่วนของความถี่ที่ใช้งานได้ด้านสูงต่อความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำ ยกตัวอย่าง เช่น แบนด์วิดท์ 10 : 1 แสดงว่าความถี่ที่ใช้งานได้ด้านสูง มีค่ามากกว่าความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำอยู่ 10 เท่า สำหรับสายอากาศแบบแคบ แบนด์วิดท์จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของความถี่ (ความถี่ด้านสูงลบด้วยความถี่ด้านต่ำ) หากด้วยความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น เช่น แบนด์วิดท์ 5 % แสดงว่า ผลต่างของความถี่ของช่วงการทำงานของสายอากาศ เป็น 5 % ของความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น

เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศที่กล่าวมา จะไม่เปลี่ยนแปลง ตามความถี่ในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ดังนั้น จึงไม่สามารถกำหนดแบนด์วิดท์ตามคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งได้ จึงต้องมีการกำหนดข้อบังคับให้เป็นตามการประยุกต์ใช้งานแต่ละอย่าง ปกติแล้ว คุณสมบัติของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นกับอินพุทอิมพีแดนซ์ จะมักถูกใช้เป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ของสายอากาศ

2.11 ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ประสิทธิภาพของตัวนำและฉนวน e_{cd} เป็นอัตราส่วนของกำลังงานที่ถูกนำมายังความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น R_r ต่อกำลังงานที่ถูกนำมาสู่ R_L และความต้านทานการสูญเสีย R_L จากสมการ(2.47)

$$P_r = \frac{1}{2} |I_r|^2 R_r = \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_r}{(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \right]$$

และจากสมการ(2.48)

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

จะหาได้ว่า

$$e_{cd} = \left[\frac{R_r}{R_r + R_L} \right] \quad (2.57)$$

ในกรณีของ ท่อโลหะ ซึ่งยาว l และมีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ มีค่าเท่ากับ A ความต้านทานกระแสดตรงจะมีค่า R_{dc} ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$R_{dc} = \left[\frac{l}{\sigma A} \right] \quad (2.57a)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสกินเดปท์ (Skin Depth) δ มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเส้นทแยงมุมที่สั้นที่สุดของพื้นที่หน้าตัดนั้น กระแสจะไหลอยู่เฉพาะในบริเวณชั้นบางๆ ที่ผิวของตัวนำเท่านั้น ดังนั้นความต้านทานที่ความถี่สูง จะมีค่าดังนี้คือ

$$R_{hf} = \frac{\ell R_s}{P} = \frac{\ell}{P} \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} \quad (2.57b)$$

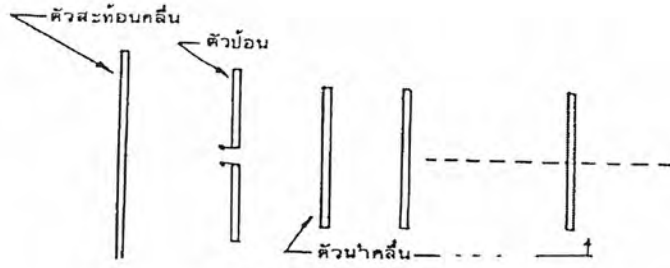
เมื่อ P เป็นเส้นรอบวงของพื้นที่หน้าตัดของท่อโลหะ ($P = C = 2\pi b$ สำหรับลวดวงกลมรัศมี b) R_s คือความต้านทานที่ผิวของตัวนำ ω เป็นความถี่เชิงมุม μ_0 เป็นค่าสภาพซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ และ σ เป็นความนำของโลหะ

2.12 สายอากาศแบบยาคิ (Yagi antenna)

เป็นสายอากาศที่มีที่ใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เพราะเป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างที่ค่อนข้างง่าย และมีอัตราขยายสูง

2.12.1 โครงสร้างของสายอากาศแบบยาคิ

สายอากาศแบบยาคิเป็นสายอากาศที่เสนอโดย ศาสตราจารย์ ยาคิ และศาสตราจารย์ อูเด (Professor H. Yagi and Professor S. Uda) ซึ่งเป็นชาวญี่ปุ่น แรงจูงใจในการเสนอสายอากาศแบบนี้ขึ้นมานั้นเป็นเพราะต้องการปรับปรุงคุณสมบัติของสายอากาศไดโพลให้ดีขึ้น ทั้งนี้เพราะสายอากาศไดโพลมีข้อจำกัดเกี่ยวกับอัตราขยาย และรูปร่างของแพทเทินกล่าวคือ อัตราขยายค่อนข้างต่ำ และแพทเทินออกไปในทิศที่กว้าง วิธีเพิ่มอัตราขยายและสร้างแพทเทินให้กับสายอากาศนั้นโดยทั่วไปจะทำได้โดยนำสายอากาศนั้นมาเรียงกันในรูปของสายอากาศอะเรย์ หรือใช้แผ่นสะท้อนเข้าช่วย การให้แผ่นสะท้อนเข้าช่วยเป็นวิธีการที่ง่าย แต่ก็ยังมีข้อจำกัดตรงที่อัตราขยายที่ได้จะสูงขึ้นไม่เกิน 6dB การใช้หลักการของสายอากาศอะเรย์นั้น ถึงแม้จะสามารถเพิ่มอัตราขยายให้สูงขึ้นเรื่อยๆ โดยการเพิ่มจำนวนของสายอากาศ ก็มีปัญหาเรื่องการป้อนสายอากาศ กล่าวคือจะต้องมีการแยกเพาเวอร์จากเครื่องส่งไปป้อนให้กับสายอากาศทุกๆ ตัวประกอบโดยที่จะต้องควบคุมทั้งขนาดของกระแสและเฟสของกระแสให้ได้ตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความยุ่งยากพอสมควร ศาสตราจารย์ทั้งสองท่านจึงได้ลองนำสายอากาศไดโพลที่ไม่ทำการป้อน (parasitic element) มาวางใกล้ๆ สายอากาศไดโพลที่ป้อนเพาเวอร์อยู่ ซึ่งปรากฏว่าถ้าเลือกใช้ความยาวของสายอากาศไดโพลที่ไม่ทำการป้อนอย่างเหมาะสมแล้วคือ ยาวกว่าสายอากาศไดโพลเล็กน้อย สายอากาศนั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่นทำให้คลื่นกระจายออกไปในทิศทางที่จำกัดขึ้น และในลักษณะเดียวกัน ถ้าเลือกความยาวให้สั้นลงกว่าสายอากาศไดโพลก็จะทำหน้าที่เป็นตัวนำคลื่นทำให้คลื่นกระจายออกไปในทิศทางที่จำกัดขึ้น ดังนั้นเมื่อใช้สายอากาศที่ไม่ป้อนนี้เป็นทั้งตัวสะท้อนและตัวนำคลื่นก็จะทำให้มีความสามารถในการชี้ทิศทางสูงขึ้น โครงสร้างของสายอากาศแบบยาคิโดยทั่วไป จึงเป็นดังที่แสดงไว้ใน รูปที่ 2.12 กล่าวคือ ประกอบด้วยตัวป้อน ตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่น ซึ่งวางอยู่ในแนวขนาน โดยมีจุดกึ่งกลางของตัวประกอบอยู่บนแกนเดียวกัน



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของสายอากาศแบบยาคิไดโพล

จากโครงสร้างของสายอากาศแบบยาคิไดโพลตาม รูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าการป้อนเพาเวอร์ที่เพียงตำแหน่งเดียว จึงนับว่าเป็นโครงสร้างที่ง่ายและใช้งานได้สะดวกมาก อย่างไรก็ตามคุณสมบัติต่างๆ เช่น อิมพีแดนซ์ ของสายอากาศไดโพลอาจจะเปลี่ยนไปได้มาก จึงต้องมีการออกแบบอย่างเหมาะสมเพื่อให้ใช้งานได้

2.12.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศแบบยาคิไดโพล

การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศแบบยาคิไดโพลนั้น เนื่องจากโดยทั่วไปตัวสะท้อนคลื่น และตัวนำคลื่นจะวางอยู่ใกล้ ๆ ตัวกับป้อน และตัวประกอบที่วางห่างกันมากที่สุดก็จะวางห่างกันไม่มากนักเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงอิมพีแดนซ์ระหว่างตัวประกอบทุกตัว การวิเคราะห์สายอากาศโครงสร้างนี้ก็จะทำได้โดยวิธี EMP ร่วมกับหลักการของวงจร กล่าวคือถ้าสายอากาศแบบยาคิไดโพลที่จะทำการวิเคราะห์นี้ประกอบด้วย N ตัวประกอบ และกระแสที่ไหลบนตัวประกอบอันดับที่ i เขียนได้เป็น

$$I_i(z_i) = I_i \sin k(\ell_i - |z_i|) \tag{2.58}$$

โดยที่ $2\ell_i$ เป็นความยาวของสายอากาศอันดับที่ i ซึ่งจะทำให้สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_i กับแรงดันที่ป้อนให้กับสายอากาศในรูปต่อไปนี้คือ

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2N} \\ Z_{31} & Z_{32} & \dots & Z_{3N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} \tag{2.59}$$

โดยที่ Z_{ii} และ Z_{ij} เป็นอิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศเองและอิมพีแดนซ์ระหว่างตัวสายอากาศตามลำดับ และ V_i เป็นแรงดันที่ขั้วของสายอากาศอันดับที่ i ในการป้อนสายอากาศแบบยาคิไดโพลนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากมีเพียงสายอากาศอันดับที่ 2 เท่านั้น ที่มีแรงดันที่ขั้วไม่เป็นศูนย์ สำหรับตัวอื่นจะเป็นศูนย์หมด เนื่องจากปัดวงจรอยู่ที่ ดังนั้น สมการ (2.59) จะเขียนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2N} \\ Z_{31} & Z_{32} & \dots & Z_{3N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_2 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

ค่า Z_{ii} และ Z_{ij} จะสามารถคำนวณได้ เมื่อโครงสร้างของสายอากาศและความถี่ใช้งานถูกกำหนดขึ้น ดังนั้นจะสามารถคำนวณค่า I_i ได้ โดยคูณ $[Z]^{-1}$ เข้าทั้งสองข้างของสมการ (2.60) ซึ่งจะผลดังนี้

$$[I] = [Z]^{-1} [V] \quad (2.61)$$

โดยที่ $[Z]^{-1}$ เป็นเมตริกซ์ส่วนกลับ (Inverse Matrix) ของ $[Z]$ ในสมการ (2.62) ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูปต่อไปนี้

$$[Z]^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & \dots & \Delta_{1N} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} & \dots & \Delta_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta_{N1} & \Delta_{N2} & \dots & \Delta_{NN} \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

โดยที่ Δ เป็นค่าดีเทอร์มิแนนต์ (Determinant) ของ $[Z]$ และ Δ_{ij} เป็นค่าดีเทอร์มิแนนต์ของเมตริกซ์ที่เกิดจากการตัดแถวที่ i และหลักที่ j ออกจาก $[Z]$ จากสมการที่ (2.60) ถึงสมการที่ (2.62) จะสามารถเขียนค่ากระแส I_i ได้ดังนี้คือ

$$I_i = \frac{\Delta_{2i}}{\Delta} V_2 \quad (2.63)$$

ดังนั้นเราสามารถหาอินพุตอิมพีแดนซ์ได้ดังนี้

$$Z_{in} = \frac{V_2}{I_2} = \frac{\Delta}{\Delta_{22}} \quad (2.64)$$

สำหรับการหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายออกไปนั้นเนื่องจากสายอากาศแบบขาคีโดโพลโดยทั่วไปความยาวของตัวประกอบจะไม่เท่ากัน ดังนั้นการคำนวณหาสนามไฟฟ้าก็จะต้องนำความยาวของสายอากาศแต่ละตัวมาคิดด้วย จากสมการ (2.60) ถ้าให้จุดอ้างอิงเป็นจุดกึ่งกลางของความยาวจะได้ว่าสายอากาศที่มีกระแสไหลในรูปสมการ (2.58) และมีความยาวเป็น $2l_2$ จะให้สนามไฟฟ้าที่จุดห่างไกลเป็น

$$E_{\theta}(r, \theta, \phi) = j60 I_i \frac{e^{-jkr}}{r} \frac{\cos(kl_2 \cos \theta) - \cos kl_2}{\sin \theta} \quad (2.65)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเมื่อใช้จุดกึ่งกลางของสายอากาศอันดับที่ 1 เป็นจุดอ้างอิงดังในรูปโครงสร้างของสายอากาศแบบยาคีโคโพล ก็จะหาสนามไฟฟ้ารวมได้ในรูปต่อไปนี้

$$E_\theta(r, \theta, \phi) = j60 \frac{e^{-jkr}}{r} \sum_{i=1}^N I_i \frac{\cos(kl_i \cos \theta) - \cos kl_i}{\sin \theta} e^{jk d_i \sin \theta \sin \phi} \quad (2.66)$$

โดยที่ d_i เป็นระยะห่างของตัวประกอบอันดับที่ i จากจุดอ้างอิง และ $d_i = 0$ เมื่อสามารถคำนวณสนามไฟฟ้าที่จุดห่างไกลได้ และสามารถคำนวณค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้ ก็จะสามารรถคำนวณค่าอัตราขยายของสายอากาศในทิศ θ, ϕ ได้ดังนี้คือ

$$G(\theta, \phi) = \frac{|E_\theta(r, \theta, \phi)|^2 Z_0}{\text{Re}[Z_m] |I_1|^2 / 4\pi r^2} = \frac{4\pi}{Z_0 \text{Re}[Z_m] |I_1|^2} \left| 60 \sum_{i=1}^N I_i \frac{\cos(kl_i \cos \theta) - \cos kl_i}{\sin \theta} e^{jk d_i \sin \theta \sin \phi} \right|^2 \quad (2.67)$$

และอัตราขยายในทิศทางแผ่รังสีคือ $\theta = 90^\circ, \dots, \phi = 90^\circ, \dots$

$$G = \frac{4\pi}{\text{Re}[Z_m] |I_1|^2} \left| 60 \sum_{i=1}^N I_i (1 - \cos kl_i) e^{jk d_i} \right|^2 \quad (2.68)$$

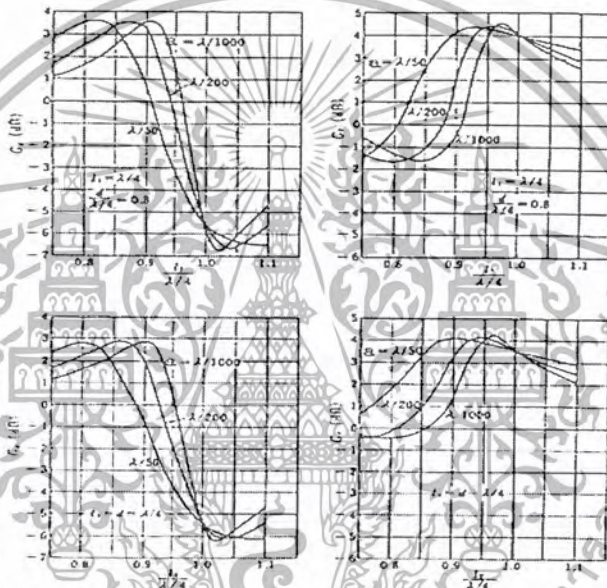
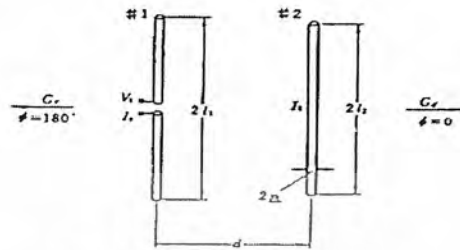
จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่าประเด็นสำคัญของทฤษฎีการวิเคราะห์สายอากาศแบบนี้ก็คือ การหาค่ากระแสที่ไหลบนสายอากาศแต่ละตัวประกอบ เมื่อรู้ค่ากระแสแล้วก็จะนำไปหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์สนามไฟฟ้า และอัตราขยายต่อไปได้

2.12.3 การออกแบบสายอากาศแบบยาคีโคโพล

สายอากาศแบบยาคีโคโพลนั้นโดยทั่วไปจะมีตัวป้อนยาวครึ่งความยาวคลื่น ส่วนตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่นนั้นจะมีความยาวแตกต่างกันไป การเลือกขนาดของตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่นจะทำให้โดยพิจารณาผลของความยาวและระยะห่างของตัวประกอบอื่นที่มีต่อการกระจายคลื่น รูปที่ 2.60 แสดงผลดังกล่าวนี้ในรูปอัตราขยายของสายอากาศยาคีโคโพลที่มี 2 ตัวประกอบ จากรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าเมื่อสายอากาศอันดับที่ 2 มีครึ่งหนึ่งของความยาวคือ l_2 น้อยกว่า $0.9 \lambda / 4$ ค่า G_d จะสูงขึ้น และค่า G_r จะต่ำลง นั่นคือสายอากาศอันดับที่สองนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวนำคลื่น ในทำนองเดียวกัน ในขณะที่ l_2 มากกว่า $\lambda / 4$

ขึ้นไปที่ค่า G_r จะสูงขึ้น และค่า G_d จะต่ำลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในเงื่อนไขเช่นนั้นสายอากาศอันดับที่ 2 จะทำหน้าที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นตัวสะท้อนคลื่นสำหรับช่วงที่ ℓ_2 อยู่ระหว่าง $0.9 \lambda / 4$ ถึง $\lambda / 4$ นั้น เป็นช่วงของการเปลี่ยนจากตัวนำคลื่นเป็นตัวสะท้อนคลื่นซึ่งในทางปฏิบัติมักจะไม่ใช่ จากคลื่น รูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าที่ ℓ_2 เป็น $0.9 \lambda / 4$ และ $\lambda / 4$ สายอากาศอันดับที่ 2 นี้จะทำ



รูปที่ 2.13 อัตรายของสายอากาศแบบยักโคโพลที่มี 2 ตัวประกอบ

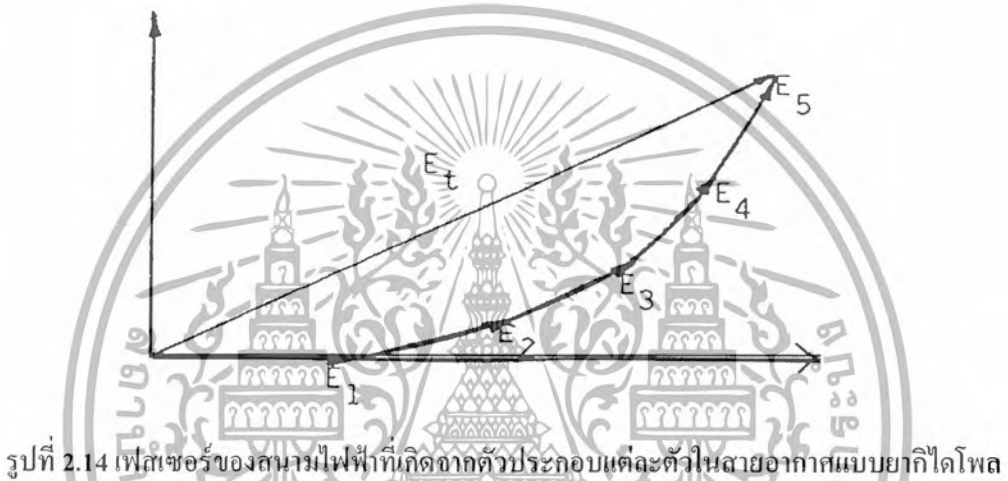
หน้าที่เป็นตัวนำคลื่นและตัวสะท้อนคลื่นที่ความถี่ใด ทั้งนี้เพราะให้อัตรายสูง แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติกำหนดความยาวของตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่น จะต้องพิจารณาจากเงื่อนไขอื่นประกอบด้วย เช่น แบนด์วิดท์ที่ต้องการใช้งาน เพราะถ้าแบนด์วิดท์กว้าง เราจะต้องเลือกความยาวของตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่นให้สามารถทำงานได้ดีตลอดย่านความถี่นั้น นั่นคือความยาวของตัวนำคลื่นไม่ควรเกิน 0.45 เท่าของความยาวคลื่นที่สั้นที่สุดที่ใช้งาน และความยาวของตัวสะท้อนคลื่นก็ไม่ควรจะสั้นกว่า 0.5 เท่าของความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดที่ใช้งาน ไมเช่นนั้นแล้วอาจจะไม่ได้แบนด์วิดท์ตามที่ต้องการได้

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.14 แล้วจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้สายอากาศตัวที่ไม่ป้อนเป็นตัวสะท้อนคลื่น จะทำให้สามารถเพิ่มอัตรายทางด้านหน้าได้ประมาณ 3 dB ถึง 4 dB และถ้าเป็นตัวนำคลื่นก็จะเพิ่มอัตรายได้ประมาณ 2 dB ถึง 3 dB อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีทั้งตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่นนั้น อัตรายที่เพิ่มขึ้นจะไม่ใช่ผลบวกโดยตรงของค่าที่ได้ในแต่ละกรณี ทั้งนี้อาจจะพิจารณาได้จากเฟสเซอร์ของสนาม

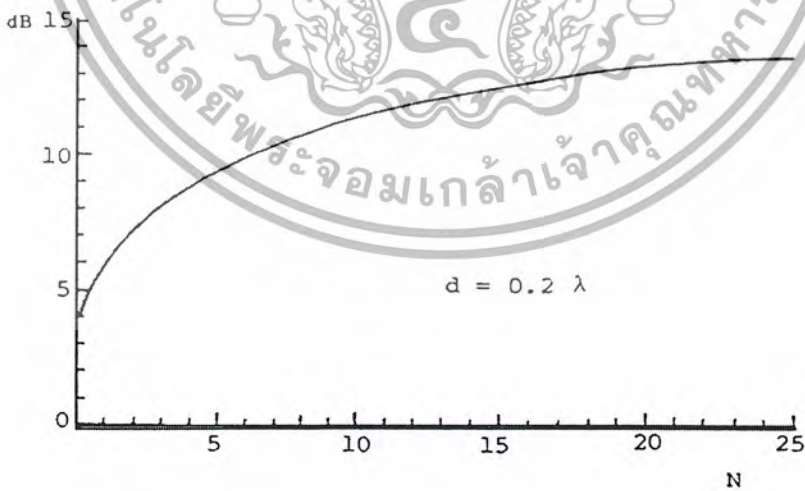
ไฟฟ้าที่เกิดจากตัวประกอบแต่ละตัว ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเป็นดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.15 กล่าวคือ เฟสเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากตัวประกอบแต่ละตัวจะมีเฟสไม่ตรงกัน ดังนั้นถึงแม้ขนาดของสนามไฟฟ้ารวมจะใหญ่ขึ้นแต่ก็จะต่ำกว่ากรณีที่เฟสตรงกันเสมอ ดังนั้นเมื่อมีจำนวนตัวประกอบมากขึ้นคือมีตัวนำคลื่นมากขึ้น ขนาดของสนามไฟฟ้ารวมก็จะใหญ่ขึ้นตามไปด้วย แต่อัตราที่ใหญ่ขึ้นจะค่อย ๆ เล็กลงเมื่อจำนวนตัวนำคลื่นมากขึ้น และเนื่องจากอัตราขยายของสายอากาศเชื่อมโยงโดยตรงกันขนาดของสนามไฟฟ้านี้ ดังนั้นผลที่ได้ก็คือ อัตราขยายของสายอากาศจะสูงขึ้นตามจำนวนตัวประกอบก็จริง แต่อัตราการสูงขึ้นนี้จะค่อย ๆ ต่ำลงเมื่อจำนวนตัวประกอบมากขึ้น รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างของอัตราขยายที่เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนตัวประกอบเพิ่มขึ้น จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนตัวประกอบมากกว่า 15 ขึ้นไป การเพิ่มขึ้นของอัตราขยายก็จะน้อยมากจนอาจจะไม่คุ้มค่าที่จะใช้วิธีเพิ่มตัวนำคลื่นในการเพิ่มอัตราการขยายอีกต่อไป



รูปที่ 2.14 เฟสเซอร์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากตัวประกอบแต่ละตัวในสายอากาศแบบยาคีโดพล



รูปที่ 2.15 การเพิ่มขึ้นของอัตราขยายเมื่อจำนวนตัวประกอบมากขึ้น

ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการเลือกความยาวของตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่น เกี่ยวกับระยะห่าง ที่

ใช้ในส่วนนี้จะอยู่ระหว่าง 0.15λ ถึง 0.25λ เพราะเป็นช่วงห่างที่มีกรุปปลิงที่เหมาะสม ทำให้ช่วย
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

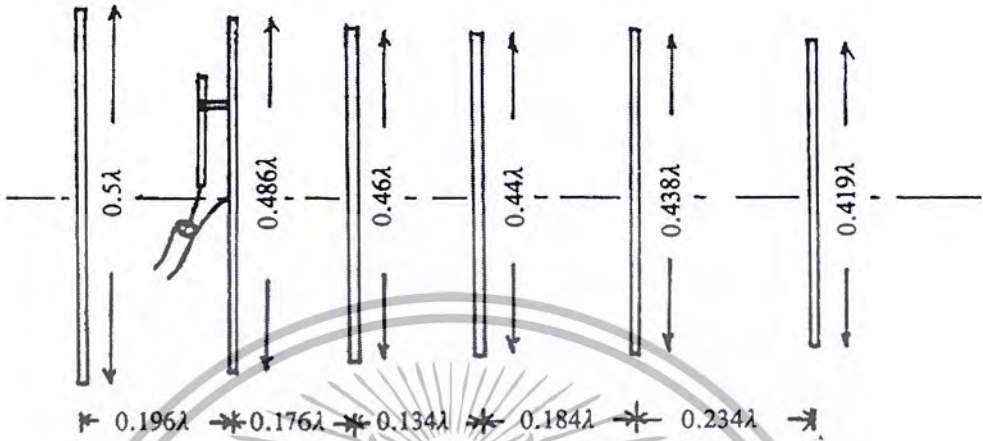
อากาศทำงานได้ดี อันที่จริงอัตราขยายของสายอากาศไม่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนตัวประกอบเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างตัวประกอบด้วย หรือพูดอีกนัยหนึ่งคือ อัตราขยายจะขึ้นอยู่กับความยาวของแผงสายอากาศเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น (Electrical Length) นั่นเอง

การกำหนดความยาวและระยะห่างของตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่นนั้น โดยทั่วไปนอกจากจะพิจารณาจากค่าอัตราขยายที่ได้แล้วจะต้องพิจารณาถึงค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย กล่าวคืออินพุตอิมพีแดนซ์ที่ได้จะต้องเข้ากับสายนำสัญญาณที่ใช้ เช่น ถ้าใช้สายโคแอกเชียล 50Ω เป็นสายนำสัญญาณอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ได้ก็ควรจะใกล้เคียงกับ 50Ω ตลอดย่านความถี่ที่ใช้งาน อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์มักจะมีค่ารีแอกแตนซ์อยู่ด้วย ในการออกแบบสายอากาศจึงต้องใช้ผลการคำนวณเป็นแนวทางในการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ในขั้นต้นก่อน แล้วจึงทำการปรับแต่งโดยใช้การทดลอง ซึ่งจะทำให้โครงสร้างที่ได้ในขั้นสุดท้ายสามารถนำไปใช้งานได้ดี รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของสายอากาศที่มีอินพุตอิมพีแดนซ์ประมาณ 50Ω ในรูปได้แสดงส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวแมทชิงไว้ด้วย หน้าที่ของตัวแมทซิงก็คือการหักล้างค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศให้ใกล้เคียงกับศูนย์มากที่สุดที่ความถี่ใช้งาน ในขณะที่เดียวกันก็ทำให้อิมพีแดนซ์ของสายอากาศใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณมากที่สุด

สำหรับสายอากาศ แบบยาก็โคโพลที่ใช้ในการรับคลื่นโทรทัศน์นั้น เนื่องจากสายนำสัญญาณในระบบรับโทรทัศน์นั้นเดิมที่ใช้เป็นสายคู่ขนานอิมพีแดนซ์ 300Ω และปัจจุบันส่วนใหญ่จะใช้สายโคแอกเชียลอิมพีแดนซ์ 75Ω อย่างไรก็ตามการออกแบบสายอากาศนี้ยังคงออกแบบให้สายอากาศมีอิมพีแดนซ์เป็น 300Ω เพราะจะต่อโดยตรงกับสายคู่ขนานได้ และเมื่อต้องการต่อกับสายโคแอกเชียล 75Ω ก็จะทำให้ได้โดยใช้ วงจรแมทซิงที่ทำหน้าที่เป็นบาลันด้วย (Balun ย่อจาก Balanced to unbalanced converter;) ซึ่งจะสามารถแปลงอิมพีแดนซ์ 300Ω แบบบาลันเป็นอิมพีแดนซ์ 75Ω แบบอับบาลันได้ ในการออกแบบให้อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเป็น 300Ω นั้น โดยทั่วไปจะไม่สามารถทำได้โดยใช้โคโพลแบบธรรมดาเป็นตัวป้อน เพราะอิมพีแดนซ์ที่ได้จะมีค่าต่ำกว่า 100Ω เสมอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ตัวป้อนที่จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์สูงขึ้น ตัวป้อนที่ใช้ได้ผลตัวหนึ่งก็คือ โคโพลแบบห้วงซึ่งสามารถแปลงอิมพีแดนซ์ให้สูงขึ้นได้ถึง 4 เท่าตัว แต่การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศยาก็โคโพลที่มีตัวป้อนเป็นโคโพลแบบห้วงนั้นจะทำให้ลำบากมาก ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมักจะใช้ผลการคำนวณของกรณีที่ใช้ตัวป้อนแบบโคโพลธรรมดาเป็นแนวทาง กล่าวคือเลือกโครงสร้างของสายอากาศยาก็โคโพลที่ให้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ใกล้เคียงกับ 75Ω โดยมีค่ารีแอกแตนซ์ต่ำ เสร็จแล้วจึงทำการทดลองวัดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์โดยใช้ตัวป้อนเป็นโคโพลแบบห้วง แล้วทำการปรับความยาวและระยะห่างของตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่นให้เหมาะสมเพื่อให้ได้อินพุตอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับ 300Ω มากที่สุด เนื่องจากสายอากาศแบบยาก็โคโพลที่ใช้รับคลื่นโทรทัศน์นั้นโดยทั่วไปต้องการแบนด์วิดท์ที่กว้างกว่าแบบที่ใช้ในการสื่อสารทั่วไป เพราะว่าถึงแม้ว่าจะใช้ในการรับคลื่นเพียงสถานีเดียวก็ต้องการแบนด์วิดท์ประมาณ 5 % ถึง 10% ขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นพาห้ (ในระบบ VHF มาตรฐานยุโรป ความถี่คลื่นพาห้จะอยู่ระหว่าง 57 MHz ถึง 68 MHz และ 174 MHz ถึง 230 MHz แบนด์วิดท์ที่ต้องการคือ 7 MHz) และถ้าจะให้ใช้รับได้หลาย ๆ สถานีก็อาจจะต้องการแบนด์วิดท์ถึง 20% ในเงื่อนไขของแบนด์วิดท์ที่ค่อนข้างกว้างเช่นนี้ การออกแบบสายอากาศให้มีอินพุตอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แดนซ์ใกล้เคียงกับ 300Ω ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการนั้นเป็นไปได้ยากมาก สำหรับสายอากาศรับโทรทัศน์จึงมักกอนุโลมให้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์คลาดเคลื่อนไปได้บ้าง โดยเมื่อคิดป้อนค่า VSWR แล้วให้ต่ำกว่า 2.0 : 1 หรือ 2.5 : 1 แล้วแต่จะกำหนด

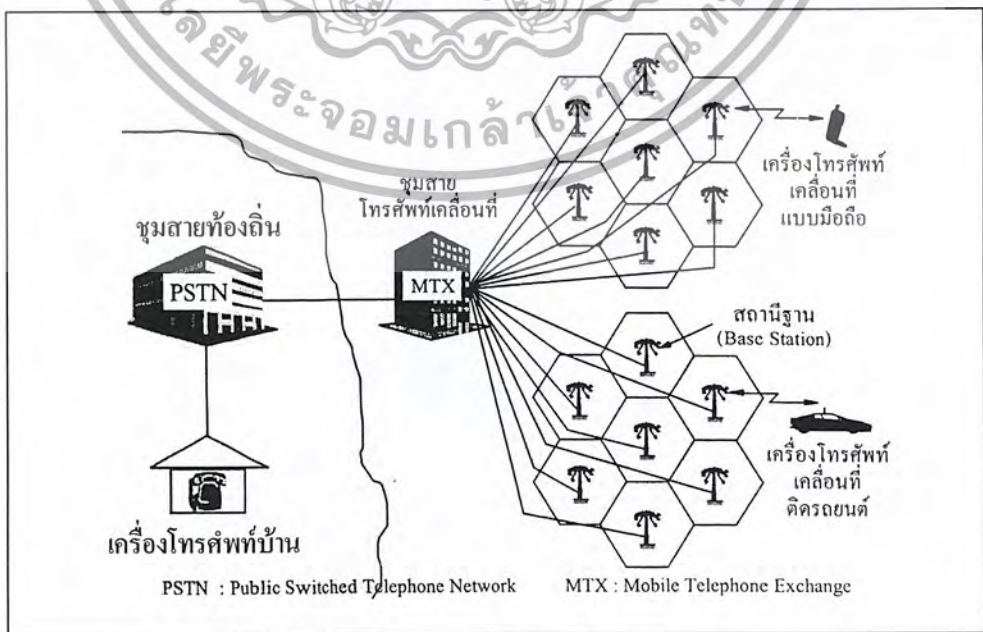


รูปที่ 2.16 ตัวอย่างโครงสร้างของสายอากาศแบบยาคีไดโพลที่มีอินพุตอิมพีแดนซ์เป็น 50Ω

2.13 ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้ในปัจจุบัน ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ ชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ (MTX: Mobile Telephone exchange), สถานีฐาน หรือ เซลไซต์ (CS: Cell Site) เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ (MS: Mobile Station) โดยจะมีการเชื่อมโยงกับชุมสายโทรศัพท์ท้องถิ่น ในส่วนของโครงข่ายโทรศัพท์สาธารณะ (PSTN: Public Switched Telephone Network) ด้วย ซึ่งจะทำให้เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่สามารถติดต่อกับโทรศัพท์ธรรมดาได้ ลักษณะของโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่เบื้องต้น จะแสดงในรูปที่

2.17



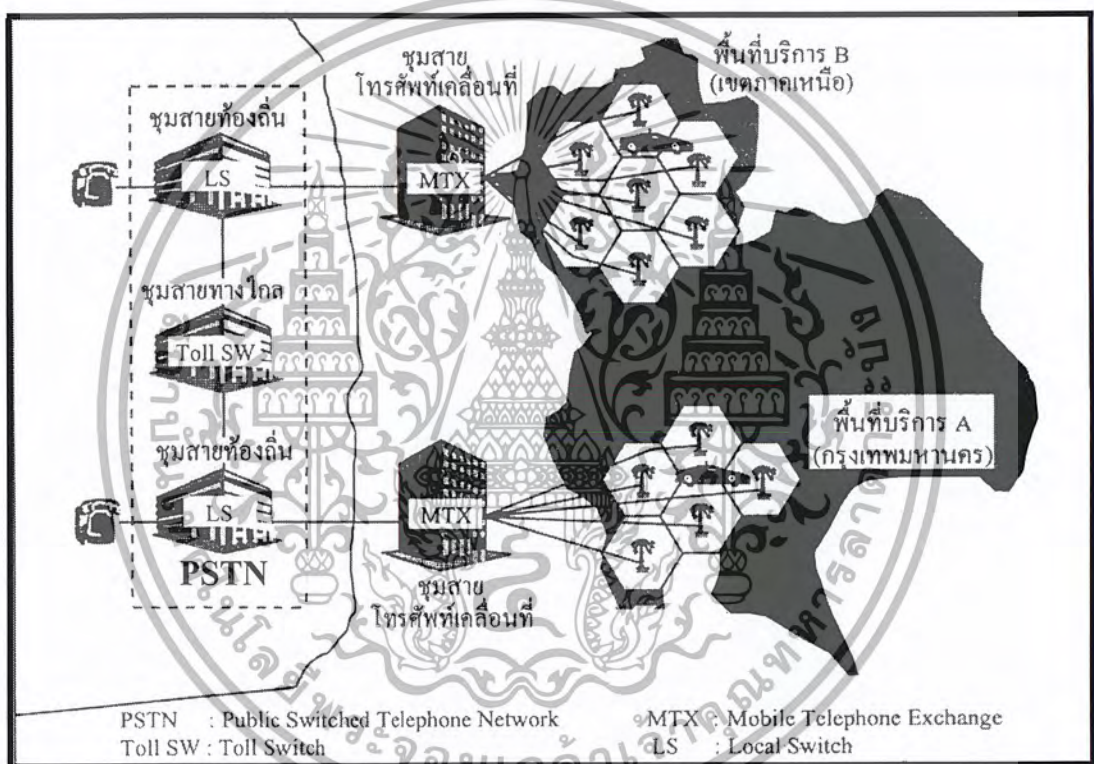
รูปที่ 2.17 โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.17 โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ประกอบด้วย ชุมสาย, โทรศัพท์เคลื่อนที่, สถานีฐาน และเครื่อง โทรศัพท์เคลื่อนที่

2.13.1 ชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่

ชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นส่วนสำคัญที่สุดในโครงข่าย โดยมีหน้าที่ในการควบคุมการทำงานทั้งหมดของโครงข่าย และเป็นสวิตซ์ในการเชื่อมโยงระหว่างเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ กับ โทรศัพท์ธรรมดาของชุมสายโทรศัพท์ท้องถิ่น (LS: Local Switch) รวมทั้งเชื่อมโยงระหว่างเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ด้วยกัน หน้าที่อีกอย่างหนึ่งก็คือควบคุมการทำงานของสถานีฐาน ซึ่งการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่จะมีทั้งสัญญาณเสียง และสัญญาณข้อมูลอยู่ด้วยกัน



รูปที่ 2.18 โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ในพื้นที่ที่ห่างกัน

ชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ จะเป็นส่วนที่ใช้ในการแบ่งขอบเขตของพื้นที่การให้บริการอีกด้วย ตัวอย่างเช่น ชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ A จะควบคุมพื้นที่ในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล ชุมสาย B จะควบคุมพื้นที่ในเขตภาคเหนือ เป็นต้น เนื่องจากพื้นที่การบริการทั้งสองเขตอยู่ห่างกัน จึงไม่สามารถที่จะใช้ชุมสายโทรศัพท์เดียวกันในการควบคุมสถานีฐานทั้ง 2 เขตได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ดังนั้น โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีการเคลื่อนตัวไปยังอีกเขตพื้นที่หนึ่ง จะเกิดขบวนการหนึ่งๆ ที่เรียกว่า การ โรมมิ่ง (Roaming)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันการทำงานของชุมสาย โทรศัพท์เคลื่อนที่จะมีหลายอย่าง เช่นการค้นหาเครื่อง โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ถูกเรียก (Paging) การแฮนด์ออฟ (Hand off) หรือการเปลี่ยนเซลล์ การตรวจสอบสถานะการใช้หรือไม่ใช้งาน การสแกนหาช่องสัญญาณ ฯลฯ

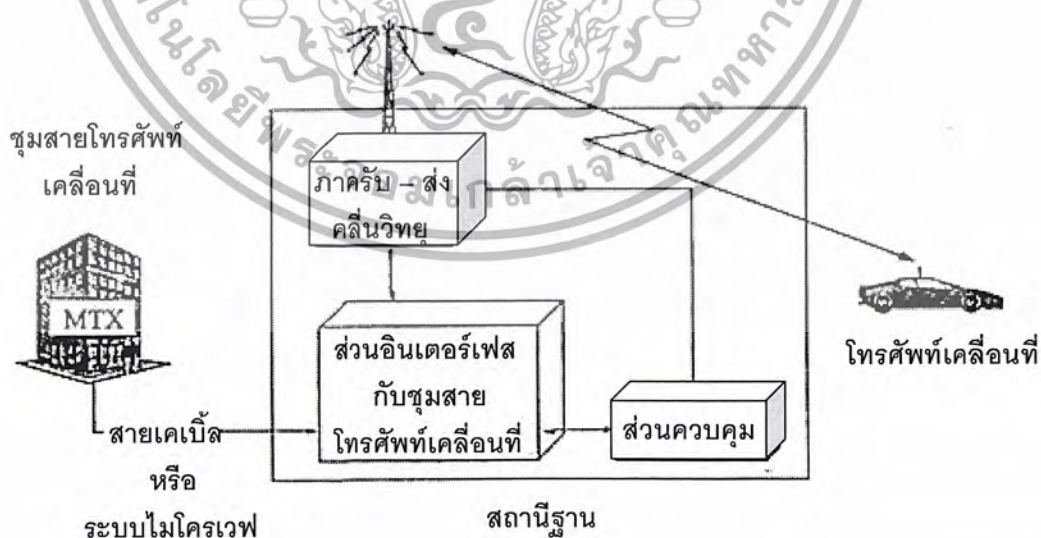
2.13.2 สถานีฐานหรือเซลล์ไซต์

สถานีฐานในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่จะทำหน้าที่ ในการเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่กับชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยส่วนที่ติดต่อกับโทรศัพท์เคลื่อนที่จะใช้การรับส่งสัญญาณทางคลื่นวิทยุเพื่อให้บริการในกรณีที่มีการเรียกเข้า หรือการเรียกจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ด้วยกัน ส่วนการเชื่อมโยงกับชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่จะใช้การติดต่อผ่านทางคู่สายหรือทางคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจะมีทั้งสัญญาณเสียงและสัญญาณควบคุม

สถานีฐาน จะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนของการรับ ส่งคลื่นวิทยุ, ส่วนควบคุม และส่วนอินเตอร์เฟสกับชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่

ส่วนประกอบการทำงานของสถานีฐาน จะประกอบด้วย

- 1) ส่วนของการรับ ส่งคลื่นวิทยุ ก็คือ เครื่องรับ, เครื่องส่ง และสายอากาศ
 - 2) ส่วนการควบคุม จะใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ที่ทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงาน
 - 3) มอนิเตอร์ระดับของสัญญาณเพื่อใช้ในการแฮนด์ออฟ
 - 4) การดูแลตรวจตราการเรียก (Supervision of Calls)
 - 5) อินเตอร์เฟสกับชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่จะทำหน้าที่ ในการเชื่อมโยงสัญญาณเสียงและสัญญาณข้อมูลระหว่างสถานีฐาน กับชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยผ่านทางสายเคเบิล หรือระบบไมโครเวฟ
- ลักษณะโครงสร้างของสถานีฐานและการเชื่อมโยงในโครงข่าย แสดงได้ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 โครงสร้างของสถานีฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13.3 เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่

เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมโยงกับผู้ใช้ ซึ่งจะมีการใช้งานที่คล้ายกับโทรศัพท์ธรรมดา แต่จะแตกต่างกันที่รวมฟังก์ชันของโทรศัพท์กับฟังก์ชันการรับ ส่งคลื่นวิทยุเข้าด้วยกัน ทำให้เครื่องโทรศัพท์ไม่จำเป็นต้องใช้การติดต่อผ่านทางคู่สายเหมือนกับโทรศัพท์ธรรมดา การติดต่อของโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นแบบฟูลดูเพล็กซ์ (Full Duplex) โดยในแต่ละการติดต่อ จะใช้ช่องสัญญาณจำนวน 2 ช่อง นั่นคือ จะใช้ความถี่ โดยความถี่หนึ่งจะใช้ในการส่งไปยังสถานีฐาน และอีกความถี่หนึ่งจะใช้ในการรับสัญญาณที่ส่งมาจากสถานีฐาน และมีกำลังส่งที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งมีตั้งแต่ 0.6 – 1.0 วัตต์ ตามขนาดของการใช้งาน เช่น โทรศัพท์แบบติดตั้งในรถยนต์ แบบมือถือ หรือแบบมือถือซึ่งมีขนาดเล็กมาก เป็นต้น การส่งสัญญาณจะมีการส่งทั้งสัญญาณเสียงพูดและสัญญาณข้อมูล โดยสัญญาณเสียงจะถูกมอดูเลทในแบบ FM (Frequency Modulation) ส่วนสัญญาณข้อมูลจะมีการมอดูเลทในแบบ FSK (Frequency Shift Keying) สัญญาณข้อมูลนี้จะถูกส่งไปให้ไมโครโปรเซสเซอร์ เพื่อทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ เช่น ควบคุมการร้องขอการเรียก (Origination Request) การบันทึกพื้นที่บริการที่เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้อยู่ ใช้ในการกำหนดสัญญาณที่ใช้ในการติดต่อข้อความคำสั่งในการแฮนด์ออฟที่ส่งมาหุ้มสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ฯลฯ

2.14 การวางเซลล์ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์

2.14.1 ลักษณะทั่วไปของปัญหาในการออกแบบระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์

โดยการขีดหลักแนวความคิดที่จะใช้แถบความถี่ให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด เพราะฉะนั้นในการออกแบบระบบ โทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์นั้น จึงจำเป็นที่จะต้องนำเอาส่วนสำคัญต่างๆ มาพิจารณาอย่างถี่ถ้วน โดยในแต่ละส่วนจะต้องสามารถวิเคราะห์และให้ความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันได้

โดยส่วนต่างๆ ที่จะนำมาพิจารณาจะประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือ

1. แนวความคิดในการนำเอาความถี่ที่ใช้แล้วมาใช้ใหม่อีก
2. หาวิธีลดการรบกวนกันระหว่างช่องความถี่ข้างเคียง
3. ปรับปรุงค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N) ให้มีค่าสูงๆ
4. สร้างระบบการแลกเปลี่ยนความถี่ขณะเปลี่ยนเซลล์ (การแฮนด์ออฟ)
5. กรรรมวิธีในการเปลี่ยนเซลล์ หรือการแยกแยะเซลล์ต่างๆ ออกจากกัน

เนื่องจากความถี่นั้นถือได้ว่าเป็นทรัพยากรอย่างหนึ่ง ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นสิ่งที่มีความสำคัญจึงอยู่ที่การให้บริการแก่ลูกค้าให้ได้มากที่สุด โดยให้มีคุณภาพตามที่กำหนด ดังนั้นคำถามที่สำคัญเพื่อที่จะนำไปพิจารณาหาหลักการในการออกแบบระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ประกอบด้วย

1. จำนวนลูกค้าที่เราสามารถให้บริการได้ในชั่วโมงธุรกิจมีประมาณกี่ราย
2. จำนวนผู้เช่าที่เราสามารถรองรับการให้บริการได้ในระบบของเรามีกี่ราย
3. ต้องการให้ช่องความถี่จำนวนเท่าใด จึงจะเพียงพอต่อความต้องการ

2.14.2 หลักการในการนำเอาความถี่ที่ใช้แล้วมาใช้ใหม่

ในช่องความถี่ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์หนึ่งช่อง จะประกอบไปด้วยช่องความถี่ 2 ช่องคือ ช่องความถี่ในการส่ง 1 ช่อง และช่องความถี่ในการรับอีก 1 ช่อง ซึ่งเป็นลักษณะของการทำงานแบบฟูลดูเพล็กซ์ (Full duplex) นั่นเอง สมมติว่า ถ้ากำหนดให้ F_1 เป็นความถี่ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้ในการให้บริการในเซลล์ C_1 โดยเซลล์ C_1 มีรัศมี R เมื่อนำความถี่ F_1 นี้มาใช้กับเซลล์อีกเซลล์หนึ่งที่มีระยะห่างออกไป และมีขนาดเซลล์เหมือน C_1 ทุกประการ เราก็จะสามารถใช้ความถี่ F_1 ได้อีก ตามลักษณะดังรูปที่ 2.20 ในการนำเอาความถี่มาใช้ใหม่นี้เป็นหัวใจของการออกแบบระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์ ดังนั้นผู้ที่ใช้ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในที่ที่ห่างไกลกัน จึงสามารถใช้ความถี่เดียวกันได้โดยไม่มีปัญหาเพราะเป็นการใช้คนละเซลล์กัน รูปที่ 2.20 ประกอบ จะเห็นว่าระบบการนำเอาความถี่มาใช้ใหม่ (Frequency reuse) นี้ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานแถบความถี่ได้มาก แต่ถ้าระบบออกแบบมาไม่เหมาะสมอาจจะเกิดการรบกวนอย่างรุนแรงขึ้นได้ การรบกวนนี้เกิดขึ้นเนื่องมาจากการใช้ช่องความถี่เดียวกันในเซลล์ที่ต่างกัน เราเรียกการรบกวนลักษณะนี้ว่า โคแชนแนลอินเตอร์เฟอเรนซ์ (co-channel interference) ดังนั้นการพิจารณาเรื่องการรบกวนนี้ถือเป็นหลักสำคัญในการออกแบบระบบการนำเอาความถี่มาใช้ใหม่



รูปที่ 2.20 อัตราส่วนของ D/R

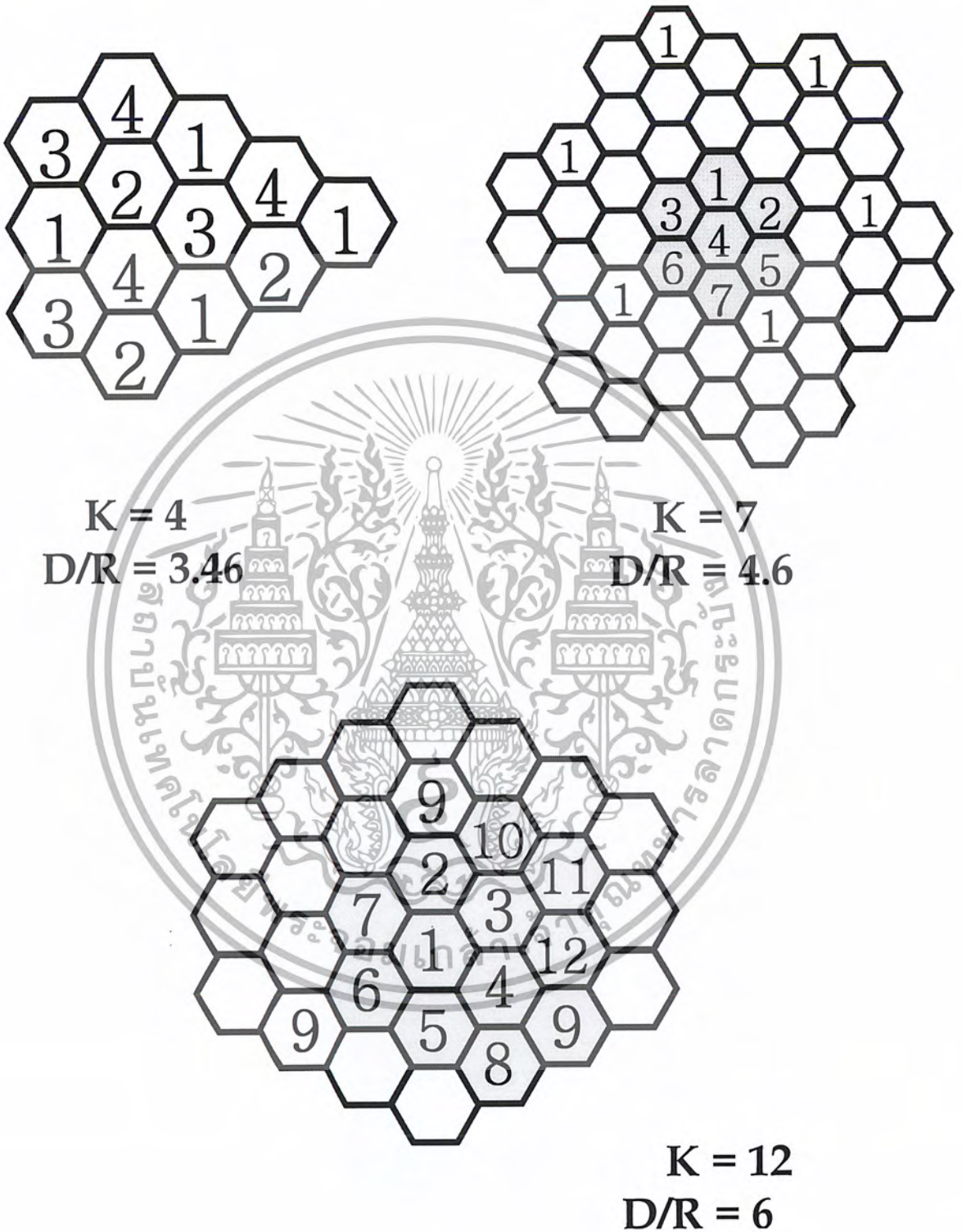
2.14.2.1 แบบแผนของการนำความถี่เดิมมาใช้ใหม่

แนวความคิดเรื่องการนำเอาความถี่เดิมมาใช้ใหม่ สามารถทำได้ 2 วิธีคือ ใช้ในระบบเวลา (Time domain) และในระบบที่ว่าง (Space domain) ในระบบเวลานั้นจะใช้การแบ่งเวลา (Time division multiplex) ออกเป็นช่องเล็ก ๆ (Slot) โดยจะมีจำนวนช่องสัญญาณ 3-8 เท่า ของจำนวนช่องความถี่ และจะใช้ความถี่ที่ซ้ำกันในช่องเวลาที่ต่างกัน เพื่อไม่ให้ความถี่รบกวนกัน ส่วนในระบบแบ่งที่ว่าง (Space Division Multiplex) จะแบ่งออกเป็น 2 แบบด้วยกันคือ

- 1) การจัดความถี่เดียวกันให้ใช้คนละพื้นที่ เช่น การใช้งานวิทยุกระจายเสียงหรือทีวีที่ใช้ความถี่ช่องเดียวกันแต่ให้บริการอยู่คนละจังหวัด และต่างระบบกัน เป็นต้น
- 2) ใช้ความถี่เดียวกันในระบบเดียวกัน และแบ่งเขตพื้นที่กัน โดยกำหนดให้มีความถี่อื่นเป็นความถี่ข้างเคียงทำงานในพื้นที่คั่นระหว่างความถี่ดังกล่าว โดยจะเกาะตัวกันเป็นโครงสร้างของเซลล์จำนวนมากดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โทรัสที่ระบบเซลล์ลาร์ และมีจำนวนความถี่ทั้งหมดเป็น K กลุ่ม เช่น ค่า K มีค่าเท่ากับ 4, 7 และ 12 ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แพทเทินแบบต่างๆ ในการนำเอาความถี่มาใช้ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14.2.2 ระยะห่างของการนำเอาความถี่เดิมมาใช้

ระยะทางที่ใกล้ที่สุดในการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่นั้น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น จำนวนของเซลล์รอบข้าง ลักษณะทางภูมิศาสตร์ ความไวของเครื่องรับ ความสูง และกำลังส่งของเครื่องส่ง จากสถานีแม่และสถานีลูกข่าย เป็นต้น

ถ้า D เป็นระยะห่างของการนำเอาความถี่เดิมมาใช้ใหม่ เราสามารถแสดงได้ว่า

$$D = \sqrt{3KR} \quad (2.69)$$

โดยที่ K คือจำนวนรูปแบบของการนำเอาความถี่เดิมมาใช้ใหม่ หรือจำนวนเซลล์ในโครงสร้างหนึ่ง ของระบบเซลล์ลุดาร์นั่นเอง และ R เป็นรัศมีของแต่ละเซลล์จะได้ค่า D ของแต่ละ โครงสร้างดังนี้คือ

$$D = \begin{cases} 3.46R & \text{เมื่อ } K = 4 \\ 4.6R & \text{เมื่อ } K = 7 \\ 6R & \text{เมื่อ } K = 12 \\ 7.55R & \text{เมื่อ } K = 19 \end{cases}$$

ถ้าเซลล์ข้างเคียงทั้งหมดมีกำลังส่งเท่ากัน เมื่อ K มีค่าเพิ่มขึ้นระยะห่างของการใช้ความถี่ใหม่ก็จะเพิ่มขึ้นด้วยการที่ค่า D เพิ่มขึ้นจะทำให้ลดโอกาสของการเกิดการรบกวนกันในช่องความถี่เดียวกันในแต่ละเซลล์

ในทางทฤษฎีค่า K ที่มาก ๆ เป็นสิ่งที่ต้องการ แต่อย่างไรก็ตามจำนวนของช่องสัญญาณที่กำหนดให้ทั้งหมดมีจำนวนจำกัดตายตัว เมื่อ K มีค่ามากเกินไป จำนวนของช่องสัญญาณในแต่ละเซลล์ก็จะน้อยลง และในทางกลับกันถ้าจำนวนช่องสัญญาณในแต่ละเซลล์มีค่ามากเกินไปก็จะเป็นการใช้ช่องสัญญาณและทรัพยากรอย่างไม่มีประสิทธิภาพ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ เป็นการใช้แถบความถี่อย่างไม่มีประสิทธิภาพ เช่น ถ้าแบ่งจำนวนรวมทั้งหมดของความถี่เป็น 2 โครงข่ายให้บริการในพื้นที่เดียวกันประสิทธิภาพของการใช้แถบความถี่ก็ลดลงได้กล่าวมาแล้ว

ถึงตอนนี้เรื่องที่ทำทาบอยู่คือ การที่จะให้ได้ค่า K น้อยที่สุดและยังคงให้ระบบมีสมรรถนะตามที่กำหนดไว้ได้ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับค่าการรบกวนกันระหว่างความถี่เดียวกันในช่องสัญญาณติดกันว่าทำอย่างไรถึงจะให้ค่าการรบกวนนี้มีค่าต่ำมากๆ เพื่อที่จะนำความถี่เดิมมาใช้ใหม่ให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งค่าต่ำที่สุดของ K คือ K เท่ากับ 3 ที่ได้จากการใช้สมการ $K = i^2 + ij + j^2$ โดยการใส่ค่า i และ j เท่ากับ 1

2.14.3 การอินเตอร์เฟียร์เรนซ์

จากหลักการนำเอาช่องสัญญาณความถี่กลับมาใช้ใหม่ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบเซลล์ลุดาร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้สเปกตรัมความถี่ที่มีอยู่จำกัด สิ่งที่จะเกิดขึ้นจากผลของเทคนิคนี้คือ มีการรบกวนของสัญญาณจากช่องสัญญาณอื่นๆ แทรกเข้ามา ซึ่งเกิดจากการรบกวนของสัญญาณจากเซลล์อื่นๆ ที่มีการใช้ช่องสัญญาณความถี่เดียวกัน ซึ่งการรบกวนของสัญญาณเช่นนี้เรียกว่า การอินเตอร์เฟียร์เรนซ์ที่กัก

ช่องสัญญาณที่เหมือนกัน (Co-channel Interference) และการรบกวนของสัญญาณอีกส่วนหนึ่งที่เกิดขึ้นจากช่องสัญญาณที่อยู่ติดกัน การรบกวนของสัญญาณนี้เรียกว่า การอินเตอร์เฟอรัลเร้นท์จากช่องสัญญาณข้างเคียง (Adjacent-channel Interference) ดังนั้นในการออกแบบระบบจึงต้องคำนึงถึงปัญหาของการเกิดอินเตอร์เฟอรัลเร้นท์นี้ด้วย

2.14.3.1 การอินเตอร์เฟอรัลเร้นท์จากช่องสัญญาณที่เหมือนกัน

การอินเตอร์เฟอรัลเร้นท์จากช่องสัญญาณที่เหมือนกันเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้โครงสร้างแบบเซลล์ลูลาร์ เพราะว่าช่องสัญญาณที่เหมือนกันจะถูกใช้ในเซลล์อื่นๆ ที่อยู่ห่างออกไป ดังนั้นค่าการเกิดการอินเตอร์เฟอรัลเร้นท์แบบนี้จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเซลล์ที่ใช้ความถี่เดียวกัน ซึ่งถ้าเซลล์ที่ใช้ความถี่เดียวกันมีระยะห่างที่น้อย ค่าการเกิดการอินเตอร์เฟอรัลเร้นท์จะมีค่าสูงขึ้นและในทางกลับกันถ้าเซลล์ที่ใช้ความถี่เดียวกันมีระยะห่างที่มาก ค่าการเกิดการอินเตอร์เฟอรัลเร้นท์จะมีค่าต่ำลง จึงต้องพยายามหาระยะห่างของเซลล์ที่ใช้ความถี่เดียวกันที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการอินเตอร์เฟอรัลเร้นท์ในค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของการอินเตอร์เฟอรัลเร้นท์ได้ดังนี้

$$q = D/R \quad (2.70)$$

พารามิเตอร์ q จะเรียกว่า แฟคเตอร์ของการอินเตอร์เฟอรัลเร้นท์จากช่องสัญญาณที่เหมือนกัน (Co-channel Interference Reduction Factor) ถ้าพารามิเตอร์ q เพิ่มขึ้น การเกิดการอินเตอร์เฟอรัลเร้นท์ของช่องสัญญาณที่เหมือนกันจะเกิดขึ้นน้อยลง จากพารามิเตอร์ q เราสามารถพิจารณาระดับสัญญาณที่ได้รับได้จากเครื่องโทรศัพท์คือค่า CI (Carrier-to-Interference Ratio) โดยจะสามารถเขียนในรูปของฟังก์ชันได้เป็น

$$D = f(K, CI) \quad (2.71)$$

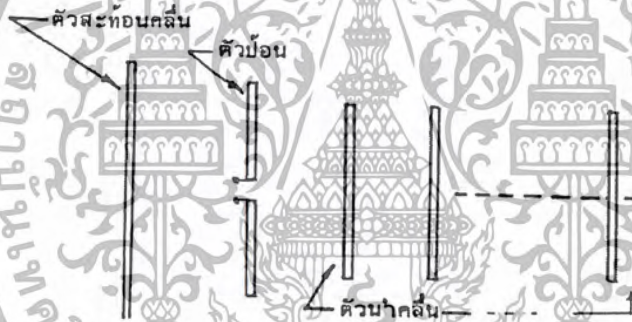
โดยที่ K เป็นจำนวนของเซลล์ที่เกิดอินเตอร์เฟอรัลเร้นท์จากช่องสัญญาณที่เหมือนกัน

บทที่ 3

หลักการคำนวณและออกแบบ

ในโครงการนี้ต้องการสายอากาศที่มีคุณสมบัติใช้เป็นสถานีฐาน(Base Station) ของเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่ใช้งานในย่านความถี่ 1900MHz เพื่อลดการเกิดการรบกวนกันของช่องสัญญาณที่มีความถี่เดียวกัน หรือการเกิด Co-Channel Interference และสามารถเลือกทิศทางที่ต้องการใช้งานได้ โดยได้มีการออกแบบสายอากาศของสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่ใช้รูปแบบคุณสมบัติของสายอากาศแบบ ยากิ (Yagi Antenna) วางบนแผ่นระนาบกราวด์ มีลักษณะเป็นสายอากาศที่ผสมกันของสายอากาศแบบ ยากิ และสายอากาศแบบ โมโนโพล (Monopole) โดยใช้สายอากาศแบบ โมโนโพล ยากิ จำนวน 4 ต้น วางในทิศทางตรงข้ามกัน 4 ทิศ เพื่อต้องการให้มีการแพร่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง (Directional) 4 ทิศทาง โดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น (Reflector) เพียง 1 ตัว ร่วมกัน

3.1 หลักในการออกแบบสายอากาศแบบ ยากิ



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบต่างๆของสายอากาศแบบ ยากิ

สายอากาศแบบ ยากิ จะมีส่วนประกอบที่สำคัญด้วยกัน 3 ส่วน คือ

- 1) ตัวสะท้อนคลื่น (Reflector)
- 2) ตัวป้อน (Feeder)
- 3) ตัวนำคลื่น (Director)

โดยหลักการที่ว่าความยาวของสายอากาศใดโพลที่ไม่ได้ทำการป้อน ยาวกว่าสายอากาศใดโพลที่เป็นตัวป้อนเล็กน้อย สายอากาศนั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น ทำให้คลื่นกระจายออกไปในทิศทางที่จำกัดขึ้น และในลักษณะเดียวกัน ถ้าความยาวของสายอากาศใดโพลที่ไม่ได้ทำการป้อน สั้นลงกว่าสายอากาศใดโพลที่เป็นตัวป้อน สายอากาศนั้นก็ทำหน้าที่เป็นตัวนำคลื่น

การกำหนดความยาวของตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่น โดยพิจารณาจากเงื่อนไข เบนด์วิดท์ที่ต้องการใช้งาน โดยเลือกความยาวของตัวสะท้อนคลื่นและตัวนำคลื่นให้สามารถทำงานได้ตลอดย่านความถี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 1900MHz

โดยผลจากหลักการทดลองที่กล่าวไว้ว่าความยาวของตัวนำคลื่นไม่ควรเกิน 0.45 เท่าของความยาวคลื่นที่สั้นที่สุดที่ใช้งาน และความยาวของตัวสะท้อนคลื่นก็ไม่ควรจะสั้นกว่า 0.5 เท่าของความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดที่ใช้งาน จะทำให้สายอากาศสามารถทำงานได้ดีตลอดย่านความถี่

เมื่อกำหนดคอกออกแบบ ให้สายอากาศใช้งานได้ในช่วงความถี่ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ไทยโมบาย(THAIMOBIIE) ที่มีความถี่ Uplink อยู่ในช่วงความถี่ 1885MHz – 1900MHz และความถี่ Downlink ในช่วง1965MHz–1980MHzดังนั้นสายอากาศต้องสามารถใช้งานได้ที่ความถี่ตั้งแต่ 1885MHz – 1980MHz

ค่าความยาวคลื่นที่สั้นที่สุดคือ ที่ความถี่ 1980MHz

$$\lambda = \frac{c}{f_{\max}} \quad (3.1)$$

เมื่อ λ คือ ค่าความยาวคลื่น (m)

C คือ ค่าความเร็วของแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/sec

f_{\max} คือค่าความถี่สูงสุด (Hz)

เพราะฉะนั้น

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{1980 \text{ MHz}}$$

$$= 0.1515 \text{ m}$$

ดังนั้นความยาวของตัวนำคลื่น ไม่ควรยาวเกินกว่า

$$0.45\lambda = 0.068 \text{ m}$$

เมื่อนำไปวางบนแผ่นระนาบกรวด สายอากาศไดโพลของตัวนำคลื่นจะมีคุณลักษณะคล้ายสายอากาศแบบโมโนโพล คือมีความยาวเพียงครึ่งหนึ่งของสายอากาศแบบไดโพล

■ เพราะฉะนั้นความยาวของตัวนำคลื่นเมื่อนำไปวางบนแผ่นระนาบกรวด ไม่ควรยาวเกินกว่า

$$\frac{0.068}{2} = 0.034 \text{ m}$$

ค่าความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดคือ ที่ความถี่ 1885 MHz

$$\lambda = \frac{c}{f_{\min}} \quad (3.2)$$

เมื่อ f_{\min} คือค่าความถี่ใช้งานต่ำสุด (Hz)

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{1885 \text{ MHz}}$$

ความยาวของตัวสะท้อนคลื่นไม่ควรจะสั้นกว่า

$$0.5\lambda = 0.0795 \text{ m}$$

เมื่อนำไปวางบนแผ่นระนาบกรวด สายอากาศไดโพลของตัวสะท้อนคลื่นจะมีคุณสมบัติคล้ายสายอากาศแบบโมโนโพล คือมีความยาวเพียงครึ่งหนึ่งของสายอากาศแบบไดโพล

- เพราะฉะนั้นความยาวของตัวสะท้อนคลื่นไม่ควรจะสั้นกว่า

$$\frac{0.0795}{2} = 0.0397 \text{ m}$$

เมื่อได้ความยาวของตัวนำคลื่นและตัวสะท้อนคลื่นแล้วต้องหาค่าของระยะห่างระหว่าง ตัวสะท้อนคลื่น ตัวป้อน และตัวนำคลื่น โดยช่วงที่มีการคับปลิงที่เหมาะสมที่ทำให้สายอากาศทำงานได้ดี ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงระหว่าง 0.15λ ถึง 0.25λ

ค่าความยาวคลื่นที่ความถี่ศูนย์กลาง (1900MHz)

$$\lambda := \frac{3 \cdot 10^8}{1900 \cdot 10^6}$$

$$\lambda := 0.158 \text{ m}$$

- เพราะฉะนั้นระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบจะอยู่ในช่วง

$$0.15\lambda \text{ ถึง } 0.25\lambda = 0.0237 \text{ m ถึง } 0.0395 \text{ m}$$

- ค่าความยาวของตัวป้อนเมื่อวางบนแผ่นระนาบกรวดควรมีค่าไม่เกิน $\lambda / 4$

เพราะฉะนั้นความยาวของตัวป้อน คือ

$$0.039 \text{ m}$$

สรุป องค์ประกอบต่างๆของสายอากาศแบบยาคี ที่สามารถใช้งานในช่วงความถี่ Uplink 1885MHz - 1900 MHz และช่วงความถี่ Downlink 1965MHz - 1980MHz

1. ความยาวของตัวสะท้อนคลื่นไม่ควรสั้นกว่า 0.0397 m
2. ความยาวของตัวนำคลื่นไม่ควรเกิน 0.034 m
3. ความยาวของตัวป้อนไม่ควรเกิน 0.039 m
4. ระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบอยู่ในช่วง 0.0237 m ถึง 0.0395 m

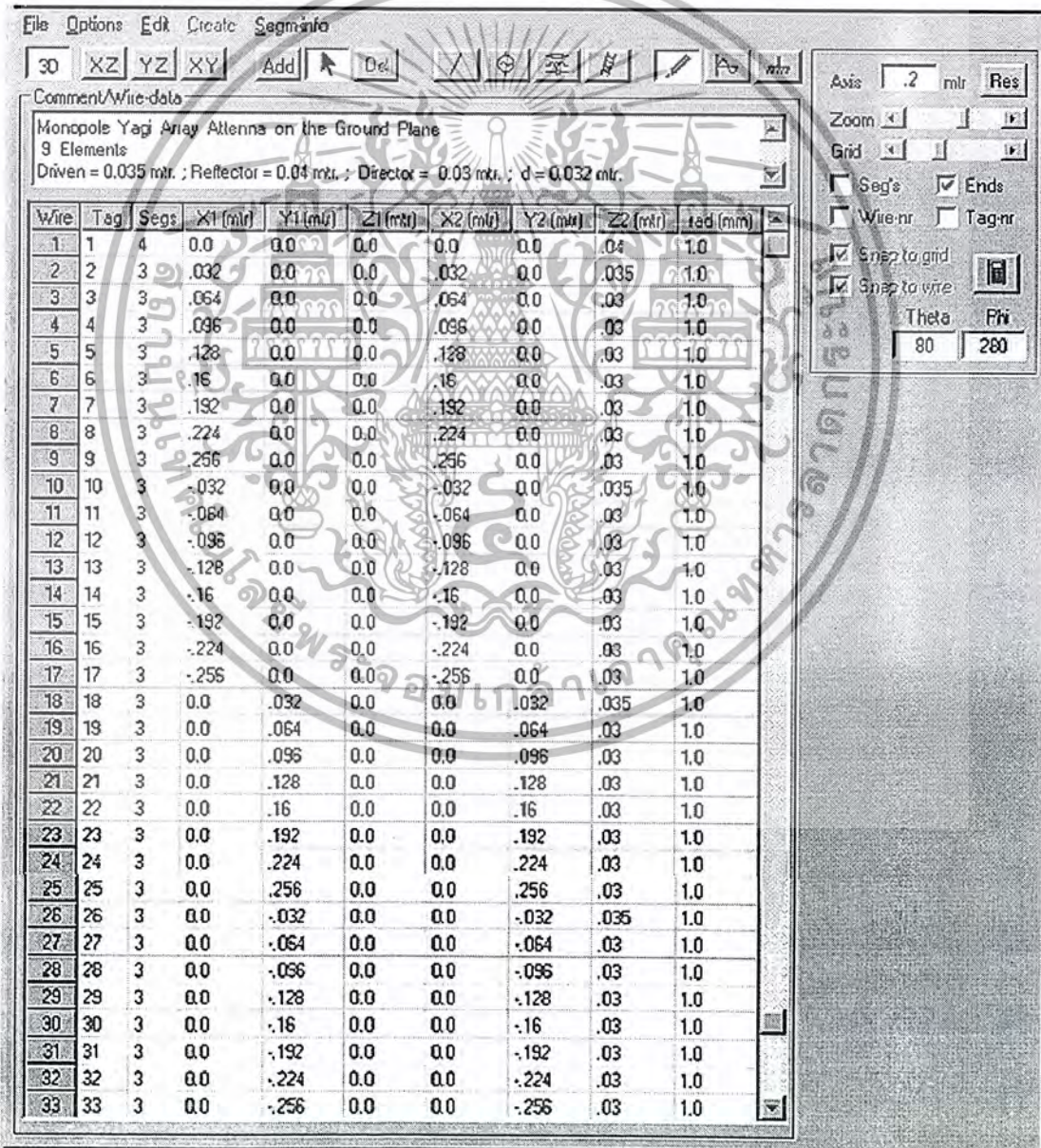
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบสายอากาศแฉกลำดับของโมนโพลยาภิ

จากนั้นทำการเลือกค่าองค์ประกอบต่างๆภายในช่วงตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดยเลือกใช้ค่าแต่ละองค์ประกอบดังนี้

- ความยาวของตัวสะท้อนคลื่นเท่ากับ 0.04 m
- ความยาวของตัวนำคลื่นเท่ากับ 0.03 m
- ความยาวของตัวป้อนเท่ากับ 0.035 m
- ระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบเท่ากับ 0.032 m

เมื่อได้องค์ประกอบต่างๆ ที่เป็นส่วนสำคัญในการออกแบบสายอากาศแบบ ยากิ แล้วจึงนำไป simulate ออกแบบสายอากาศแบบโมนโพลยาภิบนแผ่นระนาบกราวด์ โดยใช้โปรแกรม Numerical Electromagnetic Code (NEC) ช่วยในการออกแบบ



File Options Edit Create Segment

3D XZ YZ XY Add Del

Comment/Wire-data

Monopole Yagi Array Antenna on the Ground Plane
9 Elements
Driven = 0.035 mtr. ; Reflector = 0.04 mtr. ; Director = 0.03 mtr. ; d = 0.032 mtr.

Wire	Tag	Segs	X1 (mtr)	Y1 (mtr)	Z1 (mtr)	X2 (mtr)	Y2 (mtr)	Z2 (mtr)	rad (mm)
1	1	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	.04	1.0
2	2	3	.032	0.0	0.0	.032	0.0	.035	1.0
3	3	3	.064	0.0	0.0	.064	0.0	.03	1.0
4	4	3	.096	0.0	0.0	.096	0.0	.03	1.0
5	5	3	.128	0.0	0.0	.128	0.0	.03	1.0
6	6	3	.16	0.0	0.0	.16	0.0	.03	1.0
7	7	3	.192	0.0	0.0	.192	0.0	.03	1.0
8	8	3	.224	0.0	0.0	.224	0.0	.03	1.0
9	9	3	.256	0.0	0.0	.256	0.0	.03	1.0
10	10	3	-.032	0.0	0.0	-.032	0.0	.035	1.0
11	11	3	-.064	0.0	0.0	-.064	0.0	.03	1.0
12	12	3	-.096	0.0	0.0	-.096	0.0	.03	1.0
13	13	3	-.128	0.0	0.0	-.128	0.0	.03	1.0
14	14	3	-.16	0.0	0.0	-.16	0.0	.03	1.0
15	15	3	-.192	0.0	0.0	-.192	0.0	.03	1.0
16	16	3	-.224	0.0	0.0	-.224	0.0	.03	1.0
17	17	3	-.256	0.0	0.0	-.256	0.0	.03	1.0
18	18	3	0.0	.032	0.0	0.0	.032	.035	1.0
19	19	3	0.0	.064	0.0	0.0	.064	.03	1.0
20	20	3	0.0	.096	0.0	0.0	.096	.03	1.0
21	21	3	0.0	.128	0.0	0.0	.128	.03	1.0
22	22	3	0.0	.16	0.0	0.0	.16	.03	1.0
23	23	3	0.0	.192	0.0	0.0	.192	.03	1.0
24	24	3	0.0	.224	0.0	0.0	.224	.03	1.0
25	25	3	0.0	.256	0.0	0.0	.256	.03	1.0
26	26	3	0.0	-.032	0.0	0.0	-.032	.035	1.0
27	27	3	0.0	-.064	0.0	0.0	-.064	.03	1.0
28	28	3	0.0	-.096	0.0	0.0	-.096	.03	1.0
29	29	3	0.0	-.128	0.0	0.0	-.128	.03	1.0
30	30	3	0.0	-.16	0.0	0.0	-.16	.03	1.0
31	31	3	0.0	-.192	0.0	0.0	-.192	.03	1.0
32	32	3	0.0	-.224	0.0	0.0	-.224	.03	1.0
33	33	3	0.0	-.256	0.0	0.0	-.256	.03	1.0

Axis .2 mtr Res

Zoom

Grid

Seg's Ends

Wire-nr Tag-nr

Snap to grid Snap to wire

Theta Phi

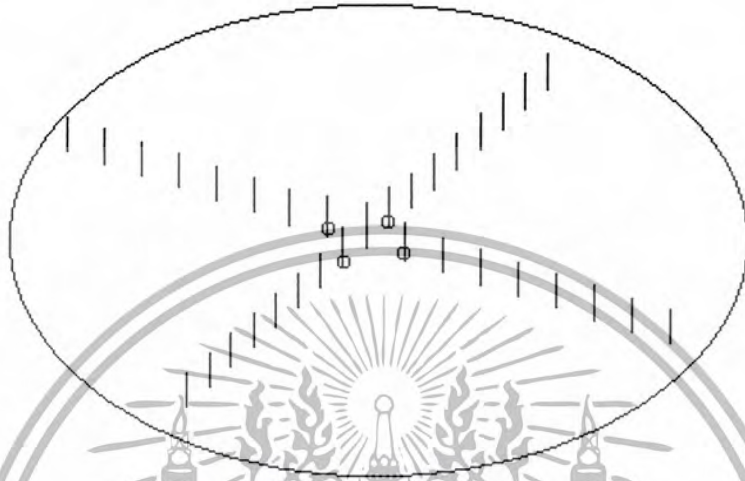
80 280

รูปที่ 3.2 การกำหนดค่าต่างๆ ให้กับโปรแกรม NEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

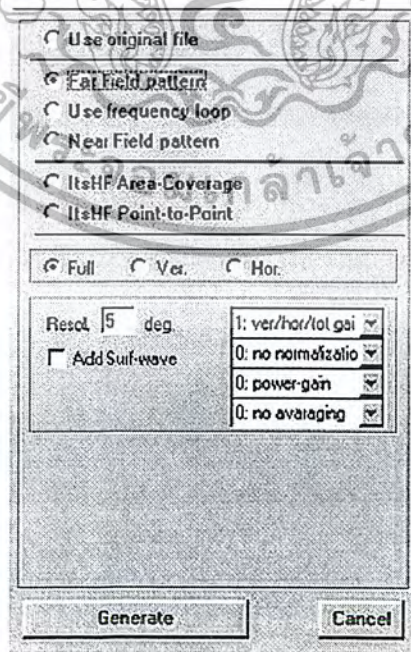
โดยกำหนดค่าความยาวและระยะห่างในแต่ละองค์ประกอบ โดยมีองค์ประกอบวางตามแกน X; แกน -X ;แกน Y และแกน -Y ให้กับโปรแกรม NEC ดังรูปที่ 3.2

เมื่อกำหนดค่าต่างๆขององค์ประกอบทั้งหมดแล้ว จะได้รูปแบบของสายอากาศตามที่ออกแบบไว้ โดยกำหนดให้ระนาบกราวด์มีค่านันต์ ดังรูปที่ 3.3



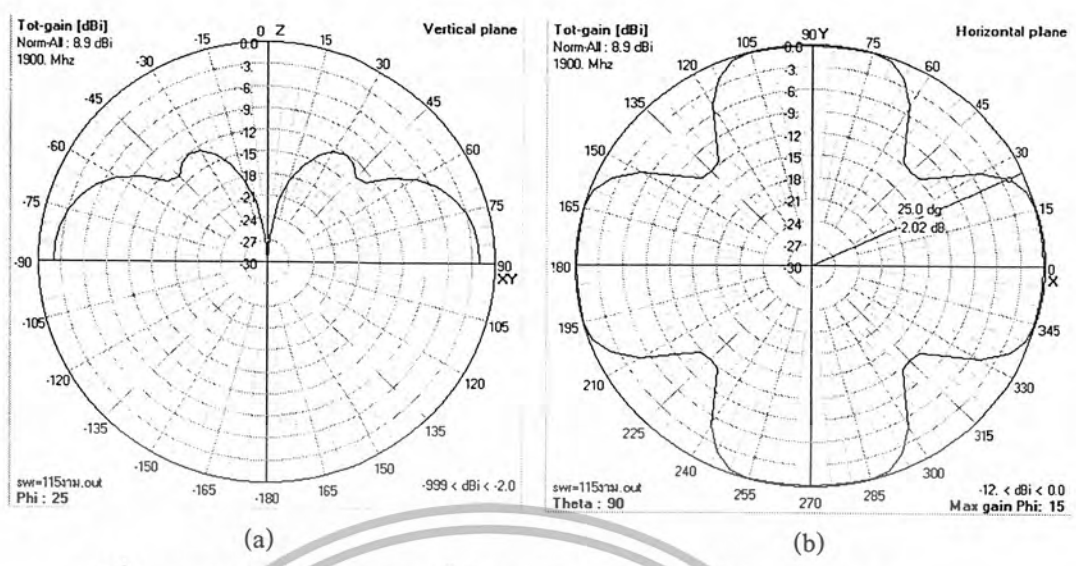
รูปที่ 3.3 แบบรูปของสายอากาศที่ออกแบบด้วยโปรแกรม NEC

กำหนดความถี่ใช้งานที่ 1900MHz ให้กับตัวป้อนทั้ง 4 ตัว และให้โปรแกรม NEC ทำการ Generate ค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ในระยะ Far Field ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการ Generate รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือทรัพย์สินทางปัญญาอื่นใดในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการ Generate ด้วยโปรแกรม NEC

รูป 3.5 (ก) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบ XZ

รูป 3.5 (ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบ XY

ค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จากการ Generate ด้วยโปรแกรม NEC จะมีรูปแบบดังรูปที่ 3.5(ก) และ 3.5(ข)

จากรูป 3.5(ข) สามารถทราบค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งหรือ ค่า Half Power Beam Width (HPBW) โดยสังเกตจากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งหรือ -3 dB ซึ่ง HPBW จะมีค่าประมาณ 55 องศา

จากนั้นนำค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ได้จากโปรแกรม NEC มาหาคำนวนหาค่า Standing Wave Ratio (SWR) จากสูตร

$$SWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \tag{3.3}$$

โดยที่
$$\Gamma = \frac{Z_A - Z_O}{Z_A + Z_O} \tag{3.4}$$

เมื่อ Z_A คือ Input impedance

Z_O คือ Output impedance โดยกำหนดให้มีค่า = 50 Ω

Γ คือ Reflection Coefficient

โดยค่า Input impedance (Z_A) จากโปรแกรม NEC มีค่าเท่ากับ 44.7955 - j4.11308Ω

$$\Gamma = \frac{44.7955 - j4.11308 - 50}{44.7955 - j4.11308 + 50}$$

$$= -0.053 + j0.046$$

$$|\Gamma| = \sqrt{(-0.053)^2 + (0.046)^2}$$

$$= 0.07$$

$$SWR = \frac{1 + 0.07}{1 - 0.07}$$

$$SWR = 1.15:1$$

จากนั้นใช้โปรแกรม NEC ทำการทดลองออกแบบสายอากาศแถวลำดับ ของโมโน โพลยาก็ บนแผ่นระนาบกราวด์ ที่มีการทำงานของตัวป้อนเพียงหนึ่งทิศทางในแนวแกน X อีกสามทิศทางที่เหลือ คือ แกน -X, Y, -Y ทำการต่อ Terminate Load 50 Ω ไว้ เพื่อทำการทดสอบสายอากาศในแต่ละทิศทาง จะได้รูปแบบของสายอากาศดังรูปที่ 3.6

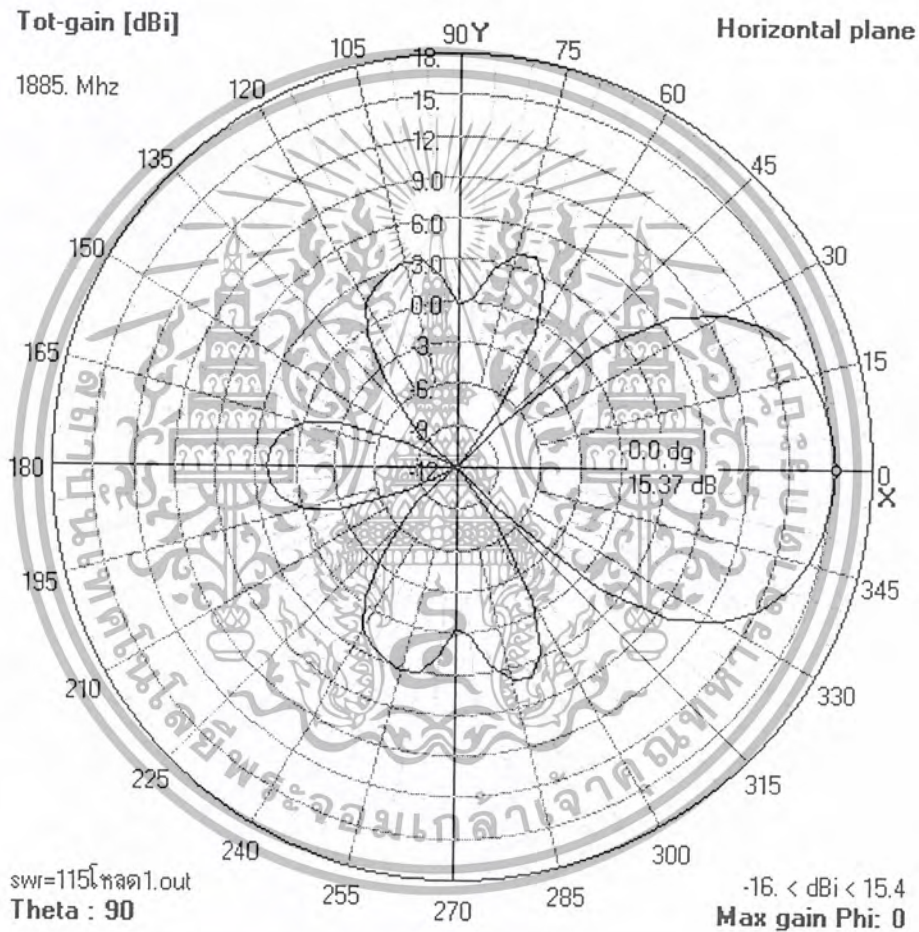


รูปที่ 3.6 สายอากาศโมโนโพลยาก็ บนแผ่นระนาบกราวด์ที่มีการป้อนเพียงหนึ่งด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการป้อนความถี่ที่ต้องการนำไปใช้งาน คือความถี่ Uplink 1885MHz – 1900MHz และ ความถี่ Downlink 1965MHz – 1980MHz โดยเลือกความถี่ที่นำมาทำการทดลอง 4 ความถี่ คือ 1885MHz , 1900MHz, 1965MHz และ 1980MHz ซึ่งจะได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น(Pattern), ค่าความกว้างของลำ คลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width),ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity),Smith chart และ ค่า Standing Wave Ratio(SWR) ดังนี้

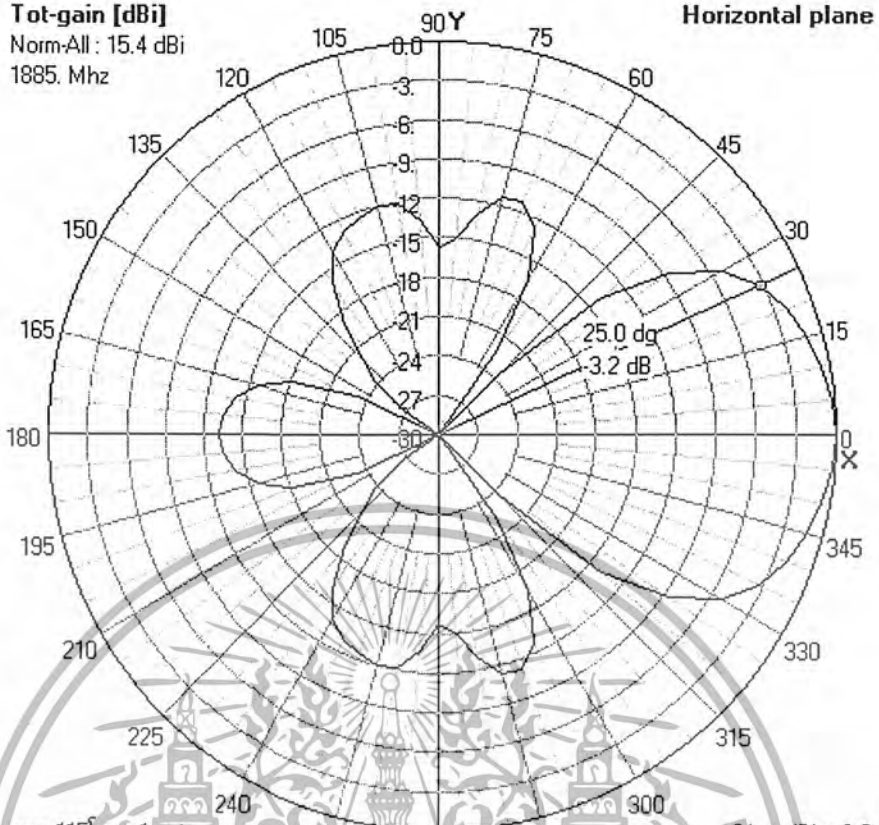
ที่ความถี่ 1885MHz



รูปที่ 3.7 (ก) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและ Directivity ที่ความถี่ 1885 MHz

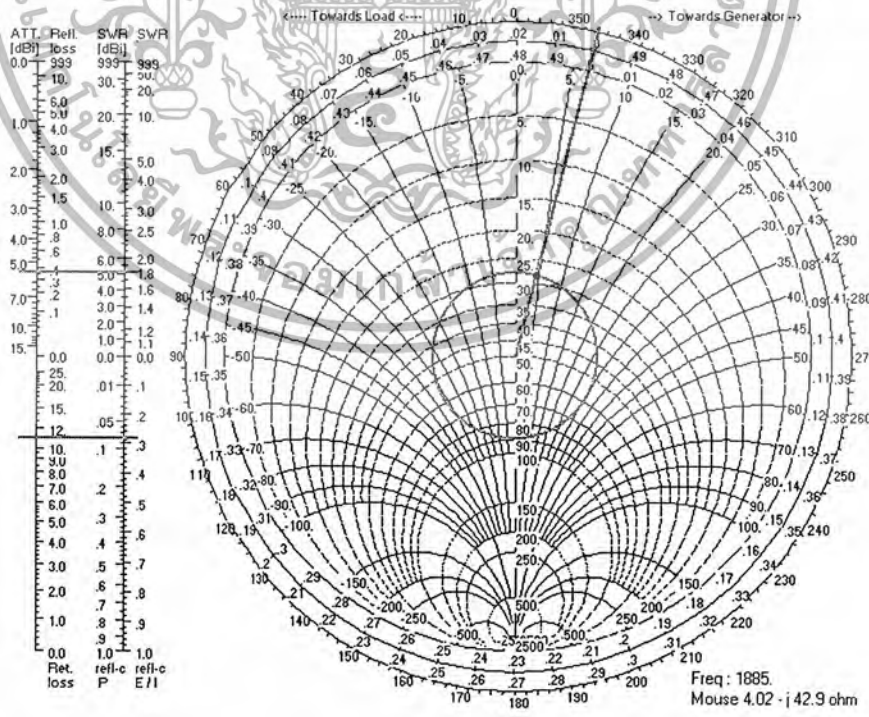
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tot-gain [dBi]
 Norm-All : 15.4 dBi
 1885. Mhz



swr=115 โหลด 1.out
 Theta : 90
 Max gain Phi: 0

รูปที่ 3.7(ข) HPBW ที่ความถี่ 1885 MHz



รูปที่ 3.7(ค) Smith chart ที่ความถี่ 1885 MHz

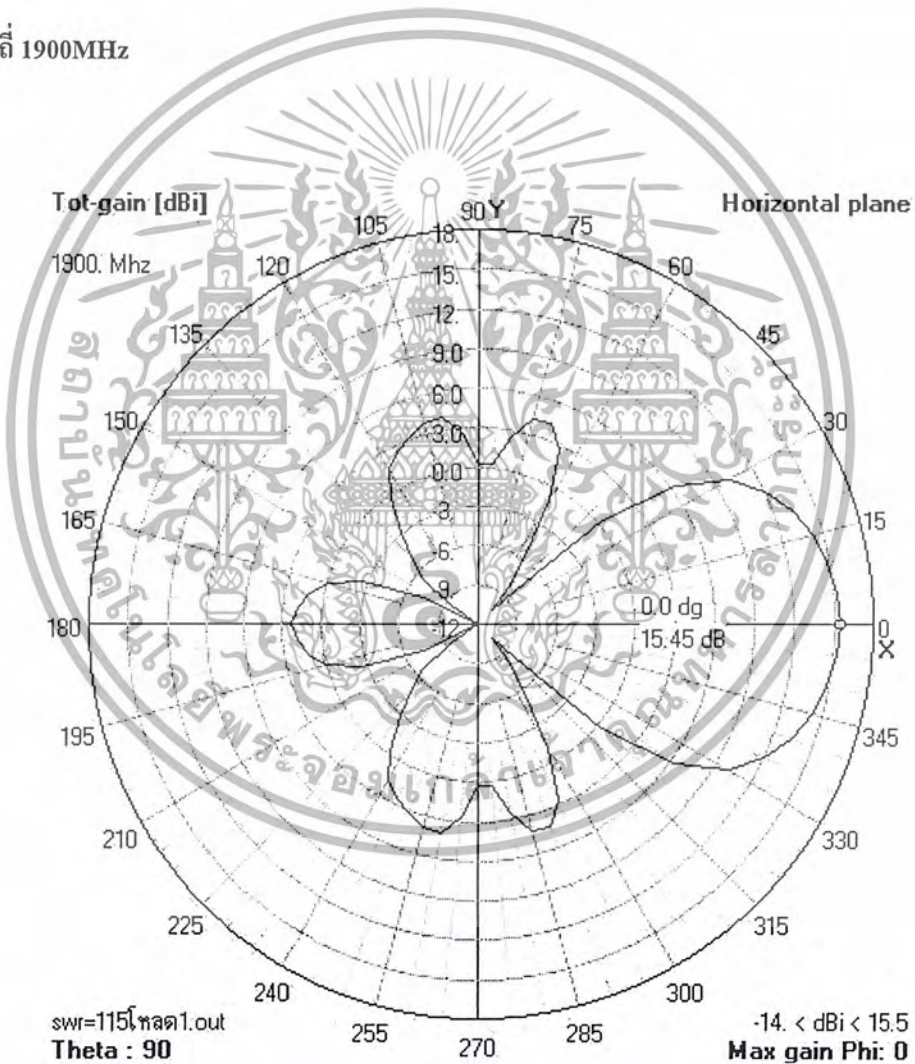
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ 1885MHz มีค่า Input impedance = $28.25+j4.33 \Omega$ จะมีค่า Standing Wave Ratio (SWR)เท่ากับ 1.789 : 1

สรุปค่าคุณสมบัติต่างๆจากการป้อนความถี่ 1885MHz ให้แก่สายอากาศแถวลำดับของโมนิโพล ยากิบนแผ่นระนาบกราวด์ เพียงหนึ่งด้าน

1. Directivity = 15.37 dB
2. HPBW = 50 องศา
3. SWR = 1.789 :1
4. F/B = 13.01

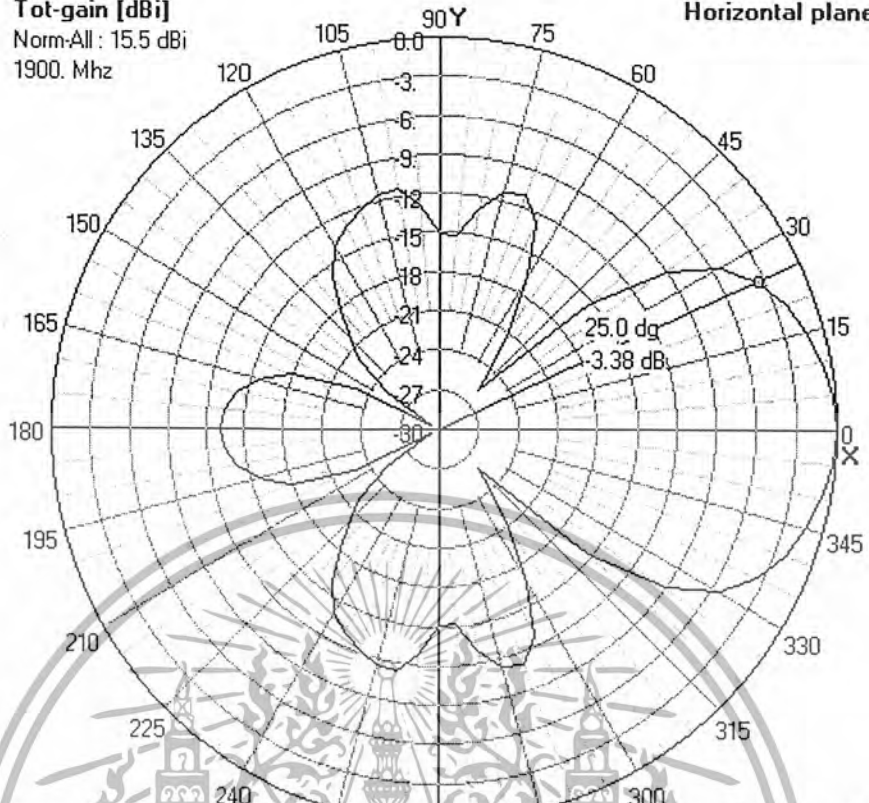
ที่ความถี่ 1900MHz



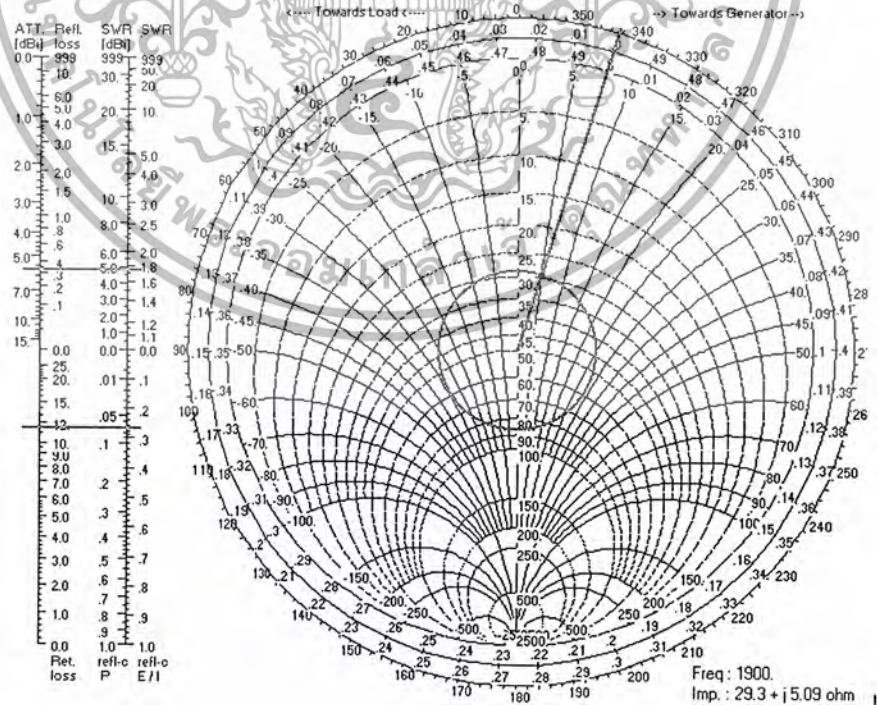
รูปที่ 3.8(ก) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นและ Gain ที่ความถี่ 1900 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tot-gain [dBi]
 Norm-All : 15.5 dBi
 1900. Mhz



SWR=115 โหลด 1. out
 Theta : 90
 รูปที่ 3.8(ข) HPBW ที่ความถี่ 1900 MHz
 -29. < dBi < 0.0
 Max gain Phi: 0



รูปที่ 3.8(ค) Smith Chart ที่ความถี่ 1900 MHz

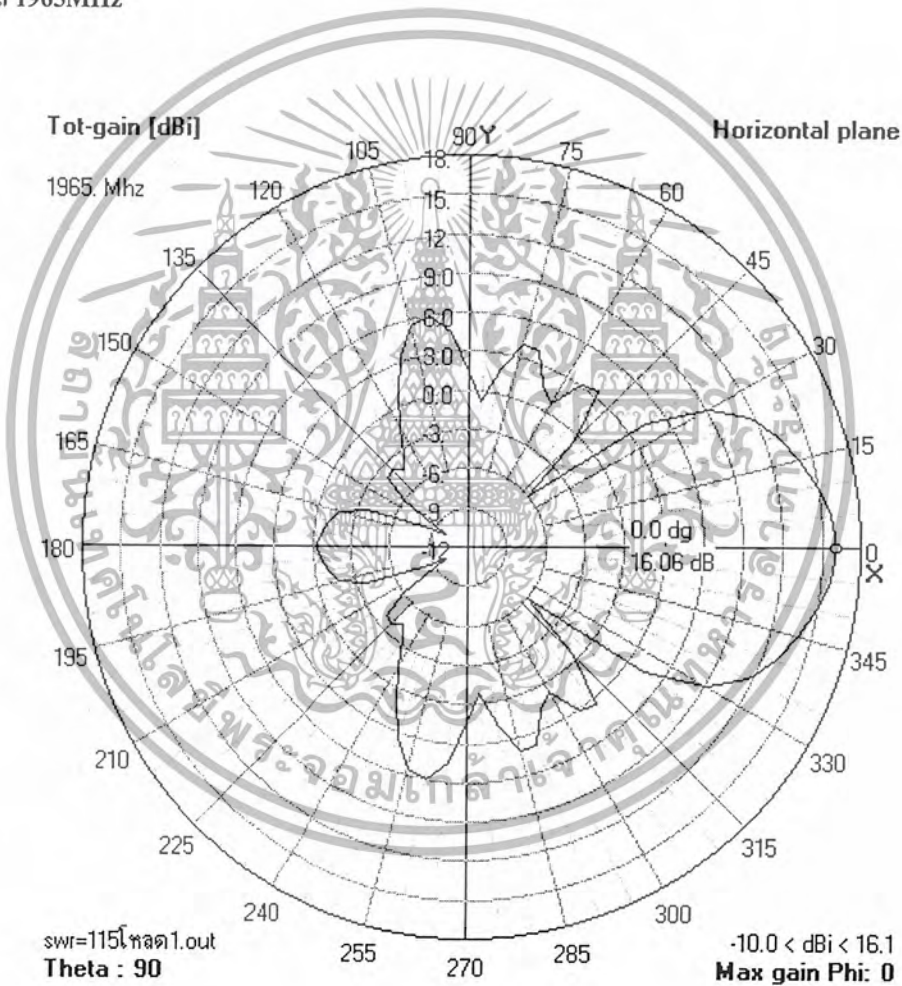
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ 1900MHz มีค่า Input impedance = $29.32+j5.89 \Omega$ จะมีค่า Standing Wave Ratio (SWR)เท่ากับ 1.741 :1

สรุปค่าคุณสมบัติต่างๆจากการป้อนความถี่ 1900MHz ให้แก่สายอากาศแถวลำดับของโมนิโพล ยากิบนแผ่นระนาบกราวด์ เพียงหนึ่งด้าน

- 1.Directivity = 15.45 dB
- 2.HPBW = 50 องศา
- 3.SWR = 1.741 :1
4. F/B = 13.06

ที่ความถี่ 1965MHz



รูปที่ 3.9(ก) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นและ Gain ที่ความถี่ 1965 MHz

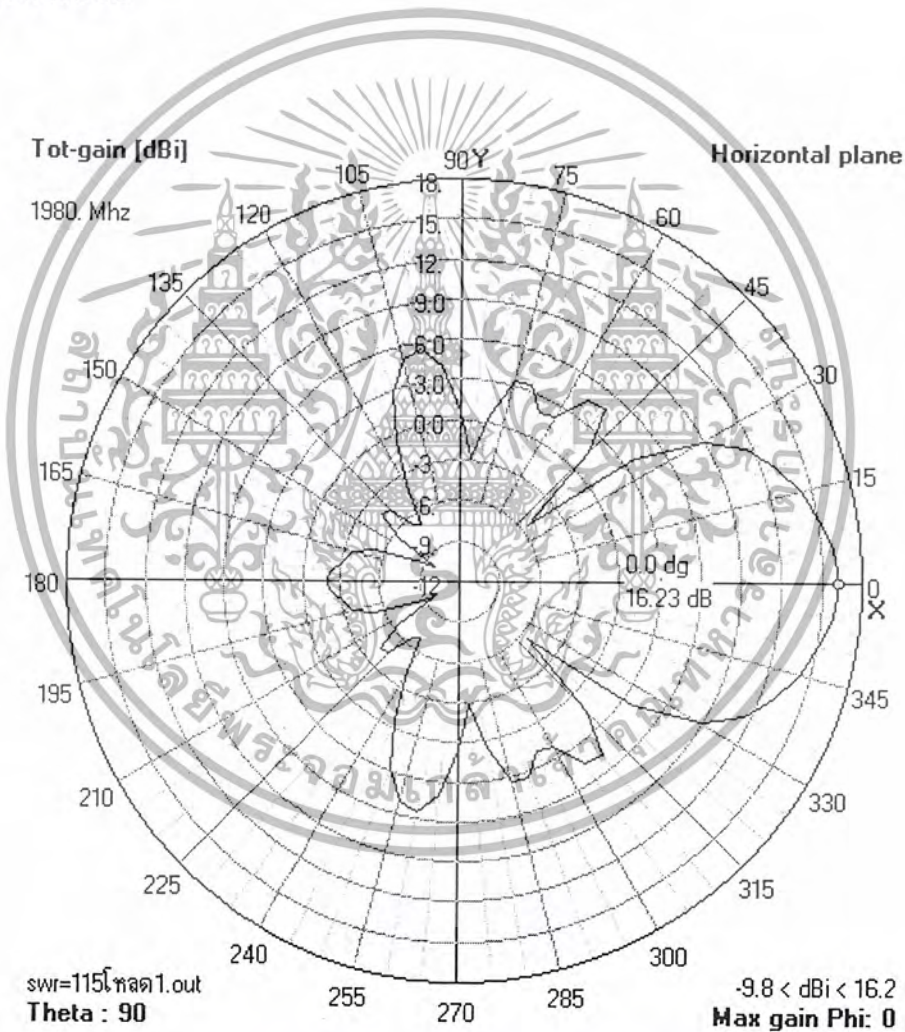
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ 1965MHz มีค่า Input impedance = $24.82 + j10.57 \Omega$ จะมีค่า Standing Wave Ratio (SWR)เท่ากับ 2.1 :1

สรุปค่าคุณสมบัติต่างๆจากการป้อนความถี่ 1965MHz ให้แก่สายอากาศแถวลำดับของโมโนโพล ยากิบนแผ่นระนาบกราวด์ เพียงหนึ่งด้าน

1. Directivity = 16.06 dB
2. HPBW = 40 องศา
3. SWR = 2.1 :1
4. F/B = 16.24

ที่ความถี่ 1980MHz



รูปที่ 3.10(ก) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นและ Gain ที่ความถี่ 1980 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ 1980MHz มีค่า Input impedance = $22.69+j14.07 \Omega$ จะมีค่า Standing Wave Ratio (SWR)เท่ากับ 2.4 :1

สรุปค่าคุณสมบัติต่างๆจากการป้อนความถี่ 1980MHz ให้แก่สายอากาศแถวลำดับของโมนิโพล ยากิบนแผ่นระนาบกราวด์ เพียงหนึ่งด้าน

1. Directivity = 16.23 dB
2. HPBW = 40 องศา
3. SWR = 2.4 :1
4. F/B = 18.06

3.3 การออกแบบสายอากาศแถวลำดับของโมนิโพลยากิบนแผ่นระนาบกราวด์โดยวิธีการ Optimizer จากโปรแกรม NEC

การออกแบบสายอากาศด้วยวิธีการ Optimizer จากโปรแกรม NEC ต้องมีการกำหนดตัวแปร ที่จะใช้ในการประมาณค่า เพื่อให้ได้ค่าคุณสมบัติต่างๆ ตามความต้องการ หรือเหมาะสมที่สุด

โดยกำหนดให้ความยาวของตัวสะท้อนคลื่น(Reflector), ตัวป้อน(Feeder), ตัวนำคลื่น(Director) เป็นตัวแปรที่ใช้ในการ Optimizer และกำหนดให้ระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบมีค่าคงที่เท่ากับ 2.8 เซนติเมตร เพื่อต้องการค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง(SWR) มีค่าเข้าใกล้ 1:1, ค่า Input impedance เข้าใกล้ 50Ω และค่า Gain ประมาณ 13 dB ออกแบบที่ความถี่ 1933MHz จากนั้นทำการ Optimizer ดังรูป (3. 11)

Settings

Function: Optimize, Option: Default

Weighting factors (FOM) in %:

SWR	Gain	F/B	F/R	R-a	X-a	Eff
0	100	0	0	0	100	100

Surf-wave at distance = 0.0 Km

Theta: 0, Phi: 90, Resolution: 10 deg, Use freq loop:

d-Theta: 0, d-Phi: 0

Variables: rec=0.05, feed=0.0335, dir=0.29, gap=0.028, seg=2.0

Variable Sensitivity:

Run	feed	dir	rec
1-1	-2.306	.67805	.01583
2-1	-2.306	.67805	.01583
3-1	2.5589	-.44112	0.0
4-1	-1.582	-1.414	-.0049
5-1	2.3485	-.6405	-.011
6-1	2.3485	-.6405	-.011
7-1	-2.315	.67317	.0118
8-1	2.3125	-.6737	-.0138
9-1	-.1412	-2.81	-.0489
10-1	-.1412	-2.81	-.0489
11-1	-.1412	-2.81	-.0489

Calculated results:

Run	SWR	Gain	F/B	F/R	R-a	X-a	Eff	Res. %	Step %
9-1	1.9485	-99.0	0.0	0.0	25.662	-.1653	100.0	1.e-5	.1
9-2	1.7095	-99.0	0.0	0.0	30.034	6.5996	100.0	-.064	10.
10-1	1.9427	-99.0	0.0	0.0	25.737	.16761	100.0	4.e-5	.1
10-1	1.9624	-99.0	0.0	0.0	25.48	-.2353	100.0	7.e-4	.1
10-1	1.9485	-99.0	0.0	0.0	25.662	-.1653	100.0	1.e-5	.1
10-2	1.6891	-99.0	0.0	0.0	29.997	4.6383	100.0	-.045	2.0
11-1	1.9427	-99.0	0.0	0.0	25.737	.16761	100.0	4.e-5	.1
11-1	1.9624	-99.0	0.0	0.0	25.48	-.2353	100.0	7.e-4	.1
11-1	1.9485	-99.0	0.0	0.0	25.662	-.1653	100.0	1.e-5	.1
11-2	1.8308	-99.0	0.0	0.0	27.318	.70252	100.0	-.005	.4
12-1	1.9442	-99.0	0.0	0.0	25.718	.0847	100.0	8.e-4	.08

Variable Values:

Run	feed	dir	rec
10-1	.03347	.02901	.05002
10-1	.03343	.02904	.05002
10-1	.03343	.02901	.05007
10-2	.03334	.02738	.04997
11-1	.03347	.02901	.05002
11-1	.03343	.02904	.05002
11-1	.03343	.02901	.05007
11-2	.03342	.02869	.05001
12-1	.03346	.02901	.05002
12-1	.03343	.02904	.05002
12-1	.03343	.02901	.05006

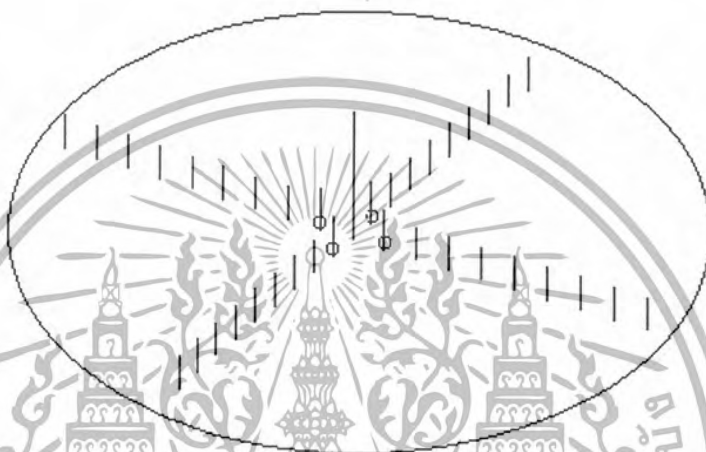
รูปที่ 3.11 วิธีการ Optimizer จากโปรแกรม NEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

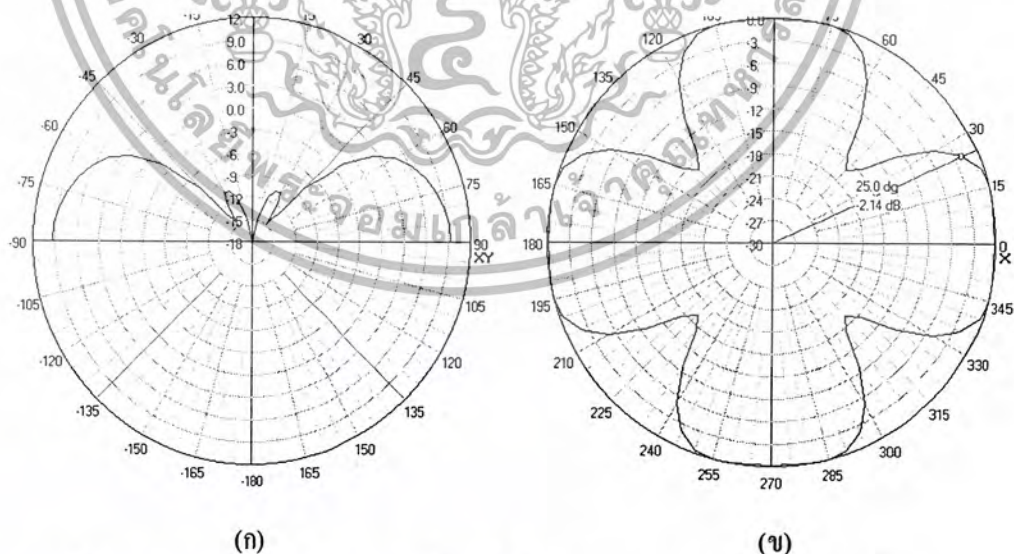
ผลที่ได้จากการออกแบบโดย วิธีการOptimizer จากโปรแกรม NEC

- ความยาวของตัวสะท้อนคลื่นเท่ากับ 10.796 cm.
- ความยาวของตัวนำคลื่นเท่ากับ 2.867 cm.
- ความยาวของตัวป้อนเท่ากับ 3.479 cm.
- ระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบเท่ากับ 2.8 cm.

จากนั้นนำค่าต่างๆขององค์ประกอบทั้งหมดที่ได้จากการ Optimizer มาสร้างสายอากาศ จะได้รูปแบบของสายอากาศตามที่ออกแบบไว้โดยกำหนดให้ระนาบกรวดมีค่าอนันต์ ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 รูปแบบของสายอากาศที่ออกแบบด้วยวิธี Optimizer จากโปรแกรม NEC เมื่อทำการ Generate ด้วยโปรแกรม NEC จะได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นดังรูปที่ 3.13



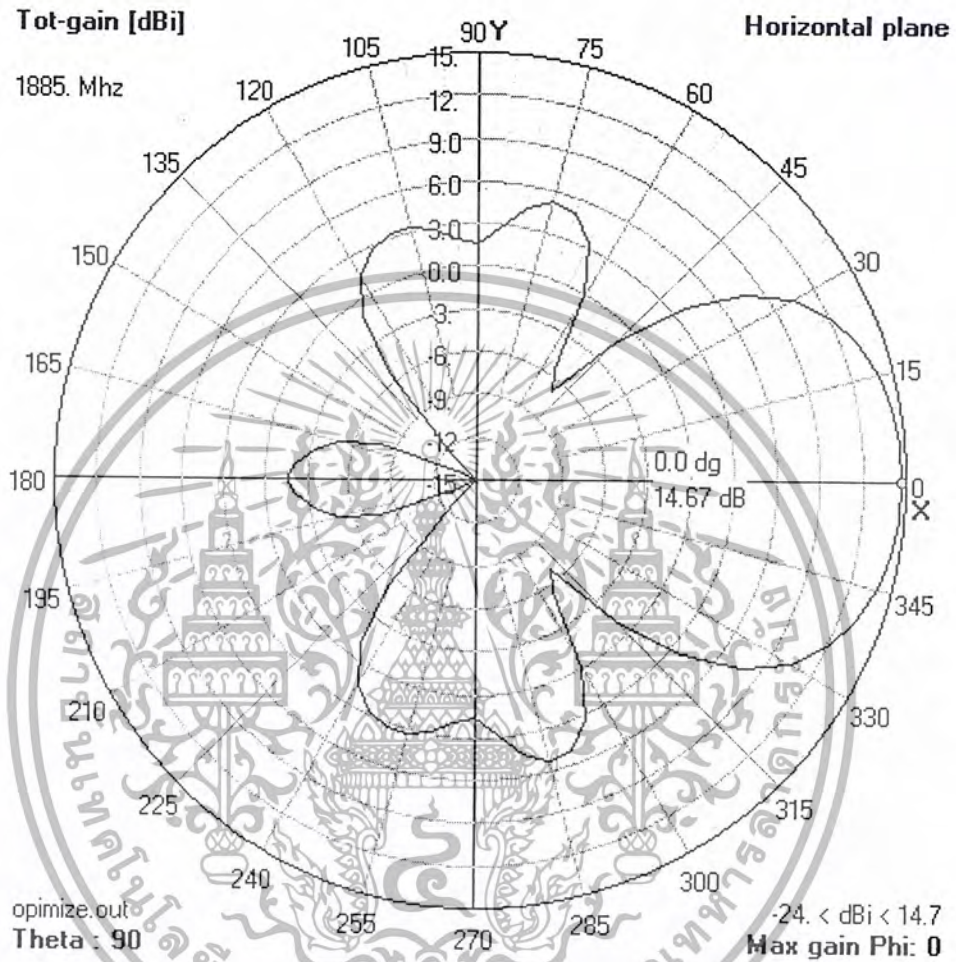
รูปที่ 3.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดย วิธีการ Optimizer จากโปรแกรม NEC

รูป 3.13 (ก) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบ XZ

รูป 3.13 (ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบ XY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการทดลองสายอากาศแถวลำดับ ของโมโนโพลยาก็ บนแผ่นระนาบกราวด์ จากการ Optimizer ที่มีการทำงานของตัวป้อนเพียงหนึ่งทิศทางในแนวแกน X อีกสามทิศทางที่เหลือ คือแกน -X, Y, -Y ทำการต่อ Terminate Load 50Ω ไว้ เพื่อทำการทดสอบสายอากาศในแต่ละทิศทาง ที่ความถี่ 1885 MHz



รูปที่ 3.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและ Directivity จากการ Optimizer ที่ความถี่ 1885 MHz

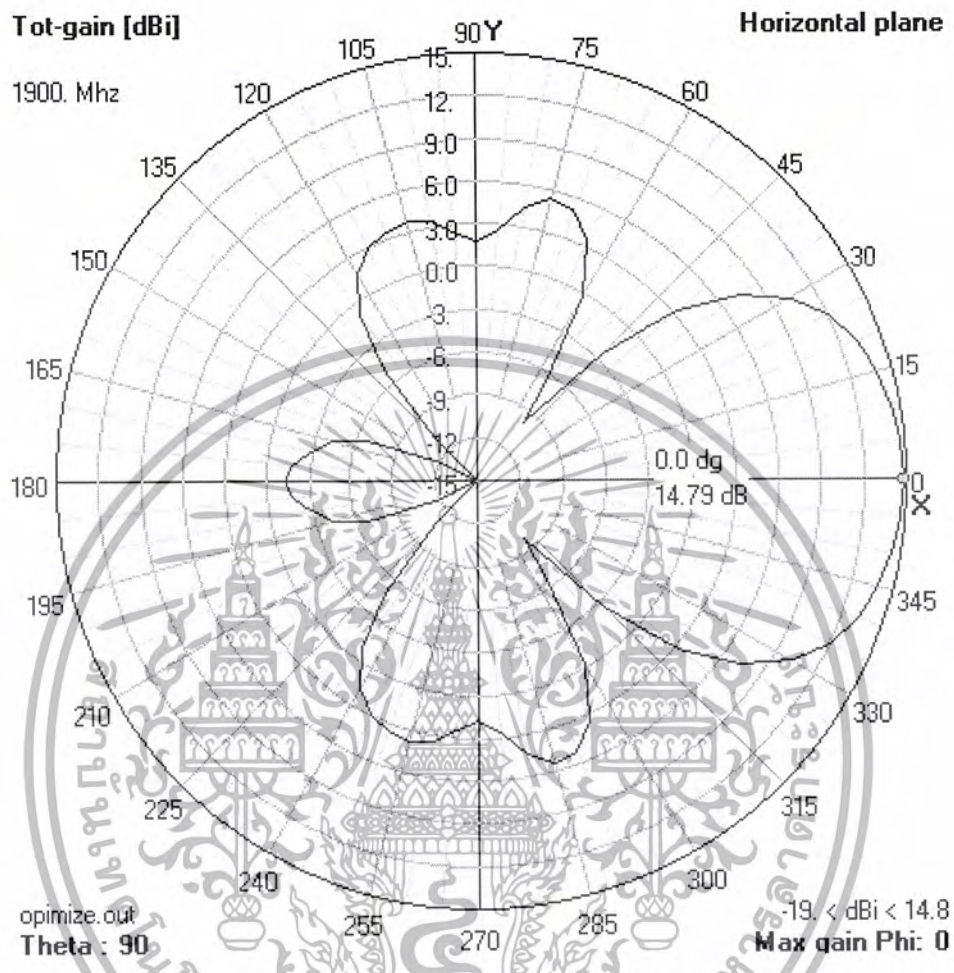
ที่ความถี่ 1885MHz มีค่า Input impedance = $28.3087 + j4.17818 \Omega$ จะมีค่า Standing Wave Ratio(SWR) เท่ากับ 1.784 : 1

สรุปค่าคุณสมบัติต่างๆจากการป้อนความถี่ 1885MHz ให้แก่สายอากาศแถวลำดับของโมโนโพลยาก็บนแผ่นระนาบกราวด์ จากการ Optimizer เพียงหนึ่งด้าน

1. Directivity = 14.67 dB
2. HPBW = 50 องศา
3. SWR = 1.784 : 1
4. F/B = 16.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ 1900 MHz



รูปที่ 3.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและ Directivity จากการ Optimizer ที่ความถี่ 1900 MHz

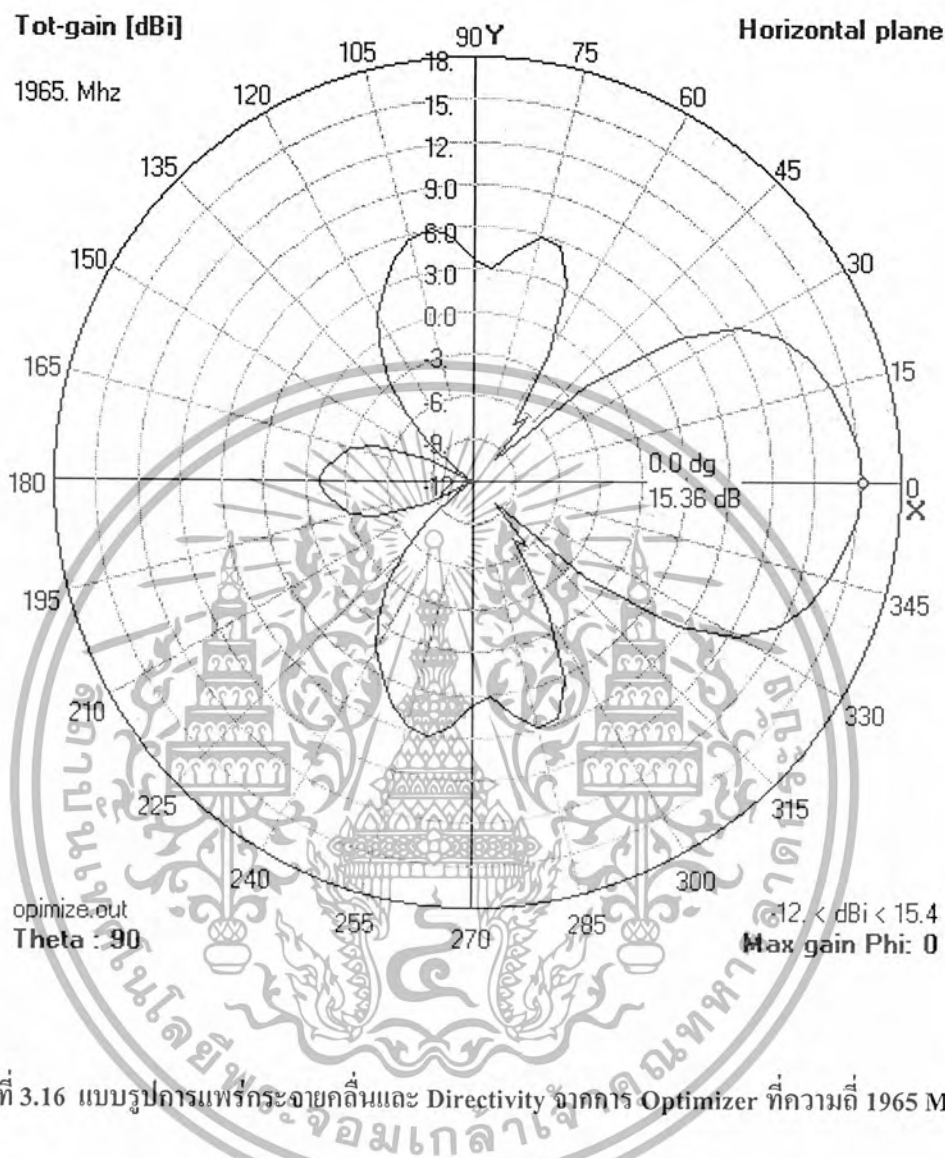
ที่ความถี่ 1900 MHz มีค่า Input impedance = $29.809 + j5.8955 \Omega$ จะมีค่า Standing Wave Ratio(SWR) เท่ากับ 1.713 :1

สรุปค่าคุณสมบัติต่างๆจากการป้อนความถี่ 1900 MHz ให้แก่สายอากาศแถวลำดับของโมโนโพล ยากิบนแผ่นระนาบกราวด์ จากการ Optimizer เพียงหนึ่งด้าน

1. Directivity = 14.79 dB
2. HPBW = 50 องศา
3. SWR = 1.713 :1
4. F/B = 16.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ 1965 MHz



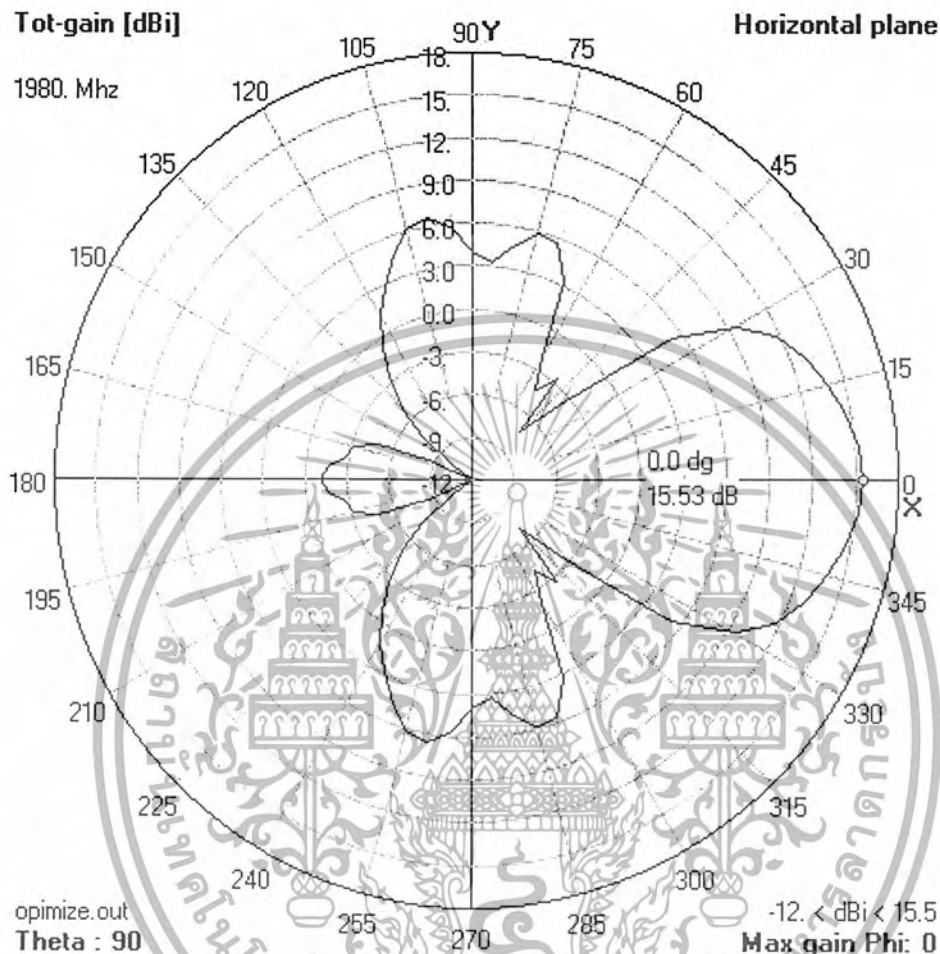
ที่ความถี่ 1965 MHz มีค่า Input impedance = $32.1519 + j9.957 \Omega$ จะมีค่า Standing Wave Ratio(SWR) เท่ากับ 1.656 : 1

สรุปค่าคุณสมบัติต่างๆจากการป้อนความถี่ 1965 MHz ให้แก่สายอากาศแถวลำดับของโมนิโพล ยากิบนแผ่นระนาบกราวด์ จากการ Optimizer เพียงหนึ่งด้าน

1. Directivity = 15.36 dB
2. HPBW = 48 องศา
3. SWR = 1.656 : 1
4. F/B = 18.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ 1980 MHz



รูปที่ 3.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและ Directivity จากการ Optimizer ที่ความถี่ 1980 MHz

ที่ความถี่ 1980 MHz มีค่า Input impedance = $31.1764 + j11.1677 \Omega$ จะมีค่า Standing Wave Ratio(SWR) เท่ากับ 1.729 : 1

สรุปค่าคุณสมบัติต่างๆจากการป้อนความถี่ 1980 MHz ให้แก่สายอากาศแถวลำดับของโมนโพล ยกิบนแผ่นระนาบกราวด์ จากการ Optimizer เพียงหนึ่งด้าน

1. Directivity = 15.53 dB
2. HPBW = 48 องศา
3. SWR = 1.729 : 1
4. F/B = 18.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางเปรียบเทียบสายอากาศที่ออกแบบจากการเลือกค่า และสายอากาศที่ออกแบบจากการ Optimizer

คุณสมบัติ	สายอากาศที่ออกแบบจากการเลือกค่า				สายอากาศที่ออกแบบจากการ Optimizer			
	1885 MHz	1900 MHz	1965 MHz	1980 MHz	1885 MHz	1900 MHz	1965 MHz	1980 MHz
Directivity	15.37	15.45	16.06	16.23	14.67	14.79	15.36	15.53
HPBW	50	50	40	40	50	50	48	48
SWR	1.789 : 1	1.741 : 1	2.1 : 1	2.4 : 1	1.784 : 1	1.713 : 1	1.656 : 1	1.729 : 1
F/B	13.01	13.06	16.24	18.06	16.57	16.5	18.03	18.63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การสร้าง การทดสอบ และผลการทดลอง

เมื่อได้ทำการออกแบบสายอากาศแถวลำดับของโมโนโพลยาภิบนแผ่นระนาบกราวด์ที่มีองค์ประกอบต่างๆ ของสายอากาศที่สามารถใช้งานในช่วงความถี่ Uplink 1885MHz – 1900MHz และช่วงความถี่ Downlink 1965MHz – 1980MHz

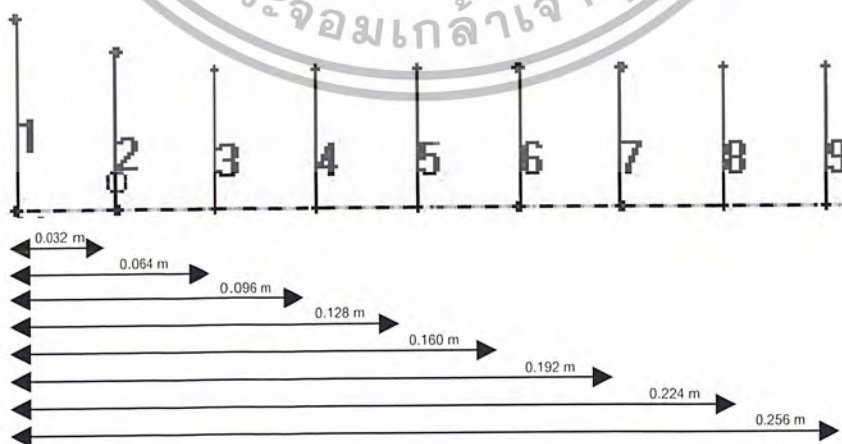
โดยเลือกโครงสร้างของสายอากาศอากาศ ที่มีรูปแบบการแพร่กระจาย(Pattern), Half Power Beam Width (HPBW), Directivity, SWR ที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นสถานีฐานของเครือข่ายระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 1900MHz

4.1 การสร้างสายอากาศจากการเลือกค่า

โดยมีจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศทั้งหมด 33 องค์ประกอบวางอยู่บนแผ่นระนาบกราวด์ โดยแบ่งเป็นสายอากาศโมโนโพลยาภิ 4 ทิศทางวางตามแกน X, -X, Y, -Y ซึ่งสายอากาศโมโนโพลยาภิจะมีจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศแต่ละทิศทาง 9 องค์ประกอบโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น(Reflector)ร่วมกันทุกทิศทาง ซึ่งมีค่าต่างๆจากการเลือกค่าที่เหมาะสม ดังนี้

- ความยาวของตัวสะท้อนคลื่นเท่ากับ 0.04 m
- ความยาวของตัวป้อนเท่ากับ 0.035 m
- ระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบเท่ากับ 0.032 m
- องค์ประกอบของสายอากาศแต่ละตัวมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.001m เท่ากันทุกองค์ประกอบ

โดยมีระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบเทียบกับตัวสะท้อนคลื่น(Reflector) ดังรูปที่ 4.1



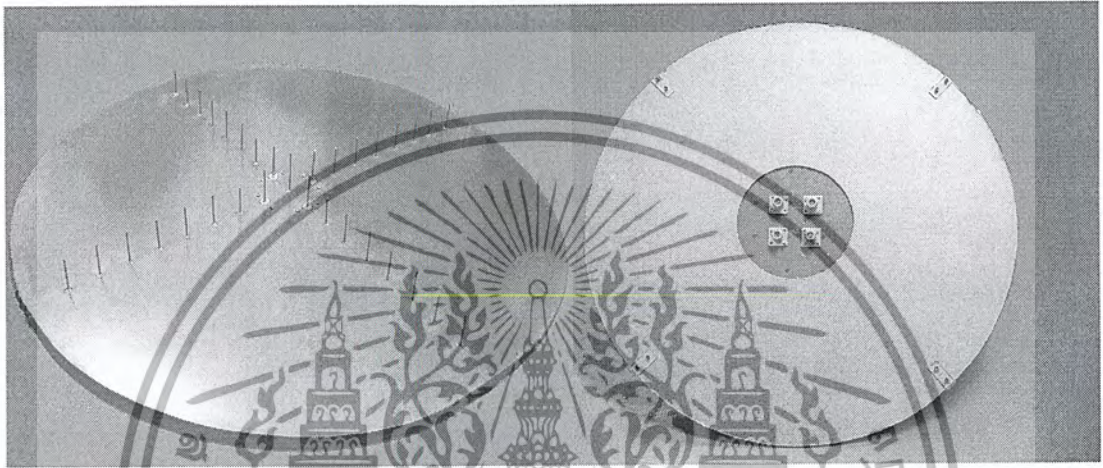
รูปที่ 4.1 ระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบเทียบกับตัวสะท้อนคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 ทำให้ทราบระยะ ความกว้างสูงสุดของสายอากาศ (จากแกนXถึงแกน-X หรือจากY แกนถึงแกน-Y)คือ

$$2 \times 0.256 = 0.512m$$

แล้วออกแบบระนาบกราวด์ มีลักษณะเป็นวงกลม ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.6 m เพื่อรองรับสายอากาศที่มีความกว้างสูงสุด 0.512 m ได้สายอากาศตามรูปที่ 4.2

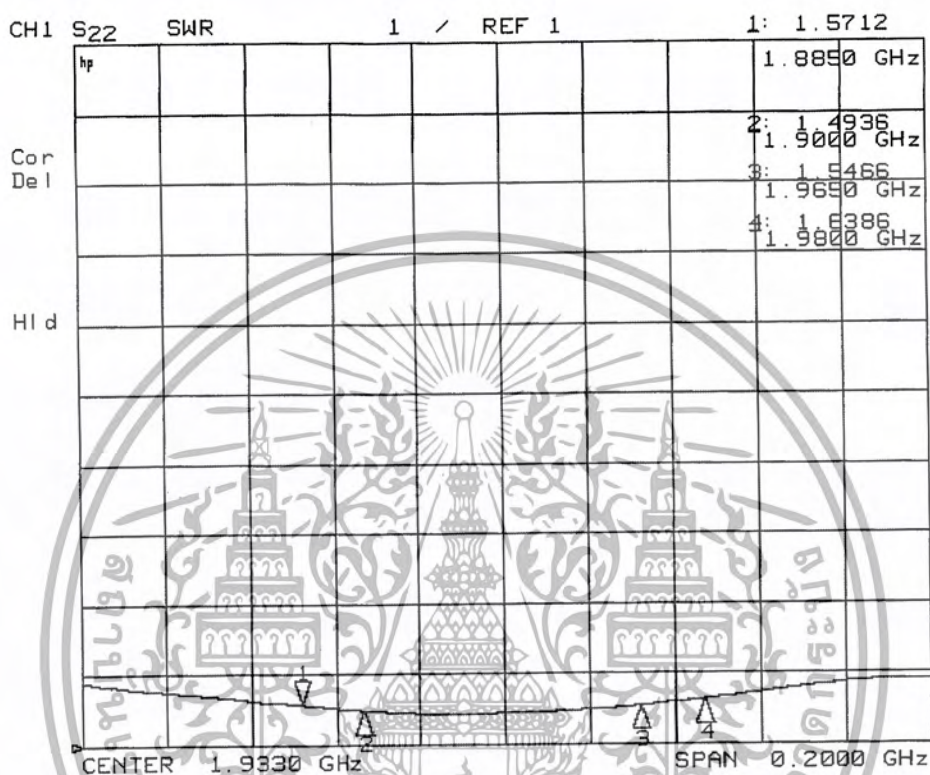


รูปที่ 4.2 รูปแบบของสายอากาศจากการเลือกค่า ที่จะนำไปทดสอบ

จากนั้นนำสายอากาศจากรูปที่4.2 มาต่อเข้ากับเครื่อง Network analyzer เพื่อวัดค่า อัตราส่วนคลื่นนิ่ง(SWR ,Standing Wave Ratio), อิมพีแดนซ์, ค่าการสูญเสียย้อนกลับ(Return Loss) และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น(Pattern) ที่ความถี่ใช้งาน Uplink 1885MHz -1900MHz และช่วงความถี่ Downlink 1965MHz -1980MHz โดยเลือกทดลองวัดค่าคุณสมบัติต่างๆที่ความถี่ 1885MHz,1900MHz,1965MHz และ 1980MHz

โดยทำการวัดค่าคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศแถวลำดับของโมโนโพลยาทิตบนแผ่นระนาบกราวด์ ที่ละหนึ่งด้าน หรือหนึ่งทิศทาง ในขณะที่สามด้านที่เหลือได้ทำการต่อ TerminateLoad 50 Ω เพื่อให้สายอากาศ 3 ด้านที่ไม่ได้ทำการป้อน เกิดการแมทซ์ซึ่ง

จากการทดสอบค่า SWR ของสายอากาศแถวลำดับของโมนิโพลยาकिनบนแผ่นระนาบกราวด์ ด้านที่ 2 (ที่มุม 90 องศา)



รูปที่ 4.4 ค่า SWR ด้านที่ 2 ที่มุม 90 องศา จากเครื่อง Network Analyzer

สรุปผลการทดสอบด้านที่ 2 ได้ค่า SWR ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

ความถี่ 1885MHz มีค่า SWR = 1.5712 :1

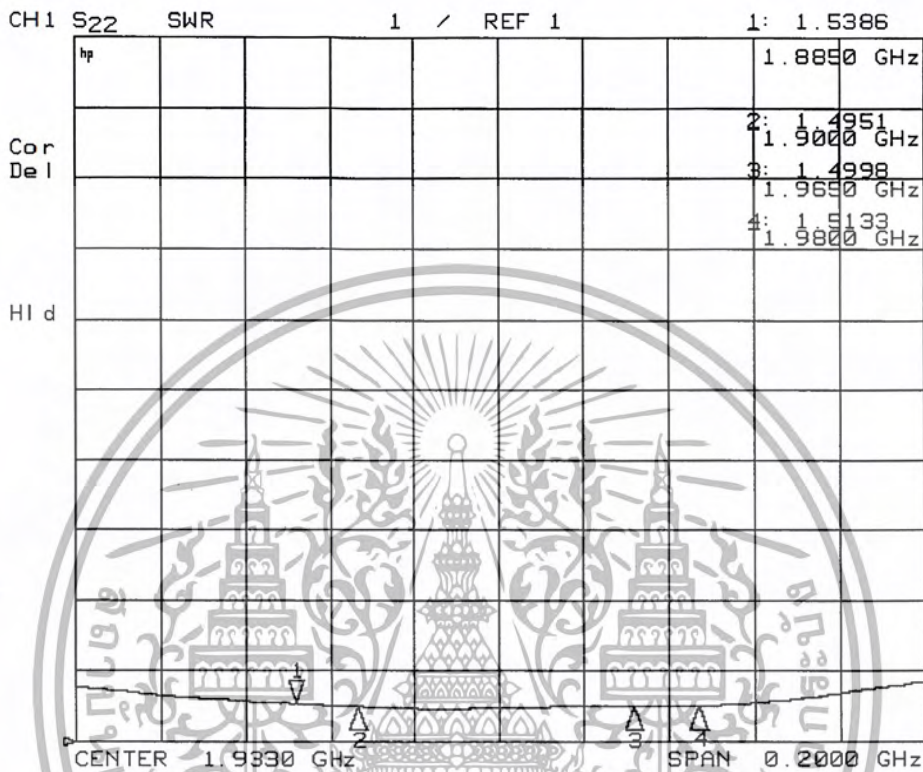
ความถี่ 1900MHz มีค่า SWR = 1.4936 :1

ความถี่ 1965MHz มีค่า SWR = 1.5466 :1

ความถี่ 1980MHz มีค่า SWR = 1.6386 :1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบค่า SWR ของสายอากาศแถวลำดับของโมโนโพลยาทิกบินแผ่นระนาบกรวด ด้านที่ 3 (ที่มุม 180 องศา)



รูปที่ 4.5 ค่า SWR ด้านที่ 3 ที่มุม 180 องศา จากเครื่อง Network Analyzer

สรุปผลการทดสอบด้านที่ 3 ได้ค่า SWR ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

ความถี่ 1885MHz มีค่า SWR = 1.5386 :1

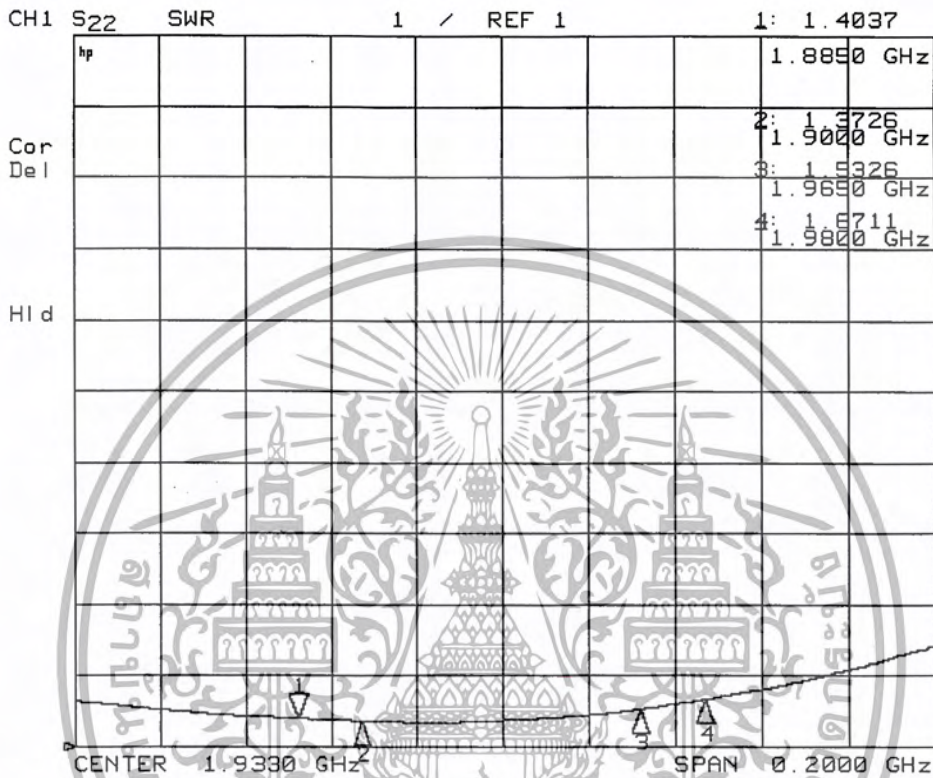
ความถี่ 1900MHz มีค่า SWR = 1.4951 :1

ความถี่ 1965MHz มีค่า SWR = 1.4998 :1

ความถี่ 1980MHz มีค่า SWR = 1.5133 :1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบวัดค่า SWR ของสายอากาศแถวลำดับของโมโนโพลยาทบินแผ่นระนาบกราวด์
ด้านที่ 4 (ที่มุม 270 องศา)



รูปที่ 4.6 ค่า SWR ด้านที่ 4 ที่มุม 270 องศา จากเครื่อง Network Analyzer

สรุปผลการทดสอบด้านที่ 4 ได้ค่า SWR ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

ความถี่ 1885MHz มีค่า SWR = 1.4037 :1

ความถี่ 1900MHz มีค่า SWR = 1.3726 :1

ความถี่ 1965MHz มีค่า SWR = 1.5326 :1

ความถี่ 1980MHz มีค่า SWR = 1.6711 :1

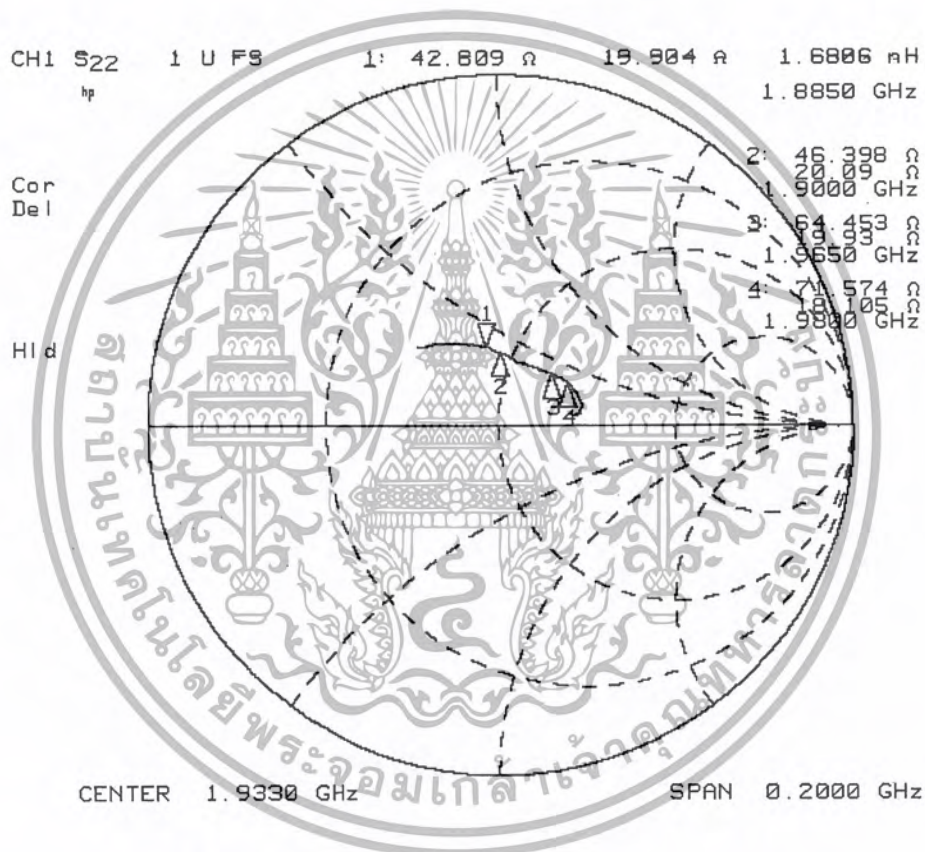
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การวัดค่าอิมพีแดนซ์

การทดสอบวัดค่าอิมพีแดนซ์ เพื่อที่จะนำมาใช้ในการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ให้แมช ซึ่งกับอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ มีค่าเท่ากับ 50Ω

4.1.2.1 ผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์

จากการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศแถวลำดับของโมนโพลยาภิบนแผ่นระนาบ กราวด์ ด้านที่ 1 (ที่มุม 0 องศา)



รูปที่ 4.7 ค่า อิมพีแดนซ์ ด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา จากเครื่อง Network Analyzer

สรุปผลการทดสอบด้านที่ 1 ได้ค่าอิมพีแดนซ์ ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

ความถี่ 1885MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $42.809 + j19.904 \Omega$

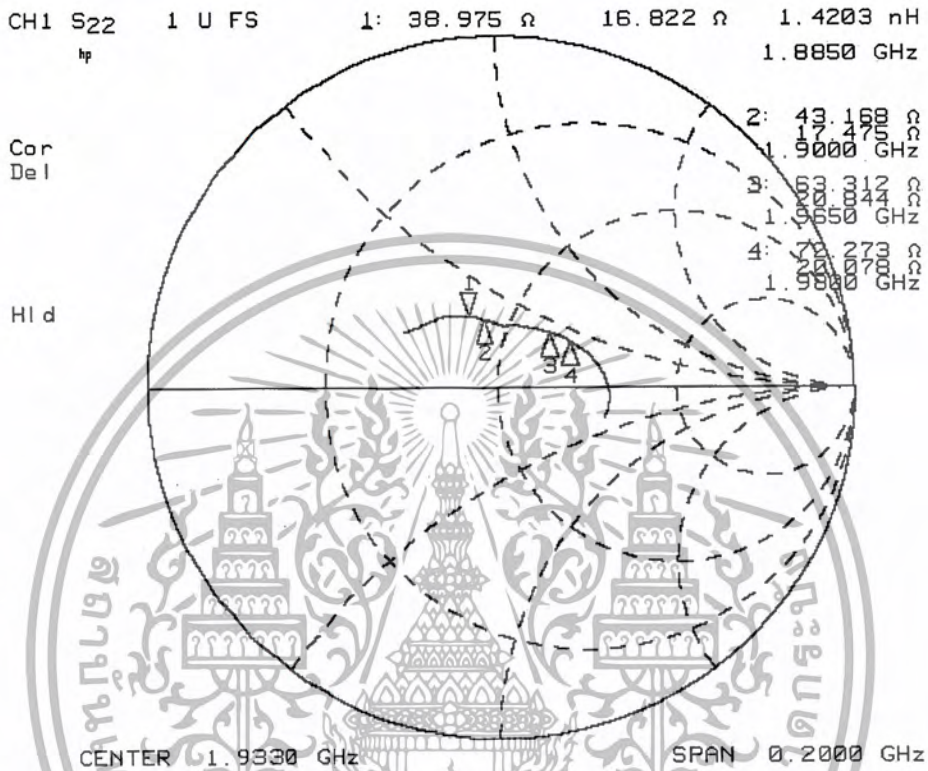
ความถี่ 1900MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $46.398 + j20.090 \Omega$

ความถี่ 1965MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $64.453 + j19.930 \Omega$

ความถี่ 1980MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $71.574 + j18.105 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบค่า อิมพีแดนซ์ ของสายอากาศแถวลำดับของโมนิโพลยาгинบนแผ่นระนาบ
กราวด์ ด้านที่ 2 (ที่มุม 90 องศา)



รูปที่ 4.8 ค่า อิมพีแดนซ์ ด้านที่ 2 ที่ มุม 90 องศา จากเครื่อง Network Analyzer

สรุปผลการทดสอบด้านที่ 2 ได้ค่าอิมพีแดนซ์ ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

ความถี่ 1885MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $38.975 + j16.822 \Omega$

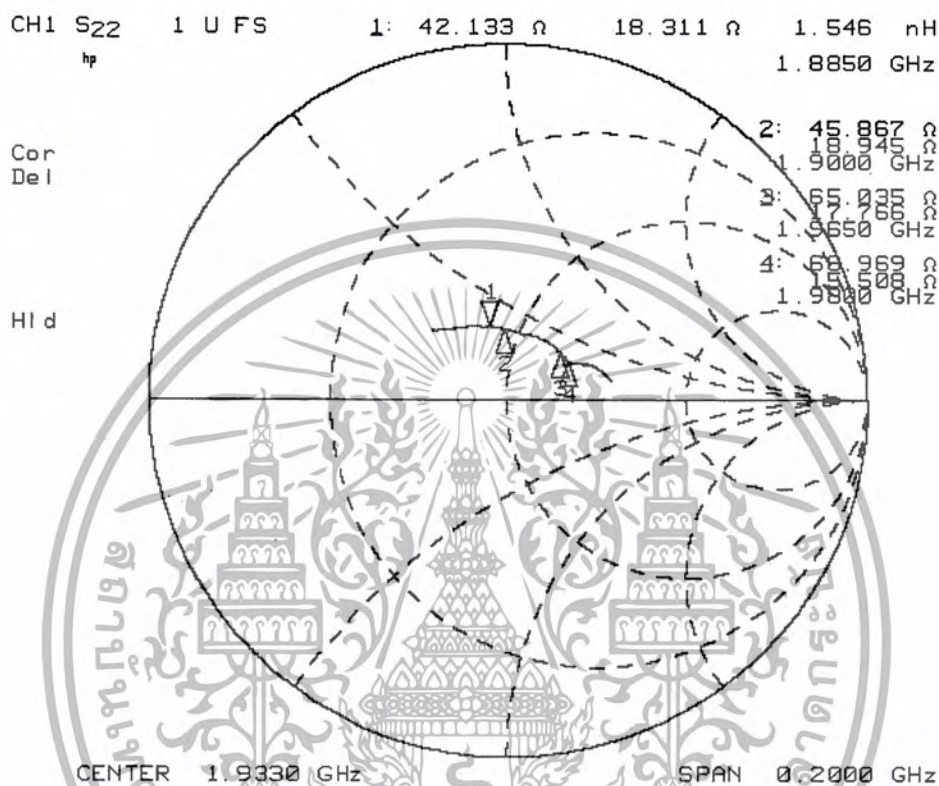
ความถี่ 1900MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $43.168 + j17.475 \Omega$

ความถี่ 1965MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $63.312 + j20.844 \Omega$

ความถี่ 1980MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $72.273 + j20.078 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบวัดค่า อิมพีแดนซ์ ของสายอากาศแถวลำดับของโมนโพลยาภิบนแผ่นระนาบ
กราวด์ ด้านที่ 3 (ที่มุม 180 องศา)



รูปที่ 4.9 ค่าอิมพีแดนซ์ ด้านที่ 3 ที่มุม 180 องศา จากเครื่อง Network Analyzer

สรุปผลการทดสอบด้านที่ 3 ได้ค่าอิมพีแดนซ์ ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

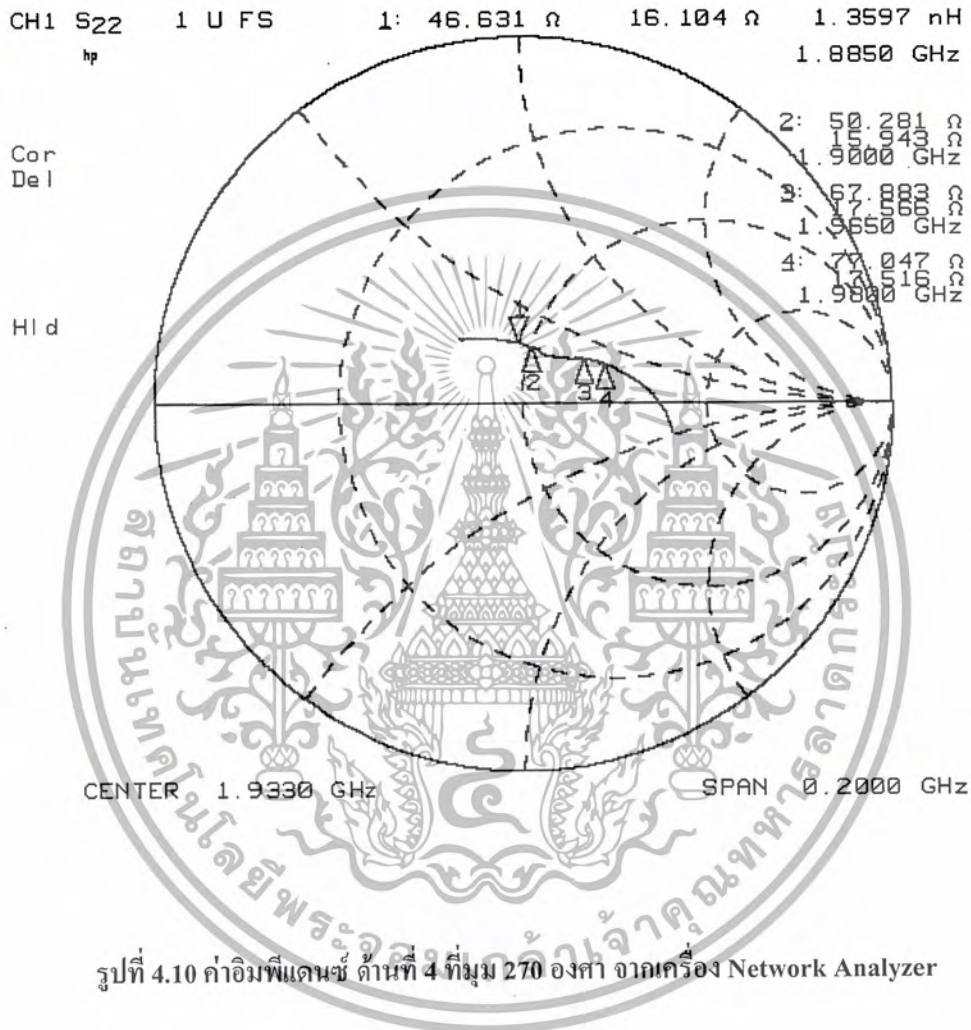
ความถี่ 1885MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $42.133 + j18.311 \Omega$

ความถี่ 1900MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $45.867 + j18.945 \Omega$

ความถี่ 1965MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $65.035 + j17.766 \Omega$

ความถี่ 1980MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $68.969 + j15.508 \Omega$

จากการทดสอบค่า อิมพีแดนซ์ ของสายอากาศแถวลำดับของโมโนโพลยาгинบนแผ่นระนาบ
กราวด์ ด้านที่ 4 (ที่มุม 270 องศา)



สรุปผลการทดลองด้านที่ 4 ได้ค่าอิมพีแดนซ์ ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

ความถี่ 1885MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $46.631 + j16.104 \Omega$

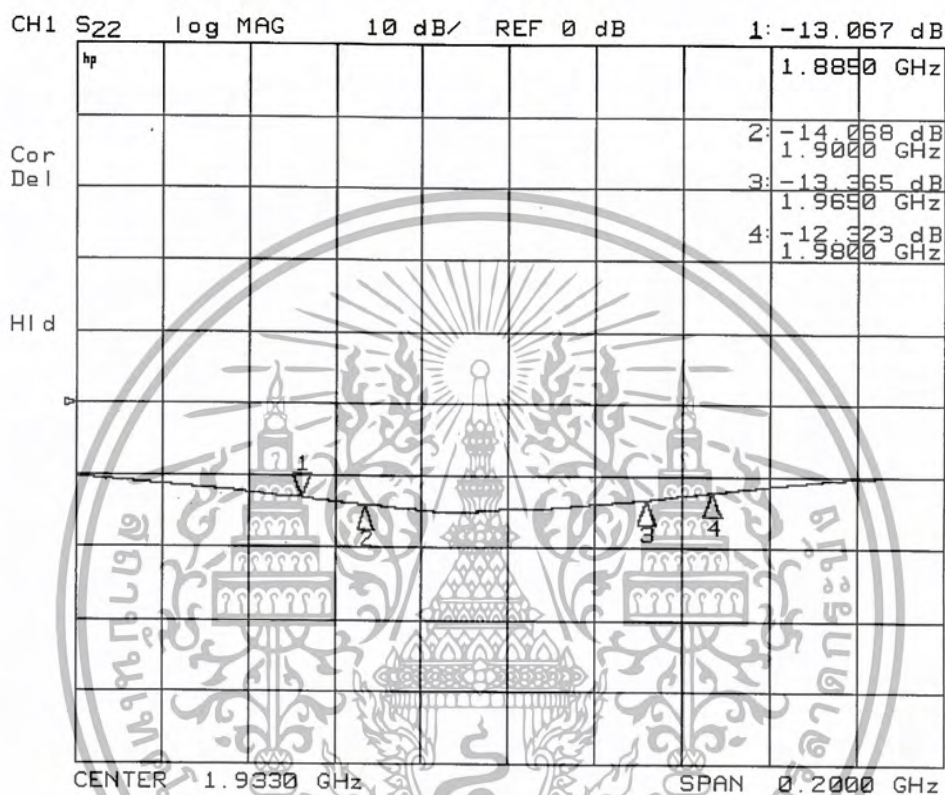
ความถี่ 1900MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $50.281 + j15.943 \Omega$

ความถี่ 1965MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $67.883 + j17.566 \Omega$

ความถี่ 1980MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $77.047 + j17.516 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ของสายอากาศแฉวลำดับของโมโนโพลย
กิบนแผ่นระนาบกราวด์ ด้านที่ 2 (ที่มุม 90 องศา)



รูปที่ 4.12 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ด้านที่ 2 ที่มุม 90 องศา จากเครื่อง Network Analyzer

สรุปผลการทดสอบได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับด้านที่ 2 ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

ความถี่ 1885MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -13.067 dB

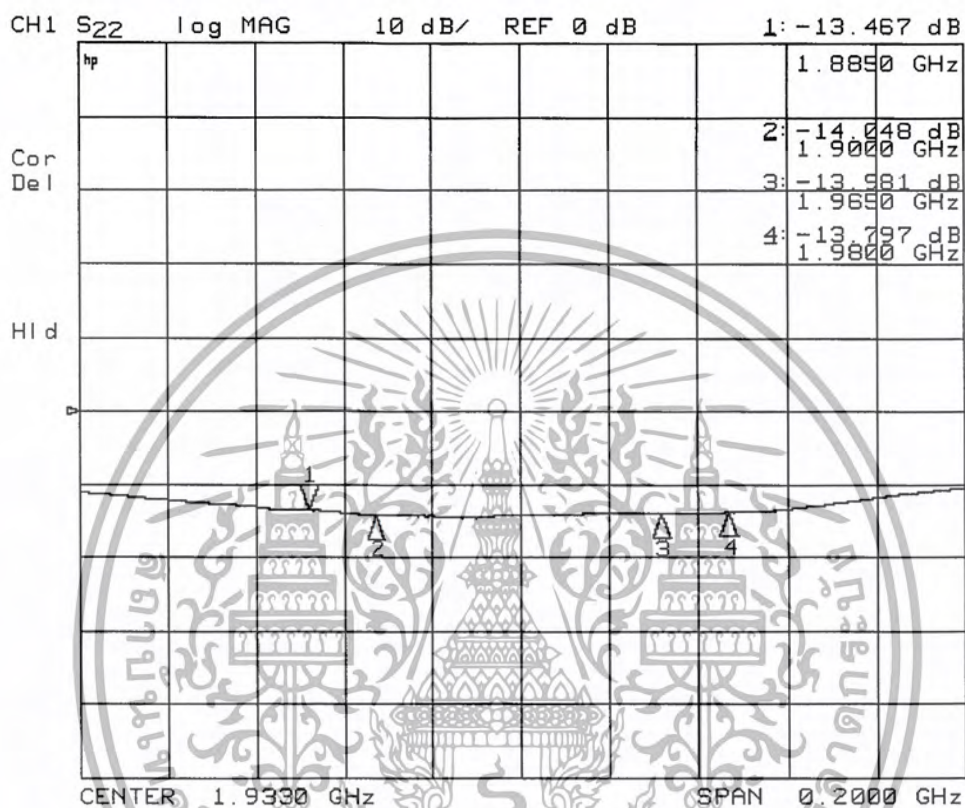
ความถี่ 1900MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -14.068 dB

ความถี่ 1965MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -13.365 dB

ความถี่ 1980MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -12.323 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ของสายอากาศแถวลำดับของโมโนโพลยา
กิบนแผ่นระนาบกราวด์ ด้านที่ 3 (ที่มุม 180 องศา)



รูปที่ 4.13 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ด้านที่ 3 ที่มุม 180 องศา จากเครื่อง Network Analyzer

สรุปผลการทดสอบได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับด้านที่ 3 ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

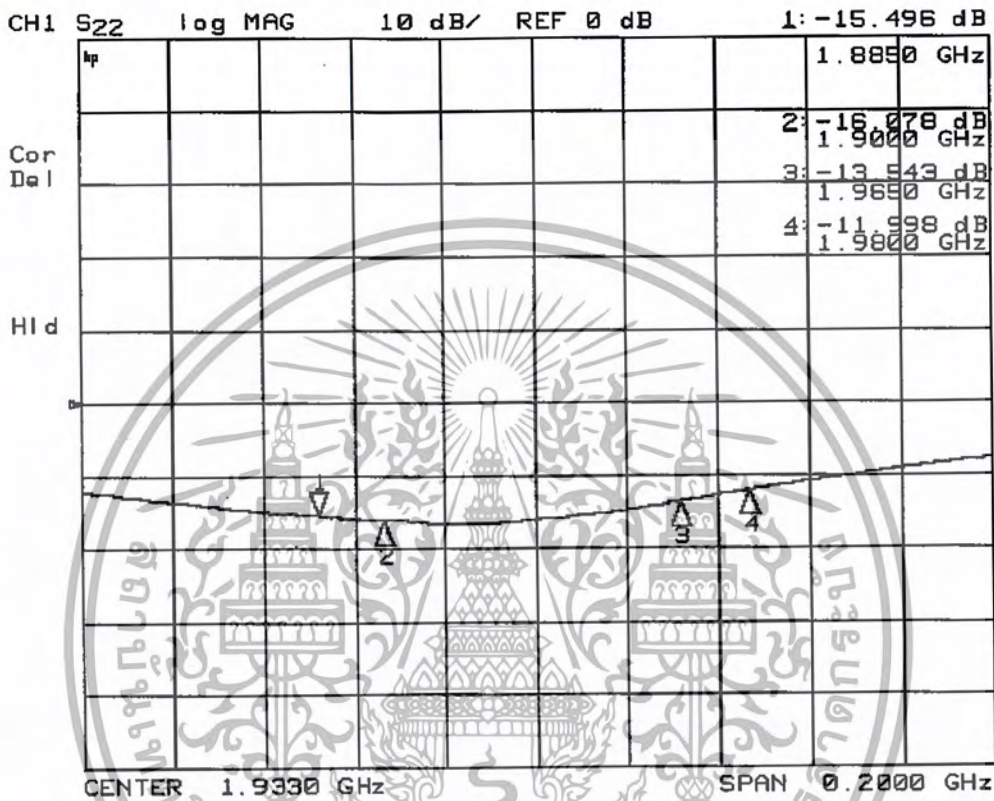
ความถี่ 1885MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -13.467 dB

ความถี่ 1900MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -14.048 dB

ความถี่ 1965MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -13.981 dB

ความถี่ 1980MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -13.797 dB

จากการทดสอบวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ของสายอากาศแถวลำดับของโมโนโพลยาгинบนแผ่นระนาบกราวด์ ด้านที่ 4 (ที่มุม 270 องศา)



รูปที่ 4.14 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ด้านที่ 4 ที่มุม 270 องศา จากเครื่อง Network Analyzer

สรุปผลการทดสอบได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับด้านที่ 4 ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

ความถี่ 1885MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -15.496 dB

ความถี่ 1900MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -16.078 dB

ความถี่ 1965MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -13.543 dB

ความถี่ 1980MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -11.998 dB

4.2 การสร้างสายอากาศจากการ Optimizer โดยใช้โปรแกรม NEC 2

โดยมีจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศทั้งหมด 37 องค์ประกอบวางอยู่บนแผ่นระนาบกราวด์ โดยแบ่งเป็นสายอากาศโมโนโพลยาคี 4 ทิศทางวางตามแกน X, -X, Y, -Y ซึ่งสายอากาศโมโนโพลยาคีจะมีจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศแต่ละทิศทาง 10 องค์ประกอบ โดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น(Reflector)ร่วมกันทุกทิศทาง ซึ่งผลที่ได้จากการออกแบบโดย วิธีการOptimizer จากโปรแกรม NEC 2 คือ

- ความยาวของตัวสะท้อนคลื่นเท่ากับ 10.796 cm.
- ความยาวของตัวนำคลื่นเท่ากับ 2.867 cm.
- ความยาวของตัวป้อนเท่ากับ 3.479 cm.
- ระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบเท่ากับ 2.8 cm.
- องค์ประกอบของสายอากาศแต่ละตัวมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.001m เท่ากันทุกองค์ประกอบ



รูปที่ 4.15 รูปแบบของสายอากาศจากการ Optimizer โดยใช้โปรแกรม NEC 2

จากนั้นนำสายอากาศจากรูปที่ 4.15 ต่อเข้ากับเครื่อง Network analyzer เพื่อวัดค่า อัตราส่วนคลื่นนิ่ง(SWR ,Standing Wave Ratio), อิมพีแดนซ์, ค่าการสูญเสียย้อนกลับ(Retrurn Loss) และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น(Pattern) ที่ความถี่ใช้งาน Uplink 1885MHz -1900MHz และช่วงความถี่ Downlink 1965MHz -1980MHz โดยเลือกทดสอบค่าคุณสมบัติต่างๆที่ความถี่ 1885MHz,1900MHz,1965MHz และ 1980MHz เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับสายอากาศที่สร้างโดยวิธีการเลือกค่า

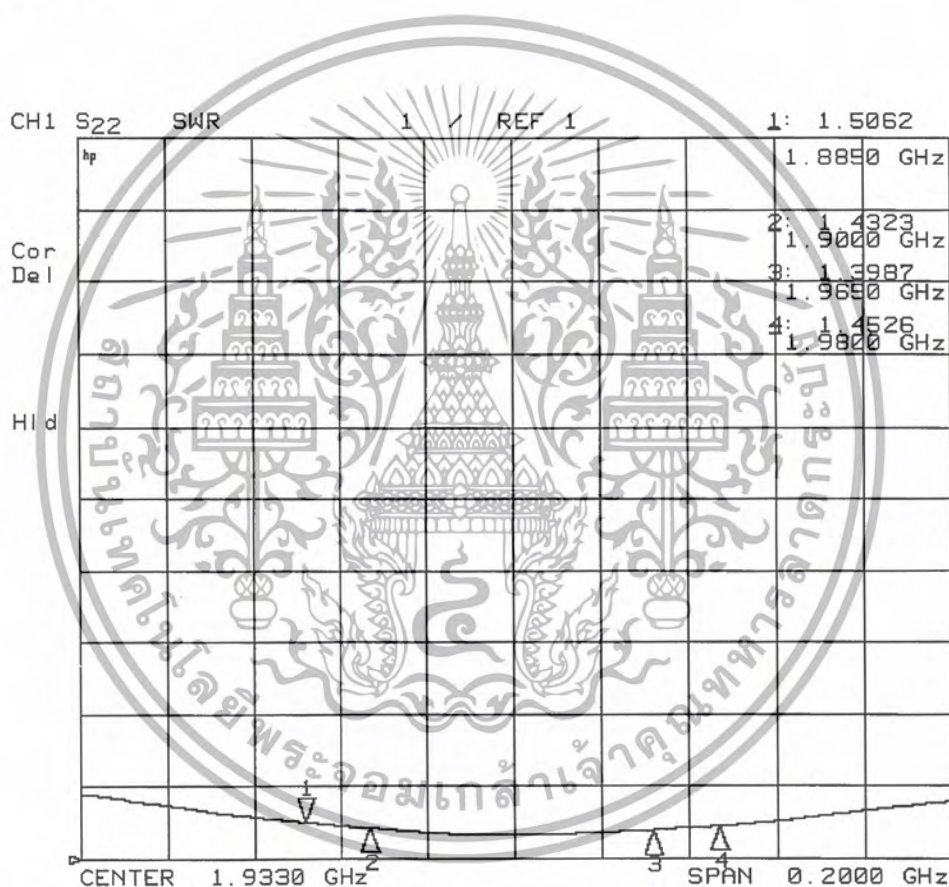
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทำการวัดค่าคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศแถวลำดับของโมโนโพลยาภิบนแผ่นระนาบกราวด์ ทีละหนึ่งด้าน หรือหนึ่งทิศทาง ในขณะที่สามด้านที่เหลือได้ทำการต่อ TerminateLoad 50Ω เพื่อให้สายอากาศ 3 ด้านที่ไม่ได้ทำการป้อน เกิดการแมทชิง

4.2.1 การวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) ของสายอากาศจากการ Optimizer โดยใช้โปรแกรม NEC 2

4.2.1.1 ผลการทดสอบค่า SWR ของสายอากาศจากการ Optimizer โดยใช้โปรแกรม NEC 2

จากการทดสอบค่า SWR ของสายอากาศแถวลำดับของโมโนโพลยาภิบนแผ่นระนาบกราวด์ด้านที่ 1 (มุม 0 องศา)



รูปที่ 4.16 ค่า SWR ด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศาโดยวิธีการ Optimizer

สรุปผลการทดสอบด้านที่ 1 ได้ค่า SWR ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

ความถี่ 1885MHz มีค่า SWR = 1.5062 :1

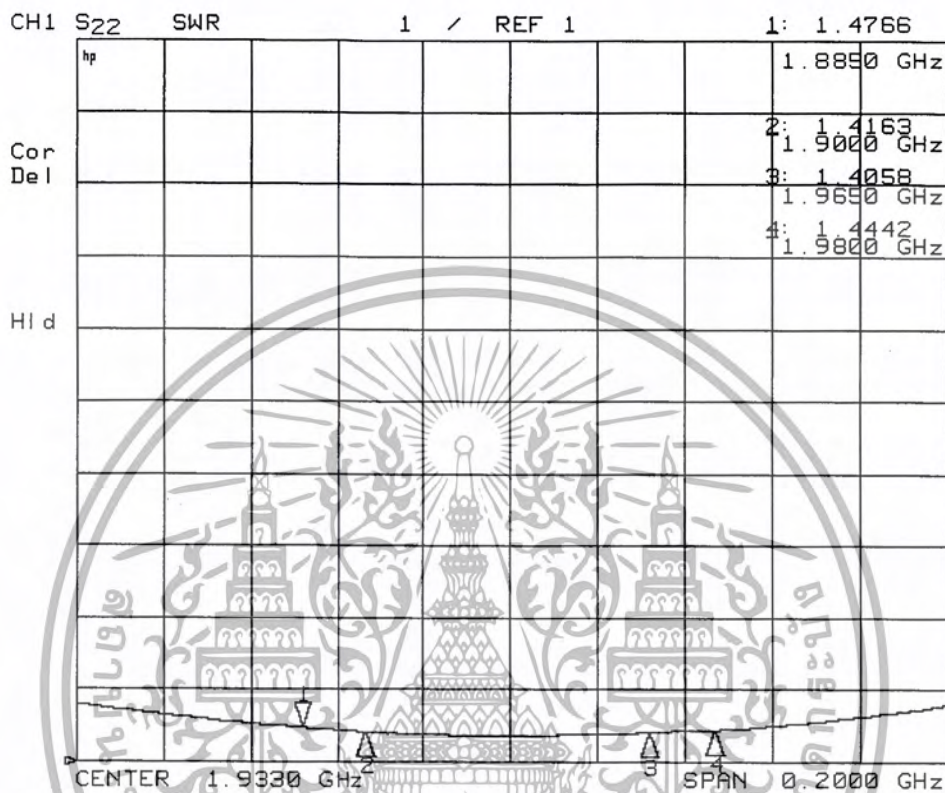
ความถี่ 1900MHz มีค่า SWR = 1.4323 :1

ความถี่ 1965MHz มีค่า SWR = 1.3987 :1

ความถี่ 1980MHz มีค่า SWR = 1.4526 :1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบวัดค่า SWR ของสายอากาศแถวลำดับของโมนิโพลยาकिनบนแผ่นระนาบกราวด์
ด้านที่ 2 (ที่มุม 90 องศา)



รูปที่ 4.17 ค่า SWR ด้านที่ 2 ที่มุม 90 องศา โดยวิธีการ Optimizer

สรุปผลการทดสอบด้านที่ 2 ได้ค่า SWR ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

ความถี่ 1885MHz มีค่า SWR = 1.4766:1

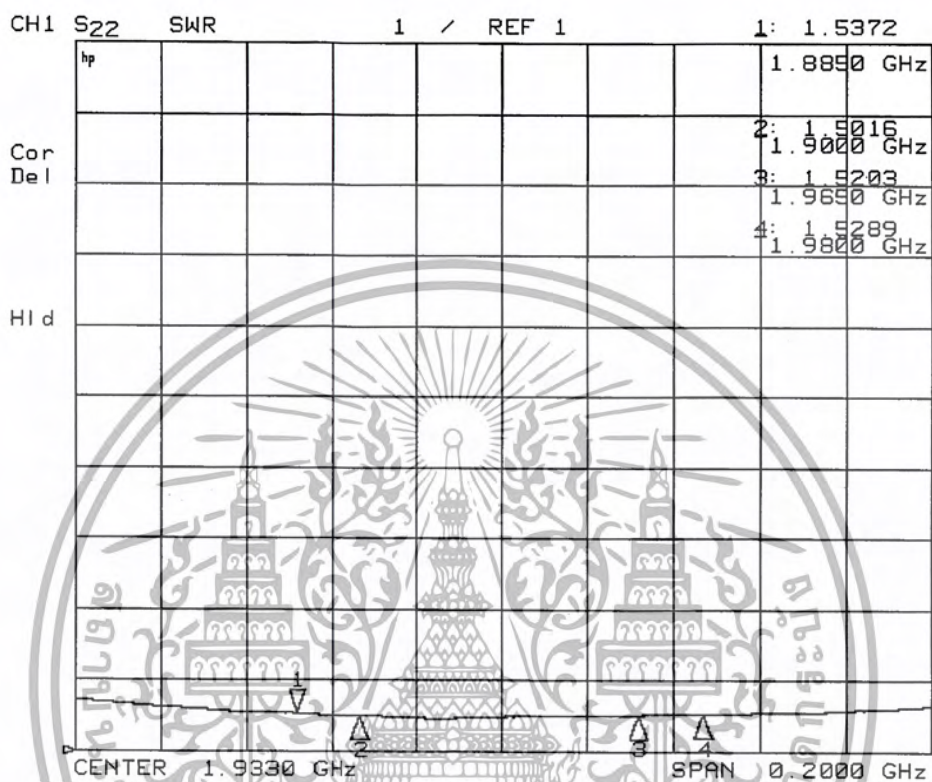
ความถี่ 1900MHz มีค่า SWR = 1.4163 :1

ความถี่ 1965MHz มีค่า SWR = 1.4058 :1

ความถี่ 1980MHz มีค่า SWR = 1.4442 :1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบวัดค่า SWR ของสายอากาศแถวลำดับของโมนิโพลยาภิบนแผ่นระนาบกราวด์
ด้านที่ 3 (ที่มุม 180 องศา)



รูปที่ 4.18 ค่า SWR ด้านที่ 3 ที่มุม 180 องศา โดยวิธีการ Optimizer

สรุปผลการทดสอบด้านที่ 3 ได้ค่า SWR ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

ความถี่ 1885MHz มีค่า SWR = 1.5372 :1

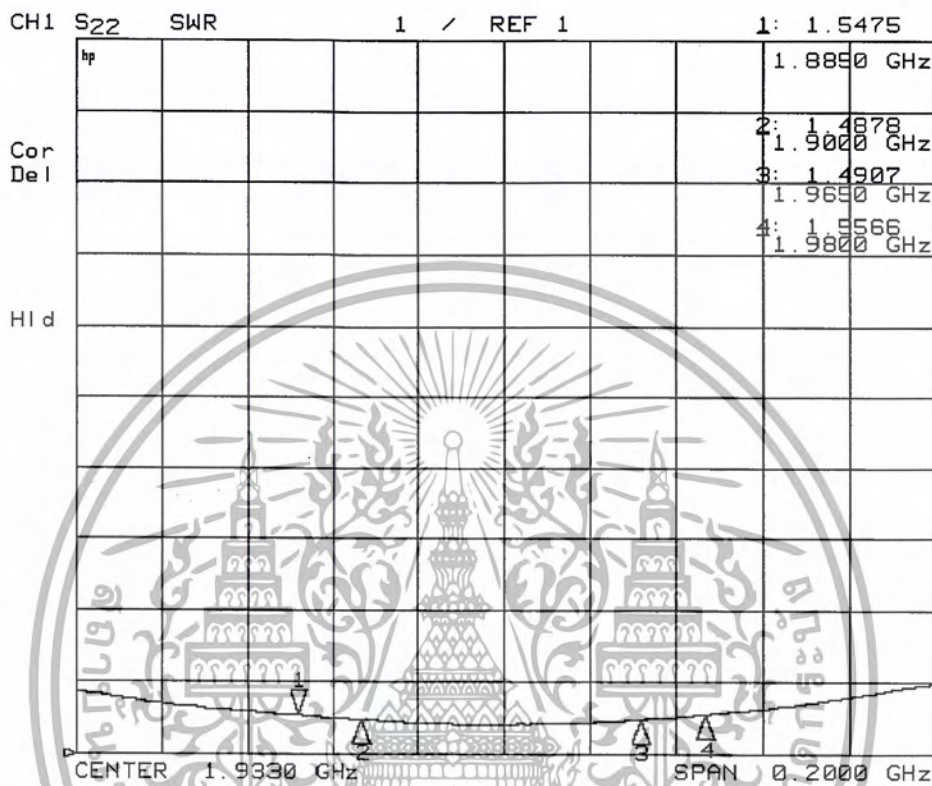
ความถี่ 1900MHz มีค่า SWR = 1.5016 :1

ความถี่ 1965MHz มีค่า SWR = 1.5203 :1

ความถี่ 1980MHz มีค่า SWR = 1.5289 :1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบวัดค่า SWR ของสายอากาศแถวลำดับของโมนิโพลยาकिनบนแผ่นระนาบกราวด์
ด้านที่ 4 (ที่มุม 270 องศา)



รูปที่ 4.19 ค่า SWR ด้านที่ 4 ที่มุม 270 องศาโดยวิธีการOptimizer

สรุปผลการทดสอบด้านที่ 4 ได้ค่า SWR ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

ความถี่ 1885MHz มีค่า SWR = 1.5475 : 1

ความถี่ 1900MHz มีค่า SWR = 1.4878 : 1

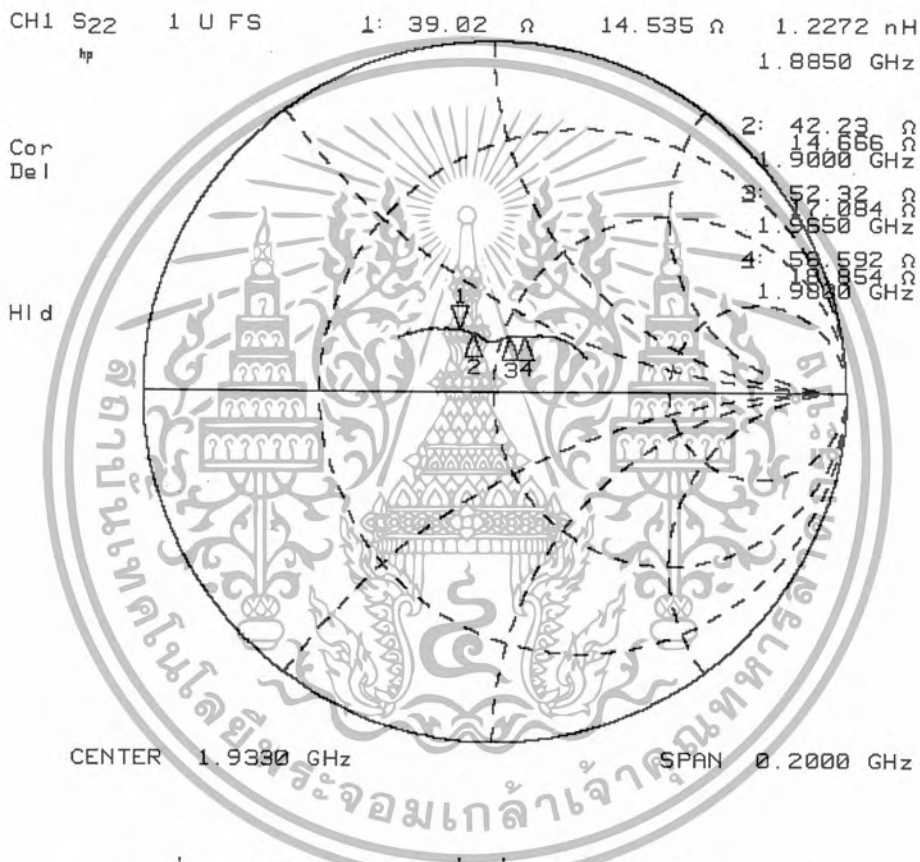
ความถี่ 1965MHz มีค่า SWR = 1.4907 : 1

ความถี่ 1980MHz มีค่า SWR = 1.5566 : 1

4.2.2 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศจากการ Optimizer โดยใช้โปรแกรม NEC 2

4.2.2.1 ผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ จากการ Optimizer โดยใช้โปรแกรม NEC 2

จากการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศแถวลำดับของโมโนโพลยาภิบนแผ่นระนาบกราวด์ ด้านที่ 1 (ที่มุม 0 องศา)



รูปที่ 4.20 ค่า อิมพีแดนซ์ ด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา โดยวิธีการOptimizer

สรุปผลการทดสอบด้านที่ 1 ได้ค่าอิมพีแดนซ์ ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

ความถี่ 1885MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $39.020 + j14.535 \Omega$

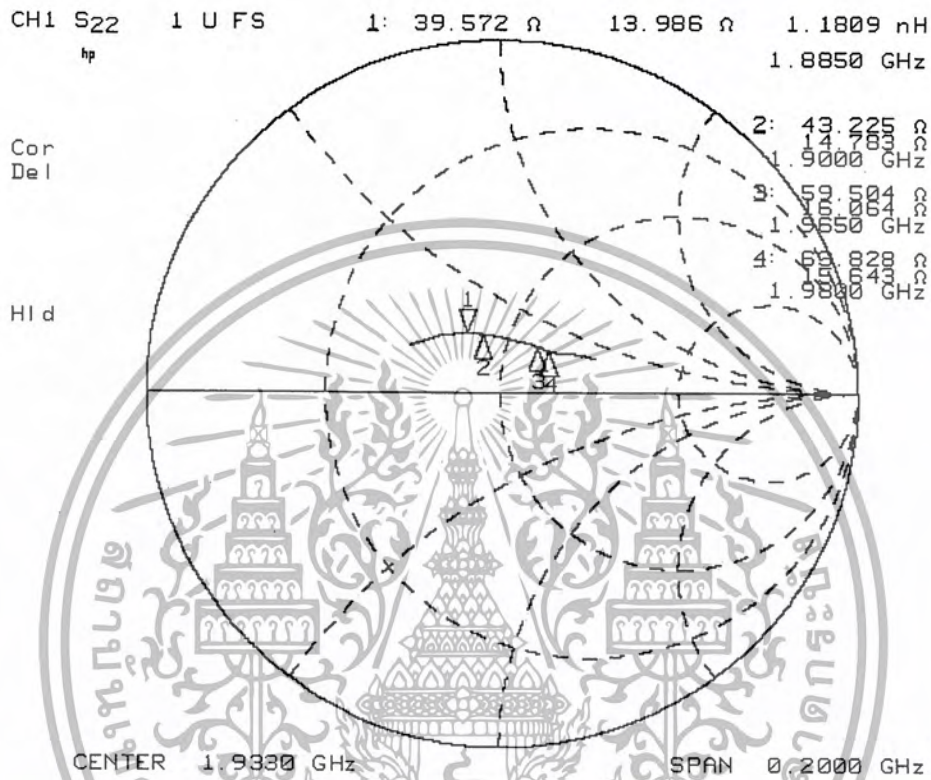
ความถี่ 1900MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $42.230 + j14.666 \Omega$

ความถี่ 1965MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $52.320 + j17.084 \Omega$

ความถี่ 1980MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $58.592 + j18.854 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบค่า อิมพีแดนซ์ ของสายอากาศแฉกลำดับของโมโนโพลยาภิบนแผ่นระนาบ
กราวด์ ด้านที่ 2 (ที่มุม 90 องศา)



รูปที่ 4.21 ค่าอิมพีแดนซ์ ด้านที่ 2 ที่มุม 90 องศา โดยวิธีการOptimizer

สรุปผลการทดสอบด้านที่ 2 ได้ค่าอิมพีแดนซ์ ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

ความถี่ 1885MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $39.572 + j13.986 \Omega$

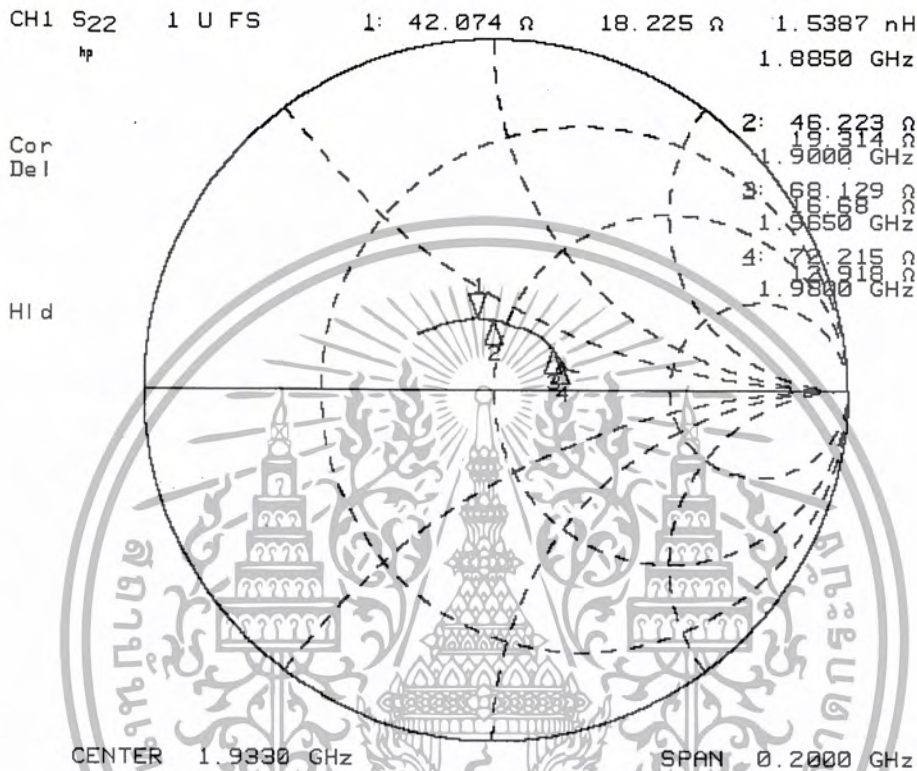
ความถี่ 1900MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $43.225 + j14.783 \Omega$

ความถี่ 1965MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $59.504 + j16.064 \Omega$

ความถี่ 1980MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $66.828 + j15.643 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบวัดค่า อิมพีแดนซ์ ของสายอากาศแฉวลำดับของโมนโพลยากิบนแผ่นระนาบ
กราวด์ ด้านที่ 3 (ทึ่มม 180 องศา)



รูปที่ 4.22 ค่าอิมพีแดนซ์ ด้านที่ 3 ทึ่มม 180 องศา โดยวิธีการOptimizer

สรุปผลการทดสอบด้านที่ 3 ได้ค่าอิมพีแดนซ์ ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

ความถี่ 1885MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $42.074 + j18.225 \Omega$

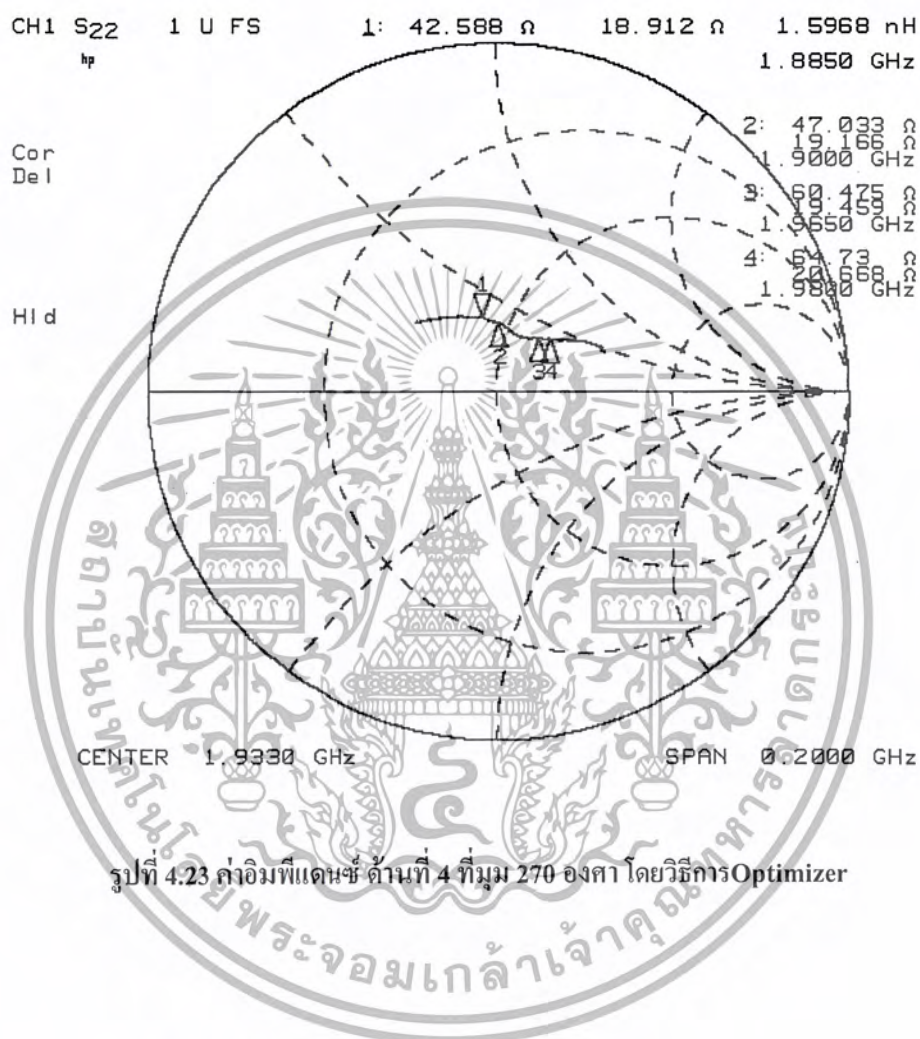
ความถี่ 1900MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $46.223 + j19.314 \Omega$

ความถี่ 1965MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $68.129 + j16.680 \Omega$

ความถี่ 1980MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $72.215 + j12.918 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบค่า อิมพีแดนซ์ ของสายอากาศแถวลำดับของโมนิโพลยาภิบนแผ่นระนาบ
กราวด์ ด้านที่ 4 (ที่มุม 270 องศา)



สรุปผลการทดสอบด้านที่ 4 ได้ค่าอิมพีแดนซ์ ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

ความถี่ 1885MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $42.588 + j18.912 \Omega$

ความถี่ 1900MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $47.033 + j19.166 \Omega$

ความถี่ 1965MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $60.475 + j19.459 \Omega$

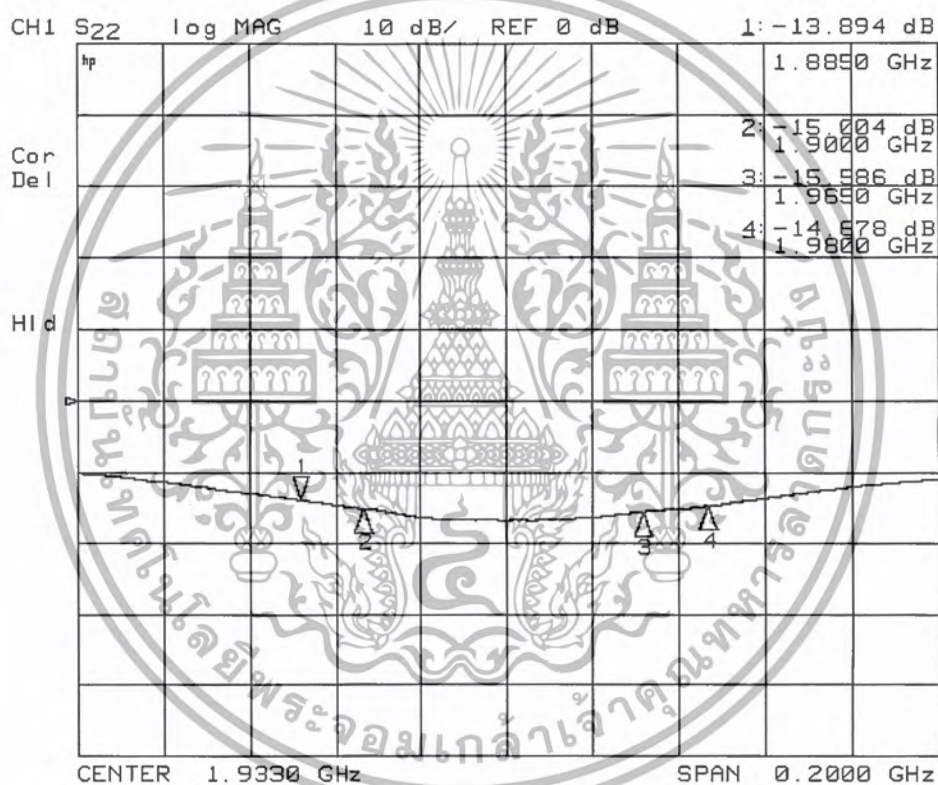
ความถี่ 1980MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ = $64.730 + j20.668 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) ของสายอากาศจากการ Optimizer โดยใช้โปรแกรม NEC 2

4.2.3.1 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Retrun Loss) จากการ Optimizer โดยใช้โปรแกรม NEC 2

จากการทดสอบค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ของสายอากาศแถวลำดับของโมโนโพลยา กิบนแผ่นระนาบกราวด์ ด้านที่ 1 (ที่มุม 0 องศา)



รูปที่ 4.24 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา โดยวิธีการOptimizer

สรุปผลการทดสอบได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับด้านที่ 1 ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

ความถี่ 1885MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -13.894 dB

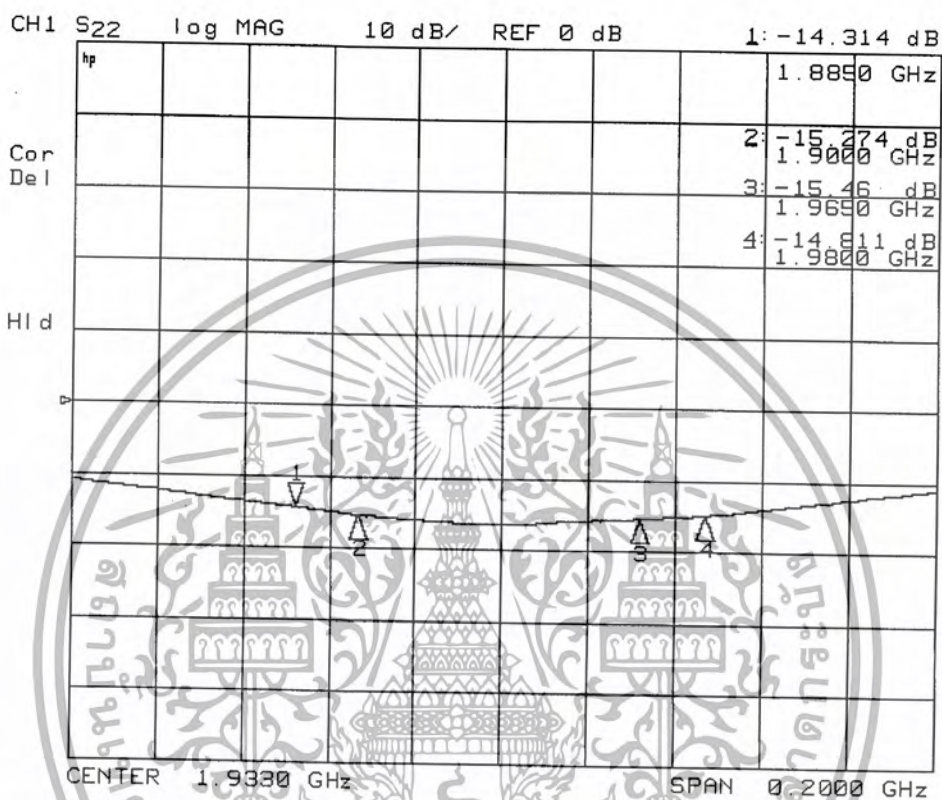
ความถี่ 1900MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -15.004 dB

ความถี่ 1965MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -15.586 dB

ความถี่ 1980MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -14.678 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ของสายอากาศแถวลำดับของโมนโพลยา
กิบนแผ่นระนาบกราวด์ ด้านที่ 2 (ที่มุม 90 องศา)



รูปที่ 4.25 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ด้านที่ 2 ที่มุม 90 องศา โดยวิธีการOptimizer

สรุปผลการทดสอบได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับด้านที่ 2 ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

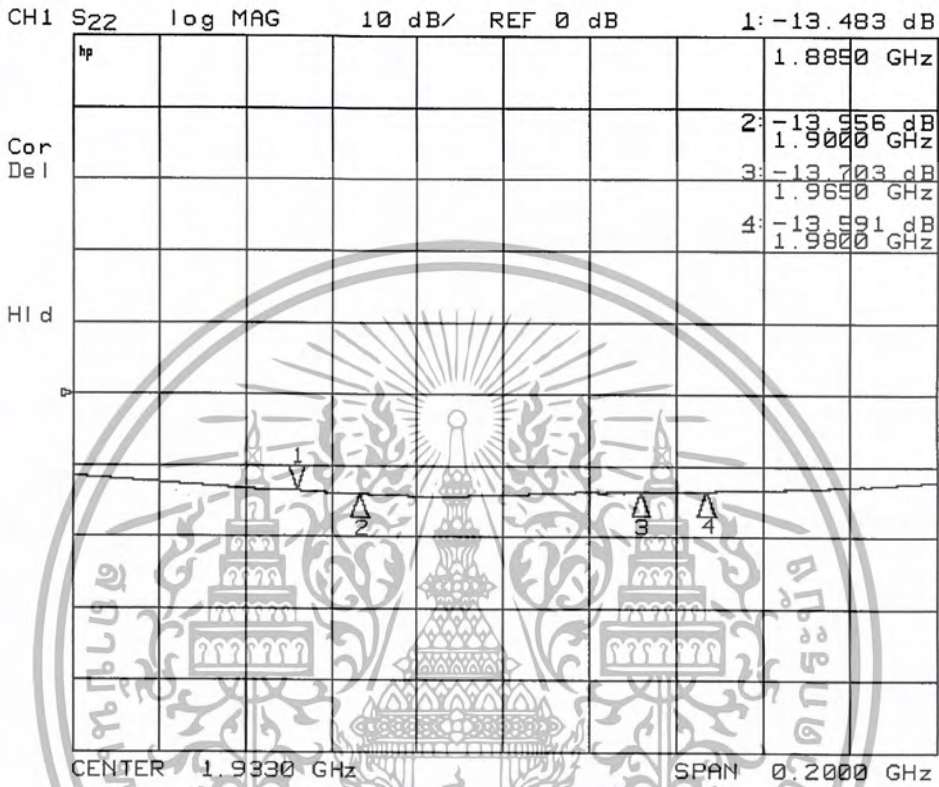
ความถี่ 1885MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -14.314 dB

ความถี่ 1900MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -15.274 dB

ความถี่ 1965MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -15.460 dB

ความถี่ 1980MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -14.811 dB

จากการทดสอบค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ของสายอากาศแถวลำดับของโมนิโพลยา
กิบนแผ่นระนาบกราวด์ ด้านที่ 3 (ที่มุม 180 องศา)



รูปที่ 4.26 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ด้านที่ 3 ที่มุม 180 องศา โดยวิธีการOptimizer

สรุปผลการทดสอบได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับด้านที่ 3 ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

ความถี่ 1885MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -13.483 dB

ความถี่ 1900MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -13.956 dB

ความถี่ 1965MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -13.703 dB

ความถี่ 1980MHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ = -13.591 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในโครงงานนี้ กำหนดให้สายอากาศแถวลำดับของโมโนโพลยาคิบนแผ่นระนาบกราวด์เป็นสายอากาศทางด้านรับ และใช้สายอากาศแบบวงแหวนมาช่วยเป็นสายอากาศทางด้านส่ง ทำการทดสอบในห้องทดสอบการสะท้อนต่ำ เพื่อป้องกันผลกระทบจากสภาพแวดล้อม โดยทำการหมุนสายอากาศทางด้านรับครั้งละ 5 องศาจนครบ 360 องศา

ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ระยะห่างของสายอากาศส่ง และสายอากาศรับ มีค่าเท่ากับ 5 เมตร โดยพิจารณาจากระยะของสนามระยะไกล(Far Field) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$R \geq 2(Dt + Dr)^2 / \lambda$$

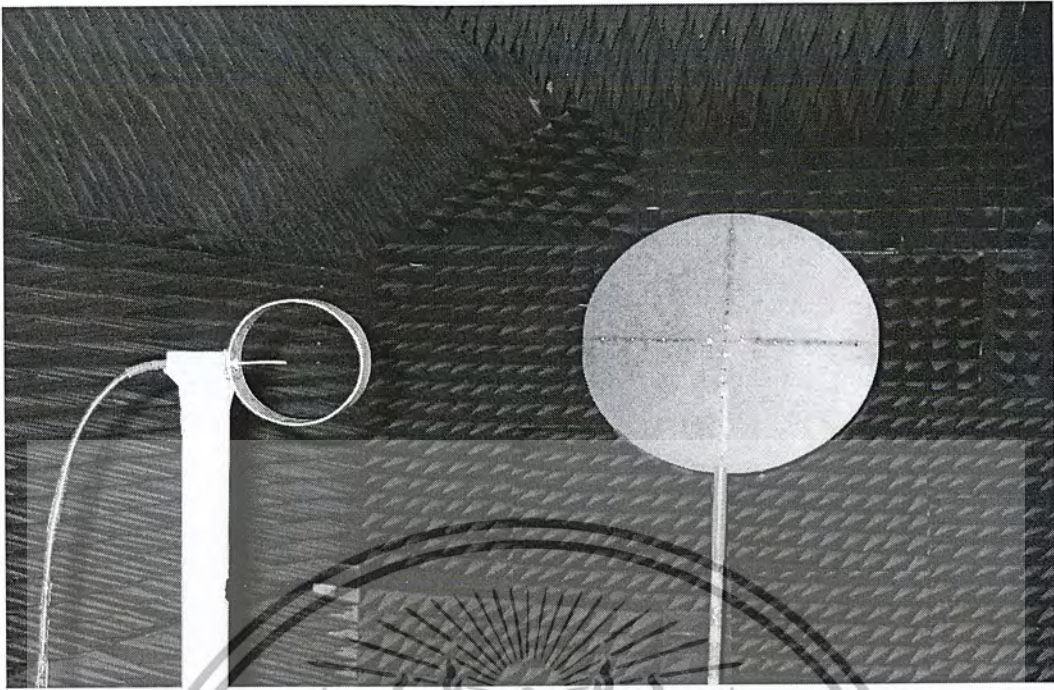
โดยที่ Dt คือมิติที่กว้างที่สุดของสายอากาศด้านส่ง

Dr คือมิติที่กว้างที่สุดของสายอากาศด้านรับ



รูปที่ 4.28 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยก

จากนั้นนำข้อมูลจากการทดสอบ มาทำการพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา ความถี่ 1885MHz

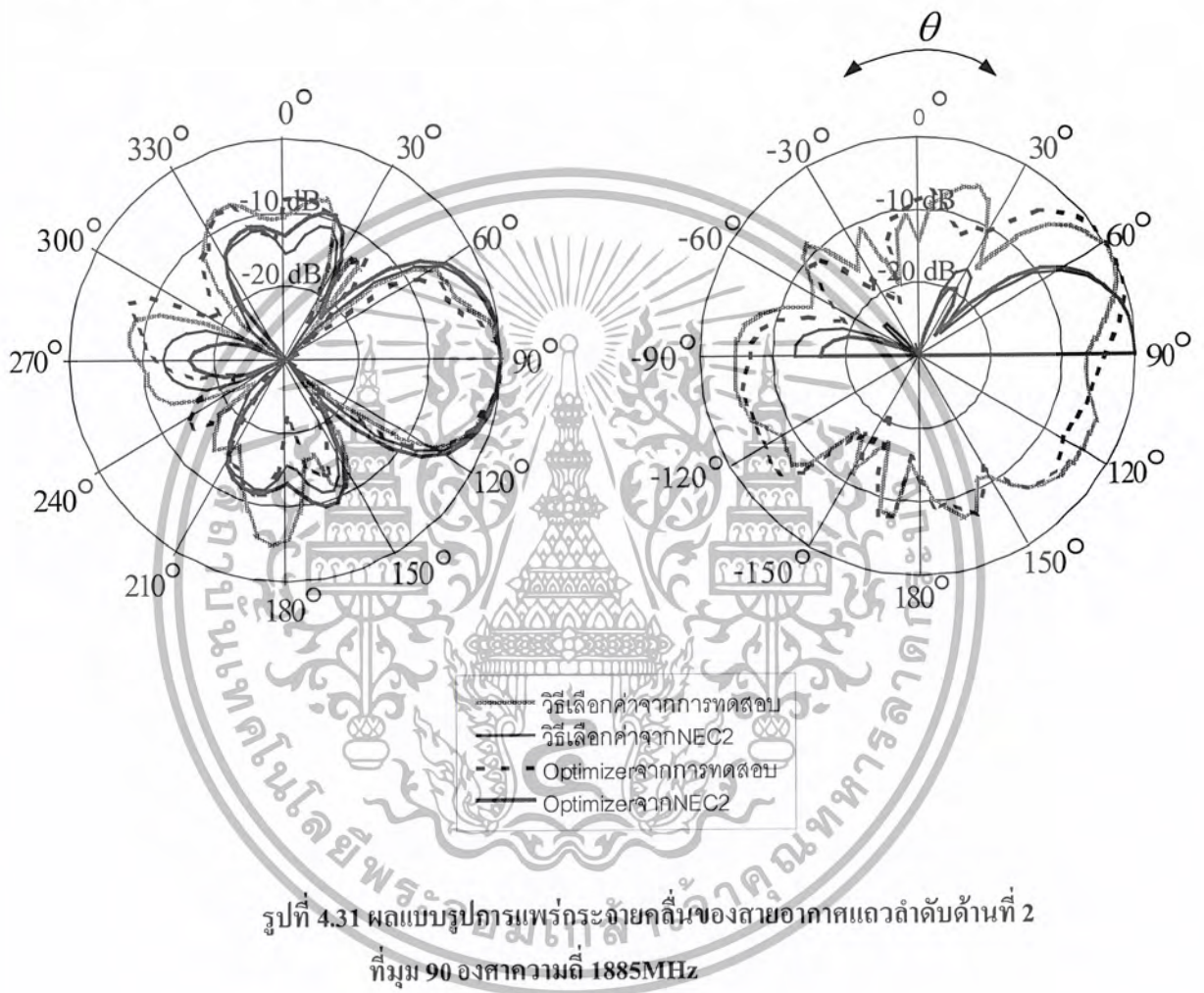


รูปที่ 4.30 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา ความถี่ 1885MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด และมุมยก ด้านที่ 1 ความถี่ 1885MHz ผลมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 โดยมีค่าลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) วัตต์ที่ -3dB ประมาณ 35 องศา

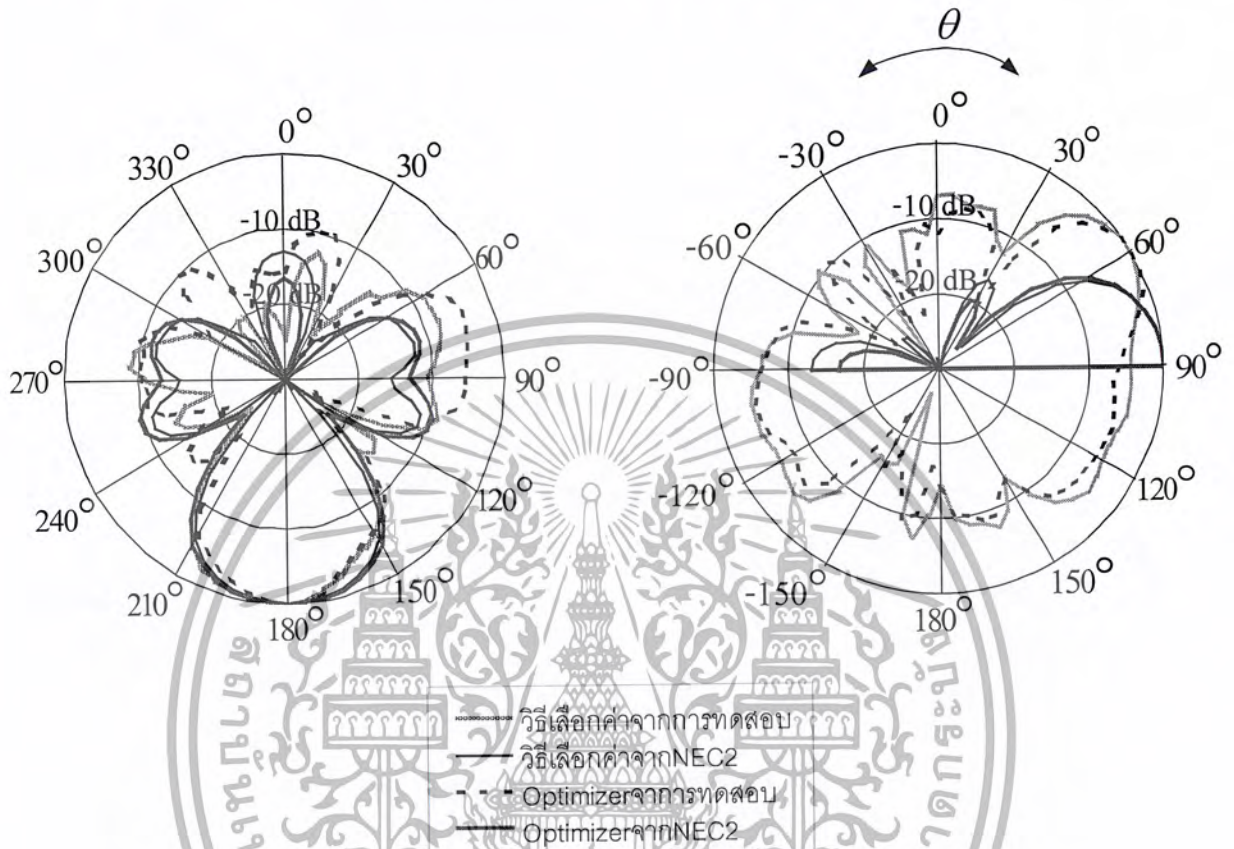
จากนั้นนำข้อมูลจากการทดสอบ มาทำการพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 2 ที่มุม 90 องศา ความถี่ 1885MHz



การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด และมุมยก ด้านที่ 2 ความถี่ 1885MHz ผลมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 โดยมีค่าลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) วัตต์ที่ -3dB ประมาณ 40 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำข้อมูลจากการทดสอบ มาทำการพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 3 ที่มุม 180 องศา ความถี่ 1885MHz

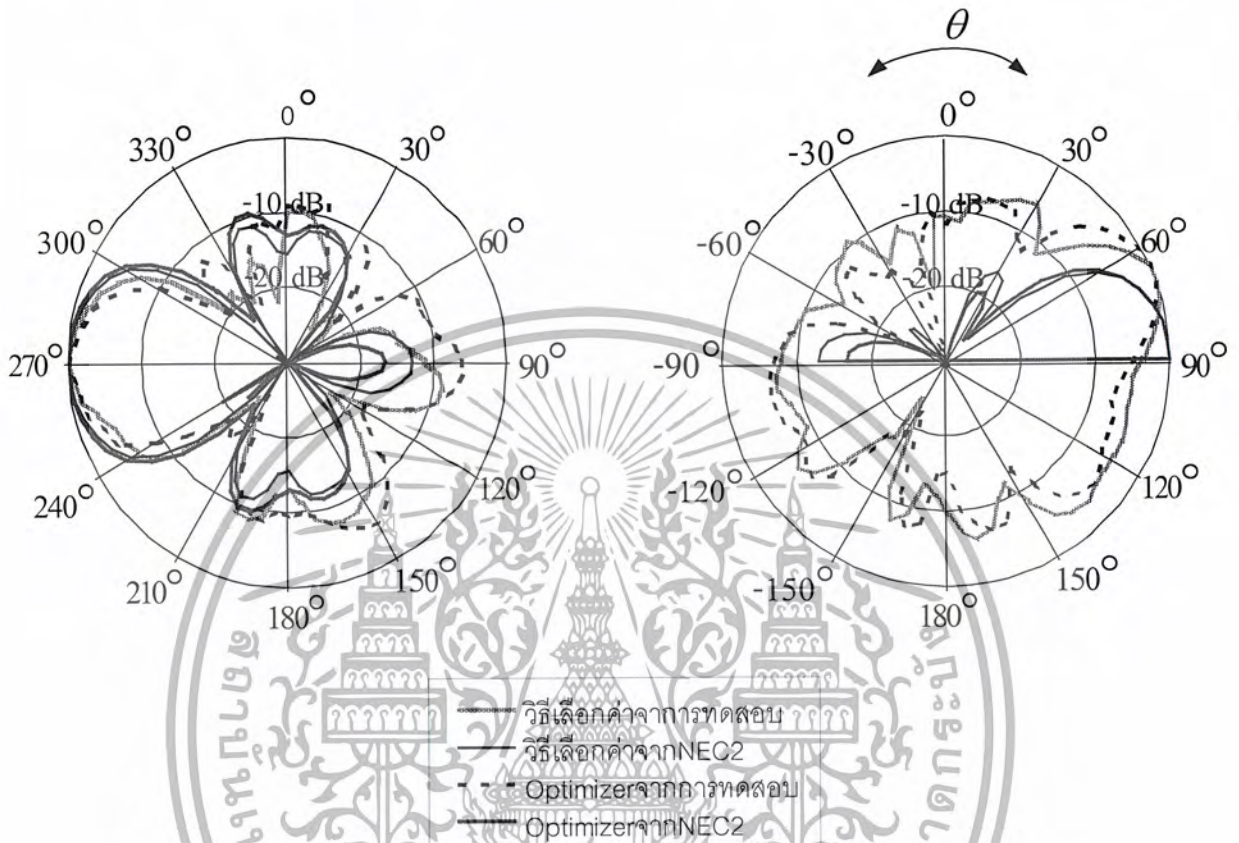


รูปที่ 4.32 ผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 3 ที่มุม 180 องศา ความถี่ 1885MHz

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด และมุมยก ด้านที่ 3 ความถี่ 1885MHz ผลมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 โดยมีค่าลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) วัตต์ที่ -3dB ประมาณ 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำข้อมูลจากการทดสอบ มาทำการพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 4 ที่มุม 270 องศา ความถี่ 1885MHz

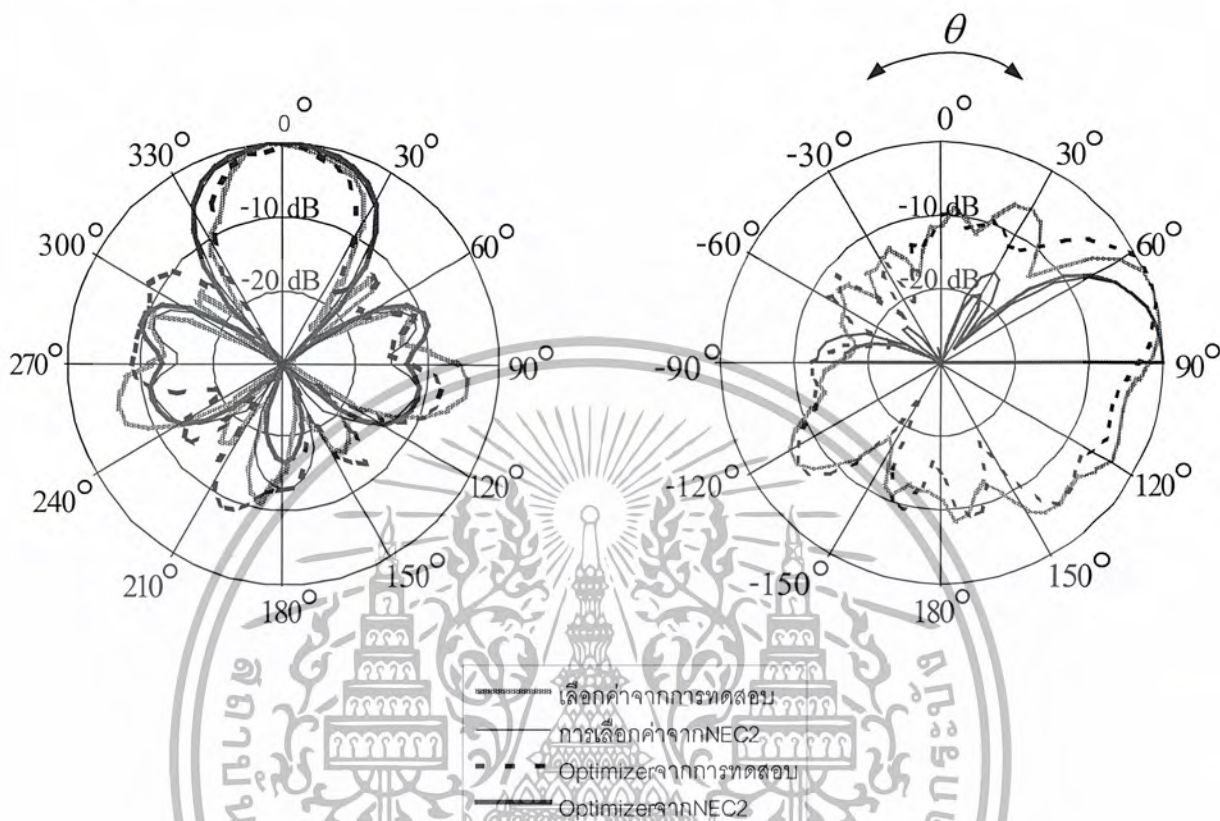


รูปที่ 4.33 ผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 4 ที่มุม 270 องศา ความถี่ 1885MHz

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด และมุมยก ด้านที่ 4 ความถี่ 1885MHz ผลมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 โดยมีค่าลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) วัตต์ -3dB ประมาณ 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

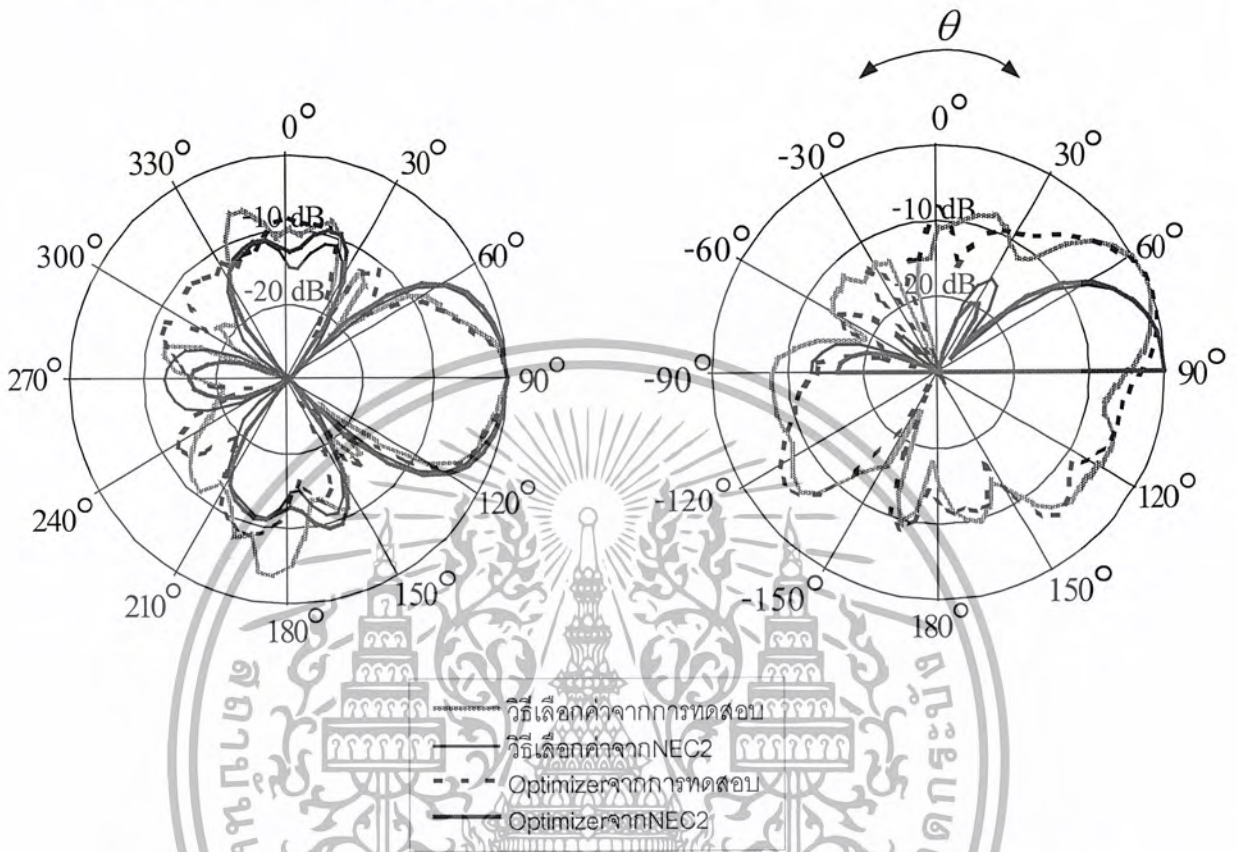
จากนั้นนำข้อมูลจากการทดสอบ มาทำการพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา ความถี่ 1900MHz



รูปที่ 4.34 ผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา ความถี่ 1900MHz

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด และมุมยกด้านที่ 1 ความถี่ 1900MHz ผลมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 โดยมีค่าลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) วัดที่ -3dBประมาณ 45 องศา

จากนั้นนำข้อมูลจากการทดสอบ มาทำการพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 2 ที่มุม 90 องศา ความถี่ 1900MHz

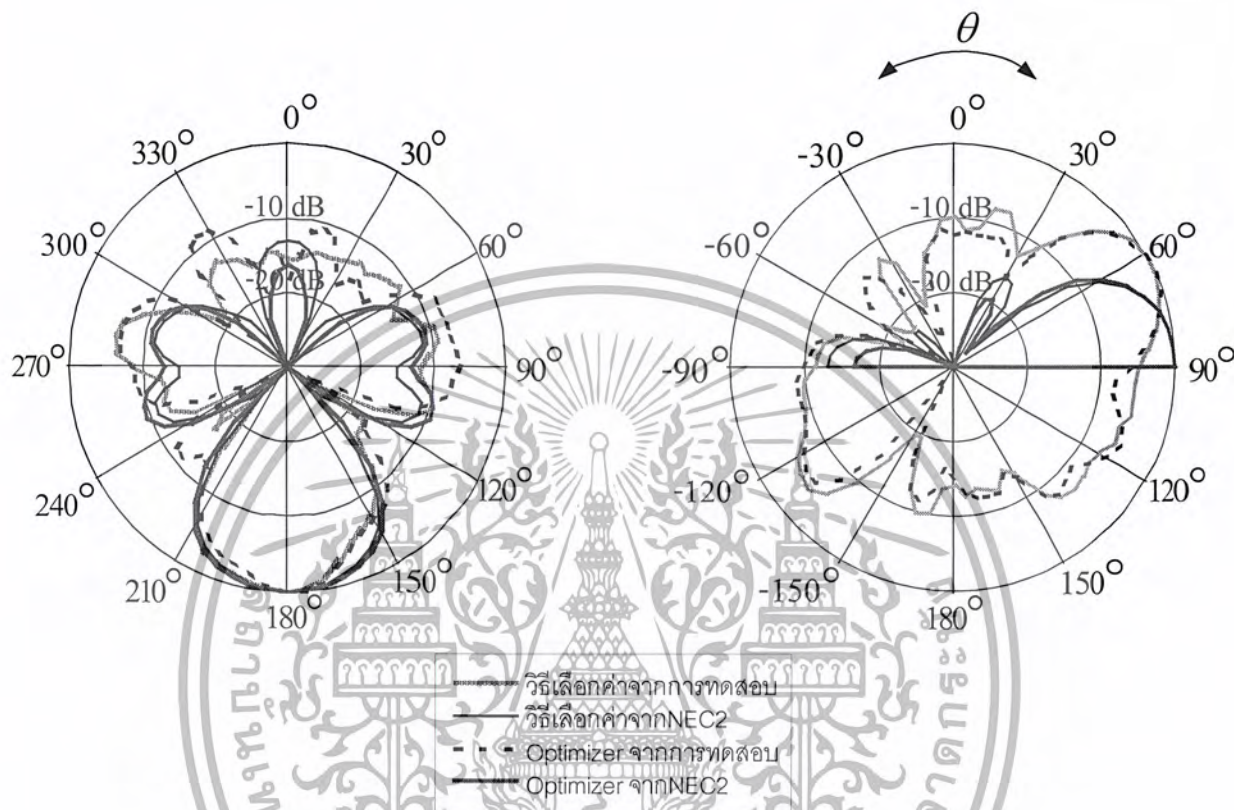


รูปที่ 4.35 แสดงผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 2 ที่มุม 90 องศา ความถี่ 1900MHz

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด และมุมยก ด้านที่ 2 ความถี่ 1900MHz ผลมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 โดยมีค่าลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) วัตต์ที่ -3dB ประมาณ 50 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำข้อมูลจากการทดสอบ มาทำการพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 3 ที่มีมุม 180 องศา ความถี่ 1900MHz

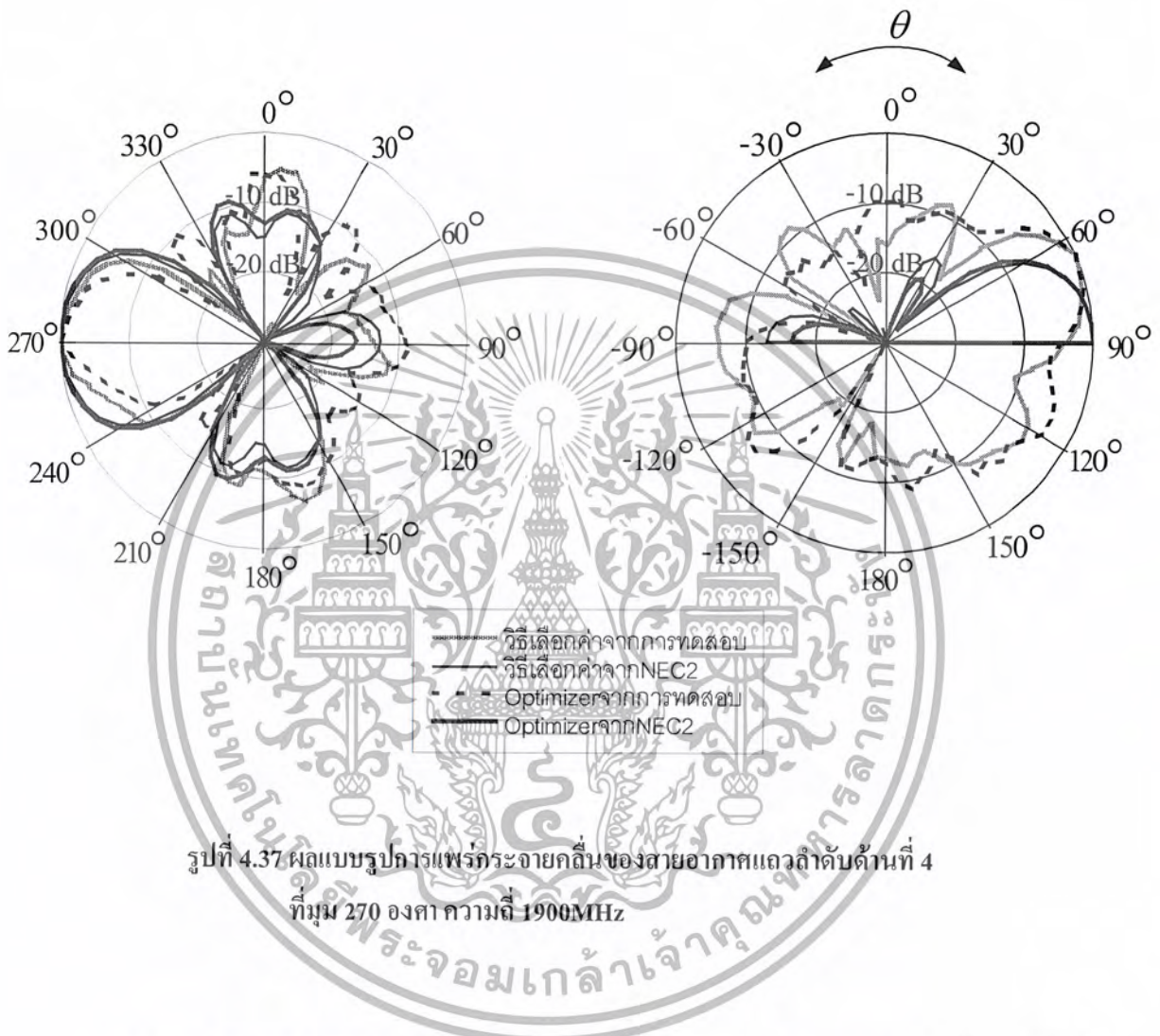


รูปที่ 4.36 ผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 3 ที่มีมุม 180 องศา ความถี่ 1900MHz

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด และมุมยก ด้านที่ 3 ความถี่ 1900MHz ผลมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 โดยมีค่าคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) วัดที่ -3dB ประมาณ 48 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำข้อมูลจากการทดสอบ มาทำการพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 4 ที่มุม 270 องศา ความถี่ 1900MHz

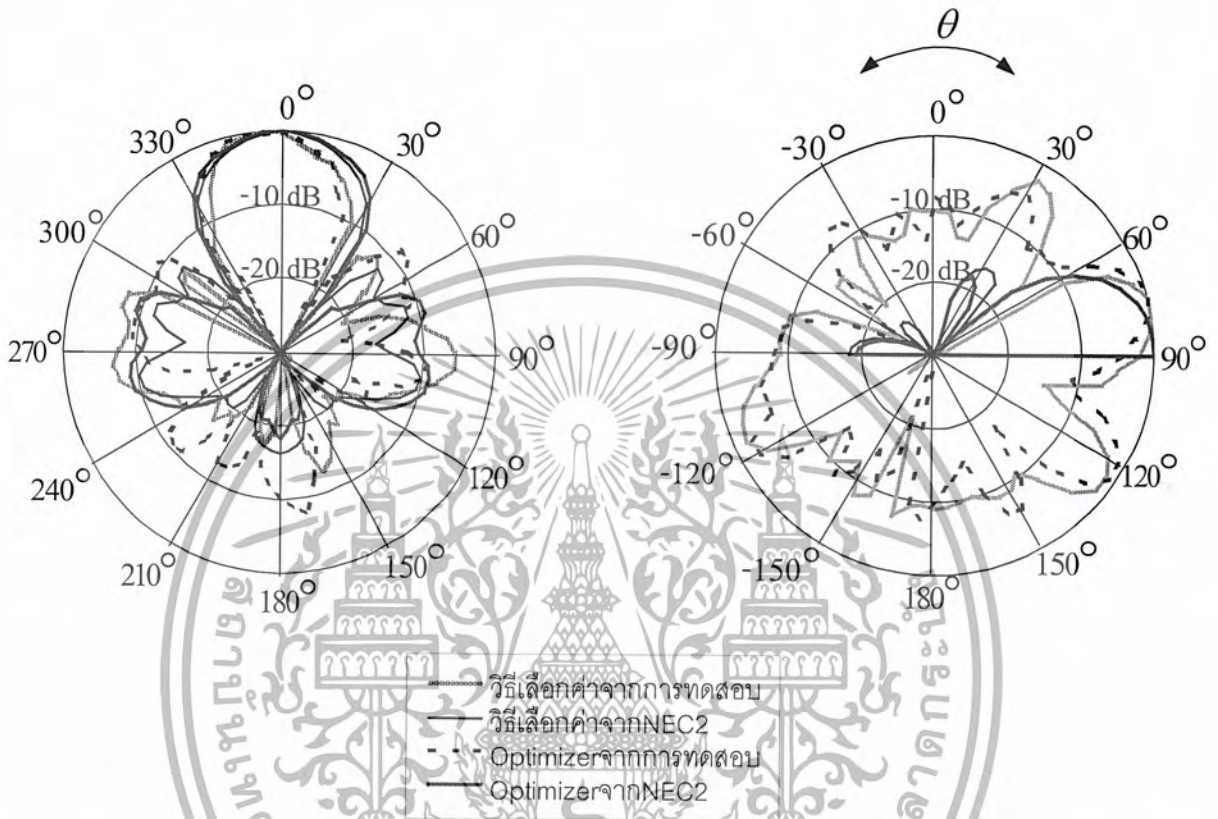


รูปที่ 4.37 ผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 4 ที่มุม 270 องศา ความถี่ 1900MHz

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด และมุมยก ด้านที่ 4 ความถี่ 1900MHz ผลมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 โดยมีค่าคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) วัตต์ที่ -3dB ประมาณ 48 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำข้อมูลจากการทดสอบ มาทำการพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา ความถี่ 1965MHz

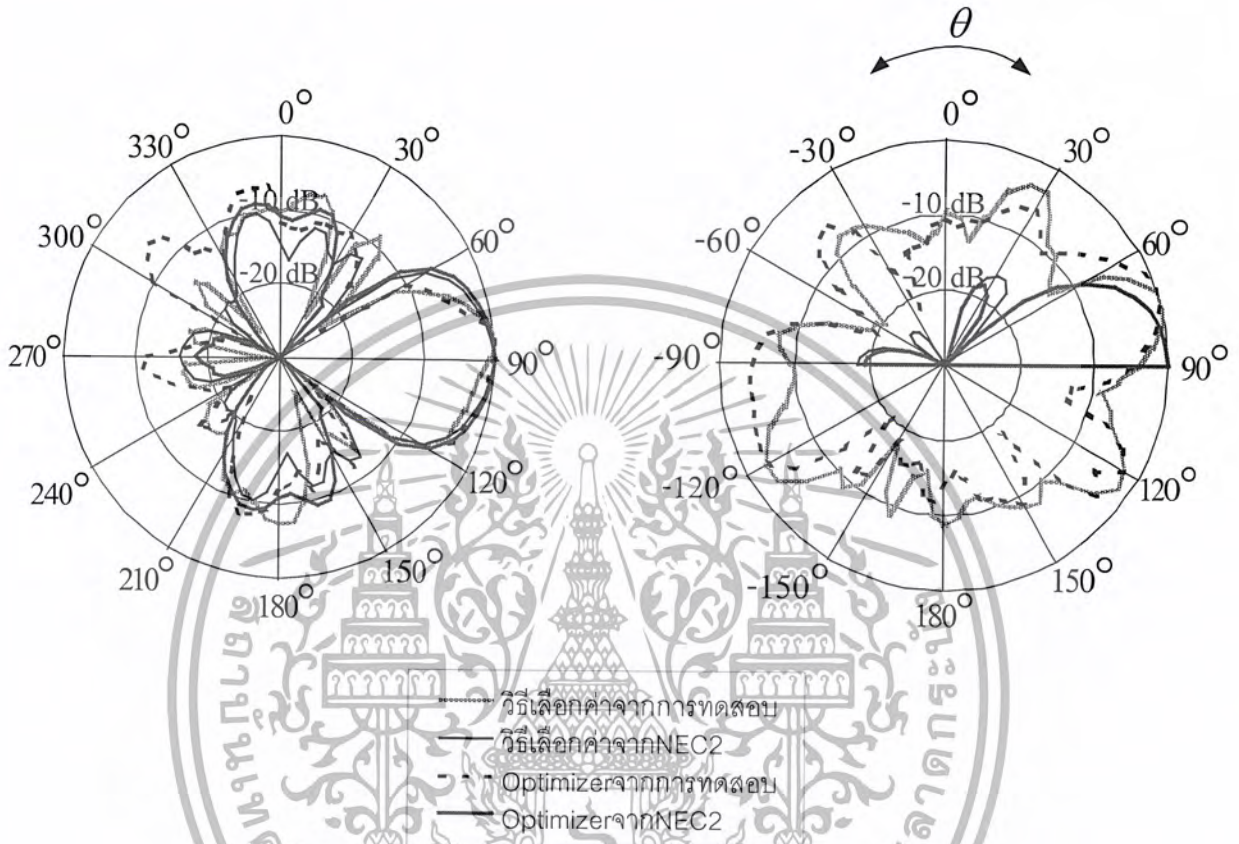


รูปที่ 4.38 ผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา ความถี่ 1965MHz

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด และมุมยก ด้านที่ 1 ความถี่ 1965MHz ผลมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 โดยมีค่าลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) วัดที่ -3dB ประมาณ 48 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำข้อมูลจากการทดสอบ มาทำการพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 2 ที่มุม 90 องศา ความถี่ 1965MHz

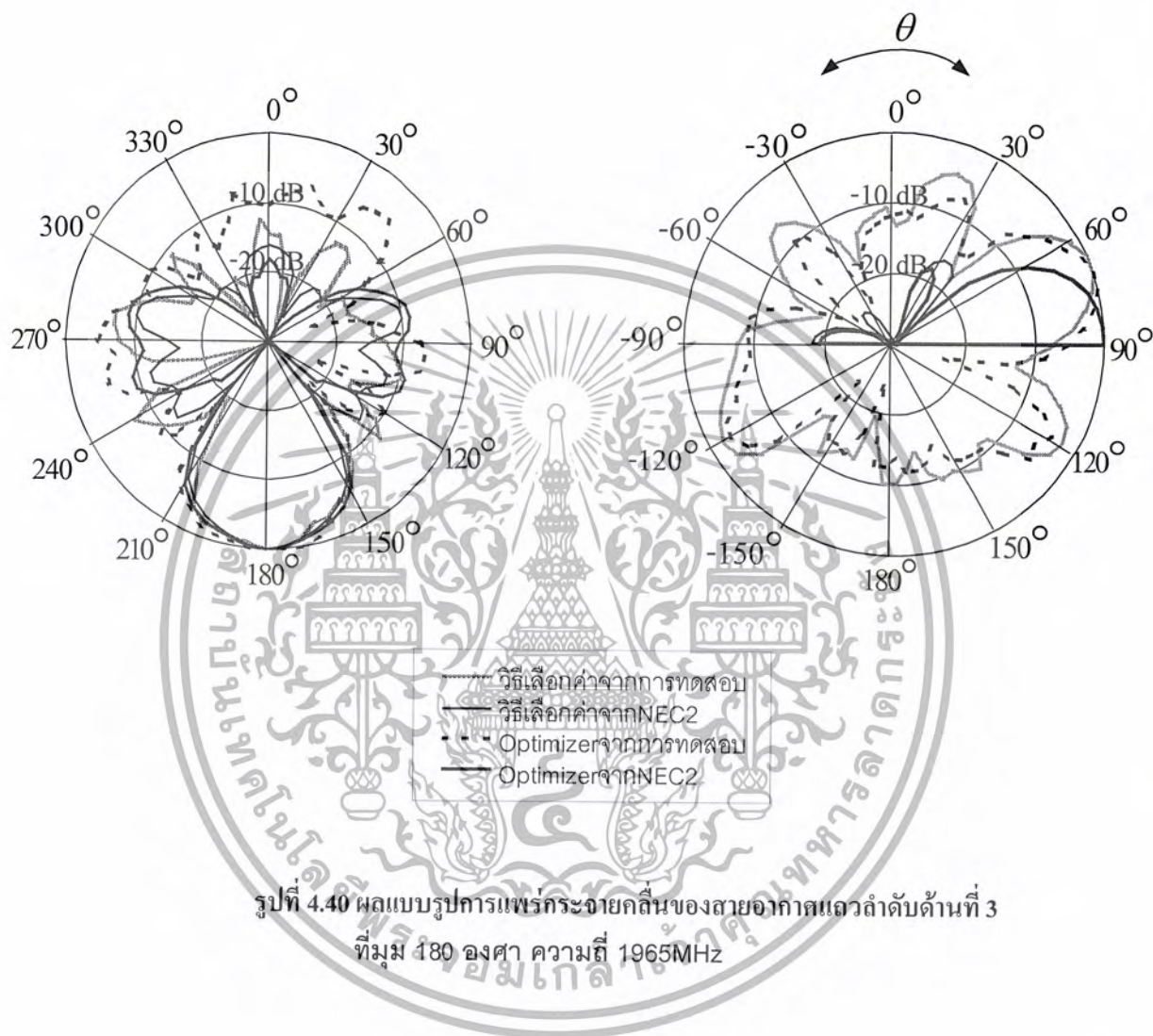


รูปที่ 4.39 ผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 2 ที่มุม 90 องศา ความถี่ 1965MHz

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด และมุมยก ด้านที่ 2 ความถี่ 1965MHz ผลมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 โดยมีค่าลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) วัดที่ -3dB ประมาณ 48 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

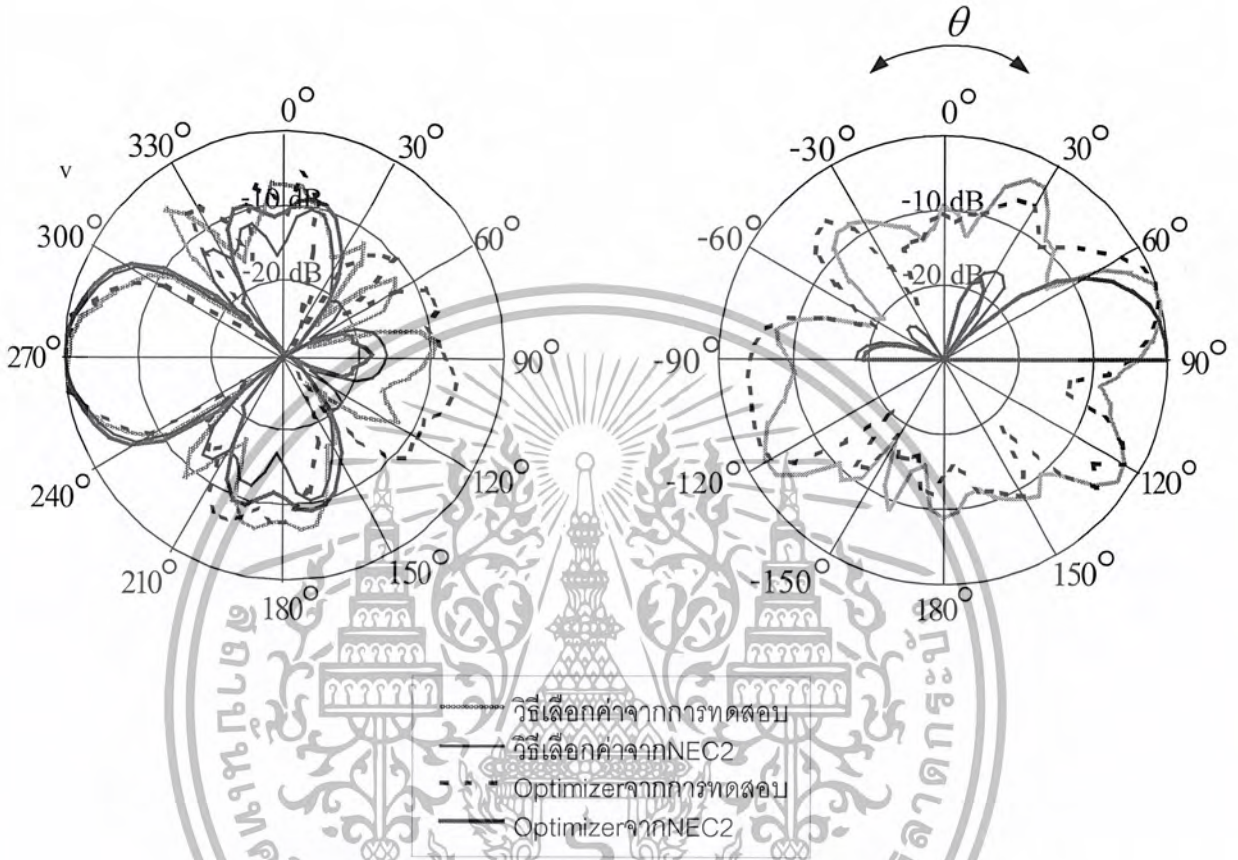
จากนั้นนำข้อมูลจากการทดสอบ มาทำการพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 3 ที่มุม 180 องศา ความถี่ 1965MHz



การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด และมุมยก ด้านที่ 3 ความถี่ 1965MHz ผลมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 โดยมีค่าลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) วัดที่ -3dB ประมาณ 48 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำข้อมูลจากการทดสอบ มาทำการพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 4 ที่มุม 270 องศา ความถี่ 1965MHz

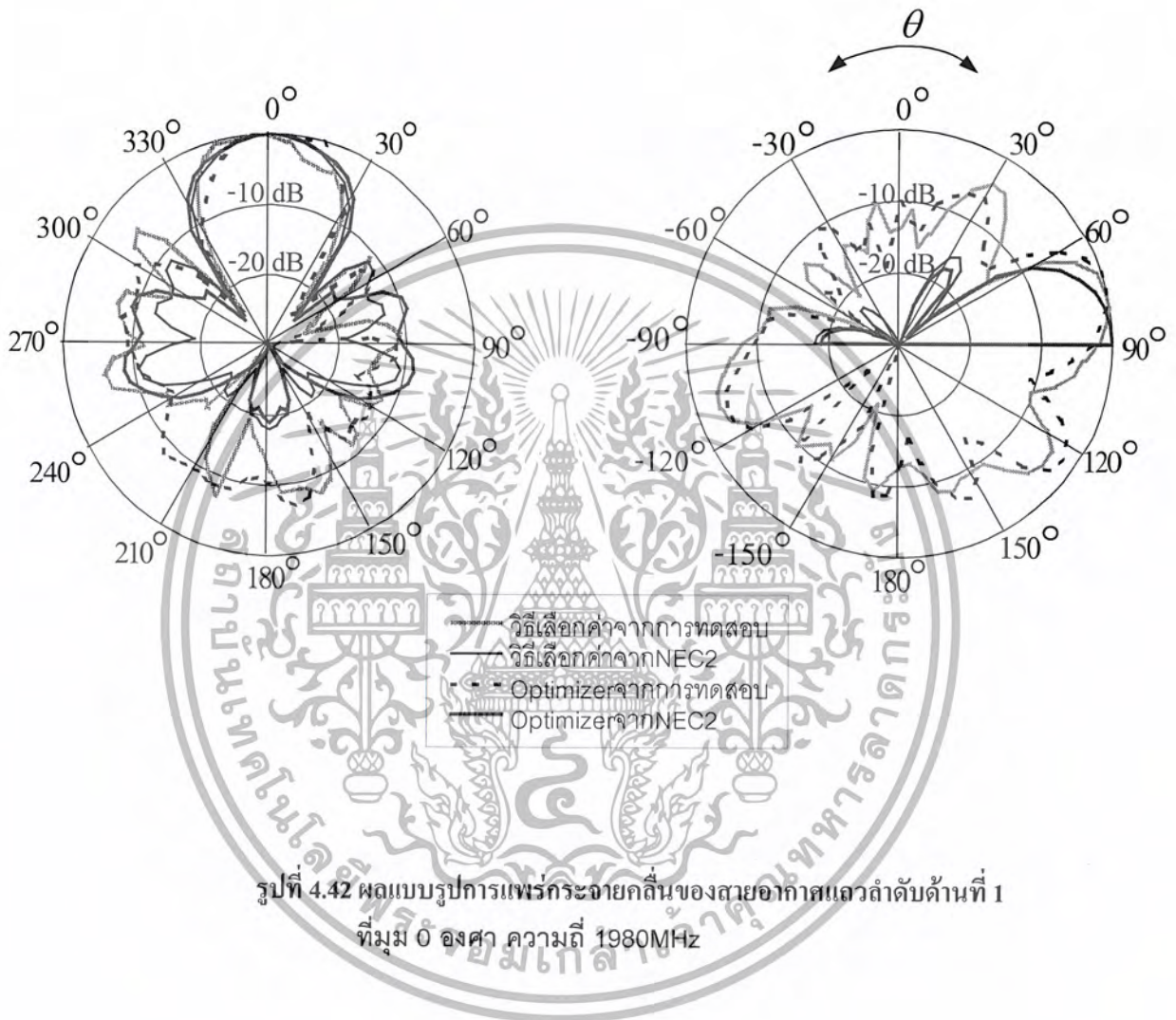


รูปที่ 4.41 ผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 4 ที่มุม 270 องศา ความถี่ 1965MHz

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด และมุมยก ด้านที่ 4 ความถี่ 1965MHz ผลมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 โดยมีค่าลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) วัดที่ -3dB ประมาณ 48 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

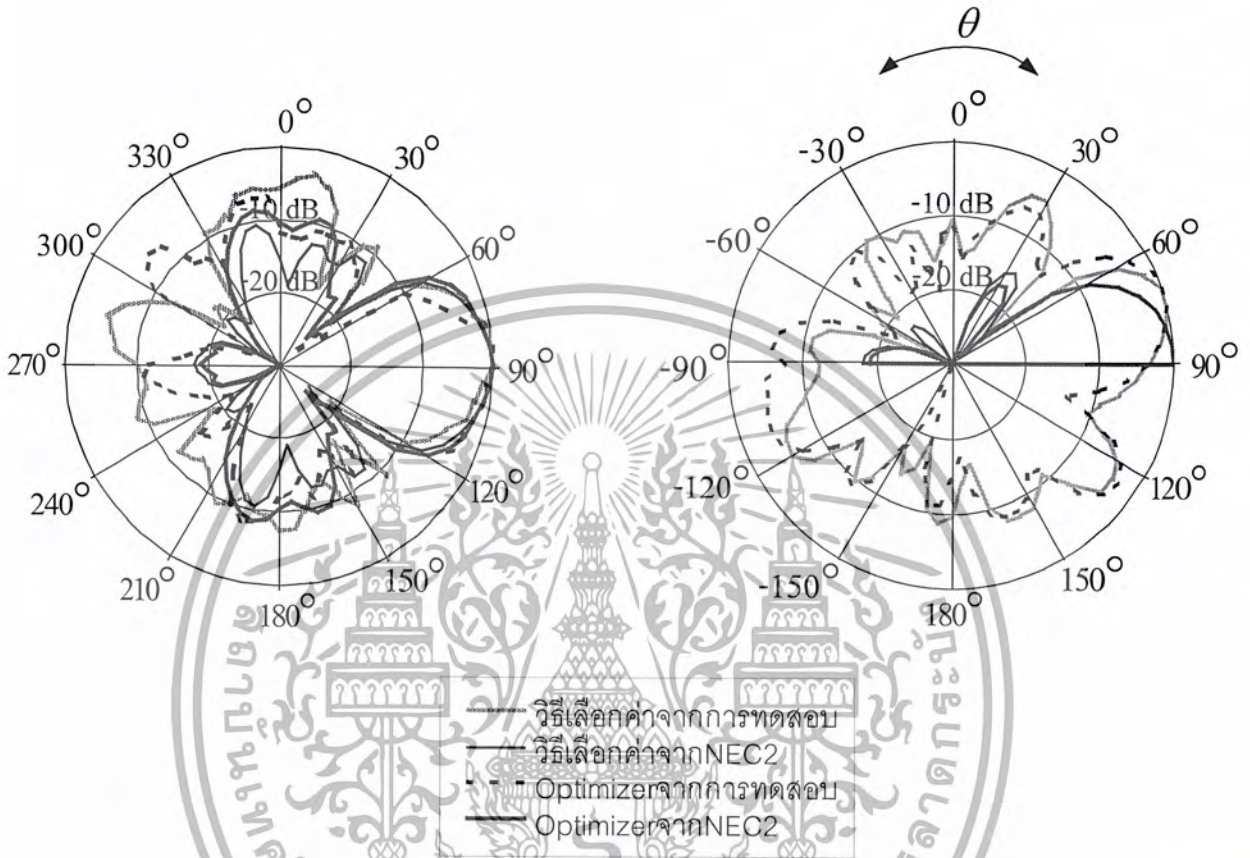
จากนั้นนำข้อมูลจากการทดสอบ มาทำการพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา ความถี่ 1980MHz



การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด และมุมยก ด้านที่ 1 ความถี่ 1980MHz ผลมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 โดยมีค่าลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) วัตต์ที่ -3dB ประมาณ 48 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำข้อมูลจากการทดสอบ มาทำการพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 2 ที่มุม 90 องศา ความถี่ 1980MHz

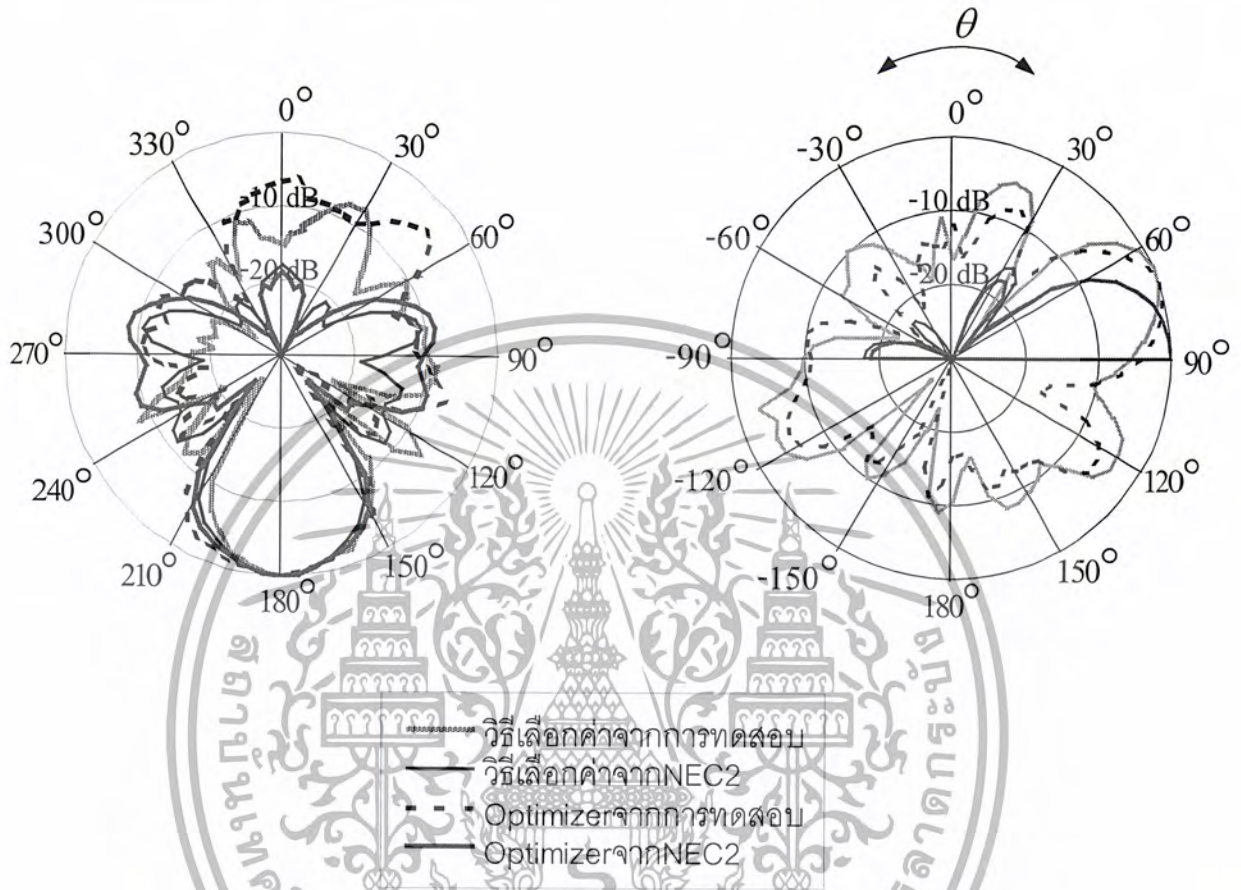


รูปที่ 4.43 ผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 2 ที่มุม 90 องศา ความถี่ 1980MHz

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด และมุมยกด้านที่ 2 ความถี่ 1980MHz ผลมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 โดยมีค่าลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) วัดที่ -3dB ประมาณ 48 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำข้อมูลจากการทดสอบ มาทำการพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 3 ที่มุม 180 องศา ความถี่ 1980MHz

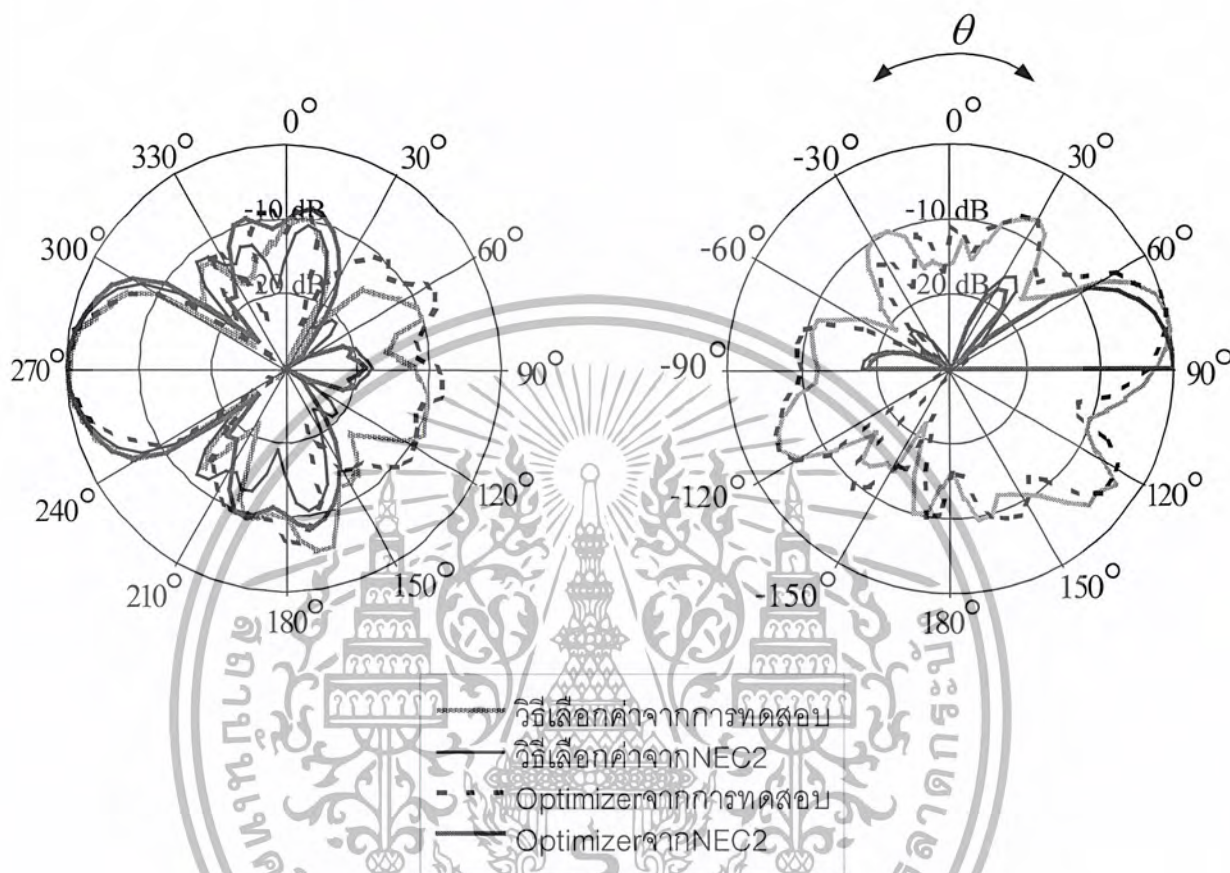


รูปที่ 4.44 ผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 3 ที่มุม 180 องศา ความถี่ 1980MHz

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด และมุมยก ด้านที่ 3 ความถี่ 1980MHz ผลมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 โดยมีค่าลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) วัดที่ -3dB ประมาณ 48 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำข้อมูลจากการทดสอบ มาทำการพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 4 ที่มุม 270 องศา ความถี่ 1980MHz



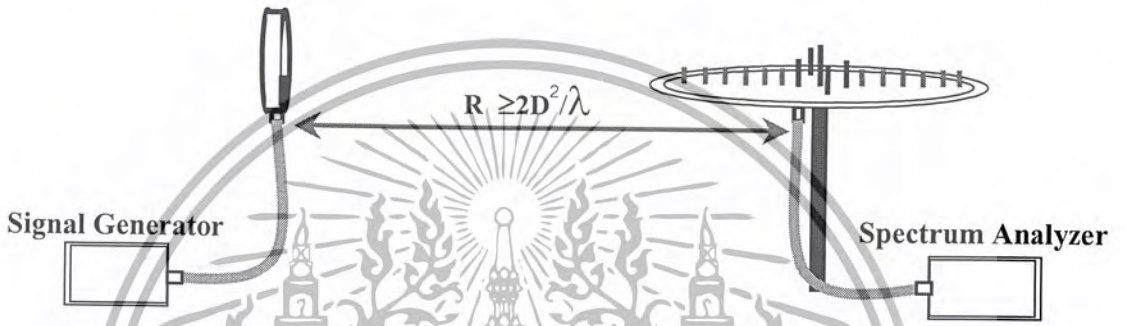
รูปที่ 4.45 ผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับด้านที่ 4 ที่มุม 270 องศา ความถี่ 1980MHz

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด และมุมยก ด้านที่ 4 ความถี่ 1980MHz ผลมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 โดยมีค่าลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) วัดที่ -3dBเท่ากับ 48 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การอัตราการขยายของสายอากาศ (Gain)

อัตราการขยายของสายอากาศ เป็นสิ่งทีบออกคุณสมบัติที่สำคัญ ของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งทดสอบ โดยการวางสายอากาศทั้ง ทางด้านรับ และทางด้านส่ง ห่างกันในระยะ R ซึ่งต้องวางให้มีระยะห่างกันมากกว่าระยะสนามไกล และสายอากาศทั้งสองต้องมีการโพลาไรซ์ที่เหมือนกันด้วย จากนั้นเตรียมการทดสอบดังรูปที่ 4.46 โดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Generator) ป้อนให้สายส่ง โดยจ่ายสัญญาณที่ความถี่ 1900 MHz ด้วยกำลังส่ง 0 dBm ส่วน สายอากาศทางด้านรับจะต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer) โดยค่ากำลังที่ได้รับได้ จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าอัตราการขยายของสายอากาศต่อไป



รูปที่ 4.46 การวัดอัตราการขยายของสายอากาศ

จากสมการของ Friis Free Space Link Equation

$$Gr(dBi) = Pr(dBm) - Pt(dBm) - Gt(dBi) + Lr(dBm) + Lt(dBm) + Ls(dBm)$$

เมื่อ คุณสมบัติต่างๆ มีค่าดังนี้

- Pr(dBm) = กำลังงานทางด้านรับ
- Gr(dBi) = อัตราขยายทางด้านรับ
- Pt(dBm) = กำลังงานทางด้านส่ง มีค่าเท่ากับ 0 dBm
- Gt(dBi) = อัตราขยายทางด้านส่ง มีค่าเท่ากับ 4.975 dBi
- Lr(dBm) = อัตราการสูญเสียของสายนำสัญญาณ ทางด้านรับ มีค่าเท่ากับ 1 dBm
- Lt(dBm) = อัตราการสูญเสียของสายนำสัญญาณ ทางด้านส่ง มีค่าเท่ากับ 1.3 dBm
- Ls(dBm) = อัตราการสูญเสียของ free space มีค่าเท่ากับ $20\log(4\pi R / \lambda)$

R = ระยะห่างระหว่างสายอากาศ ต้องมากกว่าระยะ Farfield มีค่าเท่ากับ 5.5 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ

สายอากาศ จากการเลือกค่า องค์ประกอบ	Pr (dBm)	Gr (dBi)
ด้านที่ 1	-38.70	9.125
ด้านที่ 2	-38.21	9.615
ด้านที่ 3	-38.32	9.505
ด้านที่ 4	-38.64	9.185

สายอากาศ จากวิธีการ Optimizer	Pr (dBm)	Gr (dBi)
ด้านที่ 1	-38.00	9.825
ด้านที่ 2	37.90	9.925
ด้านที่ 3	-38.44	9.382
ด้านที่ 4	-38.24	9.585



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

โครงการนี้ เป็นการวิเคราะห์ การออกแบบ การสร้าง และทดสอบสายอากาศแถวลำดับของโมโนโพลยาภิบนแผ่นระนาบกราวด์ ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ 4 ทิศทาง และการโพลาริซ์แบบเชิงเส้น เพื่อเป็นสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ในโครงการนี้ได้แบ่งการออกแบบ และสร้างสายอากาศ เป็น 2 วิธี คือวิธีการเลือกค่าองค์ประกอบแต่ละตัว และวิธีการOptimizer โดยส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์ออกแบบโดยใช้โปรแกรม NEC2(Numerical Electromagnetic Code2) ช่วยในการออกแบบสายอากาศให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ 4 ทิศทาง และสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ ตั้งแต่ 1885MHz -1980MHz (ช่วงความถี่Uplinkและความถี่ Downlinkของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ THAIMOBILE 1900MHz) แล้วทำการสร้างและทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายของสายอากาศในระนาบมุมยก และระนาบมุมกวาด ทีละด้านจนครบ 4 ด้าน (ที่ความถี่ 1885MHz ,1900MHz ,1965MHz และ1980MHz)

จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม NEC2 จำลองการสร้างสายอากาศ จะเห็นว่าสายอากาศที่ออกแบบโดยวิธีการ Optimizer จะมีค่าคุณสมบัติต่างๆ ดีกว่าการออกแบบโดยวิธีการเลือกค่าองค์ประกอบ

การเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของตัวป้อนของสายอากาศมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง โดยถ้าปรับความยาวของตัวป้อนของสายอากาศใกล้เคียงกับความยาวของตัวสะท้อนคลื่น หรือตัวนำคลื่น จะทำให้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่าสูงขึ้น

จำนวนองค์ประกอบของตัวนำคลื่นจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพแฉะจกทิศทาง และค่า HPBW โดยถ้ามีจำนวนองค์ประกอบของตัวนำคลื่นมากขึ้นค่าสภาพแฉะจกทิศทางจะมีค่ามากขึ้น แต่ค่า HPBW จะมีค่าลดลง

จากการทดลองวัดค่าอัตราคลื่นนิ่ง, อิมพีแดนซ์, ค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดที่ความถี่ต่างกัน แต่ละด้านทั้ง 4 ด้าน มีค่าต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากการสร้าง และการทดสอบสายอากาศ

ข้อดีของสายอากาศแถวลำดับของโมโนโพลยาภิบนแผ่นระนาบกราวด์ คือ ลดการเกิดการรบกวนกันของช่องความถี่เดิมที่ใช้งานไปแล้ว และสามารถเลือกทิศทางที่ต้องการให้มีการรับส่งสัญญาณได้ ส่วนข้อบกพร่องจากการทดลองคือ ไม่สามารถวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ทั้ง4ทิศทางที่ความถี่ที่ต่างกันได้พร้อมกัน เพราะข้อจำกัดของอุปกรณ์ในการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบดิจิตอล ย่านความถี่ 1900 MHz

ไทยโมบาย เป็นระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งพัฒนา และดำเนินการภายใต้การผสมผสานความร่วมมือระหว่าง บริษัท ทศท. คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) และการสื่อสารแห่งประเทศไทย เพื่อสร้างการบริการด้านการสื่อสารของคนไทยเพื่อคนไทย รองรับทุกคำทักทาย ทุกคำพูด ทุก ๆ คำจากใจ และถ่ายทอดให้ยิ่งชัดเจน ด้วยมาตรฐานของเทคโนโลยี ไร้ขีดจำกัดเพื่อสร้างสิ่งที่ดีที่สุด ทั้งบริการ และคุณภาพของการสื่อสาร สำหรับตอบสนองทุกรูปแบบชีวิต ทุกความต้องการพื้นฐานของคนไทย...ด้วยความจริงใจ

ผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบดิจิตอล PCS (Personal Communication Service) ในย่านความถี่ 1900 MHz. ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้น ในสหรัฐอเมริกา และได้รับความนิยมแพร่หลายในภาคพื้นทวีปอเมริกา สามารถรองรับผู้ใช้บริการในพื้นที่ต่าง ๆ ทั่วประเทศได้ทันที ด้วยสัญญาที่คมชัดให้คนไทยเชื่อมต่อความสุขได้อย่างในทันทีที่เปิดใช้บริการ



ไทยโมบายคือ

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ดิจิตอล 1900 MHz ดำเนินงานโดย กิจการร่วมค้าไทยโมบาย จากความร่วมมือของ บมจ. ทศท. คอร์ปอเรชั่นและการสื่อสารแห่งประเทศไทย โดยมุ่งหวังให้คนไทย ได้มีทางเลือกใหม่ของการใช้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีประสิทธิภาพสูง ในอัตราค่าบริการที่เป็นธรรม

ไทยโมบาย ได้นำเทคโนโลยีระบบดิจิตอลในย่านความถี่ 1900 MHz ที่พัฒนาขึ้นในสหรัฐอเมริกา สามารถรองรับเทคโนโลยี 3G รับส่งข้อมูลได้รวดเร็วที่สุด ทั้งภาพ และข้อมูลขนาดใหญ่ เพื่อให้การติดต่อสื่อสารของคนไทยได้ก้าวทันยุคในอนาคตอันใกล้ การวางเครือข่ายเป็นอุปกรณ์สถานีฐาน และความรู้ความชำนาญการวางระบบระดับโลกของซีเมนซ์และอีริคสัน โดยการเปิดให้บริการในระยะเริ่มต้นจะสามารถให้บริการเครือข่ายของไทยโมบายได้ใน กรุงเทพมหานคร และปริมณฑล สำหรับในพื้นที่ต่างจังหวัดทั่วประเทศเป็นเครือข่ายร่วม

ในขณะนี้ไทยโมบาย ได้ติดตั้งชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ 3 ชุมสาย พร้อมสถานีฐาน 200 สถานี ในกรุงเทพฯ และปริมณฑลในเดือนพฤศจิกายน และ 500 สถานีฐาน ในปลายปีนี้ โดยจะสามารถรองรับลูกค้าได้ถึง 300,000 เลขหมาย และมีเป้าหมายจะขยายโครงการให้ครอบคลุมพื้นที่บริการ โดยต่อเนื่อง และจะสามารถรองรับลูกค้าได้ถึง 750,000 เลขหมาย ภายในปี 2546 รวมไปถึงการพัฒนาบริการเสริมต่างๆ เพื่อให้ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการให้มากยิ่งขึ้นเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะบริการ

ทศท. ร่วมมือกับ กสท. เปิดให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 1900 MHz ภายใต้ชื่อ Thai Mobile เป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบดิจิทัล ใช้งานในย่านความถี่ 1900 MHz ได้รับการพัฒนาขึ้นในสหรัฐอเมริกา ใช้ชื่อว่า Personal Communication Service (PCS) เป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้กันแพร่หลายในทวีปอเมริกา เทคโนโลยีที่ใช้ เทคโนโลยีของ 1900 MHz การพัฒนาของ PSC ไม่ได้กำหนดเทคโนโลยีที่จะใช้ จึงสามารถใช้ได้กับหลายเทคโนโลยี เช่น GSM, CDMA และ TDMA

GSM (Global System for Mobile Communications) คือ มาตรฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่จัดทำโดยกลุ่มประเทศยุโรปตะวันตก เป็นระบบที่ได้รับความนิยมเชื่อถือจากประเทศต่างๆ ทั่วโลก

CDMA มาตรฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ กำเนิดขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้งานความถี่ 800 และ 1900 MHz ลักษณะการใช้งาน ใช้วิธีการส่งสัญญาณ โดยแบ่งตามเวลา

ส่วนประกอบของระบบ เทคโนโลยี ทั้ง 3 ระบบ มีความคล้ายคลึงกัน ดังนี้

1. เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Station/Mobile Subscriber-MS) ทำหน้าที่แปลสัญญาณเสียงเป็นสัญญาณดิจิทัลก่อนเชื่อมต่อกับระบบสถานีฐาน
2. ระบบสถานีฐาน (Base Station Subsystem) แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ
 - สถานีฐาน (Base Transceiver Station - BTS) ทำหน้าที่รับส่งสัญญาณกับเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่
 - ส่วนควบคุมสถานีฐาน (Base Station Controller - BSC) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของสถานีฐานทำหน้าที่คล้ายชุมสายย่อยของระบบ
3. ชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Services Switching Center – MSC) ทำหน้าที่ติดต่อจุดเชื่อมสัญญาณเข้าออกชุมสาย, ควบคุมการสื่อสาร, ส่งข้อมูลเชื่อมต่อกับชุมสายอื่น, เก็บข้อมูลการใช้บริการ และควบคุมการย้ายข้ามเซลล์
4. หน่วยเก็บข้อมูลท้องถิ่น หรือฐานข้อมูลผู้ใช้บริการท้องถิ่น (Visiting Location Register – VLR) ทำหน้าที่เป็นฐานข้อมูลเพื่อเก็บข้อมูลชั่วคราวของเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้บริการข้ามเขต ต่างชุมสาย รวมทั้งบอกตำแหน่งปัจจุบันของเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ VLR เป็นส่วนหนึ่งของ MSC เพราะเป็นการทำงานที่เกี่ยวข้องกัน
5. หน่วยเก็บข้อมูลหลักของผู้ใช้บริการ หรือฐานข้อมูลหลักของผู้ใช้บริการ (Home Location Register- HLR) ทำหน้าที่เป็นฐานข้อมูล เก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ เช่น บริการที่ใช้, ขอบเขต, การใช้งาน, ตำแหน่งปัจจุบัน ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ศูนย์ตรวจสอบการใช้งานหรือศูนย์ตรวจสอบพารามิเตอร์ต่างๆ (Authentication Center-AuC) ทำหน้าที่ตรวจสอบความถูกต้องของโทรศัพท์ ป้องกันการฉ้อโกง
7. หน่วยเก็บข้อมูลเลขหมายประจำเครื่อง (Equipment Identity Register-EIR) ทำหน้าที่เป็นฐานข้อมูล โดยทำการระบุเลขหมายโทรศัพท์เคลื่อนที่ถาวร
8. ศูนย์ควบคุมระบบโครงข่าย (Operation and Maintenance Center-OMC) ทำหน้าที่ควบคุมและบริหารการทำงานจากระบบโครงข่ายโดยรวม



การเปิดให้บริการ

- ในช่วงโครงการนำร่อง Thai Mobile ซึ่งเป็นธุรกิจใหม่ของ ทศท. เปิดให้บริการ โทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ GSM 1900 MHz เริ่มตั้งแต่วันที่ 25 มีนาคม 2545 ครอบคลุมพื้นที่ในนครหลวงเพื่อทดสอบระบบการทำงาน และพัฒนาศักยภาพบริการก่อนเปิดให้บริการแก่ประชาชนทั่วไป ประมาณ 3 เดือน หรือมากกว่านั้นขึ้นอยู่กับ การติดตั้งสถานีฐาน โดยทดลองให้บริการในกลุ่มลูกค้าชั้นดี (Key Account) ของ ทศท. ทั้งจากโทรศัพท์พื้นฐานและ โทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 470 MHz รวมทั้งผู้ปฏิบัติงานของ ทศท.จำนวน 5,000 เครื่อง ในระยะนำร่องนี้ลูกค้าสามารถ โทรออกและรับเข้า ทุกเลขหมายภายในประเทศ รวมทั้งโทรออกไปยังโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบอื่น โดยผ่านบริการ GSM 1900 MHz ของ Thai Mobile คุณภาพของเสียงในแต่ละพื้นที่ที่ลูกค้า โทรออกหรือรับเข้า ขึ้นอยู่กับขีดความสามารถของสถานีฐานและขนาดของพื้นที่ให้บริการ ในระหว่างโครงการนำร่อง ทศท. จะมีเครื่อง โทรศัพท์เคลื่อนที่ให้เลือกเพียงรุ่นเดียว คือ Motorola P7689 ซึ่งมีรูปแบบทันสมัยและใช้งานง่าย โดยในอนาคตจะมีโทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นต่างๆ ให้เลือกมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลังจากช่วงโครงการนำร่อง Thai Mobile จะมีการเชื่อมโยงโครงข่ายกับผู้ให้บริการรายอื่น เพื่อที่จะเพิ่มพื้นที่ให้บริการได้ครอบคลุมทั่วประเทศ โดยมีเป้าหมายเปิดให้บริการแก่ ประชาชนทั่วไปในปลายปี 2545 นี้ จำนวน 300,000 เลขหมาย และจะขยายเป็น 3,000,000 เลขหมายภายในระยะเวลา 5 ปี

- ช่วงเปิดให้บริการ เมื่อวันที่ 27 พฤศจิกายน 2545 กิจการร่วมค้าไทยโมบายเปิดตัวให้บริการเชิงพาณิชย์โทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 1900 อย่างเป็นทางการ โดยให้ตัวแทนทางการตลาดทั้งสองราย คือ บริษัท อินเตอร์ เนชั่นเนล เอนจิเนียริง จำกัด (มหาชน) หรือ ไออีซี และบริษัท สามารถ อี-เทรคดิง จำกัด ทำการตลาดตั้งแต่วันที่ 28 พฤศจิกายน 2545 เป็นต้นไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือและ ให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี จาก คร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และรศ.ดร.จเร สุรวัฒน์ปัญญา อาจารย์ที่ปรึกษา ขอขอบคุณรศ.ดร.สมผล โกศลวิตร ที่ให้คำแนะนำเทคนิคต่างๆ ในการทดลอง ขอขอบคุณ พี่สุธาณี ละมุลตรี พี่ไพโรจน์ วุ่นชุ่ม ที่ช่วยเหลือให้คำปรึกษาในด้านการทดสอบสายอากาศ และขอขอบคุณ พี่นักศึกษาปริญญาโท ทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามในที่นี้ ที่คอยให้คำแนะนำ และช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจตลอดมา และสุดท้าย ขอกราบขอบคุณพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุน รวมทั้งการอบรมสั่งสอนที่ดี จนมีวันนี้

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. โมไนย ไกรฤกษ์ และ วิวัฒน์ กิรานนท์, “ทฤษฎีสายอากาศ”, วศ.สจล. 123, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. ถวิล พึ่งมา, “ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์”, ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. บัณฑิต ไรจน์อารยานนท์ “วิศวกรรมไมโครเวฟ”, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ.2536
4. C. A. Balanis , “Antenna Theory Analysis and Design” , Harper & Row Publishers , New York , 1982



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้