

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศยาگی-อูเดแบบบ่วงสำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

Yagi-Uda Loop Antenna for Wireless Local Area Network System



โดย

นางสาวพิชานันท์ วงศ์ศิริธร

นายสุรัตน์ แซ่เตีย

ร.พ.
พ63๔๙
๒๕๕๙

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 72116
วัน,เดือน,ปี 11 ส.ย. 2550

b. 11๙๖3๕๙๐
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว
ไม่ถูกต้อง
(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

ผ่านการตรวจขึ้นงานแล้ว
ถูกต้อง
(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

สายอากาศยาคี-อูดาแบบบ่วงสำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย
Yagi-Uda Loop Antenna for Wireless Local Area Network System



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

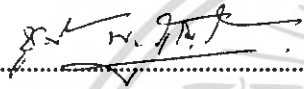
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศยาคิ-อูเดแบบบ่วงสำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

Yagi-Uda Loop Antenna for Wireless Local Area Network System

ผู้จัดทำ

1. นางสาวพิชชานันท์ วงศ์ศิริธร 46012024
2. นายสุรัตน์ แซ่เตีย 46012034


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศยาคิ-อูดาแบบบ่วงสำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย
Yagi-Uda Loop Antenna for Wireless Local Area Network System

โดย นางสาวพิชชานันท์ วงศ์ศิริธร 46012024
นายสุรัตน์ แซ่เตีย 46012034

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

บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอ การศึกษาและการออกแบบสายอากาศยาคิ-อูดาแบบบ่วง ที่มีค่าสภาพเงาจงทิศทางปานกลาง และนำมาใช้งานกับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยในโครงการนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบสายอากาศก่อน แล้วจึงนำผลจากการศึกษาและออกแบบที่ได้ มาสร้างสายอากาศและทดสอบ เพื่อทำการประเมินประสิทธิภาพการทำงาน ซึ่งผลที่ได้ยืนยันว่า สามารถนำสายอากาศที่ได้ นำเสนอไปใช้ในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายได้

Abstract

This project presents the study and design of Yagi-Uda Loop antenna for Wireless Local Area Network (WLAN) system. This antenna has moderate directivity. The antenna properties is firstly studied and designed. Subsequently, the results of the study and design will be used for antenna fabrication and measurements. Finally, the antenna assessment of the operating performance will be carried out. The results of this project are very useful for the Wireless Local Area Network system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจาก ผศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และ ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาผู้ให้ความช่วยเหลือคำแนะนำแนวทางการศึกษา แนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น และดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดี ตลอดจนคอยอบรมสั่งสอน ขอบขอบคุณ รศ.ดร.สมผล โกศลวิตร ที่ให้คำแนะนำเทคนิคต่างๆ ในการการทดลอง และขอบขอบคุณกิตติศักดิ์ แพบัวและ พี่ๆทุกคนในห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายที่ได้ให้คำแนะนำ และความรู้ทางด้านต่างๆ ตลอดจนเพื่อนๆทุกคนที่ได้แลกเปลี่ยนความรู้ความคิดเห็น ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 แนวความคิดและที่มาของโครงการงาน | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการงาน | 1 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการงาน | 1 |
| 1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงการงาน | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการ | 3 |
| 2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับทฤษฎีสายอากาศ (Introduction about The Antenna Theory) | 3 |
| 2.1.1 ธรรมชาติการทำงานของสายอากาศ | 4 |
| 2.1.2 สายอากาศชนิดต่างๆ (Type of Antenna) | 4 |
| 2.1.2.1 สายอากาศเส้นลวด | 5 |
| 2.1.2.2 สายอากาศช่องเปิด | 5 |
| 2.1.2.3 สายอากาศแถบบาง | 5 |
| 2.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้งานของสายอากาศ (Fundamental Parameters of Antenna) | 6 |
| 2.2.1 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) | 6 |
| 2.2.1.1 แบบรูปการแผ่กระจายแบบ ไอโซทรอปิกแบบชี้ทิศทางและแบบ ทิศทางรอบตัว(Isotropic, Directional, and Omnidirectional Pattern) | 7 |
| 2.2.1.2 แบบรูปการกระจายคลื่นหลัก (Principle Patterns) | 8 |
| 2.2.1.3 ลำคลื่นของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Lobe) | 8 |
| 2.2.1.4 บริเวณต่างๆของสนามจากสายอากาศ (Field Regions) | 10 |
| 2.2.2 ความหนาแน่นกำลังงานการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Power Density) | 11 |
| 2.2.3 ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Intensity) | 12 |
| 2.2.4 ค่าการชี้ทิศทางสูงสุด (Directivity) | 13 |
| 2.2.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง (Directional Patterns) | 13 |
| 2.2.6 อัตราขยาย (Gain) | 14 |
| 2.2.7 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency) | 15 |
| 2.2.8 ประสิทธิภาพของลำคลื่น (Beam Efficiency) | 16 |
| 2.2.9 โพลาริเซชัน (Polarization) | 16 |
| 2.2.9.1 โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น (Linear Polarization) | 18 |
| 2.2.9.2 โพลาริเซชันวงกลม (Circular Polarization) | 18 |
| 2.2.9.3 โพลาริเซชันแบบวงรี (Elliptical Polarization) | 18 |
| 2.2.9.4 โพลาริเซชันลอสแฟกเตอร์ (Polarization Loss Factor : PLF) | 19 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|-----------|
| 2.2.10 อินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance) | 20 |
| 2.2.11 ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Antenna Radiation Efficiency) | 24 |
| 2.2.12 ช่วงกว้างแถบความถี่ (Bandwidth) | 25 |
| 2.3 สายอากาศเส้นลวด (Wire Antenna) | 25 |
| 2.4 สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna) | 32 |
| 2.4.1 สายอากาศไดโพลสั้น (Short Dipole) | 33 |
| 2.4.2 สายอากาศไดโพลยาว (Long Dipole Antenna) | 34 |
| 2.5 สายอากาศบ่วง (Loop Antenna) | 39 |
| 2.6 สายอากาศยาگی-อูดา (Yagi-Uda Antenna) | 47 |
| 2.7 ระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) | 49 |
| บทที่ 3 หลักการคำนวณ และการออกแบบ | 52 |
| 3.1 หลักการออกแบบสายอากาศยาگی-อูดาแบบบ่วง (Yagi-Uda Loop Antenna) | 52 |
| 3.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบ | 53 |
| 3.2.1 การกำหนดช่วงความถี่ในการใช้งาน | 53 |
| 3.2.2 การกำหนดค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ | 53 |
| 3.2.3 การคำนวณหาค่าความยาวคลื่น | 53 |
| 3.2.4 การคำนวณหาขนาดของอาร์มีขององค์ประกอบของสายอากาศ | 53 |
| 3.2.4.1 อาร์มีของตัวสะท้อน (Reflector) | 53 |
| 3.2.4.2 อาร์มีของตัวป้อนสัญญาณ (Feeder) | 53 |
| 3.2.4.3 อาร์มีของตัวนำคลื่น (Director) | 54 |
| 3.3 การออกแบบสายอากาศ | 54 |
| 3.4 การคำนวณความยาวสายโคแอกเซียลและระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวรับ-ส่ง | 62 |
| 3.4.1 การคำนวณความยาวสายโคแอกเซียล | 62 |
| 3.4.2 ระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวรับ-ส่ง | 64 |
| บทที่ 4 การสร้างและผลการทดสอบ | 65 |
| 4.1 การสร้างสายอากาศ | 65 |
| 4.2 ผลการทดสอบ | 66 |
| 4.2.1 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ (Return loss) | 66 |
| 4.2.2 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) | 68 |
| 4.2.3 ผลการทดสอบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Impedance) | 70 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|----|
| 4.2.4 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ | 70 |
| 4.2.4.1 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ในระนาบของสนามแม่เหล็ก (H-Plane) | 71 |
| 4.2.4.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ในระนาบของสนามไฟฟ้า (E-Plane) | 74 |
| 4.2.5 ผลการทดสอบโพลาไรเซชันของสายอากาศ (Polarization) | 76 |
| 4.2.6 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain) | 77 |
| 4.2.7 การหาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ (Directivity) | 79 |
| 4.2.8 การทดสอบการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศ | 80 |
| 4.2.8.1 การทดสอบระบบบริการและค่าวิสัยสามารถ (Throughput) ที่ Transmission Data Rate 54 Mbps | 82 |
| 4.2.8.2 การทดสอบกำลังงานทางด้วนรับของสายอากาศ | 85 |
| บทที่ 5 บทวิจารณ์และบทสรุป | 86 |
| ภาคผนวก | 87 |
| กิตติกรรมประกาศ | 97 |
| เอกสารอ้างอิง | 98 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ

| | |
|---|---|
| รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการดำเนินโครงการ | 2 |
|---|---|

บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการ

| | |
|--|----|
| รูปที่ 2.1 นิยามการทำงานของสายอากาศในภาคส่งและภาครับ | 3 |
| รูปที่ 2.2 การแผ่พลังงานจากสายอากาศ | 4 |
| รูปที่ 2.3 ตัวอย่างสายอากาศเส้นลวด | 5 |
| รูปที่ 2.4 ตัวอย่างสายอากาศช่องเปิด | 5 |
| รูปที่ 2.5 ตัวอย่างสายอากาศแถบบาง | 6 |
| รูปที่ 2.6 ระบบโคออร์ดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ | 6 |
| รูปที่ 2.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบทิสทางรอบตัว | 7 |
| รูปที่ 2.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร | 8 |
| รูปที่ 2.9 (ก) โลปต่างๆและบีบวิตซ์ของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ | 9 |
| รูปที่ 2.9 (ข) แบบรูปการแพร่กระจายในแบบลิเนียร์ | 10 |
| รูปที่ 2.10 การแบ่งบริเวณสนามจากสายอากาศ | 10 |
| รูปที่ 2.11 มุมตันของลำคลื่นซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่สมมาตรกันและสมมาตรกัน | 14 |
| รูปที่ 2.12 การหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระนาบและวงรีโพลาริเซชันที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในระนาบ $Z=0$ | 17 |
| รูปที่ 2.13 หน่วยเวกเตอร์โพลาริเซชันของคลื่นและสายอากาศ | 20 |
| รูปที่ 2.14 สายอากาศส่งและวงจรสมมูลย์ | 21 |
| รูปที่ 2.15 สายอากาศรับและวงจรสมมูลย์ | 23 |
| รูปที่ 2.16 สายอากาศเส้นลวดสั้น | 25 |
| รูปที่ 2.17 แบบรูปกำลังเชิงจั่วของสายอากาศเส้นลวด | 30 |
| รูปที่ 2.18 แบบรูปกำลังรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากของสายอากาศเส้นลวดสั้น | 30 |
| รูปที่ 2.19 สายอากาศไดโพล | 32 |
| รูปที่ 2.20 การกระจายของกระแสบนสายอากาศไดโพลสั้น | 33 |
| รูปที่ 2.21 การกระจายกระแสเมื่อกระแสสูงอยู่นั้นอยู่ห่างจากขั้วอินพุทเท่ากับ d | 37 |
| รูปที่ 2.22 สายอากาศแบบบ่วงวงกลม | 39 |
| รูปที่ 2.23 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแนวราบของสายอากาศบ่วง | 40 |
| รูปที่ 2.24 ฟังก์ชันเบสเซลอันดับหนึ่ง | 45 |
| รูปที่ 2.25 คุณสมบัติความต้านทานการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบบ่วง | 46 |
| รูปที่ 2.26 คุณสมบัติสถานะทางทิศทางของสายอากาศแบบบ่วง | 47 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|----|
| รูปที่ 2.27 โครงสร้างของสายอากาศยาคี-ฮูคะ | 47 |
| รูปที่ 2.28 การทำงานของสายอากาศยาคี-ฮูคะ | 48 |
| บทที่ 3 หลักการคำนวณ และการออกแบบ | |
| รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศยาคี-ฮูคะแบบบ่วง | 52 |
| รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมแสดงการออกแบบสายอากาศยาคี-ฮูคะแบบบ่วง | 52 |
| รูปที่ 3.3 สายอากาศที่ทำการออกแบบด้วยโปรแกรม CST | 54 |
| รูปที่ 3.4 รายละเอียดโครงสร้างของสายอากาศที่ทำการออกแบบ | 55 |
| รูปที่ 3.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ | 55 |
| รูปที่ 3.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Polar ที่ในระนาบ H-Plane โดยมีค่า HPBW = 46.9 องศา | 56 |
| รูปที่ 3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Polar ที่ในระนาบ E-Plane โดยมีค่า HPBW = 51.1 องศา | 57 |
| รูปที่ 3.8 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ (Return Loss) ซึ่งจะใช้งานได้ในช่วงความถี่ 2.328 - 2.623 GHz | 58 |
| รูปที่ 3.9 ค่า VSWR จากผลการทดลองในช่วง 2.40-2.50 GHz | 59 |
| รูปที่ 3.10 ค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ | 60 |
| รูปที่ 3.11 ค่าส่วนจริงของอิมพีแดนซ์ซึ่งจะเห็นว่าที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 50.15 Ω | 60 |
| รูปที่ 3.12 ค่าส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 2.45 GHz | 61 |
| บทที่ 4 การสร้างและผลการทดสอบ | |
| รูปที่ 4.1 สายอากาศยาคี-ฮูคะแบบบ่วงจากการสร้าง ที่จะนำไปทดสอบ | 66 |
| รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ของสายอากาศ | 67 |
| รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง | 69 |
| รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ | 70 |
| รูปที่ 4.5 การจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบสายอากาศ | 71 |
| รูปที่ 4.6 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบของสนามแม่เหล็กที่มีโพลาไรเซชัน แบบร่วม (Co-polarization) | 71 |
| รูปที่ 4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็กที่มีโพลาไรเซชัน แบบร่วม (Co-polarization) | 72 |
| รูปที่ 4.8 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบของสนามแม่เหล็กที่มีโพลาไรเซชัน แบบไขว้ (Cross-polarization) | 72 |
| รูปที่ 4.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็กที่มีโพลาไรเซชัน แบบไขว้ (Cross-polarization) | 73 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|----|
| รูปที่ 4.10 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่มีโพลาริเซชัน แบบร่วม (Co-polarization) | 74 |
| รูปที่ 4.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าที่มีโพลาริเซชัน แบบร่วม (Co-polarization) | 74 |
| รูปที่ 4.12 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่มีโพลาริเซชัน แบบไขว้ (Cross-polarization) | 75 |
| รูปที่ 4.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าที่มีโพลาริเซชัน แบบไขว้ (Cross-polarization) | 75 |
| รูปที่ 4.14 การทดสอบโพลาริเซชันของสายอากาศ | 76 |
| รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบโพลาริเซชันของสายอากาศ | 77 |
| รูปที่ 4.16 รูปการทดสอบวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ | 78 |
| รูปที่ 4.17 กราฟผลการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ช่วงความถี่ระหว่าง 2.40-2.50 GHz | 79 |
| รูปที่ 4.18 อุปกรณ์การทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศ | 81 |
| รูปที่ 4.19 การทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศ | 81 |
| รูปที่ 4.20 แผนผังการทดสอบ | 82 |
| รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศที่ Transmission Data Rate 54 Mbps | 83 |
| รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบกำลังงานทางด้านรับของสายอากาศ | 85 |

สารบัญตาราง

หน้า

บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการ

| | |
|--|----|
| ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของสายอากาศบ่วงแบบต่างๆที่มีเส้นรอบวงยาว 1λ | 40 |
| ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายในมาตรฐานต่างๆ | 50 |
| ตารางที่ 2.3 ค่าวิสัยสมารถ (Throughput) โดยประมาณของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย | 51 |

บทที่ 3 หลักการคำนวณ และการออกแบบ

| | |
|--|----|
| ตารางที่ 3.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศในช่วงความถี่ที่ต้องการ | 58 |
| ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ของสายอากาศในช่วงความถี่ที่ต้องการ | 59 |

บทที่ 4 การทดลอง และผลการทดลอง

| | |
|---|----|
| ตารางที่ 4.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบในช่วงความถี่ที่ต้องการ | 67 |
| ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ของสายอากาศในช่วงความถี่ที่ต้องการ | 69 |
| ตารางที่ 4.3 อัตราขยายของสายอากาศในช่วงความถี่ที่ต้องการ | 79 |
| ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบ | 82 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวความคิดและที่มาของโครงการ

ปัจจุบันเทคโนโลยีระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย หรือ WLAN (Wireless LAN) กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากประโยชน์ของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย มีอยู่มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย สร้างความสะดวกและอิสระในการใช้งานและติดตั้งเครือข่าย เทคโนโลยีดังกล่าวทำให้การเชื่อมต่ออุปกรณ์คอมพิวเตอร์ในบ้านหรือสำนักงานเข้าด้วยกันหรือต่อเข้ากับเครือข่ายไม่จำเป็นต้องใช้สายนำสัญญาณให้ยุ่งยากและดูแลรักษาอีกต่อไป อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ทั้งแบบตั้งโต๊ะและพกพาสามารถเชื่อมต่อถึงกันหรือเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายจากตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่ ในรัศมีของสัญญาณได้อย่างอิสระ

โดยในการเชื่อมต่อในปัจจุบันจะเป็นการเชื่อมต่อโดยการใช้ตัวแอ็กเซสพอยน์ (Access Point) เป็นศูนย์กลางเป็นอุปกรณ์กระจายสัญญาณ โดยทุกสถานีที่ใช้งานจะต้องอยู่ในรัศมีการใช้งานของ ตัวแอ็กเซสพอยน์ โดยประมาณ 50 เมตร ในบริเวณเปิด

เนื่องจากระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ยังมีข้อเสียคือการที่มีระยะทางในการส่งที่สั้นมาก ๆ ทำให้การใช้งานส่วนใหญ่ยังคงถูกจำกัดพื้นที่ ซึ่งถ้าต้องการที่จะใช้งานในบริเวณกว้างๆ จึงจำเป็นต้องใช้ตัวแอ็กเซสพอยน์ หลายตัวเพื่อให้มีบริการอย่างทั่วถึง และเนื่องจากระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย เป็นระบบการสื่อสารแบบจุดต่อจุด สายอากาศที่นำมาใช้ในระบบนี้จึงควรจะเป็นสายอากาศที่มีอัตราขยายสูง และมีแบบรูปการกระจายคลื่นแบบทิศทาง

สำหรับโครงการนี้ได้ทำการออกแบบสายอากาศที่มีแบบรูปการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว เพื่อใช้ในระบบการสื่อสารแบบจุดต่อจุด ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสายอากาศแบบทิศทางเดียว สำหรับนำไปใช้ในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ศึกษาสายอากาศยagi-อูคะแบบบ่วงสำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

1.2.2 เพื่อออกแบบและสร้างสายอากาศที่ทำงานได้ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.40-2.50 GHz

1.2.3 เพื่อวัดหาคุณสมบัติพารามิเตอร์ของสายอากาศ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

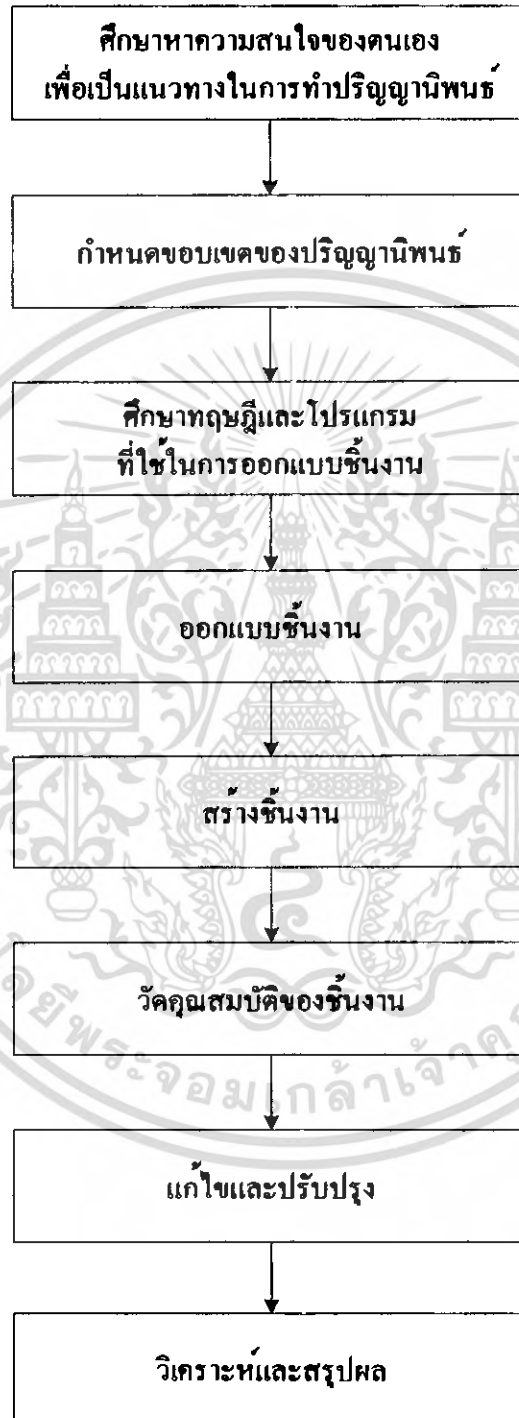
1.3.1 ออกแบบสายอากาศยagi-อูคะแบบบ่วงที่ใช้งานที่ความถี่ 2.40-2.50 GHz

1.3.2 ทำการออกแบบและสร้างสายอากาศยagi-อูคะแบบบ่วง

1.3.3 ทำการวัดคุณสมบัติของสายอากาศที่สร้างเสร็จ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

ในการทำปฏิญานิพนธ์เล่มนี้ได้มีการศึกษาและวางแผนและทำงานตามขั้นตอนการทำงานดังแผนผังการทำงานต่อไปนี้



รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการดำเนินโครงการ

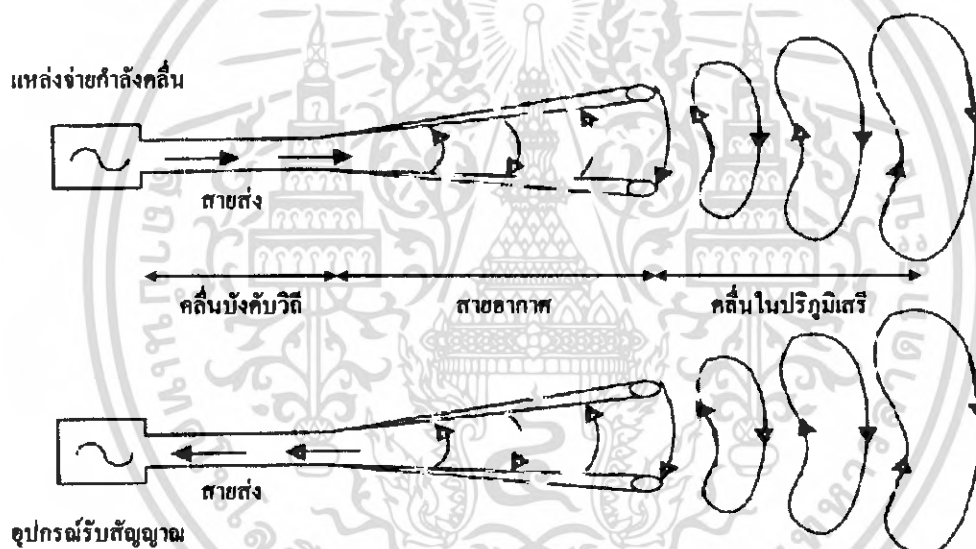
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับทฤษฎีสายอากาศ

หน้าที่สำคัญของสายอากาศคือ การเปลี่ยนรูปพลังงานกลับไปมาระหว่างพลังงานในลักษณะคลื่นบังคับวิถีในสายส่งและพลังงานในปริภูมิเสรี (free space) สายอากาศจะเปลี่ยนรูปพลังงานจากลักษณะคลื่นบังคับวิถีไปเป็นคลื่นในปริภูมิเสรีที่แพร่กระจายไปในทิศทางที่ต้องการเมื่อปฏิบัติงานเป็นสายอากาศส่ง และเมื่อปฏิบัติงานเป็นสายอากาศรับสายอากาศจะเปลี่ยนคลื่นในปริภูมิเสรีที่มาจากทิศทางของสถานีอันพึงประสงค์หรือรวมทั้งบรรดาคลื่นรบกวนทั้งหลายเป็นคลื่นบังคับวิถีในสายส่งและเข้าสู่เครื่องรับในที่สุด นอกจากนี้ยังอาจกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า สายอากาศเป็นส่วนที่เป็นภาคเชื่อมต่อระหว่างอิเล็กทรอนิกส์อน (คลื่นบังคับวิถี) กับ โฟตอน (คลื่นในปริภูมิเสรี) รูปที่ 2.1 แสดงนิยามของสายอากาศตามที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 2.1 นิยามการทำงานของสายอากาศในภาคส่งและภากรับ

จุดเด่นของการเป็นสายอากาศไม่ได้หยุดอยู่เพียงการมีความสามารถในการรับหรือแผ่พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า สายอากาศต้องสามารถเลือกรับหรือส่งพลังงานจากคลื่นกำเนิดไปสู่ปลายทางที่กำหนดได้ด้วยเหตุนี้การออกแบบสายอากาศเพื่อให้สามารถปฏิบัติการกิจที่กำหนดได้จึงมีความหมายยิ่งนัก เมื่อนำผลลัพธ์จากการออกแบบไปวิเคราะห์ ก็จะสามารถทราบสมรรถนะของสายอากาศได้ว่าเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ ผลที่วิเคราะห์ทำให้สามารถหาทางปรับเปลี่ยนการออกแบบ เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นได้ล่วงหน้า

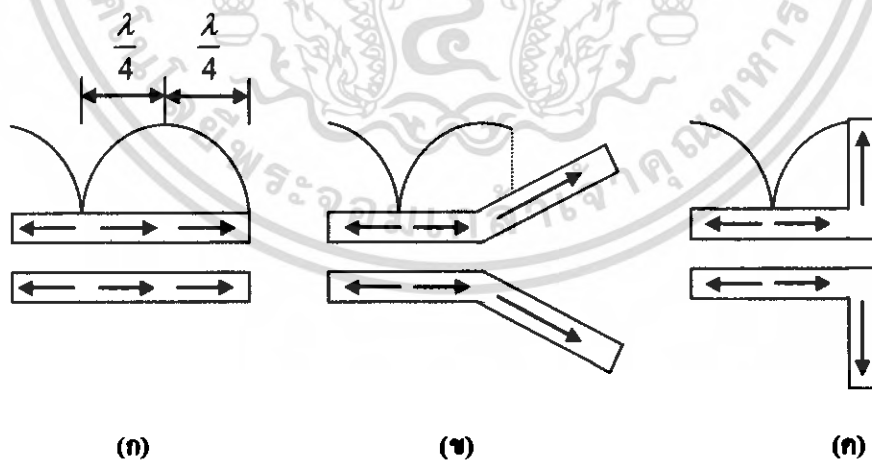
2.1.1 ธรรมชาติการทำงานของสายอากาศ

เมื่อสายอากาศทำงานในภาครีบนั้น กลไกการทำงานเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปพลังงานจากลักษณะของคลื่นในปริภูมิเสรีให้เป็นคลื่นบังคับวิถีสามารถเข้าใจได้โดยง่าย ด้วยการพิจารณาว่าคลื่นในปริภูมิเสรีที่ตกกระทบบนสายอากาศเหนี่ยวนำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศอันเป็นผลสืบเนื่องให้มีการไหลของสัญญาณเมื่อมีการต่อขั้วดังกล่าวเข้ากับอุปกรณ์รับสัญญาณ

ในกรณีที่สายอากาศทำงานในภาคส่ง สิ่งที่เกิดขึ้นคือ พลังงานในลักษณะของคลื่นบังคับวิถีได้รับการแปลงรูปไปเป็นพลังงานในลักษณะของคลื่นในปริภูมิเสรี การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นในลักษณะที่มีการเคลื่อนย้ายของพลังงานจากสายอากาศเข้าสู่บริเวณปริภูมิเสรี โดยปราศจากการนำหรือการพา และมีใช้การแผ่ เนื่องจากมีการเปลี่ยนรูปพลังงาน ดังนั้นจึงเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวที่เกิดขึ้นว่าการแผ่พลังงาน

สิ่งที่น่าสนใจเกี่ยวกับการแผ่พลังงานก็คือ กลไกการเกิดขึ้นของปรากฏการณ์ เมื่อพิจารณาการทำงานของสายอากาศเส้นลวด จะพบว่าเมื่อเริ่มค้นด้วยการป้อนกำลังงานคลื่นให้ที่ขั้วของสายอากาศ ในจังหวะนี้เท่ากับการกระตุ้นให้อินдукชันมีประจุเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง เมื่ออินдукชันดังกล่าวเคลื่อนที่ไปถึงปลายทางของเส้นลวดก็จะถูกหน่วงให้หยุดและกระดอนกลับ

ในช่วงที่อินдукชันมีประจุถูกเร่งและหน่วงนี้เองจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงาน ซึ่งผลลัพธ์ก็คือการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การถูกเร่งนั้นเกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วยแหล่งพลังงานที่ต่ออยู่ที่ขั้วของสายอากาศ ส่วนการหน่วงเป็นผลจากแรงต้านภายในเนื่องจากการสะสมตัวของประจุที่ปลายสายอากาศ ดังนั้นถ้าหากสามารถทำให้อินдукชันมีประจุถูกเร่งและหน่วง ไม่ว่าจะด้วยการทำให้มีอิมพีแดนซ์ที่ไม่ต่อเนื่องหรือการตัดหรือการหักลวดให้งอ ก็จะส่งผลให้เกิดการแผ่พลังงานในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า รูปที่ 2.2 แสดงกรณีต่างๆของการเกิดขึ้นของการแผ่พลังงานจากสายอากาศเส้นลวด



รูปที่ 2.2 การแผ่พลังงานจากสายอากาศ (ก) สายส่งแบบขนาน
(ข) สายส่งแบบขนานที่ปลายถูกทำให้ต่างออก (ค) สายอากาศขั้วงู

2.1.2 สายอากาศชนิดต่างๆ

ในบรรดาสายอากาศที่มีใช้งานอยู่เป็นจำนวนมากในระบบต่างๆในปัจจุบัน หากจัดแบ่งตามโครงสร้างหลักที่ปรากฏ จะสามารถแบ่งแยกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ดังนี้

2.1.2.1 สายอากาศเส้นลวด

ลักษณะที่ปรากฏของสายอากาศกลุ่มนี้จะประกอบด้วยเส้นลวดตัวนำในรูปแบบต่างๆ หรืออาจเป็นท่อทรงกระบอกกลางที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าความยาวคลื่นหลายๆสายอากาศชนิดนี้มักเป็นที่นิยมใช้งานในย่านความถี่ต่ำ ตัวอย่างสายอากาศกลุ่มนี้ ได้แก่ สายอากาศขั้วคู่ สายอากาศยาคี-ดูคะและสายอากาศขั้วเดี่ยว เป็นต้น รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างสายอากาศกลุ่มนี้



สายอากาศขั้วคู่

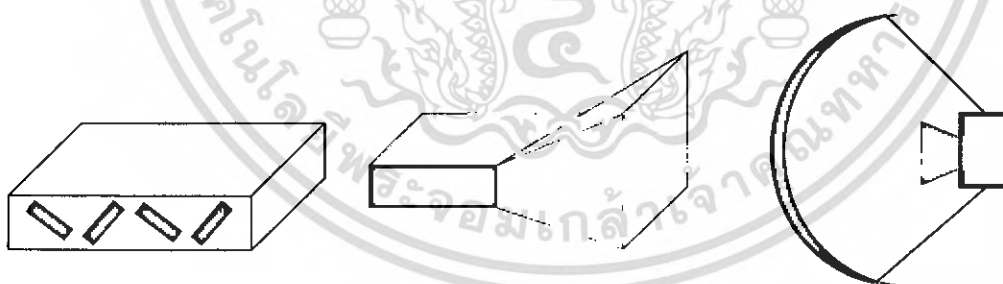
สายอากาศยาคี-ดูคะ

สายอากาศขั้วเดี่ยว

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างสายอากาศเส้นลวด

2.1.2.2 สายอากาศช่องเปิด

สายอากาศกลุ่มนี้มีลักษณะปรากฏให้เห็นชัดเจนในสภาพของช่องเปิดที่มีพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนตัวออกมา มักนิยมใช้งานในย่านความถี่สูง ตัวอย่างสายอากาศกลุ่มนี้ ได้แก่ สายอากาศช่อง สายอากาศปากแตรต่างๆ สายอากาศจานสะท้อน เป็นต้น รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างสายอากาศช่องเปิด



สายอากาศช่อง

สายอากาศปากแตรทรงพีระมิด

สายอากาศจานสะท้อน

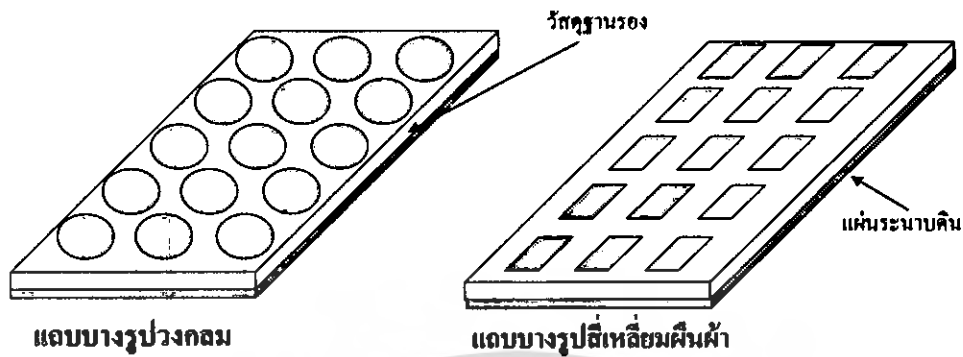
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างสายอากาศช่องเปิด

2.1.2.3 สายอากาศแถบบาง

ลักษณะสำคัญของสายอากาศชนิดนี้ คือ การเป็นแถบโลหะบางที่มีรูปร่างใดๆก็ได้โดยแถบโลหะบางนี้วางตัวอยู่เหนือแผ่นระนาบดิน มีวัสดุฐานรองคั่นระหว่างแถบโลหะบางกับแผ่นระนาบดิน สายอากาศชนิดนี้มักสร้างให้อยู่ในลักษณะกลุ่มสายอากาศ เนื่องจากองค์ประกอบเดียวจะมีอัตราขยายต่ำมาก ไม่เหมาะสมที่จะทำงานในลักษณะสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว จุดเด่นของสายอากาศชนิดนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดที่กะทัดรัด ความแบนราบ และความสามารถที่จะได้รับการติดตั้งบนโครงสร้างที่มีพื้นผิวโค้ง ปกติ มักใช้งานที่ความถี่ค่อนข้างสูง รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างสายอากาศแถบบางชนิดนี้

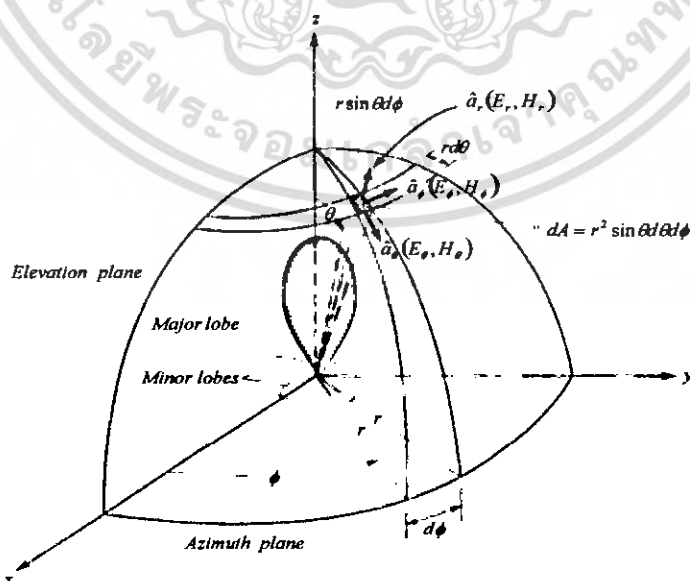


รูปที่ 2.5 ตัวอย่างสายอากาศแถบบาง

2.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้งานสายอากาศ

2.2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศ (Radiation Pattern) หรือรูปแบบสายอากาศ มีความหมายคือ ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ หรือ แสดงโดยเส้นที่สามารถแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติการแพร่กระจายของสายอากาศตามฟังก์ชันของ สเปซ โคออร์ดิเนต (Space Coordinates) ส่วนมากในกรณีของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนี้จะกำหนดการคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far-Field) และแสดงให้เห็น เช่นเดียวกับฟังก์ชันตามทิศทางของ โคออร์ดิเนต คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วยกำลังความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็ก (Flux), ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity), ความเข้มของสนาม (Field Strength), เฟส (Phase), หรือ โพลาริเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่



รูปที่ 2.6 ระบบโคออร์ดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

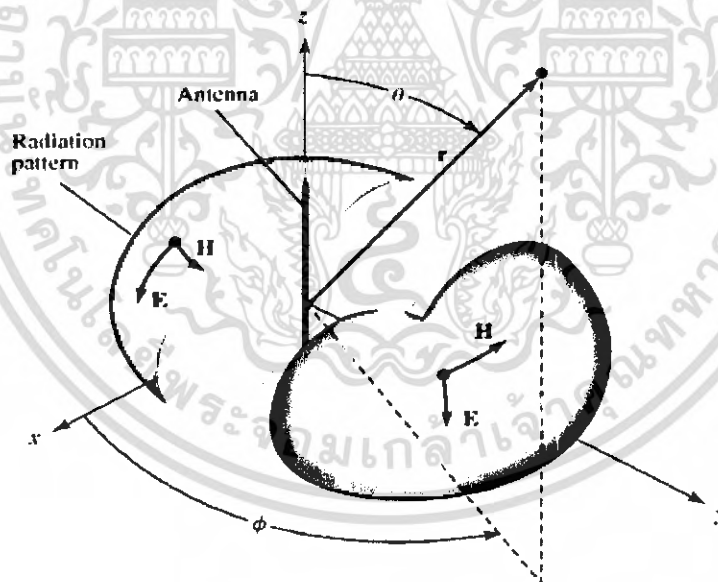
จากรูปจะเป็นการแสดงระบบโคออร์ดิเนตที่ใช้ในการแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น สำหรับการ ใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่า แบบรูปกำลังงาน (Power Pattern) ของสายอากาศและกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆที่มีรัศมีคงที่เรียกว่า สนามการแพร่กระจาย (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น

2.2.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายแบบไอโซทรอปิกแบบชี้ทิศทางและแบบทิศทางรอบตัว

(Isotropic, Directional, and Omnidirectional Pattern)

ตัวแพร่กระจายคลื่น ไอโซทรอปิก (Isotropic Radiation) คือ สายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้นให้มีการแพร่กระจายคลื่นเท่าๆกันในทุกทิศทาง แม้ว่ามันจะเป็นแค่แนวความคิดและสามารถที่จะเป็นจริงได้ในทางกายภาพ แต่ก็มักจะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติและทิศทางของสายอากาศ

สายอากาศชี้ทิศทาง(Directional Antenna) คือสายอากาศที่มีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นหรือรองรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างของสายอากาศที่มีคุณสมบัตินี้คือ สายอากาศแบบทิศทางรอบตัว (Omnidirectional Antenna) คุณสมบัติของสายอากาศแบบนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.7



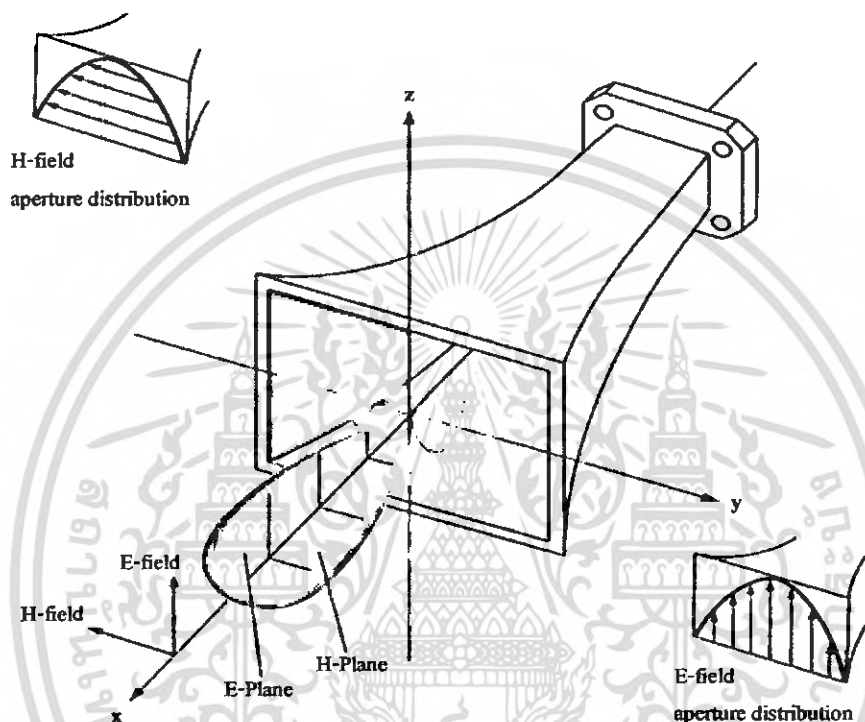
รูปที่ 2.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบทิศทางรอบตัว

จากรูปจะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนี้ ไม่มีทิศทางในระนาบอาซิมุทหรือระนาบมุมกวาด (Azimuth Plane) [$f(\phi), \theta = \pi/2$] แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบเอเลเวชันหรือมุมยก (Elevation Plane) [$g(\theta), \phi = \text{ค่าคงที่}$] แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวนี้เป็นกรณีพิเศษของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบชี้ทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 แบบรูปการกระจายคลื่นหลัก (Principal Pattern)

เรามักจะอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศ ในเทอมของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก (Principal Pattern) ของสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก H สำหรับสายอากาศโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด



รูปที่ 2.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร

จากรูปเป็นการแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก โดยมีระนาบ XZ (ระนาบเอเลเวชัน ; $\phi = 0$) เป็นระนาบ E หลักและมีระนาบ XY (ระนาบอาซิมุท ; $\theta = \pi/2$) เป็นระนาบ H หลัก

2.2.1.3 ลำคลื่นของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)

ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe) เป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำรูปที่ 2.9 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสามมิติ ซึ่งสามารถแบ่งลำคลื่นเป็นแบบต่างๆดังนี้

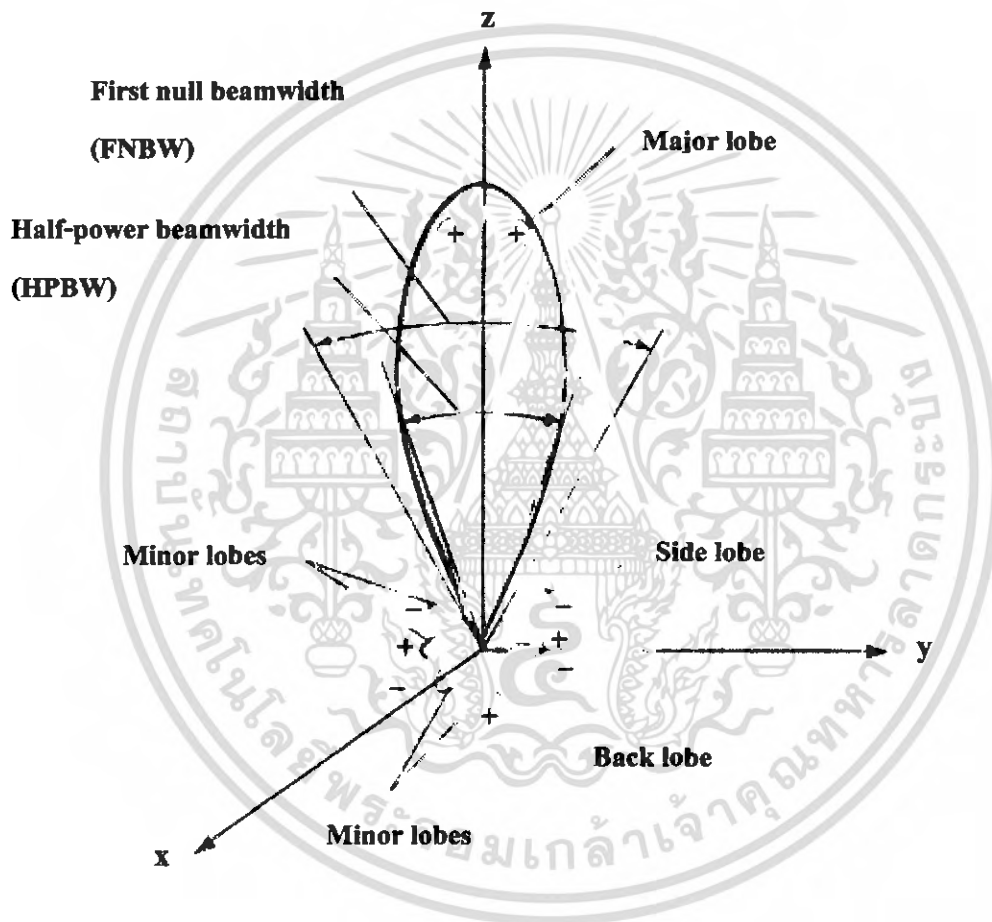
ลำคลื่นหลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นที่อยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุดตามรูปที่ 2.9 มีลำคลื่นหลักอยู่ในทิศทาง $\theta = 0$ สำหรับสายอากาศบางชนิดอาจมีลำคลื่นหลักมากกว่าหนึ่งลำคลื่น เช่นสายอากาศแยกลำคลื่น (Split-beam Antenna)

ลำคลื่นย่อย (Minor Lobe) คือลำคลื่นอื่นที่นอกเหนือจากลำคลื่นหลัก

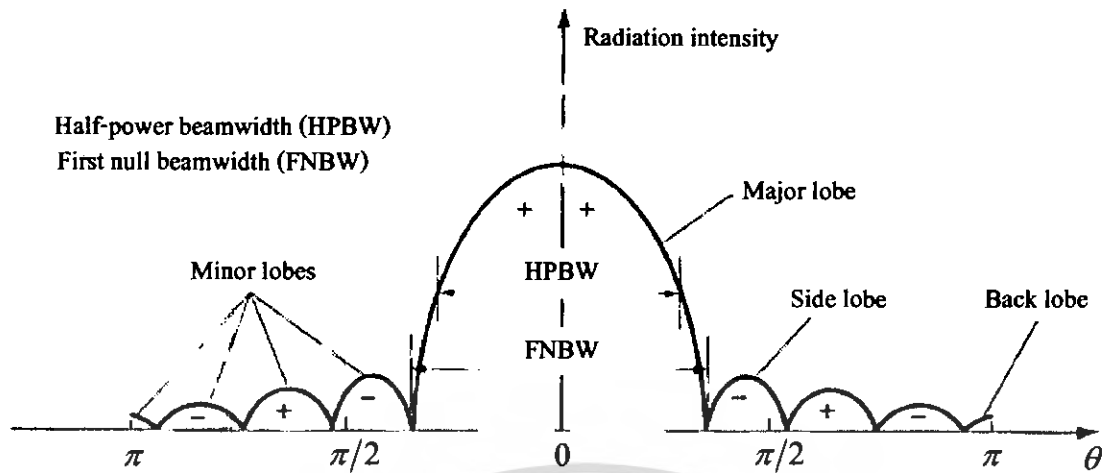
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำคลื่นข้าง (Side Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่ติดอยู่กับลำคลื่นหลักและอยู่ในทิศทางของครึ่งวงกลม ซีกเดียวกับลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นหลัง (Back Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับลำคลื่นหลัก ปกติแล้วลำคลื่นย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสายอากาศที่ดีจึงต้องกำจัดลำคลื่นเหล่านี้ให้เหลือน้อยที่สุด ระดับของลำคลื่นย่อยมักจะแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นพลังงานในลำคลื่นที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นพลังงานในลำคลื่นหลัก ซึ่งเรียกว่าอัตราส่วนของไซด์โลบ (Side Lobe Level: SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของไซด์โลบน้อยกว่า -20 dB



รูปที่ 2.9 (ก) โลบต่างๆและบีมวิดท์ของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ



รูปที่ 2.9 (ข) แบบรูปการแพร่กระจายในแบบอเนกนิยม

2.2.1.4 บริเวณต่างๆของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไปมักจะเป็นบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive-Near Field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating - Near Field) และสนามกระจายระยะไกล (Far Field) ดังแสดงในรูปที่ 2.10

บริเวณสนามแพร่กระจายระยะใกล้



$$R_1 = 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$$

$$R_2 = 2D^2/\lambda$$

รูปที่ 2.10 การแบ่งบริเวณสนามจากสายอากาศ

บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด และมีสนามเป็นชนิดแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่บริเวณนี้จะมีระยะทาง $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ จากผิวของสายอากาศเมื่อ λ เป็นความยาวคลื่นและ D เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ

บริเวณสนามกระจายระยะใกล้เป็นบริเวณของสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับ บริเวณสนามระยะไกล โดยมีสนามที่แพร่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายของสนามตามมุมต่างๆนั้นแปรผันตามระยะทางจากสายอากาศ เมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้น ในบริเวณนี้จะมีระยะทาง $2D^2/\lambda > R \geq 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$

บริเวณสนามระยะไกลเป็นบริเวณสนามของสายอากาศ ซึ่งการแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่างๆไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศถ้าสายอากาศมีมิติที่ใหญ่ที่สุดเท่ากับ D บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง R มากกว่า $2D^2/\lambda$ จากสายอากาศ

ในบริเวณนี้สามารถมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse Field) และการแพร่กระจายของสนามตามมุมต่างๆไม่ขึ้นกับระยะทาง ขอบในบริเวณดังกล่าวมีค่า R เท่ากับ $2D^2/\lambda$ และขอบนอกมีค่าเป็นอนันต์

2.2.2 ความหนาแน่นกำลังงานการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Power Density)

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการส่งข่าวสารผ่านตัวกลางถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับพลังงานและกำลังงานไฟฟ้า โดยใช้ตัวความสัมพันธ์ดังกล่าวได้แก่ พอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น (Instantaneous Poynting Vector) ซึ่งมีสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\vec{W} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (2.1)$$

เมื่อ \vec{W} = พอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น (W/m²)

\vec{E} = ความเข้มของสนามไฟฟ้าชั่วขณะเวลานั้น (V/m)

\vec{H} = ความเข้มสนามแม่เหล็กชั่วขณะ (A/m)

เนื่องจากพอยดิงเวกเตอร์มีความหมายแสดงถึงความหนาแน่นของกำลังงาน ดังนั้นกำลังงานทั้งหมดที่พุ่งตัดผ่านพื้นผิวปิดจะสามารถหาได้โดยการอินทิเกรตส่วนของพอยดิงเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิวทั้งหมดซึ่งเมื่อเขียนเป็นสมการจะได้

$$P = \oint_S \vec{W} \cdot d\vec{s} = \oint_S \vec{W} \cdot \vec{n} da \quad (2.2)$$

เมื่อ P = กำลังงานทั้งหมดชั่วขณะเวลานั้น (W)

da = พื้นที่จ็วบนพื้นที่ปิด (m²)

ในกรณีของสนามที่แปรผันกับเวลามักจะหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นกำลังงานได้โดยการอินทิเกรตค่าพอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้นตลอดหนึ่งคาบ แล้วหารด้วยคาบเวลานั้นสำหรับสนามที่แปรผันกับเวลา ซึ่งกระจายเป็นฮาร์โมนิกในรูป $e^{j\omega t}$ เมื่อกำหนดสนาม \vec{E} และ \vec{H} เป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเชิงซ้อนแล้วจะหาความสัมพันธ์กับค่า \vec{E} และ \vec{H} ชั่วขณะเวลาใดๆได้จาก

$$\vec{E}(x, y, z; t) = \text{Re}[\vec{E}(x, y, z)e^{j\omega t}] \quad (2.3)$$

$$\vec{H}(x, y, z; t) = \text{Re}[\vec{H}(x, y, z)e^{j\omega t}] \quad (2.4)$$

จากสมการ(2.3),(2.4)โดยอาศัย $\text{Re}[\vec{E}e^{j\omega t}] = \frac{1}{2}[\vec{E}e^{j\omega t} + \vec{E}^*e^{-j\omega t}]$ และสมการ (2.1) จะ

สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\bar{W} = \bar{E} \times \bar{H} = \frac{1}{2} \text{Re}[\bar{E} \times \bar{H}^*] + \frac{1}{2} [\bar{E} \times \bar{H} e^{2j\omega t}] \quad (2.5)$$

เทอมแรกของสมการที่ (2.5) ไม่เป็นฟังก์ชันของเวลาและเทอมที่สองมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นสองเท่าของความถี่ที่กำหนดให้ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของพหุคูณเวกเตอร์จึงสามารถที่จะหาได้เป็น

$$\bar{W}_{AV}(x, y, z) = [\bar{W}(x, y, z; t)]_{AV} = \frac{1}{2} \text{Re}[\bar{E} \times \bar{H}^*] \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.6)$$

ตัวประกอบ $\frac{1}{2}$ ในสมการที่ (2.5) และ (2.6) เกิดขึ้นเพราะสนาม E และ H เป็นค่าสูงสุด จากสมการที่ (2.6) กำลังงานเฉลี่ยที่แพร่กระจายในอากาศ จะเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} P_{rad} &= P_{AV} \\ &= \iint_S \bar{W}_{rad} \cdot d\bar{s} \\ &= \frac{1}{2} \iint_S \text{Re}[\bar{E} \times \bar{H}^*] \cdot d\bar{s} \end{aligned} \quad (2.7)$$

2.2.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)

คำจำกัดความของคำว่าความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ในทิศทางที่กำหนดให้คือ กำลังงานที่แพร่ออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศเกี่ยวกับสนามระยะไกลความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นสามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่นและผลจากการยกกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.8)$$

เมื่อ U = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

W_{rad} = ความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น (W/m²)

ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้คือ

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

เมื่อ E = ความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

E_θ, E_ϕ = ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

η = อินทริเนสิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้นในรูปแบบของการแพร่กระจายคลื่นของกำลังงานก็จะใช้เพื่อแสดงถึงความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (2.8) ตลอดมุมตัน 4π ทั้งหมดซึ่งจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{rad} = \iiint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.9)$$

2.2.4 ค่าการชี้ทิศทางสูงสุด (Directivity)

ค่าการชี้ทิศทางในทิศทางที่กำหนดคือ อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งใช้สำหรับอ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศสำหรับใช้อ้างอิงนี้จะใช้อิซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (Isotropic Point Source)

ค่าการชี้ทิศทางสูงสุดคือ ค่าการชี้ทิศทางในทิศทางที่มีค่ามากที่สุดหรือค่าการชี้ทิศทางสูงสุดของต้นกำเนิดที่ไม่เป็นอิซโทรปิกคือ อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของอิซโทรปิกพอยท์ซอร์สเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_g = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.10)$$

$$D_{max} = D_g = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.11)$$

เมื่อ D_g = ค่าการชี้ทิศทาง (ไม่มีหน่วย)

D_0 = ค่าการชี้ทิศทางสูงสุด (ไม่มีหน่วย)

U = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

U_{max} = ค่าสูงสุดของความเข้มของการแผ่กระจาย (W/หน่วยมุมตัน)

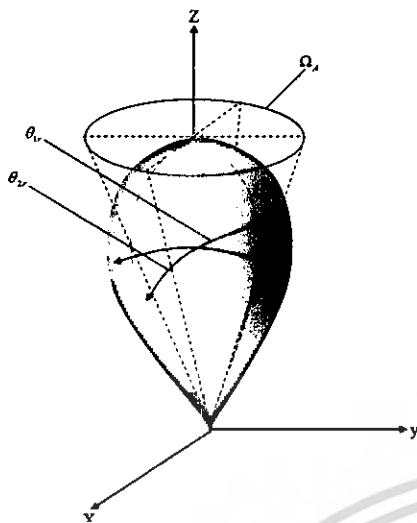
U_0 = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของอิซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (W/หน่วยมุมตัน)

P_{rad} = กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด (W)

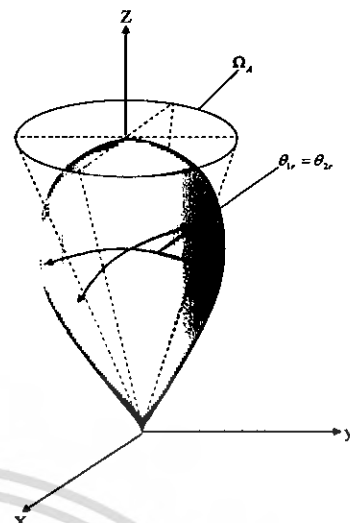
จากสมการที่ (2.10) และ (2.11) จะทราบ ค่าการชี้ทิศทางและค่าการชี้ทิศทางสูงสุดของอิซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่มีค่าเป็นหนึ่งเพราะว่ามันมีการแผ่กระจายกำลังงานออกไปทุกทิศทางด้วยค่าที่เท่ากันคือ U, U_{max} และ U_0 ต่างมีค่าเท่ากัน แต่สำหรับต้นกำเนิด (สายอากาศ) แบบอื่นนั้นย่อมมีค่าการชี้ทิศทางมากกว่าหนึ่งเสมอ และค่าของการชี้ทิศทางจะมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์และน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าการชี้ทิศทางสูงสุด ($0 \leq D_g \leq D_0$)

2.2.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง (Directional Patterns)

สายอากาศที่มีลำคลื่นหลักแคบๆเพียงลำคลื่นเดียวและมีลำคลื่นย่อยที่มีขนาดเล็กจนสามารถตัดทิ้งได้ มุมตันของลำคลื่น จะมีค่าประมาณเท่ากับผลคูณของ HPBW ใน 2 ระนาบ ซึ่งตั้งฉากกันดังแสดงในรูป 2.11(ก) สำหรับแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่หุนแล้วสมมาตรกัน โดยรอบ HPBW ในระนาบใดๆจะเท่ากัน ดังแสดงในรูป 2.11(ข)



(ก) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไม่สมมาตร



(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสมมาตร

รูปที่ 2.11 มุมตันของลำคลื่นซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่สมมาตรกันและสมมาตรกัน

$$D_0 = \frac{4\pi}{\Omega_A} = \frac{4\pi}{\Theta_{1r}\Theta_{2r}} \quad (2.12)$$

มุมตันของลำคลื่น Ω_A ประมาณได้จาก

$$\Omega_A \approx \Theta_{1r}\Theta_{2r} \quad (2.13)$$

Θ_{1r} = HPBW ในระนาบใดๆ (องศา)

Θ_{2r} = HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (องศา)

เมื่อรู้ความกว้างของลำคลื่นเป็นองศา สมการ (2.12) จะสามารถคิดแปลงให้เหมาะสมที่จะแทนค่าความกว้างของลำคลื่นนั้นโดยตรงได้เป็น

$$D_0 \approx \frac{4\pi(180/\pi)^2}{\Theta_{1d}\Theta_{2d}} = \frac{41253}{\Theta_{1d}\Theta_{2d}} \quad (2.14)$$

2.2.6 อัตราขยาย (Gain)

อัตราขยายเป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าสภาพเจาะจงทิศทาง โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วยในขณะที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางอธิบายคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

อัตราการขยายกำลัง (Power Gain) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้นั้นมีค่าเท่ากับ 4π คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อทิศทางกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่ง เมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้โดยเฉพาะ โดยทั่วไปแล้วจะคิดค่ากำลังขยายในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{อัตราขยาย} &= 4\pi \frac{\text{ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น}}{\text{กำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ}} \\ &= 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \end{aligned} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้วมักจะพูดถึงอัตราขยายสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของอัตราขยายกำลังในทิศทางที่กำหนดให้ต่ออัตราขยายกำลังของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศนั้นต้องเท่ากับสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบอาจจะเป็นสายอากาศโคโพล สายอากาศปากแตร แต่โดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็นไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้น

$$G_g = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.16)$$

กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด P_{rad} สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ P_{in} ดังนี้

$$P_{rad} = e_t P_{in} \quad (2.17)$$

เมื่อ e_t เป็นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย) ทำให้จะได้

$$G_g(\theta, \phi) = e_t \left[\frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (2.18)$$

ซึ่งสัมพันธ์กับค่าการชี้ทิศทางดังนี้

$$G_g(\theta, \phi) = e_t D_g(\theta, \phi) \quad (2.19)$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าสูงสุดของอัตราขยายจะสัมพันธ์กับค่าการชี้ทิศทางสูงสุดโดย

$$G_0 = D_g(\theta, \phi)_{max} = e_t D_g(\theta, \phi)_{max} \quad (2.20)$$

ดังนั้นค่าประมาณของอัตราขยายจะได้

$$G_0 = \frac{30000}{\Theta_{1r} \Theta_{2r}} \quad (2.21)$$

Θ_{1r} = HPBW ในระนาบใดๆ (องศา)

Θ_{2r} = HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (องศา)

2.2.7 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency)

ประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ e_t จะใช้ได้เมื่อเรากำหนดถึงการสูญเสียต่างๆ ที่ขั้วและภายในโครงสร้างของสายอากาศด้วย การสูญเสียต่างๆนั้นอาจเนื่องมาจาก

- 1) การสะท้อนกลับเนื่องมาจากความเข้ากันไม่ได้ (Mismatch) กันระหว่างสายส่งกับสายอากาศ
- 2) การสูญเสียทั้งในดิวาและฉนวน ($I^2 R$)

โดยทั่วไปแล้ว ประสิทธิภาพทั้งหมด คำนวณได้จาก

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (2.22)$$

เมื่อ e_t = ค่าประสิทธิภาพทั้งหมด (ไม่มีหน่วย)

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

e_c = ค่าประสิทธิภาพของดิวา (ไม่มีหน่วย)

e_d = ค่าประสิทธิภาพของฉนวน (ไม่มีหน่วย)

Γ = ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของศักดาไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

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

เมื่อ Z_{in} = ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

Z_0 = ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ (Characteristic Impedance) ของสายส่ง

ปกติ e_c และ e_d คำนวณหาได้ลำบาก ส่วนมากมักหาได้จากการทดลอง แต่ถึงกระนั้นก็แยก e_c จาก e_d

ไม่ออก ดังนั้นเพื่อความสะดวก มักจะเขียนสมการ (2.22) ใหม่เป็น

$$e_r = e_r e_{cd} = (1 - |\Gamma|^2) \quad (2.23)$$

เมื่อ $e_{cd} = e_c e_d$ คือประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

2.2.8 ประสิทธิภาพของลำคลื่น (Beam Efficiency)

เป็นพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่ง ที่จะใช้ในการตัดสินใจว่าสายอากาศมีคุณภาพของการส่งหรือรับคลื่นดีเพียงใด ได้แก่ ประสิทธิภาพของลำคลื่น สำหรับสายอากาศ ซึ่งมีลำคลื่นหลักอยู่ในทิศทางแกน $Z(\theta = 0)$ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) ประสิทธิภาพของลำคลื่นจะกำหนดได้ดังนี้คือ

$$BE = \frac{\text{Power transmitted (received) within cone angle } \theta_1}{\text{Power transmitted (received) by the antenna}} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.24)$$

เมื่อ θ_1 เป็นมุมที่มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของมุมของกรวย ที่เราต้องการจะหาเปอร์เซ็นต์ของกำลังงานทั้งหมดในนั้น ดังนั้น จะเขียนสมการ (2.24) ได้ดังนี้

$$BE = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_1} U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2.25)$$

เมื่อให้ θ_1 เป็นมุมที่เกิดมินัล (Null) คือ จุดตำแหน่งที่กำลังมีค่าเป็นศูนย์คู่แรก ดังนั้น ประสิทธิภาพของลำคลื่นจะเป็นปริมาณที่แสดงถึงอัตราส่วนของจำนวนกำลังงานในคลื่นหลัก ต่อ กำลังงานที่มีทั้งหมด

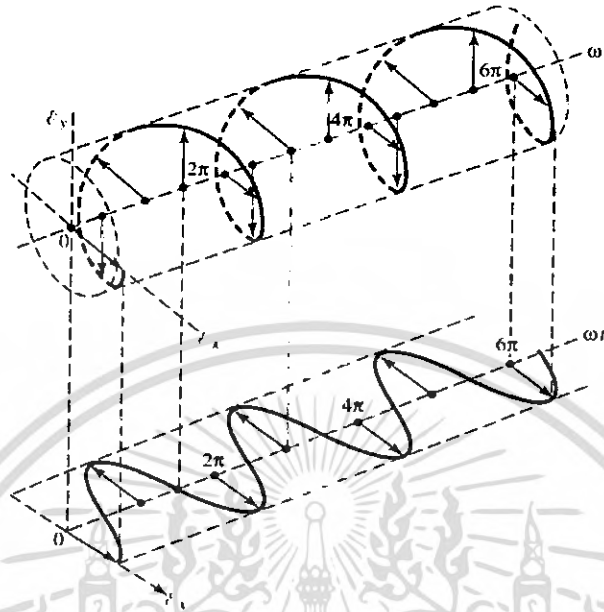
2.2.9 โพลาริเซชัน (Polarization)

ก่อนที่จะกล่าวถึงความหมายของโพลาริเซชันของสายอากาศ จะกล่าวถึงความหมายของโพลาริเซชัน ของคลื่นเสียก่อน

โพลาริเซชันของลำคลื่นที่แพร่กระจายนั้น เป็นรูปแสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไป ที่อธิบายทิศทางและขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลา รูปแสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลาริเซชันจะแสดงการกวาดของยอดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ ณ ตำแหน่งที่ทำการสังเกต ซึ่งทั้งนี้และการสังเกตนี้จะทำโดยมองตามหลังคลื่นที่เดินทางไป รูปที่ 2.12 ประกอบ



รูปที่ 2.12 การหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระนาบและวงรีโพลาริเซชัน ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในระนาบ $Z=0$

สำหรับโพลาริเซชันของสายอากาศ ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง จะเป็นโพลาริเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้นจากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังที่ขั้วของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาจะให้หมายถึง ทิศทางที่สายอากาศมีค่าการขยายมากที่สุด ดังนั้นโพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกัน จะต่างกัน การแบ่งชนิดของโพลาริเซชันอาจแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ

- 1) โพลาริเซชันเชิงเส้น (Linear Polarization)
- 2) โพลาริเซชันวงกลม (Circular Polarization)
- 3) โพลาริเซชันแบบวงรี (Elliptical Polarization)

ถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา จะเรียกว่า เป็นโพลาริเซชันมือขวา ในขณะที่หากสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจะเป็นโพลาริเซชันมือซ้าย ซึ่งจะเขียนสนามชั่วขณะเวลานั้นของคลื่นระนาบ ที่เดินทางในทิศทาง $-Z$ ได้ว่า

$$\vec{E}(z;t) = \hat{a}_x E_x(z;t) + \hat{a}_y E_y(z;t) \quad (2.26)$$

เมื่อส่วนประกอบของสนามชั่วขณะเวลานั้น สัมพันธ์กับค่าเชิงซ้อนของสนามนั้นดังนี้

$$E_x(z;t) = E_x \cos(\omega t + kz + \phi_x) \quad (2.27)$$

$$E_y(z;t) = E_y \cos(\omega t + kz + \phi_y) \quad (2.28)$$

เมื่อ E_x และ E_y เป็นขนาดของสนามค่าสูงสุด ในทิศทาง x และ y ตามลำดับ

2.2.9.1 โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น (Linear Polarization)

คลื่นซึ่งเป็นโพลาริเซชันเชิงเส้น ความแตกต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบทั้งสองของสนาม จะมีค่าดังนี้

$$\Delta\phi = \phi_y + \phi_x = n\pi \quad ; \quad n = 0,1,2,\dots \quad (2.29)$$

2.2.9.2 โพลาริเซชันวงกลม (Circular Polarization)

การที่จะสามารถเกิดการโพลาริเซชันแบบวงกลมได้ ก็ต่อเมื่อขนาดของส่วนประกอบของสนามทั้งสองมีค่าเท่ากัน และความต่างเฟส ระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง เป็นจำนวนคี่เท่าของ $\frac{\pi}{2}$ นั่นคือ

$$|E_x| = |E_y| \longrightarrow E_x = E_y \quad (2.30)$$

เมื่อ

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\frac{(1+4n)\pi}{2} \quad ; \quad n = 0,1,2,\dots \text{cw} \quad (2.31)$$

$$= -\frac{(1+4n)\pi}{2} \quad ; \quad n = 0,1,2,\dots \text{ccw} \quad (2.32)$$

เมื่อ

CW (Clockwise) คือ สนามหมุนตามเข็มนาฬิกา

CCW (Counter Clockwise) คือ สนามหมุนทวนเข็มนาฬิกา

ถ้าคลื่นเดินทางในทิศทางตรงกันข้าม (คือทิศทาง +Z) เฟสในสมการ (2.31) และ (2.32) ที่ทำให้เกิด CW (Clockwise) และ CCW (Counter Clockwise) จะต้องสลับกัน

2.2.9.3 โพลาริเซชันแบบวงรี (Elliptical Polarization)

โพลาริเซชันแบบวงรี จะเกิดขึ้นเมื่อความต่างเฟสเป็นจำนวนคี่เท่าของ $\frac{\pi}{2}$ แต่ขนาดของสนามไฟฟ้าจะไม่เท่ากัน หรือความต่างเฟสเป็นจำนวนคี่ของ $\frac{\pi}{2}$ นั่นคือ

$$|E_x| \neq |E_y| \longrightarrow E_x \neq E_y$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\frac{(1+4n)\pi}{2} \quad ; \quad n = 0,1,2,\dots \text{cw} \quad (2.33a)$$

$$= -\frac{(1+4n)\pi}{2} \quad ; \quad n = 0,1,2,\dots \text{ccw} \quad (2.33b)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm \frac{n\pi}{2} > 0 \longrightarrow \text{cw} \quad (2.34)$$

$$< 0 \longrightarrow \text{ccw} \quad (2.35)$$

โดยที่ $n = 0,1,2,\dots$

ในกรณีของโพลาริเซชันแบบวงรีนั้น การกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ จะเป็นวงรีเอียง อัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนย่อย จะเรียกว่าเป็นอัตราส่วนของแกน (Axial Ratio : AR) ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

$$AR = \frac{OA}{OB} \quad \text{โดยที่ } 1 \leq AR \leq \infty \quad (2.36)$$

เมื่อ $OA =$ แกนหลัก และ $OB =$ แกนย่อย

การเอียงของวงรีเทียบกับแกน y สามารถแสดงได้ด้วยมุมเอียงดังนี้คือ

$$\tau = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2E_x E_y \cos(\Delta\phi)}{E_x^2 + E_y^2} \right] \quad (2.37)$$

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

$E_y (E_x)$ หรืออัตราส่วนของแกนมีค่าเท่ากับ $\frac{E_x}{E_y}$ หรือ $\frac{E_y}{E_x}$

2.2.9.4 โพลาริเซชันลอสแฟกเตอร์ (Polarization Loss Factor : PLF)

โดยทั่วไปแล้ว โพลาริเซชันของสายอากาศจะไม่เหมือนกับโพลาริเซชันของคลื่นที่เดินทางมายังสายอากาศ ซึ่งเรียกว่า เกิด โพลาริเซชันมismatch (Polarization Mismatch) ทำให้สายอากาศไม่สามารถดึงเอาพลังงานออกจากคลื่นได้สูงสุด เนื่องจากเกิดการสูญเสียจากโพลาริเซชัน (Polarization Loss) สมมติว่า สนามไฟฟ้าของคลื่นที่เดินทางเข้ามายังสายอากาศนั้นเขียนได้ดังนี้

$$\vec{E}_i = \hat{\rho}_w E_i \quad (2.38)$$

เมื่อ $\hat{\rho}_w$ เป็นหน่วยเวกเตอร์ของคลื่น และ โพลาริเซชันของสนามไฟฟ้าของสายอากาศรับ มีค่าดังนี้

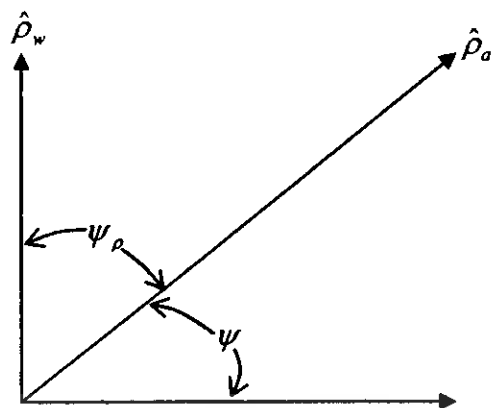
$$\vec{E}_a = \hat{\rho}_a E_a \quad (2.39)$$

เมื่อ $\hat{\rho}_a$ เป็นหน่วยเวกเตอร์ของสายอากาศ

จะสามารถกำหนดให้โพลาริเซชันลอสแฟกเตอร์ (Polarization Loss Factor : PLF) มีค่าดังนี้

$$PLF = |\hat{\rho}_w \cdot \hat{\rho}_a|^2 = |\cos \psi_p|^2 \quad (2.40)$$

เมื่อ ψ_p เป็นมุมระหว่างหน่วยเวกเตอร์ทั้งสอง ดังแสดงในรูป 2.13

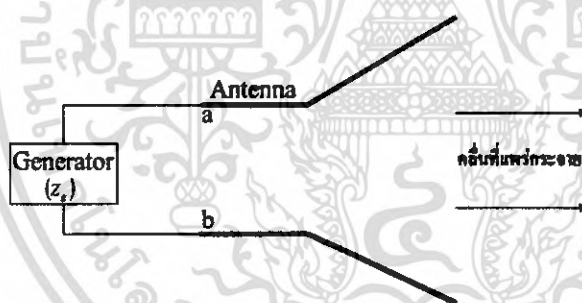


รูปที่ 2.13 หน่วยเวกเตอร์โพลาไรเซชันของคลื่นและสายอากาศ

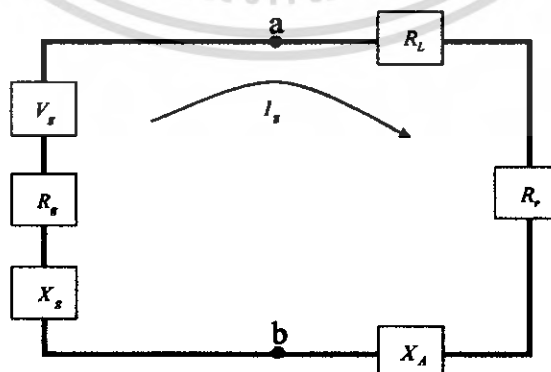
2.2.10 อินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)

อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่ขั้วของสายอากาศนั้น อาจเป็นอัตราส่วนระหว่างศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศนั้นหรือเป็นอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่จุดใดๆ ในรูปที่ 2.14 (ก) ที่ขั้ว a และ b เป็นขั้วของสายอากาศ อัตราส่วนของศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วนี้ เมื่อไม่ได้ต่อโหลด จะเป็นอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งมีค่า

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.41)$$

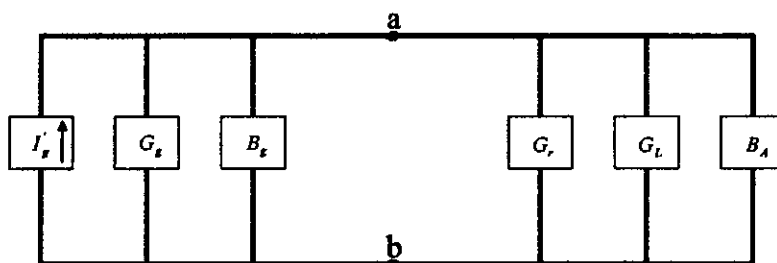


(ก) สายอากาศในโหมดการส่ง



(ข) วงจรสมมูลย์ทวินิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) วงจรสมมูลนอร์ตัน

รูปที่ 2.14 สายอากาศส่งและวงจรสมมูลย์

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

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

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

โดยทั่วไปความต้านทานในสมการ (2.41) จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

$$R_A = R_r + R_L \quad (2.42)$$

เมื่อ R_r คือ ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

R_L คือ ความต้านทานการสูญเสียของสายอากาศ

และสายอากาศทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง จะแสดงวงจรสมมูลย์ได้ดังรูปที่ 2.14(ข)และ2.14(ค)

ในการหาปริมาณกำลังงานที่ถูกนำมาสู่ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นเพื่อแพร่กระจายออก กับกำลัง

งานที่สูญเสียในความต้านทานการสูญเสีย ที่กลายเป็นความร้อน $\left(\frac{I^2 R_L}{2}\right)$ นั้น เราจะหากระแสที่ไหล

ภายในลูป (Loop) ได้ว่ามีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} I_g &= \frac{V_g}{Z_i} = \frac{V_g}{Z_A + Z_g} \\ &= \frac{V_g}{(R_r + R_L + R_g) + j(X_A + X_g)} \end{aligned} \quad (2.43)$$

เมื่อ R_g คือ ความต้านทานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ (โอห์ม)

X_g คือ รีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ (โอห์ม)

และขนาดของกระแสจะมีค่าดังนี้

$$|I_g| = \frac{|V_g|}{\left[(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2\right]^{1/2}} \quad (2.44)$$

เมื่อ V_g เป็นค่าศักดาไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดสัญญาณ กำลังงานที่ถูกนำมายังสายอากาศเพื่อการแพร่กระจายคลื่น จะมีค่าดังนี้

$$P_r = \frac{1}{2} |I_g|^2 R_r$$

$$= \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_r}{[(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2]} \right] \quad (2.45)$$

และกำลังงานที่สูญเสียกลายเป็นความร้อน จะคําดังนี้

$$\begin{aligned} P_L &= \frac{1}{2} |I_g|^2 R_L \\ &= \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_L}{[(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2]} \right] \end{aligned} \quad (2.46)$$

กำลังงานส่วนที่เหลือ จะเป็นส่วนที่สูญเสียเป็นความร้อนในความต้านทานที่ขั้ว R_g ของเครื่องกำเนิด สัญญาณซึ่งมีค่า

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

กำลังงานที่ถูกนำมายังสายอากาศจะมีค่ามากที่สุด เมื่อเกิดการคอนจูเกตแมทซ์ (Conjugate Match) นั่นคือ จะเกิดเมื่อ

$$R_g = R_r + R_L \quad (2.48)$$

และ

$$X_A = -X_g \quad (2.49)$$

ในกรณีนี้ สมการ(2.46),(2.47)และ(2.48)จะกลายเป็นสมการคังนี้

$$P_r = \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_r}{4(R_r + R_L)^2} \right] = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_r}{(R_r + R_L)^2} \right] \quad (2.50)$$

$$P_L = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_L}{(R_r + R_L)^2} \right] \quad (2.51)$$

$$P_g = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_g}{(R_r + R_L)^2} \right] = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{1}{(R_r + R_L)} \right] \quad (2.52)$$

จากสมการ(2.50)ถึง(2.52)จะพบว่า

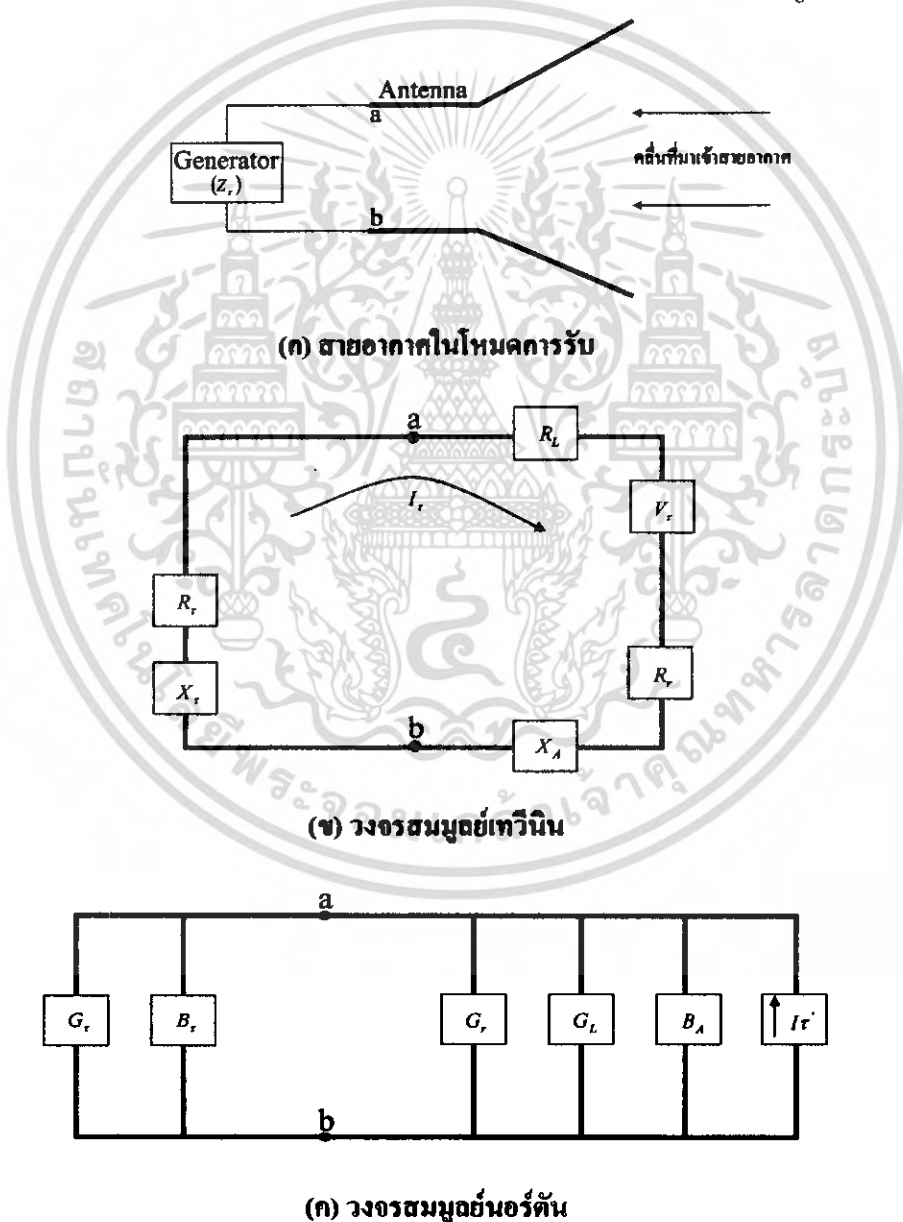
$$\begin{aligned} P_g &= P_r + P_L = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_g}{(R_r + R_L)^2} \right] \\ &= \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_r + R_L}{(R_r + R_L)^2} \right] \end{aligned} \quad (2.53)$$

คังนั้น กำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณ จะต้องจ่ายเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทซ์ จะมีคําดังนี้

$$\begin{aligned} P_S &= \frac{1}{2} V_g I_g^* = \frac{1}{2} V_g \left[\frac{V_g^*}{2(R_r + R_L)} \right] \\ &= \frac{|V_g|^2}{4} \left[\frac{1}{(R_r + R_L)} \right] \end{aligned} \quad (2.54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในจำนวนกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่ายทั้งหมด ครึ่งหนึ่งจะสูญเสียเป็นความร้อนภายในความต้านทานภายใน (R_g) ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ และอีกครึ่งหนึ่งจะถูกนำมายังสายอากาศซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทซ์เท่านั้น ในส่วนของกำลังงานที่มายังสายอากาศส่วนหนึ่งจะแพร่กระจายออกไป โดยผ่านกำลังงานที่เกิดจากความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น อีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียเป็นความร้อนซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ ซึ่งถ้าสายอากาศไม่มีการสูญเสีย ($e_{cd} = 1$) ครึ่งหนึ่งของกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่าย จะแพร่กระจายออกไปเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทซ์ ถ้าสมมติว่าเป็นการแมทซ์ที่สมบูรณ์ระหว่างสายอากาศกับสายส่ง ($e_r = 1$) ถ้ามีการสูญเสียเนื่องจากไม่แมทซ์กันแล้ว จะทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศลดลง สำหรับการใส่สายอากาศเป็นสายอากาศรับ ดังรูปที่ 2.15 ถ้าที่คลื่นตกกระทบเข้ามายังสายอากาศ จะเหนี่ยวนำให้เกิดศักดาไฟฟ้า V_g ซึ่งเทียบได้กับ V_g ในโหมดการส่ง



รูปที่ 2.15 สายอากาศรับและวงจรสมมูลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความถี่ และจะเหมาะสมกับสายส่งเฉพาะในช่วงความถี่หนึ่งๆเท่านั้น นอกจากนี้ อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศยังขึ้นกับแฟคเตอร์ต่างๆ อีก ได้แก่ รูปทรง วิธีการป้อนสัญญาณ และสิ่งแวดล้อมข้างเคียง เนื่องจากคำนวณได้ยากจึงมักจะหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ได้จากการทดลองวัด

2.2.11 ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ(Antenna Radiation Efficiency)

ประสิทธิภาพของตัวนำและฉนวน e_{cd} เป็นอัตราส่วนของกำลังงานที่ถูกนำมายังความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น R_r และความต้านทานการสูญเสีย R_L

จากสมการ(2.45)

$$P_r = \frac{1}{2} |I_g|^2 R_r$$

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

และจากสมการ(2.46)

$$P_L = \frac{1}{2} |I_g|^2 R_L$$

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

จะหาได้ว่า

$$e_{cd} = \left[\frac{R_r}{R_r + R_L} \right] \quad (2.54)$$

ในกรณีของท่อโลหะซึ่งยาว ℓ และมีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ มีค่าเท่ากับ A ความต้านทานกระแสดตรงมีค่า R_{dc} ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$R_{dc} = \left[\frac{\ell}{\sigma A} \right] \quad (2.55ก)$$

ถ้าสกินเดปท์ (Skin Depth) δ มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเส้นทแยงมุมที่สั้นที่สุดของพื้นที่หน้าตัดนั้น กระแสจะไหลอยู่เฉพาะในบริเวณชั้นบางๆ ที่ผิวตัวนำเท่านั้น ดังนั้นค่าความต้านทานที่สูง จะมีค่าดังนี้คือ

$$R_{hf} = \frac{\ell R_s}{P} = \frac{\ell}{P} \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} \quad (2.55ข)$$

เมื่อ P เป็นเส้นรอบวงของพื้นที่หน้าตัดท่อโลหะ ($P = C = 2\pi b$ สำหรับลวดวงกลมรัศมี b) R_s คือความต้านทานที่ผิวของตัวนำ ω เป็นความถี่เชิงมุม μ_0 เป็นสภาพซึมซาบแม่เหล็กของอากาศและ σ เป็นความนำของโลหะ

จากรูปที่ 2.16 เส้นลวดสั้นจะวางตัวในแนวแกน z โดยจุดกึ่งกลางของเส้นลวดจะอยู่ที่จุดศูนย์กลางของระบบพิกัด เนื่องจากสายอากาศสั้นทำด้วยเส้นลวดที่มีขนาดสั้นดังนั้นกระแสลวดความยาวของเส้นลวดพิจารณาได้เป็นกระแสสม่ำเสมอ (Uniform Current) ซึ่งกระแสแปรตามเวลาบนเส้นลวดได้เป็น

$$\bar{I} = I_m e^{j\omega t} \hat{a}_z \quad (2.56)$$

การแผ่พลังงาน (Radiation) จากสายอากาศเส้นลวดสั้นนี้จะสามารถหาได้จากศักย์หน่วง และสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations) สำหรับศักย์หน่วง A นั้นจากเอกลักษณ์ของเวกเตอร์จะได้เป็น

$$\nabla \cdot \nabla \times \bar{A} = 0 \quad (2.57)$$

และจากสมการของแมกซ์เวลล์จะเป็น

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (2.58)$$

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (2.59)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (2.60)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho \quad (2.61)$$

เมื่อ

$$\bar{B} = \mu \bar{H} \quad (2.62)$$

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E} \quad (2.63)$$

จากสมการที่(2.57)และ(2.60)นั้น ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะหาได้จากการเคิร์ลศักย์แม่เหล็กชนิดเวกเตอร์ได้เป็น

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A} \quad (2.64)$$

จากสมการที่(2.59)จะได้

$$\nabla \times \bar{E} + \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = 0 \quad (2.65)$$

เมื่อแทนสมการ(2.64)และสมการ(2.65)จะได้เป็น

$$\nabla \times \left(\bar{E} + \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (2.66)$$

จากเอกลักษณ์ของเวกเตอร์จะได้

$$\nabla \times \nabla \Psi = 0 \quad (2.67)$$

จากสมการ(2.66)และสมการ(2.67)นิยามให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{E} + \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} = -\nabla \psi \quad (2.68)$$

จากสมการ(2.68)ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและศักย์หน่วงจะได้เป็น

$$\bar{E} = -\left(\nabla \psi + \frac{\partial \bar{A}}{\partial t}\right) \quad (2.69)$$

และจากสมการ(2.62)และ(2.64)ความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กและศักย์หน่วงจะได้เป็น

$$\bar{H} = \frac{1}{\mu}(\nabla \times \bar{A}) \quad (2.70)$$

สำหรับศักย์เวกเตอร์ \bar{A} เนื่องจากกระแสแปรค่าตามเวลาจะได้เป็น

$$\bar{A} = \int \frac{\mu \bar{I} d\lambda}{4\pi r} \quad (2.71)$$

เมื่อกระแสภายในวงเล็บ $[\bar{I}]$ เท่ากับ $\bar{I} = I_m e^{j\omega(t-r/v)} \hat{a}_z$ ซึ่งจะเป็นกระแสที่เวลา $t-r/v$ เพื่อใช้ในการหาศักย์เวกเตอร์ที่เวลา t และ r เป็นระยะทางในแนวรัศมีถึงจุดที่คำนวณศักย์เวกเตอร์ ส่วน v จะเป็นความเร็วของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจะหาได้จาก

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2.72)$$

เมื่อแทนสมการ(2.56)ใน(2.71)จะได้

$$\bar{A} = \mu \int_{-L/2}^{L/2} \frac{I_m e^{j\omega(t-r/v)}}{4\pi r} dz \hat{a}_z \quad (2.73)$$

จากสมการ(2.73)ศักย์เวกเตอร์จะมีเฉพาะองค์ประกอบในทิศทางของ Z เท่านั้น ดังนั้นจะกลายเป็น

$$\bar{A}_z = \frac{\mu L I_m e^{j\omega(t-r/v)}}{4\pi r} \quad (2.74)$$

เนื่องจากตัวเลขคลื่น (Wave Number) จะหาได้จาก

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{f\lambda} = \frac{\omega}{v} \quad (2.75)$$

เมื่อแทนสมการ(2.75)ใน(2.74)และวิเคราะห์เฉพาะศักย์เวกเตอร์ในระบบพิกัด จะได้

$$\bar{A}_z = \frac{\mu L I_m e^{-jkr}}{4\pi r} \quad (2.76)$$

จากรูปที่ 2.16 องค์ประกอบของศักย์เวกเตอร์ในระบบพิกัดทรงกลมนั้น จะได้เป็น

$$\bar{A} = A_r \hat{a}_r + A_\theta \hat{a}_\theta + A_\phi \hat{a}_\phi \quad (2.77)$$

เนื่องจากศักย์เวกเตอร์มีเฉพาะองค์ประกอบ A_r และ A_θ จะพิจารณาได้จากองค์ประกอบของเวกเตอร์หนึ่งของ \hat{a}_z คือ

$$\hat{a}_z = \cos \theta \hat{a}_r - \sin \theta \hat{a}_\theta \quad (2.78)$$

จากสมการ(2.76)ถึง(2.78)องค์ประกอบของศักย์เวกเตอร์ในระบบพิกัดทรงกลมจะได้เป็น

$$A_r = \bar{A}_z \cos \theta = \frac{\mu L I_m e^{-jkr} \cos \theta}{4\pi r} \quad (2.79)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_\theta = -\bar{A}_z \sin \theta = -\frac{\mu I_m e^{-jkr} \sin \theta}{4\pi r} \quad (2.80)$$

$$A_\phi = 0 \quad (2.81)$$

เนื่องจากสนามแม่เหล็กของสายอากาศจะหาได้จากสมการ(2.70)เป็น

$$\bar{H} = \frac{1}{\mu} (\nabla \times \bar{A}) = \frac{1}{\mu r^2 \sin \theta} \begin{vmatrix} \hat{a}_r & r\hat{a}_\theta & r \sin \theta \hat{a}_\phi \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & 0 \\ A_r & rA_\theta & 0 \end{vmatrix} \quad (2.82)$$

เพราะว่าศักย์เวกเตอร์นั้นไม่มีองค์ประกอบของ ϕ และไม่มี การเปลี่ยนแปลงของศักย์หน่วยใน ทิศทาง ของมุมทิศ (Azimuth) ดังนั้นสมการ(2.82)จะกลายเป็น

$$\bar{H} = \frac{1}{\mu r} \left(\frac{\partial}{\partial r} rA_\theta - \frac{\partial A_r}{\partial \theta} \right) \hat{a}_\phi \quad (2.83)$$

เมื่อแทนสมการ(2.79)และ(2.80)ใน(2.83)จะได้

$$\begin{aligned} H_\phi &= \frac{I_m Le^{-jkr} \sin \theta}{4\pi} \left(\frac{jk}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \\ &= \frac{jk I_m Le^{-jkr} \sin \theta}{4\pi} \left(1 + \frac{1}{jkr} \right) \end{aligned} \quad (2.84)$$

และ $H_r = H_\theta = 0 \quad (2.85)$

ส่วนศักย์สเกลาร์ Ψ จะเป็น

$$\Psi = \frac{I_m Le^{-j\omega(r-r/v)} \cos \theta}{4\pi \epsilon v} \left(\frac{1}{r} + \frac{v}{j\omega r^2} \right) \quad (2.86)$$

เนื่องจากเกรเดียน $\nabla \Psi$ ในระบบพิกัดทรงกลม จะหาได้จาก

$$\nabla \Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial r} \hat{a}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \hat{a}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \Psi}{\partial \phi} \hat{a}_\phi \quad (2.87)$$

และสนามไฟฟ้าระบบพิกัดทรงกลมจะได้เป็น

$$\bar{E} = E_r \hat{a}_r + E_\theta \hat{a}_\theta + E_\phi \hat{a}_\phi \quad (2.88)$$

จากสมการ(2.69),(2.77)และ(2.87)องค์ประกอบทั้งสามของสนามไฟฟ้า E จะได้

$$E_r = -\left(\frac{\partial \Psi}{\partial r} + \frac{\partial A_r}{\partial t} \right) \quad (2.89)$$

$$E_\theta = -\left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} + \frac{\partial A_\theta}{\partial t} \right) \quad (2.90)$$

$$E_\phi = -\left(\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \Psi}{\partial \phi} + \frac{\partial A_\phi}{\partial t} \right) \quad (2.91)$$

เมื่อแทนสมการ(2.79)ถึง(2.81)และ(2.86)แทนในสมการ(2.89)ถึง(2.91)โดยวิเคราะห์เฉพาะการ แปรค่าในระบบพิกัด จะได้

$$E_r = \frac{I_m Le^{-jkr} \cos \theta}{4\pi} \left(\frac{2\eta}{r^2} + \frac{2}{j\omega \epsilon r^3} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{\eta I_m L e^{-jkr} \cos \theta}{2\pi r^2} \left(1 + \frac{1}{jkr} \right) \quad (2.92)$$

$$E_\theta = \frac{I_m L e^{-jkr} \sin \theta}{4\pi} \left(\frac{j\omega\mu}{r} + \frac{\eta}{r^2} + \frac{1}{j\omega\epsilon r^3} \right)$$

$$= \frac{j\eta k I_m L e^{-jkr} \sin \theta}{4\pi} \left(1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{(kr)^2} \right) \quad (2.93)$$

$$E_\phi = 0 \quad (2.94)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.95)$$

สำหรับค่าของ η ในสมการ(2.95)นี้เรียกว่า อินทริเนติกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance)ของตัวกลาง ในกรณีของบริเวณที่มีระยะทางห่างไปจากสายอากาศประมาณ $kr \ll 1$ นั้นเรียกว่า บริเวณสนามระยะใกล้ (Near-field Region) สนามของ H ในสมการ (2.84) ถึง(2.85) และสนามของE ในสมการ (2.92) ถึง (2.94) จะได้เป็น (พิจารณาที่ $kr \ll 1$)

$$E_r = \frac{-j\eta I_m L e^{-jkr} \cos \theta}{2\pi kr^3} \quad (2.96)$$

$$E_\theta = \frac{-j\eta I_m L e^{-jkr} \sin \theta}{4\pi kr^3} \quad (2.97)$$

$$E_\phi = H_r = H_\theta = 0 \quad (2.98)$$

$$H_\phi = \frac{I_m L e^{-jkr} \sin \theta}{4\pi r^2} \quad (2.99)$$

ส่วนในบริเวณที่มีระยะทางห่างจากสายอากาศมากประมาณ $kr \gg 1$ นั้นเรียกว่า บริเวณของสนามระยะไกล (Far-field Region) จากสนามของEในสมการ (2.92) ในบริเวณสนามระยะไกลจะได้ $E_r = \eta I_m L \cos \theta / 2\pi r^2$ และจากสมการ(2.93)จะได้ $E_\theta = j\eta I_m L \sin \theta / 4\pi r$ นั่นคือ E_r จะมีค่าน้อยกว่า E_θ มากเพราะว่า E_r จะแปรผกผันกับ r^2 ในขณะที่ E_θ แปรผกผันกับ r ดังนั้นในบริเวณที่ $kr \gg 1$ จะสามารถประมาณสมการสนามของH ในสมการ(2.84)ถึง(2.85)และสนามของE ในสมการ (2.92)ถึง(2.94)ได้เป็น(พิจารณาที่ $kr \gg 1$)

$$E_\theta = \frac{j\omega\mu I_m L e^{-jkr} \sin \theta}{4\pi r} \quad (2.100)$$

$$E_r = E_\phi = H_r = H_\theta = 0 \quad (2.101)$$

$$H_\phi = \frac{jk I_m L e^{-jkr} \sin \theta}{4\pi r} \quad (2.102)$$

เมื่ออัตราส่วนของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะได้เป็น

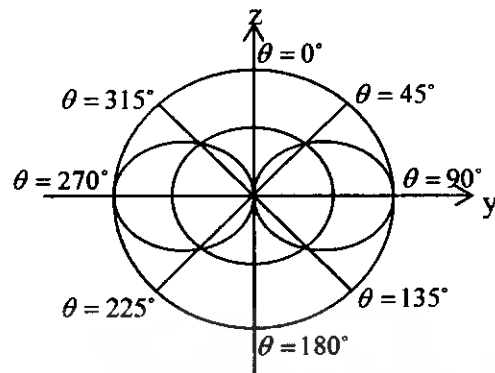
$$\frac{E_\theta}{H_\phi} = \frac{\omega\mu}{k} = \eta \quad (2.103)$$

สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเส้นลวดสั้นนั้นจะสามารถหาได้ด้วยสมการดังนี้

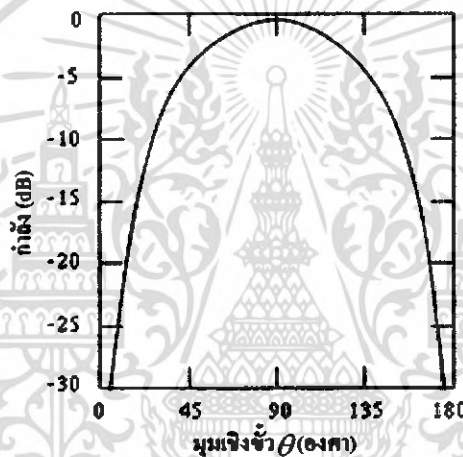
$$W_r = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*) = W_r(\theta) \hat{a}_r = \frac{\eta k^2 I_m^2 L^2 \sin^2 \theta}{32\pi^2 r^2} \hat{a}_r \quad (2.104)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบรูปกำลังของสายอากาศนี้จะแสดงในรูปที่ 2.17 และ 2.18 ตามลำดับ



รูปที่ 2.17 แบบรูปกำลังเชิงขั้วของสายอากาศเส้นลวด



รูปที่ 2.18 แบบรูปกำลังรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากของสายอากาศเส้นลวดสั้น

เนื่องจากกำลังของคลื่นที่แผ่ออกจากสายอากาศนั้นจะได้ กำลังทั้งหมดที่ไหลผ่านทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ r ดังนี้

$$\begin{aligned}
 P_r &= \oint_S \mathbf{W}_r \cdot d\mathbf{s} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \mathbf{W}_r \cdot r^2 \sin\theta d\theta d\phi \\
 &= \int_0^\pi \mathbf{W}_r \cdot 2\pi r^2 \sin\theta d\theta = \frac{\eta k^2 I_m^2 L^2 \pi}{16\pi} \int_0^\pi \sin^3\theta d\theta \\
 &= 40\pi^2 I_m^2 \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2 \quad (2.105)
 \end{aligned}$$

เมื่อความต้านทานการแผ่พลังงานของสายอากาศคือ

$$R_r = \frac{2P_r}{I_m^2} \quad (2.106)$$

ดังนั้นเมื่อแทนสมการ(2.105)ใน(2.106)ความต้านทานการแผ่พลังงานของสายอากาศจะได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_r = 80\pi^2 \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2 \quad (2.107)$$

สำหรับการวิเคราะห์สภาพเจาะงทศทางของสายอากาศเส้นลวดสั้นนั้นจะมีขั้นตอนดังนี้ จากความเข้มการแผ่พลังงานของสายอากาศจะเป็น

$$U(\theta, \phi) = W_r r^2 \hat{a}_r = \frac{\eta k^2 I_m^2 L^2 \sin^2 \theta}{32\pi^2} \quad (2.108)$$

จากสมการ

$$U(\theta, \phi) = U_m |F(\theta, \phi)|^2 \quad (2.109)$$

ดังนั้นจากสมการ(2.108)และ(2.109)จะได้

$$U_m = \frac{\eta k^2 I_m^2 L^2}{32\pi^2} \quad \text{และ} \quad F(\theta, \phi) = \sin \theta \quad (2.110)$$

ค่าเฉลี่ยของความเข้มการแผ่พลังงานจะเป็น

$$U_{av} = \frac{P_r}{4\pi} = \frac{\eta k^2 I_m^2 L^2}{48\pi^2} \quad (2.111)$$

จากสมการ $D = \frac{U_m}{U_{av}}$, สมการ(2.110)และ(2.111)สภาพเจาะงทศทางของสายอากาศจะได้เป็น

$$D = \frac{U_m}{U_{av}} = \frac{3}{2} \quad (2.112)$$

สำหรับสายอากาศไม่มีการสูญเสีย ($e = 1$) นั้นจากสมการ $G = eD$ อัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศเส้นลวดสั้นจะได้เป็น

$$G = D = \frac{3}{2} \quad (2.113)$$

เนื่องจากกระแสบนเส้นลวดสั้นตลอดความยาวของเส้นลวดเป็นกระแสสม่ำเสมอ ดังนั้นแรงดันที่รับรู้จะเป็น

$$V_R = \int Edz = EL \quad (2.114)$$

จากสมการ

$$V_R = Eh$$

เมื่อ V_R = ค่าแรงดันเหนี่ยวนำ

E = ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าตกกระทบ

h = ความสูงประสิทธิผล

จากสมการ(2.114)ความสูงประสิทธิผลของสายอากาศจะได้เป็น

$$h = L \quad (2.115)$$

ในกรณีที่ตัวกลางการแพร่กระจายคลื่น (Propagation Medium) ของสายอากาศ เป็นอากาศว่าง (Free Space) นั้น อินทรีนตีกอิมพีแดนซ์ ของตัวกลางจะมีค่าเท่ากับ

$$\eta = 120\pi = 377 \quad \Omega \quad (2.116)$$

เมื่อค่าพื้นที่ประสิทธิผลมีค่า $A_e = \frac{\eta h^2}{4R_r}$

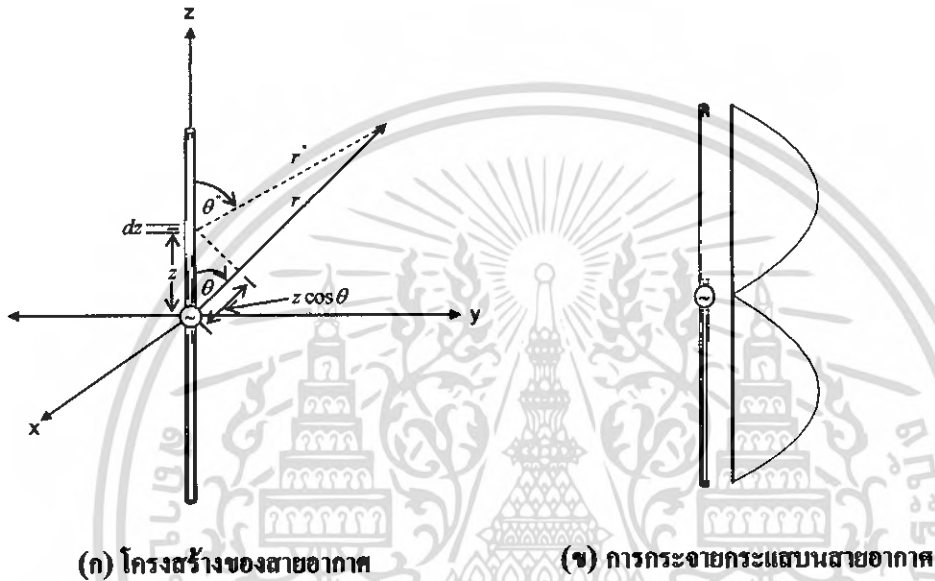
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการแทนสมการ(2.107),(2.115)และ(2.116)หาค่าพื้นที่ประสิทธิผลจะได้สมการของพื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศเส้นลวดสั้นดังนี้

$$A_e = \frac{\eta h^2}{4R_r} = \frac{120\pi L^2}{320\pi^2(L/\lambda)^2} = \frac{3}{2} \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) = \frac{\lambda^2}{4\pi} D \quad (2.117)$$

2.4 สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna)

สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna) จะแสดงในรูปที่ 2.19



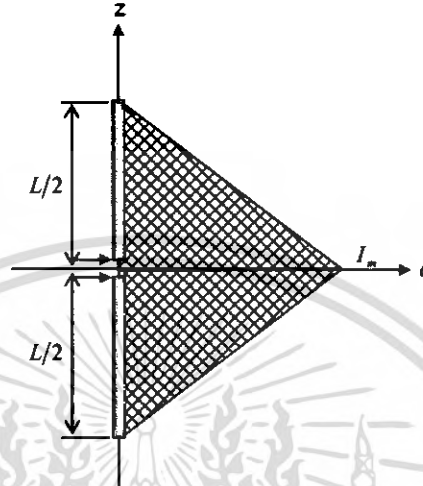
รูปที่ 2.19 สายอากาศไดโพล

จากรูปที่ 2.19 (ก) สำหรับสายอากาศไดโพลสั้นนั้นจะป้อนเครื่องกำเนิดแรงดัน (Voltage Generator) ที่กึ่งกลางของสายอากาศ ถ้าการกระจายของกระแสตลอดความยาวของสายอากาศเป็นกระแสไซน์ซอซด์และมีขนาดกระแสเป็นศูนย์ที่ปลายทั้งสองของสายอากาศ แบบรูปของกระแสคลื่นนิ่ง (Current Standing Wave Pattern) บนสายอากาศ จะปรากฏจุดศูนย์ของกระแสที่ปลายทั้งสองของสายอากาศที่จุดที่อยู่ห่างจากปลายทั้งสองของสายอากาศทุกๆ ครึ่งความยาวคลื่นระหว่างปลายทั้งสองกับจุดกึ่งกลางของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 2.19(ข) โดยกระแสบนสายอากาศไดโพลจะเป็น

$$I(z) = \begin{cases} I_m \sin \left[k \left(\frac{L}{2} - z \right) \right], & z > 0 \\ I_m \sin \left[k \left(\frac{L}{2} + z \right) \right], & z < 0 \end{cases} \quad (2.118)$$

2.4.1 สายอากาศไดโพลสั้น (Short Dipole)

ในกรณีที่ความยาวทางไฟฟ้าของแขนแต่ละข้างของสายอากาศไดโพลแสดงในรูปที่ 2.19 นั้นมีความยาวน้อยกว่าหอกงศา สายอากาศนี้จะเรียกว่า สายอากาศไดโพลสั้น (Short Dipole Antenna) การกระจายของกระแสบนสายอากาศไดโพลสั้นนี้จะประมาณได้เป็นรูปสามเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การกระจายของกระแสบนสายอากาศไดโพลสั้น

สำหรับกระแสบนสายอากาศไดโพลสั้นนี้จะได้เป็น

$$I = \begin{cases} \frac{2I_m}{L} \left(\frac{L}{2} - z \right), & z > 0 \\ \frac{2I_m}{L} \left(\frac{L}{2} + z \right), & z < 0 \end{cases} \quad \frac{L}{\lambda} < \frac{1}{30} \quad (2.119)$$

สำหรับสายอากาศไดโพลสั้นนี้ สัมพันธ์ในสมการ(2.72)จะกลายเป็น

$$\bar{A}_z = \frac{\mu I_m e^{j(\omega t - kr)}}{2\pi L r} \left[\int_0^{L/2} \left(\frac{L}{2} - z \right) dz + \int_{-L/2}^0 \left(\frac{L}{2} + z \right) dz \right] \quad (2.120)$$

เมื่อวิเคราะห์เฉพาะการแปรค่าในระบบพิกัด สมการ(2.120)จะกลายเป็น

$$\bar{A}_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu L I_m e^{-jkr}}{4\pi r} \right) \quad (2.121)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ(2.121)และ(2.76)จะเห็นได้ว่าการกระจายกระแสรูปสามเหลี่ยมบนสายอากาศสั้นนี้จะได้ศักย์เวกเตอร์ที่มีขนาดเท่ากับเศษหนึ่งส่วนสองของศักย์เวกเตอร์ที่เกิดจากการกระจายกระแสสม่ำเสมอตลอดความยาวของสายอากาศ ดังนั้นสนามระยะไกลของสายอากาศไดโพลสั้นจะได้เป็นเศษหนึ่งส่วนสองของสนามในสมการ(2.100)และ(2.102)นั่นคือ

$$E_\theta = \frac{j\omega\mu I_m L e^{-jkr} \sin\theta}{8\pi r} \quad (2.122)$$

$$E_r = E_\phi = H_r = H_\theta = 0 \quad (2.123)$$

$$H_\phi = \frac{jk I_m L e^{-jkr} \sin\theta}{8\pi r} \quad (2.124)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลสั้นจะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} W_r &= \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*) = W_r(\theta) \hat{a}_r \\ &= \frac{\eta k^2 I_m^2 L^2 \sin^2 \theta}{128 \pi^2 r^2} \hat{a}_r \end{aligned} \quad (2.125)$$

จากสมการ

$$P_r = \iint_S W_r ds$$

จะได้สมการแสดงกำลังทั้งหมดของคลื่นแผ่ออกจากสายอากาศไดโพลสั้นดังนี้

$$\begin{aligned} P_r &= \iint_S W_r ds = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi W_r r^2 \sin \theta d\theta d\phi \\ &= \frac{\eta k^2 I_m^2 L^2}{64 \pi} \int_0^\pi \sin^3 \theta d\theta \\ &= 10 \pi^2 I_m^2 \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2 \end{aligned} \quad (2.126)$$

ดังนั้นเมื่อแทนสมการ(2.126)ใน(2.106)ความต้านทานการแผ่พลังงานของสายอากาศจะได้เป็น

$$R_r = 20 \pi^2 \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2 \quad (2.127)$$

จากแบบรูปกำลังของสายอากาศไดโพลสั้นและเส้นลวดสั้นนั้นจะเหมือนกัน ดังนั้นสภาพจะจางทิศทางและพื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศทั้งสองจะเหมือนกันด้วย นั่นคือพื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศไดโพลสั้นจะได้เป็น

$$A_e = \frac{3\lambda^2}{8\pi} \quad (2.128)$$

เมื่อ $A_e = \frac{\eta h^2}{4R_r}$ เมื่อนำมาเทียบกับสมการที่(2.128)จะได้

$$h = \left(\frac{4R_r A_e}{\eta}\right)^{1/2} \quad (2.129)$$

เมื่อแทนสมการ(2.127)และ(2.128)ใน(2.129)ความสูงประสิทธิผลของสายอากาศไดโพลสั้นจะเป็น

$$h = \frac{L}{2} \quad (2.130)$$

2.4.2 สายอากาศไดโพลยาว (Long Dipole Antenna)

ในการวิเคราะห์สายอากาศไดโพลยาวนั้น จะมีการกระจายของกระแสไหลวนย่อยบนสายอากาศ สำหรับสายอากาศไดโพลยาวนี้เมื่อวิเคราะห์ในรูปขององค์ประกอบของกระแสคงตัว สายอากาศจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบเล็กๆของกระแสคงตัว (Small Element of Constant Current) จำนวนมาก ดังนั้นสนามจากการแผ่พลังงานของสายอากาศจะสามารถหาได้จากการวางซ้อน (Superposition) ของ

สนามจากการแผ่พลังงานของแต่ละส่วนเล็กๆของสายอากาศประกอประกกัน จากสมการ(2.100)และ(2.103) สนามระยะไกลของสายอากาศเนื่องจากองค์ประกอบของกระแสคงตัวจะได้เป็น

$$dE_{\theta} = \frac{j\eta k I(z) dz e^{-jkr} \sin \theta}{4\pi r^2} \quad (2.131)$$

สำหรับจุดสนามระยะไกลของสายอากาศที่แสดงในรูปที่ 2.19 นั้น ความสัมพันธ์ของระยะทาง r และ r'' จะได้เป็น

$$r'' \approx r - z \cos \theta \quad (2.132)$$

$$\theta'' \approx \theta \quad (2.133)$$

และ
$$\left| \frac{1}{r''} \right| \approx \left| \frac{1}{r} \right| \quad (2.134)$$

เมื่อแทนสมการ(2.132)ถึง(2.134)ในสมการ(2.131)สนามไฟฟ้าทั้งหมดของสายอากาศไดโพล

ยาวจะได้เป็น
$$E_{\theta} = \frac{j\eta k e^{-jkr} \sin \theta}{4\pi r} \left[\int_{-L/2}^{L/2} I(z) e^{jkz \cos \theta} dz \right] \quad (2.135)$$

หรือ

$$E_{\theta} = \frac{j\eta k I_m e^{-jkr} \sin \theta}{4\pi r} \left\{ \left[\int_0^{L/2} e^{jkz \cos \theta} \sin \left[k \left(\frac{L}{2} - z \right) \right] dz \right] + \left[\int_{-L/2}^0 e^{jkz \cos \theta} \sin \left[k \left(\frac{L}{2} + z \right) \right] dz \right] \right\} \quad (2.136)$$

เนื่องจากพจน์ของการอินทิเกรตในสมการ(2.136)นั้นจะอยู่ในรูปของการอินทิเกรต คือ

$$\int e^{ax} \sin(bx + c) = \frac{e^{ax}}{a^2 + b^2} [a \sin(bx + c) - b \cos(bx + c)] \quad (2.137)$$

เมื่อกำหนดให้

$$a = jk \cos \theta, \quad b = \pm k, \quad c = k \frac{L}{2}, \quad a^2 + b^2 = k^2 \sin^2 \theta \quad (2.138)$$

จากสมการ(2.136)ถึง(2.138)จะได้

$$E_{\theta} = \frac{j\eta I_m e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos \left(\frac{kL}{2} \cos \theta \right) - \cos \frac{kL}{2}}{\sin \theta} \right] \quad (2.139)$$

$$H_{\phi} = \frac{E_{\theta}}{\eta}$$

โดยจะมีค่าความหนาแน่นกำลังเฉลี่ยคือ

$$\begin{aligned} W_{av} &= \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\bar{E} \times \bar{H}^*) \\ &= \frac{1}{2} |E_{\theta}| |H_{\phi}| \hat{a}_r = \frac{1}{2} |E_{\theta}| \left| \frac{E_{\theta}}{\eta} \right| \hat{a}_r \\ &= \frac{|E_{\theta}|^2}{2\eta} \hat{a}_r \end{aligned} \quad (2.140)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนสมการ(2.139)ในสมการ(2.140)จะได้

$$W_{av} = \frac{\eta I_m^2 m}{8\pi^2 r^2} \left[\frac{\cos\left(\frac{kL}{2} \cos\theta\right) - \cos\frac{kL}{2}}{\sin\theta} \right]^2 \hat{a}_r \quad (2.141)$$

ดังนั้นจะได้ค่ากำลังทั้งหมดของคลื่นแผ่ออกจากสายอากาศโคโพลยาวจะได้เป็น

$$\begin{aligned} P_r &= \iint_S W_r ds = \int_0^\pi W_r 2\pi r^2 \sin\theta d\theta \\ &= \frac{\eta I_m^2}{4\pi} \int_0^\pi \left[\frac{\cos\left(\frac{kL}{2} \cos\theta\right) - \cos\frac{kL}{2}}{\sin\theta} \right]^2 d\theta \end{aligned} \quad (2.142)$$

เมื่อแทนสมการ(2.142)ในสมการ(2.106)ความต้านทานการแผ่พลังงานของสายอากาศจะได้เป็น

$$R_r = \frac{2P_r}{I_m^2} = \frac{\eta}{2\pi} \int_0^\pi \left[\frac{\cos\left(\frac{kL}{2} \cos\theta\right) - \cos\frac{kL}{2}}{\sin\theta} \right]^2 d\theta \quad (2.143)$$

จากสมการที่(2.143)จะได้

$$\begin{aligned} R_r &= 60 \left\{ C + \ln kL - C_i(kL) + \frac{1}{2} \sin(kL) [S_i(2kL) - 2S_i(kL)] \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \cos(kL) \left[C + \ln\left(\frac{kL}{2}\right) + C_i(2kL) - 2C_i(kL) \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.144)$$

เมื่อ C คือค่าคงตัวของอูลเลอร์ (Euler's Constant) มีค่าเท่ากับ

$$C = 0.5772..... \quad (2.145)$$

ส่วน $S_i(x)$ และ $C_i(x)$ จะเป็นไซน์และโคไซน์อินทิเกรต ตามลำดับ เมื่อ

$$S_i(x) = \int_0^x \frac{\sin x}{x} dx \quad (2.146)$$

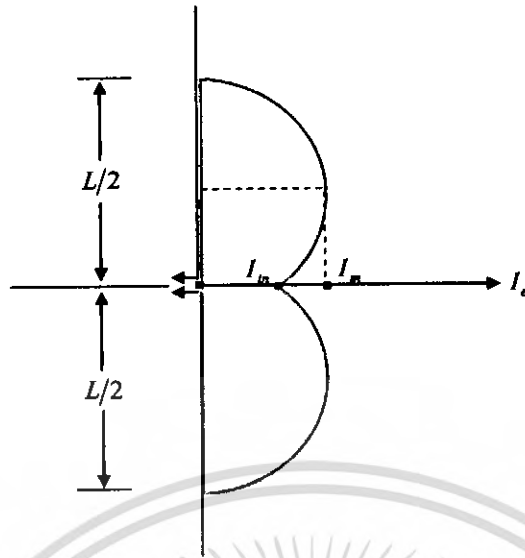
และ

$$C_i(x) = \int_x^\infty \frac{\cos x}{x} dx \quad (2.147)$$

ในกรณีที่สายอากาศโคโพลไม่ได้ถูกป้อนที่จุดกระแสสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 2.21 นั้น ความต้านทานการแผ่พลังงานที่เห็นได้ที่ขั้วอินพุทของสายอากาศจะแตกต่างไปจากความต้านทานการแผ่พลังงานที่ได้ในสมการ (2.143) โดยความต้านทานการแผ่พลังงานที่ขั้วอินพุทจะเป็น

$$R_{in} = R_r \left(\frac{I_m}{I_{in}} \right)^2 \quad (2.148)$$

เมื่อ I_{in} เป็นขนาดของกระแสอินพุท



รูปที่ 2.21 การกระจายกระแสเมื่อกระแสสูงสุดนั้นอยู่ห่างจากขั้วอินพุทเท่ากับ d

จะเป็นได้เป็น

$$I_{in} = I_m \cos kd \quad (2.149)$$

เมื่อแทนสมการ(2.149) ใน (2.148)ความต้านทานการแผ่พลังงานที่เห็นได้ที่ขั้วอินพุทจะเป็น

$$R_{r_{in}} = \frac{R_r}{\cos^2 kd} \quad (2.150)$$

โดยจะได้ค่าความเข้มการแผ่พลังงานของสายอากาศดังนี้

$$U(\theta, \phi) = W_r r^2 \hat{a}_r = \frac{\eta I_m^2}{8\pi^2} \left[\frac{\cos\left(\frac{kL}{2} \cos\theta\right) - \cos\frac{kL}{2}}{\sin\theta} \right]^2 \quad (2.151)$$

จากสมการ

$$U(\theta, \phi) = U_m |F(\theta, \phi)|^2 \quad (2.152)$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ว่า } U_m = \frac{\eta I_m^2}{8\pi^2} \text{ และ } F(\theta, \phi) = F(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{kL}{2} \cos\theta\right) - \cos\frac{kL}{2}}{\sin\theta} \quad (2.153)$$

สำหรับความเข้มการแผ่พลังงานสูงสุดของสายอากาศใดโพลจะอยู่ในทิศทาง $(\theta_{\max}, \phi_{\max})$

$$\text{ดังนั้นจาก } U(\theta, \phi)_{\max} = U(\theta_{\max}, \phi_{\max}) = U_m F_{\max}$$

$$\text{จะได้ } = \frac{\eta I_m^2}{8\pi^2} F_{\max} \quad (2.154)$$

ดังนั้นจะได้ค่าเฉลี่ยของความเข้มการแผ่พลังงานจะเป็น

$$P_r = \oint_S W_r \cdot ds = \int_0^\pi W_r \cdot 2\pi r^2 \sin\theta d\theta$$

$$= \frac{\eta I_m^2}{4\pi} \int_0^\pi \frac{\left[\cos\left(\frac{kL}{2} \cos\theta\right) - \cos\frac{kL}{2} \right]^2}{\sin\theta} d\theta \quad (2.155)$$

และจากสมการ(2.153)และ(2.152)จะได้

$$P_r = \frac{\eta I_m^2}{4\pi} \int_0^\pi F(\theta) \sin\theta d\theta \quad (2.156)$$

ดังนั้นจากสมการที่(2.156) และสมการค่าเฉลี่ยของความเข้มการแผ่พลังงานจะได้ค่าเฉลี่ยของความเข้มการแผ่พลังงานของไดโพลยาวคือ

$$U_{av} = \frac{P_r}{4\pi} = \frac{\eta I_m^2}{16\pi^2} \int_0^\pi F(\theta) \sin\theta d\theta \quad (2.157)$$

จะได้ค่าสภาพเงาเชิงทิศทางดังนี้

$$D = \frac{U(\theta, \phi)_{\max}}{U_{av}} = \frac{2F_{\max}}{\int_0^\pi F(\theta) \sin\theta d\theta} \quad (2.158)$$

จากสมการ(2.143) ความต้านทานการแผ่พลังงานของสายอากาศจะเขียนใหม่ได้เป็น

$$R_r = \frac{\eta}{2\pi} \int_0^\pi F(\theta) \sin\theta d\theta \quad (2.159)$$

จากสมการ(2.158) และ(2.159)จะเขียนความสัมพันธ์ของ D และ R_r ได้เป็น

$$D = \frac{\eta F_{\max}}{\pi R_r} \quad (2.160)$$

สำหรับพื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศไดโพลยาว เมื่อแทนสมการ(2.160)ใน(2.117)จะได้

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} D = \frac{\lambda^2 \eta F_{\max}}{4\pi^2 R_r} \quad (2.161)$$

โดยจะมีค่าความสูงประสิทธิผลของสายอากาศไดโพลได้ดังนี้

$$h = \left(\frac{4R_r A_e}{\eta} \right)^{1/2} \quad (2.162)$$

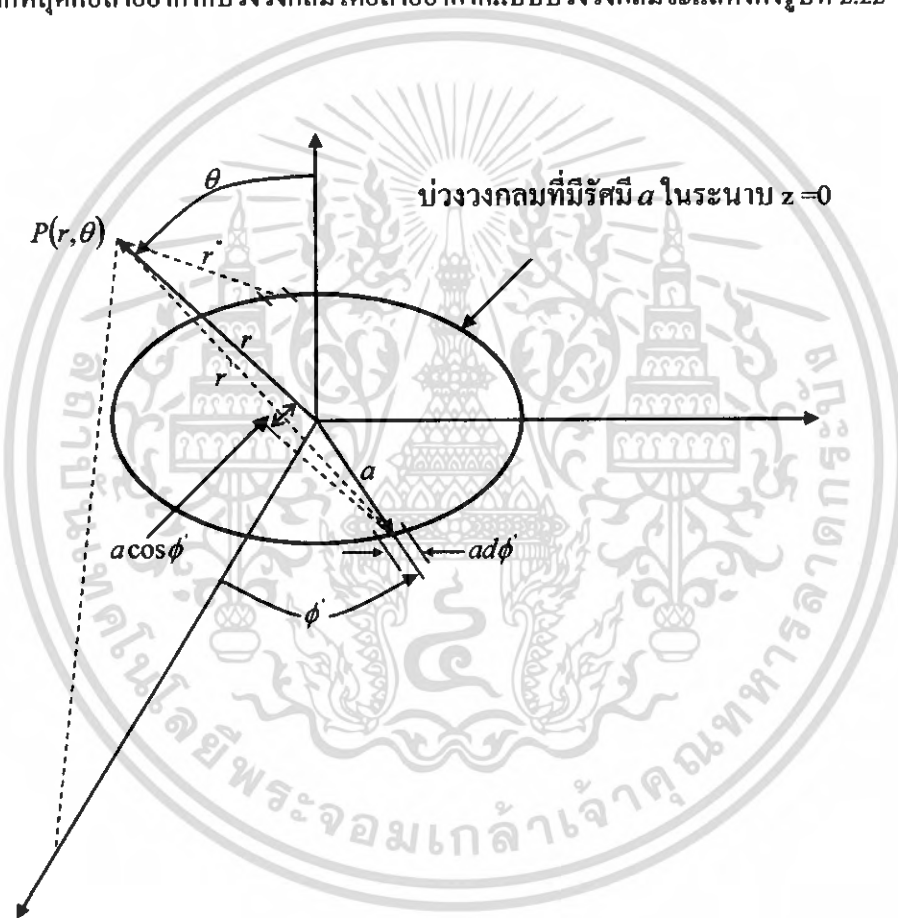
เมื่อแทนสมการ(2.161)ใน (2.162)ความสูงประสิทธิผลของสายอากาศไดโพลจะเป็น

$$h = \frac{\lambda}{\pi} f_{\max} \quad (2.163)$$

เมื่อ f_{\max} เป็นค่าสูงสุดของ $f(\theta)$

2.5 สายอากาศบ่วง (Loop Antenna)





สายอากาศบ่วงเป็นสายอากาศอีกรูปแบบหนึ่งที่มีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อนและมีความสามารถในการทำงานมากมายหลายประการ และเป็นสายอากาศที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย และสามารถนำไปพลิกแพลงอย่างอื่นเช่น นำมาใช้เป็นสายอากาศขาคี-อูตะ แล้วทำการหาระยะห่างและความยาวของแต่ละวงให้เหมาะสมเพื่อที่จะได้อัตราขยายที่สูงสุด สายอากาศแบบบ่วงนี้จะมีรูปแบบที่แตกต่างกันออกไปไม่ว่าจะเป็น บ่วงสี่เหลี่ยม บ่วงวงกลม บ่วงสามเหลี่ยมหรือบ่วงวงรี และมีอีกหลากหลายรูปแบบ เนื่องจากว่าสายอากาศดังกล่าวมีความง่ายในการสร้างและการวิเคราะห์ โดยสายอากาศแบบบ่วงที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือสายอากาศบ่วงวงกลมโดยสายอากาศแบบบ่วงวงกลมจะแสดงดังรูปที่ 2.22



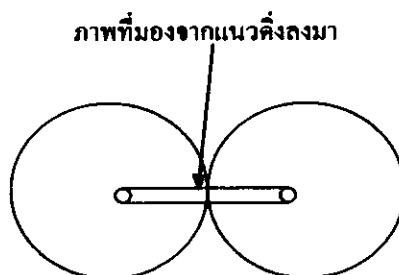
รูปที่ 2.22 สายอากาศแบบบ่วงวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของสายอากาศบ่วงแบบต่างๆที่มีเส้นรอบวงยาว 1λ

| สายอากาศบ่วง 1λ แบบ | อัตราขยายเมื่อเทียบ ไอโซทรอปิก (dB_i) | อัตราขยายเมื่อเทียบ ไดโพล (dB_d) | ค่าความต้านทานการ แพร่กระจายคลื่น (Ω) |
|---|--|---|---|
| แบบวงกลม  | 3.49 | 1.34 | 133 |
| แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส  | 3.14 | 0.99 | 117 |
| แบบสี่เหลี่ยม ขนมเปียกปูน  | 3.14 | 0.99 | 117 |
| แบบสามเหลี่ยม  | 2.82 | 0.67 | 106 |

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าสายอากาศแบบบ่วงวงกลมจะมีค่าอัตราขยายที่มากที่สุด โดยเมื่อพิจารณาบ่วงทั้งหมดดังกล่าวจะให้การกระจายคลื่นคล้ายกับสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น เพียงแต่ว่าลำคลื่นในระนาบราบจะกว้างกว่า ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากองค์ประกอบส่วนที่อยู่ในแนวราบของมันสั้นกว่า ส่วนการกระจายคลื่นในแนวตั้งจะแคบกว่ามาก จึงทำให้มีอัตราขยายที่มากกว่าสายอากาศไดโพล โดยถึงแม้แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส และแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนจะมีอัตราขยายเท่ากัน แต่การกระจายคลื่นจะแตกต่างกันเล็กน้อยโดยลำคลื่นในแนวตั้งของแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะแคบกว่า ส่วนลำคลื่นในแนวราบของแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนจะแคบกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการหมุนตัวไป 45° นั้นเอง ส่วนสายอากาศบ่วงแบบสามเหลี่ยมจะมีอัตราขยายที่น้อยที่สุด เพราะจุดที่กระแสสูงสุดนั้นอยู่ห่างกันน้อยกว่าแบบอื่นๆ ส่วนบ่วงวงกลมมีอัตราขยายมากที่สุด เพราะจุดที่กระแสสูงนั้นอยู่ห่างกันมากที่สุด โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบ่วงแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแนวราบของสายอากาศบ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นได้ชัดว่าจะไม่มีการรับสัญญาณคลื่นในทิศที่ตั้งฉากกับระนาบของบ่วง (ทิศที่มองตรงเข้าหาสายอากาศ) คุณสมบัติข้อนี้เหมาะสำหรับการใช้สายอากาศแบบบ่วงในการหาทิศทาง จากรูปที่ 2.22 การแผ่พลังงานจากส่วนย่อย $ad\phi'$ ของสายอากาศแบบบ่วงนั้นจะวิเคราะห์ได้ในทำนองเดียวกับกับการแผ่พลังงานของสายอากาศเส้นลวดสั้น จากศักร์หนึ่งวงเนื่องจากองค์ประกอบกระแส (Current Element) ที่มุม ϕ' จะได้เป็น

$$dA_{\phi_1} = \frac{\mu ad\phi' I_m e^{j(\omega t - kr')} \cos \phi'}{4\pi r'} \quad (2.164)$$

และศักร์หนึ่งวงเนื่องจากองค์ประกอบกระแสในทิศทางตรงกันข้ามที่มุม $\phi' + \pi$ จะได้เป็น

$$dA_{\phi_2} = -\frac{\mu ad\phi' I_m e^{j(\omega t - kr'')} \cos \phi'}{4\pi r''} \quad (2.165)$$

สำหรับสนามระยะไกลของสายอากาศแบบบ่วงในรูปที่ 2.22 จะประมาณระยะทางจากสายอากาศถึงจุด P ได้ดังนี้

$$r' \approx r - a \cos \phi' \sin \theta \approx r - \psi \quad (2.166)$$

$$r'' \approx r + a \cos \phi' \sin \theta \approx r + \psi \quad (2.167)$$

และ

$$\left| \frac{1}{r'} \right| \approx \left| \frac{1}{r''} \right| \approx \left| \frac{1}{r} \right| \quad (2.168)$$

เมื่อแทนสมการ (2.166) ถึง (2.168) ในสมการ (2.164) และ (2.165) จะได้

$$dA_{\phi_1} = \frac{\mu ad\phi' I_m e^{j(\omega t - kr')} \cos \phi'}{4\pi r} e^{jk\psi} \quad (2.169)$$

$$dA_{\phi_2} = -\frac{\mu ad\phi' I_m e^{j(\omega t - kr'')} \cos \phi'}{4\pi r} e^{-jk\psi} \quad (2.170)$$

ผลรวมของสมการ (2.169) และ (2.170) จะได้

$$\begin{aligned} dA_{\phi} &= dA_{\phi_1} + dA_{\phi_2} \\ &= \frac{\mu ad\phi' I_m e^{j(\omega t - kr)} \cos \phi'}{4\pi r} (e^{jk\psi} - e^{-jk\psi}) \end{aligned} \quad (2.171)$$

นั่นคือศักร์หนึ่งวงเนื่องจากการกระจายกระแสบนสายอากาศแบบบ่วงนั้นหาได้จากการอินทิเกรตสมการ (2.171) จะได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_\phi = \frac{\mu I_m e^{j(\alpha t - kr)}}{4\pi r} \int_0^\pi [e^{j(kr\cos\phi')} + e^{j(kr\sin\phi')} - e^{j(kr\cos\phi')} - e^{j(kr\sin\phi')}] d\phi' \quad (2.172)$$

$$A_\phi = \frac{j\mu I_m e^{j(\alpha t - kr)}}{2\pi r} \int_0^\pi \sin(ka \cos\phi' \sin\theta) \cos\phi' d\phi' \quad (2.173)$$

หรือ
$$A_\phi = \frac{j\mu I_m e^{j(\alpha t - kr)}}{2r} J_1(ka \sin\theta) \quad (2.174)$$

จากสมการ (2.174) จะได้ว่าสนามไฟฟ้าระยะไกลของสายอากาศแบบบ่วงคือ

$$E_\phi = -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} = \frac{\omega \mu I_m e^{j(\alpha t - kr)}}{2r} J_1(ka \sin\theta) \quad (2.175)$$

สำหรับตัวกลางไม่มีความสูญเสีย ($\sigma = 0$) ค่าคงตัวการแพร่กระจาย γ จะเป็น

$$\gamma^2 = -\omega^2 \mu \epsilon = -k^2 \quad (2.176)$$

จากสมการ (2.176) ค่าตัวเลขคลื่นจะได้เป็น

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} = \frac{\omega \mu}{\eta} \quad (2.177)$$

เมื่อ η เป็นอินทรีนติกอิมพีแดนซ์ของตัวกลางไม่มีความสูญเสีย

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.178)$$

จากสมการ (2.175) และ (2.177) สนามไฟฟ้าระยะไกลของสายอากาศแบบบ่วงจะได้เป็น

$$E_\phi = \frac{\eta k a I_m e^{j(\alpha t - kr)}}{2r} J_1(ka \sin\theta) \quad (2.179)$$

และสนามแม่เหล็กระยะไกลของสายอากาศแบบบ่วงจะได้เป็น

$$H_\theta = \frac{E_\phi}{\eta} = \frac{k a I_m e^{j(\alpha t - kr)}}{2r} J_1(ka \sin\theta) \quad (2.180)$$

จากสมการ (2.179) จะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบบ่วงนั้นจะถูกโพลาไรซ์ในทิศทางของ ϕ เท่านั้น ดังนั้น จะได้ว่าความหนาแน่นกำลังเฉลี่ยของสายอากาศจะได้เป็น

$$W_r = \frac{1}{2} |E_\phi| |H_\theta| \hat{a}_r \quad (2.181)$$

เมื่อแทนสมการ (2.180) ใน (2.181) จะได้

$$W_r = \frac{\eta k^2 a^2 J_1^2}{8r^2} J_1^2(ka \sin\theta) \hat{a}_r \quad (2.182)$$

ดังนั้นจะได้ค่ากำลังทั้งหมดของคลื่นที่แผ่ออกจากสายอากาศแบบบ่วงคือ

$$\begin{aligned} P_r &= \iint_S W_r \cdot ds \hat{a}_r = \iint_S W_r \cdot ds \\ &= \int_0^\pi W_r 2\pi r^2 \sin\theta d\theta \end{aligned} \quad (2.183)$$

เมื่อแทนสมการ (2.182) ใน (2.183) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_r = \frac{\pi\eta k^2 a^2 I_m^2}{4} \int_0^\pi J_1^2(ka \sin \theta) \sin \theta d\theta \quad (2.184)$$

ในกรณีที่บ่วงนั้นมีขนาดของรัศมีน้อยกว่า 1/3 ของความยาวคลื่นจะประมาณฟังก์ชันเบสเซลในสมการ (2.184) ได้เป็น

$$J_1(ka \sin \theta) \approx \frac{ka \sin \theta}{2} \quad (2.185)$$

เมื่อแทนสมการ (2.185) ใน (2.184) กำลังทั้งหมดของคลื่นแผ่ออกจากสายอากาศแบบบ่วงเล็ก (Small Loop Antenna) จะเขียนได้เป็น

$$P_r = \frac{\pi\eta(ka)^4 I_m^2}{16} \int_0^\pi \sin^3 \theta d\theta = \frac{4}{3} \left[\frac{\pi\eta(ka)^4 I_m^2}{16} \right] \quad (2.186)$$

เนื่องจากค่าของ อินทรีนสิกอิมพีแดนซ์ ของตัวกลางเท่ากับ 120π (Ω) ดังนั้นสมการ (2.186) จะได้เป็น

$$P_r = 10\pi^2 (ka)^4 I_m^2, \quad a < \frac{\lambda}{\pi} \quad (2.187)$$

เมื่อแทนสมการ (2.187) ใน (2.106) ความต้านทานการแผ่พลังงานของสายอากาศจะได้เป็น

$$R_r = \frac{2P_r}{I_m^2} = 20\pi^2 (ka)^4 \quad (2.188)$$

สำหรับการวิเคราะห์สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแบบบ่วงนั้นเมื่อแทนสมการ (2.182) ใน (2.181) ความหนาแน่นกำลังเฉลี่ยของสายอากาศจะได้เป็น

$$W_r = \frac{\eta(ka)^4 I_m^2}{32r^2} \sin^2 \theta, \quad (2.189)$$

จากสมการ (2.189) จะได้ค่าความเข้มของการแผ่พลังงานของสายอากาศคือ

$$U(\theta, \phi) = W_r r^2 a_r = \frac{\eta(ka)^4 I_m^2}{32} \sin^2 \theta \quad (2.190)$$

จากสมการ

$$U(\theta, \phi) = U_m |F(\theta, \phi)|^2 \quad (2.191)$$

ดังนั้นจากสมการ (2.190) และ (2.191) จะได้

$$U_m = \frac{\eta(ka)^4 I_m^2}{32} \quad \text{และ} \quad F(\theta, \phi) = \sin \theta \quad (2.192)$$

เมื่อแทนสมการ (2.186) ในสมการค่าเฉลี่ยของความเข้มการแผ่พลังงานจะได้ ค่าเฉลี่ยของความเข้มการแผ่พลังงานของบ่วงจะเป็น

$$\begin{aligned} U_{av} &= \frac{P_r}{4\pi} = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{\pi\eta(ka)^4 I_m^2}{12} \right] \\ &= \frac{\eta(ka)^4 I_m^2}{48} \end{aligned} \quad (2.193)$$

จากสมการ(2.192) และ (2.193) สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศจะได้เป็น

$$D = \frac{U_m}{U_{av}} = \frac{3}{2} \quad (2.194)$$

จากสมการ(2.194) จะพบว่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแบบบ่วงนั้นจะเหมือนกันกับสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเส้นลวดสั้น ส่วนพื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศแบบบ่วงจะได้เป็น

$$A_e = \frac{3\lambda^2}{8\pi} = \frac{\lambda^2}{4} D \quad (2.195)$$

เป็นเมื่อแทนสมการ (2.188) และ (2.195) ในสมการ (2.162) ความสูงประสิทธิผลจะได้

$$h = \left(\frac{4R_r A_e}{\eta} \right)^{1/2} = \frac{(ka)^2 \lambda}{2} = kA_g \quad (2.196)$$

เมื่อ A_g เป็นพื้นที่ทรงเรขาคณิตของสายอากาศแบบบ่วง
ในกรณีที่สายอากาศมีขนาดของบ่วงใหญ่ ฟังก์ชันของเบสเซลในสมการ (2.184) จะได้เป็น

$$\int_0^\pi J_1^2(ka \sin \theta) \sin \theta d\theta = \frac{1}{ka} \int_0^{2ka} J_2(x) dx \quad (2.197)$$

สำหรับสายอากาศที่มีขนาดของบ่วงใหญ่ เมื่อ a มากกว่าความยาวคลื่นของสมการ (2.197) จะประมาณได้เป็น

$$\int_0^{2ka} J_2(x) dx \approx 1, \quad a > \lambda \quad (2.198)$$

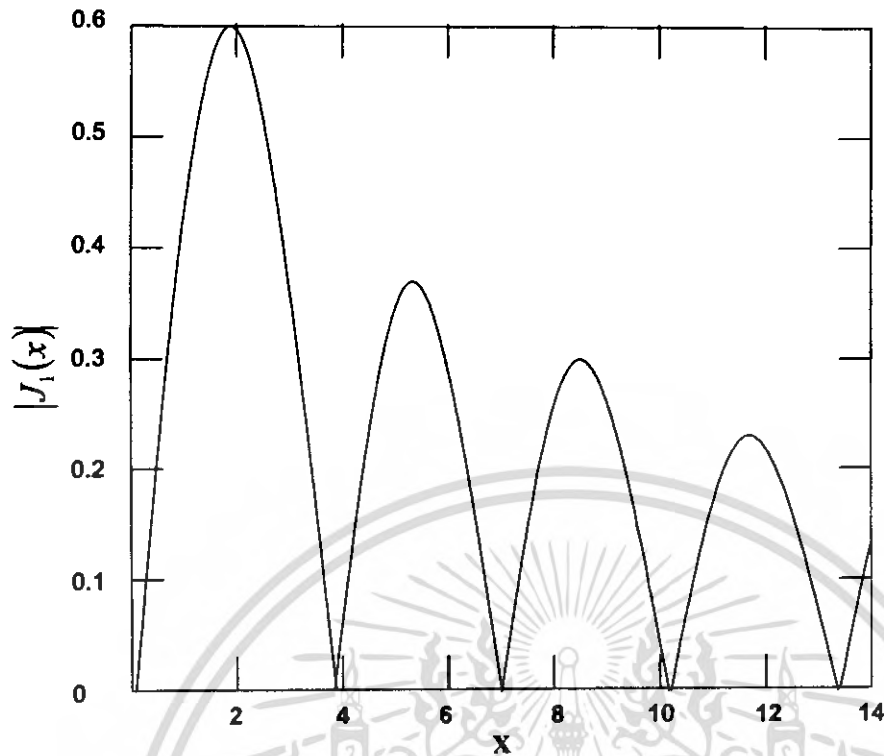
จากสมการ (2.183), (2.197) และ (3.198) กำลังทั้งหมดของคลื่นแผ่ออกจากสายอากาศแบบบ่วงที่มีขนาดของบ่วงใหญ่จะได้เป็น

$$P_r = \frac{\pi \eta (ka) I_m^2}{4}, \quad a > \lambda \quad (2.199)$$

เมื่อแทนสมการ (2.199) ในสมการ (2.106) ความต้านทานการแผ่พลังงานจะได้เป็น

$$R_r = \frac{2P_r}{I_m^2} = 60\pi^2 (ka) \quad (2.200)$$

เมื่ออินทิกรัลอิมพีแดนซ์ ของตัวกลางเท่ากับ 120π (Ω) สำหรับฟังก์ชันเบสเซลนั้นแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ฟังก์ชันเบสเซลอันดับหนึ่ง

จากรูปที่ 2.24 ค่าสูงสุดของฟังก์ชันเบสเซลจะเป็น

$$J_1(x)_{\max} = J_1(1.84) = 0.582 \quad (2.201)$$

สำหรับการวิเคราะห์ทิศทางของสายอากาศแบบบ่วงที่มีขนาดของบ่วงใหญ่ จะมีค่าความเข้มการแผ่พลังงานของสายอากาศคือ

$$U(\theta, \phi) = W_r r^2 a_r = \frac{\eta k^2 a^2 I_m^2}{8} J_1^2(ka \sin \theta) \quad (2.202)$$

จากสมการ

$$U(\theta, \phi) = U_m |F(\theta, \phi)|^2 \quad (2.203)$$

และเมื่อแทนสมการ (2.201) ใน (2.202) ค่าสูงสุดของความเข้มการแผ่พลังงานของสายอากาศจะเป็น

$$U_m = \frac{\eta k^2 a^2 I_m^2}{8} (0.582)^2 = \frac{0.338 \eta (ka)^2 I_m^2}{8} \quad (2.204)$$

และจากสมการ (2.201) และ (2.202) แบบรูปการแผ่พลังงานจะมีค่าสูงสุดที่มุม

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{1.84}{ka} \right) \quad (2.205)$$

โดยจะมีค่าเฉลี่ยของความเข้มการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบบ่วงที่มีขนาดบ่วงใหญ่คือ

$$U_{av} = \frac{P_r}{4\pi} = \frac{\eta (ka)^2 I_m^2}{16} \quad (2.206)$$

จากสมการ (2.204) และ (2.206) สภาวะทิศทางของสายอากาศจะได้เป็น

$$D = \frac{U_m}{D_{av}} = \frac{(0.338)(16)ka}{8} = 0.676ka = \frac{0.676C}{\lambda} \quad (2.207)$$

เมื่อ C เป็นเส้นรอบวงของสายอากาศแบบบ่วง

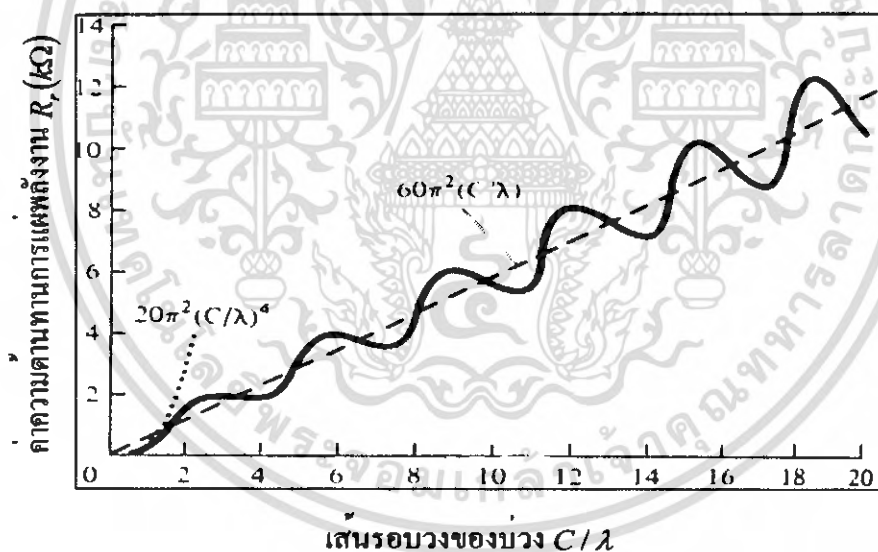
เมื่อแทนสมการ (2.207) ใน (2.208) พื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศแบบบ่วงที่มีขนาดบ่วงใหญ่จะได้เป็น

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} D = \frac{\lambda^2}{4\pi} (0.676ka) = 0.338\lambda_a \quad (2.208)$$

เมื่อแทนสมการ (2.200) และ (2.208) ใน (2.162) ความสูงประสิทธิผลจะได้เป็น

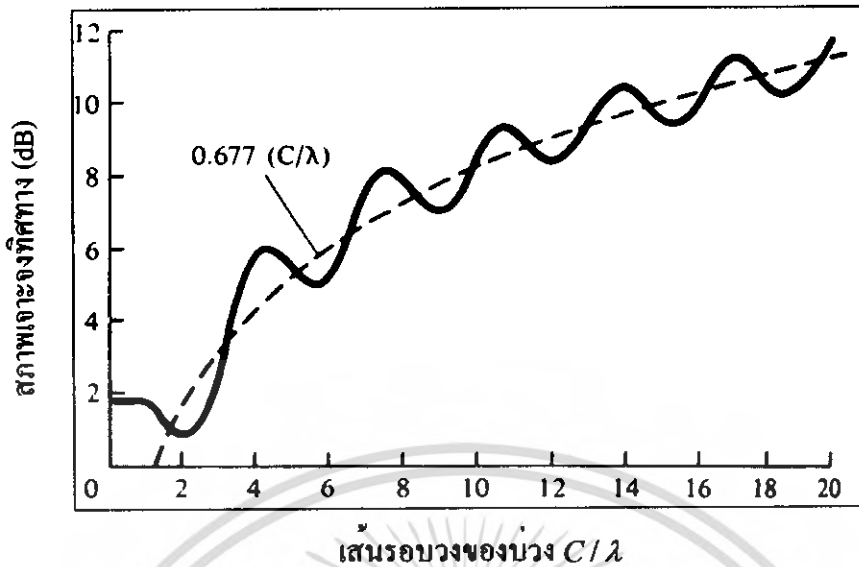
$$h = \left(\frac{4R_r A_e}{\eta} \right)^{1/2} = \sqrt{0.338} (2\pi a) = 0.582C \quad (2.209)$$

สำหรับความต้านทานการแผ่พลังงานและสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแบบบ่วงซึ่งเป็นฟังก์ชันของเส้นรอบวงของบ่วงจะแสดงในรูปที่ 2.25 และในรูปที่ 2.26 ตามลำดับ



รูปที่ 2.25 คุณลักษณะความต้านทานการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบบ่วง

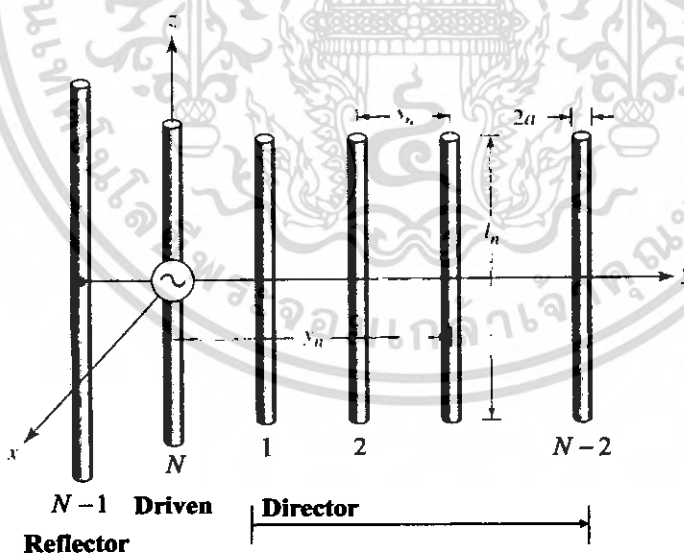
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 คุณสมบัติสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแบบบ่วง

2.6 สายอากาศยาคิ-อูดา (Yagi-Uda Antenna)

สายอากาศที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติในย่านความถี่ HF (3-30 MHz) VHF (30-300 MHz) และ UHF (300-3000 MHz) กันมากได้แก่สายอากาศยาคิ-อูดา (Yagi-Uda Antenna) สายอากาศแบบนี้ประกอบไปด้วยลิเนียร์ ไดโพล (Linear Dipole) หลายๆตัวดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 โครงสร้างของสายอากาศยาคิ-อูดา

จะมีลิเนียร์ไดโพลอีลีเมนต์ (Element) ตัวหนึ่งได้รับพลังงานจากสายส่ง (Feed Transmission Line) ในขณะที่อีลีเมนต์อื่นก็มีคุณสมบัติเป็นพาราซิติค เรดิเอเตอร์ (Parasitic Radiators) ซึ่งกระแสนพาราซิติค เรดิเอเตอร์ถูกเหนี่ยวนำโดยการมีมวลคัปปลิง (Mutual Coupling) ฟิลด์ อีลีเมนต์ ที่นิยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้กันมากสำหรับสายอากาศยาคือ โฟลด์เดดไดโพล (Folded Dipole) สายอากาศนี้ได้รับการออกแบบมาเพื่อให้ทำงานเป็นเอนด์ไฟร์ อาร์เรย์ (End-fire Array) ซึ่งคุณสมบัตินี้สามารถที่จะทำได้โดยใช้พาราจิติก อีลีเมนต์ ไว้ในทิศทางด้านหน้าของลำคลื่น เรียกว่าเป็นตัวกำหนดทิศทาง (Director) และด้านหลังของลำคลื่น เรียกว่า ตัวสะท้อนคลื่น (Reflector) ซึ่งนิยมใช้เป็นสายอากาศเครื่องรับ โทรทัศน์ที่ใช้กันอยู่ตามบ้านเรือน

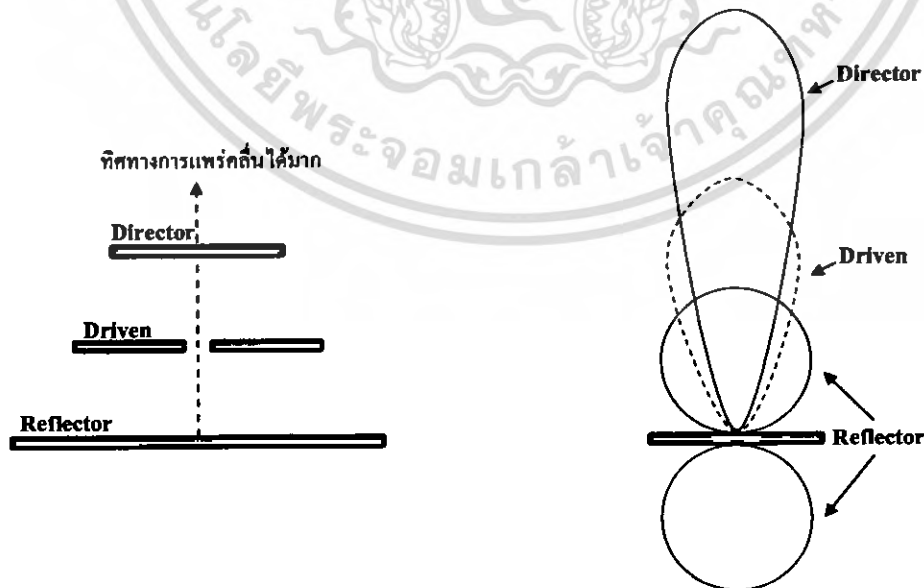
สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า คุณสมบัติของสายอากาศยาคิพิจารณาได้ใน 3 ส่วนคือ

1. การจัดเรียงตัวของตัวสะท้อนคลื่น
2. ตัวป้อนสัญญาณ
3. ตัวกำหนดทิศทาง

จากการทดลองจำนวนมาก สรุปได้ว่าระยะระหว่างตัวสะท้อนคลื่นและขนาด มีผลเล็กน้อยต่อฟอร์เวิร์ดเกน (Forward Gain) และมีผลมากต่อแบคเวิร์ดเกน (Backward Gain) และอินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance) และยังสามารถใช้ควบคุมหรือเพิ่มผลดีของพารามิเตอร์ของสายอากาศ โดยไม่มีผลต่ออัตราขยายของสายอากาศ

ค่าความยาวรัศมีของตัวป้อนสัญญาณนั้นจะมีผลเล็กน้อยต่อฟอร์เวิร์ดเกนและมีผลมากต่อแบคเวิร์ดเกน และรูปร่างทางเรขาคณิตของมันได้รับการเลือกเพื่อควบคุมอินพุทอิมพีแดนซ์ซึ่งโดยทั่วไปจะให้ค่าที่เป็นจริง

ขนาดและระยะห่างของตัวกำหนดทิศทาง มีผลอย่างมากต่อฟอร์เวิร์ดเกน แบคเวิร์ดเกน และอินพุทอิมพีแดนซ์ และมันได้รับการพิจารณาว่าเป็นอีลีเมนต์ (Element) ที่สำคัญที่สุดของอาร์เรย์ (Array) ถ้าเรานำสายอากาศหลายๆชุดมาต่อเรียงแถว เรียกว่าเป็นอาร์เรย์ อัตราขยายของสายอากาศจะมากขึ้น และสามารถควบคุมทิศทางการแพร่คลื่นได้ สายอากาศที่ไม่ได้ต่อเข้ากับสายนำสัญญาณ แต่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหรือแรงดันบนตัวสายอากาศเราเรียกว่าพาราจิติก อีลีเมนต์คังรูป



รูปที่ 2.28 การทำงานของสายอากาศยาคิ-อูตะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.28 อีลีเมนต์จะวางห่างจากโคโพลเป็นระยะห่างเท่ากับ $1/4$ เราเรียกโคโพลว่า ตัวถูกขับ (Driven Element) ซึ่งมีความยาวเท่ากับ $1/2$ ถ้าเรารับคลื่นเข้ามาจะเข้าที่ ไดเรกเตอร์ (Director) ซึ่งมีความยาวจะสั้นกว่า $1/2$ ประมาณ 5 % และความยาวของไดเรกเตอร์จะอยู่ห่างจาก ตัวขับประมาณ 0.11 จะเกิดการเหนี่ยวนำ เฟสจะเปลี่ยนไป 90 องศา พอลคลื่นเหนี่ยวนำลงบนโคโพล ก็จะมีเฟสกลับทางไป 180 องศา และจากโคโพลจะเหนี่ยวนำไปยัง รีเฟลคเตอร์ (Reflector) ซึ่งรีเฟลคเตอร์จะเหนี่ยวนำเกิดกระแสไหลในตัวรีเฟลคเตอร์แล้วจะแพร่คลื่นออกมาเหนี่ยวนำที่ ตัวถูกขับ (Driven Element) จะเปรียบเสมือนรีเฟลคเตอร์เป็นตัวสะท้อนคลื่นนั่นเองซึ่งจะอยู่ห่างจากโคโพลประมาณ 0.181 ถึง 0.21 และมีความยาวของรีเฟลคเตอร์มักจะยาวกว่า โคโพล ประมาณ 5 % ในการส่งออกอากาศนั้นสายอากาศยาก็ 3 อีลีเมนต์ จากรูป 2.28 แสดงให้เห็นการแพร่กระจายคลื่น และการเสริมของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของตัวรีเฟลคเตอร์กับ ไดเรกเตอร์ ทำให้เราได้รูปแบบรวมเป็นลักษณะบีบเดี่ยว บีบวิคท์แคบลงอัตราขยายสูงขึ้น เราสามารถเพิ่มอีลีเมนต์ของไดเรกเตอร์ให้มีจำนวนมากขึ้น เพื่ออัตราขยายของสายอากาศให้สูงขึ้นไปอีกด้วย

2.7 ระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN)

การใช้งานเครือข่ายไร้สายมีอัตราการเติบโตเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วนับตั้งแต่มาตรฐาน IEEE 802.11 เกิดขึ้น เครือข่ายไร้สายก็ได้รับการปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งปัจจุบันเครือข่ายไร้สายสามารถใช้งานได้ด้วยความสะดวก และมีความปลอดภัยสูงขึ้นมา นอกจากนั้นก็ยังให้อัตราความเร็วของการสื่อสารที่เพิ่มสูงขึ้นจนสามารถรองรับกับการใช้งานในด้านต่างๆ ได้อย่างดี ไม่ว่าจะเป็นการใช้งานอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง และการใช้งานด้านความบันเทิงต่างๆ สำหรับการประยุกต์ใช้งานเครือข่ายไร้สาย นับว่ามีอย่างหลากหลาย ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ผู้ใช้งานตามบ้านเรือนที่พัก สามารถนำระบบเครือข่ายไร้สายมาใช้งานทั้งการแชร์การใช้งานอินเทอร์เน็ตร่วมกับสมาชิกในครอบครัว รับฟังและรับชมสื่อบันเทิงบนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตผ่านผลิตภัณฑ์ไร้สายแบบต่างๆ ได้จากทุกๆ ที่ภายในบริเวณบ้าน โดยไม่ต้องเดินสายนำสัญญาณให้ยากลำบาก

ผู้ใช้งานภายในองค์กร สามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มผลผลิตของการทำงานของพนักงาน ลดค่าใช้จ่ายของการวางสายนำสัญญาณลง ใช้จ่ายขอยอบเขตการใช้งานเครือข่ายเดิมให้มีความยืดหยุ่น ในกิจการโรงแรมสามารถให้บริการแก่แขกผู้มาเข้าพักได้โดยสะดวก ร้านอาหารสามารถนำมาให้บริการกับลูกค้าที่เข้ามาสั่งอาหาร, ผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเดินสายสัญญาณให้เข้าถึงจุดบริการต่างๆ มากขึ้น และสามารถให้บริการในจุดบริการที่สายสัญญาณไม่สามารถเข้าถึงได้เช่นกัน, ผู้บริหารระบบเครือข่ายสามารถเฝ้าตรวจสอบระบบ และปรับเปลี่ยนแก้ไขปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับระบบเครือข่ายจากจุดใดก็ได้ ทำให้สะดวกและรวดเร็วต่อการจัดการมากขึ้น

ผู้ใช้งานภายในสถานศึกษา สถานศึกษาสามารถใช้เครือข่ายไร้สายโดยให้นักศึกษาสามารถเข้าเรียนในแบบออนไลน์ได้ สามารถสืบค้นข้อมูลบนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตจากจุดใดจุดหนึ่งของสถาบันได้ ช่วยให้นักศึกษาสามารถใช้งานได้สะดวกและรวดเร็วมากขึ้น

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับมาตรฐาน IEEE 802.11

มาตรฐาน IEEE 802.11 ซึ่งได้รับการตีพิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2540 โดย IEEE (The Institute of Electronics and Electrical Engineers) และเป็นเทคโนโลยีสำหรับ WLAN ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด คือข้อกำหนดสำหรับอุปกรณ์ WLAN ในส่วนของ Physical (PHY) Layer และ Media Access Control (MAC) Layer โดยในส่วนของ PHY Layer มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้กำหนดให้อุปกรณ์มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 1, 2, 5.5, 11 และ 54 Mbps โดยมีสื่อ 3 ประเภทให้เลือกใช้ ได้แก่ คลื่นวิทยุที่ความถี่สาธารณะ 2.4 และ 5 GHz, และ อินฟราเรด (1 และ 2 Mbps เท่านั้น) สำหรับในส่วนของ MAC Layer มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้กำหนดให้มีกลไกการทำงานที่เรียกว่า CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับหลักการ CSMA/CD (Collision Detection) ของมาตรฐาน IEEE 802.3 Ethernet ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปในเครือข่าย LAN แบบใช้สายนำสัญญาณ นอกจากนี้ในมาตรฐาน IEEE802.11 ยังกำหนดให้มีทางเลือกสำหรับสร้างความปลอดภัยให้กับเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN โดยกลไกการเข้ารหัสข้อมูล และการตรวจสอบผู้ใช้ ที่มีชื่อเรียกว่า WEP (Wired Equivalent Privacy)

วิวัฒนาการของมาตรฐาน IEEE 802.11

มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้รับการตีพิมพ์ครั้งแรกในปี พ.ศ. 2540 ซึ่งอุปกรณ์ตามมาตรฐานดังกล่าวจะมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 1 และ 2 Mbps ด้วยสื่อ อินฟราเรด หรือ คลื่นวิทยุที่ความถี่ 2.4 GHz และมีกลไก WEP ซึ่งเป็นทางเลือกสำหรับสร้างความปลอดภัยให้กับเครือข่าย WLAN ได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากมาตรฐาน IEEE 802.11 เวอร์ชันแรกเริ่มมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำและไม่มีการรองรับหลักการ Quality of Service (QoS) ซึ่งเป็นที่ต้องการของตลาด อีกทั้งกลไกรักษาความปลอดภัยที่ใช้ยังมีช่องโหว่อยู่มาก IEEE จึงได้จัดตั้งคณะทำงาน (Task Group) ขึ้นมาหลายชุดด้วยกันเพื่อทำการปรับปรุงเพิ่มเติมมาตรฐานให้มีศักยภาพสูงขึ้น โดยคณะทำงานกลุ่มที่มีผลงานที่น่าสนใจและเป็นที่ยอมรับได้แก่ IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11e, IEEE 802.11g, และ IEEE 802.11i

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายในมาตรฐานต่างๆ

| คุณสมบัติ | IEEE802.11b | IEEE802.11a | IEEE802.11g |
|----------------------------------|-------------|-------------|---------------|
| ความเร็วในการสื่อสารข้อมูลสูงสุด | 11Mbps | 54Mbps | 54Mbps |
| กลไกการส่งสัญญาณ | DSSS | OFDM | DSSS และ OFDM |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| คุณสมบัติ | IEEE802.11b | IEEE802.11a | IEEE802.11g |
|---|--|---|--|
| ความเร็วสื่อสาร | 1,2,5.5,11 Mbps | 6,9,12,18,24,36,48,54 Mbps | DSSS : 1,2,5.5,11 Mbps OFDM:6,9,12,18,24,36,48,54 Mbps |
| ช่วงความถี่ที่ใช้งาน | 2.4-2.4835 GHz | 5.15-5.35 GHz 5.425-5.675 GHz 5.725-5.875 GHz | 2.4-2.4835 GHz |
| การมอดูเลทสัญญาณ | DBPSK : 1 Mbps DQPSK : 2Mbps CCK : 5.5,11 Mbps | BPSK: 6,9 Mbps QPSK : 12,18 Mbps 16-QAM : 24,36 Mbps 64-QAM : 48,54 Mbps | DBPSK : 1 Mbps DQPSK : 2 Mbps CCK : 5.5,11 Mbps OFDM:6,9,12,18,24,36,48,54 Mbps |
| กลไกควบคุมการเข้าถึงตัวกลางสื่อสารข้อมูล (Media Access Control) | CSMA/CA | CSMA/CA | CSMA/CA |
| ความสามารถในการทำงานร่วมกับมาตรฐานอื่นๆ | IEEE802.11b IEEE802.11g | IEEE802.11a | IEEE802.11b IEEE802.11g |

ตารางที่ 2.3 ค่าวิสัยสามารถ (Throughput) โดยประมาณของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

| ระยะทาง(ฟุต) | IEEE802.11b | IEEE802.11a | IEEE802.11g |
|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 10 | 5.8 Mbps | 24.7 Mbps | 24.7 Mbps |
| 50 | 5.8 Mbps | 19.8 Mbps | 24.7 Mbps |
| 100 | 5.8 Mbps | 12.4 Mbps | 19.8 Mbps |
| 150 | 5.8 Mbps | 4.9 Mbps | 12.4 Mbps |
| 200 | 3.7 Mbps | 0 | 4.9 Mbps |
| 250 | 1.6 Mbps | 0 | 1.6 Mbps |
| 300 | 0.9 Mbps | 0 | 0.9 Mbps |

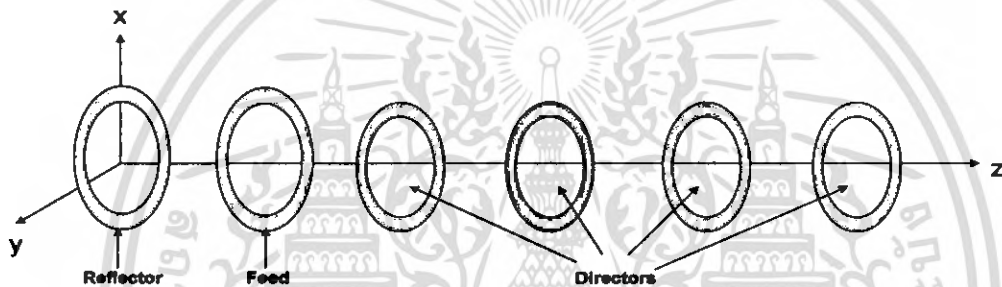
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการคำนวณและออกแบบ

3.1 หลักการออกแบบสายอากาศยาคิ-อูเดแบบบ่วง (Yagi-Uda Loop Antenna)

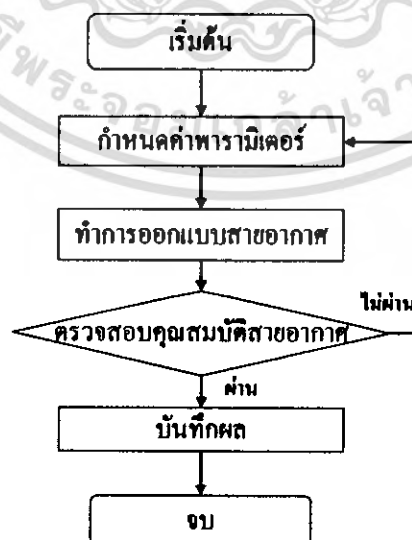
นอกจากสายอากาศไดโพลแล้วสายอากาศบ่วงก็เป็นสายอากาศที่เป็นพื้นฐานของสายอากาศอีกรูปแบบหนึ่ง โดยรูปแบบของบ่วงเล็กจะมีความคล้ายคลึงกับไดโพลจิว โดยเมื่อทำการเพิ่มขนาดของเส้นรอบวงของบ่วงจะส่งผลให้ ค่าการแพร่กระจายไปตามแกนนั้นจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นและมีค่าเข้าใกล้ค่าสูงสุดที่ประมาณ 1 ความยาวคลื่น ดังนั้นบ่วงจึงสามารถใช้เป็นองค์ประกอบพื้นฐานของสายอากาศแทนสายอากาศไดโพลได้ โดยสายอากาศยาคิ-อูเดแบบอาร์เรย์แสดงในรูปที่ 3.1 โดยทำการเลือกขนาดและระยะห่างของบ่วง โดยสายอากาศจะมีแบบรูปของการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวที่เป็นไปตามแกนของบ่วงและอาร์เรย์โดยสายอากาศยาคิ-อูเดแบบบ่วงนั้นจะมีส่วนประกอบที่สำคัญด้วยกัน 3 ส่วน



รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศยาคิ-อูเดแบบบ่วง

- 1) ตัวสะท้อนคลื่น(Reflector)
- 2) ตัวป้อนสัญญาณ(Feeder)
- 4) ตัวนำคลื่น(Director)

โดยการออกแบบสายอากาศจะมีขั้นตอนการทำงานตามบล็อก ไดอะแกรมดังนี้



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมแสดงการออกแบบสายอากาศยาคิ-อูเดแบบบ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบ

หลักการในการออกแบบที่สำคัญประการหนึ่งคือการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างสายอากาศโดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศยาก็-อูเดแบบบ่วงจะเป็นไปดังนี้

3.2.1 การกำหนดช่วงความถี่ในการใช้งาน

เนื่องจากสายอากาศยาก็-อูเดแบบบ่วงเป็นสายอากาศที่มีทิศทางการแพร่กระจายทิศทางเดียว ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะใช้ในการติดต่อสื่อสารแบบจุดต่อจุด โดยในหัวข้อโครงการนี้ได้กำหนดให้ใช้งานกับระบบสื่อสารไร้สายซึ่งจะใช้ความถี่ในช่วง 2.40-2.50 GHz โดยจะมีค่าความถี่หลักที่ใช้งานอยู่ที่ค่า 2.45 GHz

3.2.2 การกำหนดค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

ในการกำหนดค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศนั้นเพื่อที่จะให้เหมาะสมกับอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่นำมาต่อกับสายอากาศเนื่องจากในโครงการนี้ได้ใช้สายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50Ω ดังนั้นเพื่อความเหมาะสมกับสายอากาศจึงกำหนดให้สายอากาศมีค่าอินพุทอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50Ω

3.2.3 การคำนวณหาค่าความยาวคลื่น

หาค่าความยาวคลื่นจาก

$$v = f\lambda \quad (3.1)$$

เมื่อ $v = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ และค่าความถี่ที่ใช้งาน = 2.45 GHz

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{2.45 \times 10^9} \\ = 0.1224489 \text{ m}$$

3.2.4 การคำนวณหาขนาดของคำรัศมีขององค์ประกอบของสายอากาศ

3.2.4.1 คำรัศมีของตัวสะท้อนคลื่น (Reflector)

เส้นรอบวงของ Reflector $\approx 1.05\lambda$ (3.2)

จะได้ว่า

$$2\pi r_1 \approx 1.05\lambda \\ r_1 \approx \frac{1.05 \times (0.1224489)}{2\pi} \\ \approx 0.02046 \text{ m}$$

$$\therefore r_1 \approx 20.5 \text{ mm}$$

จะได้คำรัศมีของตัวสะท้อนคลื่น $\approx 20.5 \text{ mm}$

3.2.4.2 คำรัศมีของตัวป้อนสัญญาณ (Feeder)

เส้นรอบวงของ Feeder $\approx 0.97\lambda$ (3.3)

จะได้ว่า

$$2\pi r_2 \approx 0.97\lambda \\ r_2 \approx \frac{0.97 \times (0.1224489)}{2\pi} \\ \approx 0.0189 \text{ m}$$

$$\therefore r_2 \approx 19 \text{ mm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ค่ารัศมีของตัวป้อนสัญญาณ $\approx 19 \text{ mm}$

3.2.4.3 ค่ารัศมีของตัวนำคลื่น (Director)

เส้นรอบวงของ Director $\approx 0.7\lambda$ (3.4)

$$\begin{aligned} \text{จะได้ว่า} \quad 2\pi r_3 &\approx 0.7\lambda \\ r_3 &\approx \frac{0.7 \times (0.1224489)}{2\pi} \\ &\approx 0.0136 \text{ m} \\ \therefore r_3 &\approx 14 \text{ mm} \end{aligned}$$

จะได้ค่ารัศมีของตัวนำคลื่น $\approx 14 \text{ mm}$

สรุป องค์ประกอบต่างๆของสายอากาศภาคิ-อูตะแบบวง ที่ใช้งานในช่วงความถี่ 2.40-2.50 GHz เป็นดังนี้

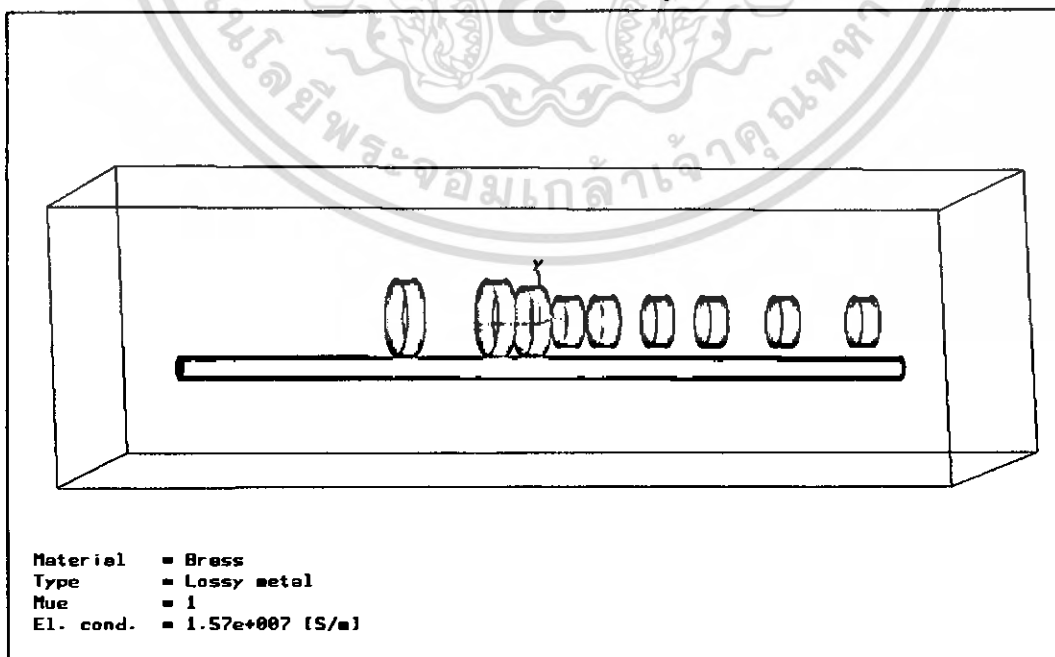
- 1.รัศมีของตัวสะท้อนคลื่น (Reflector) $\approx 20.5 \text{ mm}$
- 2.รัศมีของตัวป้อนสัญญาณ (Feeder) $\approx 19 \text{ mm}$
- 3.รัศมีของตัวนำคลื่น (Director) $\approx 14 \text{ mm}$

3.3 การออกแบบสายอากาศ

จากการคำนวณ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศจะได้ค่าที่จะนำมาทำการออกแบบสายอากาศโดยจะใช้ค่าขนาดของแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศวงดังนี้

- 1.รัศมีของ Reflector $\approx 21 \text{ mm}$
- 2.รัศมีของ Feeder $\approx 19 \text{ mm}$
- 3.รัศมีของ Director $\approx 14 \text{ mm}$

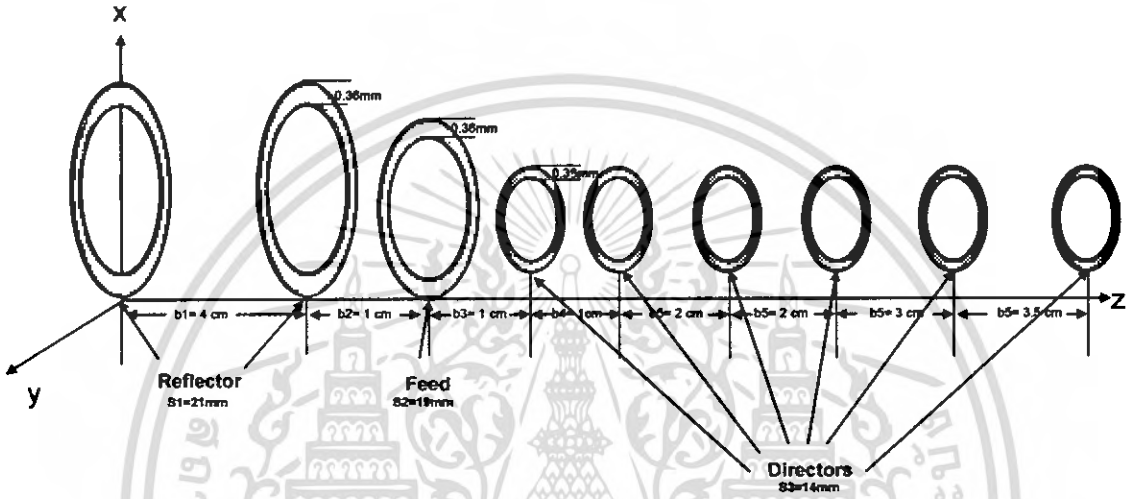
โดยเมื่อได้องค์ประกอบของสายอากาศต่างๆที่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการออกแบบแล้วจึงนำไป Simulate โดยจะใช้โปรแกรม CST (Computer Simulation Technology) เป็นส่วนสำคัญในการช่วยออกแบบ โดยเมื่อกำหนดองค์ประกอบต่างๆทั้งหมดแล้วจะได้ดังรูปที่ 3.3



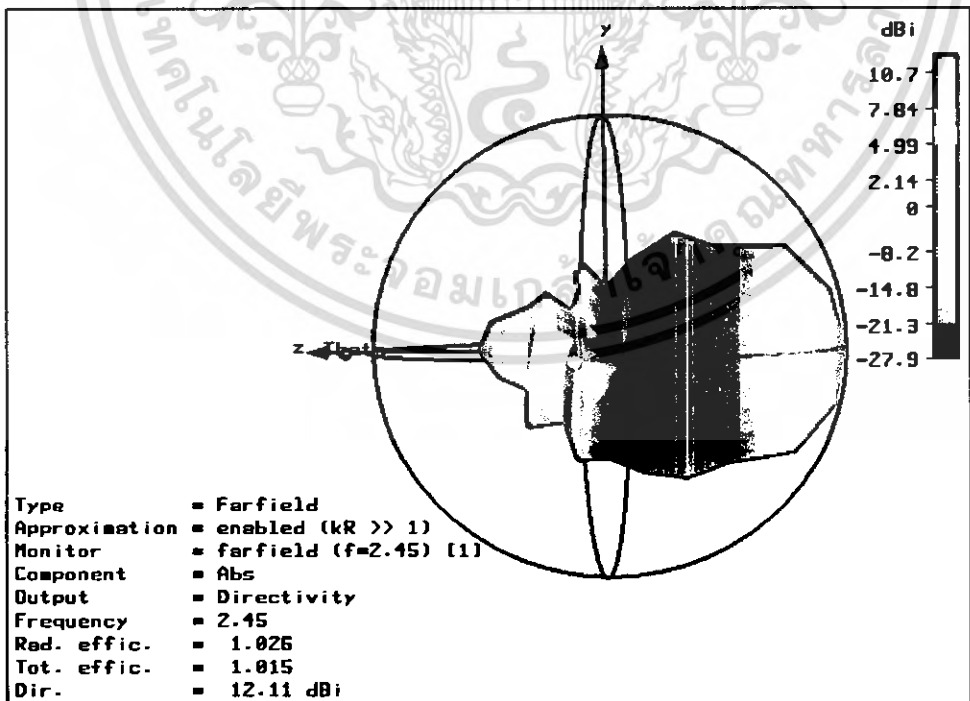
รูปที่ 3.3 สายอากาศที่ทำการออกแบบด้วยโปรแกรม CST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.3 เป็นรูปที่แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างที่ทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรม CST โดยจากรูปจะประกอบไปด้วย ตัวยึดติดสายอากาศ (Boom) โดยเลือกใช้วัสดุ PVC เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อการทำงานของสายอากาศเนื่องจาก PVC มีคุณสมบัติที่เป็นฉนวนไฟฟ้า และแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศใช้วัสดุทองเหลือง โดยโครงสร้างของสายอากาศยาก็-แบบบ่วงที่ทำการออกแบบได้นั้นจะประกอบไปด้วยตัวสะท้อนคลื่น (Reflector) จำนวน 2 ตัว ตัวป้อนสัญญาณ (Feeder) จำนวน 1 ตัว และตัวนำคลื่น (Director) จำนวน 6 ตัว โดยจะแสดงรายละเอียดของโครงสร้างของสายอากาศดังรูปที่ 3.4 ด้านล่าง



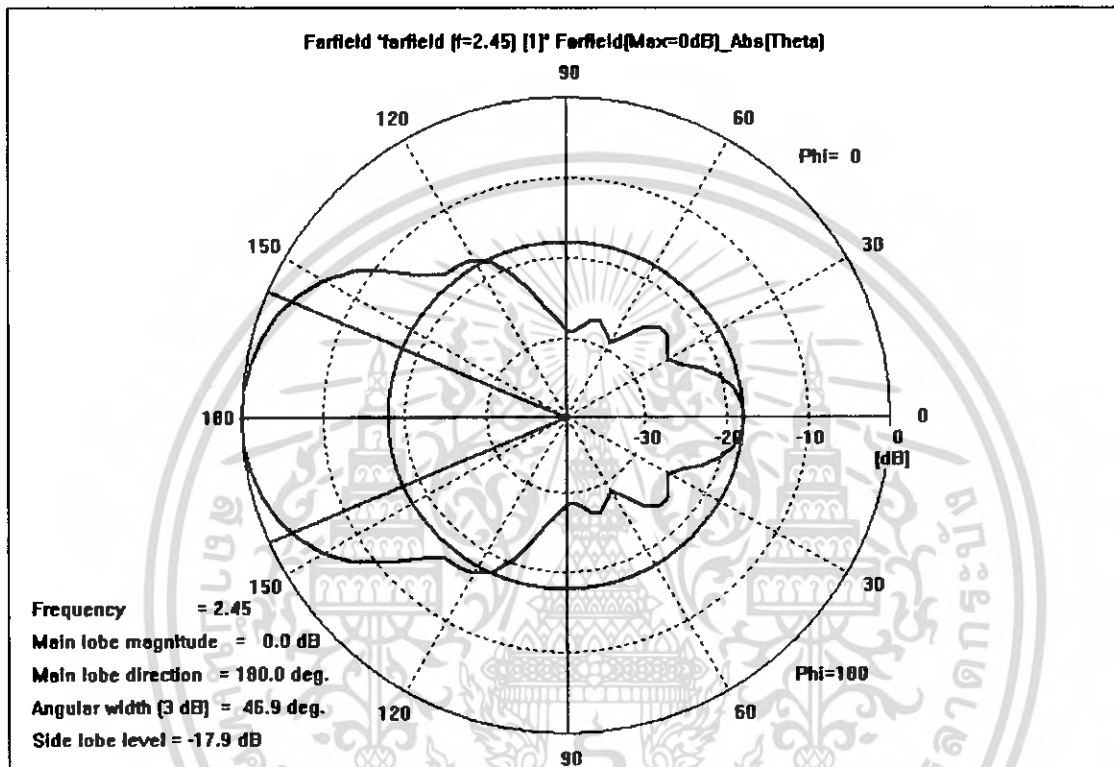
รูปที่ 3.4 รายละเอียดโครงสร้างของสายอากาศที่ทำการออกแบบ



รูปที่ 3.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ

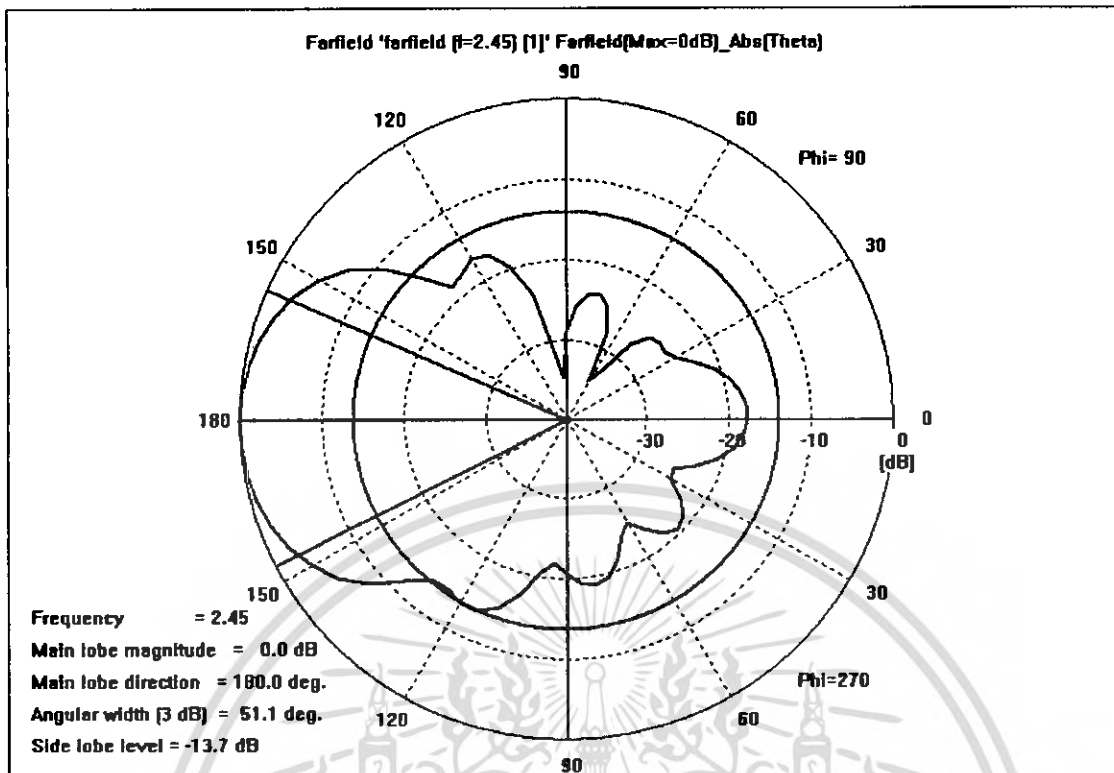
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.5 เมื่อทำการพิจารณาที่สนามระยะไกลที่ความถี่ 2.45 GHz จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ทำการออกแบบจะเป็นแบบรูปการมีทิศทาง(Directional Patterns) คือสายอากาศจะมีลำคลื่นหลักแคบๆเพียงลำคลื่นเดียว และจากการพิจารณาจะพบว่าสายอากาศจะเป็นแบบการแพร่กระจายคลื่นไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งและสามารถทำงานได้ในทิศทางที่ต้องการ โดยจะมีค่าการชี้ทิศทางสูงสุด(Directivity) = 12.11 dBi ซึ่งหมายถึงสายอากาศยาก็-อูจะแบบวงที่ทำการออกแบบได้เมื่อนำมาวัดค่าการชี้ทิศทางเมื่อเทียบกับสายอากาศไอโซทรอปิกจะมีค่า 12.11dB



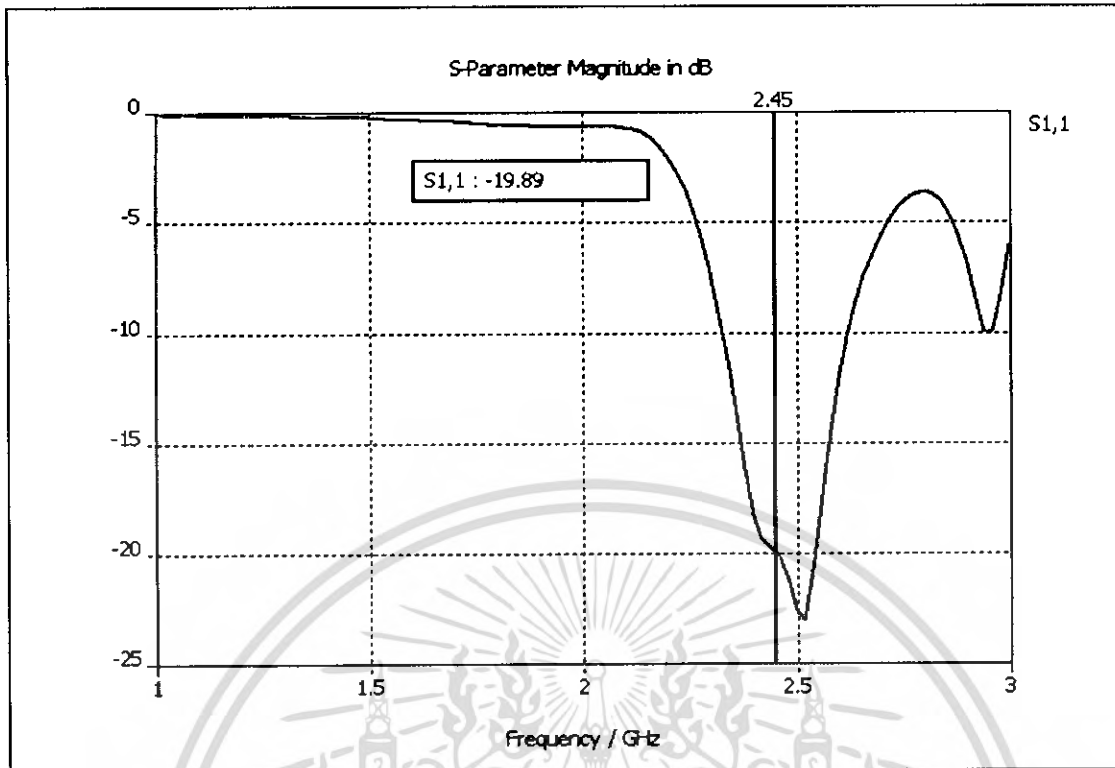
รูปที่ 3.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Polar ที่ในระนาบ H-Plane โดยมีค่า HPBW = 46.9 องศา

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก และทิศทางการแพร่กระจายในทิศที่แรงที่สุด เมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ในระนาบ H ที่ได้จะมีค่าระดับของลำคลื่นย่อย = -17.9 dB โดยจะมีค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (Half Power Beamwidth:HPBW) = 46.9 องศา และมีค่า Front To Back Ratio = 18 dB จากรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Polar ที่ในระนาบ H จะเห็นได้ว่าการออกแบบสามารถทำให้ได้รูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H ที่มีทิศทางตรงไม่มีการเบี่ยงเบนทิศทางออกไป



รูปที่ 3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Polar ที่ในระนาบ E-Plane โดยมีค่า HPBW = 51.1 องศา

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางการแพร่กระจายในทิศที่แรงที่สุด เมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ในระนาบ E ที่ได้จะมีค่าระดับของลำคลื่นย่อย = -13.7 dB โดยจะมีค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (Half Power Beamwidth:HPBW) = 51.1 องศา และมีค่า Front To Back Ratio = 18 dB จากรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Polar ที่ในระนาบ E จะเห็นได้ว่าการออกแบบสามารถทำให้ได้รูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E ที่มีทิศทางตรงไม่มีการเบี่ยงเบนทิศทางออกไป



รูปที่ 3.8 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ (Return Loss) ซึ่งจะใช้งานได้ในช่วงความถี่ 2.328 - 2.623 GHz

ตารางที่ 3.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศในช่วงความถี่ที่ต้องการ

| ความถี่ (GHz) | ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (dB) |
|---------------|----------------------------|
| 2.40 | -18.24 |
| 2.45 | -19.89 |
| 2.50 | -22.52 |

จะเห็นว่าความถี่ที่ใช้งานจริงคือ 2.45 GHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ -19.89 dB ซึ่งเป็นค่าที่สามารถนำไปสร้างและใช้งานได้เพราะโดยทั่วไปแล้วจะกำหนดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) จะต้องมีค่าที่น้อยกว่า -10 dB ซึ่งจากผลการออกแบบโดยโปรแกรม CST ที่ได้ดังตารางที่ 3.1 นี้ จะเป็นการยืนยันว่าสายอากาศที่ทำการออกแบบนั้นสามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน โดยสามารถคิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ Bandwidth ดังนี้

$$\Delta f = \frac{f_H - f_L}{f_0} \times 100\% \quad (3.5)$$

โดยค่า

$$f_0 = \frac{2.623 + 2.328}{2}$$

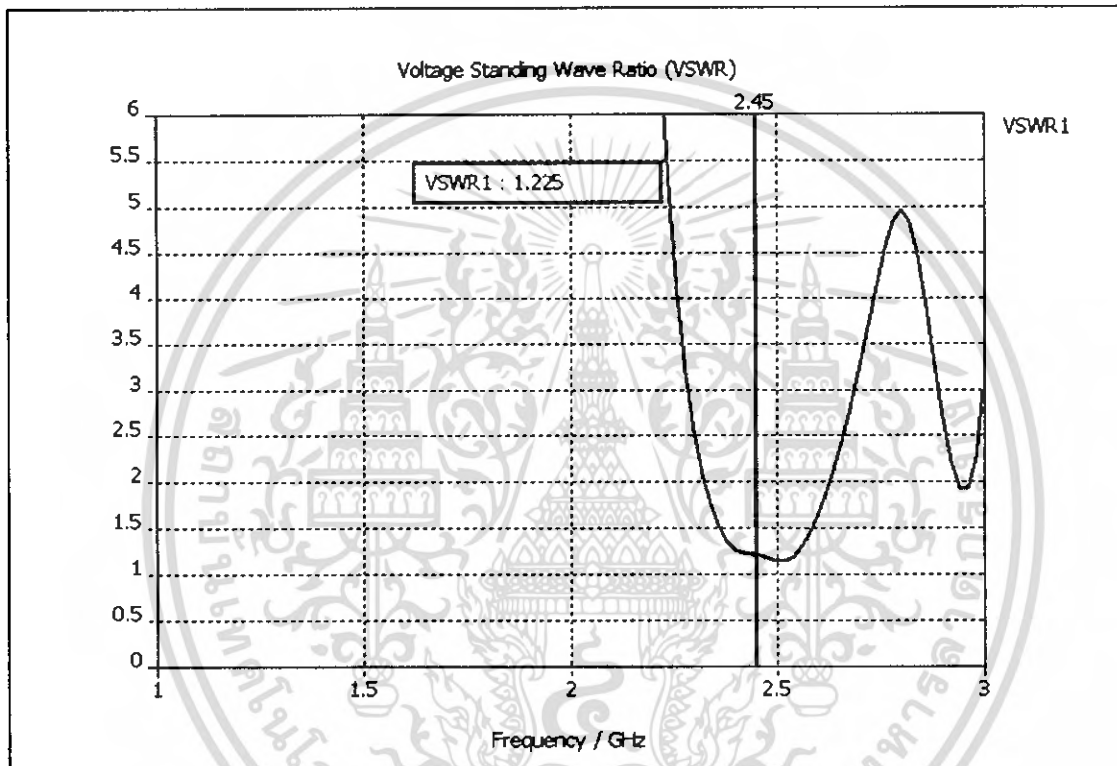
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 2.4755 \text{ GHz}$$

$$\Delta f = \frac{2.623 - 2.328}{2.4755} \times 100\%$$

$$= 11.917\%$$

ดังนั้นค่า เปอร์เซนต์ Bandwidth จะมีค่าเท่ากับ 11.917 %



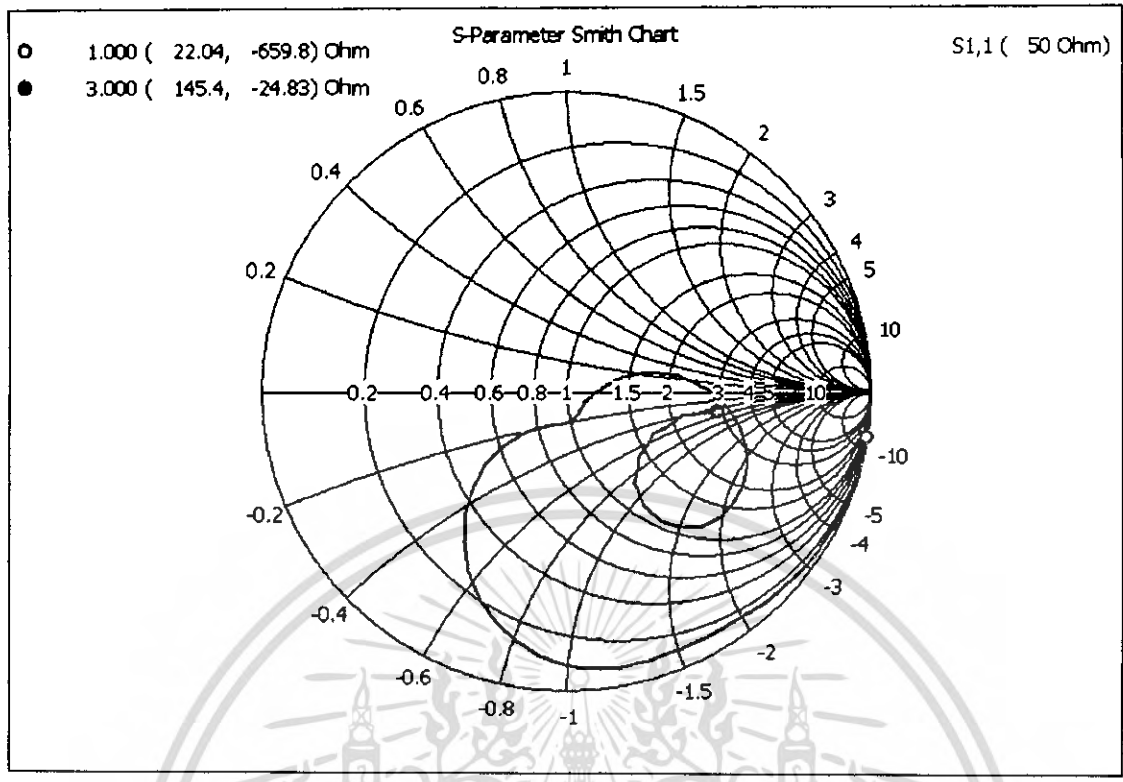
รูปที่ 3.9 ค่า VSWR จากผลการทดลองในช่วง 2.40-2.50 GHz

จากรูปค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้ในช่วงที่ต้องการใช้งานจะมีค่าที่ไม่เกิน 2:1 แสดงดังตารางที่ 3.2 ดังนี้

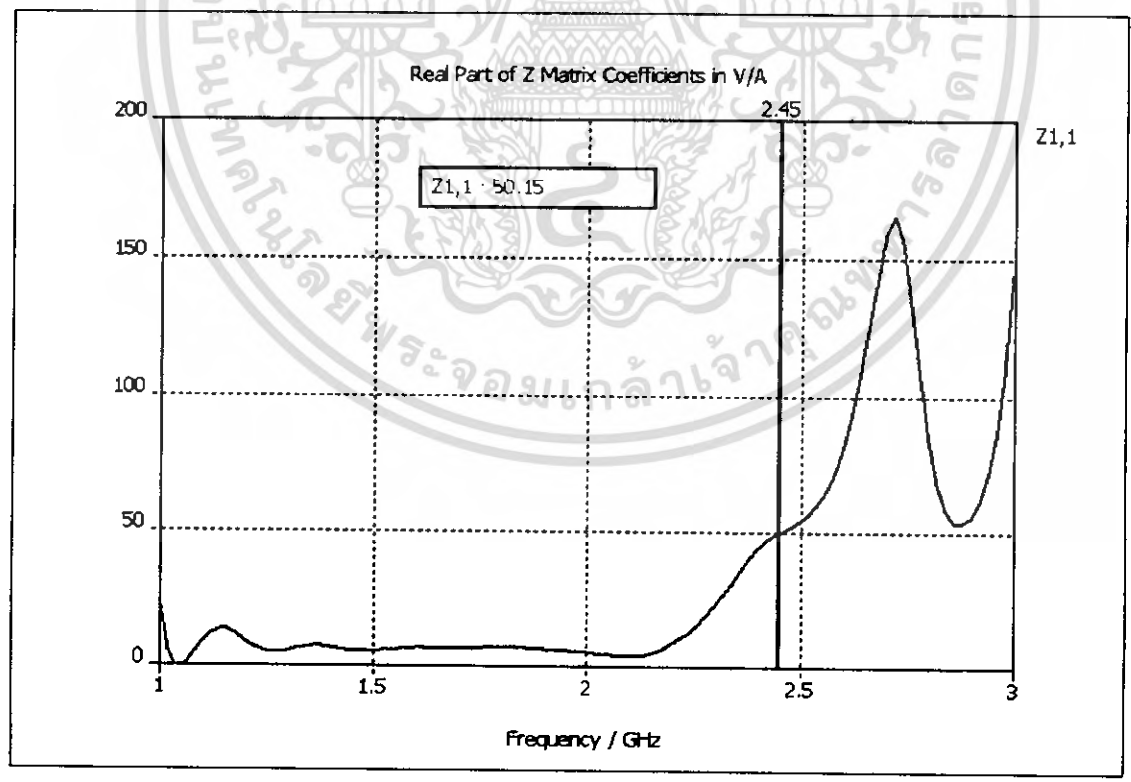
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ของสายอากาศในช่วงความถี่ที่ต้องการ

| ความถี่ (GHz) | ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง |
|---------------|-----------------------|
| 2.40 | 1.279:1 |
| 2.45 | 1.225:1 |
| 2.50 | 1.162:1 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

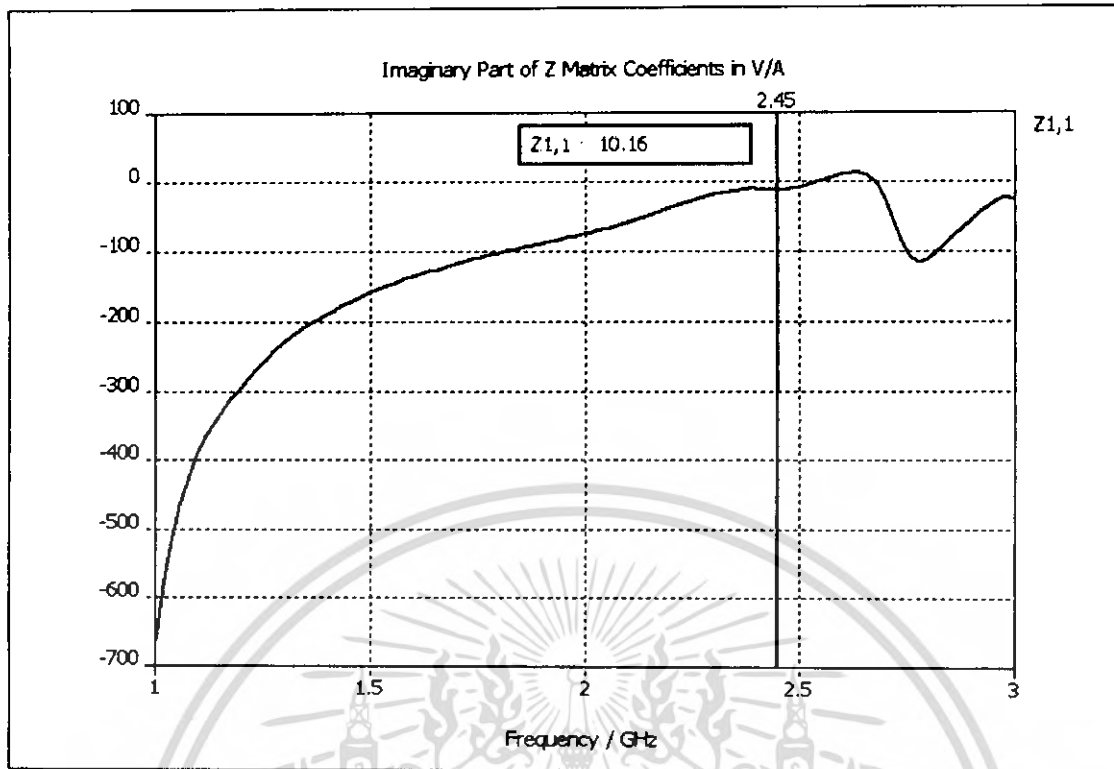


รูปที่ 3.10 ค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ



รูปที่ 3.11 ค่าส่วนจริงของอิมพีแดนซ์ซึ่งจะเห็นว่าที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 50.15 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ค่าส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 2.45 GHz

จะเห็นว่าเมื่อนำค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้ออกมาจากโปรแกรม CST (Computer Simulation Technology) มาทำการคำนวณหาค่า Standing Wave Ratio (SWR) จากสูตร

$$SWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (3.6)$$

โดยที่

$$\Gamma = \frac{Z_A - Z_o}{Z_A + Z_o} \quad (3.7)$$

เมื่อ Z_A คือ Input impedance

Z_o คือ Output impedance โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 50 Ω

Γ คือ Reflection Coefficient

โดยค่า Input impedance (Z_A) ที่อ่านได้จากโปรแกรม CST มีค่าเท่ากับ 50.15 - j10.16 Ω

$$\Gamma = \frac{50.15 - j10.16 - 50}{50.15 - j10.16 + 50}$$

$$\begin{aligned}
 &= 0.0117 - j0.1 \\
 |\Gamma| &= \sqrt{(0.0117)^2 + (-0.1)^2} \\
 &= 0.1007 \\
 SWR &= \frac{1 + 0.1007}{1 - 0.1007} \\
 &= 1.224 \\
 SWR &= 1.224 : 1
 \end{aligned}$$

จะเห็นว่าค่า SWR ที่ได้จากการคำนวณมีค่าตรงกับค่าที่โปรแกรมคำนวณให้ ซึ่งสามารถจะนำไปใช้ได้เพราะ โดยทั่วไปค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้สำหรับสายอากาศ คือค่าของ SWR ไม่ควรมีค่ามากกว่า 2:1

3.4 การคำนวณความยาวสายโคแอกเซียลและระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวรับ-ส่ง

3.4.1 การคำนวณความยาวสายโคแอกเซียล

จากสายรีจิดโคแอกเซียลที่ใช้ในการต่อระหว่างวง Feed กับ คอนเนคเตอร์โดยใช้สายรีจิดโคแอกเซียลจะมีค่าอิมพีแดนซ์ 50Ω , $\mu_r = 1$, $\epsilon_r = 2.5$

จากสมการ

$$Z_i = Z_o \frac{Z_L + jZ_o \tan \beta l}{Z_L + jZ_L \tan \beta l} \quad (3.5)$$

l = ค่าความยาวของสายโคแอกเซียล

Z_i = ค่าอิมพีแดนซ์

Z_o = ค่าอิมพีแดนซ์เชิงอิมพีแดนซ์

Z_L = ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

เมื่อต้องการให้ สายส่งที่ใช้ไม่มีผลต่อการลดทอนของสัญญาณโดยให้ เหมือนกับว่าเครื่องส่งต่ออยู่กับสายอากาศเลยโดยกำหนดให้ $l = n\lambda/2$ เมื่อ $\beta = 2\pi/\lambda$, ($n=1, 2, 3\dots$)

จะได้

$$\tan \beta l = \tan n\pi$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3.5) จะได้

$$Z_i = Z_o \frac{Z_L + jZ_o \tan n\pi}{Z_L + jZ_L \tan n\pi} \quad (3.6)$$

เมื่อ $\tan n\pi = 0$ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_o = Z_L \quad (3.7)$$

ดังนั้นจะพบว่าเมื่อกำหนดให้ค่าความยาวของสายส่งมีค่า $l = n\lambda/2$ แล้ว จะเสมือนกับว่าสายอากาศนั้น ได้ทำการต่อกับเครื่องส่งโดยตรงโดยไม่ต้องคำนึงถึง Z_L ของสายนำสัญญาณ

การคำนวณหาค่าความยาวคลื่นของสายนำสัญญาณ

เมื่อ μ_r คือ ค่าเพอร์มิททีบิลิตีของตัวกลาง = 1

ϵ_r คือ ค่าเพอร์มิททีบิลิตีของตัวกลาง = 2.5

ϵ_0 คือ ค่าเพอร์มิททีบิลิตีของอากาศ

μ_0 คือ ค่าเพอร์มิททีบิลิตีของอากาศ

λ_L คือ ค่าความยาวคลื่นของสายนำสัญญาณ (m)

f คือ ค่าความยาวถี่ (Hz) = 2.45 GHz

$$\lambda_L = \frac{v}{f} \quad (3.8)$$

$$\lambda_L = \frac{1}{f \sqrt{\epsilon\mu}} \quad (3.9)$$

$$\lambda_L = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \times \frac{1}{\sqrt{\mu_r\epsilon_r} f} \quad (3.10)$$

$$\text{เมื่อ } c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\lambda_L = \frac{(3 \times 10^8) \times \frac{1}{\sqrt{2.5}}}{2.45 \times 10^9}$$

จะได้ว่า

$$\lambda_L = 0.077 \text{ m}$$

โดยจากสมการที่ (3.7) จะได้ค่าความยาวของสายโคแอกเชียลที่มีค่าเป็นจำนวนเท่าของ $\frac{\lambda_L}{2}$ (m)

$$\text{จะได้ ความยาวสายโคแอกเชียล} = \frac{n\lambda_L}{2} \text{ (m)} \quad (n \text{ มีค่าเท่ากับ } 1, 2, 3, \dots)$$

$$\text{ความยาวสายโคแอกเชียล} = \frac{n(0.077)}{2} = n0.0385 \text{ m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 ระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวรับ-ส่ง

การวัดแบบรูปของการแพร่กระจายคลื่นนั้นจะต้องทำการพิจารณาที่บริเวณสนามระยะไกล(Far Field) ของสายอากาศ

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (\text{m})$$

เมื่อ R = ระยะห่างระหว่างสายอากาศ (m)

D = คือมิติที่กว้างที่สุดของสายอากาศ (m)

จากสายอากาศที่ทำการออกแบบและสร้าง

$$D = 0.265 \text{ m และ } \lambda = 0.1224489 \text{ m}$$

$$R \geq \frac{2(0.265)^2}{0.1224489}$$

$$R \geq 1.147 \text{ m}$$

ซึ่งจะได้ค่าระยะห่างของสายอากาศที่ทำการทดสอบ โดยต้องมีระยะห่างที่มากกว่า 1.147 เมตร



บทที่ 4

การสร้างและผลการทดสอบ

4.1 การสร้างสายอากาศ

จากผลการวิเคราะห์ในบทที่ 3 ที่ทำการออกแบบสายอากาศขาคี-อูตะแบบบ่วง เพื่อให้ได้ตามคุณสมบัติที่ต้องการแล้วในส่วนของบทที่ 4 นี้ก็จะนำรูปแบบที่ได้จากบทที่ 3 มาทำการสร้างสายอากาศ โดยจะมีอุปกรณ์และกระบวนการสร้างดังนี้

การจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการสร้างสายอากาศขาคี-อูตะแบบบ่วง

1. แผ่นทองเหลืองที่มีความหนา 0.36 มิลลิเมตร
2. ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร
3. สายริจิด โทแอกเซียล มีค่าอิมพีแดนซ์ของสาย 50Ω
4. คอนเนคเตอร์ (SMA) N-type
5. กรรไกรตัดแผ่นโลหะ
6. ตะกั่วและหัวแร้ง
7. ส่วนไฟฟ้า
8. นี้อคพลาสติกจำนวนเท่ากับจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศ

กระบวนการสร้างสายอากาศขาคี-อูตะแบบบ่วง

1. ทำการตัดแผ่นทองเหลืองให้ได้ขนาดตามต้องการและทำการเจาะรูตรงกลางของแผ่นทองเหลือง โดยในการเจาะรูนั้นจะให้รูมีขนาดเท่ากับขนาดของนีสที่นำมาใช้
2. นำแผ่นทองเหลืองที่เจาะรูเรียบร้อยแล้วมาทำการตัดและเชื่อมติดให้เป็นรูปร่างตามขนาดที่กำหนด
3. ตัดท่อ PVC ให้ได้ตามขนาดที่ต้องการแล้วนำท่อ PVC ไปเจาะรูเพื่อให้เป็นแกนที่ใช้ในการยึดติดของแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศ ใช้เป็น boom ของสายอากาศ
4. นำวงทองเหลืองที่ใช้เป็นแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศมาติดกับ boom ของสายอากาศโดยการใช้นี้อคพลาสติกเป็นตัวยึด
5. ทำการตัดสายริจิด โทแอกเซียลโดยมีความยาวตามที่คำนวณ
6. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศกับสายริจิด โทแอกเซียลโดยเชื่อมต่อกันที่วง Feed ซึ่งที่จุดป้อนสัญญาณต้องให้มีระยะห่างประมาณ 2 มิลลิเมตร
7. ทำการเชื่อมต่อสายริจิด โทแอกเซียลกับคอนเนคเตอร์ (SMA)



รูปที่ 4.1 สายอากาศยาคี-อูตะแบบบ่วง จากการสร้าง ที่จะนำไปทดสอบ

4.2 ผลการทดสอบ

เมื่อทำการออกแบบสายอากาศที่มีองค์ประกอบต่างๆแล้วจากนั้นก็นำสายอากาศยาคี-อูตะแบบบ่วงที่สร้างเสร็จแล้วมาวัดค่าคุณสมบัติต่างๆของสายอากาศ

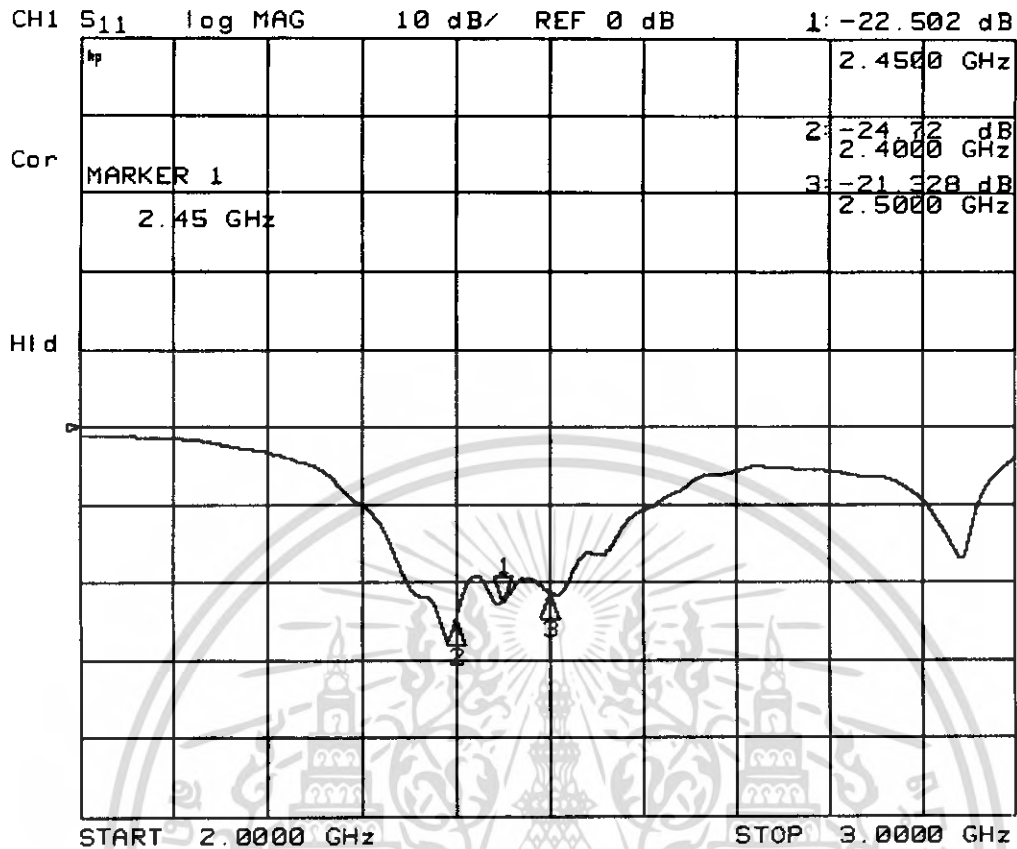
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดคุณสมบัติของสายอากาศ

1. สายอากาศยาคี-อูตะแบบบ่วง
2. สายอากาศไดโพล
3. สายนำสัญญาณ
4. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย
5. คอนเนคเตอร์ (SMA) N-type

4.2.1 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ (Return loss)

กำลังงานที่คลื่นแพร่กระจายออกไปนั้นจะมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ โดยจะคิดเป็นหน่วย dB ในทางปฏิบัตินั้นต้องการให้มีสัญญาณย้อนกลับต่ำโดยทั่วไป ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ที่ยอมรับได้ ควรมีค่าที่น้อยกว่า -10 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ของสายอากาศ

จากผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศจะเห็นได้ว่าสายอากาศสามารถทำงานได้ในช่วง 2.3-2.61 GHz จากช่วงความถี่ที่ทำงานได้ดังกล่าวจะพบว่าสายอากาศสามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการซึ่งเมื่อพิจารณาที่ค่าความถี่เท่ากับ 2.45 GHz สายอากาศจะมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) = -22.502 dB จากผลการทดสอบจะพบว่าสายอากาศที่ทำการออกแบบสามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการ

ตารางที่ 4.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบในช่วงความถี่ที่ต้องการ

| ความถี่ (GHz) | ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (dB) |
|---------------|----------------------------|
| 2.40 | -24.72 |
| 2.45 | -22.502 |
| 2.50 | -21.328 |

โดยสามารถคิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ Bandwidth ดังนี้

$$\Delta f = \frac{f_H - f_L}{f_0} \times 100\%$$

โดยค่า

$$f_0 = \frac{2.61 + 2.3}{2}$$

$$= 2.455 \text{ GHz}$$

$$\Delta f = \frac{2.61 - 2.3}{2.455} \times 100\%$$

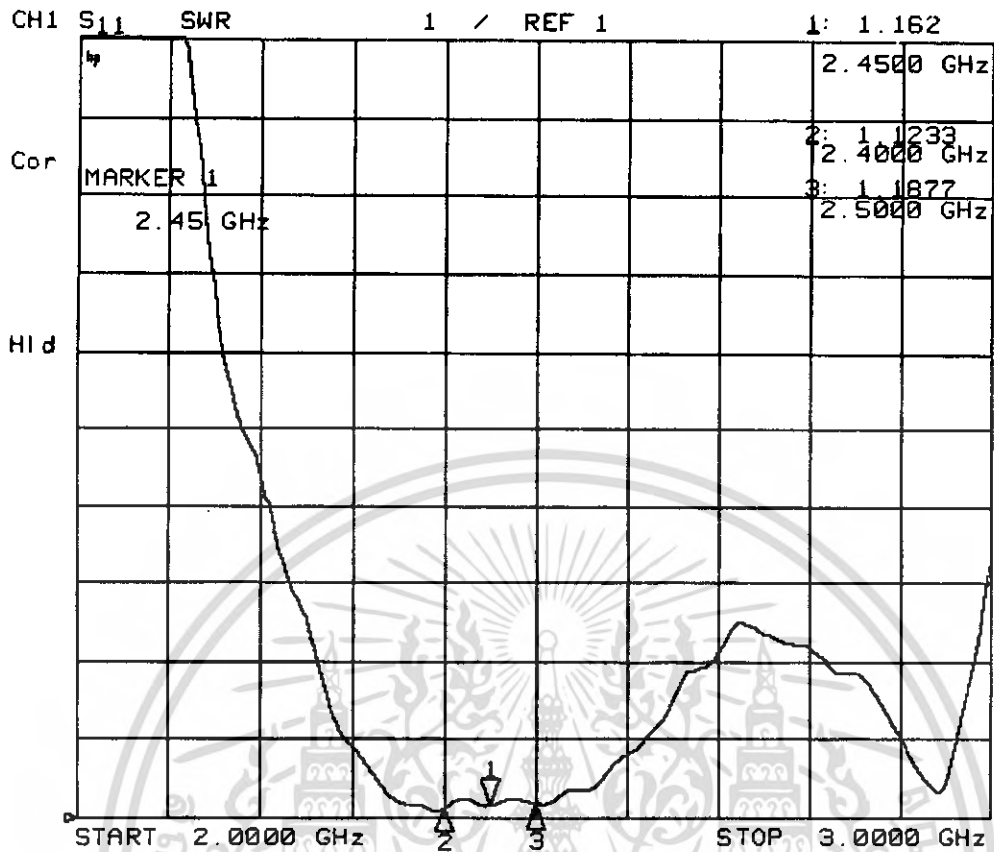
$$= 12.627\%$$

ดังนั้นค่า เปอร์เซ็นต์ Bandwidth จะมีค่าเท่ากับ 12.627 %

4.2.2 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR)

ในทางปฏิบัตินั้นสายอากาศที่ทำการออกแบบไม่สามารถที่จะปรับให้มีค่าอิมพีแดนซ์ (ค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จากขั้วของสายอากาศ) ให้มีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของเครื่องรับหรือเครื่องส่งได้ ดังนั้นเมื่อมีการต่อสายอากาศเข้ากับเครื่องรับหรือเครื่องส่ง ผลก็จะทำให้มีกำลังงานส่วนหนึ่งเกิดการสะท้อนกลับที่จุดอินพุทของสายอากาศ ดังนั้นเพื่อเป็นการบ่งบอกแก่ผู้ที่นำสายอากาศไปใช้งาน ว่าสายอากาศตัวนี้ถ้าหากนำไปใช้งานแล้วจะสามารถรับกำลังงานที่ส่งมาจากเครื่องส่งได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งสามารถบอกได้ด้วยค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่จะต้องนำมาใช้งานตามมาตรฐานจะต้องมีค่าไม่เกิน 2:1 แต่ถ้านำไปใช้งานจริงๆควรมีค่าไม่เกิน 1.5:1 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศควรมีค่าใกล้เคียง 50Ω ซึ่งค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ดีที่สุดก็คือ 1:1



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าสายอากาศเมื่อพิจารณาที่ความถี่ 2.45 GHz จะมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง 1.162:1 ซึ่งจะพบว่าสายอากาศมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเป็นไปตามมาตรฐาน โดยจะมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งไม่เกิน 2:1 จากรูปค่า SWR ที่ได้ในช่วงที่ต้องการใช้งานจะมีค่าที่ไม่เกิน 2:1 แสดงดังตารางที่ 4.2 ดังนี้

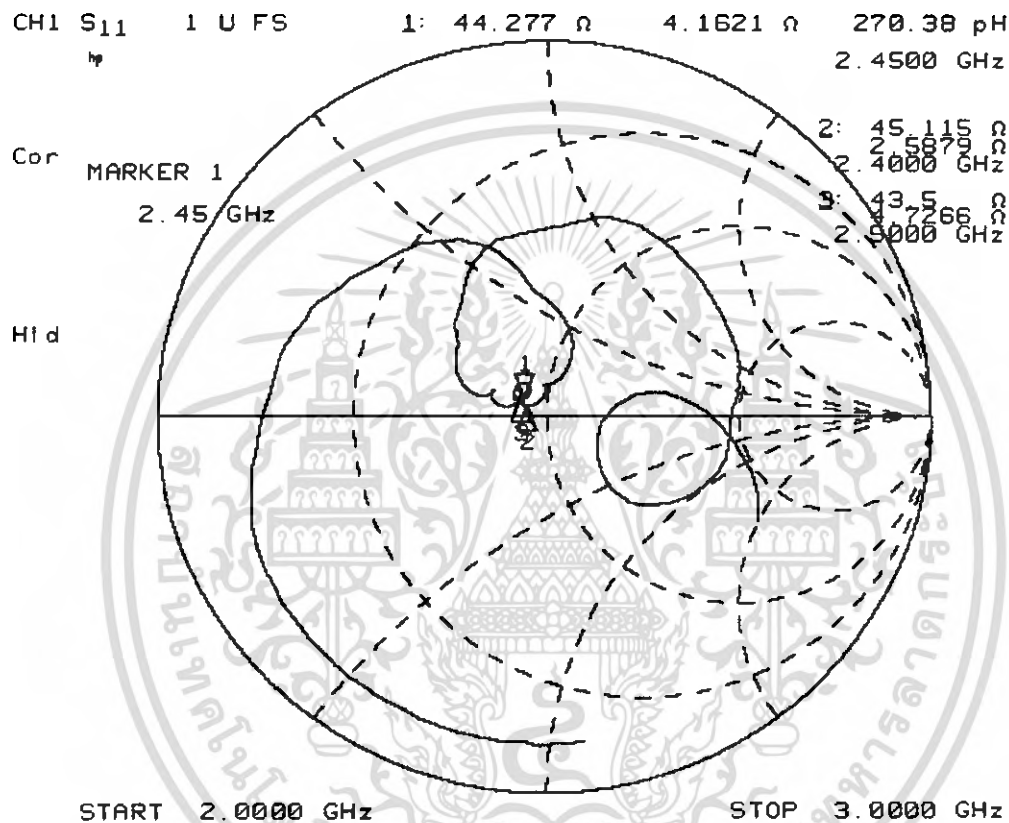
ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ของสายอากาศในช่วงความถี่ที่ต้องการ

| ความถี่ (GHz) | ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง SWR |
|---------------|---------------------------|
| 2.40 | 1.1233:1 |
| 2.45 | 1.162:1 |
| 2.50 | 1.1877:1 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลการทดสอบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Impedance)

สำหรับการทดสอบวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศก็เพื่อที่จะนำมาใช้ในการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ให้สามารถเข้ากันได้กับอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ มีค่าเท่ากับ 50Ω ซึ่งในการทดสอบนั้นควรที่จะให้ผลที่วัดออกมาได้มีค่าใกล้เคียงกับ 50Ω โดยจะทำการทดสอบกับเครื่องวิเคราะห์ระบบโครงข่าย (Network analyzer) พบว่าค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ได้มีค่าเท่ากับ 44.277Ω

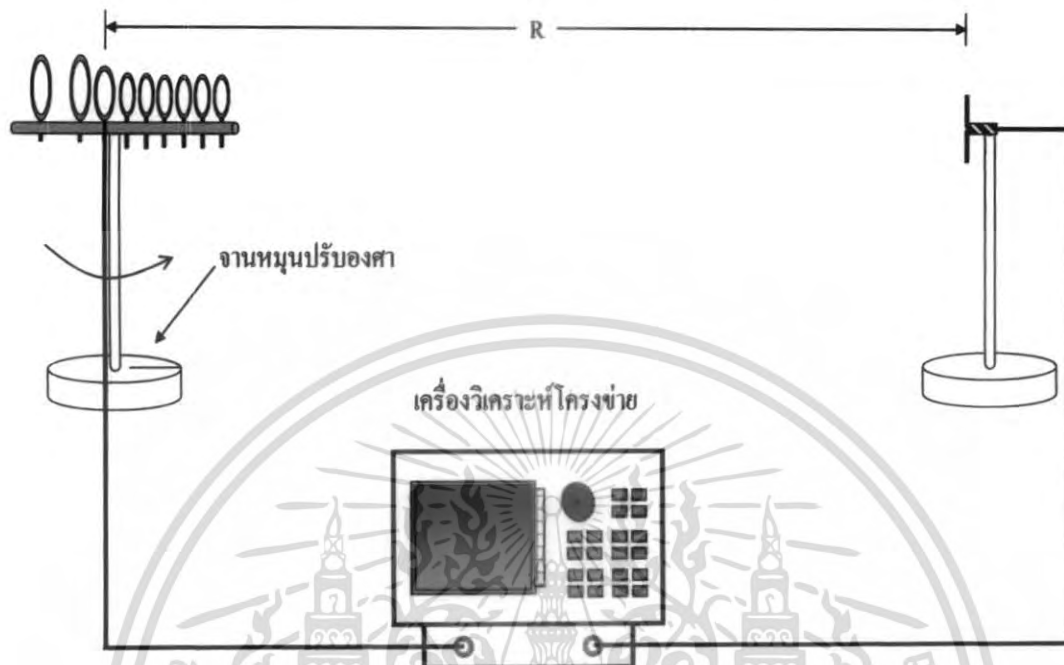


รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

4.2.4 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในโครงการนี้ จะกำหนดให้สายอากาศ ยากิ-อูตะแบบบ่วงเป็นสายอากาศทางด้านรับ และใช้สายอากาศแบบไดโพล มาใช้เป็นสายอากาศทางด้านส่ง โดยจะทำการทดสอบในห้องทดสอบการสะท้อนค่า เพื่อเป็นการป้องกันผลกระทบที่เกิดจากสภาพแวดล้อมภายนอก โดยการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะทำการวัดทั้งระนาบของสนามแม่เหล็กและระนาบของสนามไฟฟ้าโดยการหมุนปรับสายอากาศทางด้านรับครั้งละ 5 องศาแล้วทำการบันทึกผลการทดสอบ ซึ่งการทดสอบนั้นจะทำทดสอบที่สนามระยะไกล (Far Field) ของสายอากาศซึ่งได้ทำการคำนวณไว้แล้วในบทที่ 3 โดยการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศจะทำกรทดสอบทั้งโพลาไรเซชันร่วม (Co-polarization) และโพลาไรเซชันไขว้ (Cross-polarization) ของสายอากาศ



รูปที่ 4.5 การจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบสายอากาศ

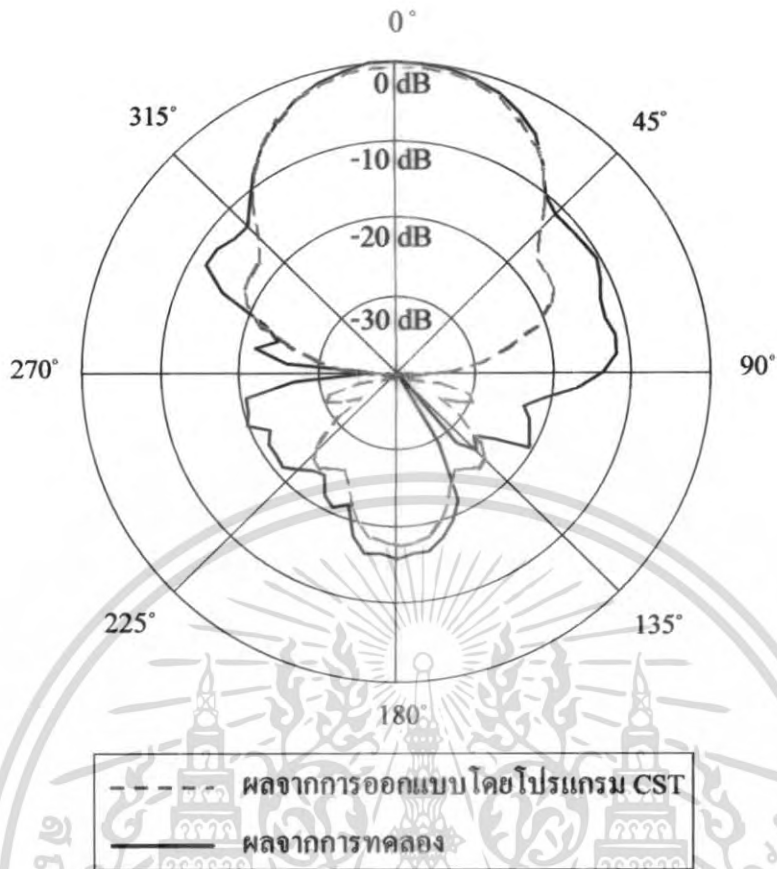
4.2.4.1 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็ก (H-Plane)



รูปที่ 4.6 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบของสนามแม่เหล็ก

ที่มีโพลาไรเซชันแบบร่วม (Co-polarization)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

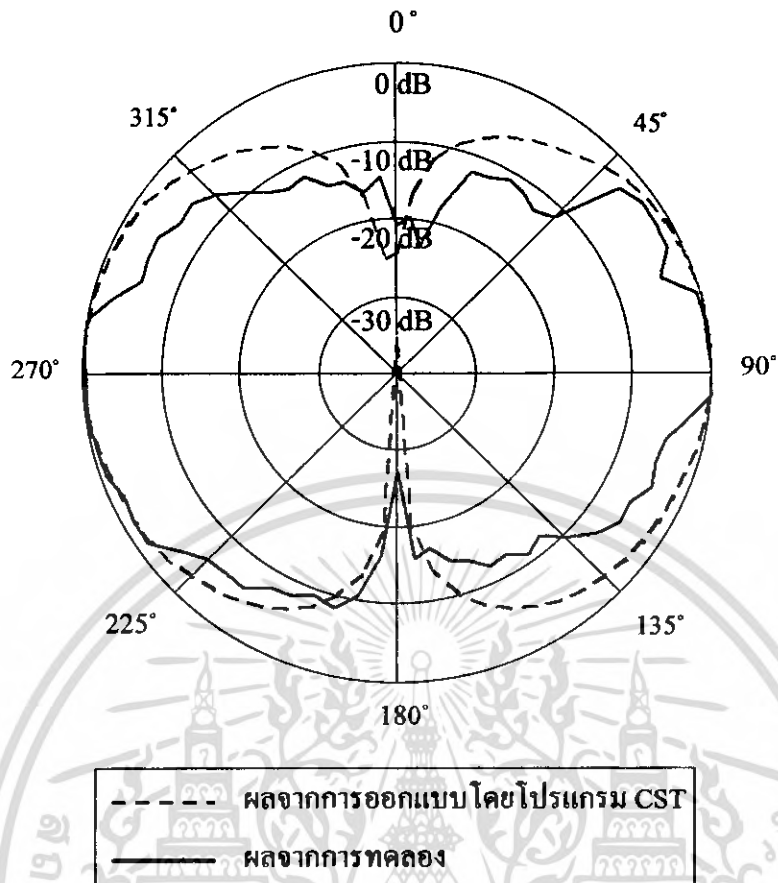


รูปที่ 4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของ
สนามแม่เหล็กที่มีโพลาไรเซชันแบบร่วม (Co-polarization)



รูปที่ 4.8 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบของสนามแม่เหล็ก
ที่มีโพลาไรเซชันแบบไขว้ (Cross-polarization)

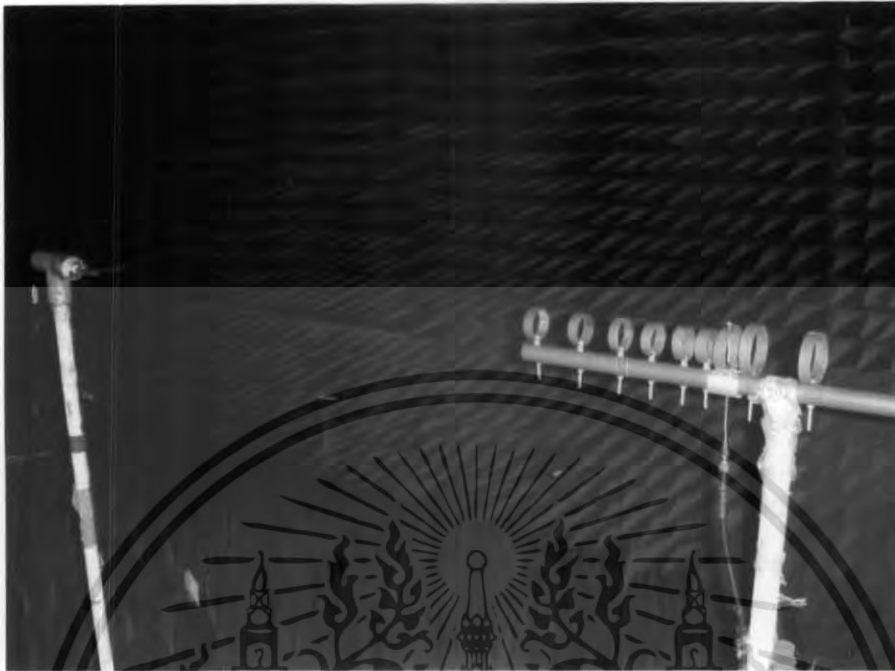
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



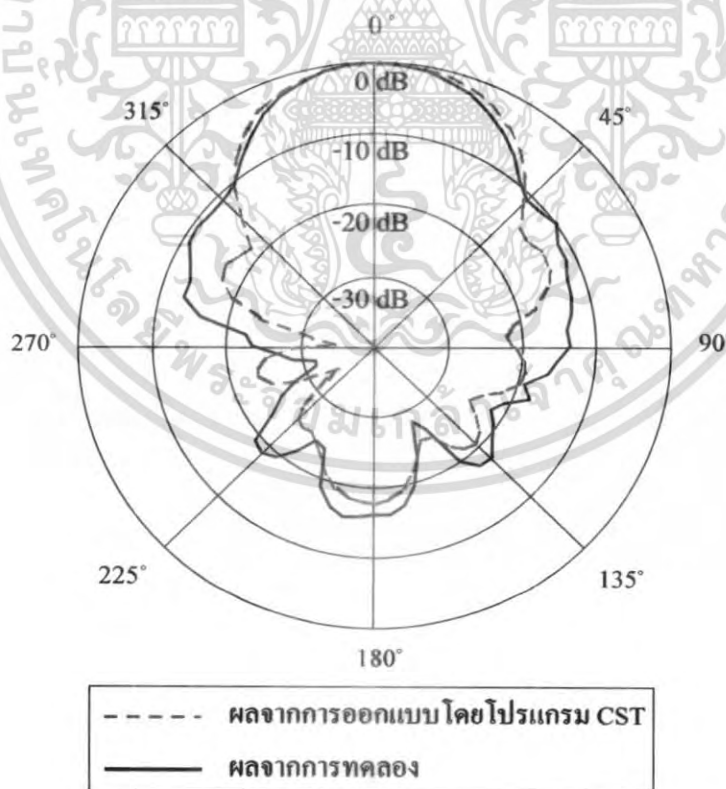
รูปที่ 4.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของ
 สนามแม่เหล็กที่มีโพลาไรเซชันแบบไขว้ (Cross-polarization)

จากผลการทดสอบจะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็กที่ได้จากการออกแบบโดยโปรแกรม CST จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันโดยจะมีลักษณะที่มีการชี้ทิศทาง

4.2.4.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของ สนามไฟฟ้า (E-Plane)

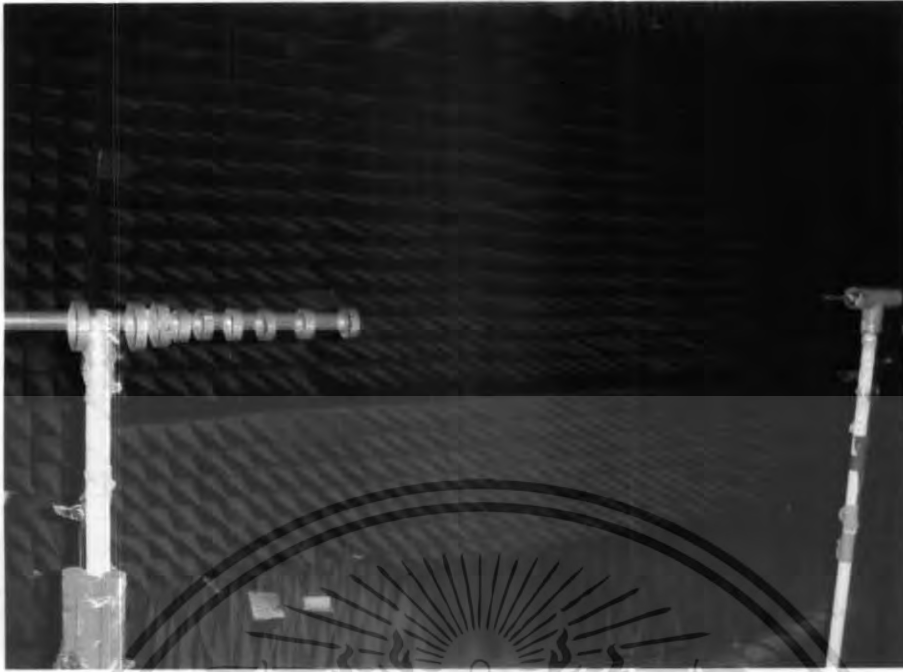


รูปที่ 4.10 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า ที่มีโพลาไรเซชันแบบร่วม (Co-polarization)

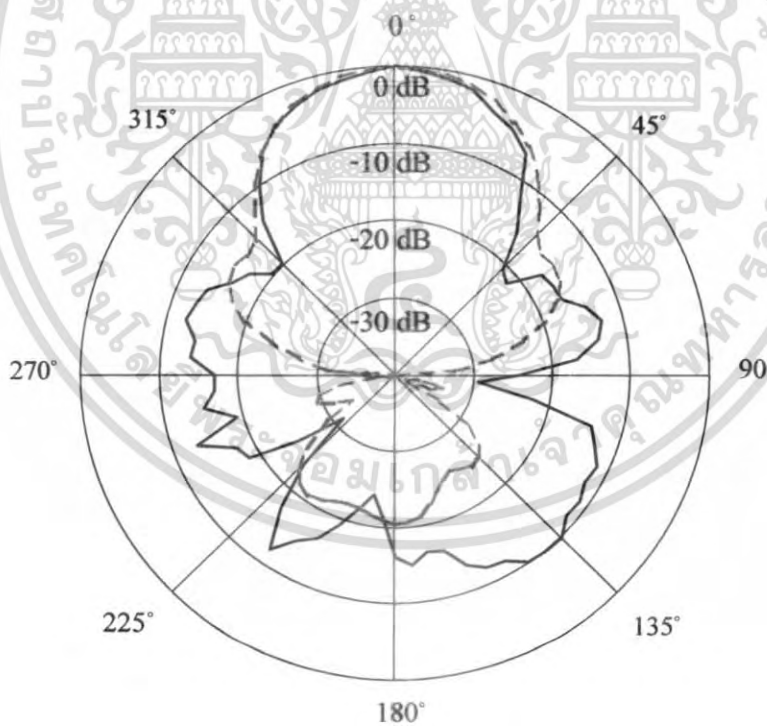


รูปที่ 4.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าที่มีโพลาไรเซชันแบบร่วม (Co-polarization)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า
ที่มีโพลาไรเซชันแบบไขว้ (Cross-polarization)



----- ผลจากการออกแบบ โดยโปรแกรม CST
————— ผลจากการทดลอง

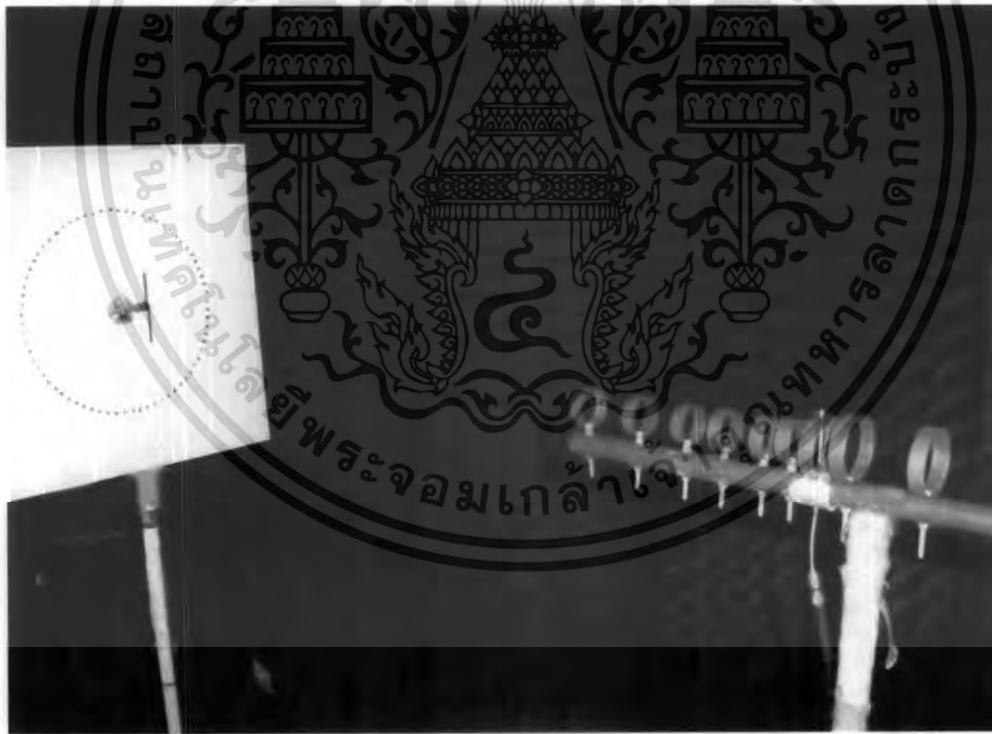
รูปที่ 4.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ
ของสนามไฟฟ้าที่มีโพลาไรเซชันแบบไขว้ (Cross-polarization)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบจะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบโดยโปรแกรม CST จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน

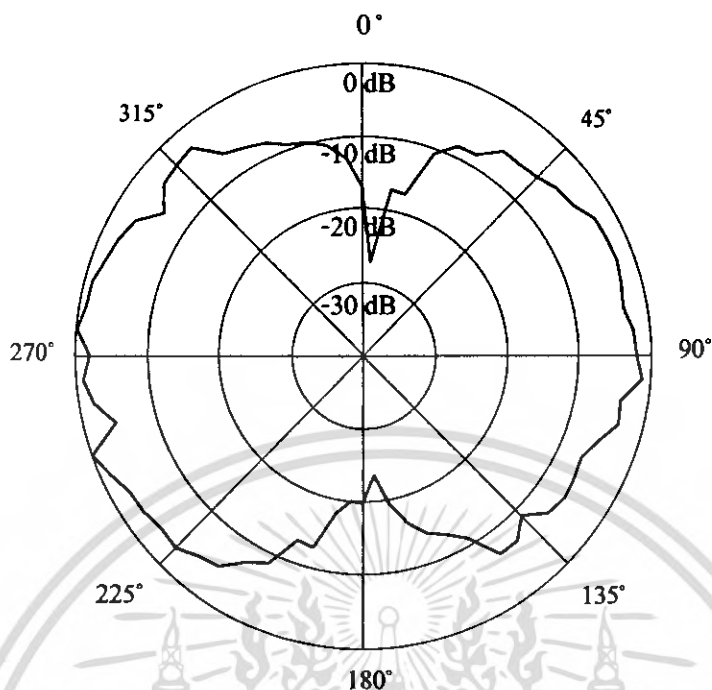
4.2.5 ผลการทดสอบโพลาไรเซชันของสายอากาศ (Polarization)

การวัดโพลาไรเซชันของสายอากาศเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณาในกรณีที่ต้องการส่งคลื่นที่มีโพลาไรเซชันอย่างใดอย่างหนึ่งออกจากสายอากาศ แล้วทำการตรวจสอบจากการวัดว่าได้คลื่นมีโพลาไรเซชันตามที่ต้องการหรือไม่ นอกจากนี้การวัดโพลาไรเซชันของคลื่น ก็ทำให้รู้สภาพของคลื่นที่บริเวณที่สนใจว่ามีโพลาไรเซชันในรูปแบบใด โดยวิธีการวัดโพลาไรเซชันของคลื่น จะสามารถทำได้โดยนำสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบเส้นตรงเช่นสายอากาศแบบไดโพล มาเป็นตัวส่งสัญญาณ โดยการวัดโพลาไรเซชันก็จะทำโดยการนำสายอากาศไดโพลดังกล่าวมาส่งคลื่นออกไปหาสายอากาศฮากิ-อูตะแบบบ่วงซึ่งเป็นตัวรับ แล้วหมุนสายอากาศไดโพลนั้นรอบตัวเองดังรูปที่ 4.14 ขนาดของสนามไฟฟ้าที่ทำการวัดได้ที่มุมต่างๆจะขึ้นอยู่กับโพลาไรเซชันของคลื่นนั้น



รูปที่ 4.14 การทดสอบโพลาไรเซชันของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบโพลาไรเซชันของสายอากาศ

เมื่อจัดสายอากาศดังรูปจะเห็นว่า เมื่อทำการหมุนสายอากาศโคโพลโดยเริ่มจากมุม 0 องศา แล้วค่อยๆ หมุนทีละ 5 องศา จนครบ 360 องศา พบว่าที่มุมใกล้ 0 องศาและ 180 องศาจะมีค่าน้อยสุดและจะมีค่ามากที่สุดคือที่มุมใกล้ 90 องศาและ 270 องศา ดังนั้นสรุปได้ว่าสายอากาศขากิ-อูอะแบบบ่วงที่สร้างขึ้นมีการส่งคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบเส้นตรงและเป็นโพลาไรเซชันแบบแนวนอน

4.2.6 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

อัตราขยายของสายอากาศ เป็นสิ่งที่บอกลักษณะสมบัติที่สำคัญ ของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งทดสอบ โดยการวางสายอากาศทั้ง ทางด้านรับ และทางด้านส่ง ห่างกันในระยะที่มากกว่าสนามระยะไกลซึ่งได้คำนวณไว้เ็นบทที่ 3 โดยทำการวัดโดยใช้สายอากาศชนิดเดียวกันทั้งทางด้านรับและทางด้านส่ง ดังในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 รูปการทดสอบวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ

โดยสามารถคำนวณหาค่าอัตราขยายของสายอากาศได้จากสูตร

$$(G_{ot})_{dB} + (G_{or})_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_t} \right)$$

โดย

$$(G_{ot})_{dB} = \text{ค่าอัตราขยายของสายอากาศส่ง (dBi)}$$

$$(G_{or})_{dB} = \text{ค่าอัตราขยายของสายอากาศรับ (dBi)}$$

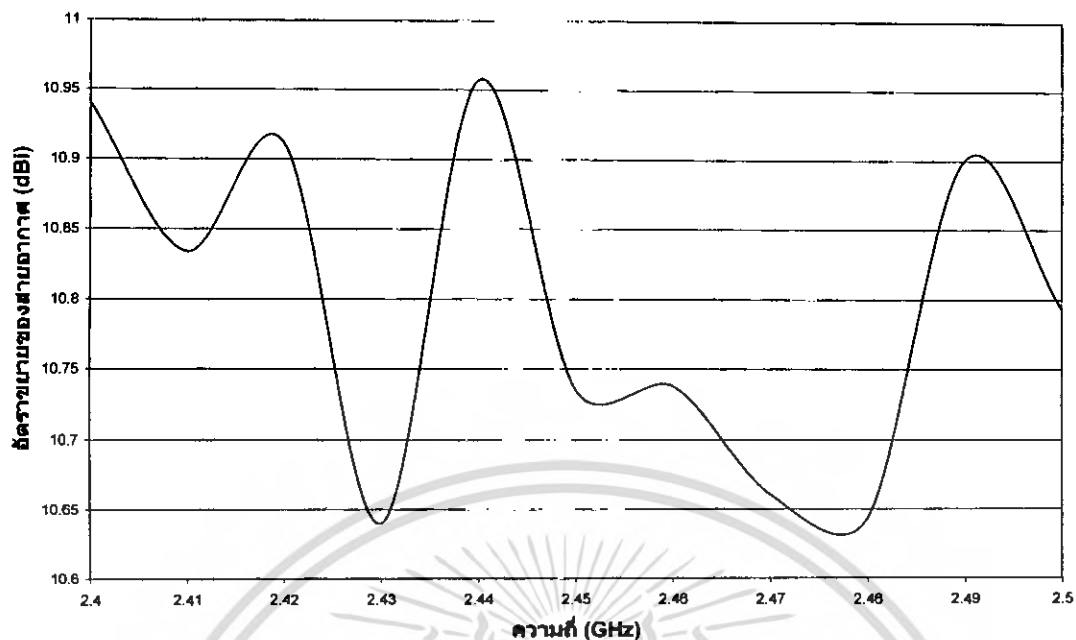
$$R = \text{ระยะห่างระหว่างสายอากาศ (m)}$$

$$P_t = \text{ค่ากำลังงานทางด้านส่ง (W)}$$

$$P_r = \text{ค่ากำลังงานทางด้านรับ (W)}$$

$$\lambda = \text{ค่าความยาวคลื่น (m)}$$

จากการทดสอบจะได้ผลการทดสอบค่าอัตราขยายของสายอากาศดังรูปกราฟที่ 4.17



รูปที่ 4.17 กราฟผลการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศในช่วงความถี่ระหว่าง 2.40-2.50 GHz

ตารางที่ 4.3 อัตราขยายของสายอากาศในช่วงความถี่ที่ต้องการ

| ความถี่ (GHz) | ค่าอัตราขยายของสายอากาศ (dBi) |
|---------------|-------------------------------|
| 2.40 | 10.94 |
| 2.45 | 10.74 |
| 2.50 | 10.79 |

4.2.7 การหาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ (Directivity)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเป็นค่าที่ใช้แสดงทิศทางของสายอากาศซึ่งโดยปกติจะถือเอาตามทิศทางของโลปหลัก โดยค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะเป็นอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์ส โดยถ้าค่าสภาพเจาะจงทิศทางยังมีค่ามากจะมีคุณสมบัติการชี้ทิศทางที่ดีกว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มีค่าน้อย โดยการหาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศในทางปฏิบัติสามารถหาได้จากค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่ได้จากการวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น โดยนำมาคำนวณตามสมการ

$$D = \frac{4\pi(180/\pi)^2}{\theta_H \theta_V} \approx \frac{41253}{\theta_H \theta_V}$$

$\theta_H = \text{HPBW}$ ในระนาบสนามแม่เหล็ก(องศา)

$\theta_V = \text{HPBW}$ ในระนาบสนามไฟฟ้า(องศา)

โดยจากวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะได้ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งได้

$$\theta_H = 49^\circ \text{ และ } \theta_V = 50^\circ$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$D = \frac{41253}{\theta_H \theta_V} = \frac{41253}{49 \times 50} = 16.838$$

$$= 10 \log 16.838 = 12.263 \text{ dBi}$$

ดังนั้นจะได้ค่าสภาพเงาเงงทิศทางของสายอากาศ คือ 12.263 dBi

โดยสามารถหาค่าประสิทธิภาพของสายอากาศได้จากสมการ

$$\eta = \frac{G}{D}$$

η = ค่าประสิทธิภาพของสายอากาศ

G = ค่าอัตราขยายของสายอากาศ

D = ค่าสภาพเงาเงงทิศทางของสายอากาศ

$$\eta = \frac{10.74}{12.263}$$

$$= 0.8758 \text{ หรือ } = 87.58\%$$

ดังนั้นจะได้ค่าประสิทธิภาพของสายอากาศ = 87.58%

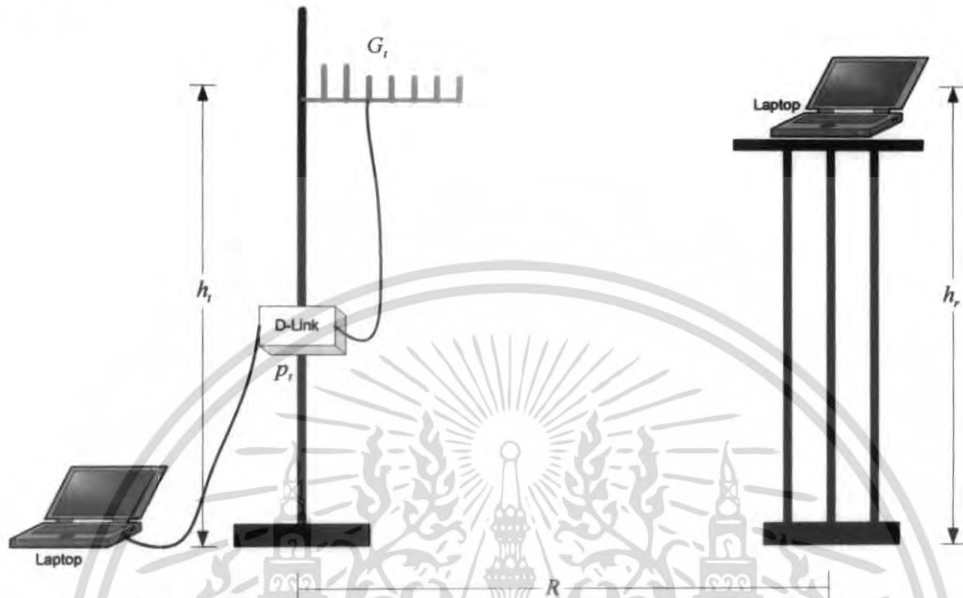
4.2.8 ผลการทดสอบการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศ

การสื่อสารแบบจุดต่อจุดสำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายซึ่งโดยทั่วไปใช้ในการเชื่อมต่อสองเครือข่ายที่อยู่ระหว่างอาคารเข้าด้วยกันซึ่งเป็นการเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐานกับสถานีฐานการทดสอบด้วยเงื่อนไขนี้ทำได้ยากเนื่องจากมีระยะบริการสูงสุดที่ไกลมากดังนั้นปัญญาประดิษฐ์จึงสมมุติให้ลูกข่ายทำหน้าที่แทนสถานีฐานด้านรับ ซึ่งการสื่อสารแบบจุดต่อจุดส่วนมากคือแนวระดับเส้นสายระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง

โดยทำการเลือกสถานที่คือริมถนนด้านหลังสนามกีฬา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นถนนคอนกรีต ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรงตั้งรูปที่ 4.20 สถานีฐานติดตั้งบริเวณด้านหลังตึก 10 ชั้น แล้วเริ่มต้นการวัดจากจุดดังกล่าวแล้วค่อยเลื่อนไปที่ละ 30 เมตร จนถึงบริเวณถนน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านหลังสนามกีฬาโดยอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.18 ด้านสถานีฐานประกอบด้วยคอมพิวเตอร์พกพาซึ่งติดตั้งโปรแกรมทดสอบ และเชื่อมต่อกับสายอากาศ เครื่องลูกข่ายเชื่อมต่อกับสถานีฐานโดยระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย การทดสอบนั้นแบ่งออกเป็นสองแบบ คือ การวัดกำลังงานรับและค่าวิสัยสามารถ



รูปที่ 4.18 อุปกรณ์การทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศ



รูปที่ 4.19 การทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แผนผังการทดสอบ

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบ

| พารามิเตอร์ | ด้านสถานีฐาน | ด้านลูกข่าย |
|----------------------------------|--|---------------|
| กำลังงานส่ง | 15 dBm | - |
| อัตราขยายของสายอากาศ | ไดโพล = 2 dBi ยาคี-อูตะแบบบ่วง = 10.7 dBi | 0 dBi |
| ความสูงของสายอากาศ | 1.5 m | 1.5m |
| เครื่องรับส่ง | D-Link DWL-2100 AP+ | NOTEBOOK ASUS |
| ระยะทางระหว่างสถานีฐานกับลูกข่าย | 30-1100 m | |

4.2.8.1 การทดสอบระยะบริการและค่าวิสัยสมารถที่ Transmission Data Rate 54 Mbps

การทดสอบระยะบริการและค่าวิสัยสมารถที่ Transmission Data Rate 54 Mbps ของมาตรฐาน IEEE 802.11g ซึ่งมีความสามารถส่งข้อมูลได้สูงถึง 54 Mbps การทดสอบค่าวิสัยสมารถและการทดสอบระยะบริการจะใช้โปรแกรม Chariot ในการทำการทดสอบโดย ทำการส่งไฟล์ขนาด 100,000 ไบต์ แล้วทำการคำนวณค่าวิสัยสมารถ โดยการทดสอบจะทำการทดสอบ โดยแต่ละจุดจะห่างกันจุดละ 30 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุที่ค่าวิสัยสามารถไม่เป็นไปตามมาตรฐาน เนื่องจากในการรับ-ส่งสัญญาณของระบบไวร์เลสแลนนั้นจะใช้ความถี่เดียวกัน ซึ่งอุปกรณ์ทุกๆตัวไม่ว่าจะเป็นแอ็กเซสพอยน์ หรือการ์ดไวร์เลสแลนก็จะรับส่งข้อมูลที่มีความถี่นี้ และจะต้องผลัดกันรับ-ส่งข้อมูลไม่สามารถส่งข้อมูลพร้อมกันได้ ไม่เช่นนั้นจะเกิดข้อมูลชนกันในอากาศ การส่งแบบนี้เรียกว่าวิธีแบบฮาล์ฟดูเพล็กซ์ (Half-Duplex Mode) คล้ายกับวิทยุตำรวจที่ผู้ส่งจะต้องกดปุ่มที่วิทยุเพื่อพูด เมื่อเราพูดก็จะไม่ได้ยินเสียงอะไร ดังนั้นอีกฝ่ายพูดอีกฝ่ายหนึ่งต้องฟัง

และไวร์เลสแลนใช้ช่องสัญญาณเคียวทั้งรับและส่งกว่าจะส่งข้อมูลได้ก็ต้องการร้องขอและตอบกลับหลายครั้งจึงทำให้ความเร็วของระบบไวร์เลสแลนที่แท้จริงจะต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้กว่าครึ่งหนึ่ง สำหรับมาตรฐานที่ใช้ทดสอบคือ IEEE802.11g ระบุว่ามีความเร็ว 54 เมกะบิตต่อวินาที ความจริงความเร็วของระบบจะมีค่าประมาณ 24-27 เมกะบิตต่อวินาที

ในการทดสอบจะเห็นว่าสายอากาศขากิ-อูเดแบบบ่วงมีค่าสนามระยะไกล (Far Field)เท่ากับ 1.147 เมตร คำนี้นี้จะได้มาจาก

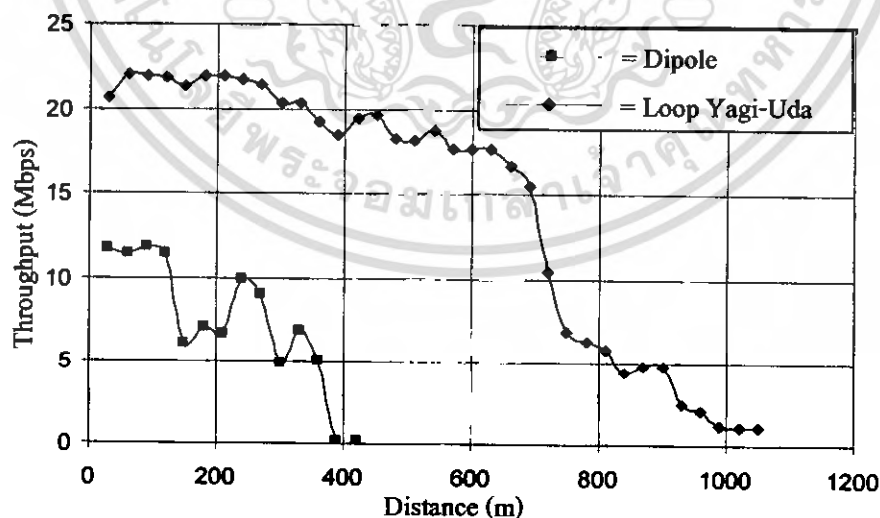
$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda}$$

$$D = 0.265 \text{ m และ } \lambda = 0.1224489 \text{ m}$$

$$R \geq \frac{2(0.265)^2}{0.1224489}$$

$$R \geq 1.147 \text{ เมตร}$$

ซึ่งในการใช้งานจะต้องใช้งานที่ระยะทางไกลกว่าค่าสนามระยะไกล เพราะถ้าถ้าน้อยกว่าระยะนี้สายอากาศจะแพร่กระจายคลื่นบางส่วนและสะสมพลังงานไว้บางส่วนจึงได้ทำการเลือกใช้ระยะเริ่มต้นที่ 30 เมตร และเพิ่มระยะทางไปทีละ 30 เมตร



รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศที่ Transmission Data Rate 54 Mbps

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบระยะบริการจะพบว่าสายอากาศยาคิ-อูคะแบบปวงจะมีระยะบริการประมาณ 1050 เมตร ในบริเวณเปิด และจากการทดสอบจะเป็นการยืนยันว่าสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

การคำนวณค่า Throughput ด้วยโปรแกรม Chariot สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Bytes Sent} + \text{Bytes Received By Endpoint 1} / ((\text{Throughput Units}) * (\text{Measured Time}))$$

โดยที่ Bytes Sent คือจำนวนไบต์ที่ทำการส่งที่ Endpoint_1 เท่ากับ 10000000 bytes

Bytes Received คือจำนวนไบต์ที่ทำการรับที่ Endpoint_1 เท่ากับ 100 bytes

Throughput Units มีค่าเท่ากับ 125000 bytes per second

Measured Time คือเวลาที่ใช้ในการรับ-ส่งข้อมูล

จากสมการ

$$\text{Throughput} = \frac{(\text{bytes sent} + \text{bytes received by endpoint 1})}{(\text{throughput units} \times \text{measured time})}$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าวิสัยสามารถ ณ จุดต่างๆ

1. ที่จุด 60 เมตร เวลาที่ใช้ในการรับ-ส่งข้อมูล= 3.561 วินาที

$$\text{Throughput} = \frac{[(10,000,000 + 100) \times 8]}{1,000,000 \times 3.561} = 22.468 \text{ Mbps}$$

2. ที่จุด 300 เมตร เวลาที่ใช้ในการรับ-ส่งข้อมูล= 3.833 วินาที

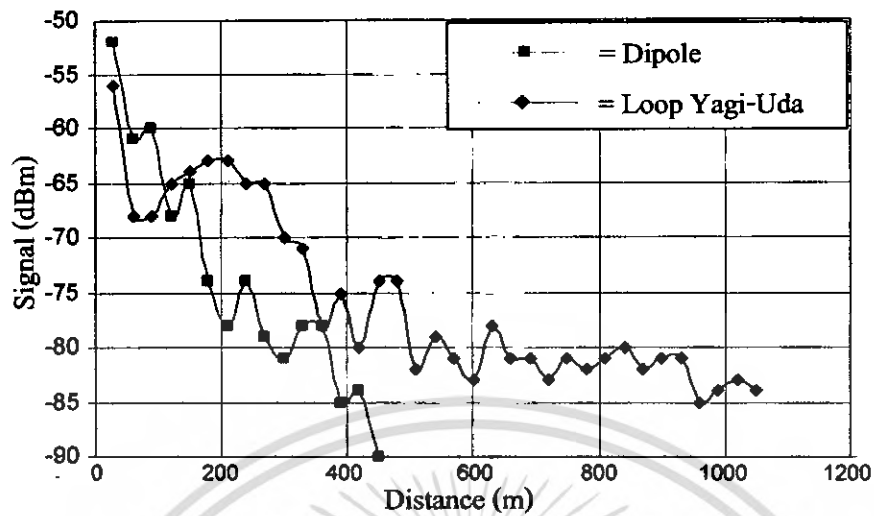
$$\text{Throughput} = \frac{[(10,000,000 + 100) \times 8]}{1,000,000 \times 3.833} = 20.873 \text{ Mbps}$$

3. ที่จุด 900 เมตร เวลาที่ใช้ในการรับ-ส่งข้อมูล= 16.029 วินาที

$$\text{Throughput} = \frac{[(10,000,000 + 100) \times 8]}{1,000,000 \times 16.029} = 4.991 \text{ Mbps}$$

จะเห็นว่าค่าวิสัยสามารถ นั้นขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการรับส่งข้อมูล ถ้าใช้เวลาในการรับ-ส่งข้อมูลน้อยค่าวิสัยสามารถ ก็จะมีค่ามาก ในทางตรงข้ามถ้าใช้เวลาในการรับ-ส่งข้อมูลมากค่าวิสัยสามารถ ก็จะมีค่าน้อย จากกราฟจะพบว่าที่ระยะทางไกลออกไปจะใช้เวลาในการรับ-ส่งข้อมูลเพิ่มมากขึ้นทำให้กราฟมีค่าลดลง

4.2.8.2 การทดสอบกำลังงานทางด้านรับของสายอากาศ



รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบกำลังงานทางด้านรับของสายอากาศ

จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าเมื่อระยะทางเพิ่มมากขึ้นค่ากำลังงานที่รับได้จะมีแนวโน้มลดลง โดยสายอากาศไดโพลมีระยะทางการทำงานที่จำกัดโดยสายอากาศยagi-อูคะแบบบ่วงสามารถทำงานได้ในระยะทางที่ไกลกว่าโดยสามารถทำงานได้ประมาณ 1050 เมตร

บทที่ 5 บทวิจารณ์และบทสรุป

ปริยุฏฐานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์การออกแบบ การสร้าง และทดสอบสายอากาศฮิกิ-อูคะแบบบ่วงซึ่งเป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวทำให้มีอัตราขยายสูง จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการติดต่อสื่อสารแบบจุดต่อจุด หรือใช้เชื่อมโยงระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายระหว่างอาคารเป็นต้น โดยสายอากาศที่ออกแบบไว้จะทำงานที่ความถี่เท่ากับ 2.40-2.50 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้กับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย แล้วทำการสร้างและทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็ก และระนาบของสนามไฟฟ้า

จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม CST (Computer Simulation Technology) จำลองการสร้างสายอากาศ จะเห็นว่า จำนวนองค์ประกอบของตัวนำคลื่นจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพเจาะจงทิศทาง และค่า HPBW คือถ้ามีจำนวนองค์ประกอบของตัวนำคลื่นมากขึ้นค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะมีค่ามากขึ้น แต่ค่าของ HPBW จะมีค่าลดลง จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม CST นั้นทำให้ได้จำนวนของวงแหวนที่เป็น Director คือ 6 วง และวงแหวนที่เป็น Reflector 2 วง โดยจะทำให้ทำงานได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการ และได้ค่าอัตราขยายที่ดี โดยพบว่าหากเพิ่มขนาดของวงแหวนที่เป็น Feeder จะทำให้ค่าของความถี่ที่ใช้งานต่ำลงและถ้าขนาดของวงแหวนที่เป็น Feeder เล็กลง จะทำให้ความถี่ที่ใช้งานสูงขึ้น

จากการทดลองจะพบว่าระยะห่างตรงจุดที่ใช้ป้อนสัญญาณให้กับวงแหวน จะมีผลต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าอิมพีแดนซ์ จึงต้องทำการปรับระยะห่างนั้นให้ได้ค่าตามที่ต้องการและสามารถทำงานในช่วงความถี่ที่ใช้งาน

จากสายอากาศที่ได้ทำการสร้างขึ้นพบว่ามีค่าอัตราขยายของสายอากาศประมาณ 10.74 dBi เป็นสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวโดยมีการ โฟลราโรเซชันแบบเชิงเส้นในแนวนอน และมีค่าประสิทธิภาพของสายอากาศ 87.58 % และสามารถนำไปใช้งานในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายได้

สายอากาศฮิกิ-อูคะแบบบ่วงนี้มีข้อดีคือสามารถเลือกทิศทางที่ต้องการในการรับส่งสัญญาณได้ มีค่าอัตราขยายและค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ค่อนข้างสูง ส่วนข้อเสียคือสร้างได้ยาก และมีโครงสร้างที่ไม่ค่อยแข็งแรงเมื่อเทียบกับสายอากาศชนิดอื่น

เอกสารอ้างอิง

1. โมไนย ไกรฤกษ์ และ วิวัฒน์ กิรานนท์, “ทฤษฎีสายอากาศ”, วศ.สจล.123 คณะวิศวกรรมศาสตร์ ,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. ฉัตรชัย ไวยาพัฒน์กร “การวิเคราะห์สายอากาศ”, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2547
3. Constantine A. Balanis “Antenna Theory Analysis and Design (Third Edition)” John Wiley & Son, 2005
4. http://www.wavesurf.at/fotos/wlan/eigene_ant/eigene_ant.htm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

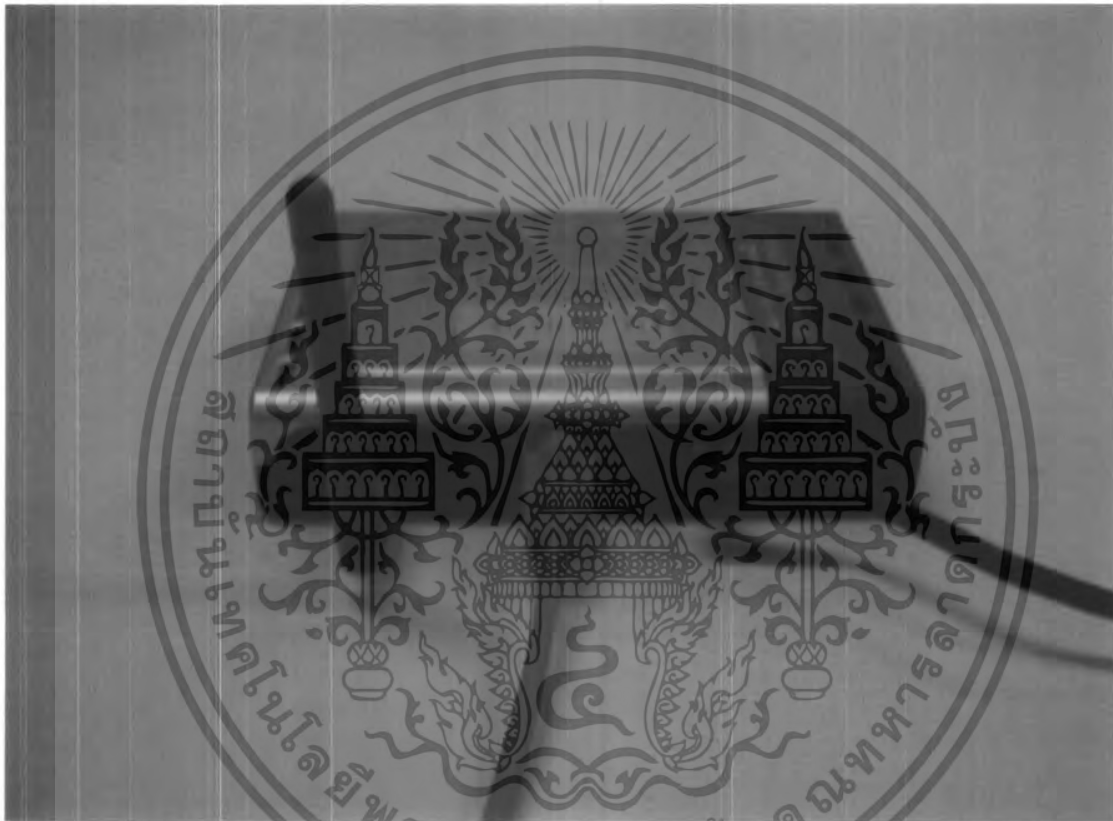
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

วิธีการติดตั้งตัว Wireless Access Point D-Link DWL-2100AP+

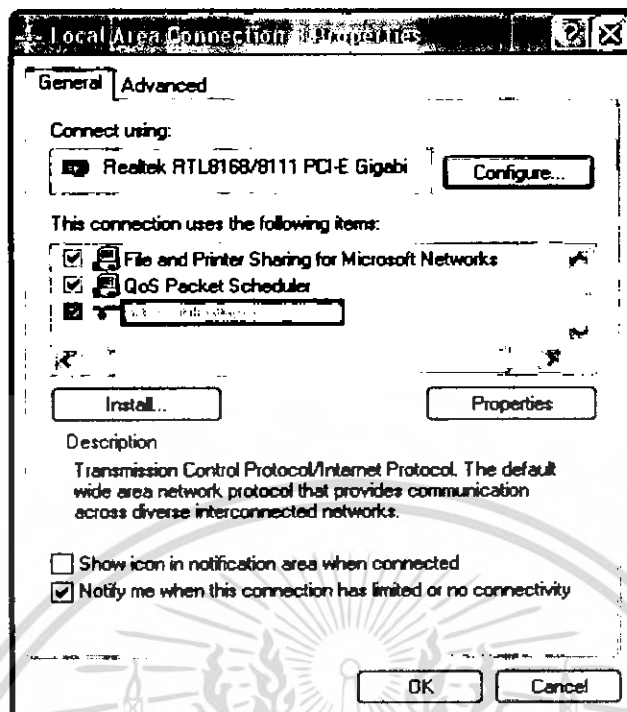
การ Setup เพื่อทำการเชื่อมต่อ ระหว่างอุปกรณ์ชิ้นต่างๆ โดยการใช้ Setup Wizard ของ D-link DWL-2100AP+ เป็นอีกทางหนึ่งที่ไม่ต้องลง Software สำหรับ setup โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการเสียบสาย Power เข้ากับตัว Wireless Access Point พร้อมทั้งเสียบสาย LAN เพื่อการเชื่อมต่อระหว่าง Wireless Access Point กับเครื่องคอมพิวเตอร์



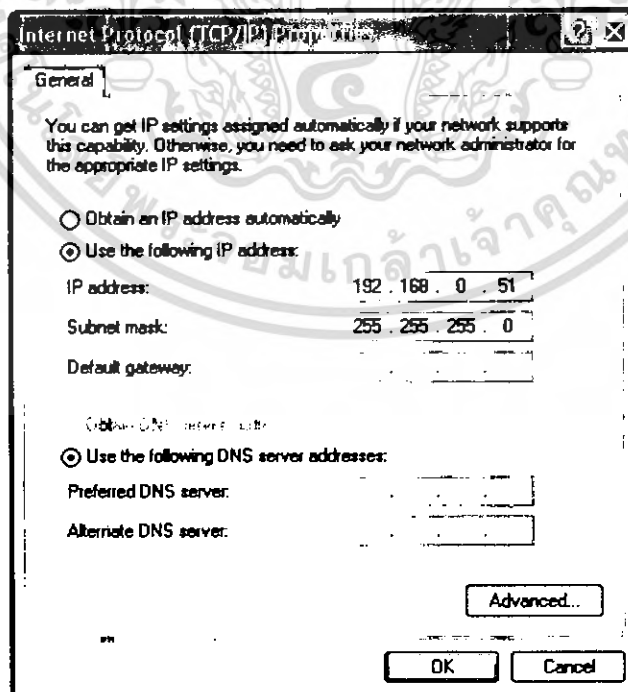
รูปที่ 1 การติดตั้ง Hardware Wireless Access Point

1. ขั้นแรกต้องทำการตั้งค่าเครื่องคอมพิวเตอร์ของเราให้สามารถเชื่อมต่อกับตัว Wireless Access Point ก่อน โดยจะเชื่อมต่อทางระบบ LAN โดยให้เข้าไปที่ Network Connections เลือก Local Area Connection ที่แถบ General เลือก Internet Protocol (TCP/IP) จากนั้นกด Properties



รูปที่ 2 การเข้าตั้งค่า Internet Protocol (TCP/IP)

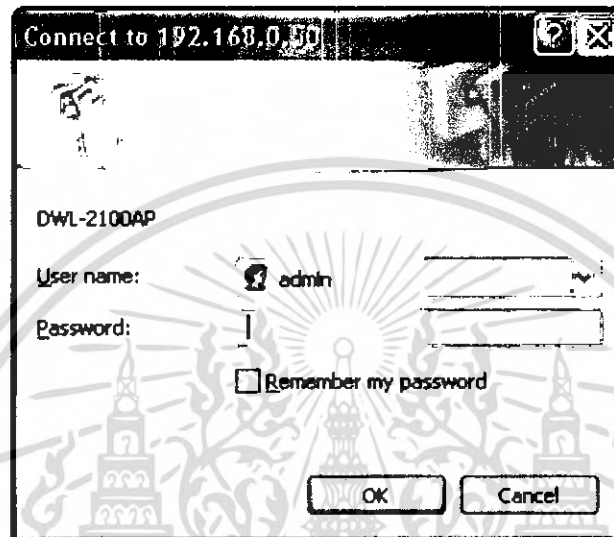
2. จากนั้นจะขึ้นหน้าต่าง Internet Protocol (TCP/IP) Properties กดเลือกการตั้งค่า IP เองที่ Use the following IP address ที่ IP address ป้อน 192.168.0.51 ที่ Subnet mask จะเป็น 255.255.255.0 จากนั้นกด OK



รูปที่ 3 การป้อนค่า IP address

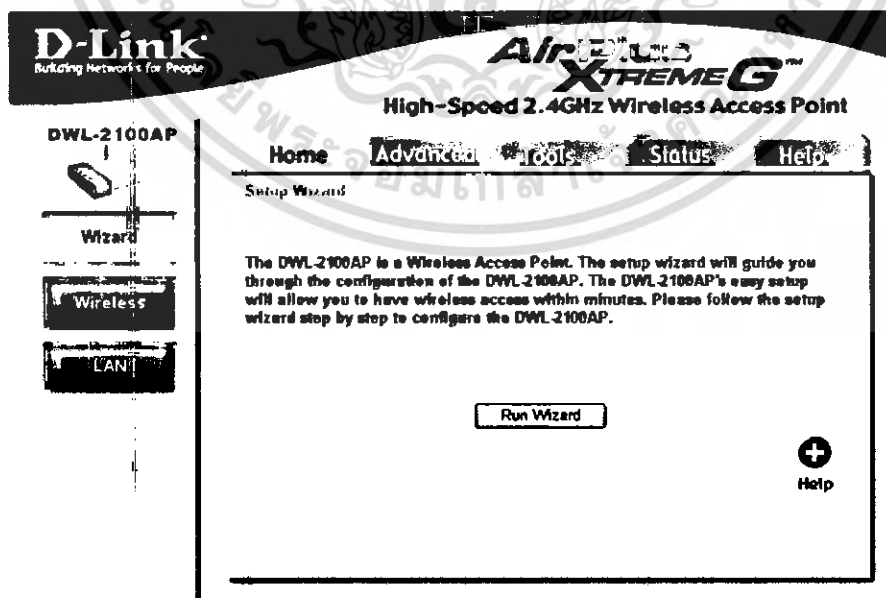
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เมื่อตั้งค่าเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงทำการตั้งค่าตัว Wireless Access Point ให้เปิด Web Browser ขึ้นมา ในที่นี้ขอใช้ Microsoft Internet Explorer จากนั้นทำการพิมพ์ 192.168.0.50 (IP Address ของ Wireless Access Point) ไปที่ช่อง Address ตามรูปแล้วก็กด Enter หลังจากนั้นก็จะมี Windows เล็กๆ โผล่ขึ้นมา ถาม User name และ password สำหรับ Wireless Access Point ของ D-Link ที่เพิ่งแกะกล่องออก จะตั้งค่า User name เป็น admin แต่ ไม่มี password ที่นี้ก็ป้อน admin ไปในช่อง User name แล้วก็กดปุ่ม OK



รูปที่ 4 การตั้งค่าตัว Wireless Access Point

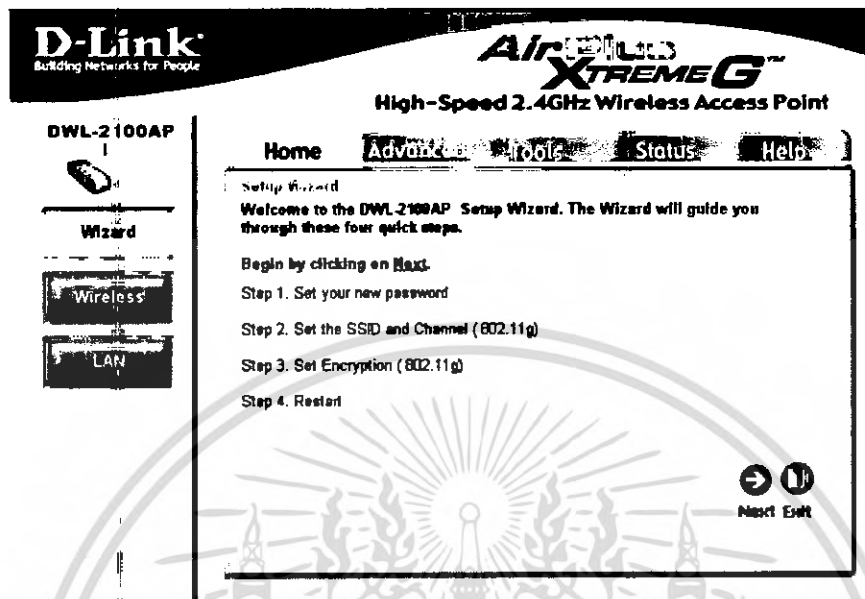
4. เริ่มทำการ Setup ขึ้นแรกให้กดที่ Run Wizard



รูปที่ 5 การ Run Wizard ของ Wireless Access Point

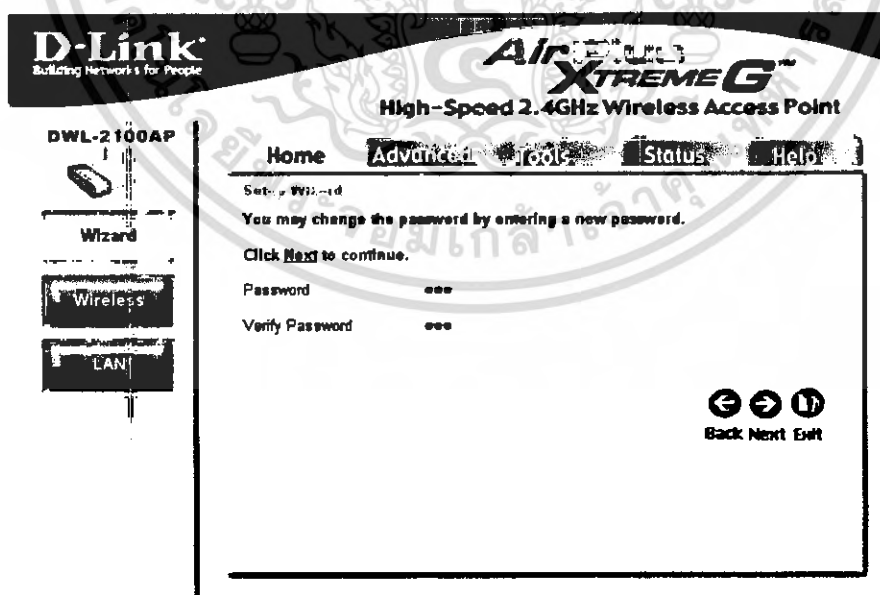
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. หน้าจอ Setup Wizard จะบอกว่า อย่างน้อยควรที่จะผ่าน 4 ขั้นตอนในการ Setup คือ เปลี่ยน Password, การตั้งชื่อ SSID , Channel และตั้งการเข้ารหัสข้อมูล หลังจากนั้นก็ restart



รูปที่ 6 แสดงขั้นตอนในการ Setup ของ Wireless Access Point

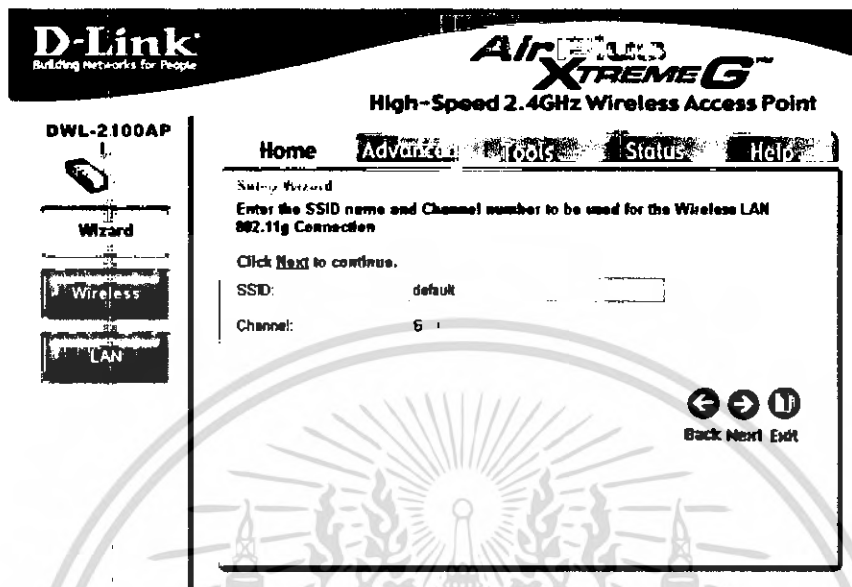
6. ขั้นแรก ที่จะต้องทำคือ เปลี่ยน Password โดยพยายามเลือก Password ที่ไม่ง่ายในการเดาเกินไปนัก ใช้คำที่ไม่มีใน Dictionary ยิ่งปลอดภัย



รูปที่ 7 แสดงขั้นตอนในการ Set Password

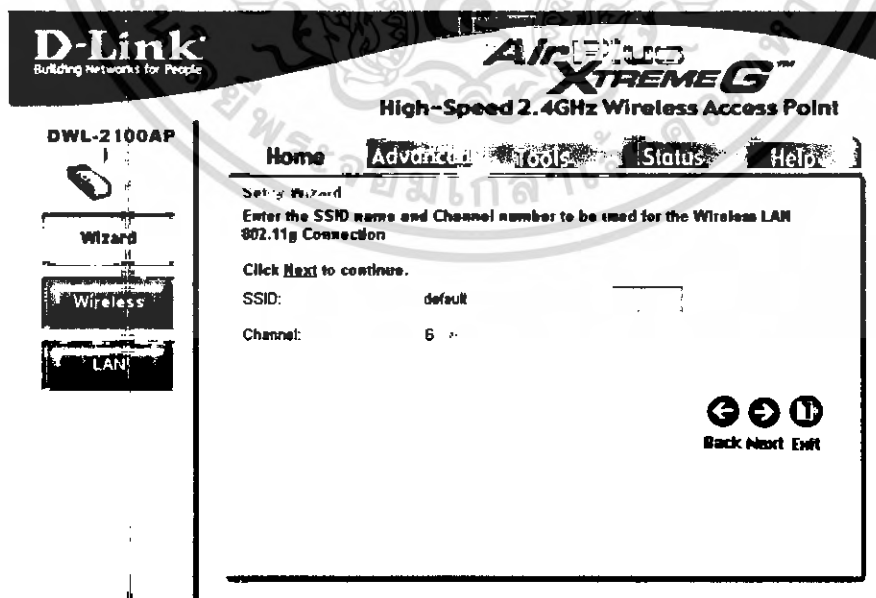
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. หลังจากนั้นก็คือการเปลี่ยนชื่อ SSID ซึ่งก็คือระบบ Network ไร้สาย หรือเรียกย่อๆว่า WLAN (Wireless Local Area Network) การตั้งชื่อ SSID นี้ สามารถตั้งเป็นอะไรก็ได้ แต่ต้องไม่เกิน 32 ตัวอักษร



รูปที่ 8 แสดงการเปลี่ยนชื่อ SSID

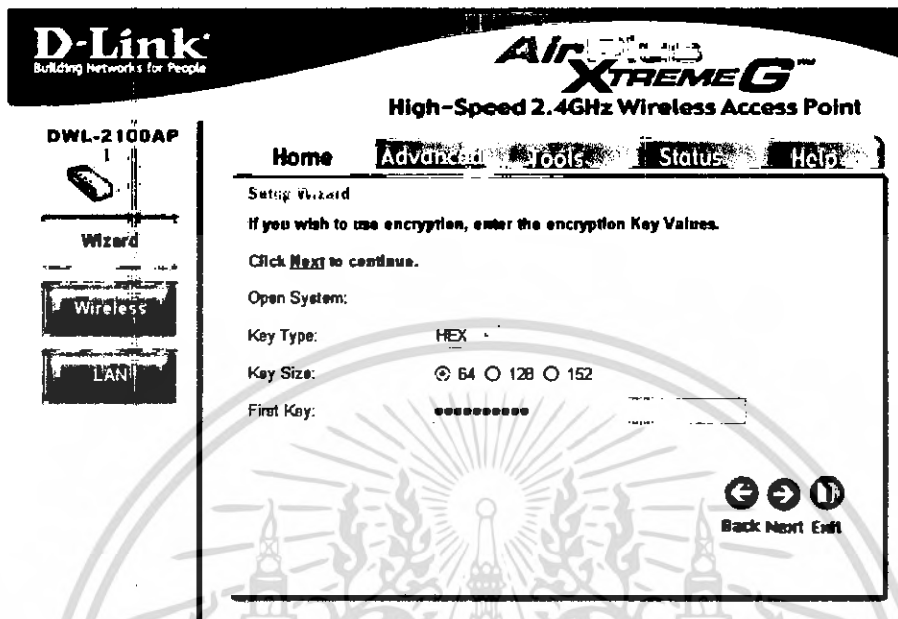
8. การเลือก Channel ซึ่งมีทั้งหมด 13 Channel ให้เลือก ค่าที่ตั้งมาจากโรงงานก็คือ Channel ที่ 6 โดยที่จะสามารถเปลี่ยนเป็น Channel อะไรก็ได้ในภายหลัง เมื่อมีสัญญาณรบกวนจาก Wireless Network ข้างเคียงที่บังเอิญมาใช้ Channel เดียวกัน



รูปที่ 9 แสดงการเลือก Channel

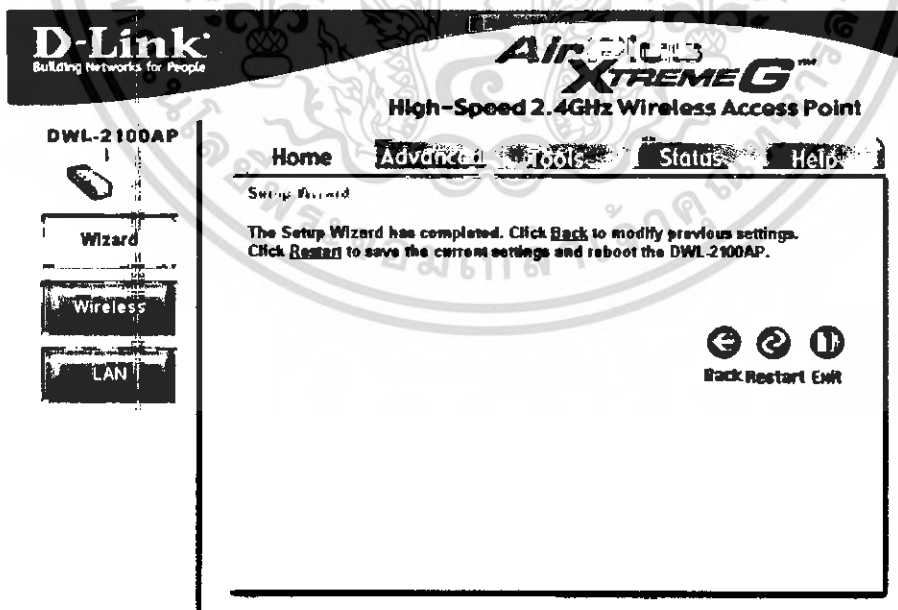
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. การ Set ค่า WEP ซึ่งข้อมาจาก Wire Equivalent Privacy แปลเป็นไทยได้ว่า ความปลอดภัยหรือความ เป็นส่วนตัวเสมือนระบบที่ใช้สาย นั้นเอง ในขั้นตอนนี้จะปล่อยให้ค่าที่ตั้งมาจากโรงงาน คือ Disabled



รูปที่ 10 แสดงการ Set ค่า WEP

10. จากนั้นกด Apply แล้วก็จะมียหน้าจอขึ้นมาบอกว่า กำลัง restart Wireless Access Point อยู่



รูปที่ 11 แสดงการ restart Wireless Access Point

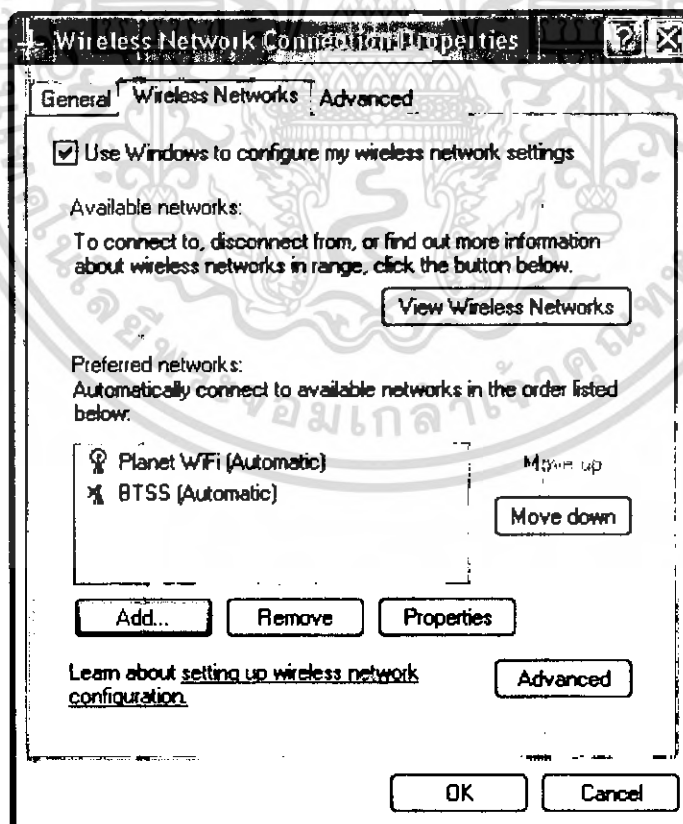
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. กด Restart จากนั้นรอการ Restart ประมาณ 30 วินาทีก็ให้ปิด Web Browser



รูปที่ 12 หน้าจอแสดงการรอการ Restart

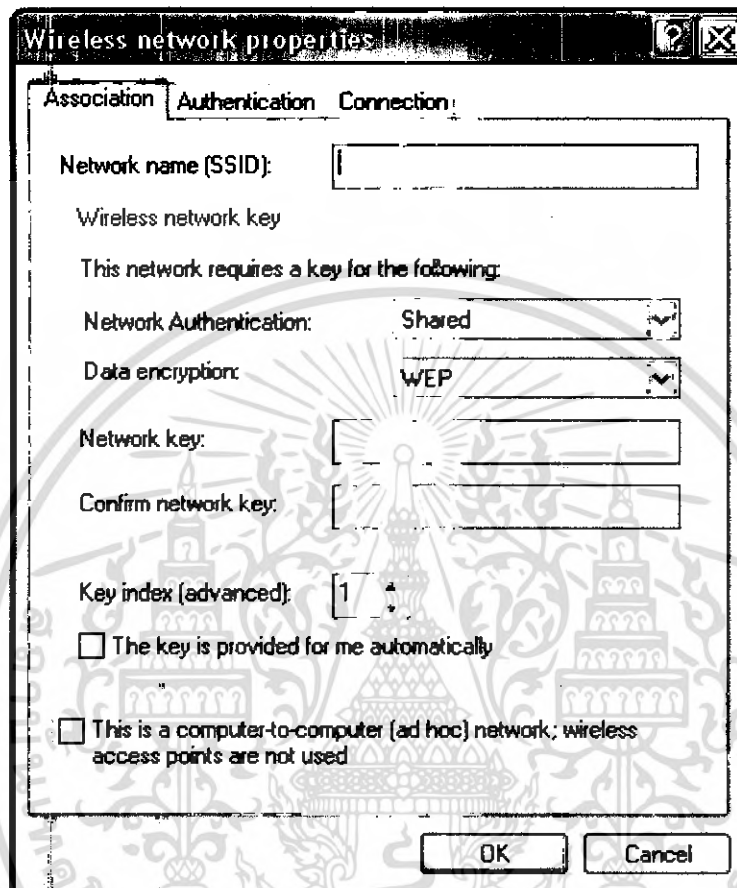
12. ที่เครื่องลูกข่ายให้ทำการเปิดใช้งาน Wireless LAN ถ้าเครื่องไหนใช้โปรแกรมเสริมในการเปิดหาจุดปล่อยสัญญาณให้ปิด โปรแกรมนั้นไปก่อนจะต้องใช้โปรแกรมหาสัญญาณ Wireless ของ Window เท่านั้น จากนั้นเข้าไปที่ Network Connections กด Properties ที่ Wireless Network Connection เลือกแถบ Wireless Network ให้ Remove จุดเชื่อมต่อสัญญาณที่มองเห็นออกให้หมด จากนั้นกด Add



รูปที่ 13 การเข้าไปตั้งค่าการรับสัญญาณ Wireless ที่เครื่องลูกข่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยนาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. จากนั้นจะขึ้นหน้าต่าง Wireless Network Properties ให้พิมพ์ Network name (SSID) ตามที่ได้ตั้งชื่อไว้ในเครื่องแม่ข่าย ที่ Network Authentication ให้เปลี่ยนเป็น Shared จากนั้นใส่ Network key ตามที่ได้ตั้งไว้ในเครื่องแม่ข่าย จากนั้นกด OK



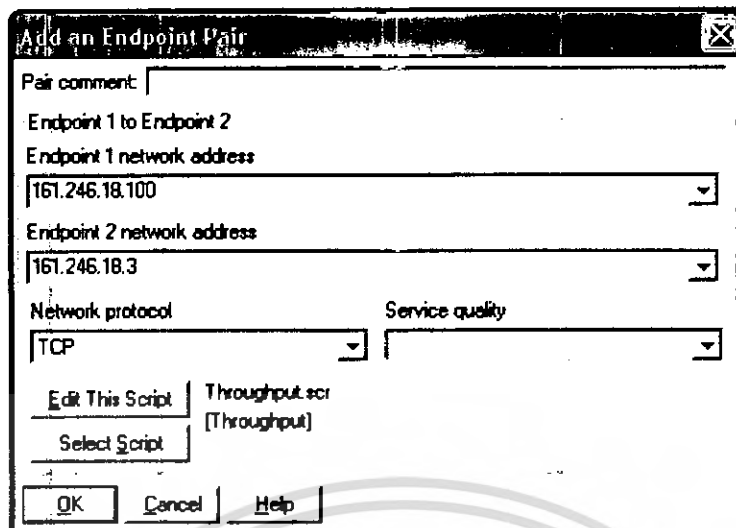
รูปที่ 14 การตั้งค่าเครื่องให้มองเห็นตัว Access Point

14. จากนั้นเครื่องคอมพิวเตอร์ก็จะเห็นเครื่องปล่อยสัญญาณแล้วจึงทำการเชื่อมต่อ เมื่อเชื่อมต่อได้แล้วให้เข้าไปที่ Wireless Network Connection แล้วเลือกแถบ Support แล้วดู IP Address ที่เครื่องเราได้รับ

การใช้งานโปรแกรม Chariot

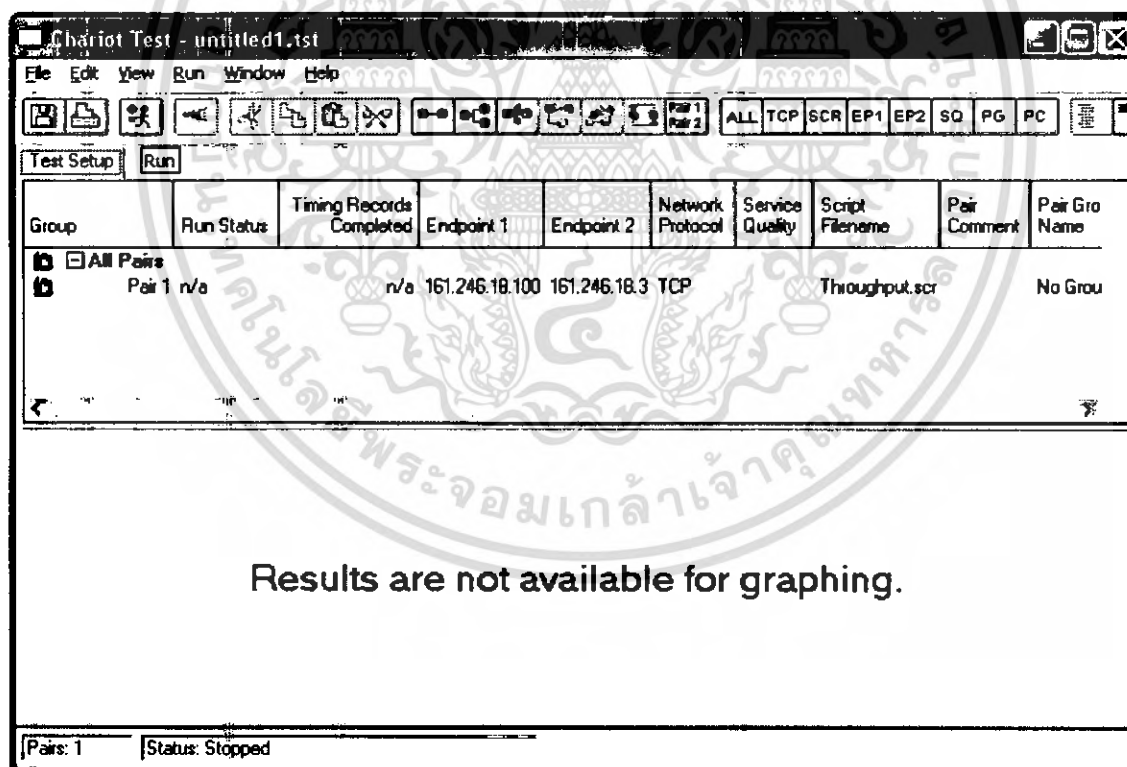
1. เปิดโปรแกรม Chariot กด New เลือก Add Pair จะปรากฏหน้าต่าง Add an Endpoint Pair สามารถตั้งชื่อได้ที่ Pair comment และที่ Endpoint 1 network address ให้ใส่ IP address ของเครื่องรับ ส่วนที่ Endpoint 2 network address ให้ใส่ IP address ของเครื่องส่งหรือเครื่องแม่ข่าย ที่ Select Script เลือก Throughput กด OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 15 การตั้งค่าโปรแกรม Chariot

16. จะปรากฏชื่อ และ IP address จากนั้นกด Run



รูปที่ 16 การ Run โปรแกรม Chariot

17. จะได้กราฟ Throughput แล้วเลือก save เป็น HTML จะได้ค่าเฉลี่ยของ Throughput ตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้