

สายอากาศที่ใช้กับสถานีทวนสัญญาณสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่
Antenna at Repeater Station for Mobile Telephone



โดย

นายประพันธ์ ตันทนงศักดิ์กุล

นายปิยะเชษฐ รังสรรค์ยุทธนา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

๑๒๖.
๒/๑/๗๖

เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 46562
วัน, เดือน, ปี..... ๕ เม.ย. 2546

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศที่ใช้กับสถานีทวนสัญญาณสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่

Antenna at Repeater Station for Mobile Telephone

โดย

นายประพันธ์ ตันทนงศักดิ์กุล 41014249

นายปิยะเชษฐ์ รัชสรณ์ยุทธนา 41014276

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

ผศ.ดร. สมผล โกศลวิตร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2544

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง สายอากาศที่ใช้กับสถานีทวนสัญญาณสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่

Antenna at Repeater Station for Mobile Telephone

ผู้จัดทำ

1. นายประพันธ์ ต้นทองศักดิ์กุล 41014249
2. นายปิยะเชษฐ รั้งสรรัศยูรธนา 41014276


----- อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์)


----- อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร. สมผล โกศลวิตร)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศที่ใช้กับสถานีทวนสัญญาณสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่

Antenna at Repeater Station for Mobile Telephone

โดย นายประพันธ์ ดันทนงศักดิ์กุล 41014249

นายปิยะเชษฐ รั้งสรรพยุทธนา 41014276

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

ผศ.ดร. สมพล โกศลวิตร

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน โทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่ในบางครั้งโทรศัพท์เคลื่อนที่จะไม่สามารถใช้ติดต่อสื่อสารกันได้ เนื่องจากอยู่ในภูมิประเทศที่อับสัญญาณ จึงจำเป็นที่จะต้องใช้ระบบทวนสัญญาณเข้ามาช่วย ดังนั้น โครงการนี้จะเป็นการออกแบบสายอากาศ ในระบบสถานีทวนสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยสายอากาศถูกออกแบบ เป็นสายอากาศรับส่งคลื่นวิทยุ ซึ่งคุณสมบัติของสายอากาศ ที่ทำการวัดประกอบด้วย ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

Abstract

Mobile Telecommunications become popular nowadays . In some situations , the communications cannot be achieved since the signal is weak . The repeater station is consequently applied . This project concerns about the design of the antenna for the repeater station for mobile telephone . This antenna is designed to transmit /receive radio wave. The antenna characteristics such as radiation pattern , input impedance and standing wave ratio are determined .

สารบัญ

| | หน้า |
|---|-----------|
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ | 2 |
| 2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น | 2-7 |
| 2.2 ฮาล์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ | 7 |
| 2.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น | 8 |
| 2.4 ค่าการชี้ทิศทางสูงสุด | 8-11 |
| 2.5 ค่าการขยาย | 12-13 |
| 2.6 ประสิทธิภาพของสายอากาศ | 13-14 |
| 2.7 ประสิทธิภาพของลำคลื่น | 14 |
| 2.8 โพลาริเซชัน | 14-18 |
| 2.9 อินพุตอิมพีแดนซ์ | 18-22 |
| 2.10 แบนด์วิดท์ | 22-23 |
| 2.11 ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ | 23 |
| 2.12 สมการการส่งคลื่นของฟรีส | 24-25 |
| 2.13 สายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น 2 ทิศทาง | 25-29 |
| 2.14 ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ | 29-33 |
| 2.15 เครื่องทวนสัญญาณ | 33-37 |
| บทที่ 3 การออกแบบและการคำนวณ | 38 |
| 3.1 ข้อกำหนดในการออกแบบสายอากาศ | 38 |
| 3.2 การออกแบบสายอากาศ | 38-39 |
| 3.3 การคำนวณคุณสมบัติของสายอากาศที่ออกแบบได้ | 39-42 |
| 3.4 การออกแบบสถานีทวนสัญญาณ | 42-48 |
| บทที่ 4 วิธีวัดและผลการทดลอง | 49 |
| 4.1 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น | 49-52 |
| 4.2 การวัดค่าการขยายของสายอากาศ | 52-54 |
| 4.3 การวัดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ | 55 |
| 4.4 ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับ | 56 |
| 4.5 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง | 56-57 |
| 4.6 การวัดอัตราขยายของเครื่องทวนสัญญาณ | 58-60 |
| 4.7 การวัดระดับสัญญาณของระบบทวนสัญญาณ | 61-65 |
| บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง | 66 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

หนังสืออ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 แสดงระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ | 2 |
| รูปที่ 2.2 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบชี้ทิศทางรอบตัว | 3 |
| รูปที่ 2.3 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร | 4 |
| รูปที่ 2.4 แสดงลําคลื่นต่างๆ, บีมิวคัท และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเชิงเส้นของสายอากาศ | 5 |
| รูปที่ 2.5 แสดงการแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ | 6 |
| รูปที่ 2.6 แสดงคำจำกัดความของเรเดียนและสเตอเรเดียน | 7 |
| รูปที่ 2.7 แสดงมุมตันของลําคลื่นซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่สมมาตรและสมมาตรกัน | 11 |
| รูปที่ 2.8 แสดงข้ออ้างอิง และการสูญเสียของสายอากาศ | 13 |
| รูปที่ 2.9 แสดงการหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระนาบ และวงรี โพลาริเซชันที่เป็นฟังก์ชันของเวลา ในระนาบ $z = 0$ | 15 |
| รูปที่ 2.10 แสดงหน่วยเวกเตอร์ โพลาริเซชันของคลื่นและสายอากาศ | 18 |
| รูปที่ 2.11 แสดงสายอากาศส่งและวงจรสมมูลย์ | 19 |
| รูปที่ 2.12 แสดงสายอากาศรับและวงจรสมมูลย์ | 22 |
| รูปที่ 2.13 แสดงการจัดวางสายอากาศเพื่อหาสมการการส่งคลื่นของฟรีส | 25 |
| รูปที่ 2.14 แสดงสายอากาศที่มีลําคลื่น 2 ทิศทางซึ่งใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนรูปวงกลม | 26 |
| รูปที่ 2.15 แสดงกำลังงานที่แพร่กระจายภายในวงแหวนเมื่อเปรียบเทียบกับความกว้างของวงแหวน | 27 |
| รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความกว้างของวงแหวน (d) กับค่าการชี้ทิศทางสูงสุด | 28 |
| รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ของค่ารัศมีของวงแหวน (a) กับความกว้างของวงแหวน (d) | 28 |
| รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ของความกว้างของวงแหวน (d) กับค่าการชี้ทิศทางสูงสุดที่รัศมี ของวงแหวน (a) ต่างๆ | 29 |
| รูปที่ 2.19 แสดงโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ | 30 |
| รูปที่ 2.20 แสดงโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ในพื้นที่ห่างกัน | 31 |
| รูปที่ 2.21 แสดงโครงสร้างของสถานีฐาน | 32 |
| รูปที่ 2.22 แสดง โครงสร้างโดยทั่วไปของเครื่องทวนสัญญาณด้านสถานีฐานไปยังโทรศัพท์เคลื่อนที่ | 34 |
| รูปที่ 2.23 แสดง โครงสร้างโดยทั่วไปของเครื่องทวนสัญญาณด้านโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังสถานีฐาน | 35 |
| รูปที่ 2.24 แสดง โครงสร้างโดยทั่วไปของเครื่องทวนสัญญาณทั้งภาครับและส่ง | 35 |
| รูปที่ 2.25 แสดงภาพอธิบายประกอบการหาระยะห่างของเครื่องทวนสัญญาณแต่ละตัว | 36 |
| รูปที่ 3.1 แสดงสายอากาศที่มีลําคลื่น 2 ทิศทางซึ่งใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนที่ออกแบบได้ | 39 |
| รูปที่ 3.2 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีลําคลื่น 2 ทิศทางที่ออกแบบได้ ใน ระนาบ E-Plane | 40 |
| รูปที่ 3.3 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีลําคลื่น 2 ทิศทางที่ออกแบบได้ ใน ระนาบ H-Plane | 41 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|----|
| รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของสายอากาศที่จะทำการออกแบบ | 42 |
| รูปที่ 3.5 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบระบบทวนสัญญาณ , a) วงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ , b) วงจรขยาย , c) คูเพิลท์เซอร์ , d) วงจรกรองความถี่ผ่าน | 43 |
| รูปที่ 3.6 แสดงวงจรของระบบทวนสัญญาณที่ออกแบบได้ | 44 |
| รูปที่ 3.7 แสดงลายวงจรพิมพ์ของระบบทวนสัญญาณที่ออกแบบได้ | 45 |
| รูปที่ 3.8 แสดงรูปถ่ายของแผ่นวงจรพิมพ์ที่ทำการต่อวงจรเรียบร้อยแล้ว | 46 |
| รูปที่ 4.1 (a) แสดงการวางสายอากาศในระนาบ E-plane | 49 |
| รูปที่ 4.1 (b) แสดงการวางสายอากาศในระนาบ H-plane | 50 |
| รูปที่ 4.1(c) แสดงการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น | 50 |
| รูปที่ 4.2 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E – plane | 51 |
| รูปที่ 4.3 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H – plane | 52 |
| รูปที่ 4.4 แสดงค่าการขยายที่ความถี่ต่างๆ | 54 |
| รูปที่ 4.5 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ | 55 |
| รูปที่ 4.6 แสดงค่าการสูญเสียสะท้อนกลับ | 56 |
| รูปที่ 4.7 แสดงค่า SWR ที่วัดได้ | 57 |
| รูปที่ 4.8 กราฟแสดงอัตราการขยายของเครื่องทวนสัญญาณด้านโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังสถานีฐาน | 59 |
| รูปที่ 4.9 กราฟแสดงอัตราการขยายของเครื่องทวนสัญญาณด้านสถานีฐานไปยังโทรศัพท์เคลื่อนที่ | 60 |
| รูปที่ 4.10 แสดงการติดตั้งระบบทวนสัญญาณ | 61 |
| รูปที่ 4.11 แสดงการติดตั้งสายอากาศที่รับสัญญาณจากสถานีฐาน | 62 |
| รูปที่ 4.12 แสดงการติดตั้งสายอากาศบริเวณที่รับสัญญาณจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ | 62 |
| รูปที่ 4.13 กราฟแสดงสัญญาณของสถานีฐานขณะเปิดเครื่องทวนสัญญาณ | 63 |
| รูปที่ 4.14 กราฟแสดงสัญญาณของสถานีฐานขณะเปิดเครื่องทวนสัญญาณ | 63 |
| รูปที่ 4.15 กราฟแสดงสัญญาณของโทรศัพท์เคลื่อนที่ขณะเปิดเครื่องทวนสัญญาณ | 64 |
| รูปที่ 4.16 กราฟแสดงสัญญาณของโทรศัพท์เคลื่อนที่ขณะเปิดเครื่องทวนสัญญาณ | 64 |
| รูปที่ 4.17 แสดงระดับสัญญาณที่เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ขณะเปิดเครื่องทวนสัญญาณ | 65 |
| รูปที่ 4.18 แสดงระดับสัญญาณที่เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ขณะเปิดเครื่องทวนสัญญาณ | 65 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 4.1 แสดงค่า Pr/Pt ที่วัดได้จากเครื่อง NETWORK ANALYZER | 53 |
| ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการขยาย ที่คำนวณจากค่า Pr/Pt ที่วัดได้ | 54 |
| ตารางที่ 4.3 แสดงอัตราขยายสัญญาณที่เครื่องทวนสัญญาณส่งออกมาในด้านสถานีฐานไป โทรศัพท์เคลื่อนที่ | 58 |
| ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราขยายสัญญาณที่เครื่องทวนสัญญาณส่งออกมาในด้านโทรศัพท์เคลื่อนที่ ไปยังสถานีฐาน | 59 |



บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันนี้ โทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายเป็นอย่างมาก เนื่องจากผู้ใช้บริการ (Subscriber) สามารถพกพาและพูดคุยกับคู่สนทนาระหว่างเดินทางได้ อีกทั้งเทคโนโลยีการพัฒนาโทรศัพท์ ก็มีอย่างต่อเนื่อง แต่ก็ยังมีปัญหาสำคัญที่พบได้บ่อย คือ ผู้ใช้บริการไม่สามารถใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ในการติดต่อสื่อสารได้ เนื่องจากอยู่ในบริเวณที่อับสัญญาณ หรือมีสัญญาณไม่แรงพอที่จะใช้ในการติดต่อสื่อสารกันได้ เช่น บริเวณทางเดินแคบๆ , ภายในอุโมงค์รถไฟใต้ดิน , ภายในลิฟท์ ฯลฯ ดังนั้น จึงต้องมีารแก้ปัญหาโดยการติดตั้งสถานีทวนสัญญาณ (Repeater Station)

โดยทั่วไป สถานีทวนสัญญาณนี้ จะแบ่งออกเป็นภาครับ คือ รับสัญญาณจากสถานีฐาน (Base Station) และภาคส่ง คือ ส่งสัญญาณออกไปยังสถานีฐาน โดยในภาครับจะมีสายอากาศตัวหนึ่ง ซึ่งทำหน้าที่รับสัญญาณที่มาจากสถานีฐาน แล้วนำมากรองสัญญาณด้วยวงจร กรองความถี่ (Filter) เพื่อให้ได้ความถี่อยู่ในช่วงความถี่ใช้งานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ จากนั้น ขยายสัญญาณด้วยวงจรขยาย (Amplifier) สัญญาณที่ถูกขยายแล้วจะถูกส่งไปยังโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยสายอากาศอีกตัวหนึ่ง ในทางกลับกัน ภาคส่ง สายอากาศตัวหนึ่ง จะรับสัญญาณจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ แล้วนำมากรองสัญญาณให้อยู่ในช่วงความถี่ใช้งานของสถานีฐาน จากนั้นก็จะขยายสัญญาณ แล้วส่งสัญญาณออกไปยังสถานีฐานโดยใช้สายอากาศอีกตัวหนึ่ง

ในโครงการนี้ สายอากาศที่ใช้รับส่งสัญญาณระหว่างสถานีทวนสัญญาณกับสถานีฐาน จะเป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ 2 ทิศทาง (Bidirectional Pattern) ซึ่งไปยังสถานีฐาน เช่นเดียวกับสายอากาศที่ใช้รับส่งสัญญาณระหว่างสถานีทวนสัญญาณกับโทรศัพท์เคลื่อนที่ ก็จะเป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ 2 ทิศทาง รายละเอียดการออกแบบสายอากาศและสถานีทวนสัญญาณ จะกล่าวไว้ในบทต่อไป

บทที่ 2

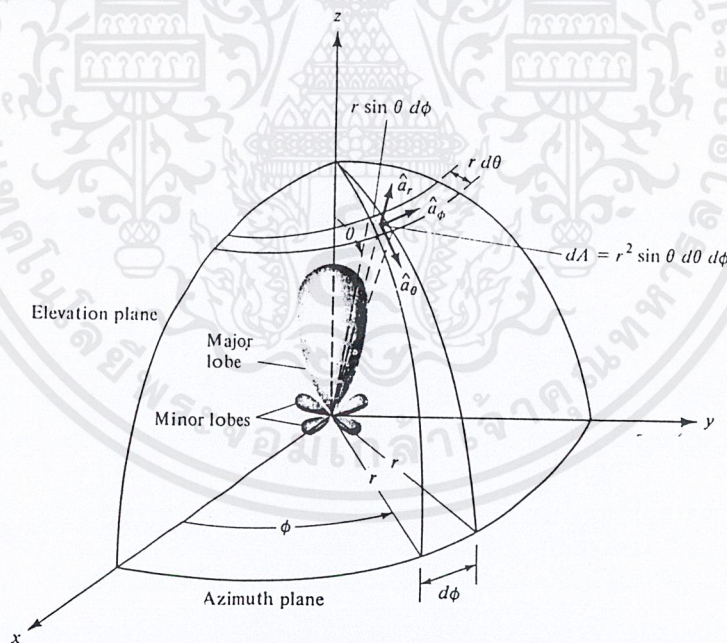
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสเปซโคออดิเนต (Space Coordinate) ส่วนใหญ่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนี้มักคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far Field)

การอธิบายคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity), ความเข้มของสนาม (Field Strength), เฟส (Phase) หรือ โพลาริเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกต ที่มีรัศมีคงที่

รูปที่ 2.1 แสดงระบบโคออดิเนตที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น สำหรับการวิเคราะห์เพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเชิงกำลังงาน (Power Pattern) ของสายอากาศ และกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆ ที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเชิงสนาม (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น



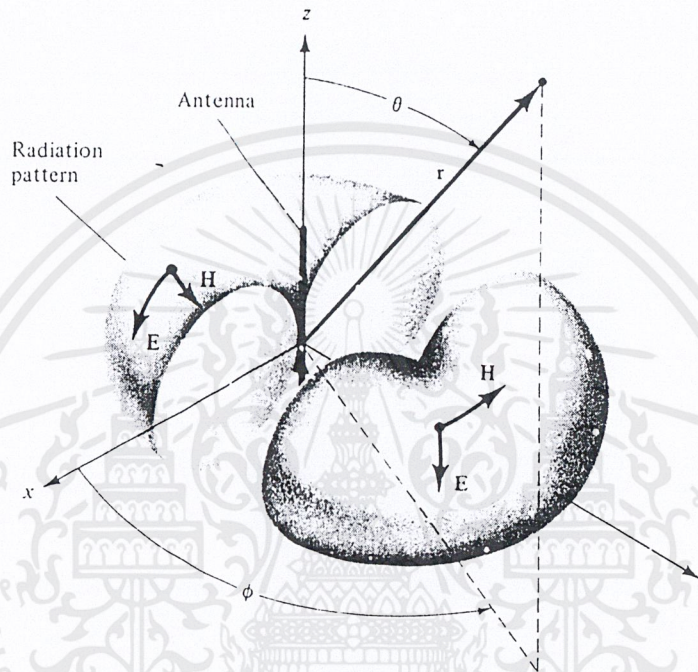
รูปที่ 2.1 แสดงระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

2.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบไอโซโทรปิก, แบบชี้ทิศทางและแบบทิศทางรอบตัว

ตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซโทรปิก (Isotropic Radiator) คือ สายอากาศที่ถูกสมมติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นเท่ากันในทุกทิศทาง ยกตัวอย่าง เช่น พอยท์ซอร์ส (Point Source) เป็นสาย

อากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างได้จริง แต่มักจะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริง เกี่ยวกับ การแสดงคุณสมบัติและทิศทางของสายอากาศ

สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional Antenna) เป็นสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างหนึ่งของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือสายอากาศแบบทิศทางรอบตัว (Omnidirectional Antenna) คุณสมบัติของสายอากาศแบบนี้มีดังแสดงในรูปที่ 2.2

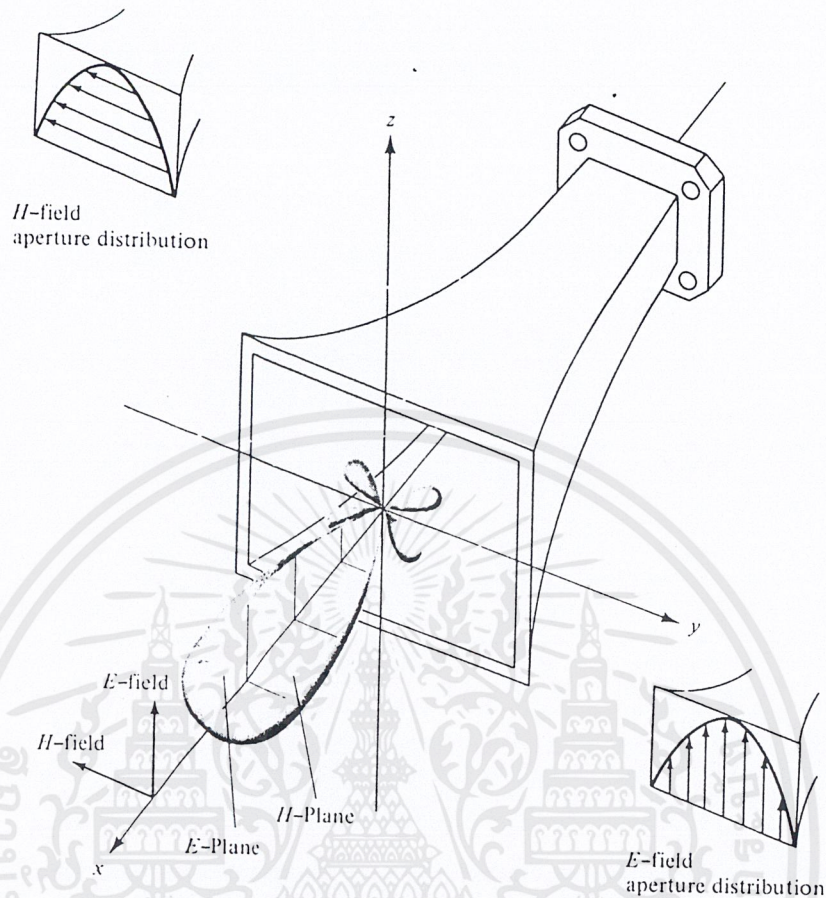


รูปที่ 2.2 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบชี้ทิศทางรอบตัว

ตามรูป จะเห็นว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนี้ ไม่มีทิศทางในระนาบอาซิมุทหรือระนาบมุมกวาด (Azimuth Plane) แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบอติเวชันหรือระนาบมุมยก (Elevation Plane) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวนี้เป็นกรณีพิเศษของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบชี้ทิศทาง

2.1.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก (Principle Pattern)

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



รูปที่ 2.3 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร

2.1.3 ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)

ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น เป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่เกิดเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นค่า รูปที่ 2.4 แสดงลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นแบบสามมิติ ซึ่งแบ่งลำคลื่นเป็นแบบต่างๆ ได้ดังนี้

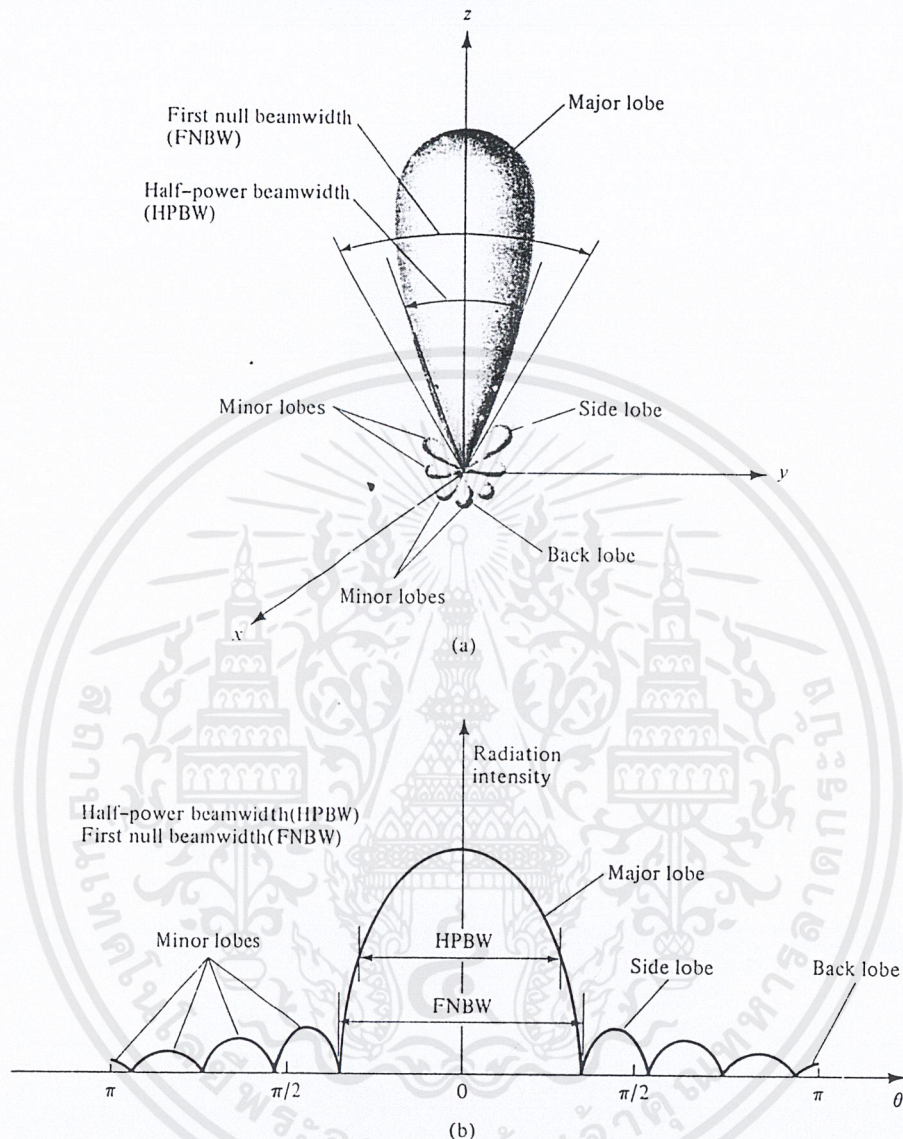
ลำคลื่นหลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ตามรูปที่ 2.4 มีลำคลื่นหลักอยู่ในทิศทาง θ เท่ากับศูนย์ สำหรับสายอากาศบางชนิด อาจมีลำคลื่นหลักมากกว่าหนึ่งลำคลื่น เช่น สายอากาศแยกลำคลื่น (Split-Beam Antenna)

ลำคลื่นย่อย (Minor Lobe) ได้แก่ ลำคลื่นอื่นๆ นอกเหนือไปจากลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นด้านข้าง (Side Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ติดกับลำคลื่นหลัก และอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นด้านหลัง (Back Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับลำคลื่นหลัก ปกติแล้วลำคลื่นย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่จำเป็นต้องกำจัดลำคลื่นเหล่านี้ให้เหลือน้อยที่สุด ระดับของลำคลื่นย่อยมักแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่น

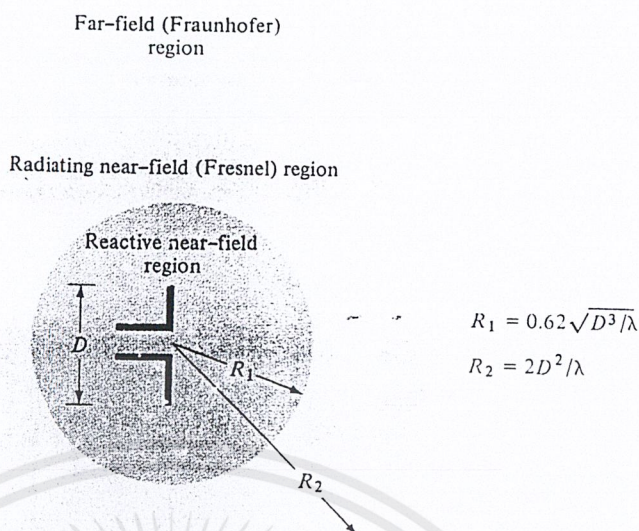
ของพลังงานในลำคลื่นที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นของพลังงานในลำคลื่นหลัก ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนของลำคลื่นย่อย (Side Lobe Ratio) หรือระดับของไซด์โลบ (Side Lobe Level : SLL) ในทางปฏิบัติ โดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของไซด์โลบน้อยกว่า -20 dB



รูปที่ 2.4 แสดงลำคลื่นต่างๆ, บีมวิดท์ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเชิงเส้นของสายอากาศ

2.1.4 บริเวณต่างๆ ของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไป มักจะแบ่งบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือ สนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive - Near Field), สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating - Near Field) และสนามระยะไกล (Far Field) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ

บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด และมีสนามเป็นชนิดรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ บริเวณนี้จะมีระยะทาง $R < 0.62\sqrt{D^2/\lambda}$ จากผิวของสายอากาศ เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่น และ D เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ

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

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

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

2.1.5 เรเดียนและสเตอเรเดียน

การวัดมุมบนระนาบ จะมีหน่วยเป็นเรเดียน หนึ่งเรเดียนเป็นมุมบนระนาบ ซึ่งยอดของมันอยู่ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมที่มีรัศมี r และถูกปิดด้วยส่วนของเส้นรอบวง ซึ่งยาว r ดังแสดงในรูปที่ 2.6a) เนื่องจากเส้นรอบวงที่มีรัศมี r มีความยาว $c = 2\pi r$ ดังนั้น บนหนึ่งรอบของวงกลมจะมี 2π เรเดียน

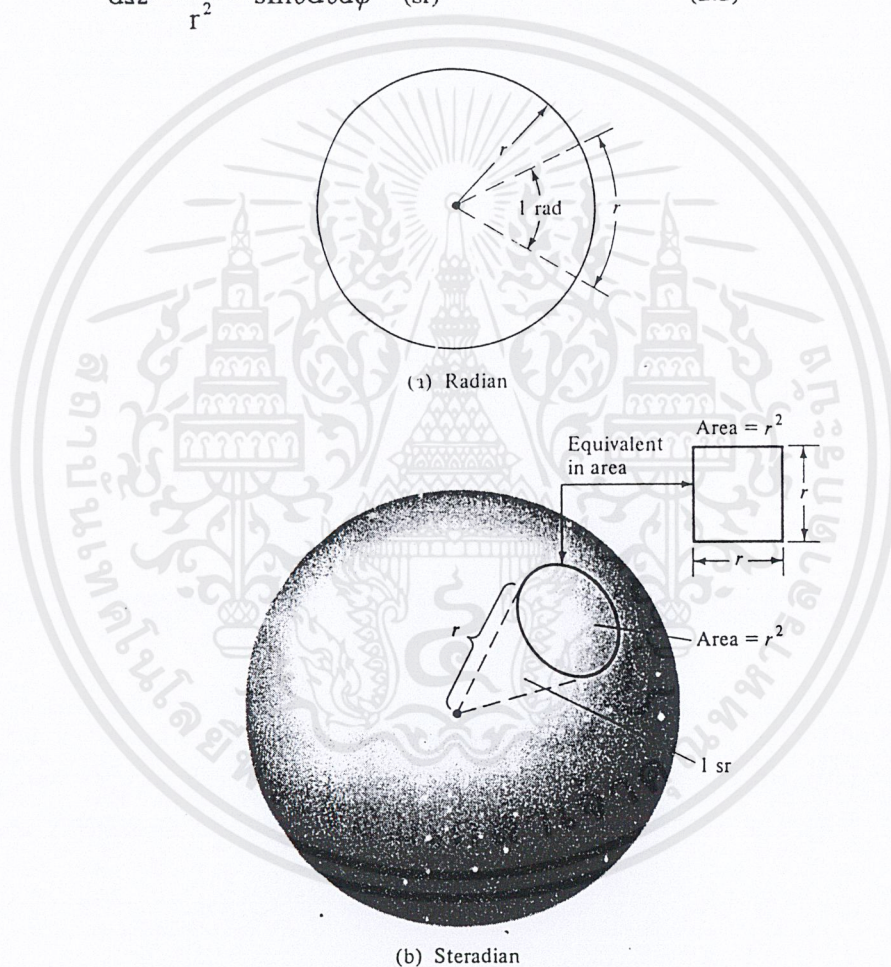
$(2\pi/r)$ ส่วนการวัดมุมตัน จะมีหน่วยเป็นสเตอเรเดียน (sr) หนึ่งสเตอเรเดียนเป็นมุมตันที่มียอดอยู่ที่จุดศูนย์กลางของทรงกลมที่มีรัศมี r ดังแสดงในรูปที่ 2.6b) เนื่องจากพื้นที่ของทรงกลมรัศมี r มีค่าเท่ากับ $4\pi r^2$ ดังนั้น ตลอดทรงกลมจะมี 4π สเตอเรเดียน ($4\pi r^2 / r^2$)

ตามรูปที่ 2.1 พื้นที่ขนาดจิ๋ว dA บนผิวของทรงกลมรัศมี r จะคำนวณได้เป็น

$$dA = r^2 \sin\theta d\theta d\phi \quad (m) \quad (2.1)$$

ดังนั้น อิลิเมนต์ (Element) ของมุมตัน $d\Omega$ ของทรงกลมเขียนได้เป็น

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \sin\theta d\theta d\phi \quad (sr) \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.6 แสดงคำจำกัดความของเรเดียนและสเตอเรเดียน

2.2 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์

ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ (Half – Power Beamwidth : HPBW) เป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลัก มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดสองจุด ดังแสดงในรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น

คำจำกัดความของคำว่า ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ในทิศทางที่กำหนดให้ คือ กำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เกี่ยวกับสนามระยะไกล ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น และผลจากการยกกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$U = r^2 w_{\text{rad}} \quad (2.3)$$

เมื่อ U คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

w_{rad} คือ ความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น (W/m^2)

ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้ คือ

$$\begin{aligned} U(\theta, \phi) &= \frac{r^2}{2\eta} |\bar{E}(r, \theta, \phi)|^2 \\ &= \frac{r^2}{2\eta} \left[|E_\theta(r, \theta, \phi)|^2 + |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2 \right] \\ &= \frac{1}{2\eta} \left[|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right] \end{aligned} \quad (2.3a)$$

เมื่อ \bar{E} คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

E_θ, E_ϕ คือ ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

η คือ อินทริเนติกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึงความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นได้เช่นกัน

กำลังงานทั้งหมดนี้ หาได้โดยการอินทิเกรตความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ตามสมการ (2.3) ตลอดมุมตัน 4π ทั้งหมด ซึ่งจะได้

$$P_{\text{rad}} = \iint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.4)$$

2.4 ค่าการชี้ทิศทางสูงสุด (Directivity)

ค่าการชี้ทิศทางในทิศทางที่กำหนด คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้น ต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งใช้สำหรับอ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศสำหรับใช้อ้างอิงนี้จะใช้ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (Isotropic Point Source)

ส่วนค่าการชี้ทิศทางสูงสุด คือ ค่าการชี้ทิศทางในทิศทางที่มีค่ามากที่สุด หรือกล่าวง่าย ๆ ว่า

ค่าการชี้ทิศทางสูงสุดของต้นกำเนิด (สายอากาศ) ที่ไม่เป็นไอโซโทรปิก คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุด ต่อ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส เขียนเป็นสมการได้ว่า

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

$$D_o = \frac{U_{max}}{U_o} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.6)$$

เมื่อ D_g คือ ค่าการชี้ทิศทาง (ไม่มีหน่วย)

D_o คือ ค่าการชี้ทิศทางสูงสุด (ไม่มีหน่วย)

U คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

U_{max} คือ ค่าสูงสุดของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

U_o คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (W/หน่วยมุมตัน)

P_{rad} คือ กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (W)

จากสมการ (2.5) และ (2.6) เราจะทราบว่า ค่าการชี้ทิศทางและค่าการชี้ทิศทางสูงสุดของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สมีค่าเป็นหนึ่ง ทั้งนี้เพราะว่า U , U_{max} และ U_o ต่างมีค่าเท่ากัน

ค่าการชี้ทิศทางสูงสุดของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส มีค่าเท่ากับหนึ่ง เพราะว่ามันแพร่กระจายกำลังงานออกไปในทุกทิศทางด้วยค่าที่เท่ากัน แต่สำหรับต้นกำเนิด (สายอากาศ) แบบอื่นๆ นั้น ย่อมมีค่าการชี้ทิศทางสูงสุดมากกว่าหนึ่งเสมอ

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

โดยทั่วไปสูตรของค่าการชี้ทิศทางและค่าการชี้ทิศทางสูงสุด อาจจะเป็นฟังก์ชันของทั้งมุม θ และ ϕ ด้วย

ต่อไปลองสมมติให้ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นอยู่ในลักษณะดังต่อไปนี้ คือ

$$U = B_o F(\theta, \phi) \approx \frac{1}{2\eta} \left[|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right] \quad (2.7)$$

เมื่อ B_o เป็นค่าคงที่ และ E_θ และ E_ϕ เป็นส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าที่ระยะไกล ค่าสูงสุดของสมการ (2.7) หาได้คือ

$$U_{max} = B_o F(\theta, \phi) \Big|_{max} = B_o F_{max}(\theta, \phi) \quad (2.8)$$

กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด หาได้จาก

$$\begin{aligned} P_{rad} &= \iint_{\Omega} U(\theta, \phi) d\Omega \\ &= B_o \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi \end{aligned} \quad (2.9)$$

ดังนั้น จะได้สูตรทั่วไปของค่าการชี้ทิศทางและค่าการชี้ทิศทางสูงสุดเป็นดังนี้ คือ

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

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

หรือเขียนสมการ (2.11) ใหม่ได้เป็น

$$D_o = \frac{4\pi}{\left[\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi \right] / F(\theta, \phi)|_{\max}} \\ = \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad (2.12)$$

เมื่อ Ω_A เป็นมุมตันของลำคลื่น ซึ่งหาได้จาก

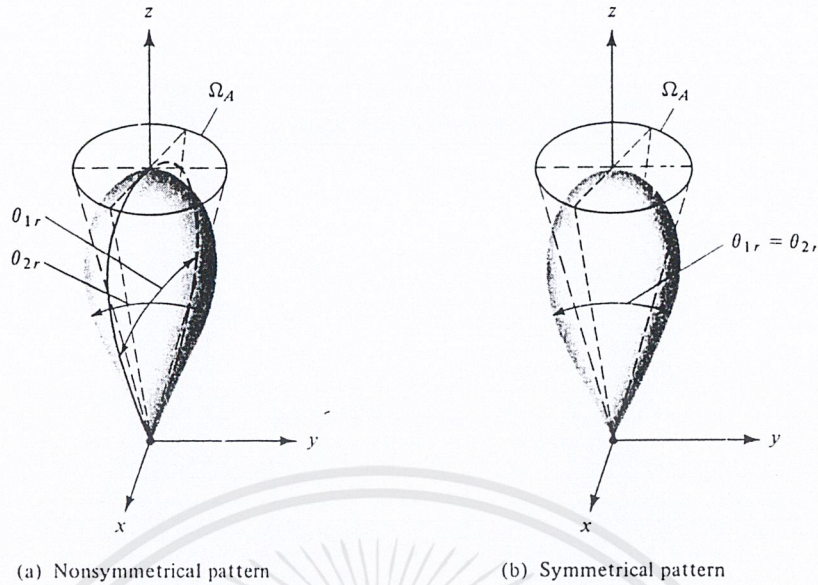
$$\Omega_A = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi}{F(\theta, \phi)|_{\max}} \\ = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F_n(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.13)$$

$$F_n(\theta, \phi) = \frac{F(\theta, \phi)}{F(\theta, \phi)|_{\max}} \quad (2.14)$$

$F(\theta, \phi)|_{\max}$ นำมาหารในสมการ (2.14) เพื่อ نرمอลไลซ์ (Normalize) ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น $F(\theta, \phi)$ ให้มีค่าสูงสุดเป็นหนึ่ง

มุมตันของลำคลื่น Ω_A มีจำกัดความว่า คือ มุมตันซึ่งกำลังงานทั้งหมดของสายอากาศ จะไหลผ่านเมื่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นมีค่าคงที่ (และมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดของ U) ที่ทุกมุมภายใน Ω_A

สายอากาศซึ่งมีลำคลื่นหลักแคบๆ เพียงลำคลื่นเดียว และมีลำคลื่นย่อยที่มีขนาดเล็กจนสามารถตัดทิ้งได้ มุมตันของลำคลื่น จะมีค่าประมาณเท่ากับผลคูณของ HPBW ใน 2 ระนาบ ซึ่งตั้งฉากกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7a สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่หมุมแล้วสมมาตรกันโดยรอบ HPBW ในระนาบใดๆ จะเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7b



รูปที่ 2.7 แสดงมุมตันของลำคลื่นซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่สมมาตรและสมมาตรกัน

โดยอาศัยการประมาณนี้ สมการ (2.12) จะเขียนใหม่ได้เป็นดังต่อไปนี้

$$D_o = \frac{4\pi}{\Omega_A} \approx \frac{4\pi}{\theta_{1r}\theta_{2r}} \quad (2.15)$$

มุมตันของลำคลื่น Ω_A ประมาณได้จาก

$$\Omega_A = \theta_{1r}\theta_{2r} \quad (2.16)$$

เมื่อ θ_{1r} คือ HPBW ในระนาบใดๆ (เรเดียน)

θ_{2r} คือ HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (เรเดียน)

เมื่อรู้ความกว้างของลำคลื่นเป็นองศา สมการ (2.15) จะคิดแปลงให้เหมาะสมที่จะแทนค่าความกว้างของลำคลื่นนั้นโดยตรง ได้เป็น

$$D_o \approx \frac{4\pi(180\pi)^2}{\theta_{1d}\theta_{2d}} = \frac{41253}{\theta_{1d}\theta_{2d}} \quad (2.17)$$

เมื่อ θ_{1d} คือ HPBW ในระนาบใดๆ (องศา)

θ_{2d} คือ HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (องศา)

สำหรับแถวลำดับเชิงระนาบ (Planar Array) จะประมาณสมการ (2.17) ได้เป็นดังนี้ คือ

$$D_o \approx \frac{32400}{\Omega_A^2(\text{degree})} = \frac{32400}{\theta_{1d}\theta_{2d}} \quad (2.17a)$$

สมการ (2.15) และ (2.17) จะใช้ได้ผลดี เมื่อแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีเพียงลำคลื่นหลักเพียงลำคลื่นเดียว และลำคลื่นย่อยจะต้องมีขนาดเล็กมากๆ เท่านั้น สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นซึ่งมี 2 ลำคลื่นหลักที่เหมือนกัน ค่าของค่าการชี้ทิศทางสูงสุดที่หาจากสมการ (2.15) หรือ (2.17) จะเป็น 2 เท่าของค่าจริง ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีลำคลื่นย่อยที่มีระดับสูง การหาค่าการชี้ทิศทางโดยใช้สมการ (2.15) หรือ (2.17) ซึ่งตัดลำคลื่นย่อยทิ้ง จะมีค่าสูงเกินความจริง

2.5 ค่าการขยาย (Gain)

ค่าการขยาย เป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าการชี้ทิศทาง โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่ค่าการชี้ทิศทาง จะอธิบายคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

ค่าการขยายกำลัง (Power Gain) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้ นั้น มีค่าเท่ากับ 4π คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้น ต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่ง เมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้โดยเฉพาะ โดยทั่วไปแล้ว เราจะคิดค่าการขยายกำลังในทิศทางที่มีกาแผ่กระจายคลื่นแรงที่สุด ดังนั้น

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

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

$$G_g = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{\text{in}}(\text{ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย})} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.19)$$

จากรูปที่ 2.8a เราสามารถเขียนได้ว่า กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด (P_{rad}) สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ (P_{in}) ด้วย

$$P_{\text{rad}} = e_r P_{\text{in}} \quad (2.20)$$

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

$$G_g(\theta, \phi) = e_r \left[\frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{\text{rad}}} \right] \quad (2.21)$$

ซึ่งสัมพันธ์กับค่าการชี้ทิศทางในสมการ (2.10) คือ

$$G_g(\theta, \phi) = e_r D_g(\theta, \phi) \quad (2.22)$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าสูงสุดของค่าการขยายจะสัมพันธ์กับค่าการชี้ทิศทางสูงสุด โดย

$$\begin{aligned} G_o &= G_g(\theta, \phi) \Big|_{\text{max}} = e_r D_g(\theta, \phi) \Big|_{\text{max}} \\ &= e_r D_o \end{aligned} \quad (2.23)$$

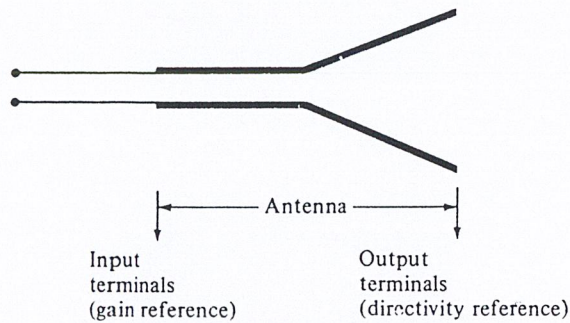
ดังนั้น ค่าประมาณของค่าการขยาย จะมีค่าเป็น

$$G_o \approx \frac{30000}{\theta_{1d} \theta_{2d}} \quad (2.23a)$$

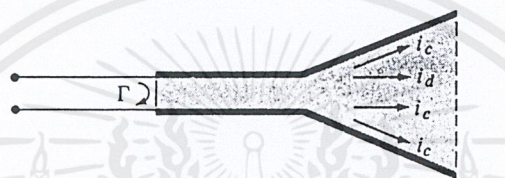
ในทางปฏิบัติ เมื่อก้าวถึงค่าการขยายมักจะหมายถึง ค่าการขยายกำลังที่มีค่าสูงสุด ดังแสดงในสมการ (2.23)

$$G_o(\text{dB}) = 10 \log_{10} [e_r D_o (\text{ไม่มีหน่วย})] \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Antenna reference terminals



(b) Reflection, conduction, and dielectric losses

รูปที่ 2.8 แสดงข้ออ้างอิง และการสูญเสียของสายอากาศ

2.6 ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ e_t จะใช้เมื่อเรากำลังพิจารณาถึงการสูญเสียต่างๆ ที่ขั้วและภายใน โครงสร้างของสายอากาศด้วย การสูญเสียต่างๆ เมื่ออ้างอิงตามรูปที่ 2.8b อาจเนื่องมาจาก

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

โดยทั่วไปแล้ว ประสิทธิภาพทั้งหมด คำนวณได้จาก

$$e_t = e_r e_c e_d \tag{2.25}$$

เมื่อ e_t คือ ประสิทธิภาพทั้งหมด (ไม่มีหน่วย)

e_r คือ ประสิทธิภาพที่เกี่ยวกับการสะท้อนกลับ มีค่าเท่ากับ $(1 - |\Gamma|^2)$ (ไม่มีหน่วย)

e_c คือ ประสิทธิภาพของตัวนำ (ไม่มีหน่วย)

e_d คือ ประสิทธิภาพของฉนวน (ไม่มีหน่วย)

Γ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศ

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

เมื่อ Z_{in} คือ อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

Z_0 คือ อิมพีแดนซ์คุณสมบัตินี้ (Characteristic Impedance) ของสายส่ง

ปกติ e_c และ e_d คำนวณหาได้ลำบาก ส่วนมากมักหาได้จากทศลง แต่ถึงกระนั้นก็แยก e_c จาก e_d ไม่ออก ดังนั้นเพื่อความสะดวก มักจะเขียนสมการ (2.25) ใหม่เป็น

$$e_t = e_r e_{cd} = e_{cd} (1 - |\Gamma|^2) \quad (2.26)$$

เมื่อ $e_{cd} = e_c e_d$ คือ ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

2.7 ประสิทธิภาพของลำคลื่น (Beam Efficiency : BE)

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

$$BE = \frac{\text{กำลังที่ส่งหรือรับภายในกรวยซึ่งทำมุม } \theta_1}{\text{กำลังงานที่ส่งหรือรับ ทั้งหมดด้วยสายอากาศนั้น}} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.27)$$

เมื่อ θ_1 เป็นมุมที่มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของมุมของกรวย ที่เราต้องการจะหาเปอร์เซ็นต์ของกำลังงานทั้งหมดในนั้น ดังนั้น จะเขียนสมการ (2.27) ได้เป็นดังนี้

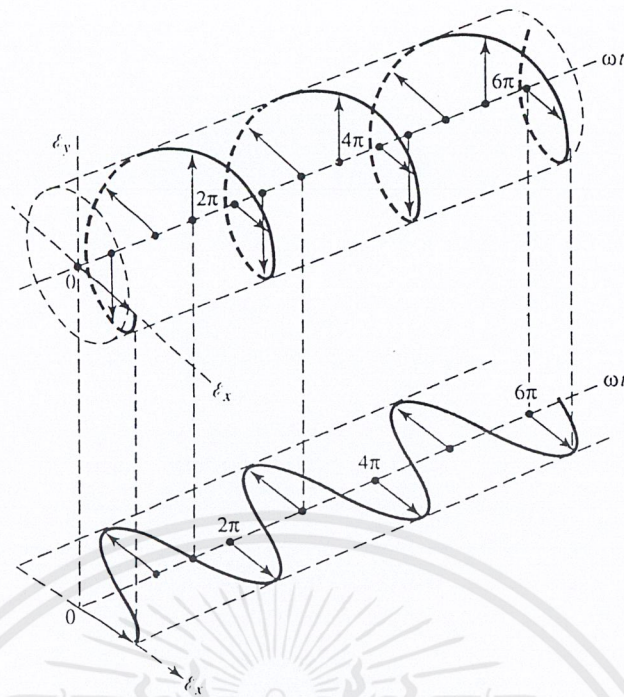
$$BE = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_1} U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2.28)$$

เมื่อให้ θ_1 เป็นมุมที่เกิดมินิมัล (Null) คือ จุดตำแหน่งที่ก่าตั้งมีค่าเป็นศูนย์เป็นคู่แรก ดังนั้น ประสิทธิภาพของลำคลื่นจะเป็นปริมาณที่แสดงถึงอัตราส่วนของจำนวนกำลังงานในลำคลื่นหลัก ต่อ กำลังงานที่มีทั้งหมด

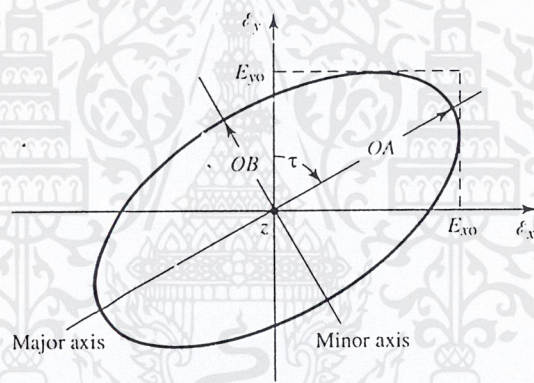
2.8 โพลาริเซชัน (Polarization)

ก่อนที่จะกล่าวถึงความหมายของโพลาริเซชันของสายอากาศ จะกล่าวถึงความหมายของโพลาริเซชันของคลื่นเสียก่อน

โพลาริเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายนั้น เป็นรูปแสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไป ที่อธิบายทิศทางและขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลา รูปแสดงโพลาริเซชันจะแสดงการกวาดของยอดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ ณ ตำแหน่งที่ทำการสังเกตซึ่งคงที่ และการสังเกตนี้จะทำโดยมองตามหลังคลื่นที่เดินทางไป รูปที่ 2.9 ประกอบ



(a) Rotation of wave



(b) Polarization ellipse

รูปที่ 2.9 แสดงการหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระนาบ และวงรีโพลาไรเซชันที่เป็นฟังก์ชันของเวลา
ในระนาบ $z = 0$

สำหรับโพลาไรเซชันของสายอากาศ ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง จะเป็นโพลาไรเซชันของคลื่นที่มาจากสายอากาศนั้นจากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังงานที่เข้าของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาให้ จะหมายถึง ทิศทางที่สายอากาศมีค่าการขยายมากที่สุด ดังนั้น โพลาไรเซชันของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกัน จะต่างกัน การแบ่งชนิดของโพลาไรเซชัน อาจแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ

- 1) โพลาไรเซชันเชิงเส้น (Linearly Polarization)
- 2) โพลาไรเซชันวงกลม (Circularly Polarization)
- 3) โพลาไรเซชันวงรี (Elliptically Polarization)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (คือเมื่อมองตามหลังคลื่นแล้ว จะเห็นมีการหมุนตามเข็มนาฬิกา) จะเรียกว่า เป็นโพลาไรเซชันมือขวา ในขณะที่ หากสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจะเป็นโพลาไรเซชันมือซ้าย

ซึ่งจะเขียนสนามชั่วขณะเวลานั้นของคลื่นระนาบ ที่เดินทางในทิศทาง $-z$ ได้ว่า

$$E(z; t) = \bar{a}_x E_x(z; t) + \bar{a}_y E_y(z; t) \quad (2.29)$$

เมื่อส่วนประกอบของสนามชั่วขณะเวลานั้น สัมพันธ์กับค่าเชิงซ้อนของสนามนั้นดังนี้

$$E_x(z; t) = E_x \cos(\omega t + kz + \phi_x) \quad (2.30)$$

$$E_y(z; t) = E_y \cos(\omega t + kz - \phi_y) \quad (2.31)$$

เมื่อ E_x และ E_y เป็นขนาดของสนามค่าสูงสุด ในทิศทาง x และ y ตามลำดับ

2.8.1 โพลาไรเซชันเชิงเส้น

คลื่นซึ่งเป็นโพลาไรเซชันเชิงเส้น ความต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบทั้งสองของสนาม จะมีค่าดังนี้

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi; n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.32)$$

2.8.2 โพลาไรเซชันแบบวงกลม

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

$$|E_x| = |E_y| \rightarrow E_x = E_y \quad (2.33)$$

เมื่อ
$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\frac{(1+2n)}{2}\pi; n = 0, 1, 2, \dots \text{cw} \quad (2.34)$$

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

เมื่อ CW (Clockwise) คือ สนามหมุนตามเข็มนาฬิกา

CCW (Counter Clockwise) คือ สนามหมุนทวนเข็มนาฬิกา

ถ้าคลื่นเดินทางในทิศทางตรงกันข้าม (คือทิศทาง $+z$) เฟสในสมการ (2.34) และ (2.35) ที่ทำให้เกิด CW และ CCW จะต้องสลับกัน

2.8.3 โพลาไรเซชันแบบวงรี

โพลาไรเซชันแบบวงรี จะเกิดขึ้นเมื่อ ความต่างเฟสเป็นจำนวนคี่ของ $\frac{\pi}{2}$ แต่ขนาดของสนามไฟฟ้าไม่เท่ากัน หรือความแตกต่างของเฟสไม่เป็นจำนวนคี่ของ $\frac{\pi}{2}$ นั่นคือ

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

เมื่อ
$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\frac{(1+2n)}{2}\pi; n = 0, 1, 2, \dots \text{cw} \quad (2.36a)$$

$$= -\frac{(1+2n)}{2}\pi; n = 0, 1, 2, \dots \text{ccw} \quad (2.36b)$$

หรือ
$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm \frac{n}{2}\pi > 0 \rightarrow \text{cw} \quad (2.37)$$

แต่ถ้า
$$< 0 \rightarrow \text{ccw} \quad (2.38)$$

โดยที่ $n = 0, 1, 2, \dots$

ในกรณีของโพลาริเซชันแบบวงรีนั้น รูปแสดงการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ จะเป็นวงรีเอียง ดังแสดงในรูปที่ 2.9b อัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนย่อย จะเรียกว่าเป็นอัตราส่วนของแกน (Axial Ratio : AR) ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

$$AR = \frac{\text{แกนหลัก}}{\text{แกนย่อย}} = \frac{OA}{OB} \quad \text{โดยที่ } 1 \leq AR \leq \infty \quad (2.39)$$

การเอียงของวงรีเทียบแกน y สามารถแสดงด้วยมุมเอียงดังนี้ คือ

$$\tau = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2E_x E_y}{E_x^2 - E_y^2} \cos(\Delta\phi) \right] \quad (2.40)$$

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

หรือ E_y (E_x) และอัตราส่วนของแกน มีค่าเท่ากับ $\frac{E_x}{E_y}$ หรือ $\frac{E_y}{E_x}$

2.8.4 โพลาริเซชันลอสแฟคเตอร์ (Polarization Loss Factor : PLF)

โดยทั่วไปแล้ว โพลาริเซชันของสายอากาศจะไม่เหมือนกับโพลาริเซชันของคลื่นที่เดินทางมายังสายอากาศ ซึ่งเรียกว่า เกิดโพลาริเซชันมิสแมทช์ (Polarization Mismatch) ทำให้สายอากาศไม่สามารถดึงเอากำลังงานออกจากคลื่นได้สูงสุด เนื่องจากเกิดการสูญเสียจากโพลาริเซชัน (Polarization Loss) สมมติว่า สนามไฟฟ้าของคลื่นที่เดินทางเข้ามาถึงสายอากาศ เขียนได้ดังนี้

$$\vec{E}_i = \vec{\rho}_w E_i \quad (2.41)$$

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

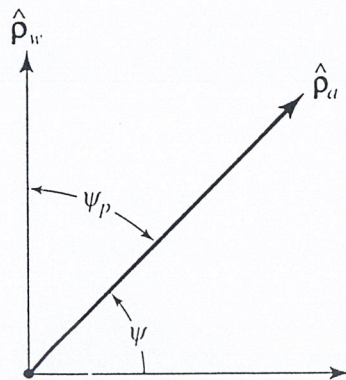
$$\vec{E}_a = \vec{\rho}_a E_a \quad (2.42)$$

เมื่อ $\vec{\rho}_a$ เป็นหน่วยเวกเตอร์ของสายอากาศ

จะกำหนดให้โพลาริเซชันลอสแฟคเตอร์ มีค่าดังนี้

$$PLF = \left| \vec{\rho}_w \vec{\rho}_a \right|^2 = \left| \cos \psi_p \right|^2 \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.43)$$

เมื่อ ψ_p เป็นมุมระหว่างหน่วยเวกเตอร์ทั้งสอง ดังรูปที่ 2.21 ถ้าเกิดโพลาริเซชันแมทช์ ค่า PLF จะเป็นหนึ่ง และสายอากาศจะรับกำลังงานได้มากที่สุด ดังนั้น ถ้าสายอากาศกับคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศตั้งฉากซึ่งกันและกันแล้ว สายอากาศนั้นจะรับคลื่น ไม่ได้เลย



รูปที่ 2.10 แสดงหน่วยเวกเตอร์โพลาร์ไรเซชันของคลื่นและสายอากาศ

2.9 อินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)

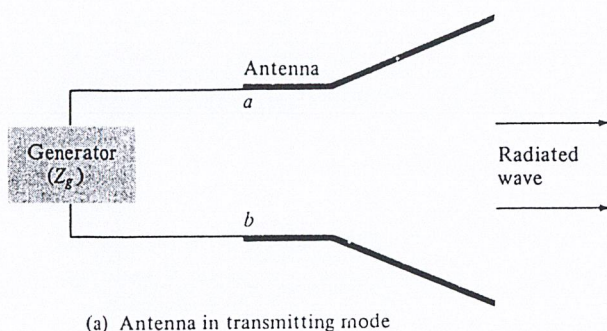
อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่ขั้วของสายอากาศนั้น อาจเป็นอัตราส่วนระหว่างศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศนั้น หรือเป็นอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่จุดใดๆ ในรูปที่ 2.11a a - b เป็นขั้วของสายอากาศ อัตราส่วนของศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วนี้ เมื่อไม่ได้ต่อโหลด (Load) จะเป็นอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งมีค่า

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.44)$$

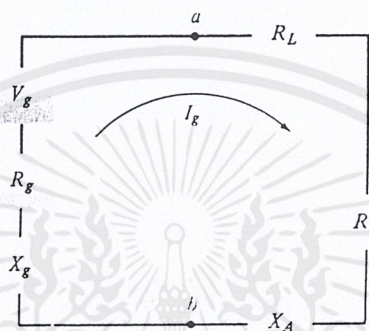
เมื่อ Z_A คือ อิมพีแดนซ์ที่ขั้ว a - b ของสายอากาศ (โอห์ม)

R_A คือ ความต้านทานที่ขั้วสายอากาศ (โอห์ม)

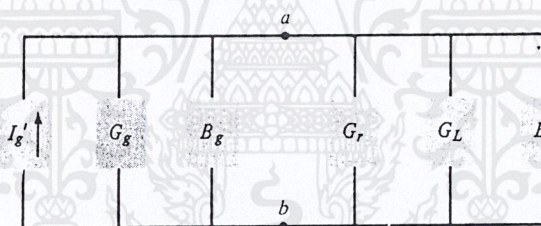
X_A คือ รีแอกแตนซ์ที่ขั้วสายอากาศ (โอห์ม)



(a) Antenna in transmitting mode



(b) Thévenin equivalent



(c) Norton equivalent

รูปที่ 2.11 แสดงสายอากาศตั้งและวงจรสมมูลย์

โดยทั่วไป ความต้านทานในสมการ (2.44) จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

$$R_A = R_r + R_L \quad (2.45)$$

เมื่อ R_r คือ ความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ

R_L คือ ความต้านทานการสูญเสียของสายอากาศ

ถ้าสมมติว่า สายอากาศต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดสัญญาณที่มี อิมพีแดนซ์ภายใน เป็นดังนี้

$$Z_g = R_g + jX_g \quad (2.46)$$

เมื่อ R_g คือ ความต้านทานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ (โอห์ม)

X_g คือ รีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ (โอห์ม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสายอากาศทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง จะแสดงวงจรสมมูลย์ได้ดังรูปที่ 2.11b ในการหาปริมาณกำลังงานที่ถูกนำมาสู่ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นเพื่อแพร่กระจายออก กับกำลังงานที่สูญเสียในความต้านทานการสูญเสีย R_L ที่กลายเป็นความร้อน ($I^2R_L/2$) นั้น เราจะหากระแสที่ไหลภายในลูป (Loop) ได้ว่ามีค่าดังนี้

$$I_g = \frac{V_g}{Z_t} = \frac{V_g}{Z_A + Z_g} = \frac{V_g}{(R_r + R_L + R_g) + j(X_A + X_g)} \quad (A) \quad (2.47)$$

และขนาดของกระแส จะมีค่าดังนี้

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

เมื่อ V_g เป็นศักดาไฟฟ้าค่าสูงสุดของเครื่องกำเนิดสัญญาณ กำลังงานที่ถูกนำมายังสายอากาศเพื่อการแพร่กระจายคลื่น จะมีค่าดังนี้

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

และกำลังงานที่สูญเสียกลายเป็นความร้อน จะมีค่าดังนี้

$$P_L = \frac{1}{2} |I_g|^2 R_L = \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_L}{(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \right] \quad (W) \quad (2.49)$$

กำลังงานส่วนที่เหลือ จะเป็นส่วนที่สูญเสียเป็นความร้อนในความต้านทานที่ขั้ว R_g ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ ซึ่งมีค่า

$$P_g = \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_g}{(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \right] \quad (W) \quad (2.50)$$

กำลังงานที่ถูกนำมายังสายอากาศ จะมีค่ามากที่สุด เมื่อเกิดการคอนจูเกตแมทช์ (Conjugate Match) นั่นคือ จะเกิดเมื่อ

$$R_r + R_L = R_g \quad (2.51)$$

และ

$$X_A = -X_g \quad (2.52)$$

ในกรณีนี้ สมการ (2.48), (2.49) และ (2.50) จะกลายเป็นดังต่อไปนี้คือ

$$P_r = \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_r}{4(R_r + R_L)^2} \right] = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_r}{(R_r + R_L)^2} \right] \quad (2.53)$$

$$P_L = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_L}{(R_r + R_L)^2} \right] \quad (2.54)$$

$$\begin{aligned} P_g &= \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_g}{(R_r + R_L)^2} \right] \\ &= \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{1}{(R_r + R_L)} \right] \end{aligned} \quad (2.55)$$

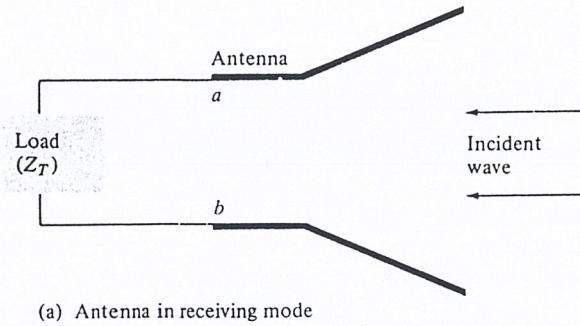
จากสมการ (2.53) ถึง (2.55) พบว่า

$$\begin{aligned} P_g &= P_r + P_L = \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_g}{(R_r + R_L)^2} \right] \\ &= \frac{|V_g|^2}{8} \left[\frac{R_r + R_L}{(R_r + R_L)^2} \right] \end{aligned} \quad (2.56)$$

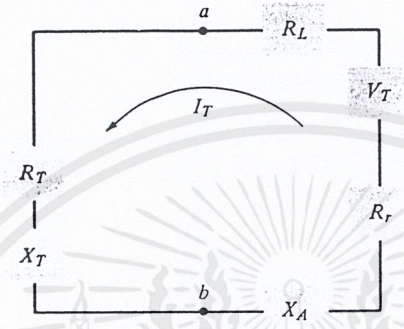
ดังนั้น กำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณ จะต้องจ่ายเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทช์ จะมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{1}{2} V_g I_g^* = \frac{1}{2} V_g \left[\frac{V_g^*}{2(R_r + R_L)} \right] \\ &= \frac{|V_g|^2}{4} \left[\frac{1}{R_r + R_L} \right] \quad (W) \end{aligned} \quad (2.57)$$

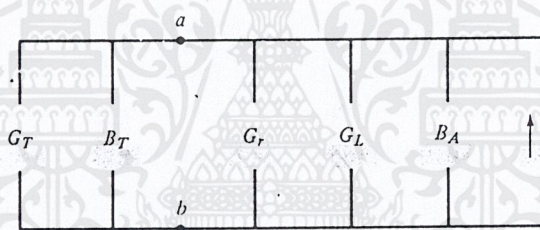
ในจำนวนกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่ายทั้งหมด ครึ่งหนึ่งจะสูญเสียเป็นความร้อนภายในความต้านทานภายใน (R_r) ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ และอีกครึ่งหนึ่งจะถูกนำมายังสายอากาศซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทช์เท่านั้น ในส่วนของกำลังงานที่ยังสายอากาศส่วนหนึ่งจะแพร่กระจายออกไป โดยผ่านกลไกที่เกิดจากความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น อีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียเป็นความร้อน ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ ซึ่งถ้าสายอากาศไม่มีการสูญเสีย ($e_d = 1$) ครึ่งหนึ่งของกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่าย จะแพร่กระจายออกเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทช์ ถ้าสมมติว่า เป็นการแมทช์ที่สมบูรณ์ระหว่างสายอากาศกับสายส่ง ($e_r = 1$) ถ้ามีการสูญเสียเนื่องจากไม่สมพงษ์หรือไม่แมทช์แล้ว จะทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศลดลง สำหรับการใส่สายอากาศเป็นสายอากาศรับ ดังรูปที่ 2.12 ถ้ามีคลื่นตกกระทบเข้ามายังสายอากาศ จะเหนี่ยวนำให้เกิดศักดาไฟฟ้า V_r ซึ่งเทียบได้กับ V_g ในโหมดการส่ง



(a) Antenna in receiving mode



(b) Thevenin equivalent



(c) Norton equivalent

รูปที่ 2.12 แสดงสายอากาศรับและวงจรสมมูลย์

โดยปกติอินพุทอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความถี่ และจะเหมาะสมกับสายส่งเฉพาะในช่วงความถี่หนึ่งๆ เท่านั้น นอกจากนี้ อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ยังขึ้นกับแฟคเตอร์ต่างๆ อีก ได้แก่ รูปทรง วิธีการป้อนสัญญาณ และสิ่งแวดล้อมข้างเคียง เนื่องจากคำนวณได้ยากจึงมักจะหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ได้จากการทดลองวัด

2.10 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศ ถูกกำหนดให้เป็นช่วงความถี่ ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้ อาจเป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่างๆ เช่น อินพุทอิมพีแดนซ์, แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น, ความกว้างของลำคลื่น, โพลาริเซชัน, ระดับของไซด์โลบ, ค่าการขยาย, ประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่น ฯลฯ อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ คือ ไม่ต่างจากคุณสมบัติที่วัดที่ความถี่ตรงกลางที่ออกแบบ จนทำให้คุณสมบัติเหล่านี้เสียไปจากข้อกำหนดหรือมาตรฐาน สำหรับสายอากาศแบนด์กว้างมักจะคิดเป็น อัตราส่วนของความถี่ที่ใช้งานได้ด้านสูง ต่อความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำ ยกตัวอย่าง เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบนด์วิดท์ 10 : 1 แสดงว่าความถี่ที่ใช้งานได้ด้านสูง มีค่ามากกว่าความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำอยู่ 10 เท่า สำหรับสายอากาศแบนด์แคบ แบนด์วิดท์จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของความถี่ (ความถี่ด้านสูง ลบด้วยความถี่ด้านต่ำ)หารด้วยความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น เช่น แบนด์วิดท์ 5 % แสดงว่าผลต่างของความถี่ของช่วงการทำงานของสายอากาศ เป็น 5 % ของความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น

เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศที่กล่าวมา จะไม่เปลี่ยนแปลง ตามความถี่ในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ดังนั้น จึงไม่สามารถกำหนดแบนด์วิดท์ตามคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งได้ จึงต้องมีการกำหนดข้อบังคับให้เป็นไปตามการประยุกต์ใช้งานแต่ละอย่าง ปกติแล้ว คุณสมบัติของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นกับอินพุทอิมพีแดนซ์ จะมักถูกใช้เป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ของสายอากาศ

2.11 ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ประสิทธิภาพของตัวนำและจนวน e_{cd} เป็นอัตราส่วนของกำลังงานที่ถูกนำมายังความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น R_r ต่อกำลังงานที่ถูกนำมาสู่ R_r และความต้านทานการสูญเสีย R_L

จากสมการ (2.48)

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

และจากสมการ (2.49)

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

จะหาได้ว่า

$$e_{cd} = \left[\frac{R_r}{R_r + R_L} \right] \quad (2.58)$$

ในกรณีของท่อโลหะ ซึ่งยาว l และมีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ มีค่าเท่ากับ A ความต้านทานกระแสดตรงจะมีค่า R_{dc} ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$R_{dc} = \frac{l}{\sigma A} \quad (\text{โอห์ม}) \quad (2.58a)$$

ถ้าสกินเดปท์ (Skin Depth) δ ($\delta = \sqrt{2/(\omega\mu\sigma)}$) มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเส้นทแยงมุมที่สั้นที่สุดของพื้นที่หน้าตัดนั้น กระแสจะไหลอยู่เฉพาะในบริเวณชั้นบางๆ ที่ผิวของตัวนำเท่านั้น ดังนั้น ความต้านทานที่ความถี่สูง จะมีค่าดังนี้คือ

$$R_{hf} = \frac{lR_s}{P} = \frac{l}{P} \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}} \quad (\text{โอห์ม}) \quad (2.58b)$$

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

2.12 สมการการส่งคลื่นของฟรีส

สมการการส่งคลื่นของฟรีส แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานระหว่างสายอากาศ 2 ตัว ที่สายอากาศรับได้ ต่อกำลังงานที่สายอากาศส่งออกไป เมื่อสายอากาศทั้งสองวางอยู่ห่างกันด้วยระยะทาง R ซึ่งมีค่ามากกว่า $2D^2/\lambda$ จากรูปที่ 2.13 สมมติว่า สายอากาศส่งเป็นแบบไอโซโทรปิกก่อน ถ้ากำลังงานที่ขั้วอินพุทของสายอากาศส่งเป็น P_t จะได้ความหนาแน่นของกำลังงาน ที่ระยะทาง R จากสายอากาศเป็น W_o ซึ่งมีค่าดังนี้

$$W_o = e_u \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (2.59)$$

เมื่อ e_u เป็นประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศส่ง ถ้าสายอากาศส่งไม่เป็นแบบไอโซโทรปิก กำลังงานในสมการ (2.59) ในทิศทาง θ_t, ϕ_t เขียนได้ดังนี้

$$W_t = \frac{P_t G_{\alpha}(\theta_t, \phi_t)}{4\pi R^2} = \frac{e_u P_t D_{gr}(\theta_t, \phi_t)}{4\pi R^2} \quad (2.60)$$

เมื่อ $G_{\alpha}(\theta_t, \phi_t)$ เป็นค่าการขยาย และ $D_{gr}(\theta_t, \phi_t)$ เป็นค่าการชี้ทิศทางของสายอากาศในทิศทาง θ_t, ϕ_t เนื่องจากค่าของเปิดประสิทธิผล A_r ของสายอากาศสัมพันธ์กับประสิทธิภาพ E_u และค่าการชี้ทิศทาง D_{gr} ด้วยสมการต่อไปนี้

$$A_r = e_{ur} D_{gr}(\theta_r, \phi_r) \left(\frac{\lambda^2}{4\pi}\right) \quad (2.61)$$

ดังนั้น จำนวนกำลังงาน P_r ที่ถูกรับโดยสายอากาศรับ สามารถเขียนได้โดยใช้สมการ (2.60), (2.61) และ โพลาริเซชันตลอดสเฟกเตอร์ว่ามีค่าดังนี้ คือ

$$\begin{aligned} P_r &= e_{ur} D_{gr}(\theta_r, \phi_r) \left(\frac{\lambda^2}{4\pi}\right) W_t \\ &= e_u e_{ur} \frac{\lambda^2 D_{gr}(\theta_t, \phi_t) D_{gr}(\theta_r, \phi_r) P_t |\bar{\rho}_t \cdot \bar{\rho}_r|^2}{(4\pi R)^2} \end{aligned} \quad (2.62)$$

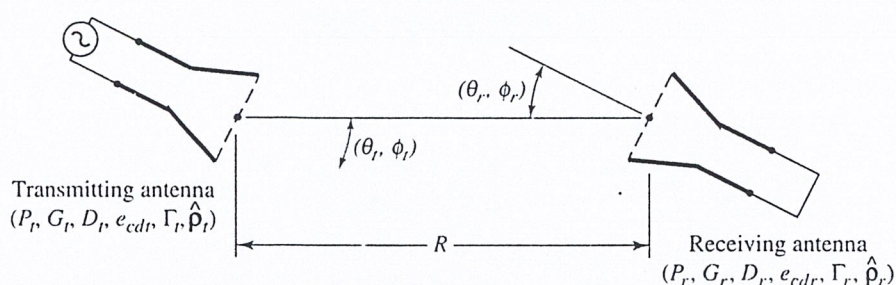
หรือ

$$\frac{P_r}{P_t} = e_{cdt} e_{cdr} (1 - |\Gamma_t|^2) (1 - |\Gamma_r|^2) \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 D_{gr}(\theta_t, \phi_t) D_{gr}(\theta_r, \phi_r) |\bar{\rho}_t \cdot \bar{\rho}_r|^2 \quad (2.63)$$

ในกรณีที่เป็นสายอากาศที่โพลาริเซชันแมทช์ และหันสายอากาศให้ส่งและรับได้แรงที่สุด สมการ (2.63) จะลดลงเป็นดังนี้

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 G_{\alpha t} G_{\alpha r} \quad (2.64)$$

เรียกสมการ (2.63) และ (2.64) ว่า สมการการส่งคลื่นของฟรีส และเทอม $(\lambda/4\pi R)^2$ เป็นแฟกเตอร์ที่แสดงการสูญเสียของสูญญากาศ



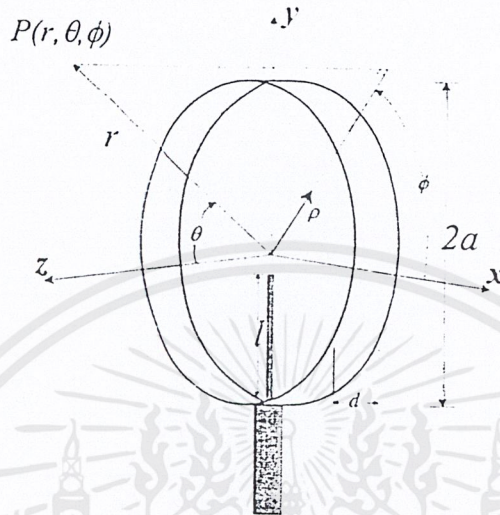
รูปที่ 2.13 แสดงการจัดวางสายอากาศเพื่อหาสมการการส่งคลื่นของฟรีส

2.13 สายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 ทิศทาง

ในปัจจุบัน ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่มีบทบาทสำคัญมาก และมันได้กลายเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญในชีวิตประจำวัน จำนวนผู้ใช้บริการมีจำนวนเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก และระบบไมโครเซลล์ลาร์ได้ถูกประยุกต์ใช้งานจนประสบผลสำเร็จ ดังนั้น จำนวนของสถานีฐานจะต้องมีจำนวนมากขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาของสายอากาศที่ใช้กับสถานีฐาน ซึ่งมีประสิทธิภาพและราคาถูก จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง โดยทั่วไป สายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว จะถูกใช้งานเพื่อครอบคลุมพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นวงกลม อย่างไรก็ตาม พื้นที่ให้บริการที่มีลักษณะเป็นทางเดินยาวและแคบ เช่น บนทางด่วน , อุโมงค์ และระเบียบ สายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 ทิศทาง จะถูกติดตั้งแทนสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว ถ้าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ สามารถถูกจำกัดได้ด้วยทางเดินยาวและแคบ แล้วพื้นที่บริการของมันก็สามารถถูกขยายเพิ่มขึ้นได้ สายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 ทิศทางอย่างง่าย ๆ สามารถถูกสร้างโดยใช้สายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว 2 ตัว นำมาต่อติดกัน เช่น สายอากาศขากิ ซึ่งในทิศทางตรงข้ามกัน หรือสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว เช่น โมโนโพล ที่กระตุ้นด้วยเฟสที่เหมาะสม สายอากาศที่สร้างด้วยเทคนิคเหล่านี้ จะได้รับปัญหาจากการสูญเสียของตัวป้อนสัญญาณ (Feeder) และโครงสร้างที่ซับซ้อน ซึ่งทำให้พวกมันมีราคาแพง ดังนั้น การวิจัยและการพัฒนาสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 ทิศทาง จึงมีการกระทำกันอย่างต่อเนื่องเรื่อยมา สำหรับในโครงการนี้ จะสร้างสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 ทิศทาง ที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนรูปวงกลม ซึ่งจะได้อีกต่อไปในบทที่ 3

2.13.1 คุณสมบัติของสายอากาศที่มีลวดเส้น 2 ทิศทางโดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนรูปวงกลม

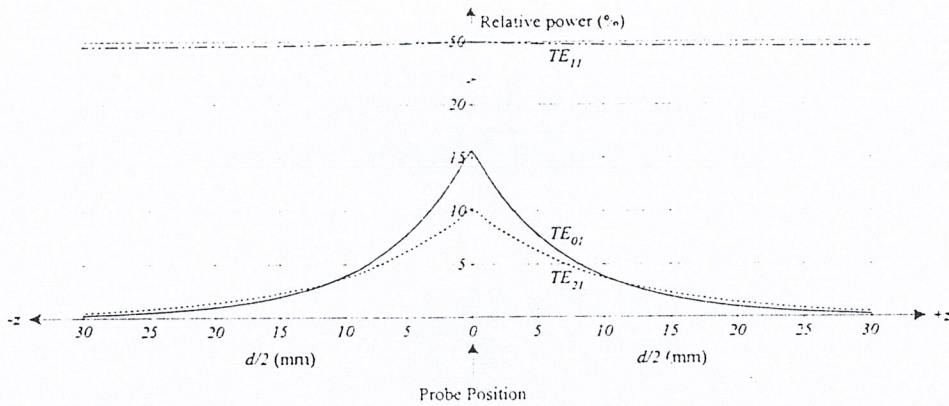
สายอากาศที่มีลวดเส้น 2 ทิศทาง ซึ่งใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนรูปวงกลม ประกอบด้วย โพรบกระตุ้นความยาว l ที่ถูกเชื่อมต่อกับสายนำสัญญาณเข้าไปยังวงแหวนรูปวงกลม วงแหวนมีรัศมีและความกว้างเป็น a และ d ตามลำดับ โพรบจะถูกวางตามแนวแกน y ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงสายอากาศที่มีลวดเส้น 2 ทิศทางซึ่งใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนรูปวงกลม

ให้พิจารณาว่าวงแหวนเป็นส่วนหนึ่งของท่อนำคลื่นรูปวงกลม ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเดินทางตามแนวแกน z และ $-z$ สนามเหล่านี้จะแพร่กระจายอยู่ในช่องว่างของวงแหวน โดยสนามเหล่านี้จะประกอบด้วยสนามของโหมดต่างๆ มากมาย ดังนั้นความกว้างและรัศมีของวงแหวน จะต้องเลือกที่สุทธเท่าที่จะเป็นไปได้ ถึงแม้ว่าจะเลือกรัศมีที่เล็กที่สุด ซึ่งคัทออฟ (Cut off) โหมดอันดับสูง (TE_{nm}) ทั้งหมด แต่โหมดโดมิแนนท์ (TE_{11}) ซึ่งเป็นสนามที่อยู่ใกล้โพรบก็ยังคงมีอยู่และประกอบด้วยโหมดอื่นๆ บ้าง โดยปกติโหมดอันดับสูงจะสูญหายไปอย่างรวดเร็วและขนาดของสนามก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อระยะห่างจากโพรบเพิ่มมากขึ้น ระยะห่างที่จะถูกเลือกใช้ จะต้องทำให้ขนาดของโหมดอันดับสูงมีค่าน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย ดังนั้นการแพร่กระจายของสนามในช่องว่างของวงแหวนจึงขึ้นอยู่กับโหมดโดมิแนนท์เพียงอย่างเดียว ส่วนรัศมีของวงแหวนที่จะถูกเลือกใช้ จะต้องมีความถี่คัทออฟต่ำสุดอยู่ในช่วงตั้งแต่โหมดโดมิแนนท์ไปจนถึงโหมด 21 (TE_{21}) ดังนั้นรัศมี a จะมีค่าอยู่ในช่วง $0.293\lambda < a < 0.486\lambda$ โดยที่ λ คือความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งาน

ความสัมพันธ์ของกำลังงานของสนามตามแนวแกน z ซึ่งจะประกอบไปด้วยโหมดอันดับต่ำ 3 โหมดของภายในวงแหวน เมื่อเปรียบเทียบกับความกว้างของวงแหวนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงกำลังงานที่แพร่กระจายภายในวงแหวนเมื่อเปรียบเทียบกับความกว้างของวงแหวน

จากรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่ากำลังงานของสนามจะประกอบด้วยโหมด 3 โหมด คือ โหมด 11, 01 และ 21 เมื่อความกว้างของวงแหวน (d) มีค่าเพิ่มขึ้น กำลังงานของสนามของโหมด 01 และ 21 จะมีค่าลดลง แต่กำลังงานของโหมด 11 จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก (ถือได้ว่าไม่เปลี่ยนแปลงเลย) จนเมื่อความกว้างของวงแหวนเพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่ง กำลังงานของสนามของโหมด 01 และ 21 จะลดลงเป็น $1/16$ เท่าของกำลังงานของสนามของโหมด 11 (มีค่าคงเดิม เมื่อ d เพิ่มขึ้น) ที่ค่า d นี้จะทำให้สนามของโหมดอันดับสูง (01 และ 21) มีค่าน้อยที่สุด คือ จะมีเฉพาะสนามของโหมด 11 เพียงโหมดเดียว

ดังนั้น โครงสร้างของสายอากาศจะเป็นส่วนหนึ่งของท่อนำคลื่นรูปวงกลม ซึ่งสามารถหาได้ง่ายตามท้องตลาดและจะต้องถูกใช้งานในโหมดโดมิแนนท์ การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสามารถถูกแสดงได้โดยการรวมกันของสนามจากแต่ละส่วน (ช่องว่างของท่อนำคลื่น) ซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้

$$E_{\theta} = A_{11} a^2 \sin\phi \frac{J_1(1.8412)}{1.8412} \frac{J_1(k a \sin\theta)}{k a \sin\theta} \sin\left(\frac{1}{2} k d \cos\theta\right) \quad (2.65)$$

$$E_{\phi} = A_{11} a^2 \cos\theta \cos\phi \frac{1.8412 J_1(1.8412)}{(1.8412)^2 - (k a \sin\theta)^2} J_1(k a \sin\theta) \sin\left(\frac{1}{2} k d \cos\theta\right) \quad (2.66)$$

โดยที่ A_{11} คือ ขนาดสัมพัทธ์ของสนามในโหมด 11

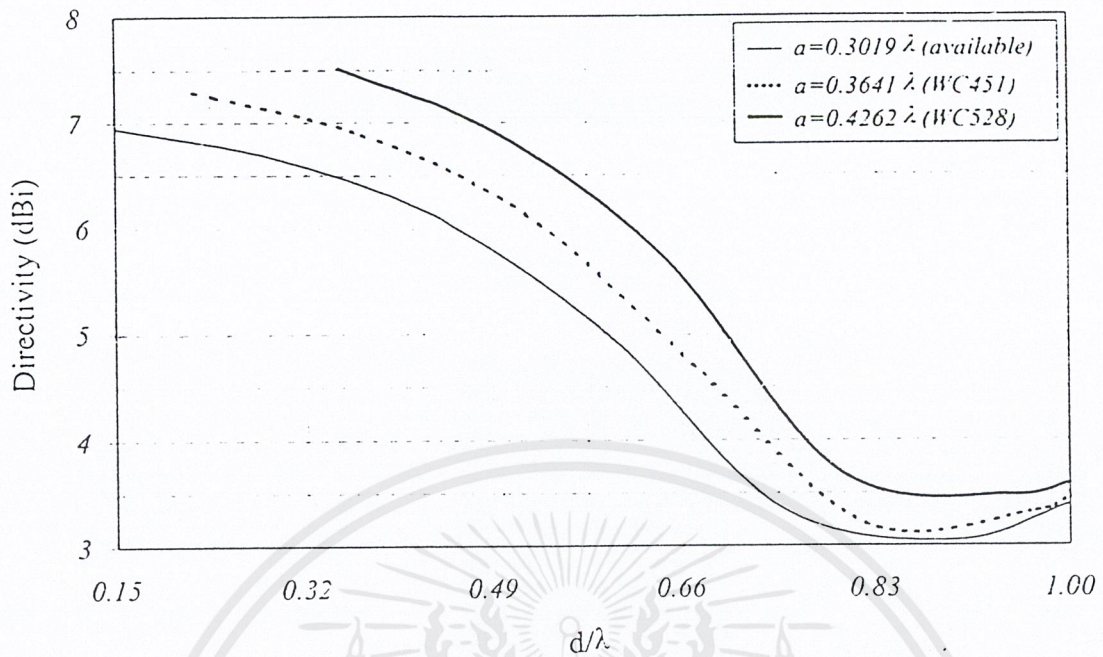
$J_1(*)$ คือ เบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ 1

k คือ เลขคลื่น (Wave number) ในสูญญากาศ มีค่าเท่ากับ $2\pi/\lambda$

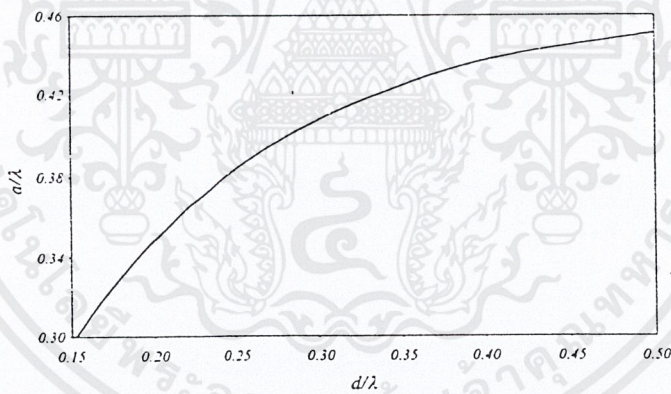
สมการของสนามเหล่านี้จะถูกใช้เพื่อตรวจสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและค่าการชี้ทิศทางของสายอากาศ เมื่อมีความกว้างของวงแหวนยาวเพียงพอ สมการเหล่านี้จะไม่สามารถใช้ได้ ในกรณีที่วงแหวนมีความกว้างสั้นเกินไป

กราฟคุณลักษณะซึ่งใช้ในการเลือกค่า d และ a ที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.16, 2.17 และ 2.18

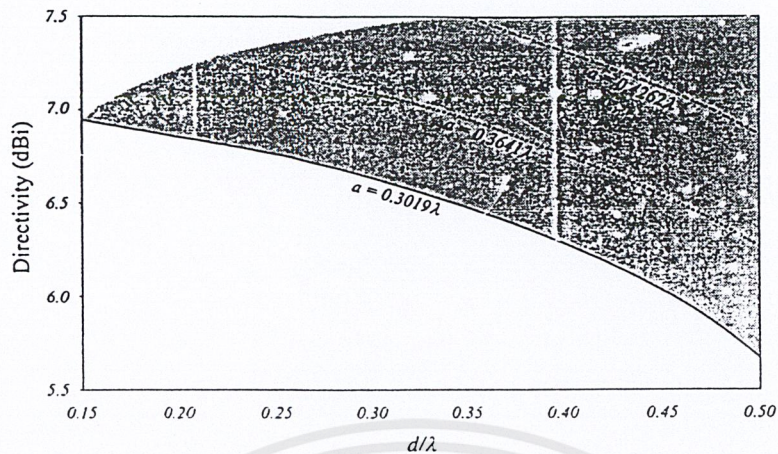
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความกว้างของวงแหวน (d) กับค่าการชี้ทิศทางสูงสุด



รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ของค่ารัศมีของวงแหวน (a) กับความกว้างของวงแหวน (d)

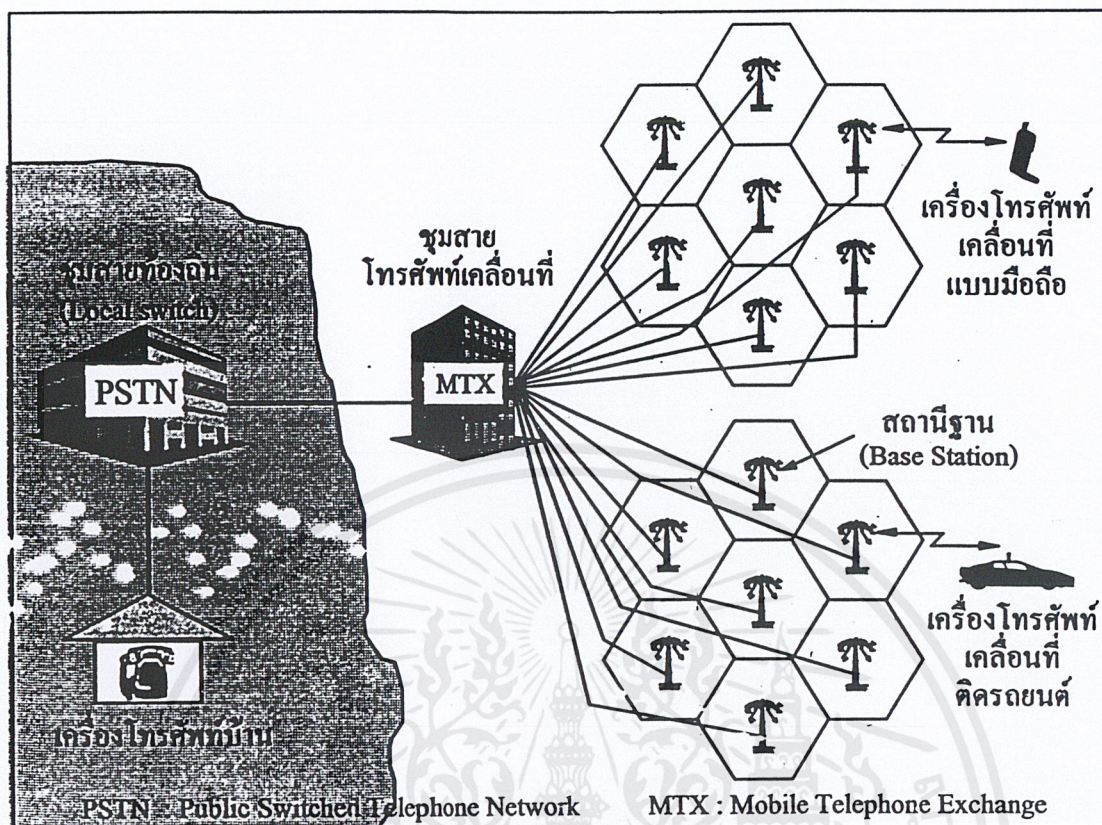


รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ของความกว้างของวงแหวน (d) กับค่าการชี้ทิศทางสูงสุดที่รัศมีของวงแหวน (a) ต่างๆ

จากรูปที่ 2.18 ความกว้างของวงแหวนที่เหมาะสมและทำให้เกิดค่าการชี้ทิศทางสูงสุดจะถูกแสดงไว้ เมื่อค่าความกว้างของวงแหวนเพิ่มขึ้น ค่าการชี้ทิศทางสูงสุดจะลดลง ถ้าความกว้างของวงแหวนมีค่ามากกว่า 0.5λ ค่าการชี้ทิศทางสูงสุดจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการแตกกระจายของลำคลื่น ดังนั้น ค่า $d > 0.5\lambda$ จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการออกแบบเสาอากาศ กราฟความสัมพันธ์นี้จะมีประโยชน์มาก สำหรับการออกแบบเสาอากาศในบทต่อไป

2.14 ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้ในปัจจุบัน ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ หุมสาย โทรศัพท์เคลื่อนที่ (MTX : Mobile Telephone exchange) , สถานีฐาน หรือเซลล์ไซต์ (CS : Cell Site) เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ (MS : Mobile Station) โดยจะมีการเชื่อมโยงกับหุมสายโทรศัพท์ท้องถิ่น ในส่วนของโครงข่ายโทรศัพท์สาธารณะ (PSTN : Public Switch Telephone Network) ด้วย ซึ่งจะทำให้เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่สามารติดต่อกับโทรศัพท์ธรรมดาได้ ลักษณะของโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่เบื้องต้นจะแสดงดังรูปที่ 2.19

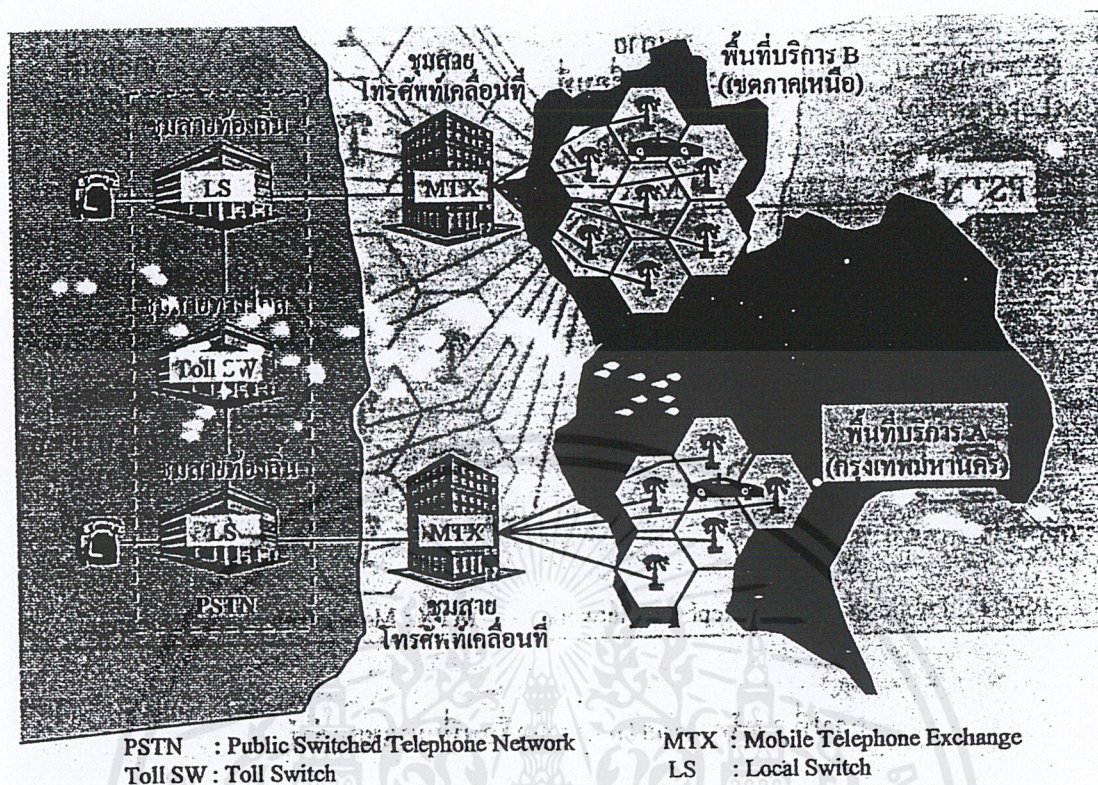


รูปที่ 2.19 แสดงโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่

จากรูปที่ 2.19 โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ประกอบด้วย ชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่, สถานีฐาน และเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่

2.14.1 ชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่

ชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นส่วนสำคัญที่สุดในโครงข่าย โดยมีหน้าที่ในการควบคุมการทำงานทั้งหมดของโครงข่าย และเป็นสวิทซ์ในการเชื่อมโยงระหว่างเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่กับโทรศัพท์ธรรมดาของชุมสายโทรศัพท์ท้องถิ่น (LS : Local Switch) รวมทั้งเชื่อมโยงระหว่างเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ด้วยกัน หน้าที่อีกอย่างหนึ่งก็คือควบคุมการทำงานของสถานีฐาน ซึ่งการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่จะมีทั้งสัญญาณเสียง และสัญญาณข้อมูลอยู่ด้วยกัน



รูปที่ 2.20 แสดงโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ในพื้นที่ห่างกัน

ชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่จะเป็นส่วนที่ใช้ในการแบ่งขอบเขตของพื้นที่การให้บริการอีกด้วย ตัวอย่างเช่น ชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ A จะควบคุมพื้นที่ในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล ชุมสาย B จะควบคุมพื้นที่ในเขตภาคเหนือ เป็นต้น เนื่องจากพื้นที่การบริการทั้งสองเขตอยู่ห่างกัน จึงไม่สามารถที่จะใช้ชุมสายโทรศัพท์เดียวกันในการควบคุมสถานีฐานทั้ง 2 เขตได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ดังนั้น เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีการเคลื่อนตัวไปยังอีกเขตพื้นที่หนึ่ง จะเกิดขบวนการหนึ่งๆ ที่เรียกว่า การโรมมิ่ง (Roaming)

ฟังก์ชันการทำงานของชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่จะมีหลายอย่าง เช่น การค้นหาเครื่องโทรศัพท์ที่ถูกเรียก (Paging) การแฮนด์ออฟ (Hand - off) หรือการเปลี่ยนเซลล์ การตรวจสอบสถานะการใช้หรือไม่ใช้งาน การสแกนหาช่องสัญญาณ ฯลฯ

2.14.2 สถานีฐานหรือเซลล์ไซต์

สถานีฐานในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ จะทำหน้าที่ ในการเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่กับชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยส่วนที่ติดต่อกับเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่จะใช้การรับ-ส่งสัญญาณทางคลื่นวิทยุเพื่อให้บริการในกรณีที่มีการเรียกเข้า หรือการเรียกจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ด้วยกัน

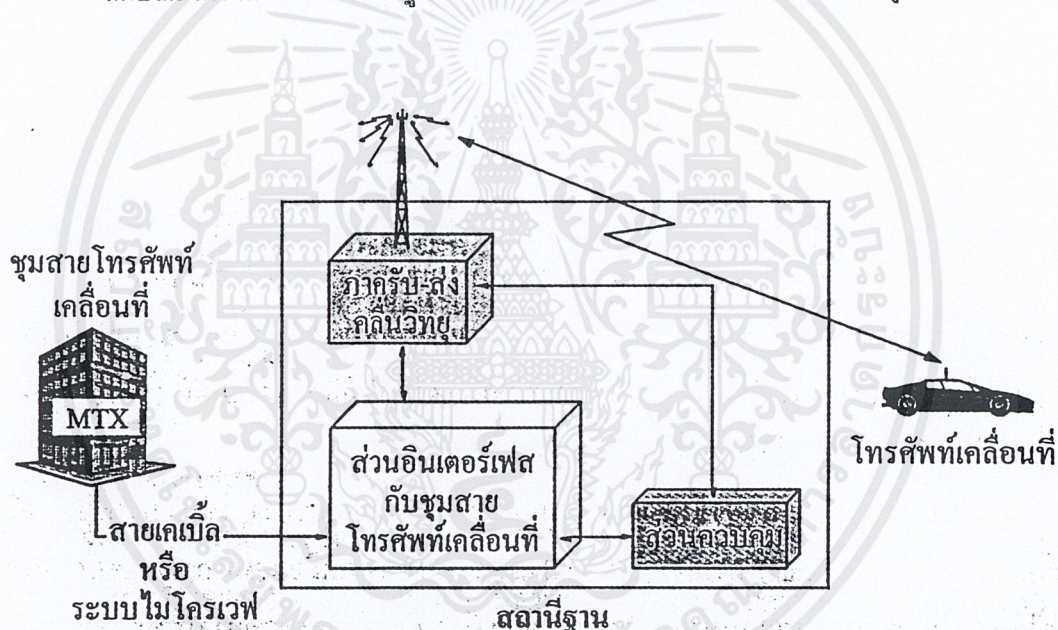
ส่วนการเชื่อมโยงกับชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่จะใช้การติดต่อผ่านทางคู่สายหรือทางคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจะมีทั้งสัญญาณเสียงและสัญญาณควบคุม

สถานีฐาน จะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนของการรับ - ส่งคลื่นวิทยุ , ส่วนควบคุม และ ส่วนอินเตอร์เฟซกับชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่

ส่วนประกอบการทำงานของสถานีฐาน จะประกอบด้วย

- 1) ส่วนของการรับ - ส่งคลื่นวิทยุ ก็คือ เครื่องรับ , เครื่องส่ง และสายอากาศ
- 2) ส่วนควบคุม จะใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ที่ทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงาน
- 3) มอนิเตอร์ระดับของสัญญาณเพื่อใช้ในการแฮนด์ออฟ
- 4) การดูแลตรวจตราการเรียก (Supervision of Calls)
- 5) อินเตอร์เฟซกับชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ จะทำหน้าที่ ในการเชื่อมโยงสัญญาณเสียงและสัญญาณข้อมูลระหว่างสถานีฐาน กับชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยผ่านทางสายเคเบิล หรือระบบไมโครเวฟ

ลักษณะโครงสร้างของสถานีฐานและการเชื่อมโยงในโครงข่าย แสดงได้ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงโครงสร้างของสถานีฐาน

2.14.3 เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่

เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมโยงกับผู้ใช้ ซึ่งจะมีการใช้งานที่คล้ายกับ โทรศัพท์ธรรมดา แต่จะแตกต่างกันที่รวมฟังก์ชันของโทรศัพท์กับฟังก์ชันการรับ - ส่งคลื่นวิทยุเข้าด้วยกัน ทำให้เครื่องโทรศัพท์ไม่จำเป็นต้องใช้การติดต่อผ่านทางคู่สายเหมือนกับโทรศัพท์ธรรมดา การติดต่อของโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นแบบฟูลดูเพล็กซ์ (Full Duplex) โดยในแต่ละการติดต่อ จะใช้ช่องสัญญาณ

จำนวน 2 ช่อง นั่นคือ จะใช้ 2 ความถี่ โดยความถี่หนึ่งจะใช้ในการส่งไปยังสถานีฐาน และอีกความถี่หนึ่งจะใช้ในการรับสัญญาณที่ส่งมาจากสถานีฐาน และมีกำลังส่งที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งมีตั้งแต่ 0.6 - 10 วัตต์ ตามขนาดของการใช้งาน เช่น เครื่องโทรศัพท์แบบติดตั้งในรถยนต์ แบบมือถือ หรือแบบมือถือซึ่งมีขนาดเล็กมาก เป็นต้น การส่งสัญญาณจะมีการส่งทั้งสัญญาณเสียงพูดและสัญญาณข้อมูล โดยสัญญาณเสียงจะถูกมอดูเลทในแบบ FM (Frequency Modulation) ส่วนสัญญาณข้อมูลจะมีการมอดูเลทในแบบ FSK (Frequency Shift Keying) สัญญาณข้อมูลนี้จะถูกส่งไปให้ไมโครโปรเซสเซอร์ เพื่อทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ เช่น ควบคุมการร้องขอการเรียก (Origination Request) การบันทึกพื้นที่บริการที่เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ใช้อยู่ ใช้ในการกำหนดช่องสัญญาณที่ใช้ในการติดต่อข้อความคำสั่งในการแฮนด์ออฟที่ส่งมาจากชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ฯลฯ

2.15 เครื่องทวนสัญญาณ (Repeater)

ในการสื่อสาร โดยใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่นั้น จะมีบริเวณที่สัญญาณโทรศัพท์ มีระดับต่ำซึ่งสัญญาณอาจจะแรงไม่พอ ที่จะทำการสื่อสารต่อไปได้ โดยถ้าบริเวณนั้น เป็นพื้นที่กว้าง ผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ ก็อาจจะทำการติดตั้งสถานีฐานเพิ่ม แต่ในกรณีที่มีบริเวณที่ระดับสัญญาณโทรศัพท์มีค่าต่ำนั้น มีพื้นที่แคบๆ ที่เกิดจากการบดบังของสิ่งก่อสร้างที่อยู่อย่างแออัด หรือ โครงสร้างของสิ่งก่อสร้างนั้นมีความแน่นหนาแน่นมาก เช่น ลานจอดรถ ซอกตึก อุโมงค์ สัญญาณที่มาจากสถานีฐานนั้น ก็อาจจะไม่สามารถทะลุผ่านไปได้ หรือสัญญาณที่ผ่านไปได้ มีระดับต่ำกว่าที่โทรศัพท์เคลื่อนที่จะสามารถสื่อสารได้ ซึ่งวิธีการแก้ไขที่เหมาะสม ก็คือ การติดตั้งเครื่องทวนสัญญาณโดย เครื่องทวนสัญญาณ จะทำการรับสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่มีความแรงของสัญญาณต่ำ ในบริเวณที่กล่าวข้างต้น หรือรับสัญญาณมาจากบริเวณใกล้เคียง ในกรณีที่บริเวณที่กล่าวข้างต้น ไม่มีสัญญาณเลย มาทำการขยายให้ได้ระดับของสัญญาณที่สามารถทำการสื่อสารได้ แล้วส่งออกไปบริเวณที่ต้องการ

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการการทำงานของเครื่องทวนสัญญาณ ที่ใช้ในการสื่อสารของโทรศัพท์เคลื่อนที่ในระบบ 1800 MHz ซึ่งจะทำงานย่านความถี่ 1.7 - 1.9GHz โดยการสื่อสารจะต้องเป็นระบบฟูลดูเพล็กซ์ คือ จากโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังสถานีฐาน ความถี่ที่ใช้คือ 1.710 - 1.785 GHz และจากสถานีฐาน มายังโทรศัพท์เคลื่อนที่ ความถี่ที่ใช้คือ 1.810 - 1.885 GHz

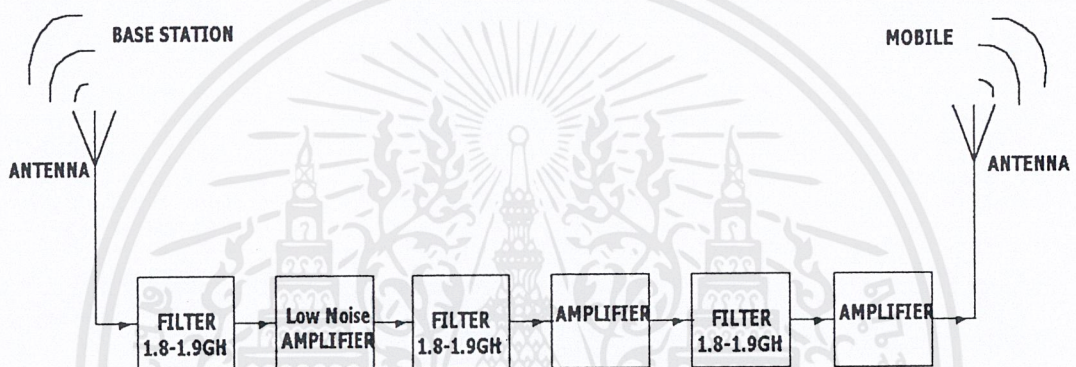
2.15.1 หลักการทำงานของเครื่องทวนสัญญาณ (Repeater)

การทำงานของเครื่องทวนสัญญาณที่เป็นแบบฟูลดูเพล็กซ์ จะประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกัน คือ

1) จากสถานีฐานไปยังโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Base Station to Mobile Telephone) : ภาครับ

โดยการทำงานจะเริ่มจาก การที่สายอากาศรับสัญญาณในช่วงความถี่ 1.7 - 1.9 GHz (ซึ่งในโครงงานนี้ สายอากาศที่ใช้รับสัญญาณ ก็คือ สายอากาศแบบสองทิศทาง รับสัญญาณเข้ามา จากนั้น จะทำการกรองสัญญาณ ด้วยตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่ผ่าน (Band pass Filter) ซึ่งช่วงความถี่ของสัญญาณที่ผ่านเข้ามา ก็คือช่วง 1.8 - 1.9 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่สถานีฐาน ใช้ส่งมายังโทรศัพท์เคลื่อนที่

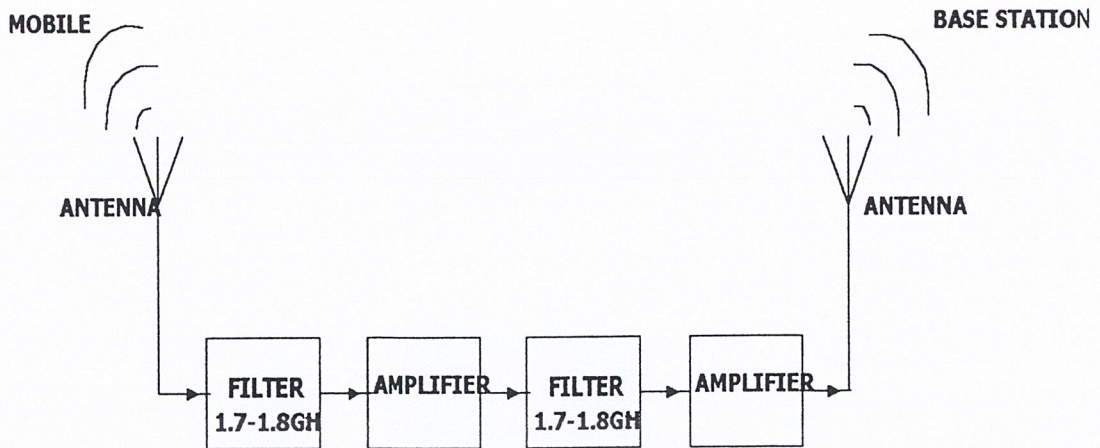
ที่ โดยสัญญาณที่เข้ามานั้นมันจะมีความแรงของสัญญาณต่ำและมีสัญญาณรบกวนค่อนข้างมาก เนื่องจากเดินทางมาจากสถานีฐาน ดังนั้น จะทำการขยายสัญญาณด้วย ตัวขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ (Low Noise Amplifier) ต่อมาก็จะทำการกรองสัญญาณ ที่มีช่วงความถี่ผ่านเช่นเดิมอีกครั้ง เพราะว่าในทางปฏิบัติ ตัวกรองสัญญาณไม่สามารถที่จะกรองเอาช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการออกไปได้หมด ทำให้สัญญาณที่ไม่ต้องการ รวมไปถึง สัญญาณรบกวนถูกขยายไปด้วยในตัวขยายก่อนหน้านี้ จากนั้น ก็จะทำการขยายสัญญาณให้มีความแรงของสัญญาณเพิ่มขึ้น ด้วยตัวขยายสัญญาณไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ระดับสัญญาณที่ต้องการ โดยระหว่างตัวขยายสัญญาณ ก็อาจจะมีตัวกรองสัญญาณมาคั่น เพื่อกรองเอาสัญญาณที่ไม่ต้องการออกไป



รูปที่ 2.22 แสดงโครงสร้างโดยทั่วไปของเครื่องทวนสัญญาณด้านสถานีฐานไปยังโทรศัพท์เคลื่อนที่

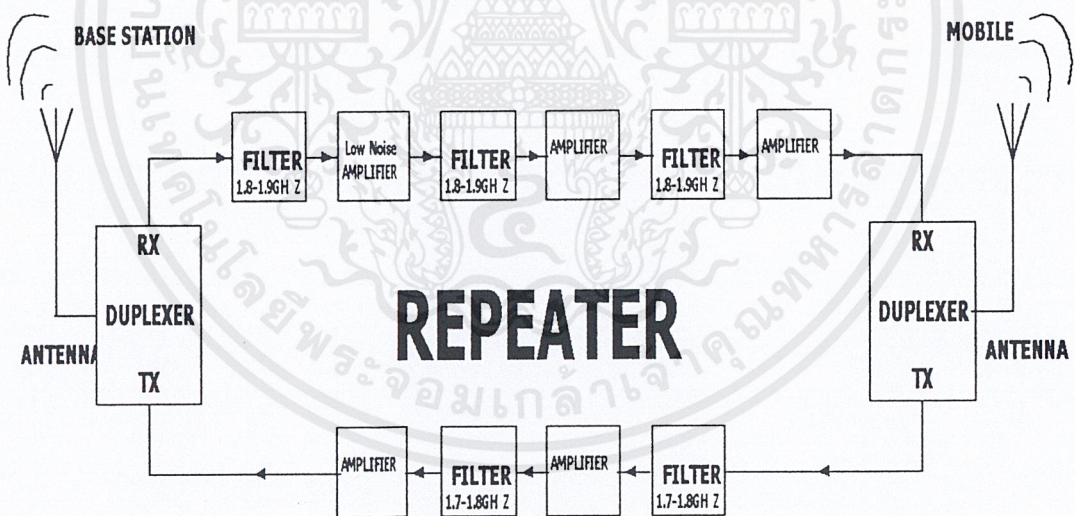
2) จากโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังสถานีฐาน (Mobile Telephone to Base Station) : ภาคตั้ง

วงจรการทำงาน ของเครื่องทวนสัญญาณในส่วนนี้ ก็จะมีโครงสร้างเช่นเดียวกับ ในส่วนแรก เพียงแต่ตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่ผ่าน (Band pass Filter) จะมีช่วงความถี่ผ่านอยู่ที่ 1.7 – 1.8 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ ใช้ส่งสัญญาณไปยังสถานีฐาน และไม่จำเป็นต้องมีตัวขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ เพราะตัวทวนสัญญาณนั้น มักจะติดตั้งอยู่ใกล้กับบริเวณที่ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ ทำให้สัญญาณที่เข้ามายังตัวทวนสัญญาณนั้น ค่อนข้างที่จะมีความแรงของสัญญาณสูง และมีสัญญาณรบกวนต่ำอยู่แล้ว



รูปที่ 2.23 แสดงโครงสร้างโดยทั่วไปของเครื่องทวนสัญญาณด้านโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังสถานีฐาน

จากที่กล่าวข้างต้น เครื่องทวนสัญญาณที่ใช้เป็นแบบฟูลดูเพล็กซ์ เพราะฉะนั้น เราจะนำส่วนประกอบของเครื่องทวนสัญญาณทั้งสองด้าน มาประกอบรวมกัน โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ดูเพล็กซ์เซอร์ (Duplexer) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณจากตัวทวนสัญญาณด้านหนึ่ง เพื่อส่งไปยังสายอากาศและรับสัญญาณจากสายอากาศเพื่อส่งต่อไปยังอีกด้านหนึ่ง



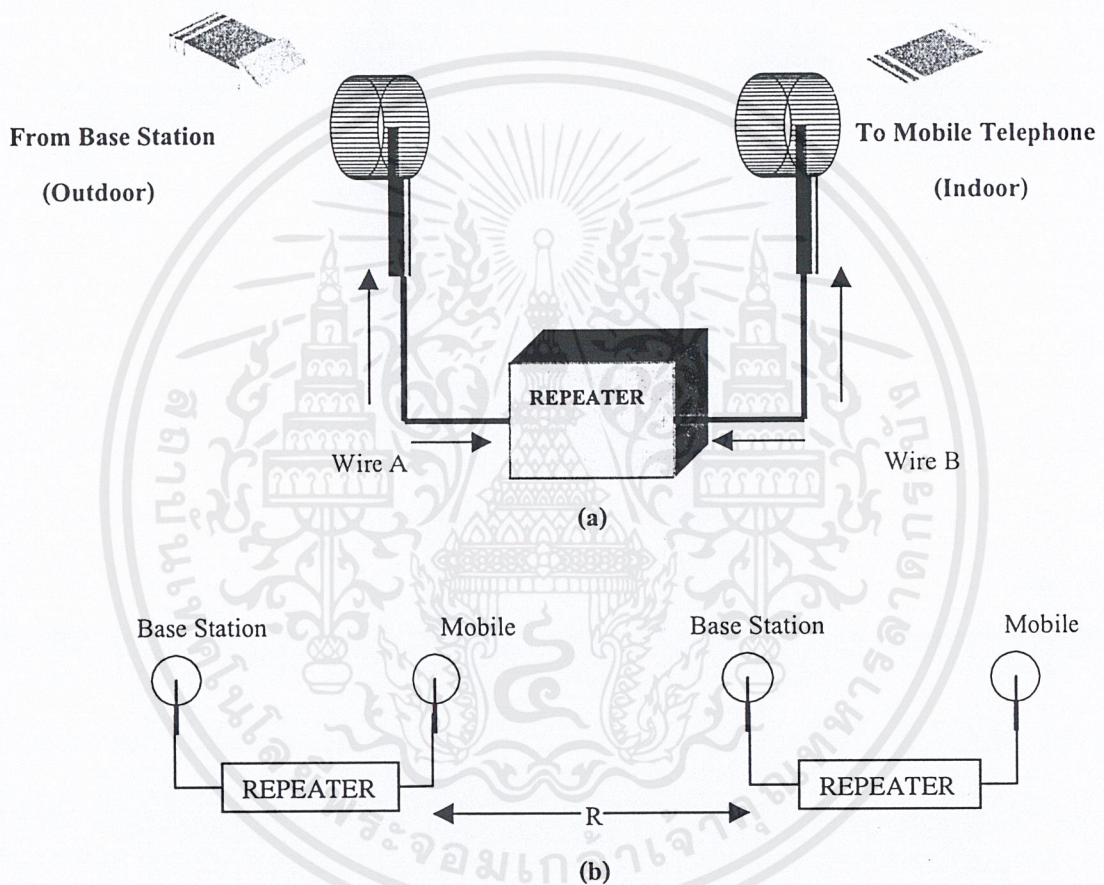
รูปที่ 2.24 แสดงโครงสร้างโดยทั่วไปของเครื่องทวนสัญญาณทั้งภาครับและส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15.2 การหาระยะห่างของเครื่องทวนสัญญาณแต่ละตัว

การหาระยะห่างของเครื่องทวนสัญญาณแต่ละตัวนั้น จำเป็นที่จะต้องทราบ ระยะห่างที่ไกลที่สุดที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่สามารถรับและติดต่อสื่อสารได้ จากเครื่องทวนสัญญาณ ซึ่งสามารถคำนวณโดยใช้สมการของฟรีส สมการที่ (2.64) ดังนี้ คือ

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4 \pi R} \right)^2 G_t G_r$$



รูปที่ 2.25 แสดงภาพอธิบายประกอบการหาระยะห่างของเครื่องทวนสัญญาณแต่ละตัว

เมื่อ $\lambda = 3 \cdot 10^8 / 1.8 \text{ GHz}$

R = ระยะที่ห่างจากสายอากาศมากที่สุดที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่สามารถสื่อสารได้ ซึ่งก็คือ ระยะห่างของสายอากาศของเครื่องทวนสัญญาณแต่ละตัว

G_t = อัตราการขยายรวมของเครื่องทวนสัญญาณ

G_r = อัตราการขยายของสายอากาศของโทรศัพท์เคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_t (dBm) = กำลังงานทั้งหมดที่ส่งไปที่สายอากาศส่งของเครื่องทวนสัญญาณแต่ละเครื่อง ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2.67) คือ

$$P_t = P_{r_a} + 2G_{Ant} + \text{LOSS wire (a)} + G_R + \text{LOSS wire (b)} \quad (2.67)$$

โดยที่ P_{r_a} (dBm) = กำลังที่รับได้ที่สายอากาศด้านที่รับสัญญาณจากสถานีฐาน

G_{Ant} (dB) = อัตราขยายของสายอากาศรับ

$\text{Loss}_{\text{wire(a)}}$ (dB) = การสูญเสียในสายนำสัญญาณด้าน a

$\text{Loss}_{\text{wire(b)}}$ (dB) = การสูญเสียในสายนำสัญญาณด้าน b

G_R (dB) = อัตราขยายของเครื่องทวนสัญญาณในด้านสถานีฐานไปยังโทรศัพท์เคลื่อนที่



บทที่ 3

การออกแบบและการคำนวณ

จากทฤษฎีและหลักการที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 จะถูกนำมาใช้ในการออกแบบสายอากาศ และ สถานีทวนสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งในโครงการนี้ จะทำการออกแบบสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ 2 ทิศทาง โดยใช้โพรบเป็นตัวกระตุ้นวงแหวนรูปวงกลม เพื่อใช้สำหรับติดตั้งที่สถานีทวนสัญญาณของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ในบริเวณที่อับสัญญาณ โดยขั้นตอนการออกแบบจะถูกกล่าวต่อไปจากนี้

3.1 ข้อกำหนดในการออกแบบสายอากาศ

โครงการนี้ จะทำการออกแบบสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ 2 ทิศทาง ซึ่งใช้โพรบตัวนำเป็นตัวกระตุ้นวงแหวนรูปวงกลม มีความถี่ใช้งานอยู่ในย่านความถี่ 1.8 GHz

3.2 การออกแบบสายอากาศ

สายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ 2 ทิศทาง ซึ่งใช้โพรบตัวนำกระตุ้นวงแหวนรูปวงกลม ในโครงการนี้ โพรบตัวนำและวงแหวน จะทำมาจากทองเหลือง เนื่องจากมีสภาพนำไฟฟ้าที่ดี และมีความแข็งแรง ทำให้ง่ายต่อการเชื่อม

ขั้นตอนแรกของการออกแบบสายอากาศ ที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ 2 ทิศทาง โดยใช้โพรบตัวนำกระตุ้นวงแหวนรูปวงกลม คือ การกำหนดพารามิเตอร์ของสายอากาศในที่นี่จะมีพารามิเตอร์ 2 ตัวที่จะถูกกำหนด คือ รัศมีของวงแหวน (a) และ ความกว้างของวงแหวน (d)

จากทฤษฎีในบทที่ 2 หัวข้อ 2.13.1 ค่ารัศมีของวงแหวนที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้เกิดโหมดโดมิแนนท์เพียงโหมดเดียว ค่ารัศมีของวงแหวนจะต้องมีค่าอยู่ในช่วง $0.293\lambda < a < 0.486\lambda$

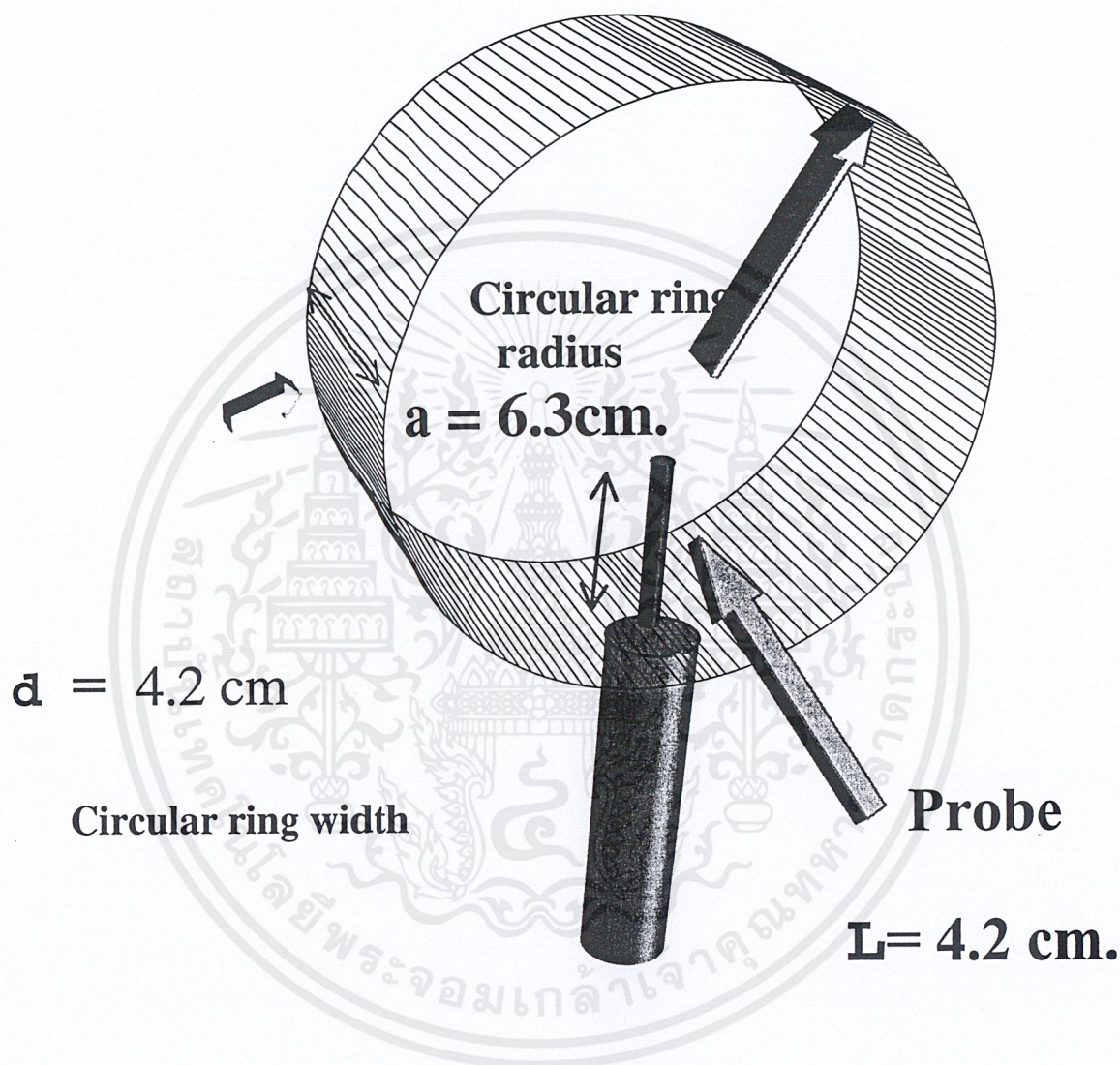
ในโครงการนี้จะเลือกรัศมีของวงแหวน a มีค่าเท่ากับ 0.32λ เมื่อ $\lambda = 3 \times 10^8 / f$ จะได้ λ มีค่าเท่ากับ 0.167 m. ดังนั้น รัศมีของวงแหวนที่เลือกได้ จะมีค่าเท่ากับ 5.3 cm.

สำหรับความกว้างของวงแหวน ซึ่งมีค่าที่เหมาะสมในการออกแบบ ก็จะต้องเป็นค่าทำให้เกิดโหมดอันดับสูงน้อยที่สุด ซึ่งหมายถึงว่า จะต้องทำให้เกิดโหมดโดมิแนนท์เพียงโหมดเดียวเช่นกัน การเลือกค่าความกว้างของวงแหวน ที่เหมาะสม สามารถทำได้โดย ใช้กราฟแสดงคุณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งใช้ในการออกแบบสายอากาศ จากรูปที่ 2.17 และ 2.18 ของบทที่ 2 หัวข้อ 2.13.1

จากกราฟคุณลักษณะของสายอากาศ (เมื่อค่า a เท่ากับ 0.32λ) จะทำการเลือกค่าความกว้างของวงแหวน d ซึ่งในโครงการนี้ก็จะเลือกค่า d เท่ากับ 0.25λ ซึ่งจะทำให้ค่าการชี้ทิศทางสูงสุด มีค่าประมาณ 7 dB ดังนั้น ความกว้างของวงแหวนที่เลือกได้ จะมีค่าเท่ากับ 4.2 cm.

ความยาวของโพรบตัวนำนั้น ในโครงการนี้ จะให้มีค่า $l = 0.25\lambda$ เนื่องจากที่ความยาวค่านี้ สายอากาศจะเกิดเรโซแนนซ์ และมีค่า SWR ต่ำ ดังนั้น ความยาวของโพรบตัวนำ จะมีค่าเท่ากับ 4.2 cm.

ดังนั้น จะได้สายอากาศ ที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ 2 ทิศทางที่ออกแบบได้ มีรัศมีของวงแหวนเท่ากับ 6.3cm. ความกว้างของวงแหวนเท่ากับ 4.2 cm และมีความยาวของโพรบตัวนำเท่ากับ 4.2 cm. ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงสายอากาศที่มีลำคลื่น 2 ทิศทางซึ่งใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนที่ออกแบบได้

3.3 การคำนวณคุณสมบัติของสายอากาศที่ออกแบบได้

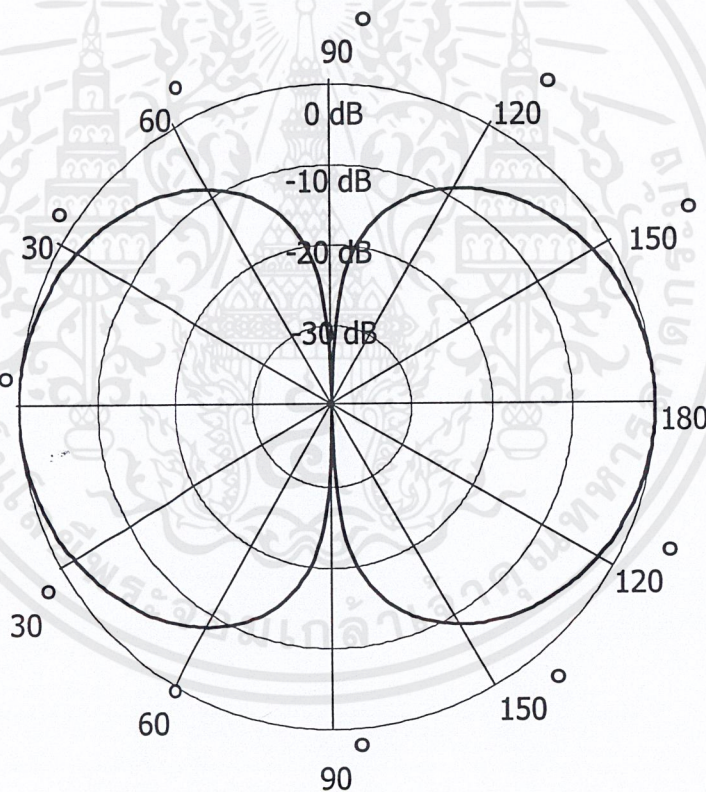
เมื่อทำการออกแบบสายอากาศเรียบร้อยแล้ว ก็จะนำสายอากาศที่ออกแบบได้ มาทำการคำนวณ และวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ เพื่อนำผลที่ได้จากการคำนวณนี้ ไปเปรียบเทียบกับผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองจริง ซึ่งการคำนวณและวิเคราะห์ เพื่อหาคุณสมบัติของสายอากาศนั้น จะใช้โปรแกรม Mathcad มาช่วยในการคำนวณและวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศ ที่จะทำการคำนวณและวิเคราะห์ ในโครงการนี้ คือ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ , กำลังงานการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ และค่าการขยายของสายอากาศ

3.3.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีลำคลื่น 2 ทิศทางที่ออกแบบได้

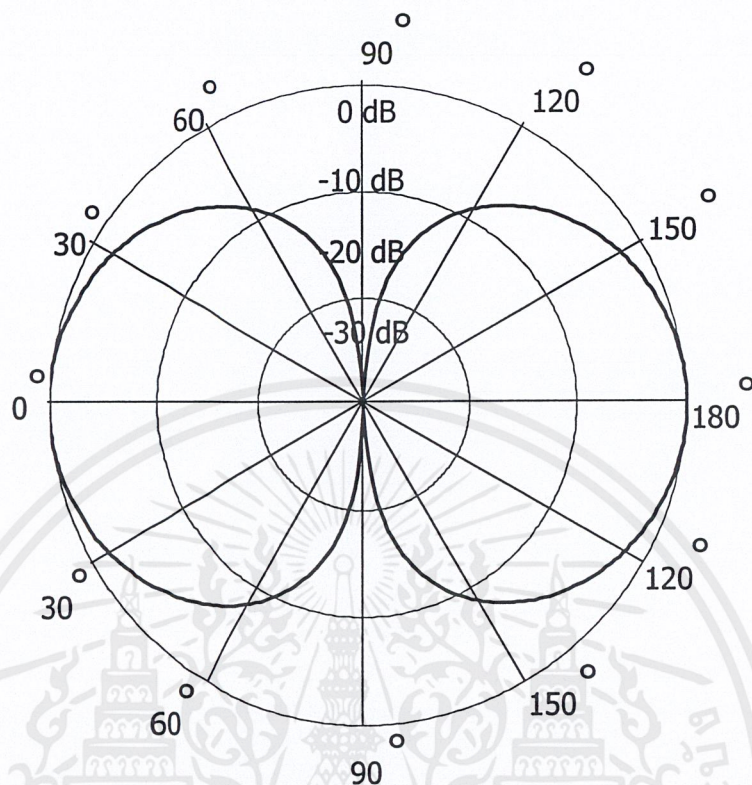
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีลำคลื่น 2 ทิศทาง ซึ่งใช้โพรบกระตุ้นวงแหวน รูปวงกลมที่ออกแบบได้ และใช้งานที่ความถี่ 1.8 GHz เมื่อมีการคำนวณและวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Mathcad จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.2 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีลำคลื่น 2 ทิศทางที่ออกแบบได้ใน

ระนาบ E-Plane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีลำคลื่น 2 ทิศทางที่ออกแบบได้ในระนาบ H-Plane

3.3.2 กำลังงานการแผ่กระจายของคลื่นของสายอากาศที่มีลำคลื่น 2 ทิศทางที่ออกแบบได้

ค่ากำลังงานการแผ่กระจายของคลื่น สามารถคำนวณได้ จากสมการกำลังงานการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในบทที่ 2 สมการที่(2.4) ซึ่งจากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Mathcad ทำให้ได้ค่ากำลังงานการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ออกแบบได้ดังนี้

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

จะได้ กำลังงานการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ มีค่าเท่ากับ 2.047×10^{-10} Watt.

3.3.3 ค่าการขยายของสายอากาศที่มีลำคลื่น 2 ทิศทางที่ออกแบบได้

ค่าการขยายของสายอากาศ ที่มีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเป็นแบบ 2 ทิศทาง ซึ่งใช้โพรบกระสุนวงแหวนรูปวงกลม ที่ได้จากการออกแบบ สามารถหาได้โดยใช้ กราฟคุณลักษณะซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการชี้ทิศทางสูงสุดกับความกว้างของวงแหวน (d) ที่ใช้ทำสายอากาศ ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.13.1 รูปที่2.18 และใช้สมการค่าการขยายของสายอากาศในบทที่ 2มาช่วยในการคำนวณทำให้ได้ค่าการขยายดังนี้

ค่าการชี้ทิศทางของสายอากาศ ที่ได้จากกราฟคุณลักษณะ รูปที่ 2.18 มีค่าเท่ากับ 7 dB

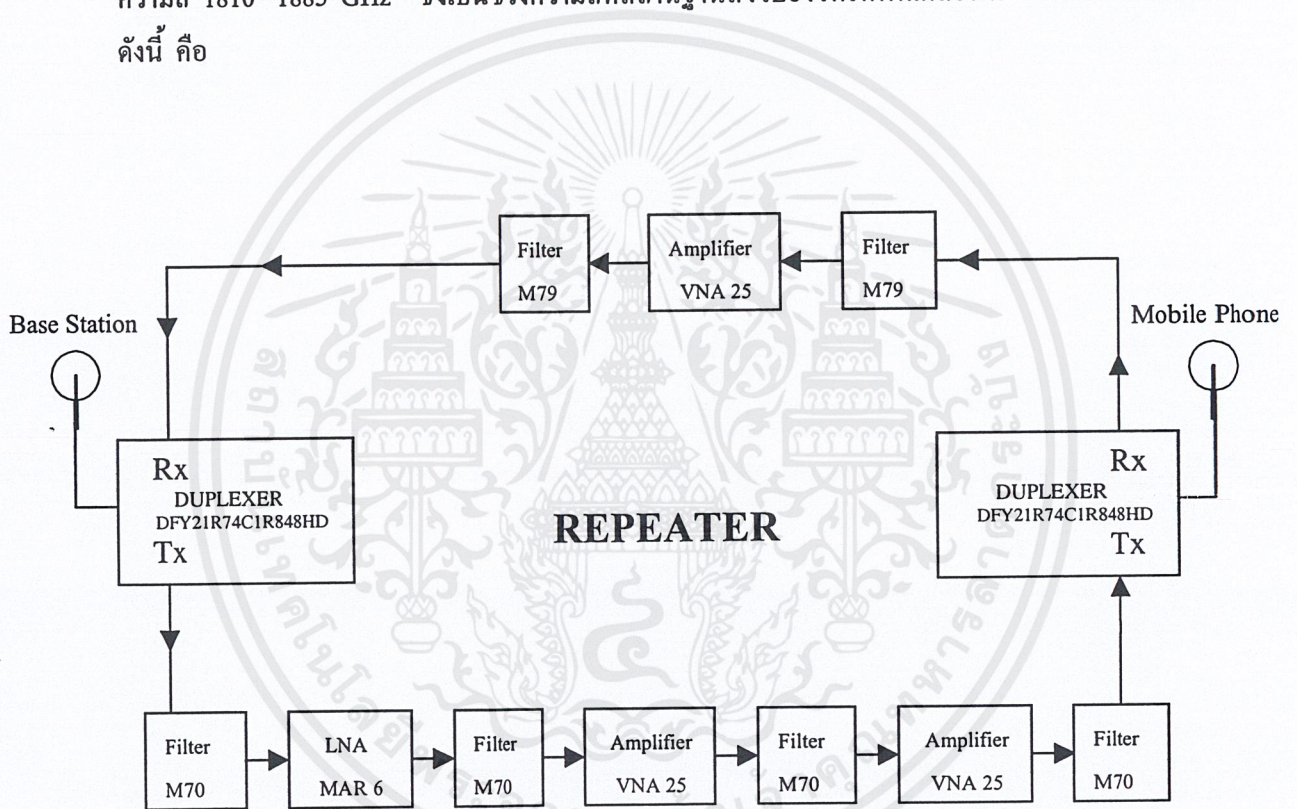
$$G_o = e_i D_o$$

เมื่อ ไม่มีการสูญเสีย (ในอุดมคติสายอากาศเป็นแบบไอโซโทรปิก) : $e_i = 1$

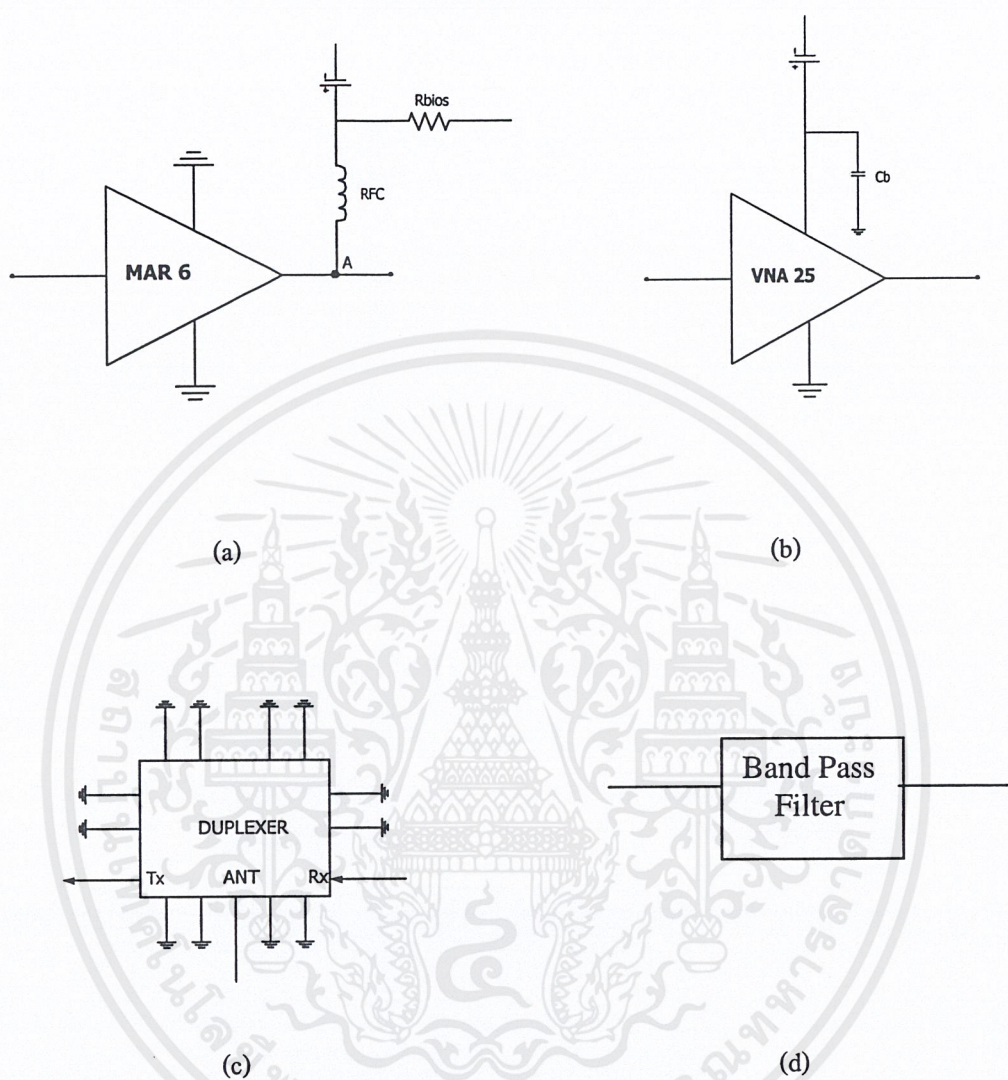
ดังนั้น จะได้ค่าการขยายของสายอากาศ มีค่าเท่ากับ 7 dB

3.4 การออกแบบสถานีทวนสัญญาณ

เครื่องทวนสัญญาณที่โครงงานนี้สนใจ เป็นเครื่องทวนสัญญาณที่เป็นแบบพลูตดูเพล็กซ์ ที่ทำงานที่ช่วงความถี่ 1710 -1785 MGz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ ใช้ส่งไปยังสถานีฐาน และช่วงความถี่ 1810 - 1885 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่สถานีฐานส่งไปยังโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยมีโครงสร้างดังนี้ คือ



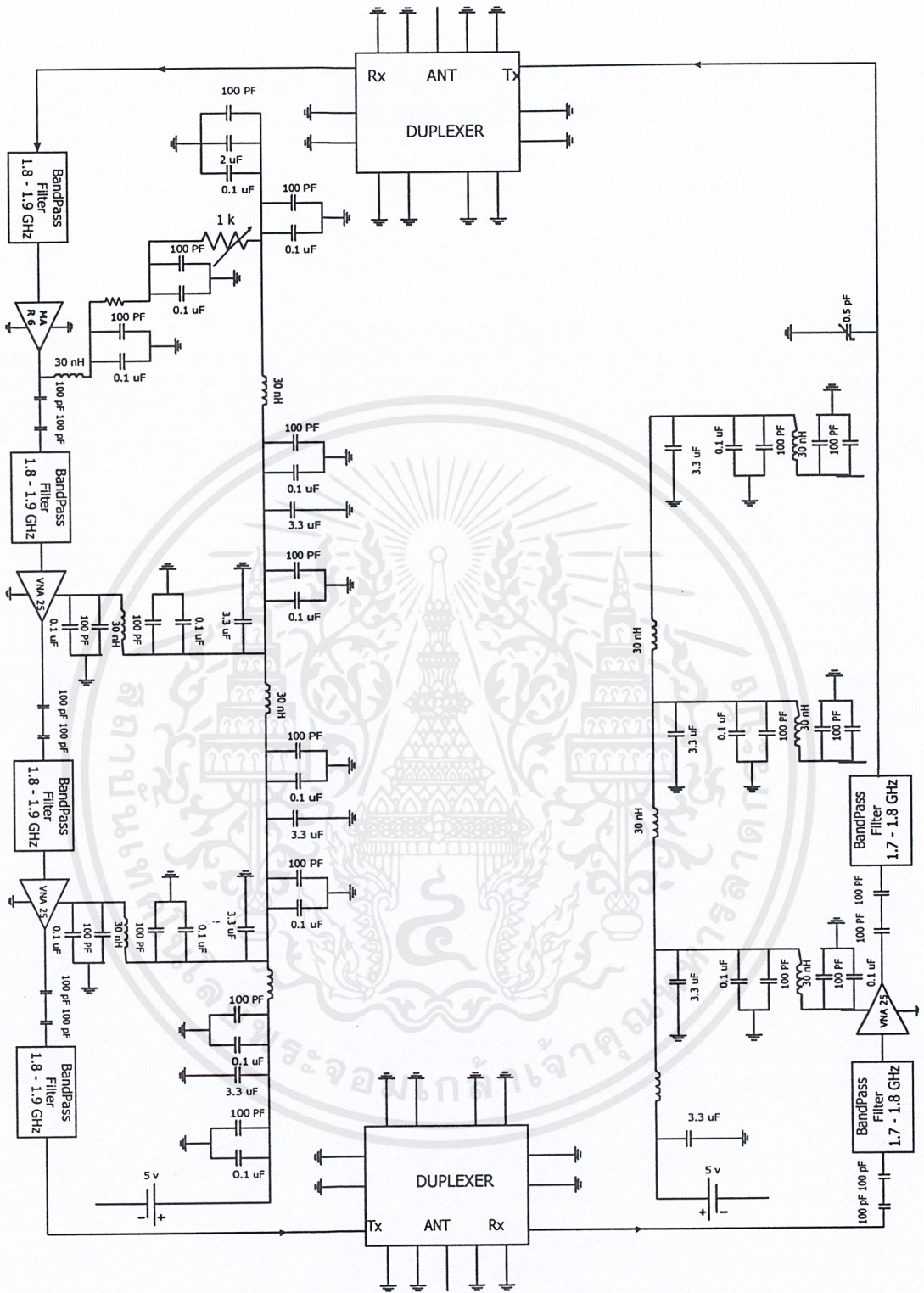
รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของสายอากาศที่จะทำการออกแบบ



รูปที่ 3.5 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบระบบทวนสัญญาณ , a) วงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ , b) วงจรขยาย , c) ดูเพล็กซ์เซอร์ , d) วงจรกรองความถี่ผ่าน

ซึ่งคุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์ต่างๆ แสดงอยู่ในภาคผนวก

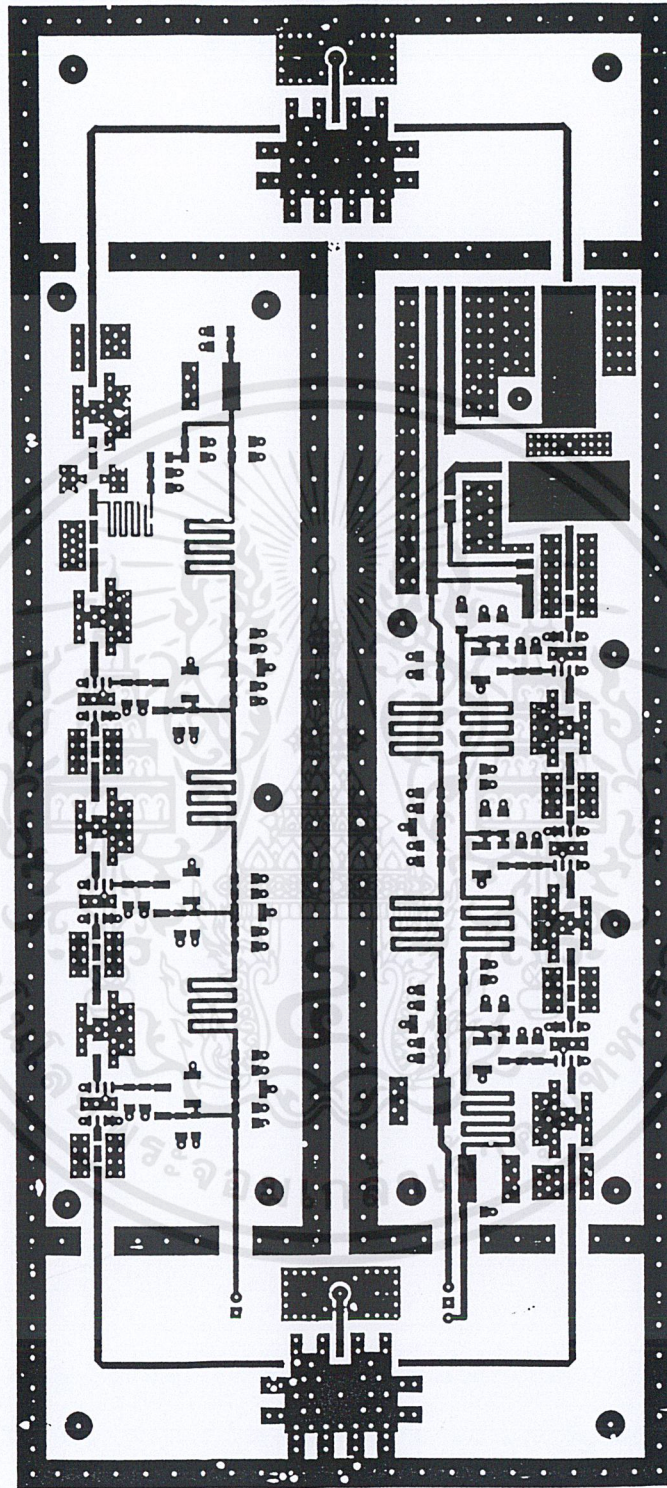
จากนั้น นำอุปกรณ์ต่างๆ มาทำการออกแบบจะได้วงจรของระบบทวนสัญญาณ แสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงวงจรของระบบทวนสัญญาณที่ออกแบบได้

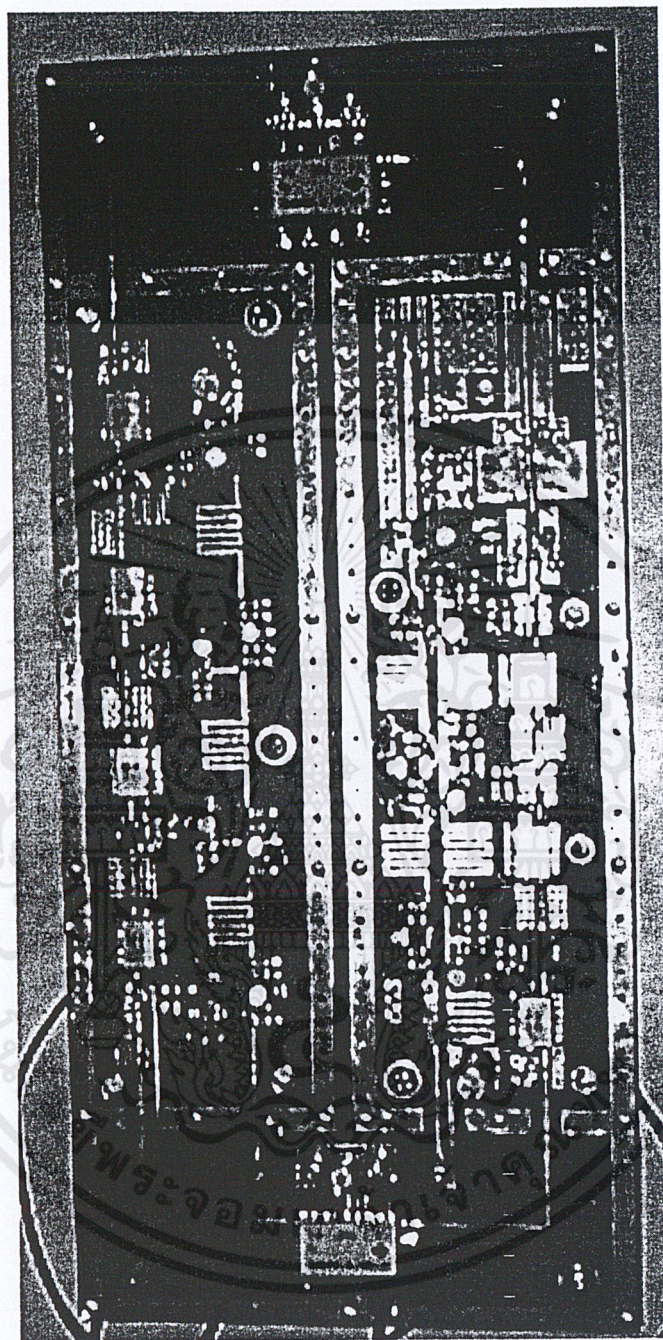
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวงจรที่ออกแบบข้างต้น สามารถที่จะนำไปออกแบบลายของแผ่นวงจรพิมพ์ได้ดังนี้ คือ



รูปที่ 3.7 แสดงลายวงจรพิมพ์ของระบบทวนสัญญาณที่ออกแบบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงรูปถ่ายของแผ่นวงจรพิมพ์ที่ทำการต่อวงจรเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรที่ออกแบบได้นั้น เราสามารถที่จะหาอัตราขยายของเครื่องทวนสัญญาณในแต่ละส่วนได้ดังนี้ คือ

1. อัตราขยายของด้านสถานีฐาน ไปยังโทรศัพท์เคลื่อนที่

จะเห็นว่าในค่านี้นี้มีวงจรขยายอยู่ทั้งหมด 4 วงจรด้วยกันคือ วงจรขยายที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ และ วงจรขยาย 2 วงจร ซึ่งสามารถคำนวณอัตราขยายรวมของเครื่องทวนสัญญาณได้ดังนี้

อัตราขยายที่เครื่องทวนสัญญาณ = อัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ + 2 * อัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณ(VNA25)+การลดทอนในคูเพิลลิ่งเซอร์ + 4 * การลดทอนในวงจรกรองช่วงความถี่ผ่าน ---- (dB)

$$= 11 + 2(16) - 3 - 4(3) \text{ ---- (dB)}$$

$$= 28 \text{ (dB)}$$

อัตราขยายรวมของเครื่องทวนสัญญาณ = อัตราขยายที่เครื่องทวนสัญญาณ + 2 * อัตราขยายในสายอากาศ + การสูญเสียในสายนำสัญญาณ

$$= 28 + 2*(4) - (0.375 \text{ dB/m})22 \text{ m}$$

$$= 27.75 \text{ (dB)}$$

2. อัตราขยายของด้าน โทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังสถานีฐาน

จะเห็นว่า ในค่านี้นี้มีวงจรขยายอยู่เพียงวงจรเดียว เนื่องจาก โดยทั่วไปเครื่องทวนสัญญาณมักจะติดตั้งอยู่ใกล้ๆ โทรศัพท์เคลื่อนที่ ดังนั้น สัญญาณของเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่เข้ามายังเครื่องทวนสัญญาณจะมีค่าแรงแล้ว จึงไม่จำเป็นที่ จะต้องมีอัตราขยายสูงในค่านี้นี้ ซึ่งอัตราขยายที่ออกแบบในค่านี้นี้สามารถที่จะ คำนวณได้ดังนี้

อัตราขยายที่เครื่องทวนสัญญาณ = อัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณ(VNA25) + การลดทอนในคูเพิลลิ่งเซอร์ + 2 * การลดทอนใน วงจรกรองช่วงความถี่ผ่าน ---- (dB)

$$= 16 - 3 - 2(3) \text{ ---- (dB)}$$

$$= 7 \text{ (dB)}$$

อัตราขยายรวมของเครื่องทวนสัญญาณ = อัตราขยายที่เครื่องทวนสัญญาณ + 2*อัตราขยายในสายอากาศ + การสูญเสียในสายนำสัญญาณ

$$= 7 + (2*4) - (0.375 \text{ dB/m}) * 22 \text{ เมตร}$$

$$= 6.75 \text{ (dB)}$$

หมายเหตุ : ค่าอัตราขยายของวงจรขยายที่นำมาคำนวณนั้น เป็นอัตราสูงสุดที่วงจรขยายสามารถที่จะให้ ได้ โดยค่าต่างๆเหล่านี้แสดงอยู่ในภาคผนวก

จากข้อมูลข้างต้นทำให้สามารถที่จะหาระยะส่งที่ไกลที่สุดของเครื่องทวนสัญญาณ ได้ดังนี้

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r$$

$$\begin{aligned} P_r \text{ (dBm)} &= \text{กำลังที่ต่ำที่สุดที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่สามารถที่จะรับและติดต่อสื่อสารได้} \\ &= \text{กำหนดให้เท่ากับ } -100 \text{ dBm} = 10^{-13} \text{ W} \end{aligned}$$

$$P_t = P_{r_a} + G_{\text{amp}} + 2G_{\text{ANT}} + \text{Loss}_{\text{in wire}}$$

$$P_{r_a} = \text{ระดับสัญญาณต่ำสุดที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่สามารถที่จะติดต่อสื่อสารได้}$$

กำหนดให้ $P_{r_a} = -80 \text{ dBm}$, $G_{\text{amp}} = 28 \text{ dB}$, $G_{\text{ANT}} = 4 \text{ dB}$, $\text{Loss}_{\text{in wire}} = -8.25 \text{ dB}$

ดังนั้น $P_t = -52.25 \text{ dBm} = 10^{-8.225} \text{ W}$

นำไปแทนค่าจะได้

$$\begin{aligned} \frac{10^{-13}}{10^{-8.225}} &= \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 10^{2.775} \\ R &= (0.166/4\pi) * 10^{3.775} = 78.686 \text{ m.} \end{aligned}$$

จะได้ระยะห่างของเครื่องทวนสัญญาณแต่ละตัว มีค่าประมาณ 78.7 m.

บทที่ 4

วิธีการวัด และ ผลการทดลอง

ในการที่เราจะพิจารณาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดต่างๆ นั้น เราจำเป็นต้องรู้ค่าพารามิเตอร์พื้นฐาน ดังต่อไปนี้

1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เป็นค่าที่แสดงว่าสายอากาศนั้น มีการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางต่างๆ อย่างไร (แต่ไม่ได้บอกว่าจะส่ง หรือ รับแรงเพียงใด)

2 โพรไฟล์เรซันของสายอากาศ เป็นค่าที่แสดงว่าคลื่นที่สายอากาศส่งออกไปนั้น มีการเปลี่ยนแปลงทิศของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นอย่างไร

3 อินพุทอิมพีแดนซ์ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่สายอากาศนั้นต้องการ ซึ่งจะตรงเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง หรืออุปกรณ์ที่จะนำมาต่อกับสายอากาศ เพื่อให้ เกิดการถ่ายทอดพลังงานอย่างเต็มที่

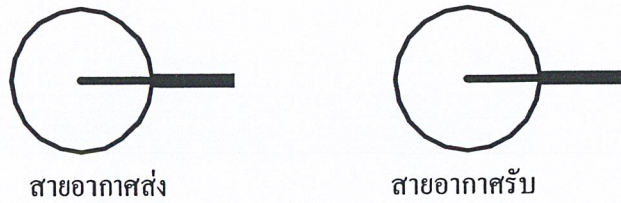
4 ค่าการชี้ทิศทาง เป็นค่าที่แสดงว่า สายอากาศมีการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางต่างๆแรงเพียงใด ซึ่งสายอากาศที่เราจะพิจารณา ในที่นี้คือ สายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 ทิศทาง ซึ่งมีการกระตุ้นด้วยโพรบ 1 จุดโดยใช้เส้นลวด ซึ่งจะทำได้เหมือนสายอากาศโมนโพล โดยมีวงแหวนทรงกลมทำตัวเป็นกราวด์ เพราะฉะนั้น สายอากาศแบบนี้จะมีโพรไฟล์เรซันเป็นแบบเชิงเส้น เช่นเดียวกับสายอากาศโมนโพล โดยค่าที่เหลืออีกสามอย่างข้างต้นนั้น จะทำการวัดต่อไป ดังนี้

4.1 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern)

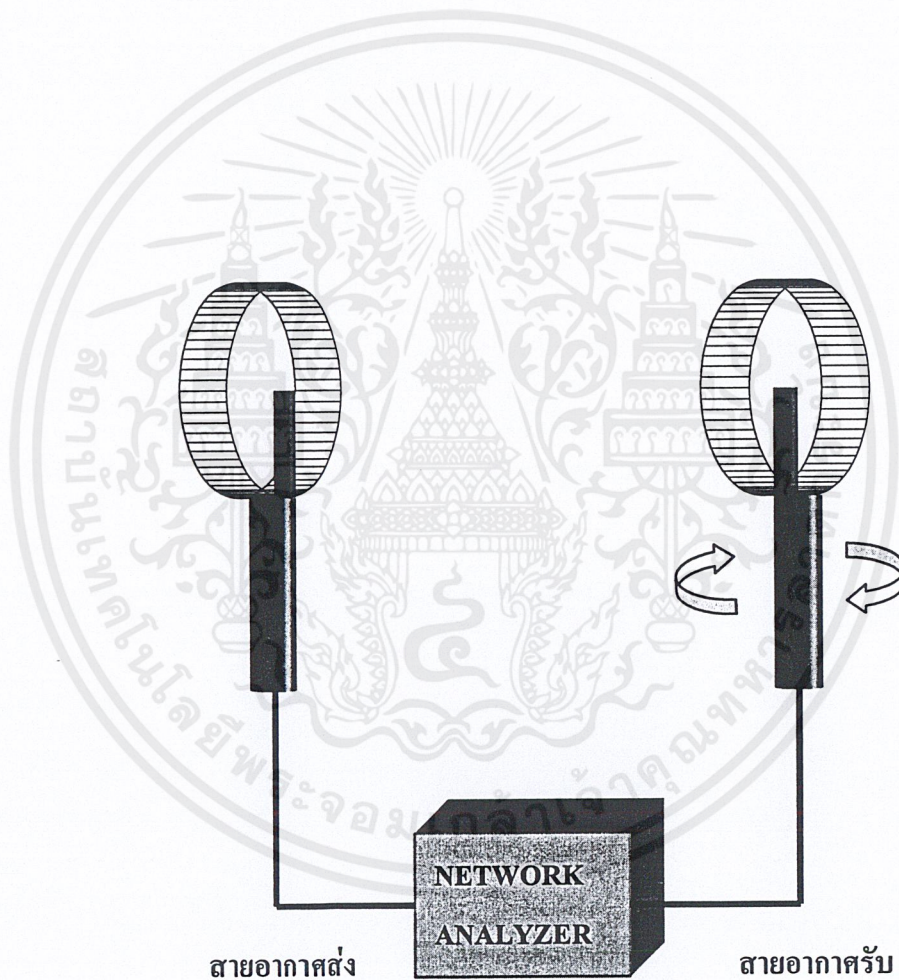
การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นทำได้ โดยใช้สมการการส่งคลื่นของฟรีสในการวิเคราะห์ ซึ่งใช้สายอากาศสองตัวโดยตัวหนึ่ง จะเป็นตัวส่งซึ่งจะอยู่กับที่ และอีกตัวจะเป็นตัวรับซึ่งจะหมุนรอบตัวเอง โดยในการวัดจะแบ่งเป็นการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane และ H-plane โดยในระนาบ E-plane จะมีการวางสายอากาศให้มี โพรไฟล์เรซันที่ตรงกันในแนวตั้ง ส่วนในระนาบ H-plane จะมีการวางสายอากาศให้มี โพรไฟล์เรซันที่ตรงกันในแนวนอนเพื่อวัดแบบรูปการแพร่กระจาย ในทิศของสนามแม่เหล็ก โดยการวัดจะมีการวางสายอากาศให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศ ทั้งสอง ต้องมากกว่าระยะ Far-field ดังรูปที่ 4.1(ค)



รูปที่ 4.1 (a) แสดงการวางสายอากาศในระนาบ E-plane



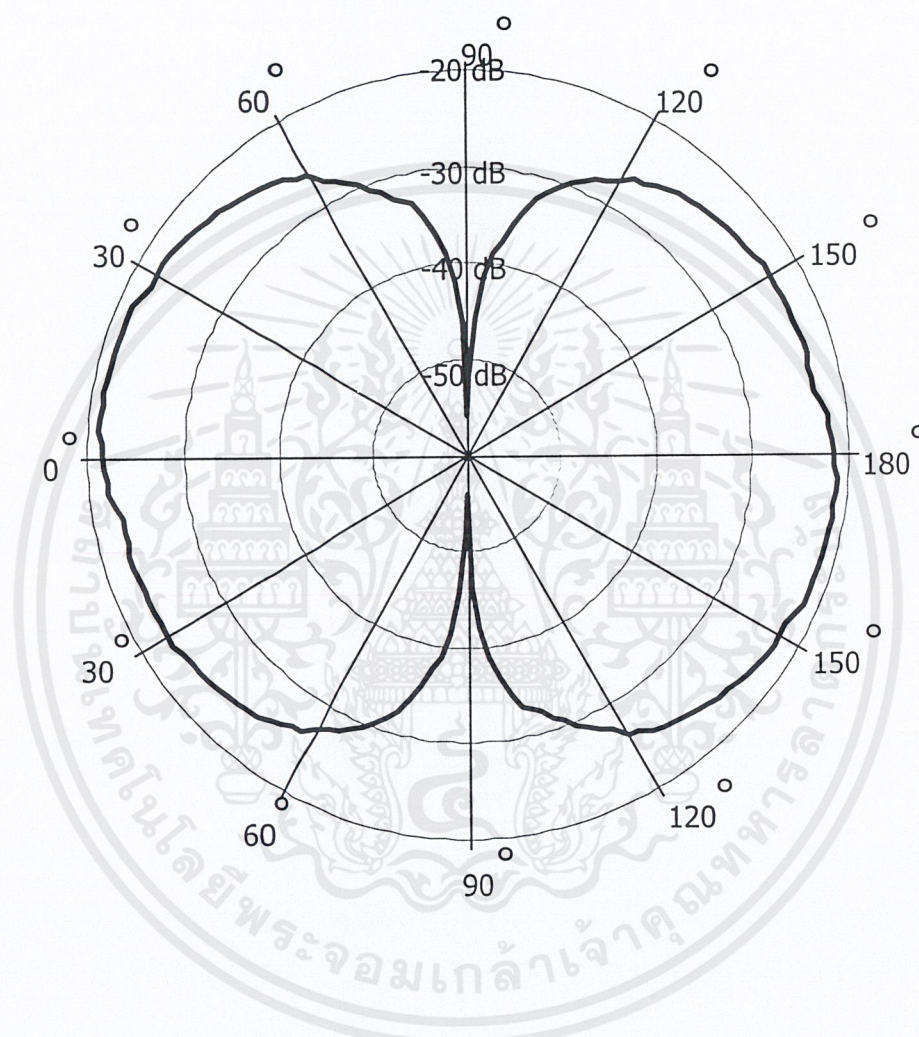
รูปที่ 4.1 (b) แสดงการวางสายอากาศในระนาบ H-plane



รูปที่ 4.1(c) แสดงการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

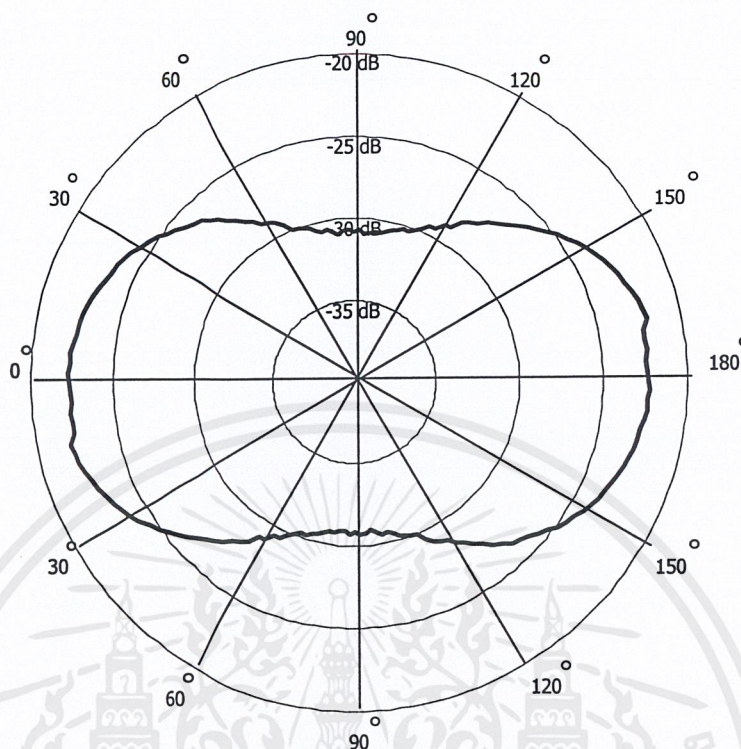
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้จากการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็น ดังนี้



รูปที่ 4.2 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E - plane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H – plane

4.2 การวัดค่าการขยายของสายอากาศ

การวัดค่าการขยายของสายอากาศ ก็คือ การแสดงผลของค่าการชี้ทิศทาง นั้นเอง เพราะจากสูตร $G = e_r D$ เมื่อ e_r เป็นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ โดยเมื่อกำหนดให้สายอากาศไม่มีการสูญเสีย จะได้ค่า e_r เท่ากับ 1 เพราะฉะนั้นจะได้ว่า ค่าการชี้ทิศทาง = ค่าการขยาย โดยในการวัด ค่าการขยายของสายอากาศนั้น ก็จะทำการติดตั้งสายอากาศ เช่นเดียวกับใช้เครื่องการวัดค่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane โดยเราไม่ต้องหมุนสายอากาศรับ แต่เราจะหันทิศที่สายอากาศมีการรับ สัญญาณได้แรงที่สุดเข้าหากัน

ผลการวัดค่าการขยาย โดยค่าที่วัดได้จากเครื่อง NETWORK ANALYZER ที่ Port 21 จะเป็นค่า P_r/P_t (dB) ซึ่งเราสามารถทำให้เป็นค่าการขยายได้จากสูตร

$$\frac{P_r}{P_t}(\text{dB}) = 10 \log \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_r G_t \right]$$

โดยที่เราสามารถให้ $G_t G_r$ มีค่าเท่ากันได้เนื่องจากเราใช้สายอากาศชนิดเดียวกันในการวัด และค่า R เป็นค่าระยะห่างระหว่างสายอากาศ ซึ่งต้องมากกว่าระยะ Far-field = $(2D^2)/\lambda$ เท่ากับ 0.2 เมตร โดยในการทดลองนี้เราใช้ค่า R เท่ากับ 0.5 เมตร เพราะฉะนั้นเราสามารถหาค่าการขยายได้ ดังนี้

$$\text{Gain} = \frac{\frac{P_r}{P_t} (\text{dB}) + 31.5}{2} \quad (\text{dB})$$

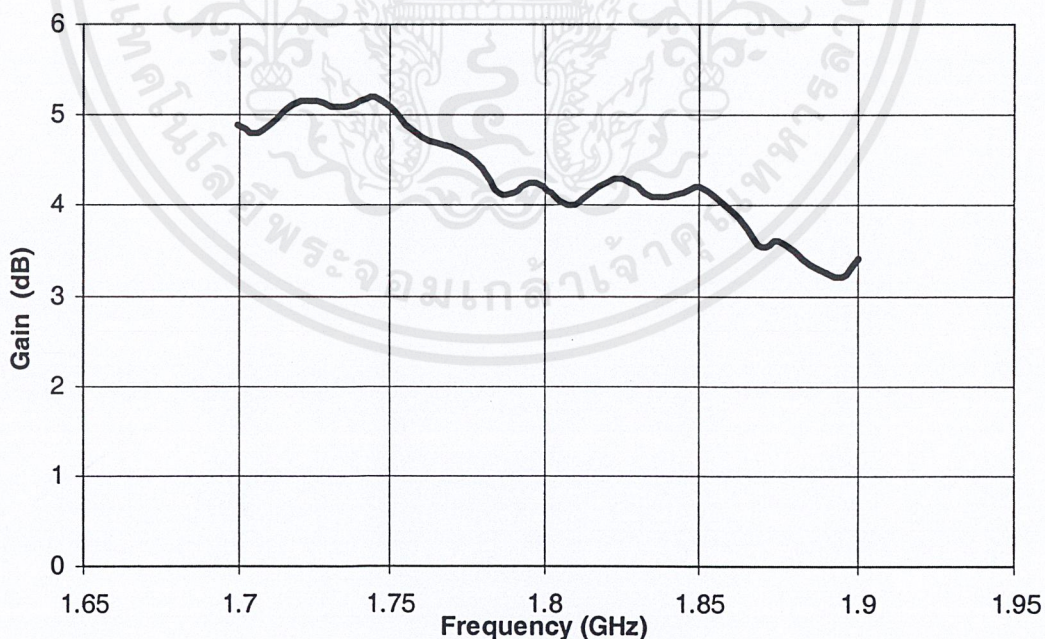
| ความถี่(GHz) | Pr/Pt (dB) | ความถี่(GHz) | Pr/Pt (dB) |
|--------------|------------|--------------|------------|
| 1.7 | -21.7 | 1.8 | -23.1 |
| 1.705 | -21.9 | 1.805 | -23.4 |
| 1.71 | -21.7 | 1.81 | -23.5 |
| 1.715 | -21.4 | 1.815 | -23.2 |
| 1.72 | -21.2 | 1.82 | -23 |
| 1.725 | -21.2 | 1.825 | -22.9 |
| 1.73 | -21.3 | 1.83 | -23.1 |
| 1.735 | -21.3 | 1.835 | -23.3 |
| 1.74 | -21.2 | 1.84 | -23.3 |
| 1.745 | -21.1 | 1.845 | -23.2 |
| 1.75 | -21.3 | 1.85 | -23.1 |
| 1.755 | -21.7 | 1.855 | -23.3 |
| 1.76 | -22 | 1.86 | -23.6 |
| 1.765 | -22.1 | 1.865 | -24 |
| 1.77 | -22.2 | 1.87 | -24.4 |
| 1.775 | -22.4 | 1.875 | -24.3 |
| 1.78 | -22.7 | 1.88 | -24.5 |
| 1.785 | -23.2 | 1.885 | -24.8 |
| 1.79 | -23.2 | 1.89 | -25 |
| 1.795 | -23 | 1.895 | -25.1 |
| | | 1.9 | -24.7 |

ตารางที่ 4.1 แสดงค่า Pr/Pt ที่วัดได้จากเครื่อง NETWORK ANALYZER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| ความถี่(GHz) | Gain (dB) | ความถี่(GHz) | Gain (dB) |
|--------------|-----------|--------------|-----------|
| 1.7 | 4.9 | 1.8 | 4.2 |
| 1.705 | 4.8 | 1.805 | 4.05 |
| 1.71 | 4.9 | 1.81 | 4 |
| 1.715 | 5.05 | 1.815 | 4.15 |
| 1.72 | 5.15 | 1.82 | 4.25 |
| 1.725 | 5.15 | 1.825 | 4.3 |
| 1.73 | 5.1 | 1.83 | 4.2 |
| 1.735 | 5.1 | 1.835 | 4.1 |
| 1.74 | 5.15 | 1.84 | 4.1 |
| 1.745 | 5.2 | 1.845 | 4.15 |
| 1.75 | 5.1 | 1.85 | 4.2 |
| 1.755 | 4.9 | 1.855 | 4.1 |
| 1.76 | 4.75 | 1.86 | 3.95 |
| 1.765 | 4.7 | 1.865 | 3.75 |
| 1.77 | 4.65 | 1.87 | 3.55 |
| 1.775 | 4.55 | 1.875 | 3.6 |
| 1.78 | 4.4 | 1.88 | 3.5 |
| 1.785 | 4.15 | 1.885 | 3.35 |
| 1.79 | 4.15 | 1.89 | 3.25 |
| 1.795 | 4.25 | 1.895 | 3.2 |
| | | 1.9 | 3.4 |

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการขยาย ที่คำนวณจากค่า Pr/Pt ที่วัดได้



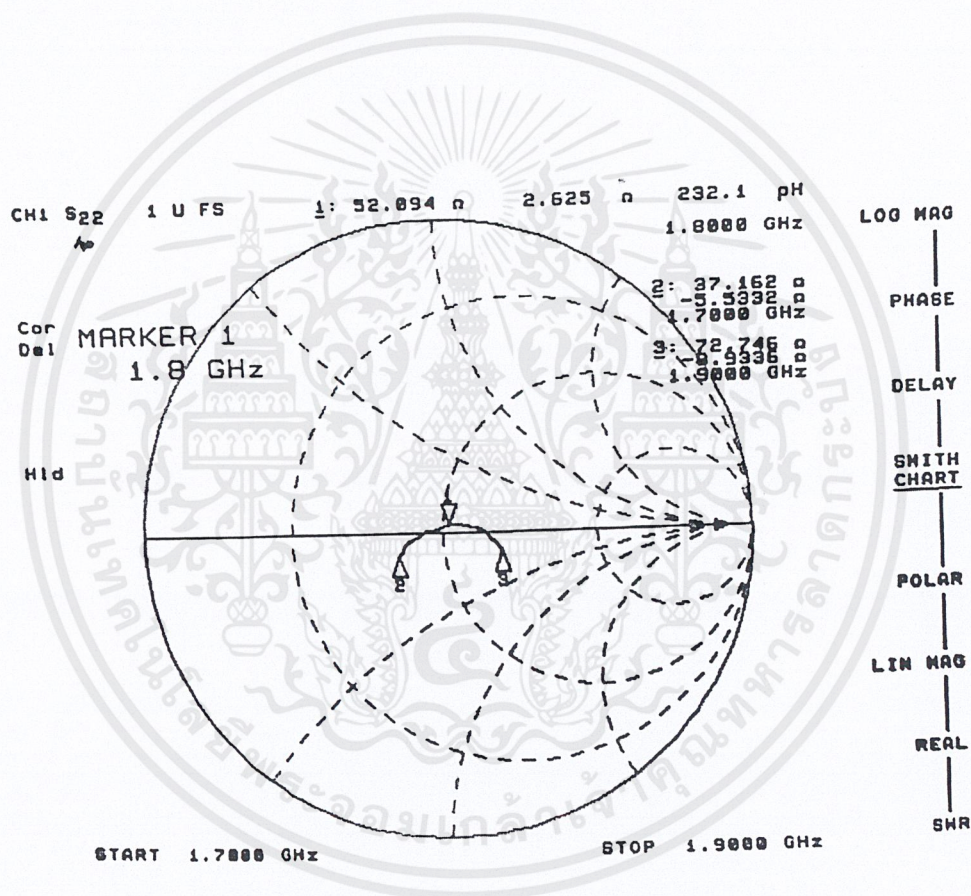
รูปที่ 4.4 แสดงค่าการขยายที่ความถี่ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การวัดค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ (Input impedance)

โดยค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ที่เราต้องการนั้นเท่ากับ 50Ω โดยค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบ 2 ทิศทางนั้น จะขึ้นอยู่กับ ค่าความยาวของตัวตัวป้อนสัญญาณ ซึ่งจากการคำนวณ ในบทที่ผ่านมาจะมีค่าประมาณ 4.3 ซม. แต่ในทางปฏิบัติที่ความยาวนี้ค่าอิมพีแดนซ์อาจจะไม่เท่ากับ 50Ω พอดีซึ่งเราสามารถปรับให้เท่ากับ 50Ω ได้ด้วยการลดหรือเพิ่มความยาวของตัวป้อนสัญญาณ เล็กน้อย

ผลจากการวัดค่าอิมพีแดนซ์ค่าที่ได้จะแกว่งอยู่ช่วงประมาณ $48 - 52 \Omega$ ที่ความถี่ 1.8 GHz ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.5 จากรูปค่าที่ได้เท่ากับ $52.094 + j2.625 \Omega$

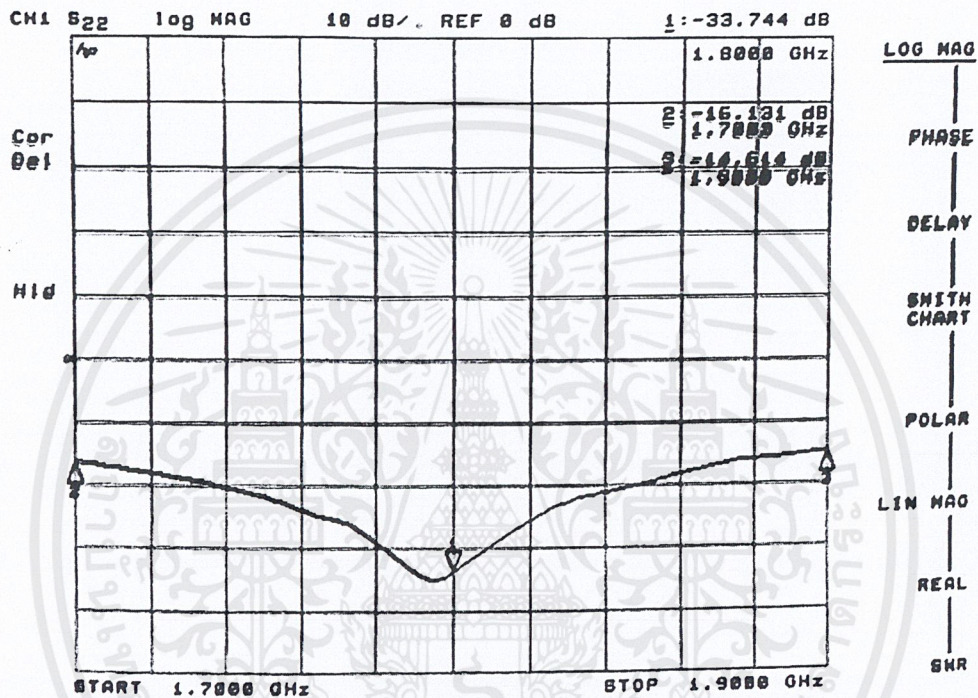


รูปที่ 4.5 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้

จากที่กล่าวมาข้างต้นค่าต่างๆที่ทำการวัดไม่ว่าจะเป็นค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น, ค่าการขยาย, แมทซ์อิมพีแดนซ์ ถือเป็นค่าพื้นฐานที่จำเป็นต้องทราบ โดยสายอากาศที่ออกแบบนี้ ยังได้วัดค่าอีกสองอย่าง คือ

4.4 ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับ (Return Loss)

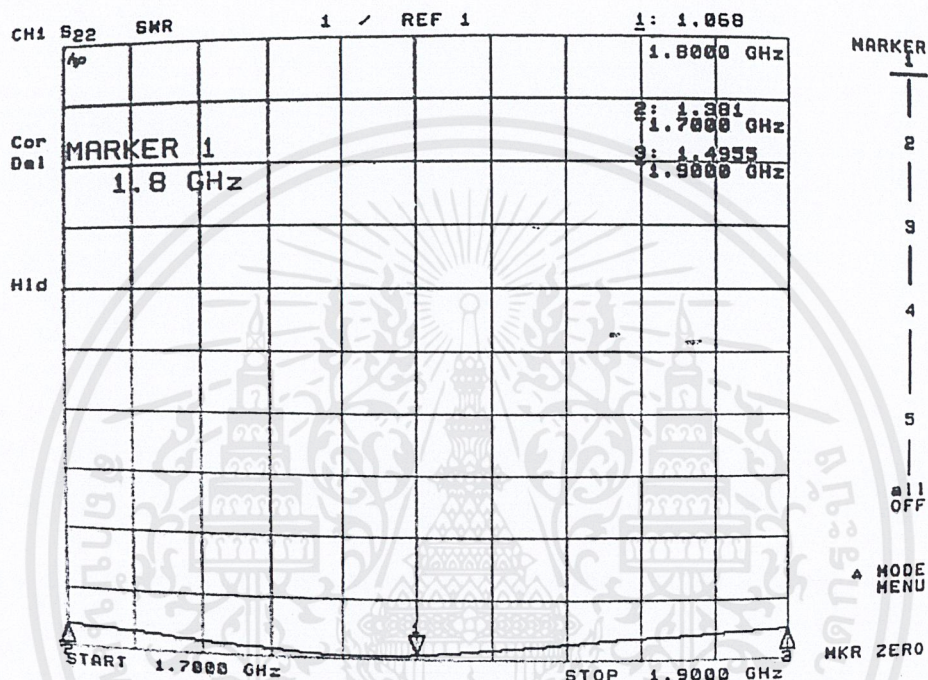
เป็นค่าที่บ่งบอกถึง การสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับของคลื่นที่ส่งออกไป โดยค่านี้ยิ่งมีค่าน้อยสายอากาศ ตัวนั้นยิ่งมีคุณสมบัติ ซึ่งค่าการสูญเสีย ที่วัดได้จะมีค่าอยู่ประมาณ -33.744 (dB) ที่ความถี่ 1.8 GHz , -16.131 (dB) ที่ 1.7 GHz , -14.614 (dB) ที่ 1.9 GHz โดยค่าที่วัดได้แสดง ดังรูป



รูปที่ 4.6 แสดงค่าการสูญเสียสะท้อนกลับ

4.5 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio :SWR)

เป็นค่าที่แสดงอัตราส่วนของคลื่นที่สะท้อนกลับมายังสายอากาศโดยปกติในการส่งสัญญาณนั้นก็จะมีการสะท้อนกลับ ของคลื่นเป็นปกติอยู่แล้ว เพราะฉะนั้นค่า SWR ที่ดีที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 1 โดยในการทดลองสายอากาศที่ออกแบบ มีค่า SWR เท่ากับ 1.068 ที่ 1.8 GHz , 1.381 ที่ 1.700GHz , 1.4955 ที่ 1.900 GHz ดังแสดงในรูป



รูปที่ 4.7 แสดงค่า SWR ที่วัดได้

จะเห็นว่าถ้าค่าจําพวกค่าการขยาย , ค่าการสูญเสียสะท้อนกลับ , SWR มีค่าที่มีคุณสมบัติดีๆ ก็จะทำให้สายอากาศ ตัวนั้นสามารถที่จะใช้งานได้ในช่วงความถี่ที่กว้าง ก็คือสายอากาศมีช่วงความถี่ที่กว้างนั่นเอง

4.6 การวัดอัตราขยายของเครื่องทวนสัญญาณ

การวัดอัตราขยายของเครื่องทวนสัญญาณนั้น จะทำโดยการป้อนสัญญาณค่าหนึ่งให้กับเครื่องทวนสัญญาณแล้ววัดสัญญาณที่เครื่องทวนสัญญาณจ่ายออกมา จากนั้นสามารถที่จะคำนวณหาอัตราขยายได้ดังนี้

$$\text{อัตราขยาย (dB)} = \text{สัญญาณที่ส่งออก(dBm)} - \text{สัญญาณที่ป้อนเข้า(dBm)}$$

โดยจะแบ่งการวัดเป็น 2 ส่วนดังนี้

1 การวัดอัตราขยายของเครื่องทวนสัญญาณในส่วนของสถานีฐาน ไปยังโทรศัพท์เคลื่อนที่

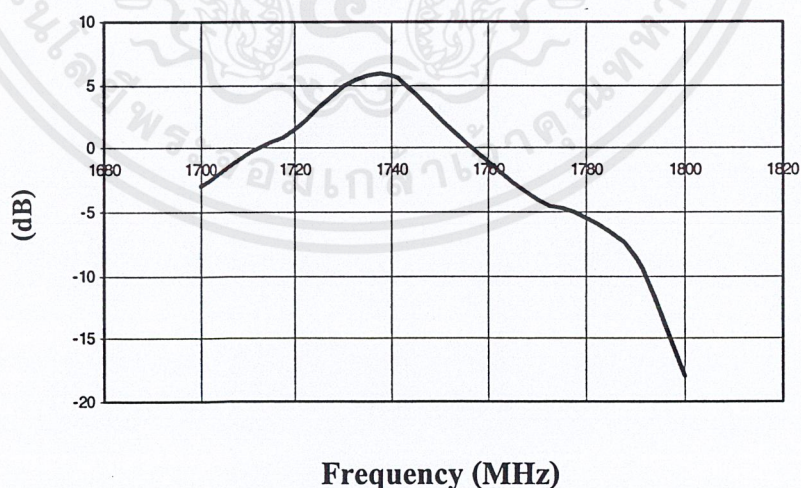
| สถานีฐาน ไปยัง โทรศัพท์เคลื่อนที่ DOWNLINK 1.810 -1.885 GHz สัญญาณป้อนเข้า = -50 dBm | | |
|--|-----------------------|-----------------|
| ความถี่ (GHz) | สัญญาณที่ส่งออก (dBm) | อัตราขยายสัญญาณ |
| 1.810 | -23.3 | 26.7 |
| 1.820 | -25.18 | 24.82 |
| 1.830 | -24 | 26 |
| 1.840 | -20.6 | 29.4 |
| 1.850 | -22.48 | 27.52 |
| 1.860 | -22.9 | 27.1 |
| 1.870 | -23.6 | 26.4 |
| 1.880 | -19.72 | 30.28 |
| 1.890 | -22.07 | 27.93 |
| อัตราขยายสัญญาณเฉลี่ย | | 27.35 |

ตารางที่ 4.3 แสดงอัตราขยายสัญญาณที่เครื่องทวนสัญญาณส่งออกมาในด้านสถานีฐานไปโทรศัพท์เคลื่อนที่

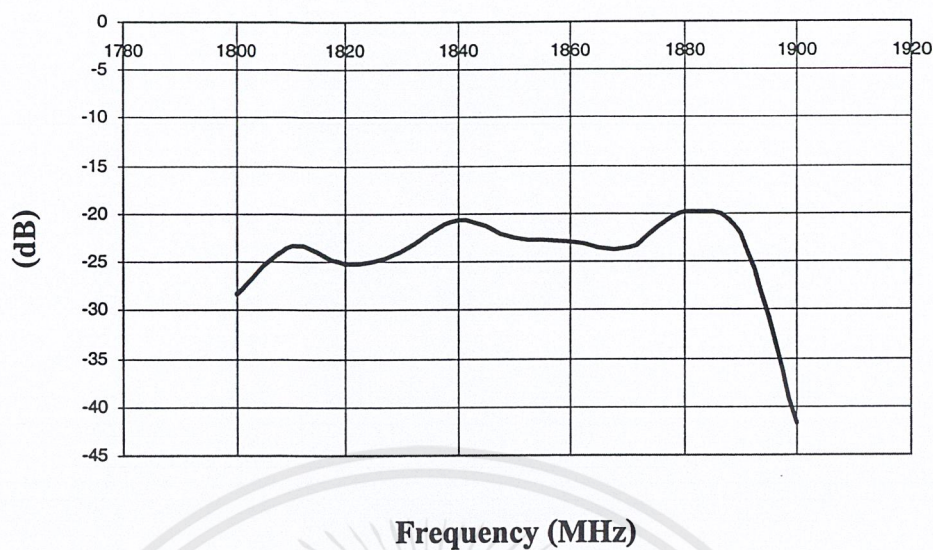
2 การวัดอัตราขยายของเครื่องทวนสัญญาณในส่วนของโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังสถานีฐาน

| โทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังสถานีฐาน UPLINK 1.705 - 1.780 GHz สัญญาณป้อนเข้า = -10 dBm | | |
|---|-----------------------|----------------------|
| ความถี่ (GHz) | สัญญาณที่ส่งออก (dBm) | อัตราขยายสัญญาณ (dB) |
| 1.710 | -10.4 | -0.4 |
| 1.720 | -8.45 | 1.55 |
| 1.730 | -5 | 5 |
| 1.740 | -4.25 | 5.75 |
| 1.750 | -7.7 | 2.3 |
| 1.760 | -11.1 | -1.1 |
| 1.770 | -14 | -4 |
| 1.780 | -15.4 | -5.4 |
| อัตราขยายสัญญาณเฉลี่ย | | 0.4625 |

ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราขยายสัญญาณที่เครื่องทวนสัญญาณส่งออกมาในด้านโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังสถานีฐาน



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงอัตราขยายของเครื่องทวนสัญญาณด้านโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังสถานีฐาน



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงอัตรการขยายของเครื่องทวนสัญญาณด้านสถานีฐานไปยังโทรศัพท์เคลื่อนที่

จากผลที่ได้ สามารถที่จะนำมาหาระยะห่างที่ไกลที่สุดจากเครื่องทวนสัญญาณที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่สามารถที่จะติดต่อสื่อสารได้ ดังนี้

P_r (dBm) = กำลังที่ต่ำที่สุดที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่สามารถที่จะรับและติดต่อสื่อสารได้
ซึ่งจะ กำหนดให้เท่ากับ -100 dBm $= 10^{-13}$ W

$$P_t = P_r + G_{amp} + 2G_{ANT} + Loss_{in\ wire}$$

กำหนดให้

$$P_r = -80 \text{ dBm}, G_{amp} = 27.35 \text{ dB}, G_{ANT} = 4 \text{ dB}, Loss_{in\ wire} = -8.25 \text{ dB}$$

เพราะฉะนั้น

$$P_t = -52.9 \text{ dBm} = 10^{-8.29} \text{ W}$$

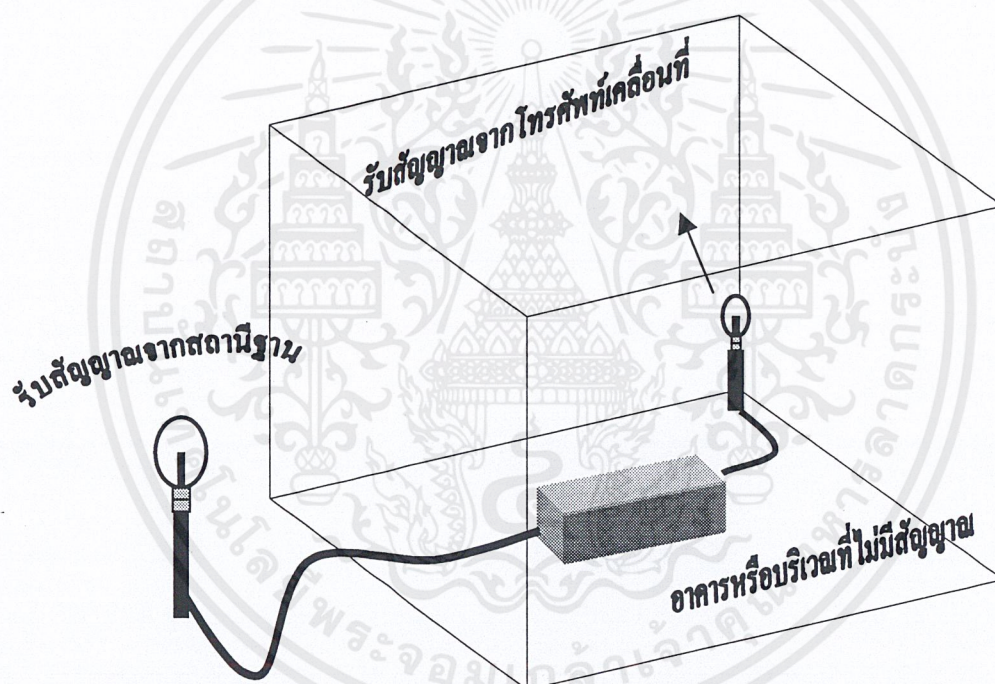
นำไปแทนในสมการของฟรีส ในบทที่ 2

จะได้ $R = 69.72 \text{ m}$.

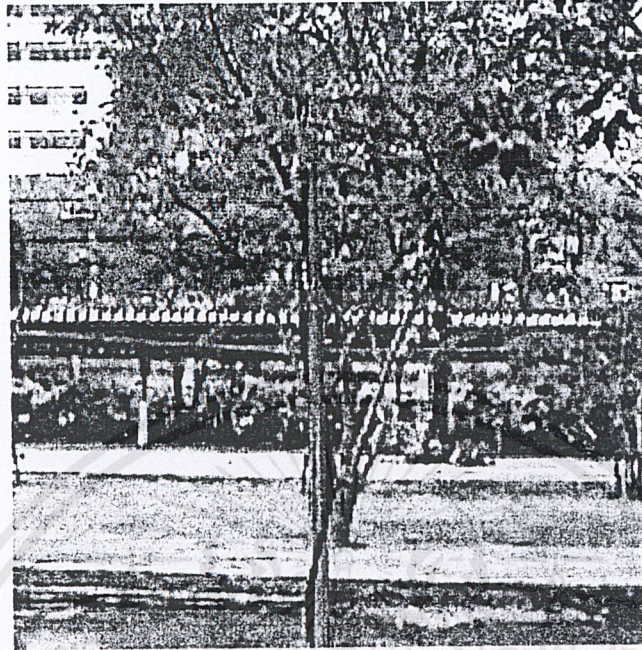
ดังนั้น ระยะห่างระหว่างเครื่องทวนสัญญาณแต่ละตัวที่ได้ จะมีค่าประมาณ 70 m.

4.7 การวัดระดับสัญญาณของระบบทวนสัญญาณ

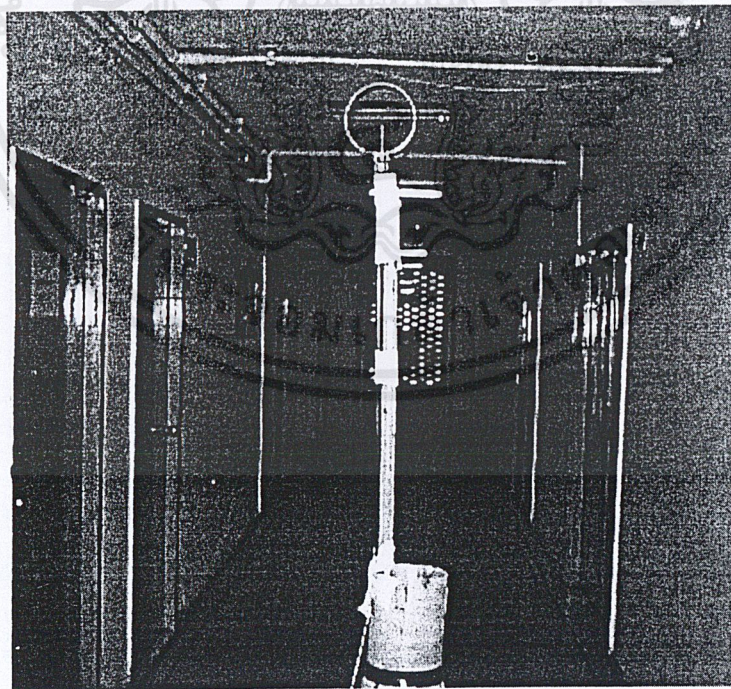
การวัดระดับสัญญาณในหัวข้อนี้ จะเป็นการวัดเพื่อเปรียบเทียบกัน ระหว่างการติดตั้งกับการไม่ติดตั้งเครื่องทวนสัญญาณในบริเวณที่มีระดับสัญญาณอ่อนกว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร โดยการติดตั้งระบบทวนสัญญาณเพื่อทำการวัดนั้นก็ทำได้ โดยนำสายอากาศที่ใช้รับสัญญาณจากสถานีฐาน ไปติดตั้งในบริเวณที่สามารถที่จะรับสัญญาณจากสถานีฐานได้ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น บริเวณนอกอาคารที่จะติดตั้งเครื่องทวนสัญญาณ และนำสายอากาศที่ใช้รับสัญญาณจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ไปติดตั้งในบริเวณที่ต้องการจะทวนสัญญาณ หรือก็คือ บริเวณที่สัญญาณอ่อนนั่นเอง



รูปที่ 4.10 แสดงการติดตั้งระบบทวนสัญญาณ

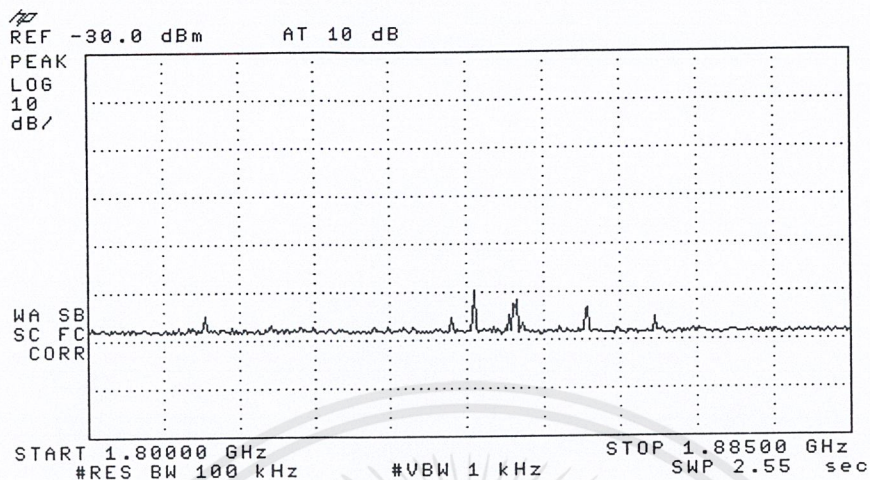


รูปที่ 4.11 แสดงการติดตั้งสายอากาศที่รับสัญญาณจากสถานีฐาน

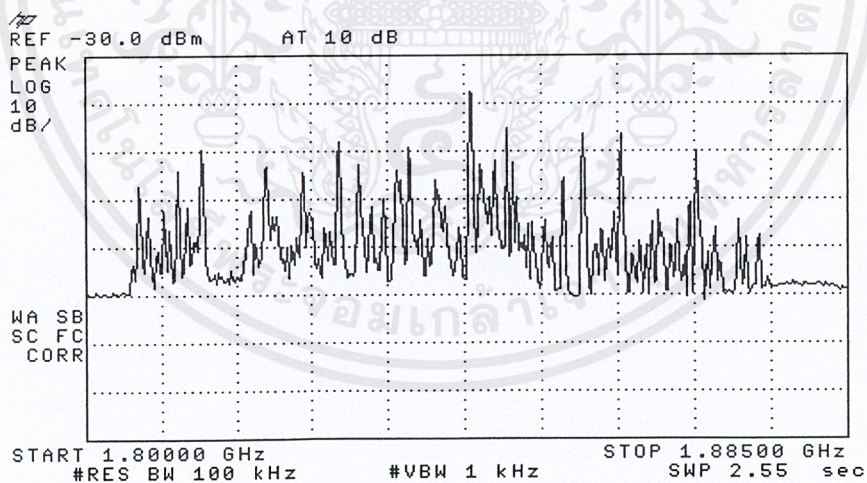


รูปที่ 4.12 แสดงการติดตั้งสายอากาศบริเวณที่รับสัญญาณจากโทรศัพท์เคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

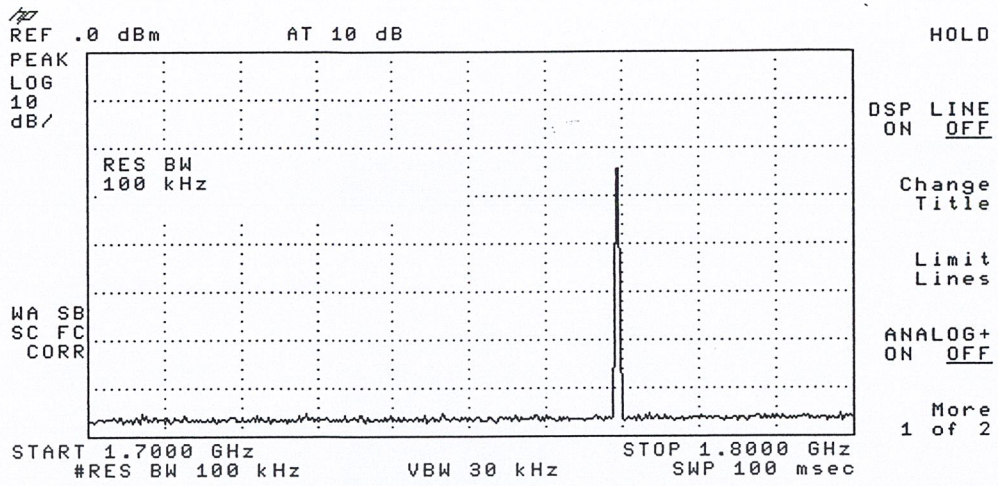


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงสัญญาณของสถานีฐานขณะปิดเครื่องทวนสัญญาณ

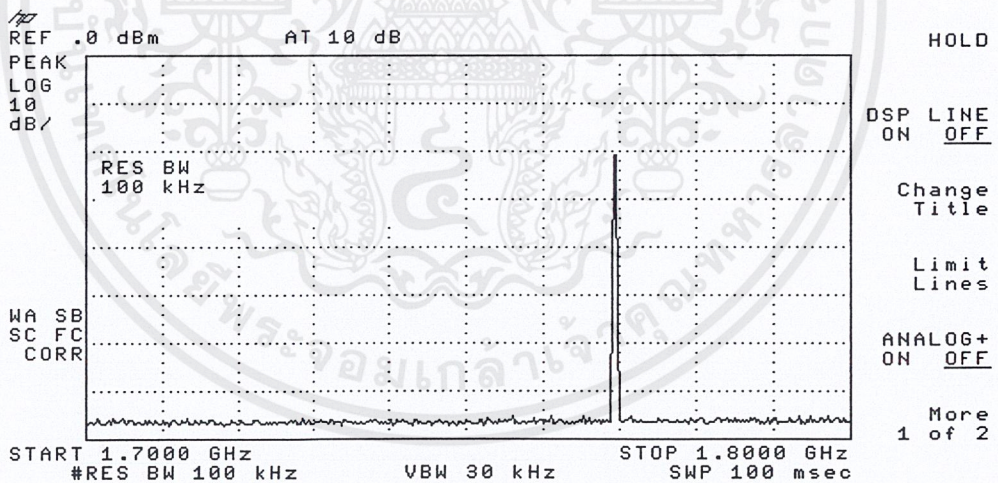


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงสัญญาณของสถานีฐานขณะเปิดเครื่องทวนสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงสัญญาณของโทรศัพท์เคลื่อนที่ขณะปิดเครื่องทวนสัญญาณ



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงสัญญาณของโทรศัพท์เคลื่อนที่ขณะเปิดเครื่องทวนสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงระดับสัญญาณที่โทรศัพท์ที่เคลื่อนที่ขณะปิดเครื่องทวนสัญญาณ



รูปที่ 4.18 แสดงระดับสัญญาณที่โทรศัพท์ที่เคลื่อนที่ขณะเปิดเครื่องทวนสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 ส่วนของสายอากาศ

คุณสมบัติของสายอากาศที่มีลำคลื่น 2 ทิศทาง โดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนรูปวงกลม ที่ได้จากการทดลอง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับทฤษฎี สามารถที่จะจำแนกได้โดยสังเขป ดังต่อไปนี้

1. เมื่อทำการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ผลที่ได้คือ ลำคลื่นจะมีลักษณะชี้ไปในทิศทางตรงกันข้ามกัน ที่มุม θ เท่ากับ 0 องศา และ 180 องศา ทั้งในระนาบ E-Plane และ H-Plane แต่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่วัดได้ อาจจะไม่ราบเรียบเหมือนกับทฤษฎี ทั้งนี้อาจเกิดจากสายอากาศที่ออกแบบได้ มีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ ในที่นี้หมายถึง ค่าความกว้าง และรัศมีของวงแหวนที่ใช้ทำเป็นสายอากาศคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ หรืออาจเกิดจากสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลอง มีสภาพที่ทำให้คลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศ เกิดการสะท้อนกลับมายังสายอากาศ ทำให้เกิดการสูญเสีย หรืออาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการวัดของผู้ทำการทดลองเอง

2. ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จากการทดลอง คือ ถือได้ว่า มีค่าใกล้เคียงกับค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ตามทฤษฎีซึ่งจะต้องมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม เพื่อให้สายอากาศเกิดการแมทซ์ซึ่งกับสายนำสัญญาณที่ต่อกับสายอากาศ

3. ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ที่วัดได้จากการทดลอง คือ มีค่าใกล้เคียงกับค่า SWR ตามทฤษฎี ซึ่งจะต้องมีค่าเท่ากับ 1 : 1 เพื่อไม่ให้เกิดการสะท้อนกลับภายในสายอากาศ ทำให้เกิดการสูญเสีย

4. ค่าการขยายของสายอากาศที่วัดได้ คือ 4.2 dB มีค่าที่คลาดเคลื่อนจากทฤษฎี อาจเป็นผลมาจากสภาพแวดล้อมที่ทำการวัด ทำให้มีการสะท้อนของคลื่นเกิดขึ้น หรืออาจเกิดจากการเตรียมเครื่องมือที่ใช้ในการวัด (Calibrate) ไม่ดีพอ ทำให้เกิดการสูญเสียในสายนำสัญญาณที่ต่อกับสายอากาศหรืออาจเกิดจากความผิดพลาดในการวัดของผู้ทำการทดลองเอง

5.2 ส่วนของระบบทวนสัญญาณ

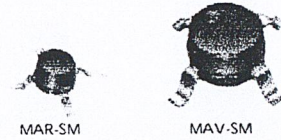
ในส่วน of ระบบทวนสัญญาณนั้นจะเห็นว่า อัตราการขยายของระบบทวนสัญญาณ มีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ออกแบบอยู่บ้าง เนื่องจากค่าอัตราขยายของวงจรขยายที่นำมาออกแบบนั้นเป็นค่า อัตราการขยายสูงสุดที่วงจรนั้นจะทำได้ แต่ในทางปฏิบัตินั้นการที่จะทำให้อัตราการขยายสามารถที่จะทำงาน ได้อย่างสมบูรณ์นั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากความถี่ที่ใช้งานนั้นอยู่ในย่านความถี่ไมโครเวฟซึ่งเป็นช่วง ความถี่ที่สูง ทำให้การลดทอนของสัญญาณในจุดต่อต่างๆภายในวงจรมีค่าค่อนข้างมาก และการรบกวน อันเนื่องมาจากการที่สัญญาณความถี่สูงย้อนกลับมา โดยการแพร่กระจายคลื่นของวงจรต่างรวมไปถึงการ สูญเสียภายในสายส่งและจุดต่อ ทำให้อัตราการขยายที่ได้ออกมาของระบบทวนสัญญาณมีค่าไม่สูงนัก แต่ค่าที่ได้มานั้นก็เพียงพอต่อการนำไปใช้งานในจุดอับสัญญาณที่มีบริเวณเล็กๆ เช่น ภายในห้องซึ่งเพียงพอ ต่อความต้องการของโครงการนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MONOLITHIC AMPLIFIERS 50 Ω

BROADBAND DC to 6 GHz



up to +17.5 dBm output

| MODEL NO. | FREQ. (MHz) | GAIN (dB) Typical at MHz | | | | MAXIMUM POWER (dBm) | | DYNAMIC RANGE | | VSWR (-1) Typ. | | ABSOLUTE MAXIMUM RATING ⁶ (25°C) | | DC OPERATING POWER ⁷ at Pin 3 | | THERMAL RESISTANCE ⁵ | CASE STYLE | CONNECTION | PRICE \$ |
|-----------|-------------|-----------------------------|------|------|-------------|--------------------------|------------------------|---------------|----------------|-------------------|-----|--|--------|---|-----------|---------------------------------|------------|------------|-----------|
| | | 100 | 1000 | 2000 | Note 1 Min. | Output (1 dB Comp.) Typ. | Input (no damage) Typ. | NF (dB) Typ. | IP3 (dBm) Typ. | In | Out | I (mA) | P (mW) | Current (mA) | Volt Typ. | θ _{jc} °C/W | Note B1 | | Qty. (30) |
| MAR-1SM | DC-1000 | 18.5 | 15.5 | — | 13.0 | +1.5 | +13 | 5.5 +14.0 | 1.3 | 1.2 | 40 | 200 | 17 | 5.00 | 115 | WW107 | cb | 1.04 | |
| MAR-2SM | DC-2000 | 12.5 | 12.0 | 11.0 | 8.5 | +4.5 | +13 | 6.5 +17.0 | 1.5 | 1.4 | 60 | 325 | 25 | 5.00 | 105 | WW107 | cb | 1.17 | |
| MAR-3SM | DC-2000 | 12.5 | 12.0 | 10.5 | 8.0 | +10.0 | +13 | 6.0 +23.0 | 1.5 | 1.7 | 70 | 400 | 35 | 5.00 | 115 | WW107 | cb | 1.24 | |
| MAR-4SM | DC-1000 | 8.3 | 8.0 | — | 7.0 | +12.5 | +13 | 7.0 +25.5 | 1.5 | 1.9 | 85 | 500 | 50 | 5.25 | 100 | WW107 | cb | 1.34 | |
| MAR-6SM | DC-2000 | 20.0 | 16.0 | 11.0 | 9.0 | +2.0 | +13 | 3.0 +14.5 | 1.7 | 1.7 | 50 | 200 | 16 | 3.50 | 120 | WW107 | cb | 1.21 | |
| MAR-7SM | DC-2000 | 13.5 | 12.5 | 11.0 | 8.5 | +5.5 | +13 | 5.0 +19.0 | 1.7 | 1.7 | 60 | 275 | 22 | 4.00 | 120 | WW107 | cb | 1.36 | |
| MAR-8SM | DC-1000 | 32.5 | 22.5 | — | 19.0 | +12.5 | +13 | 3.3 +27.0 | # | # | 65 | 500 | 36 | 7.80 | 140 | WW107 | cb | 1.32 | |
| MAV-11SM | 50-1000 | 12.7 | 10.5 | — | 9.0 | +17.5 | +13 | 3.6 +30.0 | 1.5 | 1.7 | 80 | 550 | 60 | 5.50 | 125 | RRR137 | cb | 1.62 | |

NOTES:

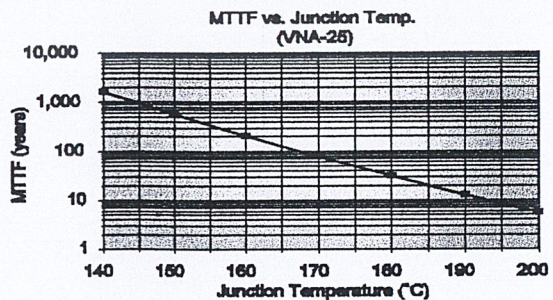
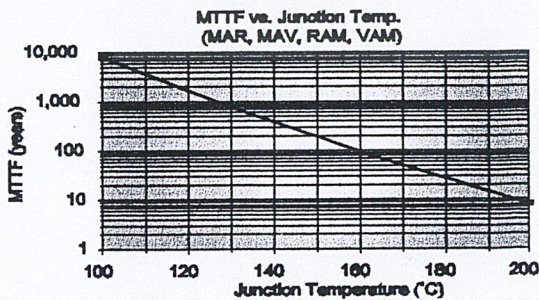
- ◆ Aquocous washable
- * RAM models are hermetically sealed.
- ☆ Increases below 1500 MHz.
- ★ Max. Voltage 7V at pin 1 (DC power). Max. voltage 10V at pins 3,6, DC or transient.
- # Dash-8 models input and output impedances are not 50 ohms, see S-parameter data. Conditionally stable, source and load VSWR<3:1 required. Dash-6 models conditionally stable, source and load VSWR<5:1 required.
- ⊙ Low frequency cutoff determined by external coupling capacitors, except VNA-25
- † Specification at 500 MHz. †† Specification at 2500 MHz. •• Specification at DC-3 GHz.
- A. Environmental specifications and re-flow soldering information available in General Information Section.
- B1. Units are non-hermetic unless otherwise noted. Details on case dimensions & finishes in "Case Styles & Outline Drawings". Case styles VV105 or BBB123 available, consult factory.
- C. Prices and Specifications subject to change without notice.
- 1. Minimum gain at highest frequency, except VAM-77, VAM-93 at 2 GHz. Full temperature range, except room temperature for Dash-4 models.
- 2. Model number designated by color dot or alphanumeric code marking.
- 3. Frequency at which output power, NF and IP3 are specified: 500 MHz for MAR-1SM, MAR-6SM, RAM-1, RAM-6, MAV-11SM, VAM-6, 2 GHz for VAM-77, VAM-93, 1000 MHz for all other models.
- 4. Dash-6 models potentially unstable with very high VSWR terminations.
- 5. Thermal resistance θ_{jc} is from hottest junction in device to mounting surface of leads.
- 6. Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded. These ratings are not intended for continuous normal operation.
- 7. Supply voltage must be connected to pin 3 through a bias resistor in order to prevent damage. See "Biasing MMIC Amplifiers" in minicircuits.com/application.html. Reliability predictions are applicable at specified current & normal operating conditions.

model identification

Model marking (see note below)

| | |
|--------------------------|---------|
| MAR-1SM (see note below) | 01 |
| MAR-2SM | 02 |
| MAR-3SM | 03 |
| MAR-4SM | 04 |
| MAR-6SM | 06 |
| MAR-7SM | 07 |
| MAR-8SM | 08 |
| RAM-1 | 1 or 01 |
| RAM-2 | 2 or 02 |
| RAM-3 | 3 or 03 |
| RAM-4 | 4 or 04 |
| RAM-6 | 6 or 06 |
| RAM-7 | 7 or 07 |
| RAM-8 | 8 or 08 |
| MAV-11SM | A |
| VAM-3 | 03 |
| VAM-6 | 06 |
| VAM-7 | 07 |
| VAM-77 | 77 |
| VAM-93 | 93 |
| VNA-25 | -25 |

Notes:
 - Prefix letter (optional) designates assembly location.
 - MAR-1SM: limited availability; consult factory.



Distribution Centers NORTH AMERICA 800-654-7949 • 417-335-5935 • Fax 417-335-5945 • EUROPE 44-1252-832600 • Fax 44-1252-837010

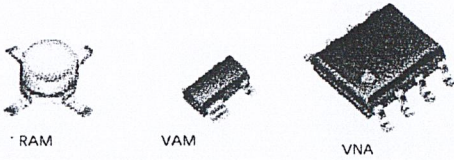
INTERNET <http://www.minicircuits.com>

P.O. Box 350166, Brooklyn, New York 11235-0003 (718) 934-4500 Fax (718) 332-4661

ISO 9001 CERTIFIED

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Surface Mount



up to +18.2 dBm output

| MODEL NO. | FREQ. (MHz) | GAIN (dB) Typical at MHz | | | | | MAXIMUM POWER (dBm) | | DYNAMIC RANGE | | VSWR (-1) Typ. | | ABSOLUTE MAXIMUM RATING ⁶ (25°C) | | DC OPERATING POWER ⁷ at Pin 3 | | THERMAL RESISTANCE ⁵ θ _{jc} °C/W | CASE STYLE Note B1 | CONNECTION | PRICE \$ Qty. (1-9) | |
|-----------|-------------|-----------------------------|------|--------|------|-------------|--------------------------|-------------------|---------------|----------------|----------------|-----|---|--------|--|------------|---|-----------------------|------------|------------------------|-----------|
| | | 100 | 1000 | 2000 | 3000 | Note 1 Min. | Output (1 dB Comp.) typ. | Input (no damage) | NF (dB) typ. | IP3 (dBm) typ. | In | Out | I (mA) | P (mW) | Current (mA) | Volt. Typ. | | | | | |
| RAM-1 | DC-1000 | 19.0 | 15.5 | — | — | 13.0 | +1.5 | +13 | 5.5 | +14.0 | 1.3 | 1.3 | 40 | 200 | 17 | 5.00 | 150 | AF190 | cb | 4.95 | |
| RAM-2 | DC-2000 | 12.5 | 11.8 | 11.0 | — | 8.5 | +4.5 | +13 | 6.5 | +17.0 | 1.2 | 1.4 | 60 | 325 | 25 | 5.00 | 145 | AF190 | cb | 4.95 | |
| RAM-3 | DC-2000 | 12.5 | 12.0 | 10.5 | — | 8.0 | +10.0 | +13 | 6.0 | +23.0 | 1.6 | 1.7 | 80 | 425 | 35 | 5.00 | 150 | AF190 | cb | 4.95 | |
| RAM-4 | DC-1000 | 8.5 | 8.0 | — | — | 7.0 | +12.5 | +13 | 6.5 | +25.5 | 1.4 | 1.9 | 100 | 540 | 50 | 5.25 | 140 | AF190 | cb | 4.95 | |
| RAM-6 | DC-2000 | 20.0 | 16.0 | 11.0 | — | 9.0 | +2.0 | +13 | 2.8 | +14.5 | 1.4 | 1.3 | 50 | 200 | 16 | 3.50 | 155 | AF190 | cb | 4.95 | |
| RAM-7 | DC-2000 | 13.5 | 12.5 | 11.0 | — | 8.5 | +5.5 | +13 | 4.5 | +19.0 | 2.0 | 1.8 | 60 | 275 | 22 | 4.00 | 155 | AF190 | cb | 4.95 | |
| RAM-8 | DC-1000 | 32.5 | 23.0 | — | — | 19.0 | +12.5 | +13 | 3.0 | +27.0 | # | # | 65 | 420 | 36 | 7.80 | 175 | AF190 | cb | 4.95 | |
| VNA-25 | 500-2500 | 14.0† | 18.0 | 16.0†† | — | 11.5 | +18.2 | +10 | 5.5 | +27.0 | 1.5† | 1.6 | 105 | 1000 | 85 | 5.0* | 125 | XX211 | hj | 4.25 | |
| | | Typical at GHz | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Qty. (30) |
| | | 0.1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | Note 1 Min. | | | | | | | | | | | | | |
| VAM-3 | DC-2000 | 11.5 | 11.0 | 9.5 | — | — | 7.5 | +9.0 | +13 | 6.0 | +22.0 | 1.5 | 1.7 | 60 | 240 | 35 | 4.70 | 500 | MMM168 | cb | 1.19 |
| VAM-6 | DC-2000 | 19.5 | 15.0 | 10.0 | — | — | 8.0 | +2.0 | +13 | 3.0 | +14.0 | 1.6 | 1.5 | 40 | 125 | 16 | 3.30 | 505 | MMM168 | cb | 1.16 |
| VAM-7 | DC-2000 | 13.0 | 12.0 | 9.8 | — | — | 7.8 | +5.5 | +13 | 5.0 | +18.0 | 1.5 | 1.5 | 50 | 175 | 22 | 3.80 | 505 | MMM168 | cb | 1.31 |
| NEWVAM-77 | DC-6000 | 13.9 | 13.6 | 12.9 | 12.5 | 11.2 | 9.9 | +11.0 | +13 | 3.8 | +18.0 | 1.3 | 1.5** | 50 | 175 | 22 | 3.3 | 194 | MMM168 | cb | 1.19 |
| NEWVAM-93 | DC-3000 | 22.3 | 21.2 | 19.1 | 17.1 | — | 17.0 | +12.7 | +13 | 3.7 | +27.0 | 1.5 | 1.1 | 75 | 330 | 35 | 3.2 | 159 | MMM168 | cb | 1.19 |

features

- cascadable
- excellent repeatability
- wide bandwidth, up to 6000 MHz
- unconditionally stable, most models
- hermetically sealed, RAM models
- high output power, up to +18.2 dBm typ
- low cost

pin connections

| PORT | cb | hj |
|---------|-----|-----------|
| RF IN | 1 | 3 |
| RF OUT | 3 | 6 |
| DC | 3 | 1 |
| GND EXT | 2,4 | 2,4,5,7,8 |

NSN GUIDE

| MCL NO. | NSN |
|---------|------------------|
| MAR-15M | 5962-01-414-8635 |
| MAR-35M | 5962-01-423-1569 |
| MAR-65M | 5962-01-460-6063 |
| RAM-6 | 5996-01-450-5504 |

DESIGNERS KITS AVAILABLE



The Design Engineers Search Engine

Provides Actual Data Instantly
At: <http://www.minicircuits.com>

In Stock... Immediate Delivery

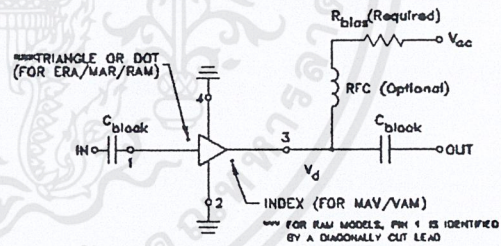
For Custom Versions Of Standard Models
Consult Our Applications Dept.



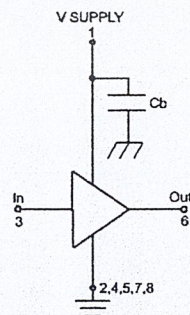
Available Tape & Feed

141

typical biasing configuration ERA/MAR/MAV/RAM/VAM



VNA biasing configuration

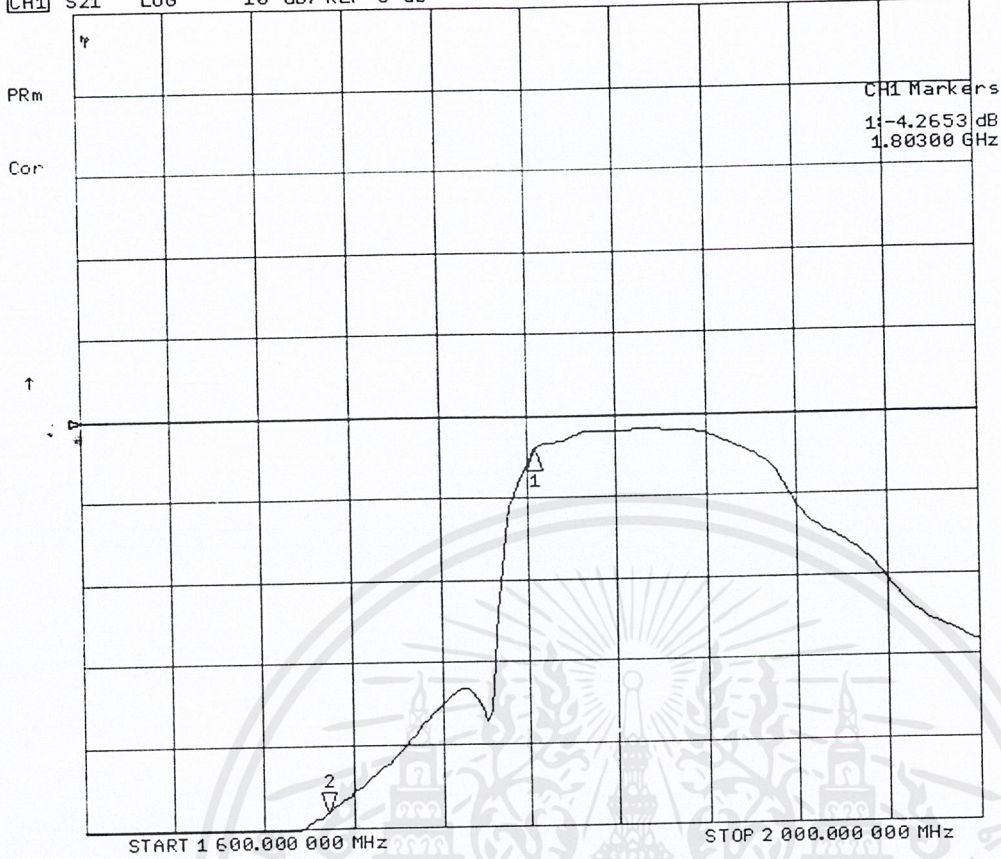


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19 Feb 2002 13:40:41

2:-48.292 dB 1 708.000 000 MHz

[CH1] S21 LOG 10 dB/REF 0 dB



Filter

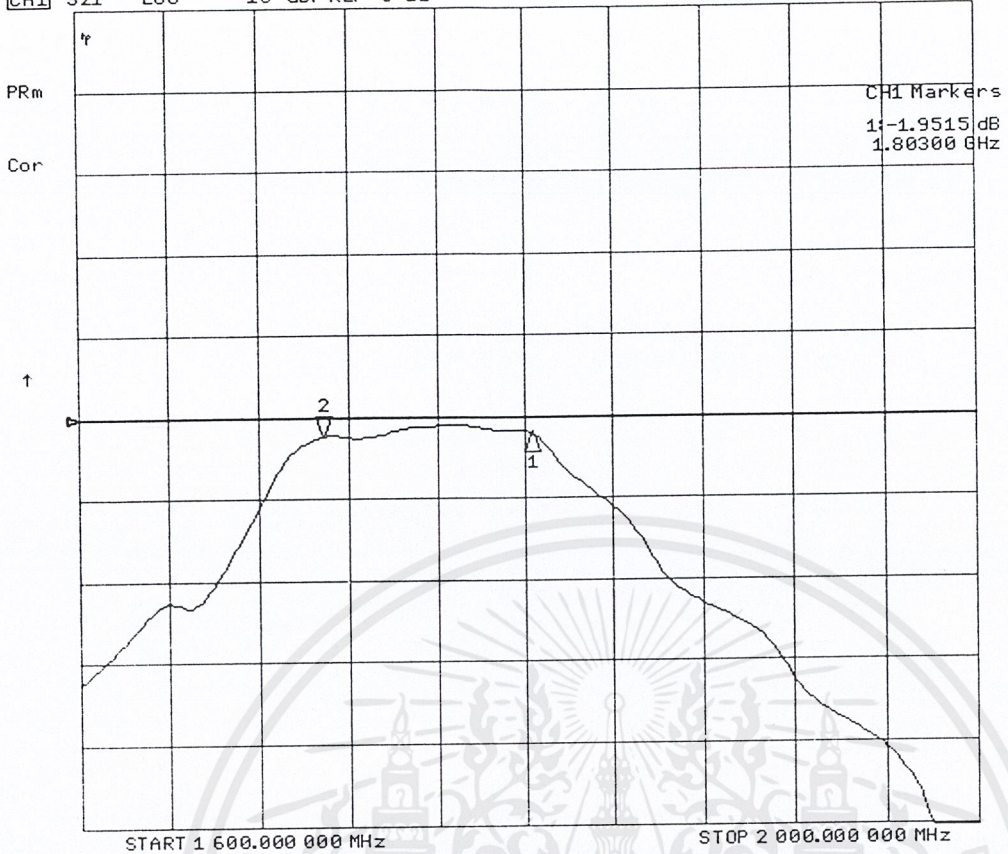
M70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19 Feb 2002 13:24:35

2:-2.4133 dB 1 708.000 000 MHz

[CH1] S21 LOG 10 dB/REF 0 dB



Filter
M79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[HOME](#) [Product Information](#) [Site Map](#)
[Investor Relations](#) [About Murata](#) [Contact](#)

[Search Engine](#) | [Catalog Library](#) | [Press Release](#) | [Design Support](#) | [Customer Support](#) |

[Home](#) > [Product Information](#) > [Search Engine](#) > [Catalog: DFY21R74C1R84BHE](#)
[Filters for Communication Equipment](#) > [Antennas/Duplexers](#) > [Dielectric Duplexers](#)

Specification

Details

| | |
|----------------------|-----------------------------|
| Previous Part Number | DFY21R74C1R84BHE |
| Global Part Number | DFYH61G74HDHAA |
| <u> Tx </u> | <u> Tx </u> |
| Ft | 1747.5MHz (Ft) |
| Bandwidth(Tx) | 75.0MHz |
| Operation Temp.(1) | (-30 to +85 degree C) |
| IL at BW(1) | 2.3dB max. |
| Operation Temp.(2) | (0 to +35 degree C) |
| IL at BW(2) | 2.0dB max. |
| Ripple | 1.8dB max. |
| VSWR | 1.8 max. |
| Attenuation (1) | 20dB min. (1805 to 1880MHz) |
| Attenuation (2) | 35dB min. (3420 to 3570MHz) |
| Attenuation (3) | 30dB min. (5130 to 5355MHz) |
| Attenuation (4) | |
| Attenuation (5) | |
| Attenuation (6) | |
| Input Power | 2.0W max. |
| Impedance | 50 ohm |
| <u> Rx </u> | <u> Rx </u> |
| Fr | 1842.5MHz (Fr) |
| Bandwidth(Rx) | 75.0MHz |
| Operation Temp.(1) | (-30 to +85 degree C) |
| IL at BW (1) | 2.7dB max. |
| Operation Temp.(2) | |
| IL at BW (2) | |
| Ripple | 1.7dB max. |
| VSWR | 2.0 max. |
| Attenuation (1) | 20dB min. (1710 to 1785MHz) |
| Attenuation (2) | 10dB min. (1920 to 1980MHz) |
| Attenuation (3) | 21dB min. (1980 to 3425MHz) |
| Attenuation (4) | |

- [Part Numbering](#)
- [Appearance](#)
- [Dimension](#)
- [Feature, Application](#)
- [Pass_Band\(Tx\)](#)
- [Spurious\(Tx\)](#)
- [Pass_Band\(Rx\)](#)
- [Spurious\(Rx\)](#)
- [Land Pattern](#)
- [Reflow Condition](#)
- [Tape](#)
- [Reel](#)
- [Notice](#)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของ Murata สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่วการณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------|-----------|
| Attenuation (5) | |
| Attenuation (6) | |
| Input Power | 1.0W max. |
| Impedance | 50 ohm |

Minimum Quantity

| | |
|--------------------|-----|
| 180mm Paper Tape | |
| 180mm Plastic Tape | |
| 330mm Paper Tape | |
| 330mm Plastic Tape | 500 |
| Bulk Case | |
| Bulk(Bag) | |
| Ammo Pack | |
| 320Reel | |
| Magazine | |
| Box | |

Product specifications in this catalog are as of DECEMBER, 2001, and are subject to change or obsolescence without notice.

All products and company names herein are trademarks or registered trademarks of their respective owners.

[TOP]

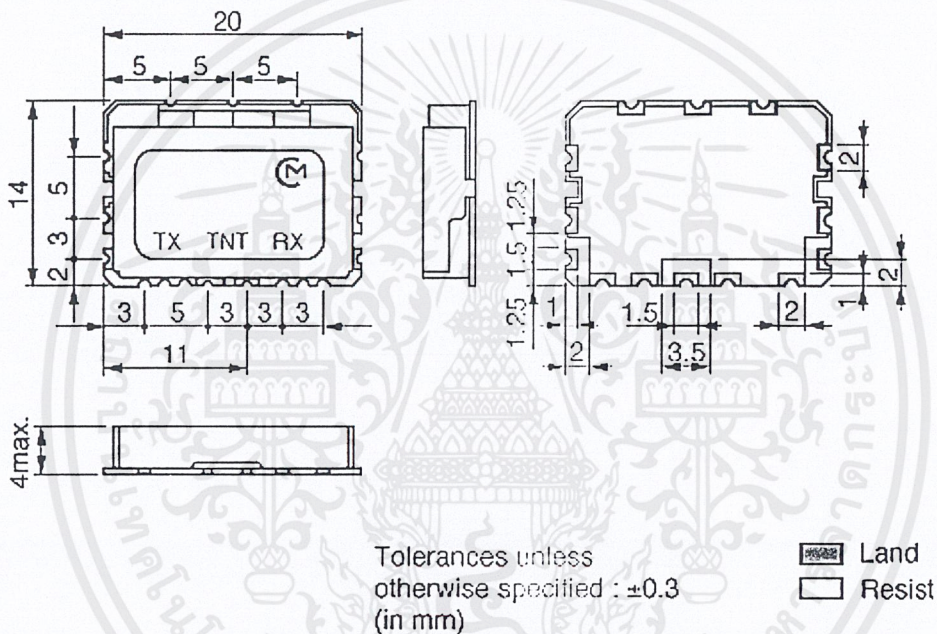
All Rights Reserved, Copyright
Murata Manufacturing Co., Ltd. 2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[HOME](#) [Product Information](#) [Site Map](#)
[Investor Relations](#) [About Murata](#) [Contact](#)


 Murata is Eminent

[Search Engine](#) | [Catalog Library](#) | [Press Release](#) | [Design Support](#) | [Customer Support](#) |

[Home](#) > [Product Information](#) > [Search Engine](#) > DFY21R74C1R84BHE: **Dimension**
[Filters for Communication Equipment](#) > [Antennas/Duplexers](#) > [Dielectric Duplexers](#)


All products and company names herein are trademarks or registered trademarks of their respective owners.

[TOP]

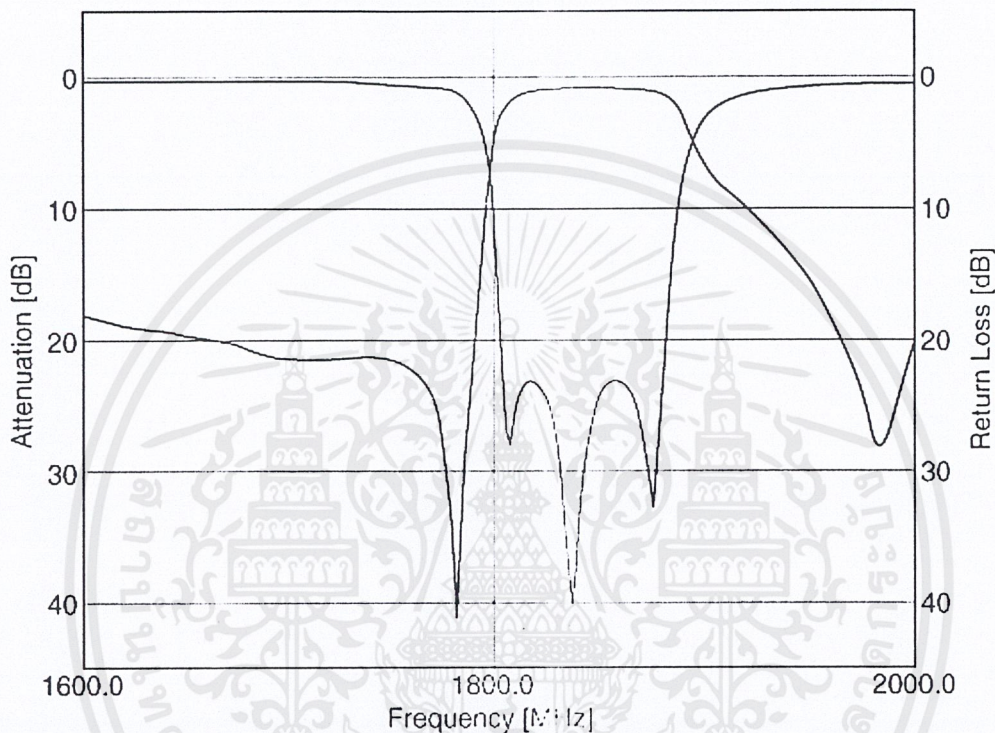
All Rights Reserved, Copyright
 Murata Manufacturing Co., Ltd. 2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[|Search Engine](#)
[|Catalog Library](#)
[|Press Release](#)
[|Design Support](#)
[|Customer Support](#)

Home > [Product Information](#) > [Search Engine](#) > DFY21R74C1R84BHE: **Pass_Band(Tx)**

Filters for Communication Equipment > Antennas/Duplexers > Dielectric Duplexers



All products and company names herein are trademarks or registered trademarks of their respective owners.

[TOP]

All Rights Reserved, Copyright
Murata Manufacturing Co., Ltd. 2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[HOME](#)
[Product Information](#)
[Site Map](#)

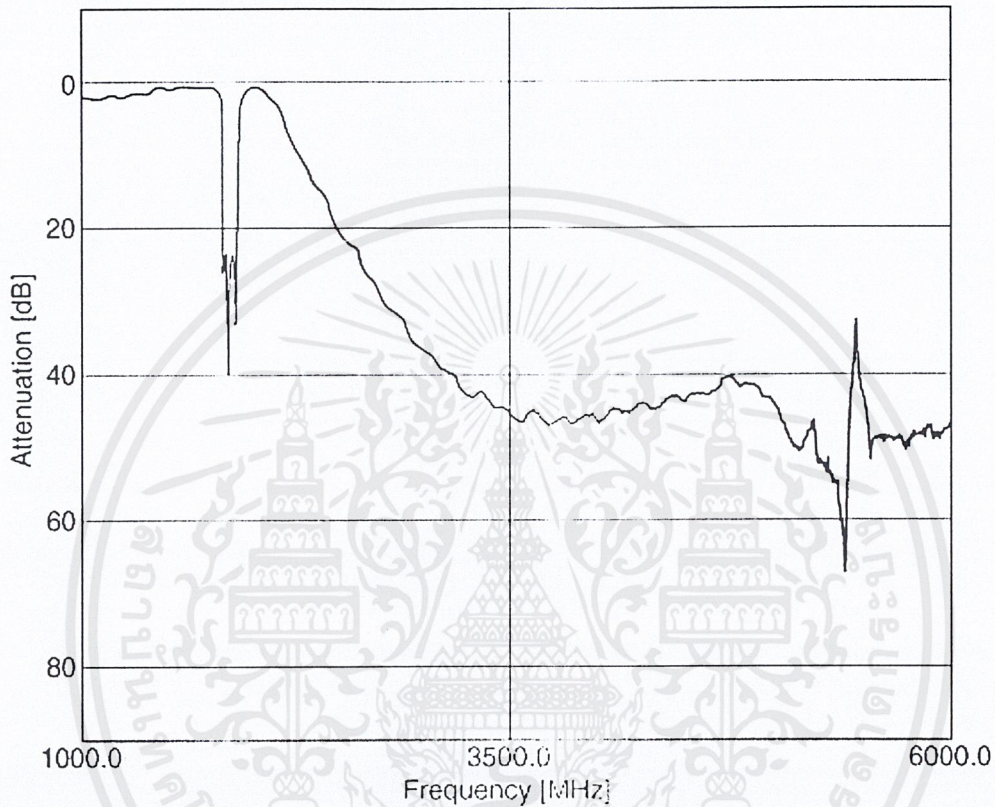
[Investor Relations](#)
[About Murata](#)
[Contact](#)


 Murata
 Innovator in Electron

[|Search Engine](#)
[|Catalog Library](#)
[|Press Release](#)
[|Design Support](#)
[|Customer Support](#)

[Home](#) > [Product Information](#) > [Search Engine](#) > DFY21R74C1R84BHE: **Spurious(Tx)**

[Filters for Communication Equipment](#) > [Antennas/Duplexers](#) > [Dielectric Duplexers](#)



All products and company names herein are trademarks or registered trademarks of their respective owners.

[TOP]

All Rights Reserved, Copyright
 Murata Manufacturing Co., Ltd. 2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

.../CD962034.GIF&sHinnmTmp=DFY21R74C1R84BHE&sLang=2&sCapt=Spurious(Tx)&nF7/2/45

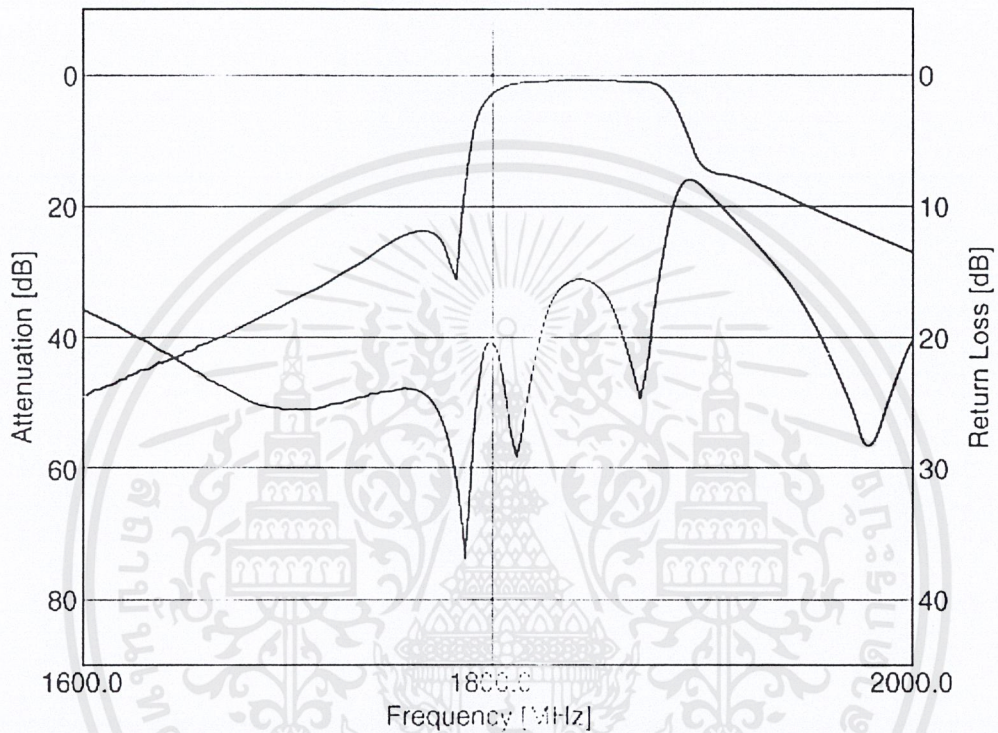
[HOME](#)
[Product Information](#)
[Site Map](#)
[Investor Relations](#)
[About Murata](#)
[Contact](#)



[Search Engine](#)
[Catalog Library](#)
[Press Release](#)
[Design Support](#)
[Customer Support](#)

Home > [Product Information](#) > Search Engine > DFY21R74C1R84BHE: **Pass_Band(Rx)**

Filters for Communication Equipment > Antennas/Duplexers > Dielectric Duplexers



All products and company names herein are trademarks or registered trademarks of their respective owners.

[TOP]

All Rights Reserved, Copyright
Murata Manufacturing Co., Ltd. 2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

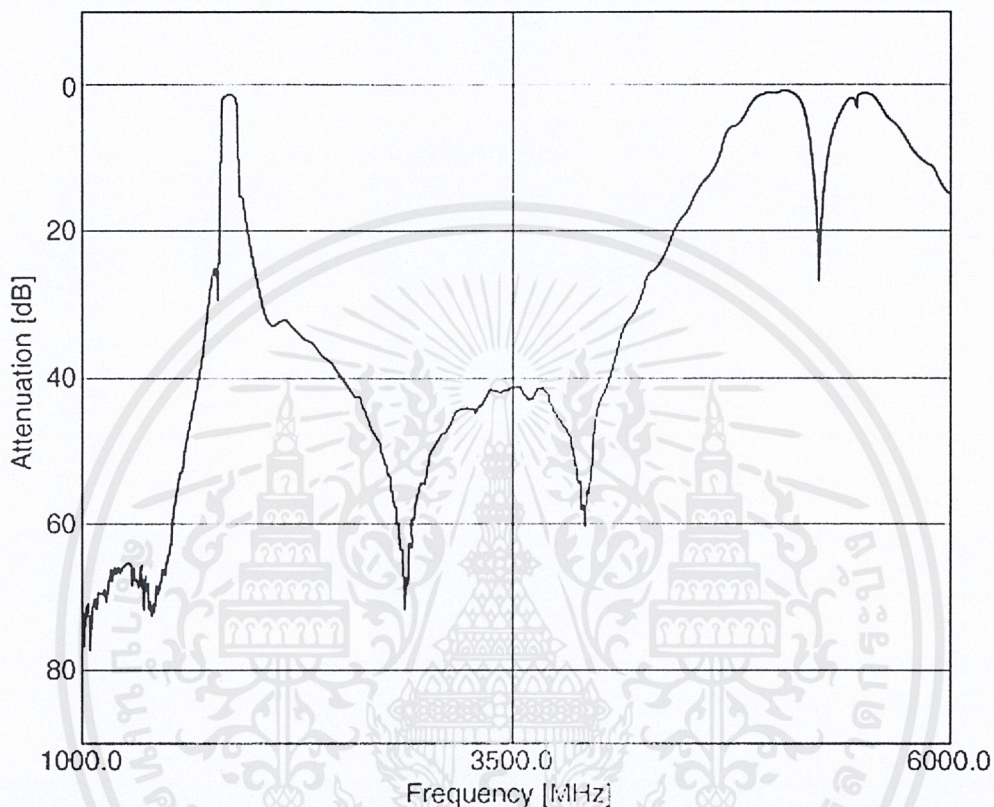
[HOME](#)
[Product Information](#)
[Site Map](#)
[Investor Relations](#)
[About Murata](#)
[Contact](#)


 Murata is. Electron

[Search Engine](#)
[Catalog Library](#)
[Press Release](#)
[Design Support](#)
[Customer Support](#)

Home > [Product Information](#) > [Search Engine](#) > DFY21R74C1R84BHE: **Spurious(Rx)**

Filters for Communication Equipment > Antennas/Duplexers > Dielectric Duplexers



All products and company names herein are trademarks or registered trademarks of their respective owners.

[TOP]

All Rights Reserved, Copyright
 Murata Manufacturing Co., Ltd. 2002

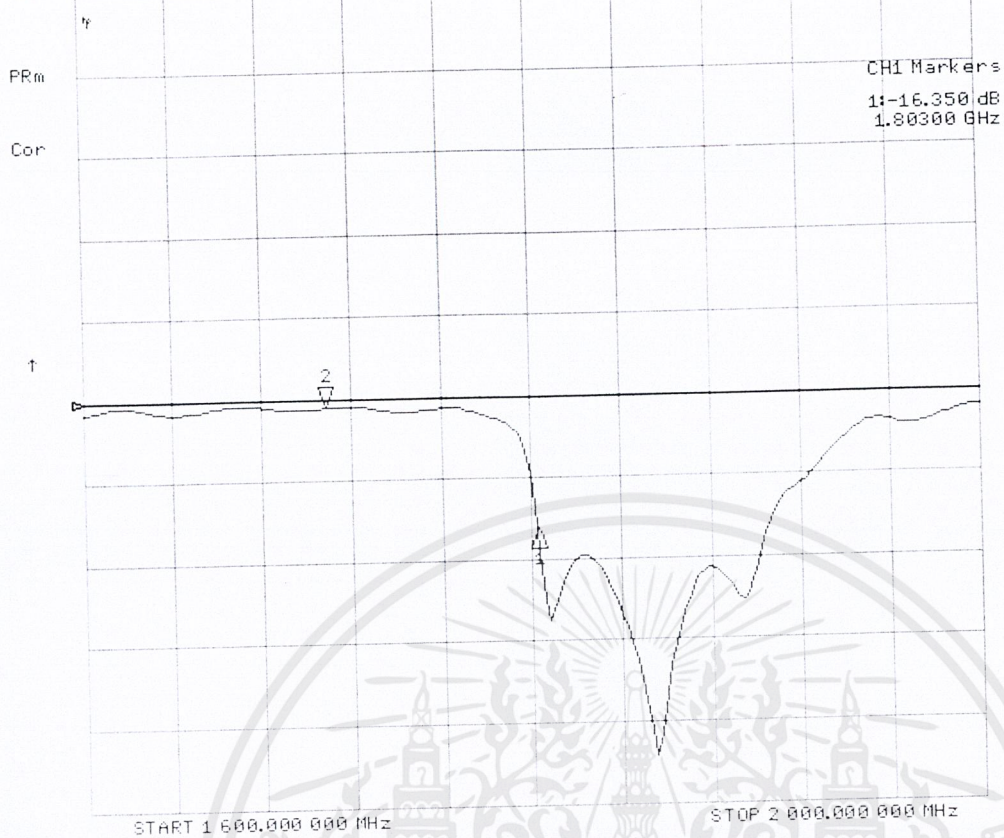
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

.../CD962036.GIF&sHinnmTmp=DFY21R74C1R84BHE&sLang=2&sCapt=Spurious(Rx)&nF7/2/45

19 Feb 2002 13:36:14

2:-1.0580 dB 1 708.000 000 MHz

[CH1] S21 LOG 10 dB/REF 0 dB



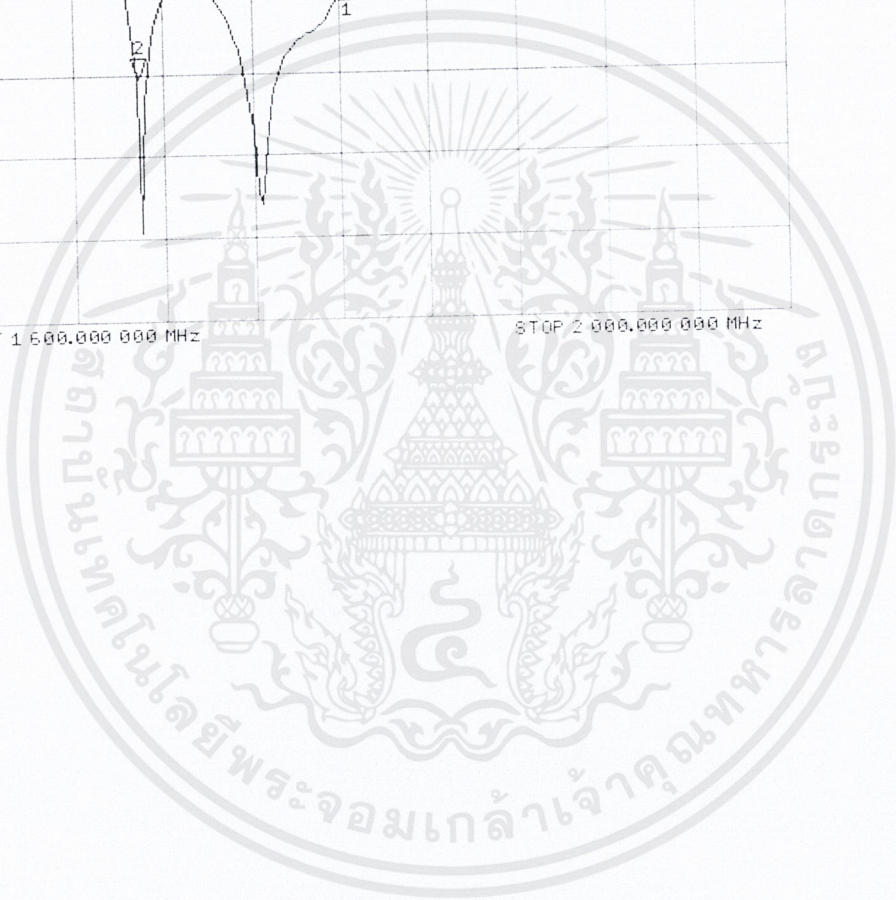
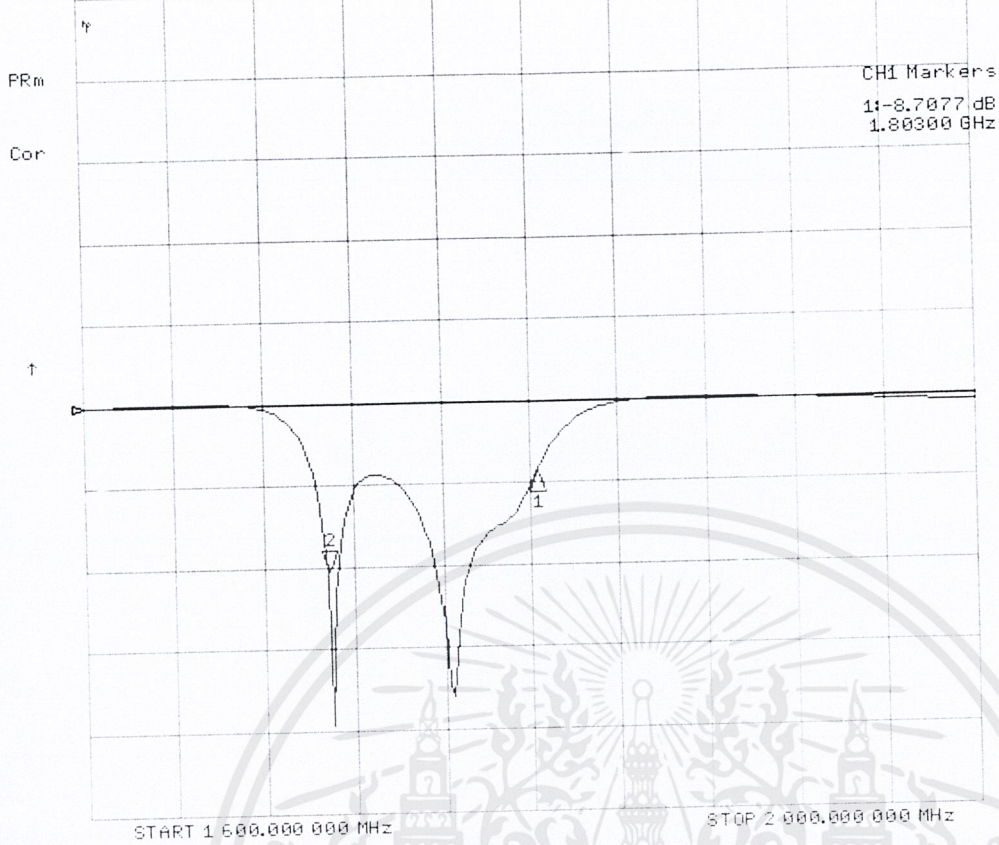
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Diplex

19 Feb 2002 13:26:11

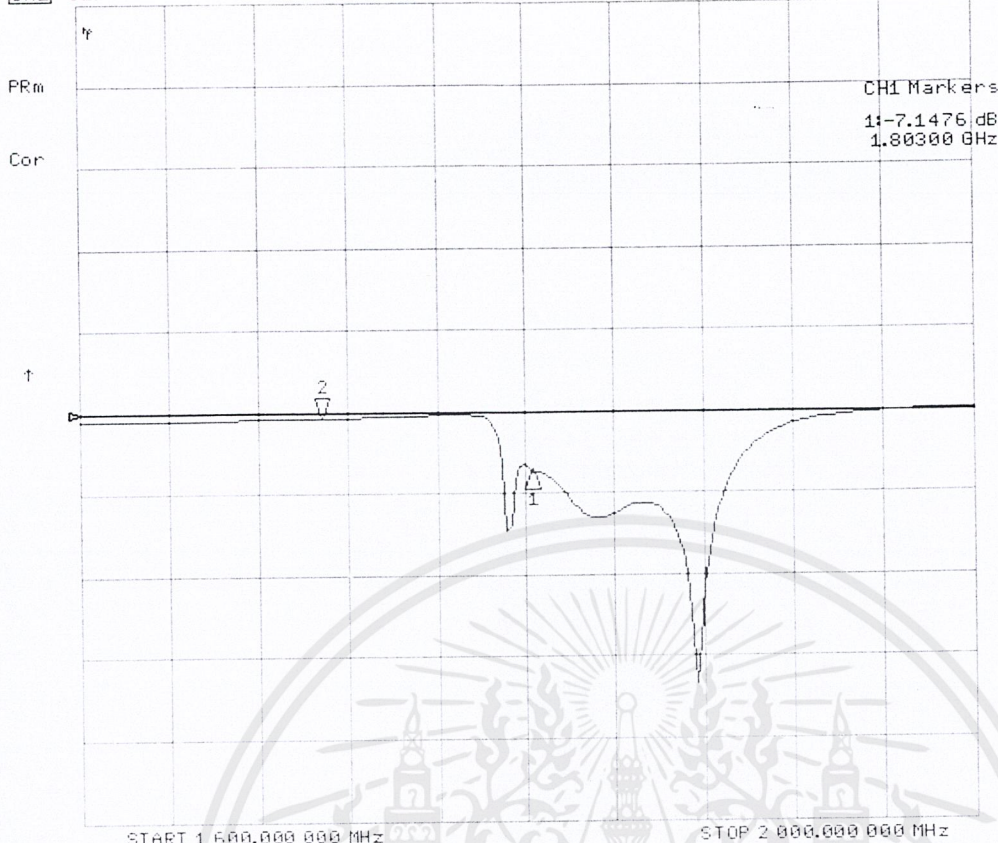
2:-20.495 dB 1 700.000 000 MHz

[CH1] S11 LOG 10 dB/REF 0 dB



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CH1 S11 LOG 10 dB/REF 0 dB 2:-.74980 dB 1 700.000 000 MHz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Duplessu

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความช่วยเหลือ และการให้คำปรึกษา ของอาจารย์ที่ปรึกษา คือ ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และ ผศ.สมผล โกศลวิตร รวมถึง นายณฤทธิ์ ยิ่งธนิศรา ที่ปริญญานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือเป็นอย่างดี จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. C. A. Balanis ,“Antenna Theory Analysis and Design” ,Harper & Row Publishers ,
New York , 1982
2. โมไนย ไกรฤกษ์ และ วิวัฒน์ กิรานนท์ ,“ทฤษฎีสายอากาศ” ,วศ.ศจล. 123 ,คณะวิศวกรรมศาสตร์ ,
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. รศ. ดร. ถวิล พึ่งมา ,“ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์” . ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ,
คณะวิศวกรรมศาสตร์ , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
4. S. Kosulvit , C. Phongcharoenpanich , M. Krairiksh and T. Wakabayachi ,“A Simple and Cost -
Effective Bidirectional Antenna Using a Probe Excited Circular Ring” ,IEICE TRANS.
ELECTRON. , VOL.E84 – C ,NO.4 APRIL 2001

