

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง วิทยาเขตระยอง

การออกแบบสายอากาศแบบรายคาบล็อกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก

**DESIGN OF LOG-PERIODIC ARRAY ANTENNA  
ON DIELECTRIC SUBSTRATE**



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาเทคโนโลยีโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การออกแบบสายอากาศแบบรายคาบสี่กบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก  
DESIGN OF LOG-PERIODIC ARRAY ANTENNA  
ON DIELECTRIC SUBSTRATE

ชื่อนักศึกษา นายสมบัติ เหมือนนาค 41013347

นายสรารุท พรหมณี 41013349

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์มนต์ชัย แซ่มซ้อย

อาจารย์พิชญ สุพรรณกุล

ภาควิชา เทคนิคอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2543

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังอนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

( )

.....กรรมการ

( )

.....กรรมการ

( )

.....กรรมการ

( )

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การออกแบบสายอากาศแบบรายคาบสื่อท่อนวัสดุฐานรอง ไดอิเล็กตริก DESIGN OF LOG-PERIODIC ARRAY ANTENNA ON DIELECTRIC SUBSTRATE
ชื่อนักศึกษา	นายสมบัติ เหมือนนาค 41013347 นายสรารุช พรหมณี 41013349
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์มนต์ชัย แซ่ม้อย อาจารย์พิชญ สุพรรณกุล
ปริญญา	อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีโทรคมนาคม
ภาควิชา	เทคนิคอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2543

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบและทดลองสายอากาศแบบรายคาบสื่อท่อนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (FR4) ในย่านความถี่ 450 MHz ถึง 4 GHz โครงสร้างของสายอากาศเป็นแบบระนาบฟันซี่ (tooth planar curve) ขนาด 18 และ 22 องศาประกอบ มีการป้อนสัญญาณเหมือนสายอากาศไดโพล โดยในปริญญานิพนธ์นี้ได้ศึกษาเจาะจงที่โครงสร้างแบบ self-complementary ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าสายอากาศชนิดนี้สามารถนำไปใช้งานได้ในลักษณะย่านความถี่กว้าง (broadband) ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (reflection coefficient) อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) อัตราการขยาย (gain) ตลอดจนแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (radiation pattern) ของสายอากาศได้นำเสนอไว้แล้วในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

<b>Title</b>	DESIGN OF LOG-PERIODIC ARRAY ANTENNA ON DIELECTRIC SUBSTRATE
<b>Student</b>	Mr.Sombut Muannak 41013347 Mr.Sarawut Prammanee 41013349
<b>Advisor</b>	Mr.Monchai Chamchoy Mr.Pichaya Supanakoon
<b>Degree</b>	Bachelor Degree of Industrial Technology
<b>Programme</b>	Telecommunication
<b>Department</b>	Industrial Technology
<b>Academic year</b>	2000

### ABSTRACT

In this project , the log-periodic array antenna on the FR4 dielectric substrate has been designed and experimented. This antenna can be operated cover the frequency range of 450 MHz to 4 GHz and used feed method as same as dipole antenna. The structure of the antenna is toothed planar radiator shape with 18 and 22 elements . Moreover , self-complementary structure are also studied. From the results , the fabricated antenna can be used in broadband frequency range and results of reflection coefficient , standing wave ratio , gain and radiation patterns have been presented in this project.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่คอยให้กำลังใจและคอยให้ความช่วยเหลือเสมอมา ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ทุกท่าน โดยเฉพาะอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์พิชญ สุพรรณกุล และอาจารย์มนต์ชัย แซ่มซ้อย ที่คอยให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือด้านข้อมูลต่าง ๆ ทั้งในด้านทฤษฎีและปฏิบัติเป็นอย่างดี และที่จะขาดเสียไม่ได้คือต้องขอขอบพระคุณ ภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้โอกาสคณะผู้จัดทำมีโอกาสเข้ามาศึกษา ณ. ที่แห่งนี้

สุดท้ายนี้ทางคณะผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่กลุ่มผู้จัดทำจนทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

นายสมบัติ เหมือนนาค  
นายสรารุช พราหมณี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	2
1.4 รายละเอียดและขั้นตอนการทำปริญญานิพนธ์	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีสายอากาศแบบรายคาบเล็กน้อย	5
2.1 แนวความคิดและทฤษฎีของสายอากาศแบบอิสระจากความถี่	5
2.1.1 ทฤษฎีสายอากาศแบบอิสระจากความถี่	6
2.1.2 คุณลักษณะของสายอากาศแบบอิสระจากความถี่	8
2.2 หลักการของสายอากาศแบบรายคาบเล็กน้อย	11
2.3 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศแบบรายคาบเล็กน้อย	15
2.3.1 รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ	15
2.3.2 โพลาริเซชัน	17
2.3.3 แบนด์วิดท์	20
2.3.4 อัตราขยายและสภาพรีน่าของสายอากาศ	20
2.3.5 อินพุทอิมพีแดนซ์	22
2.4 การวิเคราะห์ในเชิงกระแสและแรงดันตาม โครงสร้างของสายอากาศรายคาบเล็กน้อย	26
2.5 สายอากาศรายคาบเล็กน้อยแบบระนาบพินซ์	30
2.6 ความสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายอากาศ	34
2.6.1 ความสูญเสียที่เกิดจากกำลังงานย้อนกลับ	34
2.6.2 ความสูญเสียกำลังงานจากการมิสแมทช์	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6.3 ความสูญเสียเนื่องจากผิวของตัวนำ	36
2.7 การสมมูลย์สายอากาศ	38
2.7.1 การเมทซ์ด้วยช่วงนำสัญญาณยาว $\frac{1}{4}\lambda$	38
2.7.2 การเมทซ์ซึ่งด้วยสลับ	39
บทที่ 3 การคำนวณ การออกแบบและการสร้าง	41
3.1 วิธีการคำนวณและออกแบบ	41
3.2 ขั้นตอนการออกแบบ	43
3.3 ขั้นตอนการสร้างสายอากาศแบบปลายคาบถือกบนวัสดุฐานรอง ไดอิเล็กตริก	53
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	57
4.1 การจำลองการทำงานของสายอากาศด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	57
4.2 โครงสร้างของสายอากาศที่ใช้ในการทดสอบ	60
4.3 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ตอินพุทและอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศ	63
4.4 การวัดแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	66
4.5 การวัดเกน (GAIN) ของสายอากาศ	73
4.6 การนำสายอากาศแบบปลายคาบถือกบนวัสดุฐานรอง ไดอิเล็กตริก ไปประยุกต์ใช้งาน	74
บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	75
5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	75
5.2 ข้อจำกัดในการทำปริญญานิพนธ์	76
5.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาปริญญานิพนธ์	76
ภาคผนวก	77
ภาคผนวก ก	78
ภาคผนวก ข	81
บรรณานุกรม	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

ภาพที่	หน้า
รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการทำปฏิกิริยานิวเคลียร์	3
รูปที่ 2.1 สายอากาศแบบ Complementary dipole (Ribbon dipole)	9
รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบสายเคเบิลคู่ ซึ่งเป็นฟังก์ชันลอการิทึมของความถี่	12
รูปที่ 2.3 สายอากาศแบบสายเคเบิลคู่ชนิดต่างๆ	13
รูปที่ 2.3 (ต่อ)สายอากาศแบบสายเคเบิลคู่ชนิดต่างๆ	14
รูปที่ 2.4 แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	16
รูปที่ 2.5 ลักษณะโพลารไรเซชันของสายอากาศ	18
รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลย์อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในโหมดการส่ง	23
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลย์อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในโหมดการรับ	26
รูปที่ 2.8 (a) แรงดันในแวนอนของตัวพีคเคอร์ของสายอากาศสายเคเบิลคู่ (b) ตำแหน่งขององค์ประกอบที่สัมพันธ์กัน	28
รูปที่ 2.9 (a) กระแสอินพุทขององค์ประกอบในสายอากาศสายเคเบิลคู่ (b) ตำแหน่งขององค์ประกอบที่สัมพันธ์กัน	29
รูปที่ 2.10 แบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศสายเคเบิลคู่	30
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของสายอากาศสายเคเบิลคู่แบบระนาบพื้นตั้ง	33
รูปที่ 2.12 การลดทอนของความหนาแน่นกระแสเนื่องจากสกินเอฟเฟกต์	36
รูปที่ 2.13 การแมทซ์ซึ่งด้วยสายยาว $\frac{1}{4}\lambda$	39
รูปที่ 2.14 สลับที่ใช้ในการแมทซ์ซึ่ง	40
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการออกแบบสายอากาศสายเคเบิลคู่ บนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก	42
รูปที่ 3.2 โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศแบบ self-complementary	43
รูปที่ 3.3 คอนทราสต์ของสภาพเจาะจงทิศทางต่อ $\sigma$ และ $\tau$ สำหรับสายอากาศแบบสายเคเบิลคู่	44
รูปที่ 3.4 โครงสร้างของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณ (18 อิลิมเมตร)	50
รูปที่ 3.5 โครงสร้างของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณ (22 อิลิมเมตร)	52
รูปที่ 3.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการสร้างสายอากาศ	53
รูปที่ 3.6 (ต่อ) แผนผังแสดงขั้นตอนการสร้างสายอากาศ	54

## สารบัญรูป (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการถ่ายขึ้นลายสายอากาศลงบนครายฟิล์มที่ติดอยู่บนแผ่นฉนวนงาน	55
รูปที่ 3.8 แผ่นฉนวนงานที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว	55
รูปที่ 3.9 ส่วนประกอบต่างๆของสายอากาศ	56
รูปที่ 3.10 สายอากาศที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ชนิด 18 อติเมท	56
ป้อนสัญญาณจาก connector โดยตรง	56
รูปที่ 4.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการออกแบบสายอากาศด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	58
รูปที่ 4.2 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศที่ใช้ในการ Simulate	59
รูปที่ 4.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ตอินพุทของสายอากาศที่ได้จากการ Simulate	59
รูปที่ 4.4 แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจากการ Simulate	60
รูปที่ 4.5 สายอากาศแบบระบายความร้อนบนวัสดุฐานรอง ไดอิเล็กตริก โครงสร้างที่ 1	61
รูปที่ 4.6 สายอากาศแบบระบายความร้อนบนวัสดุฐานรอง ไดอิเล็กตริก โครงสร้างที่ 2	62
รูปที่ 4.7 ชุดสลับแม่เหล็กของสายอากาศโครงสร้างที่ 2	62
รูปที่ 4.8 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสายอากาศ	63
รูปที่ 4.9 สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ตอินพุทของสายอากาศโครงสร้างที่ 1	64
รูปที่ 4.10 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศโครงสร้างที่ 1	65
รูปที่ 4.11 สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ตอินพุทของสายอากาศโครงสร้างที่ 2	65
รูปที่ 4.12 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศโครงสร้างที่ 2	66
รูปที่ 4.13 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	67
รูปที่ 4.14 วิธีการวัดแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	67
รูปที่ 4.15 กำลังที่สายอากาศด้านรับรับสัญญาณได้	68
รูปที่ 4.16 แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโครงสร้างที่ 1	69
วางสายอากาศรับสัญญาณในแนวตั้ง	69
รูปที่ 4.17 แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโครงสร้างที่ 2	70
วางสายอากาศรับสัญญาณในแนวตั้ง	70
รูปที่ 4.18 แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโครงสร้างที่ 1	71
วางสายอากาศรับสัญญาณในแนวนอน	71

## สารบัญรูป (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
รูปที่ 4.19 แพทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโครงสร้างที่ 2 วางสายอากาศรับสัญญาณในแนวนอน	72
รูปที่ 4.20 วิธีการติดตั้งใช้งานสายอากาศในการรับสัญญาณของเครื่องรับโทรทัศน์ ย่านความถี่ UHF (เช่น ITV)	74



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าความต้านทานของโลหะตัวนำ	37
3.1 ขนาดของสายอากาศสำหรับค่า $\tau = 0.90$	51
4.1 กำลังของสัญญาณที่สายอากาศรับได้และอัตราขยายของสายอากาศ	73



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริภูมิวิทยุ

สายอากาศ (Antenna) เป็นส่วนหนึ่งที่จะขาดไม่ได้สำหรับระบบการสื่อสารด้วยการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (เช่นคลื่นความถี่วิทยุ) ไปในอากาศ(Radiowave Propagation) ซึ่งถ้าจะเปรียบเทียบระบบสายอากาศเข้ากับส่วนประกอบของกำลังไฟฟ้า ก็เปรียบเสมือนกับสายส่งที่เชื่อมสถานีจ่ายไฟฟ้าทางด้านต้นทางและสถานีรับปลายทาง จะแตกต่างกันก็ตรงที่ว่าไม่ได้จ่ายหรือรับเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่ง แต่จ่ายและรับพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยมีอากาศเป็นตัวรับและส่งสัญญาณนั่นเอง

ในการสื่อสารโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในบางครั้งจำเป็นที่จะต้องใช้สายอากาศที่ทำงานได้ในแถบความถี่กว้างเพื่อให้ระบบทำงานได้ดี ประหยัดและสะดวกในการใช้งาน โดยที่สายอากาศแบบนี้จะเรียกว่าเป็นสายอากาศแบบบรอดแบนด์ (Broad-band Antenna) ตัวอย่างหนึ่งของสายอากาศชนิดนี้คือสายอากาศแบบรายคาบล็อก (Log-periodic Antenna) และเนื่องด้วยการสื่อสารในปัจจุบันนี้ ได้มีการใช้งานการสื่อสารในย่านความถี่ที่สูงขึ้นเช่นในย่านความถี่ไมโครเวฟ ดังนั้นสายอากาศก็จำเป็นต้องพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ดังกล่าวได้ และสายอากาศแบบรายคาบล็อกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (Log-periodic Array Antenna on dielectric substrate) ก็เป็นสายอากาศชนิดหนึ่งที่สามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของปริภูมิวิทยุ

เนื่องจากสายอากาศแบบรายคาบล็อกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกเป็นสายอากาศชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างใกล้เคียงกับแนวความคิดของโครงสร้างที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ โดยสายอากาศแบบรายคาบล็อกบนวัสดุฐานรอง ไดอิเล็กตริกนี้จะคล้ายคลึงกับโครงสร้างแบบแถวลำดับ ไดโพล (Dipole Array) ซึ่งแต่ละองค์ประกอบทำจากอะลูมิเนียม ซึ่งเป็น โครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ และมีข้อจำกัดในการใช้งานในย่านความถี่สูงเช่นย่านความถี่ไมโครเวฟ แต่เมื่อนำมาสร้างเป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างแบบรายคาบล็อกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกแล้ว จะทำให้สามารถขจัดข้อจำกัดดังกล่าวข้างต้นได้ และเนื่องจากมีโครงสร้างเป็นแผ่นเรียบ จึงสามารถออกแบบและพัฒนาให้มีรูปร่างที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและมีความสะดวกในการใช้งานได้ ประกอบกับสายอากาศแบบรายคาบล็อกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกนี้เป็นสายอากาศที่มีขนาดเล็ก กะทัดรัด น้ำหนักเบา ทำให้สามารถนำไปติดตั้งใช้งานได้ง่าย ดังนั้นปริภูมิวิทยุนี้จึงต้องการที่จะสร้างสายอากาศแบบรายคาบล็อกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกที่มีคุณสมบัติดังได้กล่าวไว้ข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์

1. ศึกษาการจำลองการทำงานของสายอากาศแบบรายคาบสี่กบนบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (Log-periodic Array Antenna on dielectric substrate) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
2. คำนวณ ออกแบบและสร้างสายอากาศแบบรายคาบสี่กบนบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกแบบ Log-periodic toothed planar antenna ชนิด self-complementary ในช่วงความถี่ใช้งาน (Bandwidth) 450MHz - 4 GHz
3. วัดและทดสอบสายอากาศแบบรายคาบสี่กบนบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกที่สร้างขึ้นพร้อมทั้งวิเคราะห์และประเมินผลการทดสอบที่ได้

### 1.4 รายละเอียดและขั้นตอนการทำปริญญาานิพนธ์

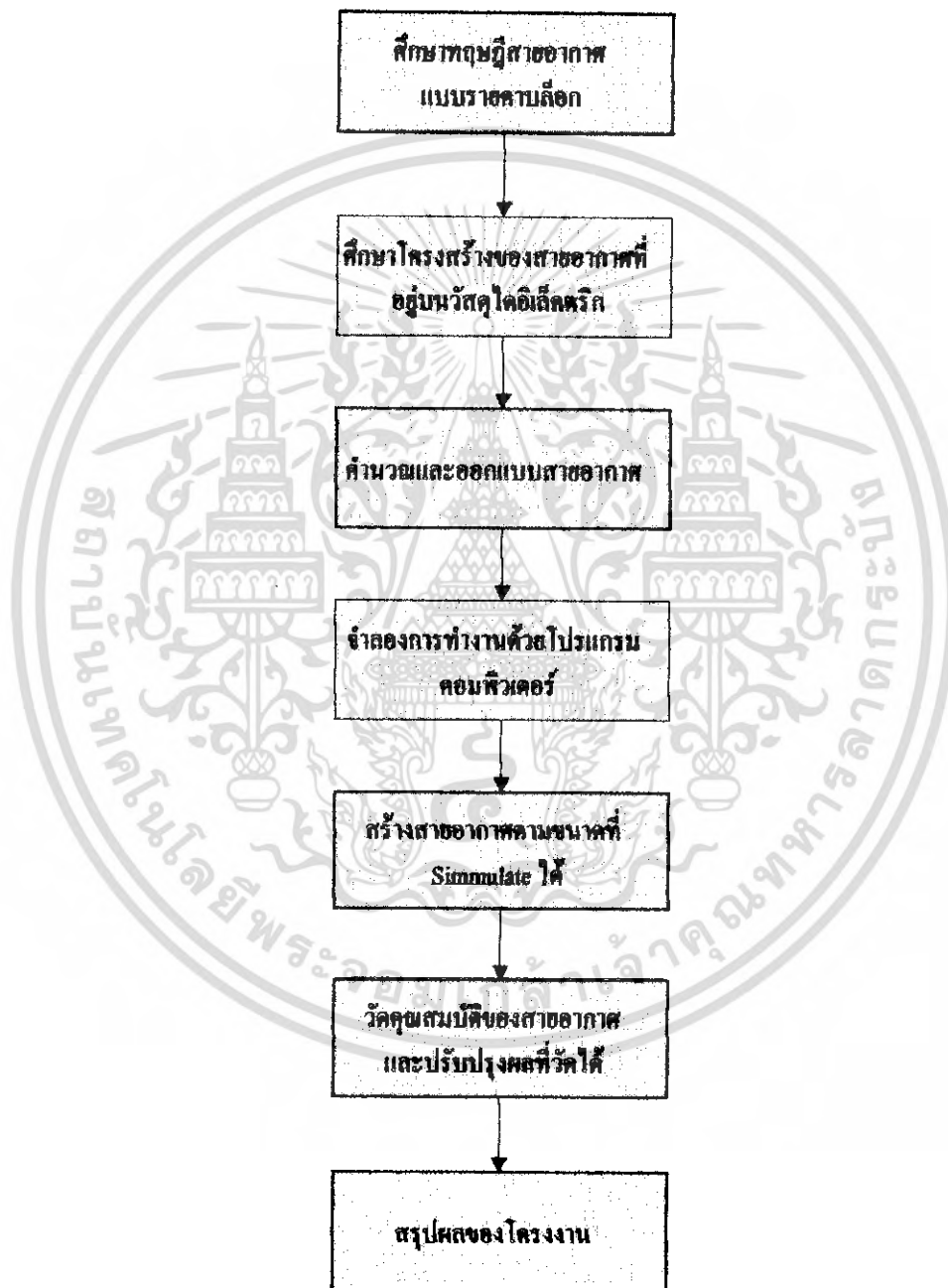
ในการทำปริญญาานิพนธ์นี้ได้มีการศึกษาถึงข้อมูลทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง การวางแผนการทำปริญญาานิพนธ์ในส่วนต่างๆทั้งการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศที่สร้างขึ้นจริง โดยจะมีการทำงานตามขั้นตอนตามแผนผังที่แสดงดังรูปที่ 1.1

ในส่วนของทฤษฎีที่ได้ทำการศึกษา นั้น จะทำการศึกษาถึงทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศที่เกี่ยวข้องกับหลักการและ โครงสร้างของสายอากาศแบบรายคาบสี่ก รวมทั้งคุณสมบัติและพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบรายคาบสี่กซึ่งเป็นสายอากาศประเภทหนึ่งของสายอากาศแบบอิสระ จากความถี่ จากนั้นได้ศึกษาถึงเรื่องเกี่ยวกับขั้วและพื้นผิวของสายอากาศ รวมถึงโครงสร้างของสายอากาศแบบ self-complementary และ โครงสร้างของสายอากาศแบบรายคาบสี่กที่สร้างอยู่บนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก ส่วนในด้านการวิเคราะห์จะใช้วิธีการวิเคราะห์สายอากาศในเชิงกระแสและแรงดันและวิเคราะห์ด้วยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สุดท้ายจะเป็นการศึกษาถึงการสูญเสียที่อาจจะเกิดขึ้นในสายอากาศและทฤษฎีการแผ่รังสีของสายอากาศ

ในส่วนของการคำนวณออกแบบและการสร้างจะอยู่ในบทที่ 3 ซึ่งได้กล่าวถึงการคำนวณและออกแบบจากสูตรพื้นฐานของสายอากาศแบบรายคาบสี่กแต่พิจารณาถึงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองที่นำมาใช้ด้วย โดยออกแบบที่ความถี่ใช้งาน 450MHz - 4 GHz และออกแบบด้วยโครงสร้างของสายอากาศรายคาบสี่กแบบระนาบพื้นตั้ง (Log-periodic toothed planar antenna) แล้วจึงนำค่าที่คำนวณและออกแบบได้มาจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากนั้นจึงนำค่าของขนาดที่จำลองการทำงาน (Simulate) ได้ผลเป็นที่ยอมรับได้มาทำการสร้างเป็นสายอากาศแบบรายคาบสี่กบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกตามที่ต้องการ

ในส่วนของการทดลองและผลการทดลองที่อยู่ในบทที่ 4 เป็นส่วนของการสร้างสายอากาศแบบสายคาบถ็อกบนวัสดุฐานรอง ไดอิเล็กตริกและการวัดคุณสมบัติพร้อมทั้งวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้เปรียบเทียบกับผลเชิงทฤษฎีว่าอยู่ในช่วงที่ออกแบบไว้หรือไม่

การสรุปผลการทำปริญญานิพนธ์จะอยู่ในบทที่ 5 เป็นส่วนของการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ในส่วนต้น ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางในการที่จะศึกษาและพัฒนาปริญญานิพนธ์นี้ต่อไป



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการทำปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความเข้าใจถึง โครงสร้าง หลักการและคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศแบบระบาย  
ลือกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก

2 สามารถออกแบบสร้างสายอากาศแบบระบายลือกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกได้ รู้ถึง  
กระบวนการสร้างสายอากาศ และวิธีการวิเคราะห์การแพร่กระจายสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า  
ของสายอากาศอย่างคร่าวๆ ได้

3 ได้รับความรู้จากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการออกแบบและการวิเคราะห์  
สายอากาศแบบระบายลือกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก นอกจากนั้นยังได้ศึกษาถึงการใช้อุปกรณ์  
และเครื่องมือทดสอบอื่นๆด้วย เช่น เครื่อง Network Analyzer และ Spectrum Analyzer เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีสายอากาศแบบรายคาบล็อก

สายอากาศแบบรายคาบล็อก เป็นสายอากาศชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างใกล้เคียงกับแนวความคิดของโครงสร้างที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ แต่เนื่องจากรูปร่างของสายอากาศชนิดนี้ไม่สามารถกำหนดได้โดยใช้มุม ดังนั้นมันจึงไม่ได้เป็นโครงสร้างที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่อย่างแท้จริงทีเดียว ทำให้การพิจารณาคูสมบัตินี้ของสายอากาศนี้ จะพิจารณาสายอากาศในลักษณะที่โครงสร้างซ้ำกันเป็นรายคาบล็อกแทนที่จะขึ้นอยู่กับการมีแอมพลิจูดที่เป็นอิสระจากความถี่เชิงมุม ซึ่งในบทนี้จะได้กล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวกับสายอากาศแบบรายคาบล็อกทั้งโครงสร้างทั่วไปและ โครงสร้างที่สร้างอยู่บนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก

### 2.1 แนวความคิดและทฤษฎีของสายอากาศแบบอิสระจากความถี่ (Concept and Theory of Frequency Independent Antenna)

แนวความคิดของสายอากาศแบบอิสระจากความถี่ (Frequency Independent antenna) คือจะมีลักษณะคุณสมบัติที่ไม่เปลี่ยนแปลงในด้านของการแผ่กระจายคลื่น (radiation) และค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ตลอดย่านความถี่ที่กว้างมากแต่ก็ไม่มีสายอากาศใดที่จะอิสระจากความถี่อย่างสมบูรณ์แบบเพราะว่าโครงสร้างทางกายภาพของสายอากาศนั้นมีขนาดที่จำกัดหรือมีขอบเขต อันจะมีผลทำให้เกิดขอบเขตของความถี่บนและความถี่ล่างขึ้น ซึ่งจะเรียกช่วงของความถี่ที่อยู่ระหว่างความถี่บนและความถี่ล่างนี้ว่าแถบความกว้างของความถี่ใช้งาน (bandwidth) ของสายอากาศ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของสายอากาศที่สำคัญตัวหนึ่งที่เป็นตัวกำหนดขนาดของสายอากาศ

สายอากาศแบบอิสระจากความถี่เป็นสายอากาศซึ่งโครงสร้างที่ทำการแผ่กระจายคลื่นจะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ที่เปลี่ยนแปลงเพื่อรักษารายยาวของการแผ่กระจายคลื่นในรูปค่าคงที่ทางสายอากาศในลักษณะของความยาวคลื่น ซึ่งสายอากาศแบบนี้สามารถทำได้ด้วยการออกแบบรูปทรงทางเรขาคณิตที่มีลักษณะหมุนวน (Rotation) โดยใช้ส่วนที่ทำการแผ่กระจายคลื่นขึ้นอยู่กับการหมุน โดยที่ไม่ขึ้นกับระยะทาง โดยที่เมื่อความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Pattern) เกิดการหมุนวน ซึ่งสายอากาศที่ว่ามีลักษณะเป็นแบบสไปรอล (Spiral) มุมเท่า หรือในเชิงลอการิทึม ซึ่งสามารถกำหนดได้จากสมการ

$$r = Ce^{a(\theta - \theta_0)} \quad (2.1)$$

โดยที่  $r$  และ  $\phi$  เป็นลักษณะพิกัดโคออร์ดิเนตแบบทรงกลมและ  $c, a$  และ  $\delta$  เป็นค่าคงที่

สายอากาศแบบอิสระจากความถี่ชนิดหนึ่งที่มีนิยมนำใช้ได้แก่ สายอากาศแบบらせนคาล็อก ซึ่งพัฒนามาจากสายอากาศแบบสปิรอล (Spiral Antenna) ทรงกรวยมุมเท่า อันเกิดจากการสอดรนาบหนึ่งระนาบเข้าตามแกนของกรวย ส่วนของสปิรอลซึ่งตัดกับระนาบนั้นจะทำการแพร่กระจายคลื่นต่อเมื่อเกิดการรีโซแนนซ์ (Resonance) ขึ้น ซึ่งการเพิ่มโคโพลขนาดครึ่งความยาวคลื่นเข้าไปจะเป็นการเสริมรีโซแนนซ์ รูปแบบโครงสร้างของสายอากาศจะมีลักษณะไขว้กันไปมาแบบเดียวกันกับในสายอากาศสปิรอล แต่สายอากาศแบบらせนคาล็อกนั้นไม่ใช่สายอากาศแบบอิสระจากความถี่ที่สมบูรณ์ เนื่องจากคุณสมบัติของสายอากาศนี้ซ้ำกันในลักษณะらせนคาล็อกแทนที่จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่เป็นอิสระจากความถี่เชิงมุม แต่ก็นับว่าเป็นสายอากาศแบบอิสระจากความถี่ชนิดหนึ่งเนื่องจากเมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติโดยรวมแล้วเหมือนกัน

### 2.1.1 ทฤษฎีสายอากาศแบบอิสระจากความถี่ (Theory of Frequency Independent Antenna)

การวิเคราะห์สายอากาศแบบอิสระจากความถี่เราจะเริ่มจากการสมมติให้สายอากาศมีลักษณะทางเรขาคณิตที่ดี ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยพิกัดทรงกลม  $(r, \theta, \phi)$  โดยมีจุดเชื่อมต่อ (terminal) ทั้งสองด้านอยู่ที่ระยะอนันต์เมื่อเปรียบเทียบกับจุดกำเนิด ส่วนจุดอื่นๆที่อยู่ภายในช่วงนี้จะวางตัวอย่างสมมาตรอยู่บนแกน  $\theta = 0$  และ  $\phi = \pi$  โดยมีความสัมพันธ์กันด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่ง และกำหนดให้สายอากาศเป็นตัวนำชนิดสมบูรณ์ (perfect conductor) ล้อมรอบด้วย Infinite Homogeneous และตัวกลางไอโซโทโรปิก ส่วนพื้นผิวของสายอากาศหรือขอบเขตของพื้นที่ของสายอากาศสามารถอธิบายได้ด้วยส่วนโค้ง

$$r = F(\theta, \phi) \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\Gamma$  แทนระยะตลอดทั้งพื้นผิวของสายอากาศ เนื่องจากสายอากาศสามารถแบ่งออกเป็นมาตรส่วนของความถี่ด้วยเวลา  $K$  ซึ่งต่ำกว่าความถี่เริ่มต้น แต่พื้นผิวทางกายภาพของสายอากาศจำเป็นต้องทำให้ค่าเวลา  $K$  ใหญ่กว่า ดังนั้นเพื่อรักษาให้คงไว้ซึ่งมิติทางไฟฟ้าบางมิติ จึงสามารถเขียนพื้นผิวใหม่ได้เป็น

$$r' = KF(\theta, \phi) \quad (2.3)$$

ทั้งพื้นผิวใหม่และพื้นผิวเก่าจะมีลักษณะเฉพาะตัว ซึ่งไม่เพียงมันจะมีลักษณะที่ง่าย แต่มันจะลงรอยสอดคล้องกันด้วย (ถ้าทั้งสองพื้นผิวมีค่าเป็นอนันต์) ความสอดคล้องนั้นสามารถสร้างขึ้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้เพียงมุม  $\phi$  และการเปลี่ยนนั้นจะไม่ยอมให้ในกรณีที่ว่าจุดเชื่อมต่อ (Terminal) ของสายอากาศทั้งสองพื้นผิวอยู่ที่จุดกำเนิด การหมุน  $\theta$  นั้นได้ถูกห้ามไม่ให้ทำในกรณีจุดเชื่อมต่อ (Terminal) ทั้งสองวางตัวโดยสมมาตรตลอดบนแกน  $\theta = 0$  และ  $\phi = \pi$  สำหรับสายอากาศทั้งสองก็เชื่อว่าสอดคล้องหรือลงรอยกับสายอากาศที่หนึ่งแต่จำเป็นต้องหมุนด้วยค่า  $C$  ดังนี้

$$KF(\theta, \phi) = F(\theta, \phi + C) \quad (2.4)$$

สำหรับมุมของการหมุน  $C$  ขึ้นอยู่กับค่า  $K$  แต่จะไม่ขึ้นอยู่กับค่า  $\theta$  หรือ  $\phi$  การสอดคล้องกันทางกายภาพแสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่เป็นตัวกำเนิดทางไฟฟ้ากระทำตัวเหมือนเป็นสองความถี่ อย่างไรก็ตามรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจะหมุนไปด้วยมุมสายตลอดช่วงมุม  $C$  เมื่อไม่มีข้อจำกัดสำหรับค่า  $K$  ( $0 \leq K \leq \infty$ ) แบบรูป (Pattern) จะหมุนโดย  $C$  ใน  $\phi$  ด้วยความถี่ เพราะว่า  $C$  ขึ้นอยู่กับค่า  $K$  แต่รูปร่างของมันจะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นอิมพีแดนซ์ (impedance) และ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจะเป็นอิสระจากความถี่ ทำให้ได้ฟังก์ชัน (Function) ซึ่งใช้แทน  $F(\theta, \phi)$  โดย Differentiated ทั้งสองข้างของสมการที่ (2.4) เทียบกับ  $C$  ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{d}{dC} [KF(\theta, \phi)] &= \frac{dK}{dC} F(\theta, \phi) \\ &= \frac{\partial}{\partial C} [F(\theta, \phi + C)] \\ \frac{d}{dC} [KF(\theta, \phi)] &= \frac{\partial}{\partial(\theta + C)} [F(\theta, \phi + C)] \end{aligned} \quad (2.5)$$

และจากสมการที่ (2.4) Differentiated ทั้งสองข้างของสมการเทียบกับ  $\phi$  จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \phi} [KF(\theta, \phi)] &= K \frac{\partial F(\theta, \phi)}{\partial \phi} \\ &= \frac{\partial}{\partial \phi} [F(\theta, \phi + C)] \\ \frac{\partial}{\partial \phi} [KF(\theta, \phi)] &= \frac{\partial}{\partial(\phi + C)} [F(\theta, \phi + C)] \end{aligned} \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.5) เท่ากับสมการที่ (2.6) จะได้

$$\frac{dK}{dC} F(\theta, \phi) = K \frac{\partial F(\theta, \phi)}{\partial \phi} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.2)  $r = F(\theta, \phi)$  แทนในสมการที่ (2.7) จะได้

$$\frac{dK}{dC} r = K \frac{\partial r}{\partial \phi}$$

$$\frac{1}{K} \cdot \frac{dK}{dC} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial r}{\partial \phi} \quad (2.8)$$

จากทางด้านซ้ายของสมการที่ (2.8) จะเห็นว่าเป็นอิสระจาก  $\theta$  และ  $\phi$  สำหรับผลเฉลยทั่วไป สำหรับพื้นผิว  $r = F(\theta, \phi)$  ของสายอากาศจะอยู่ในรูป

$$r = F(\theta, \phi) = e^{a\phi} f(\theta) \quad (2.9)$$

เมื่อ  $a = \frac{1}{K} \cdot \frac{dK}{dC}$  และ  $f(\theta)$  คือฟังก์ชันที่กำหนดขึ้น

ดังนั้นสำหรับสายอากาศโดยทั่วไปแล้วจะมีคุณสมบัติที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ก็ต่อเมื่อพื้นผิวของสายอากาศนั้นสามารถแสดงคุณสมบัติได้ตามสมการที่ (2.9) ซึ่งการกระทำเช่นนี้จะเกิดขึ้นได้ด้วยฟังก์ชันที่สามารถระบุรูปแบบได้อย่างชัดเจนและแน่นอน  $f(\theta)$  และในลำดับต่อไปก็จะพิจารณาความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติและประโยชน์ใช้สอยที่จะเกิดขึ้นจากโครงสร้างของสายอากาศที่สร้างขึ้นตามพื้นผิวที่กำหนดไว้ในสมการที่ (2.9)

### 2.1.2 คุณลักษณะของสายอากาศแบบอิสระจากความถี่ (Characteristic of Frequency Independent Antenna)

สายอากาศแบบอิสระจากความถี่เป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่คงที่ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งานที่กว้างมากโดยมีอัตราส่วนของ bandwidth ประมาณ 10:1 หรือมากกว่า และนอกจากนี้ยังมี อิมพีแดนซ์ โพลาริเซชันและเฟสศูนย์กลาง (phase center) ของความถี่คงที่ด้วย ซึ่งมีสายอากาศเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่มีคุณสมบัตินี้ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติอื่นๆอีกจากการพิจารณาความสัมพันธ์ด้านมุมเพิ่มเติมซึ่งจะทำให้ได้คุณสมบัติของความเป็นอิสระจากความถี่ที่ดีขึ้น เช่นสร้างในลักษณะของโครงสร้างแบบ self-complementary

การพิจารณาอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่สร้างจากโลหะ ( $Z_{metal}$ ) และมีโครงสร้างของสายอากาศแบบ self-complementary สามารถที่จะหาอินพุทอิมพีแดนซ์ได้โดยการเปลี่ยนโลหะเป็นอากาศและเปลี่ยนอากาศเป็นโลหะ ซึ่งจากโครงสร้างของสายอากาศแบบ complementary

จะทำให้ได้อิมพีแดนซ์เป็น  $Z_{air}$  สำหรับโครงสร้างของสายอากาศแบบ complementary เป็นรูปแบบอย่างง่ายของการถ่ายเทระหว่างค่าบวกและค่าลบ ตัวอย่างเช่นสายอากาศแบบริบบอน ไดโพล (ribbon dipole) ที่มีโครงสร้างแบบ complementary และสายอากาศแบบสล็อต (slot antenna) ดังรูป



รูปที่ 2.1 สายอากาศแบบ complementary dipole (Ribbon dipole)

หลักการของบาบิเนต (Babinet's principle) สามารถใช้ในการหาอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบ complementary โดยหลักการของบาบิเนตสำหรับในสถานะของแสงซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงอยู่ข้างหลังแผ่นตัวนำบางแบบ complementary จะสร้างขอบเขตบนด้านตรงข้ามกับแหล่งกำเนิดเมื่อให้เป็นขอบเขตที่สมบูรณ์และยังคงมีขอบเขตนี้อยู่เสมอแม้ไม่มีแผ่น โลหะอยู่ ลักษณะที่แผ่กว้างของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะ ได้รับความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบ complementary คือ

$$Z_{metal} Z_{air} = \frac{\eta^2}{4} = \frac{(376.7)^2}{4} = 35,475.7 \Omega \quad (2.10)$$

ในที่นี้สมมติให้ไม่มีค่าไดอิเล็กตริกหรือวัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กในขณะนั้น ถ้าเช่นนั้นค่า  $\eta$  ที่ถูกต้องควรเป็นค่าที่อยู่ในอวกาศว่าง (free space) ถ้าสายอากาศไดโพลดังแสดงในรูปจะสามารถ ริโซแนนท์ได้โดยลดความยาวของมันเพียงเล็กน้อยให้ต่ำกว่าความยาวครึ่งคลื่น (half - wavelength) จะได้ค่าอิมพีแดนซ์เป็น  $Z_{metal} = Z_{dipole} = 70 \Omega$  ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของ half-wave slot antenna ดังแสดงในรูปจะได้ค่า  $Z_{air}$  คือ

$$Z_{slot} = \frac{\eta^2}{4Z_{dipole}} = \frac{35,475.7}{4(70)} = 506.8 \Omega \quad (2.11)$$

ตำแหน่งของ slot ซึ่ง complementary กันจะเป็นลักษณะของโคโพลในอุดมคติผลของค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่เป็นสองส่วน ประกอบกันจะเท่ากับค่าคงที่  $\eta^2/4$  และถ้าสายอากาศนี้เป็นส่วนประกอบของตัวเองและมีอิมพีแดนซ์ที่อิสระจากความถี่ จะเรียกว่ามีคุณสมบัติของ self-complementary ซึ่งสายอากาศมีคุณสมบัติครบตามนี้ จะเรียกว่า self-complementary antenna โครงสร้างแบบ self-complementary สามารถสร้างจากการวางตัวที่แน่นอนตลอดการเปลี่ยนแปลงหรือการหมุนของมุมที่เปลี่ยนไป ค่าอิมพีแดนซ์ของ self-complementary antenna ตามโครงสร้างนี้สามารถหาได้จาก

$$Z_{metal} = Z_{air} = \frac{\eta}{2} = 188.5 \Omega \quad (2.12)$$

ความเป็นอิสระของอิมพีแดนซ์เป็นหลักการออกแบบลำดับที่สองที่ต้องคำนึงถึงสำหรับสายอากาศแบบอิสระจากความถี่ ซึ่งสายอากาศแบบ self-complementary ก็เป็นรูปแบบหนึ่งที่มีความเป็นอิสระจากความถี่ ปรากฏว่าจะมีสายอากาศบางชนิดที่ไม่ได้มีโครงสร้างเป็นแบบ self-complementary อย่างแท้จริง จะมีคุณสมบัติด้านการแผ่กระจายคลื่นในบางช่วงความถี่ซึ่งเป็นส่วนน้อยเท่านั้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่บ้าง

จากที่ผ่านมาระดมพิจารณาถึงคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศที่มีความเป็นอิสระจากความถี่ เพื่อที่จะใช้ในการอธิบายลักษณะเฉพาะของสายอากาศแบบบรอดแบนด์เนื่องจากมีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกันและนอกจากนี้ยังได้แบนด์วิดท์ที่กว้างด้วย จึงอาจกล่าวได้ว่าสายอากาศแบบบรอดแบนด์นอกจากจะมีคุณสมบัติของความเป็นอิสระจากความถี่แล้ว ควรจะมีคุณสมบัติอื่นๆดังต่อไปนี้

1. เน้นความสำคัญของมุมมากกว่าขนาดของความยาว
2. มีลักษณะ โครงสร้างที่เหมาะสมคือ โครงสร้างแบบ self-complementary
3. ความหนาของโลหะควรมีขนาดที่เหมาะสม และใช้เพิ่มขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางเมื่อต้องการความเป็นรีโซแนนซ์ที่มากขึ้น (กรณีขนาดที่ออกแบบได้ต่ำกว่าจุดที่รีโซแนนซ์)

ในทางทฤษฎีแล้วสายอากาศแบบอิสระจากความถี่ควรจะแสดงคุณสมบัติครบทั้งสามข้อดังที่กล่าวมา แต่พบว่าในทางปฏิบัติจะเน้นการออกแบบเพื่อให้ได้คุณสมบัติของแบนด์วิดท์ที่กว้าง ส่วนคุณสมบัติอื่นๆจะให้ความสำคัญในการออกแบบน้อยกว่า ตัวอย่างเช่นสายอากาศแบบบรอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาบถือบางชนิดที่มีโครงสร้างแตกต่างไปจากหลักการของ self-complementary แต่ทำให้ได้แถบความถี่ที่กว้าง ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะได้รับผลเสียจากการกระทำเช่นนี้คืออิมพีแดนซ์จะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่และไม่สามารถทำนายค่าที่แน่นอนอนได้ ซึ่งอาจจะไม่เป็นปัญหากับการประยุกต์ใช้งานบางอย่าง

ลักษณะเด่นของสายอากาศแบบอิสระจากความถี่คือมี self-scaling การแผ่กระจายคลื่นส่วนใหญ่จะมีตำแหน่งจากการแบ่งของสายอากาศแบบอิสระจากความถี่ซึ่งมีความกว้างเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นหรือระยะ โดยรอบเป็นหนึ่งความยาวคลื่นซึ่งเราจะเรียกว่าบริเวณแอกทีฟ การแผ่กระจายคลื่นจะมีค่าสูงสุดที่จุดที่ตั้งฉากกับระนาบของโครงสร้างและสามารถอธิบายได้ด้วยรูปแบบอย่างง่ายด้วยรูปที่มีความยาวหนึ่งความยาวคลื่น เมื่อความถี่จะลดลงบริเวณแอกทีฟจะเคลื่อนไปยังส่วนของสายอากาศที่ใหญ่กว่าซึ่งมีความกว้างเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น คุณสมบัติของโครงสร้างที่เน้นมุมและใช้ความหนาของโลหะจากโครงสร้างเป็นตัวกำหนดขอบเขตเมื่อสามารถปรับกระแสได้ขณะที่ความถี่เปลี่ยนไป

สายอากาศแบบอิสระจากความถี่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ สายอากาศแบบสไปรอล (spiral antennas) และสายอากาศแบบรายคาบถือ (log-periodic antennas) ซึ่งในปฏิญานินพจน์นี้จะกล่าวถึงเฉพาะสายอากาศแบบรายคาบถือเท่านั้น

## 2.2 หลักการของสายอากาศแบบรายคาบถือ (Principle of Log-periodic Antenna)

สายอากาศแบบรายคาบถือเป็นสายอากาศประเภทที่เป็นอิสระจากความถี่ โดยที่คุณสมบัติทางไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงในลักษณะเป็นรายคาบลอการิทึม (logarithm) ของความถี่ ในขณะที่ความถี่  $f_1$  เลื่อนไปอีกความถี่หนึ่งคือ  $f_2$  ภายในย่านความถี่ของสายอากาศ จะมีความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ทั้งสองดังนี้

$$f_2 = \frac{f_1}{\tau} \quad (2.13)$$

โดยที่  $\tau$  เป็นค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบซึ่งเป็นค่าคงที่ โดยมี  $\tau < 10$  เสมอ ในทำนองเดียวกันก็สามารถหาค่าของความถี่สำหรับองค์ประกอบอื่นๆ ได้เช่นเดียว เช่น

$$f_3 = \frac{f_1}{\tau^2}$$

$$f_4 = \frac{f_1}{\tau^3}$$

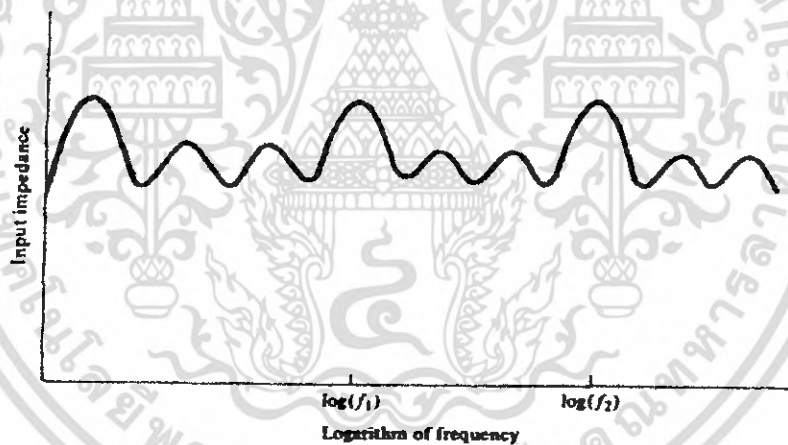
.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_n = \frac{f_1}{\tau^{n-1}} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $n = 1, 2, 3, \dots, n$   
 $f_1 =$  ความถี่ต่ำสุดของการใช้งาน  
 $f_n =$  ความถี่สูงสุดของการใช้งาน

ซึ่งจากคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเป็นรายคาบตามค่าลอการิทึมของความถี่ ทำให้เมื่อเราทำการพล็อตค่าของอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในลักษณะฟังก์ชันของลอการิทึมความถี่จะได้ลักษณะเป็นรายคาบของค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ดังนั้นชื่อที่ว่ารายคาบถือก็มีความสำคัญ เนื่องมาจากการแปรผันเป็นรายคาบที่ขึ้นอยู่กับค่าลอการิทึมของความถี่ตามที่แสดงในรูปที่ 2.1 พารามิเตอร์อื่นๆก็จะมีแปรผันคล้ายคลึงกับค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ได้แก่ สภาพเอะจงทิศทาง (directivity) , ความกว้างของลำแสงบีม (Beamwidth)

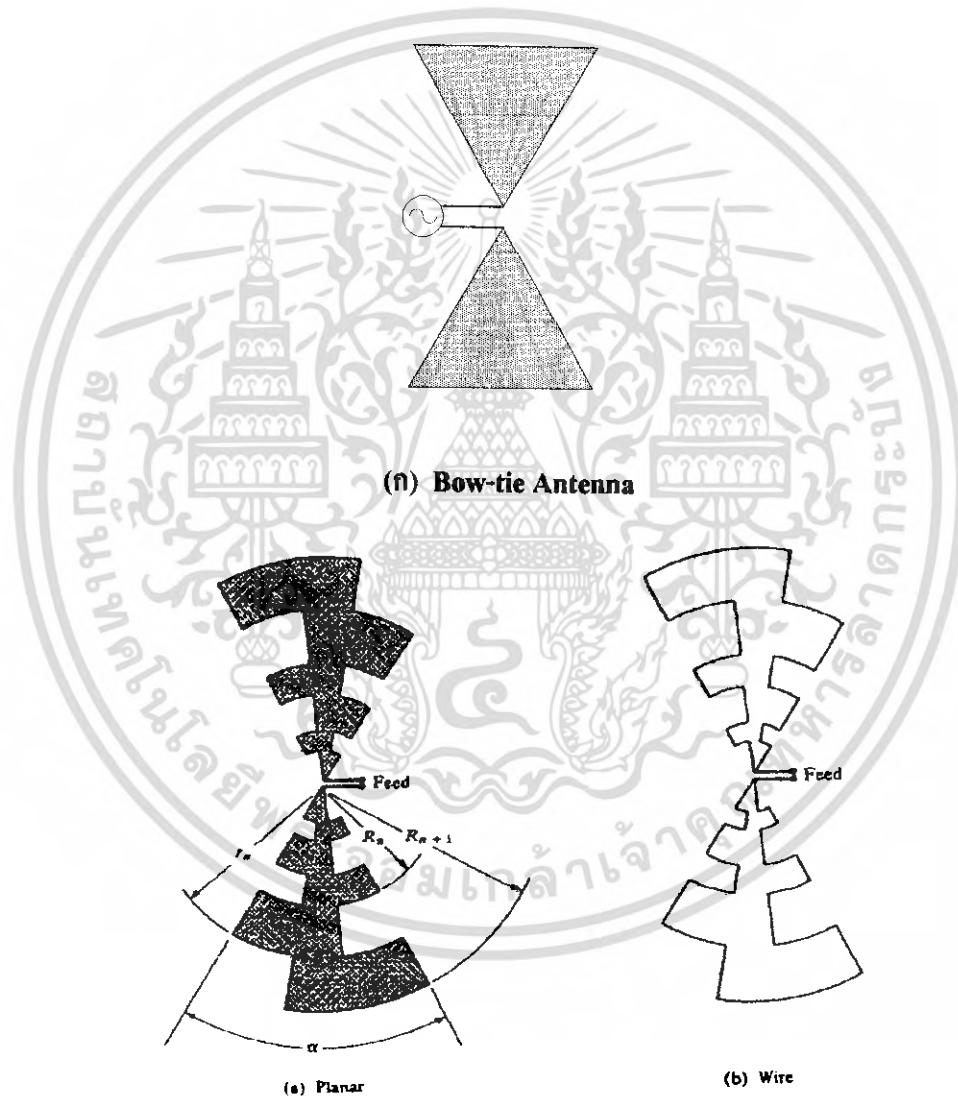


รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบรายคาบถือ ซึ่งเป็นฟังก์ชันลอการิทึมของความถี่

สายอากาศแบบรายคาบถือเป็นสายอากาศที่ใช้การป้อนสัญญาณเข้าที่องค์ประกอบแรก ของสายอากาศจากนั้นจึงแพร่กระจายไปยังองค์ประกอบ (element) ถัดๆ ไปจนถึงองค์ประกอบสุดท้าย ซึ่งสายอากาศชนิดนี้จะออกแบบมาให้ใช้งานได้ตลอดช่วงของความถี่ที่กำหนด ประโยชน์ในการใช้งานก็คือสายอากาศชนิดนี้จะแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่คงที่ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน เช่น ค่าความต้านทานในการแพร่กระจายคลื่น (radiation resistance) , ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) , อัตราการขยาย (Gain) และอัตราส่วน โลกหน้าต่อ โลกหลัง (Front-to-Back Ratio) เป็นต้น ในระบบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของสายอากาศนี้จะมีองค์ประกอบบางส่วนเท่านั้นที่แอกทิฟที่ความถี่ที่ความถี่หนึ่งของการใช้งาน ดังนั้นในการออกแบบของแถวลำดับ (array) ก็คือจะให้บริเวณแอกทิฟนี้เลื่อนไปตามองค์ประกอบต่างๆ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความถี่ใช้งาน

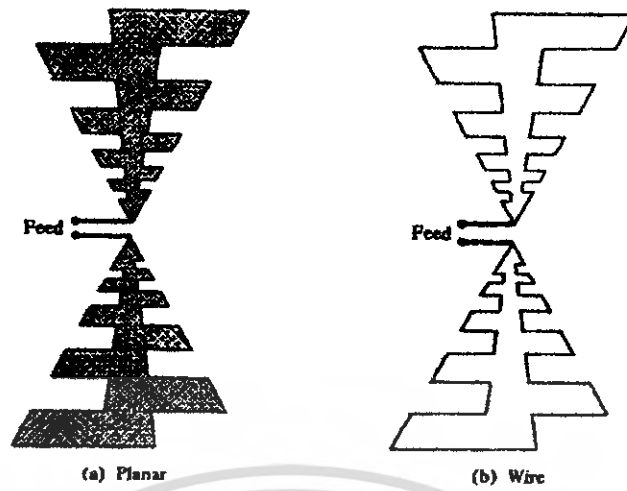
โครงสร้างของสายอากาศแบบระบายคานด็อกมีหลายรูปแบบ เช่น แบบซิกแซก (ZigZag) แบบระนาบ (Planar) , แบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal) , แบบร่อง (Slot) , แบบวี (V) , และแบบไดโพล (dipole) แต่รูปแบบที่นิยมใช้กันก็คือแบบระบายคานด็อกแถวลำดับไดโพล (logperiodic dipole array antenna) สำหรับรูปแบบที่จะกล่าวถึงในปริญญาวิทยานิพนธ์นี้คือสายอากาศแบบระนาบสร้างบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (dielectric substrate)



(ข) สายอากาศระบายคานด็อกพื้นซีแบบระนาบและเส้นลวด

### รูปที่ 2.3 สายอากาศแบบระบายคานด็อกชนิดต่างๆ

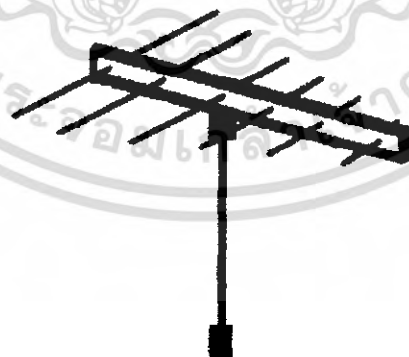
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) สายอากาศระยคาบด็อกแบบพื้นที่เหลี่ยมคางหมู



(ง) สายอากาศแบบร่องระยคาบด็อกแบบคิคฝั่งเรียบ

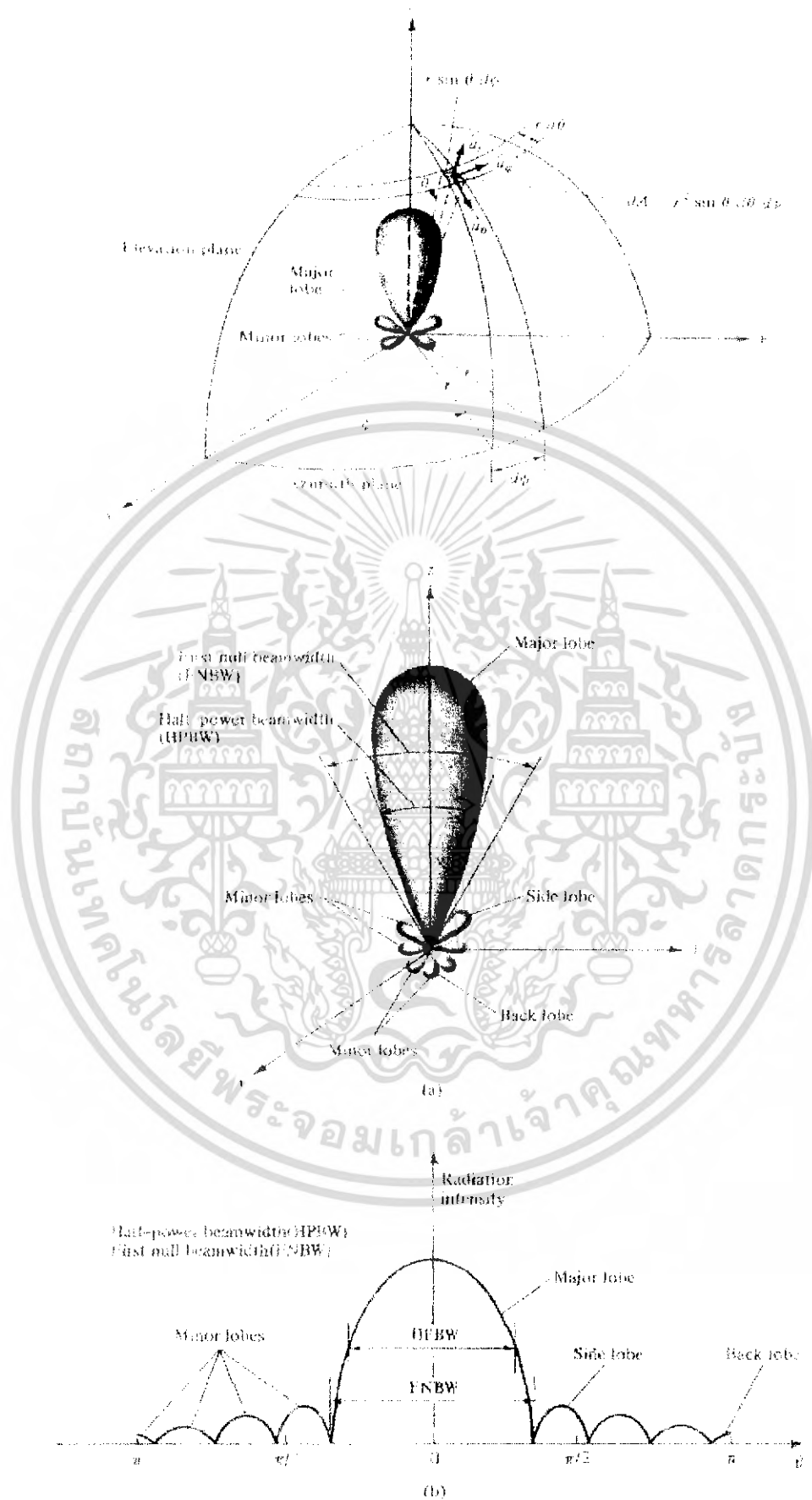


(จ) สายอากาศระยคาบด็อกแบบแถวดำดับโคโพล

รูปที่ 2.3 (ต่อ) สายอากาศแบบระยคาบด็อกชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





**รูปที่ 2.4 แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่มีรัศมีคงที่แพทเทิร์นของการกระจายคลื่นโดยทั่วไปจะมี 2 แบบคือ

1. ถ้าเขียนจากสนามไฟฟ้า  $[D(\theta, \phi)]$  ในสมการ (2.9) จะเรียกว่า “ฟิลด์แพทเทิร์น (Field pattern)” ดังรูป 2.4 (a)

2. ถ้าเป็นแพทเทิร์นที่เขียนจากกำลังคลื่น  $[D(\theta, \phi)^2]$  จะเรียกว่า “เพาเวอร์แพทเทิร์น (power pattern)” ดังรูป 2.4 (b)

โดยปกติจะหารไว้ด้วยค่าสูงสุดซึ่งจะทำให้แพทเทิร์นมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 หรือถ้ากำกับหน่วยเป็น dB ค่าสูงสุดก็จะเป็น 0 dB

แพทเทิร์นของการกระจายคลื่นโดยทั่วไปแล้วจะมีรูปร่างทำนองเดียวกับรูปที่ 2.4 ซึ่งเรียกลักษณะสำคัญๆ ในแพทเทิร์นมีดังนี้

1. เมนบีม (Main beam) หรือโลบหลัก (Major Lobe) คือบีมส่วนที่มีกำลังคลื่นกระจายออกไปมากที่สุดและ โดยทั่วไปจุดสูงสุดของแพทเทิร์นจะอยู่ในเมนบีมนี้ สำหรับสายอากาศบางชนิดอาจมีโลบหลักนี้มากกว่าหนึ่งโลบ เช่น สายอากาศแยกบีม (Split-Beam Antenna)
2. โลบย่อย (Minor Lobe) ได้แก่ โลบอื่นๆ นอกเหนือไปจากโลบหลัก
3. โลบข้าง (Side Lobe) เป็นโลบย่อยที่อยู่ติดโลบหลักจะอยู่ที่ทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับโลบหลัก
4. โลบหลัง (Back Lobe) เป็นโลบย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับโลบหลัก ปกติแล้วโลบย่อยนี้จะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ดีต้องจำกัดโลบหลังนี้ให้มีค่าน้อยที่สุด

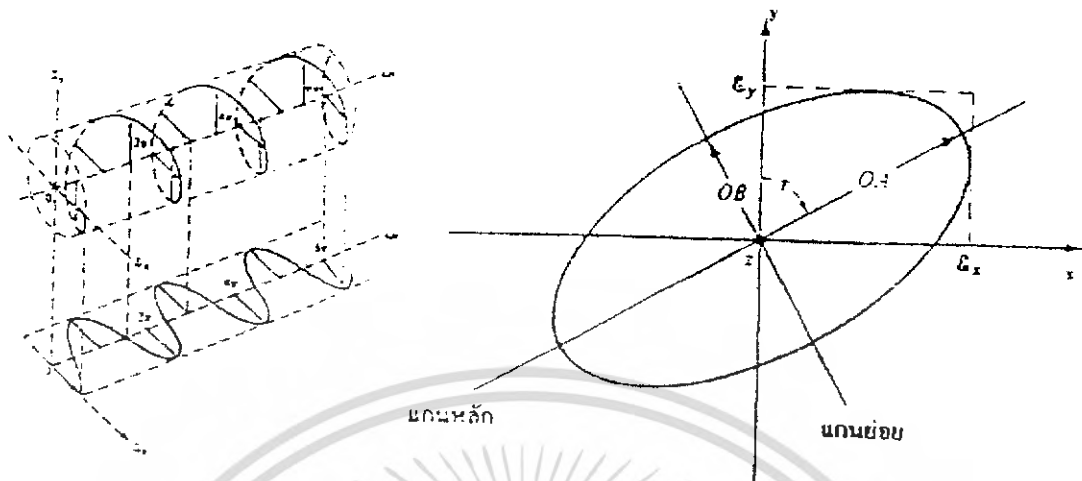
ระดับของโลบย่อยมักจะแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในโลบที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นของพลังงานในโลบหลัก ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนของ “ไซด์โลบ (Side Lobe Ratio) หรือระดับไซด์โลบ (Side Lobe level:SLL)” ในทางปฏิบัติมักจะต้องการระดับไซด์โลบน้อยกว่า -20 dB

แพทเทิร์นของการกระจายคลื่นนั้น ในบางกรณีจะมีรูปร่างพิเศษคือ แพทเทิร์นแบบไอโซโทรปิก (Isotropic pattern) คือสายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นเท่ากันในทุกทิศทางเช่นแหล่งกำเนิดคลื่นแบบจุด (point source) ซึ่งแพทเทิร์นเป็นรูปทรงกลมเป็นสายอากาศที่ไม่สามารถสร้างได้จริง แต่มักใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับคุณสมบัติการแสดงทิศทางของสายอากาศ

### 2.3.2 โพลาริเซชัน: (Polarization)

โพลาริเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายนั้น เป็นรูปแบบที่ใช้แสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไป สามารถอธิบายทิศทางและขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หันตามเวลาโดยโพลาริเซชันจะแสดงการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าต่างๆ ณ ตำแหน่งที่ทำการสังเกตที่คงที่และการสังเกตนี้จะทำโดยมองตามหลักคลื่นที่เดินทางไป ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะโพลาริเซชันของสายอากาศ

สำหรับลักษณะการโพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางใดทิศทางหนึ่งจะเป็นโพลาริเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้นจากทิศทางที่กำหนดให้ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังงานที่ขั้วของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่กำหนดทิศทางมาให้จะหมายถึงทิศทางที่สายอากาศมีเกนมากที่สุด ดังนั้นโพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกันจะต่างกัน การแบ่งชนิดของโพลาริเซชันของสายอากาศแบ่งออกเป็น

- ก. แบบลิเนียร์ลิโพลาริเซชัน (Linearly Polarization)
- ข. แบบโพลาริเซชันทรงกลม (Circularly Polarization)
- ค. แบบโพลาริเซชันวงรี (Elliptically Polarization)

สำหรับสายอากาศแบบรายการลืออนั้นจะมีลักษณะของการโพลาริเซชันเป็นแบบโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น (Linear Polarization) ซึ่งจะเขียนสนามชั่วขณะเวลานั้นของคลื่นระนาบ ที่เดินทางในทิศทาง  $(-z)$  ได้ว่า

$$E(z,t) = a_x E_x(z,t) + a_y E_y(z,t) \quad (2.16)$$

เมื่อส่วนประกอบของสนามชั่วขณะเวลานั้นสัมพันธ์กับค่าเชิงซ้อนของสนามนั้นดังนี้

$$E_x(z,t) = E_1 \cos(\omega t - kz) \quad (2.17)$$

$$E_y(z, t) = E_2 \cos(\omega t - kz + \theta) \quad (2.18)$$

ถ้าให้เฟสของ  $E_2$  เร็วกว่า  $E_1$  อยู่ในมุม  $\theta$  ที่ระนาบ  $Z=0$

$$E_x(z, t) = E_1 \cos(\omega t) \quad (2.19)$$

$$E_y(z, t) = E_2 \cos(\omega t + \theta) \quad (2.20)$$

$$E_y(z, t) = E_2 (\sin \omega t \cos \theta + \cos \omega t \sin \theta) \quad (2.21)$$

เมื่อ  $\cos \omega t = \frac{E_x(z, t)}{E_1}$  (2.22)

และ  $\sin \omega t = \sqrt{1 - \left(\frac{E_x}{E_1}\right)^2}$  (2.23)

แทนค่า  $\cos \omega t$ ,  $\sin \omega t$  ในสมการ  $E_y(z, t)$  จะได้

$$\frac{E_x^2}{E_1^2 \sin^2 \theta} - \frac{2 \cos \theta E_x E_y}{E_1 E_2 \sin^2 \theta} + \frac{E_y^2}{E_2 \sin^2 \theta} = 1 \quad (2.24)$$

จากสมการ (2.24) เป็นสมการของวงรีที่มีแกนหลักทั้งสองไม่ตรงกับแกน  $x$  และ  $y$

จากสมการ (2.24) แทน  $q = \theta$

$$\frac{E_x^2}{E_1^2 \sin^2 \theta} - \frac{2 \cos \theta E_x E_y}{E_1 E_2 \sin^2 \theta} + \frac{E_y^2}{E_2 \sin^2 \theta} = 1$$

$$\frac{E_x^2}{E_1^2} - \frac{2 \cos \theta E_x E_y}{E_1 E_2} + \frac{E_y^2}{E_2} = \sin^2 \theta \quad (2.25)$$

ถ้าให้เฟสของ  $E_1$  และ  $E_2$  ต่างกัน  $n\pi$  คือ  $\theta = n\pi$ ; เมื่อ  $n = 1, 2, 3, \dots$  จะได้สมการเส้นตรงและยังเป็นลิเนียร์โพลาไรเซชันได้อีกหลายเงื่อนไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศถูกกำหนดให้เป็นช่วงความถี่ ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้อาจจะเป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่างๆ เช่น อินพุทอิมพีแดนซ์ , แพทเทิร์น , บีมิววิท , โพลาริเซชัน , ระดับของไซด์โลบ , เกน และประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่นให้อยู่ในค่าที่ใช้งานได้คือไม่ต่างจากคุณสมบัติที่วัดที่ความถี่ตรงกลางที่ออกแบบจนทำให้คุณสมบัติเหล่านี้เสียไปจากข้อกำหนดหรือมาตรฐาน

เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศที่กล่าวมาจะไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่สามารถกำหนดแบนด์วิดท์ตามคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งได้ จึงต้องมีการกำหนดข้อบังคับให้เป็นไปตามการประยุกต์ใช้งานแต่ละอย่าง ปกติแล้วคุณสมบัติของแพทเทิร์น กับอิมพีแดนซ์ แบนด์วิดท์จึงมักถูกใช้เป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ของสายอากาศ

### 2.3.4 อัตราขยายและสภาพชี้นำของสายอากาศ (Gain and Directivity of Antenna)

เกนของสายอากาศนั้นเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากไดเรกทิวิตี โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ซึ่งในขณะที่ไดเรกทิวิตีแสดงคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

เพาเวอร์เกน (Power Gain) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้ นั้นมีค่าเท่ากับ  $4\pi$  คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ในทิศทางนั้นต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากข้อต่อของเครื่องส่งเมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้ โดยทั่วไปแล้วเราจะคิดเพาเวอร์เกนในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด

$$Gain = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_m} \quad (2.26)$$

โดยทั่วไปแล้วเรามักจะพูดถึงเกนสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของเพาเวอร์เกนในทิศทางที่กำหนดให้ต่อเพาเวอร์เกนของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศทั้งสองนั้นต้องเท่ากัน สายอากาศเปรียบเทียบกับส่วนใหญ่ใช้แบบไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้น

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

เมื่อกำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด ( $P_{rad}$ ) สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศ  $P_m$  คือ

$$P_{rad} = e_r P_m \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $e_r$  เป็นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ  
ดังนั้นจะได้

$$G_g(\theta, \phi) = \frac{e_r [4\pi U(\theta, \phi)]}{P_{rad}} \quad (2.28)$$

จะได้ความสัมพันธ์คือ

$$G_g(\theta, \phi) = e_r D_g(\theta, \phi) \quad (2.29)$$

ค่าสูงสุดความสัมพันธ์กับค่าโคเรคทีวิตี คือ

$$\begin{aligned} G_o &= G_g(\theta, \phi)_{\max} = e_r D_g(\theta, \phi)_{\max} \\ G_o &= e_r D_o \end{aligned} \quad (2.30)$$

เมื่อ  $G_o$  = อัตราขยายของสายอากาศในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นสูงสุด  
 $D_o$  = ค่าเพาเวอร์เกนที่มีค่าสูงสุด

$$G_o (dB) = 10 \log_{10} [e_r \times D_o] \quad (2.31)$$

ส่วนสภาพการชี้หน้าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของสายอากาศจะเป็นตัวบอกว่าสายอากาศจะรับสัญญาณได้ดีในทิศทางใดทิศทางหนึ่งหรืออาจเรียกว่ารูปแบบของสภาพการชี้หน้า ถึงแม้ว่าสายอากาศจะรับสัญญาณได้ดีในทิศทางใดทิศทางหนึ่งโดยเฉพาะของมัน แต่มันก็สามารถรับสัญญาณจากทิศทางอื่นได้ด้วย แต่ความไวอาจจะน้อยกว่าทิศทางที่กำหนด สภาพการชี้หน้าจะแสดงการเปลี่ยนแปลงของความไวที่ทุกๆ ทิศทางโดยปกติจะแสดงเป็นกราฟในเชิงมุม รูปร่างของโลปของรูปแบบในเชิงมุม (Polar pattern) จะแสดงคุณสมบัติสภาพการชี้หน้าของสายอากาศ เช่นรูปแบบของสายอากาศแบบไดโพล  $\lambda/2$  แสดงในเทอมของแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ จะเป็นแบบสองทิศทาง (Bi-directional) มีโลป (lobe) ที่มีขนาดเท่ากันทั้งด้านหน้าและด้านหลัง 2 ทิศทาง ทิศทางที่ความไวมีค่ามากที่สุดอยู่ในแนวเส้นตั้งฉากกับความยาวของสายอากาศ ซึ่งรูปแบบนี้จะมีลักษณะเป็นสามมิติ คือซีกแนวตั้งฉากกับกระดาษซึ่งจะมีรูปร่างเหมือนกัน โดยการหมุนแนวระนาบของกระดาษรอบตัวมันเอง สังเกตว่าที่จุด 70% บนเส้นศูนย์องศาเรียกจุด ครึ่งกำลังงาน (half power point) และจะเป็นตำแหน่งที่มีความกว้างของโลปมากที่สุด มุมที่แสดงจุดนี้เรียกความกว้างของลำคลื่นเชิงมุม

(Beamwidth angle) จะเป็นตัวบอกคุณสมบัติเปรียบเทียบสภาพชั้นนำของสายอากาศชนิดต่างๆจากโรงงาน

นอกจากทิศทางที่มีค่ามากที่สุดแล้วยังมีทิศทางที่รับได้น้อยที่สุด เรียกว่า นัลโลบ (null lobe) ซึ่งจะอยู่ระหว่างทิศทางที่การรับดีที่สุดทั้งสองโลบ ที่ตำแหน่งนี้สายอากาศแบบไดโพลจะรับสัญญาณไม่ได้เลยถึงแม้จะรีโซแนนซ์กับความถี่ของการส่ง

อัตราขยายของสายอากาศยังแบ่งออกเป็นอัตราขยายของการส่ง (transmitting gain) โดยเปรียบเทียบกับไดโพลที่เป็นโพลชนิดค่าเท่ากัน (ของทิวี่ 300 โอห์ม) กำลึงเท่ากัน ระยะห่างเท่ากัน และ อัตราขยายของการรับ (receiving gain) โดยเทียบกับไดโพลมาตรฐานที่ความถี่ใดๆ

### 2.3.5 อินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)

อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่ขั้วของสายอากาศนั้นๆจะเป็นอัตราส่วนระหว่างศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วสายอากาศนั้นคืออัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่จุดใดๆ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเป็น

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (\text{โอห์ม}) \quad (2.32)$$

เมื่อ  $R_A$  = ความต้านทานที่ขั้วสายอากาศ

$X_A$  = รีแอกแตนซ์ที่ขั้วสายอากาศ

โดยทั่วไปความต้านทานที่ขั้วสายอากาศ ( $R_A$ ) จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

$$R_A = R_r + R_l \quad (\text{โอห์ม}) \quad (2.33)$$

เมื่อ  $R_r$  = ความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ

$R_l$  = ความต้านทานการสูญเสียของสายอากาศ

ถ้าให้สายอากาศต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ภายในเป็นดังนี้

$$Z_g = R_g + jX_g \quad (\text{โอห์ม}) \quad (2.34)$$

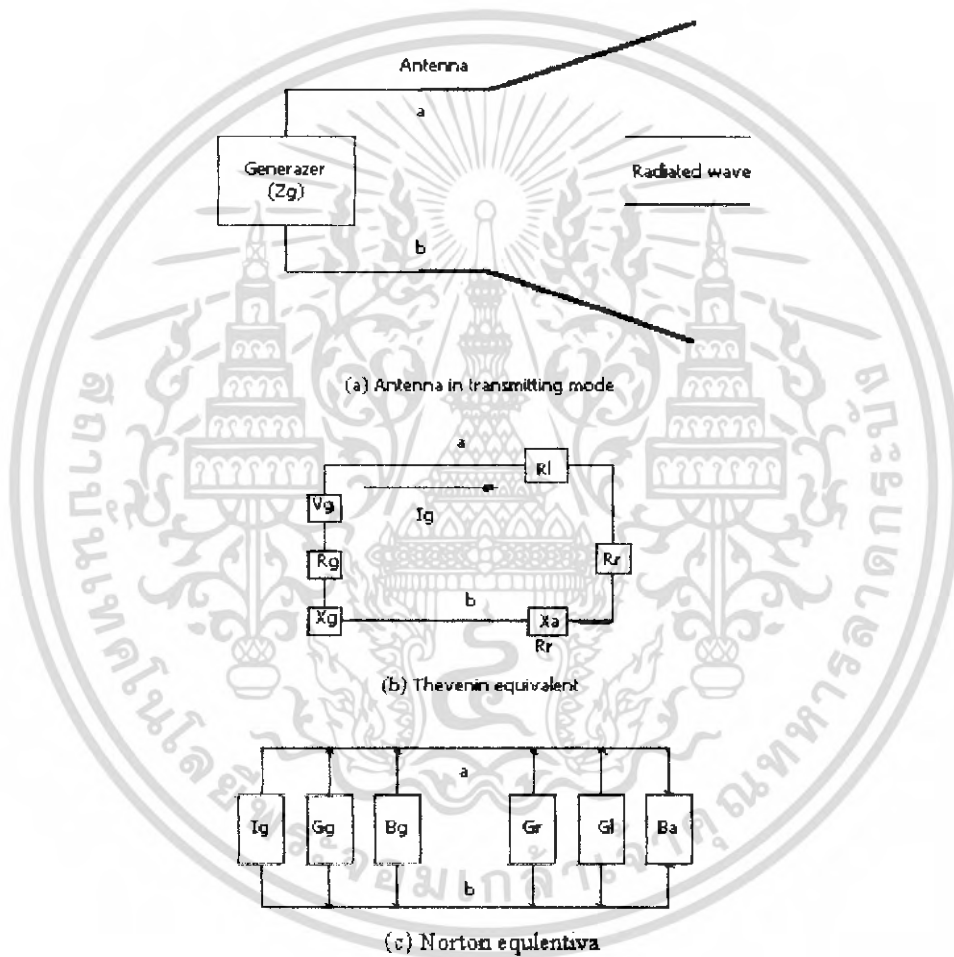
เมื่อ  $R_g$  = ความต้านทานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ

$X_g$  = รีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ

พิจารณารูปที่ 2.6 สามารถหากระแสที่ไหลภายในลูปได้คือ

$$I_g = \frac{V_g}{Z_t} = \frac{V_g}{Z_A + Z_g} \quad (\text{แอมป์})$$

$$I_g = \frac{V_g}{(R_r + R_L + R_g) + j(X_A + X_g)} \quad (\text{แอมป์}) \quad (2.35)$$



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลย์อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในโหมดการส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของกระแสมีค่าดังนี้

$$|I_o| = \frac{|V_o|}{\sqrt{(R_r + R_l + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2}} \quad (\text{แอมป์}) \quad (2.36)$$

กำลังงานที่ถูกนำมายังสายอากาศ เพื่อการแพร่กระจายคลื่นจะมีค่าดังนี้

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

$$P_r = \frac{|V_o|^2}{2} \cdot \frac{R_r}{(R_r + R_l + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \quad (\text{วัตต์}) \quad (2.37)$$

กำลังงานที่สูญเสียกลายเป็นความร้อนมีค่าดังนี้

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

$$P_L = \frac{|V_o|^2}{2} \cdot \frac{R_L}{(R_r + R_l + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \quad (\text{วัตต์}) \quad (2.38)$$

กำลังส่วนที่เหลือจะเป็นส่วนที่สูญเสียเป็นความร้อนในความต้านทานที่ขั้ว  $R_g$  ของเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งมีค่า

$$P_o = \frac{|V_o|^2}{2} \cdot \frac{R_g}{(R_r + R_l + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \quad (\text{วัตต์}) \quad (2.39)$$

จะเห็นว่ากำลังงานที่ถูกนำมายังสายอากาศ จะมีค่ามากที่สุด เมื่อเกิดการคอนจูเกตแมทซ์ (Conjugate Match) นั่นคือจะเกิดเมื่อ

และ

$$R_g = R_r + R_l$$

$$X_A = -X_g$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะทำให้

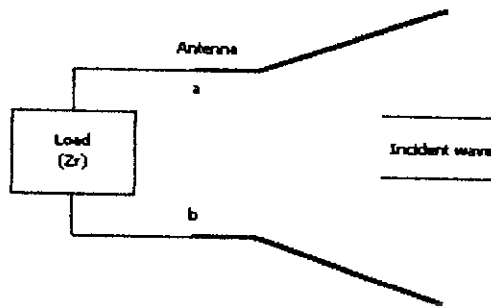
$$P_g = P_r + P_L = \frac{|V_g|^2}{8} \cdot \frac{R_g}{(R_r + R_L)^2} \quad (2.40)$$

ดังนั้นกำลังที่เครื่องกำเนิดสัญญาณต้องจ่ายเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทซ์ จะมีค่าดังนี้

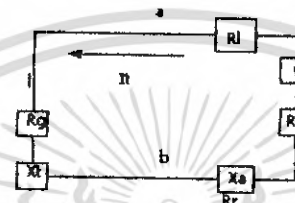
$$\begin{aligned} P_r &= \frac{1}{2} V_g I_g^* \\ &= \frac{1}{2} V_g \cdot \frac{V_g^*}{2(R_r + R_L)^2} \\ &= \frac{|V_g|^2}{4} \cdot \frac{1}{R_r + R_L} \quad (\text{วัตต์}) \end{aligned} \quad (2.41)$$

จำนวนกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่ายทั้งหมด  $P_g$  ครึ่งหนึ่งจะสูญเสียเป็นความร้อนภายในความต้านทานภายใน ( $R_g$ ) ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ และอีกครึ่งหนึ่งจะถูกนำมายังสายอากาศซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทซ์เท่านั้น ในส่วนของกำลังงานที่มายังสายอากาศส่วนหนึ่งจะแพร่กระจายออกไปโดยผ่านกลไกที่เกิดจากความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น  $P_r$  อีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียเป็นความร้อนซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ ซึ่งถ้าสายอากาศไม่มีการสูญเสีย ( $e_{\text{loss}}=1$ ) ครึ่งหนึ่งของกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่าย จะแพร่กระจายออกเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทซ์ สมมติว่าเป็นการแมทซ์ที่สมบูรณ์ระหว่างสายอากาศกับสายส่ง ( $e_r=1$ ) ถ้ามีการใช้สายอากาศเป็นสายอากาศรับ ดังรูป 2.7 ถ้ามีคลื่นตกกระทบเข้ามาที่ยังสายอากาศ จะเหนี่ยวนำให้เกิดศักดาไฟฟ้า  $V_r$  ซึ่งเทียบได้กับ  $V_g$  ในโหมดของการส่ง

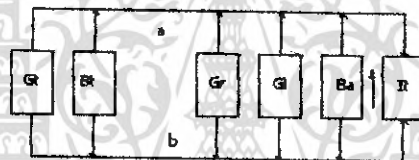
โดยปกติอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความถี่และจะเหมาะสมกับสายส่งเฉพาะในช่วงความถี่หนึ่งๆเท่านั้น นอกจากนี้อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศยังขึ้นกับแฟคเตอร์ต่างๆอีกได้แก่รูปทรง วิธีการป้อนสัญญาณและสิ่งแวดล้อมข้างเคียง เนื่องจากคำนวณได้ยากจึงมักจะหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ได้จากการทดลองวัด



(a) Antenna in transmitting mode



(b) Thevenin equivalent



(c) Norton equivalent

รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลย์อื่นทุกอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในโหมดการรับ

### 2.4 การวิเคราะห์ในเชิงกระแสและแรงดันตามโครงสร้างของสายอากาศระยะคาบล็อก (Current and Voltage Analysis of logperiodic Antenna Structure)

เริ่มแรกเราจะทำการสมมุติว่ากระแสในแต่ละองค์ประกอบถูกกระจายตัวในลักษณะรูปไซน์ เราจะคำนวณโดยวิธีการธรรมดา คือใช้ลักษณะค่ามิชวลอิมพีแดนซ์ระหว่างองค์ประกอบหลายๆตัวและอิมพีแดนซ์ของตัวเองในแต่ละองค์ประกอบ ในส่วนที่สองของปัญหาเราได้เบนความสนใจไปที่สายส่งแบบสวดตัวนำขนานซึ่งป้อนสัญญาณที่ปลายข้างหนึ่งและทำการโหลดด้วยการต่อแบบขนาน โดยใช้อิมพีแดนซ์ที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบที่มีคุณสมบัติของขนาดและระยะห่างตามลักษณะของระยะคาบล็อกแถวลำดับ (logperiodic array) ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์เราได้มาจากการคำนวณ โดยจะใช้รูปแบบวงจรในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์, แรงดัน และกระแสในสายส่งที่ถูกโหลด พร้อมกับกับค่ากระแสในแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศ ในส่วนสุดท้ายของปัญหาการวิเคราะห์ด้วยค่าที่มาจากขนาดและเฟสของกระแสในองค์ประกอบของสายอากาศ จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้ การวัดที่เราได้กระทำไม่เพียงแต่อิมพีแดนซ์และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น แต่ยังรวมถึงการกระจายกระแสและแรงดันในโครงสร้างของสายอากาศ จึงสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

(1) แสดงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการกระจายแรงดันและกระแสภายในโครงสร้างอย่างเพียงพอเพื่อให้มองเห็นถึงหนทางการใช้งานของสายอากาศ

(2) แสดงกราฟหลายๆแบบที่ใช้ในการออกแบบ ซึ่งจะแสดงวิธีที่จะปรับขนาดของโครงสร้างของสายอากาศเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ได้ออกแบบไว้

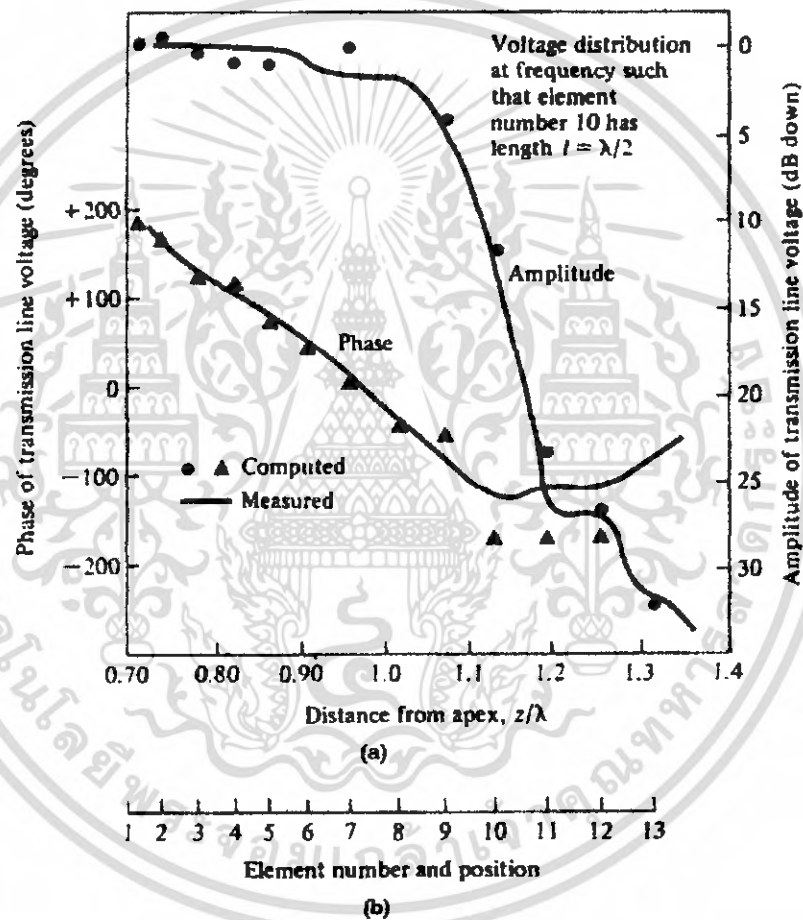
ขั้นแรกเพื่อให้เข้าใจถึงการใช้งานของสายอากาศที่ดีขึ้น เราต้องทำการตรวจสอบผลลัพธ์ของแรงดันและกระแสในสายอากาศสายคาบถ็อก จากรูปที่ 2.8 แสดงถึงแอมพลิจูดและเฟสของแรงดันในสายส่ง (แรงดันพื้นฐานขององค์ประกอบ) ต่อฟังก์ชันของระยะทางไปตามสาย (จากจุดยอด) ความรูปร่างนี้เป็นความถี่ที่ทำให้องค์ประกอบหมายเลขสี่ยาวเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น สังเกตจากกราฟจะเห็นว่าแรงดันมีแอมพลิจูดค่อนข้างจะคงที่และการคืบหน้าของเฟสเป็นไปอย่างมีรูปแบบจากจุดป้อนลงมาถึงประมาณองค์ประกอบหมายเลขหก (องค์ประกอบที่ใหญ่ที่สุดคือหมายเลขหนึ่ง) บริเวณที่มีแรงดันคงที่นี้เรียกว่าบริเวณในการส่ง  $\omega$ . ความถี่นั้น (Transmission region) เนื่องจากการกระจายของแรงดันดูเหมือนว่าอยู่ในสายส่งที่ถูกแมทซ์สังเกตว่า เฟสจะเปลี่ยนแปลงไปประมาณ  $105^\circ$  ตามความยาวสาย ซึ่งความยาวนั้นมีค่าโดยประมาณเท่ากับ  $\frac{1}{4}$  ของความยาวคลื่น ซึ่งหมายความว่าความเร็วเฟสในสายมีค่าโดยประมาณแค่ 0.6 ของความเร็วเฟสของคลื่นระนาบในอากาศ

การที่ความเร็วเฟสลดลงมีผลมาจากการ โหลดของสายด้วยตัวเก็บประจุที่ขนาน มีสาเหตุจากองค์ประกอบที่เล็กกว่าขนาดของสายอากาศอีกทีหนึ่ง การทำการ โหลดนี้ปรากฏว่ามีค่าเกือบจะคงที่ต่อความยาวหนึ่งหน่วย เนื่องจากเมื่อองค์ประกอบใหญ่ขึ้นจะมีระยะห่างที่กว้างขึ้นด้วย หลังจากองค์ประกอบหมายเลขหก ทันทีทันใดนั้นแอมพลิจูดจะตกลงอย่างรวดเร็ว การเปลี่ยนแปลงของเฟสแบบก้าวหน้าในลักษณะเชิงเส้นก็จะถูกทำให้เปลี่ยนไปในอีกรูปแบบหนึ่ง ค่าแรงดันที่ตกลงไปนี้จะเกี่ยวข้องกับการกระตุ้นกระแสอย่างแรงภายในองค์ประกอบ จะชี้แจงในตอนท้าย สังเกตว่าตอนท้ายสุดแล้วแรงดันที่องค์ประกอบที่ใหญ่ที่สุดจะมีค่าน้อยมาก ซึ่งจะต่ำกว่าองค์ประกอบที่ตัวเล็กกว่าถึง 30 dB

จากรูปถัดมา (รูปที่ 2.9) โดยพิจารณากระแสในองค์ประกอบสังเกตเห็นว่าแอมพลิจูดของกระแสในองค์ประกอบที่ 7, 6, 5, 4 มีค่ามากกว่าแอมพลิจูดของกระแสในองค์ประกอบอื่นๆ อยู่ 5-10 dB ซึ่งตามความเป็นจริงแล้ว แอมพลิจูดของกระแสในองค์ประกอบที่ใหญ่ที่สุดจะมีค่าน้อยเกินไปที่จะนำมาพล็อตไว้ ณ.ที่นี้บริเวณที่แอมพลิจูดของกระแสมีค่าสูงนี้เรียกว่า บริเวณแยกทีฟ สนามที่ปลายโครงสร้างที่ใหญ่จะมีค่าน้อย ดังนั้นจึงทำให้เกิดข้อเท็จจริงที่ว่า โครงสร้างไม่อาจขยายได้โดยไม่มีขอบเขตคือเท่ากับว่าไม่มีความสำคัญที่ความถี่นี้ องค์ประกอบที่เล็กลงก็จะมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยเกินกว่าที่จะถูกกระตุ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถัดมาให้สังเกตดูว่าเฟสของกระแสในองค์ประกอบที่สัมพันธ์กัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณแอกทีฟ ดูเหมือนว่าจะเป็นการเลื่อนเฟสแบบเชิงเส้นในลักษณะก้าวหน้าในทิศทางที่ตรงข้ามกับที่เกิดขึ้นในสายที่ไม่ถูกโหลด ลักษณะเฟสของกระแสในองค์ประกอบที่แอกทีฟจะอยู่ในข้อเท็จจริงเกี่ยวกับการเดินทางของคลื่นกลับไปตามจุดป้อนเฟสที่เกิดในลักษณะนี้เป็นคุณลักษณะ “แบคไฟร์” (Back Fire) ของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

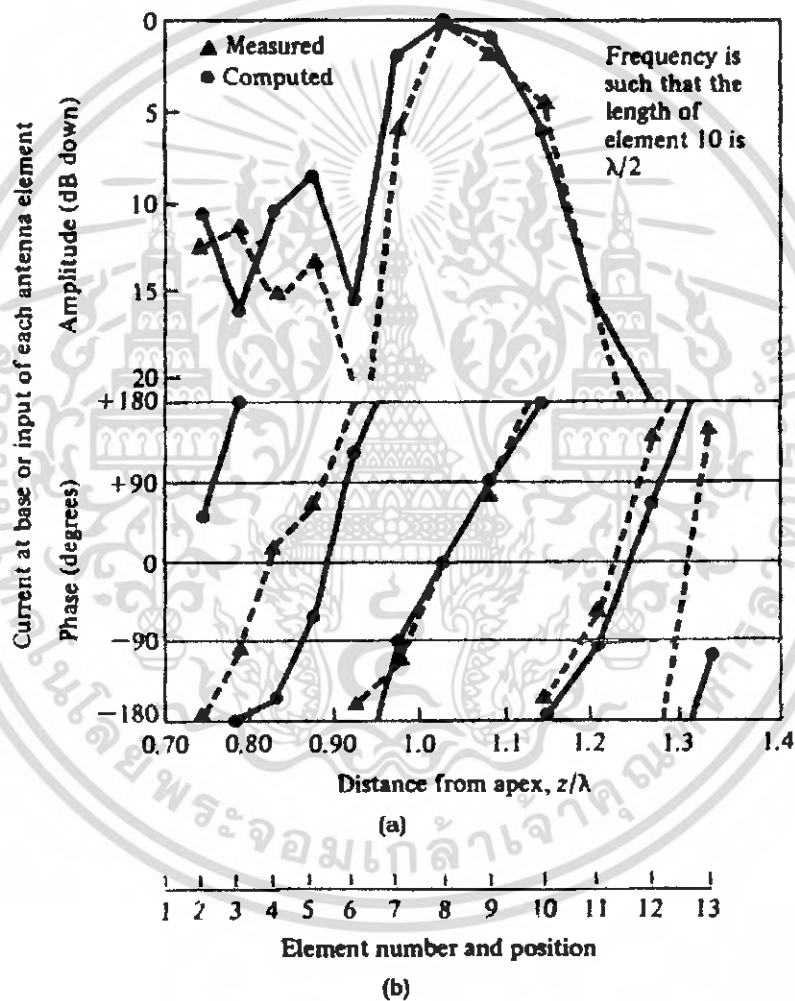


รูปที่ 2.7 (a) แรงดันในแนวอนของตัวพีคเคอร์ของสายอากาศสายคาบลด

(b) ตำแหน่งขององค์ประกอบที่สัมพันธ์กัน

ในขณะที่ความถี่ในการใช้งานเปลี่ยนแปลง แบบรูปทั่วไปของการกระจายแรงดันและกระแสยังคงเหมือนเดิม แต่บริเวณแอกทีฟจะย้ายในอยู่ที่องค์ประกอบต่างกันออกไป ในขณะที่ความถี่เพิ่มขึ้นบริเวณแอกทีฟจะย้ายไปตามทิศทางขององค์ประกอบที่สั้นลง ประสิทธิภาพจะเริ่มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงตามความถี่เช่นกัน ขอบเขตของความถี่สูงจะถูกจำกัดที่องค์ประกอบซึ่งสั้นที่สุดซึ่งยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ซึ่งเราจะต้องให้ระยะห่างของสายป้อนมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับขนาดความยาวคลื่นและในขณะที่ความถี่ลดลงบริเวณแอกทิฟก็จะย้ายไปที่องค์ประกอบที่ยาวขึ้น ประสิทธิภาพค่อนข้างจะคงที่อย่างน้อยในจนกว่าบริเวณแอกทิฟไปถึงองค์ประกอบที่ใหญ่ที่สุด พุดง่าย ๆ ก็คือขอบเขตของความถี่ต่ำจะอยู่ที่ความถี่ซึ่งองค์ประกอบที่ยาวที่สุดมีขนาดยาวครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

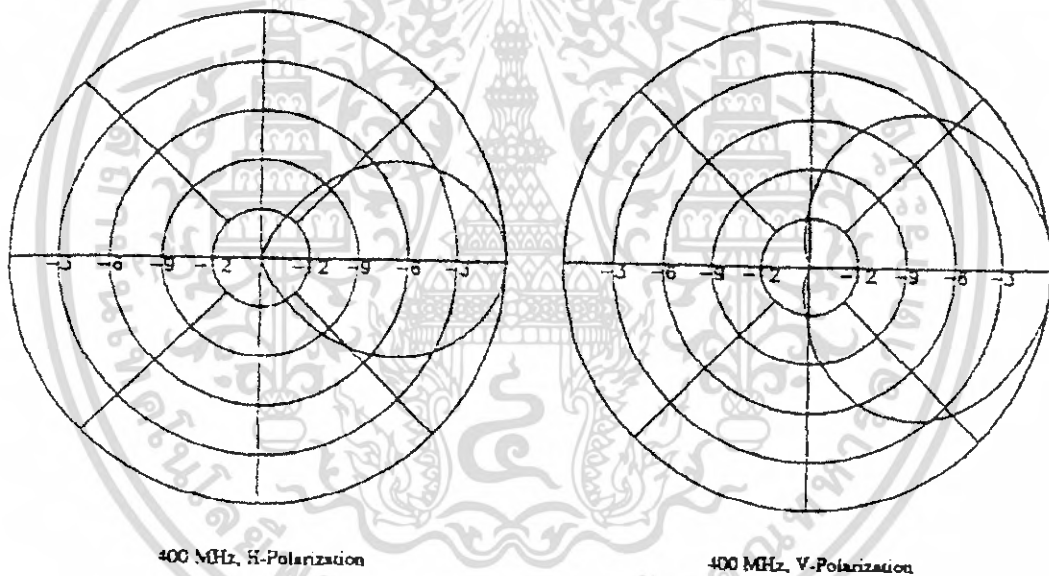


รูปที่ 2.8 (a) กระแสอินพุทขององค์ประกอบในสายอากาศระยคาบถ็อก  
(b) ตำแหน่งขององค์ประกอบที่สัมพันธ์กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดกระแสในองค์ประกอบและตำแหน่งจะทำให้ง่ายขึ้นในการคำนวณหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น รูปที่ 2.10 แสดงแบบรูปของสายอากาศสายคาบสี่เหลี่ยมซึ่งมีพารามิเตอร์คล้ายกับข้อมูลทางแรงดันและกระแสที่ได้นำเสนอไปตามที่กล่าวไว้ข้างต้น ทิศทางของจุดสูงสุดในแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะเลยปลายที่เล็กของโครงสร้าง ซึ่งจะตรงข้ามกับทิศทางที่คลื่นที่เริ่มจะมีค่าลดลงของตัวป้อนสายอากาศแบบลวดขนาน

ตามที่ความถี่จะเปลี่ยนไปภายในย่านการใช้งานของโครงสร้าง ค่าของอินพุทอิมพีแดนซ์ที่จุดป้อนซึ่งเมื่อนำมาพล็อตลงบนแผนภาพสมิท (smith chart) จะมีลักษณะแนวอนและอยู่ในวงกลมขนาดเล็กซึ่งมีศูนย์กลางอยู่ที่แกนจำนวนจริงของแผนภาพ ระดับค่าความต้านทานอินพุทโดยเฉลี่ยของโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้,  $R_{in}$  ซึ่งเป็นค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ของสายสมมูลซึ่งประกอบอยู่ในบริเวณสายส่งจะพบว่าเป็นค่าที่แท้จริง ถึงแม้จะเป็นฟังก์ชันที่มีหลายตัวแปร แต่ก็แค่ฟังก์ชันที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์  $r$  อย่างช้า ระดับค่าความต้านทานเฉลี่ยเป็นฟังก์ชันของค่า  $\sigma$



รูปที่ 2.9 แบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศสายคาบสี่เหลี่ยม

## 2.5 สายอากาศสายคาบสี่เหลี่ยมแบบระนาบพื้นซี (Log-periodic toothed planar antenna)

สายอากาศสายคาบสี่เหลี่ยมแบบระนาบพื้นซีเป็นสายอากาศแบบ bow-tie อย่างง่าย เพียงแต่มีลักษณะเป็นพื้นซี โดยที่พื้นซีเหล่านี้จะแสดงถึงการกระจายตัวของกระแส ซึ่งไหลไปในสายอากาศ หากโครงสร้างของสายอากาศเป็นแบบ bow-tie กระแสจะไหลออกไปตลอดทุกซี่ของสายอากาศ รูปร่างที่ค่อนข้างจะสม่ำเสมอของสายอากาศนี้ สามารถอธิบายโดยตรวจสอบจากสายอากาศแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบสไปรอล (spiral) ที่มีมุมทุกมุมเท่ากับความยาวตามเส้นรัศมีจากจุดศูนย์กลางของ spiral ถึงตำแหน่งของขอบที่ไกลออกไปของตัวนำสามารถหาได้จากสมการ

$$m = r(\phi + 2n\pi) = r_0 e^{a(\phi + 2n\pi)} \quad (2.42)$$

อัตราส่วนของตำแหน่งที่  $n+1$  กับตำแหน่งที่  $n$  คือ

$$\frac{m+1}{m} = \frac{r_0 e^{a(\phi + (n+1)2\pi)}}{r_0 e^{a(\phi + 2n\pi)}} = e^{2\pi a} = \varepsilon \quad (2.43)$$

ซึ่งเป็นการกระจายออกมาจากอัตราส่วนของสายอากาศแบบ spiral ซึ่ง

$$\varepsilon = \frac{r(\phi + 2\pi)}{r\phi} = \frac{r_0 e^{a(\phi + 2\pi)}}{r_0 e^{a\phi}} = e^{2\pi a} \quad (2.44)$$

เมื่อ  $\varepsilon$  คือ expansion ratio

ซึ่ง  $\varepsilon$  เป็นค่าคงที่และด้วยเหตุนี้ระยะทาง(หรือคาบเวลา) ขอบเขตแต่ละด้านจะเป็นอัตราส่วนที่คงที่สำหรับสายอากาศแบบระนาบ spiral สำหรับโครงสร้างของสายอากาศแบบ log-periodic toothed planar antenna อัตราส่วนของระยะทางของขอบแต่ละด้านก็คงที่ด้วยเช่นกัน ซึ่งกำหนดขึ้นตาม scale factor

$$\tau = \frac{R_{n+1}}{R_n} < 1 \quad (2.45)$$

ความกว้างของช่องหาได้จาก

$$\sigma = \frac{a_n}{R_n} < 1 \quad (2.46)$$

ความสัมพันธ์นี้เป็นจริงสำหรับทุกๆค่า  $n$  พารามิเตอร์  $r$  เป็นตัวกำหนดคาบเวลาของโครงสร้าง เราอาจจะสมมติได้ว่ารูปแบบของคาบเวลาและอิมพีแดนซ์มีลักษณะเหมือนกันในกรณีเดียวกัน ถ้าความถี่  $f_{n+1}$  และ  $f_n$  ที่ใกล้ๆกับ นำมาเขียนในลักษณะที่เหมือนกันได้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau = \frac{f_n}{f_{n+1}}$$

$$f_{n+1} = \frac{f_n}{\tau} \quad ; \quad f_n < f_{n+1} \quad (2.47)$$

จากสมการเมื่อนำมา take logarithm ทั้งสองข้างจะได้

$$\log f_{n+1} = \log f_n + \log \left( \frac{1}{\tau} \right) \quad (2.48)$$

ดังนั้น จากการกระทำนี้คือ ค่าระยะของคาบในรูปแบบของฟังก์ชัน Logarithmic และดังที่ได้กล่าวมานี้ จึงเป็นชื่อเรียกของสายอากาศแบบรายคาบเลือก ซึ่งสายอากาศแบบรายคาบเลือกทั้งหมดก็จะมีคุณสมบัตินี้เหมือนกัน

ถ้าขนาดของซี่ของสายอากาศ Log-periodic toothed planar antenna ถูกปรับแต่งโดยถูกต้อง โครงสร้างนี้สามารถทำเป็นแบบ self-complementary ได้ จากรูป 2.11 เราจะเห็นว่าสายอากาศชนิดนี้ในรูปแบบต่างๆ ไป (เป็นแบบ self-complementary หรือ ไม่ก็ตาม) จะมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$r + \beta = 180^\circ$$

$$\beta + 2\delta = \alpha \quad (2.49)$$

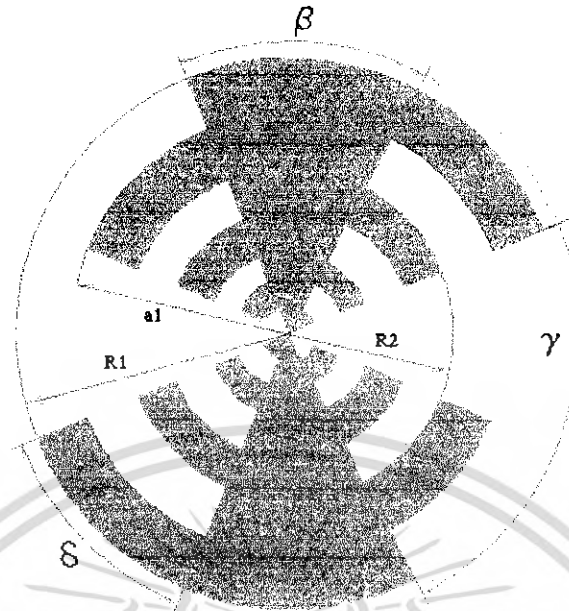
แต่ถ้าโครงสร้างเป็นแบบ self-complementary (เหมือนรูปที่แสดงไว้)

$$\alpha = r, \beta = \delta \quad (2.50)$$

เมื่อแทนค่าของสมการที่ (2.50) ลงในสมการที่ (2.49) คือ  $\beta + \gamma = 180^\circ$  และ  $\beta + 2\beta = \alpha$  จะได้ค่า

$$\alpha = 135^\circ \text{ และ } \beta = 45^\circ$$

ซึ่งใช้สำหรับสายอากาศแบบ self-complementary Log-periodic toothed planar antenna



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของสายอากาศรอยคาบล็อกแบบระนาบพื้นจี

เราจะสังเกตเห็นว่าในหัวข้อที่กล่าวมานี้ สายอากาศซึ่งเป็นแบบ self-complementary จะทำให้ได้สายอากาศแบบ broadband และมี input impedance เท่ากับ  $188.5\Omega$  ถ้าหากความกว้างของจีและช่องว่างสามารถทำให้เท่ากันกับ  $\sigma = \frac{a_n}{R_n} = \frac{R_n + 1}{a_n}$  ใช้สมการที่ (2.45) และสมการ (2.46) หา  $\sigma$  ได้จาก

$$\sigma = \sqrt{\gamma} \quad (2.51)$$

ความสัมพันธ์นี้และรูปแบบ self-complement นี้ นิยมมากในทางปฏิบัติ

คุณสมบัติของสายอากาศแบบ Log-periodic toothed planar antenna จะขึ้นอยู่กับค่า  $r$  พบว่าจากการทดลองค่าของ half-power beamwidth เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่า  $r$  โดย จะเพิ่มขึ้นจากประมาณ  $30^\circ$  ที่ค่า  $r=0.2$  จนถึงประมาณ  $75^\circ$  ที่ค่า  $r=0.9$  รูปแบบของการแพร่กระจายคลื่นจะมี 2 โลบ สำหรับค่าสูงสุดในทิศทางปกติจากระนาบของสายอากาศการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบโพลาร์ไลซ์เชิงเส้น ขนานกับขอบของจีของสายอากาศ การแพร่กระจายนี้จะตั้งฉาก ถ้าเป็นโครงสร้างที่ไม่มีจีฟัน ( $\delta=0$ ) ซึ่งกรณีนี้เป็นสายอากาศแบบ bow-tie ซึ่งแท้ที่จริงแล้วกระแสที่ไหลตามขวางจะมีอิทธิพลเหนี่ยวนำของกระแสที่ไหลปกติเกือบทั้งหมดของกระแสที่ปรากฏบนจีของสายอากาศจะยาวประมาณ quarter-wavelength ( ซึ่งเป็นบริเวณ active ) ซึ่งเราจะพบว่ามัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บอกถึงความกว้างของ Bandwidth ความจำกัดของความถี่ใช้งานจะถูกกำหนดขึ้นจากความถี่ซึ่งเกิดขึ้นที่ซึ่งของสายอากาศที่ใหญ่ที่สุด และเล็กที่สุด ซึ่งวัดความยาว quarter-wavelength ทั้งสองค่า

Log-periodic toothed planar antenna จะมีเสถียรภาพด้านอิมพีแดนซ์และรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นซึ่งซ้ำกันเป็นแบบรายคาบของความถี่ ด้วยค่าคงที่  $r$  และสำหรับสายอากาศชนิดนี้ที่มีโครงสร้างแบบ self-complementary แม้ว่าจะไม่ได้มีการทำให้เป็นอิสระจากความถี่อย่างแท้จริง แต่ก็นำความมีเสถียรภาพซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงเลขสำหรับความถี่ระหว่างแต่ละรายคาบของโครงสร้างซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง  $f_n < f < f_{n+1}$  ซึ่งแท้ที่จริงแล้ว จากการวัดก็จะได้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่เป็นเชิงเส้นเหมือนกันด้วยอัตราส่วนของ Bandwidth = 10:1

## 2.6 ความสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายอากาศ (Loss in Antenna)

### 2.6.1 ความสูญเสียที่เกิดจากกำลังงานย้อนกลับ (Return Power Loss)

กำลังงานย้อนกลับเกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางไปตามสายนำสัญญาณและไปกระทบกับมิสมัทช์โหลด ทำให้กำลังงานบางส่วนย้อนกลับมาตามสายความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของกำลังงานนี้มีชื่อเรียกว่า Return Loss และมีค่าตามสมการ

$$P_{return} = 10 \log \frac{P_i}{P_r} \quad (2.52)$$

เมื่อ  $P_{return}$  = กำลังงานย้อนกลับ, dB

$P_i$  = กำลังงานตกกระทบ (Incident power), W

$P_r$  = กำลังงานสะท้อนกลับ (Reflected power), W

เพราะว่า  $P = \frac{V^2}{R}$  (W) ฉะนั้นสมการที่ (2.52) มีรูปเป็น

$$\begin{aligned} P_{return} &= 10 \log \frac{V_i^2/Z_o}{V_r^2/Z_o} \\ &= 10 \log \frac{V_i^2}{V_r^2} \\ &= 10 \log \left( \frac{V_i}{V_r} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.53)$$

และจาก  $\log M^N$  จะได้สมการที่ (2.53) ในรูปสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{return} = 10(2) \log \frac{V_i}{V_r} \quad (2.54)$$

หารเศษและส่วนเทอมใน log ด้วย  $V_i$  จะได้

$$P_{return} = 20 \log \frac{1}{V_r/V_i} \quad (2.55)$$

จาก  $\Gamma = \frac{V_r}{V_i}$  ดังนั้น สมการที่ (2.55) สามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของ  $\Gamma$  ได้เป็นตามสม

การ

$$P_{return} = 20 \log \frac{1}{\Gamma} \quad (2.56)$$

กำลังงานที่สะท้อนกลับมาตามสายนั้นตามความเป็นจริงก็คือ ส่วนหนึ่งของกำลังงานตกกระทบที่ส่งไปตามสายนำสัญญาณ ฉะนั้น Return power loss อาจเรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่า Two-way power loss

### 2.6.2 ความสูญเสียกำลังงานจากการมิสแมตช์ (Mismatch power loss)

คำว่า Mismatch loss หรือเรียกอีกชื่อว่า One-way power loss เป็นคำที่ใช้เรียกความสูญเสียจากการสะท้อนกลับซึ่งเป็นผลมาจากการมิสแมตช์ โดยสามารถหาค่ากำลังสูญเสียจากการมิสแมตช์ของสายได้จากสมการ

$$P_{mismatch} = 10 \log \frac{P_i}{P_i P_r} \quad (2.57)$$

โดยที่  $P_{mismatch}$  = กำลังงานมิสแมตช์, dB

$P_i$  = กำลังงานตกกระทบ, dB

$P_r$  = กำลังงานสะท้อนกลับ, dB

ทำการหารสากการที่ (2.57) ทั้งเศษและส่วนด้วย  $P_i$  จะได้สมการ

$$P_{mismatch} = 10 \log \frac{1}{1 - P_r/P_i} \quad (2.58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.58) ซึ่ง  $\Gamma^2 = \frac{P_r}{P_i}$  ดังนั้นจะได้ว่า

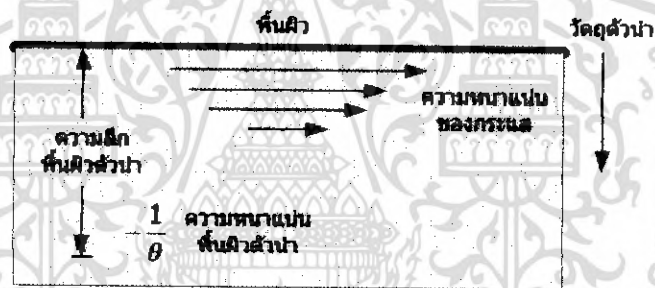
$$P_{mismatch} = 10 \log \frac{1}{1 - \Gamma^2} \quad (2.59)$$

โดยที่  $P_{mismatch}$  = กำลังงานมิสมแมทซ์, dB

$\Gamma^2$  = สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของกำลังงาน, ไม่มีหน่วย

### 2.6.3 ความสูญเสียเนื่องจากผิวของตัวนำ (skin effect)

เมื่อความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่แท่งตัวนำเพิ่มขึ้น ความลึกของกระแสที่ผ่านที่ผิวตัวนำจะลดลง ความลึกของกระแสที่ผิวตัวนำนี้มีชื่อเรียกว่า ความลึกพื้นผิวตัวนำ (skin depth) ที่ชั้นความลึก หรือระยะความลึกของกระแสที่ผิวตัวนำซึ่งมีความหนาแน่นของกระแสลดลงเป็น  $\frac{1}{e}$  ของกระแสที่พื้นผิว ( $e = 2.718$ ) แสดงไว้ดังรูป



รูปที่ 2.11 แสดงการลดลงของความหนาแน่นกระแสเนื่องจากสกินเอฟเฟกต์

ความลึกพื้นผิวตัวนำนี้ จะมีค่ามากขึ้นอยู่กับความถี่ใช้งาน ค่าเพอมีอะบิลิตีของตัวกลางและสภาพความเป็นตัวนำ

$$\text{skin depth (m)} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \gamma}} \quad (2.60)$$

โดยที่  $f$  = ความถี่, Hz

$\mu$  = ค่าเพอมีอะบิลิตี, H/m

$\gamma$  = สภาพความเป็นตัวนำ (Conductivity), S/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะว่าสภาพความต้านทานเป็นส่วนกลับหรือแปรผกผันกับสภาพความเป็นตัวนำ

$$\gamma = \frac{1}{r} \quad (2.61)$$

และสมการที่ (2.61) จะได้เป็น

$$\text{skin depth (m)} = \frac{r}{\sqrt{\pi f \mu}} \quad (2.62)$$

โดยที่  $f$  = ความถี่, Hz

$\mu$  = ค่าเพอมีอับิลิตี, H/m

$r$  = ความต้านทาน,  $\Omega / m$

การที่ระยะความลึกถูกลดลงที่ความถี่สูงนั้น ทำให้ความหนาแน่นของกระแสที่บริเวณพื้นผิวตัวนำเพิ่มขึ้น แต่ถ้าทำการลดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำจะมีผลให้ความต้านทานเพิ่มขึ้นและกระแสจะลดลงไปด้วย ค่าความต้านทานของโลหะตัวนำที่ใช้งาน แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความต้านทานของโลหะตัวนำ

โลหะตัวนำ	หน่วย (โอห์ม/เมตร)
อลูมิเนียม	$2.620 \times 10^{-8}$
ทองคำ	$2.439 \times 10^{-8}$
ทองแดง	$1.724 \times 10^{-8}$
เงิน	$1.620 \times 10^{-8}$

ถ้าทราบความถี่ใช้งาน จะสามารถคำนวณความลึกของชั้นความหนาแน่นกระแสจากพื้นผิวของตัวนำได้โดยใช้สมการที่ (2.61) และ (2.62) ในการใช้งานสามารถลดผลจากความสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากผิว ของตัวนำ (Skin effect) ได้โดยการขูดหรือเคลือบผิวด้วยโลหะซึ่งมีความต้านทานต่ำ และมีราคาสูง (เช่นทองคำ เป็นต้น) ซึ่งวิธีการนี้นิยมใช้กันในอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้งานที่ ความถี่สูง ตัวอย่างเช่น การฉาบผิวด้านในของท่อนำคลื่นด้วยทองหรือเงินเพื่อลดความต้านทานที่ ผิวดำนำ เป็นต้น

## 2.7 การผสมผสานอากาศ ( Matching of Antenna)

สาเหตุที่มีการแมทซ์ซึ่งเนื่องจากการรับส่งของระบบสายอากาศย่านความถี่หนึ่งๆ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับ การตอบสนองทางความถี่ขององค์ประกอบเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับคุณลักษณะทางความถี่ (frequency characteristic) ของการต่อสายส่งเข้ากับองค์ประกอบด้วย ในทางปฏิบัติค่าของอิมพีแดนซ์ของสายส่งเป็นค่าจริงและค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเป็นค่าเชิงซ้อน และการแปรเปลี่ยนค่าคุณสมบัติทั้งสองเป็นแบบฟังก์ชัน ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบวงจรคัปปลิง-แมทซ์ (coupling matching network) ขึ้นมาเพื่อจะ ได้ทำการแมทซ์ค่าคุณลักษณะทั้งสองในย่านความถี่ที่ต้องการ

### 2.7.1 การแมทซ์ด้วยช่วงนำสัญญาณยาว (1/4)λ

วิธีการแมทซ์ซึ่งด้วยวิธีนี้นับว่าง่ายดีเพราะใช้ความยาวที่พอเหมาะ แล้วต่อเชื่อมกันโดยตรงโดยไม่ต้องมีอุปกรณ์อื่นใดประกอบด้วย ตามที่เราทราบมาแล้วหากตัดความยาวของสายนำสัญญาณ ให้มีขนาดความยาวเพียง (1/2) ของความยาวคลื่น และถ้าให้ปลายด้านหนึ่งลัดวงจร ค่าอิมพีแดนซ์ของสายจะมีค่าเป็นอนันต์ และจะไม่ขึ้นกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอีกด้วย อย่างไรก็ตามหากว่าใช้ค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์และอิมพีแดนซ์ทางด้านแหล่งกำเนิดสัญญาณมาต่อเชื่อมก็จะทำหน้าที่เป็นตัวแมทซ์ซึ่งได้นั้นคือค่าอิมพีแดนซ์ของสายที่นำมาทำเป็นตัวแมทซ์ซึ่งจะมีสูตรดังนี้

$$Z_{ms} = \sqrt{Z_0 Z_1} \quad (2.63)$$

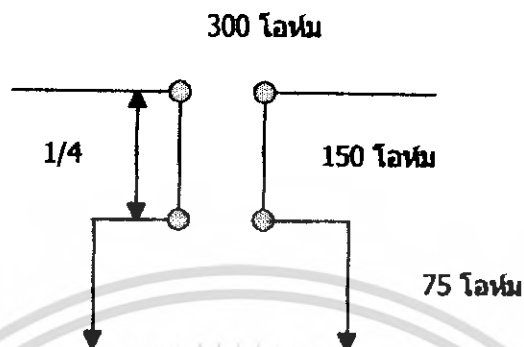
เมื่อ  $Z_{ms}$  คือลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของสายที่เป็นตัวแมทซ์ซึ่ง  
 $Z_0$  คืออิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ  
 $Z_1$  คืออิมพีแดนซ์ของตัวเครื่องส่ง

จากรูปที่ 2.13 เป็นตัวอย่างการต่อแมทซ์ซึ่งโดยสมมุติด้วยว่าสายอากาศเป็นชนิดที่มีอิมพีแดนซ์ 300 โอห์ม เพื่อต่อเข้ากับเครื่องรับทีวีสีที่มีอิมพีแดนซ์เพียง 75 โอห์ม ค่าอิมพีแดนซ์ของสายที่ต้องการคือ

$$Z_{ms} = \sqrt{75 \times 30} = 145\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเหมาะที่เราจะใช้สายขนาด 150 โอห์มดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.12 การแมตช์จิ่งด้วยสายยาว  $(1/4)\lambda$

ความยาวของสายที่มีขนาด  $(1/4)\lambda$  สามารถคำนวณได้จากสูตร  $\frac{246 \times V_c}{f(\text{MHz})}$  มีหน่วยเป็นฟุต

เมื่อ  $f$  คือค่าความถี่ของสัญญาณ

$V_c$  คือค่าคงตัวของความเร็ว (ใช้ค่าประมาณ 0.77 สำหรับสายจำพวกทวินลีด)

ในบางครั้งการที่เราจะหาขนาดของสายมาใช้งานทำได้ยากเพราะค่าอิมพีแดนซ์ของสายมีค่าไม่ต่อเนื่องตลอด ดังนั้นถ้าคำนวณได้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายแล้วก็จะหาสายมาใช้งานไม่ได้ วิธีแก้ไขคืออาจจะใช้ท่ออลูมิเนียมโดยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง  $d$  วางห่างกัน โดยค่าอิมพีแดนซ์ของอลูมิเนียมคู่มือค่าเป็น

$$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{\epsilon}} \log \frac{2D}{d} \quad (2.64)$$

ค่าความยาวของแท่งอลูมิเนียมที่ใช้ความยาว  $\frac{242V_c}{f(\text{MHz})}$  มีหน่วยเป็นฟุต

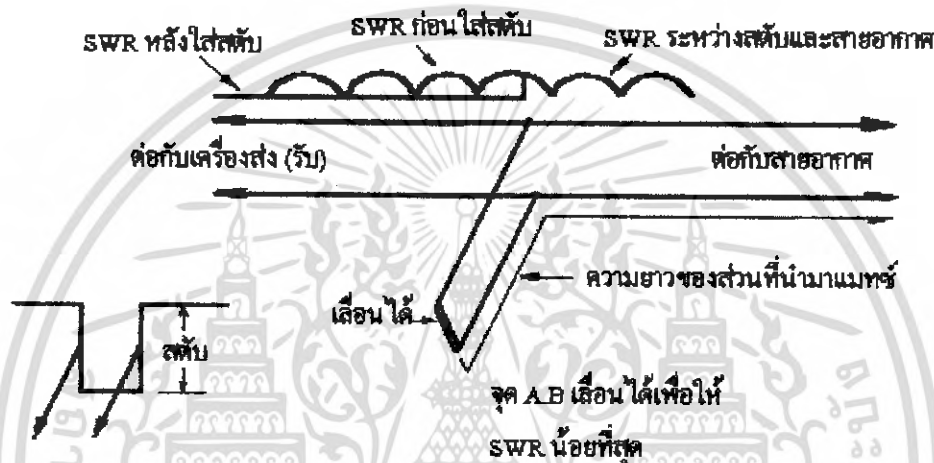
### 2.7.2 การแมตช์จิ่งด้วยสตับ

เมื่อนำสายนำสัญญาณสองเส้นมาต่อกัน โดยที่อิมพีแดนซ์ของสายไม่เท่ากัน การสะท้อนของคลื่นย่อมเกิดขึ้นได้ซึ่งจะเป็นผลทำให้ค่า VSWR มีค่าสูงซึ่งจะทำให้ส่วนของสัญญาณที่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีแอกทีฟปรากฏขึ้นมากมายวิธีหนึ่งที่จะแก้ปัญหานี้ได้ก็คือใช้สตัด์ ซึ่งก็ต้องการหาขนาดของสตัด์และวิธีการออกแบบ

ความหมายของคำว่าสตัด์ก็คือ สายที่นำมาต่อขนานกับสายนำสัญญาณเพื่อให้อิมพีแดนซ์รวมของสายเมทซ์ได้กับค่านำเนคสัญญาณหรือโหลด ถ้าพิจารณาในแง่ของการสะท้อนของคลื่น ถ้าหากไม่มีสตัด์การเคลื่อนที่เหนี่ยวนำของคลื่นในสายนำสัญญาณจะเสมือนเป็นคลื่นซึ่งให้ค่า VSWR สูง แต่เมื่อนำสตัด์มาต่อก็จะทำให้คลื่นในสายราบเรียบดังรูป



รูปที่ 2.13 สตัด์ที่ใช้ในการเมทซ์จิ่ง

เมื่อเราใช้สายที่มีอิมพีแดนซ์ที่มีค่าไม่เท่ากับสายอากาศ เช่น ใช้สายนำสัญญาณ 70 โอห์ม ใช้กับสายอากาศฮาล์ฟเวฟโค โพล ซึ่งย่อทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่น การสะท้อนของคลื่นมัก จะเหนี่ยวนำออกมาภายนอกในกรณีที่มีค่าแรงดันสแตคคิงวพมีค่าไม่เป็นศูนย์ ซึ่งก็จะทำให้เกิดคลื่น ในลักษณะในแนวคิงเกิดคลื่นขึ้นจากสายสัญญาณนี้ จะทำให้สายนำสัญญาณที่ใช้กับตัวสายอยู่ใน สภาพที่ไม่เมทซ์กันมากยิ่งขึ้นวิธีการแก้ไขเพื่อให้ได้สภาวะการเมทซ์เกิดขึ้นทำได้ดังรูปที่ 2.13

### บทที่ 3

## การคำนวณ การออกแบบ และการสร้าง

### 3.1 วิธีการคำนวณและการออกแบบ

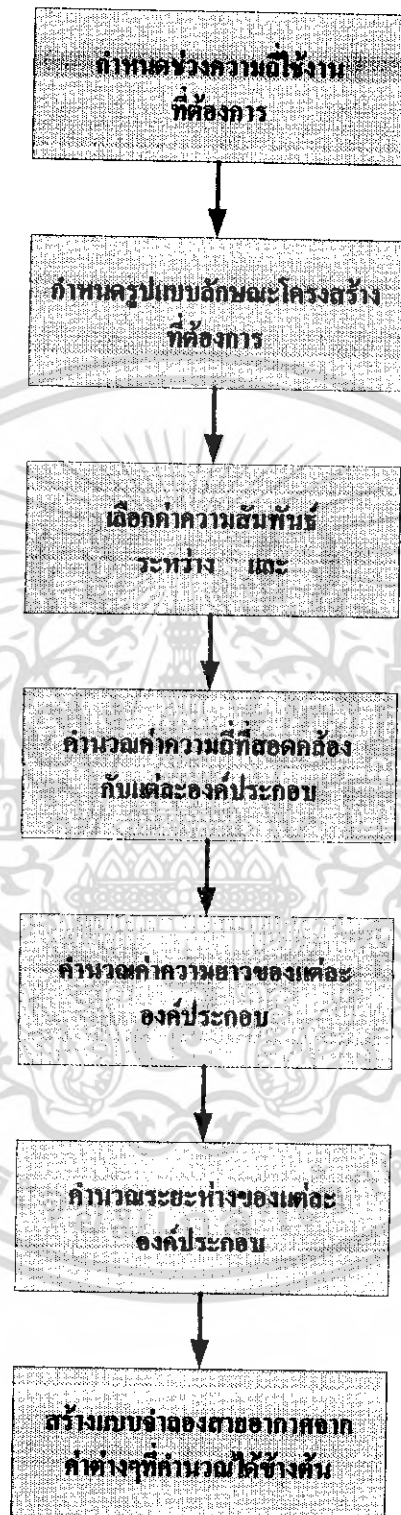
สายอากาศแบบรายคาบคือกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริกมีข้อดีหลายประการคือ อัตราการกระจายสูง อินพุทอิมพีแดนซ์สามารถคำนวณได้ตามต้องการ อัตราส่วนโบนหน้าต่อโบนหลัง (front to back) สูง ความกว้างของช่วงความถี่กว้าง ซึ่งค่าที่กล่าวเหล่านี้เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยมากเมื่อความถี่ของการทำงานเปลี่ยนไป (จะแตกต่างจากสายอากาศแบบอื่นๆ เมื่อความถี่รีโซแนนซ์เปลี่ยนไปจะทำให้ SWR เพิ่มขึ้น) ซึ่งค่าที่กล่าวมาข้างต้นมีความสัมพันธ์กันอย่างสกลคือเป็นส่วนใหญ่

ก่อนที่จะทำการออกแบบ จะกล่าวถึงตัวย่อและความหมายเพื่อสะดวกในการคำนวณดังนี้

- $B$  = ช่วงความกว้างของความถี่ของการใช้งาน (operating bandwidth)
- $B_s$  = ช่วงกว้างของความถี่สำหรับโครงสร้าง (bandwidth for structure)
- $B_{ar}$  = ช่วงกว้างของความถี่ของบริเวณแอ็คทีฟ (bandwidth of the active region)
- $\tau$  = ตัวคงที่ในการออกแบบ (design constant)
- $\sigma$  = ตัวคงที่ระยะห่างสัมพันธ์ (relative spacing constant)
- $\sigma_{opt}$  = ค่ามากที่สุดของ  $\sigma$  (optimum rate for  $\sigma$ )
- $\alpha$  = มุมที่มีค่าครึ่งหนึ่งของมุมยอด (apex half-angle)
- $Z$  = ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวฟีดเดอร์ของสายอากาศ (antenna-feeder impedance)
- $R$  = ค่าเฉลี่ยความต้านทานของการแผ่กระจายคลื่น (the mean radiation resistance level)
- $Z$  = ค่าเฉลี่ยอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของไดโพล (average characteristic impedance of dipole)
- $f_l$  = ความถี่ต่ำสุดของการใช้งาน (lowest frequency, MHz)
- $f_h$  = ความถี่สูงสุดของการใช้งาน (highest frequency, MHz)
- $l$  = ความยาวขององค์ประกอบ (element length)
- $d$  = ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ (element spacing)

จากนั้นสามารถพิจารณาการออกแบบสายอากาศแบบรายคาบคือกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริกได้จากแผนผังแสดงขั้นตอนการออกแบบข้างล่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการออกแบบสายอากาศระบายความร้อนนิวตริออนรองไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ขั้นตอนการออกแบบ

#### 1. กำหนดแถบความกว้างของความถี่ (Bandwidth) ที่ต้องการ

โดยเลือกค่าความถี่ต่ำสุดและความถี่สูงสุดของช่วงความถี่ที่ต้องการ สำหรับปริภูมิพนธ์นี้เลือกค่าแถบความกว้างของความถี่อยู่ในช่วง 450 MHz ถึง 4 GHz ซึ่งจะได้ช่วง Bandwidth เท่ากับ 3.5 GHz

#### 2. กำหนดลักษณะโครงสร้างของสายอากาศที่ต้องการจะออกแบบ

สำหรับปริภูมิพนธ์นี้เลือกโครงสร้างของสายอากาศเป็นแบบ self-complementary structure ซึ่งมีโครงสร้างทั่วไปดังแสดงในรูป



รูปที่ 3.2 โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศแบบ self-complementary

จากรูปสำหรับโครงสร้างแบบ self-complementary Log-periodic toothed planar antenna นี้จะได้ความสัมพันธ์ลักษณะพิเศษของโครงสร้างนี้คือ

$$\gamma + \beta = 180^\circ \quad (3.1)$$

$$\beta + 2\delta = \alpha \quad (3.2)$$

ในที่นี้กำหนดให้  $\alpha = \gamma$  และ  $\beta = \delta$

จากสมการที่ (3.1) จะได้  $\alpha + \beta = 180^\circ \quad (3.3)$

จากสมการที่ (3.2) จะได้  $\beta + 2\beta = \alpha \quad (3.4)$

แทนค่าจากสมการที่ (3.4) ลงในสมการที่ (3.3) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\beta + 2\beta + \beta = 180^\circ$$

$$4\beta = 180^\circ$$

$$\beta = 180 / 4$$

$$\beta = 45^\circ$$

ดังนั้นจะได้

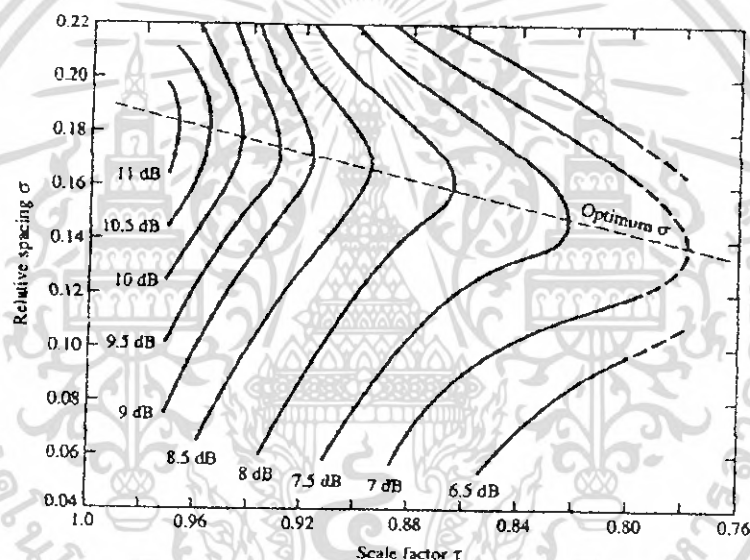
แทนค่า  $\beta$  ลงในสมการที่ (3.4)

จะได้

$$\alpha = 135^\circ$$

### 3. เลือกค่าคงที่จากความสัมพันธ์ระหว่าง $\tau$ และ $\sigma$

โดยพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปข้างล่าง



รูปที่ 3.3 คอนทัวร์ของสภาพเจาะงทิตทางต่อ  $\sigma$  และ  $\tau$  สำหรับสายอากาศแบบระยคาบคาล็อก

ค่าที่เหมาะสมของ  $\tau$  และ  $\sigma$  ควรจะเป็น

$$0.8 < \tau < 0.98$$

$$0.9 < \sigma < \sigma_{opt} \quad (3.5)$$

ในที่นี้เลือกค่า  $\tau = 0.88$

สำหรับโครงสร้างของสายอากาศแบบ self-complementary structure สามารถคำนวณค่าของ  $\sigma$  ได้จากสูตร

$$\sigma = \sqrt{\tau} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า  $\tau = 0.88$  ลงในสมการที่ (3.6)

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad \sigma &= \sqrt{\tau} \\ \sigma &= \sqrt{0.88} \\ \sigma &= 0.938 \end{aligned}$$

#### 4. คำนวณหาค่าอัตราช่วงความถี่ที่ใช้งาน (B)

จากสูตร 
$$B = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $f_{\max}$  คือความถี่สูงสุด  
 $f_{\min}$  คือความถี่ต่ำสุด

และสายอากาศที่ทำการออกแบบอยู่ในช่วงความถี่ 450-4 GHz

จะได้ค่า 
$$B = \frac{4 \times 10^9}{450 \times 10^6} = 8.89$$

#### 5. คำนวณหาค่าแบนด์วิดท์บริเวณเอกทีฟ (bar)

$$\begin{aligned} \text{Bar} &= 1.1 + 7.7(1 - \tau)^2 \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\ &= 1.1 + 7.7(1 - 0.88)^2 \cot(67.5^\circ) \\ &= 1.1 + (7.7 \times 0.0144 \times 0.414) \\ &= 1.1459 \end{aligned} \quad (3.8)$$

#### 6. คำนวณหาค่าแบนด์วิดท์โครงสร้างแบบเออร์เรย์ (Bs)

$$\begin{aligned} B_s &= B \times \text{Bar} \\ &= 8.89 \times 1.1459 \\ &= 10.187 \end{aligned} \quad (3.9)$$

#### 7. คำนวณหาค่าความยาวของแกนสายอากาศ (L)

$$\begin{aligned} \lambda_{\max} &= \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r} \times f_{\min}} \\ &= \frac{3 \times 10^{10}}{\sqrt{4.1274} \times 450 \times 10^6} \end{aligned} \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจาก

$$= 32.815 \text{ cm}$$

$$l = \frac{\lambda_{\max}}{2}$$

$$l = \frac{32.815}{2} = 16.4075 \text{ cm}$$

### 8. คำนวณหาค่าจำนวนอิตีเมนต์ของสายอากาศ (N)

$$n = 1 + \frac{\log\left(\frac{f_{\min}}{f_{\max}}\right)}{\log(\tau)} \quad (3.11)$$

$$= 1 + \frac{\log\left(\frac{450 \times 10^6}{4 \times 10^9}\right)}{\log(0.88)}$$

$$= 18.091 \approx 18$$

เพราะค่าที่ได้เมื่อนำ  $n$  ไปคูณกับ  $\frac{1}{\tau^n}$  จะได้จำนวน  $n$  ต่ำที่สุดที่ 18 อิตีเมนต์ จึงจะอยู่ในย่านความถี่ที่ออกแบบ

### 9. คำนวณหาค่าความยาวของแต่ละอิตีเมนต์

$$\text{จาก } l_n = l_1 \times \tau^{n-1}$$

$$l_{n-1} = l_n \times \tau \quad (3.12)$$

$$l = l_1 = \lambda_{\max}$$

$$l_1 = 16.4075 \text{ cm}$$

$$l_2 = l_1 \times \tau = 16.4075 \times 0.88 = 14.4386 \text{ cm}$$

$$l_3 = l_1 \times \tau^2 = 16.4075 \times 0.88^2 = 12.7059 \text{ cm}$$

$$l_4 = l_1 \times \tau^3 = 16.4075 \times 0.88^3 = 11.1812 \text{ cm}$$

$$l_5 = l_1 \times \tau^4 = 16.4075 \times 0.88^4 = 9.8395 \text{ cm}$$

$$l_6 = l_1 \times \tau^5 = 16.4075 \times 0.88^5 = 8.6576 \text{ cm}$$

$$l_7 = l_1 \times \tau^6 = 16.4075 \times 0.88^6 = 7.6197 \text{ cm}$$

$$l_8 = l_1 \times \tau^7 = 16.4075 \times 0.88^7 = 6.7053 \text{ cm}$$

$$l_9 = l_1 \times \tau^8 = 16.4075 \times 0.88^8 = 5.9007 \text{ cm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$l_{10} = l_1 \times r^9 = 16.4075 \times 0.88^9 = 5.1926 \text{ cm}$$

$$l_{11} = l_1 \times r^{10} = 16.4075 \times 0.88^{10} = 4.5695 \text{ cm}$$

$$l_{12} = l_1 \times r^{11} = 16.4075 \times 0.88^{11} = 4.0212 \text{ cm}$$

$$l_{13} = l_1 \times r^{12} = 16.4075 \times 0.88^{12} = 3.5386 \text{ cm}$$

$$l_{14} = l_1 \times r^{13} = 16.4075 \times 0.88^{13} = 3.1139 \text{ cm}$$

$$l_{15} = l_1 \times r^{14} = 16.4075 \times 0.88^{14} = 2.7403 \text{ cm}$$

$$l_{16} = l_1 \times r^{15} = 16.4075 \times 0.88^{15} = 2.4115 \text{ cm}$$

$$l_{17} = l_1 \times r^{16} = 16.4075 \times 0.88^{16} = 2.1221 \text{ cm}$$

$$l_{18} = l_1 \times r^{17} = 16.4075 \times 0.88^{17} = 1.8674 \text{ cm}$$

#### 10. คำนวณหาค่าระยะระหว่างอีลีเมนต์

จากความสัมพันธ์ของส่วนโค้งที่รองรับมุมคือ

$$r = \frac{a}{\theta}$$

(3.13)

โดยที่  $\theta$  = มุมรองรับส่วนโค้ง (เรเดียน)

$a$  = ความยาวส่วนโค้ง

$r$  = รัศมี

จาก  $360^\circ = 2\pi = 6.283$

ดังนั้นเมื่อ  $\theta = 135^\circ$

$$\theta = 135^\circ = \frac{6.283 \times 135}{360} \text{ เรเดียน}$$

$$= 2.361 \text{ เรเดียน}$$

จากนั้นจึงสามารถคำนวณค่าระยะระหว่างอีลีเมนต์ได้ดังนี้

$$R_1 = \frac{a}{2.361} = \frac{16.4075}{2.361} = 6.7706 \text{ cm}$$

(3.14)

$$R_2 = R_1 \times r = 6.7706 \times 0.88 = 5.9581 \text{ cm}$$

$$R_3 = R_1 \times r^2 = 6.7706 \times 0.88^2 = 5.2431 \text{ cm}$$

$$R_4 = R_1 \times r^3 = 6.7706 \times 0.88^3 = 4.6139 \text{ cm}$$

$$R_5 = R_1 \times r^4 = 6.7706 \times 0.88^4 = 4.0603 \text{ cm}$$

$$R_6 = R_1 \times r^5 = 6.7706 \times 0.88^5 = 3.5731 \text{ cm}$$

$$R_7 = R_1 \times r^6 = 6.7706 \times 0.88^6 = 3.1443 \text{ cm}$$

$$R_8 = R_1 \times r^7 = 6.7706 \times 0.88^7 = 2.7670 \text{ cm}$$

$$R_9 = R_1 \times r^8 = 6.7706 \times 0.88^8 = 2.4349 \text{ cm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{10} = R_1 \times \tau^9 = 6.7706 \times 0.88^9 = 2.1427 \text{ cm}$$

$$R_{11} = R_1 \times \tau^{10} = 6.7706 \times 0.88^{10} = 1.8856 \text{ cm}$$

$$R_{12} = R_1 \times \tau^{11} = 6.7706 \times 0.88^{11} = 1.6593 \text{ cm}$$

$$R_{13} = R_1 \times \tau^{12} = 6.7706 \times 0.88^{12} = 1.4602 \text{ cm}$$

$$R_{14} = R_1 \times \tau^{13} = 6.7706 \times 0.88^{13} = 1.2849 \text{ cm}$$

$$R_{15} = R_1 \times \tau^{14} = 6.7706 \times 0.88^{14} = 1.1308 \text{ cm}$$

$$R_{16} = R_1 \times \tau^{15} = 6.7706 \times 0.88^{15} = 0.9951 \text{ cm}$$

$$R_{17} = R_1 \times \tau^{16} = 6.7706 \times 0.88^{16} = 0.8756 \text{ cm}$$

$$R_{18} = R_1 \times \tau^{17} = 6.7706 \times 0.88^{17} = 0.7706 \text{ cm}$$

$$R_{19} = R_1 \times \tau^{18} = 6.7706 \times 0.88^{18} = 0.6781 \text{ cm}$$

### 11. คำนวณหาค่าความถี่ที่สอดคล้องกันกับอีลีเมนต์

จาก

$$f_n = \frac{f_1}{\tau^{n-1}}$$

$$f_{n-1} = \frac{f_n}{\tau}$$

ในที่นี้กำหนดความถี่ต่ำสุดที่  $f_1 = 0.45 \text{ GHz}$

(3.15)

$$f_2 = \frac{f_1}{\tau} = \frac{0.45 \times 10^9}{0.88} = 0.5113 \text{ GHz}$$

$$f_3 = \frac{f_1}{\tau^2} = \frac{0.45 \times 10^9}{0.88^2} = 0.5811 \text{ GHz}$$

$$f_4 = \frac{f_1}{\tau^3} = \frac{0.45 \times 10^9}{0.88^3} = 0.6603 \text{ GHz}$$

$$f_5 = \frac{f_1}{\tau^4} = \frac{0.45 \times 10^9}{0.88^4} = 0.7504 \text{ GHz}$$

$$f_7 = \frac{f_1}{\tau^6} = \frac{0.45 \times 10^9}{0.88^6} = 0.9803 \text{ GHz}$$

$$f_8 = \frac{f_1}{\tau^7} = \frac{0.45 \times 10^9}{0.88^7} = 1.1140 \text{ GHz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_9 = \frac{f_1}{\tau^8} = \frac{0.45 \times 10^9}{0.88^8} = 1.2659 \text{ GHz}$$

$$f_{10} = \frac{f_1}{\tau^9} = \frac{0.45 \times 10^9}{0.88^9} = 1.4385 \text{ GHz}$$

$$f_{11} = \frac{f_1}{\tau^{10}} = \frac{0.45 \times 10^9}{0.88^{10}} = 1.6347 \text{ GHz}$$

$$f_{12} = \frac{f_1}{\tau^{11}} = \frac{0.45 \times 10^9}{0.88^{11}} = 1.8576 \text{ GHz}$$

$$f_{13} = \frac{f_1}{\tau^{12}} = \frac{0.45 \times 10^9}{0.88^{12}} = 2.1109 \text{ GHz}$$

$$f_{14} = \frac{f_1}{\tau^{13}} = \frac{0.45 \times 10^9}{0.88^{13}} = 2.3988 \text{ GHz}$$

$$f_{15} = \frac{f_1}{\tau^{14}} = \frac{0.45 \times 10^9}{0.88^{14}} = 2.7259 \text{ GHz}$$

$$f_{16} = \frac{f_1}{\tau^{15}} = \frac{0.45 \times 10^9}{0.88^{15}} = 3.0976 \text{ GHz}$$

$$f_{17} = \frac{f_1}{\tau^{16}} = \frac{0.45 \times 10^9}{0.88^{16}} = 3.5200 \text{ GHz}$$

$$f_{18} = \frac{f_1}{\tau^{17}} = \frac{0.45 \times 10^9}{0.88^{17}} = 4.0000 \text{ GHz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานเดียวกันก็สามารถคำนวณและออกแบบที่ค่า  $\tau$  และ  $\sigma$  อื่นๆ ได้ดังนี้

เมื่อพิจารณาที่ค่า  $\tau = 0.9$

จะได้ค่า  $\sigma = 0.9487$  และจำนวนอิเลิเมนต์  $N = 21.736 \approx 22$  Element

และขนาดของสายอากาศดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 3.1 ขนาดของสายอากาศสำหรับค่า  $\tau = 0.90$

L(ความยาวของส่วนโค้ง)	R(รัศมี)	F(ความถี่)
L1=16.4075cm	R1=6.7706cm	F1=0.45GHz
L2=14.7667cm	R2=6.0935cm	F2=0.50GHz
L3=13.2901cm	R3=5.4842cm	F3=0.55GHz
L4=11.9611cm	R4=4.93576cm	F4=0.62GHz
L5=10.7650cm	R5=4.4422cm	F5=0.68GHz
L6=9.6885cm	R6=3.9979cm	F6=0.76GHz
L7=8.7196cm	R7=3.5982cm	F7=0.85GHz
L8=7.8476cm	R8=3.2384cm	F8=0.94GHz
L9=7.0629cm	R9=2.9145cm	F9=1.05GHz
L10=6.3566cm	R10=2.6231cm	F10=1.16GHz
L11=5.7209cm	R11=2.3607cm	F11=1.29GHz
L12=5.1488cm	R12=2.1247cm	F12=1.43GHz
L13=4.6340cm	R13=1.9122cm	F13=1.59GHz
L14=4.1706cm	R14=1.7210cm	F14=1.77GHz
L15=3.7535cm	R15=1.5489cm	F15=1.97GHz
L16=3.3781cm	R16=1.3940cm	F16=2.18GHz
L17=3.0403cm	R17=1.2546cm	F17=2.43GHz
L18=2.7363cm	R18=1.1292cm	F18=2.69GHz
L19=2.4626cm	R19=1.0162cm	F19=2.99GHz
L20=2.2164cm	R20=0.9146cm	F20=3.33GHz
L21=1.9948cm	R21=0.8231cm	F21=3.71GHz
L22=1.7953cm	R22=0.7408cm	F22=4.11GHz

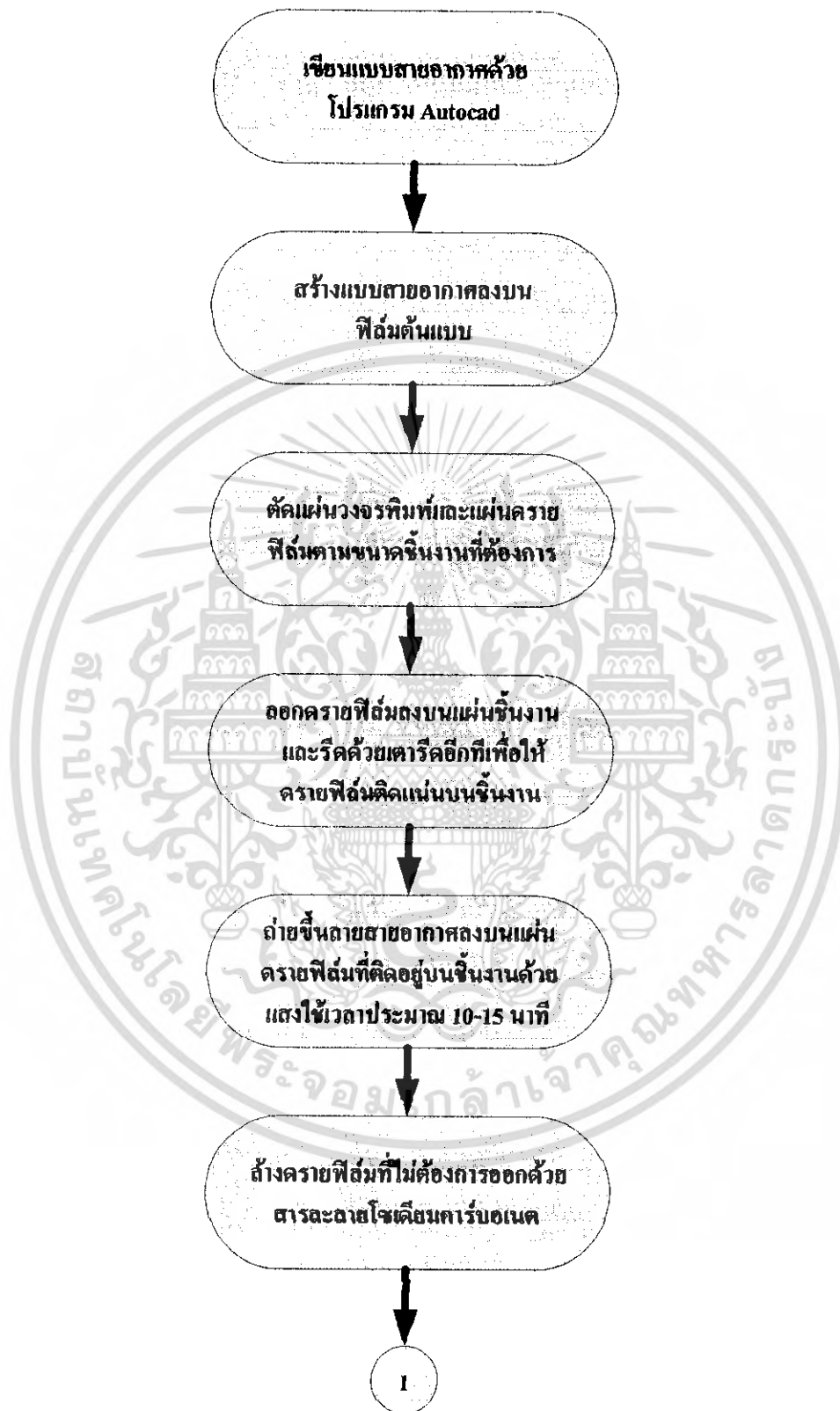
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 โครงสร้างของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณ ( 22 อิลิเมนต์)

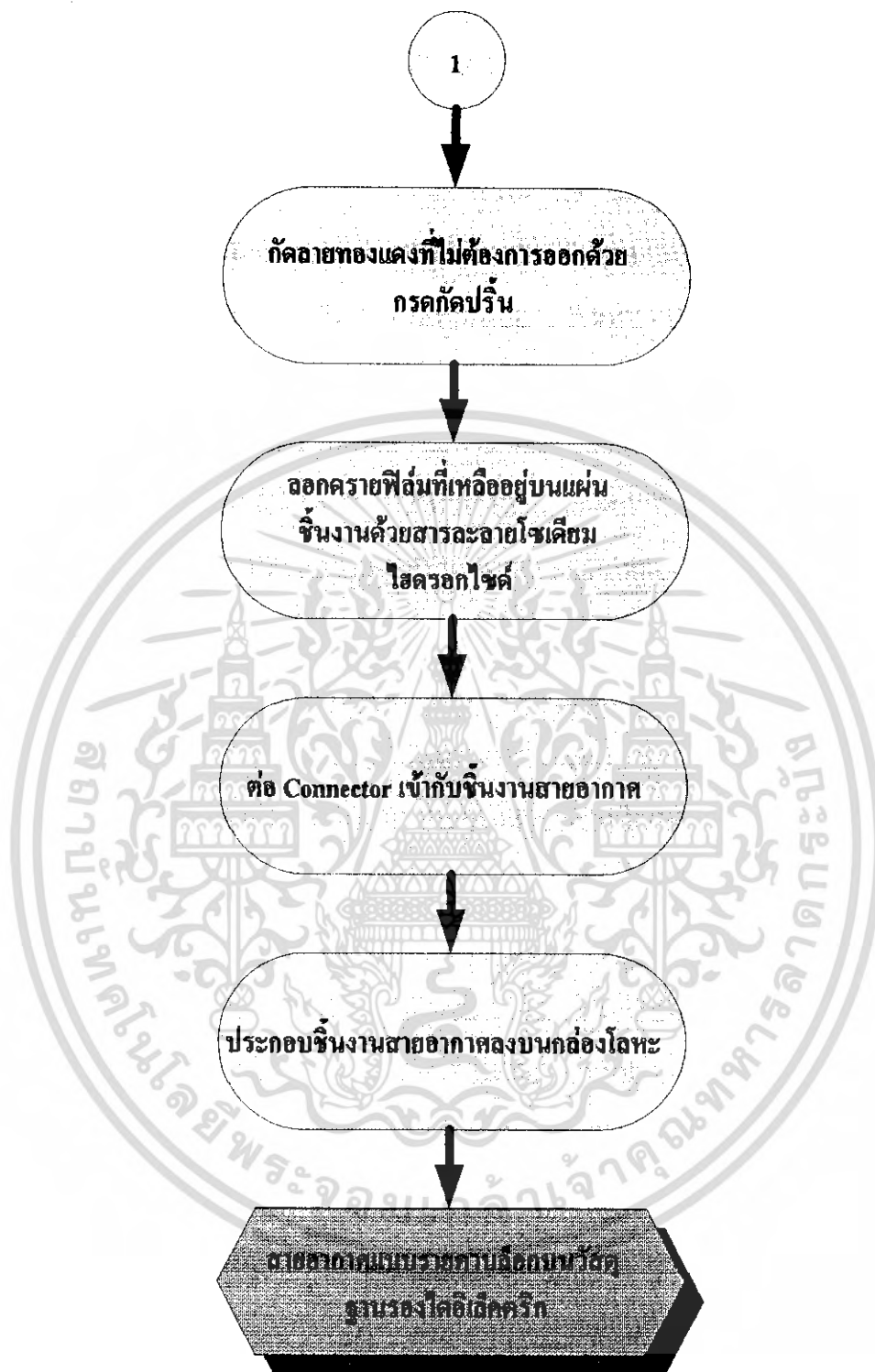
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ขั้นตอนการสร้างสายอากาศแบบรายการลือกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก



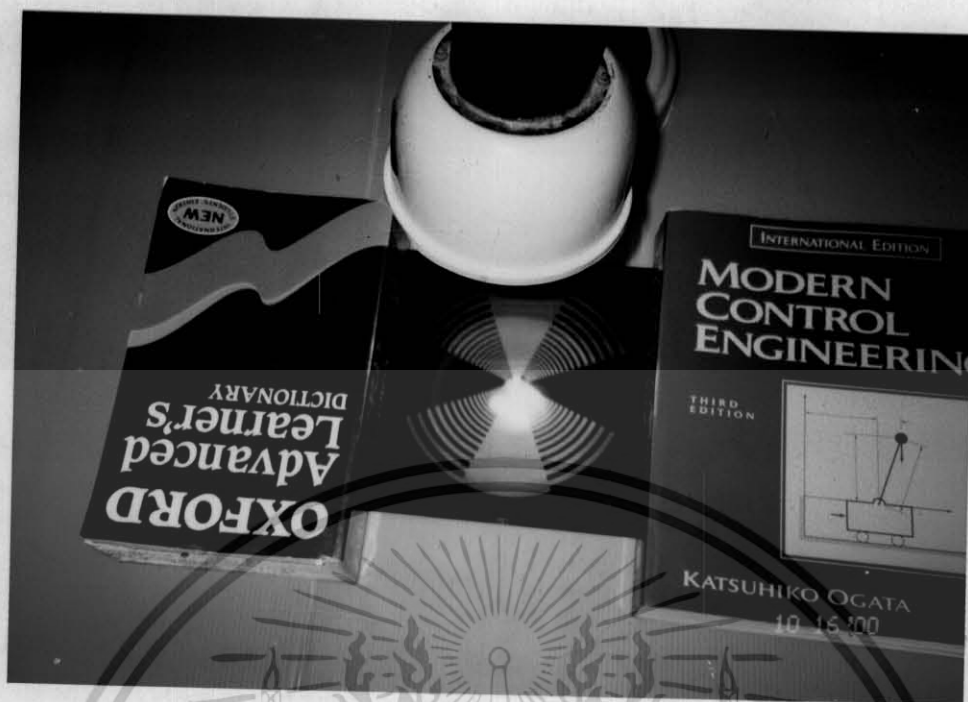
รูปที่ 3.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการสร้างสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 (ต่อ) แผนผังแสดงขั้นตอนการสร้างสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

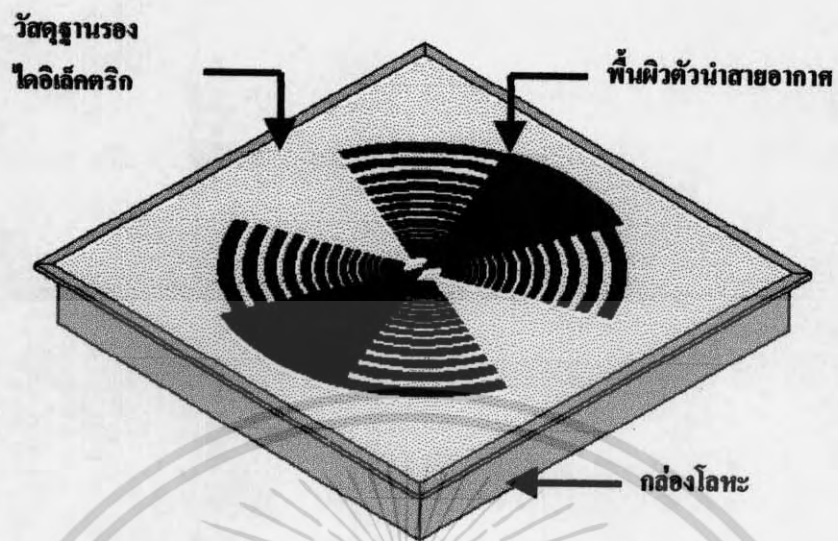


รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการถ่ายเงินลายสายอากาศลงบนครายฟิล์มที่ติดอยู่บนแผ่นซีงาน



รูปที่ 3.8 แผ่นซีงานที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ส่วนประกอบต่างๆ ของสายอากาศ



รูปที่ 3.10 สายอากาศที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ชนิด 18 องค์ประกอบ  
ป้อนสัญญาณจาก Connector โดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

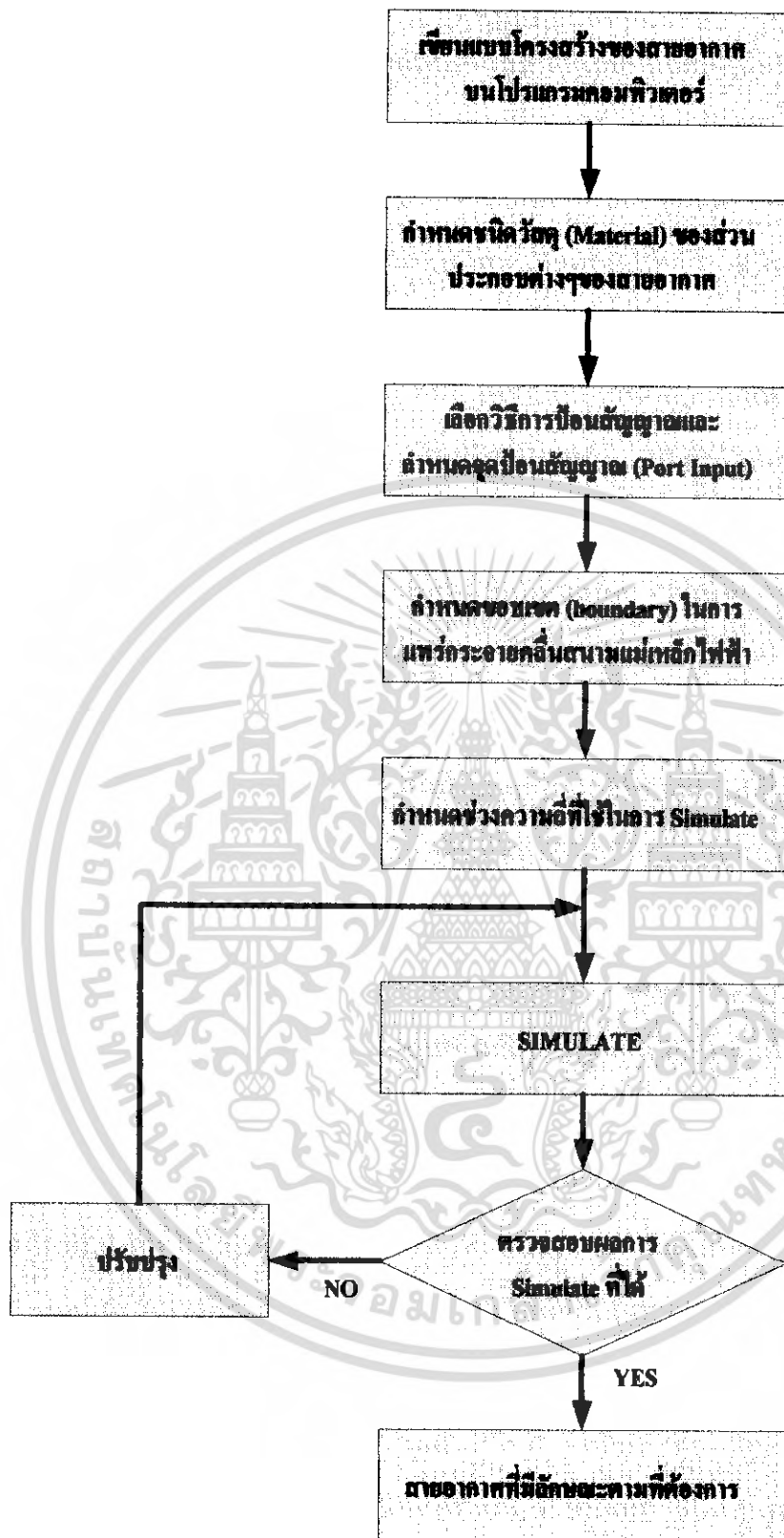
#### 4.1 การจำลองการทำงานของสายอากาศด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เนื่องจากสายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะการทำงาน โดยการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากตัวสายอากาศในกรณีที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่งและทำการรับคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาจากกระทบที่พื้นผิวของตัวสายอากาศในกรณีที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับ ซึ่งคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า จึงต้องใช้เครื่องมือทดสอบโดยเฉพาะ ซึ่งถ้าเราสร้างสายอากาศแล้วทดสอบเลยในทันที ถ้าหากสายอากาศที่สร้างขึ้นยังมีผลการทดสอบที่ไม่ตรงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการก็ต้องการก็ต้องการทำการสร้างและทดสอบใหม่จนกว่าจะได้สายอากาศตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการซึ่งเสียเวลามาก จึงได้มีการนำเอาโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบและจำลองลักษณะการทำงานของสายอากาศเพื่อให้ได้สายอากาศที่ตรงตามวัตถุประสงค์การใช้งานหรือมีลักษณะที่ใกล้เคียงมากที่สุดก่อนนำไปสร้างสายอากาศจริง

การนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบสายอากาศจะต้องรู้ถึงขั้นตอนต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีลักษณะตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ทั้งนี้การออกแบบจะต้องคำนึงถึงโครงสร้างที่เป็นจริงของสายอากาศ ขนาดและตำแหน่งต่างๆ จะต้องมีความถูกต้องหรือใกล้เคียงกับชิ้นงานที่จะสร้างได้จริงมากที่สุด สำหรับการออกแบบสายอากาศแบบรายการลือกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกในปริภูมิอนันต์ มีคุณสมบัติของสายอากาศที่ต้องการดังนี้

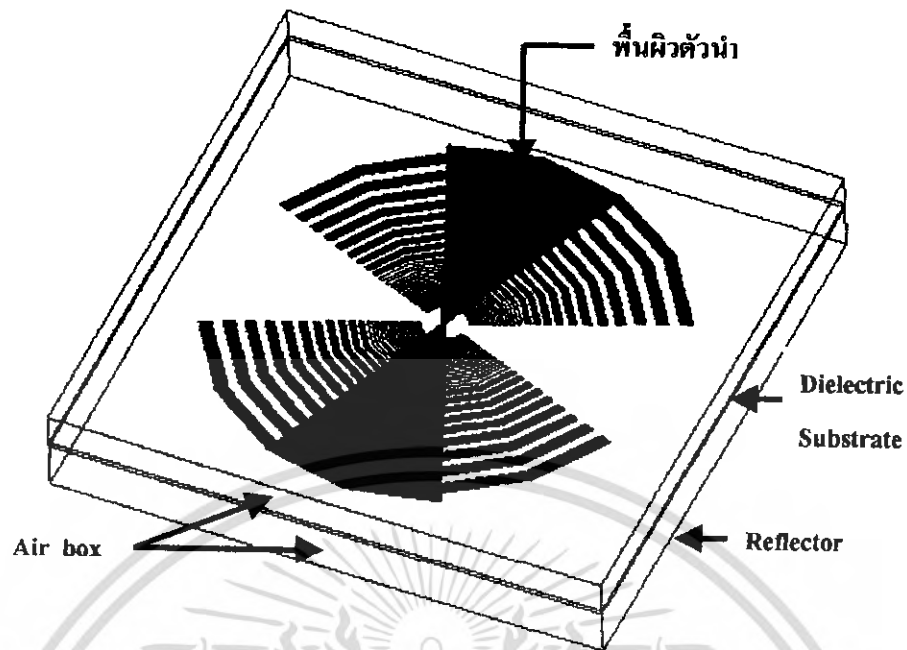
1. เป็นสายอากาศแบบ Broadband และมีความเป็นอิสระจากความถี่
2. ใช้งานในย่านความถี่ 450MHz ถึง 4GHz
3. วัสดุฐานรองมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 4.1274 และมีความสูงเท่ากับ 1.466 mm
4. พื้นผิวดำของสายอากาศเป็นทองแดง
5. ชิ้นงานสายอากาศมีขนาด 17×17 เซนติเมตร
6. ใช้กล่องโลหะซึ่งมีความสูงประมาณ 1-1.5 เซนติเมตรเป็นตัวสะท้อนสัญญาณด้านหลัง
7. ใช้วิธีการป้อนสัญญาณในลักษณะเดียวกับสายอากาศไดโพล

เมื่อทราบถึงคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศก็นำมาออกแบบสายอากาศด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนการออกแบบดังนี้

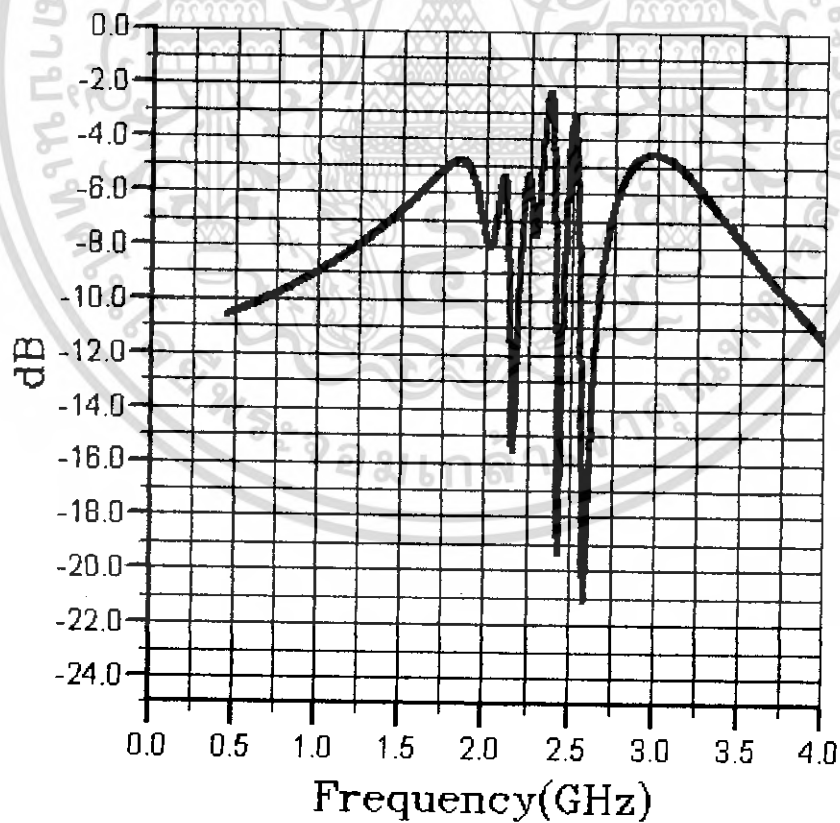


รูปที่ 4.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการออกแบบสายอากาศด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

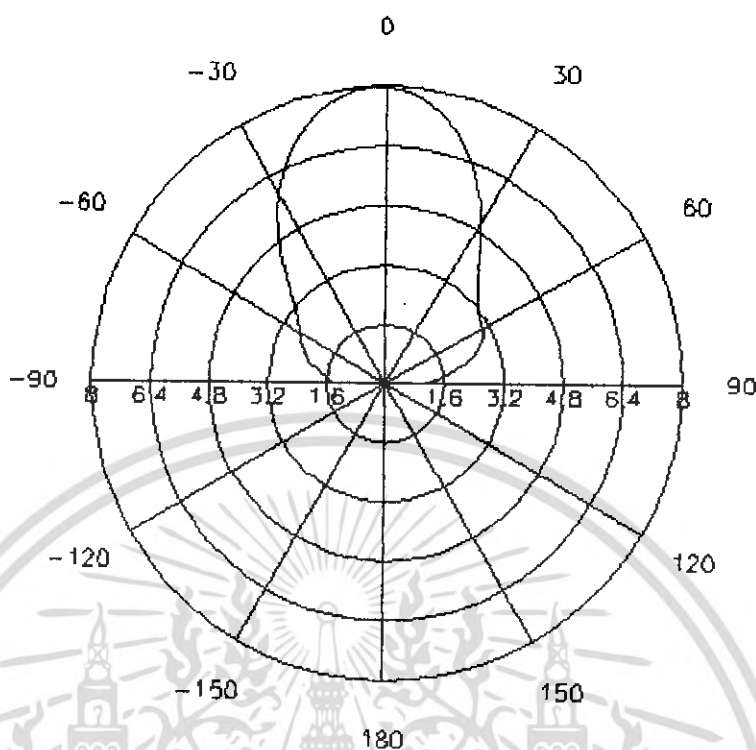


รูปที่ 4.2 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศที่ใช้ในการ Simulate



รูปที่ 4.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ตอินพุทของสายอากาศที่ได้จากการ Simulate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจากการ Simulate

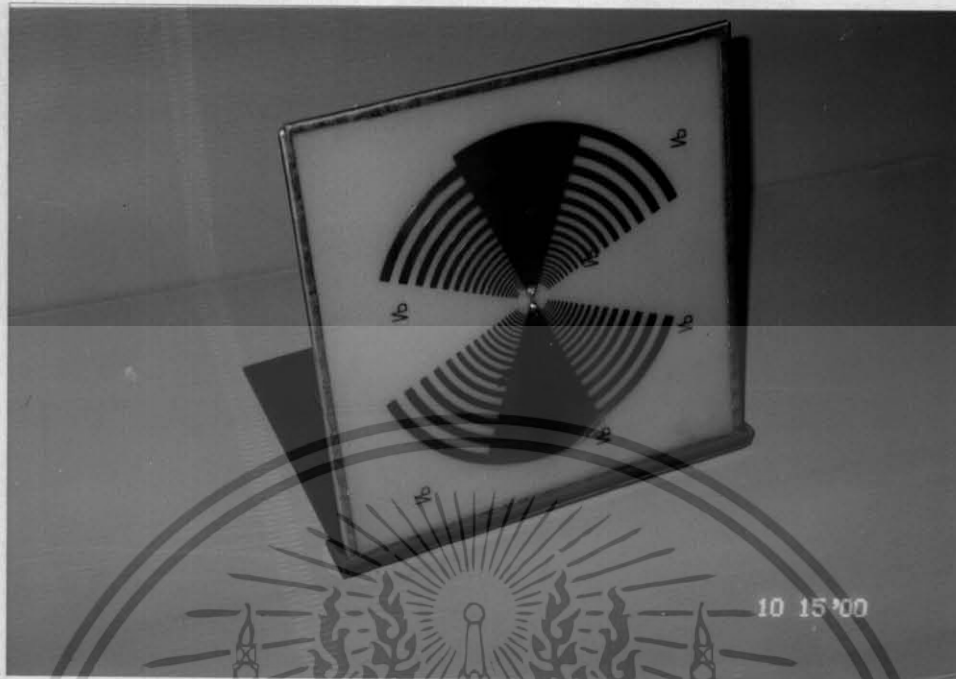
#### 4.2 โครงสร้างของสายอากาศที่ใช้ในการทดสอบ

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงโครงสร้างของสายอากาศแบบสายเคเบิลสี่แกนบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้นในบทที่ 3 ซึ่งออกแบบให้ใช้งานในย่านความถี่ 450MHz ถึง 4 GHz บนวัสดุฐานรอง ไดอิเล็กตริกที่มีค่าเพอิมิตีวิตี ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.1274 ความสูงของวัสดุฐานรองเท่ากับ 1.466 mm สามารถพิจารณาลักษณะโครงสร้างของสายอากาศที่จะใช้ในการทดสอบได้สอง โครงสร้างคือ

โครงสร้างที่ 1 สายอากาศแบบสายเคเบิลสี่แกนบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกที่มีลักษณะเฉพาะคือ

- มีจำนวนองค์ประกอบเท่ากับ 18 องค์ประกอบ
- ใช้กล่องโลหะที่มีความสูง 1 เซนติเมตรเป็นตัวสะท้อนสัญญาณด้านหลัง
- การป้อนสัญญาณใช้คอนเน็คเตอร์ต่อตรงกับสายอากาศ
- ไม่มีการปรับแมทซิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 สายอากาศแบบราคาบล็อกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกโครงสร้างที่ 1

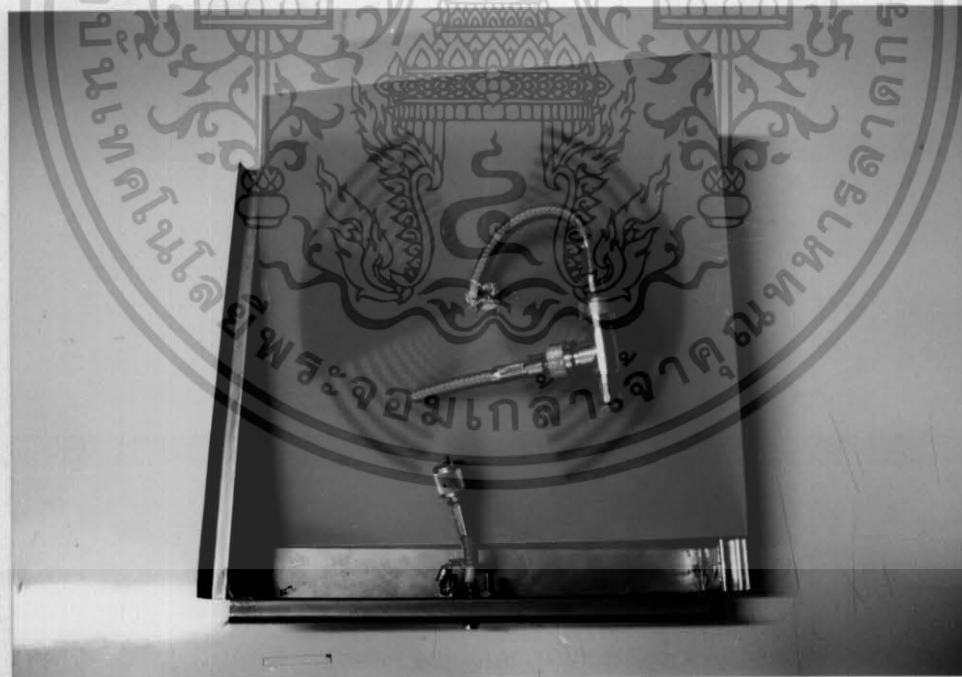
โครงสร้างที่ 2 สายอากาศแบบราคาบล็อกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกที่มีลักษณะเฉพาะคือ

- มีจำนวนองค์ประกอบเท่ากับ 22 องค์ประกอบ
- ใช้กล่องโลหะที่มีความสูง 1.5 เซนติเมตรเป็นตัวสะท้อนสัญญาณด้านหลัง
- การป้อนสัญญาณใช้สายโคแอกเซียล
- ใช้การปรับเมทซิ่งด้วยสตัป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 สายอากาศแบบรายการล็อกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกโครงสร้างที่ 2



รูปที่ 4.7 ชุดสตัปแม่ทซ์ของสายอากาศโครงสร้างที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ตอินพุทและอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR)

#### ของสายอากาศ

##### 4.3.1 วัตถุประสงค์

เพื่อเปรียบเทียบ โครงสร้างของสายอากาศแบบรายคาบลือกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก ทั้งสองโครงสร้างว่าแตกต่างกันหรือไม่ โดยพิจารณาเปรียบเทียบจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ตอินพุทและอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio) ของสายอากาศแต่ละ โครงสร้างที่วัดได้ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ตอินพุทและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศนั้น สามารถบอกได้ว่าสายอากาศมีประสิทธิภาพในการรับสัญญาณ ได้มากน้อยแค่ไหน

##### 4.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้า (Network Analyzer)
2. เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ (Series Synthesized Sweeper)
3. สายอากาศแบบรายคาบลือกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกทั้ง 2 โครงสร้าง



รูปที่ 4.8 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

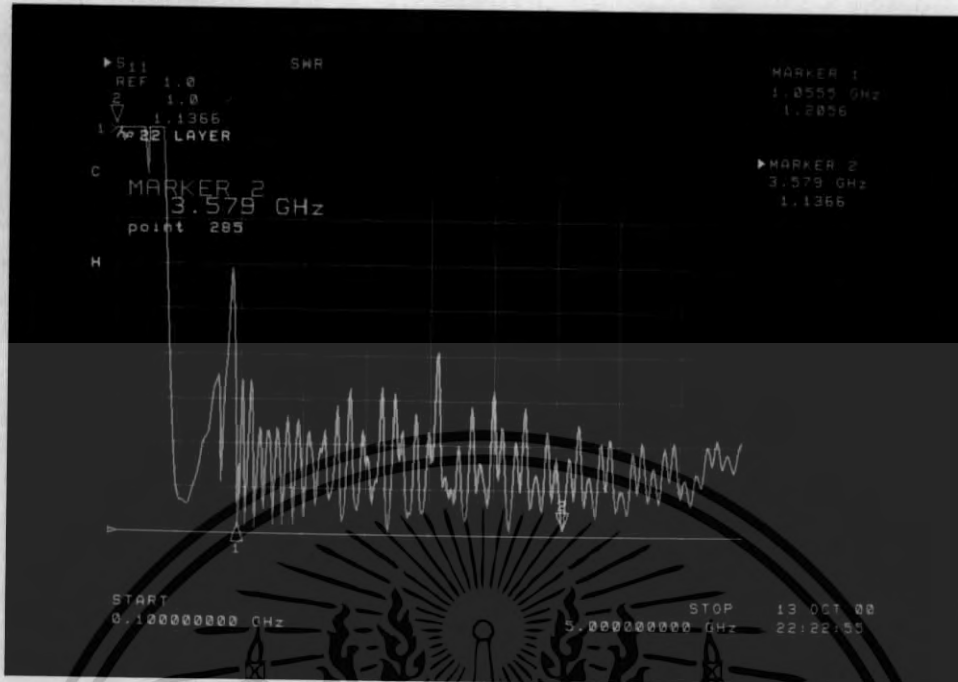
### 4.3.3. ขั้นตอนการทดสอบ

1. ปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการทดสอบ
2. สำหรับการวัดที่ความถี่ใช้งาน 450MHz ถึง 4 GHz ต้องทำการปรับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้าให้มีการวัดค่าอยู่ในช่วงความถี่ระหว่าง 100MHz - 5GHz
3. ต่อสายอากาศเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้าที่พอร์ต1
4. วัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ตอินพุท (S11) และอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) พร้อมบันทึกผลการทดสอบที่ได้



รูปที่ 4.9 สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ตอินพุทของสายอากาศโครงสร้างที่1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

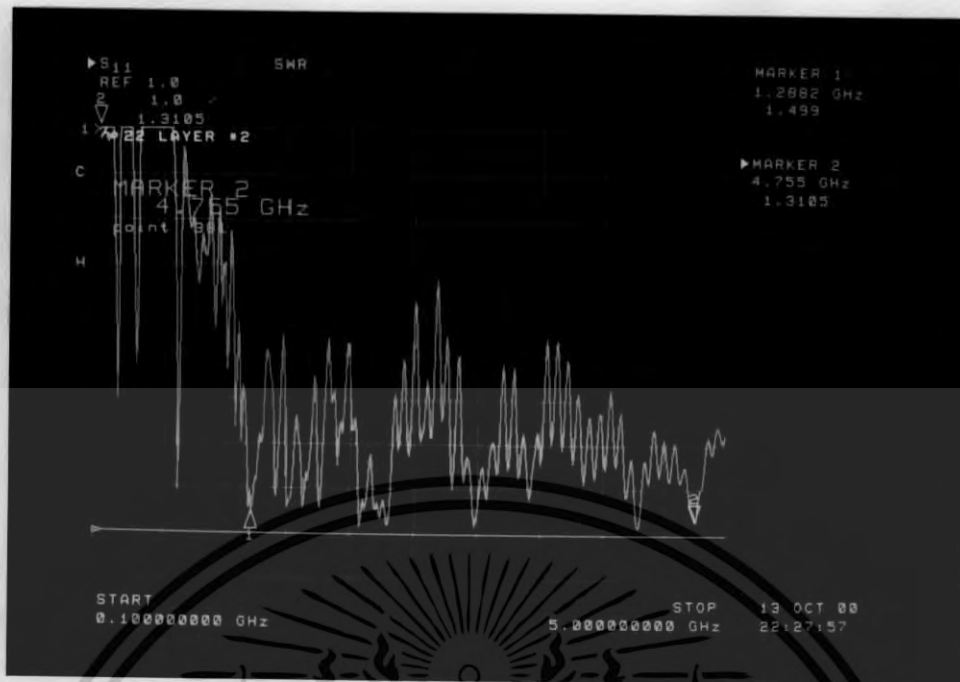


รูปที่ 4.10 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศโครงสร้างที่ 1



รูปที่ 4.11 สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ตอินพุทของสายอากาศโครงสร้างที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) ของสายอากาศโครงสร้างที่ 2

#### 4.4 การวัดแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

##### 4.4.1 วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศว่ามีทิศทางและรูปแบบในการแพร่กระจายคลื่นเป็นอย่างไร มีประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นอย่างน้อยแค่ไหนในทิศทางที่ต้องการ

##### 4.4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัม (Spectrum Analyzer)
2. เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ (Series Synthesized Sweeper)
3. สายอากาศแบบระบายความร้อนด้วยน้ำมาตรฐานรองไดอิเล็กตริกทั้ง 2 โครงสร้าง
4. สายอากาศส่งแบบ log-periodic ชนิด circular loop ที่มีความถี่ใช้งาน 2.4 GHz

##### 4.4.3 ขั้นตอนการทดสอบ

ในการทดสอบแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศนี้จะทดสอบโดยที่สายอากาศแบบระบายความร้อนด้วยน้ำมาตรฐานรองไดอิเล็กตริกทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับ และใช้สายอากาศส่งเป็นสายอากาศแบบ log-periodic ชนิด circular loop ที่มีความถี่ใช้งาน 2.4 GHz และส่งด้วยกำลังส่ง 1 mW (0dBm) ซึ่งวิธีการวัดแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้แสดงไว้ในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านล่าง โดยการทดสอบจะวัดค่ากำลังของสัญญาณที่สายอากาศรับรับสัญญาณได้ที่มุมในการรับ  
ต่าง ๆ กันแล้วนำมาเขียนเป็นกราฟแสดงแพทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ



รูปที่ 4.13 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดแพทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ



รูปที่ 4.14 วิธีการวัดแพทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



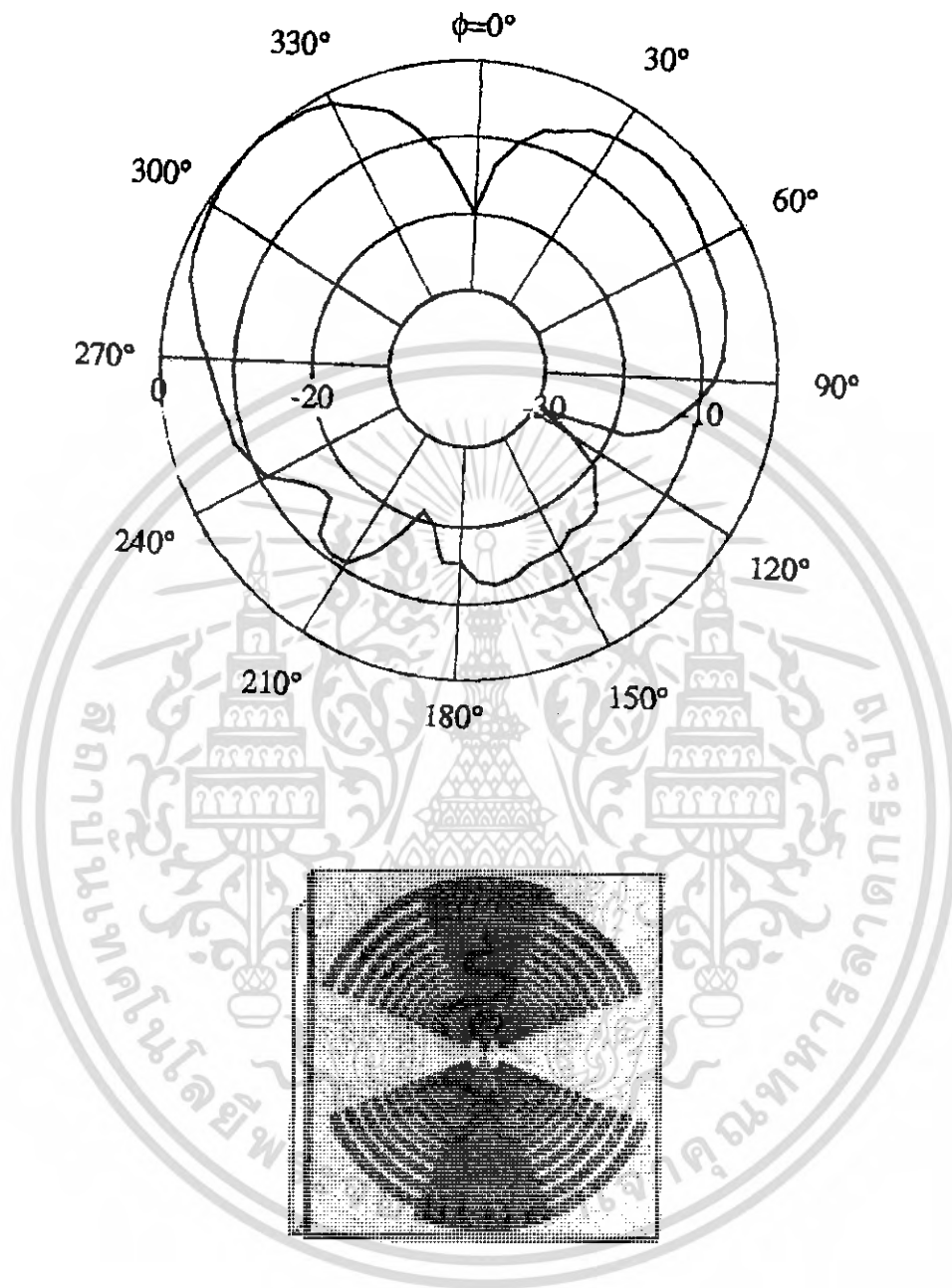
**รูปที่ 4.15** กำลังที่สายอากาศด้านรับรับสัญญาณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



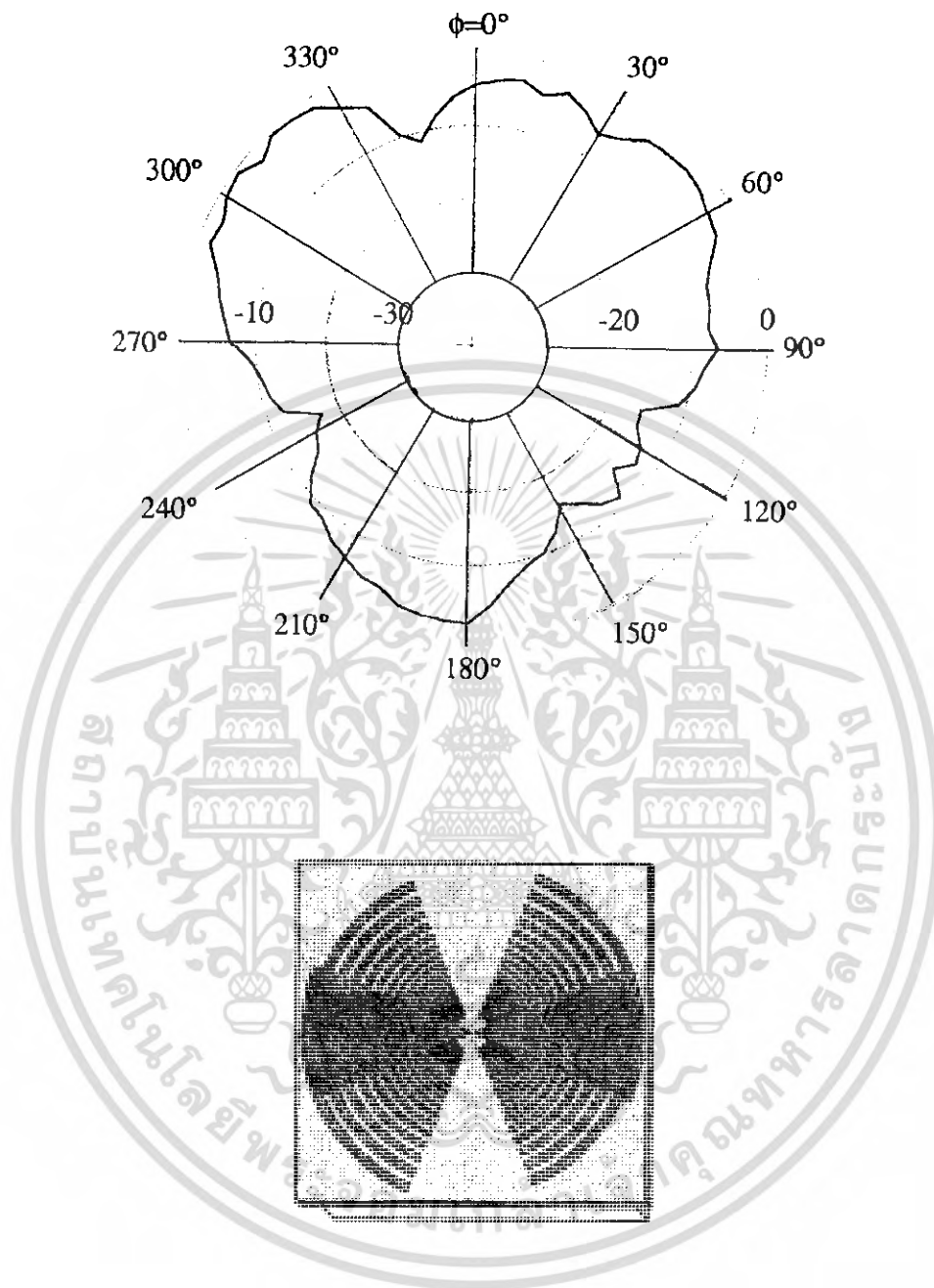
รูปที่ 4.16 แพทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโครงสร้างที่ 1  
วางสายอากาศรับสัญญาณในแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



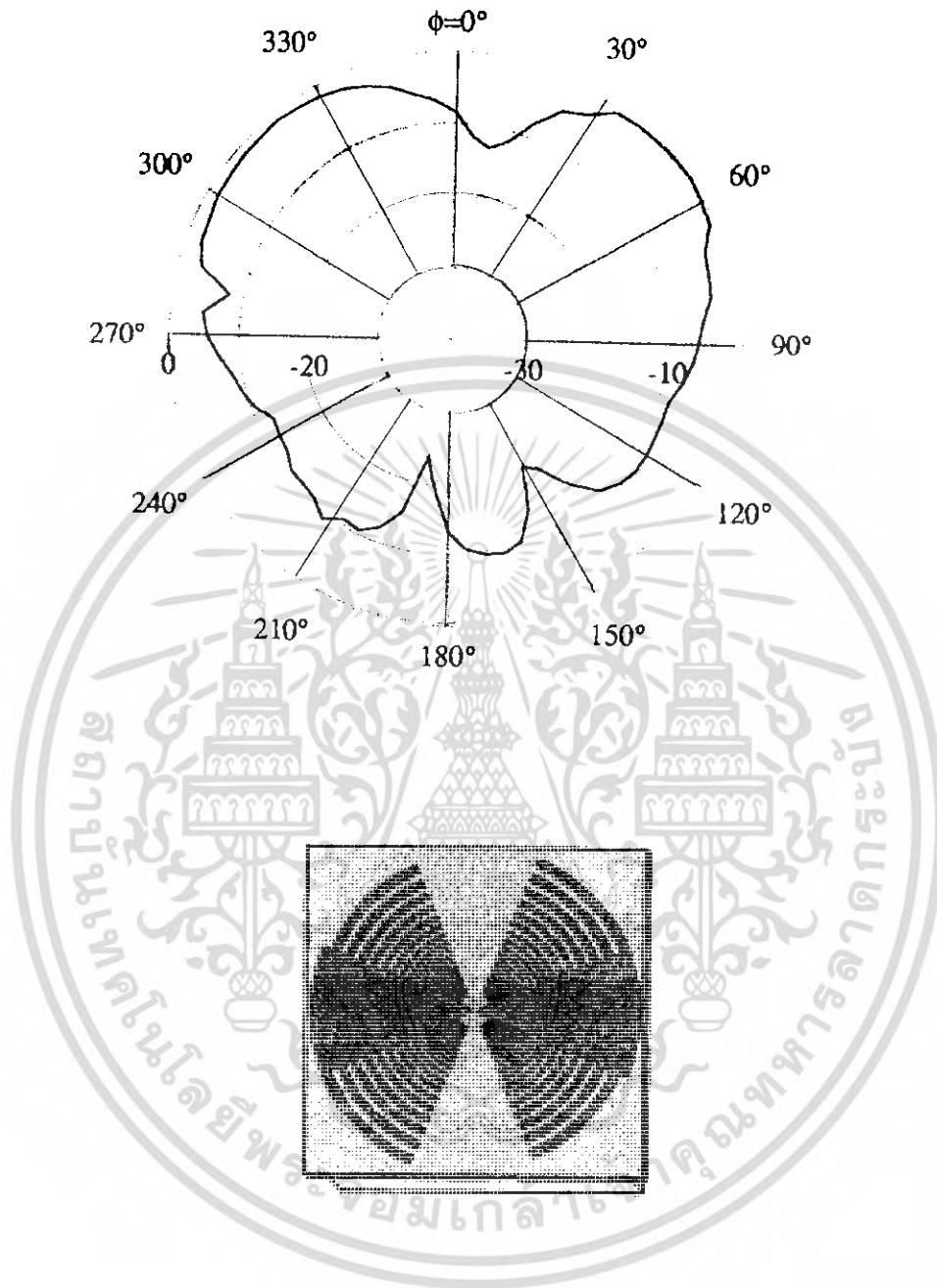
รูปที่ 4.17 แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโครงสร้างที่ 2  
วางสายอากาศรับสัญญาณในแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 แพทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโครงสร้างที่ 1  
วางสายอากาศรับสัญญาณในแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโครงสร้างที่ 2  
วางสายอากาศรับสัญญาณในแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 การวัดเกน (GAIN) ของสายอากาศ

### 4.5.1 วัตถุประสงค์

เพื่อที่จะทราบถึงอัตราขยายของสายอากาศว่ามีค่าเท่าใด เนื่องจากเกนของสายอากาศเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่สามารถจะบอกถึงคุณสมบัติของสายอากาศได้


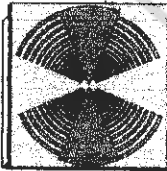

### 4.5.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัม (Spectrum Analyzer)
2. เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ (Series Synthesized Sweeper)
3. สายอากาศแบบระบายคาบถ็อกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกทั้ง 2 โครงสร้าง
4. สายอากาศส่งแบบ log-periodic ชนิด circular loop ที่มีความถี่ใช้งาน 2.4 GHz
5. สายอากาศไดโพลที่มีความถี่ใช้งาน 2.4 GHz

### 4.4.3 ขั้นตอนการทดสอบ

ในการทดสอบเกนของสายอากาศนี้จะเปรียบเทียบการรับสัญญาณด้วยสายอากาศแบบระบายคาบถ็อกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกกับการรับสัญญาณด้วยสายอากาศไดโพล โดยใช้สายอากาศส่งตัวเดียวกันคือสายอากาศแบบ log-periodic ชนิด circular loop ที่มีความถี่ใช้งาน 2.4 GHz และส่งด้วยกำลังส่ง 1 mW (0dBm) ซึ่งค่าของกำลังงานที่รับได้จะมีค่าดังแสดงไว้ในตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 4.1 กำลังของสัญญาณที่สายอากาศรับได้และอัตราขยายของสายอากาศ

การวางตัวของสายอากาศ	ชนิดของสายอากาศ	กำลังงานที่รับได้	อัตราขยาย
	ไดโพล	-35.83dBm	0 dB
	สายอากาศ โครงสร้างที่ 1	-31.67 dBm	4.16 dB
	สายอากาศ โครงสร้างที่ 2	-33.50 dBm	2.33 dB
	สายอากาศ โครงสร้างที่ 1	-33.17dBm	2.66 dB
	สายอากาศ โครงสร้างที่ 2	-34.50 dBm	1.33 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.6 การนำสายอากาศแบบรายการลือกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกไปประยุกต์ใช้งาน**  
 ในที่นี้จะนำสายอากาศแบบรายการลือกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกไปใช้งานในการรับ  
 สัญญาณของเครื่องรับโทรทัศน์ ซึ่งแสดงวิธีการติดตั้งใช้งานดังรูป



**รูปที่ 4.20 วิธีการติดตั้งใช้งานสายอากาศในการรับสัญญาณของเครื่องรับโทรทัศน์  
 ย่านความถี่ UHF (เช่น ITV)**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับปริมาณพันธบัตรนี้ได้ทำการออกแบบ สร้างและทดสอบสายอากาศแบบรายคาบ ล็อกบนวัสดุฐานรอง ไดอิเล็กตริก (FR4) ที่มีค่าเพอิมิตีวี่เท่ากับ 4.1274 ความสูงของวัสดุฐานรอง เท่ากับ 1.466 mm ใช้งานในย่านความถี่ 450 MHz ถึง 4 GHz โดยทำการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติ ของสายอากาศซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองที่ได้ดังนี้

ในส่วนแรกเป็นการจำลองการทำงานของสายอากาศด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อ พิจารณาคุณสมบัติของสายอากาศเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การสะท้อน และแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น ของสายอากาศ เพื่อดูผลการจำลองการทำงานที่ได้จากโครงสร้างจากการออกแบบ ทั้งนี้เนื่องจาก การวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถช่วยในการออกแบบสายอากาศให้ได้ผลตรง ตามคุณสมบัติที่ต้องการมากขึ้นเพราะสามารถปรับปรุงโครงสร้างให้ได้ผลการทดลองที่ดีที่สุดก่อน นำไปสร้างชิ้นงานจริง ซึ่งผลการจำลองการทำงานที่ได้ดังแสดงไว้ในบทที่ 4

ในส่วนที่สองเป็นการทดสอบ โครงสร้างของสายอากาศที่ทำการออกแบบในสอง โครงสร้างคือโครงสร้างที่ 1 เป็นแบบ 18 องศาประกอบ ใช้การป้อนสัญญาณโดยใช้คอนเน็คเตอร์ต่อตรง กับชิ้นงานสายอากาศ และ โครงสร้างที่ 2 เป็นแบบ 22 องศาประกอบใช้การป้อนสัญญาณด้วยคอน เน็คเตอร์ต่อผ่านสายโคแอกเซียลและใช้การปรับแมทซ์ด้วยสลับที่ความถี่ 2.1 GHz โดยการทดสอบ สายอากาศนั้นจะทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (reflection coefficient) อัตราส่วนคลื่น นิ่ง (VSWR) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (radiation patterns) และเกน (Gain) ของสายอากาศจาก ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าสายอากาศแบบรายคาบล็อกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก สามารถทำงานได้ในลักษณะแถบความถี่กว้าง (broadband) มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับโดย เฉลี่ยตลอดช่วงความถี่ใช้งานต่ำกว่า  $-5$  dB และอัตราส่วนคลื่นนิ่งโดยเฉลี่ยตลอดช่วงความถี่ใช้งาน ประมาณ 1.75 ซึ่งอยู่ในช่วงที่แสดงว่าสายอากาศสามารถใช้งานได้ในย่านความถี่ที่ออกแบบคือ 450 MHz ถึง 4GHz และใช้งานได้ดีมากที่บางความถี่ ส่วนแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นก็แสดงว่าสาย อากาศสามารถรับสัญญาณได้ในทิศทางที่ต้องการ นอกจากนี้ค่าอัตราขยายของสายอากาศก็อยู่ใน ช่วงที่ใช้งานได้ดีคือประมาณ 2 dB และจากการเปรียบเทียบโครงสร้างของสายอากาศทั้งสอง โครงสร้างแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างที่ 1 มีผลการทดลองในด้านต่างๆที่ดีกว่าโครงสร้างที่ 2 เนื่องจาก โครงสร้างที่ 2 ใช้การป้อนสัญญาณจากสายโคแอกเซียลซึ่งจะเกิดการสูญเสียมากจากเชื่อมต่อสาย ยิงถ้าใช้งานที่ความถี่สูงมากๆ ยิ่งทำให้เกิดการสูญเสียมากขึ้นอีกซึ่งเป็นข้อด้อยของการป้อน สัญญาณในลักษณะนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อจำกัดในการทำปริญญานิพนธ์

1. ค่า  $E_c$  ของวัสดุฐานรองไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นคือมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ที่เปลี่ยนแปลงซึ่งแก้ไขได้ด้วยการใช้วัสดุฐานรองที่มีคุณสมบัติที่ถี่ขึ้นซึ่งมีราคาค่อนข้างแพง
2. ตัวนำที่ใช้เป็นตัวนำชนิดไม่สมบูรณ์เนื่องจากวัสดุฐานรองที่ใช้เป็นแผ่นวงจรมิใช่วัสดุฐานรองที่ใช้ในการสร้างสายอากาศโดยเฉพาะ
3. ในการออกแบบไม่ได้นำค่าความสูงของวัสดุฐานรองมาคิดจึงเกิดความคลาดเคลื่อนไปบ้างซึ่งแก้ไขโดยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งสะดวกโดยคิดค่าความสูงของวัสดุฐานรองด้วย

## 5.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาปริญญานิพนธ์

เมื่อพิจารณาสายอากาศแบบระบายความร้อนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกที่สร้างขึ้นจะเห็นว่าสามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ เนื่องจากสายอากาศในปริญญานิพนธ์นี้เป็นสายอากาศแบบ passive จึงสามารถปรับปรุงได้โดยทำเป็นสายอากาศแบบ active และทั้งนี้ยังสามารถออกแบบให้ใช้งานได้ในช่วงความถี่อื่นๆ โดยใช้หลักการคำนวณดังได้แสดงไว้ในปริญญานิพนธ์นี้และนอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธีการป้อนสัญญาณแบบอื่นๆที่เหมาะสมได้

## บรรณานุกรม

1. C.A.Balanis , "Antenna Theory Analysis and Design" ,John Wiley and Sons , New York, Second Edition ,1997
2. V. Rumsey , "Frequency Independent Antenna" , Academic Press , New York , 1966
3. W.L. Stutzman and G.A. Thiele , "Antenna Theory and Design" , John Wiley & Sons, New York , Second Edition , 1997
4. คร.โมนัย ไกรฤกษ์ และวิวัฒน์ กิรานนท์, "ทฤษฎีสายอากาศ", คำราชวิศวกรรมศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , กรุงเทพมหานคร
5. พิชัย ภัคคีพานิชเจริญ , "ทฤษฎีและการใช้งานความถี่ย่านไมโครเวฟ" สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์ , กรุงเทพมหานคร , 2536

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



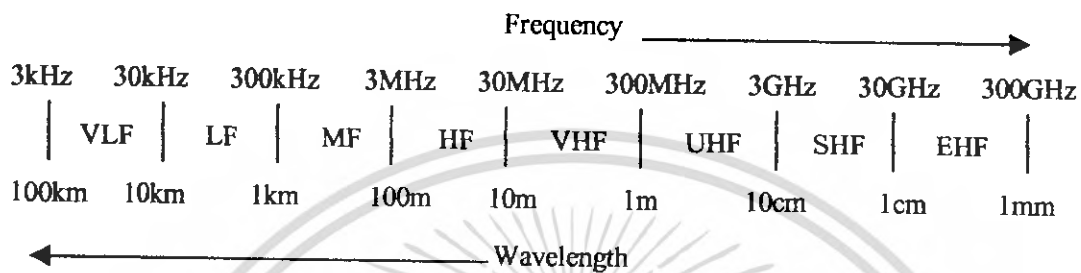
## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## Tables of Commonly Used Frequencies (in U.S.)

## 1. ก RADIO FREQUENCY BANDS



## 2. ก TELEVISION CHANNEL FREQUENCIES

**VHF**

Channel No.	Frequency Range (MHz)	Channel No.	Frequency Range (MHz)
2	54-60	8	180-186
3	60-66	9	186-192
4	66-72	10	192-198
5	76-82	11	198-204
6	82-88	12	204-210
7	174-180	13	210-216

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## UHF

Channal No.	Frequency Range (MHz)	Channal No.	Frequency Range (MHz)	Channal No.	Frequency Range (MHz)
14	470-476	30	566-572	46	662-668
15	476-482	31	572-578	47	668-674
16	482-488	32	578-584	48	674-680
17	488-494	33	584-590	49	680-686
18	494-500	34	590-596	50	686-692
19	500-506	35	596-602	51	692-7-698
20	506-512	36	602-608	52	698-704
21	512-518	37	608-614	53	704-710
22	518-524	38	614-620	54	710-716
23	524-530	39	620-626	55	716-722
24	530-536	40	626-632	56	722-728
25	536-542	41	632-638	57	728-734
26	542-548	42	638-644	58	734-740
27	548-554	43	644-656	59	740-476
28	554-560	44	650-656	:	:
29	560-566	45	656-662	69	800-806

*Note:* The carrier frequency for the video portion is the lower frequency plus 1.25 MHz. The audio carrier frequency minus 0.25 MHz. All channels have a 6 MHz. Bandwidth. For example , the Channel 2 video carrier is at 55.25 MHz and audio carrier is at 59.75 MHz.

### 3. ก MOBILE TELEPHONE BANDS

Cellular 824-894 MHz

PCS 1850-1990 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. ๓ RADAR BANDS

World W II Band Designations		IEEE Band Designations	
-	-	HF	3-30 MHz
-	-	VHF	30-300 MHz
-	-	UHF	300-1000 MHz
L	390-1550 MHz	L-band	1-2 GHz
S	1550-3900 MHz	S-band	2-4 GHz
C	3.9-6.2 GHz	C-band	4-8 GHz
X	6.2-12.9 GHz	X-band	8-12 GHz
Ka	12.9-18 GHz	Ku-band	12-18 GHz
K	18-26.5 GHz	K-band	18-27 GHz
Ku	26.5-40 GHz	Ka-band	27-40 GHz
-	-	V-band	40-75 GHz
-	-	W-band	75-110 GHz
-	-	Millimeter	110-300 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

**Material Data and Other Constants****1.๗ CONDUCTIVITIES OF GOOD CONDUCTORS**

Conductor	Conductivity (S/m)
Silicon steel	$2 \times 10^6$
Brass	$1.1 \times 10^7$
Aluminum	$3.5 \times 10^7$
Gold	$4.1 \times 10^7$
Copper	$5.7 \times 10^7$
Silver	$6.1 \times 10^7$

**2.๗ WIRE DATA**

Wire size AWG	Diameter in Mm (in.)	Single Copper Wire Continuous Duty Current Capacity (A)	Copper Wire de Resistance per Unit Length ( $\Omega/100m$ )
8	3.264(0.1285)	73	0.1952
9	2.906(.1144)	-	0.2462
10	2.588(0.1019)	55	0.3103
11	2.305(0.0907)	-	0.3914
12	1.828(0.8085)	41	0.4935
13	1.828(0.0720)	-	0.6224
14	1.628(0.0641)	32	0.7849
16	1.291(0.0508)	22	1.248
18	1.024(0.0403)	16	1.984

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wire size AWG	Diameter in Mm (in.)	Single Copper Wire Conductinuous Duty Current Capacity (A)	Copper Wire de Resistance per Unit Length ( $\Omega/100m$ )
20	0.812(0.0320)	11	3.155
22	0.644(0.0253)	-	5.017
24	0.511(0.0201)	-	7.98
26	0.405(0.0159)	-	12.69
28	0.321(0.0129)	-	20.17
30	0.255(0.0100)	-	32.06

### 3.๗ DIELECTRIC CONSTANT : PERMITTIVITY

$$\epsilon_0 = 80854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\approx 10^9 / 36 \pi \text{ F/m}$$

### 4.๗ PERMEABILITY

$$\mu_0 = 1.26 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$\approx 4 \pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

### 5.๗ VELOCITY OF LIGHT

$$c = 1 \text{ layer} / \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = 2.997925 \times 10^8 \text{ m/s}$$

### 6.๗ INTRINSIC IMPEDANCE OF FREE SPACE

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 120 \pi \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้