

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศแอ็กทีฟที่ฟลิต้ออาร์เรย์บนผิวทรงกลม

ACTIVE SPHERICAL SLOT ARRAY ANTENNA



โดย

นางสาวศุรรัตตา บุดาสา

นางสาววรรณพา มหามงคล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2541

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 32583
วัน, เดือน, ปี 18 พ.ค. 2542

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เมื่อมีการแก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแอ็กทีฟสล็อตอาร์เรย์บนผิวทรงกลม
ACTIVE SPHERICAL SLOT ARRAY ANTENNA



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2541

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศแอ็กทีฟสล็อตอาร์เรย์บนผิวทรงกลม

ACTIVE SPHERICAL SLOT ARRAY ANTENNA

ผู้จัดทำ

1. นางสาวศุภรัตดา บุคดาสา 38014517

2. นางสาวอรรณพพา มหามงคล 38014626


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแอ็กทีฟสล็อตอาร์เรย์บนผิวทรงกลม

ACTIVE SPHERICAL SLOT ARRAY ANTENNA

โดย นางสาวศุภรัตดา บุคสา 38014517

นางสาวอรรณพ มหามงคล 38014626

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษา การคำนวณ การออกแบบ การสร้างและรวมทั้งการทดสอบสายอากาศชนิดสล็อตอาร์เรย์แบบแอ็กทีฟบนผิวทรงกลมที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิรตซ์ สำหรับใช้เป็นสายอากาศเฟสอาร์เรย์เพื่อใช้รับสัญญาณจากดาวเทียม ส่วนประกอบของระบบสายอากาศประกอบด้วยวงจรรอสซิลเลเตอร์ 8 ตัว ทำหน้าที่สร้างสัญญาณความถี่ต่างกันป้อนให้กับควิต์ที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบและเจาะสล็อตที่ผิวด้านนอก การออกแบบวงจรรอสซิลเลเตอร์อาศัยความสัมพันธ์ของ ค่ามิชวลคัปปลิงที่ได้จากการทดลอง ผลจากการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศนี้สามารถขึ้นชั้นผลการคำนวณได้เป็นอย่างดีเพราะ ผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน

ABSTRACT

This thesis concerns about the study, calculation, design, fabrication and measurement of an active spherical slot array antenna at the operating frequency of 2450 MHz for applying as the phased array in the satellite communication subscriber. The antenna system is made up of eight oscillators that are used to generate the signal for various frequencies and the cavities excited by linear electric probe and backed up by the slot array. The frequencies of oscillators are designed by using the measured data of the mutual coupling. The experimental results that verify the calculation are in good agreement.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 ทฤษฎีของสายอากาศแบบสล็อตอาร์เรย์บนผิวทรงกลม	2
2.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสล็อตเดี่ยว	2
2.1.2 สายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนผิวทรงกลม	6
2.2 วงจรรีโซเนเตอร์	8
2.3. ทฤษฎีการกวาดลำคลื่น โดยกลไกทางแอมป์	9
2.3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่มีการอินเจกต์สัญญาณ	9
2.3.2 ออสซิลเลเตอร์ที่มีการมีวหวลคัปปลิงน้อย (Loosely-coupled Oscillator)	12
2.4 ไมโครสตริปไลน์ (Microstrip line)	13
2.4.1 เอ็ฟเฟกทีฟเพอร์มิตตีวดี (effective permittivity: ϵ_r)	13
2.4.2 ค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะ (characteristic impedance: Z_0)	14
2.4.3 การหาค่า W/h	15
2.4.4 ความเร็วเฟสและความยาวคลื่นบนแผ่นสตริป (phase velocity and line wavelength)	16
2.5 แบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าตามขวาง (Transverse electric (TE) mode)	16
2.5.1 การหาขนาดของคววิตีสี่เหลี่ยมผืนผ้า	20
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง	
3.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์และผลเฉลยเชิงเส้น	22
3.2 สายอากาศแอมป์สล็อตอาร์เรย์บนผิวทรงกลม	24
3.3 การออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์	28
3.3.1 การหาความยาวของไมโครสตริป	32
3.3.2 การหาความกว้างของไมโครสตริป	35
3.3.3 การคำนวณหาค่าตัวประกอบคุณภาพ	36
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 การทดลองวัดการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์	38
4.2 การทดลองวัดคุณสมบัติของสายอากาศ	39
4.2.1 การทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	39
4.2.2 การทดลองวัดค่ามีวหวลคัปปลิง	40
4.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	42
4.3.1 การคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	42
4.3.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 4.3.1 การคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน 42 การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 4.3.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการน 44 ใช้

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

บรรณานุกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 (ก) ลักษณะของปัญหาสล็อตเดียวบนฟิวต์วาทรงกลม	2
รูปที่ 2.1 (ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าของสล็อตเดียวบนฟิวต์วาทรงกลม	3
รูปที่ 2.1 (ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กของสล็อตเดียวบนฟิวต์วาทรงกลม	3
รูปที่ 2.2 สายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนฟิวทรง	6
รูปที่ 2.3 (ก) วงจรรีโซเนเตอร์แบบขนาน	8
รูปที่ 2.3 (ข) วงจรรีโซเนเตอร์แบบอนุกรม	8
รูปที่ 2.4 วงจรเรโซแนนซ์อนุกรม	9
รูปที่ 2.5 (ก) ลักษณะของสายส่งไมโครสตริป	13
รูปที่ 2.5 (ข) ลักษณะของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในสายส่งไมโครสตริป	13
รูปที่ 2.6 แสดงหลักการของเอฟเฟกทีฟเพอร์มิตติวิตี	14
รูปที่ 2.7 แสดงระบบพิกัดมุมฉากและเวกเตอร์หน่วย	17
รูปที่ 2.8 คาวิตีสี่เหลี่ยมมุมฉาก	19
รูปที่ 2.9 รูปคาวิตีของสายอากาศ	21
รูปที่ 3.1 สายอากาศเอ็กทีฟสล็อตอาร์เรย์บนฟิวทรงกลม	22
รูปที่ 3.2 สล็อตที่ป้อนด้วยส่วนของคาวิตีตัวนำทรงกลม	22
รูปที่ 3.3 (ก) ส่วนคาวิตีของสล็อต	25
รูปที่ 3.3 (ข) สายอากาศเอ็กทีฟสล็อตอาร์เรย์บนฟิวต์วาทรงกลม	25
รูปที่ 3.3 (ค) รูปถ่ายสายอากาศจริง	26
รูปที่ 3.4 วงกลมเสถียรภาพ	29
รูปที่ 3.5 วงกลมเสถียรภาพใหม่	31
รูปที่ 3.6 วงกลมสมิทชาร์ท(ก)	32
รูปที่ 3.7 วงกลมสมิทชาร์ท(ข)	33
รูปที่ 3.8 วงกลมสมิทชาร์ท(ค)	34
รูปที่ 3.9 วงกลมสมิทชาร์ท(ง)	35
รูปที่ 3.10 วงจรออสซิลเลเตอร์	36
รูปที่ 4.1 การทดลองวัดคุณสมบัติของออสซิลเลเตอร์	38
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างการแสดงผลการออสซิลเลตทางหน้าจอเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่	39
รูปที่ 4.3 อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสล็อต	40
รูปที่ 4.4 การทดลองวัดค่ามิวชวลคัปปลิง	40
รูปที่ 4.5 คำสัมประสิทธิ์การคัปปลิงระหว่างสล็อตบนฟิวทรงกลม	42
รูปที่ 4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นตามทฤษฎีทั้ง 8 ทิศทางในระบบบวมกว่าค	43
รูปที่ 4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นตามทฤษฎีในระนาบมุมยก	44

	หน้า
รูปที่ 4.8 การทดลองวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	45
รูปที่ 4.9 (ก) แบบรูปการแพร่กระจายเมื่อกำหนดความถี่ให้มุมของลำคลื่นหลักอยู่ที่ตำแหน่ง 0° ในระนาบมุมกวาด (azimuth plane)	46
รูปที่ 4.9 (ข) แบบรูปการแพร่กระจายเมื่อกำหนดความถี่ให้มุมของลำคลื่นหลักอยู่ที่ตำแหน่ง 0° ในระนาบมุมยก (elevation plane)	47
รูปที่ 4.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อกำหนดความถี่ให้มุมของลำคลื่นหลักอยู่ที่ตำแหน่ง 45°	48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศที่ใช้เป็นแบบจำลองการวิเคราะห์	23
ตารางที่ 3.2 ค่าเฟสที่กระตุ้นให้แต่ละองค์ประกอบ	24
ตารางที่ 3.3 ค่าความถี่ที่ใช้อินเจกให้กับตัวสายอากาศ	27
ตารางที่ 4.1 ผลการทำงานของวงจรรอสซิลเลเตอร์	38
ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่ามิวชวลคัปปลิงระหว่างสล็อตต่างๆ	41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

โดยทั่วไปสายอากาศอาร์เรย์บนผิวทรงกลมเป็นที่นิยมในการนำมาใช้เป็นสายอากาศที่สามารถปรับเฟสได้ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของตัวมันเองที่รูปร่างของลำคลื่นคงที่ขณะที่เปลี่ยนทิศทางไปซึ่งคุณสมบัติข้อนี้ นับว่าเป็นประโยชน์มากทั้งในระบบเรดาร์และการรับสัญญาณจากดาวเทียมในระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ การเลือกองค์ประกอบของสายอากาศที่จะนำมาวางบนผิวด้านทรงกลมเป็นเรื่องที่สำคัญอย่างยิ่ง อย่างเช่น ถ้าเลือกใช้เส้นลวดมาเป็นองค์ประกอบเพื่อทำเป็นสายอากาศไดโพลหรือสายอากาศไดโพลไขว้กัน หรือเลือกใช้ไมโครสตริปเป็นสายอากาศไมโครสตริป สายอากาศเหล่านี้จะมีความยุ่งยากในการสร้างและการจัดวางบนผิวทรงกลมแต่สายอากาศสล็อตอาร์เรย์เป็นเพียงการเจาะร่องบนผิวหน้าของภาวีสต์ด้านทรงกลมเท่านั้น

ในส่วนกลไกการปรับเฟสสามารถทำได้หลายวิธี สำหรับกลไกการปรับเฟสแบบแอ็กทีฟเป็นวิธีใหม่ที่น่าสนใจ เนื่องจากการปรับเฟสทางกลหรือการใช้ตัวปรับเฟสแบบเก่าทำได้ยากและค่อนข้างซับซ้อน แต่สำหรับการปรับเฟสแบบแอ็กทีฟนี้ทำได้ง่ายเพียงทำการเปลี่ยนค่าเฟสที่ป้อนให้กับสายอากาศโดยการอินเจ็กต์สัญญาณเข้าไป

โดยอาศัยข้อดีของสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ทรงกลมร่วมกับกลไกการปรับลำคลื่นของสายอากาศแอ็กทีฟจึงได้เลือกที่จะนำเสนอสายอากาศแอ็กทีฟสล็อตอาร์เรย์บนผิวทรงกลมสำหรับใช้เป็นสายอากาศปรับเฟสในระบบเรดาร์และดาวเทียม ซึ่งออกแบบไว้ที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ ประกอบด้วยสล็อตจำนวน 8 สล็อต เรียงตัวบนผิวทรงกลมที่ป้อนด้วยภาวีสต์ส่วนของทรงกลม และกระตุ้นด้วยโพรบไฟฟ้าเชิงเส้น สล็อตเหล่านี้จัดเรียงกันในเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อให้ได้จำนวนเฟสที่เปลี่ยนไปน้อยที่สุด สำหรับวงจรรอสซิลเลเตอร์ได้ถูกออกแบบเพื่อให้กำเนิดสัญญาณความถี่ที่ต้องการ และอินเจ็กต์ให้กับ สล็อตอาร์เรย์เพื่อปรับเฟส รวมทั้งการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ เพื่อยืนยันผลการคำนวณและทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

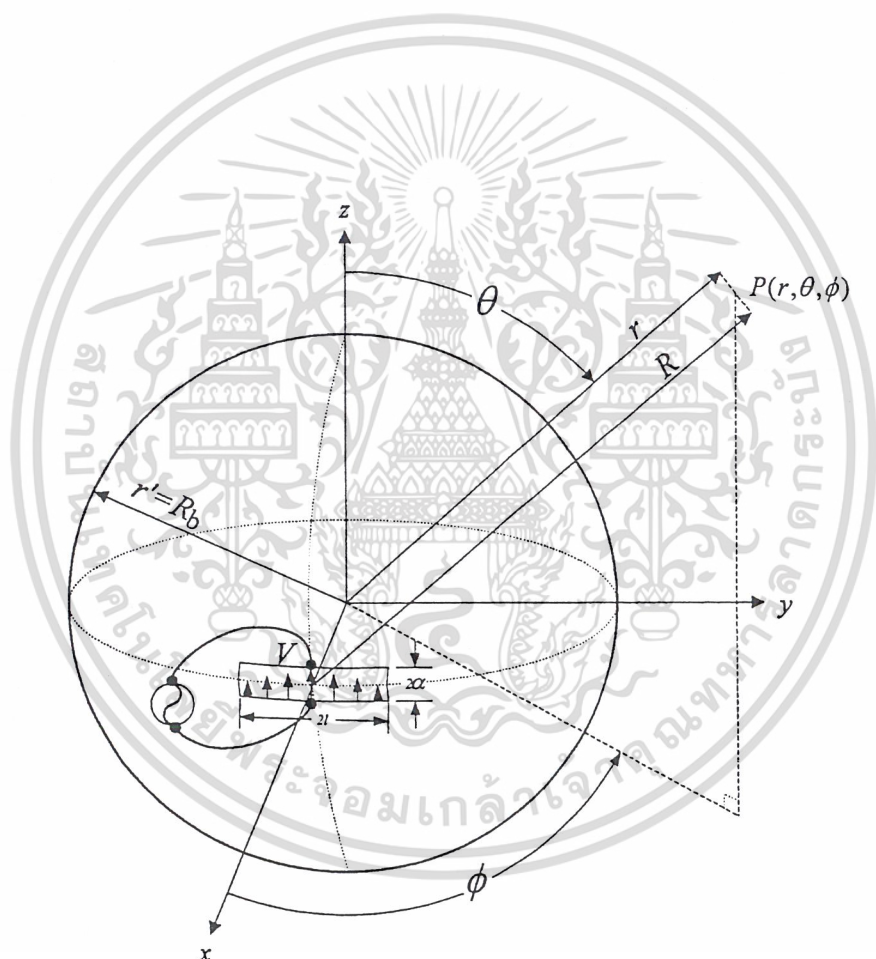
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ทฤษฎีของสายอากาศแบบสล็อตอาร์เรย์บนผิวทรงกลม

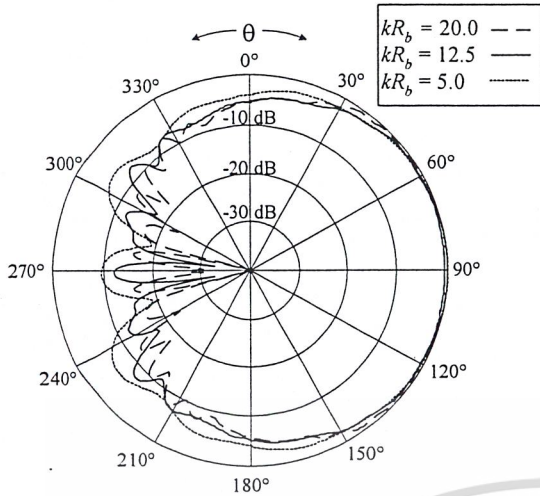
2.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสล็อตเดี่ยว

พิจารณาสล็อตเดี่ยวบนผิวทรงกลมโดยที่สล็อตมีความยาว $2l$ และกว้าง 2α วางอยู่บนผิวทรงกลมที่มีรัศมี $r' = R_0$ โดยมีจุดสังเกตเป็น $P(r, \theta, \phi)$ ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ก)

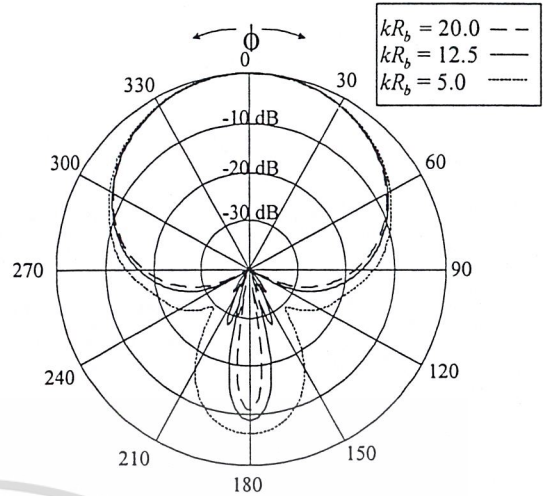


รูปที่ 2.1 (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 (ข)



รูปที่ 2.1 (ค)

รูปที่ 2.1 สลิตเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกลม

- (ก) ลักษณะของปัญหา
- (ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า
- (ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก

ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของควาวิตรีรูปทรงกลมสามารถเขียนได้ในรูปของผลรวมของสนามในโหมดแม่เหล็กตามขวาง (Transverse Magnetic Mode) และสนามในโหมดไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electric Mode) ดังแสดงในสมการที่ (2.1) และ (2.2)

$$\bar{E}_t(r, \theta, \phi) = \sum_{m=0}^{\infty} (E_{mr} \hat{a}_r + E_{m\theta} \hat{a}_\theta + E_{m\phi} \hat{a}_\phi) \tag{2.1}$$

$$\bar{H}_t(r, \theta, \phi) = \sum_{m=0}^{\infty} (H_{mr} \hat{a}_r + H_{m\theta} \hat{a}_\theta + H_{m\phi} \hat{a}_\phi) \tag{2.2}$$

โดยแต่ละองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าจะเขียนได้เป็น

$$E_{mr}(r, \theta, \phi) = -E_{m0} \sum_{n=m}^{\infty} A_{mn}^{TM} \frac{n(n+1)}{k_0 r} \frac{k_0 R_b h_n^{(2)}(k_0 r)}{[k_0 R_b h_n^{(2)}(k_0 R_b)]'} P_n^m(\cos \theta) \cos m\phi \tag{2.3ก}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{m\theta}(r, \theta, \phi) = -E_{m0} \sum_{n=m}^{\infty} \left\{ A_{mn}^{TE} \frac{h_n^{(2)}(k_0 r)}{h_n^{(2)}(k_0 R_b)} \frac{m P_n^m(\cos \theta)}{\sin \theta} + A_{mn}^{TM} \frac{R_b}{r} \frac{[k_0 r h_n^{(2)}(k_0 r)]'}{[k_0 R_b h_n^{(2)}(k_0 R_b)]'} \frac{dP_n^m(\cos \theta)}{d\theta} \right\} \cos m\phi \quad (2.3\text{ข})$$

$$E_{m\phi}(r, \theta, \phi) = E_{m0} \sum_{n=m}^{\infty} \left\{ A_{mn}^{TE} \frac{h_n^{(2)}(k_0 r)}{h_n^{(2)}(k_0 R_b)} \frac{dP_n^m(\cos \theta)}{d\theta} + A_{mn}^{TM} \frac{R_b}{r} \frac{[k_0 r h_n^{(2)}(k_0 r)]'}{[k_0 R_b h_n^{(2)}(k_0 R_b)]'} \frac{m P_n^m(\cos \theta)}{\sin \theta} \right\} \sin m\phi \quad (2.3ค)$$

$$H_{mr}(r, \theta, \phi) = -\frac{j}{\eta_0} E_{m0} \sum_{n=m}^{\infty} A_{mn}^{TE} \frac{n(n+1)}{k_0 r} \frac{h_n^{(2)}(k_0 r)}{h_n^{(2)}(k_0 R_b)} P_n^m(\cos \theta) \sin m\phi \quad (2.3ง)$$

$$H_{m\theta}(r, \theta, \phi) = -\frac{j}{\eta_0} E_{m0} \sum_{n=m}^{\infty} \left\{ A_{mn}^{TE} \frac{[k_0 r h_n^{(2)}(k_0 r)]'}{[k_0 r h_n^{(2)}(k_0 R_b)]'} \frac{dP_n^m(\cos \theta)}{d\theta} - A_{mn}^{TM} \frac{R_b}{r} \frac{[k_0 r h_n^{(2)}(k_0 r)]'}{[k_0 R_b h_n^{(2)}(k_0 R_b)]'} \frac{m P_n^m(\cos \theta)}{\sin \theta} \right\} \sin m\phi \quad (2.3จ)$$

$$H_{m\phi}(r, \theta, \phi) = -\frac{j}{\eta_0} E_{m0} \sum_{n=m}^{\infty} \left\{ A_{mn}^{TE} \frac{[k_0 r h_n^{(2)}(k_0 r)]'}{[k_0 r h_n^{(2)}(k_0 R_b)]'} \frac{m P_n^m(\cos \theta)}{\sin \theta} - A_{mn}^{TM} \frac{[k_0 R_b h_n^{(2)}(k_0 r)]'}{[k_0 R_b h_n^{(2)}(k_0 R_b)]'} \frac{dP_n^m(\cos \theta)}{d\theta} \right\} \cos m\phi \quad (2.3ฉ)$$

โดยที่

$$A_{mn}^{TE} = -\frac{2n+1}{2n(n+1)} \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \int_{\frac{\pi}{2}-\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} m P_n^m(\cos \theta) d\theta \quad (2.4ก)$$

$$A_{mn}^{TM} = -\frac{2n+1}{2n(n+1)} \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \int_{\frac{\pi}{2}-\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \frac{dP_n^m(\cos \theta)}{d\theta} \sin \theta d\theta \quad (2.4ข)$$

โดยที่

$h_n^{(2)}$ แสดงฟังก์ชันแรงแกลชเชนิกที่ (2) ซึ่งแทนคลื่นที่เดินทางออกจากผิวทรงกลม

$P_n^m(\cos \theta)$ แทนฟังก์ชันเลอจองด์ลำดับ (n, m) ของฟังก์ชันโคไซน์

η_0 เป็นอินทรีนซิคอิมพีแดนซ์ ของช่องว่างอิสระ

$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ เป็นจำนวนลูกคลื่นบริเวณช่องว่างอิสระ

ω เป็นความถี่เชิงมุมที่คำนวณได้จากค่าความถี่ปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสนามระยะไกลของคลื่นที่เดินทางออกจากผิวทรงกลมสามารถหาได้จากนิพจน์อะซิมป์โตติก (Asymptotic Expression) ของฟังก์ชันแอสกิลทรงกลมสำหรับอาร์กิวเมนต์ขนาดใหญ่ ดังนี้

$$E_{mr}(r, \theta, \phi) \approx 0 \quad (2.5ก)$$

$$E_{m\theta}(r, \theta, \phi) \approx -\frac{e^{-jk_0 r}}{r} E_{m0} \sum_{n=m}^{\infty} (j)^n \left\{ \frac{jA_{mn}^{TE}}{2\alpha} \frac{l}{h_n^{(2)}(k_0 R_b)} \frac{dP_n^m(\cos\theta)}{d\theta} + \frac{A_{mn}^{TM}}{2\alpha} \frac{k_0 R_b}{[k_0 R_b h_n^{(2)}(k_0 R_b)]'} \frac{mP_n^m(\cos\theta)}{\sin\theta} \right\} \cos m\phi \quad (2.5ข)$$

$$E_{m\phi}(r, \theta, \phi) \approx \frac{e^{-jk_0 r}}{r} E_{m0} \sum_{n=m}^{\infty} (j)^n \left\{ \frac{jA_{mn}^{TE}}{2\alpha} \frac{l}{h_n^{(2)}(k_0 R_b)} \frac{mP_n^m(\cos\theta)}{\sin\theta} + \frac{A_{mn}^{TM}}{2\alpha} \frac{k_0 R_b}{[k_0 R_b h_n^{(2)}(k_0 R_b)]'} \frac{dP_n^m(\cos\theta)}{d\theta} \right\} \sin m\phi \quad (2.5ค)$$

$$H_{mr}(r, \theta, \phi) \approx 0 \quad (2.5ง)$$

$$H_{m\theta}(r, \theta, \phi) = -\frac{E_{m\phi}(r, \theta, \phi)}{\eta_0} \quad (2.5จ)$$

$$H_{m\phi}(r, \theta, \phi) = \frac{E_{m\theta}(r, \theta, \phi)}{\eta_0} \quad (2.5ฉ)$$

โดยที่ค่าแรงดันที่กระจายที่ปากร่องจะพิจารณาเป็นรูปไซน์ดังแสดงในสมการที่ (2.6)

$$E_{\theta}(\phi) = \begin{cases} \frac{V_{m0}}{2R_b \alpha} \sin[k_0(l - R_b|\phi|)] & , |R_b\phi| \leq l \\ 0 & , \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2.6)$$

ซึ่งเมื่อกระจายในรูปอนุกรมฟูรีเยร์แล้วจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าในแต่ละโหมดได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_{m0} &= \frac{2}{(1+\delta)\pi} \int_0^{lR_b} \sin[k_0(l - R_b\phi)] \cos m\phi d\phi \quad (2.7) \\ &= \frac{l}{\pi k_0 R_b} (1 - \cos k_0 l) \quad ; m=0 \\ &= \frac{l}{\pi} \frac{l}{R_b} \text{sinc}_0 l \quad ; m=k_0 R_b \\ &= \frac{l}{\pi} \frac{2k_0 R_b}{(k_0 R_b)^2 - m^2} [\cos(\frac{ml}{R_b}) - \cos k_0 l]; \text{elsewhere} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โดยที่ δ เป็นฟังก์ชัน Kronecker Delta ซึ่งมีค่าเป็นหนึ่งที่ $m=0$ และเป็นศูนย์ที่บริเวณอื่น

2.1.2 สายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนผิวทรงกลม

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระยะไกลของสล็อตอาร์เรย์บนผิวทรงกลม แล้วจากนั้นจะประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศปรับเฟสต่อไป

พิจารณาคณิตศาสตร์การแพร่กระจายคลื่นของสล็อตอาร์เรย์บนผิวทรงกลมจำนวนทั้งสิ้น P องค์ประกอบ โดยมีจำนวนองค์ประกอบในแต่ละวงเป็น $i = 1, 2, 3, \dots, M$ โดยที่จำนวนวงรวมเป็น $j = 1, 2, 3, \dots, N$ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนผิวทรงกลม

ค่าระยะห่างระหว่างสล็อตแต่ละสล็อต (s_ϕ) หาได้จาก

$$s_\phi = \frac{2\pi R_b \sin \alpha_i}{M} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารโดยที่ α_i เป็นจุดศูนย์กลางของมุมของแต่ละสล็อตในวงเดียวกันญาติให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดส่วนระยะห่างระหว่างองค์ประกอบในแนวตั้งซึ่งอยู่ก้นลวงจะเป็นเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d_\theta = \frac{\pi R_b}{N} \quad (2.9)$$

โดยจากค่าของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากสล็อตเดี่ยวบนผิวทรงกลม ต่อมาเราจะพิจารณาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสล็อตอาร์เรย์บนผิวทรงกลมโดยใช้หลักการทับซ้อน (Superpositon) จากสนามไฟฟ้าบนสล็อตเดี่ยว ดังนี้

$$\overline{E}(\theta, \phi) = \sum_{j=1}^N \left[\sum_{i=1}^M \overline{E}_i(R_b, \xi_{ij}, \varsigma_{ij}) e^{j(kR_b \cos \xi_{ij} + \varphi_{ij})} \right] \quad (2.10)$$

โดยที่

$$\overline{E}_i(R_b, \xi_{ij}, \varsigma_{ij}) = E_\xi(R_b, \xi_{ij}, \varsigma_{ij}) [\cos \gamma_i - \sin \gamma_i] \hat{\xi}_{ij} + E_\zeta(R_b, \xi_{ij}, \varsigma_{ij}) [\cos \gamma_i + \sin \gamma_i] \hat{\zeta}_{ij} \quad (2.11)$$

โดยที่ $\hat{\xi}$ และ $\hat{\zeta}$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยบนสล็อตซึ่งอยู่ที่โคออร์ดิเนตท้องถิ่น γ_i เป็นมุมของสล็อตแต่ละสล็อตเทียบกับเส้นแนวนอนของผิวทรงกลม และ φ_{ij} เป็นเฟสที่กระตุ้นให้แก่ละองค์ประกอบเพื่อปรับสายอากาศให้ชี้ในทิศทางที่ต้องการ (องค์ประกอบที่ i ของวงที่ j)

และเพื่อที่จะแปลงโคออร์ดิเนตท้องถิ่นของสล็อตไปเป็นโคออร์ดิเนตของจุดสังเกตค่าความสัมพัทธ์ระหว่าง (R_b, ξ, ς) และ (r, θ, ϕ) จะแสดงได้เป็น

$$\begin{aligned} \cos \xi_{ij} &= \frac{\overline{R}_{st} \cdot \overline{R}_o}{\left| \overline{R}_{st} \right| \left| \overline{R}_o \right|} \\ &= \sin \theta_m \sin \theta \cos(\phi - \phi_{mn}) + \cos \theta_m \cos \theta \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\text{และ} \quad \tan \varsigma_{ij} = \frac{\sin \theta \sin(\phi - \phi_{mn})}{\cos \theta_m \sin \theta \cos(\phi - \phi_{mn}) - \sin \theta_m \cos \theta} \quad (2.13)$$

$$\hat{\xi}_{ij} = \frac{-\sin \theta_m \cos \theta \cos(\phi - \phi_{mn}) - \cos \theta_m \sin \theta}{\sin \xi_{ij}} \hat{\theta} + \frac{\sin \theta_m \sin(\phi - \phi_{mn})}{\sin \varsigma_{ij}} \hat{\phi} \quad (2.14)$$

$$\hat{\zeta}_{ij} = \frac{-\sin \theta_m \sin(\phi - \phi_{mn})}{\sin \xi_{ij}} \hat{\theta} - \frac{\sin \theta_m \cos \theta \cos(\phi - \phi_{mn}) - \cos \theta_m \sin \theta}{\sin \varsigma_{ij}} \hat{\phi} \quad (2.15)$$

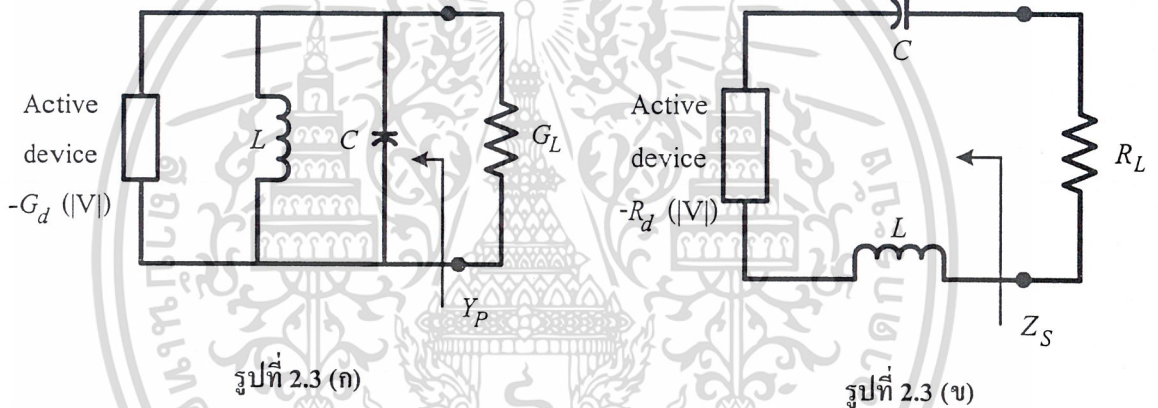
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อที่จะปรับทิศทางของลำคลื่นให้กวาดไปในทิศทางที่เราต้องการ ค่าของเฟสที่เลื่อนไปในแต่ละองค์ประกอบจำเป็นต้องถูกรวมไว้ด้วย ซึ่งค่าเฟสดังกล่าวในกรณีที่ลำคลื่นชี้ในทิศทาง (θ_p, ϕ_p) จะเป็น

$$\varphi_{ij} = -[\sin\theta_p \sin\theta_m \cos(\phi_p - \phi_{mn}) + \cos\theta_m \cos\theta_p] \quad (2.16)$$

จากค่าเฟสนี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่กวาดลำคลื่นได้ต่อไป

2.2 วงจรรีโซเนเตอร์



รูปที่ 2.3 (ก)

รูปที่ 2.3 (ข)

รูปที่ 2.3 วงจรรีโซเนเตอร์

(ก) วงจรรีโซเนเตอร์แบบขนาน

(ข) วงจรรีโซเนเตอร์แบบอนุกรม

จากรูปที่ 2.3 (ก) พิจารณาวงจรรีโซเนเตอร์แบบขนาน ได้ว่า

$$Y_p(\omega, (v)) \approx -G_d(A_i) + j2C_i(\omega - \omega_i) \quad (2.17)$$

$$Q_p = \omega_o RC = \frac{R}{\omega_o L} = R \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\omega_o}{B} \quad (2.18)$$

จากรูปที่ 2.3 (ข) พิจารณาวงจรรีโซเนเตอร์แบบอนุกรม ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{is}(\omega, v) \approx -R_d(A_i) + j \frac{R_L 2Q}{\omega_i} (\omega - \omega_i) \quad (2.19)$$

$$Q_s = \frac{\omega_o L}{R} = \frac{1}{\omega_o C R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\omega_o}{B} \quad (2.20)$$

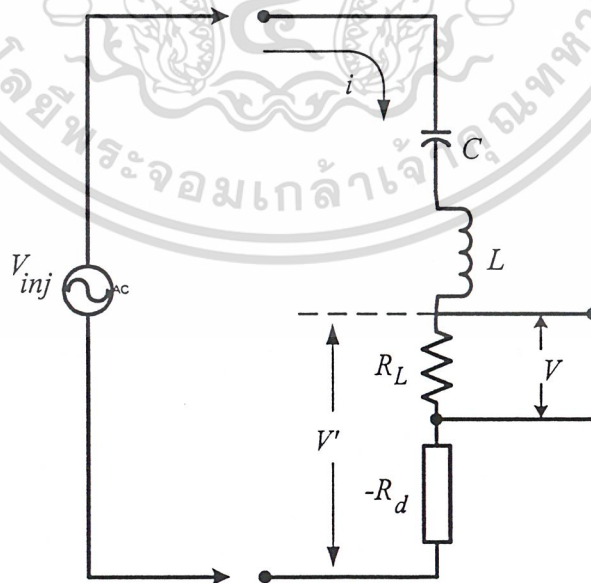
ซึ่งค่า Q คือค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจร

2.3. ทฤษฎีการกวาดล้าคลื่นโดยกลไกทางแอ็กทีฟ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการกวาดล้าคลื่นของสายอากาศโดยใช้วิธีการ injection locking ซึ่งในส่วนแรกจะกล่าวถึงทฤษฎีของออสซิลเลเตอร์ไมโครเวฟและการ injection locking และท้ายที่สุดจะแสดงนิพจน์ของค่าความถี่ที่สอดคล้องกับพารามิเตอร์ของสายอากาศ เช่น เฟส (phase) ค่าตัวประกอบคุณภาพ (quality factor) และค่ามิววลคัปปลิง (mutual coupling) เพื่อใช้คำนวณหาความถี่ที่จะอินเจกให้กับตัวสายอากาศต่อไป

2.3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่มีการอินเจกสัญญาณ

พิจารณาวงจรอนุกรมของตัวเก็บประจุ C (capacitor) และตัวเหนี่ยวนำ L (inductor) ต่อกับอุปกรณ์ที่มีค่าความต้านทานค่าลบ R_d (negative resistance) โดยค่าความต้านทานโหลดเป็น R_L ต่อกับแหล่งกำเนิดที่ให้แรงดันเป็น V_{inj} ดังรูปที่ 2.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.4 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมภายใต้เงื่อนไขการใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยประยุกต์ใช้กฎของแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's Voltage Law) จะสามารถเขียนค่าความสัมพันธ์ของแรงดันได้เป็น

$$V_{inj} = \frac{1}{C} \int i dt + L \frac{di}{dt} + i(R_L + (-R_d)) \quad (2.21)$$

และเมื่อเขียน $i = \frac{v}{R_L}$ จะทำให้ (2.21) กลายเป็น

$$V_{inj} = \frac{1}{CR_L} \int v dt + \frac{L}{R_L} \frac{dv}{dt} + v \left[1 - \frac{R_d}{R_L}\right] \quad (2.22)$$

เมื่อคูณตลอดด้วย ω_0 จะได้ว่า

$$V_{inj} = \frac{\omega_0}{CR_L \omega_0} \int v dt + \frac{L \omega_0}{R_L \omega_0} \frac{dv}{dt} + v \left[1 - \frac{R_d}{R_L}\right] \quad (2.23)$$

จัดรูปให้อยู่ในรูปของค่าตัวประกอบคุณภาพ (2.23) จะเป็น

$$V_{inj} = Q \omega_0 \int v dt + \frac{Q}{\omega_0} \frac{dv}{dt} + v \left[1 - \frac{R_d}{R_L}\right] \quad (2.24)$$

คูณตลอดด้วย $\frac{\omega_0}{Q}$

$$\frac{\omega_0}{Q} V_{inj} = \omega_0^2 \int v dt + \frac{dv}{dt} + v \frac{c}{Q} \left[1 - \frac{R_d}{R_L}\right] \quad (2.25)$$

ต่อไปจะพิจารณาค่าแรงดันเอาต์พุต (output voltage) ให้อยู่ในรูปของขนาด (magnitude) และเฟส (phase) ดังนี้

$$v = A(t)e^{j(\omega_0 + \phi(t))} = A(t)e^{j\theta(t)} \quad (2.26)$$

ซึ่งค่าอินทิเกรตเทียบกับเวลาของแรงดันในสมการที่ (2.26) จะสามารถเขียนได้เป็นผลสำเร็จ

โดยใช้การอินทิเกรตบางส่วนและจัดรูปให้อยู่ในรูปอนุพันธ์ได้เป็น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int v dt = \frac{-2jv}{\omega_0} + \frac{1}{\omega_0^2} \frac{dv}{dt} + \dots \quad (2.27)$$

และค่าตัวประกอบการแบ่งแรงดันที่อุปกรณและโหลดต่อแรงดันที่โหลดจะสามารถประมาณได้จากสูตรของ *Van der Pol* ดังนี้

$$\left(1 - \frac{R_d}{R_L}\right) \approx -\mu(\alpha_0^2 - A^2) \quad (2.28)$$

โดยที่

μ = ค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของออสซิลเลเตอร์ (nonlinearity parameter describing the oscillator)

α_0 = ค่าแอมพลิจูดอิสระของออสซิลเลเตอร์ (free-running amplitude of oscillator)

โดยการใช้ความสัมพันธ์ *Van der Pol* ดังกล่าว ค่าอนุพันธ์ของแรงดันเทียบกับเวลาจะเป็น

$$\frac{dv}{dt} = v \left[\frac{\mu\omega_0}{2Q} [\alpha_0^2 - A^2] + j\omega_0 \right] + \frac{\omega_0}{2Q} V_{inj} \quad (2.29)$$

ซึ่งนิพจน์ที่สมบูรณ์ของอนุพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตจะได้จากน้า (2.26) แทนใน (2.29)

ผลที่ได้คือ

$$\frac{dA(t)e^{j\theta(t)}}{dt} = A(t)e^{j\theta(t)} \left[\frac{\mu\omega_0}{2Q} [\alpha_0^2 - A^2] \right] + A(t)e^{j\theta(t)} j\omega_0 + \frac{\omega_0}{2Q} V_{inj} \quad (2.30)$$

ซึ่งเมื่อแยกส่วนจริงและจินตภาพจะได้ 2 พจน์ของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด และเฟสต่อเวลาตามลำดับ ดังแสดงใน (2.31) และ (2.32)

$$\frac{dA(t)}{dt} = \frac{\mu\omega_0 A(t)}{2Q} (\alpha_0^2 - A^2) + \frac{\omega_0 A(t)}{2Q} \operatorname{Re} \left[\frac{V_{inj}}{v} \right] \quad (2.31)$$

และ

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \omega_0 + \frac{\omega_0}{2Q} \operatorname{Im} \left[\frac{V_{inj}}{v} \right] \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ออสซิลเลเตอร์ที่มีการมีวชวลคัปปลิงน้อย (Loosely-coupled Oscillator)

พิจารณาค่าของการมีวชวลคัปปลิง

$$V_{ij} = A_{ij} [\cos \theta_{ij} + j \sin \theta_{ij}] \quad (2.33)$$

โดยที่

$$k_{ij} = k_{ji} = \varepsilon_{ij} e^{-j\phi_{ij}} \quad (2.34)$$

k_{ij} เป็นค่าการมีวชวลคัปปลิงซึ่งประกอบด้วยแอมพลิจูดของการเชื่อมต่อรวม (ε_{ij}) และเฟส (ϕ_{ij}) ตามลำดับ

ซึ่งเมื่อแทนค่าการมีวชวลคัปปลิง (2.33) ใน (2.31) และ (2.32) และโดยใช้ความสัมพันธ์ $\cos(-x) = \cos(x)$ และ $\sin(-x) = -\sin(x)$ ตามลำดับ จะได้ว่า

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\mu\omega_0 A}{2Q} (\alpha_0^2 - A^2) + \frac{\omega_0}{2Q} \sum_{j=1}^N \varepsilon_{ij} A_j \cos(\phi_{ij} + \theta_i - \theta_j) \quad (2.35)$$

และ

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_0 - \frac{\omega_0}{2Q} \sum_{j=1}^N \varepsilon_{ij} \frac{A_j}{A_i} \sin(\phi_{ij} + \theta_i - \theta_j) \quad (2.36)$$

และเมื่อพิจารณากรณีที่มีการมีวชวลคัปปลิงน้อย ($\varepsilon_{ij} \ll 1$) แล้วค่า $A_i \approx \alpha_i$ ซึ่งทำให้ $\frac{d\theta}{dt}$ มีผลมากกว่า $\frac{dA}{dt}$ และเมื่อออสซิลเลเตอร์มีการชิงโครไนซ์ทุกตัวจะทำให้ (2.36) กลายเป็น

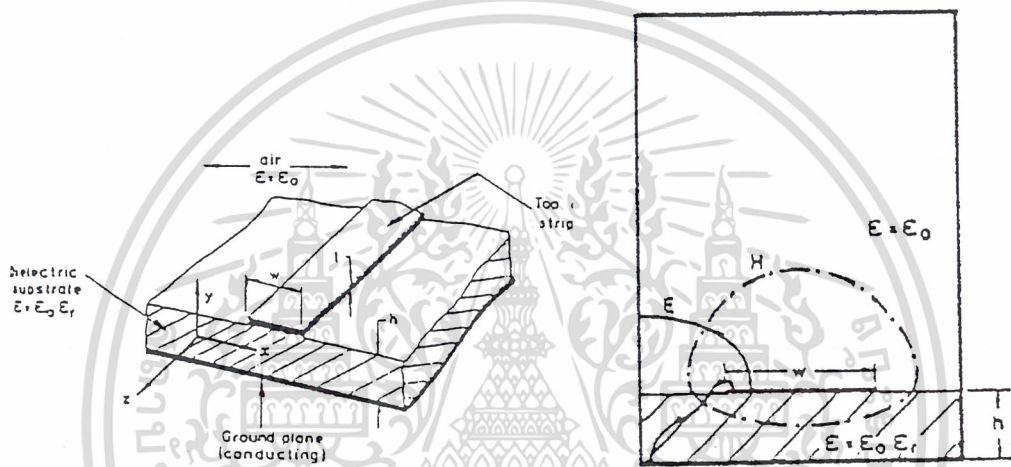
$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \omega_0 \left[1 - \frac{1}{2Q} \sum_{j=1}^N \varepsilon_{ij} \frac{A_j}{A_i} \sin(\phi_{ij} + \theta_i - \theta_j) \right] \quad (2.37)$$

จากนิพจน์ (2.37) ดังกล่าวจะพบว่าค่าความถี่ของออสซิลเลเตอร์จะขึ้นกับค่าเฟส (θ), ค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) และค่าแอมพลิจูด (ε_{ij}) และเฟส (ϕ_{ij}) ของการมีวชวลคัปปลิงตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ไมโครสตริปไลน์ (Microstrip line)

ไมโครสตริปไลน์เป็นสายส่งเชิงระนาบ (planar transmission line) ชนิดหนึ่ง ประกอบด้วย สตริปตัวนำ (strip conductor) และระนาบกราวด์ (ground plane) ซึ่งถูกคั่นกลางด้วยไดอิเล็กตริกสับสเตรต (dielectric substrate) ซึ่งทำจากสารไดอิเล็กตริก (dielectric material) โครงสร้างของไมโครสตริป แสดงดังรูปที่ 2.5 (ก) ลักษณะของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในตัวนำสตริป ประกอบด้วยสนามที่อยู่ในไดอิเล็กตริกสับสเตรตใต้แผ่นสตริป และสนามที่อยู่ในอากาศเหนือแผ่นสตริป ดังแสดงใน รูปที่ 2.5 (ข) ดังนั้นไมโครสตริปจึงมีโครงสร้างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (inhomogeneous)



รูปที่ 2.5 (ก) ลักษณะของสายส่งไมโครสตริป

รูปที่ 2.5 (ข) ลักษณะของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในสายส่งไมโครสตริป

สำหรับคลื่นในโหมด TEM (Transverse ElectroMagnetic) ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่น ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารไดอิเล็กตริก ได้แก่ค่า เพอร์มิตติวิตี (effective permittivity: ϵ) และค่าเพอร์มิอับิลิตี (permeability : μ) ในกรณีที่มีสารตัวกลาง 2 ชนิด คลื่นในโหมดนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสองค่า ค่าหนึ่งเป็นความเร็วในไดอิเล็กตริกสับสเตรตและอีกค่าหนึ่งเป็นความเร็วในอากาศเหนือพื้นผิวซึ่งทำให้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ไม่ต่อเนื่องกัน ดังนั้นคลื่นที่เคลื่อนที่ไปบนแผ่นสตริปจึงไม่ใช่คลื่นในโหมด TEM ในการวิเคราะห์โดยทั่วไปจะพิจารณาคลื่นที่เดินทางในไมโครสตริปเป็นคลื่นในโหมด quasi-TEM ซึ่งถือเป็นคลื่นในโหมดผสม (hybrid mode)

2.4.1 เอ็ฟเฟ็กทีฟเพอร์มิตติวิตี (effective permittivity: ϵ_e)

การประมาณลักษณะการเดินทางของคลื่นในแผ่นสตริปเป็นคลื่นในโหมด quasi-TEM สามารถแทนโครงสร้างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันของไมโครสตริปได้ด้วยโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) โดยที่ยังคงขนาดทางเรขาคณิตเดิมไว้ (W, h, t) แต่จะพิจารณา

ค่าเอ็ฟเฟ็กทีฟเพอร์มิตติวิตี (ϵ_e) เสมือนว่าคลื่นเดินทางในสายส่งที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกค่าใหม่ค่าหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ทั้งนี้สามารถคำนวณค่าได้จาก

$$\epsilon_e \cong \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{h}{W} \right)^{-ab} ; 1 \leq \epsilon_r \leq 128 \tag{2.38}$$

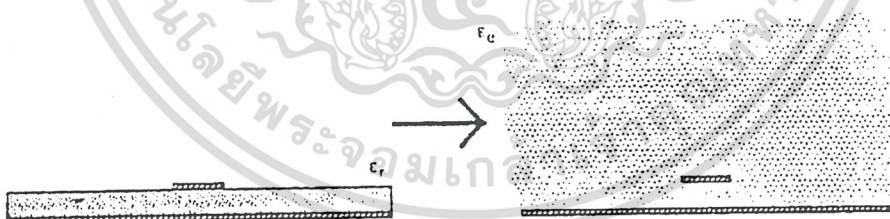
$$0.01 \leq \frac{W}{h} \leq 100$$

โดยที่

$$a = 1 + \frac{1}{49} \log \frac{(W/h)^4 + (W/52h)^2}{(W/h)^4 + 0.432} + \frac{1}{18.7} \log \left[1 + \left(\frac{W}{18.1h} \right)^3 \right] \tag{2.39}$$

$$b = 0.564 \left(\frac{\epsilon_r - 0.9}{\epsilon_r + 3} \right)^{0.053} \tag{2.40}$$

เมื่อ ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (dielectric constant) หรือ รีเลทีฟเพอร์มิตติวิตี (relative permittivity) ของไดอิเล็กตริก
 W คือ ความกว้างของแผ่นสตริป (เมตร)
 h คือ ความหนาของไดอิเล็กตริกสับเซรต (เมตร)



รูปที่ 2.6 แสดงหลักการของเอ็ฟเฟ็กทีฟเพอร์มิตติวิตี

2.4.2 ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance: Z_0)

คลื่นโหมด quasi-TEM ที่เดินทางบนตัวนำที่ไม่มีกระแสสูญเสีย ค่าของ Z_0 จะไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ของคลื่น และจะเป็นฟังก์ชันทางเรขาคณิตของ $\frac{W}{h}$ และ ϵ_e ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์

ได้จากสมการของHammerstad และ Jansen

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_o \cong \frac{l}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o \epsilon_e}} \log \left[F_l \frac{h}{W} + \sqrt{1 + \left(2 \frac{h}{W}\right)^2} \right] \quad (2.41)$$

โดยที่

$$F_l = 6 + (2\pi - 6) \exp \left[- \left(\frac{30.666h}{W} \right)^{0.7528} \right] Z_o \quad (2.42)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าสำหรับแผ่นสตริปที่มีค่า Z_o ต่ำ จะมีขนาดของแผ่นกว้างกว่าสตริปที่มีค่า Z_o สูง

2.4.3 การหาค่า W/h

ในการออกแบบวงจรทางไมโครสตริปนั้น สิ่งที่จะต้องรู้เป็นอันดับแรกคือ อัตราส่วน W/h ของแผ่นสตริปที่สอดคล้องกับ Z_o, ϵ_r และ h ที่ต้องการ ซึ่งการประมาณอัตราส่วน W/h ในเทอมของ Z_o และ ϵ_r นั้นสามารถหาความสัมพันธ์ได้จากสมการของ Wheeler ซึ่งถูกพัฒนาโดย Hammerstad อีกครั้ง

เมื่อ

$$W/h \leq 2 \quad \frac{W}{h} = 4 \left(\frac{l}{2} e^A - e^{-A} \right)^{-1} \quad (2.43)$$

โดยที่

$$A = \pi \sqrt{2(\epsilon_r + 1)} \frac{Z_o}{120\pi} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (2.44)$$

หรือเมื่อ

$$W/h \geq 2 \quad \frac{W}{h} = \frac{\epsilon_r - 1}{\pi \epsilon_r} \left(\log(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right) + \frac{2}{\pi} [B - 1 - \log(2B - 1)] \quad (2.45)$$

โดยที่

$$B = \frac{\pi}{2\sqrt{\epsilon_r}} \frac{120\pi}{Z_o} \quad (2.46)$$

อย่างไรก็ตาม สมการดังกล่าวจะใช้ได้ก็ต่อเมื่อความหนา t ของแผ่นสตริปมีค่าน้อยมาก

จนกระทั่งถือว่าเป็นศูนย์เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณากรณีที่ไม่โครสตริปมีค่าความหนาหรือ $t \neq 0$ (non-zero thickness) ค่าความกว้าง (W) จะต้องใช้ค่าความกว้างประสิทธิผล (effective width) แทน โดยคำนวณได้จาก

$$W_{eff} = W + \frac{t}{h} \left(\ln \frac{2h}{t} + 1 \right) \quad (2.47)$$

2.4.4 ความเร็วเฟสและความยาวคลื่นบนแผ่นสตริป (phase velocity and line wavelength)

ความเร็วเฟสและความยาวคลื่นบนแผ่นสตริปสามารถพิจารณาเป็นความสัมพันธ์กับค่าเอ็ฟเฟ็กทีฟเพอร์มิตติวิตีได้ดังนี้

$$v_\phi = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (2.48)$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (2.49)$$

โดยที่

v_ϕ = ความเร็วเฟส (เมตรต่อวินาที)

λ_g = ความยาวคลื่นบนแผ่นสตริป (เมตร)

λ_0 = ความยาวคลื่นของคลื่นที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสง (เมตร)

c = ความเร็วแสงในสุญญากาศ มีค่า 3×10^8 เมตรต่อวินาที

จากความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่า v_ϕ และ λ_g เป็นฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางเรขาคณิตของไมโครสตริปและเกี่ยวเนื่องไปถึงค่า Z_0 ด้วย

2.5 แบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าตามขวาง (Transverse electric (TE) mode)

ในพิกัดมุมฉาก รูปทั่วไปของสนามไฟฟ้าสามารถเขียนได้ดังนี้

$$E(x, y, z) = \hat{a}_x E_x(x, y, z) + \hat{a}_y E_y(x, y, z) + \hat{a}_z E_z(x, y, z) \quad (2.50)$$

ที่ซึ่ง x, y, z เป็นพิกัดเรกแทนกูลาร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และเมื่อนำสมการที่ (2.50) ไปแทนในเอกสารนี้เป็นการศึกษาเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

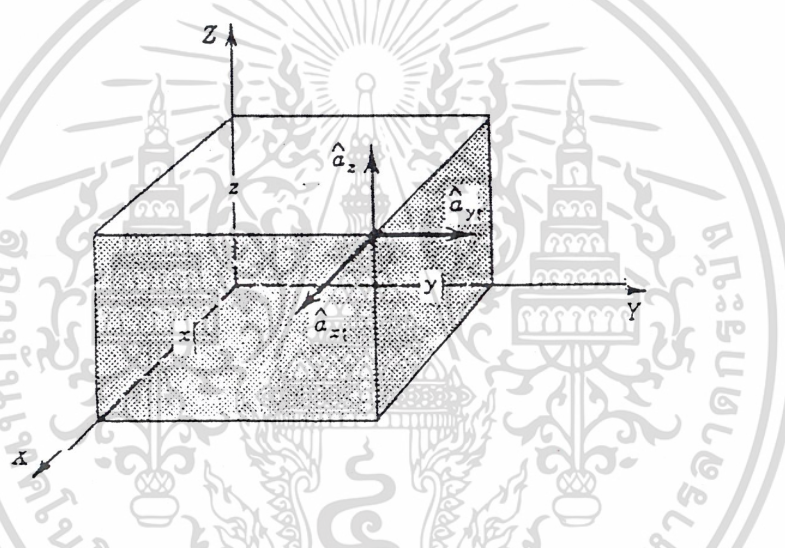
$$\nabla^2 E + \beta^2 E = \nabla^2 (\hat{a}_x E_x + \hat{a}_y E_y + \hat{a}_z E_z) + \beta^2 (\hat{a}_x E_x + \hat{a}_y E_y + \hat{a}_z E_z) = 0 \quad (2.51)$$

ซึ่งเมื่อเราลดรูปจะได้เป็นสมการคลื่น 3 สมการ ดังนี้

$$\nabla^2 E_x(x, y, z) + \beta^2 E_x(x, y, z) = 0 \quad (2.52ก)$$

$$\nabla^2 E_y(x, y, z) + \beta^2 E_y(x, y, z) = 0 \quad (2.52ข)$$

$$\nabla^2 E_z(x, y, z) + \beta^2 E_z(x, y, z) = 0 \quad (2.52ค)$$



รูปที่ 2.7 แสดงระบบพิกัดมุมฉากและเวกเตอร์หน่วย

จะเห็นได้ว่าสมการที่ (2.52ก), (2.52ข) และ (2.52ค) นั้นเป็นสมการคลื่นที่มีรูปแบบที่เหมือนกัน แต่เราจะเลือกแต่เฉพาะสมการที่ (2.52ก) ซึ่งอยู่ในเทอมของ E_x มาพิจารณา เนื่องจากว่าในควาติตี้ที่สัมพันธ์ พื้นที่ของเราจะกำหนดให้คลื่นเดินทางไปในทิศทางของแกน x

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2.52) ได้ว่า

$$\nabla^2 (\hat{a}_x E_x + \hat{a}_y E_y + \hat{a}_z E_z) = \hat{a}_x \nabla^2 E_x + \hat{a}_y \nabla^2 E_y + \hat{a}_z \nabla^2 E_z \quad (2.53)$$

และใช้วิธีทำการแยกตัวแปร (separating of variables method) สมมติให้ $E_x(x, y, z)$ ให้อยู่ในรูปดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\nabla^2 E_x + \beta^2 E_x = \frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + \beta^2 E_x = 0 \quad (2.54)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปดสิ่งเนื้อหาของเอกสารนี้โดยเด็ดขาด

เมื่อ x, y, z คือตัวแปรของ E_x ซึ่งจะแก้สมการโดยใช้วิธีดิฟเฟอเรนเชียลเชิงเส้น (differential equation) ได้ดังนี้

$$E_x(x, y, z) = f(x)g(y)h(z) \quad (5.55)$$

เมื่อ $f(x), g(y)$ และ $h(z)$ เป็นฟังก์ชันของตัวแปรแต่ละตัว เมื่อนำไปแทนในสมการที่ (5.55) แล้วทำการหารตลอดสมการด้วยเทอมของ fgh จะได้สมการที่ (2.56)

$$gh \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + fh \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} + fg \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \beta^2 fgh = 0 \quad (2.56)$$

$$\frac{1}{f} \frac{d^2 f}{dx^2} + \frac{1}{g} \frac{d^2 g}{dy^2} + \frac{1}{h} \frac{d^2 h}{dz^2} + \beta^2 = 0 \quad (2.56ก)$$

ในแต่ละเทอมของสมการที่ (2.56ก) เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรในเทอมของค่าคงที่เท่ากับ $-\beta^2$ เมื่อทำการแยกแต่ละเทอมของสมการที่ (2.56ก) จะได้สมการที่ (2.57ก), (2.57ข) และ (2.57ค)

$$\frac{1}{f} \frac{d^2 f}{dx^2} = -\beta_x^2 \Rightarrow \frac{d^2 f}{dx^2} = -\beta_x^2 f \quad (2.57ก)$$

$$\frac{1}{g} \frac{d^2 g}{dy^2} = -\beta_y^2 \Rightarrow \frac{d^2 g}{dy^2} = -\beta_y^2 g \quad (2.57ข)$$

$$\frac{1}{h} \frac{d^2 h}{dz^2} = -\beta_z^2 \Rightarrow \frac{d^2 h}{dz^2} = -\beta_z^2 h \quad (2.57ค)$$

ที่ซึ่ง

$$\beta_x^2 + \beta_y^2 + \beta_z^2 = \beta^2 \quad (2.58)$$

จากสมการที่ (2.58) เมื่อเรากำหนดให้ $\beta_x, \beta_y, \beta_z$ เป็นค่าคงที่ในแต่ละทิศทางของพิกัด x, y, z เมื่อทำการพิจารณาแก้สมการที่ (2.57ก), (2.57ข) และ (2.57ค) จะได้สมการที่ (2.59ก), (2.59ข), (2.60ก), (2.60ข), (2.61ก) เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

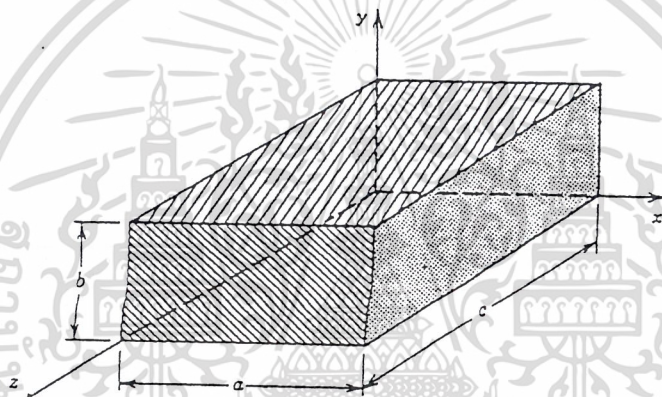
$$f_1(x) = A_1 e^{-j\beta_x x} + B_1 e^{+j\beta_x x} \quad (2.59\text{ก})$$

$$f_2(x) = C_1 \cos(\beta_x x) + D_1 \sin(\beta_x x) \quad (2.59\text{ข})$$

$$g_1(y) = A_2 e^{-j\beta_y y} + B_2 e^{+j\beta_y y} \quad (2.60\text{ก})$$

$$g_2(y) = C_2 \cos(\beta_y y) + D_2 \sin(\beta_y y) \quad (2.60\text{ข})$$

$$h_1(z) = A_3 e^{-j\beta_z z} + B_3 e^{+j\beta_z z} \quad (2.61)$$



รูปที่ 2.8 คิวตี้สี่เหลี่ยมมุมฉาก

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.8 จะประกอบด้วยสนามดังนี้

$$E_x = -\frac{1}{\epsilon} \frac{\partial F_z}{\partial y}$$

$$E_y = \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial F_z}{\partial x}$$

$$E_z = 0$$

(2.62)

เมื่อแทน

$$F_z(x, y, z) = f(x)g(y)h(z) \quad (2.63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อนำสมการที่ (2.63) ไปแทนในสมการของสนามไฟฟ้า E ทั้ง 3 สมการ และทำการแก้สมการหาขอบเขตที่สนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ที่ผิวสัมผัสของควาวิตีสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะได้ดังสมการที่ (2.64)

$$F_z(x, y, z) = A_{mnp} \cos(\beta_x x) \cos(\beta_y y) \sin(\beta_z z) \quad (2.64)$$

ที่ซึ่ง

$$\begin{aligned} \beta_x &= \frac{m\pi}{a} & m &= 0, 1, 2, \dots \\ \beta_y &= \frac{n\pi}{b} & n &= 0, 1, 2, \dots \\ \beta_z &= \frac{p\pi}{c} & p &= 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (2.65)$$

เมื่อ $m = n \neq 0$

$$\beta_x^2 + \beta_y^2 + \beta_z^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{c}\right)^2 = \beta_r^2 = \omega_r^2 \mu \epsilon = (2\pi f_r)^2 \mu \epsilon \quad (2.66)$$

$$(f_r)_{mnp}^{TE} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{c}\right)^2} \quad (2.67)$$

$$(f_r)_{mnp}^{TE} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{l}{a}\right)^2 + \left(\frac{l}{c}\right)^2} \quad (2.68)$$

$(f_r)_{mnp}$ คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของคลื่น โหมด TE_{mnp}^z

μ คือ ค่าเพอร์มิอิตีวี่

ϵ คือ ค่าเพอร์มิตติวี่

2.5.1 การหาขนาดของควาวิตีสี่เหลี่ยมผืนผ้า

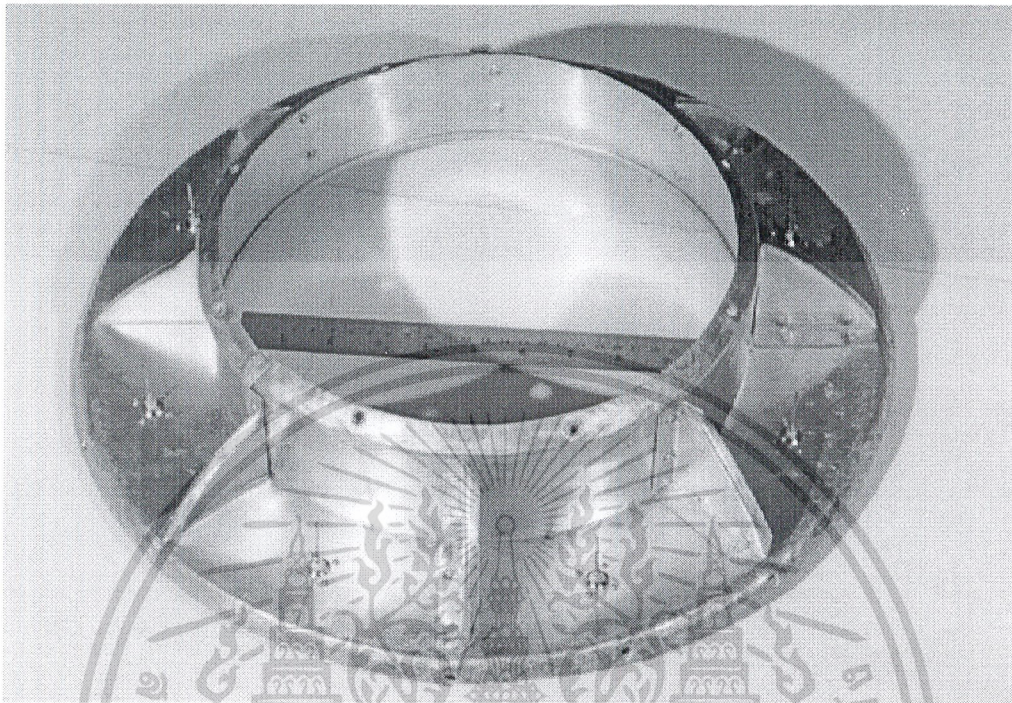
จากสมการที่ (2.68) พิจารณาความถี่เรโซแนนซ์ที่เท่ากับ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ จะคำนวณค่าขนาดของควาวิตีได้ดังนี้

ความยาว (c) = 13.88 เซนติเมตร

ความกว้าง (a) = 6.82 เซนติเมตร

ส่วน b กำหนดให้มีค่าเท่ากับ a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 รูปถ่ายควาวิตัวของสายอากาศ

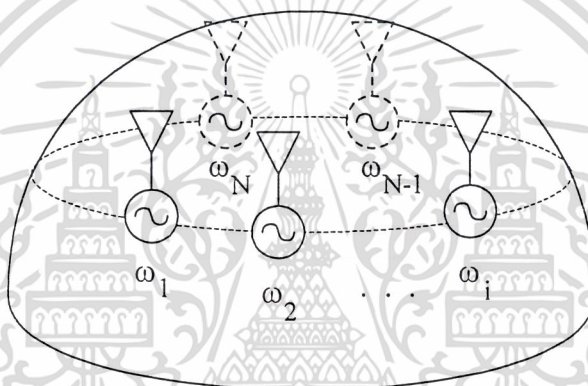
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

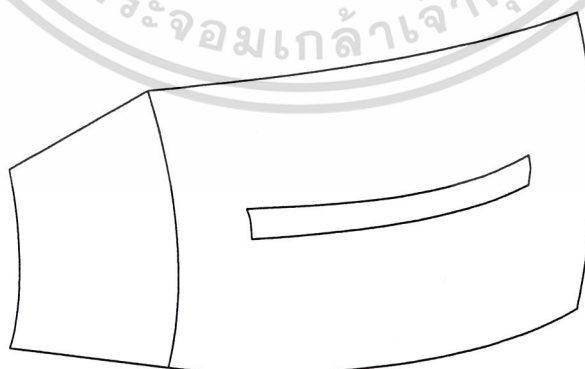
การออกแบบและการสร้าง

3.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์และผลเฉลยเชิงเส้น

พิจารณาการวิเคราะห์สายอากาศสล็อตอาร์เรย์โดยสล็อตมีความยาวครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น จำนวน 8 ร่อง วางอยู่บนผิวทรงกลมโดยตำแหน่งมุมในแนวตั้งของทรงกลมเป็น 45 องศา ค่ารัศมีของทรงกลมเป็นสองเท่าของความยาวคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งสล็อตแต่ละสล็อตจะถูกป้อนด้วยค่าวิคส์ส่วนของทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยที่ความถี่ที่ปฏิบัติการเป็น 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศแสดงค่าในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สายอากาศแอ็กทีฟสล็อตอาร์เรย์บนผิวทรงกลม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในวงจำกัดเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 3.2 สล็อตที่ป้อนด้วยส่วนของค่าวิคส์ส่วนนำทรงกลม
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศที่ใช้เป็นแบบจำลองการวิเคราะห์

ความถี่ที่ใช้ปฏิบัติการ	2450 เมกะเฮิรตซ์
ความยาวของร่อง	6.12 เซนติเมตร
จำนวนร่อง	8
มุมที่ตั้งของร่อง	45°
รัศมีของทรงกลม	24.48 เซนติเมตร

ในการออกแบบเพื่อให้ได้สายอากาศแพร่กระจายคลื่นเป็น 8 ลำคลื่นในแนวอน (ϕ_p) คือที่มุม $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ$, และ 315° ตามลำดับ โดยให้ลำคลื่นในแนวตั้ง (θ_p) ซึ่งตั้งที่มุม 45° ซึ่งจากความต้องการการปรับลำคลื่นดังกล่าวค่าเฟสที่สอดคล้องกับแต่ละองค์ประกอบจะคำนวณได้จากสมการ 3.1

$$\varphi_{ij} = -ka[\sin \theta_p \sin \theta_m \cos(\phi_p - \phi_{mn}) + \cos \theta_m \cos \theta_p] \quad (3.1)$$

โดยที่

- k คือ ค่าคงที่เฟสซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{2\pi}{\lambda}$
- a คือ ค่ารัศมีของการวางสลีต (spherical radius) เท่ากับ 2λ
- θ_m คือ ตำแหน่งของสลีตในระนาบมุมยก (elevation slot position) เท่ากับ 45°
- θ_p, ϕ_p คือ ตำแหน่งของลำคลื่นหลัก
- ϕ_{mn} คือ ตำแหน่งของสลีตในระนาบมุมกวาด (azimuth slot position) จำนวน 8 ร่อง เท่ากับ $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ$ และ 315°

และสามารถแสดงค่าเฟสที่คำนวณได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ค่าเฟสที่กระตุ้นให้แต่ละองค์ประกอบ

ตำแหน่งของสล็อต แต่ละตัว (ϕ_{mn}) \rightarrow								
มุมของลำคลื่นหลัก ในแนวนอน (ϕ_p) \downarrow	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
0°	0°	105.4°	0°	254.5°	0°	254.5°	0°	105.4°
45°	105.4°	0°	105.4°	0°	254.5°	0°	254.5°	0°
90°	0°	105.4°	0°	105.4°	0°	254.5°	0°	254.5°
135°	254.5°	0°	105.4°	0°	105.4°	0°	254.5°	0°
180°	0°	254.5°	0°	105.4°	0°	105.4°	0°	254.5°
225°	254.5°	0°	254.5°	0°	105.4°	0°	105.4°	0°
270°	0°	254.5°	0°	254.5°	0°	105.4°	0°	105.4°
315°	105.4°	0°	254.5°	0°	254.5°	0°	105.4°	0°

3.2 สายอากาศแอ็กทีฟสล็อตอาร์เรย์บนผิวทรงกลม

พิจารณาสวนควาวิตซ์ของสล็อตดังรูปที่ 3.2(ก) ซึ่งทำหน้าที่เป็นโหลดของอุปกรณ์แอ็กทีฟ (ในที่นี้หมายถึง FET) เพื่อให้เกิดการออสซิลเลต รูปที่ 3.1(ข) แสดงหลักการของการอินเจกชันในอาร์เรย์บนผิวตัวนำทรงกลมเพื่อป้อนเฟสให้กับสล็อตแต่ละสล็อตตามค่าจากตารางที่ 3.2 ออสซิลเลเตอร์แต่ละตัวจะต้องออสซิลเลตความถี่ในช่วงอินเจกชันแบนด์วิธ

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \omega_o \left[1 - \frac{1}{2Q} \sum_{j=1}^N \varepsilon_{ij} \frac{A_j}{A_i} \sin(\phi_{ij} + \varphi_{ij}) \right] \quad (3.2)$$

โดยที่

ω_o เป็น ค่าความถี่เชิงมุมอิสระของวงจรออสซิลเลเตอร์ (free-running angular frequency of the oscillator)

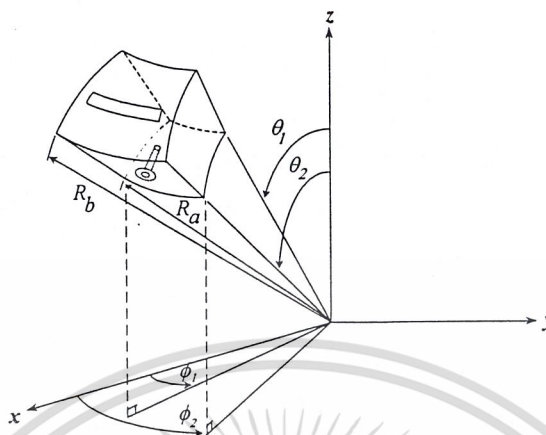
Q เป็น ค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรออสซิลเลเตอร์

ε_{ij} เป็น ค่าคัปปลิงระหว่างองค์ประกอบที่ i และ j

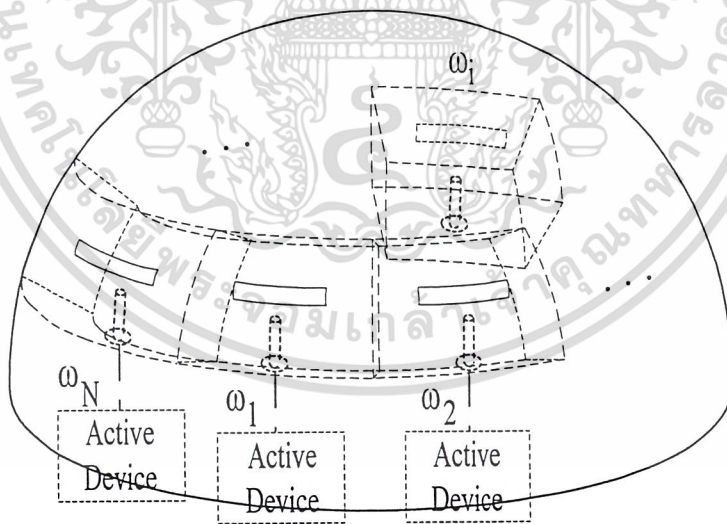
ϕ_{ij} เป็นค่าเฟสของสัญญาณที่จ่ายให้กับแต่ละองค์ประกอบ

φ_{ij} เป็นเฟสของค่าคัปปลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

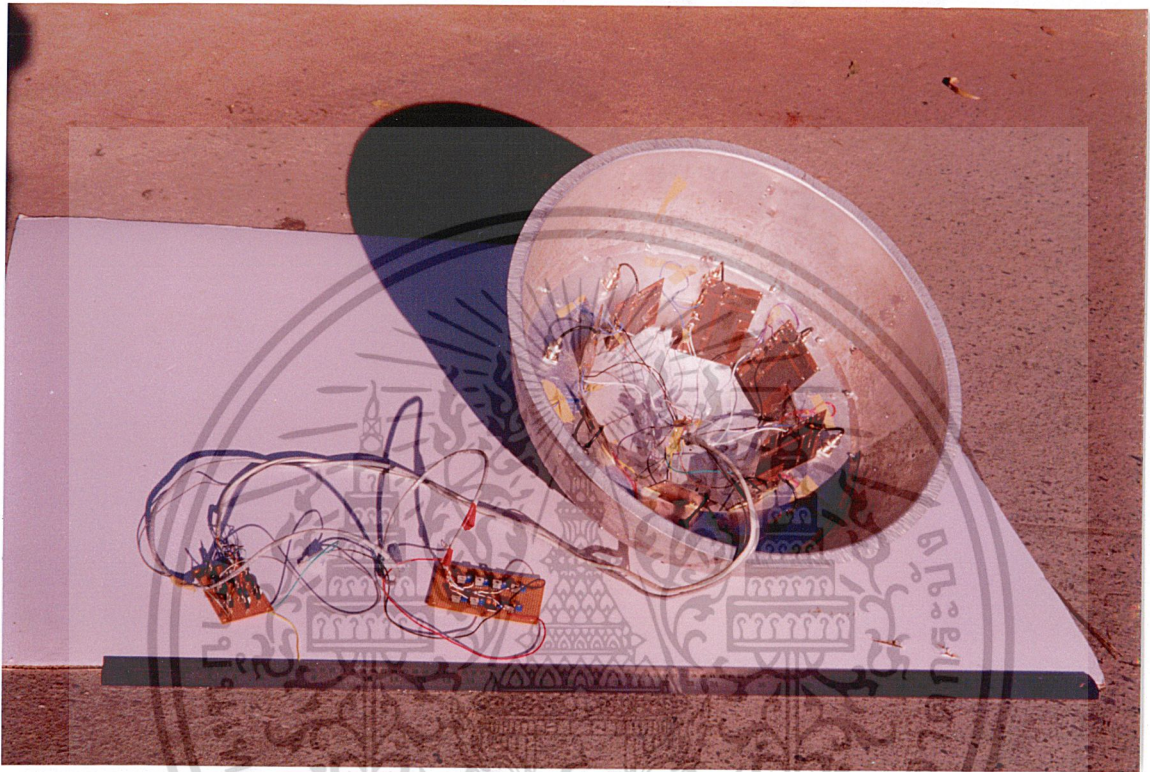


รูปที่ 3.3(ก) ส่วนกาวติดของสล็อต



รูปที่ 3.3(ข) สายอากาศแฉีกที่ฟลิตเตอร์เรย์บนผิวตัวนำทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 (ค) รูปถ่ายสายอากาศจริง

จากค่าเฟสตามตารางที่ 3.2 และค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรซึ่งเท่ากับ 206 (การคำนวณจะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อที่ 3.3.3) รวมทั้งค่าการมีมวลลัพท์ปลั่งระหว่างสล็อตที่ได้จากการวัด ทำการแทนค่าต่างๆในสมการที่ 3.2 จะทำให้ได้ค่าความถี่ที่จะใช้อินเจ็กให้กับวงจรออสซิลเลเตอร์ แต่ละตัวตามตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ค่าความถี่ที่ใช้อินเจกให้กับตัวสายอากาศ

มุมของลำคลื่นหลัก (ϕ_p)	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
ค่าความถี่ (GHz)								
f_1	2.449	2.451	2.450	2.449	2.451	2.449	2.450	2.451
f_2	2.450	2.450	2.450	2.451	2.450	2.450	2.451	2.450
f_3	2.452	2.451	2.450	2.451	2.450	2.451	2.451	2.450
f_4	2.459	2.451	2.452	2.449	2.452	2.450	2.449	2.452
f_5	2.452	2.449	2.450	2.452	2.448	2.452	2.450	2.449
f_6	2.449	2.451	2.449	2.449	2.450	2.451	2.450	2.450
f_7	2.450	2.4450	2.450	2.4450	2.450	2.451	2.450	2.450
f_8	2.451	2.450	2.450	2.451	2.450	2.451	2.451	2.449

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์

การออกแบบออสซิลเลเตอร์โดยใช้รีโซเนเตอร์ที่เป็นไมโครสตริปไลน์ และ GaAs MESFET เบอร์ 2SK571 เป็นส่วนของอุปกรณ์แอ็กทีฟ วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยมีค่า S พารามิเตอร์ที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ V_{DS} 3 โวลต์ และ I_{DS} 10 มิลลิแอมป์ ดังนี้

$$S_{11} \text{ เท่ากับ } 0.906 \angle -64$$

$$S_{12} \text{ เท่ากับ } 0.069 \angle 47$$

$$S_{21} \text{ เท่ากับ } 2.826 \angle 121$$

$$S_{22} \text{ เท่ากับ } 0.21 \angle 16.1$$

ทำการตรวจสอบค่าเสถียรภาพ(stability parameter: K) โดยที่ค่า K จะต้องน้อยกว่า 1 จาก

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|} \quad (3.3)$$

$$\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21} \quad (3.4)$$

จากสมการ (3.3) และ (3.4) จะได้ค่า $K = 0.31$ ซึ่งน้อยกว่า 1 ดังนั้นการทำงานของเฟทจะอยู่ในช่วงเสถียรภาพซึ่งสามารถกำเนิดความถี่ได้ ต่อจากนั้นทำการพล็อตวงกลมเสถียรภาพ (stability circle) เพื่อหาความเสถียรภาพในการออกแบบวงจรจากจุดศูนย์กลางและรัศมีของวงกลมเสถียรภาพของแหล่งจ่าย (source stability circle)

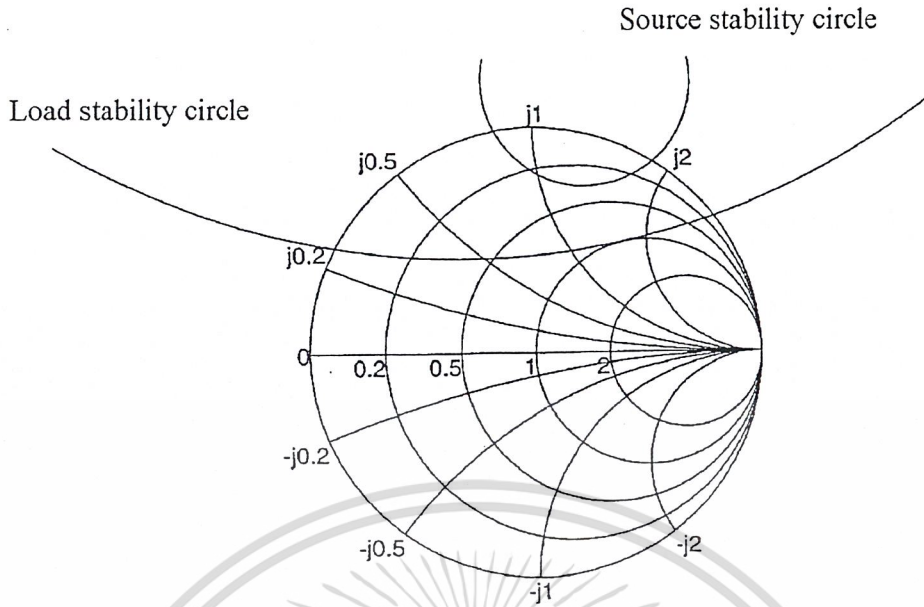
จุดศูนย์กลางวงกลมเสถียรภาพของแหล่งจ่าย

$$\Gamma_{SC} = \frac{S_{22}\Delta - S_{11}}{|\Delta|^2 - |S_{11}|^2} \quad (3.5)$$

รัศมีวงกลมเสถียรภาพของแหล่งจ่าย

$$R_{SC} = \frac{|S_{12}S_{21}|}{(|\Delta|^2 - |S_{11}|^2)} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 วงกลมเสถียรภาพ

จากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าวงกลมเสถียรภาพมีขนาดเล็กทำให้มีโอกาสเป็นไปได้ที่ Γ_{SC} ที่เลือก จะไม่อยู่ในส่วนที่ไม่เสถียรภาพ (unstable region) จึงต้องใช้ส่วนจินตภาพอนุกรม (series reactance: jX) ต่อที่ขาแหล่งจ่ายของเพทเพื่อจะทำให้ค่าของ S พารามิเตอร์เปลี่ยนไป (จาก 2 พอร์ตเป็น 3 พอร์ต) ซึ่งจะได้ค่า S พารามิเตอร์เป็น

$$S_{11} = \hat{S}_{11} - \frac{\hat{S}_{13}\hat{S}_{31}}{1 + \hat{S}_{33}} \tag{3.7}$$

$$S_{12} = \hat{S}_{12} - \frac{\hat{S}_{13}\hat{S}_{32}}{1 + \hat{S}_{33}} \tag{3.8}$$

$$S_{21} = \hat{S}_{21} - \frac{\hat{S}_{23}\hat{S}_{31}}{1 + \hat{S}_{33}} \tag{3.9}$$

$$S_{22} = \hat{S}_{22} - \frac{\hat{S}_{23}\hat{S}_{32}}{1 + \hat{S}_{33}} \tag{3.10}$$

จาก

$$\hat{S}_{11} = S_{11} + \frac{\sigma_{11}\sigma_{12}}{4 - \sigma} \tag{3.11ก}$$

$$\hat{S}_{12} = S_{12} + \frac{\sigma_{11}\sigma_{21}}{4 - \sigma} \tag{3.11ข}$$

$$\hat{S}_{13} = \frac{2\gamma_{11}}{4 - \sigma} \tag{3.11ค}$$

$$\hat{S}_{21} = S_{21} + \frac{\sigma_{12}\sigma_{22}}{4 - \sigma} \tag{3.12ก}$$

$$\hat{S}_{22} = S_{22} + \frac{\sigma_{21}\sigma_{22}}{4 - \sigma} \tag{3.12ข}$$

$$\hat{S}_{23} = \frac{2\sigma_{22}}{4 - \sigma} \tag{3.12ค}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไขหรือต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{S}_{31} = \frac{2\sigma_{12}}{4-\sigma} \quad (3.13ก)$$

$$\hat{S}_{32} = \frac{2\sigma_{21}}{4-\sigma} \quad (3.13ข)$$

$$\hat{S}_{33} = \frac{6}{4-\sigma} \quad (3.13ค)$$

และ

$$\sigma_{11} = 1 - S_{11} - S_{12} \quad (3.14ก)$$

$$\sigma_{12} = 1 - S_{11} - S_{21} \quad (3.14ข)$$

$$\sigma_{21} = 1 - S_{22} - S_{12} \quad (3.14ค)$$

$$\sigma_{22} = 1 - S_{22} - S_{21} \quad (3.14ง)$$

$$\sigma = S_{11} + S_{12} + S_{21} + S_{22} \quad (3.15)$$

พิจารณาวงจร 3 พอร์ต ถ้าส่วนจินตภาพอนุกรม (jX) ที่ต่อกับขาแหล่งจ่ายของเฟดต่อลงกราวน์ จะได้ค่า S พารามิเตอร์เป็น

$$S_{11} = \hat{S}_{11} - \frac{\hat{S}_{13}\hat{S}_{31}}{\hat{S}_{33} - \Gamma^{-1}} \quad (3.16ก)$$

$$S_{12} = \hat{S}_{12} - \frac{\hat{S}_{13}\hat{S}_{32}}{\hat{S}_{33} - \Gamma^{-1}} \quad (3.16ข)$$

$$S_{21} = \hat{S}_{21} - \frac{\hat{S}_{23}\hat{S}_{31}}{\hat{S}_{33} - \Gamma^{-1}} \quad (3.16ค)$$

$$S_{22} = \hat{S}_{22} - \frac{\hat{S}_{23}\hat{S}_{32}}{\hat{S}_{33} - \Gamma^{-1}} \quad (3.16ง)$$

โดยที่

$$\Gamma = \frac{(\bar{Z}_S - 1)}{(\bar{Z}_S + 1)} \quad (3.17)$$

ค่า \bar{Z}_S ที่เลือกใช้ มีขนาดเท่ากับ $-j0.2$ ที่ขาแหล่งจ่ายร่วม (common source) ทำให้ค่า S พารามิเตอร์เปลี่ยนไปดังนี้

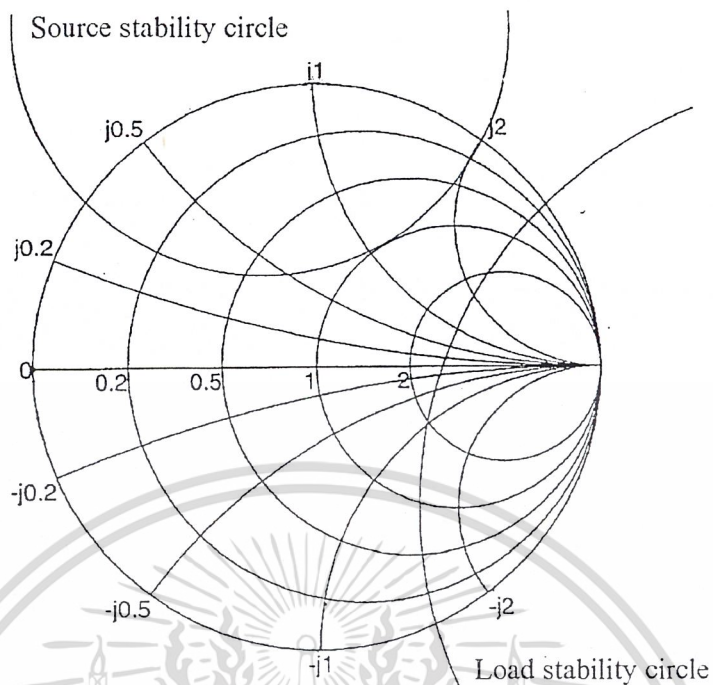
$$S_{11} \text{ เท่ากับ } 1.175 \angle -62.66$$

$$S_{12} \text{ เท่ากับ } 0.1270 \angle 7.3$$

$$S_{21} \text{ เท่ากับ } 3.0473 \angle 136$$

$$S_{22} \text{ เท่ากับ } 0.8288 \angle -48.5$$

จากค่า S พารามิเตอร์ใหม่ที่ได้นำไปคำนวณหาค่า K จะได้ $K = -0.1648$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 นำเอกสารไปพล็อตค่าวงกลมเสถียรภาพใหม่ได้ดังรูปที่ 3.5 การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 วงกลมเสถียรภาพใหม่

จากรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าวงกลมเสถียรภาพของแหล่งจ่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น จากนั้นทำการเลือกค่าของ Γ_S จากเงื่อนไข $|S_{11}| < 1$ จึงต้องเลือกค่า Γ_S อยู่ในวงกลมเสถียรภาพของแหล่งจ่าย และจากเงื่อนไข $|S_{22}| < 1$ ดังนั้น \bar{Z}_L จะต้องอยู่นอกวงกลมเสถียรภาพของโหลดเพื่อไม่ให้เสถียรภาพ ดังนั้นเลือก $\Gamma_S = 1 \angle 90^\circ$ (อยู่ในวงกลมเสถียรภาพของแหล่งจ่าย) แล้วนำไปคำนวณหา \bar{Z}_L จากสูตรอิมพีแดนซ์ของอินพุท

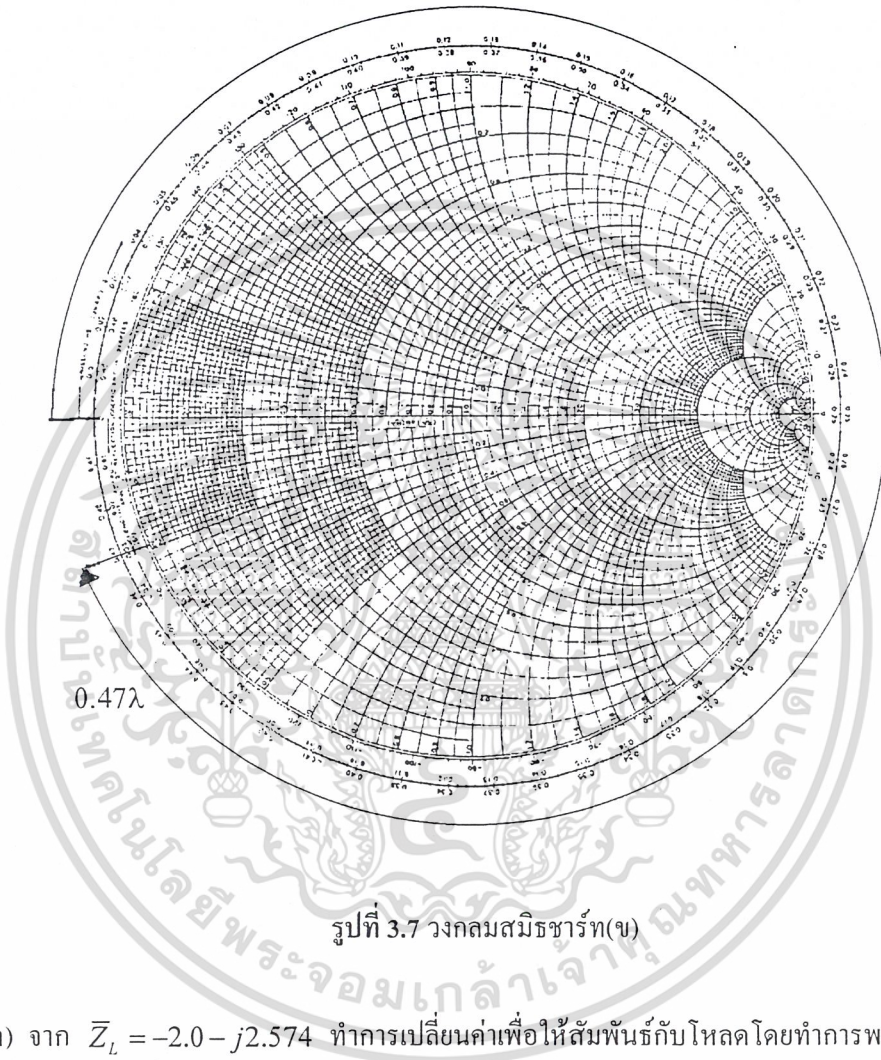
$$\Gamma_{out} = \frac{S_{22} - \Delta\Gamma_S}{1 - S_{11}\Gamma_S} \tag{3.18}$$

โดยที่ $\Gamma_S = 1 \angle 90^\circ$ (สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแหล่งจ่าย)
จะได้

$$\bar{Z}_L = \frac{(1 + \Gamma_{out})}{(1 - \Gamma_{out})} \tag{3.19}$$

ดังนั้น เอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและข้อมูลไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) จาก $\bar{Z}_S = -j0.2$ หาความยาวของซ็อตสตัดป์โดยวนสมิธชาร์ทในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (toward generator) แสดงได้รูปที่ 3.7 จะได้ความยาวเท่ากับ 0.47λ



รูปที่ 3.7 วงกลมสมิธชาร์ท(ข)

(ค) จาก $\bar{Z}_L = -2.0 - j2.574$ ทำการเปลี่ยนค่าเพื่อให้สัมพันธ์กับโหลดโดยทำการพล็อตค่าในสมิธชาร์ท จะได้ \bar{Z}_L ใหม่คือ $-2.0 + j2.574$ และเพื่อให้วงจรทำงานได้เสถียรภาพมากยิ่งขึ้น ทำการเลือกจาก

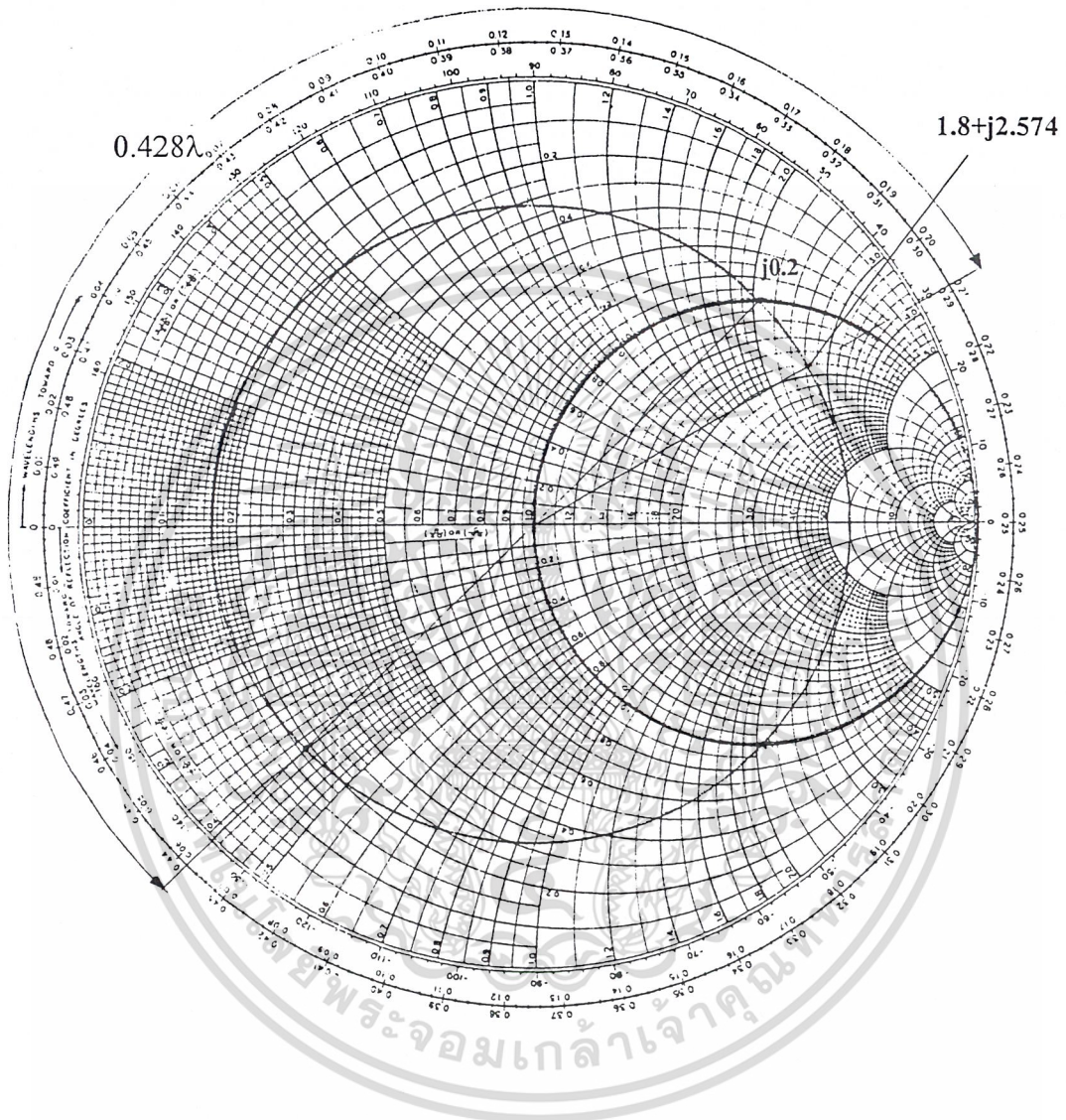
$$\bar{Z}_L = X + jY \quad (3.21)$$

เมื่อ

$$X < \text{Re}(\bar{Z}_L) \text{ และ } Y = \text{Im}(\bar{Z}_L)$$

เอกสารนี้เป็นดั่งนั้นจะได้ \bar{Z}_L ใหม่เท่ากับ $1.8 + j2.574$ ทำการแมตช์กับโหลด 50Ω แสดงได้คั้งสมิธชาร์ทไม่รูปที่ 3.8 โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ แปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

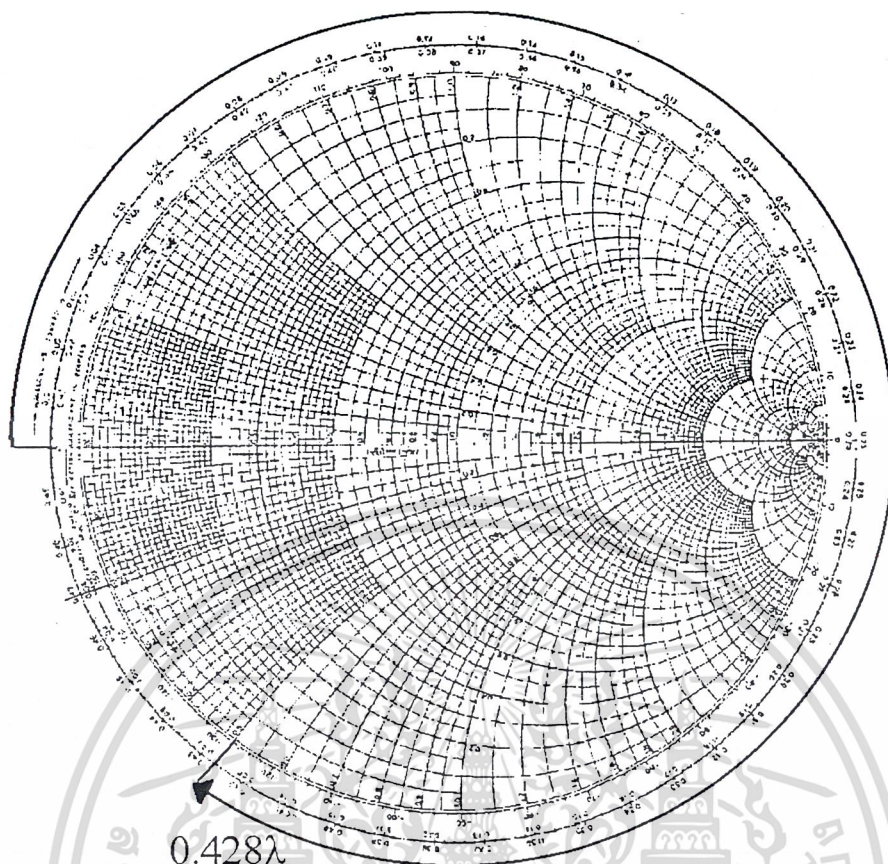
(ก) เป็นส่วนของสายส่งซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 0.27λ



รูปที่ 3.8 วงกลมสมิทชาร์ท(ก)

(ข) เป็นส่วนของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกัน มีค่าเท่ากับ $j2.0$ ทำการเปลี่ยนเป็นการต่อแบบอนุกรม มีค่าเท่ากับ $-j0.5$ แล้วนำไปพล็อตลงในสมิทชาร์ทเพื่อหาความยาวของสตัปแบบเปิดวงจรในรูปของคอนดักแตนซ์ L ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งจะได้ความยาวสตัปเท่ากับ 0.428λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 วงกลมสมิทซาร์ท(ง)

(ง) ส่วนไบอัสไลน์ (bias line) เลือกใช้สายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 75Ω โดยมีความยาว เท่ากับ $\frac{1}{4}\lambda$

3.3.2 การหาความกว้างของไมโครสตริป

วงจรถูกออกแบบบนไมโครสตริปที่มีเทฟลอน (teflon) เป็นสับสเตรด (substrate) มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.45 จากทฤษฎีของไมโครสตริปที่กล่าวถึงในบทที่ 2 อักษรสมการที่ (2.45-2.47) แทนค่าต่างๆดังต่อไปนี้

$$\epsilon_r = 2.45$$

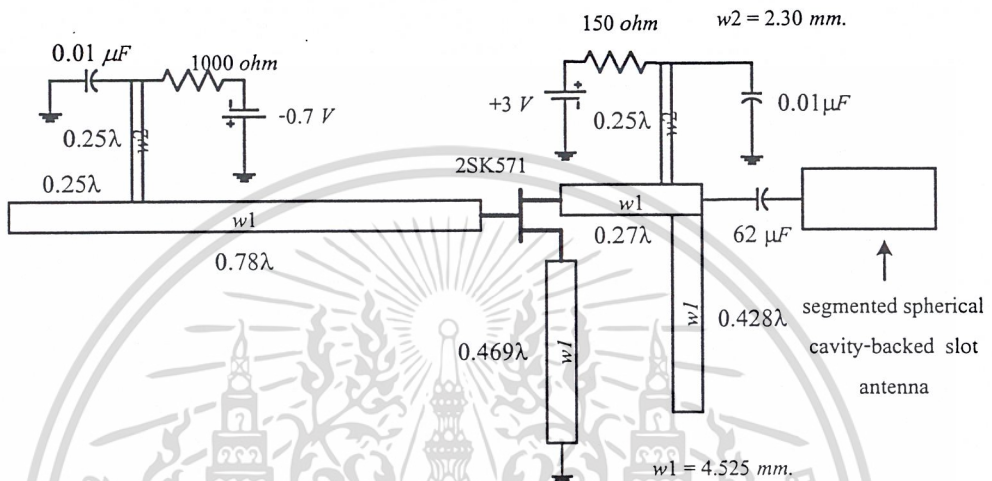
$$Z_0 = 50 \Omega$$

$$h = 1.6 \text{ mm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ความกว้างของไมโครสตริปที่ $Z_o = 50 \Omega$ เท่ากับ $W_1 = 4.525 \text{ mm}$ ส่วนกรณีที่ต้องการสายส่งที่ $Z_o = 75 \Omega$ จะได้ $W_2 = 2.30 \text{ mm}$

จากขั้นตอนการคำนวณและออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์ข้างต้นสามารถแสดงรูปวงจรได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรออสซิลเลเตอร์

3.3.3 การคำนวณค่าตัวประกอบคุณภาพ

การคำนวณค่าตัวประกอบคุณภาพ ก็คือการคำนวณค่า Q ของส่วนรีโซเนเตอร์ของวงจรออสซิลเลเตอร์ ซึ่งได้ทำการออกแบบวงจรนี้โดยใช้สายส่งไมโครสตริปทำหน้าที่เป็นส่วนของรีโซเนเตอร์ จาก

$$Q = \frac{WL}{R} = \frac{\pi}{2\alpha l} = \frac{\beta}{2\alpha} \tag{3.22}$$

การสูญเสียจากตัวนำ

$$\alpha = \frac{R_s}{Z_o W} \quad (\text{N}_p/m) \tag{3.23}$$

เมื่อ

Z_o เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งไมโครสตริป

W เป็นความกว้างของสายส่งไมโครสตริป ศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_s = \sqrt{\frac{W\mu_o}{2\sigma}} \quad (3.24)$$

เมื่อ

σ เป็นค่าคอนดักติวิตี (conductivity) ของทองแดงเท่ากับ $5.813 \times 10^7 \text{ S/m}$

μ_o เป็นค่าเพอมีอาบิลิตีอิสระ (permeability of free-space) เท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

ดังนั้นจะได้

$$R_s = 1.84 \times 10^{-2} \text{ } \Omega$$

แทนค่า R_s ลงใน (3.23)

$$\alpha = \frac{1.84 \times 10^{-2}}{50 \times 2.865 \times 10^{-3}} = 0.128 \text{ N}_p/m$$

จากสมการ (3.22) จะได้

$$Q = \frac{\pi}{(2) \times (0.128) \times (59.51 \times 10^{-3})} = 206.21$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การทดลองวัดการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์

จากค่าเฟสตามตารางที่ 3.2 ตัวประกอบคุณภาพ และค่ามิวชวลคัปปลิงทั้งหมดที่ได้กล่าวมาแล้ว ในบทที่ผ่านมา ทำให้เราทราบว่าแต่ละทิศทางในระนาบมุมกวาดของลำคลื่นหลัก (ϕ_p) จะต้องมีการจ่าย สัญญาณความถี่ให้กับสล็อตแต่ละตัวด้วยความถี่ค่าต่างกัน ดังแสดงค่าความถี่ในตารางที่ 3.3 โดยใช้ วงจรออสซิลเลเตอร์ทั้งหมด 8 ตัว ซึ่งได้ทำการทดสอบการทำงานของวงจรโดยใช้เครื่องวิเคราะห์แถบ ความถี่ (spectrum analyzer) สามารถจัดการทดลองได้ดังรูปที่ 4.1

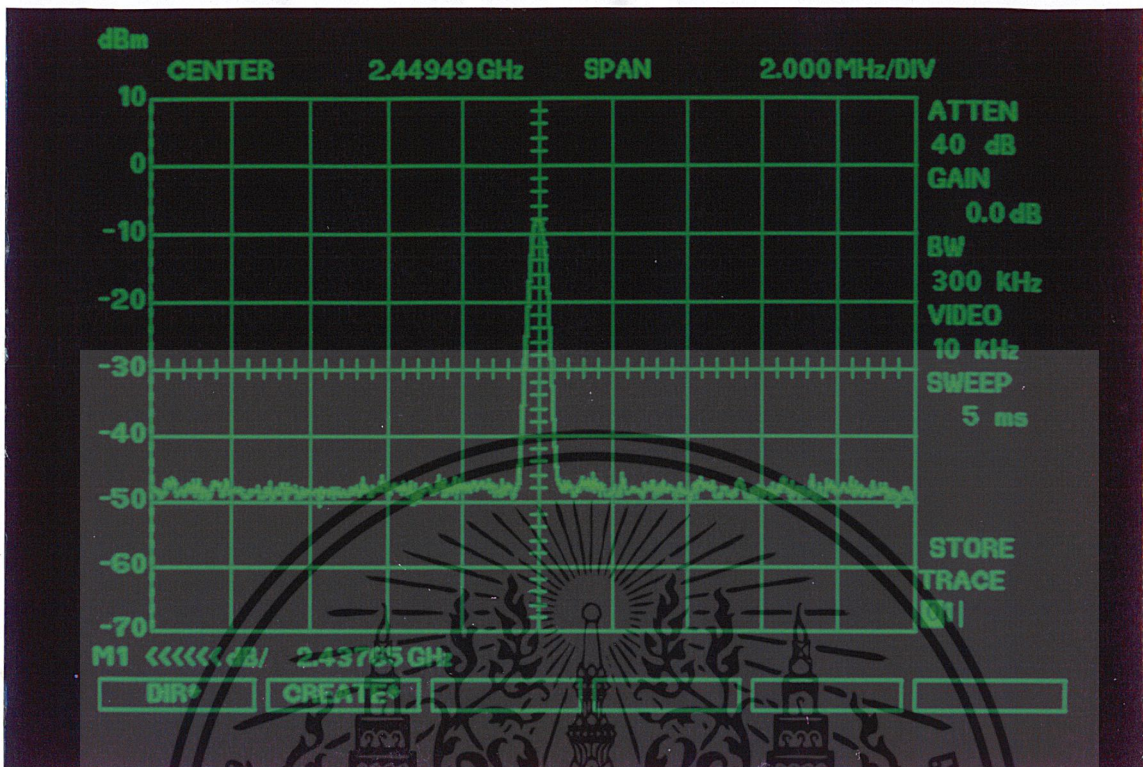


รูปที่ 4.1 การทดลองวัดคุณสมบัติของออสซิลเลเตอร์

จากการทดลองวัดคุณสมบัติของวงจรออสซิลเลเตอร์ โดยกำหนดให้มุมในระนาบมุมกวาดของ ลำคลื่นหลัก (ϕ_p) อยู่ที่ตำแหน่ง 0° และ 45° ความถี่ที่ออสซิลเลเตอร์ทั้ง 8 ตัวเกิดการออสซิลเลตแสดง ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์

f (GHz)	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8
\rightarrow								
$(\phi_p) \downarrow$								
0°	2.449	2.450	2.452	2.449	2.452	2.449	2.450	2.451
45°	2.451	2.450	2.451	2.451	2.450	2.451	2.450	2.450



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างการแสดงผลการออกสิจลเสตทางหน้าจอเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่

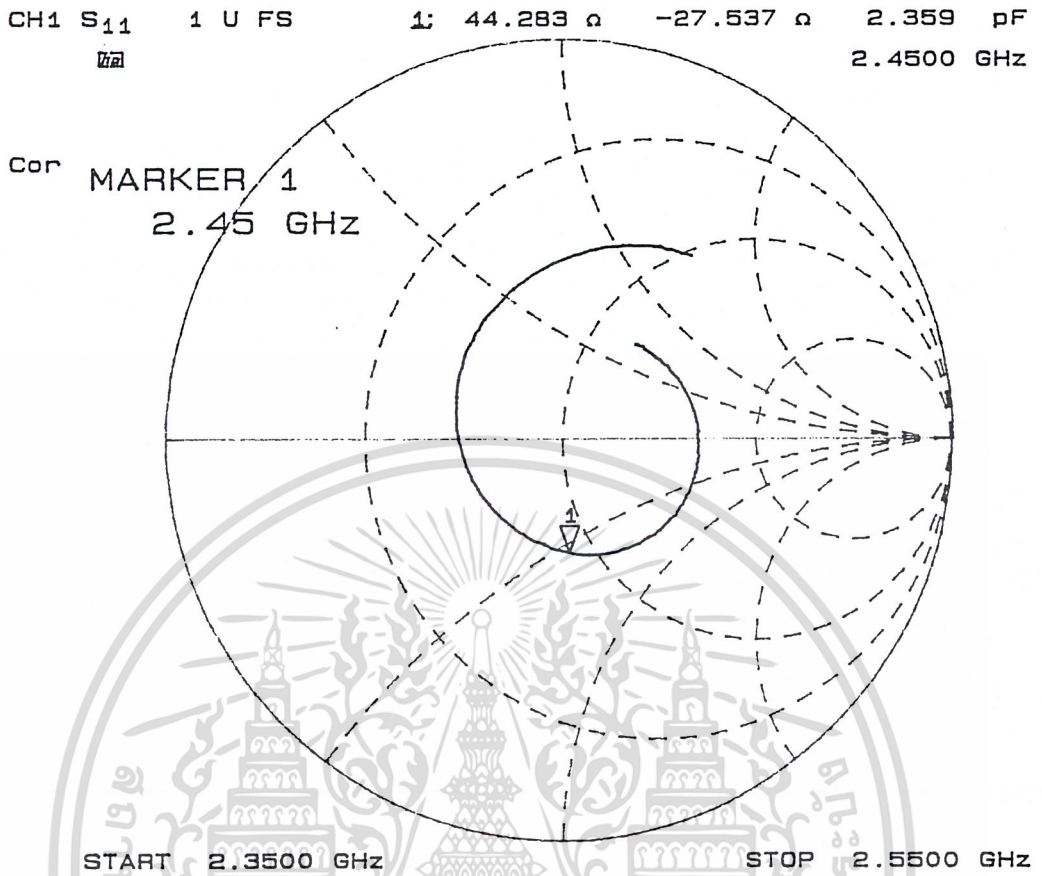
4.2 การทดลองวัดคุณสมบัติของสายอากาศ

4.2.1 การทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

ในการต่อสายอากาศเข้ากับวงจรออกสิจลเสเตอร์จะต้องออกแบบให้พารามิเตอร์วงจรสัมพันธ์กับค่าอิมพีแดนซ์ของสล็อตแต่ละตัวซึ่งทำหน้าที่เป็น โหลดของวงจร

จากการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสล็อตโดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer) จะได้ตัวอย่างผลการวัดดังรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าอิมพีแดนซ์ของสล็อตตัวอย่างมีค่าเท่ากับ $44.28 - j27.5 \Omega$ ที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์

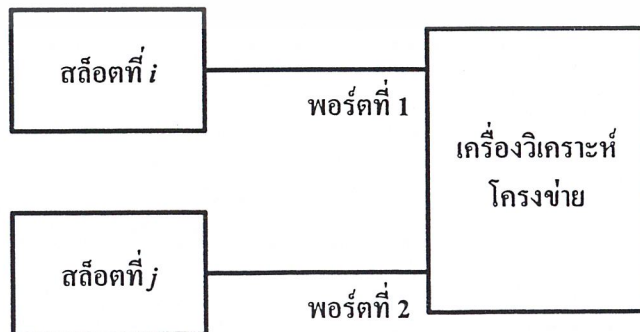
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสล็อต

4.2.2 การทดลองวัดค่ามิวชวลคัปปลิง

ในการหาค่าความถี่ที่จะใช้ป้อนให้กับสล็อตแต่ละตัวที่ตำแหน่งลำคลื่นหลักต่างๆ กัน จะต้องอาศัยค่ามิวชวลคัปปลิงระหว่างสล็อตต่างๆ ซึ่งสามารถทำการวัดได้โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 4.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปลงหรือเผยแพร่ข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

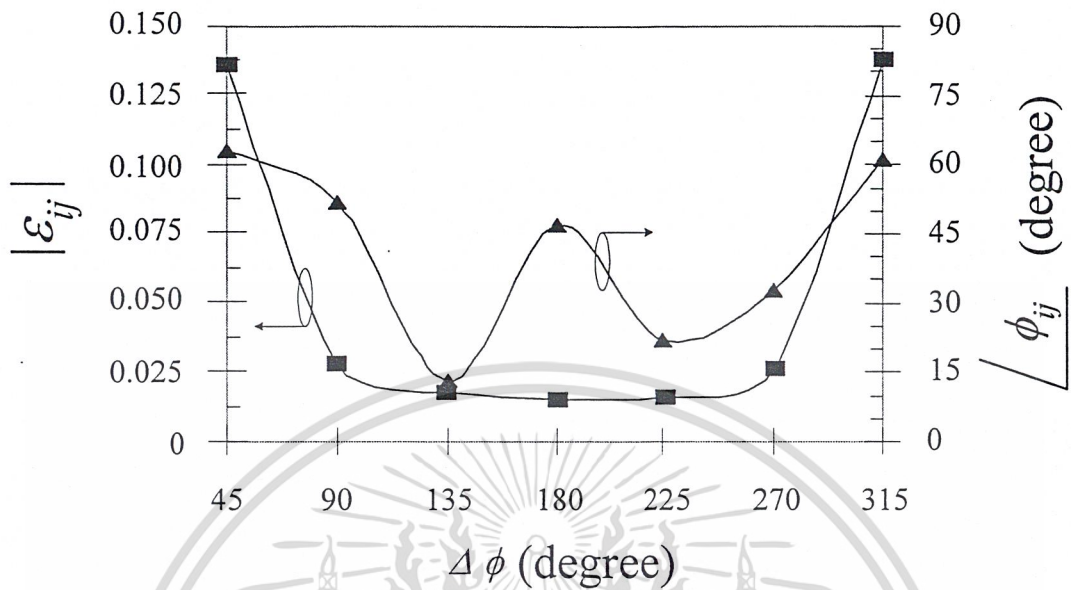
รูปที่ 4.4 การทดลองวัดค่ามิวชวลคัปปลิง

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่ามิวซลคัปปลิ่งระหว่างสล็อตต่างๆ

ค ระหว่าง อง ก ประกอบ ที่	1 ^a	2	3	4	5	6	7	8
1	0	-21∠130	-35∠158	-36∠165	-37∠135	-36∠107	-39∠139	-16∠131
2	-20∠101	0	-17∠67	-25∠101	-27∠26	-33∠77	-35∠-134	-26∠144
3	-28∠-146	-14∠73	0	-14∠126	-33∠162	-36∠47	-38∠75	-39∠74
4	-38∠-123	-33∠27	-16∠137	0	-15∠160	-30∠-178	-38∠157	-39∠103
5	-37∠115	-33∠27	-32∠152	-17∠168	0	-16∠153	-36∠161	-38∠76
6	-39∠140	-36∠89	-38∠158	-30∠-165	-19∠148	0	-25∠125	-37∠145
7	-39∠139	-35∠134	-36∠57	-38∠157	-36∠161	-25∠125	0	-18∠99
8	-17∠150	-26∠144	-39∠74	-39∠103	-36∠96	-38∠122	-15∠103	0

จากนั้นนำค่ามิวซลคัปปลิ่ง S_{ij} ของแต่ละเอเลเมนต์ในอาร์เรย์ที่วัดได้ตามตารางที่ 4.2 มาหาค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิ่งระหว่างองค์ประกอบแต่ละตัวซึ่งสามารถแสดงผลโดยพล็อตในรูปของ ϵ_{ij} ดังกราฟรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



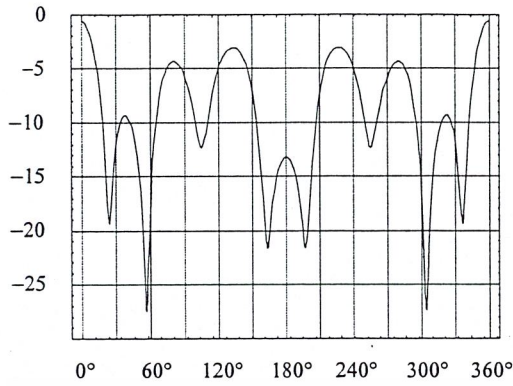
รูปที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงระหว่างสลีตบนผิวทรงกลม

4.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

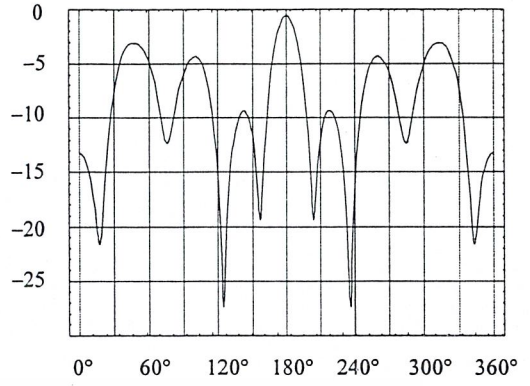
4.3.1 การคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

จากการออกแบบสายอากาศกำหนดให้สายอากาศสามารถกวาดลำคลื่นไปได้โดยรอบแปดทิศทาง แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นตามทฤษฎีได้ทำการคำนวณ และแสดงให้เห็นการเปลี่ยนทิศทางในระนาบมุมกวาดตั้งรูปที่ 4.6 (ก)-4.6 (ข) ส่วนรูปที่ 4.7 เป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกที่ทำมุม 45 องศา โดยที่แกนตั้งของกราฟแสดงค่าแอมพลิจูดสัมพัทธ์และแกนนอนแสดงมุมของลำคลื่น

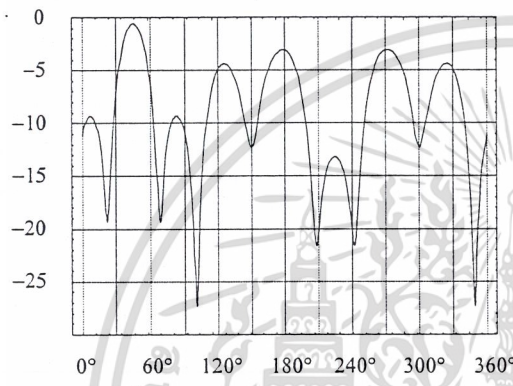
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



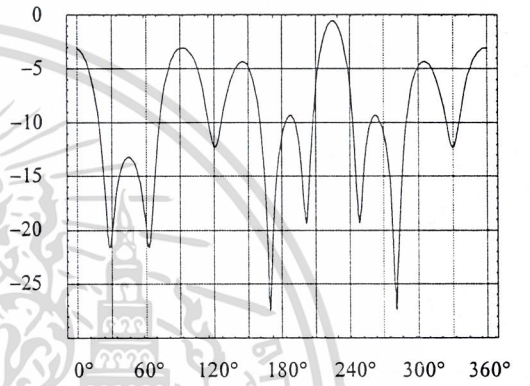
รูปที่ 4.6 (ก) $\phi_p = 0^\circ$



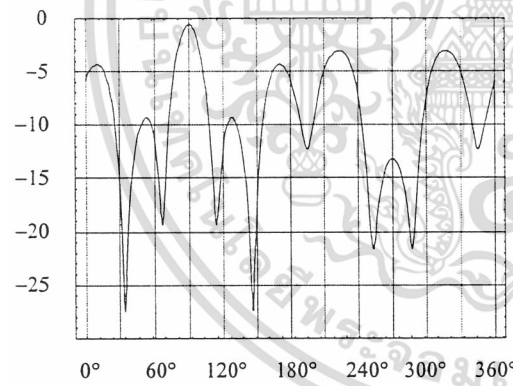
รูปที่ 4.6 (จ) $\phi_p = 180^\circ$



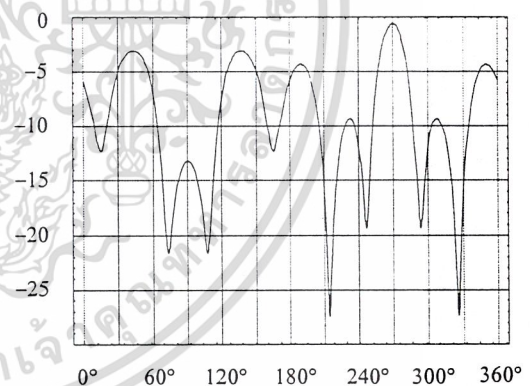
รูปที่ 4.6 (ข) $\phi_p = 45^\circ$



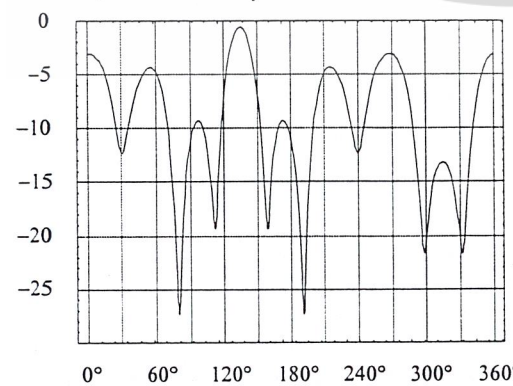
รูปที่ 4.6 (ฉ) $\phi_p = 225^\circ$



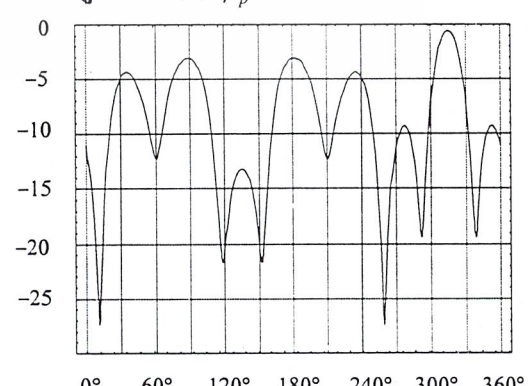
รูปที่ 4.6 (ค) $\phi_p = 90^\circ$



รูปที่ 4.6 (ช) $\phi_p = 270^\circ$

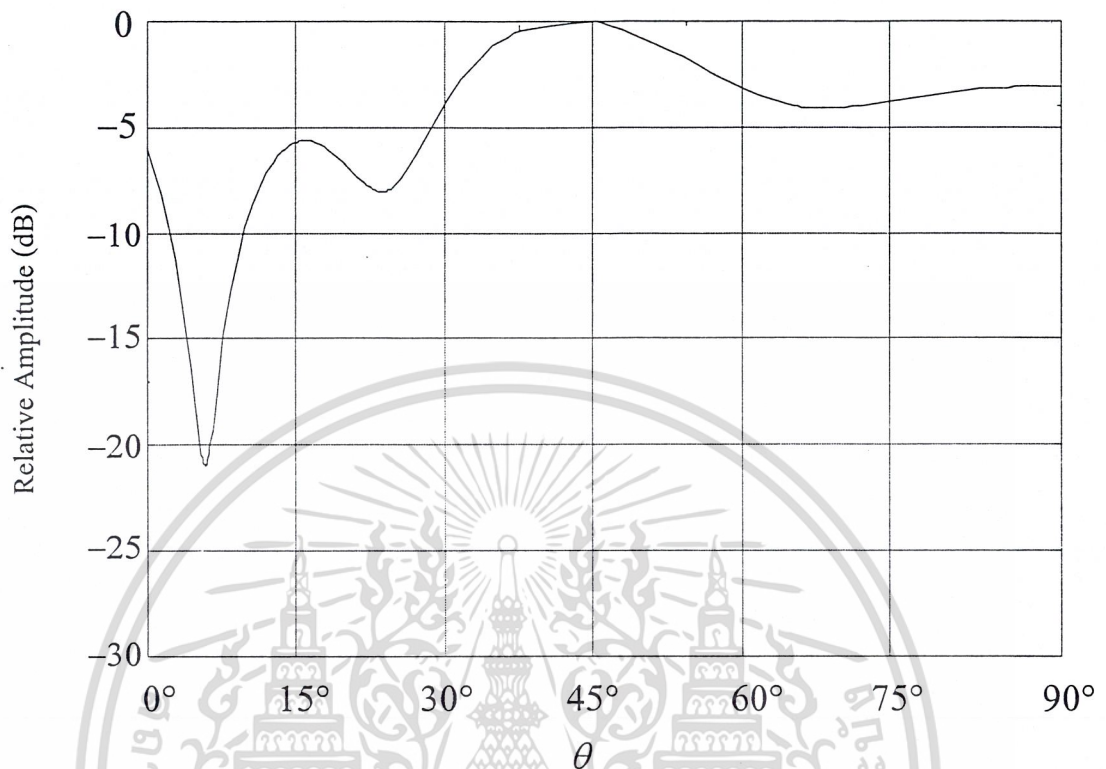


รูปที่ 4.6 (ง) $\phi_p = 135^\circ$ ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น



รูปที่ 4.6 (ซ) $\phi_p = 315^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 รูปที่ 4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นตามทฤษฎีทั้ง 8 ทิศทาง ในระบบมุมกวาด

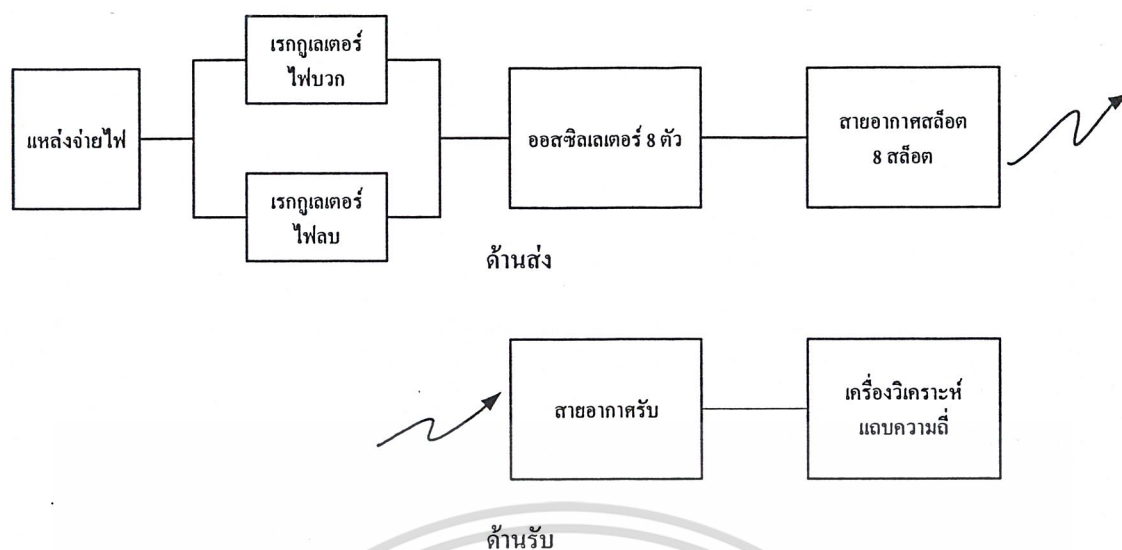


รูปที่ 4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นตามทฤษฎีในระนาบมุมยก

4.3.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ในปฏิญานาพินธ์ฉบับนี้ เพื่อทำการทดสอบว่าสายอากาศสามารถทำงานได้จริงตามทฤษฎีที่ว่าค่าเฟสที่เปลี่ยนไปทำให้ตำแหน่งของลำคลื่นหลักเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อป้อนความถี่ให้กับสล็อตทั้ง 8 ตัวจำนวน 2 ชุด โดยความถี่ชุดแรกต้องการให้ตำแหน่งของลำคลื่นหลักอยู่ที่ 0 องศา และชุดที่สองตำแหน่งของลำคลื่นหลักอยู่ที่ 45 องศา โดยจัดการทดลองดังรูปที่ 4.8

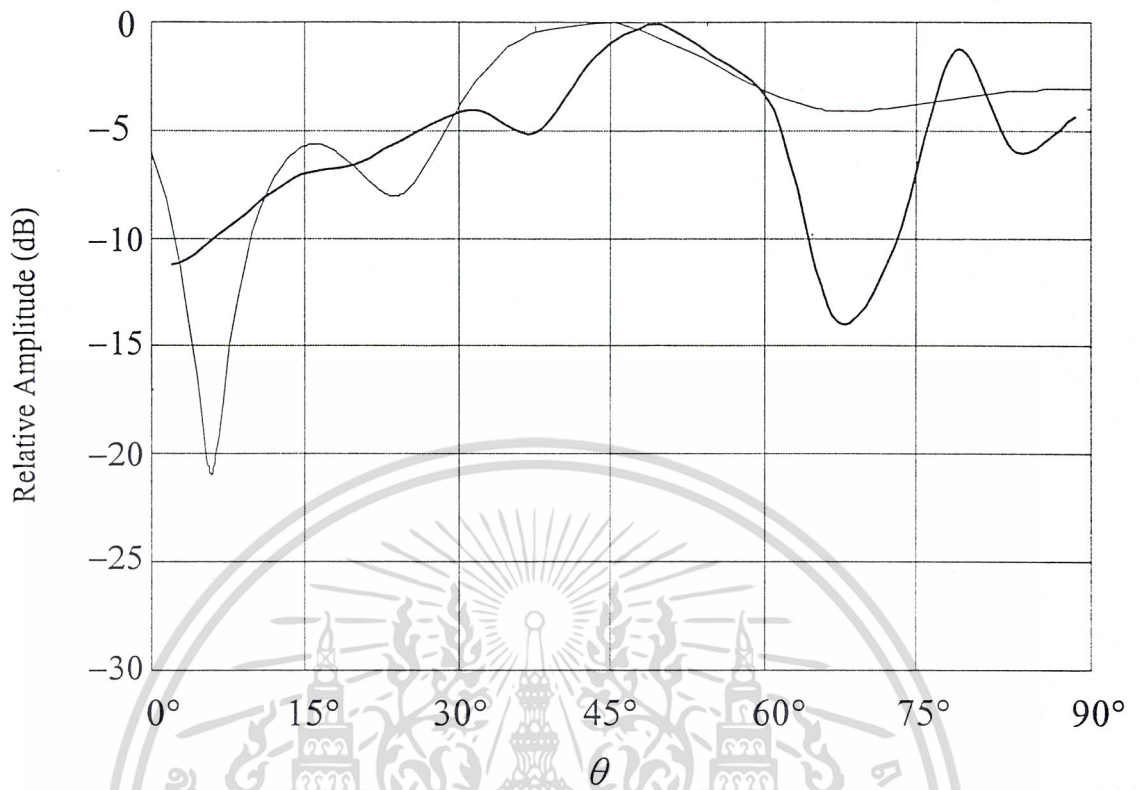
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 การทดลองวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

จากรูปที่ 4.8 ป้อนสัญญาณไฟเลี้ยงวงจรผ่านวงจรเรกกูเลเตอร์ (regulator) ให้กับวงจรออสซิลเลเตอร์ทั้ง 8 ตัว เพื่อออสซิลเลตความถี่ให้กับสายอากาศสล็อตทั้งแปด สายอากาศแอ็กทีฟสล็อตอาร์เรย์นี้จะทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง ทางด้านสายอากาศรับ ใช้สายอากาศปากแตรต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ แล้วอ่านค่าระดับสัญญาณที่สายอากาศรับได้ที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิรตซ์ นำค่าที่ได้ไปพล็อตเป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งในระนาบมุมกวาด (azimuth plane) และระนาบมุมยก (elevation plane) ได้ดังรูปที่ 4.9 และ รูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



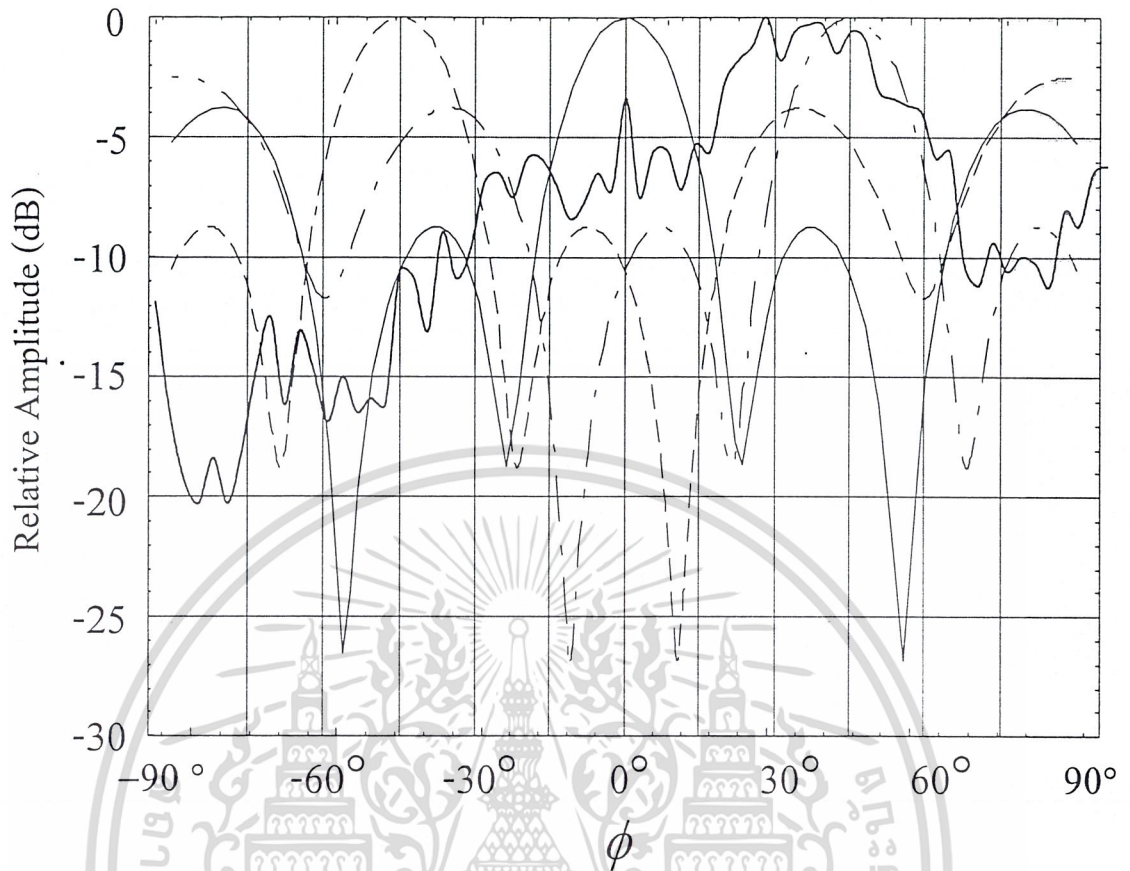
รูปที่ 4.9 (ข)

รูปที่ 4.9 แบบรูปการแพร่กระจายเมื่อกำหนดความถี่ให้มุมของลำคลื่นหลักอยู่ที่ตำแหน่ง 0°

(ก) ในระนาบมุมกวาด (azimuth plane)

(ข) ในระนาบมุมยก (elevation plane)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อกำหนดความถี่ให้มุมของลำคลื่นหลักอยู่ที่ตำแหน่ง 45°

โดยที่

- ผลจากการคำนวณที่มุม $\phi_p = 0^\circ$
- - - - - ผลจากการคำนวณที่มุม $\phi_p = 45^\circ$
- · - · - · - ผลจากการคำนวณที่มุม $\phi_p = -45^\circ$
- ผลจากการทดสอบที่มุม $\phi_p = 45^\circ$

จากผลการทดสอบจะเห็นว่าแม้ทิศทางการชี้ของลำคลื่นจะไม่ตรงพอดีกับตำแหน่งที่ออกแบบไว้ตามทฤษฎี แต่ลำคลื่นหลักก็สามารถเปลี่ยนทิศทางไปได้จริง ทำให้มั่นใจว่าหลักการที่นำเสนอจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง ส่วนในระนาบมุมยก ลำคลื่นหลักมีทิศทางชี้ที่มุม 45° เพียงทิศทางเดียวไม่ว่าจะกวาดลำคลื่นในระนาบมุมกวาดไปในทิศทางใดก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์

สายอากาศแอ็กทิฟสล็อตอาร์เรย์บนผิวทรงกลมในปริภูมิตวินพารามิเตอร์ที่ซึ่งออกแบบไว้ที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ เป็นการนำเสนอสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ที่มีกลไกการปรับลำคลื่นแบบแอ็กทิฟซึ่งเป็นกลไกที่สามารถควบคุมทิศทางของลำคลื่นหลักจากการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของวงจรรออสซิลเลเตอร์ กล่าวคือค่าเฟสของสัญญาณที่จ่ายให้กับสล็อตทั้งแปดของสายอากาศมีผลทำให้ตำแหน่งของลำคลื่นหลักเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางต่างๆกันโดยวิธีการอินเจกชันล็อกกิง (injection locking) ซึ่งวงจรรออสซิลเลเตอร์ที่จ่ายสัญญาณให้กับองค์ประกอบแต่ละตัวถูกออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ต่างๆกัน ดังนั้นการปรับลำคลื่นหลักไปยังทิศทางใดๆ สามารถทำได้ง่ายเพียงการเปลี่ยนค่าความถี่ของวงจรรออสซิลเลเตอร์ ค่าตัวประกอบคุณภาพ และค่ามิวชวลคัปปลิงทั้งหมดสามารถคำนวณหาค่าความถี่ที่ใช้อินเจกชันให้กับตัวสายอากาศที่มีสล็อตทั้งหมด 8 สล็อต ซึ่งวางตัวกันอย่างเหมาะสมบนผิวทรงกลมเพื่อให้ได้เงื่อนไขที่ใช้จำนวนเฟสน้อยที่สุด

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเปลี่ยนชุดความถี่ของสัญญาณที่จ่ายให้กับสล็อตทั้งแปดสล็อตในแนวมุมกวาดทิศทางของลำคลื่นหลักสามารถปรับได้ ส่วนในระนาบมุมถูกกำหนดให้ลำคลื่นหลักทำมุมคงที่ที่ 45 องศาจากแนวตั้งฉาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนผิวทรงกลมนี้สามารถกวาดลำคลื่นได้โดยการเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณอออสซิลเลเตอร์ที่ทำหน้าที่จ่ายสัญญาณให้กับสายอากาศ

สายอากาศในปริภูมิตวินพารามิเตอร์นี้ถูกออกแบบและทดลองสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบจากการทดลองพบว่าผลที่ได้ยังไม่เป็นที่น่าพอใจนักเนื่องจากความยุ่งยากในการปรับเปลี่ยนค่าความถี่ของวงจรรออสซิลเลเตอร์ อย่างไรก็ตามผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหลักการปรับลำคลื่นนี้ใช้งานได้จริง

เมื่อพิจารณาจากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทางทฤษฎีที่ได้ เมื่อทิศทางของลำคลื่นหลักเกิดการเปลี่ยนแปลงไปปฏิบัติงานในช่วงการเปลี่ยนทิศทางจะมีค่าลดต่ำลงมาก ดังนั้นแนวทางการพัฒนาอาจทำได้โดยการเพิ่มจำนวนทิศทางของลำคลื่นหลักจาก 8 ทิศทางเป็น 16 ทิศทาง นอกจากนี้ข้อมูลค่าอิมพีแดนซ์ของสล็อตบนผิวควิวดีทรงกลม และค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงระหว่างสล็อตซึ่งเป็นข้อมูลที่จำเป็นในการออกแบบสายอากาศเป็นค่าที่ได้จากการวัดจริง การศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลเหล่านี้เพิ่มเติมจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการปรับปรุงสายอากาศให้มีประสิทธิภาพในการทำงานดีขึ้น และการทำงานของสายอากาศยังขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของวงจรรออสซิลเลเตอร์และวิธีการควบคุมความถี่ของสัญญาณที่วงจรจ่ายให้กับสายอากาศซึ่งสามารถปรับปรุงและพัฒนาให้ดีขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

デバイス

MES形電界効果トランジスタ
MES Field Effect Transistor

2SK571

ภาคผนวก ข.

ตารางข้อมูล (data sheet) ของ GaAs MESFET เบอร์ 2SK571

NチャネルGaAs MES電界効果トランジスタ

VHF-Cバンド低雑音増幅用

N-Channel GaAs MES FET
VHF-C Band Low Noise Amplifier

2SK571はVHF-Cバンドまでの低雑音増幅用、C-Xバンドまでの発振用として設計されたNチャネルGaAs MES (Metal Semiconductor) FETです。
for LNA in sked VHF-C band or C-X band OSC

外形図/PACKAGE DIMENSIONS
(Unit: mm)

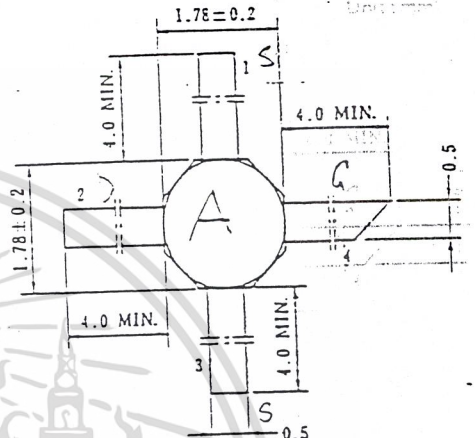
特長/FEATURE

OVHF-Cバンドで低雑音かつ高利得です。

NF 0.8 dB TYP. Ga 12 dB TYP. @f=4 GHz
NF 2.0 dB TYP. Ga 8.5 dB TYP. @f=8 GHz

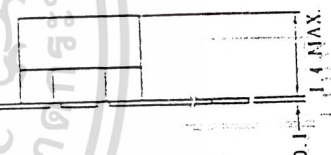
絶対最大定格/ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Ta=25 °C)

項目	記号	定格	単位
ドレイン・ソース間電圧	V _{DS}	5	V
ゲート・ドレイン間電圧	V _{GDO}	-6	V
ゲート・ソース間電圧	V _{GSO}	-6	V
ドレイン電流	I _D	150	mA
全損失	P _T	300	mW
チャンネル温度	T _{ch}	125	°C
保存温度	T _{stg}	-65 ~ 125	°C
ゲート電流	I _G	±0.3	mA



電極接続

- 1. Source
- 2. Drain
- 3. Source
- 4. Gate



電気的特性/ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Ta=25 °C)

項目	記号	条件	MIN.	TYP.	MAX.	単位	
ゲート・ソース間流れ電流	I _{GSO}	V _{GS} = -5 V			10	μA	
ドレイン電流	I _{DSS}	V _{DS} = 3 V, V _{GS} = 0	30	60	150	mA	
ピンチオフ電圧	V _P	V _{DS} = 3 V, I _D = 100 μA	-0.8	-1.5	-4	V	
相互コンダクタンス	g _m	V _{DS} = 3 V, I _D = 10 mA	20	40	60	mS	
最大発振周波数	f _{max}	V _{DS} = 3 V, I _D = 30 mA		60		GHz	
雑音指数	NF*	V _{DS} = 3 V I _D = 10 mA	f = 2 GHz	0.6			dB
			f = 4 GHz	0.8	1.4		dB
			f = 8 GHz	2.0			dB
NF 最小利得	G _a	V _{DS} = 3 V I _D = 10 mA	f = 2 GHz	15			dB
			f = 4 GHz	12			dB
			f = 8 GHz	8.5			dB
最大有能電力利得	MAG	V _{DS} = 3 V I _D = 30 mA	f = 2 GHz	17.5			dB
			f = 4 GHz	15			dB
			f = 8 GHz	12			dB
			f = 12 GHz	8			dB

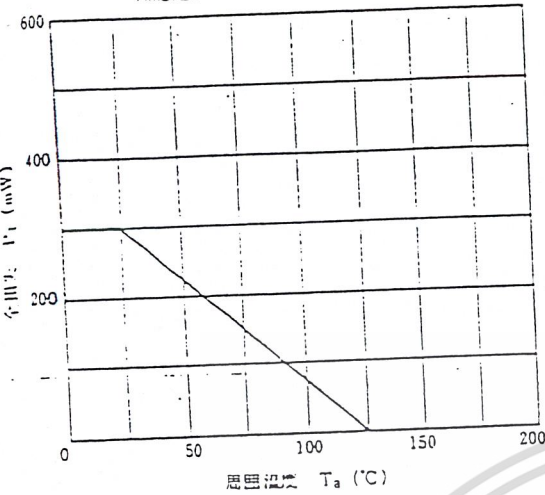
* 雑音係数

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

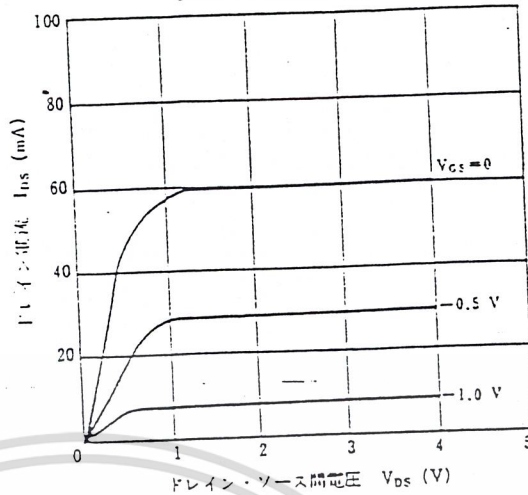
—日本電気株式会社—

典型特性 (Ta = 25 °C)

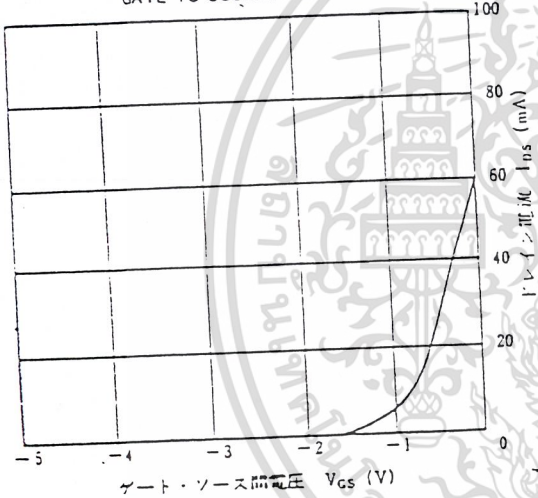
TOTAL POWER DISSIPATION vs AMBIENT TEMPERATURE



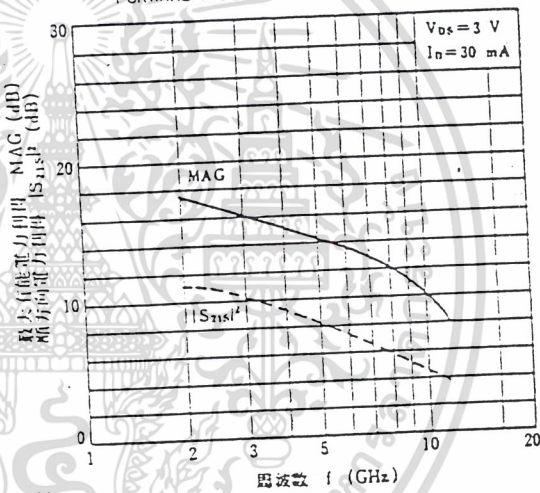
DRAIN CURRENT vs DRAIN TO SOURCE VOLTAGE



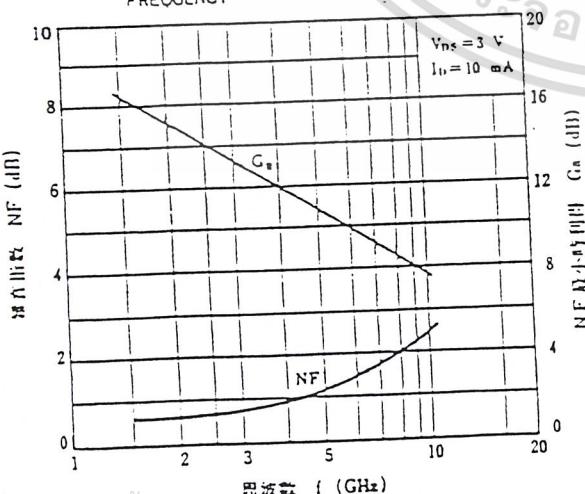
DRAIN CURRENT vs GATE TO SOURCE VOLTAGE



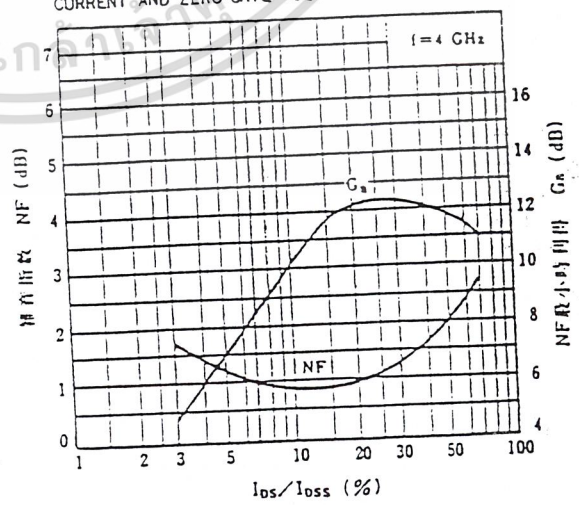
MAXIMUM AVAILABLE GAIN FORWARD INSERTION GAIN vs FREQUENCY



NOISE FIGURE ASSOCIATED GAIN vs FREQUENCY



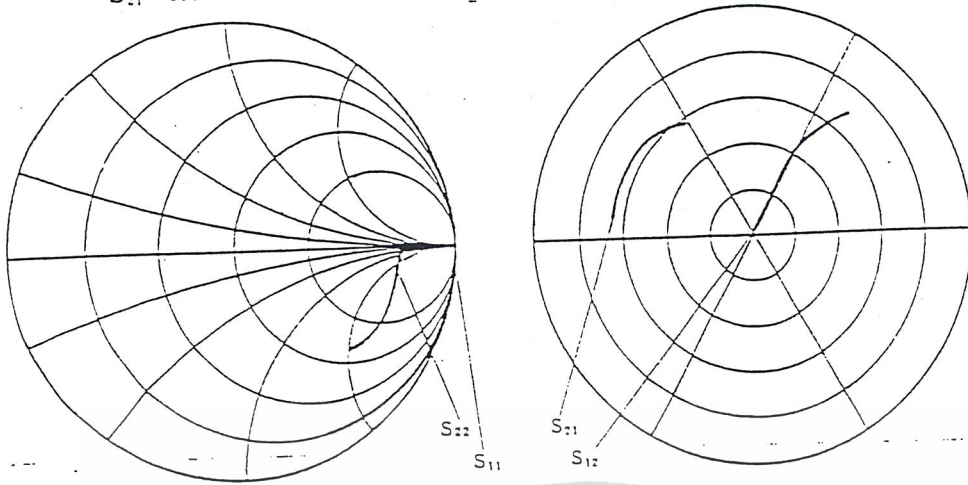
NOISE FIGURE ASSOCIATED GAIN vs RATIO OF DRAIN CURRENT AND ZERO-GATE VOLTAGE CURRENT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

@ 3 V, 10 mA

S_{21} : 5.0 full scale. S_{12} : 0.1 full scale



S-MAGN AND PHASE

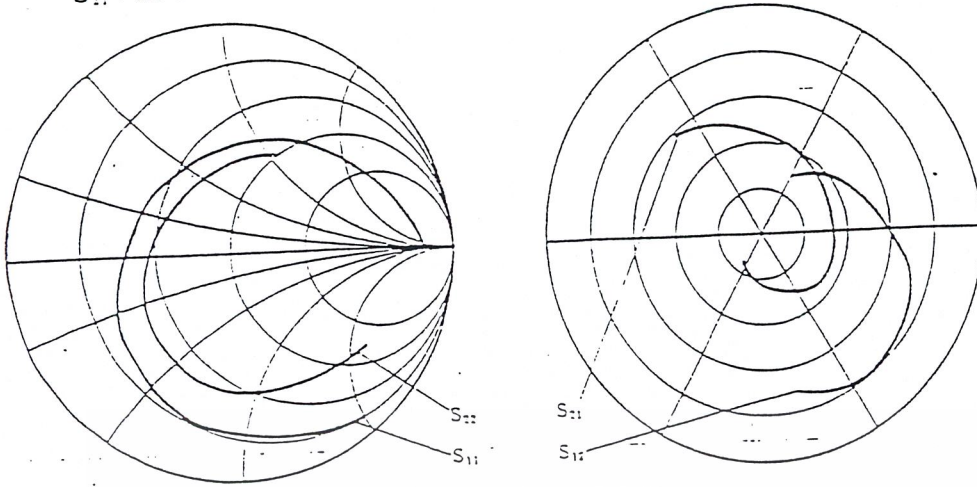
$G_{ms} = G_{ms}$ if k less than 1

MHZ	S_{11}	S_{21}	S_{12}	S_{22}	k	G_{ms} dB
100	1.000 -3	3.255 178	0.001 16	0.756 -2	0.69	35.3
200	0.992 -6	3.340 172	0.002 98	0.760 -3	0.54	33.3
300	1.004 -8	3.304 173	0.001 49	0.752 -5	0.06	33.7
400	0.972 -10	3.220 168	0.002 97	0.743 -7	1.90	26.9
500	0.997 -16	3.442 163	0.004 77	0.724 -9	0.17	29.8
600	0.994 -16	3.374 165	0.003 93	0.735 -10	0.13	30.9
700	0.964 -21	3.275 161	0.009 73	0.748 -13	0.56	25.5
800	0.993 -24	3.321 158	0.004 73	0.732 -17	0.21	29.1
900	0.940 -26	3.266 154	0.011 71	0.718 -19	0.80	24.7
1000	0.994 -31	3.361 152	0.016 67	0.712 -19	0.11	23.2
1100	0.955 -31	3.138 151	0.019 68	0.735 -20	0.37	22.1
1200	0.981 -36	3.237 147	0.022 67	0.767 -23	0.10	21.7
1300	0.980 -35	3.309 147	0.030 61	0.754 -26	0.15	20.5
1400	0.921 -41	3.077 144	0.031 63	0.725 -27	0.36	19.9
1500	0.977 -44	3.148 140	0.032 66	0.757 -26	0.07	19.9
1600	0.960 -45	3.122 139	0.038 61	0.750 -30	0.13	19.1
1700	0.951 -47	3.065 136	0.038 58	0.729 -30	0.23	19.0
1800	0.944 -50	3.120 134	0.048 59	0.733 -30	0.21	18.1
1900	0.922 -52	3.097 133	0.047 58	0.719 -31	0.26	18.2
2000	0.924 -56	2.958 129	0.053 54	0.732 -34	0.26	17.4
2100	0.917 -57	3.029 129	0.059 51	0.729 -37	0.25	17.1
2200	0.905 -60	2.955 124	0.062 51	0.708 -38	0.31	16.8
2300	0.895 -64	3.016 123	0.063 52	0.691 -41	0.26	16.8
2400	0.906 -64	2.826 121	0.069 47	0.678 -41	0.31	16.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

@ 3 V, 10 mA

S₂₁ : 5.0 full scale. S₁₂ : 0.3 full scale



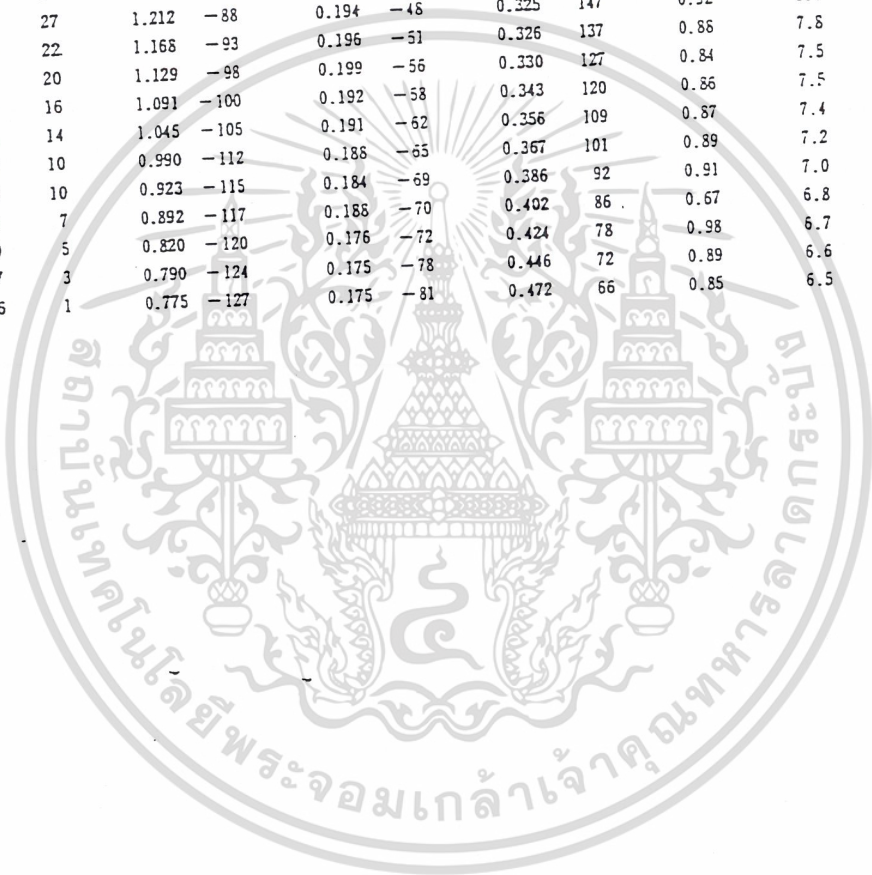
S-MAGN AND PHASE

G_{ms} = G_{ms} if k less than 1

MHZ	S ₁₁	S ₂₁	S ₁₂	S ₂₂	k	G _{ms} dB
2000	0.911 -53	2.920 130	0.077 54	0.702 -36	0.26	15.8
2250	0.899 -60	2.857 124	0.085 48	0.690 -39	0.32	15.3
2500	0.877 -65	2.814 119	0.092 45	0.677 -43	0.34	14.9
2750	0.856 -73	2.720 113	0.096 42	0.663 -47	0.37	14.5
3000	0.838 -77	2.615 110	0.098 40	0.653 -49	0.41	14.3
3250	0.813 -81	2.525 104	0.103 37	0.651 -51	0.47	13.9
3500	0.784 -85	2.463 100	0.107 34	0.646 -55	0.52	13.6
3750	0.785 -89	2.405 97	0.110 33	0.638 -57	0.51	13.4
4000	0.770 -94	2.307 92	0.112 29	0.631 -62	0.55	13.1
4250	0.761 -98	2.296 88	0.116 25	0.625 -64	0.57	13.0
4500	0.751 -103	2.270 84	0.118 25	0.625 -66	0.56	12.8
4750	0.743 -106	2.187 80	0.119 23	0.623 -69	0.59	12.7
5000	0.732 -111	2.141 77	0.123 21	0.618 -72	0.60	12.4
5250	0.721 -115	2.145 71	0.126 17	0.616 -75	0.63	12.3
5500	0.708 -119	2.106 68	0.126 17	0.613 -77	0.64	12.2
5750	0.691 -122	2.037 64	0.126 15	0.611 -79	0.69	12.1
6000	0.679 -126	1.976 60	0.127 12	0.610 -81	0.74	11.9
6250	0.661 -130	1.953 57	0.128 11	0.606 -84	0.75	11.8
6500	0.650 -133	1.915 53	0.128 9	0.607 -86	0.79	11.7
6750	0.636 -137	1.862 50	0.128 9	0.604 -88	0.82	11.6
7000	0.622 -140	1.842 46	0.129 7	0.603 -90	0.86	11.5
7250	0.611 -143	1.836 42	0.130 7	0.602 -91	0.87	11.5
7500	0.597 -146	1.794 41	0.129 7	0.600 -94	0.90	11.4
7750	0.583 -150	1.760 37	0.131 5	0.599 -95	0.93	11.3
8000	0.566 -154	1.779 33	0.134 3	0.595 -98	0.94	11.2
8250	0.551 -158	1.755 29	0.134 2	0.593 -99	0.98	11.2
8500	0.534 -162	1.719 27	0.133 2	0.588 -101	1.01	10.4
8750	0.519 -166	1.681 23	0.134 1	0.586 -103	1.06	9.5
9000	0.502 -171	1.697 20	0.137 1	0.583 -105	1.04	9.6
9250	0.486 -174	1.674 17	0.137 0	0.576 -107	1.09	9.0
9500	0.472 -179	1.668 13	0.139 -1	0.570 -107	1.12	8.7
9750	0.462 176	1.682 12	0.142 -1	0.563 -110	1.09	8.9
10000	0.457 169	1.709 6	0.146 -3	0.561 -112	1.06	9.2
10250	0.451 164	1.708 3	0.146 -3	0.558 -113	1.07	9.1
10500	0.441 155	1.688 -1	0.149 -5	0.553 -116	1.07	9.0
10750	0.430 148	1.685 -6	0.157 -6	0.546 -119	1.04	9.1
11000	0.422 140	1.694 -10	0.153 -8	0.536 -121	1.08	8.7
11250	0.407 130	1.645 -16	0.156 -12	0.527 -124	1.13	8.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับบริษัท... ไม่ควรเผยแพร่ หักสิทธิ์ที่เรามีให้จนกว่าจะได้ออกแบบหรือพิมพ์เอกสารฉบับนี้

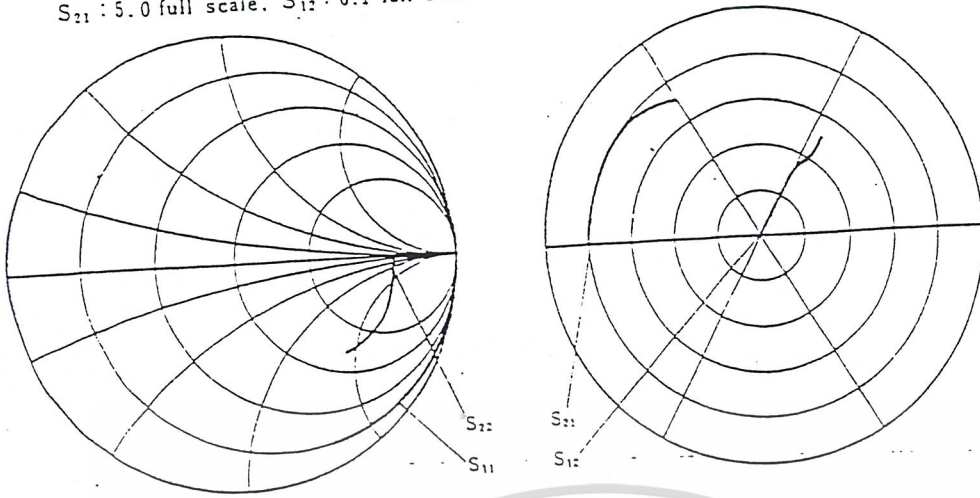
MHz	S_{11}	S_{21}	S_{12}	S_{22}	k	G_{max} dB
11500	0.394 124	1.590 -20	0.162 -10	0.517 -125	1.15	7.6
11750	0.390 116	1.572 -21	0.154 -10	0.506 -127	1.24	7.1
12000	0.397 110	1.554 -24	0.160 -12	0.501 -131	1.20	7.1
12250	0.404 103	1.557 -28	0.170 -13	0.499 -134	1.12	7.5
12500	0.424 97	1.568 -31	0.175 -15	0.495 -138	1.06	8.1
12750	0.451 89	1.595 -34	0.183 -16	0.490 -143	0.96	9.4
13000	0.480 82	1.637 -41	0.190 -22	0.471 -148	0.89	9.4
13250	0.518 75	1.648 -47	0.186 -25	0.449 -153	0.87	9.5
13500	0.548 66	1.610 -54	0.186 -27	0.431 -158	0.87	9.4
13750	0.563 59	1.529 -59	0.187 -29	0.412 -164	0.91	9.1
14000	0.581 53	1.447 -65	0.188 -32	0.393 -169	0.95	8.9
14250	0.595 47	1.349 -68	0.188 -35	0.367 -176	1.03	7.5
14500	0.612 42	1.344 -71	0.188 -37	0.353 179	1.03	7.6
14750	0.633 39	1.297 -75	0.191 -41	0.348 172	1.00	8.0
15000	0.659 34	1.271 -79	0.192 -43	0.337 164	0.98	8.2
15250	0.685 30	1.241 -83	0.194 -45	0.325 156	0.94	8.1
15500	0.710 27	1.212 -88	0.194 -48	0.325 147	0.92	8.0
15750	0.736 22	1.168 -93	0.196 -51	0.326 137	0.88	7.8
16000	0.753 20	1.129 -98	0.199 -56	0.330 127	0.84	7.5
16250	0.768 16	1.091 -100	0.192 -58	0.343 120	0.86	7.5
16500	0.778 14	1.045 -105	0.191 -62	0.356 109	0.87	7.4
16750	0.786 10	0.990 -112	0.188 -65	0.367 101	0.89	7.2
17000	0.799 10	0.923 -115	0.184 -69	0.386 92	0.91	7.0
17250	0.861 7	0.892 -117	0.188 -70	0.402 86	0.67	6.8
17500	0.819 5	0.820 -120	0.176 -72	0.424 78	0.98	6.7
17750	0.837 3	0.790 -124	0.175 -78	0.446 72	0.89	6.6
18000	0.846 1	0.775 -127	0.175 -81	0.472 66	0.85	6.5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

@ 3 V, 30 mA

S_{21} : 5.0 full scale. S_{12} : 0.1 full scale



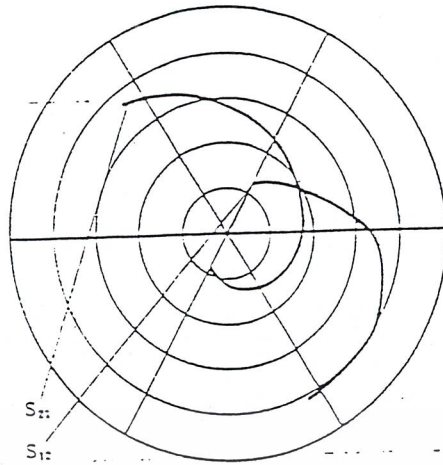
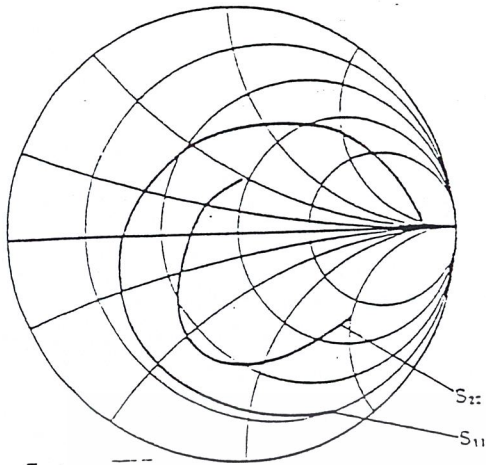
S-MAGN AND PHASE

MHZ	S_{11}	S_{21}	S_{12}	S_{22}	$G_{ms} = G_{ms}$ if k less than 1	k	G_{ms} dB
100	0.997 -3	4.085 177	0.001 12	0.677 -2	0.99	0.60	36.1
200	0.991 -7	4.191 172	0.002 97	0.682 -2	0.60	-0.38	34.3
300	1.010 -9	4.145 172	0.002 47	0.682 -5	1.75		28.3
400	0.974 -12	4.021 167	0.002 96	0.663 -7	0.51		32.2
500	0.992 -18	4.285 164	0.003 70	0.647 -9	0.13		32.9
600	0.994 -18	4.224 164	0.002 99	0.659 -9	1.46		25.9
700	0.956 -23	4.098 159	0.004 70	0.670 -13	0.46		31.3
800	0.987 -26	4.134 157	0.003 79	0.654 -18	1.10		24.8
900	0.929 -29	4.059 153	0.009 75	0.637 -19	0.26		26.5
1000	0.984 -34	4.170 150	0.009 67	0.632 -19	0.91		25.6
1100	0.944 -34	3.903 150	0.008 71	0.658 -20	0.34		25.9
1200	0.970 -40	4.018 145	0.010 67	0.677 -24	0.28		24.2
1300	0.967 -39	4.069 145	0.015 63	0.668 -25	0.65		23.1
1400	0.913 -45	3.785 142	0.018 63	0.645 -27	0.18		22.1
1500	0.961 -48	3.856 138	0.024 67	0.678 -26	0.29		22.2
1600	0.940 -50	3.847 137	0.023 63	0.667 -31	0.33		20.8
1700	0.933 -52	3.769 134	0.031 58	0.656 -31	0.32		20.4
1800	0.924 -55	3.809 131	0.035 60	0.650 -30	0.35		20.2
1900	0.909 -57	3.780 131	0.036 60	0.635 -32	0.39		20.1
2000	0.906 -61	3.607 126	0.025 56	0.655 -34	0.39		19.6
2100	0.893 -63	3.686 127	0.040 51	0.656 -37	0.49		19.7
2200	0.883 -65	3.575 122	0.038 53	0.620 -38	0.34		18.4
2300	0.875 -71	3.635 120	0.053 53	0.611 -41	0.48		18.8
2400	0.881 -69	3.413 119	0.045 50	0.586 -41			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 - ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

@ 3 V, 30 mA

S_{21} : 5.0 full scale. S_{12} : 0.3 full scale



S-MAGN AND PHASE

$G_{ms} = G_{ms}$ if k less than 1

MHz	S_{11}	S_{21}	S_{12}	S_{22}	k_p	G_{ms} dB
2000	0.894 -61	3.695 128	0.065 55	0.627 -35	0.29	17.6
2250	0.871 -68	3.577 121	0.071 49	0.620 -38	0.36	17.0
2500	0.847 -74	3.506 116	0.076 47	0.609 -42	0.39	16.6
2750	0.821 -82	3.384 110	0.079 44	0.602 -46	0.42	16.3
3000	0.798 -87	3.225 107	0.082 42	0.589 -49	0.46	15.9
3250	0.777 -92	3.107 101	0.086 39	0.583 -51	0.52	15.6
3500	0.740 -96	3.025 96	0.087 36	0.568 -53	0.63	15.4
3750	0.738 -101	2.927 94	0.090 37	0.569 -55	0.60	15.1
4000	0.720 -107	2.791 88	0.091 33	0.568 -59	0.64	14.9
4250	0.709 -111	2.730 85	0.094 31	0.565 -61	0.66	14.6
4500	0.696 -116	2.707 80	0.097 31	0.567 -63	0.66	14.5
4750	0.686 -121	2.597 77	0.097 29	0.567 -66	0.69	14.3
5000	0.674 -126	2.527 73	0.100 28	0.565 -68	0.70	14.0
5250	0.661 -131	2.503 67	0.103 25	0.565 -70	0.73	13.8
5500	0.647 -136	2.456 64	0.103 24	0.563 -72	0.75	13.8
5750	0.628 -139	2.384 61	0.103 24	0.564 -74	0.80	13.6
6000	0.617 -144	2.287 56	0.105 22	0.568 -75	0.84	13.4
6250	0.599 -149	2.249 53	0.105 21	0.566 -78	0.86	13.3
6500	0.586 -153	2.200 49	0.106 19	0.569 -80	0.90	13.2
6750	0.571 -157	2.134 46	0.108 19	0.569 -81	0.93	13.0
7000	0.556 -161	2.093 42	0.110 18	0.572 -83	0.94	12.8
7250	0.544 -165	2.079 39	0.112 19	0.576 -84	0.95	12.7
7500	0.532 -169	2.033 37	0.110 18	0.577 -86	0.98	12.7
7750	0.520 -175	1.974 33	0.113 17	0.576 -87	1.00	12.4
8000	0.503 -179	1.967 29	0.117 16	0.577 -88	1.01	11.2
8250	0.491 175	1.949 25	0.117 14	0.576 -90	1.03	11.2
8500	0.477 170	1.906 23	0.118 16	0.574 -91	1.05	10.7
8750	0.464 165	1.858 19	0.121 14	0.576 -93	1.07	10.2
9000	0.451 159	1.846 15	0.125 15	0.576 -94	1.06	10.2
9250	0.440 154	1.819 13	0.126 14	0.572 -95	1.09	9.8
9500	0.433 148	1.795 9	0.129 12	0.566 -96	1.10	9.5
9750	0.431 141	1.785 8	0.133 13	0.562 -98	1.07	9.7
10000	0.432 135	1.794 2	0.137 11	0.561 -99	1.04	10.0
10250	0.434 130	1.781 -1	0.137 10	0.562 -100	1.03	10.1
10500	0.435 120	1.747 -4	0.141 8	0.558 -102	1.02	10.1
10750	0.440 113	1.717 -9	0.148 5	0.553 -103	0.99	10.7
11000	0.444 106	1.709 -13	0.146 7	0.545 -105	1.01	10.0
11250	0.448 99	1.688 -18	0.150 2	0.541 -106	1.00	10.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ควรนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาต

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณอาจารย์โมไนย ไกรฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ทองทศ วานิชศรี และ
อาจารย์ณรงค์ เหมกรณ์ ที่ให้ปรึกษาและความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี
ขอบพระคุณและขอบคุณทุกท่านที่ให้คำแนะนำและกำลังใจตลอดการทำโครงการนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Adler, "A Study of Locking Phenomena in Oscillators," Proc. IRE, vol.34, pp. 351-357, June 1946; also reprinted in Proc. IEEE, vol. 61, pp. 1380-1385, Oct 1973.
- [2] R. S. Carson, *High-Frequency Amplifiers*, John Wiley&Sons Inc., 1990.
- [3] R. E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering*, McGraw-Hill, Inc., 1997.
- [4] K. Kurokawa, "Injection-Locking of Solid-State Microwave Oscillators," Proc. IEEE, vol.61, pp.1386-1407, Oct 1973.
- [5] S. Y. Liao, *Microwave Circuit Analysis and Amplifier Design*, Prentice-Hall Inc., 1987.
- [6] J. A. Navarro, K. Chang, *Intergrated Active Antennas and Spatial Power Combining*, John Wiley&Sons Inc., 1997.
- [7] K. D. Stephan, W. A. Morgan, "Analysis of Interinjection-Locked Oscillators for Integrated Phased Arrays," IEEE Trans. on Antennas and Propagat., vol. AP-35, no.7, July 1987.
- [8] K. D. Stephan, "Inter-Injection-Locked Oscillators for Power Combining and Phased Arrays," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.34, no.10, pp.1017-1025, Oct 1986.
- [9] G. D. Vendelin, *Design of Amplifiers and Oscillators by the S-Parameter Methods*, John Wiley&Sons Inc., 1998.
- [10] R. A. York, "Nonlinear Analysis of Phase Relationship in Quasi-Optical Oscillator Arrays," IEEE Trans. on Microwave Theory Tech., vol. 41, no.10, pp.1799-1809., Oct 1993.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้