

การพัฒนาาระบบส่งและรับคลื่นแบบอะเรย์แปดสมาชิกผลัดกันทำงาน
ด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการสร้างภาพไมโครเวฟ

DEVELOPMENT OF AN 8-ELEMENT ELECTRONICALLY SWITCHED
TRANSCIVER ARRAY SYSTEM FOR MICROWAVE IMAGING

อดิเรก แรังกาสิกอร์น
ADIREK RANGKASIKORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของเอกสารศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปี ๒๕๕๐

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. ๒๕๕๐

**การพัฒนาระบบส่งและรับคลื่นแบบอะเรย์แปดสมาชิกผลัดกันทำงาน
ด้วยสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการสร้างภาพไมโครเวฟ**

**DEVELOPMENT OF AN 8-ELEMENT ELECTRONICALLY SWITCHED
TRANSCIVER ARRAY SYSTEM FOR MICROWAVE IMAGING**

อดิเรก แรังกสิกรณ์

ADIREK RANGKASIKORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

**DEVELOPMENT OF AN 8-ELEMENT ELECTRONICALLY SWITCHED
TRANSCEIVER ARRAY SYSTEM FOR MICROWAVE IMAGING**

ADIREK RANGKASIKORN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบส่งและรับคลื่นแบบอะเรย์แปดสมาชิกผลัดกันทำงานด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการสร้างภาพไมโครเวฟ
นักศึกษา	นาย อติเรก แรงกสิกรณ์
รหัสนักศึกษา	45064017
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. อนุพงษ์ สรงประภา

บทคัดย่อ

ได้ทำการพัฒนาระบบใหม่ของการสร้างภาพไมโครเวฟย่านความถี่แถบเอกซ์ซึ่งควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ โดยนอกจากการมีข้อดีในส่วนของลดขนาดและราคาต้นทุนของระบบด้วยการเปลี่ยนแนวการออกแบบจากการใช้อุปกรณ์แบบท่อนำคลื่นไปเป็นไมโครสตริปและโคแอกเซียลแล้ว การใช้เทคนิคการผสมสัญญาณ 2 เฟส ทำให้วัดทั้งขนาดและเฟสของคลื่นได้พร้อมกัน การสร้างภาพวัตถุไม่มีสัญญาณรบกวนในรูปของภาพออเคอร์ศูนย์เหมือนเช่นเดียวกับการใช้ไมโครเวฟฮอโลกราฟี การร่นระยะวัตถุจึงสามารถกระทำได้ซึ่งก็สามารถลดขนาดพื้นที่เก็บข้อมูลสนามของคลื่น โดยยังคงความละเอียดของภาพเท่าเดิม ซึ่งเมื่อร่วมกับการเพิ่มจำนวนหัวรับส่งคลื่นจาก 1 เป็น 8 และใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์เลือกทีละหัว แทนการเลื่อนตำแหน่งเชิงกล การเก็บข้อมูล 1 ภาพขนาด 64x64 พิกเซล ใช้เวลาเพียง 13 นาที

Thesis Title	Development of an 8-Element Electronically Switched Transceiver Array System for Microwave Imaging
Student	Mr. Adirek Rangkasikorn
Student ID.	45064017
Degree	Master of Science
Program	Applied Physics
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Anupong Songphapar

ABSTRACT

New version of computer controlled x-band microwave imaging system has been developed. In addition to be more advantage in term of system compactness and cost reduction upon changing component section theme from waveguide to microstrip – coaxial based, the speed performance is also enhanced by the use of signal mixing technique in conjunction with the increase the number of antenna from 1 to 8 scanning controlled by electronics switch. There is no zero – order image noise interfering with the reconstructed object's image as in the case of microwave holography. So at the same resolution, the field recording aperture can be reduced by simply shortening the object distance. The time spends for 64×64 pixels image recording is 13 minutes.

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าต้องขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา
รองศาสตราจารย์ อนุพงษ์ ศรีประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ท่านได้ให้แนว
ทางการวิจัย การช่วยเหลือแก้ไขในส่วนที่ไม่เข้าใจและคอยผลักดันให้งานได้ดำเนินต่อไป

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เป็นกรรมการสอบหัวข้อ ที่คอยให้ความรู้และแนะนำ
ขอบกพร่องต่าง ๆ เพื่อที่จะได้นำไปแก้ไขให้ดีขึ้น และขอขอบคุณทางภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์ ที่ข้าพเจ้าได้หยิบยืมอุปกรณ์เครื่องมือและสถานที่ ที่ใช้ดำเนินการวิจัยนี้

ขอขอบคุณผลงานวิจัยและเอกสารอ้างอิงต่าง ๆ ที่ข้าพเจ้าได้หยิบยืมมา ที่ทำให้เกิดความ
สนใจในการทำงานวิจัยนี้ ซึ่งข้าพเจ้าคาดว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจในทางด้าน
ไมโครเวฟกำลังงานต่ำ เพื่อนำไปพัฒนาต่อไปในวันข้างหน้า

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยไมโครเวฟประยุกต์และห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องมือ
ทางการแพทย์และสิ่งแวดล้อม ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ โดยมีเพื่อน ๆ ใน
ห้องปฏิบัติการฯ ทุกท่านช่วยเป็นแรงผลักดัน

สุดท้ายคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแก่บิดา นาย
ทองอินทร์ และมารดา นางบุญเลื่อน แรงกสิกรรม ที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพ
ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

อดิเรก แรงกสิกรรม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎีและแนวคิดในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบข่ายของการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	5
2.1 ระบบไมโครเวฟ.....	5
2.1.1 แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์ไอโคด	6
2.1.2 สายส่งสัญญาณ	7
2.1.2.1 ไมโครสตริป.....	7
2.1.2.2 แผ่นปรินท์.....	9
2.1.2.3 แมตริงอิมพีแดนซ์และสมิตชาร์ต.....	11
2.1.3 อุปกรณ์ควบคุมการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟ.....	13
2.1.3.1 ไคเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์ไลน์แบบเส้นขนาน.....	13
2.1.3.2 สวิตช์ไมโครเวฟ.....	19
2.1.3.3 ที่จังกัซัน.....	21
2.1.3.4 เฟสชิฟเตอร์.....	22
2.1.4 มิกเซอร์.....	22
2.1.4.1 มิกเซอร์ที่ใช้เฟด.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.5 สายอากาศและการจำลองการทำงาน.....	25
2.1.5.1 สายอากาศแบบวิวัลด์.....	25
2.1.5.2 การจำลองการทำงาน.....	26
2.2 พื้นฐานการสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	29
2.2.1 ฮอโลกราฟีทางแสง.....	30
2.2.2 ไมโครเวฟฮอโลกราฟี.....	32
2.2.3 ทฤษฎีการสร้างภาพไมโครเวฟคลื่นความถี่เดียวระยะใกล้.....	36
บทที่ 3 การพัฒนาระบบส่งและรับคลื่นแบบอะเรย์เปิดสมาชิก	
ผลิตภัณฑ์งานด้วยสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์	39
3.1 การออกแบบระบบ.....	39
3.1.1 อุปกรณ์ไมโครเวฟที่ออกแบบ.....	39
3.1.1.1 การออกแบบโคเรชันแนลคัปเปิลอร์ไลน์เส้นขนาน.....	39
3.1.1.2 การออกแบบที่จังก์ชัน	40
3.1.1.3 การออกแบบไมโครเวฟมิกเซอร์.....	41
3.1.1.4 การออกแบบสายอากาศวิวัลด์.....	42
3.1.2 การออกแบบโครงสร้างและกลไกการเคลื่อนที่.....	44
3.1.2.1 การออกแบบโครงสร้างหลัก.....	44
3.1.2.2 การออกแบบกลไกการเคลื่อนที่.....	44
3.1.3 ระบบควบคุมและการเก็บข้อมูลเพื่อประมวลผล.....	45
3.1.3.1 การออกแบบชุดสวิตซ์สายอากาศส่งและรับในตัวเดียวกัน.....	46
3.1.3.2 การออกแบบโปรแกรมระบบเก็บข้อมูล.....	47
3.2 การสร้างและประกอบระบบ.....	49
3.2.1 อุปกรณ์ไมโครเวฟ.....	49
3.2.1.1 การสร้างโคเรชันแนลคัปเปิลอร์ไลน์เส้นขนาน.....	49
3.2.1.2 การสร้างที่จังก์ชันกับเฟสชิฟเตอร์.....	49
3.2.1.3 การสร้างไมโครเวฟมิกเซอร์.....	50
3.2.1.4 การสร้างสายอากาศวิวัลด์.....	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1.5 การใช้งานแหล่งกำเนิดคลื่นแบบก้านนำไดโอด	52
3.2.1.6 การใช้งานสวิตช์ไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์.....	52
3.2.1.7 การใช้งานสายโคแอกเซียลนำสัญญาณ.....	53
3.2.1.8 การใช้งานคอนเนคเตอร์.....	53
3.2.1.9 การใช้งานออสซิลโลสโคป.....	54
3.2.1.10 การใช้งานวงจรมอดูเลชัน IF	54
3.2.1.11 การใช้งานส่วนแปลงอานาลอกเป็นดิจิตอลและ ส่วนการเก็บข้อมูล.....	55
3.2.2 การประกอบโครงสร้างระบบ.....	57
3.3 การทดลอง	59
3.3.1 การทดสอบวัดประสิทธิภาพการส่งกำลังการคับปลิงตลอดจน เฟสของสัญญาณและอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์	59
3.3.2 การวัดสมบัติการเปลี่ยนสัญญาณของวงจรรีบ.....	59
3.3.3 การวัดลักษณะการกระจายคลื่นของสายอากาศวิวลัคิที่สร้างขึ้น.....	60
3.3.4 การวัดความไวในการเปิด - ปิดไมโครเวฟสวิตช์.....	60
3.3.5 การทดลองเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพด้วยสายอากาศวิวลัคิกับระบบเก่า.....	60
3.3.6 การทดลองเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพด้วยสายอากาศฮอร์น กับระบบไมโครเวฟใหม่.....	62
3.3.7 การทดลองเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพวัตถุด้วยสายอากาศวิวลัคิเดี่ยว กับระบบไมโครเวฟใหม่.....	63
3.3.8 การทดลองเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพวัตถุ ด้วยระบบแปลสายอากาศวิวลัคิผลัดกันทำงาน.....	64
3.4 วิธีการสร้างภาพกลับ.....	65
บทที่ 4 ผลการทดลอง	66
4.1 ผลการทดสอบสมบัติของอุปกรณ์.....	67
4.1.1 ผลการวัดสมบัติอุปกรณ์ไมโครเวฟที่ออกแบบสร้างขึ้น.....	66
4.1.1.1 ผลการวัดไคเรคชันนัลคับเปลอร์ไลน์เส้นขนาน.....	66

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.1.2 ผลการวัดที่จังก์ชันกับเฟสชิฟเตอร์.....	68
4.1.1.3 ผลการวัดสมบัติการเปลี่ยนแปลงสัญญาณของวงจรรับ.....	70
4.1.1.4 ผลการวัดสมบัติของสายอากาศวิวัลด์ิ.....	71
4.1.2 ผลการศึกษาอัตราเร็วของสวิทช์ไมโครเวฟ.....	75
4.2 ผลการทดสอบการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพวัตถุในเบื้องต้น.....	76
4.2.1 ผลจากการเก็บข้อมูลด้วยสายอากาศวิวัลด์ิกับระบบเก่า.....	76
4.2.2 ผลจากการเก็บข้อมูลด้วยสายอากาศฮอร์นกับระบบใหม่ ของการส่งและรับคลื่น.....	78
4.2.3 ผลจากการเก็บข้อมูลด้วยสายอากาศวิวัลด์ิกับระบบใหม่ ของการส่งและรับคลื่น.....	80
4.3 ผลการทดสอบการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพวัตถุด้วยระบบสมบูรณ์ ของอะเรย์เสาอากาศแปดสมาชิก ผลัดกันทำงาน	82
4.3.1 ผลการทดสอบสายสัญญาณที่จะใช้เป็นส่วนประกอบของระบบ.....	82
4.3.2 ผลการทดสอบเพื่อคัดเลือกสายอากาศวิวัลด์ิ.....	87
4.3.3 ผลการทดสอบเพื่อคัดเลือกสวิทช์.....	88
4.3.4 ผลการเก็บข้อมูลและสร้างภาพวัตถุโดยใช้ระบบรวม ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์.....	91
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	95
5.1 บทสรุปการทดลอง.....	95
5.1.1 อุปกรณ์และระบบไมโครเวฟ.....	95
5.1.2 โครงสร้างและการเคลื่อนที่.....	96
5.1.3 การทดลองเก็บข้อมูลและผลการสร้างภาพกลับ.....	97
5.2 ปัญหาที่พบ.....	97
5.3 แนวทางการพัฒนา.....	97
5.3.1 พัฒนาระบบไมโครเวฟ.....	97
5.3.2 พัฒนาด้านโครงสร้างและการเคลื่อนที่.....	98
5.3.3 พัฒนาด้านการเก็บข้อมูลและการสร้างภาพ.....	98

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	99
ภาคผนวก.....	101
ภาคผนวก ก. แสดงแผนภาพขั้นตอนการทำงานและโปรแกรมควบคุมมอเตอร์ บันทึกข้อมูล.....	102
ภาคผนวก ข. แสดงแผนภาพขั้นตอนการทำงานและโปรแกรม MATLAB ในการสร้างภาพกลับ.....	104
ภาคผนวก ค. ข้อมูลอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางไมโครเวฟความถี่สูง.....	109
ประวัติผู้เขียน.....	114

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุชั้นสเตรท.....	10
2.2 ตารางแสดงค่าอิมพีแดนซ์บนกราฟสมิทชาร์ต.....	13
3.1 ตารางแสดง ค่าต่าง ๆ ของการออกแบบไดเรคชันแนลคัปเปิลอร์ไลน์.....	39
3.2 ตารางแสดงค่าต่าง ๆ ของการออกแบบที่จังก์ชัน.....	40
3.3 ตารางแสดงค่าที่ได้เลือกในการออกแบบมิกเซอร์.....	41
3.4 ตารางแสดงค่าต่าง ๆ ของการออกแบบสายอากาศวิวัตตี.....	42
4.1 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์สายนำสัญญาณ ยาว 30 เซนติเมตร.....	83
4.2 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์สายนำสัญญาณ ยาว 40 เซนติเมตร.....	86
4.3 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์สายอากาศวิวัตตี.....	87
4.4 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์สวิตช์ไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์.....	89

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบส่งรับคลื่นไมโครเวฟของการสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	5
2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับกระแสในปรากฏการณ์ของกันน์.....	6
2.3 กันน์ไดโอด.....	6
2.4 วงจรสมนัยของกันน์ไดโอดออสซิลเลเตอร์.....	7
2.5 (a) ลักษณะโครงสร้างและการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของไมโครสตริป (b) รูปแบบไมโครสตริปในทางปฏิบัติ.....	8
2.6 สมิตซาร์ต.....	12
2.7 ไครเรชันนัลคัปเปิลอร์แบบเส้นขนาน.....	16
2.8 โครงสร้างไครเรชันนัลคัปเปิลอร์บนแผ่นไมโครสตริป.....	18
2.9 วงจรสมนัยของ PIN diode (a) ขณะไบอัสตรง (b) ขณะไบอัสกลับ.....	20
2.10 วงจรสมมูลของโครงสร้าง PIN diode กับอุปกรณ์อื่น (a) แบบอนุกรม (b) แบบขนาน (c) แบบผสม.....	20
2.11 วงจรสมนัยของทีจังก์ชันบนแผ่นไมโครสตริป.....	21
2.12 โครงสร้างการทำงานของมิกเซอร์.....	23
2.13 โครงสร้างของมิกเซอร์ทั่วไปแบบใช้ไดโอด.....	24
2.14 ตัวอย่างวงจรของมิกเซอร์ชนิดที่ใช้เมสเฟด.....	25
2.15 ภาพสายอากาศวิวล์โคโดยแบบจำลอง 2 มิติ.....	26
2.16 สนามไฟฟ้าและแม่เหล็กในระนาบใด ๆ.....	27
2.17 การจัดวางอุปกรณ์ในการถ่ายสอโลแกรมทางแสง.....	30
2.18 การบันทึกข้อมูลภาพสอโลแกรมทางแสง.....	30
2.19 การสร้างภาพของวัตถุกลับมา.....	31
2.20 ระบบการบันทึกสอโลแกรม แบบเลส์ – ยูเพทนิคส์.....	32
2.21 แสดงการบันทึกข้อมูลภาพสอโลแกรมของวัตถุโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ.....	33
2.22 แสดงระบบการสร้างภาพกลับมาจากรีวรอยการแทรกสอดภาพสอโลแกรม.....	35
2.23 เค้าโครงระบบสร้างภาพระยะใกล้.....	36
3.1 ผลการออกแบบไครเรชันนัลคัปเปิลอร์ไลน์แบบขนานบนแผ่นปรินท์.....	40
3.2 ผลการออกแบบทีจังก์ชันบนแผ่นปรินท์.....	41
3.3 วงจรไมโครเวฟมิกเซอร์ที่ใช้เฟด.....	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 แบบสายอากาศวิวาล์ดี (a) มองจากด้านบน (b) มองจากด้านล่าง (c) ภาพฉาย	43
3.5 โครงสร้างหลักที่ใช้ติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์.....	44
3.6 กลไกการเคลื่อนที่.....	45
3.7 แผนภาพระบบควบคุมและเก็บข้อมูล.....	45
3.8 สวิตช์ไมโครเวฟกับการวางสายอากาศแบบตัวส่งตัวรับตัวเดียวกัน.....	46
3.9 แผนภาพการทำงานของระบบเก็บข้อมูล.....	48
3.10 ตำแหน่งการเก็บข้อมูล.....	48
3.11 ไคเรคชันแนลกับเพลตอร์บนแผ่นปริ้นท์.....	49
3.12 ที่จังก์ชันกับเฟสชิฟเตอร์บนแผ่นปริ้นท์.....	50
3.13 ไมโครเวฟมิทเซอร์บนแผ่นปริ้นท์.....	50
3.14 ระบบไมโครเวฟบนแผ่นปริ้นท์.....	51
3.15 สายอากาศวิวาล์ดี.....	51
3.16 แหล่งกำเนิดคลื่นแบบก้านนำไอโด.....	52
3.17 สวิตช์ไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์.....	52
3.18 สายโคแอกเซียลนำสัญญาณ.....	53
3.19 การเชื่อมต่อคอนเน็คเตอร์.....	53
3.20 ออสซิลโลสโคปรุ่น 54621A	54
3.21 แผงวงจรขยายสัญญาณ.....	54
3.22 แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์.....	55
3.23 แผงวงจรของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์.....	56
3.24 ภาพการวางสายอากาศชิดกับชุดการเคลื่อนที่แนวตั้ง.....	57
3.25 ระบบส่งและรับคลื่นแบบอะเรย์แปดสมาชิกผลัดกันทำงานด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์.....	58
3.26 มอเตอร์และชุดขับการสแกนในแนว $x - y$	58
3.27 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (HEWLETT PACKARD 8510C NETWORK ANALYZER).....	59
3.28 การทดลองเพื่อกำหนดความไวในการเปิด - ปิด.....	60
3.29 ระบบไมโครเวฟที่ใช้ทดลองภาครับส่งไมโครเวฟฮอโลกราฟีแบบเก่า.....	61
3.30 การติดตั้งสายอากาศและชุดเคลื่อนที่.....	62
3.31 การติดตั้งสายอากาศฮอร์นและชุดเคลื่อนที่กับระบบไมโครเวฟใหม่.....	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.32 การทดลองสายอากาศวิวัลส์คิกกับไมโครเวฟใหม่.....	63
3.33 การทดลองเก็บข้อมูลโดยใช้ระบบที่สมบูรณ์.....	64
3.34 โปรแกรม Matlab version 6.....	65
4.1 ดันแบบไดเรคชันแนลคัปเปิลอร์บนแผ่นปริ้นท์พร้อมกำหนดพอร์ทใช้งาน.....	66
4.2 ผลการวัดไดเรคชันแนลคัปเปิลอร์ 20 dB.....	67
4.3 ผลการวัดไดเรคชันแนลคัปเปิลอร์ 14 dB.....	68
4.4 ดันแบบที่จังก์ชันกับเฟสชิฟเตอร์.....	68
4.5 ผลการลดทอนกำลังของที่จังก์ชันกับเฟสชิฟเตอร์.....	69
4.6 ผลต่างมุมเฟสของที่จังก์ชันกับเฟสชิฟเตอร์.....	69
4.7 ดันแบบ ไมโครเวฟมิกเซอร์บนแผ่นปริ้นท์.....	70
4.8 ผลการอ่านค่าที่ได้จากมิกเซอร์ I.....	70
4.9 ผลการอ่านค่าที่ได้จากมิกเซอร์ Q.....	71
4.10 ดันแบบสายอากาศวิวัลส์คิก.....	71
4.11 ไคเร็คติวิตีจากการจำลองแสดงผลโดย SEMCAD.....	72
4.12 ลักษณะภาพไคเร็คติวิตี 3 มิติ.....	73
4.13 สมบัติไคเร็คติวิตีของสายอากาศจากการวัดทดสอบ.....	74
4.14 ผลการทดลองความไวของสวิทช์ไมโครเวฟ.....	75
4.15 การติดตั้งทดลองระบบไมโครเวฟเก่าเชื่อมต่อกับสายอากาศวิวัลส์คิก.....	76
4.16 ผลการทดลอง A1 ดันแบบวัตต์โลหะรูปแผ่นสามเหลี่ยม.....	77
4.17 ผลการทดลอง A2 ดันแบบวัตต์โลหะรูปวงแหวน.....	77
4.18 ผลการทดลอง A3 ดันแบบวัตต์โลหะรูปกระบอกป็น.....	78
4.19 ผลการทดลอง A4 ดันแบบวัตต์ลูน้าตาลทรายขาวรูปกรอบสี่เหลี่ยม.....	78
4.20 การติดตั้งทดลองสายอากาศฮอร์นและชุดเคลื่อนที่ 2 แกน กับระบบไมโครเวฟใหม่ของการส่งและรับคลื่นไมโครเวฟ.....	79
4.21 ผลการทดลอง B1 ดันแบบวัตต์โลหะรูปแผ่นสามเหลี่ยม.....	79
4.22 ผลการทดลอง B2 ดันแบบวัตต์โลหะรูปวงแหวน.....	80
4.23 ผลการทดลอง B3 ดันแบบวัตต์โลหะรูปกระบอกป็น.....	80
4.24 ผลการทดลอง B4 ดันแบบวัตต์ลูน้าตาลทรายขาวรูปกรอบสี่เหลี่ยม.....	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 การติดตั้งทดลองสายอากาศวิวัลดีกับระบบใหม่ของการส่งและรับคลื่นไมโครเวฟ.....	81
4.26 ผลการทดลอง C1 ต้นแบบวัตถุโลหะรูปแผ่นสามเหลี่ยม.....	81
4.27 ผลการทดลอง C2 ต้นแบบวัตถุโลหะรูปวงแหวน.....	82
4.28 ผลการทดลอง C3 ต้นแบบวัตถุโลหะรูปกระบอกป็น.....	82
4.29 ผลการทดลอง C4 ต้นแบบวัตถุน้ำตาลทรายขาวรูปกรอบสี่เหลี่ยม.....	82
4.30 สักขณะสัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ.....	83
4.31 สายอากาศวิวัลดี.....	87
4.32 สวิตช์ไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์.....	88
4.33 การติดตั้งสมบูรณ์ใช้ทดลองเก็บข้อมูลทั้งระบบ.....	91
4.34 ข้อมูลดิบจากความไม่เท่าเทียมของสายอากาศ.....	92
4.35 ข้อมูลแก้ไขความไม่เท่าเทียมของสายอากาศ.....	92
4.36 ข้อมูลแก้ไขชดเชยความไม่ต่อเนื่อง.....	93
4.37 ผลการทดลอง D1 ต้นแบบวัตถุโลหะรูปแผ่นสามเหลี่ยม.....	93
4.38 ผลการทดลอง D2 ต้นแบบวัตถุโลหะรูปวงแหวน.....	94
4.39 ผลการทดลอง D3 ต้นแบบวัตถุโลหะรูปกระบอกป็น.....	94
4.40 ผลการทดลอง D4 ต้นแบบวัตถุน้ำตาลทรายขาวรูปกรอบสี่เหลี่ยม.....	94

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคโลกาภิวัตน์ซึ่งมีการติดต่อธุรกิจ การค้าขาย และการเดินทางระหว่างผู้คนในประเทศต่าง ๆ เป็นไปอย่างกว้างขวาง สะดวกสบายทั้งทางรถยนต์ เรือ และเครื่องบิน มาตรการรักษาความปลอดภัยและความมั่นคงด้วยการตรวจตราควบคุมการนำเข้าสิ่งของต้องห้ามที่ด่านตรวจคนเข้าเมืองแต่ละประเทศก็เป็นที่ไปด้วยความยากลำบากมากขึ้น ในส่วนของการตรวจสัมภาระของนักเดินทางทุกคนจำนวนมากในแต่ละวันนั้นได้มีการพัฒนาให้ทันสมัยขึ้น จากการเปิดออกหรือค้นด้วยเจ้าหน้าที่ ซึ่งมีความล่าช้า มาเป็นการตรวจสอบด้วยเครื่องรังสีเอ็กซ์ระบบอัตโนมัติประสิทธิภาพสูง แต่สำหรับความพยายามในส่วนของพัฒนาเครื่องมือหรือเครื่องช่วยตรวจสอบสิ่งของต้องห้ามที่พกมากับตัวผู้เดินทาง นอกจากจะต้องการความรวดเร็วเช่นกันแล้ว สิ่งที่สำคัญกว่าก็คือ ต้องพยายามหลีกเลี่ยงวิธีการที่จะทำให้ผู้เดินทางส่วนใหญ่ซึ่งเป็นสุจริตชนรู้สึกตกใจหรือไม่ได้รับการต้อนรับตามที่ควร จนถึงความรู้สึกถึงการลบลู่ไม่ให้เกียรติ ทำให้เกิดภาพพจน์ที่ไม่ดีต่อประเทศเจ้าบ้าน อาทิเช่น การพัฒนาประตูทางออกซึ่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจโลหะก็เป็นมาตรการที่ดีกว่า การใช้เครื่องที่เป็นลักษณะกระบอก ให้เจ้าหน้าที่กวัดแกว่ง กวาดไปรอบ ๆ ตัวผู้เดินทาง และก็คิดว่าการใช้สุนัขขึ้นดักฝิ่นระวางคมกลืนเป็นลำดับ แต่ปัญหายังไม่จบสิ้น เพราะสิ่งต้องห้ามที่น่าหวาดหวั่นกันมากที่สุด 2 ประเภท คือ อาวุธปืนหรือวัตถุระเบิดที่ไม่ได้ทำด้วยโลหะและยาเสพติด ผู้พกพาสามารถผ่านประตูดังกล่าวไปได้ ระยะเวลาที่มีความพยายามในการใช้รังสีเอ็กซ์พลังงานต่ำในการแก้ปัญหานี้ แต่ไม่เป็นที่ยอมรับทางสากล เนื่องจากผลข้างเคียงของอันตรายของรังสีที่มีต่อผู้คน แนวทางพัฒนาต่อมาของหลายบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือต่างจึงมุ่งวิจัยใช้คลื่นไมโครเวฟและมิลลิเมตรเวฟ (Millimeter – wave) ที่ปลอดภัยสำหรับงานดังกล่าว และเพิ่งจะมีการผลิตจำหน่ายในเชิงพาณิชย์เมื่อต้นปีที่ผ่านมา

สำหรับประเทศไทยในปัจจุบัน ปัญหาการก่อการร้ายและการค้ายาเสพติดข้ามชาติตลอดจนการโจรกรรม ในสถานที่ราชการนำมามีความรุนแรงมากขึ้น หนทางใดก็ตามที่จะสกัดกั้น ซึ่งจะช่วยให้เกิดความสงบสุขก็เป็นสิ่งที่ควรกระทำ คณะวิจัยของห้องปฏิบัติการไมโครเวฟประยุกต์ได้ทำการริเริ่มและดำเนินการศึกษาวิจัยและพัฒนาวิธีการตรวจสอบวัตถุภายใต้สิ่งบดบังด้วยการใช้คลื่นไมโครเวฟกำลังต่ำ มาเป็นลำดับ เพื่อให้ได้มาซึ่งต้นแบบที่จะสามารถนำไปสู่การผลิตเพื่อใช้งานอย่างแพร่หลายได้ภายในประเทศในอนาคตอันใกล้ สำหรับประจำตามจุดตรวจคนเข้าเมืองหรือสถานที่ล่อแหลมย่อย ๆ ได้แก่ ทางเข้าหน่วยราชการ โรงเรียน โรงพยาบาล หรือศูนย์การค้า

ธนาคาร ร้านขายทอง ฯลฯ ด้วยเทคโนโลยีขั้นสูงทัดเทียมกันแต่ในต้นทุนต่ำกว่าเครื่องที่จะนำเข้าจากต่างประเทศมาก ส่วนหนึ่งในช่วงปลายของการพัฒนาดังกล่าวจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและพัฒนาระบบส่งและรับคลื่นซึ่งสามารถวัดได้ทั้งขนาดและเฟสแบบอะเรย์หลายสมาชิกผลัดกันทำงานด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการสร้างภาพไมโครเวฟสามารถนำไปสู่การพัฒนาต้นแบบเครื่องมองภาพวัตถุภายใต้สิ่งบดบังได้ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษา ทดค้น วิจัยและพัฒนาเพื่อพัฒนาระบบส่งและรับคลื่นซึ่งสามารถวัดได้ทั้งขนาดและเฟสแบบอะเรย์หลายสมาชิกผลัดกันทำงาน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาเครื่องต้นแบบนั้น

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

จากผลของการศึกษาและรวบรวมข้อมูลของหลักการการทำงานการออกแบบระบบและอุปกรณ์ทางไมโครเวฟ ตลอดจนความสำเร็จที่ผ่านมาของการประยุกต์ทฤษฎีคลื่นในการสร้างภาพไมโครเวฟ จึงคาดว่า การพัฒนาสร้างระบบส่งและรับคลื่นแบบอะเรย์แปดสมาชิกผลัดกันทำงานด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการสร้างภาพไมโครเวฟ จะมีข้อดีที่ทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้รวดเร็ว รวมถึงได้ภาพไมโครเวฟของวัตถุ 2 มิติ ที่มีความชัดเจนขึ้น

1.4 ทฤษฎีและแนวคิดในการวิจัย

ประสาทตาของมนุษย์มีการตอบสนองเฉพาะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่แสง จึงไม่สามารถมองเห็นรูปร่างวัตถุที่แผ่คลื่นนอกย่านความถี่ดังกล่าวได้ อย่างไรก็ตามมนุษย์สามารถใช้ระบบเลนส์ที่เหมาะสมประกอบด้วยแผงรับภาพ ประเภทแผ่นฟิล์มชนิดพิเศษ ตลอดจนแผงอุปกรณ์ถ่ายเทประจุ (Charge coupled device; CCD) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ทำหน้าที่โฟกัสและรับภาพวัตถุจากคลื่นเหล่านั้นปรากฏบนจอแสดงผลให้เห็นกันได้ ซึ่งก็เป็นวิธีการที่ใช้ได้ดีกับคลื่นในย่านรังสีเอ็กซ์และย่านอินฟราเรด ทว่าไม่สามารถกระทำกับในกรณีของคลื่นไมโครเวฟกำลังต่ำ ซึ่งมีสมบัติในการส่องผ่านทะลุวัสดุหลายประเภท เช่น ปูนซีเมนต์ ไม้ พลาสติก ผ้าหนา ๆ เช่นเดียวกับรังสีเอ็กซ์ (ในขณะที่อินฟราเรดไม่มีสมบัติดังกล่าว) แต่แตกต่างตรงที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในรูปของการทำให้อะตอมของเนื้อเยื่อมีการแตกตัวใด ๆ ทั้งนี้เพราะความยาวคลื่นที่มีค่ามาก พลังงานต่อหนึ่งหน่วยอนุภาคของคลื่นที่เรียกกันว่า โฟตอน (Photon) นั้นมีค่าน้อย คลื่นไมโครเวฟมีความจำเป็นต้องใช้วิธีการของการรับคลื่นโดยสายอากาศและการนำ

สัญญาณในลักษณะทำนองเดียวกับการรับคลื่นวิทยุ แต่ใช้เทคโนโลยีระดับสูงและอุปกรณ์ที่มีราคาแพงกว่าโดยมีความซับซ้อนและยุ่งยากในระดับเดียวกับการออกแบบระบบสื่อสารดาวเทียมและระบบเรดาร์ ซึ่งเทคโนโลยีการรับรู้ภาพวัตถุโดยคลื่นไมโครเวฟนั้น สามารถวัดได้ทั้งขนาด (Amplitude) และเฟส (Phase) ของคลื่นเมื่อทำการประมวลผลของสัญญาณ จึงสามารถแสดงผลเป็นภาพ 3 มิติของวัตถุได้ ซึ่งแตกต่างจากเซนเซอร์ทางแสง รังสีเอ็กซ์หรืออินฟราเรด ซึ่งวัดได้เพียงขนาดความแรงของคลื่นเท่านั้น ภาพที่ได้จึงเป็นเพียงภาพ 2 มิติ การจะให้ได้ภาพ 3 มิติ ทางแสงต้องอาศัยเทคนิคทางโฮโลกราฟี อย่างไรก็ตามการฉายภาพของวัตถุที่ได้จากการใช้แสงจะมีคุณภาพดีกว่าการใช้ไมโครเวฟ เนื่องด้วยความยาวคลื่นที่สั้นกว่า

1.5 ขอบข่ายของการวิจัย

1.5.1 ศึกษาส่วนที่เกี่ยวข้องกับระบบไมโครเวฟ พัฒนาการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไมโครเวฟต่าง ๆ ที่ต้องใช้ในการวิจัย โดยใช้แหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ 10 กิกะเฮิรตซ์ มีกำลังคลื่นที่ 10 มิลลิวัตต์ และศึกษาทฤษฎีการทำงานของแต่ละอุปกรณ์ในระบบ เพื่อที่จะสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดของระบบได้

1.5.2 พัฒนาระบบควบคุมและแสดงผลของการได้มาของข้อมูลด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น เพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบรวมถึงการระบุตำแหน่งตัวส่งและรับ แบบกึ่งอัตโนมัติ ผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์

1.6 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

1.6.1 ศึกษาทฤษฎีหลักการและการออกแบบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิต การควบคุม การส่ง การรับ และตรวจวัดคลื่นไมโครเวฟ รวมถึงหลักการทำงานและควบคุมอุปกรณ์อื่นๆ ที่จำเป็นเช่น สเตปมอเตอร์ที่ใช้

1.6.2 ศึกษาทฤษฎีการสร้างภาพจากข้อมูลของคลื่นที่มาจกวัตถุ

1.6.3 ออกแบบและสร้างระบบสแกน x, y แบบกึ่งอัตโนมัติช่วงระนาบกว้างและยาว 40×40 ตารางเซนติเมตร ที่มีความละเอียดในแต่ละพิกเซล 0.625 เซนติเมตร

1.6.4 ศึกษาและพัฒนาโปรแกรมที่ต้องใช้ควบคุมการทำงาน การเลื่อนตำแหน่งวัตถุ การเก็บข้อมูลสัญญาณและการประมวลผลสร้างภาพ

1.6.5 ทำการใช้โปรแกรมไมโครเวฟออฟฟิศและเซมแคด จำลองและปรับปรุงการทำงานของอุปกรณ์ไมโครเวฟต่างๆ ที่ได้ออกแบบขึ้น จากนั้นจึงทำการสร้าง

1.6.6 ทำการวัดและทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ไมโครเวฟแต่ละส่วนที่ใช้ในระบบ

1.6.7 ปรับระบบไมโครเวฟฮอว์โลกราฟีเดิมและใช้สายอากาศใหม่เพื่อทำการทดลองส่งและรับคลื่นสะท้อนจากวัตถุ เพื่อให้ได้ทั้งค่าความเข้มและเฟสของคลื่น แล้วพิจารณาสร้างภาพวัตถุเป็นแนวทางเบื้องต้น

1.6.8 ประกอบและทดสอบระบบโดยรวมพร้อมมีการทดสอบเก็บข้อมูลสร้างภาพวัตถุกับสายอากาศเดี่ยวก่อนประกอบอะเรย์

1.6.9 ศึกษาและวิเคราะห์การแก้ปัญหาที่เกิดจากผลการทดลองในแต่ละขั้นตอนการวิจัย

1.6.10 สร้างภาพไมโครเวฟจากระบบส่งและรับคลื่นแบบอะเรย์แปดสมาชิกผลัดกันทำงานด้วยสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้น

1.6.11 สรุปผลการวิจัย แนวทางในการดำเนินงานพัฒนาต่อไปในอนาคต

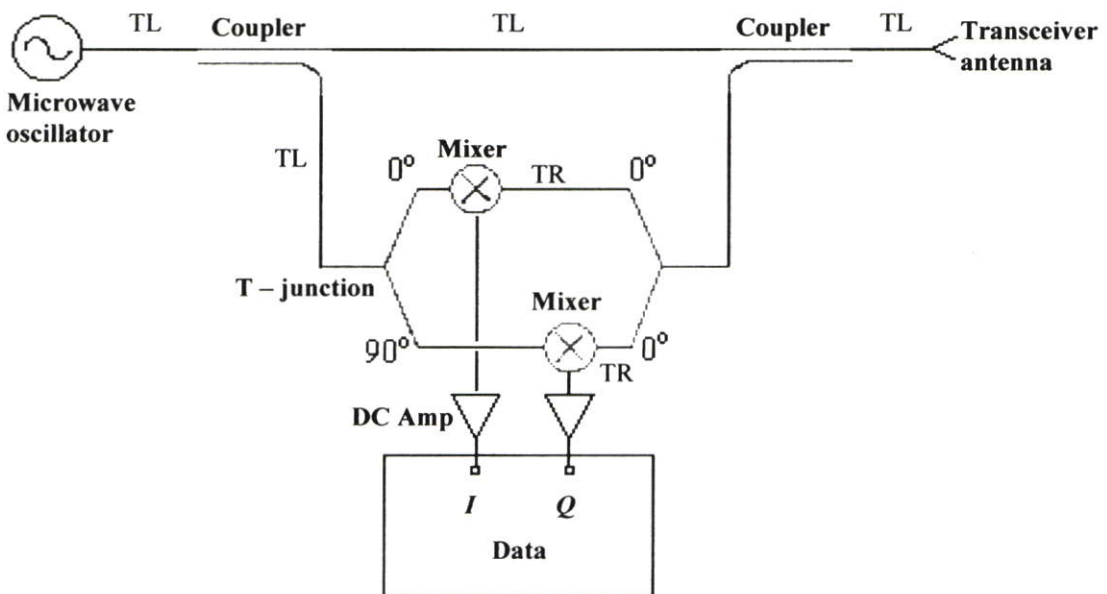
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

ในที่นี้จะได้กล่าวถึงหลักการในส่วนของระบบไมโครเวฟและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง รวมถึงทฤษฎีทางฟิสิกส์ของฮอโลกราฟีและเทคนิคการสร้างภาพวัตถุ 2 มิติที่สะท้อนคลื่นไมโครเวฟความถี่เดียว

2.1 ระบบไมโครเวฟ

ระบบไมโครเวฟพื้นฐานที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นแบบโฮโมไดน์ (Homodyne) มีองค์ประกอบดังรูปที่ 2.1 โดยไมโครเวฟออสซิลเลเตอร์ (microwave oscillator) ส่งคลื่นผ่านสายส่ง (transmission line) เข้าสู่อุปกรณ์คัปเปิลเลอร์ตัวแรก (coupler) แบ่งคลื่นออกไปในเส้นทางรองของสายส่งสู่อุปกรณ์ที-จังก์ชัน (T-Junction) แรก ทำการแยกคลื่นเป็นสองเส้นทาง โดยเส้นทางผ่านสายส่งความยาวต่างกันเท่ากับ $\frac{1}{4}$ ของความยาวคลื่นกำหนดให้มีเฟส 0 องศาและ 90 องศา แล้วในแต่ละเส้นทางต่อกับมิกเซอร์ (Mixer) ส่วนคลื่นในเส้นทางหลักของคัปเปิลเลอร์นั้นผ่านสายส่งมุ่งไปยังสายอากาศ (antenna) แผ่ออกไปยังวัตถุ และสะท้อนคลื่นจากวัตถุกลับเข้ามาที่คัปเปิลเลอร์ตัวสอง มาเข้าที่จังก์ชันสองแล้วแยกเป็น 2 คลื่น เท่าเทียบกันเข้าสู่มิกเซอร์ทั้งสองสัญญาณจากมิกเซอร์ก็จะส่งไปยัง วงจรขยายดีซี (amplifier DC) ได้เป็นข้อมูล I (Inphase) และ Q (Quadrature phase) [1] – [3]

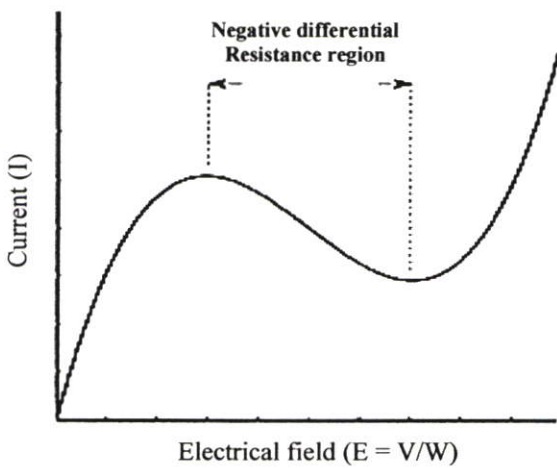


รูปที่ 2.1 ระบบส่งรับคลื่นไมโครเวฟของการสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ

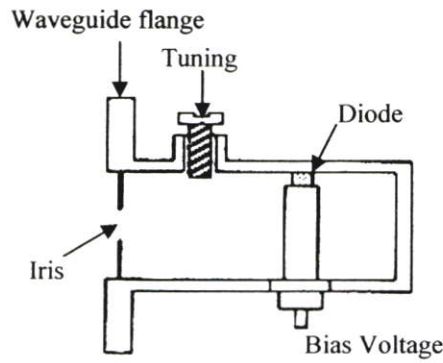
ในการพัฒนาระบบไมโครเวฟนั้นจำเป็นจะต้องเข้าใจหลักการทำงานของอุปกรณ์แต่ละส่วน เพื่อการเลือกซื้อหา กระทั่งออกแบบสร้างขึ้นเองให้มีสมบัติที่เหมาะสม

2.1.1 แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์ไดโอด (Gunn diode Oscillator)

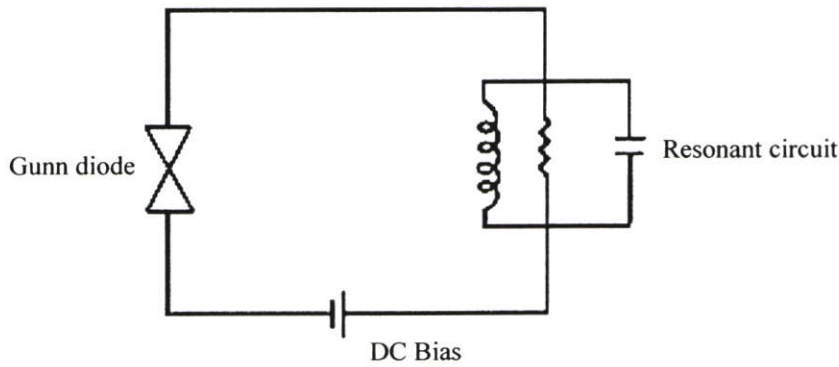
แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์ไดโอด [4] แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่ไมโครเวฟที่ใช้คุณสมบัติของปรากฏการณ์แบบกัมมันต์ (Gunn effect) ของผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium – Arsenide) ชนิด N โดยเมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมผลึกค่าน้อยๆ ที่คงที่ กระแสจะไหลเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับผลึก แต่เมื่อถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงในระดับหนึ่งเรียกว่า ค่าแรงดันขีดจำกัด V_{th} (threshold voltage) จะเกิดอเสถียรภาพทางไฟฟ้าในผลึก กระแสจะไหลเปลี่ยนค่าตลอดเวลาในลักษณะของพัลส์ (pulse) เป็นคาบด้วยค่าความถี่ผกผันกับระยะ W ระหว่างขั้วไฟฟ้า จะได้ความสัมพันธ์ของค่ากระแสเฉลี่ย I กับสนามไฟฟ้า E เป็นดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับกระแสในปรากฏการณ์ของกัมมันต์



รูปที่ 2.3 กัมมันต์ไดโอด



รูปที่ 2.4 วงจรสมนัยของกัณน์ไดโอดออสซิลเลเตอร์

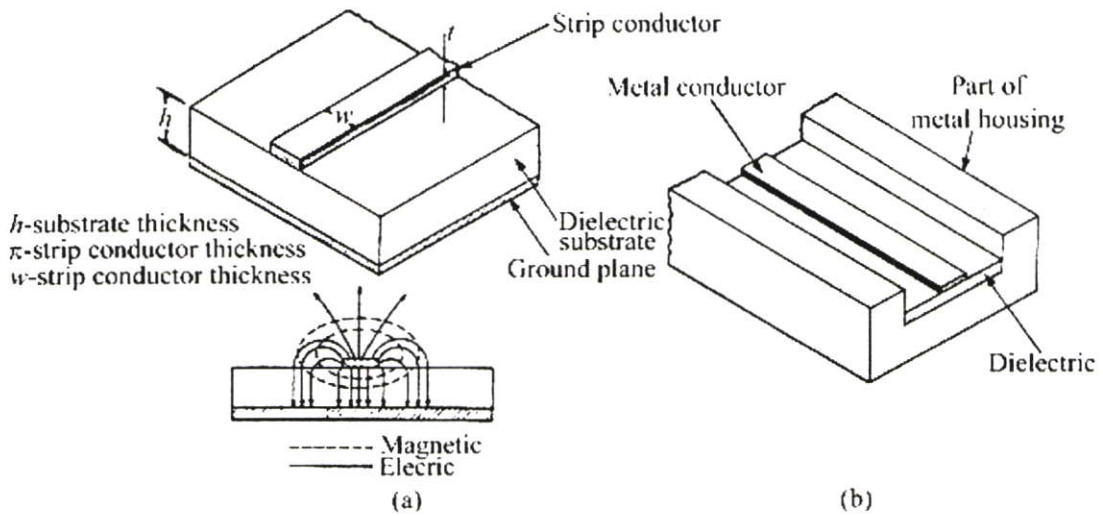
แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัณน์ไดโอดจะมีส่วนประกอบเป็น ดังรูปที่ 2.3 โดยมีการติดตัวกัณน์ไดโอดไว้ในโพรง (cavity) กล่องโลหะกึ่งปิดที่ส่วนของท่อนำคลื่น ซึ่งที่ความถี่สูง โครงสร้างนี้จะกระทำตัวเสมือนวงจรกำทอนทางไฟฟ้า (resonance circuit) ตามวงจรสมนัยในรูปที่ 2.4 กำหนดเลือกให้กระแสของกัณน์ไดโอดเป็นแบบฟังก์ชันไซน์ (sine) ความถี่เดียว ซึ่งกำหนดด้วยขนาดปริมาตรเมื่อปรับสกรู (tuner) ทำให้ได้คลื่นไมโครเวฟแผ่ออกมาจากช่องเปิด (iris) แบบคลื่นไซน์ที่ความถี่เดียวกันนี้

2.1.2 สายส่งสัญญาณ (Transmission line)

สายส่งสัญญาณมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ ไม่ว่าจะเป็น ไมโครสตริป (microstrip line) สตริปไลน์ (stripline) สล็อตไลน์ (slotline) และ โคแพลนนารีไลน์ (coplanar line) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำสายส่งแบบไมโครสตริปมาใช้งาน และเพื่อเป็นการสร้างความเข้าใจในหลักการของสายส่งไมโครสตริปจะต้องศึกษาลักษณะ โครงสร้างของแผ่นปริ้นท์หรือแผ่นพีซีบี (Printed Circuit Board; PCB) ใช้งานในย่านความถี่สูงที่มีต่อการออกแบบสายส่ง และการแมตชิงอิมพีแดนซ์ด้วย [5] – [7]

2.1.2.1 ไมโครสตริป

ไมโครสตริปเป็นสายส่งสัญญาณที่สร้างบนแผ่นปริ้นท์ที่นิยมใช้กันมาก เพราะราคาถูกกว่าและง่ายต่อการติดต่อกับอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์และสะดวกในการจับยึด ลักษณะและรูปแบบการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างไมโครสตริปเป็นดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 (a) ลักษณะโครงสร้างและการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของไมโครสตริป
(b) รูปแบบไมโครสตริปในทางปฏิบัติ

สายส่งสัญญาณไมโครสตริปจะประกอบด้วยชั้นฉนวนไดอิเล็กทริก ที่มีชั้นกราวด์อยู่หนึ่งด้านและลายสตริปอยู่อีกด้านดังในรูปที่ 2.5(b) สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าระหว่างลายสตริปและกราวด์ กระจายอยู่ในอากาศด้านบนรวมถึงในส่วนของฉนวน การกระจายจะมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ และส่วนมากพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกจำกัดที่บริเวณใกล้ ๆ ไมโครสตริป ถ้าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าสูงและเส้นแรงไฟฟ้าจบลงที่กราวด์ การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์จะยากมากหากต้องใช้ค่าไดอิเล็กทริกที่ต่างกัน ด้วยเหตุนี้ไมโครสตริปจึงไม่สามารถกำหนดในรูปแบบคลื่น TEM ได้เนื่องจากความเร็วเฟสของสนาม TEM ที่บริเวณไดอิเล็กทริกมีค่า $c/\sqrt{\epsilon_r}$ แตกต่างจากอากาศที่มีค่าเท่ากับ c

ปริมาณที่สำคัญในการกำหนดพฤติกรรมเคลื่อนที่ของคลื่น คือ ค่าลักษณะเฉพาะอิมพีแดนซ์ของไมโครสตริป (characteristic impedance) Z_0 ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ_r , ความหนา h และความกว้างลายสตริป w ส่วนใหญ่กำหนดค่า Z_0, ϵ_r และ h มาให้แล้วพิจารณาเลือก w เพราะว่าจะแบ่งกรณีที่กำหนดค่าให้มีความถูกต้องได้สองส่วน [6] กรณีที่หนึ่ง $w/h \leq 1$ และกรณีที่สอง $w/h > 1$ ทั้งสองกรณีจะใช้หาการแพร่กระจายเฉพาะที่สัมพันธ์ระหว่างไดอิเล็กทริกทั้งสอง เรียกว่า ค่าเอฟเฟกทีฟเพอร์มิททิวิตี ϵ_{eff} (Effective permittivity) เพื่อใช้ในการคำนวณไมโครสตริป โดยค่าที่ได้จะอยู่ในช่วง $1 < \epsilon_{eff} < \epsilon_r$ ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{w}}} \right) \quad (2.1)$$

ความเร็วเฟสและค่าการแพร่มีดังนี้

$$v_{phase} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad \text{และ} \quad \beta = k_0 \sqrt{\epsilon_{eff}} \quad (2.2)$$

เมื่อกำหนดขนาดของไมโครสตริปได้แล้วก็สามารถหาค่าลักษณะเฉพาะอิมพีแดนซ์ Z_0 จากการคำนวณได้ คือ

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln\left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h}\right) & \text{ที่ } \frac{w}{h} \leq 1 \\ \frac{120}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[\frac{w}{h} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{w}{h} + 1.44\right) \right]} & \text{ที่ } \frac{w}{h} \geq 1 \end{cases} \quad (2.3)$$

แต่ถ้าให้ค่าลักษณะเฉพาะอิมพีแดนซ์ Z_0 และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ_r ก็หาอัตราส่วน w/h ได้คือ

$$\frac{w}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \text{ที่ } w/h < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & \text{ที่ } w/h > 2 \end{cases} \quad (2.4)$$

โดยให้

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0 \sqrt{\epsilon_r}}$$

2.1.2.2 แผ่นปรินท์

แผ่นปรินท์ที่ใช้ทำไมโครสตริปเป็นแบบมีชั้นทองแดง 2 ด้าน (Double – side metal – clad board) ชนิดพิเศษ ซึ่งส่วนที่เป็นชั้นฐานหรือชั้นซับสเตรท (substrate) เป็นวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material) ที่มีเนื้อสม่ำเสมออย่างมาก

ชนิดของวัสดุไดอิเล็กทริกจะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน มาตรฐานวัสดุไดอิเล็กทริกของแผ่นปริ้นท์ชั้นต่ำและใช้กันแพร่หลายได้แก่ FR4 (Fiber reinforced grade 4) ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) 4.5 ที่ความถี่ 1 GHz. ซึ่งไม่เหมาะสมกับการใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟ ชั้สเตรทโดยทั่วไปจะมีลักษณะที่ไม่เหมาะสมทั้งทางกลและทางไฟฟ้าในการสร้างวงจรไมโครเวฟ แต่ได้มีการวิจัยพัฒนาทางด้านวัสดุขึ้น ทำให้ได้ชั้สเตรทที่มีสมบัติเหมาะสมดังต่อไปนี้

1. ค่าการสูญเสีย Loss tangent ($\tan \delta$) ต่ำ
2. ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสม่ำเสมอ
3. เป็นแผ่นบาง
4. ไม่บิดงอ
5. แผ่นตัวนำไม่หลุดลอกง่าย
6. มีความหนาสม่ำเสมอ
7. เกิดปฏิกิริยาเคมีได้ช้า
8. มีความคงทนแข็งแรง
9. ตัด เจาะ ง่าย
10. มีความหนาหลายขนาด
11. มีเสถียรภาพ
12. ทนความร้อน

ที่นิยมใช้กัน ได้แก่ RT/Duroid, Oak, Rexolite, Epsilam, Superstrate และ CuFlon มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในช่วง 2.1 (CuFlon) ถึง 10.3 (Epsilam) ทั้งนี้การใช้งานจะขึ้นกับความหนาของชั้สเตรทด้วย [8] – [10]

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุชั้สเตรท

Material	ϵ_r	$\tan \delta$ at 10 GHz
Alumina	9 - 10	6×10^{-4}
Beryllia	6.6	1×10^{-4}
Glass	5	20×10^{-4}
Quartz (fused)	3.8	1×10^{-4}
Rytle	100	4×10^{-4}
Sapphire	9.3 – 11.7	1×10^{-4}
GaAs	13	16×10^{-4}

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

Material	ϵ_r	$\tan \delta$ at 10 GHz
Silicon	12	$10 - 100 \times 10^{-4}$
RT/Duroid 5880	2.22	10×10^{-4}

โดยที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงช่วยทำให้สามารถลดขนาดความกว้างของแถบสตริปและลดปริมาณการแผ่คลื่นสำหรับโครงสร้างสายส่งสัญญาณ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าลอสแทนเจนมีค่าเปลี่ยนแปลงกับความถี่

2.1.2.3 แมตซิงอิมพีแดนซ์และสมิตชาร์ต (Impedance matching and the Smith chart)

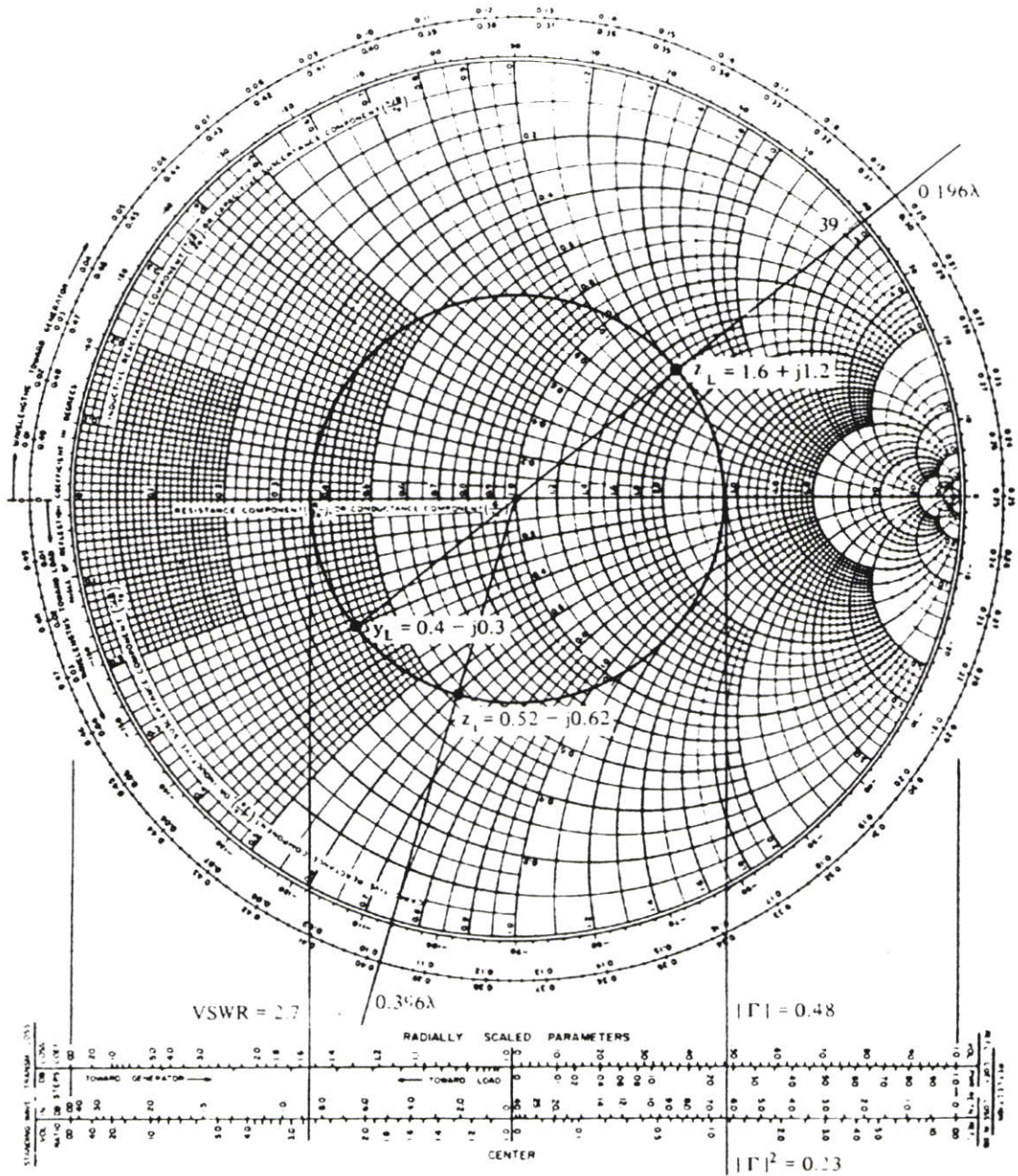
การส่งผ่านคลื่นในวงจรไมโครเวฟจำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของความต่อเนื่องในการเดินทางของคลื่น โดยสามารถพิจารณาในรูปของการแมตอิมพีแดนซ์ (Impedance match) ซึ่งในแต่ละชั้นส่วนในระบบไมโครเวฟ เช่นในสายอากาศ วงจรแอมป์ลิไฟร์ ตัวมิกเซอร์ เป็นต้น ถ้ามีอิมพีแดนซ์เท่ากับสายส่งแล้วจะทำให้การส่งกำลังจากจุดหนึ่งไปอีกจุดไม่มีการสะท้อนเกิดขึ้น

ในการระบุและปรับค่าอิมพีแดนซ์ของแต่ละอุปกรณ์เพื่อทำการแมตซิง ทำได้หลายวิธี ตั้งแต่ทำการวัดจริงจากอุปกรณ์ การคำนวณจากสมการ และสุดท้ายใช้สมิตชาร์ต ซึ่งได้รับความนิยมรับว่าเป็นพื้นฐานที่สะดวกในการหาค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนไป

สมิตชาร์ตแสดงในรูปกราฟโพล่า สามารถแสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) โดยแสดงในกราฟที่มีค่าแมกนิจูด และเฟส ในรูป $\Gamma = |\Gamma|e^{j\theta}$ ซึ่งค่าแมกนิจูดจะแสดงในรูปของรัศมี ($|\Gamma| \leq 1$) ที่กึ่งกลางกราฟ และมุม θ ($-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$) หากวัดจากด้านซ้ายไปตามเส้นผ่านศูนย์กลางค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสามารถแสดงอยู่บนกราฟสมิตชาร์ตได้ทั้งหมด

สมิตชาร์ตสามารถแก้ปัญหาเรื่องการแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดเมื่อต่อกับสายส่งที่มีความยาวต่าง ๆ และแปลงเป็นค่าแอดมิตแตนซ์ได้ง่าย จากการเขียนเส้นความสัมพัทธ์บนกราฟ โดยอิมพีแดนซ์ที่ได้จากสมิตชาร์ตจะเป็นค่าที่มาจากกรานอมาไลซ์ $z = Z/Z_0$ เช่น ตัวอย่างมีสายส่ง $Z_0 = 50\Omega$ ที่ความยาว 32 เซนติเมตรต่อกับโหลดที่มีค่าอิมพีแดนซ์ $Z_L = 80 + j60\Omega$ ใช้กับความถี่ที่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ มีความยาวคลื่นบนสายส่ง 10 เซนติเมตร เริ่มโดยกรานอมาไลซ์ค่าโหลดอิมพีแดนซ์ด้วย Z_0 ระบุจุดบนกราฟสมิตชาร์ตในรูปที่ 2.6 [9] - [10] ด้วยการวาดวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่กึ่งกลางกราฟ มีรัศมีตัดผ่านจุด Z_L เพื่อหาค่านอมาไลซ์อินพุทอิมพีแดนซ์ z_i ได้จากจุดบนวงกลมนี้โดยพิจารณาจากความยาวของสายส่งที่ต่อกับโหลดเทียบกับความยาวคลื่นบนสายส่งได้ $d = 32/10 = 3.2$ โดยจะพิจารณาวน (ตามเข็มนาฬิกา) ไป 1 รอบ ทุก ๆ ครั้งความยาวคลื่นก็จึงได้ 6.4 รอบ แล้วจึงอ่านค่านอมาไลซ์อินพุทอิมพีแดนซ์ Z_i ส่วนค่านอมาไลซ์โหลดแอดมิต

แดนซ์(y_L) ได้จากจุดตัดที่เกิดขึ้นที่ด้านตรงข้ามของวงกลมของกราวด์เส้นผ่านจากจุด z_L กับจุดศูนย์กลาง แล้วหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ($|\Gamma|$) และค่าสัดส่วนสแตนด์ดิ้งเวฟ (VSWR) สามารถหาได้จากการอ่านสเกลด้านล่างของกราฟสมิตชาร์ตของวงกลมที่มีโวลเดอิมพีแดนซ์หรือแอดมิตแดนซ์มากที่สุด โดยมีค่าต่าง ๆ ของตัวอย่าง ดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.6 สมิตชาร์ต

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากกราฟสมิตชาร์ต

จุดบนกราฟสมิตชาร์ต	ค่าที่อ่านได้
นอมาไลซ์โพลคิมพีแดนซ์ (z_i)	$1.6 + j1.2 \ \Omega$
นอมาไลซ์อินพุทอิมพีแดนซ์ (z_i)	$0.526 - j0.62 \ \Omega$
อินพุทอิมพีแดนซ์ (Z_i)	$26 - j31 \ \Omega$
นอมาไลซ์โพลคแอคมิตแดนซ์ (y_L)	$1.6 + j1.2 \ \Omega$
สัดส่วนสแตนดิ่งเวฟ (VSWR)	2.70
สัมประสิทธิ์การสะท้อน ($ \Gamma $)	0.48

2.1.3 อุปกรณ์ควบคุมการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟ

หลักการควบคุมส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟและการปรับแต่งของสัญญาณขึ้นกับชนิดของสัญญาณที่จะให้เป็นในแต่ละส่วนของระบบ หากจะแบ่งอุปกรณ์ตามหน้าที่ของการควบคุมสัญญาณไมโครเวฟที่สำคัญ ๆ ได้แก่ ไคเรคชันนัลคัปเปิลเลอร์ (directional coupler) ทำหน้าที่แยกกำลังที่ใช้ส่งผ่านจากเส้นทางหลักไปให้กับเส้นทางรอง สวิตช์ไมโครเวฟ (microwave switches) ทำหน้าที่เปิด ปิด หรือเลือกเส้นทางเดินของคลื่น ทีจังก์ชัน (T - junction) ทำหน้าที่แยกสัญญาณออกเป็น 2 ส่วนและเปลี่ยนสถานะของเฟสสัญญาณทั้งสองให้มีความสัมพันธ์กันตามต้องการ เฟสชิฟเตอร์ (phase shifter) ทำหน้าที่ปรับแปรมุมเฟสของคลื่นในสายส่งสัญญาณ และตัวลดทอนไมโครเวฟ (microwave attenuators) จะทำการลดทอนกำลังของสัญญาณ เมื่อมีความสามารถในการสร้างการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้ตามต้องการจึงพัฒนาทำเป็นอุปกรณ์สำเร็จนำไปใช้ในระบบต่าง ๆ ได้แก่ เฟสอะเรย์เรดาร์ ระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม ในกรณีของสวิตช์และเฟสชิฟเตอร์อาจใช้สัญญาณโวลต์ (voltage signal) ในการควบคุมการไบอัส (bias) รอยต่อของสารกึ่งตัวนำไดโอดชนิดพีไอเอ็น (PIN diode)

ในงานวิจัยนี้ ไคเรคชันนัลคัปเปิลเลอร์ สวิตช์ไมโครเวฟ ทีจังก์ชัน และเฟสชิฟเตอร์มีความสำคัญมาก โดยจะมาใช้ในควบคุมสัญญาณไมโครเวฟเพื่อทำให้มีการแบ่ง การหยุดหรือเปลี่ยนเส้นทาง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจกับอุปกรณ์ทั้ง 4 นี้

2.1.3.1 ไคเรคชันนัลคัปเปิลเลอร์แบบเส้นขนาน (Parallel Line Directional Coupler)

ไคเรคชันนัลคัปเปิลเลอร์แบบเส้นขนานในแบบไมโครตรีปมีลักษณะดังรูปที่ 2.7 มีหลักการเดียวกับคัปเปิลเลอร์แบบอื่น ๆ คือ การแยกกำลังที่ใช้ส่งผ่านจากเส้นทางหลักไปให้กับเส้นทางรอง โดยแบ่งกำลังขึ้นกับระยะห่าง (Spacing, S) ในการกำหนดระยะห่างนี้ต้องการกำลัง

บางส่วนของกำลังการส่งกำลังจากพอร์ทที่ 1 (port 1) ไปยังพอร์ทที่ 2 โดยผ่านตัวคัปเปิลเลอร์แล้วแยกออกส่งผ่านไปยังพอร์ทที่ 3 ที่อยู่ฝั่งตรงข้าม และเมื่อใช้งานจะออกแบบให้ไม่มีกำลังออกที่พอร์ทที่ 4 ลดการสะท้อนกลับโดยเลือกต่อตัวต้านทานที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับสายส่ง เช่น ที่ $Z_0 = 50$ โอห์ม [11] – [12]

ค่าตัวแปรที่ใช้กับโคเรชันนัลคัปเปิลเลอร์ ซึ่งพิจารณาในทอมแรงดันได้ดังนี้

C = ค่าการคัปปลิง (coupling factor)

D = ค่าโคเรคตีวิตี (directivity)

I = ค่าไอโซเลชัน (isolation)

T = ค่าการส่งผ่าน (transmission factor)

โดยที่ค่าการคัปปลิง (C) อยู่ในทอมของแรงดันไฟฟ้าพอร์ทที่ 3 เทียบกับพอร์ทที่ 1

$$C = \frac{P_3}{P_1} = 10 \log \frac{P_3}{P_1} (dB) \quad (2.5)$$

เมื่อพิจารณาคัปเปิลเลอร์ที่ 6 dB พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่พอร์ทที่ 3 จะเท่ากับหนึ่งในสี่ส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่พอร์ทที่ 1 หรือ อาจกล่าวได้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่พอร์ท 3 มีค่า -6 dB เทียบกับพอร์ทที่ 1 ในส่วนของค่าทรานสมิซชัน (T) ซึ่งเป็นการวัดการส่งผ่านโดยตรงที่แขนปฐมภูมิ (primary arm) ของคัปเปิลเลอร์ อยู่ในทอมอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่พอร์ท 2 กับพอร์ทที่ 1

$$T = \frac{P_2}{P_1} = 10 \log \frac{P_2}{P_1} (dB) \quad (2.6)$$

ส่วนค่าโคเรคตีวิตี (D) นั้น อยู่ในทอมอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่พอร์ทที่ 4 เทียบพอร์ทที่ 3

$$D = \frac{P_4}{P_3} = 10 \log \frac{P_4}{P_3} (dB) \quad (2.7)$$

ค่าโคเรคตีวิตีส่วนนี้กำหนดโดยระบุให้พอร์ทที่ 4 มีโหลด (Load) ที่มีอิมพีแดนซ์เท่ากับสายส่งต่ออยู่ ซึ่งค่าโคเรคตีวิตีในอุดมคติ $D = 0$ นั่นก็คือมีการแบ่งกำลังคลื่นไปที่ พอร์ทที่ 2 และ 3 เท่านั้น ส่วนค่าไอโซเลชัน (I) เป็นค่าในทอมอัตราส่วนระหว่างกำลังคลื่นพอร์ทที่ 4 กับพอร์ทที่ 1

$$I = \frac{P_4}{P_1} = 10 \log \frac{P_4}{P_1} (dB) \quad (2.8)$$

การคับปลิงจากเส้นทางหนึ่งไปยังอีกเส้นทางหนึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามไปตามความยาวตัวคับเพลอร์ ซึ่งจะแบ่งการพิจารณาได้เป็นสองกรณี คือ โหมดคู่ (even mode) และ โหมดคี่ (odd mode) ทั้งสองกรณีจะนำมาใช้ในการพิจารณาค่าตัวแปรอื่นต่อไป ในที่นี้ โครงสร้างโคเรชันนัลคับเพลอร์มีค่าตัวแปรต่าง ๆ คือ

- s = ระยะห่างระหว่างสองเส้นทาง
- w_1 = ความกว้างของไมโครสตริปคับเพลอร์
- l = ช่วงความยาวของไมโครสตริปคับเพลอร์
- w_2 = ความกว้างของไมโครสตริปทรานสมิซชัน

โดยมีค่าที่ให้มาพร้อมกับสมบัติของแผ่นสตริป คือ

- Z_0 = ค่าอิมพีแดนซ์
- C = ค่าการคับปลิง
- ϵ_r = ค่าเพอร์มิตติวิตีของแผ่นสตริป
- h = ค่าความหนาของแผ่นสตริป
- f = ความถี่ที่ใช้งาน

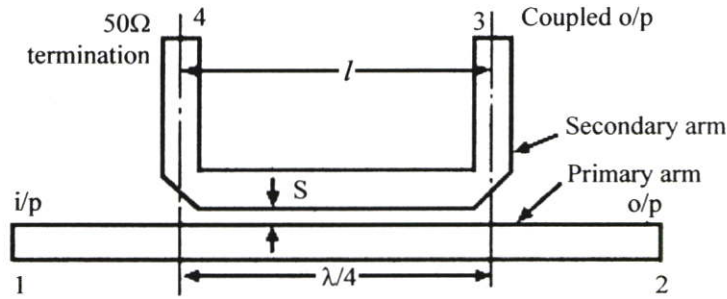
ในการออกแบบสร้างอันดับแรกจะต้องหาค่า Z_{0e} และ Z_{0o} ที่มีความสัมพันธ์กับค่า C และ Z_0 ได้ดังสมการ

$$Z_{0e} = Z_0 \left\{ \frac{1+10^{C/20}}{1-10^{C/20}} \right\}^{0.5} \quad (2.9)$$

$$Z_{0o} = Z_0 \left\{ \frac{1-10^{C/20}}{1+10^{C/20}} \right\}^{0.5} \quad (2.10)$$

Z_{0e} และ Z_{0o} คือ ค่าอิมพีแดนซ์ภายในที่เป็นไปได้ในโหมดคู่และโหมดคี่บนตัวคับเพลอร์ และในกรณีที่คิดรวมค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดบนแผ่นสตริปจะได้เป็น Z_{0se} ซึ่งอยู่ในโหมดคู่ได้ดังสมการ

$$Z_{0se} = \frac{Z_{0e}}{2} \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.7 ไครเรชันนัลคัปเปิลอร์แบบเส้นขนาน

ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดบนสตริป Z_{0so} ที่อยู่ในโหมดคี่

$$Z_{0so} = \frac{Z_{0o}}{2} \quad (2.12)$$

ต่อมาคำนวณหาค่าความกว้างของไมโครสตริปเส้นเดี่ยว $(w/h)_s$ เมื่อพิจารณาในส่วน
ของโหมคคู่และโหมคคี่ได้ $(w/h)_{se}$ และ $(w/h)_{so}$ ตามลำดับ ด้วยการพิจารณาด้วยสมการไมโคร-
สตริปเส้นเดี่ยวในคลื่น TEM ที่

$$\frac{w}{h} = \left[\frac{e^H}{8} - \frac{1}{4e^H} \right]^{-1} \quad (2.13)$$

เมื่อ

$$H = \frac{Z_0 \sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}{1.119.9} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2(\epsilon_r + 1)} \left[\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{\pi} \right] \quad (2.14)$$

โดยแทนค่า Z_0 ในสมการ (2.14) ด้วย Z_{0e} และ Z_{0o} ทำให้ได้ค่าความกว้างของไมโคร-
สตริปเส้นเดี่ยวของโหมคคู่และโหมคคี่ $(w/h)_{se}$, $(w/h)_{so}$ ตามลำดับ จากนั้นทำการคำนวณค่า
 (w/h) และ (s/h) ของตัวคัปเปิลอร์ได้ดังสมการ

$$\frac{s}{h} = \frac{2}{\pi} = \cosh^{-1} \left\{ \frac{\cosh\left[\left(\frac{\pi}{2}\right)\left(\frac{w}{h}\right)_{se}\right] + \cosh\left[\left(\frac{\pi}{2}\right)\left(\frac{w}{h}\right)_{so}\right]}{\cosh\left[\left(\frac{\pi}{2}\right)\left(\frac{w}{h}\right)_{so}\right] - \cosh\left[\left(\frac{\pi}{2}\right)\left(\frac{w}{h}\right)_{se}\right]} \right\}^{-2} \quad (2.15)$$

หลังจากได้ (s/h) นำมาคำนวณกลับหาค่า (w/h)

$$(w/h)_{se} = (2/\pi) \cosh^{-1} \left(\frac{2d - g + 1}{g + 1} \right) \quad (2.16)$$

ซึ่ง

$$g = \cosh \left[\left(\frac{\pi}{2} \right) \left(\frac{s}{h} \right) \right] \quad (2.17)$$

และ

$$d = \cosh \left[\frac{\pi w}{h} + \frac{\pi s}{2h} \right] \quad (2.18)$$

เราสามารถจัดรูปสมการ (2.16) ให้อยู่ในรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$d = \frac{g - 1 + \{(g + 1) \cosh[(\pi/2)(w/h)_{se}]\}}{2} \quad (2.19)$$

แทนค่า d ที่ได้ลงในสมการ (2.20) เพื่อหาค่า (w/h)

$$\frac{w}{h} = \frac{\cosh^{-1} d}{\pi} - \frac{s}{2h} \quad (2.20)$$

ส่วนค่า (s/h) และ (w/h) ที่ได้จากการคำนวณในโหมดที่ โดยที่ $\varepsilon_r < 6$

$$\left(\frac{w}{h} \right)_{so} = \frac{2}{\pi} \cosh^{-1} \left[\frac{2d - g - 1}{g - 1} \right] + \left[\frac{4}{\pi(1 + \varepsilon_r/2)} \right] \cosh^{-1} \left[1 + \frac{2w/h}{s/h} \right] \quad (2.21)$$

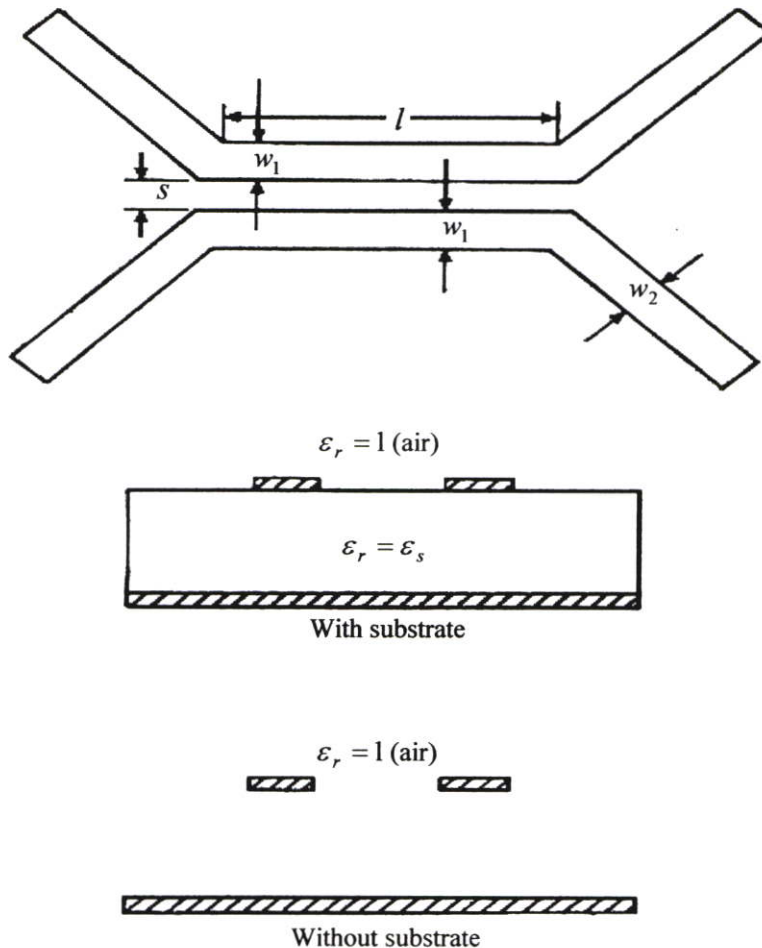
และที่ $\varepsilon_r > 6$

$$\left(\frac{w}{h} \right)_{so} = \frac{2}{\pi} \cosh^{-1} \left[\frac{2d - g - 1}{g - 1} \right] + \frac{1}{\pi} \cosh^{-1} \left[1 + \frac{2w/h}{s/h} \right] \quad (2.22)$$

ขั้นต่อมาทำการคำนวณค่าความยาวคัปเปิลเลอร์ l โดยความยาวในแต่ละช่วงของไมโคร-สตริปจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่เกิดจากค่าเพอร์มิตติวิตีของสตริป จากที่ทราบมาช่วงที่คลื่นเคลื่อนที่บนแผ่นสตริปที่ใช้คำนวณหาความยาวคัปเปิลเลอร์อยู่ในช่วง $\lambda_{gm}/4$ โดย λ_{gm} คือความยาวคลื่น เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องของความยาวคัปเปิลเลอร์จะได้จากการนำเอาความยาวที่ได้จากทั้งสองโหมดมาเฉลี่ยกันจะได้

$$\lambda_{ge} = \frac{300Z_{0e}}{fZ_{0le}} \quad (2.23)$$

$$\lambda_{go} = \frac{300Z_{0o}}{fZ_{0lo}} \quad (2.24)$$



รูปที่ 2.8 โครงสร้างโคเรคชันนัลคัปเปิลเลอร์บนแผ่นไมโครสตริป

โดย

$$Z_{0ie} = \frac{1}{cC_e} \quad (2.25)$$

$$Z_{0io} = \frac{1}{cC_o} \quad (2.26)$$

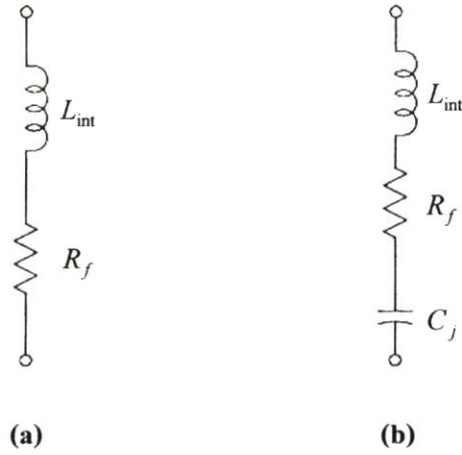
ซึ่งค่า Z_{0ie} และ Z_{0io} คือค่าอิมพีแดนซ์เมื่อไม่คิดถึงการมีอยู่ของสัปสเตรท และเมื่อได้ λ_{ge} และ λ_{go} ก็ทำการคำนวณหาความยาวคลื่นเพลตอร์ได้จาก แสดงในรูปที่ 2.8

$$l = \frac{\lambda_{go} + \lambda_{ge}}{8} = (2n-1) \frac{\lambda_{go} + \lambda_{ge}}{8} \quad (2.27)$$

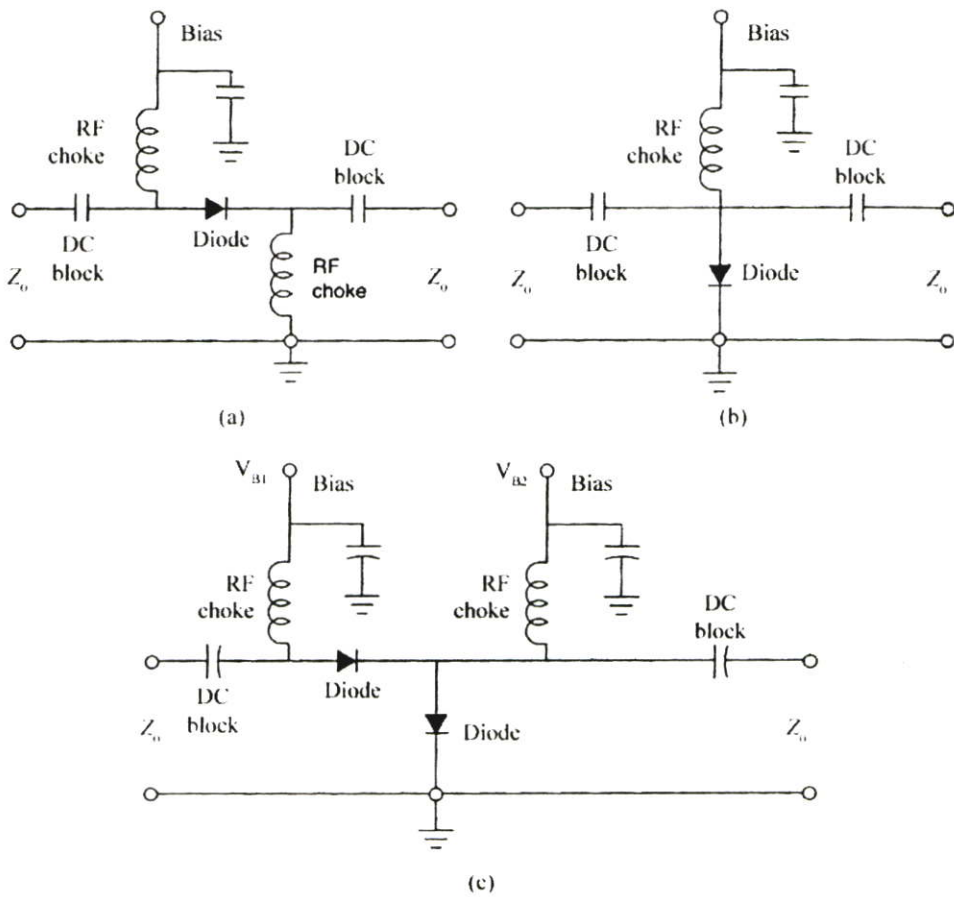
2.1.3.2 สวิตช์ไมโครเวฟ (Microwave switches)

สวิตช์ไมโครเวฟอาศัยหลักของรีเลย์ (Relay) หรือ PIN diode ซึ่งในกรณีหลังนี้มีวงจรสมนัยในขณะทำการไบอัสตรงกับไบอัสกลับ ดังรูปที่ 2.9 สถานะของสวิตช์ไมโครเวฟที่กำหนดด้วยสมบัติของตัวไดโอดจะสามารถทำงานได้เร็วทันการเปลี่ยนแปลงของคลื่นและเหมาะที่จะใช้ประกอบรวมกับอุปกรณ์ไมโครเวฟอื่น ๆ โดยการไบอัสของ PIN diode จะมีกระแสไบอัสตรงอยู่ที่ประมาณ 10 มิลลิแอมป์และมีแรงดันไบอัสกลับอยู่ที่ 40 – 60 โวลต์ เมื่อนำมาใช้งานในสถานะสวิตช์ [13]

การทำงานของวงจรสวิตช์ไมโครเวฟโดยใช้ PIN diode ที่ต่อใช้อยู่ในรูปของสวิตช์ SPST (Single pole single throw) คือ มีสัญญาณอินพุตเชื่อมต่อหรือแยกจากทางเอาต์พุตตามแต่กำหนดด้วยสัญญาณควบคุม การต่อวงจรนั้นสามารถทำได้สามแบบต่อไปนี้คือ การต่อแบบอนุกรม การต่อแบบขนาน และการต่อแบบผสม ดังรูปที่ 2.10 โดยต่อร่วมกับอุปกรณ์อื่น ๆ ได้แก่ ตัวเก็บประจุเพื่อป้องกันแรงดันไฟตรงรบกวนสัญญาณ โดยต้องมีค่าความเป็นอิมพีแดนซ์ต่ำมากที่ความถี่ไมโครเวฟ และต้องมีตัวเหนี่ยวนำในรูปของโช้คอาร์เอฟ (RF choke) เพื่อเป็นทางผ่านของกระแสตรงจากการไบอัสไดโอด โดยต้องมีค่าอิมพีแดนซ์สูง ที่ความถี่ไมโครเวฟซึ่งอาจใช้สกริปที่ความยาวหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่นทำหน้าที่ดังกล่าว



รูปที่ 2.9 วงจรสมนัยของ PIN diode (a) ขณะไบอัสตรง (b) ขณะไบอัสกลับ



รูปที่ 2.10 วงจรสมนัยของสวิตช์ไมโครเวฟจากการต่อ PIN diode กับอุปกรณ์อื่น

(a) แบบอนุกรม (b) แบบขนาน (c) แบบผสม

2.1.3.3 ที่จังก์ชัน (T - junction)

ที่จังก์ชันที่ใช้เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างวงจรสายนำสัญญาณบนไมโครสตริป [11] – [12] เช่น การทำสตับ แมตชิง (Stub matching) สตับฟิวเตอร์ (Stub filter) และคัปเปิลอร์แบบบรานช์ (branch coupler) โดยมีลักษณะของที่จังก์ชันใช้เลือกเส้นทางผ่านของคลื่นไมโครเวฟ ดังรูปที่ 2.11 การวิเคราะห์หาค่าการเก็บประจุและค่าเหนี่ยวนำที่มาจากที่จังก์ชันบนไมโครสตริป ประกอบด้วย ค่าตัวเหนี่ยวนำที่ต่อลำดับบนเส้นทางหลัก L_1 และ L_2 บนแขนต่อของที่จังก์ชัน และค่าตัวเก็บประจุ C_T ที่จุดต่อ กรณีตัวอย่างสำหรับค่าตัวแปรต่าง ๆ โดยให้สายส่งแขนหลัก T_1 ของที่จังก์ชันมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์มและ $\epsilon_r = 9.9$ มีความสัมพันธ์ดังนี้ คือ

$$\frac{C_T}{W_1} (pF/m) = \frac{100}{\tanh(0.0072Z_0)} + 0.64Z_0 - 261 \quad \text{for } 25 \leq Z_0 \leq 100 \quad (2.28)$$

โดยค่า Z_0 คือค่าลักษณะเฉพาะอิมพีแดนซ์

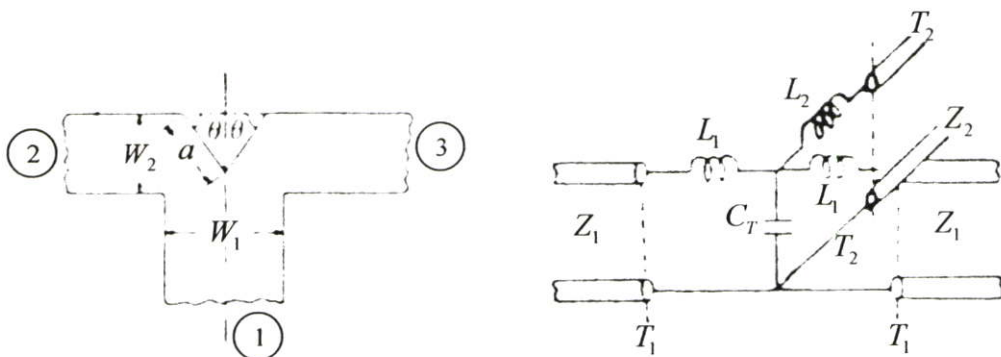
$$\frac{L_1}{h} (nH/m) = -\frac{W_2}{h} \left[\frac{W_2}{h} \left(-0.016 \frac{W_1}{h} + 0.64 \right) + \frac{0.016}{W_1/h} \right] L_{w1}$$

$$\text{for } 0.5 \leq \left(\frac{W_1}{h}, \frac{W_2}{h} \right) \leq 2.0 \quad (2.29)$$

$$\frac{L_2}{h} (nH/m) = \left[\left(0.12 \frac{W_1}{h} - 0.47 \right) \frac{W_2}{h} + 0.195 \frac{W_1}{h} - 0.357 + 0.0283 \sin \left(\pi \frac{W_1}{h} - 0.75\pi \right) \right] L_{w2}$$

$$\text{for } 1 \leq \frac{W_1}{h} \leq 2, \quad 0.5 \leq \frac{W_2}{h} \leq 2 \quad (2.30)$$

เมื่อ L_w คือค่าตัวเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาว (nH/m) สำหรับไมโครสตริปที่กว้าง W โดยสมการที่กล่าวมาข้างต้นจะเป็นที่จังก์ชันแบบสมมาตร



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของที่จังก์ชันบนแผ่นไมโครสตริป

2.1.3.4 เฟสชิฟเตอร์ (Phase Shifter)

หลักการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสขึ้นที่สายนำสัญญาณ วิธีที่ง่ายที่สุดคือการทำให้เส้นทางของสายนำสัญญาณ (Transmission line) ให้มีความยาวเปลี่ยนแปลงไปเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเส้นทางอื่น [11] – [13] โดยปกติสามารถกำหนดการเปลี่ยนเฟสจากสมการ ซึ่งการเปลี่ยนเฟสจะสัมพันธ์กับความยาวคลื่น

$$\Delta\phi = \beta(l_2 - l_1) = \beta\Delta l \quad (2.31)$$

ที่

$$\Delta l = l_2 - l_1 \quad (2.32)$$

โดยตามธรรมชาติของสายนำสัญญาณเมื่อเปลี่ยนความยาว (Δl) จะทำให้ค่าเฟสของการแพร่กระจายคลื่น β เปลี่ยนเป็นไปตามสมการการแพร่กระจายคลื่น TEM

$$\beta = \omega/V_p \quad (2.33)$$

จะได้เป็น

$$\Delta\phi = \omega\Delta l/V_p \quad (2.34)$$

โดย V_p และ ω คือความเร็วเฟสและอัตราเร็วเชิงมุมของสัญญาณในทรานสมิซชันไลน์ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการ (2.34) สามารถกำหนดให้อยู่ในเทอมของเวลาที่คล้อยจกจากการเปลี่ยนเฟสได้ดังสมการ

$$\tau_d = \Delta\phi/\omega = \Delta l/V_p \quad (2.35)$$

2.1.4 มิกเซอร์ (Mixer Design)

มิกเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนช่วงความถี่สูง มาอยู่ในช่วงความถี่ต่ำ [13] – [14] ซึ่งในอุปกรณ์ทางไมโครเวฟได้นำหลักการของมิกเซอร์ไปใช้งานมากมาย เช่น ทำเป็นตัวขยายสัญญาณ ตัวจำกัดสัญญาณ และตัวตรวจวัดสัญญาณ ถึงแม้ว่าจะนำหลักการมิกเซอร์มาใช้กัน

แพร่หลายแต่การศึกษาหลักการของมิกเซอร์ก็ยังคงพัฒนาต่อไปเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในส่วนที่ใช้ในการจำกัดช่วงความถี่ที่สูงขึ้นไป ผลได้ง่ายขึ้น ลดการสูญเสียของสัญญาณให้น้อยที่สุด ลดสัญญาณรบกวนและลดต้นทุนการผลิต

พิจารณาตัวอย่างของมิกเซอร์ชนิดที่ทำหน้าที่คูณสองสัญญาณเข้าด้วยกัน (Multiplier mixer) ดังรูปที่ 2.12 ถ้าสัญญาณอ้างอิง (Local oscillator, LO) ที่มีค่าเป็น

$$V_{LO}(t) = I \sin(\omega_{LO}t) \quad (2.36)$$

และสัญญาณคลื่นไมโครเวฟ (Radio frequency, RF) ที่มีค่าเท่ากับ

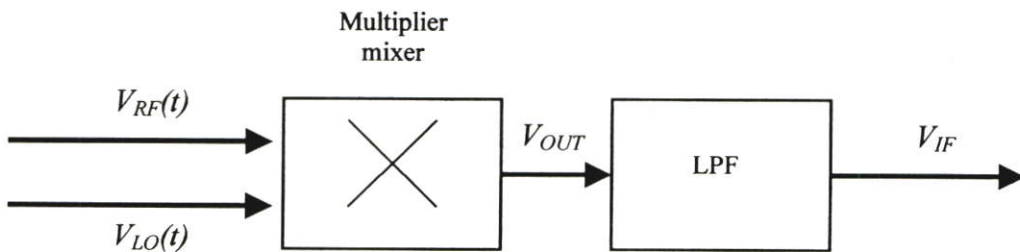
$$V_{RF}(t) = A \sin(\omega_{RF}t + \phi) \quad (2.37)$$

เมื่อผสมสัญญาณได้สัญญาณใหม่ ที่มีค่าเท่ากับ

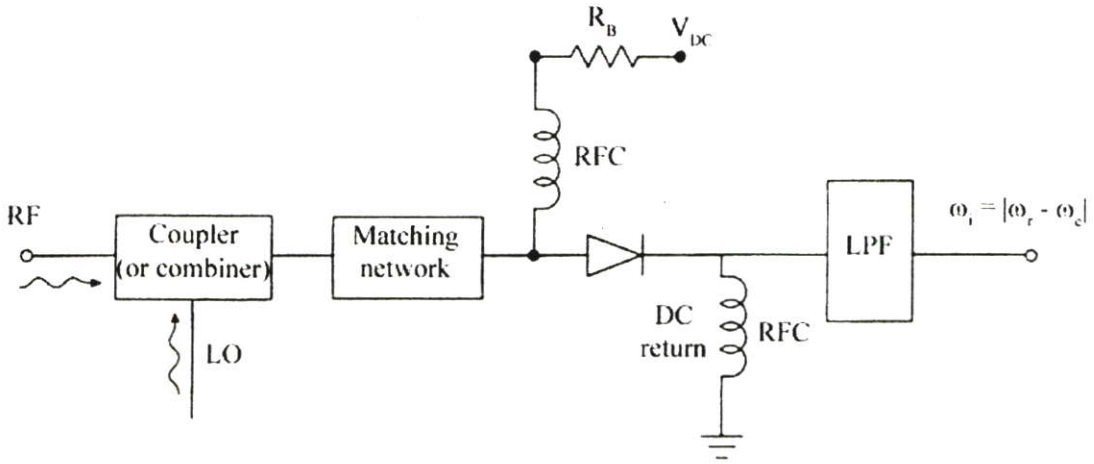
$$V_{out}(t) = A \sin(\omega_{RF}t + \phi) \cdot \sin(\omega_{LO}t) \quad (2.38)$$

แต่นำสัญญาณผ่านการกรองความถี่ต่ำ ทำให้ได้สัญญาณเอาท์พุทไอเอฟ (Integrated frequency, IF) ที่อัตราเร็วผลต่างเชิงมุม ω_{IF} คือ

$$V_{IF} = A \cos \left\{ \underbrace{(\omega_{RF} - \omega_{LO})}_{\omega_{IF}} t + \phi \right\} \quad (2.39)$$



รูปที่ 2.12 โครงสร้างการทำงานของมิกเซอร์



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของมิกเซอร์ทั่วไปแบบใช้ไดโอด

สังเกตว่าข้อมูลของแอมพลิจูด A และเฟส ϕ ของสัญญาณคลื่นไมโครเวฟยังมีปรากฏอยู่ในสัญญาณเอาต์พุทไอเอฟ ที่ความถี่ต่ำกว่า ซึ่งสามารถที่จะทำการประมวลสัญญาณได้ง่ายกว่าการกระทำที่ความถี่ไมโครเวฟ

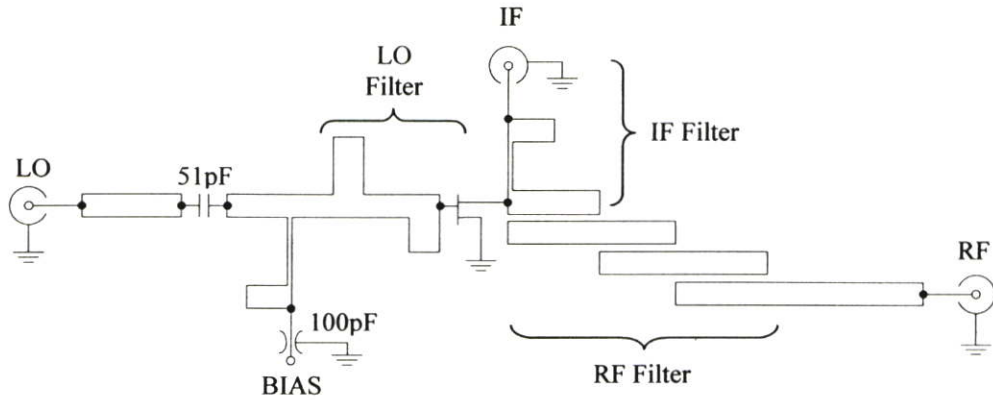
มิกเซอร์ได้ถูกใช้งานมากในงานสื่อสาร ระบบเรดาร์ และเครื่องรับสัญญาณ ซึ่งมิกเซอร์มักจะถูกทำเป็นอุปกรณ์ที่พร้อมใช้งาน โดยหลักการจะมีสัญญาณอินพุทสองสัญญาณ ได้แก่ สัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณคลื่นไมโครเวฟซึ่งผลของการผสมคลื่นจะมีความถี่เกิดขึ้นมาใหม่ได้ $\omega_o - \omega_r, \omega_o + \omega_r$ และ $2(\omega_o - \omega_r)$ และฮาร์โมนิกอื่น ๆ โดยสัญญาณเอาต์พุทไอเอฟ มักจะสนใจในส่วนของความถี่ที่เกิดจากเทอมผลต่าง $\omega_o - \omega_r$

โดยทั่ว ๆ ไปสามารถใช้อุปกรณ์ที่มีสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น ได้แก่ ไดโอด ทรานซิสเตอร์ ทำหน้าที่หลักของมิกเซอร์ได้ จากรูปที่ 2.13 เป็นตัวอย่างของวงจรมิกเซอร์ที่ใช้ไดโอด

2.1.4.1 มิกเซอร์ที่ใช้เฟต (FET Mixer)

มิกเซอร์ที่ทำจากเฟตซึ่งใช้งานที่ความถี่สูงชนิดเมสเฟต (MESFET) [14] – [15] อาศัยหลักการเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ของช่องทาง (Channel) ระหว่างขาเดรนกับซอร์สของเฟตควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกต (gate) โดยที่สถานะ ON มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ แต่ในขณะที่เปลี่ยนเป็นสถานะ OFF จะได้ค่าอิมพีแดนซ์สูง

ในการออกแบบมิกเซอร์ที่ใช้เฟตในระบบไมโครเวฟ มักจะใช้สารกึ่งตัวนำที่ทำจาก GaAs เพราะพาหะนำไฟฟ้ามีความคล่องตัวสูง ครอบสนองได้รวดเร็ว ในการใช้งานจะให้สัญญาณคลื่นอ้างอิง LO มีขนาดของสัญญาณใหญ่ และสัญญาณคลื่นไมโครเวฟ RF มักจะมีขนาดที่เล็กกว่ามาก



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างวงจรของมิกเซอร์ชนิดที่ใช้เมสเฟต

ตัวอย่างวงจรมิกเซอร์ชนิดที่ใช้เมสเฟตดังแสดงในรูปที่ 2.14 แสดงโครงร่างระบบมิกเซอร์ที่ใช้เมสเฟต โดยหลักการทำงานของมิกเซอร์เป็นไปตามสมบัติมิกเซอร์ ซึ่งจะให้สัญญาณอ้างอิง (LO) ต่อกับส่วนพิวเตอร์ก่อนเข้าทางด้านขาเกท (gate) และให้สัญญาณคลื่นไมโครเวฟ RF ต่อผ่านตัวกรองสัญญาณชนิดแบนพาส (band pass filter) แล้วจึงต่อเข้าทางด้านขาเดรน (drain) และจากขาเดรนต่อกับตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (low pass filter) ออกมาเป็นสัญญาณเอาต์พุตไอเอฟ IF

2.1.5 สายอากาศและการจำลองการทำงาน

ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศต้องสัมพันธ์กับความถี่ที่ใช้ใน เพื่อกำหนดขนาดของสายส่งสัญญาณบนแผ่นปริ้นท์หรือแผ่นพีซีบี (Printed circuit board; PCB) ที่สอดคล้องกับการใช้งานและมีลักษณะอิมพีแดนซ์ (characteristic impedance; Z_0) ตรงตามต้องการ

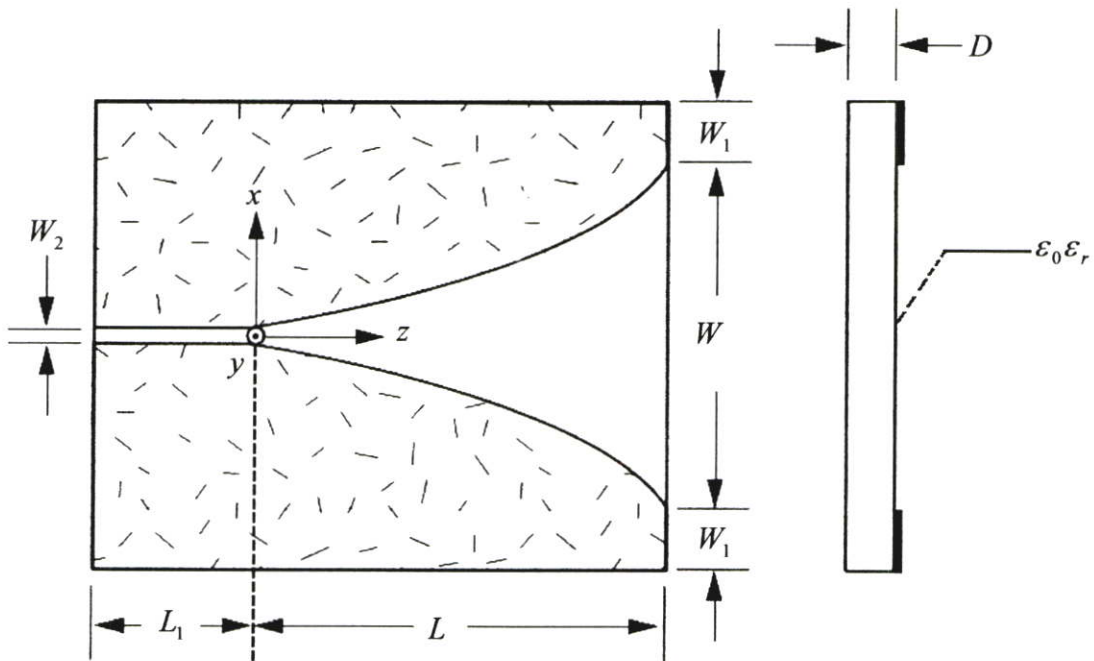
เพื่อทำความเข้าใจในสายอากาศที่จะสร้างขึ้นจะต้องศึกษาลักษณะ โครงสร้างของแผ่นปริ้นท์ที่มีผลต่อความถี่ ลักษณะของสายส่งสัญญาณที่เลือกทำบนแผ่นปริ้นท์ที่จะนำมาใช้งาน รวมถึงการแมตชิ่งอิมพีแดนซ์ และในการใช้งานที่มีขนาดพื้นที่จำกัด เช่นการติดตั้งสายอากาศแบบอะเรย์ ในที่นี้จะเลือกพิจารณาสายอากาศแบบของวิวาลดี

2.1.5.1 สายอากาศแบบวิวาลดี (Vivaldi Antenna)

ในการเลือกออกแบบสายอากาศแบบวิวาลดี [16] – [19] เนื่องจากเงื่อนไขลักษณะรูปร่างของตัวสายอากาศมีความเหมาะสมกับการใช้งานในการวิจัยนี้ โดยรูปร่างสายอากาศวิวาลดีจะทำขึ้นบนแผ่นไมโครสตริป ซึ่งลักษณะที่เห็นได้ชัดเจนในการออกแบบสายอากาศวิวาลดีนี้จะใช้ปริ้นท์พีซีบีที่มีชั้น ไดอิเล็กทริกชั้นสเตรทตรงกลางและชั้นตัวนำอยู่ทั้งสองด้าน จะแบ่งออกเป็นสามส่วน

ส่วนที่เป็นสายส่งสัญญาณส่งสายอากาศจะใช้ไมโครสตริปโดยให้ด้านบนเป็นลายสตริป ด้านล่างเป็นระนาบกราวด์ ส่วนที่เป็นสายอากาศจะใช้โคเพลนเนอร์ โดยด้านบนจะมีความโค้งออกจากศูนย์กลางที่ต่อกับสายส่งสัญญาณออกไปตามความยาวของสายอากาศอีกด้านหนึ่งก็โค้งออกจากศูนย์กลางในลักษณะตรงข้ามกับด้านแรก และส่วนปลายสายอากาศจะทำการอิมพีแดนซ์แมตซิง (Impedance Matching) เมื่อออกแบบสายอากาศวิวัลส์ดังที่แสดงในรูปที่ 2.15

ในการคำนวณที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศแบบนี้ไม่มีเป็นสมการมาตรฐานในการหาค่าการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องใช้งานโปรแกรมที่ช่วยในการวิเคราะห์การแพร่กระจายของคลื่น ผลปฏิบัติการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม SEMCAD การคำนวณและเขียนแบบ 3 มิติ ซึ่งใช้เทคนิคFDTD (Finite-Difference Time-Domain); [12] เทคนิคนี้อ้างอิงสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations) ที่ใช้คำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.15 ภาพสายอากาศวิวัลส์โดยแบบจำลอง 2 มิติ

2.1.5.2 การจำลองการทำงาน

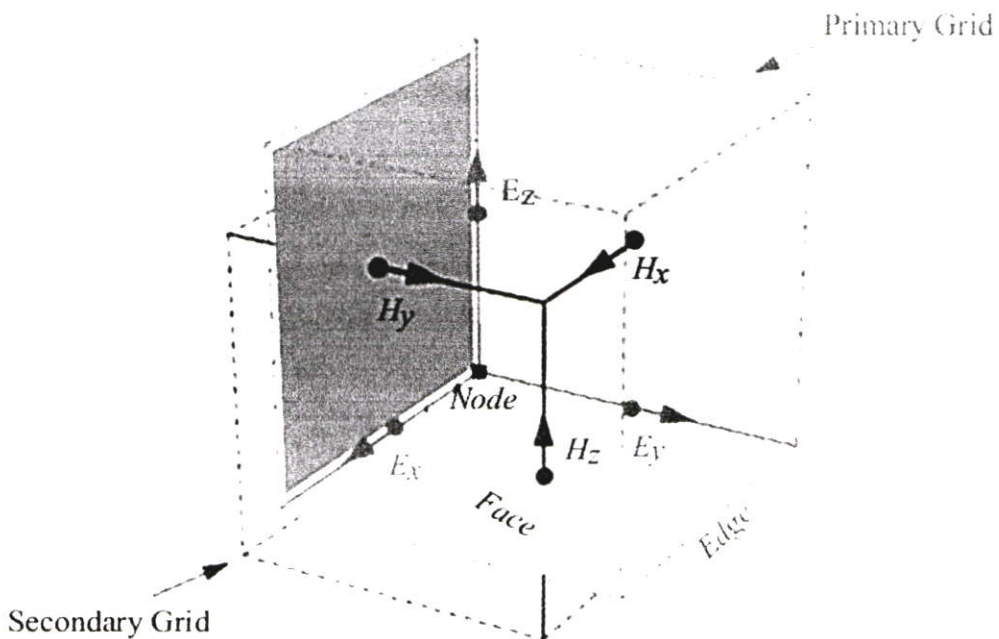
การจำลองการทำงานจะเป็นการทำความเข้าใจในสมการแมกซ์เวลล์ที่ไม่ต่อเนื่อง ที่ใช้คณิตศาสตร์ในการคำนวณสมการแม่เหล็กไฟฟ้าของโปรแกรม SEMCAD และข้อจำกัดความแตกต่างโดยการประมาณตำแหน่งและเวลา โดยเริ่มจากส่วนที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งและเวลาดังนั้นในการจำลองแบบต้องอาศัยทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า ภายใต้แบบจำลองที่มีความโค้งมีมุมและความหนาของไดอิเล็กทริก ในการคำนวณยังต้องมีการกำหนดค่าต่าง ๆ ที่จำเป็น ซึ่งฟังก์ชันเหล่านี้จะมีอยู่ในโปรแกรม SEMCAD [18] และผลการจำลองจะแสดงค่าออกมาให้ตรวจสอบ

การใช้งานโปรแกรม SEMCAD จะอาศัยทฤษฎี FDTD (Finite-Difference Time-Domain Method) ซึ่งหลักการจะใช้สมการแมกซ์เวลล์แบบไม่ต่อเนื่อง โดยจำลองสมการแมกซ์เวลล์รูปเคิร์ดของสนามที่เปลี่ยนกับเวลาแบบเป็นช่วงระยะทางและเวลาเป็นห้วงสั้น ๆ ซึ่งองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กจะอยู่ในบริเวณจุดโหนด(node) ที่สร้างจุดยึดในระบบคาร์ทีเซียนดังรูปที่ 2.16 องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กจะถูกปรับปรุงไปมาโดยจำกัดค่าแตกต่างของเคิร์ดรอบ ๆ องค์ประกอบ สามารถคำนวณหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าชั่วคราวได้หากรู้สนามตรงบริเวณ(boundary) ที่กำหนดที่เวลาเริ่มต้น พิจารณาการแทนทอมอนุพันธ์ (derivative) ด้วยค่าผลต่างจำกัดช่วงของการเปลี่ยนตัวแปร x และ t

$$\frac{\partial F(i, j, k, n)}{\partial x} = \frac{F^n(i+1/2, j, k) - F^n(i-1/2, j, k)}{\Delta x} + O[(\Delta x)^2] \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial F(i, j, k, n)}{\partial t} = \frac{F^{n+1/2}(i, j, k) - F^{n-1/2}(i, j, k)}{\Delta t} + O[(\Delta t)^2] \quad (2.41)$$

โดยในที่นี้ F^n อาจเป็นค่าสนามไฟฟ้า (E) หรือสนามแม่เหล็ก (H) ที่เวลา $n \cdot \Delta t$ และตำแหน่ง i , j และ k และ $O[(\Delta x)^2]$ และ $O[(\Delta t)^2]$ เป็นส่วนคลาดเคลื่อนในออคเตอร์ของผลต่างเวลาขงกำลังสองตามลำดับ



รูปที่ 2.16 สนามไฟฟ้าและแม่เหล็กในระนาบใด ๆ

การนำมาใช้งานในสมการแมกซ์เวลล์

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial}{\partial t} \varepsilon \vec{E} + \sigma_E \vec{E} \quad (2.42)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mu \vec{H} - \sigma_H \vec{H} \quad (2.43)$$

จากสมการ (2.43) จะได้

$$\frac{E_x|_{i,j,k}^{n+1} - E_x|_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \frac{1}{\varepsilon_{i,j,k}} \left(\frac{H_z|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z|_{i,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} - \frac{H_y|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} - \sigma_{i,j,k} E_x|_{i,j,k}^{n+1/2} \right) \quad (2.44)$$

ค่าโดยประมาณของ

$$E_x|_{i,j,k}^{n+1/2} = \frac{E_x|_{i,j,k}^{n+1} - E_x|_{i,j,k}^n}{2} \quad (2.45)$$

จากสมการ (2.45) การลดตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเช่น E_x^{n+1} จะได้ช่วงเวลาใหม่ได้

$$E_x|_{i,j,k}^{n+1} = \left(\frac{1 - \frac{\Delta t \sigma_{i,j,k}}{2\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\Delta t \sigma_{i,j,k}}{2\varepsilon_{i,j,k}}} \right) E_x|_{i,j,k}^n + \left(\frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\Delta t \sigma_{i,j,k}}{\varepsilon_{i,j,k}}} \right) \left(\frac{H_z|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z|_{i,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} - \frac{H_y|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \right) \quad (2.46)$$

ต่อมาสมการแมกซ์เวลล์อื่น ๆ ก็หาได้แบบเดียวกันทั้งหมด หากอธิบายความแตกต่างการจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไปตามจุดยึดอื่น ๆ และถ้าจุดยึดมีช่วงไม่แน่นอนซึ่งมีใช้ในโปรแกรม SEMCAD ความผิดพลาดจากกรณีนี้จะเกิดขึ้นในอันดับที่หนึ่ง เพราะว่าสมการที่ (2.42) และ (2.43) นั้นไม่ได้ถูกกำหนดเป็นค่าสมการความแตกต่าง อย่างไรก็ตาม SEMCAD มีส่วนที่แก้ไขค่าการผิดพลาดของ FDTD ในการที่โหนดไม่ต่อเนื่อง

ค่าตัวเลขช่วงเวลาที่เหมาะสมกับการคำนวณจะกำหนดค่าความต่างที่เหมาะสมกับการจำลองแบบของช่วงเวลา ที่ใช้ในการปรับปรุงจะต้องถูกกำหนดให้ใช้กับสูตรของ FDTD ตามสมการแมกซ์เวลล์ในแต่ละจุดได้ว่า

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (2.47)$$

โดยที่ $\Delta x, \Delta y$ และ Δz จะเป็นช่วงระยะระหว่างโหนดตามระนาบคาร์ทีเซียนและ c คือ ความเร็วของแสงในตัวกลาง โดยช่วงเหล่านี้รวมถึงช่วงเวลาที่ใช้คำนวณก็ต้องให้ให้เล็กที่สุดก็จะมีความแม่นยำสูง

2.2 พื้นฐานการสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ

การถ่ายภาพเป็นการบันทึกความเข้มของแสงลงบนฟิล์มหรือแผ่นกระดาษที่เป็นสองมิติ โดยอาศัยเลนส์รวมแสงที่สะท้อนจากวัตถุลงบนฉากรับ สำหรับการมองภาพจากฟิล์มหรือกระดาษอัดภาพก็จะอาศัยการสะท้อนของแสงจากฟิล์มมาเข้ายังตา โดยการบันทึกภาพลงบนฟิล์มนี้ เราอาศัยเฉพาะความเข้มของแสงที่มากกระทบในการทำให้เกิดภาพ ดังนั้นรายละเอียดเกี่ยวกับความลึกของภาพจะไม่ปรากฏบนฟิล์มธรรมดา

แต่ในการสร้างภาพกลับมาของฮอโลแกรมแบบนอกแกน(off axis)แสงโดยการเก็บข้อมูลการแพร่กระจายคลื่นที่สะท้อนจากเป้าหมายแทรกสอดกับจากคลื่นอ้างอิง ซึ่งค่าความเข้มจะถูกบันทึกในระนาบฮอโลแกรม โดยการสร้างภาพวัตถุกลับ ด้วยการฉายคลื่นอ้างอิงไปที่ฮอโลแกรมจะต้องเกิดฟังก์ชันคลื่น 4 องค์ประกอบเสมอ การเกิดภาพก็เช่นกันจะเกิดจากภาพจริงและภาพเสมือนอยู่ตรงข้ามเสมอซึ่งระยะห่างของภาพทั้งสองขึ้นอยู่กับมุมของคลื่นอ้างอิงตอนที่ทำการบันทึก การสร้างภาพฮอโลกราฟีของวัตถุ

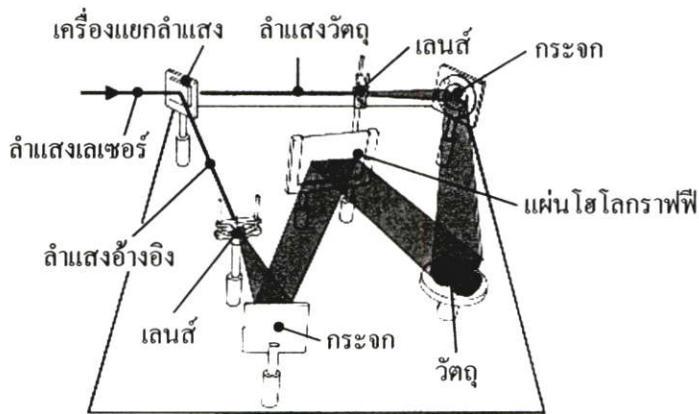
กระบวนการทางไมโครเวฟฮอโลแกรมเป็นการแทนที่การแทรกสอดของคลื่นวัตถุและคลื่นอ้างอิงในช่วงความยาวคลื่นแสงด้วยคลื่นไมโครเวฟ และเมื่อการแยกออกของคลื่นอ้างอิง ก็ทำให้เกิดฟังก์ชันคลื่น 4 องค์ประกอบเช่นกัน และเทคนิคไมโครเวฟฮอโลแกรมในการแยกภาพนั้นจำเป็นต้องมีมุมสะท้อนที่จะทำให้เกิดภาพนั้นจำกัดเพื่อไม่ให้ภาพมาซ้อนทับกันของภาพออเคอร์ศูนย์ โดยที่ขนาดของภาพเท่าเดิมที่ทำได้จึงปรับได้เฉพาะระยะห่างของวัตถุกับระนาบไมโครเวฟฮอโลแกรม จึงทำให้การสร้างภาพนั้นขาดความละเอียดถ้าหากเก็บข้อมูลไม่มากพอ

จากพัฒนาเทคนิคระบบใหม่ของการสร้างภาพไมโครเวฟความถี่เดียวใช้เทคนิคการผสมสัญญาณ 2 เฟส ทำให้วัดทั้งขนาดและเฟสของคลื่นได้พร้อมกัน การสร้างภาพวัตถุไม่มีสัญญาณ

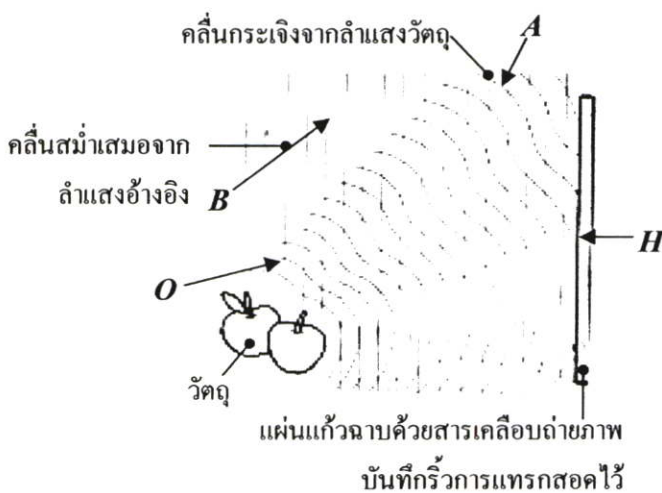
รบกวนในรูปของภาพออเคอร์ศูนย์เหมือนเช่นเดียวกับกรณีการใช้ไมโครเวฟฮอโลกราฟี การรบกวนระลอกจึงสามารถกระทำได้ซึ่งก็สามารถลดขนาดพื้นที่เก็บข้อมูลสนามของคลื่น

2.2.1 ฮอโลกราฟีทางแสง

สำหรับฮอโลกราฟีจะแตกต่างจากการถ่ายภาพธรรมดาตรงที่การบันทึกนั้นสามารถบันทึกความลึกความตื้นไว้ได้ด้วย โดยอาศัยความต่างเฟสของแสงที่จุดต่าง ๆ โดยอาศัยลำแสงอ้างอิงมาทำการแทรกสอดกับลำแสงที่สะท้อนจากวัตถุ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบเฟสของลำแสงสะท้อนเหล่านั้น ด้วยเหตุที่การบันทึกนี้เป็นการบันทึกเฟสของแสงด้วยดังนั้นแสงที่ใช้จำเป็นต้องเป็นแสงอาพันธ์ และแหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้กันก็คือเลเซอร์นั่นเอง และภาพที่บันทึกจากวิธีฮอโลกราฟีจะเรียกว่า ฮอโลแกรม [20] – [22] แสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การจัดวางอุปกรณ์ในการถ่ายภาพฮอโลแกรมทางแสง



รูปที่ 2.18 การบันทึกข้อมูลภาพฮอโลแกรมทางแสง

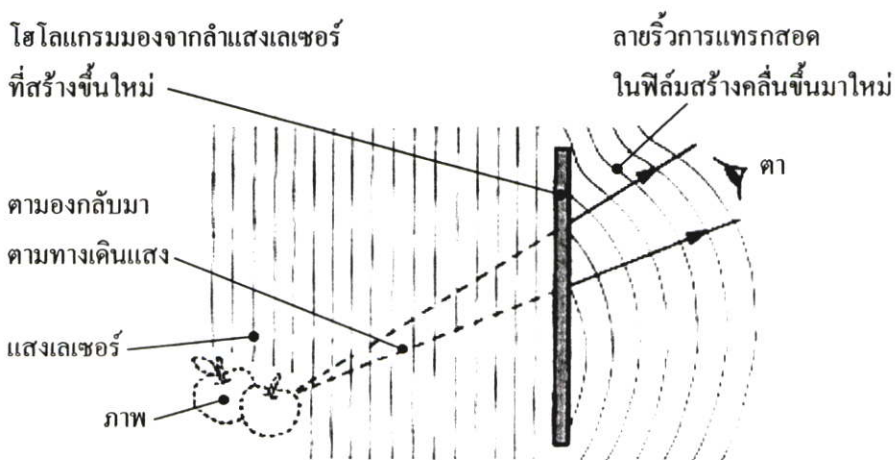
จากรูปที่ 2.18 แสดงถึงวิธีการบันทึกขนาดและเฟส โดยการกระจายคลื่นของวัตถุ O เคลื่อนที่มายังระนาบของฮอโลแกรม H แทนด้วยสนามการกระจายคลื่นเชิงซ้อน A และแหล่งกำเนิดคลื่นอ้างอิง มีการกระจายคลื่น B มาตกบนระนาบฮอโลแกรม คลื่นทั้งสองจะเกิดการแทรกสอดกันอยู่บนระนาบ H ซึ่งความเข้มของร็วรอยการแทรกสอดบนระนาบฮอโลแกรม I_H จะเป็นไปตามสมการที่ (2.48)

$$\begin{aligned} I_H &= (A+B)(A+B)^* \\ &= |A|^2 + |B|^2 + A^*B + B^*A \end{aligned} \quad (2.48)$$

จะเห็นจะเห็นได้ว่าเป็นรูปแบบของร็วรอยการแทรกสอดที่มีลักษณะเฉพาะที่เกิดขึ้นโดยคลื่นจากวัตถุ และคลื่นอ้างอิงที่ทราบฟังก์ชันขนาดและเฟส โดยปกติ I_H จะอยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นบนฟิล์มและนำมาทำให้เกิดการสร้างภาพกลับมาได้รูปที่ 2.19 ในรูปนี้ให้แสงจากแหล่งกำเนิด เกิดหน้าคลื่น B ผ่านฮอโลแกรม หน้าคลื่น C ที่ออกมาจากฮอโลแกรม ซึ่งเกิดจากการปรับแต่ง หน้าคลื่น B ด้วยค่าการส่งผ่าน I_H ดังสมการ

$$C = BI_H = |A|^2 B + |B|^2 B + A^* B^2 + A|B|^2 \quad (2.49)$$

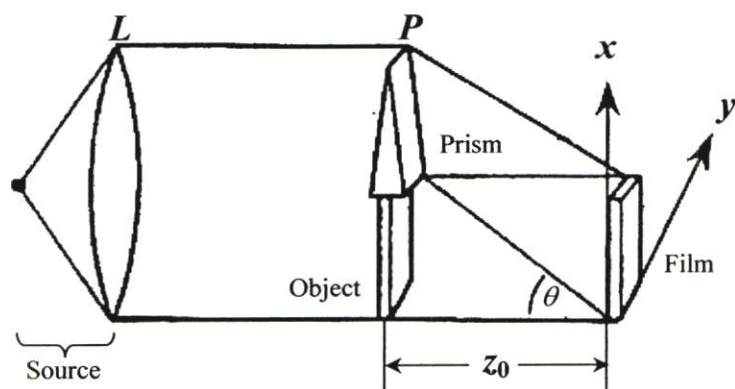
ซึ่งเทอมท้ายแสดงถึงส่วนหน้าคลื่นที่จะเกิดการสร้างเป็นคลื่นวัตถุ A และ $A^* B^2$ เป็นเทอมที่สำคัญมาก เพราะสามารถทำให้เกิดภาพจริงของวัตถุ



รูปที่ 2.19 การสร้างภาพของวัตถุกลับมา

ฮอโลแกรมที่น่าสนใจและเป็นที่ยอมรับกันดีชนิดหนึ่งคือ ฮอโลแกรม แบบเลิร์ – ยูแพทนิคส์ (Leith – Upatnicks Hologram) หรือเรียกว่าชนิดลำแสงอ้างอิงอยู่นอกแกน (Offset-reference หรือ Off - axis Hologram) ซึ่งแตกต่างจากฮอโลแกรมของกาบอร์ (Gabor Hologram) ก็คือลำแสงที่ส่องผ่านมาที่วัตถุนั้นจะถูกใช้เป็นลำแสงอ้างอิงด้วย โดยลำแสงอ้างอิงถูกแยกด้วยปริซึมที่วางอยู่บนวัตถุ และทำมุม θ กับลำแสงจากวัตถุที่ตกลงบนฟิล์มดังรูปที่ 2.20 ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่จำเป็นต้องใช้แสงเลเซอร์ที่โคฮีเร้นท์สูง ๆ แต่สามารถสร้างฮอโลแกรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในการบันทึกฮอโลแกรม แบบเลิร์ – ยูแพทนิคส์ เมื่อลำแสงจากแหล่งกำเนิดถูกทำให้ขนานด้วยเลนส์ L โดยลำแสงระนาบจะส่องตรงไปยังระนาบวัตถุและไปตกกระทบบนฟิล์มฮอโลแกรมด้วยค่าการส่งผ่านคือ $t_0(x_0, y_0)$ ส่วนลำแสงที่ผ่านปริซึมที่วางอยู่เหนือวัตถุจะทำมุม θ กับลำแสงของวัตถุที่ตกบนฟิล์มฮอโลแกรมที่ใช้บันทึกภาพ



รูปที่ 2.20 ระบบการบันทึกฮอโลแกรม แบบเลิร์ – ยูแพทนิคส์

2.2.2 ไมโครเวฟฮอโลกราฟี

ไมโครเวฟฮอโลกราฟี เป็นการแทนที่การแทรกสอดของคลื่นวัตถุและคลื่นอ้างอิงในช่วงความยาวคลื่นแสงด้วยไมโครเวฟ เราสามารถทำนายสมการคลื่นของวัตถุที่ระนาบฮอโลแกรมได้เมื่อเราทราบสมการคลื่นของวัตถุที่จุดเริ่มต้น ใช้การประมาณค่าการเลี้ยวเบนแบบเฟรสเนล ในกรณี 2 มิติ [23] พิจารณาระบบพิกัดตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) ตำแหน่งจุดต่าง ๆ บนวัตถุแผ่นแบน (planar object) และตำแหน่งเซนเซอร์แบบจุด (point sensor) เป็น $P_1(x, y, z)$, $P_2(\zeta, \eta, o)$ และ $P_3(u, v, w)$ ตามลำดับ มีสามระนาบขนานกัน โดยมีแหล่งกำเนิด (source plane) คลื่นบางส่วนเคลื่อนที่ออกไปตกกระทบวัตถุในระนาบ (ζ, η, o) หรือระนาบวัตถุ (object plane) ซึ่งระนาบของจุดเริ่มต้น (origin, o) ที่อยู่ห่างไปเป็นระยะทาง z แล้วสะท้อนมาที่เซนเซอร์ที่ระนาบ (u, v, w) หรือระนาบเซนเซอร์ (sensor plane) ห่างการระนาบวัตถุระยะทาง w ดังรูปที่ 2.21

เมื่อเลื่อนสแกนเซนเซอร์ไปพร้อม ๆ กับแหล่งกำเนิด กล่าวคือ ในกรณีนี้ $x = u, y = v$ ฟังก์ชันคลื่นสนามไฟฟ้าที่ระนาบเซนเซอร์ เป็นสนามของคลื่นที่ตกกระทบ แล้วเดินทางออกมาจากระนาบวัตถุ ดังสมการ

$$a(x, y, w) = A_4 \exp\{jk_2(w+z)\} \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} D(\zeta, \eta) \exp\left[jk_2 \left\{ \frac{(x-\zeta)^2 + (y-\eta)^2}{2wz/(w+z)} \right\} \right] d\zeta d\eta$$

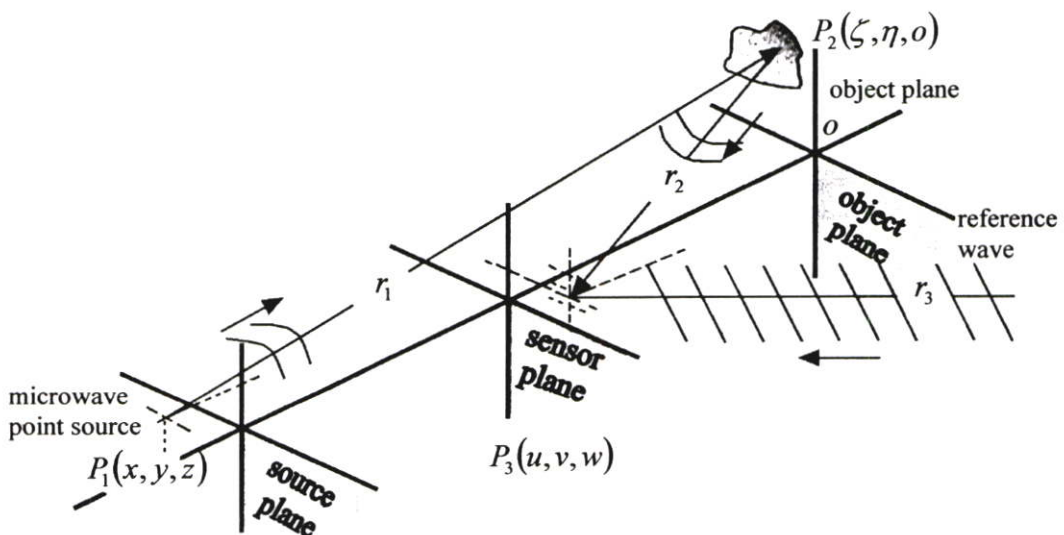
$$= a_0(x, y, w) \exp\{-j\phi(x, y, w)\} \quad (2.50)$$

ระนาบเซนเซอร์อยู่ห่างจากระนาบวัตถุ เป็นระยะทาง w แต่สมการ (2.50) แสดงถึงสมการเลี้ยวเบนซึ่งถ้าเมื่อเทียบกับกรณีของฮอโลแกรมทั่ว ๆ ไปที่มีการสแกนเซนเซอร์แต่ฉายวัตถุด้วยแหล่งกำเนิดที่อยู่กับที่ จะราวกับว่ามีเซนเซอร์อยู่กับที่ที่ระยะห่างจากระนาบวัตถุเป็นระยะ $z = wz/(w+z)$ ซึ่งน้อยกว่า w เสมอ แสดงถึงความสามารถในการแยกแยะ (resolve) ที่ดีกว่า

การบันทึกฮอโลแกรม นอกจากมีคลื่นจากแหล่งกำเนิดสะท้อนวัตถุและไปตกกระทบเซนเซอร์แล้ว บนระนาบเซนเซอร์ยังมีการกระจายของคลื่นอ้างอิงแบบระนาบ(plane wave) ซึ่งเคลื่อนที่มาในทิศทางทำมุม θ กับแนวเส้นปกติของระนาบเซนเซอร์มีฟังก์ชันคลื่นดังสมการ

$$b(x, y) = b_0 \exp[-j2\pi\alpha x] \quad (2.51)$$

โดยที่ α คือ ความถี่ของหน้าคลื่นอ้างอิงตามแนวแกน x มีค่าเท่ากับ $\frac{\sin \theta}{\lambda}$



รูปที่ 2.21 แสดงการบันทึกข้อมูลภาพฮอโลแกรมของวัตถุโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

เมื่อ $\lambda = 2\pi/k$ เป็นความยาวคลื่น และ b_0 คือ แอมพลิจูดคลื่น

ฟังก์ชันคลื่นรวมที่ได้ $U(x, y)$ เมื่อแปลงข้อมูลความเข้มโดยเซนเซอร์จะมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} I(x, y) &= U(x, y) \times U^*(x, y) \\ &= (a + b) \times (a + b)^* \\ &= |a|^2 + |b|^2 + a^*b + ab^* \end{aligned} \quad (2.52)$$

สองเทอมสุดท้ายของสมการ (2.52) แสดงถึงส่วนของหน้าคลื่นที่จะเกิดการสร้างกลับเป็นคลื่นวัตถุ a^*b เป็นเทอมที่สำคัญมาก เพราะสามารถทำให้เกิดภาพจริง (real image) ของวัตถุ และเมื่อกำหนดให้ a อยู่ในเทอมการกระจายของขนาดและเฟสที่

$$a(x, y) = a(x, y) \exp[-j\phi(x, y)] \quad (2.53)$$

แทนค่าสมการ (2.53) ลงในสมการที่ (2.52) และพิจารณาให้ w เป็นค่าคงที่ แอมพลิจูดและเฟส ที่บันทึกได้จากสมการความเข้มเป็นรีวรอยการแทรกสอดของคลื่นวัตถุและคลื่นอ้างอิง แสดงได้ดังสมการ (2.53)

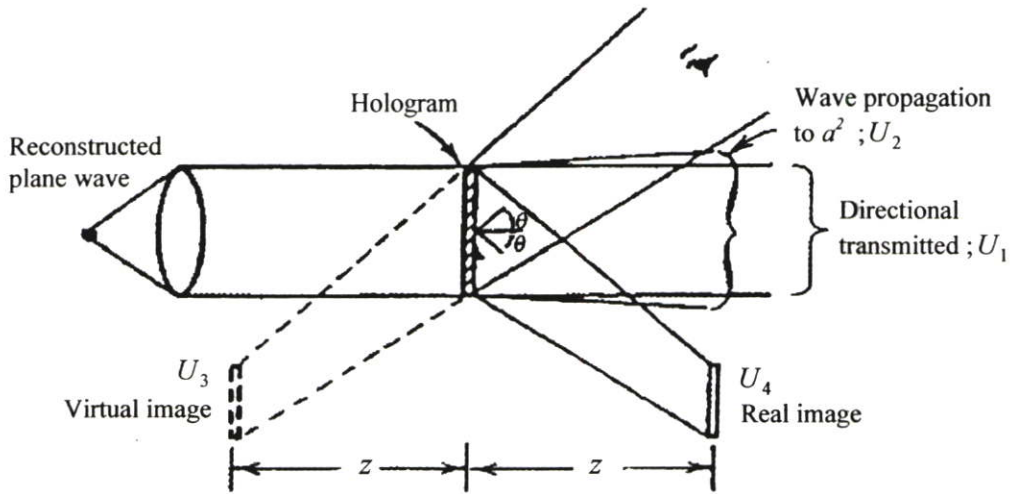
$$I(x, y) = b_0^2 + a_0^2(x, y) + 2b_0a_0(x, y) \cos[2\pi\alpha x - \phi(x, y)] \quad (2.53)$$

สมการ (2.53) แสดงถึงขนาดและเฟสที่บันทึกไว้เป็นรูปรีวรอยการแทรกสอดของคลื่นวัตถุและคลื่นอ้างอิง

การสร้างภาพกลับ (reconstruction) หรือการมองเห็นภาพของฮอโลแกรมทำโดยการล้าง (develop) แผ่นฟิล์มในทางทฤษฎี คือ เปลี่ยนสมการ (2.53) อยู่ในรูปของฟังก์ชันการส่งผ่าน (Transmittance Function, t_r)

$$\begin{aligned} t_r(x, y) &= \beta I(x, y) \\ &= t_b + \beta \left[|a(x, y)|^2 + b_0 a \exp(j2\pi\alpha x) + b_0 a^* \exp(-j2\pi\alpha x) \right] \end{aligned} \quad (2.54)$$

ซึ่ง β เป็นค่าคงที่ขึ้นกับขั้นตอนการสร้างภาพกลับ



รูปที่ 2.22 แสดงระบบการสร้างภาพกลับมาจากรีวรอยการแทรกสอดภาพฮอโลแกรม

ดังนั้นเมื่อนำฮอโลแกรมมาสร้างเป็นภาพวัตถุ ด้วยการส่งคลื่นอ้างอิงผ่านไปยังฮอโลแกรม โดยกำหนดคลื่นอ้างอิงมีขนาด b_0 เราจะได้ฟังก์ชันคลื่นที่ผ่านแผ่นฮอโลแกรมออกมา และเพื่อให้สะดวกในการพิจารณา เราจะแยกออกเป็น 4 องค์ประกอบ คือ

$$\begin{aligned} U_1 &= t_b b_0 & U_3 &= \beta b_0^2 a(x, y) \exp(j2\pi\alpha x) \\ U_2 &= \beta b_0 |a(x, y)|^2 & U_4 &= \beta b_0^2 a^*(x, y) \exp(-j2\pi\alpha x) \end{aligned}$$

โดยที่ U_1 เป็นตัวแทนคลื่นที่ส่งผ่านฮอโลแกรมออกมาโดยตรงในแนวแกนแสงอ้างอิง
 U_2 เป็นตัวแทนคลื่นที่ส่งผ่านฮอโลแกรมแล้วเลี้ยวเบนออกจากแกนแสงเล็กน้อยในลักษณะเดียวกับสลิตเดี่ยว ซึ่งขนาดของคลื่นฮอยเกนส์ที่จุดต่างบนระนาบสลิตมีค่าต่าง ๆ กัน

คลื่น U_1 และ U_2 จะอยู่บริเวณตรงกลางใกล้แกนแสง ดังนั้นบริเวณนี้จะมีความเข้มมาก จึงสว่างกว่าบริเวณอื่น คือศูนย์กลางของภาพหรือเป็นภาพลำดับศูนย์ (zero Order)

U_3 เป็นตัวแทนคลื่นที่เกิดภาพเสมือนของวัตถุที่ระยะ z ซึ่งถูกหักเหจากแกนแสงด้วยมุม θ ซึ่งมองเห็นได้โดยการมองผ่านฮอโลแกรมกลับไปทางแหล่งกำเนิดแสง ดังรูปที่ 2.22 เป็นการเกิดภาพเสมือน โดยจะเกิดที่ระยะเดิมที่วางวัตถุจริง

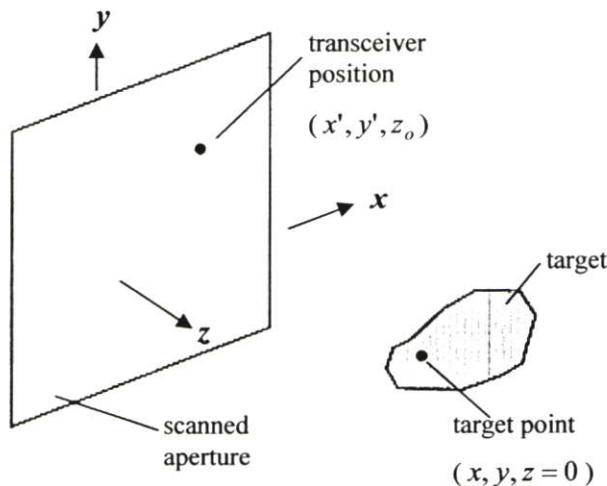
U_4 เป็นตัวแทนคลื่นที่เกิดภาพจริงของวัตถุที่ระยะ z มีทิศทางตรงข้ามกับภาพเสมือน ซึ่งถูกหักเหจากแกนแสงด้วยมุม $-\theta$ และเป็นภาพจริงสามารถใช้จากรับได้และมองเห็นภาพที่ปรากฏบนฉากนั้นจริง

คลื่นที่ทำให้เกิดภาพจริง (real image) ของวัตถุที่ระยะ z มีแนวการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปจากแนวคลื่นอ้างอิงเป็นมุม θ ส่วนแนวคลื่นที่นำมาซึ่งภาพเสมือน (virtual image) จะอยู่ที่มุมตรง

ข้าม ในการสร้างภาพกลับมาจากฮอโลแกรมแบบนอกแกน ผลลัพธ์จะต้องเกิดฟังก์ชันคลื่น 4 องค์ประกอบ ดังรูปที่ 2.22 ภาพที่ได้เป็นภาพจริงและภาพเสมือน อยู่ตรงข้ามเสมอซึ่งระยะห่างของภาพทั้งสอง ขึ้นอยู่กับมุมของคลื่นอ้างอิงตอนที่ทำการบันทึก

2.2.3 ทฤษฎีการสร้างภาพไมโครเวฟคลื่นความถี่เดียวระยะใกล้

ในหัวข้อที่ผ่านมาเมื่อพิจารณาการบันทึกความเข้มที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างคลื่นอ้างอิงกับคลื่นที่สะท้อนจากวัตถุที่ระนาบไกลเป็นระยะที่การประมาณเฟรสนเนล ใช้ได้ ซึ่งขนาดมิติความกว้างของพื้นที่เก็บค่าความเข้มคลื่นควรต้องน้อยกว่าระยะห่างจากวัตถุนั้น เมื่อทำการประมวลผลสร้างภาพวัตถุ จึงมีรายละเอียดที่ต่ำ ซึ่งข้อจำกัดนี้ดูเหมือนว่าจะแก้ไขได้ถ้าทำการบันทึกความเข้มที่ระยะใกล้ขึ้น โดยใช้ทฤษฎีที่ถูกต้องกว่าการประมาณดังกล่าว ซึ่งก็ได้แก่การประมาณด้วยวิธีแองกูลา สเปคตรัม แบควเวิร์ด เวฟ โพรพาเกชัน (Angular spectrum backward wave propagation) [1], [24] – [26] แต่อย่างไรก็ดีเมื่อใช้เทคนิคของฮอโลกราฟีที่มุมคลื่นอ้างอิงเดียวกัน จะพบว่าภาพอันดับศูนย์ซึ่งเคยแยกออกจากภาพวัตถุที่การบันทึกระยะห่างจะกลายเป็นมาซ้อนทับภาพวัตถุ สำหรับกรณีบันทึกระยะใกล้บนทอนรายละเอียดของภาพที่ควรจะดีขึ้นนั้น ปัญหานี้หลีกเลี่ยงได้โดยเปลี่ยนจากการใช้เทคนิคของฮอโลกราฟีไปเป็นการตรวจวัดทั้งขนาดและเฟสของคลื่น ไมโครเวฟโดยตรง ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อนี้



รูปที่ 2.23 เค้าโครงสร้างระบบสร้างภาพระยะใกล้

จากรูปที่ 2.23 ตำแหน่งส่งและรับคลื่นแบบสนามสเกลาร์ (scalar field) ณ จุด (x', y', z_0) และจุดใด ๆ บนผิววัตถุแผ่นระนาบซึ่งเป็นเป้าหมาย (target) ตำแหน่ง $(x, y, 0)$ วัตถุเป้าหมายนั้นถูก

กำหนดให้โดยฟังก์ชันการสะท้อน $f(x, y, z)$ ซึ่งเป็นสัดส่วนสนามที่สะท้อนกับสนามทั้งหมดที่ตกกระทบ การบวกรันทางสเกลาร์ของคลื่นวงกลม (spherical wave) ที่สะท้อนมาจากแต่ละจุดบนวัตถุ เป้าหมายโดยที่มีเฟสไม่เท่ากันจะได้ค่าสนามของคลื่นสุทธิ ณ ตำแหน่งของตัวรับ คือ

$$s(x', y') = \iint f(x, y, z) e^{-j2k\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+z^2}} dx dy \quad (2.55)$$

เมื่อ $k = \omega/c$ คือ เวฟนัมเบอร์ (wave number) โดยที่ ω คือ Temporal angular frequency และ c คือ อัตราเร็วของแสง ทำการเขียนฟังก์ชันคลื่นวงกลมในรูปขององค์ประกอบย่อยๆ ที่เป็นฟังก์ชันคลื่นแบบระนาบ (plane wave) ในหลากหลายทิศทางเคลื่อนที่ ดังนั้นคือ

$$e^{-j2k\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+z^2}} = \iint e^{jk'_x(x-x') + jk'_y(y-y') + jk_z z_0} dk'_x dk'_y \quad (2.56)$$

โดยที่ k'_x และ k'_y คือ ฟูเรียร์พารามิเตอร์ (Fourier parameter) ที่คล้องจองกับค่า x' และ y' ตามลำดับ โดยค่า k'_x และ k'_y จะอยู่ระหว่าง $-2k$ ถึง $2k$

แทนค่าสมการ (2.56) ลงในสมการ (2.55) และจัดรูปใหม่จะได้ว่า

$$s(x', y') = \iint \underbrace{\left[\iint f(x, y, z_0) e^{-j(k'_x x + k'_y y)} dx dy \right]}_{\text{2D Fourier Transform of } f(x, y, z_0)} \times e^{j(k'_x x' + k'_y y' + k_z z_0)} dk'_x dk'_y \quad (2.57)$$

เทอมในวงเล็บใหญ่ คือ การแปลงฟูเรียร์สองมิติ (FT_{2D}) ของฟังก์ชัน $f(x, y, z)$ ซึ่งก็คือ

$$F(k_x, k_y) = FT_{2D} \{f(x, y)\} \quad (2.58)$$

สมการ (2.57) ก็จะมีรูปเป็น

$$s(x, y) = \iint F(k_x, k_y) e^{jk_z z_0} e^{j(k'_x x + k'_y y)} dk'_x dk'_y \quad (2.59)$$

เมื่อพิจารณาสมการ 2.57 จะเป็นได้ว่าการอินทิเกรต (integrate) นี้แท้จริงก็คือการทำการแปลงฟูเรียร์สองมิติย้อนกลับ (FT_{2D}^{-1}) ของฟังก์ชัน $F(k_x, k_y) e^{jk_z z_0}$ กล่าวคือ

$$s(x, y) = FT_{2D}^{-1} [F(k_x, k_y) e^{jk_z z_0}] \quad (2.60)$$

เมื่อทำการแปลงฟูเรียร์สองมิติ ต่อทั้ง 2 ข้างของสมการที่ 2.60 จึงได้ว่า

$$F(k_x, k_y) = FT_{2D}[s(x, y)]e^{-jk_z z_0} \quad (2.61)$$

และดังนั้นฟังก์ชันการสะท้อนของคลื่นที่ระนาบวัตถุ ซึ่งก็บ่งบอกถึงรูปร่างลักษณะของวัตถุ ก็จึงหาได้จาก

$$f(x, y) = FT_{2D}^{-1}\left[FT_{2D}[s(x, y)]e^{-jk_z z_0}\right] \quad (2.62)$$

จากความสัมพันธ์แบบแพร่กระจายของระนาบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = (2k)^2 \quad (2.63)$$

$$k_z = \sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2} \quad (2.64)$$

ดังนั้นวิธีการสร้างภาพกลับสรุปได้ดังนี้

$$f(x, y) = FT_{2D}^{-1}\left[FT_{2D}[s(x, y)]e^{-j\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2}z_0}\right] \quad (2.65)$$

บทที่ 3

การพัฒนาระบบส่งและรับคลื่นแบบอะเรย์แปดสมาชิก ผลัดกันทำงานด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์

ในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบ สร้าง และพัฒนาระบบส่งและรับคลื่นแบบอะเรย์แปดสมาชิกผลัดกันทำงานด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับสร้างภาพไมโครเวฟ ที่ได้ดำเนินการมา

3.1 การออกแบบระบบ

การสร้างระบบส่งและรับคลื่นแบบอะเรย์แปดสมาชิกผลัดกันทำงานด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับสร้างภาพไมโครเวฟนั้น จำเป็นต้องมีการออกแบบอุปกรณ์เพิ่มเติมขึ้นเพื่อใช้งาน โดยต้องทำการออกแบบให้เหมาะสมกับเงื่อนไขสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ด้วย อุปกรณ์ที่ได้ทำการออกแบบขึ้นแบ่งออกเป็น อุปกรณ์ในระบบไมโครเวฟ โครงสร้างและกลไกการเคลื่อน ระบบเก็บข้อมูล รวมถึงวิธีการประมวลผลสร้างภาพด้วย

3.1.1 อุปกรณ์ไมโครเวฟที่ออกแบบ

อุปกรณ์ไมโครเวฟที่ทำการออกแบบขึ้นนั้นอาศัยทฤษฎีและหลักการดังที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2 และใช้ โปรแกรม ไมโครเวฟออฟฟิศ (Microwave office) และ SEMCAD เพื่อทำการจำลองการทำงานและปรับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ เพื่อให้ได้ตามผลที่ดีที่สุดของแต่ละอุปกรณ์

3.1.1.1 การออกแบบโคเรคชันแนลคัปเปิลอร์ไลน์เส้นขนาน

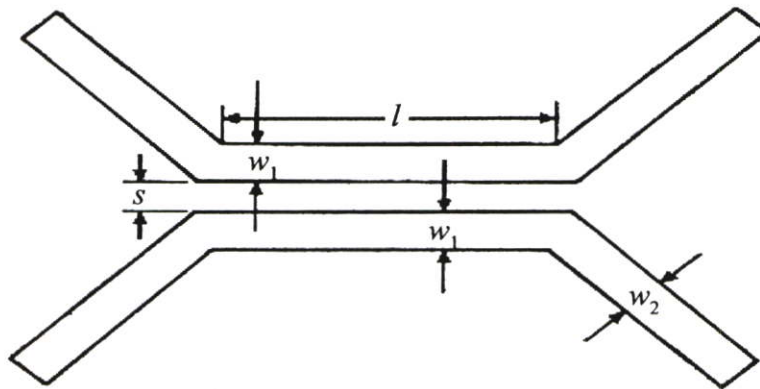
เมื่อทำการออกแบบโคเรคชันแนลคัปเปิลอร์ไลน์เส้นขนานบนแผ่นปริ้นท์ได้ทำการออกแบบไว้ 2 กรณี โดยมีค่าการคัปปลิงที่ค่า 14 dB และ 20 dB สมบัติค่าตัวแปรต่างที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 มีค่าตามตารางที่ 3.1 ตามตัวแปรต่าง ๆ ที่กำหนดในรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าที่ใช้ในการออกแบบโคเรคชันแนลคัปเปิลอร์ไลน์

Parameter	Coupler	
	No.1	No.2
ค่าการคัปปลิง (C)	14 db	20 dB
ความกว้างของไมโครสตริปทรานสมิซชัน (w_2)	2.5 mm	2.5 mm
ความกว้างของไมโครสตริปส่วนคัปเปิลอร์ (w_1)	2.25 mm	2.45 mm

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

Parameter	Coupler	
	No.1	No.2
ค่าเพอร์มิตติวิตีของแผ่นสตริป (ϵ_r)	2.23	2.23
ค่าเอฟเฟกทิฟเพอร์มิตติวิตีของแผ่นสตริป (ϵ_{reff})	1.98	1.98
ค่าความหนาของแผ่นสตริป (h)	0.787	0.787
ระยะห่างคัปเปิลอร์ (s)	0.17 mm	0.8
ความยาวคัปเปิลอร์	5.344 mm	5.344
ความถี่ที่ใช้งาน (f)	10 GHz	10 GHz



รูปที่ 3.1 ผลการออกแบบโคเรคชันแนลคัปเปิลอร์ไลน์แบบขนานบนแผ่นปริ้นท์

3.1.1.2 การออกแบบที่จังก์ชัน

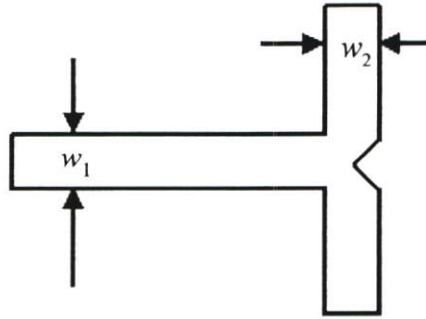
เมื่อทำการออกแบบที่จังก์ชันบนแผ่นปริ้นท์ ที่มีสมบัติคือ w_1 และ w_2 มีค่าเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร โดยการคำนวณตามทฤษฎีเพื่อสอดคล้องกับค่าที่ต้องการตามตารางที่ 3.2 ทำให้ได้ที่จังก์ชัน ลักษณะดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าต่าง ๆ ของการออกแบบที่จังก์ชัน

Parameter	ค่าที่ใช้
ความกว้างของไมโครสตริปคัปเปิลอร์ (w_1, w_2)	2.5 mm
ค่าเพอร์มิตติวิตีของแผ่นสตริป (ϵ_r)	2.23
ค่าเอฟเฟกทิฟเพอร์มิตติวิตีของแผ่นสตริป (ϵ_{reff})	1.98
ค่าความหนาของแผ่นสตริป (h)	0.7874
Z_0	50 โอห์ม

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

Parameter	ค่าที่ใช้
ความถี่ที่ใช้งาน (f)	10 GHz



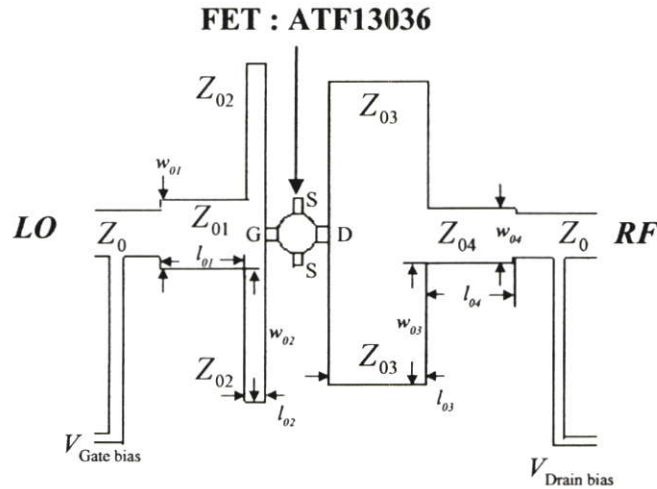
รูปที่ 3.2 ผลการออกแบบที่จังก์ชันบนแผ่นปริ้นท์

3.1.1.3 การออกแบบไมโครเวฟมิกเซอร์

ไมโครเวฟมิกเซอร์ในงานวิจัยนี้ จะใช้เฟตเตอร์ ATF - 13336 ที่ทำการไบอัสที่ขาเกตและเดรนเทียบกับขาซอส (ให้เป็นกราวด์) ให้มีจุดทำงาน (operating point) ซึ่งมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ความถี่สูง $f = 10$ GHz กำหนดด้วยค่าขนาดและเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกำลังคลื่นที่พอร์ท LO (พอร์ท 1) และพอร์ท RF (พอร์ท 2) คือ $S_{11} = 0.56|84^\circ$ และ $S_{22} = 0.18|110^\circ$ ตามลำดับ การจำลองการออกแบบปรับความยาวและความกว้างของสองช่วง (section) ของแถบไมโครสตริปที่ต่อกับส่วนสายส่งที่มี $Z_0 = 50$ โอห์ม ในแต่ละด้านเพื่อให้เกิดการแมทซ์ทั้งพอร์ท LO และพอร์ท RF มากที่สุดสำหรับชั้นสเตรท ซึ่งมีค่า $\epsilon_r = 2.2$, $\epsilon_{reff} = 1.98$, $h = 0.7874$ ซึ่งจะทำได้วงจรไมโครเวฟมิกเซอร์ที่มีค่าต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.3 และมีลักษณะดังรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าที่ได้เลือกในการออกแบบมิกเซอร์

Section	Z_0 (Ohm)	w (mm)	l (mm)
Z_{01}	28.70	5.30	5.34
Z_{02}	93.00	7.96	0.08
Z_{03}	29.28	7.96	5.10
Z_{04}	41.87	3.22	5.34



รูปที่ 3.3 วงจรไมโครเวฟมิกเซอร์ที่ใช้เฟต

3.1.1.4 การออกแบบสายอากาศวิวัลด์ิ

จากการจำลองแบบในโปรแกรม SEMCAD พบว่าสายอากาศแบบวิวัลด์ิเป็นรูปแบบที่เหมาะสมกับงาน โดยที่มีรูปแบบการกระจายคลื่นไปข้างหน้า ในแนวระนาบแผ่นมีลำคลื่น (beam) แคบ อัตราขยายสายอากาศ (antenna gain) สูง สามารถนำมาจัดเรียงในลักษณะแถวอะเรย์ได้ในพื้นที่จำกัดได้ดี โดยในการออกแบบสายอากาศนี้ค่าตัวแปรที่เลือก เป็นดังตารางที่ 3.4

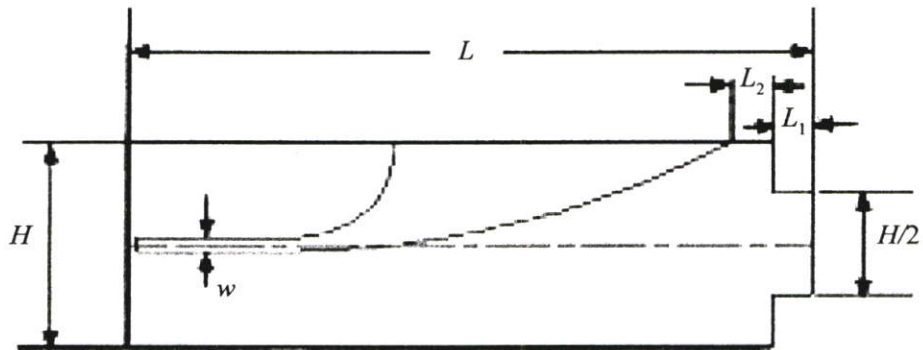
ตารางที่ 3.4 แสดงค่าต่าง ๆ ของการออกแบบสายอากาศวิวัลด์ิ

Parameter	ค่าที่เลือก
PCB Substrate: RT/Duriod 5880	1.588 mm
ความถี่ที่ใช้งาน (f)	10 GHz
ค่าเพอร์มิตติวิตีของแผ่นสตริป (ϵ_r)	2.23
ค่าเพอร์มิตติวิตีของแผ่นสตริปอ้างอิง (ϵ_{ref})	1.98
Z_0	50 โอห์ม
ช่วงความยาวสายอากาศ (L)	121 mm
ช่วงความกว้างสายอากาศ (H)	45 mm
ช่วงความยาวอิมพีแดนซ์แมตซิ่ง ($L_1 = L_2$)	7.5 mm
ความยาวช่วงแรกของ Feeding Microstrip line: (L_m)	20 mm
ความยาวช่วงถัดไป Feeding Microstrip line: (L_b)	16.94 mm
ช่วงความกว้างสายส่ง (w)	3.2 mm

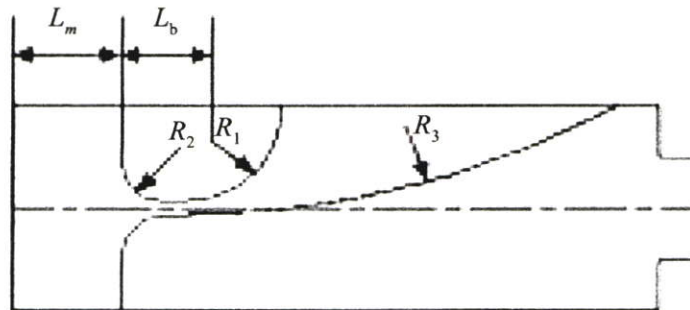
ตารางที่ 3.4 (ต่อ)

Parameter	ค่าที่เลือก
ระยะรัศมีส่วนโค้ง (R_1)	18.4 mm
ระยะรัศมีส่วนโค้ง (R_2)	8 mm
ระยะรัศมีส่วนโค้ง (R_3)	160 mm

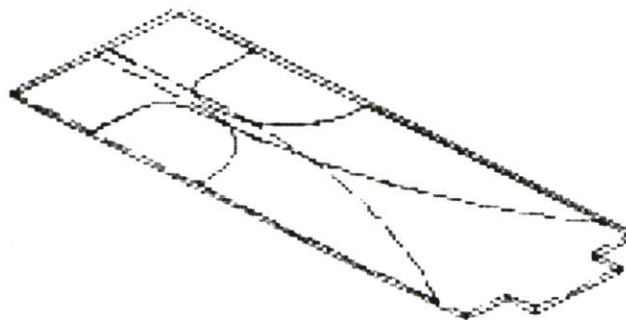
ผลจากการออกแบบทำให้ได้ต้นแบบสายอากาศซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.4



(a)



(b)



(c)

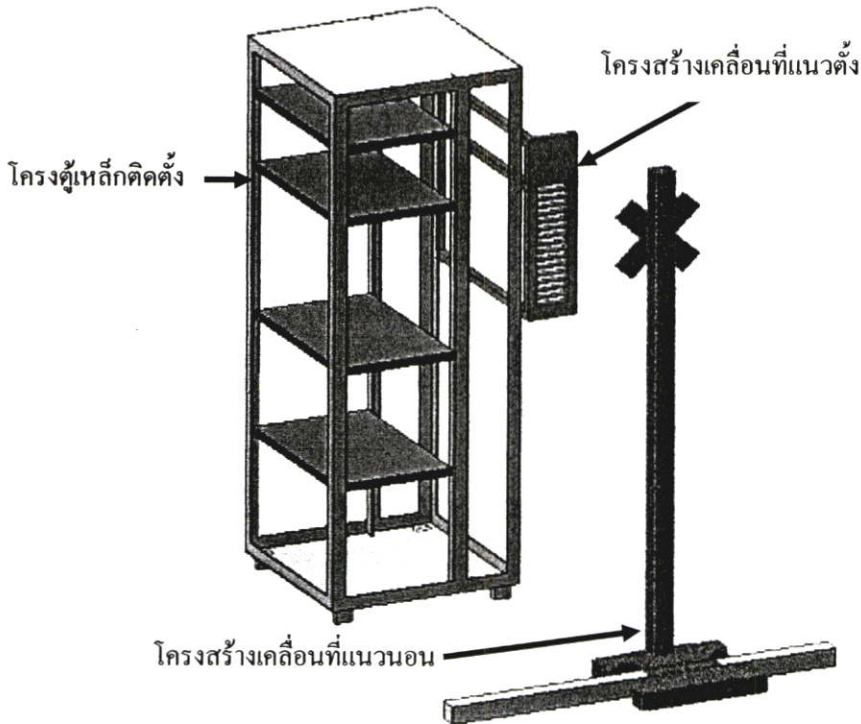
รูปที่ 3.4 สายอากาศสวิตช์ที่ทำการออกแบบ (a) มองจากด้านบน (b) มองจากด้านล่าง

(c) ภาพฉาย

3.1.2 การออกแบบโครงสร้างและกลไกการเคลื่อนที่

3.1.2.1 การออกแบบโครงสร้างหลัก

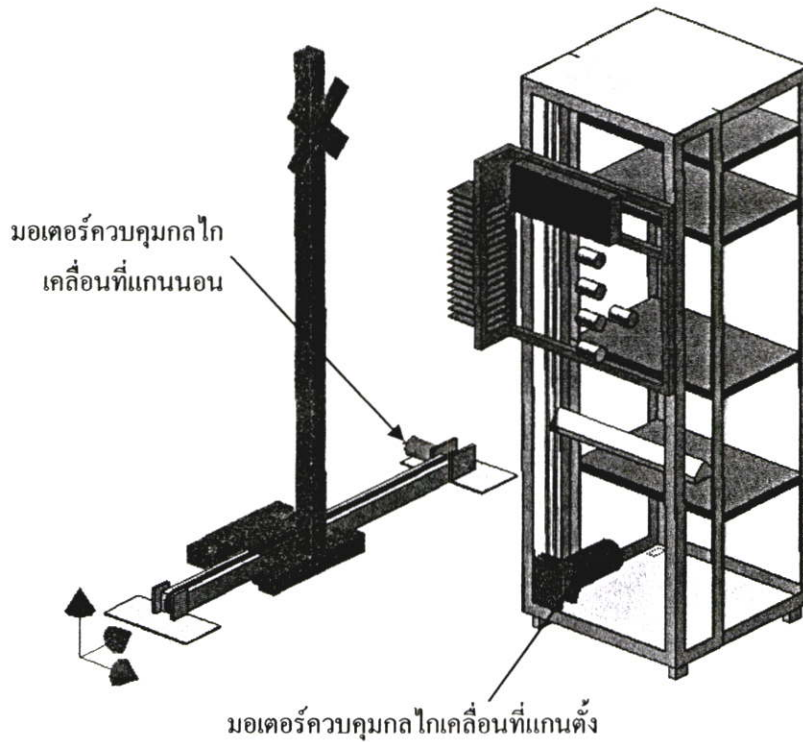
โครงสร้างหลักที่ใช้ติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบมีลักษณะดังรูปที่ 3.5 ประกอบด้วย โครงสร้างตู้เหล็กติดตั้งอุปกรณ์ โครงสร้างเคลื่อนที่ในแนวตั้ง และโครงสร้างเคลื่อนที่ในแนวนอน ซึ่งโครงสร้างตู้เหล็กมีขนาดโหล่งานที่พื้นกว้าง 58 เซนติเมตร ยาว 58 เซนติเมตรและสูง 176 เซนติเมตร โดยภายในจะมีส่วนที่เป็นชั้นวางสำหรับติดตั้งเครื่องมือต่าง ๆ



รูปที่ 3.5 โครงสร้างหลักที่ใช้ติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.2.2 การออกแบบกลไกการเคลื่อนที่

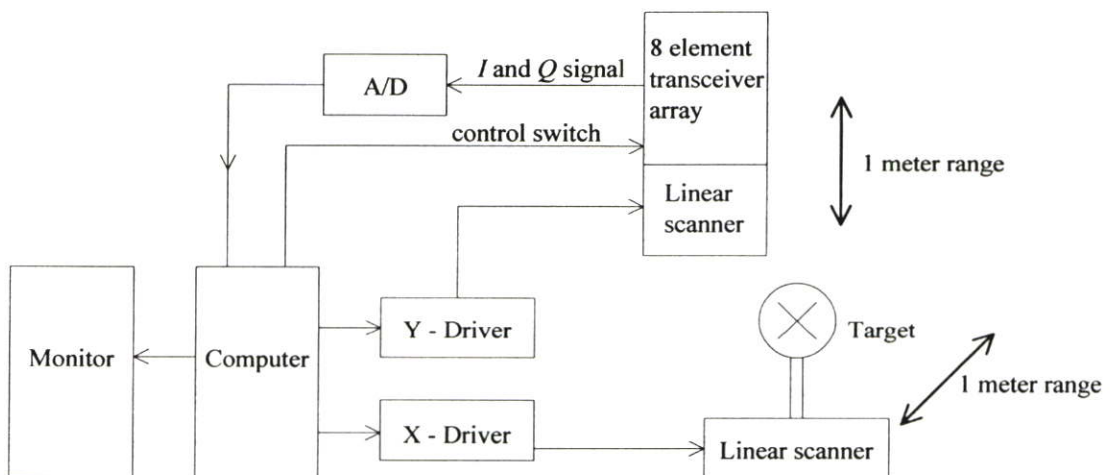
ส่วนของกลไกที่ใช้ในการเคลื่อนที่มีด้วยกัน 2 ส่วน คือ การกราดเคลื่อนที่เชิงเส้น (linear scan) แนวตั้งและแนวนอน ส่วนหลักของกลไกการเคลื่อนที่ก็ คือ สเต็ปมอเตอร์ (step motor) ที่ควบคุมการทำงานด้วยชุดขับเคลื่อน (motor driver) ที่เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ การเคลื่อนที่แนวตั้ง เป็นส่วนที่ติดตั้งอุปกรณ์เกี่ยวกับไมโครเวฟ เช่น สายอากาศ สายนำสัญญาณ ชุดสวิทช์ ไมโครเวฟและท่อนำคลื่น ซึ่งจะมีน้ำหนักมากจึงมีชุดถ่วงน้ำหนักเพื่อลดงานที่มอเตอร์ต้องใช้เคลื่อนที่ให้มากที่สุด และในส่วนโครงสร้างเคลื่อนที่แนวนอน เป็นการใส่ขั้ววัตถุที่ทำการสแกนในลักษณะการเลื่อนระบุตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กลไกการเคลื่อนที่

3.1.3 ระบบควบคุมและการเก็บข้อมูลเพื่อประมวลผล

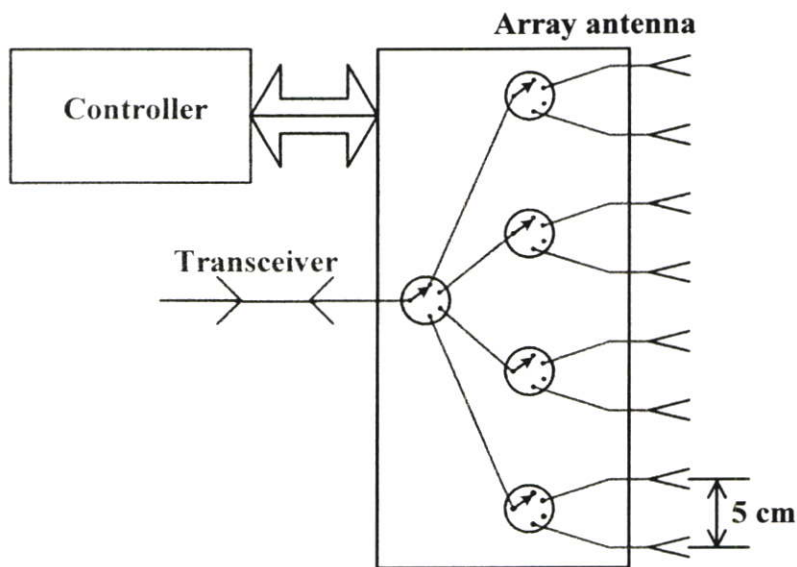
ในการควบคุมอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลของระบบเป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้ได้มาซึ่งข้อมูลในการสร้างภาพ ดังนั้นเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง และมีความรวดเร็วในการเก็บข้อมูลจึงมีความจำเป็นยิ่งที่จะต้องมีการออกแบบระบบในการเก็บข้อมูลให้ดี โดยระบบเก็บข้อมูลที่ทำกรออกแบบขึ้นมีลักษณะแผนภูมิการทำงานเป็นดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนภาพระบบควบคุมและเก็บข้อมูล

3.1.3.1 การออกแบบชุดสวิทช์สายอากาศส่งและรับในตัวเดียวกัน

เมื่อต้องการเก็บข้อมูลส่งและรับสัญญาณ ให้ได้เร็วกว่าการใช้ระบบสายอากาศเดี่ยวซึ่งเก็บข้อมูลได้คดต้องงอกับการขับเคลื่อนเชิงกลให้เลื่อนไปที่ละจุด ก็จึงมีแนวคิดที่จะใช้สายอากาศจำนวนมาก (ในที่นี้คือ 8) โดยเพิ่มวางเรียงเป็นแบบแถวอะเรย์ในแนวตั้ง แปรสมาชิกห่างระหว่างกัน 5 เซนติเมตร ซึ่งอยู่ในเงื่อนไขการไม่รบกวนต่อกันที่รับได้จากการออกแบบสายอากาศ ผลัดกันทำงาน โดยการควบคุมด้วยไมโครเวฟสวิทช์แบบ SP4T (single pole four throw) ซึ่งต่อในลักษณะเพื่อให้มีระยะเส้นทาง (path length) เท่าๆ กันในแต่ละเส้นทาง ดังในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 สวิทช์ไมโครเวฟกับการวางสายอากาศแบบตัวส่งตัวรับตัวเดียวกัน

เมื่อกำหนดการวางเส้นทางสายส่งดังได้กล่าว หากพิจารณาด้านเวลาแล้ว ซึ่งโดยปกติระบบการเลือกสายอากาศด้วยสวิทช์เร็วกว่าการเลื่อนเชิงกลมาก เก็บข้อมูลก็น่าจะเร็วขึ้น 8 เท่าจากการเก็บข้อมูลเส้นทางเดียว ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการใน โครงการนี้แต่เมื่อเพิ่มเส้นทางมากขึ้นเงื่อนไขของระบบก็มากขึ้นตาม เช่น สายนำสัญญาณจะต้องมีค่าการลดทอนเท่ากันทั้งหมด การเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณต้องเท่ากัน จึงควรต้องมีการทำการแมตชิงสัญญาณที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงมุมของสัญญาณให้เท่ากันในแต่ละเส้นทาง

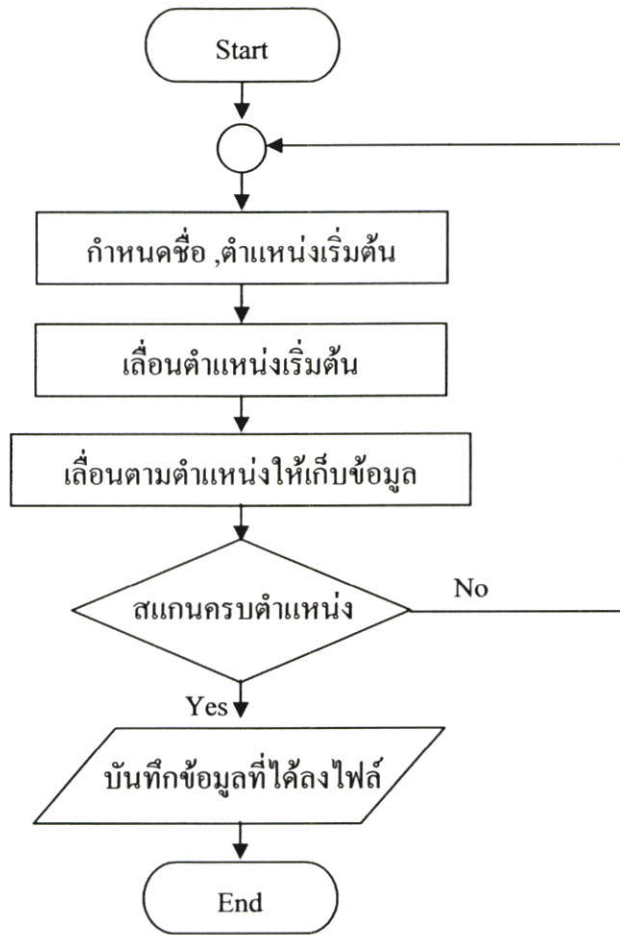
ในทุกกรณีเมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศมากขึ้นก็ต้องพิจารณาคุณสมบัติการแพร่กระจายสนาม ไม่ให้มีสัญญาณรบกวนการรับส่งของกลุ่มสายอากาศอื่นเข้ามารบกวนในการเก็บสัญญาณ นอกเหนือจากที่จะยอมรับได้ โดยดูผลจากการจำลองแบบใน โปรแกรมกับการวัดจริงที่ได้

3.1.3.2 การออกแบบโปรแกรมระบบเก็บข้อมูล

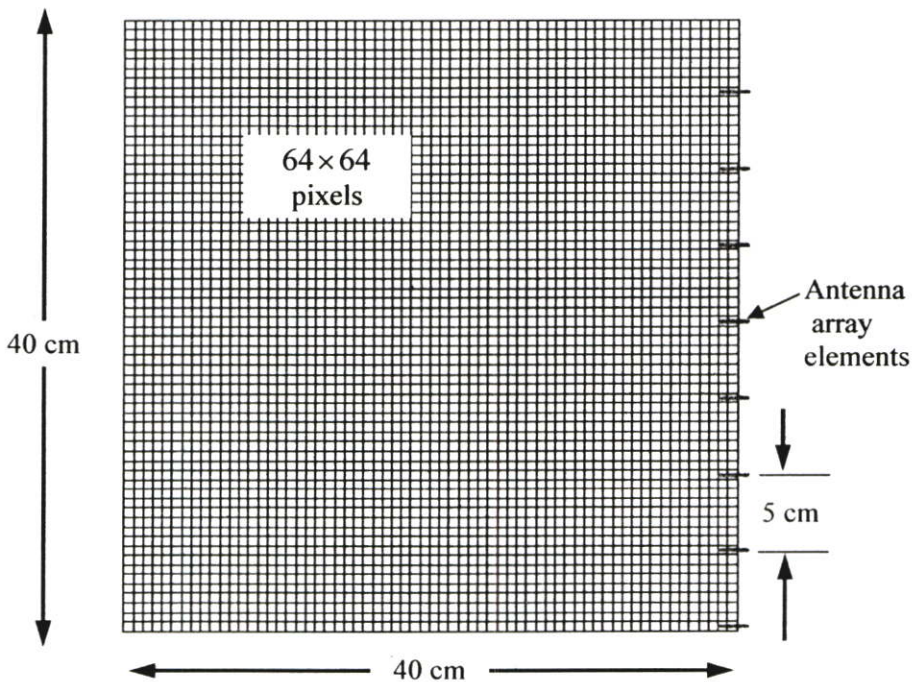
ในการควบคุมการทำงานของระบบเก็บข้อมูลนั้น จะใช้คอมพิวเตอร์ โดยออกแบบโปรแกรมควบคุมและเก็บข้อมูลที่พัฒนาโดยใช้ภาษา Visual C++ ด้วยการเริ่มจากการทดสอบความพร้อมของการติดต่อกับอุปกรณ์และพอร์ตใช้งานต่าง ๆ และทำการพัฒนาโปรแกรม

ลักษณะการทำงานของโปรแกรมที่ทำการพัฒนาขึ้นนั้น เมื่อเริ่มการทำงาน โปรแกรมจะออกคำสั่งให้มีการสร้างไฟล์ข้อมูล คำสั่งการอ่านค่าผ่านพอร์ต RS 232 ที่เป็นพอร์ตอนุกรม (serial port) ของเครื่องคอมพิวเตอร์ คำสั่งควบคุมการทำงานของมอเตอร์เพื่อให้เคลื่อนที่และมีความถูกต้องของตำแหน่งในการเก็บข้อมูลผ่านทางพอร์ตขนาน (parallel port) คำสั่งควบคุมลำดับการทำงานของสวิทช์ไมโครเวฟผ่านทางพอร์ตควบคุมของบอร์ดขยาย ETT-PC8255 โดยการสั่งงานทั้งหมดจะแสดงผลออกมาทางจอคอมพิวเตอร์ และตรวจสอบการทำงานของระบบได้ขณะทำงานซึ่งสามารถสรุปลำดับการทำงานของระบบได้ดังรูปที่ 3.9

จำนวนจุดของการเก็บข้อมูล มีจำนวน 64×64 พิกเซล (pixels) ซึ่งตามลักษณะการจัดวางแนวตั้งมี 8 สายอากาศเรียงเป็นแถวอะเรย์ การติดตั้งสายอากาศทั้ง 8 ตัวจะวางใกล้เคียงกัน เว้นช่วงละ 50 มิลลิเมตร ระยะเคลื่อนต่อจุดของการเก็บข้อมูลแนวตั้งคือ 6.25 มิลลิเมตร รวมเป็นระยะทางที่ครอบคลุมแนวตั้ง 40 เซนติเมตร และระยะการเลื่อนแนวนอนจะเหมือนกับแนวตั้ง ทำให้ได้ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลเป็นดังรูปที่ 3.10 โดยจะทำการเก็บข้อมูลที่รับได้จากสายอากาศทั้งแปดที่สลับกันทำงานจากล่างขึ้นบน ก่อนที่จะเลื่อนวัตถุทุก ๆ 1 ช่องแกนอนเมื่อครบระยะแกนอนแล้วจึงเคลื่อนทั้งอะเรย์ขึ้นไป 1 ช่องแกนตั้ง ทำลักษณะเช่นนี้ไปได้ข้อมูลครบทุกจุด



รูปที่ 3.9 แผนภาพการทำงานของระบบเก็บข้อมูล



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งการเก็บข้อมูล

3.2 การสร้างและประกอบระบบ

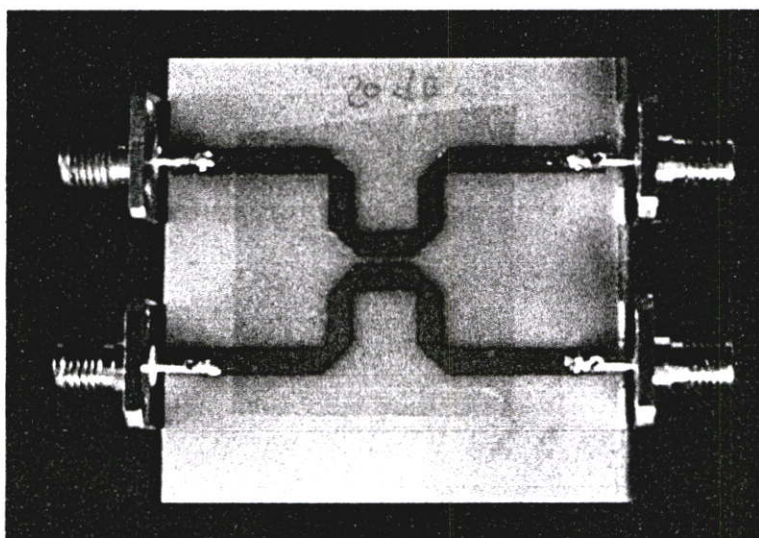
เมื่อทำการออกแบบระบบในส่วนต่าง ๆ เพิ่มเติมและได้ทำการทดสอบและจำลองผลด้วยโปรแกรมต่าง ๆ เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงได้ดำเนินการสร้างแต่ละส่วนขึ้นตามแบบที่ได้ทำไว้ และเมื่อใช้ร่วมกับอุปกรณ์หลักที่มีอยู่เดิม จึงประกอบกันเป็นระบบโดยรวม

3.2.1 การสร้างอุปกรณ์ไมโครเวฟ

อุปกรณ์ในระบบ ไมโครเวฟที่ทำการสร้างขึ้นเองและส่วนที่มีอยู่เดิม ได้แก่

3.2.1.1 การสร้างไดเรกชันแนลคัปเปิลอร์ไลน์เส้นขนาน

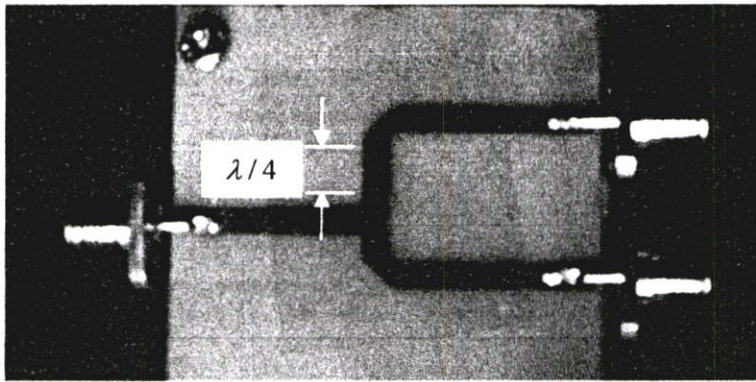
ไดเรกชันแนลคัปเปิลอร์ไลน์แบบขนานบนแผ่นปรินท์ที่สร้างขึ้นมาตามการออกแบบมีลักษณะดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.11 ไดเรกชันแนลคัปเปิลอร์บนแผ่นปรินท์

3.2.1.2 การสร้างที่จังก์ชันกับเฟดชิฟเตอร์

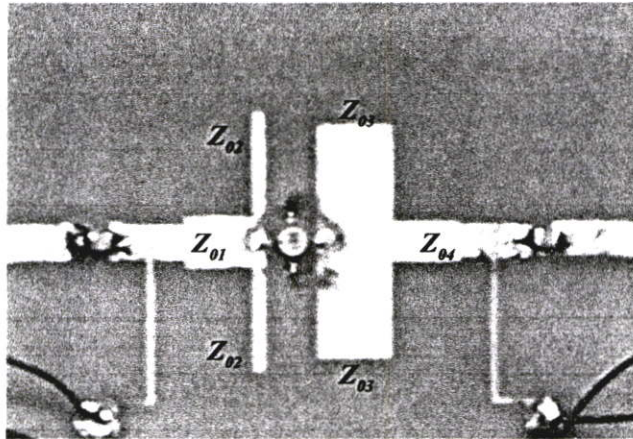
จากค่าที่ทำการออกแบบไว้ในการทำตัวแบ่งสัญญาณที่จังก์ชันและเพิ่มเงื่อนไขของการเลื่อนเฟสให้ต่างกัน 90 องศา สามารถที่จะทำบนแผ่นปรินท์ได้ มีลักษณะดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ที่จังก์ชันกับเฟสชิฟเตอร์บนแผ่นปริ้นท์

3.2.1.3 การสร้างไมโครเวฟมิกเซอร์

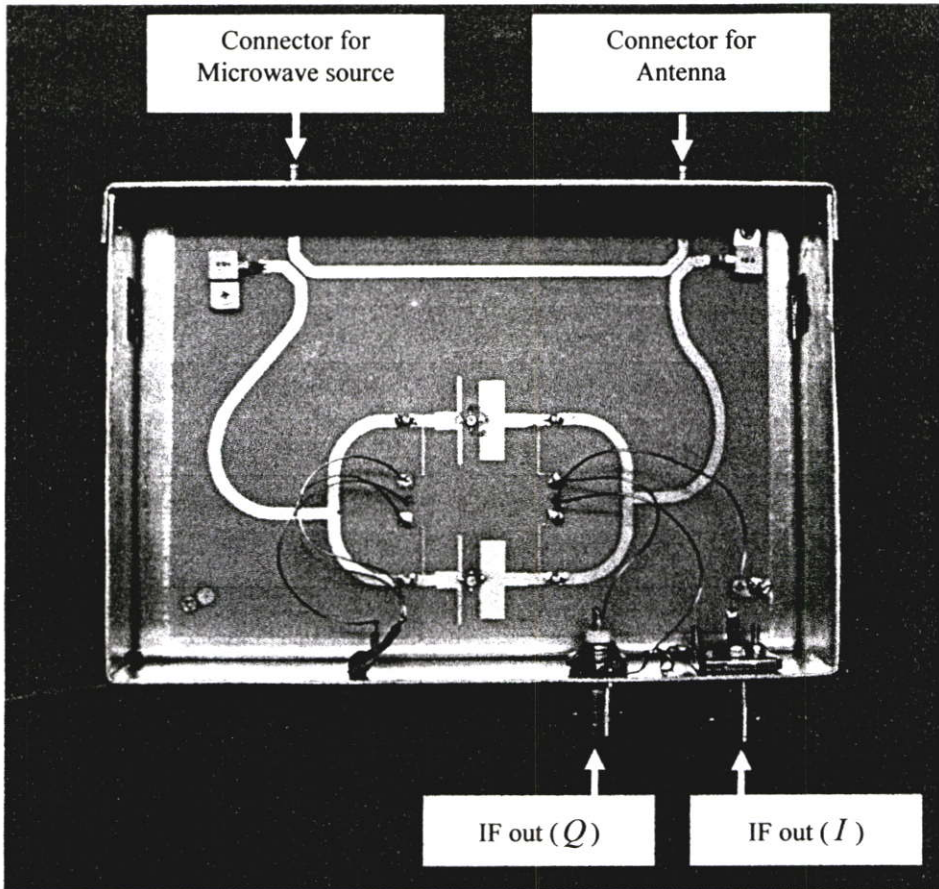
วงจรไมโครเวฟมิกเซอร์บนแผ่นปริ้นท์ที่สร้างขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ไมโครเวฟมิกเซอร์บนแผ่นปริ้นท์

เมื่อได้อุปกรณ์ทั้งสามอย่างที่กล่าวมาและได้ทำการทดสอบจนได้ผลเป็นที่น่าพอใจ จึงได้ทำการรวมอุปกรณ์ทั้งสามในรูปของระบบวงจรรับ (receiver) ให้อยู่ในแผ่นปริ้นท์เดียวกัน ดังรูปที่

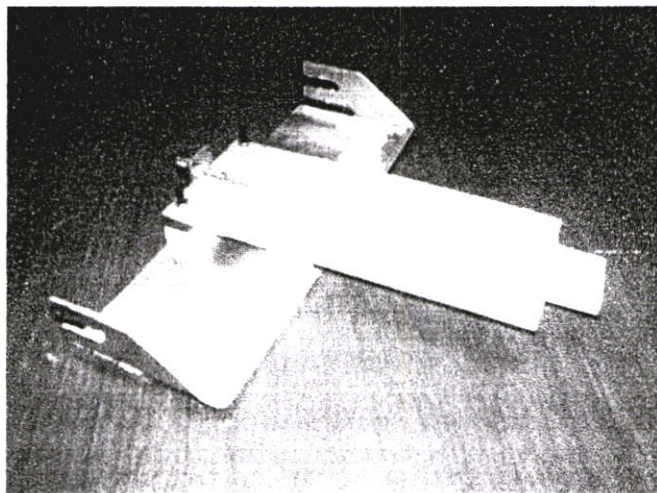
3.14



รูปที่ 3.14 ระบบไมโครเวฟบนแผ่นปรินท์

3.2.1.4 การสร้างสายอากาศวิวลดี

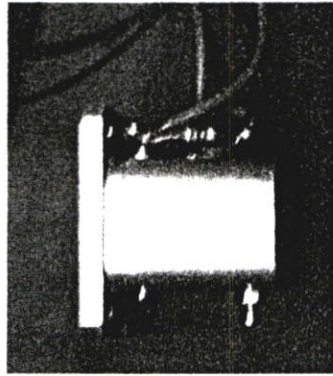
สายอากาศวิวลดีที่สร้างขึ้นตามแบบ นั้น จำเป็นต้องเพิ่มที่ส่วนจับยึดให้ง่ายต่อการติดตั้งกับโครงสร้าง จึงได้สายอากาศวิวลดีที่มีลักษณะดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 สายอากาศวิวลดี

3.2.1.5 การใช้งานแหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์ไดโอด

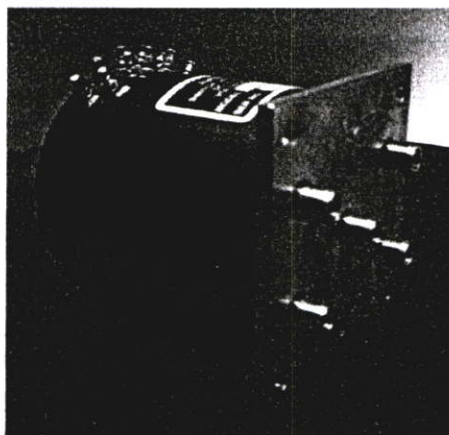
แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์ไดโอด (Gunn oscillator) ดังรูปที่ 3.16 เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ กัมมันต์ไดโอดออสซิลเลเตอร์ รุ่น MPL : MP – 10G0M ทำงานที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยการไบอัสแรงดันไฟ 8 โวลต์ มีกำลังส่ง 10 มิลลิวัตต์ โดยทำงานเป็นตัวสร้างสัญญาณคลื่นไมโครเวฟและตัวรับคลื่นสัญญาณในชุดเดียวกัน



รูปที่ 3.16 แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์ไดโอด (MPL : MP – 10G0M)

3.2.1.6 การใช้งานสวิทช์ไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์

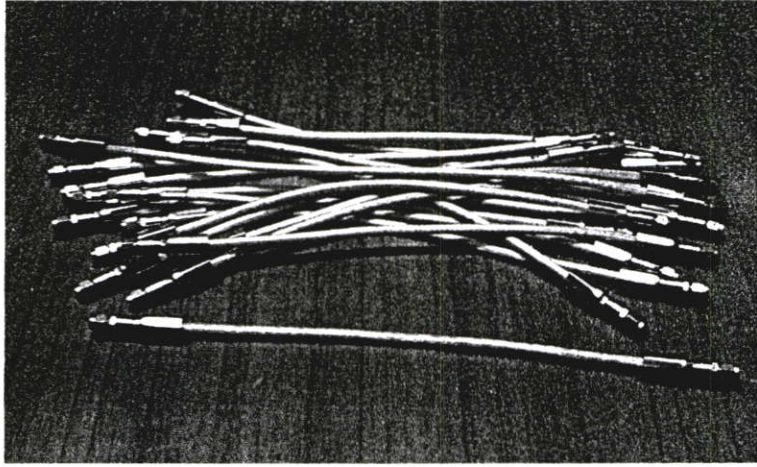
สวิทช์ไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์ เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญของงานวิจัยนี้ เป็นสวิทช์แบบ SP4T ที่ทำงานในย่านความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งมีลักษณะการทำงานเป็นสายนำสัญญาณที่เลือกเส้นทางได้โดยใช้รีเลย์แบบปกติเป็นตัวสับสวิทช์เลือกช่องสัญญาณ โดยสวิทช์ที่ใช้ คือ SEM143T ทำงานที่ความถี่ในช่วงไม่เกิน 18 กิกะเฮิร์ตซ์ ด้วยการไบอัสแรงดัน 28 โวลต์ โดยสามารถเลือกได้ 4 ช่องสัญญาณ



รูปที่ 3.17 สวิทช์ไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์ (SEM143T)

3.2.1.7 การใช้งานสายโคแอกเซียลนำสัญญาณ

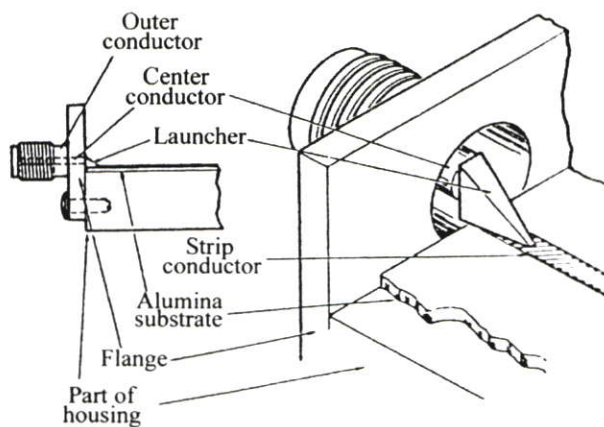
สายนำสัญญาณแบบโคแอกเซียลที่ใช้ชนิดคัลเพลง ปรับแต่งให้มีความยาวที่เหมาะสมจากสายรุ่น SUCOFLOX_104 สายนำสัญญาณในย่านความถี่สูง ในช่วงความถี่ 0.01 – 26.5 กิกะเฮิรตซ์



รูปที่ 3.18 สายโคแอกเซียลนำสัญญาณ

3.2.1.8 การใช้งานคอนเนคเตอร์ (Connector)

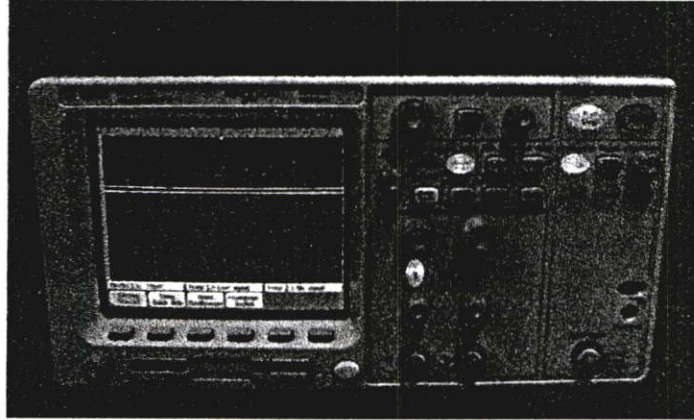
คอนเนคเตอร์แบบเอสเอ็มเอ (SMA) ใช้เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างวงจรการส่งผ่านไมโคร-สตริปไลน์กับสายโคแอกเซียลนำสัญญาณ โดยในการเชื่อมต่อนั้นมักจะเกิดการสูญเสียเนื่องจากการเดินทางของสัญญาณมีการสะดุดไม่ต่อเนื่อง (discontinuity) เช่น เกิดจากการโค้งงอของลายวงจร หรือลายวงจรไม่เชื่อมต่ออย่างเหมาะสม จึงต้องพิจารณาให้เกิดการสูญเสียที่ต่ำสุด จากรูปที่ 3.19 จะเห็นถึงเทคนิคหนึ่งของการเชื่อมต่อคอนเนคเตอร์กับลายสตริปเพื่อลดการลดทอนสัญญาณ



รูปที่ 3.19 การเชื่อมต่อคอนเนคเตอร์

3.2.1.9 การใช้งานออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

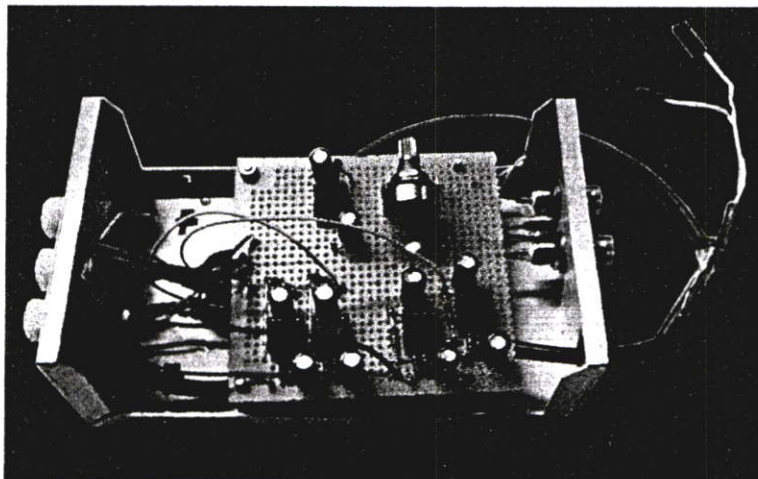
ในการแปลงสัญญาณ IF จากตัวรับสัญญาณไมโครเวฟซึ่งเป็นค่าระดับไฟตรง (DC) ในเบื้องต้นมีการใช้ออสซิลโลสโคป Agilent รุ่น 54621A ในการอ่านค่าสัญญาณอนาล็อกและแปลงสัญญาณเป็นดิจิทัลส่งเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อไปเก็บเป็นข้อมูลในไฟล์ที่กำหนดผ่านพอร์ต RS 232 ที่มีอยู่ ทั้งสัญญาณ I และ Q



รูปที่ 3.20 ออสซิลโลสโคป รุ่น 54621A

3.2.1.10 การใช้งานวงจรขยายสัญญาณ IF (Signal Amplifier IF)

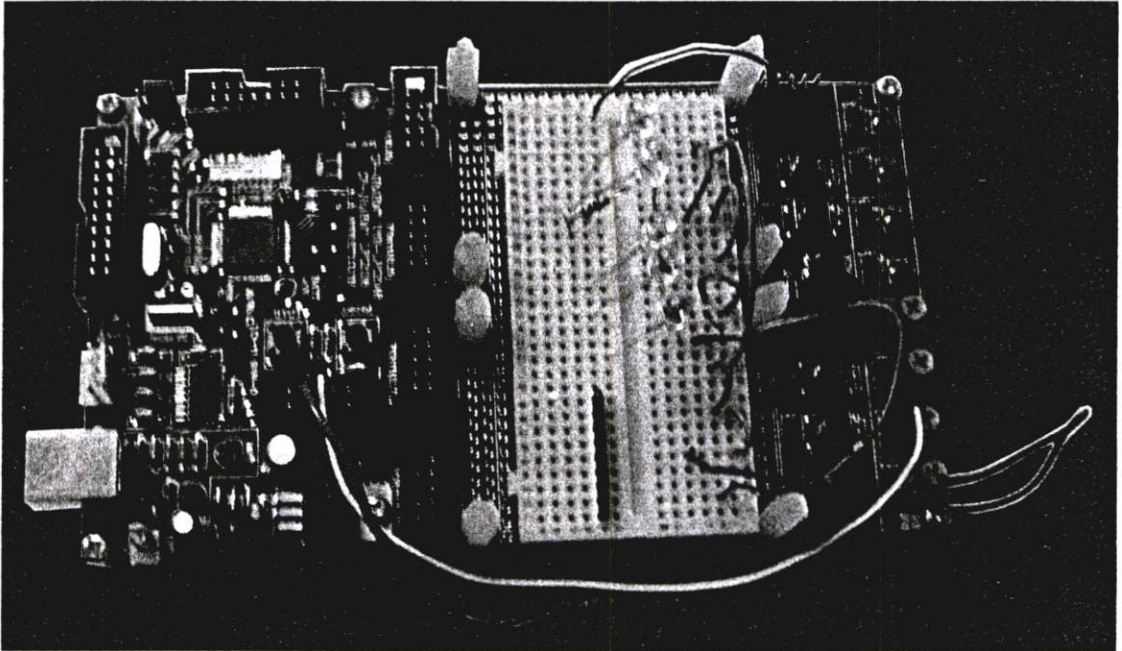
เครื่องขยายสัญญาณใช้ในงานวิจัยในส่วนขยายสัญญาณจากตัวตรวจวัดคลื่นไมโครเวฟที่มีอยู่เดิม ซึ่งอัตราขยายต้องจำกัดระดับแรงดันที่ขยายได้ให้อยู่ในช่วง 0 – 3 โวลต์ ของทุกเส้นทางสายอากาศ ทั้งสัญญาณ I และ Q ดังรูปที่ 3.21



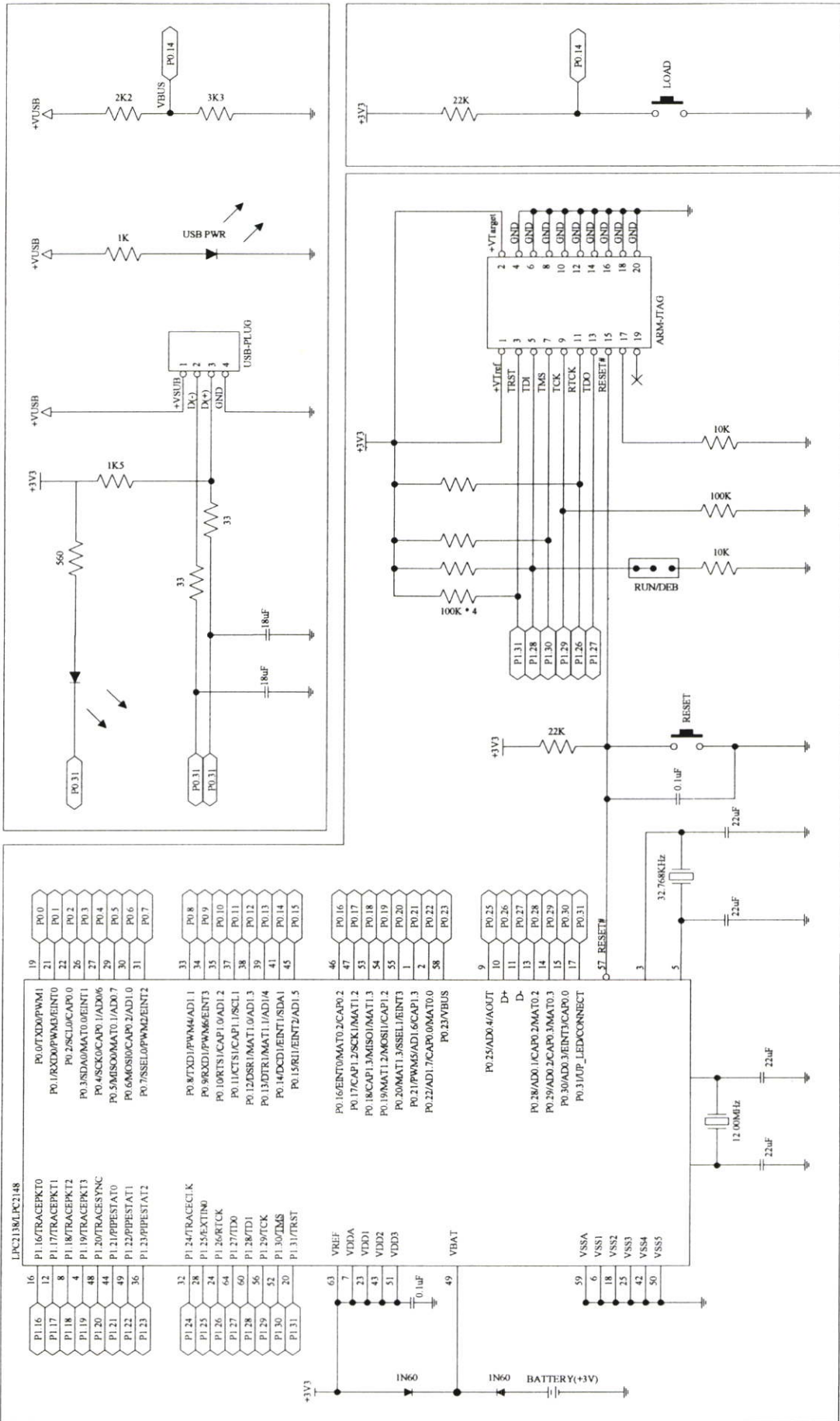
รูปที่ 3.21 แผงวงจรขยายสัญญาณ

3.2.1.11 การใช้งานส่วนแปลงขนาดออกเป็นดิจิทัลและส่วนการเก็บข้อมูล

สำหรับการแปลงขนาดออกเป็นดิจิทัลจากสัญญาณขาออกจากวงจรขยาย IF และการควบคุมแล้วดำเนินการเก็บข้อมูลกระทำโดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM7TDMI-S ที่ได้บรรจุอยู่บนแผงวงจร CP-JR ARM7 USB-LPC2148 EXP จากบริษัท อีทีที จำกัด ซึ่งมีโครงข่ายวงจรและแผ่นพิมพ์วงจรเป็นดังรูปที่ 3.22



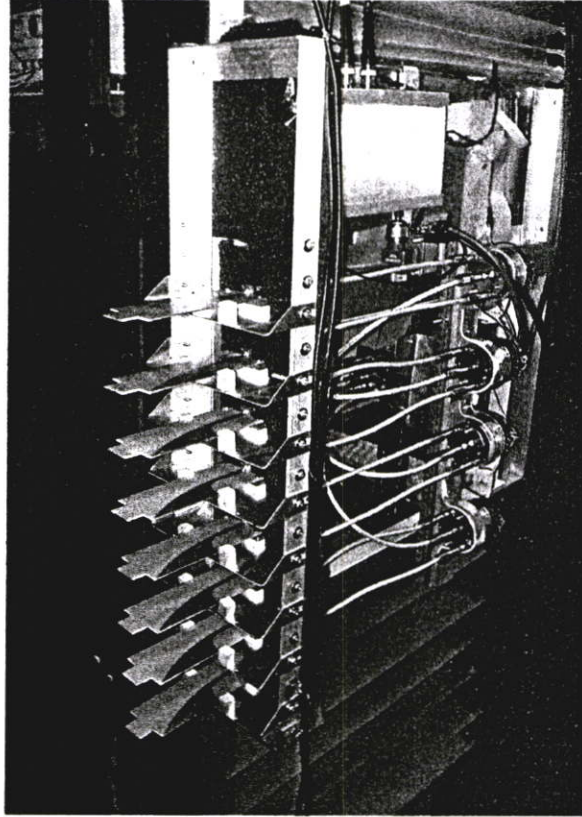
รูปที่ 3.22 แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.23 ฟังก์ชันของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

3.2.2 การประกอบโครงสร้างระบบ

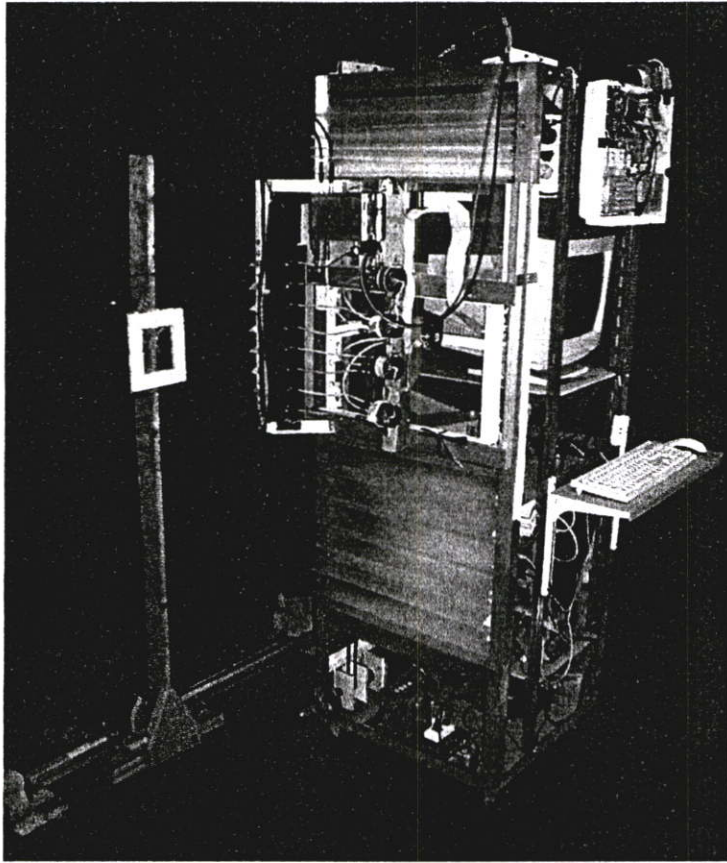
เมื่อทำการประกอบสายอากาศวิวาล์ดกับสวิตช์ไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์ Single-pole 4-throw (SP4T) ในส่วนของการติดตั้งสายอากาศวิวาล์ดแบบ อะเรย์โดยมีลักษณะดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ภาพการวางสายอากาศชิดกับชุดการเคลื่อนที่แนวตั้ง

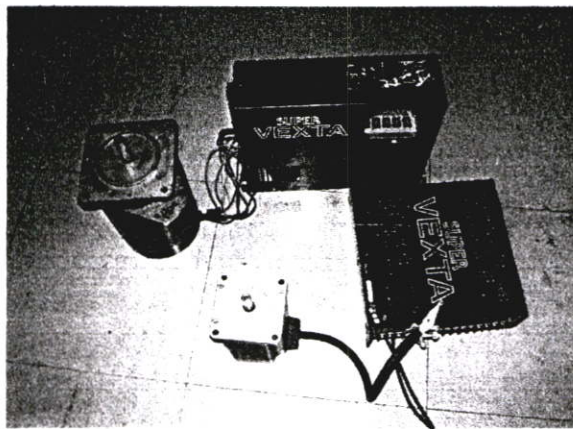
สำหรับโครงระบบในส่วนรองรับการขับเคลื่อนทั้งแกนตั้งและแกนอนที่ได้ประกอบเสร็จแล้วนั้นมีลักษณะดังรูปที่ 3.25

ระบบสร้างภาพที่ได้จากการพัฒนาสายอากาศที่ใช้สแกนแบบแฉกร่วมกับระบบสวิตช์ไมโครเวฟ จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของข้อมูลภาพ ซึ่งแบ่งข้อมูลที่เก็บเป็นสองสัญญาณที่รับได้จะแปลงอยู่ในสัญญาณอินเฟส (I) และต่างเฟส 90 องศา (Q) โดยสามารถหาขนาดและเฟสของสัญญาณ การยกกำลังสองของสัญญาณ I และ Q จากความสัมพันธ์ $I + jQ = Ae^{-j2kR}$ มาบวกเข้าด้วยกัน แล้วถอดรากที่สองจะได้ขนาด A ของตัวแปรฟังก์ชันคลื่น ที่ A คือ ขนาดของการกระเจิงของคลื่นและ R คือ ระยะของวัตถุเป้าหมายอยู่ในเทอมของเฟส



รูปที่ 3.25 ระบบส่งและรับคลื่นแบบอะเรย์แปรสมาชิกผลัดกันทำงานด้วยสวิทซ์อิเล็กทรอนิกส์.

ในการเก็บข้อมูลเพื่อการสร้างภาพไมโครเวฟจะต้องมีการเก็บข้อมูลที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนว $x - y$ จึงจำเป็นที่จะต้องมียุอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้กลไกโซ่มอเตอร์แบบสเตปทำให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยการควบคุมการทำงานอัตโนมัติผ่านชุดขับ (Motor driver) ดังรูปที่ 3.26 ด้วยโปรแกรมจากเครื่องคอมพิวเตอร์



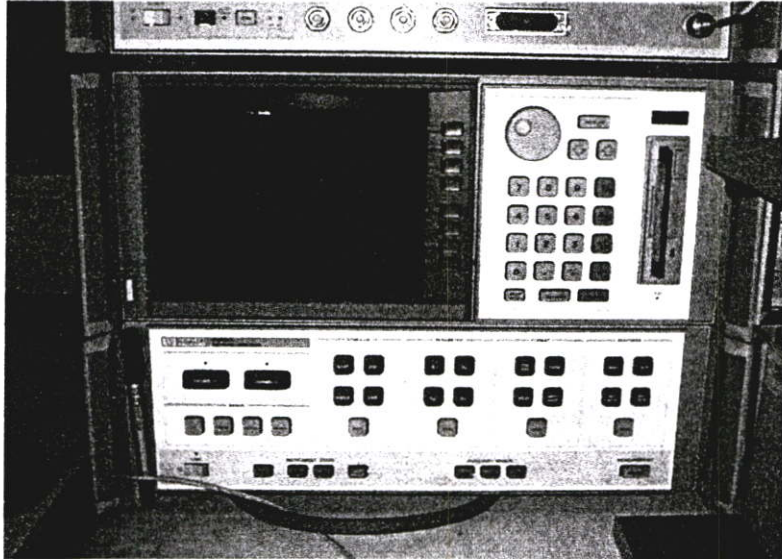
รูปที่ 3.26 มอเตอร์และชุดขับการสแกนในแนว $x - y$

3.3 การทดลอง

ในส่วนของการทดลองที่เกี่ยวข้องระบบส่งและรับคลื่นแบบอะเรย์แปรศมาชิกผลัดกันทำงานด้วยสวิทซ์อิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้นมานั้น แบ่งได้เป็นส่วนของการทดสอบสมบัติของทั้งอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น เช่น การทดลองวัดการคัปปลิงของโคเรคชันนัลคัปเปิลเลอร์ ฯลฯ รวมถึงการทดสอบอุปกรณ์ที่เลือกใช้และปรับแต่ง เช่น การวัดความไวในการเปิด – ปิดสวิทซ์ไมโครเวฟ ฯลฯ จากนั้นจึงทำการทดสอบการทำงานของระบบต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์เหล่านั้น

3.3.1 การทดสอบวัดประสิทธิภาพการส่งกำลังการคัปปลิงตลอดเฟสของสัญญาณและอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์

สำหรับการพิสูจน์ทราบสมบัติของอุปกรณ์ที่ออกแบบสร้างขึ้น คือโคเรคชันนัลคัปเปิลเลอร์ที่จังก์ชันเฟสชิฟเตอร์ สายอากาศวิวัตติ ตลอดจนการวัดเพื่อปรับแต่งเลือกใช้สายนำสัญญาณโคแอกเซียลที่มีอยู่นั้น ในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การส่งกำลังผ่านค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ค่าการคัปปลิง ค่ามุมเฟสสัมพันธ์ของคลื่น และค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ใช้งานนั้น กระทำโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรแบบเวกเตอร์ (VECTOR NETWORK ANALYSER HP8510C) ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (HEWLETT PACKARD 8510C NETWORK ANALYZER)

3.3.2 การวัดสมบัติการเปลี่ยนสัญญาณของวงจรรับ

เพื่อเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของระบบวงจรรับจึงได้ทำการทดลองป้อนสัญญาณจากกันน์ไดโอดออสซิลเลเตอร์ แล้วต่อปลายข้างหนึ่งของอุปกรณ์ลัดทอนคลื่น (variable

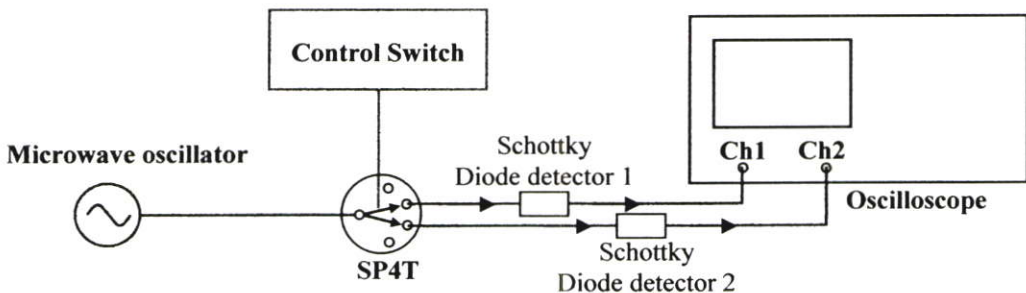
attenuator) เข้าแทนที่สายอากาศ โดยปลายอีกข้างหนึ่งต่อกับโหลด 0 โอห์ม (short circuit) ทำการปรับระดับการลดทอน เพื่อจำลองระดับคลื่นสะท้อนกลับ ซึ่งเข้าทางพอร์ท RF ของมิกเซอร์ ในขณะที่พอร์ท LO ที่แบ่งจากกันนำไดโอดออสซิลเลเตอร์ มีค่าคงที่ บันทึกค่าความสัมพันธ์ระหว่างระดับสัญญาณ IF ทั้ง I และ Q กับระดับลดทอน

3.3.3 การวัดลักษณะการกระจายคลื่นของสายอากาศวิวัลด์ที่สร้างขึ้น

เมื่อสร้างสายอากาศวิวัลด์ได้ตามที่ได้ออกแบบแล้ว จึงทำการทดสอบวัดลักษณะการกระจายคลื่นของสายอากาศวิวัลด์ โดยใช้สายอากาศวิวัลด์เป็นตัวส่งคลื่นไมโครเวฟพร้อมทั้งหมุนสายอากาศรอบเป็นวงกลมตามระนาบที่ใช้ในการวิจัย ทุก ๆ การหมุนเปลี่ยนมุม 10 องศา แล้วจดบันทึกที่ระดับสัญญาณด้วยเครื่องออสซิลโลสโคปที่ได้มาจากสายอากาศตัวรับชนิดฮอร์น ผ่านตัวดีเทคเตอร์ Schottky diode detector ที่ตั้งอยู่กับที่ห่างออกมาเป็นระยะ 1.5 เมตร ซึ่งการทดสอบใช้ห้องทดลองกว้างและไม่มีสิ่งกีดขวางให้เกิดการสะท้อนของคลื่น เพื่อต้องการความถูกต้องของการกระจายคลื่น แล้วจึงไปเทียบลักษณะการกระจายคลื่นที่ได้จากโปรแกรมที่ใช้ออกแบบสายอากาศ

3.3.4 การวัดความไวในการเปิด - ปิดไมโครเวฟสวิตช์

เพื่อกำหนดช่วงเวลาการทำงานของชุดสวิตช์และช่วงการเก็บข้อมูล ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดความเร็วของระบบ โดยต้องคำนึงถึงความถูกต้องของสัญญาณเป็นสำคัญ จึงทำการทดลองตามรูปที่ 3.28 ด้วยการเริ่มป้อนสัญญาณไมโครเวฟจากกันนำไดโอดออสซิลเลเตอร์เข้าสวิตช์ไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์ แล้วทำการส่งตัวควบคุมสับสวิตช์ไมโครเวฟเป็นจังหวะด้วยความเร็วในการสับสวิตช์ต่อครั้งที่ต่างกัน คือ ที่ 100 มิลลิวินาที และ 2 วินาที สังเกตลักษณะสัญญาณที่ได้จากทั้งสอง Schottky diode detector ด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป



รูปที่ 3.28 การทดลองเพื่อกำหนดความไวในการเปิด - ปิด

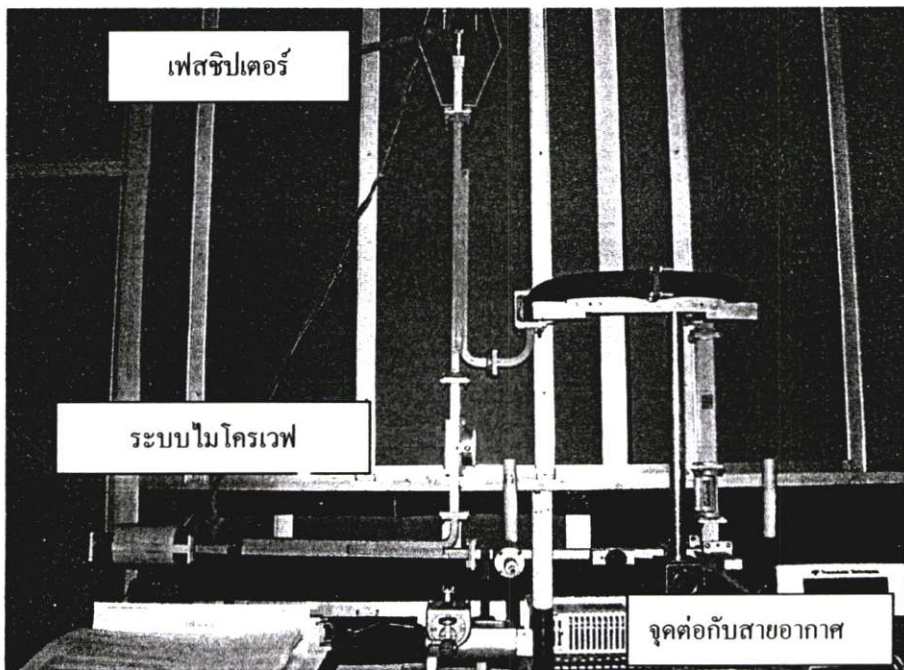
3.3.5 การทดลองเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพวัตถุด้วยสายอากาศวิวัลด์กับระบบเก่า

การทดลองในเบื้องต้นของการสร้างภาพเป็นการปรับประยุกต์เก็บข้อมูลของภาพวัตถุ โดยระบบเก่า ซึ่งเป็นระบบที่ใช้อุปกรณ์ประเภทท่อนำคลื่นไมโครเวฟ โดยรวมแล้วอุปกรณ์ที่นำมา

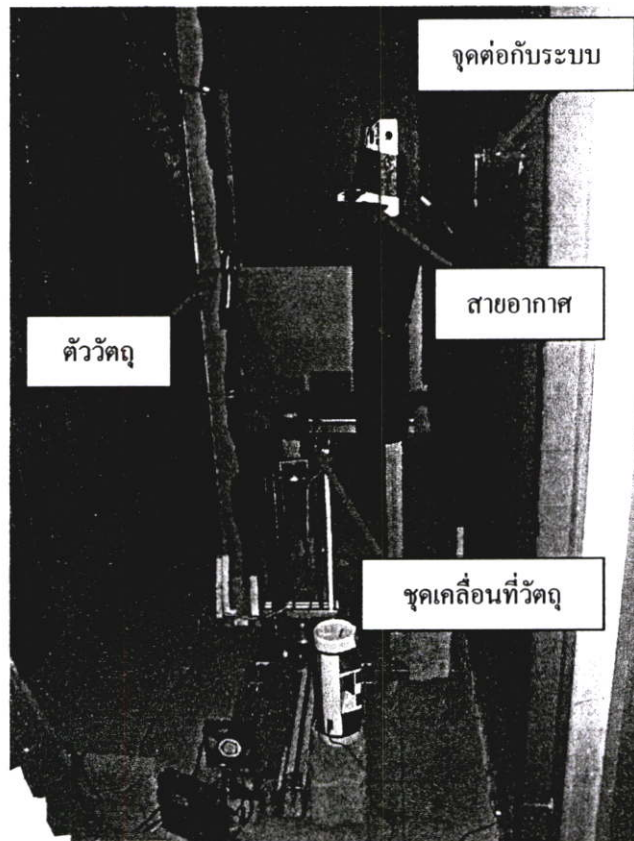
ต่อเป็นระบบไมโครเวฟเป็นอุปกรณ์มาตรฐาน เช่น ท่อนำคลื่นทางตรง ท่อนำคลื่นทางโค้ง ไคเรค - ชั้นนำคลื่นเพลตอร์ ไมโครเวฟมิกเซอร์ เฟสชิปเตอร์และสายอากาศแบบฮอร์นรูปพีระมิด (pyramidal horn antenna) ซึ่งมีข้อเสียตรงที่ระบบส่งและรับคลื่นมีขนาดและน้ำหนักมากไม่เหมาะแก่การเคลื่อนย้าย แต่ก็มีข้อดีตรงที่การสูญเสียกำลังที่ใช้ไปในระบบน้อยและสามารถควบคุมความถูกต้องของข้อมูลที่จะเก็บมาได้ เพื่อจะนำมาสร้างภาพกลับของวัตถุได้ถูกต้องและใช้อย่างยิ่งต่อการพัฒนา ระบบไมโครเวฟชุดใหม่ในการทดลองขั้นต่อไปด้วย

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบสร้างสายอากาศที่ต้องการแล้วจึงนำมาทดลองแทนที่สายอากาศฮอร์น และเขียนโปรแกรมสั่งงานเพื่อที่จะเริ่มทำการทดลองด้วยระบบการทดลองที่ติดตั้งอยู่แล้วของโครงงานวิจัยเก่า ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.29 และ 3.30

การทดลองส่วนภาครับส่งนั้นเพื่อที่จะใช้เป็นผลอ้างอิงและทดสอบการทำงานของระบบ เช่น ค่าที่รับได้จากสายอากาศมีความถูกต้องของสัญญาณและขนาดของสัญญาณที่ถูกลดทอนไป ทดสอบระบบการจัดเก็บข้อมูลรวมถึงการควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกนต่าง ๆ ตรวจสอบสภาพแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อสัญญาณ และทำการเก็บข้อมูลที่ต้องการ โดยการเลื่อนวัตถุไปในแนวแกนนอนและแกนตั้งในระนาบฮอโลแกรมขนาด 64×64 จุดข้อมูลทีละระยะห่างจากวัตถุ 30 เซนติเมตรไว้เป็นข้อมูลอ้างอิงโดยข้อมูลนี้จะนำไปใช้ในการสร้างภาพเสมือนจริงดังที่กล่าวไว้ใน ทฤษฎี



รูปที่ 3.29 ระบบไมโครเวฟที่ใช้ทดลองภาครับส่งไมโครเวฟโฮโลกราฟิกแบบเก่า

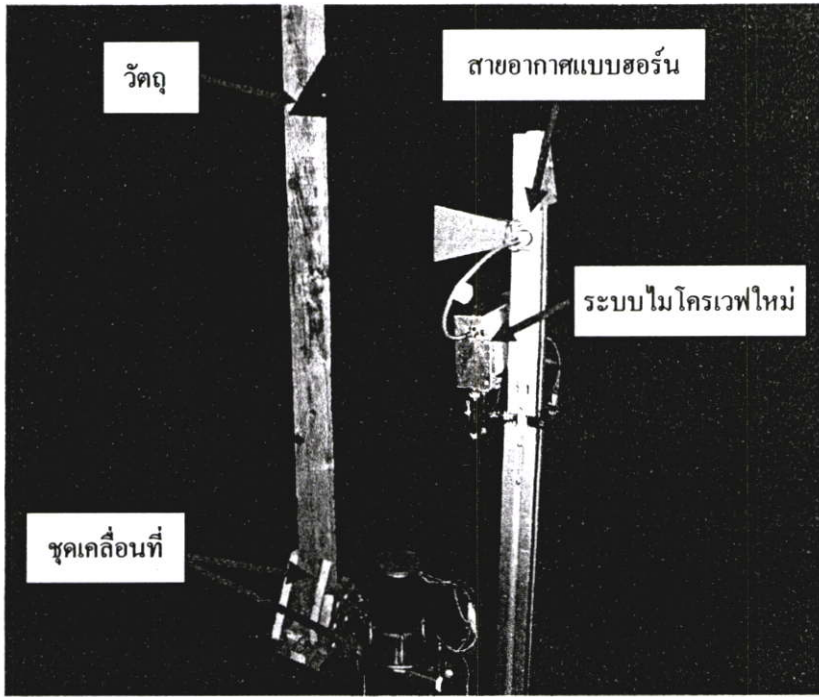


รูปที่ 3.30 การติดตั้งสายอากาศและชุดเคลื่อนที่

การเก็บข้อมูลจากระบบดังรูปเมื่อไม่ใช้หลักการของฮอโลกราฟี เพื่อให้ได้ข้อมูล I และ Q ก็จำเป็นต้องเก็บข้อมูลเป็นจำนวน 2 ครั้ง ในการเก็บข้อมูล I ก็ทำการสแกนข้อมูลจุดทั้งหมดหนึ่งรอบ พอเสร็จก็จึงทำการเก็บข้อมูลในส่วนค่า Q โดยทำซ้ำเหมือนกับการเก็บข้อมูลของ I แต่ต้องทำการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสที่ตัวเฟสชิปเตอร์ของระบบเลื่อนไปเป็นมุม 90 องศา เมื่อได้ข้อมูลทั้งสองแล้วจึงใช้ข้อมูลที่ได้นั้น นำมาสร้างภาพของวัตถุ

3.3.6 การทดลองเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพด้วยสายอากาศฮอร์นกับระบบไมโครเวฟใหม่

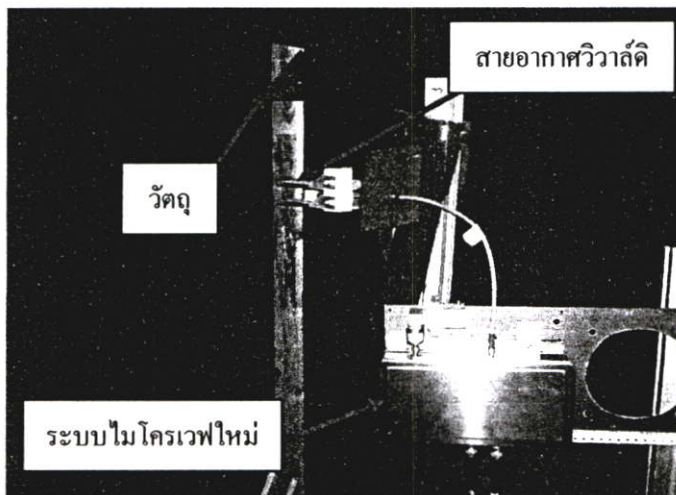
เมื่อได้ทดสอบความถูกต้องของการเก็บข้อมูลว่าสามารถประยุกต์ใช้ทฤษฎีสร้างภาพกลับของวัตถุระยะใกล้ได้แล้ว ขั้นตอนจะมาพัฒนาชุดระบบไมโครเวฟขึ้นเพื่อเพิ่มสัญญาณเอาท์พุท เพิ่มการเก็บข้อมูล I และ Q ให้ได้พร้อมกันเพื่อลดเวลาการทดลองโดยใช้วงจรมิกเซอร์ที่สร้างขึ้น และเพื่อให้แน่ใจในระบบไมโครเวฟอันใหม่นี้ใช้งานได้จริง จึงใช้สายอากาศเดี่ยวแบบฮอร์นมาทำการทดลองดูก่อน



รูปที่ 3.31 การติดตั้งสายอากาศฮอร์นและหุ่นเคลื่อนที่กับระบบไมโครเวฟใหม่

3.3.7 การทดลองเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพวัตถุด้วยสายอากาศวิวัตต์เดียวกับระบบไมโครเวฟใหม่

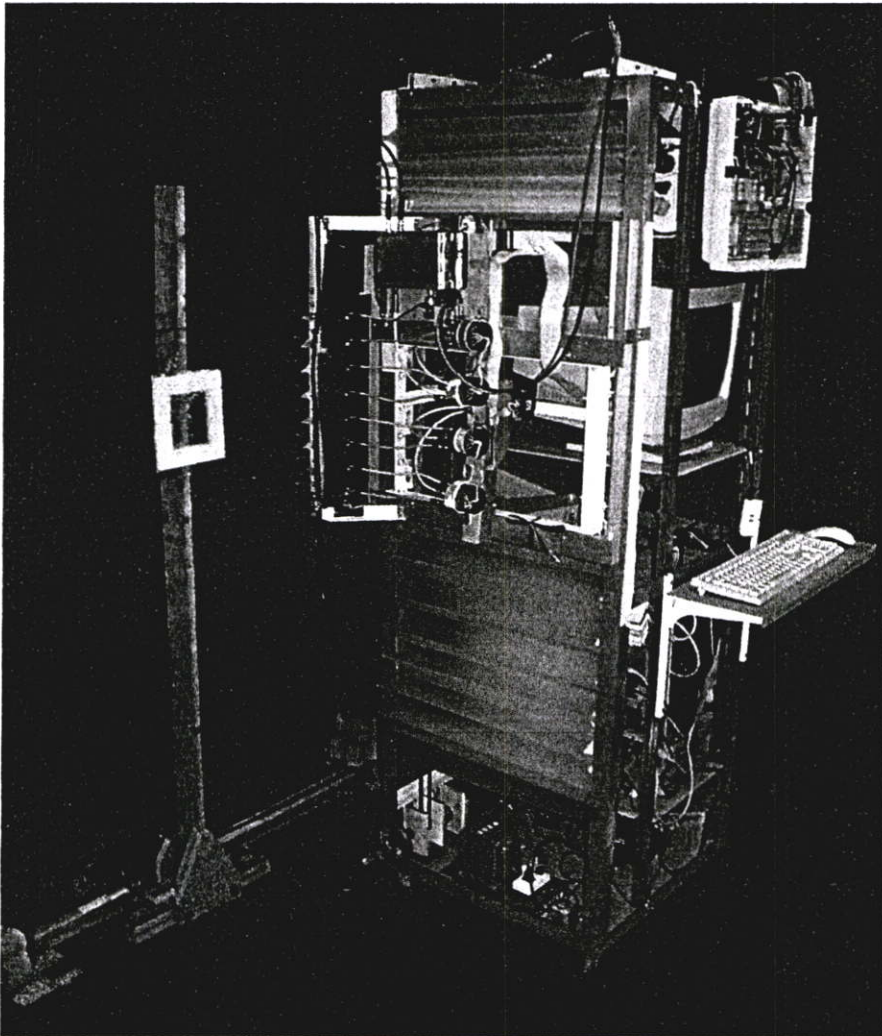
การทดลองสายอากาศแบบวิวัตต์เดียวกับระบบไมโครเวฟอันใหม่ที่พัฒนาขึ้น โดยจะทำการเปลี่ยนสายอากาศวิวัตต์มาแทนสายอากาศฮอร์นที่ได้ทดลองไปก่อนหน้านี้ จึงทำการทดลองโดยใช้วัตถุเดิมใน เพื่อนำมาสรุปความเป็นไปได้ของงานวิจัย และเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับระบบอื่นต่อไป



รูปที่ 3.32 การทดลองสายอากาศวิวัตต์กับ ไมโครเวฟใหม่

3.3.8 การทดลองเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพวัตถุด้วยระบบแปดสายอากาศวิวัลด์ผลิตภัณฑ์ ทำงาน

ปัญหาใหญ่ที่จะต้องพบสำหรับการทำระบบแปดสายอากาศ ผลิตภัณฑ์ทำงานก็คือ การควบคุมเส้นทางเลือกของสัญญาณให้มีความเท่าเทียมกันมากที่สุด ทั้งปริมาณการลดทอนและความต่างเฟสของคลื่น จึงจำเป็นต้องพิถีพิถันเป็นพิเศษในการวัดและปรับแต่งในส่วนของบรรดาสายนำสัญญาณแบบโคแอกเซียลที่นำมาใช้ การต่อเข้ากับบรรดาสวิตช์ไมโครเวฟก็ต้องเลือกวัดให้เหมาะสมที่สุดก่อน ทำการติดตั้งและวางอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ทั้งหมด การควบคุมการเคลื่อนที่ของชุดสายอากาศผ่านโปรแกรม ต้องกำหนดเวลาที่ใช้การจับเก็บข้อมูลใหม่ โดยการเคลื่อนที่ด้านแนวตั้งจะเปลี่ยนจากการเลื่อนวัตถุ (ในระบบสแกนแบบเก่า) ไปเป็นการยกระดับของสายอากาศและระบบ

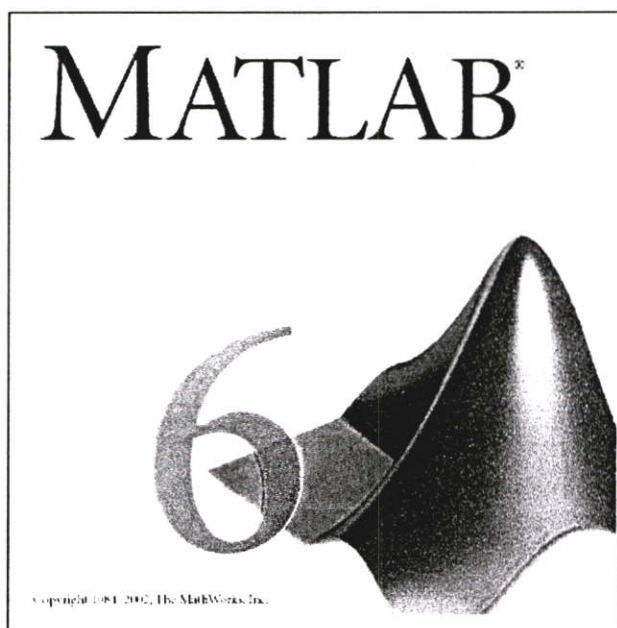


รูปที่ 3.33 การทดลองเก็บข้อมูลโดยใช้ระบบที่สมบูรณ์

3.4 วิธีการสร้างภาพกลับ

ในโครงการวิจัยนี้ใช้วิธีการสร้างภาพกลับมาโดยทางดิจิทัล ซึ่งเป็นการนำข้อมูลที่เก็บบันทึกไว้ในรูปของเมตริกซ์ ที่เป็นตัวแทนการกระจายคลื่นในรูปส่วนจริง I (real part) และส่วนจินตภาพ Q (imaginary part) ของฟังก์ชันคลื่น มาสร้างภาพวัตถุที่ระนาบที่ต้องการโดยใช้สมการสร้างภาพกลับในหัวข้อทฤษฎีการสร้างภาพไมโครเวฟความถี่เดียวระยะใกล้ โดยต้องนำข้อมูลมาจัดให้อยู่ในรูปแบบตามสมการที่กำหนด หลังจากนั้นทำการหาค่าต่างๆ ที่ระนาบที่ต้องการโดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast-Fourier Transform) เป็นอัลกอริทึม (Algorithm) สำหรับการคำนวณการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform) ด้วยโปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB)

ความเข้มของภาพที่จะนำมาสร้างภาพวัตถุหาได้จากการเอาฟังก์ชันคลื่นที่คำนวณได้ตรงระนาบวัตถุคูณด้วยค่าสังยุค (conjugate) และในการแปลงฟูเรียร์เราจะได้ขนาดของกรอบที่แสดงภาพผกผันกับระยะห่างของแต่ละจุด pixel ที่ติดกัน



รูปที่ 3.34 โปรแกรม Matlab version 6

โดยรายละเอียดของโปรแกรมการสร้างภาพไมโครเวฟความถี่เดียวได้แสดงไว้ในส่วนของภาคผนวก ข.

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองวัดสมบัติของอุปกรณ์ไมโครเวฟต่าง ๆ ที่นำไปสู่การพัฒนาาระบบส่งและรับคลื่นแบบอะเรย์แปดสมาชิกผลัดกันทำงานด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับสร้างภาพไมโครเวฟ และการทดสอบระบบที่สร้างขึ้น

4.1 ผลการทดสอบสมบัติของอุปกรณ์

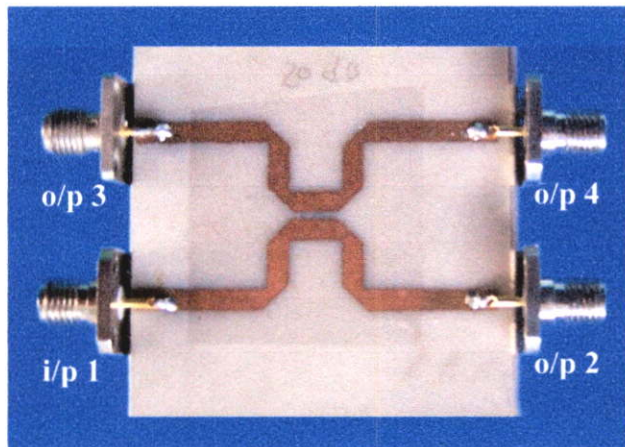
การสร้างระบบส่งและรับคลื่นแบบอะเรย์แปดสมาชิกผลัดกันทำงานด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับสร้างภาพไมโครเวฟนั้น จะมีประสิทธิผลของการทำงานที่ดีหรือไม่ขึ้นขึ้นกับประสิทธิภาพของแต่ละอุปกรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ไมโครเวฟต่าง ๆ ทั้งที่ได้ทำการออกแบบและเลือกใช้

4.1.1 ผลการวัดสมบัติอุปกรณ์ไมโครเวฟที่ออกแบบสร้างขึ้น

การใช้ HP8510C สำหรับการวัดสมบัติอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สร้างขึ้น และผลการวัดการกระจายคลื่นของสายอากาศรวบรวมไว้ในหัวข้อต่อไป

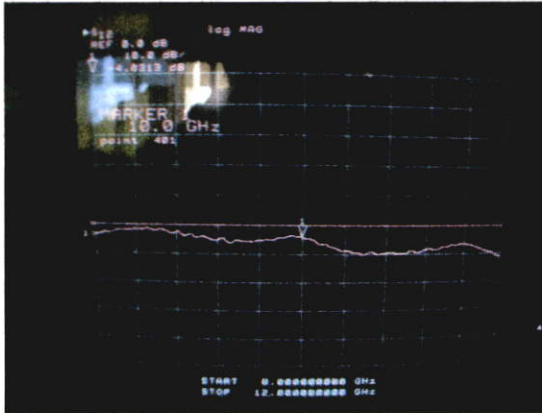
4.1.1.1 ผลการวัดโคเรชันแนลคัปเปิลอร์ไลน์เส้นขนาน

โคเรชันแนลคัปเปิลอร์ไลน์เส้นขนานที่สร้างขึ้นมีลักษณะและพอร์ทสัญญาณขาเข้า (input port; i/p) และขาออก (out port; o/p) เป็นดังรูปที่ 4.1 โดยทำการสร้างโคเรชันแนลคัปเปิลอร์ไลน์ 2 ชุด คือ โคเรชันแนลคัปเปิลอร์ไลน์ที่มีค่าการคัปปลิงที่ค่า 20 dB และ 14 dB

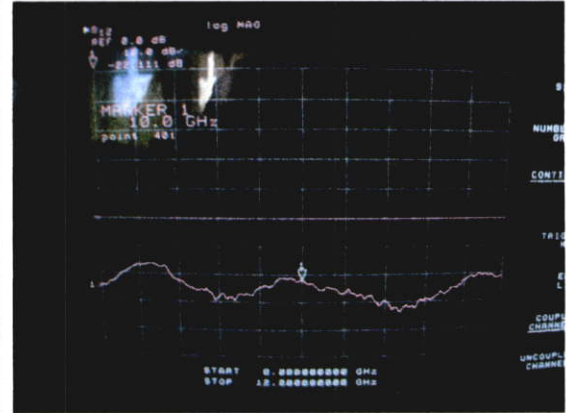


รูปที่ 4.1 ดันแบบโคเรชันแนลคัปเปิลอร์บนแผ่นปริ้นท์พร้อมกำหนดพอร์ทใช้งาน

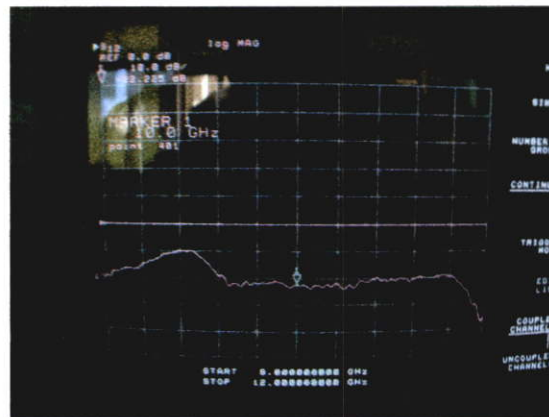
ผลการวัดไคเรกชันแนลคัปเปิลอร์ไลน์ในช่วงความถี่ 8 ถึง 12 กิกะเฮิรตซ์ โดยที่ความถี่ 10 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งตั้งเป้าหมายการออกแบบให้มีค่าการคัปปลิง 20 dB นั้น ในทางปฏิบัติวัดได้ กำลังสัญญาณขาเข้าที่พอร์ท 1 เทียบกับสัญญาณขาออกที่พอร์ท 2 มีค่าทรานสมิสชัน -4.0313 dB ส่วนสัญญาณขาเข้าที่พอร์ท 1 เทียบกับสัญญาณขาออกที่พอร์ท 3 มีค่าคัปปลิง 22.111 dB และสัญญาณขาเข้าที่พอร์ท 1 เทียบกับสัญญาณขาออกที่พอร์ท 4 มีค่า 22.225 dB ดังรูปที่ 4.2 (a) – (c) ตามลำดับ



(a)



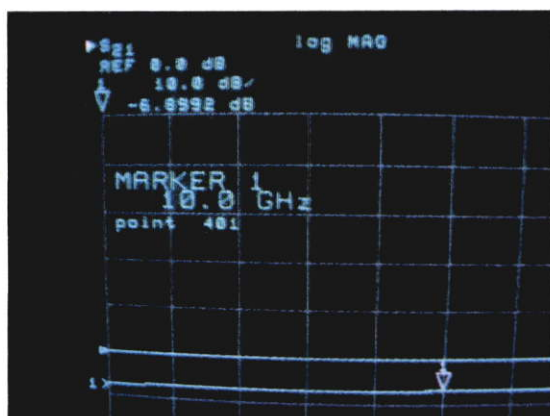
(b)



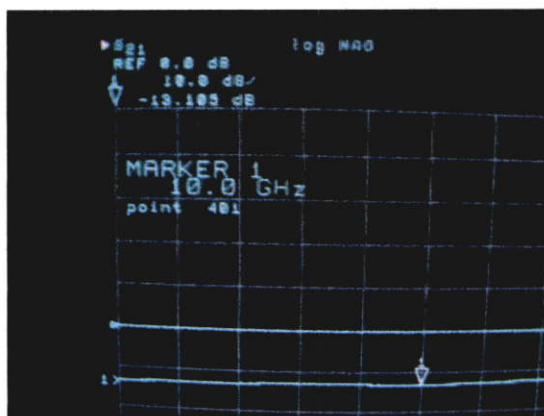
(c)

รูปที่ 4.2 ผลการวัดไคเรกชันแนลคัปเปิลอร์ 20 dB ในช่วงความถี่ 8 ถึง 12 กิกะเฮิรตซ์

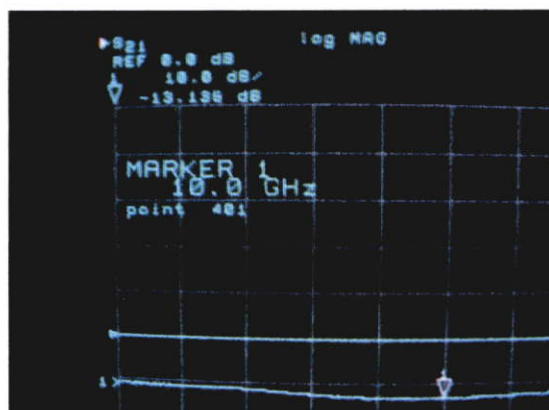
ผลการวัดไคเรกชันแนลคัปเปิลอร์ไลน์ที่มีค่าการคัปปลิง 14 dB พบว่า สัญญาณขาเข้าที่พอร์ท 1 เทียบกับสัญญาณขาออกที่พอร์ท 2 มีค่าทรานสมิสชัน -6.0992 dB ส่วนสัญญาณขาเข้าที่พอร์ท 1 เทียบกับสัญญาณขาออกที่พอร์ท 3 มีค่าคัปปลิง 13.105 dB และสัญญาณขาเข้าที่พอร์ท 1 เทียบกับสัญญาณขาออกที่พอร์ท 4 มีค่า 13.136 dB ดังรูปที่ 4.3 (a) – (c) ตามลำดับ



(a)



(b)

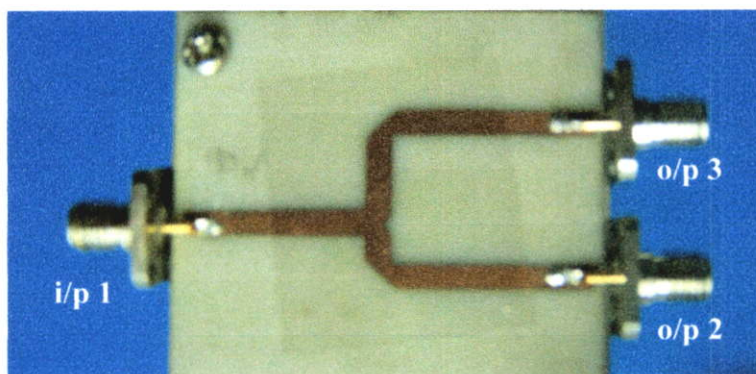


(c)

รูปที่ 4.3 ผลการวัดไดเรกชันแนลคัปเปิลอร์ 14 dB

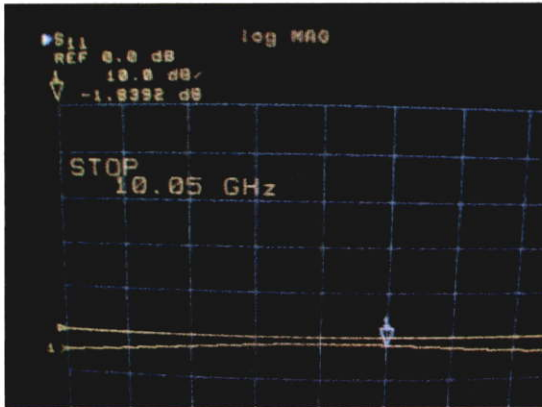
4.1.1.2 ผลการวัดที่จังก์ชันกับเฟสชิฟเตอร์

ที่จังก์ชันที่สร้างขึ้นมีลักษณะ พอร์ตสัญญาณขาเข้าและขาออก เป็นดังรูปที่ 4.4

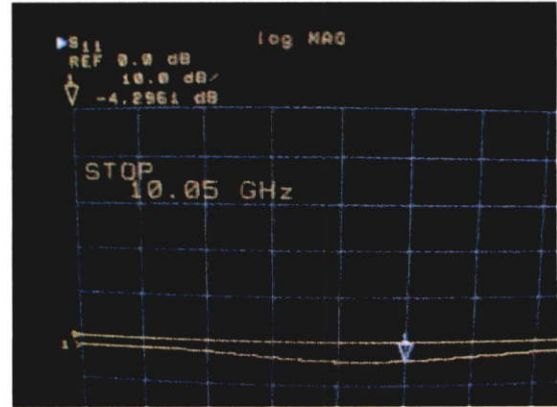


รูปที่ 4.4 ต้นแบบที่จังก์ชันกับเฟสชิฟเตอร์ที่ระบุพอร์ตใช้งาน

ผลการวัดการลดทอนกำลังที่ได้จากการแบ่งแยกของทีจังก์ชันที่สร้างขึ้น พบว่า สัญญาณขาเข้าที่พอร์ท 1 เทียบกับสัญญาณขาออกที่พอร์ท 2 ได้ค่าการลดทอน 1.0392 dB และสัญญาณขาเข้าที่พอร์ท 1 เทียบกับสัญญาณขาออกที่พอร์ท 3 มีค่า 4.2961 dB ดังรูปที่ 4.5 (a) – (b) ตามลำดับ



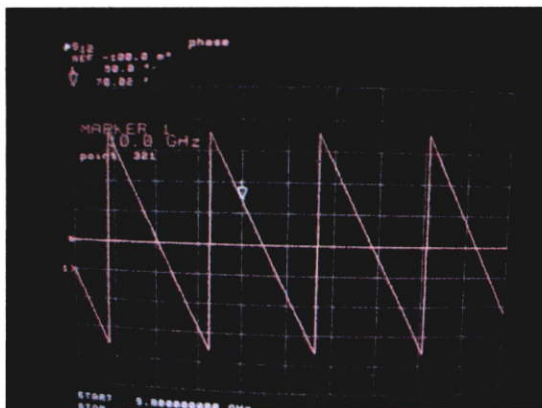
(a)



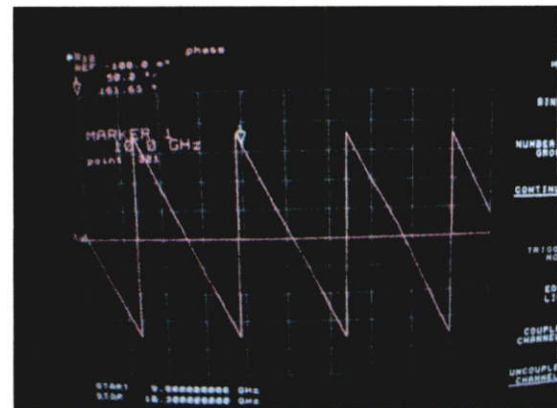
(b)

รูปที่ 4.5 ผลการลดทอนกำลังของทีจังก์ชันกับเฟสชิฟเตอร์

ผลการวัดผลต่างของมุมที่ได้จากการแบ่งแยกของทีจังก์ชันที่สร้างขึ้น พบว่า สัญญาณขาเข้าที่พอร์ท 1 เทียบกับสัญญาณขาออกที่พอร์ท 2 ได้มุม 70.02 องศา และสัญญาณขาเข้าที่พอร์ท 1 เทียบกับสัญญาณขาออกที่พอร์ท 3 มีค่ามุม 161.63 องศา ได้ผลต่างของมุมระหว่าง 2 เส้นทางเป็น 91.61 องศา ดังรูปที่ 4.6 (a) – (b) ตามลำดับ



(a)

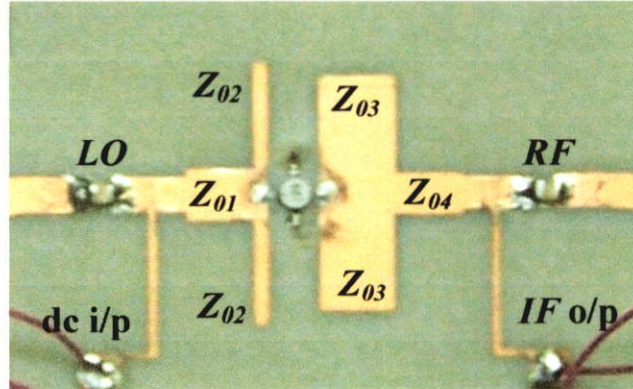


(b)

รูปที่ 4.6 ผลต่างมุมเฟสของทีจังก์ชันกับเฟสชิฟเตอร์

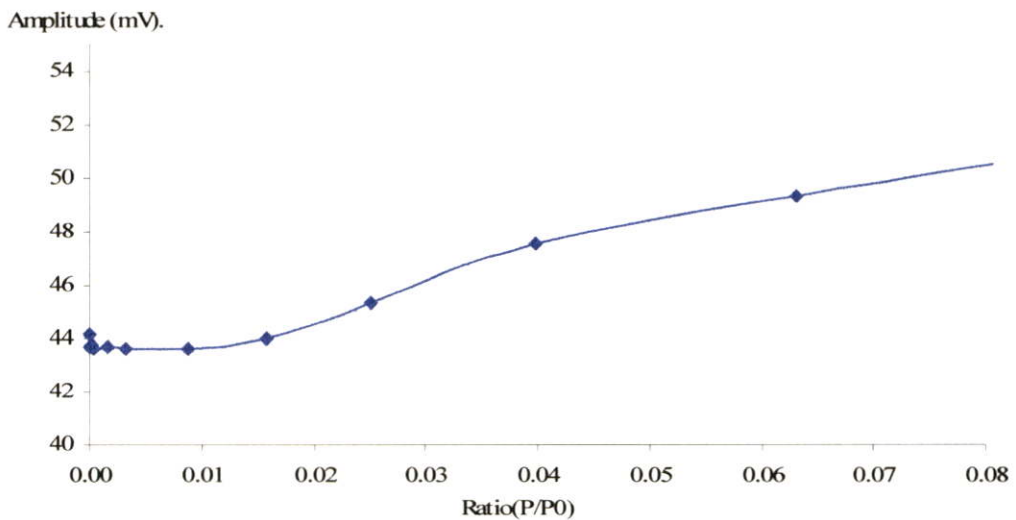
4.1.1.3 ผลการวัดสมบัติการเปลี่ยนแปลงสัญญาณของวงจรรับ

ผลการวัดนี้เท่ากับเป็นการทดสอบส่วนไมโครเวฟมิกเซอร์ที่นำมาใช้งานวิจัยนี้ ซึ่งใช้เฟตเตอร์ ATF – 13336 ใช้แรงดันไฟฟ้าไบอัสกระแสตรงที่ – 1.3 โวลต์ สัญญาณอ้างอิง (Local oscillator; LO) และสัญญาณคลื่นไมโครเวฟ (Radio frequency; RF) ที่ 10 GHz โดยลักษณะไมโครเวฟมิกเซอร์ที่ระบุพอร์ตต่าง ๆ เป็นดังรูปที่ 4.7

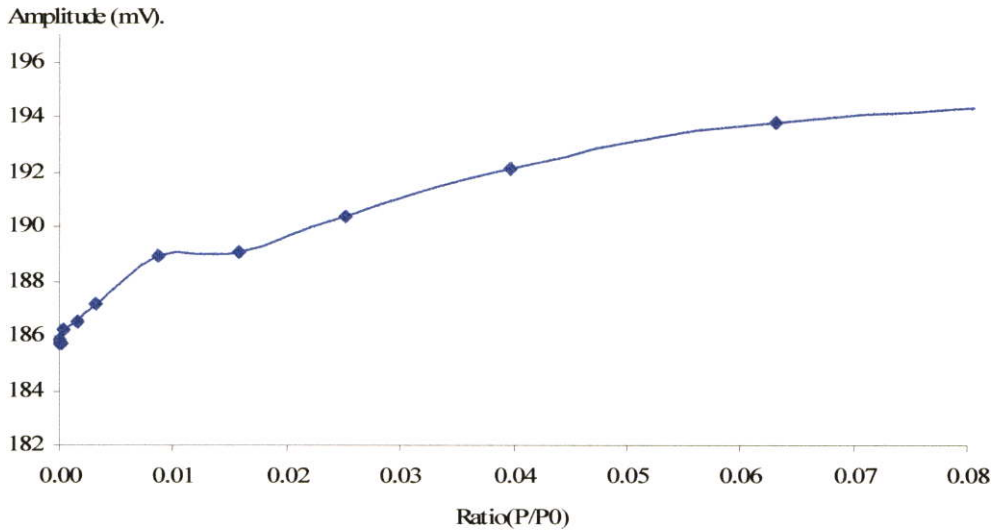


รูปที่ 4.7 ต้นแบบไมโครเวฟมิกเซอร์บนแผ่นปริ้นท์

ผลของสัญญาณผสมเอาท์พุท (Integrated frequency; IF) นำต่อเข้าวงจรรองความถี่ต่ำภายนอก ซึ่งขึ้นกับระดับของสัญญาณ RF เป็นดังกราฟในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 สำหรับสัญญาณ I และ Q ตามลำดับ ซึ่งมีการแปรเฟสและขนาดของสัญญาณ RF



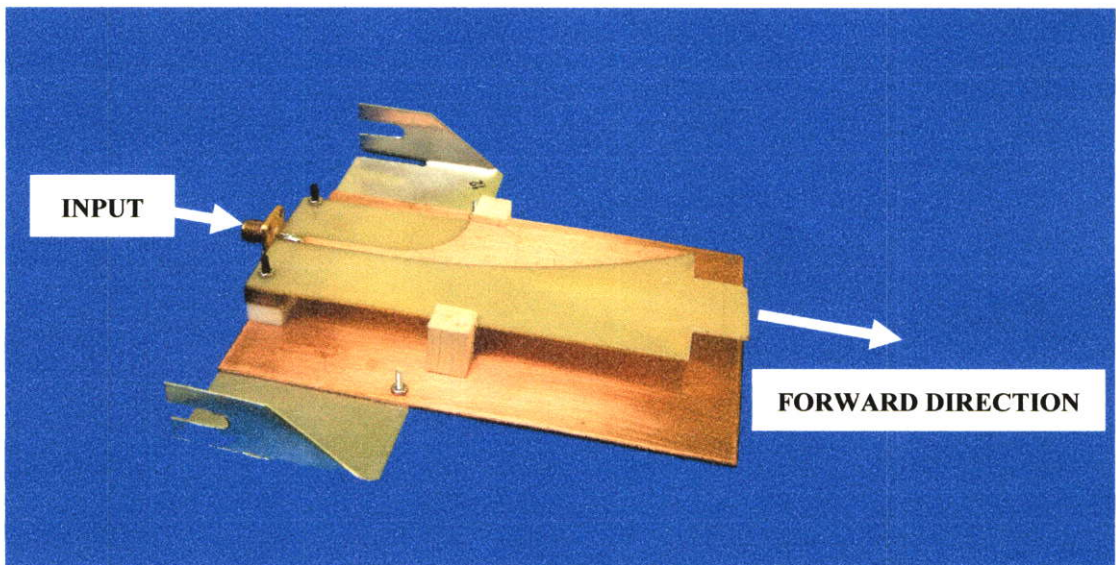
รูปที่ 4.8 ผลการอ่านค่าที่ได้จากมิกเซอร์ I



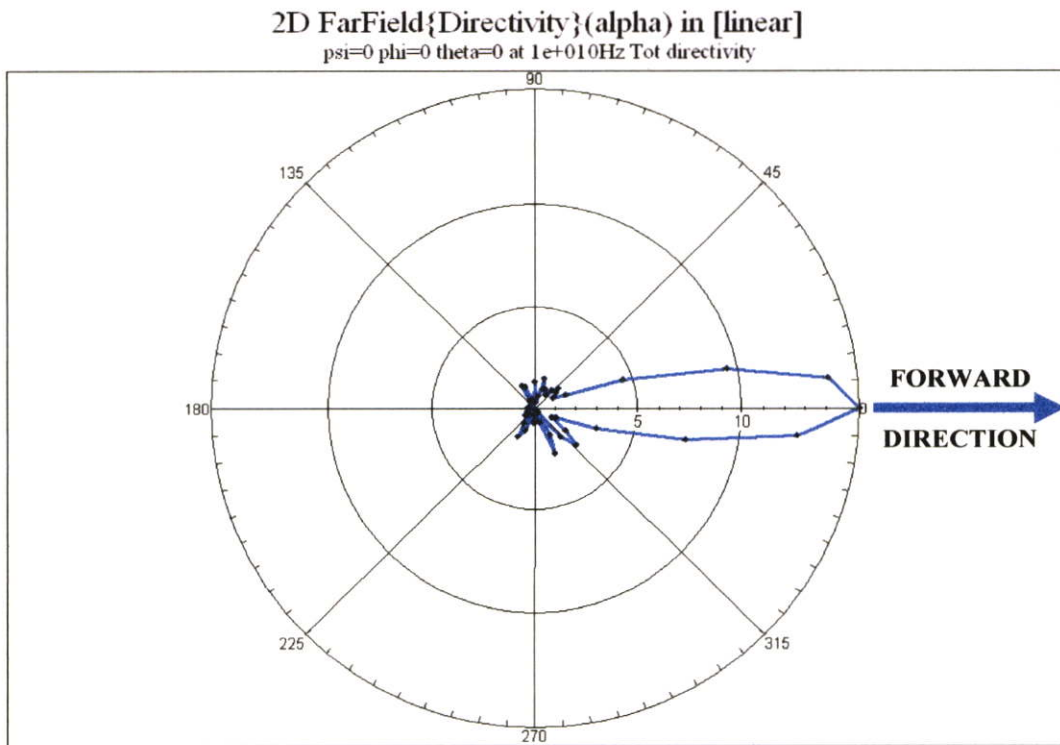
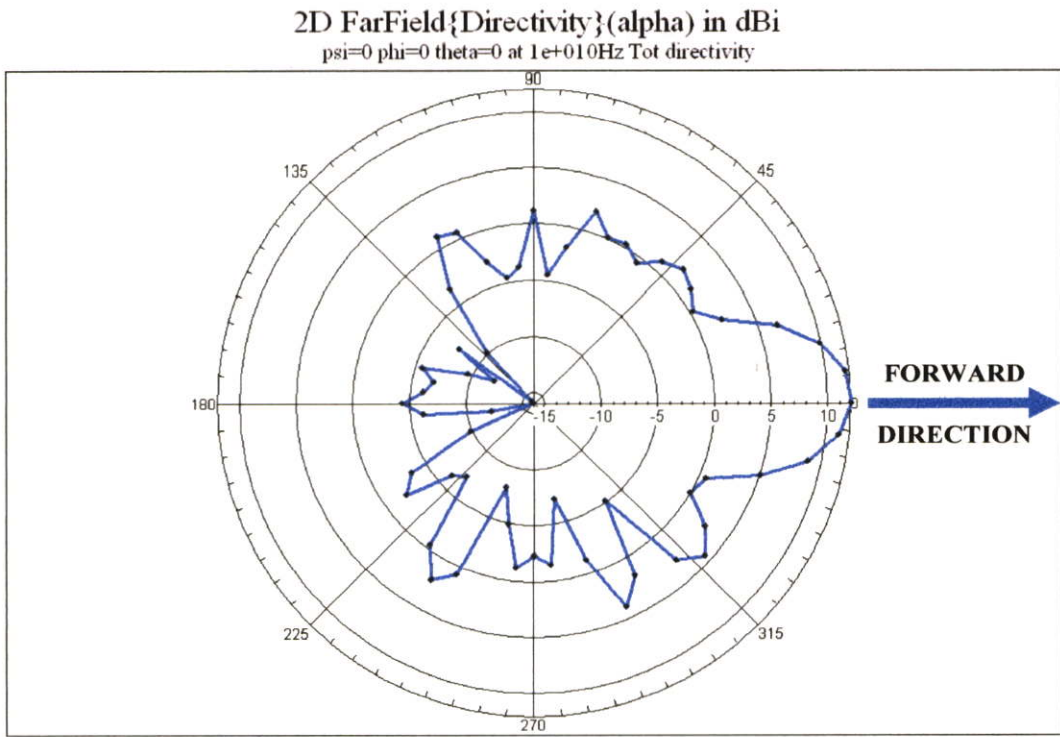
รูปที่ 4.9 ผลการอ่านค่าที่ได้จากมิทเซอร์ Q

4.1.1.4 ผลการวัดสมบัติของสายอากาศวิวัลดี

จากการจำลองการทำงานของแบบสายอากาศด้วยโปรแกรม SEMCAD สำหรับสายอากาศวิวัลดีที่สร้างขึ้น เมื่อกำหนดคินพุทและทิศทางไปข้างหน้าของการแผ่คลื่นเป็นดังในรูปที่ 4.10 ได้ผลของการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศวิวัลดีในแนวระนาบของสายอากาศ แสดงในลักษณะของกราฟโพลาร์ (polar graph) แสดงในเทอมของค่าเดซิเบลกำลังคลื่นและค่ากำลังคลื่นกับมุม แสดงในรูปที่ 4.11 (a) และ (b) ตามลำดับ

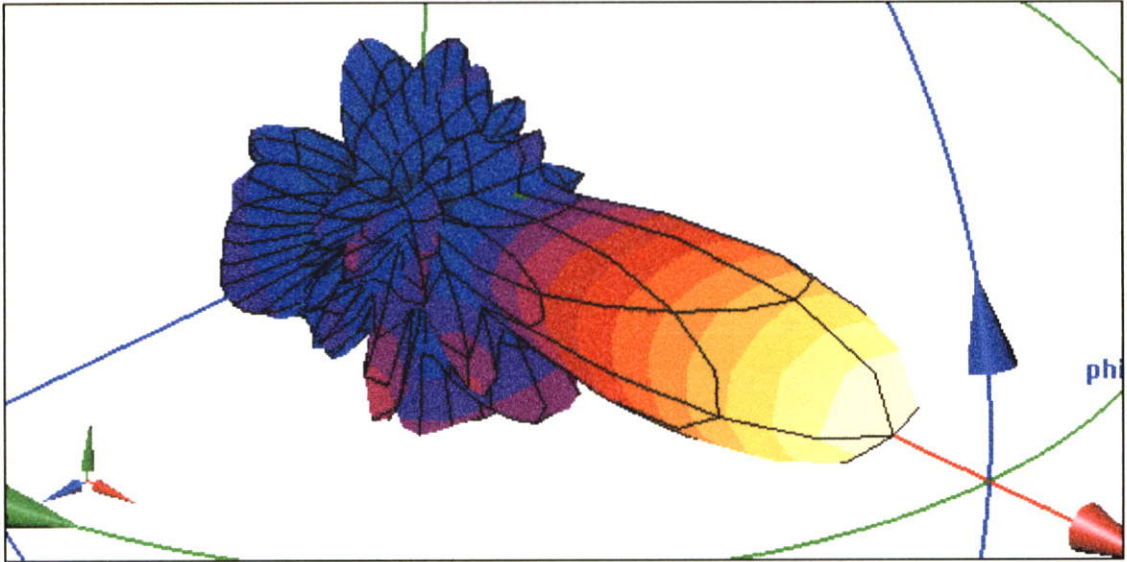


รูปที่ 4.10 ต้นแบบสายอากาศวิวัลดี



รูปที่ 4.11 ไดรเรคตีวิตีของสายอากาศจากการจำลองแสดงผลโดย SEMCAD

โคเรคทีวิตี 3 มิติ ผลได้จากโปรแกรม SEMCAD แสดงการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศวิวลัดในสเปซ 3 มิติ แสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ลักษณะภาพโคเรคทีวิตี 3 มิติ

ค่าที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม

$$\text{Radiated power Prad} = 0.00151346 \text{ W}$$

$$\text{Directivity} = 11.9254 \text{ dBi}$$

$$\text{Max of } |\mathcal{E}_{tot}(\theta, \varphi)| = 0.840746 \text{ V/m at } \theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ$$

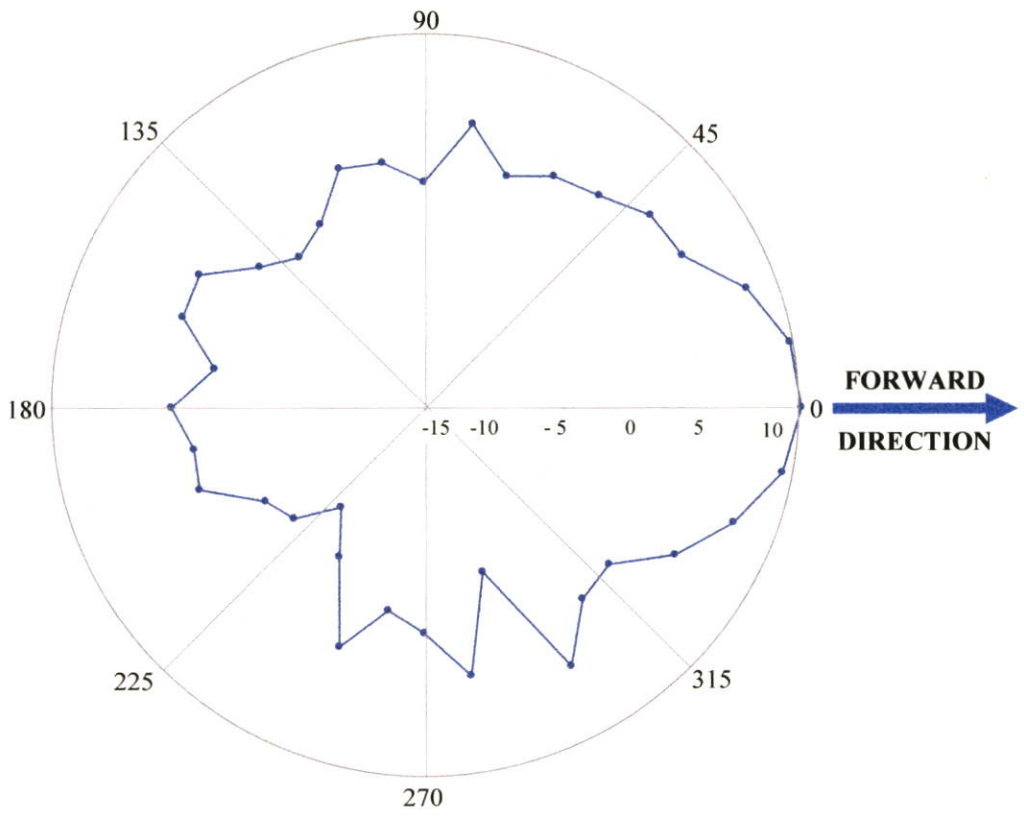
$$\text{Max of } |\mathcal{E}_{theta}(\theta, \varphi)| = 0.372723 \text{ V/m at } \theta = 39.375^\circ, \varphi = 331.875^\circ$$

$$\text{Max of } |\mathcal{E}_{phi}(\theta, \varphi)| = 0.819749 \text{ V/m at } \theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ$$

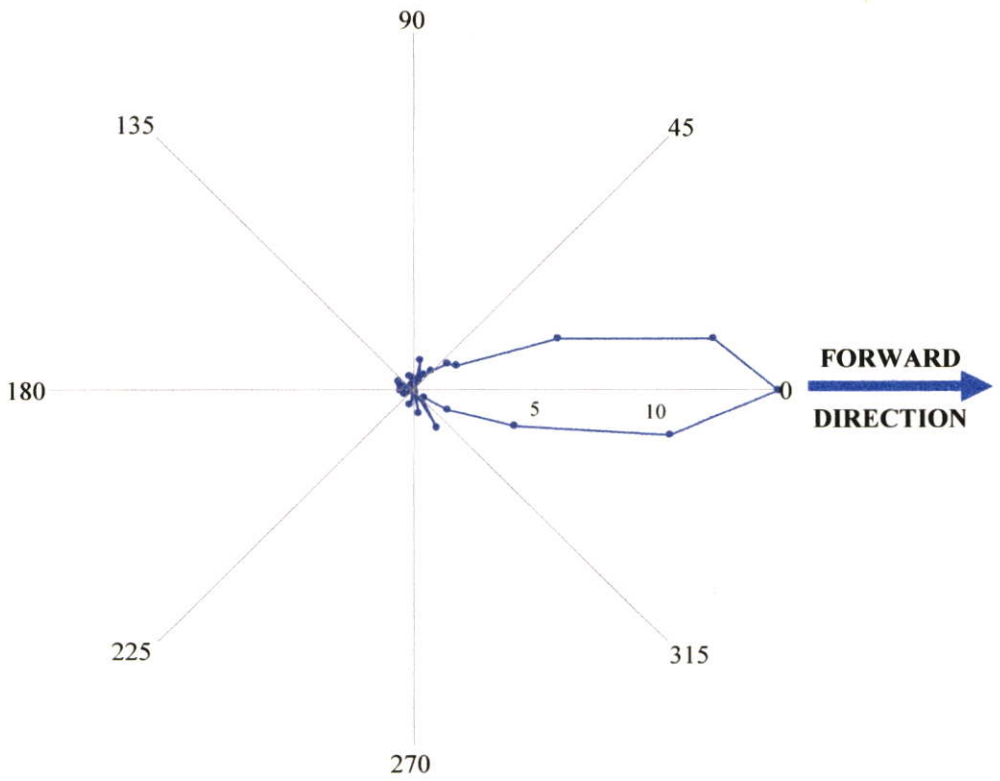
$$\text{Max radiation intensity } U_{\max} = 0.000938143 \text{ W/sr}$$

$$\text{Effective angle Prad/ } U_{\max} = 1.61325 \text{ sr}$$

แล้วทำการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากหัววัดซึ่งอยู่กับที่ ได้ผลการกระจายพลังงานของสายอากาศ ผลการทดลองวัดสมบัติโคเรคทีวิตี เมื่อทำการหมุนสายอากาศวิวลัดในตำแหน่งมุมต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.13 (a) อยู่ในหน่วยของเดซิเบล (dB) และรูปที่ 4.13 (b) อยู่ในหน่วยของแรงดันไฟฟ้า (μV .)



(a)



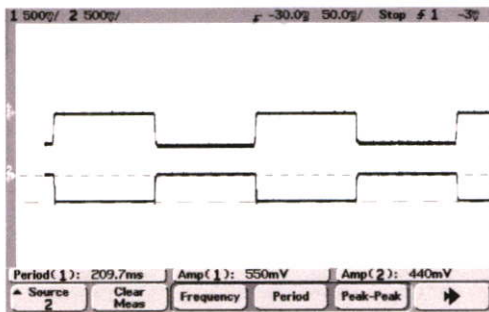
(b)

รูปที่ 4.13 สมบัติไดเรกทิวิตีของสายอากาศจากการวัดทดสอบ

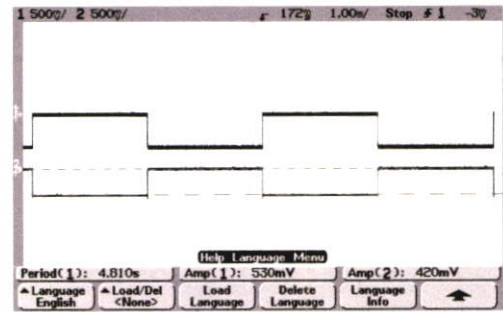
4.1.2 ผลการศึกษาอัตราเร็วของสวิตช์ไมโครเวฟ

เพื่อกำหนดช่วงเวลาการทำงานของชุดสวิตช์และช่วงการเก็บข้อมูล ตามการทดลองรูปที่ 3.28 ด้วยการเริ่มป้อนสัญญาณไมโครเวฟจากกันนำโคโดเข้าสวิตช์ไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์แล้วทำการสังวัตควบคุมสับสวิตช์ไมโครเวฟเป็นจังหวะด้วยอัตราเร็วในการสับสวิตช์ คือ ที่ 100 มิลลิวินาที และ 2 วินาที ต่อครั้ง สัญญาณตอบสนองของทั้งสองด้านของสวิตช์กับเวลา ซึ่งสังเกตได้ ด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป เป็นไปดังรูปที่ 4.14 (a) และ (b) ตามลำดับ

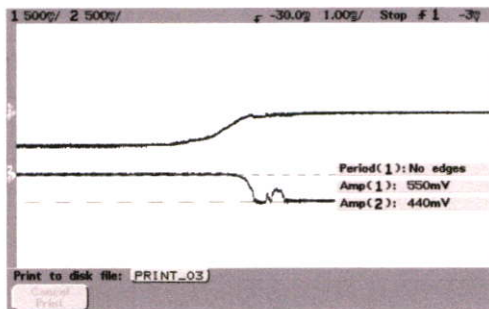
ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุมและสัญญาณตอบสนองของสวิตช์ เพื่อพิจารณาช่วงเวลาทรานเซียน (transient) ที่อัตราการสับสวิตช์ 100 มิลลิวินาทีต่อครั้ง และ 2 มิลลิวินาทีต่อครั้ง เป็นดังรูปที่ 4.14(c) และ (d) ตามลำดับ



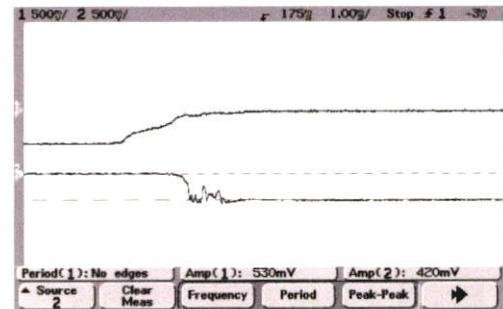
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 4.14 ผลการศึกษาอัตราเร็วของสวิตช์ไมโครเวฟ

- การตอบสนองของสวิตช์ทั้งสองด้านที่ อัตราเร็วการสับสวิตช์ 100 ms/ครั้ง
- การตอบสนองของสวิตช์ทั้งสองด้านที่ อัตราเร็วการสับสวิตช์ 2 s/ครั้ง
- สัญญาณควบคุมและสัญญาณตอบสนองของการสับสวิตช์ที่ 100 ms/ครั้ง
- สัญญาณควบคุมและสัญญาณตอบสนองของการสับสวิตช์ที่ 2 วินาที/ครั้ง

จากผลการทดลองไม่ว่าจะใช้เวลาในการสับสวิตช์ 100 มิลลิวินาที และ 2 วินาที ช่วงเวลาทรานเซียนสัญญาณลงและขึ้นของทั้งสองสัญญาณ จะมีค่าเท่าเดิมคือที่ 3 มิลลิวินาที

เพราะฉะนั้นจึงถือเป็นข้อจำกัด ซึ่งถ้าสามารถเก็บข้อมูลสัญญาณคลื่นไมโครเวฟในช่วงหลังเวลานี้ โดยการอ่านค่าของ A/D ทำได้เร็วมากที่สุดเท่าใดก็ยิ่งจะสามารถทำให้ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลน้อยลง

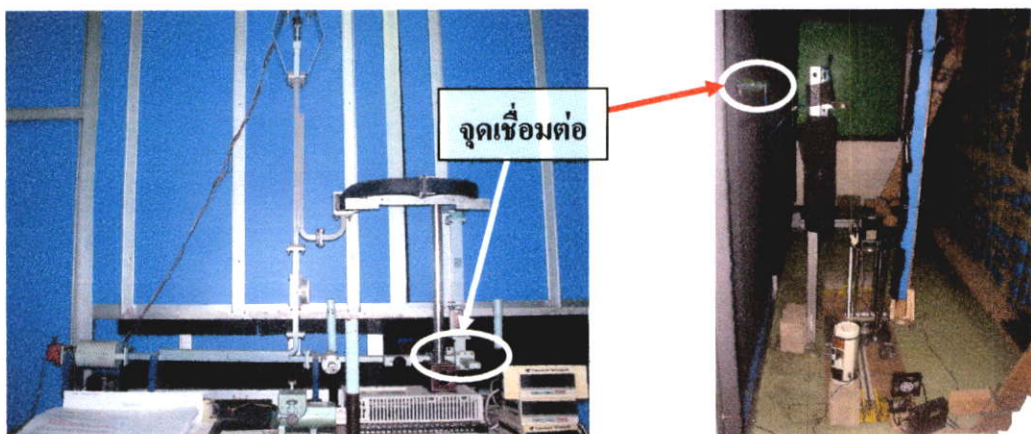
สำหรับกรณีถ้ามีสายอากาศจำนวนมากเป็นอะเรย์ 64×64 แล้วควบคุมการเก็บค่าสัญญาณคลื่นด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์นี้ โดยเมื่อเวลาไว้ต่อจุดเป็น 10 มิลลิวินาทีแล้วก็จะใช้เวลาในการเก็บข้อมูลทั้งหมดเพียง 41 วินาที แต่ถ้าเป็นการเคลื่อนที่เชิงกลของสายอากาศเดี่ยว ซึ่งถ้าใช้เวลาในการเลื่อนต่อ 1 จุดนาน เช่น 1 วินาที ก็จะใช้เวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง และสำหรับตัวเลขตัวอย่างนี้ ถ้ามีอะเรย์ของแปดสายอากาศ ก็จะช่วยให้ลดเวลาการเก็บข้อมูลลงเหลือประมาณ 9 นาที

ผลที่ได้นี้สามารถบอกถึงประสิทธิภาพของระบบที่ทำการพัฒนาในแง่ความรวดเร็วในการเก็บข้อมูล แต่การตั้งช่วงเวลาในการสับสวิตช์ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลกระทบ ไม่ว่าจะเป็นความแม่นยำถูกต้องและการเสื่อมสภาพของสวิตช์หากใช้งานหนักมากเกินไป ซึ่งต้องพิจารณาช่วงเวลาให้สอดคล้องจากการทดลองกันต่อไป

4.2 ผลการทดสอบการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพวัตถุในเบื้องต้น

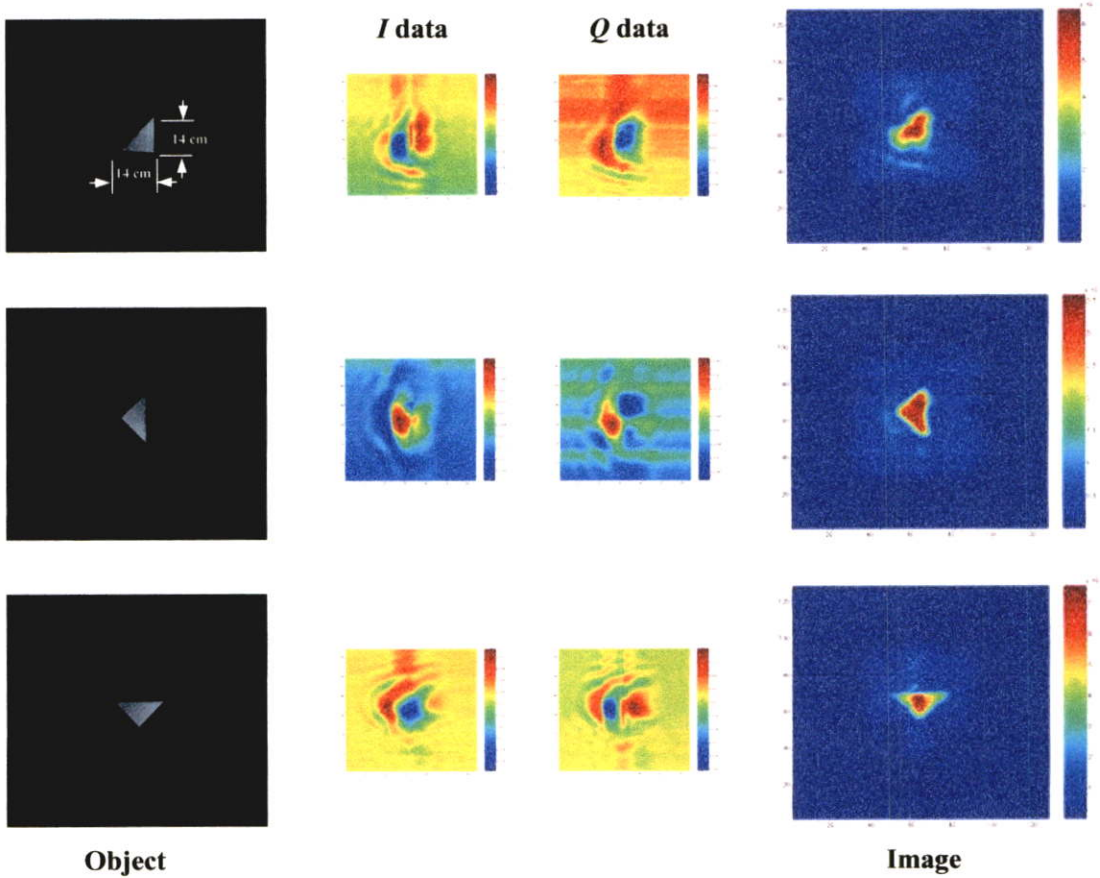
4.2.1 ผลจากการเก็บข้อมูลด้วยสายอากาศวิวัลด์กับระบบเก่า

ผลของการทดสอบเก็บข้อมูล โดยนำสายอากาศวิวัลด์ติดเข้ากับระบบเก่าที่จุดเชื่อมต่อ และใช้ชุดแอสแกนเลื่อนวัตถุที่จัดสร้างขึ้นในช่วงต้นของการวิจัยที่ใช้สเตปมอเตอร์ขับเคลื่อนซึ่งเคลื่อนที่ได้ช้า ดังรูปที่ 4.15 พบว่าใช้เวลาทั้งหมดในการเก็บข้อมูลประมาณ 6 ชั่วโมง โดยแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ การเก็บสัญญาณข้อมูล I และข้อมูล Q เมื่อได้ข้อมูลครบแล้ว จึงทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้โดยการสร้างภาพกลับ

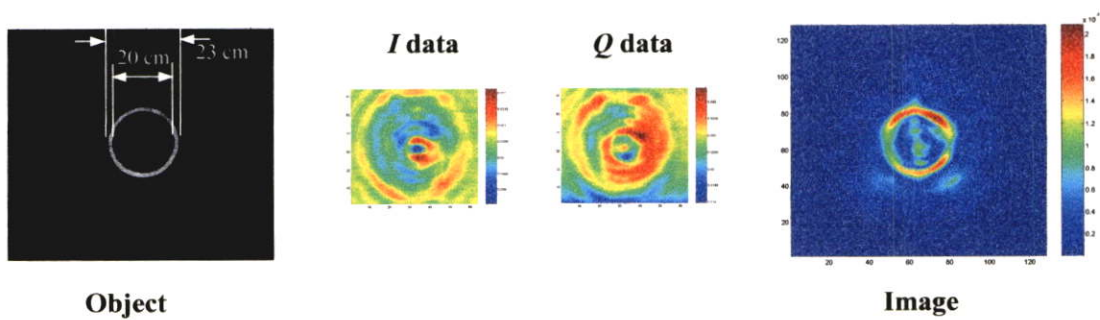


รูปที่ 4.15 การติดตั้งทดลองระบบไมโครเวฟเก่าเชื่อมต่อกับสายอากาศวิวัลด์

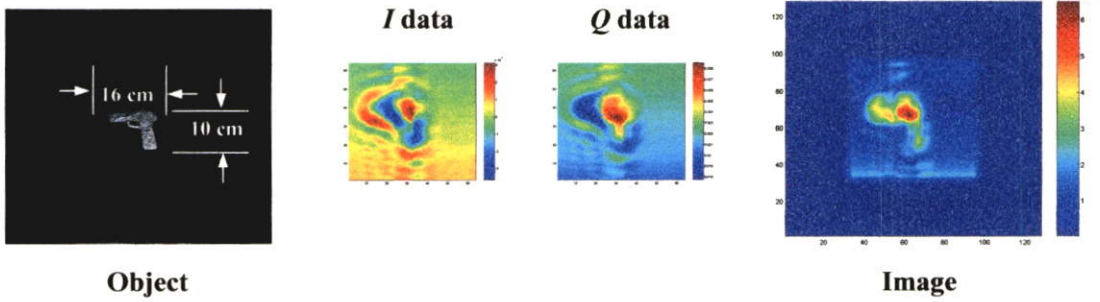
ผลการกระจายค่าส่วนจริง I และส่วนจินตภาพ Q ของคลื่นที่ระนาบของการเก็บข้อมูล และผลการประมวลสร้างภาพกลับ สำหรับแต่ละวัตถุต้นแบบจำนวน 4 ตัวอย่าง ได้แก่ แผ่นโลหะรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก แผ่นโลหะรูปวงแหวน แผ่นโลหะรูปกระบอกปืนพก และน้ำตาลทรายรูปกรอบสี่เหลี่ยม ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.16 – 4.19 ตามลำดับ ซึ่งผลภาพวัตถุที่ได้ก่อนข้างชัดเจนเป็นไปตามทฤษฎีของการสร้างภาพกลับ



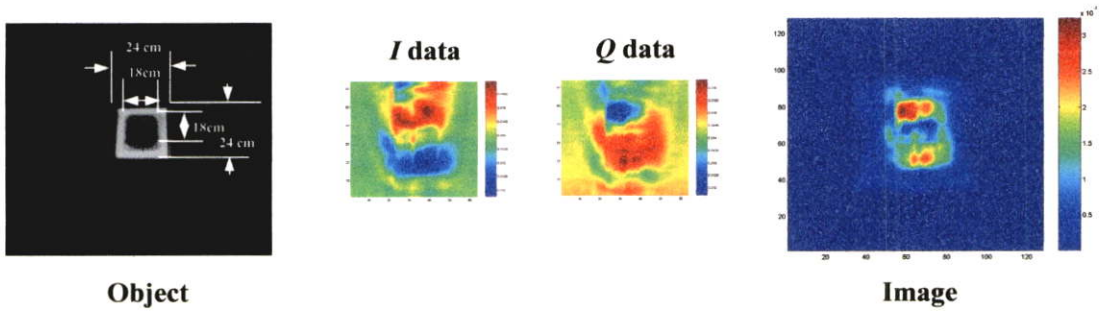
รูปที่ 4.16 ผลการทดลอง A1 ด้วยต้นแบบวัตถุโลหะรูปแผ่นสามเหลี่ยม



รูปที่ 4.17 ผลการทดลอง A2 ด้วยต้นแบบวัตถุโลหะรูปวงแหวน



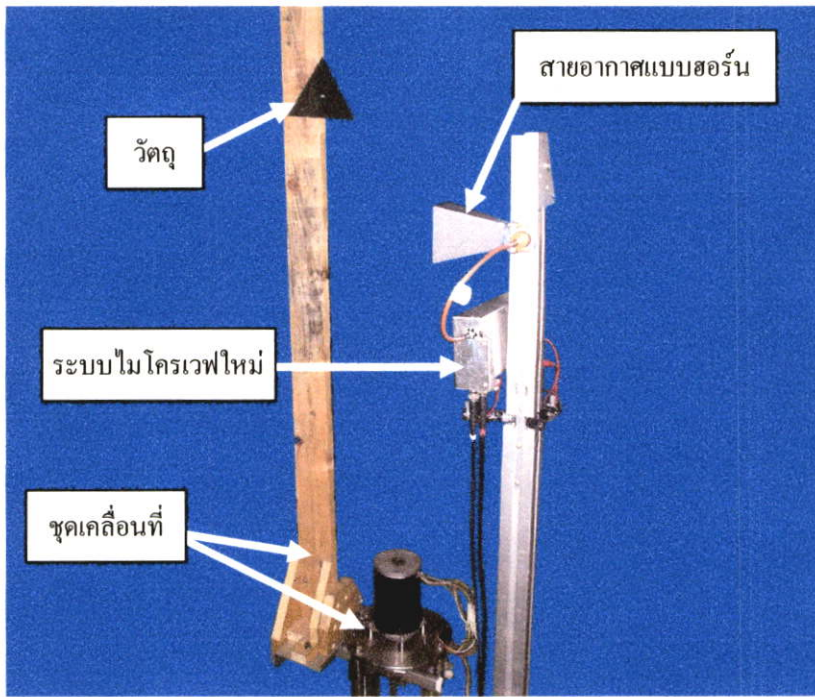
รูปที่ 4.18 ผลการทดลอง A3 ด้วยดินแบบวัตถุโลหะรูปกระบอกปืน



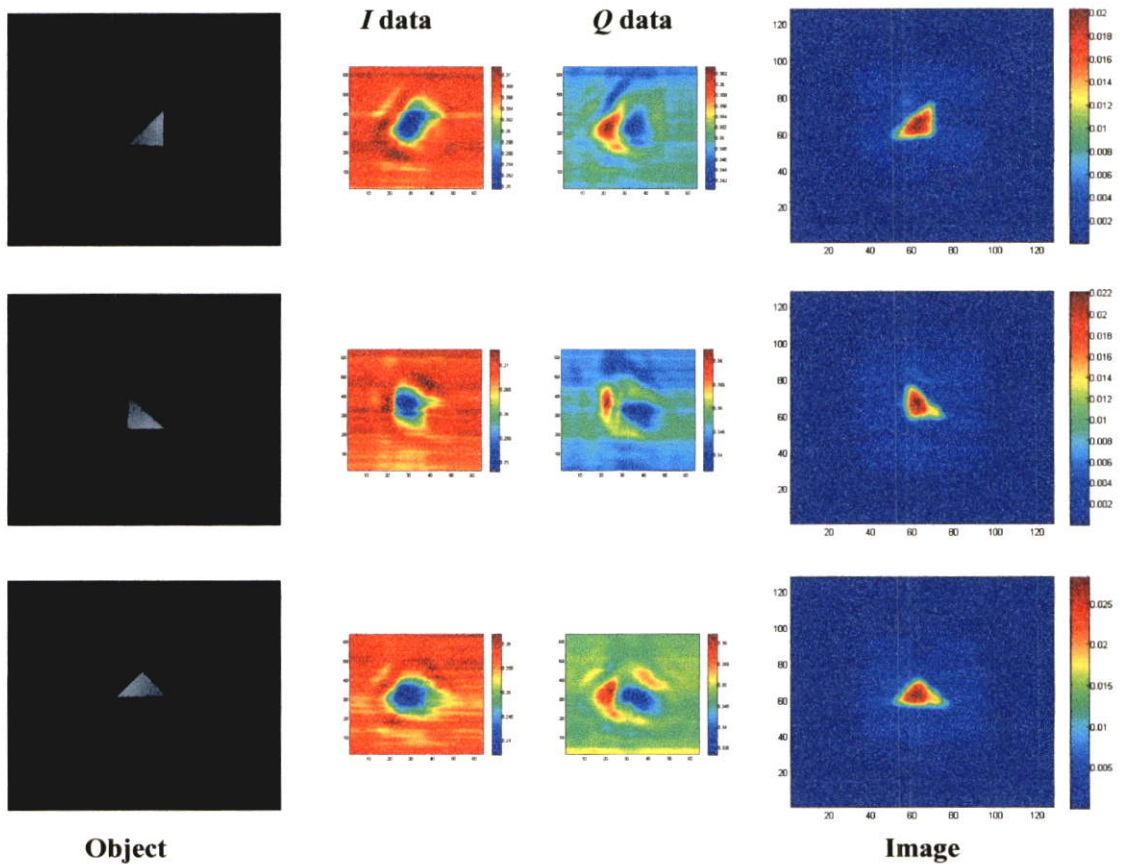
รูปที่ 4.19 ผลการทดลอง A4 ด้วยดินแบบวัตถุน้ำตาลทรายขาวรูปกรอบสี่เหลี่ยม

4.2.2 ผลจากการเก็บข้อมูลด้วยสายอากาศฮอร์นกับระบบใหม่ของการส่งและรับคลื่น

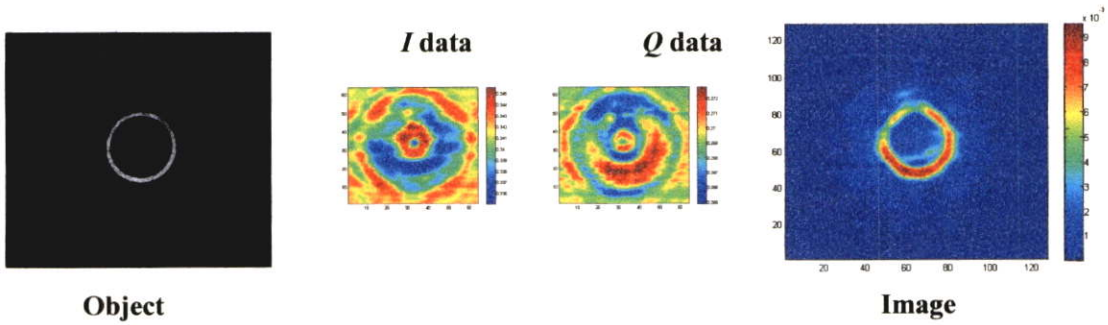
สำหรับผลของการทดลองสแกนภาพวัตถุโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่ฮอร์นเป็นสายอากาศ ต่อกับระบบรับส่งคลื่นระบบใหม่ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น ซึ่งเพิ่มช่องสัญญาณเอาท์พุทเป็นสองช่อง แล้วใช้ระบบสแกนเลื่อนวัตถุแบบเพลากลียวที่จัดสร้างขึ้นในช่วงต้นของงานวิจัย ดังรูปที่ 4.20 พบว่า ใช้เวลาทั้งหมดในการเก็บข้อมูลเหลือประมาณ 3 ชั่วโมง เนื่องจากการเก็บสัญญาณ I และ Q ทำได้พร้อมกัน เมื่อได้ข้อมูลมาแล้วทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลด้วยการสร้างภาพกลับมาสำหรับวัตถุทั้งสี่ตัวอย่างเดิม ด้วยโปรแกรมเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 4.2.1 ผลที่ได้แสดง ดังรูปที่ 4.21 – 4.24 ตามลำดับ พบว่า ภาพวัตถุที่ประมวลผลชัดเจนกว่าการใช้สายอากาศวิวาล์ดกับระบบเก่า



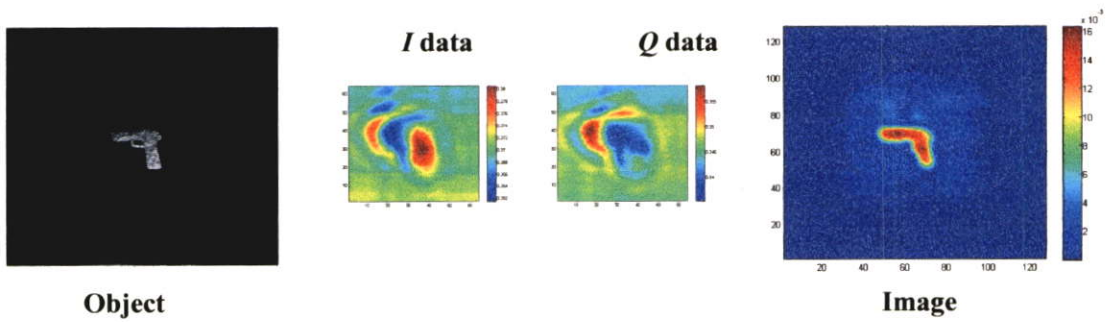
รูปที่ 4.20 การติดตั้งทดลองสายอากาศฮอร์นและชุดเคลื่อนที่ 2 แกน
กับระบบใหม่ของการส่งและรับคลื่นไมโครเวฟ



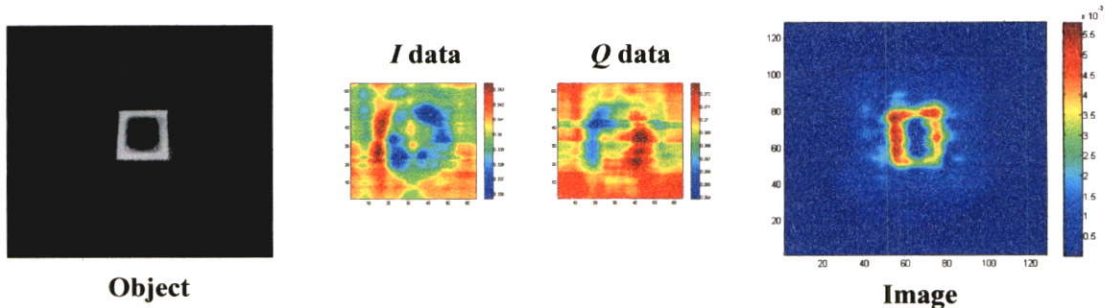
รูปที่ 4.21 ผลการทดลอง B1 ด้วยต้นแบบวัตถุโลหะรูปแผ่นสามเหลี่ยม



รูปที่ 4.22 ผลการทดลอง B2 ด้วยต้นแบบวัตถุโลหะรูปวงแหวน



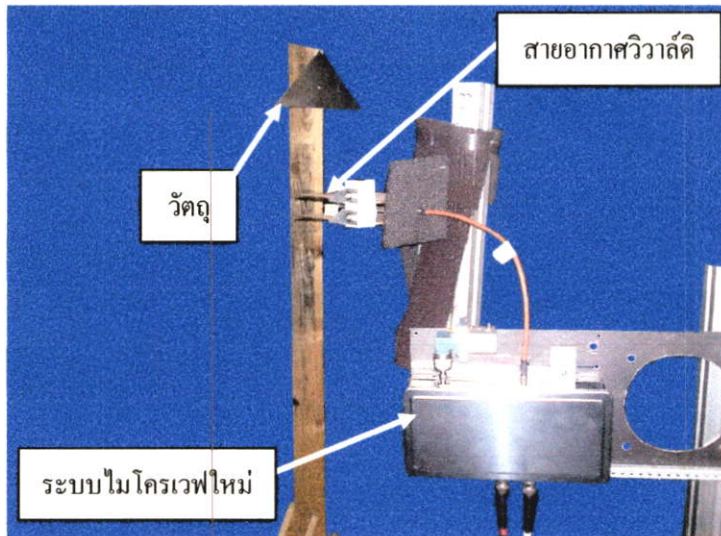
รูปที่ 4.23 ผลการทดลอง B3 ด้วยต้นแบบวัตถุโลหะรูปกระบอกปืน



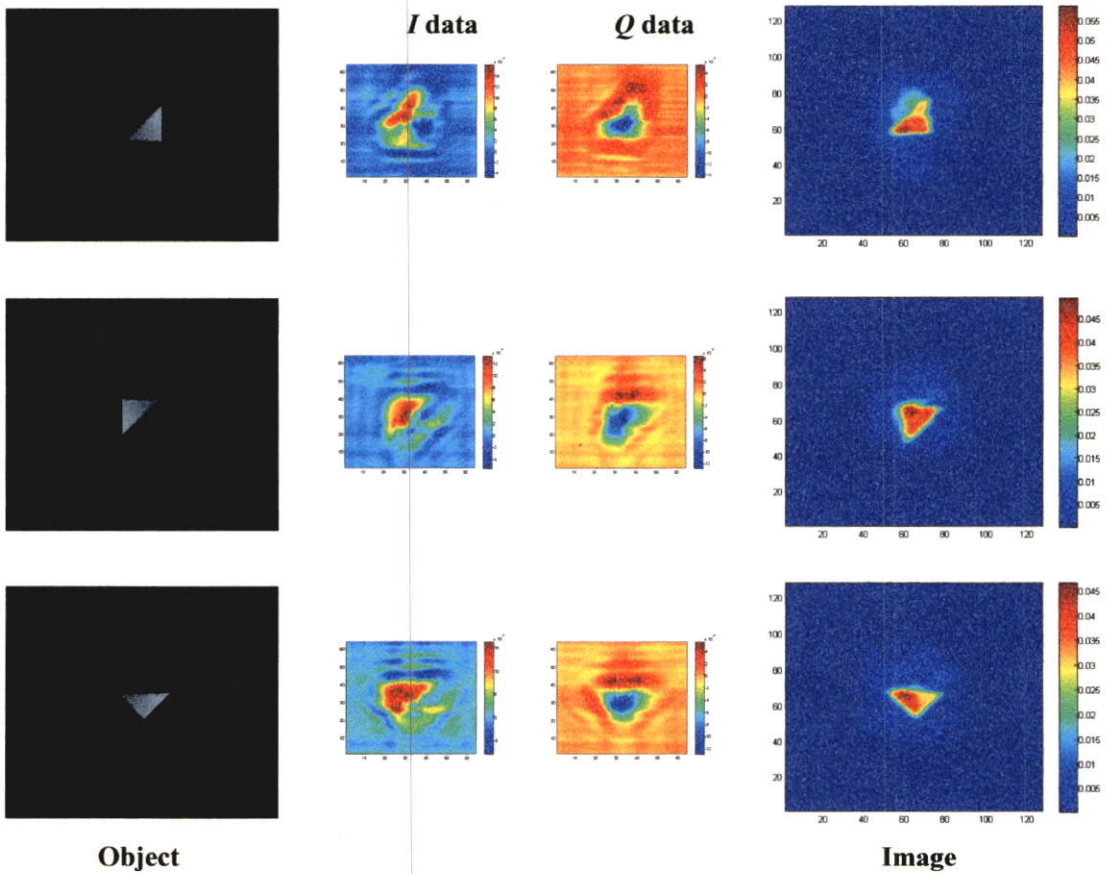
รูปที่ 4.24 ผลการทดลอง B4 ด้วยต้นแบบวัตถุน้ำตาลทรายขาวรูปกรอบสี่เหลี่ยม

4.2.3 ผลจากการเก็บข้อมูลด้วยสายอากาศวิลาศิกับระบบใหม่ของการส่งและรับคลื่น

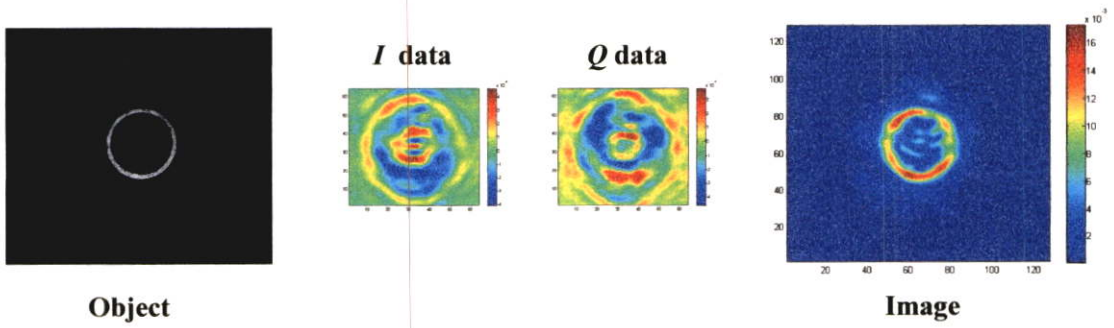
สำหรับการทดลองเมื่อนำสายอากาศวิลาศิกมาใช้แทนสายอากาศฮอร์น ต่อกับระบบรับและส่งคลื่นชุดใหม่ โดยเลื่อนวัตถุ 2 มิติ ด้วยชุดสแกนที่เหมือนกันดังรูปที่ 4.25 ใช้เวลา 3 ชั่วโมง และได้ผลการเก็บข้อมูลและประมวลผลภาพสำหรับวัตถุตัวอย่างเดิมทั้งสิ้นี่เป็นดังรูปที่ 4.26 – 4.29 ตามลำดับ พบว่า มีคุณภาพของภาพที่ดีเทียบกับการใช้สายอากาศแบบฮอร์น



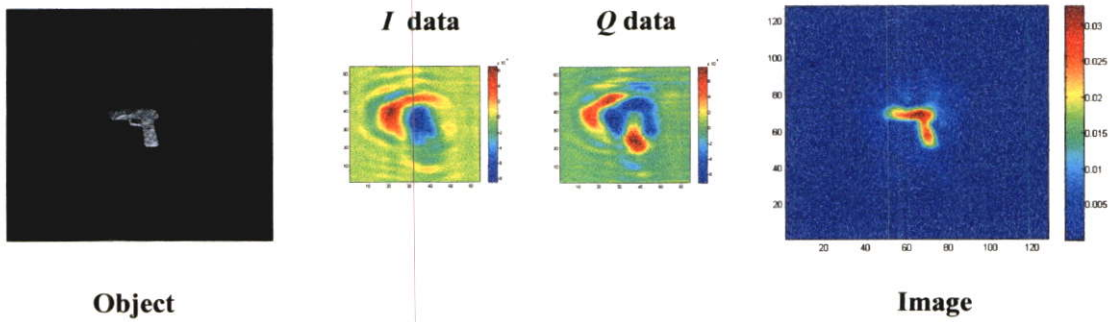
รูปที่ 4.25 การติดตั้งทดลองสายอากาศวิทยุคลื่นดีกับระบบใหม่ของการส่งและรับคลื่นไมโครเวฟ



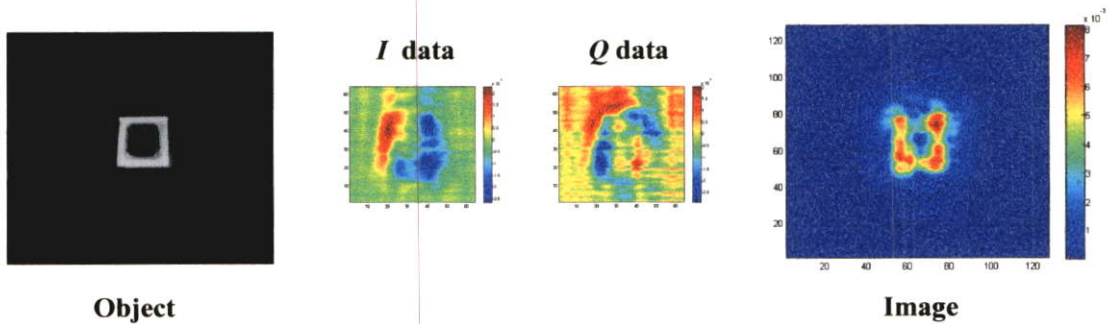
รูปที่ 4.26 ผลการทดลอง C1 ด้วยต้นแบบวัตถุโลหะรูปสามเหลี่ยม



รูปที่ 4.27 ผลการทดลอง C2 ด้วยต้นแบบวัตถุโลหะรูปวงแหวน



รูปที่ 4.28 ผลการทดลอง C3 ด้วยต้นแบบวัตถุโลหะรูปกระบอกรูปปืน



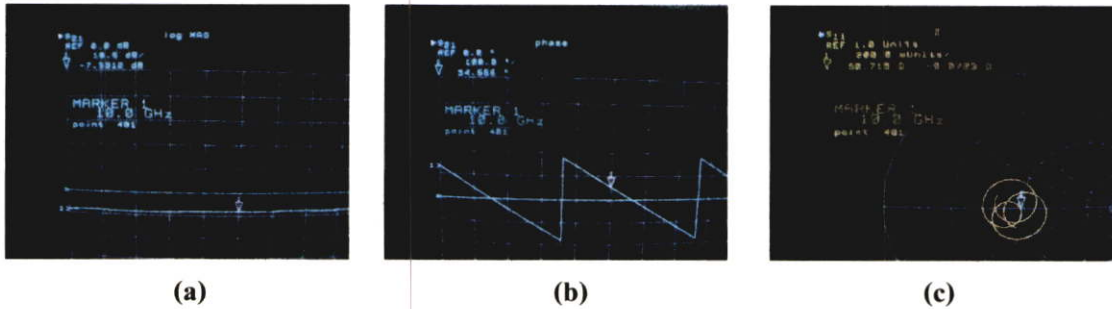
รูปที่ 4.29 ผลการทดลอง C4 ด้วยต้นแบบวัตถุน้ำตาลทรายรูปกรอบสี่เหลี่ยม

4.3 ผลการทดสอบการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพวัตถุด้วยระบบสมบูรณของอะเรย์สายอากาศแปดสมาชิก ผลัดกันทำงาน

4.3.1 ผลการทดสอบสายสัญญาณที่จะใช้เป็นส่วนประกอบของระบบ

การทดสอบเพื่อคัดเลือกความเท่าเทียมกันของสายนำสัญญาณ โคแอกเซียลที่ได้ทำการปรับแต่งความยาว 2 ช่วง ที่ยาว 30 เซนติเมตร สำหรับใช้งาน 8 เส้นและสำรองอีก 8 เส้นในการต่อระหว่างระบบไมโครเวฟกับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ และที่ยาว 40 เซนติเมตร สำหรับใช้งาน 5 เส้น ในการต่อระหว่างสวิตช์กับสวิตช์ โดยใช้เครื่อง HP8510C

มีตัวอย่างผลการวัดค่าการลดทอนสัญญาณ มุมเฟสและอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ 9.8-10.2 กิกะเฮิร์ตซ์ ปรากฏที่หน้าจอแสดงในรูปที่ 4.30(a) – (c) ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาเฉพาะที่ความถี่ 10 กิกะ-เฮิร์ตซ์ สำหรับการวัดสายนำสัญญาณที่ต่อกับโหลดที่ปรับเปลี่ยนระหว่างวงจรเปิด (open circuit) กับโหลดที่แมตช์ (match) โดยมีการสลับทั้ง 2 ด้านของขั้วสาย มีผลรวบรวมอยู่ในตารางที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.30 ลักษณะสัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์สายนำสัญญาณ ยาว 30 เซนติเมตร

สายที่	ขั้วสายด้านที่ต่อกับโหลด	สถานะโหลด	Attenuation (dB)	Phase Shift ($^{\circ}$)	Impedance: Z_o (Ω)
1	A	Open	-5.5	159.2	$15.8 + j8.2$
		Match	-24	-100	$48.5 - j5.7$
	B	Open	-5.5	158	$15.9 + j8.6$
		Match	-25.8	-108	$48.2 - j4.6$
2	A	Open	-5.5	157.2	$15.9 + j9$
		Match	-25.1	-125	$45.5 - j2.8$
	B	Open	-5.5	166	$15.5 + j5.3$
		Match	-19.9	-996	$47.8 - j9.6$
3	A	Open	-5.7	160	$16.4 + j7.79$
		Match	-26	-133	$46.5 - j3.39$
	B	Open	-5.6	167	$15.8 + j4.9$
		Match	-21	-107	$47 - j7$

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

สายที่	ขั้วสายด้านที่ ต่อกับโหลด	สถานะโหลด	Attenuation (dB)	Phase Shift ($^{\circ}$)	Impedance: Z_o (Ω)
4	A	Open	.5.7	157	16.4 + j8.8
		Match	-22	-143	44 - j3.9
	B	Open	-5.78	162	16.3 + j6.7
		Match	-20	-118	44.8 - j7.9
5	A	Open	-5.8	155	16.7 + j9.5
		Match	-23	-97.5	48.7 - j6.5
	B	Open	-5.8	150	17.3 + j11.5
		Match	-26	-133	47.9 - j4.2
6	A	Open	-5.7	162	16.4 + j6.9
		Match	-22	-94	48.9 - j7
	B	Open	-5.8	160	16.6 + j7.7
		Match	-25	-94	49.2 - j5.2
7	A	Open	-6	152	17.6 + j10.9
		Match	-26.7	-117	47.7 - j3.9
	B	Open	-6	158	17.3 + j8.2
		Match	-23.5	-96	48.7 - j6.49
8	A	Open	-5.8	152.9	17.4 + j10.6
		Match	-22.8	-125	45.7 - j5.3
	B	Open	-5.9	151	17.4 + j11.1
		Match	-22.4	-122	45.7 - j5.8
9	A	Open	-5.8	148	17.3 + j12.5
		Match	-22.7	-148	45.2 - j2.77
	B	Open	-5.6	163	16 + j6.4
		Match	-19.6	-106	46.2 - j9.3

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

สายที่	ขั้วสายด้านที่ ต่อกับโหลด	สถานะโหลด	Attenuation (dB)	Phase Shift ($^{\circ}$)	Impedance: Z_o (Ω)
10	A	Open	-5.8	152	$17 + j10.7$
		Match	-26.8	-134	$46.8 - j3$
	B	Open	-5.7	161	$16.3 + j7.4$
		Match	-21	-104	$47.2 - j7.9$
11	A	Open	-5.8	156	$16.7 + j9.1$
		Match	-25	-102	$48.8 - j5.28$
	B	Open	-5.8	155.7	$16.9 + j9.5$
		Match	-23.9	-101	$48.4 - j6$
12	A	Open	-6	155	$17.4 + j9.4$
		Match	-24.7	-101	$48.5 - j5.5$
	B	Open	-6.1	151	$17.8 + j10.9$
		Match	-26	-107	$48.3 - j4.4$
13	A	Open	-5.7	163.5	$16.1 + j6.4$
		Match	-22.4	-115.1	$46.4 - j6.3$
	B	Open	-5.6	168.1	$15.88 + j4.6$
		Match	-23.8	-123	$46.2 - j5.1$
14	A	Open	-5.7	161.7	$16.3 + j7.1$
		Match	-24.7	-127	$46.4 - j4.3$
	B	Open	-5.7	165.7	$16.1 + j5.5$
		Match	-22.1	-111	$46.5 - j6.7$
15	A	Open	-5.8	152	$17 + j11$
		Match	-24	-158	$44.4 - j2.01$
	B	Open	-5.7	166.4	$16.1 + j5.3$
		Match	-19.4	-111	$45.3 - j9.1$

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

สายที่	ขั้วสายด้านที่ ต่อกับโหลด	สถานะโหลด	Attenuation (dB)	Phase Shift ($^{\circ}$)	Impedance: Z_o (Ω)
16	A	Open	-6	144	$18.1 + j13.9$
		Match	-22.9	-128	$45.5 - j5$
	B	Open	-5.9	148.5	$17.7 + j12.4$
		Match	-21.9	-118	$45.8 - j6.4$

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์สายนำสัญญาณ ยาว 40 เซนติเมตร

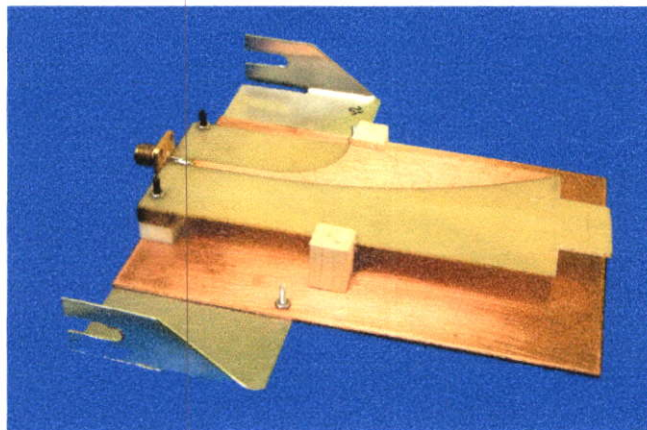
สายที่	ขั้วสายด้านที่ ต่อกับโหลด	สถานะโหลด	Attenuation (dB)	Phase Shift ($^{\circ}$)	Impedance : Z_o (Ω)
L1	A	Open	-6.49	144	$19.4 + j13.7$
		Match	-24.5	-118	$47.025 - j4$
	B	Open	-6.5	147	$19.2 + j12.7$
		Match	-23.5	-111.8	$47 - j5.9$
L2	A	Open	-5.8	142	$17.8 + j15.2$
		Match	-23.7	-93	$49.2 - j6.3$
	B	Open	-5.8	144	$17.8 + j14.3$
		Match	-22.3	-90	$49.3 - j7.5$
L3	A	Open	-5.9	134.77	$18.9 + j18.2$
		Match	-23.8	-142.5	$45 - j3.5$
	B	Open	-6.2	142	$19.1 + j14.8$
		Match	-20.6	-115.5	$45.4 - j7.7$
L4	A	Open	-6.6	133.4	$21.1 + j18.1$
		Match	-24.5	-116.6	$47 - j5$
	B	Open	-6.7	139.6	$20.4 + j15.7$
		Match	-22.5	-111.5	$46.9 - j6.5$

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

สายที่	ขั้วสายด้านที่ ต่อกับโหลด	สถานะโหลด	Attenuation (dB)	Phase Shift ($^{\circ}$)	Impedance : Z_o (Ω)
L5	A	Open	-6.38	136.12	20 + $j17.3$
		Match	-23.167	-101.12	48.2 - $j6.6$
	B	Open	-6.4	130	20.9 + $j19.5$
		Match	-24.3	-107	47.8 - $j5.67$

4.3.2 ผลการทดสอบเพื่อคัดเลือกสายอากาศวิวัลดี

ผลของการใช้เครื่อง HP8510C ทดสอบเหล่าสายอากาศวิวัลดีซึ่งได้ทำการเพิ่มส่วนจับยึดเพื่ออำนวยความสะดวกดังรูปที่ 4.31 โดยคุณสมบัติทางการแพร่กระจายคลื่นยังไม่เปลี่ยนแปลงมาก จึงได้ทำการจัดไว้จำนวน 16 ชุด จะเลือกใช้งาน 8 ชุดและสำรอง 8 ชุด โดยเลือกสายอากาศที่สมดุลกันมากที่สุด ผลที่ได้จากการวัดค่าที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์เป็นตามตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการเลือกสายอากาศนั้นไปใช้งาน



รูปที่ 4.31 สายอากาศวิวัลดี

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์สายอากาศวิวัลดี

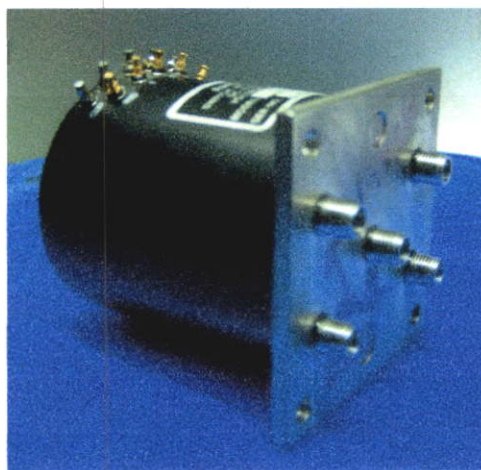
หมายเลข	Attenuation(dB)	Phase Shift ($^{\circ}$)	Impedance: Z_o (Ω)
ANT1	-12.2	-119	36.1 - $j16.4$
ANT2	-10.7	-113	34.9 - $j20.3$
ANT3	-11.37	-122	34.1 - $j16.8$
ANT4	-10.4	-108	35.2 - $j22.3$

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

หมายเลข	Attenuation(dB)	Phase Shift (°)	Impedance: Z_o (Ω)
ANT5	-10.2	-110.4	34.6 - j 21.9
ANT6	-11.6	-118	35.3 - j 17.4
ANT7	-9.8	-105	35.2 - j 24.5
ANT8	-10.7	-106	36.7 - j 22.4
ANT9	-11.1	-122	33.5 - j 17.054
ANT10	-12.2	-108	38.7 - j 18.9
ANT11	-10.25	-111	34.3 - j 21.7
ANT12	-11.8	-131.6	33.32 - j 13
ANT13	-11	-117	34.6 - j 18.5
ANT14	-10.35	-111.7	34.5 - j 21.4
ANT15	-10.6	-105	36.6 - j 16.4
ANT16	-10.6	-126.2	31.76 - j 16.4

4.3.3 ผลการทดสอบเพื่อคัดเลือกสวิตช์

สวิตช์ไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์ชนิด SP4T ในรูปที่ 4.32 มี 6 ตัว เลือกใช้งาน 5 ตัว ผลที่ได้จากการวัดโดยใช้เครื่อง HP8510C ได้ค่าที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ ตามตารางที่ 4.4 จะนำไปใช้เลือกในการใช้งานให้สอดคล้องกับสายนำสัญญาณและสายอากาศต่อไป



รูปที่ 4.32 สวิตช์ไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์สวิตช์ไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์

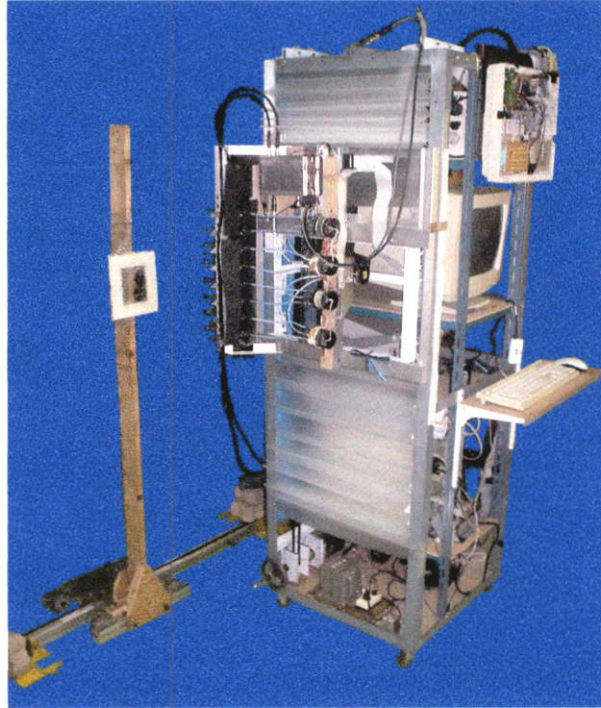
สวิตช์ หมายเลข	ขั้วสายที่ต่อ กับโหลด	สถานะโหลด	Attenuation (dB)	Phase Shift ($^{\circ}$)	Impedance : Z_o (Ω)
S1	1.1	Open	-7.3	38.1	79.9 + $j51.9$
		Match	-20.5	-134	43.4 - $j5$
	1.2	Open	-7.4	41.4	75.3 + $j51.3$
		Match	-21.5	-134	44.1 - $j5.3$
	1.3	Open	-7.4	31.1	90.3 + $j48.2$
		Match	-19.5	-133.5	42.7 - $j6.6$
	1.4	Open	-7.4	29.5	94.8 + $j46$
		Match	-18.6	-132	42.1 - $j7.8$
S2	1.1	Open	-7.2	5.1	125 + $j13$
		Match	-26.6	-143	46.34 - $j2.6$
	1.2	Open	-7.2	2	127.5 + $j4.4$
		Match	-23.3	-138	45 - $j3.9$
	1.3	Open	-7.2	5.9	125 + $j13.5$
		Match	-26.1	-141	46.5 - $j2.6$
	1.4	Open	-7.4	6.2	126.7 + $j15$
		Match	-23.6	-131	45.6 - $j4.5$
S3	1.1	Open	-7.3	5.6	105 + $j23$
		Match	-26.9	-133	53.24 - $j2.0$
	1.2	Open	-7.2	5.3	133.5 + $j3.4$
		Match	-23.7	-108	65 - $j1.8$
	1.3	Open	-7.3	5.4	132 + $j11.3$
		Match	-26.5	-122	51.5 - $j1.6$
	1.4	Open	-7.3	5.2	136.7 + $j8.7$
		Match	-23.8	-139	34.5 - $j5.5$

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

สวิตช์ หมายเลข	ขั้วสายที่ต่อ กับโหลด	สถานะโหลด	Attenuation (dB)	Phase Shift ($^{\circ}$)	Impedance : Z_o (Ω)
S4	1.1	Open	-5.7	44.1	90.4 + $j48.9$
		Match	-22.9	-123	46.7 - $j6.5$
	1.2	Open	-5.7	42.6	78.6 + $j51.3$
		Match	-22.4	-124	47.3 - $j5.3$
	1.3	Open	-5.4	41.3	95.4 + $j48.2$
		Match	-23.8	-130	42.5 - $j6.1$
	1.4	Open	-5.4	49.1	98.0 + $j48$
		Match	-23.4	-143	45.3 - $j6.8$
S5	1.1	Open	-6.3	5.3	122 + $j46.1$
		Match	-20.9	-143	44.3 - $j3.9$
	1.2	Open	-6.2	5.1	132.5 + $j41.8$
		Match	-21.4	-146	42.1 - $j3.4$
	1.3	Open	-6.2	4.9	123 + $j33.1$
		Match	-22.1	-151	48.9 - $j3.5$
	1.4	Open	-6.4	5.2	135.5 + $j25.2$
		Match	-22.3	-148	42.8 - $j3.4$
S6	1.1	Open	-5.3	7.6	112 + $j12$
		Match	-22.1	-134	43.6 - $j6.4$
	1.2	Open	-5.2	6.8	124.5 + $j6.7$
		Match	-21.8	-124	65 - $j4.8$
	1.3	Open	-5.8	8.6	122 + $j10.8$
		Match	-21.3	-145	61.2 - $j4.3$
	1.4	Open	-5.4	7.4	124.7 + $j9.7$
		Match	-20.3	-142	63.3 - $j5.2$

4.3.4 ผลการเก็บข้อมูลและสร้างภาพวัตถุโดยใช้ระบบรวมที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

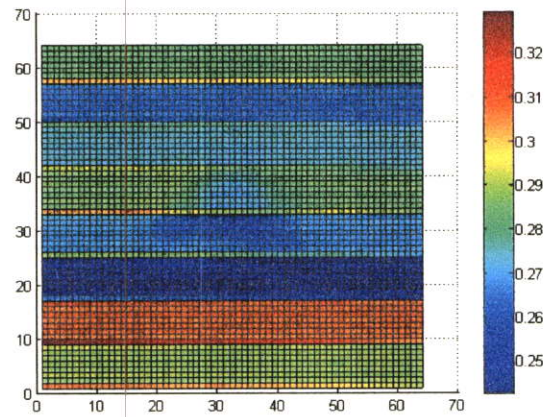
เมื่อได้ทำการคัดเลือกอุปกรณ์ที่ได้จากการพิจารณาผลการวัดสมบัติสายนำสัญญาณ สายอากาศและสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ไมโครเวฟให้แต่ละเส้นทางต่อระหว่างระบบวงจรรับและส่ง ไมโครเวฟกับสายอากาศทั้งแปดมีความเหมือนหรือใกล้เคียงกันในด้านคุณสมบัติทางด้านสัญญาณ คลื่นมากที่สุด มาประกอบเป็นระบบที่สมบูรณ์ ซึ่งมีกลไกการเลื่อนอะเรย์ในแกนตั้ง และเลื่อนวัตถุ ในแกนนอนด้วยกลไกของโซ่ซึ่งรวดเร็ว โดยมีลักษณะของระบบเป็นดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 การติดตั้งสมบูรณ์ใช้ทดลองเก็บข้อมูลทั้งระบบ

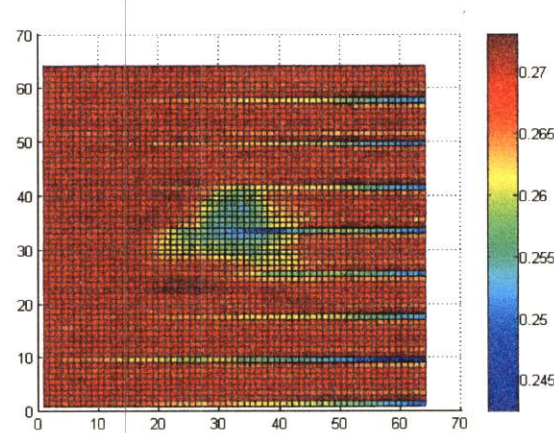
ผลการทดลองเก็บข้อมูลโดยใช้ระบบที่ประกอบสมบูรณ์ ซึ่งได้เพิ่มส่วนควบคุมการสั่งงาน การประสานงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ สั่งงานการเลือกเส้นทางโดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาใช้ในงานวิจัย พบว่าใช้เวลาการเก็บข้อมูล 13 นาที

แต่เมื่อพิจารณาที่ข้อมูลดิบของการเก็บค่าสัญญาณสะท้อนจากวัตถุตัวอย่างเดิมทั้ง 4 ตัวอย่าง พบว่า มีปัญหาการกระจายค่าของข้อมูลที่ผิดปกติคล้ายกันดังรูปที่ 4.34 โดยเกิดตรงพิกเซลที่ติดกับตรงส่วนต่อของการเก็บค่าสัญญาณจากสายอากาศทั้งแปด ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เท่าเทียมกันอย่างแท้จริงของแต่ละเส้นทางส่งและรับคลื่น ดังนั้นจึงต้องทำการเฉลี่ยข้อมูลตรงรอยต่อดังกล่าวให้มีความไม่ต่อเนื่องน้อยที่สุด ก่อนทำการประมวลผลสร้างภาพวัตถุ



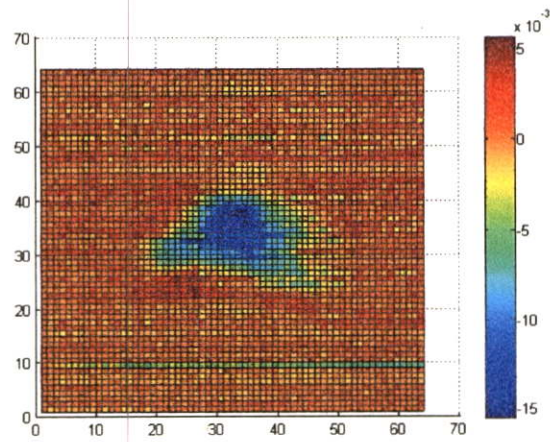
รูปที่ 4.34 ข้อมูลดิบจากความไม่เท่าเทียมของสายอากาศ

การเฉลี่ยข้อมูลดิบทำโดยเริ่มพิจารณาให้แถวที่ n ใด ๆ ที่เลือก เป็นแถวข้อมูลอ้างอิง กำหนดจุดอ้างอิงขึ้น 1 จุด หาผลต่างของข้อมูลจากแถวที่ $n+1$ เทียบจุดอ้างอิง นำผลต่างที่ได้ไปหักออกจากข้อมูลทุกจุดของแถวที่ $n+1$ โดยทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนครบทุกแถวข้อมูล พบว่า ผลการเฉลี่ยข้อมูลดิบ เป็นดังรูปที่ 4.35



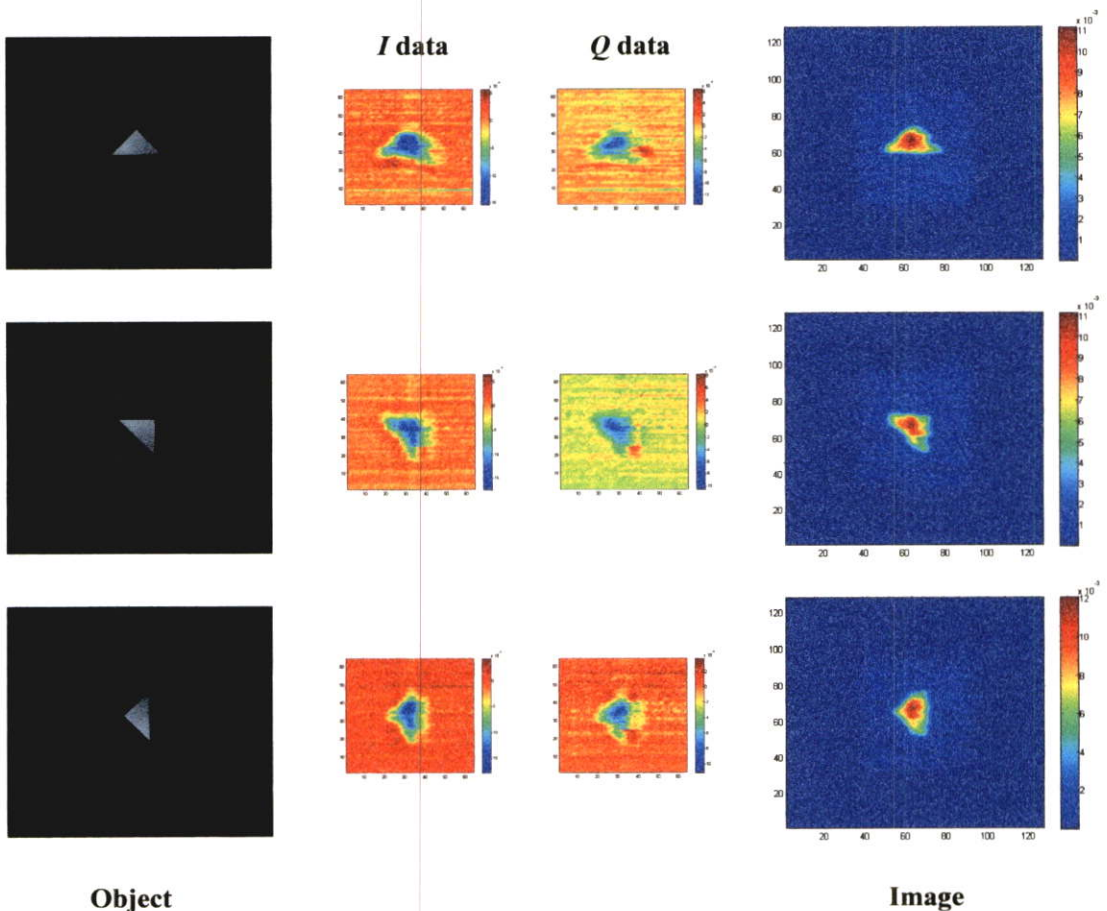
รูปที่ 4.35 ข้อมูลแก้ไขความไม่เท่าเทียมของสายอากาศ

จากรูปที่ 4.35 ข้อมูลที่แก้ไขในส่วนการไม่เท่าเทียมของสายอากาศ ยังปรากฏความไม่ต่อเนื่องในบางแถวของข้อมูล จึงต้องมีการชดเชยลดความไม่ต่อเนื่องนี้ โดยกำหนดจุดอ้างอิงในแถวแรกของข้อมูลแล้วทำการหาผลต่างของแต่ละข้อมูลทั้ง 8 แถวในชุดสายอากาศอะเรย์แปดสมาชิก ทำให้เมตริกซ์ของผลต่างข้อมูลที่จะนำไปใช้เป็นค่าชดเชยให้กับข้อมูลในชุดสายอากาศอะเรย์แปดสมาชิก อีก 6 ชุด ด้วยการนำไปหักล้างกับข้อมูลในแต่ละชุดสายอากาศอะเรย์ พบว่า ผลการชดเชยข้อมูลดิบที่ได้มีลักษณะเป็นดังรูปที่ 4.36

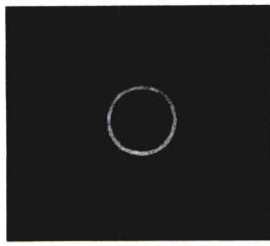


รูปที่ 4.36 ข้อมูลแก้ไขชดเชยความไม่ต่อเนื่อง

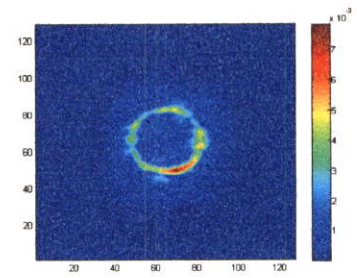
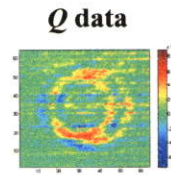
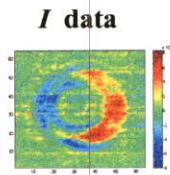
ผลการแก้ไขความไม่เท่าเทียมของสายอากาศและการชดเชยความไม่ต่อเนื่อง พบว่าสามารถชดเชยข้อผิดพลาดในส่วนระบบไมโครเวฟในขณะเก็บข้อมูลได้ และเมื่อนำข้อมูลที่ผ่านการแก้ไขไปทำการประมวลผลสร้างภาพวัตถุขึ้น จากตัวอย่างเดิมทั้ง 4 ตัวอย่าง ผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.37 - 4.40 ตามลำดับ สังเกตว่าภาพที่ได้มีความชัดเจน เช่นเดียวกับระบบสายอากาศเดี่ยว



รูปที่ 4.37 ผลการทดลอง D1 ด้วยต้นแบบวัตถุโลหะรูปสามเหลี่ยม



Object

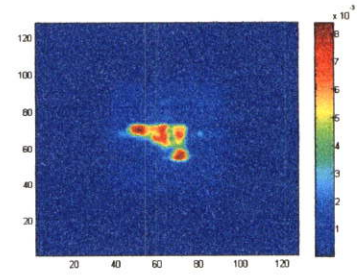
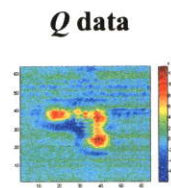
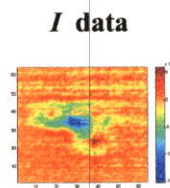


Image

รูปที่ 4.38 ผลการทดลอง D2 ด้วยต้นแบบวัตถุโลหะรูปวงแหวน

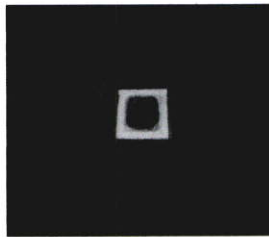


Object

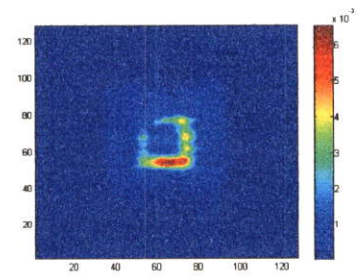
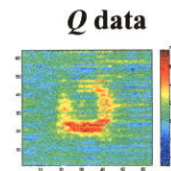
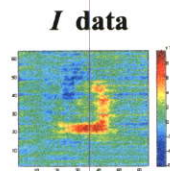


Image

รูปที่ 4.39 ผลการทดลอง D3 ด้วยต้นแบบวัตถุโลหะรูปกระบอกปืน



Object



Image

รูปที่ 4.40 ผลการทดลอง D4 ด้วยต้นแบบวัตถุน้ำตาลทรายรูปกรอบสี่เหลี่ยม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 บทสรุปผลการทดลอง

5.1.1 อุปกรณ์และระบบไมโครเวฟ

อุปกรณ์ที่ได้พัฒนาและทดลอง ได้แก่ ไครเรชันแนลคัปเปอเรเตอร์ไลน์ ที่จังก์ชันกับเฟสชิฟเตอร์ ไมโครเวฟมิกเซอร์ สายนำสัญญาณ สายอากาศวิวัลดี วงจรขยายสัญญาณ และสวิตช์ไมโครเวฟ แล้วประกอบรวมเป็นระบบไมโครเวฟ ซึ่งอุปกรณ์ต่างๆ จะได้สรุปผลการสร้างที่ได้ที่ได้จากการทดลอง

การสร้างไครเรชันแนลคัปเปอเรเตอร์ไลน์ที่ 14 dB และ 20 dB วัดผลด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ ผลออกมาใกล้เคียงที่ออกแบบไว้ แต่ค่าการส่งผ่านสัญญาณถูกลดทอน 6.0992 dB และ 4.0313 dB ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้ควรจะค่าสลับกัน

ส่วนอุปกรณ์ที่จังก์ชันกับเฟสชิฟเตอร์จากการสร้างและได้ทดสอบความแตกต่างของมุมเฟสที่ออกมา นั้น ผลที่ดูจากภาพแสดงผลให้เห็นมุมเฟสแรกได้ 70.02 องศา และเห็นมุมเฟสที่สองได้ 161.63 องศา เห็นว่าผลต่างเป็นไปตามที่ออกแบบไว้คือ มีผลต่าง 91.61 องศา แต่ผลในส่วนของค่าลดทอนสัญญาณมีความแตกต่างกันมากเกินซึ่งจริงๆ แล้วไม่ควรจะมี ถ้าดูจากผลที่ปรากฏในการทดลอง

ไมโครเวฟมิกเซอร์ทำการทดลองโดยการป้อนสัญญาณคลื่นไมโครเวฟเข้าด้าน IF เสมือนที่งานจริงของระบบไมโครเวฟ แต่ใช้ตัวลดทอนไมโครเวฟแบบปรับค่าลดทอนสัญญาณที่สะท้อนกลับเข้ามาทางด้าน RF แล้วทำการบันทึกผลที่วัดได้ แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของมิกเซอร์ว่าทำงานได้จริง

สายนำสัญญาณที่ได้แก้ไขสมบัติโดยการตัดแต่งสายนำสัญญาณให้มีการเท่าเทียมกันทั้งแปดเส้นทางนั้นทำได้ยาก เพราะมีเงื่อนไขต้องทำการเชื่อมต่อกับตัวคอนเน็คเตอร์ก่อนทำการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ วิธีแก้ไขคือทำสายอากาศสำรองไว้ให้เลือกใช้งาน

สายอากาศวิวัลดีที่ทำการสร้างขึ้นได้ทำการทดสอบวัดการแพร่กระจายคลื่นได้ผลเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ ในการทำสายอากาศวิวัลดีที่มีสมบัติคล้ายกันจำนวนแปดอัน ก็ยากที่จะทำให้เกิดการเท่าเทียมกันของสายอากาศ สาเหตุอาจเกิดจากอุปกรณ์ที่เพิ่มเข้ามา เช่น ตัวจับยึดและคอนเน็คเตอร์ เป็นต้น แต่ก็ได้เลือกสายอากาศที่มีคล้ายกันมากที่สุดมาใช้ในงานวิจัยนี้ ดูจากผลการทดลองที่วัดได้

วงจรรขยายสัญญาณที่พัฒนาขึ้นต้องการอัตราขยายสัญญาณอยู่ที่ 150 เท่า เพื่อให้ได้ระดับแรงดันในช่วง 0–3 โวลต์

สวิตช์ไมโครเวฟที่ได้ทดสอบการเปิด-ปิดสัญญาณไมโครเวฟนั้น สามารถทำความเร็วโดยไม่ให้มีข้อผิดพลาดจากการเปิด-ปิด อยู่ที่ 3 มิลลิวินาที แต่ในการวิจัยนี้ใช้สายอากาศแปดตัวใช้เวลาที่ 50 มิลลิวินาที ซึ่งยังสามารถพัฒนาระบบให้เร็วขึ้นอีกได้

5.1.2 โครงสร้างและการเคลื่อนที่

โครงสร้างและระบบการเคลื่อนที่ได้พัฒนาขึ้นนั้นต้องการเก็บข้อมูล 64×64 จุดเท่ากับ 4,096 ข้อมูล ขนาดพื้นที่เก็บข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ที่ 40.8×40.8 เซนติเมตร และขนาดของวัตถุที่มีขนาดกึ่งหนึ่งของพื้นที่เก็บข้อมูลและต้องไม่เล็กมากไปกว่าความยาวของคลื่น ไมโครเวฟที่ใช้ โดยวัตถุที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเหมาะสมกับการพหุภาคีดตัวได้ง่าย เช่นวัตถุที่ทำมาจากโลหะ, แผ่นโลหะและรวมถึงก้อนน้ำตาลทราย เป็นต้น โดยเคลื่อนที่ระหว่างจุดต่อจุดอยู่ที่ 0.6375 เซนติเมตร

ช่วงต้นของงานวิจัย สามารถเปรียบเทียบได้ภายในกลุ่มการทดสอบ 4.2 โดยที่มีระบบการเคลื่อนที่เดียวกัน คือ ชุดการเคลื่อนที่แนวนอนและแนวตั้งอยู่ในชุดเดียวกัน เคลื่อนที่ไปทั้งชุดกับการเคลื่อนที่แนวนอน

ส่วนโครงสร้างซึ่งการทดลองนั้นเปลี่ยนเฉพาะสายอากาศกับระบบไมโครเวฟ ได้แก่ การเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพด้วยสายอากาศวิวัลด์กับระบบเก่า การเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพด้วยสายอากาศฮอร์นกับระบบไมโครเวฟใหม่ และการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพด้วยสายอากาศวิวัลด์กับระบบไมโครเวฟใหม่

โครงสร้างและการเคลื่อนที่ ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ในแต่ละจุดนาน เนื่องจากเคลื่อนที่โดยหมุนเกลียว ซึ่งเน้นไปในทางที่เก็บข้อมูลได้ถูกต้องเพื่อนำไปสร้างภาพมาวิเคราะห์เทียบกัน โดยมีระยะเวลาวางวัตถุอยู่ที่ 30 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบ 4.2.1 ส่วนการทดสอบ 4.2.2 และ 4.2.3 อยู่ที่ 24 เซนติเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากระบบ ไมโครเวฟถูกลดทอนกำลังลงจากการเพิ่มอุปกรณ์ไมโครเวฟ เวลาใช้ประมาณ 3 ชั่วโมง

ช่วงท้ายการทดสอบ 4.3.4 ได้ทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง แต่การเคลื่อนที่คงเดิม เนื่องจากจะต้องการเพิ่มความเร็วของการเก็บข้อมูล จึงปรับเปลี่ยนระบบการเคลื่อนที่แนวตั้งที่สั่งงานด้วยมอเตอร์เป็นแบบเดียวกันกับการเคลื่อนที่แนวนอน จึงทำให้การเคลื่อนที่ได้เร็วโดยใช้สายอากาศ 8 เส้นใช้เวลาประมาณ 13 นาที จากโครงสร้างการทดลองทำนองเดียวกันกับการทดลอง 4.2.2 และ 4.2.3 แต่ระยะเวลาวางวัตถุอยู่ที่ 10 เซนติเมตร

5.1.3 การทดลองเก็บข้อมูลและแสดงผลการสร้างภาพกลับ

การเก็บข้อมูลและการสร้างภาพกลับ เกิดจากการสะท้อนคลื่นของวัตถุกลับเข้าสู่ระบบไมโครเวฟ โดยขนาดของสัญญาณจะขึ้นกับวัตถุ สัญญาณคลื่นที่ได้อยู่ในค่าแรงดันไฟฟ้าก่อนแปลงระดับสัญญาณเป็นข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการสร้างภาพกลับต่อไป

ในส่วนการเปรียบเทียบเวลาในการเก็บค่าและการสร้างภาพกลับภายในกลุ่ม การทดสอบ 4.2.1 ซึ่งผลภาพวัตถุที่ได้ค่อนข้างชัดเจนเป็นไปตามทฤษฎีของการสร้างภาพกลับ การทดลอง 4.2.2 พบว่า ภาพวัตถุที่ประมวลผลชัดเจนกว่าการใช้สายอากาศวิวาสดีคัทกับระบบเก่า การทดลอง 4.2.3 พบว่า มีคุณภาพของภาพที่ดีเทียบกับการใช้สายอากาศแบบฮอร์น การทดลองทั้งระบบ 4.3.4 สังเกตว่าภาพที่ได้มีความชัดเจน เช่นเดียวกับระบบสายอากาศเดี่ยว และภาพที่ได้ทำการทดลองช่วงหลังๆ จะมีคุณภาพที่เหมือนกัน

5.2 ปัญหาที่พบ

ปัญหาที่พบหลังจากพัฒนาระบบไมโครเวฟแบ่งได้เป็นส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ ปัญหาจากการออกแบบระบบรวมอุปกรณ์ไมโครเวฟต่างๆ ทำให้สัญญาณคลื่นที่สะท้อนกลับมาเข้าตัวมิทเซอร์มีขนาดเล็กลงมากจากการลดทอนของอุปกรณ์ จึงทำให้การเก็บข้อมูลเกิดการผิดพลาดได้ง่ายเพราะสัญญาณที่รับกลับมามีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับสัญญาณรบกวนที่ขนาดเท่าเดิม และเมื่อใช้สวิทช์ไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์ในการเลือกเส้นทางที่ยังมีส่วนที่ไม่เท่าเทียมกันของสายอากาศทั้ง 8 เส้นทาง และปัญหาจากข้อจำกัดของจำนวนอุปกรณ์ที่มีใช้อยู่ในการสำรองใช้หากเกิดการเสียหายในอนาคต

ปัญหาการควบคุมและสั่งงานในระบบการเก็บข้อมูลที่ต้องทำให้สอดคล้องกัน เป็นปัญหาใหญ่ที่ยังต้องการพัฒนาเป็นอันดับต้นๆ โดยปัญหานี้จะเป็นส่วนกลับของข้อมูลที่ต้องการเมื่อต้องเก็บข้อมูลมาด้วยความเร็วที่สูงๆ แล้วจะเกิดการไม่เสถียรของสัญญาณมากเมื่อเปลี่ยนเส้นทางสายอากาศ ซึ่งก็จะไปสัมพันธ์กับระบบไมโครเวฟที่มีปัญหาอยู่อีกทีหนึ่ง

5.3 แนวทางการพัฒนา

5.3.1 พัฒนาระบบไมโครเวฟ

การพัฒนาระบบไมโครเวฟต้องทำให้เป็นระบบปิดที่แยกส่วนทำงานชัดเจน ไม่ให้มีสัญญาณไมโครเวฟรบกวนกับระบบส่วนอื่นๆ สามารถแก้ไขหรือมีจุดที่สามารถปรับคุณสมบัติระบบได้ โดยไม่ต้องมาสร้างทั้งระบบขึ้นใหม่ให้ยุ่งยากและทำอุปกรณ์ให้เป็นมาตรฐานไมโครเวฟมิลลิเมตรเวฟยิ่งขึ้น และส่วนที่ต้องปรับปรุงเส้นทางการรับและส่งสัญญาณให้เกิดความเท่ากันมากที่สุด

5.3.2 พัฒนาด้านโครงสร้างและการเคลื่อนที่

การพัฒนาด้านโครงสร้างและการเคลื่อนที่เพิ่มจำนวนเส้นการรับส่งสัญญาณมากขึ้นเพื่อลดการทำงานของระบบกลไก และถ้าสามารถปรับปรุงระบบสแกนให้ไวมากขึ้น โดยที่ตำแหน่งจุดเก็บข้อมูลถูกต้องแล้ว เพื่อช่วยให้ใช้เวลาน้อยลงและเมื่อทำงานได้เร็วแล้วก็ สามารถที่จะเพิ่มจำนวนของการเก็บข้อมูลในพื้นที่ใหญ่ขึ้นได้ หรือทำการเลือกพื้นที่ในการเก็บข้อมูลได้

5.3.3 พัฒนาการเก็บข้อมูลและการสร้างภาพ

เพื่อให้ทำการเก็บข้อมูลได้เร็วขึ้นนั้นควรจะเปลี่ยนเครื่องมือที่ใช้ในการแปลงสัญญาณเป็นข้อมูลให้มีความไวและถูกต้องของการแปลงสัญญาณ และสามารถตรวจเช็คสัญญาณที่ถูกต้องได้ และในส่วนของ การสร้างภาพกลับจะต้องพัฒนาให้เป็น โปรแกรมที่สามารถใช้ได้ง่ายๆ เพื่อช่วยลดเวลาในการใช้งาน

สรุปผลการทดลองต่างๆ ที่ได้ทำการทดลองมาอาจจะยังไม่ใช้ค่าที่ถูกต้องนัก จึงต้องมีการพัฒนาต่อไป เพื่อนำไปสู่การส่งเสริมปรับปรุงและพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านไมโครเวฟกำลังงานต่ำ ให้ใช้งานในด้านใหม่ ๆ ให้เกิดเป็นประโยชน์ในอนาคตและแพร่หลายมากขึ้น เช่น การตรวจหาวัตถุภายในสิ่งบดบังทั้งกลางแจ้งหรือที่มืด การตรวจสอบสินค้าการเกษตร รวมถึงด้านการใช้เครื่องมือที่พัฒนามาจากไมโครเวฟกำลังงานต่ำถูกนำไปใช้งานในชีวิตประจำวัน เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] David M. Sheen. 2001. "Douglas L. McMakin, and Thomas E. Hall, Three-Dimensional Millimeter-Wave Imaging for Concealed Weapon Detection." **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**. vol.49, no. 9 : 1581-1592.
- [2] Pozar D.M. 1993. **Microwave Engineering**. New York : Addison-Wesley.
- [3] Collins R. E. 1994. **Foundation of microwave engineering**. New York : John Wiley & Sons.
- [4] ชรรณศักดิ์ วิมลเกียรติคุณ. 2545. "การศึกษาวิจัยและพัฒนาไมโครเวฟฮอโลกราฟี ในการมองภาพวัตถุโดยใช้เทคนิคการกระเจิงมอดูเลตคลื่นแสง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] Fooks E.H. and Zakarevicius R.A. 1990. **Microwave Engineering Using Microstrip Circuits**. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice Hall.
- [6] Gupta K. C. et. al. 1996. **Microstrip Lines and Slotlines**. 2nd ed. Dedham, MA : Artech House.
- [7] Yamashita E. and Atsuki K. 1969. "Design of transmission line dimensions for a given characteristic impedance." **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**. vol. 17 : 638 – 639.
- [8] Edwards T. 1992. **Foundations for Microstrip Circuit Design**. New York : John Wiley & Sons.
- [9] Trinogga L.A. et. al. 1991. **Practical Microstrip Circuit Design**. England : Ellis Horwood.
- [10] Bahl I. J. and Bhartia P. 1998. **Microwave Solid-State Circuit Design**. New York : John Wiley & Sons.
- [11] Seeger, J. A. 1986. **Microwave theory, components, and devices**. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice-Hall.
- [12] Chang Kai. 1989. **Handbook of Microwave and Optical Components : v.1**. New York : John Wiley & Sons.
- [13] Radmanesh M. 2001. **Radio Frequency and Microwave Electronics Illustrated**. Upper Saddle River, New Jersey : Prentice Hall.

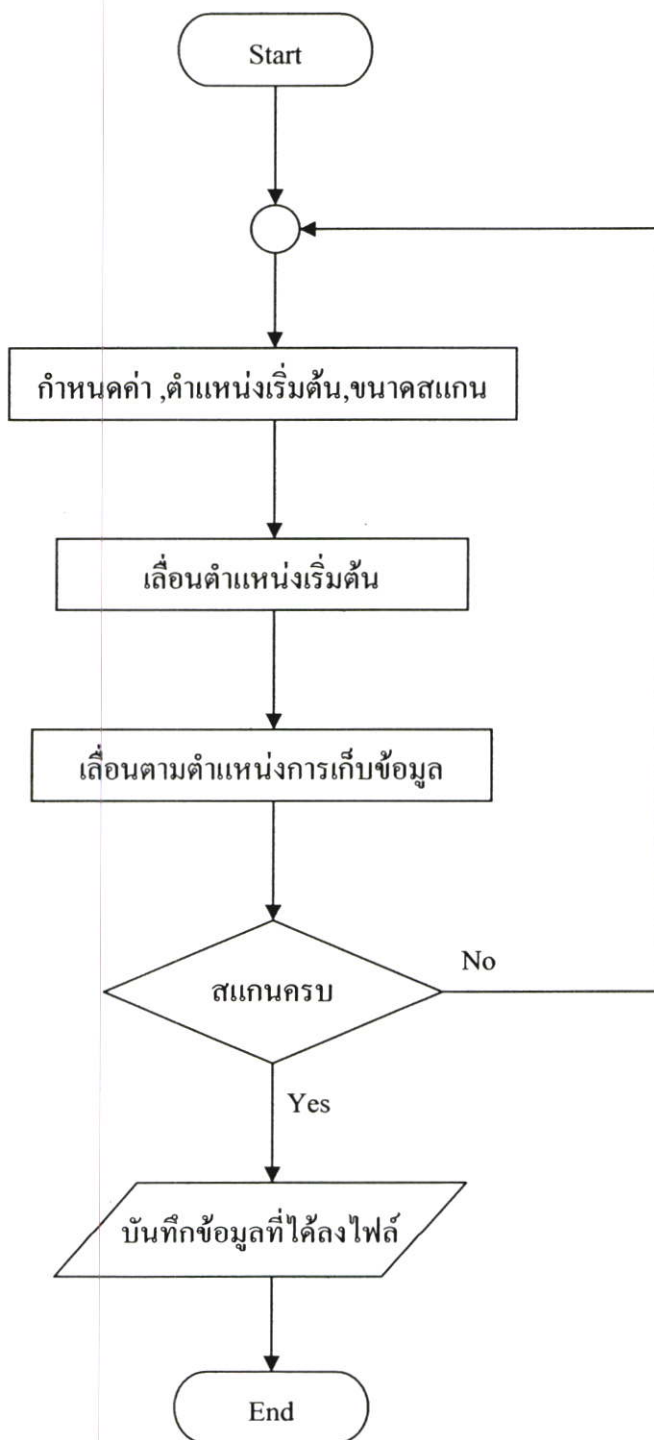
- [14] Maas S. A. 1987. "A GaAs MESFET Mixer with Very Low Intermodulation." **Proceedings of The IEEE**. vol.35 , no.4 : 425 – 429.
- [15] Gonzalez G. 1944. **Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design**. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice Hall.
- [16] Kraus J. D. and Marhefha R. J. 2003. **Antennas for All Applications**. 3rded New York : McGraw Hill.
- [17] Balanis A. 1964. **Antenna Theory Analysis and Design**. New York : John Wiley & Sons.
- [18] SEMCAD Simulation Program, "FDTD Method", chap.3, Reference Manual.
- [19] Kuo L. C. 2001. "3-D FDTD Design Simulation and Experimental Measurement of a Ka-Band Planer Antipodal Linearly-Tapered Slot Antenna (AL TSA)." **Proceedings of APM2001**. vol. 3, no.9 : 1271 – 1274.
- [20] ชำนาญ สำเนาพ่อค้า. 2542. "ระบบการสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [21] ธวัชชัย คำศรี. 2542. "การมองภาพที่ถูกบดบังด้วยคลื่นไมโครเวฟ" ปริญญาานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [22] Anderson, A.P. 1977. "Microwave holograph." **Proceedings of The IEEE**. no.124 : 946-962.
- [23] Vimonkiattikun T. et. al. 2000. "Microwave holographic- imaging remote objects using light-modulated scattering technique." **Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2000)**. vol. 2 : 828 - 833.
- [24] Srongprapa A. and Vimonkiattikun T. 2001. "Digital image construction from off – axis microwave hologram by angular spectrum backward propagation algorithm." **International Symposium on Signal Processing and its Applications (ISSPA)**. pp 635 – 638.
- [25] Herman I.P. 1996. **Optical Diagnostics forThin Film Processing**. San Diego : Academic Press.
- [26] Goodman J.W. 1968. **Introduction to Fourier Optics**. New York : McGraw Hill.

ภาคผนวก

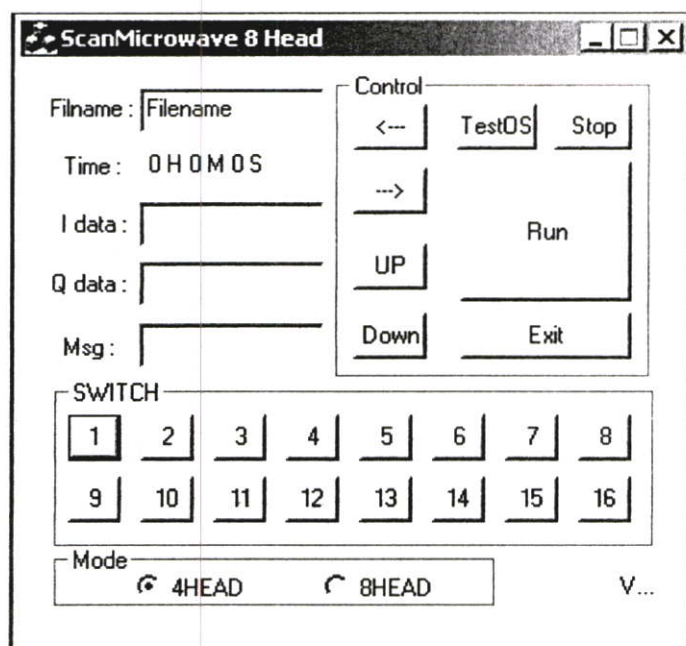
ภาคผนวก ก.

แสดงแผนภาพขั้นตอนการทำงานและโปรแกรมควบคุมมอเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูล

แผนภาพขั้นตอนการทำงาน



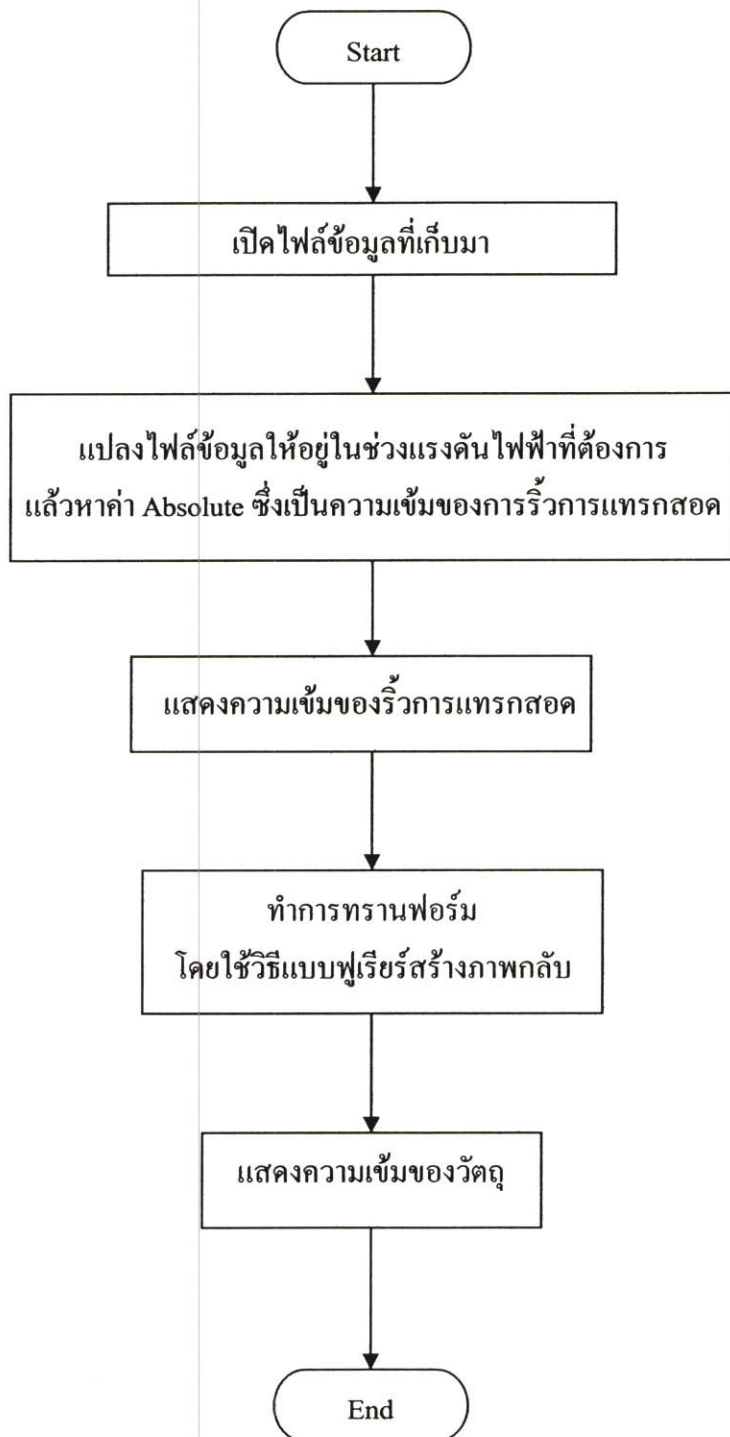
โปรแกรมควบคุมการทำงานเพื่อจัดเก็บข้อมูล



ภาคผนวก ข.

แสดงแผนภาพขั้นตอนการทำงานและโปรแกรม MATLAB ในการสร้างภาพกลับ

แผนภาพขั้นตอนการสร้างภาพกลับ



โปรแกรม MATLAB ในการสร้างภาพกลับ

```

clear
format long e

i_da=[          เปิดข้อมูล I 64 x 64          ];

q_da=[          เปิดข้อมูล Q 64 x 64          ];

for r=1:64
    for c=1:62
        Est1= i_da(r,c)-i_da(r,c+1);
        Est2= q_da(r,c)-q_da(r,c+1);
        if abs(Est1)>= 30E-03
            i_da(r,c+1)= (i_da(r,c)+i_da(r,c+2))/2 ;
        end
        if abs(Est2)>= 30E-03
            q_da(r,c+1)= (q_da(r,c)+q_da(r,c+2))/2 ;
        end
    end
end

M= 36 ;
N= 2 ;
Est1= .2E-03;
Est2= .2E-03;

EsLIM_i= 2.0E-03;
EsLIM_q= 2.0E-03;

for r=M:-1:2
    EsA= i_da(r,N)-i_da(r-1,N);
    for c=1:64
        if abs(EsA)>= Est1
            i_da(r-1,c)= i_da(r-1,c)+(EsA) ;
        end
    end
end
for r=M:1:63
    EsA= i_da(r,N)-i_da(r+1,N);
    for c=1:64
        if abs(EsA)>= Est1
            i_da(r+1,c)= i_da(r+1,c)+(EsA) ;
        end
    end
end
end

for r=M:-1:2
    EsA= q_da(r,N)-q_da(r-1,N);
    for c=1:64
        if abs(EsA)>= Est2
            q_da(r-1,c)= q_da(r-1,c)+(EsA) ;
        end
    end
end

```

```

        end
    end
end
for r=M:1:63
    EsA= q_da(r,N)-q_da(r+1,N);
    for c=1:64
        if abs(EsA)>= Est2
            q_da(r+1,c)= q_da(r+1,c)+(EsA) ;
        end
    end
end
end

EsMINi= i_da(M,N);      EsMINq= q_da(M,N);

for r=1:8
    for c=1:64
        EsC(r,c)=i_da(r,c)-EsMINi;
        if abs(EsC(r,c)) >= EsLIM_i
            i_da(r,c)= i_da(r,c)-EsC(r,c) ;
            i_da(r+8,c)= i_da(r+8,c)-EsC(r,c) ;
            i_da(r+16,c)= i_da(r+16,c)-EsC(r,c) ;
            i_da(r+24,c)= i_da(r+24,c)-EsC(r,c) ;
            i_da(r+32,c)= i_da(r+32,c)-EsC(r,c) ;
            i_da(r+40,c)= i_da(r+40,c)-EsC(r,c) ;
            i_da(r+48,c)= i_da(r+48,c)-EsC(r,c) ;
            i_da(r+56,c)= i_da(r+56,c)-EsC(r,c) ;
        end
        EsC(r,c)=q_da(r,c)-EsMINq;
        if abs(EsC(r,c)) >= EsLIM_q
            q_da(r,c)= q_da(r,c)-EsC(r,c) ;
            q_da(r+8,c)= q_da(r+8,c)-EsC(r,c) ;
            q_da(r+16,c)= q_da(r+16,c)-EsC(r,c) ;
            q_da(r+24,c)= q_da(r+24,c)-EsC(r,c) ;
            q_da(r+32,c)= q_da(r+32,c)-EsC(r,c) ;
            q_da(r+40,c)= q_da(r+40,c)-EsC(r,c) ;
            q_da(r+48,c)= q_da(r+48,c)-EsC(r,c) ;
            q_da(r+56,c)= q_da(r+56,c)-EsC(r,c) ;
        end
    end
end
end

i_max=max(max(i_da));i_min=min(min(i_da));
q_max=max(max(q_da));q_min=min(min(q_da));
EsB=(i_max-i_min)/(q_max-q_min);

i_da =(i_da-i_da(M,N));
q_da =(q_da-q_da(M,N));%*EsB;

figure(1); pcolor(i_da); colorbar; colormap(jet) ;
shading interp;
figure(2); pcolor(q_da); colorbar; colormap(jet) ;
shading interp;

```

```

kk= (pi*2/3);
kx = (1/0.6375)/64;
ky= (1/0.6375)/64;
for r= 1: 64
    for c = 1:64
        x=r;  y=c;
        del_x = 32.5-x ;
        del_y = y-32.5 ;
        e_exp1(x,y) = exp(-j*80*sqrt( 4*(kk)^2 -
(kx*del_x)^2 - (ky*del_y)^2 ));
    end
end

e_exp=zeros(128);
for r=1:64
    for c=1:64
        e_exp(32+r,32+c) = e_exp1(r,c) ;
    end
end

slop = repmat(0.01,64,64);
for R=2:8
    mv = repmat(0.01*(R*R),64-2*(R-1),64-2*(R-1));
    for r=1:(64-2*(R-1))
        for c=1:(64-2*(R-1))
            slop(R-1+r,R-1+c)= mv(r,c);
        end
    end
end

i_da =i_da.*slop;    q_da =q_da.*slop;

i_da_mo=zeros(128);
for r=1:64
    for c=1:64
        i_da_mo (32+r ,32+c)=i_da(r ,c );
    end
end

Amax= sqrt( i_da_mo.*conj(i_da_mo) );
max= i_da_mo ;
figure(3); pcolor(Amax); colorbar; shading interp;

i_ff = fft2 (i_da_mo);
i_ff = fftshift (i_ff);
i_iff_e =ifft2( i_ff.*e_exp );

q_da_mo=zeros(128);
for r=1:64
    for c=1:64
        q_da_mo (32+r ,32+c)=q_da(r ,c );
    end
end

Amax= sqrt( q_da_mo.*conj(q_da_mo) );
max= q_da_mo ;

```

```
figure(4); pcolor(Amax); colorbar; shading interp;

q_ff = fft2 (q_da_mo);
q_ff = fftshift (q_ff);
q_iff_e = ifft2( q_ff.*e_exp);

fxy_iq_iff_e = i_iff_e+(j*q_iff_e);
max = sqrt (fxy_iq_iff_e.*conj(fxy_iq_iff_e) );
figure(5) ; pcolor(max) ; colorbar ; colormap(jet);
shading interp;
```

ภาคผนวก ค.

ข้อมูลอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางไมโครเวฟความถี่สูง

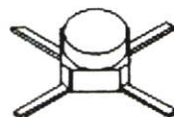
1. Gallium Arsenide FET



2-16 GHz Low Noise Gallium Arsenide FET

Technical Data

36 micro-X Package



ATF-13336

Features

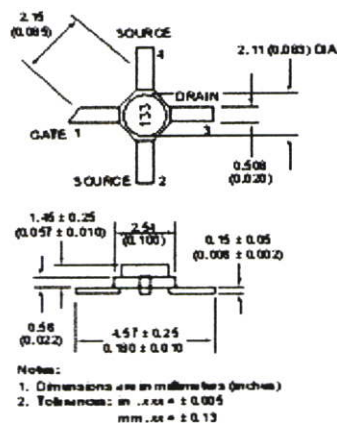
- **Low Noise Figure:**
1.1 dB Typical at 12 GHz
- **High Associated Gain:**
9.0 dB Typical at 12 GHz
- **High Output Power:**
17.5 dBm Typical P_{1dB} at 12 GHz
- **Cost Effective Ceramic Microstrip Package**
- **Tape-and-Reel Packaging Option Available⁽¹⁾**

Description

The ATF-13336 is a high performance gallium arsenide Schottky-barrier-gate field effect transistor housed in a cost effective microstrip package. Its premium noise figure makes this device appropriate for use in low noise amplifiers operating in the 2-16 GHz frequency range.

This GaAs FET device has a nominal 0.3 micron gate length with a total gate periphery of 250 microns. Proven gold fused metallization systems and nitride passivation assure a rugged, reliable device.

36 micro-X Package Dimensions



Electrical Specifications, $T_A = 25^\circ\text{C}$

Symbol	Parameters and Test Conditions	Units	Min.	Typ.	Max.	
NE_{01}	Optimum Noise Figure: $V_{DS} = 2.5\text{V}$, $I_{DS} = 20\text{mA}$	$f = 8.0\text{GHz}$	dB		1.2	1.6
		$f = 12.0\text{GHz}$	dB		1.1	
		$f = 11.0\text{GHz}$	dB		1.6	
G_A	Gain @ NE_{01} : $V_{DS} = 2.5\text{V}$, $I_{DS} = 20\text{mA}$	$f = 8.0\text{GHz}$	dB	8.0	11.5	
		$f = 12.0\text{GHz}$	dB		9.0	
		$f = 11.0\text{GHz}$	dB		7.5	
P_{1dB}	Power Output @ 1dB Gain Compression: $V_{DS} = 1\text{V}$, $I_{DS} = 10\text{mA}$	$f = 12.0\text{GHz}$	dBm		17.5	
G_{1dB}	1dB Compressed Gain: $V_{DS} = 1\text{V}$, $I_{DS} = 10\text{mA}$	$f = 12.0\text{GHz}$	dB		8.5	
g_m	Transconductance: $V_{DS} = 2.5\text{V}$, $V_{GS} = 0\text{V}$		mA/V	25	55	
I_{DSS}	Saturated Drain Current: $V_{DS} = 2.5\text{V}$, $V_{GS} = 0\text{V}$		mA	40	50	90
V_P	Pinch-off Voltage: $V_{DS} = 2.5\text{V}$, $I_{DS} = 1\text{mA}$		V	-1.0	-1.5	-0.5

Note:

1. Refer to PACKAGING section "Tape and Reel Packaging for Surface Mount Semiconductors".

ATF-13336 Absolute Maximum Ratings

Symbol	Parameter	Units	Absolute Maximum ⁽¹⁾
V_{DS}	Drain-Source Voltage	V	+5
V_{GS}	Gate-Source Voltage	V	-1
V_{GD}	Gate-Drain Voltage	V	+3
I_{DS}	Drain Current	mA	I_{DSS}
P_T	Power Dissipation ⁽²⁾	mW	225
T_{CH}	Channel Temperature	°C	175
T_{STG}	Storage Temperature	°C	-55 to +175

Thermal Resistance: $\theta_{JC} = 100^\circ\text{C/W}; T_{CH} = 150^\circ\text{C}$
 Liquid Crystal Measurement: $1 \mu\text{m Spot Size}^{(3)}$

Part Number Ordering Information

Part Number	Devices Per Reel	Reel Size
ATF-13336-T11	1000	7"
ATF-13336-S11	10	strip

ATF-13336 Noise Parameters: $V_{DS} = 2.5 \text{ V}, I_{DS} = 20 \text{ mA}$

Freq. GHz	NF ₀ dB	I_{opt}		R _v 50
		Mag	Ang	
10	0.8	.63	93	.27
50	1.1	.47	138	.10
80	1.2	.40	-153	.20
120	1.4	.52	-45	.88
140	1.6	.57	-2	1.3

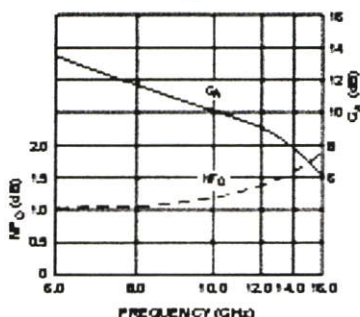
ATF-13336 Typical Performance, $T_A = 25^\circ\text{C}$ 

Figure 1. Optimum Noise Figure and Associated Gain vs. Frequency.
 $V_{DS} = 2.5 \text{ V}, I_{DS} = 20 \text{ mA}, T_A = 25^\circ\text{C}$

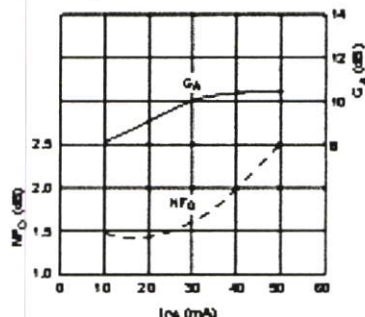


Figure 2. Optimum Noise Figure and Associated Gain vs. I_{DS} .
 $V_{DS} = 2.5 \text{ V}, f = 12.0 \text{ GHz}$

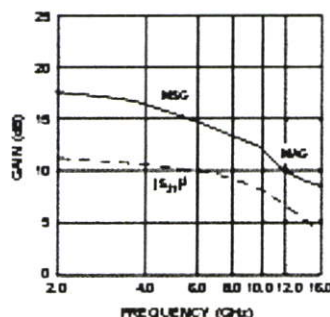


Figure 3. Insertion Power Gain, Maximum Available Gain and Maximum Stable Gain vs. Frequency.
 $V_{DS} = 2.5 \text{ V}, I_{DS} = 20 \text{ mA}$

Typical Scattering Parameters, Common Emitter, $Z_0 = 50 \Omega, T_A = 25^\circ\text{C}, V_{DS} = 2.5 \text{ V}, I_{DS} = 20 \text{ mA}$

Freq. GHz	S_{11}		dB	S_{21}		dB	S_{12}		S_{22}	
	Mag.	Ang.		Mag.	Ang.		Mag.	Ang.	Mag.	Ang.
10	.93	-51	10.3	3.29	127	-27.1	.041	57	.61	-41
30	.88	-55	10.3	3.28	106	-23.1	.030	33	.58	-51
40	.83	-63	10.1	3.19	83	-22.6	.071	25	.57	-57
50	.79	-117	9.9	3.13	63	-20.6	.080	12	.51	-65
60	.69	-112	10.2	3.22	43	-18.9	.111	1	.39	-79
70	.60	-178	10.1	3.21	21	-17.6	.132	-18	.32	-97
80	.51	141	9.8	3.10	-1	-17.3	.137	-83	.31	-112
90	.56	103	8.9	2.80	-26	-16.7	.147	-48	.21	-121
100	.56	71	8.3	2.60	-18	-16.5	.150	-83	.09	-145
110	.58	41	7.6	2.49	-68	-16.8	.145	-78	.07	-89
120	.63	30	6.7	2.17	-90	-17.5	.133	-95	.16	41
130	.65	3	6.0	2.00	-108	-18.3	.121	-107	.19	3
140	.66	-7	5.5	1.89	-126	-18.9	.111	-121	.19	-4
150	.70	-19	4.9	1.76	-144	-19.0	.112	-129	.16	-28
160	.72	-31	4.1	1.63	-175	-19.2	.110	-142	.14	-82

A model for this device is available in the DEVICE MODELS section.

Notes

- Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.
- T_{CH} max measurement = 25°C .
- Derate at $2.5 \text{ mW}/^\circ\text{C}$ for $T_{CH} > 80^\circ\text{C}$.
- Storage above $+100^\circ\text{C}$ may tarnish the leads of this package if difficult to solder into a circuit. After a device has been soldered into a circuit, it may be safely stored up to 175°C .
- The small spot size of this technique results in a higher, though more accurate determination of θ_{JC} than do alternate methods. See MEASUREMENTS section for more information.

2. Microwave electronics switch

SEM Series

SP4T / DC-18 GHz

- 5 Models Available From Stock
- Standard Features Include:
Normally Open and Latching Models
TTL Logic Control, Suppression Diodes,
Indicator Circuits



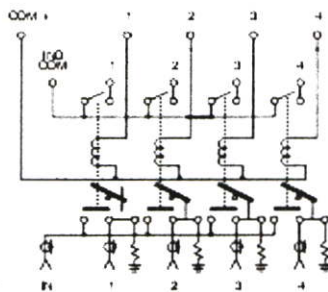
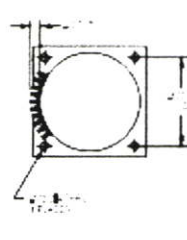
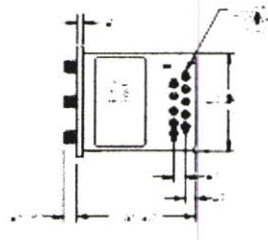
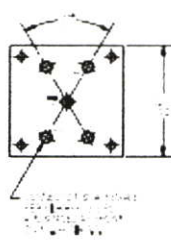
MODEL NO.	FEATURES	ACTUATING CURRENT mA @28 Vdc & 25°C	FREQUENCY RANGE DC-18 GHz	INSERTION LOSS dB (max)	VSWR (max)	ISOLATION dB (min)
SEM143	SP4T (SWA)	140	DC-3	0.2	1.2:1	80
	NORMALLY OPEN		3-6	0.3	1.3:1	70
	INDICATOR CKT		8-12.4	0.4	1.4:1	60
			12.4-18	0.5	1.5:1	60
SEM1430	SP4T (SWA)	140	DC-3	0.2	1.2:1	80
	NORMALLY OPEN		3-6	0.3	1.3:1	70
	INDICATOR CKT		8-12.4	0.4	1.4:1	60
	TTL* SUPPRESSION DIODE		12.4-18	0.5	1.5:1	60
SEM143T	SP4T (SWA)	140	DC-3	0.2	1.2:1	80
	NORMALLY OPEN		3-6	0.3	1.3:1	70
	TERMINATED		8-12.4	0.4	1.4:1	60
	INDICATOR CKT		12.4-18	0.5	1.5:1	60
SEM1430T	SP4T (SWA)	140	DC-3	0.2	1.2:1	80
	NORMALLY OPEN		3-6	0.3	1.3:1	70
SEM1430T-24	SP4T (SWA)	225 @ 24V	DC-3	0.2	1.2:1	80
	NORMALLY OPEN		3-6	0.3	1.3:1	70
	TTL* SUPPRESSION DIODE		8-12.4	0.4	1.4:1	60
	INDICATOR CKT		12.4-18	0.5	1.5:1	60

*APPROX. ALL SWITCHES WITH TTL

1. Selected position of the switch is controlled by TTL Logic High
2. Switch required only normal +28 Vdc for coil (additional 5 Vdc is not required).

3. TTL Logic Voltage Level: Low 0 to 0.8Vdc High 2.5 to 5.0 Vdc
4. TTL Logic Input Current: Low 0mA High 1.0 mA max @ 3.0 Vdc

SEM143T

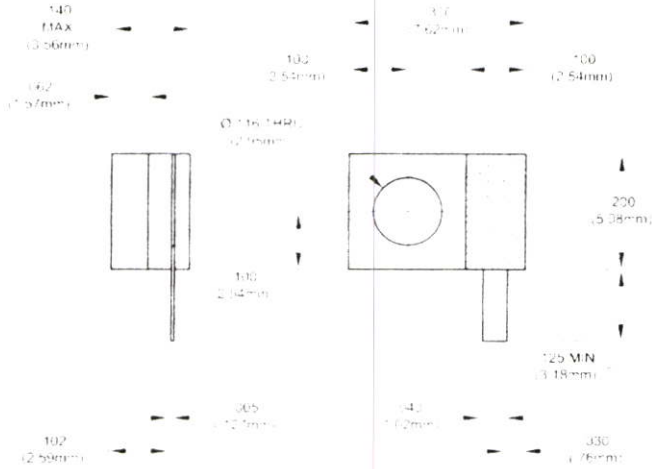


SCHEMATIC SHOWN IN NO OHM TERMINATED POSITION

3. Match Load

HIGH POWER FLANGE MOUNT BERYLLIUM OXIDE TERMINATIONS

10 Watts **Part No. 32-1068**
Termination, Flange Mount



PERFORMANCE SPECIFICATIONS

10 Watts
Part No. 32-1068

Frequency: DC to 10.0 GHz
VSWR (Max): 1.12:1 DC - 4.0
1.40:1 4.0 - 10.0

ประวัติผู้เขียน

นายอดิเรก แรังกสิกรณ์ สำเร็จการศึกษาระดับอนุปริญญา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม จากภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2545 โดยระหว่างศึกษาได้เข้าทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย ประจำห้องปฏิบัติการเครื่องมือทางการแพทย์และสิ่งแวดล้อม ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง