

การศึกษาและพัฒนาระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่อง
แบบช่องเปิดสังเคราะห์

STUDY AND DEVELOPMENT OF A CONTINUOUS WAVE
SYNTHETIC APERTURE RADAR (SAR) SYSTEM

ประจักษ์ ทองจันทร์
PRAJAK TONGJAN

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับรองให้สำเร็จการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและพัฒนาระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่อง
แบบช่องเปิดสังเคราะห์

STUDY AND DEVELOPMENT OF A CONTINUOUS WAVE
SYNTHETIC APERTURE RADAR (SAR) SYSTEM

ประจักษ์ ทองจันทร์
PRAJAK TONGJAN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 74892
วัน,เดือน,ปี..... 15 ต.ค. 2550

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2550

**STUDY AND DEVELOPMENT OF A CONTINUOUS WAVE
SYNTHETIC APERTURE RADAR (SAR) SYSTEM**

PRAJAK TONGJAN

**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 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและพัฒนาระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่อง แบบช่องเปิดสังเคราะห์
นักศึกษา	นาย ประจักษ์ ทองจันทร์
รหัสนักศึกษา	45064010
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. อนุพงษ์ สรงประภา

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการศึกษาและพัฒนาระบบเรดาร์แบบช่องเปิดสังเคราะห์ (Synthetic Aperture Radar, SAR) โดยใช้เทคโนโลยีของคลื่นต่อเนื่อง (Continuous Wave, CW) ซึ่งเป็นจุดเด่นเหนือระบบเรดาร์แบบช่องเปิดสังเคราะห์แบบทั่วไป การประมวลผลภาพ ในเงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ คือ ระยะห่างระหว่างวัตถุกับสายอากาศ ขนาดของช่องสังเคราะห์ สำหรับระบบต้นแบบอัตโนมัติ ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีการเลื่อนวัตถุด้วยสเตปมอเตอร์ และใช้สายอากาศแบบฮอร์น ในการรับส่งสัญญาณ ต่อเข้ากับ HP8511A Frequency Converter และ HP8510C Network Analyzer ทำให้วัดทั้งขนาดและเฟสของคลื่นได้พร้อมกัน ในช่วงความถี่ 9.1-9.6 กิกะเฮิรตซ์

Thesis	Study and Development of aContinuous Wave Synthetic Aperture Radar (SAR) System
Student	Mr.Prajak Tongjan
Student ID.	45064010
Degree	Master of Science
Program	Applied Physics
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Anupong Srongprapa

ABSTRACT

This Thesis demonstrates Study and Development of a synthetic aperture radar (SAR) using continuous wave (CW) technology and it's advantages over conventional SAR systems. SAR imaging algorithm in situation is range between horns antenna with object and width of aperture. This automatic SAR system that is controlled by computer is operating at 9.1-9.6 GHz and using horns antennas connect to HP8511A Frequency Converter for generate and detect single. All signal magnitude and phase is measured by HP8510C Network Analyzer and scanned on each position by stepping motor.

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษารองศาสตราจารย์ อนุพงศ์ สรวงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ท่านให้ความช่วยเหลือ คำชี้แนะช่วยแก้ไขปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้และคอยแนะนำขอบปรองต่างๆ เพื่อที่จะได้นำไปแก้ไขให้ดีขึ้น และขอขอบคุณทางภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ข้าพเจ้าได้หยิบยืมอุปกรณ์, เครื่องมือและสถานที่ ที่ใช้ดำเนินการวิจัยนี้ ขอขอบคุณเพื่อน ๆ จากห้องปฏิบัติการไมโครเวฟและห้องปฏิบัติการเครื่องมือแพทย์และสิ่งแวดล้อม ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณผลงานวิจัยและเอกสารอ้างอิงต่างๆ ที่ข้าพเจ้าได้หยิบยืมมา ที่ทำให้เกิดความสนใจในการทำงานวิจัยนี้ ซึ่งข้าพเจ้าคาดหวังงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจในทางด้านไมโครเวฟกำลังงานต่ำ เพื่อนำไปพัฒนาต่อไปในวันข้างหน้า

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดียิ่งให้แก่ข้าพเจ้า

ประจักษ์ ทองจันทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ระบบเรดาร์แบบช่องเปิดสังเคราะห์ (Synthetic Aperture Radar: SAR).....	4
2.1.1 SAR-C/X-SAR.....	6
2.2 การตรวจจับพัลส์ และความละเอียด.....	9
2.3 การประมวลผลช่องเปิดสังเคราะห์.....	11
2.3.1 การทำย้อนกลับ.....	14
2.3.2 อัลกอริทึมการสร้างภาพกลับ.....	18
2.4 ระบบไมโครเวฟที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.4.1 แหล่งกำเนิดแบบ Synthesizer	19
2.4.2 ไครคชันนัลคัปเปิลเลอร์ (Directional Coupler).....	19
2.4.3 สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด (Pyramidal Horn Antenna).....	21
2.4.4 เครื่องแปลงความถี่ (Frequency converter).....	22
2.4.5 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายวงจรไมโครเวฟ (Microwave network analyzer).....	23

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	25
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้.....	25
3.2 ระบบอุปกรณ์สำหรับวัดสัญญาณไมโครเวฟ.....	26
3.2.1 ระบบเครื่องมือวัด.....	27
3.2.2 ไคเรคชันนัลคัปเปิลเลอร์ (Directional Coupler).....	28
3.2.3 สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด (Pyramidal Horn Antenna).....	29
3.2.4 ชุดเลื่อนตำแหน่งวัตถุ.....	30
3.2.5 แผงดูดซับคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Absorber Panel).....	31
3.3 การทดลองระบบเรดาร์แบบช่องเปิดสังเคราะห์.....	31
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	35
4.1 การวัดค่าคุณสมบัติของระบบสายอากาศ.....	35
4.2 การหาระยะพิสัยของระบบ.....	37
4.3 การสร้างภาพระบบเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์.....	39
4.3.1 เมื่อมีวัตถุหนึ่งชิ้นระยะ 2.6 เมตร.....	39
4.3.2 เมื่อมีวัตถุสองชิ้นระยะ 3.0 เมตร ซึ่งอยู่เหลื่อมจากกัน 0.8 เมตร.....	41
4.3.3 เมื่อมีวัตถุหนึ่งชิ้นระยะ 1.5 เมตร.....	43
4.3.4 เมื่อมีวัตถุสองชิ้นระยะ 1.5 เมตร.....	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	47
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	47
5.1.1 ระบบไมโครเวฟ.....	47
5.1.2 ขนาดพื้นที่เก็บข้อมูล.....	47
5.1.3 ความสมบูรณ์ของภาพ.....	47
5.1.4 เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูล.....	47
5.2 ปัญหาที่พบ.....	47
5.3 แนวทางการพัฒนา.....	48
5.3.1 พัฒนาระบบไมโครเวฟ.....	48
5.3.2 พัฒนาด้านการเก็บข้อมูลและการสร้างภาพ.....	48

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	49
ภาคผนวก.....	50
ภาคผนวก ก. แสดงแผนภาพขั้นตอนการทำงานและโปรแกรมในการสร้างภาพกลับ.....	51
ภาคผนวก ข. แสดงแผนภาพขั้นตอนการทำงานและโปรแกรม MATLAB ในการสร้างภาพกลับ.....	60
ภาคผนวก ค. ข้อมูลอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	65
ประวัติผู้เขียน.....	88

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพจากเรดาร์ของเอเซียตะวันออกเฉียงใต้.....	5
2.2 SAR-C/X-SAR จากดาวเทียมนอกโลกที่โคจรรอบโลกห่าง 225 กิโลเมตร จาก Courtesy NASA/JPL.....	7
2.3 ภาพ SAR-C ของเมือง Salt Lake City รัฐยูทาห์ แสดงให้เห็นถึงทะเลสาบ ภูเขาและเมือง จาก Courtesy NASA/JPL.....	8
2.4 รูปภาพ X-SAR เป็นรูปจากด้านบนมองลงมายังภูเขา Rocky 150 ไมล์จากทางตะวันตกของ Great Falls, Montana รูปนี้แสดงให้เห็นถึงผลของการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก โดยเห็น จากลักษณะที่เป็นคลื่นทำให้เห็นว่าภาคพื้นดินถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ ๆ จาก Courtesy ของ NASA/JPL.....	8
2.5 สรุปความความสัมพันธ์ของสมการ.....	10
2.6 แสดงตัวอย่างของสัญญาณที่มีความสัมพันธ์กันของ ออโตครอริเลชันฟังก์ชัน และเพาเวอร์สเปกตรัม.....	11
2.7 ระบบการเกิดภาพเรขาคณิตของ SAR สำหรับกรณีทั่วไปของ โหมค squint; กรณีด้านข้างตรง ไปยัง สี่เหลี่ยมสี่ด้านบนการสังเคราะห์ช่องเปิดตรงกับตำแหน่งของการติดต่อสื่อสาร/การรับ เรดาร์สำหรับให้ จุดสี่เหลี่ยมสี่เท่าคือตำแหน่งอื่นๆที่อาจเป็น spatial coordinated สำหรับเรดาร์ ตามแนวการบิน.....	12
2.8 รูปนี้ครอบคลุม spatial frequency ใน monostatic SAR (broadside case) อยู่บนพื้นฐานของการ ทำกลับ.....	17
2.9 โครงสร้างระบบ SAR ที่ใช้.....	19
2.10 ไคเรชันแนลคัปเปลอร์.....	20
2.11 สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด.....	21
2.12 โครงสร้างการทำงานของมิกเซอร์.....	22
2.13 องค์ประกอบเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายวงจรมิโครเวฟ.....	24
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	26
3.2 ระบบวัดสัญญาณไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3.3 แผนภาพระบบวัดสัญญาณไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง.....	27
3.4 ไคเรชันแนลคัปเปลอร์.....	29
3.5 สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด.....	29

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
3.6 ชุดเลื่อนตำแหน่งวัตถุ.....	30
3.7 แผงควบคุมขับเคลื่อนไมโครเวฟ.....	31
3.8 ระบบเรดาร์แบบช่องเปิดสังเคราะห์.....	32
3.9 ลักษณะของการจัดวางวัตถุเพื่อการทดลอง.....	33
3.10 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบเรดาร์แบบช่องเปิดสังเคราะห์.....	33
3.11 แผนภาพแสดงคำนวณความละเอียดด้านทิศการเคลื่อนที่ของระบบเรดาร์แบบช่องเปิดสังเคราะห์.....	34
4. 1 เครื่อง HP 8511A Frequency Converter Test Set ที่ใช้ในการทดลอง.....	37
4.2 แผนภาพการต่ออุปกรณ์ในการทดลอง.....	36
4.3 สัญญาณแอมพลิจูดจากพอร์ท a1 ในช่วงความถี่ 9.1 ถึง 9.6 กิกะเฮิรตซ์.....	36
4.4 สัญญาณแอมพลิจูดจากพอร์ท b1 ในช่วงความถี่ 9.1 ถึง 9.6 กิกะเฮิรตซ์.....	37
4.5 สัญญาณแอมพลิจูด ในช่วงความถี่ 9.1 ถึง 9.6 กิกะเฮิรตซ์ จำนวน 3201 ข้อมูล.....	38
4.6 ผลของการการแปลงฟูเรียร์ เมื่อวางวัตถุที่ระยะ 3 เมตร.....	38
4.7 แสดงการจัดวางวัตถุที่ใช้ในการทดลอง.....	39
4.8 แสดงแอมพลิจูดของข้อมูลที่วัดมาได้.....	39
4.9 แสดงแอมพลิจูดของการแปลงฟูเรียร์.....	40
4.10 แสดงภาพของวัตถุ.....	40
4.11 แสดงการจัดวางวัตถุที่ใช้ในการทดลอง.....	41
4.12 แสดงแอมพลิจูดของข้อมูลที่วัดมาได้.....	41
4.13 แสดงแอมพลิจูดของการแปลงฟูเรียร์.....	42
4.14 แสดงภาพของวัตถุ.....	42
4.15 แสดงการจัดวางวัตถุที่ใช้ในการทดลอง.....	43
4.16 แสดงแอมพลิจูดของข้อมูลที่วัดมาได้.....	43
4.17 แสดงแอมพลิจูดของการแปลงฟูเรียร์.....	44
4.18 แสดงภาพของวัตถุ.....	44
4.19 แสดงการจัดวางวัตถุที่ใช้ในการทดลอง.....	45
4.20 แสดงแอมพลิจูดของข้อมูลที่วัดมาได้.....	45
4.21 แสดงแอมพลิจูดของการแปลงฟูเรียร์.....	46
4.22 แสดงภาพของวัตถุ.....	46

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบเรดาร์แบบช่องเปิดสังเคราะห์ (Synthetic Aperture Radar: SAR) เป็นระบบที่มีการประยุกต์ติดตั้งสายอากาศ ส่งและรับคลื่นในช่วงไมโครเวฟ บนเครื่องบินหรือดาวเทียม เพื่อนำไปใช้งานการสำรวจระยะไกล (Remote sensing) ในการสำรวจสภาพแวดล้อมและการกระจายของทรัพยากรธรรมชาติต่างๆ ทั้งส่วนบนและที่ระยะลึกลงไปใต้ผิวโลกเท่าที่คลื่นจะเดินทางไปได้ ก่อนที่จะมีการสะท้อนกลับ

ข้อมูลของภาพที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นกับอันตรกิริยา (Interaction) ของแต่ละช่วงความยาวคลื่นกับธรรมชาติการสะท้อน (Reflection) การส่งผ่าน (Transmission) และการดูดกลืน (Absorption) ของตัวกลางและพื้นผิว ข้อมูลเหล่านี้ เป็นประโยชน์ต่อการสำรวจระยะไกล (Remote sensing) ในงานต่างๆ ตัวอย่างเช่น การใช้ข้อมูลจากดาวเทียมสำรวจอวกาศบริเวณที่ประสบอุทกภัยเพื่อให้ความช่วยเหลือแก่ประชาชนได้ทันทั่วถึง ที่ในสภาวะท้องฟ้าปิดทัศนวิสัยเลวร้าย ท่ามกลางพายุฝน การสำรวจรวบรวมข้อมูลแปลงนาทุ่งของประเทศในเขตร้อนในช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อการวางแผนจัดการการควบคุมสภาพแวดล้อม การฉายคลื่นไมโครเวฟความถี่ต่ำจากดาวเทียมไปสะท้อนพื้นผิวโลก บริเวณภูมิประเทศที่ถูกปกคลุมไปด้วยป่าไม้ ก็จะสามารถทราบถึงการกระจายตัวของแร่ธาตุบนผิวดินได้ เนื่องจากคลื่นนั้นสามารถทะลุผ่านกิ่งไม้ ใบไม้ ได้โดยที่มีการสะท้อนและดูดกลืนต่ำ นอกจากนี้ยังมีประโยชน์ด้านความมั่นคงในการสำรวจภูมิทัศน์ ติดตามตรวจสอบการเคลื่อนย้ายกองกำลัง ยานรบต่างๆ ของฝ่ายตรงข้ามได้ตลอดทั้งกลางวันกลางคืน อย่างไรก็ตาม ระบบของการประมวลผลภาพจากสัญญาณการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้นั้น จะต้องมีอุปกรณ์ ที่ยุ่งยากซับซ้อนกว่ากรณีของภาพที่ได้จากการใช้กล้องถ่ายรูป โดยใช้แฟลชฉายแสงที่ตามองเห็นไปบนพื้นผิว

ปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากระบบที่ติดตั้งบนดาวเทียมของต่างประเทศซึ่งให้ข้อมูลที่จำกัดตามพิสัยการโคจร การจัดซื้อระบบและดาวเทียมซึ่งมีวงโคจรที่เหมาะสมกับการสำรวจอาณาบริเวณของประเทศไทยโดยเฉพาะนั้นเสียค่าใช้จ่ายที่สูงมาก หากบุคลากรในประเทศสามารถพัฒนาและสร้างระบบได้เอง โดยในอนาคตอาจจะมีดาวเทียมที่ใช้ระบบเรดาร์แบบช่องเปิดสังเคราะห์เป็นของตนเอง จะทำให้ลดการพึ่งพาจากต่างประเทศและลดรายจ่ายได้อีกเป็นจำนวนมาก

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อ ศึกษาและออกแบบพัฒนาระบบเรดาร์แบบช่องเปิดสังเคราะห์ (SAR) ต้นแบบ เพื่อนำมาทดลอง และศึกษาถึงการทำงาน เงื่อนไขและการประมวลผลภาพ ในการที่จะนำไปสู่การสร้างระบบที่ใช้งานได้จริงในอนาคต

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

ในระบบเรดาร์ (Radar) แบบเดิมนั้น ความละเอียด (Resolution) ในการแยกแยะภาพของวัตถุ จะแปรผันตามความยาวคลื่น (λ) และระยะทางระหว่างวัตถุกับแผงหรือช่องเปิด (Aperture) ของส่วนรับสัญญาณคลื่น แต่จะแปรผกผันกับขนาดพื้นที่ของช่องเปิด (ซึ่งในกรณีของการถ่ายภาพโดยใช้แสง ขนาดพื้นที่ของช่องเปิดก็คือ พื้นที่ของหน้ากล้อง) ดังนั้นที่ระยะทางไกลจากพื้นผิวที่ต้องการบันทึกภาพ เท่ากัน คลื่นไมโครเวฟซึ่งมีความยาวคลื่นมากกว่าคลื่นแสงในระดับ 100,000 เท่า การที่จะได้ภาพซึ่งมีคุณภาพของรายละเอียดที่เท่ากัน ก็จะต้องให้พื้นที่ของจานสายอากาศ ซึ่งก็คือ ช่องเปิดรับสัญญาณคลื่น ของระบบไมโครเวฟจะมีขนาดใหญ่กว่าหน้ากล้องถ่ายรูปถึง 100,000 เท่า ซึ่งก็เช่นกัน จะได้สายอากาศ มีความกว้างและยาวถึงด้านละ 5 กิโลเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่เกินกว่าจะสร้างหรือติดตั้งบนดาวเทียมหรือเครื่องบิน

ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้เทคนิคของเรดาร์ แบบช่องเปิดสังเคราะห์ (SAR) ซึ่งใช้ประโยชน์ของการที่ดาวเทียมหรือเครื่องบินเครื่องที่ในแนวเส้นตรง (เช่น แกน X) ขนานไปกับผิวโลกและขนานกับแนวยาวของสายอากาศ ด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่ง V_x เมตรต่อวินาที โดยทำการส่งและรับคลื่นสะท้อนกลับอยู่ตลอดเวลา ผลก็คือข้อมูลที่ได้ใน 1 วินาที จากสายอากาศรับส่งคลื่นที่มีขนาดกว้าง a ยาว b มีพื้นที่ $a \cdot b$ ตารางเมตร มีการเคลื่อนที่อยู่ นั้น จะเทียบได้กับข้อมูลที่ได้จากสายอากาศอยู่นิ่งที่มีขนาด $V_x \cdot b$

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาและออกแบบระบบเบื้องต้นของ SAR แบบคลื่นต่อเนื่องกำลังต่ำในย่านความถี่ 9.1 ถึง 9.6 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยจะจำลองระบบลงมาให้ใช้กับการมองวัตถุระยะใกล้เฉพาะแนวราบในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ชุดสคอปมอเตอร์ในการเลื่อนวัตถุและใช้เครื่อง HP8511A Frequency converter ทำหน้าที่รับสัญญาณจากระบบสายอากาศส่งและรับคลื่น ซึ่งผลิตเป็นแหล่งกำเนิด HP83620B โดยมีการวัด การควบคุมและประมวลผลข้อมูลโดยใช้เครื่อง HP8510C

Network analyzer ซึ่งระบบทั้งหมดนี้จะถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ผ่านทาง GPIB port และจะนำข้อมูลที่ได้อมาประมวลผลภาพด้วย โปรแกรม MATLAB ตามที่คำนวณไว้ก่อนการทดลอง

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงบทนำความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ ระบบไมโครเวฟ ฟิสิกส์ของการแผ่คลื่น การประมวลผลพัลส์ การประมวลผลช่องเปิดสังเคราะห์เป็นต้น

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการสร้างระบบ SAR และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย การทดลองและเทคนิคการประมวลผลภาพวัตถุจากการทดลอง

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดสอบหาค่าสมรรถนะของระบบ พารามิเตอร์ที่ใช้และผลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับทางทฤษฎี

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในที่นี้จะได้กล่าวถึงหลักการในส่วนของระบบเรดาร์แบบช่องเปิดสังเคราะห์ การประมวลผลและการสร้างภาพกลับ รวมถึงหลักการทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้งาน

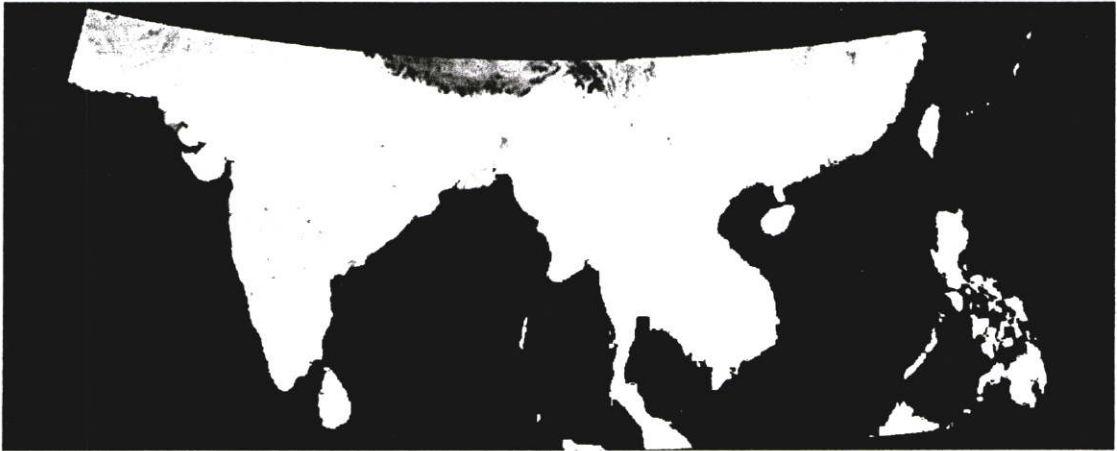
2.1 ระบบเรดาร์แบบช่องเปิดสังเคราะห์ (Synthetic Aperture Radar: SAR)

การสร้างภาพในเทคนิค SAR นี้ ใช้ประโยชน์จากการเลื่อนกราด (scan) ความถี่และการแบ่งสำรวจพื้นที่ซึ่งจะแสดงค่าในตัวตรวจจับเรดาร์ กรณีของเรดาร์ที่ใช้ช่องเปิดขนาดใหญ่สำหรับบันทึกสัญญาณคลื่น ความละเอียดของภาพภูมิทัศน์สามารถหาได้โดยผลการสังเคราะห์ข้อมูลการสังเกตวัตถุที่ความถี่ต่างกันและมุมต่างกันมารวมกัน ความละเอียดจะเหมาะสมกับแถบความถี่กว้างและช่องเปิดขนาดใหญ่ซึ่งสามารถหาได้จากการรวมสัญญาณจากหลายแถบความถี่แคบกับมุมการสังเกต คำว่าสังเคราะห์มาจากการสังเคราะห์ของเรดาร์ที่มีลำสัญญาณแคบ

เซ็นเซอร์ของไมโครเวฟของ SAR มีลักษณะเด่นกว่าเซ็นเซอร์รับภาพแบบอื่น ๆ สำหรับเรื่องย่านความถี่ไมโครเวฟซึ่งถูกเลือกใช้สำหรับการทะลุทะลวงระบบบรรยากาศและพื้นดิน มีช่วงการวัดที่แม่นยำสูงและสามารถแยก (Resolution) ภาพที่ความละเอียดสูงได้

ในกรณีการเก็บข้อมูลภาพอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลภาพต้องสามารถเชื่อมกันได้อย่างฉับไว ซึ่งเมื่อมีขนาดข้อมูลขนาดใหญ่ หากภาพนั้นไม่ชัดเจนอาจมีการเชื่อมข้อมูลที่ผิดพลาดได้ การตัดสินใจทำให้อยู่บนพื้นฐานของข้อมูลที่มีอยู่ ตาของมนุษย์ถูกฝึกมาเพื่อการมองและโฟกัสจุดที่มีค่าความเปรียบต่างสูงและจะสั่งการเพื่อวิเคราะห์ให้เกิดเป็นภาพ ภาพที่มองเห็นได้ดีจะเกิดที่บริเวณขอบของสีและเฉดสีนั้นคือต้องทำการผลิตภาพให้ได้ขอบที่มีความคมชัดและมีค่าความเปรียบต่างสูง นี่จะเป็นรูปแบบทั่วไปในการมองเห็นของตามนุษย์

การใช้คลื่นไมโครเวฟมีข้อดี 3 ข้อที่ดีกว่าการมองภาพวัตถุโดยใช้แสง กล่าวคือ สามารถทะลุทะลวงผ่านฝน ก้อนเมฆ คิว้น ผุ่นผง และ ประการที่สองไม่ขึ้นอยู่กับสถานะแสงของอาทิตย์ว่าจะมีมากหรือน้อย สภาพกลางวันหรือกลางคืน และสุดท้ายคือสามารถทะลุผ่านพื้นดินหรือแม้แต่น้ำเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตได้ ความสามารถของสัญญาณเรดาร์ที่ทะลุผ่านนี้จะแปรผันตาม ค่าความยาวคลื่น โดยที่ความยาวคลื่นยาวกว่าและมีอำนาจทะลุทะลวงสูง เมื่อเรดาร์กระทบผืนน้ำหรือวัตถุนั้นและมีการสะท้อนกลับของพลังงาน จะทำให้เกิดความเปรียบต่างที่มีขนาดใหญ่ได้ ความถี่ของไมโครเวฟจาก 300 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 100 กิกะเฮิร์ตซ์ จะมีความยาวคลื่น 1 เมตร ถึง 3 มิลลิเมตรตามลำดับ



รูปที่ 2.1 ภาพจากเรดิโอมิเตอร์ของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

เซ็นเซอร์ไมโครเวฟจะถูกแบ่งเป็นสองแบบคือ แอกทีฟ (active) และแพสซีฟ (passive) เซ็นเซอร์แบบแพสซีฟที่วัดพลังงานในการแผ่รังสีคลื่น ไมโครเวฟย่านความถี่สูง ไปจนถึงมิลลิเมตรเวฟ (millimeter - wave) จากเป้าหมายซึ่งจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิทางกายภาพของวัตถุ เรียกว่า เรดิโอมิเตอร์ (Radiometer) และจำเป็นต้องมีตัวรับสัญญาณที่มีเซนซิวิตี (sensitivity) สูง เพื่อตรวจจับพลังงานที่มีขนาดเล็กที่ถูกปล่อยออกมาโดยผิวโลก ความละเอียดของเรดิโอมิเตอร์ มาจากความกว้างของสายอากาศ และแนวของการสแกน รูปที่ 2.1 แสดงจุดความเปรียบต่างที่อุณหภูมิสว่างจะเห็นว่ายอดเขาหิมาลายันที่เป็นจุดสูงสุดของพื้นดินเห็นได้ว่าเป็นกว่าเมื่อเทียบกับบริเวณรอบ ๆ ซึ่งรูปเรดิโอมิเตอร์เหนือภาคพื้นอินเดียนี้พบว่ามีความเย็นใน Tibetan Plateau เทียบกับที่พื้นดินที่อุ่นกว่าด้วยความละเอียด 12.5 x 12.5 กิโลเมตร

ลักษณะของรูปเรดิโอมิเตอร์คือการเปรียบต่างของอุณหภูมิ ความสว่าง ที่เป็นลักษณะอุณหภูมิทางกายภาพของวัตถุที่ปล่อยออกมา ความสามารถในการปล่อยจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ความสว่างถึงอุณหภูมิทางกายภาพซึ่งมีค่าจาก 0 ถึง 1 วัตถุที่เป็น โลหะค่าที่ปล่อยคือ 0 และเป็นสีดำ ขณะที่สำหรับพื้นดินค่าจะอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.7 ส่วนสำหรับมหาสมุทรและทะเลสาบจะมีค่าการปล่อยที่ต่ำดังนั้นภาพที่ปรากฏจึงเย็นกว่าพื้นดิน

เซ็นเซอร์แบบแอ็กทีฟ จะส่งคลื่นไปยังวัตถุและตรวจรับคลื่นที่สะท้อนกลับ การส่งผ่าน และการรับสัญญาณจะถูกเปรียบเทียบ โดยใช้กระบวนการทางเทคนิคที่รู้จักกันว่า Coherent processing เซ็นเซอร์แบบแอ็กทีฟจะถูกเรียกว่า เรดาร์ (Radio Detection and Ranging; RADAR) การแสดงผลเรดาร์โดยทั่ว ๆ ไปมักอิงกับจอร์จกลสมส์เขียวที่ซึ่งมีรูปแบบของการสื่อความหมายบอกตำแหน่ง วัตถุด้วยการสแกนลำแสงเป็นวงกลมที่หมุนวนรอบจุดศูนย์กลาง เป้าหมายที่ถูกแสดงจะเป็นจุดสว่างเมื่อถูกตรวจจับ ซึ่งเอาไว้ใช้บอกตำแหน่งระยะใกล้ไกลของเป้าหมายห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่น เพราะสามารถวัดระยะทางของวัตถุอย่างถูกต้องแม่นยำ

สัญญาณเรดาร์สามารถที่จะคัดแปลงแก้ไขหรือกรองเข้าสู่รูปแบบที่ซึ่งสามารถแสดงข้อมูลในเชิงปริมาณของความแปรปรวนต่างได้ คอปเพลอร์เรดาร์ (คอปเพลอร์)ใช้ในการพยากรณ์อากาศซึ่งจะให้สีของแผนที่เป็นสีสว่าง ซึ่งจะทำให้เห็นถึงบริเวณที่มีพายุที่มีการเคลื่อนที่ไปบริเวณไหน การแสดงผลภาพของระบบเรดาร์ไม่ได้ใช้สีที่แตกต่างไปจากสีที่ตามองเห็น สมบัติการแผ่คลื่นของวัตถุและมุมสะท้อนคลื่นซึ่งถูกกำหนดด้วยรูปร่างตามเรขาคณิต มีผลต่อการจัดเรียงความเข้มหรือเจดสีให้สอดคล้องกัน สำหรับตัวอย่างวัตถุที่เป็นโลหะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะสะท้อนออกเช่นเดียวกับการสะท้อนของแสงที่กระทบกระจกเงา ส่วนวัสดุอื่น ๆ จะดูดพลังงานบางส่วนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และก็มีกรณีเช่นเดียวกับวัตถุทางแสงที่ดูดกลืนพลังงาน ไมโครเวฟอย่างมาก

SAR เป็นเซ็นเซอร์แบบแอ็กทีฟ ใช้เซ็นเซอร์หลายตัวเพื่อผลิตภาพที่มีความละเอียดสูง สัญญาณจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการเมื่อได้รับการออกแบบข้อมูลเช่น ช่วง, ความสูง และสมบัติการมองเห็นภาพของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อินเตอร์พรีมิเตอร์ SAR เป็นระบบที่มีเสารับสัญญาณหลายตัว ถูกเรียงเป็นแนวยาว ระบบ SAR โดยทั่วไปจะถูกประยุกต์ใช้ในทางทหารจะแสดงให้เห็นเป้าหมาย, การสอดแนม, การประเมินการโจมตีเป้าหมาย และเส้นแบ่งแนวเขตชายแดน

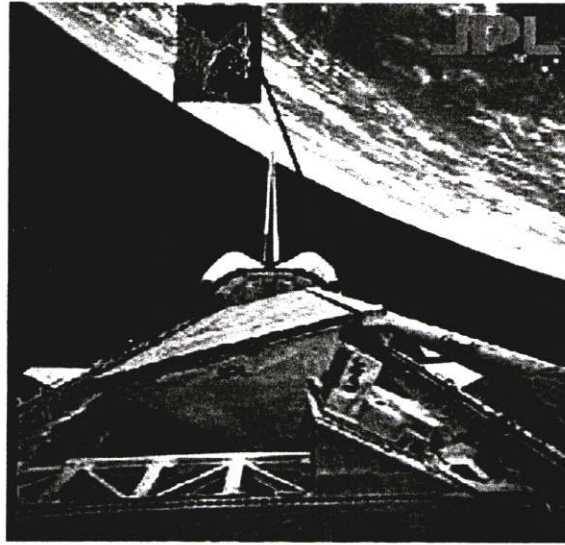
ระบบ SAR ที่ถูกนำมาใช้งานในแต่ละรูปแบบถูกทำให้ต่างกันออกไป ตามแต่องค์ประกอบหลักที่สำคัญ คือ ความถี่ ความละเอียด (Resolution) ลักษณะฐานการเคลื่อนที่ แถบความกว้าง ความโค้งเว้า การกระจาย และระบบพลังงาน อัตราการเกิดภาพ กระบวนการก่อนหรือหลังการบิน น้ำหนัก และราคา การประยุกต์ใช้งานรวมถึงแผนที่ภูมิประเทศ โบราณคดี การเกษตรกรรม และการวางแผนผังเมือง รวมถึงการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก และ สมุทรศาสตร์ ซึ่งระบบ SAR ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ SAR - C / X - SAR จึงต้องการทำความเข้าใจกับระบบ SAR นี้

2.1.1 SAR-C/X-SAR

ระบบ SAR-C/X-SAR และที่ภูมิประเทศที่แตกต่างกันของแผนที่เหนือ Salt Lake City ที่รัฐยูทาห์ จะถูกสร้างโดยใช้ข้อมูลที่ได้จาก SAR-C แสดงให้เห็นในรูป 2.3 ส่วนรูป 2.4 แสดงให้เห็นบริเวณเทือกเขาร็อกกีในรัฐมอนทาน่า โดยใช้ SAR

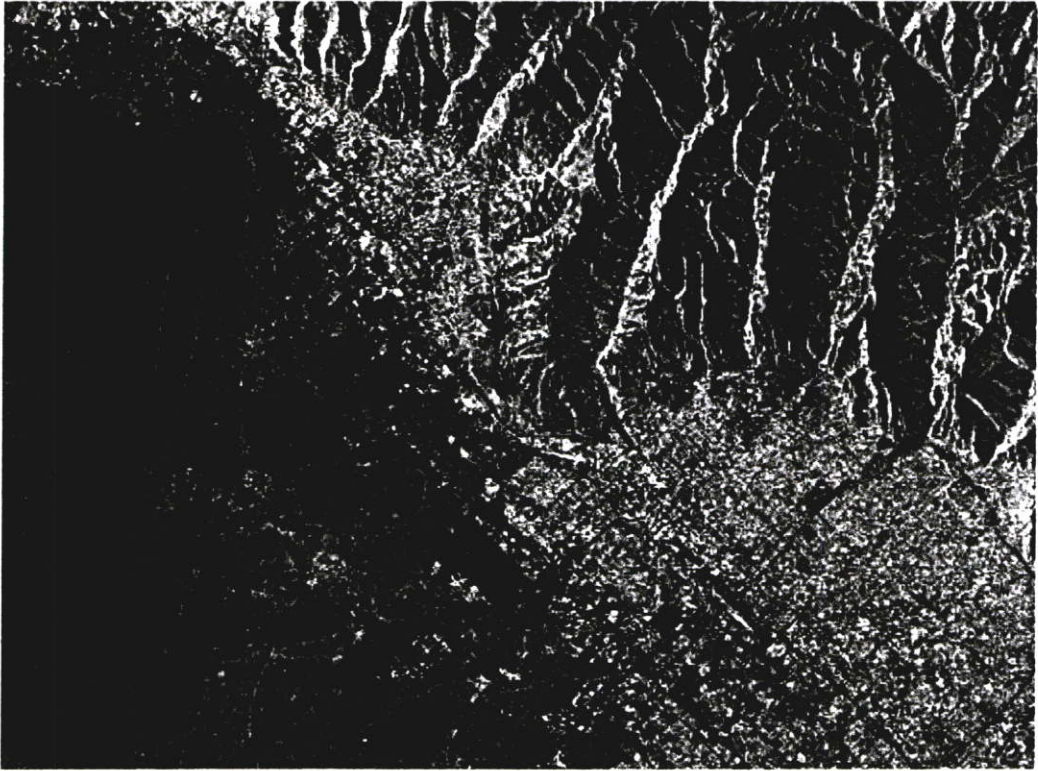
X-SAR คือ ระบบ 9.6 กิกะเฮิรตซ์ ที่พัฒนาโดยโครงการอวกาศของเยอรมันและอิตาลี โดยใช้ดาวเทียมซึ่งแสดงในรูปที่ 2.2 SAR-C ถูกพัฒนาโดยประเทศสหรัฐอเมริกาและใช้งานในคลื่นวิทยุ L และ C ทั้งสองระบบของ SAR ถูกควบคุมโดยดาวเทียมที่โคจรนอกโลก จุดมุ่งหมายแรกคือถ่ายภาพสิ่งมีชีวิตที่หลากหลาย มหาสมุทร หิมะ น้ำแข็งและลักษณะทางกายภาพของโลก ดาวเทียม โคจรห่างจากโลก 225 กิโลเมตร ขณะที่ภาพถ่ายจาก X-SAR จะถ่ายได้ระยะกว้าง 20 ถึง 70 กิโลเมตร ซึ่งมีความละเอียด 25 x 25 เมตร และอัตราการถ่ายภาพอยู่ที่ 17,000 km²/min นี้คือ 250,000 เท่าของความละเอียดที่ถูกปรับปรุงมากกว่าภาพถ่ายที่เป็นแพสซีฟเซ็นเซอร์ของ SSMI

จังหวะที่ถูกส่งออกอยู่ที่อัตรา 1240 ถึง 1736 เฮิร์ตซ์ และพีคที่ส่งผ่านไปมีพลังงานที่ 1.4 กิโลวัตต์ ระบบจะจ่ายพลังงาน 3 ถึง 9 กิโลวัตต์ มันเพียงพอต่อการใช้งานครอบคลุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่มีใช้อยู่บนดาวเทียม ระบบอื่นๆที่อยู่บนดาวเทียมจะต้องปิดลงขณะที่รูปถ่ายกำลังดำเนินการ เครื่องมือซึ่งหนัก 11,000 กิโลกรัม และขั้นตอนจะสมบูรณ์ที่สุดคือหลังจากกลับจากเที่ยวบิน X-SAR ทำการได้ละเอียดเป็นอย่างดีเมื่อมีการโคจรที่ระดับความสูงทำให้สามารถมองเห็นจากรูปถ่ายได้

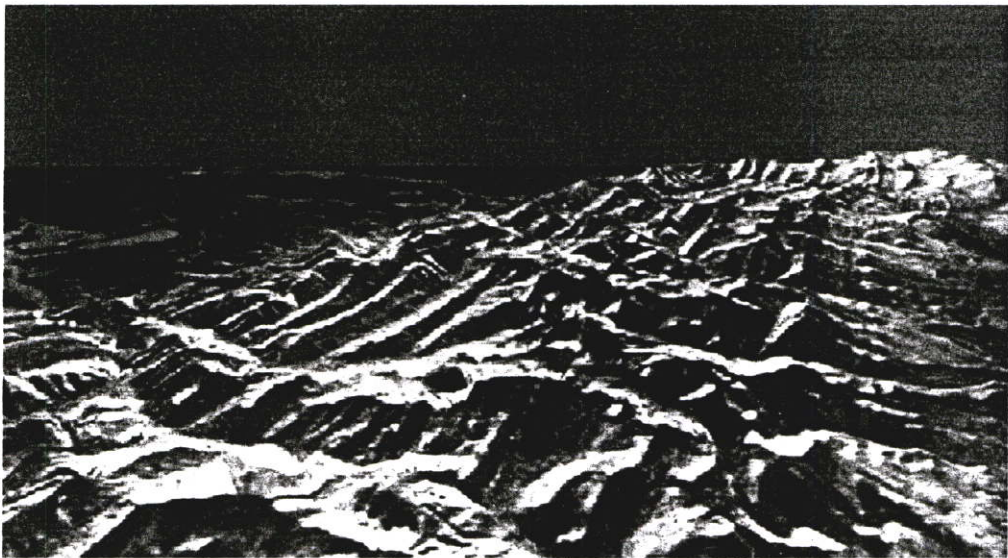


รูปที่ 2.2 SAR-C/X-SAR จากดาวเทียมนอกโลกที่โคจรรอบโลกห่าง 225 กิโลเมตร จาก Courtesy NASA/JPL

รูปที่ 2.3 คือรูป SIR-C ของ Salt Lake City รัฐยูทาห์ ที่ซึ่งเป็นภาพที่มีความเปรียบต่างที่ดีมากระหว่างทะเลสาบกับเมืองและภูเขา ในที่นี้สีและเฉดจะถูกเติมจากภาพ 2 มิติ ให้ปรากฏเป็น 3 มิติ ถนนจะมองเห็นซึ่งจะเห็นว่าตัดผ่านเข้าไปยังเมือง เราจะเห็นภาพสนามบินนานาชาติของ Salt Lake อยู่ข้างใต้ไปทางด้านซ้ายจากตรงกลางของรูปซึ่งปรากฏเป็นรูปสี่เหลี่ยมสีดำ



รูปที่ 2.3 ภาพ SAR-C ของเมือง Salt Lake City รัฐยูทาห์ แสดงให้เห็นถึงทะเลสาบ ภูเขาและเมือง
จาก Courtesy NASA/JPL



รูปที่ 2.4 รูปภาพ X-SAR เป็นรูปจากด้านบนมองลงมายังภูเขา Rocky 150 ไมล์จากทางตะวันตก
ของ Great Falls, Montana รูปนี้แสดงให้เห็นถึงผลของการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก
โดยเห็นจากลักษณะที่เป็นคลื่นทำให้เห็นว่าภาคพื้นถูกแบบออกเป็นสองส่วนใหญ่ ๆ
จาก Courtesy ของ NASA/JPL

รูปที่ 2.4 คือรูปภูเขา Rocky 150 ไมล์จากทางตะวันตกของ Great Falls เป็นรูปแผนที่ที่มองจากด้านบนลงมาสีและเฉดจะใช้ X-SAR โดยจะทำการเป็น 3 มิติ และจะมีประโยชน์ในทางภูมิศาสตร์เพื่อศึกษาผลกระทบของ การเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก รอยคลื่นเห็นได้ง่ายมากจากการที่มีชนกันของแผ่นดินทั้งสอง อะไรที่ไม่ได้แสดงให้เห็นในภาพแผนที่ที่ถ่ายมาได้ ณ ตำแหน่งที่มีความสูงขณะนี้ มันขึ้นอยู่กับความไวในการจับสัญญาณแผนที่ระดับความสูงแบบดิจิทัล (Digital elevation maps) บางทีอาจจะถูกสร้างแล้วโดยจะหารูปร่างพื้นดินที่มีความแม่นยำ นักวิทยาศาสตร์ได้กำหนดการเคลื่อนที่ของแผ่น โลกโดยตรวจสอบภาพถ่ายมากมายในแต่ละปีซึ่งทำให้มีความแม่นยำในการทำนายสภาวะต่างๆที่จะเกิดขึ้น

2.2 การประมวลผลพัลส์

การหาพัลส์โดยการวัดเวลาที่ผ่านไประหว่างเริ่มการส่งสัญญาณและเมื่อสามารถรับสัญญาณกลับมาได้ ระบบโดยทั่วไปจะวัดพัลส์ได้จากพัลส์เรดาห์ ระยะเวลาของรอบการส่งสัญญาณ T ที่ระยะพัลส์ R คือ $2R/c$ เมื่อ c คืออัตราเร็วการแพร่ ดังนั้นขนาดของพัลส์ T เมื่อพัลส์เพิ่มขึ้น $\Delta R = cT/2$ และสามารถแยกระยะสองจุดโดยใช้วิธีนี้ การทำให้ความละเอียดของวัตถุดีขึ้นได้โดยระยะเวลาส่งพัลส์ที่แคบ T และเพิ่มความกว้างของความถี่แถบความถี่ B ซึ่ง $BT = 1$

รูปแบบสัญญาณที่ใช้งานจะมีการเลื่อนไปเล็กน้อยในแต่ละรอบ ทำให้ความละเอียดแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลา จึงต้องมีการทำ ออโตครอริเลชันฟังก์ชัน

$$R(T) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)s^*(t+\tau)dt \quad (2.1)$$

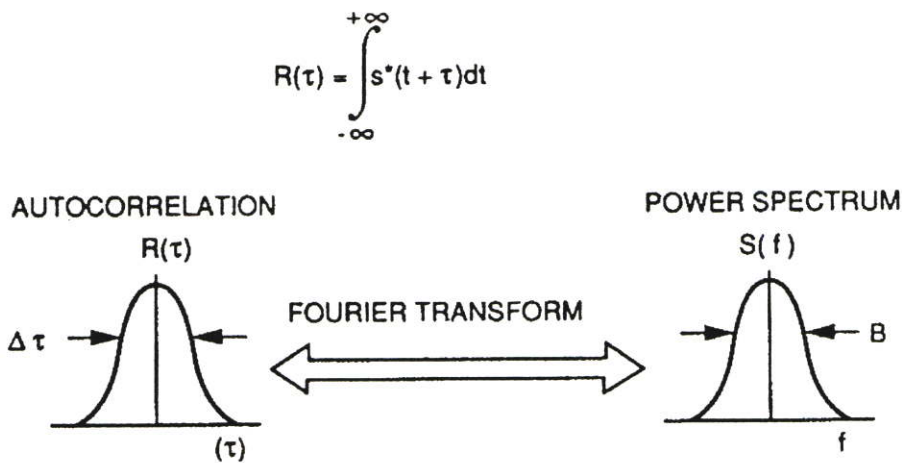
เมื่อ $s(t)$ คือ สัญญาณ, T คือเวลาที่เลื่อนไป และคอนจูเกตถูกเขียนในรูปทั่วไปที่ประกอบไปด้วยสัญญาณเชิงซ้อน ปริมาณ $R(T)$ จะหมายถึงระดับที่รูปแบบสัญญาณตรงกับที่เลื่อนไป คือเป็นฟังก์ชันของการเลื่อนไป ในอุดมคติ $R(T)$ เป็นอิมพัลส์ โดยทั่วไป ออโตครอริเลชันฟังก์ชัน จะมีความกว้างไม่เป็นศูนย์ อธิบายได้อีกอย่างคือจะมีความสัมพันธ์กับความถี่ Δf โดยที่อธิบายสัญญาณได้อีกแบบคือเป็นพาเวอริสเปกตรัม ซึ่งเป็นการกระจายตัวของกำลังต่อหน่วยของแถบความถี่ ที่เป็นฟังก์ชันของแถบความถี่ $R(f)$ และพาเวอริสเปกตรัม $S(f)$ ประกอบขึ้นเป็นคู่ผลการแปลงฟูเรียร์ เขียนได้โดย

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau)e^{-j2\pi f\tau}d\tau \quad (2.2)$$

ความสัมพันธ์ของความไม่แน่นอน ระหว่างคู่ผลการแปลงฟูเรียร์ นั่นคือ $B\Delta\tau = 1$ และสามารถหาขีดจำกัดของ ความละเอียดของพัลส์ได้คือ

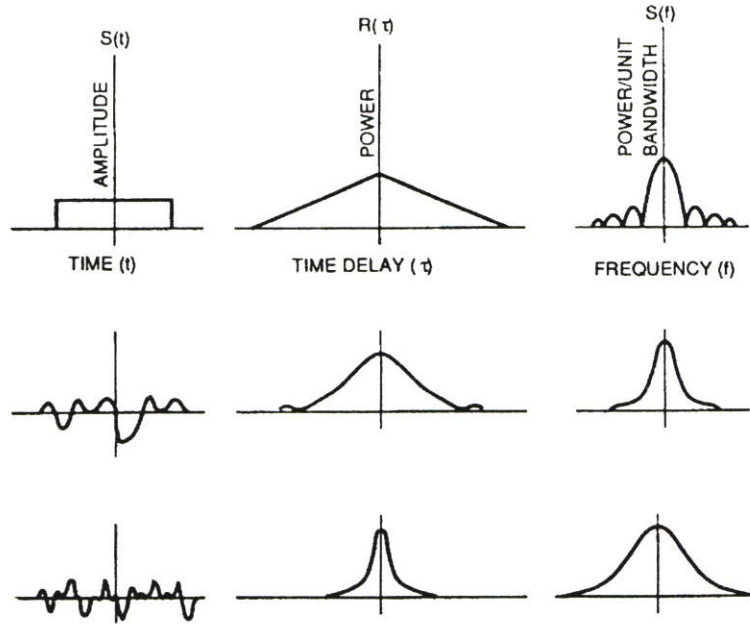
$$\Delta R = c\Delta\tau/2 = c/2B \quad (2.3)$$

สมการ (2.3) แสดงถึง ความละเอียดของพัลส์จะขึ้นอยู่กับความกว้างแถบความถี่ของสัญญาณ และจะไม่ขึ้นกับรูปแบบสัญญาณที่ส่งไป ระยะพัลส์ และความถี่ ดังนั้น เรดาร์สองระบบทำงานที่ 100 GHz กับ 3 GHz แต่ระบบมีความกว้างแถบความถี่ของสัญญาณที่ 1GHz จะให้ผลของความละเอียดเท่ากันแน่นอนที่ระบบความถี่สูงกว่าสามารถให้ ความกว้างแถบความถี่ ได้กว้างกว่า และมีศักยภาพที่จะให้ความละเอียดที่ดีกว่าด้วย



รูปที่ 2.5 สรุปความความสัมพันธ์ของสมการ

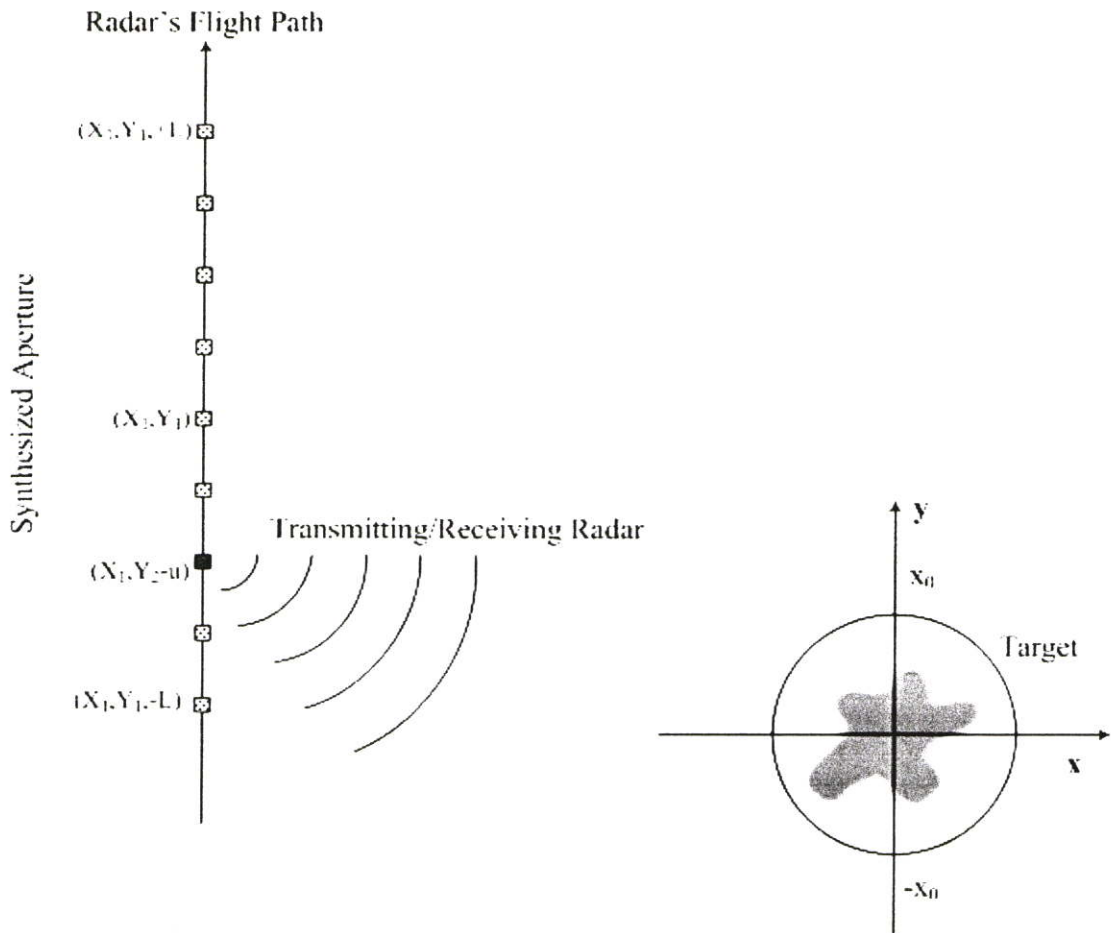
รูปที่ 2.5 สรุปความความสัมพันธ์ของสมการที่กล่าวมา รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างของสัญญาณที่มีความสัมพันธ์กันของ ออโตโครริเลชันฟังก์ชัน และกำลังสเปกตรัม สัญญาณนำเสนอในรูปแบบของการมอดูเลตพาหะ สัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วแสดงถึง สเปกตรัมที่กว้างกว่าและ ออโตโครริเลชันฟังก์ชันที่แคบกว่า ซึ่งจะให้ความละเอียดของพัลส์สูงกว่า



รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างของสัญญาณที่มีความสัมพันธ์กันของ ออโตคอร์เรเลชันฟังก์ชัน และเพาเวอร์สเปกตรัม

2.3 การประมวลผลช่องเปิดสังเคราะห์

ขั้นตอนแรกในการทำย้อนกลับใด ๆ ก็จะได้รับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่แสดงออกมาแล้วถูกบันทึกเป็นสัญญาณ แหล่งกำเนิด และสมบัติของวัตถุที่ทดสอบ นี้ถูกเรียกว่าแบบจำลองระบบของการสร้างภาพกลับ แบบจำลองระบบในทางปฏิบัตินั้นควรจะมีการแสดงให้เห็นอย่างแม่นยำระหว่างวัตถุและแหล่งกำเนิด อย่างไรก็ตามแบบจำลองระบบควรจะได้ผลการคำนวณที่สามารถจัดการย้อนกลับได้ด้วย ต่อจากนั้นเราจะนำเสนอแบบจำลองระบบสำหรับปัญหาการถ่ายภาพ SAR



รูปที่ 2.7 ระบบการเกิดภาพเรขาคณิตของ SAR สำหรับกรณีทั่วไปของโหมด squint; กรณีด้านข้างตรงไปยัง $y_1 = 0$ ที่เหลี่ยมสี่ด้านของการสังเคราะห์ช่องเปิดตรงกับตำแหน่งของการติดต่อสื่อสาร/การรับเรดาร์สำหรับให้ u จุดสี่เหลี่ยมสี่เท่าคือตำแหน่งอื่นๆที่อาจเป็น spatial coordinated สำหรับเรดาร์ตามแนวการบิน

เริ่มโดยพิจารณารูปสองมิติ ระบบจะตรวจสอบลักษณะทางภาคพื้นดินของ SAR: ลักษณะทางเรขาคณิตของพื้นที่ลาดเอียงจะถูกปรับโดยใช้หลักการเดียวกับหัวข้อที่ 5 ในกรณีนี้ทั้งเรดาร์และวัตถุจะถูกสนใจที่ระนาบด้านบน ยกตัวอย่างเช่น $Z = 0$, ใน spatial domain เราจะใช้เวกเตอร์ (x, y) และ (k_x, k_y) ในการพิจารณาตามลำดับของ spatial และ spatial domain สำหรับสัญญาณ spatial domain เช่น $f(x, y)$ มันจะเป็น spatial Fourier transform ซึ่งกำหนดโดย $F(k_x, k_y)$ แกน x จะใช้ช่วงช่วงและแกน y จะระบุช่วงของโดเมนที่ไขว้กัน

ความเร็วเริ่มต้นในสื่อรอบๆเป้าหมาย(น้ำหรืออากาศ) คือ C จำนวนคลื่นของคลื่นที่เดินทางผ่านสื่อตัวกลางที่มีความถี่ ω คือ $k = \frac{\omega}{C}$ สัญญาณเรดาร์ที่ส่งผ่านประกอบด้วยความถี่ที่หลากหลาย เรามีการพัฒนาการวิเคราะห์บนพื้นฐานการบันทึกสัญญาณที่มีความถี่หนึ่ง ๆ (ที่ได้รับจากกระบวนการที่สอดคล้องกันของสัญญาณที่ได้กลับมา) ทำการตรวจสอบกรณีที่เกี่ยวข้องกับการ

ส่งผ่าน/การรับเรดาร์ที่เคลื่อนที่เป็นเส้น $x = X_1$ ใน (x, y) โดเมนเรดาร์นี้ทำการส่งผ่านและในทางเดียวกันจะรับที่ $(X_1, Y_1 + u)$ สำหรับ $u \in [-L, +L]$ (การสังเคราะห์ช่องเปิด) บนระนาบ (x, y) ; X_1 (range), และ Y_1 (ช่วงตรงข้ามที่เชื่อมต่อออกไป) นั้นจะเป็นค่าคงที่โดย มีค่าเป็นศูนย์ (0) ซึ่งสัมพันธ์กับกรณีที่ยาวมาก ซึ่งจะต้องระบุขั้วพิกัด (X_1, Y_1) ถึง (R_0, θ_1) พื้นที่ของวัตถุที่ทดสอบในการถ่ายภาพจะเป็นรูปจานซึ่งมีรัศมี X_0 ศูนย์กลางอยู่ที่จุดกำเนิด ตามรูปที่ 2.7

จะสมมุติฐานว่าลักษณะรัศมีของเรดาร์คือทรงกลม ดังนั้นเฟสรอบๆพื้นผิวทรงกลมจะมีการส่งข้อมูลสะท้อนออกมา มีค่าตัวเลขจากจุดที่ถูกกระจายออกไปจาก (x, y) คือ $2k\sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 + u - y)^2}$ ดังนั้นการสะท้อนของสัญญาณจะเปลี่ยนไป (แอมพลิจูดฟังก์ชันจะถูกเปลี่ยน)

$$s(u, w) = \iint f(x, y) \cdot \exp\left[j2k\sqrt{(x_1 - x)^2 + (Y_1 + u - y)^2}\right] \cdot dx dy \quad (2.4)$$

เมื่อ $f(x, y)$ คือฟังก์ชันของวัตถุที่สะท้อนกลับ เมื่ออินทิเกรตในโดเมน (x, y) จะเป็นพื้นที่เป้าหมายทั้งหมดเช่นในวงกลมรัศมี X_0 ศูนย์กลางจะอยู่ที่จุดกำเนิด

รูปทรงกลมที่มีจำนวนคลื่นเท่ากับ $2k$ ที่ด้านขวาของสมการ (2.4) คือ

$$\exp\left[j2k\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (Y_1 + u - y)^2}\right]$$

ซึ่งจะถูกเรียกว่า Spherical Hankel function ของชนิดที่หนึ่ง อันดับศูนย์ Hankel function จะมีการอินทิเกรตตามมาเป็นตัวแทนของแอมพลิจูดฟังก์ชันและค่าคงที่จะถูกยกเลิก

$$\int_{x/2}^{x/2} \exp\left[j2k\sqrt{(x_1 - x)^2 + (Y_1 + u - y)^2} \cdot \cos\phi + j \cdot 5\phi\right] d\phi \quad (2.5)$$

สมการ (2.5) แทนการแยกออกเป็นส่วนของคลื่นทรงกลมในเทอมของคลื่นระนาบที่เดินทางที่มุม $\phi \in [-\pi/2, \pi/2]$ ใช้ในการวิเคราะห์ขนาดช่องใน spatial domain การอินทิเกรตใน (2) ควรจะคิดทั้งหมดในเทอมของ ϕ โดเมน อย่างไรก็ตามเรากังวลเฉพาะค่าจริงของ ϕ เพราะการวัดระบบบันทึกเฉพาะองค์ประกอบของคลื่นสะท้อนที่ยังคงอยู่ นี่เป็นข้อเท็จจริงที่ช่วงของเป้าหมายที่มีความหมายสำคัญมากกว่าความยาวคลื่นของคลื่นทรงกลม (เช่น $2\pi/2k$)

การเปลี่ยนรูปของ ϕ เป็นไปตามสมการ

$$\phi \equiv \alpha - \beta \quad (2.6)$$

กับ

$$\alpha \equiv \arcsin\left(\frac{k_u}{2k}\right) \quad (2.7)$$

และ

$$\beta \equiv \arcsin\left(\frac{Y_1 + u - y}{\sqrt{(x_1 - x)^2 + (Y_1 + u - y)^2}}\right) \quad (2.8)$$

การหาค่าตัวแปรที่ถูกแปลงจาก ϕ ถึง k_u ในสมการ (2.5) และหลังจากมีการจัดเรียงสมการใหม่ ส่วนหนึ่งจะได้รับจาก spherical Hankel function ตามสมการนี้

$$\int_{-2k}^k \exp\left[j\sqrt{4k^2 - k_u^2}(X_1 - x) + jk_u(Y_1 + u - Y)\right] \times \exp\left[j \cdot 5 \arcsin\left(\frac{k_u}{2k}\right) - j \cdot 5 \arcsin\left(\frac{Y_1 + u - y}{\sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 + u - y)^2}}\right)\right] \frac{dk_u}{\sqrt{4k^2 - k_u^2}} \quad (2.9)$$

สมการ (2.9) เป็นตัวแทนจากสมการ (2.4) ซึ่งเป็นผลที่ได้จากระบบแบบจำลองซึ่งจะถูกใช้ในส่วนถัดไปเพื่อพัฒนาการทำย้อนกลับของระบบการเกิดภาพ SAR

2.3.1 การทำย้อนกลับ

การได้มาของระบบผันกลับของแบบจำลองโดยกระบวนการคอปเพลอร์เราทำการกลับเทอมของเฟสในสมการ (2.9) เข้าไปในฟังก์ชันเชิงเส้นของ (x, y, u) ซึ่งจะเข้าถึงโดยการประโยชน์จากค่าประมาณนี้

$$\arcsin\left(\frac{Y_1 + u - y}{\sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 + u - y)^2}}\right) \approx \frac{u - y}{X_1} + \frac{Y_1}{R_1} \quad (2.10)$$

โดยที่ $R_1 = \sqrt{X_1^2 + Y_1^2}$ การใช้ กระจายอนุกรมเทย์เลอร์ดังสมการที่ได้แสดงไว้ในสมการ (2.10) โดยหาค่าจาก

$$\frac{1}{6} \left(\frac{u - y}{R_1}\right)^2 \ll 1 \quad (2.11)$$

การแทนค่าสูงสุดที่ซึ่ง $y-u$ สามารถหาค่าได้ เช่น $X_0 + L$, ในสมการ (2.11) เราได้รับค่าตามผลลัพธ์นั้นจากสมการ (2.10)

$$\frac{1}{6} \left(\frac{X_0 + L}{R_1} \right)^2 \ll 1 \quad (2.12)$$

ค่าประมาณในสมการ (2.10) จะได้มาเป็นสมการ (2.12) ที่เป็นความสม่ำเสมอของความถี่ของสัญญาณเรดาร์ เช่น ω ตามสมการ (2.12) ซึ่งง่ายในทางปฏิบัติที่ระยะดีเท่ากับการสังเคราะห์ช่องเปิดระยะไกลแล้วสะท้อนกลับเกิดระบบภาพ

การใช้สมการ (2.10) เพื่อขยายฟังก์ชันคลื่นทรงกลมตัวอย่างจากสมการ (2.9) จะได้

$$\int_{-2k}^{2k} \exp \left[j \sqrt{4k^2 - k_u^2} (X_1 - x) + j k_u (Y_1 + u - Y) \right] \times \exp \left[j \cdot 5 \arcsin \left(\frac{k_u}{2k} \right) - j \cdot 5 \frac{u - y}{X_1} - j \cdot 5 \frac{Y_1}{R_1} \right] \frac{dk_u}{\sqrt{4k^2 - k_u^2}} \quad (2.13)$$

เมื่อแทนค่าในสมการ (2.13) สำหรับฟังก์ชันคลื่นทรงกลมในระบบแบบจำลอง 1 และหลังจากมีการจัดเรียงใหม่จะได้รับดังนี้

$$s(u, w) = \int_{-2k}^{2k} A(k_u, w) \left[\iint f(x, y) \cdot \exp \left[-j \left(\sqrt{4k^2 - k_u^2} x + K_u y \right) \right] dx dy \right] \cdot \exp(K_u u) dk_u = \int_{-2k}^{2k} A(k_u, w) F \left(\sqrt{4k^2 - k_u^2}, K_u \right) \cdot \exp(j K_u u) dk_u \quad (2.14)$$

ที่ซึ่ง

$$K_u \equiv k_u \left(1 - \frac{0.5}{X_1} \right) \quad (2.15)$$

และ

$$A(k_u, \omega) \equiv \exp \left(j \sqrt{4k^2 - k_u^2} X_1 + j k_u Y_1 \right) \cdot \frac{\exp \left[j \cdot 5 \arcsin \left(\frac{k_u}{2k} \right) - j \cdot 5 \frac{Y_1}{R_1} \right]}{\sqrt{4k^2 - k_u^2}} \quad (2.16)$$

ขณะนี้เราสมมติว่าเราระวังใช้วัดสำหรับ $u \in (-\infty, \infty)$ เมื่อทำ Spatial Fourier transforms ของทั้งสองข้างของสมการ (2.14) ที่เกี่ยวกับ u (กระบวนการคอปเพลอร์) ผลที่ได้จะเป็นดังนี้ (ภายในค่าคงที่)

$$S(K_u, \omega) = A(k_u, \omega) F\left(\sqrt{4k^2 - k_u^2}, K_u\right) \quad (2.17)$$

เมื่อ K_u และ k_u สัมพันธ์กับสมการ (2.15) ท้ายที่สุดจากสมการ (2.17) เราสามารถเขียนค่าทำกลับได้ดังนี้

$$F(k_x, k_y) = \frac{1}{A(k_u, \omega)} S(K_u, \omega) \quad (2.18)$$

ที่

$$k_x \equiv \sqrt{4k^2 - k_u^2}$$

$$k_y \equiv k_u \quad (2.19)$$

การแทนด้วยข้อมูลที่หาค่าได้ตามโครงสร้าง $F(\cdot)$ จากข้อมูลของคอปเพลอร์และตัวอย่างของ Spatial frequency จะครอบคลุมการถูกบังคับโดยสมการ (2.19) ที่แสดงในรูปที่ 2.8

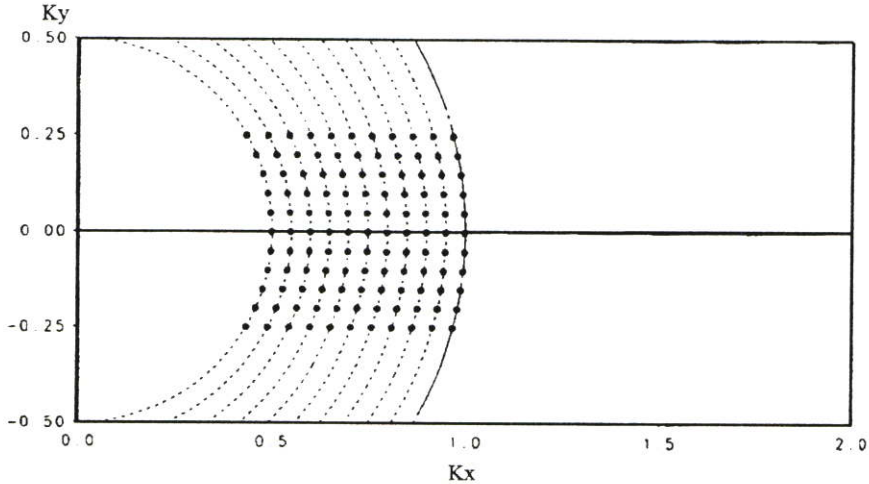
สมการสุดท้ายที่เป็นสมการการทำย้อนกลับสำหรับการเกิดภาพ SAR คือสมการ (2.18) (k_u, ω) สามารถหาค่าได้จากสมการนี้โดยได้จาก $F(k_x, k_y)$ ในพื้นที่แบนพาสใน spatial frequency domain มันจะครอบคลุมไม่เหมือนกับการคาดหวังจากการครอบคลุมโดยการผันกลับของ SAR ในสมการ (2.6) และ (2.7) และ ISAR ของสมการ (2.8) และ (2.9) ซึ่งไม่เป็นเชิงขั้วผ่านเป็นวงกลมที่มีรัศมี $2k$ ส่วนสำคัญที่สุดของการเบี่ยงเบนของสมการ (2.18) จาก SAR ในโหมด Spot light การทำย้อนกลับคือ Spatial Fourier transform ที่บันทึกข้อมูลของตำแหน่งเรดาร์ที่ถูกใช้ประมาณตัวอย่างของ $F(\cdot)$ กระบวนการ Spatial Fourier transform จะคล้ายกับกระบวนการคอปเพลอร์ที่แสดงในแผนที่ SAR ที่ซึ่งผกผันเช่นเดียวกับพื้นฐานการประมาณค่าเฟสเนล การผันกลับของ SAR สามารถหาอนุพันธ์จากสมการ (2.18) โดยใช้ลำดับเทย์เลอร์ในการประมาณค่าเฟสเนล

สำหรับวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์และการตีความ เราทำให้ง่ายขึ้นโดยใช้สมการ (2.15) และ (2.13) ซึ่งค่าคงที่ ฟังก์ชันแอมพลิจูด และฟังก์ชันเฟสที่เพิ่มอย่างช้า ๆ จะถูกตัดออกไปจะได้ว่า

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$k_y \approx k_u$$

$$A(k_u, k_y) \approx \exp\left(j\sqrt{4k^2 - k_u^2} X_1 + jk_u Y_1\right) \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.8 รูปนี้ครอบคลุม spatial frequency ใน monostatic SAR (broadside case) อยู่บนพื้นฐานของการทำกลับ

ค่าที่ประมาณไว้ในสมการ (2.20) จะสามารถอ้างเหตุผลได้ในปัญหาที่เกิดในทางปฏิบัติของ SAR การใช้สมการ(2.20) ในสมการ (2.18) และ (2.19) ผลลัพธ์ที่ได้จะได้ตามสมการผกกลับดังนี้

$$F(k_x, k_y) = \exp(-jk_x X_1 - jk_y Y_1) S(k_u, \omega) \quad (2.21)$$

ด้วย

$$\begin{aligned} k_x &\equiv \sqrt{4k^2 - k_u^2} \\ k_y &\equiv k_u \end{aligned} \quad (2.22)$$

เราสังเกตจากสมการ (2.21) ที่ $(X_1, Y_1) = (0, 0)$ (เช่น จุดกำเนิดที่ศูนย์กลางของช่องเปิดสังเคราะห์) ข้อมูลคออปเปอร์จะเท่ากับ Spatial Fourier transform ของฟังก์ชันเป้าหมายที่สะท้อนกลับ บทบาทของฟังก์ชันเฟสเชิงเส้นของ (k_x, k_y) ในสมการ (2.21) $\exp(-jk_x X_1 - jk_y Y_1)$ มันจะ

ง่ายมากที่ไปศูนย์กลางของพื้นที่เป้าหมาย (เช่น วงกลมที่มีรัศมี X_0) ที่จุดกำเนิดใน Spatial domain นี่คือความต้องการในทางปฏิบัติสำหรับการประกอบอัลกอริทึมใหม่ (การประมาณค่าในช่วง เหมือนกับการผกผันไม่ต่อเนื่องของ Fourier transformation)

2.3.2 อัลกอริทึมการสร้างภาพกลับ

อัลกอริทึมการสร้างภาพกลับสำหรับโหมด Squint จะสรุปในส่วนถัดไป การนำไปปฏิบัติ ต้องทำ 3 แบนพาส ไปสู่การแปลงกลับของ โลว์พาส หนึ่งคือ spatial domain และสองคือ spatial frequency domain (นั่นคือ การแปลงกลับ แบนพาส อื่นไปสู่ โลว์พาสในกระบวนการที่เชื่อมติดกัน ของข้อมูลที่สะท้อนกลับมาชั่วขณะ) ส่วนหนึ่งของการแปลงกลับ เราใช้ข้อเท็จจริงที่สามารถหาค่า ได้ของของข้อมูลแบนพาส ที่ถูกทำให้อยู่ตรงกลางรอบๆ $(k_x, k_y) = (2k_c \cos \theta_1, 2k_c \sin \theta_1)$ สำหรับ เทอมความถี่ที่ให้ของสัญญาณเรดาร์เราจะแสดงได้ในขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 ข้อมูลหลายเชิงจะถูกสะสมใน โดเมน u ด้วย $\exp(-j2k \sin \theta_1 u)$ ซึ่งเปลี่ยน แบน พาส มีขนาดช่องเปิด ข้อมูลที่กำหนดเองใน โหมด squint สูโลว์พาส การปฏิบัติงานในขั้นตอนนี้ เป็นสิ่งสำคัญเพื่อทำการแปลงฟูเรียร์แบบดิสคริต ในขั้นตอนที่ 2 เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการ ผิดเพี้ยนภาพ (aliasing) การทำงานนี้ไม่จำเป็นในกรณีของการมองด้านข้างนั่นคือที่ $\theta_1 = 0$

ขั้นตอนที่ 2 นำไปผ่านให้เกิดผลการแปลงฟูเรียร์ของโลว์พาส ที่ถูกทำให้ข้อมูลอยู่ในรูป โดเมน u อย่างลึ้มว่าข้อมูลได้รับมาโดยผ่านการแปลงฟูเรียร์แบบดิสคริต ซึ่งควรจะกำหนดค่า ของ $k_u \in [-k_{u0} + 2k \sin \theta_1, k_{u0} + 2k \sin \theta_1]$ ที่ซึ่ง $k_{u0} \equiv 2\pi/2\Delta_u$

ขั้นตอนที่ 3 ทำการคูณข้อมูลที่ถูกลบด้วย $\exp(-j\sqrt{4k^2 - k_u^2} X_1 - jk_u Y_1)$ การปฏิบัตินี้ เลื่อนจุดกำเนิดตรงกลางของพื้นที่เป้าหมาย (แบนพาส ถึง โลว์พาส ใน spatial domain) ค่าคงที่ใด ๆ หรือแอมพลิจูดฟังก์ชัน

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดข้อมูลผลลัพธ์ไปยัง $(k_x, k_y) = (\sqrt{4k^2 - k_u^2} - 2k_c \cos \theta_1, k_u - 2k_c \sin \theta_1)$ การทำแบบนี้แสดงให้เห็นข้อมูลที่ถูกลบได้มาในสมการ (2.22) นอกเหนือจากนี้ มันยังเลื่อนข้อมูล แบนพาส spatial frequency ไปยังโดเมน โลว์พาส spatial frequency โดยหัก $(2k_c \cos \theta_1, 2k_c \sin \theta_1)$

จาก Spatial frequency ที่บ่งชี้จากสมการ (2.22) นำไปสู่ฟังก์ชันเฟสเชิงเส้น ในโดเมน (x, y) ที่มีความสำคัญสุดท้ายในการนำมาประกอบขึ้นใหม่ อย่างลึ้มว่าการเลื่อนควรจะเหมือนเทอม ความถี่ (ที่ k_c ถูกใช้) มิฉะนั้นการนำมาประกอบใหม่ของข้อมูล spatial domain เกิดการหดและ ขยายที่เราไม่ต้องการ

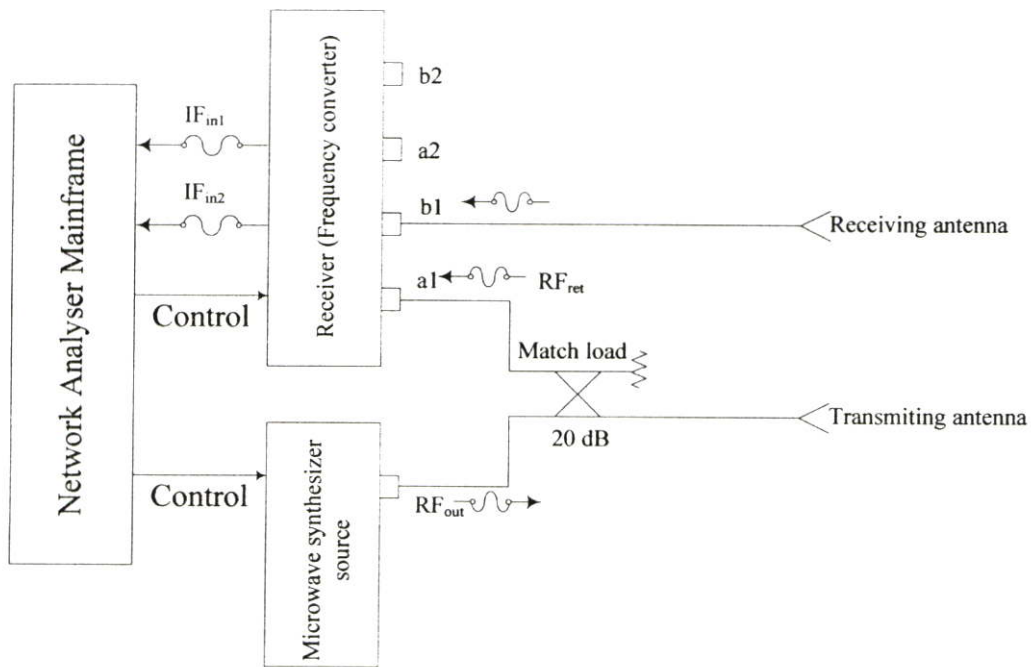
ขั้นตอนที่ 5 การกำหนดประมาณค่าในช่วงที่ข้อมูลไม่สม่ำเสมอบน low-pass ที่ uniform grid สม่ำเสมอใน spatial frequency domain

ขั้นตอนที่ 6 ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1-5 เพื่อหาความถี่ชั่วขณะของสัญญาณเรดาร์

ขั้นตอนที่ 7 ใช้การแปลงให้เป็นสองมิติของการแปลงฟูเรียร์แบบดิสครีต ของข้อมูลที่อยู่บน uniform gridสม่ำเสมอ จะได้รับผลลัพธ์ที่สำคัญของข้อมูลและการแสดงผลออกมา

2.4 ระบบไมโครเวฟที่เกี่ยวข้อง

ระบบไมโครเวฟที่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีองค์ประกอบดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างระบบ SAR ที่ใช้

เพื่อให้เข้าใจในระบบไมโครเวฟที่นำมาประยุกต์ใช้กับระบบ SAR มากยิ่งขึ้นจะต้องเข้าใจหลักการทำงานของอุปกรณ์ที่จำเป็นต่าง ๆ ซึ่งจะได้ปรับปรุงและแก้ไขปัญญาที่เกิดขึ้นได้

2.4.1 แหล่งกำเนิดแบบ Synthesizer

ประกอบด้วยวงจรไมโครเวฟ ซึ่งทำหน้าที่ผลิตสัญญาณที่มีขนาดแน่นอนและสามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้อย่างละเอียด ซึ่งแตกต่างจากระบบที่เป็นแบบ Sweeper ซึ่งในแต่ละความถี่ที่ผลิตได้อาจมีค่าสัญญาณไม่เท่ากัน

2.4.2 ไคเรคชันนัลคัปเปิลเลอร์ (Directional Coupler)

ไคเรคชันนัลคัปเปิลเลอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ทำภารกิจเอากำลังงานส่วนหนึ่งจากกำลังงานที่ผ่านท่อนำคลื่นออกมา ซึ่งให้เลือกใช้งานตามค่าการลดทอนแบบต่าง ๆ ตัวคัปเปิลเลอร์ช่วยให้สามารถทำ

การวัดคลื่นสัญญาณที่มีกำลังสูงด้วยมิเตอร์วัดกำลังทำได้ ลักษณะของไครเรชันแนลคัปเปิลอร์ที่ใช้ ประกอบด้วยท่อนำคลื่น 2 ท่อน ประกบติดกัน ดังรูปที่ 2.10 ไครเรชันแนลคัปเปิลอร์จะดึงเอากำลังงานที่ส่งผ่านในท่อนตรงออกมาส่วนหนึ่งออกทางแขนเสริม (Auxiliary Arm) หรือท่อนส่วนโค้ง โดยระหว่างท่อนนำคลื่น 2 ท่อนที่ประกบติดกันนี้จะมีช่องเล็ก ๆ ให้สัญญาณผ่านออกมาได้ซึ่งช่องหรือรูเล็ก ๆ นี้จะอยู่ห่างกันเท่ากับ $\frac{\lambda}{4}$ ขนาดและจำนวนของรูเล็กเหล่านี้เป็นตัวกำหนดปริมาณของกำลังงานที่สามารถผ่านออกมาที่แขนเสริมที่ปลายโค้งของแขนเสริมจะต่อด้วยเครื่องมือวัดสัญญาณ ส่วนปลายที่เหลือด้านซ้ายมือภายในจะต่อไว้ด้วยโหลด เพื่อดูดคลื่นคลื่นที่ผ่านมาไม่ให้เกิดการสะท้อนกลับ

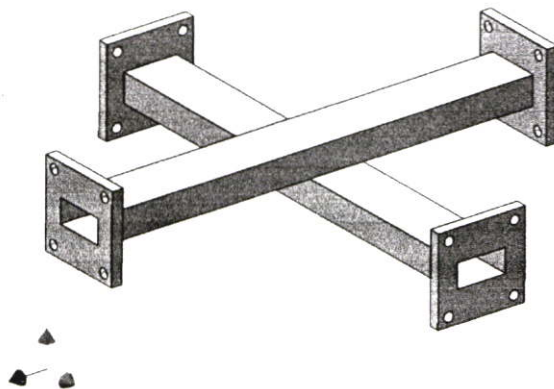
อัตราส่วนกำลังงานที่เข้าไปในคัปเปิลอร์เทียบกับกำลังงานที่ออกแขนเสริมเรียกว่า คัปปลิงแฟกเตอร์ กำลังงานอินพุทใช้สัญลักษณ์ P_{in} และกำลังงานเอาต์พุทที่แขนเสริมใช้ P_{aux} คัปปลิงแฟกเตอร์หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$C = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{aux}} \quad (2.27)$$

โดยที่ C (dB) = คัปปลิงแฟกเตอร์

P_{in} = กำลังอินพุทเข้าสู่คัปเปิลอร์

P_{aux} = กำลังเอาต์พุทที่แขนเสริม

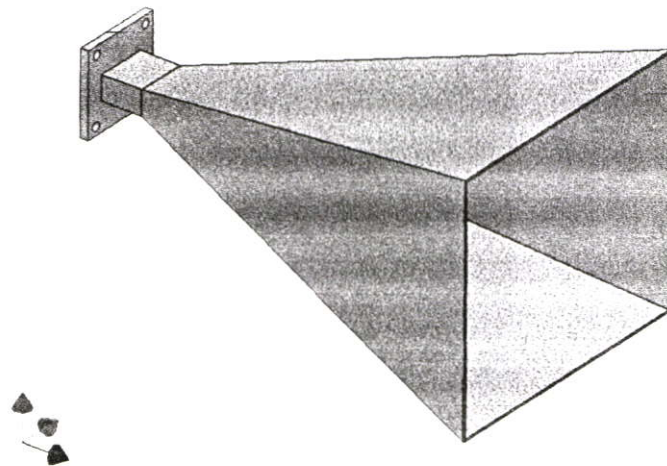


รูปที่ 2.10 ไครเรชันแนลคัปเปิลอร์

2.4.3 สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด (Pyramidal Horn Antenna)

สายอากาศเป็นอุปกรณ์หนึ่งของระบบไมโครเวฟ สายอากาศเป็นส่วนที่เชื่อมระหว่างระบบไมโครเวฟกับอากาศ โดยทำหน้าที่ทั้งส่งกำลังในรูปแบบของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และรับกำลังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้มาจากการแพร่กระจายคลื่นอีกด้วย ทั้งนี้สายอากาศที่ใช้กับระบบไมโครเวฟแตกต่างกับสายอากาศที่ใช้กับคลื่นที่ความถี่ต่ำเป็นอย่างมาก เพราะความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะมีความยาวคลื่นน้อย ยากแก่การกำหนดทิศทางในการแพร่กระจายคลื่นได้ การเลือกใช้สายอากาศจะพิจารณาจากสมบัติการแพร่กระจายคลื่น อันได้แก่รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Antenna Pattern) ทิศทางการแพร่กระจายคลื่น (Directivity) กำลังการขยายของสายอากาศ (Gain antenna) และการโพลาไรเซชัน (Polarization) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด

สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด มีสมบัติที่สามารถกำหนดทิศทางการแพร่กระจายคลื่นได้ อีกทั้งกำหนดรูปแบบการกระจายคลื่นได้ง่าย ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชัน รวมถึงกำลังการขยายของสายอากาศที่ใช้ในการส่งและรับสัญญาณคลื่นไมโครเวฟสูงด้วย



รูปที่ 2.11 สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด

สายอากาศฮอร์นทรงพีระมิดที่แสดงในรูปที่ 2.11 โดยทั่วไปจะมีค่า VSWR ที่น้อยกว่า 1.2 ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของสายอากาศ แสดงให้เห็นว่าไม่มีการสูญเสียในการส่งกำลัง การแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณคลื่นที่ส่วนปลายของสายอากาศแบบฮอร์นจะมีลักษณะการกระจายกำลังบีมแคบ ซึ่งเป็นรูปแบบเฉพาะของการกระจายคลื่นที่สัมพันธ์กับความยาว λ และขนาดของช่องเปิด a และ b ของรูปทรงพีระมิดของสายอากาศฮอร์น ซึ่งค่ากำลังขยายของสายอากาศเป็นดังสมการ

$$G = 10ab/\lambda^2 \quad (2.23)$$

โดยลักษณะการกระจายคลื่นที่ก้ำล้งส่งครึ่งหนึ่งของก้ำล้งส่งเป็นส่วนบ่งบอกสมบัติของสายอากาศฮอร์น ในส่วนระนาบคลื่น E – plane มีค่ามุมจากการคำนวณเป็น

$$\phi = \frac{51\lambda^\circ}{b} \quad (2.24)$$

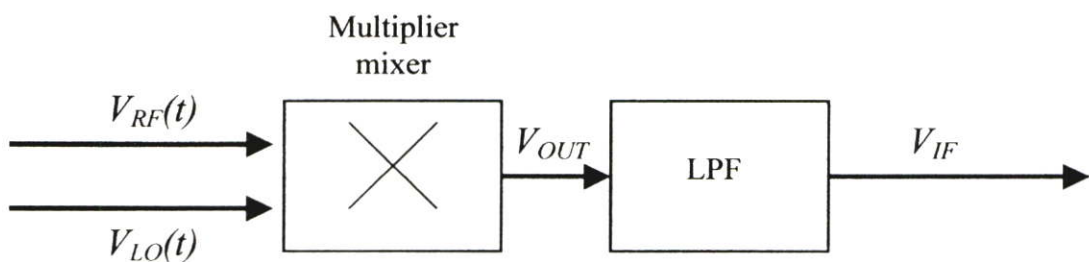
และลักษณะการกระจายคลื่นที่ก้ำล้งส่งครึ่งหนึ่งของก้ำล้งส่งเป็นส่วนบ่งบอกสมบัติของสายอากาศฮอร์น ในส่วนระนาบคลื่น H – plane มีค่ามุมจากการคำนวณเป็น

$$\phi = \frac{70\lambda^\circ}{a} \quad (2.24)$$

2.4.4 เครื่องแปลงความถี่ (Frequency converter)

เครื่องแปลงความถี่มีส่วนประกอบสำคัญคือ อุปกรณ์มิกเซอร์ (mixer) ซึ่งทำหน้าที่ในการผสมสัญญาณ ไมโครเวฟที่รับได้กับสัญญาณคลื่นอ้างอิง

มิกเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนช่วงความถี่สูง มาอยู่ในช่วงความถี่ต่ำ ซึ่งในอุปกรณ์ทางไมโครเวฟได้นำหลักการของมิกเซอร์ไปใช้งานมากมาย เช่น ทำเป็นตัวขยายสัญญาณ ตัวจำกัดสัญญาณ และตัวตรวจวัดสัญญาณ ถึงแม้ว่าจะนำหลักการมิกเซอร์มาใช้กันแพร่หลายแต่การศึกษาหลักการของมิกเซอร์ก็ยังพัฒนาต่อไปเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในส่วนที่ใช้ในการจำกัดช่วงความถี่ที่สูงขึ้นไป ผลิตง่ายขึ้น ลดการสูญเสียของสัญญาณให้น้อยที่สุด ลดสัญญาณรบกวนและลดต้นทุนการผลิต



รูปที่ 2.12 โครงสร้างการทำงานของมิกเซอร์

จากรูปที่ 2.12 ถ้าสัญญาณอ้างอิง(Local oscillator, LO) ที่มีค่าเป็น

$$V_{LO}(t) = 1 \sin(\omega_{LO}t) \quad (2.28)$$

และสัญญาณคลื่นไมโครเวฟ (Radio frequency, RF) ที่มีค่าเท่ากับ

$$V_{RF}(t) = A \sin(\omega_{RF}t + \phi) \quad (2.29)$$

เมื่อผสมสัญญาณได้สัญญาณใหม่ ที่มีค่าเท่ากับ

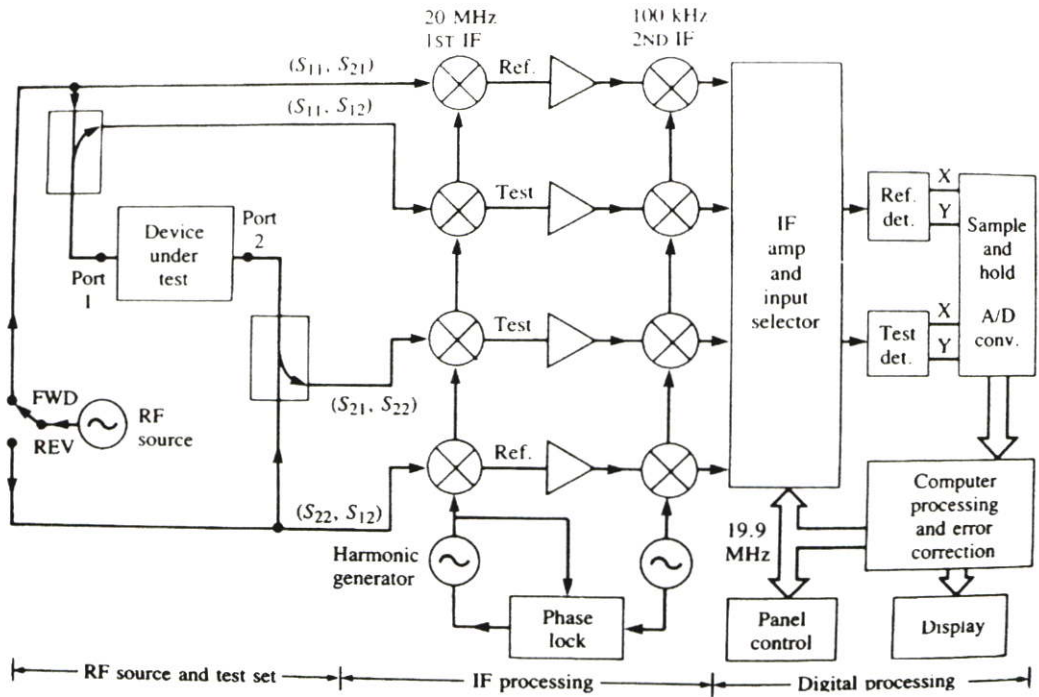
$$V_{out}(t) = A \sin(\omega_{RF}t + \phi) \bullet \sin(\omega_{LO}t) \quad (2.30)$$

แล้วนำสัญญาณผ่านการกรองความถี่ต่ำ ทำให้ได้สัญญาณผสมเอาท์พุท (Integrated frequency, IF) ที่

$$V_{IF} = A \cos \left\{ \underbrace{(\omega_{RF} - \omega_{LO})}_{\omega_-} t + \phi \right\} \quad (2.31)$$

2.4.5 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายวงจรไมโครเวฟ (Microwave network analyzer)

ในการใช้งานปกติมีองค์ประกอบโดยรวมของทั้งระบบเป็นดังรูปที่ 2.13 ซึ่งจำเป็นต้องมีการต่อส่วนของเครื่องแปลงความถี่สัญญาณ ที่ใช้มิกเซอร์ 4 ชุดที่ความถี่สูงแล้วแปลงลงมาที่ความถี่ต่ำด้วยมิกเซอร์อีก 4 ชุด สัญญาณจากแหล่งกำเนิดจะถูกส่งผ่านสายสัญญาณยังอุปกรณ์ไมโครเวฟที่ต้องการทดสอบสัมประสิทธิ์และสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านตลอดจนค่าของอิมพีแดนซ์



รูปที่ 2.13 องค์ประกอบเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายวงจรมิคโรว์

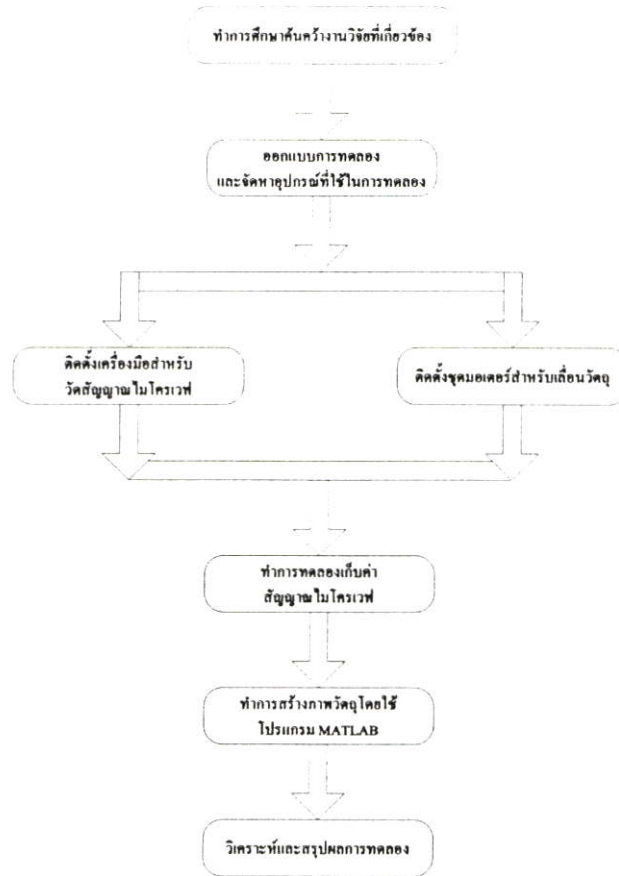
บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงระบบการสร้างภาพระบบเรดาร์แบบช่องเปิดสังเคราะห์ หลังการทำงาน และวิธีการตรวจจับสัญญาณ แนะนำอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและวิจัยระบบเรดาร์แบบช่องเปิดสังเคราะห์

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

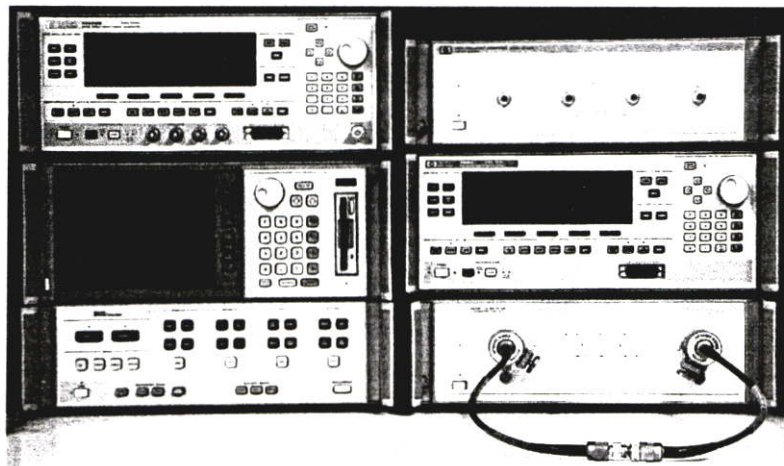
1. ทำการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบการทดลองและจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
3. ติดตั้งเครื่องมือสำหรับวัดสัญญาณ ไมโครเวฟ
4. ติดตั้งชุดมอเตอร์สำหรับเลื่อนวัตถุ
5. ทำการทดลองเก็บค่าสัญญาณ ไมโครเวฟ
6. ทำการสร้างภาพวัตถุโดยใช้โปรแกรม MATLAB
7. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบภาพวัตถุที่ได้กับวัตถุจริง และหาแนวทางแก้ไขปรับปรุงให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.2 ระบบอุปกรณ์สำหรับวัดสัญญาณไมโครเวฟ

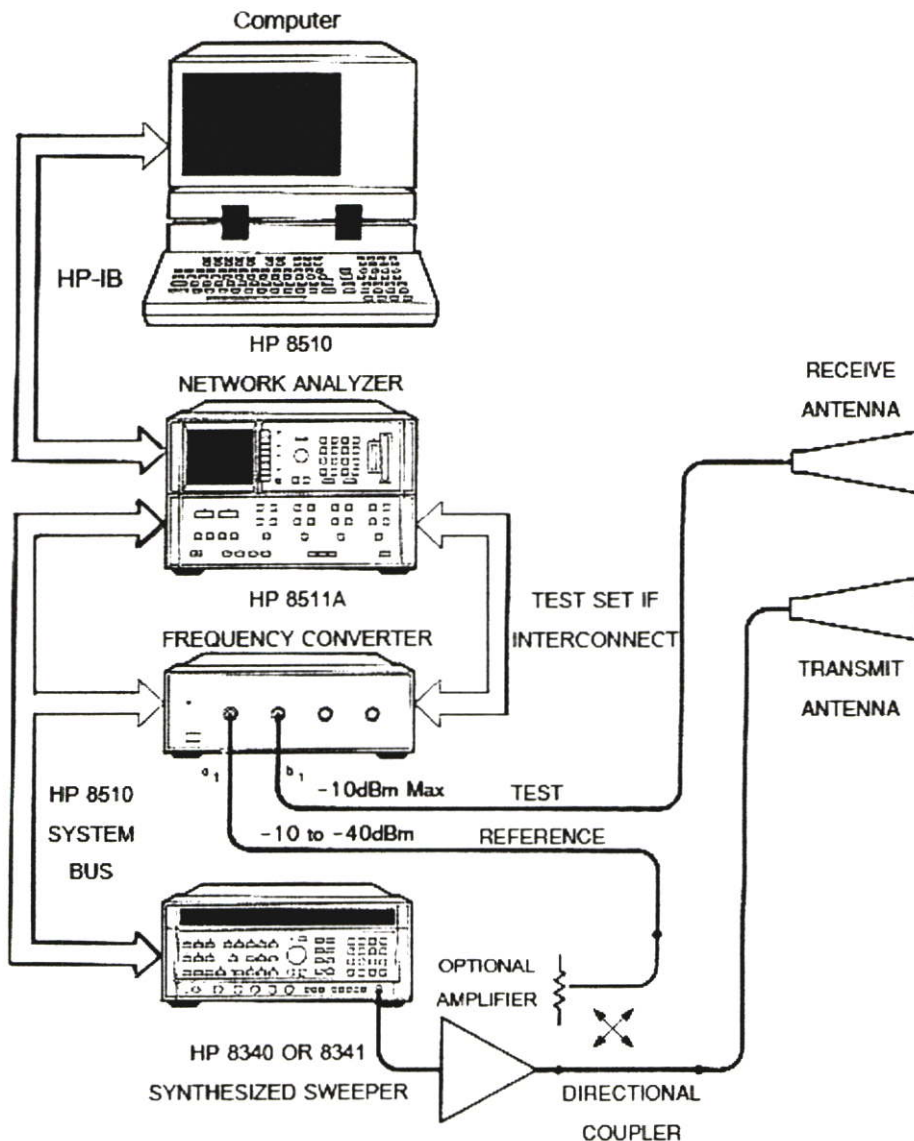
ระบบที่ใช้ทดลองนี้จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆดังนี้



รูปที่ 3.2 ระบบวัดสัญญาณไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ระบบเครื่องมือวัด

HP83620B เครื่องสร้างสัญญาณไมโครเวฟ โดยจะส่งเคราะห์คลื่นไมโครเวฟช่วงความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 20 กิกะเฮิรตซ์ ชุดทดสอบ 4 ช่องสัญญาณ HP8511A ถูกออกแบบให้มาทำงานร่วมกับ Network Analyzer HP8510C และอุปกรณ์ไมโครเวฟต่างๆเช่น Couplers และ Power Splitters เป็นต้น เครื่อง HP8511A สามารถใช้งานได้สะดวกและหลากหลาย ซึ่งความถี่อยู่ในช่วง 45 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 26.5 กิกะเฮิรตซ์ และถูกนำมาใช้สำหรับวัดพารามิเตอร์ของการสะท้อนและส่งผ่านของอุปกรณ์ทั้ง หนึ่งพอร์ท หรือ สองพอร์ท ซึ่งนำไปใช้ในการหาลักษณะพารามิเตอร์ของสายอากาศ, Radar cross section และ อุปกรณ์ส่งผ่านความถี่ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพระบบวัดสัญญาณไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง

3.2.2 ไคเรชันนัลคัปเปิลเลอร์ (Directional Coupler)

ไคเรชันนัลคัปเปิลเลอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ทำการดึงเอากำลังงานส่วนหนึ่งจากกำลังงานที่ผ่านท่อนำคลื่นออกมา ซึ่งให้เลือกใช้งานตามค่าการลดทอนแบบต่าง ๆ ตัวคัปเปิลเลอร์ช่วยให้สามารถทำการวัดคลื่นสัญญาณที่มีกำลังสูงด้วยมิเตอร์วัดกำลังต่ำได้ ลักษณะของไคเรชันนัลคัปเปิลเลอร์ที่ใช้ประกอบด้วยท่อนำคลื่น 2 ท่อน ประกบติดกัน ปลายท่อนหนึ่งโค้งออกไปทำมุมฉากกับท่อนตรง ไคเรชันนัลคัปเปิลเลอร์จะดึงเอากำลังงานที่ส่งผ่านในท่อนตรงออกมาส่วนหนึ่งออกทางแขนเสริม (Auxiliary Arm) หรือท่อนส่วนโค้ง โดยระหว่างท่อนนำคลื่น 2 ท่อนที่ประกบติดกันนี้จะมีช่องเล็ก ๆ ให้สัญญาณผ่านออกมาได้ซึ่งช่องหรือรูเล็ก ๆ นี้จะอยู่ห่างกันเท่ากับ $\lambda/4$ ขนาดและจำนวนของรูเล็กเหล่านี้เป็นตัวกำหนดปริมาณของกำลังงานที่สามารถผ่านออกมาที่แขนเสริมที่ปลายโค้งของแขนเสริมจะต่อด้วยเครื่องมือวัดสัญญาณ ส่วนปลายที่เหลือด้านซ้ายมือภายในจะต่อไว้ด้วยโพลดเพื่อดูดคลื่นที่ผ่านมาไม่ให้เกิดการสะท้อนกลับ

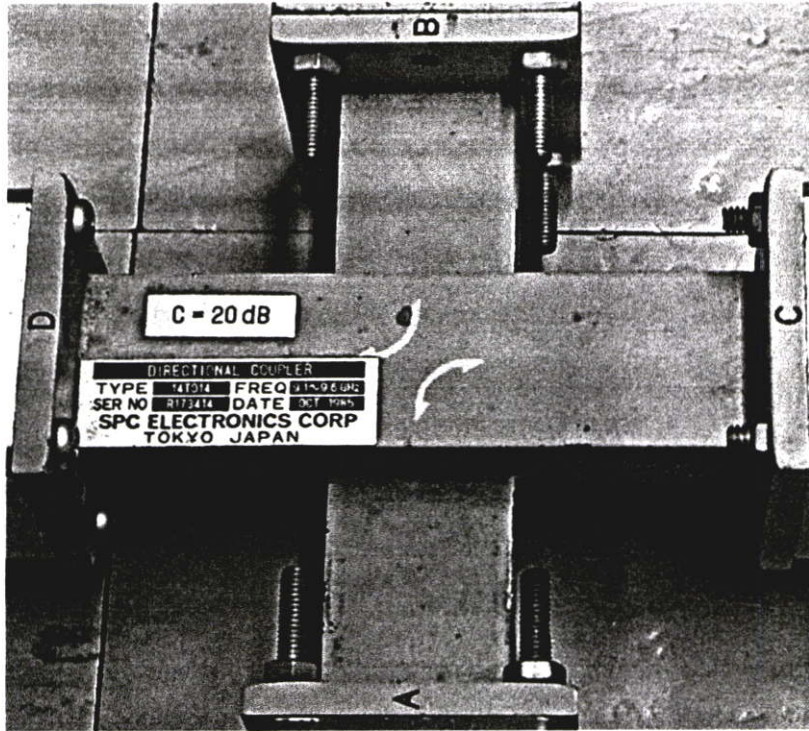
อัตราส่วนกำลังงานที่เข้าไปในคัปเปิลเลอร์เทียบกับกำลังงานที่ออกแขนเสริมเรียกว่า คัปปลิงแฟกเตอร์ กำลังงานอินพุทใช้สัญลักษณ์ P_{in} และกำลังงานเอาต์พุทที่แขนเสริมใช้ P_{aux} คัปปลิงแฟกเตอร์หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$C = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{aux}}$$

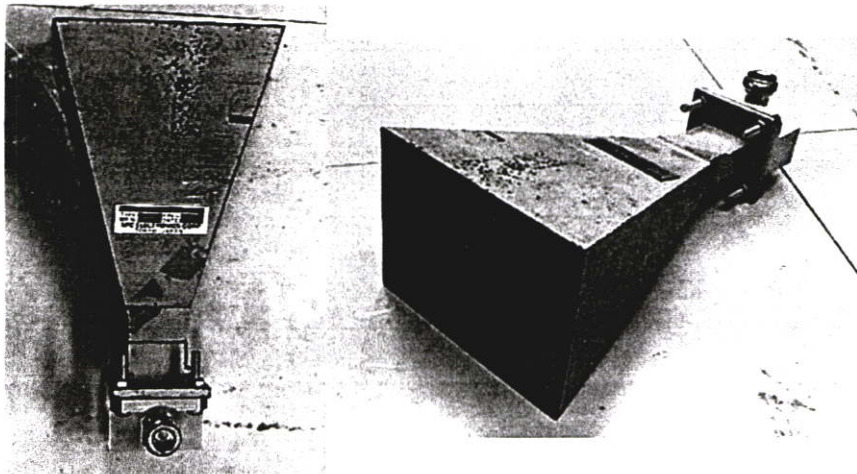
โดยที่ C (dB) = คัปปลิงแฟกเตอร์

P_{in} = กำลังอินพุทเข้าสู่คัปเปิลเลอร์

P_{aux} = กำลังเอาต์พุทที่แขนเสริม



รูปที่ 3.4 ไคเรคชันนัลคัปเปิลเลอร์



รูปที่ 3.5 สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด

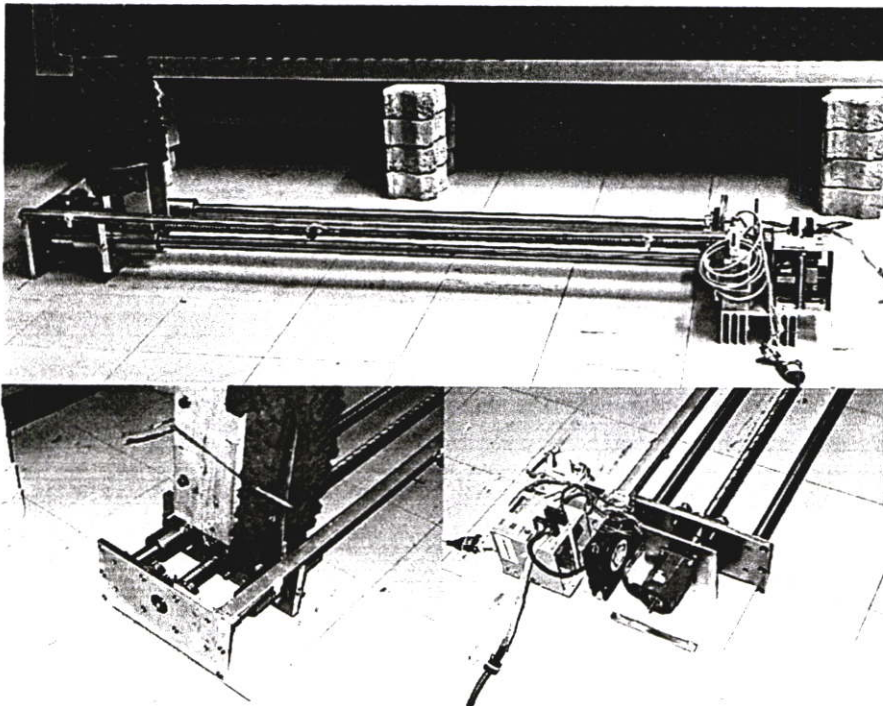
3.2.3 สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด (Pyramidal Horn Antenna)

ในการส่งคลื่นจากที่ว่างเข้าไปในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม (Rectangular Waveguide) โหมดในการแพร่กระจายคลื่น ของท่อนำคลื่นที่ได้รับจะเหมือนโหมดการกระจายของคลื่นในที่ว่าง แต่เนื่องจากเกิดความไม่สม่ำเสมอหรือจะเรียกว่าความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity) ของสายนำสัญญาณ

ท่อนำคลื่นที่จุดอินพุท ดังนั้นในการแพร่กระจายคลื่นผ่านช่วงรอยต่อนี้จะเกิดคลื่นในโหมดที่ลำดับสูงขึ้น โดยที่คลื่นโหมดนี้จะไม่แพร่กระจายต่อไปเมื่อผ่านพ้นช่วงรอยต่อจะถูกกลทอนจนหมด ส่วนการส่งผ่านพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านจากท่อนำคลื่นออกสู่ที่ว่างการส่งผ่านพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพสูงสุด ก็ต่อเมื่อไม่มีการมิสมแมทซ์ (Mismatch) เกิดขึ้นที่ท่อนำคลื่น ซึ่งทำให้เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณผลที่ตามมาจะเกิดความสูญเสียทางกำลังงาน และมีการก่อดั้วของคลื่นนิ่งขึ้นในท่อนำคลื่นด้วย สำหรับบริเวณช่วงรอยต่อของท่อนำคลื่นกับที่ว่างสามารถทำให้เกิดการแมทซ์ขึ้นได้ ด้วยการปรับท่อนำคลื่นช่วงปลายนี้ให้มีลักษณะเหมือนฮอร์นทรงพีระมิด ท่อนำคลื่นจะถูกทำให้พอดี (Matching) เข้ากับที่ว่างโดยผ่านช่วงปากแตรและในช่วงทรานซิชัน (Trasition Region) นี้จะเกิดคลื่นในโหมดที่สูงกว่าด้วยเพื่อให้การแพร่กระจายคลื่นสามารถเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตรอยต่อ (Boundary Condition)

3.2.4 ชุดเลื่อนตำแหน่งวัตถุ

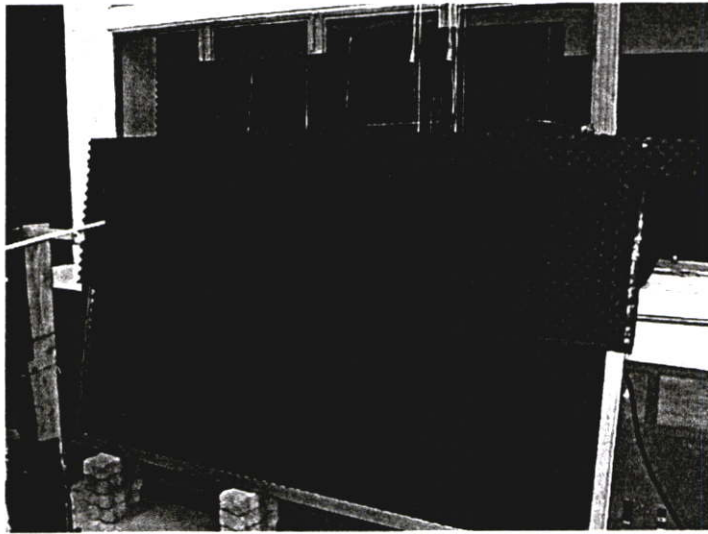
ใช้สเตปป์ิงมอเตอร์รุ่น OS22A (OEM57-83) และชุดขับและควบคุมรุ่น OEM650X ของ Compumotor Division Parker Hannifin Corporation ซึ่งควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตอนุกรม เพื่อเป็นตัวเลื่อนตำแหน่งวัตถุอัตโนมัติ (เฉพาะแนวนอน) ในขณะที่ทำการตรวจวัดสัญญาณคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 3.6 ชุดเลื่อนตำแหน่งวัตถุ

3.2.5 แผงดูดซับคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Absorber Panel)

ทำหน้าที่เป็นแผงดูดคลื่นไมโครเวฟเมื่อมีการทะลุผ่านไม่ให้สะท้อนกลับ สำหรับในงานที่ใช้มีค่าลดการสะท้อน 12 เดซิเบลที่ความถี่ในย่าน 9 กิกะเฮิรตซ์ ทำการทดสอบคุณสมบัติการส่งคลื่นทะลุผ่านโดยวัดค่ากำลังที่ผ่านวัสดุดูดซับคลื่น วิเคราะห์ความแตกต่างกำลังเข้าและออกจากแผงดูดคลื่นไมโครเวฟ

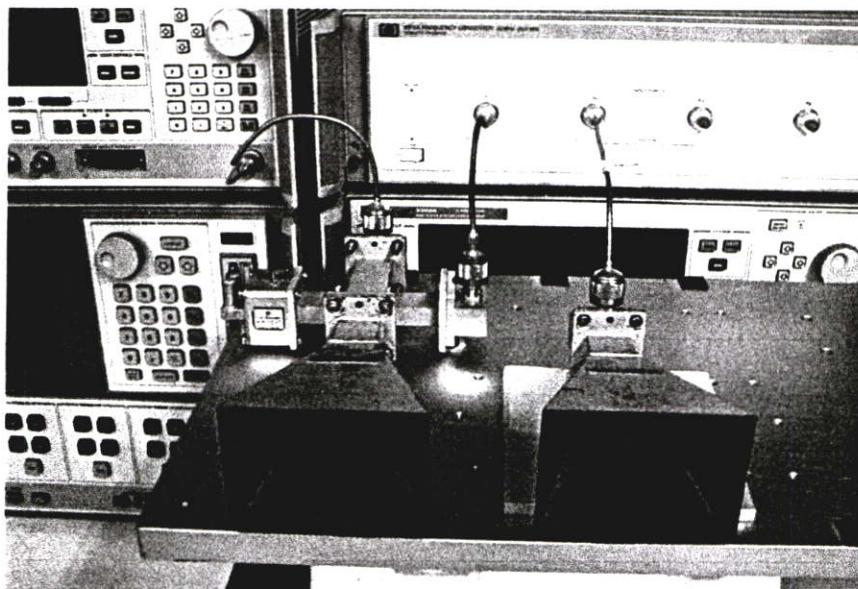


รูปที่ 3.7 แผงดูดซับคลื่นไมโครเวฟ

3.3 การทดลองระบบเรดาร์แบบช่องเปิดสังเคราะห์

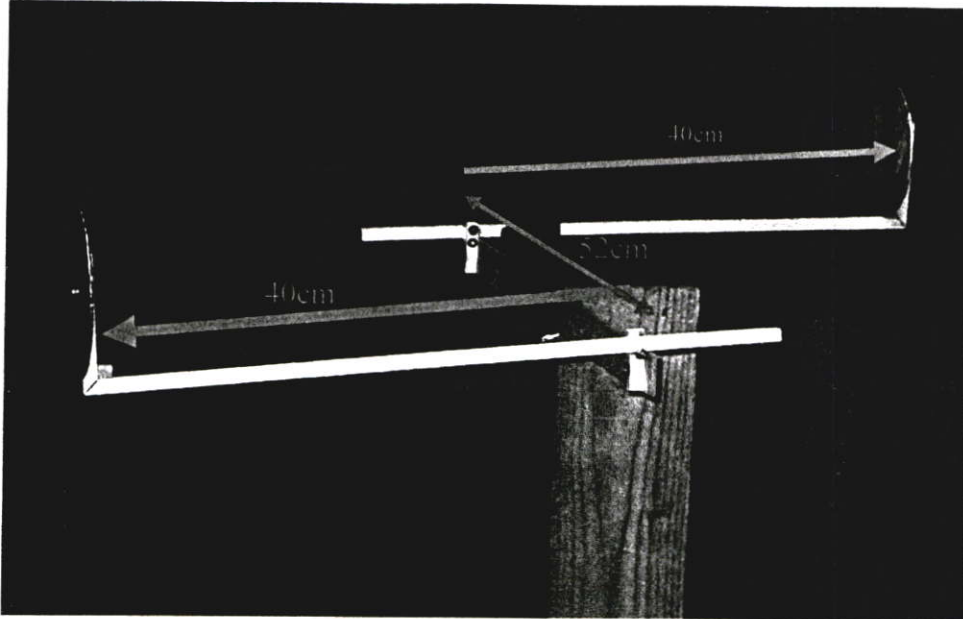
ในการทดลองระบบที่สร้างขึ้นมา จะมีเงื่อนไขการทดลองดังนี้

- Transmitted Power (P_o)	0	dBm
- Central Frequency (f_c)	9.35	GHz
- Band (B)	0.5	GHz
- Frequency number (n_r)	3201	
- Linear length (L)	1	m
- Linear point number (n_p)	100	
- Distance (R_o)	3	m

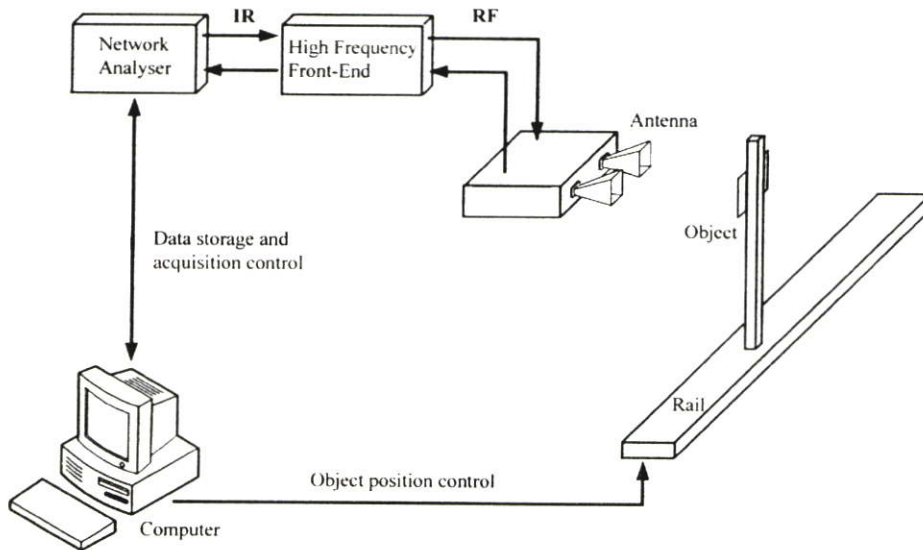


รูปที่ 3.8 ระบบเรดาร์แบบช่องเปิดสังเคราะห์

จากรูปที่ 3.8 จะเห็นว่าสายอากาศแบบฮอร์นที่ใช้งานใน ตัวส่งและตัวรับสัญญาณจะใช้ชนิดเดียวกัน และตำแหน่งที่วางจะพยายามวางไว้ใกล้กันที่สุด โดยที่สัญญาณไม่กวนซึ่งกันและกัน โดยในการทดลองนี้ สายอากาศจะยึดติดอยู่กับที่ และจะทำการเลื่อนวัตถุแทน วัตถุที่ใช้ในการทดลองนี้จะใช้โลหะในการสะท้อนสัญญาณรูปทรงเรขาคณิตต่างๆ เช่นดังรูปที่ 3.9 เป็นลักษณะของการจัดวางวัตถุเพื่อการทดลอง รูปที่ 3.10 จะเป็นการแสดงการทำงานของระบบเรดาร์แบบช่องเปิดสังเคราะห์ ระบบทั้งหมดจะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อที่จะทำส่งสัญญาณ และเลื่อนตำแหน่งได้โดยอัตโนมัติ ชุด Network Analyzer จะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ทางพอร์ต GPIB ชุดเลื่อนตำแหน่งจะใช้ชุดควบคุมของ Parker รุ่น OEM650X โดยจะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ทางพอร์ตอนุกรม โปรแกรม MATLAB จะถูกใช้ ในการควบคุมระบบ การเก็บค่าสัญญาณ และประมวลผลภาพ



รูปที่ 3.9 ลักษณะของการจัดวางวัตถุเพื่อการทดลอง



รูปที่ 3.10 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบเรดาร์แบบช่องเปิดสี่แฉก

ตัวแปรที่สำคัญของการทดลองนี้มี 2 ค่าคือ ค่าแรกเป็นความละเอียดของพิสัยได้คือ

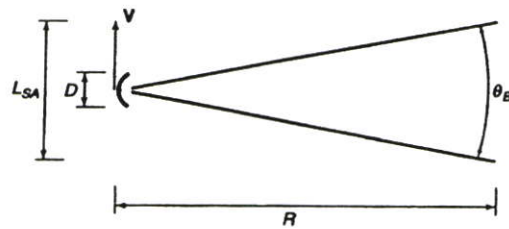
$$\Delta R = c\Delta\tau/2 = c/2B \quad (3.1)$$

จากสมการข้างต้น $c = 299,792.458$ เมตรต่อวินาที $B = 500,000$ GHz จะสามารถคำนวณความละเอียดของพิสัยได้คือ $\Delta R = c/2B = 0.299$ เมตร และอีกค่าหนึ่งคือ ความละเอียดด้านทิศการเคลื่อนที่ จากรูปที่ 3.8 จะได้

$$\delta_{cr} = \frac{\lambda}{2\Delta\theta} = \frac{\lambda}{2(L_{sa}/R)} = \frac{R\lambda}{2L_{sa}} \quad (3.2)$$

θ คือ ความกว้างของมุมการส่ง L_{sa} คือความกว้างของช่องเปิดสังเคราะห์ λ ในการทดลองนี้คือ 0.032 เมตร δ_{cr} คือ ความละเอียดด้านทิศการเคลื่อนที่ R คือระยะของพิสัย(Range) ซึ่งจะได้ว่าความละเอียดด้านทิศการเคลื่อนที่ ในการทดลองนี้จะมีค่าเป็น $\delta_{cr} = R\lambda/2L_{sa} = 3*0.032/2*1 = 0.048$ เมตร นี่คือนิยามประสิทธิภาพของระบบนี้

Synthetic-Aperture Radar (SAR):



$$\delta_{cr} = \frac{\lambda}{2\Delta\theta} = \frac{\lambda}{2(L_{sa}/R)} = \frac{R\lambda}{2L_{sa}}$$

รูปที่ 3.11 แผนภาพแสดงคำนวณความละเอียดด้านทิศการเคลื่อนที่ของระบบเรดาร์แบบช่องเปิดสังเคราะห์

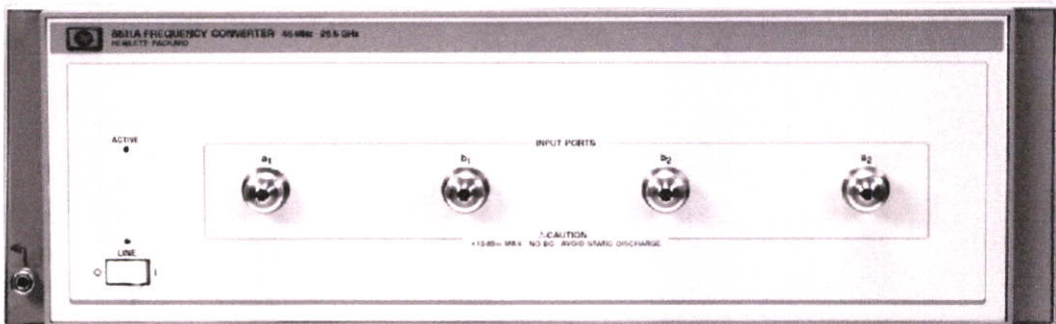
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่นำไปสู่การพัฒนาาระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องแบบช่องเปิดสังเคราะห์ทำงานด้วยควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีการเลื่อนวัตถุด้วยสเตปมอเตอร์ และใช้สายอากาศแบบฮอร์น ในการรับส่งสัญญาณ ต่อเข้ากับ HP8510C Network Analyzer และสร้างภาพวัตถุด้วยโปรแกรม MatLab

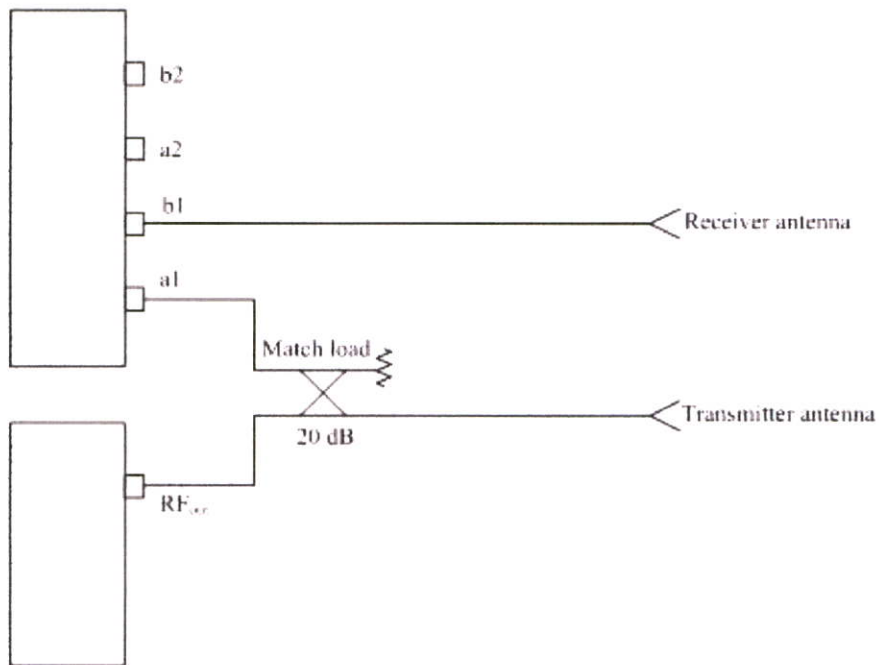
4.1 การวัดค่าคุณสมบัติของระบบสายอากาศ

ในการทดลองนี้จะใช้เครื่อง HP 8511A Frequency Converter Test Set ดังรูปที่ 4.1 ในการรับค่าสัญญาณคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนจากวัตถุกลับมายังสายอากาศตัวรับ โดยที่พอร์ท a1 จะรับสัญญาณอ้างอิงจากสายอากาศตัวส่ง ที่ต่อกับไดเรคชันนัลคัปเปิลอร์ จะทำการลดทอนสัญญาณลง 20 เดซิเบล เพื่อเปรียบเทียบกับเฟสของสัญญาณที่สะท้อนกลับมาว่าเปลี่ยนไปเท่าใด และพอร์ท b1 จะรับสัญญาณจากสายอากาศตัวรับดังรูปที่ 4.2



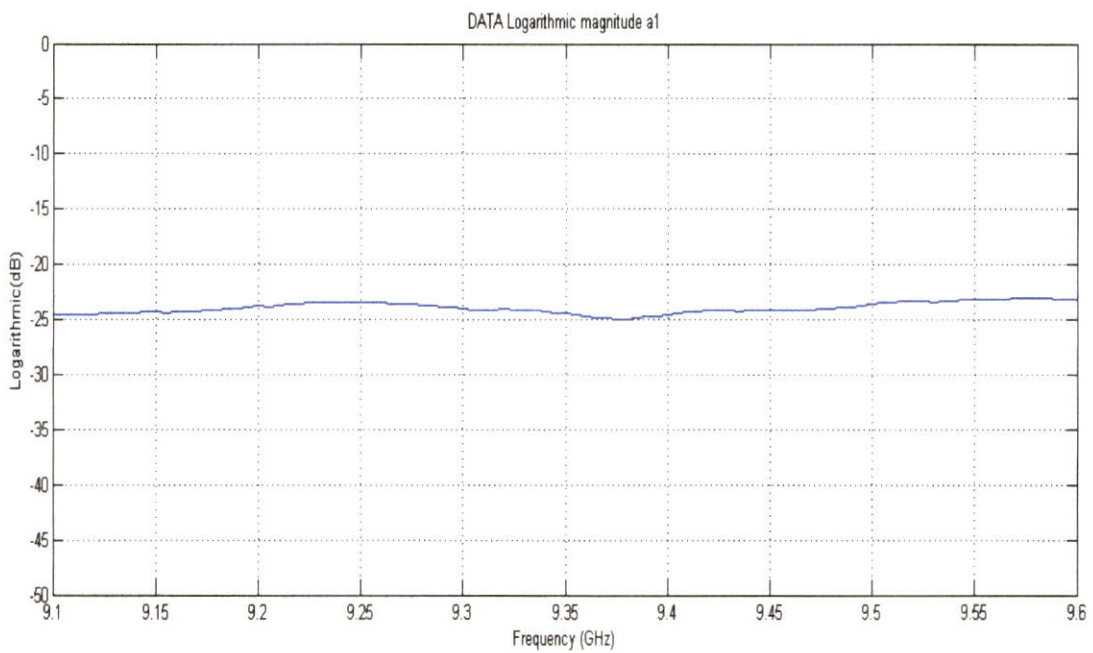
รูปที่ 4.1 เครื่อง HP 8511A Frequency Converter Test Set ที่ใช้ในการทดลอง

HP8511A Frequency
converter test set

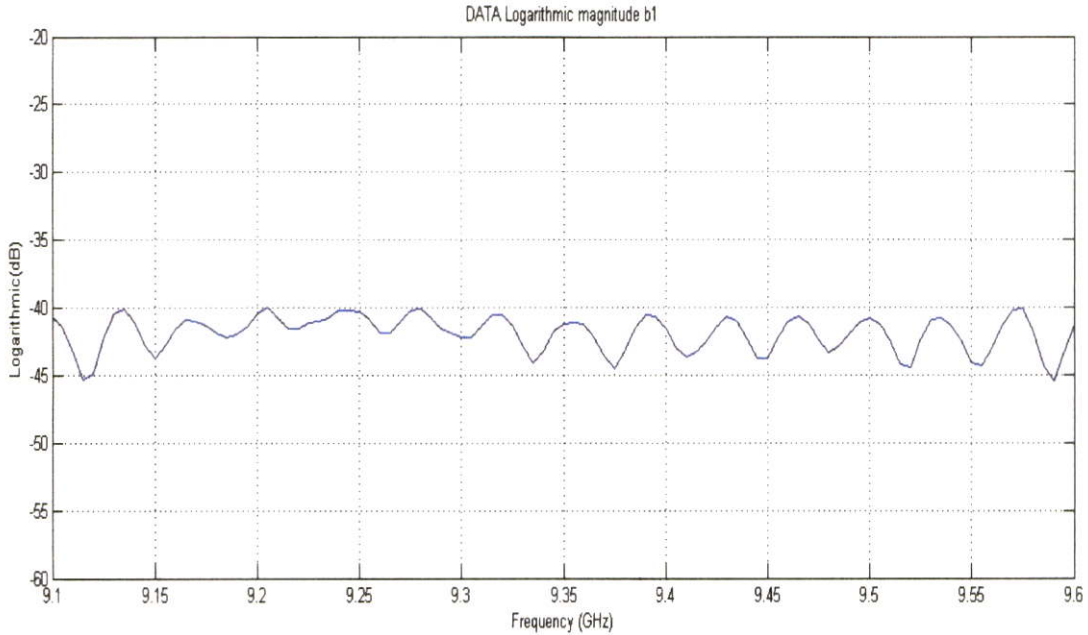


HP83620B Swept
signal generator

รูปที่ 4.2 แผนภาพการต่ออุปกรณ์ในการทดลอง



รูปที่ 4.3 สัญญาณแอมพลิจูดจากพอร์ต a1 ในช่วงความถี่ 9.1 ถึง 9.6 กิกะเฮิรตซ์



รูปที่ 4.4 สัญญาณแอมพลิจูดจากพอร์ท b1 ในช่วงความถี่ 9.1 ถึง 9.6 กิกะเฮิร์ตซ์

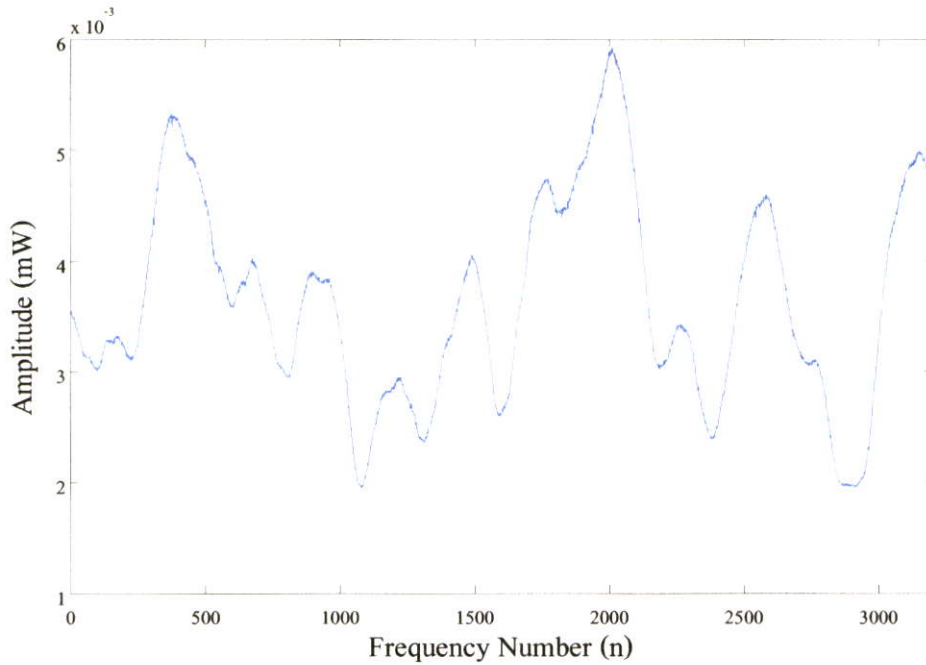
ก่อนเริ่มการทดลองจะต้องมีการวัดค่าแอมพลิจูดจากสายอากาศที่ใช้ในการทดลอง ว่าช่วงความถี่นั้นเหมาะสมหรือไม่ถ้าช่วงความถี่ไม่เหมาะสมกับสายอากาศจะทำให้ค่าที่วัดได้ถูกลดทอนจากความเป็นจริงไปมาก ในการทดลองนี้จะเห็นว่าค่าแอมพลิจูดที่วัดมาได้มีความสม่ำเสมอตลอดช่วงความถี่ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ค่าที่วัดมาได้นั้นจะมีหน่วยเป็นเดซิเบล

4.2 การหาระยะพิสัยของระบบ

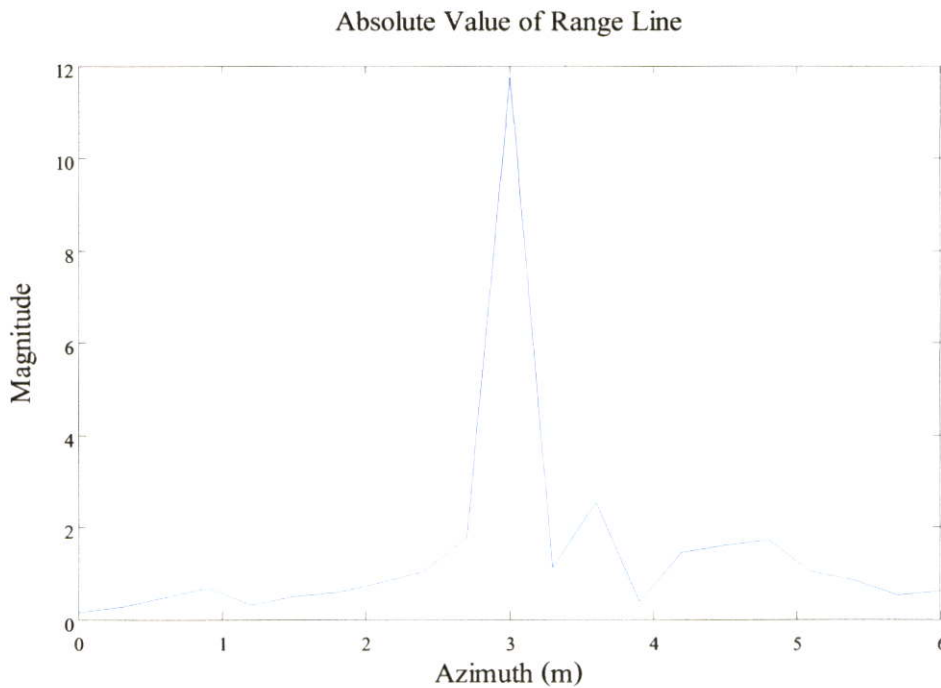
ในการทดลองเราได้ทำการทดสอบวัดระยะพิสัยของระบบ โดยทำการเก็บค่าสัญญาณที่สะท้อนกลับมาและทำการเปลี่ยนช่วงความถี่ตั้งแต่ 9.1 ถึง 9.6 กิกะเฮิร์ตซ์ จำนวน 3201 ข้อมูล ดังรูปที่ 4.5 โดยค่าที่เก็บมาได้นั้นจะอยู่ในเทอมของความถี่ (f) เมื่อทำการแปลงฟูริเยร์จากของค่าสัญญาณที่ได้นั้น จากแกนแนวนอนที่อยู่ในเทอมของความถี่จะถูกแปลงให้อยู่ในเทอมของเวลา (t) โดยที่ $t = 1/f$ ในการเก็บสัญญาณแต่ละครั้งคลื่นจะต้องเดินทางไปและกลับ เราสามารถหาระยะเวลาทั้งหมดได้จาก $2\Delta t = 1/(\Delta f / N)$ โดยที่ N เป็นจำนวนของข้อมูล 3201 จุด จากการทดลองนี้ $\Delta f = 0.5$ กิกะเฮิร์ตซ์ $2\Delta t = (1/0.5 \times 10^9) \times 3201 = 6402$ นาโนวินาที ดังนั้น $\Delta t = 3201$ นาโนวินาที

เนื่องจากมีข้อมูลทั้งหมด 3201 ข้อมูล ดังนั้นระยะเวลามนแต่ละข้อมูลคือ 1 นาโนวินาที คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางด้วยความเร็วโดยประมาณเท่ากับ 3×10^8 เมตร/วินาที ระยะทาง 3 เมตร

คลื่นจะเดินทางโดยใช้เวลา 10 นาโนวินาที ดังนั้นข้อมูลเมื่อทำการแปลงฟูรีเยแล้วในแกนแนวนอน ข้อมูล 10 ช่อง จึงเท่ากับระยะทาง 3 เมตร



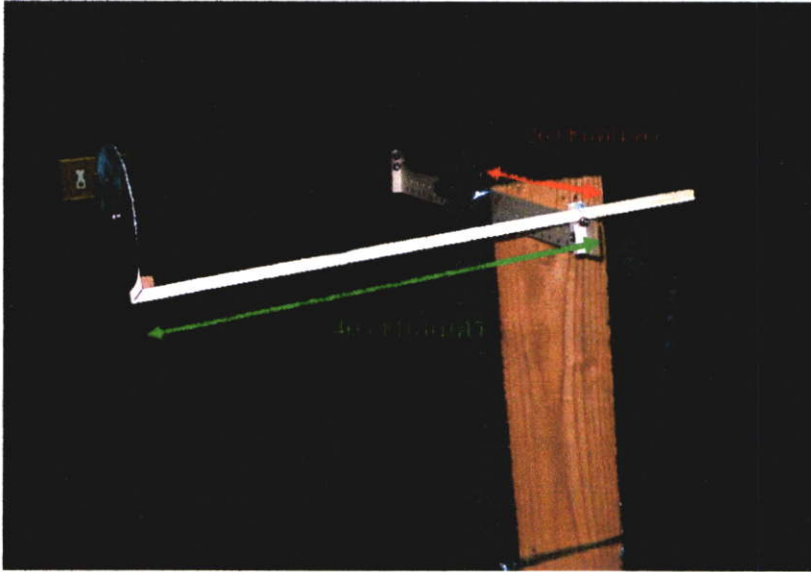
รูปที่ 4.5 สัญญาณแอมพลิจูด ในช่วงความถี่ 9.1 ถึง 9.6 กิกะเฮิรตซ์ จำนวน 3201 ข้อมูล



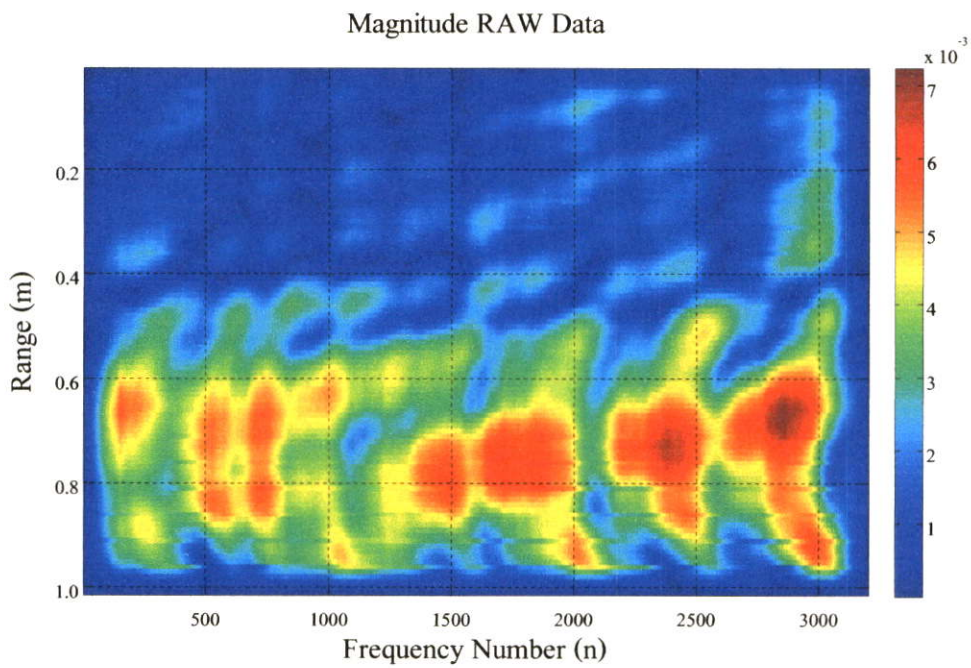
รูปที่ 4.6 ผลของการการแปลงฟูรีเยร์ เมื่อวางวัตถุที่ระยะ 3 เมตร

4.3 การสร้างภาพระบบเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์

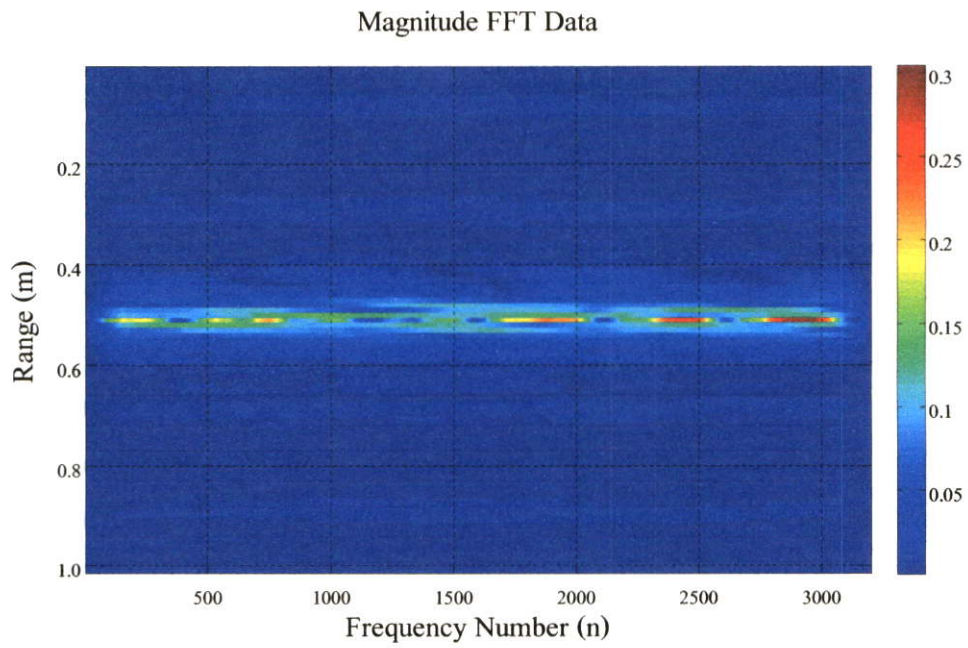
4.3.1 เมื่อมีวัตถุหนึ่งชิ้นระยะ 2.6 เมตร



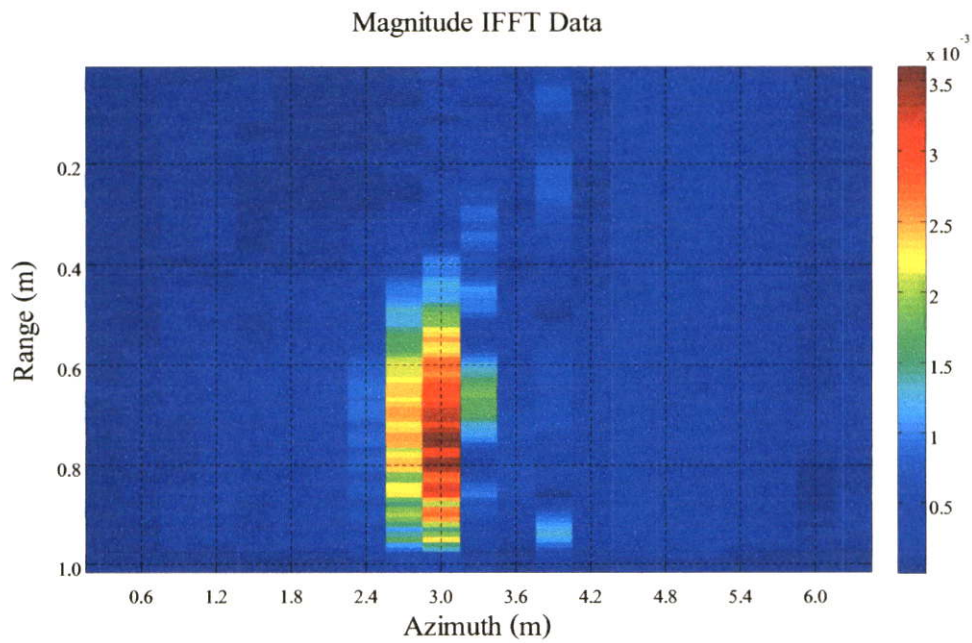
รูปที่ 4.7 แสดงการจัดวางวัตถุที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.8 แสดงแอมพลิจูดของข้อมูลที่วัดมาได้



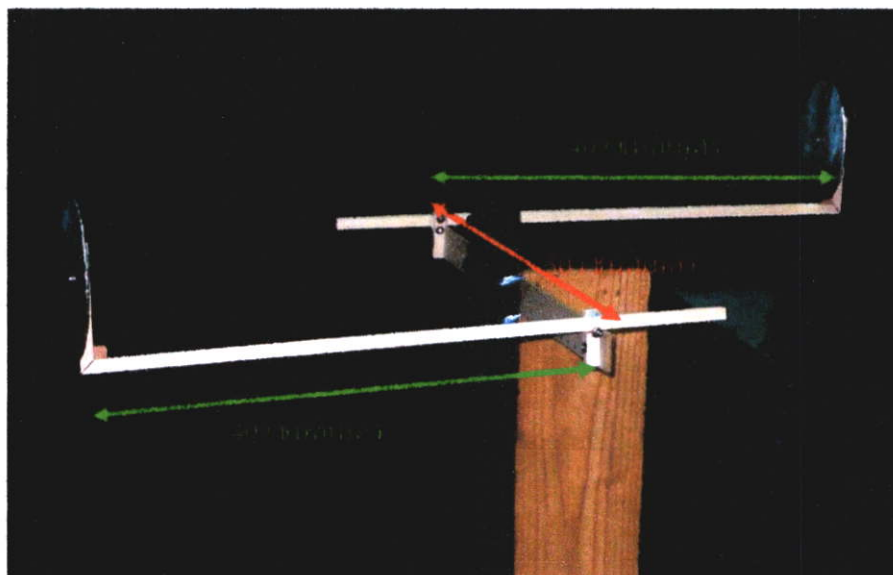
รูปที่ 4.9 แสดงแอมพลิจูดของการแปลงฟูเรียร์



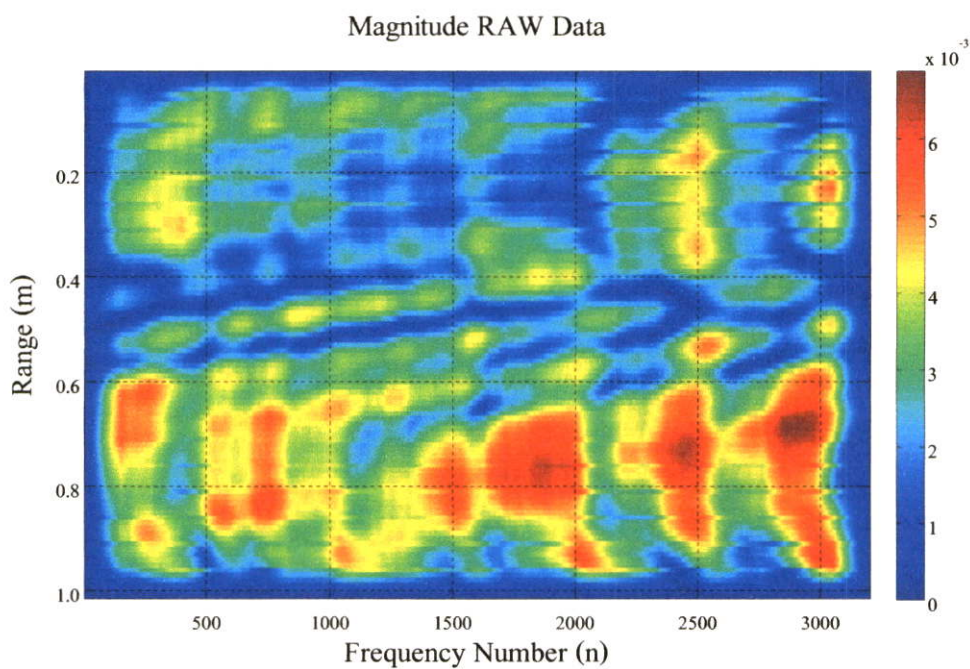
รูปที่ 4.10 แสดงภาพของวัตถุ

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นภาพของวัตถุอยู่ห่างจากสายอากาศเป็นระยะประมาณ 2.6 เมตร ซึ่งใกล้เคียงกับระยะที่ทำการวางวัตถุไว้

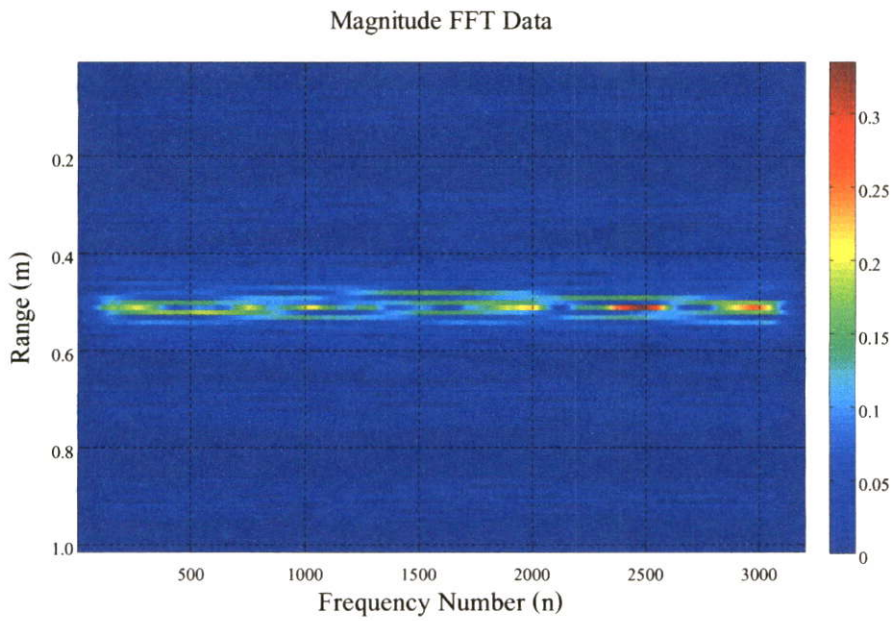
4.3.2 เมื่อมีวัตถุสองชิ้นระยะ 3.0 เมตร ซึ่งอยู่ห่างจากกัน 0.8 เมตร



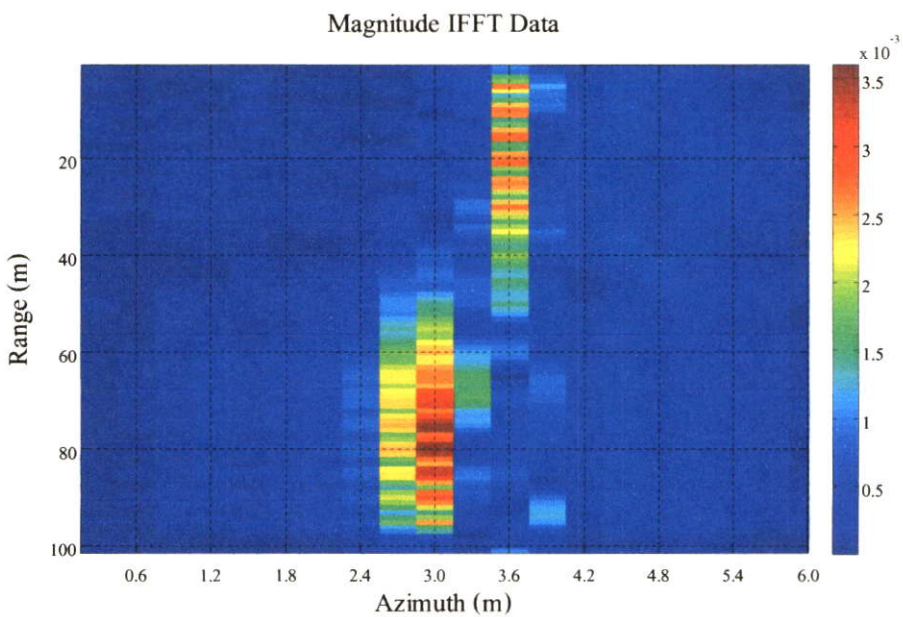
รูปที่ 4.11 แสดงการจัดวางวัตถุที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.12 แสดงแอมพลิจูดของข้อมูลที่วัดมาได้



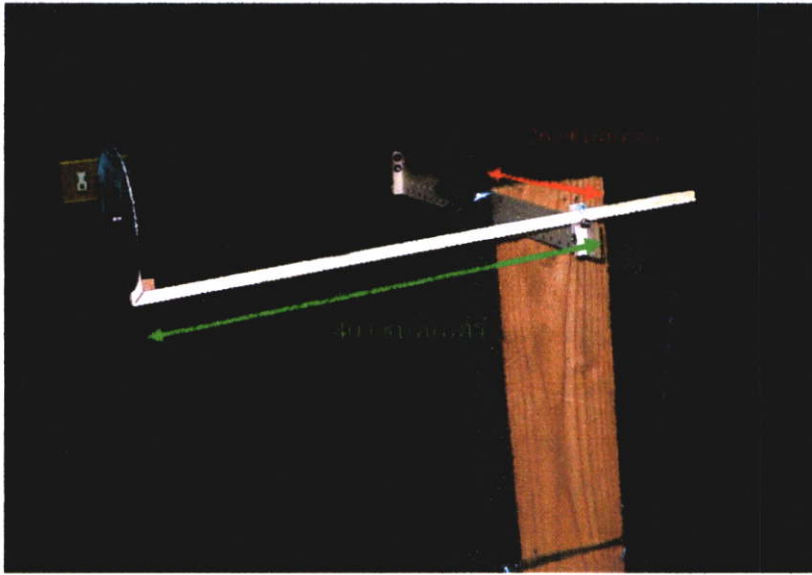
รูปที่ 4.13 แสดงแอมพลิจูดของการแปลงฟูเรียร์



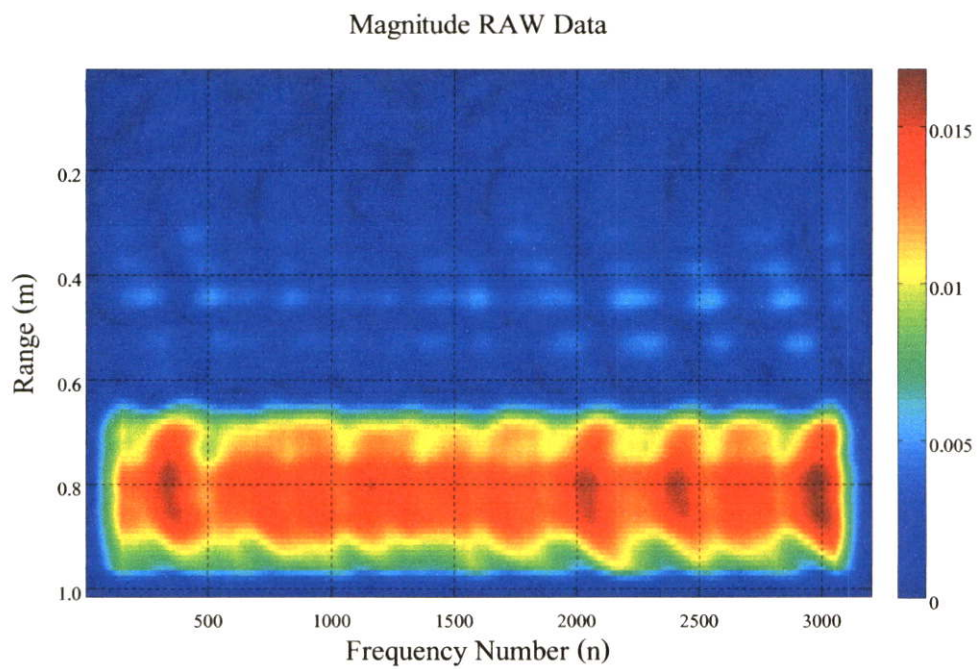
รูปที่ 4.14 แสดงภาพของวัตถุ

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นภาพของวัตถุสองชิ้นอยู่ห่างจากสายอากาศเป็นระยะประมาณ 2.8 เมตร และ 3.6 เมตรตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับระยะที่ทำการวางวัตถุไว้

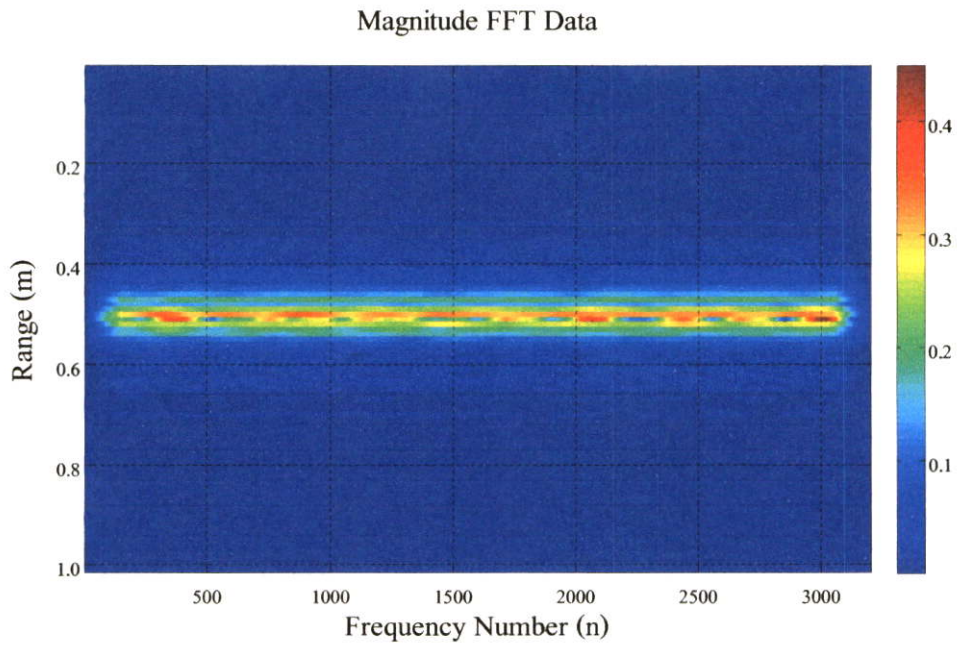
4.3.3 เมื่อมีวัตถุหนึ่งชิ้นระยะ 1.5 เมตร



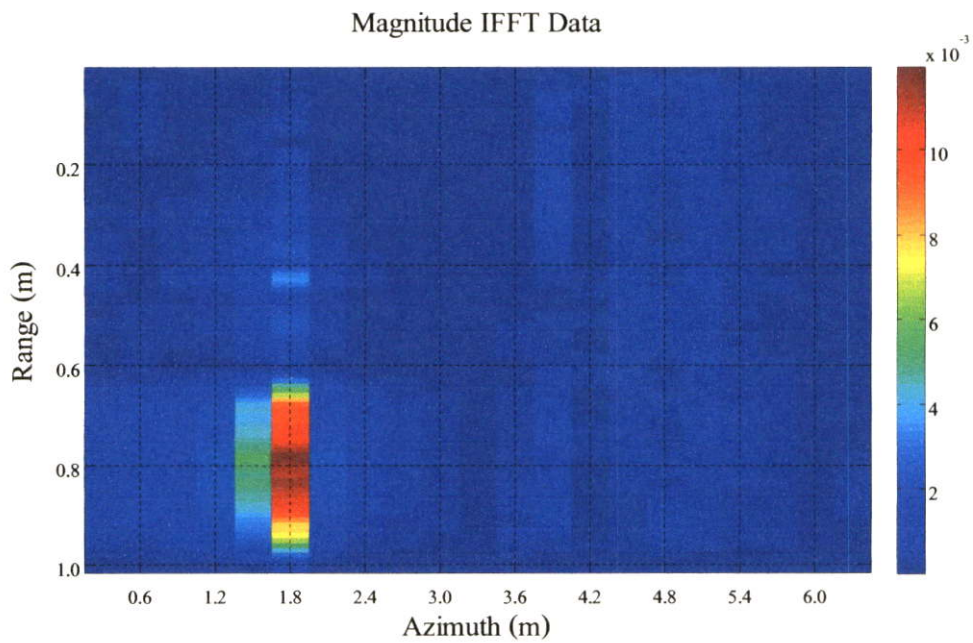
รูปที่ 4.15 แสดงการจัดวางวัตถุที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.16 แสดงแอมพลิจูดของข้อมูลที่วัดมาได้



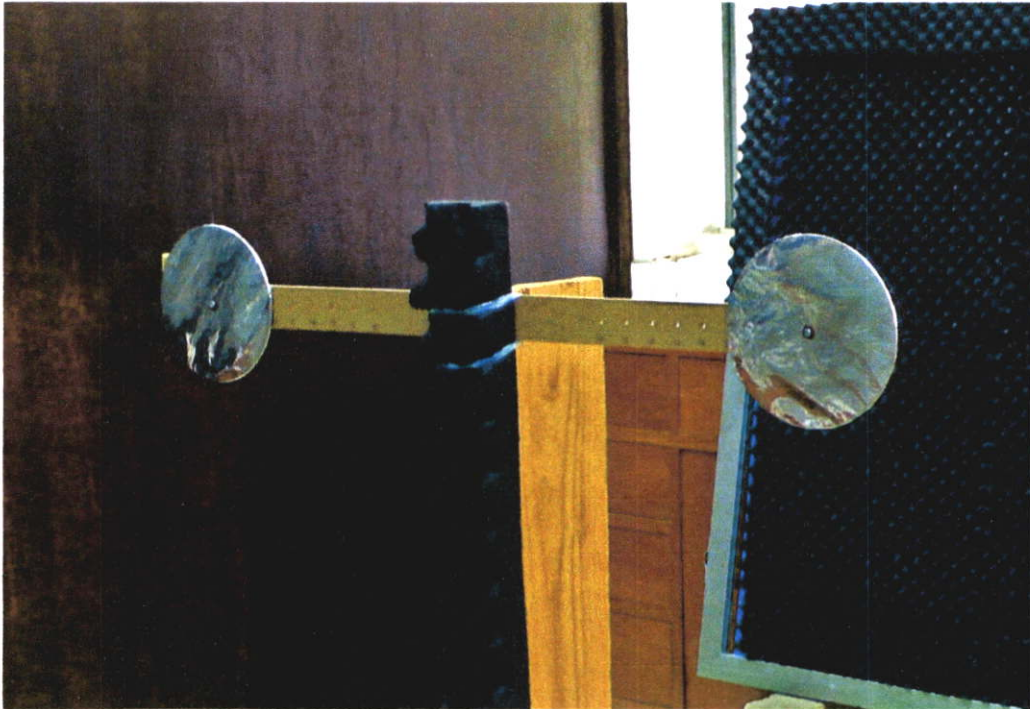
รูปที่ 4.17 แสดงแอมพลิจูดของการแปลงฟูเรียร์



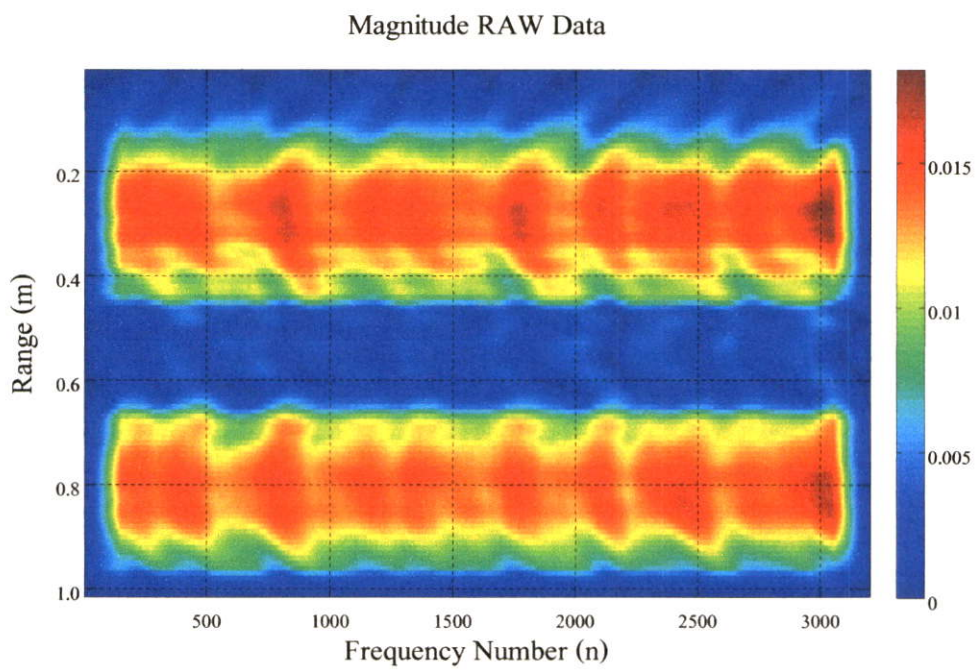
รูปที่ 4.18 แสดงภาพของวัตถุ

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นภาพของวัตถุอยู่ห่างจากสายอากาศเป็นระยะประมาณ 1.5 เมตร ซึ่งใกล้เคียงกับระยะที่ทำการวางวัตถุไว้

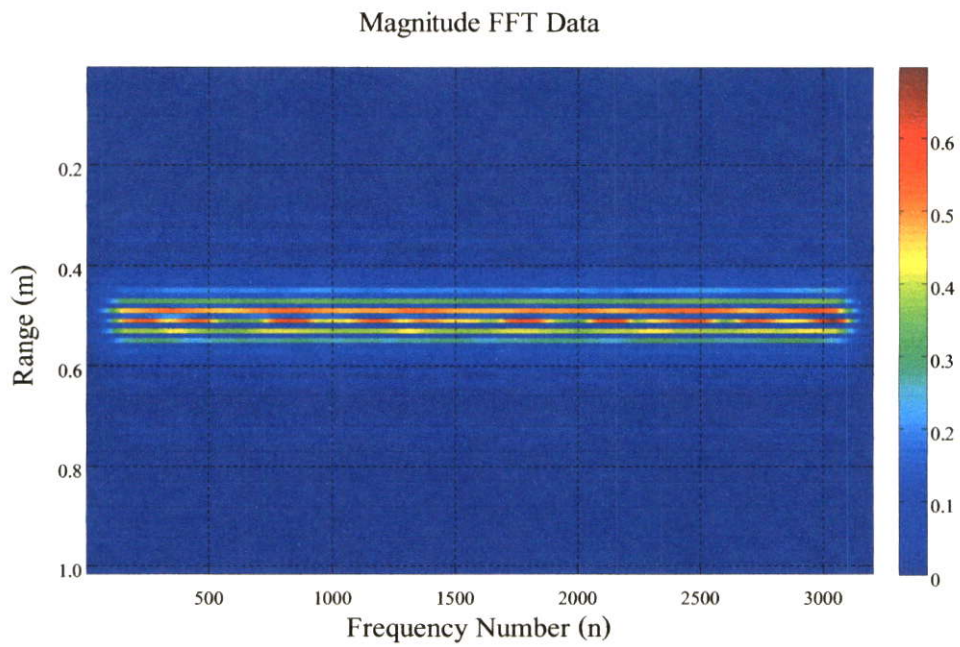
4.3.4 เมื่อมีวัตถุสองชิ้นระยะ 1.5 เมตร



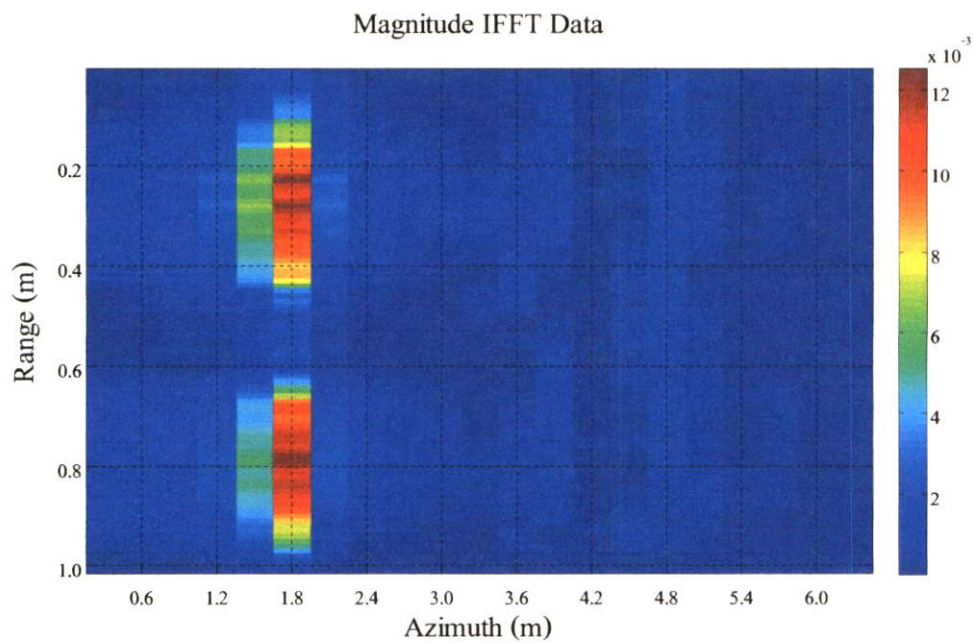
รูปที่ 4.19 แสดงการจัดวางวัตถุที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.20 แสดงแอมพลิจูดของข้อมูลที่วัดมาได้



รูปที่ 4.21 แสดงแอมพลิจูดของการแปลงฟูเรียร์



รูปที่ 4.22 แสดงภาพของวัตถุ

จากรูปที่ 4.22 จะเห็นภาพของวัตถุสองชิ้นอยู่ห่างจากสายอากาศเป็นระยะประมาณ 1.5 เมตร ซึ่งใกล้เคียงกับระยะที่ทำการวางวัตถุไว้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 บทสรุปผลการทดลอง

5.1.1 ระบบไมโครเวฟ

ระบบไมโครเวฟที่พัฒนาขึ้นยังต้องพัฒนาต่อเนื่องจากการสูญเสียกำลังที่ใช้ส่งสัญญาณ และถูกลดทอนสัญญาณกับสายนำสัญญาณมากจึงทำให้การเก็บข้อมูลเกิดการผิดพลาดได้ง่าย อีกทั้งท่อนำคลื่นที่ใช้งานถูกจำกัดไว้ที่ 9.1 – 9.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ทำให้ทำให้ความละเอียดของภาพยังไม่ดีนัก เนื่องจากความละเอียดของภาพนั้นจะขึ้นกับช่วงความกว้างของความถี่ที่ใช้งาน

5.1.2 ขนาดพื้นที่เก็บข้อมูล

ระยะที่เก็บข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ที่ 1 เมตรทำการเก็บข้อมูล 3201 ข้อมูล โดยการเคลื่อนที่ระหว่างจุดอยู่ที่ 0.01 เมตร และเมื่อ Δr คือ ความละเอียดด้านทิศการเคลื่อนที่ L_{sa} คือความกว้างของช่องเปิดสังเคราะห์ มีค่า 1 เมตร λ ในการทดลองนี้คือ 0.032 เมตร R คือระยะของพิกัด (Range) มีค่า 3 เมตร ซึ่งจะได้ว่า ความละเอียดด้านทิศการเคลื่อนที่ ในการทดลองนี้จะมีค่าเป็น $\Delta r = R\lambda/2L_{sa} = 3*0.032/2*1 = 0.048$ เมตร

5.1.3 ความสมบูรณ์ของภาพ

ผลที่ได้ในส่วนของการสร้างภาพกลับในส่วนของการใช้ระบบที่ทำการทดลองนี้เป็นที่น่าพอใจ แม้ว่าจะเห็นภาพของวัตถุที่สร้างภาพกลับมายังไม่ชัดเจนแต่ก็ยังสามารถแยกแยะวัตถุออกจากกันได้

5.1.4 เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลอยู่ที่ 1 ชั่วโมง 20 นาที ต่อการเก็บข้อมูลหนึ่งครั้ง ซึ่งนับว่าช้ากว่าที่ควรจะเป็น แต่ก็ยังสามารถพัฒนาระบบให้มีความเร็วขึ้นได้อีก

5.2 ปัญหาที่พบ

ปัญหาที่พบหลังจากพัฒนาระบบไมโครเวฟแบ่งได้เป็นส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ ช่วงความถี่ที่ใช้งาน ได้มีน้อยเกินไป ซึ่งเป็นผลมาจากท่อนำคลื่นที่ใช้งานถูกจำกัดไว้ที่ 9.1 – 9.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ทำให้ความละเอียดของภาพยังไม่ดีนัก การควบคุมและสั่งงานในระบบการเก็บข้อมูลที่ต้องทำงานสอดคล้องกัน ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ที่ยังจำเป็นต้องพัฒนาระบบเป็นอันดับต้นๆ โดยระบบนี้ไม่สามารถเก็บข้อมูลที่มีความเร็วสูงได้ จึงทำการทดลองได้ช้ามาก ซึ่งเป็นข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ใน

การทดลอง รวมทั้งระยะของการเก็บข้อมูลและพื้นที่ทำการทดลองมีขนาดเล็ก ทำให้จำนวนของข้อมูลนั้นมีน้อยเกินไป ส่งผลให้ได้ภาพมีคุณภาพ ไม่นั้น

5.3 แนวทางการพัฒนา

5.3.1 พัฒนาระบบไมโครเวฟ

การพัฒนาระบบไมโครเวฟต้องทำให้เป็นระบบปิดที่แยกส่วนทำงานชัดเจน ไม่ให้มีสัญญาณไมโครเวฟรบกวนกับระบบส่วนอื่นๆ และสามารถปรับคุณสมบัติระบบได้ โดยไม่ต้องมาสร้างทั้งระบบขึ้นใหม่ให้ยุ่งยากและทำอุปกรณ์ให้เป็นมาตรฐานไมโครเวฟมิลลิเมตรเวฟยิ่งขึ้น และส่วนที่ต้องปรับปรุงควรใช้สายอากาศที่มีช่วงความถี่ที่กว้างขึ้น และปรับปรุงไปใช้สายอากาศแบบอะเรย์เพื่อที่จะได้ข้อมูลเร็วขึ้น

5.3.2 พัฒนาด้านการเก็บข้อมูลและการสร้างภาพ

เพื่อให้ทำการเก็บข้อมูลได้เร็วขึ้นนั้นควรที่จะเปลี่ยนแปลงในส่วนของระบบแปลงสัญญาณเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ไวและถูกต้องมากขึ้น และสามารถตรวจเช็คสัญญาณที่ถูกต้องได้ และในส่วนของการสร้างภาพกลับจะต้องพัฒนาให้เป็น โปรแกรมที่สามารถใช้ได้ง่ายๆ เพื่อช่วยลดเวลาในการใช้งาน

สรุปผลการทดลองต่างๆ ที่ได้ทำการทดลองมาอาจจะยังไม่ใช้ค่าที่ถูกต้องนัก จึงต้องมีการพัฒนาต่อไป เพื่อนำไปสู่การส่งเสริมปรับปรุงและพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านไมโครเวฟกำลังงานต่ำ ให้ใช้งานในด้านใหม่ ๆ ให้เกิดเป็นประโยชน์ในอนาคตและแพร่หลายมากขึ้น เช่น การตรวจหาวัตถุภายใต้สิ่งบดบังทั้งกลางแจ้งหรือที่มืด การตรวจสอบสินค้าการเกษตร รวมถึงด้านการใช้เครื่องมือที่พัฒนามาจากไมโครเวฟกำลังงานต่ำถูกนำมาใช้งานในชีวิตประจำวัน เป็นต้น

บรรณานุกรม

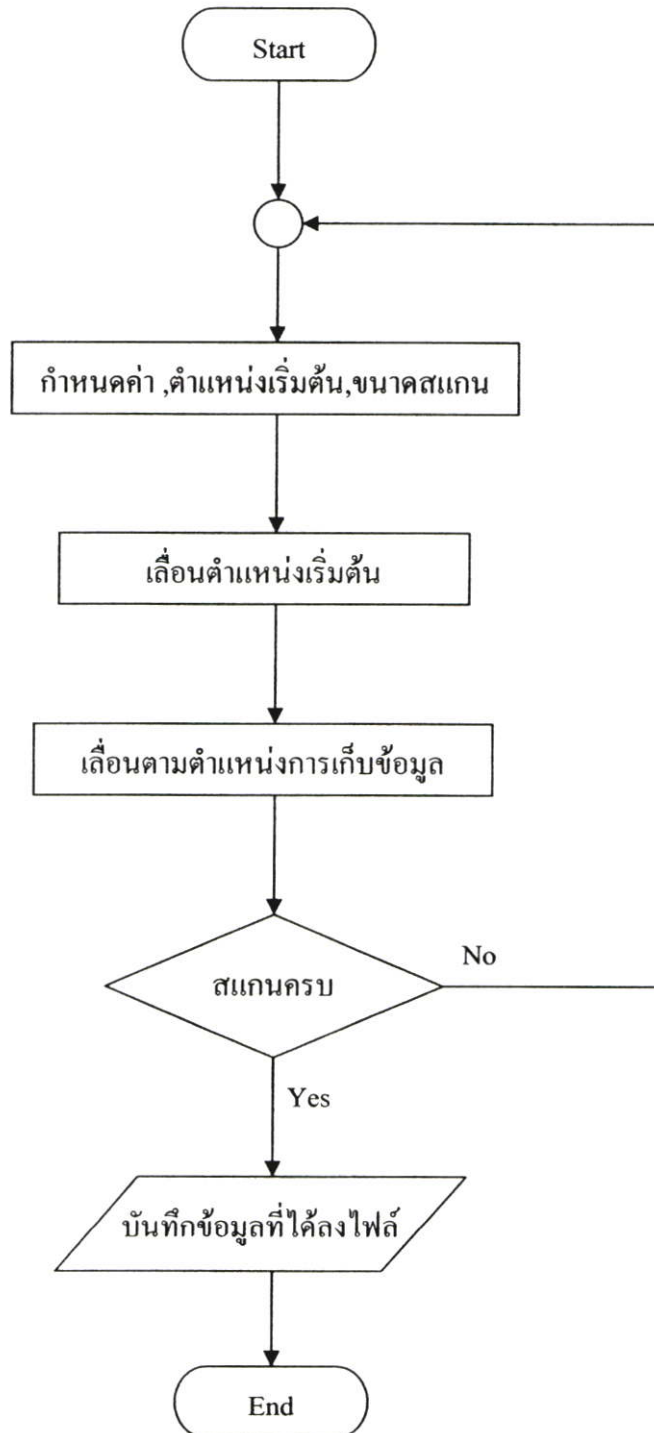
- [1] รัชชัย คำศรี. 2542. “การมองภาพที่ถูกบดบังด้วยคลื่นไมโครเวฟ” ปรินญาณิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] Anderson A.P. 1977. “Microwave holograph.” **Proceedings of The IEEE**. no.124 : 946-962.
- [3] Balanis A. 1964. **Antenna Theory Analysis and Design**. New York : John Wiley & Son.
- [4] Chu T. H. and Farhat N. H. 1988 “Frequency-swept microwave imaging of dielectric objects.” **IEEE Trans. Microwave Theory Tech**. vol. 36 : 489–493.
- [5] Collins R. E. 1994. **Foundation of microwave engineering**. New York : John Wiley & Sons.
- [6] David M. Sheen, Douglas L. McMakin and Thomas E. Hall. 2001. “Three-Dimensional Millimeter-Wave Imaging for Concealed Weapon Detection.” **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**. vol.49, no. 9 : 1581-1592.
- [7] Goodman J.W. 1968. **Introduction to Fourier Optics**. New York : McGraw Hill.
- [8] Herman I.P. 1996. **Optical Diagnostics for Thin Film Processing**. San Diego : Academic Press
- [9] John C. Curlander, Robert N. McDonough. 1991. **Synthetic aperture radar: systems and signal processing** New York : John Wiley.
- [10] Pieraccini M., Tarchi D., Rudolf H., Leva D., Luzi G., Bartoli G. and Atzeni C. 2000. “Structural static testing by interferometric synthetic radar.” **NDT&E International** 33 : 565–570
- [11] Seeger J. A. 1986. **Microwave theory, components, and devices**. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice-Hall.
- [12] Soumekh M. 1992. “A system model and inversion for synthetic aperture radar imaging.” **IEEE Trans. Image Processing**. vol. 1 : 64–76.
- [13] Soumekh M. 1994. **Fourier Array Imaging**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- [14] Soumekh M. 1999. **Synthetic aperture radar signal processing with MATLAB algorithms**. New York : John Wiley.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

แสดงแผนภาพขั้นตอนการทำงานและโปรแกรมควบคุมระบบเพื่อบันทึกข้อมูล

แผนภาพขั้นตอนการทำงาน



โปรแกรม MATLAB ในการควบคุมระบบเพื่อบันทึกข้อมูล

```

%hp8510C_OEM650X.m

close all;clear all;clc

global g

%1. Create the object.

com_port = 'COM7'; %Use your serial port
s = serial(com_port); %Create object.
BoardNumber = 8; %The GPIB controller card number
DeviceNumber = 16; %This is device settable
g=gplib('AGILENT',BoardNumber,DeviceNumber); %Create object.

%2. Configure the object.

set(s,'BaudRate',9600);
set(s,'DataBits',8);
set(s,'StopBits',1);
set(s,'Parity','none')
set(s,'FlowControl','none');
set(s,'RequestToSend','off');
set(s,'Terminator','CR'); % 'LF/CR'
set(s,'InputBufferSize',200000);
%Large input buffer. This makes room for bringing in a lot of data.
set(g,'InputBufferSize',200000); %Alternate syntax.
set(g,'EOSCharCode',0); %sets the termination character
%to 0 for binary data transfer.

%3. Connect to the object.

fopen(s) %Open communication.
fopen(g) %Open communication.

```

%4. Communicate with the instrument.

```

fprintf('%s\n',datestr(now));
fprintf(s,'1Z\n');           % Reset Driver
pause(10)
fprintf(s,'1SSA1');         % Echo off
pause(9)
out = fscanf(s);
fprintf('%s',out);
fprintf(s,'1LD0\n 1MC\n 1A1\n 1V1\n 1H-\n 1G');   % Go to CCW Limit
pause(27)
fprintf(s,'1LD0\n 1MN\n 1MPA\n 1PZ\n 1A1\n 1V5');
fprintf(s,'1D10000\n 1H+\n 1G\n 1T1\n 1PZ\n 1PR'); % Go to Initial
pause(5)
out = fscanf(s);
fprintf('%s',out);

%Configure the instrument.
po=0;      %set source #1 power dBm.
npoints=801; %Number of data points.
fprintf(g,'FORM4; FREQ;');   %Set data output format to ASCII.
                               %Select Frequency Domain.
fprintf(g,['CHAN1; POIN' num2str(npoints) '; POWE ' num2str(po) ';']);
fprintf(g,'RAMP; SWET 200 ms;'); %Set Ramp sweep mode & sweep time.
fprintf(g,'TITL "TEST SAR SYSTEM by PRAJAK TONGJAN";');
freq = linspace(9.100,9.600,3201);

fprintf('Start %s\n',datestr(now));
% fprintf(s,'1A10\n 1V0.1\n 1H+ 1D0\n 1G\n');
fprintf(s,'1A10\n 1V0.1\n 1H+');
pause(10)

```

```

for i = 0:10:1000      % cycle/ 10 mm MAX 1000 mm
    step = i*500;      % 500 step/ 1 mm
    fprintf(s,['1D' num2str(step) '\n 1G\n 1PR']);
    fprintf(['H+ ' num2str(i) ' mm  ']);    % Show state to screen
    pause(5)
    Phase(g);
    Logmag(g);
    out = fscanff(s);
    fprintf('%s',out);

end

fprintf(s,'1A10\n 1V1\n 1D0 1H-\n 1G\n 1T2');    % Back to Initial
pause(27)
fprintf('Finish %s\n',datestr(now));

%5. Clean up.

fclose(s)          % Close communication
delete(s)          % Delete object
clear s
fclose(g)          %Close communication.
delete(g)          %Delete object.
clear g

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Logmag.m
```

```
function Logmag(g)
```

```
%Set start and stop sweep frequency
```

```
fi=9.100;    %Start frequency. GHz.
```

```
fe=9.225;    %Stop frequency. GHz.
```

```
fprintf(g,['STAR ' num2str(fi) ' GHz; STOP ' num2str(fe) ' GHz; ']);
```

```
%Get Log Mag data.
```

```
fprintf(g,'USER4; LOGM; SING: AUTO;'); %Select parameter.
```

```
fprintf(g,'OUTPFORM');           %while BUSY.
```

```
pause(5)
```

```
%OK, I got really lazy here and put a pause in to wait for the
```

```
% data transfer to finish. You should query the instrument inside
```

```
% a while loop which exists when the instrument is ready.
```

```
d=fscanf(g); %Get the data.
```

```
m=stread(d,'%f','delimiter',',');
```

```
LA1=m(1:2:end);    %Extract A component = basic units of selected format.
```

```
LB1=m(2:2:end);    %Extract B component = 0.
```

```
fi=9.225;    %Start frequency. GHz.
```

```
fe=9.350;    %Stop frequency. GHz.
```

```
fprintf(g,['STAR ' num2str(fi) ' GHz; STOP ' num2str(fe) ' GHz; ']);
```

```
%Get Log Mag data.
```

```
fprintf(g,'USER4; LOGM; SING: AUTO;'); %Select parameter.
```

```
fprintf(g,'OUTPFORM');           %while BUSY.
```

```
pause(5)
```

```
%OK, I got really lazy here and put a pause in to wait for the
```

```
% data transfer to finish. You should query the instrument inside
```

```
% a while loop which exists when the instrument is ready.
```

```
d=fscanf(g); %Get the data.
```

```
m=stread(d,'%f','delimiter',',');
```

```

LA2=m(1:2:end);    %Extract A component = basic units of selected format.
LB2=m(2:2:end);    %Extract B component = 0.

fi=9.350;          %Start frequency, GHz.
fe=9.475;          %Stop frequency, GHz.
fprintf(g,['STAR ' num2str(fi) ' GHz; STOP ' num2str(fe) ' GHz; ']);
%Get Log Mag data.
fprintf(g,'USER4; LOGM; SING; AUTO;'); %Select parameter.
fprintf(g,'OUTPFORM');          %while BUSY.
pause(5)
%OK, I got really lazy here and put a pause in to wait for the
% data transfer to finish. You should query the instrument inside
% a while loop which exists when the instrument is ready.
d=fscanf(g); %Get the data.
m=stread(d,'%f','delimiter',' ');
LA3=m(1:2:end);    %Extract A component = basic units of selected format.
LB3=m(2:2:end);    %Extract B component = 0.

fi=9.475;          %Start frequency, GHz.
fe=9.600;          %Stop frequency, GHz.
fprintf(g,['STAR ' num2str(fi) ' GHz; STOP ' num2str(fe) ' GHz; ']);
%Get Log Mag data.
fprintf(g,'USER4; LOGM; SING; AUTO;'); %Select parameter.
fprintf(g,'OUTPFORM');          %while BUSY.
pause(5)
%OK, I got really lazy here and put a pause in to wait for the
% data transfer to finish. You should query the instrument inside
% a while loop which exists when the instrument is ready.
d=fscanf(g); %Get the data.
m=stread(d,'%f','delimiter',' ');
LA4=m(1:2:end);    %Extract A component = basic units of selected format.
LB4=m(2:2:end);    %Extract B component = 0.

```

```

LA(1,1:801) = LA1;
LA(1,801:1601) = LA2;
LA(1,1601:2401) = LA3;
LA(1,2401:3201) = LA4;

%Save Data.

fid = fopen('DATA_L.txt', 'a');
%a = Open file, or create new file, for writing:
%  append data to the end of the file.

fprintf(fid, '%f\t', LA);
%Write formatted data to file "Fixed-point notation and Horizontal tab".

%Set start and stop sweep frequency
fprintf(fid, '\n'); %Write "New line".
fclose(fid); %Close one or more open files.
fprintf('Log MAG Done. ');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Phase.m

function Phase(g, fm)

%Set start and stop sweep frequency
fi=9.100; %Start frequency, GHz.
fe=9.225; %Stop frequency, GHz.

fprintf(g, ['STAR ' num2str(fi) ' GHz; STOP ' num2str(fe) ' GHz; ']);

%Get Log Mag data.

fprintf(g, 'USER4; PHAS; SING; AUTO;'); %Select parameter.
fprintf(g, 'OUTPFORM'); %while BUSY.
pause(5)

%OK, I got really lazy here and put a pause in to wait for the
% data transfer to finish. You should query the instrument inside
% a while loop which exists when the instrument is ready.

d=fscanf(g); %Get the data.

```

```

m=stread(d,'%f','delimiter','');
LA1=m(1:2:end);    %Extract A component = basic units of selected format.
LB1=m(2:2:end);    %Extract B component = 0.

fi=9.225;    %Start frequency, GHz.
fe=9.350;    %Stop frequency, GHz.
fprintf(g,['STAR ' num2str(fi) ' GHz; STOP ' num2str(fe) ' GHz; ']);
%Get Log Mag data.
fprintf(g,'USER4; PHAS; SING; AUTO;'); %Select parameter.
fprintf(g,'OUTPFORM');    %while BUSY.
pause(5)
%OK. I got really lazy here and put a pause in to wait for the
% data transfer to finish. You should query the instrument inside
% a while loop which exists when the instrument is ready.
d=fscanf(g); %Get the data.
m=stread(d,'%f','delimiter','');
LA2=m(1:2:end);    %Extract A component = basic units of selected format.
LB2=m(2:2:end);    %Extract B component = 0.

fi=9.350;    %Start frequency, GHz.
fe=9.475;    %Stop frequency, GHz.
fprintf(g,['STAR ' num2str(fi) ' GHz; STOP ' num2str(fe) ' GHz; ']);
%Get Log Mag data.
fprintf(g,'USER4; PHAS; SING; AUTO;'); %Select parameter.
fprintf(g,'OUTPFORM');    %while BUSY.
pause(5)
%OK. I got really lazy here and put a pause in to wait for the
% data transfer to finish. You should query the instrument inside
% a while loop which exists when the instrument is ready.
d=fscanf(g); %Get the data.
m=stread(d,'%f','delimiter','');
LA3=m(1:2:end);    %Extract A component = basic units of selected format.

```

```

LB3=m(2:2:end);    %Extract B component = 0.

fi=9.475;         %Start frequency, GHz.
fe=9.600;         %Stop frequency, GHz.
fprintf(g,['STAR ' num2str(fi) ' GHz; STOP ' num2str(fe) ' GHz; ']);
%Get Log Mag data.
fprintf(g,'USER4; PHAS; SING; AUTO:'); %Select parameter.
fprintf(g,'OUTPFORM');          %while BUSY.
pause(5)
%OK, I got really lazy here and put a pause in to wait for the
% data transfer to finish. You should query the instrument inside
% a while loop which exists when the instrument is ready.
d=fscanf(g); %Get the data.
m=stream(d,'%f','delimiter',' ');
LA4=m(1:2:end);    %Extract A component = basic units of selected format.
LB4=m(2:2:end);    %Extract B component = 0.

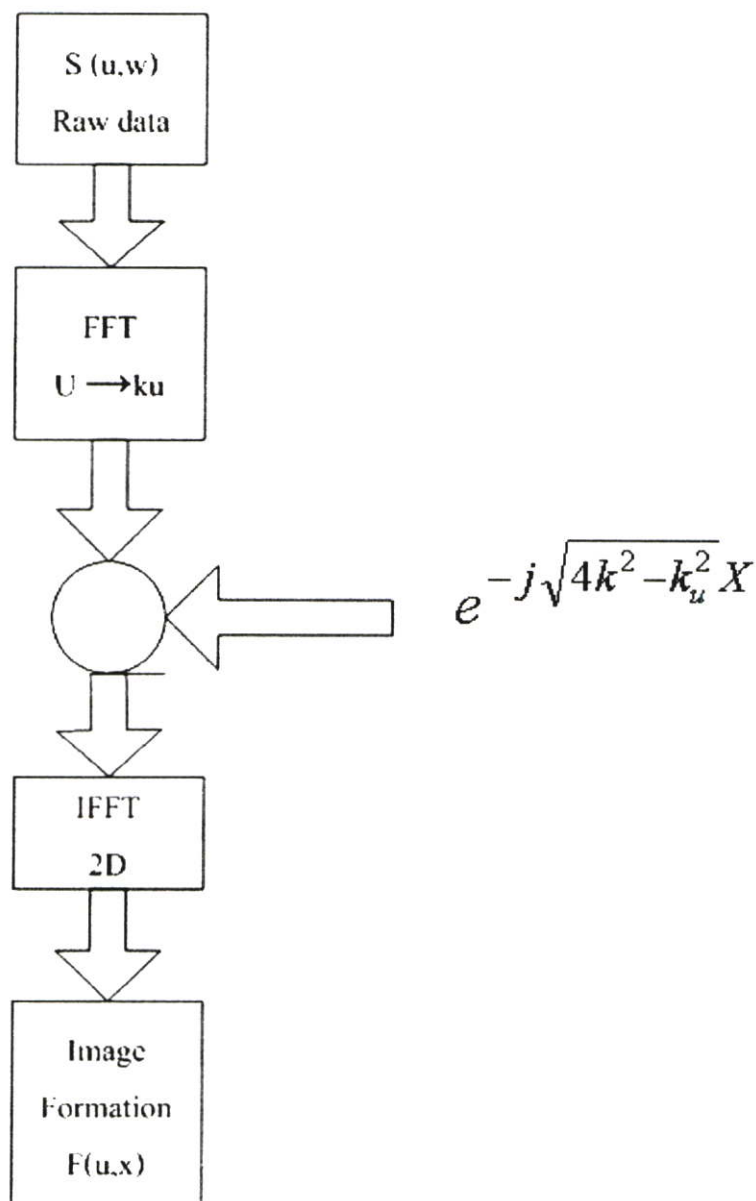
LA(1,1:801) = LA1;
LA(1,801:1601) = LA2;
LA(1,1601:2401) = LA3;
LA(1,2401:3201) = LA4;
%Save Data.
fid = fopen('DATA_P.txt', 'a');
%a = Open file, or create new file, for writing;
% append data to the end of the file.
fprintf(fid, '%f\t', LA);
%Write formatted data to file "Fixed-point notation and Horizontal tab".
%Set start and stop sweep frequency fprintf(fid, '%f\t', LA);
fprintf(fid, '\n'); %Write "New line".
fclose(fid);      %Close one or more open files.
fprintf('Phase Done. ');

```

ภาคผนวก ข.

แสดงแผนภาพขั้นตอนการทำงานและโปรแกรม MATLAB ในการสร้างภาพกลับ

แผนภาพขั้นตอนการสร้างภาพกลับ



โปรแกรม MATLAB ในการสร้างภาพกลับ

```
close all;clear all;clc
```

```
L=load('DATA_L.txt','txt');
```

```
mag=10.^(L./20);      %convert Log to Linear
```

```
A=mag;
```

```
P=load('DATA_P.txt','txt');
```

```
theta=deg2rad(P);    %convert degree to radian
```

```
P=theta;
```

```
% cj=sqrt(-1);
```

```
pi2=2*pi;
```

```
c=3e8;
```

```
fi=9.1e9;
```

```
fc=9.35e9;
```

```
fe=9.6e9;
```

```
npoints=3201;
```

```
kc=2*pi*fc;
```

```
wc=pi2*fc;
```

```
R=3;          %Rage
```

```
Cr=1;         %ocoss Rage
```

```
Du=2*pi*(R/(4*kc*(Cr*R)));
```

```
freq = linspace(fi,fe,npoints);
```

```
s=A.*exp(j.*P);
```

```
rc = abs(-50:1:50);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
for column = 1:3201,
```

```
    if(column<151)
```

```
        yf(1,column) = (1/150)*(column);
```

```
    else if(151<column<3051)
```

```

        yf(1,column) = 1;
    end
end
if(column>3051)
    yf(1,column) = (1/150)*(3201-column);
end
end
for row = 1:101,
    if(row<6)
        xf(row,1) = (1/5)*(row);
    else if(6<column<95)
        xf(row,1) = 1;
    end
end
if(row>95)
    xf(row,1) = (1/5)*(101-row);
end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for row = 1:101,
    ss = s(row,:).*yf(1,:);
    s(row,:) = ss;
end
for column = 1:3201,
    ss = s(:,column).*xf(:,1);
    s(:,column) = ss;
end
figure()
imagesc(abs(s))
title('Magnitude RAW Data');

```

```

grid on
colormap jet
colorbar

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

for column = 1:3201,
    ss = s(:,column);
    fm = fftshift(fft(fftshift(ss)));
    fft_sc(:,column) = fm;

```

```

end

```

```

figure()

```

```

imagesc(abs(fft_sc))

```

```

title('Magnitude FFT Data');

```

```

grid on

```

```

colormap jet

```

```

colorbar

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

for column = 1:3201,

```

```

    k = 2*pi/(c/freq(column));

```

```

%   ku = 1/(1/100);

```

```

    for row = 1:101,

```

```

        ku = rc(row);

```

```

        sw(row,column) = exp(-j*R*sqrt((4*k^2)-ku^2));

```

```

    end

```

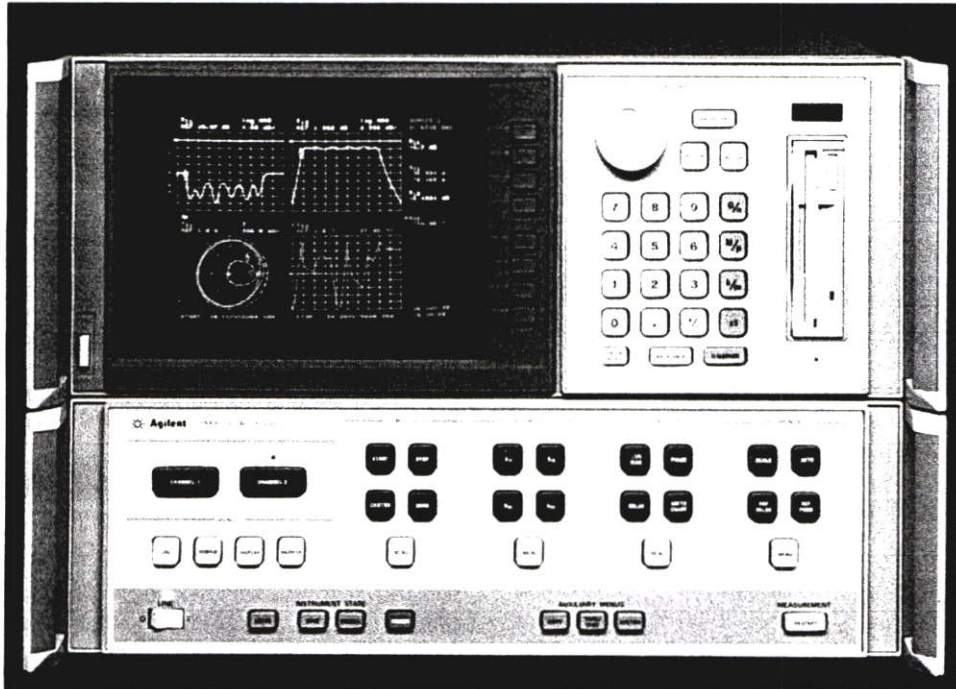
```

end

```


ภาคผนวก ค.
ข้อมูลอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. Agilent 8510C Network Analyzer



System capabilities¹

Measurement

Number of display channels: Two display channels are available.

Number of display parameters: The four basic parameters, S11, S21, S12, S22, can be displayed for either selected channel in either a "four quadrant" or an "overlay" format.

Measurement parameters: S11, S21, S12, S22. Parameters may be redefined by the user for special applications. Conversion to Z1 (input impedance), Z2 (output impedance), Y1 (input admittance), Y2 (output admittance), and 1/S is also provided.

Domains available: Frequency, time (Option 010), pulse profile² (Option 008), auxiliary voltage (rear panel output acting as device stimulus, range is ± 10 VDC), and power³ (sweep power level at a CW frequency).

Formats

Cartesian: log/linear magnitude, phase, group delay, SWR, real part of complex parameter, imaginary part of complex parameter.

Smith chart: Marker format can be selected as log magnitude, linear magnitude, R - jX, or G - jB.

Polar: Marker format can be selected as log magnitude, linear magnitude, phase, or real and imaginary.

Data markers: Five independent data markers read out and display the value of the formatted parameter and stimulus (frequency, time, or auxiliary voltage).

Marker functions

Marker search: Specific trace values can be located, such as MAX, MIN, and target (for example 3.00 dB point).

Discrete/continuous: Markers can indicate data at actual data points or they can interpolate between data points to allow the setting of a marker at an exact stimulus value.

Delta marker: Marker readout shows difference between active marker and the reference marker (any marker can be used as the reference).

Group delay characteristics

Group delay is computed by measuring the phase change within a specified step (determined by the frequency span and the number of points per sweep).

Aperture: Determined by the frequency span, the number of steps per sweep, and the amount of smoothing applied.

Minimum aperture = (frequency span)/(# points - 1)

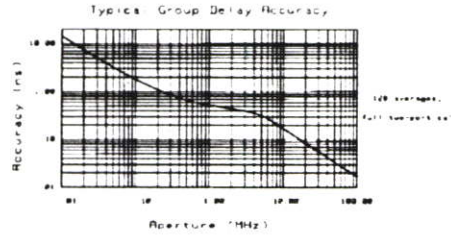
Maximum aperture = 20% of the frequency span

Range: The maximum delay is limited to measuring no more than ± 180 degrees of phase change within the minimum aperture.

$$\text{Range} = 1/(2 \times \text{minimum aperture})$$

For example, with a minimum aperture of 200 kHz, the maximum delay that can be measured is 2.5 μsec .

Accuracy: The following graph shows group delay accuracy at 20 GHz with an 8614B test set and an 83621A operating in stepped sweep mode. Insertion loss is assumed to be zero.



In general, the following formula can be used to determine the accuracy, in seconds, of a specific group delay measurement.

$$\frac{0.003 \times \text{Phase accuracy (deg)} + \text{delay (sec)} \times \text{linearity (Hz)}}{\text{Aperture (Hz)}}$$

Depending on the aperture and the device length, the phase accuracy used is either incremental phase accuracy or worst case phase accuracy. The above graph shows this transition.

Source control

All source control is provided from the 8610C front panel.

Compatible sources

8360 series synthesized sweeper

8340A/B synthesized sweeper⁴

8341A/B synthesized sweeper⁴

8360B sweep oscillator with 836xx RF plug in⁴

(ramp sweep mode only)

Sweep limits: Set start/stop or center/span of the stimulus parameter (frequency, time, or auxiliary voltage).

Measured # points per sweep: Selectable as 51, 101, 201, 401, or 801 points. In frequency list mode, the number of points can range from 1 to 792.

Sweep modes

Ramp sweep⁵ (analog)

Stepped sweep (available with all sources except the Agilent 8360B): A faster version of step sweep, called "quick step", is selectable when using an 8360 series synthesized sweeper.

Frequency list sweep: Define up to 30 different arbitrary sub sweep frequency ranges by specifying start/stop, center/span, or CW sweeps. Define the number of points or step size for each range. Display all segments or a single segment on screen. All frequencies are synthesized if using the 8340/41 or 8360 series synthesized sweepers. Frequency domain only.

Single point (single frequency)

Fast CW mode (GPIB only): Raw data (real and imaginary) is sent immediately to GPIB as soon as it is taken. Display is blanked in this mode. The source is phase locked once when entering this mode, but is not re phase locked at each point. Must be triggered externally (TTL). Data is available approximately 600 μsec after the trigger pulse is received.

1. The symbol ¹ denotes a new feature or capability due to the 8610C firmware revision 7.0.

2. Pulse profile domain is not available in the 8510XF systems.

3. Power domain requires 8360 series sources. Sources with firmware revisions prior to 01.04.83 require updating.

4. The 8340, 8341 and 8350 series sources are not compatible with the 8510XF systems.

5. Ramp sweep mode is not available in the 8510XF systems.

Power sweep: From power domain, sweep power at a CW frequency. When combined with the receiver calibration feature, power sweep allows quicker and more accurate absolute power measurements of an amplifier's 1 dB gain compression point.

Alternate sweep: The two channels, including markers, may be coupled¹ (same source parameters) or uncoupled (different source parameters).

Sweep time: Minimum sweep time is automatically selected, depending on the number of points per sweep (and the averaging factor if in stepped mode). Longer sweep times may be entered by the user from 0.1 to 100 seconds.

Source power: Set source power (dBm) or power slope (dBm/GHz). For the S parameter test sets with built in attenuators, the port 1 or port 2 signal level can be controlled by setting the internal attenuator of the test set. Flat power is achievable at the test port when using the user flatness feature of the 8360 series synthesizers. An E4418A power meter with the 8480 series of power sensors are required to measure power for flatness correction.

Multiple frequency control mode: In this mode, the 8510C controls up to three frequency ranges independently: the frequency of the primary source (83621A synthesized sweeper), the frequency of a secondary source (may be phase locked 8360B sweep oscillator), and the frequency of the network analyzer receiver.

Frequency control: All frequency ranges can be separately defined as functions of the device under test frequency, by specifying a multiplier (a ratio of integers) and an offset for each frequency.

Definition storage: The active multiple frequency mode parameters are stored in non volatile memory and may be saved on disc with the hardware configuration.

Sweep modes: All sweep modes can be used in multiple frequency mode.

External LO phase lock control: In applications where an external LO is used in place of a test set, LO phase lock control is provided to phase lock a sweep oscillator with DC FM capability (for example, 8360B) to a synthesized sweeper (for example, 83621A).

Power leveling and power control²

Power leveling capability comes as part of the standard 8510XP systems. With power leveling, power levels at the test ports are controlled with a typical accuracy of ± 1.0 dB with a control range greater than 20 dB.

Power leveling modes: These modes are available in both RF and LO power control.

System leveling: Power leveled at the test ports and is entirely controlled by the 8510XP system. This is also the normal operating mode.

Internal leveling: Power leveled at the output port of the source.

External leveling: Leveling is achieved using an external detector.

Leveling off: Source set to the unleveled mode.

Power leveling detections modes: These modes are available under system leveling. Each mode will determine how the 'unleveled' condition is detected.

Always: The 8510C polls for errors during every sweep.

Smart: The 8510C polls for errors during the first sweep following a change in frequency, and thereafter only if an error was detected during the first sweep. This is the default mode.

Once: The 8510C polls for errors only during the first sweep following a change in frequency.

Never: The 8510C does not poll for errors during any sweep.

Power control: Set port power (dBm) or power slope (dBm/GHz). With system leveling selected, the 8510XP system will control the RF source, the millimeter wave controller and the test heads to deliver the user requested power to the test ports.

Vector error correction techniques

Calibration types available: Various calibration types are available. Once calibrated, the frequency limits may be narrowed using the FREQUENCY SUBSET feature of the 8510C.

Response/isolation calibration: Compensates for frequency response and directivity (reflection) or frequency response and crosstalk (transmission) of test sets. Requires a short or open circuit and load termination (reflection) or through connection and load termination (transmission).

One port calibration: Correction of test set port 1 or port 2 directivity response and source match errors.

Requires three known standards, for example, open, short, and load (fixed, sliding, or offset) terminations.

Two port calibration: Compensates for port 1 and port 2 directivity, source match, reflection frequency response, load match, transmission, frequency response and crosstalk. Crosstalk (isolation) calibration can be eliminated.

Full two port (transmission): For use with an S parameter test set, requires three known standards at each port, for example, short, open (or offset short), and load (fixed, sliding, or offset) terminations. A through connection is also required.

One path two port calibration: A two port calibration for one port Reflection/Transmission test sets, such as the millimeter wave systems, provides a full two port error corrected measurement when the test device is turned around and measured in both directions.

1. In the 8510XP systems, the two channels are coupled (uncoupled channels is not available).

2. The features or capabilities listed under Power Leveling and Power Control are only available in the 8510XP systems.

Thru reflect line (TRL): A two port calibration which requires a through connection, a reflection standard, and a reference transmission line. S parameter test sets only.

Line reflect match (LRM): A two port calibration similar to TRL except it uses fixed loads and not transmission line(s) as its impedance reference. LRM is a particularly convenient broadband calibration for non coaxial environments with accuracy as good as TRL. S parameter test sets only.

Adaptor removal calibration: A two port calibration for noninsertable devices, such as those with identical sexed connectors on both ports. S parameter test sets only.

Two port to one port calibration: Create and store a separate one port calibration set for either port 1 or port 2 from an existing two port calibration.

Reference plane extension: Redefine the plane of measurement reference (zero phase) to other than that established at calibration. A new reference plane is defined in seconds of delay from the test set port and ranges between -1 second.

Connector compensation: Compensates for errors between dissimilar but matable connectors such as 3.5 mm and SMA.

Receiver cal: Adjusts non ratioed receiver inputs to absolute power levels; displays absolute power in dBm; requires reference sweep of known source power (using flatness correction).

Set Zo: Can redefine the characteristic impedance of a measurement to other than 50 Ω .

Data averaging: Similar to a variable bandwidth IF filter, this function computes the running average of either a number of data traces in ramp mode or data points in stepped mode. Averaging factors range from 1 to 4096 in powers of 2. In stepped sweep mode, each data point is averaged before being displayed.

Trace smoothing: Similar to variable bandwidth video filter, this function computes the moving average of adjacent data points in a single trace. Smoothing aperture ranges from 0.125% to 20% of the trace width.

Data hardcopy

Data plotting: Hard copy plots are automatically produced by the 8510C when used with an HP GL compatible plotter using either the system bus (GPIB compatible) or serial output interface (RS 232 C).

Plotter functions: Plot trace(s), graticule(s), marker(s), or text with any plotter pen. Operating and system parameters can also be plotted.

Formats: Full or quarter page plots of any parameter.

Plot all 4 S parameters: Plots all four S parameters in 4 quadrant format.

Plotter/printer buffer: Retain trace update of the 8510 while plotting/printing previous data via either of the two serial output interface (RS 232 C) ports. Total buffer memory available is 400 Kbytes for serial output port 1 and 100 Kbytes for serial output port 2.

Data listings: For printing and plotting, the Agilent 8510C can send data, via either its GPIB¹ or its RS 232 interface, to the HP ThinkJet, QuietJet, DeskJet, LaserJet, or PaintJet graphics printers. Measurement data, operating parameters and system parameters can all be printed or plotted.

Display control

Display type: Color (raster scan), 7.6" diagonal; display graticule, 5.6" diagonal.

Title: Add custom titles (49 characters maximum) to the display of the 8510C. Titles are plotted when making hardcopies of displayed measurements.

Adjust display: Control the intensity and background intensity of the display. Also, customize the color, tint, and brightness of the data traces, memory traces, reference lines, graticules, text, and warning messages. Select from 16 colors. Default colors can be recalled along with one set of user defined display values. Control is in the percent of full range.

Limit lines: Define up to eight test limit segments per parameter per channel; segments may be any combination of flat lines, sloping lines, or discrete points; limit testing gives pass/fail decision on each sweep.

CRT formats: Single channel, dual channel overlay (both traces on one graticule), dual channel split (each trace on separate graticules), four parameter overlay or split.

Trace functions

Display data: Display current measurement data, memory data, or current measurement and memory data simultaneously.

Trace math: Vector math (, , \times , /) of current linear measurement values and memory data.

Scale resolution

Magnitude: Log format (dB/div): 0.001 to 500

Linear format (units/div): 10×10^{-1} to 500

Phase: Cartesian (degrees/div): 10×10^{-1} to 500

Polar (degrees/display graticule): 45

Reference value: Ranges between -500 units (dB, degrees, seconds, etc.)

Reference position: Ranges from the 0 (bottom) to 10 (top) graticule position.

Auto: Automatically selects scale resolution and reference value to center the trace on the CRT graticules for easy viewing.

Electrical delay: Offset measured phase or group delay data by a defined amount of electrical delay, in seconds. Operates similar to an electronic line stretcher. Amount of electrical delay can range between -1 second. Electrical delay can also be displayed in electrical length (meters) or physical length by entering the appropriate VELOCITY FACTOR, the propagation velocity relative to the speed of light.

Waveguide delay: Non linear electrical delay used to remove the effects of dispersion in waveguide.

Table delay: Allows user to input an array of real and imaginary pairs to correct for dispersion in non coaxial media such as microstrip or coplanar waveguide.

1. When remoteplotting from the 8510 system bus (GPIB compatible) port to a Centronics printer/plotter, use an IEEE 450HV¹ or IEEE 450HVE HP or Centronics Converter.

Storage

Internal memory

Instrument state: Eight instrument states can be stored in non-volatile memory via the SAVE menu. They can then be recalled via the RECALL menu. Instrument states include all control settings, memory trace data, active list frequency tables, active calibration coefficients, and custom display titles. Register 8 is reserved for the power-up state, which can be defined by the user.

Hardware configurations: One hardware configuration is stored in active non-volatile memory. This configuration is not changed at instrument preset. The hardware configuration includes all instrument addresses and the multiple frequency mode parameters.

Data traces: Eight traces of data can be stored in the trace memories. Traces 1-4 are stored in non-volatile memory.

Calibration sets: Eight separate calibration sets may be stored in non-volatile memory. If any 801 point full two-port calibrations are stored, storage may be limited to as few as four calibration sets.

Calibration kits: Two calibration kits, including user-modified kits can be stored in the 8510 internally allocated memory. An internally stored kit is written over when another calibration kit is loaded in the same data storage location. Calibration kits can also be stored to disk.

Internal disk drive: The built-in disk drive can be used to store and retrieve different types of data on a 3.5 inch disk. Data files can be stored in either the HP LIF or MS-DOS[®] formats. Diskettes of double-sided format or high-density format are recommended.

External disk drive: Data can also be stored on disk using an external disk drive with command subset SS/80. Data files are stored in Hewlett-Packard's standard LIF or MS-DOS format.

Disk storage memory requirements

Type of Data to be Stored	Memory Required (Kbytes)
Calibration set (full two-port, 801 pts)	234
Calibration kit	2
Instrument state	7
Hardware state	0.5
Machine dump	400
Data data (201 pts)	
1 S-parameter	5.5
4 S-parameters	20
Data formatted, raw or memory (201 pts)	5.5
User display	33

Time domain (Option 010)

Description

With the time domain option, data from transmission or reflection measurements is converted from the frequency domain to the time domain using the inverse Fourier transform and presented on the CRT display. The time domain response shows the measured parameter value versus time. Markers may also be displayed in electrical length (or physical length if the relative propagation velocity is entered).

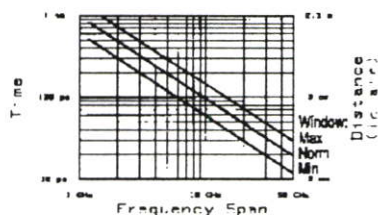
1. Response resolution is the ability to resolve two closely spaced responses of equal magnitude. For example, in time impulse response, two equal responses that are separated in time by less than one impulse width cannot be resolved as two separate responses.

Time stimulus modes

Two types of time domain stimulus waveforms can be simulated during the transformation—a step and an impulse. Although these waveforms are generated mathematically with the inverse FFT, the results for linear circuits are the same as would be obtained if the actual time waveforms had been applied and measured.

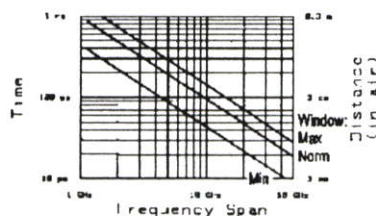
Low pass step: This stimulus, similar to a traditional Time Domain Reflectometer (TDR) waveform, is used to measure low pass devices. Transforming to time low pass requires a sweep over a harmonic set of frequencies including an extrapolated DC value. The step response is typically used for reflection measurements only. The low pass step waveform displays a different response for each type of impedance (R, L, C), giving useful information about the discontinuities being measured.

Response resolution: In low pass step mode, response resolution is determined by the step rise time (10% to 90%) of the time stimulus. This depends on both the frequency span and the window used (see Windows):



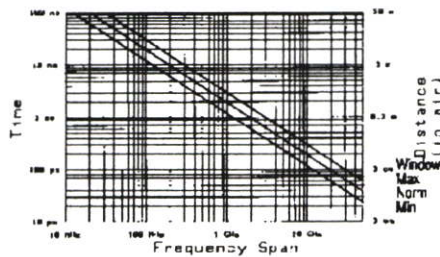
Low pass impulse: This stimulus is also used to measure low pass devices, and is the mathematical derivative of the low pass step response. Transforming to time low pass requires a sweep over a harmonic set of frequencies including an extrapolated DC value. The time domain response shows changes in the parameter value versus time. The impulse response can be used for reflection (fault location) or transmission measurements.

Response resolution: In low pass impulse mode, response resolution is defined by the 50% impulse width of the time stimulus. This depends on both the frequency span and the window used (see Windows):



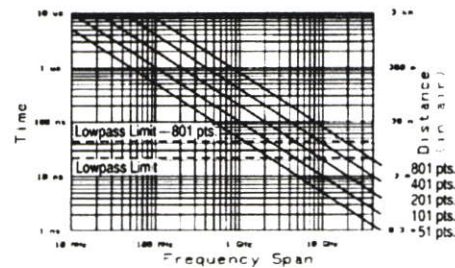
Bandpass impulse: The bandpass impulse simulates a pulsed RP signal (with an impulse envelope) and is used to measure the time domain response of band limited devices. The start and stop frequencies are selectable by the user to any values within the limits of the source and test set used. The bandpass time domain response shows changes in the parameter values versus time. Bandpass time domain responses are useful for both reflection and transmission measurements.

Response resolution¹: In bandpass impulse mode, response resolution is defined by the 60% impulse width of the time stimulus. This depends on both the frequency span and the window used (see Windows):



Time domain range

The time domain range, the range over which the display is free of response repetition, depends on the frequency span and the number of points as shown in the following graph²:



Range resolution: Range resolution is the ability to locate a single response in time. It is a function of the time span selected and the number of data points. Range resolution = time span/(number of points - 1). Range resolution better than 1 mm (3 ps) can typically be achieved. This is determined by source stability.

Windows: The windowing function can be used to modify (filter) the frequency domain data to reduce overshoot and ringing in the Time Domain response. Three types of windows are available: minimum, normal, maximum. Typical effective impulse width and sidelobe response to each type of window are shown in the table below:

Window type	Kaiseressel parameter	Impulse width	Sidelobes (relative to peak)
Minimum	0	Minimum	15 dB
Normal	6	1.5x Minimum	50 dB
Maximum	13	2.5x Minimum	90 dB

Gating: The gating function can be used to isolate individual Time Domain responses. In converting back to the frequency domain the effects of the responses outside the gate are removed. The location and span of the gate can be controlled by setting either the gate center position and time span or by setting the gate start and stop times.

Measurement throughput summary

The following table shows typical measurement times for an 8510C system with full two port error correction.

	Number of points				
	51	101	201	401	801
Measurement³					
Ramp sweep ⁴	270 ms	340 ms	470 ms	740 ms	1.3 s
Stepped sweep					
Avg factor = 1	1.25 s	2.5 s	5 s	10 s	20 s
Avg factor = 128	6.25 s	12.8 s	24 s	49 s	106 s
Time domain conversion⁵	50 ms	100 ms	200 ms	400 ms	800 ms
GPB data transfer to computer⁶					
Internal format	20 ms	30 ms	50 ms	100 ms	200 ms
ASCII format	240 ms	460 ms	900 ms	1.8 s	3.6 s
IEEE 754 floating point format					
32 bit	20 ms	40 ms	80 ms	160 ms	320 ms
64 bit	40 ms	80 ms	150 ms	300 ms	590 ms

Remote programming

Interface: GPIB interface operates according to IEEE 488 1978 and IEC 625 standards and IEEE 728 1982 recommended practices.

System interface: The 8510C system bus is a GPIB port used exclusively by the 8510C to control and extract information from the other instruments in the system such as the RP source, test set, and the digital plotter.

Addressing: The GPIB addresses of the 8510C and all instruments connected to the 8510 system interface can be verified or set from the 8510C front panel via the LOCAL menu. Addresses can range from 0 to 30 decimal.

1. Response resolution is the ability to resolve two closely spaced responses of equal magnitude. For example, in time impulse response, two equal responses that are separated in time by less than one impulse width cannot be resolved as two separate responses.
2. In low pass mode (step or impulse), range is limited by the minimum spacing between frequency domain data points (45 MHz or 22.5 MHz with 801 points). This limit is labeled on the graph as "low pass limit".
3. Includes system trace time, but does not include source hand-switch times (typically 50 nsec each). Time domain gating is assumed off.
4. If averaging is used, multiply the above ramp sweep measurement times by the averaging factor to get the total time.
5. Option 010 only, gating off.
6. Measured with an HP 9000 Series 300 computer. Single point data transfers can be accomplished in approximately 1 nsec per point using the fast CW mode.

The factory selected addresses are the following:

8510C network analyzer	16
Source #1	19
Source #2	18
Test set	20
Plotter	06
Printer	01
Disc drive	00
Pass through address	17

Pass-through address: Instruments connected to the 8510C system bus may be accessed via the pass through address.

Transfer formats:

Binary (internal 48 bit floating point complex format)
ASCII

32/64 bit IEEE 754 floating point format

Form 5 (for transfer to PC's)

Interface function codes:

SH1, AH1, T6, TE0, L4, LE0, SR1, RL1, PPO, DC1, DT0, CO, E1

General characteristics

Rear panel connectors

Sweep in: Input for 0 to 10 V sweep voltage from compatible sweep oscillator.

Stop sweep: Input and output for stop sweep signal from compatible sweep oscillator.

10 MHz in: Input for external 10 MHz reference.

Input level: 10 dBm to 20 dBm, typical

Input frequency accuracy: $\pm 0.005\%$ (50 ppm)

20 MHz out: Output of internal 20 MHz reference oscillator.

Frequency accuracy: $\pm 0.01\%$, typical

Analog ± 10 V: Settable output voltage used for auxiliary voltage domain measurements, or analog output for analog recorders.

Range: 9.996 to 10.000 volts

Linearity: $\pm 0.1\%$, typical

Resolution: 4.88 mV, nominal

Output impedance: 1k Ω

External trigger: TTL input to trigger acquisition of single data point. Delay is included to equalize the single path delay from the test port. Data is taken on negative going TTL pulse.

Pulse repetition period: 1 msec: minimum with no averaging. If averaging, add (200 μ s x averaging factor).

Pulse width: 1 μ s minimum.

Environmental

Operating conditions: Temperature: 5 °C to 40 °C

Non-operating conditions: Temperature: 40 °C to 75 °C

Power

47.5 to 66 Hz: 100, 120, 200, 240 Vac, $\pm 10\%$

8510C: 460 VA, maximum

Test sets: 145 VA, maximum

8510XF millimeter subsystem: 500 VA, maximum

Weight

8510C: Net, 42 kg (92 lb); shipping, 52 kg (114 lb)

8511A/B: Net, 15 kg (33 lb); shipping, 18 kg (40 lb)

8514B: Net, 17 kg (38 lb); shipping, 20 kg (45 lb)

8515A: Net, 19 kg (41 lb); shipping, 22 kg (48 lb)

8517B: Net, 16.6 kg (34.2 lb); shipping, 18.7 kg (41.2 lb)

85105A: Net, 20.4 kg (45 lb); shipping, 24.5 kg (54 lb)

85104A series modules (each): Net, 6 kg (23 lb);

shipping 6.8 kg (15 lb)

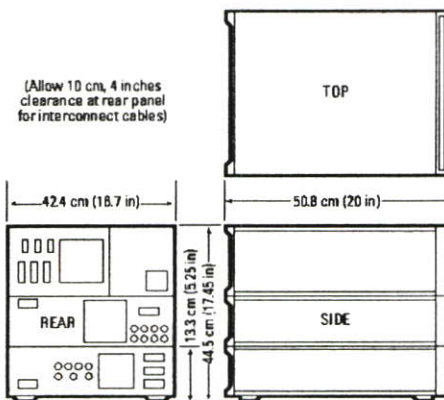
8510XF controller: Net, 20.4 kg (45 lb); shipping,

24.5 kg (54 lb)

8510XF test heads (each): Net, 11.34 kg (25 lb);

shipping, 13.6 kg (30 lb)

Dimensions



2. Agilent 8511A/8511B frequency converters

Agilent 8511A/8511B frequency converters

15 MHz to 26.5 GHz/15 MHz to 50 GHz

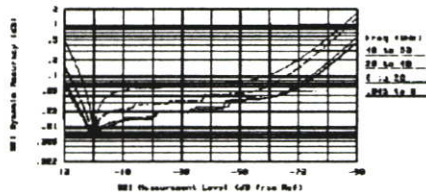
Description

Combining the 8511A or 8511B frequency converter with the 8510C network analyzer results in a four channel receiver/signal processor operating over a 45 MHz to 26.5 or 50 GHz frequency range. This system offers flexibility in the configuration of a user supplied signal separation network to meet the needs of custom measurements. The 8511A/B contains four separate RF to IF converters all of which can operate over the entire dynamic range of the system. Either the a1 or a2 input must be defined as the reference channel to maintain phase lock and to track the RF source.

Dynamic accuracy

The following plots show the worst case magnitude and phase uncertainty due to IP residuals and detector inaccuracies. These plots exclude uncertainty due to noise, frequency response, directivity, port matches, crosstalk, and connector repeatability. Reference power is 20 dBm.

Measurement uncertainty



Magnitude

Input port characteristics

The following specifications show the uncorrected system characteristics at the four measurement ports.

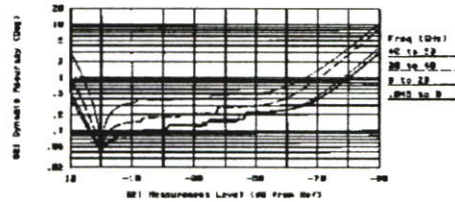
	Frequency range (GHz)				
	0.045-8	8-20	20-26.5	26.5-40	40-50
Impedance match (all four ports)					
8511A	17 dB	15 dB	9 dB	—	—
8511B	17 dB	15 dB	9 dB	9 dB	7 dB
Frequency response tracking¹					
8511A	±1 dB	±1 dB	±1 dB	—	—
8511B	±1 dB	±1 dB	±3 dB	±3 dB	±3 dB
Crosstalk²					
8511A	115 dB	116 dB	114 dB	—	—
8511B	116 dB	114 dB	107 dB	107 dB	105 dB

1. Ratio measurement of any two ports excludes slope.
2. After error correction, response and isolation calibration assumes no noise.

The following specifications describe the system performance for the 8510C network analyzer with the 8511A/B frequency converter.

Dynamic range (on all inputs)

	Frequency range (GHz)				
	0.045-8	8-20	20-26.5	26.5-40	40-50
Maximum power measured at port 2					
8511A	-10 dBm	-10 dBm	-15 dBm	—	—
8511B	-9 dBm	-8 dBm	-12 dBm	-12 dBm	-17 dBm
Reference power at port 1 (nominal)					
8511A	-20 dBm	-20 dBm	-20 dBm	—	—
8511B	-20 dBm	-20 dBm	-20 dBm	-20 dBm	-20 dBm
Minimum power measured at port 2					
8511A	-112 dBm	-115 dBm	-113 dBm	—	—
8511B	-113 dBm	-113 dBm	-106 dBm	-106 dBm	-104 dBm
Receiver					
dynamic range					
8511A	102 dB	105 dB	98 dB	—	—
8511B	104 dB	105 dB	94 dB	94 dB	87 dB
System					
dynamic range					
8511A	92 dB	95 dB	93 dB	—	—
8511B	93 dB	93 dB	86 dB	86 dB	84 dB



Phase

8511A general information

Input ports

Connector type (all inputs): 3.5 mm (F)
Impedance: 50 Ω nominal

8511B general information

Input ports

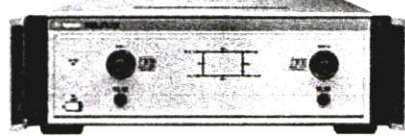
Connector type (all inputs): 2.4 mm (F)
Impedance: 50 Ω nominal

3. Agilent 8517A S-Parameter Test Set

S-parameter test sets

Description

Combining the 8510C network analyzer with an 8514B, 8516A, or 8517B results in a system for making full S parameter measurements. The dual port architecture of the test sets develops a separate reference channel for each incident port. RF switching is done with a single built in electronic switch.



Test set general information

	8514B	8516A	8517B	85110A	85110L	85105A/85104A			
Frequency range (GHz)	0.045 to 20	0.045 to 28.5	0.045 to 50	2 to 20	0.045 to 2	33 to 50	40 to 80	50 to 75	75 to 110
Test ports (port 1 or 2)									
Nominal operating power level (dBm)	2 to 6	5 to 25	+2 to 29 +5 to 16	0 to 3	0	0	0	0	3
Connector type	3.5 mm (m)	3.5 mm (m)	2.4 mm (m)	3.5 mm (m)	7 mm	WR-22	WR-19	WR-15	WR-10
Impedance, DC bias	50 Ω nominal, 500 mA, 40 Vdc maximum					Waveguide impedance, no bias			
Attenuation range (incident signal)	0 to 90 dB, in 10 dB steps		0 to 80 dB, in 10 dB steps	0 to 90 dB, in 10 dB steps		N/A	N/A	N/A	N/A
RF input connector (rear panel)									
Max. input power	+16 dBm	+14 dBm	+18 dBm	+14 dBm	+14 dBm	+13 dBm	+13 dBm	+13 dBm	+13 dBm
Connector type	3.5 mm (f)	3.5 mm (f)	2.4 mm (f)	3.5 mm (f)	3.5 mm (f)	3.5 mm (f)	3.5 mm (f)	3.5 mm (f)	3.5 mm (f)

Various configurations are available for all test sets. Please see the 8510 Network Analyzer Configuration Guide.

4. Agilent 8360B Series Synthesized Swept Signal Generators



Agilent

8360B Series Synthesized Swept Signal Generators 8360L Series Synthesized Swept CW Generators

Data Sheet

Discontinued Product Information — For Support Reference Only —

Information herein, may refer to products/services no longer supported. We regret any inconvenience caused by obsolete information. For the latest information on Agilent's test and measurement products go to www.agilent.com/find/products

In the US, call Agilent Technologies at 1-888-829-4444
(any weekday between 8am-5pm in any U.S. time zone)

World-wide Agilent sales office contact information is available at
www.agilent.com/find/contactus

10 MHz to 110 GHz

Specifications apply after full user calibration, and in coupled attenuator mode of operation (ALC level greater than -10 dBm).

Frequency

Range:	
83620B	10 MHz to 20 GHz
83622B	2 GHz to 20 GHz
83623B	10 MHz to 20 GHz (high power)
83624B	2 GHz to 20 GHz (high power)
83630B	10 MHz to 26.5 GHz
83640B	10 MHz to 40 GHz
83650B	10 MHz to 50 GHz
83623L	10 MHz to 20 GHz
83630L	10 MHz to 26.5 GHz
83640L	10 MHz to 40 GHz
83650L	10 MHz to 50 GHz

Resolution:

Standard	1 kHz
Option 008	1 Hz

Frequency bands (for CW signals):

Frequency range	n
10 MHz to <2 GHz	1
2 GHz to <7 GHz	1
7 GHz to <13.5 GHz	2
13.5 GHz to <20 GHz	3
20 GHz to <26.5 GHz	4
26.5 GHz to <38 GHz ¹	6
38 GHz to 50 GHz	8

Internal 10 MHz time base

Accuracy = Calibration ± Aging Rate ± Temperature Effects ± Line Voltage Effects

Aging Rate: 5×10^{-10} /day, 1×10^{-7} /year

With Temperature: $1 \times 10^{-10}/^{\circ}\text{C}$, typical

With Line Voltage: 5×10^{-10} for line voltage change of 10%, typical

Sweep functions

Control: Start-stop, center-span, marker (M1-M2), alternate sweep

Trigger: auto, external, single, or GPIB

Sweep modes

CW and manual modes

Accuracy: Same as time base

Switching Time:

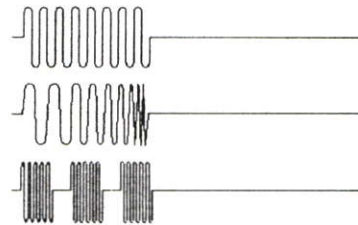
For steps within a frequency band:

$15 \text{ ms} + (\text{step size} / 1 \text{ GHz}) \times 5 \text{ ms step size}$

Maximum, or across band switch points: 50 ms

Step or list modes within a frequency band:

$5 \text{ ms}_2 + (\text{step size} / 1 \text{ GHz}) \times 5 \text{ ms}$



1. This band is 26.5 GHz to 40 GHz for the 83640B/L.



Agilent Technologies

Step sweep mode

Accuracy: Same as time base
 Minimum Step Size: Same as frequency resolution
 Number of Points: 2 to 801
 Switching Time: Same as CW
 Dwell Time: 100 μ s to 3.2 s

List mode

Accuracy: Same as time base
 Minimum step size: Same as frequency resolution
 Number of points: 1 to 801
 Switching time: Same as CW
 Dwell time: 100 μ s to 3.2 s

Ramp sweep mode

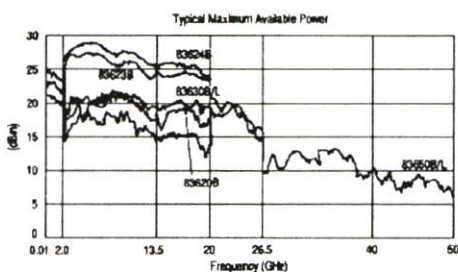
Accuracy (sweep time ≥ 100 ms and ≤ 5 s):
 Sweep widths $> n \times 10$ MHz (start, stop, and
 band-edge frequencies are phase-locked
 corrected during sweep)
 Lesser of 1% of sweep width or $n \times 1$ MHz
 $\pm 0.1\%$ of sweep width.
 Sweep time: 10 ms to 100 s, 300 MHz/ms
 maximum rate

RF output

Output power

Maximum leveled (dBm) ²	Standard	Option 006 (B models only)
83620B, 83622B	+13	+13
83623B	+17	+17
83623L	+15	Not applicable
83624B	+20	+17
83630B/L		
Output frequencies <20 GHz	+13	+13
Output frequencies ≥ 20 GHz	+10	+10
83640B/L		
Output frequencies <26.5 GHz	+10	+10
Output frequencies ≥ 26.5 GHz	+6	+6
83650B/L		
Output frequencies <26.5 GHz	+10	+10
Output frequencies ≥ 26.5 GHz and <40 GHz	+5	+5
Output frequencies ≥ 40 GHz	+2.5	+2.5

With attenuator (Option 001): Minimum scannable
 output power is -110 dBm. Maximum leveled
 output power is reduced by 1.5 dB to 20 GHz,
 2 dB above 20 GHz, and 2.5 dB above 40 GHz.



Minimum scannable

Standard: -20 dBm
 Option 001: -110 dBm
Resolution: 0.02 dB

Switching time (without attenuator change):
 10 ms, typical

Temperature stability: 0.01 dB/°C, typical

Accuracy (dB): ± 0.4

Specifications apply in CW, step, list, manual
 sweep, and ramp sweep modes of operation.

Power	Frequency (GHz)			
	<2.0	≥ 2.0 and ≤ 20	>20 and ≤ 40	>40
>+10 dBm	± 1.2	± 1.3		
>+10 dBm ⁵	± 0.6	± 0.7	± 0.9	± 1.7
>+60 dBm	± 0.9	± 1.0	± 1.2	± 2.0
≤ -60 dBm	± 1.4	± 1.5	± 1.7	± 2.5

User flatness correction

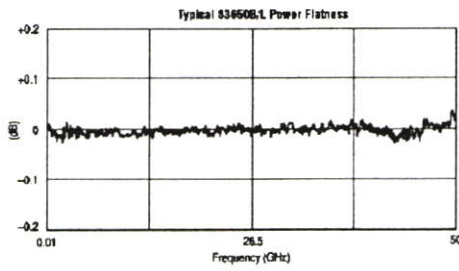
Number of points: 2 to 801 points, table.
 Number of tables = up to 8
 Entry modes: GPIB power meter, GPIB bus,
 and manual.

Flatness (dB)

Specifications apply in CW, step, list, manual
 sweep, and ramp sweep modes of operation.

Power	Frequency (GHz)			
	<2.0	≥ 2.0 and ≤ 20	>20 and ≤ 40	>40
>+10 dBm	± 0.9	± 1.0		
>+10 dBm ⁷	± 0.5	± 0.6	± 0.8	± 1.5
>+60 dBm	± 0.7	± 0.8	± 1.0	± 1.7
≤ -60 dBm	± 1.1	± 1.2	± 1.4	± 2.1

2. Specification applies over the 0 °C to 35 °C temperature range (0 °C to 25 °C for output frequencies >20 GHz). Maximum leveled output power over the 35 °C to 55 °C temperature range typically degrades by less than 2 dB.
 3. Includes flatness.
 4. Specifications apply over the 15 °C to 35 °C temperature range for output frequencies <50 MHz.
 5. Specifications apply over the 15 °C to 35 °C temperature range and are degraded 0.3 dB outside of that range.



Analog power sweep

Range: -20 dBm to maximum available power, can be offset using step attenuator.

External leveling

Range:

At external IEEE802.E detector: -36 to -4 dBm
At external leveling input: -200 μ V to -0.5 volts

Bandwidth

External detector mode: 10 or 100 kHz (sweep speed and modulation mode dependent), nominal

Power meter mode: 0.7 Hz, nominal

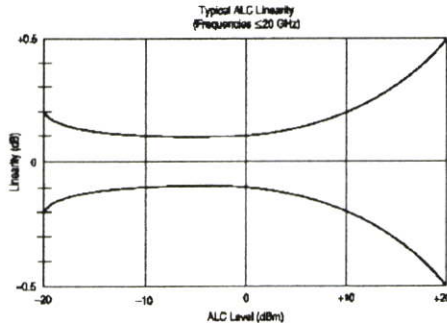
Source match

(internally leveled), typical⁶

<20 GHz 1.6:1 SWR

<40 GHz 1.8:1 SWR

<50 GHz 2.0:1 SWR



Spectral purity

Specifications apply in CW, step, list, and manual sweep modes of operation. Specifications for harmonics beyond maximum instrument frequencies are typical.

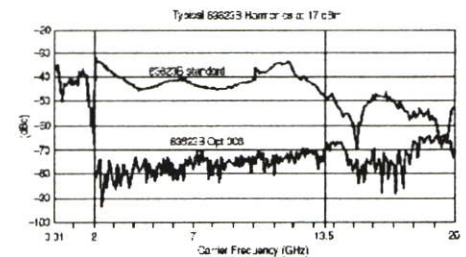
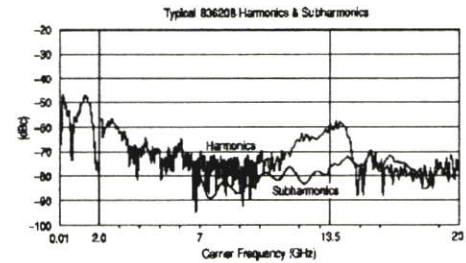
Spurious signals (dBc)

Harmonics

Output frequencies	Agilent model numbers				
	83620B 83622B	83623B 83624B	83623L	83630B/L	83640B/L 83650B/L
<2.0 GHz					
Standard	-30	-25 ⁷	-25 ⁷	-30	-30 ⁷
Option 006	-30 ⁷	-25 ⁷		-30 ⁷	-30 ⁷
≥ 2.0 GHz and <28.5 GHz					
Standard	-50	-25	-45	-50	-50
Option 006	-60	-60		-60	-50
≥ 28.5 GHz					
Standard					-40
Option 006					-40

Subharmonics

Output frequencies	Agilent model numbers				
	83620B 83622B	83623B 83624B	83623L	83630B/L	83640B/L 83650B/L
<7 GHz	None	None	None	None	None
≥ 7 and ≤ 20 GHz	-50	-50	-50	-50	-50
>20 GHz and ≤ 40 GHz				-50	-40 ⁸
>40 GHz					-35 ⁸



6. Typically 2.0:1 SWR at frequencies below 50 MHz.
7. Specification is -20 dBc below 50 MHz.
8. Specifications typical below 0 dBm.

Nonharmonically related

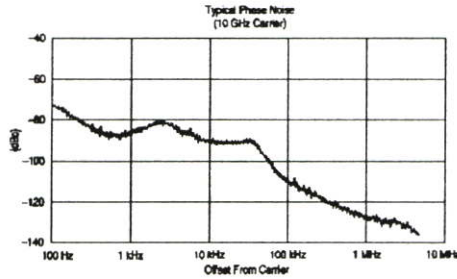
10 MHz to <2.0 GHz ⁹	-60
≥2.0 to <20 GHz	-60
>20 GHz to ≤26.5 GHz	-58
>26.5 to <40 GHz	-54
≥40 GHz to ≤50 GHz	-52

Power-line related (<300 Hz offset from carrier)

10 MHz to <7 GHz	-55
7 GHz to <13.5 GHz	-49
13.5 GHz to 20 GHz	-45
>20 GHz to <26.5 GHz	-43
26.5 GHz to <38 GHz ¹⁰	-39
38 GHz to 50 GHz	-37

Single-sideband phase noise (dBc/Hz)

Frequency range	Offset from carrier			
	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz
10 MHz to <7 GHz	-70	-78	-86	-107
7 GHz to <13.5 GHz	-64	-72	-80	-101
13.5 GHz to 20 GHz	-60	-68	-76	-97
>20 GHz to <26.5 GHz	-58	-66	-74	-95
26.5 GHz to <38 GHz ¹⁰	-54	-62	-70	-91
38 GHz to 50 GHz	-52	-60	-68	-89



Residual FM (rms, 50 Hz to 15 kHz bandwidth)
 CW mode or Sweep widths ≤n × 10 MHz; n × 60 Hz, typical
 Sweep widths >n × 10 MHz; n × 15 kHz, typical

Modulation

All modulation specifications are only applicable to the Agilent 8360B series. Pulse modulation specifications apply for output frequencies 100 MHz and above.

Pulse (8360B only)

	Standard	Option 006
On/off ratio¹¹	80 dB	80 dB
Rise/fall times	25 ns	10 ns
Minimum width¹²		
Internally leveled	1 μs	1 μs
Search mode		
Output frequencies <2.0 GHz	50 ns	50 ns
Output frequencies ≥2.0 GHz	50 ns	15 ns
ALC off mode		
Output frequencies <2.0 GHz	50 ns	50 ns
Output frequencies ≥2.0 GHz	50 ns	15 ns
Minimum repetition frequency		
Internally leveled	10 Hz	10 Hz
Search mode	DC	DC
ALC off mode	DC	DC

Level accuracy	
(dB, relative to CW level)	
Widths ≥1 μs	±0.3
Widths <1 μs (Search Mode)	±0.5, typical

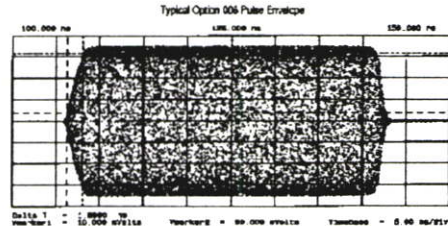
Video feedthrough	
Output frequencies <2.0 GHz	
Power levels ≤10 dBm	2%
Power levels >10 dBm	5%
Output frequencies ≥2.0 GHz	
83620B, 83626B, 83630B	0.1%
83623B, 83624B, 83640B, 83650B	1%

Overshoot, ringing	15%, typical	10%, typical
---------------------------	--------------	--------------

Delay ¹³	
Output frequencies <2.0 GHz	80 ns, typical
Output frequencies ≥2.0 GHz	80 ns, typical

Compression	±10 ns, typical	±5 ns, typical
--------------------	-----------------	----------------

Internal pulse generator



Width range: 1 μs to 65 ms
 Period range: 2 μs to 65 ms
 Resolution: 1 μs

9. Specification applies at output levels 0 dBm and below.
 10. Frequency range is 26.5 GHz to 40 GHz on the 83640B/L.
 11. In the 83671B/83624B, specification applies at ALC levels 0 dBm and above, and over the 20 °C to 55 °C temperature range. Specification degrades 5 dB below 20 °C, and 1 dB per dB below ALC level 0 dBm in those models.
 12. With external input, internal pulses are limited by minimum width of internal pulse generator.
 13. Option 007 adds 30 ns delay and ±5 ns pulse compression for external pulse inputs. AM and Scan Bandwidth (3 dB, 30% depth, modulation peaks 3 dB below maximum rated power): DC to 250 kHz.

AM and scan (S:360B only)

Bandwidth (3 dB, 30° depth, modulation peaks 3 dB below maximum rated power): DC to 100 kHz

Modulation depth

ALC levels noted, can be offset (using step attenuator)
Normal Mode: -20 dBm to maximum available power
Deep Mode¹⁴: 50 dB below maximum available power

Unleveled Mode¹⁵: 50 dB below maximum available power

Sensitivity

Linear: 100°/volt

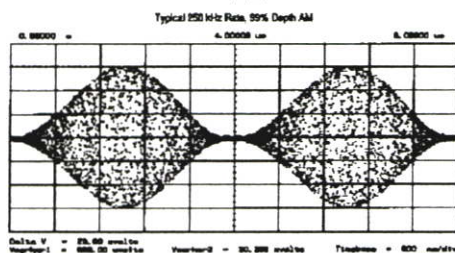
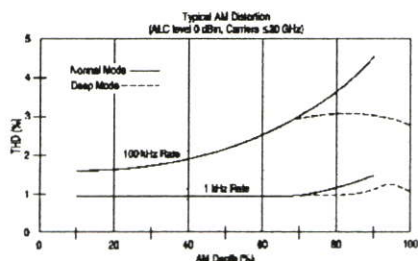
Accuracy (1 kHz rate, 30° depth, normal mode): 5°

Exponential: 10 dB/volt

Accuracy (normal mode): 0.25 dB ± 5% of depth in dB

Incidental phase modulation (30° depth): 0.2 radians peak, typical

Incidental FM: Incidental phase modulation × modulation rate

**FM** (S:360B only)**Locked mode**

Maximum deviation: ±8 MHz

Rates (3 dB bandwidth, 500 kHz deviation):

100 kHz to 8 MHz

Maximum modulation index (deviation/rate): $n \times 5$

Unlocked mode

Maximum deviation

At rates ≤ 100 Hz: ±75 MHz

At rates > 100 Hz: ±8 MHz

Rates (3 dB bandwidth, 500 kHz deviation): DC to 8 MHz

Sensitivity

100 kHz, 1 MHz, or 10 MHz/volt, switchable.

Accuracy (1 MHz rate, 1 MHz deviation): 10°

Simultaneous modulations (S:360B only)

Full AM bandwidth and depth is typically available at any pulse rate or width. FM is completely independent of AM and pulse modulation.

Internal modulation generator (Option 002)**AM, FM modulation signals**

Internal waveforms: Sine, square, triangle, ramp, noise

Rate

Range:

Sine: 1 Hz to 1 MHz

Square, triangle, ramp: 1 Hz to 100 kHz

Resolution: 1 Hz

Depth, deviation

Range: same as the base instrument

Resolution: 0.1°

Accuracy: same as base instrument

Pulse

Modes: free-run, gated, triggered, delayed

Period range: 300 ns to 100 ms

Width range: 25 ns to 100 ms

Resolution: 25 ns

Accuracy: 5 ns

Video delay

Internal sync pulse: 0 to 100 ms

Externally supplied sync pulse: 225 ns to 100 ms

Modulation meter

Accuracy (rates ≤ 100 kHz): 5% of range)

14. Deep mode offers reduced distortion for very deep AM. Waveform is DC-coupled and feedback-leveled at ALC levels above -13 dBm. At ALC levels below -13 dBm, out₁ is DC-controllable, but subject to sample-and-hold drift of 0.25 dB/second.
15. The 8360 has two unleveled modes, ALC Off and Search. In ALC Off mode, the modulator drive can be controlled from the front panel to vary quiescent RF output level. In Search mode, the instrument microprocessor momentarily closes the ALC loop to find the modulator drive setting necessary to make the quiescent RF output level equal to an entered value, then opens the ALC loop while maintaining that modulator drive setting. Neither of these modes is feedback-leveled.

General

Storage temperature range: -40°C to 75°C

Operating temperature range: 0°C to 55°C

Environmental

EMC: Within limits of CISPR Pub.11 1990 Group 1, Class A, and Mil-Std-461C Part 7 RE02

Warm-up time

Operation: Requires 30-minute warm-up from cold start at 0°C to 55°C . Internal temperature equilibrium reached after two-hour warm-up at stable ambient temperature.

Frequency reference: Reference time base is kept at operating temperature with the instrument connected to AC power. Instruments disconnected from AC power for more than 24 hours require 30 days to achieve time base aging specification. Instruments disconnected from AC power for less than 24 hours require 24 hours to achieve time base aging specification.

Power requirements

48 to 66 Hz; 115 volts (-10 to $+25\%$) or 230 volts (-10 to $+15\%$); 400 VA maximum (30 VA in STANDBY)

Weight and dimensions

Net weight: 27 kg (60 lb)

Shipping weight: 36 kg (80 lb)

Dimensions: 178 H \times 425 W \times 648 mm D
(7.0 \times 16.75 \times 22.5 inches)

Adapters supplied

83620B, 83622B, 83623B/L, 83624B, 83630B/L

Type N (female) – 3.5 mm (female) Part Number 1250-1745

3.5 mm (female) – 3.5 mm (female) Part Number 5061-5311

83640B/L, 83650B/L

2.4 mm (female) – 2.92 mm (female) Part Number 1250-2187

2.4 mm (female) – 2.4 mm (female) Part Number 1250-2188

Inputs and outputs

Auxiliary output

Provides an unmodulated reference signal from 2 to 26.5 GHz at a typical minimum power level of -10 dBm. Nominal output impedance 50 ohms. (SMA female, rear panel.)

RF output

Nominal output impedance 50 ohms. (Precision 3.5 mm male on 20 and 26.5 GHz models; 2.4 mm male on 10 and 50 GHz models, front panel.)

External ALC input

Used for negative external detector or power meter leveling. Nominal input impedance 120 k Ω ; damage level ± 15 volts. See *RF Output* specifications. (BNC female, front panel.)

Pulse input/output (S360B models only)

TTL-low-level signal turns RF off. When using standard internal pulse generator a TTL-level pulse sync signal preceding the RF pulse by nominally 80 ns is output at this connector. Nominal input impedance 50 ohms; damage level -5.5 , $+0.5$ volts. See *Modulation* specifications. (BNC female, front panel.)

AM input (S360B models only)

Nominal input impedance 50 ohms (internally switchable to 2 k Ω); damage level ± 15 volts. See *Modulation* specifications. (BNC female, front panel.)

FM input (S360B models only)

Nominal input impedance 50 ohms (internally switchable to 600 ohms); damage level ± 15 volts. See *Modulation* specifications. (BNC female, front panel.)

Trigger input

Activated on TTL rising edge. Used to externally activate an analog sweep or to advance to the next point in step or list mode. Damage level -5.5 , $+0.5$ volts. (BNC female, rear panel.)

Trigger output

Outputs a one-microsecond-wide TTL pulse at 1601 points evenly spaced across an analog sweep, or at each point in step or list mode. (BNC female, rear panel.)

10 MHz reference input

Accepts 10 MHz ± 100 Hz, 0 to -10 dBm reference signal for operation from external time base. Nominal input impedance 50 ohms. Damage level -10 , $+5$ volts. (BNC female, rear panel.)

10 MHz reference output

Nominal signal level 0 dBm, nominal output impedance 50 ohms. (BNC female, rear panel.)

Sweep output

Supplies a voltage proportional to the sweep ranging from 0 volts at start of sweep to 10 volts at end of sweep, regardless of sweep width. In CW mode, voltage is proportional to percentage of full instrument frequency range. Minimum load impedance 3 k Ω . Accuracy $\pm 0.25\%$, ± 10 mV, typical. (BNC female, rear panel.)

Stop sweep input/output

Sweep will stop when grounded externally. TTL-high while sweeping, TTL-low when S360 stops sweeping. Damage level -5.5 , $+0.5$ volts. (BNC female, rear panel.)

Z-Axis blanking/markers output

Supplies positive rectangular pulse (approximately +5 volts into 2 k Ω) during the retrace and blank switchpoints of the RF output. Also supplies a negative pulse (-5 volts) when the RF is at a marker frequency (intensity markers only). (BNC female, rear panel.)

Volts/GHz output

Supplies a voltage proportional to output frequency at 0.25 volts/GHz, 0.5 volts/GHz, or 1 volt/GHz (model dependant and internally switchable). Maximum output 18 volts. Minimum load impedance 2 k Ω . Accuracy $\pm 0.5\%$, ± 10 mv, typical. (BNC female, rear panel.)

Source module interface

Provides bias, flatness correction, and leveling connections for the 83550 series of millimeter-wave source modules. (Special, front, and rear panels.)

Auxiliary interface

Provides control signal connections to the 8516A S-parameter test set. Also used when two 8360 series synthesized sweepers are operated in master-slave mode. (25-pin D-subminiature receptacle, rear panel.)

Pulse video output (Option 002 only.) Outputs the pulse modulation waveform that is supplied to the modulator. This can be either the internally or externally generated pulse modulation signal. (BNC female, rear panel.)

Pulse sync out (Option 002 only.) Outputs a 50 ns wide TTL pulse synchronized to the leading edge of the internally generated pulse. (BNC female, rear panel.)

AM/FM output (Option 002 only.) Outputs the internally generated AM or FM waveform. This output can drive 50 ohms or greater. The AM output is scaled the same as it is generated, either 100% A or 10 dB A. The FM scaling depends on the FM deviation selected. (BNC female, rear panel.)

Models

83620B	10 MHz to 20 GHz
83622B	2 GHz to 20 GHz
83623B	10 MHz to 20 GHz (high power)
83624B	2 GHz to 20 GHz (high power)
83630B	10 MHz to 26.5 GHz
83640B	10 MHz to 40 GHz
83650B	10 MHz to 50 GHz
83623L	10 MHz to 20 GHz
83630L	10 MHz to 26.5 GHz
83640L	10 MHz to 40 GHz
83650L	10 MHz to 50 GHz

Options**Option 001 adds step attenuator**

With this option, minimum settable output power is -110 dBm. Maximum leveled output power is reduced by 1.5 dB to 20 GHz, 2 dB above 20 GHz, and 2.5 dB above 40 GHz.

Option 002 adds internal modulation generator

(8360B only – not available on 8360L)

Adds a digitally synthesized modulation waveform source-on-a-card to the 8360. Provides signals that would otherwise be applied to the external modulation inputs.

Option 004 rear panel RF output

Moves RF output, external AM input, pulse input/output, AM input, and FM input connectors to the rear panel.

Option 005 fast pulse modulation

(8360B only – not available on 8360L)

Improves pulse rise/fall time to 10 ns. Also improves harmonic performance.

Option 008 1 Hz frequency resolution

Provides frequency resolution of 1 Hz.

Option 700 MATE system compatibility

Provides CTL programming commands for MATE system compatibility.

Option 806 rack slide kit

Used to rack mount the 8360 while permitting access to internal spaces.

Option 908 rack flange kit

Used to rack mount the 8360 without front handles.

Option 910 extra operating and service manuals

Provides a second copy of Operating and Service manuals.

Option 913 rack flange kit

Used to rack mount the 8360 with front handles. Front handles are standard on the 8360.

Special option H31

Modifies the main product to limit frequency output to 31 GHz. Please consult your Agilent sales representative for further information about this customized option.

ISO 9002 compliant

These models are manufactured in an ISO 9002 registered facility in concurrence with Agilent Technologies' commitment to quality.

Upgrades

Model and frequency upgrades are available. Please contact your Agilent sales representative for details.

Dedicated Agilent 8510 system source models

Dedicated source are optimized for use as 8510 network analyzer system components. They are configured without modulation capabilities or front panel keyboard displays, and with rear connectors and with one-year on-site service (where available). Specifications for these models are the 8510 specifications, plus the following:

Frequency range

S3621B: 15 MHz to 20 GHz

S3631B: 15 MHz to 26.5 GHz

S3651B: 15 MHz to 50 GHz

Resolution: 1 Hz

Accuracy

CW Mode: Same as time base¹⁶

Sweep Mode (at frequencies ≤ 26.5 GHz):

Sweep Widths $\leq n \times 10$ MHz: 0.1% of sweep width \pm time base accuracy

Sweep Widths $> n \times 10$ MHz and ≤ 100 MHz: 1% of sweep width

Sweep Widths > 100 MHz and ≤ 1 GHz: 4 MHz

Sweep Widths > 1 GHz: 0.1% of sweep width

Sweep Mode (at frequencies > 26.5 GHz):

Sweep Widths $\leq n \times 10$ MHz: 0.1% of sweep width \pm time base accuracy

Sweep Widths $> n \times 10$ MHz and ≤ 800 MHz: 1% of sweep width

Sweep Widths > 800 MHz and ≤ 8 GHz: 8 MHz

Sweep Widths > 8 GHz: 0.1% of sweep width

Output power

Maximum leveled

Frequencies ≤ 20 GHz: -10 dBm

Frequencies > 20 GHz and ≤ 26.5 GHz: -1 dBm

Frequencies > 26.5 GHz and ≤ 10 GHz: -3 dBm

Frequencies > 10 GHz: 0 dBm

Minimum settable: -20 dBm

Specifications describe warranted instrument performance over the 0 °C to 55 °C temperature range, except as noted otherwise. **Supplemental characteristics**, denoted as typical or nominal, are intended to provide information useful in applying the instrument, but are non-warranted parameters.



Agilent Email Updates

www.agilent.com/find/emailupdates

Get the latest information on the products and applications you select.

¹⁶ Internal time base verified to 1 ppm with standard on-site verification procedure.

www.agilent.com

Agilent Technologies' Test and Measurement Support, Services, and Assistance

Agilent Technologies aims to maximize the value you receive, while minimizing your risk and problems. We strive to ensure that you get the test and measurement capabilities you paid for and obtain the support you need. Our extensive support resources and services can help you choose the right Agilent products for your applications and apply them successfully. Every instrument and system we sell has a global warranty. Two concepts underlie Agilent's overall support policy: "Our Promise" and "Your Advantage."

Our Promise

Our Promise means your Agilent test and measurement equipment will meet its advertised performance and functionality. When you are choosing new equipment, we will help you with product information, including realistic performance specifications and practical recommendations from experienced test engineers. When you receive your new Agilent equipment, we can help verify that it works properly and help with initial product operation.

Your Advantage

Your Advantage means that Agilent offers a wide range of additional expert test and measurement services, which you can purchase according to your unique technical and business needs. Solve problems efficiently and gain a competitive edge by contracting with us for calibration, extra-cost upgrades, out-of-warranty repairs, and onsite education and training, as well as design, system integration, project management, and other professional engineering services. Experienced Agilent engineers and technicians worldwide can help you maximize your productivity, optimize the return on investment of your Agilent instruments and systems, and obtain dependable measurement accuracy for the life of those products.

For more information on Agilent Technologies' products, applications or services, please contact your local Agilent office.

Phone or Fax

United States:	Korea:
(tel) 800 829 4444	(tel) (800) 769 0800
(fax) 800 829 4433	(fax) (800) 769 0900
Canada:	Latin America:
(tel) 877 894 4414	(tel) (305) 269 7500
(fax) 800 746 4868	Taiwan:
China:	(tel) 0800 047 866
(tel) 800 810 0189	(fax) 0800 286 331
(fax) 800 820 2816	Other Asia Pacific:
Europe:	Countries:
(tel) 31 20 547 2111	(tel) (85) 6375 8100
Japan:	(fax) (85) 6755 0042
(tel) (81) 426 56 7832	Email: tm_ap@agilent.com
(fax) (81) 426 56 7840	

The complete list is available at:
www.agilent.com/find/contactus

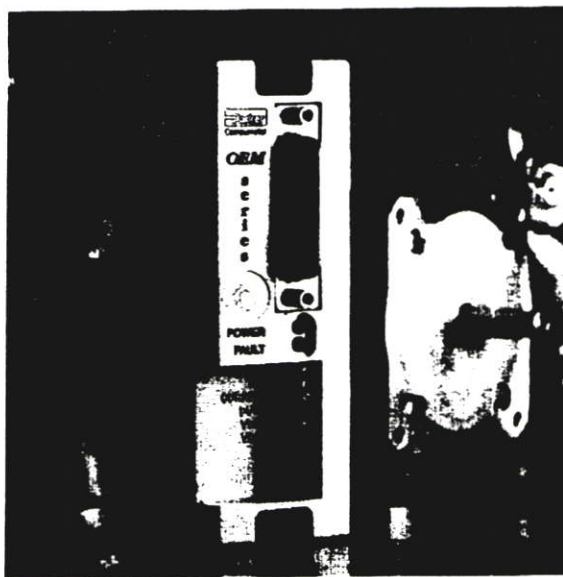
Product specifications and descriptions in this document subject to change without notice.

© Agilent Technologies, Inc. 2002, 2006
Printed in USA, July 12, 2006
5954-6162E



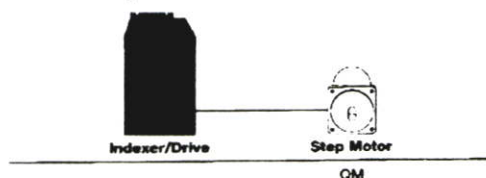
Agilent Technologies

5. OEM650X Microstepping Drive/Controller



A Full Spectrum of Products

The following OEM products are available to complement your need for an indexer/drive.



For complete specifications by return fax, please call us at this number and request Document 1321.

OEM650X

Fully Integrated Indexer and Microstepping Drive for Low-Inductance, High-Current Motors

Features

Performance

All of the high performance found in the OEM650 plus:

- Designed for use with a low inductance (< 10 mH)
- Provides 0.8 Amps to 7.5 Amps
- Single 24-75 VDC power supply input
- Compatible with a variety of motors
- Built-in stand-alone indexer

I/O

- Standard RS-232C serial communications interface
- Incremental encoder support for position tracking, stall detection and position maintenance
- Three sequence select inputs for program initiation by an external device
- CW, CCW and Home inputs

Language

- Simple Compumotor X Language
- Optional 2K bytes of battery-backed RAM to store up to 7 command sequences (-M2 option)
- Address selectable for daisy chaining up to 8 units

Protection Circuit

- Short circuit protected— phase-to-phase, and phase-to-ground
- Power dump circuitry to protect drive from regeneration caused by large inertial loads
- Self-test feature to verify proper system operation
- Overtemperature circuitry protects the drive from thermal damage
- Certified as U.L. recognized component

Physical

- Status/fault LED indicators to confirm proper operation
- Application-specific integrated circuit (ASIC) and surface mount technology minimize product footprint, overall package size, and increase product reliability
- Removable snap-on molded cover for convenient configuration and protection against contaminants
- Optically isolated fault output for imbedded applications
- Heat plate design allows thermal dissipation through the mounting surface
- Simplified, two-screw mounting
- Right-angle screw terminal allows side-to-side mounting, or Euro-rack compatibility
- Overall dimensions 5.0 x 3.6 x 1.6 in. (127 x 91 x 41 mm)
- Also available with a removable 10 pin motor/power connector (-RC option)

OEM650X Specifications



Parameter	Value
Power Input	
DC	24–75 VDC @ 2A rms (motor dependent)
Performance	
Accuracy	±5 arc min (0.833°) typical. Unloaded-bidirectional with Compumotor supplied motors. Other motors may exhibit different absolute accuracy. ±1 arc min (0.167°) Loaded-in addition to unloaded accuracy, per each frictional load equal to 1% rated torque
Repeatability	±5 arc sec (0.0014°) typical Unloaded one revolution returning to start point from same direction.
Hysteresis	Less than 2 arc min (0.0334°) unloaded bidirectional.
Resolution	16 selectable choices: 200, 400, 1000, 2000, 5000, 10000, 12800, 18000, 20000, 21600, 25000, 25400, 25600, 36000, 50000, 50800
Waveform	Selectable. Allows waveform shaping for optimum smoothness or relative accuracy. Pure sine, -4%, -6%, 8%, 10% 3rd harmonic.
RS-232C Interface	
Connection	3-wire implementation (Tx, Rx, Gnd)
Parameters	9,600 baud rate, 8 data bits, 1 stop bit, no parity
Configurations	Up to 8 OEM350X/OEM650X units can be controlled from a single host RS 232C port in a daisy chain configuration
Inputs	
Sequence Select Inputs	Three inputs to be used to select and run motion programs and for interactive machine control; TTL-compatible**
Trigger Inputs	Three trigger inputs internally pulled up to 5V; sinking current is 1.2 mA, TTL-compatible**
Limits and Home	Logic High = 2.0–5.0V Logic Low = 0–0.8V
Encoder	
A, B and Z Channel	Single ended, zc-tive high; Logic Low = 0–0.8V; Logic High = 2.0–5.0V (4.5 mA sink)
Max Frequency	160 kHz (pre-quadrature)
Min Pulse Width (V)	500 nsecs
Outputs	
2 Programmable Outputs	Logic High = minimum of 4.26 V (source >24 mA) Logic Low = maximum of 0.44 V (sinks to 24 mA)
Fault Output	Conducting = drive fault; non conducting = normal operation
Amplifier	
Type	20 kHz fixed frequency, variable duty cycle pulse width modulated (PWM) Current controlled, bipolar chopper
Number of Phases	2
Output Current	0.8–7.5 amps current per phase peak (selectable)
Drive Supply Voltage	24–75 VDC (dependent on external power supply)
Standby Current Reduction	25%, 50% or 75% of selected motor current
Nominal Chopping Frequency	20 kHz
Max Stopping Rate	2 MHz max pulse rate; 50 rps max speed
Protective Circuits*	
Short Circuit	Phase-to-phase, phase-to-ground
Brownout	if DC supply drops below 24 VDC
Overtemperature	if internal air temperature exceeds 158 F (70°C)
Environmental	
Operating Drive	32°F to 122°F (0°C to 50°C) Max allowable ambient temperature is 122°F (50°C). Fan cooling may be required if airflow restricted
Storage	40°F to 185°F / 4°C to 85°C
Humidity	0 to 95% Non-condensing
Physical	
Drive Dimensions	5.0 x 3.6 x 1.6 in (127 x 91 x 41 mm)
Weight	0.84 lb (0.32 kg)
Motor	
Type	Two phase hybrid permanent magnet, 1.8"
Number of Leads	4, 6 or 8
Minimum Inductance	0.5 mH (40 mH max)

* Drive shuts down in conditions listed. Power must be cycled to resume operations.

** TTL compatible voltage levels: Low < 0.4V; High > 2.4V

6. OS-A Series Motors

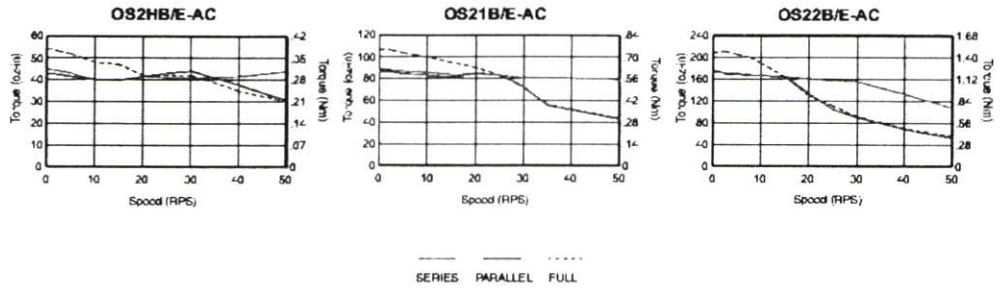
Specifications

OS Series Motor Specifications Size 23 Frame		OS2HA	OS21A	OS22A	OS2HB	OS21B	OS22B
Static torque	oz-in	45.1	77.4	78.6	67.35	76.5	238
	(Nm)	(0.35)	(0.87)	(1.37)	(0.43)	(0.84)	(1.68)
Rotor inertia	oz-in ²	0.36	0.66	1.36	0.36	0.66	1.35
	(kg-cm ²)	(0.07)	(0.12)	(0.25)	(0.07)	(0.12)	(0.25)
Phase Inductance (mH)	Series	1.7	1.8	2.8	8.6	12	16.6
	Parallel	NA	NA	NA	2.2	3	4.2
Detent Torque	oz-in	2.5	4.0	7.0	2.5	4.0	7.0
	(N-m)	(0.02)	(0.03)	(0.06)	(0.02)	(0.03)	(0.06)
Bearings Information							
Thrust Load	lb	13	13	13	13	13	13
	(kg)	(5.9)	(5.9)	(5.9)	(5.9)	(5.9)	(5.9)
Radial Load	lb	20	20	20	20	20	20
	(kg)	(9.1)	(9.1)	(9.1)	(9.1)	(9.1)	(9.1)
End Play (Reversing load equal to 1 lb)	in	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
	(mm)	(0.025)	(0.025)	(0.025)	(0.025)	(0.025)	(0.025)
Radial Play (Per 0.5 lb load)	in	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008
	(mm)	(0.02)	(0.02)	(0.02)	(0.02)	(0.02)	(0.02)
Motor Weight	lb	-	1.5	2.5	-	1.5	2.5
	(kg)	(0.5)	(0.7)	(1.1)	(0.5)	(0.7)	(1.1)
Certifications	UL recognized (CE, IVD)	Pending	Pending	Pending	Pending	Pending	Pending
	(CE, EMC & LVD)	No	No	No	No	No	No
Drive Current							
E-AC	Series	NA	NA	NA	1.76 (1.24)	1.88 (1.33)	2.38 (1.68)
	Parallel	NA	NA	NA	3.25 (2.30)	3.5 (2.47)	3.5 (2.47)
E-DC	Series	3.0 (2.2)	4.8 (3.35)	4.8 (3.35)	NA	NA	NA
	Parallel	NA	NA	NA	NA	NA	NA
GT	Series	NA	NA	NA	1.7 (1.2)	1.8 (1.3)	2.4 (1.7)
	Parallel	NA	NA	NA	3.4 (2.4)	3.6 (2.6)	4.8 (3.4)
DEFM750	Series	2.65 (1.5)	3.3 (2.3)	3.8 (2.7)	NA	NA	NA
	Parallel	5.3 (3.7)	6.6 (4.7)	7.5 (5.3)	NA	NA	NA
ZLTA	Series	NA	NA	NA	1.8 (1.3)	1.6 (1.3)	2.4 (1.7)
	Parallel	NA	NA	NA	3.6 (2.6)	3.8 (2.6)	4.8 (3.4)

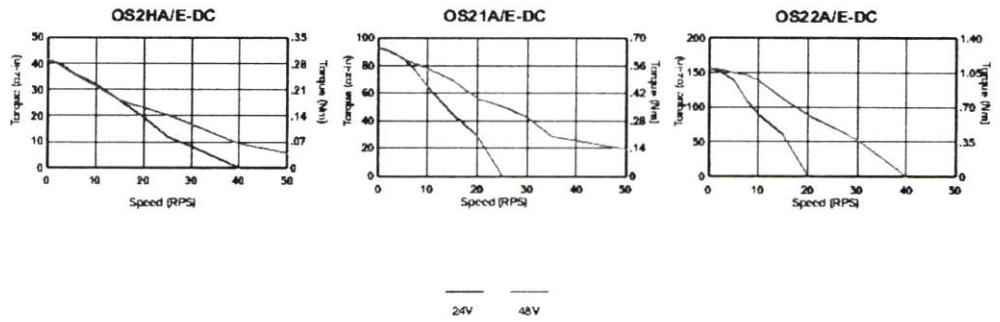
Speed-Torque Curves

Motor Speed-Torque Performance Curves

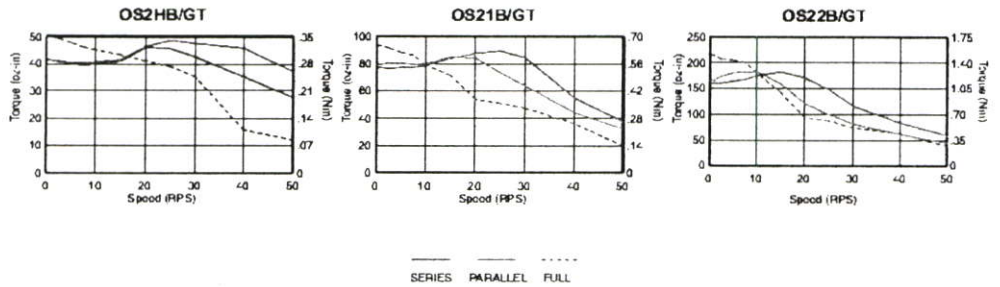
E-AC Drive with OS Series Motors - 23 frame



E-DC Drive with OS Series Motors - 17 and 23 frame



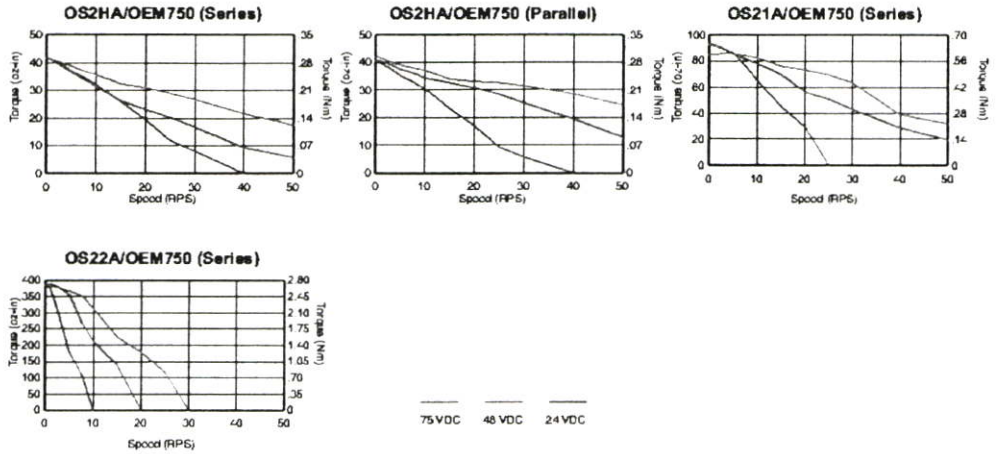
GT Drive with OS Series Motors - 23 frame



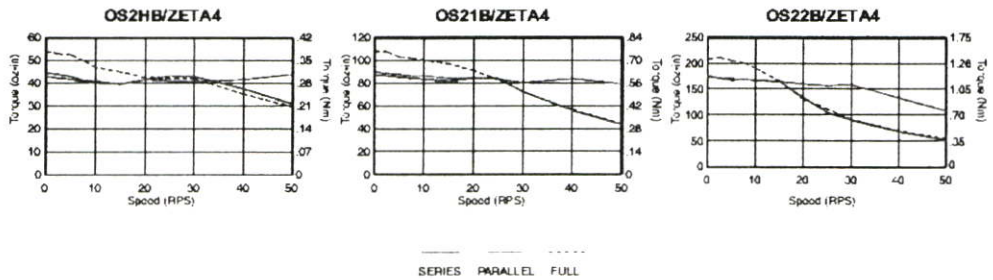
Speed-Torque Curves

Motor Speed-Torque Performance Curves

OEM750 Drive with OS Motors - 23 frame, 24, 48 and 75 VDC



ZETA Drive with OS Series Motors - 23 frame

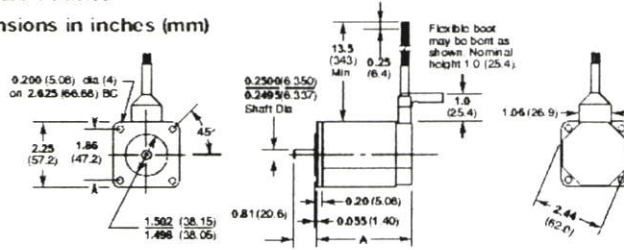


Dimensions

OS Dimensional Drawings

Size 23 Frame

Dimensions in inches (mm)



Model	A
OS2H (OEM57-40)	1.50 (38.1)
OS21 (OEM57-51)	2.06 (52.3)
OS22 (OEM57-83)	3.10 (87.7)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายประจักษ์ ทองจันทร์
วัน เดือน ปีเกิด	4 เมษายน 2523 ที่ลำปาง
ที่อยู่	306/63 หมู่ 2 ถนน ลำปาง-เด่นชัย ตำบล พระบาท อำเภอ เมือง จังหวัด ลำปาง 52000 โทร.0-5422-1888
ประวัติการศึกษา	2544 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2550 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) ระบบอิเล็กทรอนิกส์ 2.) การออกแบบวงจรความถี่สูง 3.) เขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2545-2549	ตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย ประจำห้องปฏิบัติการเครื่องมือทางการแพทย์และ สิ่งแวดล้อม ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2549	รางวัลชมเชยการประกวดสิ่งประดิษฐ์ประหยัคพลังงาน ในงาน “ถนนเทคโนโลยี 2549” ซึ่งจัดขึ้นโดย บริษัท อสมท จำกัด (มหาชน)