

การศึกษาวิจัยและพัฒนาไมโครเวฟฮอโลกราฟี ในการมองภาพวัตถุโดยใช้
เทคนิคการกระเจิงมอดูเลตคลื่นแสง

THE STUDY RESEARCH AND DEVELOPMENT OF MICROWAVE
HOLOGRAPHIC IMAGING REMOTE OBJECTS USING LIGHT-MODULATED
SCATTERING TECHNIQUE

ธรรมศักดิ์ วิมตเกษรติกุล
THAMMASAK VIMONKIATTIKUN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-324-163-9

การศึกษาวิจัยและพัฒนาไมโครเวฟฮอโลกราฟี ในการมองภาพวัตถุโดยใช้
เทคนิคการกระเจิงมอดูเลตคลื่นแสง

THE STUDY RESEARCH AND DEVELOPMENT OF MICROWAVE
HOLOGRAPHIC IMAGING REMOTE OBJECTS USING LIGHT-MODULATED
SCATTERING TECHNIQUE

ธรรมศักดิ์ วิมลเกียรติคุณ
THAMMASAK VIMONKIATTIKUN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 45658
วัน, เดือน, ปี..... 1 2 ก.พ. 2546

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-324-163-9

THE STUDY RESEARCH AND DEVELOPMENT OF MICROWAVE
HOLOGRAPHIC IMAGING REMOTE OBJECTS USING LIGHT-MODULATED
SCATTERING TECHNIQUE

THAMMASAK VIMONKIATTIKUN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2002

ISBN 974-324-163-9

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

Thesis Title THE STUDY RESEARCH AND DEVELOPMENT OF MICROWAVE HOLOGRAPHIC IMAGING REMOTE OBJECTS USING LIGHT-MODULATED SCATTERING TECHNIQUE

Student Mr. Thammasak Vimonkiattikun

Student ID. 40061081

Degree Master of Engineering

Programme Electrical Engineering

Year 2002

Thesis Adviser Associate Professor Jirawath Panklang

Thesis Coordinate Adviser Assistant Professor Anupong Srongprapa

ABSTRACT

This thesis concerns with the development of the existing low power X band microwave holography imaging system based on the use of laser light to modulate the scattering cross-section of the photo – receiver dipole. To improve the reconstruct image quality , research has been done on various aspects such as the study on the scattering characteristic of photo – diode dipole, the design and construction of a new 9 m² automatic scanning system in newly design anechoic chamber for reducing unintentional reflection . Both the distance between object and hologram plane and the angle between reference wave and object wave beam are varied . Fresnel diffraction and angular spectrum backward – wave algorithm are used in conjunction with the techniques for Zero – order image suppression during the process of computerized image reconstruction.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาทางด้านเทคนิควิธีการสร้างภาพฮอโลแกรมโดยสนามคลื่นไมโครเวฟ กับการประมวลผลสร้างภาพ จาก รศ. จีรวัดณ์ ปานกลาง และ ผศ. อนุพงศ์ สรงประภา ซึ่งเป็นอาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์จากท่านและกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอบพระคุณพ่อและแม่ที่เป็นกำลังใจมาโดยตลอด ให้อดทนต่อสู้ให้สำเร็จ

ขอบพระคุณ รศ. สุวรรณ คูสำราญ ผู้สร้างพื้นฐานการมองภาพแบบ ฮอโลกราฟี ในประเทศไทย

ขอบพระคุณ ศูนย์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่สนับสนุนด้านเงินทุนในการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณภาควิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่เกิดขึ้นได้เลยถ้าไม่มีแรงบรรดาลใจอย่างแรงกล้าจากน้องสาวอันเป็นที่รัก ผู้ที่เกิดมาเข้าไปกว่าเทคโนโลยีการมองภาพสามมิติในปัจจุบัน

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ธรรมศักดิ์ วิมลเกียรติคุณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VII
สัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1	
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	4
บทที่ 2 ไมโครเวฟฮอโลกราฟี.....	6
2.1 พื้นฐานของไมโครเวฟฮอโลกราฟี.....	6
2.2 ทฤษฎีการกระเจิงคลื่นโดยเส้นลวดบาง.....	10
2.3 เทคนิคการวัดสนามไฟฟ้าด้วยตัวกระเจิงคลื่น.....	19
2.4 การมองภาพในเชิงฟิสิกส์ของฮอโลแกรมการเลี้ยวเบน แบบเฟรลเนลและฟรอนส์โฮเฟอร์.....	22
2.4.1 การประมาณแบบเฟรลเนล.....	22
2.4.2 การประมาณแบบฟรอนส์โฮเฟอร์.....	25
2.4.2.1 ปากช่องสังเกตคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (rectangular aperture).....	26
2.4.2.2 ปากช่องสังเกตคลื่นแบบวงกลม (Circular Aperture).....	27

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5 การเพิ่มความละเอียดของภาพไมโครเวฟฮอโลกราฟี โดยศึกษาจากการเคลื่อนที่ของตัวส่งและตัวรับสัญญาณจากวัตถุ.....	29
2.6 ระบบการสร้างภาพไมโครเวฟฮอโลกราฟีด้วยเทคนิคสเปกตรัมทำมุมย้อนกลับ(Angular Spectrum Backward Propagation)	32
2.7 การกำจัดภาพอันดับศูนย์ในงานไมโครเวฟฮอโลกราฟีแบบเยื้องแกน.....	38
บทที่ 3 ระบบการสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	41
3.1 แนวคิดของระบบการสร้างภาพด้วยไมโครเวฟฮอโลกราฟี.....	41
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	43
3.2.1 แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกันน์ไดโอด (Gunn Oscillator).....	43
3.2.2 ตัวลดทอนสัญญาณ (Attenuator).....	45
3.2.3 ไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์(Directional Coupler).....	45
3.2.4 สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด (Pyramidal Horn Antenna).....	46
3.2.5 ตัวตรวจวัดสัญญาณ (Detector).....	48
3.2.6 ชุดมอดูเลตความถี่และตัวกระจายคลื่น (Frequency Modulation Unit Scatterer).....	49
3.2.7 อุปกรณ์ขยายสัญญาณขั้นต้น (Preamplifier).....	50
3.2.8 เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน (Lock-in amplifier).....	50
3.2.9 การ์ดแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล (Analog to Digital Convertor card).....	51
3.2.10 ชุดเลื่อนตำแหน่งวัตถุและตัวปรับเฟสคลื่นอ้างอิง(Scanner and Reference Wave Phase – Shifter).....	51
3.2.11 แผงดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Absorber Panel).....	52
3.2.12 กำแพงทรายและแผ่นพลาสติกที่ทำการบดบังวัตถุ.....	53
3.3 โครงสร้างและการทำงานของไมโครเวฟฮอโลกราฟี.....	54
บทที่ 4 การวิจัยและผลการดำเนินการทดลอง.....	58
4.1 รูปภาพวัตถุที่ใช้ในการทดลองสแกนภาพฮอโลแกรม.....	58
4.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลองมองภาพฮอโลแกรมผ่านสนามคลื่นไมโครเวฟ.....	63

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3	ผลการทดลองในการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการมองภาพฮอโลแกรมโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ.....	64
4.3.1	ผลการตอบสนองต่อความถี่เมื่อเปลี่ยนความยาวของไดโพล ที่ความถี่ 50 KHz	64
4.3.2	การเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อความถี่การมอดูเลตของโฟโตไดโอดไดโพลเบอร์ต่างๆที่ความยาวเท่ากัน.....	71
4.3.3	ผลการตอบสนองความเข้มที่เกิดขึ้นจากสะท้อนวัตถุ.....	72
4.3.4	ผลการทดสอบภาพวัตถุเมื่อปรับเปลี่ยนค่าความละเอียดในการสแกน จากค่าน้อยที่สุด 64*64 ตำแหน่ง ไปจนถึง 256*256 ตำแหน่งและ เปลี่ยนค่าความถี่ในการมอดูเลต.....	74
4.3.5	ผลการเปลี่ยนมุม θ ของคลื่นอ้างอิง.....	80
4.3.6	ทดสอบขนาดวัตถุที่เหมาะสมที่ทำการสแกนภาพและขนาดความถูกต้องของภาพวัตถุเปรียบเทียบโดยขนาดของวัตถุที่แตกต่างกัน.....	82
4.3.7	ทดสอบผลกระทบจากชนิดวัสดุและพื้นผิวที่นำมาใช้สแกนภาพ.....	85
4.3.8	ผลการมองภาพวัตถุผ่านสิ่งบดบังมีการปรับความหนาวัสดุที่บดบัง.....	88
4.3.9	การทดลองมองภาพแบบสเปกตรัมทำมุมย้อนกลับเพื่อหลีกเลี่ยงภาพอันดับศูนย์.....	95
4.3.10	ผลการทดลองการกำจัดภาพอันดับศูนย์ในงานไมโครเวฟฮอโลกราฟีแบบเอียงแกน.....	97
บทที่ 5	บทสรุป.....	98
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	98
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	99
	เอกสารอ้างอิง.....	100
	ภาคผนวก.....	102
	ประวัติผู้เขียน.....	123

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างการบันทึกภาพฮอโลแกรมแบบเยื้องแกน.....7
2.2	แสดงระบบการสร้างภาพกลับมาของเล็ท-ยูแพทนิคส์.....9
2.3	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เข้าสู่เส้นลวดรัศมี a และความยาว L ที่มุม α กระแส ที่เกิดขึ้นในเส้นลวด สนามไฟฟ้าผลิตระแสนี้คือ E^{scat} ทำให้สนามไฟฟ้าที่ตก กระทบหักล้างไปคือสนามไฟฟ้า E^{inc}10
2.4	เส้นลวดแบ่งเป็น N ส่วน แต่ละส่วนเริ่มต้นที่จุดศูนย์กลางของเส้นลวดความ ยาวมีความยาว $H/2$ ส่วนปลายมีความยาวเท่ากัน(มีทั้งหมด N ส่วน) ระหว่าง แต่ละส่วนมีความยาว H เพราะใช้วิธีสมมาตรทำให้จุดเริ่มต้นมีความยาว $H/2$ ทำให้เกิดพัลส์สะท้อนมีขนาดสัญญาณเท่ากับ H คร่อมจุดศูนย์ กลางเส้นลวด.....15
2.5	การจัดเรียงอุปกรณ์สำหรับวัดสนามไฟฟ้าด้วยวิธีกระเจิงคลื่น.....19
2.6	แสดงการหมุนตัวไดโพล.....20
2.7	แสดงรูปภาพการเลี้ยวเบนโดยปากของคลื่นสี่เหลี่ยมด้วยความกว้างอัตราส่วน $I_x / I_y = 2$27
2.8	รูปการเลี้ยวเบนแบบพรอนโฮเฟอร์ทางแสงของปากช่องคลื่นทรงกลม.....29
2.9	โครงสร้างของการสแกนแบบ T-R ฮอโลกราฟี.....30
2.10	โครงสร้างการสแกนภาพ ก). สแกนเคลื่อนที่ตัวรับอย่างเดียว ข). สแกนเคลื่อนที่ ทั้งตัวรับและตัวส่ง.....32
2.11	การสร้างภาพกลับโดยวิธีการแพร่แบบสเปกตรัมทำมุมย้อนกลับ.....33
2.12	แสดงหน้าคลื่นต่างๆ (ก). การถ่ายทำแผ่นฮอโลแกรม (ข). การสร้างภาพ วัตถุ คืนกลับ (ค). การกระจายความเข้มของภาพอันดับศูนย์.....39
3.1	แสดงการจัดวางอุปกรณ์ในการถ่ายฮอโลแกรมทางแสง.....41
3.2	โครงสร้างการบันทึกภาพไมโครเวฟฮอโลแกรมโดยมีกำแพงไดอิเล็กทริกบังวัตถุ.....42
3.3	ห้องบันทึกภาพไมโครเวฟฮอโลกราฟีระบบดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ขนาด 3.5 ลูกบาศก์เมตร แสดงกราฟความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าต่อกระแส.....43
3.4	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและกระแสในปรากฏการณ์แบบกันน์.....44
3.5	แสดงวงจรสมนัยของกันน์ไดโอดออกซิลเลเตอร์.....44
3.6	แสดงรูปของกันน์ไดโอด.....44
3.7	แสดงอุปกรณ์ตัวลดทอนสัญญาณคลื่นไมโครเวฟแบบปรับค่าได้.....45

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8	แสดง (ก). รูปถ่ายสายอากาศฮอร์นทรงปิระมิดที่ใช้ในการทดลอง และ (ข). โครงสร้างสายอากาศแบบฮอร์นทรงปิระมิด.....47
3.9	แสดงอุปกรณ์ไมโครเวฟตัวผสมสัญญาณ.....48
3.10	โฟโต้ไดโอดและสายใยแก้วนำแสงพร้อมฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์เป็นมอดูเลต ความถี่ของสัญญาณคลื่นวัตถุ.....49
3.11	แสดงเครื่องขยายสัญญาณขั้นต้น.....50
3.12	แสดงเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน.....51
3.13	แสดงชุดปรับเฟสคลื่นอ้างอิง.....52
3.14	แสดงชุดเลื่อนตำแหน่งวัตถุ.....52
3.15	แสดงแผงดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ.....53
3.16	กำแพงทราเยนนาปรับระดับตั้งแต่ 10 ซม. สูง 2 เมตร และ กำแพงโฟม ความหนา สามารถปรับระดับได้ตั้งแต่ 5 ซม. ถึง 30 ซม. สูง 2 เมตร กว้าง 3 เมตร.....54
3.17	โครงสร้างของระบบไมโครเวฟฮอโลกราฟี.....55
3.18	การจัดวางตำแหน่งต่างๆ ระหว่าง ฮอร์น, โฟโต้ไดโอด, วัตถุที่สแกน.....56
3.19	แสดงการจัดวางเครื่องมือในตำแหน่งต่างๆ ในระบบไมโครเวฟฮอโลกราฟี.....57
4.1	วงกลมมือลูมิเนียมพอยล์หุ้ม.....58
4.2	วงแหวนมือลูมิเนียมพอยล์หุ้ม.....59
4.3	วงกลมสองวงมือลูมิเนียมพอยล์หุ้ม.....59
4.4	วงกลมสี่วงไม่เท่ากันเป็นวัสดุทองเหลืองมือลูมิเนียมพอยล์หุ้ม.....60
4.5	แผ่นสแตนเลสรูปกากบาท.....60
4.6	ลูกเทนนิสมีและไม่มีพอยล์หุ้มวางเรียงกันเป็นแถว.....61
4.7	วัตถุรูปปิ่นแบนหุ้มด้วยอลูมิเนียมผิวขรุขระ.....61
4.8	แผ่นวงกลมทำด้วยทองเหลือง.....62
4.9	ภาพวัตถุหลักๆที่ใช้ในการทดลองนำมาเปรียบเทียบขนาด.....62
4.10	กราฟแสดงการให้แรงดันที่โฟโต้ไดโอดโดยแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกัน 2 ชุด.....66
4.11	ผลการคำนวณภาคตัดขวางของการกระเจิงของเส้นลวดบางที่มีความยาวต่างๆ ตามทฤษฎีของเฮเลน.....67

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ผลการตอบสนองของโฟโต้ทรานซิสเตอร์เบอร์ TIL78 เมื่อเปลี่ยนความยาวของไดโพล ที่ระดับความเข้มแสงของการมอดูเลตต่างกันที่ความถี่ของการมอดูเลต50kHz.....	67
4.13 ผลการตอบสนองของ LDR เบอร์ CDS P1241-05 เมื่อเปลี่ยนความยาวของไดโพลระดับความเข้มแสงของการมอดูเลตต่างกัน ที่ความถี่ของการมอดูเลต 50 kHz.....	68
4.14 ผลการตอบสนองของ Unknow โฟโต้ทรานซิสเตอร์เมื่อเปลี่ยนความยาวของไดโพลที่ระดับความเข้มแสงของการมอดูเลตต่างกัน ที่ความถี่ของการมอดูเลต 50 kHz.....	68
4.15 ผลการตอบสนองของโฟโต้ทรานซิสเตอร์เบอร์ CDS 9PS1A เมื่อเปลี่ยนความยาวของไดโพล ที่ระดับความเข้มแสงของการมอดูเลตต่างกัน ที่ความถี่ของการมอดูเลต 50 kHz.....	69
4.16 ผลการตอบสนองของโฟโต้ไดโอดเบอร์ SFH229 เมื่อเปลี่ยนความยาวของไดโพล ที่ระดับความเข้มแสงของการมอดูเลตต่างกัน ที่ความถี่ของการมอดูเลต 50 kHz.....	69
4.17 ผลการตอบสนองของ Unknow โฟโต้ไดโอด เมื่อเปลี่ยนความยาวของไดโพลที่ระดับความเข้มแสงของการมอดูเลตต่างกันที่ความถี่ของการมอดูเลต 50 kHz.....	70
4.18 ผลการตอบสนองของ Unknow โฟโต้ไดโอด เมื่อเปลี่ยนความยาวของไดโพลที่ระดับความเข้มแสงของการมอดูเลตต่างกันที่ความถี่ของการมอดูเลต 50 kHz.....	70
4.19 ผลการเปรียบเทียบการตอบสนองของไดโพลโฟโต้ไดโอด MRD721 กับ SFH229 เมื่อเปลี่ยนความยาวของไดโพลที่ ความถี่ของการมอดูเลต 50 kHz.....	71
4.20 กราฟแสดงค่าแรงดันไมโครเวฟกับความถี่ใช้ในการมอดูเลตของโฟโต้ไดโอด.....	72
4.21 ภาพแผ่นโลหะวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ซม. ภาพฮอโลแกรมและกราฟแสดงขนาดประเมินจากการกระจายของความเข้มที่เกิดจากการสะท้อนวัตถุ.....	73
4.22 ภาพวงแหวน ความละเอียดในการสแกน 64x64 ระยะห่าง ระหว่างวัตถุกับฮอว์น 288 ซม. ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวกระจังคลื่น 249.5 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 50 kHz	75
4.23 ภาพวงแหวน ความละเอียดในการสแกน 128x128 ระยะห่าง ระหว่างวัตถุกับฮอว์น 288 ซม. ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวกระจังคลื่น 249.5 ซม.....	75

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 ภาพวงแหวน ความละเอียดในการสแกน 128x128 (แบบเลื่อนจากเดิมสองเท่า ครั้งละ 1.08 ซม.) ระยะห่างระหว่างวัตถุกับฮอว์น 288 ซม. ระยะห่างระหว่างวัตถุ กับตัวกระจังคลื่น 249.5 ซม.....	76
4.25 ภาพวงแหวน ความละเอียดในการสแกน 256x256 ระยะห่างระหว่างวัตถุกับฮอว์น 288 ซม. ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวกระจังคลื่น 249.5 ซม.ความถี่ในการมอดดูเลต 50 kHz.....	76
4.26 ภาพวงแหวน ความละเอียดในการสแกน 256x256 ระยะห่าง ว่างระหว่างวัตถุกับฮอว์น 288 ซม. ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวกระจังคลื่น 249.5 ซม. ความถี่ในการมอดดูเลต 100 kHz.....	77
4.27 ภาพวงแหวน ความละเอียดในการสแกน 256x256 ระยะห่าง ว่างระหว่างวัตถุกับฮอว์น 288 ซม. ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวกระจังคลื่น 249.5 ซม. ความถี่ในการมอดดูเลต 200 kHz.....	77
4.28 ภาพกากบาทใหญ่ ความละเอียดในการสแกน 128x128 ระยะห่างระหว่างวัตถุกับฮอว์น 288 ซม. ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวกระจังคลื่น 249.5 ซม. ความถี่ในการมอดดูเลต 200 kHz.....	78
4.29 ภาพกากบาทใหญ่ ความละเอียดในการสแกน 256x256 ระยะห่างระหว่างวัตถุกับฮอว์น 288 ซม. ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวกระจังคลื่น 249.5 ซม. ความถี่ในการมอดดูเลต 200 kHz.....	78
4.30 ภาพวงกลมความละเอียดในการสแกน 256x256 ระยะห่าง ว่างระหว่างวัตถุกับฮอว์น 288 ซม. ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวกระจังคลื่น 249.5 ซม ความถี่ในมอดดูเลต 300 kHz.....	79
4.31 ภาพวงกลม ความละเอียดในการสแกน 256x256 ระยะห่างระหว่างวัตถุกับฮอว์น 288 ซม. ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวกระจังคลื่น 249.5 ซม.ความถี่ในการมอดดูเลต 500 kHz.....	79
4.32 วัตถุกากบาทเล็ก ใช้มุม $\theta = 69.6^\circ$ ระยะ $z' = 47.38$ ซม.ความถี่ในการมอดดูเลต 200 KHz.....	80
4.33 วัตถุกากบาทเล็ก ใช้มุม $\theta = 43.30^\circ$ ระยะ $z' = 47.38$ ซม. ความถี่ในการมอดดูเลต 200 KHz.....	81

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34	วัตถุภาพขนาดเล็ก ใช้มุม $\theta = 33.96^\circ$ ระยะ $z' = 47.38$ ซม. ความถี่ในการ มอดูเลต 200 KHz.....81
4.35	วัตถุภาพขนาดเล็ก ใช้มุม $\theta = 27.9^\circ$ ระยะ $z' = 47.38$ ซม. ความถี่ในการ มอดูเลต 200 KHz.....82
4.36	วัตถุภาพขนาดใหญ่ ระยะระหว่างวัตถุกับฮอเรน 288 ซม. ความถี่ในการ มอดูเลต 500 kHz.....83
4.37	วัตถุภาพขนาดเล็ก ระยะระหว่างวัตถุกับฮอเรน 288 ซม. ความถี่ใน การมอดูเลต 200 kHz.....83
4.38	(ก) แผ่นวัตถุรูปโดนัท (ข) แผ่นวัตถุวงกลมสองวง (ค),(ง). ภาพฮอโลแกรม ที่มีขนาดใกล้เคียงวัตถุจริง.....84
4.39	ภาพวงกลมสี่วงขนาดไม่เท่ากันทำการทดสอบความสามารถในการตรวจจับ ภาพที่เล็กที่สุด.....85
4.40	วัตถุลูกเทนนิสมีพอยล์และไม่มีพอยล์หุ้มเรียงเป็นแถวสี่ลูก ความละเอียด 256x256 ระยะระหว่างวัตถุกับฮอเรน 288 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 2 MHz แถวที่ 3 จะยื่นออกมาข้างหน้าและเฉียง.....86
4.41	วัตถุวงกลมทองเหลือง ความละเอียด 256x256 ระยะระหว่างวัตถุกับฮอเรน 288 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 50 KHz.....86
4.42	วัตถุภาพทองเหลือง ความละเอียด 256x256 ระยะระหว่างวัตถุกับฮอเรน 288 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 2 MHz.....87
4.43	วัตถุวงกลมสี่วงขนาดไม่เท่ากัน ไม่มีพอยล์หุ้มเป็นวัสดุทองเหลือง ระยะ ระหว่างวัตถุกับฮอเรน 288 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 50 KHz กำแพง โฟมหนา 7 นิ้วดบัง.....87
4.44	กำแพงโฟมที่ใช้ในการทดสอบการทะลุผ่านของคลื่นไมโครเวฟ กำลังต่ำ แบบปรับความหนาของกำแพงครั้งละ 5 ซม.....88
4.45	กำแพงทรายที่ใช้ในการทดสอบการทะลุผ่านของคลื่นไมโครเวฟกำลังต่ำแบบ ปรับความหนาของกำแพงครั้งละ 10 ซม.....89
4.46	วัตถุวงกลมสี่วงขนาดไม่เท่ากัน ความละเอียด 256x256 ระยะระหว่าง วัตถุกับฮอเรน 288 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 100 kHz มีโฟมบังหนา 10 ซม.....89

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.47	วัตถุป็น ความละเอียด 256x256 ระยะระหว่างวัตถุ กับฮอรัน 288 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 500 kHz มีโพมบังหนา 10 ซม.....90
4.48	วัตถุป็น ความละเอียด 256x256 ระยะระหว่างวัตถุกับฮอรัน 288 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 500 kHz มีโพมบังหนา 18 ซม.....90
4.49	วัตถุวงกลมสีวง ความละเอียด 256x256 ระยะระหว่างวัตถุกับฮอรัน 288 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 500 kHz กำแพงทรายหนา 10 ซม.....91
4.50	วัตถุกากบาทใหญ่สเดนเลส มีทรายบังมีความทรายหนา 10 ซม. พร้อม ภาพฮอโลแกรม และภาพวัตถุ.....92
4.51	วัตถุกากบาทใหญ่สเดนเลส ระยะจากช่องสังเกตถึงไดโพลกระเจิงคลื่น 128.75 ซม. ระยะจากช่องสังเกต ถึงระนาบวัตถุ 218 ซม. มีทรายบัง และกำแพงทรายหนา 10 ซม. พร้อมภาพฮอโลแกรม และภาพวัตถุ.....93
4.52	วัตถุกากบาทใหญ่สเดนเลสเลื่อนไปทางขวา จากกึ่งกลางช่องสังเกต 20 ซม. ระยะจากช่องสังเกตถึงไดโพลกระเจิงคลื่น 117.25 ซม. ระยะ จากช่องสังเกตถึงระนาบวัตถุ 218 ซม. มีทรายบังและกำแพงทรายหนา 10 ซม. พร้อมภาพฮอโลแกรมและภาพวัตถุ.....94
4.53	วัตถุรูปกากบาทที่ระยะ $z_0 = 47.4$ ด้วยการบันทึกลมุคลื่นอ้างอิงที่เปลี่ยน แปลงสองค่า ก) วัตถุ ข) -ค) ภาพฮอโลแกรม ง)-จ) ภาพวิธีการทราน ฟอรัมแบบเฟรสเนล ฉ)-ช) ภาพการแพร์แบบ.....95
4.54	วัตถุรูปวงกลมสีวงไม่เท่ากันที่ระยะ $z_0 = 47.4$ ด้วยการบันทึกลมุคลื่นอ้างอิง ที่เปลี่ยนแปลงสองค่า ก) วัตถุ ข) -ค) ภาพฮอโลแกรม ง)-จ) ภาพวิธีการ ทรานฟอรัมแบบเฟรสเนล ฉ)-ช) ภาพการแพร์แบบ.....96
4.55	วัตถุรูปป็น ที่ระยะ $d = 104$ ซม. (ก) วัตถุ (ข) ฮอโลแกรม (ค) ภาพอันดับ ศูนย์ (ง) ภาพวัตถุทางซ้ายในภาพ ค. (จ) เมื่อตัดภาพอันดับศูนย์ (ฉ) ภาพ วัตถุทางซ้ายในภาพ.....97
4.50	วัตถุรูปป็น ที่ระยะ $d = 79$ ซม. (ก)วัตถุ (ข)ฮอโลแกรม (ค) ภาพอันดับ ศูนย์ (ง) ภาพวัตถุทางซ้ายในภาพ ค. (จ) เมื่อตัดภาพอันดับศูนย์ (ฉ) ภาพ วัตถุทางซ้ายในภาพ (จ).....97

สัญลักษณ์

θ	มุมคลื่นตกกระทบไดโพลทำมุมกับระนาบแกน X
σ	Radar Cross Section
μ	โมบิลิตี้
λ	ความยาวคลื่น
$G_s(Z,Z')$	สมมูล Green Function
E	สนามไฟฟ้า
t	เวลา
A	ค้ำยเวกเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้า
E^{Scat}	สนามไฟฟ้าที่ถูกกระเจิง
E^{Inc}	สนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ
$C(\text{dB})$	ค้ำปลิ่งแพกเตอร์
B	ความเข้มแม่เหล็กไฟฟ้า
ψ	มุมของสนามไฟฟ้าทำมุมกับยูนิตเวกเตอร์
$P_1(x,y,z)$	ระนาบแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ
$P_2(\zeta,\eta,0)$	ระนาบวัตถุ
$P_3(u,v,w)$	ระนาบเซนเซอร์
$a(x,y,w)$	ฟังก์ชันคลื่นสะท้อน
$R(\zeta,\eta)$	สัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่นของวัตถุ
δ	ขีดจำกัดการแยก เรย์เลห์ (Rayleigh)
D	มิติของฮอโลแกรม
α	ค่าความถี่เป็นช่วงของหน้าคลื่น (wave front)
b_0	แอมพลิจูดของคลื่น
$b(x,y)$	สนามระนาบคลื่นอ้างอิง
$t_t(x,y)$	ฟังก์ชันการทะลุผ่าน (Transmittance Function)
β	ค่าคงที่ขึ้นกับกระบวนการล้างและชนิดของฟิล์ม
ϵ_0	ค่าซึมซาบทางไฟฟ้า
ω	ความถี่เชิงมุมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
z_0	อิมพีแดนซ์ของโหมด H ในท่อนำคลื่น

สัญลักษณ์(ต่อ)

α	โพลาไรซ์อะบิลิตี (Polarizability) ของไดโพล
a, b	ความกว้างยาวภาคตัดขวางท่อนำคลื่น
l_x, l_y	ความกว้างของปากช่องสังเกต
τ	แอมพลิจูดที่วัดโดยแทนเป็นค่าความเข้ม
x_1, y_1	ปากช่องสังเกตคลื่นปกติแผ่ในคลื่นเป็นแบบลักษณะโมโนโครเมติก
$L(u, v)$	ขนาดกรอบของภาพ
$\Delta L(x, y)$	ขนาดช่องระหว่างจุดเก็บข้อมูลถัดกัน (grid space)
u, v	ความถี่เชิงมิติของระนาบ x และ y
V_{th}	แรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มีการใช้ประโยชน์คลื่นไมโครเวฟในงานสาขาต่างๆทั้งในด้าน การสื่อสาร ทาง การทหาร การทำให้อาหารสุก การอบแห้งในงานอุตสาหกรรม การฉายรักษาโรคมะเร็งชนิด การใช้ตรวจสอบแหล่งทรัพยากรจากระยะไกล ฯลฯ และเนื่องด้วยสมบัติการทะลุผ่านตัวกลางหลากหลายชนิดทำให้มีการศึกษาวิจัยเพื่อนำมาใช้เป็นประโยชน์ในงานวินิจฉัยทางการแพทย์ การตรวจสอบวัสดุแบบไม่ทำลาย ซึ่งปัจจุบันงานส่วนใหญ่ทางด้านนี้ในต่างประเทศยังอยู่ในระดับการพัฒนาเครื่องต้นแบบในห้องปฏิบัติการ ยังมิได้มีการผลิตในทางการค้าอย่างกว้างขวาง

จากผลการศึกษาออกแบบและสร้างระบบ ตลอดจนการทดลองบันทึกภาพวัตถุด้วยคลื่นไมโครเวฟความเข้มต่ำโดยเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณโดโพลกระเจิงคลื่น ในขั้นต้นซึ่งได้ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการวิจัยไมโครเวฟประยุกต์นั้น [1],[2] ยังมีปัญหาอุปสรรคอีกมากที่จะต้องมีการแก้ไขพัฒนา ทั้งในส่วนของระบบและกระบวนการกรรมวิธีของการได้มาซึ่งภาพที่ชัดเจน การศึกษาปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลองที่ขึ้นกับตัวแปรต่างๆ เช่น ขนาดความยาวของสายอากาศโดโพลกระเจิงคลื่น การตอบสนองความถี่ของการมอดูเลต ผลของขนาดพื้นที่และขนาดพิกเซลของการเก็บข้อมูลความเข้มฮอโลแกรม ระยะห่างระหว่างวัตถุกับฮอโลแกรม มุมคลื่นอ้างอิง ตลอดจนผลของการมีวัสดุมาบดบังซึ่งการวิจัยเพิ่มเติมพัฒนาในสิ่งเหล่านี้ได้รับการอนุมัติสนับสนุนในด้านเงินทุน จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ด้วยงบประมาณ 1,387,655 บาท ในโครงการ “การมองภาพวัตถุที่ถูกบดบังด้วยวิธีไมโครเวฟฮอโลกราฟี(ระยะที่ 1)” ซึ่งงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอนี้ก็มีส่วนการศึกษาลักษณะของโครงการดังกล่าว

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

การนำเทคนิคฮอโลกราฟีมาใช้ในการดูภาพวัตถุด้วยคลื่นไมโครเวฟ จะสามารถนำไปสู่การเห็นภาพวัตถุเป็นมิติมีความลึก แต่ที่ผ่านมามีส่วนใหญจะเป็นการนำฮอโลกราฟีมาใช้ทางแสง ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาคิดค้นวิจัยเพื่อนำเทคนิควิธีต่างๆ ทำให้เกิดภาพทางฮอโลแกรมโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ให้เกิดภาพที่มีความชัดมีรายละเอียดโดยยังคงใช้กำลังคลื่นน้อย แต่สามารถตรวจจับและเก็บข้อมูลสัญญาณได้เร็วขึ้น ไมโครเวฟฮอโลกราฟีมีขอบเขตที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ อาทิเช่น การหารูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ระยะไกลจากข้อมูลซึ่งทำการวัดที่ระยะใกล้ การ

ตรวจสอบแนวท่อก๊าซ ร่องรอยโบราณสถาน ทรัพยากรแหล่งแร่ธาตุ หรือแม้กระทั่งทุ่งนาระเบิดที่ฝังไว้ในดิน การตรวจตราอาวุธที่ซุกซ่อนในกระเป๋าเดินทางหรือพกติดตัวเพื่อป้องกัน การก่อการร้าย การตรวจตราดูความผิดปกติของอวัยวะภายในร่างกาย การตรวจดูจุดบกพร่องในเนื้อชิ้นงานอุตสาหกรรม เหล่านี้เป็นต้น จัดเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ให้ข้อมูลในแง่มุมที่แตกต่างและเป็นประโยชน์ในการตรวจวินิจฉัยไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าวิธีการอื่นๆ ได้แก่ การฉายรังสีอินฟราเรด รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา คลื่นอัลตราซาวด์ โพลีทรอน อิเล็กตรอน นิวตรอน เป็นต้น ตลอดจนเทคนิคทางนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

จากผลสำเร็จที่เกิดขึ้นจากการศึกษาทดลอง และสร้างระบบเบื้องต้นของการบันทึกภาพวัตถุด้วยคลื่นไมโครเวฟความเข้มต่ำ โดยเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณไดโพลกระเจิงคลื่น และฮอโลกราฟี คณะผู้ร่วมวิจัยจึงได้มีจุดประสงค์ร่วมกันที่จะพัฒนา นำไปสู่ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ต่อไปเพื่อการมองภาพวัตถุโลหะ ภายใต้สิ่งบดบังซึ่งเป็นสารไดอิเล็กทริก โดยได้ทำการวิจัยเพิ่มเติมในส่วนของพัฒนาเพิ่มขีดความสามารถการแยกแยะวัตถุ ทั้งด้วยการลดทอนคลื่นรบกวน การเพิ่มพื้นที่ของการสแกน และการปรับกรรมวิธีประมวลผลภาพด้วยคอมพิวเตอร์ พร้อมกันนี้ก็คำนึงถึงการพัฒนาระบบการเก็บข้อมูลให้ใช้เวลาอันน้อยลง โดยการออกแบบสร้างระบบสแกนเลื่อนตำแหน่งวัตถุอัตโนมัติอัตราเร็วสูงองแกนช่วงกว้าง การเลือกใช้ไฟโต้ไดโอดไดโพลกระเจิงคลื่นที่ถูกมอดูเลตด้วยแสงและลอคสัญญาณด้วยเครื่องขยายสัญญาณแบบลอคอิน ความถี่สูงให้ถึงในระดับเมกะเฮิรตซ์ เพื่อที่จะเป็นการรองรับโครงการในขั้นต่อไปในอนาคตจะได้ทำการศึกษาถึงผลการปรับเปลี่ยนสายอากาศส่งและรับคลื่นในรูปแบบต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาแนวทางการออกแบบสร้างสายอากาศที่มีลักษณะให้นำคลื่นสมา์เสมอ บริเวณกว้างเหมาะสมกับการเก็บข้อมูลที่รวดเร็วด้วยการใช้อะเรย์ของไฟโต้ไดโอด เพื่อให้การสแกนเป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์ควบคู่กับการประมวลผลความเร็วสูง สำหรับการสร้างภาพด้วยการใช้ไอซีประมวลผลสัญญาณดิจิทัล จากการที่ผู้วิจัยได้ค้นคว้างานวิจัยในปัจจุบันตลอดจนศึกษาปัญหาที่เกี่ยวข้องจำเป็นที่จะต้องตั้งสมมุติฐาน เพื่อกำหนดขอบเขตของการศึกษา ดังนี้

1.3.1 เมื่อทำการปล่อยแสงผ่านใยนำแสงไปที่ไฟโต้ไดโอดเพื่อทำการมอดูเลต ขาขอไฟโต้ไดโอดจะประพฤติเป็นเสมือนสายอากาศที่ต้องทำการคำนวณ ความยาวที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ สัญญาณการกระเจิงคลื่นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ การแปรเปลี่ยนกระแสเหนี่ยวนำมีค่ามาก

1.3.2 การมอดูเลตไดโพลกระเจิงคลื่นโฟโตไดโอด นำจะมีที่ความสัมพันธ์ของขนาดของคลื่นที่กระเจิงกลับกับความถี่การมอดูเลต คล้องจองกับการตอบสนองในวงจรไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

1.3.3 เนื่องการสะท้อนที่ไม่พึงปรารถนาซึ่งจะมีผลการรบกวนการทดลอง จึงจำเป็นต้องออกแบบสร้างห้องทดลองผนังดูดซับคลื่นโดยใช้วัสดุที่หาได้ภายในประเทศและราคาถูก

1.3.4 การเพิ่มพื้นที่ของการสแกนและความถี่ของจุดตำแหน่งการเก็บข้อมูล นำจะมีผลต่อการเพิ่มคุณภาพ จึงมีการออกแบบจัดสร้างเครื่องสแกนวัตถุอัตโนมัติในระนาบ x และ y ที่มีขนาดกว้าง 2.5 เมตร \times 2.5 เมตร มีความละเอียดของการเคลื่อนที่ 0.5 ซม

1.3.5 ระยะห่างระหว่างวัตถุกับฮอโลแกรมควรมีผลต่อคุณภาพของภาพ

1.3.6 มุมที่คลื่นอ้างอิงกระทำต่อคลื่นวัตถุ มีผลต่อการคุณภาพของภาพต่างๆ

1.3.7 นำวัสดุต่างๆมาทำเป็นวัตถุ ในการมองภาพสังเกตว่าวัตถุชนิดอะไรที่เหมาะสมในการใช้สนามคลื่นไมโครเวฟตรวจจับภาพ ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้ลูมิเนียมโลหะเป็นวัสดุหลัก และมีสารไดอิเล็กทริกบางชนิด เช่น ยาง พลาสติก เป็นต้น

1.3.8 นำวัสดุ แผ่นพลาสติก แผ่นโฟม แผ่นไม้ กำแพงทราย มาบังวัตถุ แล้วศึกษาการทะลุผ่านของสนามคลื่นไมโครเวฟ การกำจัดสัญญาณรบกวนเนื่องจากการสะท้อนจากพื้นผิวของสิ่งบดบังเหล่านั้น จากภาพวัตถุด้วยวิธีที่เหมาะสม

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดในการวิจัย

การวิจัยไมโครเวฟฮอโลกราฟีในแนวทางทฤษฎีได้ใช้สัญญาณความเข้มแสงไปมอดูเลตการกระเจิงคลื่นไมโครเวฟ ของไดโพลทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์คลื่นที่สะท้อนจากวัตถุ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ภาพในระยะที่ไกลขึ้นเพราะตัวรับคลื่นอยู่ใกล้วัตถุมากกว่าตัวส่งคลื่น ในขณะที่ตัวรับคลื่นซึ่งมีขนาดเล็กก็จะมีผลการรบกวนต่อคลื่นที่ทำการวัดน้อยที่สุด และการกำจัดภาพอันดับศูนย์ของฮอโลกราฟีแบบเอียงแกน เพื่อกำจัดภาพที่ไม่ต้องการออกจากภาพที่ได้รับมา โดยศึกษาทฤษฎีการเคลื่อนที่ของตัวรับคลื่นอย่างเดียว (conventional) และการเคลื่อนที่ของตัวรับและส่งคลื่นไปพร้อมกัน (source and receiver scan) ทำให้สามารถรับภาพที่มีความละเอียดมากขึ้น เป็นผลจากการเคลื่อนที่ของตัวส่งและตัวรับสัญญาณไปพร้อมๆกัน การใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนแบบเฟรลเนลและเฟราน์โฮเฟอร์ตลอดจนวิธีสเปกตรัมทำมุมย้อนกลับ ในการวิเคราะห์ภาพในช่วงระยะ z ที่แปรเปลี่ยนโดยมีอัลกอริทึมต่างกัน เพื่อให้ภาพจริงจากวัตถุไม่ถูกภาพอันดับศูนย์บดบัง วิธีการลบภาพสัญญาณรบกวนต่างๆออกจากภาพจริงของวัตถุเหล่านี้ เพื่อให้ได้ภาพจากฮอโลแกรมที่มีความละเอียดและคมชัด

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 ศึกษาวิจัยระบบการสร้างภาพฮอโลแกรมไมโครเวฟที่กำลังคลื่น 10 มิลลิวัตต์ และความถี่ 9.2 กิกะเฮิรท์ ในแบบคลื่นอ้างอิงไม่ได้อยู่ในระนาบเดียวกับคลื่นสัญญาณ โดยการศึกษาลักษณะการใช้งานที่เหมาะสมของไดโพลกระเจิงคลื่น โดยสแกนวัตถุในขนาดประมาณ 25-35 เซนติเมตร ในรูปร่างต่าง ๆ กัน

1.5.2 เพิ่มความละเอียดจาก $128 * 128$ เป็น $256 * 256$ และระยะห่างต่างๆ ทำการมอดูเลตสัญญาณในความถี่ 50 กิโลเฮิรท์ ถึง 500 กิโลเฮิรท์ เปรียบเทียบคุณภาพของสัญญาณที่ได้ทำการปรับเปลี่ยนมุมคลื่นอ้างอิง ทำการลบสัญญาณรบกวนเช่น ภาพอันดับศูนย์ไม่ให้นำรบกวนสัญญาณภาพจริง เพื่อให้ได้ภาพที่มีความชัดในลักษณะที่ดีกว่าเมื่อไม่มีการกำจัดภาพอันดับศูนย์ออกไป และภาพที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงวัตถุจริง

1.6 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

1.6.1 ศึกษาทฤษฎีฮอโลแกรมและการนำไปใช้ในงานด้านต่างๆ

1.6.2 ศึกษาการเรียนรู้การทำงานของระบบที่มีอยู่เดิม

1.6.3 ทำการสร้างระบบสแกน x,y อัตโนมัตืช่วงกว้างและสูง 2.5×2.5 ตารางเมตร โดยมีความละเอียดในแต่ละพิกเซลน้อยที่สุดครึ่งเซนติเมตร

1.6.4 สร้างห้องทดลองดูคลื่นคลื่นไมโครเวฟขนาด $3 \times 3 \times 3$ ลูกบาศก์เมตร โดยใช้วัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟราคาถูกผ่านการทดสอบที่ผลิตขึ้นใช้เอง

1.6.5 ปรับระบบไมโครเวฟฮอโลกราฟีการส่งและรับคลื่น ตรวจสอบสัญญาณกับคลื่นอ้างอิงโดยมีการขยายสัญญาณลือคอินแอมพลิฟายด์ความถี่สูง เปรียบเทียบความเข้มและเฟส

1.6.6 ปรับสัญญาณการมอดูเลตให้มีความถี่เพิ่มขึ้นจาก 50 กิโลเฮิรท์ไปจนถึงระดับ 200 กิโลเฮิรท์ โดยใช้ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ในการกำเนิดพัลส์ดูการตอบสนองการกระเจิงคลื่นของไดโพลโพโตนิคต่างๆ เช่น แอลดีอาร์ โฟโตไดโอด โฟโต้ทรานซิสเตอร์

1.6.7 ศึกษาและทำการปรับสัญญาณคลื่น ที่กระเจิงจากไดโพลโดยการออกแบบสาย อากาศไดโพลให้เหมาะสม

1.6.8 ศึกษาทฤษฎีการเลี้ยวเบนแบบเฟรลเนลและเฟราน์โฮเฟอร์ ตลอดจนวิธีสเปกตรัมทำมูมย้อนกลับ รวมทั้งเทคนิควิธีการพื้นที่รับคลื่นสังเคราะห์ (Synthetic Aperture) แบบการเคลื่อนที่ตัวรับและตัวส่งคลื่นไปด้วยกัน

1.6.9 ศึกษาวิธีการประมวลผลภาพในวิธีต่างๆ ทำให้ภาพที่ได้เหมือนวัตถุสแกน

- 1.6.10 สร้างโปรแกรมประมวลผลความเข้มของสัญญาณที่ได้โดยใช้ MATLAB
- 1.6.11 ศึกษาการกำจัดผลของสัญญาณรบกวนจากภาพอันดับศูนย์ ออก
จากภาพฮอโลแกรม
- 1.6.12 วิเคราะห์ผลการทดลอง
- 1.6.13 สรุปผลการวิจัย แนวทางการนำไปใช้และดำเนินงานพัฒนาต่อไปใน
อนาคต

บทที่ 2

ไมโครเวฟฮอโลกราฟี

การวิจัยและพัฒนาเพื่อนำไมโครเวฟมาทำการตรวจจับภาพวัตถุ ให้เป็นฮอโลแกรม ผู้ทำการวิจัยต้องมีความเข้าใจทฤษฎีพื้นฐานของไมโครเวฟ และสามารถนำทฤษฎีฮอโลแกรม มาประยุกต์ใช้ได้เป็นอย่างดี

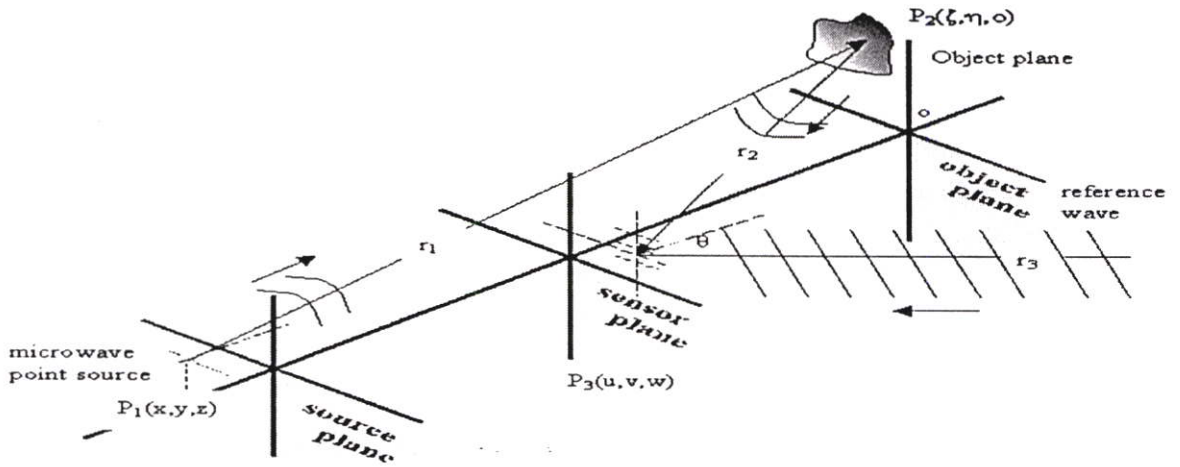
ในบทนี้จะทำการกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของไมโครเวฟฮอโลกราฟี ทฤษฎีเกี่ยวกับฮอโลแกรม รวมทั้งทฤษฎีการเกิดกระแสเหนี่ยวนำในเส้นลวดหรือไดโพลกระแสเคลื่อน เมื่อมีคลื่นมาตกกระทบเพื่อนำหลักการนี้ไปใช้ในการรับสัญญาณคลื่นจากวัตถุ ในการสร้างภาพจากสนามคลื่นไมโครเวฟ ผู้วิจัยควรที่จะศึกษาหลักการมองภาพในเชิงฟิสิกส์ของฮอโลแกรมการเลี้ยวเบนเฟรลน์เนลและเฟราน์โฮเฟอร์ เพื่อนำหลักการเลี้ยวเบนแบบเฟรลน์เนลมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ ในส่วนต่อไปทำความเข้าใจในทฤษฎีการเพิ่มรายละเอียดการแยกแยะ (Resolution) โดยทำการสังเคราะห์พื้นที่การเก็บข้อมูลให้มากกว่าพื้นที่จริงโดยการเคลื่อนที่ไปด้วยกันของตัวส่งคลื่นและตัวรับคลื่นของวัตถุ ศึกษาทฤษฎีและเทคนิคการลดสัญญาณรบกวน ภาพวัตถุในระนาบฮอโลแกรม

2.1 พื้นฐานของไมโครเวฟฮอโลกราฟี

ไมโครเวฟฮอโลกราฟี เป็นการแทนที่การแทรกสอดของคลื่นวัตถุและคลื่นอ้างอิงในช่วงความยาวคลื่นแสงด้วยไมโครเวฟ เราสามารถทำนายสนามของคลื่นวัตถุที่ระนาบฮอโลแกรมได้เมื่อเราทราบสนามของคลื่นวัตถุที่จุดเริ่มต้น เมื่อสนามคลื่นไมโครเวฟที่โพลาไรซ์ (Polarized) สามารถบรรยายโดยใช้ปริมาณสเกลลาร์ ทฤษฎีการเลี้ยวเบนของคลื่นสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ถ้าพื้นที่ส่วนหนึ่งของระนาบ x, y ที่ $z = 0$ ซึ่งทำหน้าที่เป็นช่องสังเกต (Aperture) บริเวณวัตถุ มีการกระจายของเฟสและแอมพลิจูดเป็น $F(x, y)$ สามารถใช้หลักการของฮอยเกนส์ได้ว่า เมื่อ $G(x, y, z)$ เป็นสนามคลื่นทรงกลม (Spherical Wave Field) จากแหล่งกำเนิดชนิดจุด (Point Source) ที่ตำแหน่ง $(0, 0)$ บนระนาบช่องสังเกตบริเวณวัตถุ ส่งมาที่จุด (x, y, z) ตรงบริเวณระนาบช่องสังเกตของการวัด (ห่างระนาบวัตถุเป็นระยะ Z) สนามของคลื่น $f(x, y, z)$ บนระนาบช่องสังเกตของการวัดจะมีค่าเป็นความยาวคลื่น λ ดังนั้นเราสามารถหาฟังก์ชันคลื่นได้เป็น

$$f(x, y, z) = F(x, y) * G(x, y, z) \quad (2.1)$$

เมื่อ * คือ convolution



รูปที่ 2.1 โครงสร้างการบันทึกภาพฮอโลแกรมแบบเยื้องแกน

ดังนั้น $G = e^{jkr} / r = e^{j2\pi r / \lambda} / r$ โดย $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ซึ่งสำหรับการประมาณแบบเฟร์ลันด์ $r = z + \sqrt{(x^2 + y^2) / 2z}$ รูปที่ 2.1 เป็นลักษณะของการจัดการบันทึกฮอโลแกรม โดยระนาบแหล่งกำเนิด, ระนาบเซนเซอร์(หรือตัวตรวจจับ) และระนาบวัตถุเรียงกันสามระนาบตามลำดับ คลื่นปล่อยมาจากแหล่งกำเนิดที่ $P_1(x,y,z)$ แพร่มากระทบจุด $P_2(\xi,\eta,0)$ ที่ระนาบวัตถุ คลื่นสะท้อนจากจุด P_2 แพร่ผ่านมายังระนาบเซนเซอร์ที่ตำแหน่ง $P_3(u,v,w)$ เมื่อเลื่อนระนาบเซนเซอร์แบบสแกนไปพร้อมกับแหล่งกำเนิด กล่าวคือถ้าเซนเซอร์และแหล่งกำเนิดสแกนวัตถุ $x = u, y = v$ ฟังก์ชันคลื่นสะท้อน $a(x,y,w)$ ที่ระนาบเซนเซอร์จะสามารถหาค่าได้จากสมการ

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

$$= A_4 \exp\{jk_2(w+z)\} \times \iint_{-\infty-\infty}^{\infty} D(\zeta,\eta) \exp\left[jk_2 \left\{ \frac{(x-\zeta)^2 + (y-\eta)^2}{2wz/(w+z)} \right\} \right] d\zeta d\eta \quad (2.2)$$

เมื่อ $R(\zeta,\eta)$ เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่นของวัตถุ และ A_4 เป็นค่าคงที่ ระนาบเซนเซอร์อยู่ห่างจากระนาบวัตถุ เป็นระยะทาง w แต่สมการ (2.2) แสดงถึงสมการเลี้ยวเบน สนามการเลี้ยวเบนที่ระนาบห่างจากระนาบวัตถุเป็นระยะ $z' = wz/(w+z)$ และซึ่งเมื่อเทียบกับสำหรับสถานการณ์ของฮอโลกราฟีทั่วไป แบบตัวรับเคลื่อนที่อย่างเดี่ยว (conventional holography) เราสามารถหาขีดจำกัดการแยกแบบ เรย์เลห์ (Rayleigh) ของระบบได้

$$\delta = \frac{\lambda wz}{D(w+z)} \quad (2.3)$$

(แทนที่ $\frac{\lambda wz}{D}$) โดย D คือ มิติ ของฮอโลแกรม

การบันทึกฮอโลแกรม นอกจากมีคลื่นจากแหล่งกำเนิดสะท้อนวัตถุและไปตกกระทบเซนเซอร์แล้ว บนระนาบเซนเซอร์ยังมีการกระจายของคลื่นอ้างอิงแบบระนาบ (plane wave) ซึ่งเคลื่อนที่มาในทิศทางทำมุมที่ตำแหน่งระนาบเซนเซอร์ มีสนามระนาบคลื่นอ้างอิง $b(x, y)$ อันนี้ทิศทางคลื่นแพร่โดยมีมุมตกกระทบ θ กับระนาบปกติ ดังนั้น

$$b(x, y) = b_0 \exp(-j2\pi\alpha x) \quad (2.4)$$

α คือ ค่าความถี่เป็นช่วงของหน้าคลื่น (wave front) ในทิศทาง x อันนี้เทียบเท่ากับ $\frac{\sin \theta}{\lambda}$
 $\lambda = 2\pi/k$ คือ ความยาวคลื่น
 b_0 คือ แอมพลิจูดของคลื่น

ฟังก์ชันคลื่นรวมจากสมการที่ (2.2) และ (2.4) คือ $C(x, y)$ ทำการแปลงเป็นความเข้มโดยคูณกับสมการฟังก์ชันรวมเชิงซ้อน ได้ดังสมการ

$$I(x, y) = C(x, y) \times C^*(x, y) \quad (2.5)$$

$$= (a + b)(a + b)^* = |a|^2 + |b|^2 + a^*b + ab^* \quad (2.6)$$

สองเทอมสุดท้ายของสมการที่ (2.6) แสดงถึงส่วนของหน้าคลื่นที่จะเกิดการสร้างภาพกลับเป็นคลื่นวัตถุ a^*b เป็นเทอมที่สำคัญมากเพราะสามารถทำให้เกิดภาพจริง (real image) ของวัตถุ

เมื่อพิจารณาให้ w เป็นค่าคงที่ อัมพลิจูด และ เฟส ที่บันทึกได้จากสมการความเข้มเป็นปริภูมิการแทรกสอดของคลื่นวัตถุและคลื่นอ้างอิง แสดงดังสมการที่ (2.7)

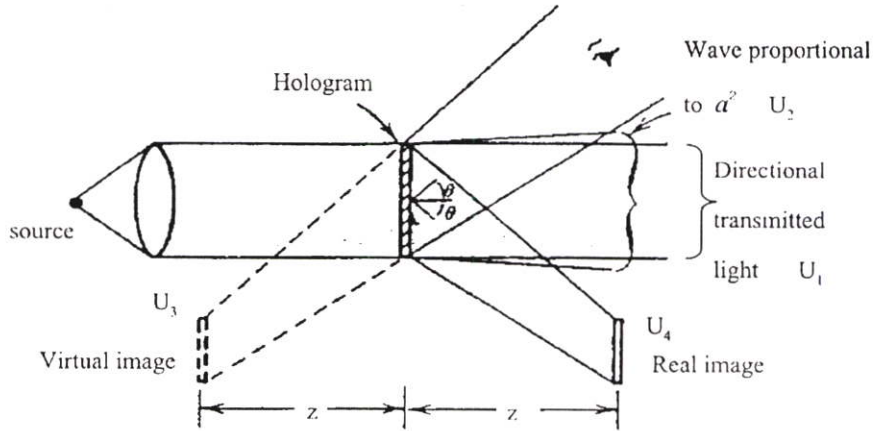
$$I(x, y) = A^2 + a^2(x, y) + 2Aa(x, y) \cos[2\pi\alpha y - \phi(x, y)] \quad (2.7)$$

สมการที่ (2.7) แสดงถึงอัมพลิจูดและเฟสที่บันทึกไว้เป็นรูปปริภูมิการแทรกสอดของคลื่นวัตถุและคลื่นอ้างอิง

การสร้างภาพกลับ (reconstruction) หรือการเห็นภาพของฮอโลแกรมทำโดยการล้าง (develop) แผ่นฟิล์มฮอโลแกรมในทางทฤษฎี คือ เปลี่ยนสมการ อยู่ในรูปของฟังก์ชันการทะลุผ่าน (Transmittance Function, t_r) $t_r(x, y) = \beta I(x, y)$

$$t_f(x, y) = t_b + \beta \left[|a(x, y)|^2 + Aa \exp(j2\pi\alpha x) + Aa^*(x, y) \exp(-j2\pi\alpha x) \right] \quad (2.8)$$

ซึ่ง β เป็นค่าคงที่ขึ้นกับกระบวนการล้างและชนิดของฟิล์ม



รูปที่ 2.2 แสดงระบบการสร้างภาพกลับมาของเลเซอร์-ยูเพทนิคส์

ดังนั้นเมื่อนำฮอโลแกรมมาสร้างเป็นภาพวัตถุทำได้ โดยการส่งคลื่นอ้างอิงเดิมผ่านไป ยังฮอโลแกรม โดยกำหนดคลื่นอ้างอิงมีแอมพลิจูด B เราจะได้ฟังก์ชันคลื่นที่ผ่าน ระบายฮอโลแกรมออกมา และเพื่อให้สะดวกในการพิจารณา เราจะแยกออกเป็น 4 องค์ประกอบ คือ

$$U_1 = t_b B \quad U_3 = \beta B A a(x, y) \exp(j2\pi\alpha x)$$

$$U_2 = \beta B |a(x, y)|^2 \quad U_4 = \beta B A a^*(x, y) \exp(-j2\pi\alpha x)$$

โดยที่

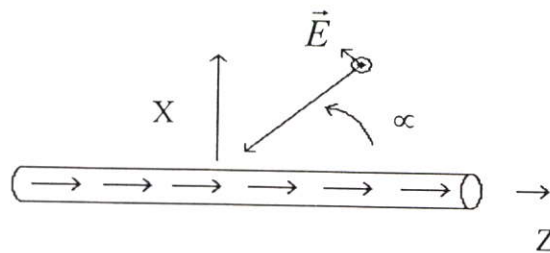
- U_1 เป็นตัวแทนคลื่นที่ส่งผ่านฮอโลแกรมออกมาโดยตรงในแนวแกนแสงอ้างอิง
- U_2 เป็นตัวแทนคลื่นที่ส่งผ่านฮอโลแกรมแล้วเลี้ยวเบนออกจากแกนแสงเล็กน้อยใน ลักษณะเดียวกับสลิตเดี่ยวซึ่งแอมพลิจูดของคลื่นฮอยเกนส์ที่จุดต่างๆ บน ระบายสลิตมีค่าต่างๆ กัน
- U_3 เป็นตัวแทนคลื่นที่เกิดภาพเสมือนของวัตถุที่ระยะ z ซึ่งถูกหักเหจากแกนแสง ด้วยมุม θ ซึ่งมองเห็นได้โดยการมองผ่านฮอโลแกรมกลับไปทางแหล่งกำเนิด แสง เป็นการเกิดภาพเสมือนโดยจะเกิดที่ระยะเดิมที่วางวัตถุจริง

U_4 เป็นตัวแทนคลื่นที่เกิดภาพจริงของวัตถุที่ระยะ z มีทิศทางตรงกันข้ามกับภาพเสมือน ซึ่งถูกหักเหจากแกนแสงด้วยมุม $-\theta$ และเป็นภาพจริงสามารถใช้ฉากรับได้และมองเห็นภาพที่ปรากฏบนฉากนั้นจริง

คลื่น U_1 และ U_2 จะอยู่บริเวณตรงกลางใกล้แกนแสงดังนั้นบริเวณนี้จะมีความเข้มมาก จึงสว่างกว่าบริเวณอื่นคือศูนย์กลางของภาพ หรือเป็นภาพลำดับศูนย์ (Zero Order) ภาพที่ได้เป็นริ้วรอยการแทรกสอดฮอโลแกรมสามารถทำให้เห็นเป็นภาพฮอโลแกรมได้โดยนำคลื่นอ้างอิง ฟังก์ชันคลื่น $b^*(x,y)$ ความเข้มที่เซนเซอร์คือ $I(x,y)$ จึงได้ $b^*(x,y) \times I(x,y)$ เพลย์เนลทรานฟอร์มของเทอม $b_0^2 a^*(x,y)$ ให้ภาพจริง สนามคลื่นของวัตถุที่ระนาบทิศทางเดียวกันกับสนาม $E(u,v,w)$ ยังคงที่ขณะที่แหล่งกำเนิดและเซนเซอร์ถูกสแกนรวมกัน

2.2 ทฤษฎีการกระเจิงคลื่นโดยเส้นลวดบาง [5],[6]

การวัดสนามไฟฟ้าด้วยตัวกระเจิงคลื่นแบบไดโพล มีการนำไปใช้เชิงวิศวกรรมมากมายขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของการทำงาน การใช้เทคนิคไดโพลกระเจิงคลื่นจากเส้นลวดเป็นอีกวิธีหนึ่งในการตรวจวัดสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณรบกวนต่ำ ได้รับรูปแบบสายอากาศแบบ near-field งานวิจัยที่ผ่านมา [1]-[4] ได้ใช้พื้นฐานของการกระเจิงคลื่นแบบเชิงเส้นโดยใช้ตัวแปรเปลี่ยนค่าของสัญญาณคลื่นตกกระทบตัวต้านทาน ที่เปลี่ยนค่าตามความเข้มของสัญญาณคลื่นหรือโพโตริซีสเตนท์ ค่าที่แปรเปลี่ยนขึ้นกับค่าความต้านทาน โดยถ้ามีคลื่นมาตกกระทบในลักษณะ dark dipole ความต้านทานจะมีค่ามากกระแสจะมีค่าน้อย เมื่อมีคลื่นมาตกกระทบในลักษณะ light dipole ความต้านทานจะมีค่าน้อยกระแสจะมีค่ามากการ



รูปที่ 2.3 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เข้าสู่เส้นลวดรัศมี a และความยาว L ที่มุม α กระแสที่เกิดขึ้นในเส้นลวด สนามไฟฟ้าที่ตกกระทบหักล้างไปคือสนามไฟฟ้า E^{inc} สนามไฟฟ้าที่ผลิตกระแสนี้คือ E^{scat}

เปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเมื่อมีการตกกระทบของคลื่น จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงซ้ำกว่าแบบไม่เชิงเส้น เพราะเมื่อต้องการให้เห็นการเปลี่ยนแปลงค่าที่มีความละเอียดในการแยกมากก็ต้องใช้ค่าความต้านทานมาก ใช้การกระเจิงคลื่นแบบไม่เชิงเส้นโดยใช้ไดโพลแบบไดโอด เพื่อให้มีการรบกวนต่อสัญญาณต่ำและตรวจจับสัญญาณความไวสูง เราสามารถวิเคราะห์ค่าด้วยวิธีโมเมนต์ (Moment method) [5],[6] โดยตัดสินการรับสัญญาณแบบ Radar Cross Section (RCS) เทคนิคนี้ส่วนมากใช้สำหรับการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารูปที่ 2.3 แสดงการเดินทางของคลื่นจากด้านขวามาที่ขดลวดเป็นมุม α ที่ผิวของเส้นลวดตกกระทบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า E^{inc} และมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระเจิง E^{scat} กระแสไหลบนผิวของเส้นลวด เพื่อให้ได้สนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามสนามตกกระทบและสนามกระเจิง มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.9) แสดงเป็นเชิงตัวเลขมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อนำมาบวกกัน

$$E^{inc} = -E^{scat} \quad (2.9)$$

หรือ

$$E^{inc} + E^{scat} = 0 \quad (2.10)$$

เราสามารถวิเคราะห์ค่าและแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสเหนี่ยวนำบนเส้นลวดโดยสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบกับสนามไฟฟ้าที่กระเจิงบนเส้นลวดตามแกน Z ด้วยรัศมี a ความยาว L ได้ความสัมพันธ์คือ

$$\frac{d^2 A(z)}{dz^2} + k^2 A(z) = j4\pi\omega\epsilon_0 E_z(z) \quad (2.11)$$

$$A(z) = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} I_z(z') G(z, z') dz' \quad (2.12)$$

$$G(z, z') = F(z - z') \quad (2.13)$$

$$F(R) = \int_0^{2\pi} \frac{e^{-jkR}}{R} d\phi' \quad (2.14)$$

$$R = \sqrt{(z - z')^2 + \left(2a \sin \frac{\phi'}{2}\right)^2} \quad (2.15)$$

สนามไฟฟ้า E_z ที่ตกกระทบบัวเหี่ยวนำเส้นลวดเป็นระนาบคลื่นทำมุม α คือ

$$E_z = e^{jkz \cos \alpha} \sin \alpha \quad (2.16)$$

คำตอบสมการ (2.11) ประกอบด้วยองค์ประกอบฟังก์ชัน A_c และสมการคำตอบคือ A_p

$$A_c = C_1 \cos kz + C_2 \sin kz \quad (2.17)$$

$$A_p = A_1 \cos(kz \cos \alpha) + B_1 \sin(kz \cos \alpha) \quad (2.18)$$

สามารถหาได้โดยดิฟเฟอเรนเชียล สมการที่ (2.18) สองครั้ง บวกด้วยค่าเริ่มต้นสมการที่ (2.18) คูณกับ k^2 และค่าด้านขวาของสมการ (2.11) ประกอบไปด้วย ω เป็นความถี่เชิงมุม ϵ_0 เป็นค่าซึมซาบทางไฟฟ้า และ E_z เป็นสนามไฟฟ้าตามแกน Z ได้คำตอบคือสมการที่ (2.19) นำมารวมกันได้คำตอบที่สมบูรณ์ดังสมการที่ (2.21) นำไปหาค่ากระแสในเส้นลวดได้เป็น

$$A_p(z) = j \frac{4\pi\omega\epsilon_0}{k^2 \sin \alpha} e^{jkz \cos \alpha} \quad (2.19)$$

ทำคำตอบให้สมบูรณ์จะได้ดังสมการที่ (2.20) ได้สองเทอม คือ

$$A(z) = A_c(z) + A_p(z) \quad (2.20)$$

ดังนั้นเมื่อรวมสมการที่ (2.17) กับ (2.19)

$$A(z) = C_1 \cos kz + C_2 \sin kz + j \frac{4\pi\omega\epsilon_0}{k^2 \sin \alpha} e^{jkz \cos \alpha} \quad (2.21)$$

สามารถหาคำตอบสมการที่ (2.21) ด้วยสมการ (2.12) เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบบัวเหี่ยวนำเส้นลวด

$$\int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} I_z(z') G(z, z') dz' = C_1 \cos kz + C_2 \sin kz + j \frac{4\pi\omega\epsilon_0}{k^2 \sin \alpha} e^{jkz \cos \alpha} \quad (2.22)$$

สมการนี้เป็นรูปแบบของสมการเฮเลน [6] เราสามารถหาคำตอบของสมการนี้ได้สำหรับกรณีนี้ ใช้ระนาบคลื่นที่ทำมุม $\alpha = 90^\circ$ ด้วยการสมมุติว่ากระแสมีความสมดุลกันทั้งสองส่วนจากจุดกึ่งกลางของเส้นลวดแสดงได้ว่า $I(z) = I(-z)$ จากส่วนนี้ทำให้มีความหมายได้ $A(z) = A(-z)$ เงื่อนไขที่กล่าวมานี้ทำให้ค่าคงที่ C_2 หายไป สมการของเฮเลนสำหรับระนาบ $\alpha = 90^\circ$ กับเงื่อนไขกระแสมีความสมมาตรกันทำให้สามารถแสดงสมการกระแสได้เป็น

$$\int_0^l I_z(z') G_s(z, z') dz' = C_1 \cos(kz) + j \frac{4\pi\omega\epsilon_0}{k^2} E^{scat}(z) \quad (2.23)$$

ที่นี้ ;

$$G_s(z, z') = F(z - z') + F(z + z') \quad (2.24)$$

ฟังก์ชัน $G_s(z, z')$ เป็นสมมาตรฟังก์ชันกรีน มันสามารถอ้างอิงเป็นสมการของเคอร์เนล เมื่อมีการนำไปประยุกต์ใช้ รัศมีของเส้นลวดจะเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวคลื่น ดังนั้นสมการ (2.14) บ่อยครั้งประมาณโดยใช้สมการ (2.25)

$$R \approx \sqrt{(z - z')^2 + a^2} \quad (2.25)$$

เมื่อใช้สมการ (2.24) กับ (2.12) และ (2.13) ได้สมการที่เป็นรูปแบบ Reduce Kernel ได้สมการ (2.26) รูปแบบสมมาตรของ Reduce Kernel สามารถหาได้เป็น

$$G_r(z, z') = \frac{e^{-jk\sqrt{(z-z')^2+a^2}}}{\sqrt{(z-z')^2+a^2}} + \frac{e^{-jk\sqrt{(z+z')^2+a^2}}}{\sqrt{(z+z')^2+a^2}} \quad (2.26)$$

การ Reduce Kernel ไม่ขึ้นกับ ϕ' และ $I(z')$ เป็นกระแสในความยาวของเส้นลวด $E^{scat}(z)$ เป็นสนามไฟฟ้า โดยการกระจายของกระแส C_1 คือค่าคงที่ ที่ได้จากเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา R เป็นระยะทางจากเส้นลวดถึงตำแหน่งที่ได้รับค่า $E^{scat}(z)$ รัศมีเส้นลวดคือ a สมการ (2.23) เป็นสมการอินทิกรัล ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเส้นลวดกับสนามไฟฟ้าที่กระเจิง สามารถใช้วิธีการแก้ปัญหาแบบโมเมนต์ ในขั้นตอนง่ายๆ เมื่อแทนกระแสโดยใช้ฟังก์ชันพัลส์ ดังสมการ

$$I(z') = \sum_{n=1}^N I_n P_n(z') \quad (2.27)$$

เราสามารถแทนสมการ (2.27) ทางด้านซ้ายของสมการ (2.23) การอินทิกรัลกระแสได้ สนามไฟฟ้า E สมมติกระแสมีค่าในระดับคงที่ในแต่ละของการแบ่งช่วงในเส้นลวด ฟังก์ชันพัลส์ (2.27) แทนค่าได้ดังสมการ (2.28)

$$P_n(z') = \begin{cases} 1 & \text{if } z' \in (a_n, b_n) \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2.28)$$

แทนค่าสมการ (2.27) ในสมการ (2.23) ได้สมการเป็น

$$\int_0^{L/2} \sum_{n=1}^N I_n P_n(z') G_r(z, z') dz' = j \frac{4\pi\omega\epsilon_0}{k^2} E^{scat}(z) + C_1 \cos(kz) \quad (2.29)$$

ฟังก์ชันพัลส์ที่อยู่ภายนอกอินทิกรัลในแต่ละช่วงของ (a_n, b_n) การอินทิกรัลของผลบวกของฟังก์ชันคือผลบวกของอินทิกรัลในแต่ละฟังก์ชันที่แบ่งจากกัน ส่วนนี้ทำให้สามารถหาค่าในส่วนผลบวกและส่วนอินทิเกรตได้เป็น

$$\sum_{n=1}^N \int_{a_n}^{b_n} I_n G_r(z, z') dz' = j \frac{4\pi\omega\epsilon_0}{k^2} E^{scat}(z) + C_1 \cos(kz) \quad (2.30)$$

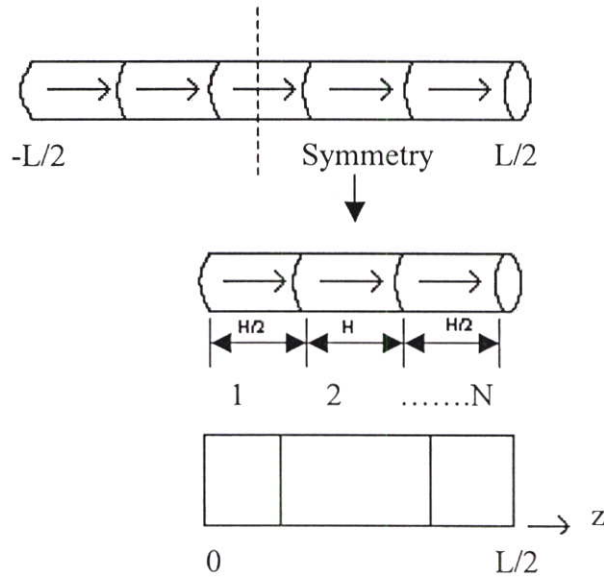
ฟังก์ชันพัลส์ตัดสินรูปร่างของกระแสแต่ละช่วงตามความยาวเส้นลวด ค่าคงที่ I_n ขนาดและเฟส ค่าคงที่สามารถนำออกมาไว้ข้างนอกอินทิกรัล หารวมทั้งหมดด้วย $\frac{j4\pi\omega\epsilon_0}{k^2}$ และเปลี่ยนชื่อค่าคงที่ข้างหน้าฟังก์ชันโคซายน์ C_1 แทนค่าเป็น A ค่าคงที่ A ไม่มีความสำคัญในการคำนวณ RCS

$$\sum_{n=1}^N I_n \frac{k^2}{j4\pi\omega\epsilon_0} \int_{a_n}^{b_n} G_r(z, z') dz' = E^{scat}(z) + A \cos(kz) \quad (2.31)$$

นำเทอมโคซายน์ทางด้านขวา มาอยู่ด้านซ้ายเป็นดังสมการ (2.32)

$$I_n \sum_{n=1}^N \frac{k^2}{j4\pi\omega\epsilon_0 a_n} \int_{a_n}^{b_n} G_r(z, z') dz' - A \cos(kz) = E^{scat}(z) \quad (2.32)$$

วิธีการตัดสินค้าของกระแสนเส้นลวดที่แบ่งเป็นส่วนๆ จะเลือกใช้การแบ่งช่วงแบบในรูปที่ 2.4 เส้นลวดแบ่งเป็น N ส่วน ส่วนเริ่มต้นและจบของเส้นลวดมีค่าเท่ากับ $H/2$ และในแต่ละส่วนมีความยาวเท่ากับ H เพราะเราใช้ความสมมาตรแบบฟังก์ชัน Green ครึ่งหนึ่งของพัลส์ที่จุดเริ่มต้นจะเป็นหนึ่งพัลส์จากการสะท้อนตามแกน X เมื่อระนาบคลื่นมาถึงเส้นลวดมี ($\alpha = \frac{\pi}{2}$) กระแสสมมาตรเมื่อขนาดและเฟสของคลื่นมาถึงเส้นลวดเหมือนกันทุกๆ จุดตามความยาว L ความสัมพันธ์ระหว่าง H และ N แสดงได้โดย



รูปที่ 2.4 เส้นลวดยาว L แต่ละส่วนเริ่มต้นที่จุดกึ่งกลางของเส้นลวด จากกึ่งกลางถึงปลายเส้นลวดมี N ส่วน ส่วนเริ่มต้นและปลายเส้นลวดมีความยาว $H/2$ ระหว่างแต่ละส่วนมีความยาว H เพราะใช้วิธีสมมาตรทำให้จุดเริ่มต้นมีความยาว $H/2$ เพราะเกิดการสะท้อนของพัลส์ ทำให้มีสัญญาณขนาดเท่ากับ H เมื่อรวมความยาวจากกึ่งกลางถึงปลายเส้นลวดยาวเท่ากับ $L/2$

$$H = \frac{L}{2N} \quad (2.33)$$

ขอบเขตการอินทิกรัลเมื่อ n เป็นลำดับของ N แสดงได้เป็น

$$n = 1 \quad \begin{cases} a_n = 0 \\ b_n = H/2 \end{cases} \quad (2.34a)$$

$$1 < n < N \quad \begin{cases} a_n = H/2 + (n-2)H \\ b_n = H/2 + (n-1)H \end{cases} \quad (2.34b)$$

$$n = N \quad \begin{cases} a_n = L/2 - H/2 \\ b_n = L/2 \end{cases} \quad (2.34c)$$

จากข้างบนทำให้มีค่าสมการที่ไม่รู้คือ $N+1$ มีค่า N ของ I_n สามารถหาค่า A สูตรสมการอินทิกรัลของเฮเลนสามารถหาค่า A โดยใช้เงื่อนไข $I(L/2) = 0$ ถ้าให้ $I_n = 0$ ทำให้สามารถหาค่าได้ ส่วนต่อไปในหนึ่งสมการมี N ที่ไม่รู้ค่า จะได้รับจำนวนที่เหมือนกันของสมการที่ไม่รู้ค่าโดยการใช้ค่าที่รู้ของค่าสนามไฟฟ้าที่แทนโดยค่า M ตามความยาวเส้นลวดที่แต่ละจุดของแกน z สมการกระแสที่อินทิเกรตจะได้ค่าเป็นลบเพราะจะได้หักล้างกับสนามที่ตกกระทบเส้นลวดเมื่อใส่ค่าที่รู้ไปในแต่ละตำแหน่งที่รู้ค่า จะได้ค่าที่ต้องการในแต่ละสมการ ตำแหน่งสนามอยู่ตรงจุดกึ่งกลางพัลซ์ตามความยาวเส้นลวดโดยพัลซ์สุดท้ายได้รับการยกเว้น ที่ปลายเส้นลวดยังคงใช้วิธีเฉลี่ยค่าจุดแมทซ์ซิง (matching point) ที่ตำแหน่งสุดท้ายของเส้นลวด ตำแหน่งสนามที่มีค่าของสมการจุดที่มีการแมทซ์ซิงตามแนวเส้นลวดมีค่า Z_m กำหนดโดยแต่ละ m มีค่าเป็น

$$m = 1 \quad z_m = 0 \quad (2.35a)$$

$$1 < m < M \quad z_m = H/4 + (m-1)H \quad (2.35b)$$

$$m = M \quad z_m = L/2 \quad (2.35c)$$

เมื่อมีค่าจำนวนเหมือนกันที่ไม่รู้ค่าของแต่ละสมการ หาค่าได้ในรูปแบบเมตริกซ์คือ

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} & c_1 \\ a_{21} & a_{22} & \vdots & a_{2N} & c_2 \\ a_{31} & a_{32} & \vdots & a_{3N} & c_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{N,1} & a_{N,2} & \cdots & a_{N,N-2} & c_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{N-1} \\ A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ b_M \end{pmatrix} \quad (2.36)$$

$$a_{nm} = \frac{k^2}{j4\pi\omega\epsilon_0} \int_{a_n}^{b_n} G_r(z_m, z') dz' \quad (2.37)$$

และ

$$b_m = e^{jk \cos \alpha z_m} \quad (2.38)$$

สามารถหาค่า b_m ได้จากสมมุติค่า ระนาบคลื่นในหน่วยแอมป์ลิจูด $E^{inc} = e^{jk \cos \alpha z}$ ที่ผ่านมาใช้วิธีการหาค่าแบบสมมาตรเคอร์เนล เราต้องมีสนามตกกระทบสมมาตรตลอดตามแนวเส้นลวด เฟสและขนาดของสนามตกกระทบมีค่าคงที่ตลอดตามแนวเส้นลวดเมื่อ $\alpha = 90^\circ$ ทำให้ได้ค่า $b_m = 1$ สำหรับค่าทั้งหมดของ m :

$$c_m = -\cos(kz_m) \quad (2.39)$$

ที่กล่าวมาต้องการแก้สมการในส่วนกระแสที่ไม่รู้ค่า สามารถคำนวณค่า Radar Cross Section (RCS) แทนค่าลงในสมการ RCS สำหรับการหาค่าในกรณี 3 มิติคือ :

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E^{scat}|^2}{|E^{inc}|^2} \quad (2.40)$$

สามารถคำนวณหาค่า RCS ของเส้นลวด อันดับแรกต้องคำนวณศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กจากสมการที่ (2.41) โดยแทนค่ากระแสในสมการที่ (2.41)

$$A_z = \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} I(z') e^{-jkz' \cos \alpha} \sin \alpha dz' \quad (2.41)$$

ที่ไกลเส้นลวดสนาม E มีค่าเท่ากับ

$$E_z = -j\omega\mu A_z \quad (2.42)$$

การอินทิเกรทกระแส สามารถหาได้จาก (2.36) ,โดยใช้สมการ (2.41) และ (2.42), ให้คำนวณหาค่าสนามกระเจิงคลื่น (E^{scat}) ใช้ความสัมพันธ์เพื่อคำนวณกระแสโดยสมมุติค่า $I(z') = I(-z')$ กรณีนี้สมการ (2.41) กลายเป็น

$$E^{scat} = -j\omega\mu \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} 2 \int_0^{\frac{L}{2}} I(z') e^{-jkz' \cos \alpha} dz' \quad (2.43)$$

ขนาดเทอมภายนอกข้างหน้าอินทิเกรตแบ่งได้เป็น :

$$|E^{scat}|^2 = \left| \frac{\omega\mu}{4\pi R} \right|^2 \left| 2 \int_0^{\frac{L}{2}} I(z') e^{-jkz' \cos \alpha} dz' \right|^2 \quad (2.44)$$

ขนาดระนาบคลื่นที่มาถึงเส้นลวดเป็น 1 โดยแทนค่า E^{inc} ด้วย 1 ในสมการ (2.40) และ แทน (2.44) เข้าสู่ (2.40) ทำให้ R ทางขวาหายไป สามารถหาค่า RCS ในด้านซ้ายด้วย

$$\sigma = \frac{(\omega\mu)^2}{\pi} \left| \int_0^{\frac{L}{2}} I(z') e^{-jkz' \cos \alpha} dz' \right|^2 \quad (2.45)$$

อินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยใช้จุดกึ่งกลางการอินทิเกรต ($\alpha = \pi/2$) ทำให้สามารถหาค่า RCS ได้เป็น :

$$\sigma = \frac{(\omega\mu)^2}{\pi} \left| \frac{H}{2} I_1 + H \sum_{n=2}^{N-1} I_N \right|^2 \quad (2.46)$$

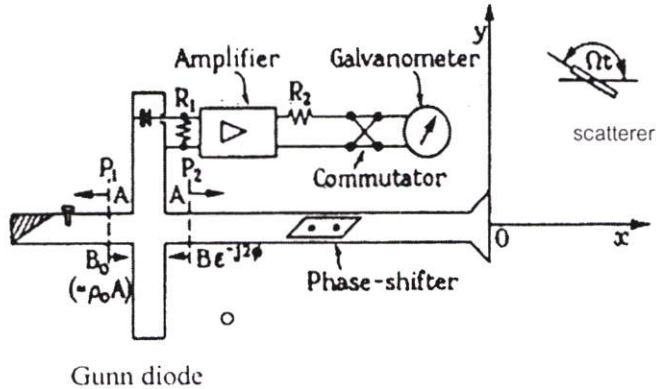
RCS (σ) สามารถแทนเป็นพื้นที่ได้ ในหน่วยทั่วไปเป็นตารางเมตร σ/λ^2 RCS บรรยายในรูปแบบ ล็อคการิทึม ให้เป็นรูปแบบ dB อ้างอิง 1 ตารางเมตร ปริมาณนี้เรียกว่า dBsm และสามารถหาค่าได้ดังสมการ

$$\sigma_{dBsm} = 10 \log_{10} \sigma \quad (2.47)$$

Radar Cross Section (σ) มีประโยชน์สำหรับการหาค่าอัตราส่วนสนามกระเจิงคลื่นเปรียบเทียบกับสนามคลื่นตกกระทบเส้นลวดในเฉพาะพื้นที่หนึ่ง

2.3 เทคนิคการวัดสนามไฟฟ้าด้วยตัวกระเจิงคลื่น

พิจารณาการวัดเรียงอุปกรณ์สำหรับวัดสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากสายอากาศโดยเทคนิคการกระเจิงคลื่น ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดคลื่น อุปกรณ์ไฮบริดที (Hybrid – T), แมทช์โหลด(match load), ตัวตรวจวัดสัญญาณ(detector), ตัวเลื่อนเฟส(phase shifter), สายอากาศแบบฮอร์น(horn antenna) และแท่งโลหะสั้นกระเจิงคลื่น (Scattering rod) ดังรูป



รูปที่ 2.5 การวัดเรียงอุปกรณ์สำหรับวัดสนามไฟฟ้าด้วยวิธีกระเจิงคลื่น

เมื่อคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นที่ออกจากสายอากาศ กำหนดด้วย A ไปตกกระทบตัวกระเจิงคลื่น ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ตัวกระเจิงคลื่น ดังสมการ

$$E_1(x, y, z) = AF(x, y, z) \quad (2.48)$$

ซึ่งสนามไฟฟ้า E_1 จะแปรตามค่าของ A และ F ซึ่ง F เป็นฟังก์ชันจำนวนเชิงซ้อนไม่มีหน่วยขึ้นกับตำแหน่งของตัวกระเจิง โดยมี u เป็นยูนิตเวกเตอร์ จากการประยุกต์ใช้ทฤษฎีสวนกลับของลอเรนซ์ (Lorentz's Reciprocity Theorem) จะได้คลื่นที่กระเจิงกลับไปในฮอร์นคือ B มีสมการเป็น

$$B = A \left(\frac{j\omega\alpha z_0}{ab} \right) (u \cdot F)^2 \quad (2.49)$$

ω คือ ความถี่เชิงมุมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

z_0 คือ อิมพีแดนซ์ของโหมด H ในท่อนำคลื่น

α คือ โพราไรซ์อะบิลิตี (Polarizability) ของไดโพล

a, b คือ ความกว้างยาวภาคตัดขวางท่อนำคลื่น

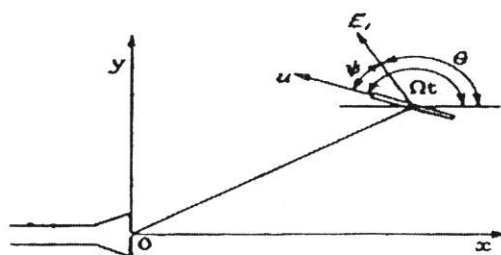
จากสมการ (2.49) ตัวดีเทคเตอร์ (detector) สามารถวัดกระแสไฟฟ้าที่มีความเป็นสัดส่วนกับ ความเข้มของ B คือ

$$I = K|B|^2 \quad (2.50)$$

แทนสมการ (2.50) ใน (2.49) ได้ว่า

$$I = K \left| \frac{\omega \alpha z_0}{ab} \right|^2 |u \cdot F|^4 |A|^2 \quad (2.51)$$

ในสมการที่ (2.51) คือกระแสที่ตัวตรวจวัดสัญญาณซึ่งจะขึ้นกับสนามไฟฟ้าที่ตัวไดโพล เป็นฟังก์ชันกำลังสี่กรณีที่ยังไม่มีการหมุนตัวไดโพล แต่เมื่อได้ทำการมอดูเลตด้วยการหมุนตัวไดโพลโดยพิจารณาตัวไดโพลขนานกับระนาบ xy และหมุนรอบแกน z ด้วยความเร็วเชิงมุม Ω ดังรูป



รูปที่ 2.6 แสดงการหมุนตัวไดโพล

ดังนั้นในกรณีของคลื่นแบบโพลาไรซ์เชิงเส้นผลลัพธ์ของ $u \cdot F$ เขียนแทนได้เป็น

$$F_t \cos \psi = |F| e^{j\phi_t} \cos \psi \quad (2.52)$$

เมื่อ $F_t(x,y,z)$ เป็นองค์ประกอบของเวกเตอร์ F ในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของคลื่น (ซึ่งก็คือขององค์ประกอบของเวกเตอร์ F ระนาบ xy) และ ϕ_t คือมุมเฟสของ F_t ดังนั้นสมการที่ (2.52) เขียนใหม่ได้เป็น

$$B = j \frac{\omega \alpha z_0}{ab} |F_t| e^{j\phi_t} \cos \psi \quad (2.53)$$

ดังนั้นเมื่อแทนสมการ (2.53) ลงในสมการ (2.50) และใช้ความสัมพันธ์ตรีโกณมิติจะได้ กระแสที่ตัวตรวจวัดเป็นผลรวมของเทอมกระแสตรงและเทอมซึ่งมีความถี่ 2 เท่า และ 4 เท่า ของ การมอดูเลต เมื่อปรับตัวขยายกระแสหรือใช้ตัวฟิลเตอร์ที่เหมาะสมสามารถตัดเทอมกระแสตรง และเทอมความถี่ 4 เท่าออกไปได้ ซึ่งจะเหลือเพียงเทอมความถี่ 2 เท่าซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการและ สำคัญ ดังนั้นกระแสที่ได้เป็น

$$I_2 = K \left| \frac{\omega \alpha z_0}{ab} \right|^2 |F|^4 |A|^2 \frac{1}{2} \cos 2(\Omega t - \theta) \quad (2.54)$$

จากสมการที่ (2.54) เมื่อพิจารณากระแสจะเห็นว่ากระแสที่ได้ไม่ตรงกับคุณสมบัติของ กฎกำลังสอง ปัญหาดังกล่าวจะแก้ไขได้ โดยสร้างคลื่นอ้างอิงขึ้นมาภายในระบบดังรูปที่ ซึ่งมีมุม สะท้อนคลื่นที่แมทซ์โหมด ทำให้มีคลื่นอ้างอิง B_0 และเพิ่มอุปกรณ์เลื่อนเฟส(phase shifter) ซึ่งมี ผลต่อคลื่น B ทำให้ถูกปรับ จึงให้กระแสที่ตัวตรวจวัดสัญญาณเป็นกำลังสอง ด้วยเฟสแพคเตอร์

$$i = K |B_0 - Be^{-j2\phi}|^2 \quad (2.55)$$

เมื่อจัดรูปและทำการประมาณในกรณีนี้ $|B_0| \gg |B|$ โดยกระจายด้วยทฤษฎีของเทย์เลอร์ใน สมการ (2.55) ทำให้ได้สมการ

$$\begin{aligned} i &= K |B_0|^2 \left| 1 - \frac{Be^{-j2\phi}}{B_0} \right|^2 \\ &\cong K |B_0|^2 \left| 1 - \frac{2Be^{-j2\phi}}{B_0} \right| \\ &\cong K |B_0|^2 \left| 1 - \operatorname{Re} \left(\frac{2Be^{-j2\phi}}{B_0} \right) \right| \end{aligned} \quad (2.56)$$

เมื่อ Re คือส่วนจริง(real part) ของเลขเชิงซ้อน

เพื่อเป็นการสะดวกเรากำหนด $K|B_0|^2$ ด้วยกระแสคงที่ I_0 (ซึ่งเป็นกระแสตอนที่ไม่มีตัว กระเจิงคลื่นอยู่) และ B_0 คือคลื่นสะท้อน สังเกตที่ระนาบ P_1 กำหนดด้วย $\rho_0 A$ ซึ่ง ρ_0 คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน สมการที่ (2.56) จึงกลายเป็น

$$i = I_0 \left| 1 - \operatorname{Re} \left(\frac{2Be^{-j2\phi}}{\rho_0 A} \right) \right| \quad (2.57)$$

แทนค่า B สมการที่ (2.54) ลงในสมการที่ (2.57) ดังนั้นองค์ประกอบ ความถี่ 2 เท่าของการมอดูเลตของกระแส i คือ

$$I_2 = -I_0 \operatorname{Re} \left(\frac{j\omega\alpha z_0 \exp 2j(\phi_i - \phi)}{\rho_0 A} \right) |F_i|^2 \cos 2(\Omega t - \theta) \quad (2.58)$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะจำนวนจริง ในสมการที่ (2.58) จะได้ว่า

$$I_2 = I_0 \operatorname{Re} \left(\frac{\omega|\alpha|z_0}{ab|\rho_0|} \right) |F_i|^2 \cos 2(\phi_i - \phi) \cos 2(\Omega t - \theta) \quad (2.59)$$

สมการที่ (2.59) คือสมการของกระแสองค์ประกอบความถี่ 2 เท่าของการมอดูเลตที่ตัวตรวจวัดซึ่งเป็นสัญญาณจากคลื่นที่กระเจิงมาจากตัวไดโพล โดยจะแปรตามสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งของไดโพลเป็นฟังก์ชันยกกำลังสองและสามารถบอกทิศทาง (θ) ได้และยังสามารถทราบมุมเฟส ϕ_i โดยการปรับเฟสของตัวเลื่อนเฟสจนได้ I_2 โดดที่สุด

ซึ่งจากวิธีนี้เราไม่ต้องวางเซ็นเซอร์ไว้ที่ระนาบฮอโลแกรม แต่เราสามารถวัดสัญญาณที่ใดระนาบฮอโลแกรมโดยใช้ตัวกระเจิงคลื่นที่มีขนาดเล็ก จะทำให้ลดปัญหาการรบกวนคลื่นได้

2.4 การมองภาพในเชิงฟิสิกส์ของฮอโลแกรมการเลี้ยวเบนแบบเฟรลน์เนลและเฟราน์โฮเฟอร์

กระบวนการของการสร้างภาพกลับ (Reconstruct) ทางดิจิทัล ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายวิธีหนึ่งคือ การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว ด้วยวิธีนี้เป็นการเชื่อมโยงระหว่างโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ สามารถคำนวณสเปกโตรแกรม (เป็นการแสดงฟังก์ชันช่วงสั้นที่เป็นฟังก์ชันของเวลา) ใช้ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มสำหรับระบบเชิงเส้นและเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของความถี่ในรูปแบบคลื่นที่ต่อเนื่อง วิธีการสร้างภาพกลับดิจิทัลวิธีนี้ใช้ผลบวกของสมการโดยการประมาณแบบเฟรลน์เนลซึ่งมีความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับระยะปากช่องสังเกตคลื่น (aperture) กับวัตถุ

2.4.1 การประมาณแบบเฟรลน์เนล

การเลี้ยวเบนที่พิจารณามีด้วยกันสองแบบคือ แบบเฟราน์โฮเฟอร์และแบบเฟรลน์เนลซึ่งการเลี้ยวเบนแบบเฟราน์โฮเฟอร์ ต้องมีการประมาณว่าหน้าคลื่นที่ตกกระทบระนาบเซนเซอร์เป็น

หน้าคลื่นระนาบ แต่ในลักษณะที่แหล่งกำเนิดและระนาบเซนเซอร์อยู่ใกล้กัน ในกรณีที่หน้าคลื่นมาถึงระนาบเซนเซอร์เป็นหน้าคลื่นทรงกลม ระยะจากแหล่งกำเนิดถึงระนาบเซนเซอร์ต้องนำมาคิด ค่าระยะนี้อาจมีขนาดเท่ากับความกว้างยาวของปากช่องสังเกต ดังนั้นทุกๆจุดของปากช่องสังเกตจะมีระยะไม่เท่ากัน

สนามคลื่นไมโครเวฟสามารถบรรยายโดยใช้ปริมาณสเกลาร์ ทฤษฎีการเลี้ยวเบนของแสงสามารถนำมาใช้ หลักการของแสงที่ส่งผ่านจากแหล่งกำเนิด และมาสะท้อนตรงวัตถุ ตรงพื้นที่ส่วนนี้มีการกระจายของเฟสและแอมพลิจูด ในระนาบ $Z = 0$ ให้ฟังก์ชันเป็น

$$F(x, y, z) = F(x, y) * G(x, y, z) \quad (2.60)$$

โดยสัญลักษณ์ * คือ Convolution และ G คือคลื่นทรงกลมของความยาวคลื่น λ ดังนั้น

$$G = \frac{e^{j2\pi/\lambda}}{R} \quad \text{ด้วย} \quad r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad \text{ถ้าใช้การประมาณแบบเฟรลน์เนล}$$

$r = Z + \sqrt{\frac{(x^2 + y^2)}{2Z}}$ ของ $f(x, y)$ โดยฟังก์ชันการประมาณแบบเฟรลน์เนลสามารถหาค่าโดยสมการ (2.61) ฟังก์ชันเขียนเป็น

$$h(x_0, y_0; x_1, y_1) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left\{j \frac{k}{2z} [(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2]\right\} \quad (2.61)$$

ในการเลี้ยวเบนที่มีระนาบสังเกตที่แน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อระยะทาง Z ยาวเพียงพอสำหรับการประมาณที่เป็นลักษณะเชิงเส้น โดยวัตถุที่จุดสังเกตอยู่ในแถบการเลี้ยวเบนเฟรลน์เนล x_0, y_0 เป็นระยะของระนาบฮอโลแกรมและ x_1, y_1 เป็นระยะของระนาบปากช่องสังเกตคลื่น ความถูกต้องของการประมาณขึ้นกับความสัมพันธ์ของขอบเขตที่แน่นอนของขนาดปากช่องสังเกตคลื่น, แถบความกว้างตัวรับคลื่น, และระยะทาง Z , เป็นเงื่อนไขที่เพียงพอสำหรับความถูกต้องของการคำนวณ, จะต้องมีเฟสเปลี่ยนแปลงมากที่สุดโดยเกิดจากในเทอมอันดับที่สูงกว่า ในช่วงที่ต่ำมากกว่า 1 เรเดียน เงื่อนไขนี้ถูกต้องเมื่อระยะ Z มีความสัมพันธ์กับ

$$Z^3 \gg \frac{\pi}{4\lambda} [(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2]_{\max}^2 \quad [17] \quad (2.62)$$

โดยค่ามากที่สุดของการบวกต้องการไม่ต่ำมากกว่า 1 เรเดียน เพื่อให้เป็นจริงสำหรับระยะทาง Z เล็กมากเมื่อเทียบกับสมการ (2.62) ทำให้ $k/2z$ มีค่ากว้างมากๆ และการออกซิเลตต์องมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วสำหรับเฟสแพกเตอร์ยกกำลังสองในสมการที่ (2.61) การอินทิเกรตจะเริ่มในการกระตุ้นตำแหน่งที่ใกล้กัน ($x_1 = x_0, y_1 = y_0$) อัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสน้อยมาก

ของอันดับเทอมเฟสที่สูงกว่าต่อไปสามารถละเลยได้ การยอมรับการประมาณของเฟรส์เนล, การอินทิกรัลแบบ (Superposition) สามารถแสดงในรูปแบบที่สมดุลงอันดับแรก $U(x_0, y_0)$ พิจารณาเป็น คอนโวลูชัน ของ $U(x_1, y_1)$ ด้วย h ; นั่นคือ

$$U(x_0, y_0) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} U(x_1, y_1) \exp\left\{j \frac{k}{2z} [(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1 \quad (2.63)$$

เทอมกำลังสองในเอ็กซ์โพเนนเชียลสามารถกระจายเป็นดังสมการที่ (2.64) ได้ดังนี้คือ

$$U(x_0, y_0) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left[j \frac{k}{2z} (x_0^2 + y_0^2)\right] \iint_{-\infty}^{\infty} \left\{ U(x_1, y_1) \exp\left[j \frac{k}{2z} (x_1^2 + y_1^2)\right] \right\} \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda z} (x_0 x_1 + y_0 y_1)\right] dx_1 dy_1 \quad (2.64)$$

ดังนั้นจากการคูณแฟกเตอร์แอมพลิจูดและเฟสนั้นจะไม่ขึ้นกับ (x_1, y_1) ฟังก์ชัน $U(x_0, y_0)$ หาได้จาก ฟูเรียทรานฟอร์มของ $U(x_1, y_1) \exp[j(k/2z)(x_1^2 + y_1^2)]$ ในส่วนนี้ การทรานฟอร์มต้องทำที่ความถี่ $(f_x = x_0 / \lambda z, f_y = y_0 / \lambda z)$ เพื่อให้มั่นใจว่า มีการจัดสเกลถูกต้องตรงระนาบที่ต้องการ รูปแบบสมการแรก (2.62) คอนโวลูชันของสมการจะสามารถเพิ่มความเข้าใจผลกระทบของการเลี้ยวเบนเฟรส์เนลในความถี่โดเมนที่ถัดกันไปในส่วนนั้นน้ำหนักฟังก์ชันไม่แปรเปลี่ยนตามสมการ (2.60) สามารถเป็นฟูเรียร์ทรานฟอร์มให้ฟังก์ชันเป็น

$$H(f_x, f_y) = \exp(jkz) \exp[-j\pi\lambda z(f_x^2 + f_y^2)] \quad (2.65)$$

การแพร่ในแถบของการเลี้ยวเบนเฟรส์เนล แฟกเตอร์เอ็กซ์โพเนนเชียลอันดับแรกจะครอบคลุมเฟสทั้งหมด โดยบางส่วนประกอบของมุมสเปกตรัมจะแพร่ระหว่างสองระนาบที่แบ่งโดยระยะ z แฟกเตอร์เอ็กซ์โพเนนเชียลในเทอมที่สองให้การแผ่กระจายเฟสด้วยการขึ้นกับความถี่อันดับที่สอง สมการ (2.65) เป็นสมการฟังก์ชันสำหรับการแปลงความถี่เป็นค่าสนามแอมพลิจูดการเลี้ยวเบน

2.4.2 การประมาณแบบเฟรานโฮเฟอร์

การคำนวณรูปแบบการเลี้ยวเบน ทำโดยง่ายถ้าการประมาณแบบเฟรลเนลนำไปใช้ ซึ่งอยู่ในแถบการเลี้ยวเบนเฟรลเนล สนามที่สังเกตอยู่ในช่วง $U(x_0, y_0)$ สามารถหาได้จากฟูเรียร์ทรานฟอร์มของการกระจายสนามแอมพลิจูดจากปากช่องสังเกตคลื่น $U(x_1, y_1)$ ด้วยฟังก์ชันเฟสยกกำลังสอง $\exp[j(k/2z)(x_1^2 + y_1^2)]$ ถ้ามีการเพิ่มสมมุติฐานมากกว่าที่กล่าวมา :

$$z \gg \frac{k(x_1^2 + y_1^2)_{\max}}{2} \quad (2.66)$$

สมการ 2.67 (เฟรานโฮเฟอร์) จะถูกนำไปใช้ เฟสแพกเตอร์กำลังสองเป็นการประมาณอยู่เหนือปากช่องสังเกตคลื่น และสนามสังเกตการกระจายสามารถพบฟูเรียร์ทรานฟอร์มของการกระจายจากปากช่องสังเกตคลื่น ดังนั้นแถบของสนามการเลี้ยวเบนเฟรานโฮเฟอร์ สามารถหาค่าได้จากสมการ :

$$U(x_0, y_0) = \frac{\exp(jkz) \exp\left[j \frac{k}{2z} (x_0^2 + y_0^2)\right]}{j\lambda z} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x_1, y_1) \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda z} (x_0 x_1 + y_0 y_1)\right] dx_1 dy_1 \quad (2.67)$$

ถัดจากแพกเตอร์การคูณก่อนการอินทิเกรต ในส่วนนี้แสดงออกมาง่าย ๆ โดยฟูเรียร์ทรานฟอร์มของการกระจายตรงปากช่องสังเกตคลื่นที่ความถี่ $(f_x = x_0 / \lambda z, f_y = y_0 / \lambda z)$

จากที่กล่าวมา สามารถพิสูจน์ได้จากตัวอย่าง ที่ความถี่แถบแสง เงื่อนไขต้องการสำหรับอยู่ในแถบของการเลี้ยวเบนเฟรานโฮเฟอร์ สังเกตจากตัวอย่างที่ความยาวคลื่น 6×10^{-7} เมตร (แสงสีแดง) และความกว้างปากช่องสังเกตคลื่น 2.5 ซม. ระยะสังเกต z ต้องเพียงพอเป็น :

$$z \gg 1,600 \quad \text{เมตร}$$

เงื่อนไขที่ต้องการ ที่จะหารูปแบบการเลี้ยวเบนแบบเฟรานโฮเฟอร์ ระยะทางที่สังเกต z ต้องเพียงพอและเป็นไปตามสมการที่ (2.66) กรณีเฟรลเนลมีข้อจำกัดดังที่กล่าวมาการเลี้ยวเบนแบบเฟรานโฮเฟอร์สามารถลดข้อจำกัดของระยะทาง z จากที่กล่าวมาฟังก์ชันสมการ (2.65) ยังคงพร้อมที่จะนำไปใช้ในรูปแบบของการเลี้ยวเบนทั้งคู่ได้

พิจารณาขั้นตอนต่อไปของตัวอย่างการเลี้ยวเบนเฟรานโฮเฟอร์ ผลลัพธ์ส่วนก่อนสามารถประยุกต์ เพื่อหาค่าสนามการกระจายเชิงซ้อนรูปแบบการเลี้ยวเบนเฟรานโฮเฟอร์ อย่างไรก็ตาม ควรจะได้ผลจากการบันทึกจากตัวตรวจจับการแผ่สนามคลื่น (Detector) การศึกษาในรูปแบบการเลี้ยวเบนควรจะได้รับค่าเป็นแบบการกระจายความเข้ม

2.4.2.1 ปากช่องสี่เหลี่ยมแบบสี่เหลี่ยม (rectangular aperture)

พิจารณาอันดับแรกในรูปแบบปากช่องสี่เหลี่ยมด้วยการทรานฟอร์มแอมพลิจูด โดย

$$\tau(x_1, y_1) = \text{rect}\left(\frac{x_1}{l_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{l_y}\right) \quad (2.68)$$

ค่าคงที่ l_x และ l_y เป็นไปตามความกว้างของปากช่องสี่เหลี่ยมยาว x_1 และ y_1 ถ้าปากช่องสี่เหลี่ยมปกติแผ่นในคลื่นเป็นแบบลักษณะโมโนโครเมติกในหน่วยแอมพลิจูด ต่อมาสนามการกระจายที่ปากช่องสี่เหลี่ยมเท่ากับฟังก์ชันการส่งผ่าน \mathcal{T} คือแอมพลิจูดที่วัดโดยแทนเป็นค่าความเข้ม โดยใช้สมการ (2.68) สนามการเลี้ยวเบนเฟรอนีเยอร์ของปากช่องสี่เหลี่ยมหาได้โดย

$$U(x_0, y_0) = \frac{\exp(jkz) \exp\left[j \frac{k}{2z} (x_0^2 + y_0^2)\right]}{j\lambda z} \mathcal{S}\{U(x_1, y_1)\} \Bigg|_{\substack{f_x = x_0/\lambda z \\ f_y = y_0/\lambda z}} \quad (2.69)$$

กำหนดว่า

$$\mathcal{S}\{U(x_1, y_1)\} = l_x l_y \text{sinc}(l_x f_x) \text{sinc}(l_y f_y) \quad (2.70)$$

พบว่า

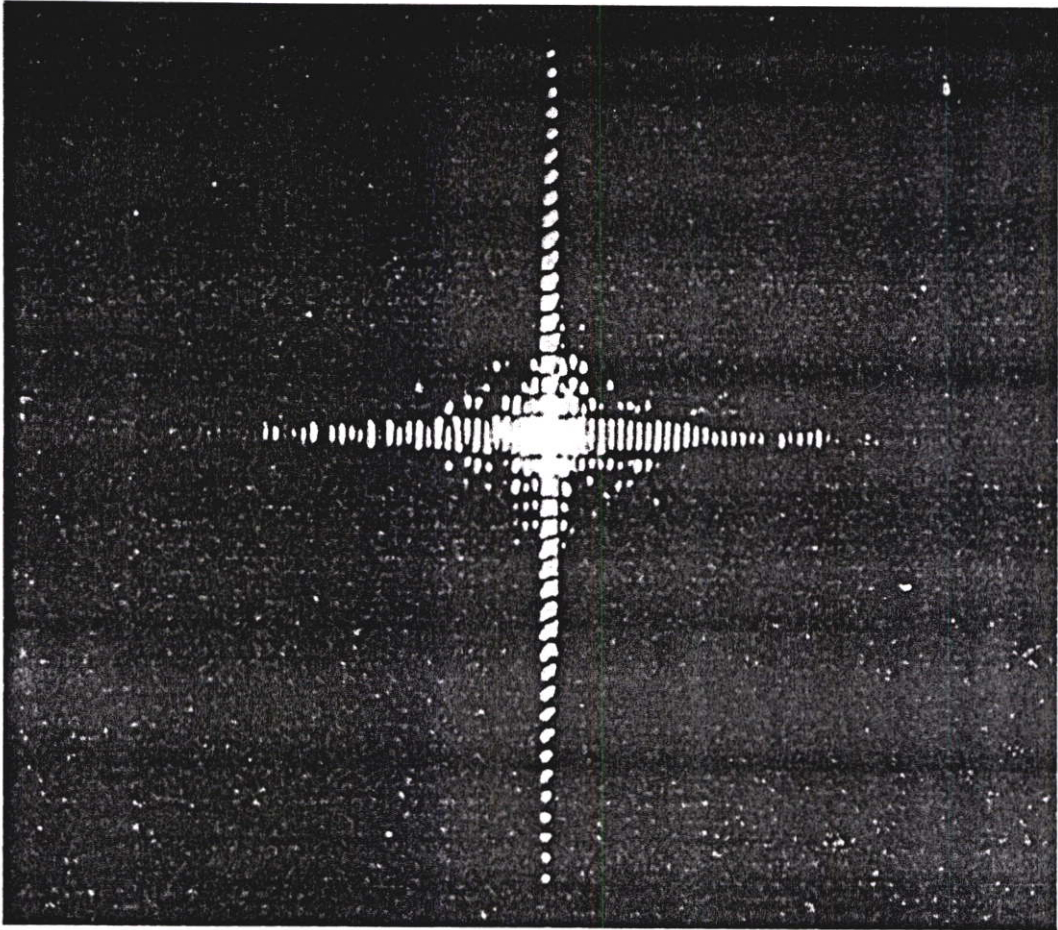
$$U(x_0, y_0) = \frac{\exp(jkz) \exp\left[j \frac{k}{2z} (x_0^2 + y_0^2)\right]}{j\lambda z} l_x l_y \text{sinc}\left(\frac{l_x x_0}{\lambda z}\right) \text{sinc}\left(\frac{l_y y_0}{\lambda z}\right) \quad (2.71)$$

และ

$$I(x_0, y_0) = \frac{l_x^2 l_y^2}{\lambda^2 z^2} \text{sinc}^2\left(\frac{l_x x_0}{\lambda z}\right) \text{sinc}^2\left(\frac{l_y y_0}{\lambda z}\right) \quad (2.72)$$

ตามแกน x_0 บันที่กว้างความกว้างระหว่างศูนย์อันดับแรก (ความกว้างของลูปลหลัก) คือ

$$\Delta x_0 = 2 \frac{\lambda z}{l_x} \quad (2.73)$$



รูปที่ 2.7 แสดงรูปภาพการเลี้ยวเบนโดยปากช่องสี่เหลี่ยมที่เหลื่อมด้วยความกว้างอัตราส่วน $l_x / l_y = 2$ [19]

2.4.2.2 ปากช่องสี่เหลี่ยมแบบวงกลม (Circular Aperture)

พิจารณาการเลี้ยวเบนปากช่องสี่เหลี่ยม เป็นวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลางของปากช่องสี่เหลี่ยมเป็น l ดังนั้น ถ้า r_1 เป็นรัศมี จากระนาบของปากช่องสี่เหลี่ยม, ต่อมา

$$\tau(r_1) = \text{circ}\left(\frac{r_1}{l/2}\right) \quad (2.74)$$

สมมูลวงกลมของปัญหานี้แนะนำว่าการส่งผ่านฟูเรียร์ในสมการ (2.67) เขียนใหม่เป็นการส่งผ่านฟูเรียร์-เบสเซล ดังนั้นถ้า r_0 เป็นรัศมีโคออดิเนตจากระนาบฮอโลแกรม, เรามีสนามแอมพลิจูดที่จุด x_0 หาได้เป็น:

$$U(x_0) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left(j\frac{kr_0^2}{2z}\right) \beta\{U(r_1)\}_{\rho=r_0/\lambda z} \quad (2.75)$$

สำหรับหน่วยแอมพลิจูด, ปกติระนาบคลื่นแผ่ตกระทอบวัตต์ , สามารถหาค่าได้เป็น $U(r_1) = t(r_1)$ ได้สมการเพิ่มเป็น :

$$\beta \left\{ \text{circ} \left(\frac{r_1}{l/2} \right) \right\} = \left(\frac{l}{2} \right)^2 \frac{J_1(\pi \rho)}{l \rho / 2} \quad (2.76)$$

ดังนั้นการกระจายแอมพลิจูดในรูปแบบสนามเลี้ยวเบนเฟรอนโฮเฟอร์แสดงได้เป็น

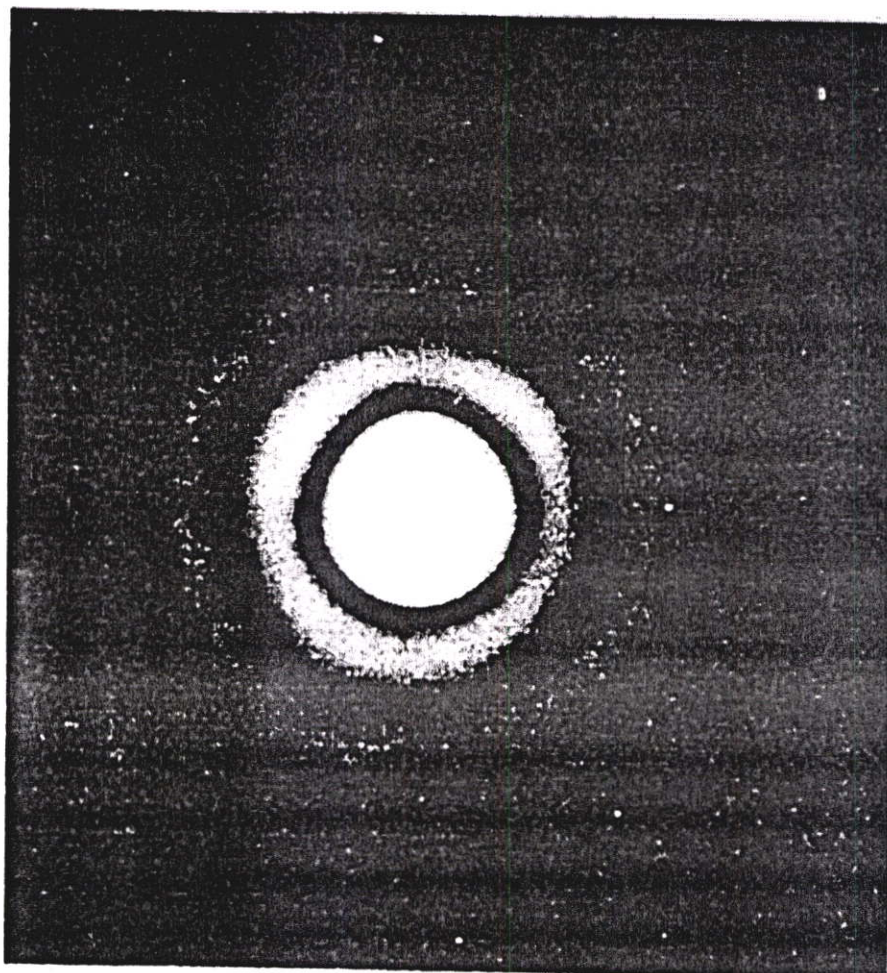
$$\begin{aligned} U(x_0) &= \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left(j \frac{kr_0^2}{2z}\right) \left[\left(\frac{l}{2} \right)^2 \frac{J_1(\pi r_0 / \lambda z)}{l r_0 / 2 \lambda z} \right] \\ &= \exp(jkz) \exp\left(j \frac{kr_0^2}{2z}\right) \frac{kl^2}{j8z} \left[2 \frac{J_1(kl r_0 / 2z)}{kl r_0 / 2z} \right] \end{aligned} \quad (2.77)$$

และการกระจายความเข้มสามารถเขียนได้เป็น

$$I(r_0) = \left(\frac{kl^2}{8z} \right)^2 \left[2 \frac{J_1(kl r_0 / 2z)}{kl r_0 / 2z} \right]^2 \quad (2.78)$$

การกระจายความเข้มที่อ้างอิงเป็นรูปแบบ แบบ Airy ที่มากที่สุดและน้อยที่สุด รูป 2.8 แสดงรูปถ่ายภาพรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ปากช่องสี่เหลี่ยมวงกลม ได้รัศมีที่โคออดิเนตอันดับแรกหาค่าโดย

$$\Delta r_0 = 1.22 \frac{\lambda z}{l} \quad (2.79)$$

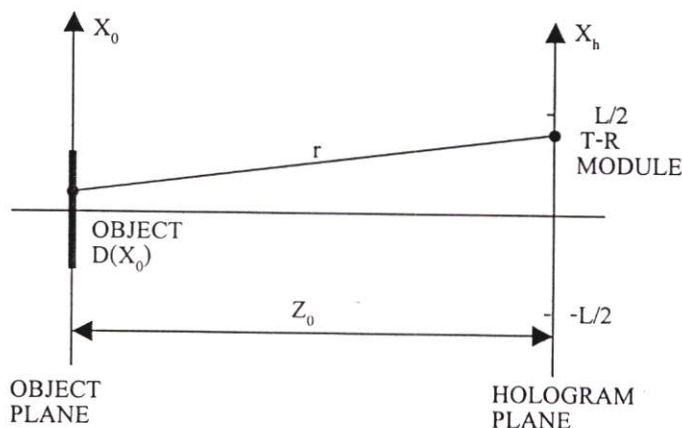


รูปที่ 2.8 รูปการเลี้ยวเบนแบบเฟรานโฮเฟอร์ทางแสงปากช่องสี่เหลี่ยม [19]

2.5 การเพิ่มความละเอียดของภาพไมโครเวฟฮอโลกราฟี โดยศึกษาจากการเคลื่อนที่ของตัวส่งและตัวรับสัญญาณจากวัตถุ

ในงานวิจัยไมโครเวฟฮอโลกราฟีสิ่งสำคัญสิ่งหนึ่ง คือความสามารถวิเคราะห์ภาพวัตถุให้ได้ภาพที่มีขนาดและรูปร่าง คล้ายรูปร่างวัตถุจริงโดยมองผ่านสิ่งบดบังที่เป็นสารไดอิเล็กตริกที่ไม่สามารถมองด้วยตาเปล่า ขีดความสามารถนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในพื้นที่ที่มีอุปสรรคมนุษย์ไม่สามารถเข้าไปได้รวมทั้งภายใต้สภาวะอากาศที่ผิดปกติ ความสัมพันธ์ที่ความยาวคลื่นมีขนาดยาวประมาณ 3 เซนติเมตร จึงเป็นสิ่งที่คาดเดาได้ว่าความละเอียดของภาพที่ได้ไม่สามารถยอมรับได้ เมื่อใช้ระบบทางไมโครเวฟในการวิเคราะห์ ในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิธีสแกนวัตถุในรูปแบบต่างๆ เพื่อเพิ่มความละเอียดของภาพโดยศึกษาการเคลื่อนที่ของตัวส่งและตัวรับสัญญาณจากวัตถุมีผลกับความละเอียดของภาพ

ในส่วนนี้จะอธิบายวิธีสแกนภาพแบบตัวส่งและตัวรับภาพเคลื่อนที่ไปด้วยกันเปรียบเทียบกับตัวส่งสัญญาณอยู่กับที่และตัวรับสัญญาณเคลื่อนที่ไป ว่าศักยภาพแตกต่างกันอย่างไร



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของการสแกนแบบ T-R ฮอโลกราฟี

อัตราส่วนเปรียบเทียบขนาดของการบันทึกภาพ ขอบเขตจำกัดของการบิดเบือนไปของภาพ ในส่วนนี้ขึ้นกับขีดจำกัดในการแยกแยะภาพยอมรับโดยความสัมพันธ์ของ $\lambda_m Z_0 / L$ โดย λ_m คือความยาวคลื่นไมโครเวฟ, Z_0 คือระยะทางวัตถุจากปากช่องสังเกตุคลื่น, L คือขนาดการบันทึกภาพ นอกจากส่วนนี้แล้วก็มีรายละเอียดเพิ่มเติมซึ่งอาจจะเปรียบเทียบได้ยากเพราะอาจจะจัดการค่าในส่วนนี้ไว้ให้เหมือนกัน เช่น แอมพลิจูด, เฟส, ความถี่, การโพลาไรซ์ของการกระเจิงคลื่นจากวัตถุ แต่ในส่วนของการโพลาไรซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เหมือนกัน เพราะเกิดจากการเลือนตัวรับส่งสัญญาณไปในแต่ละตำแหน่งที่ต่างกัน ทำให้ความถี่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปถ้าเราให้ศักยภาพของแอมพลิจูดและเฟสมีขีดความสามารถสูงสุดเพียงมี ทำให้ได้ความละเอียดของภาพมากที่สุดแล้ว ก็อาจจะได้ภาพที่มีความละเอียดจนยอมรับได้ ในส่วนการเคลื่อนที่ของตำแหน่งตัวส่งและรับสัญญาณอาจจะเป็นส่วนหนึ่งเท่านั้นที่เพิ่มความละเอียดของภาพ หลักการของการสแกนภาพแบบ T-R (หรือสแกนวัตถุ) [20] ภาพฮอโลแกรมอ้างอิงในเชิงโครงสร้างสองมิติเป็นดังรูปที่ 2.9 ด้วยวัตถุหนึ่งมิติฟังก์ชันการสะท้อนหรือการกระเจิงมีการกระจาย $D(x_0)$ แผ่คลื่นในลักษณะโคฮีเรนต์ พิจารณากรณีเมื่อวัตถุตั้งกับที่และจุดศูนย์กลางที่ $x_0 = 0$ ขณะที่ T-R สแกนด้วยความเร็วคงที่ V อยู่หน้าขนาดบันทึกภาพ L สนามคลื่นที่ x_0 ของวัตถุโดยเป็นแบบ T-R เมื่อตำแหน่งที่โคออดิเนต x_h ให้ค่าโดย

$$\psi(x_0) = \frac{A}{r} e^{-jkr} \cong \frac{A}{Z_0} e^{-j\frac{k}{2z_0}(x_0 - x_h)^2} \quad (2.80)$$

ที่นี้ $k = 2\pi / \lambda_m$, A คือแอมพลิจูดคงที่ สนามการกระเจิงโดยวัตถุนี้แผ่โดยสนามหน้าระนาบฮอโลแกรม

$$O(x_h) = \int_{\text{object}} D(x_0) \psi(x_0) e^{-j\frac{k}{2Z_0}(x_h-x_0)^2} dx_0 \quad (2.81)$$

โดยรวมสองสมการคือ สมการที่ 2.80 และ สมการที่ 2.81 ได้สมการที่ 2.82 ดังนี้คือ

$$O(x_h) = \frac{A}{Z_0} \int D(x_0) e^{-j\frac{k}{2Z_0}(x_h-x_0)^2} dx_0 \quad (2.82)$$

สมการที่ 2.82 คือสมการสนามที่อยู่หน้าปากทางรับภาพ L โดยวัตถุ $D(x_0)$ เมื่อคลื่นแผ่จากวัตถุด้วยความยาวคลื่น λ_m ตำแหน่งที่ได้ผลกระทบคือ $Z_0/2$ หรือเมื่อวัตถุอยู่ที่ Z_0 ความยาวคลื่นที่ได้คือ $\lambda_m/2$ เห็นได้ว่าในโหมด T-R ระบบจะเพิ่มขีดจำกัดการแยกความละเอียดของภาพโดยมีแฟกเตอร์ 2 เข้ามาเกี่ยวข้องจะเห็นวัตถุสองครั้งหรือเห็นวัตถุในระยะทางน้อยกว่าเดิมสองเท่า เพื่อให้เข้าใจละเอียดขึ้นให้พิจารณาในรูปที่ 2.10 สนามคลื่นกระเจิงในวัตถุที่อยู่หนึ่ง แฉโดยโคฮีเรนซ์เริ่มจากจุดเริ่มต้นและเคลื่อนที่ไปโดยตัวรับคลื่น หน้าระนาบฮอโลแกรมโครงสร้างในเชิงสองมิติแสดงดังรูปที่ 2.10 (ก) โดยอธิบายอย่างง่าย ตัวส่ง T และตัวรับ R อยู่ที่ตำแหน่ง 1 ที่เวลาหนึ่ง ตัวรับสแกนไปในทิศทางเส้นปะ เฟส ϕ แฉคลื่นจากตัวส่งคลื่น T (โดยจะอยู่หนึ่งที่ตำแหน่งเริ่มต้น) และกระเจิงคลื่นโดยตำแหน่งวัตถุที่อยู่หนึ่งที่ O ที่ตำแหน่ง Z_0 รับค่าที่ตัวรับคลื่นที่ตำแหน่ง 1 และ 2 โดยระยะ $d = (y^2 + Z_0^2)^{1/2}$ ความแตกต่างระหว่างสองเฟสที่วัดค่าควรเป็น

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{12} &= \phi_1 - \phi_2 = k2Z_0 - k(Z_0 + r) \\ &= k(Z_0 - r) \end{aligned} \quad (2.83)$$

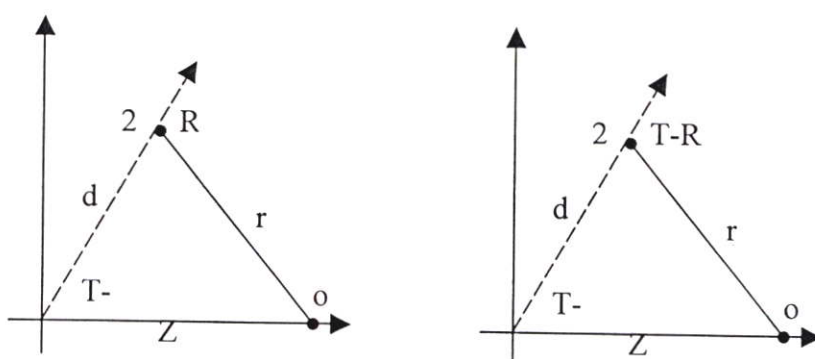
ที่นี้ $K = 2\pi/\lambda_m$ และ r คือระยะระหว่างวัตถุกับตำแหน่ง 2

ถ้าเราสมมติว่า $\phi_1 = 0$ ดังนั้นตำแหน่ง 1 ควรจะเป็นแถบสว่างยอดคลื่นแรก ต่อมาสำหรับ $\Delta\phi_{12} = \pi$, จุด 2 เป็นแถบสว่างยอดคลื่นถัดไป ในการเคลื่อนที่ระหว่างจุดที่ 1 กับจุดที่ 2 พิจารณาในกรณีเมื่อตัวส่งและรับคลื่นสแกนจากจุด 1 ถึง จุดที่ 2 แสดงดังรูปที่ 2.10 ข. ในกรณีนี้คือ

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{12} &= \phi_1 - \phi_2 = k2Z_0 - k2r \\ &= 2k(Z_0 - r) \end{aligned} \quad (2.84)$$

สมการข้างบนเป็นผลจากการซิปเฟสสองครั้งผลจากการสแกนตัวรับเดี่ยวๆ ดังนั้นถ้าการสแกนตัวรับเดี่ยวๆ จากจุด 1 ถึง 2 หนึ่งยอดคลื่นแถบมีดถูกบันทึก ต่อมาในการสแกนทั้งคู่ ตัวส่งและ

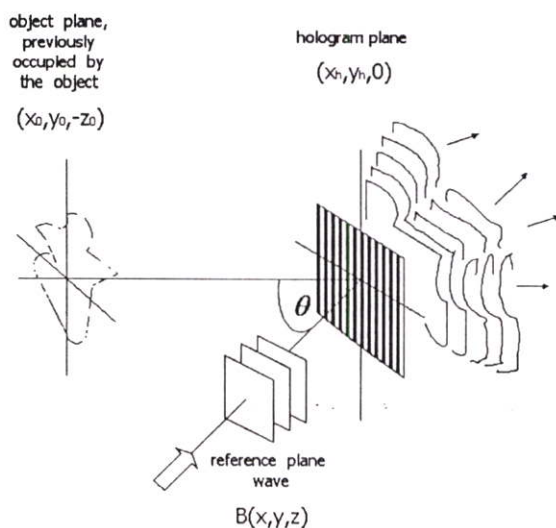
ตัวรับคลื่น สองยอดคลื่นมีดถูกบันทึก ความเข้มของยอดคลื่นที่สูงกว่าเพิ่มรายละเอียดของภาพ เป็นผลเพิ่มมุมการเลี้ยวเบนและเพิ่มการแบ่งเป็นสองเท่าระหว่างการสร้างภาพกลับของวัตถุ ที่มี การแบ่งรายละเอียดของวัตถุ ในการสร้างภาพกลับจากการสแกนแบบ T-R ของสองจุดที่อยู่ติด กันวัตถุควรแบ่งโดยระยะสองเท่าของการวัดแบบตัวสแกนอยู่นิ่ง โดยภาพแหล่งคลื่นมีเส้นผ่า ศูนย์กลางที่แน่นอน เป็นสัดส่วนกับ $(\lambda_m Z_0 / L)$ ด้วยความยาว L เป็นความยาวของฮอโลแกรม ในการบันทึกภาพ เราได้บทสรุปว่าในการสแกนแบบ T-R วัตถุแบ่งโดย $(\lambda_m Z_0 / 2L)$ ซ้ำจำกัด การแยกนี้ยอมรับด้วยการแผ่ความยาวคลื่น $\lambda_m / 2$ ด้วยการบันทึกภาพในเส้นผ่าศูนย์กลางความ ยาว L หรือเมื่อการบันทึกภาพเส้นผ่าศูนย์กลางความยาว $2L$ ด้วยการแผ่คลื่นด้วย ความยาวคลื่น λ_m เห็นได้ว่าซ้ำจำกัดการแยกรายละเอียดเพิ่มโดยแฟกเตอร์ 2 โดยตำแหน่ง การเคลื่อนที่ต่างๆ สามารถพิจารณาได้ในรูปที่ 2.10 (ข)



รูปที่ 2.10 โครงสร้างการสแกนภาพ ก). สแกนเคลื่อนที่ตัวรับอย่างเดียว ข). สแกนเคลื่อนที่ทั้ง ตัวรับและตัวส่ง

2.6 การสร้างภาพไมโครเวฟฮอโลกราฟีด้วยเทคนิคสเปกตรัมทำมุมย้อนกลับ (Angular Spectrum Backward Propagation)

วิธีการสร้างภาพการแพร่แบบสเปกตรัมทำมุมย้อนกลับ โดยทำการวิเคราะห์ค่านวนเชิงตัว เลข ทำการสร้างภาพกลับจากไมโครเวฟฮอโลแกรม ที่เกิดขึ้นจากการแทรกสอดระหว่างระนาบ คลื่นอ้างอิงแบบเยื้องแกน และคลื่นสะท้อนจากวัตถุ โดยการทดลองทดสอบได้ว่าการส่ง ผ่านแบบเฟิร์ลเนลที่ใช้ค่านวนในการสร้างภาพ ถ้าใช้การแพร่แบบสเปกตรัมทำมุมย้อนกลับ คุณภาพของภาพที่ได้ในช่วงระยะไซนเฟิร์ลเนล สามารถเปรียบเทียบกับภาพที่ได้รับจากวิธี แบบเฟิร์ลเนล



รูปที่ 2.11 การสร้างภาพกลับโดยวิธีการแพร่แบบสเปกตรัมทำมุ่มย้อนกลับ

ชนิดของวิธีที่ใช้สังเคราะห์จากการสะท้อนภาพจากคลื่นไมโครเวฟ นำมาใช้วิเคราะห์คำนวณภาพจากวัตถุในวิธีต่างๆมากมาย วิธีการประมาณแบบเฟรลด์เนล และ เฟราน์โฮเฟอร์ นำมาใช้เพื่อสังเคราะห์ภาพ จากการเก็บข้อมูลที่ได้จากสนามความเข้มฮอโลแกรมจากการแทรกสอดของคลื่นสะท้อนจากวัตถุที่จะตรวจจับภาพและคลื่นอ้างอิง ถ้าระบบไมโครเวฟสามารถตรวจวัดแอมพลิจูดและเฟสของคลื่นวัตถุ คลื่นอ้างอิงก็ไม่จำเป็นต้องใช้แต่ใช้วิธีสังเคราะห์คลื่นแทนในเทคนิควิธีการแพร่แบบสเปกตรัมทำมุ่มย้อนกลับ เป็นการใช้ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนของสูตรการทำมุ่มสเปกตรัมเพื่อให้ได้คุณภาพที่ดีขึ้นของสนามภาพที่ใกล้ (near-field) ในรูปที่ 2.11 ระนาบตรงปากฮอร์นและตำแหน่งบนวัตถุถูกชี้เป็น (x_0, y_0, z_0) สัญญาณที่สะท้อนวัตถุสามารถเขียนเป็นสมการ กระบวนการทางวิธีการสร้างภาพกลับมาโดยทางดิจิทัล นำข้อมูลที่เก็บบันทึกไว้ในรูปของเมตริกซ์ที่เป็นตัวแทนการกระจายคลื่น ในรูปความเข้มซึ่งเกิดจากร้อยการแทรกสอดของคลื่นวัตถุ และคลื่นอ้างอิงมาสร้างภาพวัตถุที่ระนาบที่ต้องการโดยใช้สมการของเฟรลด์เนล ซึ่งต้องนำข้อมูลมาจัดให้อยู่ในรูปแบบตามสมการของเฟรลด์เนลก่อน โดยระนาบคลื่นอ้างอิงแบบเยื้องแกนคือ $B(x, y, z)$ ได้การกระจายความเข้มของฮอโลแกรมคือ $I(x_h, y_h, 0)$ ดังนั้นภาพฮอโลแกรมจะได้จากระนาบ $(x, y, z) = (x_h, y_h, 0)$ หลังจากนั้นทำการหาค่าสมการของเฟรลด์เนลที่ระนาบที่ต้องการ โดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast-Fourier Transform) เป็นอัลกอริทึม (Algorithm) สำหรับการคำนวณการแปลงฟูเรียร์แบบดิสครีต (Discrete Fourier Transform) ด้วยโปรแกรม MATLAB [THE MATH WORKS, Inc] สนามคลื่นวัตถุ $f(x, y, z)$ จากการแพร่อย่างที่ผ่านมาทำให้รู้ว่าการแพร่ระนาบวัตถุ $(x, y, z) = (x_0, y_0, -z_0)$ เทียบกับระนาบฮอโลแกรมจะได้สนามคลื่น เป็นสมการดังนี้

$$I(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B t_f(x/\lambda z', y/\lambda z') \exp \left[j(\pi/\lambda z') \left(\left(\frac{x}{\lambda z'} \right)^2 + \left(\frac{y}{\lambda z'} \right)^2 \right) \right] \exp \left(-j2\pi \left[\frac{ux}{\lambda z'} + \frac{vy}{\lambda z'} \right] \right) dudv [21] \quad (2.85)$$

I พังก์ชันคลื่นที่ระนาบของภาพ (Image plane) ที่เกิดจากการทำเฟรลเนลทรานฟอร์มต่อข้อมูลความเข้มบนฮอโลแกรม

t_f ค่าความเข้มของคลื่นวัตถุแทรกสอดกับคลื่นอ้างอิงที่วัดโดยตัวตรวจวัด

B อัมพลิจูดของคลื่นระนาบที่ใช้ในการสร้างภาพกลับ เป็นระยะสัมพันธ์หาได้จาก $wz' / (w + z')$

w ระยะห่างระหว่างตัวตรวจวัดสัญญาณกับวัตถุ

z' ระยะห่างระหว่างตัวโดโพลกระเจิงคลื่นกับวัตถุ

λ เป็นความยาวคลื่นที่มาจากวัตถุ

ความเข้มของภาพที่จะนำมาสร้างภาพวัตถุหาได้จาก $I * I^*$ และในการแปลงฟูเรียร์เราจะได้นขนาดของกรอบที่แสดงภาพดังนี้

$$L(u, v) = \frac{\lambda z'}{\Delta L(x, y)} \quad (2.86)$$

$L(u, v)$ = ขนาดของกรอบของภาพ

$\Delta L(x, y)$ คือ ขนาดช่องระหว่างจุดเก็บข้อมูลถัดกัน (grid space) ของระนาบฮอโลแกรม ที่ทำการบันทึกกระบวนการทางคณิตศาสตร์ จะมีผลลัพธ์ 2 ส่วน คือส่วนจริง $S_r(x, y)$ และส่วนจินตภาพ $S_i(x, y)$ ของสัญญาณเชิงซ้อน ดังนั้นแอมพลิจูดสัญญาณที่สะท้อนและระยะทางถึงวัตถุ สามารถแยกกระบวนการโดยผลรวมแบบ Superposition, เป้าหมาย(วัตถุ) สามารถเห็นเป็นภาพได้โดยจำนวนที่มากมาย ของจุดและสัญญาณ (x, y) คือ ผลรวมการสะท้อนอิสระดังนั้น S_r, S_i ถูกวัดและบันทึกค่า การใช้เทคนิควิธีการแพร่แบบสเปกตรัมทำมุมย้อนกลับสำหรับการสร้างภาพ พิจารณาสมการ (2.85) เสาอากาศสแกนในระนาบ (x, y) เมื่อ $Z =$ ค่าคงที่ และหน้าคลื่นสะท้อนถูกบันทึก สมการเขียนเป็น

$$f(x, y, z) = g(x, y, z) \exp[j\phi(x, y, z)] \quad (2.87)$$

ที่นี้ $g =$ แอมพลิจูด
 $\phi_0 =$ เฟสของคลื่นเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง

ทฤษฎีของสูตรการเลี้ยวเบนมาจากพื้นฐานของหลักการฮอยเกนส์และเป็นพื้นฐาน จากการทำ Superposition ของคลื่นทรงกลมกระจายมาจากทุกๆจุดจากวัตถุสังเกต ในการคำนวณภาพ วัตถุที่ใช้ความละเอียดที่สูงของภาพ และระบบการคำนวณจากช่องสังเกตคลื่น ที่รับภาพขนาดใหญ่ ในงาน (ภาพทางการแพทย์) การประมาณโดยเฟรลเนลไม่สามารถรองรับได้ ทฤษฎี สเปกตรัมเชิงมุมแก้ไขปัญหาในจุดนี้ของการเลี้ยวเบนแบบเฟรลเนลได้ จากการได้เปรียบเพราะ สามารถทำฟูเรียร์สำหรับการใช้แถบสนามคลื่นที่ใกล้ (Near fields) ($f/1$) สนามภาพวัตถุที่ได้ $f(x, y, z)$ ได้รับแพร่คลื่นจากระนาบวัตถุ ระนาบฮอโลแกรมสามารถเขียนได้ในรูปแบบสมการ สนามคลื่นเพื่อให้เข้าใจง่ายในการทำสเปกตรัมเชิงมุม

$$B(x, y, z)I(x_h, y_h) = B(x, y, z)\{f(x_h, y_h, 0)\}^2 + B(x, y, z)\{B(x_h, y_h, 0)\}^2 \\ + B(x, y, z)B(x_h, y_h, 0)f^*(x_h, y_h, 0) + B(x, y, z)B^*(x_h, y_h, 0)f(x_h, y_h, 0)$$

มุมคลื่นอ้างอิง θ รูปที่ 2.11 ทำมุมกับแนวแกน z สามารถที่จะเพิ่มค่าได้ในกรณีที่มีมุม θ มีค่า กว้าง เพื่อให้ภาพอันดับศูนย์ไม่ไปรบกวนภาพวัตถุแต่ผลที่ตามมาคือการลดลงของคุณภาพ ภาพวัตถุที่เกิดจากการถ่างมุม θ ในอีกแบบหนึ่งถ้าภาพที่เกิดจากการสร้างภาพ ใช้วิธีการ แพร่แบบสนามคลื่นทำมุมย้อนกลับของทิศสนามคลื่นวัตถุ ในระนาบวัตถุที่เทียบกับ ระนาบฮอโลแกรม $(x_0, y_0, -z_0)$ คำนวณความเข้มผ่านเทอมที่ 3 และ 4 ของสมการข้างบน ให้ ระนาบคลื่นที่แพร่ไปข้างหน้ามีค่า $(x, y, z) = (x_0, y_0, z_0)$ โดยภาพวัตถุเป็นเทอมที่ 4 และเทอม ที่ 3 ถ้าคลื่นถ่างออกไปไม่ให้ไปรบกวนภาพจริง ทำให้ไม่ต้องไปเพิ่มมุม θ เพื่อขยับภาพอันดับ ศูนย์ จากสูตรสเปกตรัมเชิงมุมการแพร่ย้อนกลับของเทอมที่ 4 สมการสนามคลื่นวัตถุมีรูปแบบ เป็น

$$f_h(x_h, y_h, 0) \equiv |B(x_h, y_h, 0)|^2 f(x_h, y_h, 0)$$

คลื่นสามารถนำมาสร้างภาพ โดยผลบวกเวกเตอร์การใช้ส่วนประกอบของระนาบคลื่นวัตถุ $(x_0, y_0, -z_0)$ ในรูปแบบดิฟเฟอเรนเชียลผ่านฟูเรียร์ 2 มิติ $f(x, y, z)$ โดยการแยกของสนามคลื่น เข้าสู่อนุกรมของระนาบคลื่นที่แพร่ในทิศทางมุมต่างๆ ผ่านฟูเรียร์ทรานฟอร์ม ดังสมการ

$$F(u, v, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_h(x_h, y_h, 0) \exp[-2\pi j(x_h u + y_h v)] dx_h dy_h \quad (2.88)$$

ในสวนนี้ u, v เป็นความถี่เชิงมิติของระนาบ x และ y ตามลำดับ และในทางกลับกันเราสามารถคำนวณได้เช่นกัน

$$f(x_h, y_h, z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int F(u, v, z) \exp[2\pi j(ux_h + vy_h)] dx_h dy_h \quad (2.89)$$

ในการแพร่จากระนาบ Z ถึงระนาบ Z' เป็นระยะระนาบที่เกิดจากการทำสเปกตรัมทำมุมย้อนกลับเทียบกับระนาบฮอโลแกรม ให้ที่ระนาบนี้เป็นจุดเริ่มต้นของระยะแทนและ f ต้องเป็นไปตามรูปแบบสมการ Helmholtz's

$$v^2 f + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 f = 0 \quad (2.90)$$

นำสมการ (2.89) แทนในสมการ (2.90) ได้สมการ

$$\iint \left\{ \frac{\partial^2 F}{\partial(z'-z)^2} + \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 - (2\pi k_x)^2 - (2\pi k_y)^2 \right] F \right\} \exp[2\pi j(k_x x + k_y y)] dk_x dk_y = 0 \quad (2.91)$$

ในความสัมพันธ์นี้ x, y ไม่ถูกนำมาใช้ ถ้า

$$\frac{\partial^2 F}{\partial(z'-z)^2} + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 [1 - (\lambda k_x)^2 - (\lambda k_y)^2] F = 0 \quad (2.92)$$

คำตอบสมการ (2.93) มี 2 ส่วนคือ F^+ และ F^-

$$F(k_x, k_y, z') = F^+(k_x, k_y) \exp\left\{ \frac{-2\pi j}{\lambda} [1 - (\lambda k_x)^2 - (\lambda k_y)^2]^{\frac{1}{2}} (z'-z) \right\} + F^-(k_x, k_y) \exp\left\{ \frac{2\pi j}{\lambda} [1 - (\lambda k_x)^2 - (\lambda k_y)^2]^{\frac{1}{2}} (z'-z) \right\} \quad (2.93)$$

ที่นี้ F^+ ให้เป็นการส่งผ่านแบบฟูรีเยร์ ของการแพร่คลื่นไปแบบไกล (far field) คลื่นจะแพร่ไปแบบไม่โฟกัส และเทอมเอกซ์โปเนนเชียลเป็นตัวแพร่คลื่นไปข้างหน้า

F^- ให้เป็นการส่งผ่านแบบฟูเรียร์ ของคลื่นที่แพร่ระนาบตัวรับคลื่น ($z = 0$) กลับไปที่เป้า การแพร่คลื่นไปข้างหน้าแบบสนามระยะใกล้ (near field) ถูกโฟกัสตั้งนั้นส่วนนี้เป็นส่วนที่รับภาพ และเทอมเอกซ์โปเนนเชียลเป็นตัวแพร่คลื่นย้อนกลับของฟังก์ชัน

สำหรับการแผ่รังสีในทิศทางย้อนกลับ (ข้างหน้าเป้าวัตถุ) เราจะได้ F^- โดยการจัดให้ $F^+ = 0$ ต่อมาโดยใช้เงื่อนไขเริ่มต้น พบว่า $F^-(k_x, k_y) = F^-(k_x, k_y, z)$ และสามารถหาสมการได้ว่า

$$F^-(k_x, k_y, z') = F^-(k_x, k_y, z) \exp\left\{\frac{2\pi j}{\lambda} [1 - (\lambda k_x)^2 - (\lambda k_y)^2]^{1/2} (z' - z)\right\} \quad (2.94)$$

ส่วนนี้คือ ฟูเรียร์ทรานฟอร์มและการแพร่คลื่นแบบย้อนกลับ ให้ระนาบคลื่นลำแสงทำมุมที่ระนาบเป้าวัตถุ อินเวอร์สฟูเรียร์ทรานฟอร์มของสมการ 2.94 , ได้รับความพวัตตุดังสมการที่ 2.95

$$f(x, y, z') = \iint F^-(k_x, k_y, z) \exp\left\{\frac{2\pi j}{\lambda} [1 - (\lambda k_x)^2 - (\lambda k_y)^2]^{1/2} (z' - z)\right\} \exp\{2\pi j(k_x x + k_y y)\} dk_x dk_y \quad (2.95)$$

ภาพวัตถุ $f(x, y, z')$ เป็นกำลังสองเพื่อให้ได้ภาพความเข้ม ดังนั้นสนามคลื่นที่กระเจิงของวัตถุ ในหนึ่งระนาบ ,สามารถคำนวณสนามคลื่นที่วัตถุได้จากชั้นตอนสี่ชั้นตอนดังนี้

- คำนวนฟูเรียร์ทรานฟอร์มของสนาม $f(x, y, z)$ (ฮอโลแกรมส่วนจริงและจินตภาพของสมการ 2.93 ได้รับความคลื่นจากการสะท้อนที่วัตถุ) จากเฟสและแอมพลิจูดในรายละเอียดที่ได้รับ
- คูณด้วยฟูเรียร์ทรานฟอร์มโดยตัวแพร่คลื่นย้อนกลับเชิงซ้อน

$$\exp\left\{\frac{2\pi j}{\lambda} [1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2]^{1/2} (z' - z)\right\}$$

ที่นี้ $z' - z$ คือ ระยะจากไดโพลถึงวัตถุเท่ากับระยะคลื่นอ้างอิง ทำกับระนาบคลื่นฮอโลแกรม คูณด้วยระนาบคลื่นสเปกตรัมเชิงมุมที่วัตถุจะได้ ระยะการโฟกัส z' โดยคำนวณจากค่า z' เพื่อเปลี่ยนระยะ z' ให้ได้ภาพที่ชัดเจนในการเปลี่ยนระยะวัตถุ

- คำนวนอินเวอร์สของระนาบคลื่นสเปกตรัมเชิงมุม ที่ระนาบวัตถุโดยให้ $f(x, y, z')$ เป็นสมการภาพวัตถุ ดังสมการที่ 2.95

- ความเข้มของภาพวัตถุได้จาก ภาพวัตถุ $|f(x, y, z')|^2$ ความเข้มของภาพวัตถุใช้สำหรับการพล็อตค่าในแต่ละพิกเซล

ในแต่ละระนาบคลื่นที่แพร่จากระนาบวัตถุถึงระนาบฮอโลแกรม , ฟังก์ชัน $F(k_x, k_y, -z)$ และ $F(k_x, k_y, 0)$ โดยทั้งสองฟังก์ชันมีความสัมพันธ์ ผ่านฟังก์ชันการแพร่

$$F(k_x, k_y, -z) = F(k_x, k_y, 0) \cdot P(k_x, k_y, z) \quad \text{โดยให้ } P(k_x, k_y, z) = e^{jz\sqrt{k_0^2 - k_x^2 - k_y^2}} \quad \text{และ } k_0 = \frac{\omega}{c}$$

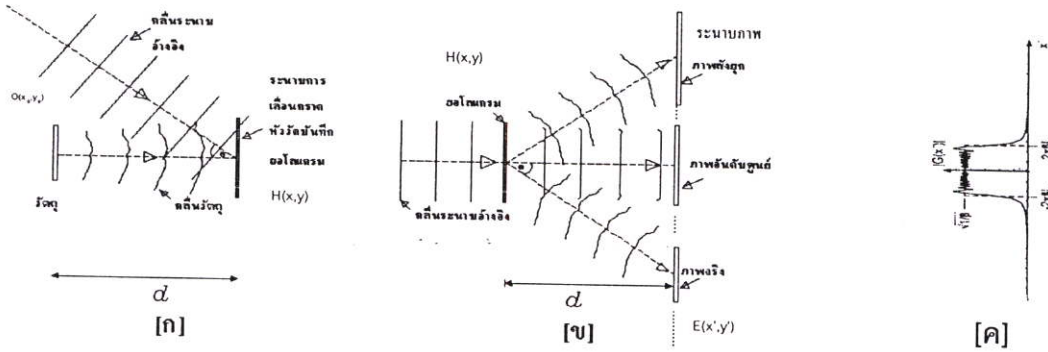
และเมื่อสมการในรากที่สองของฟังก์ชันการแพร่เป็น $k_x^2 + k_y^2 < k_0^2$ ทำให้ฟังก์ชันการแพร่เป็นจริง และสามารถปรับเฟสของคลื่น เมื่อไรก็ตาม $k_x^2 + k_y^2 > k_0^2$ คลื่นเหล่านั้นจะเข้าเงื่อนไขที่คลื่นจะเลือนหายไปอย่างรวดเร็วในระนาบ x และ y และค่อยๆหายไปแบบ Damping ในทิศทาง z โดยไม่มีการบันทึกภาพ การแพร่คลื่นย้อนกลับโดยให้ระนาบคลื่นสเปกตรัมเชิงมุมที่ระนาบเป้าวัตถุ คำสั่งสำหรับการคำนวณได้รับภาพ(ความเข้ม) $|f(x, y, z)|^2$ จากภาพวัตถุ ภาพความเข้มวัตถุใช้สำหรับการพล็อตผลและได้ภาพที่เห็น

2.7 การกำจัดภาพอันดับศูนย์ในงานไมโครเวฟฮอโลกราฟีแบบเยื้องแกน

การประมวลผลเพื่อสร้างภาพวัตถุกลับคืน โดยใช้ข้อมูลฮอโลแกรมที่ได้จากการวัดการกระจายความเข้มสัญญาณในพื้นที่จำกัด บนระนาบสังเกตการณ์การแทรกสอดของคลื่นไมโครเวฟอ้างอิง และคลื่นจากวัตถุซึ่งมีแนวการเคลื่อนที่กระทำมุ่มต่อกัน ภาพอันดับศูนย์ จะมีบทบาทสำคัญในการกินเนื้อที่การเลื่อมซ้อนหรือกระทั่งบดบังภาพวัตถุ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในกรณีที่วัตถุอยู่ใกล้ระนาบสังเกตการณ์ หรือมุมระหว่างแนวคลื่นทั้งสองมีค่าน้อย ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการลดผลรบกวนของภาพอันดับศูนย์ โดยใช้เทคนิคการกรองในตัวแปรมิติความถี่สูงผ่าน

ในงานวิจัยการมองวัตถุโดยใช้คลื่นไมโครเวฟกำลังต่ำ ด้วยเทคนิคฮอโลกราฟี ซึ่งได้มีการพัฒนาขึ้นที่ห้องปฏิบัติการวิจัยไมโครเวฟประยุกต์มาเป็นลำดับ นอกจากจะต้องเกี่ยวข้องกับการออกแบบปรับปรุงในส่วนประสิทธิภาพของระบบส่งรับคลื่น และเก็บข้อมูลฮอโลแกรมตลอดจนการคำนวณถึงตัวแปรและขอบเขตเงื่อนไขการประมาณค่าต่างๆ เพื่อลดความยุ่งยากในขั้นตอนการสร้างภาพวัตถุกลับคืน (Reconstruction) ยังมีอีกปัญหาพื้นฐานหนึ่งที่มีควมคู่มา กับฮอโลกราฟีเสมอซึ่งก็คือ การมีภาพอันดับศูนย์ (Zero-order image) [22] และภาพสังยุคต์ (conjugate image) ปะปนมากับภาพวัตถุในภาพสุดท้ายที่สร้างขึ้น ถึงแม้ว่าการใช้เทคนิคการให้แนวเคลื่อนที่ของคลื่นอ้างอิงกับคลื่นวัตถุไม่ซ้อนทับกัน (off-axis) จะทำให้ภาพเหล่านั้น แยกไปอยู่คนละบริเวณในระนาบของภาพ (image plane) แต่ก็จะต้องแลกด้วยความสูญเสียการแยกแยะรายละเอียดของภาพวัตถุ (resolution) อันเนื่องมาจากทรัพยากรจำนวนหน่วยย่อยของภาพ (pixel) ของการประมวลผลที่มีจำนวนจำกัด จะต้องแบ่งไปให้กับบริเวณภาพที่ปะปนอีกทั้ง

ก็จะมีกรณีของการเหลื่อมซ้อนทับกันของภาพเป็นบางส่วน ถ้ามุมระหว่างแนวคลื่นทั้งสอง หรือ ระยะจากวัตถุกับระนาบฮอโลแกรม (hologram plane) ไม่มากพอ



รูปที่ 2.12 แสดงหน้าคลื่นต่างๆ (ก) การถ่ายทำแผ่นฮอโลแกรม (ข) การสร้างภาพวัตถุคืนกลับ (ค) การกระจายความเข้มของภาพอันดับศูนย์

งานไมโครเวฟฮอโลกราฟีมีขั้นตอนหลักสำคัญ 2 ประการทำนองเดียวกันงานทางด้านแสง ประกอบด้วยส่วนแรกของการถ่ายทำแผ่นฮอโลแกรม (hologram formation) ซึ่งในที่นี้จะเป็นการใช้หัววัดบันทึกข้อมูลการกระจายความเข้มบนระนาบฮอโลแกรม (hologram plane) หรือระนาบสังเกตการณ์อันเนื่องมาจากการแทรกสอดของคลื่นไมโครเวฟ จากวัตถุและคลื่นอ้างอิงที่อาพันธ์กัน โดยอาจจะใช้การเลื่อนกราด (scanning) หัววัดเดียว อ่านค่าความเข้มไปตามจุดต่างๆที่มีระยะห่างสม่ำเสมอในลักษณะของหน่วยย่อยของภาพจนครอบคลุม พื้นที่สำหรับกรณี 2 มิติของฮอโลกราฟีแบบเยื้องแกน โดยทั่วไปมักใช้คลื่นอ้างอิงที่เป็นคลื่นระนาบ (plane wave) มีทิศการเคลื่อนที่ทำมุมกับกับคลื่นจากวัตถุแผ่นแบนดังรูปที่ 2.12(ก) โดยที่ $\theta \neq 0$ ในสมมุติฐานที่ว่าสถานะโพราไรเซชันเชิงเส้นของคลื่น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ประกอบกับถ้าระยะ d มีค่ามากกว่าขนาดของทั้งวัตถุ และขนาด L ของฮอโลแกรมจนสามารถใช้การประมาณของเฟรลเนล ใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนของคลื่นแบบสเกลาร์ ได้ว่า ในการสร้างภาพวัตถุคืนกลับด้วยคลื่นระนาบอ้างอิงในทิศตัวฉากกับแผ่นฮอโลแกรม ดังรูปที่ 2.12(ข) สนามไฟฟ้าของคลื่นบนระนาบของภาพ คือ $E(x',y')$ มีค่าเป็น

$$E(x', y') = \exp\left(\frac{i2\pi d}{j\lambda d}\right) \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda d}(x'^2 + y'^2)\right] \quad (2.96)$$

$$\iint H(x, y) \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)\right] \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda d}(xx' + yy')\right] dx dy \quad [23]$$

$$\text{โดยที่ } H(x, y) = [o(x, y) + E_R(x, y)] [o(x, y) + E_R(x, y)]^* \quad (2.97)$$

เมื่อ $O(x, y)$ และ $E_R(x, y)$ เป็นฟังก์ชันคลื่นวัตถุและคลื่นระนาบอ้างอิงที่ตำแหน่งระนาบฮอโลแกรมตามลำดับ

พิจารณานิทรินทรกรรมทางขวามือของสมการ (2.96) จะเป็นการหาค่า F_1 ซึ่งเป็นการแปลงฟูเรียร์ของผลคูณระหว่างฮอโลแกรม H กับ Chirp Function ซึ่งเทียบเท่าได้กับการทำคอนโวลูชันระหว่างค่าการแปลงฟูเรียร์ของแต่ละเทอม สำหรับภาพอันดับศูนย์ซึ่งเป็นพจน์ดีซี (dc term) ของ F_1 หาได้จากการทำคอนโวลูชันระหว่างพจน์ดีซีของการแปลงฟูเรียร์ของฮอโลแกรม (แทนด้วย δ -function) กับค่าการแปลงฟูเรียร์ของ chirp function ซึ่งจะมีลักษณะการกระจายความเข้มใน 1 มิติ เป็นดังรูปที่ 2.12(ค) โดยที่ $\beta = 1/\lambda d$ ในกรณีการคำนวณการแปลงแบบไม่ต่อเนื่องเมื่อแบ่งฮอโลแกรมใน 1 มิติออกเป็น N พิกเซล ที่มีขนาดแต่ละพิกเซล เท่ากับ $\Delta x = L/N$ ค่า $\beta = (\Delta x)^2 / \lambda d$ และความกว้างของพจน์ดีซีของ F_1 จะเป็น $2\pi N (\Delta x)^2 / \lambda d$ จะเห็นได้ว่าถ้าทำการกรองมิติความถี่สูงผ่าน [4] ด้วยการหาค่าเฉลี่ยของ H แล้วนำไปหักลบออกจาก H ก็จะทำให้ผลการคอนโวลูชันเป็นศูนย์สามารถกำจัดภาพอันดับศูนย์ออกไปได้

บทที่ 3

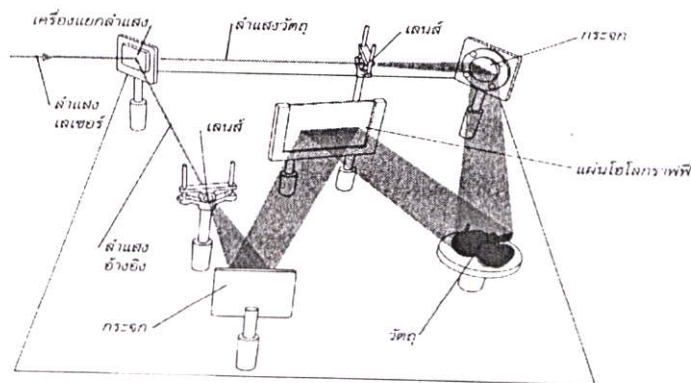
ระบบการสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ในบทนี้กล่าวถึงระบบการสร้างภาพด้วยไมโครเวฟฮอโลกราฟี หลักการทำงานและวิธีการตรวจจับสัญญาณ แนะนำอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและวิธีการสร้างภาพไมโครเวฟฮอโลกราฟี

3.1 แนวคิดของระบบการสร้างภาพด้วยไมโครเวฟฮอโลกราฟี

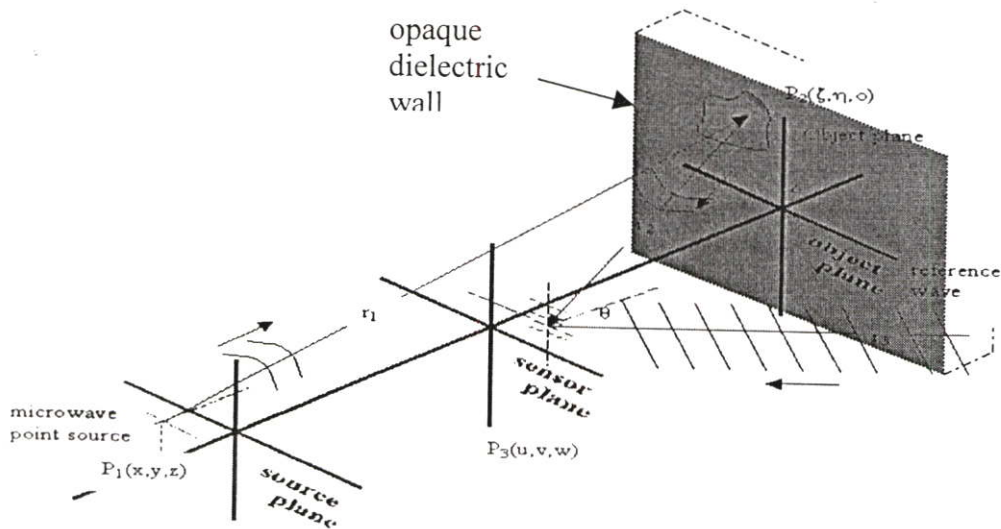
การถ่ายภาพ (photography) เป็นการบันทึกสถานการณ์จริงที่เป็นสามมิติ ให้อยู่บนฟิล์มหรือกระดาษที่เป็นเพียง 2 มิติ โดยอาศัยเลนส์รวมแสงที่สะท้อนจากวัตถุ ให้ไปตกบนฟิล์ม สำหรับการมองภาพจากฟิล์มหรือกระดาษ ที่อัดภาพก็จะอาศัยการสะท้อนของแสงจากฟิล์มหรือกระดาษที่ อัดภาพมาเข้าตา การบันทึกภาพลงบนฟิล์มนี้ เราอาศัยเฉพาะความเข้มของแสงที่มาตกกระทบในการทำให้เกิดภาพ ดังนั้นรายละเอียดเกี่ยวกับความลึก-ความตื้นของภาพจึงไม่ปรากฏอยู่บนฟิล์มหรือกระดาษที่อัดภาพนั้นๆ ภาพที่เรามองเห็นจึงเป็น 2 มิติ

สำหรับฮอโลกราฟี จะแตกต่างจากการถ่ายภาพตรงที่ในการบันทึกนั้นสามารถบันทึกความลึกความตื้นไว้ได้ด้วย โดยอาศัยความต่างเฟสของแสงสะท้อนทั้งหลายจากวัตถุ การบันทึกเช่นนี้ทำโดยอาศัยลำแสงอีกลำหนึ่งเป็นลำแสงอ้างอิงมาทำการแทรกสอดกับลำแสงสะท้อน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบเฟสของลำแสงสะท้อนเหล่านั้น ด้วยเหตุที่การบันทึกนี้เป็นการบันทึกเฟสของแสงด้วย ดังนั้นแสงที่ใช้จำเป็นต้องเป็นแสงอาพันธ์ และแหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้กันก็คือเลเซอร์นั่นเอง ฟิล์มที่บันทึกภาพไว้ด้วยวิธีทางฮอโลกราฟีนี้มีชื่อเรียกว่า ฮอโลแกรม (hologram)



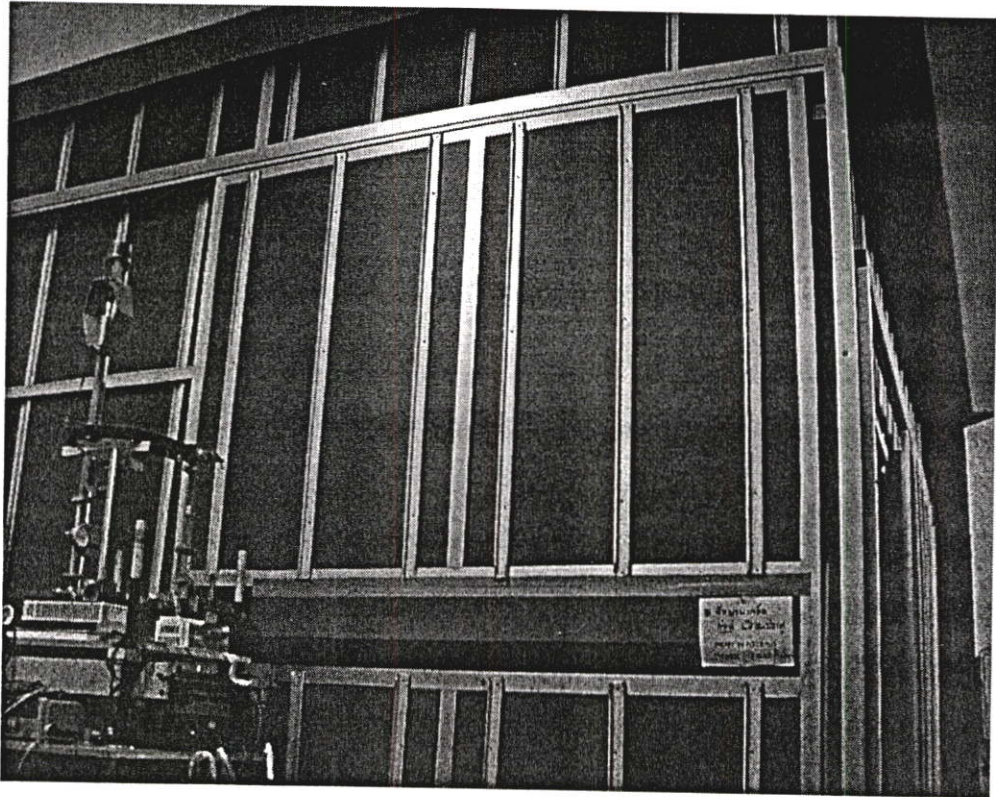
รูปที่ 3.1 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ในการถ่ายฮอโลแกรมทางแสง

การบันทึกภาพวัตถุให้เป็นภาพฮอโลแกรม ดังรูปที่ 3.1 โดยมีแผ่นรับคลื่นวัตถุและคลื่นอ้างอิง ได้รั้วรอยฮอโลแกรม เป็นการสร้างภาพฮอโลแกรมทางแสง จากรูปที่ 3.2 แสดงถึงวิธีการบันทึกอัมปลิจูดและเฟสฮอโลแกรม โดยที่การกระจายคลื่นของวัตถุ P_2 เคลื่อนที่มายังระนาบของฮอโลแกรม P_3 แทนด้วยสนามการกระจายคลื่นเชิงซ้อน r_2 และแหล่งกำเนิดคลื่นอ้างอิง มีการกระจายคลื่น r_3 มาตกบนระนาบฮอโลแกรม คลื่นทั้งสองจะเกิดการแทรกสอดกันอยู่บนระนาบ P_3 ซึ่งความเข้มของรั้วรอยการแทรกสอดบนระนาบ



รูปที่ 3.2 โครงสร้างการบันทึกภาพไมโครเวฟฮอโลแกรม โดยมีกำแพงไดอิเล็กทริกบังวัตถุ

ระบบไมโครเวฟฮอโลกราฟี สามารถทำการสแกนวัตถุในพื้นที่ 2.5×2.5 ตารางเมตร ในห้องดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ จัดสร้างโดยห้องปฏิบัติการวิจัยไมโครเวฟประยุกต์, ภาควิชาฟิสิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ดังรูป 3.3 พร้อมกับทำการสแกนในระนาบ x,y ให้ได้ภาพมีขนาดละเอียดที่สุด 256×256 ตำแหน่ง สัญญาณคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านสิ่งบดบังที่มีโครงสร้างที่ไมโครเวฟทะลุผ่านไปได้ ทำให้เราสามารถมองทะลุผ่านสิ่งบดบัง ได้สร้างกำแพงขึ้นมาบดบังวัตถุ เช่น ไม้ โฟมที่มีความหนาแปรเปลี่ยนได้ และ กำแพงทรายที่มีความหนาแปรเปลี่ยนได้ ได้ทดลองเพิ่มความหนาของกำแพงจากความหนาน้อยไปมาก เพื่อทดสอบดูว่าการตรวจสอบภาพวัตถุภายใต้สิ่งบดบังของโครงสร้างวัสดุแต่ละชนิด มีผลอย่างไรกับสัญญาณคลื่นไมโครเวฟที่ส่งผ่านจากวัตถุ บันทึกการแทรกสอดของคลื่นวัตถุและคลื่นอ้างอิงในช่วงความยาวคลื่นแสงด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยบันทึกความเข้มและเฟสของคลื่นที่สะท้อนจากวัตถุได้ภาพ 3 มิติ โดยคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านไปได้ ทำให้เราสามารถมองวัตถุผ่านสิ่งบดบัง

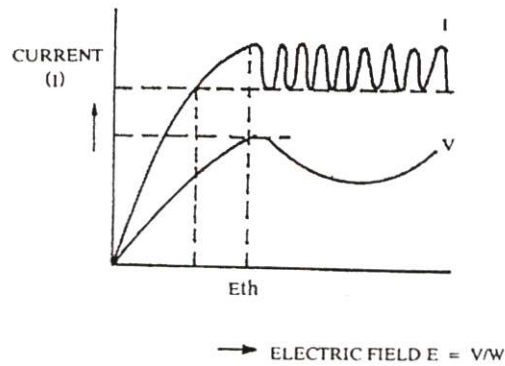


รูปที่ 3.3 ห้องบันทึกภาพไมโครเวฟฮอโลกราฟีระบบดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ขนาด 3x3x3 ลูกบาศก์เมตร [ห้องปฏิบัติการวิจัยไมโครเวฟประยุกต์, ภาควิชาฟิสิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง]

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

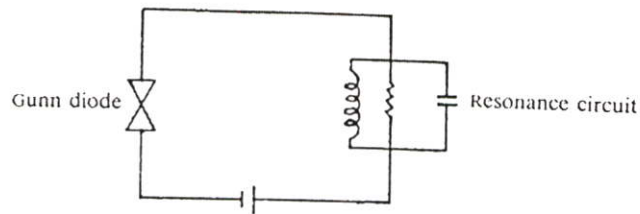
3.2.1 แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์ไดโอด (Gunn Oscillator)

แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์ไดโอด เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่ไมโครเวฟที่ใช้คุณสมบัติของปรากฏการณ์แบบกัมมันต์ลักษณะกราฟระหว่างกระแสและสนามไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.4 ของผลึกแกเลียมอาเซไนด์ (Gallium-Arsenide) ชนิด N ส่วนประกอบของแหล่งกำเนิดประกอบด้วยผลึกที่มีอิเล็กโทรด (Electrode) 2 ขั้วบรรจุอยู่ในกล่องโลหะที่อนำคลื่นขนาดเล็ก เพื่อให้ได้คุณสมบัติการกระจายความร้อน ปรากฏการณ์แบบกัมมันต์ของผลึก GaAs ชนิด N สามารถทำให้เกิดขึ้นได้โดยการจ่ายไฟฟ้าตรงคร่อมผลึก เมื่อแรงดันน้อยกระแสไหลเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ผลึก แต่เมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงระดับหนึ่งเรียกว่าค่าแรงดันขีดจำกัด V_{th} (Threshold Voltage) จะเกิดเสถียรภาพทางไฟฟ้า ในผลึกกระแสจะไหลเป็นห่วงเป็นความถี่ผันผวนกับระยะ W ระหว่างขั้วไฟฟ้า จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าต่อกระแสดังแสดงในรูปที่ 3.4

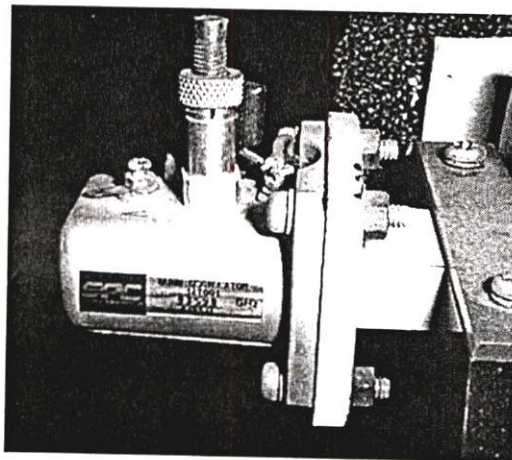


รูปที่ 3.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและกระแสในปรากฏการณ์แบบกัมน์

กัมน์ไดโอดทำงานร่วมกับวงจรการกำทอน (resonance circuit) ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในกล่องเดียวกันเพื่อนำ พลังงานไมโครเวฟที่เกิดขึ้นภายในส่งออกไปยังท่อนำคลื่น วงจรสมมูล (Equivalent circuit) ดังรูปที่ 3.5 ความถี่ในตัวกำเนิดขึ้นอยู่กับการกำทอนเป็นหลัก



รูปที่ 3.5 แสดงวงจรสมมูลของกัมน์ไดโอดออสซิลเลเตอร์



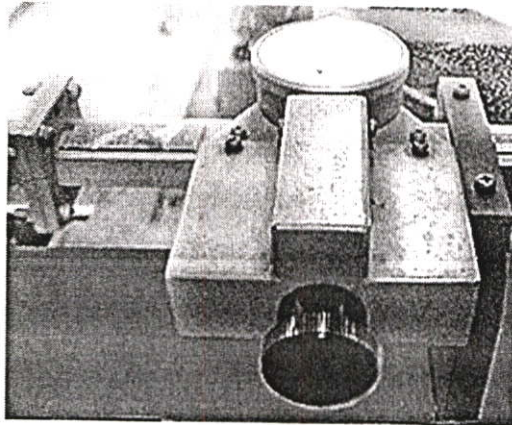
รูปที่ 3.6 แสดงรูปของกัมน์ไดโอด

3.2.2 ตัวลดทอนสัญญาณ (Attenuator)

ตัวลดทอนสัญญาณคลื่นไมโครเวฟที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดคลื่นเช่นแก๊นนี่ไดโอด ใช้เป็นอุปกรณ์ลดทอนกำลังคลื่นของสัญญาณที่ผ่านตัวลดทอนให้มีค่าที่เหมาะสม สำหรับงานวิจัยใช้แบบปรับค่าได้ต่อเนื่อง ค่าการลดทอนมีหน่วยเป็น dB หาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$A = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (3.1)$$

โดยที่ A คือค่าการลดทอนเมื่อผ่านตัวลดทอน
 P_{in} คือกำลังด้านอินพุทของตัวลดทอน
 P_{out} คือกำลังด้านเอาต์พุทของตัวลดทอน



รูปที่ 3.7 แสดงอุปกรณ์ตัวลดทอนสัญญาณคลื่นไมโครเวฟแบบปรับค่าได้

3.2.3 ไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์ (Directional Coupler)

ไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ทำการดึงเอากำลังงานส่วนหนึ่งจากกำลังงานที่ผ่านท่อนำคลื่นหลักออกมา ซึ่งให้เลือกใช้งานตามค่าการลดทอนแบบต่างๆ ตัวคัปเปิลเลอร์ช่วยให้สามารถทำการวัดคลื่นสัญญาณที่มีกำลังสูง ด้วยมิเตอร์วัดกำลังต่ำได้ลักษณะของไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์ที่ใช้กัน ประกอบด้วยท่อนำคลื่น 2 ท่อน ประกบติดกันปลายท่อนหนึ่งโค้งออกไปทำมุมฉากกับท่อนตรง ไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์จะดึงเอากำลังงานที่ส่งผ่านในท่อนตรงออกมา ส่วนหนึ่งออกทางแขนเสริม (Auxiliary Arm) หรือท่อนส่วนโค้ง โดยที่ระหว่างท่อนนำคลื่น 2 ท่อนที่ประกบติดกันนี้จะมีช่องเล็กๆ ให้สัญญาณผ่านออกมาได้ซึ่งช่องหรือรูเล็ก ๆ นี้จะอยู่ห่างกันเท่ากับ $\frac{\lambda}{4}$ ขนาดและจำนวนของรูเล็กเหล่านี้เป็นตัวกำหนดปริมาณของกำลังงานที่สามารถผ่านออกมาที่แขนเสริมที่ปลายโค้งของแขนเสริมจะต่อด้วยเครื่องมือวัดสัญญาณ ส่วนปลายที่เหลือด้านซ้ายมือ

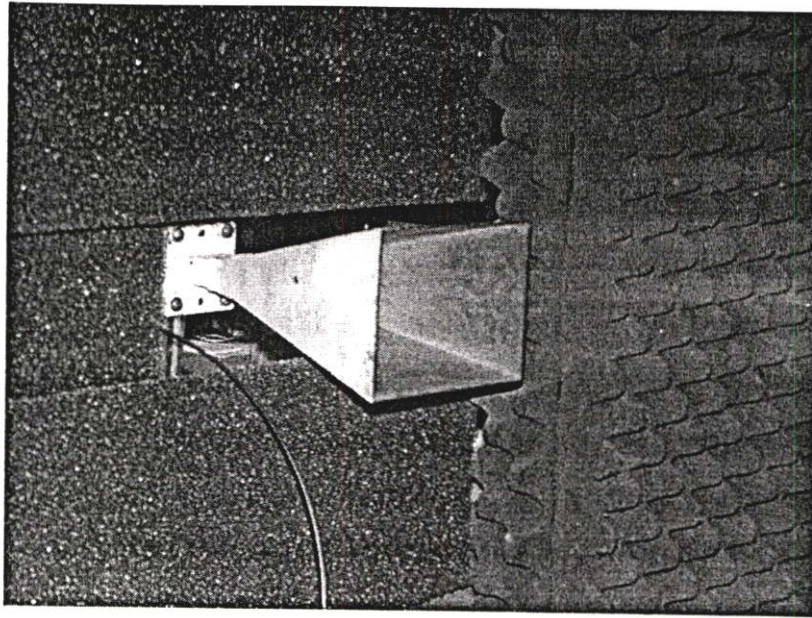
ภายใน จะต่อไว้ด้วยโหลด เพื่อดูดกลืนคลื่นที่ผ่านมาไม่ให้เกิดการสะท้อนกลับ อัตราส่วนกำลังงานที่เข้าในคัปเปิลเลอร์เทียบกับกำลังงานออกที่แขนเสริมเรียกว่า คัปปลิงแพคเตอร์ กำลังงานอินพุทใช้สัญลักษณ์ P_{in} และกำลังงานเอาต์พุทที่แขนเสริมใช้สัญลักษณ์ P_{aux} คัปปลิงแพคเตอร์หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$C = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{aux}} \quad (3.2)$$

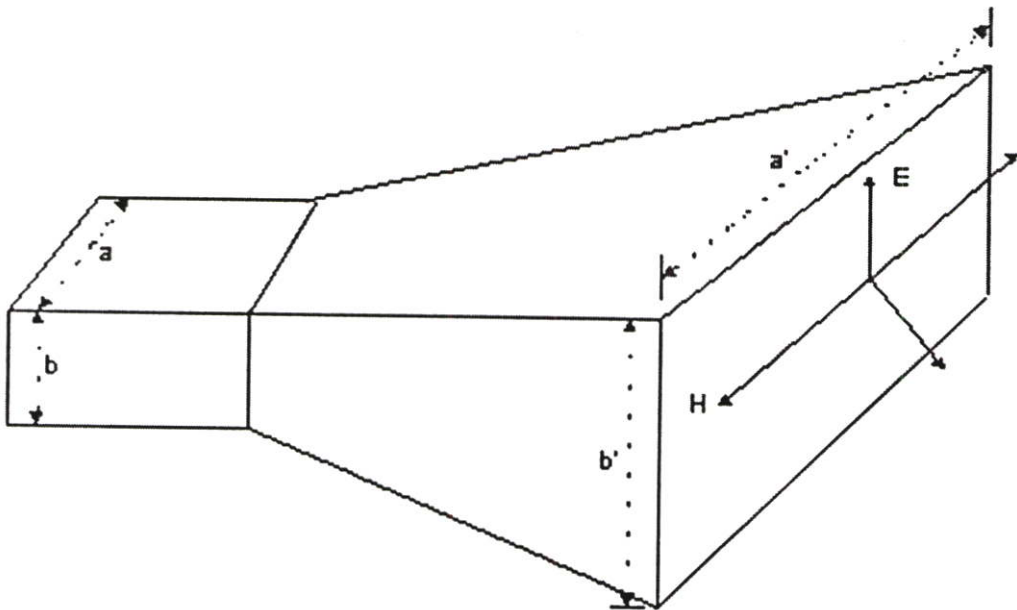
โดยที่ C (dB) = คัปปลิงแพคเตอร์
 P_{in} = กำลังอินพุทเข้าสู่คัปเปิลเลอร์
 P_{aux} = กำลังเอาต์พุทที่แขนเสริม

3.2.4 สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด (Pyramidal Horn Antenna)

ในการส่งคลื่นจากที่ว่างเข้าไปในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม(rectangular waveguide) โหมดในการแพร่กระจายคลื่น ของท่อนำคลื่นที่ได้รับจะเหมือนโหมดการกระจายของคลื่นในที่ว่าง แต่เนื่องจากเกิดความไม่สม่ำเสมอหรือจะเรียกว่าความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity) ของสายนำสัญญาณท่อนำคลื่นที่จุดอินพุท ดังนั้นในการแพร่กระจายคลื่นผ่านช่วงรอยต่อนี้จะเกิดคลื่นในโหมดที่ลำดับสูงขึ้น โดยที่คลื่นโหมดนี้จะไม่แพร่กระจายต่อไปเมื่อผ่านพ้นช่วงรอยต่อจะถูกลดทอนจนหมด ส่วนการส่งผ่านพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านจากท่อนำคลื่นออกสู่ที่ว่างการส่งผ่านพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพสูงสุด (Excellent Efficiency) ก็ต่อเมื่อไม่มีการ mismatch) เกิดขึ้นที่ท่อนำคลื่นซึ่งทำให้เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณผลที่ตามมาจะเกิดความสูญเสียทางกำลังงาน และมีการก่อดัวของคลื่นนิ่งขึ้นในท่อนำคลื่นด้วย สำหรับบริเวณ



(ก).



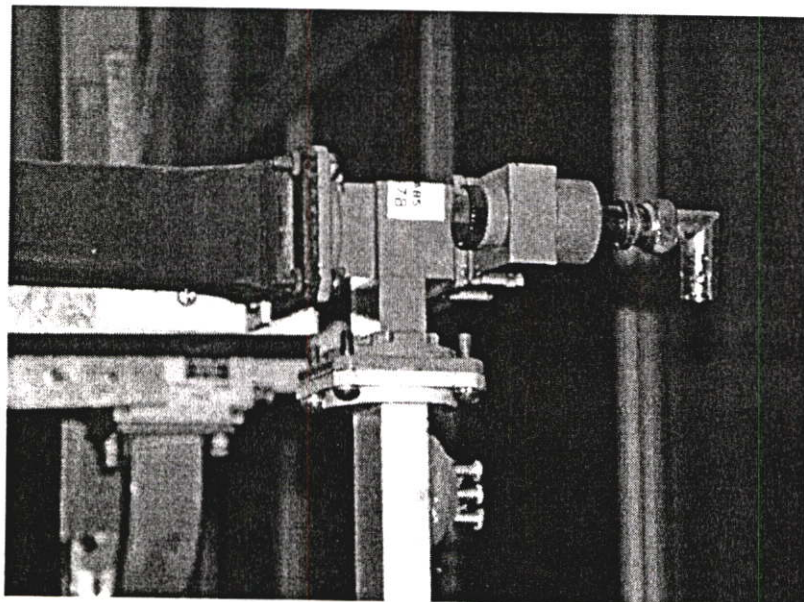
(ข).

รูปที่ 3.8 แสดง (ก). รูปถ่ายสายอากาศฮอร์นทรงพีระมิดที่ใช้ในการทดลอง และ (ข). โครงสร้างสายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด

ช่วงรอยต่อของท่อนำคลื่นกับที่ว่างสามารถทำให้เกิดการแมทชิงขึ้นได้ ด้วยการปรับท่อนำคลื่นช่วงปลายนี้ให้มีลักษณะเหมือนฮอร์นทรงพีระมิด ดังรูปที่ 3.8 (ข). ท่อนำคลื่นจะถูกทำให้พอดี (matching) เข้ากับที่ว่างโดยผ่านช่วงปากแตรและในช่วงทรานซิชัน (Transition Region) นี้จะเกิดคลื่นในโหมดที่สูงกว่าด้วยเพื่อให้การแพร่กระจายคลื่นสามารถเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตรอยต่อ (Boundary Condition)

3.2.5 ตัวตรวจวัดสัญญาณ (Detector)

การวัดกำลังงานในย่านความถี่ไมโครเวฟกำลังต่ำนั้น วิธีหนึ่งคือการแปลงสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้เป็นค่ากระแสตรง กรรมวิธีในการเปลี่ยนแปลงนี้เราเรียกว่า การตรวจจับ (Detection) หรือบางครั้งต้องการเปลี่ยนความถี่ของคลื่นสัญญาณหนึ่งให้เป็นคลื่นสัญญาณหลายความถี่ต่างๆ กัน หรือเป็นชุดอนุกรมของความถี่ สิ่งประดิษฐ์ที่ทำหน้าที่นี้เราเรียกว่า ตัวผสมสัญญาณ (Mixer) ไมโครเวฟตัวผสมสัญญาณมีข้อแตกต่างจากตัวตรวจวัดสัญญาณไมโครเวฟ (Microwave Detector) ตรงนี้จะมีอินพุทของคลื่นสัญญาณสองอินพุท ดังรูปที่ 3.9 ทางเข้าของสัญญาณจะอยู่ด้านซ้ายและล่างของรูป ชุดตรวจวัดสัญญาณออกมาอยู่ด้านขวา ในขณะที่ตัวตรวจวัดสัญญาณไมโครเวฟจะมีอินพุทเพียงหนึ่งอินพุท ในการใช้งานตัวตรวจวัดสัญญาณและตัวผสมสัญญาณไดโอดจะติดบนฐานหรือที่เรียกว่าตัวตรวจวัดสัญญาณและตัวผสมสัญญาณเม้าท์ เพื่อลดการสะท้อนกลับอันเนื่องจากการมิสมแมทชิง ให้เหลือน้อยที่สุดการตรวจจับคือการกรองคลื่นสัญญาณวิทยุ (Radio Frequency Signal) ให้เป็นสัญญาณตรง ซึ่งเป็นสัดส่วนกับกำลังของสัญญาณ โดยใช้ไดโอดเฉพาะซึ่งทำงานตลอดย่านความถี่ไมโครเวฟในการรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้น คลื่นไมโครเวฟจะถูกแปลงสัญญาณ (Rectified) ด้วยไมโครเวฟไดโอด และกรองความถี่สูงออกโดยใช้ตัวคาปาซิเตอร์ (Capacitor) เพื่อให้ได้กระแสตรงในระบบงานวิจัยนี้ใช้ไมโครเวฟตัวผสมสัญญาณ

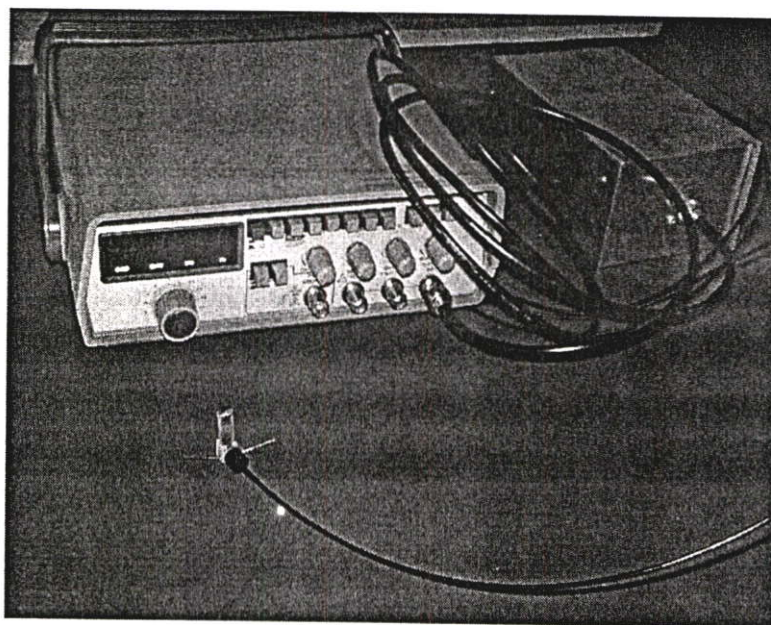


รูปที่ 3.9 แสดงอุปกรณ์ไมโครเวฟตัวผสมสัญญาณ [Lectronic Research Labs, Model 1-800/358-8378]

ไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) คือการทำงานไม่เป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการตรวจวัดสัญญาณการแปลงความถี่ และการผลิตความถี่ฮาร์โมนิค ไดโอดที่ใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟจะมีค่าการเก็บประจุ ค่าการเหนี่ยวนำ และค่าฟิสิกเกอร์บกรวน (Noise Figure) ต่ำสามารถทำงานได้ดีถึงย่านความถี่ 100 กิกะเฮิรตซ์ ไมโครเวฟไดโอดที่ใช้กันทั่วไปคือ ซีอ็อกกั๊บบารีเยอร์ไดโอด (Schottky Barrier Diode)

3.2.6 ชุดมอดูเลตความถี่และตัวกระจายคลื่น (Frequency Modulation Unit Scatterer)

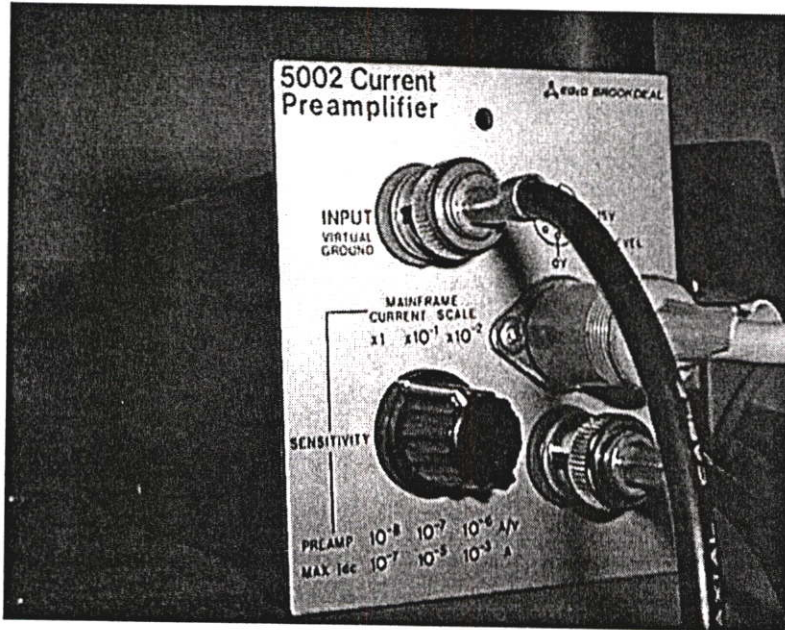
ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงโดยใช้ไดโอดเปล่งแสง MFOE71 ของบริษัท โมโตโลรา มอดูเลตด้วยความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ส่งแสงที่มอดูเลตแล้วผ่านเส้นใยนำแสงพลาสติกไปยังโฟโตไดโอด MRD721 ของบริษัท โมโตโลรา ดังรูป 3.10 โดยทำหน้าที่เป็นไดโพลกระจายคลื่นจากคลื่นวัตถุดกกระทบกลับไปที่ย่อส่งเกิดคลื่น



รูปที่ 3.10 โฟโตไดโอดและสายใยแก้วนำแสงพร้อมชุดกำเนิดสัญญาณสำหรับการมอดูเลตความถี่ของสัญญาณคลื่นวัตถุ

3.2.7 อุปกรณ์ขยายสัญญาณขั้นต้น (Preamplifier)

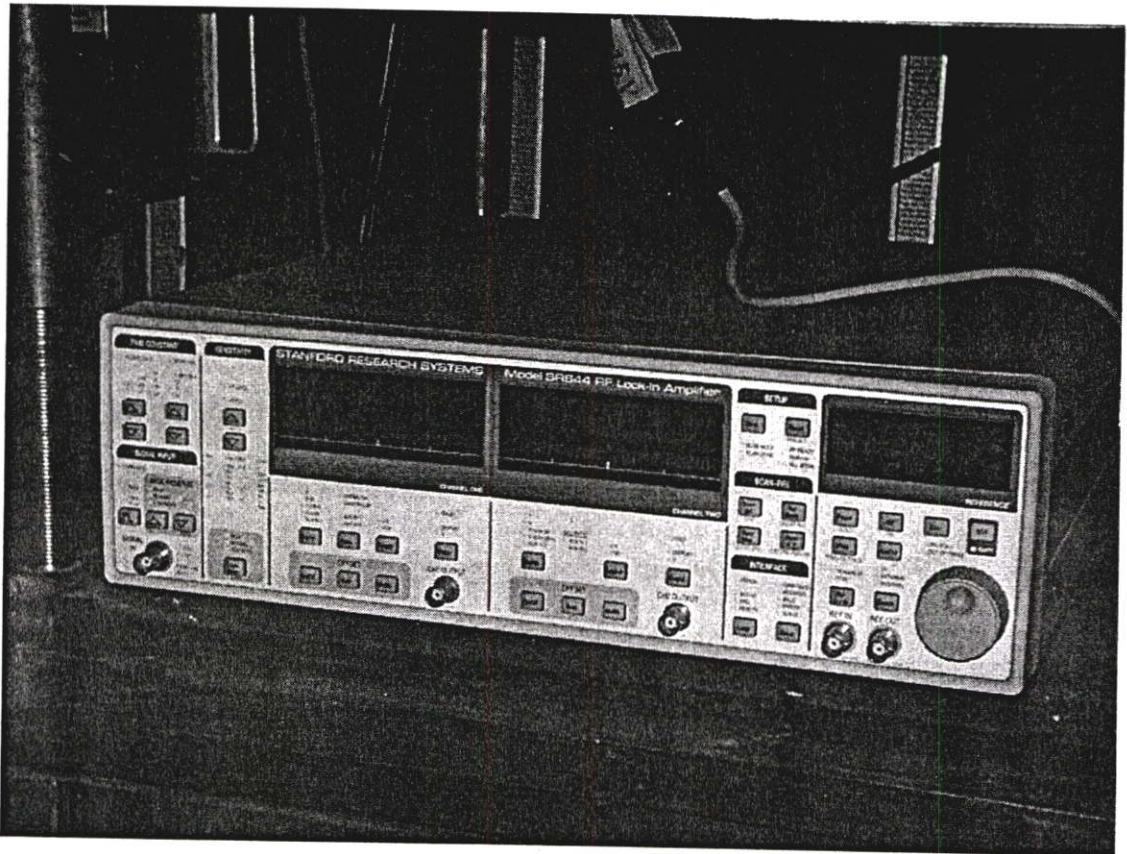
ทำหน้าที่ขยายสัญญาณกระแสที่เกิดจากตัวตรวจวัดภายในระบบ เป็นการขยายกระแสขั้นต้นจากตัวตรวจวัดสัญญาณที่ส่งกลับจากการสะท้อนวัตถุผ่านระนาบไดโพลเพื่อนำไปขยายในภาคขยายแบบล็อกอินต่อไป



รูปที่ 3.11 แสดงเครื่องขยายสัญญาณกระแสขั้นต้น [บริษัท EG&G BROOKDEAL Model 5002]

3.2.8 เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน (RF Lock-In Amplifier)

เป็นอุปกรณ์สำหรับการเพิ่มขนาดของสัญญาณเทียบกับสัญญาณรบกวน เลือกขยายสัญญาณเฉพาะที่แปรตามความถี่ที่มอดูเลต โดยสามารถทำหน้าที่ขยายสัญญาณความแรงต่ำมากๆ เพื่อนำไปบันทึกเป็นวีวฮอโลแกรมที่เกิดตรงบริเวณระนาบตัวไดโพลกระเจิงคลื่น

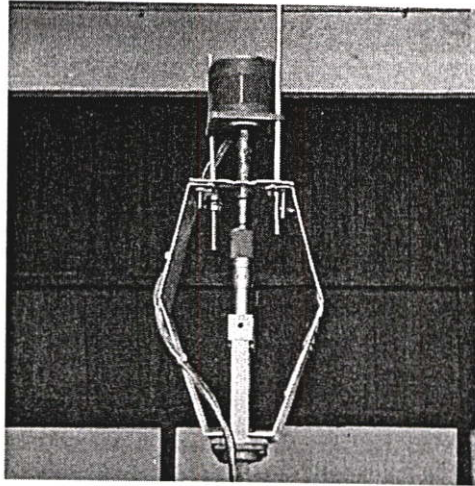


รูปที่ 3.12 แสดงเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน [บริษัท STANFORD RESEARCH SYSTEMS Model SR844]

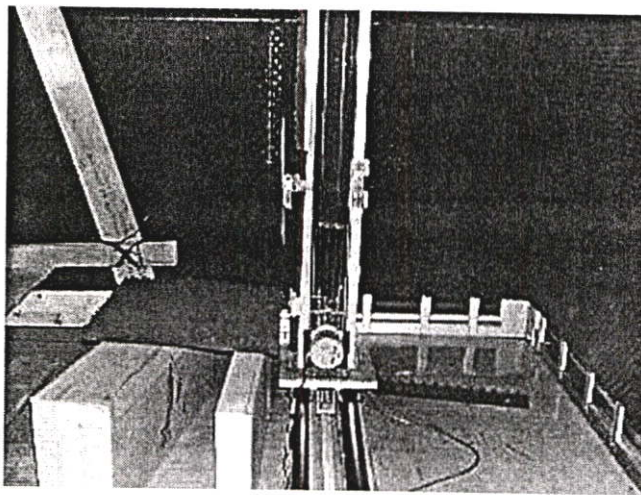
3.2.9 การ์ดแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (A/D card)
ทำหน้าที่แปลงแรงดันที่เอาต์พุทของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน เป็นสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 12 บิต เพื่อนำไปบันทึกในคอมพิวเตอร์ต่อไป

3.2.10 ชุดเลื่อนตำแหน่งวัตถุและตัวปรับเฟสคลื่นอ้างอิง (Scanner and Reference Wave Phase - Shifter)

ใช้สเตปปีงมอเตอร์เป็นตัวเลื่อนซึ่งควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ ผ่านอุปกรณ์ติดต่อภายนอก เพื่อเลื่อนตำแหน่งของวัตถุอัตโนมัติ(เฉพาะแนวนอน) ในขณะที่ทำการตรวจวัดสัญญาณและปรับเฟสของคลื่นอ้างอิงให้สอดคล้องกับตำแหน่งของวัตถุ



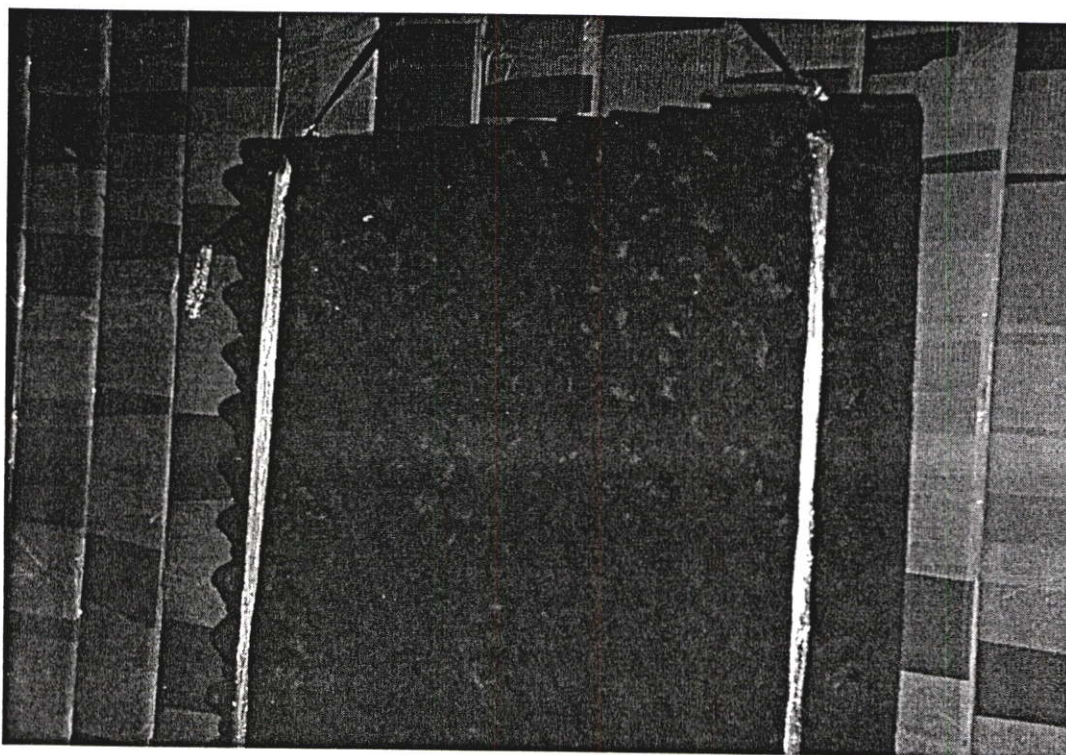
รูปที่ 3.13 แสดงชุดปรับเฟสคลื่นอ้างอิง



รูปที่ 3.14 แสดงชุดเลื่อนตำแหน่งวัตถุ

3.2.11 แผงดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Absorber Panel)

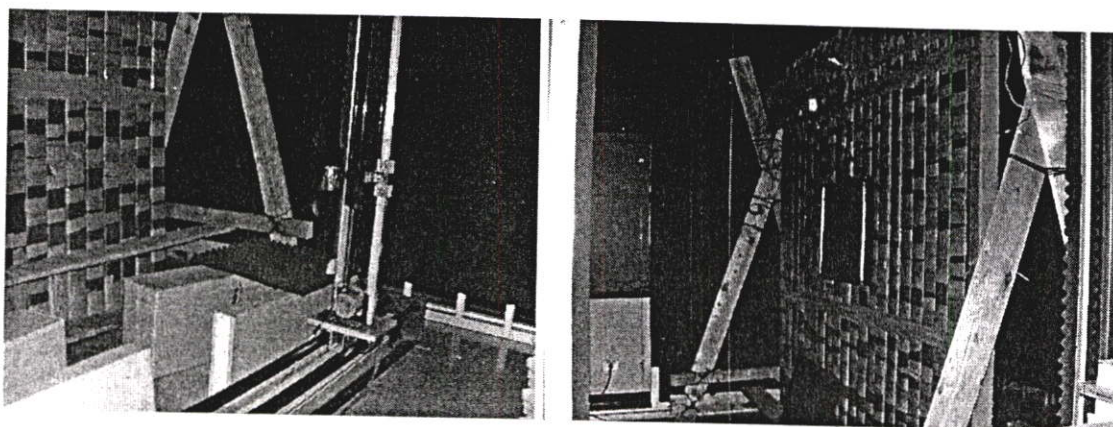
ทำหน้าที่เป็นแผงดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟเมื่อมีการทะลุผ่านไม่ให้สะท้อนกลับ สำหรับในงานที่ใช้มีค่าลดทอนการสะท้อน 12 เดซิเบลที่ความถี่ในย่าน 9 กิกะเฮิรตซ์ ทำการทดสอบคุณสมบัติการส่งคลื่นทะลุผ่านโดยวัดค่ากำลังที่ผ่านวัสดุดูดกลืนคลื่น วิเคราะห์ความแตกต่างกำลังเข้าและออกจากแผงดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ



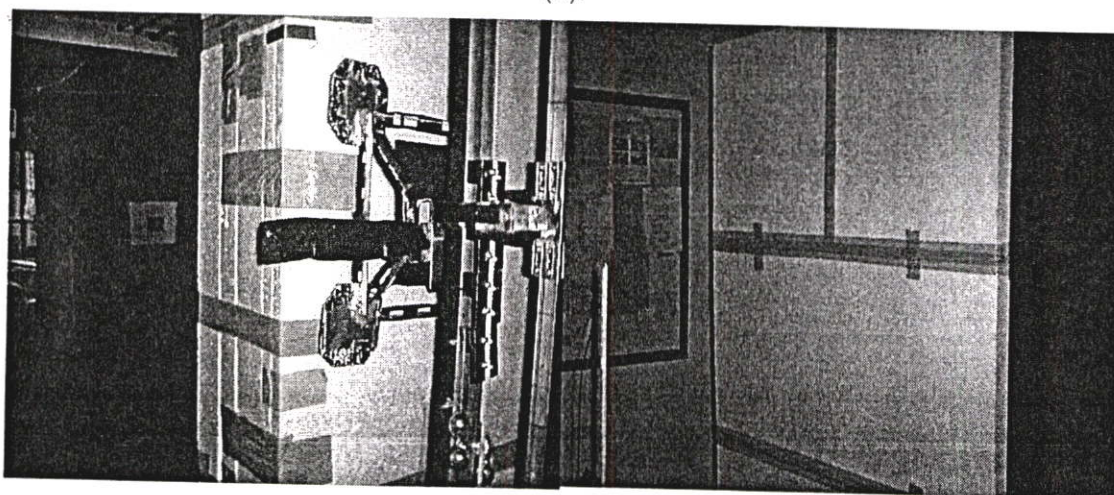
รูปที่ 3.15 แสดงแผงดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟ

3.2.12 กำแพงทรายและแผ่นพลาสติกที่ทำการบดบังวัตถุ

แสดงแผงกั้นวัตถุกับช่องสังเกตคลื่น เป็นกำแพงทรายหนา 10 ซม. และกำแพงโฟม ความหนาสามารถปรับระดับได้ตั้งแต่ 5 ซม. ถึง 30 ซม. วัตถุประสงค์ของการมองภาพภายใต้สิ่งบดบังวัตถุ



(ก).



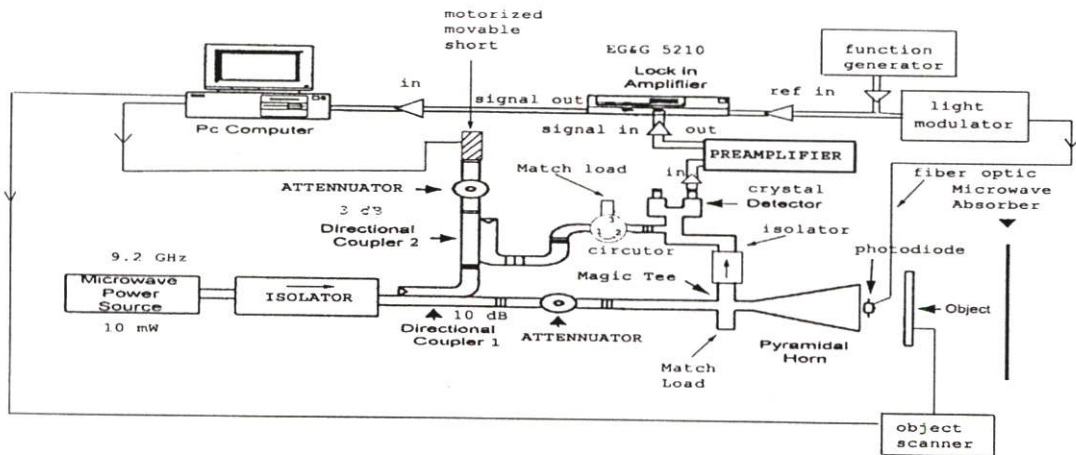
(ข).

รูปที่ 3.16 (ก). กำแพงทรงแทงหน้า 10 ซม. สูง 2 เมตร (ข). กำแพงโพน ความหนาสามารถปรับระดับได้ตั้งแต่ 5 ซม. ถึง 30 ซม. สูง 2 เมตร กว้าง 3 เมตร

3.3 โครงสร้างและการทำงานของไมโครเวฟฮอโลกราฟี

ระบบการมองภาพไมโครเวฟฮอโลกราฟี ใช้วิธีกระเจิงคลื่นจากวัตถุที่อยู่กับที่ แพร่คลื่นที่เป็นคลื่นอาพันธ์กลับมาที่ตัวส่ง มีการส่งคลื่นอ้างอิงเพื่อให้มีการแทรกสอดกับคลื่นวัตถุ และสร้างรูปแบบสนามคลื่นสามารถวัดโดยตัวตรวจจับความเข้ม แบบที่มีการปรับปรุงให้ดีขึ้นกว่าเดิม คือใช้ตัวรับสัญญาณที่ ล็อคเฟสอาพันธ์ด้วยออสซิลเลเตอร์ และทำการสังเคราะห์คลื่นอ้างอิงภายในระบบ โดยขนาดจริงของภาพ, ความเข้มของสัญญาณที่ต่ำ และการลดการรบกวนของสัญญาณได้ โดยการให้เทคนิคมอดูเลตการกระเจิง โดยใช้แสงมอดูเลตด้วยการตรวจสอบซิงโครนิสของสัญญาณกระเจิงมอดูเลต ดังรูปที่ 3.17 สนามแพร่คลื่นจากสายอากาศฮอร์น และคลื่นอ้างอิงแบบไม่ใช้แนวแกนเดียวกับคลื่นอ้างอิงโดยการโปรแกรม สามารถเคลื่อนมุมได้โดยใช้ตัวปรับเฟสคลื่นอ้างอิง แหล่งกำเนิดกันไดโอด 10 mW 9.2 กิกะเฮิร์ตซ์ คลื่นวัตถุจะกระตุ้นที่ MRD721 ไฟโตไดโอด ยาว 2 เซนติเมตร ถูกมอดูเลตทางแสงที่ 50-200 กิโลเฮิร์ตซ์ ผ่านสายไฟเบอร์ออปติก เพื่อผลการกระเจิงคลื่นมอดูเลต คลื่นเดินทางกลับมาที่สายอากาศฮอร์นรวมตัวกับคลื่นอ้างอิง และจะขยายสัญญาณโดย

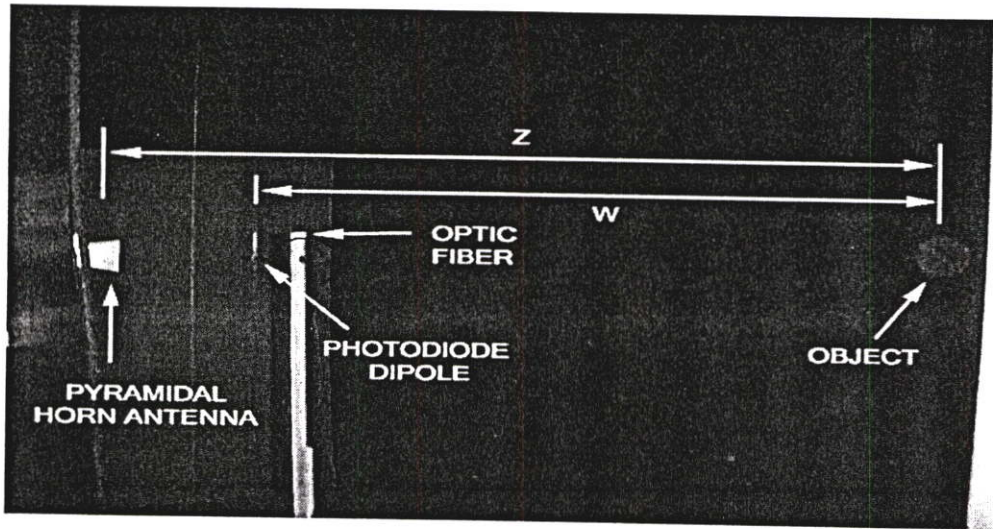
low-noise preamplifier โดยใช้ lock-in amplifier เพื่อผลิตสัญญาณความถี่วิทยุรอยสลอแกรม วัตถุจะถูกสแกน 1/3 ของความยาวคลื่น ในทิศทาง x และ y การประมาณการเลี้ยวเบนเฟรสเนล ถูกใช้ในการสร้างภาพกลับมาของดิจิทัล จากการเก็บข้อมูลสลอแกรมเพื่อได้ภาพ 2 มิติของวัตถุ



รูปที่ 3.17 โครงสร้างของระบบไมโครเวฟสลอแกรม

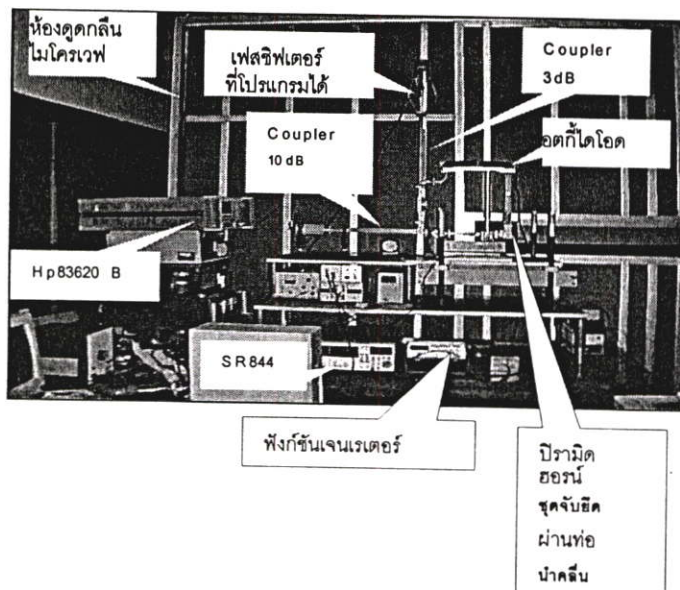
เมื่อคลื่นไมโครเวฟจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ 9.2 กิกะเฮิรตซ์ ส่งผ่านท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ผ่านไอโซเลเตอร์ (Isolator) เป็นชุดแยกสัญญาณคลื่นออกเป็นสองส่วนในอัตราส่วนคงที่ และมีไว้เพื่อกันคลื่นย้อนกลับไปรบกวนแหล่งกำเนิดคลื่น และผ่านต่อไปยังไดเรกชันเนลคัปเปอร์ตัวที่หนึ่ง คลื่นจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 10 คลื่นที่มีขนาด 1/10 เท่า จะตรงไปยังไดเรกชันเนลคัปเปอร์ตัวที่สองเพื่อทำเป็นสัญญาณอ้างอิง ส่วนคลื่นที่มีขนาด 9/10 จะผ่านตัวลดทอนสัญญาณผ่านแมจิกที และกระจายออกไปตรวจวัดวัตถุโดยเสาอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด คลื่นที่สะท้อนกลับจากวัตถุกลับมาถึงเสาอากาศ เราจะวัดเฉพาะสัญญาณคลื่นที่ถูกรบกวนโดยตัวกระเจิงคลื่นไดโพล แบบไฟโตไดโอดซึ่งถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นตัวแทนของสัญญาณของวัตถุที่ระนาบไดโพล คลื่นที่ถูกรบกวนซึ่งมีองค์ประกอบความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ จะเคลื่อนที่เข้าสู่เสาอากาศและไปแทรกสอดกับคลื่นอ้างอิง ต่อจากนั้นคลื่นที่เป็นผลลัพธ์ จะแปลงเป็นสัญญาณที่ความถี่ต่ำด้วยตัวผสมสัญญาณ และผ่านภาคขยายขั้นต้นเพื่อขยายกระแส ต่อไปยังภาคขยายสัญญาณแบบล็อก-อินเพื่อเลือกขยายสัญญาณที่ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ต่อจากนั้นแรงดันเอาท์พุทซึ่งเป็นแรงดันแบบอนาล็อกจะถูกส่งไปแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 12 บิต และบันทึกโดยคอมพิวเตอร์ซึ่งควบคุมจังหวะการเก็บข้อมูลให้สอดคล้องกับตำแหน่งการเลี้ยวเบนของวัตถุโดยการสแกน และตัวปรับเลี้ยวเบนเฟสของคลื่น

อ้างอิง ซึ่งต่างก็ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ในการทดลองเรามีการจัดตำแหน่งของฮอร์น ตัวกระจะเจิง และวัตถุตั้งรูปที่ 3.18 โดยชุดของฮอร์นและตัวกระจะเจิงอยู่กับที่ แต่เราจำลองสถานการณ์ การเลื่อนสแกนโดยการเลื่อนวัตถุแทน โดยเงื่อนไขที่เลือกคือ ขยับไปที่ละ 0.54 เซนติเมตร ในแนวนอน(แกน x) 256 จุดจากจุดล่างสุดของแนวตั้ง (แกน y) ขึ้นมาที่ละ 0.54 เซนติเมตรเป็น จำนวนทั้งสิ้น 256 แถว



รูปที่ 3.18 การจัดวางตำแหน่งต่างๆ ระหว่าง ปิรามิดฮอร์น , ไฟโตไดโอด, วัตถุที่สแกน

ลักษณะการจัดวางตำแหน่งการส่งสัญญาณคลื่นไมโครเวฟ จุดที่สะท้อนคลื่น และ ตำแหน่งตรวจจับคลื่นเป็นไปดังรูปที่ 3.18 ไฟโตไดโอดเป็นตัวจับสัญญาณที่มาจากไดโพล โดยคลื่นจะส่งผ่านจากปิรามิดฮอร์น สะท้อนที่วัตถุ และผ่านไดโพลกระจะเจิงคลื่นตรงไฟโตไดโอด ส่งกลับมาที่ปิรามิดฮอร์น ผ่านตัวแยกคลื่นที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดมาที่ซอกที่ไดโอด แล้วขยาย สัญญาณประมวลผล ในรูปที่ 3.19 เป็นการจัดวางเครื่องมือในงานการสร้างภาพฮอโลแกรม โดย แหล่งกำเนิดคลื่นอยู่ด้านซ้ายส่งคลื่นผ่านท่อนำคลื่นแยกขึ้นไปในตัวปรับเฟสอ้างอิง ส่วนหนึ่ง ไปที่ปิรามิดฮอร์นนำคลื่นเข้าสู่ห้องดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟแล้วรับคลื่นกลับมา หลังจากทำการมอดูเลตสัญญาณ ตรวจจับสัญญาณความเข้มโดย SR 844, ขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน [STANFORD RESEARCH SYSTEMS] , ทำการแทรกสอดกับสัญญาณอ้างอิง ประมวลผลโดย คอมพิวเตอร์เพื่อสร้างภาพโดยใช้โปรแกรม MATLAB [THE MATH WORKS,Inc.]



รูปที่ 3.19 แสดงการจัดวางเครื่องมือในตำแหน่งต่างๆ ในระบบไมโครเวฟฮอโลกราฟี

บทที่ 4

การวิจัยและผลการดำเนินการทดลอง

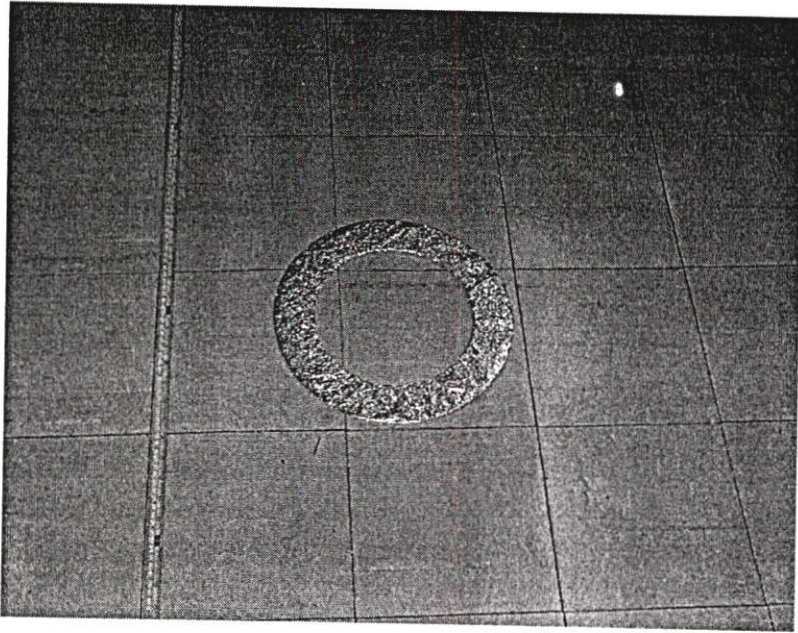
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการมองภาพวัตถุโดยคลื่นสนามไมโครเวฟ การทดลองได้ทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อดูปัจจัยที่ทำให้ได้รูปมีความชัดเจนและขนาดให้ได้เท่ากับวัตถุจริง โดยขั้นตอนการทดลองสแกนภาพวัตถุและผลการทดลองในการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆอธิบายในบทนี้

4.1 รูปภาพวัตถุที่ใช้ในการทดลองสแกนภาพฮอโลแกรม

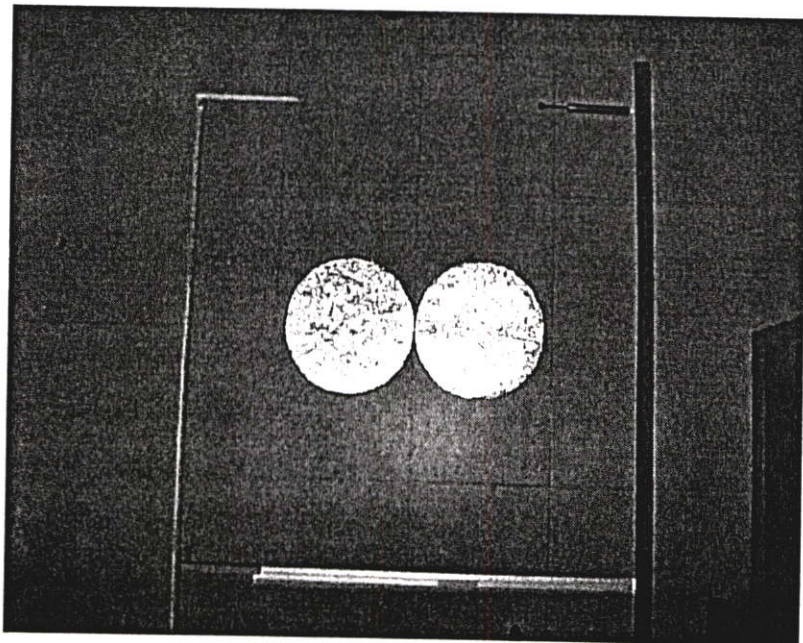
การสแกนภาพวัตถุโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ในการวิจัยนี้ใช้ความถี่ 9.2 กิกะเฮิรตซ์ซึ่งมีความยาวคลื่นขนาด 3 ซม. สามารถตรวจจับวัตถุที่มีขนาดประมาณ 2 ซม. แต่ปัจจัยที่มีผลในการทดลองวิจัยนี้คือการกระเจิงของคลื่นและความแรงของสัญญาณ ทำให้สามารถตรวจจับภาพที่มีขนาดใหญ่ขึ้น การทดลองสามารถทำให้เกิดการวิเคราะห์ภาพลักษณะทางเรขาคณิตในลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม โค้งเว้า มีมุมและขนาดที่แปรเปลี่ยน วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ เช่น การสะท้อนและการดูดกลืนคลื่นของวัสดุ ค่าความแม่นยำถูกต้องของขนาดภาพวัตถุ วัตถุขนาดที่เหมาะสมในการตรวจจับภาพ จำเป็นต้องใช้วัตถุที่มีความแตกต่างกันในแง่ของโครงสร้างทางวัสดุ เช่น อลูมิเนียมฟอยล์, สเตนเลส, ทองเหลือง, ยาง, โฟม, แผ่นไดอิเล็กทริก, ทราาย โดยวิเคราะห์โครงสร้างภาพของวัตถุทางเรขาคณิตในรูปแบบต่างๆ เช่น กากบาท, วงกลม, วงแหวน, แผ่นเหล็กรูปปิ่น เป็นต้น โดยรูปที่ทำการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 – 4.9



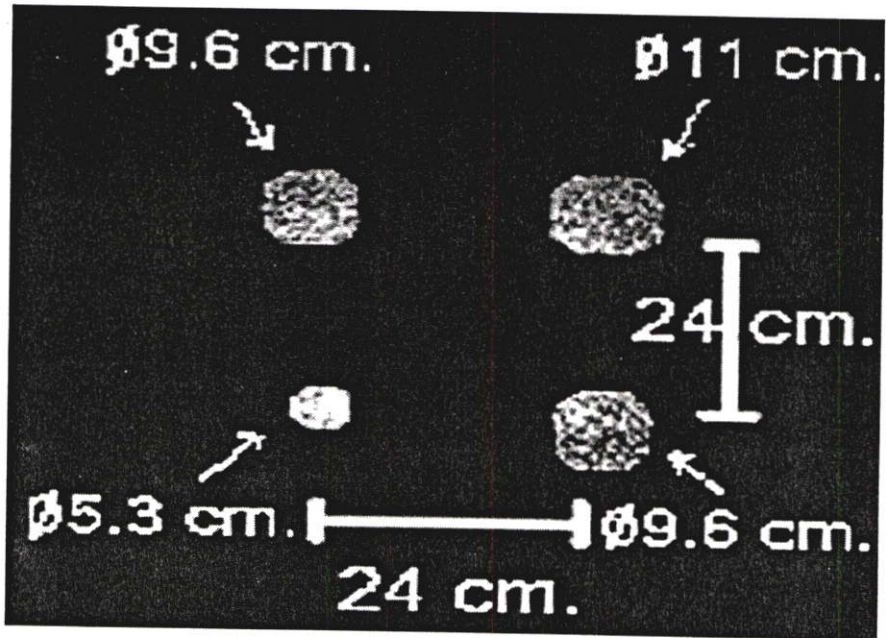
รูปที่ 4.1 แผ่นโลหะทองเหลืองรูวงกลมมีอลูมิเนียมฟอยล์หุ้ม



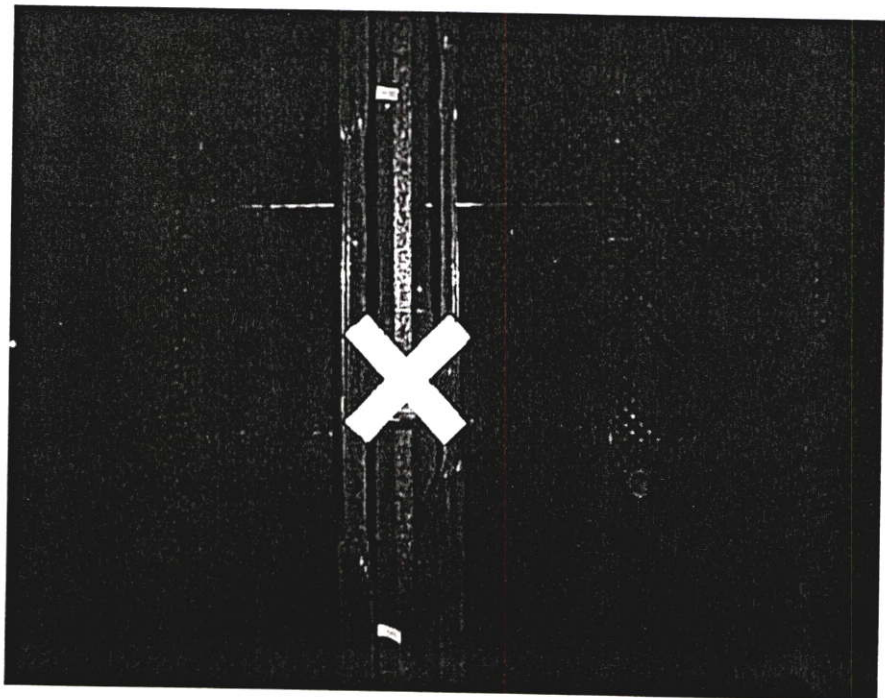
รูปที่ 4.2 แผ่นโลหะทองเหลืองรูปวงแหวนมือลูมิเนียมฟอยล์หุ้ม ขนาดความกว้าง
ของวงแหวน จากวงในถึงวงนอก 5 ซม.



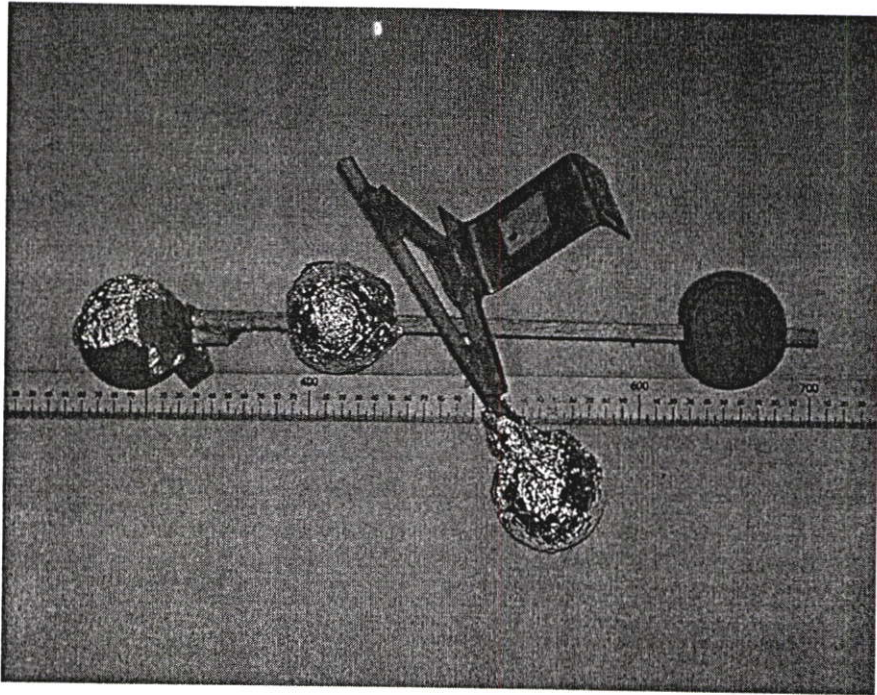
รูปที่ 4.3 แผ่นโลหะทองเหลืองรูปวงกลมสองวงมือลูมิเนียมฟอยล์หุ้ม



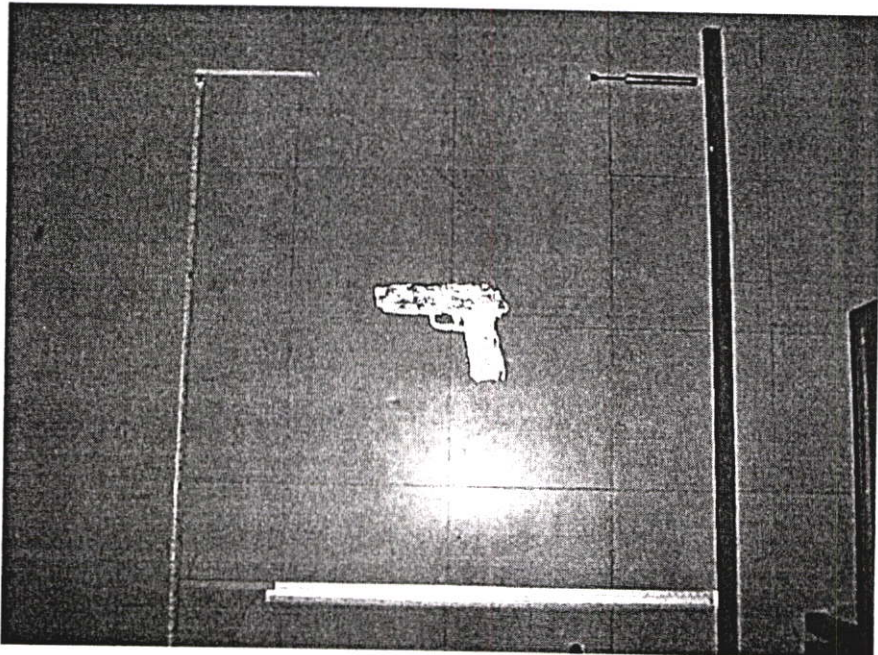
รูปที่ 4.4 แผ่นโลหะรูปวงกลมสี่วงขนาดแตกต่างกันเป็นวัสดุทองเหลืองมีอลูมิเนียมฟอยล์หุ้มและมีแกนเชื่อมวงกลมทั้งสี่ที่หุ้มโดยวัสดุดูดซับคลื่น



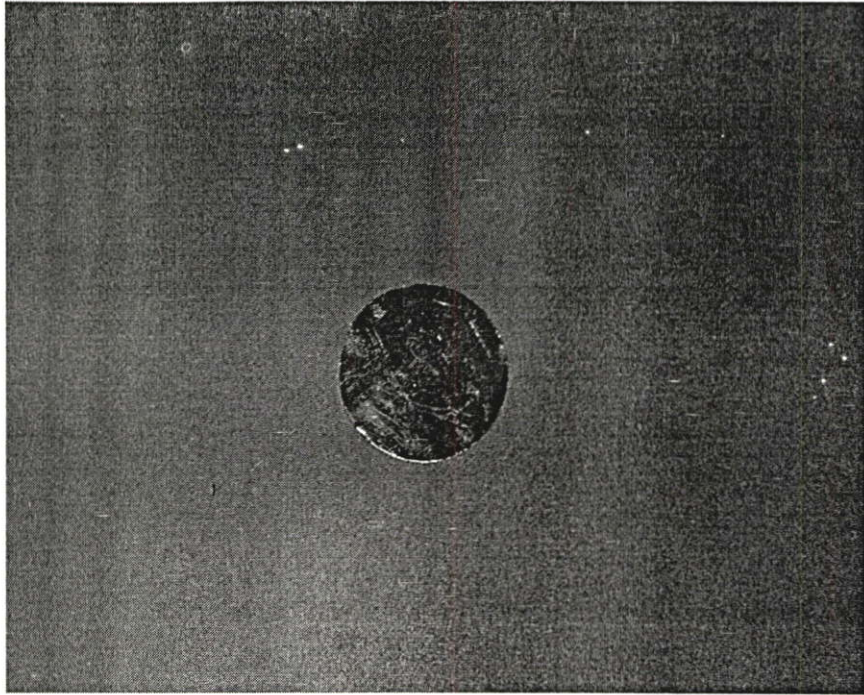
รูปที่ 4.5 แผ่นสแตนเลสรูปกากบาท



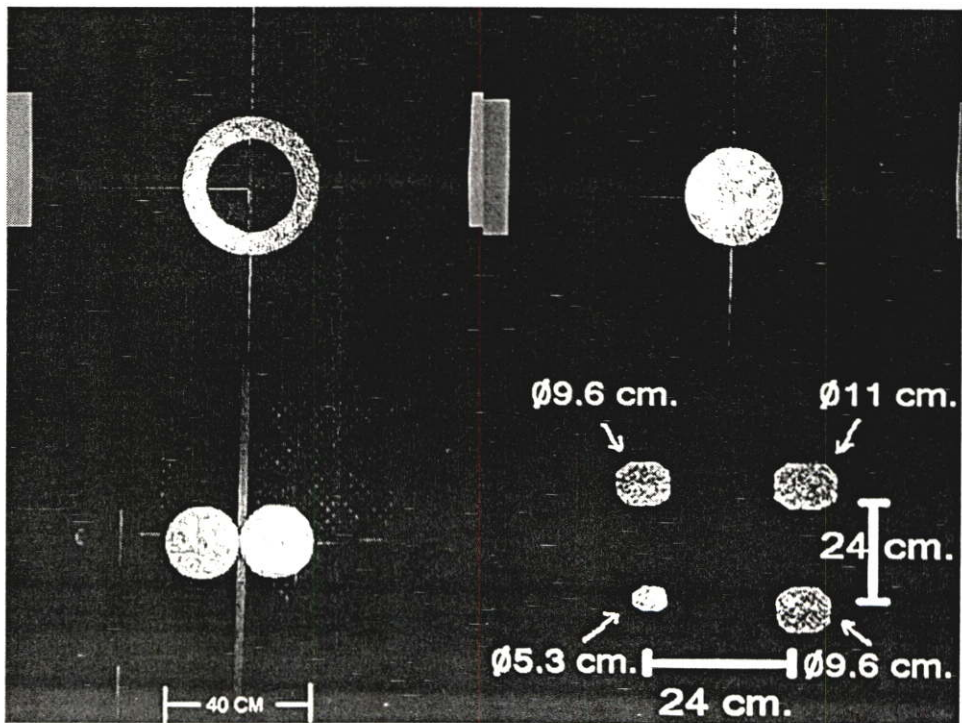
รูปที่ 4.6 ลูกเทนนิสเรียงกันตามแนวยาวสี่ลูกมีและไม่มีลูมิเนียมฟอสฟอรัสหุ้มวางเรียงกันเป็นแถวโดยลูกที่สามจากซ้ายยื่นมาข้างหน้า



รูปที่ 4.7 แผ่นโลหะสแตนเลสรูปปิ่นแบนหุ้มด้วยลูมิเนียมฟอสฟอรัส



รูปที่ 4.8 แผ่นโลหะรูปวงกลมทำด้วยทองเหลือง



รูปที่ 4.9 ภาพวัตถุหลักๆที่ใช้ในการทดลองเปรียบเทียบขนาดวัตถุกับภาพฮอโลแกรม

4.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลองมองภาพฮอโลแกรมผ่านสนามคลื่นไมโครเวฟ

4.2.1 ทำการทดสอบเสาอากาศไดโพลในเชิงกระเจิงคลื่น นำเส้นลวดไดโพลชนิดต่างๆมาทำการทดสอบ เช่น โฟโตไดโอด, โฟโตทรานซิสเตอร์, LDR ส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านขดลวดไดโพล ทำการตัดเส้นลวดที่ปลายของเส้นไดโพลที่ละ 0.5 มม. วัดสนามไฟฟ้าแปรเปลี่ยนกับความต่างศักย์ที่วัดค่าโดย Lock in – Amplifier ได้ค่าความยาวของสายอากาศที่ให้ค่าการกระเจิงคลื่นมากที่สุด

4.2.2 ทำการทดลองวัดค่าการตอบสนอง ต่อความถี่ของไดโพลชนิดต่างๆ หาค่าการตอบสนองความถี่มากที่สุด ที่ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่แปรตามสนามไฟฟ้ากระเจิงที่ไดโพลเพียงพอต่อการตรวจวัดการสะท้อนของคลื่น

4.2.3 นำวัตถุที่ทำการมองภาพมาทำการติดที่ตัวสแกน x และ y ที่มีขนาดการเคลื่อนที่ 2.5x2.5 ตารางเมตร ทำการสแกนวัดค่าความเข้มที่เกิดจากคลื่นสะท้อนกลับ พล็อตกราฟวิเคราะห์ค่าความเข้มเทียบกับภาพวัตถุ

4.2.4 วิเคราะห์ค่าความละเอียดของภาพที่ทำการสแกน ในระยะเฟรลน์เนล หาค่าการเคลื่อนที่ในแต่ละสแต็ปของแกน X และ Y ที่เหมาะสมที่สุดในการตรวจจับภาพ

4.2.5 เปรียบเทียบภาพจากความถี่ของการมอดูเลตจากน้อยไปมาก เพื่อหาค่าความถี่ที่เหมาะสมในการสร้างภาพ

4.2.6 ทำการทดลองปรับค่ามุมอ้างอิงที่เหมาะสม เพื่อหลบเลี่ยงการรบกวนภาพวัตถุ

4.2.7 ทดลองเปลี่ยนวัตถุที่สแกนจากวัตถุขนาดเล็กไปขนาดใหญ่ ทดสอบการตรวจจับภาพวัตถุเล็กที่สุดที่สามารถตรวจจับภาพ วิเคราะห์ค่าความคาดเคลื่อนขนาดของภาพวัตถุเทียบกับวัตถุจริง

4.2.8 ทดสอบคุณสมบัติของคลื่นสะท้อนวัสดุต่างๆ และคุณสมบัติการสะท้อนพื้นผิวที่แตกต่างกัน เปรียบเทียบคุณสมบัติของการสะท้อนคลื่นในวัสดุประเภท ไดอิเล็กทริก, ยาง, โฟม, ทราช, ทองเหลือง, เหล็ก เป็นต้น

4.2.9 วิเคราะห์ภาพที่ได้จากการสแกนในหัวข้อที่ 4.2.8 ทำการทดสอบกับวัสดุบดบังวัตถุที่ไม่โครเวฟสามารถทะลุผ่าน ทดสอบความหนาของวัสดุที่บดบังมีผลอย่างไรกับภาพวัตถุที่ได้

4.2.10 เมื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสม จากหัวข้อที่ผ่านมาทำการสังเคราะห์การหลีกเลี่ยงภาพอันดับศูนย์ ในแบบสเปกตรัมทำมุมย้อนกลับเทียบกับแบบเฟรลน์เนล และสังเคราะห์ภาพโดยการกำจัดภาพอันดับศูนย์แบบเทอม DC

4.2.11 สรุปผลการทดลองและผลการดำเนินงานพร้อมหาเหตุผลประกอบ การวิจัย

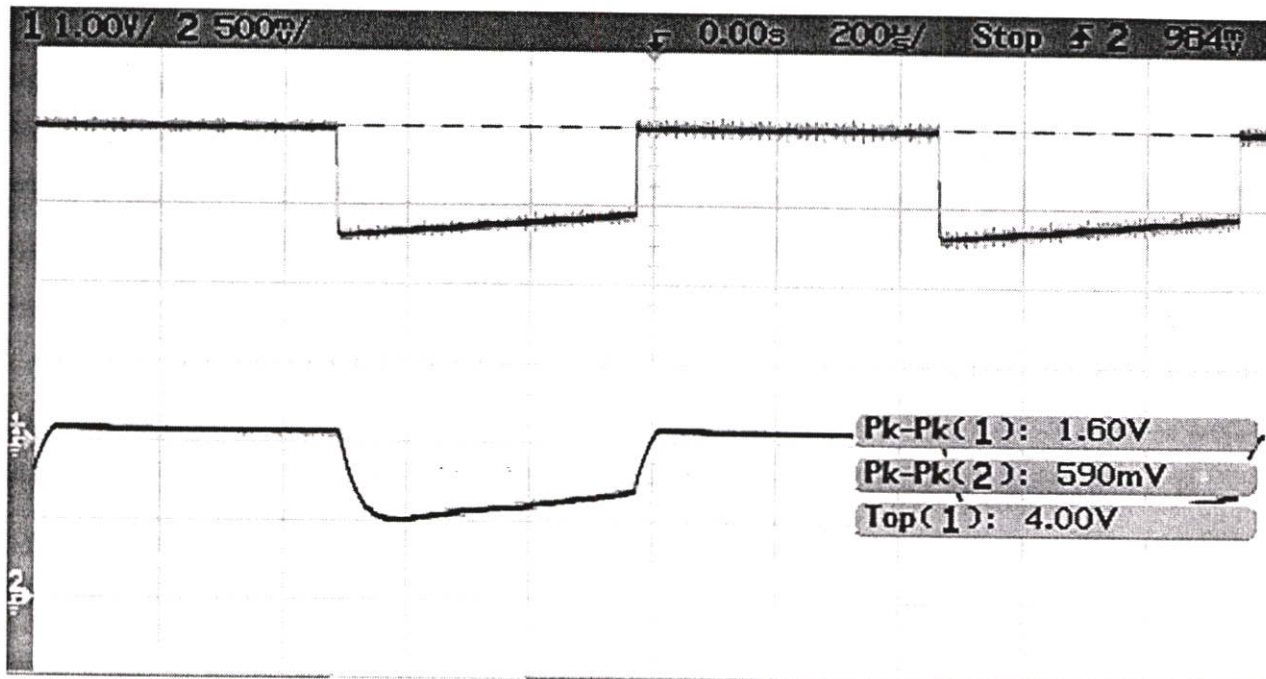
4.3 ผลการทดลองในการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการ มองภาพฮอโลแกรมโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

การทดลองเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ วิธีทดลองและผลการทดลอง ในการสร้างภาพและเปลี่ยนค่าตัวแปรที่มีผลกับการมองภาพวัตถุ ทดสอบการตอบสนองของความยาวของไดโพลที่ความถี่เฉพาะ 50 kHz ตัวแปรต่างๆ ที่ทำการปรับเปลี่ยนมีดังนี้ ความถี่ในการมอดูเลต, ความยาวของไดโพล, การเคลื่อนที่ของวัตถุ, มุมของคลื่นอ้างอิง, ขนาดวัตถุที่ทำการรับภาพ, ระยะของการรับภาพ, การลดสัญญาณรบกวนในวิธีต่างๆ

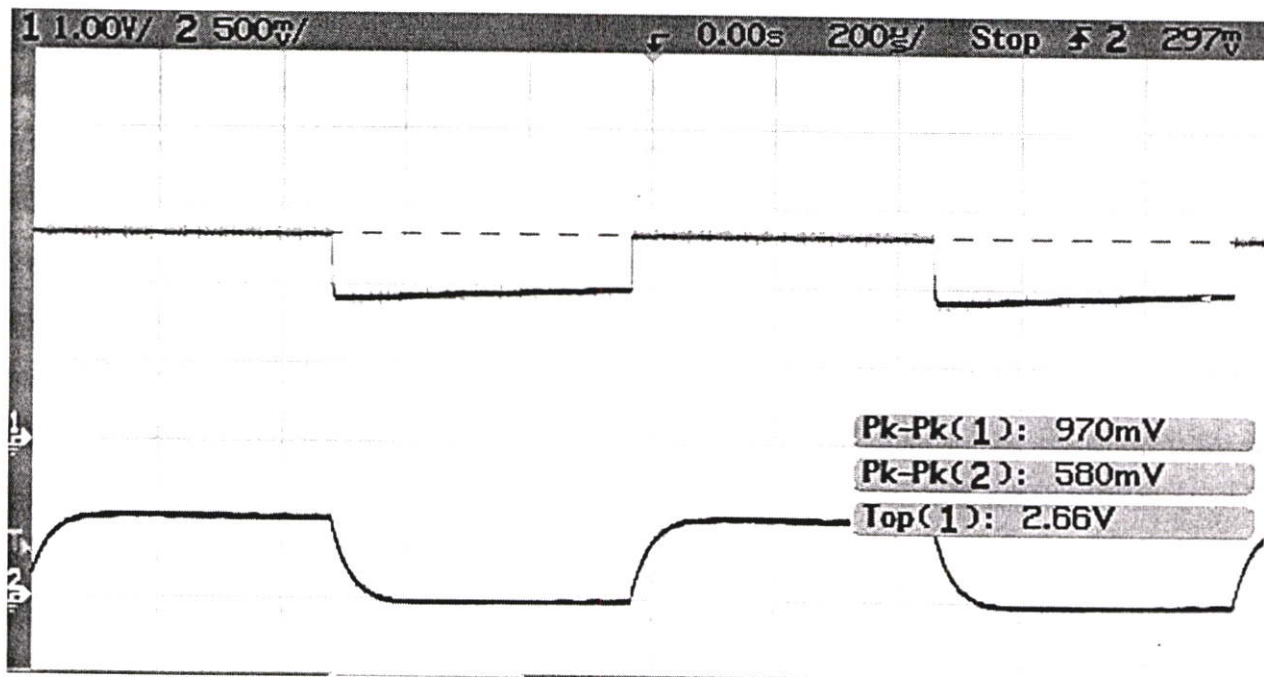
4.3.1 ผลการตอบสนองต่อความถี่เมื่อเปลี่ยนความยาวของไดโพลที่ความถี่ 50 KHz

ผลของการตอบสนองต่อความถี่เมื่อเปลี่ยนความยาวลวดของ โฟโตไดโอด, โฟโตทรานซิสเตอร์, LDR สามารถวิเคราะห์ค่าด้วยวิธีโมเมนต์ (Moment Method) ตัดสินการรับสัญญาณแบบ Radar Cross Section (RCS) การทดลองทำโดยการส่งคลื่นตกกระทบไดโพลและใช้ความถี่ในการมอดูเลตเชิงแสงที่ 50 kHz จับสัญญาณเอทพุทที่ขาของเส้นลวดทั้งสองสามารถเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของสัญญาณเอทพุท ที่ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบเส้นลวด เป็นไปตามสมการของเฮเลน ดังสมการที่ (2.22) และสามารถคำนวณค่า Radar Cross Section (RCS) โดยใช้สมการที่ (2.40) เมื่อแทนค่าแฟกเตอร์ต่างๆในสมการเฮเลน จะได้ลักษณะกราฟเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังกราฟรูปที่ 4.11 พบว่าความยาวของขาคูปรกรณ์เพื่อให้เป็นไดโพล มีการกระเจิงได้ดีที่สุดที่ความยาวประมาณ 0.45 เท่าของความยาวคลื่นที่ความถี่การมอดูเลตต่ำๆ อุปกรณ์ที่มีการตอบสนองต่อ Rise time ที่ดีจะมีการกระเจิงคลื่นได้ดีกว่าสำหรับการมอดูเลตที่ความถี่สูง ทำการทดลองแต่ละไดโพลโดยใช้ชุดทดลอง 2 ชุดทดสอบ โดยให้ความเข้มที่ได้จากแรงดันไฟฟ้าจากชุดการทดลองที่ 1 เป็นไปตามกราฟรูปที่ 4.10 (ก). แรงดันไฟฟ้าที่ให้ค่าเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมให้ค่าสูงสุดเท่ากับ 4 โวลต์ ต่ำสุดเท่ากับ 2.66 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าที่ได้รับจากโฟโตไดโอดมีค่า 590 มิลลิโวลต์ ดังชุดทดลองที่ 2 ให้ค่าสนามไฟฟ้ามากกว่าเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มจากค่าแรงดันต่ำสุด 1.66 โวลต์ สูงสุดเป็น 2.66 โวลต์ เป็นค่าแรงดันที่ไดโอดเริ่มทำงาน แรงดันไฟฟ้าที่ได้รับจากโฟโตไดโอดมีค่า 590 มิลลิโวลต์ ชุดทดลองที่ 2 จากกราฟรูปที่ 4.10 (ข). ที่ค่าแรงดัน 2.66 โวลต์ ทำให้สามารถ

วิเคราะห์ได้ว่าความเข้มแสงที่ตกกระทบโฟโตไดโอด มีผลต่อสนามไฟฟ้าที่กระเจิงกลับมาที่ช่องสังเกต จากกราฟรูป 4.12 เป็นการทดสอบโฟโตทรานซิสเตอร์เบอร์ TIL78 จะเห็นว่าจากการทดลองสองครั้ง ค่าของข้อมูลที่ได้มีลักษณะโครงสร้างของกราฟคล้ายกันแต่ค่าของข้อมูลมีค่าต่างกัน ทำให้รู้ว่าค่าสัญญาณเอาท์พุทที่ได้ มีค่าเปลี่ยนแปลงเนื่องจากทดลองเปลี่ยนระดับความเข้มของสัญญาณและใช้กราฟในรูปที่ 4.11 ที่ได้จากการคำนวณนี้เป็นตัวเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ของการกระเจิงคลื่นจากไดโพลกราฟรูปที่ 4.13 เป็นผลการตอบสนองกับความยาวของเส้นลวดกับกระแสตามเส้นลวดไดโพลชนิด LDR เบอร์ CDS P1241-05 พบว่าค่าเอาท์พุทที่ได้มีค่าของข้อมูลเป็นไปตามลักษณะของสมการเฮเลน แต่ยอดของกราฟที่ได้รับมีผลต่างจากกราฟระดับต่ำสุดของสัญญาณน้อยเกินที่จะนำมาใช้งาน กราฟรูปที่ 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 ผลที่ได้ของข้อมูลมีลักษณะของกราฟ เป็นไปตามสมการเฮเลนแต่มีการกระเพื่อมของกราฟตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงความยาวเส้นลวด จากการทดลองทั้งหมดพบว่าชนิดไดโพล ที่มีค่าของการให้สนามไฟฟ้าโฟโตทรานซิสเตอร์เบอร์ TIL78 ให้สนามไฟฟ้ามากกว่าโฟโตไดโอดเบอร์ SFH229, MRD721 แต่ค่าของ Rise Time ของ TIL78 ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์มีค่าน้อยกว่าโฟโตไดโอด จากกราฟรูปที่ 4.19 MRD721 ให้สัญญาณของ Lock-in Amplifier มากกว่า SFH229 ถึง 10 เท่าจึงนำ MRD721 มาใช้ในการวิจัยสร้างภาพฮอโลแกรม



(ก).

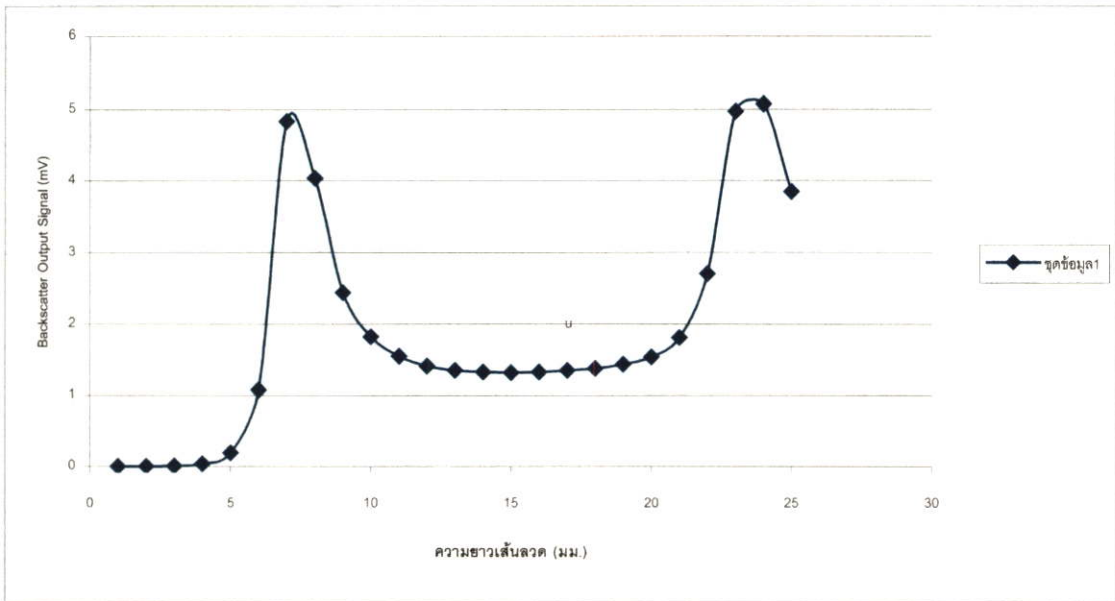


(ข).

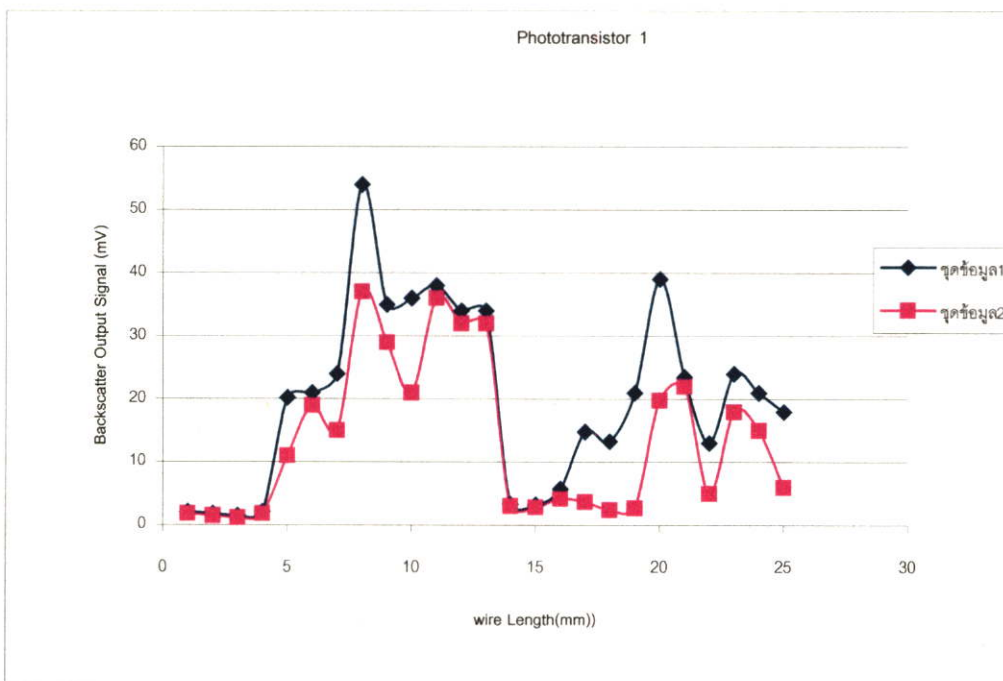
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการให้แรงดันที่โฟโตไดโอดโดยแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกัน 2 ชุด แสดงดังกราฟที่ 1 และได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ไดโอดดังกราฟที่ 2

รูป (ก). แรงดันไฟฟ้าที่ไดโอดของการทดลองชุดข้อมูลที่ 1 ค่าสูงที่สุดเท่ากับ 4.0 โวลต์ และแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุดเท่ากับ 2.40 โวลต์ เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ไดโอดเริ่มทำงาน

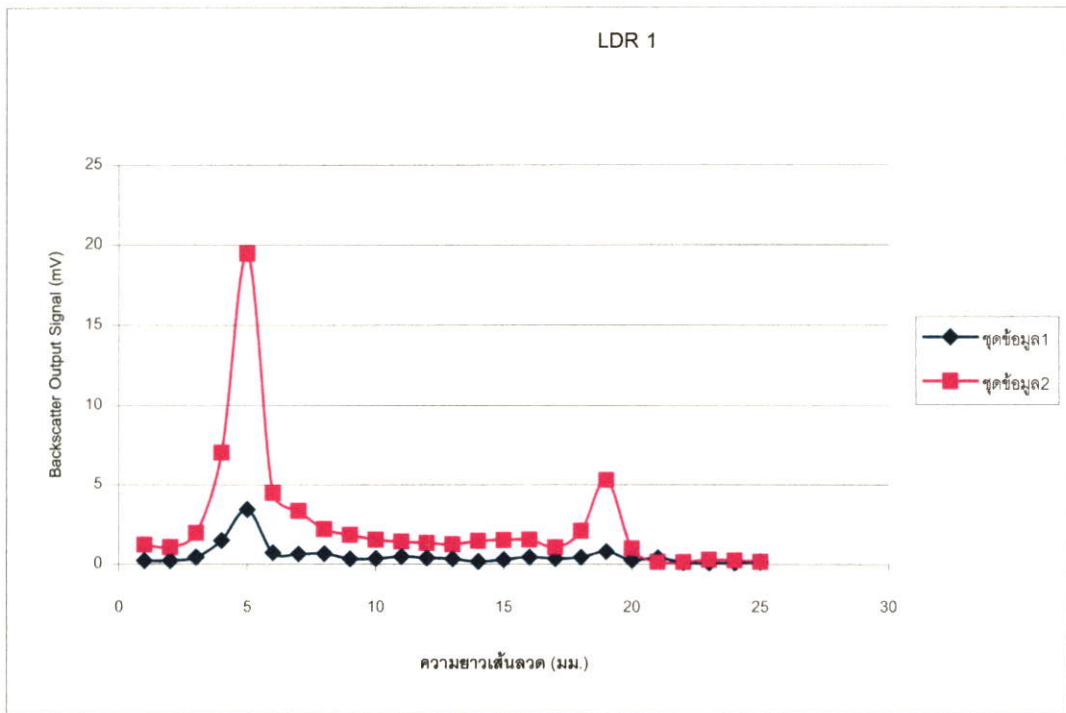
รูป (ข). แรงดันไฟฟ้าที่ไดโอดของการทดลองชุดข้อมูลที่ 2 ค่าสูงที่สุดเท่ากับ 2.66 โวลต์ เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ไดโอดเริ่มทำงานและแรงดันต่ำที่สุดเท่ากับ 1.69 โวลต์



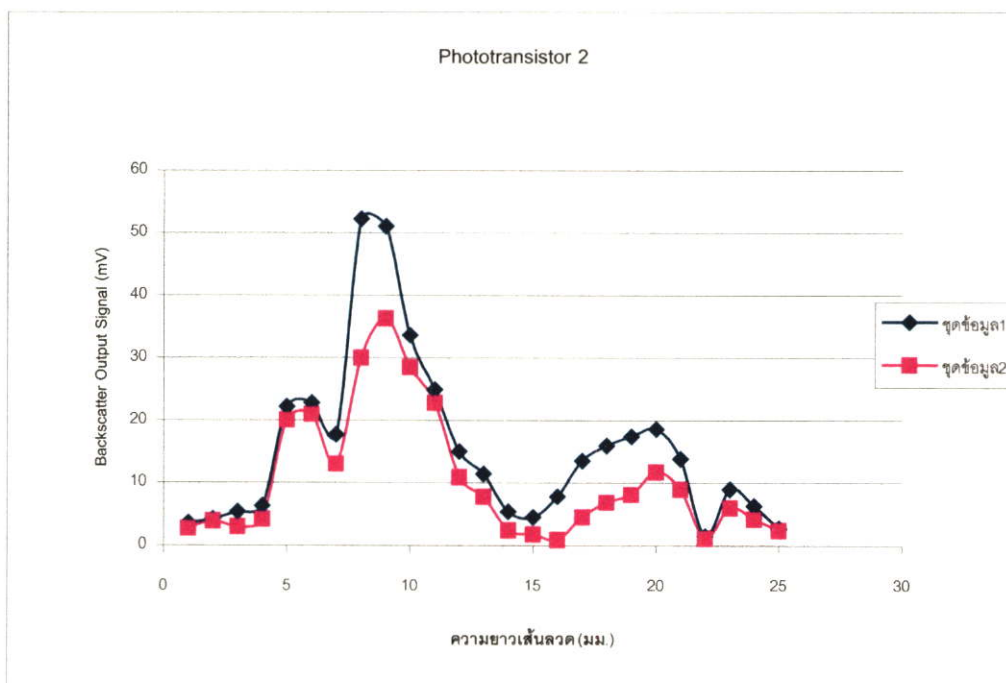
รูปที่ 4.11 ผลการคำนวณสัญญาณคลื่นสะท้อนกระเจิงกลับมาที่ช่องส่งเกิดคลื่น ตามภาคตัดขวางของการกระเจิงคลื่นที่ตกกระทบเส้นลวดไดโพล ที่ความยาวเส้นลวดต่างๆ ตามทฤษฎีของเฮเลน



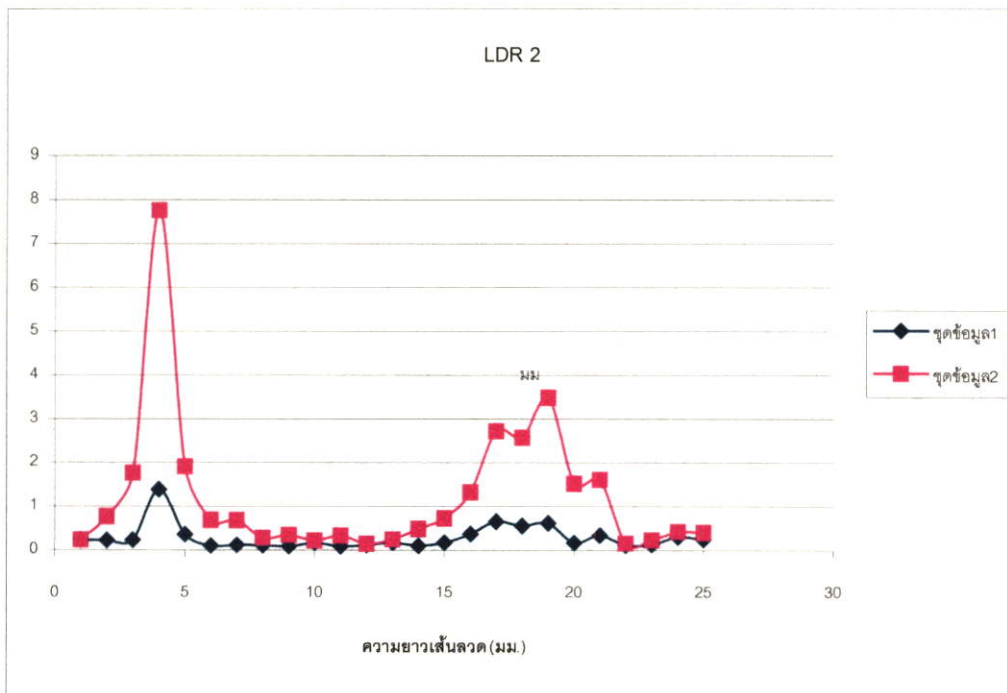
รูปที่ 4.12 ผลการตอบสนองของโฟโตทรานซิสเตอร์เบอร์ TIL78 เมื่อเปลี่ยนความยาวของไดโพลปรับความเข้มแสงที่ความถี่ของการมอดูเลต 50 kHz



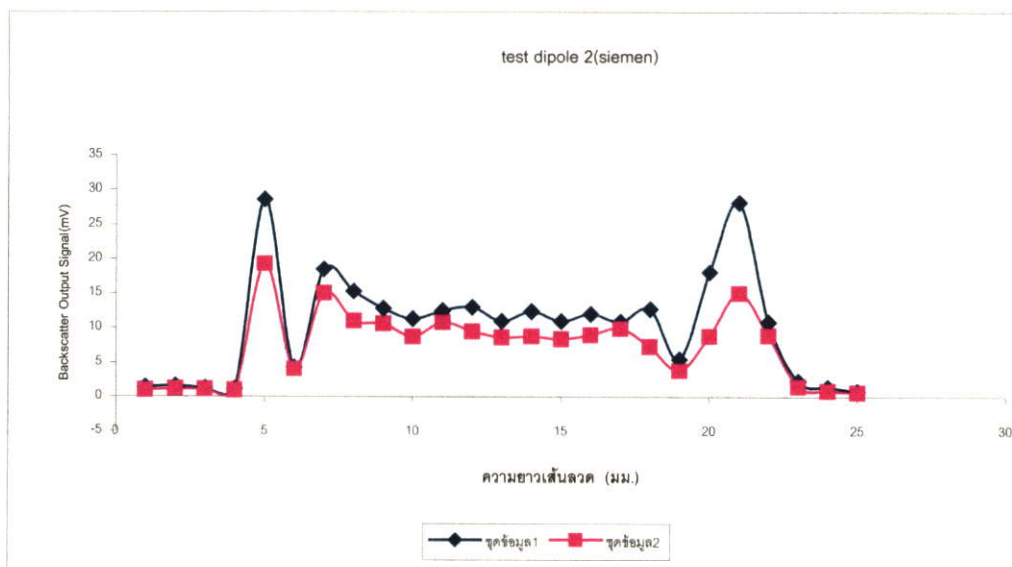
รูปที่ 4.13 ผลการตอบสนองของ LDR เบอร์ CDS P1241-05 คลื่นกระเจิงกลับมาที่ช่องสังเกต เปลี่ยนความยาวของไดโพลปรับความเข้มแสงที่ความถี่ของการมอดูเลต 50 kHz



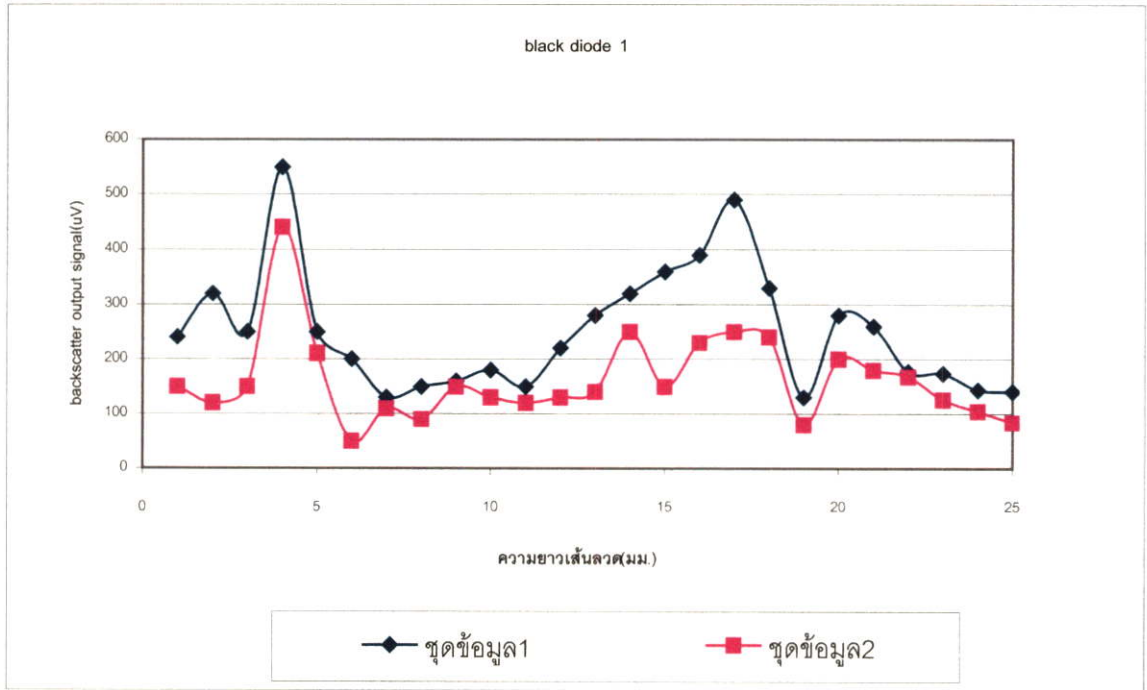
รูปที่ 4.14 ผลการตอบสนองของ Unknown โฟโตทรานซิสเตอร์ คลื่นกระเจิงกลับมาที่ช่องสังเกต เปลี่ยนความยาวของไดโพลโดยปรับความเข้มแสงที่ความถี่ของการมอดูเลต 50 kHz



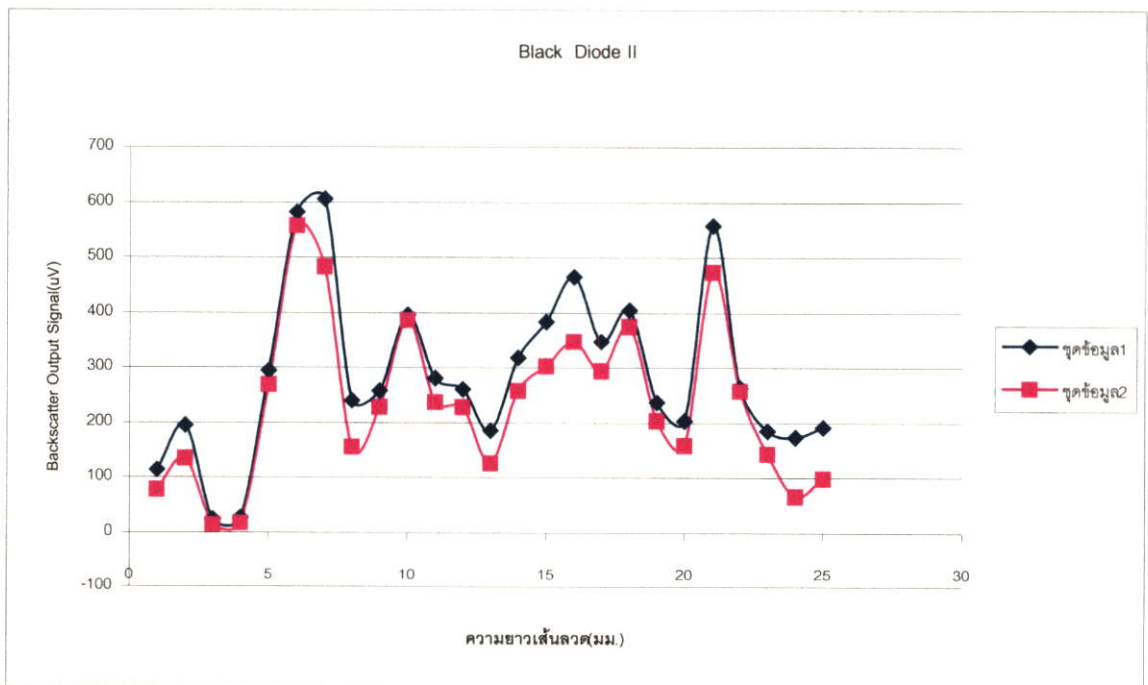
รูปที่ 4.15 ผลการตอบสนองของโฟโตทรานซิสเตอร์เบอร์ CDS 9PS1A คลื่นกระเจิงกลับมาที่ช่องสังเกต เปลี่ยนความยาวของไดโพลโดยปรับความเข้มแสงที่ความถี่ของการมอดูเลต 50 kHz



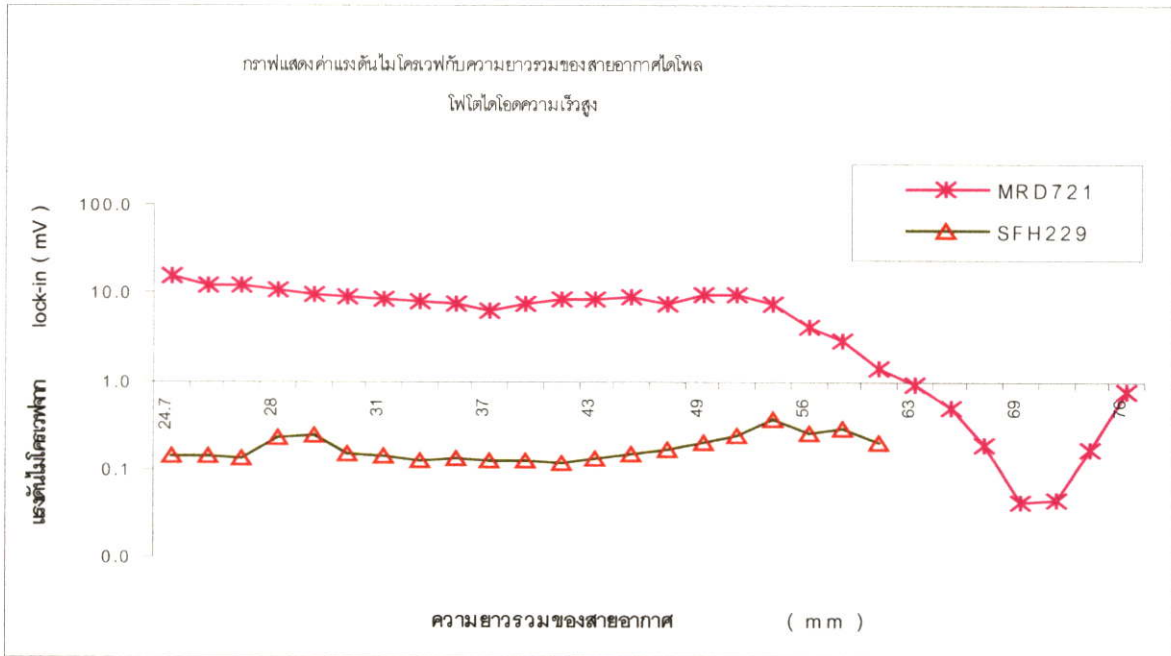
รูปที่ 4.16 ผลการตอบสนองของโฟโตไดโอดเบอร์ SFH229 คลื่นกระเจิงกลับมาที่ช่องสังเกต เปลี่ยนความยาวของไดโพลโดยปรับความเข้มแสงที่ความถี่ของการมอดูเลต 50 kHz



รูปที่ 4.17 ผลการตอบสนองของ Unknow โฟโตไดโอด คลื่นกระเจิงกลับมาที่ช่องสังเกต เปลี่ยนความยาวของไดโพลโดยปรับความเข้มแสงที่ความถี่ของการมอดูเลต 50 kHz



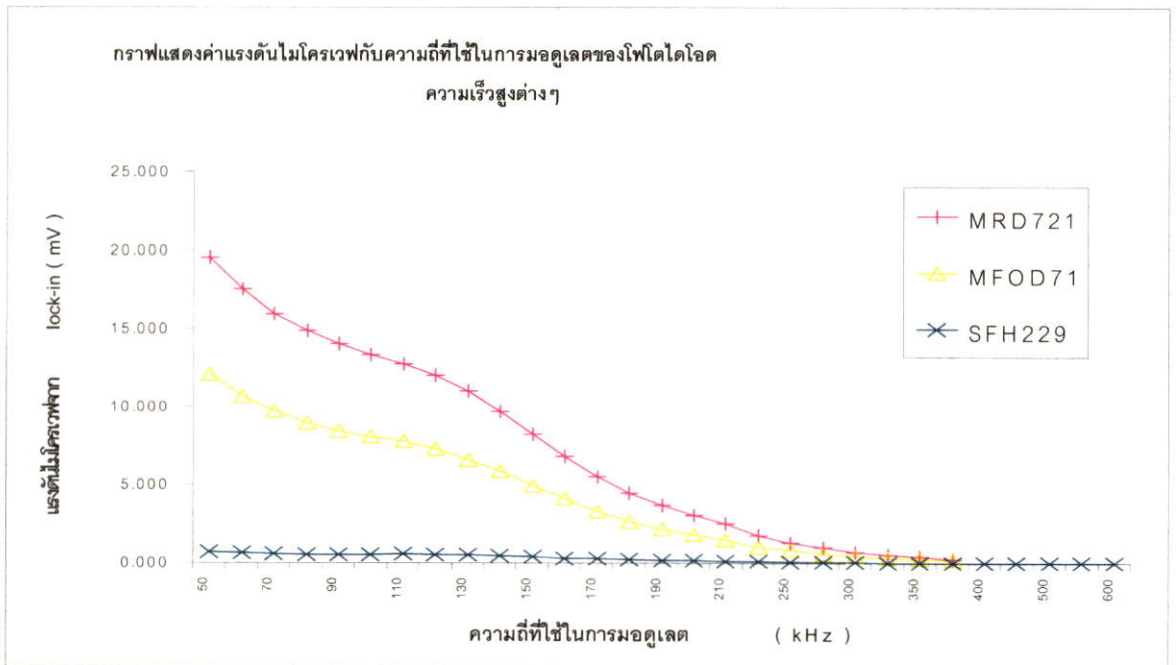
รูปที่ 4.18 ผลการตอบสนองของ Unknow โฟโตไดโอด คลื่นกระเจิงกลับมาที่ช่องสังเกต เปลี่ยนความยาวของไดโพลโดยปรับความเข้มแสงที่ความถี่ของการมอดูเลต 50 kHz



รูปที่ 4.19 ผลการเปรียบเทียบการตอบสนองของไดโพลโพโตไดโอด MRD721 กับ SFH229 เมื่อเปลี่ยนความยาวของไดโพลที่ความถี่ของการมอดูเลต 50 kHz จับสัญญาณแรงดันที่แปรเปลี่ยนกับคลื่นไมโครเวฟจาก Lock-in Amplifier

4.3.2 การเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อความถี่การมอดูเลต ของโพโตไดโอดไดโพลเบอร์ต่างๆ ที่ความยาวเท่ากัน

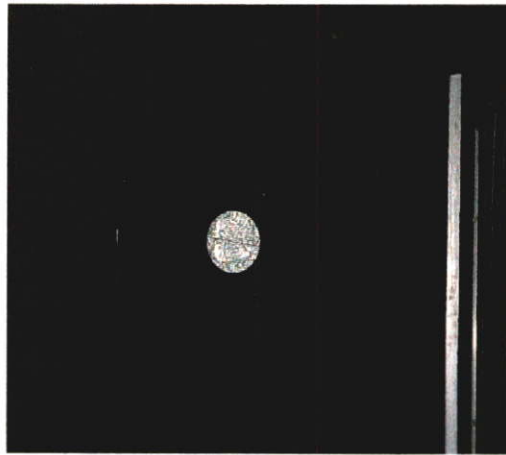
การตอบสนองต่อความถี่การมอดูเลตใช้การปรับความถี่ของสัญญาณแสงในไฟเบอร์ออปติกมาที่ตัวรับแสงของโพโตไดโอดทำการปรับความถี่ตั้งแต่ 50 kHz ไปจนถึง 600 kHz วัดแรงดันจากคลื่นไมโครเวฟพบว่าที่ความถี่ต่างๆ จะได้แรงดันไฟฟ้าของสัญญาณที่สูง และแรงดันไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อความถี่สูงขึ้น เนื่องจากความต้องการข้อมูลของสัญญาณที่มากจำเป็นต้องทำการมอดูเลตที่ความถี่สูง แต่เมื่อความถี่ของสัญญาณสูงทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำ จึงต้องทำการเลือกชนิดของไดโพลโพโตไดโอดที่ให้แรงดันไฟฟ้าที่สูงที่สุดในการทดลองจะพบว่า MRD721 มีค่าแรงดันไฟฟ้ามากที่สุดเมื่อเทียบกับชนิดไดโพลอื่นๆ ที่ความถี่เดียวกันจากกราฟข้างล่างพบว่าค่าความถี่ตั้งแต่ 200 kHz มีค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำลงเรื่อยๆจนเกือบจะเป็นศูนย์ที่ความถี่ 300 kHz ขึ้นไป ค่าความถี่ในการมอดูเลตมีความจำเป็นต่อการรับข้อมูลยิ่งมีความถี่ในการมอดูเลตสูงทำให้ได้รับข้อมูลของภาพจะมีความชัดมากขึ้น นำมาเป็นข้อมูลประกอบกับการวิเคราะห์ภาพฮอโลแกรมที่สร้างภาพจากค่าความถี่ของการมอดูเลตแปรเปลี่ยน



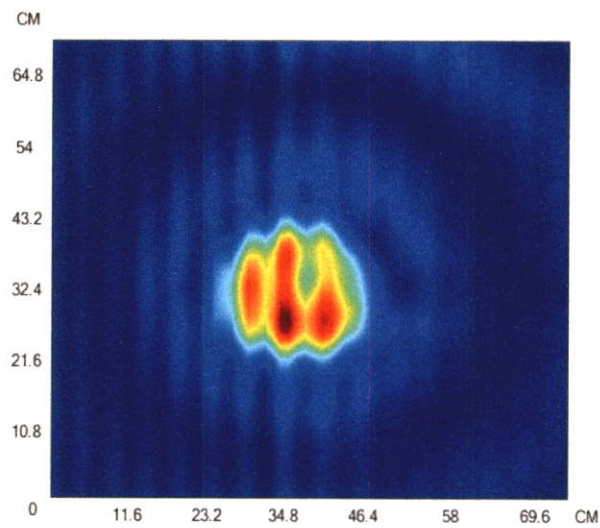
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าแรงดันไมโครเวฟกับความถี่ที่ใช้ในการมอดูเลตของโฟโตไดโอด

4.3.3 ผลการตอบสนองความเข้มที่เกิดขึ้นจากการสะท้อนวัตถุ

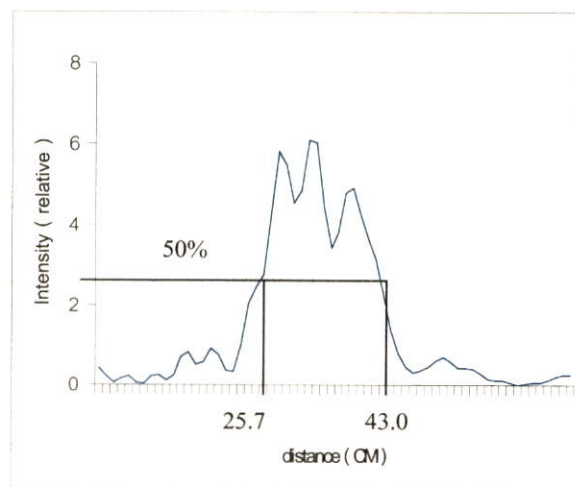
การวัดความเข้มที่เกิดจากการสะท้อนคลื่นจากวัตถุ เพื่อศึกษาการสะท้อนของคลื่น วัตถุเทียบกับตำแหน่งวัตถุ ใช้วัตถุแผ่นกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ซม. ดังรูปที่ 4.20 (ก). วัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ในลักษณะการกระจายของคลื่นจากการสะท้อนวัตถุมาที่ตัวตรวจจับคลื่น ในลักษณะเป็นโฟโตไดโอดไดโพลกระแสจิงคลื่น สามารถวัดกระแสไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนกับความเข้มได้จากสมการที่ 2.50 โดยกระแสจากตัวตรวจจับคลื่นหาค่าได้จากการแทนค่าตัวแปรในสมการที่ 2.59 ความเข้มที่ได้จากกราฟรูปที่ 4.21 (ค) มีความเป็นสัดส่วนกับภาพจากฮอโลแกรมในลักษณะตามขวาง ดังรูปที่ 4.21 (ข) ความเข้มควรจะมีค่าเท่ากันเมื่อมีการตรวจจับสัญญาณการสะท้อนจากวัตถุ แต่จากการทดลองรูปคลื่นไม่เป็นยอดคลื่นสี่เหลี่ยม เนื่องจากการตรวจวัดสัญญาณและลักษณะทางกายภาพของรูปวัตถุ จะเห็นว่าจุดศูนย์กลางของแผ่นวงกลมที่ค่าความเข้มมากที่สุด มีพื้นที่ของการกระเจิงคลื่นมาก และพบว่าความกว้างของความเข้มโดยเฉลี่ยที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของยอดคลื่นสัญญาณควรมีค่าเท่ากับความกว้างของแผ่นวัตถุวงกลมประมาณ 20 ซม. ค่าที่ได้รับจากการทดลองได้ค่าเฉลี่ยความเข้มมีค่าเท่ากับ 17.3 ซม. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับภาพวัตถุจริง



(ก)



(ข)

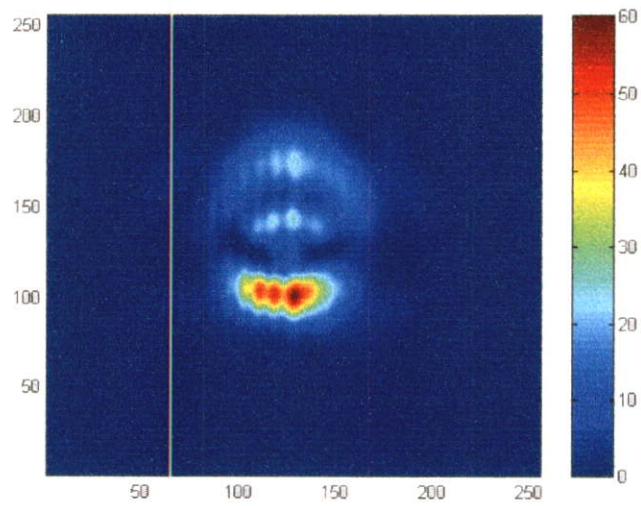


(ค)

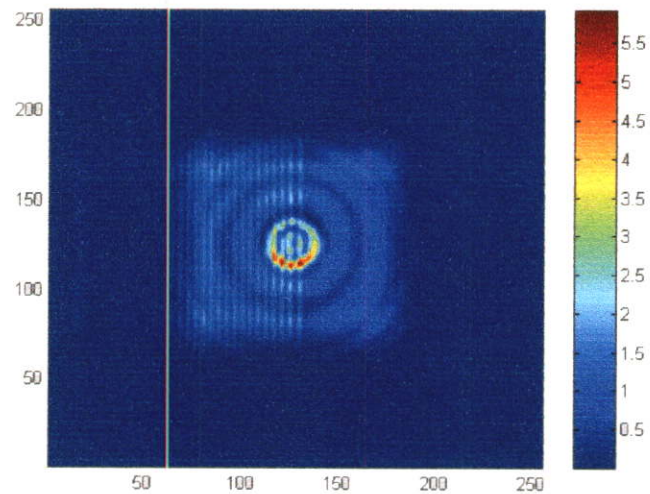
รูปที่ 4.21 ก). ภาพแผ่นโลหะวงกลมที่ใช้ในการทดลอง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. ข). ภาพจากคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนแผ่นวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ซม. ค). กราฟแสดงขนาดประเมนจากการกระจายของความเข้มที่เกิดจากการสะท้อนวัตถุ

4.3.4 ผลการทดสอบภาพวัตถุเมื่อปรับเปลี่ยนค่าความละเอียด ในการสแกนจากน้อยที่สุด 64x64 ตำแหน่งไปจนถึง 256x256 ตำแหน่ง และเปลี่ยนค่าความถี่ในการมอดูเลต

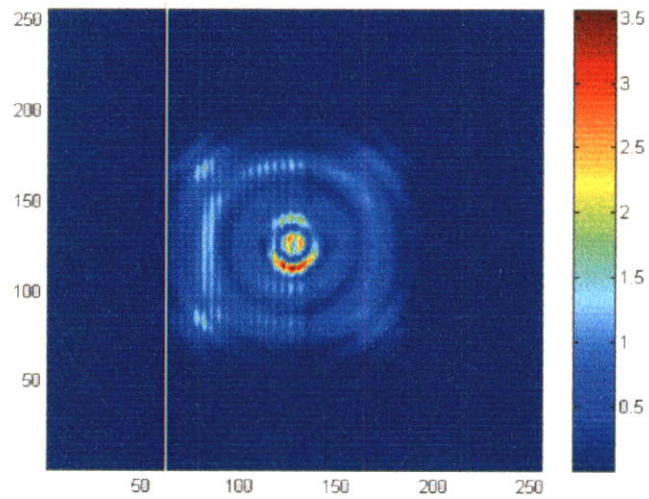
การปรับเปลี่ยนพื้นที่ในการเก็บข้อมูลทางฮอโลแกรม เพื่อดูระยะพื้นที่ของการสแกนภาพวัตถุที่เหมาะสม ทดสอบโดยการเพิ่มระยะการเคลื่อนที่ของวัตถุ จากการเคลื่อนที่ของวัตถุครั้งละ 0.54 ซม. โดยในการเคลื่อนที่ในแต่ละแนวสามารถแปรเปลี่ยนพื้นที่การรับภาพจาก 64 ตำแหน่ง เป็น 256 ตำแหน่ง การเพิ่มพื้นที่ในการสแกนจะทำให้ได้ความละเอียดของภาพวัตถุมากขึ้น แต่มีข้อจำกัดขึ้นอยู่กับระยะของการแผ่ลำคลื่นที่ทำให้ค่าความเข้มที่สะท้อนกลับ ต้องมีค่าในระดับใกล้เคียงระดับความเข้มตรงกลางลำคลื่น เพื่อให้ได้รับสัญญาณการสะท้อนจากวัตถุที่ระดับความถี่ 50 kHz จากรูปที่ประมวลผลแสดงความเข้มของรูปที่ได้โดยมีค่าเปรียบเทียบความเข้มที่ได้จากสัญญาณแสดงด้านขวาของรูป รูปที่ 4.22 ภาพวงแหวนจากรูปถ่ายรูปที่ 4.2 มีความละเอียดในการสแกน 64x64 ตำแหน่ง ไม่สามารถแยกแยะรูปที่ได้เป็นวัตถุรูปร่างลักษณะอย่างไร แต่มีเค้าโครงรูปร่างลักษณะวงกลม รูปที่ 4.23 เมื่อเพิ่มความละเอียดในการสแกนเป็น 128x128 ตำแหน่ง พบว่ารูปที่ได้สามารถบอกลักษณะของรูปร่างและมีความละเอียดของภาพเพิ่มขึ้น รูป 4.24 ความละเอียดของภาพ 128x128 ตำแหน่ง เพิ่มระยะของการเคลื่อนที่แต่ละครั้งเป็น 1.08 ซม. ภาพที่ได้มีความละเอียดน้อยลงกว่ารูปที่ 4.23 ในการสแกนวัตถุรูปที่ 4.25 ภาพวงแหวนความละเอียดในการสแกน 256x256 ตำแหน่ง มีความละเอียดและความชัดของภาพมากที่สุดมีความโค้งกลมของวงแหวน รูปที่ 4.26 ภาพวงแหวนความละเอียดของภาพ 256x256 ตำแหน่ง เพิ่มความถี่ในการมอดูเลตจาก 50 kHz เป็น 100 kHz ภาพวงแหวนมีความคมชัดและละเอียดขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความถี่เป็น 200 kHz ดังรูปที่ 4.27 ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่โฟโตไดโอดไดโพลให้ค่าของสัญญาณที่ Lock-in Amplifier มากที่สุดภาพวงแหวนที่ได้จะมีภาพละเอียดและชัดเจนกว่า มีความโค้งมนของวงแหวนมากกว่าที่ความถี่ 100 kHz รูปที่ 4.28 ภาพกากบาทใหญ่จะเห็นว่าภาพสามารถแยกแยะรอยมุมและแนวตรงของกากบาทได้ว่าเป็นแนวตรงและเป็นรอยแยกของกากบาท จากรูปที่ 4.29 มีระยะการสแกนเป็น 256x256 ตำแหน่ง ความคมชัดของภาพมีความคมชัดกว่า 128x128 ตำแหน่ง แต่ในส่วนของการแยกแยะลักษณะรูปร่างความละเอียด 128x128 ตำแหน่ง ก็พอเพียงในการแยกแยะภาพวัตถุ ในการสร้างภาพความละเอียดและพื้นที่ในการสแกนเป็นส่วนหนึ่ง ในปัจจุบันที่มีผลกระทบต่อภาพ รูปที่ 4.30 และ 4.31 เป็นการสแกนภาพวงกลมจากรูปถ่ายรูปที่ 4.8 ความละเอียดที่ 256 x 256 ตำแหน่งใช้ความถี่ที่ 300 และ 500 kHz รูปที่ได้ไม่สามารถแยกแยะภาพวัตถุได้ ความถี่ในการมอดูเลตที่เหมาะสมกับไดโพลโฟโตไดโอดมีความจำเป็นในการตรวจจับภาพวัตถุ



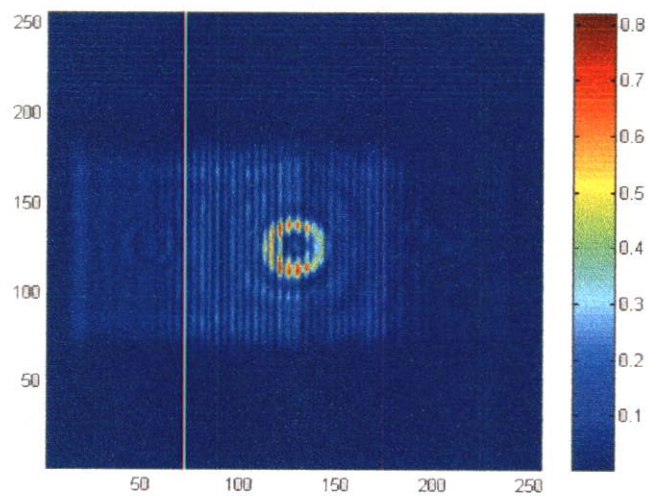
รูปที่ 4.22 ภาพวงแหวน ความละเอียดในการสแกน 64x64 ตำแหน่ง ระยะห่างระหว่างวัตถุกับฮออร์น 288 ซม. ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวกระจังคลื่น 249.5 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 50 kHz



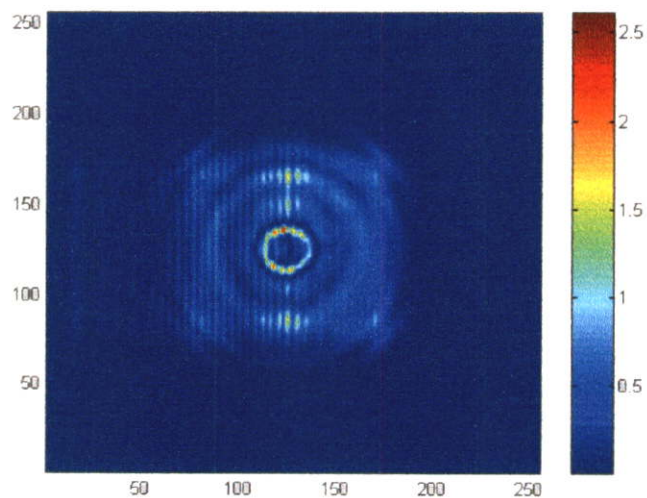
รูปที่ 4.23 ภาพวงแหวน ความละเอียดในการสแกน 128x128 ตำแหน่ง ระยะห่างระหว่างวัตถุกับฮออร์น 288 ซม. ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวกระจังคลื่น 249.5 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 50 kHz



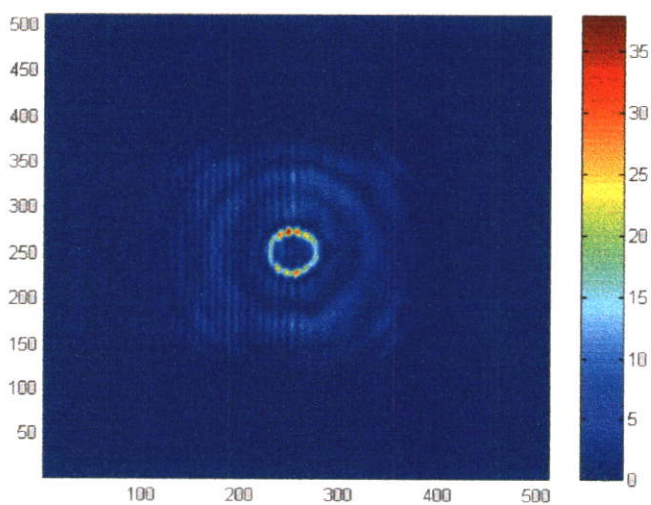
รูปที่ 4.24 ภาพวงแหวน ความละเอียดในการสแกน 128x128 ตำแหน่ง (แบบเลื่อนครั้งละ 1.08 ซม.) ระยะห่างระหว่างวัตถุกับฮอว์ก 288 ซม. ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวกระจังคลื่น 249.5 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 50 kHz



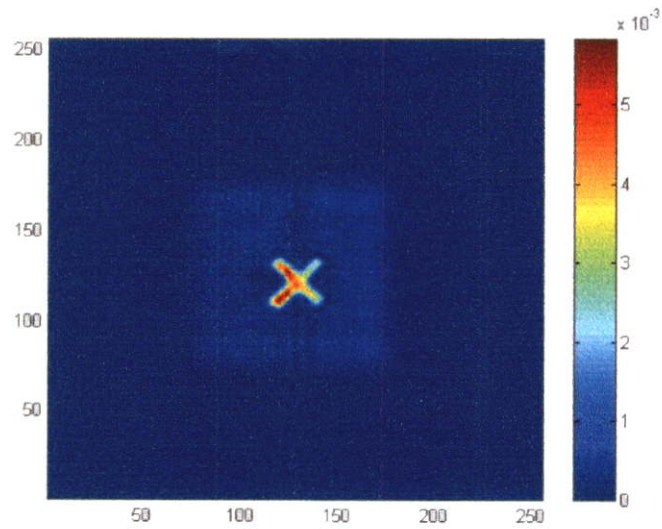
รูปที่ 4.25 ภาพวงแหวน ความละเอียดในการสแกน 256x256 ตำแหน่ง ระยะห่างระหว่างวัตถุกับฮอว์ก 288 ซม. ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวกระจังคลื่น 249.5 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 50 kHz



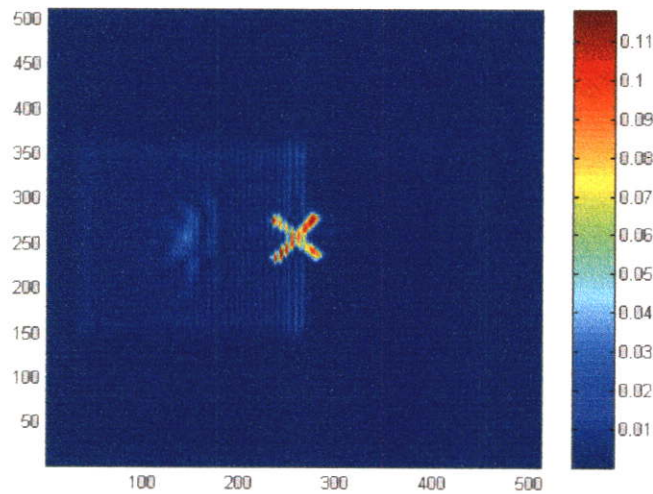
รูปที่ 4.26 ภาพวงแหวน ความละเอียดในการสแกน 256x256 ตำแหน่ง ระยะห่างระหว่างวัตถุกับฮอว์น 288 ซม. ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวกระจังคลื่น 249.5 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 100 kHz



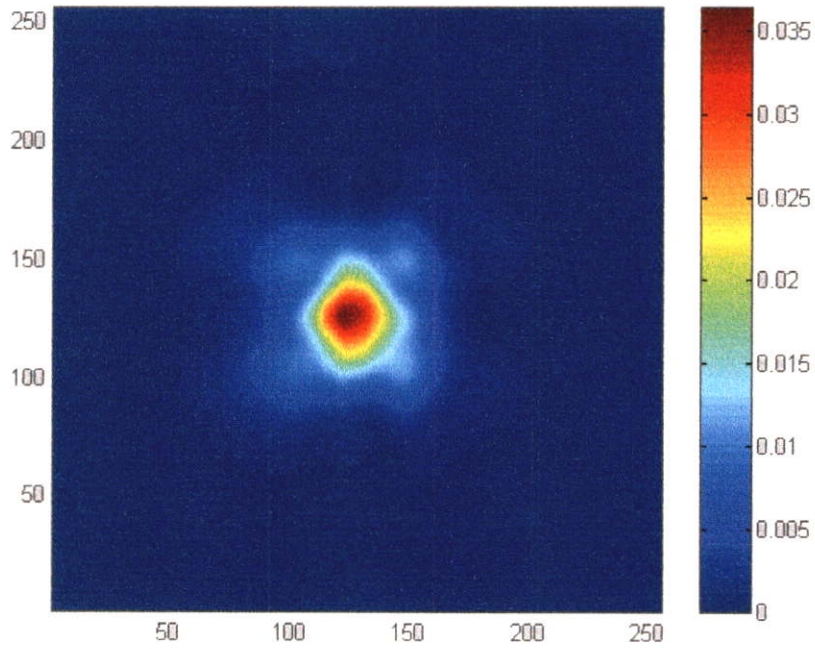
รูปที่ 4.27 ภาพวงแหวน ความละเอียดในการสแกน 256x256 ตำแหน่ง ระยะห่างระหว่างวัตถุกับฮอว์น 288 ซม. ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวกระจังคลื่น 249.5 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 200 kHz



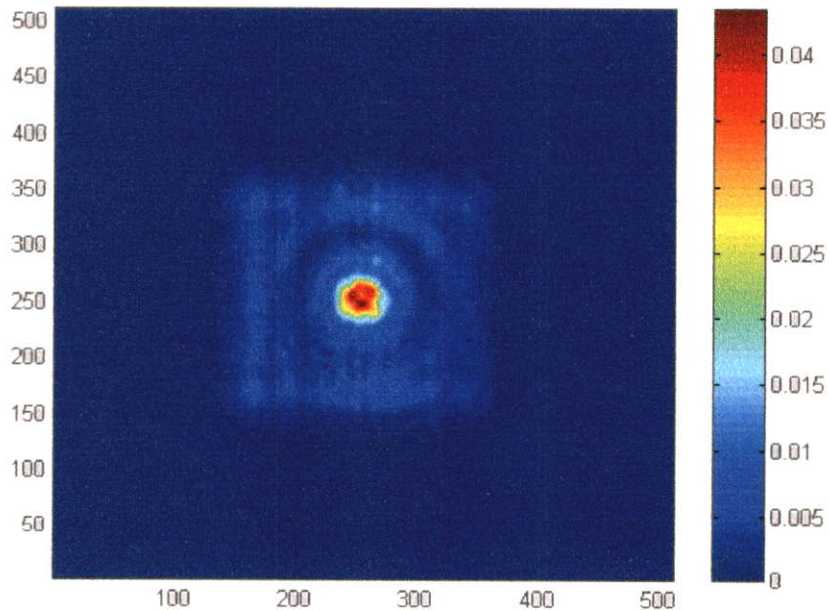
รูปที่ 4.28 ภาพกากบาทใหญ่ ความละเอียดในการสแกน 128x128 ตำแหน่ง ระยะห่างระหว่างวัตถุกับฮอรัญ 288 ซม. ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวกระจังคลื่น 249.5 ซม ความถี่ในการมอดูเลต 200 kHz



รูปที่ 4.29 ภาพกากบาทใหญ่ ความละเอียดในการสแกน 256x256 ตำแหน่ง ระยะห่างระหว่างวัตถุกับฮอรัญ 288 ซม. ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวกระจังคลื่น 249.5 ซม ความถี่ในการมอดูเลต 200 kHz



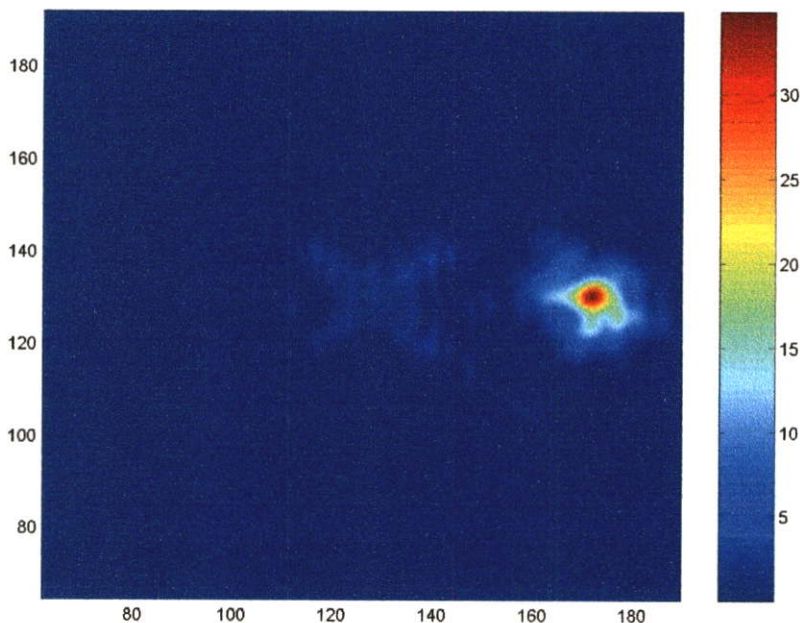
รูปที่ 4.30 ภาพวงกลม ความละเอียดในการสแกน 256x256 ตำแหน่ง ระยะห่างระหว่างวัตถุกับฮอว์ก 288 ซม. ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวกระจังคลื่น 249.5 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 300 kHz



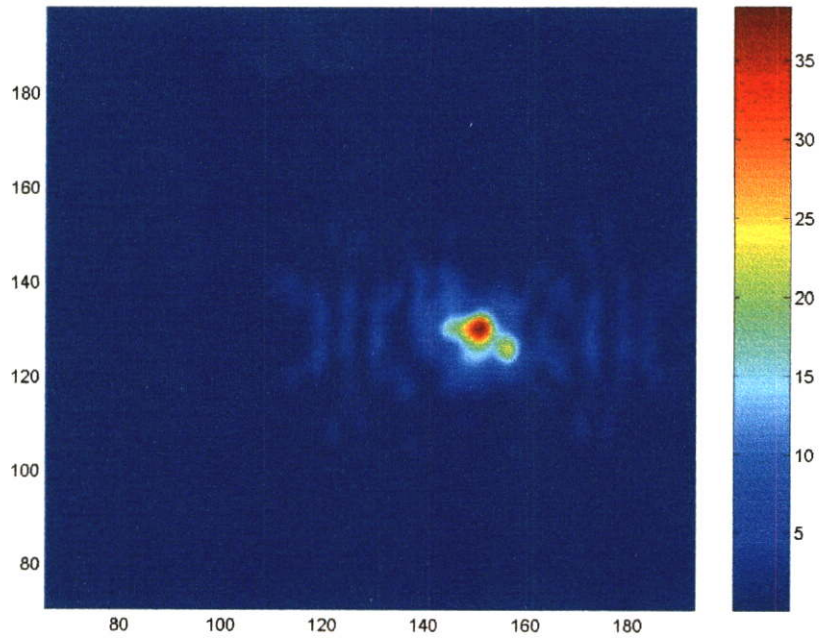
รูปที่ 4.31 ภาพวงกลม ความละเอียดในการสแกน 256x256 ตำแหน่ง ระยะห่างระหว่างวัตถุกับฮอว์ก 288 ซม. ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวกระจังคลื่น 249.5 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 500 kHz

4.3.5 ผลการเปลี่ยนมุม θ ของคลื่นอ้างอิง

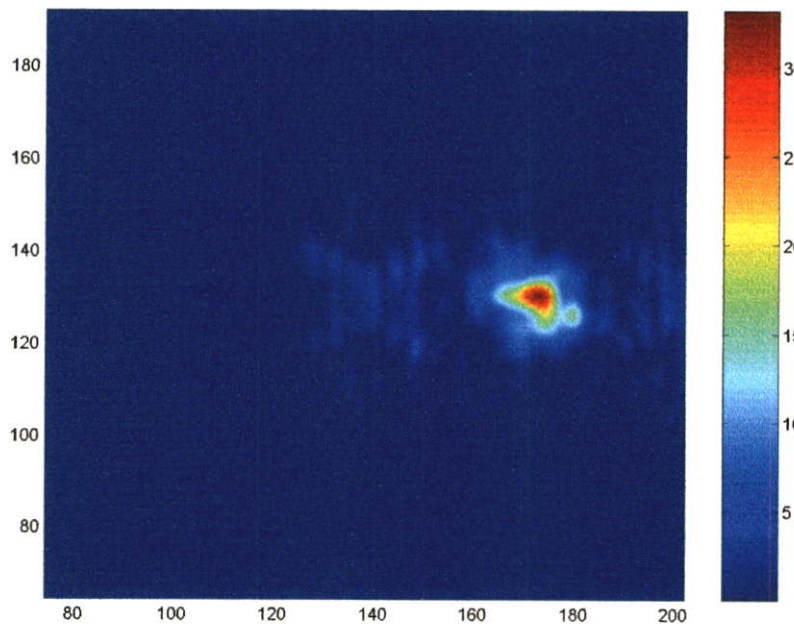
มุมของคลื่นอ้างอิงสามารถเลื่อนปรับค่าให้ได้ความชัดเจนของภาพ ดังรูปที่ 3.19 เนื่องจากมุม θ มีผลต่อการแทรกสอดของภาพซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการสร้างภาพฮอโลแกรม และเป็นการเบนหลบเลี่ยงการรบกวนของภาพอันดับศูนย์แต่เมื่อถ่างมุมมากไป จะทำให้ภาพที่ได้ไม่มีความชัดเจนเนื่องจากระนาบคลื่นของการแทรกสอดไม่สัมพันธ์กัน เกิดความต่างเฟสกันขึ้น แต่เมื่อมุมคลื่นอ้างอิงน้อยจนทำให้คลื่นทั้งสองเกิดเหลื่อมกัน ภาพอันดับศูนย์ก็จะบังวัตถุ วิธีทดลองทำการปรับตัวปรับเฟสคลื่นอ้างอิงเพื่อให้มุมอ้างอิงเบนไปตามค่ามุมที่ต้องการ และเป็นค่าที่เหมาะสมตามทฤษฎี การทดลองนี้ได้ใช้ระยะวัตถุกับระยะช่องสังเกต 120 ซม. ระยะช่องสังเกตกับระนาบไดโพล 78 ซม. ได้ระยะสังเกตคือระยะ 47.38 ซม. ซึ่งเป็นระยะที่ใกล้ ในระยะนี้จะเห็นความแตกต่างของการเปลี่ยนมุมคลื่นอ้างอิงได้ชัดเจน จากรูป 4.32 มุมของคลื่นอ้างอิงเท่ากับ 69.6° รูปที่ได้ภาพอันดับศูนย์ได้เลื่อนออกไปจากภาพวัตถุมากกว่ารูป 4.33 ที่ใช้มุมอ้างอิง 43.3° ภาพจากการทดลองทั้ง 4 ภาพ มุมที่ 27.9° มีชั้นเหลื่อมของภาพเนื่องจากมุมอ้างอิงน้อยเกิน สำหรับการแทรกสอดของคลื่นทั้งสองทำให้ภาพบิดเบือนจากภาพจริง



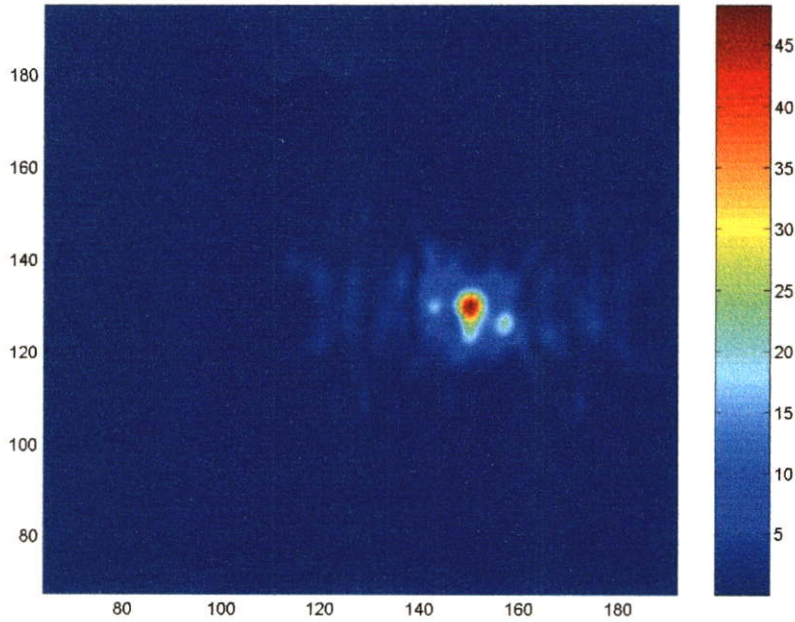
รูปที่ 4.32 วัตถุกากบาทเล็ก ใช้มุม $\theta = 69.6^\circ$ ระยะสังเกต $z' = 47.38$ ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 200 KHz ภาพจากวิธีการทรานฟอร์มแบบเฟรลีเนล



รูปที่ 4.33 วัตถุกากบาทเล็ก ไข่มุม $\theta = 43.30^\circ$ ระยะสังเกต $z' = 47.38$ ซม.
 ความถี่ในการมอดูเลต 200 KHz ภาพจากวิธีการทรานฟอร์มแบบเฟร็ดเนล



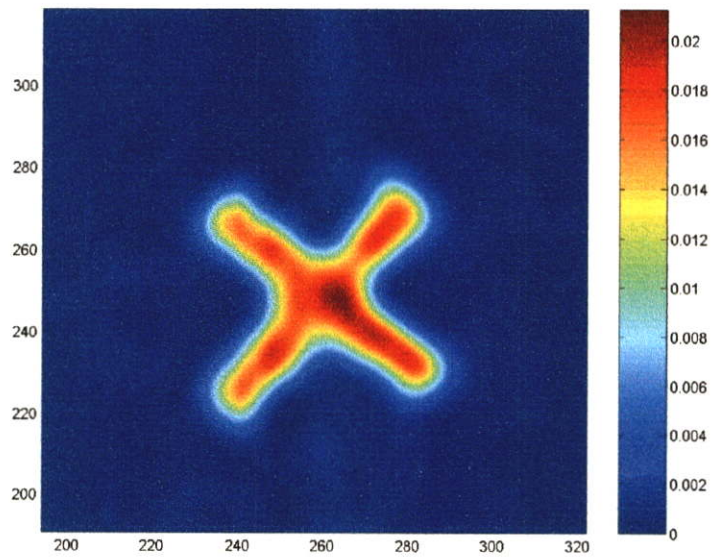
รูปที่ 4.34 วัตถุกากบาทเล็ก ไข่มุม $\theta = 33.96^\circ$ ระยะสังเกต $z' = 47.38$ ซม.
 ความถี่ในการมอดูเลต 200 KHz ภาพจากวิธีการทรานฟอร์มแบบเฟร็ดเนล



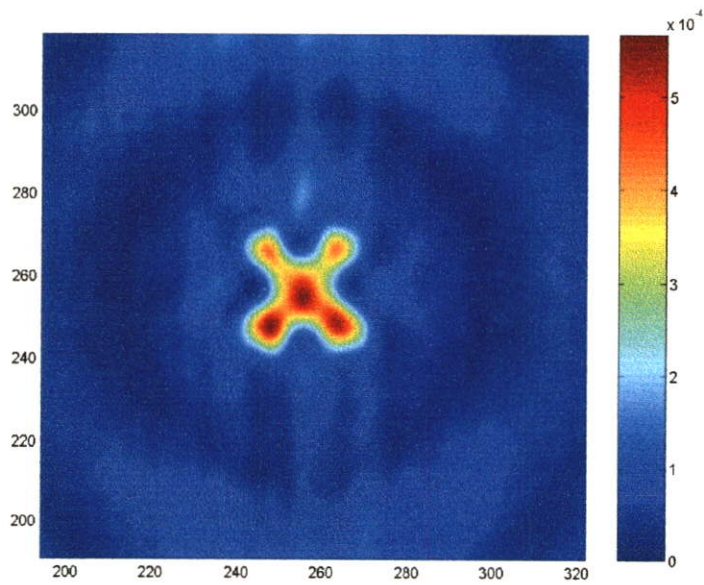
รูปที่ 4.35 วัตถุกากบาทเล็ก ใช้มุม $\theta = 27.9^\circ$ ระยะสังเกต $z' = 47.38$ ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 200 KHz ภาพจากวิธีการทรานฟอร์มแบบเฟรลน์เนล

4.3.6 ทดสอบขนาดวัตถุที่เหมาะสมที่ทำการสแกนภาพ และขนาดความถูกต้องของภาพวัตถุเปรียบเทียบโดยขนาดของวัตถุที่แตกต่างกัน

รูปที่ได้จากการมองภาพผ่านฮอโลแกรม จากการทดลองที่ผ่านมามีลักษณะภาพใกล้เคียงวัตถุจริง ในการทดลองนี้ทำการศึกษาขนาดของรูปที่ได้ว่าเป็นไปตามขนาดของวัตถุ กากบาทจตุรัสเล็กมีความกว้าง 17 ซม. และกากบาทจตุรัสใหญ่มีความกว้าง 34 ซม. ดังรูปที่ 4.36 และ 4.37 ทำการสแกนวัตถุกากบาทที่ขนาดแตกต่างกัน 1 เท่า รูปที่ได้เมื่อเทียบขนาดกับวัตถุมีขนาดใกล้เคียงวัตถุโดยเทียบขนาดกับจุดที่สแกนได้ และรูปที่ 4.38 วงแหวนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 ซม. และ วงกลมสองวงติดกันขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 ซม. ขนาดที่ได้จากภาพมีขนาดเท่ากับวัตถุ ส่วนวงแหวนมีขนาดความกว้างของวงแหวนประมาณ 5 ซม. รูปที่ได้มีขนาดความกว้างของวงแหวนประมาณ 6 ซม. สแกนวัตถุทรงกลมที่มีขนาดต่างกันเพื่อเปรียบเทียบขนาดของภาพวัตถุ รูปที่ 4.39 เป็นการทดลองความถี่ไมโครเวฟที่ 9 GHz กับความเหมาะสมในขนาดวัตถุเล็กที่สุดที่สแกนได้ ภาพวัตถุวงกลม 4 วง มีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาด ภาพฮอโลแกรมที่ได้วงเล็กที่สุดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.3 ซม. เห็นมีเค้าโครงเป็นวงกลม แต่วงกลมที่เส้นผ่าศูนย์กลาง 9.6 ซม. ได้ภาพชัดเจน

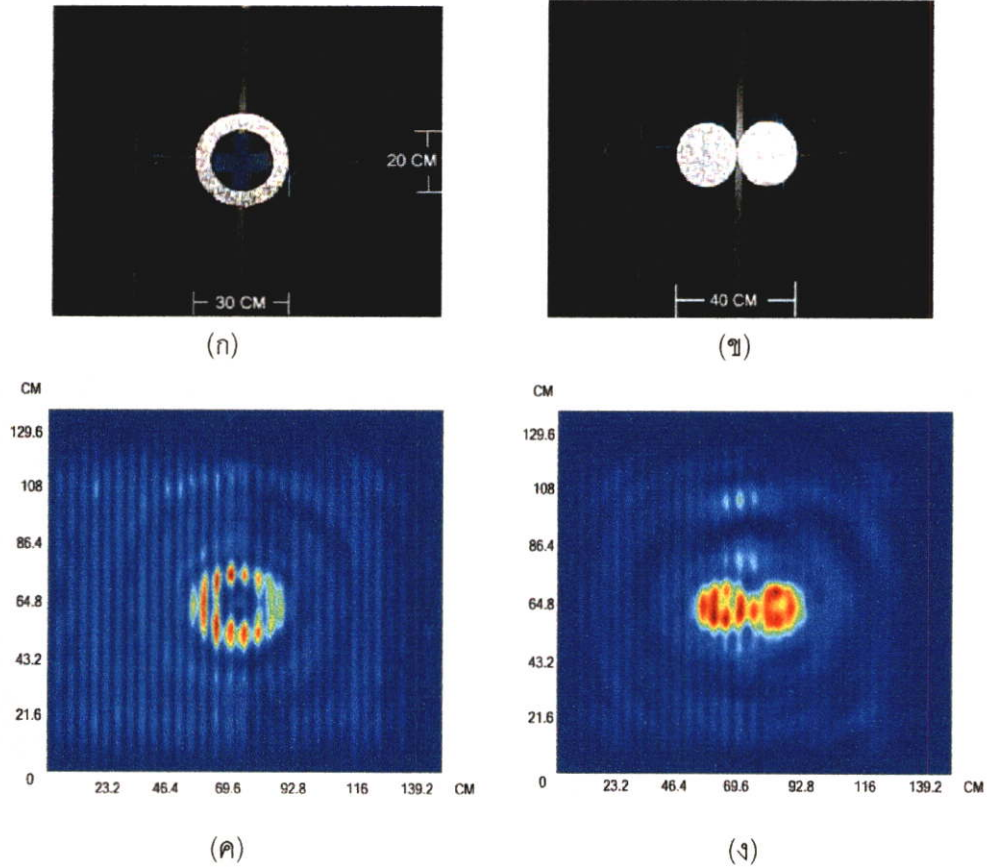


รูปที่ 4.36 วัดตุ๊กกาบาทใหญ่ ระยะระหว่างวัดตุ๊กกับสายอากาศฮอร์น 288 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 200 kHz

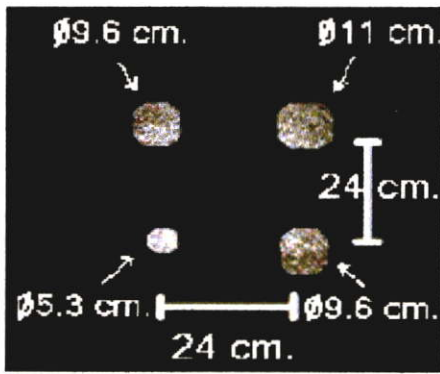


รูปที่ 4.37 วัดตุ๊กกาบาทเล็ก ระยะระหว่างวัดตุ๊กกับสายอากาศฮอร์น 288 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 200 kHz

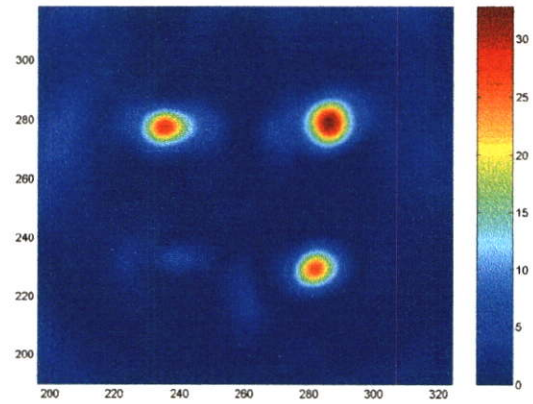
4.3.6.1 วงแหวนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 ซม. และ วงกลมสองวง
ความยาว 40 ซม.



รูปที่ 4.38 (ก) แผ่นวัดรูปโดนัท (ข) แผ่นวัดรูปวงกลมสองวง (ค),(ง). ภาพที่ได้จากการคำนวณที่มีขนาดใกล้เคียงวัดจริง



(ก).

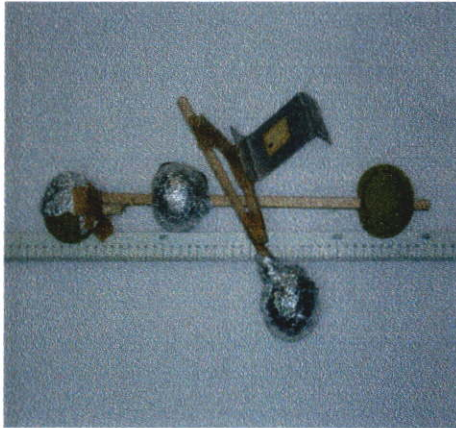


(ข).

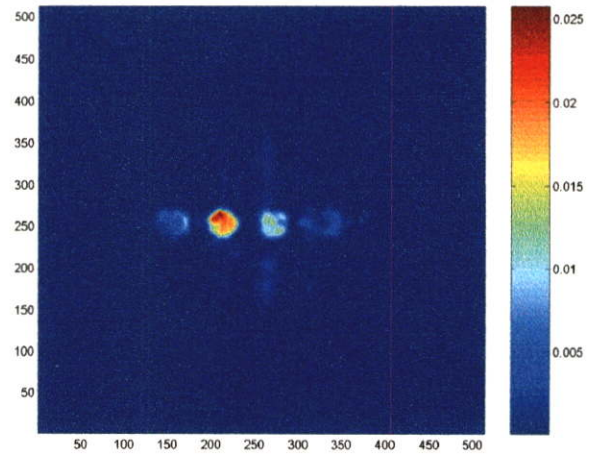
รูปที่ 4.39 (ก). ภาพแผ่นวงกลมฟอยล์อลูมิเนียมสี่วงขนาดไม่เท่ากัน ทำการทดสอบความสามารถในการตรวจจับภาพที่เล็กที่สุด ขนาดวงกลมเล็กที่สุดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.3 ซม. ขนาดใหญ่ที่สุด 11 ซม. และมีวงกลม 2 วง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.6 ซม. (ข). ภาพที่ได้จากการคำนวณ

4.3.7 ทดสอบผลกระทบจากชนิดของวัสดุและพื้นผิวของวัสดุ ที่นำมาใช้สแกนภาพ

วัสดุต่างๆที่ใช้ในการตรวจจับภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟจะสะท้อนโลหะและในกรณีความเข้มต่ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คลื่นสามารถจะสะท้อนสารจำพวกไดอิเล็กทริกได้บ้างไม่มากซึ่งต้องทำการทดลองดูว่าสะท้อนมากน้อยเพียงใด รูปที่ 4.40 เป็นการนำลูกเทนนิส 4 ลูก วางเรียงกันตามแนวยาวโดยลูกที่ 2 และ 3 จากด้านซ้าย หุ้มฟอยล์อลูมิเนียม และลูกที่ 1 หุ้มฟอยล์อลูมิเนียมครึ่งหนึ่งเพื่อจะวิเคราะห์ลักษณะความแตกต่างทางกายภาพของวัสดุสองชนิดที่เป็นยางและโลหะ ลูกที่ 3 ยื่นไปข้างหน้าสามารถถ่ายรูปได้จากรูปที่ 4.6 รูปที่ได้จากการมองภาพฮอโลแกรมสามารถเห็นลูกเทนนิสทั้งสี่ไม่เท่ากัน ลูกที่ 2 มีความชัดของสัญญาณมากที่สุด และมีลักษณะเป็นทรงกลม ลูกที่ 3 มีความชัดของลูกเทนนิสเป็นลักษณะทรงกลม ความเข้มของสัญญาณน้อยกว่าลูกที่ 2 และลูกบอลที่ 1 ได้รับความเข้มของสัญญาณแค่ครึ่งเดียว รูปที่ 4.41 เป็นการสแกนภาพวัตถุวงกลมทองเหลืองที่แสดงดังรูปถ่ายรูปที่ 4.8 รูปที่ 4.42 วัตถุกากบาททองเหลือง การตรวจจับความเข้มของสัญญาณ รูปที่ได้มีลักษณะความชัดของภาพเหมือนกับโลหะสแตนเลส เมื่อทำวัสดุที่เป็นผิวขรุขระดังรูป 4.42 วงกลมสีทองเหลือง ที่แสดงดังรูปถ่ายรูปที่ 4.8 เพื่อทำให้ความเข้มของสัญญาณจากคลื่นสะท้อนที่ไม่กระเจิงจากผิวที่เรียบของวัตถุมีส่วนทำให้คลื่นกระเจิง ทำการทดลองพบว่าพื้นผิวของโลหะที่ขรุขระมีผลกระทบต่อความเข้มของภาพน้อยเมื่อเทียบกับโครงสร้างชนิดของวัสดุ

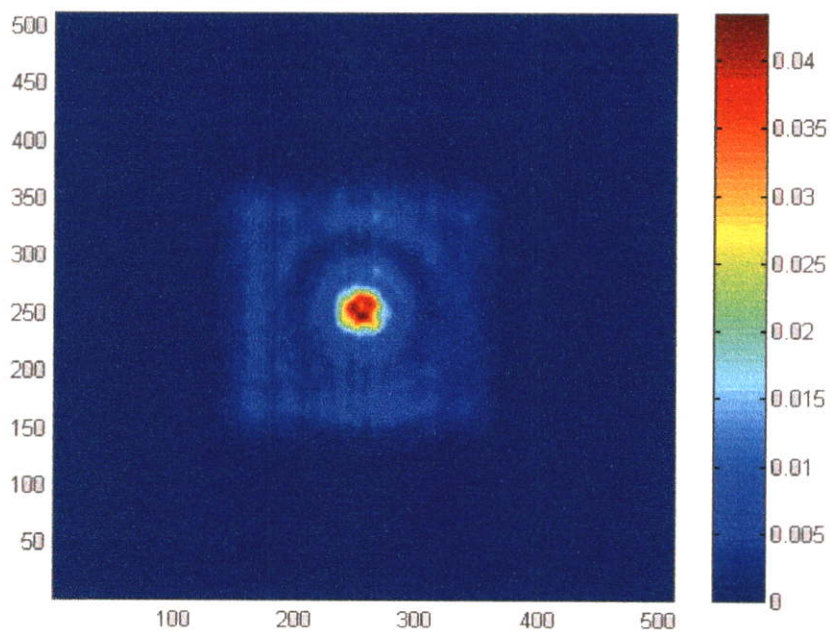


(ก).

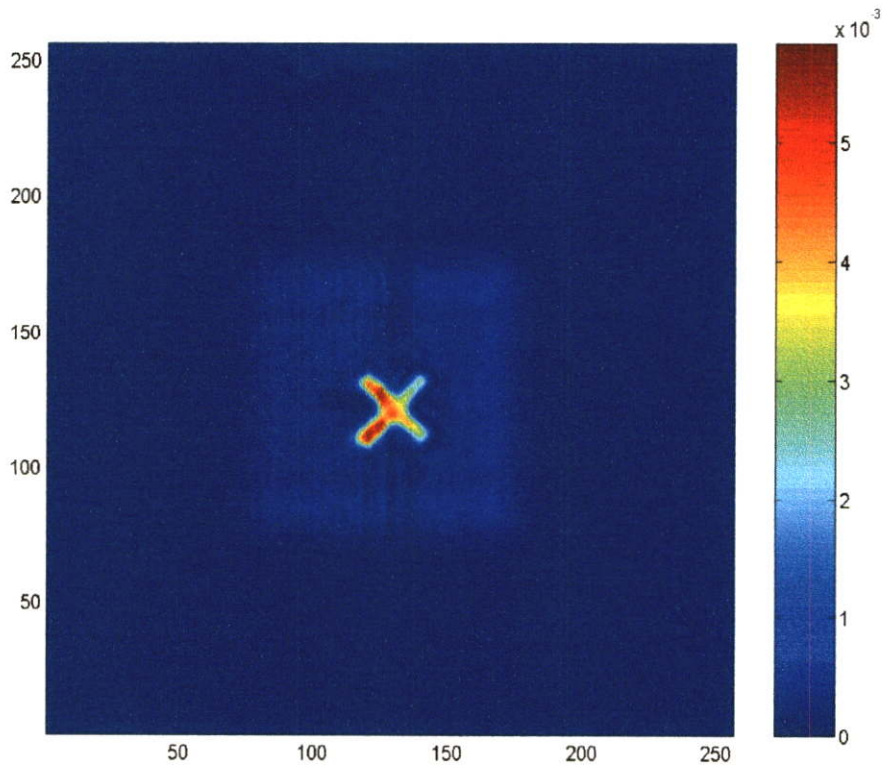


(ข).

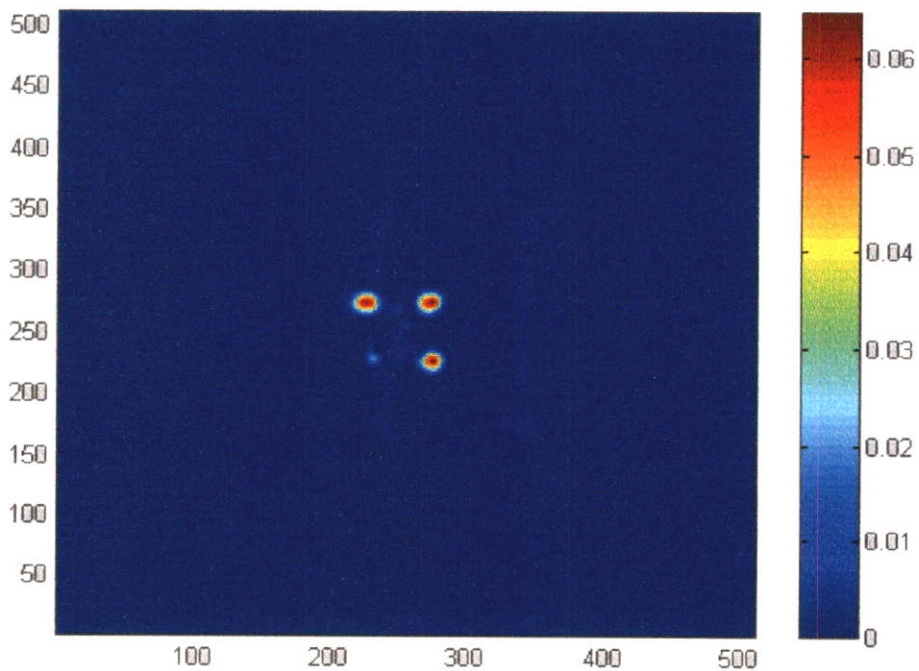
รูปที่ 4.40 (ก). ภาพวัตถุลูกเทนนิสมีพอยล์และไม่มีพอยล์หุ้มเรียงกันสี่ลูก ลูกที่ 3 จากซ้าย จะยื่นออกมาข้างหน้าและเฉียง (ข). ภาพที่ได้จากการสแกนเทียบกับภาพวัตถุ ความละเอียด 256x256 ตำแหน่ง ระยะระหว่างวัตถุกับฮอρν 288 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 200 kHz



รูปที่ 4.41 วัตถุวงกลมทองเหลือง ความละเอียด 256x256 ตำแหน่ง ระยะระหว่างวัตถุกับฮอρν 288 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 50 KHz



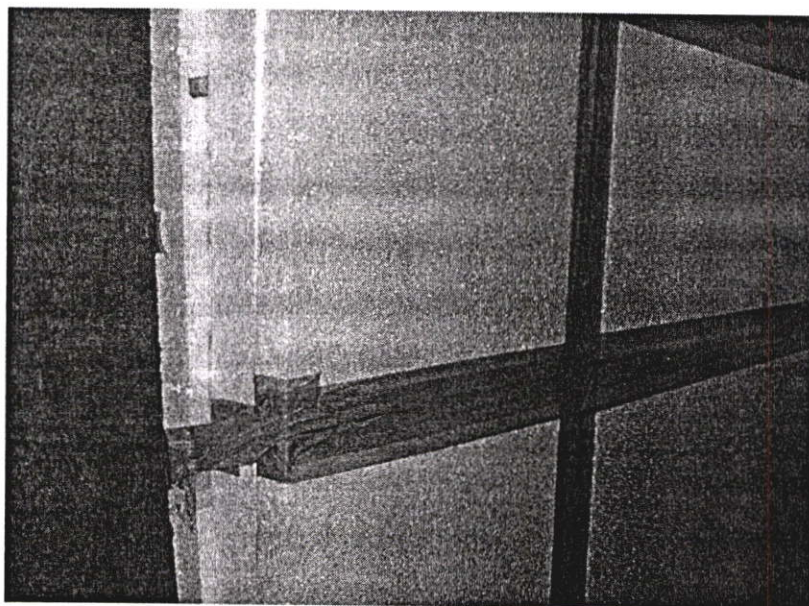
รูปที่ 4.42 วัตถุกากบาทของเหลืออง ความละเอียด 256x256 ตำแหน่ง ระยะระหว่างวัตถุกับฮอรั่น 288 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 200 kHz



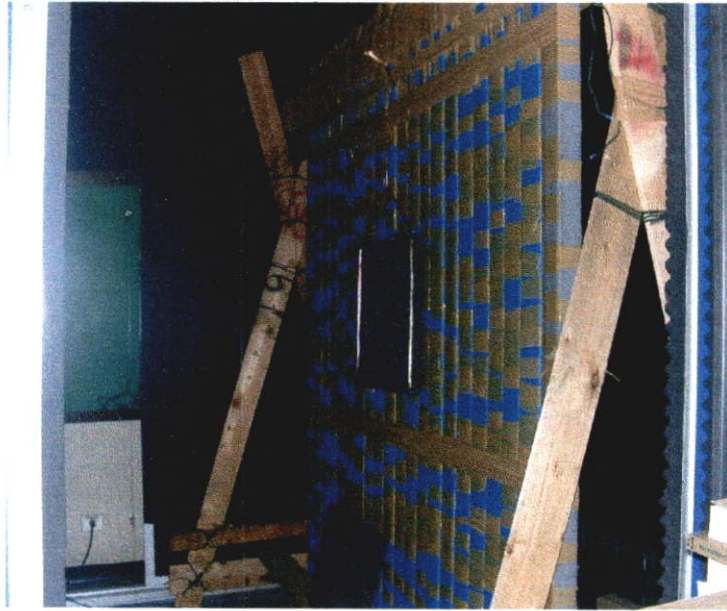
รูปที่ 4.43 วัตถุวงกลมสี่วงขนาดไม่เท่ากันมีฟอยล์ลูมิเนียมหุ้มเป็นวัตถุของเหลืออง ระยะระหว่างวัตถุกับฮอรั่น 288 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 50 KHz

4.3.8 การทดลองมองภาพวัตถุผ่านสิ่งบดบังและมีการปรับเพิ่มความหนาของวัสดุที่บดบัง

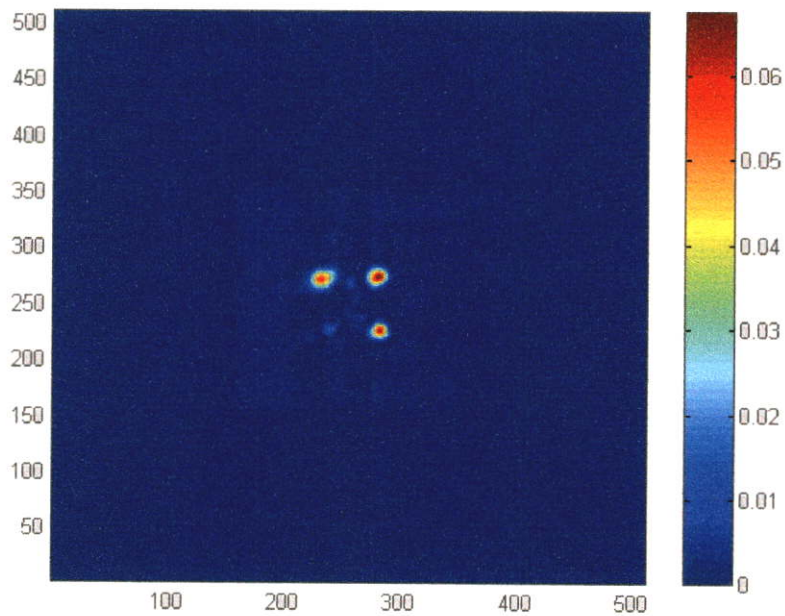
จากการทดลองที่ 4.3.7 สมมุติฐานของคลื่นไมโครเวฟกำลังต่ำสามารถทะลุผ่านวัสดุจำพวก ไดอิเล็กทริก, ทราาย, ยาง ทำการศึกษาทดลองโดยการสร้างกำแพงโฟมและทราาย โดยกำแพงโฟมมีขนาดความหนา 5 ซม. สูง 2.5 ม. ส่วนกำแพงทราายหนา 10 ซม. สูง 2.5 ม. ภาพของกำแพงทั้งสองแสดงดังรูป 4.44 และ 4.45 การทดลองทะลุผ่านโดยปรับเพิ่มความหนาของกำแพงวิเคราะห์รูปที่ได้ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร การทดลองในรูปที่ 4.46, 4.47, 4.48 และ 4.49 ใช้กำแพงโฟมมีความหนา 10 และ 18 ซม. คลื่นไมโครเวฟกำลังต่ำ สามารถทะลุผ่านได้ภาพเหมือนกับไม่มีกำแพงโฟม การทดลองรูปที่ 4.50 , 4.51 และ 4.52 ใช้กำแพงทราายหนา 10 ซม. มีภาพซ้อนของวัตถุเกิดขึ้นเนื่องจากการสะท้อนคลื่นวัตถุที่กำแพงทราายด้านหลังกลับสู่วัตถุ และสะท้อนกลับผ่านกำแพงทราายมาที่ระนาบสังเกต ภาพซ้อนวัตถุที่ได้มีความเข้มของภาพน้อยกว่าภาพวัตถุและภาพไม่ชัด ภาพวัตถุที่ได้มีความเข้มน้อยกว่ารูปที่ไม่มีกำแพงบดบังวัตถุ มีลักษณะบิดเบือนไปจากภาพจริงแต่ยังมีลักษณะคล้ายวัตถุ รูปที่ได้จะเป็นภาพวัตถุจากสัญญาณคลื่นกำลังต่ำ เนื่องจากการลดทอนของสัญญาณที่ทะลุผ่านกำแพงทราายมีความชัดของภาพวัตถุน้อยกว่าภาพที่ใช้กำแพงโฟม



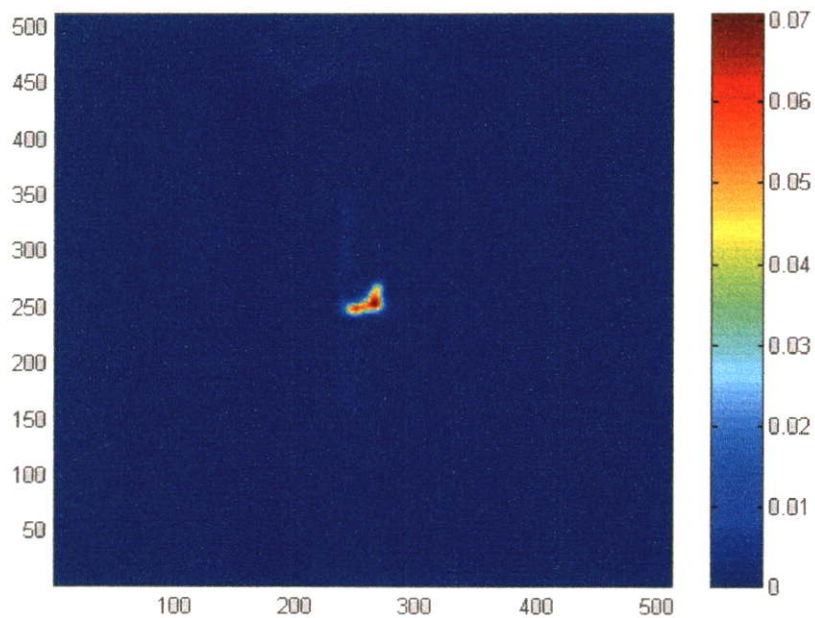
รูปที่ 4.44 กำแพงโฟมที่ใช้ในการทดสอบการทะลุผ่านของคลื่นไมโครเวฟกำลังต่ำแบบปรับความหนาของกำแพงครั้งละ 5 ซม.



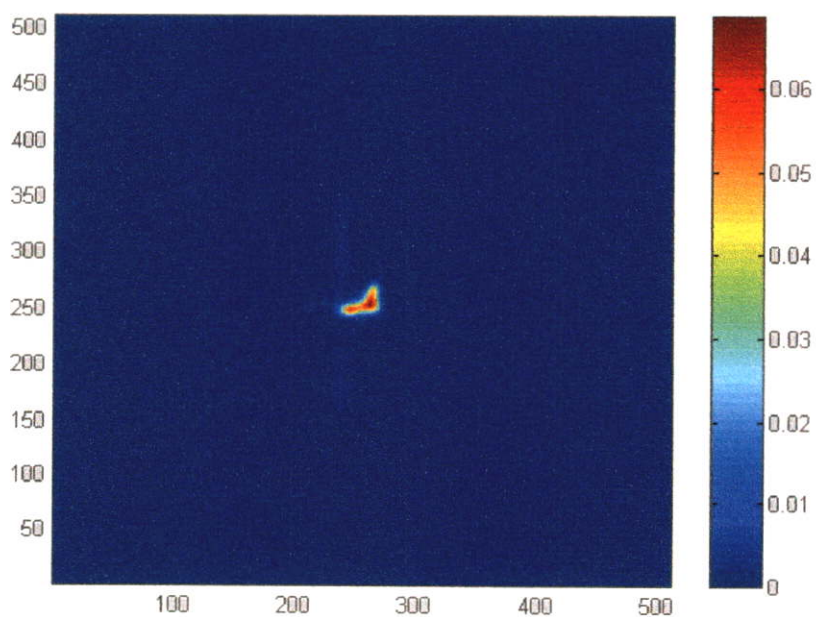
รูปที่ 4.45 กำแพงทรายที่ใช้ในการทดสอบการทะลุผ่านของคลื่นไมโครเวฟกำลังต่ำแบบปรับความหนาของกำแพงครั้งละ 10 ซม.



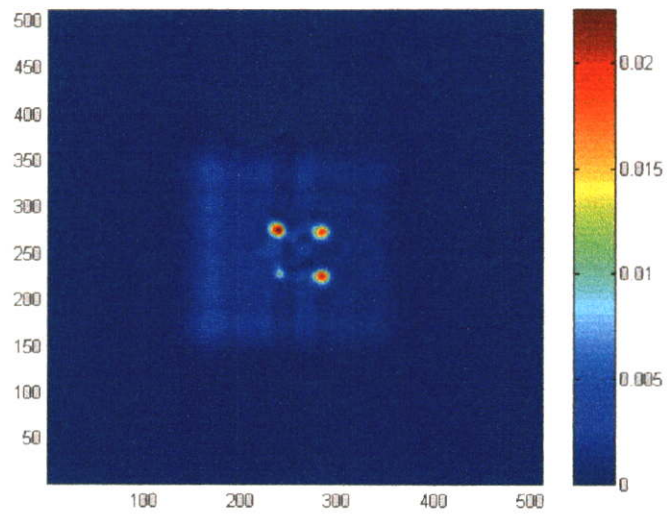
รูปที่ 4.46 วัดถ่วงกลมสี่วงขนาดไม่เท่ากัน ความละเอียด 256x256 ตำแหน่ง ระยะระหว่างวัดกับฮอร์น 288 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 200 kHz มีโพมบังหนา 10 ซม.



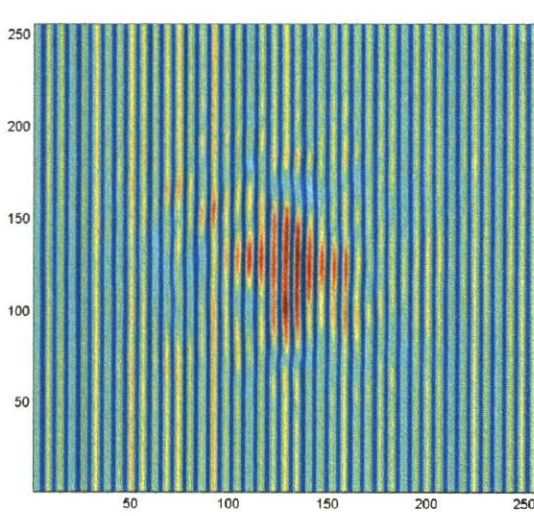
รูปที่ 4.47 วัตถุปืน ความละเอียด 256x256 ตำแหน่ง ระยะระหว่างวัตถุกับฮอรั 288 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 200 kHz มีโฟมบังหนา 10 ซม.



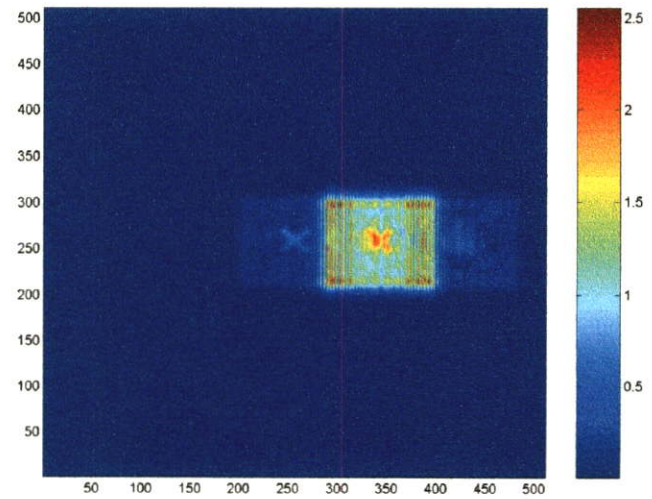
รูปที่ 4.48 วัตถุปืน ความละเอียด 256x256 ระยะระหว่างวัตถุกับฮอรั 288 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 200 kHz มีโฟมบังหนา 18 ซม.



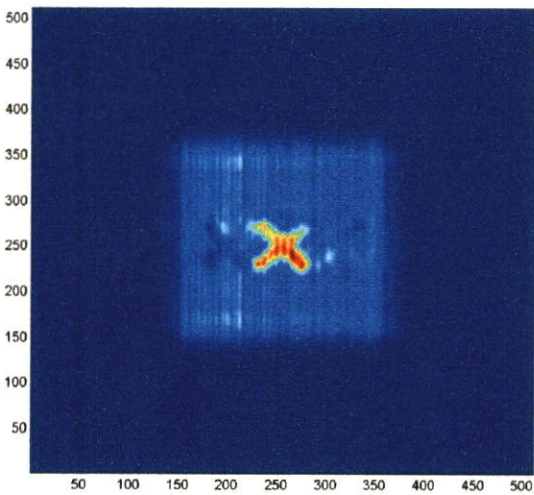
รูปที่ 4.49 วัดวงกลมสี่วง ความละเอียด 256x256 ระยะระหว่างวัดกับฮอรัซ 288 ซม. ความถี่ในการมอดูเลต 200 kHz มีกำแพงทรายบังหน้า 10 ซม.



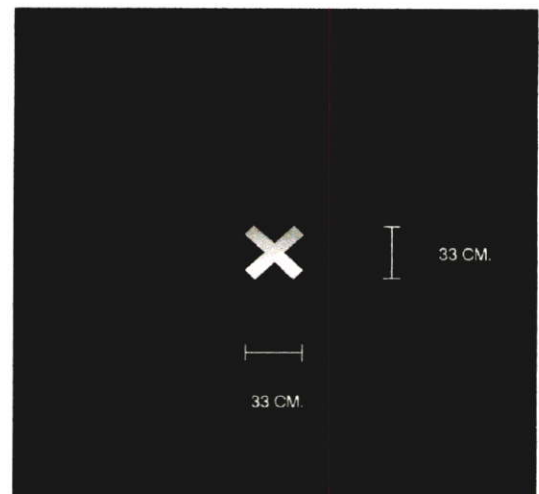
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.50 วัตถุกากบาทใหญ่สแตนเลส

พร้อมภาพฮอโลแกรม และภาพวัตถุ

(ข). ภาพฮอโลแกรมที่ทำการสร้างภาพกลับ

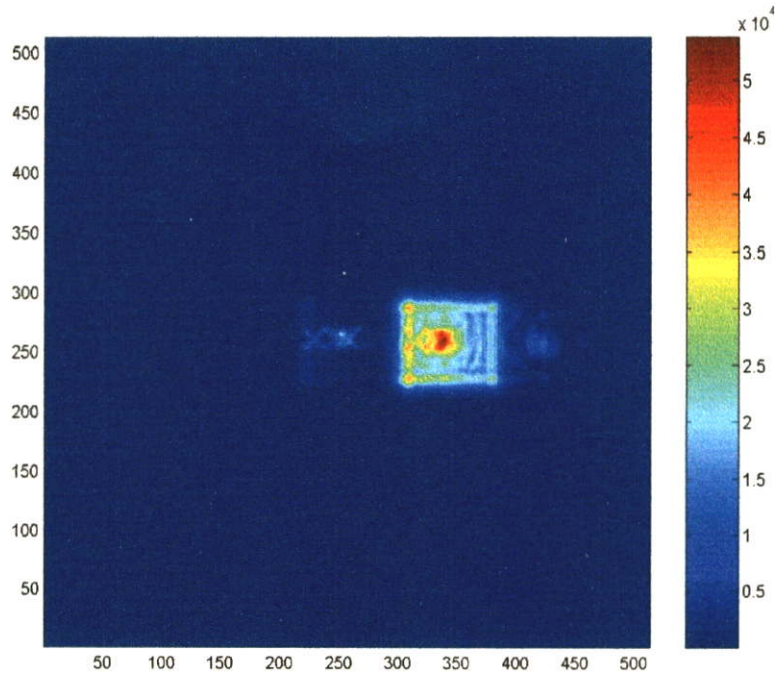
(ง) ภาพวัตถุที่ทำการวัดขนาดก่อนการสแกนภาพ

มีกำแพงทรายบังมีความหนา 10 ซม.

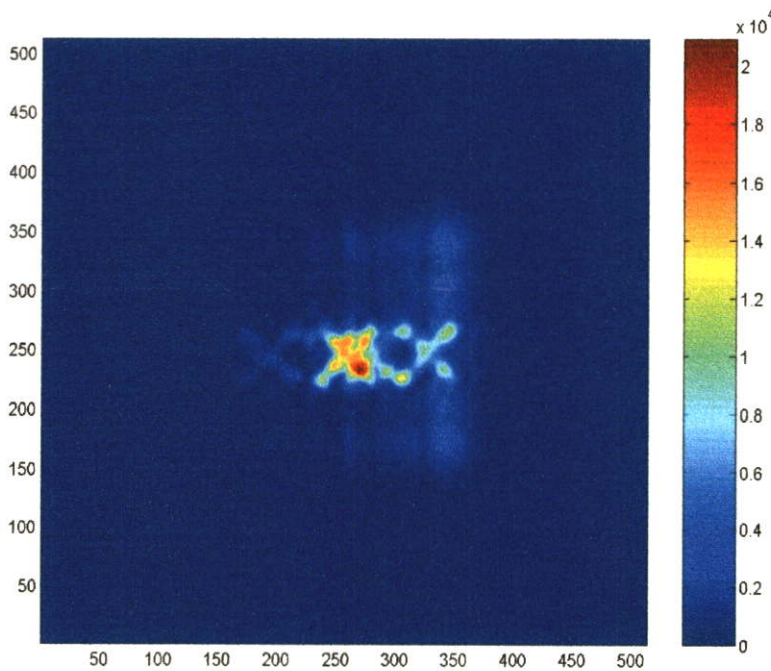
(ก). ภาพฮอโลแกรมที่เกิดจากการเลี้ยวเบน

(ค) ภาพฮอโลแกรมที่ทำการขยายภาพวัตถุ

(ง) ภาพวัตถุที่ทำการวัดขนาดก่อนการสแกนภาพ

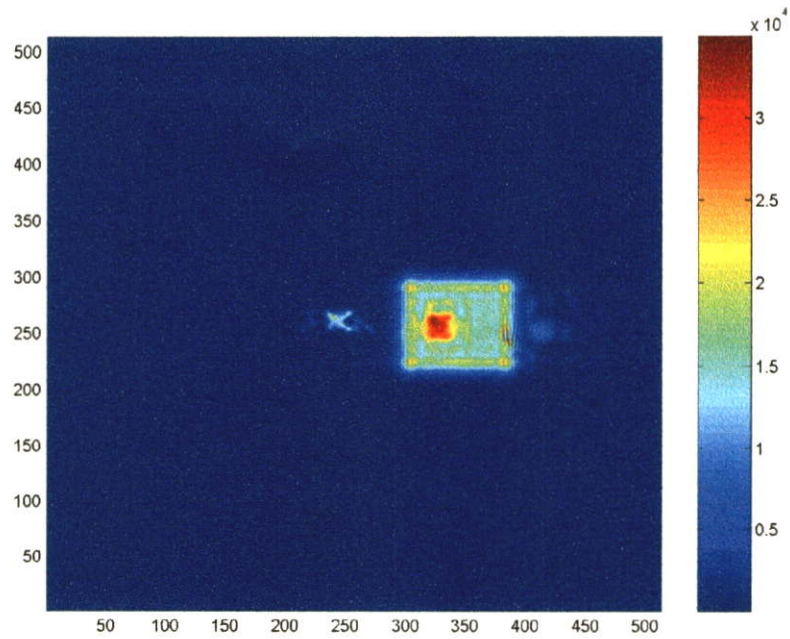


(ก).

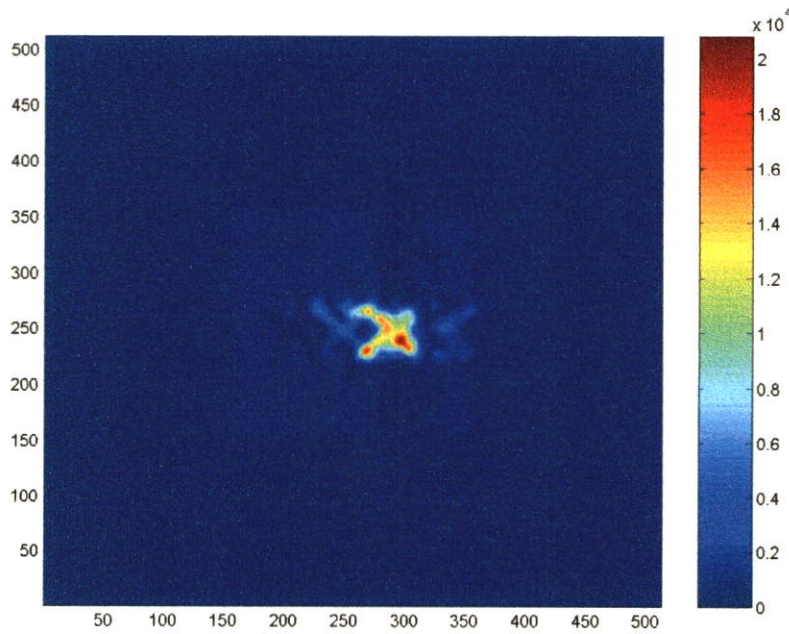


(ข).

รูปที่ 4.51 วัตถุภาพบาทใหญ่สุดเตนเลส ระยะจากช่องสังเกตถึงไดโพลกระเจิงคลื่น 128.75 ซม. ระยะจากช่องสังเกตถึงระนาบวัตถุ 218 ซม. มีทรายบั้งและกำแพงทรายหนา 10 ซม. พร้อมภาพฮอโลแกรม และภาพวัตถุ (ก). ภาพฮอโลแกรมที่ทำการสร้างภาพกลับจากการเลี้ยวเบน (ข). ภาพที่ได้ทำการขยายภาพวัตถุ



(ก).

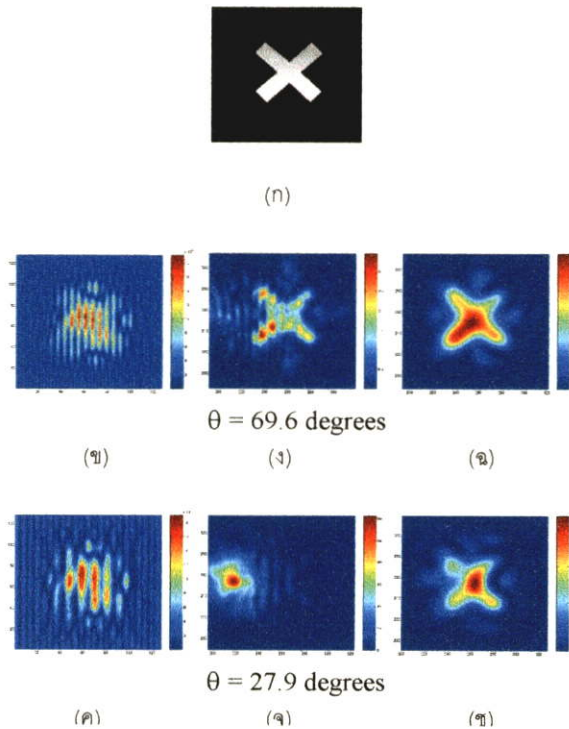


(ข).

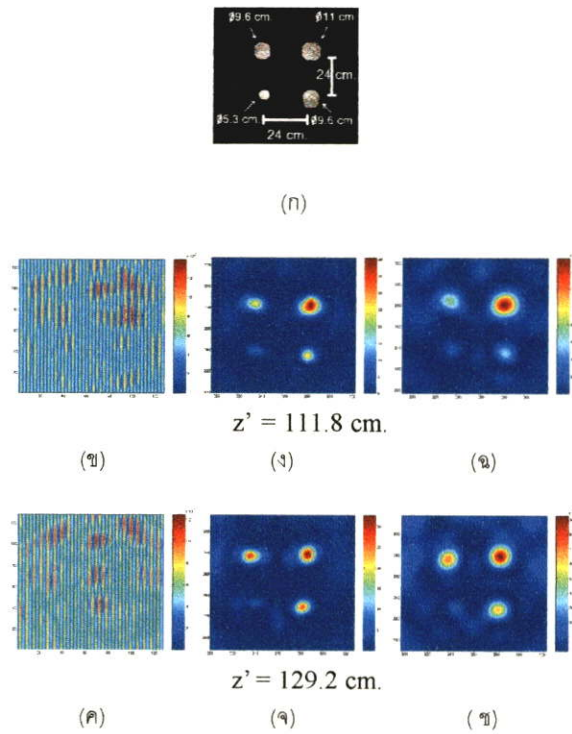
รูปที่ 4.52 ภาพวัตถุจากภาพใหญ่สแตนเลสเลื่อนไปทางขวาจากกึ่งกลางช่องสังเกต 20 ซม. ระยะจากช่องสังเกตถึงไดโพลกระเจิงคลื่น 117.25 ซม. ระยะจากช่องสังเกตถึงระนาบวัตถุ 218 ซม. มีทรายบังและกำแพงทรายหนา 10 ซม. พร้อมภาพฮอโลแกรม และภาพวัตถุ (ก). ภาพฮอโลแกรมที่ทำการสร้างภาพกลับ (Reconstruct) (ข). ภาพที่ทำการขยายภาพวัตถุ

4.3.9 ผลการทดลองมองภาพแบบสเปกตรัมทำมุมย้อนกลับ เพื่อหลีกเลี่ยงภาพอันดับศูนย์

ภาพฮอโลแกรมที่ได้จากการทดลองส่วนมาก จะมีการเหลื่อมซ้อนกันของภาพวัตถุ และภาพอันดับศูนย์ วิธีการหนึ่งของการได้รับภาพวัตถุโดยให้มีการรบกวนของภาพลดงวิธีหนึ่งคือการเบนไปของมุมอ้างอิง ดังการทดลองที่ 4.2.5 เพื่อให้ภาพอันดับศูนย์เลียงจากวัตถุจริงด้วยวิธีสเปกตรัมทำมุม แต่รูปที่ได้จะมีการบิดเบือนจากภาพวัตถุเนื่องจากมุมอ้างอิงที่เปลี่ยนแปลงไป มีวิธีสังเคราะห์วิธีหนึ่งที่ไม่ต้องเปลี่ยนแปลงมุมอ้างอิงแต่สามารถหลบเลี่ยงภาพอันดับศูนย์ได้คือการใช้วิธีการสังเคราะห์ภาพ จากสเปกตรัมทำมุมย้อนกลับ เปรียบเทียบกับรูปที่ไม่ได้ลดสัญญาณรบกวน ทำการสแกนภาพวัตถุรูปกากบาท และภาพวงกลมสีวง ที่ระยะสังเกต $z' = 47.4$ ซึ่งอยู่ในระยะเฟรลน์เนลด้วยการบันทึกมุมของคลื่นอ้างอิง ที่เปลี่ยนแปลงสองค่าทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับวิธีการสร้างภาพปกติแบบเฟรลน์เนล ที่แสดงดังรูปที่ 4.53 และ 4.54



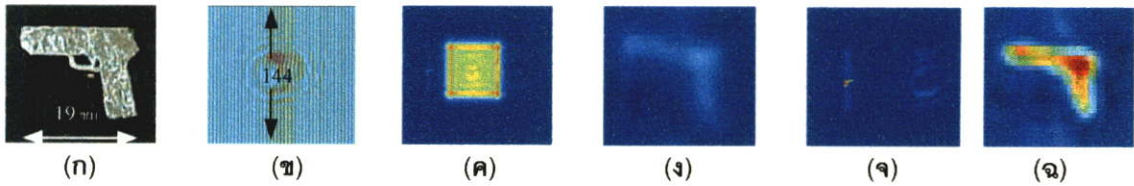
รูปที่ 4.53 วัตถุรูปกากบาท ที่ระยะสังเกต $z' = 47.4$ ด้วยการบันทึกมุมคลื่นอ้างอิงที่เปลี่ยนแปลงสองค่า ก) วัตถุ ข) -ค) ภาพฮอโลแกรม ง) -จ) ภาพวิธีการทราานฟอร์มแบบเฟรลน์เนล ฉ) -ช) ภาพการแพร่แบบสเปกตรัมทำมุมย้อนกลับ



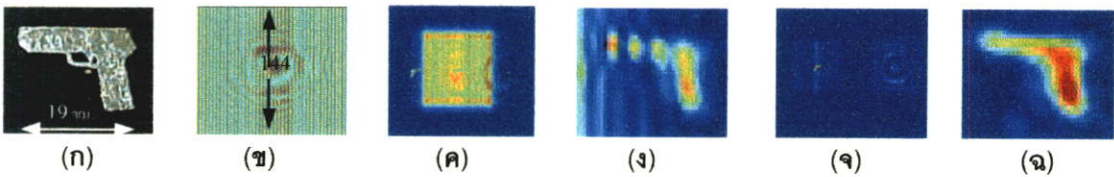
รูปที่ 4.54 วัตถุรูปวงกลมสี่วงไม่เท่ากัน ที่ระยะสังเกต $z' = 47.4$ ด้วยการบันทึกมุมคลื่นอ้างอิงที่เปลี่ยนแปลงสองค่า ก) วัตถุ ข) -ค) ภาพฮอโลแกรม ง) -ฉ) ภาพวิธีการทรานฟอร์มแบบเฟร็ดเนล ฉ) -ช) ภาพการแพร่แบบสเปกตรัมทำมุมย้อนกลับ

4.3.10 ผลการทดลองการกำจัดภาพอันดับศูนย์ในงานไมโครเวฟฮอโลแกรมแบบเยื้องแกน

ตัวอย่างของผลการทดลองบันทึกข้อมูลฮอโลแกรมและสร้างภาพวัตถุคืนกลับในกรณีของภาพปกติเปรียบเทียบกับรูปที่มีการกำจัดภาพอันดับศูนย์ สำหรับวัตถุโลหะรูปปืน ที่ระยะสังเกต d ที่แตกต่างกัน ผลเป็นดังรูปที่ 4.55 และ รูปที่ 4.56 เห็นได้ว่า รูปปืนที่ระยะ d ที่ไกลกว่าจะมีขนาดเล็กกว่าระยะ d ที่ใกล้กว่าและเมื่อทำการลบ dc เทอมออกไปรูปที่ได้มีความชัดเจนมากขึ้นกว่าตอนไม่ได้ลบภาพอันดับศูนย์



รูปที่ 4.55 วัตถุรูปปืน ที่ระยะ $d = 104$ ซม. (ก)วัตถุ (ข)ฮอโลแกรม (ค) ภาพอันดับศูนย์ (ง)ภาพวัตถุทางซ้ายในภาพ ค. (ฉ) เมื่อตัดภาพอันดับศูนย์ (ฉ) ภาพวัตถุทางซ้ายในภาพ ง.



รูปที่ 4.56 วัตถุรูปปืน ที่ระยะ $d = 79$ ซม. (ก) วัตถุ (ข) ฮอโลแกรม (ค) ภาพอันดับศูนย์ (ง) ภาพวัตถุทางซ้ายในภาพ ค. (ฉ) เมื่อตัดภาพอันดับศูนย์ (ฉ) ภาพวัตถุทางซ้ายในภาพ ง.

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและวิจัย

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาระบบที่มีอยู่เดิมของชุดการทดลองการสร้างภาพวัตถุด้วยไมโครเวฟฮอโลกราฟีคลื่นกำลังต่ำแถบเอ็กซ์ แบบที่ใช้ตัวกระจะเจิงคลื่นมอดูเลตด้วยแสงเป็นส่วนหลักของการวัดสัญญาณ ระบบใหม่สามารถรองรับการสแกนข้อมูลไมโครเวฟฮอโลแกรมที่มีขนาด 2.5×2.5 ตารางเมตร โดยใหญ่กว่าระบบเดิม 4 เท่า ใช้เวลาสแกนจำนวน 256×256 จุดการทดลองในเวลาทั้งสิ้น 12 ชั่วโมง เร็วกว่าระบบเดิมกว่า 4 เท่า เช่นกันโดยตัดปัญหาสัญญาณรบกวนในระบบเดิม เนื่องจากการสะท้อนอันไม่พึงปรารถนาด้วยการสร้างห้องทดลองขนาด $3 \times 3 \times 3$ ลูกบาศก์เมตร บุด้วยวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่สร้างและผ่านการทดสอบ ในส่วนของความพยายามปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลองและอัลกอริทึมของการสร้างภาพคืนกลับ ได้ข้อสรุปจากผลการทดลองต่างๆ ดังนี้

1. การทดลองศึกษาผลการมอดูเลตโดโพลที่ทำด้วยอุปกรณ์โฟโตนิกกับแสงทั่วไป ที่หาได้ในประเทศพบว่าความยาวขาอุปกรณ์ ที่ต่างออกเพื่อให้เป็นโดโพลนั้น มีการกระเจิงได้ดีที่สุดความยาวประมาณ 0.45 เท่าของความยาวคลื่น สอดคล้องกับทฤษฎีพื้นฐานของการกระเจิงคลื่นโดยเส้นลวดบางที่ความถี่การมอดูเลตต่างๆเท่ากัน อุปกรณ์โฟโตนิกกับแสงที่มีเซนซิวิตีดีกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มที่ดีกว่า จะมีการกระเจิงคลื่นได้ดีกว่า และนอกจากนี้อุปกรณ์ที่มีการตอบสนองตัวแปร Turn-On , Turn-Off Time ที่เร็วกว่าก็จะสามารถให้การกระเจิงคลื่นที่ดีกว่า สำหรับการมอดูเลตที่ความถี่สูง โฟโตไดโอด MRD 71 มีความเหมาะสมกับระบบปัจจุบันสามารถทำการมอดูเลตที่ความถี่สูง 200 KHZ โดยยังมีขนาดสัญญาณการกระเจิงคลื่นมากพอเมื่อเทียบกับสัญญาณรบกวนในระบบ

2. จากผลการตอบสนองการกระจายความเข้ม เนื่องจากการพิจารณาภาพวัตถุ ต่างๆที่สร้างขึ้นพบว่าการแยกแยะ (Resolution) ของระบบที่มีการเลื่อนทั้งหัวส่งและรับคลื่นไมโครเวฟไปพร้อมกันกับที่วัตถุที่มีค่าประมาณ 5 ซม. จะได้รายละเอียดที่ดีกว่าระบบไมโครเวฟฮอโลกราฟีแบบธรรมดา ที่อิงกับการจัดเรียงแบบไมโครเวฟฮอโลกราฟีทางแสง

3. การเพิ่มพื้นที่ในการเก็บข้อมูลทางฮอโลแกรม มีผลทำให้คุณภาพของวัตถุดีขึ้น
4. การลดระยะระหว่างวัตถุกับระนาบฮอโลแกรมยังมีผลไม่เด่นชัดในการเพิ่มคุณภาพของภาพวัตถุทั้งนี้อาจเนื่องด้วยการศึกษาที่ยังคงมีข้อจำกัดในด้านของขนาดและบริเวณทดลองและขนาดของฮอโลแกรม ทำให้ไม่สามารถเลื่อนวัตถุได้มากนักโดยไม่ขัดกับเงื่อนไขการประมาณของเฟรลเนล
5. การเพิ่มระยะระหว่างระนาบเซนเซอร์กับวัตถุมีผลทำให้ภาพวัตถุมีขนาดเล็กลงไปตามระยะของการมองภาพ
6. การปรับเปลี่ยนมุมระหว่างคลื่นอ้างอิงกับคลื่นวัตถุมีค่าน้อยเกินไปทำให้ภาพอันดับศูนย์มาดบังรบกวนคุณภาพของภาพวัตถุและเมื่อมุมของคลื่นทั้งสองน้อยไปคลื่นทั้งสองจะไม่แทรกสอดให้เกิดริ้วฮอโลแกรมของภาพมีการบิดเบือนไปของภาพวัตถุ มุมของคลื่นอ้างอิงที่เหมาะสมมีความสำคัญต่อคุณภาพของภาพวัตถุที่ได้รับ
7. ระบบสามารถมองเห็นวัตถุที่ไม่ใช้วัสดุได้ แต่ภาพจะไม่ชัดเจนเนื่องจากสัญญาณคลื่นสะท้อนที่ต่ำกว่ากรณีวัสดุโลหะมาก
8. สามารถมองเห็นวัสดุที่บดบังด้วยวัสดุต่างๆเช่นโฟม ไม้อัด และกำแพงทรายโดยจะมีภาพซ้อนในกรณีของกำแพงทรายอันเนื่องจากการสะท้อนหลายครั้งบริเวณด้านหลังของกำแพงกับวัตถุ
9. การใช้เทคนิคสเปกตรัมทำมูมย้อนกลับ ช่วยในการหลีกเลี่ยงภาพอันดับศูนย์ได้ดีกว่าเทคนิคการประมาณเฟรลเนล
10. การหักกลับข้อมูลฮอโลแกรมด้วยความเข้มเฉลี่ยของฮอโลแกรมก่อนการประมวลผลช่วยลดผลของภาพอันดับศูนย์ทำให้ภาพวัตถุชัดเจนยิ่งขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในระบบที่จะพัฒนาในขั้นต่อไปของการวิจัยถ้าจะอิงกับหลักการใช้ไดโพลกระเจิงคลื่นด้วยแสงจำเป็นต้องหาโฟโตไดโอดที่มี Rise Time ต่ำกว่า 1 นาโนวินาที และควรจะมีตัวถังทำด้วยพลาสติกเพื่อลดปัญหาการสะท้อนคลื่น ทั้งนี้จึงสามารถมอดูเลตได้ที่ความถี่สูงในระดับเมกะเฮิรตซ์ จะทำให้การสแกนแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นอะเรย์ของไดโอดในอนาคตเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชำนาญ สำเนาพ็อคค่า. 2542. "ระบบการสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ". วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์. คณะบัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] ธวัชชัย คำศรี. 2542. "การมองภาพวัตถุที่บดบังด้วยคลื่นไมโครเวฟ". วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต. ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] Tricoles, G. and Farhat, N.H. 1977. "Microwave holography: applications and techniques". Proc. of the IEEE. 65(1). pp.108-102.
- [4] Born, M. and Wolf, E. 1964. *Principle of Optics*. New York :
- [5] Wang, Johnson J.H. 1991. *Generalized Moment Methods in Electromagnetics*. John Wiley, New York:
- [6] Bancroft, R. 1996. *Understanding Electromagnetic Scattering Using The Moment Method*. London: Artech House.
- [7] Cullen, A.L. and Parr, J.C. 1955. "A new perturbation method for measuring microwave field in free space". Proc. of the IEE. 102(B). pp.836-844.
- [8] Hajnai, J.V. 1987. "Compound modulated scatterer measuring system". Proc. of the IEE. 134H(4). pp. 350-356.
- [9] Orme, R.D. Anderson, A.P. 1973. "High resolution microwave holographic technique application to the imaging of objects obscured by dielectric media". Proc. of the IEE. 120(4). pp.401-406.
- [10] Richmond J.H. 1955. "A modulated scattering technique for measurement of field distributions". IRE Trans. on Microwave Theory and Techniques. MTT-3. pp. 13-15.
- [11] Leith, E.N. 1971. "Quasi-Holographic Techniques in The Microwave Region". Proc. of the IEEE. vol.59, no.9, pp.1305-1318.
- [12] Aoki, S. 1971. "Microwave Holographic and Optical Reconstruction". *Applied Optics*. vol.6, no.11, pp.1943-1946.

- [13] Augustine,C.F. Deutsch,C. Fritzler,D. Marom,E. 1969. "Microwave Holography Using Liquid Crystal Area Detectors". *Proc. of the IEEE*. vol. 57, no.9, pp.1333-1334.
- [14] Vimonkiattikun,T. Panklang,J. Srongprapa,A. 2000. "Microwave holographic-imaging remote objects using light-modulated scattering technique". *Proc. 21st Asian Conference on Remote sensing(Taipei, Taiwan)*. vol2, pp.828-833.
- [15] Aoki,Y. Boivin,A. 1970. "Computer Reconstruction of Images Frame Microwave Hologram,". *Proc. of the IEEE*. vol.58, no.5, pp.821-822.
- [16] Ching.O.Yue. Rope.E.L. and Tricoles,G. 1975. "Two Reconstruction Methods For Microwave Imaging of Buried Dielectric Anomalies". *IEEE Trans. Computer*. vol.c-24, pp.381-390.
- [17] Goodman,J.W. 1968. *Introduction to Fourier Optics*. San Francisco, California: McGraw-Hill. Chap.4,pp.57-74.
- [18] N.H,Farhat. 1989. "Microwave Diversity Imaging and Automated Target Identification Based on Models of Neural Networks". *Proc. of the IEEE*. vol.77, no.5, pp.670-681.
- [19] Goodman,J.W. 1968. *Introduction to Fourier Optics*. McGraw-Hill, San Francisco, California: Chap.8,pp.198-268.
- [20] N.H,Farhat W.R,Guard. "Holographic Imaging with Object Synthesized Apertures," *IEEE Trans. on MTT*, Vol.Mtt-22,pp.531-535, May 1974.
- [21] Boyer,A.L. Hirsch,P.M. Jordan,J.A. Lesem.L.B. Van Rooy.DL. 1971 . "Reconstruction of Ultrasonic Images By Backward Propagation". *Acoustical Holography*. New York-London: Plenum Press. vol.3,pp.333-348.
- [22] Etienne Cuche,Pierre Marquet, and Christian Depeursinge "Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography" *Applied Optics*. Vol.39, No.23, August 2000. pp.4070-4075.
- [23] Thomas M. Kreis. Werner P.O. Juptner. "Suppression of the dc term in digital holography" *Opt. Eng.* 36(8),August 1997. p.2357-2360

ภาคผนวก (ก).

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

Microwave holographic- imaging remote objects using light-modulated scattering technique

Thammasak Vimonkiattikun¹, Jirawath Panklang², Anupong Srongprapa³

^{1,2}Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering

³Applied Microwave Research Laboratory(AMRL)

Department of Applied Physics, Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520,

Tel (66-2)3269980 ext. 213/214, fax: (66-2)3269981, ksanupon@kmitl.ac.th,
Thailand

KEY WORDS: Image Processing, Microwave, Holography, Digital Signal Processing, Remote Sensing, Modulated Scattering.

ABSTRACT

Modulated scattering technique is mostly used for measuring microwave fields with less perturbation to obtain near – field antenna pattern, such a technique can also be used for microwave holography. A computerized system for recording and reconstruction of microwave hologram at 9.2 GHz X-band frequency is described. A small dipole loaded by MRD 721 photodiode is suspended by thin balsa post at some distance along symmetric Z-axis of the fixed illuminating pyramidal horn antenna. The scattering cross-section of the dipole was modulated by 50 KHz optical signals guided to the diode through a plastic optical fiber. Low-intensity microwave was transmitted to a remote object via a free space and then reflected from object surface. Both the outgoing and backward wave excited the scattering wave, originated from the dipole, then propagated back to the same antenna and mixed with the synthetic off-axis internal reference wave providing by a programmable microwave phase shifter. The object was scanned 1/3 of wavelength stepwise in both X and Y directions, perpendicular to Z-axis, generating 128x128 sampling. For each object position, the output current of the mixer was preamplified and coherently measured at the modulated frequency using a lock-in amplifier to form hologram intensity signals. Fresnel diffraction approximation is used in digital reconstruction from stored hologram data to yield the two-dimensional image of the object. The distance between antenna, scatterer and object plane was allowed to varied. The higher resolving power of system compare with the Rayleigh limit for a conventional hologram has been demonstrated.

1. INTRODUCTION

As a mean of seeing through optically opaque medium, various application areas of microwave holography (Tricole, 1977) are possible such as all-weather remote sensing, medical diagnosis, buried objects locator, etc. In ordinary system the microwave field scattered from a stationary object coherently illuminated from a stationary transmitter is mapped over a prescribed hologram recording aperture by means of a detector that is scanned over the aperture. The simplest one need a fixed reference beam to interfere with the object wave and creates wavefield pattern that can be measured by intensity sensitive detector. The more advance one uses coherent phase-locked receiver with local oscillator acting as synthetic internal reference beam. Normally, with regards to the actual size of the conventional probing detector for low intensity application, the detected wavefield is considerably disturbed.

This problem can be overcome by using modulated scattering technique, where the original ones measured the field using a scatterer which may be mechanically (Cullen and Parr,1955), electrically (Richmond,1955) or optically (Iizuka,1963) modulated with synchronous detection of the modulated scattered signal. Orme and Anderson (Orme,1973) used spinning dipole technique of Cullen and Parr in their high resolution microwave holographic imaging of the objects obscured by dielectric media. In the work described here, a system similar to Orme and Anderson's, has been used to perform two-dimensional image of remote metallic objects. Now, the scatterer, in the form of a selected high speed photodiode, is modulated optically via a plastic fiber (Hajnal,1987) and the system is computerized for creating arbitrary internal reference beam angle, scanning control, data collecting and performing image reconstruction digitally.

2. OFF-AXIS SCANNING SOURCE / RECEIVER MICROWAVE HOLOGRAPHY

In some situations where microwavefield can be appropriately described as scalar quantity, scalar diffraction theory of light wave can be used. It is well known in physical optics that light which passes through an aperture or reflects from a plana reflector is fully described by the phase and amplitude distribution in the aperture/or reflector area. According to The Huygens' principle, this is sufficient to reconstruct the light wave at any point behind the aperture (or in front of the reflector). If we describe phase and amplitude in the aperture plane $z = 0$ by the complex function $F(x,y)$, we obtain for the wave $f(x,y,z)$ which develops behind the aperture (Born and Wolf,1964)

$$f(x,y,z) = F(x,y)*G(x,y,z) \quad (1)$$

where the symbol * denotes convolution and G is a sperical wave of wavelength λ originating in the aperture plane. Thus $G = e^{j2\pi/\lambda} / r$ with $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, which becomes in Fresnel's approximation $r = z + \sqrt{(x^2 + y^2) / 2z}$ giving the function $f(x,y,z)$ to be found from a Fresnel's transform of $F(x,y)$. Figure.1 represents the general geometric set up of the scanning-source/receiver microwave hologram recording. Here, a point source, a sensor (or detector), and an object are located at 3 consecutive planes denoted by source plane, sensor plane and object plane respectively. Spherical wave emitted from point source at $P_1 (x,y,z)$ propagates to a point $P_2 (\zeta,\eta,o)$ on finite extended object at object plane. The reflected wave from point P_2 propagates to sensor at position $P_3 (u,v,w)$. If sensor and point source are scanned coincidently, (i.e. $x = u$, $y = v$) the reflected wavefunction at sensor plane are given by

$$\begin{aligned} a(x, y, w) &= a_0(x, y, w) \exp\{-j\phi(x, y, w)\} \\ &= A_4 \exp\{jk_2(w+z)\} \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} D(\zeta, \eta) \exp\left[jk_2 \left\{ \frac{(x-\zeta)^2 + (y-\eta)^2}{2wz/(w+z)} \right\} \right] \partial\zeta\partial\eta \quad (2) \end{aligned}$$

which is recognised as the diffraction field at plane $z' = wz/(w+z)$ distant from the object for the situation of conventional holography. The Rayleigh resolution limit of the system is then given by

$$\delta = \frac{\lambda wz}{D(w+z)} \quad (3)$$

(instead of $\frac{\lambda w}{D}$) where D is the hologram dimension.

At the sensor position there is also reference planewave field $b(x,y)$ whose direction of propagation make an incident angle θ to the normal of the plane. Thus

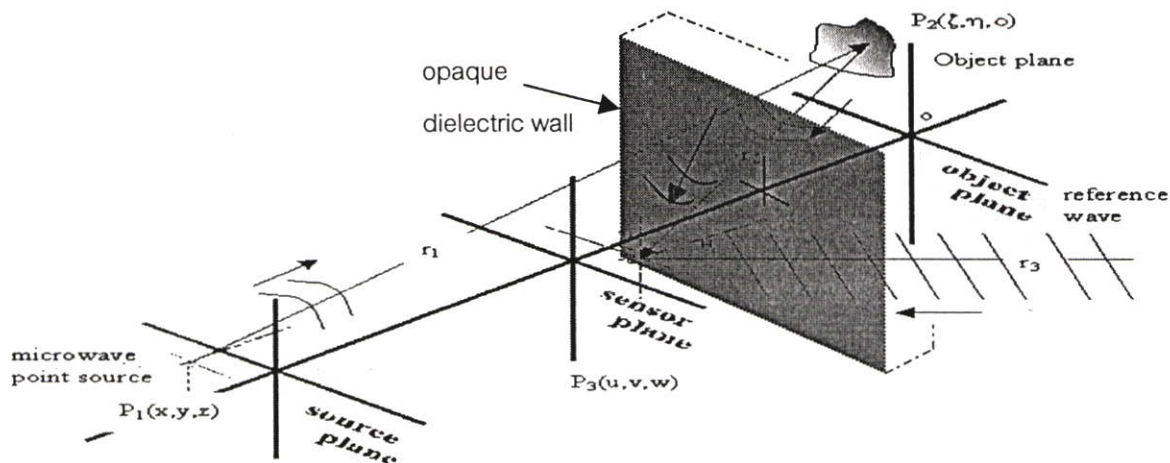


Figure 1. Recording Image data hologram of object using microwave

$$b(x,y) = b_0 \exp(-j2\pi\alpha x) \quad (4)$$

where α is spatial frequency of wavefront in the x direction which is equal to $\frac{\sin \theta}{\lambda}$, $\lambda = 2\pi/k$ is wavelength, and b_0 is the field amplitude.

If the total wave function is $C(x,y)$ and regards w as a constant, the intensity at sensor is

$$I(x,y) = C(x,y) \times C^*(x,y) \quad (5)$$

$$= (a + b)(a + b)^* = |a|^2 + |b|^2 + a^*b + ab^* \quad (6)$$

$$= \left(|a(x,y)|^2 + b_0^2 + b_0 a(x,y) \exp[j2\pi\alpha x] + b_0 a^*(x,y) \exp[-j2\pi\alpha x] \right) \quad (7)$$

Image reconstruction process concerns with the modification of the reconstructed reference plane wave $b^*(x,y)$ by the intensity distribution $I(x,y)$ to be $b^*(x,y) \times I(x,y)$. Fresnel's transform of the term $b_0^2 a^*(x,y)$ corresponds to the real image wavefield of the object at the image plane. There is also a direct illuminating field $E(u,v,w)$ which remain constant, as the sensor and source are scanned together. This term do not alter the results derived above significantly.

3. MODULATED SCATTERING MICROWAVE HOLOGRAPHIC SYSTEM

A schematic diagram of the system is shown in Figure 2. Experimental positions arrangement of the pyramidal microwave antenna, dipole scatterer and object are shown in Figure 3. Both the antenna radiating field and the synthetic off-axis reference wave providing by a programmable movable short phase-shifter are fed by a single 10 mw. 9.2 GHz. Gunn oscillator. Direct illuminating wave and the object wavefield excite the 2 cm.-long MRD 721 photodiode, optically modulated at 50 KHz. via a fiber optic cable, to produce modulated scattering wave travelling back to the same antenna and combines with the reference wave at the mixer. Synchronous demodulation of the mixer signal output after amplification by a low-noise preamplifier is done by using a lock-in amplifier to produce hologram intensity signals. In this computerized-controlled prototype system, the source and scatterer are stationary while the

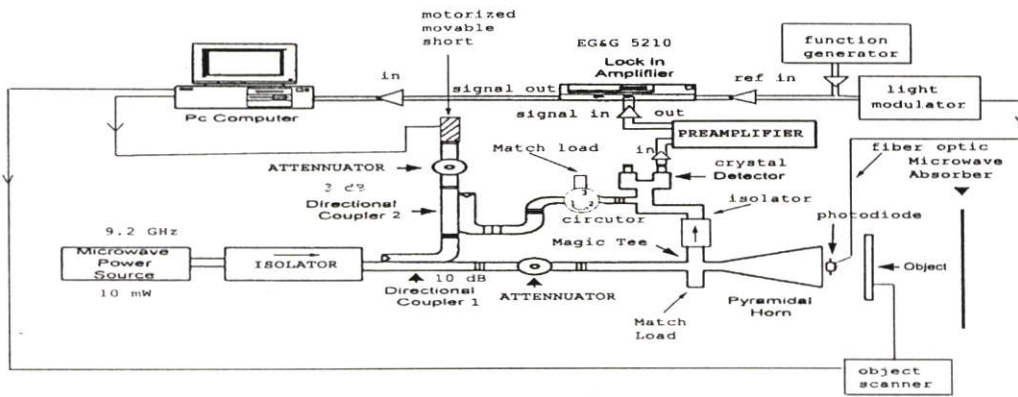


Figure. 2 Schematic diagram of microwave holographic system

object is scanned $1/3$ of wavelength stepwise in both x and y direction generating 128×128 sampling signals associate with each position. Fresnel diffraction approximation is used in digital reconstruction from stored hologram data to yield the two-dimensional image of the object.

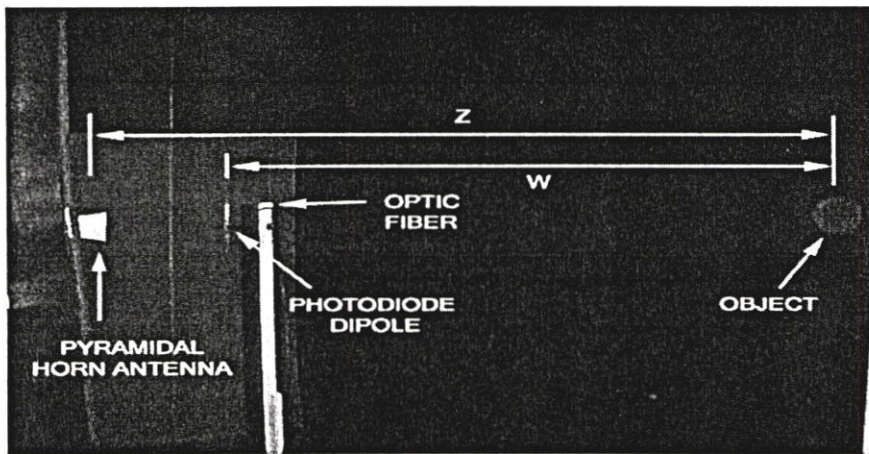


Figure. 3 Relative position between microwave antenna, dipole and object

4. EXPERIMENTED RESULTS

The system was successfully used to image flat metallic objects of various shape and size at different synthesized reference wave incident angle θ and limited distance, bound by the size of the existent small anechoic chamber $3.5 \times 3.5 \times 3.5 \text{ m}^3$ together with the degrading ratio S/N of the signal, but not too short to violate the Fresnel approximation. Some of the results are shown in Figure 4 for donut-shape object (for $z = 288 \text{ cm.}$, $w = 211.5 \text{ cm.}$, $\theta = 44.3^\circ$) and dumbbell-shape object (for $z = 288 \text{ cm.}$, $w = 249.5 \text{ cm.}$, $\theta = 44.3^\circ$). Figure 5 shows the full width-half maximum of the image field intensity distribution of a 20 cm. diameter plate (for which $z = 288 \text{ cm.}$, $w = 249.5 \text{ cm.}$, $\theta = 44.3^\circ$). Consider this case as an example, the theoretical resolution limits are 5.44 cm. and 2.92 cm. for the conventional and source-receiver type hologram respectively. The estimated difference between actual object size and full width-half maximum of 2.7 cm. implies that the resolving power of the system that has been developed is significantly better than conventional system.

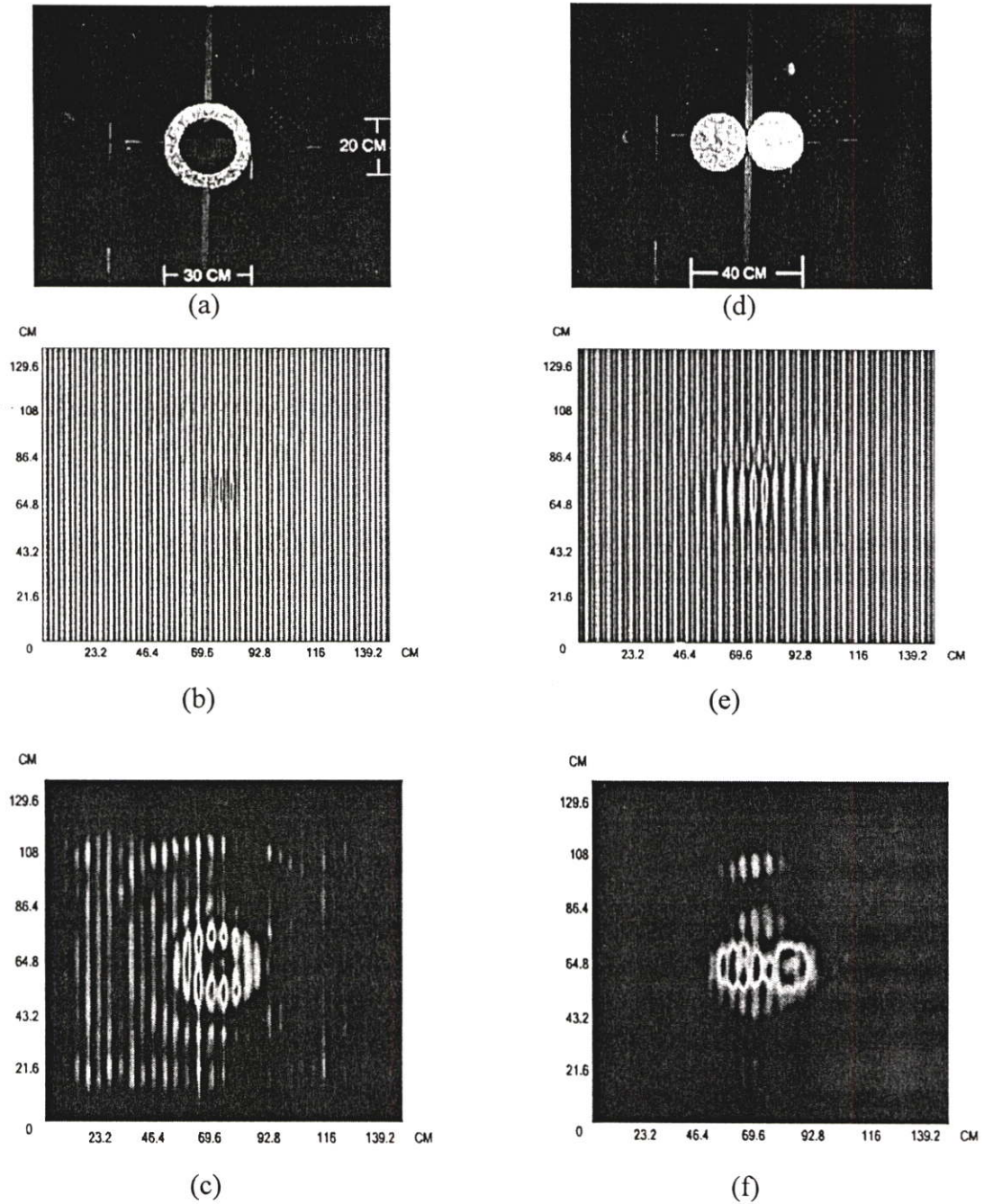


Figure. 4 Examples of the experimented results for : (a) donut-shape metallic plate objects with (b) its corresponding microwave hologram and its image (c), (d) dumbbells-shape metallic plate object with (e) its corresponding microwave hologram and its image (f).

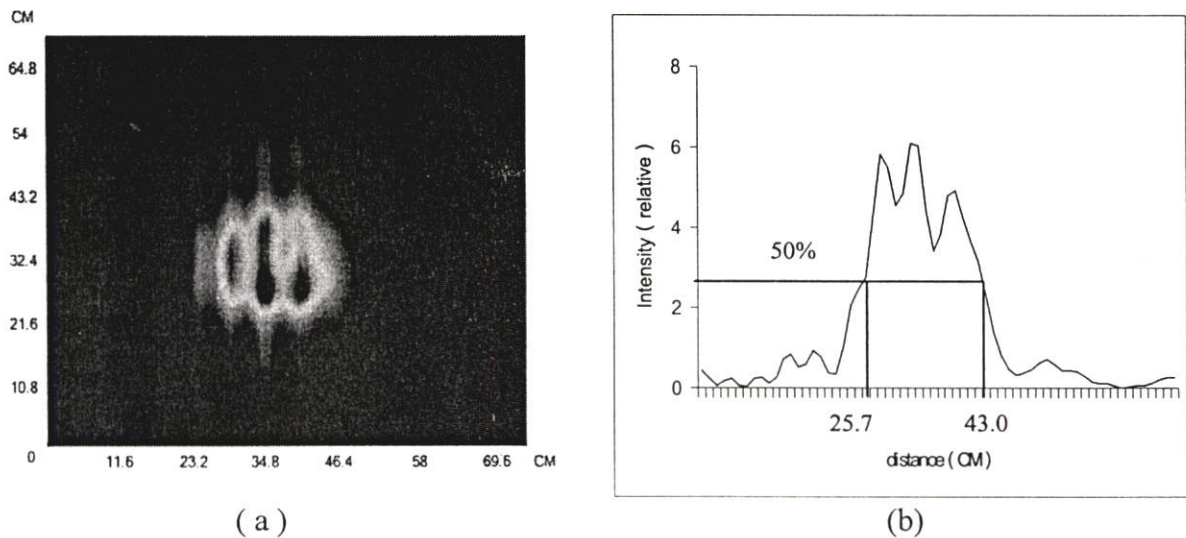


Figure. 5 (a) microwave image of a 20 cm diameter flat metallic plate with (b) its corresponding estimate size from full width-half maximum intensity distribution.

5. CONCLUSIONS

A technique for obtaining two-dimensional microwave holographic images of objects using light-modulated scatterer has been described. Images of different target shape using the technique have been presented. The higher resolving power of the system compare with the Rayleigh limit for a conventional holography has been demonstrated.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

The research described in this paper was carried out by the Applied Microwave Research Laboratory, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, under a contract with the Thailand National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC). We are also grateful for financial assistance from the NECTEC.

REFERENCE

- Born, M., and Wolf, E., 1964. Principle of Optics., New York.
- Cullen, A.L., and Parr, J.C., 1955. A new perturbation method for measuring microwave field in free space., Proc. IEE, 102B, pp.836-844.
- Hajnal, J.V.,1987., Compound modulated scatterer measuring system., Proc. IEE, 134H(4), pp. 350-356.
- Orme,R.D., and Anderson,A.P., 1973. High resolution microwave holographic technique : application to the imaging of objects obscured by dielectric media., Proc. IEE, 120(4),pp. 401-406.
- Richmond J.H., 1955. A modulated scattering technique for measurement of field distributions. IRE Trans. on Microwave Theory and Techniques., ;V. MTT-3,pp. 13-15.
- Tricoles, G. and Farhat, N. H. , 1977. Microwave holography: applications and techniques, Proc. of the IEEE.,65(1),pp. 108-120.

DIGITAL IMAGE CONSTRUCTION FROM OFF-AXIS MICROWAVE HOLOGRAM BY ANGULAR SPECTRUM BACKWARD PROPAGATION ALGORITHM

Anupong Srongprapa¹, Thammasak Vimonkiattikun²

Applied Microwave Research Laboratory (AMRL)

¹Department of Applied Physics, Faculty of Science,

²Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520,

Tel: (66-2)3269982 ext. 213/214, Fax: (66-2)3269981, E-mail: ksanupon@kmitl.ac.th,
Thailand

ABSTRACT

The angular spectrum backward propagation method has been proposed as another mean to numerically reconstruct image from microwave hologram, producing by the interference between an off-axis reference plane wave and wave reflected from an object. The experimental verification has been carried out at wavelength and hologram aperture size of 3.26 cm. and 148.48 cm. respectively. The quality of image for object-hologram distance in the Fresnel zone is comparable to the one obtained from conventional Fresnel transform algorithm despite of using smaller processing aperture.

1. INTRODUCTION

Reflected-type microwave imaging has found many important applications in identifying various target object. Several techniques of image recording and construction have been reported [1] - [7]. With regard to the case of digital image construction, very little progress has been made toward fully inversion of 3D electromagnetic wavefields data to obtain image of the objects. The calculation concerned are highly intensive. Usually, Fresnel or Fraunhofer approximation [8] has been adopted to construct image from the detected holographic field intensity data of the interference between wave reflected from object and a reference wave. For more sophisticated microwave system that can measure spatial distribution of both amplitude and phase of the object wave, the reference wave is not necessary.

In that case, backward propagation technique, in conjunction with the use of angular spectrum formulation of diffraction theory [9] are preferred to compute higher quality near-field image directly. Since

amplitude-only transducer is cheaper than amplitude-phase transducer, possibility of using the later method to calculate image intensity from hologram data should have some benefit.

2. BACKWARD PROPAGATION OF RECONSTRUCTED WAVEFIELDS EMERGING FROM AN OFF-AXIS MICROWAVE HOLOGRAM

Consider a hypothetical Leith-Upatnieks [10] or off-axis holographic reconstruction situation in Fig.1 where the same rectangular cross-sectional beam of off-axis reference plane wave $B(x,y,z)$ previously used for generating hologram intensity distribution $I(x_h, y_h)$ is shone again on to the developed rectangular hologram at plane $(x, y, z) = (x_h, y_h, 0)$.

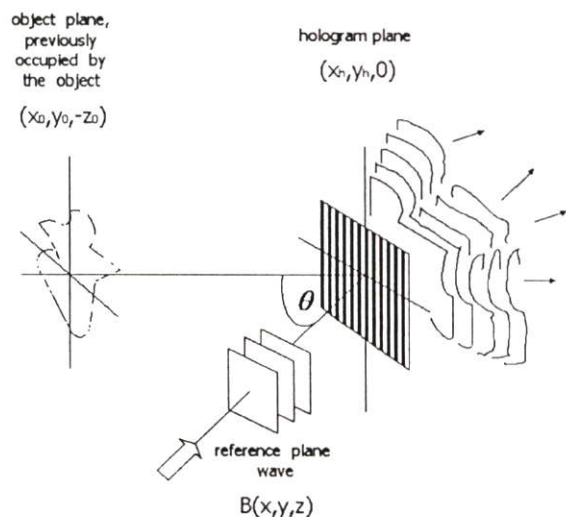


Fig.1. Off-axis holographic Reconstruction of the object wavefields.

If the reference incident angle θ is allowed to increase, the spatial separation among the main wavebeams can be extended. In conventional digital holographic reconstruction, known wavefields corresponded to the first two, the third and fourth term of the right hand side of Eq. (1) are forward propagated to plane $(x, y, z) = (x, y, z_0)$. Then calculation of the field intensity yields zero-order image of the diffracted reference plane wave, real and virtual image of object respectively. In this case, even for large θ , spatial noise that degrade the quality of the real image, comes mainly from the somewhat diverge intense beam that form zero-order image.

On the other hand, if image construction is done by backpropagation of those emerging wavefields to the object plane $(x_0, y_0, -z_0)$ and then making intensity calculation, role of the third and fourth term in Eq. (1) are interchanged. Now, image of object is represented by the fourth term while the major noise should come from the diverge weak beam corresponded to the third term, instead of the non-diverge intense beam that form zero-order reference image.

According to the angular spectrum formulation, backward propagation of the fourth- term object-like emerging wavefields :

$$f_h(x_h, y_h, 0) = |B(x_h, y_h, 0)|^2 f(x_h, y_h, 0)$$

to the object plane $(x_0, y_0, -z_0)$ is governed by decomposing of wavefields into a series of individual plane waves, propagating in different angular directions, through a Fourier transform. Let

$$F(k_x, k_y, 0) = \int \int_{-\infty}^{\infty} f_h(x_h, y_h, 0) e^{-j(x_h k_x + y_h k_y)} dx_h dy_h \tag{2}$$

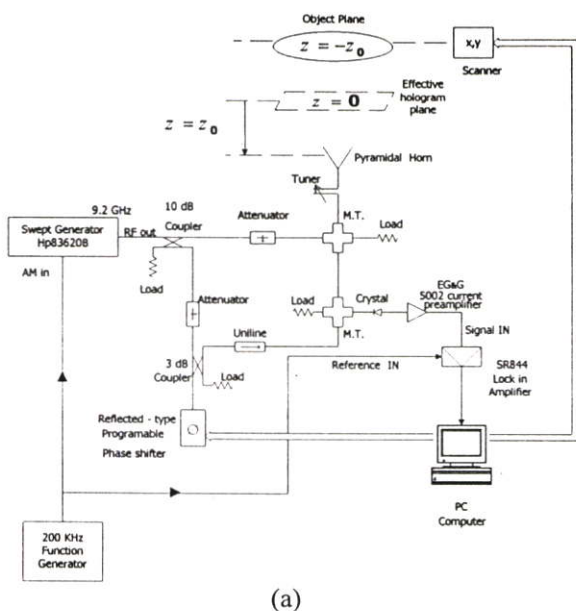
where k_x and k_y are the spatial frequencies of the elementary plane waves. Then

$$f_h(x_h, y_h, 0) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int \int_{-\infty}^{\infty} F(k_x, k_y, 0) e^{j(x_h k_x + y_h k_y)} dk_x dk_y \tag{3}$$

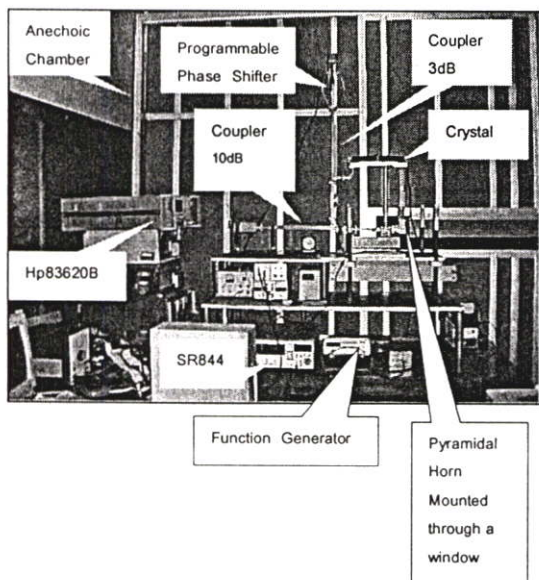
Similarly the wavefield at the object plane can be written as

$$f(x_0, y_0, -z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int \int_{-\infty}^{\infty} F(k_x, k_y, -z) e^{j(k_x x_0 + k_y y_0)} dk_x dk_y \tag{4}$$

Since each elementary plane wave propagated from the object plane to the hologram plane, the spectral



(a)



(b)

Fig.2. The scanning source-receiver microwave holographic system : (a)schematic (b) picture.

The replicate information of object wavefields $f(x, y, z)$ previously propagated from the object plane $(x, y, z) = (x_0, y_0, -z_0)$ to the hologram plane are contained in the transmitted 4 wavefields emerging from the hologram surface according to the following equation.

$$B(x, y, z) |f(x_h, y_h)| = B(x, y, z) |f(x_h, y_h, 0)|^2 + B(x, y, z) |B(x_h, y_h, 0)|^2 + B(x, y, z) B(x_h, y_h, 0) f^*(x_h, y_h, 0) + B(x, y, z) B^*(x_h, y_h, 0) |f(x_h, y_h, 0)| \tag{1}$$

function $F(k_x, k_y, -z)$ and $F(k_x, k_y, 0)$ are related through a propagation function i.e.

$$F(k_x, k_y, -z) = F(k_x, k_y, 0) \cdot P(k_x, k_y, z) \tag{5}$$

where $P(k_x, k_y, z) = e^{jz\sqrt{k_0^2 - k_x^2 - k_y^2}}$ (6)

and $k_0 = \frac{\omega}{c}$ (7)

where ω is the angular frequency of the microwave source fields and c is the light speed in air .

When $k_x^2 + k_y^2 < k_0^2$, the square root in Eq.(6) is real , so that the propagator only modifies the phase of the wave.

However, when $k_x^2 + k_y^2 > k_0^2$ evanescent wave dominates.

3. EXPERIMENTALS

The intensity distribution in microwave holograms have been recorded by using a computer – controlled scanning source – receiver system shown in Fig.2.

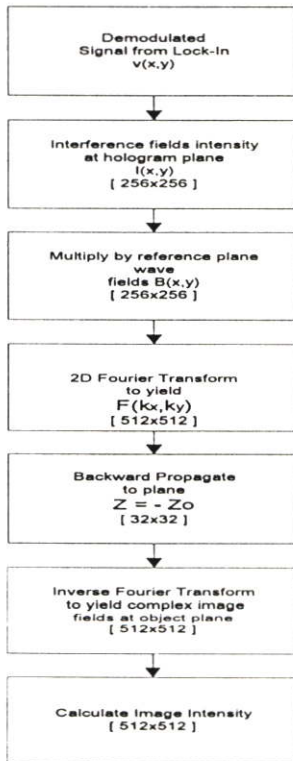


Fig.3. Block diagram showing the algorithm of angular spectrum backward propagation image construction from off-axis hologram data.

The 3.26 cm. - wavelength microwave signal from HP 83620B amplitude modulated at 200kHz, serve as both object illumination and internal off – axis reference wave. SR 844 Lock-in amplifier was used to demodulate the combined reference and reflected object wave signals detected by crystal detector at each x-y sampling point that separate 0.58 and 0.54 cm. apart in horizontal and vertical direction respectively for all 256x256 points per hologram.

The computer is programmed to process the image data according to the angular spectrum backward propagation algorithm as shown in Fig.3. Conventional holographic reconstruction based on Fresnel transform are also performed to yield images as for comparison purpose. All Fourier calculations are performed on the 512x512 data points basis using usual zero-padding and windowing technique. Fig.4 shows the experimented results for the used of both backward propagation and conventional Fresnel reconstruction in image construction of the equiplanar 4-metallic plate objects, holographic recorded at two effective plane in the Fresnel zone. Degradation of the image quality obtained from both types of reconstruction ,due to the zero-order noise as θ was increased, is illustrate in Fig.5 for an X-shaped object

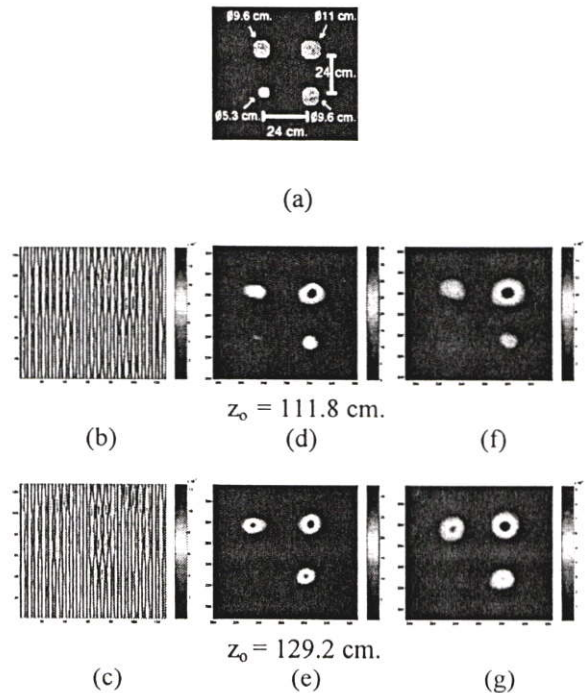


Fig. 4. Examples of the experimented results for two holographic reconstruction methods of four-circular metallic plates object at two recording distance z_0 : (a) object, (b)-(c) holograms, (d)-(e) images by Fresnel transform method, and (f)-(g) images by angular spectrum backward propagation.

In this short distance recording situation where Fresnel approximation was not quite valid, the Fresnel image should suffer additional distortion whereas the angular spectrum image should not.

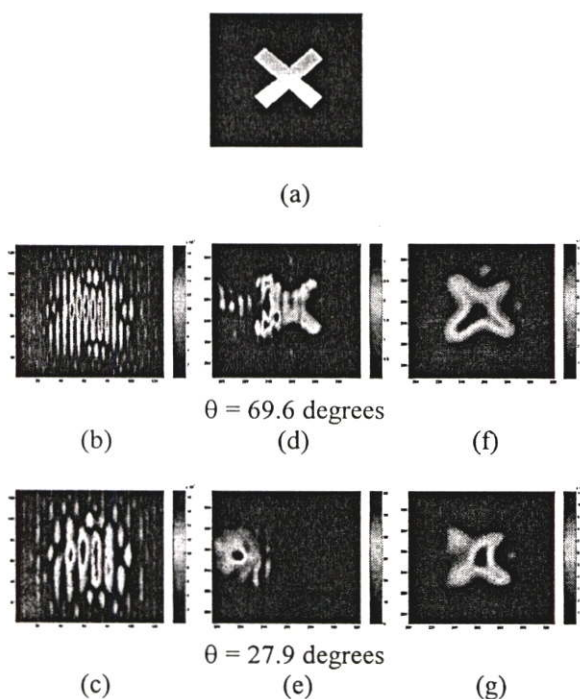


Fig. 5. Examples of the experimented results for two holographic reconstruction methods of an X-shaped metallic plate object located at $z_0 = 47.4$ cm., recording with two different reference wave incident angle θ :(a) object, (b)-(c) holograms, (d)-(e) images by Fresnel transform method, and (f)-(g) images by angular spectrum backward propagation.

4. CONCLUSIONS

This paper described and experimental illustrated the proposed idea of applying backward propagation algorithm to construct image of the object from the detected hologram intensity data. Results obtained from the present system suggests that the image quality is comparable to the one obtained from the conventional Fresnel transform at the observing distance in Fresnel zone. Suitable reference wave incident angle should also be chosen to avoid zero-order noise term.

REFERENCES

- [1] E.N. Leith, "Quasi - Holographic Techniques in The Microwave Region," Proc. IEEE , vol. 59, no. 9, pp.1305-1318, 1971.
- [2] S. Aoki , " Microwave Holograms and Optical Reconstruction," Applied Optics, vol. 6, no.11,pp.1943-1946, 1967.
- [3] C.F. Augustine, C. Deutsch, D.Fritzler ,E. Marom , " Microwave Holography Using Liquid Crystal Area Detectors ," Proc. IEEE , vol. 57,no. 9, pp.1333-1334, 1969.
- [4] T. Vimonkiattikun, J. panklang, A. Srongprapa , " Microwave holographic- imaging remote objects using light- modulated scattering technique," Proc. 21st Asian Conference on Remote sensing (Taipei ,Taiwan), vol. 2 , pp.828-833, 2000.
- [5] Y.Aoki , A.Boivin," Computer Reconstruction of Images from Microwave Hologram, " Proc. IEEE , vol. 58, no. 5, pp. 821-822, 1970.
- [6] O. Ching Yue, E.L. Rope, and G. Tricoles," Two Reconstruction Methods For Microwave Imaging of Buried Dielectric Anomalies," IEEE Trans. Computer , vol. .c-24, no.4 , pp. 381-390, 1975.
- [7] N.H. Farhat , " Microwave Diversity Imaging and Automated Target Identification Based on Models of Neural Networks," Proc. IEEE , vol.77, no.5, pp. 670-681, 1989.
- [8] J.W.Goodman, " Introduction to Fourier Optics," McGraw-Hill, San Francisco, Calif. , Chap. 4, pp.57-74, 1968.
- [9] A.L. Boyer, P.M. Hirsch, J.A. Jordan, JR., L.B. Lesem ,and D.L. Van Rooy, " Reconstruction of Ultrasonic Images By Backward Propagation," Acoustical Holography, vol.3, Plenum Press New York - London, pp. 333-348, 1971.
- [10] J.W. Goodman, *ibid* , Chap. 8, pp. 198-268.

ชื่อบทความ : การกำจัดภาพอันดับศูนย์ในงานไมโครเวฟโฮโลกราฟีแบบเอียงแกน
 Suppression of zero-order image in off-axis Microwave Holography

กลุ่มสาขาวิจัย: วิศวกรรมศาสตร์

ผู้แต่ง : ธรรมศักดิ์ วิมลเกียรติคุณ อนุพงศ์ ตรงประภา

สถาบันการศึกษา : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ : ห้องปฏิบัติการวิจัยไมโครเวฟประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ ถ.ฉลองกรุง กทม10520

อีเมลล์ : ksanupon@kmitl.ac.th โทรศัพท์ : 02-3264341-3 ต่อ 213

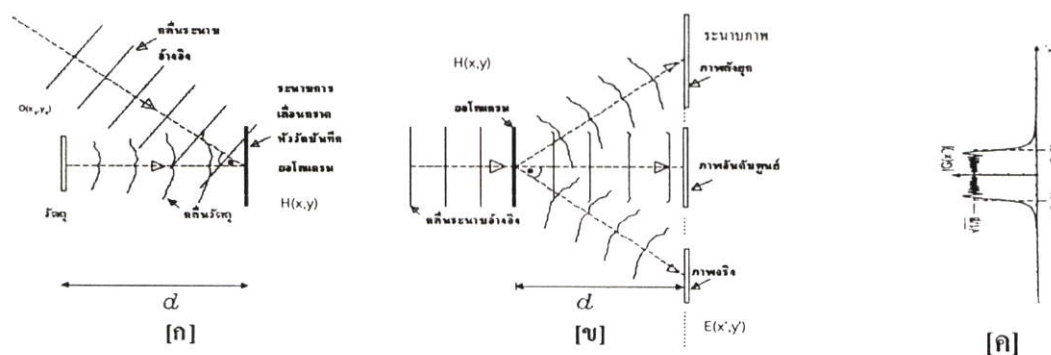
บทคัดย่อ

การประมวลผลเพื่อสร้างภาพวัตถุกลับคืนโดยใช้ข้อมูลฮอโลแกรมที่ได้จากการวัดการกระจายความเข้มสัญญาณในพื้นที่จำกัดบนระนาบสังเกตการณ์การแทรกสอดของคลื่นไมโครเวฟอ้างอิง และคลื่นจากวัตถุซึ่งมีแนวการเคลื่อนที่กระทำมุดอกัน ภาพอันดับศูนย์จะมีบทบาทสำคัญในการกินเนื้อที่ การเลื่อมซ้อน หรือกระทั่งบดบังภาพวัตถุ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในกรณีที่วัตถุอยู่ใกล้ ระนาบสังเกตการณ์หรือมุมระหว่างแนวคลื่นทั้งสองมีค่าน้อย ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการลดผลรบกวนของภาพอันดับศูนย์ โดยใช้เทคนิคการกรองในตัวแปรมิติความถี่สูงผ่าน

บทนำ

ในงานวิจัยการมองวัตถุโดยใช้คลื่นไมโครเวฟกำลังต่ำ ด้วยเทคนิคฮอโลกราฟี ซึ่งได้มีการพัฒนาขึ้นที่ห้องปฏิบัติการวิจัยไมโครเวฟประยุกต์มาเป็นลำดับ [1],[2] นั้น นอกจากจะต้องเกี่ยวข้องกับกรอกแบบปรับปรุงในส่วนประสิทธิภาพของระบบส่งรับคลื่นและเก็บข้อมูลฮอโลแกรมตลอดจนการคำนวณถึงตัวแปรและขอบเขตเงื่อนไขการประมาณค่าต่างๆเพื่อลดความยุ่งยากในขั้นตอนการสร้างภาพวัตถุกลับคืน(Reconstruction)ยังมีอีกปัญหาพื้นฐานหนึ่งที่มีควมคุ้มกับฮอโลกราฟีเสมอซึ่งก็คือ การมีภาพอันดับศูนย์ (Zero-order image) และภาพสังยุค (conjugate image) ปะปนมากับภาพวัตถุในภาพสุดท้ายที่สร้างขึ้น ถึงแม้ว่าผู้ใช้เทคนิคการให้แนวเคลื่อนที่ของคลื่นอ้างอิงกับคลื่นวัตถุไม่ซ้อนทับกัน (off-axis) [3] จะทำให้ภาพเหล่านั้น แยกไปอยู่คนละบริเวณในระนาบของภาพ (image plane) แต่ก็จะต้องแลกด้วยความสูญเสียการแยกแยะรายละเอียดของภาพวัตถุ (resolution) อันเนื่องมาจากทรัพยากรจำนวนหน่วยย่อยของภาพ (pixel) ของการประมวลผลที่มีจำนวนจำกัด จะต้องแบ่งไปให้กับบริเวณภาพที่ปะปนอีกทั้งก็จะมีกรณีของการเลื่อมซ้อนทับกันของภาพเป็นบางส่วน ถ้ามุมระหว่างแนวคลื่นทั้งสอง หรือระยะจากวัตถุกับระนาบฮอโลแกรม (hologram plane) ไม่มากพอ

วิธีการกำจัดภาพอันดับศูนย์



รูปที่ 1 แสดงหน้าคลื่นต่างๆ (ก)การถ่ายทำแผ่นฮอโลแกรม (ข)การสร้างภาพวัตถุคืนกลับ (ค)การกระจายความเข้มของภาพอันดับศูนย์ งานไมโครเวฟโฮโลกราฟีมีขั้นตอนหลักสำคัญ 2 ประการทำนองเดียวกันงานทางด้านแสง ประกอบด้วยส่วนแรกของการถ่ายทำแผ่นฮอโลแกรม(hologram formation) ซึ่งในที่นี้จะเป็นการใช้หัววัดบันทึกข้อมูลการกระจายความเข้มบนระนาบฮอโลแกรม(hologram plane)หรือระนาบสังเกตการณ์อันเนื่องมาจากการแทรกสอดของคลื่นไมโครเวฟจากวัตถุและคลื่นอ้างอิงที่อาพันธ์กัน โดยอาจจะใช้การเลื่อนกราด(scanning)หัววัดเดียว อ่านค่าความเข้มไปตามจุดต่างๆที่มีระยะห่างสม่ำเสมอในลักษณะของหน่วยย่อยของภาพจนครอบคลุมพื้นที่สำหรับกรณี 2 มิติของฮอโลกราฟีแบบเอียงแกนโดยทั่วไปมักใช้คลื่นอ้างอิงที่เป็นคลื่นระนาบ(plane wave) มีทิศการเคลื่อนที่ทำมุมกับกับคลื่นจากวัตถุแผ่นแบนดังรูปที่ 1.ก โดยที่ $\theta \neq 0$ ในสมมติฐานที่ว่าสถานะโพราไรเซชันเชิงเส้นของคลื่นไม่มีการเปลี่ยนแปลง

Oral Presentation

ประกอบกับถ้าระยะ d มีค่ามากกว่าขนาดของทั้งวัตถุ และขนาด L ของโฮโลแกรมจนสามารถใช้การประมาณของเฟรสเนล ใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนของคลื่นแบบสเกลาร์ จะได้ว่า ในการสร้างภาพวัตถุคืนกลับด้วยคลื่นระนาบอ้างอิงในทิศตัวฉากกับแผ่นโฮโลแกรม ดังรูปที่ 1(ข) สนาม ไฟฟ้าของคลื่นบนระนาบของภาพ คือ $E(x',y')$ มีค่าเป็น

$$E(x', y') = \exp\left(\frac{i2\pi d}{\lambda}\right) \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda d}(x'^2 + y'^2)\right] \iint H(x, y) \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)\right] \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda d}(xx' + yy')\right] dx dy \dots\dots(1)$$

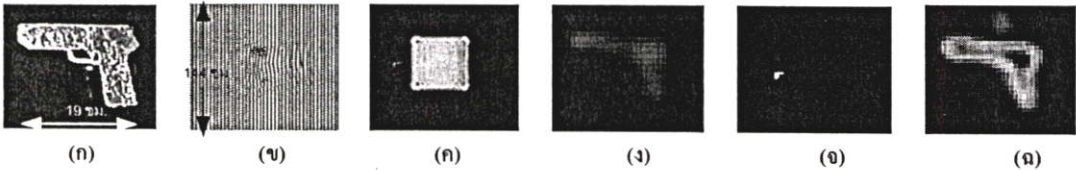
$$\text{โดยที่ } H(x, y) = [o(x, y) + E_R(x, y)] [o(x, y) + E_R(x, y)]^* \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ $O(x,y)$ และ $E_R(x,y)$ เป็นฟังก์ชันคลื่นวัตถุและคลื่นระนาบอ้างอิงที่ตำแหน่งระนาบโฮโลแกรมตามลำดับ

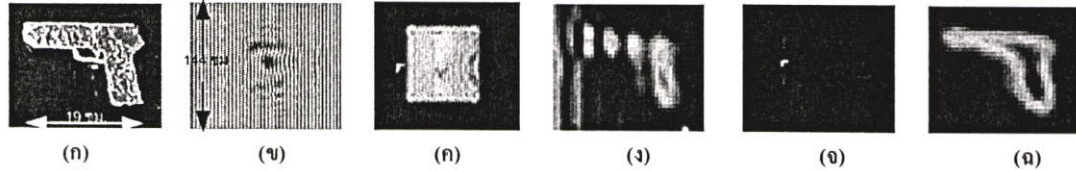
พิจารณาอินทิเกรตทางขวามือของสมการ (1) จะเป็นการหาค่า F_1 ซึ่งเป็นการแปลงฟูเรียร์ของผลคูณระหว่างโฮโลแกรม H กับ chirp function ซึ่งเทียบเท่าได้กับการทำคอนโวลูชันระหว่างค่าการแปลงฟูเรียร์ของแต่ละเทอม สำหรับภาพอันดับศูนย์ซึ่งเป็นพจน์ดีซี (dc term) ของ F_1 หาได้จากการทำคอนโวลูชันระหว่างพจน์ดีซีของการแปลงฟูเรียร์ของโฮโลแกรม (แทนด้วย δ -function) กับค่าการแปลงฟูเรียร์ของ chirp function ซึ่งจะมีลักษณะการกระจายความเข้มใน 1 มิติ เป็นดังรูปที่ 1(ค) โดยที่ $\beta = 1/\lambda d$ ในการมีการคำนวณการแปลงแบบไม่ต่อเนื่อง เมื่อแบ่งโฮโลแกรมใน 1 มิติออกเป็น N pixels ที่มีขนาดแต่ละ pixel เท่ากับ $\Delta x = L/N$ ค่า $\beta = (\Delta x)^2 / \lambda d$ และความกว้างของพจน์ดีซีของ F_1 จะเป็น $2\pi N (\Delta x)^2 / \lambda d$ จะเห็นได้ว่าถ้าทำการกรองมิติความถี่สูงผ่าน (4) ด้วยการหาค่าเฉลี่ยของ H แล้วนำไปหักลบออกจาก H ก็จะทำให้ผลการคอนโวลูชันเป็นศูนย์กำจัดภาพอันดับศูนย์ไปได้

ผลการวิจัย

ตัวอย่างของผลการทดลอง บันทึกข้อมูลโฮโลแกรม และสร้างภาพวัตถุคืนกลับในกรณีของภาพปกติเปรียบเทียบกับภาพที่มีการกำจัดภาพอันดับศูนย์ สำหรับวัตถุ โลหะรูปปืน ที่ระยะ d ที่แตกต่างกัน ผลเป็นดังรูปที่ 2 และ รูปที่ 3



รูปที่ 2 ผลการทดลองที่ระยะ $d = 104$ ซม. (ก)วัตถุ (ข)โฮโลแกรม (ค)ภาพอันดับศูนย์ (ง)ภาพวัตถุทางซ้ายในภาพ ค. (จ)เมื่อตัดภาพอันดับศูนย์ (ฉ) ภาพวัตถุทางซ้ายในภาพ ก.



รูปที่ 3 ผลการทดลองที่ระยะ $d = 79$ ซม. (ก)วัตถุ (ข)โฮโลแกรม (ค)ภาพอันดับศูนย์ (ง)ภาพวัตถุทางซ้ายในภาพ ค. (จ)เมื่อตัดภาพอันดับศูนย์ (ฉ) ภาพวัตถุทางซ้ายในภาพ ก.

อภิปรายผล

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าภาพวัตถุที่ได้เมื่อทำการกำจัดภาพอันดับศูนย์ออกไปจะชัดเจนขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เป็นเทคนิคที่มีประโยชน์ต่อการทำไมโครเวฟโฮโลกราฟี

เอกสารอ้างอิง

[1] T.Vimonkiattikun , J.panklang , A.Srongprapa , "Microwave holographic – imaging remote objects using light modulated scattering technique," Proceedings of the 21st Asian Conference on Remote Sensing, V.2 , PP 828 – 833 (2000).
 [2] A .Srongprapa , T. Vimonkiattikun , "Digital image construction from off-axis microwave hologram by angular spectrum backward propagation algorithm," IEEE Proceedings of The 6th Int. Symposium on signal processing and its applications ,V.2 , pp .635-638 ,(2001).

Oral Presentation

[3] E.Leith,J.Uptnieks, "Microscopy by wavefront reconstruction," J.Opt.Soc.Am.,V55,pp. 567-570(1965)

[4] T.M.Kreis ,W.P.O.Jupner, "Suppression of the dc term in digital holography ,"Opt.Eng.,V.36,no.8,pp.2357-2360,(1997)

คำสำคัญ : ภาพอันดับศูนย์, ไมโครเวฟ, ฮอโลกราฟี, เยื้องแกน

คำสำคัญ : ภาพอันดับศูนย์, ไมโครเวฟ, ฮอโลกราฟี, เยื้องแกน

ภาคผนวก (ข).

โฟโตไดโอดที่ใช้เป็นตัวกระเจิงคลื่นมอดูเลตในการทดลอง

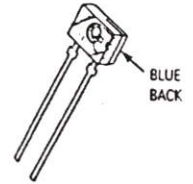
Photo Detector PIN Diode Output

... designed for application in laser detection, light demodulation, detection of visible and near infrared light-emitting diodes, shaft or position encoders switching and logic circuits, or any design requiring radiation sensitivity, ultra high-speed, and stable characteristics.

- Ultra Fast Response — (<1 ns Typ)
- Sensitive Throughout Visible and Near Infrared Spectral Range for Wide Application
- Annular Passivated Structure for Stability and Reliability
- Economical, Low Profile, Miniature Plastic Package
- Lens Molded Into Package
- Designed for Automatic Handling and Accurate Positioning

MRD721

**PHOTO DETECTOR
 DIODE OUTPUT
 100 VOLTS**



**CASE 349-01
 PLASTIC**

MAXIMUM RATINGS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
Reverse Voltage	V_R	100	Volts
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C (Note 1)	P_D	150	mW
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-40 to +100	$^\circ\text{C}$
Lead Soldering Temperature (5 sec. max, 1/16" from case) (Note 2)	—	260	$^\circ\text{C}$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Fig. No.	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Dark Current ($V_R = 20\text{ V}, R_L = 1\text{ M}\Omega$; Note 3) $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = 100^\circ\text{C}$	3 and 4	I_D	—	0.06 14	10 —	nA
Reverse Breakdown Voltage ($I_R = 10\ \mu\text{A}$)	—	$V_{(BR)R}$	100	200	—	Volts
Forward Voltage ($I_F = 50\text{ mA}$)	—	V_F	—	—	1.1	Volts
Series Resistance ($I_F = 50\text{ mA}$)	—	R_s	—	8	—	Ohms
Total Capacitance ($V_R = 20\text{ V}; f = 1\text{ MHz}$)	5	C_T	—	3	—	pF

OPTICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Characteristic	Fig. No.	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Light Current ($V_R = 20\text{ V}$, Note 4)	2	I_L	1.5	4	—	μA
Sensitivity ($V_R = 20\text{ V}$, Note 5)	—	$S(\lambda = 0.8\ \mu\text{m})$ $S(\lambda = 0.94\ \mu\text{m})$	—	5 1.2	—	$\mu\text{A/mW/cm}^2$
Response Time ($V_R = 20\text{ V}, R_L = 50\ \Omega$)	—	$t_{(resp)}$	—	1	—	ns
Wavelength of Peak Spectral Response	6	λ_s	—	0.8	—	μm

- Notes: 1. Measured with the device soldered into a typical printed circuit board.
 2. Heat sink should be applied to leads during soldering to prevent case temperature from exceeding 100°C .
 3. Measured under dark conditions. ($H = 0$).
 4. Radiation Flux Density (H) equal to 5 mW/cm^2 emitted from a tungsten source at a color temperature of 2870 K .
 5. Radiation Flux Density (H) equal to 0.5 mW/cm^2 .

TYPICAL CHARACTERISTICS

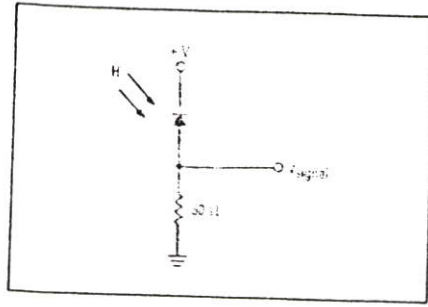


Figure 1. Operating Circuit

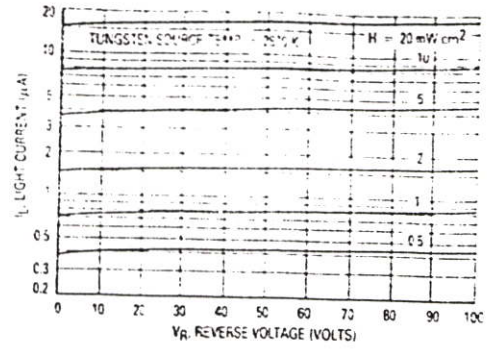


Figure 2. Irradiated Voltage — Current Characteristic

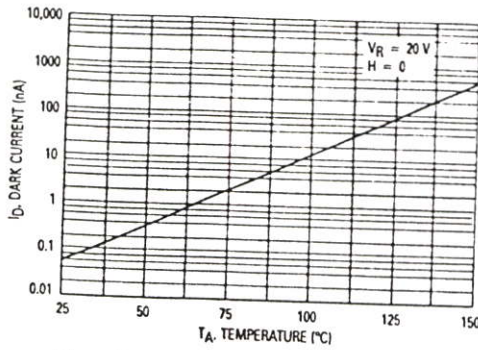


Figure 3. Dark Current versus Temperature

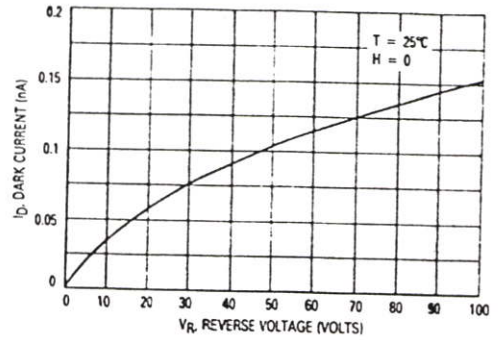


Figure 4. Dark Current versus Reverse Voltage

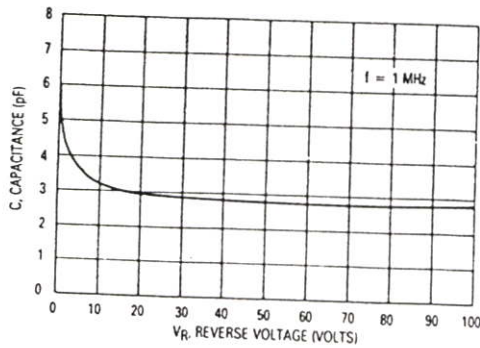


Figure 5. Capacitance versus Voltage

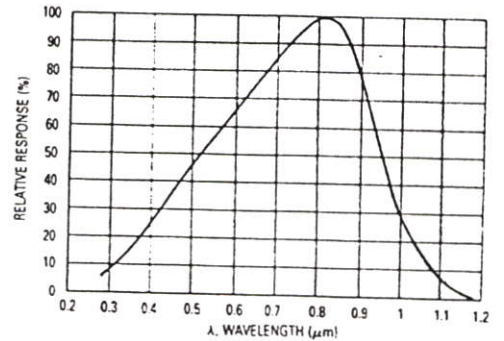
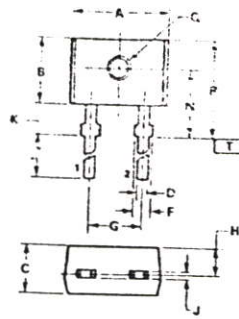


Figure 6. Relative Spectral Response

OUTLINE DIMENSIONS

CASE 349-01
PLASTIC

NOTES

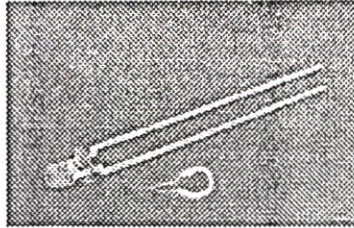
- 1 DIMENSIONS A, B AND C ARE DATUM
- 2 POSITIONAL TOLERANCE FOR DIMENSION
E IS 0.25 (0.010) [0.125 (0.005)]
- 3 POSITIONAL TOLERANCE FOR DIMENSION
F IS 0.25 (0.010) [0.125 (0.005)]
- 4 [0.25 (0.010)] IS SEATING PLUG
- 5 DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANS
Y14.5, 1973

STYLE 1
PIN 1 CATHODE
2 ANODE

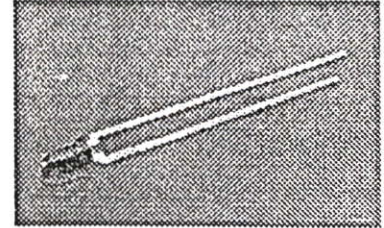
DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	3.41	4.40	0.134	0.173
B	2.71	3.30	0.107	0.130
C	2.10	3.18	0.083	0.125
D	1.41	2.00	0.056	0.079
E	1.19	1.41	0.047	0.056
G	0.54 BSC		0.021 BSC	
H	1.67 BSC		0.066 BSC	
J	0.73	0.96	0.029	0.038
K	11.80	19.20	0.465	0.752
N	3.20	3.30	0.126	0.130
P	0.79	1.52	0.031	0.060
T	3.57	4.60	0.140	0.181

Silizium-PIN-Fotodiode mit sehr kurzer Schaltzeit Silicon PIN Photodiode with Very Short Switching Time

SFH 229
SFH 229 FA



SFH 229



SFH 229 FA

Wesentliche Merkmale

- Speziell geeignet für Anwendungen im Bereich von 380 nm bis 1100 nm (SFH 229) und bei 880 nm (SFH 229 FA)
- Kurze Schaltzeit (typ. 10 ns)
- 3 mm-Plastikbauform im LED-Gehäuse
- Auch gegurtet lieferbar

Anwendungen

- Lichtschranken für Gleich- und Wechselbetrieb
- Industrieelektronik
- „Messen/Steuern/Regeln“

Features

- Especially suitable for applications from 380 nm to 1100 nm (SFH 229) and of 880 nm (SFH 229 FA)
- Short switching time (typ. 10 ns)
- 3 mm LED plastic package
- Also available on tape and reel

Applications

- Photointerrupters
- Industrial electronics
- For control and drive circuits

Typ Type	Bestellnummer Ordering Code
SFH 229	Q62702-P215
SFH 229 FA	Q62702-P216

Grenzwerte
Maximum Ratings

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Betriebs- und Lagertemperatur Operating and storage temperature range	$T_{op}; T_{stg}$	- 40 ... + 100	°C
Löttemperatur (Lötstelle 2 mm vom Gehäuse entfernt bei Lötzeit $t \leq 3$ s) Soldering temperature in 2 mm distance from case bottom ($t \leq 3$ s)	T_S	230	°C
Sperrspannung Reverse voltage	V_R	20	V
Verlustleistung Total power dissipation	P_{tot}	150	mW

Kennwerte ($T_A = 25$ °C)
Characteristics

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Value		Einheit Unit
		SFH 229	SFH 229 FA	
Fotostrom Photocurrent $V_R = 5$ V, Normlicht/standard light A, $T = 2856$ K, $E_V = 1000$ lx	I_P	28 (≥ 18)	-	μ A
$V_R = 5$ V, $\lambda = 950$ nm, $E_e = 1$ mW/cm ²	I_P	-	20 (≥ 10.8)	μ A
Wellenlänge der max. Fotoempfindlichkeit Wavelength of max. sensitivity	$\lambda_{S_{max}}$	860	900	nm
Spektraler Bereich der Fotoempfindlichkeit $S = 10$ % von S_{max} Spectral range of sensitivity $S = 10$ % of S_{max}	λ	380 ... 1100	730 ... 1100	nm
Bestrahlungsempfindliche Fläche Radiant sensitive area	A	0.3	0.3	mm ²
Abmessung der bestrahlungsempfindlichen Fläche Dimensions of radiant sensitive area	$L \times B$ $L \times W$	0.56 × 0.56	0.56 × 0.56	mm × mm
Abstand Chipoberfläche zu Gehäuseoberfläche Distance chip front to case surface	H	2.4 ... 2.8	2.4 ... 2.8	mm
Halbwinkel Half angle	φ	± 17	± 17	Grad deg.

Kennwerte ($T_A = 25\text{ °C}$)

Characteristics (cont'd)

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Value		Einheit Unit
		SFH 229	SFH 229 FA	
Dunkelstrom, $V_R = 10\text{ V}$ Dark current	I_R	50 (≤ 5000)	50 (≤ 5000)	pA
Spektrale Fotoempfindlichkeit, $\lambda = 850\text{ nm}$ Spectral sensitivity	S_λ	0.62	0.60	A/W
Quantenausbeute, $\lambda = 850\text{ nm}$ Quantum yield	η	0.90	0.88	<u>Electrons</u> Photon
Leerlaufspannung Open-circuit voltage $E_V = 1000\text{ lx}$, Normlicht/standard light A, $T = 2856\text{ K}$ $E_e = 0.5\text{ mW/cm}^2$, $\lambda = 950\text{ nm}$	V_O V_O	450 (≥ 400) –	– 420 (≥ 370)	mV mV
Kurzschlußstrom Short-circuit current $E_V = 1000\text{ lx}$, Normlicht/standard light A, $T = 2856\text{ K}$ $E_e = 0.5\text{ mW/cm}^2$, $\lambda = 950\text{ nm}$	I_{SC} I_{SC}	27 –	– 9	μA μA
Anstiegs- und Abfallzeit des Fotostromes Rise and fall time of the photocurrent $R_L = 50\ \Omega$; $V_R = 10\text{ V}$; $\lambda = 850\text{ nm}$; $I_p = 800\ \mu\text{A}$	t_r, t_f	10	10	ns
Durchlaßspannung, $I_F = 100\text{ mA}$, $E = 0$ Forward voltage	V_F	1.3	1.3	V
Kapazität, $V_R = 0\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$, $E = 0$ Capacitance	C_0	13	13	pF
Temperaturkoeffizient von V_O Temperature coefficient of V_O	TC_V	–2.6	–2.6	mV/K
Temperaturkoeffizient von I_{SC} Temperature coefficient of I_{SC} Normlicht/standard light A $\lambda = 950\text{ nm}$	TC_I	0.18 –	– 0.2	%/K
Rauschäquivalente Strahlungsleistung Noise equivalent power $V_R = 10\text{ V}$, $\lambda = 850\text{ nm}$	NEP	6.5×10^{-15}	6.5×10^{-15}	$\frac{\text{W}}{\sqrt{\text{Hz}}}$
Nachweisgrenze, $V_R = 10\text{ V}$, $\lambda = 850\text{ nm}$ Detection limit	D^*	8.4×10^{12}	8.4×10^{12}	$\frac{\text{cm} \times \sqrt{\text{Hz}}}{\text{W}}$

ประวัติผู้เขียน

นายธรรมศักดิ์ วิมลเกียรติคุณ เกิดเมื่อวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2517 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2538

ปัจจุบันทำงานเป็นอาจารย์พิเศษ สอนและวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบเครื่องมือแบบสามมิติโดยคอมพิวเตอร์ ที่คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นที่ปรึกษาให้กับบริษัทเอกชนในด้านเทคนิคการทำแม่พิมพ์ในอุตสาหกรรมรถยนต์โดยใช้โปรแกรม CAD/CAM และทำงานวิจัยเกี่ยวกับการนำภาพสามมิติไปใช้งานทางการแพทย์ ทำงานวิจัยด้านเทคนิคสร้างเครื่องมือทางทันตกรรมประดิษฐ์ให้กับ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยความร่วมมือของ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง