



# MICROWAVE IMAGING SYSTEM



**CHUMNARN SUMPAPOKA**

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

**1999**

**ISBN 974 - 622 - 553 - 7**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 1999**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ระบบการสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ

นักศึกษา

ชำนาญ สำเภพอ่ำ

รหัสประจำตัว

35626001

ปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา

สาขาฟิสิกส์ประยุกต์

พ.ศ.

2542

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ผศ. อนุพงศ์ สรงประภา

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม

รศ. สุวรรณ ฤกษ์ารณ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีและระบบการสร้างภาพโดยใช้เทคนิคไมโครเวฟฮอโลกราฟี เพื่อ  
ควัดดูในสภาวะที่ปราศจากแสง ระบบที่นำเสนอจะประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือแหล่งกำเนิดคลื่น  
ไมโครเวฟแบบกัมมันต์ไดโอดความถี่ 9.2 จิกะเฮิร์ตซ์ กำลัง 10 มิลลิวัตต์ สายอากาศแบบฮอร์นทรง  
พีระมิด ชุดอุปกรณ์กระเจิงคลื่นซึ่งประกอบด้วย ตัวโฟโต้ไดโอด ที่รับสัญญาณการมอดูเลตด้วย  
ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์จากเลเซอร์ไดโอด ผ่านเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก ซึ่งอุปกรณ์ชุดนี้ทำหน้าที่  
เป็นไดโพลกระเจิงคลื่น นอกจากนี้ยังประกอบด้วยชุดเลื่อนตำแหน่งวัตถุ ชุดอุปกรณ์ตรวจวัด  
สัญญาณและระบบประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ โดยเมื่อคลื่นไมโครเวฟตกกระทบวัตถุจะมีการ  
สะท้อนกลับเป็นคลื่นวัตถุ เมื่อใช้ตัวไดโพลกระเจิงคลื่นวางไว้ตรงกึ่งกลางระนาบปากฮอร์น ซึ่งทำ  
หน้าที่เสมือนระนาบ ฮอโลแกรมมารับคลื่นวัตถุดังกล่าว ไดโพลจะกระเจิงคลื่นวัตถุเข้ามาพร้อมกับ  
คลื่นอ้างอิงในระบบตรวจวัดสัญญาณ ข้อมูลของอัมพลิจูดและเฟสของคลื่นวัตถุจะถูกบันทึกไว้ในรูป  
ความเข้มของคลื่นรวมทุกจุดที่ตำแหน่งของวัตถุที่เลื่อนไปและสามารถนำข้อมูลไปแปลงกลับเป็น  
ภาพของวัตถุนั้น โดยใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ ประมวลผลสัญญาณด้วยคอมพิวเตอร์

<b>Thesis Title</b>	Microwave Imaging System
<b>Student</b>	Chumnarn Sumpaopoka
<b>Student ID</b>	35626001
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Programme</b>	Applied Physics
<b>Year</b>	1999
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Anupong Srongprapa
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Assoc. Prof. Suwan Kusamran

## ABSTRACT

This research presents a study of the method and system of invisible object image formation by using microwave holographic technique. The system is principally composed of a 9.2 GHz 10 mW Gunn diode microwave source, a pyramidal horn antenna, a photodiode dipole scatterer which was modulated at 50 KHz by a laser diode via plastic fiber, an object scanning unit, a signal detecting and a computer for signal processing unit. The object waves are scattered by dipole scatterer and interfered with reference waves in a crystal detector component. The amplitude and phase of the object waves are recorded in the form of intensity of combined waves at different object positions and can be reconstructed to object image by using with digital processing.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้ทุนอุดหนุนวิจัยประเภทนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ด้วยดีตลอดมาจนงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี โดยได้รับความกรุณาจากคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเป็นอย่างดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณา โดยเฉพาะ ผศ. อนุพงษ์ สรงประภา อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. สุวรรณ คู่อาราม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และรศ.ดร. ปรีชา ยุพาพิน รศ. สุพล รักวิจัย รศ.ดร. วันชัย ธีรวัจจา ที่กรุณาช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์และชี้แนะทางแก้ไขจนเสร็จสิ้นสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ พันเอกสมร ศรีทันดรและอาจารย์พัชรา ศรีทันดร ที่กรุณาให้คำแนะนำคอยเอื้อเฟื้อและให้กำลังใจตลอดมาจนประสบความสำเร็จ

ขอขอบคุณ คุณนิศافر เกียรติไพศาลโสภณ คุณอาโมทย์ สมบูรณ์แก้ว คุณรังสิยา วงษ์สุดิน พันโท ทวีศักดิ์ บุญรักษา คุณปรเมษฐ์ จันทร์เพ็ง คุณมยุรี หาญสุภาอนุสรณ์ คุณภัทรพงศ์ รักน้อย ที่คอยให้คำแนะนำและชี้แนะทางในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือทุกสิ่งทุกอย่างจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนในการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถ้ามีประโยชน์หรือมีคุณค่าต่อสังคมและประเทศชาติ ผู้วิจัยขอมอบความดีนี้แด่ บิดามารดา ที่คอยดูแลเอาใจใส่ เป็นกำลังใจและตั้งเคียงด้วยความรักตลอดระยะเวลาการศึกษา และขอมอบความดีนี้แก่ผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน

ชำนานูย์ สำเภาพ่อค้า

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	VI
<b>บทที่ 1</b> บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 การดำเนินการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	3
<b>บทที่ 2</b> ความรู้พื้นฐานทางไมโครเวฟและอุปกรณ์.....	4
2.1 แถบสเปคตรัมความถี่.....	4
2.2 พื้นฐานทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	6
2.2.1 สมการพื้นฐานทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	6
2.2.2 โหมดการกระจายคลื่นในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม.....	9
2.2.3 คลื่นทรานสเวอร์สอิเล็กตริกโหมด.....	10
2.2.4 คลื่นทรานสเวอร์สแมกเนติกโหมด.....	14
2.2.5 ความเร็วเฟสและความเร็วกลุ่ม.....	16
2.3 อุปกรณ์ทางที่ใช้ในการวิจัย.....	18
2.3.1 แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์โคโอด.....	18
2.3.2 ตัวลดทอนสัญญาณ.....	19
2.3.3 ไดเรคชันนัลคัปเปิลเลอร์.....	19
2.3.4 สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด.....	21
2.3.5 ตัวตรวจวัดสัญญาณ.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 เทคนิคการวัดสนามไฟฟ้าด้วยตัวกระเจิงคลื่น.....	23
2.5 สรุป.....	26
<b>บทที่ 3 ทฤษฎีการเลี้ยวเบนของคลื่น.....</b>	<b>28</b>
3.1 การแพร่กระจายคลื่น.....	28
3.2 ทฤษฎีของเฮล์มโฮลทซ์.....	29
3.3 ทฤษฎีการเลี้ยวเบนแบบสเคลาร์.....	30
3.4 การการเลี้ยวเบนผ่านช่องรับคลื่น.....	32
3.4.1 ช่องรับคลื่นที่เป็นสลิต.....	34
3.4.2 ช่องรับคลื่นที่เป็นสี่เหลี่ยมสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	35
3.5 สรุป.....	36
<b>บทที่ 4 ไมโครเวฟฮอโลกราฟี.....</b>	<b>37</b>
4.1 พื้นฐานทางฮอโลกราฟีทางแสง.....	37
4.2 ไมโครเวฟฮอโลกราฟี.....	42
4.2.1 การบันทึกฮอโลแกรมตามเงื่อนไขเฟรสเนล.....	43
4.2.2 การสร้างภาพกลับมา.....	44
4.2.2.1 การสร้างภาพกลับมาโดยทางแสง.....	44
4.2.2.2 การสร้างภาพกลับมาโดยทางดิจิทัล.....	44
4.3 การบันทึกฮอโลแกรมด้วยเทคนิคการกระเจิงคลื่น.....	45
4.4 สรุป.....	48
<b>บทที่ 5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>49</b>
5.1 ออกแบบสายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด.....	49
5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการสร้างภาพ.....	51
5.2.1 แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์ไดโอด.....	51
5.2.2 ตัวลดทอนสัญญาณ.....	51
5.2.3 ไครเรชันแนลคัมเพลตอร์.....	52
5.2.4 สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.5 ตัวตรวจวัดสัญญาณ.....	52
5.2.6 ชุดมอดูเลตความถี่.....	53
5.2.7 อุปกรณ์เตรียมขยายสัญญาณ.....	53
5.2.8 ชุดเลื่อนตำแหน่งวัตถุและตัวปรับเฟส.....	54
5.2.9 ชุดควบคุมสแต็ปปีงมอเตอร์และเก็บบันทึกผล.....	57
5.2.10 เครื่องตรวจวัดและขยายสัญญาณ.....	57
5.2.11 แผงคูดกลืนไมโครเวฟ.....	58
5.3 การหารูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศ.....	59
5.4 การทำงานของระบบการสร้างภาพ.....	60
5.5 การทดลองบันทึกข้อมูลของโลแกรม.....	61
5.5.1 การบันทึกข้อมูลของวัตถุแท่งสี่เหลี่ยมยาว.....	62
5.5.2 การบันทึกข้อมูลของวัตถุรูปตัว X.....	62
5.6 วิธีการสร้างภาพของวัตถุกลับมาโดยวิธีดิจิทัล.....	62
5.6 สรุป.....	64
<b>บทที่ 6 ผลการวิจัย.....</b>	<b>65</b>
6.1 ผลการทดลองการหารูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด.....	65
6.2 ผลการทดลองการบันทึกของ โลแกรม.....	71
6.3 ผลของการกระจายความเข้มของสัญญาณบนหอ โลแกรม.....	81
6.4 ผลการทำเฟรส์เนลทรานส์ฟอร์มของหอ โลแกรมของวัตถุรูปตัว X.....	84
6.5 สรุป.....	85
<b>บทที่ 7 บทสรุปและการประยุกต์ใช้งาน.....</b>	<b>86</b>
7.1 บทสรุป.....	86
7.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น.....	87
7.2.1 ด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	87
7.2.2 ด้านกลไกของระบบ.....	87
7.2.3 ด้านโครงสร้างของสายอากาศ.....	87
7.2.4 ด้านห้องทดลองไมโครเวฟ.....	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.3 การพัฒนาต่อไป.....	88
7.4 การประยุกต์ใช้งาน.....	88
เอกสารอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	92
ภาคผนวก ก. ชุดมอดูเลตความถี่.....	93
ภาคผนวก ข. เครื่องตรวจวัดและขยายสัญญาณ.....	97
ภาคผนวก ค. แผงทดสอบคลื่น ไมโครเวฟ.....	99
ภาคผนวก ง. การประมาณค่าของเฟรส์เนล.....	102
ภาคผนวก จ. ทฤษฎีการแปลงฟูเรียร์.....	104
ภาคผนวก ฉ. การเขียน โปรแกรมควบคุมสแต็ปปีงมอเตอร์และบันทึกข้อมูล.....	107
ภาคผนวก ช. การเขียน โปรแกรมการแปลงเป็นฟูเรียร์ของข้อมูลเฟรส์เนลฮอโลแกรม ของวัตถุรูปตัว X.....	113
ประวัติผู้เขียน.....	116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเรียกชื่อแถบความถี่ย่านไมโครเวฟตามมาตรฐานของ IEEE.....	5
6.1 แสดงผลของสัญญาณที่วัดได้กับระยะเวลาการสแกนตัวไดโพลในแนวนอนกึ่งกลางฮอร์น ครึ่งละ 3 เซนติเมตร.....	66
6.2 แสดงผลของสัญญาณที่วัดได้กับระยะเวลาการสแกนตัวไดโพลในแนวตั้งกึ่งกลางฮอร์น ครึ่งละ 3 เซนติเมตร.....	68
6.3 แสดงผลของสัญญาณที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดสัญญาณเมื่อสแกนวัตถุในแนวนอน ครึ่งละ 10.8 มิลลิเมตรจากบริเวณกลางฮอร์นไปด้านซ้าย จำนวน 1 x 25 จุด.....	71
6.4 แสดงผลของสัญญาณที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดสัญญาณเมื่อสแกนวัตถุในแนวนอน ครึ่งละ 10.8 มิลลิเมตรจากบริเวณกลางฮอร์นไปด้านขวา จำนวน 1 x 25 จุด.....	73
6.5 แสดงผลของสัญญาณที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดสัญญาณเมื่อสแกนวัตถุในแนวนอน ครึ่งละ 5.4 มิลลิเมตร จำนวน 1 x 88 จุด โดยใช้วัตถุ 1 แท่ง.....	75
6.6 แสดงผลของสัญญาณที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดสัญญาณเมื่อสแกนวัตถุในแนวนอน ครึ่งละ 5.4 มิลลิเมตรจำนวน 1 x 88 จุด โดยใช้วัตถุ 2 แท่ง วางห่างกัน 8 เซนติเมตร...	78

## สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 แสดงการจัดวางอุปกรณ์การทดลองการสร้างภาพด้วยคลื่น ไมโครเวฟ.....	3
2.1 แสดงการจัดแถบสเปกตรัมความถี่.....	4
2.2 แสดงการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	6
2.3 แสดงโครงสร้างของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม.....	9
2.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าต่อกระแส.....	18
2.5 แสดงวงจรเสมือนของกัมมันต์ไดโอดออสซิลเลเตอร์.....	19
2.6 แสดงอุปกรณ์ไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์.....	19
2.7 แสดงหลักการการทำงานของไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์.....	20
2.8 แสดงโครงสร้างสายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด.....	21
2.9 แสดงลักษณะของเส้นแรงไฟฟ้าบริเวณทรานซิชั่นซึ่งเป็นตัวกระจายคลื่น ออกสู่ที่ว่าง.....	21
2.10 แสดงอุปกรณ์ไมโครเวฟมิคเซอร์.....	22
2.11 การจัดเรียงอุปกรณ์สำหรับวัดสนามไฟฟ้าด้วยวิธีกระเจิงคลื่น.....	23
3.1..แสดงการเกิดหน้าคลื่นตามหลักของฮอยเกนส์.....	29
3.2 แสดงพิกัดอธิบายการเลี้ยวเบนคลื่นที่ระนาบใดๆ.....	30
3.3 แสดงการกระจายความเข้มแสงของฟังก์ชัน $\sin c\left(\frac{kax}{f}\right)$ บนฉาก.....	35
3.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนผ่านช่องรับคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบพรอนโฮเฟอร์.....	36
4.1 แสดงการจัดวางการถ่ายโซโลแกรมทางแสง.....	37
4.2 แสดงการบันทึกข้อมูลโซโลแกรมทางแสง.....	38
4.3 แสดงการสร้างภาพของวัตถุกลับมา.....	39
4.4 แสดงระบบการบันทึกโซโลแกรมแบบเล็ทซ์-ยูแพทนิคส์.....	39
4.5 แสดงระบบการสร้างภาพกลับมาของเล็ทซ์-ยูแพทนิคส์.....	41
4.6 แสดงระบบพิกัดสำหรับการบันทึกโซโลแกรม.....	43
4.7 แสดงระบบพิกัดสำหรับการบันทึกด้วยเทคนิคการกระเจิงคลื่น.....	46
5.1 แสดงลักษณะ โครงสร้างสายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิดที่สร้างขึ้น.....	49
5.2 แสดงตัวอย่างรูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศแบบฮอร์น.....	50
5.3 แสดงอุปกรณ์แหล่งกำเนิดคลื่นกัมมันต์ไดโอดความถี่ 9.2 จิกะเฮิร์ตซ์ กำลัง 10 มิลลิวัตต์.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.4 แสดงอุปกรณ์ตัวลดทอนสัญญาณแบบปรับค่าได้.....	51
5.5 แสดงอุปกรณ์ไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์.....	52
5.6 แสดงสายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิดที่สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้.....	52
5.7 แสดงอุปกรณ์ตัวตรวจวัดสัญญาณไมโครเวฟชนิดมิกเซอร์.....	52
5.8 ชุดมอดูเลตความถี่.....	53
5.9 แสดงอุปกรณ์เตรียมขยายสัญญาณ.....	53
5.10 แสดงชุดเลื่อนตำแหน่งวัตถุและตัวปรับเฟส.....	54
5.11 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นระนาบคบนฮอโลแกรม.....	54
5.12 แสดงการสร้างคลื่นอ้างอิงภายในท่อนำคลื่น.....	55
5.13 (ก) แสดงการเลื่อนตำแหน่งตัวโคโพล	
(ข) แสดงการเลื่อนระยะแผ่นสะท้อนคลื่น .....	56
5.14 แสดงอุปกรณ์ชุดควบคุมสแต็ปปีงมอเตอร์และเก็บบันทึกผล.....	57
5.15 แสดงเครื่องตรวจวัดและขยายสัญญาณ.....	58
5.16 แสดงชุดอุปกรณ์คูคคลื่น ไมโครเวฟที่สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัย.....	58
5.17 แสดงระบบชุดทดลองเพื่อหารูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศโดยใช้ตัวกระเจิง คลื่นในการวัดสนามไฟฟ้าที่ส่งมาจากสายอากาศ.....	59
5.18 แสดงชุดระบบการสร้างภาพวัตถุด้วยคลื่น ไมโครเวฟ.....	60
5.19 แสดงการชุดอุปกรณ์การสร้างภาพวัตถุด้วยคลื่น ไมโครเวฟ.....	61
5.20 แสดงวัตถุรูปตัว X.....	63
6.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลของสัญญาณกับระยะการสแกนตัวโคโพลในแนวนอนกึ่ง กลางฮอร์นครึ่งละ 3 เซนติเมตร.....	67
6.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลของสัญญาณกับระยะการสแกนตัวโคโพลในแนวตั้งกึ่ง กลางฮอร์นครึ่งละ 3 เซนติเมตร.....	69
6.3 แสดงรูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศที่สร้างขึ้น แบบตัดขวาง.....	70
6.4 แสดงรูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศที่สร้างขึ้น แบบพื้นผิว 3 มิติ.....	70
6.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าของสัญญาณที่วัดได้กับระยะสแกนวัตถุในแนว นอนครึ่งละ 10.8 มิลลิเมตร จากบริเวณกลางฮอร์นไปด้านซ้ายของฮอร์น	
6.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าของสัญญาณที่วัดได้กับระยะสแกนวัตถุในแนว นอนครึ่งละ 10.8 มิลลิเมตร จากบริเวณกลางฮอร์นไปด้านขวาของฮอร์น	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลของสัญญาณกับตำแหน่งวัตถุเมื่อสแกนในแนวนอนครั้งละ 5.4 มิลลิเมตร โดยใช้วัตถุ 1 แท่ง.....	72
6.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลของสัญญาณกับตำแหน่งวัตถุเมื่อสแกนในแนวนอนครั้งละ 5.4 มิลลิเมตร โดยใช้วัตถุ 2 แท่ง วางห่างกัน 8 เซนติเมตร.....	74
6.9 แสดงการกระจายความเข้มของสัญญาณบนระนาบฮอโลแกรมสำหรับการสแกนวัตถุแท่งสี่เหลี่ยมยาว 1 แท่ง จำนวน 25 x 25 จุด จากบริเวณกึ่งกลางฮอว์นไปด้านซ้าย.....	81
6.10 แสดงการกระจายความเข้มของสัญญาณบนระนาบฮอโลแกรมสำหรับการสแกนวัตถุแท่งสี่เหลี่ยมยาว 1 แท่ง จำนวน 25 x 25 จุด จากบริเวณกึ่งกลางฮอว์นไปด้านขวา.....	81
6.11 แสดงการกระจายความเข้มของสัญญาณบนระนาบฮอโลแกรมสำหรับการสแกนวัตถุแท่งสี่เหลี่ยมยาว 1 แท่ง จำนวน 88 x 88 จุด.....	82
6.12 แสดงการกระจายความเข้มของสัญญาณบนระนาบฮอโลแกรมสำหรับการสแกนวัตถุแท่งสี่เหลี่ยมยาว 2 แท่ง วางห่างกัน 8 เซนติเมตร จำนวน 88 x 88 จุด.....	82
6.13 แสดงการกระจายความเข้มของสัญญาณบนระนาบฮอโลแกรมสำหรับการสแกนวัตถุรูปตัว X จำนวน 64 x 64 จุด.....	83
6.14 แสดงภาพที่ได้จากการคำนวณเฟสเนลทธานสปอร์มของฮอโลแกรมสำหรับการสแกนวัตถุรูปตัว X จำนวน 64 x 64 จุด.....	84

# บทที่ 1

## บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาของการดำเนินการวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย วิธีการ และขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้ โดยจะกล่าวเป็นลำดับหัวข้อดังต่อไปนี้

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านไมโครเวฟมีความเจริญก้าวหน้าไปเป็นอย่างมากซึ่งจะพบเห็นการใช้งานของเทคโนโลยีนี้ได้โดยทั่วไป เช่นในด้านการสื่อสาร การแพทย์ การอุตสาหกรรม และการทหาร เป็นต้น โดยเฉพาะด้านการสื่อสารได้ใช้เทคโนโลยีทางด้านไมโครเวฟกันอย่างกว้างขวาง ดังจะเห็นได้จากการสื่อสารผ่านโทรศัพท์มือถือตลอดจนการรับส่งสัญญาณหรือข้อมูลผ่านดาวเทียม อุปกรณ์ที่ใช้ในการสื่อสารดังกล่าวมาแล้วข้างต้นล้วนแล้วแต่ใช้คลื่นพาห์ในการส่งข่าวสารและข้อมูล โดยคลื่นพาห์ที่ใช้กับระบบนี้ได้ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในย่าน 1-30 จิกะเฮิร์ตซ์ (GHz) อยู่ในย่านที่เรียกว่าความถี่ย่านไมโครเวฟ

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำคุณสมบัติของไมโครเวฟมาศึกษาเพื่อทำการสร้างภาพวัตถุในสภาวะที่ปราศจากแสง โดยใช้เทคนิคทางฮอโลแกรม ซึ่งระบบที่ศึกษานี้ใช้หลักการของคลื่นเมื่อตกกระทบวัตถุจะมีการสะท้อนที่พื้นผิวของวัตถุ จากวิธีการนี้เองจึงได้นำเอาคลื่นที่สะท้อนจากพื้นผิวของวัตถุและคลื่นอ้างอิงนำมาทำการประมวลผลเพื่อสร้างเป็นภาพ โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่ตรวจวัดได้เป็นรูปภาพของวัตถุต่อไป

ปกติแล้วการที่มนุษย์เราจะมองวัตถุหรือบันทึกภาพของวัตถุจะต้องอาศัยแสงสว่างไปตกกระทบที่วัตถุแล้วสะท้อนจากวัตถุจะเดินทางไปตกลงบนเรตินาของดวงตาจึงทำให้สามารถมองเห็นวัตถุได้ แต่ในกรณีที่ไม่มีแสงหรือมีวัสดุบดบังวัตถุก็จะทำให้ไม่สามารถมองเห็นวัตถุนั้นได้จากหลักการนี้เองจึงทำให้มนุษย์พยายามเอาชนะธรรมชาติโดยได้ค้นคิดและทำการวิจัยเพื่อให้สามารถที่จะมองเห็นวัตถุในที่มืดหรือบริเวณที่มีวัสดุบดบังการมองเห็น ซึ่งพบได้จากตัวอย่างวัตถุที่ถูกบดบังจากการมองเห็นได้ด้วยตา โดยสิ่งบดบังที่เป็นสารไดอิเล็กตริกนั้น คลื่นไมโครเวฟสามารถจะทะลุผ่านได้เราเรียกว่าเป็นการสะท้อนภาพไมโครเวฟ การประยุกต์ใช้ที่ปลอดภัยประเภทนี้ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงกรณีที่มีตัวกลางที่บดบังเป็นชั้นของผ้า ความน่าเชื่อถือของไมโครเวฟในการเปิดเผยถึงโครงสร้างของสิ่งที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า นั้นไม่ได้ถูกจำกัดอยู่เฉพาะเป้าหมายของวัตถุที่เป็นโลหะเท่านั้น แต่ยังสามารถเห็นโครงสร้างภายในและความผิดปกติภายใน

เอกสารต้นฉบับเอกสารที่ส่งวันเวาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารไดอิเล็กตริกด้วยภาพของการสะท้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ สิ่งที่น่าสนใจสำหรับวิศวกรเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้การสะท้อนของไมโครเวฟคือความเป็นไปได้ของการทำแผนที่สสารอนุภาคที่อยู่ใต้ดินเช่น ท่อ, สายเคเบิล และอื่นๆ รวมไปถึงการใช้งานสำรวจชั้นหิน, อุโมงค์, ทางใต้ดิน, งานทางโบราณคดีเป็นต้น ยังสามารถใช้การสะท้อนระยะไกลเพื่องานทางภูมิศาสตร์หรือเรียกว่าการตรวจสอบระยะไกล (Remote Sensing) และมีโอกาสที่เป็นไปได้ว่าทางกองทัพ สภาความมั่นคง ทางธุรกิจและด้านสาธารณสุข ได้ให้ความสนใจกับการประยุกต์ใช้ทางด้านนี้มาก

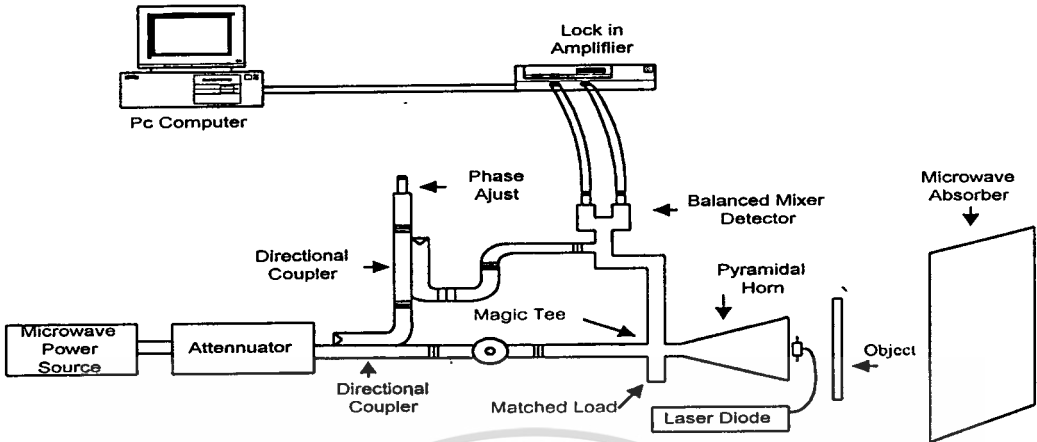
## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เนื่องมาจากปัจจุบันนี้การช่วยเหลือผู้ประสบภัยและการตรวจรักษาความปลอดภัยได้มีความจำเป็นเพิ่มขึ้นอย่างมาก จึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ทันสมัยและใช้เทคโนโลยีในระดับสูงเพื่อการค้นหาและช่วยเหลือผู้ประสบภัย ดังนั้นจึงได้มีการค้นคว้าและวิจัยเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อใช้ในทางด้านนี้ เช่นการใช้อุปกรณ์สำหรับการมองเห็นในที่มืด เครื่องตรวจจับวัตถุและเครื่องตรวจจับความร้อนเป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาเครื่องต้นแบบของระบบการสร้างภาพด้วยไมโครเวฟ เพื่อประยุกต์ใช้ตรวจหาวัตถุที่อยู่ด้านหลังสิ่งกีดขวางแบบทึบแสง จึงทำให้เกิดความสนใจนำเทคโนโลยีของไมโครเวฟมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถเป็นแนวทางในการออกแบบและจัดสร้างระบบการสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟต่อไปได้

## 1.3 การดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยในเรื่องของ ระบบการสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยเริ่มจากการศึกษาหลักการและทฤษฎีของไมโครเวฟ ในการวิจัยนี้ใช้แหล่งกำเนิดไมโครเวฟที่มีความถี่ 9.2 จิกะเฮิรตซ์และ กำลัง 10 มิลลิวัตต์ (mW) ในการศึกษาการสร้างภาพด้วยไมโครเวฟด้วยโมโนสแตติก (Monostatic) ซึ่งมีภาคส่งและภาครับสัญญาณจะอยู่ในอุปกรณ์เดียวกัน ได้ทำการออกแบบและจัดสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งได้แก่สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด (Pyramidal Horn Antenna) อุปกรณ์เลื่อนตำแหน่งวัตถุและตัวปรับเฟสติดตั้งระบบสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟและทดสอบการทำงานของชุดทดลองดังรูปที่ 1.1 ปรับปรุงและแก้ไขระบบในส่วนที่บกพร่อง ทดลองเก็บข้อมูล นำข้อมูลที่ได้สร้างเป็นภาพต่อไป



รูปที่ 1.1 แสดงการจัดวางชุดการทดลองการสร้างภาพวัตถุด้วยคลื่นไมโครเวฟ

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

เพื่อเป็นการส่งเสริมและพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านไมโครเวฟสำหรับใช้งานในด้านการสร้างภาพ และยังเป็นการพัฒนาต้นแบบและระบบในการสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟสำหรับนำไปใช้งานในด้านการตรวจหาวัตถุที่อยู่หลังวัตถุทึบแสงที่ไม่สามารถมองด้วยตาเปล่าได้ อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนาการสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟในระดับสูงต่อไป

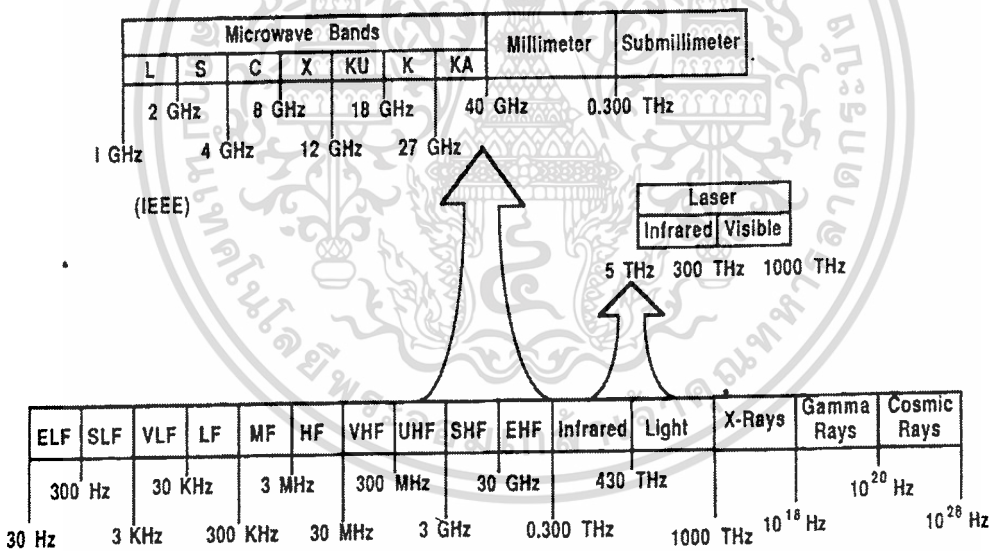
## บทที่ 2

# ความรู้พื้นฐานทางไมโครเวฟและอุปกรณ์

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงความรู้พื้นฐานและทฤษฎีเบื้องต้นทางไมโครเวฟ สมการพื้นฐานทางแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ การวิเคราะห์คุณสมบัติของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมและอุปกรณ์เทคนิคการวัดสนามไฟฟ้าด้วยตัวกระเจิงคลื่น

### 2.1 แถบสเปกตรัมความถี่

แถบสเปกตรัมความถี่(Frequency Spectrum) เริ่มต้นตั้งแต่ 30 เฮิรตซ์ (Hz) ไปจนถึงความถี่  $10^{28}$  เฮิรตซ์ ดังแสดงให้เห็นการจัดแถบสเปกตรัมความถี่ในรูปที่ 2.1 และการเรียกชื่อแถบความถี่ ตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการจัดแถบสเปกตรัมความถี่

ความถี่ในย่านไมโครเวฟมีการจัดแถบสเปกตรัมความถี่ตามมาตรฐานของ IEEE ซึ่งใช้กันอยู่ในปัจจุบัน มีชื่อเรียกแถบความถี่ย่อยจาก L ถึง KA ดังแสดงในตารางที่ 2.1

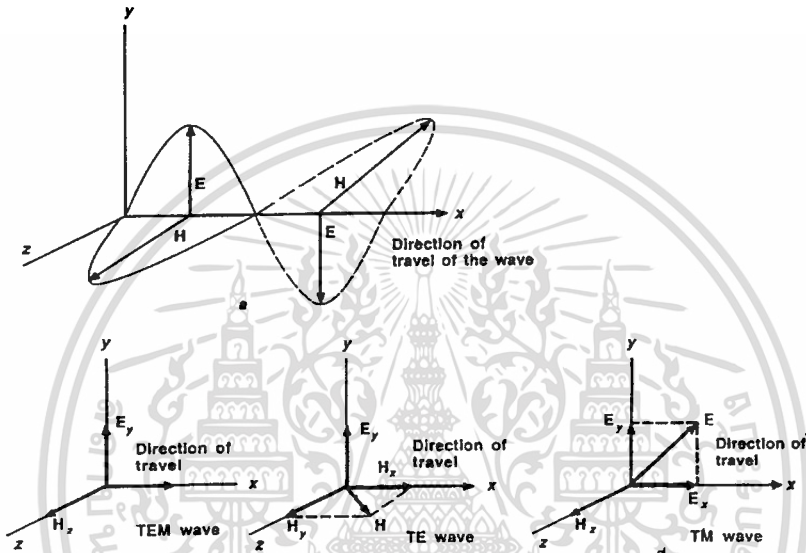
ตารางที่ 2.1 การเรียกชื่อแถบความถี่ย่านไมโครเวฟตามมาตรฐานของ IEEE

แถบความถี่	ย่านความถี่ (GHz)
HF	0.003 – 0.030
VHF	0.030 – 0.300
UHF	0.300 – 1
L	1 – 2
S	2 – 4
C	4 – 8
X	8 – 12
KU	12 – 18
K	18 – 27
KA	27 – 40
Millimeter	40 – 300
Submillimeter	มากกว่า 300

ความถี่ที่อยู่เหนือความถี่ย่านไมโครเวฟมีชื่อเรียกว่าแถบรังสีความร้อน หรือแถบความถี่อินฟราเรด (Infrared) มีแถบสเปกตรัมความถี่ตั้งแต่ 0.3 ถึง 4.3 เทอราเฮิร์ตซ์ (THz) ส่วนความถี่ที่อยู่เมื่อย่านอินฟราเรดมีแถบสเปกตรัมความถี่ 4.3 เทอราเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เพตะเฮิร์ตซ์ (PHz) หรือเรียกย่านแสงที่มองเห็น (Visible Light) ซึ่งย่านความถี่นี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในทางด้านเลเซอร์ และเส้นใยนำแสง (Fiber Optics)

## 2.2 พื้นฐานทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ไมโครเวฟและคลื่นแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า (E) ซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก (H) หรือในทางกลับกันถ้ามีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กทำให้เหนี่ยวนำเกิดสนามไฟฟ้า โดยจะมีการเหนี่ยวนำตลอดเวลา มีการถ่ายเทพลังงานระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะแพร่คลื่นรวมออกไปเรียกว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

### 2.2.1 สมการพื้นฐานทางแม่เหล็กไฟฟ้า

จากการศึกษาเรื่องแม่เหล็กไฟฟ้าได้ทราบมาแล้วว่าสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) ซึ่งเป็นสมการที่อธิบายพฤติกรรม และปรากฏการณ์ต่าง ๆ ทางไฟฟ้า และแม่เหล็กได้ โดยสมบูรณ์มีด้วยกัน 4 สมการ คือ

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$  ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.4) การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	E	คือสนามไฟฟ้า
	H	คือสนามแม่เหล็ก
	D	คือความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า
	B	คือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
	J	คือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
	$\rho$	คือความหนาแน่นประจุไฟฟ้า

เมื่อกำหนดให้ตัวกลางเป็นไอโซโทรปิก(Isotropic) และตัวกลางเป็นไปตามกฎของโอห์มค่าสภาพยอม (permittivity,  $\epsilon$ ) และ ค่าสภาพนำ (conductivity,  $\sigma$ ) ค่าให้ซึมได้ (permeability,  $\mu$ ) มีค่าคงที่

จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$D = \epsilon E \quad (2.5)$$

$$J = \sigma E \quad (2.6)$$

$$B = \mu H \quad (2.7)$$

ถ้าเรากำหนดฟังก์ชันรูปไซน์ (Sinusoidal Function) ที่ขึ้นกับเวลาในรูปของ  $e^{j\omega t}$  และให้  $\partial/\partial t$  แทนโดย  $j\omega$  ดังสมการของแมกซ์เวลล์ เขียนได้ดังนี้

$$\nabla \times E = -j\omega\mu H \quad (2.8)$$

$$\nabla \times H = (\sigma + j\omega\epsilon) E \quad (2.9)$$

$$\nabla \cdot D = \rho v \quad (2.10)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.11)$$

ทำการเคิร์ลลงในสมการ (2.8) ทั้งสองข้าง

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu \nabla \times \mathbf{H} \quad (2.12)$$

นำสมการ (2.9) แทนลงในสมการ (2.12) ด้านขวามือจะได้ว่า

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)\mathbf{E} \quad (2.13)$$

ใช้คุณสมบัติเอกลักษณ์ของเวกเตอร์เคิร์ลของเคิร์ล  $\mathbf{E}$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\nabla^2 \mathbf{E} + \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) \quad (2.14)$$

ในที่ว่าง (Free space)

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v = 0 \quad (2.15)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (2.16)$$

แทนสมการ (2.14) ลงในสมการซ้ายมือของสมการ (2.13) และแก้ไขสมการ (2.16) ได้เป็น

$$\nabla^2 \mathbf{E} = -j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)\mathbf{E} \quad (2.17)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma^2 \mathbf{E} \quad (2.18)$$

โดยที่  $\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} = \alpha + j\beta$

เมื่อ  $\gamma$  คือค่าคงที่การส่งผ่านในตัวกลาง

$\alpha$  คือค่าลดทอนคงที่

$\beta$  คือเฟสคงที่

ในทำนองเดียวกันจะได้

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma^2 \mathbf{H} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

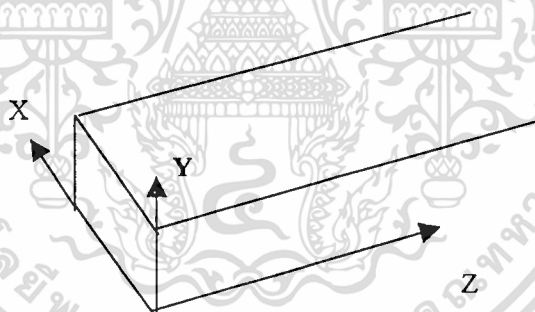
ดังนั้นผลเฉลยของสมการ ( 2.1) และ (2.2) สามารถหาคำตอบของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กในฟังก์ชันของเวลาจากสมการการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กไฟฟ้า ดังสมการ

$$\nabla^2 E = \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.20)$$

$$\nabla^2 H = \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (2.21)$$

### 2.2.2 โหมดการแพร่กระจายคลื่นในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม

ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโดยทั่วไปจะมีรูปหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งเป็นท่อนำสัญญาณของไมโครเวฟที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางที่สุดแบบหนึ่ง ข้อดีของท่อนำคลื่นเมื่อเทียบกับสายโคแอกเชียลคือมีค่าการลดทอนน้อยกว่า พิจารณาท่อนำคลื่นที่ภายในเป็นอากาศ (หรือเป็นก๊าซบางอย่าง) ที่ไม่มีการสูญเสียของตัวกลางอยู่คือ  $\sigma = 0$  และแกนของท่อเป็นเส้นตรงไม่โค้งงอ และรูปหน้าตัดของท่อไม่เปลี่ยนแปลงตามแนวแกน  $z$



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม ก่อนอื่นต้องทำการสร้างสมการคลื่นให้เรียบร้อยแล้วแก้สมการคลื่นเพื่อให้ได้ผลเฉลยทั่วไป ในกรณีนี้จะได้ว่าไม่มีคลื่น TEM (Transverse Electric-Magnetic) ส่งผ่านได้ จะมีเฉพาะคลื่น TE (Transverse Electric) และ TM (Transverse Magnetic) เท่านั้นที่ส่งผ่านได้

### 2.2.3 คลื่นทรานสเวอร์สอิเล็กทริกโหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 คลื่นทรานสเวิร์สอิเล็กทริกโหมด

ในกรณีของคลื่นทรานสเวิร์สอิเล็กทริกโหมด (Transverse Electric Mode, TE) เนื่องจาก  $E_z = 0$  เพราะฉะนั้นสมการคลื่นที่ต้องสร้างก็คือสมการคลื่นของ  $H_z$  ซึ่งในกรณีของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมนี้กำหนดให้  $\sigma = 0$  ตามเงื่อนไขที่ไม่มีการสูญเสียในตัวกลาง เพราะฉะนั้นสมการคลื่นสำหรับ  $H_z$  จะเขียนได้ดังนี้[18]

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + k_c^2 H_z = 0 \quad (2.22)$$

โดยที่  $k_c^2 = \gamma^2 + \omega\mu\epsilon = \gamma^2 + k^2$

ในการแก้สมการคลื่นเพื่อหาผลเฉลยทั่วไปของ  $H_z$  นั้นจะได้

$$H_z(x, y, z) = (A \cos k_x x + B \sin k_x x) (C \cos k_y y + D \sin k_y y) e^{\pm \gamma z} \quad (2.23)$$

สำหรับสนามในแนวขวางนั้นสามารถหาได้โดยให้  $\sigma = 0$  จะได้ว่า

$$E_x = -\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (2.24)$$

$$E_y = \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (2.25)$$

$$H_x = -\frac{\gamma}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} = \frac{j\beta}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (2.26)$$

$$H_y = -\frac{\gamma}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} = \frac{j\beta}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (2.27)$$

โดยที่  $\gamma = j\beta$  เพราะ  $\alpha = 0$  เมื่อ  $\sigma = 0$

การหาผลเฉลยจะทำได้โดยพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังของท่อนำคลื่น โดยทั่วไปท่อนำคลื่นจะทำด้วยตัวนำไฟฟ้าที่ดี เงื่อนไขขอบเขตก็คือสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสกับท่อนำคลื่นที่ผิวของท่อนำคลื่นจะต้องเป็นศูนย์ จะได้  $E_x$  ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_x = -\frac{j\omega\mu}{k_c^2} (A \cos k_x x + B \sin k_x x) (-C k_y \sin k_y y + D k_y \cos k_y y) e^{-yz} \quad (2.28)$$

จะเห็นได้ว่า  $E_x = 0$  ที่  $y = 0$  ก็ต่อเมื่อ  $D = 0$  และ  $E_x = 0$  ที่  $y = b$

โดยที่  $k_y b = n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots$

และจะได้  $E_y$  เป็น

$$E_y = -\frac{j\omega\mu}{k_c^2} (A k_x \sin k_x x + B k_x \cos k_x x) (C \cos k_y y + D \sin k_y y) e^{\pm j\beta z} \quad (2.29)$$

เมื่อ  $E_y = 0$  ที่  $x = 0$  ก็ต่อเมื่อ  $B = 0$  และ  $E_y = 0$  ที่  $x = a$

โดยที่  $k_x a = m\pi \quad m = 0, 1, 2, \dots$

ผลเฉลยเฉพาะของ  $H_z$  จะได้

$$\begin{aligned} H_{zmn} &= AC \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{\pm j\beta_{mn}z} \\ &= A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{\pm j\beta_{mn}z} \end{aligned} \quad (2.30)$$

โดยที่  $A_{mn} = AC$  ซึ่งถูกกำหนดจากคลื่นที่ส่งผ่าน สำหรับ  $\beta_{mn}$  หาได้จาก

$$y_{mn}^2 = (j\beta_{mn})^2 = k_{cmm}^2 - \omega^2 \mu \epsilon = k_{cmm}^2 - k^2$$

$$\text{โดยที่ } k_{cmm}^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2$$

จากการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวขวางจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{xmn} = \frac{j\omega\mu}{k_{cmm}^2} \left( \frac{n\pi}{b} \right) A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{\pm j\beta_{mn} z} \quad (2.31)$$

$$E_{ymn} = - \frac{j\omega\mu}{k_{cmm}^2} \left( \frac{n\pi}{a} \right) A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{\pm j\beta_{mn} z} \quad (2.32)$$

$$H_{xmn} = \mp \frac{j\beta_{mn}}{k_{cmm}^2} \left( \frac{m\pi}{b} \right) A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{\pm j\beta_{mn} z} \quad (2.33)$$

$$H_{ymn} = \mp \frac{j\beta_{mn}}{k_{cmm}^2} \left( \frac{n\pi}{a} \right) A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{\pm j\beta_{mn} z} \quad (2.34)$$

ค่าอิมพีแดนซ์คลื่นสำหรับคลื่นที่ส่งผ่านไปในทิศ  $z$  จะได้ว่า

$$Z_{hmn} = \frac{E_{xmn}}{H_{ymn}} = - \frac{E_{ymn}}{H_{xmn}} = \frac{\omega\mu}{\beta_{mn}} = \frac{k}{\beta_{mn}} \eta \quad (2.35)$$

สารไดอิเล็กตริกที่เป็นที่ว่างจะได้

$$\beta_{mn}^2 = k_c^2 - k_c^2 - \left[ \left( \frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left( \frac{n\pi}{b} \right)^2 \right] \quad (2.36)$$

$$Z_{hmn} = \frac{k_0}{\beta_{mn}} \eta_0 \quad (2.37)$$

ความเร็วเฟสของคลื่น โหมดต่าง ๆ

$$v_{pmn} = \frac{\omega}{\beta_{mn}} = \frac{k_0}{\beta_{mn}} c = \frac{c}{\left[ 1 - (k_{cmm} / k_0)^2 \right]^{1/2}} \quad (2.38)$$

และความยาวของคลื่นที่ส่งผ่านในแนวแกน  $z$  จะเป็น

$$\lambda_{mn} = \frac{2\pi}{\beta_{mn}} = \frac{2\pi}{\left[ k_0^2 - k_{cmm}^2 \right]^{1/2}} \quad (2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวิชาการ [k<sub>0</sub><sup>2</sup> - k<sub>cmm</sub><sup>2</sup>]<sup>1/2</sup> ปรึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังไมโครเวฟ (Microwave Power) กรณีที่มีคลื่นส่งผ่านท่อนำคลื่นได้มากกว่าหนึ่ง โหมดนั้นจะมี สนามแม่เหล็กไฟฟ้ารวมของโหมด TE จะเขียนได้เป็น

$$H_z = \sum_n^m H_{znm} \quad (2.40)$$

$$\vec{E}_t = \sum_n^m [i_x E_{xnm} + i_y E_{ynm}] \quad (2.41)$$

$$\vec{H}_t = \sum_n^m [i_x H_{xnm} + i_y H_{ynm}] \quad (2.42)$$

ในการคำนวณกำลังของคลื่นที่ส่งผ่านไปในทิศ  $z$  นั้น สามารถใช้หลักการของพอยน์ติงเพาเวอร์จะ  
ได้

$$P = \text{Re} \left[ \int_0^a \int_0^b (E \times H^*) \cdot i_z dx dy \right] \quad (2.43)$$

$$= \text{Re} \left[ \int_0^a \int_0^b (E_t \times H_t^*) \cdot i_z dx dy \right] \quad (2.44)$$

$$= \text{Re} \left[ \int_0^a \int_0^b \sum_n^m \{ E_{xnm} H_{yrs}^* - E_{ynm} H_{xrs}^* \} dx dy \right] \quad (2.45)$$

และสามารถคำนวณกำลังที่ส่งผ่านไปในโหมด  $TE_{nm}$  ได้เป็น

$$\begin{aligned} P_{l_{nm}} &= \frac{\beta_{nm}^2 |A_{nm}|^2}{k_{c_{nm}}^4} Z_{l_{nm}} \frac{ab}{\epsilon_{0m} \epsilon_{0m}} \left\{ \left( \frac{n\pi}{b} \right)^2 + \left( \frac{m\pi}{a} \right)^2 \right\} \\ &= \frac{\epsilon_{0m} \epsilon_{0m} ab}{4} |A_{nm}|^2 \left( \frac{\beta_{nm}}{k_{c_{nm}}} \right)^2 Z_{l_{nm}} \end{aligned} \quad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหมด  $TE_{10}$  จัดว่าเป็นโหมดพื้นฐาน (Fundamental mode หรือ Dominant mode) ของคลื่นส่งผ่านไป ในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมนี้ ในการออกแบบท่อนำคลื่นโดยทั่วไปก็จะออกแบบให้มีความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของท่อนำคลื่นและความถี่ใช้งาน ถ้า  $k_0 < k_{c10}$  ก็จะไม่มีการนำคลื่นในโหมดใดส่งผ่านไปได้เลย ถ้า  $k_0 > k_{c20}$  ก็จะทำให้โหมด  $TE_{20}$  ส่งผ่านไปด้วย สภาพที่มีคลื่นส่งผ่านไปพร้อมกันหลายโหมด เนื่องจากความเร็วกลุ่มของแต่ละโหมดไม่เท่ากัน

#### 2.2.4. คลื่นทรานสเวิร์สแมกเนติกโหมด

ในกรณีของคลื่นทรานสเวิร์สแมกเนติกโหมด (Transverse Magnetic Mode; TM) เนื่องจาก  $H_z = 0$  เพราะฉะนั้นสมการคลื่นที่ต้องสร้างก็คือสมการคลื่นของ  $E_z$  ซึ่งในกรณีของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมนี้กำหนดให้  $\sigma = 0$  ตามเงื่อนไขที่ไม่มีการสูญเสียในตัวกลาง จะเขียนได้ในรูปดังนี้ [18]

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + k_c^2 E_z = 0 \quad (2.47)$$

ในการแก้สมการคลื่นเพื่อหาผลเฉลยทั่วไปของ  $E_z$  นั้นจะได้

$$E_z(x,y,z) = (A \cos k_x x + B \sin k_x x) (C \cos k_y y + D \sin k_y y) e^{\pm jz} \quad (2.48)$$

สำหรับสนามในแนวขวางนั้นสามารถหาได้โดยให้  $\sigma = 0, y = j\beta$  จะได้

$$E_x = \frac{y}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\frac{j\beta}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (2.49)$$

$$E_y = -\frac{y}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} = -\frac{j\beta}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (2.50)$$

$$H_x = \frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (2.51)$$

$$H_y = \frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (2.52)$$

การหาผลเฉลยจะทำได้โดยพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังของท่อนำคลื่น พิจารณาจาก  $E_z$  โดยตรงที่ผนังของท่อนำคลื่นจะต้องเป็นศูนย์ จะได้  $E_z$  ดังนี้  
เมื่อ  $E_z = 0$  ที่  $x = 0$  ก็ต่อเมื่อ  $A = 0$  และ  $E_z = 0$  ที่  $x = a$

$$\text{โดยที่ } k_x a = m\pi \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

เมื่อ  $E_z = 0$  ที่  $y = 0$  ก็ต่อเมื่อ  $C = 0$  และ  $E_z = 0$  ที่  $y = b$

$$\text{โดยที่ } k_y b = n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

ผลเฉลยเฉพาะของ  $E_z$  จะได้

$$\begin{aligned} E_{zmn}(x, y, z) &= BD \sin k_x y e^{\pm j\beta_{mn} z} \\ &= B_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{\pm j\beta_{mn} z} \end{aligned} \quad (2.53)$$

โดยที่  $B_{mn} = BD$  ซึ่งถูกกำหนดจากกำลังคลื่นที่ส่งผ่าน จากการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวขวางจะได้

$$E_{xmn} = \frac{j\beta_{mn}}{k_{cmn}^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) B_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{\pm j\beta_{mn} z} \quad (2.54)$$

$$E_{ymn} = \frac{j\beta_{mn}}{k_{cmn}^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) B_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{\pm j\beta_{mn} z} \quad (2.55)$$

$$H_{xmn} = \mp \frac{j\omega\epsilon}{k_{cmn}^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) B_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{\pm j\beta_{mn} z} \quad (2.56)$$

$$H_{ymn} = \mp \frac{j\omega\epsilon}{k_{cmn}^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{\pm j\beta_{mn} z} \quad (2.57)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอิมพีแดนซ์คลื่นสำหรับคลื่นที่ส่งผ่านไปในทิศ  $z$  จะได้ว่า

$$Z_{emn} = \frac{E_{xmn}}{H_{ymn}} = -\frac{E_{ymn}}{H_{xmn}} = \frac{\beta_{mn}}{\omega\mu} = \frac{\beta_{mn}}{k} \eta \quad (2.58)$$

ในกรณีสารไดอิเล็กตริกเป็นที่ว่างจะได้

$$Z_{emn} = \frac{\beta_{mn}}{k_0} \eta_0 \quad (2.59)$$

เมื่อเปรียบเทียบ  $Z_{cmn}$  กับ  $Z_{hmn}$  จะเห็นได้ว่าไม่เท่ากัน และของ  $Z_c$  และ  $Z_h$  ก็ยังเปลี่ยนแปลงไปตามอันดับของโหมด  $m$  กับ  $n$  จะพบว่า  $Z_{hmn} Z_{emn} = \eta_0^2$  เสมอเพราะ  $\beta_{mn}$  ของโหมด  $TE_{mn}$  และ  $TM_{mn}$  มีค่าเท่ากัน

ความเร็วเฟสของคลื่น โหมดต่างๆ มีค่าดังนี้

$$v_{pmn} = \frac{\omega}{\beta_{mn}} = \frac{k_0}{\beta_{mn}} c = \frac{c}{\left[1 - (k_{cmn}/k_0)^2\right]^{1/2}} \quad (2.60)$$

และความยาวของคลื่นที่ส่งผ่านในแนวแกน  $z$  มีค่าเป็น

$$\lambda_{mn} = \frac{2\pi}{\beta_{mn}} = \frac{2\pi}{\left[k_0^2 - k_{cmn}^2\right]^{1/2}} \quad (2.61)$$

โดยสรุปแล้วคลื่นที่ส่งผ่านไปตามท่อนำคลื่นได้นั้น จะมีคลื่น  $TE$  และ  $TM$  ซึ่งคลื่นทั้งสองจะมีผลเฉลยแบบการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ซ้ำแบบกัน และสนามไฟฟ้าที่ผนังโลหะจะมีทิศตั้งฉากกับผนังโลหะเสมอ

2.2.5 ความเร็วเฟสและความเร็วกลุ่ม

ความเร็วเฟสของคลื่นคือความเร็วที่ตามคลื่นไปเพื่อที่จะมองเห็นเฟสคงที่ (Phase Constant) ในกรณีของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะพิจารณาความเร็วเฟสในโหมดต่างๆ  $v_{pmn} = k_0 c / \beta_{mn}$  ซึ่งมีค่ามากกว่า  $c$  เพราะ  $\beta_{mn} < k_0$  อย่างไรก็ตามความเร็วเฟสนี้จะไม่ใช่ความเร็วในการส่งผ่านกำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

พิจารณาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณเบสแบนด์ (Base Band) เช่น สัญญาณเสียงหรือสัญญาณภาพ เป็นต้น จะได้ความเร็วเฟสเป็น

$$v_p = \frac{\lambda_g}{\lambda_0} c \tag{2.62}$$

$\lambda_0$  คือ ความยาวคลื่นในอากาศ  
 $\lambda_g$  คือ ความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น

ความเร็วในการส่งผ่านจึงเป็นความเร็วในการส่งผ่านของกลุ่มคลื่น ซึ่งเรียกว่าความเร็วกลุ่ม มีนิยามดังนี้

$$v_g = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta\beta} = \left( \frac{d\beta}{d\omega} \right)^{-1} \tag{2.63}$$

เนื่องจาก  $\beta_{mn} = (k_0^2 - k_{cmn}^2)^{1/2}$  ดังนั้นจะได้ความเร็วกลุ่มของโหมดอันดับ  $mn$  ในรูปต่อไปนี้

$$v_{gmn} = \left( \frac{d\beta_{mn}}{d\omega} \right)^{-1} = \frac{\beta_{mn}}{k_0} = \frac{\lambda_0}{\lambda_{gmn}} c \tag{2.64}$$

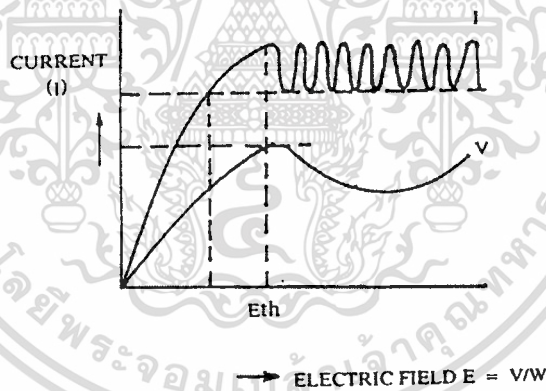
เนื่องด้วย  $\beta_{mn} < k_0$  เสมอ ดังนั้น  $v_{gmn}$  จึงต้องมีค่าน้อยกว่า  $c$  เสมอ

เนื่องจากอุปกรณ์ส่วนสำคัญในระบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นอุปกรณ์ทางไมโครเวฟได้แก่ แหล่งกำเนิดไมโครเวฟ ตัวลวดทอนสัญญาณ ไดรেকชันนัลคัปเปิลอร์ สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด ตัวตรวจวัดสัญญาณ จึงจะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

### 2.3.1 แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์ไดโอด

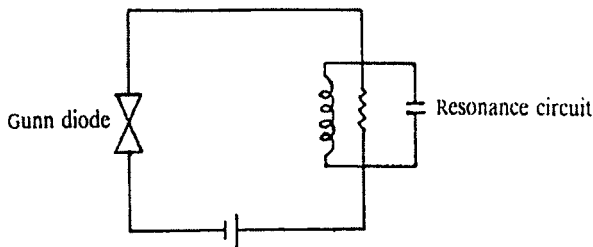
แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์ไดโอด(Gunn Diode)เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่ไมโครเวฟที่ใช้คุณสมบัติของปรากฏการณ์แบบกัมมันต์ของผลึกแกเลียมอาเซไนด์ (Galium-Asenide) ชนิด N ส่วนประกอบของแหล่งกำเนิดประกอบด้วยผลึกที่มีอิเล็กโทรด (Electrode) บรรจุอยู่ในกล่องโลหะขนาดเล็กเพื่อให้ได้คุณสมบัติการกระจายความร้อน

ปรากฏการณ์แบบกัมมันต์ของผลึก GaAs ชนิด N สามารถทำให้เกิดขึ้นได้โดยการจ่ายไฟฟ้าแรงสูงแก่ผลึก ทำให้กระแสไหลเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ผลึก เมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงระดับหนึ่งเรียกว่า ค่าแรงดันขีดจำกัด (Threshold Voltage)  $E_H$  จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าต่อกระแสแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าต่อกระแส

กัมมันต์ไดโอดมีวงจรการกำทอนอยู่ภายนอกเพื่อนำพลังงานไมโครเวฟที่เกิดขึ้นภายในส่งออกไปยังท่อนำคลื่น ความถี่ของการออสซิลเลตในตัวกำเนิดความถี่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของกัมมันต์ไดโอดดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงวงจรเสมือนของกันนำโค ไอคอสซิลเลเตอร์

2.3.2 ตัวลดทอนสัญญาณ (Attenuator)

ตัวลดทอนสัญญาณใช้เป็นอุปกรณ์ลดทอนกำลังไฟฟ้าของสัญญาณที่ผ่านตัวลดทอน ให้มีค่าที่เหมาะสมในการวัดและอยู่ในย่านการวัดของกำลังมิเตอร์ไฟฟ้า สำหรับงานวิจัยใช้แบบปรับค่าได้ต่อเนื่องค่าการลดทอนมีหน่วยเดซิเบล (dB) หาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$A = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{out}} \tag{2.65}$$

โดยที่

- A คือค่าการลดทอนเมื่อผ่านตัวลดทอน
- $P_{in}$  คือกำลังด้านอินพุตของตัวลดทอน
- $P_{out}$  คือกำลังด้านเอาต์พุตของตัวลดทอน

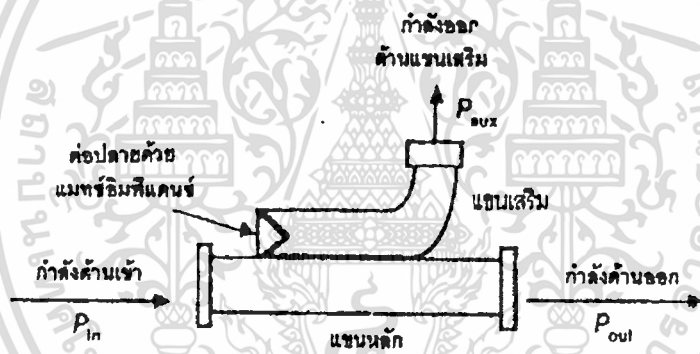
2.3.3 ไคเรคชันนัลคัปเปิลเลอร์



รูปที่ 2.6 แสดงอุปกรณ์ไคเรคชันนัลคัปเปิลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์ (Directional Coupler) เป็นอุปกรณ์ที่ทำภารกิจเอากำลังงานส่วนหนึ่งจากกำลังงานที่ผ่านท่อนำคลื่นหลักออกมา ซึ่งให้เลือกใช้งานตามค่าการลดทอนแบบต่างๆ ตัวคัปเปิลเลอร์ช่วยให้สามารถทำการวัดคลื่นสัญญาณที่มีกำลังสูงด้วยมิเตอร์วัดกำลังต่ำได้ ลักษณะของไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์ที่ใช้กันแสดงดังรูปที่ 2.6 ประกอบด้วย ท่อนำคลื่นสองท่อน ประกบติดกัน ปลายท่อนหนึ่งโค้งออกไปทำมุมฉากกับท่อนตรง ไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์จะดึงเอากำลังงานที่ส่งผ่านในท่อนตรงออกมาส่วนหนึ่งออกทางแขนเสริม (Auxiliary Arm) หรือท่อนส่วนโค้ง โดยที่ระหว่างท่อนนำคลื่นสองท่อนที่ประกบติดกันจะมีช่องเล็กๆ ให้สัญญาณผ่านออกมาได้ซึ่งช่องหรือรูเล็กๆ นี้จะอยู่ห่างกันเท่ากับ  $\frac{\lambda}{4}$  ขนาดและจำนวนของรูเล็กๆ เหล่านี้เป็นตัวกำหนดปริมาณของกำลังงานที่สามารถผ่านออกมาที่แขนเสริม โดยที่ปลายโค้งของแขนเสริมจะต่อด้วยเครื่องมือวัดสัญญาณ ส่วนปลายที่เหลือจากรูปที่ 2.7 คือด้านซ้ายมือ ซึ่งจะต่อไว้ด้วยโหลดรูปทรงสามเหลี่ยม ทั้งนี้เพื่อดูดคลื่นคลื่นที่ผ่านมาไม่ให้เกิดการสะท้อนกลับ ในวิจยนี้คัปปลิ่งแฟคเตอร์ มีค่าเท่ากับ 3 เดซิเบล



รูปที่ 2.7 แสดงหลักการทำงานของไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์

อัตราส่วนกำลังงานที่เข้าในคัปเปิลเลอร์เทียบกับกำลังงานออกที่แขนเสริมเรียกว่า คัปปลิ่งแฟคเตอร์ตามรูปที่ 2.7 กำลังงานอินพุตใช้สัญลักษณ์  $P_{in}$  และกำลังงานเอาต์พุตที่แขนเสริมใช้สัญลักษณ์  $P_{aux}$  คัปปลิ่งแฟคเตอร์หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$C = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{aux}} \quad (2.66)$$

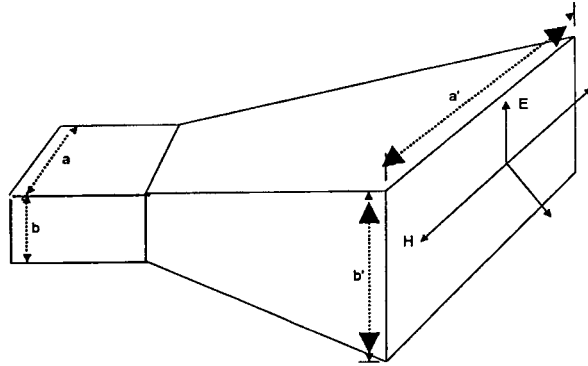
โดยที่  $C$  = คัปปลิ่งแฟคเตอร์

$P_{in}$  = กำลังอินพุตเข้าสู่คัปเปิลเลอร์

$P_{aux}$  = กำลังเอาต์พุตที่แขนเสริม

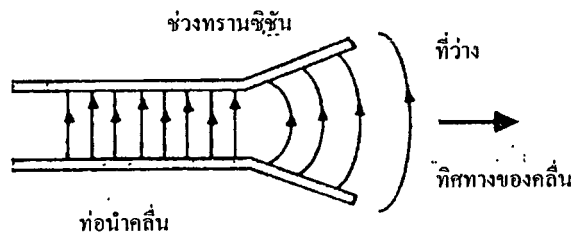
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด



รูปที่ 2.8 แสดง โครงสร้างสายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด

ในการส่งคลื่นจากที่ว่างเข้าไปในท่อนำคลื่น โหมดในการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นที่ได้รับจะเหมือนโหมดการกระจายของคลื่นในที่ว่างแต่เนื่องจากเกิดความไม่สม่ำเสมอหรือจะเรียกว่าความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity) ของสายนำสัญญาณท่อนำคลื่น ที่จุดอินพุต ดังนั้นในการแพร่กระจายคลื่นผ่านช่วงรอยต่อนี้จะเกิดคลื่นในโหมดที่ลำดับสูงขึ้น โดยที่คลื่นโหมดนี้จะไม่แพร่กระจายต่อไปเมื่อผ่านพ้นช่วงรอยต่อ จะถูกลดทอนจนหมด ส่วนการส่งผ่านพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านจากท่อนำคลื่นออกสู่ที่ว่างการส่งผ่านพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพสูงสุด (Excellent Efficiency) ก็ต่อเมื่อไม่มีการมีสมมาตรเกิดขึ้นที่ท่อนำคลื่น ซึ่งทำให้เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณผลที่ตามมาจะเกิดความสูญเสียทางกำลังงาน และมีการก่อดั้วของคลื่นนิ่งขึ้นในท่อนำคลื่นด้วย สำหรับบริเวณช่วงรอยต่อของท่อนำคลื่นกับที่ว่างสามารถทำให้เกิดการแมทชิงขึ้นได้ด้วยการปรับท่อนำคลื่นช่วงปลายนี้ให้มีลักษณะเหมือนฮอร์นทรงพีระมิด ท่อนำคลื่นจะถูกแมทชิงเข้ากับที่ว่าง โดยผ่านช่วงทรานซิชัน (Transition Region) และในช่วงทรานซิชัน นี้จะเกิดคลื่นในโหมดที่สูงกว่าด้วย เพื่อให้การแพร่กระจายคลื่นสามารถเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตรอยต่อ (Boundary Condition)



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของเส้นแรงไฟฟ้าบริเวณทรานซิชันซึ่งเป็นตัวกระจายคลื่นออกสู่ที่ว่าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.5 ตัวตรวจวัดสัญญาณ

การวัดกำลังงานในย่านความถี่ไมโครเวฟนั้นจำเป็นต้องแปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้เป็นค่ากระแสตรง กรรมวิธีในการเปลี่ยนแปลงนี้เราเรียกว่า การดีเทกชัน (Detection) หรือบางครั้งต้องการเปลี่ยนความถี่ของคลื่นสัญญาณหนึ่งให้เป็นคลื่นสัญญาณหลายความถี่ต่างๆ กัน หรือเป็นชุดอนุกรมของความถี่ สิ่งประดิษฐ์อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่นี้เราเรียกว่ามิกเซอร์ (Mixer) ไมโครเวฟมิกเซอร์มีข้อแตกต่างจากตัวตรวจวัดสัญญาณไมโครเวฟ (Microwave Detector) ตรงไมโครเวฟมิกเซอร์ที่จะมีอินพุตของคลื่นสัญญาณสองอินพุต ในขณะที่ตัวตรวจวัดสัญญาณไมโครเวฟจะมีอินพุตเพียงหนึ่งอินพุต ในการใช้งาน ตัวตรวจวัดสัญญาณและมิกเซอร์ ไดโอดจะติดบนฐานหรือที่เรียกว่าตัวตรวจวัดสัญญาณและมิกเซอร์เม้าท์เพื่อลดการสะท้อนกลับอันเนื่องมาจากมิสมatching ให้เหลือน้อยที่สุด

ดีเทกชันคือการกรองคลื่นสัญญาณคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Signal) ให้เป็นสัญญาณกระแสตรงซึ่งเป็นสัดส่วนกับกำลังของสัญญาณ โดยใช้ไดโอดเฉพาะซึ่งทำงานตลอดย่านความถี่ไมโครเวฟในการรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้น คลื่นไมโครเวฟจะถูกแปลงสัญญาณ (Rectified) ด้วยไมโครเวฟไดโอดและกรองความถี่สูงออกโดยใช้ตัวคาปาซิเตอร์ (Capacitor) เพื่อให้ได้กระแสตรง ในตัวอย่างนี้ใช้ไมโครเวฟมิกเซอร์ แสดงดังรูปที่ 2.10



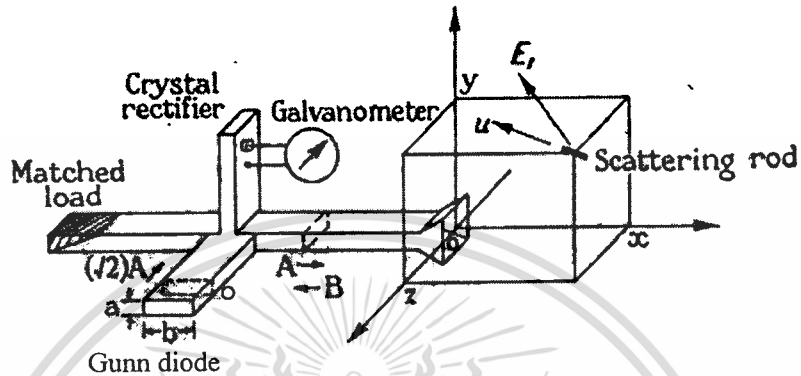
รูปที่ 2.10 แสดงอุปกรณ์ไมโครเวฟมิกเซอร์

ไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์อุปกรณ์แบบนอนลิเนียร์ (Nonlinear) คือการทำงานไม่เป็นเชิงเส้น ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการตรวจวัดสัญญาณการแปลงความถี่และการผลิตความถี่ฮาร์โมนิก ไดโอดที่ใช้ทำงานในย่านความถี่ไมโครเวฟจะมีค่าการเก็บประจุ ค่าการเหนี่ยวนำ และค่าน้อยสปีกเกอร์ต่ำ (Noise Figure) สามารถทำงานได้ดีถึงย่านความถี่ 100 จิกะเฮิร์ตซ์ ไมโครเวฟไดโอดที่ใช้กันมีชื่อเรียกว่าชอตต์บาเรียร์ไดโอด (Schottky Barrier Diode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 เทคนิคการวัดสนามไฟฟ้าด้วยตัวกระเจิงคลื่น

พิจารณาการจัดเรียงอุปกรณ์สำหรับวัดสนามไฟฟ้าโดยเทคนิคการกระเจิงคลื่น ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดคลื่น, อุปกรณ์ไฮบริด (Hybrid -T), แมทซ์โหลด, ตัวตรวจวัดสัญญาณและแท่งโลหะสั้นกระเจิงคลื่น (Scattering rod) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การจัดเรียงอุปกรณ์สำหรับวัดสนามไฟฟ้าด้วยวิธีกระเจิงคลื่น

เมื่อคลื่นจากแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่ออกจากฮอร์น กำหนดด้วย  $A$  ไปตกกระทบตัวกระเจิงคลื่น ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ตัวกระเจิงคลื่น ดังสมการ

$$E_1(x, y, z) = AF(x, y, z) \quad (2.67)$$

ซึ่งสนามไฟฟ้า  $E_1$  จะแปรตามค่าของ  $A$  และ  $F$  ซึ่ง  $F$  เป็นฟังก์ชันจำนวนเชิงซ้อน ไม่มีหน่วยขึ้นกับตำแหน่งของตัวกระเจิง โดยมี  $u$  เป็นยูนิตเวกเตอร์ จากการประยุกต์ใช้ของลอเรนซ์ (Lorentz's Reciprocity Theorem) [10] จะได้คลื่นที่กระเจิงกลับเข้าไปในฮอร์นคือ  $B$  มีสมการเป็น

$$B = A \left( \frac{j\omega\alpha z_0}{ab} \right) (u \cdot F)^2 \quad (2.68)$$

$\omega$  คือความถี่เชิงมุมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

$z_0$  คืออิมพีแดนซ์ของโหมด H ในท่อนำคลื่น

$\alpha$  คือโพลาไรซ์อะบิลิตี (Polarizability) ของไดโพล

$a, b$  คือความกว้างยาวภาคตัดขวางท่อนำคลื่น

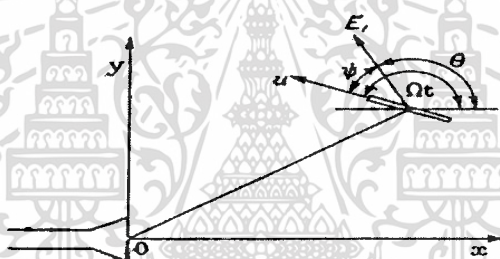
จากสมการ(2.68) ตัวดีเทคเตอร์สามารถวัดกระแสไฟฟ้ามีความเป็นสัดส่วนกับ ความเข้มของ  $B$  คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I \doteq K|B|^2 \quad (2.69)$$

แทนสมการ (2.68) ใน (2.69) ได้ว่า

$$I = K \left| \frac{\omega \alpha Z_0}{ab} \right|^2 |u \cdot F|^4 |A|^2 \quad (2.70)$$

ในสมการที่ (2.70) คือกระแสที่ตัวตรวจวัดสัญญาณซึ่งจะขึ้นกับสนามไฟฟ้าที่ตัวไดโพล เป็นฟังก์ชันกำลังสี่กรณีที่ยังไม่มี การหมุนตัวไดโพล แต่เมื่อได้ทำการมอดูเลตด้วยการหมุนตัวไดโพลโดยพิจารณาตัวไดโพลขนานกับระนาบ xy และหมุนรอบแกน z ด้วยความเร็วเชิงมุม  $\Omega$  ดังรูปที่ 2.3 ดังนั้นในกรณีของคลื่นแบบโพลาไรซ์เชิงเส้นผลลัพธ์ของ  $u \cdot F$  เขียนแทนได้เป็น



รูปที่ 2.12 แสดงการหมุนตัวไดโพล

$$F_t \cos \psi = |F_t| e^{j\phi_t} \cos \psi \quad (2.71)$$

เมื่อ  $F_t(x,y,z)$  เป็นองค์ประกอบของเวกเตอร์  $F$  ในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของคลื่น (ซึ่งก็คือขององค์ประกอบของเวกเตอร์  $F$  ระนาบ xy) และ  $\phi_t$  คือมุมเฟสของ  $F_t$  ดังนั้นสมการที่ (2.68) เขียนใหม่ได้เป็น

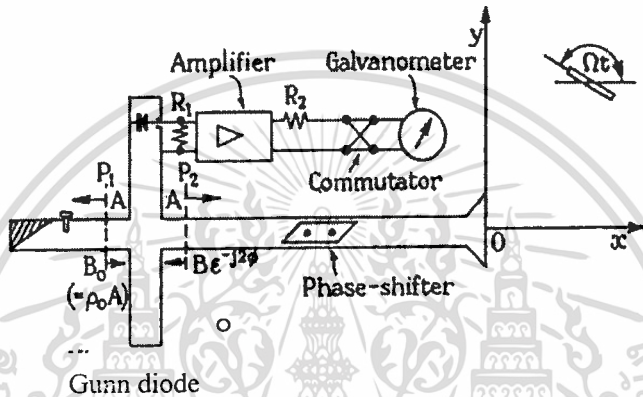
$$B = j \frac{\omega \alpha Z_0}{ab} |F_t|^2 e^{j2\phi_t} A \cos^2(\Omega t - \theta) \quad (2.72)$$

ดังนั้นเมื่อแทนสมการ (2.72) ลงในสมการ (2.69) และใช้ความสัมพันธ์ตรีโกณมิติจะได้ กระแสที่ตัวตรวจวัดเป็นผลรวมของเทอมกระแสตรงและเทอมซึ่งมีความถี่ 2 เท่า และ 4 เท่า ของ การมอดูเลต เมื่อปรับตัวขยายกระแสหรือใช้ตัวฟิลเตอร์ที่เหมาะสมสามารถตัดเทอมกระแสตรง ออกจากสัญญาณได้ หากต้องการสัญญาณที่มีความถี่ 2 เท่า และ 4 เท่า ของการมอดูเลต อย่างไรก็ตามหากต้องการสัญญาณที่มีความถี่ 2 เท่า และ 4 เท่า ของการมอดูเลต จะต้องใช้อุปกรณ์ที่ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเทอมความถี่ 4 เท่าออกไปได้ซึ่งจะเหลือเพียงเทอมความถี่ 2 เท่า ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการและสำคัญ ดังนั้นกระแสที่ได้เป็น

$$I_2 = K \left| \frac{\omega \alpha z_0}{ab} \right|^2 |F_r|^4 |A|^2 \frac{1}{2} \cos 2(\Omega t - \theta) \tag{2.73}$$

จากสมการที่ (2.73) เมื่อพิจารณากระแสจะเห็นว่ากระแสที่ได้ไม่ตรงกับคุณสมบัติของกฎกำลังสอง



รูปที่ 2.13 การจัดเรียงอุปกรณ์สำหรับวัดสนามไฟฟ้าด้วยวิธีหมุนตัวไดโพล

ปัญหาดังกล่าวจะแก้ไขได้ โดยสร้างคลื่นอ้างอิงขึ้นมาภายในระบบดังรูปที่ 2.13 ซึ่งมีหูดสะท้อนคลื่นที่แมทซ์โหลด ทำให้มีคลื่นอ้างอิง  $B_0$  และเพิ่มอุปกรณ์เลื่อนเฟส (phase shifter) ซึ่งมีผลต่อคลื่น  $B$  ทำให้ถูกปรับ จึงให้กระแสที่ตัวตรวจวัดสัญญาณเป็น ด้วยเฟสเฟกเตอร์

$$i = K \left| B_0 - B e^{-j2\phi} \right|^2 \tag{2.74}$$

เมื่อจัดรูปและทำการประมาณในกรณีนี้  $|B_0| \gg |B|$  โดยกระจายด้วยทฤษฎีของเทย์เลอร์ในสมการ (2.74) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} i &= K |B_0|^2 \left| 1 - \frac{B e^{-j2\phi}}{B_0} \right|^2 \\ &\cong K |B_0|^2 \left| 1 - \frac{2B e^{-j2\phi}}{B_0} \right|^2 \end{aligned}$$

$$\cong K|B_0|^2 \left[ 1 - \operatorname{Re} \left( \frac{2Be^{-j2\phi}}{B_0} \right) \right] \quad (2.75)$$

เมื่อ  $\operatorname{Re}$  คือส่วนจริง (real part) ของเลขเชิงซ้อน

เพื่อเป็นการสะดวกเรากำหนด  $K|B_0|^2$  ด้วยกระแสคงที่  $I_0$  (ซึ่งเป็นกระแสตอนที่ไม่มีตัวกระเจิงคลื่นอยู่) และ  $B_0$  คือคลื่นสะท้อน สังกะที่ระนาบ  $P_1$  กำหนดด้วย  $\rho_0 A$  ซึ่ง  $\rho_0$  คือสัมประสิทธิ์การสะท้อน สมการที่ (2.75) จึงกลายเป็น

$$i = I_0 \left| 1 - \operatorname{Re} \left( \frac{2Be^{-j2\phi}}{\rho_0 A} \right) \right| \quad (2.76)$$

แทนค่า  $B$  สมการที่ (2.73) ลงในสมการที่ (2.76) ดังนั้นองค์ประกอบ ความถี่ 2 เท่าของการมอดูเลตของกระแส  $i$  คือ

$$I_2 = -I_0 \operatorname{Re} \left[ \frac{(j\omega\alpha Z_0) \exp 2j(\phi_i - \phi)}{\rho_0 A} \right] |F_i|^2 \cos 2(\Omega t - \theta) \quad (2.77)$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะจำนวนจริง ในสมการที่ (2.77) จะได้ว่า

$$I_2 = I_0 \frac{\omega|\alpha|Z_0}{ab|\rho_0|} |F_i|^2 \cos 2(\phi_i - \phi) \cos 2(\Omega t - \theta) \quad (2.78)$$

สมการที่ (2.78) คือสมการของกระแสสองครั้งประกอบความถี่ 2 เท่าของการมอดูเลตที่ตัวตรวจวัดซึ่งเป็นสัญญาณจากคลื่นที่กระเจิงมาจากตัวไดโพล โดยจะแปรตามสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งของไดโพลเป็นฟังก์ชันยกกำลังสองและสามารถบอกทิศทางสนาม ( $\theta$ ) ได้และยังสามารถทราบมุมเฟส  $\phi_i$  โดยการปรับเฟสของตัวเลื่อนเฟส จนได้  $I_2$  โดที่สูงสุด หลักการนี้จึงนำมาประยุกต์ใช้สำหรับงานวิจัยนี้

## 2.5 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงการจัดแถบคลื่นตั้งแต่คลื่นที่มีความถี่ต่ำไปจนถึงคลื่นที่มีความถี่สูงมากๆ ทำให้ทราบว่าช่วงความถี่และชื่อของความถี่นั้นเรียกว่าอย่างไร และอธิบายปรากฏการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ด้วยสมการของแมกซ์เวลล์ ลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ตลอดจนอธิบายถึงคุณสมบัติและการทำงานของอุปกรณ์ไมโครเวฟแต่ละชนิด และได้กล่าวถึงเทคนิคการวัดสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟโดยใช้ตัวกระเจิงคลื่น



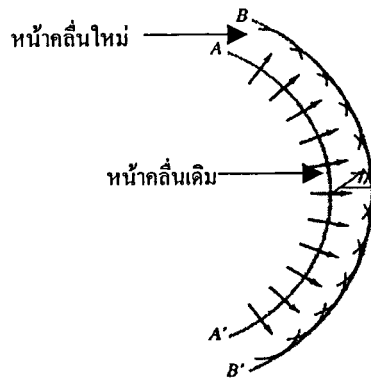
## บทที่ 3

# ทฤษฎีการเลี้ยวเบนของคลื่น

เมื่อกล่าวถึงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นที่ทราบกันดีว่า การอธิบายปรากฏการณ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้น ใช้สมการแมกซ์เวลล์ ซึ่งการพิจารณาเป็นไปด้วยความยุ่งยาก แต่ในบางกรณีของการศึกษาเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในที่นี้หมายถึงคลื่นไมโครเวฟ โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่คลื่นส่วนใหญ่มีการเคลื่อนที่แบบโพลาไรซ์ในทิศทางเดียว ปัญหาในกรณีนี้อาจอธิบายได้ง่ายขึ้นโดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนแบบสเกลาร์ (Scalar Diffraction Theory) ดังจะกล่าวถึงในรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

### 3.1 การแพร่กระจายคลื่น (Wave Propagation)

การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังตำแหน่งใดๆ สามารถอธิบายได้ด้วยรูปแบบของหน้าคลื่น (Wavefront) ซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการณ์ธรรมชาติของคลื่นอื่นได้แก่ การหักเห การสะท้อน การเลี้ยวเบน การกระเจิงและการแทรกสอด เป็นต้น หน้าคลื่นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของการแพร่กระจายของคลื่นนั้น เพื่อที่จะทราบรูปร่างของหน้าคลื่นนักวิทยาศาสตร์ได้เสนอความคิดมากมายและแนวคิดที่สำคัญคือหลักของฮอยเกนส์ (Christian Huygens) ซึ่งกล่าวว่าทุกๆ จุดบนหน้าคลื่นสามารถพิจารณาว่าเป็นแหล่งกำเนิดหน้าคลื่นทรงกลมอันใหม่ที่ซึ่งกระจายคลื่นออกทุกทิศทางด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของการแพร่กระจายคลื่นนั้นดังรูปที่ 3.1 และเฮล์มโฮลทซ์ (Helmholtz) ได้เสนอวิธีการอธิบายปรากฏการณ์คลื่นทั่วไปโดยใช้สมการของแมกซ์เวลล์ โดยคิดเฉพาะสนามที่เป็นสเกลาร์ (Scalar Wave) และต่อมาความคิดนี้ได้ถูกขยายมากยิ่งขึ้นโดยเฟรส์เนล (Augustin Jean Fresnel) โดยสามารถคำนวณการกระจายของคลื่นในรูปแบบของการเลี้ยวเบนซึ่งมีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น และมีการใช้คณิตศาสตร์แทนความคิดของทั้งสองท่าน เรียกว่าหลักของฮอยเกนส์-เฟรส์เนล ซึ่งถูกใช้เป็นการประมาณอันดับแรก (First Approximation) และจะได้กล่าวในหัวข้อตามลำดับต่อไป



รูปที่ 3.1 แสดงการเกิดหน้าคลื่นตามหลักการของฮอยเกนส์

### 3.2 ทฤษฎีของเฮล์มโฮลทซ์

ให้ฟังก์ชันคลื่นที่ตำแหน่ง  $P$  และเวลา  $t$  เป็นสเกลาร์ฟังก์ชัน  $\psi(P, t)$  สำหรับกรณีที่เป็นคลื่นโพลาไรซ์เชิงเส้น [1] ของคลื่นความถี่เดียว (Monochromatic Frequency) จะได้ว่า

$$\psi(P, t) = E_0(P) \cos[2\pi ft + \Phi(P)] \quad (3.1)$$

ซึ่ง  $E_0(P)$  คือ อัมพลิจูด และ  $\Phi(P)$  คือเฟส และสามารถเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันได้เป็น

$$\psi(P, t) = \text{Re}[E(P) \exp(-j2\pi ft)] \quad (3.2)$$

โดยที่  $E(P)$  คือฟังก์ชันเชิงซ้อนของตำแหน่ง จะได้ว่า

$$E(P) = E_0(P) \exp[-j\Phi(P)] \quad (3.3)$$

กำหนดให้คลื่นแสงแทนด้วย  $\psi(P, t)$  ดังนั้นสมการคลื่นสเกลาร์ เขียนได้เป็น

$$\nabla^2 \psi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad (3.4)$$

โดยที่  $\nabla^2$  คือตัวดำเนินการลาปลาซเชียด (Laplacian Operator) มีค่าเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

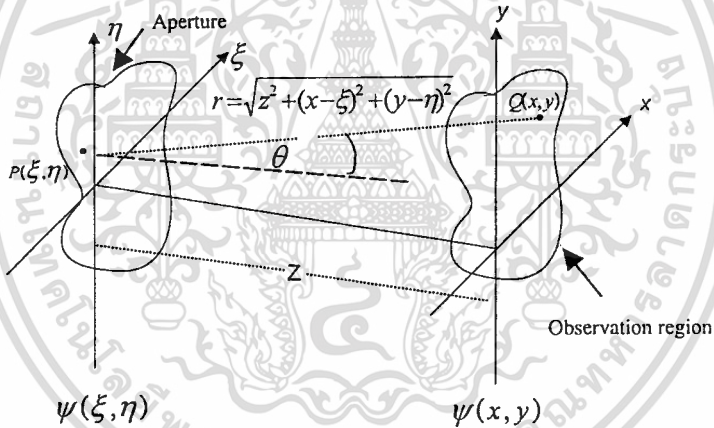
ถ้าคลื่นเชิงซ้อน  $E(P)$  ตามเงื่อนไขโดยไม่ขึ้นกับเวลา ดังนั้น

$$(\nabla^2 + k^2)E = 0 \quad (3.5)$$

โดยที่  $k = 2\pi \frac{f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$  เรียกว่าเลขคลื่น (Wave Number)

สมการที่ (3.5) เรียกว่า สมการเฮล์มโฮลทซ์ ซึ่งอัมพลิจูดเชิงซ้อนของคลื่นความถี่เดียวที่เคลื่อนที่ผ่านที่ว่าง จะต้องเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังกล่าว ซึ่งจะอธิบายต่อไป

### 3.3 ทฤษฎีการเลี้ยวเบนแบบสเกลาร์



รูปที่ 3.2 แสดงพิภคเพื่ออธิบายการเลี้ยวเบนของคลื่นที่ระนาบใด ๆ

จากรูปที่ 3.2 พิจารณาจุด  $P$  บนระนาบวัตถุ  $(\xi, \eta)$  ซึ่งเป็นสลิตรรูปร่างใดๆ และ  $Q$  เป็นจุดใดๆ บนอีกระนาบหนึ่งคือระนาบ  $(x, y)$  เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านสลิตบนระนาบ  $(\xi, \eta)$  ไปตกกระทบบนระนาบ  $(x, y)$  ที่จุด  $Q$  ซึ่งอาจมีภากรับอยู่ อัมพลิจูดเชิงซ้อนของคลื่นที่ตำแหน่ง  $Q$  เป็นเป็นผลรวมคลื่นจากทุกจุดบนระนาบ  $(\xi, \eta)$  และจากหลักของฮอยเกนส์และเฟรส์เนล สามารถหาฟังก์ชันคลื่นที่ระนาบ  $(x, y)$  ได้เป็น

$$\psi(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y; \xi, \eta) \psi(\xi, \eta) \xi d\eta \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $h(x, y; \xi, \eta) = \frac{1}{j\lambda} \frac{\exp(jkr)}{r} \cos \theta$  คืออัมพลิจูดของคลื่นที่แพร่กระจายจากจุด  $P$  มายังจุด

$Q$  ในระนาบ  $(x, y)$  ขึ้นมุม  $\theta$  และระยะ  $r$

$\psi(\xi, \eta)$  คือฟังก์ชันคลื่นในระนาบ  $(\xi, \eta)$

$\theta$  คือมุมระหว่างเส้นปกติกับทิศทางการแพร่คลื่นที่จุด  $P$

เมื่อให้  $\theta$  มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ตามเงื่อนไขของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff) คือทิศทางการแพร่คลื่นไปยังระนาบ  $(x, y)$  เมื่อ  $\cos \theta \cong 1$  ความผิดพลาดของการแพร่กระจายคลื่นจะไม่เกิน 5% ถ้ามุม  $\theta$  ไม่เกิน 18 องศา ดังนั้น  $r$  ประมาณได้ว่ามีค่าเข้าใกล้  $z$  จึงเขียนฟังก์ชันได้ใหม่คือ

$$h(x, y; \xi, \eta) \cong \frac{1}{j\lambda z} \exp(jkr) \quad (3.7)$$

การประมาณค่าของเฟรส์เนลทำให้ได้ว่าสำหรับการเลี้ยวเบนตามเงื่อนไขของเฟรส์เนลสามารถหาระยะ  $r$  โดยประมาณเป็น

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{z^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2} \\ &= z \sqrt{1 + \left(\frac{x - \xi}{z}\right)^2 + \left(\frac{y - \eta}{z}\right)^2} \end{aligned} \quad (3.8)$$

จากการกระจายโพลิโนเมียลของรากที่สองจะได้ว่า

$$\sqrt{1+b} = 1 + \frac{1}{2}b - \frac{1}{8}b^2 + \dots |b| < 1 \quad (3.9)$$

ดังนั้นสมการที่ (3.8) เทียบกับสมการที่ (3.9) จะได้เป็น

$$r \cong z \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{x - \xi}{z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{y - \eta}{z} \right)^2 \right] \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการประมาณของเฟรส์เนล จึงทำให้สามารถเขียนสมการของ  $h(x, y; \xi, \eta)$  ได้เป็น

$$h(x, y; \xi, \eta) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left\{j \frac{k}{2z} [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]\right\} \quad (3.11)$$

เมื่อระยะ  $z$  เป็นไปตามเงื่อนไข[1]

$$z^3 \gg \frac{\pi}{4\lambda} [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]_{\max}^2 \quad (3.12)$$

การประมาณของเฟรส์เนลเป็นการประมาณที่ยอมรับคั้งนั้นการรวมกันของจุดต่างๆของฟังก์ชัน  $\psi(\xi, \eta)$  ที่อยู่บนระนาบ  $(\xi, \eta)$  แปลงไปเป็นฟังก์ชัน  $\psi(x, y)$  บนระนาบ  $(x, y)$  ได้ โดยการคอนโวลูชัน (Convolution) ฟังก์ชัน  $\psi(\xi, \eta)$  ด้วย  $h$  ดังนี้

$$\psi(x, y) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} \psi(\xi, \eta) \exp\left\{j \frac{k}{2z} [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]\right\} d\xi d\eta \quad (3.13)$$

เมื่อกระจายเทอมกำลังสองของเอกซ์โปเนนเชียล จะได้สมการคลื่นตามเงื่อนไขของเฟรส์เนลเป็น

$$\psi(x, y) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left[j \frac{k}{2z} (x^2 + y^2)\right] \iint_{-\infty}^{\infty} \left\{ \psi(\xi, \eta) \exp\left[j \frac{k}{2z} (\xi^2 + \eta^2)\right] \right\} \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda z} (x\xi + y\eta)\right] d\xi d\eta \quad (3.14)$$

จากสมการที่ (3.14) แสดงถึงฟังก์ชันคลื่น  $(x, y)$  ในระนาบ  $(x, y)$  สำหรับการแปลงฟูเรียร์สองมิติ จากฟังก์ชัน  $\psi(\xi, \eta)$

### 3.4 การเลี้ยวเบนผ่านช่องรับคลื่น

สำหรับช่องรับคลื่นที่มีลักษณะช่องสี่เหลี่ยม ความกว้าง  $2a$  ยาว  $2b$  กระจายคลื่นสม่ำเสมอตลอดทั้งแท่ง จะมีสมการของฟังก์ชันคลื่นที่ระนาบ  $(x, y)$  เป็น

$$\psi(x, y) = K \int_{-a}^a \int_{-b}^b \exp\left[\frac{jk(x - \xi)^2}{2z}\right] \exp\left[\frac{jk(y - \eta)^2}{2z}\right] d\xi d\eta \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{โดยที่ } K = \left(-j/\lambda\right) \exp(jkz/z)$$

การกระจายความเข้ม  $I(x,y)$  ในแบบเฟรส์เนล หาได้จาก

$$I(x,y) = \psi(x,y)\psi^*(x,y) \quad (3.17)$$

เมื่อ  $I(x,y)$  คือความเข้มของคลื่นที่กระจายอยู่บนฉากรับคลื่น

$\psi(x,y)$  คือฟังก์ชันคลื่นที่กระจายอยู่บนฉาก

$\psi^*(x,y)$  คือฟังก์ชันคลื่นส่วนกลับที่กระจายอยู่บนฉาก

สำหรับตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือรูปแบบการเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ของแสงผ่านช่องรับคลื่นนั้นได้เป็นไปตามเงื่อนไขอันใดอันหนึ่งในเงื่อนไขสองข้อต่อไปนี้คือ [3]

- 1) ถ้าระนาบที่ประกอบด้วยจุดกำเนิดแสงและระนาบสังเกต เป็นระนาบที่ขนานกัน ในระบบทางแสงและทั้งจุดกำเนิดแสงและจุดสังเกตต่างก็อยู่ใกล้แกนแสง ดังนั้นแล้วรูปแบบการเลี้ยวเบนของช่องรับคลื่นที่มีขอบเขตจะถูกสังเกตได้

$$\psi(x,y) = \frac{ke^{-jkz}}{z} \iint \psi'(\xi,\eta) \exp\left[\frac{-2j\pi(\xi x + \eta y)}{\lambda z}\right] d\xi d\eta \quad (3.18)$$

- 2) ระยะทางจากจุดกำเนิดแสงไปยังช่องรับคลื่น  $z'$  และจากช่องรับคลื่นไปยังระนาบสังเกต  $z$  เป็น

$$|z| \text{ and } |z'| \gg \frac{(\xi^2 + \eta^2)_{\max}}{\lambda} \quad (3.19)$$

โดยที่ซึ่ง  $\xi$  และ  $\eta$  เป็นพิกัดของจุดต่างๆไปในช่องรับคลื่นและ  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบสังเกต

$$\psi(x,y) = \frac{ke^{-jkf}}{f} \iint \psi'(\xi,\eta) \exp\left[\frac{-2j(\xi x + \eta y)}{\lambda f}\right] d\xi d\eta \quad (3.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดนี้ อัมปลิจูดและเฟสของสนามในระนาบโฟกัสอธิบายได้โดยการใช้การแปลงฟูเรียร์ของการกระจายผ่านช่องรับคลื่น ดังสมการ

$$\psi(x, y) = \exp\left(\frac{jk|x|^2}{2f}\right) \iint A(\xi, \eta) \exp\left[\frac{-jk}{f}(\xi x + \eta y)\right] d\xi d\eta \quad (3.21)$$

ในที่นี้  $A(\xi, \eta)$  สอดคล้องกับ  $\psi'(\xi, \eta)$  และอธิบายถึงการกระจายของอัมปลิจูดและเฟสผ่านช่องรับคลื่น และ  $\psi(x, y)$  อธิบายถึงสนามในระนาบโฟกัส ซึ่ง  $\psi(x, y)$  เป็นฟูเรียร์อินทิกรัลของ  $A(\xi, \eta)$  นั่นเอง

### 3.4.1 ช่องรับคลื่นที่เป็นสลิต (Slit Aperture)

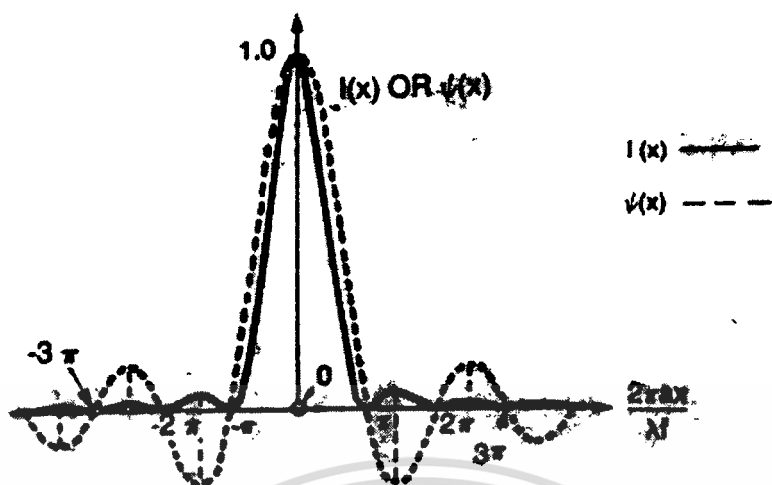
พิจารณาสลิตที่มีความยาวไม่จำกัด ความกว้าง  $2a$  จุดศูนย์กลางวางในแนวแกน  $\eta$  และให้แสงที่เสมอเหมือนกันในทุกๆ จุดของสลิต [3]

$$A(\xi, \eta) = \begin{cases} A & |\xi| < a \\ 0 & |\xi| > a \end{cases} = A \operatorname{rect}(\xi/a) \quad (3.22)$$

สำหรับปัญหาในมิติเดียวค่าอินทิกรัลของการเลี้ยวเบนเป็นดังสมการ

$$\psi(x) = \int A(\xi) \exp\left(\frac{-jk}{f}\xi x\right) d\xi = A \int_{-a}^a \exp\left(\frac{-jk\xi x}{f}\right) d\xi \quad (3.23)$$

$$\psi(x) = \frac{-Af}{jkx} \left[ \exp\left(\frac{-jkax}{f}\right) - \exp\left(\frac{+jkax}{f}\right) \right] = 2aA \frac{\sin\left(\frac{kax}{f}\right)}{\frac{kax}{f}} \quad (3.24)$$



รูปที่ 3.3 แสดงการกระจายความเข้มแสงของฟังก์ชัน  $\text{sinc} \left( \frac{kax}{f} \right)$  บนฉาก

เครื่องหมาย  $\text{sinc} \theta = \sin \theta / \theta$  ซึ่งหมายถึงความถี่ที่ใช้และเทอมของฟังก์ชัน  $\psi(x)$  อาจเขียนได้เป็น

$$\psi(x) = 2aA \sin \left( \frac{kax}{f} \right) \quad (3.25)$$

จะเห็นว่า ไม่ได้ใช้สมการที่มีกำลังสองในการคำนวณรูปแบบของการเลี้ยวเบน ซึ่งจะแสดงถึงความเข้มแสงเท่านั้น ความเข้มแสง  $I(x)$  ซึ่งนิยามโดย  $\psi(x)\psi^*(x)$  มีค่าเป็น

$$I(x) = 4a^2 A^2 \text{sinc}^2 \left( \frac{kax}{f} \right) \quad (3.26)$$

### 3.4.2 ช่องรับคลื่นที่เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า

พิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของคลื่นที่ผ่านช่องรับคลื่นที่เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งให้การส่องคลื่นที่สม่ำเสมอ มีความกว้าง  $2a$  ยาว  $2b$  อัมพลิจูด  $A$  จุดศูนย์กลางอยู่บนแนวแกนในระนาบ  $\xi$  และ  $\eta$  ดังนั้นจะได้ว่า

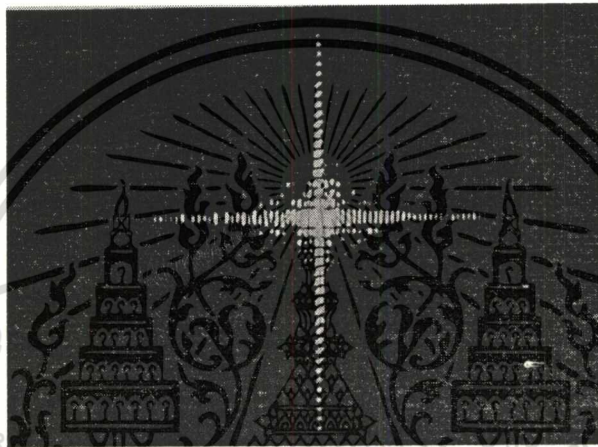
$$\psi(x, y) = A \int_{-a-b}^{+a+b} \int \exp \left[ \frac{-jk}{f} (\xi x + \eta y) \right] d\xi d\eta \quad (3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\psi(x, y) = 4Aabsinc\left(\frac{kax}{f}\right)sinc\left(\frac{kby}{f}\right) \quad (3.28)$$

และค่าความเข้มแสงเป็น

$$\begin{aligned} I(x, y) &= \psi(x, y)\psi^*(x, y) \\ &= 16A^2a^2b^2sinc^2\left(\frac{kax}{f}\right)sinc^2\left(\frac{kby}{f}\right) \end{aligned} \quad (3.29)$$



รูปที่ 3.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนผ่านช่องรับคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบฟรอนโฮเฟอร์

### 3.5 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงหลักการแพร่กระจายของคลื่นเบื้องต้น การเลี้ยวเบนแบบสเกลาร์และเงื่อนไขฮอยเกนส์ เฟรส์เนลและเฟรอนโฮเฟอร์สำหรับอธิบายการเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางช่องรับแสงแบบสลิตและแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งสนามของคลื่นบนฉากเป็นฟูรีเยร์อินทิกรัลและเฟรส์เนลอินทิกรัลของช่องรับคลื่นนั่นเอง จากหลักการนี้เองสามารถใช้หลักการของฮอโลกราฟีในการสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

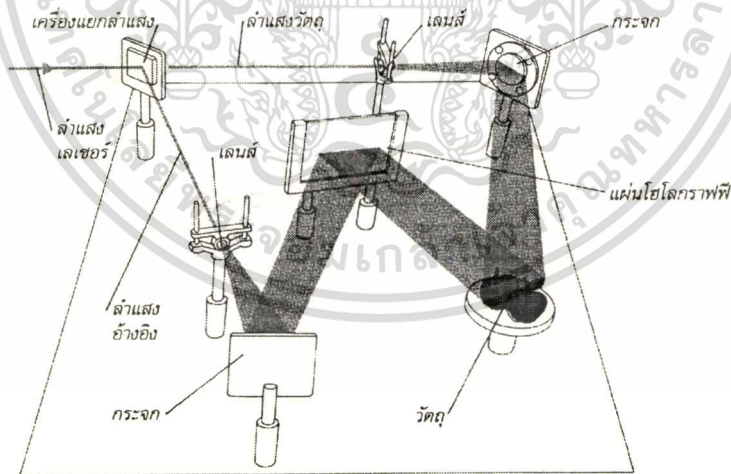
## บทที่ 4

# ไมโครเวฟฮอโลกราฟี

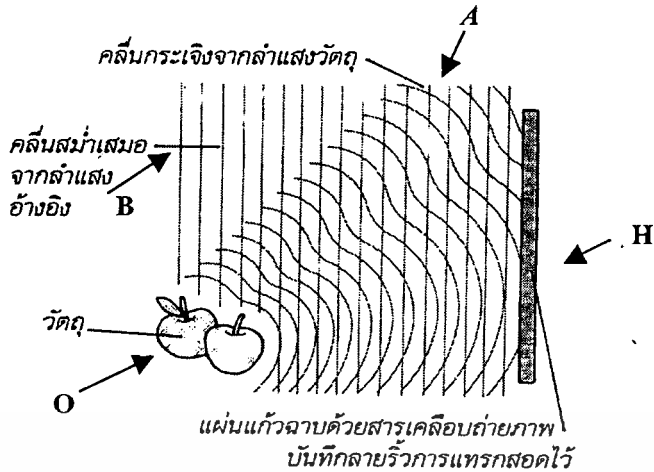
ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างภาพฮอโลแกรม (Hologram Construction) ตลอดจนการสร้างภาพกลับ (Reconstruction) เนื่องจากในทางปฏิบัติ ตัวตรวจวัดสำหรับทำการวัดสนามไฟฟ้านั้น ไม่สามารถใช้วัดอัมพลิจูดและเฟสของคลื่นได้โดยตรง แต่สามารถที่จะวัดความเข้มของสัญญาณได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยหลักการของฮอโลกราฟีเข้าช่วยในการหารูปแบบการกระจาย (Distribution Pattern) ของอัมพลิจูดและเฟสของคลื่น โดยอาศัยหลักการแทรกสอดระหว่างคลื่นที่มาจากวัตถุกับคลื่นอ้างอิงบนระนาบใดๆ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

### 4.1 พื้นฐานทางฮอโลกราฟีทางแสง

ฮอโลกราฟี (Holography) โดยทั่วไปก็คือการบันทึกอัมพลิจูดและเฟสของคลื่นจากวัตถุและคลื่นอ้างอิงลงบนฟิล์มชนิดพิเศษเรียกว่าฮอโลแกรม สุดท้ายคือการนำฮอโลแกรมปรับปรุงและสร้างภาพกลับมาโดยฉายคลื่นอ้างอิงไปบนฮอโลแกรม ถ้าข้อมูลทั้งหมดที่กระเจิงมาจากวัตถุครบถ้วนสมบูรณ์ ภาพของวัตถุที่ได้จากการสร้างกลับมาก็จะสมบูรณ์ด้วย



รูปที่ 4.1 แสดงการจัดวางการถ่ายภาพฮอโลแกรมทางแสง



รูปที่ 4.2 แสดงการบันทึกข้อมูลของฮอโลแกรมทางแสง

จากรูปที่ 4.2 แสดงถึงวิธีการบันทึกอัมพลิจูดและเฟสของฮอโลแกรมทางแสง โดยที่การกระจายคลื่นของวัตถุ เคลื่อนที่มายังระนาบของฮอโลแกรม H แทนด้วยสนามการกระจายคลื่นเชิงซ้อน  $A$  และแหล่งกำเนิดคลื่นอ้างอิง กระจายคลื่น  $B$  ไปบนระนาบฮอโลแกรม คลื่นทั้งสองจะเกิดการแทรกสอดกันอยู่บนระนาบ  $H$  ซึ่งความเข้มของร็วรอยการแทรกสอดบนระนาบฮอโลแกรม  $I_H$  จะเป็นไปตามสมการที่ (4.1)

$$\begin{aligned} I_H &= (A + B)(A + B)^* \\ &= |A|^2 + |B|^2 + A^*B + B^*A \end{aligned} \quad (4.1)$$

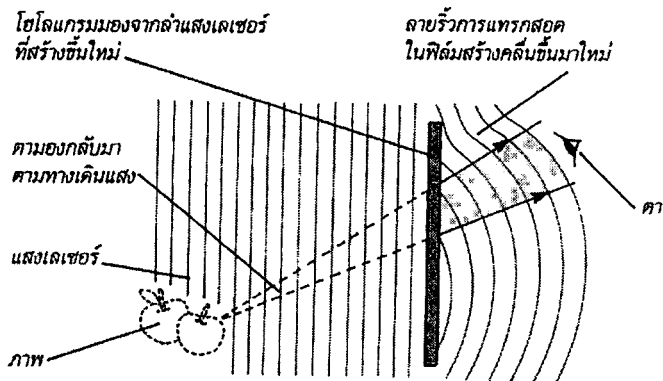
เมื่อ  $I_H$  จะเห็นได้ว่าเป็นรูปแบบของร็วรอยการแทรกสอดที่มีลักษณะเฉพาะที่เกิดขึ้น โดยคลื่นจากวัตถุ และคลื่นอ้างอิงที่ทราบฟังก์ชันของอัมพลิจูดและเฟส ดังนั้นคลื่นเชิงซ้อน  $A$  จากวัตถุจึงอิสระจากทั้ง  $A^*B$  หรือ  $B^*A$  โดยปกติ  $I_H$  จะอยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นบนฟิล์มและนำมาทำให้เกิดการสร้างภาพกลับมาได้ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ในรูปนี้ให้แสงจากแหล่งกำเนิดหน้าคลื่น  $B$  ผ่านฮอโลแกรม หน้าคลื่นที่ออกมาจากฮอโลแกรม  $C$  ซึ่งเกิดจากการปรับแต่ง หน้าคลื่น  $B$  ด้วยค่าการส่งผ่าน  $I_H$  ดังสมการ

$$C = BI_H = |A|^2 B + |B|^2 B + A^* B^2 + A|B|^2 \quad (4.2)$$

เทอมสุดท้ายในสมการ(4.2) แสดงถึงส่วนของหน้าคลื่นที่จะเกิดการสร้างเป็นคลื่นวัตถุ  $A$  และ

เทอม  $A^*B^2$  เป็นเทอมที่สำคัญมาก เพราะสามารถทำให้เกิดภาพจริงของวัตถุให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

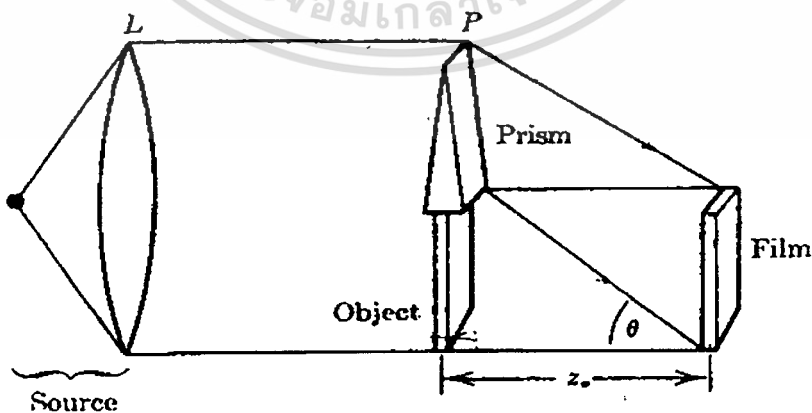
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงการสร้างภาพของวัตถุกลับมา

โฮโลแกรมที่น่าสนใจและเป็นที่ยุติกันดีชนิดหนึ่งคือ โฮโลแกรมแบบเล็ทซ์-ยูแพทนิคส์ (Leith-Upatnieks Hologram) หรือที่ยุติกันดีที่เรียกว่าชนิดลำแสงอ้างอิงอยู่นอกแกน (Offset-reference Hologram) ซึ่งแตกต่างจากโฮโลแกรมของกาบอร์ (Gabor Hologram) ก็คือลำแสงที่ส่องผ่านมาที่วัตถุนั้นจะถูกใช้เป็นลำแสงอ้างอิงด้วย โดยลำแสงอ้างอิงถูกแยกด้วยปริซึมที่วางอยู่บนวัตถุและทำมุม  $\theta$  กับลำแสงจากวัตถุที่ตกลงบนฟิล์มดังรูปที่ 4.4[1]

ในการเสนอการสร้างโฮโลแกรมวิธีนี้ได้ประสบความสำเร็จโดยเล็ทซ์-และยูแพทนิคส์ ในปี ค.ศ. 1962 วิธีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้แสงเลเซอร์ที่มีโคฮีเร้นท์สูงๆ แต่สามารถสร้างโฮโลแกรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.4 แสดงระบบการบันทึกโฮโลแกรมแบบเล็ทซ์-ยูแพทนิคส์

ในการบันทึกฮอโลแกรมแบบเล็ท-ยูเพนนิคส์แสดงดังรูปที่ 4.4 เมื่อลำแสงจากแหล่งกำเนิดถูกทำให้ขนานโดยเลนส์ L โดยลำแสงระนาบจะส่องตรงไปยังวัตถุและไปตกบนฟิล์มด้วยการส่งผ่านคือ  $t_0(x_0, y_0)$  ส่วนลำแสงที่ผ่านปริซึมที่วางอยู่เหนือวัตถุจะทำมุม  $\theta$  กับลำแสงของวัตถุที่ตกบนฟิล์มดังนั้นบนฟิล์มที่ใช้บันทึกภาพประกอบด้วยลำแสงจากวัตถุและลำแสงอ้างอิง ซึ่งมีการกระจายคลื่นบนฟิล์มดังสมการ

$$U(x, y) = A \exp(-j2\pi\alpha y) + a(x, y) \quad (4.3)$$

$a(x, y)$  คือคลื่นจากวัตถุ

โดยที่  $\alpha$  คือความถี่ ของลำแสงอ้างอิงเขียนได้เป็น

$$\alpha = \frac{\sin \theta}{\lambda} \quad (4.4)$$

ดังนั้นการกระจายความเข้มบนฟิล์มแสดงได้ดังสมการ

$$I(x, y) = A^2 + |a(x, y)|^2 + Aa(x, y) \exp(j2\pi\alpha y) + Aa^*(x, y) \exp(-j2\pi\alpha y) \quad (4.5)$$

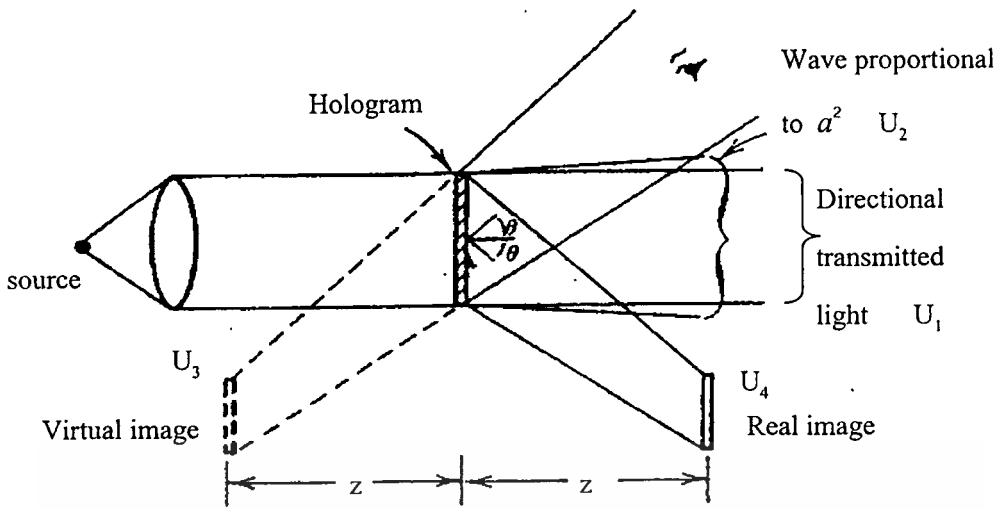
และอาจเขียน  $a$  อยู่ในรูปการกระจายของอัมพลิจูดและเฟสเป็น

$$a(x, y) = a(x, y) \exp[-j\phi(x, y)] \quad (4.6)$$

แทนค่าจากสมการ (4.6) ลงในสมการ (4.5) และรวมสองเทอมสุดท้ายของสมการที่ (4.5) ผลที่ได้เขียนสมการใหม่เป็น

$$I(x, y) = A^2 + a^2(x, y) + 2Aa(x, y) \cos[2\pi\alpha y - \phi(x, y)] \quad (4.7)$$

สมการที่ (4.7) แสดงถึงอัมพลิจูดและเฟสที่บันทึกไว้เป็นรูปรีวิรอยการแทรกสอดของคลื่นวัตถุและคลื่นอ้างอิงตามลำดับ



รูปที่ 4.5 แสดงระบบการสร้างภาพกลับมาของเลзер-ยูเพทนิคส์

การสร้างภาพกลับมาหรือการเห็นภาพของฮอโลแกรมทำโดยนำแผ่นฮอโลแกรมมาพัฒนาปรับปรุงคุณภาพในทางทฤษฎีคือการนำฟังก์ชันการส่งผ่าน (Transmittance Function,  $\beta$ ) คูณสมการ ที่(4.5) เขียนสมการใหม่เป็น

$$t_f(x, y) = t_h + \beta[|a(x, y)|^2 + Aa \exp(j2\pi\alpha y) + Aa^* \exp(-j2\pi\alpha y)] \quad (4.8)$$

เพื่อสะดวกในการพิจารณา จึงกำหนดการกระจายความเข้มบนฮอโลแกรมด้วยฟังก์ชันการส่งผ่านมีด้วยกันสี่องค์ประกอบคือ

$$\begin{aligned} t_1 &= t_h & t_3 &= \beta A a(x, y) \exp(j2\pi\alpha y) \\ t_2 &= \beta |a(x, y)|^2 & t_4 &= \beta A a^*(x, y) \exp(-j2\pi\alpha y) \end{aligned} \quad (4.9)$$

ดังนั้นเมื่อนำฮอโลแกรมมาสร้างเป็นภาพวัตถุทำได้โดยการส่งคลื่นอ้างอิงเดิมผ่านไปยังฮอโลแกรมและคลื่นอ้างอิงเป็นคลื่นระนาบที่มีอัมพลิจูด  $B$  ดังรูปที่ 4.5 จะได้ฟังก์ชันคลื่นที่ผ่านพื้นแผ่นฮอโลแกรมออกมาสี่องค์ประกอบคือ

$$\begin{aligned} U_1 &= t_h B & U_3 &= \beta B A a(x, y) \exp(j2\pi\alpha y) \\ U_2 &= \beta B |a(x, y)|^2 & U_4 &= \beta B A a^*(x, y) \exp(-j2\pi\alpha y) \end{aligned} \quad (4.10)$$

เมื่อพิจารณาสมการ ที่ 4.10 ซึ่งมีฟังก์ชันคลื่น 4 องค์ประกอบด้วยกันคือ  $U_1$  เป็นตัวแทนคลื่นที่ส่งผ่านฮอโลแกรมออกมาโดยตรงในแนวแกนแสง  $U_2$  เป็นตัวแทนคลื่นที่ส่งผ่านฮอโลแกรมแล้วเลี้ยวเบนออกจากแกนแสงเล็กน้อยในลักษณะเดียวกับสลิตเดี่ยวซึ่งอัมพลิจูดของคลื่นฮอยเกนส์ที่จุดต่างๆบนระนาบสลิตมีค่าแตกต่างกัน โดยคลื่น  $U_1$  และ  $U_2$  จะอยู่บริเวณตรงกลางใกล้แกนแสง ดังนั้นบริเวณนี้จะมีความเข้มมากจึงสว่างกว่าบริเวณอื่นคือศูนย์กลางของภาพหรือเป็นภาพลำดับศูนย์ (Zero Order) ส่วน  $U_3$  เป็นตัวแทนคลื่นที่เกิดภาพเสมือนของวัตถุที่ระยะ  $z_0$  ซึ่งถูกหักเหจากแกนแสงด้วยมุม  $\theta$  มองเห็นได้โดยการมองผ่านฮอโลแกรมกลับไปทางแหล่งกำเนิดแสง จากรูปที่ 4.5 การเกิดภาพเสมือนจะเกิดที่ระยะเดิมที่วางวัตถุจริง สำหรับองค์ประกอบสุดท้าย  $U_4$  คือคลื่นที่ผ่านฮอโลแกรมแล้วทำให้เกิดภาพจริงของวัตถุที่ระยะ  $z_0$  มีทิศตรงกันข้ามกับภาพเสมือน ซึ่งถูกหักเหด้วยมุม  $-\theta$  และเป็นภาพจริงสามารถใช้ฉากรับได้และมองเห็นภาพที่ปรากฏบนฉากรั้นจริง

สรุปได้ว่าการสร้างภาพกลับมาของฮอโลแกรมแบบนอกแกนแสงจะต้องเกิดฟังก์ชันคลื่นสี่องค์ประกอบเสมอ การเกิดภาพก็เช่นกันจะเกิดภาพจริงและภาพเสมือนอยู่ตรงกันข้ามกันเสมอซึ่งระยะห่างของภาพทั้งสองขึ้นอยู่กับมุมของคลื่นอ้างอิงตอนบันทึกครั้งแรก .

จากหลักการและความเข้าใจพื้นฐานทางฮอโลแกรม ทางแสงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการสร้างฮอโลกราฟีทางไมโครเวฟได้เช่นกัน ซึ่งฮอโลกราฟีเชิงแสงจะทำการบันทึกภาพวัตถุลงบนฟิล์มฮอโลแกรมและที่สำคัญการนำฟิล์มมาใช้ในการสร้างภาพกลับมาเป็นภาพวัตถุสามมิติได้สำหรับไมโครเวฟฮอโลกราฟีใช้เทคนิคเดียวกันกับฮอโลกราฟีทางแสงต่างกันตรงที่ ความยาวคลื่นของไมโครเวฟมีความยาวมากกว่าคลื่นแสงมาก ซึ่งเป็นปัญหาในการบันทึกฮอโลแกรมและการสร้างภาพกลับมาของไมโครเวฟฮอโลกราฟี แต่มีวิธีในการแก้ปัญหาโดยใช้เทคนิคทางดิจิทัลในการสร้างฮอโลแกรมและสร้างภาพกลับมาจะกล่าวเป็นลำดับต่อไป

## 4.2 ไมโครเวฟฮอโลกราฟี

กระบวนการทางไมโครเวฟฮอโลกราฟีเป็นการแทนที่การแทรกสอดของคลื่นวัตถุและคลื่นอ้างอิงในช่วงความยาวคลื่นแสงด้วยไมโครเวฟและทำการสร้างภาพกลับมาโดยกระบวนการทางแสงหรือทางดิจิทัล การบันทึกเฟสและอัมพลิจูดโดยตรงของสนามไมโครเวฟกำลังเข้ามาแทนที่การบันทึกแบบฮอโลกราฟีทางแสง ในหลายๆสถานการณ์การสร้างภาพด้วยระบบดิจิทัลจากข้อมูลเฟสและอัมพลิจูด สามารถทำได้โดยอาศัยทฤษฎีคอนโวลูชัน และการตอบสนองแบบคอนจูเกต (Conjugate Response) ของการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform) และการแปลงกลับของฟูเรียร์ (Invert Fast Fourier Transform)

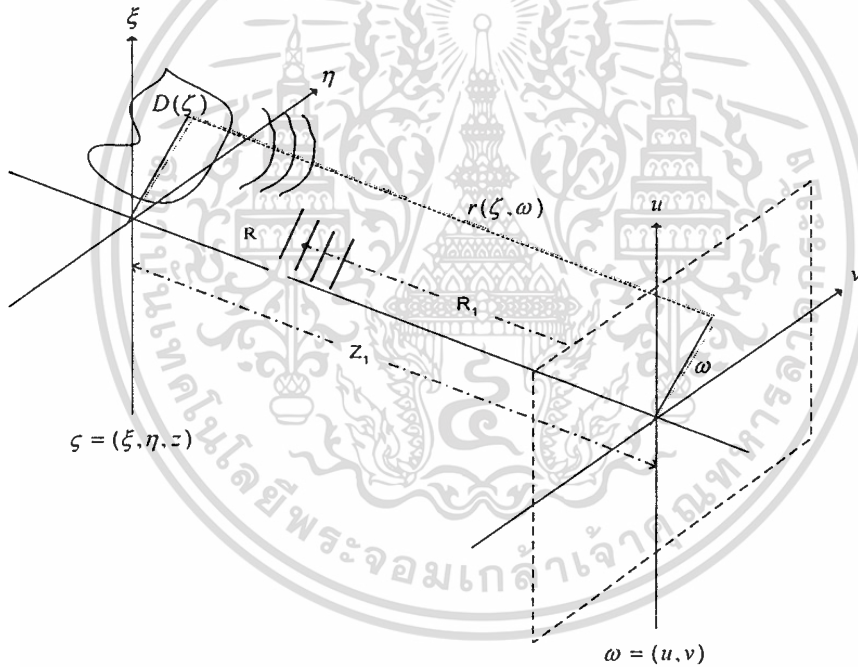
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยทั่วไปหลักการการทำงานของระบบแบ่งเป็นสองขั้นตอนใหญ่ๆ คือ

1. การบันทึกข้อมูลที่ได้จากวัตถุในรูปความเข้มสนามไมโครเวฟ
2. การสร้างภาพของวัตถุกลับมา

#### 4.2.1 การบันทึกฮอโลแกรมตามเงื่อนไขเฟรส์เนล

การบันทึกฮอโลแกรมตามเงื่อนไขเฟรส์เนล สิ่งที่สำคัญคือระยะห่างระหว่างวัตถุกับระนาบฮอโลแกรมจะต้องไม่ห่างกันมากนักเมื่อเทียบกับขนาดของระนาบฮอโลแกรมกล่าวคือ



รูปที่ 4.6 แสดงระบบพิกัดสำหรับการบันทึกฮอโลแกรม

จากรูปที่ 4.6 เป็นการจัดระบบบันทึกฮอโลแกรมแบบนอกแกนซึ่งคล้ายกับแบบของเลิร์-ยูแพทนิคส์ คือมีคลื่นวัตถุและคลื่นอ้างอิงที่เป็นคลื่นระนาบแพร่กระจายไปยังระนาบฮอโลแกรมซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของเฟรส์เนลคือระยะวัตถุกับระนาบฮอโลแกรมเท่ากับ  $z_1$  และมีตัวตรวจวัดสัญญาณติดตั้งอยู่บนระนาบฮอโลแกรมทำหน้าที่ตรวจวัดสัญญาณ เมื่อทำการสแกนวัตถุในแนวระนาบของวัตถุจำนวน  $N \times N$  จุด ทำให้สัญญาณที่ตัวตรวจวัดสัญญาณมีอัมพลิจูดและเฟสเปลี่ยนไป

นอกจากนี้ตำแหน่งที่วัตถุสแกนแล้วทำให้ค่าของสัญญาณที่วัดมีค่าไม่ต่อเนื่องและค่าที่วัดได้จะถูกเก็บข้อมูลไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปของเมตริกซ์  $N \times N$  ข้อมูล รูปแบบของสมการคลื่นในระบบนี้สามารถเปรียบเทียบได้กับสมการคลื่นของเลี้ยวเบนทัศนศาสตร์ที่ (4.3) ถึง (4.7)

#### 4.2.2 การสร้างภาพกลับมา

มีด้วยกันหลายวิธี ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงสองวิธีคือ

##### 4.2.2.1 การสร้างภาพกลับมาโดยทางแสง

การสร้างภาพกลับมาโดยทางแสง สิ่งที่สำคัญคือต้องบันทึกสัญญาณที่วัดได้จากตัวตรวจวัดสัญญาณลงบนแผ่นฟิล์ม ทำได้โดยต่อสัญญาณจากตัวตรวจวัดสัญญาณเข้าแกน  $Z$  ที่ด้านหลังของออสซิลโลสโคป เมื่อทำการสแกนวัตถุในแกน  $X$  และ  $Y$  ความเข้มของสัญญาณจะปรากฏบนจอออสซิลโลสโคปแล้วทำการถ่ายภาพบนจอออสซิลโลสโคป นำฟิล์มไปล้างและทำการย่อขนาดของฟิล์มให้มีขนาดที่สอดคล้องกับความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการสร้างภาพกลับมา เมื่อนำแสงมาฉายลงบนแผ่นฟิล์มก็จะมองเห็นภาพที่บันทึกไว้

##### 4.2.2.2 การสร้างภาพกลับมาโดยทางดิจิทัล

ในการสร้างภาพกลับมาโดยทางดิจิทัล เมื่อนำข้อมูลที่เก็บบันทึกไว้ในรูปของเมตริกซ์ซึ่งเปรียบเทียบได้กับสมการคลื่นที่ (4.7) แสดงถึงการกระจายคลื่นในรูปของความเข้มเป็นรีวรอยการแทรกสอดของคลื่นวัตถุและคลื่นอ้างอิงมาทำการการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast-Fourier Transform) เป็นอัลกอริทึม (Algorithm) สำหรับการคำนวณการแปลงฟูเรียร์แบบดิสครีต (Discrete Fourier Transform) ต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ ก่อนที่จะนำข้อมูลมาคำนวณต้องทำการแปลงให้อยู่ในรูปแบบของเฟรสเนล (Fresnel Transform) เสียก่อน ทำได้โดยการนำเอาข้อมูลที่ตรวจวัดได้มาทำการคูณกับค่าเฟสแพคเตอร์แล้วยกกำลังสอง จะทำให้ได้ผลลัพธ์เป็นการแปลงฟูเรียร์ของเฟรสเนลสองโดเมน โดยมีสมการดังนี้คือ

$$I(x', y') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B t_f(x, y) \exp[j(\pi / \lambda z)(x^2 + y^2)] \exp[-j2\pi(x'x + y'y)] dx dy \quad (4.11)$$

$I$  คือฟังก์ชันคลื่นที่ระนาบของภาพ (Image plane) ที่ทำฟูเรียร์ทรานฟอร์มของเฟรสเนลสองโดเมน

$t_f$  คือค่าความเข้มของคลื่นวัตถุและคลื่นอ้างอิงที่วัดโดยตัวตรวจวัด

$B$  คืออัมพลิจูดของคลื่นระนาบที่ใช้ในการสร้างภาพกลับมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$z$  เป็นระยะจากระนาบตรวจวัดไปยังจุดที่ต้องการให้เกิดภาพ

$\lambda$  เป็นความยาวคลื่นที่มาจากวัตถุ

ซึ่งความเข้มของภาพที่ปรากฏหาได้จาก  $I, I^*$

รูปแบบดิฟเฟอเรนเชียลของการดำเนินการ (Operation) นี้เป็น

$$I(x', y') = \sum_{x'=0}^{N-1} \sum_{y'=0}^{N-1} B t_f(x, y) \exp \left[ \frac{j\pi}{\lambda z} \left\{ \left( \frac{L_x}{M} \right)^2 x^2 + \left( \frac{L_y}{N} \right)^2 y^2 \right\} \right] \cdot \exp \left[ -j2\pi \left( \frac{xx'}{M} + \frac{yy'}{N} \right) \right] \quad (4.12)$$

$x', y' = 0, 1, \dots, N-1$

$M, N$  คือจำนวนจุดแต่ละจุดที่ทำการตรวจวัด

$L_x, L_y$  คือขนาดความกว้างและความยาวของพื้นที่สแกน

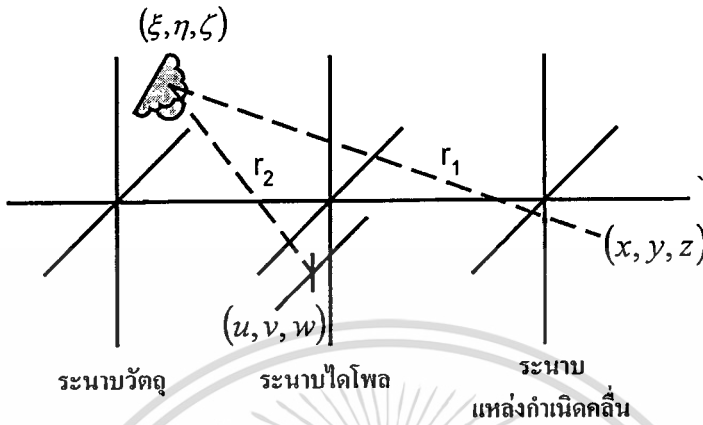
$\lambda$  เป็นความยาวคลื่นที่มาจากวัตถุ

$t_f(x, y)$  คือค่าความเข้มของคลื่นวัตถุและคลื่นอ้างอิงที่วัด โดยตัวตรวจวัด

สมการที่ (4.12) สามารถหาความเข้มได้จาก  $I$  คูณด้วย คอนจูเกตของ  $I$  ซึ่งก็คือการสร้างภาพกลับมาของวัตถุนั้นเอง และลักษณะของภาพที่เกิดขึ้นมีทั้งภาพจริงและภาพเสมือน

การสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยทั่วไปคงที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนับว่าเป็นอีกก้าวหนึ่งในการพัฒนาการสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟวิธีหนึ่ง ยังมีอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจวิธีดังกล่าวคือระบบที่มีตัวตรวจวัดสัญญาณและตัวส่งคลื่นอยู่ในอุปกรณ์เดียวกัน (Monostatic) และใช้เทคนิคการวัดสนามไฟฟ้าด้วยตัวกระเจิงคลื่นรายละเอียดดูในหัวข้อที่ 2.4[10] ข้อดีของวิธีนี้คือให้ความละเอียดของภาพที่ดีกว่าวิธีแรกกรณีระยะวัตถุถึงฮอโลแกรมเท่ากันซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้

### 4.3 การบันทึกฮอโลแกรมด้วยเทคนิคการกระเจิงคลื่น



รูปที่ 4.7 แสดงระบบพิกัดสำหรับการบันทึกด้วยเทคนิคการกระเจิงคลื่น

จากรูปที่ 4.7 พิจารณาระบบพิกัด  $(x, y, z)$ ,  $(u, v, w)$  และ  $(\xi, \eta, \zeta)$  โดยให้ระนาบทั้งสามขนานกันและมีแกนหนึ่งที่ใช้ร่วมกัน แล่งกำเนิดบนระนาบ  $(x, y, z)$  ส่งคลื่นไปยังวัตถุที่ต้องการจะสร้างภาพซึ่งอยู่ที่ระนาบ  $(\xi, \eta, \zeta)$  ก่อนที่คลื่นจะเคลื่อนที่ไปยังวัตถุ ก็จะผ่านระนาบ  $(u, v, w)$  ซึ่งเป็นระนาบของตัวไดโพลกระเจิงคลื่นตามจังหวะของการมอดูเลตสัญญาณความถี่ค่าหนึ่ง หลังจากทีคลื่นตกกระทบวัตถุ คลื่นจะสะท้อนกลับมาที่ระนาบ  $(u, v, w)$  เกิดการรวมกันกับคลื่นจากแหล่งกำเนิดที่ส่งมายังตัวไดโพลตรงๆ ดังนั้นเมื่อส่งคลื่นไปทั่วบริเวณขอบเขตวัตถุที่ระนาบ  $(\xi, \eta, \zeta)$  สนามคลื่นที่ตัวไดโพลบนระนาบ  $(u, v, w)$  ก็คือตัวแทนของคลื่นที่มาจากวัตถุนั่นเอง

สนามไมโครเวฟที่ตัวไดโพลกระเจิงคลื่น  $\psi_2(u, v, w)$  ก็จะประกอบด้วยสนามที่มาจากวัตถุและมีฟังก์ชันการสะท้อนของวัตถุรวมอยู่ด้วย ตามความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\psi_2(u, v, w) = A_1 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_i(\xi, \eta) D(\xi, \eta) \exp(jk_2 r_2) d\xi d\eta \quad (4.13)$$

โดยสนามที่เปล่งออกมาจากวัตถุคือ  $E_i(\xi, \eta)$  เป็นสนามหน้าคลื่นทรงกลม

$$E_i(\xi, \eta) = A_2 \exp(jk_2 r_1) \quad (4.14)$$

โดยที่  $E_i(\xi, \eta)$  คือสนามไฟฟ้าที่สะท้อนกลับมาจากวัตถุ  
เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการที่ขอไปเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$D(\xi, \eta)$  คือฟังก์ชันของการสะท้อนของวัตถุ

เมื่อทำการรวมสมการทั้งสองเข้าด้วยกันและแสดงในเทอมของแกนพิกัดฉาก (Cartesian co-ordinates) ดังในรูปที่ 4.7 และใช้ค่าประมาณของเฟรส์เนล (ภาคผนวก ก.) จะได้ดังสมการ

$$\psi_2(u, v, w) = A_4 \exp\{jk_2(w+z)\} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} D(\xi, \eta) \exp\left[ jk_2 \left\{ \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2z} + \frac{(u-\xi)^2 + (v-\eta)^2}{2w} \right\} \right] d\xi d\eta \quad (4.15)$$

สมการที่ (4.15) นี้เป็นตัวแทนของสนามไฟฟ้าที่กระเจิงมาจากวัตถุโดยมีตัวโคโพลทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณเพื่อส่งสัญญาณต่อไปที่ตัวตรวจวัด เมื่อทำการสแกนวัตถุ โดยให้  $x = u$  และ  $y = v$  ซึ่งหมายถึงระนาบตัวโคโพลและระนาบของแหล่งกำเนิดคลื่นจะสแกนไปพร้อมกัน ดังนั้นสมการที่ (4.15) เขียนใหม่ตามเงื่อนไขจะได้ว่า

$$\psi_2(u, v, w) = A_4 \exp\{jk_2(w+z)\} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} D(\xi, \eta) \exp\left[ jk_2 \left\{ \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2wz/(w+z)} \right\} \right] d\xi d\eta \quad (4.16)$$

สมการที่ (4.16) แสดงถึงสมการการเลี้ยวเบนที่ระนาบ โดย  $wz/(w+z)$  เป็นระยะจากวัตถุถึงตัวตรวจวัดตามเงื่อนไขของเฟรส์เนล ตัวตรวจวัดจะบันทึกการกระจายของสนามที่มาจากวัตถุและสนามคลื่นผลรวมที่ระนาบตัวโคโพล  $(u, v, w)$  ซึ่งเป็นผลรวมของคลื่นจากวัตถุ  $\psi_2(u, v, w)$  และคลื่นที่แหล่งกำเนิดส่งมาแล้วตกกระทบกับตัวโคโพลโดยตรง  $E_i(u, v, w)$  ซึ่งมีค่าคงที่ โดยกำหนดให้เป็นค่าคงที่เชิงซ้อน  $A_5$  มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\psi_2(x, y, z) \propto \{A_5 + \psi_2(u, v, w)\} \cos^2(\omega t) \quad (4.17)$$

การสแกนวัตถุโดยการวางระนาบฮอโลแกรม (ในที่นี้หมายถึงระนาบโคโพล) ในแนวเดียวกันกับทิศทางของคลื่นแหล่งกำเนิด จะทำให้เกิดการรบกวนกันระหว่างสนามรบกวนที่ตัวโคโพลกับคลื่นเดิม การแก้ปัญหาทำได้โดยการวางระนาบฮอโลแกรมอยู่แกนเดิม แต่แยกคลื่นอ้างอิงกับสัญญาณคลื่นเดิมออกจากแกนเดียวกันไปที่โคเรชันนัลตัวที่ 2 และสัญญาณอ้างอิง  $A_6$  จะกลายเป็นฟังก์ชันของ  $E_r(x)$  ดังนั้นเฟสจะเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นดังสมการ

$$E_r(x) = A_6 \exp(jk_2 x \sin \theta) \quad (4.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามคลื่น  $\psi_2(x, y, z)$  ซึ่งเป็นสัญญาณที่ถูกมอดูเลตด้วยความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ แล้ว จะถูกส่งไปรวมกับสัญญาณอ้างอิงที่มีค่าแน่นอนซึ่งรออยู่แล้วที่ตัวตรวจวัดสัญญาณ สัญญาณอ้างอิงดังกล่าวกำหนดให้เป็นค่าคงที่  $A_6$  หลังจากทำการรวมสัญญาณแล้วจะถูกส่งต่อไปยัง เครื่องตรวจจับ และขยายสัญญาณ บันทึกข้อมูลที่ได้เป็นความเข้มของสัญญาณผลลัพธ์  $I(x, y)$  ดังนี้คือ

$$I(x, y) = G \left[ 2A_6^* \{A_5 + \psi_2(u, v, w)\} + A_6 \{A_5^* + \psi_2^*(u, v, w)\} \right] \quad (4.19)$$

ในสมการที่ (4.19) นี้ เป็นรูปแบบมาตรฐานในการสร้างฮอโลแกรมในเทอมของภาพเสมือน  $2A_6^* \{A_5 + \psi_2(u, v, w)\}$  และภาพจริง  $A_6 \{A_5^* + \psi_2^*(u, v, w)\}$  ค่า  $G$  คือฟังก์ชันการส่งผ่านของระบบ สำหรับการสร้างภาพกลับมาใช้หลักการเดียวกันกับวิธีดิจิทัล

สำหรับการสร้างภาพกลับมาใช้เทคนิคทางดิจิทัลดังกล่าวมาแล้วข้างต้น

#### 4.4 สรุป

วิธีการสร้างภาพของวัตถุด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยใช้หลักการสะท้อนคลื่นจากวัตถุมารวมกับคลื่นอ้างอิงที่ตัวตรวจวัดและบันทึกเป็นความเข้มของสัญญาณที่เกิดจากการแทรกสอดกัน ด้วยเทคนิคไมโครเวฟฮอโลกราฟี เป็นวิธีการที่ให้ความละเอียดของวัตถุได้สูง การเพิ่มรายละเอียดของภาพให้ดีขึ้นได้โดยการเลื่อนระนาบฮอโลแกรมที่มีตัวตรวจวัดติดตั้งอยู่เข้าไปใกล้วัตถุมากขึ้น แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่ตัวตรวจวัดจะทำให้คลื่นสะท้อนกลับไปยังวัตถุเป็นผลให้เกิดความผิดพลาดของสัญญาณที่สะท้อนจากวัตถุเพิ่มขึ้นด้วย วิธีที่แก้ปัญหาคือการเพิ่มรายละเอียดของภาพวัตถุโดยที่ตัวตรวจวัดไม่ไปรบกวนสัญญาณคลื่นจากวัตถุ ซึ่งเป็นวิธีที่กล่าวไว้ในตอนท้ายของบทนี้ เทคนิคไมโครเวฟฮอโลกราฟีเป็นวิธีการที่สะดวกในการเก็บบันทึกข้อมูลอีกด้วย สามารถทำการประมวลผลข้อมูลให้แปลงกลับเป็นภาพได้การใช้คอมพิวเตอร์

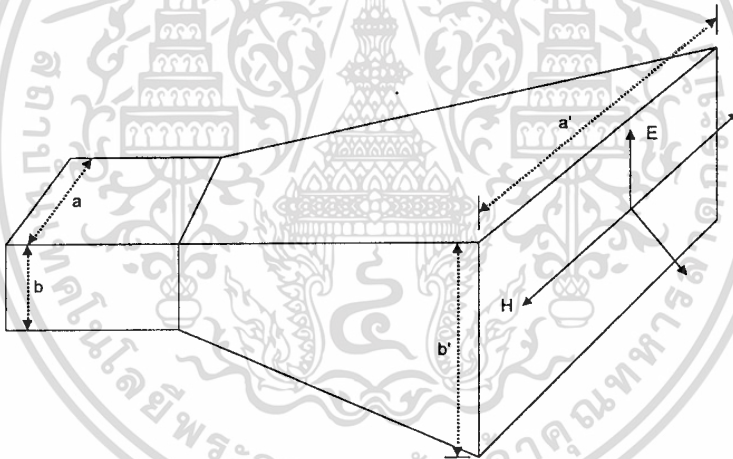
## บทที่ 5

### การดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย การออกแบบสายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด การหารูปแบบการแพร่ของคลื่นในสายอากาศทรงพีระมิด การออกแบบระบบชุดทดลองการสร้างภาพด้วยไมโครเวฟ และการทดลองหาการกระจายของคลื่นที่มาจากวัตถุเพื่อสร้างเป็นภาพ โดยใช้เทคนิคการรบกวนสนามคลื่นที่ตัวกระจังซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดดังต่อไปนี้

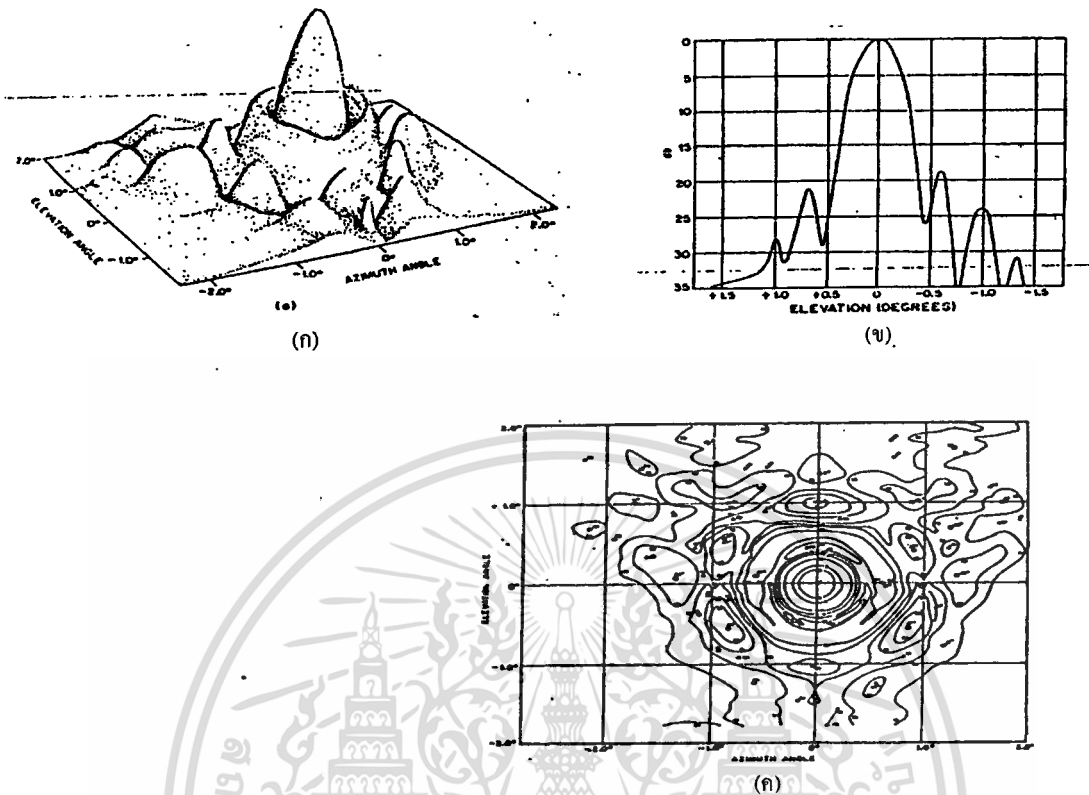
#### 5.1 การออกแบบสายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด

ในการสื่อสารโดยใช้คลื่นไมโครเวฟนั้น จะต้องประกอบไปด้วยตัวส่งและตัวรับ โดยที่สิ่งจำเป็นต้องคำนึงถึงคือสายอากาศ และในที่นี้จะกล่าวถึงสายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิดซึ่งใช้เป็นตัวส่งและตัวรับในตัวเดียวกัน ดังนั้นจึงได้ออกแบบสร้างสายอากาศ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในการวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1. แสดง โครงสร้างสายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้วัสดุที่ทำสายอากาศเป็น โลหะทองเหลือง เพราะเป็นโลหะที่มีการสูญเสียกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่พื้นผิวต่ำและมีราคาถูก มีค่าการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟได้ดี และในการออกแบบต้องคำนึงถึงรูปแบบ (Pattern) การแพร่ของคลื่นที่ส่งออกไป ขนาดความกว้างและยาว  $b'$  เท่ากับ 53.5 เซนติเมตร  $a'$  เท่ากับ 64.5 เซนติเมตร



รูปที่ 5.2 แสดงตัวอย่างรูปแบบการแผ่คลื่นของสายอากาศแบบฮอร์น

- (ก) แสดงรูปแบบของลำคลื่นแบบปลายคินสอ(สามมิติ)
- (ข) แสดงรูปแบบที่ความเข้มค่าหนึ่ง
- (ค) แสดงลวดลายรูปแบบที่ความเข้มค่าหนึ่งแบบตัดขวาง

พิจารณารูปที่ 5.2 (ก), (ข) และ (ค) จะประกอบไปด้วยหลายลูป (Loop) คือ ลูปหลัก (Main Loop) ลูปด้านข้าง (Side Loop) จะเห็นว่าส่วนของแกนหลักนั้นกำลังคลื่นจะแรงสุดและเป็นสิ่งที่ต้องการของการออกแบบสายอากาศ มุมระหว่างจุดสองจุดบนลูปหลักซึ่งมีกำลังความเข้มเท่ากับครึ่งหนึ่งของกำลังความเข้มสูงสุดคือ 3 เดซิเบล ของลำคลื่น โดยมีหลักในการกำหนดทิศทางการแผ่ของคลื่นหรือความกว้างของลำคลื่นจะแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นดังสมการ

$$\theta_H = \frac{80\lambda_0}{a} \quad \text{and} \quad \theta_E = \frac{53\lambda_0}{b} \quad (5.1)$$

ซึ่ง  $\theta_H$  และ  $\theta_E$  คือมุมของลำคลื่น ระนาบ H ระนาบ E ตามลำดับ

$\lambda_0$  คือความยาวคลื่นในที่ว่าง

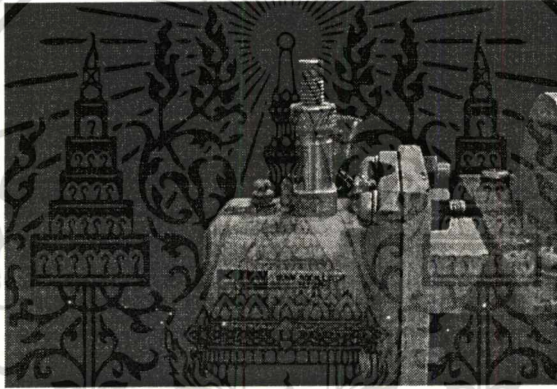
a, b คือกับพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการสร้างภาพ

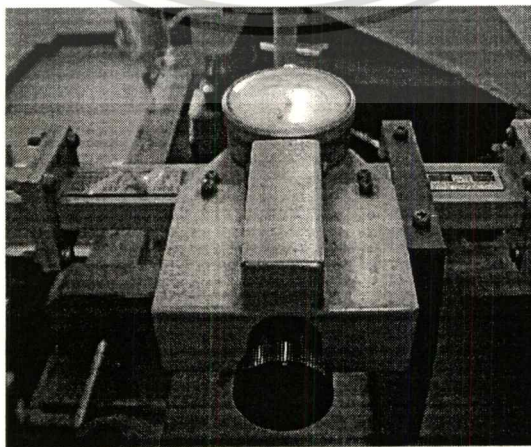
ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบในการสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟซึ่งต่างจากการทดลองต่างๆไปกล่าวคือในงานวิจัยนี้ในสายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิดเป็นทั้งตัวส่งคลื่นและตัวรับคลื่นพร้อมกันและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยที่สำคัญได้แก่ แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ตัวลดทอนสัญญาณ ไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์ สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด ตัวตรวจวัดสัญญาณ ชุดมอดูเลตความถี่ , ประกอบด้วยเลเซอร์ไดโอดแบบมอดูเลต, โฟโอดีโอดพร้อมด้วยเส้นใยนำแสงแบบพลาสติก, เครื่องตรวจจับและขยายสัญญาณ (Lock in Amplifier) จึงจะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

### 5.2.1 แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์ไดโอด



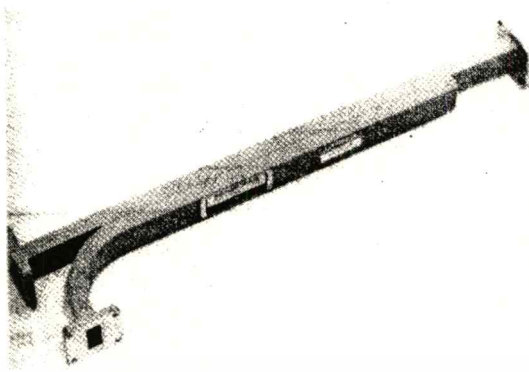
รูปที่ 5.3 แสดงอุปกรณ์แหล่งกำเนิดคลื่นกัมมันต์ไดโอด ความถี่ 9.2 จิกะเฮิร์ตซ์ กำลัง 10 มิลลิวัตต์

### 5.2.2 ตัวลดทอนสัญญาณ



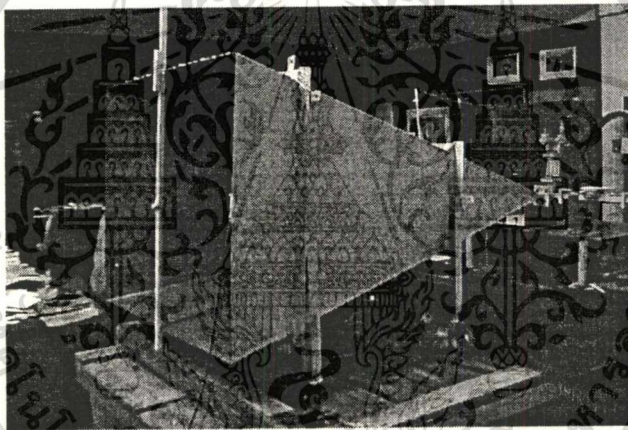
เอกสารรูปที่ 5.4 แสดงอุปกรณ์ตัวลดทอนสัญญาณแบบปรับค่าได้ นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.3 ไคเรกชันนัลคัปเปเตอร์



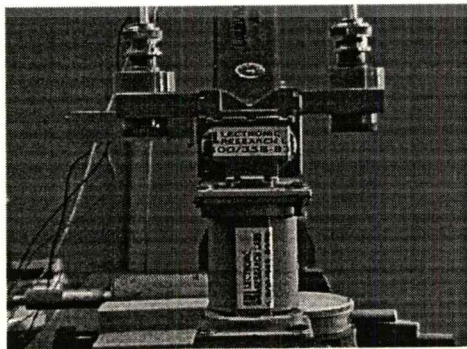
รูปที่ 5.5 แสดงอุปกรณ์ไคเรกชันนัลคัปเปเตอร์

### 5.2.4 สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด



รูปที่ 5.6 แสดงสายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิดที่สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัย

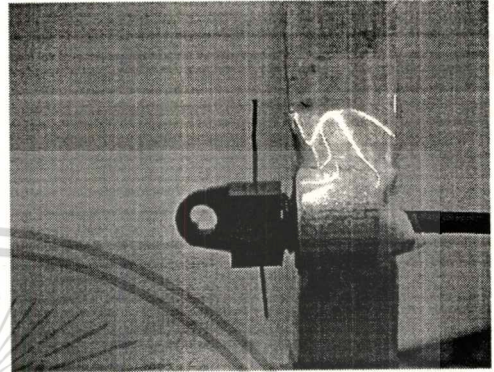
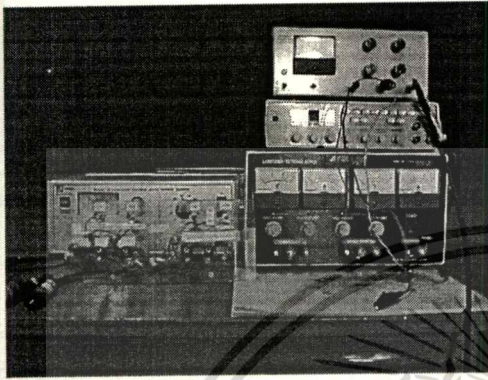
### 5.2.5 ตัวตรวจวัดสัญญาณ



รูปที่ 5.7 แสดงอุปกรณ์ตัวตรวจวัดสัญญาณไมโครเวฟชนิดมิกเซอร์  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.6 ชุดมอดูเลตความถี่

ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไดโอดเลเซอร์แบบมอดูเลต ซึ่งทำหน้าที่ปล่อยแสงเลเซอร์พร้อม กับมอดูเลตความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ เส้นใยนำแสงแบบพลาสติก ทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้แสงเลเซอร์ เดินทางไปยังตัวตรวจวัดโฟโต้ไดโอด ซึ่งทำหน้าที่เป็นไดโพลกระเจิงคลื่น



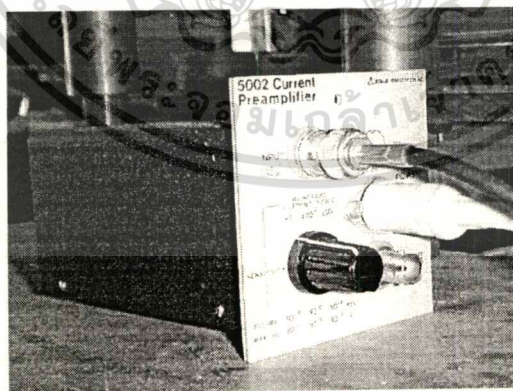
(ก)

(ข)

รูปที่ 5.8 ชุดมอดูเลตความถี่ (ก) ชุดเลเซอร์ไดโอด (ข) ไดโพลชนิดโฟโต้ไดโอด

### 5.2.7 อุปกรณ์เตรียมขยายสัญญาณ

อุปกรณ์เตรียมขยายสัญญาณทำหน้าที่นำสัญญาณผลลัพธ์สุดท้ายมาขยายสัญญาณให้โตขึ้น หนึ่งครั้ง ก่อนเข้าเครื่องตรวจวัดขยายสัญญาณ

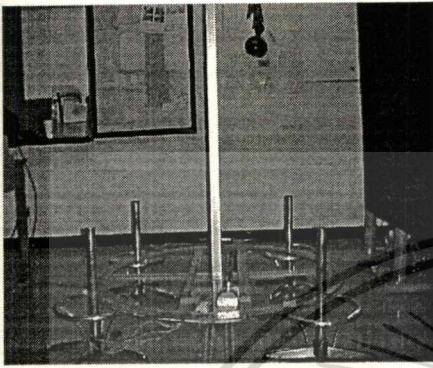


รูปที่ 5.9 แสดงอุปกรณ์เตรียมขยายสัญญาณ

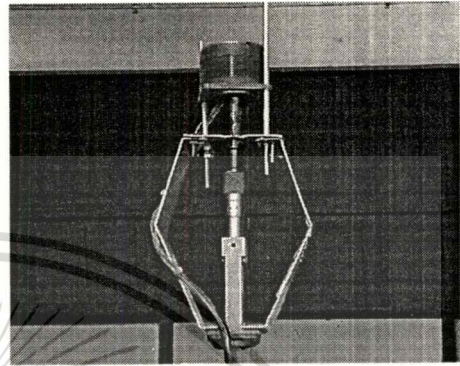
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.8 ชุดเลื่อนตำแหน่งวัตถุและตัวปรับเฟส

ทำหน้าที่เลื่อนตำแหน่งวัตถุโดยใช้ คอมพิวเตอร์ในการควบคุมสเปคโตรปิงมอเตอร์เพื่อสแกนวัตถุตามเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นมา ส่วนตัวปรับเฟสจะทำงานสอดคล้องกับชุดเลื่อนตำแหน่งวัตถุ ดังรูปที่ 5.10



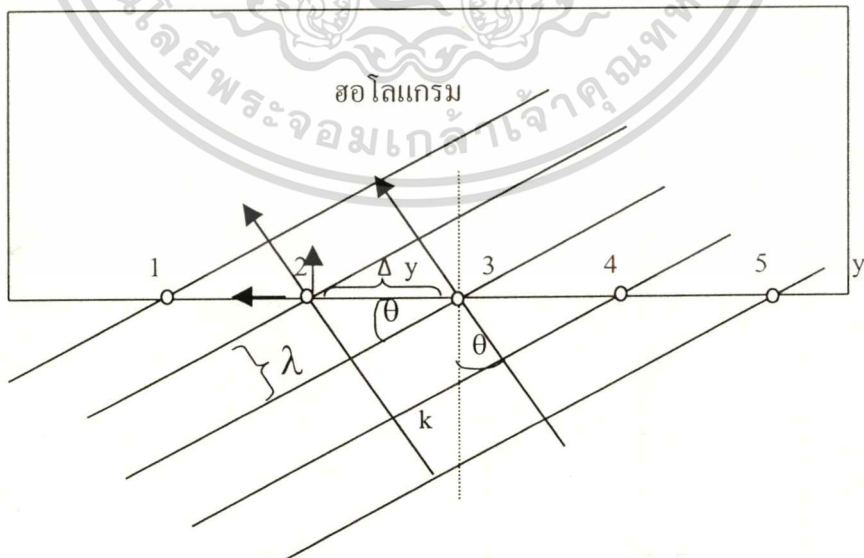
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.10 ชุดเลื่อนตำแหน่งวัตถุและตัวปรับเฟส (ก) แสดงชุดอุปกรณ์การสแกนวัตถุ (ข) ตัวปรับเฟสของคลื่นอ้างอิงที่สร้างขึ้น

การสร้างคลื่นอ้างอิงที่เป็นคลื่นระนาบภายในท่อนำคลื่น โดยใช้อุปกรณ์ตัวปรับเฟสเป็นตัวสร้างคลื่น โดยมีเงื่อนไขเปรียบเทียบกับคลื่นระนาบภายนอกท่อนำคลื่น โดยพิจารณาคลื่นระนาบที่ตกลงบนระนาบฮอโลแกรมทำมุม  $\theta$  ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นระนาบตกบนฮอโลแกรม

จากรูปที่ 5.11 ทำการวัดฟังก์ชันคลื่นที่ตำแหน่ง 1,2,3,4 และ5 ด้วยตัวไดโพลจะมีค่าเท่ากันทุกตำแหน่งเนื่องจากเป็นลักษณะคาบที่ซ้ำกัน (Periodicity) ฟังก์ชันคลื่นแสดงด้วยสมการ

$$E = E_0 \exp(ikr) \quad (5.2)$$

โดยฟังก์ชันคลื่นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามระยะแนวแกน  $y$  จะได้ว่า

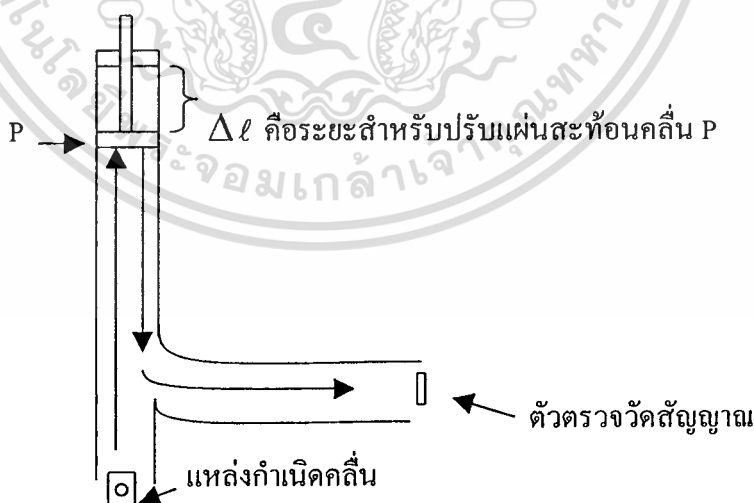
$$E = E_0 \exp(iky \sin \theta) \quad (5.3)$$

ดังนั้นถ้าเรากำหนดทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นระนาบทำมุม  $30^\circ$  องศา กับเส้นปกติของระนาบฮอโลแกรม ตัวตรวจวัดสัญญาณจะวัดค่าของสัญญาณที่ตำแหน่งดังกล่าวเท่ากันทุกๆ ระยะ  $\Delta y$  กำหนดโดย

$$\Delta y = \lambda_0 / \sin \theta = 2\lambda \quad (5.4)$$

$\lambda_0$  คือความยาวคลื่นในอากาศ 3.26 เซนติเมตร

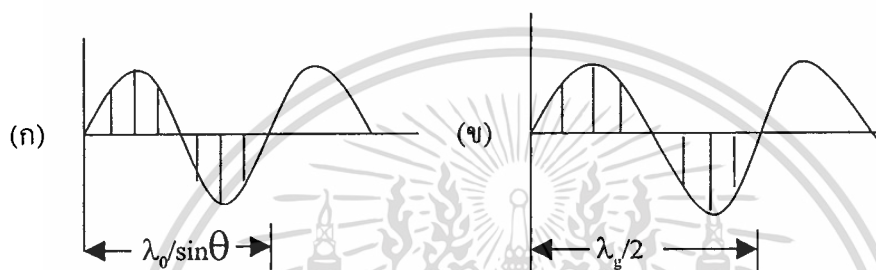
เมื่อกลับมาพิจารณากระบวนการของงานวิจัยนี้การสร้างคลื่นอ้างอิงขึ้นภายในท่อนำคลื่นภาคกระทบตัวตรวจวัดสัญญาณ ลักษณะการเกิดฟังก์ชันคลื่นที่เป็นคาบซ้ำกันจะเปรียบเทียบกับคลื่นระนาบที่อยู่ภายนอกท่อนำคลื่น แสดงระบบดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 แสดงการสร้างคลื่นอ้างอิงภายในท่อนำคลื่น

จากรูปที่ 5.12 ฟังก์ชันคลื่นที่ตัวไดโพลที่ตำแหน่งใดๆจะมีค่า  $E = E_0 \exp(j\phi)$  ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเลื่อนระยะของแผ่นสะท้อนคลื่น  $P$  เป็นระยะ  $\Delta \ell$  ซึ่งจะมีค่าซ้ำกันทุกๆ  $\Delta \ell = \lambda_g/2$   
 $\lambda_g$  คือความยาวคลื่นในท่อนนำคลื่น 4.7 เซนติเมตร

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นระนาบในสองกรณีนี้จะเห็นว่าการเลื่อนตำแหน่งตัวไดโพลจะสอดคล้องกับระยะของแผ่นสะท้อนคลื่น กล่าวคือถ้าเลื่อนตำแหน่งตัวไดโพล ในแนวแกน  $y$  เป็นระยะ  $\Delta y$  จากรูปที่ 5.11 จะต้องเลื่อนแผ่นสะท้อนคลื่นเป็นระยะ  $\Delta \ell$  ไปพร้อมกันเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ทั้งสองกรณีดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 (ก) แสดงการเลื่อนตำแหน่งตัวไดโพล (ข) แสดงการเลื่อนระยะแผ่นสะท้อนคลื่น

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นอ้างอิงเป็นมุม 30 องศาตั้งนั้น

$$\lambda_0/\sin 30 = 2\lambda_0 \text{ เทียบได้กับ } \lambda_g/2 \quad (4.6)$$

และได้แบ่งช่วงของการเลื่อนตำแหน่งของคาบที่ซ้ำกันเป็น 12 ช่วงย่อยๆจะได้ว่า

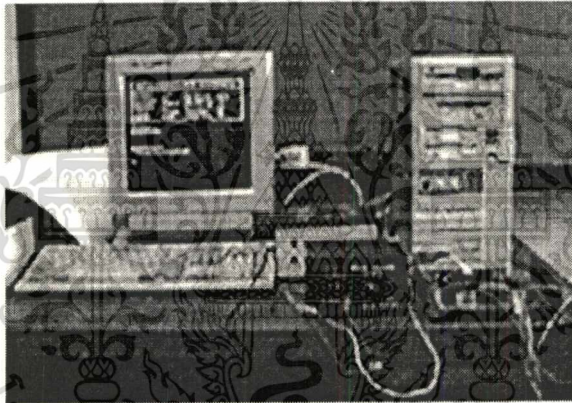
ระยะเลื่อนตำแหน่งตัวไดโพล	ระยะเลื่อนแผ่นสะท้อนคลื่น
$2\lambda_0/12$	$\lambda_g/2 \times 12$
$(2 \times 3.26)/12$	$4.7/(2 \times 12)$
0.54 เซนติเมตร	0.195 เซนติเมตร

กล่าวโดยสรุปวิธีการสร้างคลื่นอ้างอิงภายในท่อนนำคลื่นโดยการปรับระยะแผ่นสะท้อนคลื่นขึ้นและลงตามลำดับการเลื่อนตำแหน่งของตัวไดโพล เหตุผลที่แบ่งช่วงการปรับระยะของแผ่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้ขาดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะท้อนและตัวไดโพลเพราะระยะการปรับของแผ่นสะท้อนมีความยาวจำกัด เท่ากับ 2.5 เซนติเมตร ในการปรับระยะของแผ่นสะท้อนคลื่นเริ่มที่ตำแหน่งศูนย์ ปรับครั้งที่ 1 ที่ ระยะ 0.195 เซนติเมตร ครั้งที่ 2 ที่ระยะ 0.38 เซนติเมตรครั้งที่ 3 ที่ระยะ 0.585 เซนติเมตร ตามลำดับ จนครบ 12 ครั้ง จะได้ระยะสุดท้ายที่ 2.34 เซนติเมตรซึ่งไม่เกิน 2.5 เซนติเมตร เมื่อเริ่มปรับครั้งที่ 13 แผ่นสะท้อนคลื่นจะกลับมาเริ่มต้นที่ ตำแหน่งศูนย์อีกครั้ง และจะปรับเช่นนี้ตลอดไปคือครบ 12 ครั้งก็จะมาเริ่มที่ ตำแหน่งศูนย์ทุกครั้ง จนการทดลองเสร็จสิ้น

### 5.2.9 ชุดควบคุมสเต็ปมอเตอร์และเก็บข้อมูล

ชุดควบคุมการทำงานของสเต็ปมอเตอร์ประกอบด้วย คอมพิวเตอร์ 1 ชุด อุปกรณ์แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ให้ทำงานและเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ 1ชุด แหล่งกำเนิดไฟฟ้า 0-24 โวลต์ 8 แอมป์ 1 เครื่อง การ์ดอนาล็อกแปลงเป็นดิจิตอล 1 ชุด

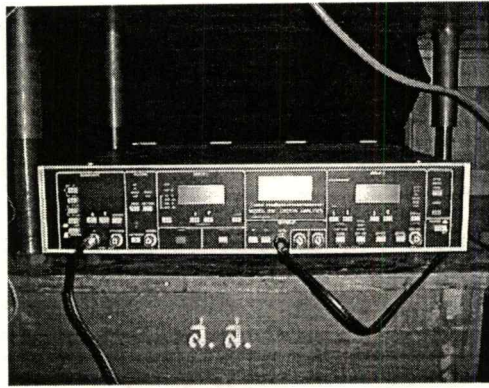


รูปที่ 5.14 แสดงอุปกรณ์ชุดควบคุมสเต็ปมอเตอร์

หลักการทำงานคือ ควบคุมให้มอเตอร์ทั้งสองตัวทำงานกึ่งอัตโนมัติตามเงื่อนไขที่กำหนด พร้อมกับบันทึกข้อมูลที่วัดค่าได้แต่ละจุดที่สแกนวัตถุ โดยใช้คำสั่งด้วยภาษา C++ (ดูภาคผนวก ฉ.)

### 5.2.10 เครื่องตรวจวัดและขยายสัญญาณ

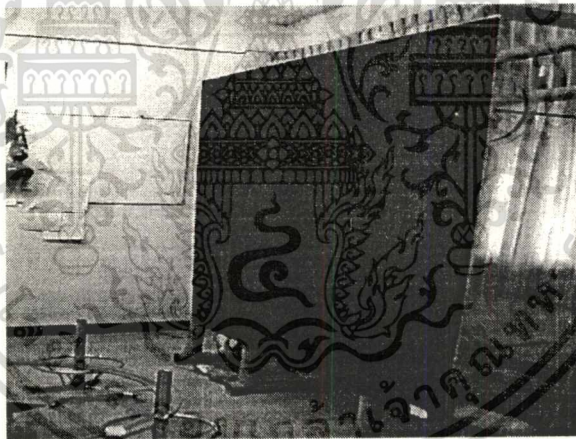
ทำหน้าที่ตรวจวัดสัญญาณคลื่นและเลือกสัญญาณที่มีความตรงกันกับความถี่อ้างอิงที่ป้อนให้กับเครื่องตรวจวัดและขยายสัญญาณ ดูรายละเอียด (ภาคผนวก ข.)



รูปที่ 5.15 แสดงเครื่องตรวจวัดและขยายสัญญาณ

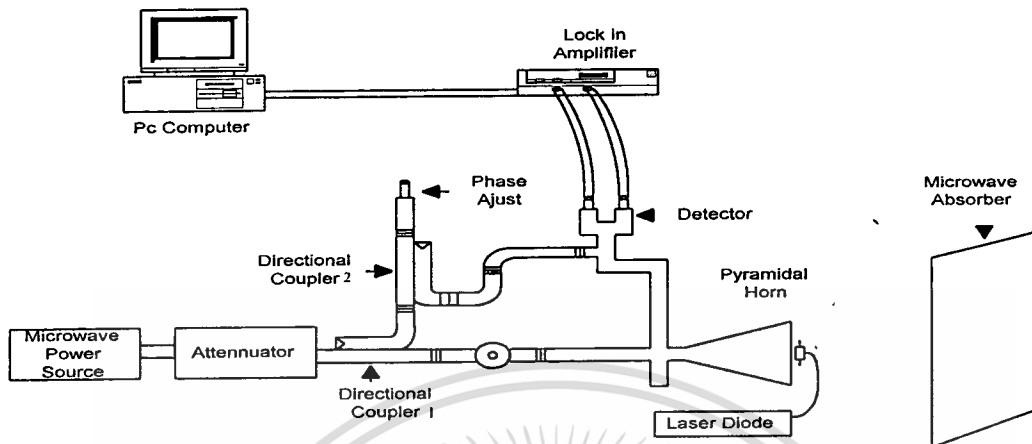
#### 5.2.11 แผงดูดคลื่นไมโครเวฟ

ทำหน้าที่ดูดคลื่นไมโครเวฟไม่ให้สะท้อนออกมา มีค่าลดการสะท้อน 12 เดซิเบลที่ ความถี่ 8-9 GHz มีขนาดกว้าง 2.4 เมตร ยาว 2.4 เมตร และความหนา 9.5 มิลลิเมตร (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ค) ดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 แสดงชุดอุปกรณ์ดูดคลื่นไมโครเวฟที่สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัย

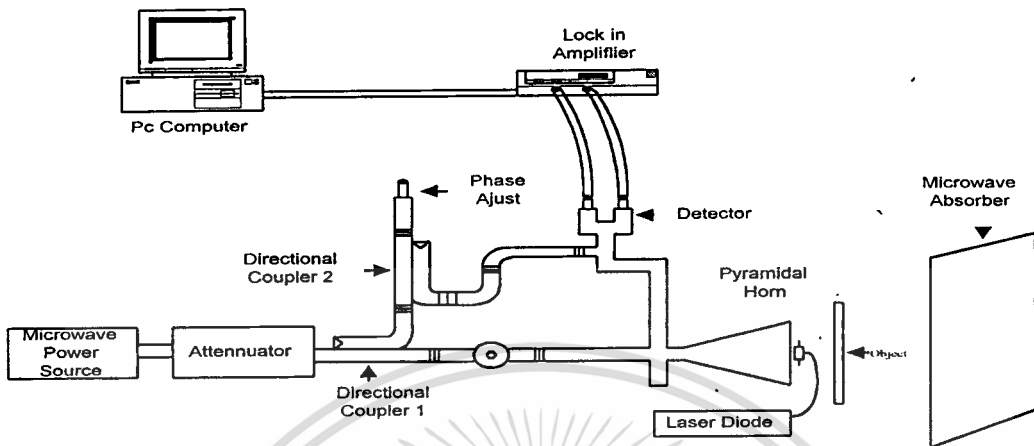
### 5.3 การทดลองหารูปแบบของการแพร่คลื่นของสายอากาศ (Radiation Patterns Wave)



รูปที่ 5.17 แสดงระบบชุดทดลองเพื่อหารูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศโดยใช้ตัวไดโพล กระเจิงคลื่นในการวัดสนามไฟฟ้าที่ส่งมาจากสายอากาศ

ในการวัดสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศด้วยเทคนิคการกระเจิงคลื่นที่ตัวไดโพล ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 จากรูปที่ 5.17 เมื่อคลื่นไมโครเวฟความถี่ 9.2 จิกะเฮิร์ตซ์ ถูกส่งผ่านท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ผ่านตัวลดทอนสัญญาณ ผ่านไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์ ตัวที่หนึ่ง คลื่นจะถูกแบ่งไปยังไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์ตัวที่สอง เพื่อไปเป็นสัญญาณอ้างอิง อีกส่วนถูกส่งไปยังสายอากาศทรงพีระมิดออกสู่ที่ว่าง ผ่านไปตกกระทบตัวไดโพลกระเจิงคลื่น ซึ่งทำหน้าที่เป็นเสมือนตัวรบกวนคลื่น (Perturbator) [10] ด้วยการมอดูเลตความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ คลื่นจะสะท้อนจากตัวไดโพลเข้ามาในสายอากาศทรงพีระมิดเดินทางมายังตัวตรวจวัดคลื่นและรวมกับกับคลื่นอ้างอิงที่มีเฟสคงที่ จากไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์ตัวที่สอง โดยที่ตัวตรวจวัดคลื่นทำการวัดสัญญาณที่กระเจิงมาจากตัวไดโพลกระเจิงคลื่นและที่ตัวตรวจวัดมีสายนำสัญญาณส่งต่อไปยังเครื่องตรวจวัดและขยายสัญญาณ เครื่องนี้ทำหน้าที่เลือกสัญญาณที่มีความถี่เดียวกันกับความถี่ที่มอดูเลตที่ตัวไดโพลแล้วเก็บข้อมูลไว้ เมื่อทำการสแกนตัวไดโพล จำนวน 15x15 จุด ข้อมูลทั้งหมดจะถูกบันทึกไว้ด้วยคอมพิวเตอร์ จากนั้นนำข้อมูลไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าของสัญญาณที่วัดได้ (แกนตั้ง) กับระยะการสแกนตัวไดโพล (แกนนอน) แสดงรูปภาพแบบเส้นและแบบพื้นผิวสามมิติตามลำดับ

## 5.4 การทำงานของระบบสร้างภาพ



รูปที่ 5.18 แสดงชุดระบบการสร้างภาพวัตถุด้วยคลื่นไมโครเวฟ

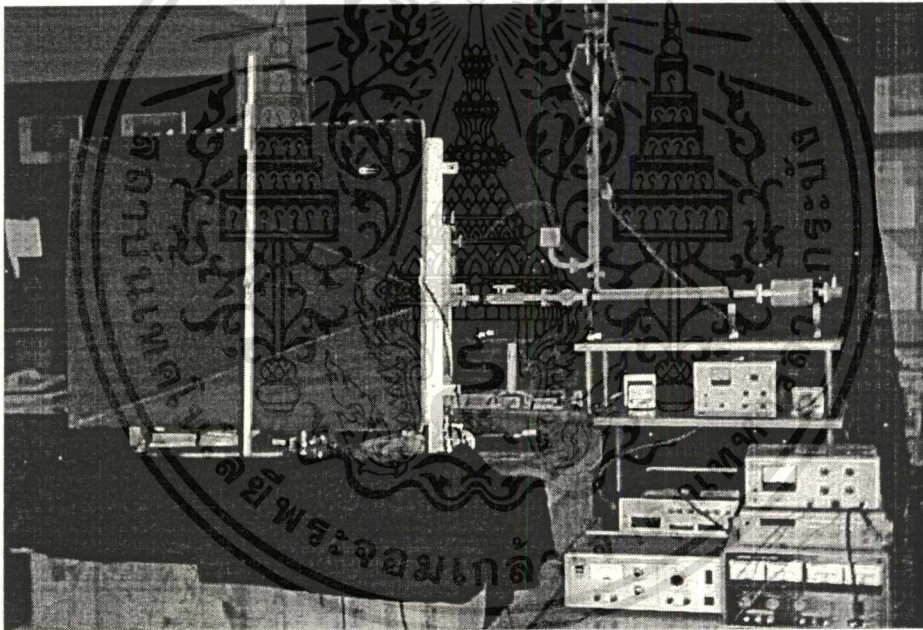
ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบสร้างระบบการสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบโมโนสแตติก โดยใช้ฮอร์นทรงพีระมิดขนาดของปากฮอร์นกว้างและยาวเท่ากับ  $53.5 \times 64.5$  ตารางเซนติเมตรเป็นตัวส่งและรับคลื่นภายในอุปกรณ์เดียวกันและใช้เทคนิคการกระเจิงคลื่นด้วยตัวไดโพล ซึ่งใช้ตัวไดโพลชนิดโฟโต้ไดโอดขนาดเล็กติดตั้งอยู่กึ่งกลางด้านหน้าฮอร์น ทำหน้าที่เสมือนตัวรับคลื่นจากวัตถุและส่งสัญญาณคลื่นต่อไปยังตัวตรวจวัดคลื่น เหตุที่ใช้ตัวไดโพลขนาดเล็กเพราะคลื่นมีการสะท้อนน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวตรวจวัดขนาดใหญ่กว่าและหน้าที่อีกอย่างของตัวไดโพลคือรบกวนสนามไมโครเวฟ วิธีการรบกวนสนามของคลื่นไมโครเวฟทำได้โดยใช้แสงจากเลเซอร์ไดโอดส่งผ่านตัวกลางเส้นใยนำแสงไปยังตัวโฟโต้ไดโอดพร้อมกับมอดูเลตความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ทำให้เหนี่ยวนำเกิดสนามไฟฟ้าที่ขาของโฟโต้ไดโอดซึ่งปล่อยขาลอยไว้สนามไฟฟ้านี้จะไปรบกวนสนามไมโครเวฟและเครื่องตรวจวัดขยายสัญญาณจะถูกป้อนความถี่เดียวกันกับการมอดูเลตความถี่ของเลเซอร์ไดโอด จึงทำให้เครื่องตรวจวัดขยายสัญญาณตรวจวัดสัญญาณที่ตัวไดโพลนี้โดยเลือกเฉพาะสัญญาณคลื่นไมโครเวฟ ที่มีความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์มอดูเลตเท่านั้น โดยมีรูปแสดงการทำงานของระบบเป็นดังรูปที่ 5.18

จากรูปที่ 5.18 เมื่อคลื่นไมโครเวฟจากแหล่งกำเนิดมีความถี่ 9.2 จิกะเฮิร์ตซ์ ถูกส่งผ่านท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ผ่านตัวลดทอนสัญญาณ ผ่านไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์ตัวที่หนึ่ง คลื่นจะถูกแบ่งไปยังไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์ตัวที่สอง อีกส่วนถูกแบ่งไปยังสายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด ผ่านตัวไดโพลกระเจิงคลื่น ไปตกกระทบที่วัตถุ คลื่นจะสะท้อนจากวัตถุกลับเข้ามาในสายอากาศทรงพีระมิด

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ นครเชียงใหม่ เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยผ่านตัวไดโพล คลื่นจากวัตถุจะรวมกันกับสนามไฟฟ้าที่ตัวไดโพลซึ่งทำหน้าที่เป็นเสมือนตัวรับกวน คลื่นที่มาจากวัตถุ ด้วยการมอดูเลตความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ คลื่นผลลัพ์ดังกล่าวจากกระนาบของตัวไดโพลจะเดินทางมายังตัวตรวจวัดคลื่น และเกิดการแทรกสอดกับคลื่นอ้างอิงที่มาจากไดเรคชันนัลคัปเปิลเลอร์ตัวที่สอง โดยที่ตัวตรวจวัดคลื่นจะวัดสัญญาณในรูปของวีวรอยการแทรกสอดของคลื่นวัตถุและคลื่นอ้างอิง สัญญาณถูกส่งต่อไปยังเครื่องตรวจวัดและขยายสัญญาณ เครื่องนี้ทำหน้าที่เลือกสัญญาณที่มีความถี่เดียวกันกับความถี่ที่มอดูเลตที่ตัวไดโพล เมื่อสแกนวัตถุแต่ละครั้งสัญญาณที่วัดได้จะเปลี่ยนแปลงอิมปลิจูดและเฟสตามระยะของวัตถุและมุมของคลื่นอ้างอิงที่ตัวปรับเฟส ระบบการทำงานของชุดสแกนเป็นไปอย่างอัตโนมัติโดยใช้สเต็ปปีงมอเตอร์ 2 ตัวสำหรับเลื่อนวัตถุและเลื่อนตัวปรับเฟส ซึ่งควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ส่วนภาคบันทึกผลจะถูกบันทึกข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์เช่นกัน ข้อมูลที่บันทึกอยู่ในรูปของเมตริกซ์ ในการสร้างภาพกลับมาโดยอาศัยคอมพิวเตอร์ในการคำนวณการแปลงเฟรส์เนล



รูปที่ 5.19 แสดงชุดอุปกรณ์ การสร้างภาพวัตถุด้วยคลื่นไมโครเวฟ

## 5.5 การทดลองบันทึกข้อมูลฮอโลแกรม

ในงานวิจัยนี้การบันทึกฮอโลแกรมใช้เทคนิคการกระเจิงคลื่นกำหนดระยะวัตถุถึงกระนาบฮอโลแกรมเป็นไปตามเงื่อนไขของเฟรส์ซึ่งได้กล่าวโดยละเอียดแล้วในบทที่ 4 สำหรับวิธีการทดลองวัดสัญญาณคลื่นจากวัตถุ ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 5.18 วัตถุที่ใช้ทดลองคือ วัตถุแท่งสี่เหลี่ยมยาวและวัตถุรูปตัว X ซึ่งจะกล่าวต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.5.1 การบันทึกข้อมูลของวัตถุแท่งสี่เหลี่ยมยาว

การทดลองครั้งที่ 1 โดยใช้วัตถุทดลองมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมยาวจำนวน 1 แท่ง มีขนาดความกว้าง 4.5 เซนติเมตร ความสูงของแท่งสี่เหลี่ยมสูงมากซึ่งไม่มีผลต่อสัญญาณในการเลื่อนตำแหน่งวัตถุในแนวตั้ง (แกน y) จากรูปที่ 5.10 (ก) กำหนดระยะห่างจากระนาบวัตถุถึงระนาบไดโพล เท่ากับ 100 เซนติเมตร การสแกนตำแหน่งวัตถุครั้งละ 10.8 มิลลิเมตร และปรับระยะแผ่นสะท้อนคลื่นที่ตัวปรับเฟสครั้งละ 7.8 มิลลิเมตร เพื่อกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นอ้างอิงทำมุม 90 องศา (ดูรายละเอียดหัวข้อ 5.2.8) เริ่มสแกนจากตำแหน่งที่ 1 ถึง 25 จากบริเวณกลางฮอร์นไปด้านซ้ายของฮอร์น ค่าของสัญญาณถูกบันทึกด้วยคอมพิวเตอร์

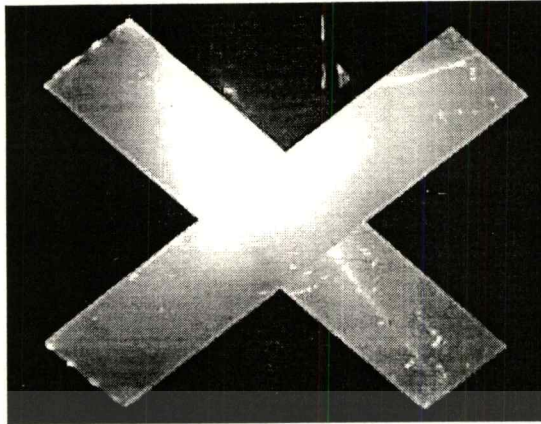
การทดลองครั้งที่ 2 ใช้วัตถุและเงื่อนไขเดียวกันกับการทดลองครั้งที่ 1 โดยเริ่มสแกนจากตำแหน่งที่ 1 ถึง 25 จากบริเวณกลางฮอร์นไปด้านขวาของฮอร์น

การทดลองครั้งที่ 3 ใช้วัตถุชนิดเดียวกันกับการทดลองครั้งที่ 1 จำนวน 1 แท่งวัตถุ เปลี่ยนการสแกนวัตถุเป็นครั้งละ 5.4 มิลลิเมตร และปรับระยะแผ่นสะท้อนคลื่นที่ตัวปรับเฟสครั้งละ 3.9 มิลลิเมตร ซึ่งการปรับระยะการสแกนและปรับแผ่นสะท้อนคลื่นลดลงครึ่งหนึ่งทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นอ้างอิงทำมุม 90 องศาเท่าเดิมแต่จำนวนครั้งในการสแกนเพิ่มขึ้นเป็น 88 ครั้ง โดยเริ่มสแกนจากซ้ายไปขวาของฮอร์น

การทดลองครั้งที่ 4 ใช้วัตถุชนิดเดียวกันกับการทดลองครั้งที่ 1 จำนวน 2 แท่ง วางห่างกันเป็นระยะ 8 เซนติเมตร ขั้นตอนการทดลองทำซ้ำเช่นเดียวกับครั้งที่ 3

### 5.5.2 การบันทึกข้อมูลของวัตถุรูปตัว X

วัตถุที่ใช้คือแผ่นอลูมิเนียมรูปตัว X ขนาด 30 x 40 ตารางเซนติเมตรและความกว้างของตัว X เท่ากับ 6 เซนติเมตร ดังรูปที่ 5.20 โดยกำหนดระยะห่างจากระนาบวัตถุถึงระนาบไดโพล เท่ากับ 100 เซนติเมตร การสแกนตำแหน่งวัตถุครั้งละ 5.4 มิลลิเมตร และปรับระยะแผ่นสะท้อนคลื่นที่ตัวปรับเฟสครั้งละ 1.95 มิลลิเมตร เพื่อกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นอ้างอิงทำมุม 30 องศา (ดูรายละเอียดหัวข้อ 5.2.8) ทำการสแกนวัตถุรูปตัว X จำนวน 64 x 64 จุด ด้วยสเต็ปปีงมอเตอร์ และบันทึกค่าของสัญญาณแบบอัตโนมัติโดยใช้ ภาษา C ++ ควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์และบันทึกผลตามลำดับ



รูปที่ 5.20 แสดงวัตถุโลหะรูปตัว X

### 5.6 วิธีการสร้างภาพของวัตถุกลับมาโดยวิธีดิจิทัล

ในการบันทึกข้อมูลฮอโลแกรมทางแสงทำได้โดยการใช้ฟิล์มบันทึกที่ไวต่อความเข้มของการแทรกสอดบนฟิล์ม ส่วนการบันทึกฮอโลแกรมด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยทั่วไปจะบันทึกโดยวิธีทางดิจิทัลและเวลาสร้างภาพกลับมาต้องใช้วิธีดิจิทัลเช่นกัน สำหรับการบันทึกฮอโลแกรมทางไมโครเวฟเป็นการบันทึกข้อมูลแบบสุ่มข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Sampling Process) ข้อมูลที่บันทึกจัดเก็บในรูปเมตริกซ์  $N \times N$  ข้อมูล ในงานวิจัยนี้การบันทึกฮอโลแกรมใช้หลักการเดียวกับเลเซอร์-ยูเพอเทนิคส์และเงื่อนไขของเฟรสเนล กล่าวคือใช้คลื่นอ้างอิงอยู่นอกแกนคลื่นและเป็นคลื่นระนาบทำมุมกับแกนคลื่น 30 องศา หลังจากการบันทึกฮอโลแกรม ขั้นตอนต่อไปนำข้อมูลของเมตริกซ์ที่ได้จากการสแกนจำนวน  $N \times N$  ข้อมูลซึ่งเปรียบเทียบกับสมการที่ (4.7) แสดงถึงอัมพลิจูดและเฟสที่ถูกบันทึกเป็นรีวอร์อยการแทรกสอดบนฮอโลแกรมของคลื่นอ้างอิงและคลื่นวัตถุตามลำดับประกอบด้วยสี่เทอม ทำการแปลงฟูเรียร์ของเฟรสเนลฮอโลแกรมดังสมการ

$$I(x', y') = \int \int_{-\infty}^{\infty} B t_f(x, y) \exp[j(\pi / \lambda z)(x^2 + y^2)] \exp[-j2\pi(x'x + y'y)] dx dy \quad (5.2)$$

$I$  คือฟังก์ชันคลื่นที่ระนาบของภาพ (Image plane) ที่ทำฟูเรียร์ทรานฟอร์มของเฟรสเนลฮอโลแกรม

$t_f$  คือค่าความเข้มของคลื่นวัตถุและคลื่นอ้างอิงที่วัดโดยตัวตรวจวัด

$B$  คืออัมพลิจูดของคลื่นระนาบที่ใช้ในการสร้างภาพกลับ

$z$  เป็นระยะจากระนาบตรวจวัด ไปยังจุดที่ต้องการให้เกิดภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งความเข้มของภาพที่ปรากฏหาได้จาก  $I \cdot I^*$

การแปลงภาพกลับมาโดยนำข้อมูลที่ตรวจวัดได้แต่ละจุดจากการสแกนวัตถุเฉพาะวัตถุรูปตัว X ดังกล่าวไปเขียนลงในโปรแกรมแมทซ์แล็บ (Mathlab) ในรูปของเมตริกซ์ ทำการแปลงเป็นฟูเรียร์ของข้อมูลเฟสเนลซอโลแกรมซึ่งมีรายละเอียด โปรแกรมในภาคผนวก ข. ซึ่งขนาดของกรอบรูปภาพและรูปภาพมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$L_1 = M\lambda Z/L_H \quad (5.3)$$

$L_1$  คือ ขนาดของกรอบภาพ

$M$  คือจำนวนจุดในการสแกน

$\lambda$  เป็นความยาวคลื่นที่มาจากวัตถุ

$Z$  คือระยะวัตถุถึงฮอโลแกรม

$L_H$  คือขนาดฮอโลแกรม

## 5.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการหารูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิดซึ่งใช้เทคนิคการกระเจิงคลื่นที่ตัวไดโพลขั้วดัดของวิธีนี้คือใช้พื้นที่ในการทดลองในห้องขนาดเล็กได้ ส่วนวิธีการสร้างภาพของวัตถุด้วยคลื่นไมโครเวฟในงานวิจัยนี้ ได้ใช้วิธีการวัดสนามคลื่นวัตถุที่ตัวไดโพลกระเจิงคลื่น ด้วยตัวตรวจวัดคลื่น เป็นวิธีการบันทึกอัมพลิจูดและเฟสของคลื่นที่มาจากวัตถุโดยตรงในรูปของความเข้มที่ระยะใกล้รวมกับคลื่นอ้างอิงโดยสามารถกำหนดมุมในการส่งคลื่นอ้างอิงไปยังระนาบฮอโลแกรมได้ การเพิ่มรายละเอียดของภาพให้ดีขึ้นทำได้โดยการเลื่อนตัวไดโพลเข้าใกล้วัตถุมากขึ้น โดยไม่มีผลการสะท้อนคลื่นของตัวไดโพลเนื่องจากตัวไดโพลมีขนาดเล็ก

ดังนั้นฮอโลแกรมที่บันทึกไว้จะให้รายละเอียดของวัตถุได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น สามารถทำการสร้างภาพกลับมาด้วยวิธีดิจิทัลโดยใช้คอมพิวเตอร์จะมีความสมบูรณ์ของภาพมากยิ่งขึ้น

## บทที่ 6

### ผลของงานวิจัย

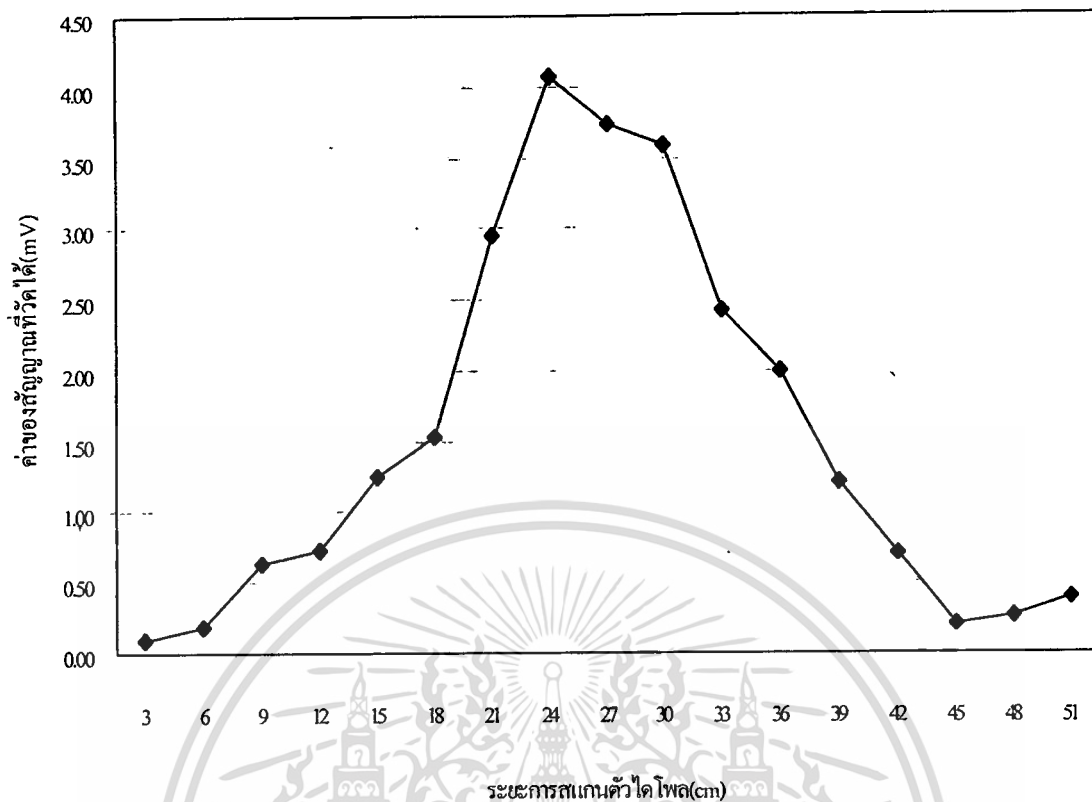
บทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดและขั้นตอนในการทดลองผลที่ได้จากการทดลอง ตลอดจนการอธิบายและผลสรุป

#### 6.1 ผลการทดลองการหารูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด

การทดลองนี้เป็นการศึกษารูปแบบการแพร่ของคลื่นเมื่อใช้สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด โดยทำการหาค่าของสัญญาณที่กระเจิงกลับจากตัวไดโพลกระเจิงคลื่น ในการทดลองนี้จัดอุปกรณ์การทดลองไว้ดังรูปที่ 5.17 และเริ่มทำการทดลองโดยการส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมและสายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิดบริเวณด้านปากฮอร์นมีตัวไดโพลกระเจิงคลื่นหนึ่งตัวซึ่งทำหน้าที่รบกวนสนามไฟฟ้าที่มาจากแหล่งกำเนิด ที่ตัวไดโพลคลื่นจะถูกมอดูเลตความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ สัญญาณที่กระเจิงกลับจากตัวไดโพลกระเจิงจะถูกเลือกสัญญาณไว้ด้วยความถี่เดียวกันกับความถี่ที่มอดูเลตเข้าไป แล้วทำการบันทึกผล โดยมีการสแกนตำแหน่งตัวไดโพลกระเจิงคลื่นในแนวนอนกึ่งกลางฮอร์นจากซ้ายไปขวาและแนวตั้งกึ่งกลางฮอร์นจากบนลงล่างโดยสแกนอย่างละ 15 ตำแหน่ง ห่างกันตำแหน่งละ 3 เซนติเมตร บันทึกผลของสัญญาณและนำข้อมูลมาเขียนกราฟ 2 ชุด ในลำดับสุดท้ายทำการสแกนตลอดพื้นที่หน้าฮอร์น จำนวน  $15 \times 15$  ครั้ง โดยเริ่มวัดสัญญาณจุดแรกที่ตำแหน่งระยะห่างด้านบน 3 เซนติเมตร ด้านข้างขวามือของปากฮอร์น 3 เซนติเมตร จุดที่สองระยะห่างด้านบน 3 เซนติเมตร ด้านข้างขวามือของปากฮอร์น 6 เซนติเมตรตามลำดับ จากนั้นนำสัญญาณซึ่งเป็นข้อมูลของความเข้ม บันทึกผลและเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าของสัญญาณที่วัดได้ (mV) กับระยะการสแกนตัวไดโพล (cm) ตามลำดับ

ตารางที่ 6.1 แสดงผลของสัญญาณที่วัดได้กับระยะการสแกนตัวไดโพลในแนวนอนกึ่งกลางฮอร์น  
ครั้งละ 3 เซนติเมตรเริ่มจากด้านขวาไปด้านซ้ายของหน้าฮอร์น

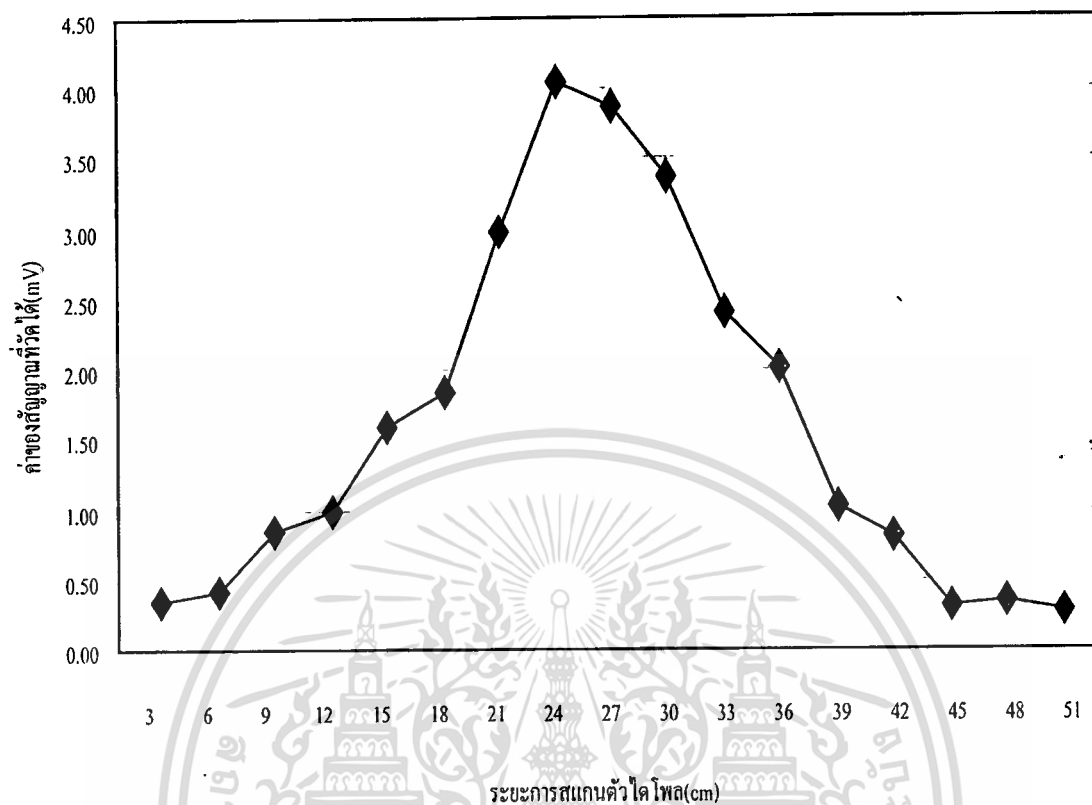
ระยะการสแกนตัวไดโพล (cm)	ค่าของสัญญาณที่วัดได้ (mV)
3	0.09
6	0.18
9	0.63
12	0.73
15	1.24
18	1.53
21	2.95
24	4.07
27	3.74
30	3.59
33	2.43
36	2.00
39	1.22
42	0.71
45	0.21
48	0.26
51	0.40



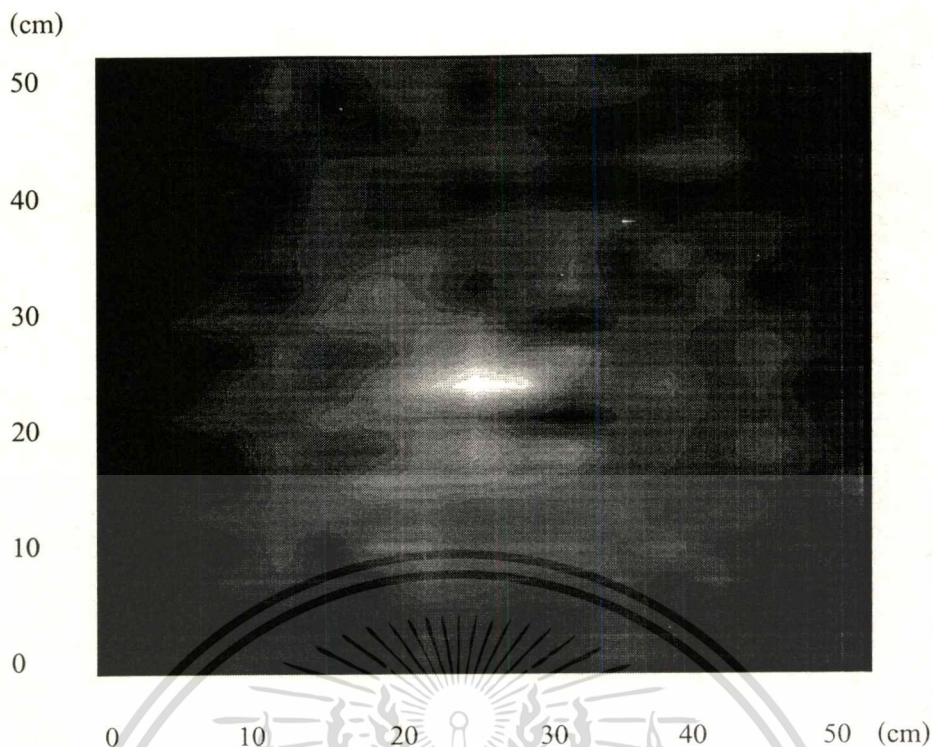
รูปที่ 6.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าของสัญญาณที่วัดได้กับระยะการสแกนตัวไดโพลเมื่อทำการ สแกนตัวไดโพลในแนวนอนบริเวณกึ่งกลางฮอร์นครั้งละ 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 6.2 แสดงผลของสัญญาณที่วัดได้กับตำแหน่งการสแกนตัวไดโพลในแนวตั้งกึ่งกลางฮอร์น  
ครั้งละ 3 เซนติเมตรเริ่มจากด้านบนลงด้านล่างของหน้าฮอร์น

ระยะการสแกนตัว ได โพล (cm)	ค่าของสัญญาณที่วัดได้(mV)
3	0.25
6	0.32
9	0.78
12	0.95
15	1.57
18	1.84
21	3.04
24	4.15
27	3.95
30	3.42
33	2.43
36	2.01
39	0.98
42	0.73
45	0.22
48	0.27
51	0.18



รูปที่ 6.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลของสัญญาณกับตำแหน่งตัว ไค โพลเมื่อทำการ สแกนตัว ไค โพลในแนวตั้งกึ่งกลางสอรันครั้งละ 3 เซนติเมตร



รูปที่ 6.3 แสดงรูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศที่สร้างขึ้นแบบตัดขวาง



รูปที่ 6.4 แสดงรูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศที่สร้างขึ้นแบบพื้นผิว 3มิติ

รูปที่ 6.3 และ 6.4 ได้จากการเขียนกราฟระหว่างความเข้มกับตำแหน่งการสแกนตัวไดโพล โดยการสแกนในแนวตั้งและแนวนอน จำนวน  $15 \times 15$  จุดแต่ละจุดห่างกัน 3 เซนติเมตร จะสังเกตเห็นว่าบริเวณตรงกลางของกราฟจะมีความเข้มมากที่สุด แสดงว่าบริเวณกึ่งกลางฮอร์นจะมีทิศทางการแพร่คลื่นได้มากที่สุด

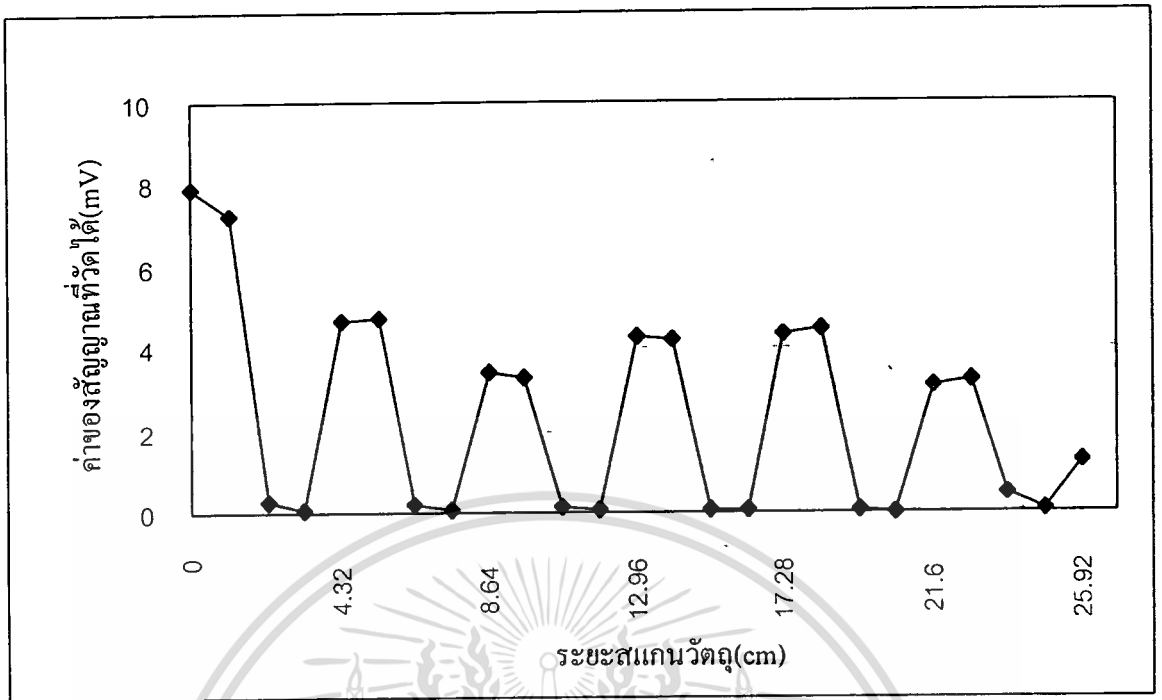
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 ผลการทดลองบันทึกข้อมูลฮोलแกรม

ในการทดลองวัดสัญญาณคลื่นจากวัตถุได้กล่าวถึงหลักการและการจัดอุปกรณ์ที่จะทดลองไว้ในรูปที่ 5.18 และวิธีการทดลองวัดสัญญาณจากการสแกนวัตถุโดยใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมการสแกนวัตถุและบันทึกผลแบบอัตโนมัติและนำผลที่ได้มาเขียนกราฟและแสดงรูปภาพที่สร้างกลับมีรายละเอียดผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 6.3 แสดงผลของสัญญาณที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดสัญญาณเมื่อสแกนวัตถุในแนวนอน ครั้งละ 10.8 มิลลิเมตรจากบริเวณกลางฮอร์น ไปด้านซ้าย จำนวน 1 x 25 จุด

ระยะสแกนวัตถุ (cm)	ค่าของสัญญาณที่วัดได้ (mV)
0	7.89
1.08	7.25
2.16	0.29
3.24	0.04
4.32	4.68
5.4	4.75
6.48	0.2
7.56	0.06
8.64	3.45
9.72	3.26
10.8	0.13
11.88	0.06
12.96	4.3
14.04	4.2
15.12	0.06
16.2	0.05
17.28	4.35
18.36	4.5
19.44	0.05
20.52	0.02
21.6	3.12
22.68	3.2
23.76	0.44
24.84	0.04
25.92	1.25

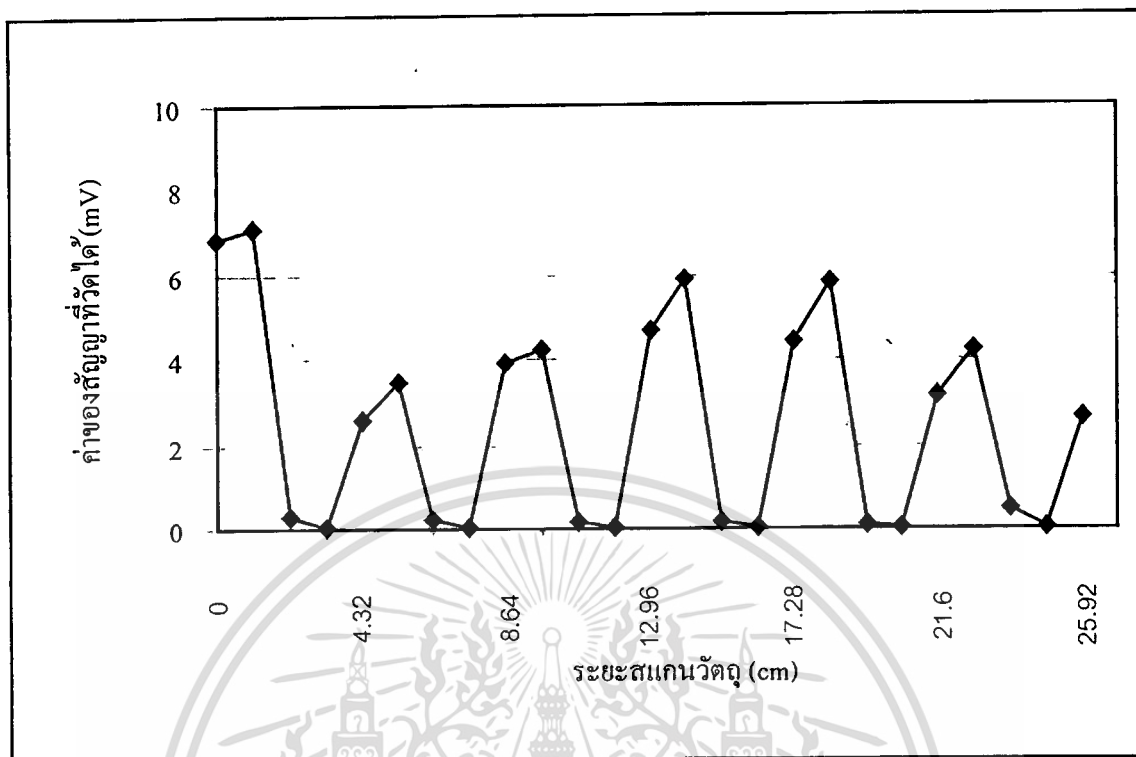


รูปที่ 6.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าของสัญญาณที่วัดได้กับระยะสแกนวัดดูในแนวนอน  
ครั้งละ 10.8 มิลลิเมตร จากบริเวณกลางฮอว์นไปด้านซ้ายของฮอว์น

ตารางที่ 6.4 แสดงผลของสัญญาณที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดสัญญาณเมื่อสแกนวัตถุในแนวนอน  
ครั้งละ 10.8 มิลลิเมตรจากบริเวณกลางฮอร์นไปด้านขวา จำนวน 1 x 25 จุด

ระยะสแกนวัตถุ (cm)	ค่าของสัญญาณที่วัดได้ (mV)
0	6.85
1.08	7.12
2.16	0.34
3.24	0.07
4.32	2.63
5.4	3.51
6.48	0.26
7.56	0.06
8.64	3.93
9.72	4.25
10.8	0.16
11.88	0.06
12.96	4.73
14.04	5.95
15.12	0.22
16.2	0.05
17.28	4.44
18.36	5.89
19.44	0.15
20.52	0.04
21.60	3.2
22.68	4.24
23.76	0.52
24.84	0.05
25.92	2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าของสัญญาณที่วัดได้กับระยะสแกนวัดดูในแนวนอน  
ครึ่งละ 10.8 มิลลิเมตร จากบริเวณกลางฮอร์นไปด้านขวาของฮอร์น

ตารางที่ 6.5 แสดงผลของสัญญาณที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดสัญญาณเมื่อสแกนวัตถุในแนวนอน  
ครั้งละ 5.4 มิลลิเมตร จำนวน 1 x 88 จุดโดยใช้วัตถุ 1 แท่ง

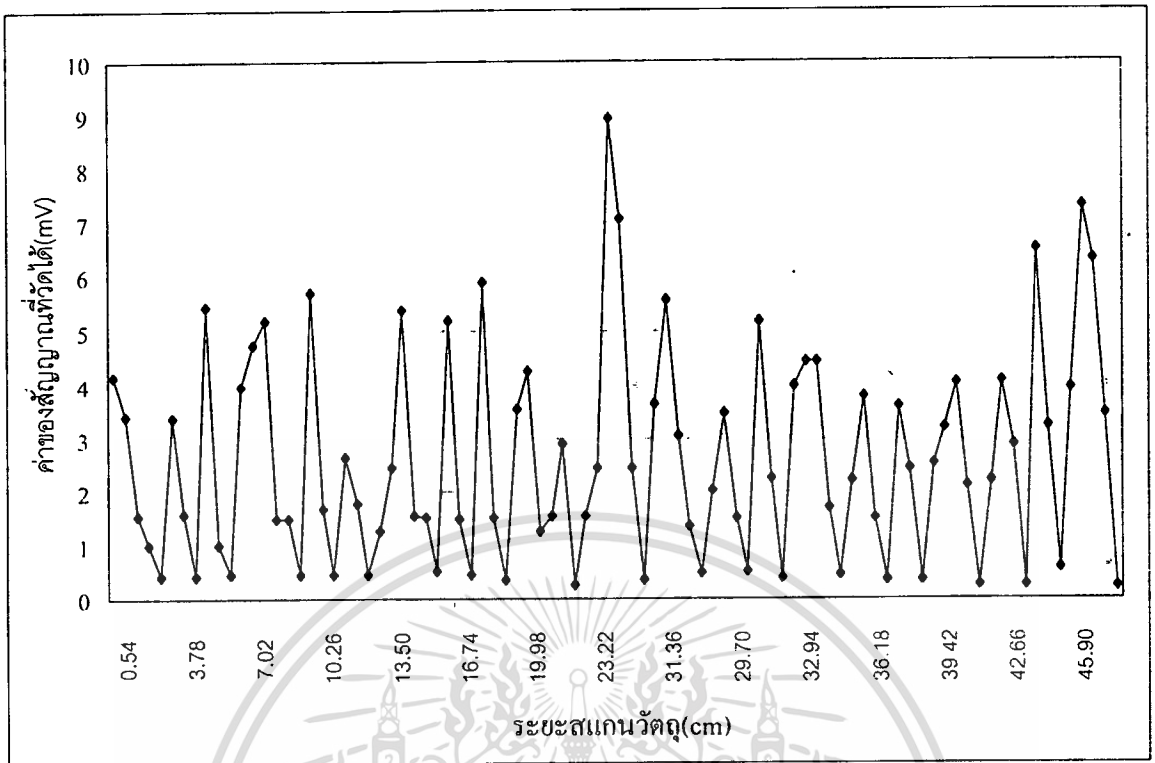
ระยะสแกนวัตถุ (cm)	ค่าของสัญญาณที่วัดได้ (mV)	ระยะสแกนวัตถุ (cm)	ค่าของสัญญาณที่วัดได้ (mV)
0	4.15	13.5	5.37
0.54	3.41	14.04	1.55
1.08	1.56	14.58	1.50
1.62	0.99	15.12	0.50
2.16	0.41	15.66	5.17
2.70	3.38	16.2	1.48
3.24	1.58	16.74	0.46
3.78	0.41	17.28	5.87
4.32	5.44	17.82	1.51
4.86	0.99	18.36	0.34
5.40	0.46	18.9	3.54
5.94	3.97	19.44	4.25
6.48	4.73	19.98	1.25
7.02	5.17	20.52	1.54
7.56	1.48	21.06	2.90
8.10	1.48	21.6	0.26
8.64	0.46	22.14	1.54
9.18	5.68	22.68	2.45
9.72	1.67	23.22	8.95
10.26	0.46	23.76	7.06
10.80	2.65	24.3	2.45
11.34	1.75	24.84	0.34
11.88	0.44	25.38	3.62
12.42	1.25	25.92	5.58
12.96	2.45	26.46	3.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.5 (ต่อ)

ระยะสแกนวัตถุ (cm)	ค่าของสัญญาณที่วัดได้ (mV)	ระยะสแกนวัตถุ (cm)	ค่าของสัญญาณที่วัดได้ (mV)
27	1.36	37.26	2.45
27.54	0.48	37.8	0.35
28.08	2.04	38.34	2.54
28.62	3.49	38.88	3.22
29.16	1.50	39.42	4.04
29.7	0.50	39.96	2.11
30.24	5.17	40.5	0.26
30.78	2.24	41.04	2.23
31.32	0.4	41.58	4.10
31.86	3.99	42.12	2.90
32.4	4.44	42.66	0.26
32.94	4.43	43.2	6.52
33.48	1.70	43.74	3.24
34.02	0.44	44.28	0.57
34.56	2.21	44.82	3.94
35.1	3.81	45.36	7.33
35.64	1.51	45.9	6.33
36.18	0.34	46.44	3.49
36.72	3.59	46.98	0.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าของสัญญาณที่วัดได้กับระยะสแกนวัดดูในแนวนอน ครั้งละ 5.4 มิลลิเมตร โดยใช้วัตถุ 1 แท่ง

ตารางที่ 6.6 แสดงผลของสัญญาณที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดสัญญาณเมื่อสแกนวัตถุในแนวนอน  
ครั้งละ 5.4 มิลลิเมตรจำนวน 1 x 88 จุด โดยใช้วัตถุ 2 แห่ง วางห่างกัน 8 เซนติเมตร

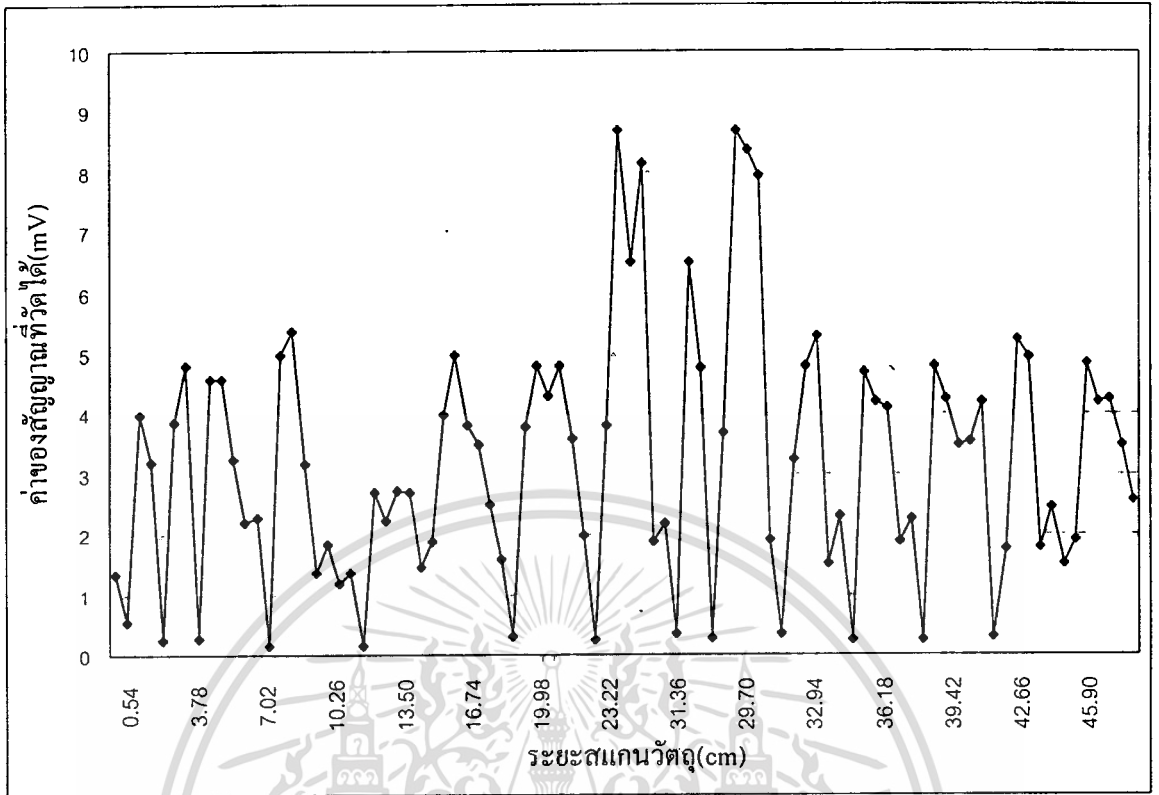
ระยะสแกนวัตถุ (cm)	ค่าของสัญญาณที่วัดได้ (mV)	ระยะสแกนวัตถุ (cm)	ค่าของสัญญาณที่วัดได้ (mV)
0	1.23	13.50	2.70
0.54	0.54	14.04	1.45
1.08	4.00	14.58	1.89
1.62	3.20	15.12	3.98
2.16	0.24	15.66	4.96
2.70	3.87	16.20	3.81
3.24	4.80	16.74	3.50
3.78	0.27	17.28	2.50
4.32	4.58	17.82	1.58
4.86	4.58	18.36	0.30
5.40	3.24	18.90	3.78
5.94	2.20	19.44	4.80
6.48	2.27	19.98	4.30
7.02	0.15	20.52	4.80
7.56	4.96	21.06	3.60
8.10	5.37	21.60	1.98
8.64	3.16	22.14	0.25
9.18	1.36	22.68	3.80
9.72	1.82	23.22	8.70
10.26	1.20	23.76	6.50
10.80	1.36	24.30	8.15
11.34	0.14	24.84	1.87
11.88	2.70	25.38	2.18
12.42	2.22	25.92	0.35
12.96	2.73	26.46	6.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.6 (ต่อ)

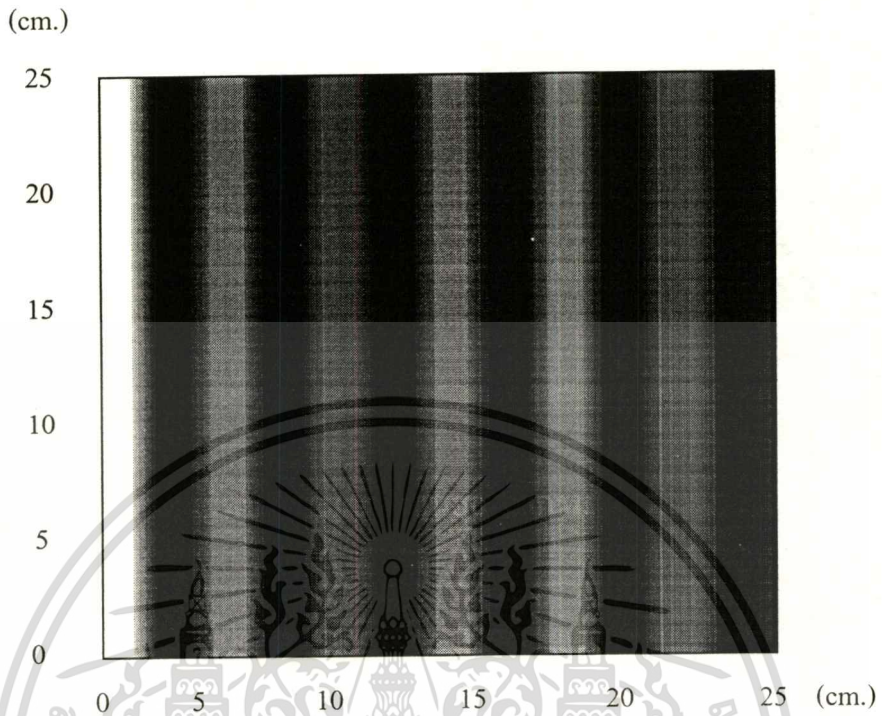
ระยะสแกนวัตถุ (cm)	ค่าของสัญญาณที่วัดได้ (mV)	ระยะสแกนวัตถุ (cm)	ค่าของสัญญาณที่วัดได้ (mV)
27.00	4.78	37.26	0.24
27.54	0.28	37.80	4.80
28.08	3.70	38.34	4.25
28.62	8.68	38.88	3.50
29.16	8.36	39.42	3.54
29.70	7.95	39.96	4.20
30.24	1.90	40.50	0.30
30.78	0.35	41.04	1.76
31.32	3.25	41.58	5.25
31.86	4.80	42.12	4.95
32.40	5.30	42.66	1.78
32.94	1.50	43.20	2.45
33.48	2.30	43.74	1.50
34.02	0.24	44.28	1.90
34.56	4.70	44.82	4.86
35.10	4.20	45.36	4.20
35.64	4.10	45.90	4.25
36.18	1.88	46.44	3.50
36.72	2.26	46.98	2.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

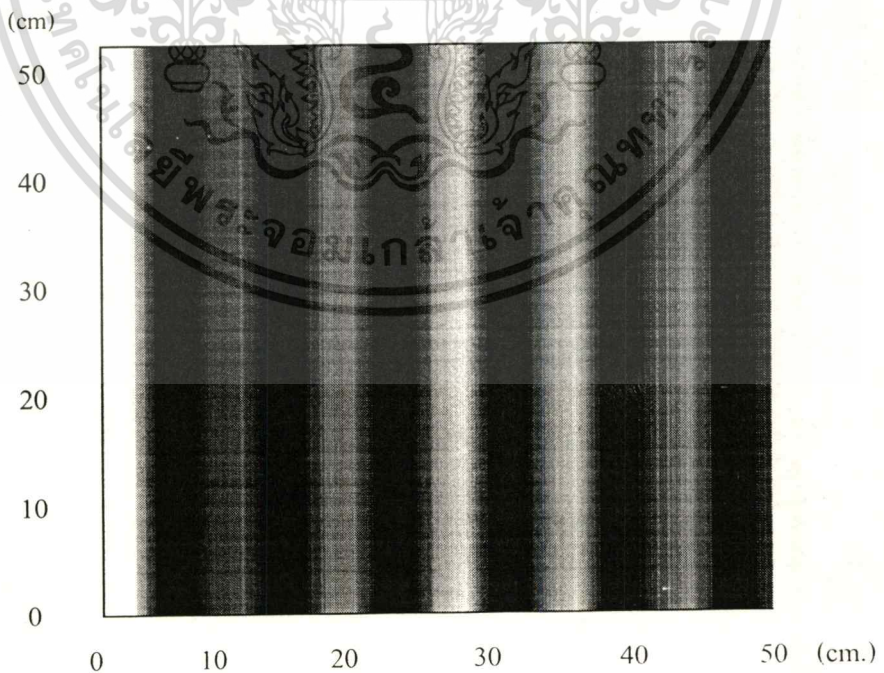


รูปที่ 6.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าของสัญญาณที่วัดได้กับระยะสแกนวัดดูเมื่อสแกนในแนววนอนครั้งละ 5.4 มิลลิเมตร โดยใช้วัตถุ 2 แท่ง วางวัตถุห่างกัน 8 เซนติเมตร

### 6.3 ผลของการกระจายความเข้มของสัญญาณบนฮอโลแกรม

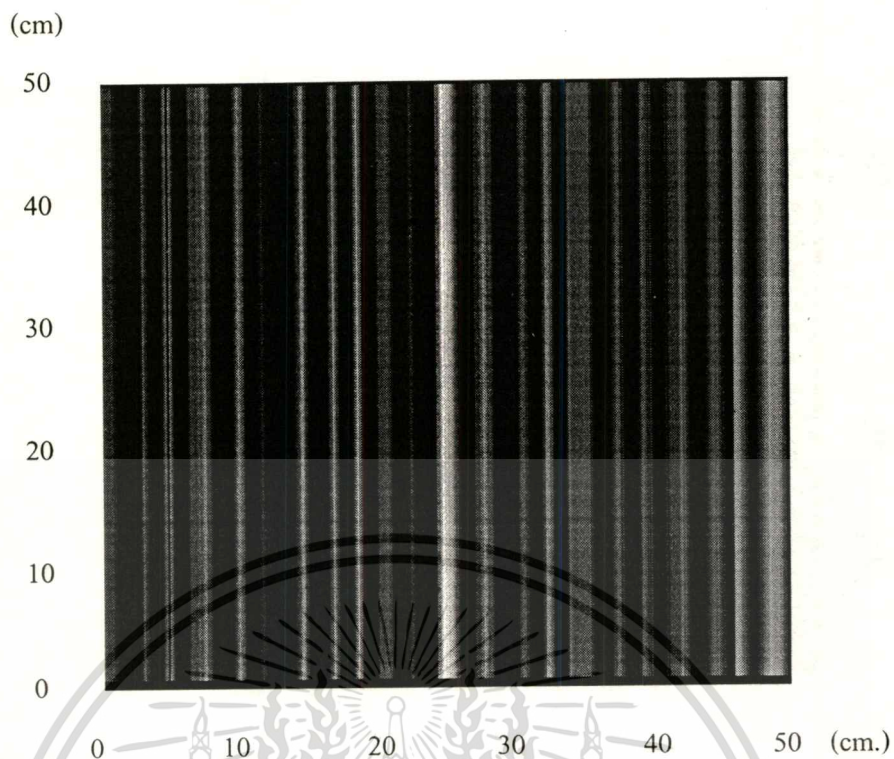


รูปที่ 6.9 แสดงการกระจายความเข้มของสัญญาณบนระนาบฮอโลแกรมสำหรับการสแกนวัตถุแท่งสี่เหลี่ยมยาว 1 แท่ง จำนวน  $25 \times 25$  จุด จากบริเวณกึ่งกลางฮอรั่นไปด้านซ้าย

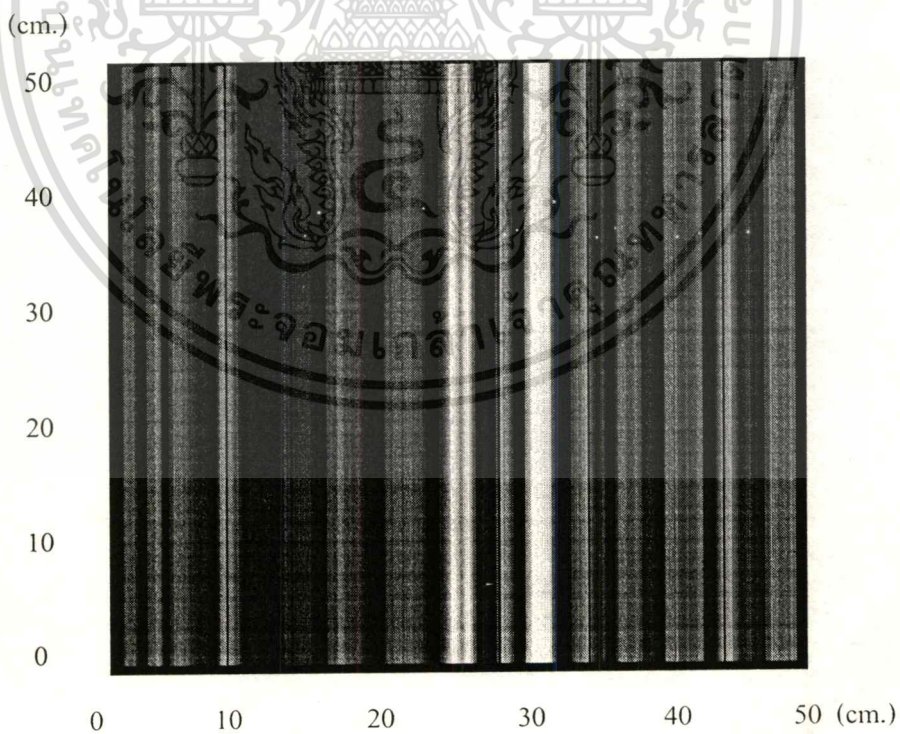


รูปที่ 6.10 แสดงการกระจายความเข้มของสัญญาณบนระนาบฮอโลแกรมสำหรับการสแกนวัตถุแท่งสี่เหลี่ยมยาว 1 แท่ง จำนวน  $25 \times 25$  จุด จากบริเวณกึ่งกลางฮอรั่นไปด้านขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.11 แสดงการกระจายความเข้มของสัญญาณบนระนาบฮอโลแกรมสำหรับการสแกนวัตถุแท่งสี่เหลี่ยมยาว 1 แท่ง จำนวน 88 x 88 จุด



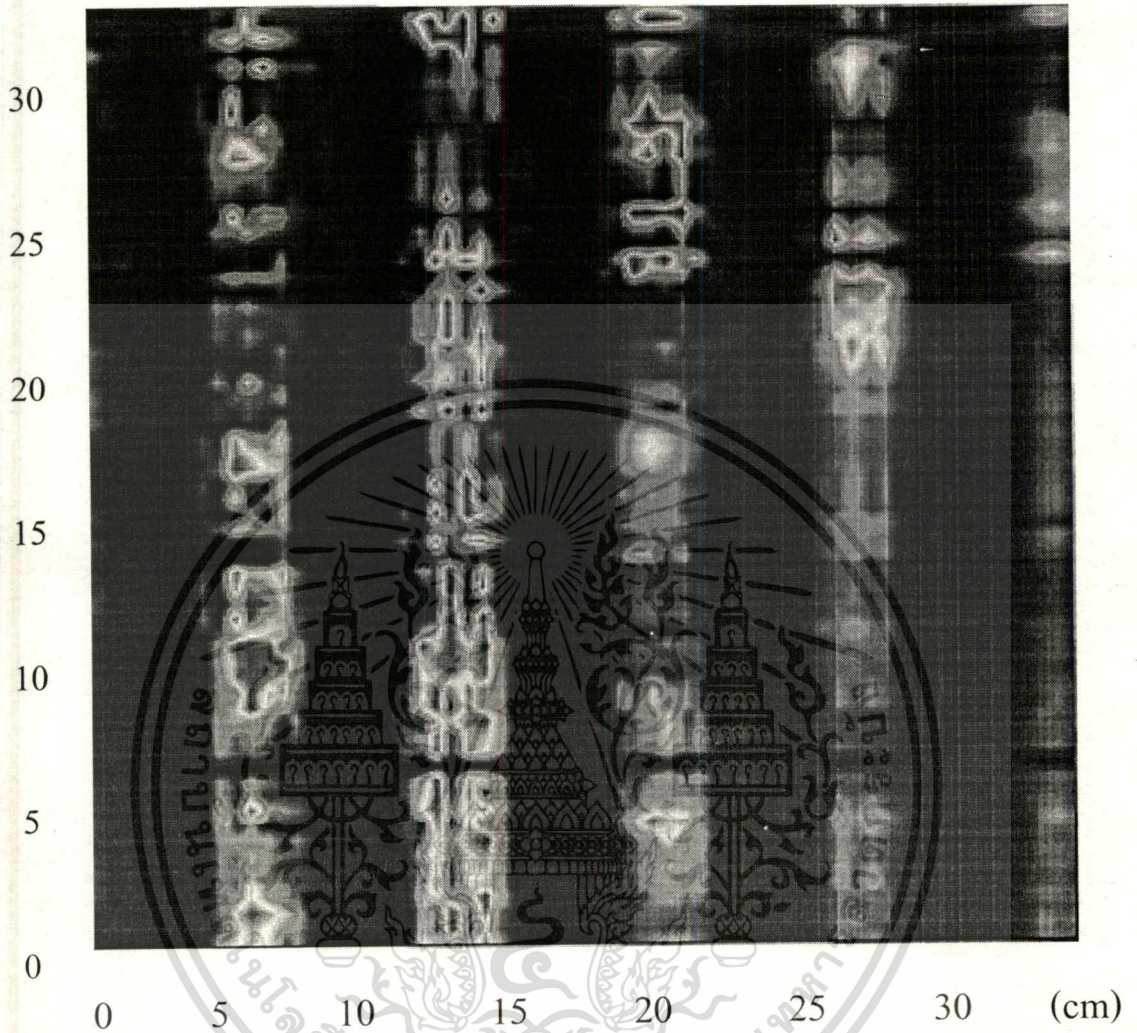
รูปที่ 6.12 แสดงการกระจายความเข้มของสัญญาณบนระนาบฮอโลแกรมสำหรับการสแกนวัตถุแท่ง

สี่เหลี่ยมยาว 2 แท่ง วางห่างกัน 8 เซนติเมตร จำนวน 88 x 88 จุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

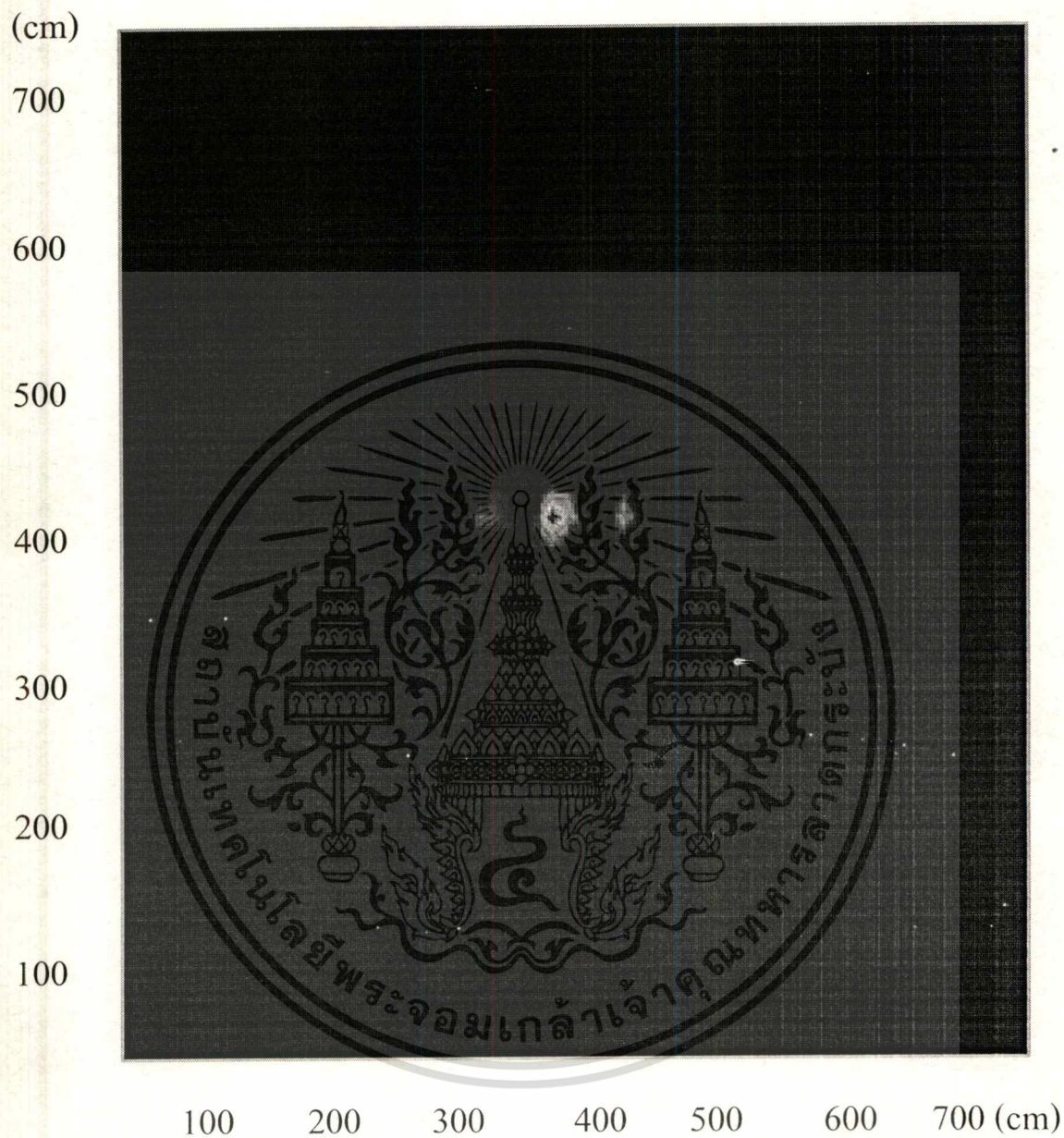
(cm)



รูปที่ 6.13 แสดงการกระจายความเข้มของสัญญาณบนระนาบฮอโลแกรมสำหรับการสแกนวัตถุรูปตัว X จำนวน 64 x 64 จุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 6.4 ผลจากการทำเฟรส์เนลทรานสฟอร์มของฮอโลแกรม



รูปที่ 6.14 แสดงภาพที่ได้จากการทำเฟรส์เนลทรานสฟอร์มของฮอโลแกรมสำหรับการสแกนวัตถุรูป  
ตัว X จำนวน 64 x 64 จุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.5 สรุปผล

จากผลการทดลองหารูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศจะสังเกตเห็นว่าบริเวณที่มีสัญญาณมากที่สุดส่วนมากจะอยู่บริเวณกลางฮอร์น ดังรูปที่ 6.3 และ รูปที่ 6.4 ซึ่งเป็นการออกแบบสายอากาศที่มีประสิทธิภาพในระดับหนึ่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ สำหรับการทดลองบันทึกข้อมูลฮอโลแกรมของวัตถุแท่งสี่เหลี่ยมยาว จำนวน 1 แท่ง สแกนครั้งละ 10.8 มิลลิเมตร ทำการทดลอง 2 ครั้ง กรณีหลังโดยมีเงื่อนไขของการสแกนวัตถุ 1 แท่ง และ 2 แท่งซึ่งวางห่างกัน 8 เซนติเมตร สแกนครั้งละ 5.4 มิลลิเมตร ส่วนคลื่นอ้างอิงใช้เงื่อนไขเดียวกันคือ ทำมุม 90 องศาที่ระนาบฮอโลแกรม ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปกราฟที่ 6.5 ถึง 6.8 จะเห็นว่าค่าที่แสดงในรูปกราฟมีลักษณะที่ไม่ต่อเนื่องแบบสุ่มคือมีค่าสูงและค่าต่ำซึ่งชี้ให้เห็นว่ามีการแทรกสอดกันที่บริเวณต่างๆบนฮอโลแกรม และเมื่อนำข้อมูลของกราฟจำนวน 1 ชุด  $N$  ข้อมูล มาเขียนกราฟใหม่จำนวน  $N$  ชุดซ้ำๆกัน เพื่อดูความเข้มของสัญญาณบนฮอโลแกรมซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6.9-6.12 เหตุผลที่เขียนกราฟจำนวน  $N$  ชุดซ้ำๆกัน เพราะประมาณได้ว่าการสแกนในแนวแกนตั้งไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณมากนัก เนื่องจากวัตถุแท่งสี่เหลี่ยมยาวมาก ส่วนการบันทึกภาพของวัตถุรูปตัว  $X$  บนระนาบฮอโลแกรมทำการบันทึกโดยสแกนจำนวน  $64 \times 64$  จุด นำข้อมูลโดยตรงจากเครื่องตรวจวัดและขยายสัญญาณมาแสดงในรูปการกระจายความเข้มของสัญญาณดังรูปที่ 6.13 และทำเฟสเนลทรานฟอร์มของฮอโลแกรมแสดงได้ดังรูปที่ 6.14 แสดงให้เห็นลักษณะของภาพเสมือนและภาพจริงที่อยู่ด้านซ้ายและด้านขวาซึ่งมีขนาดเล็กมากเป็นผลเนื่องมาจากกรอบของรูปภาพมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับภาพ สัมพันธ์กันด้วยสมการที่ (5.3) ขนาดของกรอบรูปภาพ ( $L_x$ ) จะแปรตามระยะวัตถุถึงฮอโลแกรม ( $Z$ ) ความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) จำนวนจุดในการสแกน ( $M$ ) และแปรผกผันกับขนาดฮอโลแกรมกับ  $L_H$  เป็นผลทำให้รูปตัว  $X$  มีขนาดเล็กไม่ชัดเจน

## บทที่ 7

# บทสรุป แนวทางในการพัฒนาและการประยุกต์

### 7.1 บทสรุป

งานวิจัยเรื่องระบบการสร้างภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟนี้ ใช้เทคนิคทางดิจิทัลในการบันทึกข้อมูลฮอโลแกรมและสร้างภาพกลับมา ภาพของวัตถุถูกสร้างขึ้นด้วยไมโครเวฟ ซึ่งเกิดจากระบวนการสร้างภาพของฮอโลกราฟี สำหรับฮอโลแกรมที่สร้างขึ้นใช้การบันทึกข้อมูลแบบสุ่มข้อมูลแล้วเก็บข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์ สำหรับการทดลองบันทึกข้อมูลฮอโลแกรมของวัตถุ 1 แท่ง และ 2 แท่ง เมื่อนำมาเขียนกราฟจำนวนข้อมูล  $44 \times 44$  ข้อมูลและ  $88 \times 88$  ข้อมูลจะเห็นการกระจายความเข้มเป็นริ้วรอยการแทรกสอดบนฮอโลแกรมเพียงอย่างเดียว เพื่อดูแนวโน้มของสัญญาณเท่านั้น ส่วนการทดลองบันทึกข้อมูลฮอโลแกรมวัตถุรูปตัว X ทำการสแกนวัตถุในแนวตั้งและแนวนอนจำนวน  $64 \times 64$  จุด นำข้อมูลที่บ้านทึกเขียนกราฟเพื่อแสดงการกระจายความเข้มของสัญญาณบนระนาบฮอโลแกรม ตลอดจนการสร้างภาพกลับโดยใช้โปรแกรมเมทแล็บ (Matlab Program) ซึ่งภายในโปรแกรมจะมีโปรแกรมย่อยสำหรับการคำนวณฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม ปรากฏว่ารูปภาพตัว X ที่ได้ออกมามีขนาดที่เล็กเพราะกรอบของภาพมีขนาดใหญ่ ซึ่งมีความสัมพันธ์กันระหว่างระยะทางจากระนาบฮอโลแกรมถึงระนาบที่ต้องการให้เกิดภาพดังได้กล่าวมาแล้ว สำหรับระบบที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการรบกวนสนามไมโครเวฟและม็อดูเลเตอร์ต่างๆของระบบดังต่อไปนี้

- 1) แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟชนิดกัมมันต์ไดโอด ความถี่ 9.2 จิกะเฮิร์ตซ์ กำลัง 10 มิลลิวัตต์
- 2) สายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิด ขนาดความกว้างปากฮอร์น 53.5 เซนติเมตรและยาว 64.5 เซนติเมตร เป็นโลหะทองเหลือง
- 3) ชุดไดโพลกระเจิงคลื่น ประกอบด้วยเลเซอร์ไดโอดชนิดมอดูเลตความถี่ที่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ โฟโต้ไดโอด เส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก เครื่องกำเนิดความถี่
- 4) ชุดเลื่อนตำแหน่งวัตถุด้วยสเต็ปมอเตอร์ และควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์
- 5) เครื่องตรวจวัดและขยายสัญญาณ สามารถถือคความถี่ได้สูงสุด 100 กิโลเฮิร์ตซ์ และมีการขยายสัญญาณได้สูงสุดในระดับนาโนโวลต์ ( $10^{-9}$  Volt)
- 6) ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ได้แก่ ไตรเร็คชันนัลคัปเปิลเลอร์
- 7) วัตถุทดสอบ เป็นแท่งอลูมิเนียมสี่เหลี่ยม ขนาดกว้าง 4.5 เซนติเมตร ยาว 2.5 เมตรและแผ่นอลูมิเนียม รูปตัว X ขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 8) แผงควบคุมคลื่นไมโครเวฟ หนา 9.5 มิลลิเมตร มีค่าลดทอนการสะท้อน 12 เดซิเบล
- 9) ตัวตรวจวัดสัญญาณคลื่นไมโครเวฟชนิดรีซอเนเตอร์ไดโอด
- 10) ระบบประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ ประกอบด้วย คอมพิวเตอร์ CPU Pentium และซอฟต์แวร์แมทแล็บ (Matlab Software)

## 7.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น

### 7.2.1 ด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

วงจรที่ใช้ในการมอดูเลตความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ อุปกรณ์โฟโต้ไดโอดมีค่าตอบสนองของทางเวลา (Time Constant) ไม่สอดคล้องกับเลเซอร์ไดโอด ทำให้เวลาการรับสัญญาณแสงของตัวโฟโต้ไดโอดไม่ทันกับการส่งแสงของตัวเลเซอร์ไดโอด ผู้วิจัยจึงแก้ปัญหาโดยใช้อุปกรณ์ที่เป็นโมดูลสำเร็จรูปคือ เลเซอร์ไดโอดแบบมอดูเลตความถี่ และเลือกโฟโต้ไดโอดที่มีค่าตอบสนองของเวลาให้รับสัญญาณแสงได้ทันกับเลเซอร์ไดโอดและตัวที่เลือกจากการทดลองคือ MFOD71 (คุณภาพบวก ก.)

### 7.2.2 ด้านกลไกของระบบ

ระบบที่ใช้ในการสแกนวัตถุ ด้วยสเต็ปปีงมอเตอร์สองตัวและควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ สเต็ปปีงมอเตอร์ตัวที่หนึ่ง ควบคุมการเลื่อนตำแหน่งของวัตถุ ผู้วิจัยใช้เหล็กทำเกลียวที่ค่อนข้างไม่ละเอียด เมื่อเวลาเลื่อนวัตถุเกิดการสั่น ทำให้คลื่นที่สะท้อนกลับมาที่ตัวตรวจวัดผิดพลาดไปบ้าง ดังนั้นผู้วิจัยทำการแก้ปัญหานี้โดย ทำการทดลองซ้ำหลายๆ ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย ส่วนสเต็ปปีงมอเตอร์ตัวที่สอง ใช้สำหรับการเลื่อนปรับเฟสของสัญญาณให้สอดคล้องกันนั้น เมื่อเวลาหมุนจะมีการสั่นเล็กน้อยทำให้เฟสที่ปรับจะมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ผู้วิจัยทำการแก้ปัญหานี้โดยการติดไมโครมิเตอร์เข้ากับแกนหมุนเพื่อบันทึกตัวเลขที่แน่นอนอีกครั้งหนึ่งและทำการทดลองหลายๆ ครั้ง

### 7.2.3 ด้านโครงสร้างของสายอากาศ

เนื่องจากในขั้นตอนการสร้างฮอร์นทรงพีระมิดนั้น การเชื่อมต่อระหว่างชิ้นงาน ผิวไม่เรียบ ทำให้หน้าคลื่นที่ไปกระทบกับตำแหน่งดังกล่าวนั้นเกิดการผิดเพี้ยนไป แต่จากการทดลองหารูปแบบการแพร่สัญญาณคลื่นที่ได้ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

### 7.2.4 ด้านห้องทดลองไมโครเวฟ

ห้องที่ใช้ในการทดลองมีปัญหาเรื่องการสะท้อนคลื่นจากภายนอก เพราะไม่ได้ถูกออกแบบมาสำหรับงานทางไมโครเวฟโดยเฉพาะ ในการตรวจสอบรูปแบบการแพร่ของคลื่นในสายอากาศ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจจะมีสัญญาณรบกวนอื่นๆ ทำให้ผลการทดลองเกิดการคลาดเคลื่อนไปบ้าง แต่ยังคงตรวจวัดคลื่นจากวัตถุทดสอบได้

### 7.3 การพัฒนาต่อไป

ระบบที่สร้างขึ้นนี้ จะสามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการตรวจจับวัตถุได้ดียิ่งขึ้น โดยปรับปรุงในส่วนต่างๆ ของระบบดังนี้คือ

- 1) แหล่งกำเนิดคลื่น ให้มีกำลังสูงขึ้น
- 2) ลดขนาดสายอากาศแบบฮอร์นทรงพีระมิดให้กระทัดรัดแต่สามารถเก็บข้อมูลที่ทำการตรวจวัดได้ตามที่ต้องการ
- 3) ระบบสแกนวัตถุ ปรับปรุงเป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด โดยใช้ไดโพลกระเจิงคลื่นแบบอะเรย์ (Array Dipole Scatterers)
- 4) ระบบประมวลผลข้อมูลให้เป็นการตอบสนองแบบเวลาจริง (Real Time)
- 5) ห้องที่ใช้สำหรับทดลอง ควรจะเป็นห้องทดลองทางไมโครเวฟ ซึ่งจะมีการออกแบบเพื่อป้องกันคลื่นรบกวนจากภายนอกและการสะท้อนจากตำแหน่งที่ไม่ต้องการ
- 6) ใช้วัสดุคัปปลิงที่เป็นฉนวน เพื่อทำการทดสอบระบบ

### 7.4 การประยุกต์ใช้งาน

เทคนิคการใช้คลื่นไมโครเวฟในการสร้างภาพ หรือเรียกอีกอย่างว่าไมโครเวฟฮอโลกราฟี อาจจะประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางดังตัวอย่างต่อไปนี้

- 1) ภาพจำลองทางอากาศ การทำแผนที่ลักษณะภูมิประเทศ และการสร้างถนน
- 2) การสะท้อนภาพวัตถุที่เป็นโลหะในฉนวนไฟฟ้า
- 3) การระบุเป้าหมายเรดาร์
- 4) สายอากาศแบบระยะไกล (Far-field)
- 5) สายอากาศแบบระยะใกล้ (Near-field)

การประยุกต์ที่กำลังเป็นที่สนใจคือการสร้างภาพวัตถุที่ถูกบดบังจากการมองเห็นได้ด้วยตา โดยสิ่งบดบังหรือฉนวนไฟฟ้านั้น คลื่นไมโครเวฟ สามารถทะลุผ่านได้เราเรียกว่าเป็นการสะท้อนภาพไมโครเวฟ การประยุกต์ใช้ที่ปลอดภัยประเภทนี้มันได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงกรณีที่มีตัวกลางที่บดบังเป็นชั้นของผ้า ความน่าเชื่อถือของไมโครเวฟในการเปิดเผยถึงโครงสร้างของสิ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่านั้นไม่ได้ถูกจำกัดอยู่เฉพาะเป้าหมายของวัตถุที่เป็นโลหะเท่านั้น แต่โครงสร้างภายใน และความผิดปกติภายในฉนวนไฟฟ้านั้น ภาพสะท้อนไมโครเวฟก็สามารถแสดงให้เห็นได้

บางทีสิ่งที่สำคัญมากที่สุดของวิศวกรรมการประยุกต์ใช้ภาพสะท้อนไมโครเวฟคือ ความเป็นไปได้ของการทำแผนที่ สาธารณูปโภค ที่อยู่ใต้ดิน เช่น ท่อ, สายเคเบิล และอื่นๆ รวมไปถึงการใช้งานสำรวจชั้นหิน, อุโมงค์, ทางใต้ดิน, งานทางโบราณคดี ก็สามารถถ่ายภาพสะท้อนระยะไกลได้ และมีโอกาสที่จะเป็นไปได้ เพราะไม่ว่ากองทัพ สภาความมั่นคง ทางธุรกิจและด้านสาธารณสุข ให้ความสนใจกับการประยุกต์ใช้นี้มาก

การบันทึกภาพวิธีนี้เหมือนกับเป็นการแทนที่การเลี้ยวเบนทางแสงด้วยกระบวนการทางดิจิตอล ซึ่งเป็นวิธีการสร้างภาพ การบันทึกเฟสและแอมพลิจูดโดยตรงของสนามไมโครเวฟกำลังเข้ามาแทนที่การบันทึกแบบฮอโลกราฟีในหลายๆ สถานการณ์ การสร้างภาพด้วยระบบดิจิตอลจากข้อมูลเฟสและแอมพลิจูด สามารถทำได้โดยไม่ต้องอาศัยฮอโตกริเลชันและการตอบสนองแบบคอนจูเกต (Conjugate Responses) เนื่องจากการกระจายของภาพนั้นอยู่ในตำแหน่งศูนย์กลางของ ระนาบเอ๊าท์พุทของการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว

เมื่อมองในแง่ของการเก็บข้อมูล ตัวรับสัญญาณไมโครเวฟที่สามารถวัดค่าเฟสและแอมพลิจูด ด้วยความไวสูงและความชัดเจนก็มีใช้อยู่ในปัจจุบัน แม้ว่าในบางครั้งจะดีกว่าถ้าใช้การบันทึกแบบ ฮอโลกราฟี เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงเล็กๆ น้อยๆ ในระดับสัญญาณความชัดเจนของการวัดค่าเฟส ซึ่งได้จากตัวรับสัญญาณที่ใช้ ความถี่กลาง (I.F Signal Processing) จะมีมากกว่าค่าที่ได้จากการบันทึกแบบฮอโลกราฟี

## เอกสารอ้างอิง

- 1) Goodman, J. W. **“Introduction to Fourier Optics”**, Mc Graw-Hill Classic Textbook, 1968.
- 2) Orme, R.D. and Anderson, A.P. **“High-Resolution Microwave Hologram Technique”**,IEEE Electronics, Vol. 120. pp.401-405.No.4, April 1973.
- 3) Reynolds, G.O. et al. **“The New Physical Optics Notebook Tutorials in Fourier Optics”**,Copublished by SPIE-The International Society for Optical Engineering, Washington, 1989.
- 4) wolf, E. **“Computer-Generate Hologram:Techniques and Application”**, Progress in Optics XVI North-holland 1978.
- 5) Aoki, Y. and Suzuki, Y. **“Hologram Conversion Computer”**, Proceedings of The IEEE, pp. 643-644 May 1974.
- 6) Aoki, Y. and Ishizuka, S. **“Numerical Image Reconstruction from an Off-Axis Sound-Wave Hologram”**, Proceedings of The IEEE, pp.735-736, April 1975.
- 7) Nyfors, E. and Vainikainen, P. **“Industrial Microwave Sensors”**, Artch House Inc, 685 Canton Street Norwood, 1989.
- 8) Sisodia, M.L. and Raghuvanshi, G.S. **“Basic Microwave Techniques and Laboratory Manual”** Wiley Eastern Limited, 1987.
- 9) Anderson, A.P. **“Microwave Holography ”**, Proc. IEE, Vol. 124, 11R, pp. 946-953, 1977.
- 10) Cullen, A.L. and Parr, J.C., **“A new Pertubation Method for Measuring Microwave Fields in Free Space”**, Proc. IEE.102B, pp.836-844, 1955.
- 11) Frank L. et. al. **“Introduction to Optics”**, Prentice Hall, Englwood Cliff, New Jersey. 1987.
- 12) Lee, W. H. **“Simple Fourier Transform Hologram Generated by Computer”** .Applied Optics , Vol. 9(3), pp. 639-643, 1970.
- 13) Lee, W.H. **“Binary Computer- Generated Holograms”** ,Applied Optics , Vol. 18(21), pp. 3361-3669, 1979
- 14) Brown,B.R. and Lohmann, A.W. **“Computer-Generated Binary Holograms”** , IBM Journal of Research and Development,Vol. 13, pp. 160-168, 1969.
- 15) Lohmann, A.W. and Paris, D.P.**“Binary Fraunhofer Holograms,Generated by Computer”**, Applied Optics,Vol. 18(21), pp. 1739-1748, 1967.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 16) Cheung W.S. and Levien, F. H. **“Microwaves Made Simple: Principles and Applications”**, Arech House Inc, 1985.
- 17) Hund, E. **“Microwave Communications”**, Mc Graw-Hill, New York 1989.
- 18.) Edminister, J. A. , **“Theory and Problems of Electromagnetics”**, Mc Graw-Hill, New York 1989 1993



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ชุดมอดูเลตความถี่ประกอบด้วย

### 1. เลเซอร์ไดโอด

#### Technical Specification

	Infrared
	785 nm.
output Power (max)	3 mV
wavelength range	775-795 nm.
supply voltage	-8 to -12 V
supply current	25-50 mA.

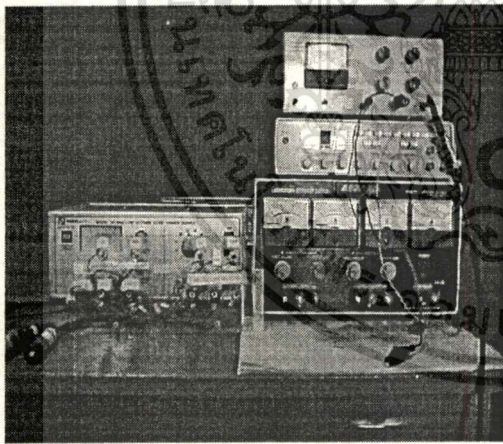
### 2. โฟโอดีไดโอด (MFOD71)

Wavelength range	750-950 nm.,
Response time	5 ns (typ.)

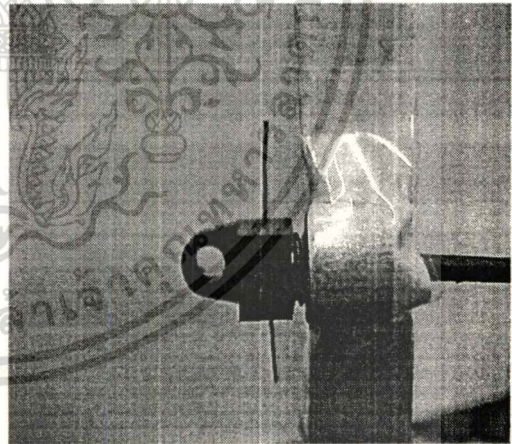
### 3. แหล่งกำเนิดสัญญาณ ขนาด 20 MHz

### 4. เส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก

### 5. แหล่งกำเนิดไฟฟ้า 0-30 โวลต์



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 อุปกรณ์ชุดมอดูเลตความถี่ (ก) ชุดแหล่งกำเนิดเลเซอร์ไดโอด (ข) โฟโอดีไดโอด

## โฟโตนิกส์

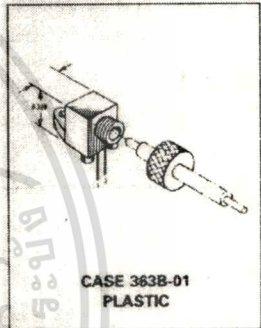
## Technical Specification

**MOTOROLA**  
**SEMICONDUCTOR**  
**TECHNICAL DATA**
**Fiber Optics — FLCS Family**  
**Photo Detector**  
**Diode Output**
**MFOD71**
**FLCS FAMILY**  
**FIBER OPTICS**  
**PHOTO DETECTOR**  
**DIODE OUTPUT**

... designed for low cost, short distance Fiber Optic Systems using 1000 micron core plastic fiber.

Typical applications include: high isolation interconnects, disposable medical electronics, consumer products, and microprocessor controlled systems such as coin operated machines, copy machines, electronic games, industrial clothes dryers, etc.

- Fast PIN Photodiode: Response Time < 5 ns
- Ideally Matched to MFOE76 Emitter for Plastic Fiber Systems
- Annular Passivated Structure for Stability and Reliability
- FLCS Package
  - Includes Connector
  - Simple Fiber Termination and Connection (Figure 4)
  - Easy Board Mounting
  - Molded Lens for Efficient Coupling
  - Mates with 1000 Micron Core Plastic Fiber (Eska SH4001)


**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 $25^\circ\text{C}$	$P_D$	150 2	mW mW/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-40 to +100	$^\circ\text{C}$

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

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Dark Current ( $V_R = 20\text{ V}, R_L = 1\text{ M}\Omega$ ) $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = 85^\circ\text{C}$	$I_D$	—	0.06 10	10 —	nA
Reverse Breakdown Voltage ( $I_R = 10\ \mu\text{A}$ )	$V_{(BR)R}$	50	100	—	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 ( $V_R = 20\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$ )	$C_T$	—	3	—	pF

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

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Responsivity ( $V_R = 5\text{ V}$ , Figure 2)	$R$	0.15	0.2	—	$\mu\text{A}/\mu\text{W}$
Response Time ( $V_R = 5\text{ V}, R_L = 50\ \Omega$ )	$t_{(resp)}$	—	5	—	ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL COUPLED CHARACTERISTICS

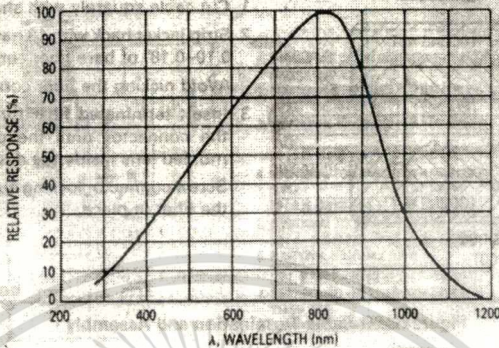


Figure 1. Relative Spectral Response

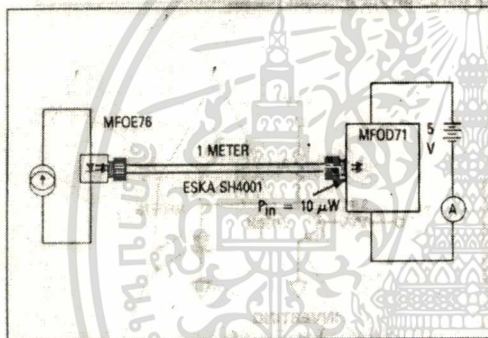


Figure 2. Responsivity Test Configuration

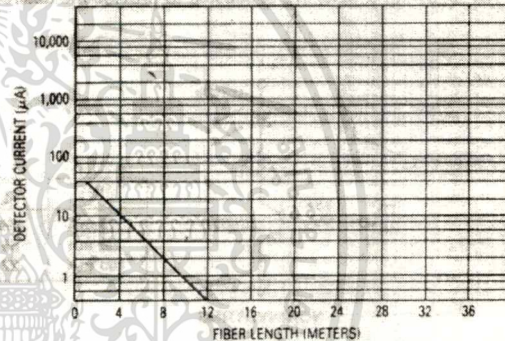


Figure 3. Detector Current versus Fiber Length

The system length achieved with a MFOE76 emitter and various detectors, using 1000 micron core plastic fiber (Eska SH4001 or equivalent), depends on the LED forward

current ( $I_f$ ) and the responsivity of the detector chosen. Each detector will perform with the MFOE76 up to the distances shown below.

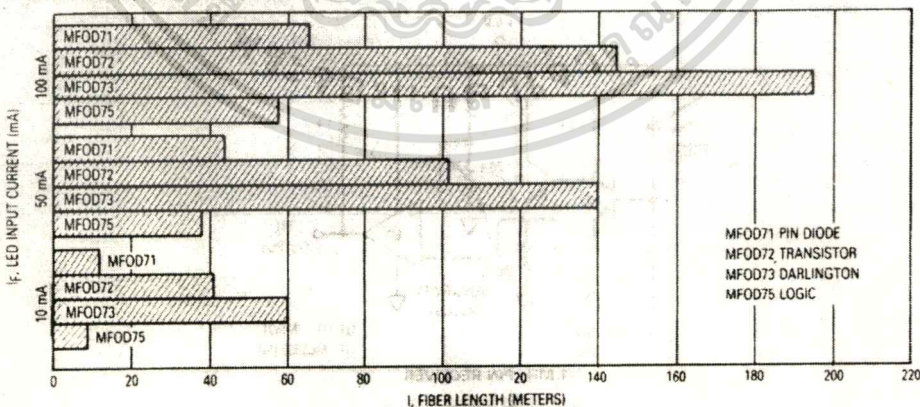


Figure 4. MFOE76 Working Distances

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องตรวจวัดขยายสัญญาณ (Lock-in Amplifier )

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องตรวจวัดและขยายสัญญาณของบริษัท EG&G PARC รุ่น 5210 แบบสองเฟส ภาคแสดงผล แบบอนาล็อก 1 จอแสดงผลและดิจิทัล 2 จอแสดงผล สามารถต่อเชื่อมสัญญาณเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลข้อมูลได้

### SPECCIFICATION

1. **INPUT TYPE:** Single-end ( A Input ) or Differential (A-B) with either floating ( $1000\Omega$ )  
**CURRENT:** Single-end ( B Input )
2. **VOLTAGE INPUT IMPEDANCE:**  $100\text{ M}\Omega$  paralld by  $25\text{ pF}$
3. **SENSITIVITY** (full-scale)  
**VOLTAGE:**  $100\text{ nV}$  ( $10\text{ nV}$  wiyh Expand ON to  $3\text{ V}$  Variable in 1-3-10 sequence or continuously.  
**CURRENT:**  $10^6\text{ A/V}$  or  $10^8\text{ A/V}$ .
4. **FREQUENCY RANGE:**  $0.5\text{ Hz}$  to  $120\text{ kHz}$ .
5. **MAXIMUM INPUTS:**  
**VOLTAGE**  $\pm 100\text{ V}$  dc;  $30\text{ V}$  ac pk-pk without damage;  $10\text{ V}$  ac pk-pk saturation.  
**CURRENT**  $15\text{ mA}$  continuous;  $1\text{ A}$  momentary without damage.  $10\text{ }\mu\text{A}$  ac pk-pk without saturation on  $10^6\text{ V/A}$ .  $100\text{ nA}$  ac pk-pk without saturation on  $10^8\text{ V/A}$ .
6. **MAXIMUM COMMON-MODE VOLTAGE:**  $10\text{ V}$  ac pk-pk.
7. **COMMON MODE REJECTION:** typically  $120\text{ dB}$  at  $1\text{ kHz}$ ,  $100\text{ dB}$  minimum at  $1\text{ kHz}$
8. **NOISE:** Typical input noise is:  
**VOLTAGE:**  $5\text{ nV}$  per root Hz at  $1\text{ kHz}$ .  
**CURRENT:**  $13\text{ fA}$  per root
9. **GAIN ACCURACY:**  
**FLAT:**  $1\%$   
**TRACKING BANDPASS:**  $3\%$
10. **GAIN STABILITY:**  $200\text{ ppm/deg}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนกการสะท้อนคลื่นไมโครเวฟ มีข้อมูลทางเทคนิคและคุณสมบัติพิเศษ (Specification)

# G E C - M A R C O N I M A T E R I A L S

## BROADBAND ABSORBERS

## LA0

### Features

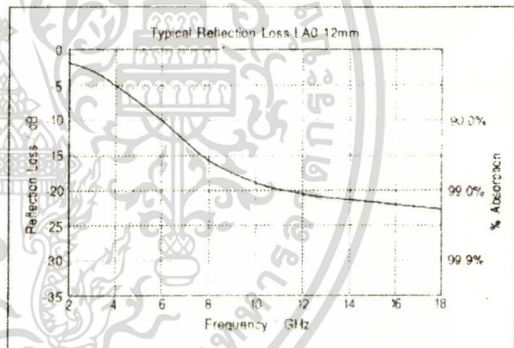
- Lightweight, flexible, open-cell foams
- Broadband absorbers, 2-100GHz
- Microwave attenuation from 17 to >20dB
- Range of thicknesses available
- Can be filled with a variety of foams and plastics (LA 1 - 6 product range)
- Custom applications



### Description

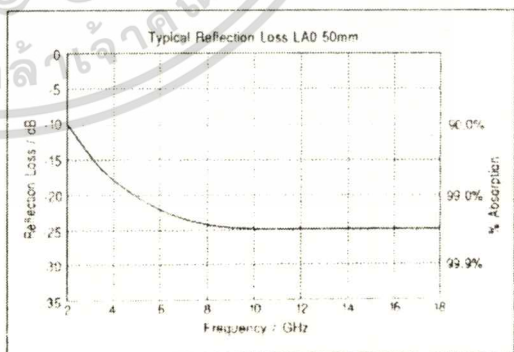
GEC-Marconi's LA0 is a range of broadband absorbers based on flexible, open cell polyurethane foams and cover the frequency range of 2-100GHz. LA0 is available in six standard thicknesses.

LA0 can provide better than 15dB reflection loss from 6 to 20GHz in the 19mm thickness and better than 20dB from 11 to 100GHz in the 9.5mm thicknesses. The material achieves its performance through the grading of its dielectric properties; GEC-Marconi's manufacturing procedure produces consistently high performance.



### Custom Products

The LA material may also be customised for specific applications. LA0 may be dielectrically loaded up to 50mm thick. LA0 absorber materials can also be supplied in sealed plastic envelopes for complete weatherproofing with only a small performance reduction. (See RAM PANELS data sheet for weather resistant broadband absorber).



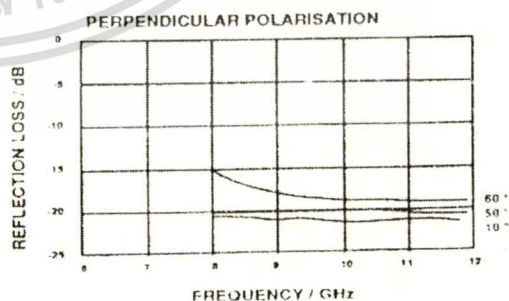
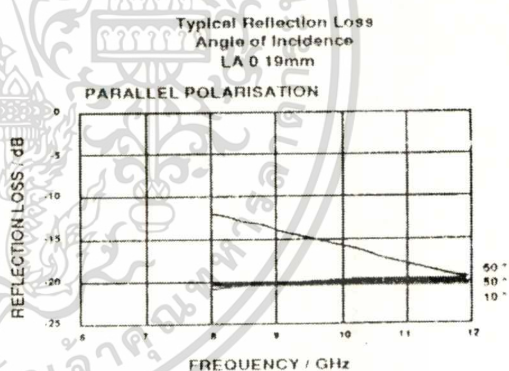
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยใช้แผ่นดูดคลื่นคลื่นไมโครเวฟมีความหนา 9.5 มิลลิเมตร และใช้แหล่งกำเนิดคลื่น 9.2 GHz ซึ่งแผ่นดูดคลื่นคลื่นจะลดทอนการสะท้อนคลื่นได้ 12 เดซิเบล ตามรายละเอียดข้อมูลข้างล่าง

LAO Thickness mm	50	25	19	12	9.5	5
Minimum Reflection loss dB @ 5-18GHz	-20dB	-20dB	-20dB			
7-18GHz				-20dB	-20dB	
11-18GHz						-20dB
35-94GHz						
4-7GHz		-10dB				
6-7GHz			-15dB			
8-11GHz				-17dB	-12dB	
18-35GHz						-10dB
Sheet size mm	610x610	610x610	610x610	610x610	610x610	610x610
Nominal Tensile Strength KPa	140	140	140	140	140	140
*Nominal Density kg/m <sup>3</sup>	54	54	54	54	54	54
Max Elongation %	200	200	200	200	200	200
Thermal Stability °C	100	100	100	100	100	100

\*Note: To ensure consistent reflectivity specifications, base material density may vary

These materials have been tested to DEF133 and MIL-STD-810B Environmental Specifications including temperatures ranging from +90°C to -54°C and Tropical Life, Mould Growth, Salt Corrosion and show electrical and mechanical resistance to contamination with the following chemicals:- Avgas 115/45, F35, F44, Avtur, MIL-H-5606 (Petroleum based hydraulic fluid for severe application), B.C.F., DERD 2490 and BS3591 (industrial methylated spirits).



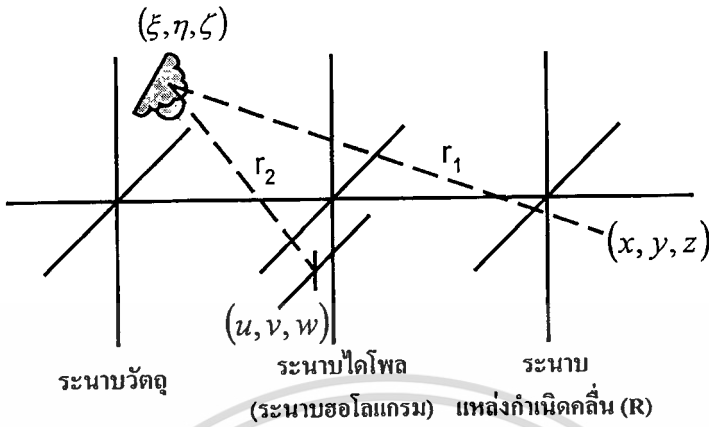
For further information please contact the Sales Department at GEC-Marconi Materials Technology

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การประมาณค่าของเฟรสเนล (Fresnel Approximation)



รูปที่ 1 แสดงระบบพิกัดสำหรับการบันทึกข้อมูล

$$\begin{aligned}
 r_1 &= \sqrt{z^2 + (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2} + \sqrt{w^2 + (u-\xi)^2 + (v-\eta)^2} \\
 &= z \sqrt{1 + \left(\frac{x-\xi}{z}\right)^2 + \left(\frac{y-\eta}{z}\right)^2} + w \sqrt{1 + \left(\frac{u-\xi}{w}\right)^2 + \left(\frac{v-\eta}{w}\right)^2} \quad (1)
 \end{aligned}$$

จากการกระจายโพลีโนเมียลของรากที่สองจะได้ว่า

$$\sqrt{1+b} = 1 + \frac{1}{2}b - \frac{1}{8}b^2 + \dots |b| < 1 \quad (2)$$

ดังนั้นสมการที่ (1) จึงกลายเป็น

$$\cong z \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{x-\xi}{z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{y-\eta}{z} \right)^2 \right] + w \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{u-\xi}{w} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{v-\eta}{w} \right)^2 \right] \quad (3)$$

สมการที่ 3 คือการประมาณค่าตามเงื่อนไขของเฟรสเนล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ทฤษฎีการแปลงฟูเรียร์

เครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์ทั้งปรากฏการณ์ที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นคือ การวิเคราะห์ฟูเรียร์ ซึ่งได้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการศึกษาเครือข่ายอิเล็กทรอนิกส์และระบบการสื่อสารข้อมูลต่างๆ ในที่นี้จะกล่าวเพียงจุดประสงค์ในการวิเคราะห์ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยตัวแปรอิสระสองตัวแปรเท่านั้น

การแปลงฟูเรียร์ (อาจเรียกว่าสเปกตรัมฟูเรียร์หรือสเปกตรัมความถี่) ของฟังก์ชันเชิงซ้อน  $g$  ของตัวแปรอิสระสองตัวแปรคือ  $x$  และ  $y$  สมการของการแปลงเป็นดังนี้

$$\mathcal{F}\{g\} = \iint_{-\infty}^{\infty} [g(x, y) \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy] \quad (1)$$

และสมการการแปลงกลับฟูเรียร์ (Inverse Fourier Transform)  $\mathcal{F}^{-1}\{G\}$  คือ

$$\mathcal{F}^{-1}\{G\} = \iint_{-\infty}^{\infty} [G(f_x, f_y) \exp[j2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y] \quad (2)$$

### สมบัติพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ของการแปลงในสองมิติ

1. ทฤษฎีเชิงเส้น (Linearity Theorem) หมายความว่า การแปลงของผลบวกของฟังก์ชันเท่ากับการแปลงของแต่ละฟังก์ชันมารวมกัน ดังสมการ

$$\mathcal{F}\{\alpha g + \beta h\} = \alpha \mathcal{F}\{g\} + \beta \mathcal{F}\{h\} \quad (3)$$

2. ทฤษฎีความคล้าย (Similarity Theorem) หมายความว่า พิกัดในระนาบ  $(x, y)$  ให้ผลเป็นพิกัดในความถี่  $(f_x, f_y)$  รวมกับการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดทั้งหมดของสเปกตรัม โดยถ้า  $\mathcal{F}\{g(x, y)\} = G(f_x, f_y)$  ดังนั้น

$$\mathcal{F}\{g(ax, by)\} = \frac{1}{|ab|} G\left(\frac{f_x}{a} + \frac{f_y}{b}\right) \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทฤษฎีการเลื่อนไป (Shift Theorem) หมายความว่า การแปลของฟังก์ชันในขอบเขตของระยะทางทำให้เกิดการเลื่อนเฟสในขอบเขตของความถี่ โดยถ้า  $\mathcal{F}\{g(x, y)\} = G(f_x, f_y)$  ดังนั้น

$$\mathcal{F}\{g(x-a, y-b)\} = G(f_x, f_y) \exp[-2j\pi(f_x a + f_y b)] \quad (5)$$

4. ทฤษฎีพาร์เซวอล (Parseval's Theorem) เป็นทฤษฎีในการอนุรักษ์พลังงาน โดยถ้า  $\mathcal{F}\{g(x, y)\} = G(f_x, f_y)$  ดังนั้น

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |g(x, y)|^2 dx dy = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |G(f_x, f_y)|^2 df_x df_y \quad (6)$$

5. ทฤษฎีการคอนโวล (Convolution Theorem) หมายถึง การคอนโวลของฟังก์ชันสองฟังก์ชันในขอบเขตระยะทางจะมีค่าเท่ากับการแปลงของแต่ละฟังก์ชันมาคูณกัน โดยถ้า  $\mathcal{F}\{g(x, y)\} = G(f_x, f_y)$  และ  $\mathcal{F}\{h(x, y)\} = H(f_x, f_y)$  ดังนั้น

$$\mathcal{F}\left\{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(\xi, \eta) h(x-\xi, y-\eta) d\xi d\eta\right\} = G(f_x, f_y) H(f_x, f_y) \quad (7)$$

6. ทฤษฎีความสัมพันธ์กันแบบอัตโนมัติ (Autocorrelation Theorem) เป็นการใช้ในกรณีเฉพาะของทฤษฎีการคอนโวล โดยถ้า  $\mathcal{F}\{g(x, y)\} = G(f_x, f_y)$  ดังนั้น

$$\mathcal{F}\left\{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(\xi, \eta) g^*(x-\xi, y-\eta) d\xi d\eta\right\} = |G(f_x, f_y)|^2 \quad (8)$$

หรือ

$$\mathcal{F}\{g(\xi, \eta)^2\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\xi, \eta) G^*(\xi - f_x, \eta - f_y) d\xi d\eta \quad (9)$$

7. ทฤษฎีอินทิกรัลฟูเรียร์ หมายถึงแต่ละจุดของความถี่ของฟังก์ชัน  $g$  การแปลงและการแปลงกลับของฟังก์ชันให้ผลเป็นฟังก์ชันนั้นนั่นเอง ยกเว้นแต่ที่จุดไม่ต่อเนื่อง

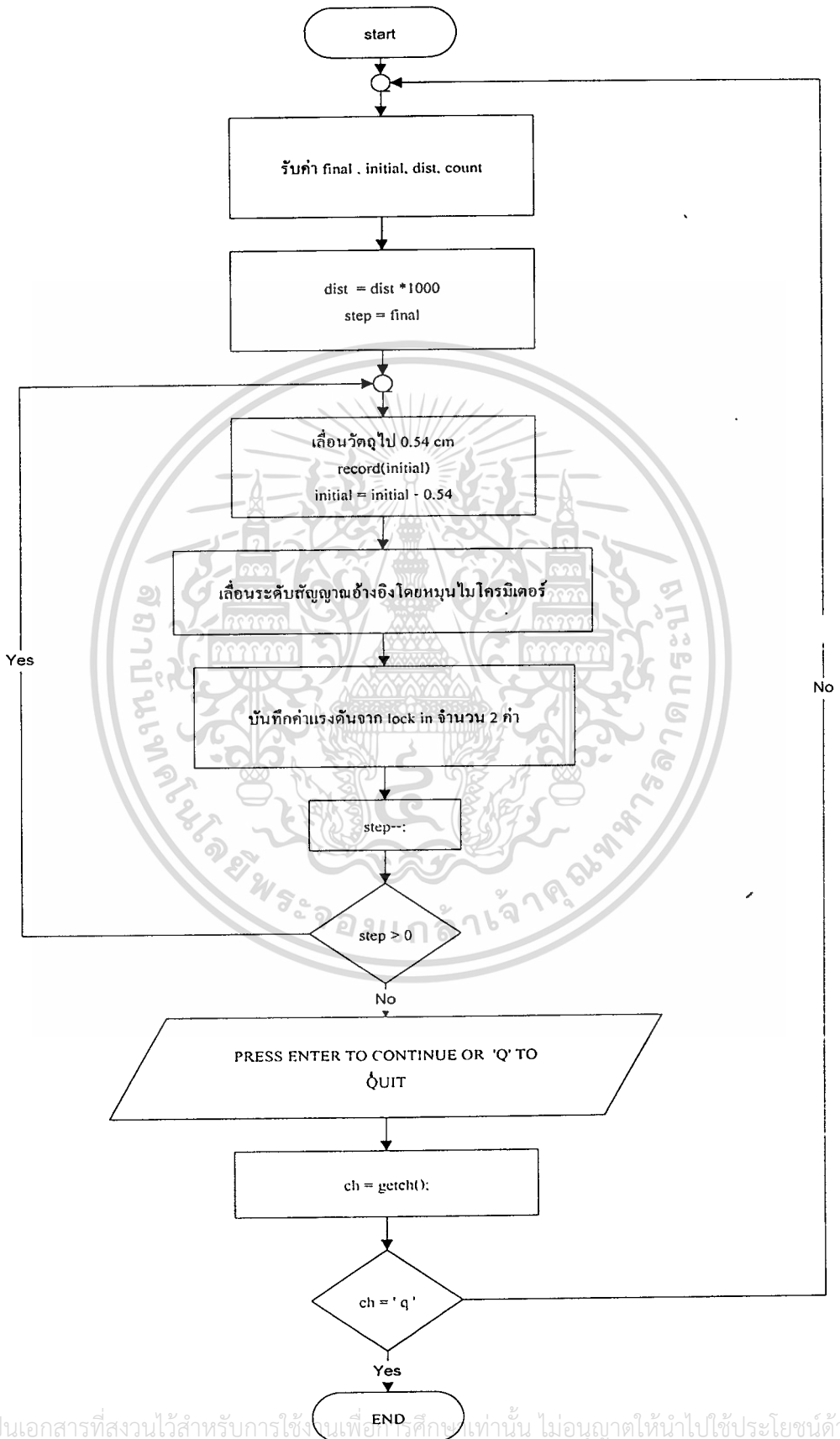
$$\mathcal{F}\mathcal{F}^{-1}\{g(x, y)\} = \mathcal{F}^{-1}\mathcal{F}\{g(x, y)\} = g(x, y) \quad (10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงแผนภาพขั้นตอนการทำงานของชุดควบคุมการทำงานของสตีปปีงมอเตอร์และบันทึกผล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเขียนโปรแกรมภาษา C++ สั่งให้สตีปิ้งมอเตอร์ทำงานและบันทึกข้อมูลที่วัดสัญญาณได้

```

include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <dos.h>
#include<math.h>
#include<stdlib.h>
#define PORT_A 0x300
#define PORT_B 0x30A
#define PORT_C 0x30B
#define PORT_D 0X280
#define PORT_E 0X28A
#define PORT_F 0X28B

void record(float at);
int atten(int mil,int step2);
int k2,j2,step2,step3,mil,input1,input2;
float test1,test2,a1,b1,value1,value2,at;
int a[4] = { 0x40,0x10,0x04,0x01 };
int b[4] = { 0x50,0x14,0x05,0x41 };
int c[4] = { 0x80,0x20,0x08,0x02 };
int d[4] = { 0xa0,0x28,0x0a,0x82 };

FILE *datay1file;
struct datay1type{float y1;}datay1;
FILE *datay2file;
struct datay2type{float y2;}datay2;
FILE *dataxfile;
struct dataxtype{float x;}datax;

main()
{ char ch;
int
z,i,j,j2,k,k2,l,step,final,dist2,step2,step3,input,count,mil,at;
float dist,initial;
z = 1;
datay1file = fopen("datay11.dat","ab");
datay2file = fopen("datay21.dat","ab");
dataxfile = fopen("datax2.dat","ab");
goto name;
out:if(count>12)
{ atten(4,dist);count=0;
if(step>0)
{goto in;}
goto in2; }

else
{
atten(1,dist);
if(step>0)
{ goto in;}
goto in2;
}
name:clrscr ();
printf

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

("*****\n");
    printf ("          THE STEPPING CONTROL & RECORD VALUE
\n");
    printf ("          FOR MICROWAVE IMAGESENSOR VER 1.0
\n");
    printf ("          DEVELOP BY P.D.I\n");
    printf
("*****\n");
    printf ("\n");
    printf (" PRESS ANY KEY TO CONTINUE OR 'Q' TO QUIT \n");
    printf ("\n");
    printf
("*****\n");

    while ((ch = getch()) != 'q')
    {
        if ((ch = getch()) != '\n')
        {
            printf ("BEFORE THE EXPERIMENT SET THE BAR");
            printf ("AT POSITION THAT YOU WANT \n");
            printf ("ENTER THE TIMES TO MOVE & INITIAL POSITION ,");
            printf ("DISTANT AND STATE OF ATTENUATOR\n");
            printf ("STATE 1 = 0\n");
            printf ("STATE 2 = *1\n");
            printf ("STATE 3 = *2\n");
            printf ("STATE 4 = *3\n");
            scanf ("%d %f %f %d",&final,&initial,&dist,&count);
                dist = dist*1000;
                step = final;
                if (step > 0)
                {
                    while( step>0 )
                    {
                        for(i=0;i<=27;i++)
                        {
                            for(j=0;j<=3;j++)
                            {
                                output (0x378,b[j]);
                                delay (25);
                            }
                            output (0x378,0);
                            goto out;
                            in:count++;
                            record(initial);
                            initial = initial - 0.54;
                            printf(" %d THIS POSITION IS %f AND ATTENUATOR AT %d
\n",z,initial,count);
                                z++;
                                delay(1);

                                step--;
                            }
                        }
                    }
                }
            else
            {
                while( step<0 )
                {
                    for(i=0;i<=27;i++)
                    {
                        for(j=3;j>=0;j--)
                        {
                            output (0x378,b[j]);
                            delay (25);
                        }
                        output (0x378,0);
                        goto out;
                        in2:count++;
                        record(initial);
                        initial = initial + 0.54;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

printf("%d THIS POSITION IS %f AND ATTENUATOR AT %d
\n",z,initial,count);

        z++;
        delay(1);

        step++;
    }
}    clrscr();
printf("Saving data to disk\n");
fclose(datay1file);
fclose(datay2file);
fclose(dataxfile);
printf("Data save complete");
step3 = dist*12;
while (step3 > 0)
    { for (j2=0;j2<=3;j2++)
      { output (0x378,d[j2]);
        delay (3);
      }
      step3--;
    }
    output (0x378,0);
/* step=final;
while( step>0 )
    { for(i=0;i<=27;i++)
      { for(j=3;j>=0;j--)
        { output (0x378,b[j]);
          delay (20);
        }
        step--;
      }
      output (0x378,0);
    }
*/
printf("PRESS ENTER TO CONTINUE OR 'Q' TO QUIT\n");
}
else
{printf ("bad command please try again\n");
goto name;}

}

return count;
}
}

```

```
int atten(int mil,int step2)
```

```

{ printf("please wait \n ");
  if(mil>3)
  {
    step3 = step2*12;
    while (step3 > 0)
      { for (j2=0;j2<=3;j2++)
        {output (0x378,d[j2]);

          delay (3);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        step3--;
    }
    output (0x378,0);
}

else
{
    while( step2 > 0)
    {
        for(j2=3;j2>=0;j2--)
        {
            output (0x378,d[j2]);
            delay (7);
        }
        step2--;
    }
    output (0x378,0);
}
return mil; return step2;
}

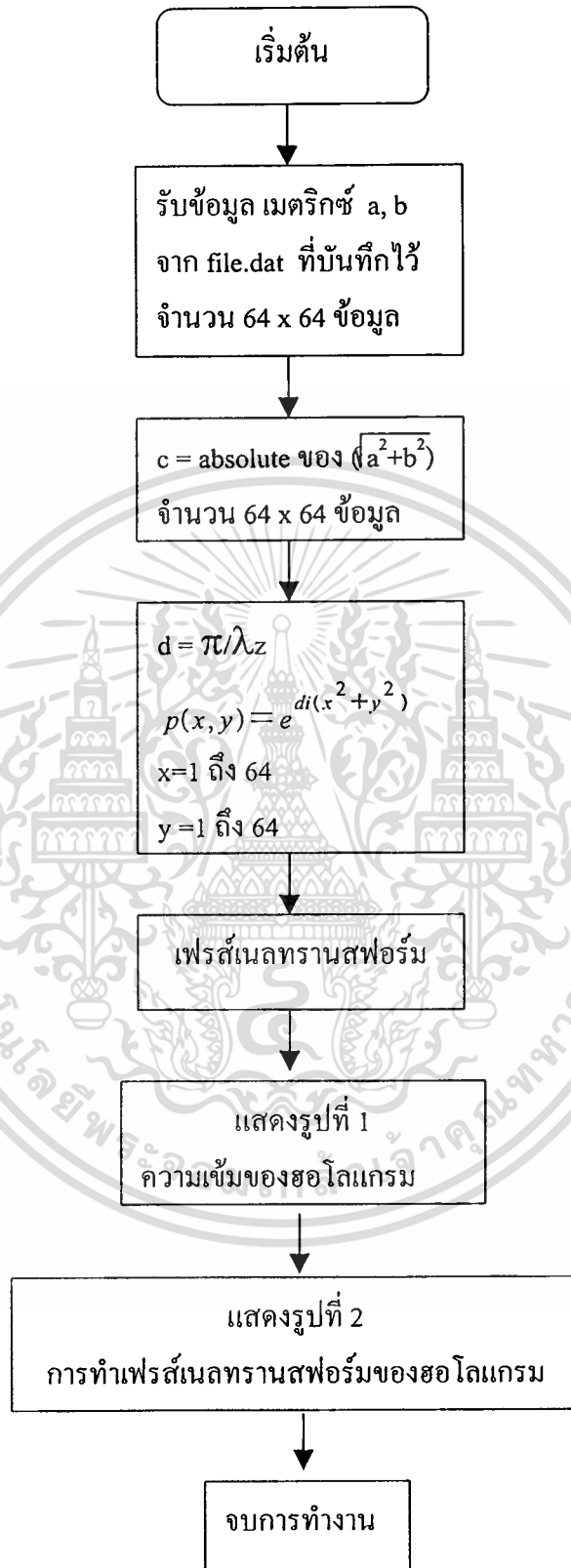
void record(float at)
{
    a1 = 5; b1 = 255;
    input1 = inp(PORT_B);
    input2 = inp(PORT_E);
    test1=input1;
    test2=input2;
    value1 = test1*(a1/b1);
    value2 = test2*(a1/b1);
    datay1.y1 = value1;
    clrscr();
    printf("y1 = %f input1 = %d\n",value1,input1);
    datay2.y2 = value2;
    printf("y2 = %f input2 = %d\n",value2,input2);
    datax.x= at;
    printf("x = %f\n",at);
    fwrite(&datay1,sizeof(struct
datay1type),1,datay1file);
    fwrite(&datay2,sizeof(struct
datay2type),1,datay2file);
    fwrite(&datax,sizeof(struct dataxtype),1,dataxfile);
}

```

ภาคผนวก ข  
**การเขียนโปรแกรมการแปลงเป็นฟูเรียร์ของข้อมูลเฟรตส์เนลฮอโลแกรม**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

format long e
fid = fopen('c:\save\datay11.dat','rb')
    a=fread(fid,[64,64],'float');
fclose(fid);
fid = fopen('c:\save\datay21.dat','rb')
    b=fread(fid,[64,64],'float');
fclose(fid);
a=4*a-10;
b=4*b-10;
a=a.*a;
b=b.*b;
c=abs(sqrt(a+b));
    for x=1:64
        for y=1:64
            d=pi/(3.26*100);
            p(x,y)=exp(d*I*0.54*0.54*(x^2+y^2));
e=c.*conj(p);
e=fft2(e,64,64);
r=e.*conj(e);
r=fftshift(r);
figure(1)
pcolor(c)
colormap(jet)
shading interp
figure(2)
pcolor(r)
colormap(jet)
shading interp
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จัดทำโดย ร้อยเอก ชำนาญ ลำเกาฬอคำ เกิดเมื่อวันที่ 23 กันยายน 2508 ที่ อำเภอ พระสมุทรเจดีย์ จังหวัด สมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมจากโรงเรียนวินิตศึกษา อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี และการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จาก มหาวิทยาลัยรามคำแหง เมื่อปีการศึกษา 2529 ประวัติการทำงานที่บริษัท ฟาร์ไซด์การไฟฟ้า แผนกวางแผนการผลิต ในปี 2533 และในปี 2534 สอบบรรจุเข้าเป็นนายทหารประจำห้องปฏิบัติการที่โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าจนถึงปัจจุบัน เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ในปีการศึกษา 2535 ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้