

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างภาพภาคตัดขวางของวัตถุด้วยวิธีไมโครเวฟโทโมกราฟี 2



นางสาวยุวดี แก้วสาทร  
นางสาววิชุดา ลัตยารัฐ

เลขหม.....  
เลขทะเบียน 47288  
วัน, เดือน, ปี 27 ส.ย. 2546

.b.....  
.i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Cross-Section Imaging of Objects using Microwave Tomography 2



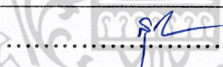



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of  
Bachelor of Science  
Department of Applied Physics  
Faculty of Science  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Academic year 2002**


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การสร้างภาพภาคตัดขวางของวัตถุด้วยวิธีไมโครเวฟโทโมกราฟี 2

นักศึกษา นางสาวยุวดี แก้วสาทร รหัสประจำตัว 42050265  
นางสาววิงญา สัตยารัฐ รหัสประจำตัว 42050274  
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์  
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.อนุพงษ์ สรงประภา

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศา  
ศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ รศ.สุวรรณ คูสำราญ	
กรรมการ ผศ.อนุพงษ์ สรงประภา	
กรรมการ ผศ.วิษณุ เพชรภา	
กรรมการ อ.สุรชาติ กมลดีดิก	



(ผศ.วิษณุ เติขิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชา

อธิการบดีของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การสร้างภาพภาคตัดขวางของวัตถุด้วยวิธีไมโครเวฟโทโมกราฟี 2		
นักศึกษา	นางสาวยุวดี แก้วสาทร	รหัสประจำตัว	42050265
	นางสาววิชญา ตัศยารัฐ	รหัสประจำตัว	42050274
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์	คณะวิทยาศาสตร์	
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์(โซลิตัสเททออิเล็กทรอนิกส์)		
ปีการศึกษา	2545		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. อนุพงษ์ สรงประภา		

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาระบบการสร้างภาพภาคตัดขวางของวัตถุด้วยวิธีไมโครเวฟโทโมกราฟีที่ความถี่ 60 กิกะเฮิรตซ์ โดยมุ่งพิจารณาผลเนื่องจากการเลี้ยวเบนของคลื่นที่เกิดจากคลื่นตกกระทบวัตถุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาสร้างภาพตัดขวางด้วยวิธีการแบคพรอบพาเกชันและทำการศึกษาออกแบบพร้อมทั้งพัฒนาสายอากาศที่ให้คลื่นระนาบในระนาบแคบๆ ที่ความถี่ 25 กิกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Special Project Title** Cross-Section Imaging of Objects using Microwave Tomography 2  
**Name** Miss Yuwadee Kaewsathorn  
 Miss Vichuda Sattayarut  
  
**Department** Applied Physics  
**Program** Applied Physics (Solid State Electronic)  
**Academic year** 2002  
**Special Project Advisor** Asst.Prof.Anupong Srongprapa



**ABSTRACT**

This special project studies and develops a microwave tomographic system operating at 60 GHz. We consider the effect of diffracted wave that generated from weakly inhomogeneous medium. Then reconstruct the cross section image using back propagation algorithm . In addition, we design the horn antenna that produce narrow length plane wave at 25 GHz.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับการสนับสนุน ช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ผศ.อนุพงศ์ สรงประภา อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ผู้ซึ่งถ่ายทอดความรู้ แนวความคิดแก้ไขปัญหา อนุเคราะห์จัดหาอุปกรณ์ ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการดำเนินงานเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

อาจารย์ทุกท่าน ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้ศึกษา

บิดา-มารดา ผู้ให้กำเนิด อบรม เลี้ยงดู เป็นกำลังใจสำคัญสูงสุดและให้โอกาสทางการศึกษา

คุณสุรศักดิ์ บุญกล้า ผู้ซึ่งคอยให้ความช่วยเหลือทางด้านกระบวนการความคิดวิชาการ และ คำปรึกษาแนะนำต่างๆ เป็นอย่างดี

คุณประจักษ์ ทองจันทร์ ผู้ซึ่งเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ต่างๆ และให้คำปรึกษาแนะนำที่มีประโยชน์ในการดำเนินโครงการ

รุ่นพี่ เพื่อนๆ รุ่นน้องรวมทั้ง บุคคลที่มีความปรารถนาดี มา ที่คอยให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจและแนะนำแนวทางที่ดีตลอดมา

ทุกท่าน

ยวดี แก้วสาทร  
วิษุภา ตัศยารัฐ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 โปรเจกชันโทโมกราฟี	3
2.2 คิฟแฟรกชันโทโมกราฟี	7
2.2.1 สมการคลื่นของสารเนื้อเดียวกัน	7
2.2.2 สมการคลื่นของสารที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	8
2.2.3 การประมาณค่าสมการคลื่น	11
2.2.4 ทฤษฎีฟูเรียร์คิฟแฟรกชัน	12
2.2.5 กระบวนการเก็บข้อมูล	16
2.2.6 การอินเตอร์โพลชันและการแบคพรอบพาเกชัน	21
2.2.7 การอินเตอร์โพลชันที่โคเมนต์ความถี่	23
2.2.8 อัลกอริทึมของการทำแบคโปรเจกชัน	28
2.2.9 การประมวลสัญญาณ	31
2.3 หลักการของการมอดูเลตสแคทเตอร์ริง	33
2.4 การออกแบบสาขาอากาศแบบฮอร์น	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ระบบของคิฟแฟรกันโทโมกราฟี	
3.1 ระบบการทดสอบการเลี้ยวเบนของคลื่น	44
3.2 ระบบของโปรเจคชันโทโมกราฟี	44
3.3 ระบบที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติของสายอากาศแบบฮอร์น	46
3.4 ส่วนประมวลผล	47
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 การทดสอบหลักการเลี้ยวเบนของคลื่น	49
4.2 การสร้างภาพภาคตัดขวางของวัตถุโดยใช้อัลกอริทึมแบคพรอบ พะเกชันโทโมกราฟี	51
4.3 การออกแบบสายอากาศแบบฮอร์นและสร้างแบบจำลอง	57
4.4 การทดสอบประสิทธิภาพการปล่อยคลื่นของสายอากาศแบบฮอร์น	62
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและแนวทางในการพัฒนา	
5.1 บทสรุป	66
5.2 ปัญหาที่พบ	66
5.3 แนวทางแก้ไข	66

เอกสารอ้างอิง

ประวัติผู้จัดทำโครงพิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
2.1.1 โปรเจกชันแบบขนาน	3
2.1.2 แผนภาพแสดงอัลกอริทึมในการเก็บข้อมูลและแสดงภาพ	6
2.2.1 แสดงคิฟแฟรกชันโทโมกราฟีที่ระนาบฉายคลื่น ไปยังวัตถุ	7
2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างฟูรีเยร์คิฟแฟรกชันและฟูรีเยร์ทรานฟอร์มข้อมูล โปรเจกชัน	13
2.2.3 แสดงค่าฟูรีเยร์ทรานฟอร์มเมื่อเพิ่มค่าความถี่ต่างกัน	16
2.2.4 ระนาบคลื่นส่องผ่านวัตถุ ฟูรีเยร์ทรานฟอร์มของวัตถุเป็นเส้น โค้งวงกลม	17
2.2.5 แสดงการฉายระนาบคลื่นส่องผ่านวัตถุ	17
2.2.6 การประมาณค่าของฟูรีเยร์ทรานฟอร์มของวัตถุผ่านในช่อง	19
2.2.7 การประมาณค่า VSP (a) ฟังก์ชันวัตถุเป็นจำนวนจริงทำให้ฟูรีเยร์ทรานฟอร์มตั้ง(b)	20
2.2.8 การประมาณค่าฟูรีเยร์ทรานฟอร์มเมื่อคลื่นตกกระทบมีความถี่ต่างๆ และมุมต่างๆ	22
2.2.9 แสดงค่ามุม $\phi$ ที่ใช้ในการ โปรเจกชัน	24
2.2.10 แสดงค่าโปรเจกชันถูกวัดโดยใช้โคออร์ดิเนต $\phi - \omega$	24
2.2.11 แสดงการสุ่มตัวอย่าง โปรเจกชันในสเปซ โคเนตเพื่อทำการฟูรีเยร์ทรานฟอร์ม	27
2.2.12 แสดงการใช้ความสัมพันธ์ของข้อมูล โปรเจกชันเพื่อทำการฟูรีเยร์ทรานฟอร์ม	28
2.2.13 แสดง $k_o r_o$ และ $k_o s_o$ ใช้ในอัลกอริทึมแบคโปรเจกชัน	29
2.2.14 การแบคโปรเจกชันที่ขึ้นกับความถี่ $\eta$ ของฟังก์ชันการกรอง	30
2.2.15 แสดงข้อมูล โปรเจกชันและการเปรียบเทียบระหว่างไม่ผ่านตัวกรอง low pass filter	33
2.2.16 แสดงข้อมูล โปรเจกชันและการเปรียบเทียบระหว่างผ่านตัวกรอง low pass filter	34
2.3.1 แสดงหลักการเกิดการกระเจิง	35
2.3.2 แสดงหลักการของเทคนิคการมอดูเลตทางแสง	36
2.3.3 แสดงระบบที่ทำการมอดูเลตทางแสง	36
2.4.1 แสดงลักษณะ โครงสร้างของสายอากาศแบบฮอร์น	38
2.4.2 แสดงลักษณะแบบสนาม (field pattern) ของสายอากาศ	39
2.4.3 แสดงแบบกำลัง (power pattern) ของสายอากาศในพิกัดเชิงขั้ว	40
2.4.4 แสดง dB pattern ของสายอากาศ	40
2.4.5 แสดงไดอะแกรมภาคตัดขวางของระนาบ H (H-plane)	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
2.4.6 แสดงสนามที่ระนาบ H(H-plane field pattern)ที่วัดจากค่ามุมและค่า R ต่างๆ	42
3.1.1 แสดงระบบที่ใช้ในการทดสอบการเลี้ยวเบนของคลื่น	44
3.2.1 แสดงโครงสร้างระบบไมโครเวฟโทโมกราฟฟี	45
3.3.1 แสดงระบบตรวจสอบสายอากาศแบบฮอร์น	46
3.4.1 โฟลวชาร์ทแสดงลำดับการสร้างภาพ	48
4.1.1 แสดงรูปแบบของการเลี้ยวเบนของคลื่น	50
4.2.1 แสดงรูปวัตถุโพมสอดได้ด้วยขดพลาสติกบรรจุน้ำ และภาพที่ได้จากการสร้าง	52
4.2.2 แสดงรูปวัตถุโพมสอดได้ด้วยขดพลาสติกบรรจุน้ำกับใส่กรอกและภาพที่สร้างได้	54
4.2.3 แสดงรูปวัตถุโพมสอดได้ด้วยใส่กรอกและภาพที่สร้างได้	55
4.2.4 แสดงรูปวัตถุโพมเคลือบผงคาร์บอนรูปทรงตัว L	57
4.3.1 แสดงโครงสร้างของฮอร์นที่ได้จากการคำนวณ	57
4.3.2 แสดงโปรแกรม HPHFSS ที่ออกแบบสายอากาศ	58
4.3.3 แสดงสายอากาศแบบฮอร์นที่ออกแบบตามค่าที่ได้จากการคำนวณ	59
4.3.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณ	59
4.3.5 แสดงลักษณะของการปล่อยคลื่นจากสายอากาศแบบฮอร์นที่ได้จากการออกแบบ	60
4.3.6 ลักษณะของ far field pattern ที่ได้จากการคำนวณ	60
4.3.7 แสดงลักษณะ far field pattern ที่มองจากด้านหน้าและด้านข้าง	61
4.3.8 สมิตซ์ชาร์ทแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	62
4.4.1 แสดงลักษณะของสายอากาศแบบฮอร์นที่สร้าง	63
4.4.2 แสดงสัญญาณการสะท้อนที่วัดได้จากสายอากาศฮอร์นที่ค่าความถี่ต่างๆ	64
4.4.3 กราฟแสดงขนาดของสัญญาณที่วัดได้จากการปล่อยคลื่นจากฮอร์น	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

กระบวนการโทโมกราฟี เป็นการสร้างภาพภาคตัดขวางของวัตถุ โดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงส่งผ่านวัตถุทึบแสง แล้วนำสัญญาณที่ผ่านออกมาประมวลผล เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของวัตถุที่เราไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

จากโครงการพิเศษเรื่องการสร้างภาพตัดขวางของวัตถุด้วยวิธีไมโครเวฟโทโมกราฟีที่ได้ทำการออกแบบสร้างระบบสร้างภาพตัดขวางของวัตถุโดยอาศัยสมมติฐานที่ว่าวัตถุกระทำตัวเสมือนตัวดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเท่านั้น โดยไม่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน นำข้อมูลโปรเจกชันที่วัดได้จากความเข้มของคลื่นที่ทะลุผ่านที่ตำแหน่งต่างๆของวัตถุในแต่ละค่าของมุมคงที่ค่าหนึ่งๆมาทำการวิเคราะห์ ทำการสร้างภาพกลับโดยใช้อัลกอริทึมฟิลเตอร์แบคโปรเจกชัน จากผลการทดลองเมื่อวัตถุตัวอย่างมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนไม่แตกต่างจากอากาศมากนัก เช่น โฟม ภาพที่ได้ไม่ชัดชัดเจนและเมื่อนำวัตถุแปลกปลอมที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแตกต่างกับวัตถุเดิมมาก เช่น แท่งคาร์บอน ภาพที่ได้จะชัดเจนบริเวณวัตถุแปลกปลอม แต่ยังไม่สามารถแยกแยะชนิดของวัตถุได้ เนื่องจากการที่จะสามารถแยกแยะชนิดของวัตถุได้นั้นค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของวัตถุจะต้องแตกต่างกันอย่างมาก อีกสาเหตุหนึ่งซึ่งทำให้ภาพที่ได้ไม่ชัดเจนก็เนื่องมาจากระบบไมโครเวฟโทโมกราฟีที่สร้างขึ้นมีสัญญาณรบกวน ขนาดของสัญญาณที่วัดได้เล็ก และผลเนื่องจากการเลี้ยวเบนของคลื่นที่เกิดขึ้นทั้งนี้เพื่อที่จะพัฒนาคุณภาพของภาพตัดขวางของวัตถุให้ชัดเจนมากขึ้นจึงต้องพิจารณาถึงรายละเอียดของการเลี้ยวเบนของคลื่นจากวัตถุที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้วภายในเมื่อวัตถุแต่ละชนิดเสมือนมีแหล่งกำเนิดคลื่นหลายๆ จุดรวมกัน เมื่อมีคลื่นจากแหล่งกำเนิดหนึ่งไปตกกระทบแหล่งกำเนิดคลื่นแบบจุดดังกล่าวก็จะทำให้เกิดการกระเจิงของคลื่นเดิมภายในวัตถุ เมื่อนำเอาการประมาณค่าของบอร์นมาช่วยหาค่าสนามที่เกิดการกระเจิงดังกล่าว แล้วนำไปเข้ากระบวนการประมวลผลและสร้างภาพกลับของวัตถุ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

- เพื่อศึกษาและพัฒนาระบบการสร้างภาพตัดขวางของวัตถุด้วยวิธีไมโครเวฟโทโมกราฟีที่มีความถี่ 60 กิกะเฮิรตซ์ โดยมุ่งพิจารณาผลเนื่องจากการเลี้ยวเบนของคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ศึกษาออกแบบและพัฒนาสาขาอากาศที่ให้คลื่นระนาบในระนาบแคบๆ ที่ความถี่ 25 กิกะเฮิร์ตซ

### 1.3 ขอบข่ายของโครงการพิเศษ

โครงการพิเศษนี้จัดทำขึ้นเพื่อหาแนวทางในปรับปรุงคุณภาพของภาพภาคตัดขวางของวัตถุที่ได้จากระบบการสร้างภาพวัตถุด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยพิจารณาการเลี้ยวเบนของคลื่นและพัฒนาโปรแกรมใช้ในการสร้างภาพและศึกษาออกแบบสาขาอากาศที่ให้คลื่นระนาบที่ความถี่ 25 กิกะเฮิร์ตซ

### 1.4 วิธีการดำเนินงาน

- ศึกษาทฤษฎีและหลักการทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างภาพภาคตัดขวางของวัตถุด้วยวิธีไมโครเวฟโทโมกราฟีโดยอาศัยหลักการเบี่ยงเบนของคลื่น
- ศึกษาโปรแกรมการสร้างภาพภาคตัดขวางของวัตถุ
- ศึกษาโปรแกรมและทำการออกแบบสาขาอากาศแบบฮอว์น
- วิเคราะห์ผลที่ได้จากการสร้างภาพภาคตัดขวางของวัตถุ

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

เพื่อเป็นแนวทางในการส่งเสริมและพัฒนาเทคโนโลยีการสร้างภาพตัดขวางของวัตถุด้วยวิธีไมโครเวฟโทโมกราฟีให้สามารถปรับปรุงคุณภาพให้ชัดเจนมากขึ้นเพื่อนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านวัสดุศาสตร์ การตรวจวินิจฉัยทางการแพทย์ที่ปลอดภัย เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

จากการออกแบบระบบไมโครเวฟโทโมกราฟีเพื่อทำการสร้างภาพตัดขวางของวัตถุโดยอาศัยสองสมมติฐานคือ 1. คลื่นไม่เกิดการเลี้ยวเบนโดยขนาดของวัตถุใหญ่กว่าความยาวคลื่นมากๆ 2. คลื่นเกิดการเลี้ยวเบนซึ่งขนาดของวัตถุมีขนาดพอๆกับความยาวคลื่น โดยสมมติฐานข้อแรกจะแทนวัตถุที่เป็นตัวดูดซับคลื่น เนื่องจากแต่ละตำแหน่งของวัตถุมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแตกต่างกัน ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านออกมาแตกต่างกันด้วย เมื่อทำการฉายคลื่นไมโครเวฟลำขนานทำมุม  $\theta$  ใดๆ กับแนวอ้างอิง ผ่านวัตถุจากด้านหนึ่งไปยังตัวตรวจรับความเข้มอีกด้านหนึ่ง

#### 2.1 โปรเจกชันโทโมกราฟี (Projection Tomography)



รูปที่ 2.1.1 โปรเจกชันแบบขนาน

กรณีที่วัตถุมีขนาดจำกัดและไม่คิดผลของการเลี้ยวเบนนั้น การทำโปรเจกชันแบบขนานโดยการฉายคลื่นไมโครเวฟลำขนาน (parallel beam) ทำมุม  $\phi$  ใดๆ กับแนวทิศอ้างอิง ผ่านเนื้อวัตถุที่มีขนาดจำกัดจากด้านหนึ่งในระนาบดังกล่าว ไปยังตัวตรวจรับความเข้มอีกด้านหนึ่งดังแสดงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1.1 เมื่อพิจารณาภาคตัดขวางของการกำสั่มประสิทธิการดูคลื่นของคลื่นไมโครเวฟที่ตำแหน่งต่างๆในระนาบ  $x, y$  คือ  $\rho(x, y)$  ที่ระยะ  $l$  ต่างๆ วัดจากกึ่งกลางลำคลื่นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} P_\phi(l) &= \int_{(\phi, l) \text{ line}} \rho(x, y) ds \\ &= \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \rho(x, y) \delta(x \cos \phi + y \sin \phi - l) dx dy \end{aligned} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\delta$  คือ delta function จากนั้นทำการแปลงฟูเรียร์ จะได้

$$\begin{aligned} S_\phi(\omega) &\equiv F[P_\phi(l)] = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{(\phi, l) \text{ line}} \rho(x, y) ds \right] e^{-i2\pi \omega l} dl \\ &= \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \rho(x, y) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x \cos \phi + y \sin \phi - l) e^{-i2\pi \omega l} dl \right] dx dy \\ &= \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \rho(x, y) e^{-i2\pi \omega (x \cos \phi + y \sin \phi)} dx dy \end{aligned} \quad (2.2)$$

ให้  $u = \omega \cos \phi$ ,  $v = \omega \sin \phi$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} S_\phi(\omega) &= \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \rho(x, y) e^{-i2\pi (ux + vy)} dx dy \\ S_\phi(\omega) &= F[\rho(x, y)] \\ \therefore \rho(x, y) &= F^{-1} S_\phi(\omega) \end{aligned} \quad (2.3)$$

ซึ่งก็คือทฤษฎีฟูเรียร์แปลง ซึ่งเป็นทฤษฎีพื้นฐานของการสร้างภาพโทโมกราฟฟี นั่นคือจากข้อมูลโปรเจกชัน  $P_\phi(l)$  ที่มุมใดๆ สามารถนำมาสร้างภาพกลับโดยการแปลงฟูเรียร์ 1 มิติ ต่อ  $P_\phi(l)$  ได้เป็น  $S_\phi(\omega)$  ซึ่งฟังก์ชันที่ได้นั้นเป็นการแปลงฟูเรียร์ของ  $\rho(x, y)$  ใน 2 มิติที่เส้นตรงตัดกับจุดกำเนิดดังรูปที่ 2.1.1 เมื่อแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับ 2 มิติของข้อมูล  $S_\phi(\omega)$  ที่วางบนระนาบความถี่ที่มุมต่างๆแล้วจะได้  $\rho(x, y)$

แต่ในทางปฏิบัติการเก็บข้อมูลโปรเจกชันมิได้กระทำทุกจุดของ 1 และทุกมุม  $\phi$  อย่างต่อเนื่อง และใช้การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลอลเชิงตัวเลข (Digital signal processing) ทำการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง(discrete)โดยใช้อัลกอริทึม Fast Fourier Transform (FFT) การคำนวณจะเริ่มกระทำมิได้ถ้ายังเก็บข้อมูลไม่ครบตามที่กำหนด ทำให้มีความล่าช้า นอกจากนี้การทำ extrapolate ในทอมของความถี่ ( $\omega$ ) ก่อนทำการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับ 2 มิติ ก็ทำให้มีความคลาดเคลื่อนได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เมื่อพิจารณาอีกแนวทางหนึ่ง จาก

$$\rho(x, y) = \iint_{-\infty-\infty}^{\infty\infty} \rho(u, v) e^{i2\pi(ux+vy)} du dv \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\rho(u, v) \equiv$  Fourier transform ของ  $\rho(x, y)$  เขียนอยู่ในรูปพิกัดเชิงขั้วได้ว่า

$$\rho(x, y) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \rho(\omega, \phi) e^{i2\pi\omega(x \cos \phi + y \sin \phi)} \omega d\omega d\phi \quad (2.5)$$

$$\rho(x, y) = \int_0^{\pi} \int_0^{\infty} \rho(\omega, \phi) e^{i2\pi\omega(x \cos \phi + y \sin \phi)} \omega d\omega d\phi \quad (2.6)$$

$$+ \int_0^{\pi} \int_0^{\infty} \rho(\omega, \phi + 180^\circ) e^{i2\pi\omega(x \cos(\phi+180^\circ) + y \sin(\phi+180^\circ))} \omega d\omega d\phi$$

แต่  $\rho(\omega, \phi+180^\circ) = \rho(-\omega, \phi)$  จะได้

$$\rho(x, y) = \int_0^{\pi} \left[ \int_0^{\infty} \rho(\omega, \phi) |\omega| e^{i2\pi\omega l} d\omega \right] d\phi \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$l = x \cos \phi + y \sin \phi \quad (2.8)$$

แทนค่า  $\rho(\omega, \phi)$  ด้วย  $S_\phi(\omega)$  ใน (2.7) จะได้ว่า

$$\rho(x, y) = \int_0^{\pi} \left[ \int_0^{\infty} S_\phi(\omega) |\omega| e^{i2\pi\omega l} d\omega \right] d\phi \quad (2.9)$$

หรือเขียนใหม่ได้ว่า

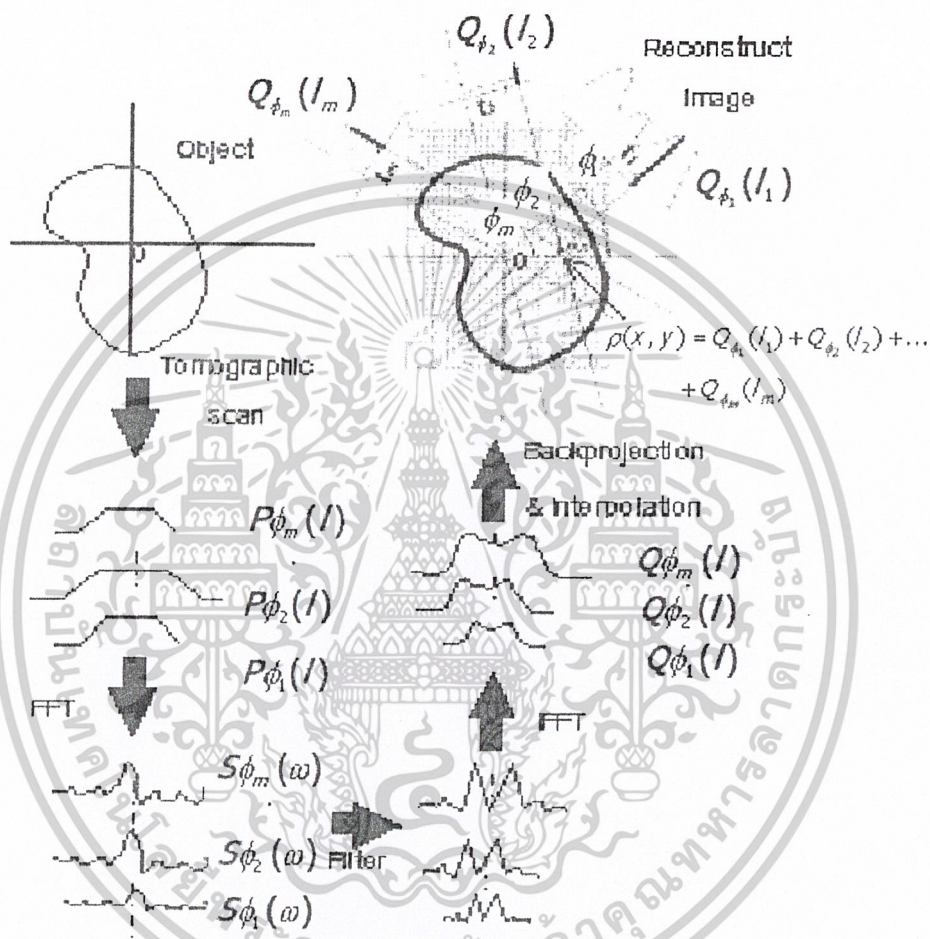
$$\rho(x, y) = \int_0^{\pi} Q_\phi(x \cos \phi + y \sin \phi) d\phi$$

เมื่อ

$$Q_\phi(l) = \int_{-\infty}^{\infty} S_\phi(\omega) |\omega| e^{i2\pi\omega l} d\omega \quad (2.10)$$

ดังนั้น เมื่อนำค่า  $P_\phi(l)$  ในแต่ละค่า  $\phi$  หนึ่งๆ มาทำการแปลงฟูเรียร์เป็น  $S_\phi(\omega)$  จากนั้น ประกอบคูณด้วยฟังก์ชันฟิลเตอร์  $|\omega|$  แล้วทำการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับต่อผลคูณที่ได้เป็น  $Q_\phi(l)$  ทำการบวกผลที่ได้ทุกค่ามุม  $\phi$  และ  $l$  ที่คล้องจองกับตำแหน่ง  $x$  และ  $y$  ที่เลือกเข้าด้วยกัน ก็จะได้ค่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\rho(x,y)$  วิธีการดังกล่าวเรียกว่า Filtered Backprojection(FB) และนิยมใช้กันมาก ลำดับขั้นตอนของการทำ FB ในการสร้างภาพกลับเป็นดังรูปที่ 2.1.2



รูปที่ 2.1.2 แผนภาพแสดงอัลกอริทึมในการเก็บข้อมูลและแสดงภาพ

ภาพที่สร้างได้จากการสร้างภาพจากวัตถุจริงมีความคมชัดน้อยกว่าภาพที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง เนื่องจากข้อมูลที่ทำการวัดจริงจากระบบไมโครเวฟโทโมกราฟฟีที่สร้างขึ้นนั้นจะมีสัญญาณรบกวนและมีขนาดสัญญาณที่เล็กมีผลการเลี้ยวเบนของคลื่นอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ภาพที่ได้จากแบบจำลองนั้นไม่คำนึงถึงผลของสัญญาณรบกวนและผลของการเลี้ยวเบนของคลื่นทำให้ภาพที่ได้มีความคมชัดมากกว่า

ดังนั้นเพื่อที่จะพัฒนาคุณภาพของภาพที่สร้างจากวัตถุจริงเราจึงต้องหันมาพิจารณาผลจากการเลี้ยวเบนของคลื่นที่เกิดขึ้นด้วย โดยจะเริ่มพิจารณาจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ดิฟแฟรคชันโทโมกราฟี (Diffraction Tomography)

การแพร่ของคลื่นภายในวัตถุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) อธิบายได้ด้วยสมการคลื่นที่เป็น second-order linear differential ซึ่งเราจะทำการพิจารณาค่าสนามทุกๆ ตำแหน่งของวัตถุ แต่สำหรับกรณีที่วัตถุไม่ใช่เนื้อเดียวกันทั้งหมดนั้นเราจะต้องอาศัยพื้นฐานการประมาณค่าเพื่อมาช่วยแก้ปัญหาการแพร่ของคลื่น ซึ่งจะกล่าวต่อไป



รูปที่ 2.2.1 แสดงกระบวนการดิฟแฟรคชันโทโมกราฟีที่คลื่นระนาบถูกฉายไปยังวัตถุแล้วทำการวัดค่าสนามที่ระเจิงอีกด้านของวัตถุ

### 2.2.1 สมการคลื่นของสารเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Wave Equation)

ในตัวกลางที่คงที่หรือเป็นเนื้อเดียวกันการเคลื่อนที่ของคลื่นความดันหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถจำลองได้จาก Helmholtz equation เราต้องการหาค่าของสนามที่สัมพันธ์กับเวลา  $\omega$  ที่แต่ละตำแหน่งของ  $\vec{r}$  จะได้สมการคลื่น

$$[\nabla^2 + k^2(\vec{r})]u(\vec{r}, t) = 0 \quad (2.12)$$

โดย  $u(\vec{r}, t)$  คือ สนามที่ทำให้สมการเป็นจริง

$k(\vec{r})$  คือ เลขคลื่นของสนามมีค่าเท่ากับ  $\frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi\omega}{c}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกันนั้น ค่าเลขคลื่นของสนามจะมีค่าคงที่เราจึงกำหนดให้เลขคลื่นของสนามมีค่าเท่ากับ  $k(\vec{r}) = k_0$  สมการคลื่นจึงกลายเป็น

$$[\nabla^2 + k_0^2]u(\vec{r}) = 0 \quad (2.13)$$

ถ้า Vector Gradient Operator,  $\nabla$ , ที่กระจายเป็นแบบ 2 มิติ นั้น จะทำให้สมการคลื่นมีค่า

$$\frac{\partial^2 u(\vec{r})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(\vec{r})}{\partial y^2} + k_0^2 u(\vec{r}) = 0 \quad (2.14)$$

โดยสมมติผลเฉลยสมการ  $u(\vec{r}) = e^{j\vec{k}\cdot\vec{r}}$

โดยที่  $\vec{k} = (k_x, k_y)$  คือ เวกเตอร์การแพร่ในระนาบ 2 มิติ

$u(\vec{r})$  คือ คลื่นระนาบ 2 มิติของ spatial frequency  $|\vec{k}|$

ซึ่งค่า  $u(\vec{r})$  ดังกล่าวเป็นค่าฟังก์ชันพื้นฐานสำหรับฟูรีเยร์ทรานฟอร์ม 2 มิติ

โดยที่

$$|\vec{k}|^2 = k_x^2 + k_y^2 = k_0^2 \quad (2.15)$$

### 2.2.2 สมการคลื่นของสารไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Inhomogeneous Wave Equation)

กรณีที่เราต้องการสร้างภาพของวัตถุที่ไม่ใช่เนื้อเดียวกันนั้น จากสมการคลื่นทั่วไป คือ

$$[\nabla^2 + k(\vec{r})^2]u(\vec{r}) = 0 \quad (2.16)$$

กรณีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไม่สนใจผลกระทบจากการโพลาไรซ์ เราสามารถพิจารณา  $k(\vec{r})$  เป็นฟังก์ชันสเกลาร์แทนค่าดัชนีหักเหของวัตถุ โดยเขียนว่า

$$k(\vec{r}) = k_0 n(\vec{r}) = k_0 [1 + n_s(\vec{r})] \quad (2.17)$$

โดยที่  $k_0$  คือ ค่าเฉลี่ยของเลขคลื่นของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$n_s(\vec{r})$  คือ การเบี่ยงเบนของค่าดัชนีหักเห

โดยทั่วไปเราจะสมมติให้วัตถุมีขนาดจำกัดดังนั้นบริเวณภายนอกวัตถุจะมีค่า  $n_s(\vec{r})$  เป็น 0 สมการคลื่นจะเขียนใหม่ได้ว่า

$$[\nabla^2 + k_0^2]u(\vec{r}) = -k_0^2[n(\vec{r})^2 - 1](\vec{r})u(\vec{r}) \quad (2.18)$$

โดยที่  $n(\vec{r})$  คือ ค่าดัชนีหักเหทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุ

$$n(\vec{r}) = \sqrt{\frac{\mu(\vec{r})\epsilon(\vec{r})}{\mu_0\epsilon_0}} \quad (2.19)$$

โดยที่  $\mu_0$  และ  $\epsilon_0$  คือค่าเฉลี่ยของ magnetic permeability และ dielectric constant ตามลำดับ สมการคลื่นทั่วไปที่มีการรบกวนเพียงเล็กน้อยจะเขียนได้ว่า

$$[\nabla^2 + k^2_0]u(\vec{r}) = -o(\vec{r})u(\vec{r}) \quad (2.20)$$

โดยที่  $o(\vec{r}) = k^2_0[n^2(\vec{r}) - 1]$  แทนฟังก์ชันของวัตถุ

เมื่อเราพิจารณาค่าสนาม  $u(\vec{r})$  เป็นผลรวมของสององค์ประกอบได้แก่  $u_o(\vec{r})$  และ  $u_s(\vec{r})$  เมื่อ  $u_o(\vec{r})$  คือ incident field เป็นค่าสนามที่เกิดขึ้นเมื่อไม่มีวัตถุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน(Inhomogeneous) และ  $u_s(\vec{r})$  คือ scattered field ซึ่งจะเกิดกรณีที่เป็นวัตถุที่ไม่ใช่เนื้อเดียวกัน(Inhomogeneous)จะได้

$$[\nabla^2 + k^2_0]u_o(\vec{r}) = 0 \quad (2.21)$$

สนามรวมจาก  $u(\vec{r}) = u_o(\vec{r}) + u_s(\vec{r})$  ค่าของสมการคลื่นที่มีเพียงองค์ประกอบของ  $u_s(\vec{r})$  คือ

$$[\nabla^2 + k_0^2]u_s(\vec{r}) = -u(\vec{r})o(\vec{r}) \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการนี้เรียกว่า “Helmholtz equation” แต่สมการนี้ยังไม่สามารถที่จะแก้สมการหาค่า  $u_s(\vec{r})$  ได้โดยตรง แต่ผลเฉลยของสมการสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ Green's function ได้

$$[\nabla^2 + k^2_0]g(\vec{r}|\vec{r}') = -\delta(\vec{r} - \vec{r}') \quad (2.23)$$

โดยที่ 
$$g(\vec{r}|\vec{r}') = \frac{e^{jk_0R}}{4\pi R}$$

และ 
$$R = |\vec{r} - \vec{r}'|$$

ในสองมิตินั้นค่าสมการที่แก้ได้เขียนในเทอมของ Hankel function อันดับที่สองได้แก่

$$g(\vec{r}|\vec{r}') = \frac{j}{4} H_0^{(1)}(k_0R) \quad (2.24)$$

ฟังก์ชันของกรีน  $g(\vec{r}|\vec{r}')$  เป็นเพียงฟังก์ชันของผลต่างของ  $\vec{r} - \vec{r}'$  ดังนั้นเราจึงอาจเขียนฟังก์ชันดังกล่าวในรูปของ  $g(\vec{r} - \vec{r}')$  เนื่องจากฟังก์ชันวัตถุในนั้นแสดงถึงจุดที่ไม่ใช่เนื้อเดียวกัน เนื่องจากฟังก์ชันของกรีนสามารถพิจารณาเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของสนามจากการกระเจิงแบบจุดๆ เดียว

ในทำนองเดียวกันเราสามารถพิจารณา forcing function ของสมการคลื่นเนื่องจากมีตัวกระตุ้นแบบอนุกรมได้เป็น

$$o(\vec{r})u(\vec{r}) = \int o(\vec{r}')u(\vec{r}')\delta(\vec{r} - \vec{r}')d\vec{r}' \quad (2.25)$$

สมการนี้เรียกว่า forcing function ของสมการคลื่นที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันแทนด้วยผลรวมของตัวกระตุ้นที่มีขนาด  $o(\vec{r}')u(\vec{r}')$  และเลื่อนไป  $\vec{r}$  ฟังก์ชันของกรีนเป็นผลเฉลยของสมการคลื่นสำหรับ delta function เนื่องจากเทอมทางซ้ายมือของสมการคลื่นเป็นเชิงเส้น ผลเฉลยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปผลรวมสนามที่กระเจิงเนื่องจากจุดกระเจิงแต่ละจุด

จากแนวคิดดังกล่าวค่าสนามรวมเนื่องจากตัวกระตุ้น  $o(\vec{r}')u(\vec{r}')\delta(\vec{r} - \vec{r}')$  จะถูกเขียนเป็นผลรวมของ  $g(\vec{r})$  ซึ่งจะเป็นการคอนโวลูชันอย่างง่าย และคลื่นรวมจากแหล่งกำเนิดทั้งหมดอยู่ในเทอมทางขวามือของสมการ(2.22) ซึ่งจะทำให้ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u_s(\vec{r}) = \int g(\vec{r} - \vec{r}') o(\vec{r}') u(\vec{r}') d\vec{r}' \quad (2.26)$$

ถ้ามองแบบผิวเผินในตอนแรกอาจจะเห็นว่าค่าที่ได้เป็นค่าของ scattered field ที่ต้องการ แต่ยังไม่ใช่ scattered field เสียทีเดียว จะต้องทำการอินทิเกรตเพื่อหาค่าดังกล่าวในเทอมของ  $u = u_o + u_s$  และเพื่อที่จะหาค่าสนามดังกล่าวเราต้องอาศัยหลักการประมาณค่ามาช่วยต่อไป

### 2.2.3 การประมาณค่าสมการคลื่น (Approximation to the wave equation)

ในกรณีที่เรากำลังต้องการสร้างภาพของวัตถุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันนั้น เราไม่สามารถที่จะแก้สมการการกระเจิงของคลื่นได้โดยตรงจึงต้องอาศัยหลักการประมาณค่ามาช่วย ซึ่งหลักการประมาณค่าที่นิยมใช้ได้แก่ Born approximation และ Rytov approximation แต่ในที่นี้เราเลือกใช้วิธี First Born approximation ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

#### The First Born approximation

การประมาณค่าของบอร์นอันดับแรกเป็นหนึ่งในวิธีการประมาณค่าในสองวิธีที่ง่ายที่สุด จากสนามรวม  $u(\vec{r})$  แสดงอยู่ในรูปผลรวม สนามตกกระทบ  $u_o(\vec{r})$  และสนามกระเจิง  $u_s(\vec{r})$

$$u(\vec{r}) = u_o(\vec{r}) + u_s(\vec{r}) \quad (2.27)$$

อินทิเกรตสมการ  $\int_V (g \nabla^2 u_o - u_o \nabla^2 g) d^3 \vec{r} = \int_V \delta^3 u_o d^3 \vec{r} = u_o$  จึงเขียนได้เป็น

$$u_s(\vec{r}) = \int g(\vec{r} - \vec{r}') o(\vec{r}') u_o(\vec{r}') d\vec{r}' + \int g(\vec{r} - \vec{r}') o(\vec{r}') u_s(\vec{r}') d\vec{r}' \quad (2.28)$$

ถ้าสนามการกระเจิง  $u_s(\vec{r})$  มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ  $u(\vec{r})$  ผลกระทบของเทอมที่สองสามารถตัดทิ้งได้

$$u_s(\vec{r}) \cong u_b(\vec{r}) = \int g(\vec{r} - \vec{r}') o(\vec{r}') u_o(\vec{r}') d\vec{r}' \quad (2.29)$$

การประมาณค่าอันดับแรกของบอร์นจะใช้ได้ก็ต่อเมื่อขนาดของสนามที่กระเจิง

$$u_s(\vec{r}) = u(\vec{r}) - u_o(\vec{r}) \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าน้อยกว่าของสนามที่ตกกระทบ  $u_0$  ถ้าวัตถุเป็นทรงกระบอกเนื้อเดียวกันจะสามารถแสดงเงื่อนไขนี้เป็นฟังก์ชันของขนาดของวัตถุและดัชนีหักเห ถ้าให้คลื่นตกกระทบ  $u(\vec{r}')$  เป็นคลื่นระนาบที่กำลังเคลื่อนที่ไปในทิศทาง  $k_0$  สำหรับวัตถุที่มีขนาดใหญ่สนามภายในวัตถุจะไม่สามารถประมาณได้ว่าเป็นสนามตกกระทบ

$$u(\vec{r}) = u_{\text{object}}(\vec{r}) \neq Ae^{jk_0 \vec{r}} \quad (2.31)$$

แต่จะเป็นฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเห  $n_s$  ไปตามรังสีผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกและขนาดกับการเคลื่อนที่ของคลื่นตกกระทบ สนามภายในวัตถุประมาณได้เป็นคลื่นที่ตกกระทบที่มีความเร็วช้ากว่า(หรือเร็วกว่า)

$$u_{\text{object}}(\vec{r}) = Ae^{jk_0(1+n_s)\vec{r}} \quad (2.32)$$

เพราะว่าคลื่นเคลื่อนที่ผ่านวัตถุความต่างเฟสระหว่างคลื่นที่ตกกระทบและสนามภายในวัตถุประมาณได้ว่าเท่ากับอินทิกรัลของดัชนีหักเหคลื่นเคลื่อนที่ผ่านสำหรับทรงกระบอกเนื้อเดียวที่มีรัศมีเป็น  $a$  เท่าของความยาวคลื่นการเลื่อนเฟสจะเป็น

$$\text{Phase shift} = 4\pi n_s \frac{a}{\lambda}$$

โดยที่  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่นของคลื่นตกกระทบ สำหรับการประมาณของบอร์นที่ใช้ได้ก็คือการเลื่อนเฟสต้องมีค่าน้อยกว่า  $\pi$  หรือ  $an_s < \frac{\lambda}{4}$

#### 2.2.4 ทฤษฎีฟูเรียร์ดิฟแฟรคชัน (The Fourier Diffraction Theorem)

พื้นฐานของ Diffraction Tomography คือ Fourier Diffraction Projection Theorem ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของฟูเรียร์ทรานฟอร์มของข้อมูล forward scattered data ที่ได้จากการวัดกับการแปลงฟูเรียร์ของวัตถุทฤษฎีจะใช้ได้ก็ต่อเมื่อวัตถุจะกระเจิงคลื่นแบบอ่อนๆเท่านั้นเมื่อวัตถุ  $f(x,y)$  ถูกฉายด้วยคลื่นระนาบดังแสดงในรูปที่(2.2.1) ฟูเรียร์ทรานฟอร์มของ forward scattered data ที่วัดบนเส้น  $TT'$  ให้ค่าของฟูเรียร์ทรานฟอร์ม 2 มิติ  $F(\omega_1, \omega_2)$  ของวัตถุตามเส้นโค้งวงกลมในโดเมนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสนามกระเจิงที่เกิดจากวัตถุที่กระเจิงคลื่นอ่อนๆ โดยแสดงให้อยู่ในรูปของการคอลโลอิดชัน

$$u_B(\vec{r}) = \int g(\vec{r} - \vec{r}') o(\vec{r}') u_o(\vec{r}') d\vec{r}' \quad (2.33)$$

โดยที่  $u_B(\vec{r})$  แทนแอมพลิจูดเชิงซ้อนของสนามในการประมาณของบอร์น จากอินทิกรัลนี้มีสองวิธีในการหาทฤษฎีฟูเรียร์ดิฟแฟรกชัน

#### Decomposing the Green's Function

วิธีแรก Green's function จะถูกแยกออกเป็นองค์ประกอบของคลื่นระนาบ จากสมการข้างบนสนามกระเจิงสามารถพิจารณาว่าเป็นการคอนโวลูชันของฟังก์ชันกรีน  $g(\vec{r} - \vec{r}')$  และผลของฟังก์ชันวัตถุ  $o(\vec{r}')$  และสนามตกกระทบ  $u_o(\vec{r}')$  พิจารณาผลกระทบบของคลื่นระนาบเดี่ยวที่ตกกระทบบวัตถุ สนามที่กระเจิงไปทางด้านหน้าจะถูกวัดดังรูป(2.2.2)



รูปที่ 2.2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟูเรียร์ดิฟแฟรกชัน กับ ฟูเรียร์ทรานฟอร์มของข้อมูลโปรเจกชันที่ได้จากการเดี่ยวเบนแล้วทำการแปลงฟูเรียร์ของวัตถุกลายเป็นครึ่งวงกลม.

คลื่นระนาบเดี่ยวสามารถพิจารณาใน 2 มิติว่าเป็น

$$u_o(\vec{r}) = e^{j\vec{K}_o \cdot \vec{r}} \quad (2.34)$$

โดยที่  $\vec{K} = (k_x, k_y)$  ที่ทำให้สมการต่อไปนี้เป็นจริง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_0^2 = k_x^2 + k_y^2 \quad (2.35)$$

โดยที่ Green's function สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ Hankel's function อันดับศูนย์

$$g(r | r') = \frac{j}{4} H_0(k_0 | r - r'|) \quad (2.36)$$

และ

$$H_0(k|\bar{r} - \bar{r}') = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\beta} e^{j[\alpha(x-x') + \beta|y-y'|]} d\alpha \quad (2.37)$$

ให้  $\bar{r} = (x, y), \bar{r}' = (x', y')$  และ

$$\beta = \sqrt{k_0^2 - \alpha^2} \quad (2.38)$$

โดยพื้นฐานแล้วสมการ(2.37)แสดงว่าเป็นคลื่นทรงกระบอก  $H_0$  เป็นการรวมของคลื่นระนาบที่ทุกๆ จุด คลื่นที่มีศูนย์กลางที่  $\bar{r}'$  กำลังเคลื่อนที่ออก สำหรับจุดดังกล่าวที่  $y > y_0$  คลื่นเคลื่อนที่ทิศขึ้นในขณะที่  $y < y_0$  คลื่นเคลื่อนที่ลงและที่มากกว่านั้น สำหรับ  $|\alpha| \leq k_0$  คลื่นเป็นแบบปกติที่เคลื่อนที่ไปในทิศทาง  $\tan^{-1}(\frac{\beta}{\alpha})$  อย่างไรก็ตาม สำหรับ  $|\alpha| \geq k_0, \beta$  กลายเป็นจินตภาพ คลื่นจะลดลงอย่างเอ็กโพเนนเชียล และถูกเรียกว่า evanescent waves และไม่มีผลเมื่อจุดสังเกตอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดประมาณ 10 เท่าความยาวคลื่นเมื่อแทนค่าจะได้ว่า

$$u_B(\bar{r}) = \frac{j}{4\pi} \int o(\bar{r}') u_o(\bar{r}') \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\beta} e^{j[\alpha(x-x') + \beta|y-y'|]} d\alpha d\bar{r}' \quad (2.39)$$

เพื่อที่จะแสดงขั้นตอนแรกในการพิสูจน์ทฤษฎี สมมติว่าทิศทางการตกกระทบของคลื่นระนาบอยู่ในทิศทางแกน  $y (+)$  ดังนั้น คลื่นที่ตกกระทบคือ

$$u_o(\bar{r}) = e^{js_0 \cdot \bar{r}} \quad (2.40)$$

โดยที่  $s_0 = (0, k_0)$  ดังนั้น ในการสร้างภาพแบบส่องผ่านสนามที่กระเจิงถูกโดยอาร์เรย์ที่อยู่ตำแหน่ง  $y = 1_0$  ( $1_0$  มากกว่าจุด  $y$  ใดๆในวัตถุ) ในเทอม  $|y - y'|$  แทน  $| - y'|$  เขียนใหม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u_B(x, y = l_0) = \frac{j}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\alpha \int \frac{O(\bar{r}')}{\beta} e^{j[\alpha(x-x') + \beta|l_0-y'|]} e^{jk_0 y'} d\bar{r}' \quad (2.41)$$

จะเห็นได้ว่า เทอมในอินทิกรัลภายในเป็นฟูเรียร์ทรานฟอร์มของฟังก์ชันวัตถุ 2-มิติที่มีความถี่  $(\alpha, \beta - k_0)$  สนามที่กระเจิงสามารถเขียนได้เป็น

$$u_B(x, y = l_0) = \frac{j}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\beta} e^{j[\alpha x + \beta|l_0|]} O(\alpha, \beta - k_0) d\alpha \quad (2.42)$$

ให้  $O$  แทนฟูเรียร์ทรานฟอร์ม 2 มิติของฟังก์ชันวัตถุ  $U_B(\omega, l_0)$  แทนฟูเรียร์ทรานฟอร์มของข้อมูลใน 1 มิติที่วัดได้  $u_B(x, l_0)$  เทียบกับ  $x$  นั่นคือ

$$U_B(\omega, l_0) = \int_{-\infty}^{\infty} u_B(x, l_0) e^{-j\omega x} dx \quad (2.43)$$

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ฟิสิกส์ของการเคลื่อนที่ของคลื่นชี้ให้เห็นว่า ความถี่สูงสุด ไม่สามารถเกิน  $k_0$  ดังนั้น โดยส่วนใหญ่  $U_B(\omega, l_0) = 0$  เมื่อ  $|\omega| < k_0$  ถ้าแปลงฟูเรียร์ทรานฟอร์มของวัตถุหาได้จากการแทนค่า(2.42)ด้วย(2.43)และใช้คุณสมบัติของฟูเรียร์อินทิกรัล

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{j(\omega-\alpha)x} dx = 2\pi\delta(\omega-\alpha) \quad (2.44)$$

$\delta(\cdot)$  เป็น Dirac delta function สนามกระเจิงสามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$U_B(\alpha, l_0) = \frac{j}{2\sqrt{k_0^2 - \alpha^2}} e^{j\sqrt{k_0^2 - \alpha^2} l_0} O(\alpha, \sqrt{k_0^2 - \alpha^2} - k_0) \quad |\alpha| < k_0 \quad (2.45)$$

สมการนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟูเรียร์ทรานฟอร์มของวัตถุกับฟูเรียร์ทรานฟอร์มมิติเดียวของสนามที่ตัวรับ สำหรับค่าแฟกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{j}{2\sqrt{k_0^2 - \alpha^2}} e^{j\sqrt{k_0^2 - \alpha^2} l_0} \quad (2.46)$$

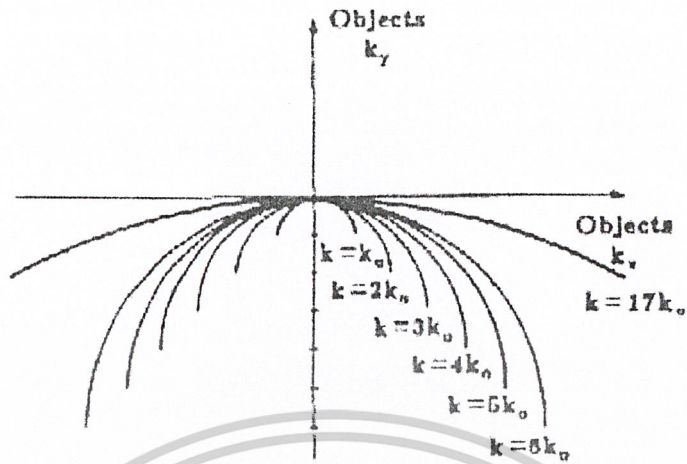
เป็นค่าคงที่สำหรับตัวรับที่อยู่กับที่ เมื่อ  $\alpha$  แปรเปลี่ยนจาก  $-k_0$  ถึง  $k_0$  โคออร์ดิเนต  $(\alpha, \sqrt{k_0^2 - \alpha^2} - k_0)$  ในการฟูรีเยร์ทรานฟอร์มของฟังก์ชันวัตถุเป็นเส้นโค้งในระนาบ(u,v) ดังแสดงในรูป (2.2.3)

### 2.2.5 กระบวนการเก็บข้อมูล (The Data Collection Process)

การทดลองโทโมกราฟีที่ดีควรจะหาค่าฟูรีเยร์ทรานฟอร์มวัตถุทุกความถี่ มีวิธีที่แตกต่างหลายวิธีที่สามารถใช้ประมาณค่าฟังก์ชันของวัตถุจากสนามที่มีการกระเจิง ระนาบคลื่นที่แปลงฟูรีเยร์(มีการเพิ่มความถี่  $\sqrt{2}k_0$ ) ของวัตถุได้เป็นเส้นโค้งครึ่งวงกลม มีสองวิธีนี้ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางและความถี่ของระนาบคลื่นที่ตกกระทบที่โดเมนค่าความถี่ โดยจะเลือกค่าที่เหมาะสมกับทิศทางและความถี่เพื่อฟูรีเยร์ทรานฟอร์มวัตถุที่ทุกความถี่ที่ให้มา ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงรัศมีของครึ่งวงกลมโดยแปรตามความถี่ของสนามที่ตกกระทบและทำให้เกิดการประมาณค่าการฟูรีเยร์ทรานฟอร์มของวัตถุ

วิธีการเก็บข้อมูลคือการหมุนวัตถุและทำการวัดค่าสนามกระเจิงในทิศทางที่ต่างๆ ในแต่ละทิศทางจะทำให้ได้ค่าของฟูรีเยร์ทรานฟอร์มของวัตถุเป็นเส้นโค้งครึ่งวงกลม เมื่อวัตถุถูกหมุนจนครบ 360 องศา การประมาณที่ฟูรีเยร์ทรานฟอร์มของวัตถุจะมีลักษณะคล้ายจาน(disk)

ค่าที่ได้จากวิธีนี้จะแสดงดังรูป 2.2.4 ซึ่งเป็นการทดลองจำนวนแปดโปรเจกชัน สังเกตว่ามีสองเส้นโค้งผ่านจุดแต่ละจุดใน fourier space อีกด้านหนึ่ง ถ้าข้อมูลที่สะท้อนถูกเก็บค่าโดยการวัดสนามที่ด้านเดียวเท่ากับแหล่งกำเนิดแล้วการประมาณค่าของวัตถุสามารถทำได้ที่มีความถี่มากกว่า  $\sqrt{2}k_0$



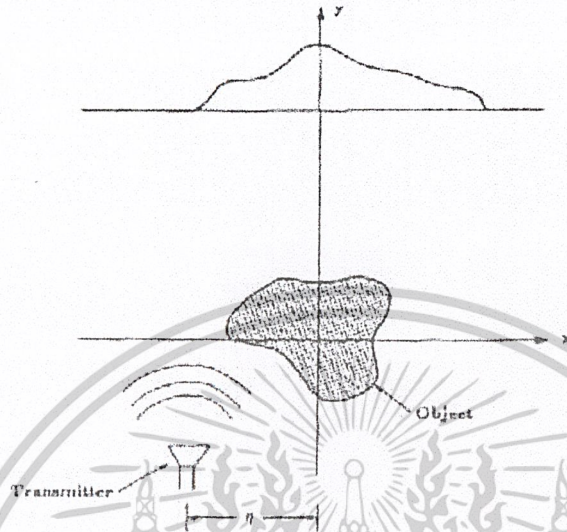
รูปที่ 2.2.3 แสดงค่าฟูรีเยร์ทรานฟอร์มเมื่อเพิ่มค่าความถี่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.2.4 แสดงคลื่นระนาบที่สองผ่าน การประมาณค่าฟูรีเยร์ทรานฟอร์มของวัตถุเป็นเส้นโค้งวงกลม

47288

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2.5 แสดงการฉายคลื่นระนาบส่องผ่านวัตถุ

พิจารณาแหล่งกำเนิดของคลื่นที่มีการฉายระนาบส่องผ่านวัตถุดังรูป 2.2.5 สนามที่มีการส่องผ่าน,  $u_i$ , สามารถแทนค่าระนาบคลื่นได้โดยการฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มฟังก์ชันที่ผ่านช่อง(aperture) ได้ว่า

$$u_i(x) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} A_i(k_x) e^{jk_x x} dk_x \quad (2.47)$$

เลื่อนแหล่งกำเนิดไปยังตำแหน่งใหม่,  $\eta$  ระบายคลื่นที่มีการส่องผ่านจะกลายเป็น

$$u_i(x; \eta) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} (A_i(k_x) e^{jk_x \eta}) e^{jk_x x} dk_x \quad (2.48)$$

ให้แยกระนาบคลื่นได้สนามที่ตกกระทบในระนาบได้

$$u_i(\eta; x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{4\pi^2} A_i(k_x) e^{jk_x \eta} \right) e^{jk_x x + k_y y} dk_x \quad (2.49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

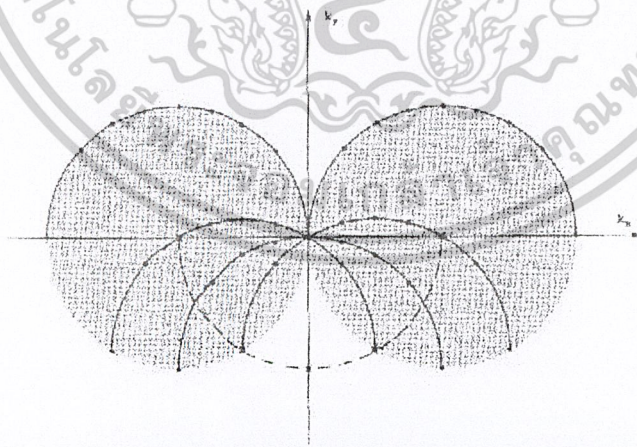
ในสมการ(2.44)แทนสมการสนามที่มีการกระเจิงจากคลื่นระนาบ เพราะฟูรีเยร์ทรานฟอร์มผลที่ได้จากแต่ละคลื่นระนาบ,  $e^{j(k_x x + k_y y)}$  สามารถแสดงได้ในวงเล็บและในส่วนเพิ่มเติมพบว่าการแปลงฟูรีเยร์ของสนามที่กระเจิงทั้งหมดเนื่องจากสนามที่ตกกระทบ  $u_i(x; \eta)$  ได้ว่า

$$U_s(\eta; \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} (A_i(k_x) e^{jk_x \eta}) \frac{O(\alpha - k_x, \gamma - k_y)}{j2\gamma} dk_x \quad (2.50)$$

ทำการแปลงฟูรีเยร์ทั้งสองข้างที่ตำแหน่งที่ส่งผ่าน(transmitter position),  $\eta$  พบว่า

$$U_s(k_x; \alpha) = A_i(k_x) \frac{O(\alpha - k_x, \gamma - k_y)}{j2\gamma} \quad (2.51)$$

ทำการเก็บค่าสนามที่มีการกระเจิงที่ตัวรับซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งที่มีการส่งผ่าน(transmitter position),  $\eta$  คล้ายกรณีคลื่นระนาบที่ตกกระทบสนามที่กระเจิงจะมีความสัมพันธ์กับการแปลงฟูรีเยร์ของวัตถุ ไม่เหมือนกับกรณีก่อนที่รูปของวัตถุเป็นคู่ของวงกลมดังรูปที่ 2.2.6 รูปนี้จะเป็นส่วนประกอบของการส่งผ่านจากทุกจุดในเส้นและวัตถุสนามที่กระเจิงที่ทุกตำแหน่งที่ตัวรับ โดยทำการหมุนวัตถุ 90 องศา



รูปที่ 2.2.6 แสดงการประมาณของฟูรีเยร์ทรานฟอร์มของวัตถุในช่อง(aperture)

จากรูปที่ 2.2.6 เป็นโครงสร้างที่ได้จากการคำนวณของเวกเตอร์  $\vec{K}$  และ  $\vec{\Lambda}$  เส้นประในรูปที่ 2.2.6 แสดงเวกเตอร์การแพร่,  $(-\vec{\Lambda})$  ของคลื่นที่มีการส่งผ่าน แต่ละเวกเตอร์  $(-\vec{\Lambda})$  เป็นครึ่งวงกลมของเวกเตอร์แทนคลื่นตัวรับสามารถเพิ่มได้ ระนาบคลื่นที่ได้รับถูกแสดงที่ตรงกลางของครึ่งวงกลมที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเส้นทึบของคลื่นที่ส่งผ่านซึ่งคู่ได้ที่  $x$  ค่าที่ได้ใน frequency domain จะคล้ายกับค่าที่ประมาณได้จากช่อง(aperture) ระบายคลื่นที่มีทิศทางจะขึ้นกับเฟสที่มีการส่งผ่าน ตัวรับจะรับคลื่นที่เคลื่อนที่ไปทางขวาผลที่ได้จากวิธีนี้ดูที่รูป 2.2.7(a) ถ้าให้ฟังก์ชันของวัตถุเป็นจำนวนจริงสามารถให้การแปลงฟูเรียร์ในการอธิบายรูป 2.2.7(b) ได้



รูปที่ 2.2.7 แสดงการประมาณค่าของ VSP (a) ถ้าฟังก์ชันวัตถุเป็นจำนวนจริงแล้วทำให้ฟูเรียร์ทรานฟอร์มสามารถให้ประมาณค่าวัตถุได้ดัง (b)

ดังนั้นจึงพิจารณาช่วงแคบๆที่มีการส่งผ่านของสนามที่บางจุดซึ่งสามารถอธิบายแอมพลิจูดได้ พิจารณาระนาบคลื่นที่มีการส่งผ่านวัตถุ,  $A_r(t)$  เรียกว่าระนาบคลื่นเพราะแอมพลิจูดของสนามตั้งฉากกับทิศที่มีการเคลื่อนที่ของที่แปลงฟูเรียร์ในโดเมนค์เวลาสามารถแบ่งสนามออกได้ตามความถี่ที่แตกต่างกัน  $\omega$  ได้ว่า

$$A_r(x, y, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} A_r(x, y, t) e^{+j\omega t} dt \quad (2.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้แอมพลิจูดของสนามที่บางความถี่ทำการแบ่งค่าสนามเข้าไปโดยตรงในระนาบคลื่นโดยการแปลงฟูเรียร์ระนาบการส่งผ่าน บางระนาบคลื่นจะอธิบายฟังก์ชันของความถี่  $k_\omega = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$  และความถี่  $\omega$  มีความสัมพันธ์โดย  $k_\omega = \frac{c}{\omega}$ ,  $c$  = ความเร็วของการแพร่ในตัวกลาง

ถ้าค่าแอมพลิจูดในการส่งผ่านของระนาบคลื่นของเกี่ยวกับความถี่  $k_x$  และความถี่  $\omega$  ที่ระนาบคลื่นที่มีการกระเจิงและแอมพลิจูด  $u_s$

$$u_s(x, y; t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \int_{-k\omega}^{k\omega} dk_x A_t(k_x, \omega) e^{-j\omega t} u_s(k_x, \omega; y) e^{j(k_x x + k_y y)} \quad (2.53)$$

สำหรับระนาบคลื่นที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.2.8(a) , 2.2.8(b) แสดงการทดลองที่มุม 0,90,180,270 องศา

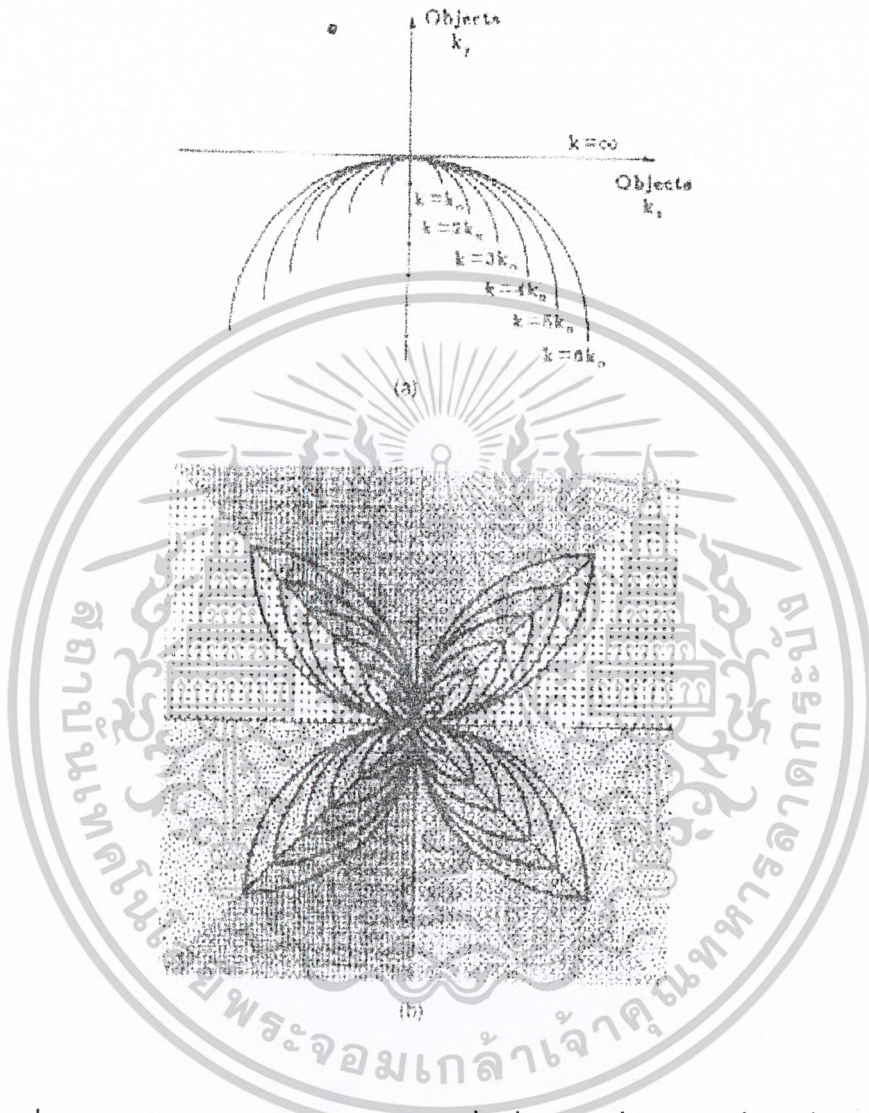
### 2.2.6 การอินเตอร์โพลชันและอัลกอริทึมของการแบคพรอเจกชันแหล่งกำเนิดที่เลี้ยวเบน (Interpolation and a Filtered Backpropagation Algorithm for Diffracting Sources)

จากทฤษฎี Fourier Diffraction Theorem พบว่าเมื่อวัตถุถูกส่งผ่านโดยระนาบคลื่นเดินทางในทิศ  $y(+)$  ค่าที่ทำการแปลงฟูเรียร์สนามที่มีการกระเจิงจะได้ดังรูป 2.2.2 เพราะฉะนั้นเมื่อเราส่งผ่านวัตถุในทิศทางที่แตกต่างกันทำให้ได้รูปร่างคล้ายงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $\sqrt{2}k$  ใน frequency domain ของ  $O(\omega_1, \omega_2)$  ซึ่งเป็นค่าที่แปลงฟูเรียร์ของวัตถุแล้วทำการสร้างภาพของวัตถุโดยการกลับค่าฟูเรียร์

จากตัวอย่างค่าที่ได้ใน โดเมนค่าความถี่จะเป็น โค้งวงกลม ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากในการคำนวณการสร้างภาพสำหรับเทคนิคคิฟเฟรคชัน โทโมกราฟี จึงได้มีการกระจายข้อมูลใน โดเมนค่าความถี่ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.2.4 แต่ละเส้น โค้งในกริด(grid)จะตรงกับการแปลงของแต่ละโปรเจกชันในการสร้างภาพจะต้องเปลี่ยนกริดวงกลมเป็นกริดสี่เหลี่ยม

อย่างไรก็ตามสำหรับการประยุกต์มี2วิธีที่ใช้สำหรับการสร้างภาพวัตถุจากค่าสนามที่วัดได้จากการกระเจิง 2 จุดที่นำมาพิจารณาคือการ interpolation ใน frequency domain และ ใน space domain ซึ่งจะเหมือนกับการกลับฟูเรียร์โดยตรง( direct fourier inversion) และ การแบคโปรเจกชัน (backprojection) ของโทโมกราฟี ไม่เหมือนกับโทโมกราฟีทั่วไปที่การแบคโปรเจกชันจะแสดงการประมาณ,ค่าของค่าของ space domain ที่ทำการ interpolationของการเลี้ยวเบน โปรเจกชันทำให้โดเมนค่าความถี่ที่ interpolation แสดงการประมาณค่าสำหรับการสร้างภาพจากเทคนิคคิฟเฟรคชันโทโมกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2.8 (a) การประมาณค่าฟูเรียร์ทรานฟอร์มซึ่งคลื่นระนาบที่ตกกระทบที่มีความถี่ต่างๆ  
 (b) แสดงผลการทดลองที่มุม 0, 90, 180, และ 270 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.7 การอินเตอร์โพลชันที่โดเมนค่าความถี่ (Frequency Domain Interpolation)

เพื่ออธิบายโดเมนค่าความถี่ที่ทำการ interpolation ระหว่างกริดที่โค้งเป็นวงกลมซึ่งข้อมูลเกิดโดยดิฟเฟรกันซ์โทโมกราฟีและกริดสี่เหลี่ยมที่เหมาะสมสำหรับการสร้างภาพ  $U_B(\omega, l_0)$  แทนฟูเรียร์ทรานฟอร์มของข้อมูลที่ได้จากการส่งผ่านเมื่อวัตถุถูกฉายระนาบคลื่นผ่านในทิศทาง  $y$

(+)  $U_{B,\phi}(\omega)$  แทนฟูเรียร์ทรานฟอร์มที่มุม  $\phi$  เป็นมุมของการส่งผ่าน แสดงดังรูปที่ 2.2.9

$Q(\omega, \phi)$  อธิบายค่าของ  $O(\omega_1, \omega_2)$  ของเส้นโค้งวงกลมที่มุม  $\phi$  ดังรูปที่ 2.2.10

$$Q(\omega, \sqrt{k_0^2 - \omega^2} - k_0) \quad |\omega| < k_0 \quad (2.54)$$

เพราะฉะนั้น เมื่อฉายระนาบคลื่นมีการส่งผ่านเกิดมุมตกกระทบเป็นมุม  $\phi$  ได้สมการว่า

$$U_B(\alpha, l_0) = \frac{j}{2\sqrt{k_0^2 - \alpha^2}} e^{j\sqrt{k_0^2 - \alpha^2} l_0} O(\alpha, \sqrt{k_0^2 - \alpha^2} - k_0) \quad |\alpha| < k_0 \quad (2.55)$$

เขียนได้

$$U_{B,\phi}(\omega) = \frac{j}{2} \frac{1}{\sqrt{k^2 - \omega^2}} \exp[jl\sqrt{k^2 - \omega^2}] Q(\omega, \phi) \quad |\omega| < k \quad (2.56)$$

เมื่อ  $Q(\omega)$  เป็นฟูเรียร์ทรานฟอร์มของวัตถุที่เส้นโค้งเป็นวงกลม AOB ดังรูปที่ 2.2.10 และ  $k$  เป็นโปรเจกชันของจุดที่เส้นโค้งวงกลมบนเส้น CD, ความเป็นยูนิฟอร์มของ  $Q$  ใน  $k$  ทำการแปลงค่าเป็นไม่เป็นยูนิฟอร์มที่เส้นโค้งดัง AOB ดังรูปที่ 2.2.11 จะพบว่าทุกจุดบนเส้น AOB เป็นพาราเมเตอร์ของ  $(\omega, \phi)$



ก่อนที่จะบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\omega, \phi)$  และ  $(\omega_1, \omega_2)$  ต้องพิจารณาจุด AO และ OB ที่เส้นโค้ง AOB ต้องพิจารณาที่มุม  $\phi$  ซึ่งแปรเปลี่ยนจาก 0 ถึง  $2\pi$  กลับค่าพารามิเตอร์  $(\omega, \phi)$  เพื่อแสดงกริดที่โค้งที่เกิดจากหนึ่งโปรเจกชันและพบว่า  $\omega$  จะเปลี่ยนจาก 0 ถึง  $k$  และ  $\phi$  เปลี่ยนจาก 0 ถึง  $2\pi$

เนื่องจากมีพารามิเตอร์ของสมการระหว่าง  $(\omega_1, \omega_2)$  และ  $(\omega, \phi)$  โคออร์ดิเนต  $(\omega_1, \omega_2)$  มีความสัมพันธ์กับโคออร์ดิเนตเชิงขั้ว  $(\Omega, \theta)$  (ดังรูปที่ 2.2.12)

$$\Omega = \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2} \quad (2.57)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \quad (2.58)$$

กำหนดให้มุม  $\beta$  เป็นมุมที่บอกตำแหน่งเชิงมุมของจุด  $(\omega_1, \omega_2)$  บนเส้น OB ในรูป 2.2.12 จากรูปพบว่าลักษณะมุม  $\beta$  ขึ้นกับพารามิเตอร์  $\omega$  ได้ความสัมพันธ์ดังนี้  $\omega = k \sin \beta$  และความสัมพันธ์ระหว่างโคออร์ดิเนตเชิงขั้ว  $(\Omega, \theta)$ , พารามิเตอร์  $\beta$  และ  $\phi$  คือ

$$\beta = 2 \sin^{-1} \frac{\Omega}{2k} \quad (2.59)$$

$$\phi = \theta + \frac{\pi}{2} + \frac{\beta}{2} \quad (2.60)$$

มีการแปลงสมการสำหรับการอินทิเกรตโพเลนชันจากพารามิเตอร์  $(\omega, \phi)$  ซึ่งใช้สำหรับแทนข้อมูลในพารามิเตอร์  $(\omega_1, \omega_2)$  ที่ต้องทำการกลับค่าการแปลงข้อมูล จำนวนการแปลงค่าของฟังก์ชัน  $\omega$  และ  $\phi$  โดยให้

$$Q(\omega, \phi) = \sum \sum Q(\omega_i, \phi_j) h_1(\omega - \omega_i) h_2(\phi - \phi_j) \quad (2.61)$$

$$\text{ให้} \quad h_1(\omega) = \begin{cases} 1 - \frac{|\omega|}{\Delta\omega} & |\omega| \leq \Delta\omega \\ 0 & \end{cases} \quad (2.62)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h_2(\omega) = \begin{cases} 1 - \frac{|\phi|}{\Delta\phi} & |\phi| \leq \Delta\phi \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.63)$$

$\Delta\phi$  และ  $\Delta\omega$  เป็นค่าสุ่มระยะห่างในการสุ่มเก็บค่า สำหรับ  $\phi$  และ  $\omega$  ข้อมูลโดเมนฟูรีเยร์คือค่า  $F(u, v)$  การสร้างภาพสามารถเขียนได้ว่า

$$f(x, y) = i(x, y) IFT\{F(u, v)\} \quad (2.64)$$

ให้ฟังก์ชันคือ  $i(x, y) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$

ถ้าฟูรีเยร์ทรานฟอร์มของ  $i(x, y)$  เป็น  $I(u, v)$  ขอบเขตการสร้างภาพได้ว่า

$$f(x, y) = IFT\{I(u, v) * F(u, v)\} \quad (2.65)$$

สังเกตว่าการคูณใน space domain มีค่าสมมูลกับการคอนโวลูชันในโดเมนความถี่ การอินเวอร์สฟูรีเยร์ทรานฟอร์ม มีความจำเป็นเพื่อให้ได้ข้อมูล fourier domain บนกริดสี่เหลี่ยม เริ่มพิจารณาการคอนโวลูชันข้อมูลที่โดเมนความถี่เนื่องจากข้อมูลที่ได้นบนกริดสี่เหลี่ยมนั้นสามารถทำการอินเวอร์สฟูรีเยร์ทรานฟอร์มได้ง่ายเหมือนการทำ polynomial interpolation ข้อมูลที่โดเมนความถี่ของ UFR เขียนได้ว่า

$$F(u, v) = \iint I(u - u', v - v') F(u', v') du' dv' \quad (2.66)$$

ค่าที่ได้จากการทดลอง  $F(u', v')$  เป็นค่าที่อยู่บนวงกลมในรูปของ  $\phi - \omega$  ดังรูปที่ 2.2.10 โดยทำการเปลี่ยนค่า

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T1(\phi, \omega) \\ T2(\phi, \omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{k_0^2 - \omega^2} - k_0 \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

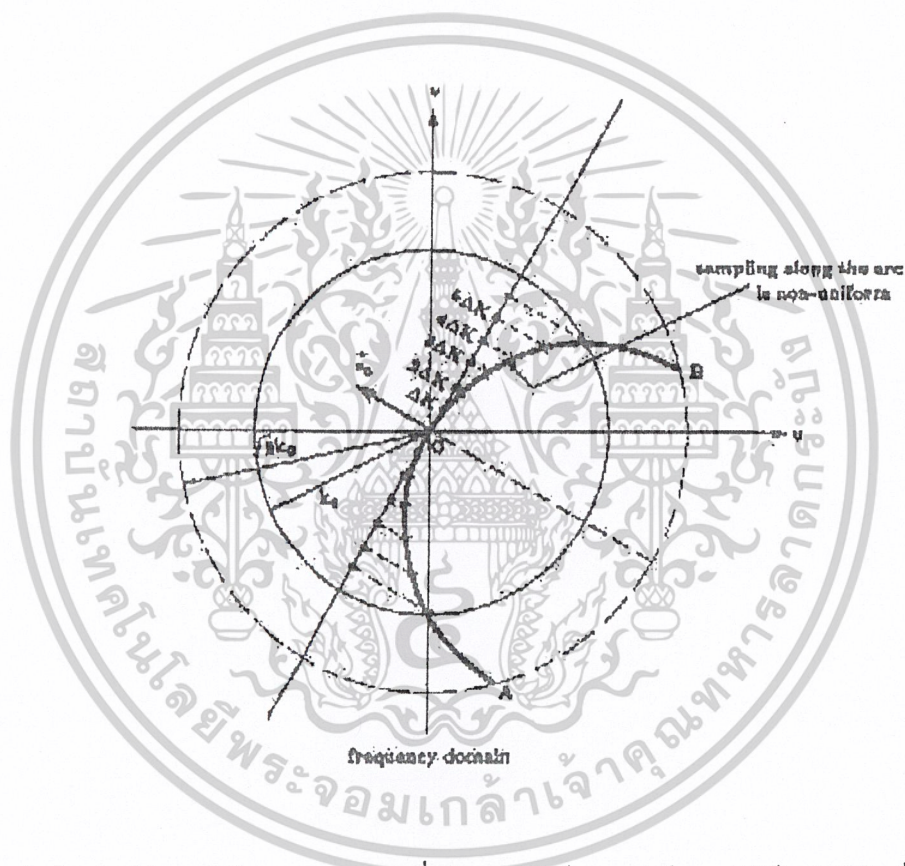
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่า Jacobian ของการแปลงค่าหาได้จาก

$$J(\phi, \omega) = \left| \frac{\partial(u', v')}{\partial(\phi, \omega)} \right| \quad (2.68)$$

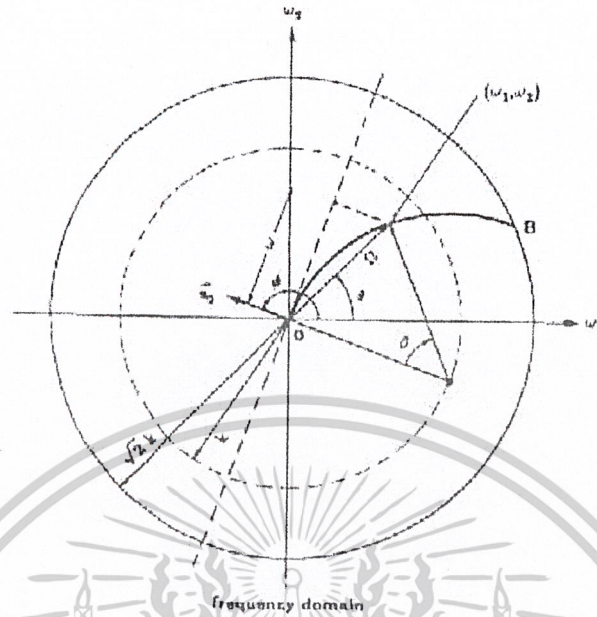
ทำการคอนโวลูชันได้ว่า

$$F(u, v) = \iint J(\phi, \omega) I(u - T_1(\phi, \omega), v - T_2(\phi, \omega)) F(T_1(\phi, \omega), T_2(\phi, \omega)) d\phi d\omega \quad (2.69)$$



รูปที่ 2.2.11 กลุ่มตัวอย่าง โปรเจกชันใน space domain เพื่อทำการฟูรีเยร์ทรานฟอร์มวัตถุให้เป็นเส้นโค้งวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2.12 ในการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรใช้ความสัมพันธ์ข้อมูลโปรเจกชันเพื่อทำการฟูรีเยร์ทรานฟอร์มวัตถุ

### 2.2.8 อัลกอริทึมการแบคพรอบพาเคชัน (Backpropagation Algorithms)

ในปัจจุบัน ได้มีการสร้างภาพจากโปรเจกชันที่มีการเลี้ยวเบนซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า “filtered backprojection method” คล้ายกับเทคนิค filtered backprojection x-ray tomography แต่ไม่มีเครื่องมือที่สามารถใช้วัดค่าได้โดยตรงจึงได้พิจารณาการกลับค่าที่แปลงฟูรีเยร์ของฟังก์ชันวัตถุ

$$o(\vec{r}) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} O(\vec{K}) e^{i\vec{K} \cdot \vec{r}} d\vec{K} \quad (2.70)$$

อินทิเกรตฟังก์ชันวัตถุในทอมแปลงฟูรีเยร์ในโคออร์ดิเนตที่แทนในรูปความถี่ (frequency domain) การทดลองดิฟเฟรเคชัน โทโมกราฟีวัดค่าที่แปลงฟูรีเยร์ของวัตถุได้เป็นเส้นโค้งครึ่งแล้วแปลงให้อยู่ในกริดสี่เหลี่ยม โดยแทน  $\vec{K} = (k_x, k_y)$  ในสมการ(2.70) ซึ่งได้เวกเตอร์รวม

$$\vec{K} = k_o(\vec{s} - \vec{s}_o) \quad (2.71)$$

โดย  $\vec{s}_o = (\cos \phi_o, \sin \phi_o)$  และ  $\vec{s} = (\cos \chi, \sin \chi)$  เป็นหน่วยเวกเตอร์ที่แทนทิศทางของเวกเตอร์คลื่นสำหรับคลื่นระนาบที่ทะลุผ่านและคลื่นระนาบที่รับได้ ตามลำดับ ดูได้ดังรูปที่ 2.2.13 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หา Jacobian ของการแปลงค่านี้ได้ว่า

$$k_x = k_o (\cos \chi - \cos \phi_o) \quad (2.72)$$

$$k_y = k_o (\sin \chi - \sin \phi_o) \quad (2.73)$$

และ

$$dk_x dk_y = |k_o^2 \sin(\chi - \phi_o)| d\chi d\phi_o \quad (2.74)$$

และสมการ(2.17)กลายเป็น

$$o(r) = \frac{1}{(2\pi)^2} \left(\frac{1}{2}\right) k_o^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{\sqrt{1 - (\vec{s} \cdot \vec{s}_o)^2}} O[k_o(\vec{s} - \vec{s}_o)] e^{jk_o(\vec{s} - \vec{s}_o)} d\chi d\phi_o \quad (2.75)$$



รูปที่ 2.2.13  $k_o \vec{r}_o$  และ  $k_o \vec{s}_o$  ที่ใช้ในการอัลกอริทึมเบคพรอบพาเคชัน

ค่าการกระเจิงที่ได้เป็นฟังก์ชันของระบบโคออร์ดิเนต  $(\chi, \phi_o)$  ข้อมูลที่ถูกเลือกจะเป็นฟังก์ชันของ  $\phi_o$  (มุมโปรเจกชัน) และ  $k$  (ค่าความถี่ใน 1 มิติของสนามที่มีการกระเจิงตามแนวของตัวรับ) ในการแปลงค่าโคออร์ดิเนตสุดท้ายจะให้นุม  $\chi$  สัมพันธ์กับโคออร์ดิเนต  $(k, \gamma)$  มีการแทนข้อมูลบนเส้นครึ่งวงกลมและข้อมูลอยู่ในช่วง  $0 \leq \chi \leq \pi$  ได้ค่า  $\chi$  ที่อินทิเกรตในสมการ(2.65)โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d\chi = \frac{-1}{k_o \gamma} dk \quad (2.76)$$

อินทิกรัล  $\chi$  จะกลายเป็น

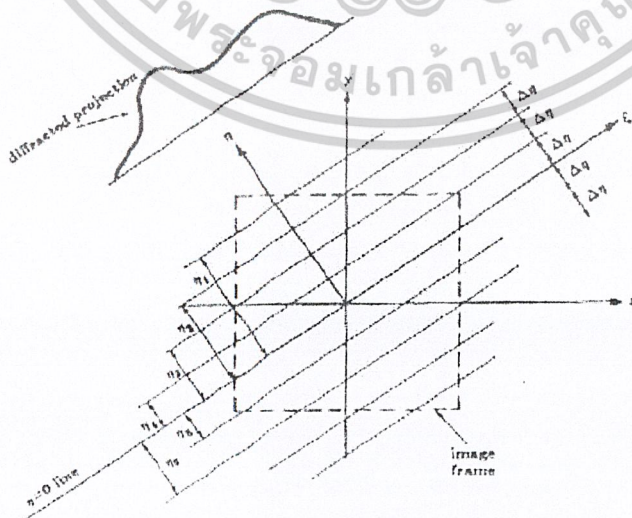
$$\frac{1}{k_o} \int_{-k_o}^{k_o} \frac{dk}{\gamma} |O[k_o(\bar{s} - \bar{s}_o)]| e^{jk(\bar{s} - \bar{s}_o) \cdot \bar{r}} dk \quad (2.77)$$

ใช้ทฤษฎี Fourier Diffraction ตามที่แสดงในสมการ(2.55) ได้ประมาณค่าในการแปลงฟูเรียร์ของฟังก์ชันวัตถุ,  $O$  โดยฟังก์ชันของ first-order Born field,  $u_B$  ที่ตัวรับแล้วฟังก์ชันวัตถุในสมการ(2.77) เขียนได้

$$O[k_o(\bar{s} - \bar{s}_o)] = -2j\gamma U_B(k, \gamma - k_o) e^{-j\gamma l_o} \quad (2.78)$$

ถ้าหมุนโคออร์ดิเนตใช้  $r = (\xi, \eta)$  ที่  $\xi = x \sin \phi - y \cos \phi$  และ  $\eta = x \cos \phi + y \sin \phi$  โคออร์ดิเนต  $(\xi, \eta)$  จะแสดงดังรูปที่ 2.2.14 ใช้ผลที่อยู่ด้านบนบนสามารถอินทิกรัล  $\chi$  ได้

$$\frac{2j}{k_o} \int_{-k_o}^{k_o} dk |k U_B(k, \gamma - k_o) e^{-j\gamma l_o} e^{k\xi + (\gamma - k_o)\eta}| \quad (2.79)$$



รูปที่ 2.2.14 การ backprojection จะขึ้นกับความลึก  $\eta$  ของฟังก์ชันการกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสมการสำหรับฟังก์ชันวัตถุใน(2.75)กลายเป็น

$$o(r) = \frac{jk_0}{(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} d\phi_0 \int_{-k_0}^{k_0} dk |k| U_B(k, \gamma - k_0) e^{-j\eta_0} e^{jk\xi + (r-k_0)\eta} \quad (2.80)$$

เพื่อทำการ filtered backpropagation เขียนได้ว่า

$$\Pi_\phi(\xi, \eta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma_\phi(\omega) H(\omega) G_\eta(\omega) \exp(j\omega\xi) d\omega \quad (2.81)$$

โดย

$$H(\omega) = \begin{cases} |\omega|, & |\omega| \leq k_0 \\ 0, & |\omega| > k_0 \end{cases} \quad (2.82)$$

$$G_\eta(\omega) = \begin{cases} \exp\left[j(\sqrt{k_0^2 - \omega^2} - k_0)\eta\right] & |\omega| \leq k_0 \\ 0, & |\omega| > k_0 \end{cases} \quad (2.83)$$

$$\Gamma_\phi(\omega) = U_B(k, \gamma - k_0) e^{j\eta_0} \quad (2.84)$$

ในเทอมของ filtered projection  $\Pi_\phi(\xi, \eta)$  ใน(2.81)การสร้างภาพของ(2.75)จะได้ว่า

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\phi \Pi_\phi(x \sin \phi - y \cos \phi, x \cos \phi + y \sin \phi) \quad (2.85)$$

### 2.2.9 การประมวลสัญญาณ (Signal Processing Concerns)

หลักในการสร้างภาพของวัตถุจากดิฟเฟรกันซ์ โปรเจกชัน มีดังนี้

1. เก็บข้อมูล
2. ฟูเรียร์ทรานฟอร์มในแต่ละข้อมูลโปรเจกชัน
3. หาค่าฟูเรียร์ทรานฟอร์มสองมิติของวัตถุจากการแปลงข้อมูล โปรเจกชัน
4. อินเวอร์สฟูเรียร์ทรานฟอร์มสองมิติเพื่อให้ได้ภาพของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นได้อย่างชัดเจนว่าการกรองข้อมูลโปรเจกชันมีความสำคัญต่อกระบวนการสร้างภาพ

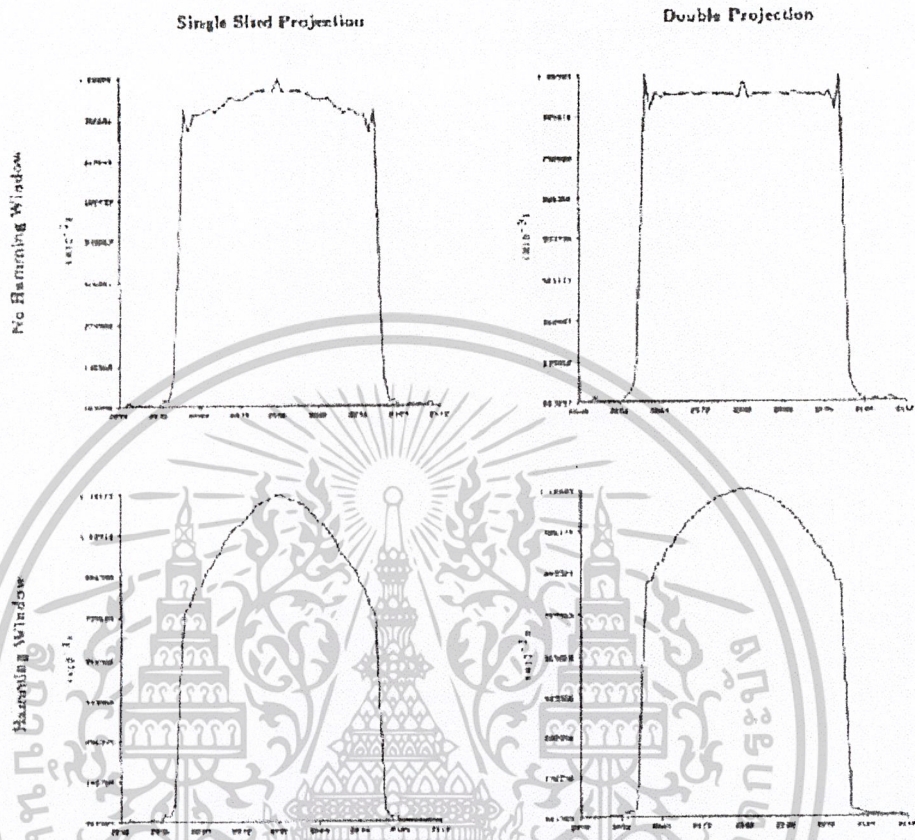
ถ้าหากข้อมูลโปรเจกชันที่มี เพิ่มเข้าไปด้วยข้อมูลที่เป็น 0 จะทำให้จำนวนข้อมูลใหม่กลายเป็น 2 เท่าของข้อมูลเดิม ซึ่งจะทำให้ผลจากวิธีนี้เป็นวงกลม และการคอนโวลูชัน ซึ่งคงเหมือนเดิม ซึ่งสิ่งที่เปลี่ยนไปคือค่าความละเอียดของข้อมูลในโดเมนค่าความถี่ ซึ่งจะทำการทำอินเตอร์โพลชันมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น แต่ข้อเสียก็คือเวลาที่ใช้ในการคำนวณไม่ได้เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของเวลาเดิมแต่จะกลายเป็น

$$\frac{(2N) \log_2(2N)}{N \log_2 N} = 2 \left[ 1 + \frac{2}{\log_2 N} \right] \quad (2.86)$$

จากรูปที่ (2.2.15) จึงสามารถสรุปได้ว่าตรงที่ขนาดของข้อมูลเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า นั้นช่วยให้คุณภาพของภาพที่ได้ดีขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

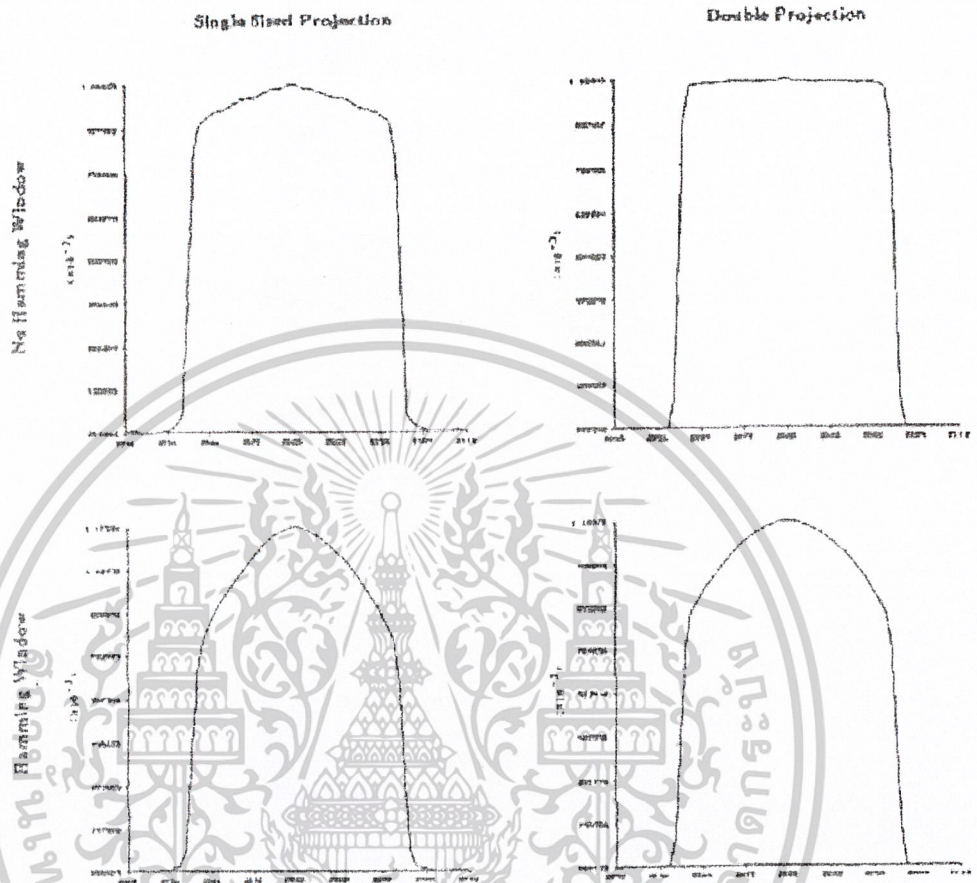
ในกรณีของ CT (computerized tomography) การเก็บข้อมูลในจำนวนจำกัดค่าหนึ่งนั้น จะไม่ทำให้เกิดปัญหาถ้าเกิดว่าเมื่อถึงช่วงที่ไม่มีการเก็บข้อมูลแล้ว ข้อมูลต่อไปจะต้องเป็น 0 นความ เป็นจริงแล้วการทำ คิฟแฟรคชัน โปรเจกชัน ไม่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากค่าแอมพลิจูดของสนามเกิดการ คีเคย์ในอัตราส่วน  $1/R$  และข้อมูลโปรเจกชันก็ไม่มีทางเป็น 0

ข้อแก้ไขที่มีผลต่อคุณภาพของภาพอย่างมากคือการใส่ฟิวเตอร์แบบ low-pass เข้าไปก่อนที่ จะทำการแปลงฟูเรียร์กลับกับข้อมูลการกรอง ก่อนที่จะทำการอินเตอร์โพลชันซึ่งจะช่วยลดค่า ความถี่สูงเนื่องจากสัญญาณรบกวน



รูปที่ 2.2.15 แสดงการสร้างภาพที่เกิดจากข้อมูลโปรเจกชันและเปรียบเทียบระหว่างการเพิ่มและไม่เพิ่มข้อมูลโปรเจกชันขณะที่ไม่ผ่านตัวกรอง low pass filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

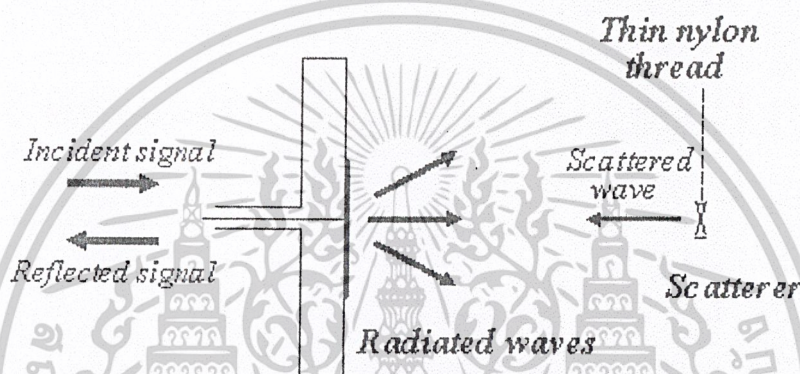


รูปที่ 2.2.16 แสดงการสร้างภาพที่เกิดจากข้อมูลโปรเจกชันและเปรียบเทียบระหว่างการเพิ่มและไม่เพิ่มข้อมูลโปรเจกชันขณะที่ผ่านตัวกรอง low pass filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 หลักการของการมอดูเลตสแคทเตอร์ริง (modulated scattering technique)

สัญญาณที่เกิดจากการกระเจิงจะมีขนาดเล็กมากและอาจจะสูญหายไปหมดเนื่องจากสัญญาณรบกวนที่อยู่รอบๆ ซึ่งเกิดจากการไม่แมทชิงกันของเครื่องมือหรือเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น การผิดรูปทางกลศาสตร์ หรือการเกิดอันตรกิริยาในระบบ เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวนั้น จะทำการมอดูเลตต่อสัญญาณที่ได้จากสายส่งด้วยความถี่ต่ำแล้วจึงแยกสัญญาณเดิมที่ได้กลับคืนมาด้วยตัวรับที่เป็นการตรวจจับแบบโคฮีเรนต์.



รูปที่ 2.3.1 แสดงหลักการเกิดการกระเจิง

ขั้นตอนการทำดังนี้คือ ลดสัญญาณรบกวนโดยแยกสัญญาณที่รั่วหรือไม่แมทออก แล้วเพิ่มค่าเซนซิวิตี (sensitivity) ซึ่งทำได้โดยการมอดูเลตสัญญาณที่กระเจิง สัญญาณสะท้อนที่ถูกมอดูเลตสามารถที่จะนำมากรองแล้วแยกออกมาจากสัญญาณที่ไม่ถูกมอดูเลต ซึ่งการกรองทำได้โดยใช้การตรวจจับแบบ โคฮีเรนต์ ในกรณีที่จะมีผลให้ทั้งค่าเซนซิวิตี (sensitivity) และประสิทธิภาพการแยกสัญญาณแฝงเพิ่มขึ้น

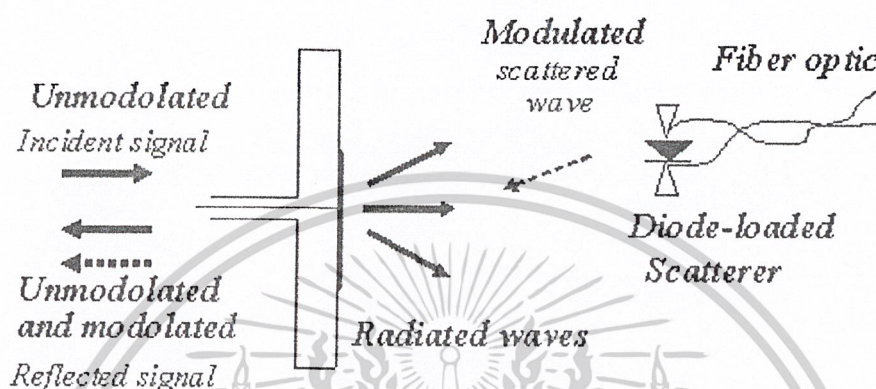
แนวทางในการมอดูเลตสัญญาณที่เกิดการกระเจิงมี 3 แบบด้วยกันได้แก่

1. Mechanically modulated scatterers.
2. Electrically modulated scatterers.
3. Optically modulated scatterers.

แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของ Optically modulated scatterers เพียงอย่างเดียวเนื่องจากเมื่อทำการเปรียบเทียบทั้ง 3 แบบแล้วพบว่าสองแบบหลังสามารถจัดระบบได้ง่ายกว่าแบบแรกที่ต้องทำการหมุนด้วยมอเตอร์หรือการทำการสั่นซึ่งต้องขึงให้ตึงโดยใช้สายไนลอนที่ไม่ทำให้เกิดการรบกวนระบบซึ่งสามารถควบคุมได้ยาก และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสองแบบหลังแล้วพบว่าวิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

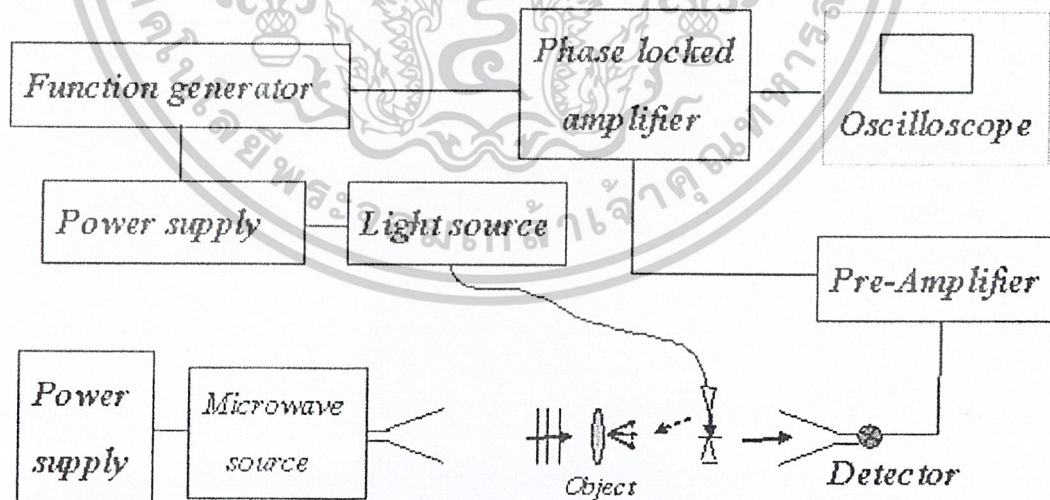
การ Electrically modulated scatterers นั้นมีการรบกวนเนื่องจากค่าสนามที่เกิดจากเส้นลวดโลหะ แต่วิธีการ Optical modulated นั้นทำการมอดูเลตสัญญาณแล้วส่งผ่านใยแก้วนำแสงซึ่งไม่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนต่อค่าสนามที่ต้องการวัดเนื่องจากเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก(แก้ว)



รูปที่ 2.3.2 แสดงหลักการของเทคนิคการมอดูเลตทางแสง

#### Optical Modulation

การมอดูเลตทางแสงทำได้โดยการส่งสัญญาณความถี่ต่ำไปกระตุ้นแหล่งกำเนิดแสงที่



รูปที่ 2.3.3 แสดงระบบที่ทำการมอดูเลตทางแสง

ส่งไปยังอุปกรณ์ตอบสนองทางแสงทำให้อุปกรณ์ดังกล่าวเป็นแหล่งกำเนิดของสัญญาณขึ้น แล้วสัญญาณดังกล่าวจะไปรบกวนค่าสนามของระนาบคลื่นไมโครเวฟที่เกิดการกระเจิงเนื่องจากวัตถุที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันอยู่ สัญญาณที่ถูกรบกวนจะถูกมอดูเลตด้วยความถี่ต่ำและเดินทางต่อไปยังเสาอากาศตัวรับและ ดีเทคเตอร์ Pre-amplifier จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้แล้ว Phase locked amplifier จะแยก สัญญาณที่ถูกรบกวนออกมาแสดงผลยังออสซิลอสโคป

อุปกรณ์ที่นำมาใช้คืออุปกรณ์ที่ตอบสนองทางแสง โดยอาจจะเป็น photoresistance Photodiode หรือ phototransistor แต่ข้อเสียของวิธีการดังกล่าวคืออุปกรณ์ตอบสนองทางแสงอาจจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของโพรบ ทำให้ค่าความละเอียดลดลงและเกิดการรบกวนอื่นๆ ขึ้น ซึ่ง ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ที่นำมาใช้ให้เหมาะกับระบบ

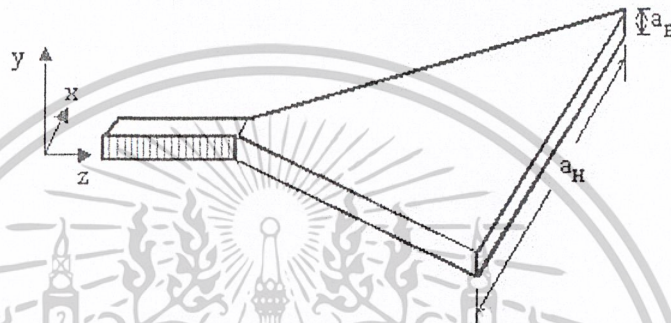
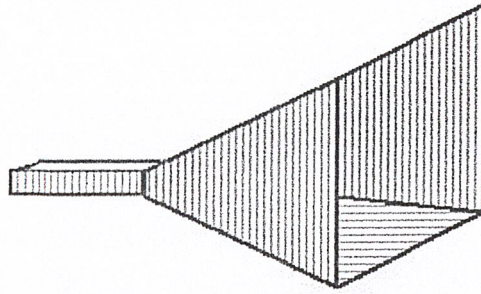
#### 2.4 การออกแบบสายอากาศแบบฮอร์น

กระบวนการสร้างภาพดิฟแฟรคชัน โทโมกราฟีจะต้องใช้ระนาบคลื่นส่งผ่านวัตถุแล้วจึงใช้ตัวตรวจจับทำหน้าที่รับคลื่นที่ผ่านออกมา ซึ่งระนาบคลื่นดังกล่าวนั้นจะต้องมีทั้งแอมพลิฟายเออร์และเฟสที่เท่ากันทุกตำแหน่งตลอดแนวหน้าคลื่นที่ไปตกกระทบยังวัตถุ สายอากาศแบบฮอร์นที่จะใช้ ในระบบจะต้องสามารถส่งระนาบคลื่นออกไปและรับคลื่นที่จะผ่านออกมาได้ ในการออกแบบสายอากาศแบบฮอร์นนั้นในลำดับแรกจะต้องพิจารณาที่ประเภทของสายอากาศที่เหมาะสมก่อนว่า จะเป็นแบบใดซึ่งก็มีอยู่หลายประเภทด้วยกัน แต่เนื่องจากแหล่งกำเนิดคลื่นที่มีอยู่นั้นเชื่อมต่ออยู่กับ wave guide ที่เป็นแบบ rectangular wave guide ตามที่แสดงในรูปที่ 2.4.1 ดังนั้นฮอร์นที่เราจะเลือกจึงจะพิจารณาเจาะจงไปที่ rectangular antennas เท่านั้น แต่ฮอร์นชนิดนี้ก็ยังมีอยู่อีกหลายแบบด้วยกัน ได้แก่

- Exponentially tapered pyramidal horn
- Sectoral H-plane horn
- Sectoral E-plane horn
- Pyramidal horn

การที่จะเลือกใช้ฮอร์นแบบใดนั้นต้องพิจารณาสมบัติต่างๆของแต่ละแบบว่าแบบใดเหมาะสมกับระบบมากที่สุด โดยเริ่มจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

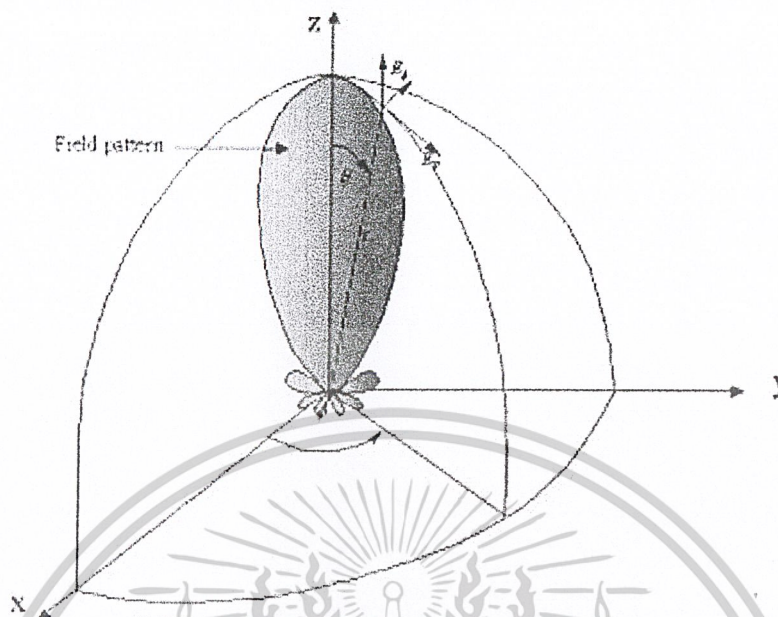


รูปที่ 2.4.1 แสดงลักษณะ โครงสร้างของสายอากาศฮอร์น รูปบนแสดง  
Pyramidal horn ส่วนรูปล่างแสดง Sectoral H-plane horn

#### Radiation Pattern.

Radiation Pattern เป็นสิ่งที่แสดงสมบัติการปล่อยรังสีของสายอากาศ โดยทำการพิจารณาที่ far field pattern ซึ่งสมบัติการปล่อยรังสีจะเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นของสนามที่แผ่ออกมาตามระยะทางจากสายอากาศที่กำหนดในทิศทาง  $\theta, \phi$  ในทิศทางที่แสดงในรูปที่ 2.4.2

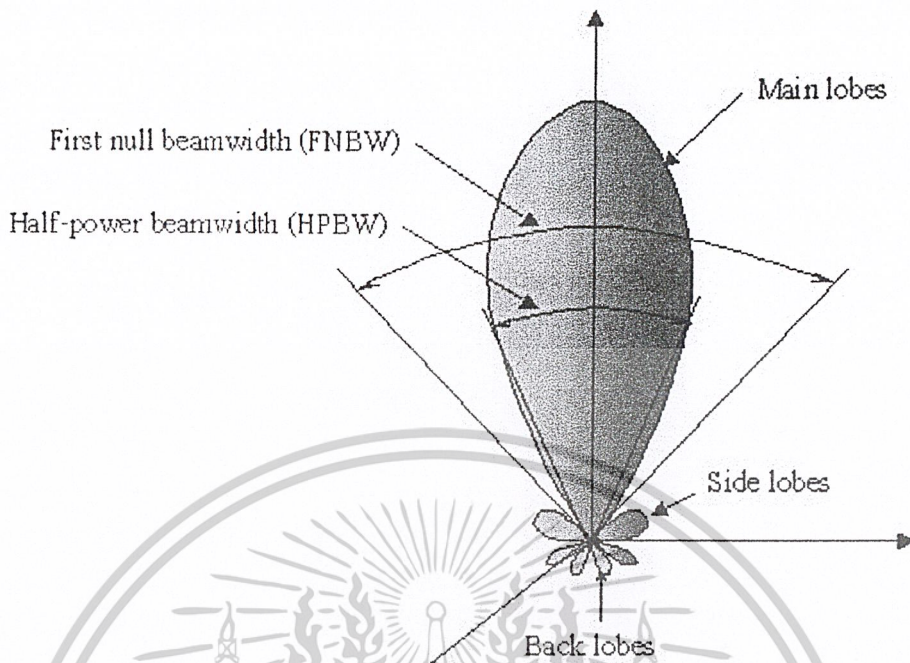
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



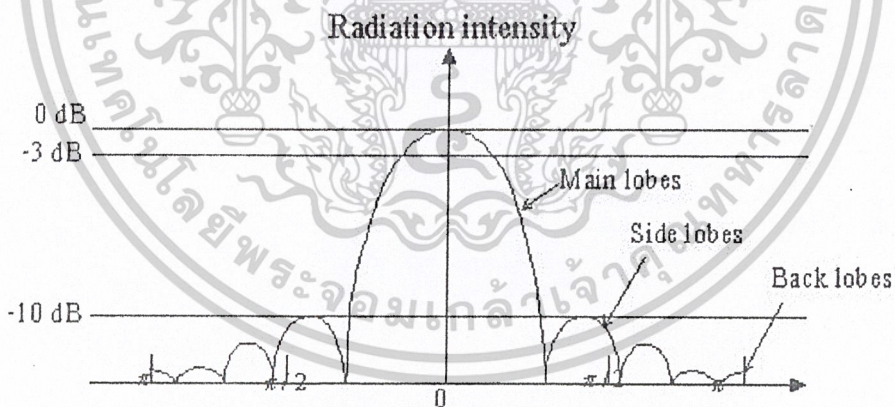
รูปที่ 2.4.2 แสดงลักษณะ field pattern ของสายอากาศ

ส่วนต่างๆ ของแพทเทิร์นการแผ่รังสี ตามที่แสดงในรูปที่ 2.4.3 จะถูกเรียกว่า โลบ (lobe) ซึ่งจะแบ่งออกเป็น main lobe , side lobe และ back lobe โดยที่ main lobe คือ โลบหลักที่เราจะทำการพิจารณาเนื่องจากเป็น โลบที่แสดงถึงความหนาแน่นของรังสีที่แผ่ออกมามากกว่า โลบอื่นๆ โดยเริ่มพิจารณาจากลักษณะของการแผ่รังสีที่มุมต่างๆ คุณลักษณะของโลบย่อยว่ามีผลมากน้อยเพียงใด เช่น side lobe นั้นจะแสดงการแผ่รังสีในทิศทางที่ไม่ต้องการจึงควรมีค่าน้อยๆ เพื่อไม่ให้มีผลต่อค่าสนามที่จะนำไปใช้ ซึ่งสามารถพิจารณาจาก dB pattern ในรูปที่ 2.4.4 ที่แสดงระดับของโลบต่างๆ จะเห็นว่ายิ่งถ้า side lobe มีค่าน้อยมากๆ ก็จะเป็นผลดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4.3 แสดง Power Pattern ของเสาอากาศในทิศทางเชิงขั้ว(linear scale)

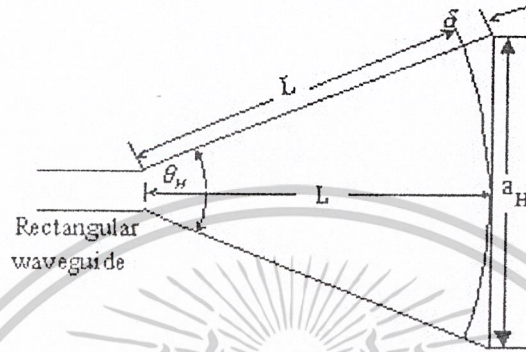


รูปที่ 2.4.4 แสดง dB Pattern ของเสาอากาศ

เนื่องจากในระบบที่ทำการศึกษาจำเป็นต้องให้ระนาบคลื่นส่งผ่านวัตถุแล้วเกิดการเลี้ยวเบนไปยังตัวตรวจรับ ซึ่งระนาบคลื่นดังกล่าวควรมี field pattern ที่มีลักษณะการแผ่รังสีออกมาในมิติเดียวหรือมีลักษณะแบบราบ มีแอมพลิจูดคงที่ที่ค่ามุมขนาดหนึ่งและที่มุมดังกล่าวคลื่นควรมีเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรงกันด้วย ดังนั้นฮอร์นที่ทำการออกแบบมาเพื่อให้ได้ระนาบคลื่นที่มีลักษณะดังกล่าวจึงควรมีลักษณะโครงสร้างที่แผ่ออกในมิติเดียว ได้แก่ Sectoral H-plane และ Sectoral E-plane



รูปที่ 2.4.5 แสดง โค้ระแกรมภาคตัดขวางของ H-plane

$$\cos \frac{\theta_H}{2} = \frac{L}{L + \delta} \quad (2.87)$$

$$\sin \frac{\theta_H}{2} = \frac{a_H}{2(L + \delta)} \quad (2.88)$$

$$\tan \frac{\theta_H}{2} = \frac{a_H}{2L} \quad (2.89)$$

จากสมบัติทางเรขาคณิต จะได้ว่า

$$L = \frac{a_H^2}{8\delta} \quad (\delta \leq L) \quad (2.90)$$

และ 
$$\theta_H = 2 \tan^{-1} \frac{a_H}{2L} = 2 \cos^{-1} \frac{L}{L + \delta} \quad (2.91)$$

ถ้าต้องการให้การกระจายของสนามจะ uniform จะต้องให้ความยาวของเสาอากาศ (L) มีค่ามากๆ ทำให้มุม  $\theta_H$  มีค่าน้อย แต่เพื่อความสะดวกควรจะต้องเลือกค่าความยาวให้น้อยๆเท่าที่จะเป็นไปได้ แล้วพิจารณาระดับของ side lobe ให้น้อยที่สุดก็จะได้อ่าความยาวที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

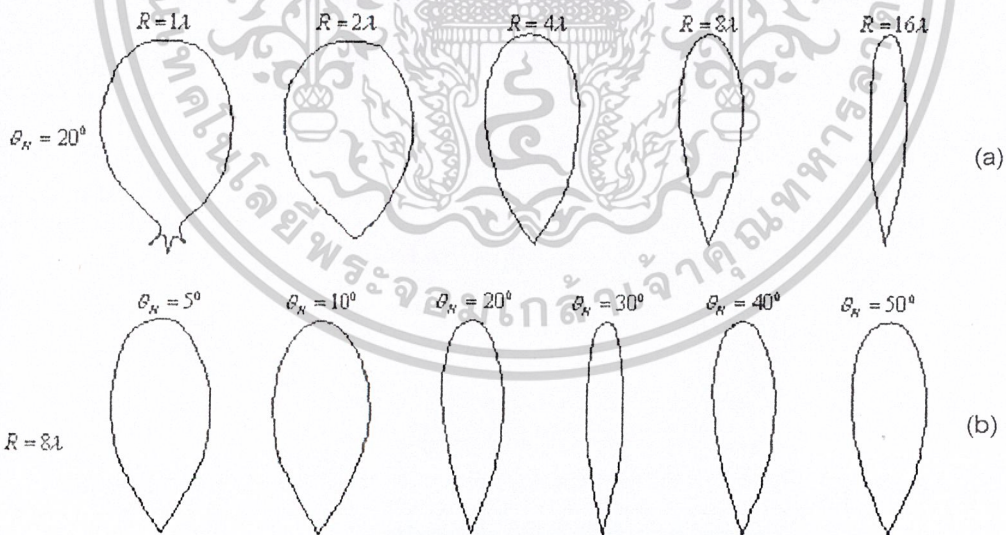
ยิ่งค่า  $\delta$  มีค่าน้อยๆ ก็จะทำให้เฟสมีการ uniform มากขึ้น และถ้าหากที่  $L$  คงที่แล้วค่า directivity จะมีค่าเพิ่มขึ้น (ความกว้างของ beam ลดลง) ตามความกว้าง  $\alpha_H$  และมุม  $\theta_H$  ที่เพิ่มขึ้น แต่ยิ่ง  $\alpha_H$  และ  $\theta_H$  มีค่ามากขึ้นมากๆ จะยิ่งทำให้ค่า  $\delta$  เข้าใกล้  $180^\circ$  ทำให้เกิดการกลับเฟสที่ขอบของปากเสาอากาศ ค่า directivity จะลดลง (side lobes เพิ่มขึ้น) ดังนั้นค่า directivity จะมากที่สุดที่มุม  $\theta_H$  จะให้ค่า  $\delta_0$  จาก (2.87) จะได้ว่า

$$\delta_0 = \frac{L}{\cos(\theta/2)} - L \quad (2.92)$$

$$L = \frac{\delta_0 \cos(\theta/2)}{1 - \cos(\theta/2)} \quad (2.93)$$

โดยทั่วไปแล้วค่า  $\delta_0$  นิยมใช้ในช่วง 0.1-0.4 เท่าของความยาวคลื่นในสูญญากาศ

การศึกษา far field pattern ของเสาอากาศที่ทำการออกแบบนั้น จากการวัดโดย Donald Rhodes ตามที่แสดงในรูป (a) คือแพทเทินของ H-plane ที่มีค่า  $R$  ค่าต่างๆ แต่มุม  $\theta_H$  คงที่คือเท่ากับ  $20^\circ$  ส่วนในรูป (b) แพทเทินที่ได้มาจาก  $R = 8\lambda$  แล้วทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากค่ามุม  $\theta_H$  ต่างๆ โดยที่  $R = L + \delta$  จะได้ผลตามที่แสดงในรูปที่ 2.4.6



รูปที่ 2.4.6 แสดง H-plane field pattern ที่วัดได้จากค่ามุมต่างๆ และที่ค่า  $R$  ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Directivity.

ค่า Directivity แสดงถึงอัตราส่วนของความเข้มของกำลังการแผ่รังสีของเสาอากาศที่จุดๆ หนึ่งต่อกำลังการแผ่รังสีของเสาอากาศทั้งหมดรวมทุกทิศทาง กรณีที่ไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้นนั้น การหาค่า directivity ของ H-plane sectoral horn สามารถแสดงให้อยู่ในเทอมของ

$$D = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} = \frac{4\pi \epsilon_{ap} A_p}{\lambda^2} \quad (2.94)$$

เมื่อ  $A_e$  คือ effective aperture,  $m^2$

$A_p$  คือ physical aperture,  $m^2$

$\epsilon_{ap}$  คือ aperture efficiency =  $A_e/A_p$

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

กรณีที่เป็น Rectangular horn  $A_p = a_E a_H$  และสมมติให้  $a_E$  และ  $a_H$  มีค่าน้อยกว่า  $1\lambda$  และให้ค่า  $\epsilon_{ap} \approx 0.6$  จาก (2.91) จะได้

$$D = \frac{7.5 A_p}{\lambda^2} \quad (2.95)$$

$$D = 10 \log \left( \frac{7.5 A_p}{\lambda^2} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2.96)$$

และจะได้  $D = 10 \log (7.5 a_{E\lambda} a_{H\lambda}) \quad (2.97)$

เมื่อ

$a_{E\lambda}$  = E-plane aperture in  $\lambda$

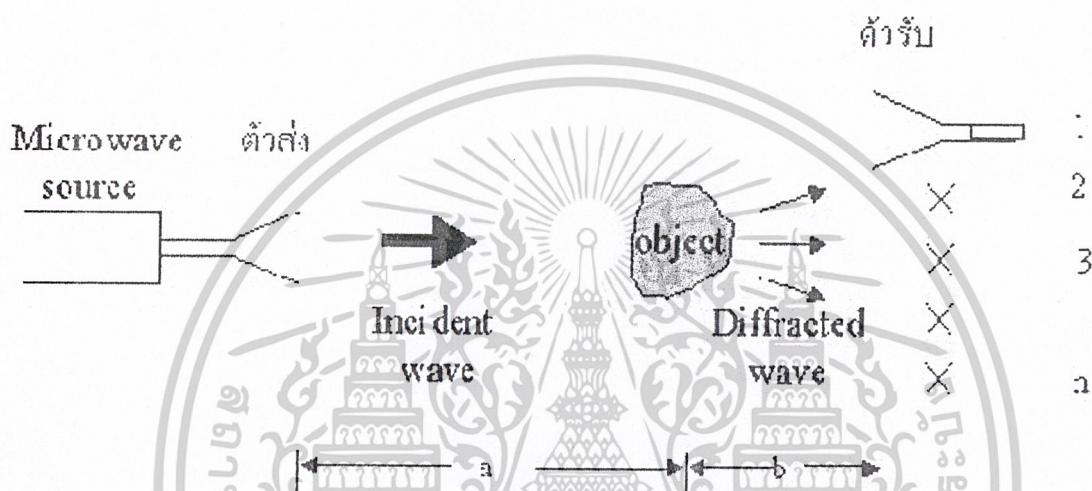
$a_{H\lambda}$  = H-plane aperture in  $\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## ระบบของดิฟแฟรคชันโทโมกราฟี

### 3.1 ระบบการทดสอบการเลี้ยวเบนของคลื่น



รูปที่ 3.1.1 แสดงระบบที่ใช้ในการทดสอบการเลี้ยวเบนของคลื่น

เมื่อ  $a$  คือ ระยะระหว่างตัวส่งกับวัตถุ

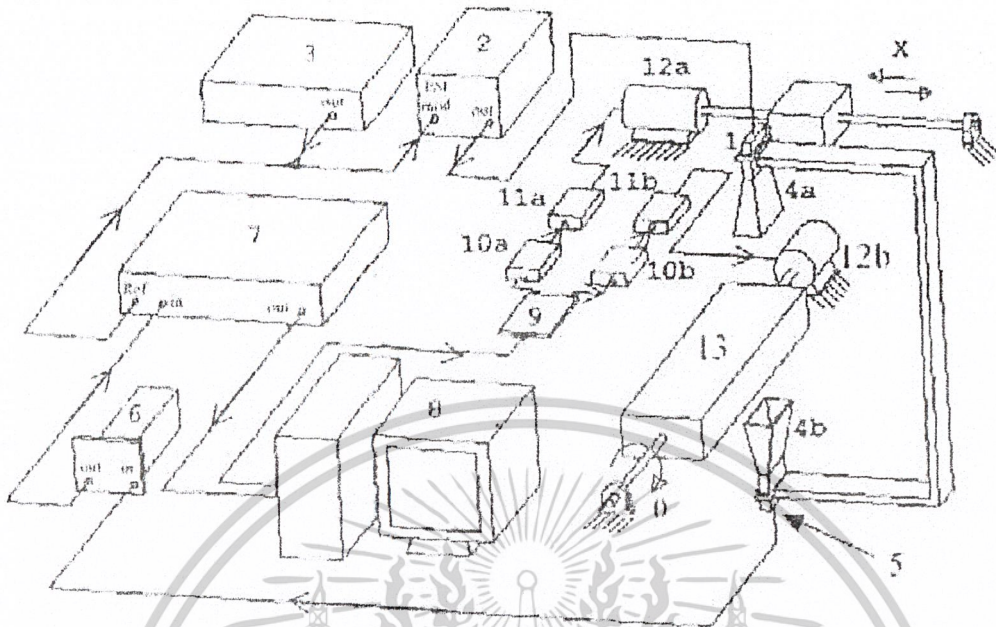
$b$  คือ ระยะระหว่างตัวรับกับวัตถุ

การทดสอบหลักการเลี้ยวเบนของคลื่น เมื่อปล่อยคลื่นไมโครเวฟเดินทางผ่านวัตถุ จากหลักการนั้นคลื่นที่ตกกระทบวัตถุจะเกิดการกระเจิงในทิศทางต่างๆ เมื่อนำตัวตรวจจับวางไว้ด้านหลังของวัตถุก็จะวัดค่าสัญญาณออกมาค่าหนึ่ง บริเวณด้านหลังวัตถุนั้น ในแต่ละตำแหน่งจะให้ค่าความเข้มของสัญญาณแตกต่างกันไป ดังนั้นเพื่อที่จะศึกษาแนวโน้มนรูปแบบการเลี้ยวเบนของคลื่นจึงต้องวัดค่าสนามที่เกิดการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่งต่างๆ ลักษณะการจัดระบบการวัดตามที่แสดงในรูปที่ 3.1.1

### 3.2 ระบบของโปรเจกชันโทโมกราฟี

ระบบโปรเจกชันโทโมกราฟีที่ใช้ในการสร้างภาพภาคตัดขวางของวัตถุที่ทำการศึกษาความถี่แสดงคั่งในรูปที่ 3.2.1 ทำการทดสอบที่ความถี่ 60 กิกะเฮิร์ตซ มีลักษณะโครงสร้างตามรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2.1 โครงสร้างระบบไมโครเวฟโทโมกราฟฟี โดยที่

1. Gun Diode Oscillator(940v043/380 aiTRG Products)
2. Microwave power supply (14T002 SPC Electronics Corp)
3. Function Generator (6Mha-Wobbelfunktionsgenertor 1006)
4. Horn Antenna
5. Schotky Diode Detector(M2060 FXR)
6. EG&G 5002 Current Preamplifier
7. EG&G 5210 Lock-in Amplifier
8. Computer
9. Microcontroller Board
10. Pulse Generator SGG100S Vexta)
11. Motor Driver 5 Phase(UDK5114N Vexta)
12. RK566-NBC 5 Phase Vexta Stepping Motor
13. Object

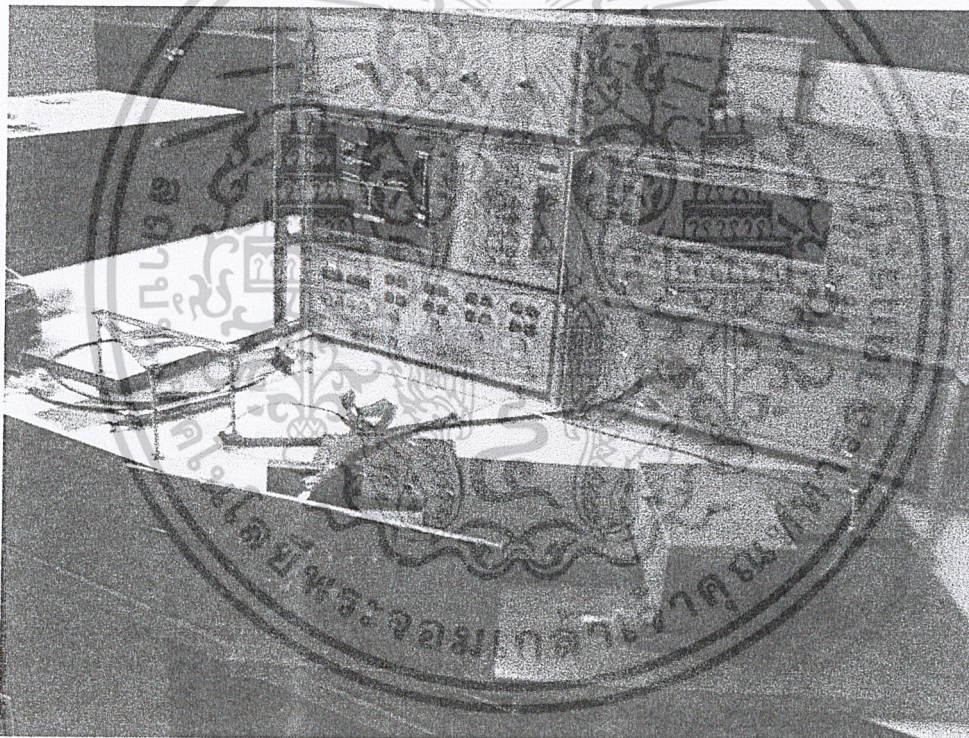
เมื่อคลื่นไมโครเวฟจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ 60 กิโลเฮิรตซ์ ถูกส่งจากฮอร์นตัวส่งเดินทาง  
ไปทะลุผ่านวัตถุไปยังสายอากาศแบบฮอร์นตัวรับที่วางอยู่ตรงข้ามกับวัตถุแล้วสัญญาณจะถูกส่งต่อไป  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังตัวตรวจวัดสัญญาณแบบชอตกีไดโอดและขยายสัญญาณแบบเข้าจังหวะกับสัญญาณอ้างอิงด้วยเครื่องขยายสัญญาณแบบลือคอิน โดยมีพีเอ็มแอลไฟล่ายเออร์ช่วยได้ค่าความเข้มของคลื่นซึ่งทะลุผ่านวัตถุที่ตำแหน่งต่างๆ จนครบจำนวนมุมหรือโปรเจกชันที่กำหนด ทำการประมวลผลสร้างภาพด้วยโปรแกรมที่เขียนบนแมทแล็บ

### 3.3 ระบบที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติของสายอากาศแบบฮอร์น

สำหรับสมบัติของสายอากาศแบบฮอร์นที่จะต้องทำการทดสอบได้แก่สมบัติการสะท้อนของสายอากาศซึ่งจะแสดงถึงความสามารถในการรับและส่งคลื่น พิจารณาโดยใช้ระบบดังที่แสดงในรูปที่

#### 3.3.1



รูปที่ 3.3.1 แสดงระบบตรวจสอบสายอากาศแบบฮอร์นซึ่งประกอบด้วย

1. Hewlett Packard 8510C network analyzer
2. Hewlett Packard 83650A 8360 series synthesized sweeper
3. Hewlett Packard 8517A s-parameter test set

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ส่วนประมวลผล

ในการสร้างภาพเราจะนำข้อมูลในแต่ละคอลัมน์ของเมทริกซ์ของข้อมูลมาทำการฟูรีเยร์-ทรานฟอร์ม โดยใช้ฟังก์ชัน  $\text{fft}()$  ใน โปรแกรมเมทแล็บ

$$\text{fft}(U);$$

$\text{fft}$  คือ อัลกอริทึมฟูรีเยร์ทรานฟอร์ม ในที่นี้เมทริกซ์ของ  $U$  คือ ข้อมูลและ  $r$  คือ ข้อมูลอาร์เรย์ที่มุม  $r$  โดยข้อมูลที่ได้อยู่ใน โดเมนค่าความถี่ ซึ่งจะนำมาคูณฟังก์ชันฟิลเตอร์  $|\omega|$  และ  $a$  คือ ค่าคงที่ เพื่อกำจัดองค์ประกอบความถี่สูงออกไป รูปแบบของฟังก์ชันฟิลเตอร์  $|\omega|$  โดยใช้คำสั่ง

$$a = \exp(-j * (\text{sqrt}(k^2 - w^2) * 5));$$

$$u = U * a * \text{filt};$$

ในกระบวนการอินเวอร์สเพื่อเลขที่อยู่ใน โพลาร์ ให้อยู่ในรูปเรกเทงกูลาร์นั้น เราใช้ฟังก์ชัน  $\text{round}()$  ในการประมาณค่าที่ใกล้ที่สุด

$$\text{round}(u(p) * \cos(\text{theta}@) + z(q) * \sin(\text{theta}@));$$

จากนั้นทำการแบคพรอบพาเกชันนำค่าที่ได้มาทำการคูณฟิลเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ  $G_u(w)$

$$b = \exp(j * (\text{sqrt}(k^2 - w^2) - k) * u(p));$$

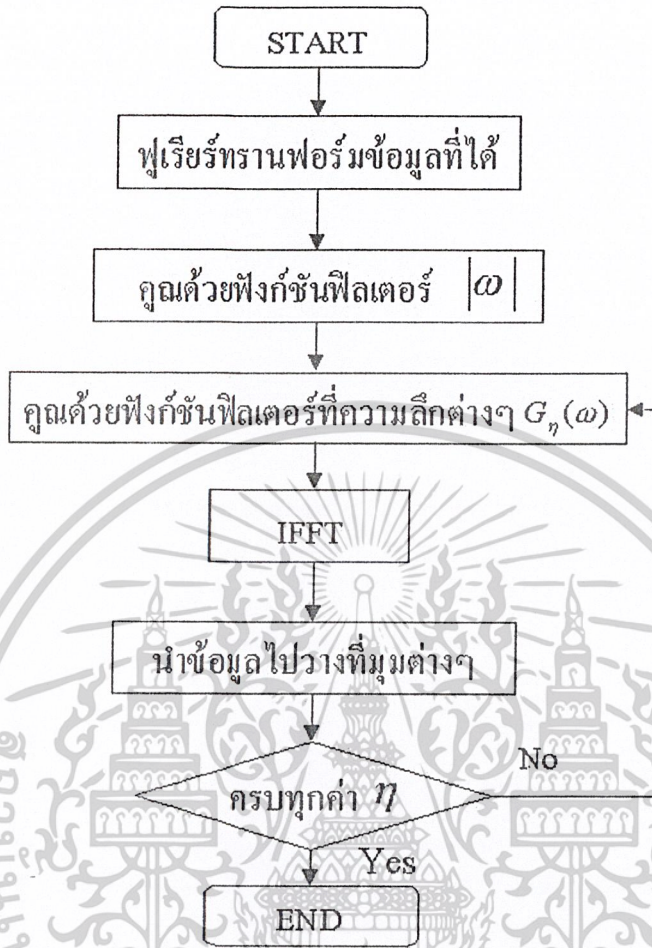
$$u = u * b;$$

ทำการอินเวอร์สฟูรีเยร์ทรานฟอร์มข้อมูลโดยคำสั่ง

$$u = \text{ifft}(u);$$

นำข้อมูลไปวางที่มุมต่างๆ ให้ครบทุกค่าความถี่  $n$  ได้ภาพวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4.1 โพลิวาร์ตแสดงลำดับการสร้างภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

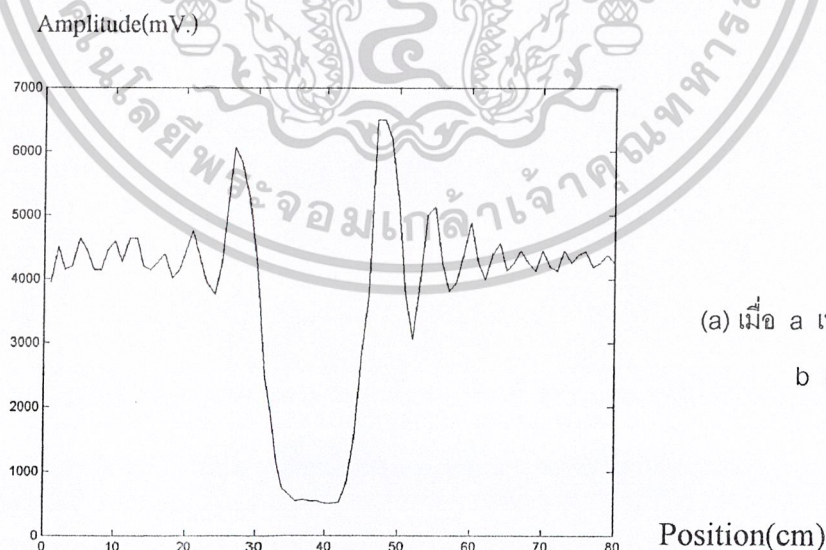
## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

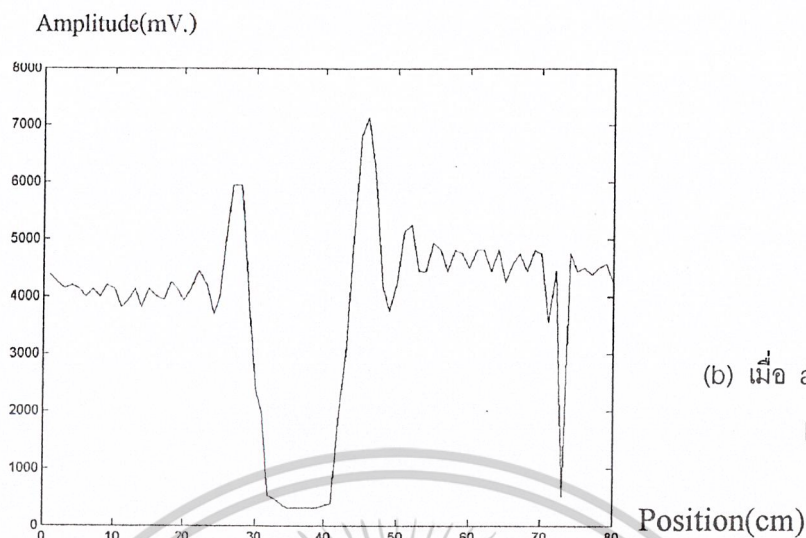
ในโครงการพิเศษนี้มีการดำเนินงานในขั้นตอนแบ่งออกเป็น 4 ส่วนด้วยกันได้แก่ การทดสอบหลักการเลี้ยวเบนของคลื่น การสร้างภาพตัดขวางของวัตถุโดยใช้อัลกอริทึมแบคพรอบพาเกชันโทโมกราฟี การออกแบบสายอากาศและสร้างแบบจำลองและการทดสอบประสิทธิภาพของฮอร์นที่สร้างจากแบบ ซึ่งจะขอกล่าวถึงรายละเอียดของการดำเนินงานในขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### 4.1 การทดสอบหลักการเลี้ยวเบนของคลื่น

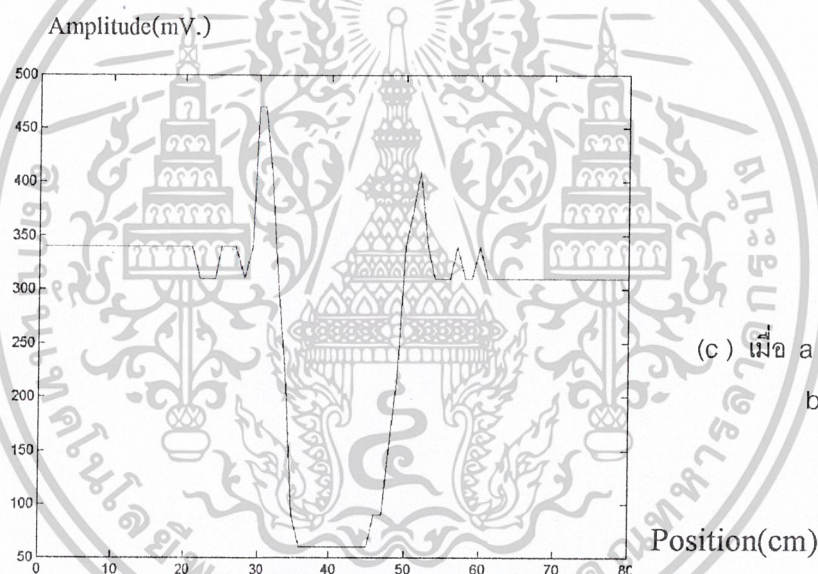
เมื่อทำการทดสอบหลักการเลี้ยวเบนของคลื่นตามระบบที่แสดงในรูปที่ 3.1.1 โดยทำการวัดค่าความเข้มของสัญญาณการกระเจิงจากด้านหลังวัตถุที่ตำแหน่งต่างๆ โดยทำการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวรับสัญญาณกับวัตถุ (ระยะ  $b$ ) ให้เข้าใกล้หรือห่างออกจากเดิม โดยที่ระยะระหว่างตัวส่งและวัตถุ (ระยะ  $a$ ) ยังคงที่ แล้ววัดค่าสัญญาณที่เลี้ยวเบน จากนั้นทดลองเปลี่ยนระยะ  $a$  โดยที่  $b$  คงที่ แล้ววัดค่าสัญญาณการเลี้ยวเบน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) เมื่อ a เท่ากับ 2 m.  
b เท่ากับ 2.5 cm.



(c) เมื่อ a เท่ากับ 2.25 m.  
b เท่ากับ 2.5 cm.

รูปที่ 4.1.1 แสดงรูปแบบของการเลี้ยวเบนของคลื่นเมื่อทำการวัดค่าสัญญาณที่ระยะระหว่างตัวส่งกับวัตถุ (a) และระยะระหว่างตัวรับกับวัตถุ (b) มีค่าต่างๆ

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในกรณีที่ตัวส่งกับวัตถุอยู่ห่างกัน 2 เมตร แล้วทำการวัดสัญญาณ โดยให้ตัวรับห่างจากวัตถุ 5 เซนติเมตร และ 2.5 เซนติเมตร พบว่าลักษณะการเลี้ยวเบนใกล้เคียงกันแต่ค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้จากระยะ 2.5 เซนติเมตร จะมีค่ามากกว่าวัดที่ระยะ 5 เซนติเมตร

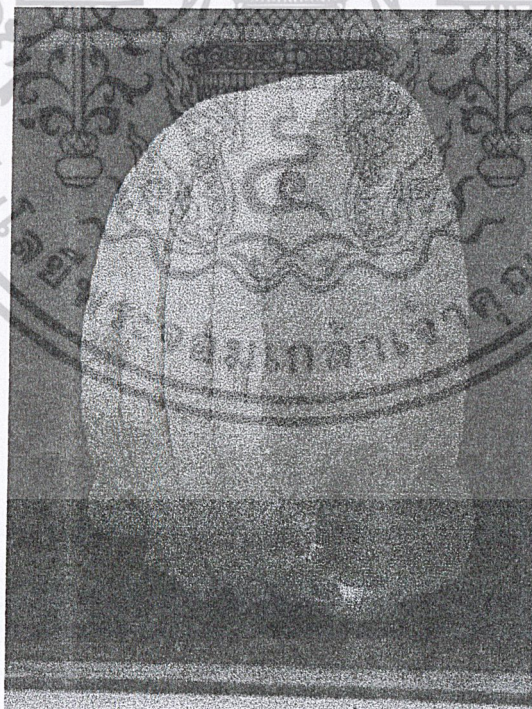
ส่วนผลที่ได้จากการเปลี่ยนระยะระหว่างตัวส่งกับวัตถุพบว่า เมื่อให้วัตถุวางห่างจากตัวรับเป็นระยะทาง 2 เมตร จะทำให้ได้สัญญาณที่มีค่ามากกว่าเมื่อเพิ่มระยะเป็น 2.25 เมตร และรูปแบบการเลี้ยวเบนก็ค่อนข้างแตกต่างกันมากคือเมื่อตัวส่งอยู่ใกล้กับวัตถุมากกว่าจะเกิดการกระจายของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นที่เกิดการกระเจิงมากกว่าเมื่อให้ตัวส่งอยู่ห่างจากวัตถุออกไป นั่นอาจเนื่องมาจากลักษณะของคลื่นที่ตกกระทบวัตถุแตกต่างกันคือ ที่ระยะไกลกว่าคลื่นตกกระทบย่อมจะมีลักษณะที่เป็นระนาบคลื่นมากกว่า

จากการทดลองเกิดปัญหาที่ว่าสัญญาณที่วัดได้มีค่าน้อย และเมื่อมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากวัตถุที่อยู่รอบๆ แล้วทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง และสาเหตุอีกประการหนึ่งคือสายอากาศแบบฮอร์นที่ใช้ในการทดลองไม่เหมาะสมกับระบบเท่าที่ควรเนื่องจากการทดลองในกรณีนี้คลื่นที่ตกกระทบวัตถุควรจะเป็นระนาบคลื่น แต่สายอากาศแบบฮอร์นที่ใช้กับระบบเป็นแบบพีระมิด ซึ่งอาจมีลักษณะ far field pattern ไม่เหมาะสมกับระบบ และเนื่องมาจากค่าสนามที่ปล่อยออกจากตัวส่งในระยะที่ทำการทดลองนั้นยังไม่เป็น far field จึงทำให้ผลที่ได้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

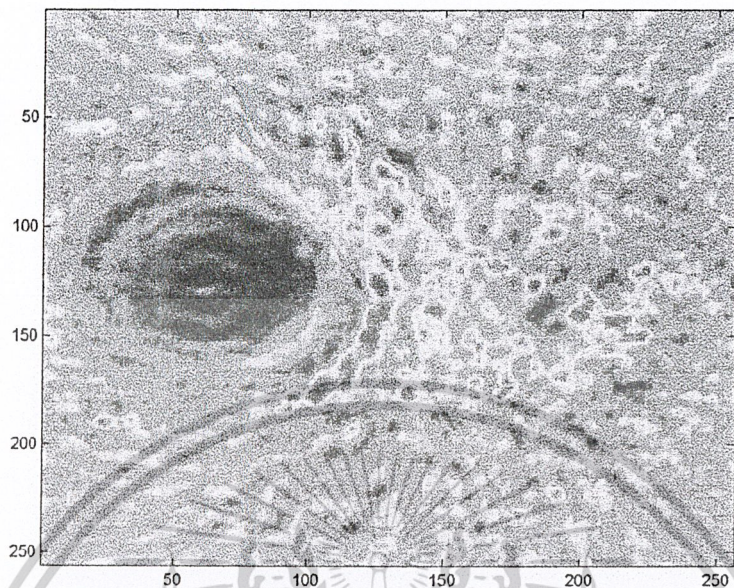
#### 4.2 การสร้างภาพตัดขวางของวัตถุโดยใช้อัลกอริทึมแบคพรอบพาแกนโทโมกราฟี

จากข้อมูลที่ได้จากการทำโปรเจกชันที่มุมต่างๆ กันไปนั้น เมื่อนำมาทำการสร้างภาพวัตถุต่างๆ โดยใช้อัลกอริทึมแบคพรอบพาแกนโทโมกราฟี จะได้ผลตามที่แสดงดังรูปต่อไปนี้

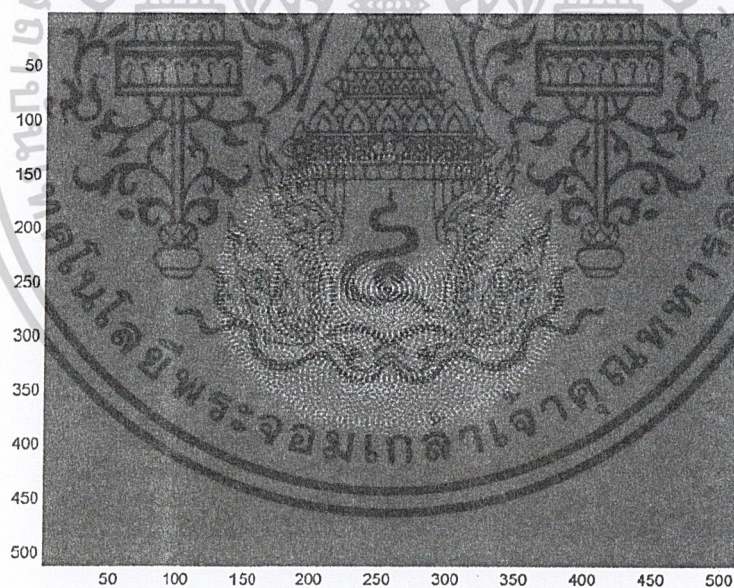


(a) รูปของวัตถุที่เป็นโคมสอດได้ด้วยขบวนการสถิติการบูรณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



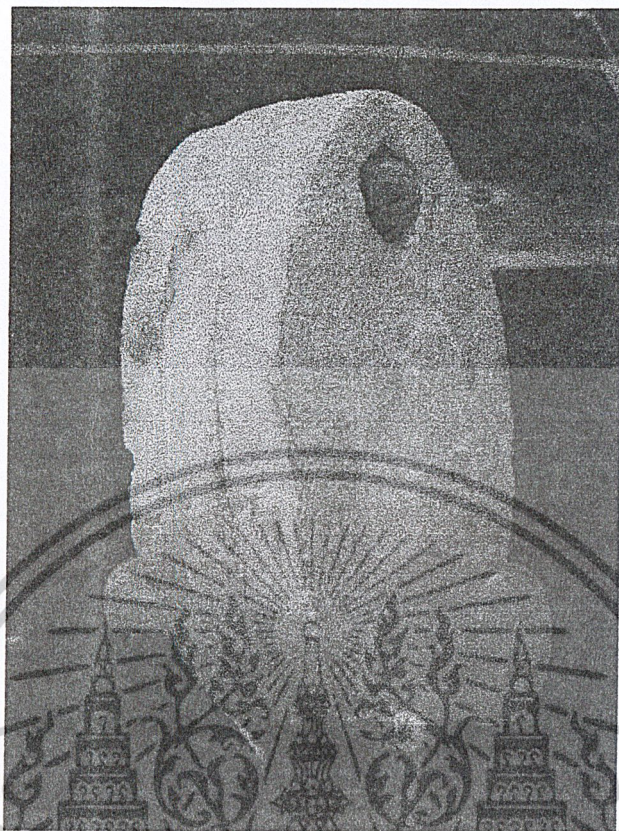
(บ) ภาพวัตถุที่ได้จากวิธีโปรเจกชันโทโมกราฟี



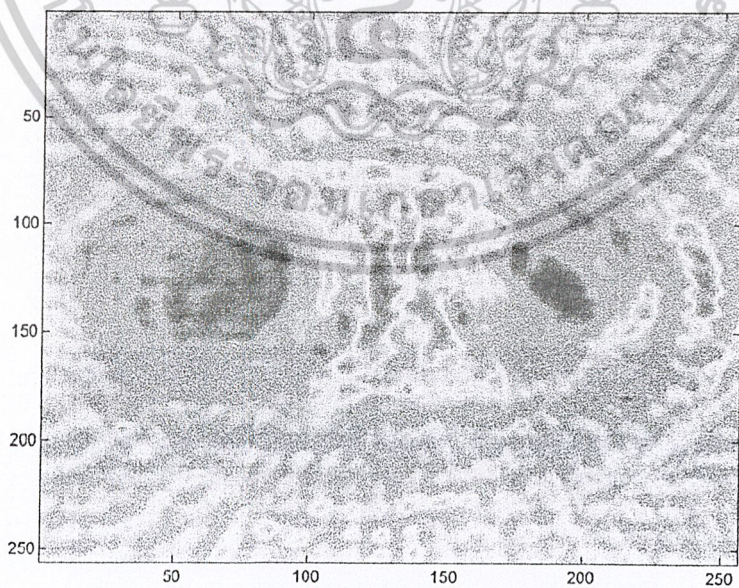
(ค) ภาพวัตถุที่ได้จากวิธีดิฟแฟรกชันโทโมกราฟี

รูปที่ 4.2.1 แสดง(า) รูปของวัตถุโม่ที่สอดใส่ด้วยขดลวดพลาสติกบรรจุน้ำ (บ) ภาพที่ได้จากวิธีโปรเจกชันโทโมกราฟีและ (ค) ภาพที่ได้จากวิธีดิฟแฟรกชันโทโมกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

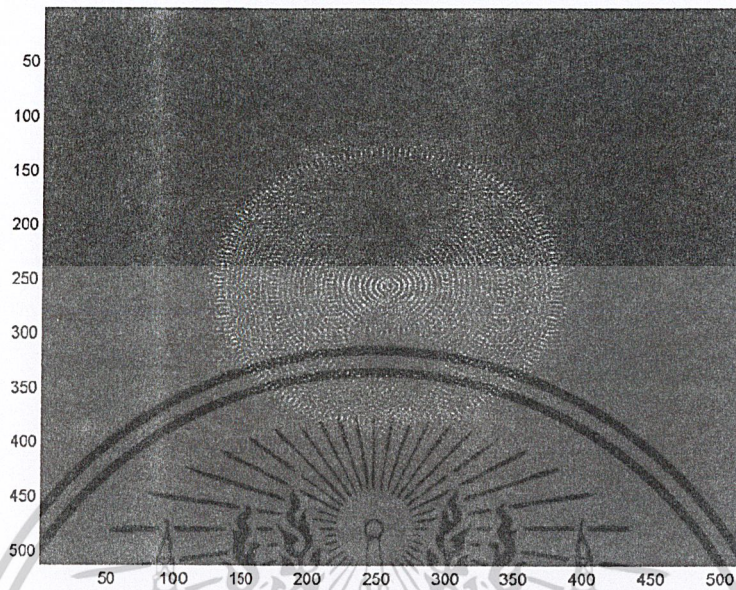


(a) ภาพวัตถุที่เป็น โฟมสกดไล่ด้วยขวดพลาสติกบรรจุน้ำและ ไม้กรอก



(b) ภาพที่ได้จากวิธีโปรเจกชันโทโมกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



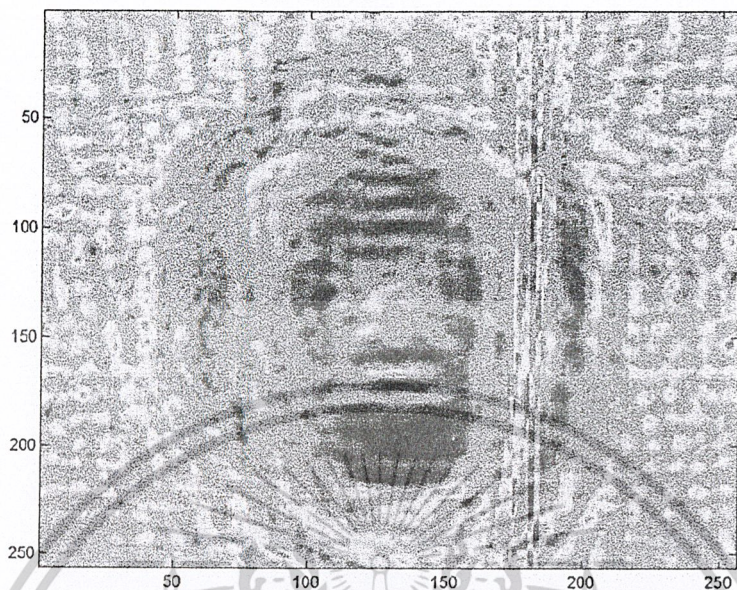
(c) ภาพที่ได้จากวิธีดิฟเฟอเรนซ์ โทโมกราฟี

รูปที่ 4.2.2 แสดง (a) รูปของวัตถุใหม่ที่สอดใส่ด้วยขวดพลาสติกบรรจุน้ำกับใส่กรอก (b) ภาพที่ได้จากวิธีโปรเจกชันโทโมกราฟีและ (c) ภาพที่ได้จากวิธีดิฟเฟอเรนซ์ โทโมกราฟี

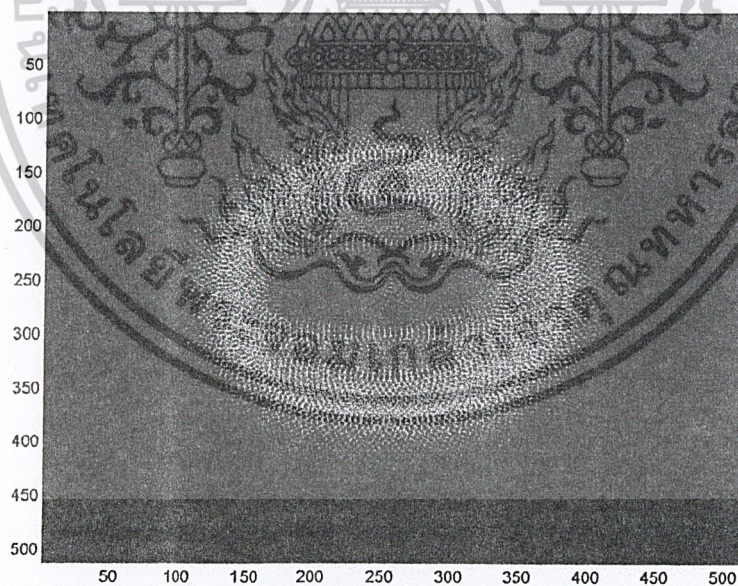


(a) รูปของวัตถุใหม่ที่สอดใส่ด้วยใส่กรอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



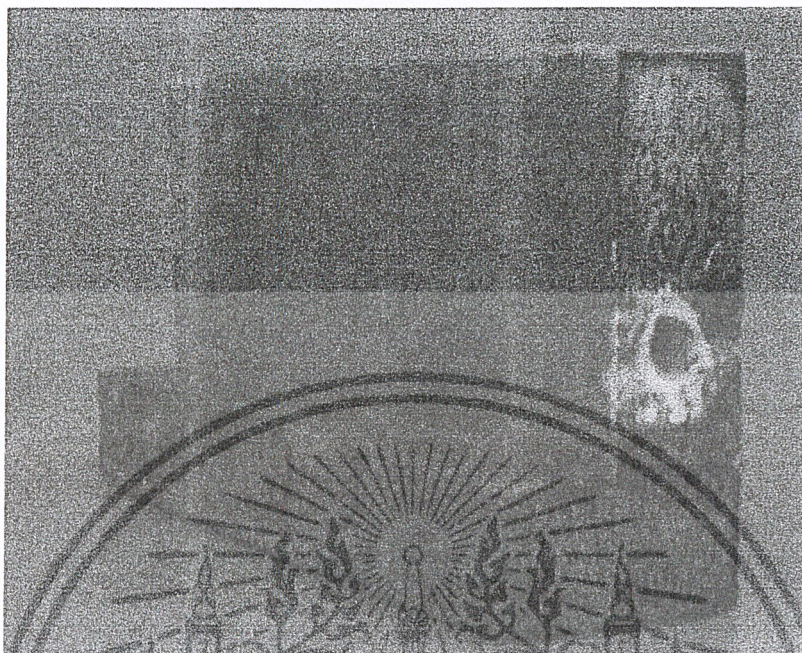
(b) ภาพที่ได้จากวิธี โพรเจกชันโทโมกราฟี



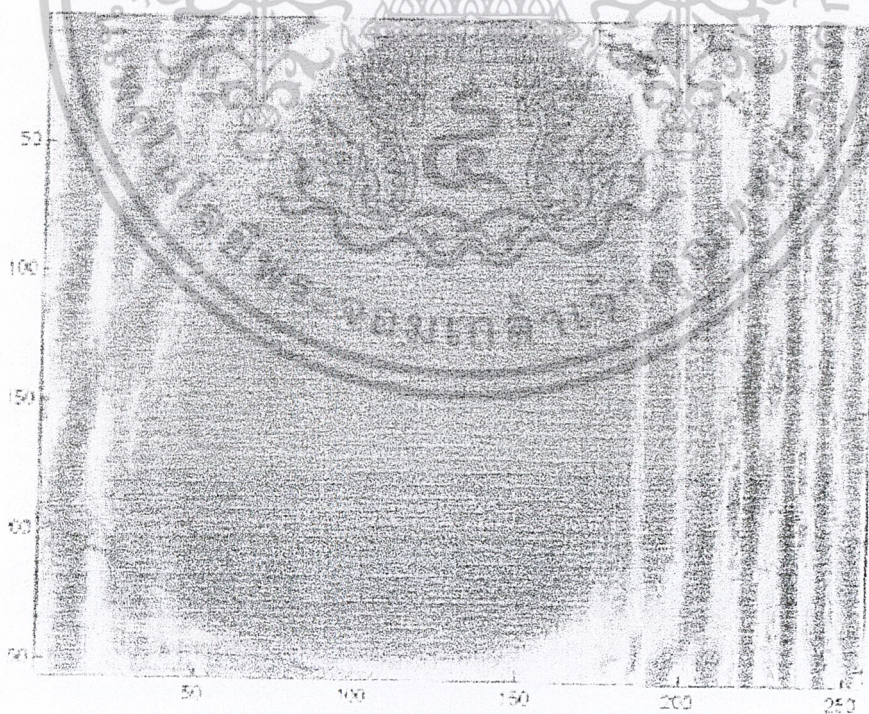
(c) ภาพที่ได้จากวิธีดิฟเฟรกันโทโมกราฟี

รูปที่ 4.2.3 แสดง(a) รูปของวัตถุ โทมที่สอดใส่ด้วยไส้กรอก (b) ภาพที่ได้จากวิธี โพรเจกชันโทโมกราฟีและ (c) ภาพที่ได้จากวิธีดิฟเฟรกันโทโมกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

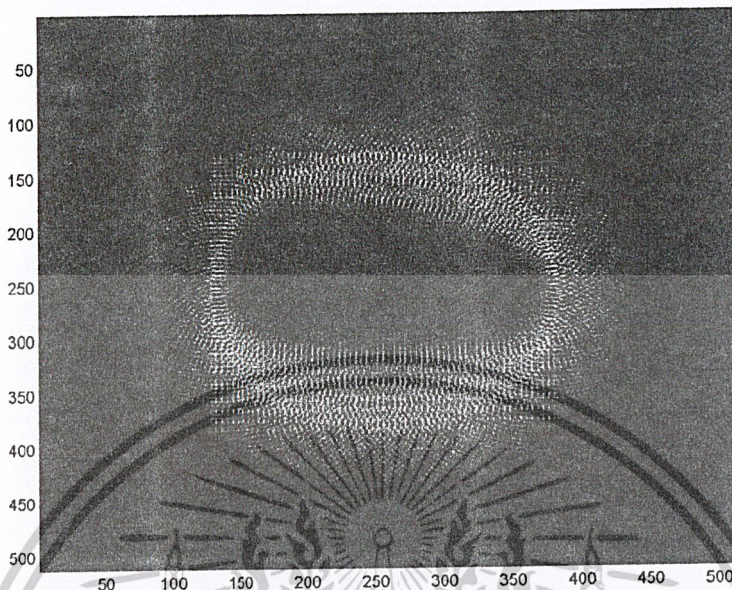


(a) รูปของวัตถุโฟมเคลือบผงคาร์บอนรูปทรงตัว L



(b) ภาพที่ได้จากวิธีโปรเจกชันโทโมกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

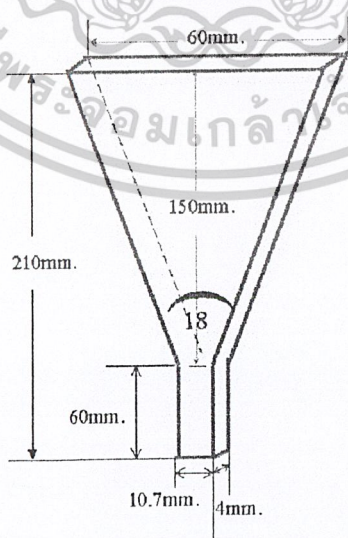


(c) ภาพที่ได้จากวิธีดิฟแฟรกชัน โทโมกราฟี

รูปที่ 4.2.4 แสดง (a) รูปของวัตถุโฟมเคลือบผงคาร์บอนรูปทรงตัว L (b) ภาพที่ได้จากวิธีโปรเจกชันโทโมกราฟี และ (c) ภาพที่ได้จากวิธีดิฟแฟรกชัน โทโมกราฟี

### 4.3 การออกแบบสายอากาศแบบฮอร์นและสร้างแบบจำลอง

จากการคำนวณทำให้สามารถหาโครงสร้างของสายอากาศแบบฮอร์นแสดงดังรูปที่ 4.3.1

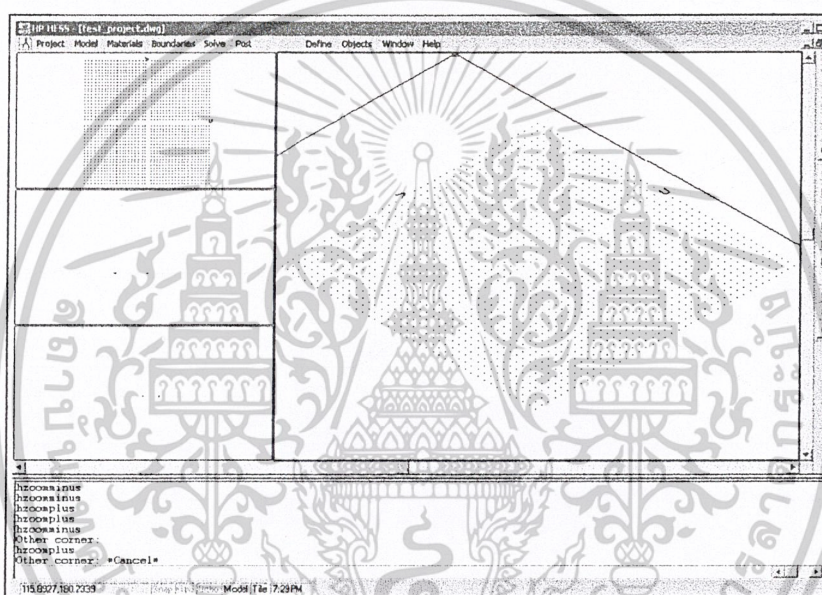


รูปที่ 4.3.1 แสดง โครงสร้างของฮอร์นที่ได้จากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการคำนวณดังกล่าวมาทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรม HP High Frequency Structure Simulator (HPHFSS) มาช่วยในการออกแบบและสร้างแบบจำลองรูปแบบของสนามที่ปล่อยออกมาจากสายอากาศ

หลังจากที่ได้ทำการคำนวณหาโครงสร้างของสายอากาศฮอร์นแบบ H-plane จากหลักการข้างต้นแล้วก็สามารถที่จะนำค่าที่คำนวณได้มาทำการเขียนแบบ จากนั้นกำหนดค่าต่างๆ ก่อนที่จะให้คอมพิวเตอร์ทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และแสดงภาพกราฟฟิคของ far field pattern ที่ได้

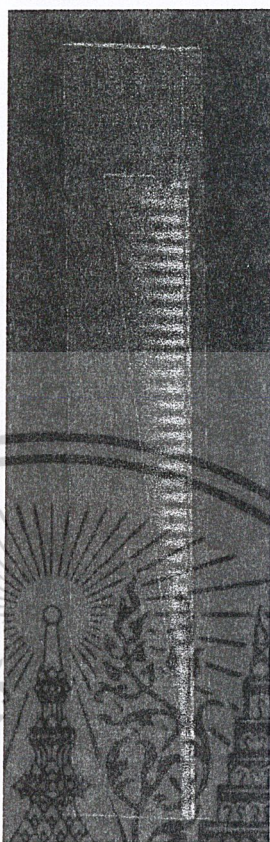


รูปที่ 4.3.2 แสดงโปรแกรม HPHFSS ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ

เริ่มต้นจากการใช้แถบเครื่องมือที่มีใน โปรแกรมในการเขียนแบบสายอากาศตามค่าที่ได้จากการคำนวณในขั้นต้น จะได้รูปแบบของสายอากาศตามที่ต้องการที่พร้อมจะเข้าสู่กระบวนการคำนวณของโปรแกรม

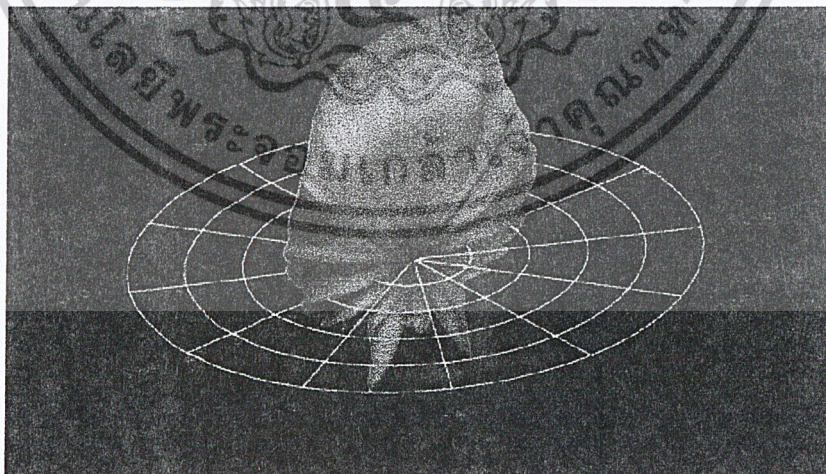
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 4.3.5 แสดงลักษณะของการปล่อยคลื่นจากสายอากาศแบบฮอร์นที่ได้ทำการออกแบบ

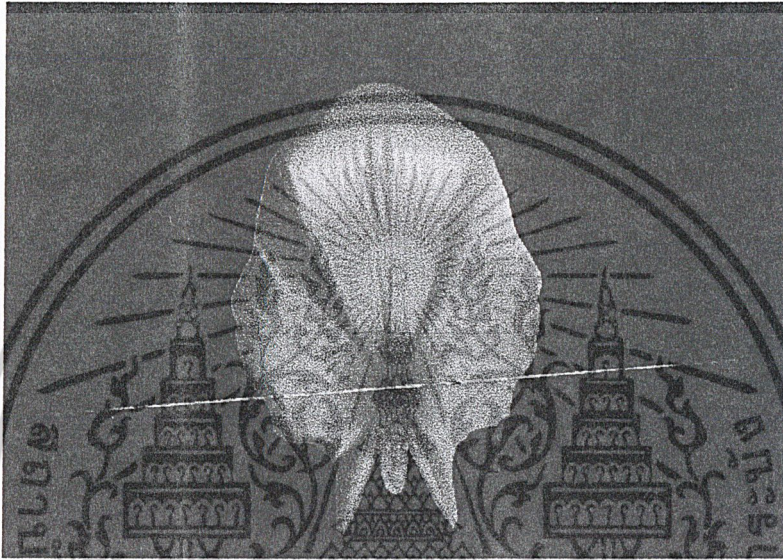
เราสามารถที่จะพิจารณาลักษณะของ far field pattern ของสายอากาศที่ค่ามุมต่างๆ ตามที่แสดงดังรูปที่ 4.3.6



รูปที่ 4.3.6 ลักษณะของ far field pattern ที่ได้จากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับโครงงานพิเศษนี้จะพิจารณา far field pattern ของสายอากาศฮอร์นแบบ H-plane ที่มีลักษณะเป็นระนาบแบนตามที่แสดงในรูปที่ 4.3.7 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อพิจารณาจากทางด้านหน้าค่าสนามที่มุมหนึ่งซึ่งจะต้องใหญ่พอที่จะครอบคลุมขนาดของวัตถุได้หมดนั้นมีค่าแอมพลิจูดที่ค่อนข้างคงที่ และเมื่อพิจารณาทางด้านข้างพบว่าลักษณะของสนามรีวแคบ แสดงถึงความราบแบนของคลื่นระนาบตามที่ต้องการ



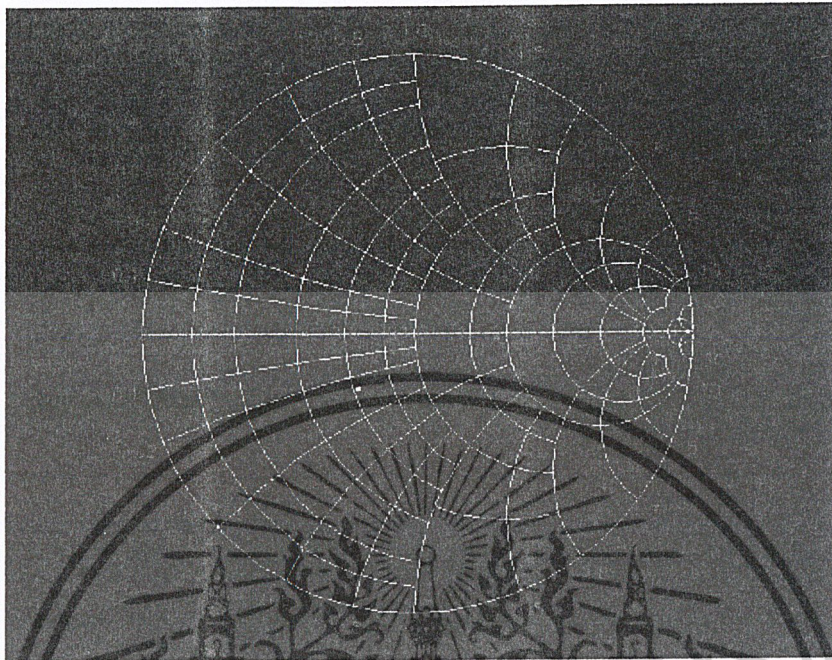
(a) ด้านหน้า



(b) ด้านข้าง

รูปที่ 4.3.7 แสดงลักษณะของ far field pattern โดย (a) พิจารณาจากทางด้านหน้า (b) พิจารณาจากทางด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3.8 สมบัติซาร์ทแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

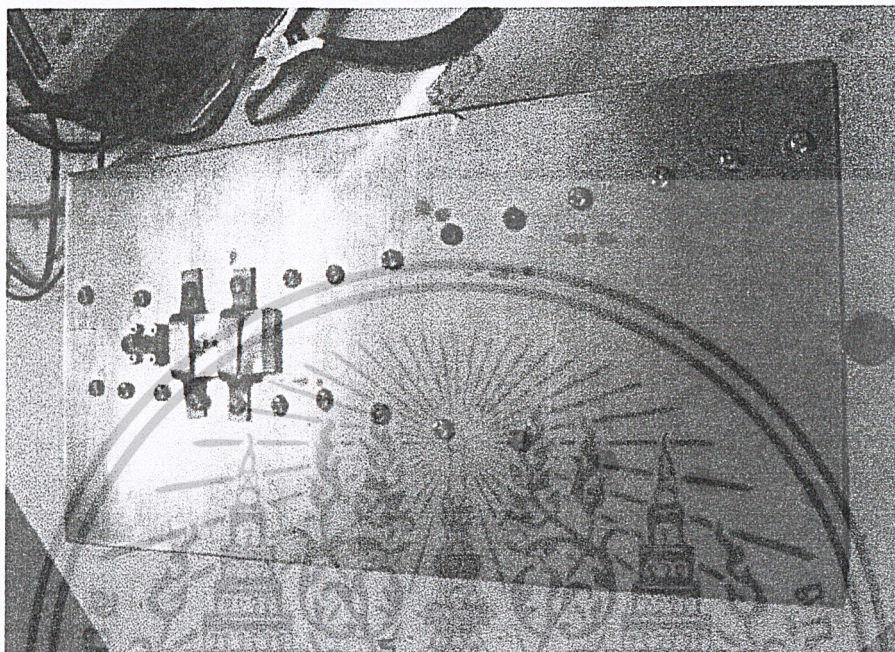
สมบัติซาร์ทแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศตามที่แสดงในรูปที่ 4.3.8 นั้นแสดงถึงความสามารถในการปล่อยคลื่นออกจากฮอร์น โดยที่ถ้าหากค่าอิมพีแดนซ์ มีค่าเท่ากับหรือเข้าใกล้ 1 ก็แสดงว่าฮอร์นปล่อยคลื่นได้ดี ไม่เกิดการสะท้อนหรือมีการสะท้อนน้อย แต่จากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ยังไม่เข้าใกล้ 1 นั่นคือยังมีการสะท้อนภายในฮอร์นอยู่มาก

#### 4.4 การทดสอบประสิทธิภาพการปล่อยคลื่นของสายอากาศแบบฮอร์น

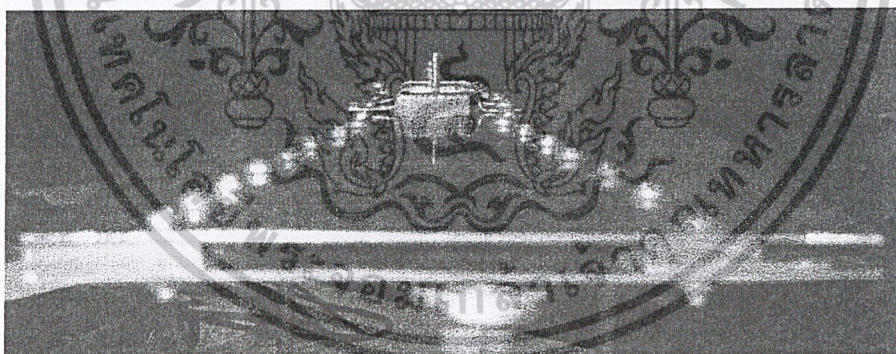
เมื่อทำการพิจารณาลักษณะของ far field pattern รวมทั้งสมบัติอื่นๆของสายอากาศแบบฮอร์นแล้วก็จะสามารถสร้างสายอากาศตามแบบได้ ซึ่งสมบัติของสายอากาศที่สร้างได้จริงจะตรงตามที่คำนวณหรือไม่นั้นก็ขึ้นอยู่กับขั้นตอนการทำงานว่ามีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด

ทำการตรวจสอบประสิทธิภาพของสายอากาศที่สร้างตามที่แสดงในรูปที่ 4.4.1 ด้วยระบบเน็ตเวิร์คเพื่อที่จะศึกษาประสิทธิภาพการเป็นตัวส่งคลื่นของฮอร์น โดยจะทำการปล่อยคลื่นเข้าไปยังสายอากาศแล้วดูค่าการสะท้อนกลับของคลื่น โดยที่ถ้าการสะท้อนกลับมีน้อยนั่นคือฮอร์นสามารถทำหน้าที่เป็นตัวส่งได้ดี แต่ถ้าหากเกิดการสะท้อนกลับของคลื่นมากนั้นก็หมายความว่าเป็นตัวส่งที่ไม่ดี และที่แต่ละค่าความถี่ของคลื่นที่ส่งเข้าไปยังสายอากาศแต่ละค่าจะสามารถส่งผ่านและสะท้อนกลับได้ไม่เท่ากัน โดยจะต้องพิจารณาค่าความถี่ที่เกิดการสะท้อนภายในฮอร์น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยที่สุดนั่นเอง ซึ่งก็ควรจะมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าความถี่ที่เราได้ทำการออกแบบไว้ ผลที่ได้แสดงตามรูปที่ 4.4.2



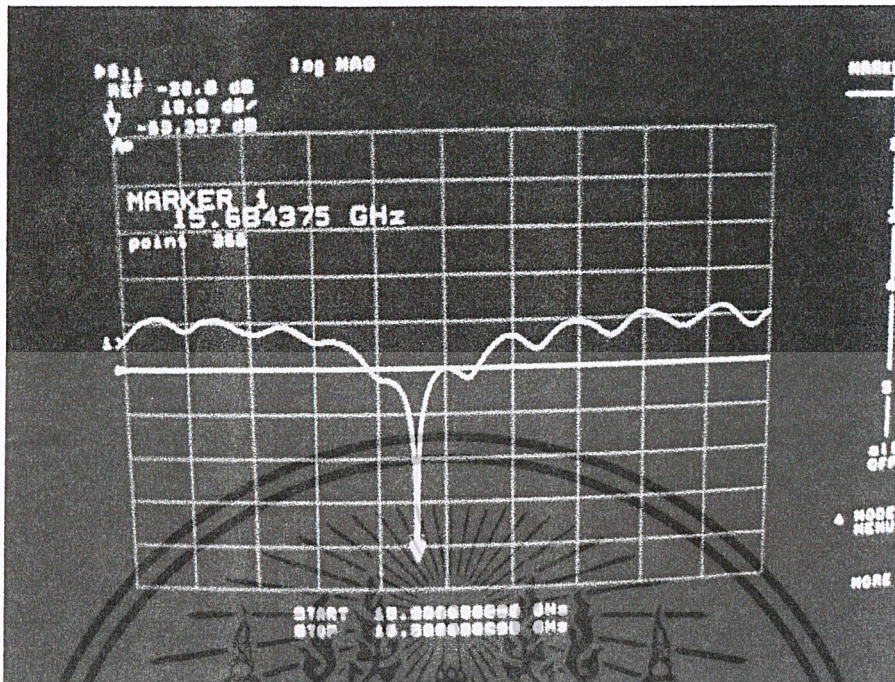
(a) ด้านบน



(b) ด้านหน้า

รูปที่ 4.4.1 แสดงลักษณะของเสาอากาศแบบฮอร์นที่สร้างจากการคำนวณและออกแบบ

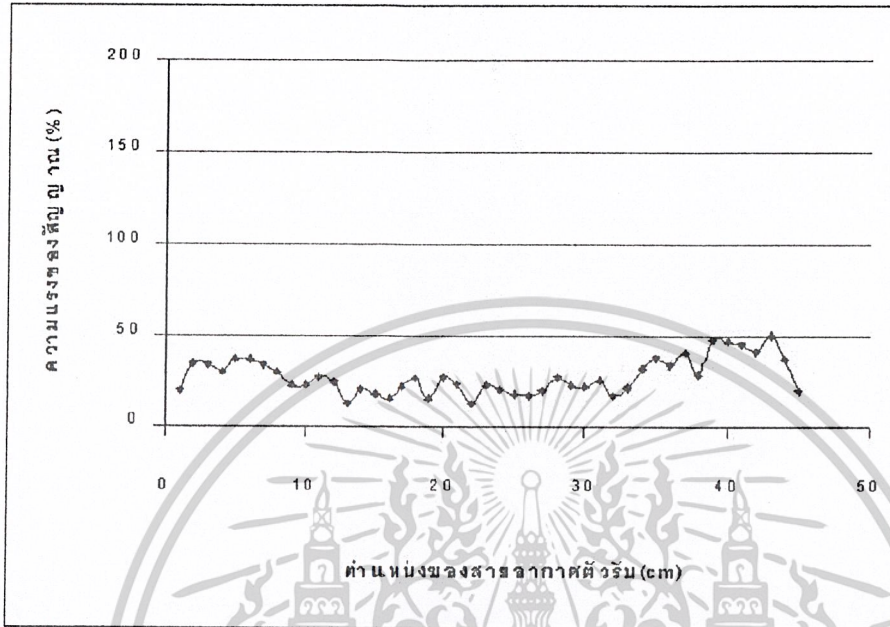
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



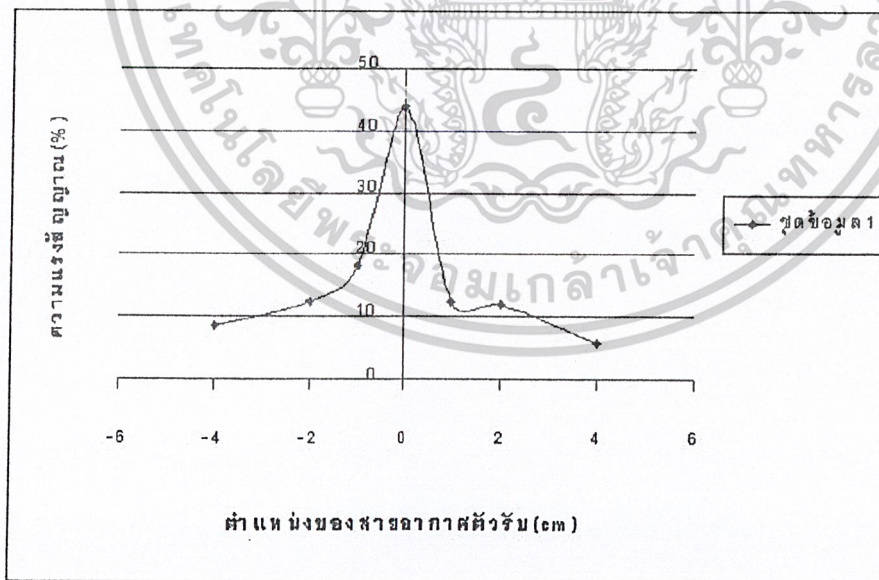
รูปที่ 4.4.2 แสดงสัญญาณการสะท้อนที่วัดได้จากสายอากาศฮอร์นที่ค่าความถี่ต่างๆ

หลังจากที่ได้ทำการตรวจสอบประสิทธิภาพในการเป็นตัวรับและตัวส่งคลื่นของสายอากาศฮอร์นจากข้างต้นแล้ว และทราบค่าความถี่ที่เหมาะสมของฮอร์นแล้วก็จะเข้าสู่ขั้นตอนของการทำการตรวจสอบลักษณะคลื่นที่ปล่อยจากฮอร์นว่ามีลักษณะเป็นคลื่นระนาบตามที่เรากำลังต้องการหรือไม่ โดยทำการปล่อยคลื่นค่าความถี่ 22.88875 กิโลเฮิรตซ์ ไปยังฮอร์นแล้ววัดค่าความเข้มของสัญญาณที่ระยะห่างจากตัวส่งต่างๆ ทั้งในแนวระนาบขนานกับปากฮอร์นและในแนวตั้งฉากกับปากฮอร์น ผลที่ได้แสดงดังกราฟในรูปที่ 4.4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) ทำการวัดสัญญาณโดยเลื่อนตัวรับตามแนวระนาบขนานกับปากของฮอร์น



(b) ทำการวัดสัญญาณโดยเลื่อนตัวรับตามแนวตั้งฉากกับปากฮอร์น

รูปที่ 4.4.3 กราฟแสดงขนาดของสัญญาณที่วัดได้จากการปล่อยคลื่นจากฮอร์นที่ออกแบบที่ระยะห่างของตัวรับ จากปากฮอร์นเท่ากับ 1.40 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและแนวทางในการพัฒนา

#### 5.1 บทสรุป

จากภาพภาคตัดขวางของวัตถุที่ได้จากกระบวนการสร้างภาพด้วยดิฟแฟรคชันโทโมกราฟี พบว่ามีความชัดมากกว่าภาพที่ได้จากการสร้างภาพด้วยโปรเจกชันโทโมกราฟี เนื่องจากเมื่อนำผลของการเลี้ยวเบนของคลื่นมาพิจารณาจะทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

การออกแบบและสร้างสายอากาศแบบฮอร์นเพื่อให้ได้หน้าคลื่นที่มีลักษณะแบนราบมีระนาบแคบๆ ที่ความถี่ 25 กิกะเฮิรตซ์นั้น สามารถทำได้แต่ค่าความถี่ยังไม่ค่อยตรงกับที่ทำการสร้างแบบจำลอง เนื่องจากเกิดความคลาดเคลื่อนจากขั้นตอนการทำ ส่งผลให้ความถี่ที่ได้คือ 22.88875 กิกะเฮิรตซ์

#### 5.2 ปัญหาที่พบ

เนื่องจากคลื่นที่ส่องผ่านวัตถุจากแหล่งกำเนิดแบบจุดไม่ได้มีลักษณะเป็นคลื่นระนาบ ทำให้ไม่สามารถเก็บค่าสนามที่เกิดการกระเจิงตลอดทั้งวัตถุได้ครบถ้วน เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาประมวลผลในการสร้างภาพโดยพิจารณาผลเนื่องจากการเลี้ยวเบนของคลื่น จึงทำให้ภาพยังไม่ชัดเจนมากนัก ในขณะที่ถ้าหากคลื่นที่ใช้เป็นคลื่นระนาบจะทำให้ภาพที่ได้ถูกต้องมากกว่า

สายอากาศฮอร์นที่สร้างมีค่าความถี่ไม่ตรงกับที่ได้ทำการออกแบบและสร้างแบบจำลอง รวมทั้งเกิดการสะท้อนภายในสายอากาศทำให้การปล่อยคลื่นจากฮอร์นไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร

#### 5.3 แนวทางแก้ไข

เพื่อให้ได้ภาพที่มีความคมชัดยิ่งขึ้น ควรจะใช้ระนาบคลื่นในการส่องผ่านวัตถุเนื่องจากจะทำให้ได้ผลของสนามที่เกิดการกระเจิงจากตลอดทั้งวัตถุ ทำให้ข้อมูลที่นำไปประมวลผลมีความถูกต้องมากขึ้น

การเกิดการสะท้อนภายในสายอากาศ แบบฮอร์นที่สร้างก่อให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณ สามารถปรับปรุงได้โดยการปรับเมซซึ่ง

## เอกสารอ้างอิง

- [1]สุรศักดิ์ บุญกล้าและศลิษา วังทอง, 2544. การสร้างภาพตัดขวางของวัตถุด้วยวิธีไมโครเวฟโทโมกราฟี วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2]Avenash C.Kak, Malcolm Slamcy.1999.Principles of computerized tomographic imaging IEEE.press.,pp.203-274.
- [3]Ch.Pichot,et al.1982 Active microwave imaging of inhomogeneous bodies. IEEE. Microwave Theory Tech.,vol.AP-33.,no4:416-425.
- [4]J.Ch.Bolomey, et al. Microwave diffraction tomography for biomedical applications. IEEE Trans.Microwave Theory Tech.,vol.30.,no.11:1998-2000.
- [5]J.Ch.Bolomey,Fred E. Gardiol.2001.Engineering Applications of the Modulated Scatterer Technique.Artech House.
- [6]John D. Kraus.Antennas.1988.McGrew-Hill Book Com.2<sup>nd</sup> edition.
- [7]J.M.Blackledge.1989.Quantitative coherent imaging. Academic press.pp.63-113,173-196.
- [8]M.Baribaud, et al.1982.Tomographic image reconstruction of biological objects from coherent microwave diffraction data. IEEE Proc., vol.129, pt H.,no.6:356-359.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้จัดทำโครงการพิเศษ

นางสาวยุวดี แก้วสาทร เกิดเมื่อวันที่ 1 เมษายน พ.ศ.2523 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนบ้านร่องหาว กิ่งอำเภอเวียงเชียงรุ้ง จังหวัดเชียงราย สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนเชียงรายวิทยาคม อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย และสำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนจุฬาราชวิทยาลัย เชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย หลังจากนั้นในปีการศึกษา 2542 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2545

นางสาววิหุภา สัตยารัฐ เกิดเมื่อวันที่ 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2524 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนอนุบาลร้อยเอ็ด อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสตรีศึกษาร้อยเอ็ด อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด เมื่อปีการศึกษา 2541 และจากนั้นในปีการศึกษา 2542 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โปรแกรมที่ใช้ในการแบคพรอบพาทะเบียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

clear

load BornEllisp.mat

k = 2*pi/0.005;
n = -128:8:127;
z = -128:127;
A = zeros(512,512);
I = zeros(512,512);
w = -k:k;
filt = |w|;
theta = (0:360/64:360-360/64)*pi/180; %64 projection
figure(1)
imagesc(real(data))

for r = 1:64
    U = data(r,:);
    U = fft(U);
    a = exp(-j*sqrt(k^2-w.^2)*5);
    U = U.*a.*filt;
    u = U;
    tic
    for p = 1:32
        b = exp(j*(sqrt(k^2-w.^2)-k)*n(p));
        u = u.*b;
        u = ifft(u);
        for q = 1:256
            x = round(n(p)*cos(theta(r)) + z(q)*sin(theta(r)));
            y = round(n(p)*sin(theta(r)) - z(q)*cos(theta(r)));
            A(x+256,y+256) = u(q);
        end
    end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
u = U;  
end  
I = I + A;  
A = A.*0;  
  
end  
figure(5)  
imagesc(real(I));
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้