

การสร้างภาพตัดขวางในโหมดส่งผ่านด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่มีการเลี้ยวเบน
โดยใช้ทฤษฎีฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป

TRANSMISSION MODE ULTRASONIC DIFFRACTION TOMOGRAPHY
USING GENERALIZED FOURIER SLICE THEORY

คทา จารวงศ์รังสี
KATA JARUWONGRUNGSEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ได้รับทุนอุดหนุนจากโครงการวิจัยของ
สภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2400-5

การสร้างภาพตัดขวางในโหมดส่งผ่านด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่มีการเลี้ยวเบน
โดยการใช้ทฤษฎีฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป

TRANSMISSION MODE ULTRASONIC DIFFRACTION TOMOGRAPHY
USING GENERALIZED FOURIER SLICE THEORY



กทา จารวงษ์รังสี

KATA JARUWONGRUNGSEE

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 63357
วัน,เดือน,ปี..... 28 ส.ค. 2549

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2400-5

**TRANSMISSION MODE ULTRASONIC DIFFRACTION TOMOGRAPHY
USING GENERALIZED FOURIER SLICE THEORY**

KATA JARUWONGRUNGSEE

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

2006

ISBN 974-15-2400-5

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้างภาพตัดขวางในโทมด่งผ่านด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่มีการเลี้ยวเบน
โดยการใช้ทฤษฎีฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป

นักศึกษา นาย คทา จารุงศรีรังสี

รหัสนักศึกษา 47060407

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

พ.ศ. 2549

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอ การสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิกโดยใช้เทคนิคการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบนของคลื่น ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถสร้างภาพจากค่าตัวแปรต่างๆในสนามคลื่น เช่น ค่าดัชนีหักเห, ความเร็วในการเดินทางของคลื่น ฯลฯ ที่สามารถตรวจวัดได้จากผลการกระเจิงของระนาบคลื่นที่กระทบวัตถุที่ถูกลงอยู่ในสนามคลื่น ณ ความถี่มูลฐานค่าใดค่าหนึ่ง โดยจากการศึกษาพบว่าปัญหาของการกระเจิงของคลื่นนั้น สามารถที่จะอธิบายได้ด้วยสมการที่ประกอบไปด้วยตัวแปรต่างๆ อันเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้อง แต่สมการที่ใช้ในการอธิบายการกระเจิงของคลื่นนี้นั้น ไม่สามารถหาค่าในลักษณะของสมการเชิงเส้นได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องอธิบายด้วยสมการการแพร่ของคลื่นซึ่งไม่เป็นสมการเชิงเส้น ซึ่งในกรณีที่ผลของการกระเจิงนี้มีค่าต่ำ จะสามารถใช้การประมาณค่าของ บอร์น(Born) หรือ ไรทอฟ(Rytov) ในการพิจารณาหาผลของสนามที่เกิดการกระเจิงนี้ได้ จึงทำให้สามารถใช้ค่าที่ได้จากการประมาณค่าดังกล่าวเป็นข้อมูลในการสร้างภาพตัดขวางด้วยทฤษฎีทางฟูเรียร์ได้ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้นได้นำเสนอผลการทดลองการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยใช้ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่มีผลกระทบของการเลี้ยวเบน ทั้งในส่วนผลการทดลองของวัตถุที่เป็นสารเนื้อเดียว และผลการทดลองของวัตถุที่มีที่มีความแตกต่างของเนื้อสารภายใน อีกทั้งผลการทดลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับภาพตัดขวางที่ได้รับจากทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางที่ใช้สำหรับแหล่งกำเนิดซึ่งไม่มีผลกระทบของการเลี้ยวเบน ซึ่งสามารถพิสูจน์ให้เห็นว่าผลลัพธ์จากการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยใช้เทคนิคการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบนของคลื่นนั้น สามารถให้ภาพตัดขวางที่มีคุณภาพสูงกว่า

Thesis Title	TRANSMISSION MODE ULTRASONIC DIFFRACTION TOMOGRAPHY USING GENERALIZED FOURIER SLICE THEORY
Student	Mr. Kata Jaruwongrungrsee
Student ID.	47060407
Degree	Master of Engineering
Programme	Electronics Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Chuchart Pintavirooj

ABSTRACT

This thesis concerns about ultrasonic diffraction tomography which is a technique for imaging with acoustic fields in which parameter, such as reflective index, sound velocity, etc., can be mapped from scatter wave resulting from insonifying the object with a plane wave at a single temporal frequency. By solving the direct scattering problem, the scattered field can be presented in term of scattering parameters. Different inversion techniques can be applied to takes advantage of the linearization process of the non-linear wave equation describing wave propagation in heterogeneous media under for limited class of scattering. Specifically, when the scattering effect is weak, one can invoke the Born or Rytov approximation and thus derive the generalized Fourier Slice Theorem to reconstruct the cross-section of the insonified object. In this thesis, experimental results of ultrasonic diffraction tomography for both homogenous and heterogeneous materials have been presented. Compared with non-diffraction tomography, it can be shown that ultrasonic diffraction tomography provide a significantly-improved results.

กิตติกรรมประกาศ

จากการที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณบุคคลต่างๆ ที่ได้มีส่วนร่วมในงานวิจัย ดังต่อไปนี้

ขอกราบขอบพระคุณคุณแม่ ที่ได้ให้กำเนิด อบรมสั่งสอน เลี้ยงดูข้าพเจ้าจนเติบโตใหญ่ และให้โอกาสในการศึกษาดังเช่นที่ข้าพเจ้าตั้งใจ รวมไปถึงกำลังใจที่ท่านได้มอบให้ตลอดเวลา

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนสนับสนุนในการทำงานวิจัยทุกๆด้าน ตลอดช่วงเวลาที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่

ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ รศ.ดร. มนัส สังวรศิลป์ ผู้ซึ่งให้การสนับสนุนการทำงานต่างๆในทุกด้าน ให้คำแนะนำที่ดีต่างๆ ตลอดจนมอบประสบการณ์ และโอกาสอันมีค่าแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. ศิริเดช บุญแสง ซึ่งได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ยิ่ง ต่องานวิจัยของข้าพเจ้า รวมถึงทำให้ข้าพเจ้าทราบถึงแนวคิดทฤษฎีพื้นฐานที่ข้าพเจ้าเคยมองข้ามไป

ขอขอบพระคุณ Dr.Hamamoto K. และ นายแก้วกล้า ดังศิษยานุศิษย์ จาก Tokai University ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งได้ให้ความรู้ และความร่วมมือในการทำงานวิจัยร่วมกันขึ้นนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ นายวิริยะ นาคบัวแก้ว เพื่อนคู่คิดซึ่งให้คำปรึกษาคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ตลอดเวลาที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ นายบุญญฤทธิ์ ลักษณะประณัย เพื่อนที่พร้อมจะก้าวไปด้วยกันทุกที่ และขอขอบคุณ อ.เพชร นันทวิวัฒนา นายจตุรธร ธีรพัฒน์กุล และนายโกสินทร์ กาพรรัตน์ เพื่อนผู้ให้การช่วยเหลือเกื้อกูลกันตลอดเวลา

ขอขอบคุณ นายอดิศักดิ์ ร่มพุดตาล รุ่นพี่ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนช่วยเหลือข้าพเจ้า ในช่วงแรกที่ข้าพเจ้าเริ่มทำงานวิจัยขึ้นนี้

ขอขอบคุณ อ.วิวัฒน์ วิทยชำนาญกุล และนางสาวปาริชาติ พงษ์จารุพงศ์ สำหรับคำแนะนำต่างๆ อันเป็นประโยชน์แก่ข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (ReCCIT) ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ในการทำงานวิจัย รวมไปถึงเครื่องมือที่จำเป็นต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้อง ร่วมห้องปฏิบัติการวิจัยสัญญาณชีวภาพ และประมวลภาพ (Bio-Lab) ที่มอบประสบการณ์ที่ดี และให้การช่วยเหลือด้านต่างๆ

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

กทา จารุงศ์รังสี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานในการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับคลื่นอัลตราโซนิก.....	4
2.1 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์.....	4
2.1.1 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์ชนิดที่ใช้ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก.....	4
2.1.2 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์แบบแมกนีโตสทริกทีฟ.....	7
2.2 การใช้งานคลื่นอัลตราโซนิกทางด้านการตรวจวินิจฉัยทางการแพทย์.....	9
2.3 การใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความแรงสูง.....	14
บทที่ 3 การสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	
โดยใช้เทคนิคสำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่ไม่เกิดผลการเลี้ยวเบน.....	17
3.1 ความหมายของภาพตัดขวาง.....	17
3.2 การสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก.....	18
3.2.1 วิธีการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้การแปลงฟูเรียร์.....	24
3.2.2 วิธีการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้แบคโปรเจกชัน.....	28
3.2.3 วิธีการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้วิธีฟิลเตอร์แบคโปรเจกชัน.....	29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิค	
โดยใช้เทคนิคสำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่เกิดผลการเลี้ยวเบน.....	32
4.1 การเดินทางของคลื่นที่เกิดการเลี้ยวเบน.....	32
4.1.1 สมการคลื่นสำหรับตัวกลางเนื้อเดียว.....	32
4.1.2 สมการคลื่นสำหรับตัวกลางที่มีเนื้อสารแตกต่าง.....	34
4.2 การประมาณค่าเข้าสู่สมการคลื่น.....	37
4.2.1 การประมาณค่าอันดับหนึ่งของบอร์น.....	37
4.2.2 การประมาณค่าอันดับหนึ่งของไรทอฟ.....	40
4.3 การสร้างภาพตัดขวางโดยใช้ทฤษฎีฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป.....	43
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	52
5.1 ระบบที่ใช้ในการทดลอง.....	52
5.1.1 อัลตราโซนิคทรานส์ดีวเซอร์.....	53
5.1.2 ไฮโดรโฟน.....	53
5.1.3 เครื่องให้กำเนิดสัญญาณกระตุ้น.....	53
5.1.4 อ่างบรรจุน้ำ.....	54
5.1.5 ส่วนเลื่อนและแท่นหมุน.....	54
5.1.6 ออสซิลโลสโคป.....	56
5.1.7 คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล.....	56
5.2 การวัดค่าดัชนีหักเหสัมพันธ์กับน้ำของวัตถุ.....	57
5.3 กระบวนการหาข้อมูลโปรเจกชันจากสัญญาณที่ได้รับ.....	60
5.4 การทดลองสร้างภาพตัดขวางจากแฟนทอมที่เป็นสารเนื้อเดียว.....	64
5.5 การทดลองสร้างภาพตัดขวางจากแฟนทอมที่มีความแตกต่างของเนื้อสารภายใน....	70
5.6 การเปรียบเทียบคุณภาพภาพตัดขวางระหว่างวิธีการทั้งสอง.....	72
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	78
เอกสารอ้างอิง.....	80

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	81
ประวัติผู้เขียน.....	83

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ปรากฏการณ์เปียโซอิเล็กทริก..... 5
2.2	การยึดชิ้นวัสดุเปียโซอิเล็กทริกเพื่อใช้งานโดยทั่วไป..... 5
2.3	โครงสร้างของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดที่ใช้หลักการ โค้งงอของวัสดุเปียโซอิเล็กทริก..... 6
2.4	ลักษณะการยึดทรานส์ดิวเซอร์ชนิดที่ใช้หลักการ โค้งงอของวัสดุเปียโซอิเล็กทริก..... 6
2.5	ปรากฏการณ์แมกนีโตรสทริกชัน..... 7
2.6	ความสัมพันธ์ของระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไป ต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กของสารของสารเฟอร์โรแมกเนติกแต่ละชนิด..... 8
2.7	โครงสร้างทั่วไปของทรานส์ดิวเซอร์แบบแมกนีโตรสทริกทีฟ..... 8
2.8	วิธีการสะท้อนของสัญญาณกระตุ้น..... 9
2.9	แบบจำลองของทรานส์ดิวเซอร์แบบอาร์เรย์ที่ใช้สำหรับการสแกนแบบขนาน..... 10
2.10	ลักษณะการสแกนสัญญาณแบบต่างๆ..... 11
2.11	การสแกนแบบขนานที่ใช้ทรานส์ดิวเซอร์ที่สามารถหมุนได้ เพื่อให้คลื่นที่ตกกระทบกับแผ่น โค้งสะท้อนคลื่นหักเหไปเป็นเส้นขนาน..... 11
2.12	การใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อตรวจทารกที่อยู่ในครรภ์มารดา..... 12
2.13	การใช้เทคนิคทางด้านการประมวลผลภาพในการสร้างภาพเสมือนของทารก..... 12
2.14	การใช้คลื่นอัลตราโซนิกตรวจหาก้อนนิ่วในถุงน้ำดี..... 13
2.15	การใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อตรวจหามะเร็งต่อมลูกหมาก..... 13
2.16	การใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อตรวจดูรังไข่..... 13
2.17	หลักการใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อทำความสะอาดพื้นผิว..... 14
2.18	รูปแบบของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์สำหรับงานทำความสะอาดพื้นผิว..... 14
2.19	ภาพจำลองการเชื่อมพลาสติกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก..... 15
2.20	จุดรวมพลังงานในการเชื่อมชิ้นงานขนาดเล็ก..... 15
2.21	การย้ายมุมพลาสติกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก..... 16
2.22	การใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อฝังหมุดโลหะลงในเนื้อพลาสติก..... 16
3.1	การฉายรังสีไปสู่วัตถุเพื่อสร้างภาพ..... 19
3.2	ลักษณะของระบบที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพตัดขวาง..... 19
3.3	การคลื่นอัลตราโซนิกจากหัวส่งไปยังหัวรับ โดยมีน้ำเป็นตัวกลาง..... 20
3.4	การส่งคลื่นอัลตราโซนิกผ่านน้ำและวัตถุที่มีความหนาแน่นค่าเดียว..... 21
3.5	การส่งคลื่นอัลตราโซนิกผ่านน้ำและวัตถุที่มีความหนาแน่นหลายค่า..... 22

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6	หลักการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้ทฤษฎีการแปลงฟูเรียร์..... 24
3.7	Block diagram แสดงวิธีการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้การแปลงฟูเรียร์..... 27
3.8	ราสเตอร์รูปแบบต่างๆ..... 27
3.9	การประมาณค่าจุด Q 27
3.10	แสดงโปรเจกชันของฟังก์ชัน 2 มิติ..... 28
3.11	Block diagram แสดงวิธีการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้วิธีฟิลเตอร์แบบโปรเจกชัน..... 29
3.12	ภาพแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของ Ram-Lak Filter..... 30
4.1	ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้ทฤษฎีฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป..... 44
4.2	การวัดสัญญาณที่เกิดการกระเจิงของวัตถุที่ถูกวางไว้ในสนามคลื่น..... 45
4.3	สัญญาณที่ถูกพลอตในระนาบของฟูเรียร์สองมิติ..... 46
4.4	ข้อที่เกิดขึ้นในระนาบเชิงซ้อนจากส่วนของผลรวมเชิงเส้น..... 49
4.5	การวางข้อมูลลงในโดเมนความถี่..... 50
4.6	ความสัมพันธ์ของขนาดส่วนโค้งที่เปลี่ยนไปเมื่อความถี่เกิดการเปลี่ยนแปลง..... 51
5.1	แบบจำลองของระบบที่ใช้ในการทดลอง..... 52
5.2	อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์แบบระนาบที่ใช้ในการทดลอง..... 53
5.3	ไฮโดรโฟนที่ใช้ในการทดลอง..... 54
5.4	เครื่องกำเนิดสัญญาณกระตุ้นสำหรับอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์..... 54
5.5	อ่างบรรจุน้ำที่ใช้ในการทดลอง..... 55
5.6	ส่วนประกอบต่างๆภายในอ่างบรรจุน้ำที่ใช้ในการทดลอง..... 55
5.7	ออสซิลโลสโคปที่นำมาใช้งาน..... 56
5.8	ภาพรวมของระบบที่ใช้ในการทดลอง..... 57
5.9	แบบจำลองวิธีการวัดค่าดัชนีหักเหของวัตถุ..... 58
5.10	การพิจารณาเวลาที่ใช้ในการเดินทางของสัญญาณ..... 59
5.11	การหาค่าดัชนีหักเหของเฟนทอมจากเงาคลื่นสี่เหลี่ยมที่สร้างขึ้นจากสารเดียวกัน..... 59
5.12	ลักษณะของคลื่นที่ตรวจวัดได้จากออสซิลโลสโคป..... 60
5.13	ตัวอย่างข้อมูลที่อ่านเข้ามาแสดงผลยังเครื่องคอมพิวเตอร์..... 60
5.14	ตัวอย่างระนาบคลื่นที่พล็อตขึ้นจากข้อมูล 1 โปรเจกชัน..... 61
5.15	กระบวนการหาข้อมูลโปรเจกชันจากสัญญาณที่ได้รับ..... 62
5.16	ตัวอย่างข้อมูลโปรเจกชันทางแอมพลิจูด..... 62
5.17	ตัวอย่างข้อมูลโปรเจกชันทางเฟส..... 62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 การวางข้อมูลโปรเจกชันลงบนโดเมนความถี่.....	63
5.19 ตัวอย่างข้อมูลบนโดเมนความถี่หลังจากการวางข้อมูล.....	63
5.20 ผลการสร้างภาพตัดขวางของแฟนทอมทรงกระบอกตันเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 เซนติเมตร.....	64
5.21 ผลการสร้างภาพตัดขวางของแฟนทอมทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.35 เซนติเมตร ภายในมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตร.....	65
5.22 ผลการสร้างภาพตัดขวางของแฟนทอมทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.35 เซนติเมตร ภายในมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตร จำนวน 3 รู.....	65
5.23 ผลการสร้างภาพตัดขวาง และเปรียบเทียบคุณภาพของภาพที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชัน ของแฟนทอมทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ภายในมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร.....	66
5.24 ผลการสร้างภาพตัดขวาง และเปรียบเทียบคุณภาพของภาพที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชัน ของแฟนทอมทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ภายในถูกเจาะเป็นรูขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร และ 1.8 เซนติเมตร.....	67
5.25 ผลการสร้างภาพตัดขวาง และเปรียบเทียบคุณภาพของภาพที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชัน ของแฟนทอมทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ภายในมีช่องรูปทรงสี่เหลี่ยม.....	68
5.26 กราฟเปรียบเทียบค่า MSE ที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชันของแฟนทอมรูปที่ 5.23.....	69
5.27 กราฟเปรียบเทียบค่า MSE ที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชันของแฟนทอมรูปที่ 5.24.....	69
5.28 กราฟเปรียบเทียบค่า MSE ที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชันของแฟนทอมรูปที่ 5.25.....	69
5.29 ผลการสร้างภาพตัดขวางของแฟนทอมที่มีความแตกต่างของเนื้อสารภายในทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร ภายในมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร.....	70
5.30 ผลการสร้างภาพตัดขวางของแฟนทอมที่มีความแตกต่างของเนื้อสารภายใน และเปรียบเทียบคุณภาพของภาพที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชัน ของแฟนทอมทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร.....	71
5.31 กราฟเปรียบเทียบค่า MSE ที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชันของแฟนทอมรูปที่ 5.30.....	72
5.32 การเปรียบเทียบคุณภาพของภาพตัดขวางระหว่างวิธีการฟิลเตอร์แบ็ค โปรเจกชัน และวิธีการแปลงฟูเรียร์ทั่วไป ของแฟนทอมที่เป็นสารเนื้อเดียวทรงกระบอก.....	73
5.33 การเปรียบเทียบคุณภาพของภาพตัดขวางระหว่างวิธีการฟิลเตอร์แบ็ค โปรเจกชัน และวิธีการแปลงฟูเรียร์ทั่วไป ของแฟนทอมที่เป็นสารเนื้อเดียวทรงกระบอก.....	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.34 การเปรียบเทียบคุณภาพของภาพตัดขวางระหว่างวิธีการฟิลเตอร์แบ็คโปรเจกชัน และวิธีการแปลงฟูเรียร์ทั่วไป ของแฟนทอมที่เป็นสารเนื้อเดียวทรงกระบอก.....	75
5.35 การเปรียบเทียบคุณภาพของภาพตัดขวางระหว่างวิธีการฟิลเตอร์แบ็คโปรเจกชัน และวิธีการแปลงฟูเรียร์ทั่วไป ของแฟนทอมที่มีความแตกต่างของเนื้อสารภายใน.....	76
5.36 กราฟเปรียบเทียบค่า MSE ระหว่างวิธีการ FBP และ GFS ของแฟนทอมรูปที่ 5.32-5.35.....	76
5.37 การแทนภาพตัดขวางระดับเทาด้วยระดับสี.....	77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic) นั้น เป็นคลื่นที่มีคุณสมบัติของคลื่นเสียงหากแต่มีความถี่ที่สูงเกินกว่าระดับการได้ยินของมนุษย์ มีพลังงานอยู่ในรูปของพลังงานทางกล สามารถกำหนดทิศทางการแพร่ของคลื่นได้อย่างแม่นยำ สามารถใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ ได้มากมาย ทั้งทางด้านการเดินเรือ ด้านอุตสาหกรรม เครื่องมือวัดต่างๆ รวมไปถึงทางด้านการตรวจวินิจฉัยทางการแพทย์ เนื่องจากคุณสมบัติเด่นทางด้านความปลอดภัย เพราะไม่มีการสะสมหรือแพร่กระจายของสารกัมมันตภาพรังสีใดๆ จึงไม่ส่งผลกระทบต่อผู้ป่วย สำหรับการใช้งานคลื่นอัลตราโซนิกทางการแพทย์นั้น มีรูปแบบการใช้งานที่หลากหลายซึ่งโดยทั่วไปจะมีจุดประสงค์หลักเพื่อใช้ในการตรวจดูอวัยวะภายในร่างกายส่วนต่างๆ ของผู้ป่วยโดยไม่จำเป็นต้องทำการผ่าตัด นอกเหนือจากนี้ยังสามารถพบเห็นการใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติ และโครงสร้างของเนื้อเยื่อต่างๆ โดยใช้หลักในการสร้างภาพตัดขวางมาเกี่ยวข้อง ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา ในการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิกจะใช้สมมุติฐานว่า ในกรณีที่คลื่นอัลตราโซนิกเดินทางผ่านวัตถุที่มีค่าดัชนีหักเห (Refractive Index) ต่ำ จะสามารถประมาณการเส้นทางของคลื่นให้เป็นเส้นตรงเช่นเดียวกับการเดินทางของรังสีเอ็กซ์ (X-ray) ได้ โดยไม่คำนึงถึงผลกระทบจากการเลี้ยวเบน (Diffraction) ของคลื่นที่เกิดขึ้นที่หน้าสัมผัสของวัตถุหรือตัวกลางซึ่งมีค่าดัชนีหักเหแตกต่างกัน ซึ่งถึงแม้ว่าข้อมูลภาพตัดขวางที่ได้รับมานั้นจะมีคุณภาพอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ แต่ก็ถือว่าเป็นข้อมูลภาพตัดขวางที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากในความเป็นจริงนั้นพฤติกรรมของคลื่นอัลตราโซนิกที่เดินทางผ่านตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหแตกต่างกัน จะเกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวกลางสองชั้น ดังนั้นการสร้างภาพตัดขวางด้วยทฤษฎีต่างๆที่เป็นทฤษฎีในการสร้างภาพตัดขวาง สำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่ไม่เกิดการเลี้ยวเบนของสัญญาณ (Non-Diffraction Tomography) ดังเช่นรังสีเอ็กซ์ จึงไม่สามารถให้ภาพตัดขวางที่สมบูรณ์ เมื่อนำมาใช้กับแหล่งกำเนิดชนิดที่เกิดการเลี้ยวเบนของสัญญาณดังเช่นคลื่นอัลตราโซนิกได้ ดังนั้นในกรณีของการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก จึงจำเป็นต้องใช้หลักการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่เกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction Tomography) ซึ่งทำให้ภาพตัดขวางที่ได้รับนั้นมีคุณภาพ สามารถยอมรับได้

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการนำเสนอการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกโดยใช้หลักการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่เกิดการเลี้ยวเบน โดยได้ทำการทดลองสร้างภาพตัดขวางจากแฟนทอม (Phantom) ชนิดต่างๆ ทั้งแฟนทอมที่เป็นสารเนื้อเดียว (Homogeneous Phantom) และแฟนทอมที่มีเนื้อสารภายในแตกต่างกัน (Heterogeneous Phantom) ซึ่งผลการทดลองบางส่วนนั้น จะนำมาเปรียบเทียบกับภาพตัดขวางที่ได้รับจากเทคนิคการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่ไม่เกิดการเลี้ยวเบนเพื่อพิสูจน์ข้อสันนิษฐานที่ได้ตั้งไว้แต่ต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาหลักการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่มีการเลี้ยวเบน
2. เพื่อประยุกต์ใช้ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่มีการเลี้ยวเบน ในการสร้างภาพตัดขวางจากคลื่นอัลตราโซนิก
3. เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของภาพตัดขวาง ที่ได้รับจากการใช้หลักการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่มีการเลี้ยวเบน และหลักการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดไม่มีการเลี้ยวเบน ในการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

1.3 สมมุติฐานในการศึกษา

ในการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิกนั้น หากเป็นการสร้างภาพตัดขวางของวัตถุที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำ จะสามารถประมาณการเดินทางของคลื่นเป็นเส้นตรงได้ ซึ่งทำให้สามารถนำข้อมูลที่ได้รับไปใช้ในการสร้างภาพตัดขวาง ด้วยหลักการเดียวกับการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่ไม่เกิดการเลี้ยวเบนดังเช่นรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งภาพตัดขวางที่ได้รับมานั้นก็มีคุณภาพอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แต่ในความเป็นจริงนั้น การประพาดตัวของคลื่นอัลตราโซนิกที่เดินทางกระทบหน้าสัมผัสของวัตถุที่มีค่าดัชนีหักเหแตกต่างกันคลื่นจะเกิดการเลี้ยวเบน ดังนั้นหากต้องการภาพตัดขวางที่มีคุณภาพและความถูกต้องสูงขึ้น ในการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิกนั้น จึงต้องใช้ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่เกิดการเลี้ยวเบน ซึ่งจะทำให้ข้อมูลภาพตัดขวางที่ได้รับมีความถูกต้องน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

สำหรับทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางที่นำมาใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้แก่ ทฤษฎีฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป (Generalized Fourier Slice Theory) ซึ่งเป็นทฤษฎีหนึ่งที่ใช้ในการสร้างภาพตัดขวางสำหรับ

แหล่งกำเนิดที่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบน โดยในงานวิจัยชิ้นนี้นั้นจะเป็นการสร้างภาพตัดขวางในโหมดส่งผ่าน (Transmission Mode) สำหรับผลการทดลองที่ได้มานั้น บางส่วนจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับ การสร้างภาพตัดขวางจากทฤษฎีที่ใช้สำหรับแหล่งกำเนิดที่ไม่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบน เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพและความถูกต้องของภาพตัดขวางที่ได้รับ

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สร้างภาพตัดขวางในโหมดส่งผ่านโดยใช้ทฤษฎีฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป
2. เปรียบเทียบคุณภาพของภาพตัดขวางที่ได้รับ ระหว่างการใช้ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่ไม่เกิดการเลี้ยวเบนของสัญญาณ และทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางแบบฟิลเตอร์เบ็คโปรเจกชัน ในการสร้างภาพตัดขวางจากคลื่นอัลตราโซนิก
3. สร้างภาพตัดขวางของแพนทอมสารเนื้อเดียว และแพนทอมที่มีสารประกอบอื่นๆ ภายใน

1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท อันประกอบไปด้วย

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 นำเสนอความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคลื่นอัลตราโซนิก ทั้งทางด้านความหมาย ความสำคัญ วิธีการให้กำเนิดคลื่น รวมไปถึงการใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตราโซนิกในด้านต่างๆ ที่สามารถพบเห็นได้

บทที่ 3 เป็นการนำเสนอทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ที่ใช้ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่ไม่เกิดการเลี้ยวเบน ซึ่งเป็นงานวิจัยก่อนหน้าที่เกี่ยวข้องโดยตรง

บทที่ 4 นำเสนอทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบน เพื่อที่จะนำไปใช้ในการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

บทที่ 5 นั้นเป็นการทดลองและผลการทดลองที่ได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับคลื่นอัลตราโซนิก

คลื่นอัลตราโซนิกนั้น หมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าขอบเขตการได้ยินของมนุษย์ ซึ่งจากการที่คลื่นนี้มีความถี่สูง จึงทำให้มีความยาวคลื่นสั้น เป็นผลทำให้สามารถกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบจากการเลี้ยวเบนจากการที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านช่องเปิดที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่น จากคุณสมบัติที่สามารถควบคุมทิศทางของคลื่นได้แม่นยำนี้เอง จึงทำให้คลื่นอัลตราโซนิกถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง ทั้งทางด้าน การแพทย์ เช่น เครื่องอัลตราซาวด์ซึ่งใช้ในการตรวจสอบอวัยวะภายในร่างกาย ฯลฯ ทางด้าน อุตสาหกรรม เช่น การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยคลื่นอัลตราโซนิก, การเชื่อมต่อวัสดุ, การตรวจสอบพื้นผิว ฯลฯ ทางด้านเครื่องมือวัดต่างๆ เช่น การวัดระยะทางต่างๆ, การวัดความลึกของมหาสมุทร, การตรวจจับสิ่งกีดขวาง ฯลฯ นอกเหนือจากนี้ยังมีการใช้งานคลื่นอัลตราโซนิกในงานด้านอื่นๆอีกมากมาย

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคลื่นอัลตราโซนิก รวมไปถึงหลักการใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตราโซนิกในงานด้านต่างๆ ที่ได้ถูกพัฒนาจนเป็นเครื่องมือเชิงพาณิชย์ที่สามารถพบได้โดยทั่วไป

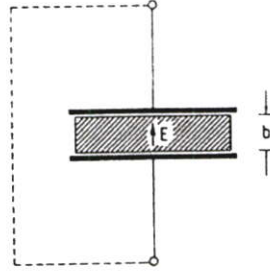
2.1 อัลตราโซนิกทรานส์ดีวเซอร์

คลื่นอัลตราโซนิกนั้นเป็นคลื่นที่มีลักษณะพลังงานเป็นพลังงานทางกล ดังนั้นการที่จะสามารถสร้างคลื่นอัลตราโซนิกนี้ได้ ก็คือต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานรูปแบบอื่นๆ ให้อยู่ในรูปแบบพลังงานทางกลที่มีความถี่ย่านของคลื่นอัลตราโซนิกนั่นเอง ซึ่งเราเรียกอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงระหว่างพลังงานรูปแบบต่างๆกับคลื่นอัลตราโซนิกนี้ว่า อัลตราโซนิกทรานส์ดีวเซอร์ (Ultrasonic Transducer) โดยอัลตราโซนิกทรานส์ดีวเซอร์นี้มีอยู่หลายชนิด ซึ่งมีหลักการกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกที่แตกต่างกันไป สำหรับชนิดที่พบเห็นได้โดยทั่วไปนั้นมีดังต่อไปนี้

2.1.1 อัลตราโซนิกทรานส์ดีวเซอร์ชนิดที่ใช้ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

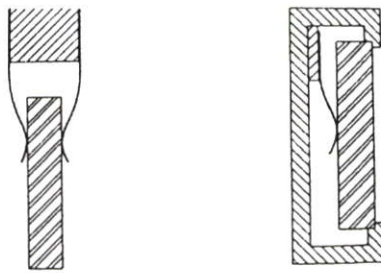
อัลตราโซนิกทรานส์ดีวเซอร์ชนิดนี้นั้น ถือได้ว่าเป็นทรานส์ดีวเซอร์ที่นิยมแพร่หลายมากที่สุด ซึ่งถูกนำมาใช้ในการสร้างคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่สูงปานกลาง โดยมีหลักการกำเนิด

คลื่นจากการใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect) นั่นคือเมื่อวัสดุที่มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Material) เช่นผลึกควอตซ์ (Quartz Crystal) มีค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้งสองต่างกันจะทำให้ผลึกเกิดการเปลี่ยนรูป ซึ่งเมื่อการเปลี่ยนรูปของผลึกนี้เกิดขึ้นด้วยความถี่ในระดับของคลื่นอัลตราโซนิกก็จะเป็นการกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกออกมา



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

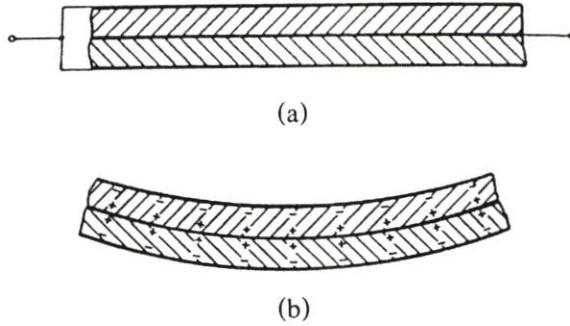
เมื่อพิจารณารูปที่ 2.1 ชิ้นสารที่มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่มีความหนา b ซึ่งถูกตัดออกมาด้วยวิธีการที่เหมาะสม (รูปแบบการเปลี่ยนรูปของชิ้นสารเมื่อได้รับพลังงานไฟฟ้านั้น ขึ้นอยู่กับทิศทางของการตัดชิ้นผลึก) โดยขนาดของชิ้นสารนั้นใหญ่มากเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของชิ้นสารเอง เมื่อชิ้นสารนี้ได้รับพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายผ่านขั้วอิเล็กโทรดจะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นภายในชิ้นสาร ซึ่งการเปลี่ยนรูปของผลึกก็เกิดจากการสะสมของพลังงานภายในชิ้นสารนี้เอง โดยปริมาณของพลังงานไฟฟ้าที่สะสมภายในนั้น มีผลโดยตรงต่อความถี่ตอบสนอง (Resonance Frequency) ของแต่ละชิ้นสาร ซึ่งปริมาณของสนามไฟฟ้านี้ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นสาร จึงกล่าวได้ว่าความถี่ตอบสนองของแต่ละชิ้นสารนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของแต่ละชิ้นสารนั่นเอง สำหรับการยึดชิ้นสารเพื่อใช้งานเป็นทรานส์ดิวเซอร์โดยทั่วไปนั้นแสดงดังรูปที่ 2.2



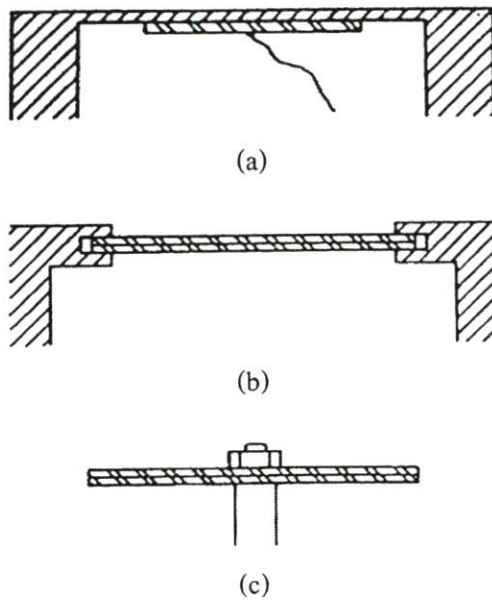
รูปที่ 2.2 การยึดชิ้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเพื่อใช้งาน โดยทั่วไป

ทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้หลักการนี้เรียกว่าเป็นเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์ที่พิจารณาทางด้านความหนาของชิ้นสารเป็นหลัก (Thickness Mode) ซึ่งทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้นั้นให้กำเนิดคลื่นได้ไม่แรงนัก จึงทำให้สามารถใช้งานได้เพียงในกรณีของการกำเนิดคลื่นเพื่อเดินทางใน

ของแข็งเท่านั้น ซึ่งไม่เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำไปใช้ในการกำเนิดคลื่นสำหรับเดินทางในอากาศหรือก๊าซใดๆ ซึ่งได้มีการคิดค้นเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้หลักการ โค้งงอของชิ้นสารเพื่อแก้ไขจุดบกพร่องดังกล่าว ซึ่งเราเรียกทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ว่า ทรานส์ดิวเซอร์แบบที่ใช้หลักการ โค้งงอของสารเปียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Bending Transducer) ซึ่งให้ความแรงของคลื่นสูงกว่ามากจึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำไปใช้กำเนิดคลื่นในของเหลว รวมไปถึงแก๊สต่างๆ



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดที่ใช้หลักการ โค้งงอของวัสดุเปียโซอิเล็กทริก
(a) ขณะอยู่ในสภาวะสมดุล (b) ขณะ ได้รับพลังงาน



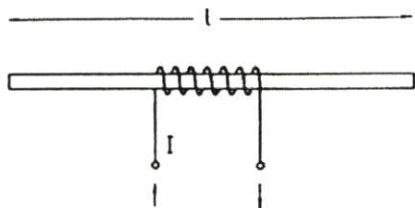
รูปที่ 2.4 ลักษณะการยึดทรานส์ดิวเซอร์ชนิดที่ใช้หลักการ โค้งงอของวัสดุเปียโซอิเล็กทริก
(a) การยึดวัสดุเปียโซอิเล็กทริกเข้ากับฟิล์มโลหะ
(b) การยึดวัสดุเปียโซอิเล็กทริกที่บริเวณขอบ
(c) การยึดวัสดุเปียโซอิเล็กทริกที่บริเวณกลางชิ้นวัสดุ

รูปที่ 2.3 นั้นแสดงโครงสร้างของทรานส์ดิวเซอร์ดังกล่าว โดยเมื่อขั้วสารได้รับพลังงานผ่านขั้วอิเล็กโทรดขั้วสารจะเกิดการโค้งงอ ซึ่งทิศทางการโค้งงอนี้ขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ขั้วสารได้รับ การใช้งานวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแบบนี้จะพบว่าความถี่ตอบสนองของขั้วสารลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานขั้วสารขนาดเดียวกันในรูปแบบทรานส์ดิวเซอร์ ซึ่งเป็นข้อด้อยที่ทำให้ไม่สามารถสร้างทรานส์ดิวเซอร์ที่มีความถี่ตอบสนองสูงๆ ด้วยวิธีการนี้ได้

จากการที่ทรานส์ดิวเซอร์นี้กำเนิดคลื่นจากขั้ววัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีความเปราะ และมีความบางจึงทำให้ในการนำไปใช้งานต้องมีการยึด และป้องกันการกระแทกโดยตรงจากวัตถุภายนอก เพื่อไม่ให้เกิดการเสียหายกับขั้วสารขึ้น โดยรูปที่ 2.4 นั้นแสดงการนำทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ไปใช้งานที่อาจพบเห็นได้ทั่วไป

2.1.2 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์แบบแมกนีโตสทริกทีฟ

ทรานส์ดิวเซอร์แบบแมกนีโตสทริกทีฟ (Magnetostrictive Transducer) นี้เหมาะสมควรสำหรับการสร้างคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความแรงสูงแต่มีความถี่ต่ำ (ในช่วง 20-40 kHz) ซึ่งยุคสมัยที่เปลี่ยนไปทำให้ทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ ถูกแทนที่ด้วยทรานส์ดิวเซอร์แบบเพียโซอิเล็กทริก แต่ถึงอย่างไรก็ตามคุณสมบัติเด่นที่ทำให้ทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ยังถูกนำมาใช้งานคือ การที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนสามารถสร้างได้โดยง่าย มีความคงทนทั้งทางด้านโครงสร้าง และทางด้านความทนทานต่อสัญญาณไฟฟ้า

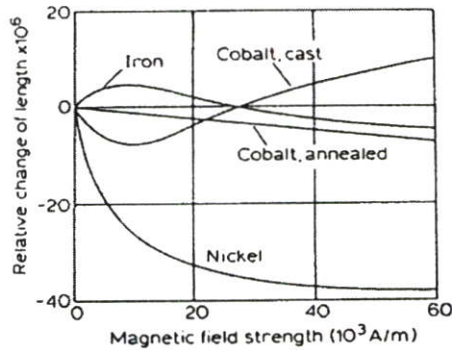


รูปที่ 2.5 ปรางค์การณณ์แมกนีโตสทริกชัน

รูปที่ 2.5 นั้นแสดงปรากฏการณ์แมกนีโตสทริกชัน (Magnetostriction Effect) โดยแกนที่นำมาใช้งานนั้นจะเป็นแกนที่สร้างจากสารประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) ซึ่งเป็นแกนเหล็กที่มีคุณสมบัติของแม่เหล็ก โดยแกนเหล็กนี้จะถูกพันด้วยขดลวด เมื่อทำการจ่ายกระแสเข้าสู่ขดลวด ขดลวดนี้จะสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะกระทำกับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากแกนเหล็ก ทำให้แกนเหล็กซึ่งไม่ได้มีการยึดไว้จะเกิดการเคลื่อนตัวไปจากเดิม ซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่และระยะทางที่เคลื่อนที่ไปนั้นขึ้นอยู่กับทิศทาง และปริมาณกระแสที่ไหลผ่านขดลวดนั่นเอง

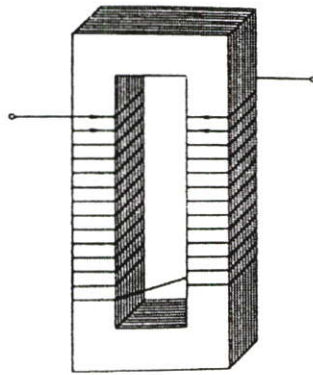
สำหรับรูปที่ 2.6 นั้นเป็นกราฟแสดงระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไป ต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มากระทำของสารแต่ละชนิด ซึ่งทำให้เห็นว่าสารที่เหมาะสมในการนำมาสร้าง

ทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้คือนิเกิล (Nickel) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของระยะทางต่อสนามแม่เหล็กสูงซึ่งทำให้ได้คลื่นที่มีความแรงอีกทั้งมีเสถียรภาพของทิศทางการเคลื่อนที่ ซึ่งแตกต่างกับสารชนิดอื่นอย่างชัดเจน



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไป

ต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กของสารของสารเฟอร์โรแมกเนติกแต่ละชนิด



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทั่วไปของทรานส์ดิวเซอร์แบบแมกนีโตสทริกทิฟ

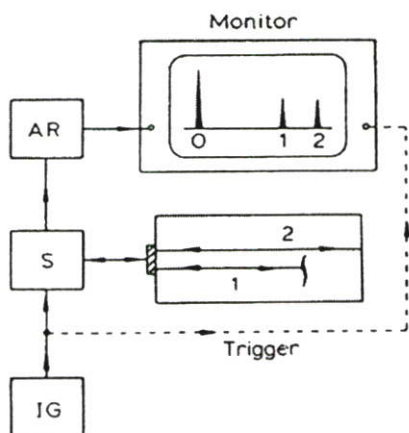
โครงสร้างของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ที่พบเห็นได้ทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.7 โดยจะเห็นได้ว่ามีแรงกระทำของสนามแม่เหล็กจากขดลวดต่อแกนเหล็กถึงสองชุด ซึ่งในความเป็นจริงอาจมีจำนวนมากกว่านี้ สำหรับแกนของทรานส์ดิวเซอร์นี้ถูกสร้างขึ้นจากแผ่นนิเกิลที่ถูกลำมาเรียงซ้อนกัน โดยอาจมีการเคลือบด้วยสารชนิดอื่นอีกด้วย ทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันการเกิดกระแสไหลวน ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการสูญเสียพลังงาน และทำให้เกิดความร้อนขึ้น

นอกเหนือจากทรานส์ดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริก และทรานส์ดิวเซอร์แบบแมกนีโตสทริกทิฟที่กล่าวมาข้างต้น ยังมีทรานส์ดิวเซอร์อีกชนิดหนึ่งซึ่งโครงสร้างคล้ายกับตัวเก็บประจุที่มีชั้นของสารไดอิเล็กทริกเป็นของแข็ง เราเรียกทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ว่า ทรานส์ดิวเซอร์แบบอิเล็กโตรสแตติก (Electrostatic Transducer) ซึ่งไม่ได้แสดงไว้ในที่นี้

2.2 การใช้งานคลื่นอัลตราโซนิกทางด้านการตรวจวินิจฉัยทางการแพทย์

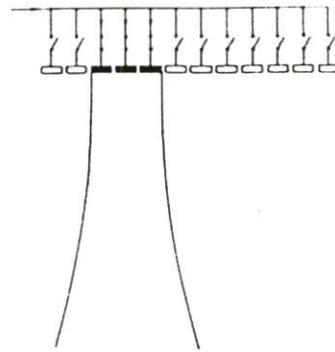
ในการใช้งานคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อการตรวจวินิจฉัยทางการแพทย์นั้น มีจุดประสงค์หลักในการใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อตรวจสอบโครงสร้าง, ลักษณะภายในของวัตถุ หรือร่างกายโดยไม่จำเป็นต้องทำลายวัตถุเหล่านั้น โดยหากเปรียบเทียบการวินิจฉัยโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกกับการวินิจฉัยโดยใช้รังสีเอ็กซ์ (X-ray) จะพบว่า ถึงแม้รังสีเอ็กซ์จะสามารถให้รายละเอียดโครงสร้างภายในได้ชัดเจน แต่เนื่องด้วยอำนาจในการทะลุทะลวงที่สูง จึงทำให้ไม่สามารถมองเห็นถึงความแตกต่างของเนื้อเยื่อ, ของเหลวต่างๆภายในร่างกายได้ ซึ่งต่างจากคลื่นอัลตราโซนิกที่พิจารณาจากการแพร่ของคลื่น ซึ่งสามารถให้รายละเอียดของส่วนต่างๆ ที่มีคุณสมบัติต่างกันได้ อีกทั้งหากเปรียบเทียบทางด้านความปลอดภัยต่อมนุษย์รังสีเอ็กซ์ซึ่งมีคุณสมบัติของสารกัมมันตภาพรังสี จะเกิดการสะสมและอาจก่อให้เกิดความผิดปกติของร่างกายได้ อีกทั้งหากเป็นการใช้รังสีที่มีความเข้มสูงอาจทำให้เนื้อเยื่อต่างๆที่รังสีเดินทางผ่านเกิดความเสียหายได้ ซึ่งแตกต่างกับคลื่นอัลตราโซนิกที่เป็นคลื่นเสียงความถี่สูงอันไม่มีผลกระทบร้ายแรงใดๆต่อร่างกาย จึงทำให้มีการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาใช้งานทางด้านการตรวจวินิจฉัยทางการแพทย์อย่างแพร่หลาย

โดยทั่วไปแล้วนั้นการใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อการตรวจวินิจฉัยทางการแพทย์ มักพบได้ในรูปของการใช้หลักการสะท้อนของคลื่น ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นการใช้วิธีการ การสะท้อนของสัญญาณกระตุ้น (Impulse Echo Method) ซึ่งเป็นวิธีการสำคัญในการใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตราโซนิก โดยจะวิเคราะห์ผลจากข้อมูลสัญญาณกระตุ้นที่สะท้อนกลับจากวัตถุที่พิจารณา



รูปที่ 2.8 วิธีการสะท้อนของสัญญาณกระตุ้น (IG : ชุดกำเนิดสัญญาณกระตุ้น (Impulse Generator), S : วงจรแยกสัญญาณ (Separator Circuit), AR : วงจรขยายสัญญาณ และวงจรปรับสัญญาณ (Amplifier and Rectifier))

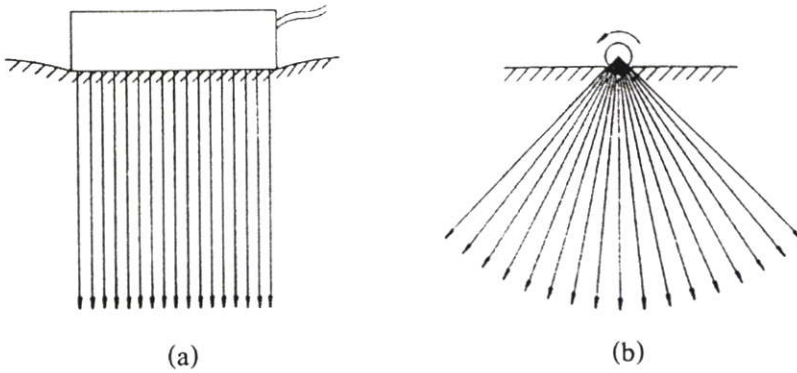
รูปที่ 2.8 นั้นแสดงหลักการเบื้องต้นของวิธีการสะท้อนของสัญญาณกระตุ้น โดยเมื่อชุดกำเนิดสัญญาณกระตุ้นซึ่งเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งเข้าสู่อัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ในช่วงเวลาแคบๆ ทำการส่งสัญญาณออกไปนั้น สัญญาณดังกล่าวจะถูกส่งไปยังอัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์เพื่อกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิคเพื่อที่จะส่งเข้าสู่เนื้อวัตถุ ในขณะที่คลื่นเดินทางในเนื้อวัตถุนั้น เมื่อคลื่นกระทบรอยต่อระหว่างเนื้อสารที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน คลื่นบางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับมายังทรานสดิวเซอร์ (ดังคลื่นหมายเลข 1) ส่วนคลื่นคงเหลือที่สามารถเดินทางผ่านไปได้อีกจะเดินทางต่อไป และเมื่อคลื่นเดินทางตกกระทบรอยต่อของตัวกลางที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันก็จะเกิดการสะท้อนของคลื่นกลับมาอีกเช่นกัน (ดังคลื่นหมายเลข 2) โดยสัญญาณทั้งหมดจะถูกแสดงโดยเครื่องแสดงผลสัญญาณ (Monitor) ซึ่งสัญญาณเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการหาโครงสร้างหรือรูปร่างภายในวัตถุนั้นเอง



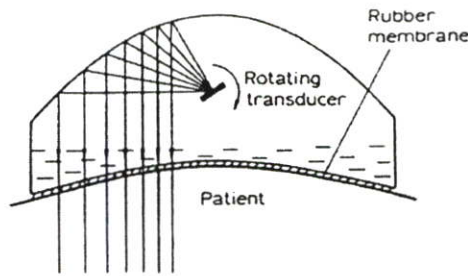
รูปที่ 2.9 แบบจำลองของทรานสดิวเซอร์แบบอาร์เรย์ที่ใช้สำหรับการสแกนแบบขนาน

สำหรับทรานสดิวเซอร์ที่ใช้ในงานทางด้านการแพทย์นั้น โดยทั่วไปจะมีลักษณะการใช้งานแบบหน้าระนาบ ซึ่งอาจมีลักษณะเป็นทรานสดิวเซอร์แบบอาร์เรย์ (Array Transducer) ที่มาจากการเรียงตัวของทรานสดิวเซอร์จำนวนมากดังรูปที่ 2.9 หรืออาจมาจากการใช้ทรานสดิวเซอร์เพียงตัวเดียวแต่ทำการหมุนเพื่อเปลี่ยนมุมในการส่งสัญญาณ ทั้งนี้หากจำแนกตามลักษณะการกวาดสัญญาณ (Scan) จะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักคือ การกวาดสัญญาณแบบขนาน (Parallel Scanning) และการกวาดสัญญาณแบบส่วนของวงกลม (Sector Scanning) ดังรูปที่ 2.10

จะเห็นได้ว่าการสแกนแบบส่วนของวงกลมนั้น จะใช้ทรานสดิวเซอร์เพียงตัวเดียวหมุนไปในมุมต่างๆกัน และทำการบันทึกค่าของสัญญาณแต่ละเส้นที่ทำการสแกนนั้น ซึ่งต่างกับการสแกนแบบขนานที่ใช้ทรานสดิวเซอร์แบบอาร์เรย์ ที่ทำการสแกนโดยเปลี่ยนตำแหน่งสายสัญญาณที่ต่อเข้ากับทรานสดิวเซอร์แต่ละชุดที่ตำแหน่งต่างๆ ทั้งนี้สิ่งสำคัญของทรานสดิวเซอร์แบบอาร์เรย์คือ คุณสมบัติของทรานสดิวเซอร์แต่ละตัวต้องมีความเหมือนหรือใกล้เคียงกัน เพื่อให้ข้อมูลที่ได้รับในแต่ละตำแหน่งสัมพันธ์กัน อีกทั้งอาจต้องมีการปรับแต่งการหน่วงเวลาสัญญาณของทรานสดิวเซอร์แต่ละชุดให้มีความสัมพันธ์กันอีกด้วย



รูปที่ 2.10 ลักษณะการสแกนสัญญาณแบบต่างๆ (a) การสแกนแบบขนาน
(b) การสแกนแบบส่วนของวงกลม

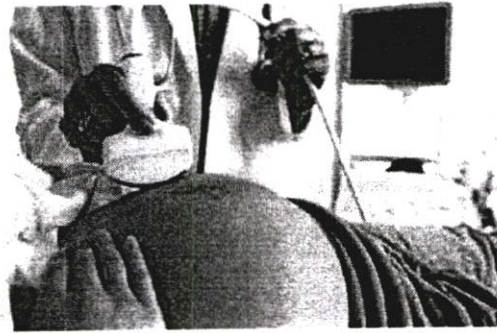


รูปที่ 2.11 การสแกนแบบขนานที่ใช้ทรานส์ดิวเซอร์ที่สามารถหมุนได้ เพื่อให้คลื่นที่ตกกระทบกับแผ่นโค้งสะท้อนคลื่นหักเหไปเป็นเส้นขนาน

นอกเหนือจากการสแกนแบบขนานที่ใช้ทรานส์ดิวเซอร์อาร์เรย์แล้ว ยังมีทรานส์ดิวเซอร์อีกชนิดหนึ่งซึ่งใช้ทรานส์ดิวเซอร์เพียงตัวเดียวทำการหมุนไปในมุมต่างๆ ให้กระทบกับวัสดุสะท้อนคลื่นที่มุมที่เหมาะสม ซึ่งทำให้เส้นที่ทำการสแกนมีลักษณะเป็นเส้นขนาน เช่นเดียวกับการสแกนที่ใช้ทรานส์ดิวเซอร์แบบอาร์เรย์

การใช้งานทรานส์ดิวเซอร์โดยทั่วไป จะต้องมีการทาเจลเพื่อลดปริมาณคลื่นที่สะท้อนกลับที่รอยต่อระหว่างหัวทรานส์ดิวเซอร์กับผิวหนัง โดยเจลนี้จะเข้าไปทำหน้าที่เป็นตัวกลางระหว่างหัวของทรานส์ดิวเซอร์ซึ่งปกติเป็นวัสดุประเภทยาง กับผิวหนัง ซึ่งหากไม่มีการทาเจลนี้ ตัวกลางที่เชื่อมต่อระหว่างผิวหนังและหัวทรานส์ดิวเซอร์จะเป็นอากาศ ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำ เมื่อคลื่นที่กำเนิดจากทรานส์ดิวเซอร์ตกกระทบรอยต่อระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับอากาศ จะเกิดการสะท้อนกลับของคลื่นปริมาณมาก เนื่องจากมีความหนาแน่นของสารที่แตกต่างกันมาก

สำหรับการใช้งานคลื่นอัลตราโซนิกทางด้านการวินิจฉัยทางการแพทย์นั้น ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่ามีจุดประสงค์หลักในการตรวจสอบโครงสร้าง หรือระบบการทำงานภายในร่างกาย ซึ่งภาพที่นำมาแสดงต่อไปนี้ นั้น เป็นการใช้งานคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อวินิจฉัยทางการแพทย์บางส่วนที่สามารถพบได้โดยทั่วไป



(a)



(b)

รูปที่ 2.12 การใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อตรวจทารกที่อยู่ในครรภ์มารดา

(a) ลักษณะการใช้งานทรานสดิวเซอร์ (b) ภาพทารกที่ได้จากการตรวจ



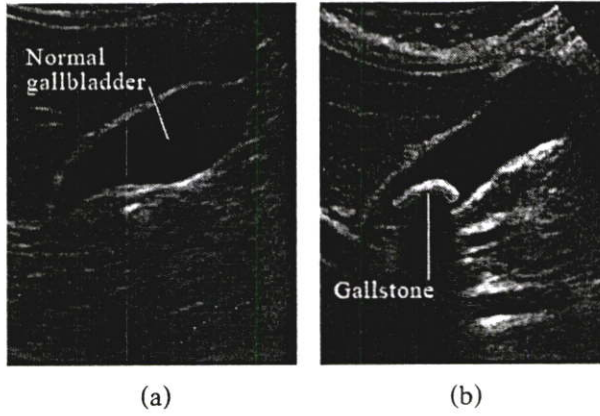
(a)

(b)

รูปที่ 2.13 การใช้เทคนิคทางด้านการประมวลผลภาพในการสร้างภาพเสมือนของทารก

(a) ภาพที่สร้างจำลองขึ้นจากการตรวจด้วยเครื่องอัลตราซาวด์ (ก่อนการเกิด 3 เดือน)

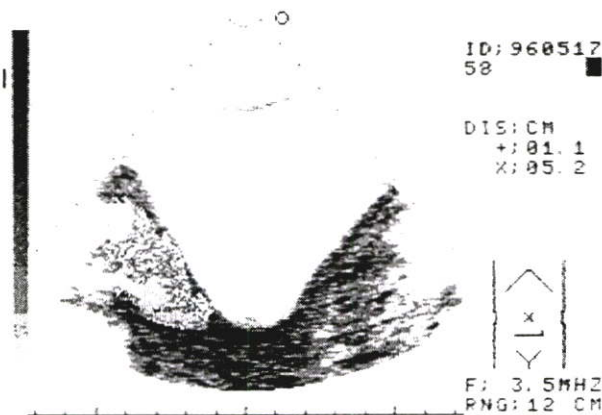
(b) ภาพถ่ายของเด็กที่เกิดจริง (ถ่ายหลังการเกิด 6 เดือน)



รูปที่ 2.14 การใช้คลื่นอัลตราโซนิกตรวจหาก้อนนิ่วในถุงน้ำดี (a) ถุงน้ำดีที่ไม่มีอาการผิดปกติ (b) ก้อนนิ่วที่เกิดขึ้นภายในถุงน้ำดี



รูปที่ 2.15 การใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อตรวจหามะเร็งต่อมลูกหมาก

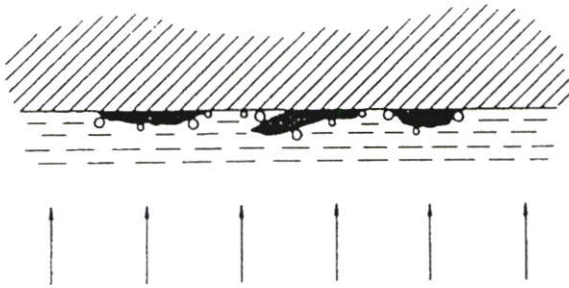


รูปที่ 2.16 การใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อตรวจถุงรังไข่

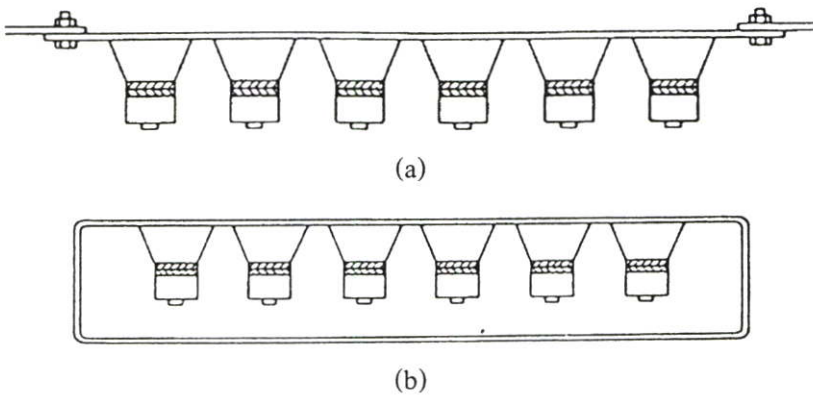
2.3 การใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความแรงสูง

การใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตราโซนิกทางการแพทย์ที่ได้กล่าวไปนั้น เป็นการใช้งานคลื่นอัลตราโซนิกที่คลื่นไม่จำเป็นต้องมีความแรงมากนัก แต่สำหรับทางด้านอุตสาหกรรม คลื่นอัลตราโซนิกส่วนใหญ่มักถูกใช้ในรูปแบบของที่มีความแรงสูง เช่น การชำระล้างพื้นผิวด้วยคลื่นอัลตราโซนิก การเชื่อมต่อวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิก เป็นต้น

การใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อทำความสะอาดพื้นผิวต่าง ๆ นั้น ถือเป็นกระบวนการใช้งานคลื่นอัลตราโซนิกทางอุตสาหกรรมที่พบเห็นได้มากที่สุด มีหลักการเบื้องต้นคือวางวัตถุที่ต้องการจะชำระล้างลงไปในอ่างซึ่งบรรจุของเหลวสำหรับทำความสะอาด แล้วจึงทำการส่งสนามคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความแรงสูงเข้าไปกระทบพื้นผิวที่ต้องการทำความสะอาด ซึ่งจะทำให้สิ่งสกปรกที่อยู่พื้นผิววัตถุหลุดออกมา



รูปที่ 2.17 หลักการใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อทำความสะอาดพื้นผิว



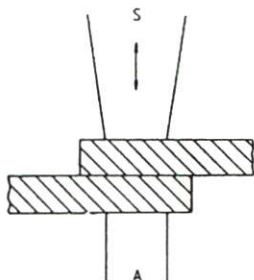
รูปที่ 2.18 รูปแบบของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์สำหรับงานทำความสะอาดพื้นผิว

(a) ชนิดที่สามารถถอดออกได้ (b) ชนิดที่ใช้วางลงในอ่างทำความสะอาดโดยตรง

สำหรับทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้ทำความสะอาดนั้น อาจมีเพียงตัวเดียวหรือมากกว่านั้นขึ้นอยู่กับขนาดของอ่าง หรือขนาดของวัตถุที่ต้องการทำความสะอาด โดยความถี่ที่ใช้ก็จะขึ้นอยู่กับ

ลักษณะของงาน เช่น การชำระล้างพื้นผิวทั่วไปนั้นจะใช้ความถี่ประมาณ 20 KHz แต่สำหรับพื้นผิวที่มีความบอบบางหรือวัตถุมีขนาดเล็ก ซึ่งอาจเกิดความเสียหายจากผลกระทบของฟองอากาศได้นั้น อาจมีการใช้ความถี่สูงถึง 50 KHz หรือในบางครั้งอาจสูงถึง 100 KHz

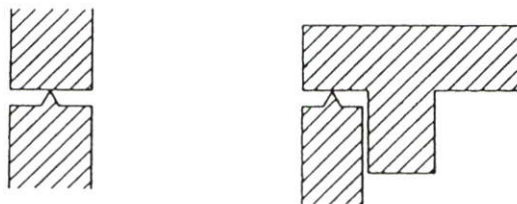
การใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตราโซนิคที่มีความแรงสูงอีกลักษณะหนึ่ง ที่สามารถพบได้คือการเชื่อมต่อวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิค ซึ่งใช้หลักจากการเกิดความร้อนของวัตถุเมื่อมีการคูดคลื่น นั่นคือหากทำการส่งคลื่นอัลตราโซนิคที่มีความแรงสูงเข้าไปในเนื้อวัตถุ เมื่อวัตถุนั้นคูดคลื่นอัลตราโซนิคดังกล่าวก็จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายใน ซึ่งหากความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่าจุดหลอมเหลวของวัตถุ ก็จะทำให้วัตถุนั้นเริ่มเกิดการละลาย จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงทำให้สามารถใช้คลื่นอัลตราโซนิคในงานทางด้านการเชื่อม การหลอม การประสาน การอัดหุ้ม ฯลฯ ต่างๆ ได้



รูปที่ 2.19 ภาพจำลองการเชื่อมพลาสติกด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

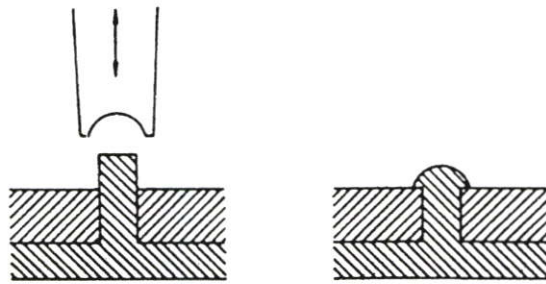
รูปที่ 2.19 นั้นแสดงหลักการโดยง่ายของการเชื่อมวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิค S นั้นแทนตัวทรานส์ดีวเซอร์ที่ใช้สำหรับการเชื่อม ซึ่งโดยปกติมักเรียกว่า โซโนโทรด (Sonotrode) A แทนทั่ง (Anvil) ที่ใช้สำหรับรับแรงที่ตกลงมา โดยชิ้นงานที่จะนำมาเชื่อมต่อกันนั้นจะถูกวางไว้ระหว่างอุปกรณ์ทั้งสอง

จุดเด่นสำคัญประการหนึ่งของการเชื่อมวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิคคือ การที่ความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมนั้นเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุเอง ซึ่งต่างจากการนำเครื่องสร้างความร้อนมาแนบที่พื้นผิววัตถุ จึงทำให้สามารถใช้ในการเชื่อมวัสดุที่มีความสามารถในการนำความร้อนต่ำเช่น พลาสติก ฯลฯ ได้เป็นอย่างดี

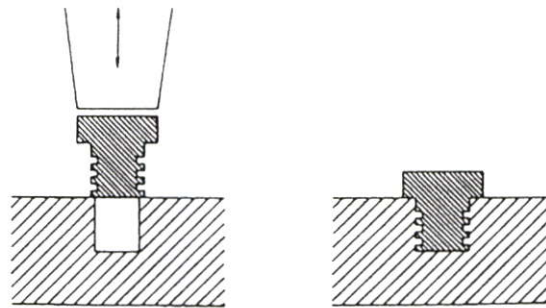


รูปที่ 2.20 จุดรวมพลังงานในการเชื่อมชิ้นงานขนาดเล็ก

สำหรับในกรณีที่ชิ้นงานมีขนาดเล็กนั้น จะทำให้ค่าการดัดโค้งกลับคืนของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความร้อนที่เกิดขึ้นภายในทำลายชิ้นงานนั่นเอง ซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้โดยการสร้างมุมแหลมเล็กๆ (โดยทั่วไปมีความสูงไม่เกิน 0.2-1 มิลลิเมตร) ลักษณะกรวยขึ้นที่บริเวณจุดเชื่อมต่อ ซึ่งมุมแหลมนี้เรียกว่าเป็นจุดรวมพลังงาน (Energy Concentrators) ซึ่งอาจมีได้หลายจุดในแต่ละจุดเชื่อมต่อ ขึ้นอยู่กับขนาดของหน้าสัมผัส โดยเมื่อชิ้นงานได้รับคลื่นอัลตราโซนิก ที่บริเวณจุดรวมพลังงานนี้ จะมีความร้อนสูงกว่าจุดอื่นๆ จึงทำให้สามารถเชื่อมชิ้นงานได้โดยไม่ทำให้โครงสร้างของชิ้นงานเสียหาย



รูปที่ 2.21 การย้ำมุมพลาสติกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก



รูปที่ 2.22 การใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อฝังหมุดโลหะลงในเนื้อพลาสติก

รูปที่ 2.21-2.22 นั้นแสดงรูปแบบการใช้งานอื่นๆที่สามารถพบเห็นได้ในงานอุตสาหกรรม โดยรูปที่ 2.21 นั้นเป็นการใช้โซโนโทรดที่มีรูปร่างเฉพาะเพื่อสร้างหมุดยึดระหว่างชิ้นงาน สำหรับรูปที่ 2.22 นั้นเป็นการฝังโลหะเข้าสู่เนื้อพลาสติกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

การใช้งานคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้กล่าวมานี้ นั้น เป็นการใช้งานคลื่นอัลตราโซนิกที่ถูกพัฒนาจนเป็นเครื่องมือเชิงพาณิชย์แล้วทั้งสิ้น นอกเหนือจากนี้ยังมีการใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตราโซนิกทางด้านอื่นๆอีกมากมาย และด้วยคุณสมบัติเด่นต่างๆของคลื่นอัลตราโซนิก จึงทำให้ยังคงมีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เองก็มีจุดประสงค์ที่จะนำเสนอการใช้งานคลื่นอัลตราโซนิกทางด้านที่ยังไม่ถูกพัฒนาเชิงพาณิชย์ โดยจะนำเสนอในรายละเอียดต่อไป

บทที่ 3

การสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยใช้เทคนิคสำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่ไม่เกิดผลการเลี้ยวเบน

ในบทนี้นั้นเป็นการนำเสนอหลักการทั่วไป ในการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยใช้เทคนิคสำหรับแหล่งกำเนิดที่ไม่เกิดการเลี้ยวเบน (Non-Diffraction Tomography) ซึ่งเป็นงานวิจัยก่อนหน้าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมา ความหมาย และหลักการสร้างภาพตัดขวางต่างๆ ที่นำมาใช้งาน

3.1 ความหมายของภาพตัดขวาง

โดยธรรมชาติการมองเห็นของมนุษย์นั้น เกิดจากการที่แสงตกกระทบวัตถุแล้วสะท้อนเข้าสู่เรตินาของดวงตา จึงปรากฏเป็นภาพต่างๆ ให้มนุษย์รับรู้ ซึ่งถ้าวัตถุที่แสงตกกระทบมีลักษณะที่บ่งแสง ภาพที่มนุษย์มองเห็นนั้น จะเป็นเพียงลักษณะของพื้นผิววัตถุภายนอกเท่านั้น ไม่สามารถที่จะรับรู้ถึงลักษณะโครงสร้างภายในของวัตถุได้ จากข้อจำกัดดังกล่าวทำให้มีการคิดค้นที่จะใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูง ดังเช่น รังสีเอ็กซ์ (X-ray) ในการส่งผ่านวัตถุ ซึ่งข้อมูลที่ได้รับมานั้นจะเป็นข้อมูลที่ขึ้นกับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของวัตถุ โดยวัตถุที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนต่างกันก็จะให้ผลของข้อมูลที่แตกต่างกันไป ซึ่งข้อมูลที่แตกต่างกันเหล่านี้จะถูกใช้เป็นข้อมูลโปรเจกชัน (Projection Data) เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการสร้างภาพตัดขวาง (Tomography) ของวัตถุต่อไป

สำหรับรูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างภาพตัดขวางนั้น นอกเหนือจากลักษณะการส่งผ่าน (Transmission) ที่ได้กล่าวไปแล้ว ยังมีรูปแบบการสะท้อน (Reflection) และ การแผ่กระจาย (Emission) ซึ่งแต่ละวิธีการก็จะถูกใช้กับแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกันไป เช่น กรณีของการสร้างภาพตัดขวางโดยเทคนิคแมกเนติกเรโซแนนซ์ (Magnetic Resonance Imaging : MRI) หรือที่เรียกเต็มๆว่านิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (Nuclear Magnetic Resonance Imaging : NMRI) ซึ่งใช้หลักการตรวจจับคลื่นจากการสั่นของนิวเคลียสของอะตอม เมื่ออยู่ภายในสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่มีความถี่ที่เหมาะสม ซึ่งคลื่นความถี่ตอบสนองที่เกิดขึ้นนั้นจะแผ่ออกในทุกทิศทาง ดังนั้นจึงต้องใช้หลักการแพร่ในการสร้างภาพตัดขวาง เช่นเดียวกับการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้เทคนิคโพซิตรอนอิมิสชันโทโมกราฟี (Positron Emission Tomography : PET) และเทคนิคซิงเกิล

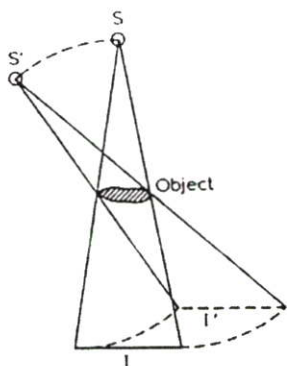
โพตรอนอิมิตชันโทโมกราฟี (Single Photon Emission Tomography : SPECT) ซึ่งใช้การฉีดสารกัมมันตภาพรังสีเข้าสู่เส้นเลือด เป็นผลให้ร่างกายของมนุษย์เกิดการแพร่กระจายกัมมันตภาพรังสีที่เกิดจากสารดังกล่าวออกมา โดยปริมาณการแพร่จะขึ้นอยู่กับปริมาณการสะสมสารกัมมันตภาพรังสีของอวัยวะส่วนต่างๆ ซึ่งเทคนิคนี้โดยปกติจะใช้ในการตรวจหามะเร็งเนื่องจากก้อนมะเร็งจะทำการซึมซับสารกัมมันตภาพรังสีที่ฉีดเข้าไปมากกว่าอวัยวะปกติของร่างกาย ทั้งนี้การซึมซับสารกัมมันตภาพรังสีดังกล่าว จะขึ้นอยู่กับสารที่ใช้ผสมอยู่ในสารกัมมันตภาพรังสีเองด้วย ซึ่งโดยปกตินิยมใช้น้ำตาลซึ่งก้อนมะเร็งจะซึมซับไว้เป็นปริมาณมาก ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีการแพร่ของกัมมันตภาพรังสีสูงกว่าจุดอื่น จึงทำให้สามารถระบุตำแหน่งของก้อนมะเร็งได้ชัดเจน สำหรับในส่วนของ การสร้างภาพตัดขวางโดยใช้หลักการสะท้อนนั้นจะพบเห็นได้ทั่วไป ในการสร้างภาพตัดขวางของวัตถุด้วยแหล่งกำเนิดที่มีคุณสมบัติในการสะท้อนกับหน้าสัมผัสของวัตถุ เช่น แสง ล้ออิเล็กทรอนิกส์ เรดาร์ หรือคลื่นอัลตราโซนิก เป็นต้น

3.2 การสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

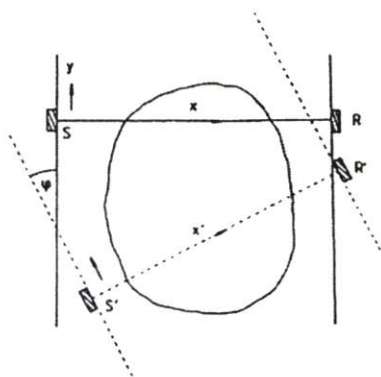
จากความสำเร็จในการสร้างภาพตัดขวางด้วยรังสีเอ็กซ์ จึงทำให้มีการคิดค้นที่จะใช้เทคนิคในการสร้างภาพตัดขวางมาประยุกต์เข้ากับกระบวนการสร้างภาพด้วยเสียง ซึ่งมีจุดมุ่งหมายที่จะทำให้ได้รับภาพตัดขวางที่มีคุณภาพสูงขึ้น สามารถให้ข้อมูลเชิงวินิจฉัยซึ่งนำไปใช้งานทางด้านการแพทย์ได้ ซึ่งหากเปรียบเทียบกับในกรณีของรังสีเอ็กซ์ ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างภาพตัดขวางจะ มาจากการตรวจวัดปริมาณรังสีที่สามารถเดินทางทะลุผ่านร่างกายหรือตัวกลางใดๆ ซึ่งปริมาณของรังสีที่ทะลุผ่านมานั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการดูดกลืนของตัวกลางนั้นๆ และเนื่องจากการเดินทางของรังสีเอ็กซ์นั้นมีลักษณะเป็นเส้นตรง จึงทำให้ผลลัพธ์ของรังสีที่เดินทางทะลุผ่านออกมาในแต่ละเส้นทางการเดินทางนั้นได้มาจากปริมาณคลื่นที่ส่งออกไป หักล้างกับผลรวมของคุณสมบัติการดูดกลืนของวัตถุที่อยู่ตลอดแนวการเดินทางของรังสี โดยปริมาณรังสีที่ตรวจวัดได้ตลอดแนวระนาบของวัตถุนั้น จะถูกบันทึกเป็นข้อมูลโปรเจกชัน (Projection Data) ที่ได้รับจากการฉายรังสีในแต่ละมุม ทั้งนี้โดยปกติแล้วจะมีการฉายรังสีที่มุมต่างๆรอบวัตถุ ซึ่งก็จะทำให้ได้รับข้อมูลโปรเจกชันที่มุมต่างๆกันของวัตถุชิ้นเดียวกัน ซึ่งจะพบว่ามีความสอดคล้องกันกับลักษณะของวัตถุจริง โดยลักษณะการฉายรังสีนั้นแสดงดังรูปที่ 3.1

เมื่อพิจารณาข้อมูลที่ได้รับจากการฉายแต่ละครั้ง จะสามารถแบ่งข้อมูลออกเป็นเส้นทางการเดินทางของรังสีที่อยู่ในแนวขนานกันได้ โดยหากพิจารณาในแต่ละเส้นทางการเดินทางของรังสีนั้นจะพบว่าคลื่นที่ถูกส่งออกจากแหล่งกำเนิด (S) จะเดินทางผ่านวัตถุ โดยในแต่ละส่วนย่อยของวัตถุ (dx) จะเกิดการลดทอนคลื่นขึ้น ซึ่งคลื่นที่สามารถเดินทางผ่านวัตถุออกมาได้นั้น จะถูก

ตรวจวัดโดยตัวตรวจจับ (R) สำหรับคลื่นที่ถูกดัดกลืนในแต่ละส่วนย่อย dx จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการออกมาได้เป็นดังสมการที่ 3.1[2]



รูปที่ 3.1 การฉายรังสีไปสู่วัตถุเพื่อสร้างภาพ



รูปที่ 3.2 ลักษณะของระบบที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพตัดขวาง

$$\frac{dI}{I} = -2\alpha(x, y)dx \quad (3.1)$$

โดย $\alpha(x, y)$ นั้นแทนค่าของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนคลื่นที่ตำแหน่ง x, y ใดๆ ซึ่งเป็นค่าที่ส่งผลโดยตรงกับขนาดของคลื่นที่จะเดินทางผ่านในแต่ละส่วนย่อยออกไป โดยหากพิจารณาถึงผลรวมในการเดินทางของคลื่นผ่านวัตถุตลอดแต่ละแนวการเคลื่อนที่ จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของผลรวมอินทิกรัล (Integration) ได้ดังสมการที่ 3.2 และ สมการที่ 3.3

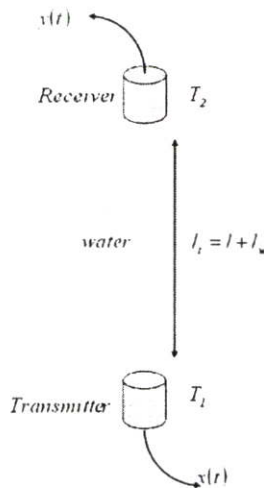
$$\ln \left[\frac{I(y)}{I_0} \right] = -2 \int \alpha(x, y) dx \quad (3.2)$$

หรืออาจจัดให้อยู่ในรูปของ
$$p(y) = \int \alpha(x, y) dx \quad (3.3)$$

เมื่อ

$$-\frac{1}{2} \ln \left[\frac{I(y)}{I_0} \right] = p(y) \quad (3.4)$$

จากแนวคิดนี้ หากประยุกต์ใช้กับแหล่งกำเนิดที่ไม่เกิดการเลี้ยวเบน (Non-Diffraction Source) ดังเช่นรังสีเอ็กซ์ หรือกัมมันตภาพรังสีต่างๆ จะสามารถใช้งานได้อย่างถูกต้อง แต่ในกรณีของคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดที่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบนของคลื่นนั้น การใช้หลักการนี้ก็จะเหมือนการประมาณการเดินทางของคลื่นว่าเป็นเส้นตรงนั่นเอง แต่หากในกรณีที่วัตถุที่เป็นตัวกลางมีค่าดัชนีหักเห (Refractive Index) ต่ำ เช่น เนื้อเยื่ออ่อน (Soft Tissue) ฯลฯ ก็จะทำให้ผลกระทบจากการเลี้ยวเบนนั้นมีค่าน้อย ซึ่งทำให้อาจละทิ้งผลดังกล่าวไปได้ นอกเหนือจากนี้ ในกรณีของรังสีเอ็กซ์นั้น ขณะที่คลื่นเดินทางผ่านวัตถุจะมีความเร็วคงที่เสมอ โดยมีความเร็วในการเคลื่อนที่เท่ากับความเร็วแสง (ประมาณ 3×10^8 m/s) ดังนั้นการพิจารณาผลกระทบของวัตถุต่อคลื่นที่ส่งผ่าน จึงมีเพียงผลทางด้านขนาดของคลื่นที่ถูกกลทอนไปโดยวัตถุเท่านั้น แต่ในกรณีของคลื่นอัลตราโซนิกซึ่งมีความเร็วในการเดินทางผ่านตัวกลางแต่ละประเภทแตกต่างกัน โดยขึ้นกับความหนาแน่นของวัตถุ ที่คลื่นเดินทางผ่าน ทำให้ข้อมูลโปรเจกชันที่จะได้รับจากคลื่นอัลตราโซนิกนั้น แบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ผลทางขนาด และผลทางด้านเวลา โดยจากรูปที่ 3.3 นั้น เป็นภาพแทนการส่งคลื่นจากหัวส่งไปยังหัวรับ โดยผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำเพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการ 3.5 [4]



รูปที่ 3.3 การคลื่นอัลตราโซนิกจากหัวส่งไปยังหัวรับโดยมีน้ำเป็นตัวกลาง

$$Y_w(f) = X(f)H_1(f)H_2(f) \exp[-[\alpha_w(f) + j\beta_w(f)](\lambda + \lambda_w)] \quad (3.5)$$

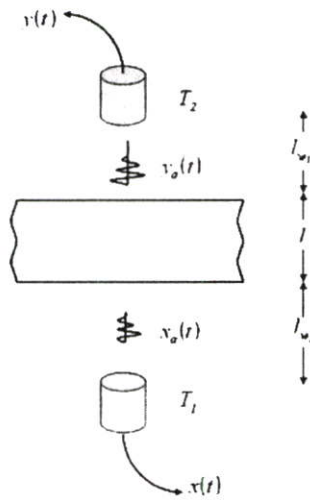
โดย

$Y_w(f)$ คือ การแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณที่เดินทางผ่านน้ำที่ได้รับ $y_w(t)$

$X(f)$ คือ การแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณไฟฟ้าที่จ่ายให้หัวส่ง ($x(t)$)

- $H_1(f)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของหัวส่ง
 $H_2(f)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของหัวรับ
 α_w คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนคลื่นในน้ำ
 β_w คือ สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงทางเฟสของคลื่นในน้ำ

สำหรับรูปที่ 3.4 นั้น แสดงถึงกรณีที่คลื่นเดินทางผ่านวัตถุ โดยเป็นการเดินทางผ่านตัวกลางที่มีค่าความหนาแน่นภายในเพียงค่าเดียว ซึ่งสามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการที่ 3.6



รูปที่ 3.4 การส่งคลื่นอัลตราโซนิกผ่านน้ำและวัตถุที่มีความหนาแน่นค่าเดียว

$$Y(f) = X(f)H_1(f)H_2(f)A_r \cdot \exp[-[\alpha(f) + j\beta(f)\lambda] \exp[-[\alpha_w(f) + j\beta_w(f)]\lambda_w] \quad (3.6)$$

โดย

- $Y(f)$ คือ การแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณที่เดินทางผ่านตัวกลางทั้งหมด $y(t)$
 A_r คือ อัตราการส่งผ่านรอยต่อ ($A_r = \tau_1 \cdot \tau_2$)
 $\alpha(f)$ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนคลื่นในเนื้อวัตถุ
 $\beta(f)$ คือ สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงทางเฟสของวัตถุ
 λ คือ ความหนาของวัตถุที่คลื่นเดินทางผ่าน
 λ_w คือ ระยะทางทั้งหมดของน้ำที่คลื่นเดินทางผ่าน ($\lambda_w = \lambda_{w1} + \lambda_{w2}$)

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของสมการ 3.5 และ สมการ 3.6 จะทำให้สามารถจัดรูปของสมการ 3.6 ใหม่ได้เป็น

$$Y(f) = Y_w(f)A_r \exp[-[(\alpha(f) - \alpha_w(f))\lambda + j(\beta(f) - \beta_w(f))\lambda]] \quad (3.7)$$

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความเร็วเสียงและค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของวัสดุต่างๆ

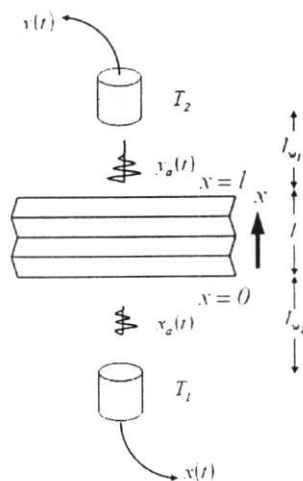
ตัวกลาง	ความเร็ว (เมตร/วินาที)	สัมประสิทธิ์การลดทอน
อากาศ	343	1.38
น้ำ	1484	0.00025
โลหิต*	1550	0.02
ไม้อาคารเคี่ยม*	1550	0.35
ไขมัน*	1450	0.06
ตับ*	1570	0.11
ไต*	1560	0.09
กระดูก	3360	1.3

*เนื้อเยื่ออ่อน

ซึ่งหากพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนคลื่นในน้ำ ($\alpha_w(f)$) จากตารางที่ 3.1 ซึ่งมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์การลดทอนคลื่นในเนื้อวัตถุ จึงทำให้สามารถละทิ้งผลดังกล่าวออกไป ดังสมการที่ 3.8

$$Y(f) = Y_w(f)A_r \exp[-[(\alpha(f) + j(\beta(f) - \beta_w(f))\lambda)] \quad (3.8)$$

จากที่กล่าวมานั้นเป็นกรณีที่วัตถุตัวกลางเป็นสารเนื้อเดียว แต่ในความเป็นจริงนั้นวัตถุอาจมีความหนาแน่นในแต่ละชั้นไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งจะพบว่าวัตถุมีความหนาแน่นรวมกัน l โดยแบ่งออกเป็นชั้นย่อยๆขนาด dx ดังนั้นจึงสามารถจัดรูปสมการที่ 3.8 ให้อยู่ในรูปอินทิกรัลชั้นได้ดังสมการที่ 3.9



รูปที่ 3.5 การส่งคลื่นอัลตราโซนิกผ่านน้ำและวัตถุที่มีความหนาแน่นหลายค่า

$$Y(f) = X(f)H_1(f)H_2(f)A_r \exp\left[-\int [\alpha(x, f) + j\beta(x, f)]dx\right] \cdot \exp[-j\beta_w(f)\lambda_w] \quad (3.9)$$

โดย

$\alpha(x, f)$ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนคลื่นในเนื้อวัตถุที่ชั้น x ใดๆ

$\beta(x, f)$ คือ สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงทางเฟสของวัตถุที่ชั้น x ใดๆ

จากสมการที่ 3.9 นั้น หากทำการแบ่งพจน์ของผลกระทบทางขนาดซึ่งขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน และพจน์ของผลกระทบทางด้าน การเลื่อนของเฟสซึ่งขึ้นกับสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงทางเฟส ซึ่งเราสามารถให้ความสัมพันธ์ของสมการที่ 3.10 และ 3.11 เพื่อจัดรูปสมการเป็นดังสมการที่ 3.12

$$\beta(x, f) = 2\pi f / V(x) \quad (3.10)$$

$$\beta_w(f) = 2\pi f / V_w \quad (3.11)$$

$$Y(f) = A_r Y_w(f) \exp\left[-\int \alpha(x, f)dx\right] \cdot \exp\left[-j2\pi f \int (1/V(x) - 1/V_w)dx\right] \quad (3.12)$$

โดย

$V(x)$ คือ ค่าความเร็วในการเดินทางของคลื่นที่ตำแหน่ง x ใดๆ

V_w คือ ค่าความเร็วในการเดินทางของคลื่นในน้ำ

จากสมการที่ 3.12 นั้นจะพบว่ามีการแบ่งออกเป็น 2 พจน์อย่างชัดเจนนั่นคือพจน์ที่มีผลต่อขนาดของสัญญาณ ซึ่งค่าที่หามาได้จากพจน์นี้นั้นสามารถใช้เป็นข้อมูลในการสร้างภาพตัดขวางได้ โดยเรียกว่าการสร้างภาพตัดขวางจากการลดทอน (Attenuation Tomography) สำหรับอีกส่วนหนึ่งนั้นได้แก่พจน์ที่มีผลต่อเฟสของสัญญาณ ซึ่งจากคุณสมบัติของการแปลงฟูเรียร์ การเลื่อนเฟส (Phase Shift) ในโดเมนความถี่นั้นมีค่าเท่ากับการหน่วงเวลา (Time Delay) ในโดเมนเวลา จึงได้ว่า

$$T_d = \int \left(\frac{1}{V(x)} - \frac{1}{V_w} \right) dx \quad (3.13)$$

สำหรับสมการที่ 3.13 นั้น หากใช้ความสัมพันธ์ทางด้านดัชนีหักเห (Refractive Index) ของคลื่นที่เดินทางผ่านวัตถุเทียบกับคลื่นที่เดินทางผ่านน้ำดังสมการที่ 3.14 จะทำให้สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 3.15

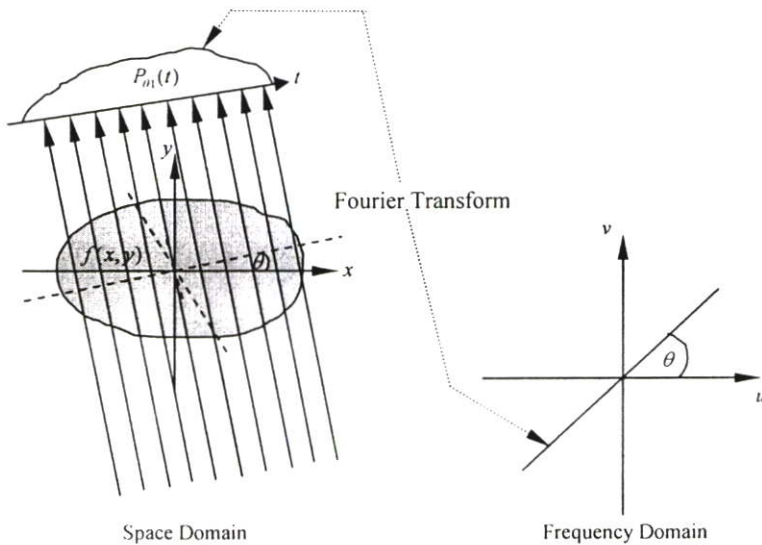
$$n(x) = \frac{V_w}{V(x)} \quad (3.14)$$

$$T_d = \frac{1}{V_w} \int_V (1 - n(x)) dx \quad (3.15)$$

สำหรับสมการที่ 3.13 และ 3.15 นั้นเป็นข้อมูลทางด้านเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางผ่านวัตถุ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการสร้างภาพตัดขวางได้เช่นเดียวกัน โดยเรียกว่าการสร้างภาพตัดขวางจากความเร็วของคลื่น (Sound Velocity Tomography) หรือหากจัดรูปสมการที่ 3.15 ให้ข้อมูลหลักที่นำไปใช้ในการสร้างภาพตัดขวางเป็นค่าของดัชนีหักเห ก็จะเรียกว่าการสร้างภาพตัดขวางจากค่าดัชนีหักเห (Refractive Index Tomography) หลังจากที่ได้รับข้อมูลในลักษณะต่างๆดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสร้างภาพตัดขวางด้วยเทคนิคต่างๆ โดยเป็นเทคนิคเดียวกันกับที่ใช้สำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่ไม่มีผลของการเลี้ยวเบน ซึ่งมีเทคนิคต่างๆมากมาย โดยในที่นี้จะนำเสนอวิธีการที่มีความสำคัญบางวิธีการได้แก่

3.2.1 วิธีการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้การแปลงฟูเรียร์

วิธีการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้การแปลงฟูเรียร์เป็นวิธีการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้นิยามจากทฤษฎีบทของฟูเรียร์สไลซ์ (The Fourier Slice Theorem) [4] ซึ่งระบุไว้ว่า เมื่อทำการหาโปรเจกชันของวัตถุ $f(x, y)$ ที่มุมต่างๆ $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ แล้วทำการแปลงฟูเรียร์โปรเจกชันเหล่านั้น จะมีค่าเท่ากับการแปลงฟูเรียร์สองมิติของภาพตามแนวเส้นที่ทำมุม $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ เช่นกัน ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งเราจะทำการพิสูจน์ทฤษฎีบทของฟูเรียร์สไลซ์ได้โดยเริ่มต้นจากการนิยามของการแปลงฟูเรียร์ 2 มิติของภาพ $f(x, y)$ จะได้



รูปที่ 3.6 หลักการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้ทฤษฎีการแปลงฟูเรียร์

$$F(u, v) = \int_{-\alpha}^{\alpha} \int_{-\alpha}^{\alpha} f(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (3.16)$$

และให้ $S_{\theta}(w)$ คือ การแปลงฟูเรียร์ของข้อมูลโปรเจกชันที่มุม $\theta(P_{\theta})$

$$S_{\theta}(w) = \int_{-\alpha}^{\alpha} P_{\theta}(t) e^{-j2\pi wt} dt \quad (3.17)$$

พิจารณาการแปลงฟูเรียร์ของวัตถุตลอดเส้นในโดเมนความถี่ โดยให้ $v = 0$ จะได้

$$F(u, 0) = \int_{-\alpha}^{\alpha} \int_{-\alpha}^{\alpha} f(x, y) e^{-j2\pi ux} dx dy \quad (3.18)$$

แต่เนื่องจากตัวประกอบเฟส (Phase factor) จะไม่ขึ้นอยู่กับ y เราสามารถแบ่งการทำอินทิกรัลออกเป็น 2 ส่วนคือ

$$F(u, 0) = \int_{-\alpha}^{\alpha} \left[\int_{-\alpha}^{\alpha} f(x, y) dy \right] e^{-j2\pi ux} dx \quad (3.19)$$

จะเห็นว่าเทอมที่อยู่ในวงเล็บเหมือนกับสมการของโปรเจกชันตลอดแนวอนที่ค่า x คงที่ ซึ่งก็คือการโปรเจกชันภาพ $f(x, y)$ ที่มุม $\theta = 0$

$$P_{\theta=0}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dy \quad (3.20)$$

นำสมการที่ 3.20 แทนลงในสมการที่ 3.19 จะได้

$$F(u, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{\theta=0}(x) e^{-j2\pi ux} dx \quad (3.21)$$

จากสมการที่ 3.21 ทางขวามือ แสดงถึงการแปลงฟูเรียร์ 1 มิติของโปรเจกชัน $P_{\theta=0}$ ดังนั้นเราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างโปรเจกชันในแนวตั้งกับการแปลง 2 มิติของฟังก์ชันวัตถุ คือ

$$F(u, 0) = S_{\theta=0}(u) \quad (3.22)$$

จะเห็นว่าเป็นรูปแบบอย่างง่ายของทฤษฎีบทของฟูเรียร์สไลด์ ผลที่ได้นี้จะไม่ขึ้นอยู่กับการหมุนระหว่างวัตถุกับระบบพิกัด เราสามารถพิสูจน์ทฤษฎีบทของฟูเรียร์สไลด์ที่มุมอื่นได้โดยให้ $f(t, s)$ คือฟังก์ชัน $f(x, y)$ ในระบบพิกัดหมุน (Rotated Coordinate System) ดังในรูปที่ 3.6 พิกัด (t, s) สัมพันธ์กับพิกัด (x, y) โดยความสัมพันธ์

$$\begin{bmatrix} t \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

ซึ่งในระบบพิกัด (t, s) เราจะสามารถเขียนโปรเจกชันตลอดแนวเส้นของค่าคงที่ t ได้เป็น

$$P_{\theta}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t, s) ds \quad (3.24)$$

นำสมการที่ 3.24 แทนลงในสมการที่ 3.17 จะได้

$$S_\theta(w) = \int_{-\infty}^{\infty} [f(t, s) ds] e^{-j2\pi w t} dt \quad (3.25)$$

เมื่อนำผลที่ได้มาแปลงให้อยู่ในระบบพิกัด (x, y) โดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการ 3.23 จะได้

$$S_\theta(w) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j2\pi w(x \cos \theta + y \sin \theta)} dx dy \quad (3.26)$$

ทางด้านขวาของสมการ คือการแปลงฟูเรียร์ 2 มิติ ที่ความถี่ $u = w \cos \theta, v = w \sin \theta$

$$S_\theta(w) = F(w, \theta) = F(w \cos \theta, w \sin \theta) \quad (3.27)$$

จากทั้งหมดที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงโปรเจกชันของฟังก์ชันวัตถุที่มุม $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ และการแปลงฟูเรียร์ของแต่ละโปรเจกชันนั้น เราสามารถหาค่าของ $F(u, v)$ ได้ถ้าจำนวนโปรเจกชันมีค่าเป็นอนันต์ ดังนั้นควรจะรู้ค่า $F(u, v)$ ในทุกๆจุดในระนาบ uv จากนั้นจึงทำการแปลงกลับฟูเรียร์เพื่อที่จะหาค่าฟังก์ชันวัตถุ $f(x, y)$

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) e^{j2\pi(ux+vy)} du dv \quad (3.28)$$

ถ้าฟังก์ชัน $f(x, y)$ มีขอบเขต คือ $-\frac{A}{2} < x < \frac{A}{2}$ และ $-\frac{A}{2} < y < \frac{A}{2}$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ 3.28 ใหม่ได้เป็น

$$f(x, y) = \frac{1}{A^2} \sum_m \sum_n F\left(\frac{m}{A}, \frac{n}{A}\right) e^{j2\pi((m/A)x + (n/A)y)}, \quad -\frac{A}{2} < x < \frac{A}{2}, -\frac{A}{2} < y < \frac{A}{2} \quad (3.29)$$

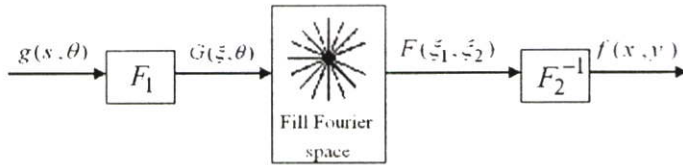
ในทางปฏิบัติ เราจะรู้ว่าส่วนประกอบของฟูเรียร์มีจำนวนจำกัด สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$f(x, y) = \frac{1}{A^2} \sum_{m=-N/2}^{N/2} \sum_{n=-N/2}^{N/2} F\left(\frac{m}{A}, \frac{n}{A}\right) e^{j2\pi((m/A)x + (n/A)y)}, \quad -\frac{A}{2} < x < \frac{A}{2}, -\frac{A}{2} < y < \frac{A}{2} \quad (3.30)$$

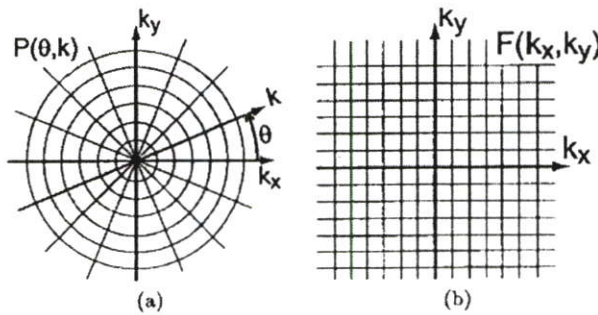
โดยสมมติว่า N เป็นจำนวนเต็มคู่ เราจะเห็นว่ารายละเอียด (Resolution) ของภาพที่สร้างได้จะถูกกำหนดโดย N สมการ 3.30 สามารถถูกคำนวณได้แบบเร็วโดยใช้อัลกอริทึมการแปลงฟูเรียร์เร็ว (FFT) ถ้าเรารู้สัมประสิทธิ์ฟูเรียร์จำนวน N^2 ของ $F(m/A, n/A)$

จากทฤษฎีข้างต้นนี้เราสามารถแบ่งขั้นตอนวิธีการสร้างภาพกลับด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์ดังรูปที่ 3.7 ออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ

- ▶ นำข้อมูลโปรเจกชันไปแปลงฟูเรียร์ 1 มิติ จะได้ $F_1\{p_\theta(r)\} = P_\theta(k)$
- ▶ วาง $P_\theta(k)$ ในราสเตอร์เชิงขั้ว(polar raster) จะได้ $P(k, \theta)$ จากนั้นจึงประมาณค่าให้อยู่ในราสเตอร์เชิงตั้งฉาก (rectangular raster) ดังรูปที่ 3.8
- ▶ ทำการแปลงกลับฟูเรียร์ 2 มิติของ $F(k_x, k_y)$ จะได้ $f(x, y)$

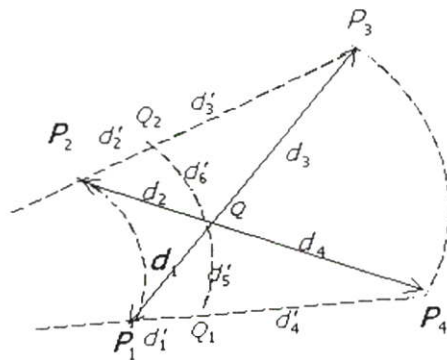


รูปที่ 3.7 Block diagram แสดงวิธีการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้การแปลงฟูเรียร์



รูปที่ 3.8 ราสเตอร์รูปแบบต่างๆ (a) ราสเตอร์เชิงขั้ว (b) ราสเตอร์เชิงตั้งฉาก

การประมาณค่าในช่วงจากราสเตอร์เชิงขั้วไปยังราสเตอร์เชิงตั้งฉาก สามารถทำได้หลายวิธีจากรูปที่ 3.9 จะทำการหาจุด Q จาก P_1, P_2, P_3, P_4 ด้วยวิธีดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.9 การประมาณค่าจุด Q

1) การหาจุดที่ใกล้ที่สุด

$$F(Q) = F(P_k) \quad k : \min_i \{d_i\} = d_k \quad (3.31)$$

2) การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น

$$F(Q) = \frac{\sum_{k=1}^4 F(P_k) / d_k}{\sum_{k=1}^4 \frac{1}{d_k}} \quad (3.32)$$

3) การประมาณค่าในช่วงแบบไม่เชิงเส้น

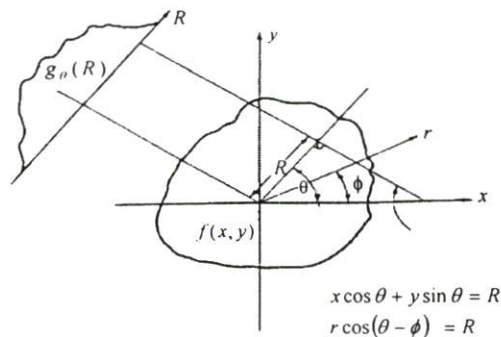
$$\begin{aligned} F(Q) &= \frac{F(Q_1)/d'_5 + F(Q_2)/d'_6}{(1/d'_5) + (1/d'_6)} \\ &= \frac{F(Q_1)/d'_6 + F(Q_2)/d'_5}{d'_5 + d'_6} \end{aligned} \quad (3.33)$$

โดยที่

$$F(Q_1) = \frac{F(P_1)/d'_4 + F(P_4)/d'_1}{d'_1 + d'_4}, \quad F(Q_2) = \frac{F(P_2)/d'_3 + F(P_3)/d'_2}{d'_2 + d'_3} \quad (3.34)$$

3.2.2 วิธีการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้แบคโปรเจกชัน

การสร้างภาพตัดขวางโดยใช้แบคโปรเจกชัน จะเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุด และมีความยุ่งยากทางคณิตศาสตร์น้อย โดยจะทำการนำค่าโปรเจกชันที่มุมต่างๆ มาบวกรวมกันบนระนาบ 2 มิติ



รูปที่ 3.10 แสดงโปรเจกชันของฟังก์ชัน 2 มิติ

จากรูปที่ 3.10 และนิยามของโปรเจกชันที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 จะได้นิยามของแบคโปรเจกชันของโปรเจกชันที่มุม θ คือ

$$b_\theta(x, y) = \int_0^\pi g_\theta(R) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - R) dR \quad (3.35)$$

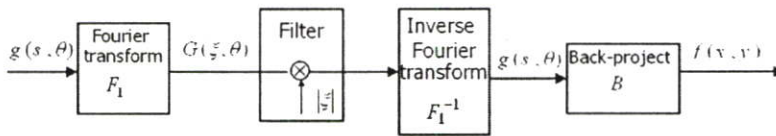
โดยที่ $b_\theta(x, y)$ คือ ตัวกระทำแบคโปรเจกชัน (Backprojection operator) ของโปรเจกชัน $g_\theta(R)$ ที่มุม θ

ดังนั้น การสร้างภาพกลับ (Image Reconstruction) จากวิธีแบคโปรเจกชัน คือ ผลรวมของแบคโปรเจกชันในทุกๆมุม จะได้

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \int_0^\pi b_\theta(x, y) d\theta \\ &= \int_0^\pi \int_{-\alpha}^\alpha g_\theta(R) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - R) dR d\theta \\ &= \int_0^\pi d\theta \int_{-\alpha}^\alpha g_\theta(R) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - R) dR \end{aligned} \quad (3.36)$$

3.2.3 วิธีการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้วิธีฟิลเตอร์แบคโปรเจกชัน

วิธีฟิลเตอร์แบคโปรเจกชันนี้เป็นวิธีที่เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการสร้างภาพตัดขวาง ทั้งนี้เนื่องจากเป็นวิธีที่ได้รับการปรับปรุงจากวิธีแบคโปรเจกชัน ซึ่งวิธีนี้จะใช้ความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีบทของฟูเรียร์สไลด์ช่วยในการพิสูจน์



รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมแสดงวิธีการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้วิธีฟิลเตอร์แบคโปรเจกชัน

จากทฤษฎีบทของฟูเรียร์สไลด์ ภาพ $f(x, y)$ จะสามารถหามาได้จากการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับ [4]

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) e^{j2\pi(ux+vy)} du dv \quad (3.37)$$

ถ้าให้ (w, θ) เป็นระบบพิกัดแบบโพลาร์ (Polar Coordinate) ในระนาบ uv เราสามารถเขียนสมการ 3.37 ใหม่เป็น

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \int_0^{2\pi} \int_0^\infty F(w, \theta) e^{j2\pi w(x \cos \theta + y \sin \theta)} w dw d\theta \\ f(x, y) &= \int_0^\pi \int_0^\infty F(w, \theta) e^{j2\pi w(x \cos \theta + y \sin \theta)} w dw d\theta \\ &\quad + \int_0^\pi \int_0^\infty F(w, \theta + \pi) e^{j2\pi w(x \cos(\theta + \pi) + y \sin(\theta + \pi))} w dw d\theta \end{aligned} \quad (3.38)$$

จากนั้นใช้คุณสมบัติ

$$F(w, \theta + \pi) = F(-w, \theta) \quad (3.39)$$

สมการ 3.38 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \int_0^{\pi} \left[\int_{-\infty}^{\infty} F(w, \theta) |w| e^{j2\pi w t} dw \right] d\theta \\ &= \int_0^{\pi} \left[\int_{-\infty}^{\infty} S_{\theta}(w) |w| e^{j2\pi w t} dw \right] d\theta \end{aligned} \quad (3.40)$$

โดยที่

$$t = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (3.41)$$

และเราสามารถเขียนสมการ 3.40 ใหม่ได้เป็น

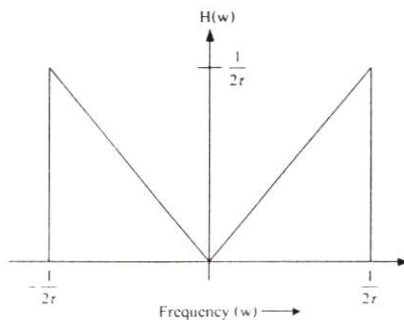
$$f(x, y) = \int_0^{\pi} Q_{\theta}(x \cos \theta + y \sin \theta) d\theta \quad (3.42)$$

โดยที่

$$Q_{\theta}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\theta}(w) |w| e^{j2\pi w t} dw \quad (3.43)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่า ในการสร้างภาพตัดขวางเราสามารถทำได้โดยการนำข้อมูลแต่ละโปรเจกชัน $P_{\theta}(t)$ มาทำการฟิลเตอร์ ที่มีผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency Response) เท่ากับ $|w|$ ดังสมการที่ 3.43 จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาทำการแบคโปรเจกชันดังสมการที่ 3.42 โดยที่ฟิลเตอร์ในสมการที่ 3.43 เรียกว่าการกรองแบบแรม-แล็ค (Ram-Lak Filter)

พารามิเตอร์ w เป็นตัวแปรความถี่ โดยหลักการแล้วการทำอินทิเกรตในสมการที่ 3.43 ต้องทำตลอดทุกย่านความถี่ ในทางปฏิบัติพลังงานที่อยู่ในส่วนประกอบ (Components) การแปลงฟูเรียร์เหนือความถี่ค่าหนึ่งจะมีค่าน้อย ดังนั้นการโปรเจกชันจึงถูกทำในแถบความถี่ที่จำกัด (Bandlimited) โดยให้ W แทนค่าความถี่ซึ่งถ้าเกินจากนี้พลังงานสำหรับการโปรเจกชันจะมีค่าน้อยมาก



รูปที่ 3.12 ภาพแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของ Ram-Lak Filter

เราสมมติว่าข้อมูลโปรเจกชันถูกสุ่มด้วยช่วงของการสุ่มเท่ากับ τ ชม. เราสมมติว่าไม่มีปัญหาเรื่องการแทนค่า (Aliasing) ซึ่งกล่าวเป็นนัยว่าในโดเมนของการแปลง (Transform Domain) โปรเจกชันไม่มีพลังงานนอกย่านความถี่ $(-W, W)$ โดยที่

$$W = \frac{1}{2\tau} \quad \text{ไซเคลตต่อชม. (3.44)}$$

เราจะสามารถเขียนสมการการกรองแบบแรม-แล็คได้เป็น

$$H(w) = |w| b_w(w) \quad (3.45)$$

โดยที่

$$b_w(w) = 0 \quad (3.46)$$

บทที่ 4

การสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

โดยใช้เทคนิคสำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่เกิดผลการเลี้ยวเบน

ในบทนี้นั้นเป็นการนำเสนอ การประยุกต์ใช้ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่มีผลกระทบของการเลี้ยวเบน (Diffraction Tomography) ในการสร้างภาพตัดขวางจากคลื่นอัลตราโซนิก เนื่องจากคลื่นอัลตราโซนิกนั้นถือเป็นแหล่งกำเนิดประเภทหนึ่งที่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบนของคลื่นเมื่อคลื่นเดินทางผ่านรอยต่อใดๆระหว่างตัวกลาง ซึ่งผลกระทบจากการเลี้ยวเบนของคลื่นนี้ทำให้ทฤษฎีในการสร้างภาพตัดขวางต่างๆ ที่ใช้สำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่ไม่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบน ไม่สามารถให้ภาพตัดขวางจากข้อมูลที่ได้รับจากคลื่นอัลตราโซนิกได้สมบูรณ์ เนื่องจากเสมือนเป็นการประมาณการเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกว่าเป็นเส้นตรง [5] ซึ่งต่างจากความเป็นจริง ดังนั้นการใช้ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่เกิดผลการเลี้ยวเบนกับคลื่นอัลตราโซนิกจึงควรที่จะสร้างภาพตัดขวางได้ถูกต้องสมบูรณ์กว่า

4.1 การเดินทางของคลื่นที่เกิดการเลี้ยวเบน

การคำนวณโปรเจกชันของคลื่นที่เกิดการเลี้ยวเบนเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางใดๆนั้น ไม่สามารถคำนวณได้โดยใช้การอินทิเกรตตามเส้น (Line Integral) เหมือนดังคลื่นที่เดินทางเป็นตรง ดังนั้นจึงต้องใช้สมการคลื่นเพื่ออธิบายการเดินทางของคลื่นดังกล่าว สำหรับในกรณีของตัวกลางเนื้อเดียว (Homogeneous medium) นั้น การคำนวณการแพร่ของคลื่นที่ตำแหน่งใดๆ สามารถทำได้โดยใช้สมการอนุพันธ์อันดับสอง แต่ทว่าในกรณีของตัวกลางที่เป็นสารที่ประกอบไปด้วยค่าความหนาแน่นหลากหลายค่า (Inhomogeneous medium) นั้น ไม่มีหลักการใดที่จะสามารถคำนวณการแพร่ของคลื่นในสารนั้นๆ ได้โดยตรง แต่ได้มีผู้นำเสนอหลักการที่ใช้ในการประมาณสมการคลื่นได้แก่ การประมาณค่าของ บอร์น (Born) และไรทอฟ (Rytov) โดยใช้ได้ในกรณีที่ตัวกลางแต่ละส่วนมีความแตกต่างกันไม่มากนักซึ่งจะนำเสนอในรายละเอียดต่อไป

4.1.1 สมการคลื่นสำหรับตัวกลางเนื้อเดียว (Homogeneous Wave Equation)

สนามคลื่นต่างๆไม่ว่าจะเป็นสนามคลื่นเสียง หรือสนามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านสามารถที่จะเขียนแทนได้ด้วยสมการที่ 4.1 [4]

$$\nabla^2 u(\mathcal{F}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\nabla^2}{dt^2} u(\mathcal{F}, t) = 0 \quad (4.1)$$

โดยที่ $u(\mathcal{F}, t)$ แทนค่าขนาดของสนามคลื่นที่ตำแหน่ง \mathcal{F} ณ เวลา t ใดๆ c แทนค่าของความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่น ซึ่งจากสมการที่ 4.1 นั้นจะพบว่ามีความซับซ้อนเกินกว่าที่จำเป็น เนื่องจากโดยส่วนมากแล้วนั้น เราจะพิจารณาความถี่มูลฐานค่าใดค่าหนึ่งจากการทำการแปลงฟูเรียร์ ณ ช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการแทนสนาม $u(\mathcal{F}, t)$ ที่ความถี่ ω ค่าใดค่าหนึ่งได้เป็น

$$[\nabla^2 + k^2(\mathcal{F})]u(\mathcal{F}, t) = 0 \quad (4.2)$$

เมื่อค่า $k(\mathcal{F})$ นั้นแทน หมายเลขคลื่น (wave number) ของคลื่นที่กำลังพิจารณา ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$k(\mathcal{F}) = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi\omega}{c} \quad (4.3)$$

โดยค่า λ คือค่าความยาวคลื่น ซึ่งในการพิจารณานั้นจะพิจารณาที่ความถี่ค่าใดค่าหนึ่ง ทำให้อาจกล่าวได้ว่าเป็นส่วนจริง (Real Part) ของ $u(\mathcal{F})e^{-j\omega t}$ โดยจะเห็นได้ว่าสนามคลื่นนั้น ขึ้นกับเวลา ดังนั้นที่เวลาใดเวลาหนึ่งจะสามารถเขียนสมการที่ 4.2 ใหม่ได้เป็น

$$(\nabla^2 + k^2(\mathcal{F}))u(\mathcal{F}) = 0 \quad (4.4)$$

สำหรับในกรณีการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นเสียงซึ่งรวมถึงคลื่นอัลตราโซนิกด้วยนั้น ค่าของ $u(\mathcal{F})$ สามารถแทนได้ด้วยค่าของความดันคลื่นที่ตำแหน่ง \mathcal{F} และสำหรับค่าความยาวคลื่นซึ่งเป็นค่าคงที่นั้นหากเขียนให้อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้น ($k(\mathcal{F}) = k_0$) จะทำให้สมการที่ 4.4 กลายเป็น

$$(\nabla^2 + k_0^2)u(\mathcal{F}) = 0 \quad (4.5)$$

เมื่อแทนค่าของตัวกระทำเกรเดียน (∇ ; Gradient operator) ลงในสมการที่ 4.5 จะจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial^2 u(\mathcal{F})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(\mathcal{F})}{\partial y^2} + k_0^2 u(\mathcal{F}) = 0 \quad (4.6)$$

โดยที่

$$u(\vec{r}) = e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}} \quad (4.7)$$

โดยที่ค่าของ \vec{k} นั้น แทนทิศทางการแพร่ของคลื่นในสองมิติ (k_x, k_y) และจะเห็นได้ว่า $u(\vec{r})$ นั้นมีรูปแบบที่ตรงกับสูตรการแปลงฟูเรียร์ ซึ่งหากอาศัยความสัมพันธ์ดังกล่าวจะสามารถจัดสมการคลื่นให้อยู่ในรูปของผลรวมระนาบคลื่นได้ หากแต่ระนาบคลื่นนั้นๆ จะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไข

$$|\vec{k}|^2 = k_x^2 + k_y^2 = k_0^2 \quad (4.8)$$

จากสมการที่ 4.7 นั้น จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$u(\vec{r}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \alpha(k_y) e^{i(k_x x + k_y y)} dk_y + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \beta(k_y) e^{i(-k_x x + k_y y)} dk_y \quad (4.9)$$

โดยอาศัยความสัมพันธ์ของสมการ 4.8 จะได้

$$k_x = \sqrt{k_0^2 - k_y^2} \quad (4.10)$$

ซึ่งจากสมการที่ 4.9 นั้นจะเห็นได้ว่าพจน์ของการอินทิเกรตนั้น สามารถแบ่งออกเป็นสองพจน์หลัก โดยมีค่าสัมประสิทธิ์หลักประจำพจน์ได้แก่ $\alpha(k_y)$ และ $\beta(k_y)$ ซึ่งเป็นส่วนของจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์นี้นั้นมีผลกระทบต่อสนามคลื่นโดยตรงในทางการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิกนั้น $\alpha(k_y)$ จะเป็นผลกระทบทางขนาดของคลื่น และ $\beta(k_y)$ นั้นจะเป็นผลกระทบทางเฟสของคลื่น และสำหรับสมการที่ 4.9 นี้จะเห็นได้ว่าเป็นสมการเชิงเส้นที่สามารถหาค่าได้ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการแปลงฟูเรียร์ของสนามคลื่น $u(\vec{r})$ นั้นจะทำให้ทราบค่าของสัมประสิทธิ์ $\alpha(k_y)$ และ $\beta(k_y)$ ได้นั่นเอง

4.1.2 สมการคลื่นสำหรับตัวกลางที่มีเนื้อสารแตกต่าง (Inhomogeneous Wave Equation)

สำหรับการสร้างภาพจากตัวกลางที่มีเนื้อสารหลากหลายนั้น หากเริ่มพิจารณาจากสมการคลื่นรูปแบบทั่วไปดังสมการที่ 4.11 [4]

$$[\nabla^2 + k(\vec{r})^2]u(\vec{r}) = 0 \quad (4.11)$$

ซึ่งในกรณีของสนามคลื่นเสียงนั้นจะสามารถประมาณสมการการแพร่ได้เป็น

$$(\nabla^2 + k_0^2)u(\mathcal{F}) = -k_0^2[n^2(\mathcal{F}) - 1]u(\mathcal{F}) \quad (4.12)$$

โดยที่ค่า n นั้นแทนค่าดัชนีหักเหของวัตถุที่ตำแหน่ง \mathcal{F} ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$n(\mathcal{F}) = \frac{c_0}{c(\mathcal{F})} \quad (4.13)$$

ค่า c_0 นั้นแทนค่าความเร็วในการแพร่ของคลื่นในตัวกลางใดๆที่วัตถุแช่อยู่ภายใน และค่าของ $c(\mathcal{F})$ นั้นแทนค่าของดัชนีหักเหภายในวัตถุที่ตำแหน่ง \mathcal{F} โดยในกรณีของสนามเสียงนั้น ค่า $c(\mathcal{F})$ ของวัตถุจะคำนวณได้จาก

$$c(\mathcal{F}) = \frac{1}{\sqrt{\rho(\mathcal{F})\kappa(\mathcal{F})}} \quad (4.14)$$

ซึ่งค่าของ ρ และ κ นั้นแทนค่าของความหนาแน่นของวัตถุ และค่า Compressibility (อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่ขึ้นกับความดัน) ของวัตถุที่ตำแหน่ง \mathcal{F} ตามลำดับ โดยสมการที่ 4.12 นั้นจะสามารถใช้ได้เฉพาะกรณีที่ค่าคุณสมบัติต่างๆ ของวัตถุนั้นเป็นค่าคงที่ ซึ่งหากจัดรูปสมการที่ 4.12 ใหม่เป็น

$$(\nabla^2 + k_0^2)u(\mathcal{F}) = -o(\mathcal{F})u(\mathcal{F}) \quad (4.15)$$

โดย

$$o(\mathcal{F}) = k_0^2[n^2(\mathcal{F}) - 1] \quad (4.16)$$

สมการที่ 4.15 นั้นเป็นสมการหลักที่เราใช้ในการพิจารณา โดยที่ค่าของ $u(\mathcal{F})$ เป็นผลรวมของ $u_0(\mathcal{F})$ และ $u_s(\mathcal{F})$

$$u(\mathcal{F}) = u_0(\mathcal{F}) + u_s(\mathcal{F}) \quad (4.17)$$

โดยที่ค่าของ $u_0(\mathcal{F})$ นั้นแทนสนามคลื่นพุ่งเข้า ซึ่งไม่ได้รับผลกระทบจากตัวกลางใดๆ ซึ่งเรียกแทนด้วยคำว่าสนามพุ่งเข้า (Incident field) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 4.18

$$(\nabla^2 + k_0^2)u_0(\mathcal{F}) = 0 \quad (4.18)$$

สำหรับในส่วนของ $u_s(\mathcal{F})$ นั้นแทนสนามคลื่นที่เกิดการกระเจิง (Scatter field) เมื่อคลื่นแพร่ผ่านวัตถุ ซึ่งหากใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ 4.17 และ 4.18 จะสามารถจัดรูปของสมการที่ 4.15 ใหม่เป็น

$$(\nabla^2 + k_0^2)u_s(\mathcal{F}) = -u(\mathcal{F})o(\mathcal{F}) \quad (4.19)$$

สมการที่ 4.19 นั้น เรียกว่าสมการคลื่นของเฮล์มโฮลทซ์ (Helmholtz wave equation) ซึ่งสมการนี้ไม่สามารถหาค่าได้โดยตรงแต่สามารถแทนค่าให้อยู่ในรูปของกรีนฟังก์ชัน ($g(\mathcal{F}|\mathcal{F}')$; Green's function) ดังสมการที่ 4.20

$$(\nabla^2 + k_0^2)g(\mathcal{F}|\mathcal{F}') = -\delta(\mathcal{F} - \mathcal{F}') \quad (4.20)$$

หรืออาจเขียนให้อยู่ในรูป

$$g(\mathcal{F}|\mathcal{F}') = \frac{e^{jk_0R}}{4\pi R} \quad (4.21)$$

โดย

$$R = |\mathcal{F} - \mathcal{F}'| \quad (4.22)$$

ในกรณีสองมิตินั้นสมการที่ 4.20 สามารถเขียนให้อยู่ในพจน์ของฮานเกลฟังก์ชันอันดับที่ศูนย์ (Zero-order Hankel function) ซึ่งจะสามารถลดรูปสมการเป็น

$$g(\mathcal{F}|\mathcal{F}') = \frac{j}{4} H_0^{(1)}(k_0R) \quad (4.23)$$

โดยกรีนฟังก์ชัน ($g(\mathcal{F}|\mathcal{F}')$) นั้นเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับผลต่างของระหว่าง \mathcal{F} และ \mathcal{F}' ดังนั้นจึงอาจพิจารณาให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายขึ้นเป็น $g(\mathcal{F} - \mathcal{F}')$ และจากสมการที่ 4.20 นั้นหากพิจารณาส่วนที่เป็นฟังก์ชันของวัตถุ ($o(\mathcal{F})$; Object function) จะเห็นได้ว่าเป็นค่าความแตกต่างกันระหว่างเนื้อสารแต่ละจุด ดังนั้นกรีนฟังก์ชันจึงสามารถพิจารณาหาค่าของผลลัพท์สนามคลื่นที่เกิดการกระเจิงจากจุดใดจุดหนึ่งได้ จึงมีความเป็นไปได้ที่จะพิจารณาสมการคลื่นในรูปการเรียงกันของคลื่นแต่ละลูกหรือเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$o(\mathcal{F})u(\mathcal{F}) = \int o(\mathcal{F}')u(\mathcal{F}')\delta(\mathcal{F} - \mathcal{F}')d\mathcal{F}' \quad (4.24)$$

จะเห็นได้ว่าสมการนี้นั้นเป็นผลรวมกันของสัญญาณกระตุ้นที่ขึ้นกับค่าของ $o(F)u(F)$ เป็นระยะทาง F โดยที่กรีนฟังก์ชันนั้นแทนด้วยเคลต้าฟังก์ชัน ($\delta(F-F')$) เพียงพจน์เดียว เนื่องจากค่าทางซ้ายมือของสมการมีลักษณะเชิงเส้น จึงทำให้สามารถที่จะเขียนสมการให้เป็น ลักษณะการรวมกันของสนามคลื่นที่เกิดการกระเจิงจากจุดที่เกิดการกระเจิงแต่ละจุด ซึ่งจากสมการ จะเห็นว่าสนามคลื่นรวม (total field) เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของ $o(F')u(F')\delta(F-F')$ ซึ่งเป็น ผลรวมการตอบสนองทั้งทางด้านขนาด และการเลื่อนของเวลา และเมื่อใช้ความสัมพันธ์จากสมการ ที่ 4.19 จะสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$u_s(F) = \int g(F-F')o(F')u(F')dF' \quad 4.25$$

ซึ่งสิ่งที่ต้องการทราบคือค่าของสนามคลื่นที่เกิดการกระเจิง (u_s) แต่สมการนี้นั้นค่าของ สนามคลื่นที่เกิดการกระเจิงมาจากพจน์ของสนามคลื่นรวม ($u = u_0 + u_s$) ทำให้สมการนี้ยังคงไม่ เป็นสมการเชิงเส้นซึ่งยังไม่สามารถหาค่าได้ จึงต้องอาศัยการประมาณค่าซึ่งจะกล่าวถึงในส่วน ถัดไป

4.2 การประมาณค่าเข้าสู่สมการคลื่น

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงสมการคลื่นสำหรับตัวกลางสารที่มีเนื้อสารหลากหลาย โดยเป็นสมการแทนค่าของสนามคลื่นที่เกิดการกระเจิง ($u_s(F)$) ที่ขึ้นกับฟังก์ชันของวัตถุ ($o(F)$) ซึ่งสมการนี้นั้นเป็นสมการที่ไม่สามารถหาค่าได้โดยตรง แต่สามารถใช้การประมาณค่าอย่างใด อย่างหนึ่งเพื่อหาค่าของสมการได้ โดยในที่นี้ได้นำเสนอการประมาณค่าสองรูปแบบคือ

4.2.1 การประมาณค่าอันดับหนึ่งของบอร์น (The First Born Approximation)

การประมาณค่าอันดับหนึ่งของบอร์นนั้นเป็นหนึ่งในวิธีการ ที่ถูกนำมาใช้ในการประมาณ ค่าของสนามคลื่น[1],[4] ซึ่งสนามคลื่นจะถูกพิจารณาในลักษณะของผลรวมระหว่างสนามพุ่งเข้า และสนามคลื่นที่เกิดการกระเจิง

$$u(F) = u_0(F) + u_s(F) \quad (4.26)$$

ซึ่งหากพิจารณาสมการนี้ร่วมกับสมการที่ 4.25 จะเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$u_s(F) = \int g(F-F')o(F')u_0(F')dF' + \int g(F-F')o(F')u_s(F')dF' \quad (4.27)$$

แต่ในกรณีที่สนามคลื่นที่เกิดการกระเจิง ($u_s(F)$) มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับสนามพุ่งเข้า ($u_0(F)$) จะทำให้สามารถละทิ้งผลของสนามคลื่นที่เกิดการกระเจิงไปได้ ซึ่งเป็นการประมาณค่าดังสมการที่ 4.28 [4]

$$u_s(F) \cong u_B(F) = \int g(F - F') o(F') u_0(F') dF' \quad (4.28)$$

ซึ่งในกรณีที่ต้องการให้การประมาณมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นค่าของ $u_0(F)$ จะถูกเขียนแทนด้วย $u_0(F) + u_B(F)$ ซึ่งจะได้สมการเป็น

$$u_B^{(2)}(F) = \int g(F - F') o(F') [u_0(F') + u_B(F')] dF' \quad (4.29)$$

อาจกล่าวได้ว่าการประมาณค่าอันดับที่ i ของบอร์นจะสามารถเขียนได้เป็น

$$u_B^{(i+1)}(F) = \int g(F - F') o(F') [u_0(F') + u_B^{(i)}(F')] dF' \quad (4.30)$$

หรือเขียนแทนในอีกลักษณะได้เป็น

$$u(F) = u_0(F) + u_1(F) + u_2(F) + \dots \quad (4.31)$$

โดยที่

$$u_{(i+1)}(F) = \int u_i(F') o(F') g(F - F') dF' \quad (4.32)$$

สำหรับสมการที่ 4.30 นั้น สามารถที่จะเขียนในรูปย่อได้เป็น

$$u_B^{(i)}(F) = \sum_{j=0}^i u_j(F) \quad (4.33)$$

และอยู่ภายในขอบเขต

$$u(F) \cong u_0(F) + u_1(F) + u_2(F) + u_3(F) + \dots \quad (4.34)$$

จากที่กล่าวมานั้น จะเห็นได้ว่าการประมาณค่าอันดับหนึ่งของบอร์นนั้นให้ค่าแทนสนามคลื่นที่เกิดการกระเจิงอันดับหนึ่ง (first-order scattered field) และ u , แทนค่าสนามคลื่นที่เกิดการกระเจิงอันดับที่ i (i^{th} -order scattered field) ซึ่งในทางทฤษฎีนั้นการประมาณค่าอันดับที่สูงกว่าย่อมให้ผลที่ดีกว่า แต่ในขณะนี้การประมาณค่าอันดับที่สูงกว่าหนึ่งยังคงอยู่ในขั้นตอนของการวิจัยเท่านั้น

สำหรับข้อจำกัดของการประมาณค่าของบอร์นนี่นั่น คือสนามคลื่นที่เกิดการกระเจิงจะต้องมีค่าน้อยกว่าสนามคลื่นพุ่งเข้าเพื่อให้สมการนี้เป็นจริง

$$u_s(\mathcal{F}) = u(\mathcal{F}) - u_0(\mathcal{F}) \quad (4.35)$$

ในกรณีที่เป็นวัตถุทรงกระบอกเนื้อเดียว ฟังก์ชันวัตถุดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่าเป็นฟังก์ชันของขนาดวัตถุ และฟังก์ชันของดัชนีหักเห โดยในกรณีที่คลื่นพุ่งเข้าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ไปในทิศทาง \mathcal{F} หากวัตถุมีขนาดใหญ่การประมาณค่าสนามคลื่นภายในวัตถุโดยอ้างอิงจากสนามพุ่งเข้าจะไม่สามารถทำได้ถูกต้อง นั่นคือ

$$u(\mathcal{F}) = u_{object}(\mathcal{F}) \neq Ae^{jk_0 \mathcal{F} \cdot \mathcal{P}} \quad (4.36)$$

แต่ใน

กรณีที่แทนฟังก์ชันของวัตถุด้วยการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเห (n_s) สนามคลื่นภายในวัตถุที่เดินทางผ่านจุดศูนย์กลาง และขนานกับทิศทางการแพร่ของระนาบคลื่นพุ่งเข้า จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านความเร็วในการเดินทางซึ่งเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$u_{object}(\mathcal{F}) = Ae^{jk_0(1+n_s)\mathcal{F} \cdot \mathcal{P}} \quad (4.37)$$

คลื่นที่แพร่ผ่านวัตถุตัวกลางนั้นจะเกิดการเลื่อนทางเฟสระหว่างสนามคลื่นพุ่งเข้า และสนามคลื่นที่เดินทางภายในวัตถุ โดยสามารถคิดเป็นผลรวมเชิงเส้นของการเปลี่ยนแปลงทางเฟสตลอดแนวการเดินทางของคลื่น ซึ่งในกรณีที่วัตถุทรงกระบอกรัศมี a ซึ่งผลรวมการเลื่อนทางเฟสของวัตถุจะเป็น

$$\text{การเปลี่ยนแปลงของเฟส} = 4\pi n_s \frac{a}{\lambda} \quad (4.38)$$

โดยที่ค่า λ นั้นแทนค่าความยาวคลื่นของสนามพุ่งเข้า ซึ่งสมการที่ 4.38 นี้แสดงให้เห็นถึงเงื่อนไขสำคัญที่จะทำให้สามารถใช้การประมาณค่าของบอร์นได้ นั่นคือการเปลี่ยนแปลงทางเฟสระหว่างสนามพุ่งเข้า และสนามคลื่นที่เดินทางผ่านวัตถุ จะต้องมิต่ำกว่า π ซึ่งแสดงเป็นเงื่อนไขดังสมการที่ 4.39

$$an_s < \frac{\lambda}{4} \quad (4.39)$$

4.2.2 การประมาณค่าอันดับหนึ่งของไรทอฟ (The First Rytov Approximation)

ทฤษฎีการประมาณค่าอีกทฤษฎีหนึ่ง ที่ใช้ในการประมาณค่าของสนามคลื่นที่เกิดการกระเจิงได้แก่ทฤษฎีการประมาณค่าของไรทอฟ (Rytov approximation) [1],[4] ซึ่งมีข้อจำกัดแตกต่างกันเล็กน้อย โดยเราจะเริ่มพิจารณาจากสนามคลื่นที่แสดงอยู่ในรูปของเฟสเชิงซ้อน [10] ดังสมการที่ 4.40

$$u(\mathcal{F}) = e^{\phi(\mathcal{F})} \quad (4.40)$$

ซึ่งหากเขียนแทนลงในสมการที่ 4.11

$$[\nabla^2 + k(\mathcal{F})^2]u(\mathcal{F}) = 0 \quad (4.11)$$

จะได้เป็น

$$\nabla^2 e^{\phi} + k^2 e^{\phi} = 0 \quad (4.41)$$

$$\nabla[\nabla\phi e^{\phi}] + k^2 e^{\phi} = 0 \quad (4.42)$$

$$\nabla^2 \phi e^{\phi} + (\nabla\phi)^2 e^{\phi} + k^2 e^{\phi} = 0 \quad (4.43)$$

โดยท้ายที่สุดจะได้

$$(\nabla\phi)^2 + \nabla^2 \phi + k_0^2 = -o(\mathcal{F}) \quad (4.44)$$

ซึ่งเมื่อเขียนสมการเฟสเชิงซ้อนนี้ให้อยู่ในรูปของผลรวมระหว่าง ฟังก์ชันเฟสของคลื่นพุ่งเข้า (Incident phase function : ϕ_0) และฟังก์ชันเฟสเชิงซ้อนของสนามคลื่นที่เกิดการกระเจิง (Scattered complex phase : ϕ_s) โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$\phi(\mathcal{F}) = \phi_0(\mathcal{F}) + \phi_s(\mathcal{F}) \quad (4.45)$$

เมื่อ

$$u_0(\mathcal{F}) = e^{\phi_0(\mathcal{F})} \quad (4.40)$$

จะสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$(\nabla\phi_0)^2 + 2\nabla\phi_0 \cdot \nabla\phi_s + (\nabla\phi_s)^2 + \nabla^2\phi_0 + \nabla^2\phi_s + k_0^2 + o(\mathcal{F}) = 0 \quad (4.41)$$

ซึ่งหากใช้หลักในการพิจารณาเช่นเดียวกับในการประมาณค่าของบอร์น จะทำให้สามารถตัดพจน์ที่ยู่ยากของสมการออกไปได้ โดยเราจะได้

$$k_0^2 + (\nabla\phi_0)^2 + \nabla^2\phi_0 = 0 \quad (4.42)$$

ซึ่งเมื่อนำไปลบออกจากสมการที่ 4.41 จะได้

$$2\nabla\phi_0 \cdot \nabla\phi_s + \nabla^2\phi_s = -(\nabla\phi_s)^2 - o(F) \quad (4.43)$$

ถึงแม้ว่าสมการที่ 4.43 นี้ ยังคงเป็นสมการที่ไม่ใช่สมการเชิงเส้น แต่สามารถที่จะพิจารณาหาค่าได้โดยใช้ความสัมพันธ์

$$\nabla^2(u_0\phi_s) = \nabla(\nabla u_0 \cdot \phi_s + u_0\nabla\phi_s) \quad (4.44)$$

หรืออาจเขียนสมการทางด้านขวามือใหม่เป็น

$$\nabla^2(u_0\phi_s) = \nabla^2 u_0 \cdot \phi_s + 2\nabla u_0 \cdot \nabla\phi_s + u_0\nabla^2\phi_s \quad (4.45)$$

เมื่อพิจารณาสมการสนามคลื่นพุ่งเข้า

$$u_0 = Ae^{ik_0 P \cdot P} \quad (4.46)$$

จะได้

$$\nabla^2 u_0 = -k_0^2 u_0 \quad (4.47)$$

ดังนั้นสมการที่ 4.45 จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$2u_0\nabla\phi_0 \cdot \nabla\phi_s + u_0\nabla^2\phi_s = \nabla^2(u_0\phi_s) + k_0^2 u_0\phi_s \quad (4.48)$$

ซึ่งเมื่อนำสมการที่ได้มานี้ไปแทนในสมการที่ 4.43 จะได้

$$(\nabla^2 + k_0^2)u_0\phi_s = -u_0[(\nabla\phi_s)^2 + o(F)] \quad (4.49)$$

จะเห็นได้ว่าสมการนี้นั้นสามารถที่จะเขียนให้อยู่ในรูปของผลรวมเชิงเส้นได้เป็น

$$u_0\phi_s = \int g(F - F')u_0[(\nabla\phi_s)^2 + o(F')]dF' \quad (4.50)$$

เมื่อใช้การประมาณค่าของไรทอฟ พจน์ภายในวงเล็บของสมการข้างต้นจะถูกประมาณค่าเป็น

$$(\nabla \phi_s)^2 + o(F) \cong o(F) \quad (4.51)$$

ซึ่งจะทำให้ได้สมการการประมาณค่าอันดับหนึ่งของไรทอฟของฟังก์ชัน $u_0 \phi_s$ เป็นดังสมการ

$$u_0 \phi_s = \int g(F - F') u_0(F') o(F') dF' \quad (4.52)$$

ดังนั้นเราจะได้สมการเฟสเชิงซ้อนของสนามคลื่นที่เกิดการกระเจิง (ϕ_s) เป็น

$$\phi_s(F) = \frac{1}{u_0(F)} \int g(F - F') u_0(F') o(F') dF' \quad (4.53)$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาพร้อมกับสมการที่ 4.28 สมการที่ 4.53 จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\phi_s(F) = \frac{u_B(F)}{u_0(F)} \quad (4.54)$$

การประมาณค่าของไรทอฟนั้นจะสามารถใช้ได้ภายใต้ข้อจำกัดที่มากกว่าการประมาณค่าของบอร์นเล็กน้อย โดยเมื่อพิจารณาการประมาณค่าของไรทอฟในสมการที่ 4.51

$$(\nabla \phi_s)^2 + o(F) \cong o(F) \quad (4.51)$$

จะพบว่าสมการนี้จะเป็นจริงเฉพาะในกรณีที่

$$o(F) \gg (\nabla \phi_s)^2 \quad (4.55)$$

ซึ่งถ้าเขียนฟังก์ชัน ($o(F)$) ให้อยู่ในเทอมของการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหจะได้เป็น

$$o(F) = k_0^2 [n^2(F) - 1] = k_0^2 [(1 + n_s(F))^2 - 1] \quad (4.56)$$

$$o(F) = k_0^2 [(1 + 2n_s(F) + n_s^2(F)) - 1] \quad (4.57)$$

$$o(F) = k_0^2 [(2n_s(F) + n_s^2(F))] \quad (4.58)$$

โดยในกรณีการประมาณค่าอันดับหนึ่งของไรทอพนัน จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันวัตถุจะแปรผันตามค่าของดัชนีหักเห หรือเขียนได้เป็น

$$o(F) \cong 2k_0^2 n_s(F) \quad (4.59)$$

เมื่อแทนสมการที่ 4.59 ลงในสมการที่ 4.55 จะได้เป็น

$$n_s \gg \frac{(\nabla \phi_s)^2}{k_0^2} \quad (4.60)$$

จะเห็นได้ว่าการประมาณค่าอันดับหนึ่งของฟังก์ชันเฟสของคลื่นที่เกิดการกระเจิง (ϕ_s) นั้นเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นขึ้นกับค่าของดัชนีหักเห ดังนั้นจึงทำให้สามารถละทิ้งพจน์แรกของสมการที่ 4.51 ไปได้โดยไม่มีผลกระทบถ้าหากค่าของดัชนีหักเห (n_s) มีค่าต่ำๆ

สำหรับข้อแตกต่างเมื่อเทียบกับการประมาณค่าของบอร์น จะพบว่าขนาดของวัตถุไม่ได้เป็นตัวแปรในการประมาณค่าของไรทอพ ซึ่งพจน์ของ $\nabla \phi_s$ นั้นเป็นการเปลี่ยนแปลงเฟสเชิงซ้อนของคลื่นต่อหน่วยระยะทาง และถูกหารด้วยค่าของหมายเลขคลื่น (wavenumber)

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4.61)$$

ซึ่งทำให้พบเงื่อนไขสำคัญในการใช้งานการประมาณค่าของไรทอพนันคือ

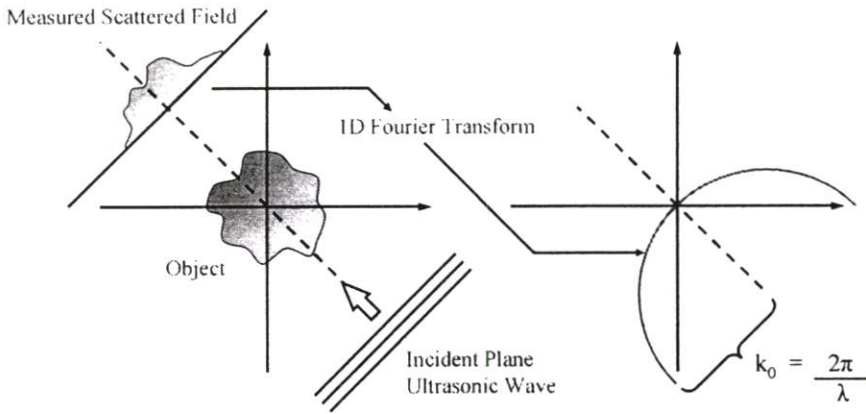
$$n_s \gg \left[\frac{\nabla \phi_s \lambda}{2\pi} \right]^2 \quad (4.62)$$

ข้อที่แตกต่างกับการประมาณค่าของบอร์นอีกอย่างหนึ่งคือ ในกรณีที่เกิดการเลื่อนของเฟส ϕ_s เกินกว่าช่วงความยาวคลื่น λ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าของเฟสนั้นจะไม่ใช่ค่าผลรวมเฟสทั้งหมด ดังนั้นเมื่อพิจารณาตัวปฏิบัติการ ∇ การประมาณค่าของไรทอพจะสามารถใช้ได้เฉพาะกรณีที่การเปลี่ยนแปลงทางเฟสที่มากเกินกว่าช่วงความยาวคลื่นที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าต่ำ

4.3 การสร้างภาพตัดขวางโดยใช้ทฤษฎีฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป

ทฤษฎีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพตัดขวาง สำหรับแหล่งกำเนิดที่เกิดการเลี้ยวเบน ที่จะนำเสนอในที่นี้ได้แก่ทฤษฎีฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป (Generalized Fourier Slice Theory) [1],[4] โดยมี

หลักการคือ การแปลงฟูเรียร์สัญญาณที่เกิดการกระเจิง (Scattered Field) ที่สามารถตรวจวัดได้ จะเทียบได้กับการแปลงฟูเรียร์ของฟังก์ชันวัตถุ โดยทฤษฎีการแปลงฟูเรียร์สำหรับแหล่งกำเนิดที่เกิดการเลี้ยวเบนนั้น จะสามารถใช้งานได้เฉพาะกรณีที่คุณสมบัติที่แตกต่างกันภายในเนื้อวัตถุมีค่าไม่มากนัก



รูปที่ 4.1 ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้ทฤษฎีฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป

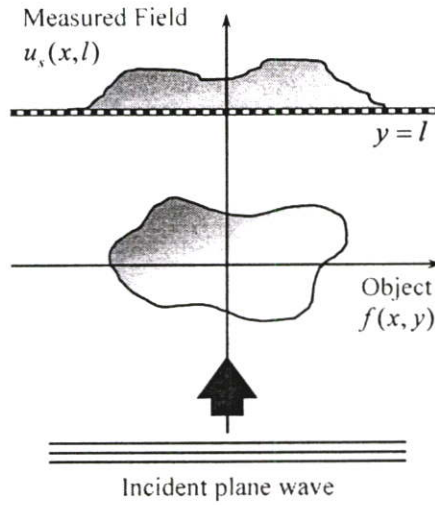
หลักการสำคัญของทฤษฎีนี้คือ เมื่อวัตถุถูกวางไว้ให้ระนาบคลื่นเดินทางผ่านในทิศทางต่างๆกันตลอดทั้ง 360 องศาของวัตถุ ผลลัพธ์ของคลื่นที่สามารถตรวจวัดได้จะถูกนำไปวางในลักษณะเส้นโค้งของวงกลมในระนาบของโดเมนความถี่ ซึ่งเมื่อทำการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับจะทำให้ได้ฟังก์ชันของวัตถุกลับคืนมา

ในตอนต้นของบทนี้นั้นได้นำเสนอการหาค่าของสนามคลื่นที่เกิดการกระเจิง สำหรับกรณีที่เกิดการกระเจิงที่เกิดขึ้นมีค่าเพียงเล็กน้อย ให้อยู่ในรูปการทำคอนโวลูชัน (convolution) ดังสมการ

$$u_B(f) = \int o(f') u_0(f') g(f - f') d(f') \quad (4.63)$$

โดยที่ค่าของ $u_B(f)$ นั้นแทนอาจแทนด้วยค่าของขนาดของสนามคลื่นเชิงซ้อนในกรณีที่เป็นการประมาณค่าของบอร์น หรือแทนด้วยการเลื่อนทางเฟสเชิงซ้อนของสนามคลื่นที่เกิดการกระเจิง ในกรณีที่เป็นการประมาณค่าของไรทอฟ โดยการหาค่าของสมการที่ 4.63 นั้นสามารถทำได้สองวิธีการโดยวิธีการแรกจะเป็นการแยกองค์ประกอบของกรีนฟังก์ชัน (Decomposition the Green's Function) และอีกวิธีหนึ่งคือการพิจารณาคุณสมบัติของการแปลงฟูเรียร์ทั้งโดเมนความถี่และโดเมนเวลา ซึ่งทั้งสองวิธีมีจุดเด่นที่แตกต่างกัน วิธีแรกนั้นเป็นการใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์อย่างตรงไปตรงมา แต่เพื่อให้่ายต่อการทำความเข้าใจวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงขอแนะนำเสนอเฉพาะวิธีการที่สอง ซึ่งสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย และสามารถแสดงให้เห็นถึงข้อ

แตกต่างระหว่างการใช้การส่งคลื่นในโหมดส่งผ่าน และการส่งคลื่นในโหมดสะท้อนกลับได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.2 การวัดสัญญาณที่เกิดการกระเจิงของวัตถุที่ถูกวางไว้ในสนามคลื่น

จากสมการที่ 4.63 นั้น เป็นสมการผลรวมเชิงเส้นของสนามคลื่นที่เกิดการกระเจิง ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นการทำคอนโวลูชันของกรีนฟังก์ชัน ($g(F - F')$) กับผลคูณของฟังก์ชันวัตถุ ($o(F')$) และสนามพุ่งเข้า ($u_0(F')$) โดยเมื่อทำการแปลงให้เข้าสู่โดเมนความถี่ค่าต่างๆจะเปลี่ยนแปลงเป็น

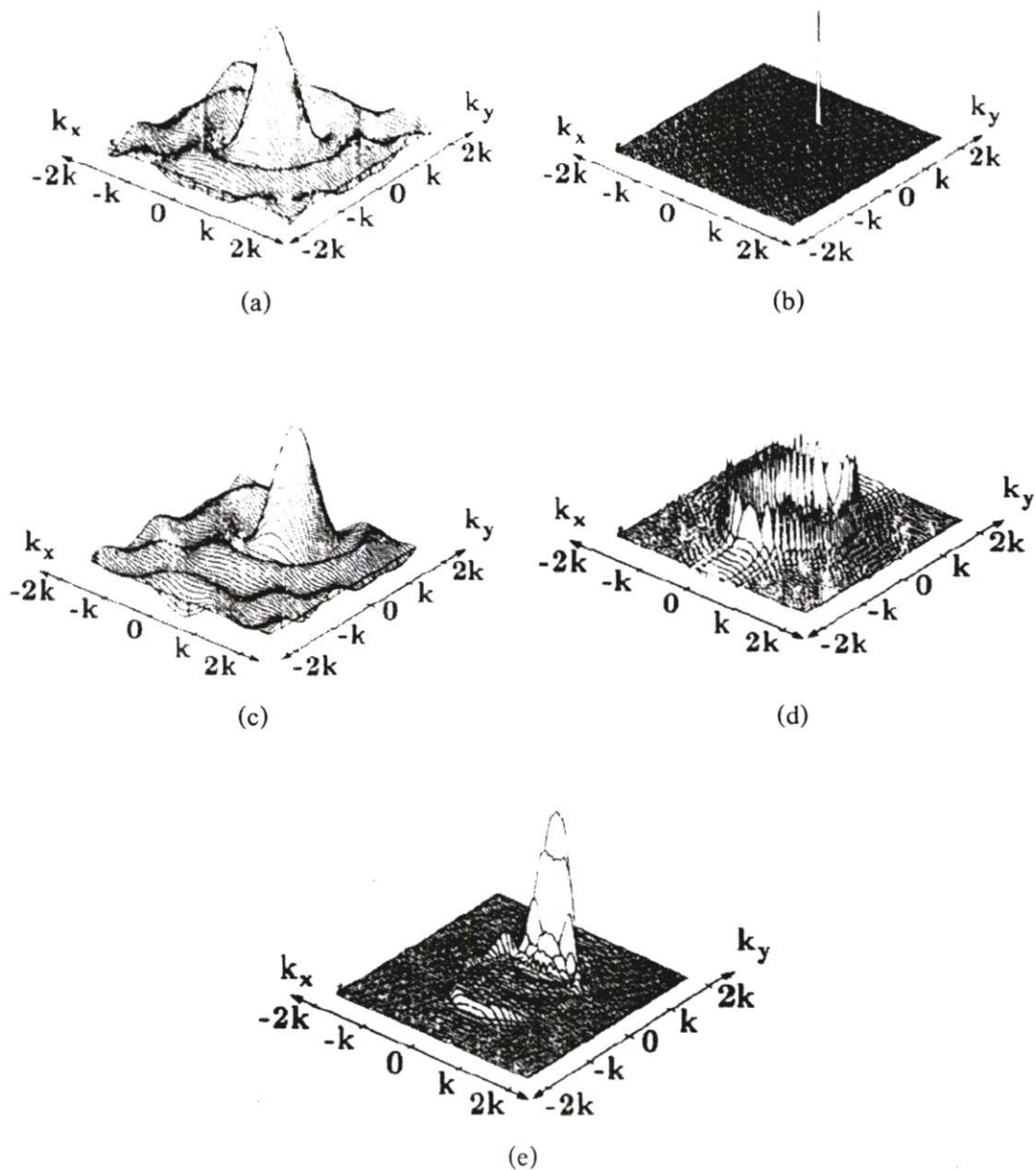
$$\begin{aligned} o(F) &\leftrightarrow O(K) \\ g(F - F') &\leftrightarrow G(K) \\ u(F) &\leftrightarrow U(K) \end{aligned} \quad (4.64)$$

ซึ่งสมการที่ 4.63 นั้นจะถูกแปลงเป็น

$$U_s(K) = G(K) \{O(K) * U_0(K)\} \quad (4.65)$$

โดยที่ * นั้นแทนการกระทำคอนโวลูชัน และ K เป็นฟังก์ชันของ α และ γ เมื่อพิจารณาค่าของ u_0 ร่วมกับสมการที่ 4.7 เมื่อทำการแปลงฟูเรียร์จะได้

$$U_0(K) = 2\pi\delta(K - K') \quad (4.66)$$



รูปที่ 4.3 สัญญาณที่ถูกพลอตในระนาบของฟูรีเยร์สองมิติ

- (a) การแปลงฟูรีเยร์ของวัตถุ (ในกรณีวัตถุทรงกระบอก)
- (b) การแปลงฟูรีเยร์ของสนามพุ่งเข้า
- (c) การทำคอนโวลูชันในโดเมนความถี่ของ (a) และ (b)
- (d) การแปลงฟูรีเยร์ของกรีนฟังก์ชัน (จากสมการที่ 4.23)
- (e) ผลคูณกันในโดเมนความถี่ของ (c) และ (d)

ซึ่งจะเห็นได้ว่าการกระทำคอนโวลูชันในสมการที่ 4.65 นั้น เปรียบได้กับการเลื่อนตำแหน่งใน โดเมนความถี่ (แสดงดังรูปที่ 4.3(c)) หรือพิสูจน์เป็นสมการได้เป็น

$$O(\Lambda) * U_0(\Lambda) = 2\pi O(\Lambda - K) \quad (4.67)$$

จากรูปที่ 4.3 (a)-(c) นั้นแสดงการแพร่ของคลื่นในทิศทาง K (เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจจะกำหนดให้ทิศทางการแพร่ของคลื่นนั้นเป็นไปตามแนวแกน y ($K = (0, k_0)$) เท่านั้น) โดยรูป (a) นั้นแสดงการแปลงฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มของวัตถุทรงกระบอกรัศมี 1λ รูป (b) นั้นแสดงการแปลงฟูเรียร์ของสนามพุ่งเข้า และรูป (c) นั้นแสดงการคูณ (ในโดเมนเวลา) หรือการคอนโวลูชัน (ในโดเมนความถี่) ของสนามพุ่งเข้าและฟังก์ชันของวัตถุ

เพื่อที่จะหาค่าของการแปลงฟูเรียร์ของกรีนฟังก์ชัน จึงทำการแปลงฟูเรียร์แก่สมการที่ 4.20

$$(-\Lambda^2 + k_0^2)G(\Lambda | F) = -e^{-j\Lambda \cdot F} \quad (4.68)$$

ซึ่งเราจะพบว่า

$$G(\Lambda | F) = \frac{e^{-j\Lambda \cdot F}}{\Lambda^2 - k_0^2} \quad (4.69)$$

โดยที่ค่าของ Λ นั้นมีค่าเท่ากับ

$$|\Lambda|^2 = \alpha^2 + \gamma^2 = k_0^2 \quad (4.70)$$

ซึ่งจะพบว่าค่าของกรีนฟังก์ชันนั้นกระจายตัวอยู่ในระนาบ K ในลักษณะของเส้นโค้งที่มีรัศมีเท่ากับ k_0 ดังรูปที่ 4.3(d) โดยสมการที่ 4.69 นั้น เมื่อนำไปพลอตโดยตรงอาจทำให้เกิดการสับสนขึ้นได้เนื่องจากจะมีค่าเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันทั้งทางด้านซ้ายและขวาแต่มีลักษณะตรงข้ามกัน ซึ่งในความเป็นจริงนั้นจะเกิดเฉพาะทางด้านที่มีขนาดสูงขึ้นเท่านั้น

เมื่อนำสัญญาณจากการคอนโวลูชันในสมการที่ 4.67 มาคูณกับกรีนฟังก์ชันในโดเมนความถี่ โดยพิจารณาที่ $F = 0$ จะสามารถเขียนสมการสนามที่เกิดการกระเจิงได้ดังรูปที่ 4.3(e) หรืออธิบายเป็นสมการได้เป็น

$$U_s(\Lambda) = 2\pi \frac{O(\Lambda - K)}{\Lambda^2 - k^2} \quad (4.71)$$

หลังจากนี้จะทำการหาค่าของสนามตลอดแนวเส้นของตัวรับ ซึ่งจะยังคงสมมุติให้ทิศทางการแพร่ของสนามพุ่งเข้านั้นยังคงเป็นไปตามแนวแกน y ($K = (0, k_0)$) โดยสนามที่เกิดการกระเจิงตลอดแนวเส้นของตัวรับ ($x, y = l_0$) ที่ตรวจวัดได้นั้นจะมีลักษณะเหมือนกับการทำการแปลงฟูเรียร์กลับของสมการที่ 4.71

$$u(x, y = l_0) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_s(\Lambda) e^{j\Lambda \cdot \rho} d\alpha d\gamma \quad (4.72)$$

เมื่อแทนสมการที่ 4.71 ลงไปจะกลายเป็น

$$u(x, y = l_0) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{O(\alpha, \gamma - k_0)}{\alpha^2 + \gamma^2 - k_0^2} e^{j(\alpha x + \gamma l_0)} d\alpha d\gamma \quad (4.73)$$

การหาค่าผลรวมเชิงเส้นนี้นั้นจะเริ่มจากการแทนค่าของ γ จากค่า α ที่ได้มา

$$\gamma_{1,2} = \pm \sqrt{k_0^2 - \alpha^2} \quad (4.74)$$

ใช้หลักการหาผลรวมตามแนวเส้น เราจะสามารถหาสมการผลรวมเชิงเส้นตลอดแนวดังรูปที่ 4.4 โดยเมื่อคูณกับ $1/2\pi$ กับแต่ละส่วนจะได้

$$u_s(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma_1}(\alpha; y) e^{j\alpha x} d\alpha + \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma_2}(\alpha; y) e^{j\alpha x} d\alpha \quad (4.75)$$

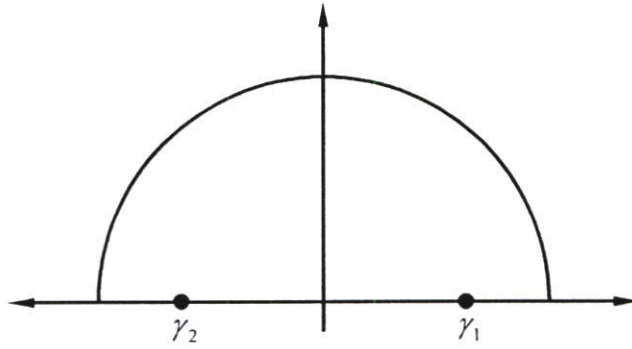
โดยที่

$$\Gamma_1 = \frac{jO(\alpha, \sqrt{k_0^2 - \alpha^2} - k_0)}{2\sqrt{k_0^2 - \alpha^2}} e^{j\sqrt{k_0^2 - \alpha^2} l_0} \quad (4.76)$$

$$\Gamma_2 = \frac{-jO(\alpha, \sqrt{k_0^2 - \alpha^2} - k_0)}{2\sqrt{k_0^2 - \alpha^2}} e^{-j\sqrt{k_0^2 - \alpha^2} l_0} \quad (4.77)$$

จากสมการ 4.76 และ 4.77 นั้น จะเห็นได้ว่าค่าของ Γ_1 แทนระนาบคลื่นที่เดินทางไปในทิศทาง y และ Γ_2 แทนระนาบคลื่นที่เดินทางไปในทิศทาง $-y$ ซึ่งทำให้สามารถที่จะแยกคิดได้

เป็นสองกรณีคือกรณีที่ค่า y มีค่ามากกว่าวัตถุ จะทำให้คลื่นที่เกิดการกระเจิงถูกแทนด้วยฟังก์ชันของ Γ_1



รูปที่ 4.4 ขั้วที่เกิดขึ้นในระนาบเชิงซ้อนจากส่วนของผลรวมเชิงเส้น

$$u_s(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma_1}(\alpha; y)e^{j\alpha x} d\alpha, \quad y > \text{object} \quad (4.78)$$

ในกรณีตรงกันข้าม เมื่อค่าของตัวรับตลอดแนว y เท่ากับ l_0 เมื่อค่าของ l_0 นั้นมีค่าน้อยกว่าค่าของแกน y ของจุดต่างๆภายในวัตถุ สนามคลื่นที่เกิดการกระเจิงจะถูกแทนด้วยฟังก์ชัน Γ_2 หรือ

$$u_s(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma_2}(\alpha; y)e^{j\alpha x} d\alpha, \quad y < \text{object} \quad (4.79)$$

โดยทั่วไปนั้นสนามคลื่นที่เกิดการกระเจิงจะถูกเขียนแทนด้วยสมการ

$$u_s(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int \Gamma(\alpha; y)e^{j\alpha x} d\alpha \quad (4.80)$$

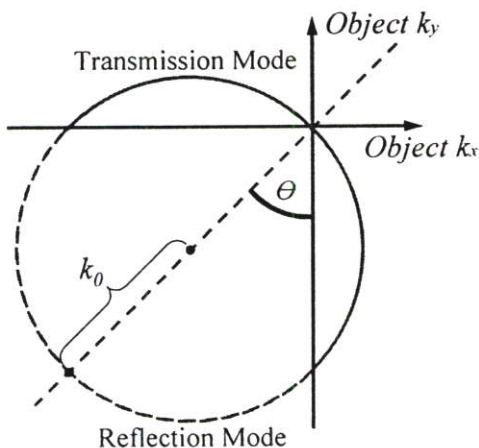
เมื่อทำการแปลงฟูเรียร์กับสมการที่ 4.80 ทั้งสองด้านจะได้

$$\int u(x, y = l_0)e^{-j\alpha x} dx = \Gamma(\alpha, l_0) \quad (4.81)$$

ซึ่งค่าของ $\Gamma(\alpha; l_0)$ ภายในสมการที่ 4.76 - 4.81 นั้น มีค่าเท่ากับการเลื่อนทางเฟสของฟังก์ชันวัตถุ โดยที่การแปลงฟูเรียร์ของสนามคลื่นที่เกิดการกระเจิงตลอดแนวเส้น $y = l_0$ นั้นสามารถเทียบได้กับการแปลงฟูเรียร์ของวัตถุในแนวเส้นโค้งของวงกลม ซึ่งเมื่อทำการหาผลรวมเชิงเส้นตามแนวเส้นขอบจะพบว่าคลื่นนั้นเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$\alpha^2 + \gamma^2 = k_0^2 \quad (4.82)$$

ซึ่งเป็นการพิสูจน์ว่า การละทิ้งผลลัพธ์ของคลื่นทั้งหมดที่ไม่อยู่บนแนวเส้นโค้งของวงกลม นั้นไม่ส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่ได้



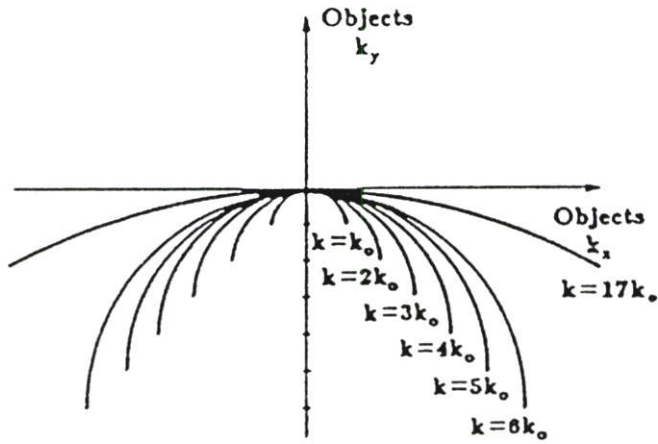
รูปที่ 4.5 การวางข้อมูลลงในโดเมนความถี่ (เส้นทึบในกรณีของการสร้างภาพตัดขวางในโหมดส่งผ่าน และเส้นประในกรณีของการสร้างภาพตัดขวางในโหมดสะท้อน)

ผลลัพธ์จากการแปลงฟูเรียร์ของวัตถุนั้นแสดงดังรูปที่ 4.5 สำหรับจุดต่างๆตามแนวเส้นโค้งนั้นจะถูกแทนด้วยค่า α, γ ซึ่งเป็นไปตามสมการ $\gamma = \sqrt{k_0^2 - \alpha^2}$ โดยที่เส้นทึบนั้นแสดงคลื่นที่รับได้ในกรณีที่ตัวรับที่ตำแหน่ง $y = l_0$ นั้นอยู่ที่ระยะที่ทะลุผ่านไปแล้ว ซึ่งพิจารณาได้ว่าเป็นการสร้างภาพตัดขวางในโหมดส่งผ่านนั่นเอง ในทางตรงกันข้ามนั้นเมื่อตัวรับที่ตำแหน่ง $y = l_0$ อยู่ที่ตำแหน่งก่อนที่จะถึงวัตถุ หมายความว่า เป็นการสร้างภาพตัดขวางในโหมดสะท้อน ซึ่งเขียนแทนด้วยส่วนโค้งที่เป็นเส้นประดังรูป

เมื่อย้อนกลับไปพิจารณาการแปลงฟูเรียร์ ของข้อมูลโปรเจกชันที่เกิดการเลี้ยวเบนที่ตรวจวัดได้นั้น ข้อมูลนี้จะถูกนำไปวางตามแนวเส้นโค้งรัศมี k_0 บนระนาบของโดเมนความถี่ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งค่าของ k_0 นั้นหาได้จากสมการ

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4.83)$$

เมื่อพิจารณาค่า λ ซึ่งเป็นค่าความยาวคลื่นของระนาบคลื่น เมื่อค่าความยาวคลื่นนี้ลดลงค่าของรัศมี k_0 จะเพิ่มขึ้น นั่นหมายความว่าขนาดของส่วนโค้งของวงกลมในโดเมนความถี่ก็จะมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย โดยความสัมพันธ์นี้แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของขนาดส่วนโค้งที่เปลี่ยนไปเมื่อความถี่เกิดการเปลี่ยนแปลง

หากยกตัวอย่างในกรณีของการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่ 5MHz จะพบว่าคลื่นนี้มีความยาวคลื่นในน้ำเท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้มีค่าของ k_0 เท่ากับ 333 เรเดียนต่อเมตร (radians/meter) แต่เมื่อพิจารณาในกรณีของรังสีเอ็กซ์ที่มีความแรง 100 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ (keV) ซึ่งมีความยาวคลื่นเท่ากับ 0.012 ไมโครเมตร จะทำให้ค่าของรัศมีเส้นโค้งนั้นมีค่าสูงถึง 5×10^8 เรเดียนต่อเมตร ซึ่งทำให้เส้นโค้งที่พิจารณานั้นมีลักษณะเป็นเส้นตรงนั่นเอง

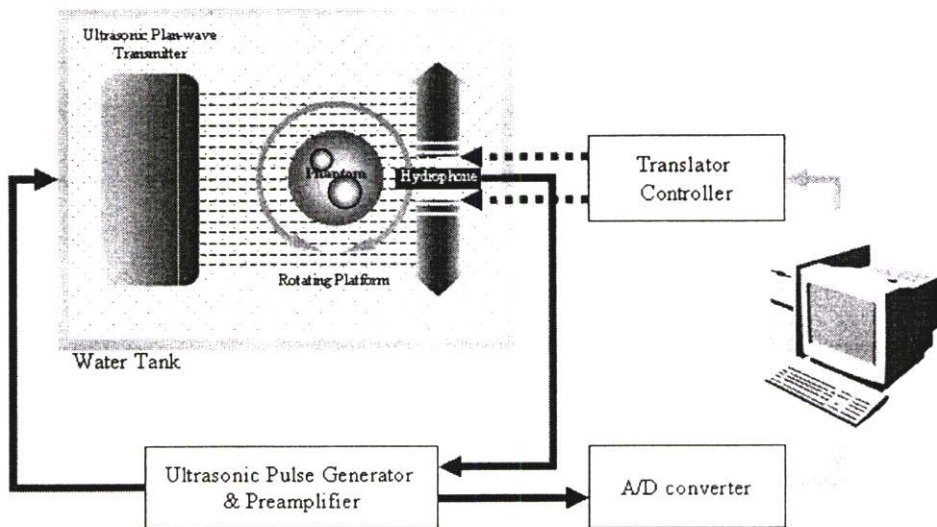
บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

จากทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวาง สำหรับแหล่งกำเนิดที่เกิดผลกระทบของการเลี้ยวเบนที่ได้นำเสนอไปนั้น ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอการทดลองสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยใช้ทฤษฎีดังกล่าว ซึ่งจะมีการนำเสนอในส่วนหนึ่งของระบบที่ใช้ในการทดลอง ผลการทดลองต่างๆ รวมไปถึงผลลัพธ์ที่เปรียบเทียบกับวิธีการเดิมเพื่อพิสูจน์ข้อสันนิษฐานที่กล่าวไว้เบื้องต้น

5.1 ระบบที่ใช้ในการทดลอง

ระบบที่ใช้ในการทดลองนี้นั้นสามารถเขียนแทนด้วยแบบจำลองได้ดังรูปที่ 5.1 โดยมีหลักการคือ ทำการส่งสัญญาณกระตุ้นจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเข้าสู่อัลตราโซนิกทรานส์ดีวเซอร์ โดยคลื่นที่กำเนิดขึ้นมานั้นจะถูกส่งผ่านวัตถุจำลองที่ใช้ในการทดสอบ หรือที่เรียกโดยทั่วไปว่าแฟนทอม (Phantom) ซึ่งแฟนทอมนี้จำเป็นที่จะต้องแช่อยู่ในน้ำเพื่อให้เป็นตัวกลางในการเดินทางของคลื่น สำหรับสัญญาณที่เดินทางผ่านวัตถุทดสอบมาได้นั้นจะถูกทำการบันทึกความเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่ตัวรับสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก หรือที่เรียกว่าไฮโดรโฟน (Hydrophone) การเก็บข้อมูลโปรเจกชันในแต่ละมุมนั้นจะใช้การเก็บข้อมูลแบบขนาน ซึ่งจะต้องทำการสแกนครั้งละจุดตลอดความยาวของช่วงที่ต้องการเก็บข้อมูล โดยในที่นี้จะใช้การควบคุมส่วนเลื่อนเพื่อเลื่อนตำแหน่งของทรานส์ดีวเซอร์และไฮโดรโฟนให้เป็นลักษณะการสแกนแบบขนาน

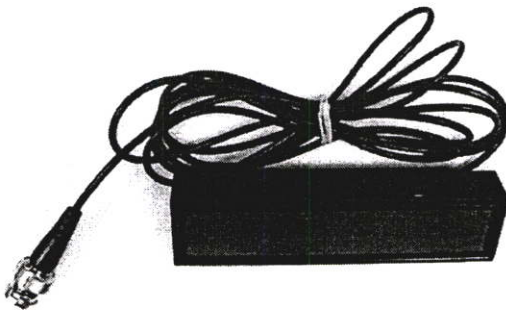


รูปที่ 5.1 แบบจำลองของระบบที่ใช้ในการทดลอง

ข้อมูลที่ได้รับมาในแต่ละจุดนั้นจะถูกบันทึกไว้ในคอมพิวเตอร์ เมื่อได้รับข้อมูลครบทุกจุดตลอดแนวระนาบที่พิจารณา จึงจะสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปคำนวณหาข้อมูลโปรเจกชันในมมต่างๆได้ หลังจากนั้นก็จะทำการหมุนแท่นหมุนวัตถุ (Rotating Platform) เพื่อทำการหาข้อมูลโปรเจกชันในมมอื่นๆในลักษณะเดียวกัน เมื่อได้รับข้อมูลโปรเจกชันจนครบทุกมุมรอบวัตถุแล้วจึงนำข้อมูลทั้งหมดไปใช้ในกระบวนการสร้างภาพตัดขวางต่อไป

สำหรับส่วนประกอบต่างๆของระบบที่ใช้งานจริงนั้นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1.1 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์



รูปที่ 5.2 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์แบบระนาบที่ใช้ในการทดลอง

อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้นั้น เป็นทรานส์ดิวเซอร์ที่ให้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกแบบระนาบ (Plane-wave Ultrasonic Transducer) มีความถี่ตอบสนอง (Resonance Frequency) ที่ 3.5 MHz

5.1.2 ไฮโดรโฟน

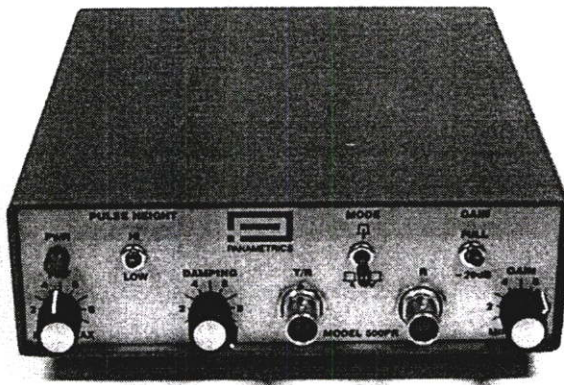
ไฮโดรโฟนนี้นั้นถือเป็นอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์รูปแบบหนึ่ง ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการรับคลื่นเสียงความถี่สูง สำหรับไฮโดรโฟนที่ใช้ในการทดลองนี้ มีความถี่กลางอยู่ที่ 3.5 MHz

5.1.3 เครื่องให้กำเนิดสัญญาณกระตุ้น

เครื่องให้กำเนิดสัญญาณกระตุ้นสำหรับอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์ (Ultrasonic Impulse Generator) ที่ใช้ในการทดลองนั้นเป็นเครื่องของบริษัท Panametrics Model : 500PR ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.3 ไฮโดรโฟนที่ใช้ในการทดลอง



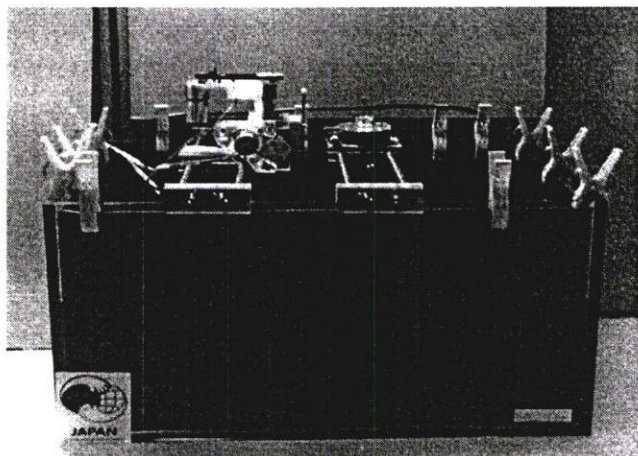
รูปที่ 5.4 เครื่องกำเนิดสัญญาณกระตุ้นสำหรับอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์

5.1.4 อ่างบรรจุน้ำ

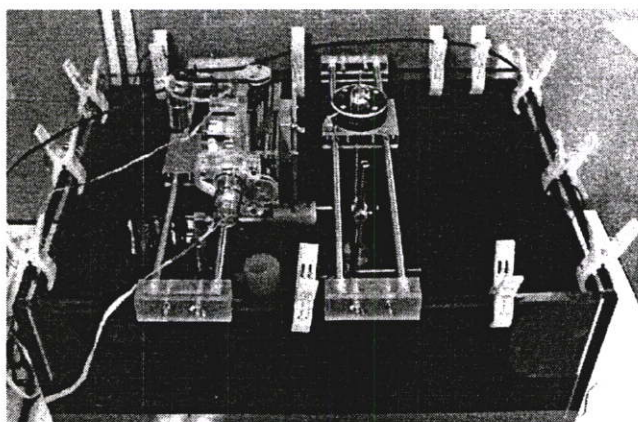
อ่างบรรจุน้ำนี้ใช้บรรจุน้ำเพื่อเป็นตัวกลางในการเดินทางของคลื่น โดยอ่างบรรจุน้ำนี้จะทำหน้าที่อีกส่วนหนึ่งคือเป็นโครงสร้างหลักในการติดตั้งอุปกรณ์อื่นๆ ได้แก่ ส่วนเลื่อน แท่นหมุน ฯลฯ ดังรูปที่ 5.5 และ 5.6 โดยจะเห็นได้ว่าในบริเวณผนังของอ่างนั้น จะมีวัสดุที่ใช้ในการดูดคลื่นคลื่นติดไว้ เพื่อป้องกันการเกิดการสะท้อนของคลื่นที่บริเวณผนังของอ่างเพื่อไม่ให้คลื่นนี้สะท้อนกลับเข้าไปรบกวนคลื่นภายในระบบได้

5.1.5 ส่วนเลื่อนและแท่นหมุน

ส่วนเลื่อน (Translator) ที่ใช้ในระบบการสแกนแบบขนานเพื่อเก็บผลของสัญญาณในแต่ละจุด และแท่นหมุน (Rotating Platform) ที่ใช้ในการหมุนแพนทอมเพื่อเปลี่ยนมุมในการเก็บข้อมูลโปรเจกชันนั้น จะถูกติดตั้งไว้กับอ่างบรรจุน้ำดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.6

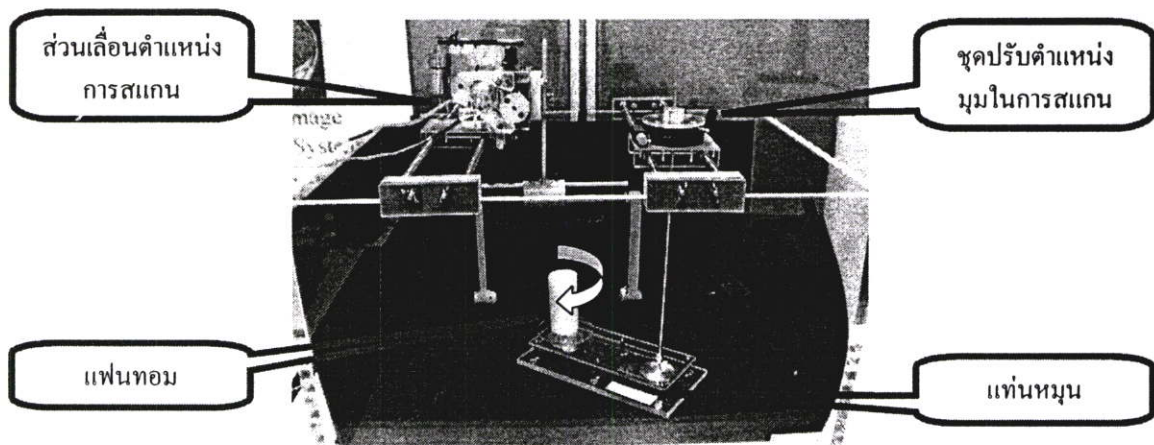


(a) Side View



(b) Over View

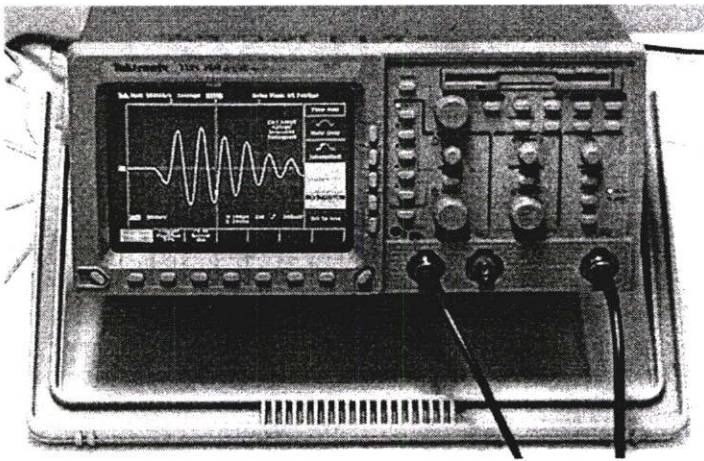
รูปที่ 5.5 อ่างบรรจุน้ำที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 5.6 ส่วนประกอบต่างๆภายในอ่างบรรจุน้ำที่ใช้ในการทดลอง

5.1.6 ออสซิลโลสโคป

ออสซิลโลสโคปนั้นถูกนำมาใช้ในการวัดและบันทึกค่าของสัญญาณต่างๆ รวมไปถึงการส่งข้อมูลสัญญาณต่างๆนั้นเข้าไปประมวลผลที่คอมพิวเตอร์ สำหรับในที่นี้ได้ใช้ออสซิลโลสโคปของบริษัท Tektronix รุ่น TDS 360 โดยทำการควบคุมผ่านพอร์ตสื่อสาร GPIB (IEEE-488 GPIB : General Purpose Interface Bus) ซึ่งข้อมูลที่ถูกส่งให้คอมพิวเตอร์ในแต่ละครั้งที่ทำการวัดสัญญาณนั้น จะเป็นข้อมูลจุดจำนวน 1000 จุด ที่มีจากการสุ่ม (Sampling) ด้วยความถี่สูง โดยข้อมูลในแต่ละจุดนั้นจะมีค่าที่เป็นไปได้ 256 ค่า โดยข้อมูลจะถูกส่งออกมาในรูปของข้อมูลรหัสแอสกี 8 บิต (8bit ASCII) นั่นคือมีค่าตั้งแต่ 0x00 ไปจนถึง 0xFF

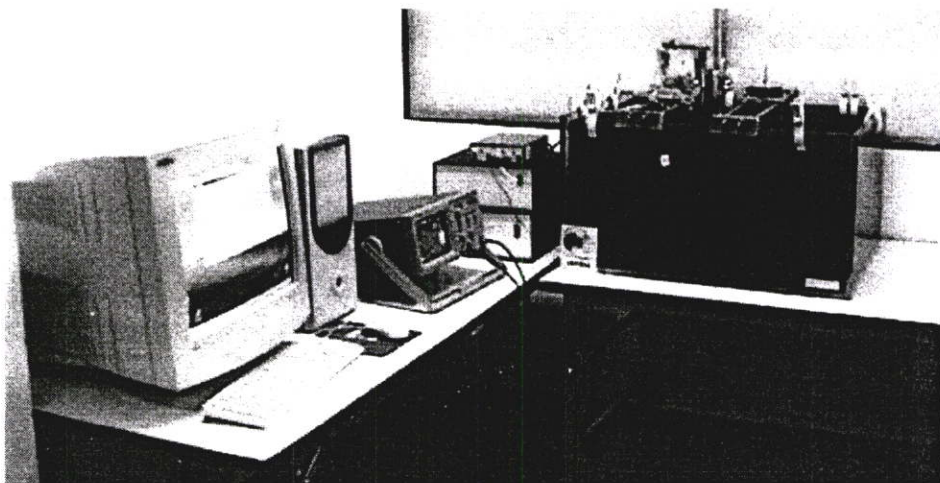


รูปที่ 5.7 ออสซิลโลสโคปที่นำมาใช้งาน

เนื่องจากการอ่านสัญญาณของคลื่นอัลตราโซนิคนั้น เป็นการอ่านสัญญาณที่ให้ความสนใจในแกนเวลาเป็นช่วงกว้าง จึงทำให้การอ่านสัญญาณในโหมดคาบเวลา (Period) ทั่วไปไม่สามารถพิจารณาสัญญาณที่ตรวจวัดได้ชัดเจน ดังนั้นออสซิลโลสโคปที่นำมาใช้จึงต้องสามารถทำการวัดสัญญาณในโหมดการหน่วงเวลา (Delay Mode) ซึ่งทำให้สามารถเลื่อนจุดที่จะพิจารณาไปที่เวลาที่พบสัญญาณของแต่ละคาบเวลาได้

5.1.7 คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer : PC) เป็นองค์ประกอบสำคัญอย่างหนึ่งของระบบ เนื่องจากต้องใช้ในการประมวลผลต่างๆ รวมไปถึงการรับค่าจากออสซิลโลสโคปเพื่อใช้ในการประมวลผล โดยคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ CPU Intel® Pentium3 733 MHz มีหน่วยความจำในการประมวลผล (RAM) ขนาด 256 MB



รูปที่ 5.8 ภาพรวมของระบบที่ใช้ในการทดลอง

5.2 การวัดค่าดัชนีหักเหสัมพันธ์กับน้ำของวัตถุ

การวัดค่าดัชนีหักเหสัมพันธ์กับน้ำของวัตถุที่ใช้ในการทดลอง จะใช้หลักการเปรียบเทียบความเร็วในการเดินทางของคลื่นในขณะที่มีวัตถุ และไม่มีวัตถุ โดยหากเริ่มพิจารณาจากสมการที่ 5.1 ซึ่งเป็นสมการหาค่าของดัชนีหักเหจะได้ว่า

$$n_o = \frac{v_o}{v_w} \quad (5.1)$$

เมื่อ

n_o แทนค่าของดัชนีหักเหสัมพันธ์กับน้ำของวัตถุ (Refractive Index of Object)

v_o แทนค่าความเร็วในการเดินทางของคลื่นเสียงในเนื้อวัตถุ (Object Sound Velocity)

v_w แทนค่าความเร็วในการเดินทางของคลื่นเสียงในตัวกลางซึ่งในที่นี้ ได้นำน้ำมาใช้เป็นตัวกลาง ดังนั้นจึงเป็นความเร็วในการเดินทางของคลื่นเสียงในน้ำ (Sound Velocity of Water) โดยปกติที่อุณหภูมิห้องจะมีความเร็วประมาณ 1500 เมตรต่อวินาที

จากสมการที่ 5.1 นั้น จะพบว่าความเร็วในการเดินทางของคลื่นในวัตถุนั้นเป็นสิ่งที่ยังไม่ทราบค่า ต่างจากความเร็วในการเดินทางของคลื่นในน้ำ ซึ่งมีค่ามาตรฐานที่อุณหภูมิต่างๆ

$$v = \frac{l}{t} \quad (5.2)$$

เมื่อ

l แทนค่าของระยะทางทั้งหมดที่คลื่นเดินทางได้ในช่วงเวลา t

t เวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางไปเป็นระยะทาง l

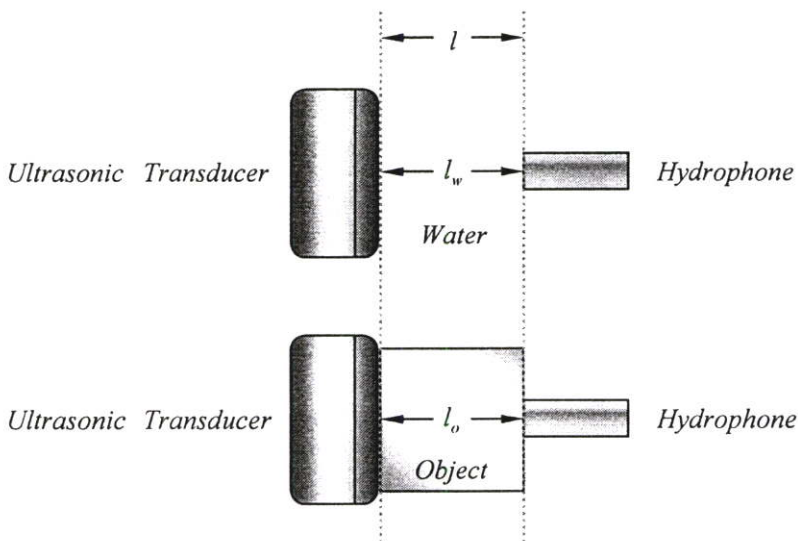
หากนำสมการหาค่าความเร็วในการเดินทางของคลื่นดังสมการที่ 5.2 แทนลงในสมการที่ 5.3 จะได้เป็น

$$n_o = \frac{v_o}{v_w} = \frac{l_o/t_o}{l_w/t_w} \quad (5.3)$$

จากสมการที่ 5.3 จะพบว่าหากพิจารณาให้ระยะทางที่คลื่นเดินทางในน้ำ (l_w) และระยะทางที่คลื่นเดินทางในวัตถุ (l_o) มีค่าเท่ากัน ($l_o = l_w$) จะทำให้สมการในการหาค่าดัชนีหักเห นั้นขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่นทั้งสอง นั่นคือ

$$n_o = \frac{t_w}{t_o} \quad (5.4)$$

สมการที่ 5.4 นี้เป็นการหาค่าดัชนีหักเหที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากค่าที่วัดได้จาก ออสซิลโลสโคปในโหมดหน่วงเวลานั้น จะสามารถบันทึกค่าของเวลาที่พบคลื่นได้โดยตรงจึงทำให้สามารถหาค่าดัชนีหักเหของวัตถุจากข้อมูลดังกล่าวได้

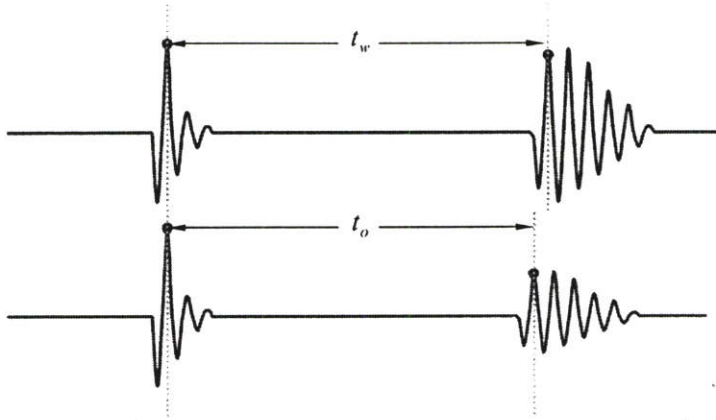


รูปที่ 5.9 แบบจำลองวิธีการวัดค่าดัชนีหักเหของวัตถุ

รูปที่ 5.9 นั้นเป็นแบบจำลองการหาค่าดัชนีหักเหของวัตถุ ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวแปรสำคัญที่ต้องควบคุมคือระยะทางระหว่างตัวส่งและตัวรับ โดยลักษณะของสัญญาณที่จะพิจารณาจะมีลักษณะดังเช่นแบบจำลองสัญญาณในรูปที่ 5.10

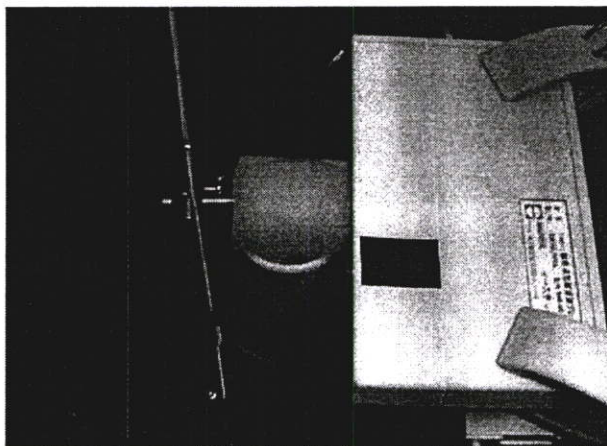
ในแบบจำลองสัญญาณในรูปที่ 5.10 นั้นจะเห็นถึงความแตกต่างระหว่างเวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่นที่ระยะทางเท่ากัน ระหว่างคลื่นที่เดินทางผ่านน้ำและวัตถุ ซึ่งค่าเวลานี้จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัตถุ โดยคลื่นจะเดินทางผ่านวัตถุที่มีความหนาแน่นสูงกว่าได้เร็วกว่าวัตถุที่มี

ความหนาแน่นต่ำกว่า ซึ่งโดยปกติแล้วน้ำหรือตัวกลางที่นำมาใช้งานใดๆ จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าวัตถุ นั่นคือคลื่นที่เดินทางผ่านวัตถุจะใช้เวลาสั้นกว่านั่นเอง



รูปที่ 5.10 การพิจารณาเวลาที่ใช้ในการเดินทางของสัญญาณ (บน : สัญญาณที่คลื่นเดินทางผ่านน้ำหรือตัวกลางใดๆ , ล่าง : สัญญาณที่คลื่นเดินทางผ่านวัตถุ)

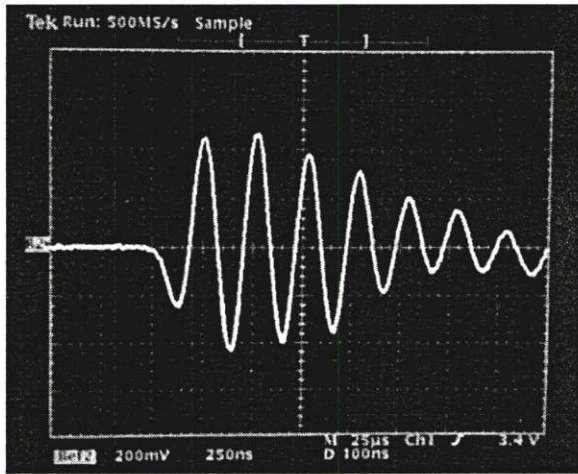
ถึงแม้ว่าหลักการดังกล่าวจะสามารถหาค่าของดัชนีหักเหได้ แต่สิ่งที่ยากในการนำไปใช้งานคือวัตถุที่ต้องการจะหาค่าดัชนีหักเหเหล่านั้นๆ ต้องเป็นวัตถุเนื้อเดียวที่มีรูปร่างที่สามารถแนบเข้ากับตัวทรานส์ดิวเซอร์ได้ ซึ่งสำหรับในงานวิจัยชิ้นนี้ที่ศึกษากับเฟนทอมที่สร้างขึ้นจากเจลลาติน จะมีการนำน้ำเจลลาตินที่ใช้ในการหล่อเฟนทอมที่ต้องการทราบค่าดัชนีหักเห นั้น ทำการหล่อลงในแม่พิมพ์สี่เหลี่ยมด้วย เพื่อที่จะใช้ในการหาค่าดัชนีหักเหด้วยวิธีดังกล่าว เนื่องจากเฟนทอมที่ใช้ในการทดลองนั้นอาจมีรูปทรงที่ไม่สามารถแนบเข้ากับตัวทรานส์ดิวเซอร์ได้ อีกทั้งภายในของเฟนทอมอาจมีช่องว่าง หรือมีสารที่มีความหนาแน่นอื่นๆ สอดแทรกอยู่ภายในทำให้ไม่สามารถหาค่าดัชนีหักเหได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 5.11 การหาค่าดัชนีหักเหของเฟนทอมจากเจลลาตินสี่เหลี่ยมที่สร้างขึ้นจากสารเดียวกัน

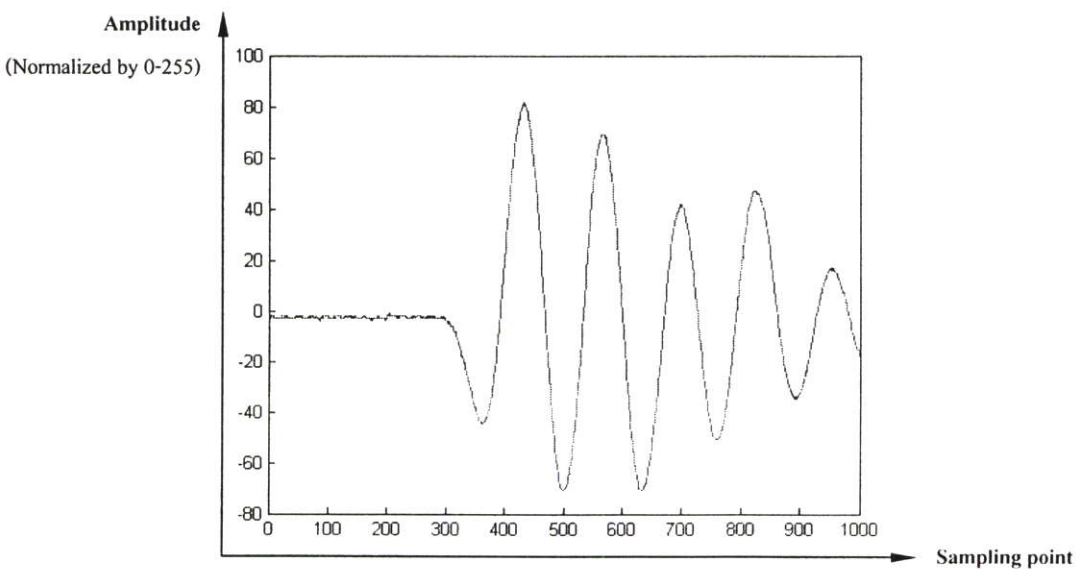
5.3 กระบวนการหาข้อมูลโปรเจกชันจากสัญญาณที่ได้รับ

ในการทดลองสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยใช้ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบนของคลื่นนี้นั้น จะเริ่มจากการเก็บข้อมูลโปรเจกชันในแต่ละมุมของวัตถุ โดยข้อมูลแต่ละโปรเจกชันจะมาจากการเก็บผลแบบขนานเหมือนดังที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยลักษณะของข้อมูลแต่ละจุดที่พบบนออสซิลโลสโคปจะมีลักษณะดังรูปที่ 5.12



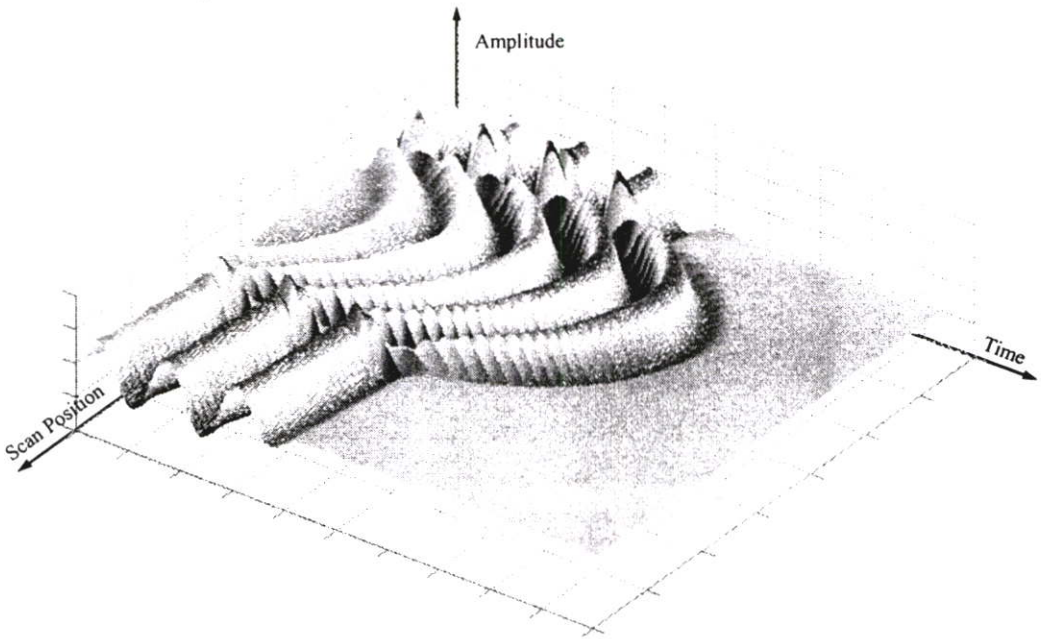
รูปที่ 5.12 ลักษณะของคลื่นที่ตรวจวัดได้จากออสซิลโลสโคป

ข้อมูลในแต่ละจุดนี้จะถูกนำเข้าไปยังคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตสื่อสาร GPIB ซึ่งข้อมูลที่อ่านเข้ามานั้นจะสามารถแสดงทางคอมพิวเตอร์ได้ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 ตัวอย่างข้อมูลที่อ่านเข้ามาแสดงผลยังเครื่องคอมพิวเตอร์

เมื่อทำการเก็บข้อมูลเหล่านี้ตลอดแนวระนาบที่พิจารณา ซึ่งถือเป็นข้อมูล 1 โปรเจกชันนั้น จะสามารถพล็อตลักษณะของระนาบคลื่นขึ้นได้ดังรูปที่ 5.14 ซึ่งเป็นระนาบคลื่นที่สร้างขึ้นจากการเก็บผลตลอดแนวระนาบจำนวน 80 จุด โดยมีเฟนทอมทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตรวางขวางอยู่ในสนามคลื่น



รูปที่ 5.14 ตัวอย่างระนาบคลื่นที่พล็อตขึ้นจากข้อมูล 1 โปรเจกชัน

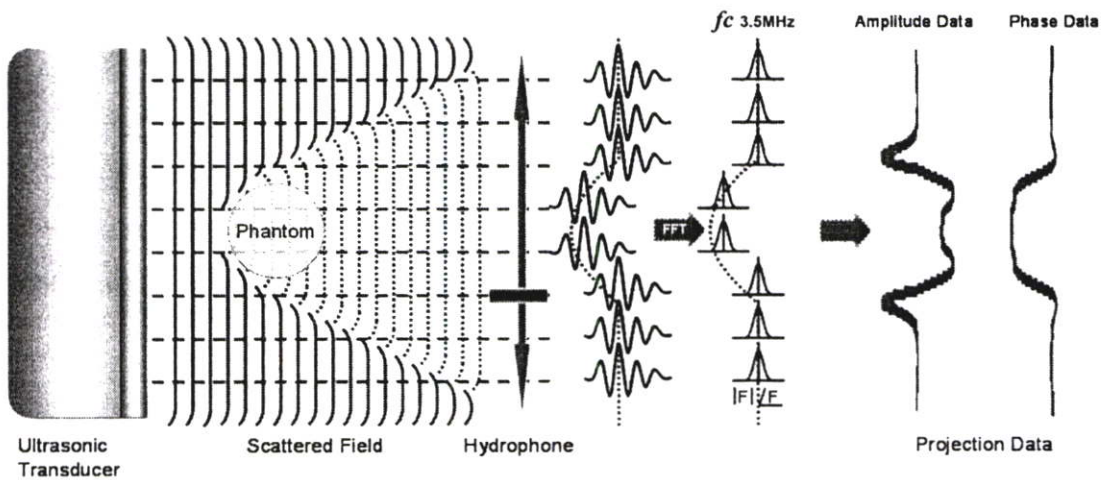
จากรูปที่ 5.14 นั้นจะพบว่าข้อมูลที่ได้นั้น ประกอบไปด้วยข้อมูลทางเวลา และทางขนาดซึ่งข้อมูลโปรเจกชันหนึ่งๆนั้น จำเป็นจะต้องวิเคราะห์เพื่อหาค่าความแตกต่างทางเฟสและแอมพลิจูดของสัญญาณด้วยการแปลงฟูเรียร์ และทำการเปรียบเทียบกับสภาวะปกติ (Normalize) นั่นคือในขณะที่ระนาบคลื่นนี้ไม่มีวัตถุ เพื่อหาความแตกต่างเฉพาะทางด้านเฟสและแอมพลิจูดออกมา โดยกระบวนการนี้ต้องกระทำที่ละจุดที่ทำการเก็บผล (Scan Position) ตามสมการที่

$$\text{AmplitudeData}(\text{ScanPosition}) = \frac{\text{abs}(\text{FFT}(\text{Data}_o(\text{ScanPosition}), \text{SelectFreq}))}{\text{abs}(\text{FFT}(\text{Data}_w(\text{ScanPosition}), \text{SelectFreq}))} \quad (5.5)$$

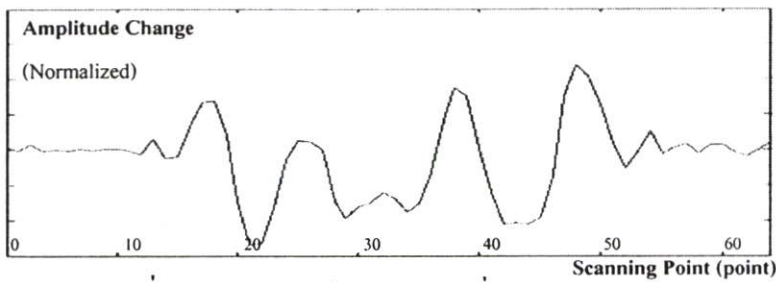
$$\text{PhaseData}(\text{ScanPosition}) = \text{angle}(\text{FFT}(\text{Data}_o(\text{ScanPosition}), \text{SelectFreq})) - \text{angle}(\text{FFT}(\text{Data}_w(\text{ScanPosition}), \text{SelectFreq})) \quad (5.6)$$

จากสมการที่ 5.5 และ 5.6 นั่นคือสมการเพื่อหาข้อมูลทางแอมพลิจูดและเฟส ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงผลของเฟนทอมโดย $\text{Data}(\text{ScanPosition})$ นั้นแทนข้อมูลทั้ง 1000 จุดของสัญญาณที่ตำแหน่ง ScanPosition ที่กำลังพิจารณา โดยแบ่งออกเป็น Data_o ซึ่งเป็นข้อมูลในขณะที่มี

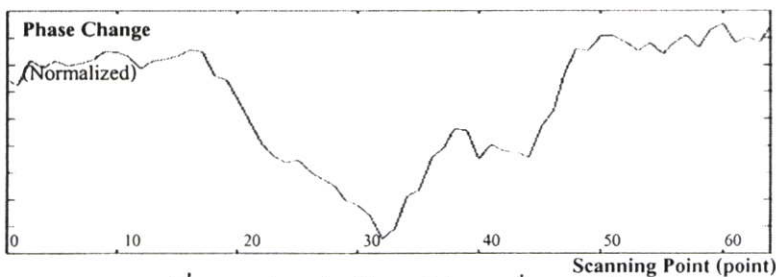
วัตถุ และ $Data_w$ นั้นแทนข้อมูลในขณะที่ไม่มียวัตถุ ซึ่งการทำ FFT ทั้ง 1000 จุด ของข้อมูลทั้งสอง ณ.ตำแหน่งที่กำลังพิจารณานั้น จะทำให้ได้ข้อมูลออกมาเป็นจำนวนเชิงซ้อนค่าหนึ่ง โดยการเลือกค่าความถี่ในการทำ FFT นั้นขึ้นอยู่กับอัตราการ sampling และ จำนวนจุดข้อมูลในแต่ละสัญญาณ ค่าจำนวนจริง (real) ที่ได้มาจะแทนข้อมูลทางแอมพลิจูดของสัญญาณ และค่าของจำนวนเชิงซ้อน (Img) จะแทนค่าของข้อมูลทางเฟส ซึ่งค่าทั้งสองจะถูกใช้เป็นข้อมูลโปรเจกชันทางเฟส และข้อมูลโปรเจกชันทางแอมพลิจูด ในตำแหน่งที่กำลังพิจารณานั้นๆ ดังนั้นเมื่อทำการหาค่าดังกล่าวจนครบทุกจุดก็จะได้ข้อมูลโปรเจกชันทางเฟส และข้อมูลโปรเจกชันทางแอมพลิจูด ของมุนนั้นๆออกมา ตัวอย่างของข้อมูลโปรเจกชันทางเฟสและแอมพลิจูด แสดงดังรูปที่ 5.16 และ 5.17



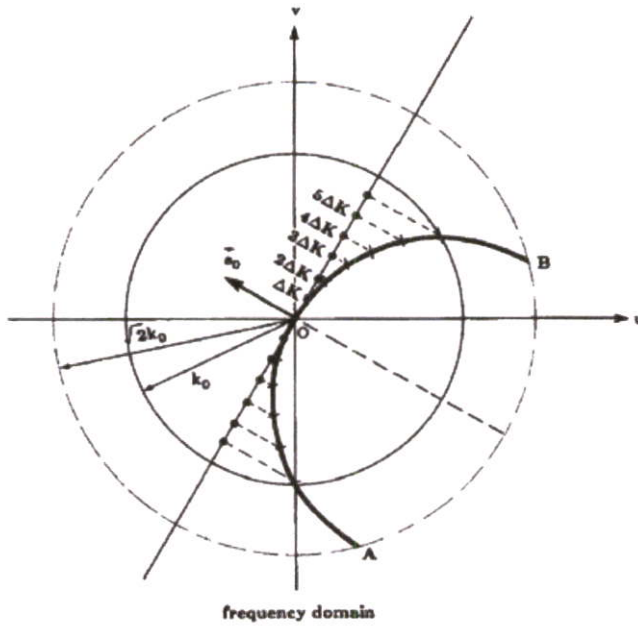
รูปที่ 5.15 กระบวนการหาข้อมูลโปรเจกชันจากสัญญาณที่ได้รับ



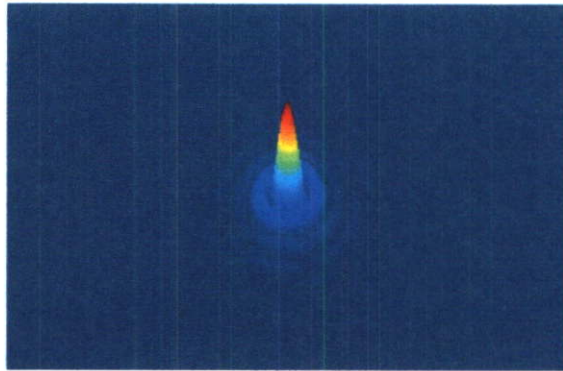
รูปที่ 5.16 ตัวอย่างข้อมูลโปรเจกชันทางแอมพลิจูด



รูปที่ 5.17 ตัวอย่างข้อมูลโปรเจกชันทางเฟส



รูปที่ 5.18 การวางข้อมูล โปรเจกชันลงบน โดเมนความถี่



รูปที่ 5.19 ตัวอย่างข้อมูลบน โดเมนความถี่หลังจากการวางข้อมูล

หลังจากที่ได้ข้อมูลโปรเจกชันทางเฟสและทางขนาด ข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำไปทำการแปลงฟูเรียร์เพื่อวางลงในโดเมนความถี่(ดังรายละเอียดในบทที่ 4) ซึ่งรูปที่ 5.18 นั้นแสดงการเทียบตำแหน่งของข้อมูลโปรเจกชันกับเส้นโค้ง โดยระยะ ΔK นั้นแทนระยะห่างระหว่างจุดข้อมูล \bar{a}_0 แทนทิศทางการพุ่งเข้าของสนามคลื่นของโปรเจกชันนั้นๆ สำหรับข้อมูลที่วางลงไปในนั้นจะวางลงไปในรูปแบบจำนวนเชิงซ้อนแบบเชิงขั้ว (Polar form) โดยมีข้อมูลโปรเจกชันทางแอมพลิจูดเป็นค่าทางขนาด และข้อมูลโปรเจกชันทางเฟสเป็นค่ามุมนั่นเอง รูปที่ 5.19 นั้นแสดงตัวอย่างของโดเมนความถี่หลังจากวางข้อมูลจำนวน 36 โปรเจกชันลงไป

5.4 การทดลองสร้างภาพตัดขวางจากเฟ้นทอมที่เป็นสารเนื้อเดียว

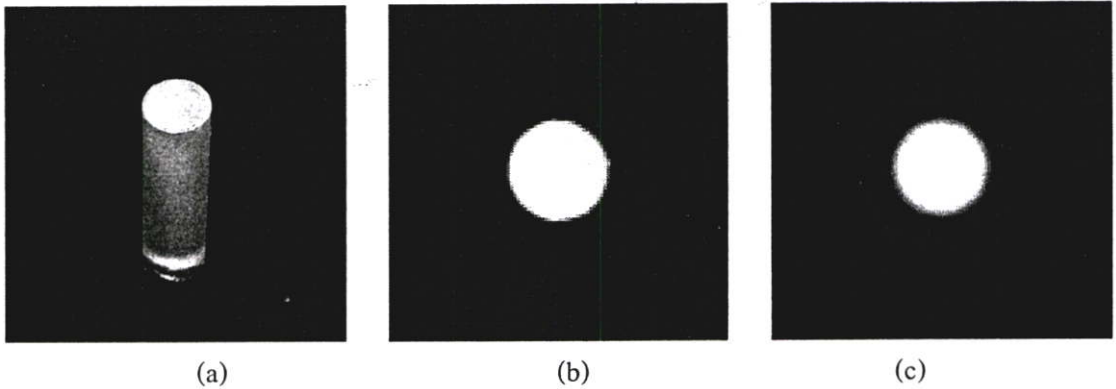
ในการทดลองสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยใช้ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่เกิดผลกระทบจากการเลี้ยวเบนนั้น จะเริ่มจากการทดลองสร้างภาพตัดขวางของเฟ้นทอมที่เป็นสารเนื้อเดียว (Homogeneous Phantom) ซึ่งข้อมูลที่ได้รับจะเป็นภาพโครงสร้างของวัตถุ สำหรับวิธีการที่ใช้วัดความถูกต้องของภาพตัดขวางที่ได้รับมานั้น จะใช้การหาค่าความผิดพลาดแบบ Mean Square Error (MSE) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าระดับเทา (Gray-scale) ระหว่างภาพตัดขวางที่ได้มากับภาพของวัตถุที่มาจากการจำลองจากวัตถุจริง สมการที่ 5.7 นั้นแสดงสมการในการหาค่า Mean Square Error

$$MSE = \frac{\sum_{y=0}^j \sum_{x=0}^i [o(x,y) - o'(x,y)]^2}{\sum_{y=0}^j \sum_{x=0}^i [o(x,y)]^2} \times 100 \quad (5.7)$$

โดยที่

$o(x,y)$ แทนค่าฟังก์ชันวัตถุของวัตถุจริง (ในที่นี้คือค่าระดับเทา) ที่ตำแหน่ง x,y ใดๆ

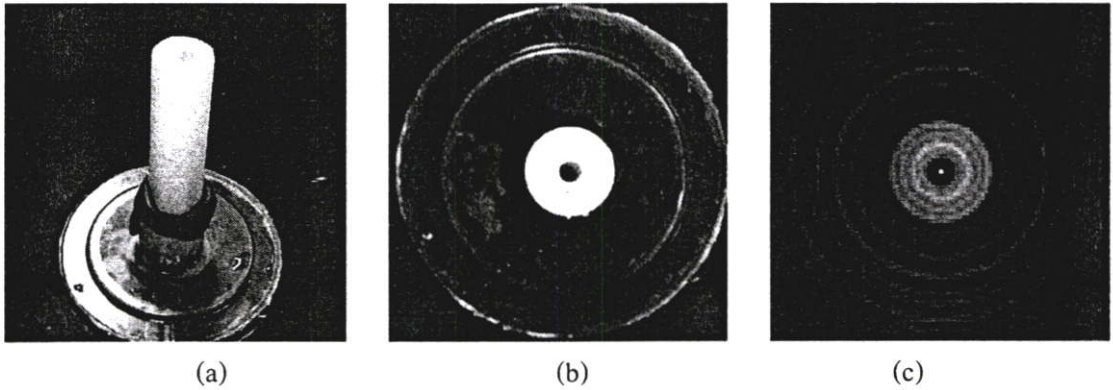
$o'(x,y)$ แทนค่าฟังก์ชันวัตถุที่ได้รับจากภาพตัดขวางที่ตำแหน่ง x,y ใดๆ



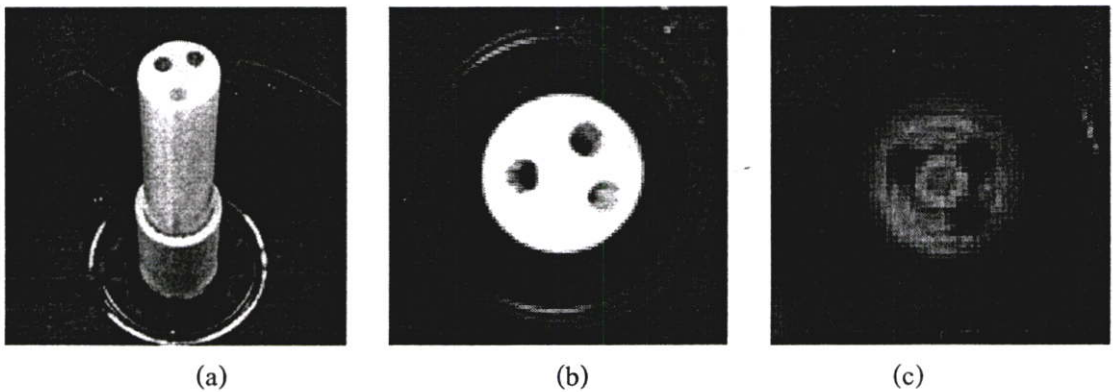
รูปที่ 5.20 ผลการสร้างภาพตัดขวางของเฟ้นทอมทรงกระบอกตันเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.1 เซนติเมตร

(a) ภาพถ่ายด้านข้างของเฟ้นทอม (b) ภาพถ่ายด้านบนของเฟ้นทอม

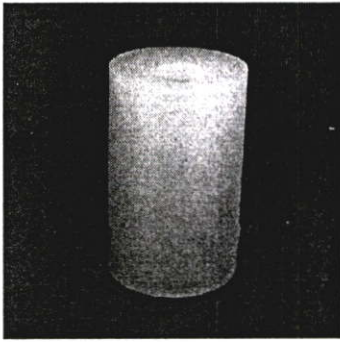
(c) ผลการสร้างภาพตัดขวาง [คำนีหักเหของเฟ้นทอม 1.055, MSE = 13.81%]



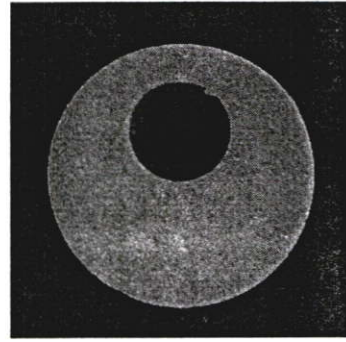
รูปที่ 5.21 ผลการสร้างภาพตัดขวางของแฟนทอมทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.35 เซนติเมตร ภายในมีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตร (a) ภาพถ่ายด้านข้างของแฟนทอม (b) ภาพถ่ายด้านบนของแฟนทอม (c) ผลการสร้างภาพตัดขวาง [ดัชนีหักเหของแฟนทอม 1.083 ค่า MSE ได้ 9.47%]



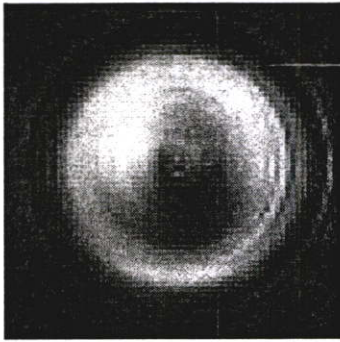
รูปที่ 5.22 ผลการสร้างภาพตัดขวางของแฟนทอมทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.35 เซนติเมตร ภายในมีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตร จำนวน 3 รู (a) ภาพถ่ายด้านข้างของแฟนทอม (b) ภาพถ่ายด้านบนของแฟนทอม (c) ผลการสร้างภาพตัดขวาง [ดัชนีหักเหของแฟนทอม 1.022 ค่า MSE = 16.92%]



(a) ภาพถ่ายด้านข้างของเทียนทอม

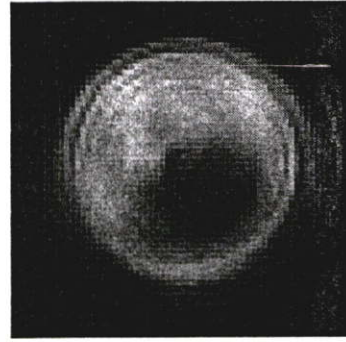


(b) ภาพถ่ายด้านบนของเทียนทอม



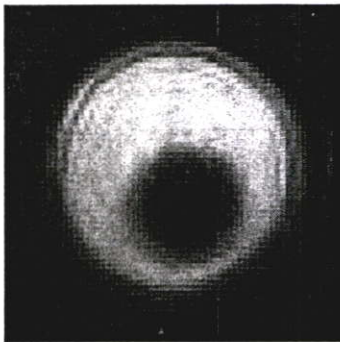
(c) ภาพตัดขวาง (4 Projections)

MSE : 42.33%



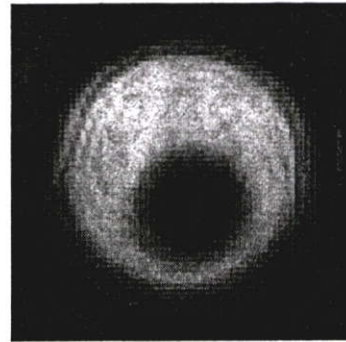
(d) ภาพตัดขวาง (9 Projections)

MSE : 29.71%



(e) ภาพตัดขวาง (18 Projections)

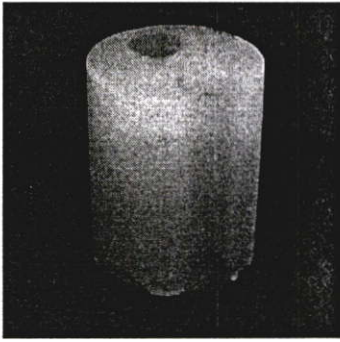
MSE : 16.11%



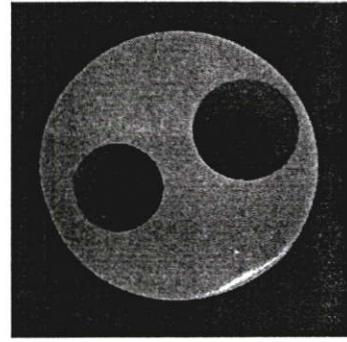
(f) ภาพตัดขวาง (36 Projections)

MSE : 13.29%

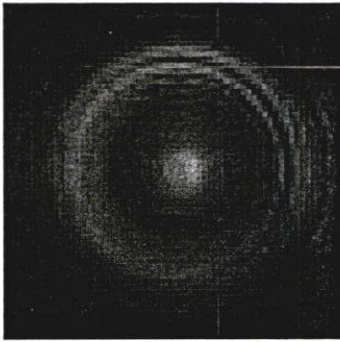
รูปที่ 5.23 ผลการสร้างภาพตัดขวาง และเปรียบเทียบคุณภาพของภาพที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชันของเทียนทอมทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ภายในมีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร



(a) ภาพถ่ายด้านข้างของเฟนทอม

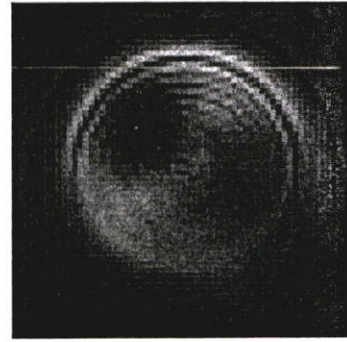


(b) ภาพถ่ายด้านบนของเฟนทอม



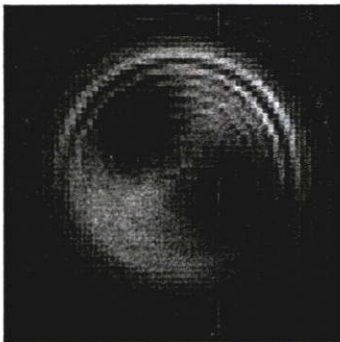
(c) ภาพตัดขวาง (4 Projections)

MSE : 56.27%



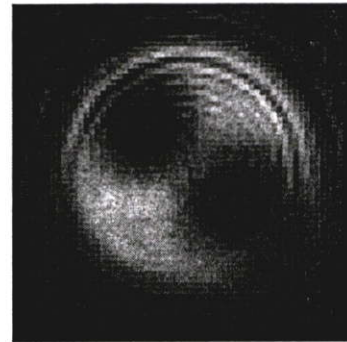
(d) ภาพตัดขวาง (9 Projections)

MSE : 33.04%



(e) ภาพตัดขวาง (18 Projections)

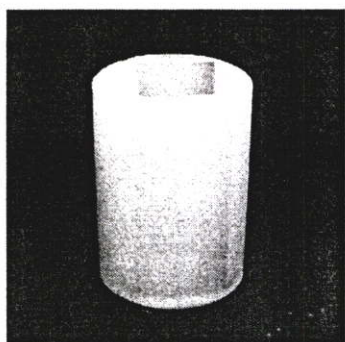
MSE : 20.73%



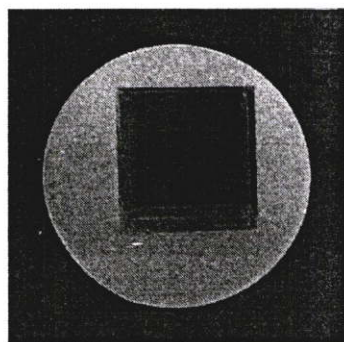
(f) ภาพตัดขวาง (36 Projections)

MSE : 18.86%

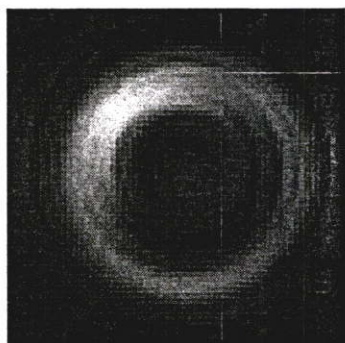
รูปที่ 5.24 ผลการสร้างภาพตัดขวาง และเปรียบเทียบคุณภาพของภาพที่ขึ้นกับจำนวน โปรเจคชันของเฟนทอมทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ภายในถูกเจาะเป็นรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร และ 1.8 เซนติเมตร



(a) ภาพถ่ายด้านข้างของเฟนทอม

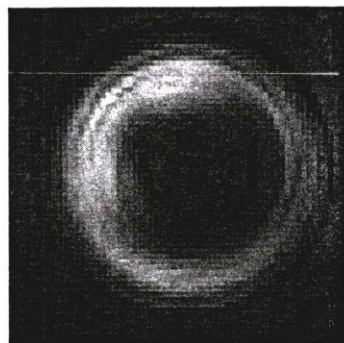


(b) ภาพถ่ายด้านบนของเฟนทอม



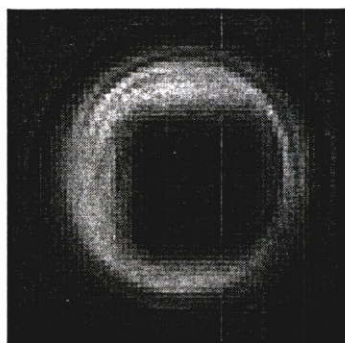
(c) ภาพตัดขวาง (4 Projections)

MSE : 58.77%



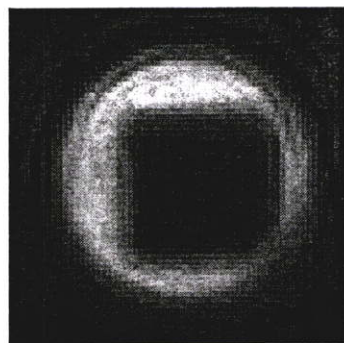
(d) ภาพตัดขวาง (9 Projections)

MSE : 38.16%



(e) ภาพตัดขวาง (18 Projections)

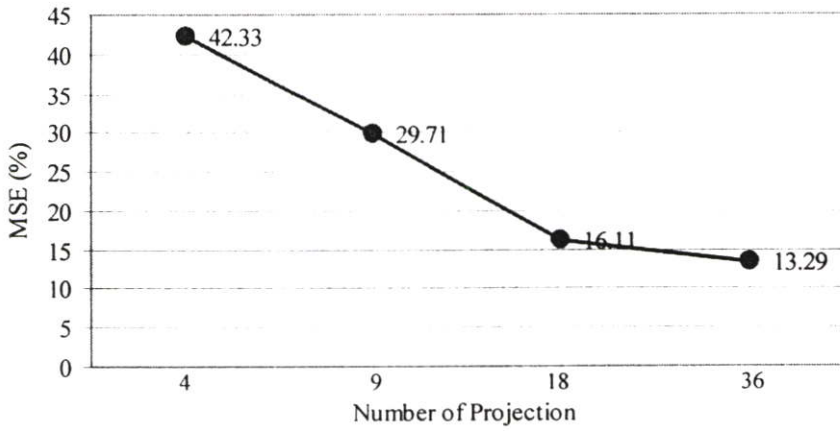
MSE : 21.13%



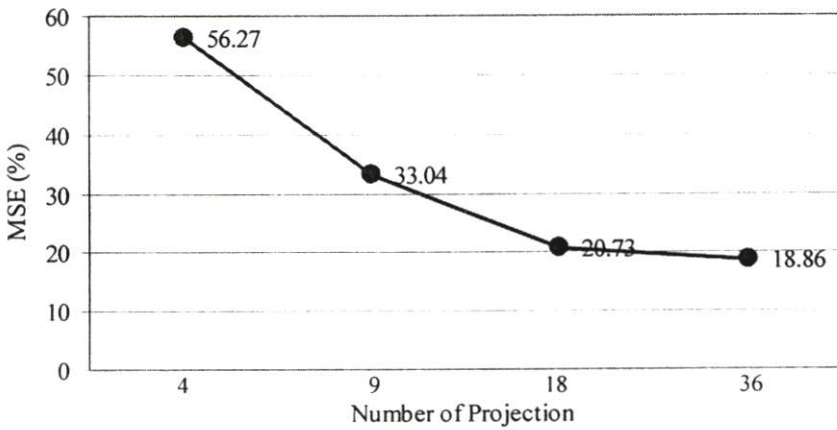
(f) ภาพตัดขวาง (36 Projections)

MSE : 19.41%

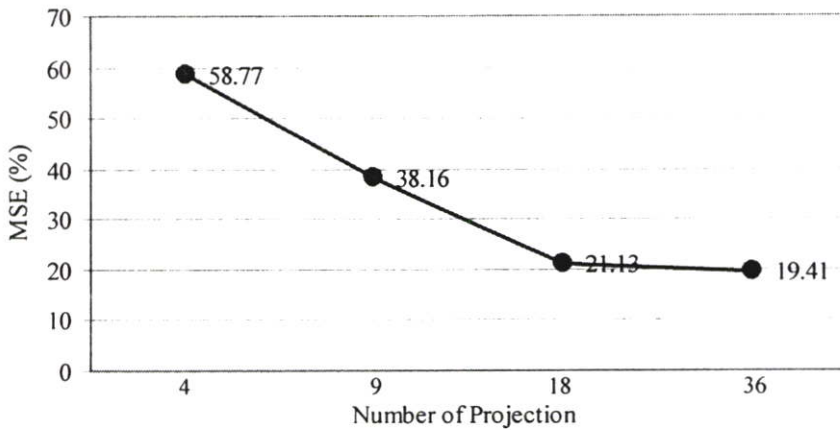
รูปที่ 5.25 ผลการสร้างภาพตัดขวาง และเปรียบเทียบคุณภาพของภาพที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชันของเฟนทอมทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ภายในมีช่องรูปทรงสี่เหลี่ยม



รูปที่ 5.26 กราฟเปรียบเทียบค่า MSE ที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชันของเฟ้นทอมรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.27 กราฟเปรียบเทียบค่า MSE ที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชันของเฟ้นทอมรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.28 กราฟเปรียบเทียบค่า MSE ที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชันของเฟ้นทอมรูปที่ 5.25

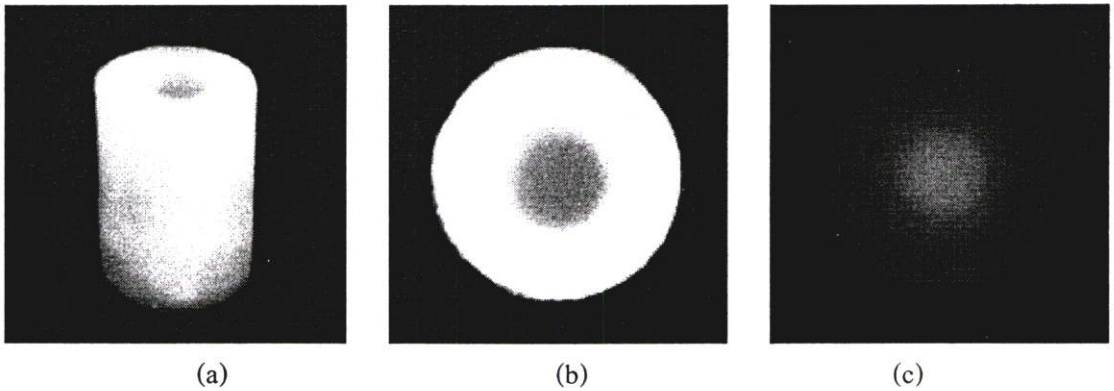
จากผลการทดลองที่ได้นำเสนอมานั้น ทำให้พบว่าทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่เกิดผลกระทบจากการเลี้ยวเบน สามารถที่จะสร้างภาพตัดขวางจากคลื่นอัลตราโซนิกในกรณีที่เป็นเฟ้นทอมเนื้อเดียวได้เป็นอย่างดี โดยจากกราฟรูปที่ 5.26-5.28 นั้นทำให้เห็นว่าจำนวน

โปรเจกชันรอบวัตถุนั้นมีผลต่อคุณภาพของภาพตัดขวางโดยตรง เมื่อจำนวนโปรเจกชันมีน้อยเกินไป จะส่งผลให้ไม่สามารถให้รายละเอียดภายในของวัตถุได้ โดยข้อมูลภาพตัดขวางที่ได้รับมานั้น จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับภาพตัดขวางที่ได้มาจากการสร้างภาพตัดขวางด้วยทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวาง สำหรับแหล่งกำเนิดที่ไม่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบนต่อไป

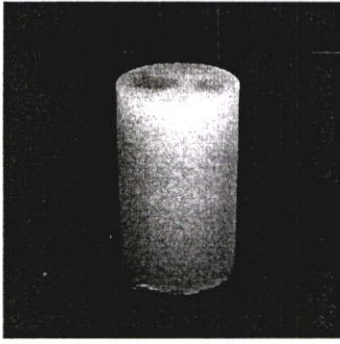
5.5 การทดลองสร้างภาพตัดขวางจากแฟนทอมที่มีความแตกต่างของเนื้อสารภายใน

การสร้างภาพตัดขวางของแฟนทอมที่มีความแตกต่างของเนื้อสารภายใน (Heterogeneous Phantom) นั้น ค่าระดับเทาที่ได้จากภาพตัดขวางถือเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากค่าของระดับเทาจะเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงความแตกต่างของความหนาแน่น ณ จุดต่างๆภายในวัตถุ โดยการทดลองในส่วนนี้มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบว่า ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่เกิดผลกระทบจากการเลี้ยวเบนที่นำมาใช้นี้ จะสามารถให้รายละเอียดของเนื้อสารที่แตกต่างกันดังกล่าวได้หรือไม่

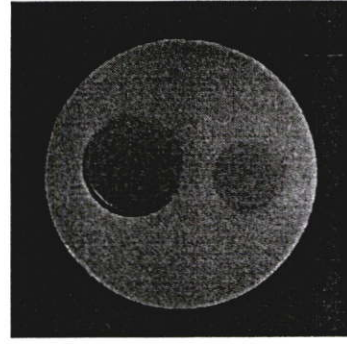
สำหรับการสร้างแฟนทอมที่มีเนื้อสารแตกต่างไปจากเดิมนั้น จะใช้การผสมสารละลายต่างๆ เช่น น้ำตาล เกลือ ฯลฯ ลงไปในขณะที่เจลาตินยังคงสถานะเป็นของเหลว ซึ่งจะทำให้ความหนาแน่นของแฟนทอมที่มีการผสมสารละลายเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยสามารถนำเจลาตินที่ยังเป็นของเหลวนี้ออกไปใช้ในเพิ่มเติมรายละเอียดภายในของแฟนทอมที่มีอยู่เดิมได้



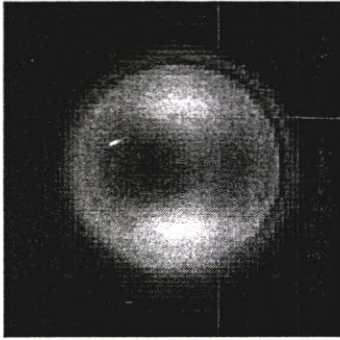
รูปที่ 5.29 ผลการสร้างภาพตัดขวางของแฟนทอมที่มีความแตกต่างของเนื้อสารภายใน ทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร ภายในมีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร (a) ภาพถ่ายด้านข้างของแฟนทอม (b) ภาพถ่ายด้านบนของแฟนทอม (c) ผลการสร้างภาพตัดขวาง [คำนวณค่า MSE ได้ 11.68%]



(a) ภาพถ่ายด้านข้างของแฟนทอม

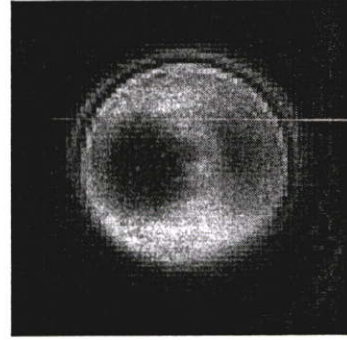


(b) ภาพถ่ายด้านบนของแฟนทอม



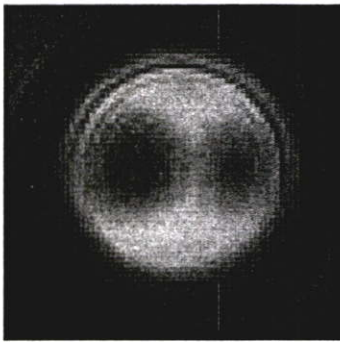
(c) ภาพตัดขวาง (4 Projections)

MSE : 31.31%



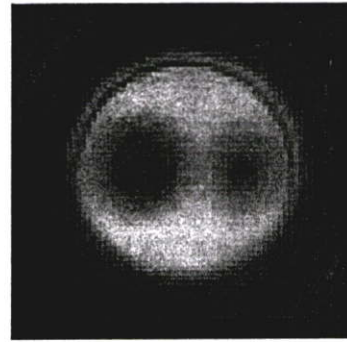
(d) ภาพตัดขวาง (9 Projections)

MSE : 26.29%



(e) ภาพตัดขวาง (18 Projections)

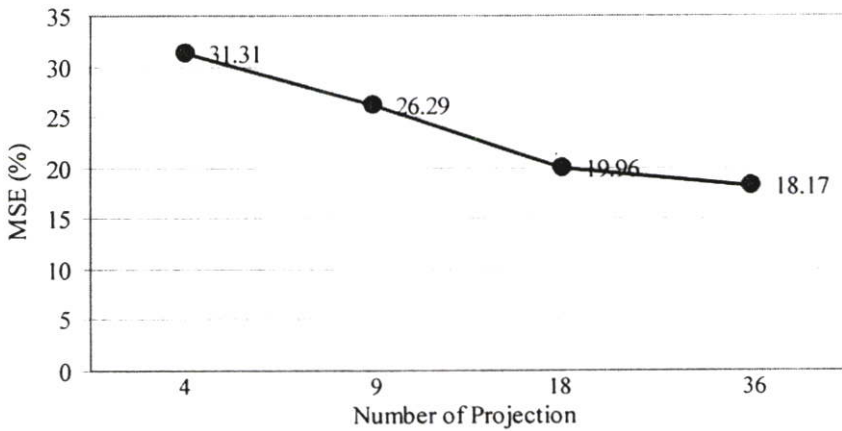
MSE : 19.96%



(f) ภาพตัดขวาง (36 Projections)

MSE : 18.17%

รูปที่ 5.30 ผลการสร้างภาพตัดขวางของแฟนทอมที่มีความแตกต่างของเนื้อสารภายใน และเปรียบเทียบคุณภาพของภาพที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชันของแฟนทอมทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร



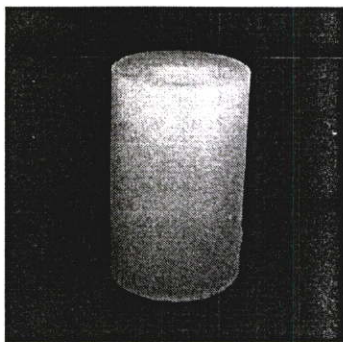
รูปที่ 5.31 กราฟเปรียบเทียบค่า MSE ที่ขึ้นกับจำนวน โปรเจกชันของเฟนทอมรูปที่ 5.30

จะเห็นได้ว่าผลของภาพตัดขวางที่ได้รับมานั้น สามารถเห็นถึงความแตกต่างกันระหว่างชั้นวัตถุที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันได้ โดยบริเวณระดับเทาที่มีค่าใกล้เคียงสีขาวนั้นจะบ่งบอกถึงจุดที่มีความหนาแน่นสูงกว่าบริเวณที่เป็นสีเทา และสีดำ ผลลัพธ์นี้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากวิธีการสร้างภาพตัดขวางจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ในหัวข้อถัดไป

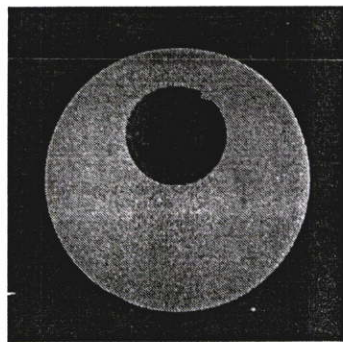
5.6 การเปรียบเทียบคุณภาพภาพตัดขวางระหว่างวิธีการทั้งสอง

จากสมมุติฐานที่ตั้งไว้เบื้องต้น ที่ว่าในการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิค ซึ่งเป็นคลื่นชนิดหนึ่งที่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบน เมื่อกระทบรอยต่อระหว่างตัวกลางที่แตกต่างกันนั้น จำเป็นที่จะต้องใช้ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวาง สำหรับแหล่งกำเนิดที่เกิดการเลี้ยวเบนโดยเฉพาะ ซึ่งต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ที่ประมาณการเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิคให้เป็นเส้นตรงเพื่อที่จะสามารถใช้ กระบวนการสร้างภาพตัดขวางที่ใช้สำหรับแหล่งกำเนิดที่ไม่เกิดการเลี้ยวเบนทั่วไปในการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิคได้ ซึ่งการประมาณการเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิคเป็นเส้นตรงดังกล่าวจะทำให้เกิดผลลัพธ์ที่มีข้อผิดพลาดบางประการที่สามารถเห็นได้ สำหรับในที่นี้การวัดคุณภาพของภาพตัดขวางจะอ้างอิงค่าของ MSE เป็นหลัก

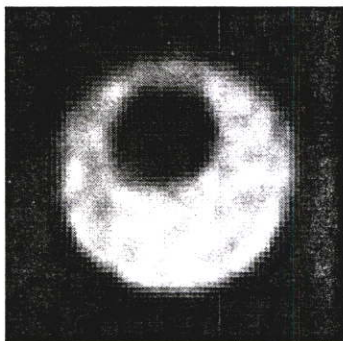
สำหรับผลลัพธ์ที่นำมาเทียบคุณภาพกันนั้น มีจำนวนโปรเจกชัน 36 โปรเจกชัน จำนวนจุดต่อข้อมูลโปรเจกชัน 80 จุด ระยะห่างระหว่างจุด 1 มิลลิเมตร โดยเป็นการเปรียบเทียบผลระหว่างวิธีการฟิลเตอร์แบ็ค โปรเจกชัน และวิธีการฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป



(a) ภาพถ่ายด้านข้างของเฟนทอม

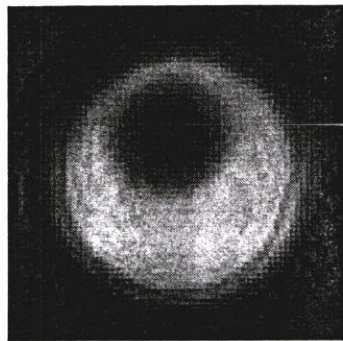


(b) ภาพถ่ายด้านบนของเฟนทอม



(c) ภาพตัดขวาง (FBP)

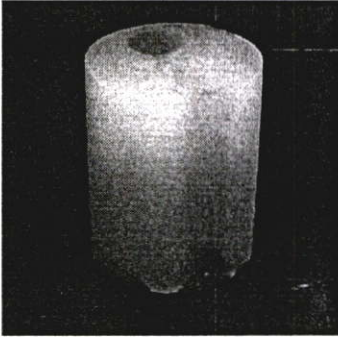
MSE : 19.52%



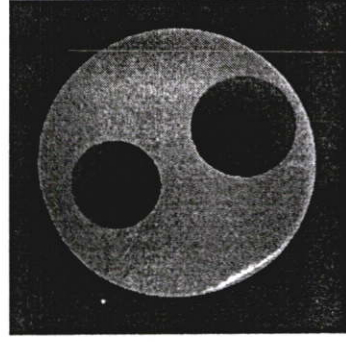
(d) ภาพตัดขวาง (Diffraction)

MSE : 13.29%

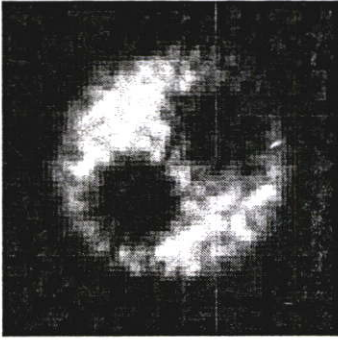
รูปที่ 5.32 การเปรียบเทียบคุณภาพของภาพตัดขวางระหว่างวิธีการฟิลเตอร์แบ็คโปรเจกชัน และวิธีการฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป ของเฟนทอมที่เป็นสารเนื้อเดียวทรงกระบอก



(a) ภาพถ่ายด้านข้างของแพนทอม

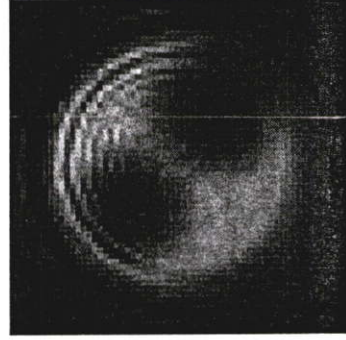


(b) ภาพถ่ายด้านบนของแพนทอม



(c) ภาพตัดขวาง (FBP)

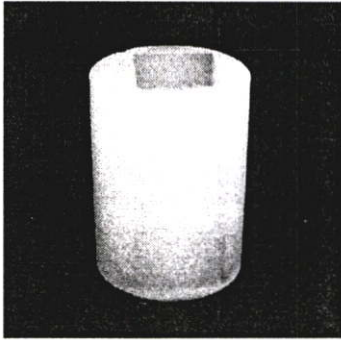
MSE : 31.85%



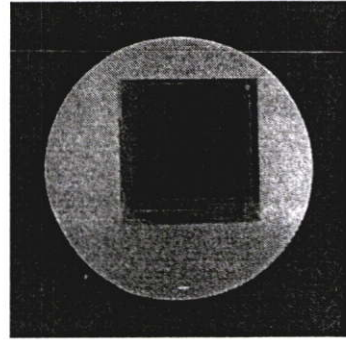
(d) ภาพตัดขวาง (Diffraction)

MSE : 18.86%

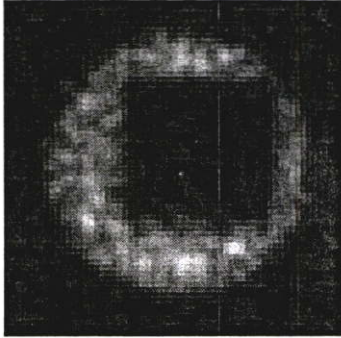
รูปที่ 5.33 การเปรียบเทียบคุณภาพของภาพตัดขวางระหว่างวิธีการฟิลเตอร์แบ็ค โปรเจกชัน และวิธีการฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป ของแพนทอมที่เป็นสารเนื้อเดียวทรงกระบอก



(a) ภาพถ่ายด้านข้างของแฟนทอม

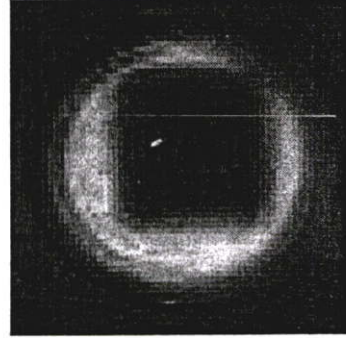


(b) ภาพถ่ายด้านบนของแฟนทอม



(c) ภาพตัดขวาง (FBP)

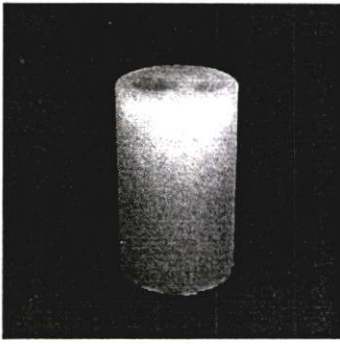
MSE : 26.63%



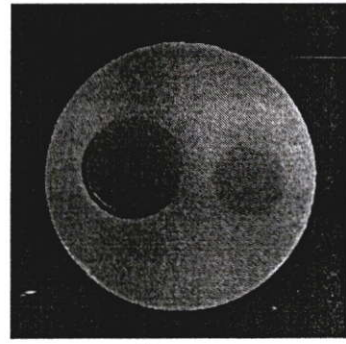
(d) ภาพตัดขวาง (Diffraction)

MSE : 19.41%

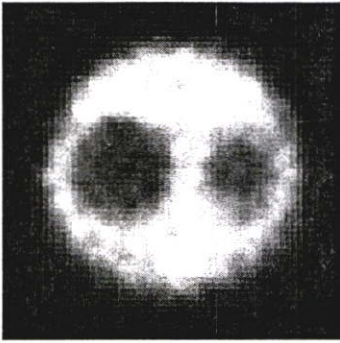
รูปที่ 5.34 การเปรียบเทียบคุณภาพของภาพตัดขวางระหว่างวิธีการฟิลเตอร์แบ็ค โปรเจกชัน และวิธีการฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป ของแฟนทอมที่เป็นสารเนื้อเดียวทรงกระบอก



(a) ภาพถ่ายด้านข้างของแฟนทอม

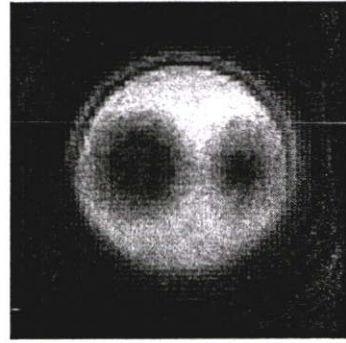


(b) ภาพถ่ายด้านบนของแฟนทอม



(c) ภาพตัดขวาง (FBP)

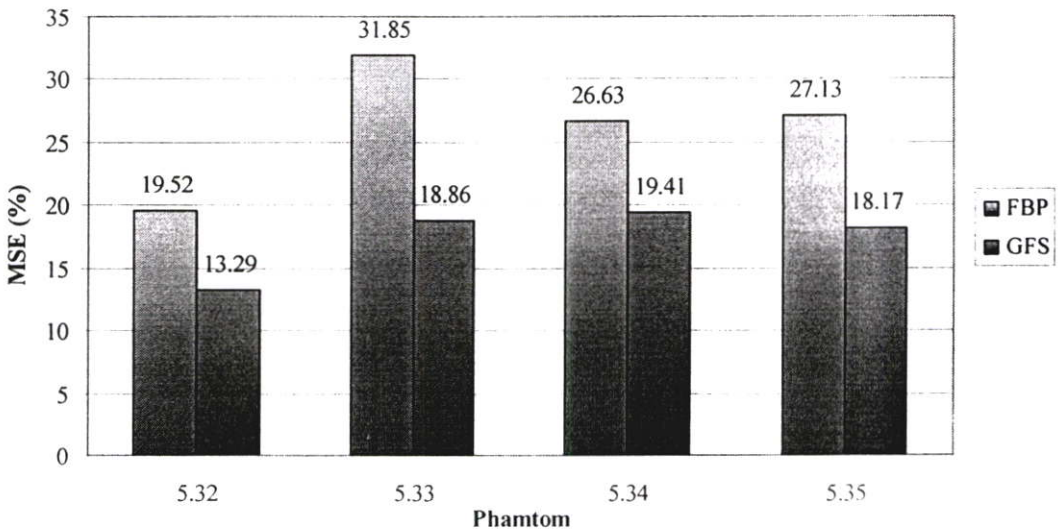
MSE : 27.13%



(d) ภาพตัดขวาง (Diffraction)

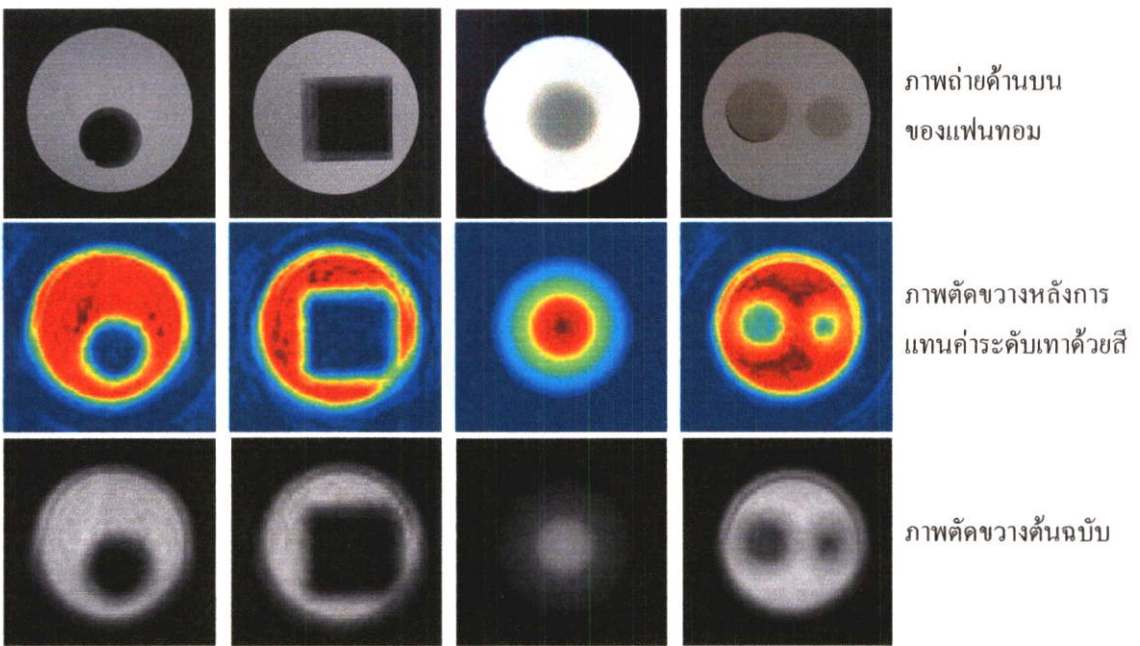
MSE : 18.17%

รูปที่ 5.35 การเปรียบเทียบคุณภาพของภาพตัดขวางระหว่างวิธีการฟิลเตอร์แบ็คโปรเจกชัน และวิธีการฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป ของแฟนทอมที่มีความแตกต่างของเนื้อสารภายใน



รูปที่ 5.36 กราฟเปรียบเทียบค่า MSE ระหว่างวิธีการ FBP และ GFS ของแฟนทอมรูปที่ 5.32-5.35

จากกราฟสรุปผลค่าของ MSE ที่เกิดขึ้นในการสร้างภาพตัดขวางระหว่างวิธีการฟิลเตอร์แบ็คโปรเจกชัน (Filtered Backprojection : FBP) อันเป็นทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่ไม่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบน และวิธีการฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป (Generalized Fourier Slice : GFS) ซึ่งเป็นทฤษฎีสร้างภาพตัดขวางที่ใช้สำหรับแหล่งกำเนิดที่มีผลกระทบของการเลี้ยวเบน ทำให้สามารถที่จะสรุปได้ว่า ในการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิกนั้น การใช้ทฤษฎีสร้างภาพตัดขวางที่ใช้สำหรับแหล่งกำเนิดที่มีผลกระทบของการเลี้ยวเบนนั้นให้ภาพตัดขวางที่มีคุณภาพดีกว่าภาพตัดขวางที่ได้จาก การสร้างภาพตัดขวางโดยใช้ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่ไม่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบน ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้



รูปที่ 5.37 การแทนภาพตัดขวางระดับเทาด้วยระดับสี

สำหรับการพิจารณารายละเอียดของภาพตัดขวางที่ได้รับมานั้น เราสามารถใช้เทคนิคแทนค่าระดับเทาด้วยระดับสี (Colormap) ซึ่งช่วยให้สามารถพิจารณาระดับเทาที่มีระดับความแตกต่างกันไม่มากนักของภาพตัดขวางได้ง่ายยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 5.37

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ที่ต้องการสร้างภาพตัดขวางของวัตถุด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยใช้ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวาง สำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบนของคลื่นนั้น ถือว่าประสบผลสำเร็จดังที่ได้ตั้งเป้าหมายเอาไว้ หากแต่ทำให้พบถึงข้อจำกัดต่างๆมากมาย ในการสร้างภาพตัดขวางด้วยทฤษฎีดังกล่าว ประการแรก ข้อจำกัดทางด้านคุณสมบัติของวัตถุที่จะใช้ในการสร้างภาพตัดขวาง วัตถุที่ใช้ในการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้ทฤษฎีนี้ นั้น ต้องมีค่าดัชนีหักเหต่ำ ซึ่งเป็นข้อจำกัดทางทฤษฎี โดยจากการทดลองนั้นได้ใช้แฟนทอมที่สร้างขึ้นจากเจลลาติน จึงสามารถควบคุมค่าดัชนีหักเหต่างๆได้ แต่ทว่าในการนำไปใช้งานจริงนั้น วัตถุต่างๆโดยส่วนใหญ่จะมีค่าดัชนีหักเหที่มากกว่านี้ทั้งสิ้น ซึ่งในช่วงเวลาที่ดำเนินงานวิจัยชิ้นนี้อยู่นั้น ได้มีความพยายามที่จะสร้างภาพตัดขวางของวัตถุอื่นๆ เช่น กระจ่างปลา ดับไก่อ ผลไม้เปลือกบาง ฯลฯ แต่ไม่สามารถทำได้สำเร็จ ซึ่งข้อจำกัดข้อนี้นับเป็นอุปสรรคสำคัญที่ทำให้ยากจะพัฒนาให้เป็นเครื่องมือเชิงพาณิชย์ได้ ประการที่สอง ข้อจำกัดทางด้านขนาดของวัตถุ ข้อจำกัดข้อนี้นั้นถือเป็นข้อจำกัดทางด้านทฤษฎีอีกเช่นเดียวกัน โดยเป็นข้อจำกัดที่ขึ้นอยู่กับความถี่คลื่นอัลตราโซนิกที่ใช้งาน ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากเรื่องของความยาวคลื่นดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ซึ่งทำให้ ความถี่ค่าหนึ่งๆ ไม่สามารถสร้างภาพตัดขวางของวัตถุได้ทุกขนาด โดยหากใช้คลื่นความถี่สูงจะสามารถสร้างภาพตัดขวางของวัตถุขนาดเล็กได้ เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้นจึงทำให้สามารถตรวจวัดรายละเอียดเล็กๆได้เป็นอย่างดี แต่การที่ความยาวคลื่นสั้นนี้เอง จึงทำให้เมื่อทำการหาภาพตัดขวางของวัตถุขนาดใหญ่ ข้อมูลการเลื่อนทางเฟสก็มีค่าเกินกว่าช่วงของคลื่น ซึ่งเป็นความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ในทางตรงกันข้าม เมื่อใช้คลื่นที่มีความถี่ต่ำซึ่งมีความยาวคลื่นมากกว่า จะสามารถสร้างภาพตัดขวางของวัตถุที่มีขนาดใหญ่กว่าได้ แต่จากการที่มีความยาวคลื่นยาวนี้เอง ทำให้ไม่สามารถวัดความแตกต่างของรายละเอียดเล็กๆ ที่สั้นกว่าความยาวคลื่นได้

สำหรับเรื่องของเปรียบเทียบคุณภาพของภาพตัดขวาง ที่สร้างจากคลื่นอัลตราโซนิก ระหว่างการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้ทฤษฎี การสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบนของคลื่น และการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวาง สำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่ไม่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบนของคลื่น จะพบว่าในกรณีของการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิกนี้ ภาพตัดขวางที่ได้รับจากทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับ

แหล่งกำเนิดชนิดที่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบนของคลื่นนั้นมีคุณภาพสูงกว่าจริง ดังผลการทดลองในบทที่ 5 ซึ่งตรงตามสมมุติฐานที่ได้ตั้งไว้แต่ต้น

จากการทำงานวิจัยชิ้นนี้นั้น เป็นการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิกโดยใช้ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบนของคลื่น ในโหมดส่งผ่าน (Transmission Mode) ดังนั้นในส่วนของงานวิจัยที่เหมาะสมในการพัฒนาต่อจากงานวิจัยนี้คือ การสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยใช้ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบนของคลื่นในโหมดสะท้อน (Reflection Mode) ซึ่งยังไม่ได้ทำการพิสูจน์ในงานวิจัยชิ้นนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Slaney, M., "Imaging with Diffraction Tomography," Ph.D. Thesis, Purdue University, 1895.
- [2] Heinrich Kuttruff, "Ultrasonics Fundamentals and Applications", Elsevier Applied Science, London and New York, 1991.
- [3] Jofre, L., Hasley, M. S., Broquetas, A., Reyes, E., Ferrando, and M. Elias-fuste, "Medical Imaging with Microwave tomographic Scanner", IEEE. Trans. Biomed. Eng., vol.37, no. 3, pp. 303-312, 1990.4.
- [4] A. C. Kak and M. Slaney, Principles of Computerized Tomographic Imaging. New York: IEEE Press, 1988.
- [5] Adirak Romputtal, "Ultrasonic Computed Tomography using Algebraic Reconstruction Technique", Master Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2547
- [6] Bolomey, J., -C., "Recent European Developments in Active Microwave Imaging for Industrial, Scientific, and Medical Application," IEEE. Trans. Microwave Theory Tech., vol. 37., no. 12, pp. 2109-2117, 1989.
- [7] Molyneux, J. E. and Written, A, "Diffraction Tomographic Imaging in a Monostatic Measurement Environment," IEEE. Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 31, no. 2, pp. 507-511, 1993.
- [8] Kak, A. C. and Slaney, M., "Principles of Computerized Tomographic Imaging", IEEE Press, NY, 1988.
- [9] Mueller, R. K., Kaveh, M. and Wade, G., "Reconstructive Tomography and Applications to Ultrasonics," Proc. IEEE, vol. 67, pp. 567-587, 1979.
- [10] A. Ishimaru, "Wave Propagation and Scattering in Random Media". New York, NY: Academic Press, 1978.

ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. C. Pintavirooj, K. Jaruwongrunsee, W. Withayachumnankul, M. Sangworasil, K. Hamamoto and , S. Taertulakarn, “Ultrasonic Refractive Index and Sound Velocity Tomography”, IEEE Tencon 2004, Lotus Hotel Gradsaungaew, CheingMai, Thailand.
2. C. Pintavirooj, K. Jaruwongrunsee, W. Withayachumnankul, K. Hamamoto and S. Daochai, “Ultrasonic Diffraction Tomography : The Experimental Result”, The 13-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG 2005) , Univ. of West Bohemia, Plzen, Czech Republic
3. C. Pintavirooj, K. Jaruwongrunsee and , K. Hamamoto “Improved Technique for Deriving Projection Data for Ultrasonic Diffraction Tomography”, World Congress in Ultrasonic, Beijing, China, Aug 30th,2005 September 1st, 2005.
4. T. Onemanisone, K. Jaruwongrunsee, K. Hamamoto and C. Pintavirooj, “Ultrasonic Diffraction Tomography with Multiple Frequency Synthesis”, The 12th International Conference on Biomedical Engineering, 7-10 December 2005, Suntec Singapore International Convention and Exhibition Centre, Singapore.

ประวัติผู้เขียน

นายคทา จารวงศ์รังสี เกิดเมื่อวันที่ 6 มกราคม พ.ศ.2525 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปีการศึกษา 2546 และสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิชานิเทศศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช เมื่อปีการศึกษา 2547 โดยได้เข้าศึกษาในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปีการศึกษา 2547 ในระหว่างที่ทำการศึกษา ได้เข้าปฏิบัติงานเป็นผู้ช่วยนักวิจัยประจำห้องปฏิบัติการวิจัยสัญญาณชีวภาพและประมวลผลภาพ (Biomedical Signal and Image Processing Laboratory) ในสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (ReCCIT) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และมีส่วนช่วยดูแลการปฏิบัติการทดลองของนักศึกษาปริญญาตรี ในการทดลองทางด้าน GPIB และ FPGA โดยงานวิจัยที่ทำในระหว่างศึกษานั้นเป็นทางด้านคลื่นอัลตราโซนิก การประมวลผลภาพ การสร้างภาพตัดขวางทางแพทย์ และงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป