

เทคนิคการวัดระยะทางโดยอาศัยความแตกต่างเฟสของสัญญาณอัลตราโซนิก  
สองความถี่

DISTANCE MEASUREMENT BASED ON PHASE DIFFERENCE OF DUAL  
ULTRASONIC FREQUENCIES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-010-144

เทคนิคการวัดระยะทางโดยอาศัยความแตกต่างเฟสของสัญญาณอัลตราโซนิก  
สองความถี่

DISTANCE MEASUREMENT BASED ON PHASE DIFFERENCE OF DUAL  
ULTRASONIC FREQUENCIES



มัณฑุพร จงแจ่มใส  
MUNCHUPHON CHONGCHAMSAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
KMITL-2018-EN-M-010-144  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบส่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DISTANCE MEASUREMENT BASED ON PHASE DIFFERENCE OF DUAL  
ULTRASONIC FREQUENCIES



MUNCHUPHON CHONGCHAMSAI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้ในเชิงพาณิชย์โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ 2018 อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2018-EN-M-010-144



COPYRIGHT 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

FACULTY OF ENGINEERING

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการวัดระยะทางโดยอาศัยความแตกต่างเฟสของสัญญาณอัลตราโซนิกสองความถี่
นักศึกษา	นางสาวมัญชุพร จงแจ่มใส
รหัสประจำตัว	60601134
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการในการวัดระยะทางซึ่งใช้ความแตกต่างเฟสของสัญญาณอัลตราโซนิกที่มีองค์ประกอบสัญญาณ 2 ความถี่ ในการหาค่าความแตกต่างเฟสนั้นสัญญาณรูปไซน์ที่มีองค์ประกอบความถี่ 2 ความถี่จะเป็นอินพุตให้กับตัวส่งอัลตราโซนิก เมื่อสัญญาณนี้สะท้อนและรับมาที่ตัวรับอัลตราโซนิก สัญญาณนี้จะถูกนำมาแยกกำลังสอง จากคุณสมบัติการเลื่อนเวลาของการแปลงฟูเรียร์ ค่าความแตกต่างเฟสนี้จะถูกตรวจจับและนำไปคำนวณหาเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทาง (Time of flight) สุดท้ายค่าระยะทางก็จะถูกคำนวณได้จากค่าเวลานี้ โดยบอร์ดประมวลผลดิจิทัล TMS320C6713 จะถูกนำมาใช้เพื่อสร้างสัญญาณสองความถี่และบันทึกสัญญาณ จากนั้นจะใช้โปรแกรม MATLAB ในการดำเนินการทางคณิตศาสตร์และคำนวณค่าระยะทางจากสัญญาณที่บันทึกไว้ จากผลการทดลองพบว่า สำหรับการวัดระยะทาง ในกรณีความต่างความถี่ 750 Hz ระยะทางผิดพลาดเฉลี่ยคือ 0.25 เซนติเมตร กรณีความต่างความถี่ 375 Hz ระยะทางผิดพลาดเฉลี่ยคือ 0.39 เซนติเมตร กรณีความต่างความถี่ 100 Hz ระยะทางผิดพลาดเฉลี่ยคือ 0.95 เซนติเมตรและกรณีใช้ความต่างความถี่ 40 Hz ระยะทางผิดพลาดเฉลี่ยคือ 2.81 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis</b>	DISTANCE MEASUREMENT BASED ON PHASE DIFFERENCE OF DUAL ULTRASONIC FREQUENCIES
<b>Student</b>	Miss Munchuphon Chongchamsai
<b>Student ID.</b>	60601134
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Telecommunications Engineering
<b>Year</b>	2018
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Paramote Wardkein

## ABSTRACT

This thesis proposes a simple method of distance measurement utilizing phase difference of two reflected ultrasonic frequencies. To obtain the phase difference, an alternating signal which contains two sinusoidal signals having different frequencies is fed to an ultrasonic transmitter. When the transmitted signal is reflected and received by the ultrasonic receiver, the received signal is first squared. Then, a time shift property of Fourier transform is applied to the squared signal to acquire the phase difference. The phase difference is converted to a time-of-flight (TOF) value and turned to be the distance. To experiment the proposed technique, a DSP TMS620C6713 board is employed to generate the alternating signal as well as to receive the reflected signal, and process the received signal by using MATLAB program. The results show that the obtained distance by this approach has fairly low error, which are only 0.25 centimeters for 750 Hz of frequencies difference, 0.39 centimeters for 375 Hz of frequencies difference, 0.95 centimeters for 100 Hz of frequencies difference and 2.81 centimeters for 40 Hz of frequencies difference.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับสำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน และ รศ.ดร.จิรสุตา โกษิยาภรณ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้ และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณนายศักรินทร์ สิ้นไชย ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้

ขอขอบคุณนางสาวภัทรพร ศิริศิลป์, นางสาวเปรี๊ยะ วงษ์เสรี, นางสาวพรณิภา จินะแก้ว ที่คอยช่วยเหลือในการจัดเก็บผลการทดลอง การเรียน ความบันเทิงและเป็นเพื่อนร่วมเรียนด้วยกันมา

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่คอยสนับสนุนและให้ความช่วยเหลือ

สุดท้ายต้องขอขอบคุณบิดา มารดาที่คอยเป็นกำลังใจและส่งเสริมข้าพเจ้าในทุกๆ อย่าง

มัณฑุพร จงแจ่มใส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 อัลตราโซนิก.....	5
2.2.1 ความหมายของอัลตราโซนิก.....	5
2.2.2 คุณสมบัติของคลื่นอัลตราโซนิก.....	5
2.2.3 เซนเซอร์อัลตราโซนิก.....	7
2.3 การวัดระยะทางด้วยอัลตราโซนิก.....	8
2.3.1 การวัดระยะทางด้วยวิธีการ TOF.....	8
2.3.2 การวัดระยะทางด้วยวิธีการเลื่อนของเฟส.....	9
2.3.3 ปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการวัดระยะทางด้วยอัลตราโซนิก.....	10
2.3.3.1 การวางตำแหน่งเซนเซอร์อัลตราโซนิก.....	11
2.3.3.2 อุณหภูมิ.....	11
2.3.3.3 ตัวกลาง.....	12
2.4 พื้นฐานของสัญญาณและระบบ.....	12
2.4.1 ระบบที่ปราศจากความผิดพลาด.....	13
2.4.2 อนุกรมฟูเรียร์.....	16
2.4.3 การแปลงฟูเรียร์.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 2.4.1 ระบบที่ปราศจากความผิดพลาด.....

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 2.4.2 อนุกรมฟูเรียร์.....

2.4.3 การแปลงฟูเรียร์.....

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 การวัด ความคลาดเคลื่อน ความถูกต้องและความเที่ยงตรง.....	18
2.5.1 การวัด.....	18
2.5.2 ความผิดพลาด.....	18
2.5.3 ความถูกต้อง.....	19
2.5.4 ความเที่ยงตรง.....	19
2.6 การใช้งานบอร์ดประมวลผลดิจิทัล TMS320C6713.....	19
2.6.1 ภาพรวมของบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C6713.....	19
2.6.2 โปรแกรม Code Composer Studio (CCS).....	20
บทที่ 3 หลักการวัดระยะทางที่นำเสนอ.....	21
3.1 กล่าวนำ.....	21
3.2 การวัดระยะทางด้วยสัญญาณความถี่ 1 ความถี่.....	21
3.3 การวัดระยะทางด้วยที่นำเสนอโดยใช้สัญญาณความถี่ 2 ความถี่.....	23
3.4 การดำเนินการวัดระยะทางด้วยวิธีการที่นำเสนอ.....	24
3.4.1 การสร้างสัญญาณรูปไซน์ที่มีองค์ประกอบความถี่ 2 ความถี่.....	25
3.4.2 การบันทึกสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากวัตถุ.....	27
3.4.3 การนำสัญญาณที่บันทึกมาดำเนินการทางคณิตศาสตร์.....	28
3.4.4 การตรวจจับผลตอบสนองทางเฟส.....	29
3.4.5 การคำนวณระยะทาง.....	29
3.4.6 ขอบเขตของการวัดระยะทาง.....	29
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	31
4.1 กล่าวนำ.....	31
4.2 การตั้งสมมติฐานและทดสอบสมมติฐานด้วยโปรแกรม MATLAB.....	31
4.3 การจำลองการวัดระยะทางด้วยโปรแกรม MATLAB.....	33
4.3.1 ระยะทางมากที่สุดเทียบกับความต่างความถี่.....	33
4.3.2 กรณีความต่างความถี่ 20 Hz.....	34
4.3.3 กรณีความต่างความถี่ 500 Hz.....	35
4.3.4 กรณีความต่างความถี่ 2 KHz.....	37
4.4 การใช้ออกแบบการทดลองและการบันทึกผลการวัดระยะทาง.....	38
4.5 ผลการสร้างสัญญาณรูปไซน์ที่มีองค์ประกอบความถี่ 2 ความถี่.....	39

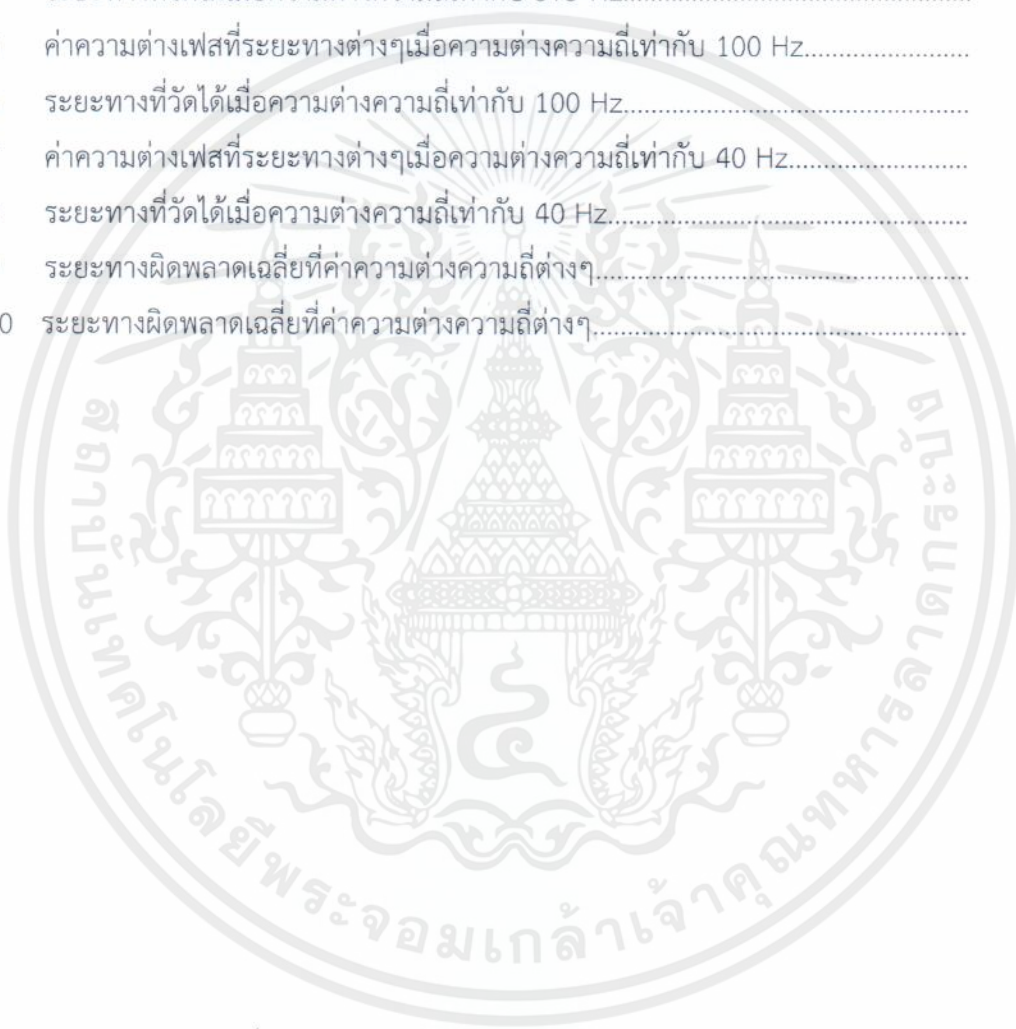
## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 ผลการบันทึกและดำเนินการทางคณิตศาสตร์สัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากวัตถุ.....	42
4.7 ผลการตรวจจับผลตอบสนองทางเฟสด้วยโปรแกรม MATLAB.....	45
4.7.1 กรณีความถี่เท่ากับ 750 Hz.....	45
4.7.2 กรณีความถี่เท่ากับ 375 Hz.....	46
4.7.3 กรณีความถี่เท่ากับ 100 Hz.....	47
4.7.4 กรณีความถี่เท่ากับ 40 Hz.....	48
4.8 ผลการวัดระยะทางที่นำเสนอ.....	49
4.8.1 กรณีความถี่เท่ากับ 750 Hz.....	49
4.8.2 กรณีความถี่เท่ากับ 375 Hz.....	52
4.8.3 กรณีความถี่เท่ากับ 100 Hz.....	56
4.8.4 กรณีความถี่เท่ากับ 40 Hz.....	59
4.9 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	62
4.10 การเปรียบเทียบวิธีการในวิทยานิพนธ์กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	62
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	65
5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	65
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	66
เอกสารอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก.....	69
ประวัติผู้เขียน.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ความเร็วคลื่นเสียงในตัวกลางชนิดต่างๆ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	12
2.2	คุณสมบัติของคู่การแปลงฟูเรียร์.....	18
4.1	ค่าความต่างเฟสที่ระยะทางต่างๆเมื่อความต่างความถี่เท่ากับ 750 Hz.....	49
4.2	ระยะทางที่วัดได้เมื่อความต่างความถี่เท่ากับ 750 Hz.....	50
4.3	ค่าความต่างเฟสที่ระยะทางต่างๆเมื่อความต่างความถี่เท่ากับ 375 Hz.....	52
4.4	ระยะทางที่วัดได้เมื่อความต่างความถี่เท่ากับ 375 Hz.....	53
4.5	ค่าความต่างเฟสที่ระยะทางต่างๆเมื่อความต่างความถี่เท่ากับ 100 Hz.....	56
4.6	ระยะทางที่วัดได้เมื่อความต่างความถี่เท่ากับ 100 Hz.....	57
4.7	ค่าความต่างเฟสที่ระยะทางต่างๆเมื่อความต่างความถี่เท่ากับ 40 Hz.....	59
4.8	ระยะทางที่วัดได้เมื่อความต่างความถี่เท่ากับ 40 Hz.....	60
4.9	ระยะทางผิดพลาดเฉลี่ยที่ค่าความต่างความถี่ต่างๆ.....	62
4.10	ระยะทางผิดพลาดเฉลี่ยที่ค่าความต่างความถี่ต่างๆ.....	63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การสะท้อนของคลื่นเสียง.....	6
2.2	การหักเหของคลื่นเสียง.....	6
2.3	การเลี้ยวเบนของคลื่นเสียง.....	7
2.4	การแทรกสอดของคลื่นเสียง.....	7
2.5	การวัดระยะทางด้วยวิธี TOF.....	8
2.6	การเลื่อนเฟสของสัญญาณรูปไซน์.....	9
2.7	กระบวนการหาค่าความต่างเฟสของสัญญาณอัลตราโซนิก.....	10
2.8	การเว้นระยะห่างของเซนเซอร์อัลตราโซนิก.....	11
2.9	การวางแผนระนาบของวัตถุ.....	11
2.10	ระบบ.....	13
2.11	ระบบที่ปราศจากความผิดพลาด.....	14
2.12	การเปรียบเทียบระหว่างโดเมนเวลาและโดเมนความถี่.....	17
2.13	บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C6713.....	20
3.1	ระบบของการวัดระยะทางด้วยอัลตราโซนิก.....	21
3.2	ระบบของการวัดระยะทางด้วยสัญญาณอัลตราโซนิก 2 ความถี่.....	23
3.3	บล็อกไดอะแกรมของการวัดระยะทาง.....	24
3.4	โปรแกรม Code Composer Studio.....	28
3.4	หน้าต่างตั้งค่าคุณสมบัติการพล็อตกราฟ.....	33
4.1	ผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของ $y^2(t)$ หลังจากทำ FFT.....	32
4.2	ผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของ $y^2(t)$ หลังจากทำ FFT ที่ความถี่ 750 Hz.....	33
4.3	กราฟความสัมพันธ์ระยะทางมากที่สุดที่วัดได้กับค่าความต่างความถี่.....	34
4.4	ผลตอบสนองทางขนาดและผลตอบสนองทางเฟส เมื่อความต่างความถี่มีค่า 20 Hz...	35
4.5	ผลตอบสนองทางขนาดและผลตอบสนองทางเฟส เมื่อความต่างความถี่มีค่า 500 Hz.	36
4.6	ผลตอบสนองทางขนาดและผลตอบสนองทางเฟส เมื่อความต่างความถี่มีค่า 2 kHz...	38
4.7	การทดลองวัดระยะทาง.....	38
4.8	สัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40.6 kHz กับ 39.85 kHz สร้างจากบอร์ด DSP.....	40
4.9	สัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40.6 kHz กับ 39.85 kHz ซึ่งจำลองจากโปรแกรม MATLAB.....	40
4.10	สัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40.5 kHz กับ 40.125 kHz สร้างจากบอร์ด DSP.....	40

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 สัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40.5 kHz กับ 40.125 kHz จำลองจากโปรแกรม MATLAB.....	41
4.12 สัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.1 kHz สร้างจากบอร์ด DSP.....	41
4.13 สัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.1 kHz จำลองจากโปรแกรม MATLAB.....	41
4.14 สัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.04 kHz สร้างจากบอร์ด DSP.....	42
4.15 สัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.04 kHz จำลองจากโปรแกรม MATLAB.....	42
4.16 สัญญาณที่สะท้อนกลับจากวัตถุกรณีความต่างความถี่ 750 Hz.....	43
4.17 สัญญาณที่สะท้อนกลับจากวัตถุกรณีความต่างความถี่ 375 Hz.....	44
4.18 สัญญาณที่สะท้อนกลับจากวัตถุกรณีความต่างความถี่ 100 Hz.....	44
4.19 สัญญาณที่สะท้อนกลับจากวัตถุกรณีความต่างความถี่ 40 Hz.....	45
4.20 สเปกตรัมของสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 39.85 kHz กับ 40.6 kHz ที่ผ่านการยกกำลังสองแล้ว.....	46
4.21 ผลตอบสนองทางเฟสของสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 39.85 kHz กับ 40.6 kHz ที่ผ่านการยกกำลังสองแล้ว.....	46
4.22 สเปกตรัมของสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40.125 kHz กับ 40.5 kHz ที่ผ่านการยกกำลังสองแล้ว.....	47
4.23 ผลตอบสนองทางเฟสของสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40.125 kHz กับ 40.5 kHz ที่ผ่านการยกกำลังสองแล้ว.....	47
4.24 สเปกตรัมของสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.1 kHz ที่ผ่านการยกกำลังสองแล้ว.....	48
4.25 ผลตอบสนองทางเฟสของสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.1 kHz ที่ผ่านการยกกำลังสองแล้ว.....	48
4.26 สเปกตรัมของสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.04 kHz ที่ผ่านการยกกำลังสองแล้ว.....	49
4.27 ผลตอบสนองทางเฟสของสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.04 kHz ที่ผ่านการยกกำลังสองแล้ว.....	49
4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริงกับระยะทางที่วัดได้กรณีความต่างความถี่เท่ากับ 750 Hz.....	51

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.29	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริงกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกรณีความถี่ความถี่เท่ากับ 750 Hz.....	52
4.30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริงกับระยะทางที่วัดได้กรณีความถี่ความถี่เท่ากับ 375 Hz.....	55
4.31	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริงกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกรณีความถี่ความถี่เท่ากับ 375 Hz.....	55
4.32	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริงกับระยะทางที่วัดได้กรณีความถี่ความถี่เท่ากับ 100 Hz.....	58
4.33	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริงกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกรณีความถี่ความถี่เท่ากับ 100 Hz.....	58
4.34	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริงกับระยะทางที่วัดได้กรณีความถี่ความถี่เท่ากับ 40 Hz.....	61
4.35	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริงกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกรณีความถี่ความถี่เท่ากับ 40 Hz.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

# ที่มาและความสำคัญของปัญหา

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันคลื่นอัลตราโซนิกนั้นได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานในหลายๆ ด้าน เช่น ในด้านประมงจะใช้คลื่นอัลตราโซนิกในการหาฝูงปลา ด้านการแพทย์จะใช้คลื่นอัลตราโซนิกในการตรวจหาตำแหน่งอวัยวะภายใน ด้านสุขภาพและความงามจะใช้คลื่นอัลตราโซนิกในการนวดหน้า ด้านอุตสาหกรรมจะใช้คลื่นอัลตราโซนิกในการทำความสะอาด การวัดตำแหน่งสิ่งของ การวัดอุณหภูมิ การวัดความเร็วลม เป็นต้น ซึ่งสาเหตุก็เพราะว่าเซนเซอร์อัลตราโซนิกนั้นมีราคาถูก หาซื้อได้ง่าย มีความปลอดภัยสูงและให้ผลข้างเคียงต่อมนุษย์น้อยมาก เมื่อเทียบกับการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การวัดระยะทางด้วยอัลตราโซนิกนั้น เทคนิคที่ใช้มี 2 วิธี คือ วิธีที่ใช้เวลาในการเดินทางของคลื่น (Time of flight) และวิธีที่ใช้การเลื่อนเฟส สำหรับวิธีที่ใช้การเดินทางของคลื่นนั้นอาศัยพื้นฐานของการวัดระยะเวลาที่คลื่นเดินทางจากตัวส่งไปยังวัตถุและสะท้อนกลับมายังตัวรับและนำมาคำนวณหาระยะทางของวัตถุ ข้อดีของวิธีการนี้คือ เป็นหลักการที่ตรงไปตรงมาง่าย แต่ข้อเสียคือขนาดของสัญญาณที่รับเข้ามาได้ต้องถูกขยายให้มีขนาดพอเหมาะกับการตรวจจับเวลาที่คลื่นเดินทางกลับมาถึงตัวรับ อีกทั้งยังมีความอ่อนไหวต่อการปนเปื้อนของสัญญาณรบกวนทางขนาดอีกด้วย ส่วนวิธีการเลื่อนเฟสจะเป็นการตรวจวัดเวลาทางอ้อมจากการเลื่อนเฟสของสัญญาณ อันเนื่องมาจากการเดินทางของคลื่นและนำมาคำนวณหาระยะทาง ทำให้วิธีการนี้มีภูมิคุ้มกันต่อการรบกวนทางขนาด แต่ว่าความยาวคลื่นของอัลตราโซนิกจะเป็นตัวจำกัดระยะทางที่สามารถวัดได้ เพราะว่าการเลื่อนเฟสสูงสุดที่ตัวตรวจจับเฟสสามารถตรวจจับได้คือ  $2\pi$

ด้วยเหตุผลข้างต้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะขอเสนอการวัดระยะทางด้วยอัลตราโซนิกโดยใช้ความต่างเฟสของสัญญาณรูปไซน์ที่มีองค์ประกอบความถี่ 2 ความถี่ โดยสัญญาณที่รับมาจะถูกนำไปยกกำลังสองก่อนจากนั้นจึงทำฟาสฟูเรียร์ ความต่างเฟสจะหาได้จากการสังเกตค่าเฟสของสัญญาณที่องค์ประกอบความถี่ต่ำ ดังนั้นจึงไม่ต้องเก็บค่าสัญญาณที่ส่งออกไปเป็นตัวอ้างอิงและเฟสของสัญญาณทั้งสองไม่จำเป็นต้องถูกตรวจจับเพื่อจะนำมาคำนวณความแตกต่างเฟสของแต่ละสัญญาณ ซึ่งบอร์ด TMS620C6713 ในการสร้างสัญญาณคลื่นรูปไซน์เพื่อเป็นอินพุตให้ตัวส่งอัลตราโซนิกและจัดเก็บสัญญาณที่ตัวรับอัลตราโซนิก เพื่อนำสัญญาณที่รับได้มาคำนวณระยะทางด้วยโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เนื่องจากหลักการใช้ความต่างเฟสของคลื่นอัลตราโซนิกสามารถใช้หาค่าระยะทางระหว่างตัวรับและตัวส่งอัลตราโซนิกได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะนำเสนอเทคนิคการวัดระยะทางด้วยอัลตราโซนิกโดยใช้ความแตกต่างเฟสของสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่ 2 ความถี่ เพื่อเป็นการต่อยอดและขยายงานวิจัยในด้านนี้ให้กว้างขวางมากขึ้น สามารถนำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้กับงานด้านอื่นๆ ได้ต่อไป

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในการใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกวัดระยะทางโดยการใช้วิธีการใช้ความต่างเฟสนั้นมีข้อจำกัด คือ ต้องใช้สัญญาณที่ส่งออกเป็นสัญญาณอ้างอิงเพื่อใช้ในการเทียบเฟสกับสัญญาณที่ตัวรับอัลตราโซนิก ทำให้ต้องมีการเก็บค่าสัญญาณที่ส่งออกไปก่อน จากหลักการทางตรีโกณมิติ พบว่าค่าความต่างเฟสของสัญญาณที่มีองค์ประกอบสัญญาณ 2 ความถี่ สามารถหาได้โดยการนำสัญญาณดังกล่าวมายกกำลังสอง ดังนั้น หากนำสัญญาณที่ตัวรับอัลตราโซนิกมายกกำลังสอง จะทำให้สามารถหาค่าความต่างเฟสได้ และจากหลักการของระบบที่ปราศจากความผิดพลาด ระยะเวลาที่คลื่นเดินทางจะเป็นสัดส่วนกับความต่างเฟสของคลื่น ดังนั้นหากทราบค่าความต่างเฟสจะสามารถคำนวณหาระยะเวลาที่คลื่นเดินทาง และสุดท้ายค่าระยะเวลานี้จะนำไปสู่การคำนวณหาค่าระยะทางได้

## 1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวัดระยะทางด้วยอัลตราโซนิกนั้นแบ่งออกเป็น 2 วิธีการ คือ การใช้เวลาในการเดินทาง (TOF) และใช้ความต่างเฟส โดยการใช้เวลาในการเดินทาง (TOF) นั้นใน [1] ได้นำเสนอหลักการใช้ลักษณะทางกายภาพของสัญญาณอัลตราโซนิกที่สะท้อนกลับมาจากวัตถุในการวัดระยะทาง ซึ่งขอบของสัญญาณที่สะท้อนกลับมานี้จะขึ้นจะอยู่กับค่า damping factor ของการสั่น โดยมีขั้นตอนคือ จะตั้งค่า threshold ไว้ หากสัญญาณที่สะท้อนกลับมามีค่ามากกว่าค่านี้ จะเริ่มนำสัญญาณบริเวณนั้นมาพิจารณาว่าเป็นจุดขอบของการตรวจจับค่า TOF โดยการนำมาเทียบกับ damping factor ซึ่งจะให้ได้ค่า TOF ที่มีความแม่นยำเพื่อนำมาคำนวณหาระยะทางของวัตถุได้ แต่สัญญาณรบกวนจะมีผลต่อการวัดระยะทางและอาจเกิดความผิดพลาดในการวัดระยะทางได้เนื่องจากตัวรับอัลตราโซนิกอาจตรวจจับสัญญาณสะท้อนได้มากกว่า 1 ค่า นอกจากนี้ใน [2] ได้นำเสนอการวัดระยะทางด้วยอัลตราโซนิกโดยใช้เทคนิค threshold-based phase-correlation ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งในการหาค่า TOF โดยวิธีการนี้ให้ peak ที่แคบโดยที่ไม่เพิ่มแบนด์วิดท์ทางกายภาพของสัญญาณ โดยเมื่อแบนด์วิดท์ของสัญญาณเพิ่มขึ้น ความกว้างของ peak ก็จะมีน้อยลง ทำให้ความถูกต้องของระบบเพิ่มขึ้น



3. ทำการวัดระยะทางโดยใช้ความต่างความถี่ 4 ค่า คือความต่างความถี่ 750 Hz ในการวัดระยะทางตั้งแต่ 1 – 15 เซนติเมตร ความต่างความถี่ 375 Hz ในการวัดระยะทางตั้งแต่ระยะทาง 1 – 25 เซนติเมตร ความต่างความถี่ 100 Hz ในการวัดระยะทางตั้งแต่ระยะทาง 5 – 100 เซนติเมตรและความต่างความถี่ 40 Hz ในการวัดระยะทางตั้งแต่ระยะทาง 10 – 230 เซนติเมตร
4. เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อความเร็วในการเดินทางของคลื่นในอากาศ การทดลองจะถูกจัดทำในสถานที่ซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีขั้นตอนในการดำเนินงานดังนี้

1. ศึกษาความเป็นมา วัตถุประสงค์ สมมติฐาน และศึกษางานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวัดระยะทางด้วยอัลตราโซนิก
3. ทดสอบสมมติฐานที่ใช้ด้วยโปรแกรม MATLAB
4. เก็บผลการทดลองในการวัดระยะทาง
5. นำค่าที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับปริณญาณิพนธ์ฉบับนี้ โดยจะมีเนื้อหาเกี่ยวกับอัลตราโซนิก การวัดระยะทางด้วยอัลตราโซนิก การแปลงฟูเรียร์ และการใช้งานบอร์ด TMS320C6713

### 2.2 อัลตราโซนิก

#### 2.2.1 ความหมายของอัลตราโซนิก

คำว่า “อัลตรา” หมายความว่า พ้นขีด หรือเกิน และ “โซนิก” คือเสียง ดังนั้น อัลตราโซนิก คือคลื่นที่มีความถี่เกินขอบเขตของเสียงของมนุษย์ที่จะได้ยิน นั่นคือ คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกิน 20 kHz เพราะคลื่นเสียงที่มนุษย์สามารถได้ยินนั้นอยู่ที่ประมาณ 20 Hz จนถึง 20 kHz

เนื่องจากคลื่นเสียงย่านอัลตราโซนิกนั้นเป็นคลื่นที่มีทิศทาง กล่าวคือ สามารถเล็งคลื่นไปในทิศทางหรือตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำเพราะคลื่นชนิดนี้มีความถี่สูง จึงมีความยาวคลื่นสั้น ดังนั้นคลื่นเสียงที่ส่งออกมาจะพุ่งออกมาเป็นลำแคบๆ จึงทำให้นิยมนำคลื่นเสียงชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้าน เช่น การตรวจจับตำแหน่งของอวัยวะต่างๆ ในร่างกาย การวัดความลึกใต้ท้องทะเล การวัดระดับน้ำในถัง การล้างทำความสะอาด เป็นต้น

ความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกที่ใช้ในงานด้านต่างๆ นั้นก็จะต่างกันออกไปด้วย เช่น คลื่นเสียงที่เดินทางผ่านอากาศนั้นจะต้องไม่เกิน 50 kHz เนื่องจากถ้าความสูงมากกว่านี้ อากาศจะดูดซับความแรงของคลื่นเสียงไปจนหมด ส่วนในทางการแพทย์ที่ต้องการระยะในการตรวจจับในระยะสั้น แต่ต้องการความแม่นยำสูง จะใช้คลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่มากๆ เช่น 1 MHz ถึง 10 MHz

#### 2.2.2 คุณสมบัติของคลื่นอัลตราโซนิก

คุณสมบัติของคลื่นอัลตราโซนิกนั้นจะเหมือนกับคลื่นเสียงธรรมดาทุกประการ จะแตกต่างกันเพียงแค่มนุษย์ไม่สามารถได้ยิน ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าว คือ

##### 1. คุณสมบัติการสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การสะท้อนของคลื่นจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่กระทบสิ่งกีดขวาง โดยปัจจัยที่มีผลต่อการสะท้อนของคลื่นเสียง คือ

- ลักษณะพื้นผิวที่คลื่นเสียงไปกระทบ คือ พื้นผิวเรียบและแข็งคลื่นเสียงจะสะท้อนได้ดี

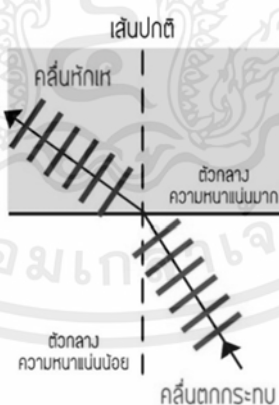
- มุมตกกระทบกับระนาบสะท้อน คือ เสียงจะสะท้อนได้ดี เมื่อมุมสะท้อนของเสียงเท่ากับมุมตกกระทบของเสียง

ซึ่งการวัดระยะทางด้วยอัลตราโซนิกนั้นก็เป็นกรนำคุณสมบัติการสะท้อนของคลื่นมาประยุกต์ใช้งาน



## 2. คุณสมบัติการหักเห

การหักเหของคลื่นจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเสียงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นและความเร็ว แต่ความถี่ของคลื่นจะยังคงที่ คือ โดยหากคลื่นเสียงเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยไปยังตัวกลางที่มีความหนาแน่นมาก คลื่นเสียงจะมีการหักเหออกจากเส้นฉาก

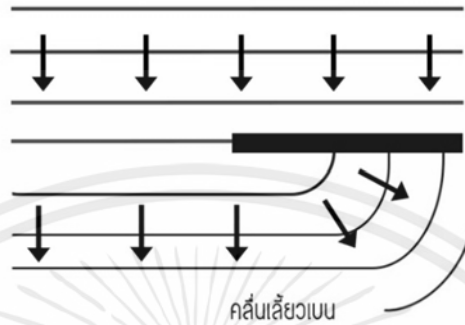


รูปที่ 2.2 การหักเหของคลื่นเสียง

## 3. คุณสมบัติการเลี้ยวเบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น การเลี้ยวเบนของคลื่นจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่ไปพบสิ่งกีดขวางที่เป็นช่องหรือขอบ โดยคลื่นบริเวณที่กระทบกับสิ่งกีดขวางก็จะสะท้อนกลับมา ส่วนคลื่นบริเวณที่ผ่านช่องหรือขอบได้นั้นจะ

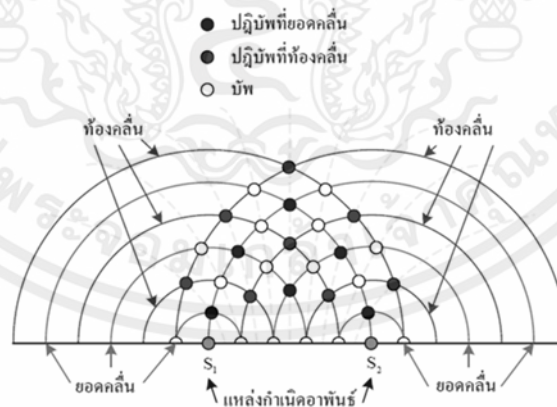
สามารถแผ่คลื่นจากช่องหรือขอบของสิ่งกีดขวางนั้นไปด้านหลังได้ โดยที่ความถี่ ความเร็วและความยาวคลื่นจะมีค่าเท่าเดิม ซึ่งการเลี้ยวเบนจะเกิดได้ดีเมื่อช่องหรือขอบนั้นมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นเสียง



รูปที่ 2.3 การเลี้ยวเบนของคลื่นเสียง

#### 4. คุณสมบัติการแทรกสอด

การแทรกสอดของคลื่นจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเสียงมากกว่า 2 คลื่นมารวมกัน ซึ่งจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันหรือแบบหักล้างกัน โดยเมื่อมีการแทรกสอดแบบเสริม ส่วนอัดของคลื่นเหล่านั้นจะเกิดที่ตำแหน่งตรงกัน ทำให้คลื่นมีขนาดรวมเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเป็นการแทรกสอดแบบหักล้าง ส่วนอัดของคลื่นลูกหนึ่งจะอยู่ตรงกันกับส่วนขยายของคลื่นอีกลูกหนึ่ง ทำให้มีขนาดหักล้างกันไป



รูปที่ 2.4 การแทรกสอดของคลื่นเสียง [6]

#### 2.2.3 เซนเซอร์อัลตราโซนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เซนเซอร์อัลตราโซนิก คือ เซนเซอร์ที่ใช้หลักการสะท้อนของอัลตราโซนิกในการตรวจจับต่างๆ

เช่น การวัดระยะทาง, การวัดระดับน้ำ เป็นต้น

โดยข้อดีของเซนเซอร์อัลตราโซนิก คือ

1. ราคาถูก
2. สามารถใช้งานในบริเวณที่ไม่สว่างได้
3. ไม่ได้รับผลกระทบจากฝุ่น ความสกปรก หรือ สภาพที่มีความชื้น
4. ไม่ได้รับผลกระทบจากสีหรือความเข้มของวัตถุ เนื่องจากใช้การสะท้อนของเสียงในการตรวจจับวัตถุ

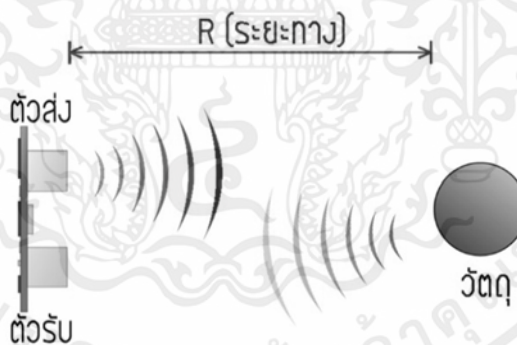
ส่วนข้อจำกัดของเซนเซอร์อัลตราโซนิก คือ

1. ได้รับความกระทบจากอุณหภูมิ เนื่องจากอุณหภูมิมิผลต่อการเดินทางของคลื่นเสียงในอากาศ
2. ไม่สามารถทำงานในสภาวะสุญญากาศได้ เนื่องจากไม่มีตัวกลางสำหรับการเดินทางของเสียง

### 2.3 การวัดระยะทางด้วยอัลตราโซนิก

หลักการวัดระยะทางด้วยอัลตราโซนิกนั้นมีหลักการใหญ่ๆ สองประเภทด้วยกัน คือ ใช้เวลาในการเดินทาง (TOF) และใช้การเลื่อนเฟส

#### 2.3.1 การวัดระยะทางด้วยวิธีการ TOF



รูปที่ 2.5 การวัดระยะทางด้วยวิธี TOF

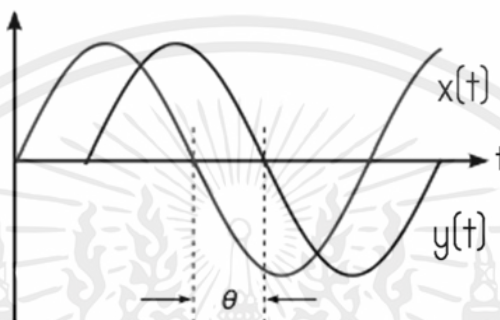
วิธี TOF นั้นอาศัยพื้นฐานของการวัดระยะเวลาที่คลื่นเดินทางจากตัวส่งไปยังวัตถุและสะท้อนกลับมายังตัวรับและนำมาคำนวณหาระยะทางของวัตถุ

โดยค่า TOF มีความสัมพันธ์กับระยะทางของวัตถุ ( $R$ ) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อ  $R = \frac{TOF * v}{2}$  จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ (2.1)

โดยที่  $v$  คือ ความเร็วในการเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกในอากาศ มีค่าเท่ากับ 340 m/s  
ข้อดีของ TOF คือเป็นหลักการที่ตรงไปตรงมาง่าย แต่มีข้อเสียคือ ขนาดของสัญญาณที่รับเข้ามาได้  
ต้องถูกขยายให้มีขนาดพอเหมาะกับการตรวจจับเวลาที่คลื่นเดินทางกลับมาถึงตัวรับ อีกทั้งยังมีความ  
อ่อนไหวต่อการปนเปื้อนของสัญญาณรบกวนทางขนาดอีกด้วย

### 2.3.2 การวัดระยะทางด้วยวิธีการเลื่อนของเฟส



รูปที่ 2.6 การเลื่อนเฟสของสัญญาณรูปไซน์

วิธีการเลื่อนทางเฟสจะเป็นการตรวจวัดเวลาทางอ้อมจากการเลื่อนเฟสของสัญญาณอัน  
เนื่องมาจากการเดินทางของคลื่นและนำมาคำนวณหาระยะทาง โดยหากสัญญาณอัลตราโซนิกที่ทำการ  
ส่ง มีค่า

$$x(t) = A_i \cos(\omega_i t) \quad (2.2)$$

สัญญาณที่ตรวจจับได้ที่ตัวรับอัลตราโซนิก จะมีค่า

$$y(t) = A_o \cos(\omega_i t - \omega_i t_d) \quad (2.3)$$

โดยที่  $t_d$  คือเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้ในการเดินทางไปและกลับ หรือมีค่าเท่ากับ TOF  
ซึ่งค่าเฟสที่เลื่อนไป คือ

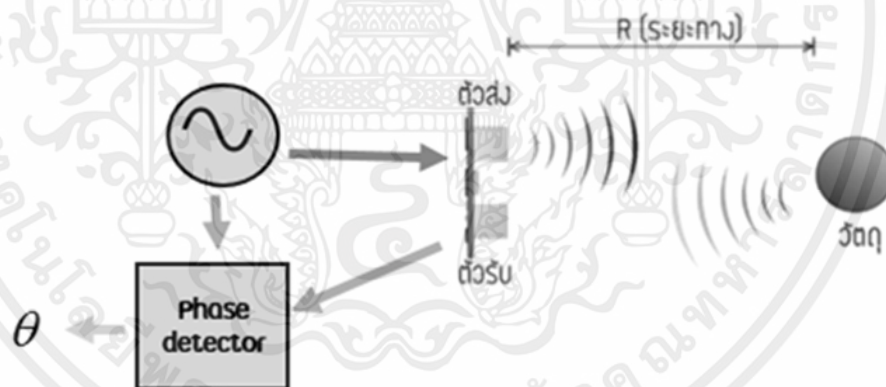
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่  $\theta = \omega t_d$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (2.4)

ดังนั้นจากสมการ 2.1 และ 2.4 แสดงให้เห็นว่า หากทราบค่าเฟสที่เลื่อนไป จะทำให้ทราบค่า TOF และสามารถนำไปคำนวณหาระยะทางระหว่างวัตถุกับตัวรับตัวส่งอัลตราโซนิกได้ คือ

$$R = \frac{\theta v}{2\omega_i} \quad (2.5)$$

โดยการหาค่าเฟสที่เลื่อนไปของสัญญาณอัลตราโซนิกที่ตัวรับเทียบกับตัวส่งสามารถทำได้ คือ เมื่อเครื่องกำเนิดสัญญาณสร้างสัญญาณเป็นอินพุตให้กับตัวส่งอัลตราโซนิกแล้ว ค่าเฟสของสัญญาณที่ตัวส่งนี้จะถูกเก็บไว้ เมื่อสัญญาณที่ตัวส่งอัลตราโซนิกเดินทางไปที่กระทบวัตถุและสะท้อนกลับมาที่ตัวรับอัลตราโซนิก ค่าเฟสจะถูกตรวจจับแล้วนำมาเทียบกับค่าเฟสที่เก็บไว้ของสัญญาณอินพุต เพื่อหาค่าความต่างเฟสของสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับอัลตราโซนิก โดยกระบวนการข้างต้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7

วิธีการเลื่อนทางเฟสนี้มีข้อดีคือ มีภูมิคุ้มกันต่อการรบกวนทางขนาด แต่จุดอ่อนของวิธีการตรวจจับการเลื่อนเฟส คือ วัฏระยะทางได้สั้นอันเนื่องมาจากการเลื่อนเฟสสูงสุดที่ตัวตรวจจับเฟสสามารถตรวจจับได้คือ  $2\pi$



รูปที่ 2.7 กระบวนการหาค่าความต่างเฟสของสัญญาณอัลตราโซนิก

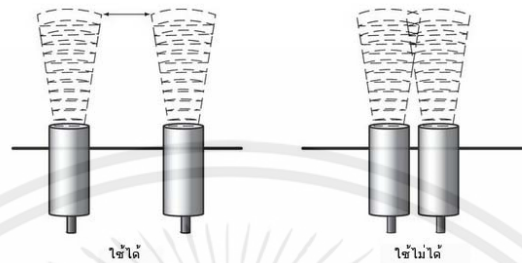
### 2.3.3 ปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการวัดระยะทางด้วยอัลตราโซนิก

การใช้อัลตราโซนิกในการวัดระยะทางนั้นมีปัจจัยภายนอก [7] หลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการวัด ซึ่งปัจจัยดังกล่าวคือ การวางตำแหน่งเซนเซอร์อัลตราโซนิก ตัวกลางและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

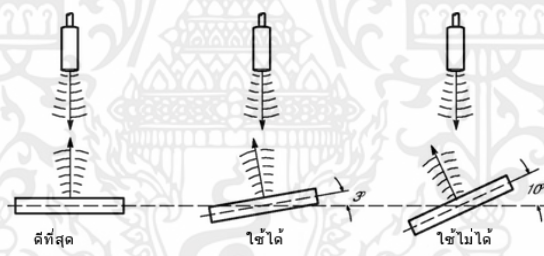
### 2.3.3.1 การวางตำแหน่งเซนเซอร์อัลตราโซนิก

การเว้นระยะห่างของเซนเซอร์อัลตราโซนิกนั้นมีผลกับการทำงานเนื่องจากเซนเซอร์ชนิดนี้จะใช้การส่งคลื่นเสียงในการทำงาน ดังนั้นการวางเซนเซอร์ต้องวางให้มีระยะห่างเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเว้นระยะห่างของเซนเซอร์อัลตราโซนิก [8]

นอกจากนี้มุมที่ใช้ในการวางวัตถุที่จะทำการตรวจจับกับเซนเซอร์ ควรวางให้มีระนาบที่ทำให้คลื่นที่ส่งไปสะท้อนกลับมาได้ และวัตถุดังกล่าวควรมีลักษณะเป็นแนวราบ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการตรวจจับ ดังแสดงในรูป 2.9



รูปที่ 2.9 การวางแนวระนาบของวัตถุ [8]

### 2.3.3.2 อุณหภูมิ

นอกจากความเร็วของเสียงจะแตกต่างกันไปตามตัวกลางแล้ว เมื่อพิจารณาความเร็วของเสียงในอากาศ ความเร็วของเสียงยังเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เมื่อ  $T$  คือ อุณหภูมิ มีหน่วยเป็นเคลวิน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส มีค่าเท่ากับ 8.314 จูลต่อโมล-เคลวิน

$M$  คือ มวลโมเลกุลของแก๊ส

$\gamma$  คือ ค่าคงตัวที่เป็นอัตราส่วนของความจุความร้อนที่ความดันคงตัวต่อความจุความร้อนที่ปริมาตรคงตัวของแก๊ส มีค่าเท่ากับ 1.4

หรือ ค่าโดยประมาณของความเร็วเสียงในอากาศในหน่วยอุณหภูมิองศาเซลเซียส มีค่าเป็นดังสมการ [10]

$$V = 331 + 0.6t \quad (2.7)$$

เมื่อ  $V$  คือ อัตราเร็วของเสียงในอากาศที่อุณหภูมิ  $t$  ใดๆ มีหน่วยเป็นเมตร/วินาที

$t$  คือ อุณหภูมิของอากาศ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส และต้องมีค่าน้อยกว่า 45 องศาเซลเซียส

### 2.3.3.2 ตัวกลาง

เสียงเป็นคลื่นที่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ ดังนั้นอัตราเร็วของเสียงในตัวกลางตัวกลางแต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวกลาง ดังแสดงตัวอย่างความเร็วเสียงในตัวกลางต่างๆ ในตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 ความเร็วคลื่นเสียงในตัวกลางชนิดต่างๆ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส [9]

ตัวกลาง	ความเร็ว (เมตร/วินาที)
อากาศ	343
แก๊สไฮโดรเจน	1339
น้ำ	1493
น้ำทะเล	1533
แก้ว	4540
เหล็ก	5200

## 2.4 พื้นฐานของสัญญาณและระบบ

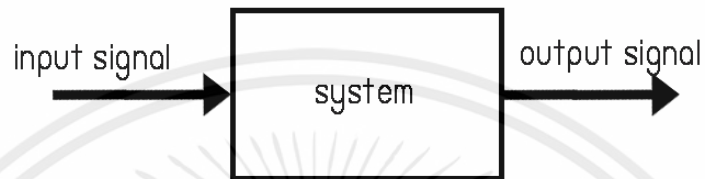
สัญญาณ [10] คือ ปริมาณทางกายภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยสัญญาณสามารถแบ่งออกได้หลายประเภท เช่น

- สัญญาณอนาล็อก คือ สัญญาณที่มีแอมพลิจูดต่อเนื่องทางเวลา
- สัญญาณดิจิทัล คือ สัญญาณที่แอมพลิจูดมีค่าอยู่ในช่วงที่จำกัด
- สัญญาณมีคาบ คือ สัญญาณที่มีลักษณะซ้ำๆ ในทุกๆ ช่วงเวลาหนึ่ง โดยช่วงเวลานี้จะเรียกว่า คาบ ( $T$ ) ซึ่งฟังก์ชันของสัญญาณมีคาบสามารถแสดงได้ คือ

เรียกว่า คาบ ( $T$ ) ซึ่งฟังก์ชันของสัญญาณมีคาบสามารถแสดงได้ คือ

$$x_T(t) = x(T + t) \quad (2.15)$$

- และสัญญาณไม่มีคาบ คือ สัญญาณที่ไม่ได้มีลักษณะเป็นคาบ
- ระบบ ดังรูปที่ 2.10 คือ สิ่งหรือกลุ่มของอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันเพื่อผลิตสัญญาณเอาต์พุตออกมาจากสัญญาณอินพุต



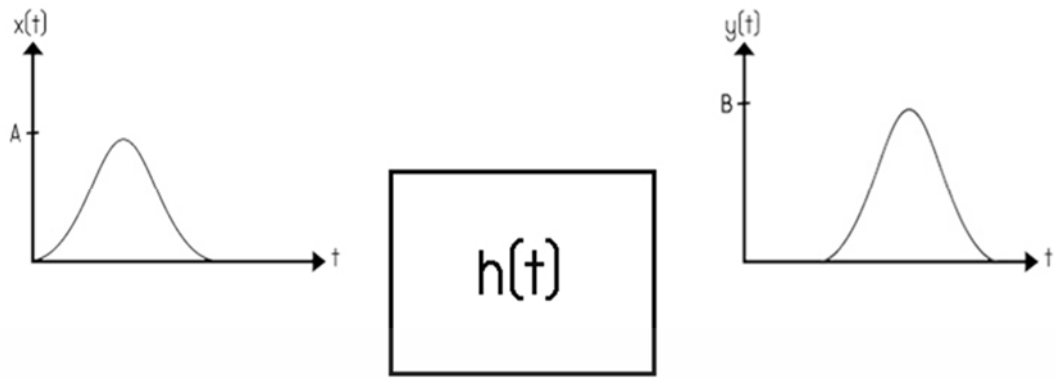
รูปที่ 2.10 ระบบ

โดยระบบแบ่งออกเป็นหลายประเภท เช่น

- ระบบเชิงเส้น คือ ระบบที่มีคุณสมบัติการบวกและคุณสมบัติการสเกล โดยหาก  $y_1(t) = H[x_1(t)]$  และ  $y_2(t) = H[x_2(t)]$  แล้ว การมีคุณสมบัติการบวกคือ หากอินพุตของระบบเป็น  $x_1(t) + x_2(t)$  เอาต์พุตของระบบจะเป็น  $y_1(t) + y_2(t)$  และการมีคุณสมบัติการสเกล คือ ถ้าอินพุตของระบบคือ  $cx_1(t)$  เอาต์พุตของระบบจะเป็น  $cy_1(t)$  เมื่อ  $c$  คือค่าคงตัว
- ระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา คือ ถ้าอินพุต  $x(t)$  ซึ่งมีผลกับเอาต์พุตคือ  $y(t) = H[x(t)]$  ดังนั้นเอาต์พุตที่เกิดจากอินพุตที่มีการเลื่อนทางเวลา(หน่วงเวลาหรือล่วงหน้า)  $x(t \pm T)$  คือ เอาต์พุตดั้งเดิมที่ถูกเลื่อนเวลาไป  $H[x(t \pm T)]$
- ระบบเชิงเส้นที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา คือ ระบบที่มีทั้งคุณสมบัติเชิงเส้นและไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

#### 2.4.1 ระบบที่ปราศจากความผิดเพี้ยน

ระบบที่ปราศจากความผิดเพี้ยน คือ ระบบซึ่งเอาต์พุตมีรูปร่างเหมือนกันกับอินพุตแต่อาจจะมีความต่างกันหรือมีการหน่วงเวลาของสัญญาณเกิดขึ้น



รูปที่ 2.11 ระบบที่ปราศจากความผิดเพี้ยน

โดยถ้าอินพุตของระบบ  $x_i(t)$  ถูกนำไปทำการแปลงฟูเรียร์ จะได้

$$X_i(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x_i(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.16)$$

ดังนั้นเอาต์พุตของระบบที่ปราศจากความผิดเพี้ยน คือ

$$y(t) = Bx_i(t - t_d) \quad (2.17)$$

เมื่อนำเอาต์พุตของระบบมาทำการแปลงฟูเรียร์จะได้

$$Y(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} Bx_i(t - t_d) e^{-j\omega t} dt \quad (2.18)$$

เปลี่ยนตัวแปรจะได้

$$\tau = t - t_d$$

$$\therefore t = \tau + t_d; dt = d\tau$$

ดังนั้น

$$Y(\omega) = B \int_{-\infty}^{\infty} x_i(\tau) e^{-j\omega(\tau + t_d)} d\tau$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และอยู่ภายใต้เงื่อนไขของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= B e^{-j\omega t_d} \int_{-\infty}^{\infty} x_i(\tau) e^{-j\omega \tau} d\tau = B e^{-j\omega t_d} X_i(\omega) \quad (2.19)$$

จากการแปลงฟูเรียร์ของอิมพัลส์ คือ

$$F\{A\delta(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} A\delta(t)e^{-j\omega t} d\omega = F_{\delta(t)}(\omega) = A \quad (2.20)$$

และการแปลงฟูเรียร์ผกผันของอิมพัลส์ คือ

$$F^{-1}\{F_{\delta(t)}(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Ae^{j\omega t} d\omega = A\delta(t) \quad (2.21)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t} d\omega = 2\pi\delta(t)$$

เปลี่ยนตัวแปรจาก  $t$  เป็น  $\omega$

$$\frac{e^{j\omega\infty} - e^{-j\omega\infty}}{j\omega} = \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t} dt = 2\pi\delta(\omega) \quad (2.22)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\omega t} dt = \frac{e^{j\omega\infty} - e^{-j\omega\infty}}{j\omega} = 2\pi\delta(-\omega) \quad (2.23)$$

เมื่อทำการแปลงฟูเรียร์ของ  $e^{j\omega_1 t}$  จะได้

$$F\{e^{j\omega_1 t}\} = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j(\omega-\omega_1)t} dt = 2\pi\delta(\omega-\omega_1) \quad (2.24)$$

และทำการแปลงฟูเรียร์ของ  $e^{-j\omega_1 t}$  จะได้

$$F\{e^{-j\omega_1 t}\} = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j(\omega+\omega_1)t} dt = 2\pi\delta(\omega+\omega_1) \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงที่  $e^{j\omega_1 t}$  และ  $e^{-j\omega_1 t}$  อย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ในกรณีนี้  $x_i(t) = A \cos(\omega_1 t) = A \frac{e^{j\omega_1 t}}{2} + A \frac{e^{-j\omega_1 t}}{2} = Ax_{i1}(t) + Ax_{i2}(t)$

ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned}
 y_1(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} 2\pi\delta(\omega - \omega_i) e^{j\omega t} d\omega \frac{B}{2} e^{-j\omega t_d} \\
 &= \frac{B}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\omega - \omega_i) e^{j\omega(t-t_d)} d\omega \\
 &= \frac{B}{2} e^{j\omega_i(t-t_d)}
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

$$\begin{aligned}
 y_2(t) &= \frac{B}{2} e^{-j\omega_i t_d} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\omega + \omega_i) e^{j\omega t} d\omega \\
 &= \frac{B}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\omega + \omega_i) e^{j\omega(t-t_d)} d\omega \\
 &= \frac{B}{2} e^{-j\omega_i(t-t_d)}
 \end{aligned} \tag{2.27}$$

สุดท้าย จากสมการ 2.26 และ 2.27 ค่าเอาต์พุตของระบบ  $y(t)$  คือ  $y(t) = y_1(t) + y_2(t)$

$$\begin{aligned}
 y(t) &= \frac{B}{2} e^{j\omega_i(t-t_d)} + \frac{B}{2} e^{-j\omega_i(t-t_d)} \\
 &= B \cos(\omega_i t - \omega_i t_d)
 \end{aligned} \tag{2.28}$$

แสดงให้เห็นว่าระบบที่ปราศจากความผิดเพี้ยนจะประกอบไปด้วยคุณสมบัติสำคัญ 2 ประการ คือ

1. อัตราการขยายจะมีค่าคงที่ สำหรับทุกๆ ความถี่องค์ประกอบ
2. การเลื่อนทางเฟสจะแปรผันตรงกับผลคูณระหว่างความถี่กับเวลาที่ล่าช้าไป  $\theta(\omega) = -\omega t_d$

#### 2.4.2 อนุกรมฟูเรียร์

ในการประมวลผลสัญญาณสมัยใหม่ หลักการทางสัญญาณและระบบได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการทำความเข้าใจกับสัญญาณตอบสนองที่เกิดขึ้น หรือสัญญาณตอบสนองบางอย่างที่ยังไม่ได้รับการพิจารณาศึกษาอย่างชัดเจนได้ โดยเฉพาะเรื่ององค์ประกอบของสัญญาณนั้นมีการอนุมานว่าสัญญาณใดๆ ก็ตามประกอบหรือเกิดขึ้นจากสัญญาณรูปไซน์ที่แอมพลิจูดต่างกัน ความถี่ต่างกันและเฟสต่างกัน หลากๆ ความถี่มารวมกัน ซึ่งแสดงรูปแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยอนุกรมฟูเรียร์สำหรับสัญญาณที่มีคาบเวลา คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาต

$$x_T(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t) \tag{2.29}$$

โดยที่

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (2.30)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.31)$$

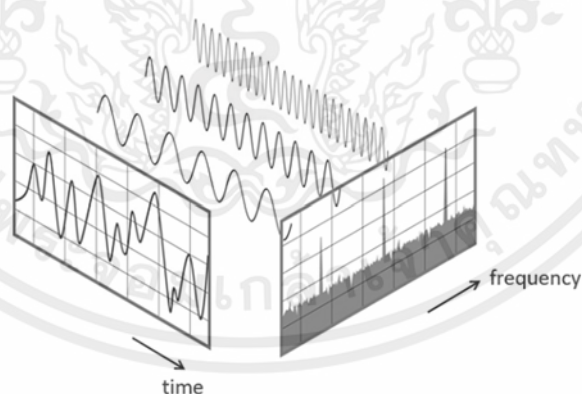
$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (2.32)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (2.33)$$

เมื่อ  $x_T(t)$  คือ สัญญาณมีคาบเวลาใดๆ  
 $T$  คือ ค่าคาบเวลา

### 2.4.3 การแปลงฟูรีเยร์

เนื่องจากอนุกรมฟูรีเยร์จะใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณจากโดเมนเวลาให้เป็นโดเมนความถี่ สำหรับสัญญาณที่มีคาบเท่านั้น ดังนั้นสำหรับสัญญาณไม่มีคาบจึงจะใช้การแปลงฟูรีเยร์ โดยการใช้โดเมนความถี่ในการวิเคราะห์นั้นจะง่ายกว่าการใช้โดเมนเวลาเพราะสามารถบ่งบอกถึงรูปร่างสเปกตรัมและแบนวิดธ์ได้ โดยในรูปที่ 2.12 เป็นการแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างโดเมนทั้งสอง



รูปที่ 2.12 การเปรียบเทียบระหว่างโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ [11]

โดยถ้าให้  $x(t)$  คือ สัญญาณที่ไม่มีคาบเวลาดังนั้นเมื่อทำการแปลงฟูรีเยร์จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลลิขสิทธิ์เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ (2.34)

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$$

ซึ่ง  $X(\omega)$  คือ สเปกตรัมของสัญญาณที่ไม่มีคาบเวลาและคู่การแปลงกลับฟูรีเยร์สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2.35)$$

คุณสมบัติที่สำคัญของการแปลงฟูรีเยร์ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2 โดยให้  $x(t) \xrightarrow{F} X(\omega)$

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของคู่การแปลงฟูรีเยร์ [10]

คุณสมบัติ	สัญญาณในโดเมนเวลา	สัญญาณในโดเมนความถี่
ความเป็นเชิงเส้น	$ax(t) + by(t)$	$aX(\omega) + bY(\omega)$
การสเกลทางเวลา	$x(ct), c > 0$	$\frac{X(\frac{\omega}{c})}{ c }$
การเลื่อนทางความถี่	$x(t)e^{j\omega_d t}$	$X(\omega - \omega_d)$
การเลื่อนทางเวลา	$x(t - t_d)$	$X(\omega)e^{-j\omega t_d}$

## 2.5 การวัด ความผิดพลาด ความถูกต้องและความเที่ยงตรง

### 2.5.1 การวัด

การวัด คือ กระบวนการเปรียบเทียบปริมาณที่ไม่ทราบค่าของตัวแปรกับค่ามาตรฐานที่ถูกกำหนดไว้ ด้วยเครื่องมือวัดแบบใดแบบหนึ่ง ผลการวัดจะบอกเป็นจำนวนเท่าของปริมาณมาตรฐาน โดยในทางปฏิบัติไม่มีเครื่องมือวัดใดที่วัดค่าแล้วมีความถูกต้องเท่ากับค่าจริง

การวัดเกี่ยวข้องกับปัจจัยที่สำคัญ 4 ประการ คือ

1. ผู้ทำการวัด จะต้องมีความรู้และทักษะในการใช้เครื่องมือวัด และปริมาณที่จะวัด
2. เครื่องมือที่ใช้วัด ต้องอยู่ในสภาพที่พร้อมจะใช้งาน
3. ปริมาณที่จะวัด ส่งผลต่อการออกแบบวิธีการวัด และการวิเคราะห์ผลการวัด
4. สิ่งแวดล้อมขณะทำการวัด ได้แก่ สิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อมเฉพาะกรณี เช่น เสียงรบกวนจากการก่อสร้างอาคาร

### 2.5.2 ความผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารความผิดพลาด (Error) คือ ค่าความแตกต่างของค่าจริงที่ถูกวัดในทางปฏิบัติกับผลที่ได้จากการคำนวณ ไม่ว่าจะเป็นการวัด โดยสาเหตุของความผิดพลาดเกิดได้จาก 3 แหล่ง คือถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความผิดพลาดเนื่องจากตัวบุคคล (Personal error) เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากผู้วัด เช่น ความ

- ลำเอียงในการวัด การไม่ใช้เลขนัยสำคัญ เป็นต้น
2. ความผิดพลาดเนื่องจากระบบ (Systematic error) เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากจัดและการใช้เครื่องมือแบบผิดวิธี
  3. ความผิดพลาดจากสิ่งแวดล้อม (Random error) เป็นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว การสั่น เป็นต้น
- โดยความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Absolute error) สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{ความผิดพลาดสัมบูรณ์} = \text{ค่าที่ได้จากการวัด} - \text{ค่าที่ยอมรับหรือค่าจริง} \quad (2.36)$$

และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด} = \frac{|\text{ค่าที่ได้จากการวัด} - \text{ค่าที่ยอมรับหรือค่าจริง}|}{\text{ค่าที่ยอมรับหรือค่าจริง}} \times 100 \quad (2.37)$$

### 2.5.3 ความถูกต้อง

ความถูกต้อง (Accuracy) คือ ค่าที่ได้จากการวัดที่มีความใกล้เคียงกับค่าจริง ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ถึงประสิทธิภาพและความสามารถของเครื่องมือที่ใช้ในการวัด โดยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมีความสัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด คือ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง} = 100 - \text{เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด} \quad (2.38)$$

### 2.5.4 ความเที่ยงตรง

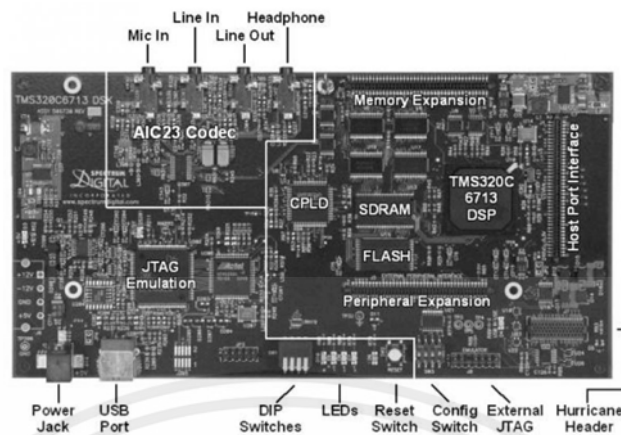
ความเที่ยงตรง (Precision) คือ ความไม่กระจายของข้อมูลที่เกิดจากการวัดหลายครั้ง เป็นความสามารถของเครื่องมือวัดในการอ่านค่าๆ เดียวภายใต้สภาพการทำงานเดียวกันหลายๆ ครั้ง

## 2.6 การใช้งานบอร์ดประมวลผลดิจิตอล TMS320C6713

### 2.6.1 ภาพรวมของบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอล TMS320C6713

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เอกสารที่จำหน่ายในเชิงการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม

บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอล TMS320C6713 [12] เป็นบอร์ดประมวลผลในตระกูล TMS320 ของบริษัท เทกซัส อินสตรูเมนต์ ซึ่งถูกใช้ประมวลผลสัญญาณในงานด้านต่างๆ เช่น การสื่อสาร, ระบบควบคุม เป็นต้น ซึ่งลักษณะของบอร์ด แสดงได้ดังรูป 2.13



รูปที่ 2.13 บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C6713 [13]

โดยคุณสมบัติของบอร์ด คือ

- ทำงานที่ 225 MHz
- codec (AIC23) ขนาด 16 บิต สำหรับอินพุตและเอาต์พุตอนาลอก ซึ่งใช้เทคโนโลยี ซิกมา-เดลต้า ในการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล (ADC) และการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก (DAC)
- คล็อก ขนาด 12 MHz ความถี่การสุ่มสัญญาณสามารถเลือกได้ในช่วง 8 – 96 kHz
- SDRAM ขนาด 16 MB
- หน่วยความจำแบบแฟลช ขนาด 512 Kbytes (ค่าพื้นฐาน คือ 256 Kbytes)
- แหล่งจ่ายไฟ 5V
- เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต USB

### 2.6.2 โปรแกรม Code Composer Studio (CCS)

โปรแกรม Code Composer Studio เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการเชื่อมโยงคอมพิวเตอร์กับบอร์ดตระกูล TMS320C3x ซึ่งจะมีเครื่องมือสำหรับการสร้างโค้ด เช่น คอมไพเลอร์ภาษาซี , แอสเซมเบลอร์ และลิงค์เกอร์

โดยคอมไพเลอร์ภาษาซีจะเป็นซอฟต์แวร์ที่ลงท้ายด้วย .c เพื่อสร้างไฟล์ซอสภาษาแอสเซมบลี ซึ่งลงท้ายด้วย .asm จากนั้นไฟล์ซอสนี้จะสร้างภาษาเครื่อง ซึ่งลงท้ายด้วย .obj ลิงค์เกอร์ จะรวมไฟล์ .obj กับไลบรารีเพื่อเป็นอินพุตในการสร้างเอ็กซ์คิวทิวไฟล์ ซึ่งลงท้ายด้วย .out และไฟล์นี้จะสามารถโหลดและรันบนบอร์ดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

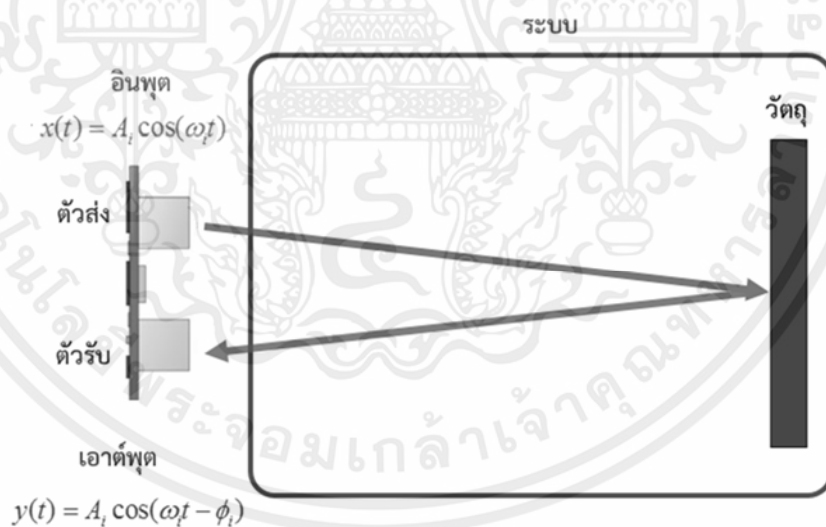
# หลักการวัดระยะทางที่นำเสนอ

### 3.1 กล่าวนำ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการวัดระยะทางด้วยคลื่นอัลตราโซนิกโดยใช้สัญญาณที่มีความถี่ 2 ความถี่ โดยจะอธิบายถึงหลักการนำเสนอ การวัดระยะทางด้วยสัญญาณความถี่ 1 ความถี่ การวัดระยะทางด้วยความถี่ 2 ความถี่และการดำเนินการวัดระยะทางด้วยวิธีการที่นำเสนอ

### 3.2 การวัดระยะทางด้วยสัญญาณความถี่ 1 ความถี่

การหาระยะทางด้วยอัลตราโซนิกในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะอนุมานว่า การส่งสัญญาณผ่านตัวกลาง (อากาศ) จะถือว่าเป็นระบบๆ หนึ่ง ซึ่งปราศจากความผิดเพี้ยน แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยระบบที่ปราศจากความผิดเพี้ยนคือ ระบบซึ่งเอาต์พุตมีรูปร่างเหมือนกันกับอินพุตแต่อาจจะมีขนาดต่างกัน หรือมีการหน่วงเวลาของสัญญาณเกิดขึ้น ซึ่งอธิบายดังสมการที่ 2.28



รูปที่ 3.1 ระบบของการวัดระยะทางด้วยสัญญาณอัลตราโซนิก 1 ความถี่

โดยสัญญาณ  $x(t)$  เป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีองค์ประกอบความถี่เดียวหรือเรียกว่า สัญญาณโมโนโทนที่ส่งจากตัวส่งอัลตราโซนิกเดินทางผ่านอากาศและกระทบวัตถุเป็นอินพุตของระบบ ดังแสดงในเอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สมการที่ 3.3

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x(t) = A_i \cos(\omega t) \quad (3.3)$$

ดังนั้นสัญญาณที่สะท้อนกลับมาที่ตัวรับหรือเอาต์พุตของระบบ  $y(t)$  จะมีค่า

$$\begin{aligned} y(t) &= A_i \cos(\omega_i t - \phi_i) \\ &= A_i \cos(\omega_i t - \omega_i t_d) \end{aligned} \quad (3.4)$$

โดยที่  $\phi_i = \omega_i t_d$  คือเฟสของสัญญาณภายใต้อิทธิพลของ  $t_d$  โดยที่  $t_d$  คือ ระยะเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทาง ดังนั้นจะสามารถหาค่าระยะเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้ในการเดินทางไปกลับระหว่างตัวรับและตัวส่งอัลตราโซนิกได้จาก

$$t_d = \frac{\phi_i}{\omega_i} \quad (3.5)$$

โดยที่  $\omega_i = 2\pi f_i$  ซึ่งเป็นความถี่เชิงมุมของคลื่นอัลตราโซนิกและจากค่าระยะเวลาที่คลื่นใช้เดินทางนี้ จะสามารถนำไปคำนวณหาระยะทางระหว่างวัตถุกับตัวรับและตัวส่งอัลตราโซนิก ( $R$ ) ได้จาก

$$\begin{aligned} R &= \frac{vt_d}{2} \\ &= \frac{v\phi_i}{2\omega_i} \end{aligned} \quad (3.6)$$

โดยที่  $v$  คือความเร็วในการเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกในอากาศมีค่าเท่ากับ 346 m/s ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

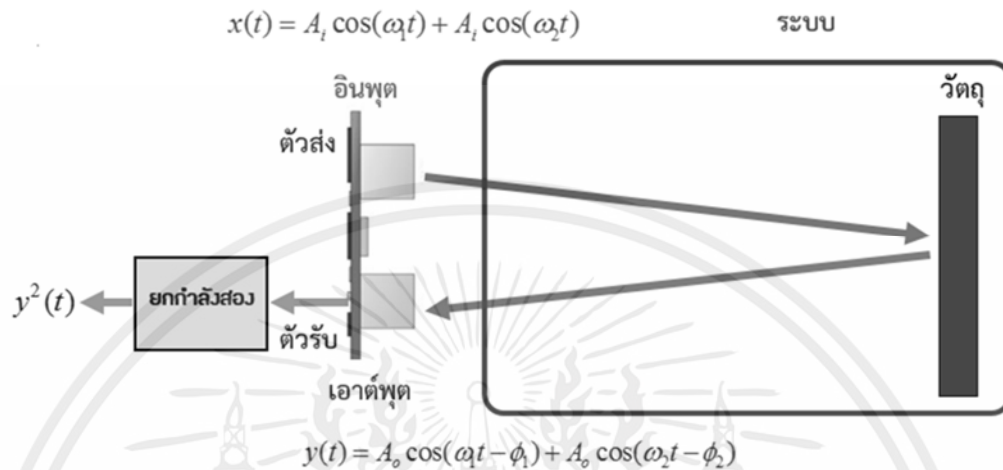
เนื่องจากเซนเซอร์อัลตราโซนิกที่ใช้ทำงานอยู่ที่ความถี่ 40 kHz และหากต้องการหาค่าระยะทางมากที่สุดที่จะหาได้จากวิธีการใช้ความถี่เดียวกัน ค่า  $\phi_i$  จะมีค่ามากที่สุดคือ  $2\pi$  เนื่องจากเป็นค่าเฟสสูงสุดที่ตัวตรวจจับเฟสจะตรวจจับได้ ดังนั้นเมื่อแทนค่าลงไปนสมการที่ 3.6 จะได้

$$\begin{aligned} R &= \frac{v\phi_i}{2\omega_i} \\ &= \frac{346(2\pi)}{2(2\pi 40000)} \\ &= 4.3 \text{ mm.} \end{aligned}$$

จะเห็นว่าค่าระยะทางมากที่สุดที่สามารถวัดได้โดยการใช้สัญญาณความถี่ 1 ความถี่มีค่าเพียง 4.3 มิลลิเมตรเท่านั้น ซึ่งถือว่าเป็นค่าระยะทางที่น้อยมาก

### 3.3 การวัดระยะทางด้วยที่นำเสนอบนการใช้สัญญาณความถี่ 2 ความถี่

เพื่อที่จะเพิ่มระยะทางในการวัด วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการวัดระยะทางด้วยการใช้สัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 2 ความถี่ โดยระบบแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ระบบของการวัดระยะทางด้วยสัญญาณอัลตราโซนิก 2 ความถี่

หากทำการสร้างสัญญาณ  $x(t)$  ที่ประกอบไปด้วยสัญญาณ 2 ความถี่แล้วให้เป็นอินพุตของตัวส่งอัลตราโซนิก ดังสมการ

$$x(t) = A_1 \cos(\omega_1 t) + A_1 \cos(\omega_2 t) \quad (3.7)$$

ค่า  $y(t)$  ซึ่งเป็นสัญญาณที่สะท้อนกลับจากวัตถุ คือ

$$y(t) = A_0 \cos(\omega_1 t - \phi_1) + A_0 \cos(\omega_2 t - \phi_2) \quad (3.8)$$

โดยที่  $\phi_1 = \omega_1 t_d$  และ  $\phi_2 = \omega_2 t_d$  คือเฟสของสัญญาณทั้งสอง ภายใต้อิทธิพลของ  $t_d$  ตามลำดับ และเมื่อทำการนำสัญญาณ  $y(t)$  นี้มายกกำลังสอง จะได้สมการคือ

$$y^2(t) = A_0^2 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \cos[2\omega_1 t - 2\phi_1] + \cos[(\omega_1 + \omega_2)t - (\phi_1 + \phi_2)] \right. \quad (3.9)$$

$$\left. + \cos[(\omega_1 - \omega_2)t - (\phi_1 - \phi_2)] + \frac{1}{2} \cos(2\omega_2 t - 2\phi_2) \right\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.9 ทำให้สามารถทราบค่าความต่างเฟสของสัญญาณทั้งสองได้ จากเทอมที่ 4 ทางขวามือคือ  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = \omega_1 t_d - \omega_2 t_d$  ด้วยการแปลงฟูเรียร์ ดังนั้นทำให้สามารถหาระยะเวลาที่คลื่นเดินทางได้ จากสมการ

$$t_d = \frac{\Delta\phi}{\Delta\omega} \quad (3.10)$$

โดยที่  $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$

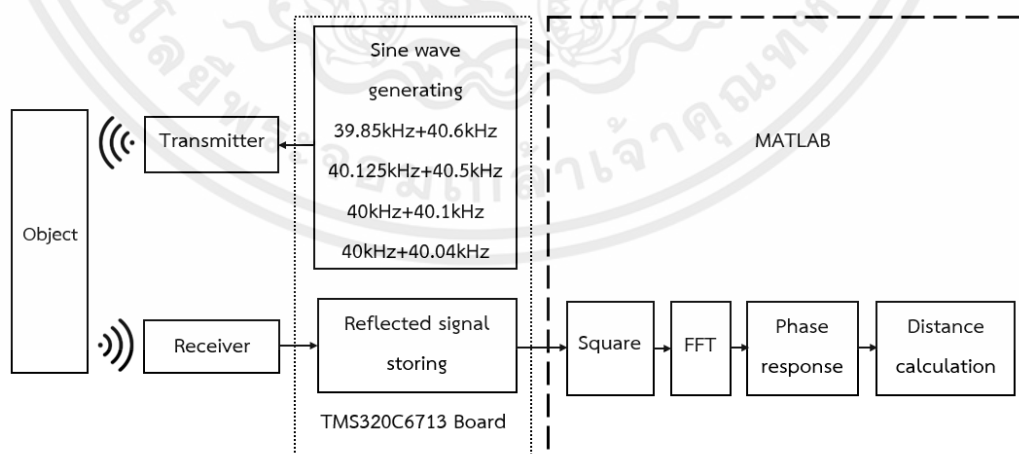
สุดท้ายค่าเวลาจะนำไปสู่การหาระยะทางระหว่างตัวส่งคลื่นกับวัตถุที่สะท้อนคลื่น ได้คือ

$$R = \frac{vt_d}{2} = \frac{v\Delta\phi}{2\Delta\omega} \quad (3.11)$$

จากสมการที่ 3.11 จะเห็นได้ว่า ระยะทางที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับความต่างความถี่และเฟสของสัญญาณ โดยถ้าความต่างความถี่มีค่าน้อย ระยะทางที่วัดได้ก็จะมีค่ายิ่งมาก ซึ่งแตกต่างจากการใช้สัญญาณความถี่เดียว ดังนั้นจึงจะเห็นว่าวิธีการวัดระยะทางโดยการใช้สัญญาณที่มีความถี่ 2 ความถี่สามารถเพิ่มระยะทางในการวัดได้

### 3.4 การดำเนินการวัดระยะทางด้วยวิธีการที่น่าเสนอ

ในการใช้อัลตราโซนิกวัดระยะทางในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถแสดงขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมของการวัดระยะทาง นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C6713 จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณรูปไซน์ที่มีองค์ประกอบความถี่ 39.85 kHz กับ 40.6 kHz สัญญาณรูปไซน์ที่มีองค์ประกอบความถี่ 40.125 kHz

กับ 40.5 kHz สัญญาณรูปไซน์ที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.1 kHz และสัญญาณรูปไซน์ที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.04 kHz ซึ่งบอร์ดนีมีข้อดีคือ สามารถสร้างสัญญาณที่มีความถี่สูงและมีความละเอียดได้ จากนั้นสัญญาณไซน์ที่สร้างขึ้นจะเป็นอินพุตให้กับตัวส่งอัลตราโซนิกและเมื่อสัญญาณไปกระทบกับวัตถุ สัญญาณก็จะสะท้อนกลับมาที่ตัวรับ จากนั้นสัญญาณที่รับได้จะถูกนำมาคำนวณหาระยะทางด้วยโปรแกรม MATLAB โดยสัญญาณที่รับมาจะถูกยกกำลังสอง หลังจากนั้นสัญญาณดังกล่าวจะถูกแปลงฟูเรียร์ (FFT) และจะทำให้ผลตอบสนองทางเฟสที่องค์ประกอบความถี่ต่ำถูกตรวจจับ สุดท้ายระยะทางของวัตถุก็จะสามารถคำนวณได้จากค่าความต่างเฟสนี้

จากบล็อกไดอะแกรมสามารถแบ่งขั้นตอนการหาระยะทางด้วยการใช้อัลตราโซนิกโดยสัญญาณที่มีความถี่ 2 ความถี่ได้ 5 ขั้นตอน คือ การสร้างสัญญาณรูปไซน์ที่มีองค์ประกอบความถี่ 2 ความถี่ การบันทึกสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากวัตถุ การนำสัญญาณที่บันทึกมาดำเนินการทางคณิตศาสตร์ การตรวจจับผลตอบสนองทางเฟส และการคำนวณระยะทาง

### 3.4.1 การสร้างสัญญาณรูปไซน์ที่มีองค์ประกอบความถี่ 2 ความถี่

ในการสร้างสัญญาณรูปไซน์ด้วยบอร์ดประมวลผลดิจิทัล TMS320C6713 นั้น เนื่องจากบอร์ด DSP มีอัตราการสุ่มตัวอย่างอยู่ในช่วง 8 – 96 kHz ดังนั้นความถี่มากที่สุดที่บอร์ดจะสามารถสร้างได้เท่ากับ 48 kHz ซึ่งเซนเซอร์อัลตราโซนิกที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำงานที่ย่านความถี่ 40 kHz และจะใช้สัญญาณ 4 สัญญาณ คือ ที่ความต่างความถี่ 750 Hz สัญญาณจะมีองค์ประกอบความถี่ที่ 39.85 kHz กับ 40.6 kHz ที่ความต่างความถี่ 375 Hz องค์ประกอบความถี่จะมีค่า 40.125 kHz กับ 40.5 kHz ที่ความต่างความถี่ 100 Hz องค์ประกอบความถี่จะมีค่า 40 kHz กับ 40.1 kHz และที่ความต่างความถี่ 40 Hz องค์ประกอบความถี่จะมีค่า 40 kHz กับ 40.04 kHz โดยการใช้สมการผลต่างและเขียนโค้ดภาษาซีเพื่อให้บอร์ด DSP สร้างสัญญาณดังกล่าวขึ้นมา ซึ่งสมการเชิงผลต่างที่ใช้ในการสร้างสัญญาณรูปไซน์ คือ

$$y(t) = 2 \cos \theta y(t-1) - y(t-2) \quad (3.9)$$

ซึ่ง

$$\theta = \omega T_s = 2\pi f T_s = \frac{2\pi f}{F_s} \quad (3.10)$$

โดยที่  $f$  คือ ความถี่ของสัญญาณรูปไซน์ที่ต้องการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 F<sub>s</sub> คือ อัตราการสุ่มตัวอย่าง  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น เมื่อแทนค่าความถี่ที่ต้องการ ( $f$ ) ซึ่งสัญญาณแรกคือ สัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 39.85 kHz และ 40.6 kHz และอัตราการสุ่มตัวอย่าง ( $F_s$ ) ของบอร์ด DSP ซึ่งมีค่าเท่ากับ 96 kHz ลงในสมการที่ 3.10 จะได้ว่า

$$\theta_{y1} = \frac{2\pi(39.85k)}{96k} = 2.608$$

$$\theta_{z1} = \frac{2\pi(40.6k)}{96k} = 2.657$$

และเมื่อนำค่า  $\theta_1$  และ  $\theta_2$  แทนลงไปในสมการที่ 3.9 จะได้สมการผลต่างในการสร้างสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่ 39.85 kHz คือ  $y_1(t)$  และที่มีความถี่ 40.6 kHz คือ  $z_1(t)$  แสดงได้ดังนี้

$$y_1(t) = 2 \cos(2.608)y(t-1) - y(t-2)$$

$$= (-1.722)y(t-1) - y(t-2)$$

$$z_1(t) = 2 \cos(2.657)z(t-1) - z(t-2)$$

$$= (-1.770)z(t-1) - z(t-2)$$

ในกรณีสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40.125 kHz และ 40.5 kHz จะได้

$$\theta_{y2} = \frac{2\pi(40.125k)}{96k} = 2.626$$

$$\theta_{z2} = \frac{2\pi(40.5k)}{96k} = 2.651$$

และสมการผลต่างของสัญญาณความถี่ 40.125 kHz และ 40.5 kHz คือ  $y_2(t)$  และ  $z_2(t)$  ตามลำดับ

$$y_2(t) = 2 \cos(2.626)y(t-1) - y(t-2)$$

$$= (-1.740)y(t-1) - y(t-2)$$

$$z_2(t) = 2 \cos(2.651)z(t-1) - z(t-2)$$

$$= (-1.764)z(t-1) - z(t-2)$$

กรณีสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz และ 40.1 kHz จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อที่ และเผยแพร่ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta_{y3} = \frac{2\pi(40)}{96k} = 2.618$$

$$\theta_{z3} = \frac{2\pi(40.1k)}{96k} = 2.625$$

ดังนั้นจะได้สมการผลต่างของสัญญาณความถี่ 40 kHz และ 40.1 kHz คือ  $y_3(t)$  และ  $z_3(t)$  ตามลำดับ

$$\begin{aligned}y_3(t) &= 2 \cos(2.618)y(t-1) - y(t-2) \\ &= (-1.732)y(t-1) - y(t-2) \\ z_3(t) &= 2 \cos(2.625)z(t-1) - z(t-2) \\ &= (-1.738)z(t-1) - z(t-2)\end{aligned}$$

กรณีสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz และ 40.04 kHz จะได้

$$\begin{aligned}\theta_{y_4} &= \frac{2\pi(40)}{96k} = 2.618 \\ \theta_{z_3} &= \frac{2\pi(40.04k)}{96k} = 2.621\end{aligned}$$

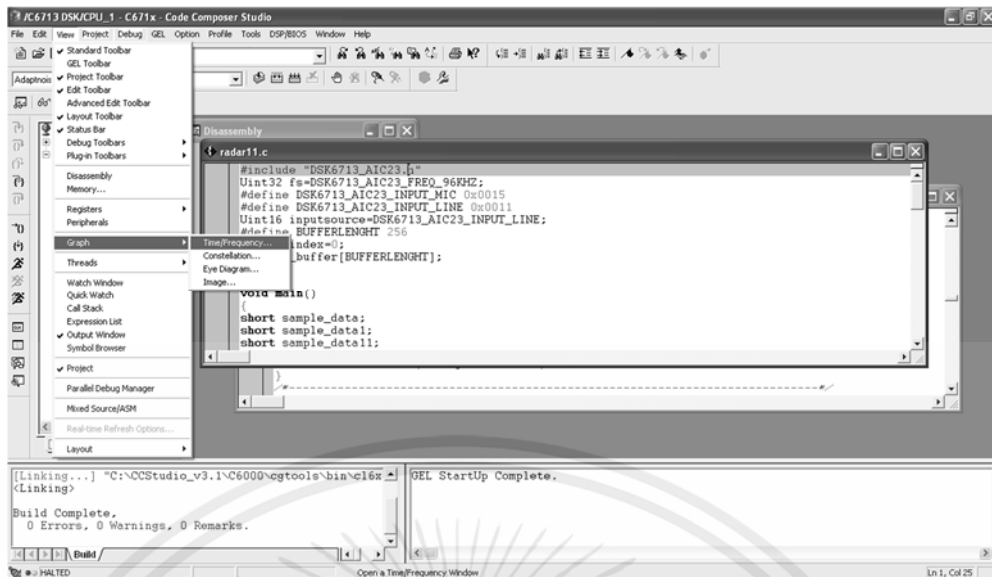
ดังนั้นจะได้สมการผลต่างของสัญญาณความถี่ 40 kHz และ 40.05 kHz คือ  $y_4(t)$  และ  $z_4(t)$  ตามลำดับ

$$\begin{aligned}y_4(t) &= 2 \cos(2.618)y(t-1) - y(t-2) \\ &= (-1.732)y(t-1) - y(t-2) \\ z_4(t) &= 2 \cos(2.621)z(t-1) - z(t-2) \\ &= (-1.735)z(t-1) - z(t-2)\end{aligned}$$

### 3.4.2 การบันทึกสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากวัตถุ

เมื่อสัญญาณอัลตราโซนิกกระทบที่วัตถุแล้ว สัญญาณดังกล่าวจะสะท้อนกลับมาที่ตัวรับอัลตราโซนิก จากนั้นสัญญาณดังกล่าวจะเป็นอินพุตให้กับบอร์ดประมวลผล ซึ่งจะเข้ามาที่พอร์ต Line In โดยในระหว่างการรับสัญญาณที่สะท้อนกลับมา สัญญาณนี้จะถูกเก็บเข้ามาไว้ในบัฟเฟอร์โดยการเขียนโค้ดผ่านทางโปรแกรม Code Composer Studio (CCS) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ร่วมกับบอร์ด DSP แสดงได้ดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 โปรแกรม Code Composer Studio

ซึ่งค่าความยาวบัฟเฟอร์สามารถกำหนดได้จากการเขียนโค้ด ดังแสดงได้ คือ

```
#define BUFFERLENGHT 2048
int bufindex=0;
int out_buffer[BUFFERLENGHT];
```

โดยที่ out\_buffer[BUFFERLENGHT] จะใช้กำหนดความยาวบัฟเฟอร์ ซึ่งในที่นี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2048 จุดข้อมูลและ bufindex คือ ดัชนีชี้ตำแหน่งในบัฟเฟอร์และการกำหนดให้บัฟเฟอร์เก็บสัญญาณที่เข้ามาทางพอร์ต Line in สามารถแสดงได้ คือ

```
input=input_left_sample();
out_buffer[bufindex++]=input;
if(bufindex>=BUFFERLENGHT) bufindex=0;
```

โดยที่ input\_left\_sample() คือสัญญาณที่รับเข้ามาทางพอร์ต Line in และเมื่อสัญญาณถูกเก็บในบัฟเฟอร์แล้วก็จะทำการบันทึกข้อมูลเป็นไฟล์ .dat

### 3.4.3 การนำสัญญาณที่บันทึกมาดำเนินการทางคณิตศาสตร์

เมื่อสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากวัตถุแล้ว สัญญาณนี้จะถูกบันทึกไว้เป็นไฟล์ .dat เพื่อนำสัญญาณดังกล่าวมาดำเนินการทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยเริ่มแรกสัญญาณจะถูกนำมาแยกกำลังสอง เพื่อให้สามารถตรวจจับความต่างเฟสที่องค์ประกอบความถี่ซึ่งเป็นความต่าง

ความถี่ของสัญญาณ 2 ความถี่ได้ จากนั้นสัญญาณที่ถูกยกกำลังสองจะถูกนำไปแปลงฟูเรียร์ เพื่อให้เห็นองค์ประกอบของสัญญาณที่มีความถี่ต่างๆ

### 3.4.4 การตรวจจับผลตอบสนองทางเฟส

การตรวจจับผลตอบสนองทางเฟสของสัญญาณที่สะท้อนกลับที่ผ่านการยกกำลังสองแล้วนั้นสามารถทำได้โดยการใช้โปรแกรม MATLAB พล็อตค่าเฟสของสัญญาณดังกล่าว

### 3.4.5 การคำนวณระยะทาง

เมื่ออ่านค่าความต่างเฟสได้แล้ว ระยะทางจากตัวรับอัลตราโซนิกกับวัตถุสามารถคำนวณหาได้โดยเมื่อแทนค่า  $v$  เท่ากับ 346 m/s และ กรณีความต่างความถี่เท่ากับ 750 Hz ดังนั้น  $\Delta\omega$  เท่ากับ  $2\pi(750)$  ลงในสมการที่ 3.11 จะได้

$$R = \frac{346\Delta\phi}{2(2\pi * 750)} = 0.037\Delta\phi \text{ m.}$$

กรณีความต่างความถี่เท่ากับ 375 Hz จะได้

$$R = \frac{346\Delta\phi}{2(2\pi * 375)} = 0.073\Delta\phi \text{ m.}$$

กรณีความต่างความถี่เท่ากับ 100 Hz จะได้

$$R = \frac{346\Delta\phi}{2(2\pi * 100)} = 0.275\Delta\phi \text{ m.}$$

และในกรณีความต่างความถี่เท่ากับ 40 Hz จะได้

$$R = \frac{346\Delta\phi}{2(2\pi * 40)} = 0.688\Delta\phi \text{ m.}$$

โดยที่  $\Delta\phi$  คือ ค่าความต่างเฟส (เรเดียน)

### 3.4.6 ขอบเขตของการวัดระยะทาง

เนื่องจากการวัดระยะทางด้วยการใช้ค่าความต่างเฟสในวิทยานิพนธ์นี้มีข้อจำกัด เนื่องจากค่าความต่างเฟสมากที่สุดที่สามารถตรวจจับได้มีค่าเท่ากับ  $\pi$  ดังนั้นทำให้ระยะทางที่วัดได้มีระยะที่จำกัดโดยเมื่อแทนค่าความต่างเฟสมากที่สุดที่สามารถตรวจจับได้นี้ลงในสมการที่ 3.11 จะได้

กรณีความถี่เท่ากับ 750 Hz

$$R = \frac{346(\pi)}{2(2\pi * 750)} = 0.115m.$$

ระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถวัดได้จากการใช้ความถี่ 750 Hz มีค่าเท่ากับ 0.115 เมตร  
กรณีความถี่เท่ากับ 375 Hz ค่าระยะทางที่มากที่สุด คือ

$$R = \frac{346(\pi)}{2(2\pi * 375)} = 0.23m.$$

กรณีความถี่เท่ากับ 100 Hz ค่าระยะทางที่มากที่สุด คือ

$$R = \frac{346(\pi)}{2(2\pi * 100)} = 0.865m.$$

กรณีความถี่เท่ากับ 40 Hz ค่าระยะทางที่มากที่สุด คือ

$$R = \frac{346(\pi)}{2(2\pi * 50)} = 2.16m.$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองโดยจะแบ่งออกเป็น 10 ส่วน คือ การตั้งสมมติฐานและทดสอบสมมติฐานด้วยโปรแกรม MATLAB การจำลองการวัดระยะทางด้วยโปรแกรม MATLAB การออกแบบการทดลองและการบันทึกผลการวัดระยะทาง ผลการสร้างสัญญาณรูปไซน์ที่มีองค์ประกอบความถี่ 2 ความถี่ ผลการบันทึกและดำเนินการทางคณิตศาสตร์สัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากวัตถุ ผลการตรวจจับผลตอบสนองทางเฟสด้วยโปรแกรม MATLAB ผลการวัดระยะทางที่น่าเสนอวิเคราะห์ผลการทดลองและการเปรียบเทียบวิธีการในวิทยานิพนธ์กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 4.2 การตั้งสมมติฐานและทดสอบสมมติฐานด้วยโปรแกรม MATLAB

ก่อนที่จะทำการทดลองวัดระยะทางด้วยเซนเซอร์อัลตราโซนิก วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการตั้งสมมติฐานและทดสอบสมมติฐานด้วยการจำลองบนโปรแกรม MATLAB ซึ่งตั้งสมมติฐานในการวัดระยะทางของวัตถุด้วยการใช้อัลตราโซนิกที่มีความถี่ 2 ค่าซึ่งมีค่าความถี่ที่ 39.85 kHz และ 40.6 kHz โดยที่วัตถุตั้งห่างจากตัวรับและตัวส่งอัลตราโซนิกเป็นระยะทาง 0.1 เมตร ดังนั้นจากสมการที่ 3.11 สามารถคำนวณเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางในอากาศได้ คือ

$$t_d = \frac{2R}{v} = \frac{2(0.1)}{346} = 0.578ms$$

และจากสมการที่ 3.10 ทำให้สามารถคำนวณหาค่าความต่างเฟสของคลื่นได้ คือ

$$\Delta\theta = \Delta\omega t_d = (2\pi)(40600 - 39850)0.000578 = 2.724rad$$

โดยที่สัญญาณที่ส่งออกมาจากตัวส่งอัลตราโซนิก มีค่าเป็นไปดังสมการ

$$x(t) = \cos(2\pi 39850t) + \cos(2\pi 40600t)$$

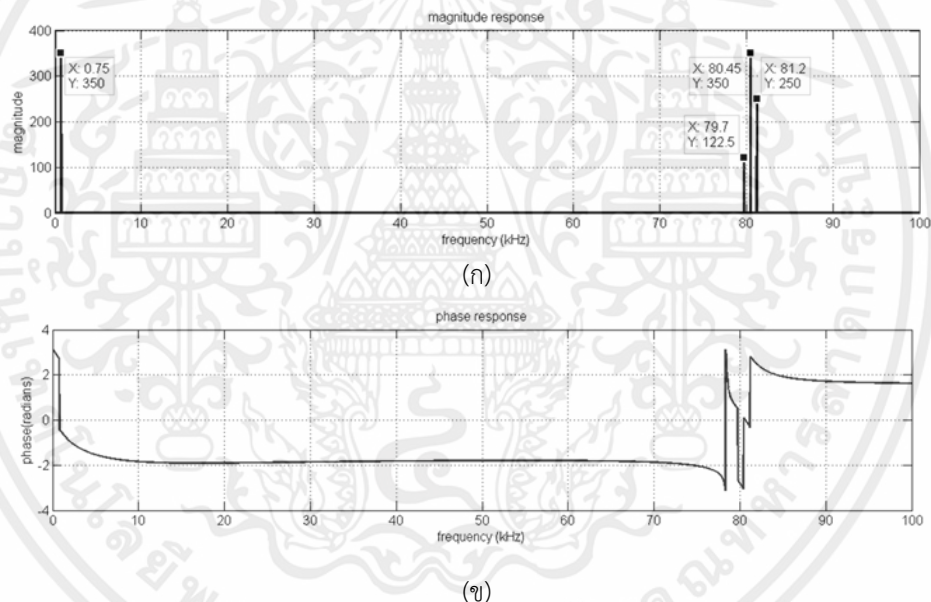
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
หากสัญญาณที่ได้รับมาจากการสะท้อนซึ่งรับได้ที่ตัวรับอัลตราโซนิกมีค่าดังสมการ

$$y(t) = 0.7 \cos(2\pi 39850t - 0.125) + 0.6 \cos(2\pi 40600t - 2.849)$$

และสุดท้ายทำการยกกำลังสองของสัญญาณ  $y(t)$  ซึ่งจะได้ดังนี้

$$y^2(t) = 0.42 \left[ 1 + \frac{1}{2} \cos(2\pi 79700t - 0.25) + \cos(2\pi 80450t - 2.974) \right. \\ \left. + \cos(2\pi 750t - 2.724) + \frac{1}{2} \cos(2\pi 81200t - 2.556) \right]$$

และเมื่อทำการแปลงอนุกรมฟูเรียร์ของสัญญาณ  $y^2(t)$  จะเห็นองค์ประกอบของสัญญาณที่ความถี่ที่ 750 Hz , 79.7 kHz, 80.45 kHz และ 81.2 kHz ดังแสดงในรูปที่ 4.1ก ผลตอบสนองทางเฟสของสัญญาณดังกล่าวแสดงในรูปที่ 4.1ข



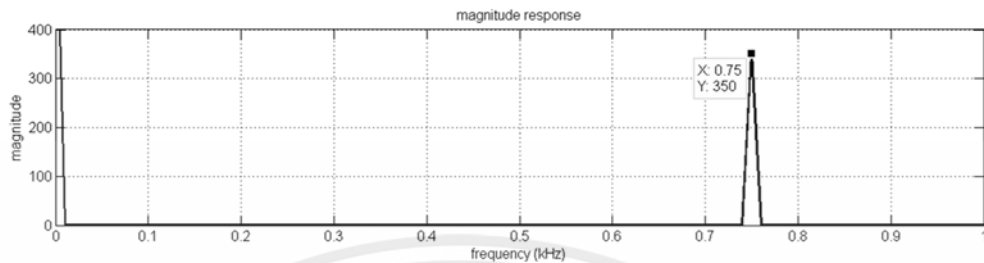
รูปที่ 4.1 ผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของ  $y^2(t)$  หลังจากทำ FFT

(ก) แสดงผลตอบสนองทางขนาดของทุกความถี่

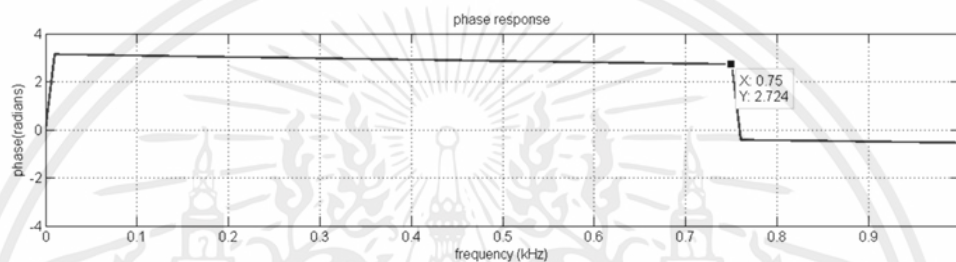
(ข) แสดงผลตอบสนองทางเฟสของทุกความถี่

โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะหาระยะทางจากความแตกต่างเฟส ดังนั้นเราจะให้ความสำคัญกับสัญญาณที่องค์ประกอบความถี่ที่ 750 Hz ซึ่งแสดงผลตอบสนองทางขนาดในโดเมนความถี่ดังรูปที่ 4.2ก และเมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเฟสที่ความถี่นี้ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.2ข พบว่ามีค่า  $2.724 \text{ rad}$  ซึ่งตรงกับที่ทำการคำนวณไว้

ดังนั้นเป็นการยืนยันสมมติฐานว่าเราสามารถวัดระยะทางของวัตถุด้วยการใช้ความต่างเฟสของคลื่นอัลตราโซนิกที่มี 2 ความถี่ได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของ  $y^2(t)$  หลังจากทำ FFT ที่ความถี่ 750 Hz

(ก) แสดงผลตอบสนองทางขนาด

(ข) แสดงผลตอบสนองทางเฟส

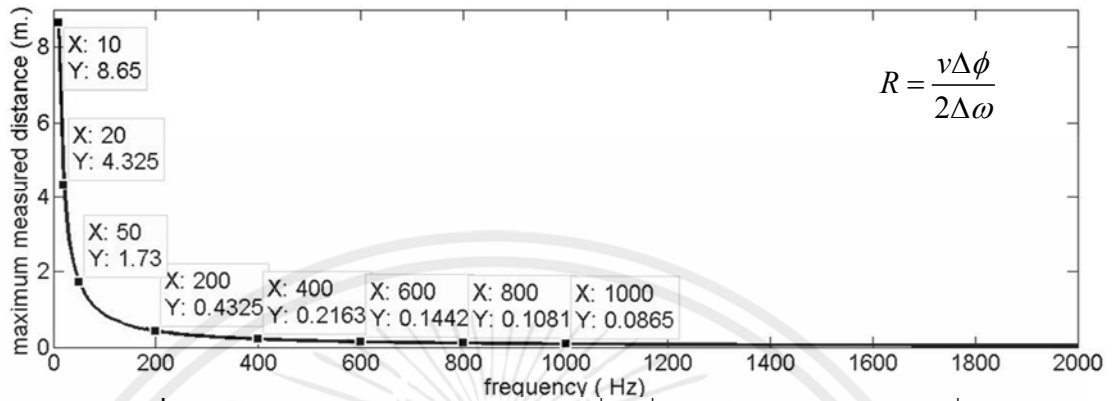
### 4.3 การจำลองการวัดระยะทางด้วยโปรแกรม MATLAB

ก่อนที่จะทำการวัดระยะทางด้วยอัลตราโซนิกโดยใช้สัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่ 2 ความถี่ ด้วยการทดลองจริง จะทำการจำลองการวัดระยะทางด้วยวิธีการนี้โดยการใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของหลักการที่นำเสนอ โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วน คือ การหา ระยะทางมากที่สุดเทียบกับความต่างความถี่ค่าต่างๆ กรณีใช้ความต่างความถี่ 50 Hz กรณีใช้ความต่างความถี่ 500 Hz และกรณีความต่างความถี่ 2 kHz

#### 4.3.1 ระยะทางมากที่สุดเทียบกับความต่างความถี่

จากความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับค่าความต่างความถี่ ซึ่งแสดงในสมการที่ 3.11 เมื่อทำการแทนค่าความต่างเฟสมากที่สุดที่ตรวจจับได้ มีค่าเท่ากับ  $\pi$  เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างถี่กับระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถวัดได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอ สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังรูปที่ 4.3 โดยจะเห็นว่ายิ่งค่าความต่างความถี่มีค่าน้อย ค่าระยะทางที่สามารถวัดได้ก็ยิ่งมีค่ามาก เช่น หากค่าความต่างความถี่มีค่า 10 Hz ระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถวัดได้มีค่าถึง 8.65

เมตร ในขณะที่การใช้ความต่างความถี่เท่ากับ 1 kHz ค่าระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถวัดได้จะมีค่าเพียง 8.65 เซนติเมตร



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระยะทางมากที่สุดที่วัดได้กับค่าความต่างความถี่

#### 4.3.2 กรณีความต่างความถี่ 20 Hz

สำหรับการจำลองการหาระยะทางกรณีความต่างความถี่ 20 Hz จากสมการที่ 3.11 ค่าระยะทางมากที่สุดที่สามารถวัดได้ด้วยวิธีการนี้ คือ

$$R = \frac{v\Delta\phi}{2\Delta\omega} = \frac{346(\pi)}{2(2\pi)(20)} = 4.325m.$$

โดยสัญญาณที่ตัวส่งอัลตราโซนิกมีค่า

$$x(t) = \cos(2\pi 40020t) + \cos(2\pi 40000t)$$

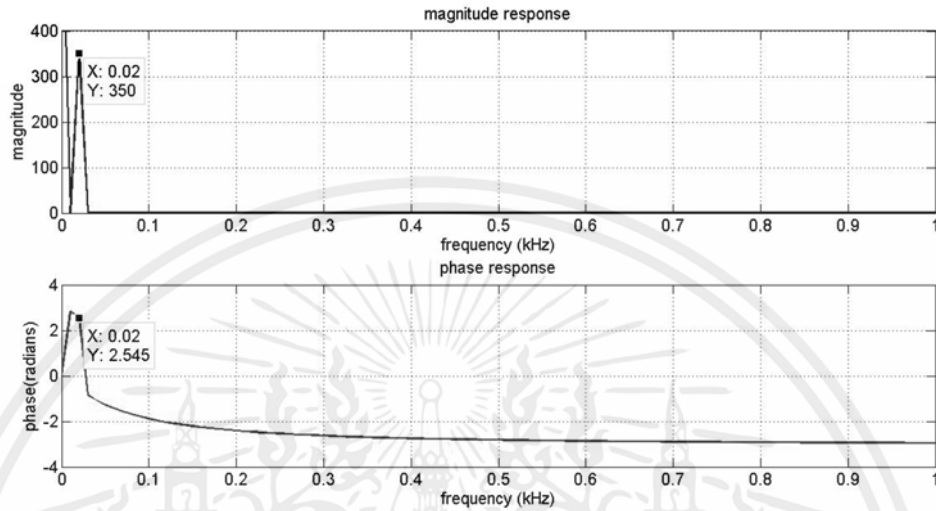
ดังนั้น สมมติให้สัญญาณที่ตัวรับอัลตราโซนิกมีค่า

$$y(t) = 0.7 \cos(2\pi 40020t - 0.407) + 0.6 \cos(2\pi 40000t - 2.952)$$

เมื่อทำการยกกำลังสองสัญญาณที่ตัวรับอัลตราโซนิกจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่  $y^2(t) = 0.42[1 + \frac{1}{2} \cos(2\pi 80040t - 0.814) + \cos(2\pi 80000t - 2.762) + \cos(2\pi 20t - 2.545) + \frac{1}{2} \cos(2\pi 80020t - 0.217)]$  ขนด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสัญญาณนี้มาแปลงฟูเรียร์จะทำให้สามารถตรวจจับผลตอบสนองทางเฟสที่องค์ประกอบความถี่ต่ำเพื่อนำไปคำนวณหาระยะทางได้ โดยผลตอบสนองทางขนาดและเฟสที่องค์ประกอบความถี่ต่ำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองทางขนาดและผลตอบสนองทางเฟส เมื่อความต่างความถี่มีค่า 20 Hz

จะเห็นว่าค่าความต่างเฟสที่ตรวจจับได้คือ  $2.545 \text{ rad}$  และจากสมการที่ 3.11 เมื่อนำค่าความต่างเฟสนี้มาคำนวณระยะทางจะได้

$$R = \frac{v\Delta\phi}{2\Delta\omega} = \frac{346(2.545)}{2(2\pi)(20)} = 3.5 \text{ m.}$$

#### 4.3.3 กรณีความต่างความถี่ 500 Hz

สำหรับการจำลองการหาระยะทางกรณีความต่างความถี่ 500 Hz ค่าระยะทางมากที่สุดที่สามารถวัดได้ด้วยความต่างความถี่นี้ คือ

$$R = \frac{v\Delta\phi}{2\Delta\omega} = \frac{346(\pi)}{2(2\pi)(500)} = 17.3 \text{ cm.}$$

เมื่อให้สัญญาณที่ตัวส่งอัลตราโซนิกมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 $x(t) = \cos(2\pi 40500t) + \cos(2\pi 40000t)$   
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบสงวนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

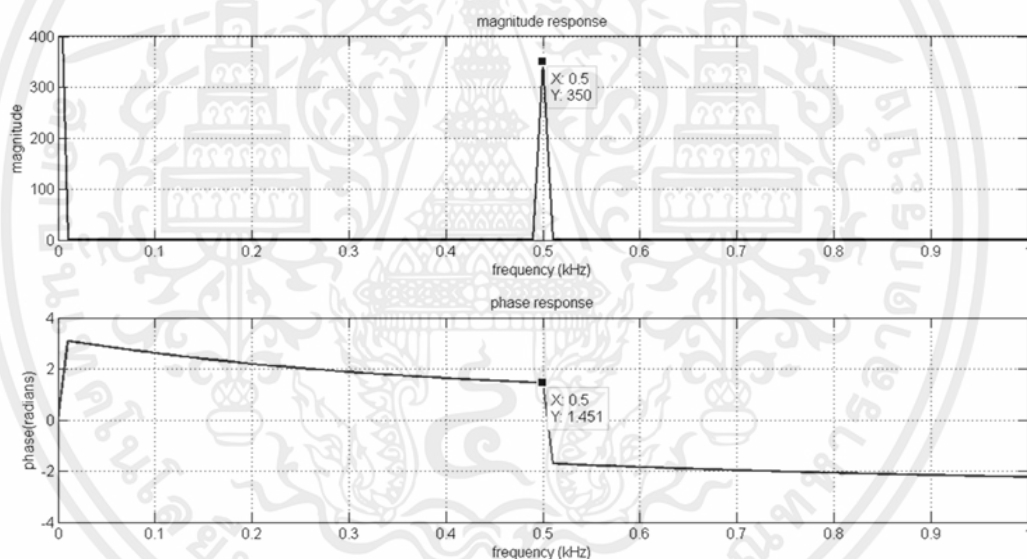
สัญญาณที่ตัวรับอัลตราโซนิกมีค่า

$$y(t) = 0.7 \cos(2\pi 40500t - 0.114) + 0.6 \cos(2\pi 40000t - 1.565)$$

เมื่อทำการยกกำลังสองสัญญาณที่ตัวรับอัลตราโซนิกจะได้

$$y^2(t) = 0.42 \left[ 1 + \frac{1}{2} \cos(2\pi 81000t - 0.228) + \cos(2\pi 80000t - 3.13) \right. \\ \left. + \cos(2\pi 500t - 1.451) + \frac{1}{2} \cos(2\pi 80500t - 1.679) \right]$$

เมื่อนำสัญญาณนี้มาแปลงฟูเรียร์จะทำให้สามารถตรวจจับผลตอบสนองทางเฟสที่องค์ประกอบความถี่ต่ำเพื่อนำไปคำนวณหาระยะทางได้ โดยผลตอบสนองทางขนาดและเฟสที่องค์ประกอบความถี่ต่ำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองทางขนาดและผลตอบสนองทางเฟส เมื่อความต่างความถี่มีค่า 500 Hz

จะเห็นว่าค่าความต่างเฟสที่ตรวจจับได้คือ  $1.451 \text{ rad}$  และเมื่อนำค่าความต่างเฟสนี้มาคำนวณระยะทางจะได้

$$R = \frac{v\Delta\phi}{2\Delta\omega} = \frac{346(1.451)}{2(2\pi)(500)} = 8 \text{ cm.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานและการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 กรณีความต่างความถี่ 2 kHz

สำหรับการจำลองการหาระยะทางกรณีความต่างความถี่ 2 kHz ค่าระยะทางมากที่สุดที่สามารถวัดได้ด้วยความต่างความถี่นี้ คือ

$$R = \frac{v\Delta\phi}{2\Delta\omega} = \frac{346(\pi)}{2(2\pi)(2000)} = 4.3\text{cm.}$$

เมื่อให้สัญญาณที่ตัวส่งอัลตราโซนิกมีค่า

$$x(t) = \cos(2\pi 39000t) + \cos(2\pi 41000t)$$

สัญญาณที่ตัวรับอัลตราโซนิกมีค่า

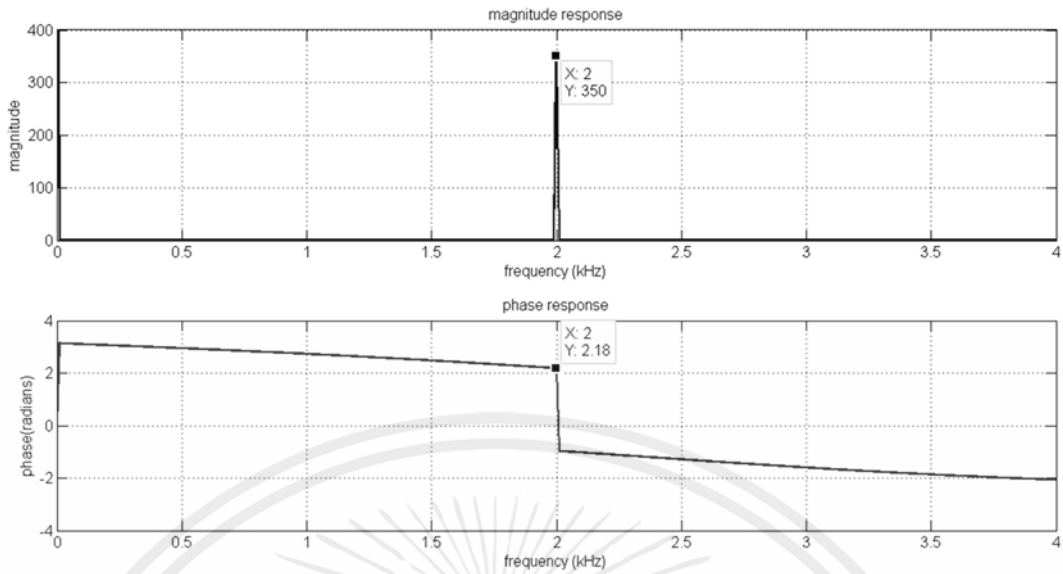
$$y(t) = 0.7 \cos(2\pi 39000t - 0.221) + 0.6 \cos(2\pi 41000t - 2.400)$$

เมื่อทำการยกกำลังสองสัญญาณที่ตัวรับอัลตราโซนิกจะได้

$$y^2(t) = 0.42 \left[ 1 + \frac{1}{2} \cos(2\pi 78000t - 0.442) + \cos(2\pi 82000t - 1.658) \right. \\ \left. + \cos(2\pi 2000t - 2.179) + \frac{1}{2} \cos(2\pi 80000t - 2.621) \right]$$

เมื่อนำสัญญาณนี้มาแปลงฟูเรียร์จะทำให้สามารถตรวจจับผลตอบสนองทางเฟสที่องค์ประกอบความถี่ต่ำเพื่อนำไปคำนวณหาระยะทางได้ โดยผลตอบสนองทางขนาดและเฟสที่องค์ประกอบความถี่ต่ำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองทางขนาดและผลตอบสนองทางเฟส เมื่อความต่างความถี่มีค่า 2 kHz

จะเห็นว่าค่าความต่างเฟสที่ตรวจจับได้คือ 2.18 rad เมื่อนำค่าความต่างเฟสนี้มาคำนวณระยะทางจะได้

$$R = \frac{v\Delta\phi}{2\Delta\omega} = \frac{346(2.18)}{2(2\pi)(2000)} = 3cm.$$

4.4 การออกแบบการทดลองและการบันทึกผลการวัดระยะทาง

การทดลองวัดระยะทางได้ถูกจัดตั้งขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การทดลองวัดระยะทาง

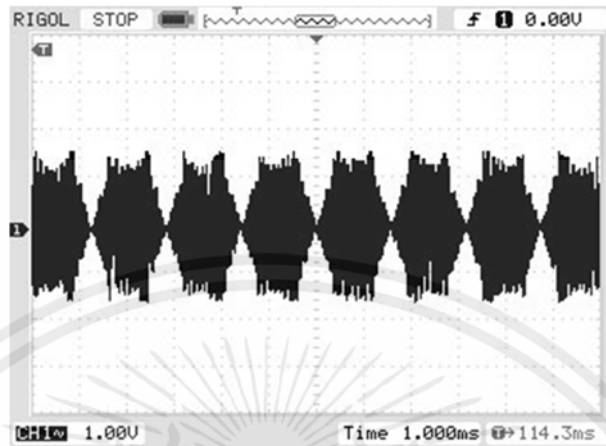
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้าหรือการนำออกไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย

ในการวัดระยะทางนั้น เซนเซอร์ตัวรับและตัวส่งอัลตราโซนิกจะอยู่ตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งเซนเซอร์ตัวส่งจะต่อเข้ากับพอร์ต Line Out และเซนเซอร์ตัวรับจะต่อกับพอร์ต Line in ของบอร์ด DSP และบอร์ดจะเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต usb เพื่อใช้งานบอร์ดร่วมกับโปรแกรม CCS v3.1 จากนั้นทำการวางวัตถุซึ่งในที่นี้คือกล่องสี่เหลี่ยมที่มีขนาด 40x30x10 เซนติเมตรเป็นระยะทางต่างๆ ซึ่งเป็นระยะทางตรงกับตัวรับและตัวส่งอัลตราโซนิก โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการทดลองที่ค่าความต่างความถี่ 4 ค่า คือ ที่ความต่างความถี่เท่ากับ 750 Hz ระยะทางมากที่สุดที่สามารถวัดได้คือ 11.5 เซนติเมตร ดังนั้น จึงจะทำการวัดระยะทางตั้งแต่ 1 – 15 เซนติเมตร กรณีความต่างความถี่เท่ากับ 375 Hz ระยะทางมากที่สุดที่สามารถวัดได้คือ 23 เซนติเมตร ดังนั้นจะทำการวัดระยะทางตั้งแต่ 1 – 25 เซนติเมตร กรณีความต่างความถี่เท่ากับ 100 Hz ระยะทางมากที่สุดที่สามารถวัดได้คือ 86.5 เซนติเมตร ดังนั้นจะทำการวัดระยะทางตั้งแต่ 5 – 100 เซนติเมตรและที่ความต่างความถี่เท่ากับ 40 Hz ระยะทางมากที่สุดที่สามารถวัดได้คือ 216 เซนติเมตร ดังนั้นจะทำการวัดระยะทางตั้งแต่ 10 – 230 เซนติเมตร และเนื่องจากอุณหภูมินั้นส่งผลต่อความเร็วในการเดินทางของคลื่นในอากาศ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงถูกจัดตั้งขึ้นในห้องที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส

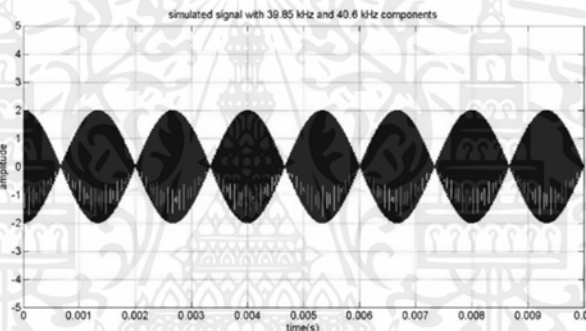
#### 4.5 ผลการสร้างสัญญาณรูปไซน์ที่มีองค์ประกอบความถี่ 2 ความถี่

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการสร้างสัญญาณไซน์ 4 สัญญาณด้วยบอร์ด TMS320C6713 ซึ่งแต่ละสัญญาณนั้นจะมีองค์ประกอบความถี่ 2 ความถี่ คือ 40.6 kHz กับ 39.85 kHz, 40.5 kHz กับ 40.125 kHz, 40 kHz กับ 40.1 kHz และ 40 kHz กับ 40.04 kHz เพื่อให้ค่าความต่างเฟสที่ได้จากสัญญาณทั้งสองมีค่าเท่ากับ 750 Hz, 375 Hz, 100 Hz และ 40 Hz ตามลำดับ โดยแต่ละสัญญาณจะเป็นอินพุตให้กับตัวส่งอัลตราโซนิก โดยสัญญาณแรก คือ สัญญาณรูปไซน์ที่มีองค์ประกอบความถี่ 40.6 kHz กับ 39.85 kHz ซึ่งสร้างจากบอร์ด DSP และทำการวัดด้วยออสซิลโลสโคป สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 สัญญาณในรูปที่ 4.9 เป็นสัญญาณดังกล่าวที่จำลองจากโปรแกรม MATLAB ในทำนองเดียวกันกับสัญญาณที่สองซึ่งคือสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ที่ 40.5 kHz กับ 40.125 kHz ที่สร้างจากบอร์ด DSP แสดงดังรูปที่ 4.10 โดยสัญญาณดังกล่าวที่จำลองขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.11 สัญญาณที่สามซึ่งเป็นสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ที่ 40 kHz กับ 40.1 kHz โดยสัญญาณที่สร้างจากบอร์ด แสดงดังรูป 4.12 ซึ่งสัญญาณดังกล่าวที่จำลองขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.13 และสัญญาณที่สี่คือสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ที่ 40 kHz กับ 40.04 kHz ที่สร้างจากบอร์ด DSP แสดงดังรูปที่ 4.14 และสัญญาณดังกล่าวที่จำลองขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.15 โดยเมื่อเปรียบเทียบสัญญาณที่สร้างจากบอร์ด

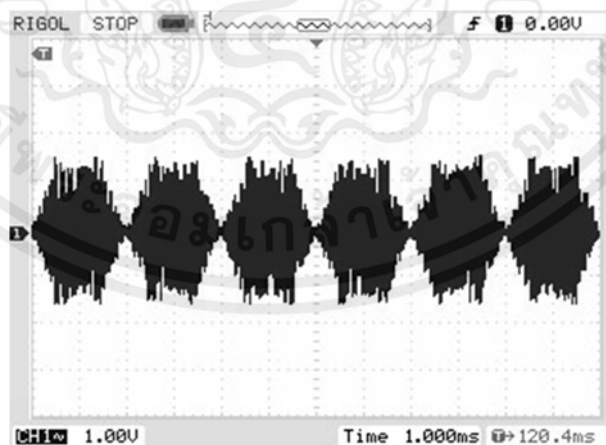
กับสัญญาณที่จำลองจากโปรแกรม MATLAB ทั้งสี่กรณีจะเห็นว่ารูปสัญญาณที่สร้างและจำลองเหมือนกันแสดงให้เห็นว่าสัญญาณที่สร้างจากบอร์ดนั้นถูกต้องตามหลักการ



รูปที่ 4.8 สัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40.6 kHz กับ 39.85 kHz สร้างจากบอร์ด DSP

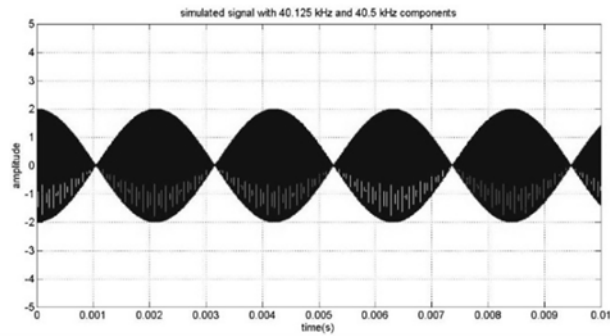


รูปที่ 4.9 สัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40.6 kHz กับ 39.85 kHz ซึ่งจำลองจากโปรแกรม MATLAB

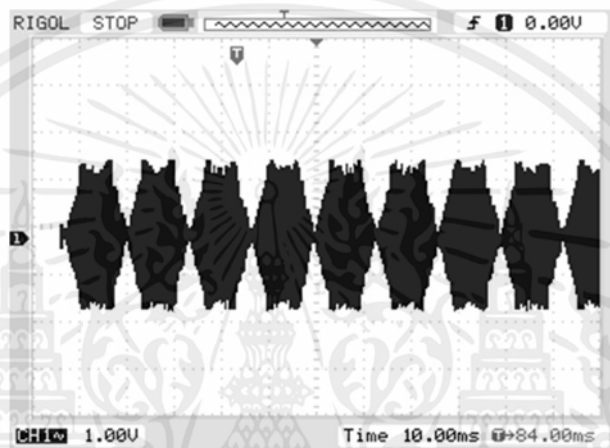


รูปที่ 4.10 สัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40.5 kHz กับ 40.125 kHz สร้างจากบอร์ด DSP

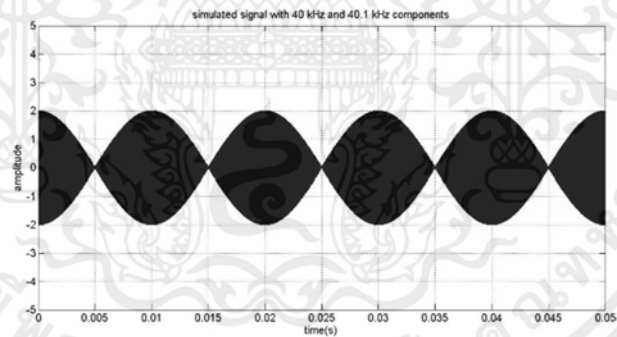
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 สัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40.5 kHz กับ 40.125 kHz จำลองจากโปรแกรม MATLAB

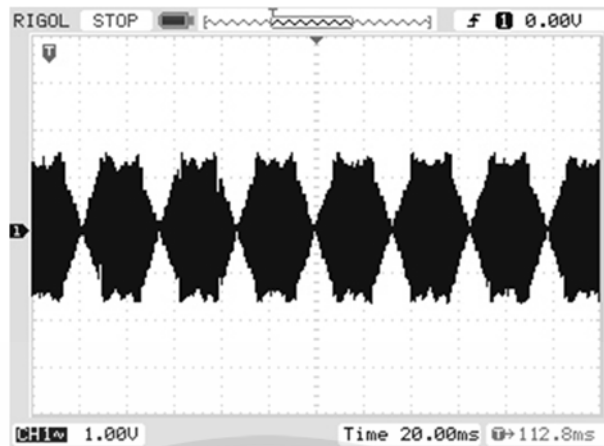


รูปที่ 4.12 สัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.1 kHz สร้างจากบอร์ด DSP

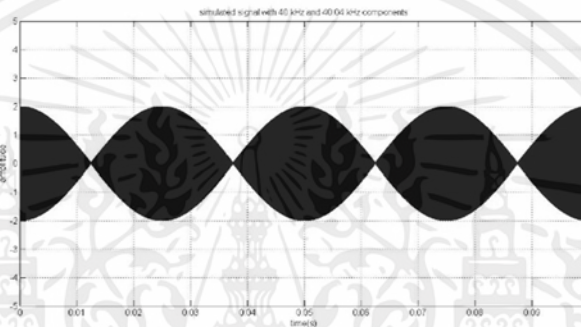


รูปที่ 4.13 สัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.1 kHz จำลองจากโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 สัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.04 kHz สร้างจากบอร์ด DSP

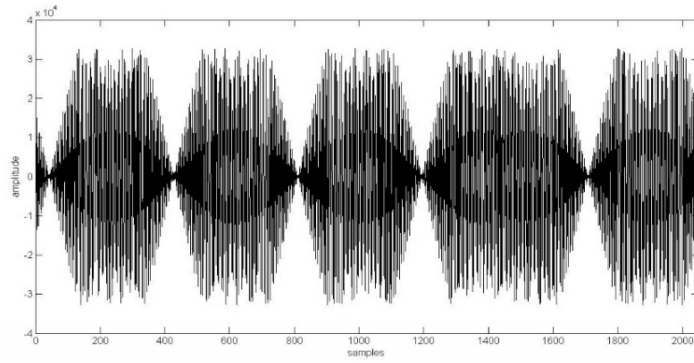


รูปที่ 4.15 สัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.04 kHz จำลองจากโปรแกรม MATLAB

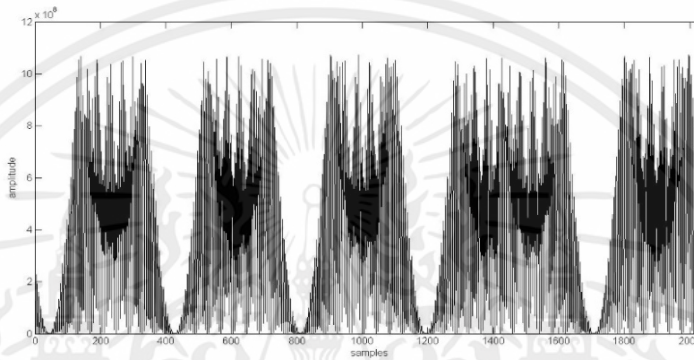
#### 4.6 ผลการบันทึกและดำเนินการทางคณิตศาสตร์สัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากวัตถุ

เมื่อสัญญาณที่สร้างจากบอร์ด DSP เป็นอินพุตให้กับตัวส่งอัลตราโซนิกแล้ว เมื่อสัญญาณดังกล่าวสะท้อนวัตถุกลับมายังตัวรับ สัญญาณที่สะท้อนกลับมาจะถูกจัดเก็บเพื่อนำมาดำเนินการหาระยะทางต่อ โดยสัญญาณดังกล่าวจะถูกจัดเก็บเป็นไฟล์ .dat จากนั้นสัญญาณนี้จะถูกนำไปยกกำลังสองโดยสัญญาณที่บันทึกได้และนำไปยกกำลังสองของทั้ง 4 กรณีสามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 4.16 – 4.19 โดยในรูปที่ 4.16ก – 4.19ก คือสัญญาณที่ตัวรับอัลตราโซนิกและถูกบันทึกเก็บไว้ ส่วนในรูปที่ 4.16ข – 4.19ข คือรูปสัญญาณดังกล่าวซึ่งถูกนำมายกกำลังสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

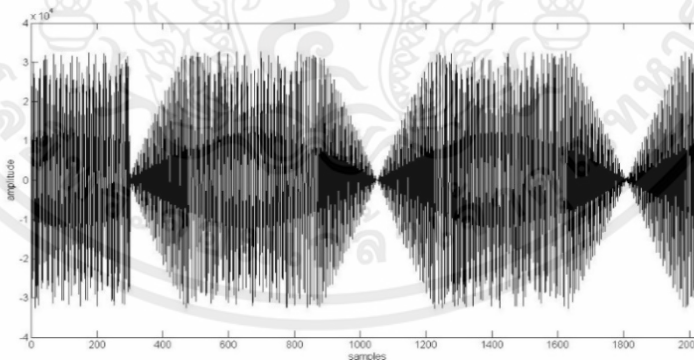


(ข)

รูปที่ 4.16 สัญญาณที่สะท้อนกลับจากวัตถุที่มีความต่างความถี่ 750 Hz

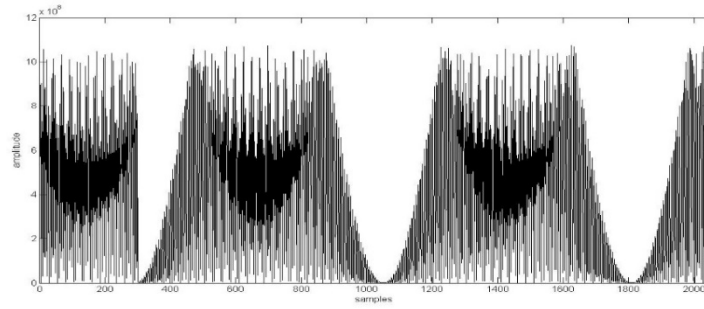
(ก) สัญญาณที่บันทึกไว้

(ข) สัญญาณที่ถูกนำมาแยกกำลังสอง



(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

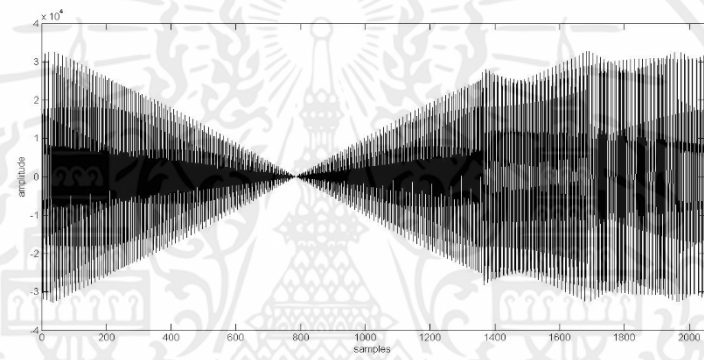


(ข)

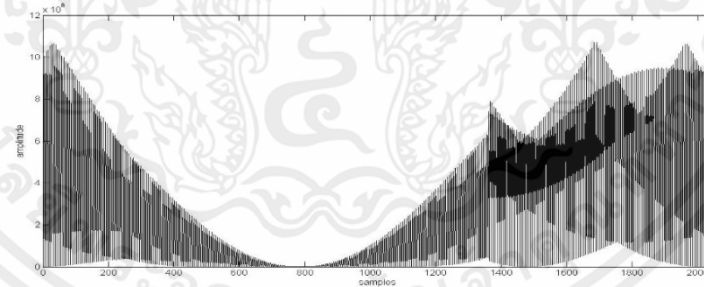
รูปที่ 4.17 สัญญาณที่สะท้อนกลับจากวัตถุที่มีความถี่ 375 Hz

(ก) สัญญาณที่บันทึกไว้

(ข) สัญญาณที่ถูกนำมายกกำลังสอง



(ก)



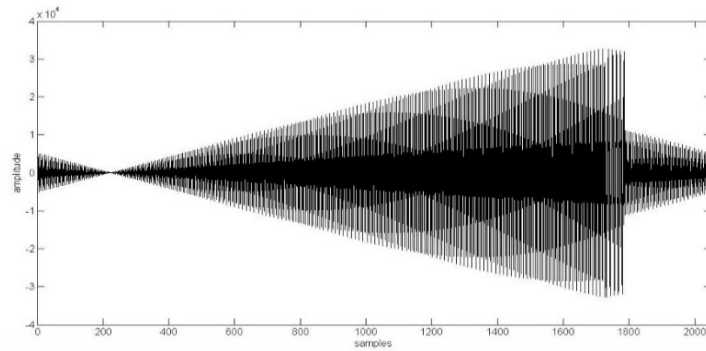
(ข)

รูปที่ 4.18 สัญญาณที่สะท้อนกลับจากวัตถุที่มีความถี่ 100 Hz

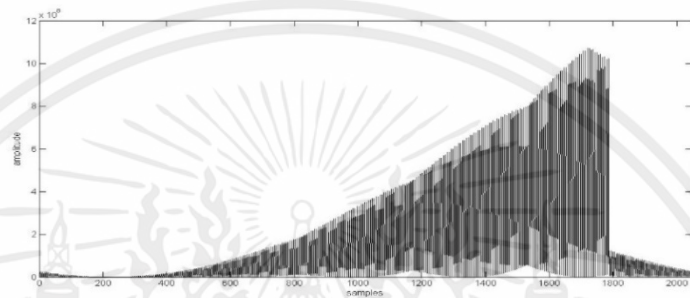
(ก) สัญญาณที่บันทึกไว้

(ข) สัญญาณที่ถูกนำมายกกำลังสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.19 สัญญาณที่สะท้อนกลับจากวัตถุกรณีความถี่ต่างกันที่ 40 Hz

(ก) สัญญาณที่บันทึกไว้

(ข) สัญญาณที่ถูกนำมาแยกกำลังสอง

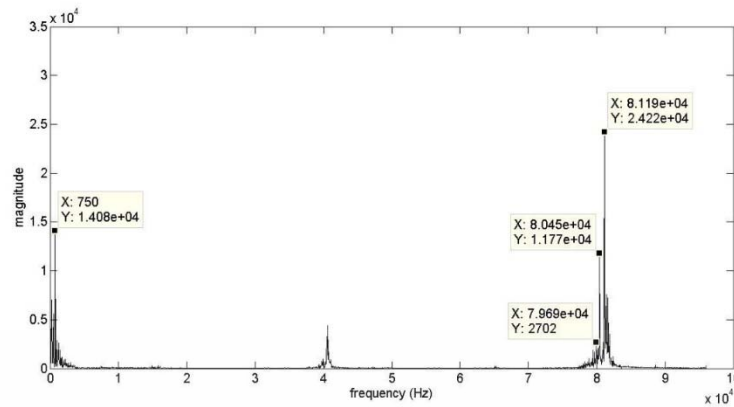
#### 4.7 ผลการตรวจจับผลตอบสนองทางเฟสด้วยโปรแกรม MATLAB

องค์ประกอบของสัญญาณที่สะท้อนกลับมาซึ่งผ่านการยกกำลังสองแล้วนั้นจะสามารถพิจารณาได้โดยการนำสัญญาณมาทำ FFT ซึ่งสามารถแสดงสเปกตรัมและผลตอบสนองทางเฟสของสัญญาณทั้ง 4 กรณีได้ ดังนี้

##### 4.7.1 กรณีความถี่ต่างกันที่ 750 Hz

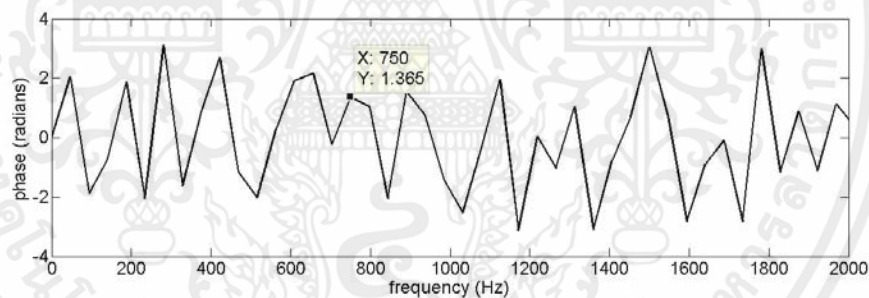
สเปกตรัมของสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 39.85 kHz กับ 40.6 kHz ซึ่งผ่านการยกกำลังสองสามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 4.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 สเปกตรัมของสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 39.85 kHz กับ 40.6 kHz ที่ผ่านการยกกำลังสองแล้ว

โดยจากรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่ามีองค์ประกอบความถี่ 750 Hz, 79.7 kHz, 80.45 kHz และ 81.2 kHz ซึ่งเป็นผลจากการนำสัญญาณที่ตัวรับมายกกำลังสอง โดยค่าความต่างเฟสที่จะถูกนำไปคำนวณระยะทางคือ ที่องค์ประกอบความถี่ 750 Hz ซึ่งสามารถตรวจจับได้โดยการพล็อตค่าผลตอบสนองทางเฟส ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.21



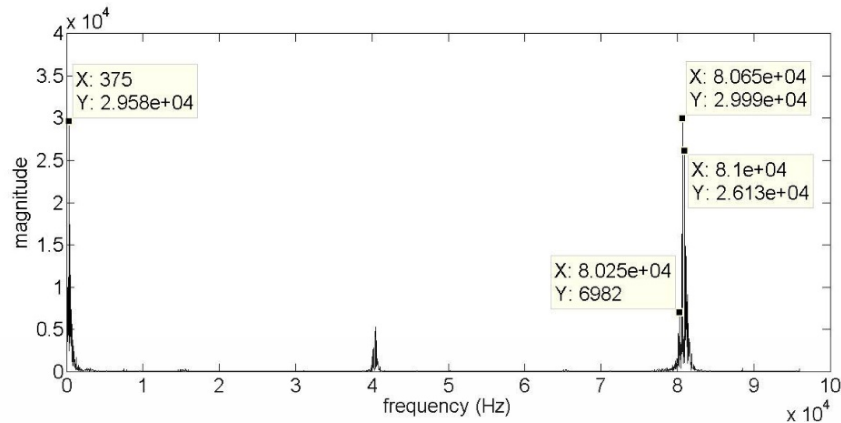
รูปที่ 4.21 ผลตอบสนองทางเฟสของสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 39.85 kHz กับ 40.6 kHz ที่ผ่านการยกกำลังสองแล้ว

จากรูปที่ 4.21 ซึ่งเป็นเฟสที่ตรวจจับได้โดยการใช้สัญญาณที่มีความต่างความถี่เท่ากับ 750 Hz ที่ระยะทางเท่ากับ 5 เซนติเมตร จะเห็นว่าเฟสที่ได้มีค่า 1.365 เรเดียน เมื่อนำมาคำนวณระยะทางจากสมการที่ 3.11 จะได้ระยะทางเท่ากับ 5.01 เซนติเมตร

#### 4.7.2 กรณีความต่างความถี่ 375 Hz

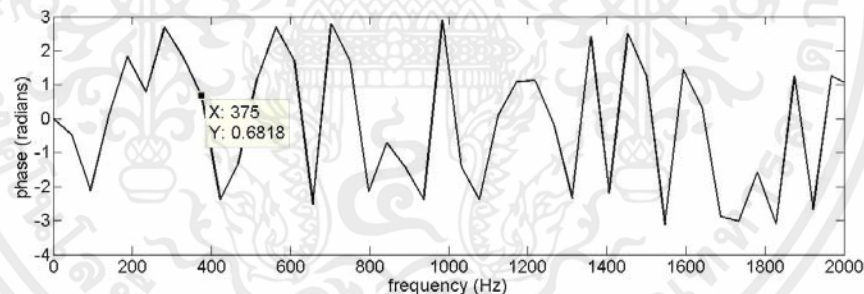
สเปกตรัมของสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40.125 kHz กับ 40.5 kHz ซึ่งผ่านการยกกำลังสองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 สเปกตรัมของสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40.125 kHz กับ 40.5 kHz ที่ผ่านการยกกำลังสองแล้ว

โดยจากรูปที่ 4.22 จะปรากฏความถี่ที่ 375 Hz, 80.25 kHz, 80.65 kHz และ 81 kHz และที่องค์ประกอบความถี่ 375 Hz จะเป็นความถี่ที่นำค่าเฟสไปคำนวณหาระยะทางโดยผลตอบสนองทางเฟสที่ความถี่นี้ โดยรูปที่ 4.23 คือเฟสที่ตรวจจับได้โดยการใช้สัญญาณที่มีความต่างความถี่เท่ากับ 375 Hz ที่ระยะทางเท่ากับ 5 เซนติเมตร จะเห็นว่าเฟสที่ได้มีค่า 0.6818 เรเดียน และเมื่อนำมาคำนวณระยะทางจะได้ค่าเท่ากับ 5 เซนติเมตร

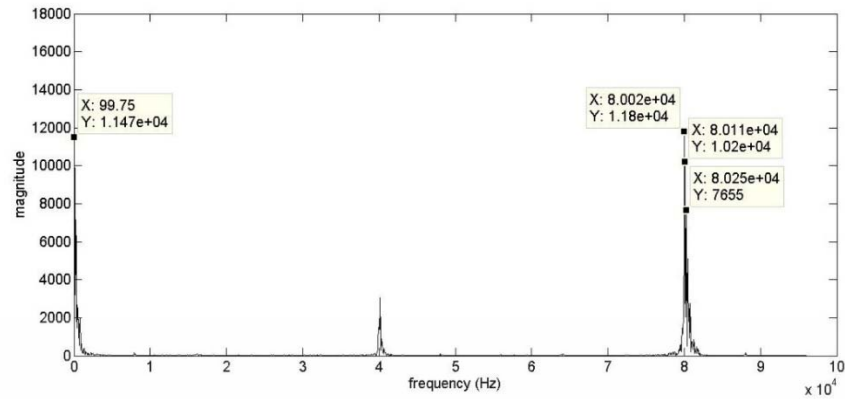


รูปที่ 4.23 ผลตอบสนองทางเฟสของสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40.125 kHz กับ 40.5 kHz ที่ผ่านการยกกำลังสองแล้ว

#### 4.7.3 กรณีความต่างความถี่ 100 Hz

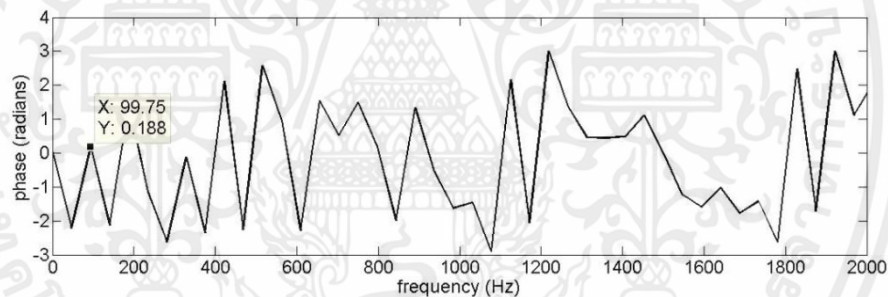
ในรูปที่ 4.24 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.1 kHz ซึ่งผ่านการยกกำลังสองแล้ว โดยจะเห็นได้ว่าสัญญาณมีองค์ประกอบความถี่ 100 Hz, 80 kHz, 80.1 kHz และ 80.2 kHz โดยค่าความต่างเฟสที่องค์ประกอบความถี่ 100 Hz จะถูกนำไปคำนวณระยะทางซึ่งสามารถตรวจจับได้โดยการพล็อตค่าผลตอบสนองทางเฟส ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ โดยเอกสารนี้เป็นไปให้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 สเปกตรัมของสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.1 kHz ที่ผ่านการยกกำลังสองแล้ว

ค่าผลตอบแทนทางเฟสของสัญญาณดังกล่าวซึ่งแสดงในรูปที่ 4.25 เป็นสัญญาณที่สะท้อนจากวัตถุที่มีระยะห่างจากตัวรับ ตัวส่งอัลตราโซนิกเท่ากับ 5 เซนติเมตร เฟสที่ตรวจจับได้มีค่า 0.188 เรเดียน และเมื่อนำมาคำนวณจะได้ระยะทางเท่ากับ 5.18 เซนติเมตร

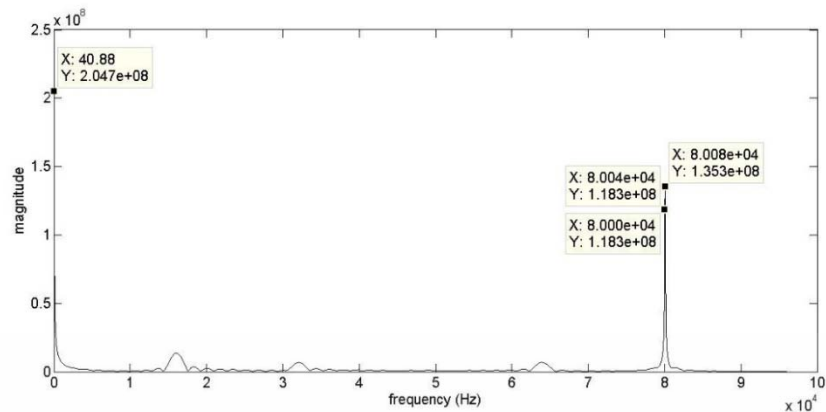


รูปที่ 4.25 ผลตอบแทนทางเฟสของสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.1 kHz ที่ผ่านการยกกำลังสองแล้ว

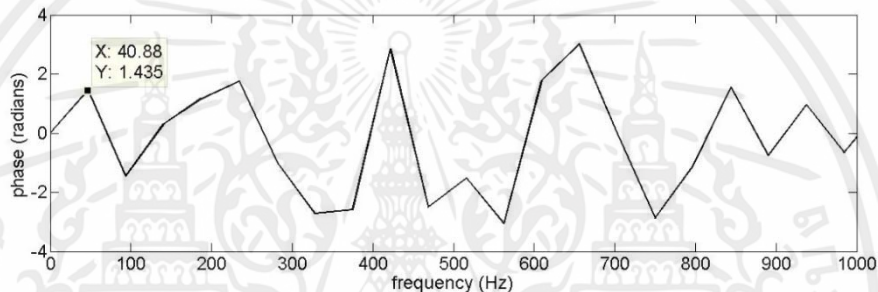
#### 4.7.4 กรณีความต่างความถี่ 40 Hz

สเปกตรัมของสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.04 kHz ที่ผ่านการยกกำลังสองแล้ว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.26 โดยสัญญาณมีองค์ประกอบที่ความถี่ 40 Hz, 80 kHz, 80.04 kHz และ 80.08 kHz โดยค่าระยะทางจะถูกคำนวณจากค่าความต่างเฟสที่องค์ประกอบความถี่ 40 Hz ซึ่งค่าผลตอบแทนทางเฟสที่องค์ประกอบความถี่ต่ำนี้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.27 โดยเป็นสัญญาณที่สะท้อนจากวัตถุที่มีระยะห่างจากตัวรับ ตัวส่งอัลตราโซนิกเท่ากับ 100 เซนติเมตร จะเห็นว่าเฟสที่ได้มีค่า 1.435 เรเดียน เมื่อนำมาคำนวณระยะทางจะได้ค่าเท่ากับ 98.8 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 สเปกตรัมของสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.04 kHz ที่ผ่านการยกกำลังสองแล้ว



รูปที่ 4.27 ผลตอบสนองทางเฟสของสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.04 kHz ที่ผ่านการยกกำลังสองแล้ว

#### 4.8 ผลการวัดระยะทางที่นำเสนอ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้การวัดระยะทางจะแบ่งออกเป็น 4 กรณีโดยใช้ความต่างความถี่ 4 ค่า คือ 750 Hz, 375 Hz, 100 Hz และ 40 Hz

##### 4.8.1 กรณีความต่างความถี่เท่ากับ 750 Hz

กรณีนี้สัญญาณจะมีองค์ประกอบความถี่ 39.85 kHz และ 40.6 kHz โดยระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถวัดได้ คือ 11.5 เซนติเมตร โดยค่าความต่างเฟสที่ระยะทางต่างๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 และระยะทางที่วัดได้เทียบกับระยะทางจริงสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าความต่างเฟสที่ระยะทางต่างๆ เมื่อความต่างความถี่เท่ากับ 750 Hz

ระยะทางจริง (เซนติเมตร)	ค่าความต่างเฟส (องศา)					เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
1	0.730	1.030	0.653	0.876	0.421	0.742
2	0.921	0.642	0.720	0.760	0.490	0.707

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ค่าความต่างเฟสที่ระยะทางต่างๆ เมื่อความต่างความถี่เท่ากับ 750 Hz

ระยะทางจริง (เซนติเมตร)	ค่าความต่างเฟส (องศา)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
3	0.819	0.823	0.794	0.836	0.806	0.816
4	1.028	0.970	1.010	1.160	0.935	1.021
5	1.320	1.365	1.341	1.374	1.420	1.364
6	1.597	1.705	1.582	1.666	1.785	1.667
7	1.843	1.885	1.953	1.933	2.010	1.925
8	2.150	2.182	2.174	2.177	2.183	2.173
9	2.450	2.476	2.498	2.477	2.424	2.465
10	2.729	2.760	2.624	2.834	2.702	2.730
11	2.993	3.004	2.834	2.950	3.271	3.010
12	3.131	3.097	2.931	2.864	3.048	3.014
13	1.796	2.834	2.174	1.644	3.112	2.312
14	2.764	2.075	2.669	3.024	1.887	2.484
15	3.011	2.887	2.561	1.452	2.653	2.513

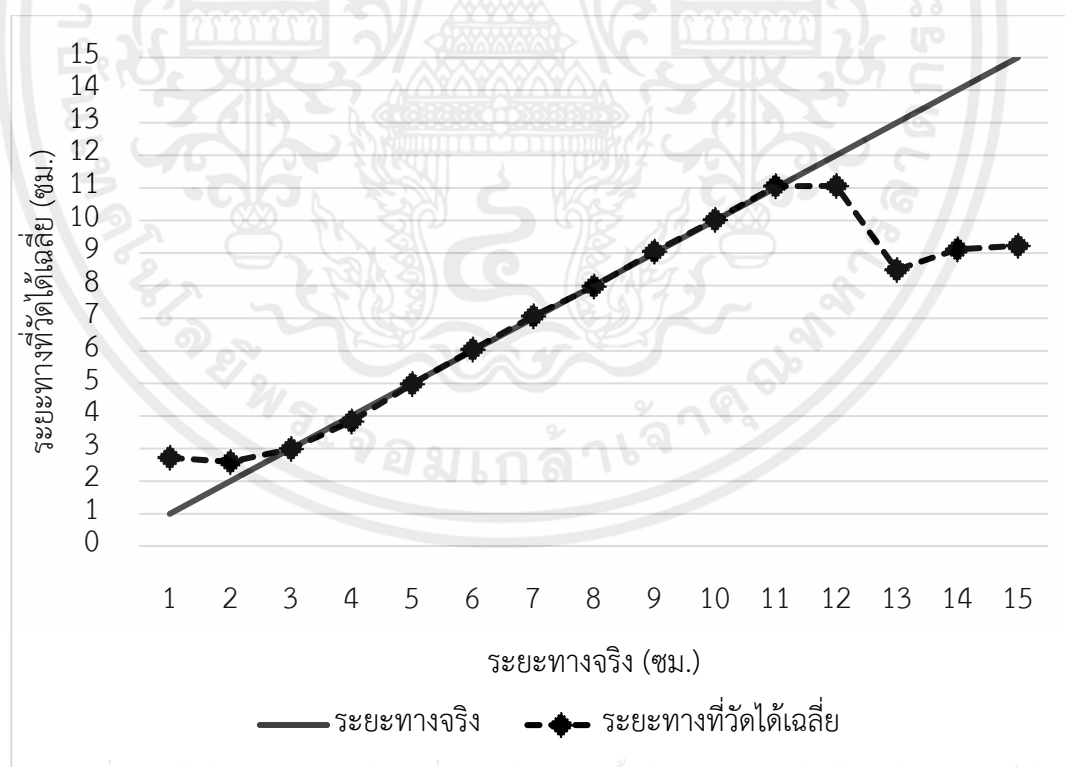
ตารางที่ 4.2 ระยะทางที่วัดได้เมื่อความต่างความถี่เท่ากับ 750 Hz

ระยะทางจริง (เซนติเมตร)	ระยะทางที่วัดได้ (เซนติเมตร)						ค่า ผิดพลาด (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย	
1	2.680	3.781	2.397	3.216	1.546	2.724	-172.40
2	3.381	2.357	2.643	2.790	1.799	2.594	-29.70
3	3.007	3.021	2.915	3.069	2.959	2.994	0.19
4	3.774	3.562	3.708	4.259	3.433	3.747	6.32
5	4.846	5.011	4.923	5.044	5.213	5.007	-0.15
6	5.863	6.259	5.808	6.116	6.553	6.120	-2.00
7	6.766	6.920	7.170	7.096	7.379	7.066	-0.95
8	7.893	8.010	7.981	7.992	8.014	7.978	0.27
9	8.994	9.090	9.171	9.093	8.899	9.049	-0.55
10	10.019	10.132	9.633	10.404	9.919	10.022	-0.22

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ระยะทางที่วัดได้เมื่อความถี่เท่ากับ 750 Hz

ระยะทางจริง (เซนติเมตร)	ระยะทางที่วัดได้ (เซนติเมตร)						ค่า ผิดพลาด (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย	
11	10.988	11.028	10.404	10.830	12.008	11.052	-0.47
12	11.494	11.370	10.760	10.514	11.190	11.066	7.79
13	6.593	10.404	7.981	6.035	11.425	8.488	34.71
14	10.147	7.618	9.798	11.102	6.927	9.118	34.87
15	11.054	10.599	9.402	5.331	9.740	9.225	38.50

เมื่อนำค่าระยะทางที่วัดได้และระยะทางจริงจากตารางที่ 4.2 มาเปรียบเทียบกับกันจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.28 โดยจากกราฟเส้นทึบคือระยะทางจริง เส้นประคือ ระยะทางที่วัดได้เฉลี่ย จากกราฟจะเห็นว่าที่ระยะทางตั้งแต่ 3 เซนติเมตรขึ้นไประยะทางที่วัดได้เฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกับระยะทางจริงจนถึงระยะทางที่มีค่ามากกว่า 11 เซนติเมตรซึ่งเป็นระยะทางที่เกินความสามารถในการวัดด้วยวิธีการนี้ ค่าระยะทางที่วัดได้จะไม่ตรงกับระยะทางจริง



รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริงกับระยะทางที่วัดได้กรณีความถี่เท่ากับ 750 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอสงวนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเทียบกับระยะทางจริงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.29 จะเห็นว่าที่ระยะทางตั้งแต่ 3 เซนติเมตรขึ้นไปเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่าใกล้เคียง 0 จนถึงระยะทางที่เกินขอบเขตของการวัดด้วยวิธีการนี้ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจะมีค่ามาก



รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริงกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกรณีความต่างความถี่เท่ากับ 750 Hz

#### 4.8.2 กรณีความต่างความถี่เท่ากับ 375 Hz

กรณีนี้สัญญาณจะมีองค์ประกอบความถี่ 40.5 kHz และ 40.125 kHz โดยระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถวัดได้ คือ 23 เซนติเมตร โดยจะทำการเก็บข้อมูลการวัดระยะทางตั้งแต่ 1 – 25 เซนติเมตร ซึ่งค่าความต่างเฟสจะแสดงในตารางที่ 4.3 และค่าระยะทางจะแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ค่าความต่างเฟสที่ระยะทางต่างๆเมื่อความต่างความถี่เท่ากับ 375 Hz

ระยะทางจริง (เซนติเมตร)	ค่าความต่างเฟส (องศา)					เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
1	0.188	0.127	0.420	0.311	0.254	0.260
2	0.280	0.280	0.273	0.315	0.305	0.291
3	0.430	0.420	0.433	0.372	0.575	0.446
4	0.555	0.486	0.520	0.522	0.488	0.514
5	0.605	0.619	0.682	0.730	0.631	0.653
6	0.760	0.759	0.736	0.762	0.801	0.764

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ค่าความต่างเฟสที่ระยะทางต่างๆ เมื่อความต่างความถี่เท่ากับ 375 Hz

ระยะทางจริง (เซนติเมตร)	ค่าความต่างเฟส (องศา)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
7	0.956	0.929	0.920	0.985	1.075	0.973
8	1.188	1.108	1.039	1.129	1.094	1.112
9	1.133	1.185	1.223	1.141	1.295	1.195
10	1.369	1.263	1.222	1.333	1.486	1.335
11	1.479	1.458	1.458	1.369	1.547	1.462
12	1.562	1.588	1.614	1.611	1.521	1.579
13	1.721	1.797	1.854	1.634	1.665	1.734
14	1.950	1.906	1.932	1.871	1.953	1.922
15	1.980	2.184	2.096	1.835	2.324	2.084
16	2.123	2.161	2.117	2.255	2.135	2.158
17	2.349	2.378	2.312	2.356	2.462	2.371
18	2.474	2.486	2.510	2.401	2.531	2.480
19	2.634	2.584	2.624	2.688	2.555	2.617
20	2.614	2.711	2.734	2.697	2.655	2.682
21	2.882	2.811	2.808	2.982	2.979	2.892
22	3.024	2.993	2.961	3.032	3.112	3.024
23	3.071	3.043	3.107	3.122	2.902	3.049
24	3.024	2.976	3.118	2.765	3.001	2.977
25	2.768	2.538	3.067	1.864	2.553	2.558

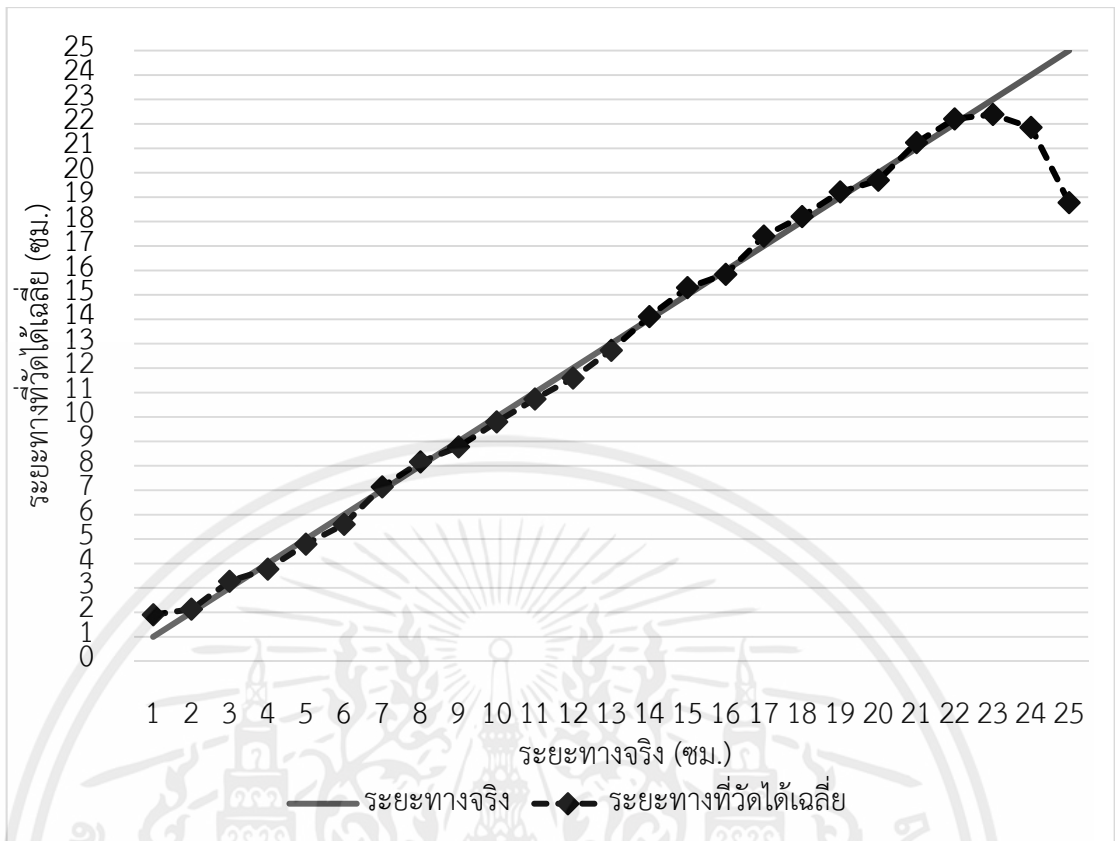
ตารางที่ 4.4 ระยะทางที่วัดได้เมื่อความต่างความถี่เท่ากับ 375 Hz

ระยะทางจริง (เซนติเมตร)	ระยะทางที่วัดได้ (เซนติเมตร)						ค่า ผิดพลาด (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย	
1	1.378	0.931	3.084	2.283	1.865	1.908	-90.83
2	2.059	2.056	2.002	2.313	2.239	2.134	-6.68
3	3.157	3.086	3.180	2.729	4.224	3.275	-9.18
4	4.077	3.565	3.817	3.830	3.580	3.774	5.65
5	4.440	4.543	5.006	5.360	4.633	4.796	4.07

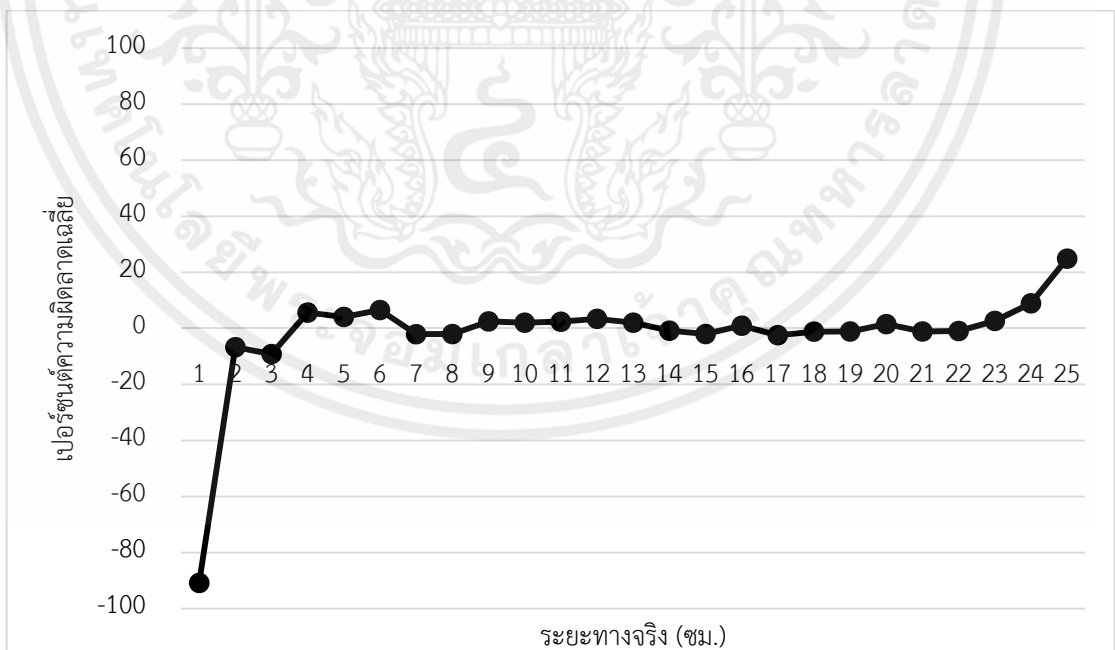
ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ระยะทางที่วัดได้เมื่อความต่างความถี่เท่ากับ 375 Hz

ระยะทางจริง (เซนติเมตร)	ระยะทางที่วัดได้ (เซนติเมตร)						ค่า ผิดพลาด (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย	
6	5.580	5.571	5.403	5.595	5.881	5.606	6.56
7	7.021	6.819	6.754	7.231	7.893	7.144	-2.05
8	8.723	8.135	7.629	8.289	8.033	8.162	-2.02
9	8.319	8.701	8.980	8.378	9.508	8.777	2.48
10	10.052	9.273	8.972	9.787	10.911	9.799	2.01
11	10.859	10.705	10.705	10.052	11.359	10.736	2.40
12	11.469	11.660	11.851	11.828	11.168	11.595	3.37
13	12.636	13.194	13.613	11.997	12.225	12.733	2.05
14	14.318	13.994	14.185	13.738	14.340	14.115	-0.82
15	14.538	16.036	15.390	13.473	17.064	15.300	-2.00
16	15.588	15.867	15.544	16.557	15.676	15.846	0.96
17	17.247	17.460	16.975	17.299	18.077	17.412	-2.42
18	18.165	18.253	18.429	17.629	18.583	18.212	-1.18
19	19.340	18.973	19.266	19.736	18.760	19.215	-1.13
20	19.193	19.905	20.074	19.802	19.494	19.694	1.53
21	21.161	20.639	20.617	21.895	21.873	21.237	-1.13
22	22.203	21.976	21.741	22.262	22.849	22.206	-0.94
23	22.548	22.343	22.813	22.923	21.307	22.387	2.67
24	22.203	21.851	22.893	20.302	22.034	21.857	8.93
25	20.324	18.635	22.519	13.686	18.745	18.782	24.87

เมื่อนำค่าระยะทางที่ได้จากตารางที่ 4.4 มาพล็อตกราฟจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.30 โดยจะเห็นว่าระยะทางที่วัดได้ในช่วง 1 – 23 เซนติเมตรจากการวัดมีค่าใกล้เคียงกับระยะทางจริง แต่ที่ระยะทางมากกว่าค่าระยะทางขอบเขตที่สามารถวัดได้ด้วยวิธีการนี้ นั่นคือ ระยะทางมากกว่า 23 เซนติเมตร ค่าระยะทางที่วัดได้จะมีค่าต่างจากระยะทางจริง และเมื่อนำเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมาพล็อตเทียบกับระยะทางจริงจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.31 โดยที่ระยะทาง 1 เซนติเมตรจะมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเป็นค่าติดลบ หมายถึงระยะทางที่วัดได้มีค่ามากกว่าระยะทางจริงและที่ระยะทางมากกว่า 23 เซนติเมตรเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจะมีค่ามากเนื่องจากเกินขอบเขตระยะทางสูงสุดที่สามารถวัดได้



รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริงกับระยะทางที่วัดได้กรณีความถี่ความถี่เท่ากับ 375 Hz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริงกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกรณีความถี่ความถี่เท่ากับ 375 Hz

### 4.8.3 กรณีความต่างความถี่เท่ากับ 100 Hz

กรณีนี้สัญญาณจะมีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz และ 40.1 kHz โดยระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถวัดได้ คือ 86.5 เซนติเมตร โดยจะทำการเก็บข้อมูลการวัดระยะทางตั้งแต่ 5 – 100 เซนติเมตร ซึ่งค่าความต่างเฟสจะแสดงในตารางที่ 4.5 และค่าระยะทางจะแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 ค่าความต่างเฟสที่ระยะทางต่างๆ เมื่อความต่างความถี่เท่ากับ 100 Hz

ระยะทางจริง (เซนติเมตร)	ค่าความต่างเฟส (องศา)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
5	0.233	0.183	0.231	0.188	0.198	0.207
10	0.446	0.392	0.368	0.468	0.297	0.394
15	0.543	0.568	0.542	0.615	0.503	0.554
20	0.846	0.786	0.738	0.725	0.843	0.788
25	0.883	0.907	0.821	0.863	0.904	0.876
30	1.081	1.195	1.156	1.038	1.160	1.126
35	1.298	1.266	1.279	1.360	1.344	1.309
40	1.480	1.489	1.321	1.468	1.762	1.504
45	1.638	1.577	1.636	1.644	1.628	1.625
50	1.806	1.817	1.843	1.851	1.863	1.836
55	2.023	1.831	2.036	1.999	1.843	1.946
60	2.178	2.033	2.153	2.171	2.152	2.137
65	2.412	2.405	2.333	2.357	2.442	2.390
70	2.467	2.548	2.450	2.463	2.541	2.494
75	2.798	2.759	2.729	2.802	2.756	2.769
80	2.894	2.967	3.020	2.946	2.905	2.946
85	3.040	3.134	3.087	3.090	3.020	3.074
90	2.764	2.412	2.116	2.601	3.021	2.583
95	1.942	2.564	2.667	2.941	1.765	2.376
100	3.124	2.732	1.250	2.112	3.117	2.467

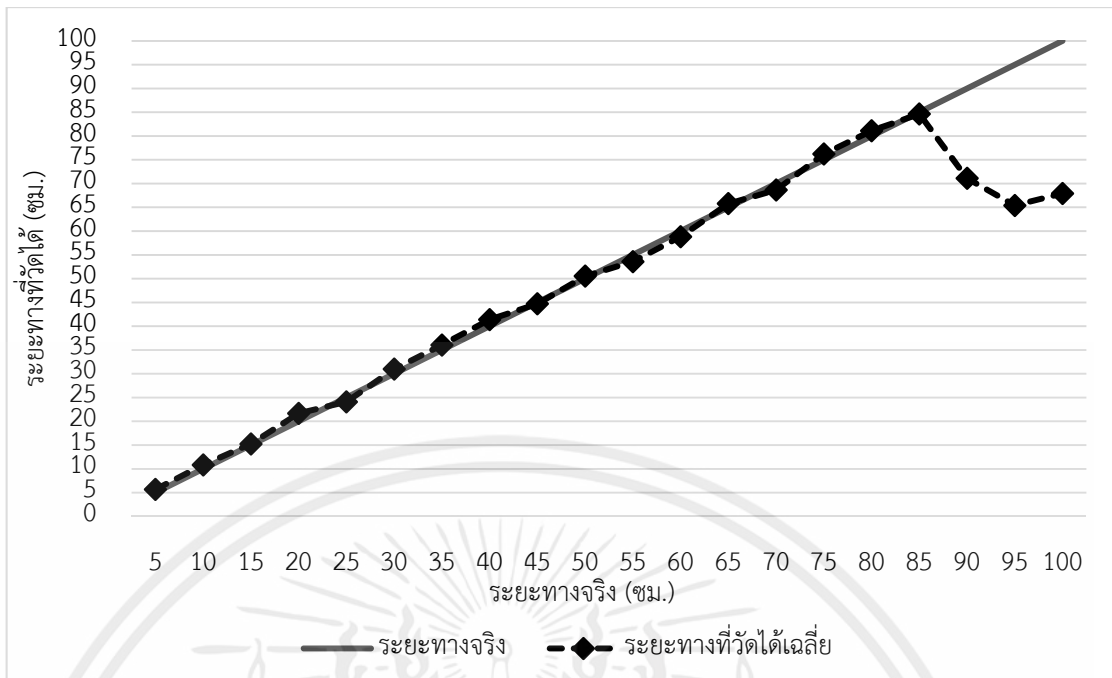
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ระยะทางที่วัดได้เมื่อความต่างความถี่เท่ากับ 100 Hz

ระยะทางจริง (เซนติเมตร)	ระยะทางที่วัดได้ (เซนติเมตร)						ค่า ผิดพลาด (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย	
5	6.415	5.039	6.360	5.176	5.452	5.688	-13.769
10	12.280	10.793	10.132	12.886	8.178	10.854	-8.538
15	14.951	15.639	14.926	16.922	13.849	15.258	-1.717
20	23.294	21.642	20.331	19.962	23.211	21.688	-8.439
25	24.315	24.973	22.605	23.762	24.891	24.109	3.564
30	29.764	32.903	31.829	28.580	31.939	31.003	-3.343
35	35.739	34.858	35.216	37.446	37.005	36.053	-3.008
40	40.750	40.998	36.372	40.420	48.514	41.411	-3.527
45	45.100	43.421	45.045	45.265	44.825	44.731	0.597
50	49.726	50.029	50.745	50.965	51.295	50.552	-1.104
55	55.701	50.414	56.059	55.040	50.745	53.592	2.561
60	59.968	55.976	59.280	59.776	59.253	58.851	1.916
65	66.411	66.219	64.236	64.897	67.237	65.800	-1.231
70	67.926	70.156	67.458	67.816	69.963	68.664	1.909
75	77.039	75.966	75.140	77.150	75.883	76.235	-1.647
80	79.683	81.693	83.152	81.114	79.986	81.125	-1.407
85	83.703	86.291	84.997	85.079	83.152	84.644	0.419
90	76.103	66.411	58.261	71.615	83.179	71.114	20.984
95	53.471	70.597	73.432	80.977	48.597	65.415	31.142
100	86.015	75.222	34.417	58.151	85.823	67.926	32.074

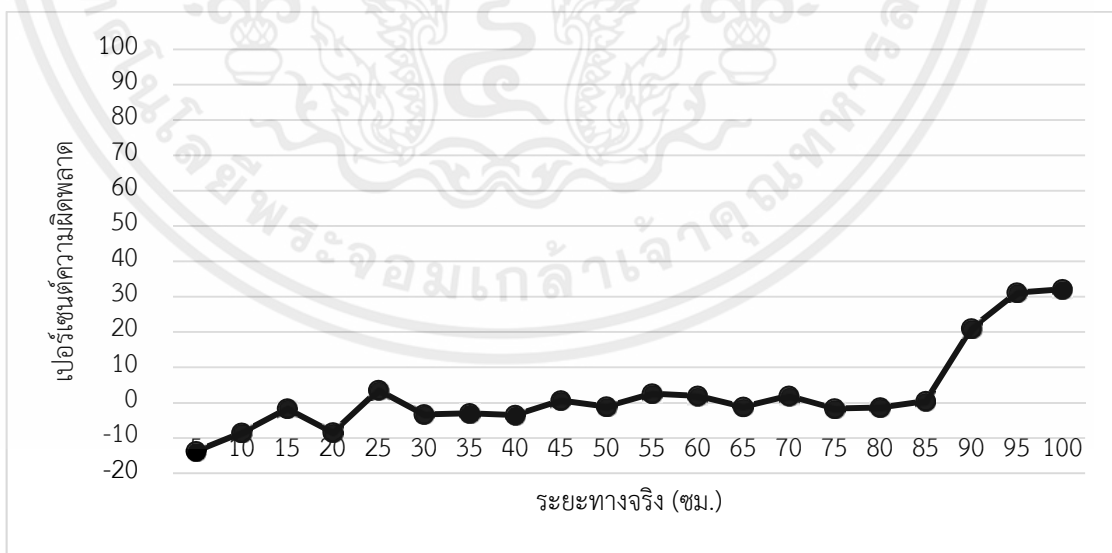
เมื่อนำค่าระยะทางที่ได้จากตารางที่ 4.6 มาพล็อตกราฟจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.32 ซึ่งจะเห็นว่าระยะทางที่ได้อิงในช่วง 5 - 85 เซนติเมตรมีค่าใกล้เคียงกับระยะทางจริง แต่ในช่วง 90 - 100 เซนติเมตรซึ่งเป็นระยะทางที่เกินความสามารถในการวัดด้วยวิธีการนี้ ระยะทางที่ได้จะมีค่าไม่ตรงกับระยะทางจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริงกับระยะทางที่วัดได้กรณีความถี่ต่างกัน เท่ากับ 100 Hz

เมื่อนำเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมาพล็อตเทียบกับระยะทางจริงจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.33 ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ระยะทางมากกว่า 1 เซนติเมตรจะมีค่าน้อยมาก แต่ในช่วง 90 – 100 เซนติเมตรระยะทางผิดพลาดจะมีค่ามาก เนื่องจากระยะทางเกินช่วงที่สามารถวัดได้ด้วยวิธีการนี้



รูปที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริงกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกรณีความถี่ต่างกัน เท่ากับ 100 Hz

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

#### 4.8.4 กรณีความต่างความถี่เท่ากับ 40 Hz

กรณีนี้สัญญาณจะมีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz และ 40.04 kHz โดยระยะทางที่มากที่สุดที่สามารถวัดได้ คือ 216 เซนติเมตร โดยจะทำการเก็บข้อมูลการวัดระยะทางตั้งแต่ 10 – 230 เซนติเมตร ซึ่งค่าความต่างเฟสจะแสดงในตารางที่ 4.7 และค่าระยะทางจะแสดงในตารางที่ 4.8

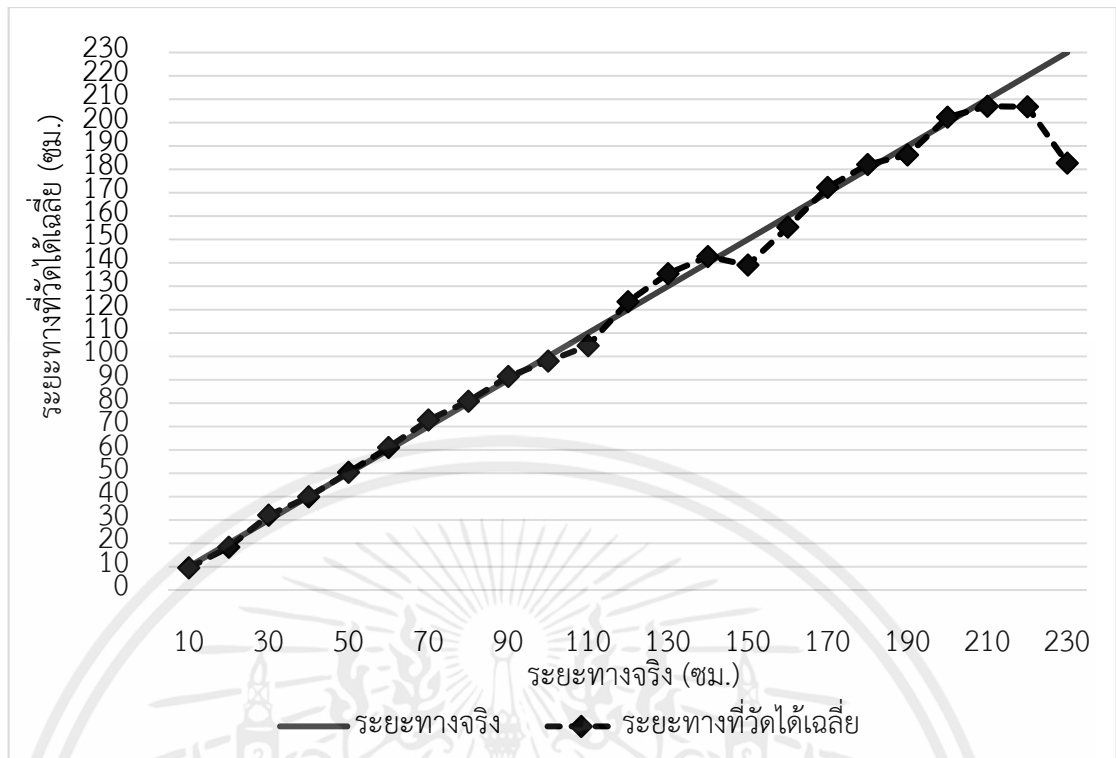
ตารางที่ 4.7 ค่าความต่างเฟสที่ระยะทางต่างๆ เมื่อความต่างความถี่เท่ากับ 40 Hz

ระยะทางจริง (เซนติเมตร)	ค่าความต่างเฟส (องศา)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
10	0.193	0.073	0.125	0.152	0.149	0.138
20	0.255	0.286	0.237	0.311	0.243	0.267
30	0.401	0.366	0.554	0.445	0.563	0.466
40	0.573	0.506	0.588	0.668	0.565	0.580
50	0.650	0.723	0.852	0.647	0.792	0.733
60	0.802	0.940	0.876	0.837	0.980	0.887
70	1.055	1.087	1.001	1.053	1.095	1.058
80	1.319	1.180	1.152	1.134	1.087	1.174
90	1.317	1.266	1.333	1.326	1.398	1.328
100	1.435	1.413	1.435	1.425	1.410	1.424
110	1.315	1.566	1.462	1.584	1.672	1.520
120	1.812	1.764	1.861	1.735	1.795	1.793
130	1.902	1.979	1.977	2.054	1.924	1.967
140	1.981	2.158	1.990	2.097	2.143	2.074
150	2.187	1.806	1.755	2.204	2.152	2.021
160	2.045	2.371	2.410	2.244	2.213	2.257
170	2.533	2.428	2.505	2.465	2.587	2.504
180	2.695	2.628	2.590	2.664	2.653	2.646
190	2.704	2.523	2.727	2.755	2.816	2.705
200	2.925	2.701	2.841	3.215	3.017	2.940
210	3.128	2.854	3.115	2.840	3.104	3.008
220	2.905	3.124	3.004	3.016	2.975	3.005
230	3.109	2.461	2.220	2.374	3.108	2.654

ตารางที่ 4.8 ระยะทางที่วัดได้เมื่อความต่างความถี่เท่ากับ 40 Hz

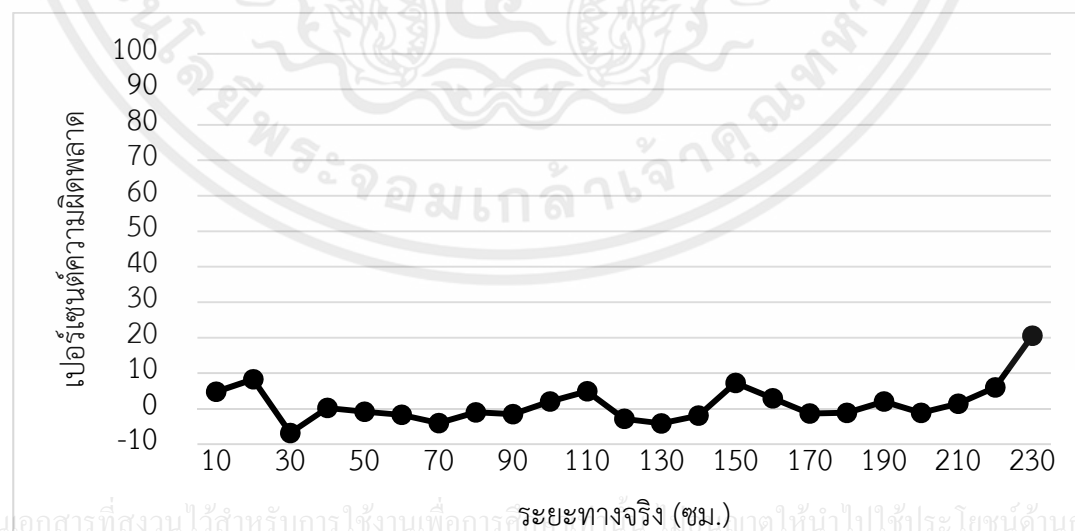
ระยะทางจริง (เซนติเมตร)	ระยะทางที่วัดได้ (เซนติเมตร)						ค่า ผิดพลาด (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย	
10	13.29	5.01	8.60	10.46	10.26	9.53	4.75
20	17.58	19.69	16.32	21.41	16.73	18.35	8.27
30	27.59	25.21	38.13	30.63	38.75	32.06	-6.87
40	39.44	34.82	40.50	45.97	38.89	39.92	0.19
50	44.76	49.75	58.63	44.55	54.49	50.44	-0.87
60	55.17	64.72	60.33	57.58	67.42	61.05	-1.74
70	72.62	74.82	68.90	72.48	75.37	72.84	-4.06
80	90.79	81.22	79.30	78.06	74.82	80.84	-1.05
90	90.65	87.14	91.76	91.27	96.23	91.41	-1.57
100	98.78	97.26	98.78	98.09	97.06	97.99	2.01
110	90.52	107.79	100.64	109.03	115.09	104.61	4.90
120	124.73	121.42	128.10	119.43	123.56	123.45	-2.87
130	130.92	136.22	136.09	141.39	132.44	135.41	-4.16
140	136.36	148.54	136.98	144.35	147.51	142.75	-1.96
150	150.54	124.31	120.80	151.71	148.13	139.10	7.27
160	140.77	163.21	165.89	154.46	152.33	155.33	2.92
170	174.36	167.13	172.43	169.68	178.07	172.33	-1.37
180	185.51	180.90	178.28	183.37	182.62	182.14	-1.19
190	186.13	173.67	187.71	189.64	193.84	186.20	2.00
200	201.34	185.92	195.56	221.30	207.67	202.36	-1.18
210	215.31	196.45	214.42	195.49	213.66	207.07	1.40
220	199.96	215.04	206.78	207.60	204.78	206.83	5.98
230	214.01	169.40	152.81	163.41	213.94	182.71	20.56

เมื่อนำค่าระยะทางที่ได้จากตารางที่ 4.7 มาพล็อตกราฟจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.34 โดยจากกราฟจะเห็นว่าที่ระยะทางน้อยกว่า 100 เซนติเมตร ค่าระยะทางที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับระยะทางจริง ส่วนในช่วง 110 - 210 เซนติเมตรระยะทางที่วัดได้มีระยะทางผิดพลาดเล็กน้อย แต่ในช่วง 220 - 230 เซนติเมตรซึ่งเกินขอบเขตการวัดระยะทางนั้น ระยะทางที่วัดได้มีค่าผิดพลาดมาก



รูปที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริงกับระยะทางที่วัดได้กรณีความถี่ความถี่เท่ากับ 40 Hz

เมื่อนำเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมาพล็อตเทียบกับระยะทางจริงจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.35 โดยเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่าอยู่ในช่วงไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ในช่วงการวัดตั้งแต่ 10 - 210 เซนติเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ผู้จัดทำมิได้รับผิดชอบต่อผลเสียหาย และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริงกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกรณีความถี่ความถี่เท่ากับ 40 Hz

#### 4.9 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการผลการทดลองการวัดระยะทางด้วยอัลตราโซนิกโดยใช้ความแตกต่างของความถี่ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ซึ่งได้ทำการทดลองแบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ กรณีความต่างความถี่เท่ากับ 750 Hz กรณีความต่างความถี่เท่ากับ 375 Hz กรณีความต่างความถี่เท่ากับ 100 Hz และกรณีความต่างความถี่เท่ากับ 40 Hz โดยสามารถแสดงระยะทางผิดพลาดเฉลี่ยได้ ดังตาราง 4.9

ตารางที่ 4.9 ระยะทางผิดพลาดเฉลี่ยที่ค่าความต่างความถี่ต่างๆ

ความต่างความถี่ (Hz)	750	375	100	40
ระยะทางผิดพลาดเฉลี่ย (เซนติเมตร)	0.25	0.28	0.95	2.8

จากตารางพบว่าที่ความต่างความถี่ 750 Hz จะมีระยะทางผิดพลาดเฉลี่ยน้อยที่สุด และค่าระยะทางผิดพลาดเฉลี่ยก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความต่างความถี่มีค่าน้อยลง โดยที่ความต่างความถี่ 40 Hz ระยะทางผิดพลาดเฉลี่ยมีค่า 2.8 เซนติเมตร ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 3.11 กล่าวคือเมื่อค่า  $\Delta\omega$  มีค่ามาก ระยะทางสูงสุดที่สามารถวัดได้ก็จะมีค่าน้อย ทำให้ช่วงการแบ่งค่าความต่างเฟสมีค่ามาก จึงทำให้การวัดระยะทางมีความถูกต้องมากกว่ากรณีที่ค่าความต่างความถี่มีค่าน้อย

นอกจากนี้ในกรณีที่ระยะทาง 1 – 2 เซนติเมตร จากตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นการใช้ความต่างความถี่เท่ากับ 750 Hz และ ตารางที่ 4.4 ซึ่งเป็นการใช้ความต่างความถี่เท่ากับ 375 Hz พบว่า ระยะทางผิดพลาดมีค่ามาก สามารถอธิบายได้ว่าความผิดพลาดนี้เกิดจากการวางวัตถุใกล้กับตัวรับ ตัวส่งอัลตราโซนิกมากเกินไป ทำให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณหลายรอบ สัญญาณที่รับได้ที่ตัวรับอัลตราโซนิกจึงมีความผิดพลาดเพิ่มขึ้น

ในกรณีความต่างความถี่ 40 Hz ที่ระยะทางมากกว่า 90 เซนติเมตร ระยะทางที่วัดได้มีค่าผิดพลาดมาก เนื่องจากกำลังในการส่งของตัวส่งอัลตราโซนิก

จากผลการทดลองทั้ง 4 กรณีเมื่อวัดระยะทางที่มีค่ามากกว่าขอบเขตสูงสุดที่สามารถวัดได้พบว่า ค่าระยะทางที่วัดได้มีค่าผิดพลาดมาก แสดงให้เห็นว่า วิธีการนี้ไม่สามารถวัดระยะทางที่เกินจากขอบเขตระยะทางสูงสุดของแต่ละความต่างความถี่ได้

#### 4.10 การเปรียบเทียบวิธีการในวิทยานิพนธ์กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ผลเป็นสงวนสิทธิ์ และต้องขอสงวนสิทธิ์ในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำเอกสารไปใช้

เปรียบเทียบวิธีการและผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบวิธีการในวิทยานิพนธ์กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

	วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้	เอกสาร [1]	เอกสาร [2]	เอกสาร [3]	เอกสาร [4]	เอกสาร [5]
วิธีการ	ความต่าง เฟส	TOF	TOF	ความต่าง เฟส	ความต่าง เฟส	ความต่าง เฟส
จำนวน ความถี่ที่ ใช้	2 ความถี่	1 ความถี่	1 ความถี่	2 ความถี่	2 ความถี่	3 ความถี่
ระยะทาง สูงสุด	216 เซนติเมตร	7 เมตร	60 เซนติเมตร	110 เซนติเมตร	40 เซนติเมตร	300 เซนติเมตร
ระยะทาง ที่ทำการ ทดลอง	10 - 230 เซนติเมตร	4 - 7 เมตร	40 - 60 เซนติเมตร	20 - 110 เซนติเมตร	5 - 40 เซนติเมตร	5 - 300 เซนติเมตร
ค่า ผิดพลาด เฉลี่ย	2.8 เซนติเมตร	6 เซนติเมตร	0.2 เซนติเมตร	0.19 เซนติเมตร	ข้อมูลไม่ เพียงพอ	0.26 มิลลิเมตร

จากตารางที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าในเอกสาร [1] และเอกสาร [2] เป็นการหาค่าระยะทางโดยการ  
ใช้วิธีการแบบ TOF แม้ว่าจะเป็นวิธีการที่ง่ายแต่ว่าการลดทอนของสัญญาณมีผลต่อการวัดระยะเวลา  
 โดยในเอกสาร [1] ที่ระยะทาง 7 เมตร ระยะทางผิดพลาดมีค่าถึง 5 เซนติเมตร

สำหรับวิธีการที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการหาค่าระยะทางจากความต่างเฟส ซึ่งเป็นหลักการ  
เดียวกับเอกสาร [3] เอกสาร [4] และเอกสาร [5] โดยในเอกสาร [5] จะสามารถวัดระยะทางได้มาก  
ถึง 300 เซนติเมตรและมีระยะทางผิดพลาดเพียง 0.26 มิลลิเมตร แต่่ววิธีการนี้ต้องใช้ความถี่ถึง 3  
ค่าและต้องทำการส่งและรับสัญญาณอัลตราโซนิกจำนวน 2 ครั้งต่อการหาระยะทาง 1 ค่า ทำให้มี  
ความสิ้นเปลืองทรัพยากร ส่วนในเอกสาร [3] แม้จะเป็นการใช้ความถี่ 2 ความถี่แต่ระยะทางสูงสุดที่  
สามารถวัดได้มีค่าเพียง 110 เซนติเมตรและยังต้องมีการเก็บสัญญาณที่ตัวส่งไว้เป็นค่าอ้างอิงในการ  
หาค่าความต่างเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งหากมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการที่ใช้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นวิธีการที่มีความง่าย ความสามารถในการวัดระยะทางสูงสุดจะขึ้นอยู่กับค่าความต่างความถี่ที่ใช้ ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความต้องการและไม่จำเป็นต้องเก็บสัญญาณที่ตัวส่งไว้ใช้ในการอ้างอิงเฟส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการวัดระยะทางด้วยอัลตราโซนิกโดยใช้ความแตกต่างของความถี่ ซึ่งระบบนี้ใช้บอร์ด TMS620C6713 สร้างสัญญาณรูปไซน์ที่มี 2 องค์ประกอบความถี่ โดยแบ่งออกเป็น 4 กรณี คือสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 39.85 kHz กับ 40.6 kHz สัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40.125 kHz กับ 40.5 kHz สัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.1 kHz และสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ 40 kHz กับ 40.04 kHz โดยแต่ละสัญญาณจะเป็นอินพุตให้กับตัวส่งอัลตราโซนิก โดยสัญญาณที่อัลตราโซนิกตัวส่งส่งออกมาจะเดินทางผ่านตัวกลางซึ่งในที่นี้คือ อากาศ แล้วไปกระทบกับวัตถุที่ระยะทางต่างๆ กัน จากนั้นจะสะท้อนกลับมาที่ตัวรับอัลตราโซนิก สัญญาณที่รับมาจะถูกบันทึกเก็บไว้ เพื่อนำมายกกำลังสองและทำ FFT จากนั้นผลตอบสนองทางเฟสที่องค์ประกอบความถี่ต่ำ คือ 750 Hz, 375 Hz, 100 Hz, 40 Hz จะถูกตรวจจับโดยการโปรแกรม MATLAB สุดท้ายระยะทางของวัตถุจะถูกคำนวณโดยค่าความต่างเฟสนี้

จากผลการทดลองได้แบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ ที่ความต่างความถี่เท่ากับ 750 Hz พบว่าระยะทางผิดพลาดเฉลี่ยในช่วง 1 – 11 เซนติเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงที่สามารถวัดได้มีค่า 0.25 เซนติเมตร ที่ความต่างความถี่เท่ากับ 375 Hz สามารถวัดระยะทางได้อยู่ในช่วง 1 – 23 เซนติเมตร พบว่า มีระยะทางผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.28 เซนติเมตร ที่ความต่างความถี่เท่ากับ 100 Hz ช่วงการวัดระยะทางที่สามารถวัดได้คือ 5 – 85 เซนติเมตร พบว่า มีระยะทางผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.95 เซนติเมตรและความต่างความถี่เท่ากับ 40 Hz สามารถวัดระยะทางอยู่ในช่วง 10 – 210 เซนติเมตร พบว่า มีระยะทางผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 2.8 เซนติเมตร

ดังนั้นจากผลการทดลอง ทำให้เห็นว่าระยะทางสามารถคำนวณหาได้จากการใช้อัลตราโซนิก โดยใช้ความแตกต่างเฟสของสัญญาณสองความถี่ได้ โดยข้อดีของวิธีการนี้ คือ ระบบไม่จำเป็นต้องเก็บค่าอินพุตของตัวส่งเพื่อใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงและใช้เพียงบอร์ด DSP ซึ่งการใช้เพียงบอร์ด DSP นี้ทำให้ระบบมีความง่าย ยิ่งไปกว่านี้ความยาวของระยะทางที่สามารถวัดได้ยังได้ถูกปรับปรุงเพราะว่าระยะทางนั้นขึ้นอยู่กับความต่างของความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อการเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิก ดังนั้นควรทำการชดเชยค่าอุณหภูมิต่อการวัดระยะทางซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ นอกจากนี้ควรเพิ่มความละเอียดและความถูกต้องของคลื่นรูปไซน์ที่ใช้ เพื่อเพิ่มระยะทางมากที่สุดที่สามารถวัดและความถูกต้องของการวัดระยะทางเพราะเทคนิคการวัดระยะทางที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อจำกัดคือ ระยะทางมากที่สุดที่สามารถวัดได้จะขึ้นอยู่กับค่าความต่างความถี่ที่ใช้ โดยการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้นระยะทางมากที่สุดที่สามารถวัดได้ คือ 216 เซนติเมตร สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่วัดระยะทางไม่ไกลมาก เช่น ด้านเทคโนโลยี สามารถใช้ตรวจจับวัตถุและป้องกันการชนของหุ่นยนต์, ด้านการแพทย์ สามารถใช้วัดความหนาและความสูงของคนไข้ เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Yan Xiaole and Gu Lichen “Time-delay Estimation of Ultrasonic Echoes Based on the Physical Model Matching” **IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, Seoul, Korea, August, 2012** vol. 17, no. 2, 2017. pp. 469-473, doi: 10.1109/CoASE.2012.6386333.
- [2] Md. Omar Khyam, Shuzhi Sam Ge, Xinde Li and Mark R. Pickering “Highly Accurate Time-of-Flight Measurement Technique Based on Phase-Correlation for Ultrasonic Ranging” **IEEE sensors journal**, vol. 17, no. 2, 2017. pp. 434-443.
- [3] Hong Hua, Yongtian Wang, Dayuan Yan “A Low-Cost Dynamic Range-Finding Device Based on Amplitude-Modulated Continuous Ultrasonic Wave” **IEEE transactions on instrumentation and measurement**, vol. 51, no. 2, 2002. pp. 362-367.
- [4] M. Yang, S.L. Hill and J.O. Gray “A multi frequency am-based ultrasonic system for accuracy distance measurement” **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, vol. 43, no. 6, 1994. pp. 861–866.
- [5] Ke-Nung Huanga and Yu-Pei Huang “Multiple-frequency ultrasonic distance measurement using direct digital frequency synthesizers” **Sensors and Actuators A: Physical**, vol. 149, no. 1, 2009. pp. 42-50.
- [6] “คลื่นกล.” [Online]. Available : [http://wavesrp512.blogspot.com/2014/07/blog-post\\_8214.html](http://wavesrp512.blogspot.com/2014/07/blog-post_8214.html). 2018.
- [7] Navya A. Singh and M.Borschbach “Effect of External Factors on Accuracy of Distance Measurement using Ultrasonic Sensors” **International Conference on Signals and Systems (ICSigSys), Sanur, Indonesia, May, 2017**, pp.266-271, doi:10.1109/ICSIGSYS.2017.7967
- [8] “อัลตราโซนิก เซนเซอร์.” [Online]. Available : <http://www.supremelines.co.th/สาระน่ารู้/2090-อัลตราโซนิก-เซนเซอร์-ultrasonic-sensors.html>. 2018.
- [9] R. Serway and J. Jewett. **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics**, ISBN 978-1-133-95399-9, pp. 511-512.

- [10] Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky and S.Hamid Nawab. **Signal & System.**  
2nd ED. New JERSEY : Prentice-Hall, Inc. 1997.
- [11] “**Fast Fourier transform.**” [Online]. Available : [https://en.wikipedia.org/wiki/Fast\\_Fourier\\_transform](https://en.wikipedia.org/wiki/Fast_Fourier_transform). 2018.
- [12] R. Chassaing. **DSP Applications Using C and the TMS320C6x DSK.** New York :  
John Wiley & Sons, Inc. 2002
- [13] “**TMS320C6713 DSP Starter Kit (DSK).**” [Online]. Available :  
<https://www.element14.com/community/docs/DOC-40454/v/tms320c6713-dsp-starter-kit-dsk.2018>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โค้ดที่ใช้ในการสร้างสัญญาณไซน์ด้วยบอร์ด TMS302C6713

```

#include "DSK6713_AIC23.h"

Uint32 fs=DSK6713_AIC23_FREQ_96KHZ;

#define DSK6713_AIC23_INPUT_MIC 0x0015

#define DSK6713_AIC23_INPUT_LINE 0x0011

Uint16 inputsource=DSK6713_AIC23_INPUT_LINE;

#define BUFFERLENGHT 256

int bufindex=0;

int out_buffer[BUFFERLENGHT];

void main()
{
short sample_data;
short sample_data1;
short sample_data11;
register float y3,y2,y,z,z2,z3;

comm_poll();

y=1200;
z=1200;

while(1)
{

y3=y2;

y2=y;

y=(-1.75*y2)-y3+10; //เปลี่ยนค่าตามความถี่ที่ต้องการ

z3=z2;

z2=z;

z=(-1.77*z2)-z3+10; //เปลี่ยนค่าตามความถี่ที่ต้องการ

sample_data=(y+z)*10;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเป็นสงวนสิทธิ์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        output_left_sample(sample_data);
    }

    input=input_left_sample();
    out_buffer[bufindex++]=input;
    if(bufindex>=BUFFERLENGHT) bufindex=0;
}
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โค้ดที่ใช้ในการแสดงผลตอบสนองทางเฟสด้วยโปรแกรม MATLAB

```
% signal คือ สัญญาณที่อิมพอร์ตมาจากการเก็บไฟล์ .dat
```

```
L=length(signal);
```

```
a11=fft(signal);
```

```
P2 = abs(a11/L);
```

```
P1 = P2(1:L/2+1);
```

```
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
```

```
P4=angle(a11);
```

```
P3 = P4(1:L/2+1);
```

```
P3(2:end-1) = P3(2:end-1);
```

```
f = fss*(0:(L/2))/L;
```

```
subplot(2,1,1);
```

```
plot(f,P1,'k');
```

```
xlabel('frequency (Hz)');
```

```
ylabel('magnitude');
```

```
xlim([0 1000]);
```

```
subplot(2,1,2);
```

```
plot(f,P3);
```

```
xlabel('frequency (Hz)');
```

```
ylabel('phase (radians)');
```

```
xlim([0 1000]);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Proceedings of

# 2018 3rd International Conference on Computer and Communication Systems

# ICCCS 2018

April 27-30, 2018

Nagoya, Japan



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณียกเว้นเพื่อการค้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม **IEEE Catalog Number: CFP18D48-USB** ของเราทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Distance Measurement Technique Using Phase Difference of Two Reflected Ultrasonic Frequencies

Munchuphon Chongchamsai, Sakkarin Sinchai, Paramote Wardkein and Surapol Boonjun

Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

e-mail: toey\_munchii@hotmail.com, sakkarin\_sinchai@yahoo.com, pramote@telecom.kmitl.ac.th,  
surapol@telecom.kmitl.ac.th

**Abstract**—This paper proposes a simple method of distance measurement utilizing phase difference of two reflected ultrasonic frequencies. To obtain the phase difference, an alternating signal which contains two sinusoidal signals having different frequencies is fed to an ultrasonic transmitter. When the transmitted signal is reflected and received by the ultrasonic receiver, the received signal is first squared. Then, a time shift property of Fourier transform is applied to the squared signal to acquire the phase difference. The phase difference is converted to a time-of-flight (TOF) value and turned to the distance. To experiment the proposed technique, a DSP TMS620C6713 board is employed to generate the alternating signal as well as to receive the reflected signal, and to process the received signal. In the experiment, two sinusoidal signals having frequencies of 39.85 kHz and 40.6 kHz are used. The results show that the obtained distance by the presented approach has fairly low error only 0.15 centimeters compared to the actual distance.

**Keywords**—component; distance measurement; ultrasonic; phase difference; phase shift

### I. INTRODUCTION

In distance measurement, most sensors, such as radar [1], laser [2] and infrared [3], are used. However, for short distance measurement, an ultrasonic sensor is a preferable option because of its cheapness, availability, high accuracy. In addition, the ultrasonic sensor has lower side effect to humans than some sensors using electromagnetic wave.

To measure distance based on an ultrasonic sensor, either a time-of-flight (TOF) method [4-7] or a phase-shifting technique [8-10] is applied.

For the TOF approach, time travelling from the ultrasonic transmitter to an object and bouncing off the object back to the ultrasonic receiver is measured. After the TOF value is acquired, the distance between the object and the ultrasonic receiver is computed. Although the TOF technique is simple, the actual reflected signal is difficult to detect. Besides, the TOF scheme is not applicable in noisy environment as the reflected signal level is low and sensitive to noise [11].

On the contrary, the phase-shifting method measures the phase difference between the transmitted signal and the received reflected signal. Then, the phase difference is calculated the distance. By using the phase-shifting technique, the influence of noise interference is lessened. In [8], the phase-shifting approach is combined with the

amplitude modulation (AM) to enhance the accuracy of the measured distance. Nonetheless, the phase-shifting technique can detect the phase difference only  $2\pi$ . With this drawback, the distance can be measured in a short range. To resolve this problem, calculating phase difference from two sinusoidal signals having different frequencies has been presented [9]. Hence, the length of the measured distance is longer than that of employing the traditional phase-shifting method. Later, the phase-shifting method is slightly enhanced by using an alternating signal having multiple frequencies [10]. With slightly improvement, the measured distance is increased due to the phase difference can be detected in a wider range. Even though the techniques of [8-10] improve the measured distance but these methods require the transmitted signal as the reference signal to determine the phase shift. Thus, the transmitted signal needs to be kept. More memory is needed.

In this work, the distance measurement by using phase difference of two reflected ultrasonic signals having different frequencies is proposed. To reduce the complexity in phase shift calculation in [8-10], the received reflected signal is first squared. Then, a time shift property of Fourier transform is applied to the squared signal to get the phase shift. By using the presented technique, the reference signal (the transmitted signal) is not needed to be stored in order to find the phase shift. All of the processes are performed on DSP TMS620C6713 board.

This paper is organized as follows. In section II, the proposed technique is described. Next, the system implementation is provided in section III. Section IV illustrates the experimental results. Lastly, section V is devoted to the conclusion.

### II. PROPOSED TECHNIQUE

In modern signal processing, the principles of signal and system play an important role to describe any response signal that happens or some response signals that have not been clearly studied especially the components of those signals. Generally, any periodic signal containing frequency components is assumed to generate from combined sinusoidal signals which have different amplitude, different frequencies, and different phases. To understand the frequency components of the periodic signal, the mathematical model of Fourier series is described. The periodic signal,  $f(t)$ , with a period  $T$  is expressed as

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sin(n\omega t) \quad (1)$$

where

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{2\pi}{T}, \\ &= 2\pi f \end{aligned} \quad (1a)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (1b)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt \quad (1c)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt \quad (1d)$$

For a non-periodic signal, the frequency components of the non-periodic signal are also explained by Fourier transform. The non-periodic signal,  $x(t)$ , is modelled by

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2)$$

where  $X(\omega)$  is the spectral density of the non-periodic signal.

In this work, three important properties of Fourier transform namely, time-scaling, frequency shifting and time-shifting are focused, as shown in (3)-(5).

$$x(ct) \xrightarrow{F} \frac{1}{|c|} X\left(\frac{\omega}{c}\right) \quad (3)$$

$$x(t) e^{j\omega_d t} \xrightarrow{F} X(\omega - \omega_d) \quad (4)$$

$$x(t - t_d) \xrightarrow{F} X(\omega) e^{-j\omega t_d} \quad (5)$$

To use the given Fourier transforming properties, the distance measurement is presumed to be a linear non-distortion system. When a signal,  $x(t)$ , is transmitted from a transmitter through air to hit an object (see Fig.1), the reflected signal,  $x(t - t_d)$ , received at a receiver is manifested by (6).

$$y(t) = Ax(t - t_d) \quad (6)$$

From (6),  $y(t)$  is the received signal which is the multiplication of the reflected signal,  $x(t - t_d)$ , which is delayed by  $t_d$ , and the attenuating gain,  $A$ , generated by the air. Later, (6) is transformed to a frequency domain using (5). (6) is rewritten as (7).

$$Y(\omega) = AX(\omega) e^{-j\omega t_d} \quad (7)$$

The relationship in (7) shows that the system having no distortion consists of two important properties as follows. First, gain is constant in every frequency component. Next, phase shifting is directly proportional to the multiple of frequency and the delayed time as shown in (8).

$$\theta(\omega) = -\omega t_d \quad (8)$$

If the signal,  $x(t)$ , is an input monotone signal expressed by (9), the output,  $y(t)$ , produced by the non-distortion system is recast in (10).

$$x(t) = A_i \cos(\omega_i t) \quad (9)$$

$$y(t) = A_o \cos(\omega_i t - \omega_i t_d) \quad (10)$$

According to (10),  $t_d$  is the time travelling of the ultrasonic signal from the transmitter to the receiver. If  $t_d$  is detected, the distance of object can be calculated. Using the monotone signal can measure distance in a short length, and require a reference signal to compare the phase difference with the reflected signal. To resolve the mentioned drawbacks, an alternating signal,  $x(t)$ , consisting of 2 frequencies written in (11) is transmitted instead of employing only one frequency signal. At the receiver, is the output of the system (the reflected signal from the object) yielded in (12).

$$x(t) = A_i \cos(\omega_1 t) + A_i \cos(\omega_2 t) \quad (11)$$

$$y(t) = A_o \cos(\omega_1 t - \phi_1) + A_o \cos(\omega_2 t - \phi_2) \quad (12)$$

From (12),  $\phi_1 = \omega_1 t_d$  and  $\phi_2 = \omega_2 t_d$  are the phases of those two signals relating to the effect of  $t_d$ , respectively.

To compute the value of the delayed time,  $t_d$ , (12) is squared producing (13).

$$\begin{aligned} y^2(t) &= A_o^2 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \cos[2\omega_1 t - 2\phi_1] \right. \\ &\quad + \cos[(\omega_1 + \omega_2)t - (\phi_1 + \phi_2)] \\ &\quad + \cos[(\omega_1 - \omega_2)t - (\phi_1 - \phi_2)] \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \cos[2\omega_2 t - 2\phi_2] \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

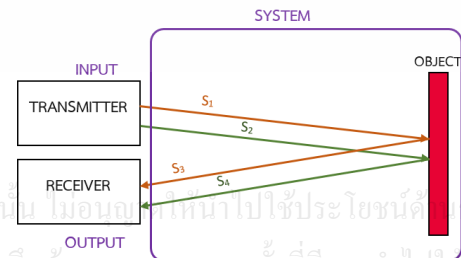


Figure 1. The system of distance measurement using ultrasonic.

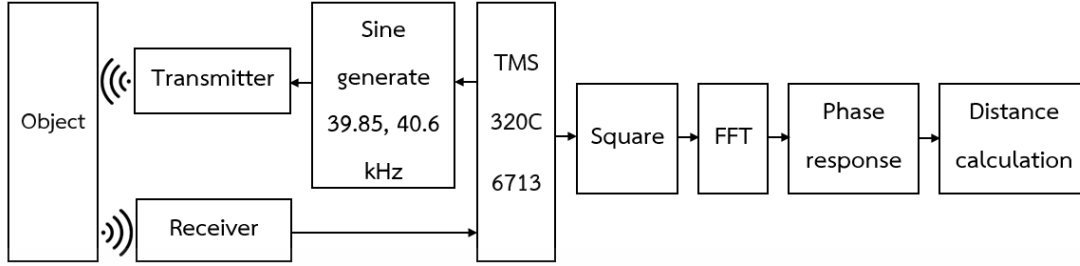


Figure 2. Block diagram of the system.

As can be observed in (13), the phase difference of the two signals is revealed at the third term on the right side which is  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = \omega_1 t_d - \omega_2 t_d$ . By using the Fourier transform, a value of time of flight (delayed time) is calculated by

$$t_d = \frac{\Delta\phi}{\Delta\omega} \quad (14)$$

where  $\Delta\omega$  is  $\omega_1 - \omega_2$ . Lastly, the distance of the object and the transmitter is computed from the time of flight as shown in

$$R = \frac{vt_d}{2} = \frac{v\Delta\phi}{2\Delta\omega} \quad (15)$$

where  $v$  is ultrasonic velocity travels through the air which is approximately equal to 340 m/s.

### III. IMPLEMENTATION

The distance measurement system using two frequencies of ultrasonic is shown as a block diagram in Fig.2. This paper uses a digital signal processing board TMS320C6713 to generate an alternating signal containing two sinusoidal signals at the frequencies of 39.85 kHz and 40.6 kHz. Then, the generated alternating signal is fed to the ultrasonic transmitter as an input. When the transmitted signal bounces off the object, the transmitted is reflected back to the ultrasonic receiver. After that the received signal is squared by the DPS board. Next, the phase response is detected at the low frequency component by taking a fast Fourier transform (FFT) to the squared signal. Finally, the distance between the object and the ultrasonic receiver is calculated from the phase difference.

### IV. SIMULATION AND EXPERIMENT

#### A. Simulation

To verify the proposed technique, the environment settings are simulated in MATLAB. In the simulation, the measured distance is set to 0.2 meters. According to (15), the time of flight travelling through the air is calculated as (16).

$$t_d = \frac{2R}{v} = \frac{2(0.2)}{340} = 1.18ms \quad (16)$$

By substituting (16) into (14), the phase difference of the two transmitted frequencies is pre-computed in (17).

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \Delta\omega t_d \\ &= (2\pi)(40600 - 39850)0.00118 \\ &= 2.419rad \end{aligned} \quad (17)$$

Next, the transmitted signal is simulated using (18).

$$x(t) = \cos(2\pi 39850t) + \cos(2\pi 40600t) \quad (18)$$

Later, the attenuation in the air is arbitrarily randomized. Hence, the reflected signal at the receiver is expressed by (19).

$$\begin{aligned} y(t) &= 0.7 \cos(2\pi 39850t - 0.1445) \\ &\quad + 0.6 \cos(2\pi 40600t - 2.563) \end{aligned} \quad (19)$$

Lastly,  $y(t)$  in (19) is squared giving (20).

$$\begin{aligned} y^2(t) &= 0.42 \times [1 + \frac{1}{2} \cos(2\pi 79900t - 0.289) \\ &\quad + \cos(2\pi 80450t - 2.708) \\ &\quad + \cos(2\pi 750t - 2.419) \\ &\quad + \frac{1}{2} \cos(2\pi 81200t - 1.984)] \end{aligned} \quad (20)$$

After squaring  $y(t)$ , (20) is transformed to a frequency domain by FFT. The frequency components of the received signal, which are 750 Hz, 79.9 kHz, 80.45 kHz and 81.2 kHz, are illustrated in Fig. 3a. Also, the phase response of the reflected signal is depicted in Fig.3b. In Fig.3c shows that the phases of the frequency components at 39.85 kHz and 40.6 kHz equal to 0.1455 rad and 2.563 rad, respectively. By subtracting 2.563 rad by 0.1455 rad, the phase difference is approximately 2.418 rad which is close to the pre-computed phase difference in (17) indicating that the proposed method is usable.

However, in this research, the distance is calculated from the phase difference of the frequency component at 750 Hz because its phase response is 2.419 rad matched with the pre-calculated phase difference.

Therefore, the simulation is proven that the distance of the object can be calculated from the phase difference of two reflected ultrasonic frequencies.

**B. Experiment**

The experiment is set according to the block diagram of system which is shown in Fig.2. The TMS320C6713 generates the alternating signal having two sinusoidal signals at frequencies of 39.85 kHz and 40.6 kHz. This generated signal is fed to be the input of the ultrasonic transmitter as exhibited in Fig.4. The blue signal is the transmitted signal and the red signal is the received signal. By comparing the transmitted signal from DPS board with Fig.5 which is the simulated transmitted signal in MATLAB, it is seen that those signals are similar. Thus, the generated signal from the DSP board is proven to be correct.

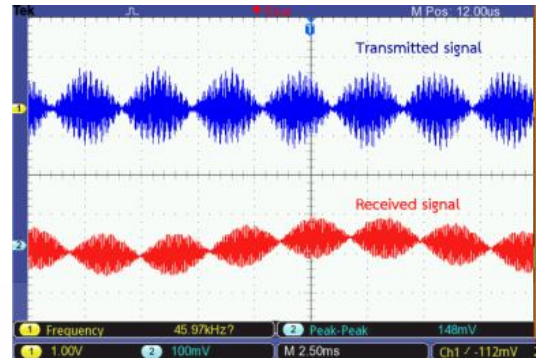


Figure 4. Generated signal from TMS320C6713 board.

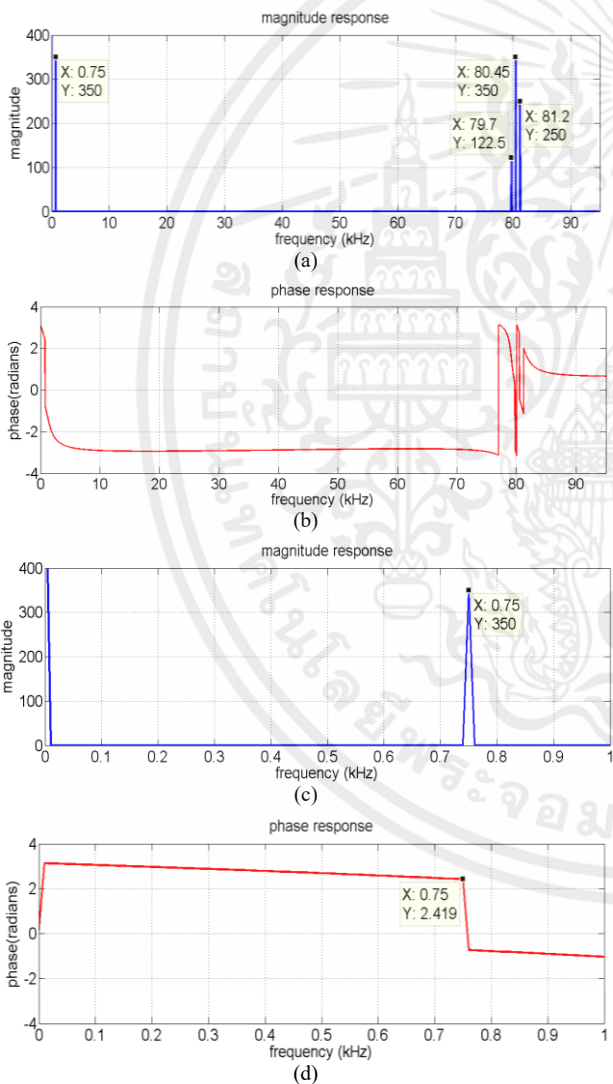


Figure 3. Magnitude and phase response of  $y^2(t)$  after applied FFT:

- (a) Magnitude response of every frequency,
- (b) Phase response of every frequency,
- (c) Magnitude response at 750 Hz and
- (d) Phase response at 750 Hz.

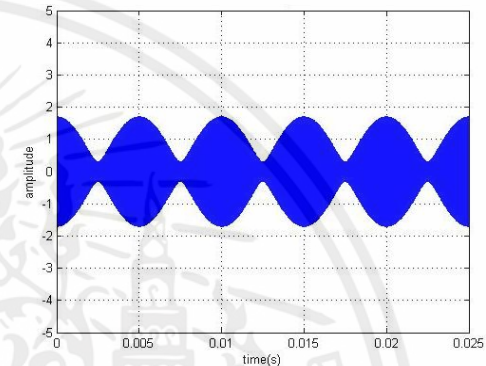


Figure 5. Simulated signal from MATLAB.

After squaring the received signal, the frequency components of the squared signal are computed by applying FFT. To reveal the frequency components of the squared signal, a Code Composer Studio (CCS) program is utilized. The CCS is the program used run on the DSP board to plot a signal spectrum. By using this program, the components of the generated signal at 39.85 kHz and 40.6 kHz are illustrated on the right side of Fig. 6. At the same time, the desired component at 750 Hz ( $\Delta\omega$ ) is appeared on the left of Fig. 6.

The phase difference composed by CCS which leads to the distance calculation is shown in Fig.7. With the resulting phase difference in Fig.7, the measured distance from 3 – 10 centimeters is calculated and shown in Fig.8. From Fig.8, the relationship between the distance and the phase different from the experiment is written as

$$R_a = 0.3\Delta\phi \tag{21}$$

where  $\Delta\phi$  is the phase difference and  $R_a$  is the actual distance.

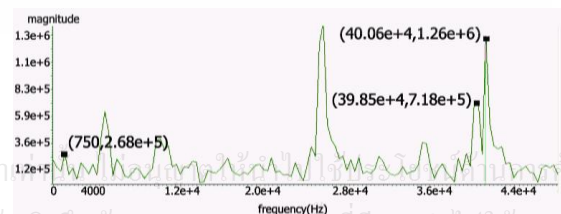


Figure 6. The frequency components of the squared received signal from Code Composer Studio program.

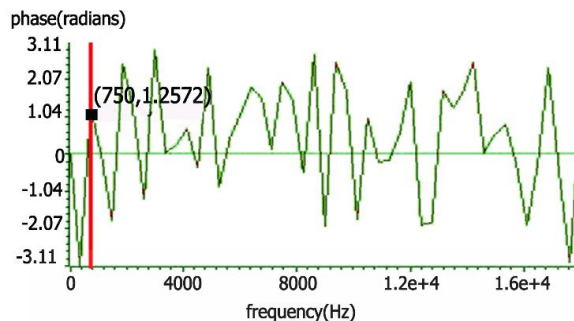


Figure 7. Phase difference from Code Composer Studio program.

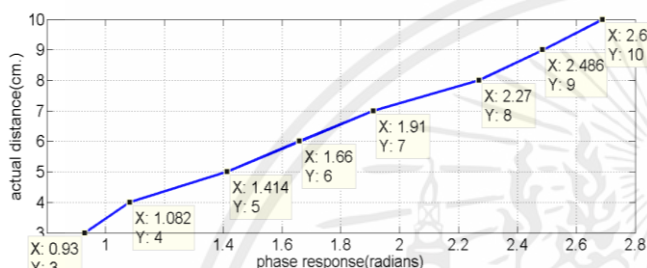


Figure 8. Phase different from the experiment.

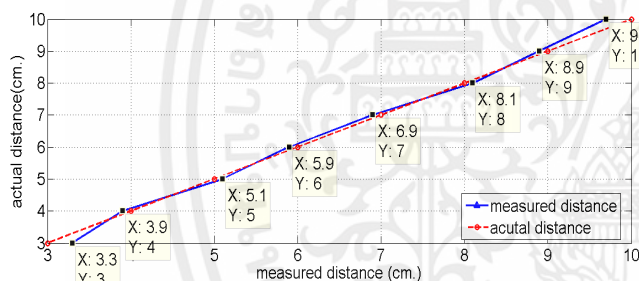


Figure 9. Measured distance compared with real distance.

After that, the measured distance is computed from the phase difference. Fig.9 manifests the comparison of the actual distance and the measured distance from the experiment. By contemplating Fig.9, it is observed that the measured distance at each length is close to the actual distance. From Fig. 9, the measured distance and the actual distance is formed the relationship in

$$R_a = 1.1R_m \quad (22)$$

where  $R_m$  is the distance measured by the presented technique and  $R_a$  is the actual distance.

## V. CONCLUSION

This paper proposes a simple method of distance measurement. The phase difference of two reflected

ultrasonic frequencies is applied to measure the distance. The system uses TMS620C6713 board to generate an alternating signal having two sinusoidal signals with different frequencies of 39.85 kHz and 40.6 kHz. This signal is then fed to the ultrasonic transmitter as the input. After the transmitted signal reflects from the object to the ultrasonic receiver, the received signal is squared and a FFT takes on the squared signal. Then, the phase difference of different frequency component at 750 Hz is detected. Finally, the distance of the object is calculated from the phase difference value. In the experiment, the distance from 3 to 10 centimeters is measured. The experimental results show that the error of the measurement is only 0.15 centimeters which exhibits the efficacy of the proposed method. The advantages of the presented technique are as follows. The reference signal of the transmitted signal is not needed. Thus, no extra memory is required. Also, the proposed approach uses only the DSP board which provides the simplicity.

## REFERENCES

- [1] John M. Weiss, "Continuous-Wave Stepped-Frequency Radar for Target Ranging and Motion Detection", Proceedings of the 42<sup>nd</sup> Annual Midwest Instruction and Computing Symposium, April, 2009 (online proceedings at <http://mics.sdsmt.edu>).
- [2] O. Toedter, A.W. Koch, "A simple laser-based distance measuring device", Measurement, vol. 20, no. 2, 1997, pp.121-128.
- [3] G. Benet, F. Blanes, J.E. Simó, P. Pérez, "Using infrared sensors for distance measurement in mobile robots", Robotics and Autonomous Systems, vol. 40, 2002, pp. 255–266.
- [4] D. Marioli, C. Narduzzi, C. Offelli, D. Petri, E. Sardini, A. Taroni, "Digital time-of flight measurement for ultrasonic sensors", IEEE Trans. Instrum. Meas. 41, 1992, pp. 93–97.
- [5] Md. Omar Khyam, Shuzhi Sam Ge, Xinde Li, Mark R. Pickering, "Highly Accurate Time-of-Flight Measurement Technique Based on Phase-Correlation for Ultrasonic Ranging", IEEE sensors journal, vol. 17, no. 2, 2017, pp.434-443.
- [6] Z. Lu, C. Yang, D. Qin, Y. Luo, M. Momayez, "Estimating ultrasonic time-of-flight through echo signal envelope and modified Gauss Newton method", Measurement, vol.94, 2016, pp. 355–363.
- [7] Ricardo Queirós, Francisco Corrêa Alegria, Pedro Silva Girão, António Cruz Serra, "A multi-frequency method for ultrasonic ranging", Ultrasonics, vol.63, 2015, pp. 86–93.
- [8] M. Yang, S.L. Hill, J.O. Gray, "A multi frequency am-based ultrasonic system for accuracy distance measurement", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 43, no.6, 1994, pp.861–866
- [9] Changzhan Guand Jaime Lien, "A Two-Tone Radar Sensor for Concurrent Detection of Absolute Distance and Relative Movement for Gesture Sensing", IEEE sensors letters, vol. 1, no. 3, 2017.
- [10] Ke-Nung Huang, Yu-Pei Huang, "Multiple-frequency ultrasonic distance measurement using direct digital frequency synthesizers", Sensors and Actuators A: Physical, vol. 149, no.1, 2009, pp.42-50.
- [11] Navya A. Singh, M.Borschbach, "Effect of External Factors on Accuracy of Distance Measurement using Ultrasonic Sensors", International Conference on Signals and Systems (ICSigSys), May 2017, pp.266-271, doi:10.1109/ICSIGSYS.2017.796

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวมัณฑุพร จงแจ่มใส  
 วัน เดือน ปีเกิด 7 มีนาคม พ.ศ.2538 สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร  
 ที่อยู่ 201/117 ซอย 8 หมู่ 4 แขวงคลองสองต้นนุ่น เขตลาดกระบัง  
 จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10520  
 ประวัติการศึกษา 2559 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) การเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรเลอร์  
 2.) การเขียนแอปพลิเคชันแอนดรอยด์  
 3.) การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้