

เครื่องวัดตำแหน่ง 3 มิติ

A System for Estimating the 3 Dimensional Positions



โดย
นายเกรียงไกร เรียงเงิน
นางสาวจิตราวดี ชีวะตานนท์

รฟ.
๗๗๗๑
๒๕๔๗

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 61528
วัน,เดือน,ปี..... 18 ก.ค. 2549

b..... 115๑๗๘๔๗
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดตำแหน่ง 3 มิติ

A System for Estimating the 3 Dimensional Positions

โดย

นางเกรียงไกร เรียงเงิน รหัส 44010036

นางสาวจิตราวดี ชีวะตานนท์ รหัส 44010072

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ประภากร สุวรรณะ

อาจารย์เทอดศักดิ์

ลิวหาทอง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานปีการศึกษา 2547
ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง เครื่องวัดตำแหน่ง 3 มิติ (A System For Estimating the 3 Dimensional)
ผู้จัดทำ นายเกรียงไกร เรียงเงิน 44010036
น.ส.จิตรราวี ชีวะตานนท์ 44010072



ลงชื่อ.....
Prasanna

(ผศ.ประภากร สุวรรณะ)
อาจารย์ที่ปรึกษา

ลงชื่อ.....
H. S.

(อ.เทอดศักดิ์ ถั่วหาทอง)
อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการเรื่อง (ภาษาไทย) เครื่องวัดตำแหน่ง 3 มิติ
(ภาษาอังกฤษ) A System For Estimating the 3 Dimensional

จัดทำโดย นายเกรียงไกร เรียงเงิน 44010036
น.ศ.จิตราวดี ชีวะตานนท์ 44010072

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ประภากร สุวรรณะ
อ.เทอดศักดิ์ ลีวะหาทอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผศ.ประภากร สุวรรณะ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

ลงชื่อ.....

(อ.เทอดศักดิ์ ลีวะหาทอง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ส่วนประกอบของโครงการ	2
1.1.1 ชุดรับ-ส่งสัญญาณอุตสาหกรรมไอซนิก	2
1.1.2 บอร์ด FPGA	3
1.1.3 ภาคคำนวณและประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์	4
บทที่ 2 ทฤษฎี	5
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับคลื่นอุตสาหกรรมไอซนิก	5
2.1.1 คุณสมบัติและธรรมชาติของคลื่นอุตสาหกรรมไอซนิก	5
2.1.2 คลื่นอุตสาหกรรมไอซนิก	5
2.1.3 ชนิดของคลื่นอุตสาหกรรมไอซนิก	6
2.1.4 คุณสมบัติที่สำคัญของคลื่นอุตสาหกรรมไอซนิก	7
2.2 อุตสาหกรรมทรานสดิวเซอร์	11
2.2.1 ปรัชญาการณียะโซอิเล็กทริก	11
2.2.2 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก	13
2.2.3 ชนิดของเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์	13
2.2.4 การทำงานของทรานสดิวเซอร์ตัวส่ง-ตัวรับ	13
2.2.5 ข้อควรระวังในการใช้งานตัวส่ง-ตัวรับทรานสดิวเซอร์	14
2.3 ความรู้เบื้องต้นของพอร์ตขนาน	15
2.3.1 ลักษณะทางกายภาพของพอร์ตขนาน	16
2.3.2 พอร์ตคาต้า(Data Port)	18
2.3.3 พอร์ต Control	19
2.3.4 พอร์ตแสดงสถานะหรือพอร์ต Status	20
2.3.5 การนำพอร์ตขนานไปใช้งาน	21
2.3.6 การเขียนโปรแกรมติดต่อกับพอร์ตขนาน	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
2.4 FPGA (Field Programmable Gate Array)	22
2.4.1 ชนิดของ FPGA	22
2.4.2 รายละเอียดของขั้นตอนในการออกแบบ FPGA	23
บทที่ 3 การออกแบบและการทำงานของเม้าส์ 3 มิติ	27
3.1 แนวทางการออกแบบเม้าส์ 3 มิติ	27
3.1.1 จุดประสงค์ก่อนออกแบบ	27
3.1.2 ขั้นตอนการออกแบบ	27
3.2 การทำงานของเม้าส์ 3 มิติ	28
3.2.1 วงจรภาคส่งคลื่นอุลตราโซนิก	28
3.2.2 วงจรภาครับคลื่นอุลตราโซนิก	29
3.2.2.1 ส่วนวงจรขยาย	29
3.2.2.2 ส่วนวงจร Super Diode	31
3.2.2.3 ส่วนวงจรป้อนกลับ	32
3.2.2.4 ส่วนวงจรเอาต์พุต(Output)	35
3.2.2.5 ส่วนวงจร Peak Detector	35
3.3 วงจรภาคประมวลผล	36
3.3.1 การคำนวณหาพิกัดตำแหน่ง	37
3.4 หลักการทำงานของส่วน FPGA	39
3.5 การเขียนโปรแกรมด้วย Visual Basic	43
บทที่ 4 ผลการทดลอง	44
4.1 ลักษณะสัญญาณที่ระยะต่าง ๆ	44
4.2 สัญญาณที่ภาคส่งคลื่นอุลตราโซนิก	46
4.3 สัญญาณที่ภาครับคลื่นอุลตราโซนิก	46
4.4 แสดงผลการ Simulate ของ FPGA	49
4.4.1 ผลการ Simulate ส่วนของ Block Control	50
4.4.2 ผลการ Simulate ส่วนของ Block Counter	50
4.4.3 ผลการ Simulate วงจรทั้งหมดของ FPGA	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
4.5 ผลการวัดค่า DTofS และการคำนวณตำแหน่งของตัวส่ง	52
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์โครงการ	54
5.1 สรุปผลการทดลอง	54
5.2 ปัญหาที่พบ	55
5.3 แนวทางแก้ไข	58
เอกสารอ้างอิง	59
ภาคผนวก	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1	แนวคิดในการออกแบบ	1
รูปที่ 1.2	แสดงการวางตำแหน่งของตัวส่งและตัวรับ	2
รูปที่ 1.3	ภาพแสดงการทำงานของส่วน FPGA	3
รูปที่ 1.4	ภาพแสดงการทำงานของส่วนประมวลผลและแสดงผล	4
รูปที่ 2.1	แสดงถึงช่วงความถี่ต่างๆที่ถูกนำไปใช้งาน	5
รูปที่ 2.2	แสดงลักษณะการเกิดคลื่นตามยาว	6
รูปที่ 2.3	แสดงลักษณะการเกิดคลื่นตามขวาง	7
รูปที่ 2.4	แสดงการบีบอัดของคลื่นเสียง 2 คลื่น	8
รูปที่ 2.5	แสดงลักษณะการเกิดคลื่นนิ่ง	8
รูปที่ 2.6	แสดงลักษณะของคลื่นเสียงที่ผ่านช่องแคบๆ จะเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดตัวใหม่	9
รูปที่ 2.7	แสดงการหักเหของคลื่นเสียงในตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน	9
รูปที่ 2.8	แสดงเมื่อคลื่นวงกลมกระทบกับฉากที่เป็นเส้นตรง คลื่นที่สะท้อนกลับมาจะเป็นคลื่นวงกลมเช่นเดียวกัน	9
รูปที่ 2.9	ผลของเปียโซอิเล็กทริก	12
รูปที่ 2.10	วงจรเสมือนของเปียโซอิเล็กทริก	12
รูปที่ 2.11	แสดงไคอะแกรมเวลาของการส่งข้อมูลไปยังเครื่องพิมพ์	16
รูปที่ 2.12	แสดงสัญญาณทั้งหมดที่อยู่บนพอร์ตขนาน	18
รูปที่ 2.13	วงจรภายในของพอร์ต Data	18
รูปที่ 2.14	วงจรภายในของพอร์ต Control	20
รูปที่ 2.15	แสดงวงจรภายในของพอร์ตแสดงสถานะ	21
รูปที่ 3.1	วงจรภาคส่งคลื่นอุลตราโซนิก	28
รูปที่ 3.2	ส่วนวงจรขยาย	29
รูปที่ 3.3	วงจร Super Diode	31
รูปที่ 3.4	ส่วนป้อนกลับ	32
รูปที่ 3.5	กราฟแรงดันตกคร่อม V_{C17}	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 3.6 วงจรเอาต์พุต(Output)	35
รูปที่ 3.7 วงจร Peak Detector	35
รูปที่ 3.8 แสดงการวางตำแหน่งของตัวส่งและตัวรับ	37
รูปที่ 3.9 แสดงภาพวงจรการทำงานภายใน Block Control 31	40
รูปที่ 3.10 แสดงภาพวงจรการทำงานภายในของคอมโพเนนท์ Count2	41
รูปที่ 3.11 แสดงภาพวงจรการทำงานภายใน Block Counter	41
รูปที่ 3.12 แสดงภาพวงจรในส่วนของ FPGA	42
รูปที่ 3.13 แสดงภาพวงจรทั้งหมดในส่วนของ FPGA	42
รูปที่ 3.14 แสดงภาพ flow chart	43
รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบสัญญาณที่ภาครับที่ระยะต่างๆ	44
รูปที่ 4.2 สัญญาณเอาต์พุตของภาคส่งคลื่นอุตราโซนิก	46
รูปที่ 4.3 สัญญาณเอาต์พุตของวงจร AGC (1) และ วงจร Comparator (2) ที่ระยะต่างๆ	46
รูปที่ 4.4 แสดง Timing Diagram ของ Block Control ที่ได้จากการ Simulate	50
รูปที่ 4.5 แสดง Timing Diagram ของ Block Counter ที่ได้จากการ Simulate	50
รูปที่ 4.6 แสดง Timing Diagram ของวงจรทั้งหมดของ FPGA	51
รูปที่ 5.1 แสดงสัญญาณทางด้านเอาต์พุตของวงจร LPF	55
รูปที่ 5.2 แสดงสัญญาณทางด้านเอาต์พุตของวงจร LPF ที่เพิ่ม order ของ วงจร LPF	56
รูปที่ 5.3 แสดงรูปคลื่นที่รับได้เมื่อวางตัวส่งห่างจากตัวรับหรือมุมระหว่าง ตัวส่งและตัวรับมากเกินไป	56
รูปที่ 5.4 แสดงพัลส์ที่ออกมาจากวงจร Peak Detector เมื่อวางตัวส่งห่างเกินไป	57
รูปที่ 5.5 แสดงพัลส์ที่ออกมาจากวงจร Peak Detector เมื่อมุมระหว่าง ตัวส่งและตัวรับมากเกินไป	59

ตารางที่ 2.1 สัญญาณสำคัญของพอร์ตขนานที่ใช้ติดต่อกับเครื่องพิมพ์	17
ตารางที่ 2.2 แสดงแอดเดรสของพอร์ตขนาน	22



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดตำแหน่ง 3 มิติ

นายเกรียงไกร เรียงเงิน 44010036
 นางสาวจิตราวดี ชีวะตานนท์ 44010072
 ผศ.ประภากร สุวรรณะ อาจารย์ที่ปรึกษา
 อาจารย์เทอดศักดิ์ ลีมหาทอง อาจารย์ที่ปรึกษา
 ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสนอระบบการหาพิกัดที่ถูกต้องในรูปของ 3 มิติ จากตัวส่งสัญญาณอัลตราโซนิกไปยังตำแหน่งรับสัญญาณอัลตราโซนิก โดยอาศัยผลต่างของเวลาที่ใช้ในการส่งจากตัวส่ง ไปยังตัวรับทั้ง 5 ตัวที่ติดตั้งไว้ที่พิกัดที่รู้ค่าของตำแหน่งแน่นอน เริ่มต้น โดยการใช้ผลต่างของเวลาระหว่างตัวรับซึ่งวัดโดยใช้บอร์ด FPGA และส่งค่าไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์โดยอาศัยพอร์ตขนาน แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาพิกัดของตัวส่งและแสดงพิกัดขึ้นทางเครื่องคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A System For Estimating the 3 Dimensional

Mr.Kriangkrai Riang-ngern ID 44010036

Miss.Jidtrawadee Cheewatanon ID 44010072

Adviser : Prapakorn Suwanna

Therdsak Leawhathong

2004

Abstract

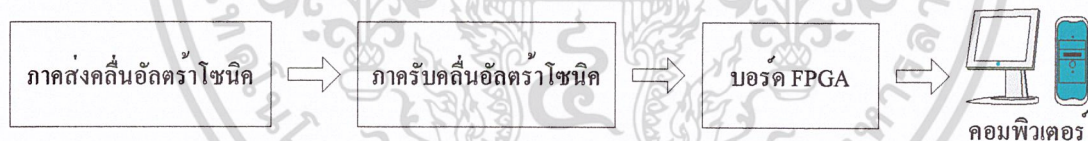
The thesis presents systems for accurately estimating position of an ultrasonic transmitter in 3D space. The position is estimated by using differences in the time of flights from the transmitter to 5 receivers fixed in known coordinates. First the receivers are measured by using a field program gate array (FPGA) . Then they are transferred to Personal Computer (PC) via a PC 's parallel port. Finally the coordinate of the transmitter is calculated and presented in PC.

บทที่ 1

บทนำ

ปริญญาบัตรฉบับนี้เสนอการออกแบบระบบ เพื่อใช้บอกตำแหน่งของตัวชี้ตำแหน่ง(X, Y, Z) บนจอคอมพิวเตอร์ โดยอาศัยหลักการทำงานของคลื่น Ultrasonic เริ่มต้นด้วยการส่งสัญญาณจากตัวส่ง (ตัวชี้ตำแหน่ง) มาที่ตัวรับทั้ง 5 ตัว ซึ่งจัดวางอยู่ในรูปสี่เหลี่ยมจำนวน 4 ตัวและ 1 ตัวอยู่ตรงกลาง ซึ่งตัวรับนี้ทั้งหมดนี้จะรับสัญญาณของตัวส่งได้ในเวลาที่ต่างกัน เราจึงนำผลต่างของเวลาที่รับได้ส่งเข้าไปที่ FPGA ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณนาฬิกา เพื่อนับผลต่างของเวลาในรูปสัญญาณนาฬิกา

จำนวนผลต่างของสัญญาณนาฬิกา ที่ได้ส่งต่อไปคำนวณระยะทางที่คอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตขนาน โดยค่าของสัญญาณนาฬิกาที่ต่างกันจะนำไปคำนวณระยะทางในพิกัด X, Y, Z โดยใช้โปรแกรม Visual Basic และแสดงผลออกเป็นภาพสามมิติที่ต้องการ ต่อไป



รูปที่ 1.1 แนวคิดในการออกแบบ

จากที่ได้กล่าวถึงการทำงานของ Mouse3D ไปพอสมควรแล้ว ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการทำงานโดยละเอียดในแต่ละส่วน โดยจะกล่าวเป็นถึงส่วนประกอบของโครงการให้ทราบเสียก่อนว่าประกอบไปด้วยอะไรบ้างแล้วจะกล่าวถึงหลักการทำงานต่อไป

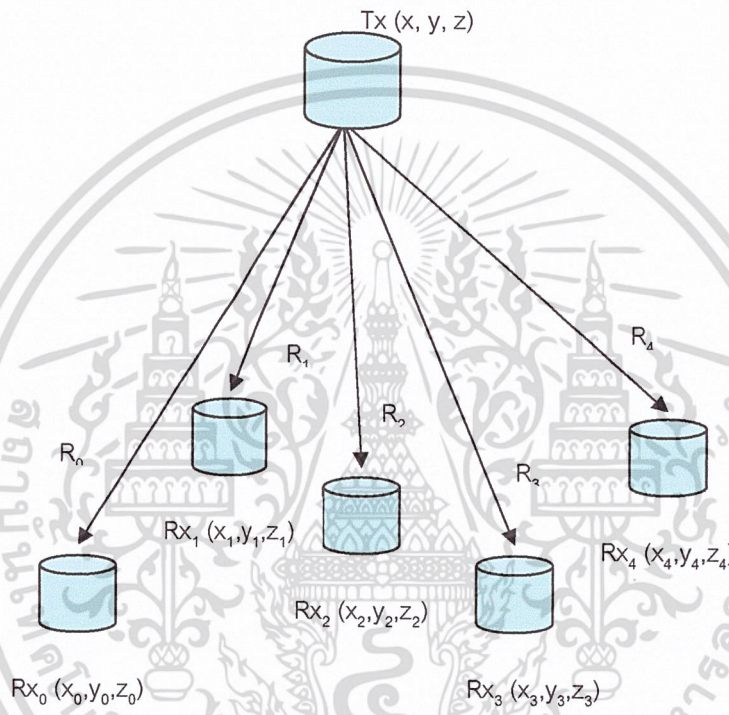
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 ส่วนประกอบของโครงการ

ในโครงการนี้จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆคือ

1.1.1 ชุดรับ-ส่งสัญญาณอัลตราโซนิก

ซึ่งจะแบ่งออกไปอีกคือ ตัวส่ง และ ตัวรับ สัญญาณอัลตราโซนิก



รูปที่ 1.2 แสดงการวางตำแหน่งของตัวส่งและตัวรับ

ตัวส่งสัญญาณอัลตราโซนิก

ส่วนนี้ทำหน้าที่ส่งคลื่นสัญญาณอัลตราโซนิก(ความถี่40kHz) ออกไป เพื่อเป็นตัวกำหนดพิกัดของตัวส่งสัญญาณว่าอยู่ที่ตำแหน่งใด โดยวงจรส่วนนี้มีหลักการทำงานซึ่งจะแสดงให้หัวข้อต่อไป

ตัวรับสัญญาณอัลตราโซนิก

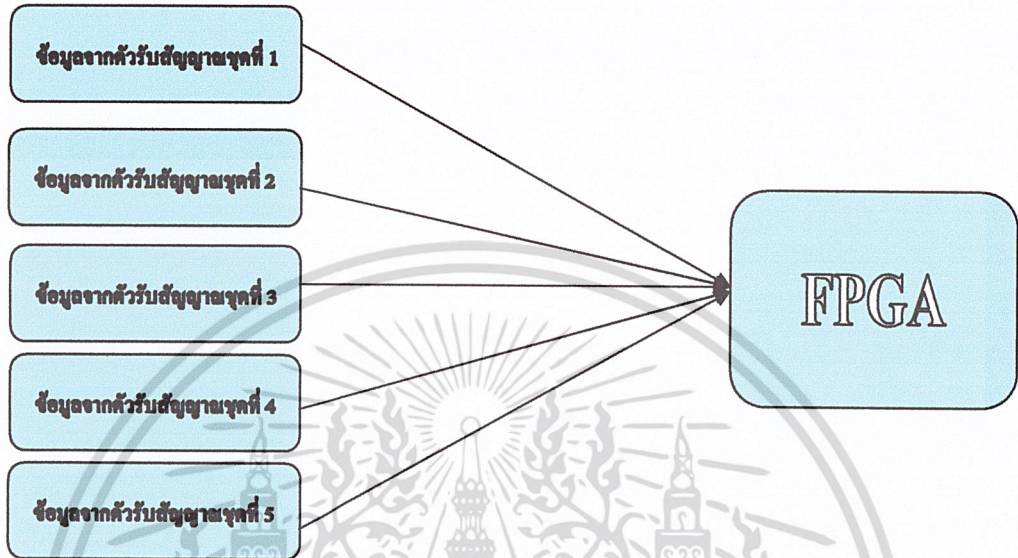
วงจรส่วนนี้ทำหน้าที่รับสัญญาณอัลตราโซนิกที่ตัวส่งๆออกมา โดยตัวรับจะแบ่งออกเป็น 5 จุดวางตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยมจำนวน 4 ตัวและตรงกลางอีก 1 ตัว ตัวรับแต่ละตัวจะได้รับสัญญาณที่

เวลาแตกต่างกันเราจึงเอาหลักการนี้ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณนาฬิกาที่จุดนับสัญญาณต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับเป็นเอกสารที่จำหน่าย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

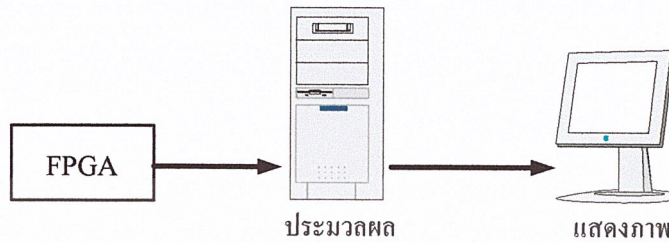
1.1.2 บอร์ดFPGA



รูปที่ 1.3 ภาพแสดงการทำงานของส่วน FPGA

บอร์ดนี้เป็นบอร์ดทดลองเกี่ยวกับการSimulate พวกลอจิกที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยได้นำบอร์ดตัวนี้เข้ามาเพื่อทำหน้าที่เป็นวงจร Counter โดยนำผลต่างของเวลาที่ภาครับสัญญาณอัลตราโซนิคมาเปรียบเทียบกับสัญญาณนาฬิกาบนบอร์ดFPGA จะได้ผลข้อมูลที่เป็นจำนวนพัลส์ของตำแหน่งทั้ง 5 ตัว ของตัวรับเพื่อส่งไปประมวลผลผ่านทางพอร์ตขนานของตัวบอร์ดต่อไป

1.1.3 ภาคนำเสนอและประมวลผลโดยเครื่องคอมพิวเตอร์



รูปที่ 1.4 ภาพแสดงการทำงานของส่วนประมวลและแสดงผล

ภาคนี้ทำงาน โดยการนำค่าCounterที่นับ ได้ส่งเข้าทางพอร์ตขนานของบอร์ดFPGA เพื่อเข้ามาคำนวณพิกัดของตัวส่งสัญญาณ ส่วนนี้ประกอบด้วย โปรแกรมVisual Basic เป็นส่วนแสดงการทำงานของโปรแกรมนี้ และนำค่าพิกัดที่คำนวณ ได้ไปขึ้นเป็นภาคสามมิติ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับคลื่นอัลตราโซนิก

เครื่องซีดำแท่ง 3 มิตินี้ อาศัยหลักการวัดระยะทางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก แล้วนำค่าระยะทางที่วัดได้มาคำนวณหาพิกัดตำแหน่ง โดยทฤษฎีของคลื่นอัลตราโซนิกจะกล่าวโดยสังเขป ดังนี้

2.1.1 คุณสมบัติและธรรมชาติของคลื่นอัลตราโซนิก

หลักการของคลื่นเสียง คือ พัลส์ของพลังงานจะถูกส่งออกมาจากตัวส่งไปซึ่งถ้าเรานำตัวรับชนิดเดียวกันกับตัวส่งซึ่งมีความถี่ตรงกันแล้วก็จะสามารถรับสัญญาณได้ ซึ่งคลื่นอัลตราโซนิกจะเป็นคลื่นที่มีทิศทางและจะพุ่งออกจากตัวส่งซึ่งจะมีขอบเขตประมาณ 30 องศาจากตัวส่ง เวลาที่ใช้ในการเดินทางในอากาศที่จะคำนวณระยะทางได้เพราะฉะนั้นการศึกษาถึงธรรมชาติของคลื่น จะสามารถทำให้เข้าใจในการนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างถูกต้อง

2.1.2 คลื่นอัลตราโซนิก

คลื่นอัลตราโซนิก คือ คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินที่มนุษย์จะได้ยิน โดยทั่วไปแล้วหูมนุษย์จะได้ยินคลื่นความถี่ประมาณ 20 Hz ถึง 20 kHz ดังนั้นแล้วคลื่นอัลตราโซนิกจึงหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 kHz จนถึง 104 GHz โดยคลื่นที่มีความถี่สูงกว่า 104 GHz และแอมพลิจูดสูงๆ จะเรียกว่า “ไฮเปอร์ซาวนด์”

	--10 ² KHz
	PRETERSOUND or MICROSOUND
	(previous) called HYPERSOUND
	-- 50 KHz
	ULTRASOUND
	(previous) called SUPPERSOUND
Ultrasonic cleaning. -- 20 - 40 KHz	-- 20 KHz
Grain refilement in metal. -- 40 KHz	AUDIOSOUND
Scattering in cast iron -- 500 MHz	-- 15 KHz
Sonar -- 10 ² - 10 ⁶ Hz	INFRASOUND

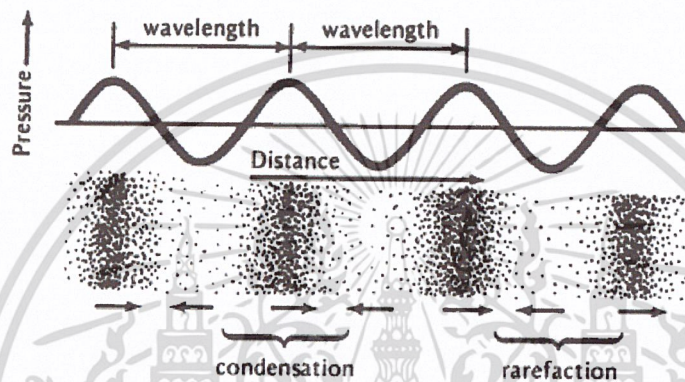
รูปที่ 2.1 แสดงถึงช่วงความถี่ต่างๆที่ถูกนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ชนิดของคลื่นอัลตราโซนิค

คลื่นอัลตราโซนิคที่เดินทางผ่านตัวกลาง ต่างๆ มีหลายชนิดด้วยกันซึ่งแต่ละชนิดแตกต่างกันตามการเคลื่อนของอนุภาคในตัวกลางนั้น

2.1.3.1 คลื่นตามยาว (Longitudinal Wave) คือคลื่นอนุภาคตัวกลางที่มีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น



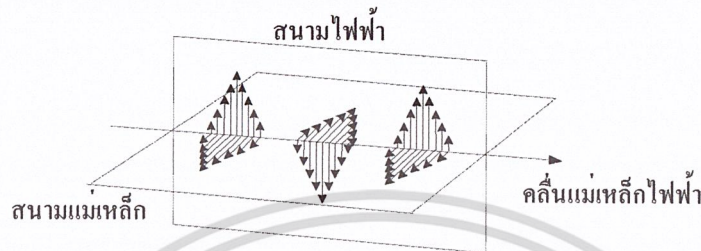
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นตามยาว

จากรูป 2.2 จะเห็นว่ามีส่วนที่เคลื่อนที่อัด (Compression) ซึ่งก็คือคลื่นช่วงของอนุภาคตัวกลางมีความชันสูงและคลื่นขยาย (Rarefaction) คือที่อนุภาคของตัวกลางมีความดันต่ำและเมื่อนำค่าของความดันที่เปลี่ยนแปลงตามระยะทางมาเขียนกราฟจะได้รูปไซน์ โดยยอดคลื่นจะตรงกับส่วนอัดและท้องคลื่นจะตรงกับส่วนขยาย ระยะทางระหว่างส่วนอัดถึงส่วนอัด หรือส่วนขยายถึงส่วนขยายคือ 1 ความยาวคลื่น และมีคาบเวลาเป็น (T) ซึ่งเท่ากับ $1/f$ โดยจุดที่เป็นแกนนั้นยาว 1 บรรยากาศ

2.1.3.2 คลื่นตามขวาง (Transverse Wave) คือที่ทุกๆจุดบนคลื่น มีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ คลื่นชนิดนี้จะเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็ง คลื่นชนิดนี้ไม่สามารถเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็งและก๊าซได้

คลื่นตามขวางที่ลักษณะเหมือนกับการเกิดขั้วลบและขั้วบวก ซึ่งเป็นเหตุผลที่ว่า การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของอนุภาคเป็นไปในทิศทางเดียว เช่น ในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางของคลื่น ที่เคลื่อนที่ไปจากต้นกำเนิดของคลื่นตามขวาง เป็นพื้นที่หน้าเรียบของระนาบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคอันเนื่องมาจากการแกว่ง และความหนาของตัวกลาง จะไม่เปลี่ยนแปลงโดยการเคลื่อนที่ของคลื่นแบบตามขวาง ความเร็วของคลื่นชนิดนี้จะน้อยกว่าความเร็วของคลื่นชนิดตามยาว ในขณะที่

เดินทางผ่านตัวกลางชนิดเดียวกัน ดังนั้นที่ความถี่เดียวกันความยาวของคลื่นตามขวางจะน้อยกว่า คลื่นตามยาวเสมอ



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นตามขวาง

2.1.3.3 คลื่นผิวหน้า (Surface Wave or Raleigh) คือ คลื่นชนิดหนึ่งซึ่งคล้ายกับคลื่นตามขวางจะต่างกันตรงที่ว่า การเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค ไม่เป็นไปในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางที่เคลื่อนที่เพียงอย่างเดียว แต่มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกับทิศทางการเคลื่อนที่ด้วย จึงทำให้คลื่นเคลื่อนที่ไปตามระนาบในแนวอนันต์ ด้วยเหตุนี้คลื่นจึงเดินทางผ่านไปเฉพาะบนผิวของตัวกลางเท่านั้น

2.1.4 คุณสมบัติที่สำคัญของคลื่นอัลตราโซนิก

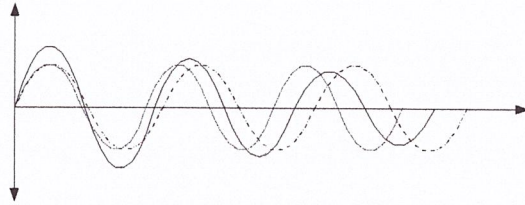
คุณสมบัติโดยทั่วไปของคลื่นเสียงจะแสดงได้ 4 แบบคือ

2.1.4.1 การแทรกสอดของเสียง (Interference)

การแทรกสอดของเสียงเกิดจากการรวมกันของคลื่น 2 คลื่นขึ้นไป ขณะเมื่อพบกันในตัวกลางเดียวกัน ซึ่งทำให้เกิดผลได้หลายลักษณะคือ

- การบีตส์ (Beats) ของคลื่นเสียงเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการรวมคลื่นที่มีความถี่ต่างกัน หรือต่างเฟสกัน เคลื่อนที่ไปในตัวกลางเดียวกันแล้วรวมเป็นคลื่นใหม่ ซึ่งทำให้แอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

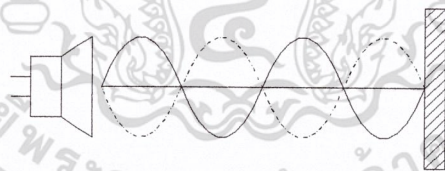


รูปที่ 2.4 แสดงการบิตส์ของคลื่นเสียง 2 คลื่น

จากรูปที่ 2.4 เป็นการแสดงบิตส์ของคลื่น 2 คลื่น ซึ่งคลื่นที่มีแอมพลิจูดเปลี่ยนไปซึ่งประโยชน์ของการบิตส์ของคลื่นนั้น จะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบความถี่ของคลื่นให้แสดงผลออกมาในลักษณะของแอมพลิจูดที่แตกต่างกันนี้

- การเกิดคลื่นนิ่ง (Standing Wave) เกิดจากการแทรกสอดของคลื่นซูดที่มีแอมพลิจูดเท่ากัน และความถี่เท่ากัน แต่มีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงกันข้ามหรือเฟสตรงกันข้าม ซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นนิ่งดังรูป เสียงจะมีความเข้มขึ้นสูงสุดที่ตำแหน่งต้นทาง. และเบาที่สุดที่ตำแหน่งปลายทาง. ซึ่งระยะระหว่างขั้วทั้ง 2 เท่ากับ

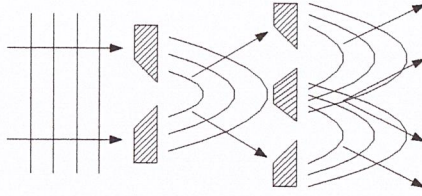
$$d = n\lambda/2; (n=1, 2, 3\dots) \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นนิ่ง

2.1.4.2 การเลี้ยวเบนของคลื่นเสียง (Diffraction)

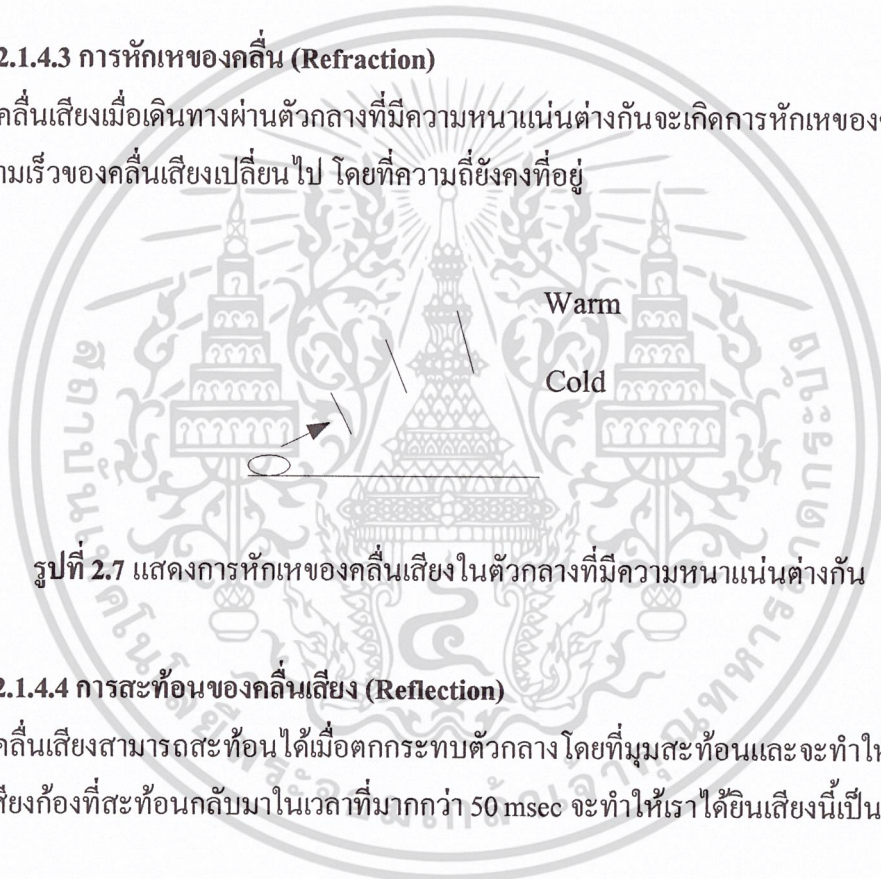
คือ คลื่นเสียงจะเลี้ยวเบนอ้อมสิ่งกีดขวางที่มีลักษณะเป็นมุมหรือช่องแคบ ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้พบในชีวิตประจำวันอยู่ตลอดเวลาเช่น ในกรณีที่เราได้ยินแตรรถที่อยู่คนละมุมถนนของตึกหรือการได้ยินเสียงลอดผ่านช่องเล็กๆ จากอีกห้องหนึ่ง ดังแสดงในรูป 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของคลื่นเสียงที่ผ่านช่องแคบๆ จะเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดตัวใหม่

2.1.4.3 การหักเหของคลื่น (Refraction)

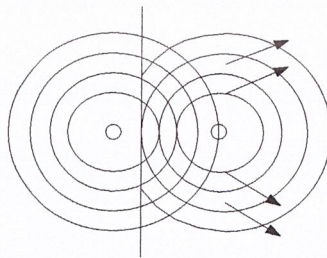
คลื่นเสียงเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกันจะเกิดการหักเหของคลื่น ซึ่งทำให้ความเร็วของคลื่นเสียงเปลี่ยนไป โดยที่ความถี่ยังคงที่อยู่



รูปที่ 2.7 แสดงการหักเหของคลื่นเสียงในตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน

2.1.4.4 การสะท้อนของคลื่นเสียง (Reflection)

คลื่นเสียงสามารถสะท้อนได้เมื่อตกกระทบตัวกลาง โดยที่มุมสะท้อนและจะทำให้เกิดเสียงก้อง ซึ่งเสียงก้องที่สะท้อนกลับมาในเวลาที่มากกว่า 50 msec จะทำให้เราได้ยินเสียงนี้เป็นครั้งที่ 2



รูปที่ 2.8 แสดงเมื่อคลื่นวงกลมกระทบกับฉากที่เป็นเส้นตรง

คลื่นที่สะท้อนกลับมาจะเป็นคลื่นวงกลมเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4.5 การเกิดคลื่นอัลตราโซนิก

อัลตราโซนิกเป็นคลื่นที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานรูปอื่นให้เป็นพลังงานกล โดยการสั่นไปมา หรือ เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้ากับพลังงานกลให้เกิดคลื่นย่านอัลตราโซนิกกระจายออกไปในอากาศ ดังนั้นจึงถือได้ว่าคลื่นที่เกิดขึ้นเป็นคลื่นกล(Mechanical Wave) อัลตราโซนิกสามารถสร้างได้โดยตัวทรานสดิวเซอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลหลักการสร้างมีหลายวิธีดังนี้

- ก. แบบเปียโซอิเล็กทริก(Piezo-electric Transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้ากับพลังงานกล โดยมีความถี่เรโซแนนท์คงที่อยู่ที่ค่าหนึ่ง
- ข. แบบแมกนีโตสตริกทีฟ (Magnetrostrictive Transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าในขดลวดกับตำแหน่งความยาวของแกนเหล็กที่สวมขดลวดนั้น
- ค. แบบอิเล็กโตรสตริกทีฟ (Electrostrictive Transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้ากับพลังงานกล

*** สำหรับเปียโซอิเล็กทริกเป็นแบบที่นิยมใช้เพราะมีราคาถูกและหาซื้อง่าย

2.1.4.6 ความถี่และความยาวคลื่น (Frequency and Wave Length)

ความถี่ คือ จำนวนของการออสซิลเลทที่สมบูรณ์จากแหล่งกำเนิดคลื่นภายในหนึ่งวินาที คลื่นที่ถูกส่งจากแหล่งกำเนิดจะเดินทางด้วยความถี่เดียวกัน

ความยาวคลื่น คือระยะทางที่คลื่นเดินทางระหว่างการสั่นที่สมบูรณ์ หรือการเดินทางครบ 1 รอบ (Cycle) สามารถกล่าวได้ว่า ความยาวคลื่นเป็นระยะทางระหว่างการอัดอย่างต่อเนื่อง (Success Compression) หรือการเบาบางของอากาศ (Rare Fraction) การอัดคือการที่บริเวณนั้นมีความหนาแน่นของโมเลกุล และแรงดันมากกว่าบริเวณรอบๆ ส่วนการเบาบางเป็นบริเวณเฉพาะที่เกิดการลดความหนาแน่นของโมเลกุลและแรงดันสัมพันธ์กับแรงดันของอากาศปกติ ความถี่และความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์กันตามสมการข้างล่าง

$$C=f\lambda \quad (2.2)$$

เมื่อ C: ความเร็วของการเดินทาง

f: ความเร็ว

λ : ความยาวคลื่น

2.1.4.7 ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก

ความเร็วที่ยอมรับของคลื่นในอากาศที่อุณหภูมิปกติความสัมพันธ์ที่ใช้จะเป็นดังสมการ

$$V = 331.45 + 0.607T \text{ (m/sec)} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ V: ความเร็วของคลื่นในตัวกลางอากาศ

T: อุณหภูมิของคลื่นในอากาศ (องศาเซลเซียส)

2.1.4.8 ปริมาณพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิก

ปริมาณพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิกจะถูกวัดในรูปความเข้ม คลื่นอัลตราโซนิกจะมีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นการไหลของพลังงานผ่านพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการเดินทางของคลื่นใน 1 วินาที

2.1.4.9 การลดทอนของคลื่นอัลตราโซนิก

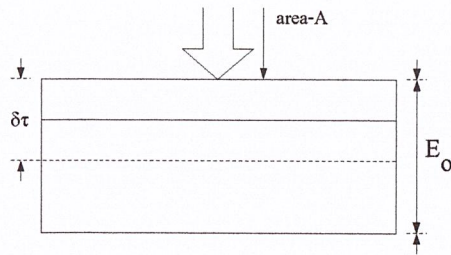
เมื่อคลื่นเดินทางผ่านตัวกลาง ลำคลื่น(Beam) ของคลื่นอัลตราโซนิกจะสูญเสียความเข้มซึ่งเกิดจากการรูดอกของลำคลื่นอัลตราโซนิก หรือเกิดจากการกระจายพลังงานของคลื่นออกจากลำคลื่นเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของตัวกลาง และอาจเกิดจากการดูดซับพลังงานส่วนหนึ่งของคลื่นโดยตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน พลังงานที่ดูดซับนี้จะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน การดูดซับพลังงานความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของวัตถุ ความยืดหยุ่นและความหนาแน่น รวมทั้งความถี่ของคลื่นที่ใช้ ยิ่งความถี่สูงพลังงานยิ่งถูกดูดซับมาก

2.2 อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์

2.2.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

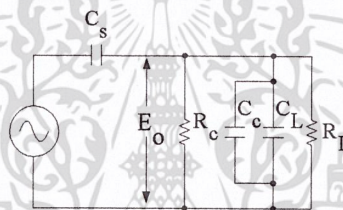
เพียโซอิเล็กทริกเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติอย่างหนึ่ง ซึ่งทำให้พลังงานสามารถเปลี่ยนแปลงจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้ กล่าวคือถ้าป้อนแรงกลให้แก่ Solek Crystalline Dielectric ดังในรูปที่ 2.9 ก็จะทำให้เกิดความเค้น (Stress) ภายในคริสตอลและทำให้ผลึกของคริสตอลผิดรูปไปเช่นพวกควอทซ์ (Quartz) ผลก็คือประจุเปลี่ยนไป การผิดรูปร่างของแลททิซเป็นผลให้ความสัมพันธ์ระหว่างการแทนที่ (Displacement) ของประจุบวกและลบในแลททิซเปลี่ยนไป การแทนที่ของประจุภายในจะเท่ากับประจุภายนอกของขั้วที่ตรงข้ามของคริสตอล เรียกว่าผลของเพียโซอิเล็กทริก

การวัดประจุทำได้โดยการต่ออิเล็กโทรด (Electrode) เข้าที่ผิวนอก แล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้งสอง ขนาด (Magnitude) และการมีขั้ว (Polarity) ของประจุบนผิวที่ถูกเหนี่ยวนำ (induce) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดและทิศทางของแรงที่มากระทำ



รูปที่ 2.9 ผลของเบี่ยงโซอิลคทริก

วงจรเสมือนของเบี่ยงโซอิลคทริกทรานสดิวเซอร์



รูปที่ 2.10 วงจรเสมือนของเบี่ยงโซอิลคทริก

C_s : คาปาซิแตนซ์ของชิ้นส่วนเบี่ยงโซอิลคทริก

R_c : Leakage Resistance ของเบี่ยงโซอิลคทริก ปกติจะมีค่าสูงประมาณ $10^8 - 10^{10}$ ความต้านทานระหว่างเทอร์มินอล โดยทั่วไปจะเป็นความต้านทานทางไหล R_L (ในช่วง $10^6 - 10^7$)

C_L : คาปาซิแตนซ์ ของ Subsequent Stage (Load) ร่วมกับ Connection Cable ที่ความถี่ปานกลางและความถี่สูง โวลต์เตจ E_0 ที่คร่อมไหลคหาได้โดย C_c และ C_L ค่าเหล่านี้มาได้โดยการใช้การแบ่ง โวลต์เตจ โดยโวลต์เตจ E_0 ได้จากสมการ

$$E_0 = E (C_c / (C_c + C_L)) \quad (2.4)$$

โดยขึ้นกับความถี่ ถ้าเอาท์พุทโวลต์เตจมีค่ามากสามารถทำให้ลดลงได้โดยการเพิ่มค่า C_L เช่นการนำค่า C_c ต่อขนานเข้าไปที่ความถี่ต่ำ โวลต์เตจ E_0 คร่อมไหลคหาได้โดยค่านี้ออกแดนซ์ของ C_c และอิมพีแดนซ์ของ C_L และ R_L ที่ต่อขนานกัน โวลต์เตจ E_0 ขึ้นกับความถี่และจะลดลงถ้าความถี่ลดลง การตอบสนองต่อความถี่สามารถปรับปรุงได้โดยการใช้ทรานสดิวเซอร์ที่มีค่าคาปาซิแตนซ์สูงหรือ โดยการเพิ่มความต้านทานไหล R_L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 วัสดุเป็ยโซอิเล็กทริก

วัสดุเป็ยโซอิเล็กทริกที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง เช่น Quartz , Tourmaline sulphate, Barium Titanate และ Ziconnate (TZI) โดยทั่วไปแล้วพวกควอทซ์ และคริสตอลที่เป็นเป็ยโซอิเล็กทริกธรรมชาติมักจะมีขั้วของมันเองตามธรรมชาติ แต่พวกวัสดุเป็ยโซอิเล็กทริกที่สังเคราะห์ขึ้นมาเช่น แบเรียม ไททานาต เซรามิก จะต้องนำมาทำการอบคริสตอลภายในแรงดัน และวางวัสดุที่ได้ในสนามไฟฟ้าที่มีแรงดันของไฟฟ้ากระแสตรงมาก หลังจากชิ้นส่วนนี้ถูกนำไปในสนามไฟฟ้าแล้ว คริสตอลนี้จะมีขั้วตามแนวของทิศทางของสนาม และประพฤติกรรมตามคุณสมบัติของเป็ยโซอิเล็กทริกสำหรับชิ้นส่วนที่ทำจากวัสดุสังเคราะห์นี้ ไม่มีข้อจำกัดทางขนาด โดยโครงสร้างของคริสตอลและยังสามารถทำให้มีรูปร่างและขนาดต่างๆ และทิศทางของขั้วก็จะถูกสร้างขึ้นระหว่างขั้นตอนการผลิต

2.2.3 ชนิดของเป็ยโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์

เป็ยโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. แบบ *Generation-Action Transducer* ใช้เป็นตัวรับ โดยแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะหาได้จากแรงดันและความถี่ที่มากระทำต่อวัสดุเป็ยโซอิเล็กทริก
2. แบบ *Motor-Action Transducer* ใช้เป็นตัวส่ง โดยการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างที่ทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิค โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดความสูงและความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ให้ในทั้งสองกรณีค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับขนาดของวัสดุ

2.2.4 การทำงานของทรานสดิวเซอร์ตัวส่งตัวรับ

เมื่อเซรามิกได้รับสัญญาณแรงดันมาครบคร่อม จะทำให้ชิ้นสารเซรามิก โค้งงอทำให้เกิดการอัดอากาศโดยรอบเกิดเป็นคลื่นขึ้นมา ดังนั้นถ้าป้อนสัญญาณเป็นห้วงๆ (Electrically Pulse) จากการออสซิลเลทก็จะให้ชิ้นสาร โค้งงอมากน้อยหรือทิศทางใดตามขนาด และทิศทางการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณไฟฟ้าจากการออสซิลเลทนั้นออกไป โดยทั่วไปกำลังเอาต์พุตที่ออกมาจะตกประมาณ 10% ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เอาต์พุตจะสูงที่ค่านี้ โดยประมาณก็ต่อเมื่อความถี่ของสัญญาณออสซิลเลเตอร์ที่ป้อนเข้าชิ้นสารเซรามิก ตรงกับความถี่เรโซแนนท์เป็นความถี่ทางกลตามธรรมชาติของชิ้นสารเซรามิกนั้นๆ ส่วนที่ความถี่อื่นๆกำลังเอาต์พุตจะลดลงกว่านี้ ส่วนการทำงานของทรานสดิวเซอร์ตัวรับมักมีการทำงานตรงข้ามกับตัวส่ง คือเมื่อมีคลื่นเสียงที่มีความถี่ตรงกับความถี่เรโซแนนท์ของชิ้นสารเซรามิกเข้ามา จะทำให้ชิ้นสาร โค้งตัวไปมาและเกิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กขึ้นคร่อมขั้วทั้งสองของตัวมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทั่วไปของอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริกก็คือ มีความต้านทานไฟฟ้าตรงสูงมากอาจถึง 100 เมกกะโอห์ม เรียกว่าถ้าเอาอัลติมิเตอร์ธรรมดา ตั้งสเกลวัดค่าความต้านทานสูงๆเข็มจะไม่กระดิกเลยแต่ขณะที่มันทำงานความต้านทานไฟฟ้าสลับจะลดลง

2.2.5 ข้อควรระวังในการใช้งานตัวรับ-ตัวส่งทรานสดิวเซอร์

1. ไม่ควรให้ตัวต้านทานทรานสดิวเซอร์ได้รับการกระแทกหรือตกจากที่สูง เพื่อป้องกันโครงสร้างภายในไม่ให้เสียหาย
2. ทรานสดิวเซอร์ที่มีขายกัน โดยทั่วไปจะทนแรงดันตกคร่อมตัวมันได้ไม่เกิน $10 V_{rms}$ ดังนั้นขนาดของสัญญาณที่จะป้อนให้กับตัวทรานสดิวเซอร์ก็ควรอยู่ในขีดจำกัดนี้
3. ความถี่เรโซแนนซ์ (คือความถี่ที่ตัวมันสามารถทำงานอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด) ของทรานสดิวเซอร์ 40 KHz (Bandwidth) ที่มีขายโดยทั่วไปจะผิดพลาดไม่เกิน ± 1 KHz และมีแถบความถี่ประมาณ 4.5 KHz (Bandwidth) สำหรับตัวส่ง และมีแถบความถี่ประมาณ 5.0 KHz (Bandwidth) สำหรับตัวรับ จะเห็นได้ว่าแถบความถี่ของตัวรับจะกว้างกว่าตัวส่งเล็กน้อย เพื่อให้แน่ใจว่าตัวรับจะสามารถรับความถี่ทั้งหมดที่ออกจากตัวส่งได้
4. อุณหภูมิที่ใช้งานของตัวทรานสดิวเซอร์ควรอยู่ในช่วง -20 ถึง 60 องศาเซลเซียส
5. ตัวส่งและตัวรับจะมีทิศทางการคล้ายกันมาก กล่าวคือที่ตำแหน่งเบนจากแนวแกนของตัวส่งไปประมาณ 30 องศา ความแรงของคลื่นเสียงที่ถูกส่งออกไปจะลดลงจากแนวแกนประมาณ 10 dB ทำนองเดียวกัน ถ้าคลื่นเสียงพุ่งเข้ามาในแนวที่เบี่ยงเบนไป จากแกนของตัวรับประมาณ 30 องศาความไวหรือขนาดของแรงดันที่ออกมาจะลด จึงควรจะทำให้ตัวรับและตัวส่งอยู่ในแนวที่พุ่งตรงมากที่สุดอย่างไรก็ตามในกรณีที่อยู่ในห้องจะเกิดการเบี่ยงเบนกันได้มาก เพราะคลื่นเสียงอัลตราโซนิก จะสะท้อนกับกำแพงและวัสดุที่อยู่ในห้อง ทำให้คลื่นเสียงเข้าไปหาตัวรับได้หลายทางอัลตราโซนิกนี้สามารถทำให้เป็นลำแคบได้โดยที่ใช้เลนส์ที่เรียกว่า Planacone acelenes วางข้างหน้าของทรานสดิวเซอร์ แต่การทำให้เป็นลำแคบ (Beam) นี้ จะทำให้ near field สั่นลงและ far field กระจายกว้างขึ้น การทำให้เป็นลำคลื่นเหมาะสำหรับการใช้ทรานสดิวเซอร์ที่สร้างคลื่นสูงที่เหมาะสมสำหรับที่ใช้งานในงานแพทย์ (Ultrasound) ที่มีความถี่ตั้งแต่ 2-5 MHz เพื่อใช้ตรวจเนื้อเยื่อมีการส่งเป็นลำแคบ
6. ในกรณีที่ใช้งานตัวรับจะต้องมีความต้านทานต่อขนานกับตัวรับที่ทำหน้าที่เป็นโหลดตามปกติแล้วตัวต้านทานนี้ควรมีค่าอยู่ระหว่าง $10 K\Omega$ ถึง $100K\Omega$ จากการทดลองพบว่าถ้าเปลี่ยนจาก $100K\Omega$ มาเป็น $10K\Omega$ ความไวจะลดลงประมาณ 10-12 dB แต่ความถี่จะกว้างขึ้น ถ้าความต้านทานต่ำลงไปอีก ความถี่เรโซแนนซ์ (ความถี่กลาง) จะลดลงไปจากที่ระบุไว้ ถ้าการใช้งานมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณรบกวนมากควรใช้โหนดที่มีค่าความต้านทานสูงสักหน่อย เพื่อให้ตัวส่งมีความไวสูงและมีความถี่แคบ

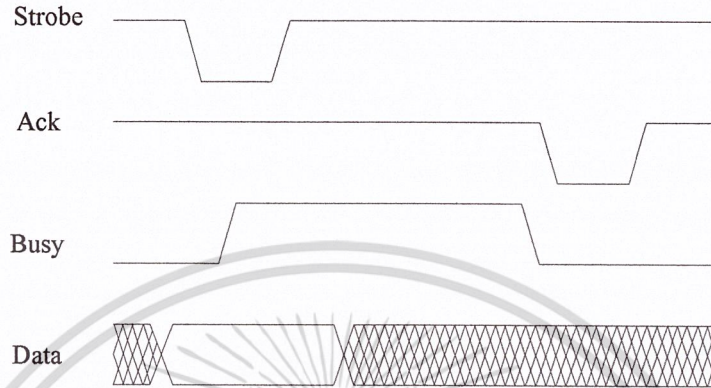
7. ตามปกติแล้วสามารถนำตัวส่งและตัวรับมาใช้งานแทนกันได้ ในการใช้งานส่วนใหญ่ ตัวส่งและตัวรับรุ่นใด ก็สามารถใช้แทนกันได้ในงานส่วนใหญ่ ขอเพียงแต่ให้มีความถี่โรเนนท์เดียวกันเท่านั้นเอง อย่างไรก็ตามในบางกรณีอาจต้องเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสมมูลทางไฟฟ้าทางด้านไฟฟ้าสลับเพื่อให้เกิดลักษณะผลตอบแทนของความถี่สอดคล้องกับของเดิม

8. ประโยชน์การใช้งานคลื่นอัลตราโซนิก คลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นที่มีทิศทาง ทำให้สามารถเล็งคลื่นไปตามเป้าหมายที่ต้องการได้เจาะจง ยิ่งคลื่นที่มีความถี่สูงขึ้นความยาวคลื่นจะยิ่งสั้นลง ถ้าความยาวคลื่นยาวกว่าช่องเปิด(ที่ทำให้เสียงออกมา) ของตัวที่ทำให้เกิดเสียงความถี่นี้ เช่น คลื่นความยาว 300Hz ในอากาศ จะมีความยาวคลื่นถึงประมาณ 1 เมตรกว่าๆ ซึ่งจะยาวกว่าช่องเปิดที่ทำให้เสียงออกมาจากตัวกำเนิดเสียงโดยทั่วไปมากมาย คลื่นจะหักเหที่ขอบด้านนอกของตัวกำเนิดเสียงที่ทำให้เกิดการกระจายทิศทางของคลื่น แต่ถ้าความถี่สูงขึ้นมาอยู่ในย่านอัลตราโซนิก อย่างเช่น 40 KHz จะมีความยาวคลื่นในอากาศเพียง 8 มิลลิเมตร เท่านั้น ซึ่งเล็กกว่าตัวที่ทำให้เกิดคลื่นความถี่นี้มากๆ คลื่นเสียงจะไม่มีกรเลี้ยวเบนที่ขอบ จึงพุ่งออกมาเป็นลักษณะลำแคบๆหรือที่เราเรียกว่า “มีทิศทาง” นั่นเองการมีทิศทางของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกทำให้เราสามารถนำเอาไปใช้งานได้หลายอย่าง เช่น คลื่นวัดความหนาแน่นของวัตถุ โดยส่งเกตรยะที่คลื่นสะท้อนกลับมา เครื่องวัดความลึก ทำแผนที่ใต้ท้องทะเล ส่วนการใช้งานทางการแพทย์ อาจใช้ความถี่ในช่วง 1MHz ถึง 10MHz ขณะที่ความถี่เป็น GHz ก็มีใช้กันหลายๆการใช้งานที่ตัวกลางที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านไม่ใช่อากาศ

2.3 ความรู้เบื้องต้นของพอร์ตขนาน

พอร์ตขนาน(Parallel port) เนื่องด้วยการถ่ายทอดข้อมูลของพอร์ตนี้เป็นแบบขนาน ทำให้พอร์ตขนานมีอัตราการถ่ายทอดข้อมูลสูงกว่า การถ่ายทอดข้อมูลแบบอนุกรมประมาณ 8-10 เท่า และการประมวลผลข้อมูลส่วนใหญ่จะมีขนาด 8 บิต ดังนั้นพอร์ตขนานจึงสามารถรองรับการถ่ายทอดข้อมูล 8 บิตได้โดยไม่ต้องต่อส่วนเพิ่มเติมใดๆ

2.3.1 ลักษณะทางกายภาพของพอร์ตขนาน



รูป 2.11 แสดง ไคอะแกรมเวลาของการส่งข้อมูลไปยังเครื่องพิมพ์

เพื่อให้เข้าใจหลักการการทำงานของพอร์ตขนาน ก่อนอื่นต้องมาทำความเข้าใจก่อนว่า ปกตินั้น การส่งพิมพ์งานจากคอมพิวเตอร์ไปยังพอร์ตนั่นมีรูปแบบการทำงานภายในอย่างไร ในรูปที่ 2.11 แสดงไคอะแกรมเวลาของติดต่อระหว่างพอร์ตนานกับเครื่องพิมพ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีสัญญาณที่ใช้งานจริงๆ มีไม่มาก เริ่มจากสัญญาณพอร์ต Data ถูกส่งออกไปยังเครื่องพิมพ์ พร้อมทั้งส่งสัญญาณ Strobe ออกไปด้วยเพื่อให้เครื่องพิมพ์รับรู้ว่าการส่งข้อมูลใหม่มาที่ขา Data แล้วจากนั้นคอมพิวเตอร์จะต้องรอการตอบกลับจากเครื่องพิมพ์ นั่นคือเครื่องพิมพ์จะสร้างสัญญาณ Busy หรือเพื่อบอกว่าเครื่องพิมพ์ยังไม่พร้อมที่จะรับข้อมูลใหม่ จนกระทั่งเมื่อเครื่องพิมพ์พร้อม เครื่องพิมพ์จะสร้างสัญญาณ ACK ส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อแจ้งว่า พร้อมที่จะรับข้อมูลใหม่แล้ว

สัญญาณข้อมูลขนาด 8 บิต สัญญาณ Strobe และสัญญาณ ACK (Acknowledge) เป็นสัญญาณที่สำคัญในการส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ไปยังเครื่องพิมพ์ นอกจากสัญญาณทั้งสามแล้ว ส่วนใหญ่การติดต่อกับเครื่องพิมพ์ยังต้องมีสัญญาณอื่นๆร่วมด้วย เนื่องจากเครื่องพิมพ์ต้องทำหน้าที่ถึง 3 อย่างด้วยกันคือ รับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ , พิมพ์ข้อมูลที่รับเข้ามา และตอบสนองต่อการใช้งานของผู้ใช้ เช่น การเปลี่ยนฟอนต์ เป็นต้น บางครั้งอาจเกิดเหตุการณ์ที่ไม่ปกติ เช่น บัฟเฟอร์สำหรับรับข้อมูลเต็ม (เนื่องจากเครื่องพิมพ์เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานทางกลย่อมทำงานได้ช้ากว่าการส่งข้อมูลของคอมพิวเตอร์) เครื่องพิมพ์จะต้องแจ้งไปยังคอมพิวเตอร์ว่าให้หยุดส่งข้อมูลชั่วคราว เนื่องจากไม่สามารถรับข้อมูลมากกว่านี้ได้แล้ว สัญญาณที่ส่งจากเครื่องพิมพ์ไปยังคอมพิวเตอร์คือสัญญาณ Busy และเมื่อเครื่องพิมพ์เกิดข้อผิดพลาด เช่นกระดาษติด เครื่องพิมพ์จะต้องแจ้งไปยังคอมพิวเตอร์เช่นกัน โดยสัญญาณที่แจ้งไปยังคอมพิวเตอร์เรียกว่าสัญญาณ Error นอกจากนี้เมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

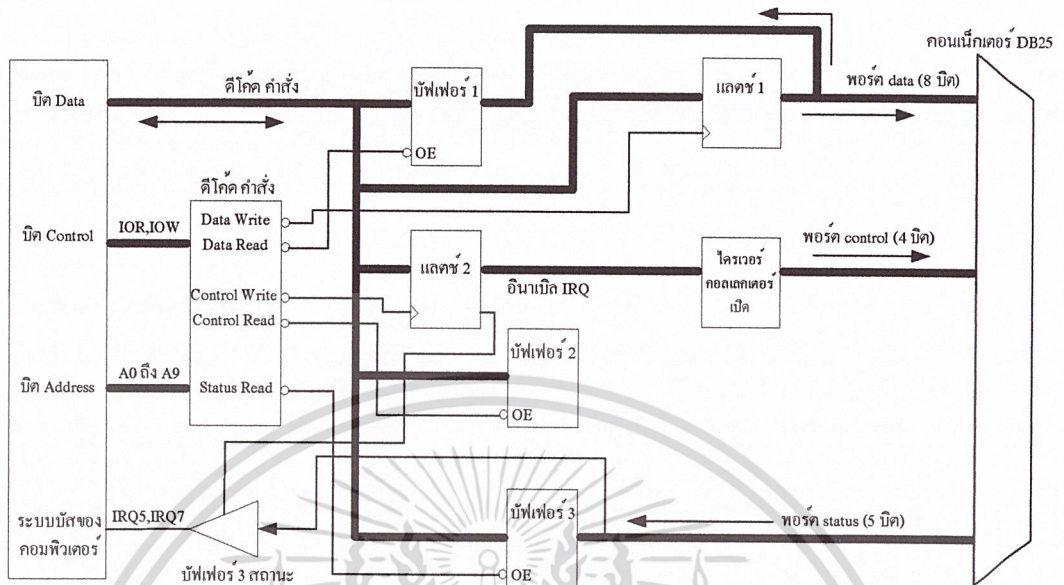
คอมพิวเตอร์ต้องการรีเซ็ตเครื่องพิมพ์คอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์จะต้องส่งสัญญาณReset ไปยังเครื่องพิมพ์เพื่อรีเซ็ตเครื่องพิมพ์ด้วย สามารถสรุปหาสัญญาณที่จำเป็นสำหรับการติดต่อดังตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าพอร์ตขนานของคอมพิวเตอร์ยังแยกย่อยออกเป็นอีก 3 พอร์ต ได้แก่ พอร์ตเอาต์พุตที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ไปยังเครื่องพิมพ์ พอร์ตเอาต์พุตสำหรับสัญญาณ Strobe และ Reset พอร์ตอินพุตสำหรับการอ่านค่าสัญญาณ Acknowledge, Busy และสัญญาณ Error จากเครื่องพิมพ์

ตารางที่ 2.1 สัญญาณสำคัญของพอร์ตขนานที่ใช้ติดต่อกับเครื่องพิมพ์

สัญญาณ	หน้าที่การทำงาน	ทิศทาง
ข้อมูล 8 บิต	ข้อมูลที่ส่งจากคอมพิวเตอร์ไปยังเครื่องพิมพ์	คอมพิวเตอร์
Strobe	แจ้งเครื่องพิมพ์ถึงข้อมูลที่ส่งมาใหม่	คอมพิวเตอร์
Acknowledge	เครื่องพิมพ์แจ้งมายังคอมพิวเตอร์ว่าได้รับข้อมูลแล้ว	เครื่องพิมพ์
Busy	แจ้งสถานะว่าเครื่องพิมพ์ไม่ว่างที่จะรับข้อมูลใหม่	เครื่องพิมพ์
Error	แจ้งสถานะว่าเครื่องพิมพ์เกิดข้อผิดพลาด	เครื่องพิมพ์
Reset	รีเซ็ตเครื่องพิมพ์	คอมพิวเตอร์

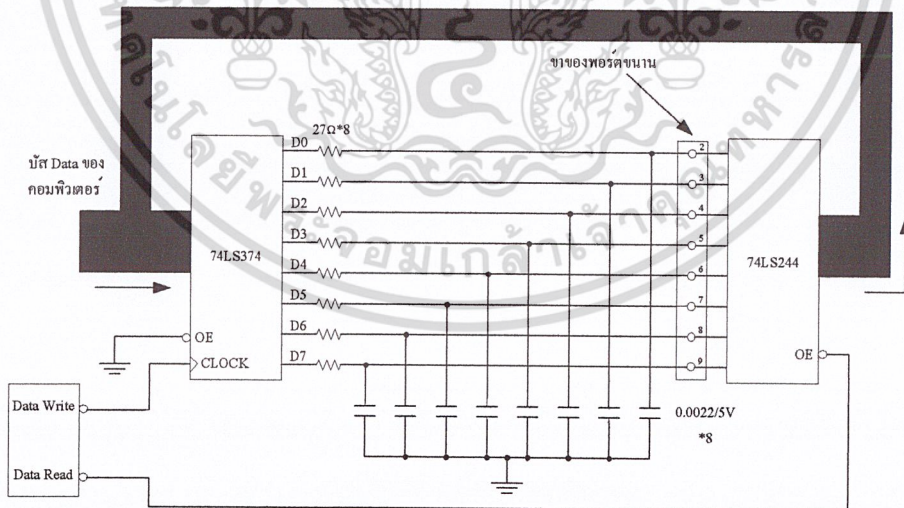
โดยปกติพอร์ตขนานออกแบบมาให้มีสายสัญญาณอยู่ทั้งหมด 17 เส้น สายสัญญาณเหล่านั้นจะมีรีจิสเตอร์ 3 ตัวควบคุมการทำงาน ดังนี้

1. พอร์ตเอาต์พุตสำหรับสัญญาณข้อมูล 8 เส้น มีรีจิสเตอร์ Data ควบคุม
2. พอร์ตอินพุตสำหรับการอ่านค่าสถานะต่างๆจากภายนอกมีอยู่ด้วยกัน 5 เส้น ใช้รีจิสเตอร์ Status ในการควบคุม
3. พอร์ตเอาต์พุตสำหรับส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ภายนอก มีอยู่ด้วยกัน 4 เส้น ใช้รีจิสเตอร์ Control ในการควบคุม



รูป 2.12 แสดงสัญญาณทั้งหมดที่อยู่บนพอร์ตขนาน

2.3.2 พอร์ตดาต้า (Data Port)



รูปที่ 2.13 วงจรภายในของพอร์ต Data

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.13 แสดงให้เห็นว่าพอร์ต Data ประกอบไปด้วยบัฟเฟอร์ 1 ตัว และไอซีแลตซ์อีก 1 ตัว เมื่อคอมพิวเตอร์ต้องการส่งข้อมูลไปยังเครื่องพิมพ์ คอมพิวเตอร์จะเขียนข้อมูลไปยังไอซีแลตซ์ 1 ทั้ง 8 บิตเอาต์พุตของไอซีแลตซ์ 1 คือ D0-D7 ซึ่งเอาต์พุตนี้จะไปปรากฏอยู่ที่พอร์ตขนานในตำแหน่งขา 2 ถึงขา 9 และที่ขาเอาต์พุตนี้สัญญาณ Data จะส่งกลับไปเป็นอินพุตของบัฟเฟอร์ 1 ด้วย ทำให้คอมพิวเตอร์สามารถอ่านค่าสถานะปัจจุบันที่เกิดขึ้นกับพอร์ต Data ได้

เมื่อคอมพิวเตอร์ส่งข้อมูล ข้อมูลจะถูกส่งมาจากบัสข้อมูลของคอมพิวเตอร์ผ่านไปให้กับ ไอซี 74LS374 ซึ่งเป็น ไอซีแลตซ์ข้อมูล และเมื่อต้องการให้ข้อมูลปรากฏที่เอาต์พุต คอมพิวเตอร์จะส่งสัญญาณ Data write ออกไปที่ขา CLK ของ 74LS374 เอาต์พุตจาก 74LS374 จะถูกกรองด้วย วงจร RC ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทานค่า 27Ω และตัวเก็บประจุ $0.0022\mu\text{F}$ เพื่อให้ช่วงเวลาที่เปลี่ยน จากลอจิก “0” เป็นลอจิก “1” หรือจากลอจิก “1” เป็นลอจิก “0” เป็นไปอย่างช้าๆ เนื่องจากการ เปลี่ยนแรงดันที่รวดเร็วทำให้เกิดสัญญาณรบกวนเหนี่ยวนำข้ามไปยังข้อมูลบิตอื่นๆ ได้ทำให้ข้อมูลที่ ส่งออกไปมีข้อผิดพลาด จากค่าตัวต้านทานและตัวเก็บประจุในวงจรทำให้เกิดการหน่วงเวลาไป ประมาณ 60 นาโนวินาที จากวงจรในรูป 2.13 ทำให้เอาต์พุตของพอร์ต Data มีคุณสมบัติดังนี้

- กระแสซิงค์สูงสุด 24 mA
- กระแสซอร์สสูงสุด 2.6 mA
- ระดับแรงดันของลอจิก “1” ต่ำสุดเท่ากับ 2.4 V
- ระดับแรงดันสูงสุดสำหรับลอจิก “0” เท่ากับ 0.5 V

สำหรับบัฟเฟอร์สำหรับการอ่านข้อมูลกลับได้แก่เบอร์ 74LS244 ซึ่งเมื่อต้องการอ่านค่า คอมพิวเตอร์จะส่งสัญญาณ Data read ออกมาเพื่ออีนามัลไอซี 74LS244 สำหรับพอร์ตขนานแบบ มาตรฐาน (Standard Parallel Port: SPP) พอร์ต Data จะต้องใช้เพื่อการส่งค่าออกเอาต์พุตเท่านั้น แต่ สำหรับพอร์ตขนานที่มีการสื่อสารสองทิศทาง (Bidirectional Parallel Port) สามารถอ่านค่าจาก พอร์ต Data ได้ด้วย แต่ก่อนที่จะอ่านค่าต้องจำไว้เสมอว่าจะต้องป้อนค่าเอาต์พุตให้มีค่าลอจิก “1” ทั้งหมดก่อน

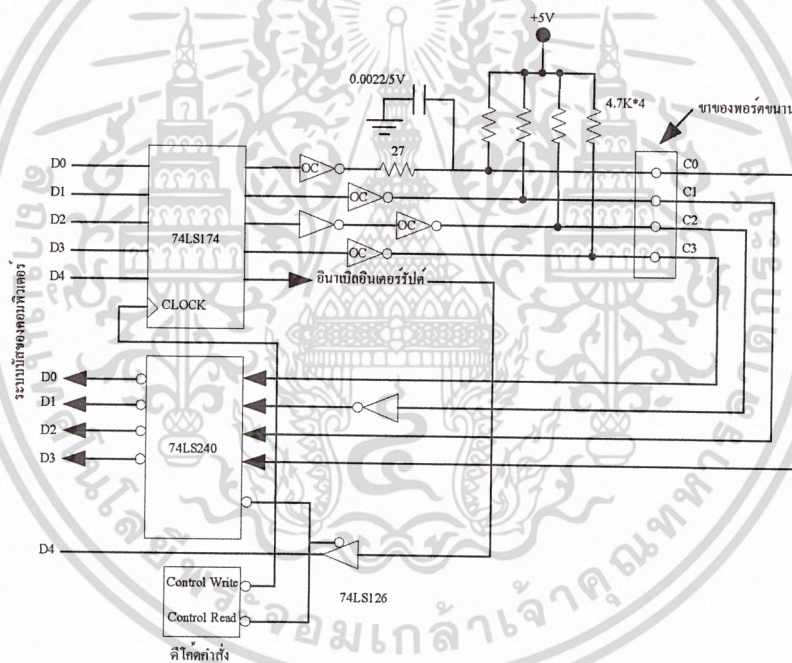
2.3.3 พอร์ต Control

พอร์ต Control ใช้สำหรับคอมพิวเตอร์ควบคุมเครื่องพิมพ์จากรูปที่ 2.12 จะเห็นว่าพอร์ต Control ประกอบไปด้วยบิตเอาต์พุต 4 บิตที่ต่อออกไปยังเครื่องพิมพ์ ส่วนบิตอินพุตอินเทอร์รัปต์ ไม่ได้ถูกต่อออกไปรูปที่ 2.14 แสดงบล็อกไดอะแกรมของพอร์ต Control เอาต์พุตของพอร์ต Control มีอินเวอร์เตอร์แบบคอลลีเกเตอร์เปิดต่อรวมอยู่ โดยเอาต์พุตเหล่านี้จะถูกพูลอัพไว้ด้วยตัวต้านทาน

ค่า $4.7\text{ K}\Omega$ สำหรับบิต C2 จะผ่านอินเวอร์เตอร์ถึงสองตัวทำให้ที่เอาต์พุตของบิต C2 ไม่มีการกลับสถานะลอจิก

สถานะของพอร์ต Control สามารถอ่านกลับได้โดยการใช้บัฟเฟอร์เบอร์ 74LS240 ซึ่งเอาต์พุตของ 74LS240 มีอินเวอร์เตอร์อยู่ภายใน ทำให้ค่าที่อ่านได้ตรงกับค่าที่ส่งออกไป การควบคุมการอ่านและเขียนข้อมูลกับพอร์ต Control คอมพิวเตอร์จะส่งข้อมูลมาที่ขา Control Write และ Control Read

เนื่องจากเอาต์พุตของพอร์ต Control เป็นแบบคอลเล็กเตอร์เปิด ดังนั้นผู้ใช้งานสามารถใช้พอร์ตนี้ในการอ่านค่าสัญญาณอินพุตจากภายนอกได้ โดยก่อนที่จะอ่านค่าจะต้องทำให้ขาพอร์ตที่ต้องการอ่านค่ามีลอจิก"1" เสียก่อน



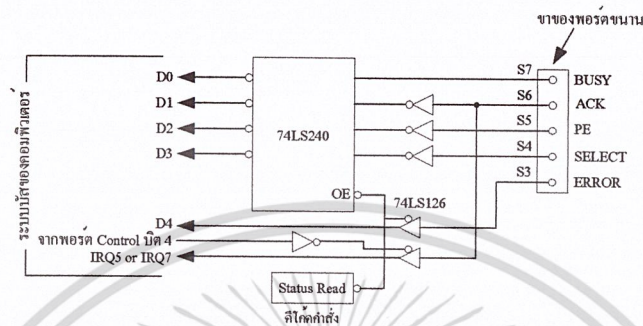
รูปที่ 2.14 วงจรภายในของพอร์ต Control

2.3.4 พอร์ตแสดงสถานะหรือพอร์ต Status

พอร์ต Status เป็นพอร์ตที่คอมพิวเตอร์ใช้สำหรับการอ่านค่าสถานะจากเครื่องพิมพ์ รูปที่ 2.15 แสดงรายละเอียดภายในของพอร์ต Status จะสังเกตเห็นว่ามีขาสัญญาณอยู่ทั้งหมด 5 สัญญาณด้วยกันและจะเรียกชื่อเป็น S3,S4,S5,S6 และ S7 ซึ่งตัวเลขนั้นหมายถึงตำแหน่งบิตของขาเหล่านี้ภายในรีจิสเตอร์ Statusนั่นเอง สำหรับS7 จะมีข้อแตกต่างจากบิตอื่นๆที่เมื่อสัญญาณจากภายนอกส่งเข้ามาแล้วจะไม่ผ่านอินเวอร์เตอร์ ในขณะที่ขาอื่นๆ ผ่านอินเวอร์เตอร์ทั้งหมด ดังนั้นเมื่อข้อมูลผ่านจากขาอินพุตไปยัง 74LS240 ซึ่งเอาต์พุตมีการกลับสถานะทำให้บิต S7 เป็นบิตเดียวที่มีการกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะ นอกจากนี้ในการใช้งานถ้าต้องการให้มีการสร้างสัญญาณอินเทอร์รัปต์จากขอบขาขึ้นของขา S6 สามารถกำหนดค่าได้จากพอร์ต Control บิต 4



รูปที่ 2.15 แสดงวงจรภาพในของพอร์ตแสดงสถานะ

2.3.5 การนำพอร์ตขนานไปใช้งาน

สำหรับพอร์ตขนานแบบมาตรฐานผู้ใช้งานสามารถนำพอร์ตอินพุต 5 บิต (พอร์ต Status) พอร์ตเอาต์พุต 4 บิต (พอร์ต Control) และพอร์ตเอาต์พุตอีก 8 บิต (พอร์ต Data) ไปใช้งานได้โดยตรง โดยที่ 4 บิตของพอร์ตเอาต์พุตหรือพอร์ต Control นั้นสามารถดัดแปลงให้ใช้งานเป็นพอร์ตอินพุตขนาด 4 บิตได้ด้วยดังนั้นผู้ใช้งานจึงสามารถนำสัญญาณจากพอร์ตขนานที่มีมากถึง 17 เส้นไปใช้งานในการควบคุมโดยใช้ระดับสัญญาณ TTL

2.3.6 การเขียนโปรแกรมติดต่อกับพอร์ตขนาน

พอร์ตขนานของคอมพิวเตอร์จะมีลักษณะเช่นเดียวกับอุปกรณ์อินพุตเอาต์พุตตัวอื่นๆ คือเมื่อต้องการติดต่อจะต้องกำหนดแอดเดรสที่ต้องการติดต่อด้วย ตารางที่ 2.2 แสดงแอดเดรสของพอร์ตขนาน โดยแบ่งออกเป็น 3 ตำแหน่งคือ แอดเดรสของรีจิสเตอร์ Data, รีจิสเตอร์ Status และรีจิสเตอร์ Control โดยแอดเดรสนี้จะมีอยู่ทั้งหมด 3 ชุดสำหรับพอร์ตขนาน 3 ชุดคือ LPT1, LPT2 และ LPT3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงแอดเดรสของพอร์ตขนาน

ชื่อพอร์ต	LPT1:		LPT2:		LPT3:	
	ฐานสิบ	ฐานสิบหก	ฐานสิบ	ฐานสิบหก	ฐานสิบ	ฐานสิบหก
DATA	888	378H	956	3BCH	632	278H
STATUS	889	379H	957	3BDH	633	279H
CONTROL	890	37AH	958	3BEH	634	27AH

2.4 FPGA (Field Programmable Gate Array)

โครงสร้างภายในของ FPGA ประกอบไปด้วยอะเรย์ของลอจิกเกตต่างๆมากมาย ซึ่งในปัจจุบันความจุเกตภายในตัวชิพ FPGA ได้เพิ่มขึ้นจากระดับไม่กี่พันตัวจนระดับล้านตัว ซึ่งสามารถรองรับวงจรดิจิทัลที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ในด้านการออกแบบพัฒนาและทดสอบก็ทำได้ง่าย ซึ่งในปัจจุบันการออกแบบวงจรโดยใช้ FPGA กำลังเป็นที่นิยมและมีแนวโน้มที่จะนำมาใช้งานมากขึ้นเรื่อยๆ

2.4.1 FPGA แบ่งได้ตามเทคโนโลยีที่ใช้ในการโปรแกรมซึ่งมีอยู่ 2 แบบคือ

การโปรแกรมโดยการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของตัวชิพ และการโปรแกรมโดยการใช้หน่วยความจำ

1. การโปรแกรมโดยการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ
 - 1.1 *Fuse* เป็นวิธีการโปรแกรมที่สามารถทำได้เพียงครั้งเดียว ซึ่งหลังจากที่โปรแกรมแล้วจุดเชื่อมต่อจะขาดจากกัน
 - 1.2 *Anti Fuse* เป็นวิธีการโปรแกรมที่คล้ายกับแบบ *Fuse* แต่ต่างกันที่หลังจากทำการโปรแกรมแล้ว จะเชื่อมต่อจะเชื่อมถึงกัน

2. การโปรแกรมโดยใช้หน่วยความจำ

2.1 *EEPROM Based FPGA*

FPGA ที่ใช้การโปรแกรมแบบนี้เรียกว่า CPLD ซึ่งเทคโนโลยีที่ใช้จะเหมือนกับ EEPROM ทำให้มีความจุของเกตต่ำ โดยทั่วไปจะน้อยกว่า 20,000 เกต แต่ข้อดีของ EEPROM Based FPGA คือสามารถเก็บข้อมูลที่โปรแกรมลงไปได้โดยไม่จำเป็นต้องมีไฟเลี้ยง และในการโปรแกรมจะใช้ทรานซิสเตอร์ 1 ตัวต่อ 1 บิต ซึ่งการโปรแกรมสามารถทำได้ประมาณ 10,000 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร หากมีการนำออกไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 SRAM Based FPGA

FPGA แบบนี้จะใช้เทคโนโลยีในการโปรแกรมเหมือนกับ SRAM (Static RAM) ทำให้สามารถโปรแกรมซ้ำได้โดยไม่จำกัดจำนวนครั้ง นอกจากนี้ยังมีความจุของเกทในระดับปานกลางถึงสูงมาก (ประมาณ 10,000 – 1,000,000 เกท) ซึ่งข้อดีของ SRAM Based FPGA คือใช้เวลาในการโปรแกรมน้อย (ระดับ ns) การโปรแกรมทำได้ง่ายเทียบได้กับการเขียน SRAM ทั่วไป และเหมาะสำหรับการออกแบบวงจรที่มีความสลับซับซ้อนส่วนข้อเสียคือ ไม่สามารถเก็บโปรแกรมในภาวะที่ไม่มีไฟเลี้ยงได้ ดังนั้น FPGA ชนิดนี้จึงมักใช้ควบคู่กับ ROM เพื่อเก็บโปรแกรมและทำการโหลดโปรแกรมลงในตัวชิปในขณะที่เริ่มต้นใช้งาน

2.4.2 รายละเอียดของขั้นตอนในการออกแบบสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. การสังเคราะห์วงจร (Logic Synthesis)

ในขั้นตอนนี้จะใช้ซอฟต์แวร์ในการสังเคราะห์วงจร (Synthesis Tools) ทำการสังเคราะห์พฤติกรรมของวงจรที่ได้จากการออกแบบด้วย Schematic หรือ VHDL ซึ่งต้องทำการตรวจสอบด้วยว่าซอฟต์แวร์นั้นสนับสนุนเทคโนโลยี FPGA (FPGA Library) ที่ต้องการหรือไม่ ตัวอย่างเช่น FPGA ของบริษัท XILINX และบริษัท ALTIUM จะมีซอฟต์แวร์สังเคราะห์วงจรจะทำการแปลงโค้ด VHDL และทำการ Optimize เพื่อให้ได้วงจรตามเทคโนโลยี ที่เลือกใช้ ในการสังเคราะห์วงจรนั้น วงจรระดับเกท (Gate Level) จะไม่เหมาะสมกับโครงสร้างที่มีอยู่ในอุปกรณ์ FPGA นั้นๆ จึงทำให้ผลที่ได้มีประสิทธิภาพและในขั้นตอนการสังเคราะห์วงจรนี้ ผู้ออกแบบสามารถกำหนดข้อบังคับสำหรับโมเดลแต่ละตัวได้ เช่น ข้อบังคับในเรื่องเวลา (Timing Constraints) หรือข้อบังคับในเรื่องของพื้นที่ (Area) หรือกำหนดชนิดและตำแหน่งของ I/O ซึ่งข้อบังคับเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในขั้นตอน Optimize เพื่อให้วงจรที่ได้เป็นไปตามที่กำหนด ส่วนสำคัญในการ Optimize คือการเทียบ (Mapping) โมเดลให้เข้ากับเทคโนโลยีที่ใช้เพื่อให้ได้วงจรที่เหมาะสมกับโครงสร้างและสถาปัตยกรรมภายในอุปกรณ์ FPGA เมื่อทำการสังเคราะห์วงจรเสร็จแล้ว ซอฟต์แวร์การสังเคราะห์วงจรก็จะมีผลการรายงานผลว่าโมเดลที่ออกแบบไปนั้นเป็นอย่างไร เช่นมีค่าความหน่วง(Delay) เท่าใดใช้ทรัพยากรต่างๆใน FPGA อะไรบ้าง เมื่อมาถึงขั้นตอนนี้ ผู้ออกแบบก็จะทราบว่าโมเดลเป็นไปตามข้อบังคับหรือไม่ ถ้าไม่ก็สังเคราะห์ใหม่จนกว่าจะเป็นไปตามที่กำหนด

2. การแบ่งวงจร (Partitioning)

ขั้นตอนนี้เป็นการแบ่งวงจรที่ได้จากการสังเคราะห์ เป็นส่วนย่อยๆสำหรับลงใน CLBs, IOBs หรือองค์ประกอบอื่นๆ ภายในอุปกรณ์ FPGA สำหรับเกณฑ์ที่ใช้ในการแบ่ง คือให้แต่ละส่วนที่จะแยกออกจากกันมีจำนวนสัญญาณที่เชื่อมต่อระหว่างกันน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อลดความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่นในตอนทำการเชื่อมต่อสัญญาณ (Routing) ในขั้นตอนนี้จะใช้ซอฟต์แวร์ทำ โดยซอฟต์แวร์จะเทียบส่วนประกอบของวงจรเช่น เกท (gate), ฟลิป-ฟลอป (flip-flop) ลงในทรัพยากรต่างๆ ที่มีอยู่ในอุปกรณ์ FPGA

หลังจากทำขั้นตอนนี้เสร็จแล้ว ผู้ออกแบบสามารถที่จะทราบว่าวงจรใช้จำนวนทรัพยากรภายในอุปกรณ์ FPGA ไปเท่าไร ส่วนข้อมูลทางเวลานั้นผู้ออกแบบจะทราบเฉพาะความหน่วงลอจิก (Logic Delay) ส่วนซอฟต์แวร์จะรวมเอาซอฟต์แวร์ย่อยอื่นๆ อีก เพื่อให้การทำ PPR (Partitioning Placement & Routing) เป็นไปอย่างต่อเนื่อง

3. การวางอุปกรณ์ (Placement)

ขั้นตอนนี้เป็นการเลือกทำเลที่ตั้งของแต่ละส่วนของวงจรที่ผ่านการแบ่งวงจร (Partitioning) มาแล้วว่าจะอยู่ ณ ตำแหน่งไหนในอุปกรณ์ FPGA เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เช่นวงจรส่วนไหนควรอยู่ใกล้กันเพื่อจะได้ค้นหาเส้นทางได้ (route) ง่ายหรือช่วยลดความหน่วง จะเห็นได้ว่าตำแหน่งภายในอุปกรณ์ FPGA นั้นมีความสำคัญเพราะถ้าจัดวงจรลงในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมแล้วจะทำให้ความหน่วงเพิ่มขึ้นหรือ Router ทำการค้นหาเส้นทางสัญญาณได้ไม่หมด

การวางอุปกรณ์ที่ดีควรวางส่วนต่างๆ ให้อยู่ใกล้กัน โดยเฉพาะส่วนที่มีการเชื่อมต่อสัญญาณด้วยกันนอกจากนั้นการกำหนดตำแหน่งขา I/O (I/O pin) ตามตำแหน่งขา I/O ของ FPGA บนแผ่น PCB ก็จะมีผลโดยตรงเลยคือซอฟต์แวร์จะวาง I/O ลงในตำแหน่งที่ผู้ออกแบบกำหนด ซึ่งบางครั้งตำแหน่งที่กำหนดไปไม่เหมาะสม ดังนั้นการกำหนดขา I/O ควรกำหนดตำแหน่งให้เหมาะสมหรือไม่ก็ให้ซอฟต์แวร์จัดการเอง

4. การเชื่อมต่อสัญญาณ (Routing)

ในขั้นตอนนี้เป็นการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างองค์ประกอบต่างๆภายในอุปกรณ์ FPGA ขั้นตอนนี้จะทำต่อเนื่องจากการวางอุปกรณ์ ในกรณีที่ทำการวางอุปกรณ์ไว้ไม่ดีซอฟต์แวร์ก็จะทำการเชื่อมต่อสัญญาณได้ไม่หมด (เนื่องจากจำนวนทรัพยากรสำหรับเชื่อมต่อสัญญาณนั้นมีอยู่จำกัด) หรือเกิดความหน่วงเกินค่าที่กำหนดในข้อบังคับ

ผู้ออกแบบสามารถทำขั้นตอนนี้ได้โดยใช้ซอฟต์แวร์ หรือผู้ออกแบบจะทำการเชื่อมต่อสัญญาณด้วยตนเองก็ได้ แต่ทางที่ดีควรใช้ซอฟต์แวร์ทำดีกว่า นอกจากนั้นการกำหนดข้อบังคับทางเวลา จะช่วยให้ผลที่ได้จากการเชื่อมต่อสัญญาณดีขึ้นได้

5. ความหน่วงด้านเวลา (Delay)

ในการทำ FPGA นั้นความหน่วงที่เกิดขึ้นเป็นความหน่วงที่เกิดจากการวางตำแหน่ง (layout) ของอุปกรณ์ ซึ่งผู้ออกแบบไม่สามารถเข้าไปแก้ไขได้ แต่สามารถทำให้มีความหน่วงน้อยที่สุดได้ สำหรับความหน่วงที่เกิดขึ้นนั้นแยกได้เป็นสองประเภทคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1 ความหน่วงทางลอจิก (Logic delay) เป็นความหน่วงภายในองค์ประกอบของอุปกรณ์ FPGA เอง

5.1.2 ความหน่วงที่เกิดจากการเชื่อมต่อสัญญาณ (Routing delay) เป็นความหน่วงที่เกิดจากการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างองค์ประกอบภายในอุปกรณ์ FPGA

โดยปกติแล้วค่าความหน่วงลอจิกไม่ควรเกิน 50% ของค่าความหน่วงที่ยอมรับได้ เพราะความหน่วงที่เกิดจากการเชื่อมต่อสัญญาณมันจะมีค่ามากกว่าค่าความหน่วงลอจิก ดังนั้นในการวางอุปกรณ์ และเชื่อมต่อสัญญาณ ผู้ออกแบบควรกำหนดข้อบังคับทางเวลาเพื่อให้ซอฟต์แวร์ได้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้น

ค่าความหน่วงที่ได้หลังจากการวางอุปกรณ์ และเชื่อมต่อสัญญาณแล้วจะมีค่าความหน่วงที่ค่อนข้างแน่นอน ซึ่งผู้ออกแบบสามารถทราบได้ว่าโมเดลที่ออกแบบนั้น เป็นไปตามข้อกำหนดหรือไม่

6. การจำลองการทำงานของวงจร (Simulation)

ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญอีกขั้นตอนหนึ่ง เพราะเป็นขั้นตอนที่สำคัญอีกขั้นตอนหนึ่ง เพราะเป็นขั้นตอนที่ผู้ออกแบบตรวจสอบฟังก์ชันการทำงานของโมเดลว่าถูกต้องหรือไม่มีข้อผิดพลาดตรงไหนเพื่อจะได้ทำการแก้ไขให้ถูกต้อง ในขั้นตอนนี้จะมีซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับการจำลองการทำงานของวงจรที่ใช้ชื่อ เช่น Model Sim ของบริษัท Model Technology หรือ Max Plus II ของบริษัท Altera ในการจำลองการทำงานของวงจรควรทำทุกครั้งหลังจากที่มีการทำแต่ละขั้นตอนนี้หลักเสร็จแล้ว เพื่อจะได้ทราบว่าข้อผิดพลาดของโมเดลเกิดขึ้นตอนไหน จะได้แก้ไขข้อผิดพลาดตรงขั้นตอนนี้ๆ ได้เลย ไม่ต้องมาคอยตรวจหาขั้นตอนที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดตรงขั้นตอนนี้ๆ นั่นคือการทำกรจำลองการทำงานของวงจร ต้องทำทั้งหลังการเขียนโค้ด, การสังเคราะห์วงจร และการทำ PPR การจำลองการทำงานของวงจรหลังจากที่เขียนโค้ดเสร็จแล้วนั้น ผู้ออกแบบสามารถทราบได้แค่โมเดลทำงานถูกต้องหรือไม่เท่านั้น (functional test) ยังไม่สามารถตรวจสอบการทำงานในเชิงเวลาได้ถูกต้อง ในการจำลองการทำงานของวงจรหลังจากที่สังเคราะห์เป็นวงจรแล้ว เพื่อตรวจสอบว่าฟังก์ชันการทำงานยังคงถูกต้องหรือไม่ และค่าความหน่วงที่เกิดขึ้นเป็นไปตามข้อบังคับหรือไม่ มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นหรือถ้ามีจะแก้ไขให้ถูกต้อง

ในการจำลองการทำงานของวงจรหลังจากที่ทำการวางอุปกรณ์การเชื่อมต่อสัญญาณ(Post layout simulation) แล้วก็มีความสำคัญเช่นกันเพราะผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรในตอนนี้จะเป็นผลลัพธ์ของโมเดลเลย ซึ่งผู้ออกแบบนอกจากจะตรวจสอบฟังก์ชันการทำงานแล้วยังต้องตรวจสอบคุณสมบัติอื่นๆ เช่น ความหน่วงที่ได้จากการทำ PPR ในรูปแบบค่าความหน่วงมาตรฐาน (Standard Delay Format: SDF) ว่าตรงตามที่กำหนดหรือไม่ หรือตรวจสอบว่า วงจรรวมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถใช้งานที่ความถี่สูงสุดเท่าไรนั่นเอง ในการจำลองการทำงานของ วงจรควรรใช้ซอฟต์แวร์ตัวเดียวกันตลอดเพื่อจะได้เปรียบเทียบผลที่ได้จากขั้นตอนต่างๆ

7. การโปรแกรมอุปกรณ์ FPGA (Configuration)

หลังจากที่โมเดลผ่านขั้นตอนต่างๆ จนกระทั่งผ่านการทำ PPR (Partitioning, Placement & Routing) แล้วนั้น ถึงตอนนี้ก็สามารถที่จะดาวน์โหลด (Download) ลงในอุปกรณ์ FPGA ได้แล้ว ในการดาวน์โหลดนี้ก่อนอื่นต้องแปลงแบบวงจรรวมที่ได้เป็นข้อมูลวงจร (Configuration data) ซึ่งอยู่ในรูปของบิตสตรีม (Bit stream) ก่อนแล้วจึงดาวน์โหลดลงเพื่อให้อุปกรณ์ FPGA มีฟังก์ชันการทำงานตามโมเดลที่ผู้ออกแบบต้องการ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้วิธีที่แตกต่างกันออกไปสำหรับอุปกรณ์ FPGA ของแต่ละบริษัทผู้ผลิตคือ

ในกรณีที่เป็นการโปรแกรม FPGA ชนิดที่ต้องโปรแกรมโดยวิธี SRAM นั้นในการใช้งานผู้ออกแบบจะต้องเก็บข้อมูลวงจรไว้ในหน่วยความจำประเภท EPROM หรือ Serial PROM ด้วยเพื่อจะใช้งานสะดวกขึ้น คือในการใช้งานโมเดลครั้งต่อไปไม่ต้องดาวน์โหลดข้อมูลวงจรจากเครื่องคอมพิวเตอร์อีก เพราะมีข้อมูลวงจรเก็บอยู่ในหน่วยความจำอยู่แล้ว แต่กรณีที่อุปกรณ์ FPGA เป็นชนิดที่โปรแกรมโดยวิธี EPROM หรือ Anti fuse ก็ไม่จำเป็นต้องมีหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลวงจร เพราะว่าอุปกรณ์ FPGA ชนิดนี้เมื่อดาวน์โหลดข้อมูลวงจรลงไปแล้ว ข้อมูลที่ดาวน์โหลดลงไปก็ยังคงอยู่ในอุปกรณ์ FPGA และครั้งต่อไปก็ใช้งานโมเดลที่ออกแบบไว้ได้เลย

บทที่ 3

การออกแบบและการทำงานของเม้าส์สามมิติ

3.1 แนวทางการออกแบบเม้าส์สามมิติ

3.1.1 จุดประสงค์ก่อนออกแบบ

1. วงจรภาคส่งและรับคลื่นอัลตราโซนิกสามารถทำงานได้
2. ควบคุมให้สามารถวัดระยะทางระหว่างตัวรับ ตัวส่งได้
3. นำผลต่างของเวลาที่รับได้ส่งเข้าไปที่ FPGA ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณนาฬิกา เพื่อที่จะนำความต่างของสัญญาณนาฬิกาไปเขียนเป็นโปรแกรมแสดงผล 3 มิติ
4. เขียนโปรแกรมในส่วนแสดงผล 3 มิติโดยใช้ Visual Basic

3.1.2 ขั้นตอนการออกแบบ

เพื่อใช้บอกตำแหน่งของตัวชี้ตำแหน่ง บนจอคอมพิวเตอร์ โดยมีหลักการทำงานประมาณได้ดังนี้ เริ่มด้วย ตัวชี้ตำแหน่งส่งสัญญาณไปที่ตัวรับ โดยตัวรับจะมีอยู่ 5 ตำแหน่ง คือ P0,P1,P2,P3 และ P4 ตามลำดับ ที่ตำแหน่ง $(X_0, Y_0, Z_0), (X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2), (X_3, Y_3, Z_3)$ และ (X_4, Y_4, Z_4) ตามลำดับ การหาพิกัด (X,Y,Z) ทำได้โดยการวัดระยะทางระหว่างตัวชี้ไปยังจุดอ้างอิงทั้ง 5 คือ $R+R_0, R+R_1, R+R_2, R+R_3$ และ $R+R_4$ โดยใช้ FPGA เป็นตัวควบคุม จากนั้นก็จะส่งข้อมูลของระยะทางทั้ง 5 ไปยังคอมพิวเตอร์ โดยออกทางพอร์ตขนานของบอร์ด FPGA เพื่อให้คอมพิวเตอร์นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาพิกัด (X,Y,Z) และนำไปแสดงผลเป็นภาพสามมิติ

ภาคส่งคลื่น

เนื่องจากตัวส่งสัญญาณ Ultrasonic จะมีความถี่ใช้งานที่ 40 KHz วงจรภาคส่งจึงเป็นวงจรผลิตความถี่ 40 KHz ป้อนให้กับตัวส่ง แต่เนื่องจากต้องเป็นตัวป้อนสัญญาณเพื่อเป็นจุดอ้างอิงให้กับ FPGA ด้วย ซึ่งสัญญาณที่จะป้อนให้กับ FPGA ต้องเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ต่ำๆ ดังนั้น วงจรภาคส่งนี้จะทำหน้าที่ผลิตความถี่ 40 KHz และผลิตสัญญาณพัลส์แล้วนำมาผสมกัน ป้อนให้กับตัวส่งอัลตราโซนิกและสัญญาณพัลส์ที่ผลิตขึ้นมานี้ก็จะถูกส่งให้กับ FPGA ด้วยพร้อมๆกัน

ภาครับคลื่น

วงจรในส่วนของภาครับคลื่น จะต้องสามารถรับสัญญาณที่ส่งมาจากตัวส่ง ซึ่งเป็นสัญญาณที่ถูกผสมกันระหว่างความถี่สูง 40 KHz กับสัญญาณพัลส์ความถี่ต่ำประมาณ 100 Hz โดยจะสร้างวงจรภาครับขึ้นมา 5 จุด เมื่อวงจรภาครับตัวใดตัวหนึ่งได้รับสัญญาณเป็นตัวแรก เคน์เตอร์ตัวอื่นจะเริ่มนับและหยุดเมื่อวงจรภาครับชุดนั้นได้รับสัญญาณครบทั้ง 5 จุด หรือ รอจนถึงเวลาที่ได้คำนวณไว้ว่าถ้าเวลาผ่านไปเท่านี้ภาครับยังรับสัญญาณได้ไม่ครบให้ตัวรับเริ่มรับค่าใหม่ ค่าที่ได้จะนำไปคำนวณหาตำแหน่งของตัวชี้ต่อไป

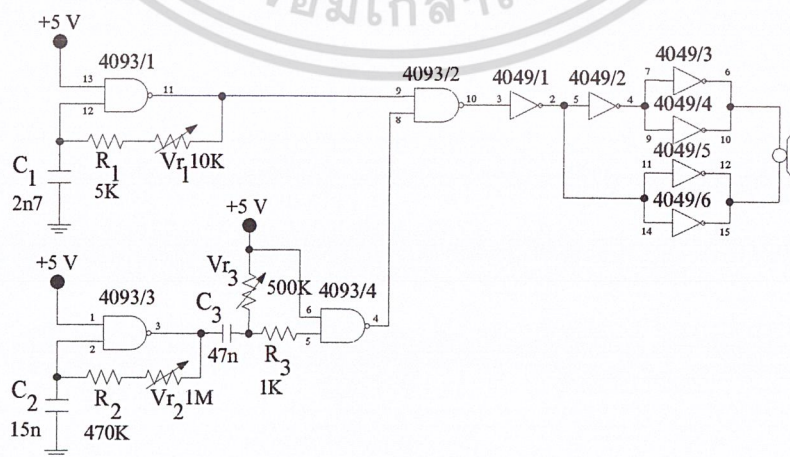
ภาคประมวลผล

วงจรในส่วนของ FPGA ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณจากวงจรภาครับ เปรียบเทียบและนับระยะเวลาที่เกิดขึ้นระหว่างตัวส่งกับตัวรับแต่ละจุด ค่าเวลาที่ได้จะส่งให้กับคอมพิวเตอร์คำนวณผ่านทางพอร์ตสื่อสารแบบขนานจากนั้น โปรแกรมก็จะทำการอ่านค่าเพื่อที่นำไปคำนวณหาพิกัดระนาบ X Y Z พร้อมทั้งแสดงออกเป็นภาพ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรมที่เขียน โดย Visual Basic

3.2 การทำงานของเมตาส์ 3 มิติ

3.2.1 วงจรภาส่งคลื่น

ภาคส่งสัญญาณจะทำหน้าที่ในการให้กำเนิดสัญญาณ ซึ่งคลื่นที่เราใช้ในที่นี้จะเป็นคลื่นอัลตราโซนิก โดยตัวส่งสัญญาณที่เราใช้จะสามารถทำงานได้ดีที่สุดที่ความถี่ 40 kHz ดังนั้นเราจึงสร้างสัญญาณนาฬิกาที่ความถี่ 40 KHz และสัญญาณความถี่ต่ำประมาณ 100 Hz



รูปที่ 3.1 แสดงภาคส่งคลื่น Ultrasonic

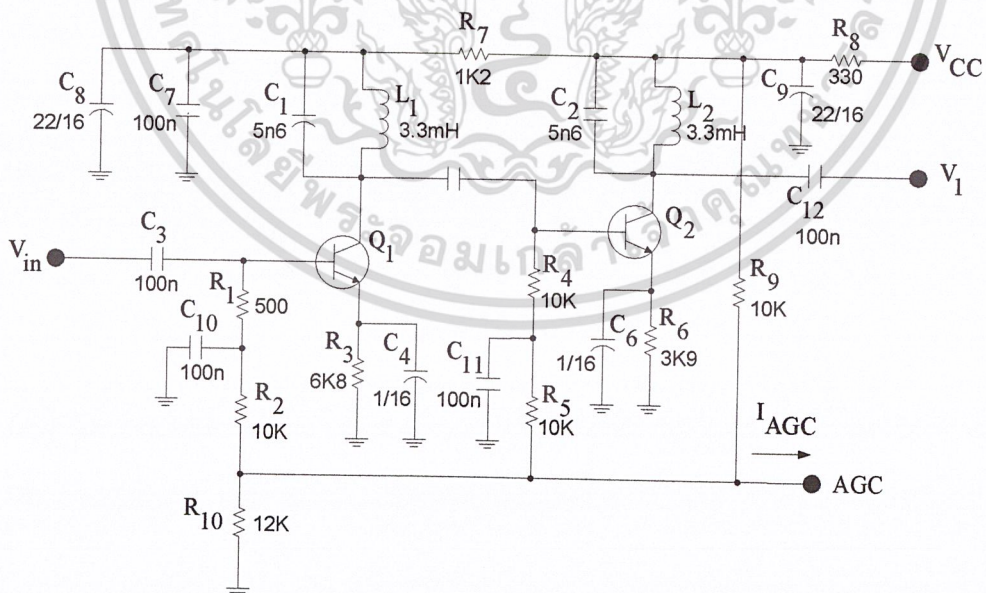
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.1 แสดงวงจรของภาคส่งสัญญาณ ซึ่งจะทำหน้าที่ในการให้กำเนิดสัญญาณความถี่ 40 KHz ผสมอยู่กับสัญญาณความถี่ต่ำ (50 Hz) แล้วป้อนให้กับตัวส่งอุลตราโซนิก ซึ่งจากรูป

1. NAND Gate 4093/1 ทำหน้าที่สร้างสัญญาณคลื่นพาห้ความถี่ 40 kHz โดยกำหนดได้จากค่าของ C_1 , R_1 และ V_{r1}
2. NAND Gate 4093/3 ทำหน้าที่สร้างสัญญาณความถี่ต่ำ 50 Hz โดยกำหนดได้จากค่าของ C_2 , R_2 และ V_{r2}
3. NAND Gate 4093/4 ทำหน้าที่ปรับขนาดความกว้างของสัญญาณความถี่ต่ำตามที่เรต้องการโดยกำหนดได้จากค่าของ C_3 , R_3 และ V_{r3}
4. จากนั้นจะได้สัญญาณความถี่ต่ำ (50 Hz) ขนาดความกว้างตามที่เรต้องการเพื่อนำไปมอดูเลตกับคลื่นพาห้ 40 kHz โดยใช้ NAND Gate 4093/2
5. NOT Gate 4049/3, 4093/4, 4093/5, 4093/6 ใช้ขับตัวส่งคลื่นอุลตราโซนิก
6. NOT Gate 4093/2 ใช้กลับเฟสของสัญญาณที่ส่งไปที่ขาทั้ง 2 ข้างของตัวส่ง เพื่อให้ขนาดของแรงดันจากยอดถึงยอดของตัวส่งเป็น 2 เท่าของไฟเลี้ยง

3.2.2 วงจรภาครับคลื่นอุลตราโซนิก

3.2.2.1 ส่วนวงจรขยาย



รูปที่ 3.2 ส่วนวงจรขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.2 เป็นส่วนของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม(Common Emitter) เมื่ออุลตราโซนิกรับสัญญาณมาจากฝั่งส่ง เข้ามาเป็น V_{in} โดยที่สัญญาณนี้มีขนาดเล็กมาก สัญญาณจะผ่านทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรขยาย ขยายสัญญาณให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยมี Z_{cn} เป็นอิมพีแดนซ์เพื่อทำให้วงจรมีคุณสมบัติเป็นวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (BPF) ซึ่งในที่นี้ตั้งไว้ที่ความถี่ 40 KHz และมีสูตรของวงจรขยาย คือ

$$\frac{V_o}{V_i} = g_m Z_c \quad (3.1)$$

เมื่อ Z_C : Impedance ที่ต่อตรงขา Collector

$$= L // C // R$$

$$= \frac{S * \frac{1}{C}}{S^2 + (S * \frac{1}{RC}) + \frac{1}{LC}}$$

$$g_m = \frac{I_{CQ}}{V_T}$$

V_T : Thermal Voltage

$$= \frac{KT}{q}$$

I_{CQ} : กระแส Bias

ตรงจุดต่อไฟเลี้ยงของ Q_1 และ Q_2 ต่อกับ R_8 และ C_9 ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำ เพื่อกรองสัญญาณรบกวนที่มากับไฟเลี้ยง เนื่องจากวงจรขยายถูกออกแบบให้มีอัตราขยายแรงดันที่สูงมาก สัญญาณรบกวนที่มากับไฟเลี้ยงซึ่งแม้ว่าจะมีขนาดต่ำมาก แต่ก็มีโอกาสที่วงจรจะขยายออกไปที่ค่านเอาท์พุท (V_1) ของวงจรได้

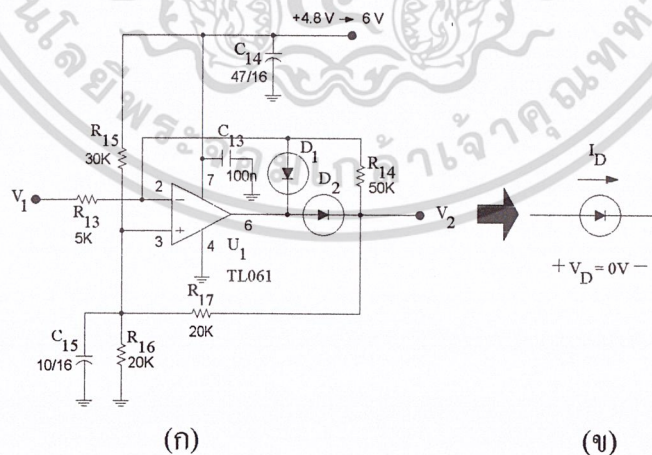
จุด AGC ของวงจรขยายต่อกับเอาท์พุทของวงจรป้อนกลับ โดยวงจรป้อนกลับจะเปลี่ยนขนาดของสัญญาณที่ออกมาจากเอาท์พุทของวงจรขยายให้เป็นกระแส I_{AGC} ถ้าสัญญาณมีขนาดใหญ่ I_{AGC} ก็จะมีค่ามาก แต่ถ้าสัญญาณมีขนาดเล็ก I_{AGC} ก็จะมีค่าน้อย I_{AGC} นี้จะไปดึงกระแสเบสที่จะไหลเข้า Q_1 และ Q_2 ให้มีค่าน้อยลง ซึ่งทำให้มีผลต่อ I_{CQ} และอัตราขยายแรงดันของ Q_1 และ Q_2 ดังนี้

$$\frac{V_o}{V_i} = g_m Z_C \approx \frac{Z_C}{\frac{V_T}{I_{CQ}}} \quad (3.2)$$

จากสมการจะเห็นว่าอัตราขยายขึ้นกับค่าของ I_{CQ} ถ้า I_{CQ} ลดลงอัตราขยายก็จะลดลง แต่ถ้า I_{CQ} เพิ่มขึ้นอัตราขยายก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

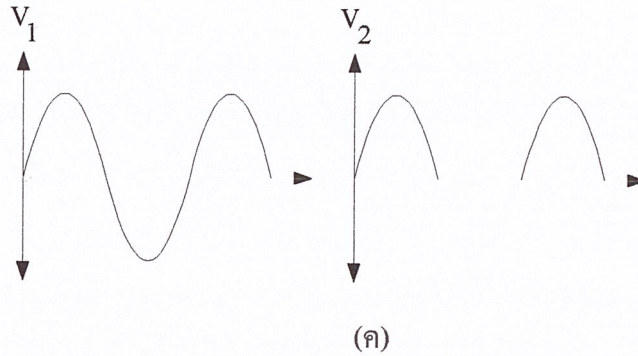
ถ้าสัญญาณที่ V_1 มีขนาดใหญ่ จะทำให้ I_{AGC} มีค่ามากทำให้ I_{CQ} มีค่าน้อยลง และทำให้อัตราขยายลดลงตาม มีผลให้ขนาดของสัญญาณที่จุด V_1 ลดลงด้วย แต่ถ้าสัญญาณที่ V_1 มีขนาดเล็ก ทำให้ I_{AGC} มีค่าน้อยทำให้ I_{CQ} มีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้อัตราขยายเพิ่มขึ้น มีผลให้ขนาดของสัญญาณที่จุด V_1 เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อรวมวงจรขยาย Q_1 และ Q_2 กับวงจรป้อนกลับ จะทำให้ขนาดของสัญญาณที่จุด V_1 มีค่าคงที่

3.2.2.2 ส่วนวงจร Super Diode



รูปที่ 3.3 วงจร Super Diode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

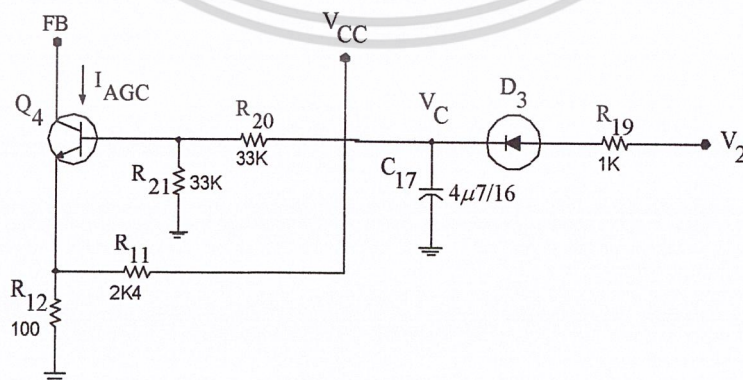


รูปที่ 3.3 วงจร Super Diode (ต่อ)

รูปที่ 3.3 ก. เป็นส่วนของวงจร Super Diode เมื่อสัญญาณเข้ามาที่ U1 TL061, D_1 และ D_2 โดยที่ทั้ง 3 ตัวรวมกันจะเปรียบเสมือนกับเป็น Diode ชนิด Super Diode เปรียบเสมือน Diode ที่มี Barrier Voltage เท่ากับ 0 V ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ข. ทำหน้าที่เรคตีไฟที่จุด V_1 ซึ่งจากเอาต์พุทของวงจรขยายให้เหลือเพียงซีกบวก โดยไม่มีผลของ Barrier Voltage ของไดโอดเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.3 ค.

เหตุผลที่ต้องใช้เป็น Super Diode เนื่องจากจะทำให้สามารถลดขนาดของสัญญาณที่นำมาป้อนให้กับตัวเรคตีไฟ ถ้าใช้ Diode ธรรมดาเป็นตัวเรคตีไฟ จะต้องเพิ่มอัตราขยายของวงจรขยาย Q_1 และ Q_2 และค่า V_{CC} เพื่อชดเชยแรงดันที่เสียไปใน Diode

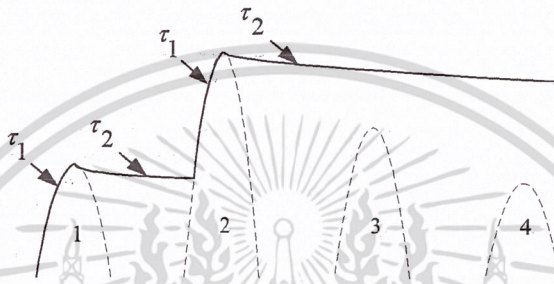
3.2.2.3 ส่วนป้อนกลับ



รูปที่ 3.4 ส่วนป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนป้อนกลับประกอบด้วย วงจร Peak Detector และวงจรขยายความคลาดเคลื่อน (Error Amp) ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าที่ขาอินพุตเป็น V_{ref} โดยวงจร Peak Detector จะตัดคลื่นพาห์ 40 kHz ของสัญญาณที่จุด V_2 และเปลี่ยนให้เป็นแรงดันไฟกระแสตรงที่มีค่าขึ้นกับระดับแรงดันสูงสุดของ Envelop จากนั้นจึงส่งไปให้วงจรขยาย Q_4 ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันที่ได้จาก Peak Detector ให้เป็นกระแส I_{AGC} โดยมีหลักการทำงานดังนี้



รูปที่ 3.5 กราฟแรงดันตกคร่อม V_{C17}

- โดยตอนที่สัญญาณกำลังขึ้น C_{17} จะถูก Charge ผ่าน R_{19} กับ D_3 ทำให้มีแรงดันเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.5 และมีค่า Time constant ดังนี้

$$\begin{aligned}\tau_1 &= R_{19} * C_{17} \\ &= 1000 * 4\mu 7 \\ &= 4.7 \text{ ms}\end{aligned}$$

- พอสัญญาณกำลังลง D_3 จะกั้นไม่ให้ C_{17} Discharge ผ่าน R_{19} เพราะฉะนั้นก็เลยต้อง Discharge ผ่าน R_{20} และ R_{21} ลงกราวด์แทน โดยมีค่า Time constant ดังนี้

$$\begin{aligned}\tau_2 &= C_{17} * (R_{20} + R_{21}) \\ &= 4\mu 7 * (33K + 33K) \\ &= 31.02 \text{ ms}\end{aligned}$$

จะเห็นว่าค่า Time Constant ของ V_{C17} ช่วงขาลงจะมากกว่าช่วงขาขึ้นมาก สัญญาณที่ได้จะมีรูปร่างดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.5 จากรูปจะเห็นว่าถึงแม้สัญญาณในลูกที่ 3 และ 4 จะตกลงแล้ว แต่

สัญญาณ V_{C17} จะไม่ตกลงตามทันที เนื่องจากกำหนดให้ค่า Time Constant ช่วงขาลงมีค่ามาก

ดังนั้นค่าแรงดัน V_{C17} จึงมีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงดันสูงสุดของ V_2

และจากรูปที่ 3 ถ้า $I_{EQ4} \leq I_{R12}$ จะเห็นว่า

$$V_{R12} = \frac{V_{CC} * 100}{100 + 2K4} \quad (3.3)$$

$$V_{R12} = V_{BQ4} - 0.7 \quad (3.4)$$

และ

$$V_{BQ4} = \frac{V_{C17} * 33K}{33K + 33K} \quad (3.5)$$

ทำให้ Q_4 จะทำงาน(On) ได้ก็ต่อเมื่อ

$$V_{BQ4} - 0.7 \geq V_{R12} \quad (3.6)$$

เมื่อ Q_4 ทำงาน Q_4 จะไปดึงกระแสของ Q_1 และ Q_2 จากส่วนของวงจรรขยาย ซึ่งค่ากระแสที่ Q_4 ดึงนั้นขึ้นอยู่กับแรงดัน V_{C17} หรือขนาดของสัญญาณ Output ของ Super Diode

ถ้า

- Output ของ Super Diode มาก(Input มาก) Q_4 ก็จะดึงกระแสมาก ทำให้ I_{cq} ของ Q_1 และ Q_2 มีค่าน้อย ส่งผลให้ g_m น้อยลง Gain ($\frac{V_o}{V_i}$) ลดลง Output ก็

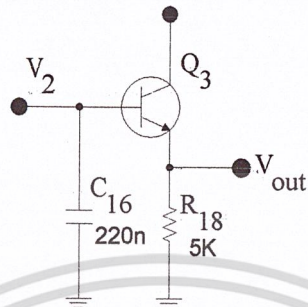
ลดลง

- Output ของ Super Diode น้อย(Input น้อย) Q_4 ก็จะดึงกระแสน้อย ทำให้ I_{cq} ของ Q_1 และ Q_2 มีค่ามาก ส่งผลให้ g_m เพิ่มขึ้น Gain ($\frac{V_o}{V_i}$) มากขึ้น Output ก็

มากขึ้น

จากข้างต้น ทำให้เราได้ว่า สุดท้ายแล้ว Output ของวงจรมีค่าเกือบคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของ Input

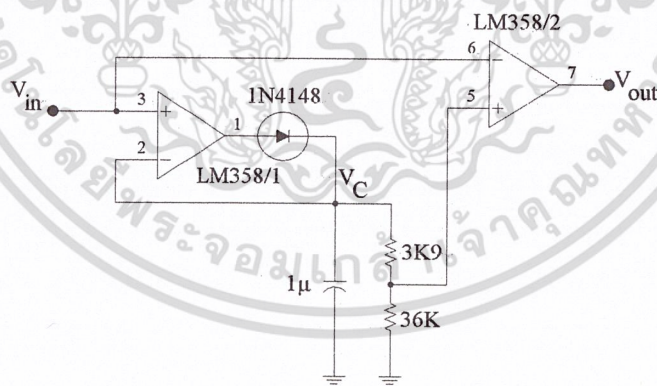
3.2.2.4 ส่วนเอาต์พุต(Output)



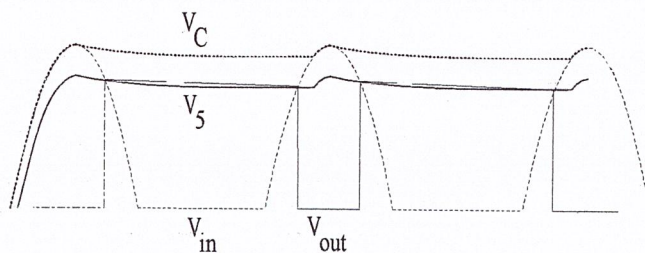
รูปที่ 3.6 วงจรเอาต์พุต(Output)

เมื่อสัญญาณเข้ามาที่ V_2 จะผ่าน C_{16} , Q_3 และ R_{18} โดยที่ C_{16} กับ Input Impedance ของ Q_3 ($=\beta * R_{18}$) จะทำหน้าที่เป็นวงจรตัดคลื่นพาห์ 40 kHz ออกไปทำให้เหลือแต่กรอบ (Envelop) ของสัญญาณ และจะทำหน้าที่เป็น Buffer ไปในตัวด้วย

3.2.2.5 วงจร Peak Detector



ก.



ข.

รูปที่ 3.7 วงจร Peak Detector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.7 ก. แสดงรูปของวงจร Peak Detector ซึ่ง LM358/1 กับ Diode 4148 จะทำหน้าที่เป็น Super diode และเราเซ็ทให้ค่า Time Constant ของวงจรมีค่าเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} \tau &= \text{คาบเวลาที่ภาคส่งส่งสัญญาณออกมา} \\ &= 40 \text{ ms} = RC \\ \text{โดยที่ } C &= 1 \mu\text{F} \\ \text{จะได้ } R &= 4 \text{ K}\Omega \end{aligned} \tag{3.7}$$

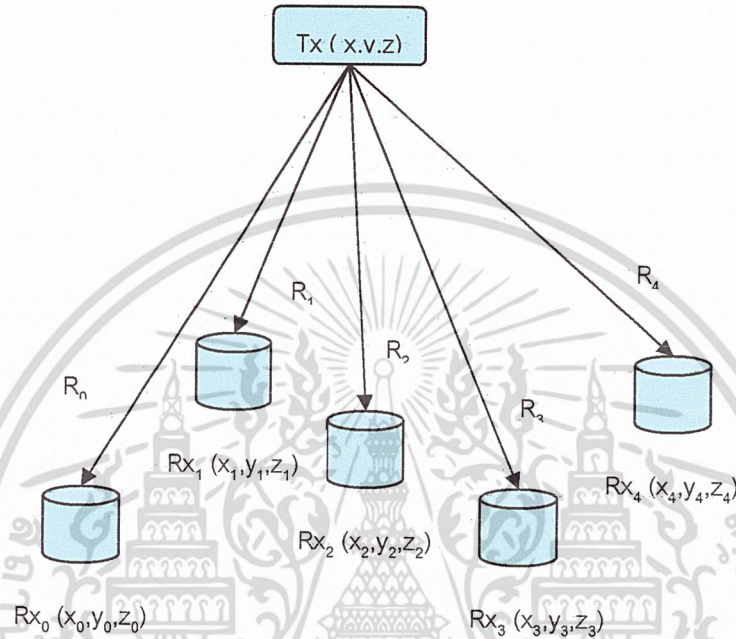
เมื่อมีสัญญาณอินพุตเข้ามาในวงจร แรงดันที่จุด V_C จะเป็นตามรูปที่ 3.7 ข. โดยมันจะถูกแบ่งแรงดันโดย R 3K9 กับ 36K ได้เป็นสัญญาณ V_5 จากนั้นก็เอา V_5 กับ V_{in} ไปเปรียบเทียบกับที่ LM358/2 ซึ่งทำหน้าที่เป็น Comparator แบบ Active Low (อินพุตเข้าที่ขาลบ) ก็จะได้ V_{out} ตามรูปที่ 3.7 จ.

3.3 วงจรภาคประมวลผล

วงจรในส่วนของภาคประมวลผลจะประกอบไปด้วยส่วน FPGA, Visual Basic ซึ่งในส่วนของ FPGA จะเขียนด้วยโปรแกรม MAXplus2 โดยสร้างวงจรตัวนับ (Counter) 5 ตัวและอื่นๆ แล้วทำการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดยผ่านทางพอร์ทขนาน ซึ่งค่าที่ได้จะส่งไปคำนวณในโปรแกรม Visual Basic และแสดงเป็นภาพสามมิติ

3.3.1 การคำนวณหาพิกัดตำแหน่ง

การคำนวณหาพิกัดตำแหน่ง อาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์ โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้



รูปที่ 3.8 แสดงการวางตำแหน่งของตัวส่งและตัวรับ

สมมติว่าตัวส่งอยู่ที่ตำแหน่ง (X, y, z) และเราทำการวางตำแหน่งของตัวรับทั้ง 5 ตัว ตามจุด ดังรูป เมื่อส่งสัญญาณUltrasonic จากตัวส่งไปยังตัวรับทั้ง 5 ตัว ระยะเวลาที่คลื่นเดินทางระหว่างตัว ส่งกับตัวรับจะถูกส่งไปที่บอร์ด FPGA เพื่อนับค่าเวลาที่ต่างกัน และส่งไปที่คอมพิวเตอร์ ผ่านทาง พอร์ตขนาน

สัญญาณจากภาคส่งคลื่นจะมีลักษณะเป็น Square Wave ที่มีความถี่ 40 KHz เป็นช่วงๆมี ลักษณะคล้ายๆพัลส์ ความถี่ 100 Hz ส่งไปที่ภาครับ โดยภาครับจะแปลงสัญญาณที่ได้เป็นพัลส์ที่มี ขนาด 5 V เพื่อไปใช้งานต่อไป

เมื่อตัวรับตัวแรกได้รับสัญญาณดังกล่าวแล้วจะทำให้เคาน์เตอร์เริ่มทำงาน โดยรับค่าไป เรื่อยๆจนครบทุกตัว แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่า R_0, R_1, R_2, R_3, R_4 ออกมาแล้วนำค่า R_0, R_1, R_2, R_3, R_4 ไปคำนวณหาค่าพิกัด x,y,z ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาพิคัด

1. การคำนวณเพื่อให้ได้ค่า R_0, R_1, R_2, R_3, R_4

เมื่อเราได้ค่าที่เคาน์เตอร์แต่ละตัวนับได้ (n) เราสามารถหาเวลาที่ใช้ได้ (t) จากสูตรต่อไปนี้

$$T = N/f$$

โดย T คือ เวลาที่แตกต่างกันระหว่างตัวรับตัวแรกกับตัวรับตัวนั้น

N คือ จำนวนที่เคาน์เตอร์นับได้

f คือ ความถี่ที่เคาน์เตอร์ใช้นับ

และเราสามารถหาค่า R_0, R_1, R_2, R_3, R_4 ได้จากสูตรต่อไปนี้

$$จะได้ R_0 = VN_0/f$$

$$R_1 = VN_1/f$$

$$R_2 = VN_2/f$$

$$R_3 = VN_3/f$$

$$R_4 = VN_4/f$$

โดย V คือ ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก (ประมาณ 350 m/s)

R_0, R_1, R_2, R_3, R_4 คือ รัศมีที่แตกต่างกันระหว่างตัวรับตัวนั้นกับตัวรับที่อยู่ใกล้ตัวส่งมากที่สุด

หลังจากนั้นเราจะนำค่า R_0, R_1, R_2, R_3, R_4 ไปคำนวณหาค่า X, Y, Z ต่อไป

2. การคำนวณหาค่า X, Y, Z

จากรูปที่ 3.8 เราสามารถคำนวณหาระยะทางจากตัวส่งไปยังตัวรับ R_{x_0} ได้ดังนี้

$$x^2 + y^2 + z^2 = R_0^2 \quad (1)$$

และคำนวณหาระยะทางจากตัวส่งไปยังตัวรับที่ i โดยที่ $i = 1, 2, 3$ และ 4 ได้ดังนี้

$$(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2 = (R_0 + R_i)^2 \quad (2)$$

จากสมการที่ 2 สามารถจัดรูปสมการได้ดังนี้

$$x^2 + y^2 + z^2 + 2 X_i x + 2 Y_i y + 2 Z_i z + X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2 = R_0^2 + 2 R_0 R_i + R_i^2 \quad (3)$$

นำสมการที่ (3) - (1) จะได้

$$2 X_i x + 2 Y_i y + 2 Z_i z + X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2 = 2 R_0 R_i + R_i^2 \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4) X_i , Y_i และ Z_i เป็นค่าคงที่ที่ได้จากตำแหน่งของตัวรับ และ R_i เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการวัดค่า DToFs ส่วน x , y , z และ R_0 เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า เราสามารถจัดรูปของสมการที่ (4) ใหม่ โดยแทน i ด้วย 1, 2, 3 และ 4 ได้ดังนี้

$$X_1 x + Y_1 y + Z_1 z + R_1 R_0 = 1/2 (X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2 - R_1^2)$$

$$X_2 x + Y_2 y + Z_2 z + R_2 R_0 = 1/2 (X_2^2 + Y_2^2 + Z_2^2 - R_2^2)$$

$$X_3 x + Y_3 y + Z_3 z + R_3 R_0 = 1/2 (X_3^2 + Y_3^2 + Z_3^2 - R_3^2)$$

$$X_4 x + Y_4 y + Z_4 z + R_4 R_0 = 1/2 (X_4^2 + Y_4^2 + Z_4^2 - R_4^2)$$

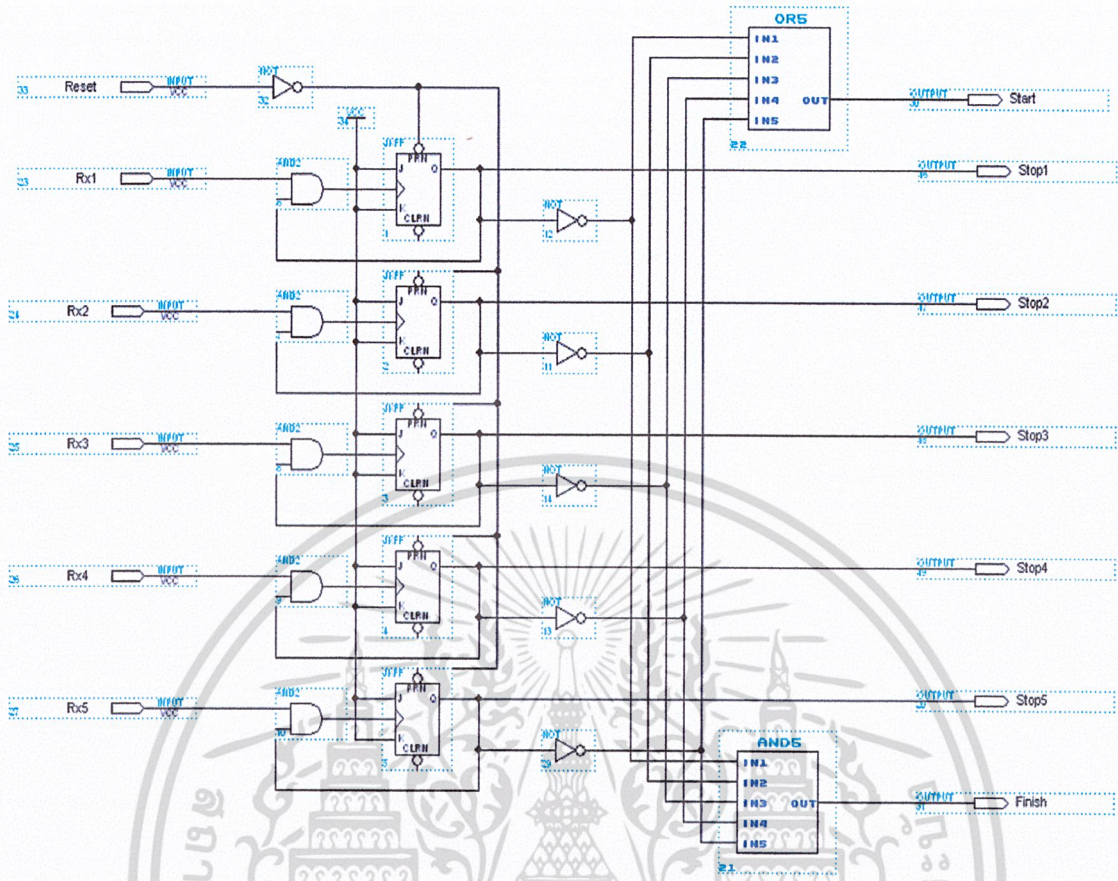
$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & R_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & R_2 \\ X_3 & Y_3 & Z_3 & R_3 \\ X_4 & Y_4 & Z_4 & R_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ R_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2 - R_1^2 \\ X_2^2 + Y_2^2 + Z_2^2 - R_2^2 \\ X_3^2 + Y_3^2 + Z_3^2 - R_3^2 \\ X_4^2 + Y_4^2 + Z_4^2 - R_4^2 \end{bmatrix}$$

3.4 หลักการทำงานของส่วนFPGA

ในส่วนของ FPGA นี้จะมีอยู่ 2 ส่วนที่สำคัญคือส่วนของภาค Control และ ภาคCounter แล้วนำทั้งสองส่วนนี้มาประกอบเข้าด้วยกัน โดยหลักการแล้วเราต้องการให้ส่วนของ FPGA นี้ทำหน้าที่นับผลต่างและแสดงผลต่างที่นับได้ในแต่ละภาครับที่รับคลื่นอัลตราโซนิกได้ที่เวลาต่างกัน ก็เพื่อนำส่วนของผลต่างทางเวลานี้ไปเป็นข้อมูลในการคำนวณหาพิกัด X, Y, Z ต่อไปในส่วนของการคำนวณ

ภาค Control

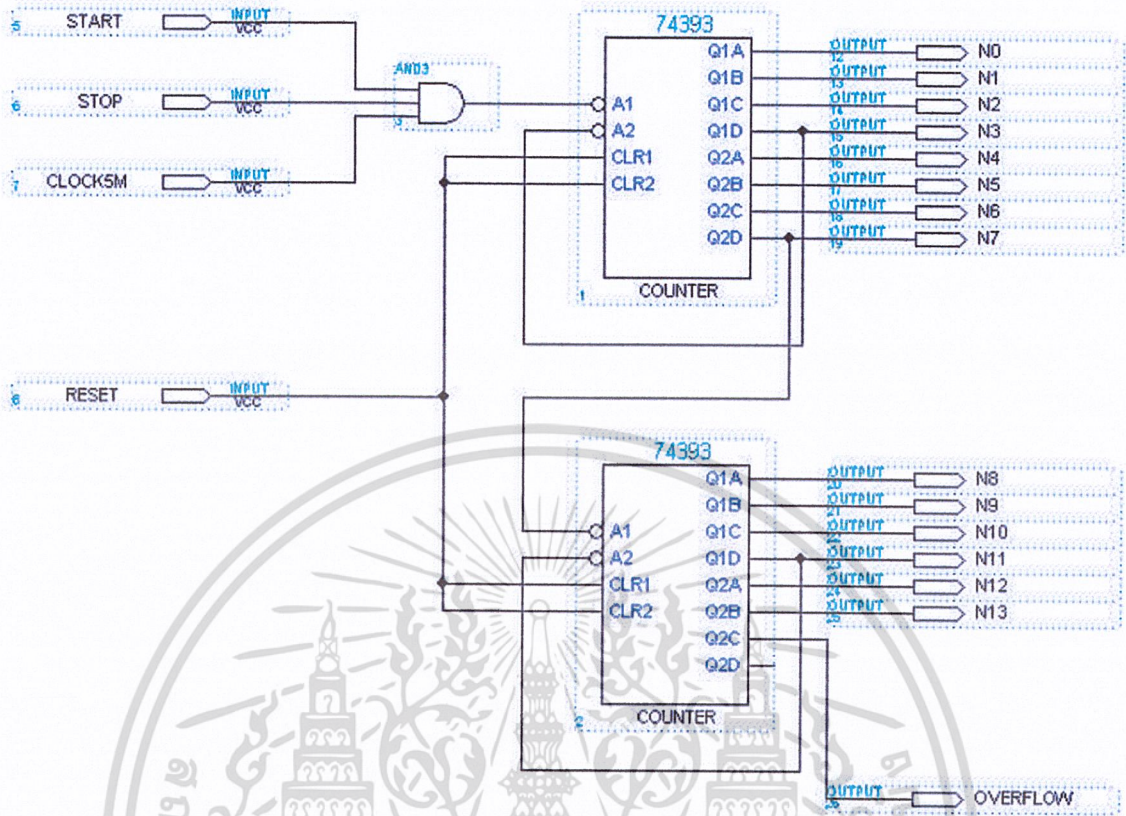
ภาคนี้จะทำหน้าที่ในการควบคุมการเริ่มนับและการหยุดนับของ ภาคCounter ในแต่ละส่วนของภาครับ ดังนั้นภาคนี้จึงต้องทำหน้าที่ผลิตสัญญาณการเริ่มต้นการนับ และสัญญาณการหยุดนับ โดยจะต้องสัมพันธ์กับสัญญาณ R_x ในแต่ละตัวแต่ละภาครับที่จะรับคลื่นได้จากภาคส่ง



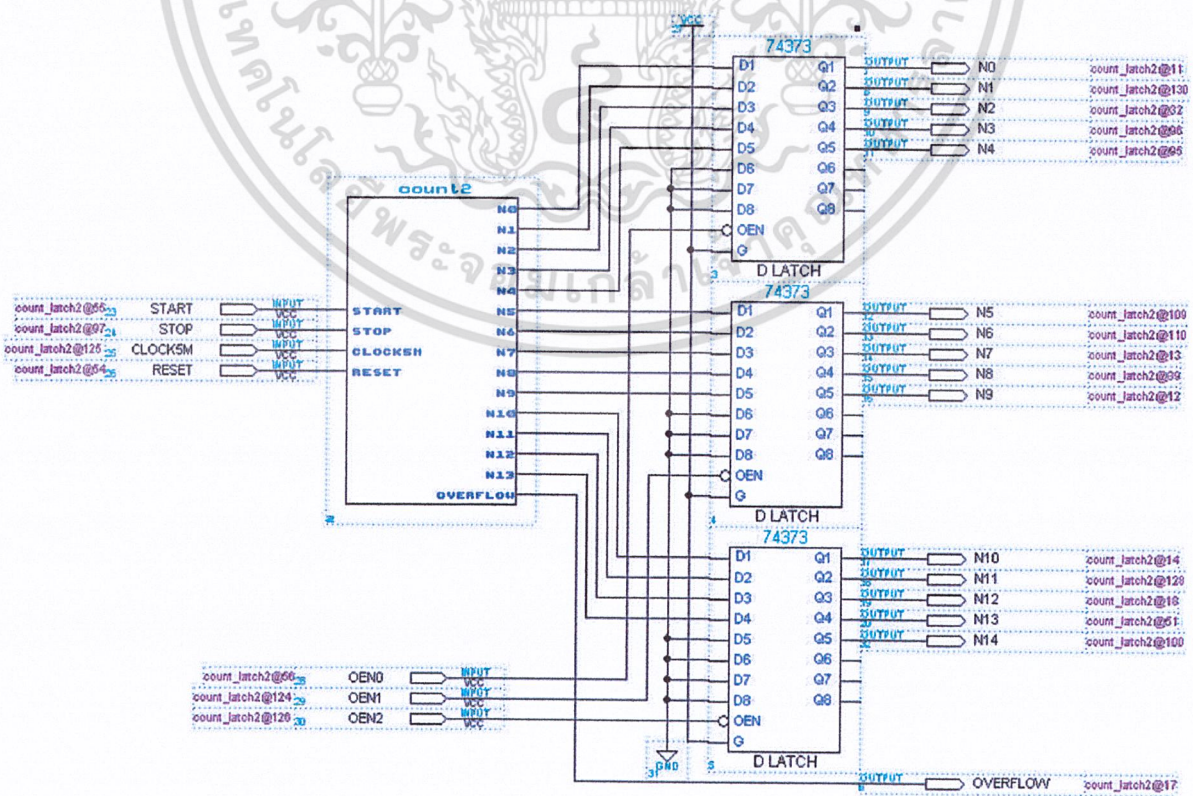
รูปที่ 3.9 แสดงภาพวงจรการทำงานภายใน Block Control

ภาค Counter

ภาคนี้จะทำหน้าที่หลักคือ นับผลต่างทางเวลาของสัญญาณ Rx ในแต่ละตัวในรูปแบบของสัญญาณนาฬิกา ภาคนี้จะประกอบด้วย IC สองชนิดด้วยกันคือ 74393 คือ IC Counter ชนิดนับฐาน 16 8บิต 2 ตัว แต่ใช้ในการนับจริงเพียง 14 บิต และ IC 74373 คือ IC ดีแลตซ์ ดังนั้นภาคนี้จะนับได้ 0-16384 ถ้าเกินนี้ก็จะส่งสัญญาณ Overflow ออกมาเสมือนว่าภาครับคลื่นภาคนั้นไม่สามารถที่จะรับคลื่นที่ส่งมาจากภาคส่งได้

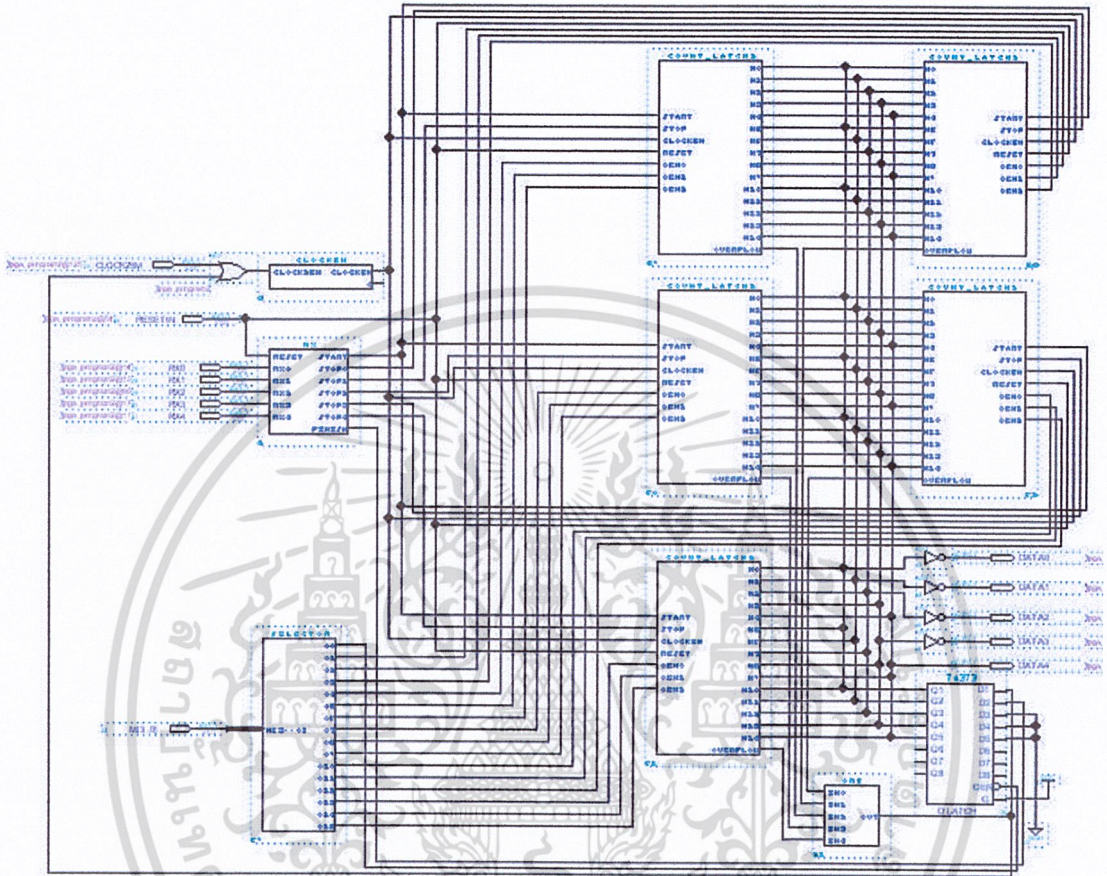


รูปที่ 3.10 แสดงภาพวงจรการทำงานภายในของคอมโพเนนท์ Count2



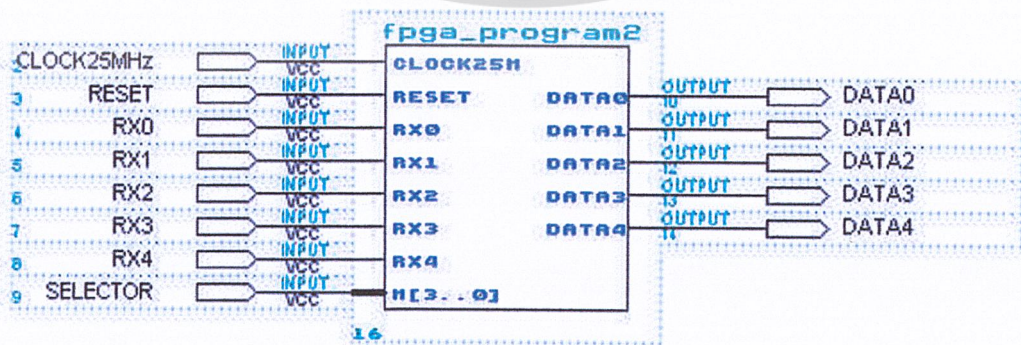
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ที่แสดงภาพวงจรการทำงานภายในใน Block Counter ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร FPGA



รูปที่ 3.12 แสดงภาพวงจรในส่วนของ FPGA

วงจรรวม FPGA

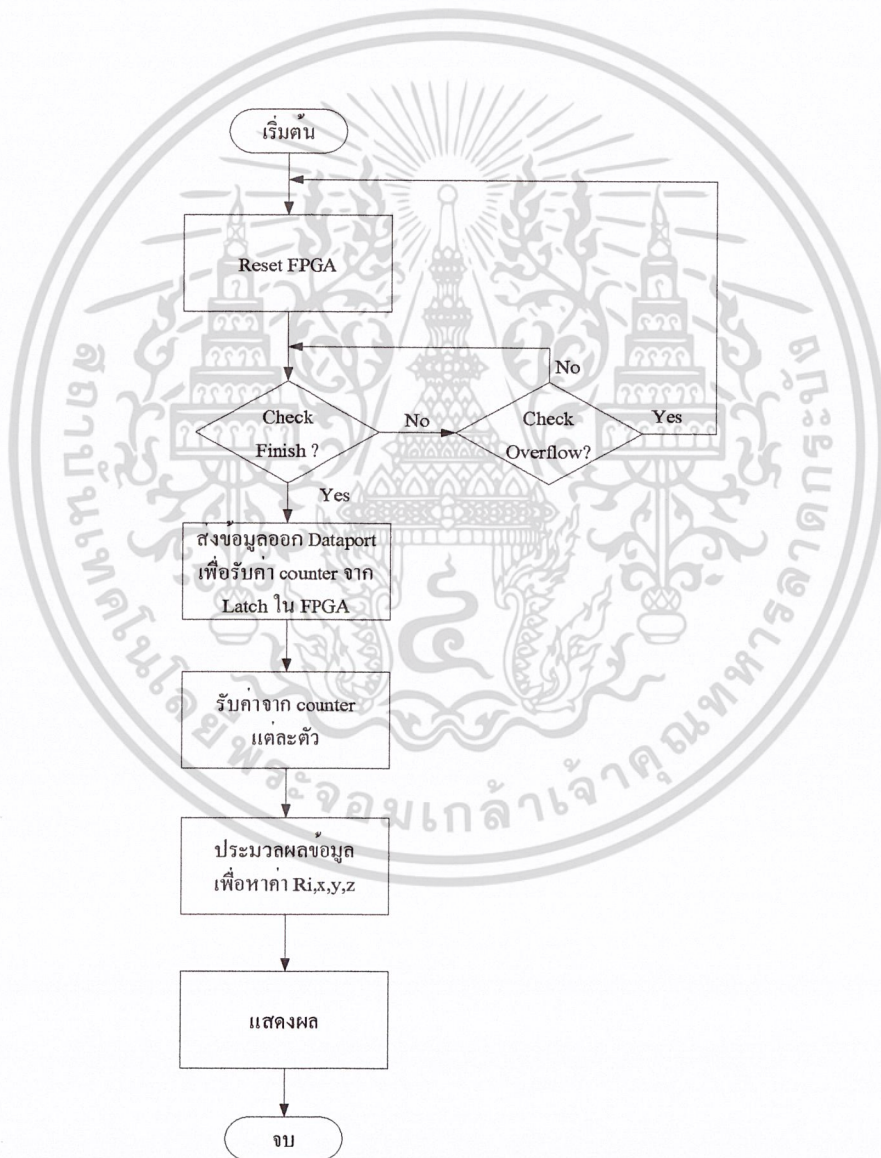


รูปที่ 3.13 แสดงภาพวงจรทั้งหมดในส่วนของ FPGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การเขียนโปรแกรมด้วย Visual Basic

เนื่องจาก Visual Basic นั้นเป็นโปรแกรมที่ไม่สนับสนุนการทำงานในลักษณะการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกโดยผ่านทางพอร์ตขนาน ดังนั้นเราต้องอาศัยไฟล์ Inpout32.DLL ซึ่งเป็นชุดฟังก์ชันของ API ที่ช่วยในการเชื่อมต่อผ่านทางพอร์ตขนาน ซึ่งทำให้ลดความยุ่งยากในการเขียนโปรแกรม ซึ่งไฟล์นี้สามารถหาโหลดได้จากทางเว็บไซต์อินเทอร์เน็ตทั่วไปที่มีให้ดาวน์โหลดฟรี ส่วนหลักการออกแบบโปรแกรมได้แสดงโฟลวชาร์ต ด้านล่างนี้



รูปที่ 3.14 แสดงภาพ flow chart

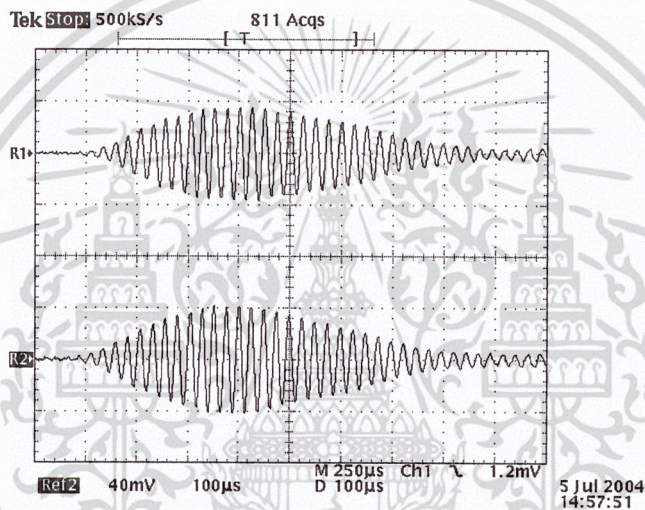
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

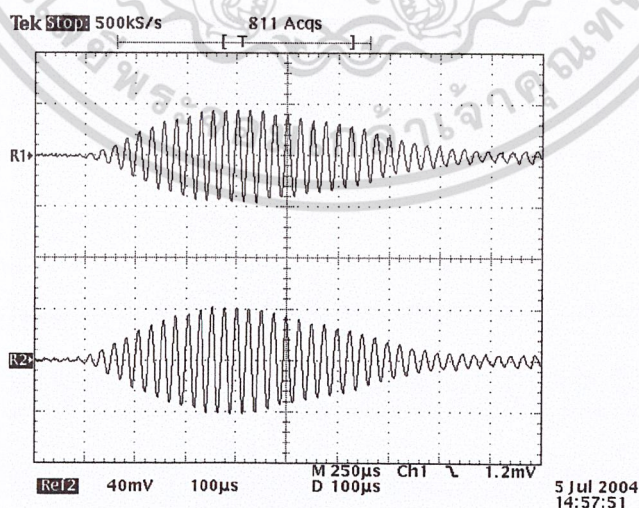
ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะสัญญาณที่ระยะต่าง ๆ

การทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบรูปร่าง Envelope ของสัญญาณอุลตราโซนิกที่รับได้ในระยะต่างๆ



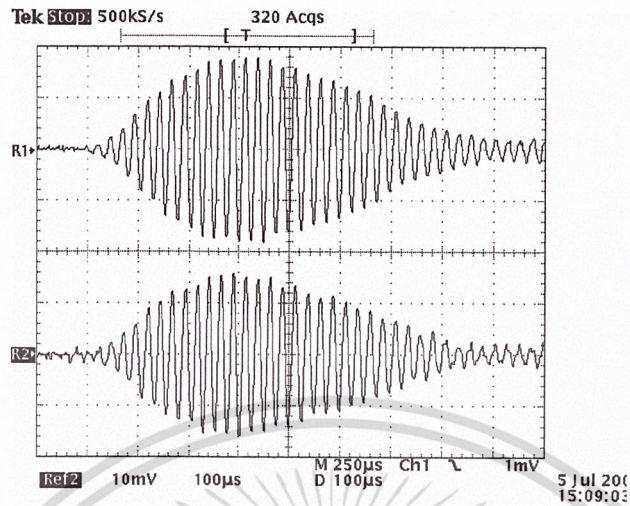
ก.) ระยะ 1 เมตร (R1) และ 0.5 เมตร (R2)



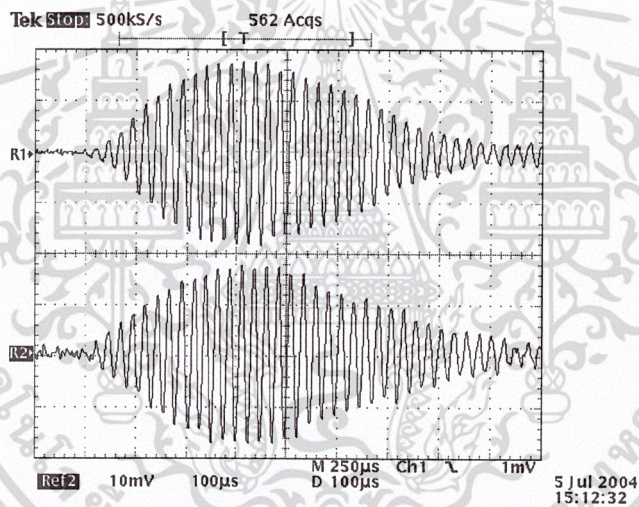
ข.) ระยะ 1.5 เมตร (R1) และ 0.5 เมตร (R2)

รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบสัญญาณที่ภาครับที่ระยะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค.) ระยะ 2 เมตร (R1) และ 0.5 เมตร (R2)



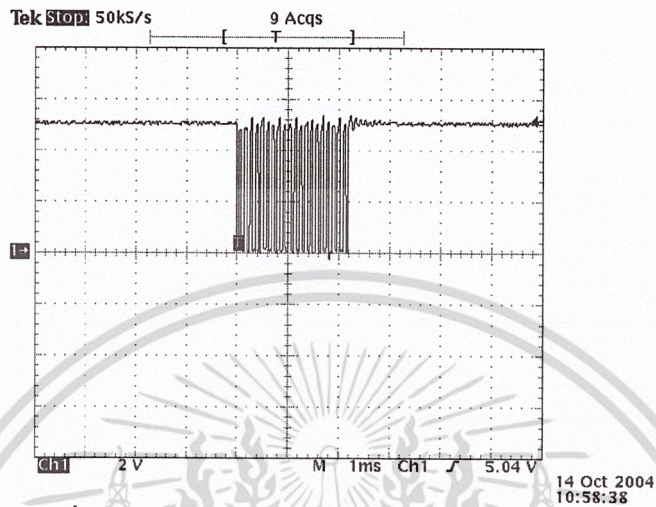
ง.) ระยะ 2.5 เมตร (R1) และ 0.5 เมตร (R2)

รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบสัญญาณที่ภาครับที่ระยะต่างๆ(ต่อ)

จากรูปที่ 4.1 พบว่าสัญญาณที่ภาครับที่วัดได้จากระยะต่างๆ มีลักษณะกรอบ(Envelope) ที่คล้ายกันในทุก ๆ ระยะที่ทำการวัดสัญญาณ

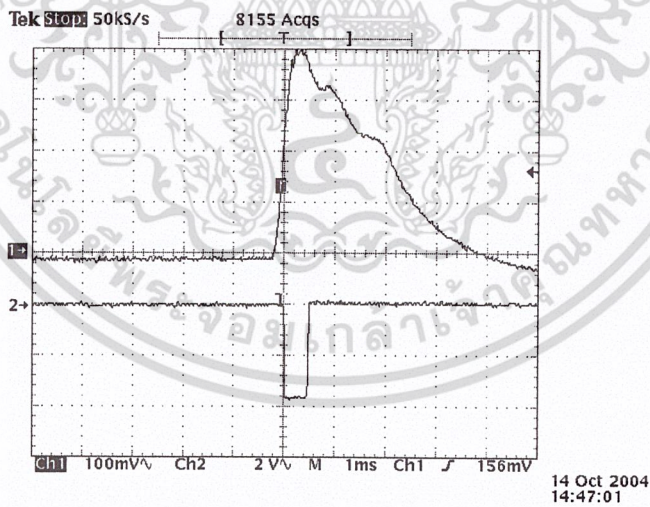
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 สัญญาณที่ภาคส่งคลื่นอุตราโซนิก



รูปที่ 4.2 สัญญาณเอาต์พุตของภาคส่งคลื่นอุตราโซนิก

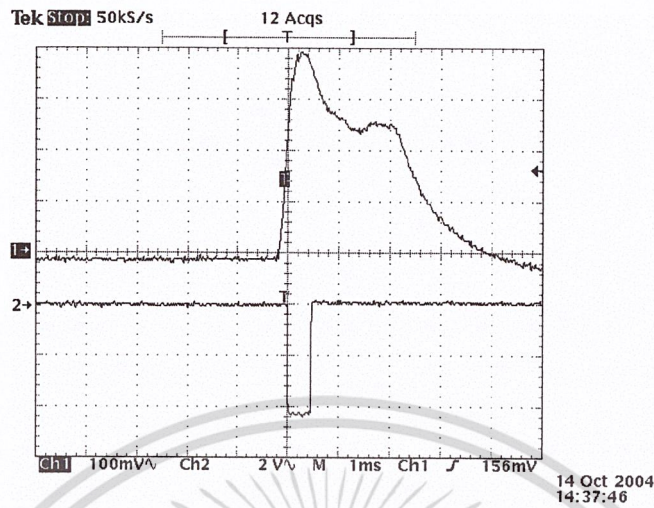
4.3 สัญญาณที่ภาครับคลื่นอุตราโซนิก



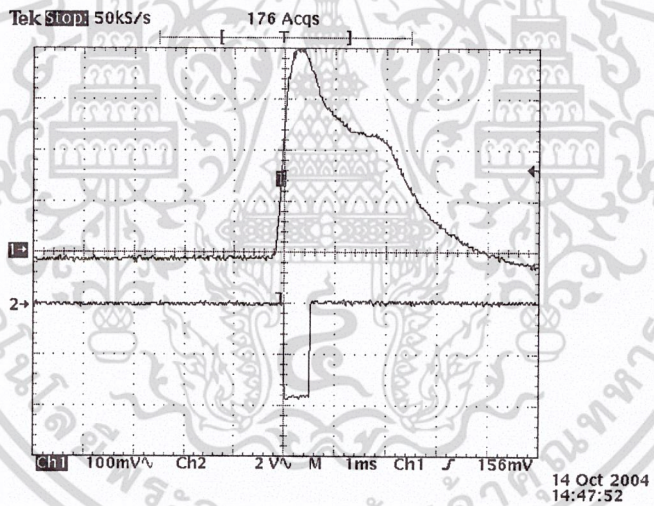
ก.) ระยะ 0.25 เมตร

รูปที่ 4.3 สัญญาณเอาต์พุตของวงจร AGC (1) และวงจร Comparator (2) ที่ระยะต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



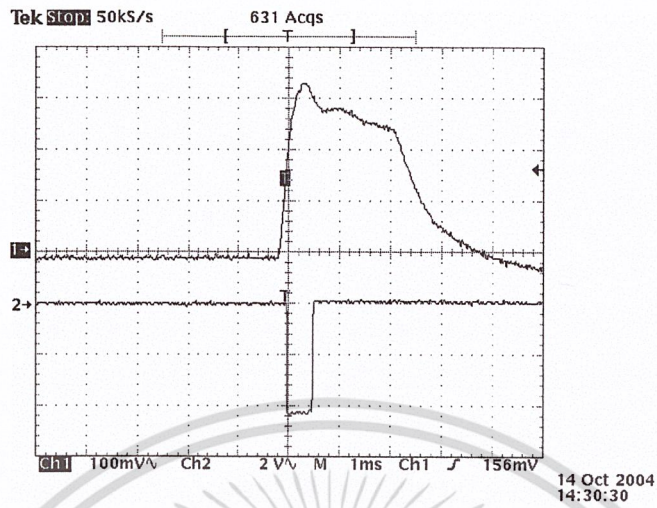
ข.) ระยะ 0.50 เมตร



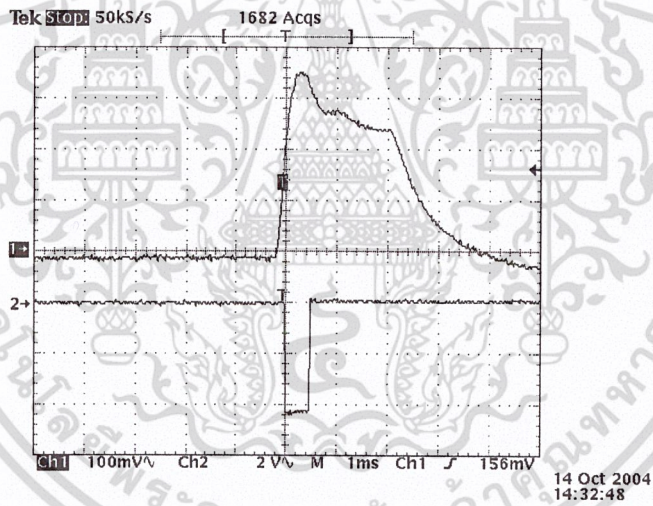
ค.) ระยะ 0.75 เมตร

รูปที่ 4.3 สัญญาณเอาต์พุตของวงจร AGC (1) และวงจร Comparator (2) ที่ระยะต่าง ๆ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



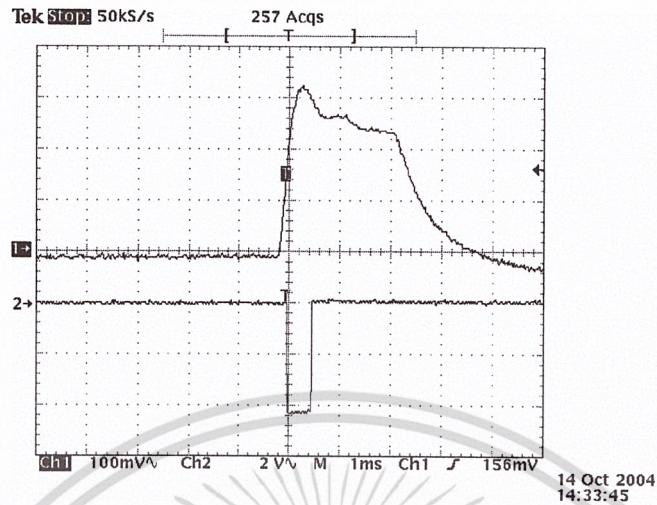
ง.) ระยะ 1.00 เมตร



จ.) ระยะ 1.50 เมตร

รูปที่ 4.3 สัญญาณเอาต์พุตของวงจร AGC (1) และวงจร Comparator (2) ที่ระยะต่าง ๆ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จ.) ระยะ 2.00 เมตร

รูปที่ 4.3 สัญญาณเอาต์พุตของวงจร AGC (1) และวงจร Comparator (2) ที่ระยะต่าง ๆ (ต่อ)

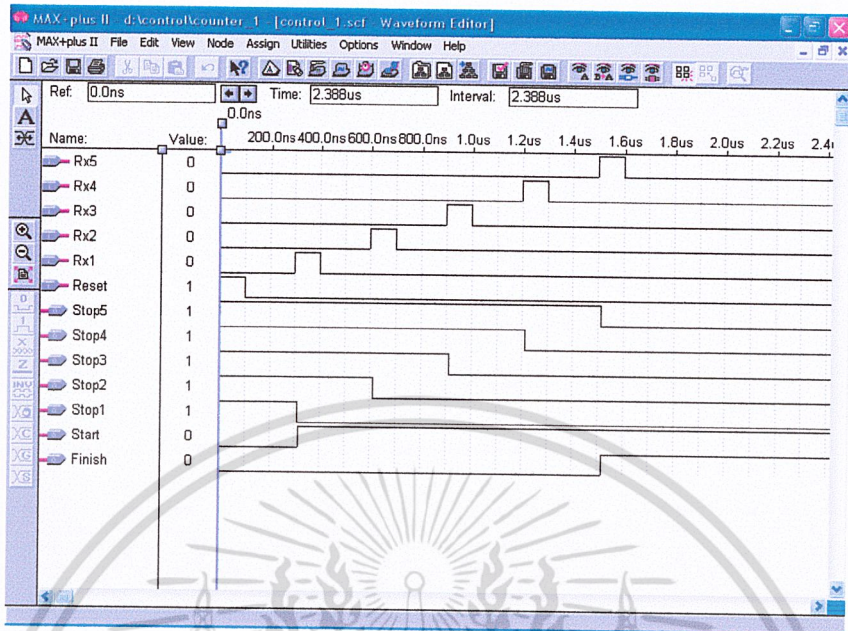
จากรูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจร AGC (1) และวงจร Comparator (2) ที่ระยะต่างๆ พบว่า กรอบของสัญญาณมีลักษณะและขนาดที่ใกล้เคียงกันที่ทุก ๆ ระยะการวัด และเอาต์พุตของ Comparator เป็นแบบ Active Low

4.4 แสดงผลการ Simulate ของ FPGA

ในหัวข้อนี้ได้แสดงผลการ Simulate วงจรที่ได้ออกแบบไว้ในแต่ละส่วนการทำงาน ซึ่งส่วนหลักๆ ได้แก่ ส่วนของ Block Control และ Block Counter

4.4.1 ผลการ Simulate ส่วนของ Block Control

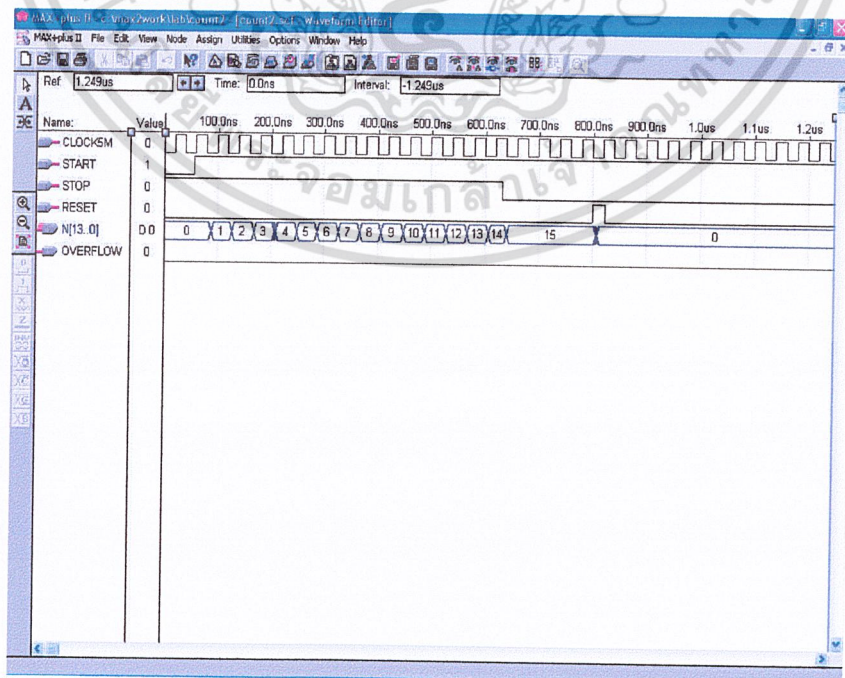
ในส่วนของ Block Control นี้เป็นส่วนที่เริ่มรับสัญญาณจากอัลตราโซนิกตัวรับ และไปควบคุมการทำงานในส่วน Block Counter ให้เริ่มนับและหยุดนับ



รูปที่ 4.4 แสดง Timing Diagram ของ Block Control ที่ได้จากการ Simulate

4.4.2 ผลการ Simulate ส่วนของ Block Counter

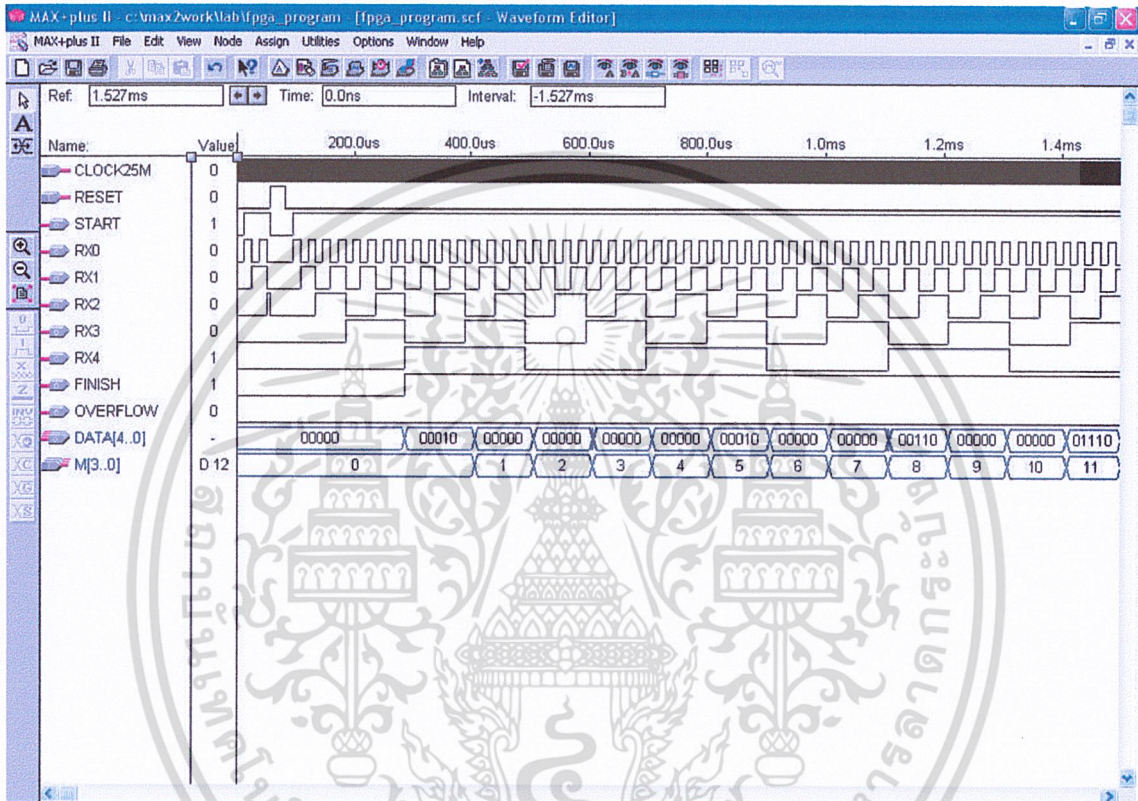
ในส่วนของ Block Counter นี้ได้ทำหน้าที่เป็นตัวจับเวลาของสัญญาณที่ส่งจากตัวส่ง จนกระทั่งตัวรับรับสัญญาณได้



รูปที่ 4.5 แสดง Timing Diagram ของ Block Counter ที่ได้จากการ Simulate เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ผลการ Simulate วงจรทั้งหมดของ FPGA

ในหัวข้อนี้ได้แสดงภาพวงจรการทำงานทุกๆ ส่วนของ FPGA ที่ได้นำมาประกอบกันอย่างสมบูรณ์และผลการ Simulate วงจรที่ได้ประกอบแล้วดังนี้



รูปที่ 4.6 แสดง Timing Diagram ของวงจรทั้งหมดของ FPGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการวัดค่า DToF และการคำนวณตำแหน่งของตัวส่ง

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวัดค่าเวลา t_i ระหว่างตัวรับอ้างอิง (Rx1) กับตัวรับทั้ง 4 ตัว ที่วางห่างกัน 50 cm

ครั้งที่วัด	ค่าเวลา (t_i) ที่วัดได้ หน่วย (us)			
	Rx1 กับ Rx2	Rx1 กับ Rx3	Rx1 กับ Rx4	Rx1 กับ Rx5
ค่าที่แท้จริง	1439.3	1439.3	1439.3	1439.3
1	1456.4	1425.8	1394.8	1432.6
2	1442.2	1437.8	1400.8	1420.2
3	1478.8	1421.6	1365.8	1429.2
4	1435.6	1413.2	1393.8	1445.0
5	1480.4	1434.0	1383.8	1434.4
6	1414.4	1413.8	1407.6	1443.2
7	1443.0	1431.8	1391.8	1442.8
8	1479.2	1436.6	1393.4	1437.8
9	1471.0	1411.2	1392.0	1425.4
10	1457.0	1434.2	1380.2	1418.2
% Error สูงสุด	2.86	1.95	5.11	1.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวัดค่าเวลา (ti) ระหว่างตัวรับอ้างอิง (Rx1) กับตัวรับทั้ง 4 ตัว และตำแหน่ง (x,y,z)

ครั้งที่วัด	ค่าเวลา (ti) ที่วัดได้ หน่วย (us)				ตำแหน่ง (cm)		
	R2	R3	R4	R5	x	y	z
ค่าที่แท้จริง	-177.385	-952.166	436.765	961.669	-0.50	1.00	0.10
1	-222.6	-904.2	337.8	888.8	-0.81	1.56	0.24
2	-239.8	-922.4	310.2	881.2	-0.95	1.78	0.34
3	-237.4	-919.6	344.2	902.4	-0.80	1.53	0.23
4	-221.8	-916.2	374.0	850.4	-0.80	1.51	0.42
5	-215.4	-925.8	304.8	874.6	-0.83	1.53	0.36
6	-224.2	-924.8	312.6	869.6	-0.72	1.33	0.35
7	-258.2	-924.0	325.6	896.4	-0.88	1.65	0.28
8	-259.8	-921.6	341.8	859.4	-0.67	1.37	0.38
9	-292.6	-934.2	334.	875.8	-0.79	1.58	0.32
10	-221.6	-924.0	328.4	883.0	-0.90	1.64	0.33
% Error สูงสุด	64.95%	5.03%	30.21%	11.57%	90.00%	78.00%	320.00%

- หมายเหตุ** - ตัวรับ Rx0 วางอยู่ที่ตำแหน่ง (0,0,0)
 - ตัวรับ Rx1 วางอยู่ที่ตำแหน่ง (0.25,0.25,0.10)
 - ตัวรับ Rx2 วางอยู่ที่ตำแหน่ง (-0.25,0.25,0.10)
 - ตัวรับ Rx3 วางอยู่ที่ตำแหน่ง (-0.25,-0.25,0.10)
 - ตัวรับ Rx4 วางอยู่ที่ตำแหน่ง (0.25,-0.25,0.10)
 - ตัวส่ง Tx วางอยู่ที่ตำแหน่ง (-0.50,1.00,0.10)

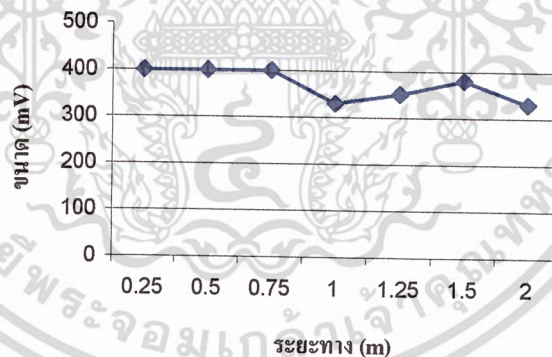
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์โครงการ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. จากผลการทดลองจะเห็นว่า สัญญาณที่ภาครับของวงจรรับ-ส่งคลื่นอุลตราโซนิกที่ระยะต่างๆ มีลักษณะของกรอบ(Envelope) ที่คล้ายกันในทุก ๆ ระยะที่ทำกรวัดสัญญาณ ดังนั้นเราสามารถที่จะตรวจสอบคลื่นอุลตราโซนิกได้โดยการตรวจสอบจุด Peak ของสัญญาณแทนที่จะใช้เป็นวงจร Comparator แบบง่ายๆ เพราะถ้าเซ็ทให้ V_{ref} ต่ำมากจะไปติด Ground Noise แทนที่จะเจอพัลส์ลูกแรกอาจจะไปเจอพัลส์ของ Noise แทน แต่ถ้าเซ็ทให้ V_{ref} สูงขึ้น ถ้าวัดที่ระยะไกลๆ สัญญาณเข้ามาต่ำก็จะตรวจไม่เจอพัลส์ลูกแรก ซึ่งทั้ง 2 สาเหตุนี้ ล้วนแต่จะทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้ทั้งสิ้น
2. จากผลการวัดสัญญาณเอาท์พุทของวงจร AGC พบว่า ที่ระยะต่างๆกัน ขนาดของสัญญาณเอาท์พุทที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงขนาดของสัญญาณเอาท์พุทของวงจร AGC ที่ระยะต่างๆ

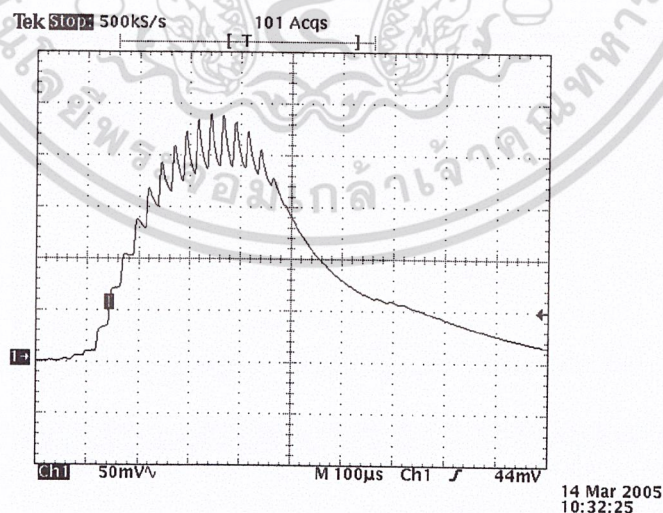
3. จากผลการวัดระยะทางพบว่าค่าระยะทางที่วัดได้เกิดการความผิดพลาดมาก ซึ่งคาดว่าสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการทำงานของวงจร Peak Detector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ปัญหาที่พบ

จากการทดลองตำแหน่งของตัวส่งที่คำนวณได้มีความผิดพลาดมาก เนื่องจากค่า DToF ที่วัดได้ผิดพลาด รุ่นพี่ที่ทำโครงการนี้เมื่อปีที่แล้วได้ใช้วงจร Comparator แบบง่ายๆ ในการตรวจสอบคลื่นอัลตราโซนิก แต่ค่า DToF ที่วัดได้มีความผิดพลาดมาก ดังนั้น ก่อนที่จะเริ่มทำโครงการนี้จึงได้ค้นหาเทคนิคการวัดค่า DToF ที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งมีนักวิจัยต่างชาติทำอยู่ แต่เมื่อติดต่อไปปรากฏว่าไม่ได้รับความร่วมมือ จึงได้คิดเทคนิคการวัดค่า DToF ขึ้นเอง โดยใช้การตรวจสอบจุด Peak ของสัญญาณ แต่จากการทดลองปรากฏว่าค่า DToF ที่วัดได้ผิดพลาดมาก ซึ่งจากการตรวจสอบการทำงานของวงจรมีสาเหตุดังนี้

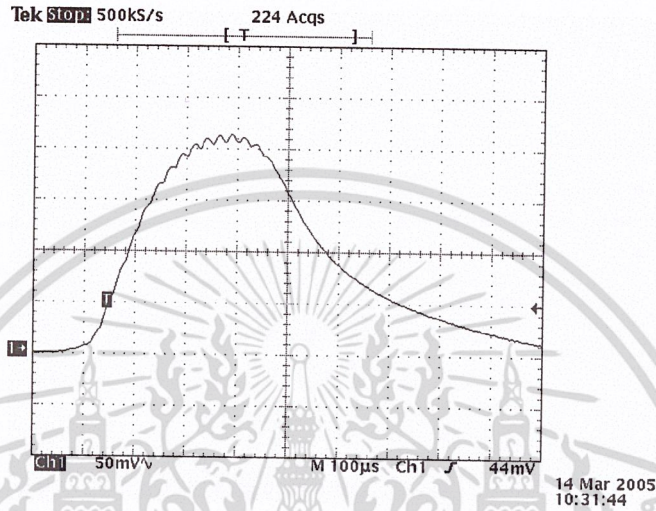
1. สภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ลม มีผลต่อลักษณะของคลื่นในการรับส่งสัญญาณ ทำให้ลักษณะของสัญญาณที่รับได้ผิดเพี้ยน ส่งผลให้การคำนวณหาระยะทางเกิดความผิดพลาด
2. จากวงจรการรับคลื่นอัลตราโซนิกในส่วนของวงจรป้อนกลับและวงจรเอาต์พุต ค่า R และ C ที่ใช้ขึ้นอยู่กับกรทดลอง จึงอาจทำให้สัญญาณที่ได้ผิดเพี้ยนไป ส่งผลต่อการคำนวณหาระยะทาง
3. วงจร Low Pass Filter ตรงจุด I/P ของ Peak Detector ตัดสัญญาณคลื่นพาห้ความถี่ 40 kHz ออกไม่หมดทำให้วงจร Comparator ของ Peak Detector ตรวจสอบจุด Peak ของสัญญาณผิดพลาด



รูปที่ 5.1 แสดงสัญญาณทางด้านเอาต์พุตของวงจร LPF

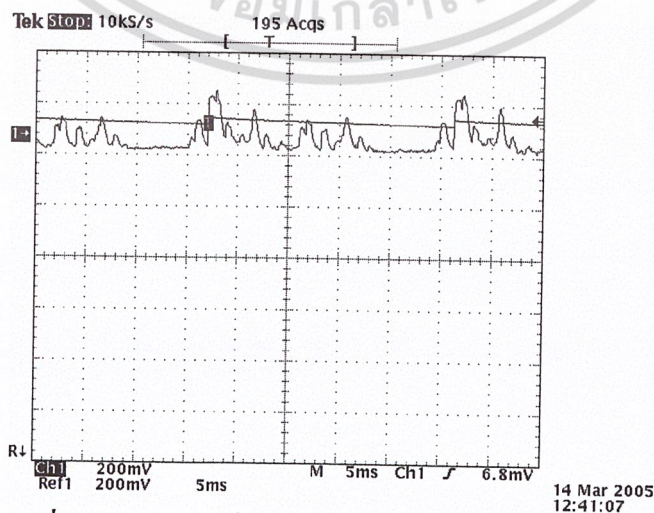
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.1 สังเกตเห็นว่าวงจร LPF ตัดสัญญาณความถี่ 40 kHz ออกไม่หมด ทำให้ไปรบกวนการทำงานของภาค Comparator ของวงจร Peak Detector ทำให้การตรวจสอบจุด Peak เกิดความผิดพลาดได้ ซึ่งแก้ไขโดยการเพิ่ม order ของวงจร LPF ซึ่งสัญญาณแสดงดังรูปที่ 5.2



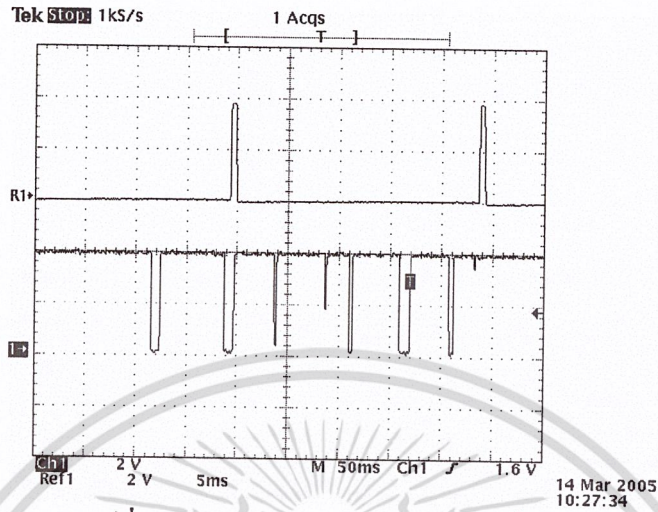
รูปที่ 5.2 แสดงสัญญาณทางด้านเอาต์พุตของวงจร LPF ที่เพิ่ม order ของวงจร LPF

4. สัญญาณอุลตราโซนิกที่รับได้มีสัญญาณรบกวน ทำให้เมื่อวางตัวส่งห่างจากตัวรับมากเกินไปหรือมุมระหว่างตัวส่งและตัวรับมากเกินไป จะทำให้ขนาดของสัญญาณที่รับได้มีขนาดเล็กจนใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน ดังแสดงในรูปที่ 5.3 และทำให้วงจร Peak Detector ตรวจสอบจุด Peak ของสัญญาณได้มากกว่า 1 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 5.4 และ 5.5 ทำให้มีผลกับการวัดค่า DToF ในครั้งต่อไปเกิดความผิดพลาด

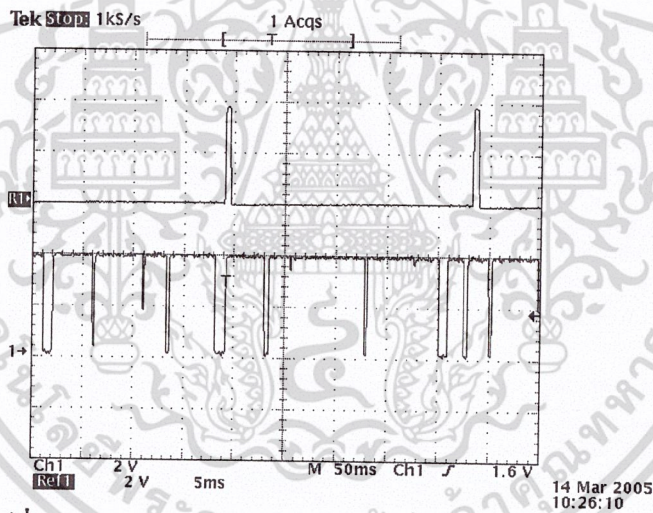


รูปที่ 5.3 แสดงรูปคลื่นที่รับได้เมื่อวางตัวส่งห่างจากตัวรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า หรือมุมระหว่างตัวส่งและตัวรับมากเกินไป
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 แสดงพัลส์ที่ออกมาจากวงจร Peak Detector เมื่อวางตัวส่งห่างเกินไป



รูปที่ 5.5 แสดงพัลส์ที่ออกมาจากวงจร Peak Detector เมื่อมุมระหว่างตัวส่งและตัวรับมากเกินไป

- ตำแหน่ง (x,y,z) ของตัวส่งได้จากการแก้ Matrix ดังนั้นถ้าค่า DToF's ที่วัดได้เกิดความผิดพลาดจะทำให้ตำแหน่งที่คำนวณได้เกิดความผิดพลาดด้วย โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของตำแหน่งขึ้นกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ DToF's จากการทดลองวัดค่าความผิดพลาดของ DToF's ได้ค่า % ความผิดพลาดสูงสุดเท่ากับ 64.95 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 แนวทางการแก้ไข

1. ในส่วนของวงจรป้อนกลับและวงจรเอาต์พุต เลือกใช้ค่า R และ C ที่เหมาะสม
2. ออกแบบวงจร LPF ให้ลดสัญญาณรบกวนและสัญญาณความถี่ 40 kHz ที่ปนกับสัญญาณอินพุตของวงจร Peak Detector ให้ดีขึ้น
3. ออกแบบวงจร Peak Detector ให้ทำงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. กฤษดา ใจเย็น และ ชัยวัฒน์ ลีมพรจิตรวีไล , “เรียนรู้และปฏิบัติการเชื่อมต่อกอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกผ่านพอร์ตขนาน” , บริษัท อินเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด กรุงเทพ
2. “เปิดโลก FPGA กับ WIZARD PLD-A01” บริษัท แอสทอรอน ลอจิก รีเสิร์ชแอนด์ดีเวลอปเมนต์
3. สัจจะ จรัสรุ่งรวิวรร , “คู่มือการเขียนโปรแกรม และใช้งาน Visual Basic6” , สำนักพิมพ์ อินโฟเพรส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมส่วนวิชาเวกเตอร์

Dim T(1 To 5) As Integer

Dim DX1 As Double, DX2 As Double, DX3 As Double, DX4 As Double

Dim DY1 As Double, DY2 As Double, DY3 As Double, DY4 As Double

Dim DZ1 As Double, DZ2 As Double, DZ3 As Double, DZ4 As Double

Dim DR1 As Double, DR2 As Double, DR3 As Double, DR4 As Double

Dim Data1 As Double, Data2 As Double, Data3 As Double, Data4 As Double

Dim TotalDet As Double

Dim Data11 As Double, Data21 As Double, Data31 As Double, Data41 As Double

Dim Data12 As Double, Data22 As Double, Data32 As Double, Data42 As Double

Dim Data13 As Double, Data23 As Double, Data33 As Double, Data43 As Double

Dim Data14 As Double, Data24 As Double, Data34 As Double, Data44 As Double

Dim C11 As Double, C21 As Double, C31 As Double, C41 As Double

Dim C12 As Double, C22 As Double, C32 As Double, C42 As Double

Dim C13 As Double, C23 As Double, C33 As Double, C43 As Double

Dim C14 As Double, C24 As Double, C34 As Double, C44 As Double

Dim Term1 As Double, Term2 As Double, Term3 As Double, Term4 As Double

Dim DX As Double, DY As Double, DZ As Double, DR As Double

Dim statusport1 As String

Dim dataport1 As String

Function FindTotal(N As Double, O As Double, P As Double, Q As Double, R As Double, S As Double, T As Double, U As Double) As Double

FindTotal = (N * R) + (O * S) + (P * T) + (Q * U)

End Function

Function FindTerm(J As Double, K As Double, L As Double, M As Double) As Double

FindTerm = ((J ^ 2) + (K ^ 2) + (L ^ 2) - (M ^ 2)) / 2

End Function

Function FindSubDet(A As Double, B As Double, C As Double, D As Double, E As Double, F As Double, G As Double, H As Double, I As Double) As Double

FindSubDet = (A * E * I) + (B * F * G) + (C * D * H) - (G * E * C) - (H * F * A) - (I * D * B)

End Function

Public Function FindT(intA, intB, intC As Integer)

Dim Data1, Data2, Data3 As Integer

Dim Rult1, Rult2, Rult3 As Integer

Dim rult As Integer

Data1 = intA \ 8

Data2 = intB \ 8

Data3 = intC \ 8

Rult1 = Data1

Rult2 = Data2 * 32

Rult3 = Data3 * 1024

rult = Rult1 + Rult2 + Rult3

FindT = rult

End Function

Public Function Compute(latchnum As Integer) As Integer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Dim N As Integer
Dim intA, intB, intC As Integer
Dim find As Integer
dataport1 = &H378
statusport1 = &H379
N = latchnum
While latchnum < (N + 3)
DoEvents
If latchnum = N Then
Out Val(dataport1), latchnum
intA = Str(Inp(Val(statusport1)))
End If
If latchnum = N + 1 Then
Out Val(dataport1), latchnum
intB = Str(Inp(Val(statusport1)))
End If
If latchnum = N + 2 Then
Out Val(dataport1), latchnum
intC = Str(Inp(Val(statusport1)))
End If
latchnum = latchnum + 1
Wend
find = FindT(intA, intB, intC)
If N = 1 Then
T(1) = find
Compute = T(1)
End If
If N = 4 Then
T(2) = find
Compute = T(2)
End If
If N = 7 Then
T(3) = find
Compute = T(3)
End If
If N = 10 Then
T(4) = find
Compute = T(4)
End If
If N = 13 Then
T(5) = find
Compute = T(5)
End If
End Function
Private Sub cmdRun_Click()
Dim M As Integer
Dim K As Integer
Dim intA, intB, intC As Integer
Dim Count1, Count2, Count3, Count4, Count5 As Integer
Dim CountR0, CountR1, CountR2, CountR3, CountR4 As Integer

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Dim data As Integer
Dim latchnum As Integer
Dim R0, R1, R2, R3, R4 As Double
Dim Finish, OverFlow As Integer

```

```

Const ClockTime = 0.2 / 1000000
Const Velocity = 331 + (0.607 * 25)

```

```

dataport1 = &H378
statusport1 = &H379

```

```

Out Val(dataport1), 16      'Reset FPGA

```

```

While Finish <> 2

```

```

  DoEvents

```

```

  Out Val(dataport1), 0      'Latch 0 Enable , Read Finish & OverFlow Status

```

```

  Finish = Inp(Val(statusport1)) \ 8

```

```

  OverFlow = Inp(Val(statusport1)) \ 8

```

```

  If OverFlow = 1 Then

```

```

    Out Val(dataport1), 16    'Reset FPGA

```

```

    txtOverFlow.Text = "OverFlow"

```

```

  End If

```

```

Wend

```

```

If Finish = 2 Then      'Program Run

```

```

  M = 1

```

```

  latchnum = 1

```

```

  While M < 6

```

```

    DoEvents

```

```

    Select Case M

```

```

      Case Is = 1: latchnum = 1

```

```

      Case Is = 2: latchnum = 4

```

```

      Case Is = 3: latchnum = 7

```

```

      Case Is = 4: latchnum = 10

```

```

      Case Is = 5: latchnum = 13

```

```

    End Select

```

```

    M = M + 1

```

```

    data = Compute(latchnum)

```

```

  Wend

```

```

  Count1 = T(1)

```

```

  Count2 = T(2)

```

```

  Count3 = T(3)

```

```

  Count4 = T(4)

```

```

  Count5 = T(5)

```

```

  CountR0 = Count1 - Count1

```

```

  CountR1 = Count2 - Count1

```

```

  CountR2 = Count3 - Count1

```

```

  CountR3 = Count4 - Count1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CountR4 = Count5 - Count1

txtR0.Text = CountR0 * 0.2

txtR1.Text = CountR1 * 0.2

txtR2.Text = CountR2 * 0.2

txtR3.Text = CountR3 * 0.2

txtR4.Text = CountR4 * 0.2

Text1.Text = CountR1

Text2.Text = CountR2

Text3.Text = CountR3

Text4.Text = CountR4

R0 = CountR0 * ClockTime * Velocity

R1 = CountR1 * ClockTime * Velocity

R2 = CountR2 * ClockTime * Velocity

R3 = CountR3 * ClockTime * Velocity

R4 = CountR4 * ClockTime * Velocity

txtR11.Text = R1

txtR22.Text = R2

txtR33.Text = R3

txtR44.Text = R4

Matrix Calculation

DX1 = CDbI(txtX1.Text)

DX2 = CDbI(txtX2.Text)

DX3 = CDbI(txtX3.Text)

DX4 = CDbI(txtX4.Text)

DY1 = CDbI(txtY1.Text)

DY2 = CDbI(txtY2.Text)

DY3 = CDbI(txtY3.Text)

DY4 = CDbI(txtY4.Text)

DZ1 = CDbI(txtZ1.Text)

DZ2 = CDbI(txtZ2.Text)

DZ3 = CDbI(txtZ3.Text)

DZ4 = CDbI(txtZ4.Text)

DR1 = R1

DR2 = R2

DR3 = R3

DR4 = R4

Data1 = FindSubDet(DX2, DY2, DZ2, DX3, DY3, DZ3, DX4, DY4, DZ4)

Data2 = FindSubDet(DX1, DY1, DZ1, DX3, DY3, DZ3, DX4, DY4, DZ4)

Data3 = FindSubDet(DX1, DY1, DZ1, DX2, DY2, DZ2, DX4, DY4, DZ4)

Data4 = FindSubDet(DX1, DY1, DZ1, DX2, DY2, DZ2, DX3, DY3, DZ3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูยัดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{TotalDet} = (-\text{DR1} * \text{Data1}) + (\text{DR2} * \text{Data2}) + (-\text{DR3} * \text{Data3}) + (\text{DR4} * \text{Data4})$$

Data11 = FindSubDet(DY2, DZ2, DR2, DY3, DZ3, DR3, DY4, DZ4, DR4)
 Data12 = FindSubDet(DX2, DZ2, DR2, DX3, DZ3, DR3, DX4, DZ4, DR4)
 Data13 = FindSubDet(DX2, DY2, DR2, DX3, DY3, DR3, DX4, DY4, DR4)
 Data14 = FindSubDet(DX2, DY2, DZ2, DX3, DY3, DZ3, DX4, DY4, DZ4)
 Data21 = FindSubDet(DY1, DZ1, DR1, DY3, DZ3, DR3, DY4, DZ4, DR4)
 Data22 = FindSubDet(DX1, DZ1, DR1, DX3, DZ3, DR3, DX4, DZ4, DR4)
 Data23 = FindSubDet(DX1, DY1, DR1, DX3, DY3, DR3, DX4, DY4, DR4)
 Data24 = FindSubDet(DX1, DY1, DZ1, DX3, DY3, DZ3, DX4, DY4, DZ4)
 Data31 = FindSubDet(DY1, DZ1, DR1, DY2, DZ2, DR2, DY4, DZ4, DR4)
 Data32 = FindSubDet(DX1, DZ1, DR1, DX2, DZ2, DR2, DX4, DZ4, DR4)
 Data33 = FindSubDet(DX1, DY1, DR1, DX2, DY2, DR2, DX4, DY4, DR4)
 Data34 = FindSubDet(DX1, DY1, DZ1, DX2, DY2, DZ2, DX4, DY4, DZ4)
 Data41 = FindSubDet(DY1, DZ1, DR1, DY2, DZ2, DR2, DY3, DZ3, DR3)
 Data42 = FindSubDet(DX1, DZ1, DR1, DX2, DZ2, DR2, DX3, DZ3, DR3)
 Data43 = FindSubDet(DX1, DY1, DR1, DX2, DY2, DR2, DX3, DY3, DR3)
 Data44 = FindSubDet(DX1, DY1, DZ1, DX2, DY2, DZ2, DX3, DY3, DZ3)

C11 = (((-1) ^ (1 + 1)) * Data11) / TotalDet
 C12 = (((-1) ^ (1 + 2)) * Data12) / TotalDet
 C13 = (((-1) ^ (1 + 3)) * Data13) / TotalDet
 C14 = (((-1) ^ (1 + 4)) * Data14) / TotalDet
 C21 = (((-1) ^ (2 + 1)) * Data21) / TotalDet
 C22 = (((-1) ^ (2 + 2)) * Data22) / TotalDet
 C23 = (((-1) ^ (2 + 3)) * Data23) / TotalDet
 C24 = (((-1) ^ (2 + 4)) * Data24) / TotalDet
 C31 = (((-1) ^ (3 + 1)) * Data31) / TotalDet
 C32 = (((-1) ^ (3 + 2)) * Data32) / TotalDet
 C33 = (((-1) ^ (3 + 3)) * Data33) / TotalDet
 C34 = (((-1) ^ (3 + 4)) * Data34) / TotalDet
 C41 = (((-1) ^ (4 + 1)) * Data41) / TotalDet
 C42 = (((-1) ^ (4 + 2)) * Data42) / TotalDet
 C43 = (((-1) ^ (4 + 3)) * Data43) / TotalDet
 C44 = (((-1) ^ (4 + 4)) * Data44) / TotalDet

Term1 = FindTerm(DX1, DY1, DZ1, DR1)
 Term2 = FindTerm(DX2, DY2, DZ2, DR2)
 Term3 = FindTerm(DX3, DY3, DZ3, DR3)
 Term4 = FindTerm(DX4, DY4, DZ4, DR4)

DX = FindTotal(C11, C21, C31, C41, Term1, Term2, Term3, Term4)
 DY = FindTotal(C12, C22, C32, C42, Term1, Term2, Term3, Term4)
 DZ = FindTotal(C13, C23, C33, C43, Term1, Term2, Term3, Term4)
 DR = FindTotal(C14, C24, C34, C44, Term1, Term2, Term3, Term4)

txtX.Text = CStr(DX)
 txtY.Text = CStr(DY)
 txtZ.Text = CStr(DZ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
txtR.Text = CStr(DR)
txtFinish.Text = Finish
txtOverFlow.Text = "No OverFlow"
'End Matrix Calculation
```

```
End If
```

```
End Sub
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้