

**ชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สาย**



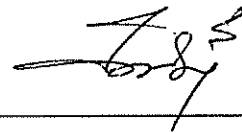
โดย

นางสาวสุพินท์ แก่งคำ รหัสประจำตัว B4905547  
นายมัชวาน ปรีพูล รหัสประจำตัว B4918288

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2545  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ประจำภาคการศึกษาที่ 3 ปีการศึกษา 2552

## ชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สาย

คณะกรรมการสอบ โครงการงาน



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อูฮารสกุล)  
กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงาน



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รอ. ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์)  
กรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ กระจงคนอก)  
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำรายงานโครงการฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม วิชา 427499 โครงการงานวิศวกรรมโทรคมนาคม และวิชา 427494 โครงการศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม ประจำปีการศึกษา 2552

โครงการ	ชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สาย
จัดทำโดย	นางสาวสุพินท์ แก้วคำ นายมัชวาน ปรีพูล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. มนต์ทิพย์ภา อุหารสกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
ภาคการศึกษาที่	3/2552

---

### บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการหาทิศทางของวัตถุกำลังได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบันเนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ในหลายระบบไม่ว่าจะเป็นในระบบสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่หรือแม้แต่ในระบบนิเวศน์วิทยา โครงการนี้จึงได้นำเสนอการสร้างชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลเพื่อสามารถนำไปใช้กับตัวหาทิศทางแบบไร้สาย โดยตัวต้นแบบของชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สายที่สร้างขึ้นจะประกอบไปด้วย วงจรเลื่อนเฟส วงจรขยายสัญญาณ วงจรรองความถี่ต่ำ วงจรยกระดับสัญญาณ และตัวประมวลผลที่ใช้ในการแสดงสัญญาณที่เข้ามา

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือในด้านวิชาการ โดยให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล รวมถึงให้ความช่วยเหลือในการให้แนวคิด การดูแลเอาใจใส่ติดตามผลงาน ซึ่งนะข้อผูกพร่องที่ข้าพเจ้ามองข้าม ตลอดจนช่วยตรวจทานและแก้ไขโครงการเล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องอื่นๆดังนี้

- พี่นักศึกษาปริญญาโททุกท่านที่คอยแนะนำ และให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์
- เพื่อนนักศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคน สำหรับความช่วยเหลือที่ดีทุกด้านตลอดจน

กำลังใจที่มอบให้แก่คณะผู้จัดทำตลอดมา

ท้ายนี้คุณความดีอันใดที่เกิดจาก โครงการฉบับนี้ ขอมอบแต่บิดา มารดา และพี่ๆของข้าพเจ้าผู้ที่คอยห่วงใย ให้โอกาส ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนทางการศึกษามาโดยตลอด



นางสาวสุพินท์ แก้วคำ

นายมัฆวาน ปรีพูล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญภาพ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงาน	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ	4
2.2 การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล	4
2.3 การมอดูเลตแบบ AM	5
2.4 Up/Down Converter	10
2.5 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (Lowpass Filter)	12
2.6 วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier)	30
2.7 วงจรระดับสัญญาณ (Clampers Circuit)	37
2.8 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	38
2.9 สรุป	48
บทที่ 3 ชุดอุปกรณ์ต้นแบบ	
3.1 บทนำ	49

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 อุปกรณ์ผสมสัญญาณ (Mixer)	49
3.3 เครื่องแยกสัญญาณ (Power Splitter/Combiner)	56
3.4 วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier)	60
3.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	62
3.6 วงจรยกระดับสัญญาณ	64
3.7 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	65
3.8 Matlab	68
3.9 สรุป	71
<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบ</b>	
4.1 บทนำ	72
4.2 การมอดูเลตสัญญาณ	72
4.3 เครื่องแยกสัญญาณ (Power Splitter/Combiner)	73
4.3 วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier)	74
4.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	76
4.6 วงจรยกระดับสัญญาณ (Clampers Circuit)	80
4.7 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	81
4.8 โปรแกรม Matlab	81
4.9 สรุปผลการทดสอบ	97
4.10 ชุดอุปกรณ์ต้นแบบทั้งหมด	98
4.11 สรุป	98
<b>บทที่ 5 ข้อสรุปโครงการ</b>	
5.1 บทนำ	99

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ปัญหาที่พบในระหว่างการทำโครงการและวิธีแก้ไขปัญหา	99
5.3 ข้อเสนอแนะ	100
5.4 แนวทางการพัฒนาต่อไป	100
5.5 บทสรุป	100
ประวัติผู้เขียน	102
บรรณานุกรม	103



## สารบัญภาพ

	หน้า	
รูปที่ 1.1	ผังโคแอสเทอเรชันของชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สาย	1
รูปที่ 2.1	แสดงกรอบคลื่นของสัญญาณ AM	7
รูปที่ 2.2	แสดงสัญญาณพาหะ	7
รูปที่ 2.3	แสดงสัญญาณ AM	7
รูปที่ 2.4	แสดงสเปกตรัมของสัญญาณข่าวสารหรือข้อมูล (บน) และสเปกตรัมของสัญญาณ AM (ล่าง)	8
รูปที่ 2.5	แสดงวงจรของการผสมสัญญาณระหว่าง RF และ LO	10
รูปที่ 2.6	แสดงวงจร Super heterodyne radio	11
รูปที่ 2.7	ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ในอุดมคติ	13
รูปที่ 2.8	ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของวงจรกรอง FIR และ IIR	14
รูปที่ 2.9	ผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองอุดมคติ	14
รูปที่ 2.10	คุณลักษณะเฉพาะของผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองแบบ FIR	17
รูปที่ 2.11	ตัวอย่างของไฟล์ FIR_BPF.m	19
รูปที่ 2.12	ลักษณะของสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ออกแบบ	20
รูปที่ 2.13	ลักษณะของ Step Response ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน	21
รูปที่ 2.14	ลักษณะของผลตอบสนองความถี่และทางเฟสของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ N=600	21
รูปที่ 2.15	ลักษณะของ Step Response ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Amplitude กับ Time ที่ N=400	22
รูปที่ 2.16	ลักษณะของผลตอบสนองความถี่และทางเฟสของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ N=400	22



## สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.17 ลักษณะของ Step Response ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Amplitude กับ Time ที่ N=294	23
รูปที่ 2.18 ลักษณะของผลตอบสนองความถี่และทางเฟสของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ N=294	23
รูปที่ 2.19 แสดงผลตอบสนองความถี่ของวงจรความถี่ต่ำผ่าน	24
รูปที่ 2.20 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	25
รูปที่ 2.21 โครงสร้างของไมโครสตริป	29
รูปที่ 2.22 แบบรูปของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในโครงสร้างไมโครสตริป	29
รูปที่ 2.23 บล็อกไดอะแกรมการต่อแบบแคสเคด 3 ภาค	31
รูปที่ 2.24 บล็อกไดอะแกรมการต่อวงจรขยายสัญญาณ	31
รูปที่ 2.25 การขยายแบบกลับเฟส	32
รูปที่ 2.26 การขยายแบบไม่กลับเฟส	33
รูปที่ 2.27 วงจรตามแรงดันหรือบัฟเฟอร์ใช้แยกวงจรแต่ละชั้นออกจากกัน	34
รูปที่ 2.28 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ	35
รูปที่ 2.29 การขยายแบบเปรียบเทียบสัญญาณ	36
รูปที่ 2.30 วงจรยกระดับแรงดันลบ	38
รูปที่ 2.31 วงจรยกระดับแรงดันบวก	38
รูปที่ 2.32 แสดงโครงสร้างของบอร์ด ET-AVR STAMP ATmega64/128	40
รูปที่ 2.33 แสดงการจัดเรียงขา	40
รูปที่ 2.34 แสดงโครงสร้างของ ET-AVR ISP	42
รูปที่ 2.35 แสดงการจัดเรียงขา	42

## สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.36 แสดงการเลือก Jumper และการต่อสาย Downloadของ ET-CAP10P เพื่อใช้กับ AVR	43
รูปที่ 2.37 แสดงการต่อ ET-AVR ISP เข้ากับ ET-AVR STAMP ATmega64/128 โดยการต่อบอร์ดทั้งสองเข้าด้วยกันนั้นจะให้สังเกตที่เครื่องหมายสามเหลี่ยมจะต่อดตรงกัน	44
รูปที่ 2.38 แสดงการกำหนดค่า Setup	45
รูปที่ 2.39 แสดงการใช้โปรแกรม	46
รูปที่ 2.40 แสดงการใช้โปรแกรม	46
รูปที่ 2.41 แสดงการเลือกกำหนด Fuse Bit เพื่อใช้กับ CPU เบอร์ ATmega64	47
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ผสมสัญญาณ (Mixer)	49
รูปที่ 3.2 แผนภาพทางไฟฟ้า	49
รูปที่ 3.3 แผนภาพโครงสร้าง	50
รูปที่ 3.4 ขนาดของ Mixer	50
รูปที่ 3.5 ตารางแสดงข้อกำหนดทางไฟฟ้า	51
รูปที่ 3.6 ตารางแสดงประสิทธิภาพของ Mixer	52
รูปที่ 3.7 กราฟแสดง Conversion Loss	52
รูปที่ 3.8 กราฟแสดง Conversion Loss Variable IFความสัมพันธ์ระหว่าง Conversion Loss(dB) และ IF Frequency(MHz)	53
รูปที่ 3.9 กราฟแสดง L-R Isolation ความสัมพันธ์ระหว่าง Isolation(dB) และ Frequency(MHz)	53
รูปที่ 3.10 กราฟแสดง L-I Isolationความสัมพันธ์ระหว่าง Isolation(dB) และ Frequency(MHz)	54
รูปที่ 3.11 กราฟแสดง RF VSWRความสัมพันธ์ระหว่าง VSWR และ Frequency(MHz)	54
รูปที่ 3.12 กราฟแสดง LO VSWRความสัมพันธ์ระหว่าง VSWR และ Frequency(MHz)	55

## สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.13 กราฟแสดง IF VSWR ความสัมพันธ์ระหว่าง VSWR และ IF Frequency(MHz)	55
รูปที่ 3.14 กราฟแสดง IP3 ความสัมพันธ์ระหว่าง IP3(dBm) และ Frequency(MHz)	56
รูปที่ 3.15 เครื่องแยกสัญญาณ (Power Splitter/Combiner)	56
รูปที่ 3.16 ภาพแสดงแผนภาพทางไฟฟ้า	56
รูปที่ 3.17 ภาพแสดงแบบโครงสร้างเครื่องแยกสัญญาณ (Power Splitter/Combiner)	57
รูปที่ 3.18 ภาพแสดงขนาดเครื่องแยกสัญญาณ (Power Splitter/Combiner)	57
รูปที่ 3.19 ภาพแสดงข้อกำหนดทางไฟฟ้า	58
รูปที่ 3.20 ภาพแสดงประสิทธิภาพของข้อมูล	58
รูปที่ 3.21 กราฟแสดง Insertion Loss ความสัมพันธ์ระหว่าง Insertion Loss (dB) และ Frequency(MHz)	59
รูปที่ 3.22 กราฟแสดง Isolation ความสัมพันธ์ระหว่าง Isolation(dB) และ Frequency(MHz)	59
รูปที่ 3.23 กราฟแสดง VSWR ความสัมพันธ์ระหว่าง VSWR และ Frequency(MHz)	60
รูปที่ 3.24 แสดงขาของ op-amp เบอร์ LM741	61
รูปที่ 3.25 แสดง schematic diagram ของวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส	61
รูปที่ 3.26 แสดงการต่อวงจรขยายสัญญาณ	62
รูปที่ 3.27 แสดง schematic diagram ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	62
รูปที่ 3.28 การขยายแบบไม่กลับเฟส	64
รูปที่ 3.29 แสดงวงจรระดับสัญญาณ	64
รูปที่ 3.30 แสดง Pin ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega 128	67
รูปที่ 3.31 แสดงการต่อวงจร MAX 232	68
รูปที่ 4.1 แสดงภาพชุดอุปกรณ์การมอดูเลตสัญญาณ	72

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.2 แสดงภาพการมอดูเลตสัญญาณ	73
รูปที่ 4.3 แสดงวงจรแยกสัญญาณ	73
รูปที่ 4.4 แสดงกราฟขยายสัญญาณที่ความถี่ 200 Hz $V_{p-p}$ 0.3V	74
รูปที่ 4.5 แสดงกราฟขยายสัญญาณที่ความถี่ 200 Hz $V_{p-p}$ 0.5V	74
รูปที่ 4.6 แสดงกราฟขยายสัญญาณที่ความถี่ 200 Hz $V_{p-p}$ 0.8V	75
รูปที่ 4.7 แสดงกราฟขยายสัญญาณที่ความถี่ 200 Hz $V_{p-p}$ 1V	75
รูปที่ 4.8 แสดงผลตอบสนองความถี่ของวงจรความถี่ต่ำผ่านที่ 240 Hz	78
รูปที่ 4.9 แสดงผลตอบสนองความถี่ของวงจรความถี่ต่ำผ่านจากการคำนวณ	79
รูปที่ 4.10 แสดงภาพการกรองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่ 200 Hz $V_{p-p}$ 170mV	80
รูปที่ 4.11 แสดงการรบกวนสัญญาณ	80
รูปที่ 4.12 ภาพแสดงพอร์คที่ 1 ความถี่ที่ 100 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	81
รูปที่ 4.13 ภาพแสดงพอร์คที่ 2 ความถี่ที่ 100 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	82
รูปที่ 4.14 ภาพแสดงพอร์คที่ 3 ความถี่ที่ 100 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	82
รูปที่ 4.15 ภาพแสดงพอร์คที่ 4 ความถี่ที่ 100 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	83
รูปที่ 4.16 ภาพแสดงพอร์คที่ 1 ความถี่ที่ 120 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	83
รูปที่ 4.17 ภาพแสดงพอร์คที่ 2 ความถี่ที่ 120 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	84
รูปที่ 4.18 ภาพแสดงพอร์คที่ 3 ความถี่ที่ 120 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	84
รูปที่ 4.19 ภาพแสดงพอร์คที่ 4 ความถี่ที่ 120 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	85
รูปที่ 4.20 ภาพแสดงพอร์คที่ 1 ความถี่ที่ 125 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	85
รูปที่ 4.21 ภาพแสดงพอร์คที่ 2 ความถี่ที่ 125 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	86
รูปที่ 4.22 ภาพแสดงพอร์คที่ 3 ความถี่ที่ 125 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	86
รูปที่ 4.23 ภาพแสดงพอร์คที่ 4 ความถี่ที่ 125 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	87
รูปที่ 4.24 ภาพแสดงพอร์คที่ 1 ความถี่ที่ 150 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	87
รูปที่ 4.25 ภาพแสดงพอร์คที่ 2 ความถี่ที่ 150 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	88
รูปที่ 4.26 ภาพแสดงพอร์คที่ 3 ความถี่ที่ 150 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	88

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.27 ภาพแสดงพอร์คที่ 4 ความถี่ที่ 150 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	89
รูปที่ 4.28 ภาพแสดงพอร์คที่ 1 ความถี่ที่ 200 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	89
รูปที่ 4.29 ภาพแสดงพอร์คที่ 2 ความถี่ที่ 200 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	90
รูปที่ 4.30 ภาพแสดงพอร์คที่ 3 ความถี่ที่ 200 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	90
รูปที่ 4.31 ภาพแสดงพอร์คที่ 4 ความถี่ที่ 200 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	91
รูปที่ 4.32 ภาพแสดงพอร์คที่ 1 ความถี่ที่ 250 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	91
รูปที่ 4.33 ภาพแสดงพอร์คที่ 2 ความถี่ที่ 250 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	92
รูปที่ 4.34 ภาพแสดงพอร์คที่ 3 ความถี่ที่ 250 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	92
รูปที่ 4.35 ภาพแสดงพอร์คที่ 4 ความถี่ที่ 250 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	93
รูปที่ 4.36 ภาพแสดงพอร์คที่ 1 ความถี่ที่ 300 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	93
รูปที่ 4.37 ภาพแสดงพอร์คที่ 2 ความถี่ที่ 300 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	94
รูปที่ 4.38 ภาพแสดงพอร์คที่ 3 ความถี่ที่ 300 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	94
รูปที่ 4.39 ภาพแสดงพอร์คที่ 4 ความถี่ที่ 300 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	95
รูปที่ 4.40 ภาพแสดงพอร์คที่ 1 ความถี่ที่ 500 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	95
รูปที่ 4.41 ภาพแสดงพอร์คที่ 2 ความถี่ที่ 500 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	96
รูปที่ 4.42 ภาพแสดงพอร์คที่ 3 ความถี่ที่ 500 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	96
รูปที่ 4.43 ภาพแสดงพอร์คที่ 4 ความถี่ที่ 500 Hz $V_{p-p}$ 2.5 V	97
รูปที่ 4.44 แสดงรูปอุปกรณ์ทั้งหมด	98

## สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	ผลตอบสนองอิมพีแดนซ์ของตัวกรองอุดมคติแบบต่างๆ	16
ตารางที่ 2.2	พารามิเตอร์ที่สำคัญๆ ของหน้าต่างแบบต่างๆ	17
ตารางที่ 4.1	แสดงผลการทดสอบของวงจรขยายสัญญาณ	76
ตารางที่ 4.2	แสดงผลการทดสอบของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ 240 Hz	76



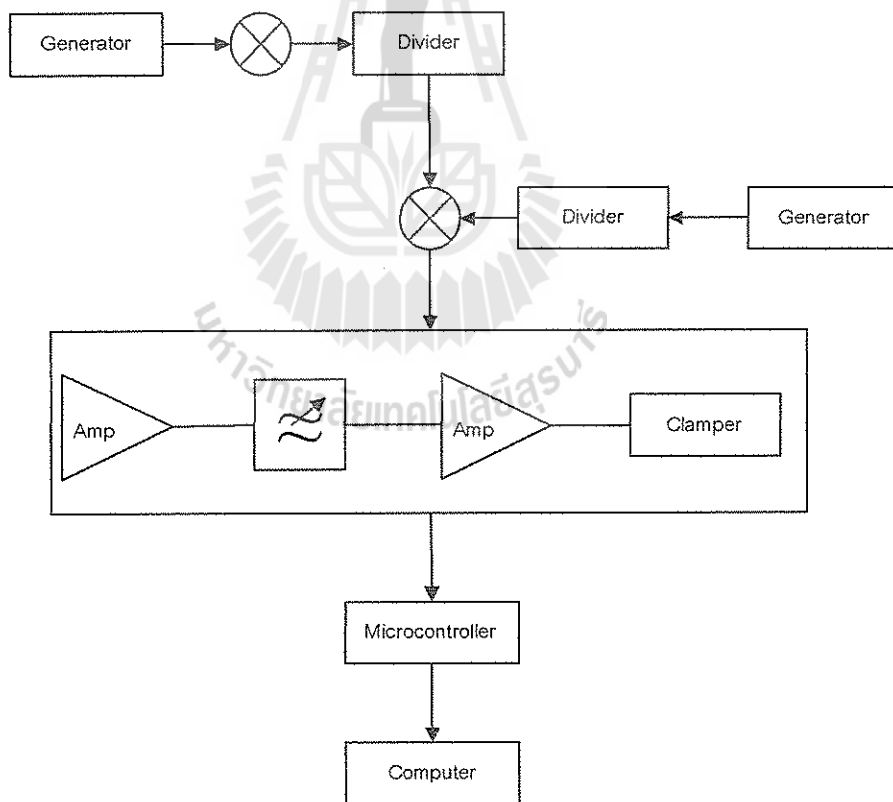
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 หลักการและเหตุผล

เทคโนโลยีการหาทิศทางของวัตถุกำลังได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบันเนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ในหลายระบบ เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ กล่าวคือเมื่อสถานีฐานรู้ทิศทางของผู้ใช้บริการ สถานีฐานจะสามารถก่อรูปลำคลื่นตรงไปผู้ให้บริการอย่างเฉพาะเจาะจง ซึ่งการกระทำดังกล่าวก่อให้เกิดการเพิ่มความจุรวมถึงประสิทธิภาพของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือแม้แต่ในระบบนิเวศน์วิทยาที่มีการติดตามสัตว์เพื่อสำรวจการเจริญเติบโตและความอุดมสมบูรณ์ของธรรมชาติ

แต่เนื่องจากตัวหาทิศทางของวัตถุแบบไร้สายส่วนมากที่มีอยู่ในปัจจุบันเป็นแบบระบบดิจิทัล ซึ่งมีราคาที่สูงมากจึงอยากสร้างขึ้นมาใช้ด้วยตัวเอง ดังนั้น โครงการชิ้นนี้จึงสนใจที่จะสร้างชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลเพื่อสามารถนำไปใช้กับตัวหาทิศทางแบบไร้สายดังที่แสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ฟังก์ชันของชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สาย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางของวัตถุแบบไร้สาย

## 1.3 ขอบเขตการทำงาน

1. ศึกษากระบวนการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล
2. ศึกษาการทำงานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์
3. ศึกษาการทำงานของภาครับเพื่อใช้ในการออกแบบส่วน RF Circuit
4. ศึกษาโปรแกรม Matlab 7.0 เพื่อใช้ในการแสดงสัญญาณที่เข้ามา
5. เขียนโปรแกรมส่งสัญญาณอินพุตเข้าไปที่เครื่องคอมพิวเตอร์และโปรแกรมประมวลผลของสัญญาณ
6. สร้างอุปกรณ์ต้นแบบและทดสอบเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์

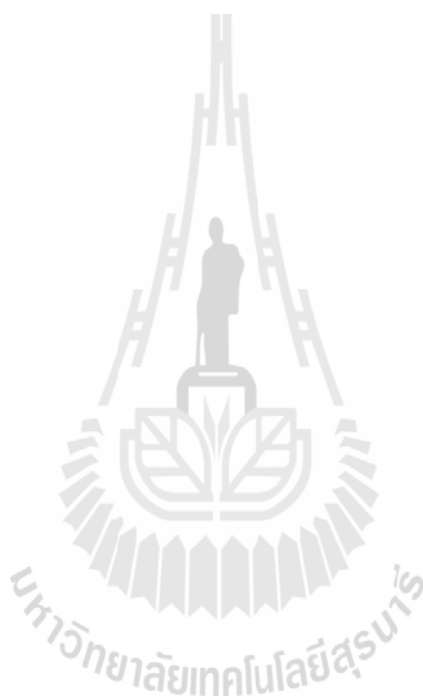
## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษากระบวนการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล
2. ศึกษาการทำงานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์
3. ศึกษาการทำงานของภาครับเพื่อใช้ในการออกแบบส่วน RF Circuit
4. ออกแบบส่วน RF Circuit ( วงจรขยายสัญญาณ , วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน , วงจรยกระดับสัญญาณ )
5. ศึกษาโปรแกรม Matlab 7.0 เพื่อใช้ในการแสดงผลของสัญญาณที่เข้ามา
6. เขียนโปรแกรมส่งสัญญาณอินพุตเข้าไปที่เครื่องคอมพิวเตอร์และโปรแกรมแสดงผลของสัญญาณ
7. สร้างอุปกรณ์ต้นแบบตามที่ออกแบบไว้
8. ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ต้นแบบ
9. สรุปผลการทดสอบและเขียนรายงาน
10. นำเสนอโครงการ



### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สาย เพื่อช่วยในการแสดงสัญญาณที่ได้จาก Generator
2. สามารถทราบคุณลักษณะของชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สาย
3. สามารถเข้าใจในทักษะการสร้างและการวัดทดสอบเพื่อหาว่ามีสัญญาณออกมาจริง
4. สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาในภาคทฤษฎีของวิชาต่างๆที่ได้จากการศึกษามาปฏิบัติและประยุกต์ใช้ได้จริง



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ในการนำเสนอโครงสร้างของภาครับสัญญาณนั้น อุปกรณ์ต้นแบบของชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลจะใช้หลักการที่คล้ายคลึงกับ โครงสร้างภาครับสัญญาณของดาวเทียม โดยภายในอุปกรณ์ต้นแบบนั้นจะประกอบด้วย การมอดูเลตสัญญาณ วงจรขยายสัญญาณ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และวงจรระดับสัญญาณ จากนั้นจะทำการส่งสัญญาณเข้าบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผลสัญญาณ ซึ่งในบทนี้เราจะได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐานขององค์ประกอบอุปกรณ์ต้นแบบชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สาย

#### 2.2 การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

##### 2.2.1 Analog Computer

สัญญาณอนาลอกคือ สัญญาณข้อมูลแบบต่อเนื่อง (Continuous Data) มีขนาดของสัญญาณไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณแบบค่อยเป็นค่อยไปแปรผันตามเวลา เป็นสัญญาณที่มนุษย์สามารถสัมผัสได้ เช่น แรงดันของน้ำ

##### 2.2.2 Digital Computer

สัญญาณดิจิทัล คือ สัญญาณข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Data) มีขนาดของสัญญาณคงที่ การเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณเป็นแบบทันที ทันใด ไม่แปรผันตามเวลา เป็นสัญญาณที่มนุษย์ไม่สามารถสัมผัสได้ เช่น สัญญาณไฟฟ้า

**Analog to Digital Converter (A/D)** ทำหน้าที่แปลงสัญญาณข้อมูลที่มีมนุษย์รับรู้ สัมผัสได้ เป็นข้อมูลทางไฟฟ้า เพื่อป้อนเข้าสู่การประมวลผล จึงเป็นขบวนการหนึ่งของการรับข้อมูล (Input Unit) เป็นกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ ที่สัญญาณแปรผันต่อเนื่อง (analog) ได้รับการแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล โดยไม่มีการลบข้อมูลสำคัญผลลัพธ์ของ ADC มีลักษณะตรงข้าม คือ กำหนดระดับหรือสถานะ ตัวเลขของสถานะมักจะเป็นการยกกำลังของ 2 คือ 2, 4, 8, 16 เป็นต้น สัญญาณดิจิทัลพื้นฐานมี 2 สถานะและเรียกว่า binary ตัวเลขทั้งหมดสามารถแสดงในรูปของไบนารี ในฐานะข้อความของ หนึ่งและศูนย์

วงจรที่ใช้ในการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลมีมากมายหลายชนิด โดยทั่วไปแล้ววงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล (A/D converters) มีใช้งานอยู่ประมาณ 7 ชนิดคือ

1. Parallel Comparator, Simultaneous, หรือ Flash A/D converter
2. Single – Ramp หรือ Single – Slope A/D converter
3. Dual – Slope A/D converter
4. Charge balance A/D converter
5. A/D converters using Counters and D/A converters
6. Tracking A/D converters
7. Successive – Approximation A/D converters

Counting Converter เป็นการแปลงสัญญาณอนาล็อก เป็นสัญญาณดิจิทัล โดยใช้ อัลกอริทึม การนับค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แล้วนำผลที่ได้จากการนับไปเปรียบเทียบกับค่าที่ต้องการที่ตั้งไว้ การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล มีประโยชน์มากในการควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งมีลักษณะการแปลงสัญญาณ ได้หลายวิธี แต่ละวิธีจะมีอัลกอริทึม ความรวดเร็วในการทำงาน และการใช้อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ต่างกันด้วย

ข้อบ่งเฉพาะของการแปลงสัญญาณ A/D (A/D Specifications) ข้อบ่งเฉพาะจะบอกถึงขีดความสามารถของ converter โดยทั่วไปแล้วจะมีอยู่หลายค่า เช่น ความแม่นยำ, ความเที่ยงตรง และ ความเที่ยงตรงเป็นเส้นตรง ซึ่งค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของแต่ละวงจร แต่มีข้อบ่งเฉพาะอีกข้อหนึ่งที่ไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะของวงจรคือ ค่าผิดพลาดระหว่างค่าจริงของสัญญาณอนาล็อก กับค่าของดิจิทัลที่ใช้แทนค่า (ค่าของ Output ของ A/D converter) ซึ่งเรียกว่า “Quantizing error” จะมีค่าอยู่ประมาณ  $+1/2$  digit ต่ำสุด (LSB) ของการแปลงสัญญาณซึ่งก็เป็นการบ่งถึงความแม่นยำได้อีกทางหนึ่งด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งสำหรับ A/D converter คือ conversion time หรือค่าเวลาสำหรับการแปลงสัญญาณ ซึ่งมีช่วงเวลาอยู่ประมาณ  $10^{-9}$  วินาที ถึง  $10^{-3}$  วินาที ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของ converter และจำนวน bit

### 2.3 การมอดูเลตแบบ AM

เนื่องจากการผสมสัญญาณต้องใช้การการมอดูเลตเชิงเส้นและผลของสัญญาณที่ได้จะเป็นคลื่นต่อเนื่อง (Continuous Wave , CW) การมอดูเลตจะประกอบด้วยสัญญาณสองส่วนคือ สัญญาณข่าวสารหรือข้อมูล (Message) และสัญญาณพาหะ (Carrier) ส่วนสัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตจะเรียกว่า “สัญญาณที่ถูกมอดูเลต” (Modulated wave) ซึ่งจะถูกส่งไปยังปลายทางต่อไป

ในที่นี้จะใช้การมอดูเลตเชิงเส้นแบบ amplitude modulation (AM) โดยจุดประสงค์หลักของการมอดูเลตก็เพื่อที่จะให้สัญญาณที่ถูกมอดูเลตมีความเหมาะสมกับการใช้งาน คำว่าเหมาะสมในที่นี้อาจจะหมายความว่าให้เหมาะสมกับการนำสัญญาณเข้าไปประมวลผลในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในขั้นถัดไป และที่สำคัญสัญญาณที่ถูกมอดูเลตจะต้องมีความสอดคล้องกับ

ข้อมูลที่จะส่ง ทั้งนี้ก็เพื่อว่าเมื่อสัญญาณนี้เดินทางไปถึงปลายทางแล้วจะต้องเหมือนกับสัญญาณที่ถูกส่งมาในตอนแรก จึงจะถือว่าระบบสื่อสารนี้สามารถทำงานได้ครบถ้วนตามที่ต้องการ

สัญญาณที่ถูกมอดูเลตที่ได้จะมีแถบข้างที่สมมาตรกันอยู่สองข้างรอบความถี่สัญญาณพาหะ การมอดูเลตสัญญาณในลักษณะนี้ยังแบ่งออกได้เป็นสองแบบย่อย ๆ คือ

### 2.3.1 Amplitude modulation (AM)

### 2.3.2 Suppressed carrier double-sideband modulation (DSB)

ก่อนที่จะกล่าวถึงการมอดูเลตจะขอกำหนดข้อตกลงบางอย่างเกี่ยวกับสัญญาณที่ต้องการส่งไปยังปลายทาง

เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์สัญญาณ จะขอกำหนดว่า

$$|x(t)| \leq 1 \quad (2.1)$$

ดังนั้นกำลังของสัญญาณ คือ  $S_x$

$$S_x \equiv \langle x^2(t) \rangle \leq 1 \quad (2.2)$$

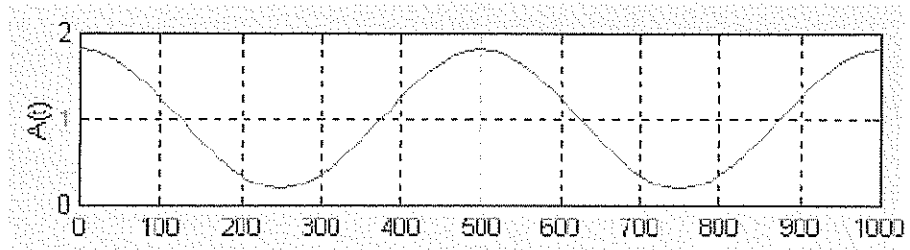
สัญญาณ AM มีลักษณะเฉพาะตัวคือจะมีส่วนที่เรียกว่า “กรอบคลื่น” (Envelope) ที่เหมือนกับสัญญาณข่าวสารหรือข้อมูล ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับการดีมอดูเลต (Demodulate) เพื่อเอาสัญญาณข่าวสารกลับคืนมา จนอาจกล่าวได้ว่าสัญญาณที่มอดูเลตแบบ AM เป็นสัญญาณที่สามารถทำการดีมอดูเลตได้ง่ายที่สุด โดยสัญญาณ AM จะมีสมการของสัญญาณที่ถูกมอดูเลตเป็น

$$X_C(t) = A_C [1 + \mu x(t)] \cos(\omega_C t) \quad (2.3)$$

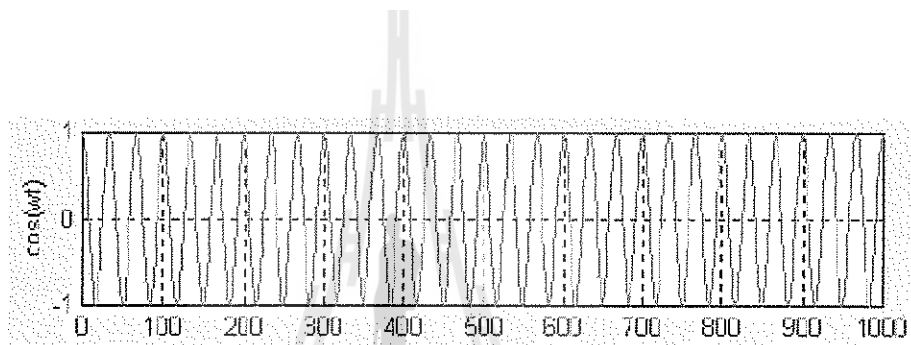
โดยที่  $\mu$  คือ ดัชนีการมอดูเลต (Modulation index) และมีค่า  $\mu \leq 1$  ส่วนที่เป็นกรอบคลื่น คือ

$$A(t) = A_C [1 + \mu x(t)] \quad (2.4)$$

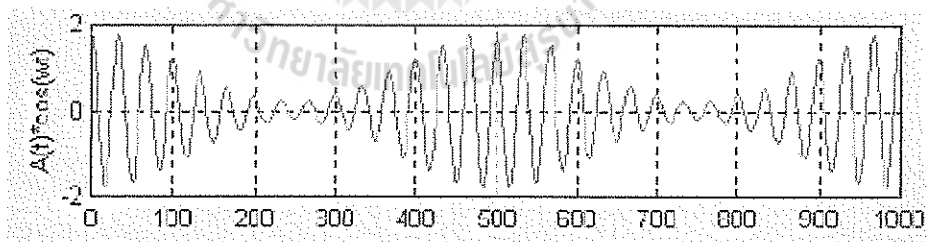
จะเห็นได้ชัดว่ากรอบคลื่นของสัญญาณ AM ไม่มีค่าที่ติดลบ ดังนั้นการมอดูเลตแบบ AM จึงไม่มีการกลับเฟสของสัญญาณที่ถูกมอดูเลต ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.1 แสดงกรอบคลื่นของสัญญาณ AM

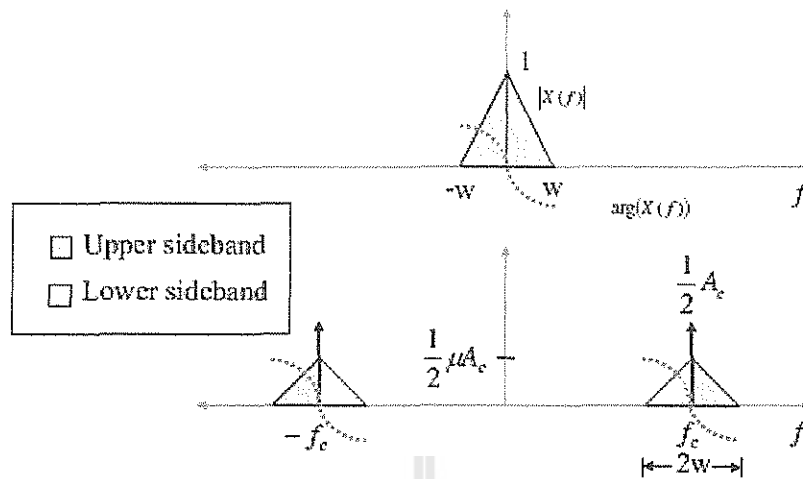


รูปที่ 2.2 แสดงสัญญาณพาหะ



รูปที่ 2.3 แสดงสัญญาณ AM

สำหรับสเปกตรัมของสัญญาณ AM ก็จะประกอบด้วยแถบข้างสองข้าง และสัญญาณพาหะ ตรงกลางดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณข่าวสารหรือข้อมูล (บน) และสเปกตรัมของสัญญาณ AM (ล่าง)

จะเห็นได้ชัดว่าสัญญาณที่ถูกมอดูเลตจะมีแบนด์วิดท์เป็นสองเท่าของแบนด์วิดท์ของสัญญาณข่าวสารหรือข้อมูล และมีกรอบคลื่นที่เหมือนกับข่าวสารทุกประการ เมื่อสนใจหาค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่ถูกมอดูเลตก็สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned}
 S_T &\equiv \langle x_c^2(t) \rangle \\
 &= \left\langle A_c^2 [1 + 2\mu x(t) + \mu^2 x^2(t)] \left[ \frac{1 + \cos(2\omega_c t)}{2} \right] \right\rangle \\
 &= \left\langle \frac{A_c^2}{2} [1 + 2\mu x(t) + \mu^2 x^2(t)] \right\rangle + \left\langle \frac{A_c^2}{2} [1 + 2\mu x(t) + \mu^2 x^2(t)] \cos(2\omega_c t) \right\rangle \quad (2.5)
 \end{aligned}$$

ปกติแล้ว  $\cos(2\omega_c t)$  จะมีความถี่สูงกว่าความถี่ของข่าวสาร ดังนั้นการหาค่าเฉลี่ยของเทอมที่สองจึงพอประมาณได้ว่าเป็นการหาค่าเฉลี่ยของค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับ  $\cos(2\omega_c t)$  และการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณ  $\cos(2\omega_c t)$  ก็เป็นที่ทราบกันว่าจะได้ค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 S_T &= \left\langle \frac{A_c^2}{2} [1 + 2\mu x(t) + \mu^2 x^2(t)] \right\rangle \\
 &= \left\langle \frac{A_c^2}{2} \right\rangle + \langle A_c^2 \mu x(t) \rangle + \left\langle \frac{A_c^2}{2} \mu^2 x^2(t) \right\rangle \quad (2.6)
 \end{aligned}$$

ข่าวสาร  $x(t)$  ส่วนใหญ่จะไม่มี DC component เช่น สัญญาณเสียงพูดนั้นคือ  $\langle x(t) \rangle = 0$  ดังนั้น

$$\begin{aligned} S_T &= \left\langle \frac{A_c^2}{2} \right\rangle + \left\langle \frac{A_c^2}{2} \mu^2 x^2(t) \right\rangle \\ &= \frac{A_c^2}{2} + \frac{A_c^2}{2} \mu^2 S_x \\ &= P_c + 2P_{sb} \end{aligned} \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.7 กำลังของสัญญาณพาหะ  $P_c = \frac{A_c^2}{2}$  และกำลังของสัญญาณแถบข้างทั้งสองข้าง  $2P_{sb} = \frac{A_c^2}{2} \mu^2 S_x$  โดยที่  $S_x$  คือ กำลังของสัญญาณข่าวสาร และจากการที่ได้กำหนดไว้แล้วว่า  $S_x = \langle x^2(t) \rangle \leq 1$  และ  $\mu \leq 1$  ดังนั้น

$$\begin{aligned} 2P_{sb} &\leq \frac{A_c^2}{2} \mu^2 \\ 2P_{sb} &\leq \frac{A_c^2}{2} \mu^2 \leq \frac{A_c^2}{2} \end{aligned} \quad (2.8)$$

นั่นคือ

$$2P_{sb} \leq P_c \quad (2.9)$$

จะกล่าวโดยสรุปได้ว่า กำลังส่วนที่ใช้ไปในการส่งสัญญาณพาหะจะมากกว่าหรือเท่ากับกำลังที่ใช้ในการส่งสัญญาณข่าวสารหรือข้อมูลทั้งหมด หรือกว่า 50% ของกำลังส่งทั้งหมดที่ใช้ในการส่งสัญญาณ AM ไปนั้น ไม่ได้เกี่ยวข้องกับข่าวสารเลย และส่วนที่เหลืออีก 50% หรือน้อยกว่า ก็ยังเป็นแถบข้างสองข้างที่สมมาตรกันอยู่ ดังนั้นกำลังที่จำเป็นจริง ๆ สำหรับใช้ในการส่งข่าวสารต่อแถบข้างหนึ่งข้างจะเหลือแค่ 25% หรือต่ำกว่านั้น

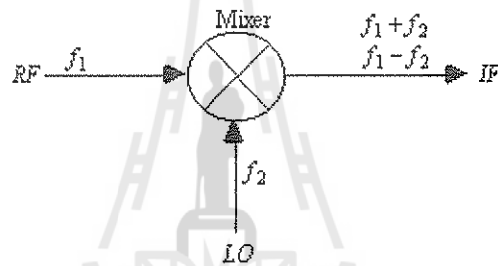
หากพิจารณาเฉพาะในเรื่องของกำลังส่งที่ใช้เพื่อส่งข่าวสาร การมอดูเลตแบบ AM นี้จะเป็นวิธีการมอดูเลตที่ไม่ค่อยจะเหมาะสมนัก แต่เนื่องด้วยเหตุผลที่การมอดูเลตแบบ AM สามารถถูกตีมอดูเลตได้อย่างง่ายดาย

## 2.4 Up/Down Converter

Up/Down Converter เป็นการแปลงย่านความถี่ IF ให้เป็นความถี่ในย่านที่ภาครับหรือภาคส่งต้องการใช้งานในระบบ จากนั้นส่งสัญญาณที่แปลงแล้วไปขยายให้มีระดับแรงดันสูงขึ้นเพื่อส่งไปใช้งานในขั้นถัดไป

### 2.4.1 Mixers

เป็นเครื่องใช้สำหรับการแปลงความถี่และเป็นองค์ประกอบสำคัญในความถี่วิทยุสมัยใหม่ (ระบบ RF) การผสมสัญญาณเป็นการแปลงพลังงาน RF ที่ความถี่หนึ่งเป็นพลังงานที่ความถี่อื่น เพื่อให้การประมวลผลสัญญาณง่ายและราคาที่ไม่แพง พื้นฐานสำหรับการแปลงความถี่เพื่อให้การขยายของสัญญาณรับที่ความถี่อื่น ๆ นอกจาก RF หรือความถี่เสียง การผสมสัญญาณจะเป็นการผสมระหว่างสัญญาณความถี่ขาเข้า (RF) และสัญญาณความถี่ขาเข้าจาก Local Oscillator (LO) จะได้สัญญาณความถี่ที่เป็นผลรวมและสัญญาณความถี่ที่เป็นผลต่าง



รูปที่ 2.5 แสดงวงจรของการผสมสัญญาณระหว่าง RF และ LO

จากวงจรของการผสมสัญญาณระหว่าง RF และ LO จะได้สมการดังนี้

$$f_{LO} + f_{RF} = f_{IF} \quad (2.10)$$

$$f_{LO} - f_{RF} = f_{IF} \quad (2.11)$$

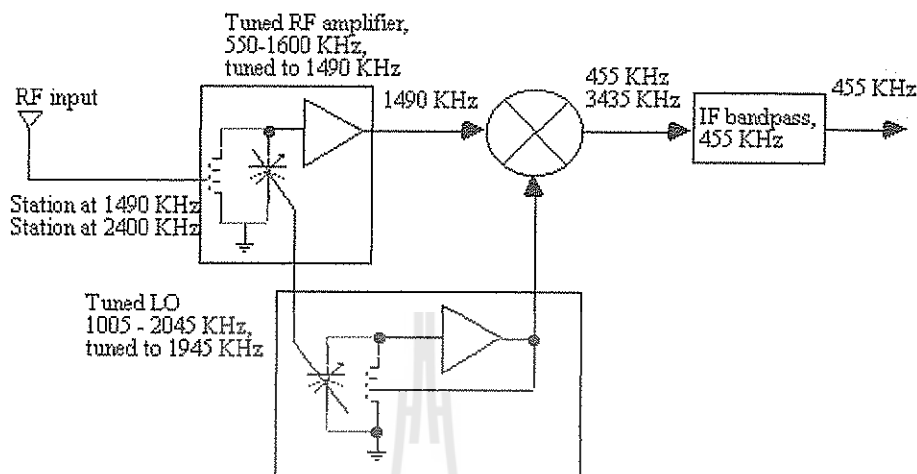
ดังนั้นจากสมการให้เปลี่ยนเป็นตัวแปร  $f$  ทั้งหมดจะได้

$$F_2 + F_1 = f_2 + f_1 \quad (2.12)$$

$$F_2 - F_1 = f_2 - f_1 \quad (2.13)$$



ยกตัวอย่างเช่น Super heterodyne radio ก็มีการใช้การผสมสัญญาณความถี่เช่นกัน



รูปที่ 2.6 แสดงวงจร Super heterodyne radio

การคำนวณความถี่ขาออกของ Super heterodyne radio จะเป็นดังนี้ จากสมการที่ (2.10)

$$f_{LO} + f_{RF} = f_{IF}$$

แทนค่าจะได้

$$1,945\text{KHz} + 1,490\text{KHz} = 3,435\text{KHz}$$

จากสมการที่ (2.11)

$$f_{LO} - f_{RF} = f_{IF}$$

แทนค่าจะได้

$$1,945\text{KHz} - 1,490\text{KHz} = 455\text{KHz}$$

พอได้ความถี่ที่มีการผสมสัญญาณความถี่แล้ว ก็จะมีการเลือกใช้ความถี่ที่เราต้องการ ในที่นี้ก็จะเลือกความถี่ที่ 455KHz เพราะความถี่อยู่ในช่วงของความถี่ที่วิทยุรับได้ และความถี่ที่ 3,435KHz ก็จะมีการกรองความถี่เพื่อกำจัดออกไปเพื่อไม่ให้ไปรบกวนสัญญาณความถี่ที่ 455 KHz และการ

กรองสัญญาณก็อยู่ที่ว่าจะใช้ Low Pass Filter , High Pass Filter หรือ Band Pass Filter อยู่ที่ความต้องการที่เราอยากได้ แต่ในชิ้นงานของเราใช้ Low Pass Filter เพื่อกรองสัญญาณเอาความถี่ต่ำมาใช้เพื่อให้เข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega 128

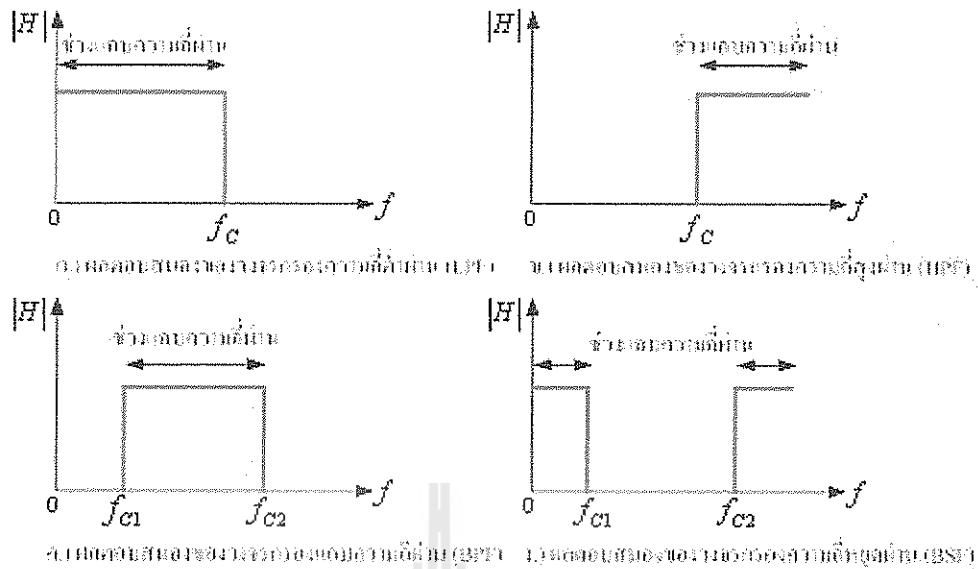
ในปัจจุบันก็มีวงจรผสมสัญญาณมากมาย เพื่อความสะดวกของแต่ละชิ้นงานหรือตามหรือตามความต้องการของลูกค้าตัวอย่างเช่น High Frequency Mixer, Low Frequency Mixer เป็นต้น และก็จะแยกไปอีกว่าอุปกรณ์ที่ใช้ผลิต High Frequency Mixer ใช้อะไรผลิต แล้วจะเหมาะกับชิ้นงานที่จะนำไปใช้หรือไม่ ดังตัวอย่าง Super heterodyne radio ที่ยกมาข้างต้น

## 2.5 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (Lowpass Filter)

เนื่องจากสัญญาณที่ใช้งานคือ 2.4 GHz ถือว่าเป็นความถี่สูงซึ่งต้องใช้การซัดตัวอย่างที่ความเร็วสูงมาก ๆ ดังนั้นจึงอาศัยหลักการผสมสัญญาณแบบ Amplitude Modulation เพื่อผสมสัญญาณความถี่ต่ำ 200 Hz เข้ากับ 2.4 GHz ดังนั้นจึงต้องมีวงจร Lowpass Filter เพื่อกรองสัญญาณความถี่ต่ำ 200Hz ออกมาจาก 2.4 GHz และนำสัญญาณ ไปประมวลผลในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป

ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ที่ใช้ในระบบสื่อสารถ้าจะกล่าวถึงวงจรกรองความถี่นั้นนับเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสำคัญมาก โดยจะนำไปใช้งานในด้านต่างๆ เช่นทางด้านอิเล็กทรอนิกส์, การสื่อสาร, การควบคุม และทางด้านเครื่องมือแพทย์ โดยในทุกวันนี้วงจรกรองความถี่สามารถแบ่งออกเป็นสองรูปแบบคือวงจรกรองความถี่แบบแอนะล็อก(analog filter) กับวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล(digital filter)

วงจรกรองความถี่ทำหน้าที่จำแนกความถี่ตามความต้องการของผู้ใช้ แบ่งตามคุณลักษณะของผลตอบสนองความถี่(frequency response) ดังรูปที่ 2.7 ได้ 4 ชนิดด้วยกันคือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน(Low-pass filter ; LPF) , วงจรกรองความถี่สูงผ่าน(High-pass filter ; HPF) , วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน(band- pass filter; BPF) และวงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่าน(band-stop filter; BSF)



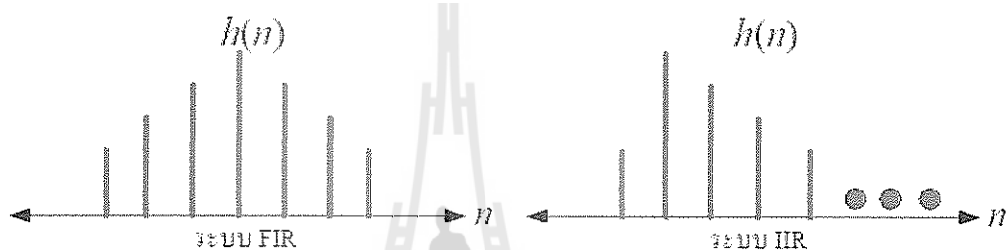
รูปที่ 2.7 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ในอุดมคติ

จากผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ในทางอุดมคติ ในรูปที่ 2.7 เมื่อให้  $|H|$  คือขนาดของแรงดันทางเข้าเอาต์พุต วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน จะยอมให้ความถี่ตั้งแต่ 0 Hz ถึงความถี่  $f_c$  ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจรได้ ส่วนความถี่ที่สูงกว่า  $f_c$  ความถี่จะไม่ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจร สำหรับวงจรกรองความถี่สูงผ่านจะยอมให้ความถี่สูงกว่าความถี่  $f_c$  ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจรได้ ส่วนความถี่ตั้งแต่ 0Hz ถึงความถี่  $f_c$  จะไม่ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจร สำหรับวงจรกรองแถบความถี่ผ่านจะยอมให้ความถี่ตั้งแต่  $f_{c1}$  ถึงความถี่  $f_{c2}$  ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจร ส่วนความถี่ตั้งแต่ 0Hz ถึงความถี่  $f_{c1}$  กับความถี่ที่สูงกว่า  $f_{c2}$  จะไม่ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจร และวงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่าน จะไม่ยอมให้ช่วงความถี่  $f_{c1}$  ถึงความถี่  $f_{c2}$  ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจร ส่วนความถี่อื่นๆ วงจรยอมให้ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตได้

วงจรกรองความถี่ที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไป มักนิยมใช้วงจรกรองความถี่แบบแอนาล็อก ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวความต้านทาน, ตัวเก็บประจุ, ตัวเหนี่ยวนำ และอุปกรณ์กึ่งตัวนำเช่นออปแอมป์ ข้อดีคือออกแบบได้ง่าย ราคาถูก แต่มีข้อเสียที่วงจรขาดเสถียรภาพ(stability) ความถี่ที่ต้องการมีความคลาดเคลื่อนสูง แต่ในปัจจุบันได้หันมานิยมใช้วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลกันมาก เพราะมีเสถียรภาพที่ดีกว่า ความถี่ที่ต้องการมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า แต่มีข้อเสียคือ การออกแบบทำได้ยากกว่า และมีราคาสูงกว่า

สำหรับบทความนี้จะขอกล่าวถึงการออกแบบและทดสอบวงจรกรองความถี่แบบคิวิตอล (band-pass filter : BPF) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่แบบสุดท้ายที่จะขอกล่าวถึง

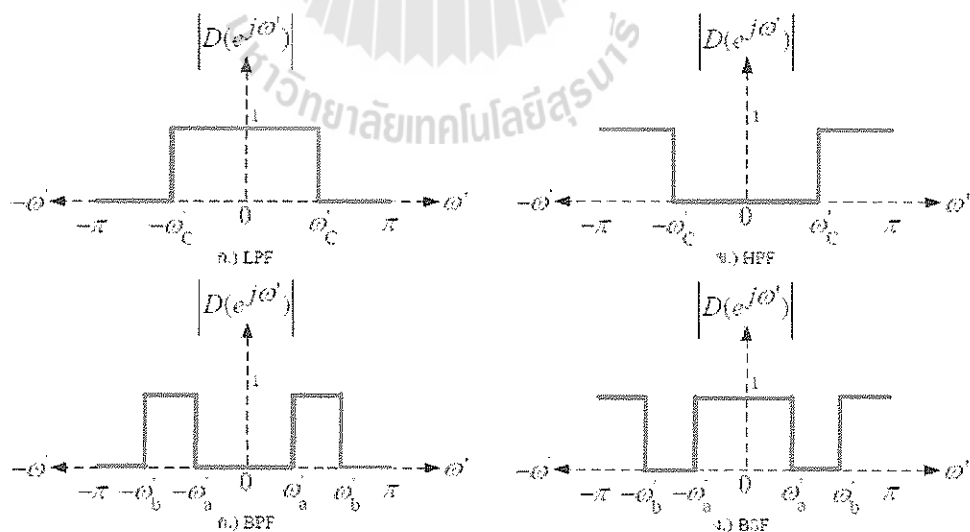
การแบ่งประเภทของวงจรกรองความถี่แบบคิวิตอล จะแบ่งตามผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบซึ่งแสดงในรูปที่ 2 คือผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด (Finite Impulse Response : FIR) กับผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนไม่จำกัด (Infinite Impulse Response : IIR) แต่ในที่นี้ขอยกตัวอย่างการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบคิวิตอลที่มีผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด หรือ FIR เพราะมีลักษณะเด่นคือ มีผลตอบสนองทางเฟสแบบเชิงเส้น (linear phase) เหมาะสำหรับการพัฒนาเครื่องมือวัดทางด้านการแพทย์ และในงานที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 2.8 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของวงจรกรอง FIR และ IIR

การออกแบบวงจรกรองความถี่ โดยวิธีหน้าต่าง (window method)

ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ โดยใช้วิธีหน้าต่างนั้น ซึ่งเป็นวิธีพื้นฐาน โดยมีสิ่งที่สำคัญคือการหาผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองความถี่ต้นแบบ จากผลตอบสนองของความถี่ของตัวกรองความถี่ในอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2.9 ผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองอุดมคติ

จากรูปที่ 3 จะสมมติให้  $d(n)$  แทนเป็นผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ และกำหนดให้  $D(e^{j\omega'})$  แทนผลตอบสนองเชิงความถี่ สำหรับตัวกรองความถี่ในอุดมคติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3(ก) เราจะหาผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของตัวกรองความถี่ในอุดมคติได้ โดยใช้เทคนิคของการแปลงฟูริเยร์แบบเวลา ไม่ต่อเนื่องชนิดผกผัน (Inverse Discrete Fourier Transform : IDTFT) ตัวอย่างเช่น วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังนี้

$$\begin{aligned}
 d(n) &= \text{IDTFT} \{D\} \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} D(e^{j\omega'}) e^{j\omega' n} d\omega' = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} (1) e^{j\omega' n} d\omega' \\
 &= \left[ \frac{e^{j\omega' n}}{2\pi j n} \right]_{-\omega'_C}^{\omega'_C} = \frac{e^{j\omega'_C n} - e^{-j\omega'_C n}}{2\pi j n} \\
 &= \frac{\sin(\omega'_C n)}{\pi n} \quad ; -\infty < n < \infty \quad \dots (1)
 \end{aligned}$$

ในสมการที่ 1 จะพบปัญหาที่  $n=0$  เพราะผลตอบสนองต่ออิมพัลส์  $d(n)$  มีค่าเป็นเศษศูนย์ ส่วนด้วยศูนย์ วิธีแก้ไขปัญหามาเราสามารถหาค่า  $d(0)$  ได้โดยใช้ทฤษฎีของโลปีตัล จะได้ว่า

$$d(0) = \frac{\lim_{n \rightarrow 0} \frac{d(\sin(\omega'_C n))}{d(n)}}{\lim_{n \rightarrow 0} \frac{d(\pi n)}{dn}} = \frac{\omega'_C}{\pi} \quad \dots (2)$$

สำหรับวงจรกรองความถี่แบบอื่นๆ เราสามารถหาผลตอบสนองต่ออิมพัลส์  $d(n)$  ได้โดยการแปลง IDTFT เพื่อหาผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองนั้นๆ ได้ดังตารางที่ 1 เพื่อใช้ในการออกแบบต่อไป

ตารางที่ 2.1 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองอุดมคติแบบต่างๆ

ชนิดของตัวกรอง	$D(n), -\infty < n < \infty$	$D(n), n = 0$
วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	$\frac{\sin(\omega_c n)}{\pi n}$	$\frac{\omega_c}{\pi}$
วงจรรองความถี่สูงผ่าน	$\delta(n) - \frac{\sin(\omega_c n)}{\pi n}$	$1 - \frac{\omega_c}{\pi}$
วงจรรองแถบความถี่ผ่าน	$\frac{\sin(\omega_2 n) - \sin(\omega_1 n)}{\pi n}$	$\frac{\omega_2}{\pi} - \frac{\omega_1}{\pi}$
วงจรรองแถบความถี่หยุดผ่าน	$\delta(n) - \frac{\sin(\omega_2 n) - \sin(\omega_1 n)}{\pi n}$	$1 - \left( \frac{\omega_2}{\pi} - \frac{\omega_1}{\pi} \right)$

จากที่ได้แสดงในตารางข้างต้น เป็นผลตอบสนองต่ออิมพัลส์  $d(n)$  ของวงจรรองความถี่แบบต่างๆ โดยวิธีการแปลง IDTFT ผู้ที่ต้องการออกแบบวงจรรองความถี่แบบดิจิทัลในที่นี้ ไม่จำเป็นต้องมีความรู้ทางคณิตศาสตร์มากนัก เพราะการออกแบบวงจรรองความถี่แบบต่างๆ เราจะใช้ผลตอบสนองอิมพัลส์ในตารางที่ 1 ได้โดยตรง ที่ได้แสดงในสมการที่ 1 กับ 2 เป็นเพียงตัวอย่างการหาผลตอบสนองอิมพัลส์  $d(n)$  ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน โดยวิธีการแปลงจาก IDTFT ที่  $n$  มีค่า  $-\infty < n < \infty$  กับที่  $n = 0$  ตามลำดับ

ก่อนที่จะทำการออกแบบนั้นจะต้องทำความเข้าใจเพิ่มเติมเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่สำคัญตามลักษณะเฉพาะของวิธีหน้าต่าง ต่อการออกแบบวงจรรองความถี่ เช่น ความถี่ตัด, อัตราการลดทอน, ความพริ้วหรือริบเปิดของแถบผ่าน และความกว้างของแถบเปลี่ยน โดยพิจารณาตามรูปที่ 4 ดังนี้

- ความถี่ตัด(cutoff frequency ;  $C f$ ) หมายถึงจุดตัดของความถี่ที่ให้สัญญาณผ่านหรือไม่ผ่านไปยังขั้วออกของวงจรรอง สำหรับวงจรรองความถี่ของ FIR กำหนดค่าความถี่ที่ขนาดลดลงประมาณ 0.5 นิยามนี้แตกต่างกับแบบ IIR ที่ใช้นิยามเดียวกันกับวงจรรองแบบแอนาลอกคือที่ขนาดลดลงประมาณ 0.707

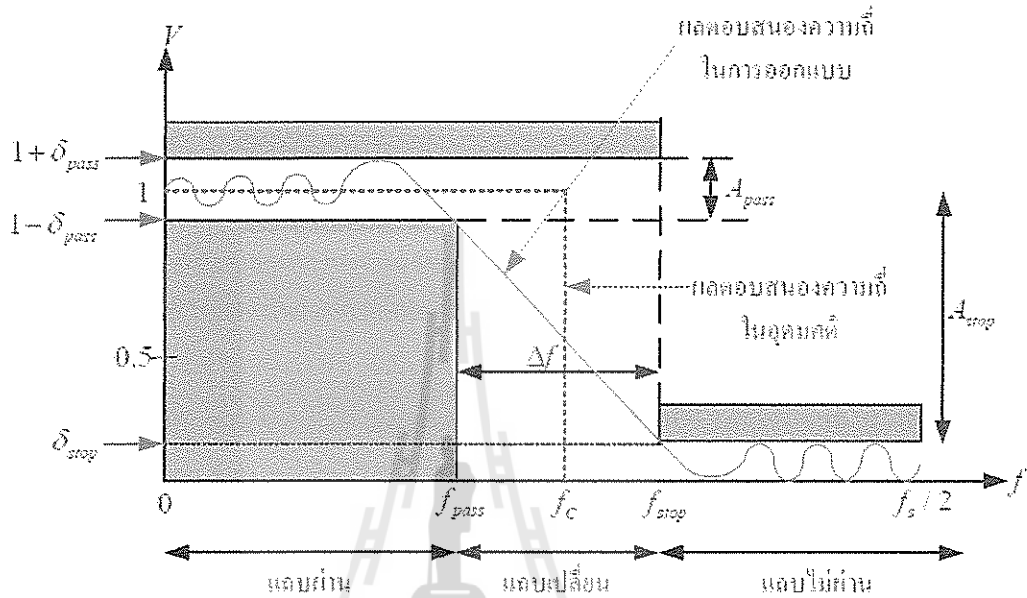
- การลดทอนของแถบหยุด(stop-band attenuation ; stop A ) คือ จำนวนเท่าที่แถบหยุดลดทอนลง วัดค่าเป็น dB โดยการลดทอนของแถบหยุดมีความสัมพันธ์กับความพริ้วของแถบหยุด แสดงดังสมการที่ 3

$$A_{\text{stop}} = 20 \log_{10} \delta_{\text{stop}} \dots (3)$$

- ความพริ้วหรือริบเปิดของแถบผ่าน(pass-band ripple ;  $\delta_{\text{pass}}$ ) หมายถึง ค่าสูงสุดที่ขนาดแถบผ่านแกว่งออกห่างจากค่า 1 ตามรูปที่ 4 เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$A_{pass} = 20 \log \frac{1 + \delta_{pass}}{1 - \delta_{pass}} \dots\dots(4)$$

• ความกว้างของแถบเปลี่ยน (transition band width ;  $\Delta f$ ) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาดเทียบกับช่วงความถี่



รูปที่ 2.10 คุณลักษณะเฉพาะของผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองแบบ FIR

ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญๆ ของหน้าต่างแบบต่างๆ

หน้าต่าง	$\delta_{pass}$	$A_{stop} = 20 \log \delta_{stop}$	$\Delta f$	$W(n), n = 0, 1, \dots, N-1$ $\left(M = \frac{N-1}{2}\right)$
สี่เหลี่ยม (rectangular)	8.9%	21	$2N$	1
ฮานนิง (Hanning)	0.63%	44	$4N$	$0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)$
แฮมมิง (Hamming)	0.22%	53	$4N$	$0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)$
แบล็กแมน (Blackman)	0.02%	74	$6N$	$0.42 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) - 0.08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right)$
ไคเซอร์ (Kaiser)	ปรับได้	ปรับได้	$\frac{A - 7.95}{14.36(N-1)}$	$\frac{I_0\left(\alpha \sqrt{1 - (n-M)^2 / M^2}\right)}{I_0(\alpha)}$

การออกแบบวงจรกรองความถี่ (FIR-BPF)

ตัวอย่างการออกแบบ

การออกแบบวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (band-pass filter : BPF) โดยใช้วิธีหน้าต่าง ต้องการความถี่ตัดผ่านด้านต่ำ 190 Hz และความถี่ตัดผ่านด้านสูง 210 Hz มีความพริ้วของแถบผ่าน ( $\delta_{\text{pass}}$ )  $0.5\% <$  อัตราการลดทอน ( $A_{\text{stop}}$ ) มากกว่า 50dB และมีความกว้างของแถบเปลี่ยน ( $\Delta f$ ) มีค่า 10 Hz ใช้ความถี่สุ่มที่ 1 KHz สำหรับอันดับกับคุณลักษณะของหน้าต่างให้เลือกใช้ตามความเหมาะสม

วิธีออกแบบ

จากข้อกำหนดของวงจรกรองความถี่ ต้องการความพริ้วของแถบผ่าน 0.5 % เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 2 จะเห็นว่าคุณลักษณะของหน้าต่างที่สามารถใช้งานได้มี 3 แบบคือ แฮมมิ่ง , แบ็กแมน และโคเชอร์ ส่วนหน้าต่างสี่เหลี่ยม กับฮานนิง ไม่สามารถใช้งานได้เพราะว่า ความพริ้วของแถบผ่าน ( $\delta_{\text{pass}}$ ) มีค่ามากกว่า 0.5 % นั่นคือ 8.9 % กับ 0.63 % ตามลำดับการหาค่าอันดับ (N) ของหน้าต่างแต่ละแบบ ควรเลือกที่มีค่าน้อยที่สุด เพราะการใช้ทรัพยากรจะใช้น้อยตามไปด้วย ซึ่งการหาค่าอันดับสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\Delta f' = \Delta f / f_s = 10 / 1000 = 0.01$$

1) หน้าต่างแฮมมิ่ง

หา N จาก

$$\Delta f' = 4 / N$$

$$N = 4 / \Delta f' = 4 / 0.01 = 400$$

จะได้ N = 400

2) หน้าต่างแบ็กแมน

หาค่า N ได้จากสมการ

$$N = \begin{cases} \frac{A - 7.95}{14.36\Delta f'} + 1 & : A > 21 \\ \frac{0.9}{\Delta f'} & : A \leq 21 \end{cases} \quad \dots(5)$$

ใช้สมการที่ 5 กรณีที่  $A > 21$  เพราะโจทย์กำหนดอัตราการลดทอน ( $A_{\text{stop}}$ ) มากกว่า 50dB ถ้ากำหนดให้การลดทอนเท่ากับ 50dB

$$N = \frac{A - 7.95}{14.36\Delta f'} + 1 = \frac{50 - 7.95}{14.36(0.01)} = 293.83 \approx 294$$

จะได้ N = 294



คำนวณหาสัมประสิทธิ์  $h(n)$  ของวงจร โดยใช้โปรแกรม MATLAB โดยสร้างไฟล์ที่มีนามสกุลเป็น .M โดยสั่งเมนูบาร์ File | New | M-file แล้วพิมพ์ตามตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 5

```

MATLAB Editor/Debugger - [C:\MATLAB\bin\FIR_BPF.m]
File Edit View Debug Window Help
Stack:
%FIR-BPF%
N=500;
fs=1000;
fc1=190;
fc2=210;
M=(N-1)/2;
n=0:N-1;
wc1=2*pi*fc1/fs;
wc2=2*pi*fc2/fs;

d=(sin(wc2*(n-M))-sin(wc1*(n-M)))/(n-M)/pi;%Table 1-BPF%
d((N+1)/2)=wc2/pi-wc1/pi;
h=round(255*d/max(d));

%Table 2>window method%
w=1;
h=d.*w;

figure(1)
n=0:N-1;
step(n,h)

%Plot frequency response%
figure(2)
freqz(h,1,100,fs)
xlabel('Frequency(Hertz)')
Zoom

```

ตัวอย่างการออกแบบ

จากตารางที่ 1

จากตารางที่ 2

การแสดงผลการทดสอบ

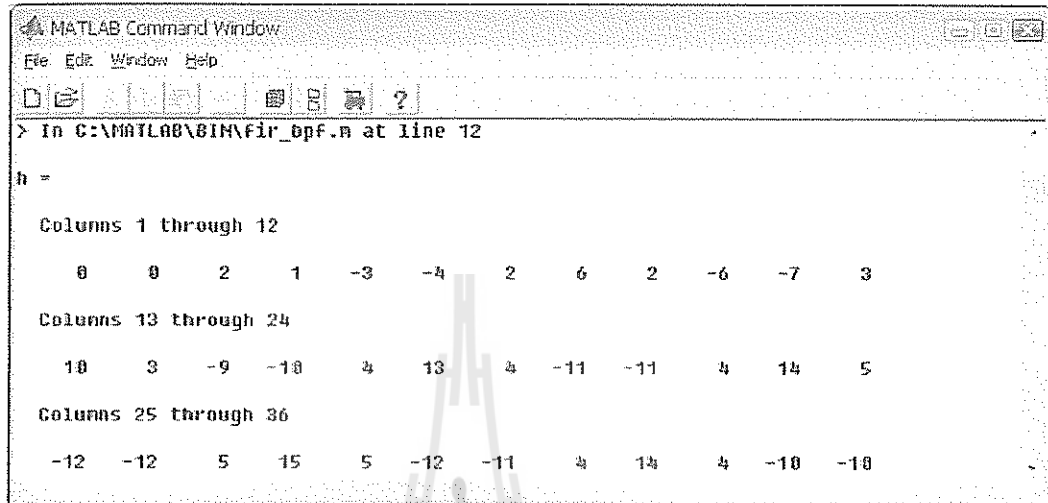
Ready Line 1 12:20 PM

รูปที่ 2.11 ตัวอย่างของไฟล์ FIR\_BPF.m

จากรูปที่ 5 ได้บอกถึงส่วนต่างๆ ของการเขียนโปรแกรมแบบ m-file ไว้แล้วนะครับ ถ้าอย่างใดก็ต้องทดลองทำดูนะครับ ซึ่งในส่วนของเครื่องหมาย % หมายถึงส่วนที่ใช้อธิบายหรือแบ่งส่วนของโปรแกรม สำหรับ  $f_{c1}$ ,  $f_{c2}$  คือค่าความถี่ตัด,  $f_s$  คือความถี่สุ่ม และ  $N$  คือจำนวนของอันดับ โดยในบทความนี้จะทดสอบ 3 แบบด้วยกัน และถ้าต้องการปรับคุณสมบัติของวงจรกรองแถบความถี่หุตุผ่าน ก็สามารถปรับค่าดังกล่าวได้ตามความต้องการหรือแล้วแต่ที่เราจะออกแบบ ส่วน

วงจรกรองความถี่แบบอื่นๆ ก็สามารถออกแบบได้ครับ โดยจะต้องทำการแก้ไขบรรทัดของผลตอบสนองอิมพัลส์ ตามตารางที่ 1 กับพารามิเตอร์ของวิธีหน้าต่าง ตามตารางที่ 2

โดยในส่วนของโปรแกรมที่ใช้นี้จะสามารถทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ออกมาได้ดังแสดงในรูปที่ 6



```

MATLAB Command Window
File Edit Window Help
> In C:\MATLAB8\BIN\Fir_bpf.m at line 12
h =
Columns 1 through 12
    0     0     2     1    -3    -4     2     6     2    -6    -7     3
Columns 13 through 24
   10     3    -9   -10     4    13     4   -11   -11     4    14     5
Columns 25 through 36
  -12   -12     5    15     5   -12   -11     4    14     4   -10   -10

```

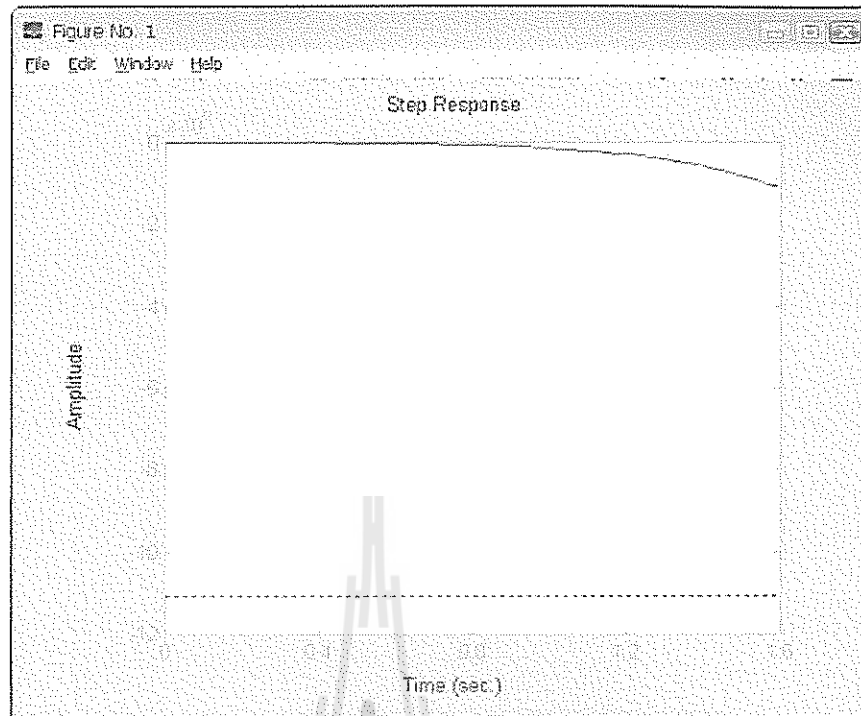
รูปที่ 2.12 ลักษณะของสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ออกแบบ

และไฟล์ FIR\_BPF.m ที่เราเขียนขึ้นมานั้นยังมีคำสั่งที่ใช้สำหรับวาดผลตอบสนองอิมพัลส์ กับผลตอบสนองความถี่รวมถึงผลตอบสนองทางเฟส(phase)ของวงจรที่ได้ออกแบบ คือคำสั่ง stem กับคำสั่ง freqz ตามลำดับ สำหรับคำสั่ง stem กับ freqz มีฟังก์ชันอยู่ในโปรแกรม MATLAB แล้วสามารถเรียกใช้ได้เลยครับ

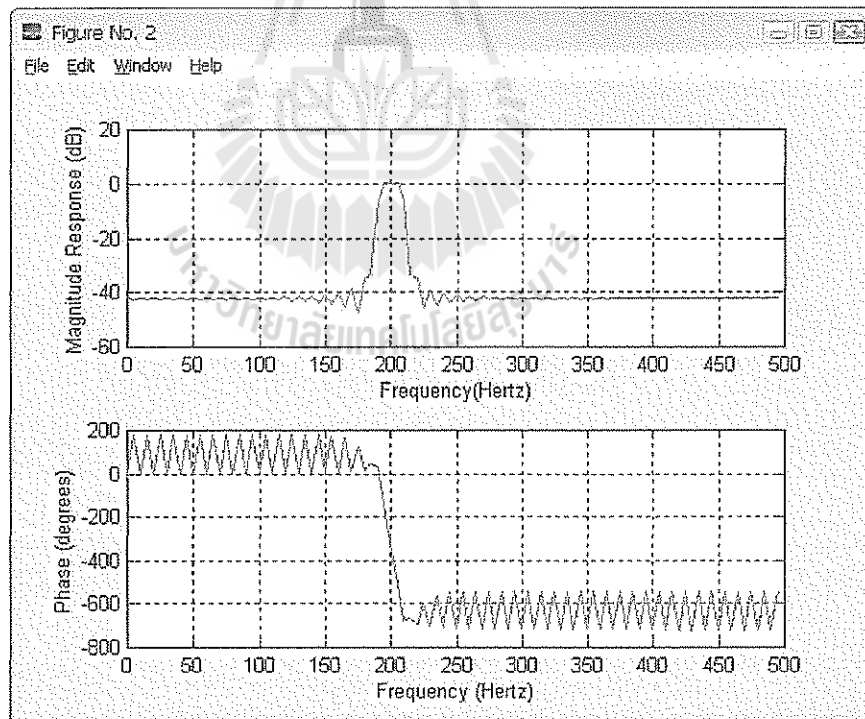
ดังเช่นในรูปที่ 6 เป็นตัวอย่างของการคำนวณหาสัมประสิทธิ์  $h(n)$  โดยพิมพ์ชื่อ FIR\_BPF ลงในหน้าต่าง MATLAB Command Window โปรแกรมก็จะทำการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ แล้ววาดกราฟแสดงลักษณะของ Step Response ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Amplitude กับ Time และกราฟคุณลักษณะของผลตอบสนองความถี่และทางเฟสของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน เมื่อ  $N=600$  ดังแสดงในรูปที่ 7 รูปที่ 8

ส่วนกราฟแสดงลักษณะของ Step Response ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Amplitude กับ Time และกราฟคุณลักษณะของผลตอบสนองความถี่และทางเฟสของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน เมื่อ  $N=400$  ดังแสดงในรูปที่ 9 รูปที่ 10

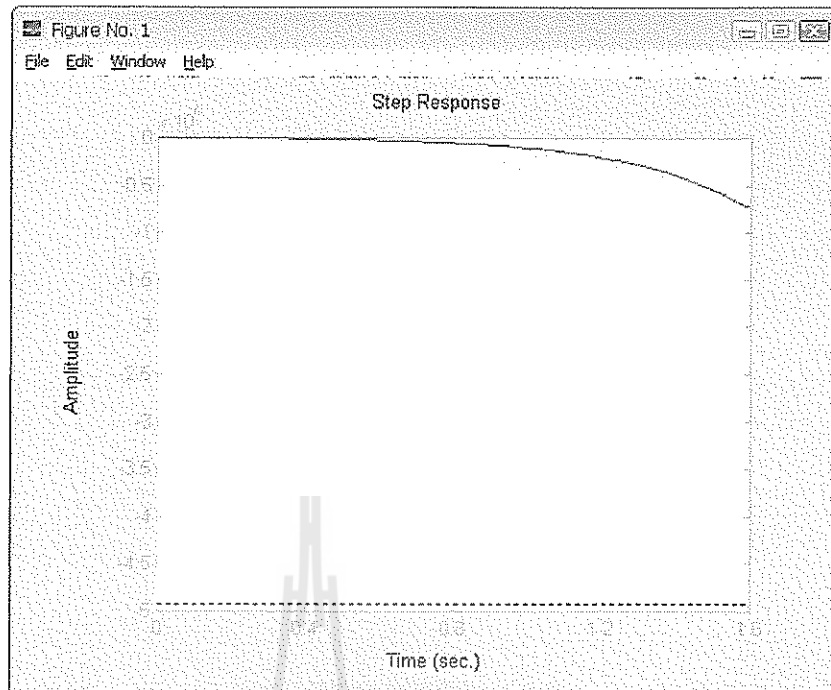
และกราฟแสดงลักษณะของ Step Response ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Amplitude กับ Time และกราฟคุณลักษณะของผลตอบสนองความถี่และทางเฟสของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน เมื่อ  $N=294$  ดังแสดงในรูปที่ 11 รูปที่ 12



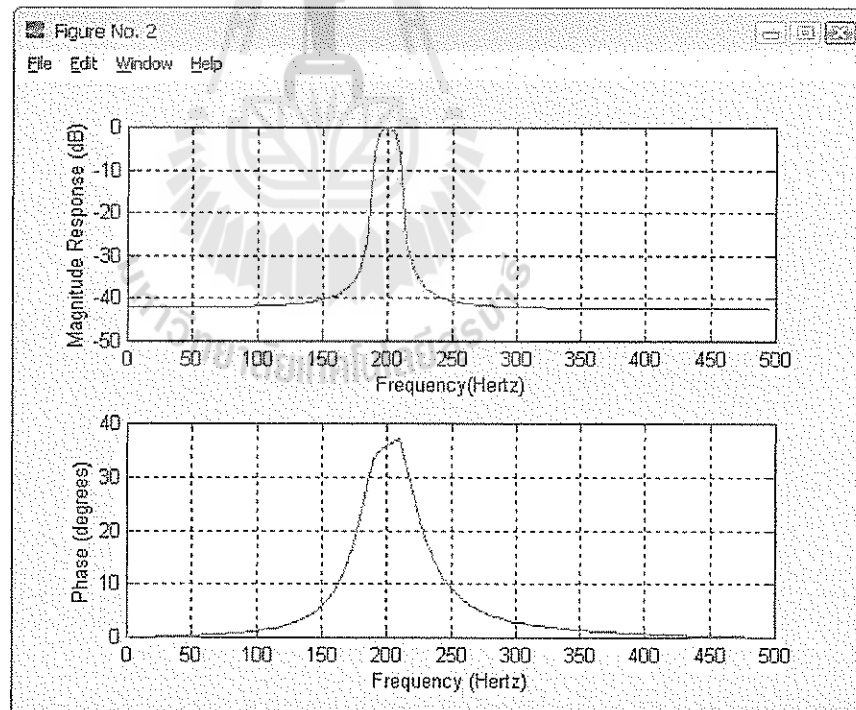
รูปที่ 2.13 ลักษณะของ Step Response ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน  
ที่เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Amplitude กับ Time ที่  $N=600$



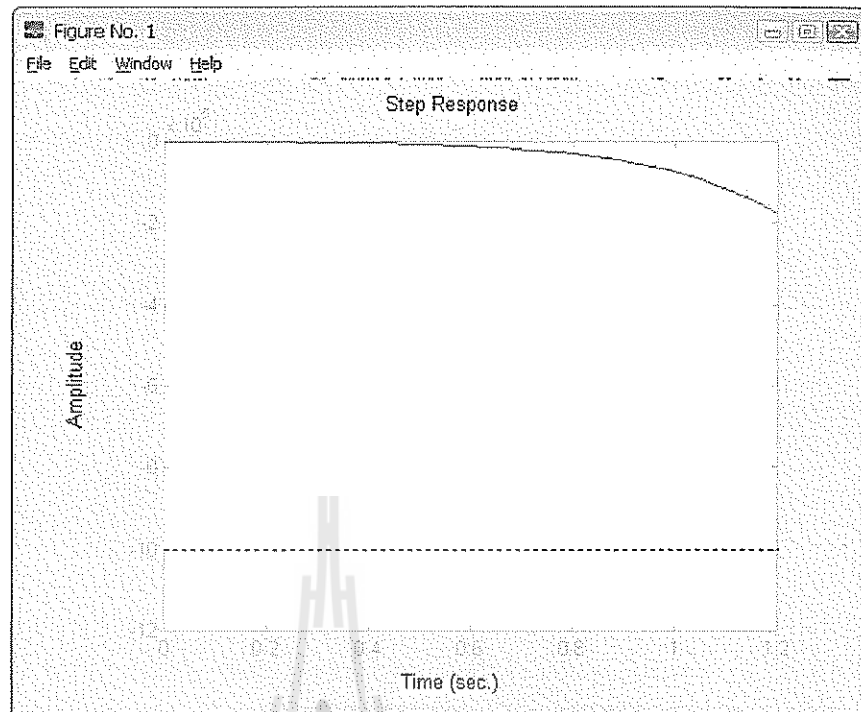
รูปที่ 2.14 ลักษณะของผลตอบสนองความถี่และทางเฟสของวงจรกรอง  
แถบความถี่ผ่านที่  $N=600$



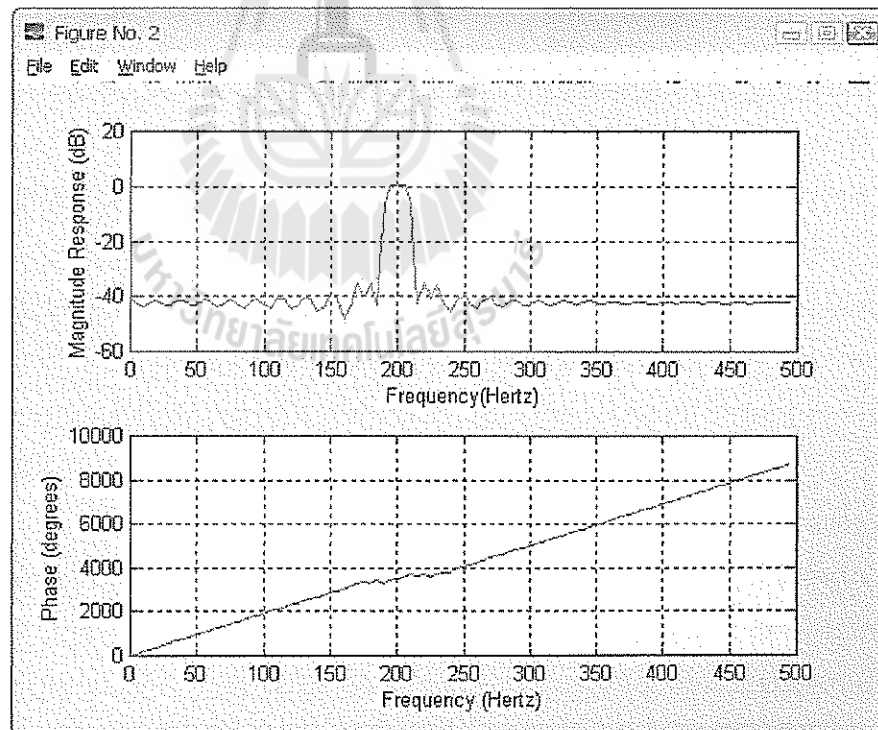
รูปที่ 2.15 ลักษณะของ Step Response ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน  
ที่เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Amplitude กับ Time ที่  $N=400$



รูปที่ 2.16 ลักษณะของผลตอบสนองความถี่และทางเฟสของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน  
ที่  $N=400$

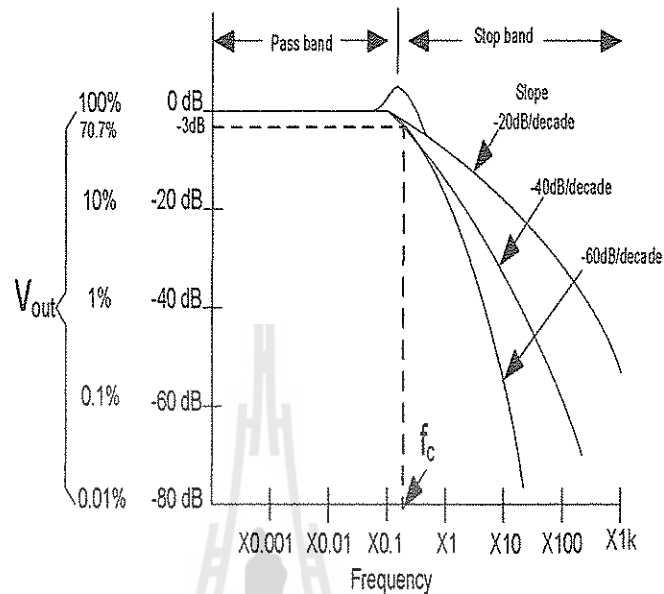


รูปที่ 2.17 ลักษณะของ Step Response ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน  
ที่เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Amplitude กับ Time ที่ N=294



รูปที่ 2.18 ลักษณะของผลตอบสนองความถี่และทางเฟสของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน  
ที่ N=294

เมื่อสัญญาณออกจากวงจรขยายสัญญาณก็จะทำการกรองความถี่เพื่อเอาความถี่บางช่วงมาใช้ โดยสัญญาณที่นอกเหนือจากนี้จะถูกกำจัดออกไป และนี่คือประโยชน์ของวงจรกรองความถี่ชนิดต่างๆ จากกราฟรูปที่ 2.8 เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

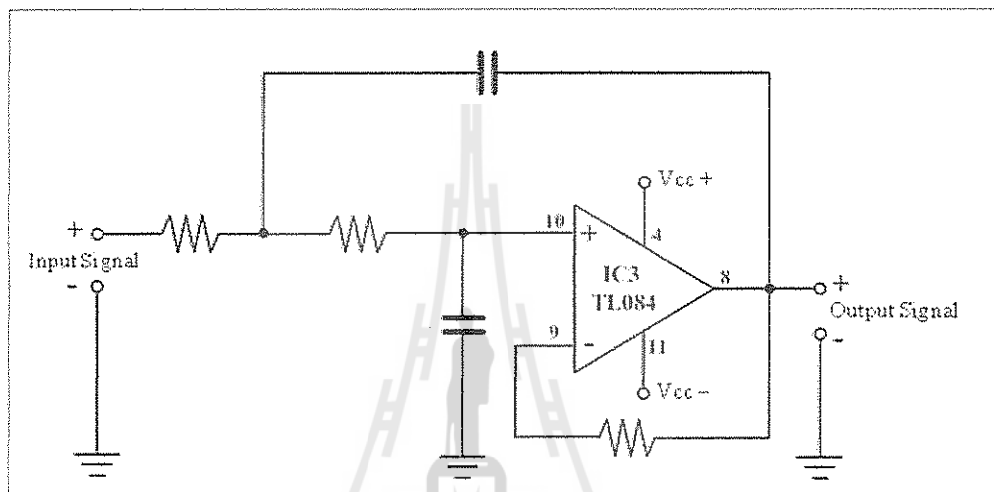


รูปที่ 2.19 แสดงผลตอบสนองความถี่ของวงจรความถี่ต่ำผ่าน

ในทางอุดมคติ วงจรกรองความถี่ต่ำจะกันไม่ให้สัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าความถี่คัตออฟ ( $f_c$ ) ผ่านเข้าไปในวงจรเลยหากสัญญาณมีความถี่สูงกว่า  $f_c$  เพียงเล็กน้อย แต่ในทางปฏิบัติ ลักษณะของความถี่สูงที่ถูกกันออกไปนั้นจะไม่เป็นเช่นนั้น แต่จะค่อยๆ ลดอัตราขยายลงเรื่อยๆ จุดที่มีความถี่มีค่าเท่ากับ  $f_c$  ถูกเรียกได้หลายชื่อเช่น ความถี่ 0.707 (ขนาดของ  $V_o$  ลดลงเหลือเพียง 70.7% เทียบกับ  $V_i$  สูงสุด) ความถี่ -3 dB (อัตราขยายของแรงดันเอาต์พุตลดลง 3dB) หรือความถี่หักมุม เป็นต้น กล่าวโดยสรุปแล้ว วงจรนี้ จะถูกลดขนาดของสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่า  $f_c$  และเรียกช่วงสัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่า  $f_c$  ว่าช่วงที่ผ่านได้ (Pass Band) และช่วงที่มีความถี่สูงกว่า  $f_c$  ว่าช่วงที่ถูกกัน (Stop Band)

จากกราฟ แสดงการตอบสนองความถี่ในรูปที่ 2.8 จะพบว่า เมื่อสัญญาณมีความถี่สูงกว่าแรงดันคัตออฟแล้ว สัญญาณบางเส้นอาจจะถูกลดทอนด้วยอัตราที่น้อยกว่าแรงดันเส้นอื่น เช่น สัญญาณที่มีความชัน -20 dB/decade (อัตราขยายลดลง 20 dB ต่อความถี่ที่เพิ่มขึ้น 10 เท่า) จะมีความชันน้อยกว่าสัญญาณที่มีค่า -60 dB/decade คุณสมบัตินี้เกิดจากการออกแบบวงจรกรองความถี่และเป็นที่แน่นอนว่า ยิ่งค่าความชันมีขนาดลบบากขึ้นเท่าไร วงจรนี้ก็จะมีความชันที่ใกล้เคียงอุดมคติยิ่งขึ้น

วงจรกรองความถี่ต่ำ แสดงวงจรดังรูปที่ 2.9 โดยประกอบด้วยโครงข่าย RC และใช้ออป-แอมป์ซึ่งต่อเป็นวงจรบัฟเฟอร์ และมีตัวต้านทานที่ทำหน้าที่ป้อนกลับ และจะต้องมีค่าเท่ากับ เพื่อเป็นการลดผลที่จะเกิดจากไฟตรงที่เรียกว่า ออฟเซตไฟตรง (DC Offset) ที่อาจเกิดขึ้นในวงจรได้ หรือที่เราเคยพบคือถ้ามีไฟตรงเมื่อไรแล้วจะทำให้ค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ (Capacitive reactance) ของตัวเก็บประจุนั้นมีค่าเป็นอนันต์ จึงส่งผลให้ค่าความต้านทานเทียบเท่าที่ขาอินพุตบวกและขาอินพุตลบของออปแอมป์มีค่าเท่ากันนั่นเอง และยังส่งผลไปถึงแรงดันไฟตรงที่ขาอินพุตทั้งสองนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน หรือก็คือ แรงดันอินพุตออฟเซตมีค่าประมาณศูนย์ด้วย



รูปที่ 2.20 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ได้แสดงในรูปที่ 2.9 นั้น เราสามารถที่จะหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้ โดยการพิจารณาได้จากผลต่างของแรงดันระหว่างขา 9 และ ขา 10 ที่มีค่าประมาณ 0 V และวงจรออปแอมป์นั้นต่อในลักษณะเป็นวงจรบัฟเฟอร์ เราจึงสามารถที่จะสรุปได้ว่าค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ จะมีค่าเท่ากับแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจร โดยสามารถคำนวณ ได้ดังนี้

$$V_{out} = \frac{\left(\frac{1}{j\omega C}\right)}{R + \left(\frac{1}{j\omega C}\right)} \times V_{in} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $\omega$  คือ ค่าความถี่ของแรงดันอินพุต ( $V_{in}$ ) หน่วยคือ rad/sec

กำหนด  $\omega = 2\pi f$  และ  $j = \sqrt{-1}$

จากสมการที่ 1 สามารถที่จะนำมาหาค่าของอัตราขยายแรงดันลูปปิด ( $A_{CL}$  : closed-loop voltage gain) ของวงจร ได้คือ

$$A_{CL} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (2.15)$$

$$A_{CL} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\left(\frac{1}{j\omega C}\right)}{R + \left(\frac{1}{j\omega C}\right)}$$

$$A_{CL} = \frac{\left(\frac{1}{j\omega C}\right) \times j\omega C}{\left[R + \left(\frac{1}{j\omega C}\right)\right] \times j\omega C} = \frac{1}{(j\omega RC + 1)}$$

ดังนั้นจะได้สมการของ  $A_{CL}$  ดังนี้

$$A_{CL} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{(1 + j\omega RC)} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ 3 จะเห็นว่าอัตราขยายแรงดันลูปปิด ( $A_{CL}$ ) จะมีการแปรผันไปตามความถี่ โดยพิจารณาได้คือ ในกรณีความถี่ต่ำและในกรณีที่ความถี่สูง โดยสามารถสรุปได้ดังนี้คือ

ในกรณีที่ความถี่ต่ำ ( $\omega = 2\pi f$ )  $\rightarrow 0$  จะพบว่าค่า

$$A_{CL} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{(1 + j\omega RC)} = 1 \quad (2.17)$$

แต่ถ้าในกรณีที่ความถี่สูง ( $\omega = 2\pi f$ )  $\rightarrow \infty$  จะพบว่าค่า

$$A_{CL} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{(j\omega RC)} \quad (2.18)$$



ซึ่งจากสมการที่ 5 เราสามารถที่จะพิจารณาในรูปของ  $dB$  ได้ คือ

$$A_{CL}(dB) = 20 \log \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) = 20 \log \left( \frac{1}{j\omega RC} \right)$$

$$A_{CL}(dB) = -20 \log(\omega RC) \quad (2.17)$$

และในสมการที่ 6 เราจะเห็นว่าถ้าความถี่มีค่าที่สูงขึ้นผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เช่น

ถ้ากำหนดให้  $\omega = \frac{1}{RC}$  แล้วจะได้ค่าของ  $A_{CL}$  คือ

$$A_{CL}(dB) = -20 \log(\omega RC)$$

$$A_{CL}(dB) = -20 \log \left( \frac{1}{RC} \times RC \right) = -20 \log(1)$$

$$A_{CL}(dB) = 0 \text{ dB}$$

แต่ถ้าเรากำหนดให้  $\omega = \frac{10}{RC}$  แล้วจะได้ค่าของ  $A_{CL}$  คือ

$$A_{CL}(dB) = -20 \log(\omega RC)$$

$$A_{CL}(dB) = -20 \log \left( \frac{10}{RC} \times RC \right) = -20 \log(10)$$

$$A_{CL}(dB) = -20 \text{ dB}$$

ดังนั้นจะเห็นว่าถ้ามีการเปลี่ยนแปลงความถี่ให้สูงขึ้น โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงไป 10 เท่า (Decade) เราจะเรียกว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ  $-20 \text{ dB / decade}$  แต่ในการออกแบบวงจร

กรองความถี่ต่ำ เราจะต้องทำการพิจารณาที่ค่าความถี่ตัด ( $\omega_c$ ) หรือ ( $f_c$ ) ที่ได้จากวงจรที่จะออกแบบ โดยสามารถหาได้ดังนี้

$$\text{กำหนดให้ } \omega_c RC = 1 \text{ และ } \omega_c = \frac{1}{RC} \text{ เมื่อ } \omega_c = 2\pi f$$

$$\omega_c = 2\pi f_c = \frac{1}{RC} \quad (2.18)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

กรณีพิจารณา  $V_{out}$  ที่ 0 dB (100% = 1)

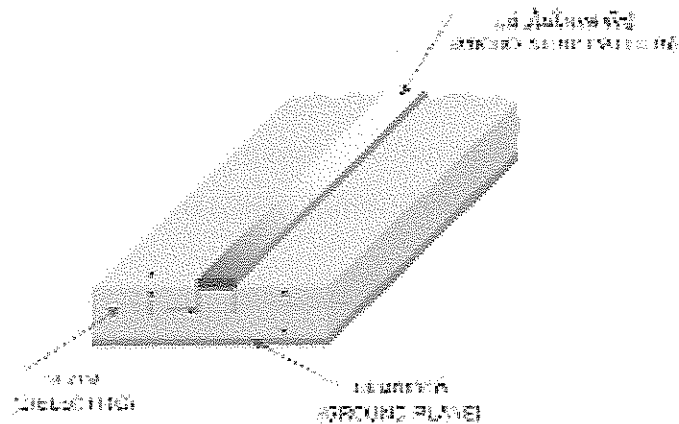
$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.19)$$

กรณีพิจารณา  $V_{out}$  ที่ -3 dB (70.7% = 0.707)

$$f_c = \frac{0.707}{2\pi RC} \quad (2.20)$$

### 2.5.1 โครงสร้างไมโครสตริป

โครงสร้างของไมโครสตริปจะสร้างมาจากแผ่นฉนวน (Dielectric) ที่มีการสูญเสียต่ำ ซึ่งเรียกว่า วัสดุฐานรองที่เป็นสารไดอิเล็กตริก (Dielectric Substrate) ด้านหนึ่งจะเป็นส่วนของตัวนำทั้งหมดที่เรียกว่า ด้านพื้นกราวด์ (Ground Plane) ส่วนอีกด้านเป็นส่วนของวงจรหรือสายอากาศที่ถูกสร้างลงไปดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยอุปกรณ์ที่เพิ่มลงไปในวงจรสามารถเพิ่มได้ทั้งอุปกรณ์ที่เป็นชิ้นๆ (Lumped component) หรือสามารถสร้างลงไปบนแผ่นสตริปได้เลย ตัวนำส่วนใหญ่จะเป็นทองแดง โดยปกติความหนาของวัสดุฐานรอง (h) จะอยู่ประมาณ 0.005 เซนติเมตร ถึง 0.635 เซนติเมตร หรือมากกว่า และวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุฐานรองจะเป็นวัสดุจำพวก Alumina Quartz หรือ Glass-Loaded PTFE ส่วนความหนาของทองแดง (t) จะอยู่ประมาณ 0.001778 เซนติเมตร ถึง 0.003556 เซนติเมตร ส่วนของสายส่งไมโครสตริปจะเป็นส่วนของทองแดงด้านบนที่ถูกตัดออกให้เหลืออยู่เพียงลายทองแดงที่มีความกว้าง (w) คุณสมบัติทางไฟฟ้าวัสดุฐานรองแสดงด้วยสภาพยอมสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant :  $\epsilon_r$ ) และค่าของ Loss Tangent ( $\delta$ )



รูปที่ 2.21 โครงสร้างของไมโครสตริบ

ด้วยโครงสร้างของไมโครสตริบเราสามารถแสดงคุณสมบัติของไมโครสตริบได้ดังนี้

1. ง่ายต่อการจัดการบนพื้นผิวของโครงสร้างไมโครสตริบทำให้เราสามารถวางอุปกรณ์ทั้งพาสซีฟและแอคทีฟไปได้ทั่วบริเวณของโครงสร้าง



รูปที่ 2.22 แบบรูปของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในโครงสร้างไมโครสตริบ

1. จากรูปที่ 2.11 แสดงภาพตัดขวางของไมโครสตริบและแสดงการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะตั้งฉากกับทิศทางของการเดินทางของคลื่น โดยสมมุติให้มีทิศทางที่เข้าไปในกระดาษ สนามไฟฟ้าจะวางตัวจากเส้นสตริบไปยังด้านพื้นกราวด์ สนามเกือบทั้งหมดจะรวมตัวไปด้านใต้ของแผ่นสตริบ มีบางส่วนที่เกิดขึ้นบริเวณขอบด้านข้างและด้านบนของสายส่งไมโครสตริบ บางส่วนก็จะขยายบริเวณไปยัง Free-space เหนือวัสดุฐานรอง ส่วนสนามแม่เหล็กก็จะเป็นวงอยู่รอบๆ สายส่งไมโครสตริบและจะขยายไปยังส่วนของวัสดุฐานรอง เนื่องด้วยมีค่าคงที่ของฉนวนอยู่สองค่าบนสตริบ (ค่าคงที่ใน Free-space และค่าคงที่ในไดอิเล็กตริก) ดังนั้นการวิเคราะห์ทาง

คณิตศาสตร์โครงสร้างสายส่งไมโครสตริปก่อนข้างมีความยุ่งยาก ในอีกด้านหนึ่งอาจกล่าวได้ว่า โครงสร้างไมโครสตริปเป็นโครงสร้างชนิดไดอิเล็กตริกผสม

1. จากโครงสร้างของไมโครสตริปที่กล่าวมาข้างต้นเราจะเห็นข้อดีของสายส่งไมโครสตริปเมื่อเปรียบเทียบกับท่อนำคลื่นและสายส่งแกนร่วม ดังนั้นการนำโครงสร้างของไมโครสตริปมาใช้งานในวงจรความถี่สูง หรือย่านไมโครเวฟจะเป็นเทคโนโลยีของวงจรระนาบ (Planar Technology) ซึ่งมีข้อดี ดังนี้

- มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา
- ง่ายต่อการทำ Production
- สามารถแก้ไขพัฒนาได้ง่าย
- มีราคาถูกในด้านการผลิตเชิงพาณิชย์

## 2.6 วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier)

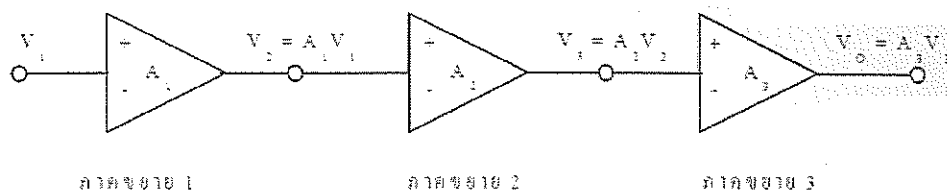
ระบบวงจรขยายหลายภาค(Multi – Stage Systems)สามารถแบ่งได้ 3 แบบใหญ่ๆ คือ

- ระบบวงจรขยายเชิงอนุกรม (Cascaded Systems)
- ระบบวงจรขยายเชิงขนาน (Cascode Systems)
- ระบบวงจรต่อเชิงผสม (Compound Systems)

โดยในโครงงานนี้จะกล่าวถึงระบบขยายเชิงอนุกรม ซึ่งเป็นการนำวงจรขยายตั้งแต่ 2 ภาคขึ้นไปมาต่อเรียงกันตามรูปที่ 2.12 โดยจะเริ่มจากภาคที่ 1 ทำการต่อขั้วด้านขาออกของภาคที่ 1 เข้ากับอินพุตของภาคที่ 2 เป็นต้น วงจรออปแอมป์ก็เช่นกัน สามารถนำมาต่อเรียงกันเป็นภาค ๆ ได้เหมือนกันเรียกว่า “วงจรแคสเคดออปแอมป์” ซึ่งในทางปฏิบัติมีความจำเป็นที่ต้องต่อวงจรแบบแคสเคดเพื่อให้ได้อัตราขยายรวมมีค่าใหญ่ขึ้น โดยอัตราขยายรวมของการต่อจะได้จากผลคูณของอัตราขยายของแต่ละภาค เขียนเป็นสมการได้คือ

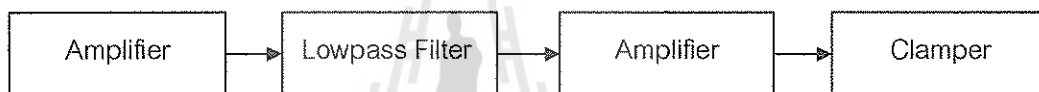
$$A = A_1 A_2 A_3 \quad (2.21)$$

ออปแอมป์แต่ละตัวที่ต่อกันแบบแคสเคดจะเรียกว่า ภาค (Stage) สัญญาณด้านเข้าจะถูกขยายด้วยอัตราขยายของแต่ละภาค เนื่องจากออปแอมป์มีข้อดี คือ มีอินพุตอิมพีแดนซ์สูงถึงอินพุตขั้วด้านขาออกอิมพีแดนซ์ต่ำถึงศูนย์ (อุดมคติ) ทำให้สามารถต่อแคสเคดกันได้โดยไม่ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและขั้วด้านขาออกของแต่ละส่วนเปลี่ยนไป แต่อย่างไรก็ตามต้องระวังในการออกแบบของออปแอมป์ในทางปฏิบัติ โดยต้องระวังการไหลลของภาคถัดไปที่จะทำให้ออปแอมป์อิ่มตัว



รูปที่ 2.23 บล็อกโคอะแกรมการต่อแบบแคสเคด 3 ภาค

ในโครงงานนี้จะใช้ภาคขยาย 2 ภาคในการขยายสัญญาณ หากแต่ภาคขยายทั้ง 2 ภาคนั้นจะถูกขึ้นด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Lowpass Filter) เนื่องจากเมื่อสัญญาณออกจาก Mixer แล้วสัญญาณจะมีขนาดลดลงจึงต้องใช้วงจรขยายสัญญาณเพื่อช่วยในการขยายสัญญาณ แล้วจึงผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Lowpass Filter) แต่สัญญาณที่ได้ยังมีขนาดเล็กจึงทำการขยายสัญญาณอีกครั้ง ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.24 บล็อกโคอะแกรมการต่อวงจรขยายสัญญาณ

ในระบบแคสเคดนี้จะมีการเชื่อมต่อระหว่างภาคได้ 3 แบบ คือ

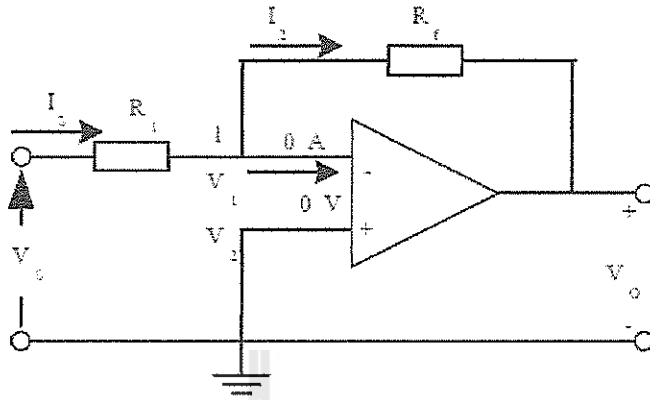
- วงจรขยายหลายภาคที่ใช้การเชื่อมต่อระหว่างภาคด้วย RC (RC Coupled Amplifiers)
- วงจรขยายหลายภาคที่ใช้การเชื่อมต่อระหว่างภาคด้วยหม้อแปลง (Transformer Coupled Amplifiers)
- วงจรขยายหลายภาคที่ใช้การเชื่อมต่อระหว่างภาคโดยตรง (Direct Coupled Amplifiers)

วงจรขยายสัญญาณโดยทั่วไปจะนิยมใช้วงจรขยายหลายภาคที่เชื่อมต่อระหว่างภาคด้วย RC เนื่องจากสามารถออกแบบได้ง่าย และราคาถูก ซึ่งวงจรขยายสัญญาณจะถูกแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

### 2.6.1 วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

ลักษณะสำคัญของวงจร คือ สัญญาณเข้าและความต้านทานป้อนกลับจะต่อเข้ากับขากลับขั้วของออปแอมป์ พิจารณาจากรูปที่ 7.5 จะต่อขาไม่กลับขั้ว (Non-inverting) เข้ากับกราวด์ ส่วน

แรงดันแหล่งจ่ายสัญญาณ  $V_i$  จะต่อเข้ากับขา กลับขั้ว (Inverting) ผ่านความต้านทาน  $R_1$  และต่อความต้านทานป้อนกลับ  $R_f$  ระหว่างขั้วด้านขาออกกับขากลับขั้ว



รูปที่ 2.25 การขยายแบบกลับเฟส

พิจารณาจากรูป 2.14 โดยใช้กฎกระแส KCL ที่จุด 1 จะได้

$$I_1 = I_2$$

$$\frac{V_i - V_1}{R_1} = \frac{V_i - V_o}{R_f} \quad (2.22)$$

แต่ถ้าเปิดแอมป์ในเชิงทฤษฎีถือว่าแรงดัน  $V_1 = V_2 = 0$  ดังนั้นเมื่อต่อขาไม่กลับขั้วลงกราวน์จะได้

$$\frac{V_i}{R_1} = \frac{-V_o}{R_f}$$

หรือ

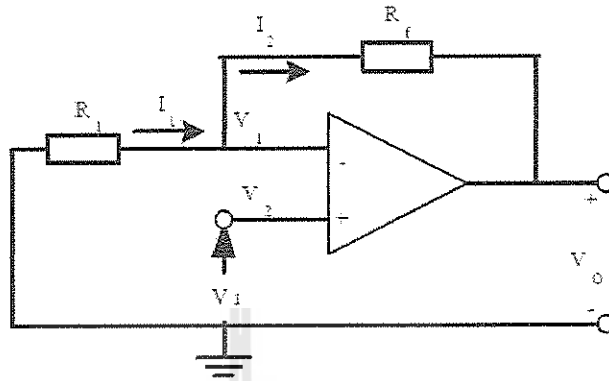
$$V_o = -\frac{R_f}{R_1} V_i \quad (2.23)$$

อัตราขยายแรงดัน คือ  $A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R_1}$  การออกแบบวงจรดังรูปที่ 2.14 คล้ายกับคำว่า

Inverter ได้มาจากเครื่องหมายลบ (-) นั่นเอง กล่าวคือ การขยายแบบกลับเฟสจะกลับขั้วสัญญาณด้านขาเข้านั่นเอง และจะเห็นว่าอัตราขยายได้จากความต้านทานป้อนกลับหารด้วยความต้านทานที่ต่อด้านขาเข้า นั่นคืออัตราขยายของวงจรจะขึ้นกับอุปกรณ์ภายนอกที่ต่อเข้ากับขั้วต่าง ๆ ของออปแอมป์เท่านั้น สำหรับตัวอย่างการใช้งานวงจรขยายแบบกลับเฟส จะนิยมใช้เป็นวงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน และวงจรกลับเฟสแรงดัน เป็นต้น

## 2.6.2 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier)

การขยายแบบไม่กลับขั้วด้วยออปแอมป์เป็นการประยุกต์ใช้ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่มีลักษณะการต่อวงจรภายนอกดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.26 การขยายแบบไม่กลับเฟส

การขยายแบบนี้สัญญาณที่จะขยายจะต่อเข้าขาไม่กลับขั้วของออปแอมป์และความต้านทาน  $R_1$  จะต่อเข้ากับขากลับขั้วเทียบกับกราวด์ ความต้านทานป้อนกลับก็ต่ออยู่ระหว่างขั้วขาต้านออกและขั้วขากลับขั้ว(พิจารณาตามรูปที่ 2.15) เช่นเดียวกับการขยายแบบอื่น เราต้องการทราบแรงดันต้านออกและอัตราขยายแรงดัน ดังนั้นประยุกต์ใช้กฎกระแส KCL ที่ขากลับขั้วจะได้

$$I_1 = I_2$$

$$\frac{0 - V_1}{R_1} = \frac{V_1 - V_o}{R_f} \quad (2.24)$$

แต่  $V_1 = V_2 = V_i$  เขียนสมการ (2.24) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{V_i}{R_1} = \frac{V_i - V_o}{R_f} \quad (2.25)$$

หรือ

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) V_i \quad (2.26)$$

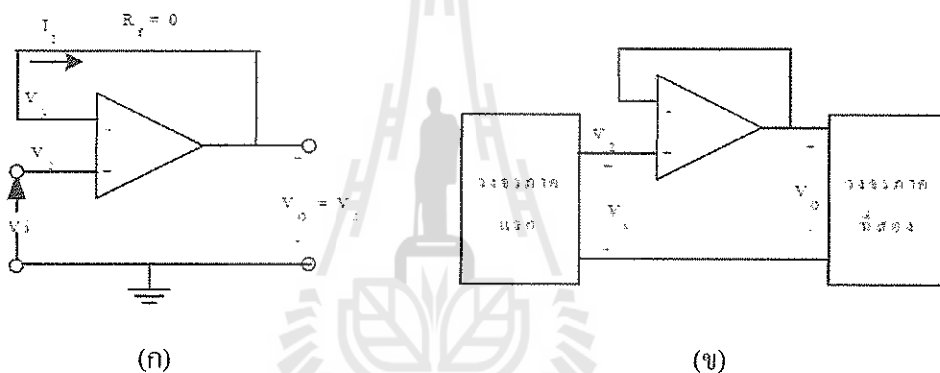
อัตราขยายแรงดัน คือ  $A_v = \frac{V_o}{V_i} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)$  ซึ่งไม่มีเครื่องหมายลบ (-) ดังนั้น แรงดัน

ต้านขาออกจะมีขั้วเหมือนกับแรงดันต้านขาเข้า นั่นคือวงจรขยายแบบไม่กลับขั้วจะถูกลูกออกแบบให้มีอัตราขยายเป็นบวกนั่นเอง และก็เหมือนกับวงจรขยายแบบกลับขั้วที่อัตราขยายของวงจรจะขึ้นกับอุปกรณ์ภายนอกที่นำมาต่อเท่านั้น

ถ้ากำหนดให้ความต้านทานป้อนกลับ  $R_f = 0$  (ต่อลัดวงจร) หรือ  $R_1 = \infty$  (หรือเปิดวงจร) อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือทั้งสองอย่างดังกล่าว จะทำให้อัตราขยายของวงจรนี้มีค่าเท่ากับ 1 กรณี  $R_f = 0$  (ต่อลัดวงจร) และ  $R_1 = \infty$  (หรือเปิดวงจร) รูปที่ 2.16 ก) จะเขียนได้เป็นวงจรดังรูปที่ 2.16 ข) ซึ่งเรียกว่า วงจรตามแรงดัน (Voltage Follower) เพราะแรงดันด้านขาออก จะมีค่าเดียวกับแรงดันด้านขาเข้า นั่นคือ

$$V_o = V_i \quad (2.27)$$

เนื่องจากออปแอมป์มีค่าความต้านทานหรืออิมพีแดนซ์ด้านขาเข้าสูงมาก จึงใช้ประโยชน์เป็นตัวคั่นระหว่างวงจรขยายซึ่งอาจเรียกว่า บัฟเฟอร์ (Buffer) ใช้สำหรับแยกวงจร โดยอธิบายได้ดังรูปที่ 2.16 โดยบัฟเฟอร์จะเป็นตัวกลางกั้นไม่ให้วงจรทั้งสองกวนซึ่งกันและกันและยังช่วยไม่ให้วงจรชั้นถัดไปกินกำลัง (Loading) วงจรแรกอีกด้วย

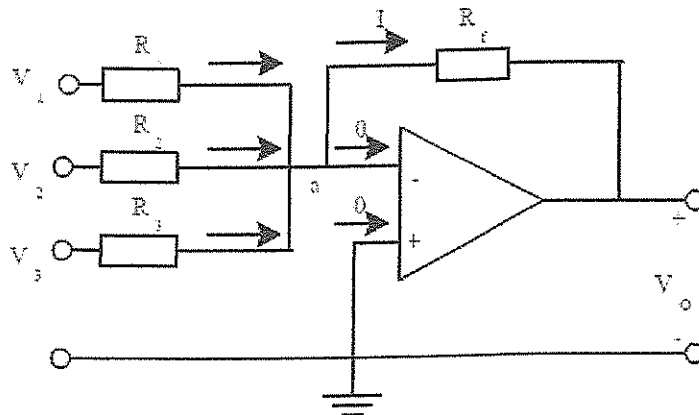


รูปที่ 2.27 วงจรตามแรงดันหรือบัฟเฟอร์ที่ใช้แยกวงจรแต่ละชั้นออกจากกัน

### 2.6.3 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ (Summing Amplifier)

นอกจากขยายสัญญาณแล้วยังสามารถใช้ออปแอมป์ในการรวม (บวก) หรือการลบได้ด้วย สำหรับการรวมคือ การต่อวงจรออปแอมป์เพื่อรับสัญญาณด้านเข้าแล้วหลายๆ สัญญาณรวมกัน และสร้างเป็นค่าที่ได้ออกมาที่ด้านออกเป็นผลรวมของค่าแรงดันของค่าด้านขาเข้า (ค่าประจำหลัก) มีลักษณะการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 2.17





รูปที่ 2.28 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ

จากรูปที่ 2.17 จะเห็นว่าวงจรขยายแบบรวมสัญญาณก็คือวงจรที่แปลงรูปมาจากวงจรขยายแบบกลับเฟส โดยใช้ข้อดีที่รูปแบบของวงจรขยายแบบกลับเฟสสามารถใช้ได้กับจุดต่อด้านขาเข้าหลายจุดต่อในเวลาเดียวกัน คือถือว่าไม่มีกระแสไหลเข้าแต่ละขั้วที่ด้านเข้าของออปแอมป์ (เป็น 0) เมื่อใช้กฎกระแส KCL ที่จุด a จะได้

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (2.28)$$

แต่

$$I = \frac{V_a - V_o}{R_f} \quad (2.29)$$

$$I_1 = \frac{V_1 - V_a}{R_1} \quad (2.30)$$

$$I_2 = \frac{V_2 - V_a}{R_2} \quad (2.31)$$

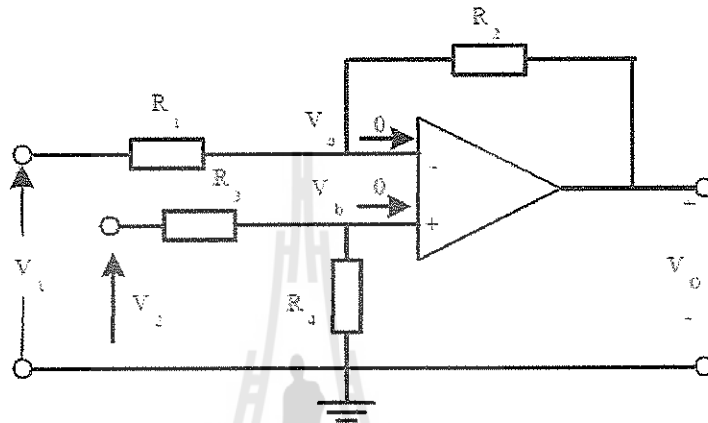
เราจะสังเกตได้ว่า  $V_a = 0$  เมื่อแทนค่าในสมการ (2.29), (2.30) และ (2.31) แล้วนำไปแทนในสมการ (2.28) เราจะได้สมการแรงดันด้านขาออกดังนี้

$$V_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}V_1 + \frac{R_f}{R_2}V_2 + \frac{R_f}{R_3}V_3\right) \quad (2.32)$$

สมการแสดงให้เห็นว่าแรงดันด้านขาออกเป็นผลรวมของแรงดันด้านขาเข้า เราจึงเรียกวงจรนี้ได้ว่า ตัวรวม (Summer) โดยจำนวนจุดต่อรับสัญญาณด้านขาเข้าอาจมากกว่าที่กล่าวข้างต้นก็ได้

### 2.6.4 วงจรขยายแบบเปรียบเทียบสัญญาณ (Difference Amplifier)

การขยายผลต่าง คือวงจรที่ใช้ในการขยายความแตกต่างของสัญญาณระหว่างขาเข้าทั้งสอง ซึ่งจะตรงข้ามกับหัวข้อการขยายแบบรวมสัญญาณที่กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้ยังมีลักษณะคล้ายหรือเกี่ยวข้องกับการขยายสำหรับเครื่องมือวัด (Instrumentation Amplifier) อันเป็นวงจขยายที่มีประโยชน์และนิยมใช้มาก



รูปที่ 2.29 การขยายแบบเปรียบเทียบสัญญาณ

พิจารณาจากรูปที่ 2.18 และใช้ข้อกำหนดของออปแอมป์ที่กล่าวว่ามีกระแสไหลเข้า (ศูนย์ :0) ขั้วขาเข้าของออปแอมป์ เช่น เดิมเราประยุกต์ใช้กฎกระแส KCL ที่จุด a เขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{V_1 - V_a}{R_1} = \frac{V_a - V_o}{R_2}$$

หรือ

$$V_o = \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) V_a - \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (2.33)$$

ที่จุด b ใช้กฎกระแส KCL จะได้

$$\frac{V_2 - V_b}{R_3} = \frac{V_b - 0}{R_4}$$

หรือ

$$V_b = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 \quad (2.34)$$

เมื่อ  $V_o = V_b$  แทนสมการ (2.34) ลงในสมการ (2.33) จะได้สมการ

$$V_o = \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1$$

หรือ

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} \left( \frac{\frac{R_1}{R_2} + 1}{\frac{R_3}{R_4} + 1} \right) V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (2.35)$$

เมื่อแรงดัน  $V_1 = V_2$  วงจรขยายต้องให้แรงดันด้านขาออก  $V_o = 0$  ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติของวงจรที่ขจัดสัญญาณร่วม (Reject a Signal Common) ที่ขาเข้าทั้งสอง ซึ่งจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวและ

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

นั่นคือ เมื่อวงจรเป็นการขยายแบบเปรียบเทียบสัญญาณสมการ (2.34) จะกลายเป็น

$$\begin{aligned} V_o &= \frac{R_2}{R_1} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 \\ &= \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \end{aligned} \quad (2.36)$$

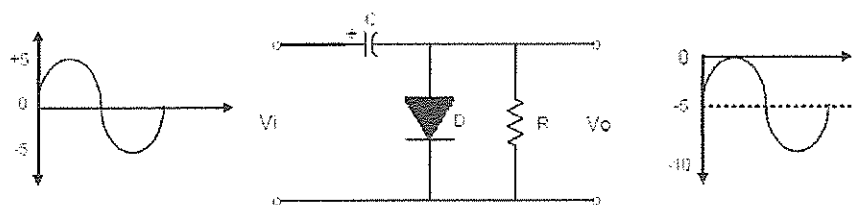
ถ้ากำหนดให้  $R_1 = R_2$  และ  $R_3 = R_4$  วงจรขยายแบบเปรียบเทียบสัญญาณจะกลายเป็นตัวลบ (Subtractor) สัญญาณ ซึ่งมีแรงดันด้านขาออกเป็น

$$V_o = (V_2 - V_1) \quad (2.37)$$

## 2.7 วงจรยกระดับสัญญาณ (Clampers Circuit)

วงจรยกระดับสัญญาณ หรือวงจรปรับระดับสัญญาณ เป็นวงจรเปลี่ยนแปลงระดับหรือตำแหน่งของสัญญาณไฟสลับ ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ โดยที่ลักษณะของรูปคลื่นไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ซึ่งสามารถตั้งระดับของสัญญาณไฟสลับ ที่ระดับใด ๆ ก็ได้

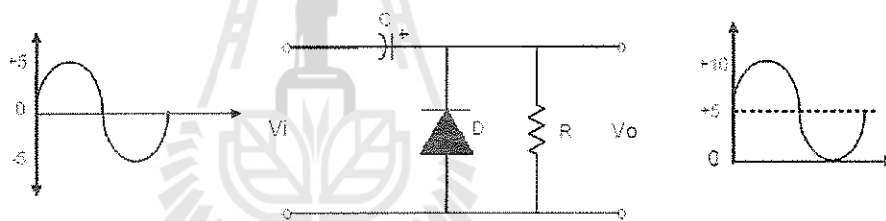
### 2.7.1 วงจรยกระดับแรงดันกลับ (NEGATIVE - VOLTAGE CLAMPER)



รูปที่ 2.30 วงจรยกระดับแรงดันกลับ

จากรูปที่ 2.19 เป็นวงจรยกระดับแรงดันกลับ ให้มีแรงดัน ไฟสลับออกเอาต์พุตเป็นช่วงลบทั้งหมด เปลี่ยนแปลงระดับจาก (0V ถึง -10 V ซึ่งอาศัย C เป็นตัวช่วยเสริมแรงดันช่วงลบออกเอาต์พุต ไดโอด D. ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อสัญญาณอินพุต เพื่อส่งไฟประจุ C ระดับแรงดันลบที่ออกเอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงจาก -5V ขึ้น ไปถึง 0V ลดลงมาเป็น -10V และกลับไปเป็น -5V ตามเดิม

### 2.7.2 วงจรยกระดับแรงดันบวก (POSITIVE - VOLTAGE CLAMPER)



รูปที่ 2.31 วงจรยกระดับแรงดันบวก

จากรูปที่ 2.20 เป็นวงจรยกระดับแรงดันบวก ให้มีแรงดัน ไฟสลับออกเอาต์พุต เป็นช่วงบวกทั้งหมด เปลี่ยนแปลงระดับจาก 0V ถึง +10V ซึ่งอาศัย C เป็นตัวช่วยเสริมแรงดันช่วงบวกออกเอาต์พุต ไดโอด D. ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อสัญญาณอินพุต เพื่อส่งไปประจุ C. ระดับแรงดันบวกที่ออกเอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงจาก +5V ขึ้น ไปถึง +10V กลับลดลงมาเป็น 0V และกลับไปเป็น +5V ตามเดิม

## 2.8 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

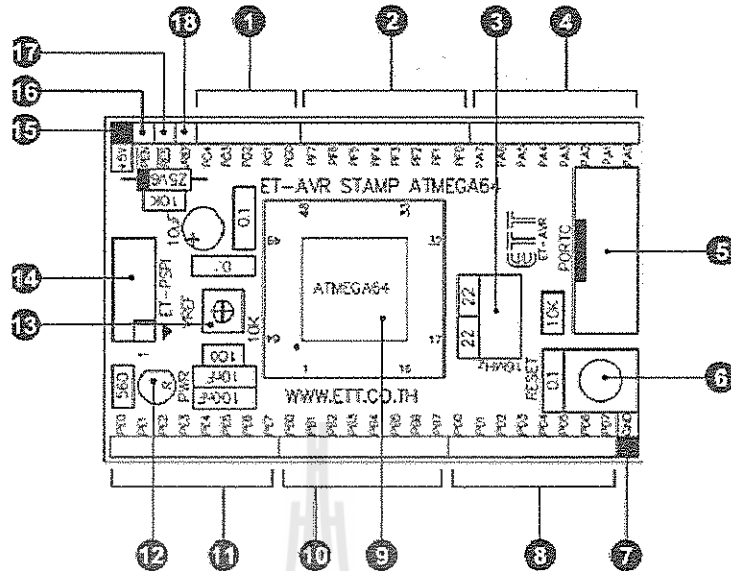
บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นจะใช้สำหรับการรับสัญญาณจากวงจรรายสัญญาณ เพื่อแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลแล้วส่งให้ส่งสัญญาณอินพุตเข้าไปที่เครื่องคอมพิวเตอร์

โดยบอร์ดที่ใช้สำหรับส่งสัญญาณอินพุตเข้าไปที่เครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นบอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ET-AVR STAMP ATmega128 เป็นบอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล AVR ของบริษัทAtmel ซึ่งบอร์ดนี้เลือกใช้ MCU เบอร์ ATmega64 และ ATmega128 ขนาด 64 Pin โดยการออกแบบโครงสร้างของบอร์ดนั้น จะเน้นเรื่องการจัดวางบอร์ดให้มีขนาดเล็กเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยได้นำ MCU มาจัดวางร่วมกับอุปกรณ์พื้นฐานที่จำเป็นและจัดขาออกมาใช้งานภายนอก ซึ่งการจัดเรียงขาสัญญาณ จะทำการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบเพื่อให้สามารถต่อใช้งานได้โดยสะดวก โดยที่ตัวบอร์ดจะใช้ไฟเลี้ยง +5V

### คุณสมบัติของบอร์ด ET-AVR STAMP ATmega128

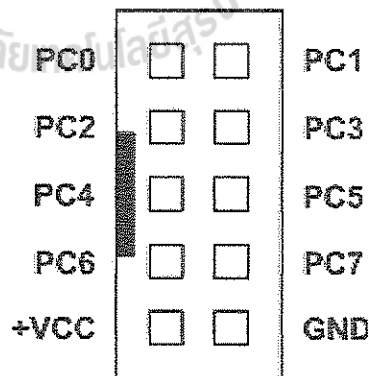
1. ใช้ MCU ตระกูล AVR เบอร์ ATmega64 และ ATmega128 ของ Atmel ซึ่งเป็น MCU ขนาด 8-Bit
2. ความเร็วสัญญาณนาฬิกา Crystal 16 MHz
3. รองรับการ โปรแกรมแบบ SPI และ JTAG (ต้องใช้ร่วมกับบอร์ด ET-AVR START KIT V1.0
4. Power Supply ใช้แรงดันไฟฟ้า 4.5 - 5.5 V
5. ภายใน MCU มีหน่วยความจำโปรแกรมแบบ Flash ขนาด 64 KB (ATmega64) และ 128KB (ATmega128) , หน่วยความจำข้อมูล RAM ขนาด 4 KB , หน่วยความจำข้อมูลการแบบ EEPROM ขนาด 2 KB (ATmega64) และ 4KB (ATmega128) สามารถลบ และเขียนซ้ำได้กว่า 100,000 ครั้ง
6. จำนวน I/O สูงสุดถึง 53 I/O Pins ซึ่งขาสัญญาณ I/O จะมีการใช้งานร่วมกันของ Function อื่น ๆ อีกดังนี้
  - SPI จำนวน 1 ช่อง , I2C จำนวน 1 ช่อง , 10-Bit ADC จำนวน 8 ช่อง
  - Programmable Serial USARTs จำนวน 2 ช่อง
  - Timers/Counters 8-Bit จำนวน 2 ช่อง , Timers/Counters 16-Bit จำนวน 2 ช่อง , 8-Bit PWM 2 ช่อง , Watchdog Timer , Real Time Counter
7. ทนอุณหภูมิใช้งานระหว่าง -40 ถึง +85°C
8. Dimensions: - PCB Size 1653.543 mil x 2559 mil (42 x 65 mm)
  - ระยะขา ความกว้าง 1500 mil ความยาว 2400 mil (~ 38.1 x 61 mm)
  - ระยะระหว่างขา 2 x 25 Pins I/O Connector 100 mil (~ 2.54 mm)

โครงสร้างบอร์ด ET-AVR STAMP ATmega64/128



รูปที่ 2.32 แสดง โครงสร้างของบอร์ด ET-AVR STAMP ATmega64/128

- หมายเลข 1 คือ พอร์ต G ซึ่งประกอบไปด้วย PG0 – PG4 จำนวน 5 Pins
- หมายเลข 2 คือ พอร์ต F ซึ่งประกอบไปด้วย PF0 – PF7 จำนวน 8 Pins
- หมายเลข 3 คือ Crystal 16 MHz
- หมายเลข 4 คือ พอร์ต A ซึ่งประกอบไปด้วย PA0 – PA7
- หมายเลข 5 คือ พอร์ต C ซึ่งประกอบไปด้วย PC0 – PC7 โดยพอร์ตนี้จะถูกเชื่อมต่อออกมารอไว้ยัง Connector ขนาด 10 PIN แบบ IDE โดยการจัดเรียงขาเป็นดังรูป



PORT-PC[0..7]

รูปที่ 2.33 แสดงการจัดเรียงขา

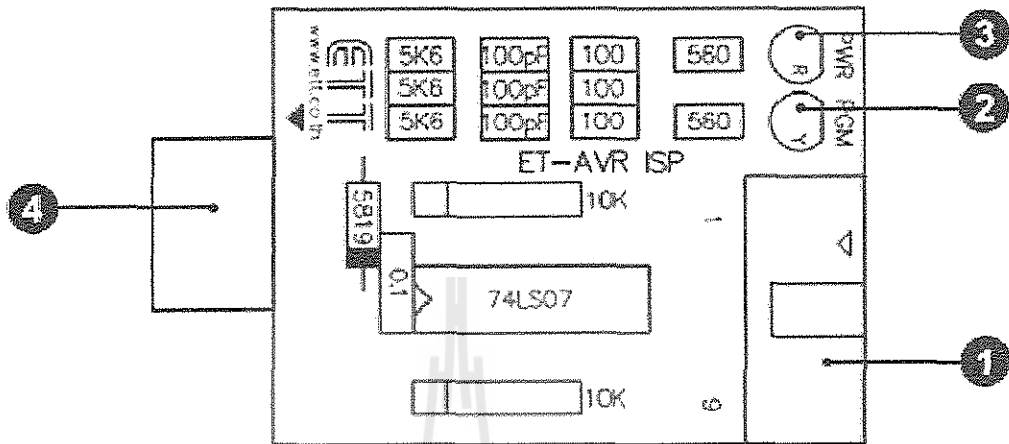
- หมายเลข 6 คือ สวิตช์ RESET
- หมายเลข 7 คือ จุดต่อ GND
- หมายเลข 8 คือ พอร์ต D ซึ่งประกอบไปด้วย PD0 – PD7
- หมายเลข 9 คือ MCU ATMEGA64 ของ Atmel
- หมายเลข 10 คือ พอร์ต B ซึ่งประกอบไปด้วย PB0 – PB7
- หมายเลข 11 คือ พอร์ต E ซึ่งประกอบไปด้วย PE0 – PE7
- หมายเลข 12 คือ LED PWR (สีแดง) แสดงสถานะของไฟเลี้ยงบอร์ด
- หมายเลข 13 คือ ตัวต้านทานปรับค่าได้ สำหรับปรับค่าแรงดันอ้างอิงของ ADC ที่ขา AREF
- หมายเลข 14 คือ พอร์ต ET-PSPI สำหรับเชื่อมต่อกับวงจร ISP PROGRAMMER เพื่อโปรแกรม Hex File ให้กับ AVR โดยการจัดเรียงขาแบบเดียวกันกับชุด STKxxx ของ Atmel
- หมายเลข 15 คือ จุดต่อ Power Supply +5V ของบอร์ด
- หมายเลข 16 คือ ขา PEN ใช้สำหรับเข้าโหมด SPI Serial Programming (ปกติไม่ได้ใช้งาน)
- หมายเลข 17 คือ จุดต่อสัญญาณ RESET สำหรับใช้ RESET จากอุปกรณ์ภายนอก
- หมายเลข 18 คือ จุดต่อขา AREF สำหรับใช้วัดค่าแรงดันอ้างอิงที่ขา AREF

### บอร์ด ET-AVR ISP

ET-AVR ISP เป็นบอร์ดที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการดาวน์โหลด Hex File ให้กับ MCU ตระกูล AVR ของ Atmel โดยใช้วิธีการแบบ Serial Programming ซึ่งการดาวน์โหลด Hex File จะกระทำผ่านทางพอร์ตขนานของคอมพิวเตอร์ โดยที่จะต้องใช้งานร่วมกับ ET-CAP10P ของอีทีที และ Software ที่ใช้ร่วมกับ ET-AVR ISP ก็คือ PonyProg2000 ซึ่ง PonyProg2000 เป็น โปรแกรม Download ข้อมูลแบบ HEX File ให้กับ CPU ตระกูล AVR โดยใช้วิธีการแบบ Serial Programming ซึ่งสามารถใช้งานกับบอร์ดตระกูล AVR ของ อีทีที ได้เป็นอย่างดี ซึ่งวิธีการใช้งานโปรแกรมโดยทั่วไปนั้น สามารถศึกษาได้จาก Help ของโปรแกรมได้เอง โดยในที่นี้จะขอแนะนำให้ทราบถึง

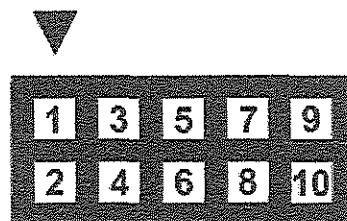
วิธีการ Setup โปรแกรม PonyProg2000 เพื่อใช้งานกับบอร์ดตระกูล AVR ของ อีทีที ซึ่งสามารถใช้งานได้ด้วยบอร์ดตระกูล AVR ทุกรุ่นของ อีทีที

### โครงสร้างของบอร์ด ET-AVR ISP



รูปที่ 2.34 แสดงโครงสร้างของ ET-AVR ISP

- หมายเลข 1 คือ พอร์ตสำหรับเชื่อมต่อกับ ET-CAP10P ของอีทีที เพื่อโปรแกรม Hex File ให้กับ MCU
- หมายเลข 2 คือ LED PGM (สีเขียว) แสดงสถานะของการ โปรแกรมหรือดาวน์โหลด Hex File ลง MCU
- หมายเลข 3 คือ LED PWR (สีแดง) แสดงสถานะของไฟเลี้ยงบอร์ด
- หมายเลข 4 คือ พอร์ตสำหรับเชื่อมต่อกับบอร์ด Target ซึ่งสามารถใช้โปรแกรม Hex File ให้กับบอร์ด ET-AVR STAMP ATmega64 โดยเสียบบอร์ด ET-AVR ISP เข้าที่ พอร์ต ETPSPI ซึ่งมีการ จัดเรียงขาสัญญาณดังรูป



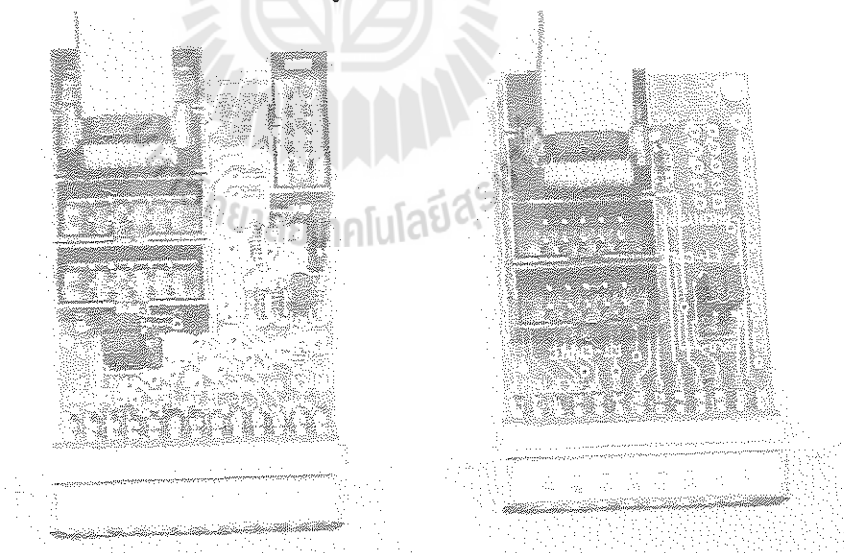
รูปที่ 2.35 แสดงการจัดเรียงขา



ตำแหน่งขา	ชื่อสัญญาณ
1	MOSI
2	VCC
3	ไม่ได้ใช้งาน
4,6,8,10	GND
5	RESET
7	SCK
9	MISO

### การเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับโปรแกรม Hex File

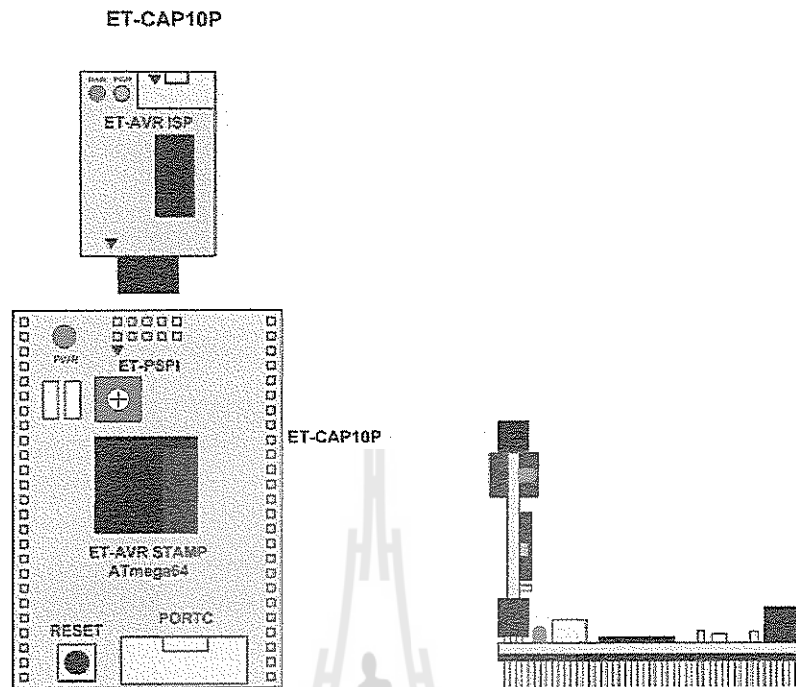
การโปรแกรมโค้ด (Hex File) ให้กับ AVR MCU ต้องใช้งานร่วมกับ ET-CAP10PIN และโปรแกรม PonyProg2000 โดยต่อ ET-CAP10PIN เข้ากับพอร์ต Printer พร้อมทั้งเลือก Jumper สำหรับใช้งานกับโปรแกรม PonyProg2000 แล้วต่อสาย Download ที่ขั้วต่อ ET-PSPI Download ของบอร์ด พร้อมทั้งจ่ายไฟเข้าบอร์ดให้เรียบร้อย ถ้ามีการต่ออุปกรณ์ภายนอกที่พอร์ต PB ให้ปลดออกก่อน โดยการเชื่อมต่อจะมีลักษณะดังรูปต่อไปนี้



(ซ้าย) ET-CAP10P V2.0

(ขวา) ET-CAP10P V1.0

รูปที่ 2.36 แสดงการเลือก Jumper และการต่อสาย Download  
ของ ET-CAP10P เพื่อใช้กับ AVR



(ซ้าย) ภาพด้านบน

(ขวา) ภาพด้านข้าง

รูปที่ 2.37 แสดงการต่อ ET-AVR ISP เข้ากับ ET-AVR STAMP ATmega64/128

โดยการต่อบอร์ดทั้งสองเข้าด้วยกันนั้นจะให้สังเกตที่เครื่องหมายสามเหลี่ยมจะต้องตรงกัน

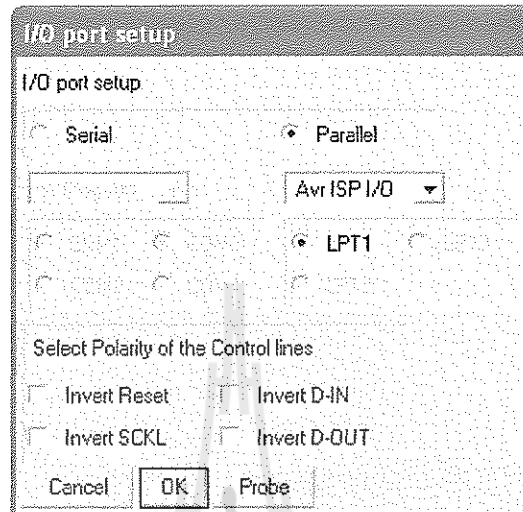
**การProgramให้Board ET-AVR STAMP ATMEGA64/128ด้วยโปรแกรม PonyProg2000**

โปรแกรม PonyProg2000 เป็น โปรแกรม Download ข้อมูลแบบ HEX File ให้กับ CPU ตระกูล AVR โดยใช้วิธีการแบบ Serial Programming ซึ่งสามารถใช้งานกับบอร์ดตระกูล AVR ของ อีทีที ได้เป็นอย่างดี ซึ่งวิธีการใช้งานโปรแกรมโดยทั่วไปนั้น สามารถศึกษาได้จาก Help ของ โปรแกรมได้เอง โดยในที่นี้จะขอแนะนำให้ทราบถึงวิธีการ Setup โปรแกรม PonyProg2000 เพื่อใช้งานกับบอร์ดตระกูล AVR ของอีทีที ซึ่งสามารถใช้งานได้กับบอร์ดตระกูล AVR ทุกรุ่นของอีทีที

สำหรับกรณีที่ใช้ CPU ตระกูล AVR เบอร์ ATmega64 นั้น จะมีข้อควรระวังอยู่อย่างหนึ่ง เนื่องจากโครงสร้างภายในของ ATmega64 นั้นจะมี Fuse Bit สำหรับกำหนดเงื่อนไขการทำงานของ CPU รวมอยู่ด้วยหลายบิต ซึ่ง Fuse Bit ต่างๆเหล่านี้ บางบิตจะมีผลต่อการDownload แบบ Serial Programming ด้วย เนื่องจากถ้าเลือกกำหนดคุณสมบัติของ Fuse Bit ไม่ถูกต้องอาจทำให้ไม่สามารถสั่งโปรแกรม CPU ตัวนั้นด้วยวิธีการ Serial Programming ได้อีก นอกจากนี้จะนำ CPU ตัวนั้นไปแก้ไข Fuse Bit ด้วยเครื่องโปรแกรมแบบ Parallel ให้ได้ค่าที่ถูกต้องเสียก่อน

โดยในการสั่งโปรแกรม CPU ตระกูล AVR ที่ใช้งานกับบอร์ดของ อีทีที นั้น ถ้าใช้การโปรแกรมด้วยโปรแกรมของ “PonyProg2000” จะต้องกำหนด Option ของโปรแกรมเพื่อให้สามารถใช้งานกับบอร์ดของอีทีที ดังนี้

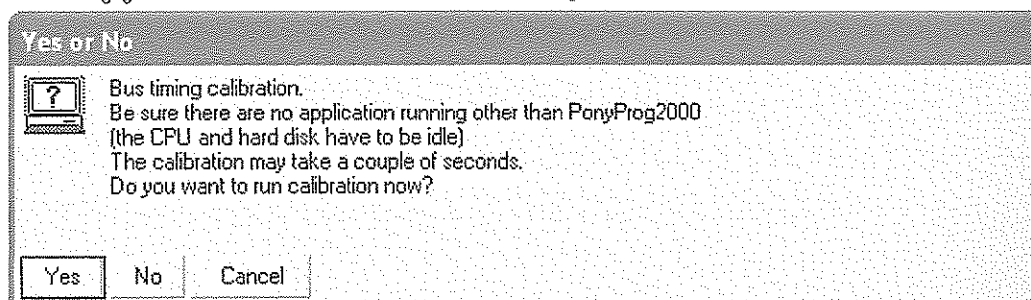
1. กำหนด Setup → Interface Setup... เป็นดังนี้

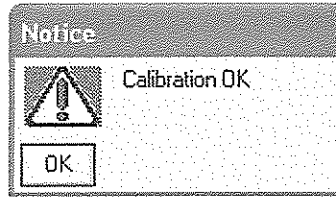


รูปที่ 2.38 แสดงการกำหนดค่า Setup

- ให้เลือก I/O Port เป็น Parallel และเลือกรูปแบบการโปรแกรมเป็น Avr ISP I/O
- ให้เลือก Printer Port ตามที่ต่อจริง เช่น LPT1 ในกรณีที่ใช้กับ Printer Port LPT1
- ส่วนของ Polarity Control Line ไม่ต้องเลือก
- การ Setup นี้ทำเพียงครั้งเดียวตอนเริ่มใช้งาน โปรแกรมในครั้งแรกเท่านั้น

2. สั่งให้โปรแกรม PonyProg2000 ทำการคำนวณหาค่าความเร็วที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการส่งสัญญาณไปโปรแกรม CPU โดยเลือกจาก Setup → Calibration

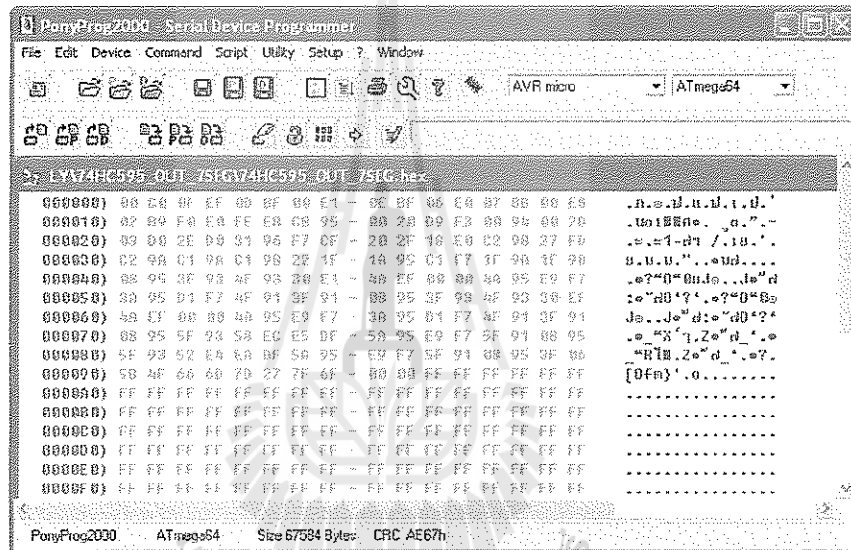




รูปที่ 2.39 แสดงการใช้โปรแกรม

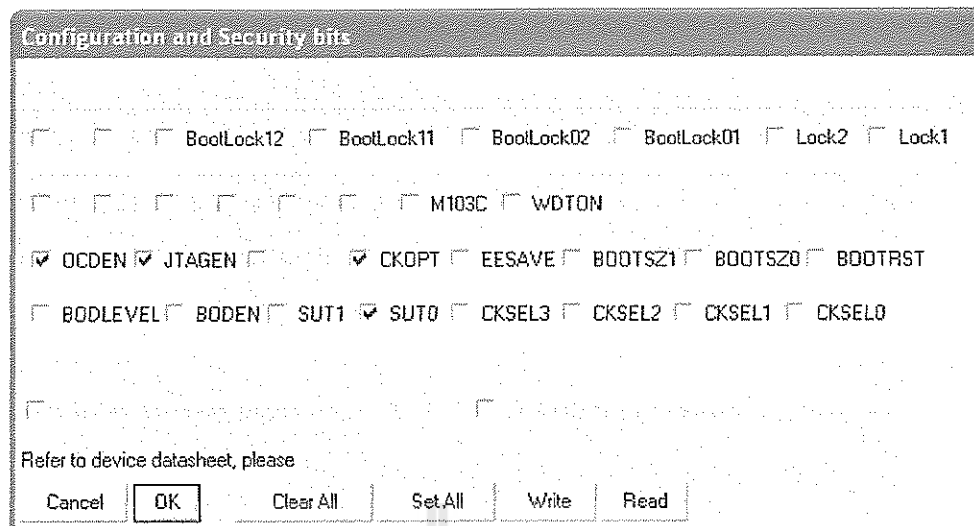
- การตั้ง Calibration จะกระทำเพียงครั้งเดียวในตอนเรียกใช้งานโปรแกรมครั้งแรกเท่านั้น

3.เลือกกำหนดเบอร์ CPU จาก Device → AVR Micro → เวย์น Atmega64



รูปที่ 2.40 แสดงการใช้โปรแกรม

4. เลือกกำหนด Command → Security and Configuration Bits โดยถ้าเป็น AVR เบอร์อื่นๆสามารถกำหนดการทำงานของ Fuse Bit ได้ตามต้องการ โดยสามารถศึกษารายละเอียดของ Fuse Bitต่างๆได้จาก Data Sheet ของ CPU ที่ใช้ได้เอง แต่ในกรณีที่ใช้ร่วมกับ Atmega64 นั้นต้องระมัดระวังในการเลือกกำหนด Fuse Bit ให้ถูกต้องด้วย ซึ่งถ้ากำหนดผิดพลาดส่งผลให้ไม่สามารถสั่งโปรแกรม CPU ด้วยวิธีการ Serial Programming ได้อีก โดยให้กำหนดเป็นดังนี้



รูปที่ 2.41 แสดงการเลือกกำหนด Fuse Bit เพื่อใช้กับ CPU เบอร์ ATmega64

#### ความหมายของ Fuse Bit ต่างๆของ ATmega64

- ในกรณีที่เลือก [✓] ที่หน้า Fuse Bit ตัวใด หมายถึงการกำหนดให้ Fuse Bit นั้นๆมีค่าเป็น "0" หรือการสั่งโปรแกรม Fuse Bit นั้นๆ
- ในกรณีที่ไม่เลือก [✓] ที่หน้า Fuse Bit ตัวใด หมายถึงการกำหนดให้ Fuse Bit นั้นๆ มีค่าเป็น "1" หรือสั่งไม่โปรแกรม Fuse Bit นั้นๆ

#### ความหมายของ Fuse Bit ของ ATmega64 ที่มีผลต่อ Serial Programming

- SPIEN เป็น Serial Programming Enable Bit ซึ่งจะต้องสั่ง โปรแกรม Fuse Bit นี้ไว้เสมอ เพื่อให้ สามารถสั่ง Download โปรแกรมให้กับ CPU ด้วยวิธีการ In-System Serial Programming ได้ ซึ่งตามปกติแล้ว Fuse Bit นี้จะถูกสั่ง โปรแกรมมาจากโรงงานอยู่แล้วและไม่สามารถสั่งลบหรือแก้ไข Fuse Bit นี้ได้ด้วยโหมด Serial Programming แต่ถ้ามีการนำ CPU ไปโปรแกรมด้วย เครื่องแบบ Parallel Programming จะต้องไม่ลืมสั่งโปรแกรม Fuse Bit นี้ไว้ด้วยเสมอทุกครั้ง

- OCDEN และ JTAGEN ทั้งสองบิตนี้จะใช้ในกรณีที่ต้องการ Debug การทำงานของMCU และโปรแกรมผ่านทาง JTAG Interface ซึ่งต้องร่วมกับ AVR JTAG Debugger ซึ่งถ้าไม่ได้ใช้งานก็ ไม่จำเป็นต้องเลือกทั้งสองบิตนี้

- CKOPT เป็น Oscillator Option Bit ถ้าสั่งโปรแกรม Fuse Bit นี้จะเป็นการกำหนดให้ CPU ทำงานที่ขานความถี่ 16MHz แต่ถ้าไม่ได้สั่งโปรแกรม Fuse Bit นี้จะเป็นการกำหนดให้ CPU ทำงานที่ขานความถี่ไม่เกิน 8MHz ซึ่งถ้าใช้กับบอร์ดมาตรฐานของอิทีทีจะใช้ XTAL เป็น

แหล่งกำเนิดความถี่ ดังนั้นควรตั้งโปรแกรมค่า Fuse Bit นี้ไว้ เพื่อให้ CPU สามารถทำงานได้ที่ย่านความถี่ของ XTAL ตั้งแต่ 1.0MHz-16.0MHz

• CKSEL3...0 เป็น Select Clock Source Bit ใช้ร่วมกันสำหรับเลือกแหล่งกำเนิดและย่านของความถี่ที่จะใช้กับ CPU ซึ่งในกรณีใช้งานกับบอร์ดมาตรฐานของอิตีที ต้องเลือกเป็น External Crystal ค่า 1.0 MHz - 16.0 MHz ซึ่งถ้าเลือกเป็นอย่างอื่นจะทำให้การทำงานของโปรแกรมผิดพลาดและที่สำคัญถ้าเลือกแหล่งกำหนดความถี่ผิด เช่น เลือกเป็น External Clock หรือ External RC Oscillator จะทำให้ CPU ไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากไม่มีการต่อสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกไว้ให้ และจะทำให้ไม่สามารถตั้งโปรแกรม CPU ด้วยวิธีโปรแกรมแบบ Serial Programming ได้อีกจนกว่าจะมีการนำ CPU ไปแก้ไขค่า Fuse Bit เพื่อเลือกแหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกาเป็น External Crystal ให้ถูกต้องเสียก่อน

## 2.9 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีต่างๆ ในการออกแบบชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สาย ได้แก่ การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล การมอดูเลตแบบ AM วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (Lowpass Filter) วงจรเลื่อนเฟส (Phase Shifter) วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) วงจรขั้วจับสัญญาณ (Clampers Circuit) บอร์ด ซึ่งทำให้ทราบวิธีคำนวณหาค่าต่างๆ ในการสร้างอุปกรณ์ นอกจากนั้นยังศึกษาเทคนิคการเขียนไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega128 และ โปรแกรม Matlab 7.0 รวมถึงศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณที่ได้จากการประมวลผล จึงทำให้ทราบการจำลองแบบหาคำนวณของวงจร RF ต่างๆ ที่ต้องประยุกต์และต้องมีความสัมพันธ์กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายกับชุดอุปกรณ์ต่างๆ ในบทต่อไปจะนำเสนอ การจำลองแบบจากทฤษฎีที่กล่าวมา และออกแบบชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สายต่อไป

### บทที่ 3

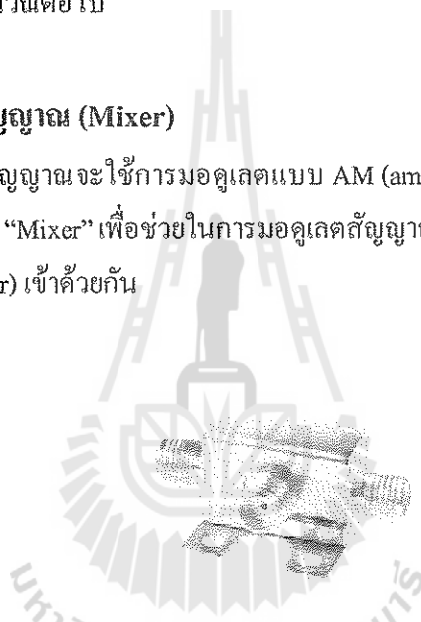
## ชุดอุปกรณ์ต้นแบบ

### 3.1 บทนำ

ในการสร้างชุดอุปกรณ์ต้นแบบของชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สายนั้น เราจำเป็นต้องที่จะต้องทำการออกแบบชุดอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้ได้ผลตามเป้าหมายที่เราได้คาดหวังไว้ ดังนั้นในบทนี้เราจึงจะกล่าวถึงการออกแบบเพื่อที่จะสร้างชุดอุปกรณ์ต่างๆ ก็คือ วงจรเลื่อนเฟส และวงจร RF ซึ่งจะทำการออกแบบด้วยการอ้างอิงจากทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 จากนั้นจึงได้ทำการออกแบบและเขียน โปรแกรมเพื่อสั่งการให้ตัวประมวลผลเพื่อให้ได้ผลตามที่คำนวณต่อไป

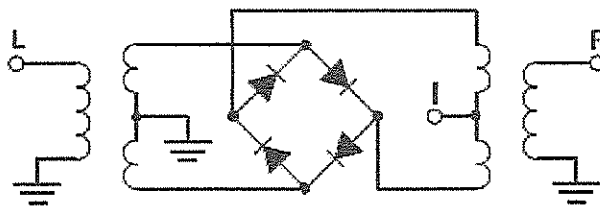
### 3.2 อุปกรณ์ผสมสัญญาณ (Mixer)

ในการผสมสัญญาณจะใช้การมอดูเลตแบบ AM (amplitude modulation) โดยใช้อุปกรณ์ผสมสัญญาณที่เรียกว่า "Mixer" เพื่อช่วยในการมอดูเลตสัญญาณข่าวสารหรือข้อมูล (Message) และสัญญาณพาหะ (Carrier) เข้าด้วยกัน



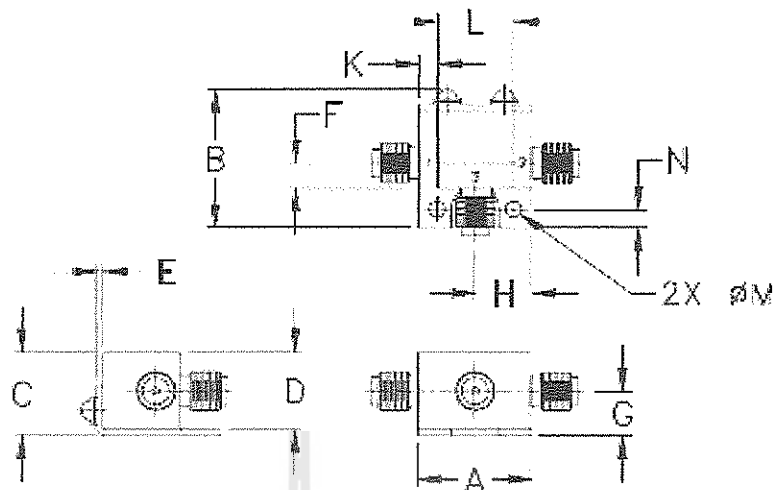
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ผสมสัญญาณ (Mixer)

ลักษณะแผนภาพทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.2 แผนภาพทางไฟฟ้า

เขียนแบบโครงสร้าง



รูปที่ 3.3 แผนภาพโครงสร้าง

การต่อ Coaxial

LO	2
RF	3
IF	1

สรุปขนาด (inch mm)

A	B	C	D	E	F	G
.74	.90	.54	.50	.04	.16	.29
18.80	22.86	13.72	12.70	1.02	4.06	7.37
H	J	K	L	M	N	wt
.37	—	.122	.496	.106	.122	grams
9.40	—	3.10	12.60	2.69	3.10	20.0

รูปที่ 3.4 ขนาดของ Mixer

ข้อควรระวัง

อุณหภูมิขณะปฏิบัติการ	-40°C to 85°C
อุณหภูมิในการเก็บรักษา	-55°C to 100°C
RF Power	50mW

\*ถ้าไม่ปฏิบัติตามข้อควรระวังอย่างเคร่งครัด อาจเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์



### คุณลักษณะ

- แบนด์วิธกว้าง 2,400 -7,000 MHz
- ค่าความสูญเสียการแปลงต่ำ 6.2dB
- ค่าการแยกสูงระหว่าง L-R 30 dB
- IF BW สูง, DC ที่ 3000 MHz
- โครงสร้างแข็งแรง
- ขนาดเล็ก
- ใช้ประโยชน์ในการแปลงความถี่ขึ้น-ลง
- การคุ้มครองตามสิทธิบัตรสหรัฐอเมริกา 6,790,049 และ 7,027,795

### การประยุกต์เพื่อการใช้ประโยชน์

- แปลงควาเพิ่มขึ้นและลง
- เรดาร์ป้องกันและการสื่อสาร
- เชื่อมเส้นของเมืองต่างๆ(แผนที่)
- WIFI
- Blue Tooth
- VSAT
- ISM

### ข้อกำหนดทางไฟฟ้า

FREQUENCY (MHz)		CONVERSION LOSS* (dB)			LO-RF ISOLATION (dB)		LO-IF ISOLATION (dB)		IP3 at center band (dBm)
LO/RF	IF	Typ	$\sigma$	Max	Typ	Min	Typ	Min	Typ
2400-7000	DC-3000	6.6	0.1	8.3	33	27	20	16	10
2400-3200		6.1	0.1	8.2	30	26	25	21	12
3200-4200		6.0	0.2	8.3	25	16	18	12	9

### รูปที่ 3.5 ตารางแสดงข้อกำหนดทางไฟฟ้า

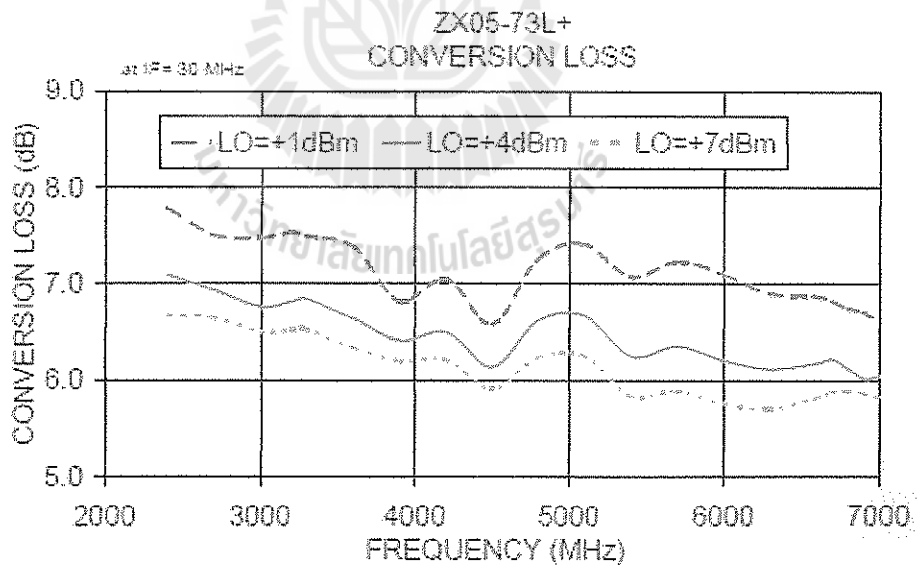
\*การสูญเสียการแปลง IF ที่ 30 MHz  $\sigma$  เป็นตัวชี้วัด repeatability จากหน่วยต่อหน่วย

## ลักษณะประสิทธิภาพของข้อมูล

Frequency (MHz)		Conversion Loss (dB)	Isolation L-R (dB)		VSWR RF Port (:1)		VSWR LO Port (:1)	
RF	LO		LO +4dBm	LO +4dBm	LO +4dBm	LO +4dBm	LO +4dBm	LO +4dBm
2400.10	2400.10	7.09	36.72	18.75	2.91	2.80		
2700.10	2700.10	6.93	33.49	21.40	3.11	1.79		
3000.10	3000.10	6.76	30.70	23.16	3.15	1.87		
3200.10	3200.10	6.81	30.46	25.41	3.26	1.91		
3300.10	3300.10	6.84	30.61	26.67	3.35	2.00		
3600.10	3600.10	6.64	30.53	28.14	2.76	2.24		
3900.10	3900.10	6.41	31.12	31.02	2.57	1.94		
4200.10	4200.10	6.50	29.90	28.74	3.00	1.84		
4500.10	4500.10	6.14	26.89	19.45	2.62	1.93		
4800.10	4800.10	6.62	25.76	14.85	2.81	2.09		
5100.10	5100.10	6.67	25.23	14.69	3.00	2.36		
5400.10	5400.10	6.25	23.60	15.75	2.60	2.75		
5700.10	5700.10	6.35	22.63	17.68	2.39	2.95		
6000.10	6000.10	6.21	21.59	20.51	2.28	2.76		
6300.10	6300.10	6.12	20.54	24.64	2.21	2.18		
6600.10	6600.10	6.18	19.39	26.49	2.25	1.54		
6700.10	6700.10	6.22	19.20	26.64	2.17	1.37		
6800.10	6800.10	6.13	19.15	26.57	2.01	1.25		
6900.10	6900.10	6.02	18.83	27.11	1.84	1.13		
7000.10	7000.10	6.04	19.34	26.85	1.86	1.05		

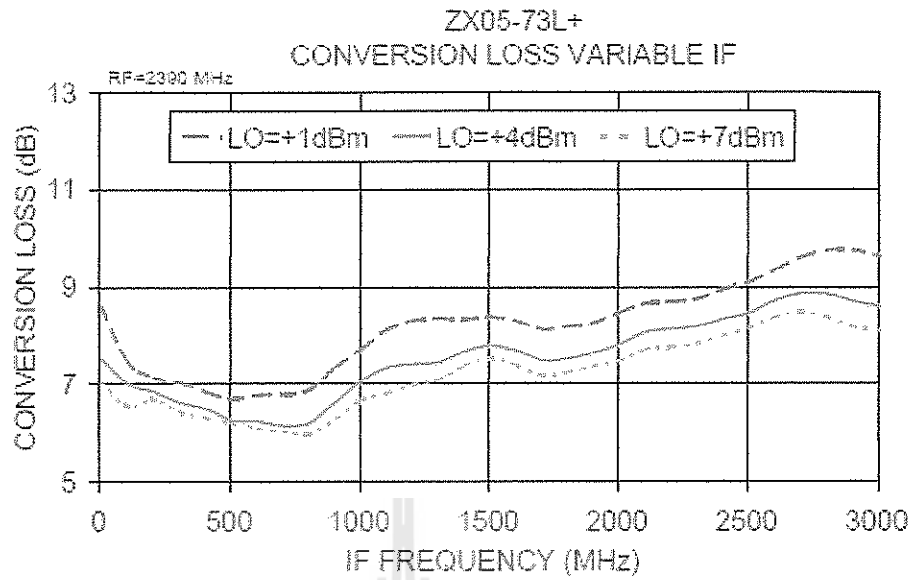
รูปที่ 3.6 ตารางแสดงประสิทธิภาพของ Mixer

## แผนภูมิประสิทธิภาพ

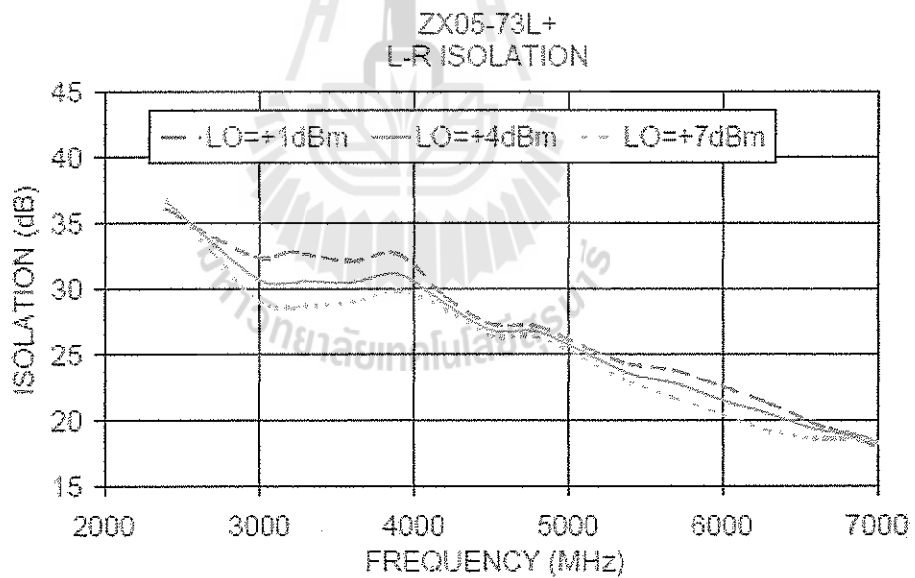


รูปที่ 3.7 กราฟแสดง Conversion Loss

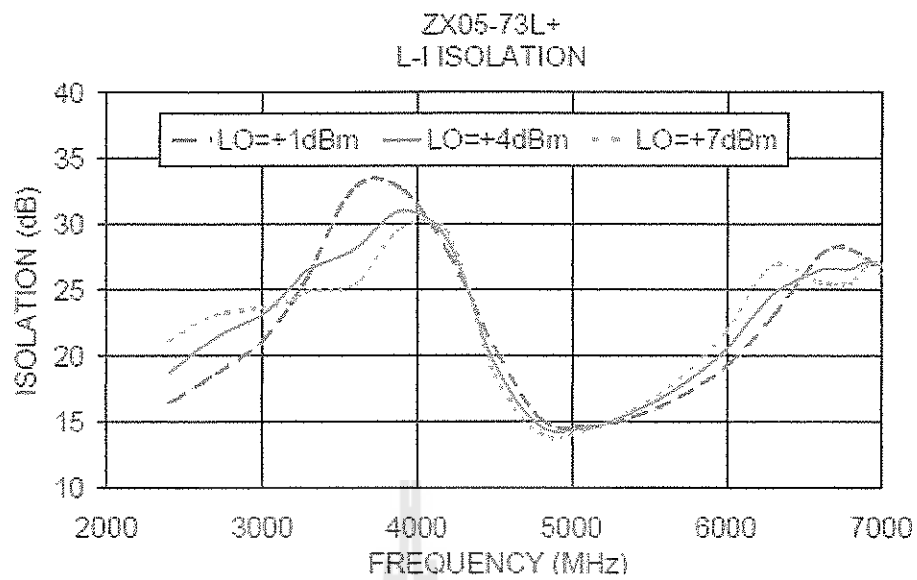
ความสัมพันธ์ระหว่าง Conversion Loss(dB) และ Frequency(MHz)



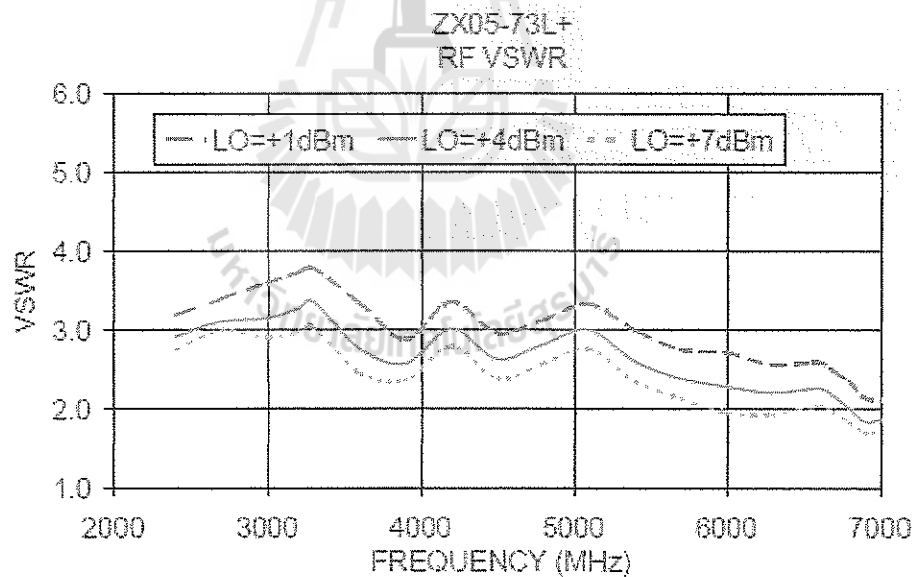
รูปที่ 3.8 กราฟแสดง Conversion Loss Variable IF  
ความสัมพันธ์ระหว่าง Conversion Loss(dB) และ IF Frequency(MHz)



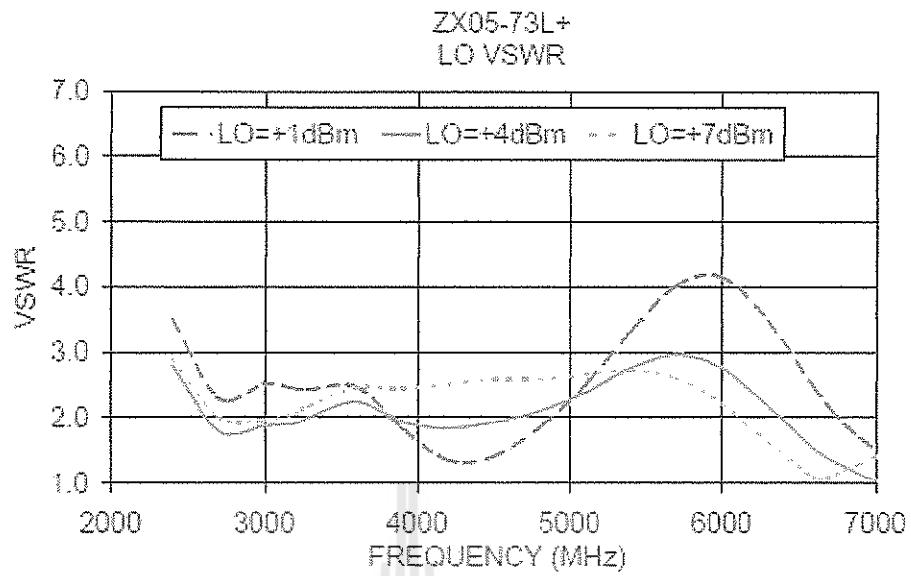
รูปที่ 3.9 กราฟแสดง L-R Isolation  
ความสัมพันธ์ระหว่าง Isolation(dB) และ Frequency(MHz)



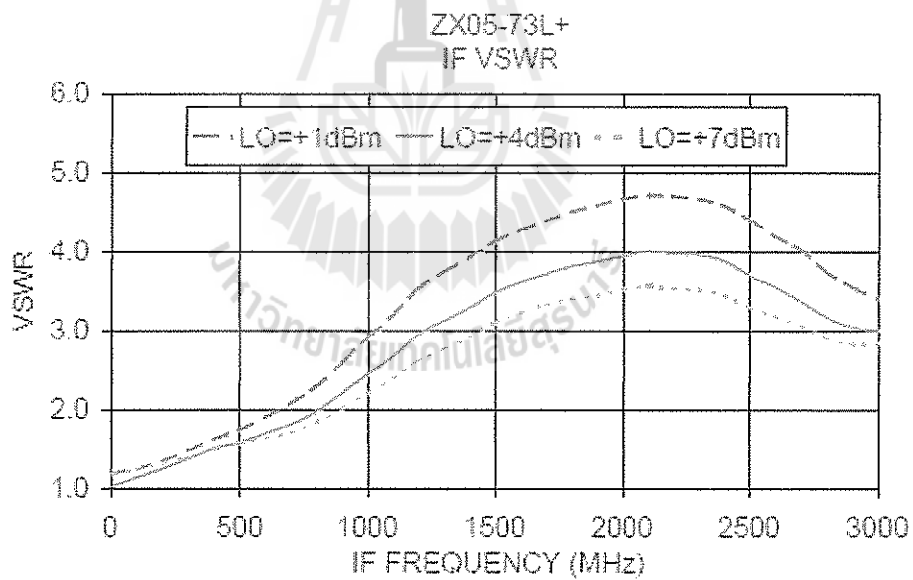
รูปที่ 3.10 กราฟแสดง L-I Isolation  
ความสัมพันธ์ระหว่าง Isolation(dB) และ Frequency(MHz)



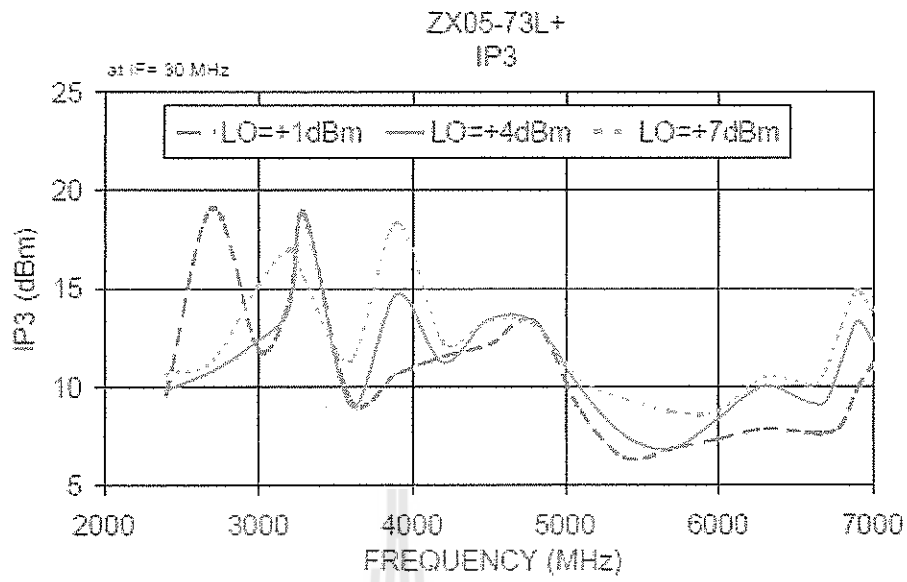
รูปที่ 3.11 กราฟแสดง RF VSWR  
ความสัมพันธ์ระหว่าง VSWR และ Frequency(MHz)



รูปที่ 3.12 กราฟแสดง LO VSWR  
ความสัมพันธ์ระหว่าง VSWR และ Frequency(MHz)

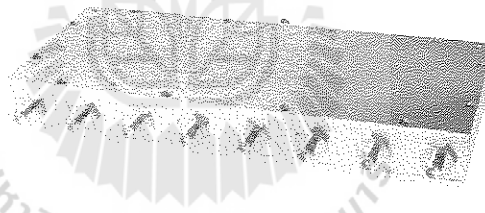


รูปที่ 3.13 กราฟแสดง IF VSWR  
ความสัมพันธ์ระหว่าง VSWR และ IF Frequency(MHz)



รูปที่ 3.14 กราฟแสดง IP3 ความสัมพันธ์ระหว่าง IP3(dBm) และ Frequency(MHz)

### 3.3 เครื่องแยกสัญญาณ (Power Splitter/Combiner)



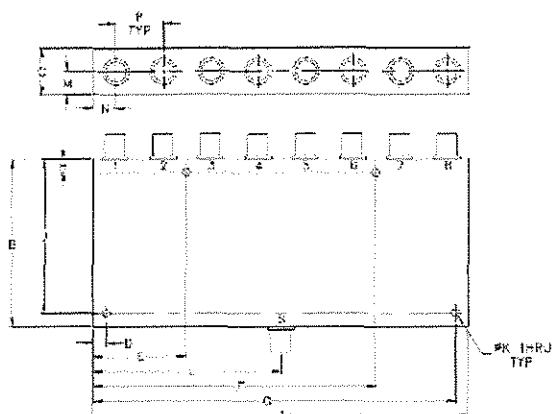
รูปที่ 3.15 เครื่องแยกสัญญาณ (Power Splitter/Combiner)

ลักษณะแผนภาพทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.16 ภาพแสดงแผนภาพทางไฟฟ้า

เขียนแบบ โครงสร้าง



รูปที่ 3.17 ภาพแสดงแบบโครงสร้างเครื่องแยกสัญญาณ (Power Splitter/Combiner)

การต่อ Coaxial

SUM PORT \_\_\_\_\_ S

PORT 1,2,3,4,5,6,7,8 \_\_\_\_\_ 1,2,3,4,5,6,7,8

สรุปขนาด ( inch mm )

A	B	C	D	E	F	G	H
7.06	3.13	.88	.250	1.750	5.310	6.810	.250
179.32	79.50	22.35	6.35	44.45	134.87	172.97	6.35
J	K	L	M	N	P		wt
2.875	.144	3.53	.44	.415	.89		grams
73.03	3.66	89.66	11.18	10.54	22.61		800

รูปที่ 3.18 ภาพแสดงขนาดเครื่องแยกสัญญาณ (Power Splitter/Combiner)

ข้อควรระวัง

อุณหภูมิขณะปฏิบัติการ -55°C to 100°C

อุณหภูมิในการเก็บรักษา -55°C to 100°C

Power Input (ที่ splitter) สูงสุด 10W

Internal Dissipation สูงสุด 0.875W

\*ถ้าไม่ปฏิบัติตามข้อควรระวังอย่างเคร่งครัด อาจเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์

### คุณลักษณะ

- wideband, 2000 to 4200 MHz
- ค่าความสูญเสียการแปลงต่ำ 0.8 dB
- ค่าการแยกตัวดี 23 dB
- โครงสร้างแข็งแรง

### การประยุกต์เพื่อการใช้งาน

- UHF/SHF
- ISM
- MMDS
- terrestrial radio

### ข้อกำหนดทางไฟฟ้า

FREQ. RANGE (MHz)	ISOLATION (dB)		INSERTION LOSS (dB) ABOVE 9.0 dB		PHASE UNBALANCE (Degrees)	AMPLITUDE UNBALANCE (dB)
	Typ	Min.	Typ	Max.		
2000-4200	23	16	0.8	1.8	10	1.2

รูปที่ 3.19 ภาพแสดงข้อกำหนดทางไฟฟ้า

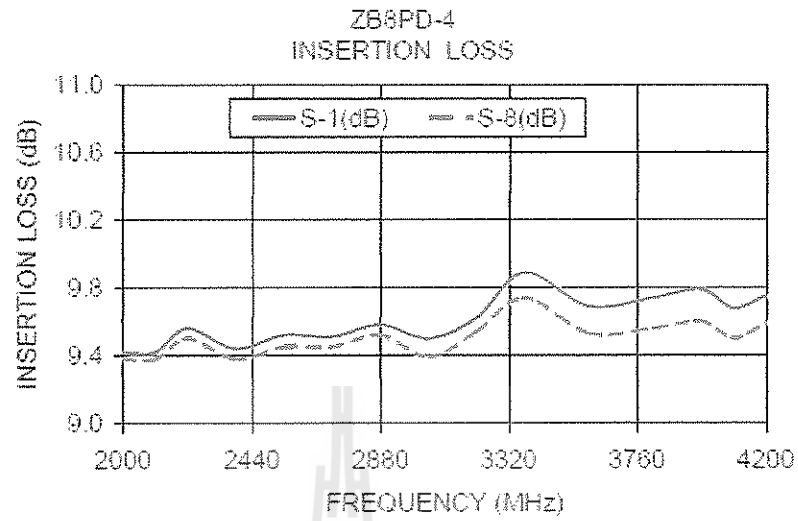
### ลักษณะประสิทธิภาพของข้อมูล

Frequency (MHz)	Insertion Loss (dB)						Amplitude Unbalance (dB)	Isolation (dB)				VSWR S	VSWR 1	VSWR 8
	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-3		1-2	1-7	3-4	5-7			
2000.00	9.42	9.43	9.46	9.46	9.42	9.39	0.69	23.19	45.51	23.53	31.45	1.11	1.09	1.07
2110.00	9.42	9.46	9.51	9.54	9.47	9.38	0.16	24.74	45.55	25.33	30.44	1.23	1.14	1.13
2220.00	9.56	9.63	9.60	9.60	9.58	9.50	0.13	28.18	45.22	29.06	28.20	1.30	1.18	1.17
2335.00	9.44	9.51	9.53	9.49	9.48	9.38	0.14	29.15	42.87	29.43	27.71	1.13	1.11	1.10
2350.00	9.52	9.58	9.61	9.57	9.55	9.45	0.17	23.71	42.98	24.24	28.65	1.24	1.12	1.10
2715.00	9.51	9.56	9.61	9.59	9.58	9.45	0.16	24.27	41.71	24.57	32.76	1.43	1.18	1.15
2830.00	9.58	9.67	9.67	9.62	9.65	9.52	0.15	30.34	45.43	30.61	45.63	1.27	1.14	1.13
3045.00	9.60	9.59	9.63	9.56	9.59	9.39	0.26	33.87	48.09	34.38	36.67	1.03	1.09	1.08
3210.00	9.62	9.75	9.83	9.74	9.77	9.54	0.28	30.45	47.51	29.42	32.25	1.28	1.14	1.11
3375.00	9.88	10.01	10.05	9.88	9.99	9.74	0.31	31.43	42.95	29.02	30.79	1.42	1.15	1.14
3595.00	9.68	9.79	9.89	9.76	9.79	9.53	0.35	24.83	49.26	25.50	30.44	1.28	1.05	1.05
3615.00	9.74	9.81	9.90	9.77	9.84	9.56	0.36	25.18	55.65	26.99	29.84	1.27	1.14	1.11
3660.00	9.79	9.89	9.96	9.85	9.88	9.60	0.36	39.55	50.61	50.31	20.62	1.37	1.21	1.20
4090.00	9.68	9.79	9.85	9.72	9.75	9.50	0.35	33.25	44.11	33.20	28.82	1.28	1.20	1.17
4200.00	9.75	9.89	9.93	9.81	9.85	9.59	0.34	29.72	39.55	30.49	30.38	1.08	1.17	1.14

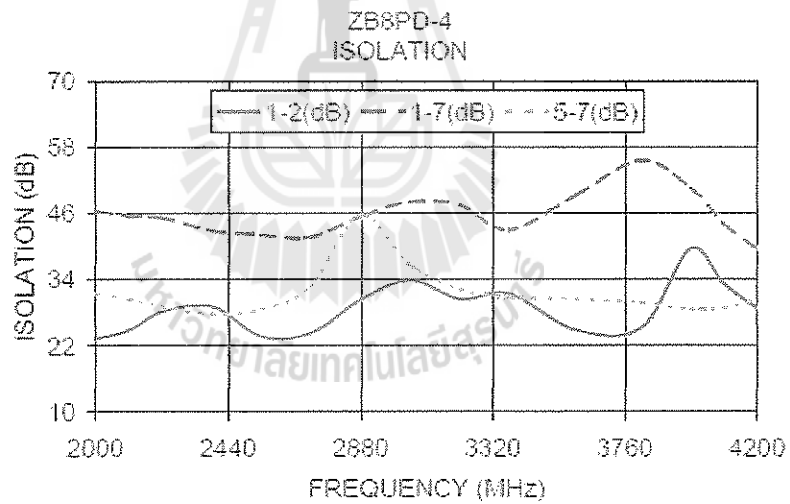
รูปที่ 3.20 ภาพแสดงประสิทธิภาพของข้อมูล



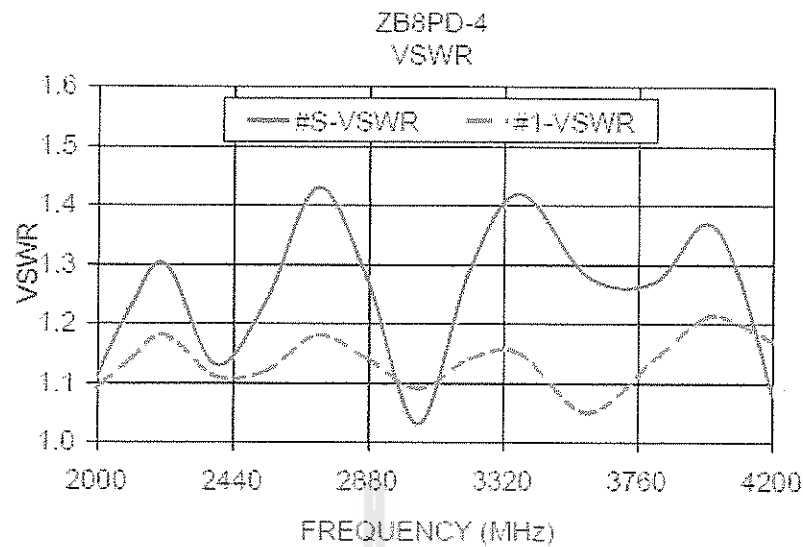
## แผนภูมิประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.21 กราฟแสดง Insertion Loss  
ความสัมพันธ์ระหว่าง Insertion Loss (dB) และ Frequency(MHz)



รูปที่ 3.22 กราฟแสดง Isolation ความสัมพันธ์ระหว่าง Isolation(dB) และ Frequency(MHz)



รูปที่ 3.23 กราฟแสดง VSWR ความสัมพันธ์ระหว่าง VSWR และ Frequency(MHz)

### 3.4 วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier)

ในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณจะเลือกใช้วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier) เนื่องจากเป็นวงจรขยายสัญญาณที่ให้สัญญาณขาออกที่มีเครื่องหมายเดียวกับสัญญาณขาเข้า จากความสัมพันธ์ของแรงดันขาออก  $V_o$  ต่อแรงดันขาเข้า  $V_i$  สามารถแสดงได้ตามสมการ (7.11)

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) V_i$$

หากต้องการให้วงจรขยายสัญญาณมีความสามารถในการขยายสัญญาณเป็น 6 เท่า หรือ  $V_o = 6V_i$  สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\frac{V_o}{V_i} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right)$$

$$\frac{6}{1} = 1 + \frac{R_f}{R_i}$$

$$6-1 = \frac{R_f}{R_i}$$

$$5R_i = R_f$$

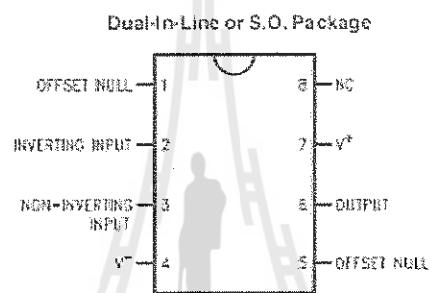
ดังนั้นเลือกให้

$$R_i = 1 \text{ k}\Omega$$

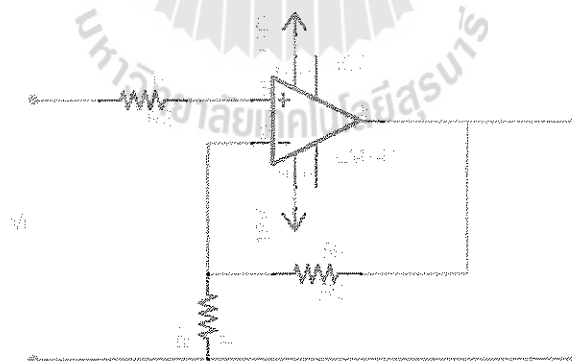
จะได้

$$R_f = 5 \text{ k}\Omega$$

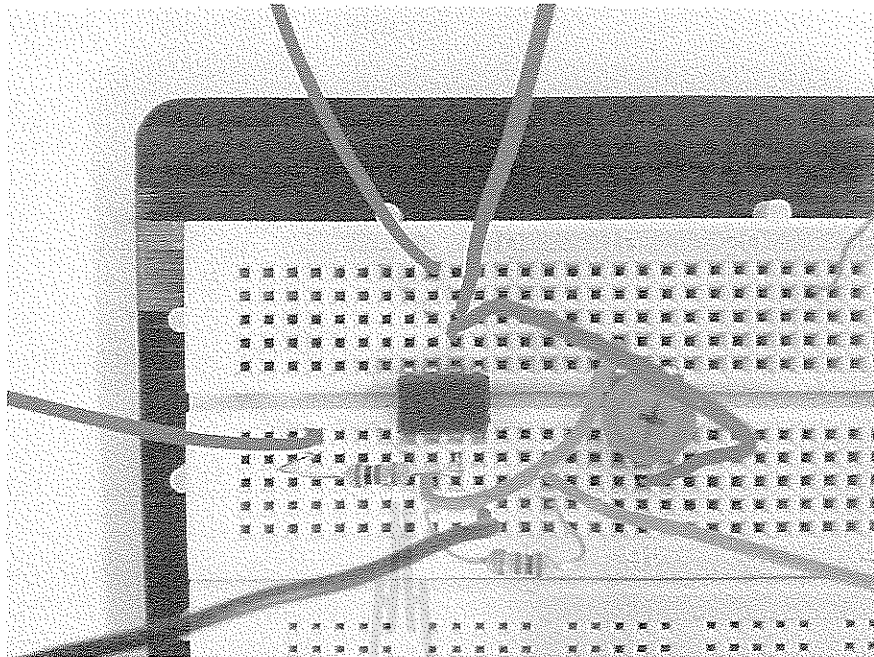
หากต้องการเพิ่มกำลังขยายให้กับสัญญาณสามารถเปลี่ยน  $R_f = 5 \text{ k}\Omega$  เป็น Potentiometer  $100 \text{ k}\Omega$  และใช้ op-amp เบอร์ LM741



รูปที่ 3.24 แสดงขาของ op-amp เบอร์ LM741



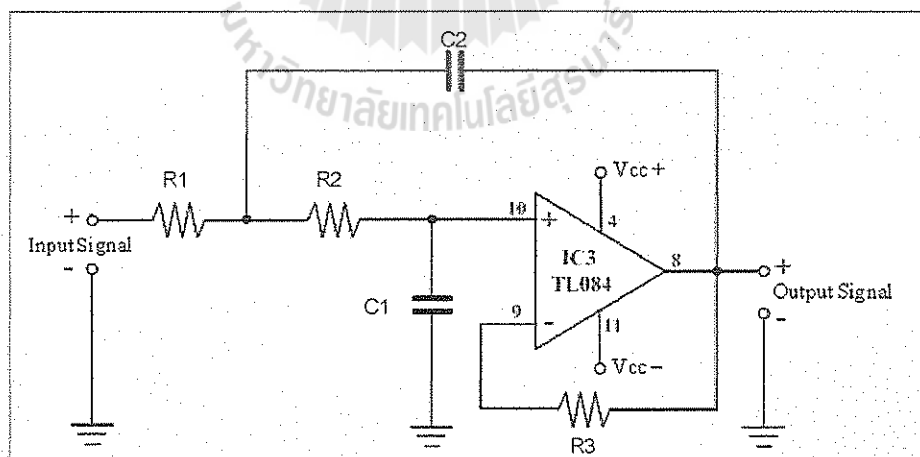
รูปที่ 3.25 แสดง schematic diagram ของวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส



รูปที่ 3.26 แสดงการต่อวงจรขยายสัญญาณ

### 3.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

เป็นการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ 240 Hz โดยในการออกแบบวงจรนี้จะทำการกำหนดค่าของตัวเก็บประจุ (C) แล้วทำการคำนวณหาค่าความต้านทาน (R) โดยใช้สมการที่ (9) เนื่องจากการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านนั้นจะพิจารณาที่ -3 dB



รูปที่ 3.27 แสดง schematic diagram ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

โดยในการออกแบบจะขอเลือกใช้  $C = 0.047 \mu\text{F}$

เมื่อ  $C = C_1, C_2 = 2C$

และ  $R = R_1 = R_2, R_3 = 2R$

หาค่าความต้านทาน (R) จากสมการที่ (9)

$$f_c = \frac{0.707}{2\pi RC}$$

ย้ายข้างสมการเพื่อหาค่าความต้านทาน (R)

$$\begin{aligned} R &= \frac{0.707}{2\pi f_c C} \\ &= \frac{0.707}{2\pi \times 240 \times 0.047 \mu} \\ &= 9.9754 \text{ k}\Omega \\ &\approx 10 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าของ  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$

$$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

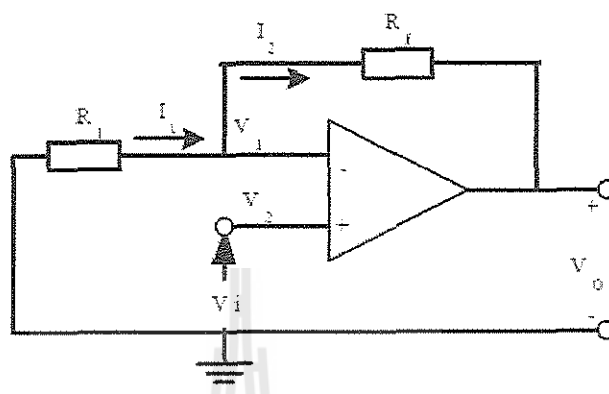
$$R_3 = 20 \text{ k}\Omega$$

$$C_1 = 0.047 \mu\text{F}$$

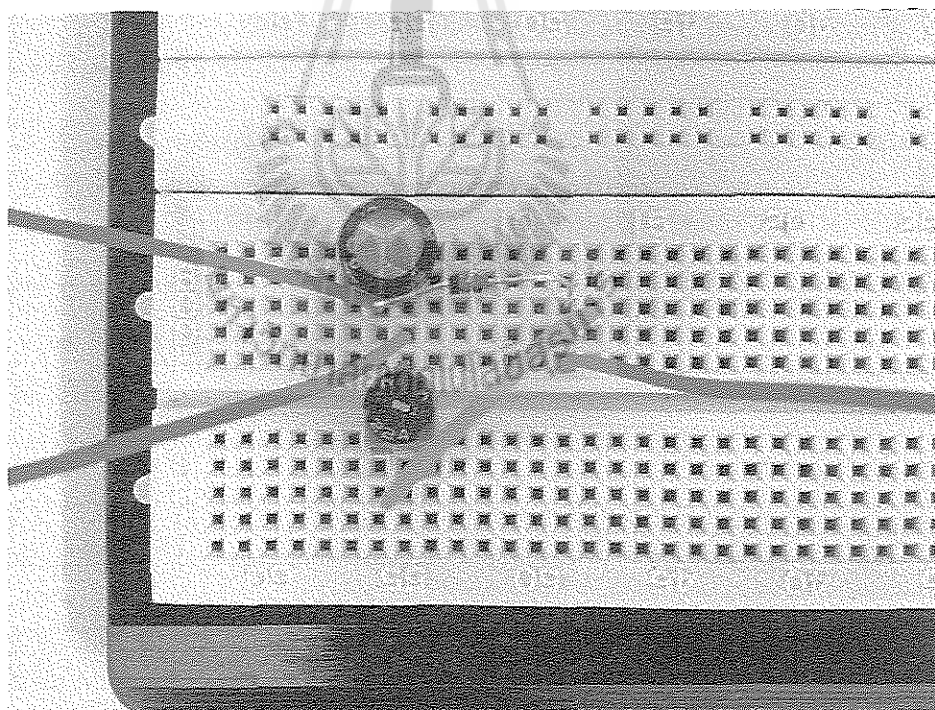
$$C_2 = 0.1 \mu\text{F}$$

### 3.6 วงจรยกระดับสัญญาณ

วงจรยกระดับสัญญาณจะใช้วงจรยกระดับแรงดันบวก (POSITIVE - VOLTAGE CLAMPER) เพื่อทำการยกระดับสัญญาณให้อยู่ในฝั่งบวกเท่านั้น แล้วทำการส่งเข้าบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการแปลงสัญญาณในขั้นถัดไป



รูปที่ 3.28 การขยายแบบไม่กลับเฟส



รูปที่ 3.29 แสดงวงจรยกระดับสัญญาณ

### 3.7 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในอ่านข้อมูลจากสัญญาณแอนะล็อกนั้น เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ET-AVR STAMP ATmega128 ซึ่งจะทำหน้าที่อ่านข้อมูลจากสัญญาณแอนะล็อกเพื่อให้ข้อมูลที่อ่านเปลี่ยนเป็นของสัญญาณดิจิทัล ดังนั้นเราจึงได้ทำการออกแบบและเขียนโปรแกรมด้วยภาษาซีดังนี้

```

/*****/;

/** Hardware      : ET-AVR STAMP ATmega128      */;
/** CPU          : ATMEL-ATmega128            */;
/** X-TAL        : 16.00 MHz                  */;
/** Compiler     : CodeVisionAVR V1.24.7e     */;
/** Last Update  : 10-04-2006 (ETT CO.,LTD)   */;
/**             : WWW.ETT.CO.TH              */;
/** Description  : Demo ADC Channel 0        */;
/**             : Setup RS232 = 57600,N,8,1   */;
/*****/;

/** CodeVisionAVR Compiler Option Setting    */;
/** Chip type   : ATmega128                  */;
/** Program type : Application                */;
/** Clock frequency : 16.000000 MHz          */;
/** Memory model : Small                     */;
/** External SRAM size : 0                    */;
/** Data Stack size : 1024                    */;
/*****/;

//Display Result to Serial Port UART0(57600 bps)

#include <mega128.h> //ATmega128 MCU
#include <stdio.h>
#include <delay.h> //StandardInput/Output
                    functions
#define ADC_VREF_TYPE 0xC0 //ADC Used Internal
                           Reference

/* pototype section */
unsigned int read_adc(unsigned char adc_input); // Read ADC Result

void main(void)
{

```

```

unsigned int val[4][100],i,j;
char command; // ADC Result

// USART initialization
// Communication Parameters: 8 Data, 1 Stop, No Parity
// USART Receiver: On
// USART Transmitter: On
// USART Mode: Asynchronous
// USART Baud rate: 57600

UCSR0A=0x00;
UCSR0B=0x18;
UCSR0C=0x86;
UBRR0H=0x00;
UBRR0L=0x10;

// ADC initialization
// ADC Clock frequency: 125 kHz
// ADC Voltage Reference: Int., cap. on AREF
// ADC High Speed Mode: Off
// ADC Auto Trigger Source: None

ADMUX=ADC_VREF_TYPE;
ADCSRA=0x87;
SFIOR&=0xEF;

while (1) //Loop Continue
{
    command = getchar();

    if (command == 0x61)
    {
        for(j=0;j<4;j++){
            printf("\n\n\rSHOW PORT %d\n",j);
            for(i=0;i<100;i++){
                val[j][i]=read_adc(0);
                if(val[j][i] <= 0x0F){
                    printf("00%X",val[j][i]); //Dispaly Result
                }else if(val[j][i] <= 0xFF){
                    printf("0%X",val[j][i]); //Dispaly Result
                }else{
                    printf("%X",val[j][i]); //Dispaly Result
                }
            }
            i=0;
        }
    }
    else{
    }
}

```



```

}

//*****//;
/** Read the AD conversion result */;
//*****//;

unsigned int read_adc(unsigned char adc_input)//Read Result ADC
{
    ADMUX=adc_input|ADC_VREF_TYPE;

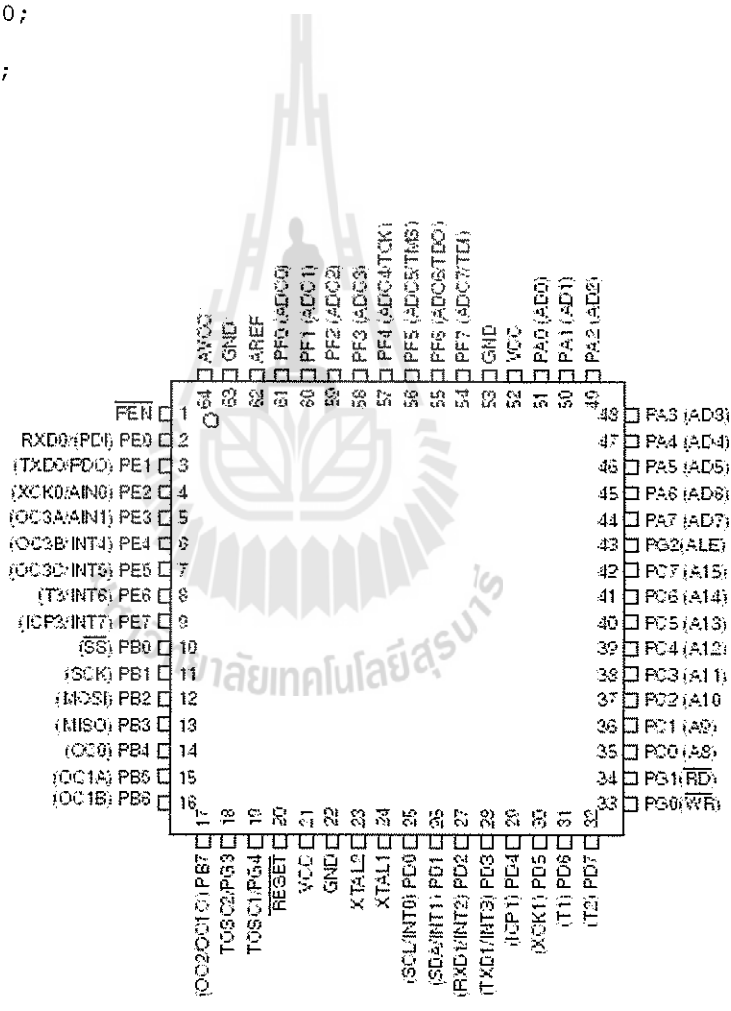
    ADCSRA|=0x40; //Start the AD conversion

    while ((ADCSRA & 0x10)==0); //Wait for the AD conversion to complete

    ADCSRA|=0x10;

    return ADCW;
}

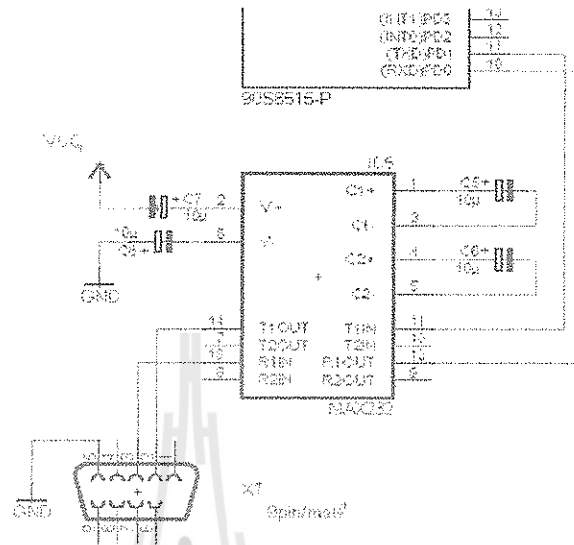
```



รูปที่ 3.30 แสดง Pin ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega 128

### วิธีการต่อ MAX232

ในการต่อ MAX232 เข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น จะมีภาพการต่อวงจร ดังรูป



รูปที่ 3.31 แสดงการต่อวงจร MAX 232

ซึ่งจากรูปวงจรตัว Max232 จะประกอบไปด้วย C 10 uF จำนวน 4 ตัว และใช้ IC เบอร์ MAX232CPE0741 โดย

- ขาที่ 11 (T1IN) จะต่อเข้ากับขา PE1 (Tx/D0) ของบอร์ด AVR ATMEGA128
- ขาที่ 12 (R1OUT) จะต่อเข้ากับขา PE0 (Rx/D0) ของบอร์ด AVR ATMEGA128

### 3.8 Matlab

Matlab จะมีการนำข้อมูลดิจิทัลที่ได้จากการอ่านค่าจากบอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์มาแปลงค่าให้เป็นข้อมูลแอนะล็อกเหมือนเดิม แล้วจึงนำข้อมูลแอนะล็อกที่ได้ไปเปรียบเทียบกับระดับโวลต์ตั้งแต่ 0V – 5V ซึ่งเทียบค่าเป็นแอนะล็อกแล้วจะได้ 000 – 3FF ค่าที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 24 บิต

การแปลงข้อมูลจากแอนะล็อกเป็นระดับโวลต์

$$Y = X * 5 / 1024 \quad ; Y = \text{ข้อมูลระดับโวลต์} , X = \text{ข้อมูลแอนะล็อก}$$

สมการที่แปลงค่าจากดิจิทัลเป็นแอนะล็อก เพื่อเปรียบเทียบกับค่าให้อยู่ในระดับโวลต์

```
clear all; close all;

clc;

s=serial('com1');

input_data_port=100;

s.BaudRate=57600;
s.InputBufferSize = input_data_port*3*4;
fopen(s);
Data_port1(1)=0; Data_port2(1)=0; Data_port3(1)=0; Data_port4(1)=0;

fprintf(s,'A');
Data_in1=fscanf(s,'%c',input_data_port*3);
Data_temp=fscanf(s,'%c',1);
Data_in2=fscanf(s,'%c',input_data_port*3);
Data_temp=fscanf(s,'%c',1);
Data_in3=fscanf(s,'%c',input_data_port*3);
Data_temp=fscanf(s,'%c',1);
Data_in4=fscanf(s,'%c',input_data_port*3);
fclose(s);delete(s); clear s

j=1;
for i=1:1:input_data_port
Data_buf_1= [Data_in1(j) Data_in1(j+1) Data_in1(j+2)] ;
Data_buf_2= [Data_in2(j) Data_in2(j+1) Data_in2(j+2)] ;
Data_buf_3= [Data_in3(j) Data_in3(j+1) Data_in3(j+2)] ;
Data_buf_4= [Data_in4(j) Data_in4(j+1) Data_in4(j+2)] ;
```

```
Data_1=hex2dec(Data_buf_1);
Data_2=hex2dec(Data_buf_2);
Data_3=hex2dec(Data_buf_3);
Data_4=hex2dec(Data_buf_4);

Data_port1(i)=(Data_1*5)/1024;
Data_port2(i)=(Data_2*5)/1024;
Data_port3(i)=(Data_3*5)/1024;
Data_port4(i)=(Data_4*5)/1024;

j=j+3;
end

aa=length(Data_port1);
u=1:1:aa;
plot(u,Data_port1,'-*')
legend('port1');
figure;

plot(u,Data_port2,'-*')
legend('port2');
figure;

plot(u,Data_port3,'-*')
legend('port3');
figure;

plot(u,Data_port4,'-*')
legend('port4');
```

### 3.9 สรุป

การออกแบบชุดอุปกรณ์ชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สายในโครงการของเรา นั้นเราจะทำการออกแบบโดยการอ้างอิงจากทฤษฎีที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ซึ่งในการออกแบบโครงการของเรา นั้น จะทำการออกแบบโดยที่จะแยกออกเป็นส่วนๆ ซึ่งในส่วนของวงจรเลื่อนเฟสและวงจร RF นั้น เราจำเป็นที่จะต้องทำการคำนวณหาค่าและรายละเอียดของชิ้นงานเสียก่อน ก่อนที่จะทำการสร้างชิ้นงานนั้นๆ โดยสูตรในการคำนวณนั้นบางส่วนเราก็ได้อ้างอิงจากทฤษฎี และบางส่วนก็ได้ทำการคัดแปลงจากทฤษฎี เพื่อให้ได้ผลเป็นไปตามเป้าหมายที่เราได้คาดหวังไว้ และในส่วนของตัวประมวลผลนั้นเราก็ได้เขียน โปรแกรม โดยใช้หลักการของภาษาซีเพื่อเป็นตัวกำหนดและสั่งให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงาน โดยอ่านค่าสัญญาณแอนะล็อกที่ได้เป็นสัญญาณแบบดิจิทัล และใช้ Matlab นำข้อมูลดิจิทัลที่ได้มาแปลงเป็นแอนะล็อก โดยแปลงสัญญาณแอนะล็อกที่ได้ให้อยู่ในรูปของ โวลต์แล้วพล็อตกราฟของสัญญาณ



## บทที่ 4

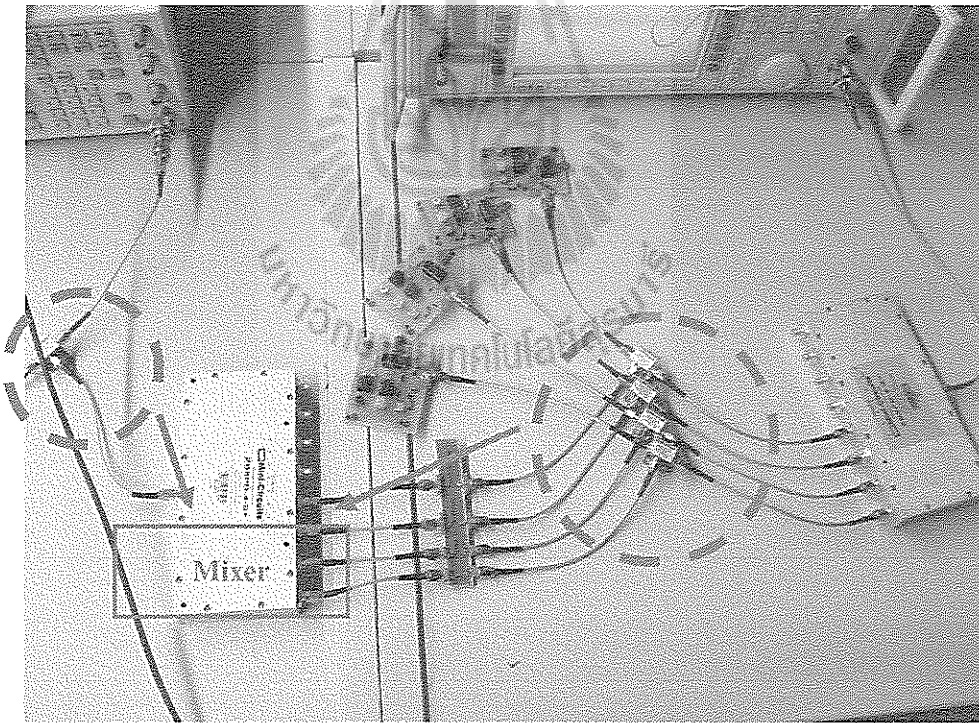
### ผลการทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบ

#### 4.1 บทนำ

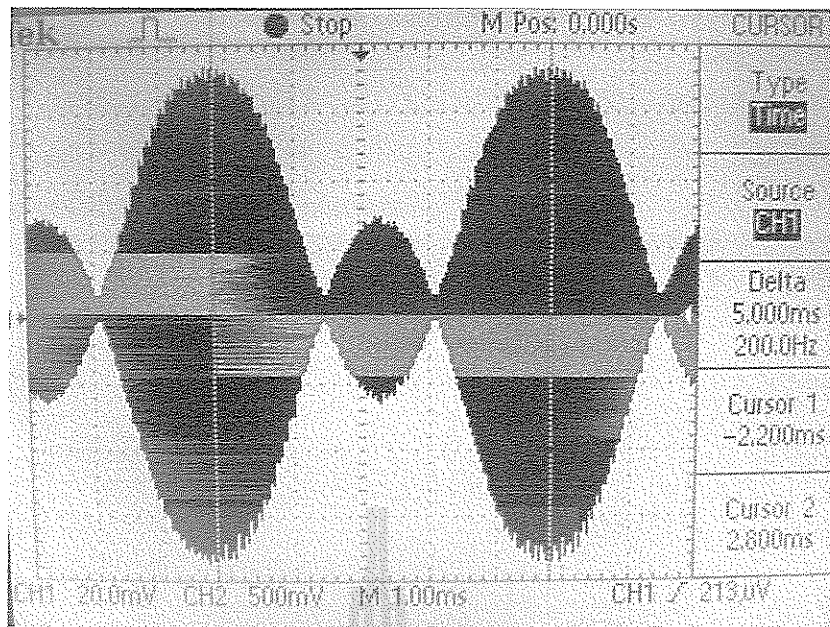
เมื่อเราได้ทำการสร้างชุดอุปกรณ์ต้นแบบของระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลโดยการอ้างอิงจากทฤษฎีที่ตั้งไว้แล้วในบทที่ 2 และ 3 แล้วนั้น เราจึงได้ทำการทดสอบอุปกรณ์แต่ละชิ้นจนกระทั่งได้ทดสอบถึงขั้นตอนในการรวมอุปกรณ์แต่ละชิ้นเข้าเป็นชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัล ซึ่งในบทนี้เราจะได้แสดงผลที่ได้จากการทดสอบต่อไป

#### 4.2 การมอดูเลตสัญญาณ

ในส่วนของการมอดูเลตสัญญาณเราใช้ Frequency Mixer ในการมอดูเลตสัญญาณและสัญญาณที่ได้จะมีทั้งสัญญาณที่ต้องการและไม่ต้องการออกมาพร้อมๆกัน สัญญาณที่เราต้องการเพื่อใหทำงานในบอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์อยู่ที่ความถี่ 200 Hz



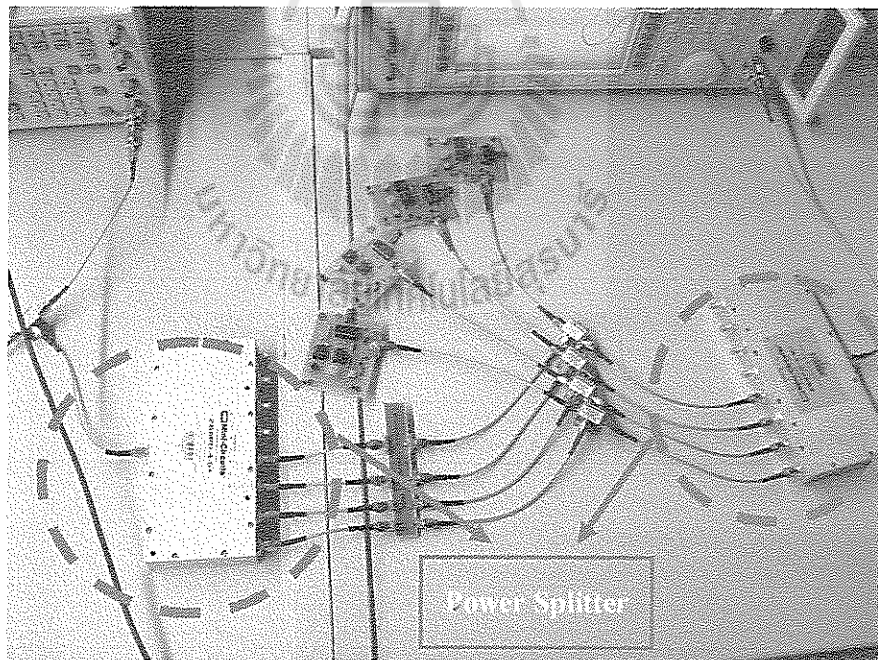
รูปที่ 4.1 แสดงภาพชุดอุปกรณ์การมอดูเลตสัญญาณ



รูปที่ 4.2 แสดงภาพการมอดูเลตสัญญาณ

#### 4.3 เครื่องแยกสัญญาณ (Power Splitter/Combiner)

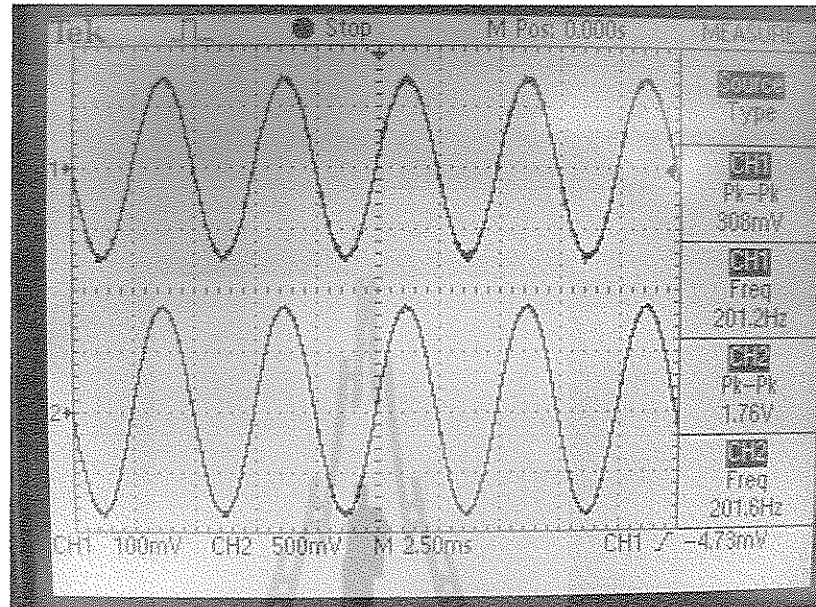
เมื่อทดสอบแล้วสามารถทำงานได้จริงโดยใช้สัญญาณจาก Generator ไปยังเครื่องแยกสัญญาณแล้วนำเครื่องวัดสัญญาณมาจับเพื่อที่จะได้สัญญาณออกมาตามที่ต้องการ



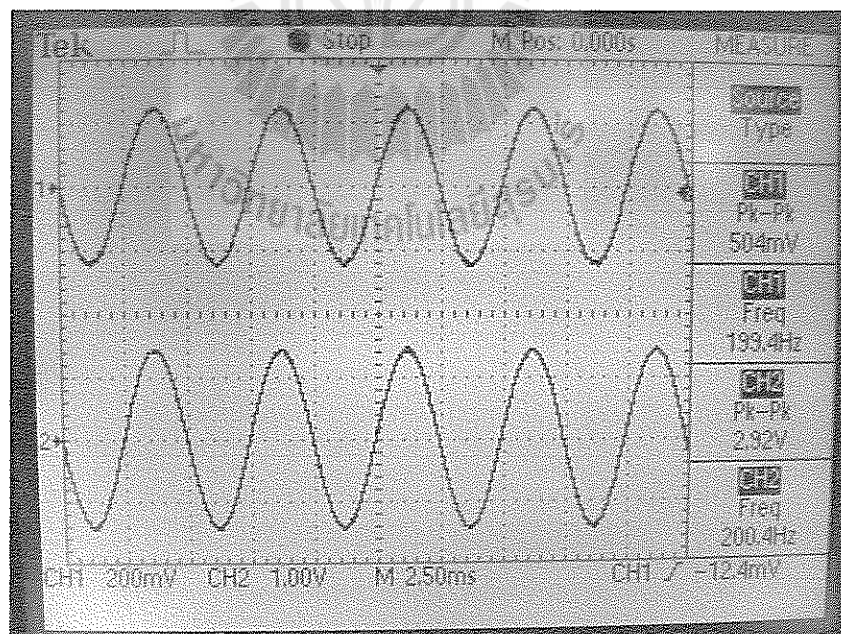
รูปที่ 4.3 แสดงวงจรแยกสัญญาณ

#### 4.4 วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier)

เมื่อเราได้ค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวแล้ว จึงนำมาสร้างเป็นชิ้นงานจริงตามรูปที่ ซึ่งแสดง schematic diagram ของวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส จากนั้นนำมาทดสอบหาผลการวัดแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณที่เข้ามา ได้ผลการทดสอบดังนี้

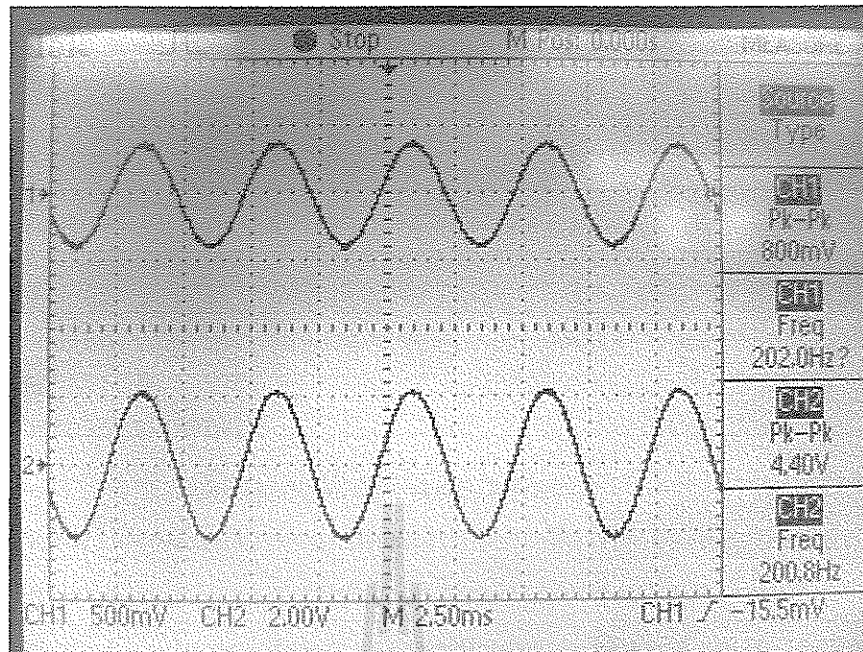


รูปที่ 4.4 แสดงกราฟขยายสัญญาณที่ความถี่ 200 Hz  $V_{p-p}$  0.3V

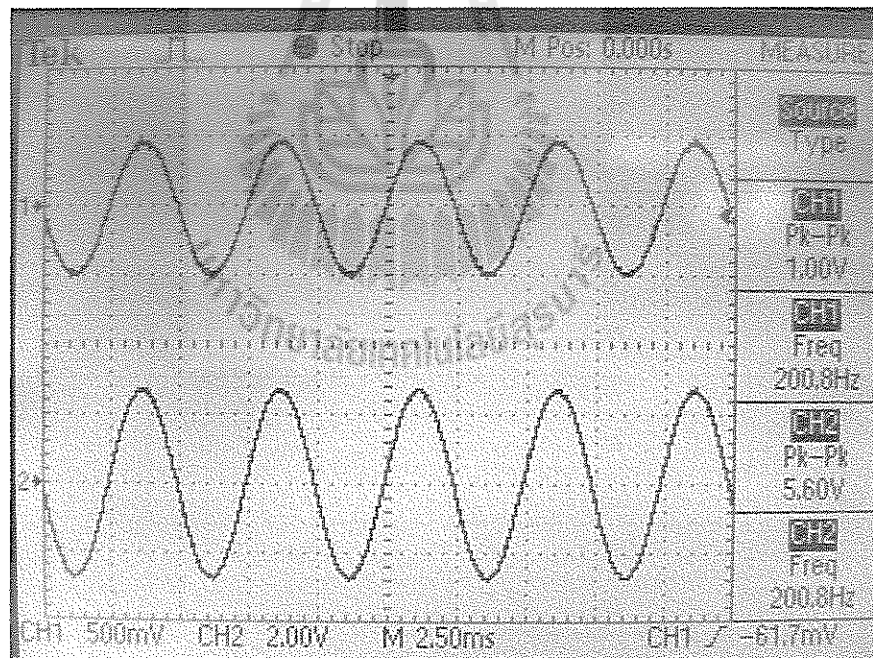


รูปที่ 4.5 แสดงกราฟขยายสัญญาณที่ความถี่ 200 Hz  $V_{p-p}$  0.5V





รูปที่ 4.6 แสดงกราฟขยายสัญญาณที่ความถี่ 200 Hz  $V_{p-p}$  0.8V



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟขยายสัญญาณที่ความถี่ 200 Hz  $V_{p-p}$  1V

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบของวงจรขยายสัญญาณ

$V_i$ (Volt)	$V_o$ (Volt)	$V_o$ ตามทฤษฎี ( $V_o=6V_i$ )
0.3	1.76	1.8
0.5	2.92	3.0
0.8	4.4	4.8
1.0	5.6	6.0

#### 4.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

เมื่อเราได้ค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแล้ว จึงนำมาสร้างเป็นชิ้นงานจริงตามรูปที่ จากนั้นนำมาทดสอบหาผลการวัดแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณที่เข้า ได้ผลการทดสอบดังนี้

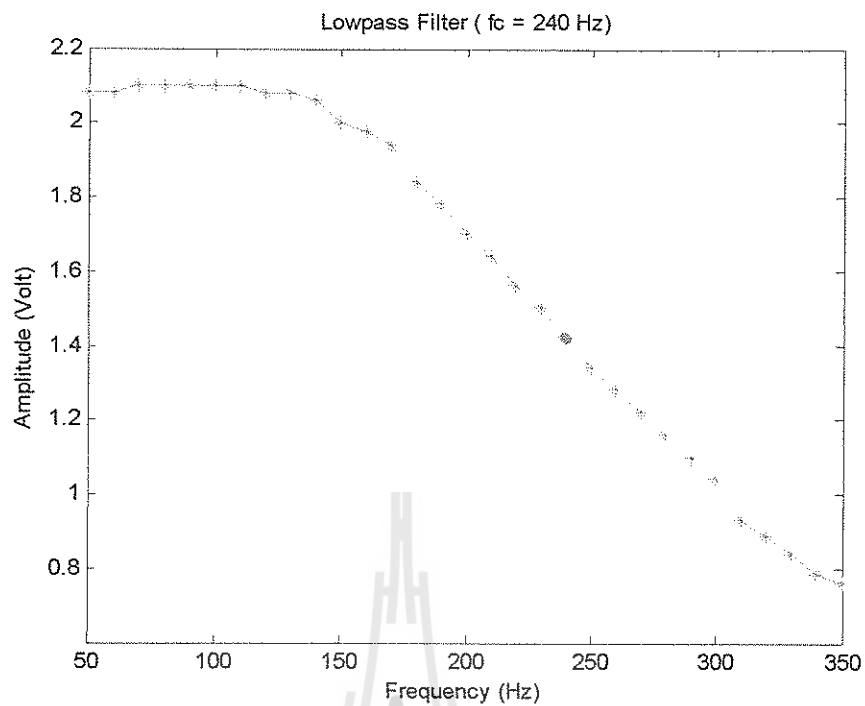
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ 240 Hz

ความถี่ (Hz)	ระดับแรงดันไฟฟ้า (Volt)
50	2.08
60	2.08
70	2.10
80	2.10
90	2.10
100	2.10
110	2.10
120	2.08
130	2.08
140	2.06
150	2.00
160	1.98
170	1.94
180	1.84
190	1.78
200	1.70

210	1.64
220	1.56
230	1.50
240	1.42
250	1.34
260	1.28
270	1.22
280	1.16
290	1.10
300	1.04
310	0.928
320	0.888
330	0.840
340	0.784
350	0.760

เมื่อได้ค่าระดับแรงดันจากการทดสอบแล้วนำมาพลอตกราฟโดยใช้โปรแกรม Matlab เพื่อดูผลตอบสนองความถี่ของวงจรความถี่ต่ำผ่านที่ 240 Hz ดังแสดงในรูปที่ 4.1





รูปที่ 4.8 แสดงผลตอบสนองความถี่ของวงจรความถี่ต่ำผ่านที่ 240 Hz

เมื่อ ได้ผลการทดสอบและกราฟผลตอบสนองความถี่ของวงจรความถี่ต่ำผ่านที่ 240 Hz แล้ว ต่อมาเราจะทำการตรวจสอบความถูกต้องของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยพิจารณาจากบริเวณที่มีขนาดของ  $V_o$  ลดลงเหลือเพียง 70.7% เทียบกับ  $V_i$  สูงสุด (ความถี่ 0.707) หรือ บริเวณที่อัตราขยายของแรงดันเอาต์พุตลดลง 3dB (ความถี่ -3 dB)

$$dB = 20 \log \left( \frac{x}{A_{\max}} \right)$$

เมื่อ  $x$  คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ -3 dB

และ  $A_{\max}$  คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุด

แทนค่าในสมการจะได้

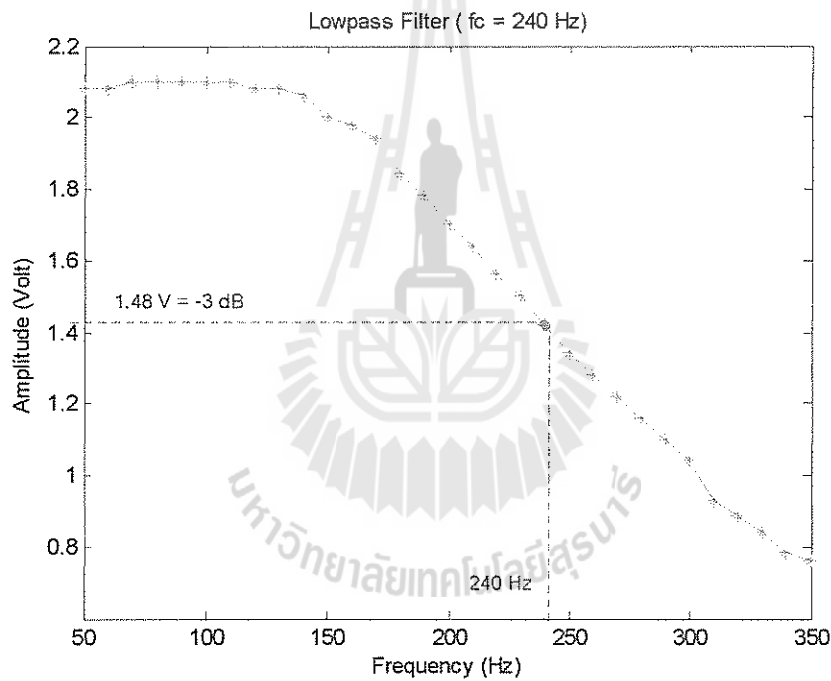
$$-3dB = 20 \log \left( \frac{x}{2.10V} \right)$$

$$10^{\left(\frac{-3}{20}\right)} = \frac{x}{2.10V}$$

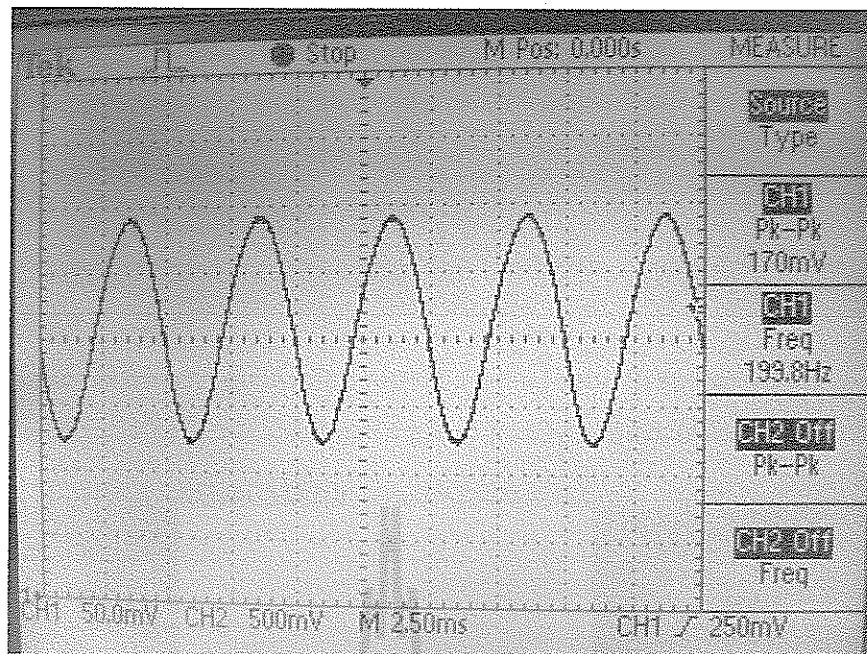
$$0.707 \times 2.10 = x$$

$$x = 1.48 \text{ Volt}$$

เมื่อได้ค่าของระดับแรงดันไฟฟ้าที่ -3 dB แล้วนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าในตารางที่จะพบว่าค่า  $x$  ที่ได้จะอยู่ระหว่าง 1.50 Volt และ 1.42 Volt นั้นแสดงว่าค่า  $x$  อยู่ระหว่างความถี่ 230 Hz และ 240 Hz ซึ่งใกล้เคียงกับทฤษฎีที่กำหนดให้  $f_c = 240$  Hz นั้นเอง



รูปที่ 4.9 แสดงผลตอบสนองความถี่ของวงจรความถี่ต่ำผ่านจากการคำนวณ

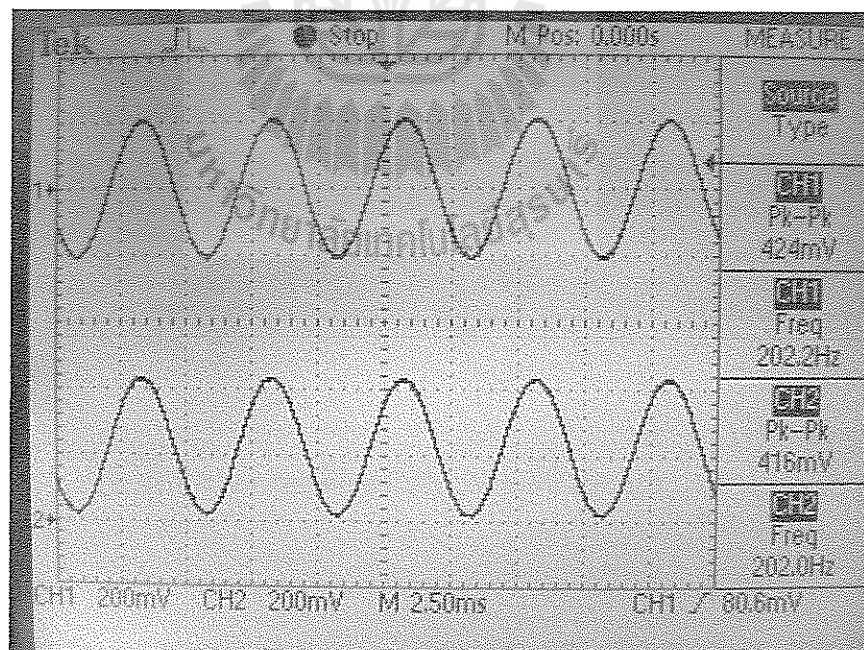


รูปที่ 4.10 แสดงภาพการกรองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่ 200 Hz  $V_{p-p}$  170mV

#### 4.6 วงจรระดับสัญญาณ (Clampers Circuit)

เมื่อเราทำการสร้างชิ้นงานจริงขึ้นมาแล้ว จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบจะได้ผลการทดสอบ

ดังรูป



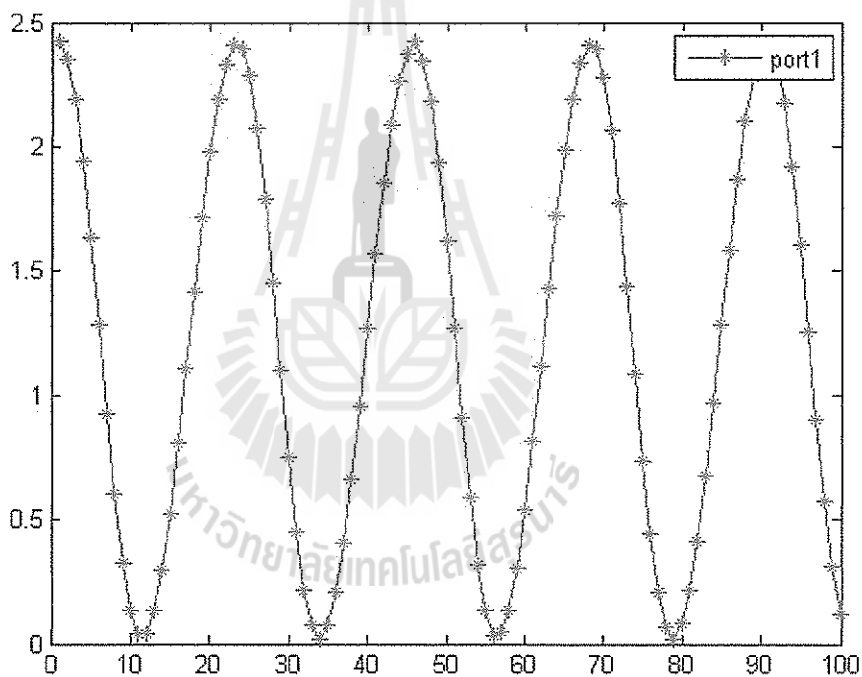
รูปที่ 4.11 แสดงการขยับสัญญาณ

#### 4.7 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

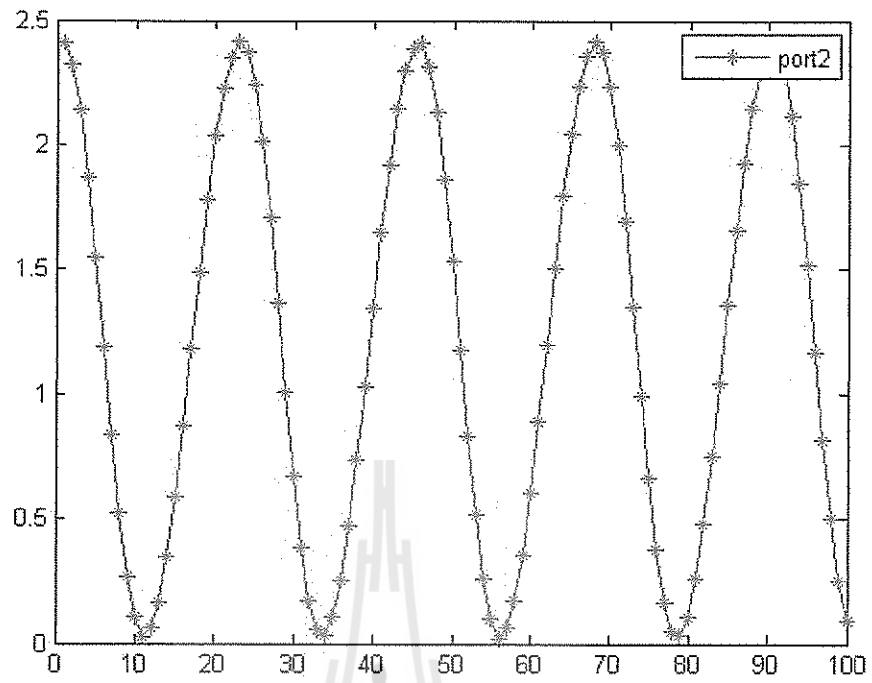
ในการทดสอบตัวบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เราจะใช้โปรแกรมในการประมวลผลร่วมกับโปรแกรม Matlab เพื่อจะได้รู้ว่าสัญญาณถูกส่งมาได้ทำการทดสอบและผลที่ได้เป็นอย่างดีได้แสดงในหัวข้อโปรแกรม Matlab ในหัวข้อต่อไป

#### 4.8 โปรแกรม Matlab

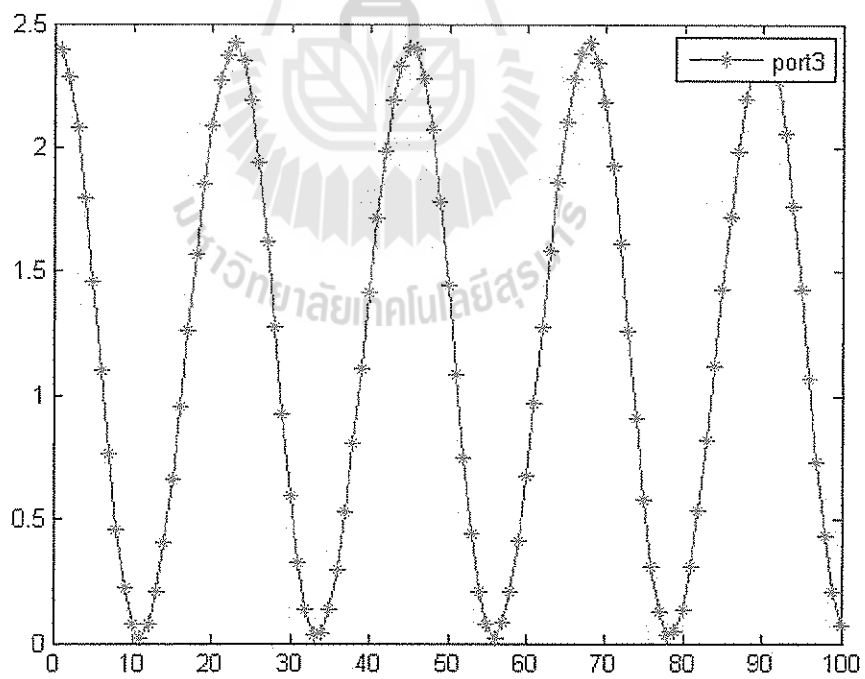
เมื่อเราได้ทำการเขียนโค้ดที่อยู่ในบทที่ 3 ลงในโปรแกรม Matlab แล้วเราก็ได้ทำการทดสอบโดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมในการทดสอบ เพื่อจะได้ลักษณะของกราฟตามที่เรต้องการและเหมาะสำหรับการใช้งาน



รูปที่ 4.12 ภาพแสดงพอร์ตที่ 1 ความถี่ 100 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V

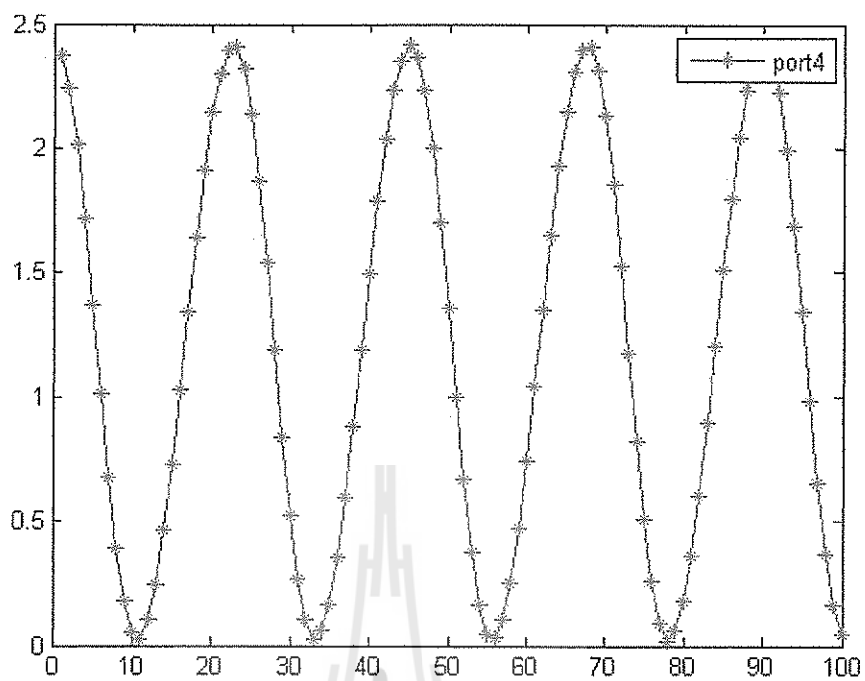


รูปที่ 4.13 ภาพแสดงพอร์ตที่ 2 ความถี่ที่ 100 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V

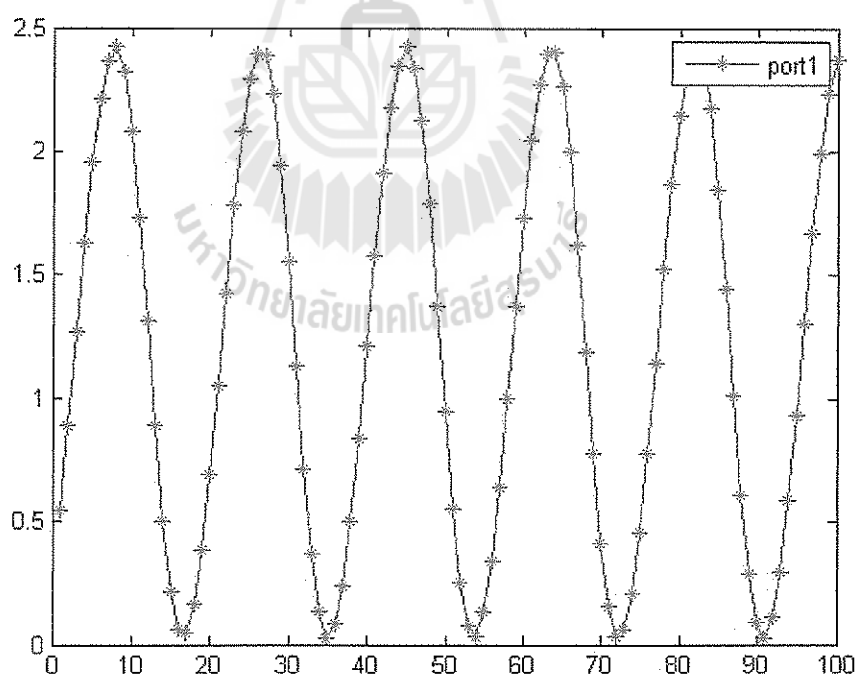


รูปที่ 4.14 ภาพแสดงพอร์ตที่ 3 ความถี่ที่ 100 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V

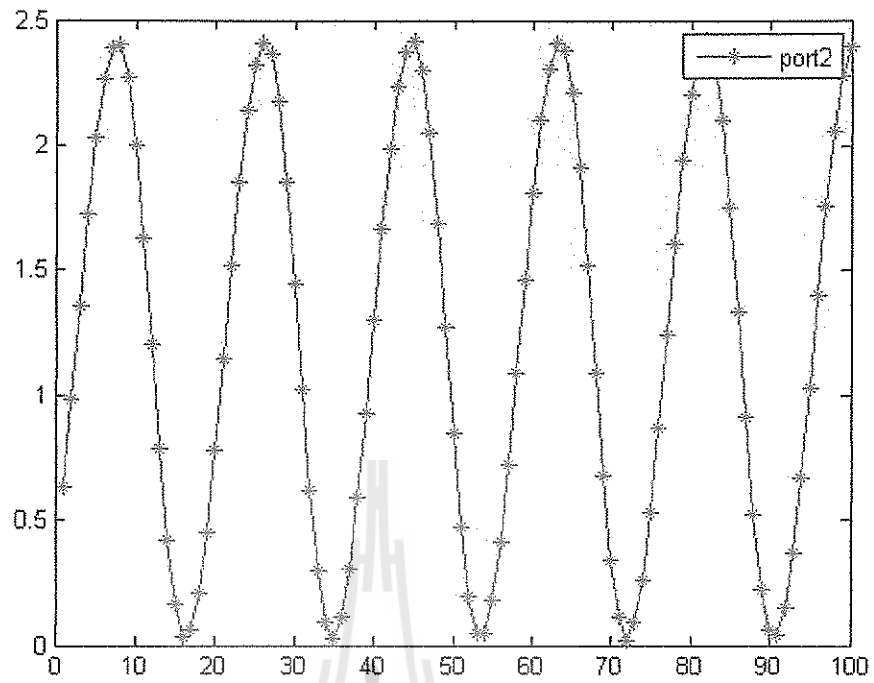




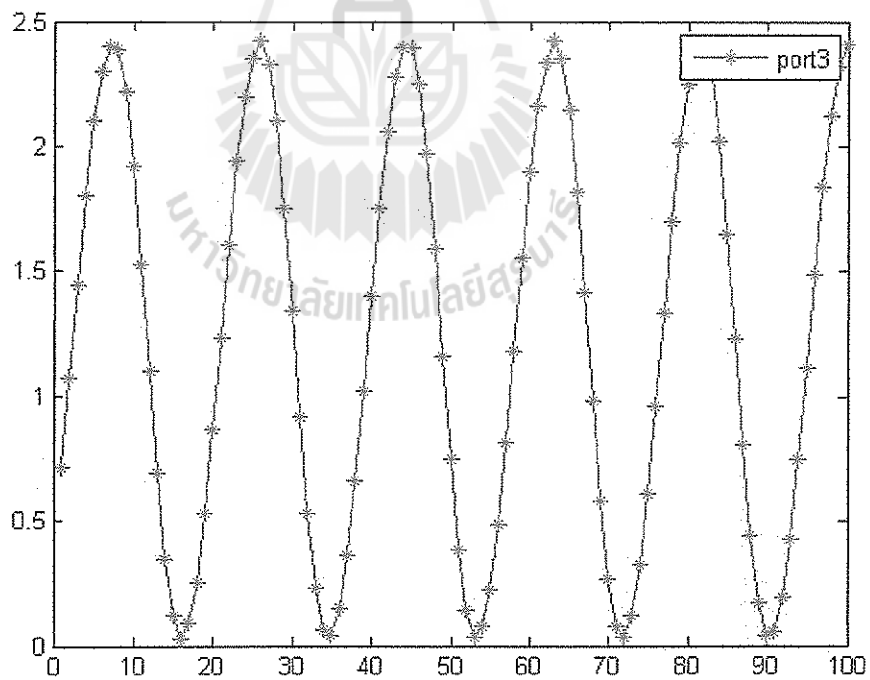
รูปที่ 4.15 ภาพแสดงพอร์ตที่ 4 ความถี่ที่ 100 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



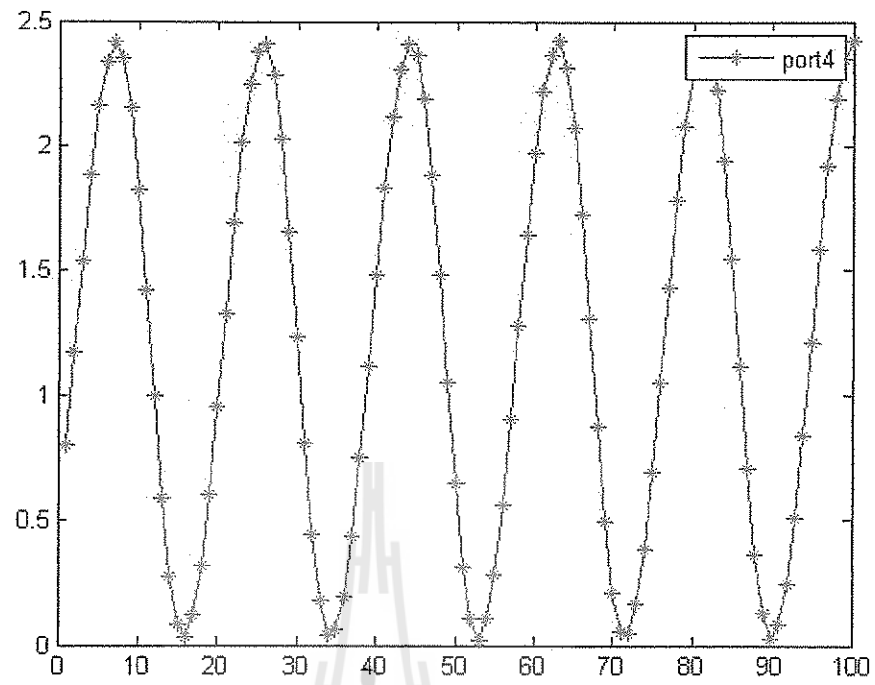
รูปที่ 4.16 ภาพแสดงพอร์ตที่ 1 ความถี่ที่ 120 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



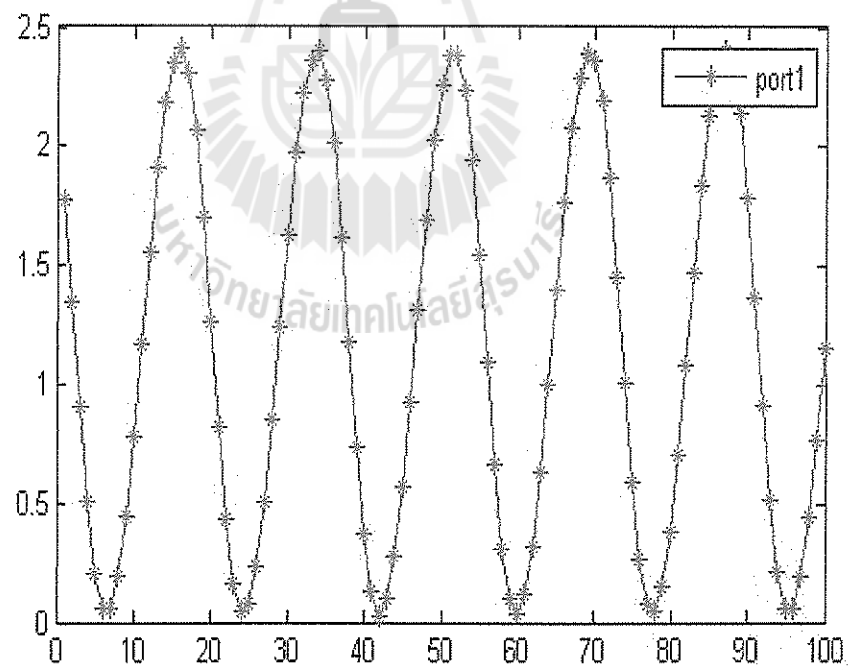
รูปที่ 4.17 ภาพแสดงพอร์ตที่ 2 ความถี่ที่ 120 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



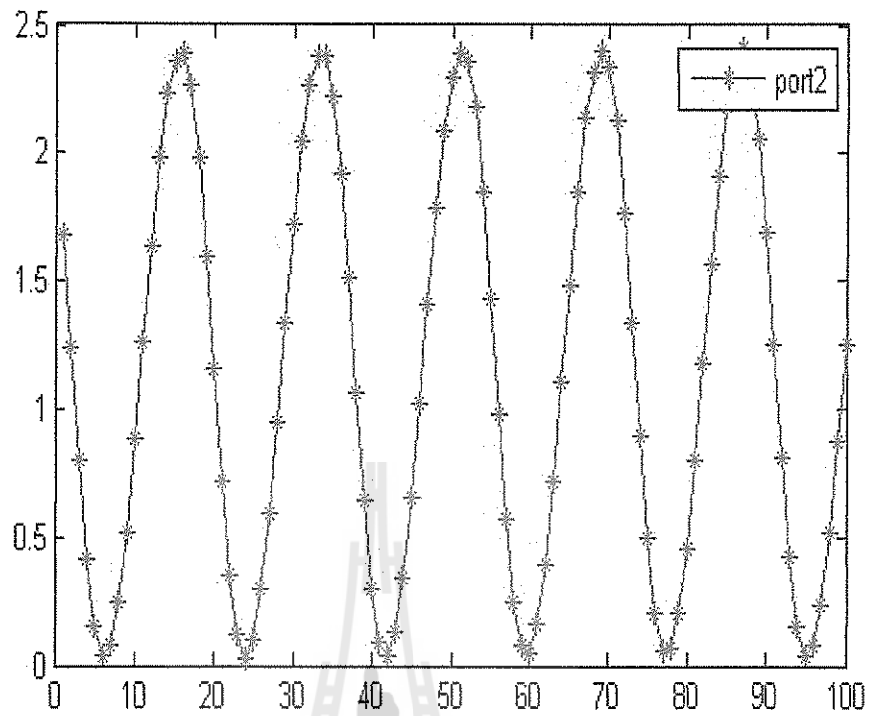
รูปที่ 4.18 ภาพแสดงพอร์ตที่ 3 ความถี่ที่ 120 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



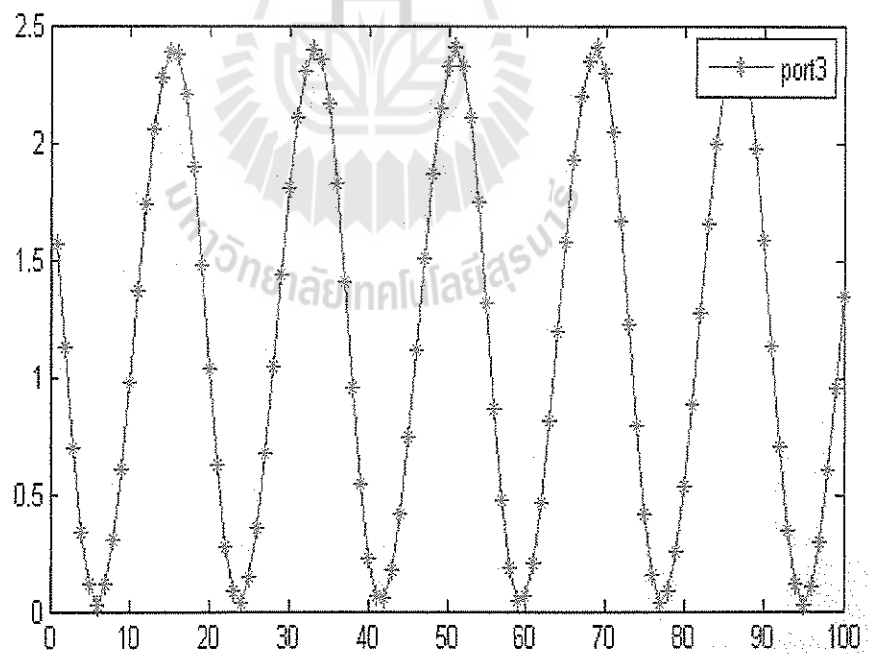
รูปที่ 4.19 ภาพแสดงพอร์ตที่ 4 ความถี่ที่ 120 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



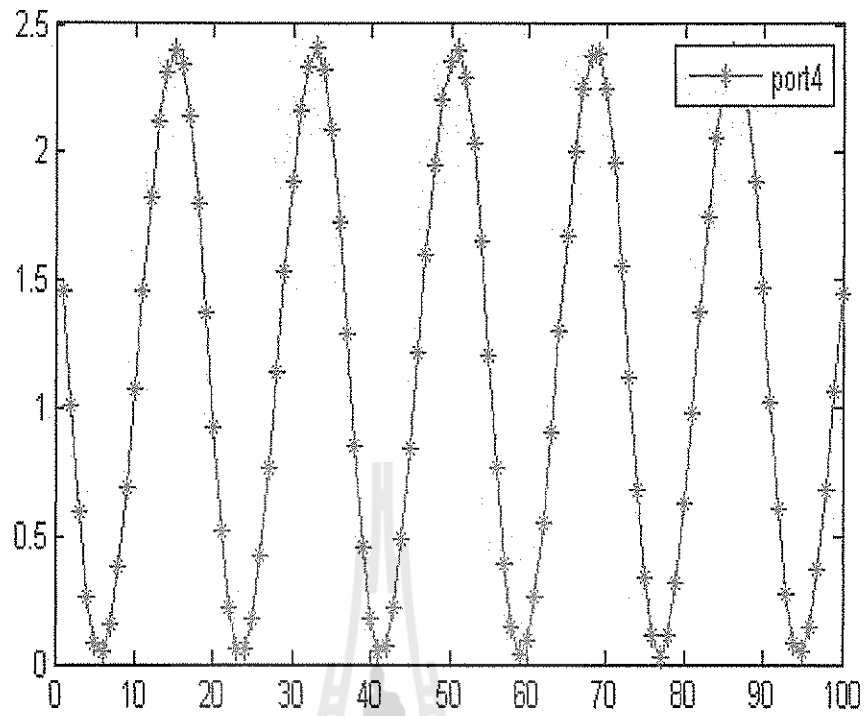
รูปที่ 4.20 ภาพแสดงพอร์ตที่ 1 ความถี่ที่ 125 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



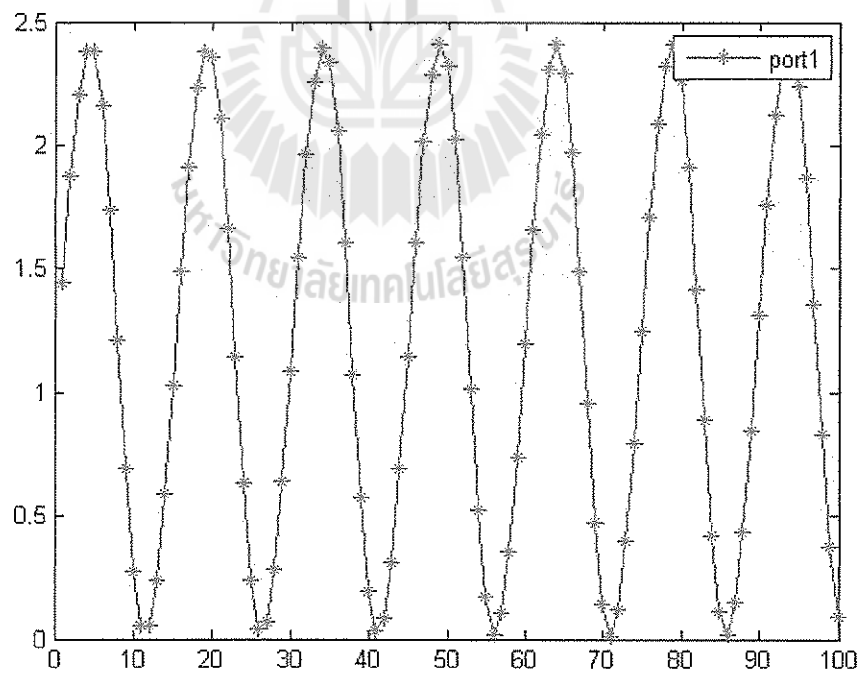
รูปที่ 4.21 ภาพแสดงพอร์ตที่ 2 ความถี่ที่ 125 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



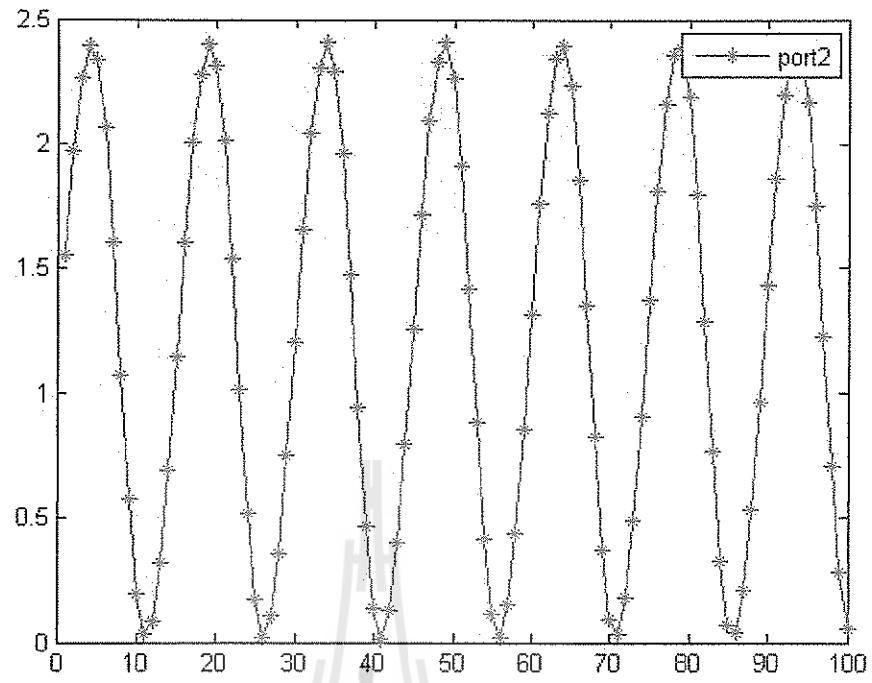
รูปที่ 4.22 ภาพแสดงพอร์ตที่ 3 ความถี่ที่ 125 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



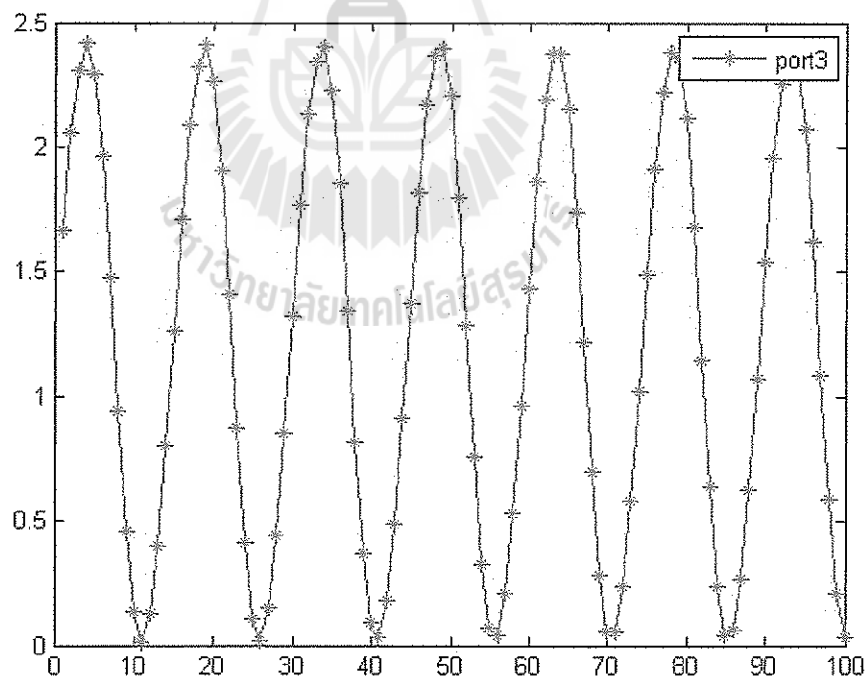
รูปที่ 4.23 ภาพแสดงพอร์ตที่ 4 ความถี่ที่ 125 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



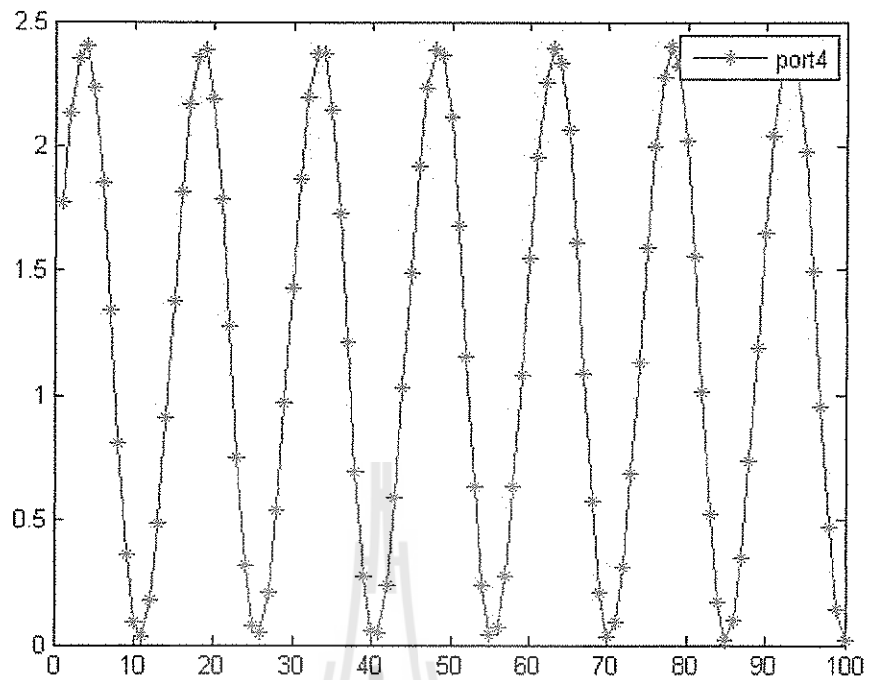
รูปที่ 4.24 ภาพแสดงพอร์ตที่ 1 ความถี่ที่ 150 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



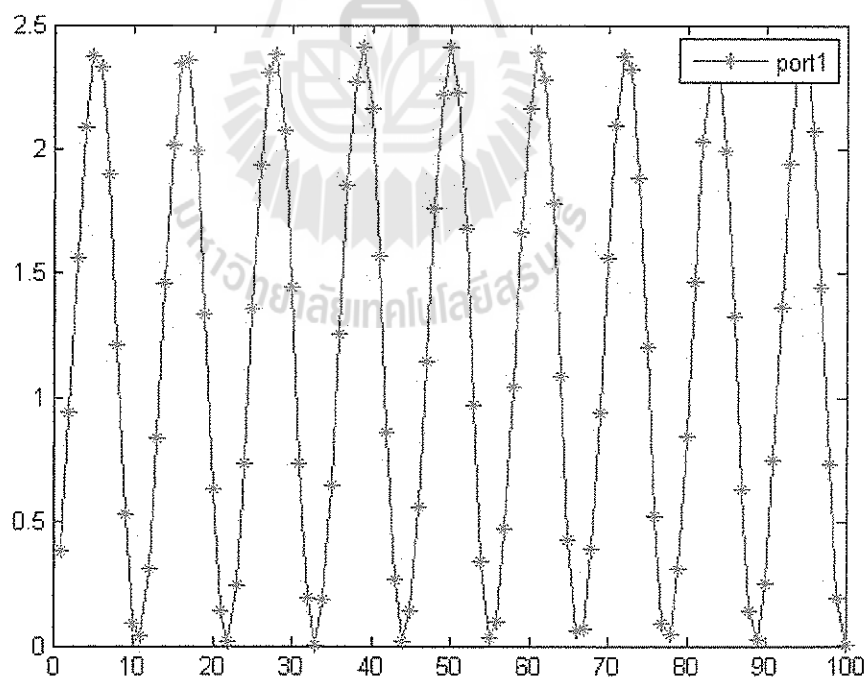
รูปที่ 4.25 ภาพแสดงพอร์ตที่ 2 ความถี่ที่ 150 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



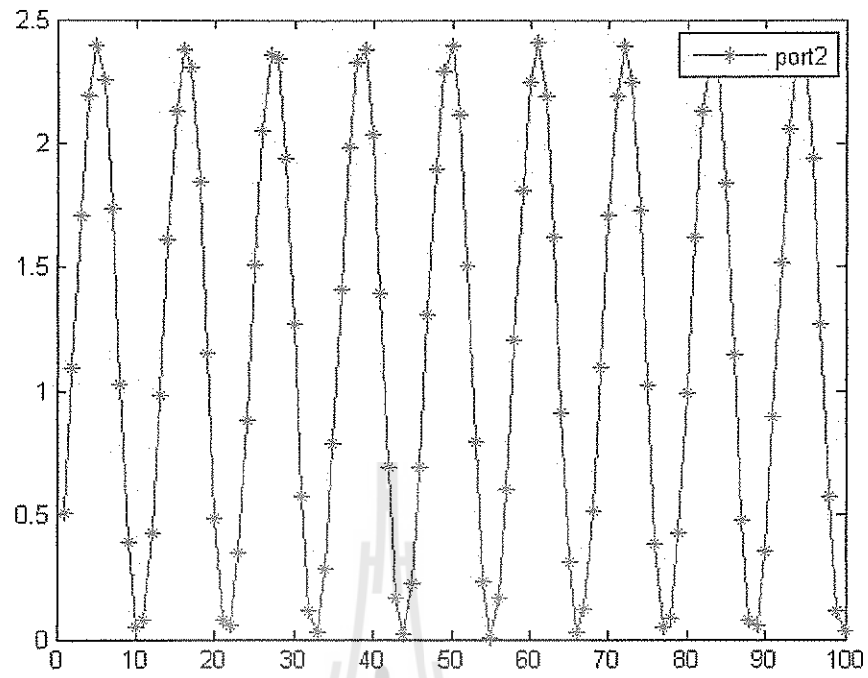
รูปที่ 4.26 ภาพแสดงพอร์ตที่ 3 ความถี่ที่ 150 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



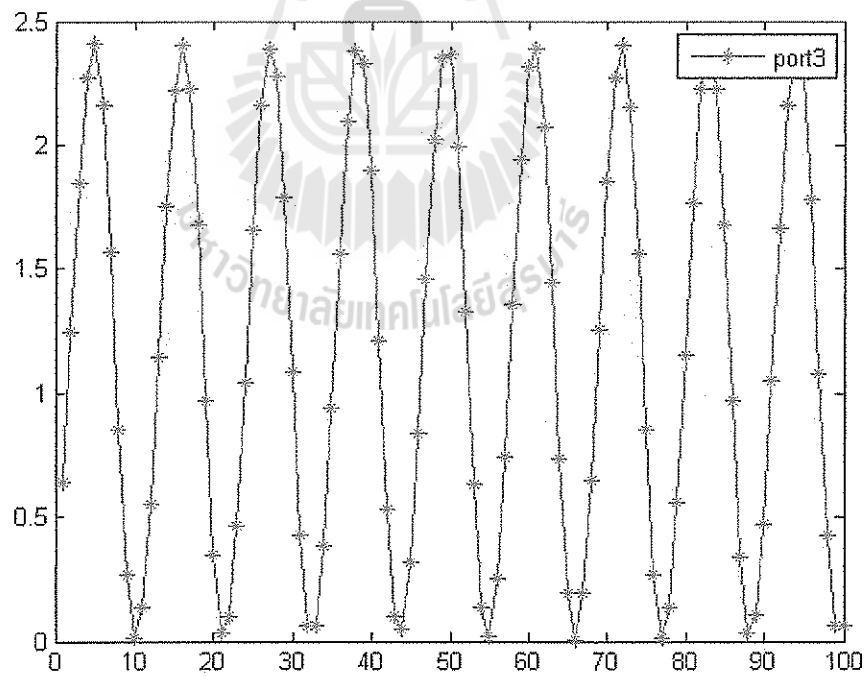
รูปที่ 4.27 ภาพแสดงพอร์ตที่ 4 ความถี่ที่ 150 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



รูปที่ 4.28 ภาพแสดงพอร์ตที่ 1 ความถี่ที่ 200 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V

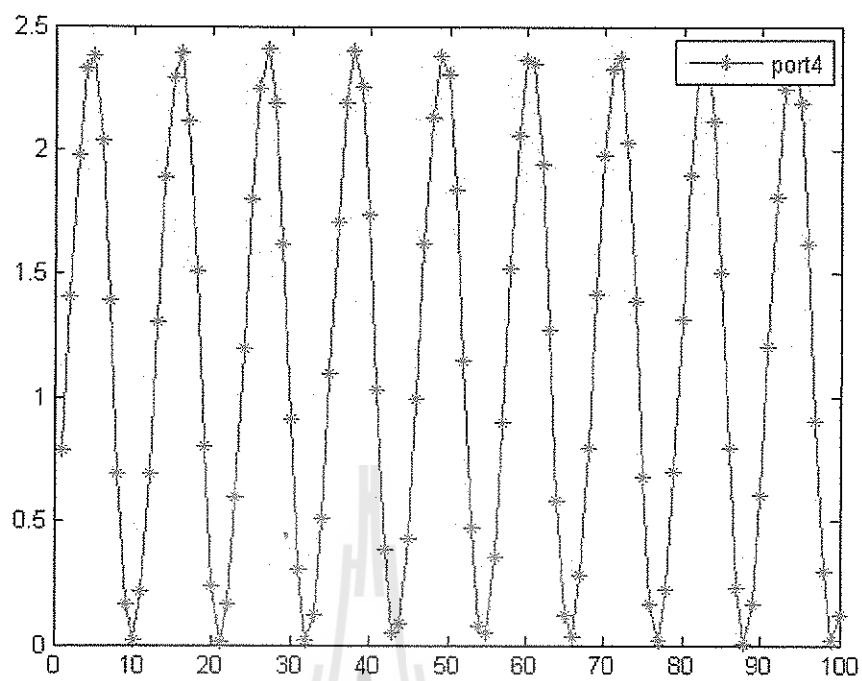


รูปที่ 4.29 ภาพแสดงพอร์ตที่ 2 ความถี่ที่ 200 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V

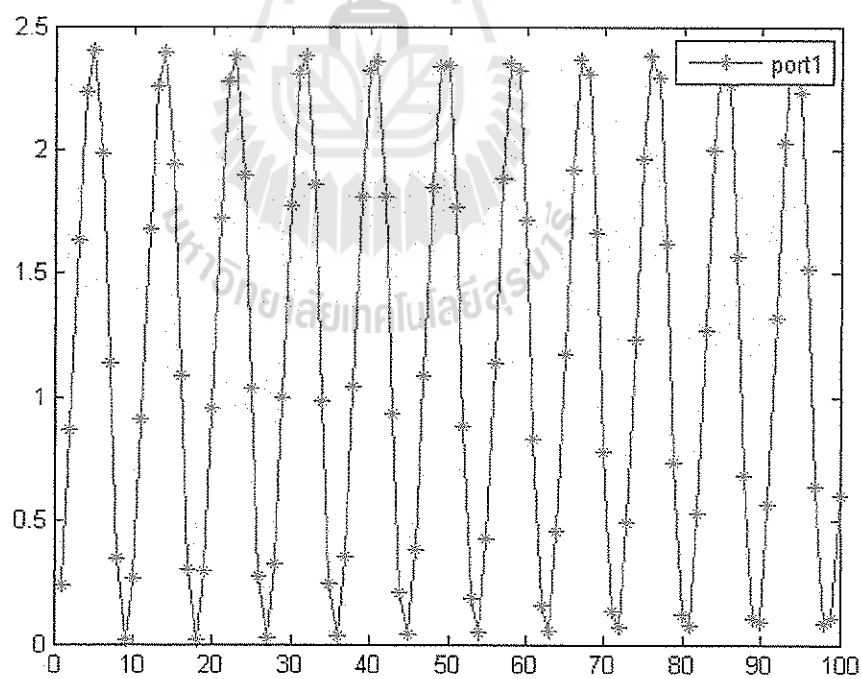


รูปที่ 4.30 ภาพแสดงพอร์ตที่ 3 ความถี่ที่ 200 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V

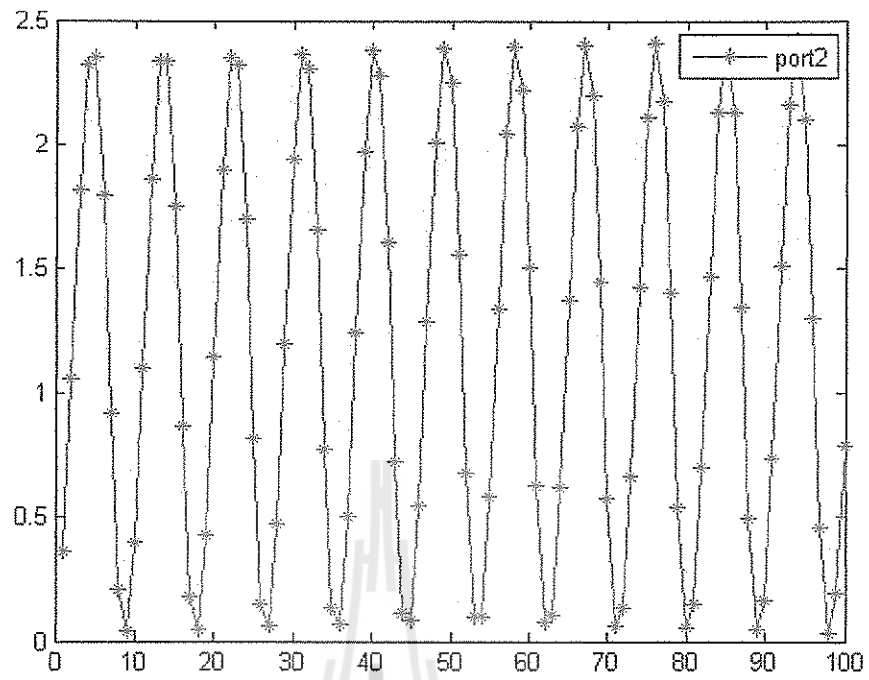




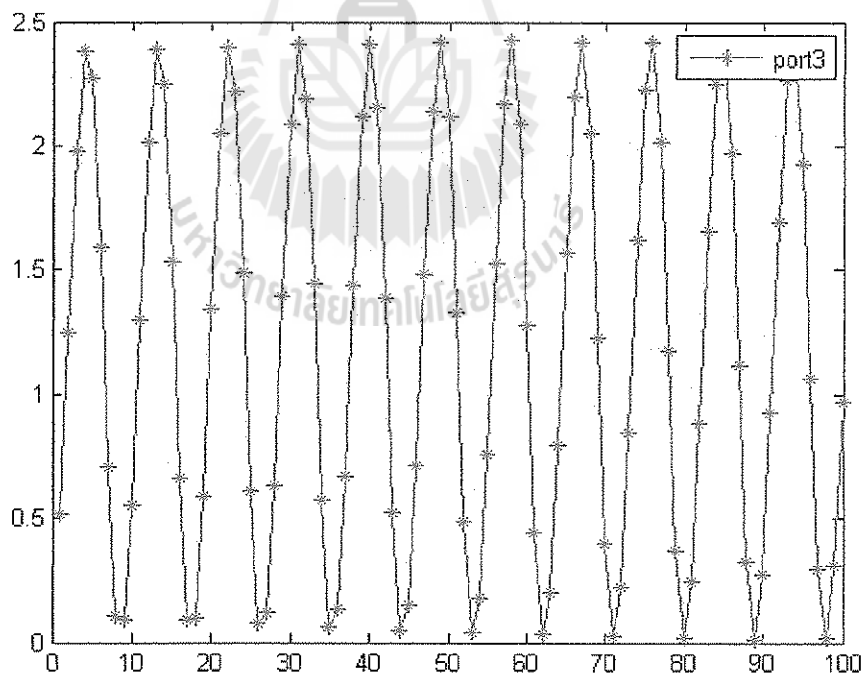
รูปที่ 4.31 ภาพแสดงพอร์ตที่ 4 ความถี่ที่ 200 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



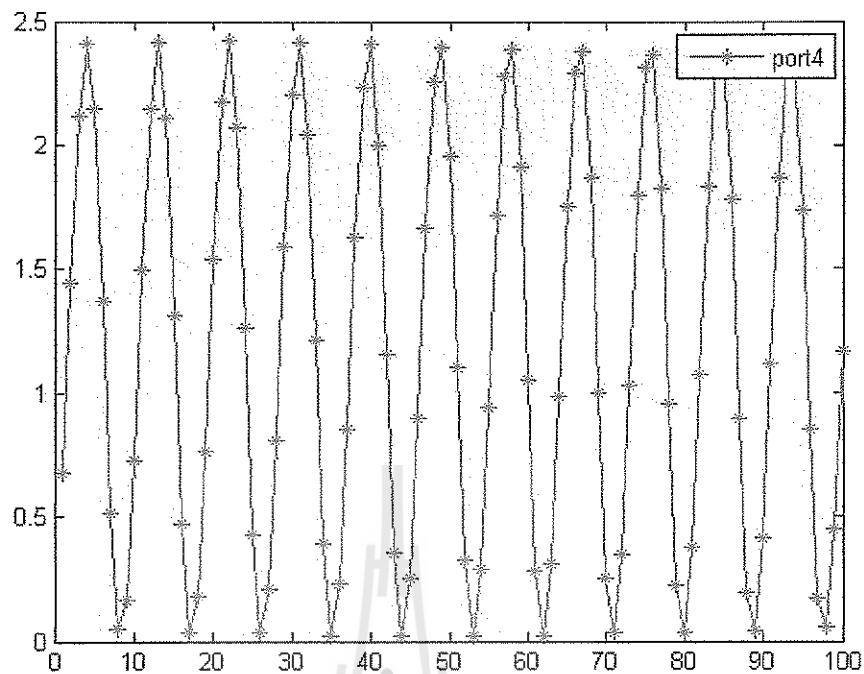
รูปที่ 4.32 ภาพแสดงพอร์ตที่ 1 ความถี่ที่ 250 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



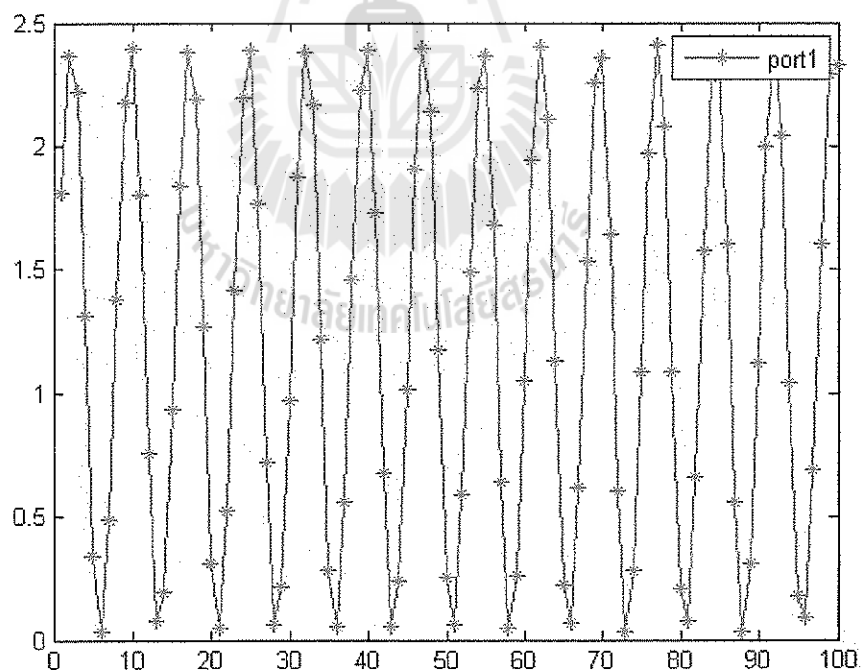
รูปที่ 4.33 ภาพแสดงพอร์ตที่ 2 ความถี่ที่ 250 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



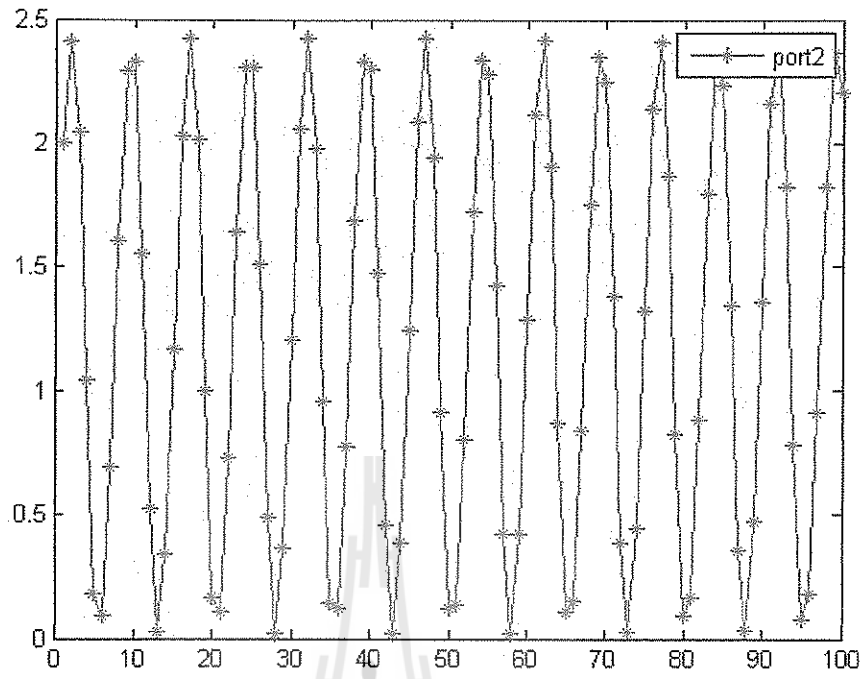
รูปที่ 4.34 ภาพแสดงพอร์ตที่ 3 ความถี่ที่ 250 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



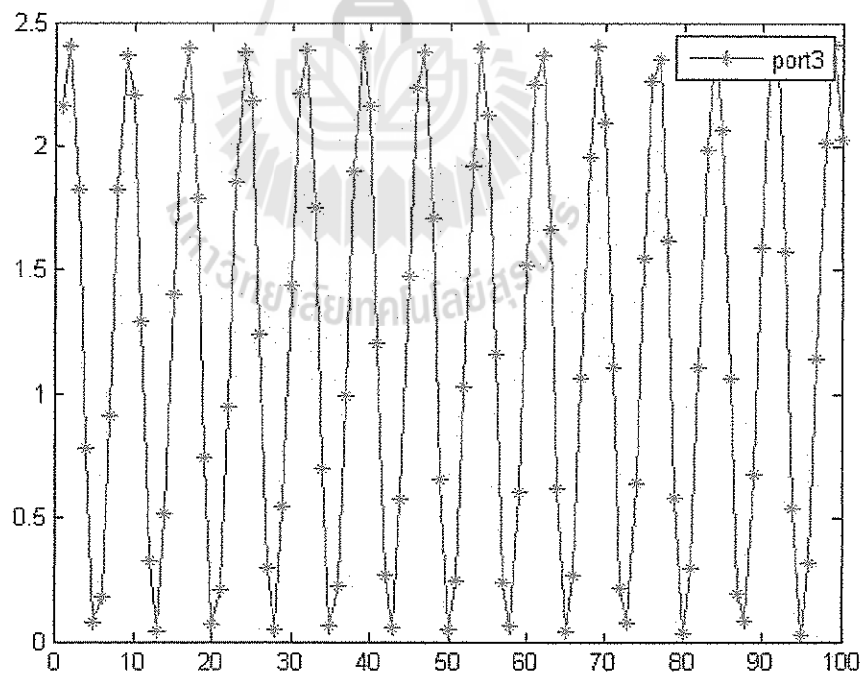
รูปที่ 4.35 ภาพแสดงพอร์ตที่ 4 ความถี่ที่ 250 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



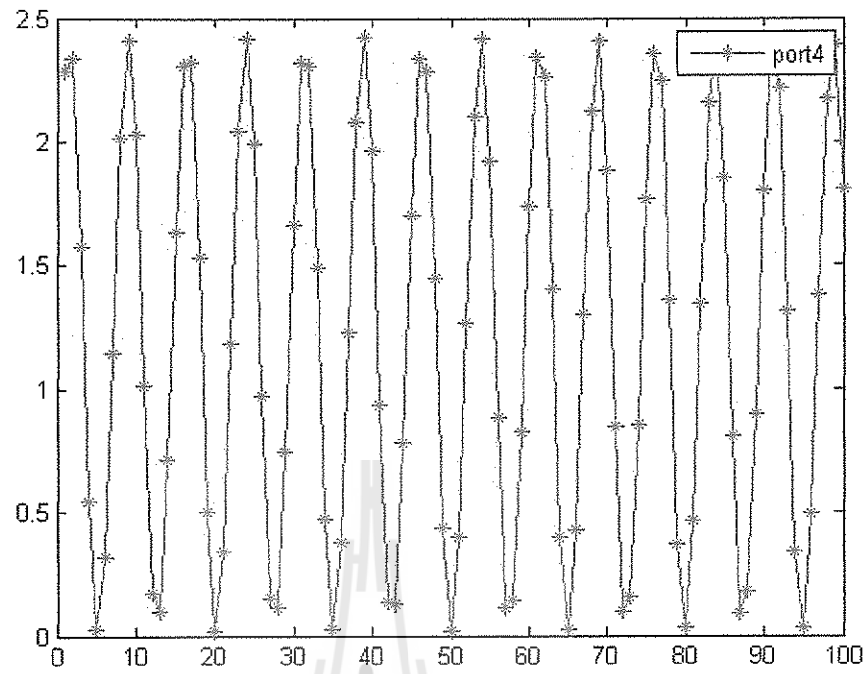
รูปที่ 4.36 ภาพแสดงพอร์ตที่ 1 ความถี่ที่ 300 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



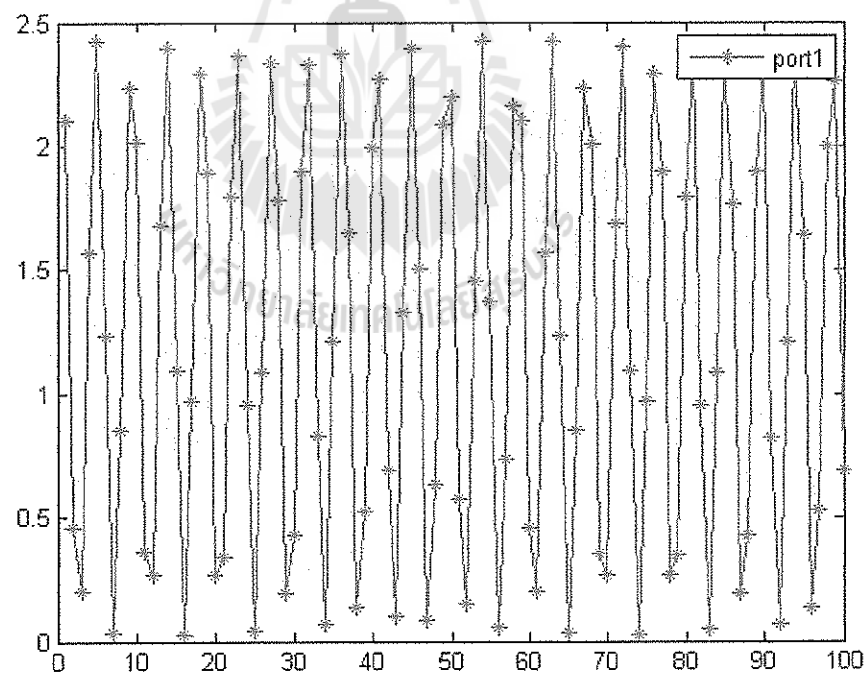
รูปที่ 4.37 ภาพแสดงพอร์ตที่ 2 ความถี่ที่ 300 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



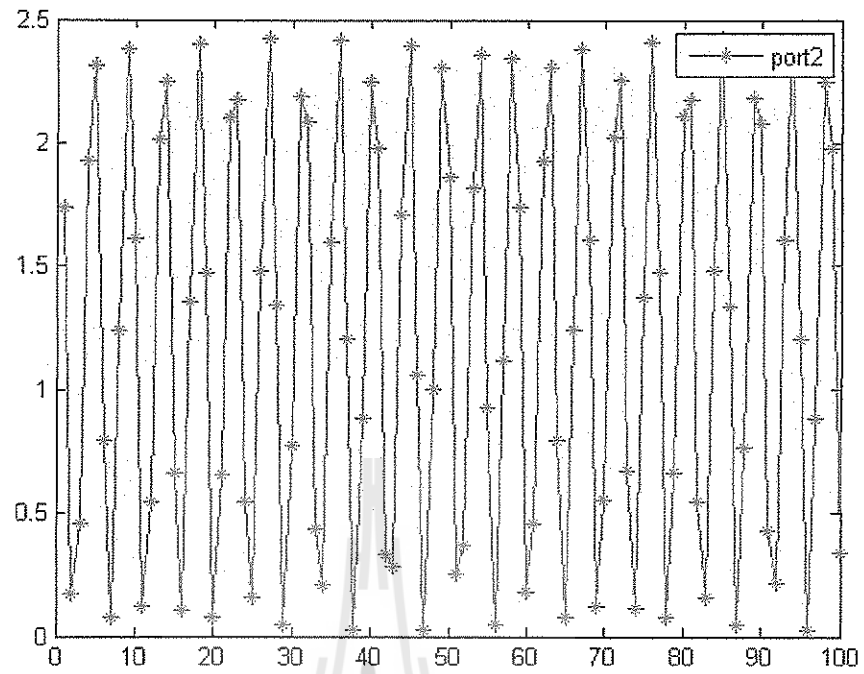
รูปที่ 4.38 ภาพแสดงพอร์ตที่ 3 ความถี่ที่ 300 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



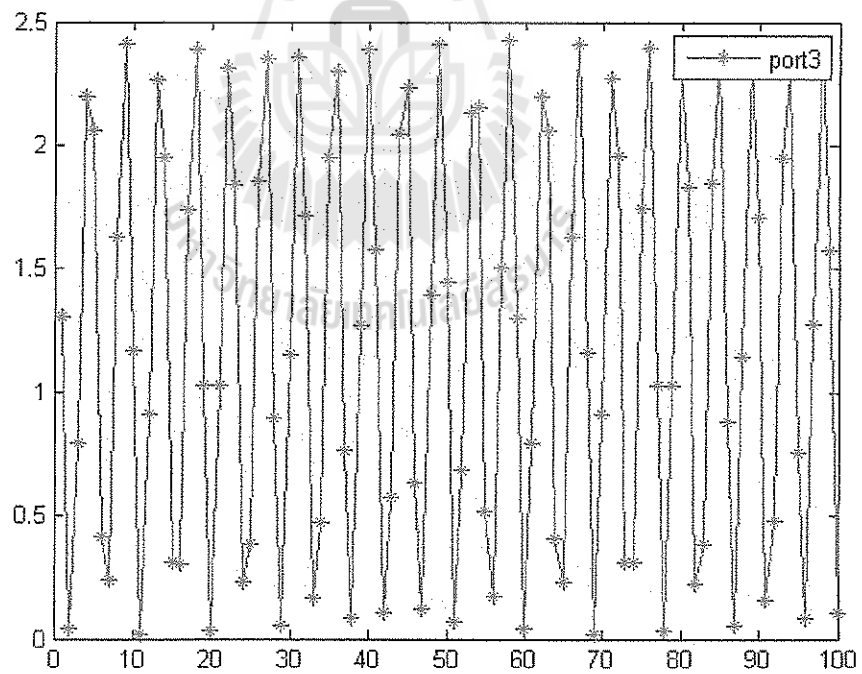
รูปที่ 4.39 ภาพแสดงพอร์ตที่ 4 ความถี่ที่ 300 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



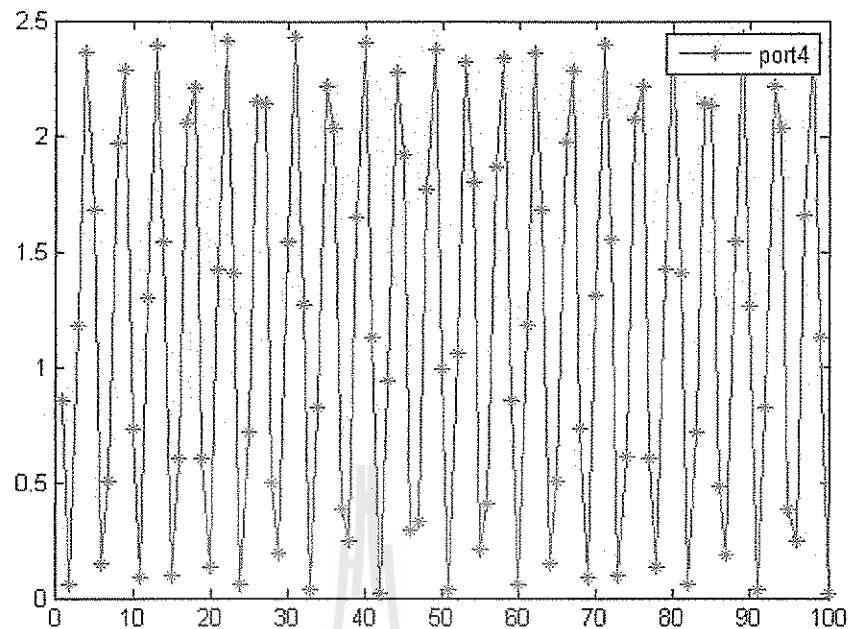
รูปที่ 4.40 ภาพแสดงพอร์ตที่ 1 ความถี่ที่ 500 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



รูปที่ 4.41 ภาพแสดงพอร์ตที่ 2 ความถี่ที่ 500 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V



รูปที่ 4.42 ภาพแสดงพอร์ตที่ 3 ความถี่ที่ 500 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V

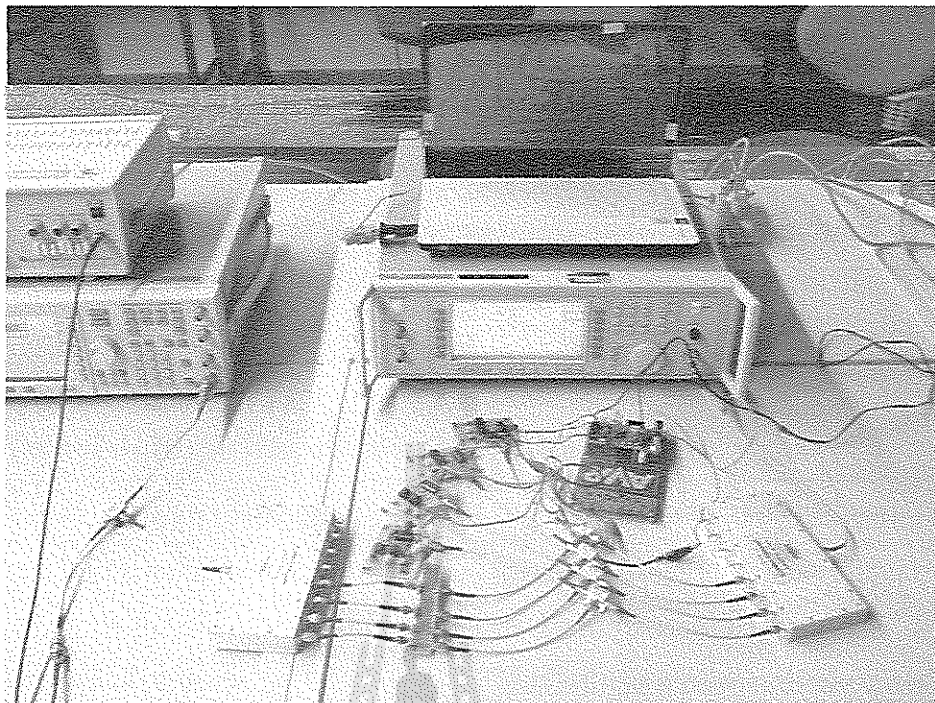


รูปที่ 4.43 ภาพแสดงพอร์ตที่ 4 ความถี่ที่ 500 Hz  $V_{p-p}$  2.5 V

#### 4.9 สรุปผลในการทดสอบ

จากกราฟทั้งหมดจะเห็นได้ว่ากราฟที่มีความถี่ที่ 100 Hz เป็นกราฟที่มีลักษณะที่ตีที่สุดแต่อาจเป็นปัญหาต่อการสร้างวงจร RF เพราะมีความถี่ที่ต่ำเกินไปจึงทำให้สร้างวงจร RF ได้ยาก และผลที่ออกมาจะไม่ได้ตามที่ต้องการ ดังนั้นเราต้องการกราฟที่มีลักษณะดีและมีความถี่ที่สูงที่สุด แต่กราฟที่มีความถี่มากกว่า 200 Hz จะเริ่มเป็นกราฟที่มีลักษณะไม่ค่อยดี ดังนั้นเราจึงต้องใช้ความถี่ที่ 200 Hz เพราะเป็นความถี่ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อไม่ให้เป็นปัญหาต่อการสร้างวงจร RF และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

#### 4.10 ชุดอุปกรณ์ต้นแบบทั้งหมด



รูปที่ 4.44 แสดงรูปอุปกรณ์ทั้งหมด

#### 4.11 สรุป

ในบทนี้เป็นการแสดงการสร้างชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สาย ที่ใช้ในความถี่ปฏิบัติการ 2.4 GHz ที่เครื่องกำเนิดสัญญาณ Generator โดยจะลดความถี่ให้เหลือ 200 Hz เพื่อให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถทำงานได้ โดยมีการพิจารณาแบบการเลื่อนเฟส จากผลการทดสอบพบว่าการเลื่อนเฟสจริงแต่อาจมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย



## บทที่ 5

### ข้อสรุปโครงการ

#### 5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปของโครงการการชดเชยระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สาย ซึ่งจะได้อธิบายถึงปัญหาที่พบในระหว่างการทำโครงการ วิธีแก้ไขปัญหาคือข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาต่อไป

#### 5.2 ปัญหาที่พบในระหว่างการทำโครงการและวิธีแก้ไขปัญหา

ปัญหาที่พบ	สาเหตุและวิธีแก้ไขปัญหา
1. ในการวัดค่า S พารามิเตอร์และกราฟ pattern ของ Phase Shifter เกิดความคลาดเคลื่อนและผิดเพี้ยนจากที่ได้ออกแบบ	<b>สาเหตุ</b> อาจเกิดจากการออกแบบและความไม่ปรารถนในการสร้างลายวงจร <b>วิธีแก้ไขปัญหา</b> ควรมีความปรารถนaborจงในการออกแบบและสร้างลายวงจร เพื่อให้มีลายวงจรที่คมชัด ไม่ขรุขระ
2. วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำมีปัญหาและพึ่งบ่อย	<b>สาเหตุ</b> เนื่องจากตัวไอซีที่ใช้ในวงจรมีขนาดเล็ก จึงไม่สามารถที่จะทนความร้อนจากการบัดกรีนานๆ ได้ <b>วิธีแก้ไขปัญหา</b> ควรทำการบัดกรีอย่างคล่องแคล่ว เพื่อจะได้ไม่ต้องแช่หัวแร้งหรือจี้ตัวไอซีในการบัดกรีนานเกินไป ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดความร้อนมาก
3. ในขณะที่ทำการทดลองวงจรขยายสัญญาณและวงจรกระชับสัญญาณที่ห้องLabนั้น พบว่าสัญญาณความถี่มีการผิดเพี้ยนจากความเป็นจริง	<b>สาเหตุ</b> เนื่องจากตัวไอซีที่ใช้ในวงจรมีขนาดเล็ก จึงไม่สามารถที่จะทนความร้อนจากการบัดกรีนานๆ ได้ <b>วิธีแก้ไขปัญหา</b> ควรทำการบัดกรีอย่างคล่องแคล่ว เพื่อจะได้ไม่ต้องแช่หัวแร้งหรือจี้ตัวไอซีในการบัดกรีนานเกินไป ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดความร้อนมาก

## ตารางที่ 1 รายละเอียดของปัญหาที่พบในระหว่างการทำโครงการและวิธีแก้ไขปัญหา

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในการกักลายวงจรนั้นควรทำด้วยความปราณีต ไม่เร่งรีบ และควรสายภาชนะของน้ำยาที่นำลายวงจรลงไปแช่อยู่ตลอดเวลา เพื่อให้ลายวงจรที่ได้ออกมานั้นมีคุณภาพดี ไม่ขรุขระ

5.3.2 เนื่องจากอุปกรณ์ไอซีที่ใช้ในการสร้างวงจรรองสัญญาณความถี่ต่ำ, วงจรขยายสัญญาณและวงจรกระตุ้นสัญญาณมีขนาดเล็ก และไม่สามารถทนความร้อนที่ถูกใจได้เป็นเวลานาน ดังนั้นเราจึงควรจัดเตรียมและตรวจสอบความพร้อมของอุปกรณ์ในการสร้างชิ้นงาน เพื่อที่จะทำให้การบัดกรีอุปกรณ์ไอซีได้อย่างคล่องแคล่ว เช่น หัวแร้งจะต้องสะอาดเพื่อทำให้ง่ายต่อการบัดกรี ควรจะมีอุปกรณ์ขยายเพื่อเพิ่มการมองเห็นวงจรไอซีได้ชัดเจน และควรมีแหวนหรือครีมเพื่อใช้หนีบอุปกรณ์ไอซีได้ง่ายขึ้น

### 5.4 แนวทางการพัฒนาต่อไป

ทำการพัฒนาชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สายที่ดีกว่าเดิม คือเปลี่ยนการส่งแบบ Serial เป็นแบบ Pararial ซึ่งต่อไปจะทำการพัฒนาเพื่อนำไปใช้ควบคู่กับตัวหาทิศทางของวัตถุแบบไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 5.5 บทสรุป

โครงการของเรา นั้นได้นำเสนอการนำเทคโนโลยีของชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สาย โดยจะมีส่วนประกอบสำคัญหลักๆ ดังนี้ 1) วงจรขยายสัญญาณ 2) วงจรรองสัญญาณความถี่ต่ำ 3) วงจรกระตุ้นสัญญาณ และ 4) ตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล ซึ่งความถี่ที่ใช้ในโครงการของเรา นั้นจะถูกออกแบบไว้ที่ 2.4 GHz โดยจะมีหลักการทำงานดังนี้คือ เมื่อมีสัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณคือ Generator เข้ามาในส่วนของวงจรที่เป็น RF ทั้งหมดและจะถูกส่งไปที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการประมวลผลว่าสัญญาณที่เข้ามา

ในการทำชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สาย โดยการนำชุดอุปกรณ์ของวงจรต่างๆมาประยุกต์ใช้งานในโครงการของเรา นั้น จะใช้หลักการทฤษฎีต่างๆใน

บทที่ 2 มาใช้ในการทำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สาย ซึ่งโครงสร้างที่เราได้ออกแบบทั้งหมดนั้น เราได้ทำการดัดแปลงโดยอ้างอิงจากเครื่องวัดสัญญาณแบบแอนะล็อกที่เป็นอุปกรณ์ที่ใหญ่ ซึ่งอาจจะยากต่อการใช้งาน ดังนั้นเราจึงสร้างชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สายชุดอุปกรณ์นี้ขึ้นมาและได้จำลองสัญญาณหลายความถี่

อาจมีความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณ เพื่อรับสัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ (Generator) จากนั้นจึงทำการเขียน โปรแกรมให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการอ่านค่าที่ได้จากแหล่งกำเนิดสัญญาณ (Generator) แล้วใช้โปรแกรม Matlab ที่ได้เขียนไว้ นำข้อมูลดิจิทัลที่ได้จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์มาแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณแอนะล็อก เพื่อดูว่าได้สัญญาณที่ออกมาจริง

เมื่อเราดูจากผลการทดลองดังที่ได้แสดงในตารางต่างๆ ที่ผ่านมาแล้วนั้นสามารถสรุปได้ว่า เราได้ทำการออกแบบและสร้างชุดระบบส่งผ่านสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับตัวหาทิศทางแบบไร้สายที่ถูกต้อง เพื่อหาสัญญาณของแหล่งกำเนิดสัญญาณ ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องวัดสัญญาณนั่นเอง



## ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุพินท์ แก่งคำ เกิดเมื่อวันที่ 7 เมษายน พ.ศ. 2531 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลโนเมือง อำเภอเมือง จังหวัดชัยภูมิ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสตรีชัยภูมิ อำเภอในเมือง จังหวัดชัยภูมิ เมื่อปี พ.ศ. 2548 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นายมัชฌวาน ปรีพูล เกิดเมื่อวันที่ 11 พฤศจิกายน พ.ศ. 2529 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลบ้านแพ อำเภอดูเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสรรพวิทยาคม อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก เมื่อปี พ.ศ. 2548 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



## บรรณานุกรม

เอกสารอ้างอิง

<http://74.125.153.132/search?q=cache:0Q10AQ->

[pe2kJ:www.wara.com/modules.php%3Fname%3DNews%26file%3Darticle%26sid%3D613+low+pass+rc+filter&cd=9&hl=th&ct=clnk&gl=th&lr=lang\\_th](http://www.wara.com/modules.php%3Fname%3DNews%26file%3Darticle%26sid%3D613+low+pass+rc+filter&cd=9&hl=th&ct=clnk&gl=th&lr=lang_th)

<http://www.wara.com/modules.php?name=News&file=article&sid=601>

[http://eng.vu.ac.th/mm/2009/~arnon/theching/elec\\_mm\\_lab/lab\\_sheet/Lab5.pdf](http://eng.vu.ac.th/mm/2009/~arnon/theching/elec_mm_lab/lab_sheet/Lab5.pdf)

