

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

วงจรรขยายกำลังแบบเดลตา-มอดูเลชัน

DELTA-MODULATION POWER AMPLIFIER



โดย

นายชัยพร จิตจักร

นางสาววิลาวัลย์ บุญสุนย์

รพ.
๕๓๕๖
๒๕๕๐

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 83265

วัน,เดือน,ปี..... 11.๑๑. 2551

b. 11๙ ๖๖๕๓๗
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๐

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรขยายกำลังแบบเดลตา-มอดูเลชัน
DELTA-MODULATION POWER AMPLIFIER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณเทพฯ วิทยาเขตบาง

เรื่อง วงจรขยายกำลังแบบเดลตา-มอดูเลชัน

DELTA-MODULATION POWER AMPLIFIER

ผู้จัดทำ

1. นายชัยพร จิตจักร 47010165
2. นางสาววิลาวัลย์ บุญสุนย์ 47010714

.....
ปัทมิมงคล
(รศ.ดร.ปัทมิมงคล วัฒนชัย)

อาจารย์ที่ปรึกษา

.....
(ศ.ดร.วิวัฒน์ กิรินนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการ 502428

วงจรรขยายกำลังแบบเดลตา-มอดูเลชัน

DELTA-MODULATION POWER AMPLIFIER

โดย นายชัยพร จิตจักร 47010165

นางสาววิลาวัลย์ บุญสุนย์ 47010714

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. ปราโมทย์ วาดเขียน

ศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาและสร้างวงจรรขยายกำลังงานเสียง ที่มีการทำงานแบบรูปปิดสวิตซ์ซึ่ง ฟลูบริดจ์ ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญ คือ วงจรเดลตา-มอดูเลชัน วงจรขับสัญญาณ และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งในส่วนของวงจรเดลตา-มอดูเลชันเป็นการแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อเข้าสู่วงจรขับสัญญาณ ซึ่งเป็นการนำสัญญาณที่ได้จากส่วนของวงจรเดลตา-มอดูเลชัน มาจัดเฟสและยกระดับสัญญาณเพื่อให้สามารถควบคุมการทำงาน (เปิด-ปิด) ของทรานซิสเตอร์ในส่วนของภาคขยายกำลัง และในที่สุดทำเป็นวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านที่ใช้ในการกู้สัญญาณที่ต้องการกลับคืนมาเพื่อนำไปขับลำโพงต่อไป โดยข้อดีสำหรับการมอดูเลตสัญญาณแบบเดลตา-มอดูเลชันนั้นสามารถลดสัญญาณรบกวนและมีอัตราการสูญเสียพลังงานน้อยมาก นอกจากนี้แล้ววงจรรขยายกำลังงานเสียงนี้ยังมีวงจรปรับแต่งสัญญาณแบบดิจิทัล 5 ข่านความถี่ โดยใช้ IC สำเร็จรูป เพื่อให้ได้วงจรรขยายกำลังงานเสียงที่สามารถปรับแต่งคุณสมบัติของเสียงได้

ABSTRACT

This project is to study and construct power amplifier which operates in loop bridge switching full bridge. The power amplifier is composed of three important parts which are delta modulator, driver circuit and low pass filter. The delta modulator converts an analog signal to a digital signal is phase arranged and dc added up by the driver circuit. This is to make the signal be able to control the on-off operation of the transistor in the power amplifier port. Finally, the low pass filter is used to recover the sound speaker. The advantage of delta modulation is that it can reduce the interfering signal and has less power dissipation loss. In addition, the IC 5 band digital equalizer circuit is included in the proposed power amplifier to adjust the properties of sound.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้จะไม่สามารถสำเร็จลงได้ หากไม่ได้รับความช่วยเหลือจาก รศ.ดร.ปราโมทย์วาดเขียน และ ศ.วิวัฒน์ กิรานนท์ และอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ รวมทั้งเพื่อนๆที่อยู่ในห้องปฏิบัติการที่คอยอำนวยความสะดวกสำหรับการใช้เครื่องมือทดลอง

ผู้จัดทำ ขอขอบคุณอาจารย์ และผู้ที่ให้คำปรึกษาทุกท่านที่มีส่วนร่วมในโครงการนี้

ชัยพร จิตจักร
วิลาวัณย์ บุญสุนช์
(คณะผู้จัดทำ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีหรือหลักการ	3
2.1 วงจรขยายกำลัง (Power Amplifier)	3
2.1.1 วงจรขยายกำลังคลาส A	3
2.1.2 วงจรขยายกำลังคลาส B	4
2.1.3 วงจรขยายกำลังคลาส AB	4
2.1.4 วงจรขยายกำลังคลาส C	5
2.1.5 วงจรขยายกำลังคลาส D	5
2.2 เคลตา-มอดูเลชัน (Delta Modulation : DM)	7
2.3 ภาคนับสัญญาณ	10
2.4 วงจรกรองความถี่ (Filter)	10
2.4.1 วงจรกรองแบบต่างๆ	12
2.4.1.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)	12
2.4.1.2 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter)	13
2.4.1.3 วงจรกรองความถี่แถบผ่าน (Band Pass Filter)	14
2.4.1.4 วงจรกรองความถี่หยุด (Band Stop Filter หรือ Notch Filter)	15
2.4.1.5 วงจรกรองความถี่ที่มีค่าเท่ากันตลอด (All Pass Filter)	15
2.5 ดิจิตอล ออดิโอ (Digital Audio)	16
2.5.1 สัญญาณเสียง	16
2.6 ระบบอีควอไลเซอร์ (Equalizer)	17
2.6.1 ชนิดของอีควอไลเซอร์	17
2.6.1.1 กราฟฟิอีควอไลเซอร์	17
2.6.1.2 พารามตริกอีควอไลเซอร์	19
2.6.1.3 พารากราฟฟิอีควอไลเซอร์	19
2.6.1.4 ดิจิตอลอีควอไลเซอร์	19
2.6.2 การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (Digital Signal Processing)	19
2.6.2.1 สัญญาณต่อเนื่อง กับสัญญาณไม่ต่อเนื่อง	19
2.6.2.2 สัญญาณดิจิตอล (Digital Signal)	20
2.6.2.3 ระบบและคุณสมบัติของระบบ	21
2.7 การแปลงค่าเซต (Z-Transform)	22
2.8 วงจรกรองความถี่แบบดิจิตอล	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.1 วงจรกรองความถี่ไม่ป้อนกลับเชิงเลข (Finite Impulse Response : FIR)	24
2.8.2 วงจรกรองความถี่ป้อนกลับเชิงเลข (Infinite Impulse Response : IIR)	26
2.9 วงจรแปลงอนาลอกเป็นดิจิทัล	27
2.10 วงจรแปลงดิจิทัลเป็นอนาลอก (D/A Converter Circuits : DAC)	28
2.11 ไมโครคอนโทรลเลอร์และการติดต่อ I ² C	30
2.11.1 MSC-51	30
2.11.2 การใช้งานขาต่างๆ MCS-51	33
2.11.3 โครงสร้างหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051	35
2.11.3.1 หน่วยความจำโปรแกรม (Program Memory)	36
2.11.3.2 หน่วยความจำภายนอก (External Data Memory)	36
2.11.3.3 หน่วยความจำข้อมูลภายใน (Internal Data Memory)	36
2.11.4 การติดต่อ I ² C	38
2.11.4.1 คุณสมบัติทั่วไปเกี่ยวกับ I ² C	39
2.11.4.2 หลักการของบัส I ² C	41
2.11.4.3 สภาวะที่เกิดบนบัส I ² C	41
2.11.4.4 การทำงานของบัส I ² C	42
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	46
3.1 วงจรเดลตา-มอดูเลชัน (Delta Modulation)	46
3.2 Close loop	57
3.3 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)	62
3.4 การออกแบบหาค่าไฟเลี้ยงให้กับวงจรขยายเสียง	63
3.5 ในส่วนของอิกควอไลเซอร์	64
3.5.1 วงจรควบคุมการทำงานของชิป TAS3002 โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์	65
3.5.2 โปรแกรมควบคุมการทำงานของชิป TAS 3002 โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์	70
3.5.2.1 โปรแกรมส่วนเลือกฟังก์ชัน และการปรับแต่งค่า	70
3.5.2.2 โปรแกรมส่วนการส่งข้อมูลผ่านระบบบัส I ² C	74
3.5.3 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์และนำค่าพารามิเตอร์ไปใช้งาน	76
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	81
4.1 ผลการทดลองในส่วนของวงจรเคลตามอดูเลชัน	81
4.1.1 ทำการป้อนอินพุตและวัดอินพุตของวงจร	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 4.1.2 สเปกตรัมของวงจรเคลตามอดูเลชัน ที่นั่น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ 82
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3 การเปลี่ยนแปลงค่า Duty cycle (D)	84
4.2 ผลการทดลองจากวงจรระดับสัญญาณ	85
4.2.1 นำสัญญาณ ไปผ่านวงจรระดับสัญญาณ	85
4.3 ผลการทดลองในส่วนของไดรเวอร์ (Driver)	85
4.3.1 ทำการป้อนสัญญาณอินพุตเข้าสู่วงจรไดรเวอร์	86
4.3.2 สัญญาณที่เข้าส่วนไดรเวอร์และสัญญาณที่ออกจากไดรเวอร์	87
4.4 การทำวงจรเคลตามอคูลेशनเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์แบบ Close Loop และผลการทดลอง	88
4.4.1 ทำการลดทอนสัญญาณเพื่อใช้ทำ Close Loop	88
4.4.2 นำสัญญาณที่ได้จากการลดทอนมาทำ Close Loop	89
4.5 ป้อนสัญญาณอินพุตเข้าวงจรเคลตามอคูลेशनเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์แล้ววัดเอาต์พุต	90
4.5.1 ป้อนสัญญาณเพื่อวัดอัตราการขยาย	90
4.6 สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตเพื่อหาค่า THD	91
4.6.1 สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตเพื่อหาค่า THD ของ Close Loop	91
4.6.2 สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตเพื่อหาค่า THD ของ Open Loop	92
4.7 ผลการทดลองหาค่าความถี่ Cut off ของวงจร Low Pass Filter	94
4.8 ผลการทดลองในส่วนของอิกวอลไลเซอร์	101
4.8.1 การทดลองวัดสัญญาณ Volume	102
4.8.2 การวัดสัญญาณ TONE (BASS & TREBLE)	106
4.8.3 การทดลอง Biquad Filter	113
บทที่ 5 บทวิจารณ์และบทสรุป	133
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ระบบการมอดูเลตแบบเคลตา-มอดูเลชัน	1
รูปที่ 1.2 การขยายกำลังงานเสียงคลาสดี	2
รูปที่ 2.1 ภาคขยายของ Class A	3
รูปที่ 2.2 ภาคขยายของ Class B	4
รูปที่ 2.3 ภาคขยายของ Class AB	5
รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของวงจรขยายคลาสดี	6
รูปที่ 2.5 ครึ่งบริดจ์ที่มีโหนดแบบ Single-ended	6
รูปที่ 2.6 วงจร H-Bridge ที่มีโหนดแบบ Bridge-tied	7
รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมของเคลตา-มอดูเลชัน	8
รูปที่ 2.8 การทำงานตามทฤษฎีการเข้ารหัสแบบเคลตา-มอดูเลชัน	9
รูปที่ 2.9 วงจรขับสัญญาณ	10
รูปที่ 2.10 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)	12
รูปที่ 2.11 ผลตอบสนองทางขนาดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	13
รูปที่ 2.12 ผลตอบสนองทางขนาดของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน	14
รูปที่ 2.13 ผลตอบสนองทางขนาดของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน	15
รูปที่ 2.14 ผลตอบสนองทางขนาดของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน	15
รูปที่ 2.15 สัญญาณต่อเนื่องและสัญญาณไม่ต่อเนื่อง	20
รูปที่ 2.16 สัญญาณไม่ต่อเนื่องและตัวอย่างการแทนลำดับค่าด้วยค่าดิจิทัล	20
รูปที่ 2.17 ระบบเวลาเชิงเต็มหน่วย	21
รูปที่ 2.18 แผนภาพของวงจรกรองความถี่สัญญาณดิจิทัล	24
รูปที่ 2.19 วงจรกรอง FIR ที่สร้างอย่างตรงไปตรงมา	25
รูปที่ 2.20 IIR Filter (Bi-Quad) Second order	26
รูปที่ 2.21 แผนผังของ ADC	27
รูปที่ 2.22 แผนผังของ DAC	28
รูปที่ 2.23 วงจร DAC แบบ R-2R Ladders	29
รูปที่ 2.24 แผนภาพกรอบโครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051	31
รูปที่ 2.25 การจัดวางตำแหน่งขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051	32
รูปที่ 2.26 การต่อคริสตัล (Crystal) เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051	35
รูปที่ 2.27 โครงสร้างหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051	35
รูปที่ 2.28 การจัดหน่วยความจำภายในแรมไมโครคอนโทรลเลอร์	37
รูปที่ 2.29 วงจรเอาต์พุตของอุปกรณ์บนระบบบัส I ² C	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.30 การต่อฟองอุปกรณ์ระบบบัส I ² C ที่ใช้ไฟเลี้ยงไม่เท่ากัน	40
รูปที่ 2.31 การต้านทานอนุกรมกับขาสัญญาณของอุปกรณ์บนระบบบัส I ² C เพื่อลดสัญญาณรบกวน	40
รูปที่ 2.32 สภาวะเริ่มต้นและสภาวะหยุด	42
รูปที่ 2.33 ไคอะแกรมสถานะต่าง ๆ บนระบบบัส I ² C	42
รูปที่ 2.34 รูปแบบของข้อมูลกำหนดแอดเดรสของอุปกรณ์บนระบบบัส I ² C	43
รูปที่ 2.35 รูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการอ้างถึงแบบ 7 บิต ของระบบบัส I ² C	44
รูปที่ 2.36 รูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการอ้างถึงแบบ 10 บิต ของระบบบัส I ² C	45
รูปที่ 3.1 วงจรเคลตา-มอดูเลชัน	46
รูปที่ 3.2 กราฟความสัมพันธ์การเปลี่ยนระดับแรงดันแต่ละส่วนของวงจรถ	47
รูปที่ 3.3 วงจร Schmitttrigger Comparator	47
รูปที่ 3.4 รูปสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ได้	48
รูปที่ 3.5 วงจรวงจรรวมอินทิเกรเตอร์	49
รูปที่ 3.6 กราฟสัญญาณสามเหลี่ยม	49
รูปที่ 3.7 วงจรขยายสัญญาณผลรวม	50
รูปที่ 3.8 วงจรวงจรรวมอินทิเกรเตอร์	51
รูปที่ 3.9 กราฟสัญญาณสามเหลี่ยม	51
รูปที่ 3.10 วงจรขยายสัญญาณผลรวม	52
รูปที่ 3.11 วงจร Schmitttrigger Comparator	53
รูปที่ 3.12 รูปสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ได้	53
รูปที่ 3.13 กราฟ Duty circle 50%	56
รูปที่ 3.14 วงจร Delta Modulation	57
รูปที่ 3.15 วงจร Delta Modulation 2	57
รูปที่ 3.16 วงจรสมิททริกเกอร์คอมพาราเตอร์ที่ต่อกับวงจรถระดับสัญญาณ	58
รูปที่ 3.17 รูปสัญญาณที่ออกมาจากวงจรถไคร์เวอร์	58
รูปที่ 3.18 รูปวงจรถดทอนสัญญาณ	59
รูปที่ 3.19 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ	59
รูปที่ 3.20 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณเมื่อต่อเข้ากับวงจรรวมอินทิเกรเตอร์	60
รูปที่ 3.21 Block diagram HIP4080	60
รูปที่ 3.22 การต่อสัญญาณเข้าขา 6 และขา 7	61
รูปที่ 3.23 สัญญาณที่ออกมาจากการเปรียบเทียบก็จะเข้าไปยังวงจรถิเลย์	62
รูปที่ 3.24 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)	62
รูปที่ 3.25 หลักการเบื้องต้นของการออกแบบคิวิตอลอิควอไลเซอร์	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทเอกชน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.26 ลักษณะโครงสร้างภายนอกและขาการใช้งานต่างๆ	66
รูปที่ 3.27 บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างภายในของ IC TAS3002	69
รูปที่ 3.28 โพล์ซาร์ทอธิบายกระบวนการ ในการเลือกฟังก์ชันในการทำงาน	71
รูปที่ 3.29 โพล์ซาร์ทอธิบายกระบวนการทำงานในส่วนของ tone control	72
รูปที่ 3.30 โพล์ซาร์ทอธิบายกระบวนการทำงานในส่วน Biquad Filter	73
รูปที่ 3.31 โพล์ซาร์ทอธิบายการส่งข้อมูลไปยังชิป TAS3002	75
รูปที่ 4.1 สัญญาณเอาต์พุตที่วงจรเคลตามอดูลเลขัน เมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต เมื่อป้อนสัญญาณกราวด์ที่ Channel 2	81
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของสัญญาณเทียบกับสัญญาณอินพุตที่ใช้ความถี่ 6 kHz	82
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของแคเรียร์ที่ 50 kHz เมื่อป้อนสัญญาณไซน์เวฟ 6 kHz	82
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของสัญญาณเทียบกับสัญญาณอินพุตที่ใช้ความถี่ 8 kHz	83
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของแคเรียร์ที่ 50 kHz เมื่อป้อนสัญญาณไซน์เวฟ 8 kHz	83
รูปที่ 4.6 สัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากวงจรเคลตามอดูลเลขันวัดเทียบกับสัญญาณอินพุต	84
รูปที่ 4.7 สัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากวงจรเคลตามอดูลเลขันวัดเทียบกับสัญญาณอินพุต (2)	84
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบสัญญาณก่อนเข้าวงจรระดับสัญญาณที่ Ch2 กับที่ ผ่านวงจรระดับสัญญาณที่ CH1	85
รูปที่ 4.9 สัญญาณที่ออกจากวงจรเคลตามอดูลเลขันที่ CH2 เข้าสู่วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ แล้ววัดสัญญาณที่ถูกเปรียบเทียบออกมาที่ CH1	86
รูปที่ 4.10 สัญญาณที่เข้าไคร์เวอร์ที่ CH2 เทียบกับสัญญาณที่ออกจากสัญญาณไคร์เวอร์ที่ CH1	87
รูปที่ 4.11 สัญญาณที่สถานะทรานซิสเตอร์ On ที่ Ch1และวัดสัญญาณ ที่สถานะทรานซิสเตอร์ Off ที่ CH2	87
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบสัญญาณก่อนเข้าวงจรลดทอนสัญญาณที่ Ch2 กับสัญญาณที่ ผ่านวงจรลดทอนสัญญาณที่ผ่านวงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่ Ch1	88
รูปที่ 4.13 สัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากวงจร ไคร์เวอร์ที่เป็นแบบ Open Loop ที่ CH1	89
รูปที่ 4.14 สัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากวงจร ไคร์เวอร์ที่เป็นแบบ Close Loop ที่ CH1	89
รูปที่ 4.15 สัญญาณอินพุตที่ Ch2 เทียบกับสัญญาณเอาต์พุตที่ Ch1 เมื่อผ่านวงจรเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์	90
รูปที่ 4.16 สัญญาณอินพุตที่ ChR1 เทียบกับสัญญาณเอาต์พุตที่ Ch1 และ Ch2. เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ ที่เป็นแบบ Full Bridge	91
รูปที่ 4.17 สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากวงจรวงจ เคลตามอดูลเลขันเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ แบบ Close Loop	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.18 สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากวงจรวงจรเคลตามอดูละชัน เฟาเวอร์แอมพลิไฟเออร์แบบ Open Loop	92
รูปที่ 4.19 กราฟผลการทดลองการหาค่าความถี่คัทออฟ	97
รูปที่ 4.20 ตัวอย่างค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์	97
รูปที่ 4.21 ตัวอย่างค่าอินพุตอิมพีแดนซ์	98
รูปที่ 4.22 ความถี่ตอบสนอง	100
รูปที่ 4.23 บล็อกไดอะแกรมในสภาวะรีเซตของ IC TAS3002	101
รูปที่ 4.24 บล็อกไดอะแกรมการทดลองการวัด Volume	102
รูปที่ 4.25 ผลการทดลองวัดอัตราขยายของ Volume วงจรอิกควอลไลเซอร์ โดยปรับอัตราขยายไว้ทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ CH 1 เทียบกับสัญญาณ อินพุตที่ CH2 เมื่อค่าเอาต์พุตถูกปรับไว้อยู่ที่ (ก) -15 dB และ (ข) +10 dB	105
รูปที่ 4.26 การวัดสัญญาณเอาต์พุตอัตราขยายและการตอบสนองความถี่ ซึ่งทำการป้อนอินพุต (ก) 50 Hz ที่ CH 2 แล้วทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ CH 1 (ข) 10 kHz ที่ CH 2 แล้วทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ CH 1	107
รูปที่ 4.27 สัญญาณ 500 Hz และ สัญญาณ 1 kHz ของ BASS +10dB	109
รูปที่ 4.28 สัญญาณ 5 kHz และ สัญญาณ 10 kHz ของ TREBLE +10dB	111
รูปที่ 4.29 ALL PASS	112
รูปที่ 4.30 BASS Gain +10 dB	112
รูปที่ 4.31 TREBLE Gain +10 dB	113
รูปที่ 4.32 ผลที่ออกจากส่วนกรองความถี่ต่ำผ่าน	115
รูปที่ 4.33 ผลที่ออกจากส่วนกรองความถี่สูงผ่าน	117
รูปที่ 4.34 ผลที่ออกจากส่วนความถี่หยุด	119
รูปที่ 4.35 กราฟจากการทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	120
รูปที่ 4.36 กราฟจากการทดลองวงจรกรองความถี่สูงผ่าน	120
รูปที่ 4.37 กราฟจากการทดลองวงจรกรองความถี่หยุด	111
รูปที่ 4.38 กราฟจากการทดลอง Biquad BW = 50 Hz	129
รูปที่ 4.39 กราฟจากการทดลอง Biquad BW = 120 Hz	129
รูปที่ 4.40 กราฟจากการทดลอง Biquad BW = 290 Hz	130
รูปที่ 4.41 กราฟจากการทดลอง Biquad BW = 700 Hz	130
รูปที่ 4.42 กราฟจากการทดลอง Biquad BW = 1.7 kHz	131
รูปที่ 4.43 กราฟจากการทดลอง Biquad BW = 4.3 kHz	131
รูปที่ 4.44 กราฟจากการทดลอง Biquad BW = 10 kHz	132

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

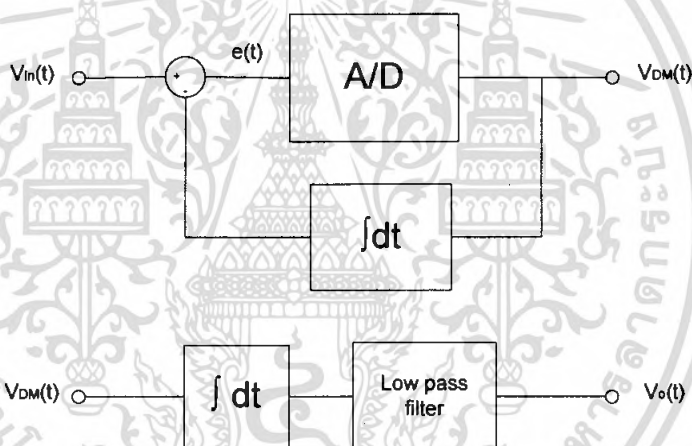
	หน้า
ตารางที่ 2.1 ช่วงความถี่ออกเคฟตามมาตรฐานของ ISO	18
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51	31
ตารางที่ 3.1 การทำงานของขา IC TAS3002	66
ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ	80
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองหาค่า THD เปรียบเทียบระหว่าง Open Loop และ Close Loop	93
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการหาความถี่หยุด	95
ตารางที่ 4.3 ความถี่ตอบสนอง (Frequency response)	99
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองวัดสัญญาณ Volume	103
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองวัด TONE (ALL PASS 0 dB)	106
ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองวัด TONE (BASS +10 dB)	108
ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองวัด TONE (TREBLE +10 dB)	110
ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	114
ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่สูงผ่าน	116
ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองวงจรความถี่หยุด	118
ตารางที่ 4.11 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ	121
ตารางที่ 4.12 ผลการทดลอง Biquad Filter 50 Hz	122
ตารางที่ 4.13 ผลการทดลอง Biquad Filter 120 Hz	123
ตารางที่ 4.14 ผลการทดลอง Biquad Filter 290 Hz	124
ตารางที่ 4.15 ผลการทดลอง Biquad Filter 700 Hz	125
ตารางที่ 4.16 ผลการทดลอง Biquad Filter 1.7 kHz	126
ตารางที่ 4.17 ผลการทดลอง Biquad Filter 4.3 kHz	127
ตารางที่ 4.18 ผลการทดลอง Biquad Filter 10 kHz	128

บทที่ 1

บทนำ

ในการติดต่อสื่อสารหรือการส่งผ่านข้อมูลนั้นมีหลากหลายวิธีการ ในการสื่อสารยุคแรกจะเป็นการสื่อสารแบบอนาลอก ซึ่งการสื่อสารแบบอนาลอกนั้น การผิดพลาดมักเกิดขึ้นได้ง่าย โดยเกิดความผิดเพี้ยนของตัวกลางและทำให้การสื่อสารนั้นไม่สัมฤทธิ์ผล จนเกิดการส่งผ่านข้อมูลแบบดิจิทัล ที่มี 2 สถานะ คือ 0 และ 1 ที่ทำให้ระบบการสื่อสารมีประสิทธิภาพมากขึ้น การสื่อสารแบบดิจิทัลมีหลายวิธี และอีกวิธีหนึ่งของการสื่อสารแบบดิจิทัล คือ การสื่อสารที่เรียกว่า เคลตา-มอดูเลชัน

การมอดูเลตสัญญาณแบบเคลตา-มอดูเลชันนั้น เป็นการมอดูเลตพัลส์แบบใช้ค่าแตกต่างสัญญาณที่มีโครงสร้างซับซ้อนน้อยที่สุด ซึ่งการเข้ารหัสเพียง 1 บิต แสดงถึงสถานะการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของสัญญาณระบบเคลตา-มอดูเลชันแสดงดังรูปที่ 1.1



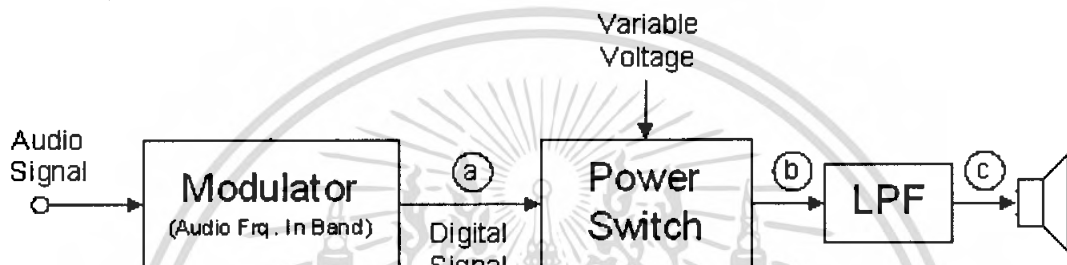
รูปที่ 1.1 ระบบการมอดูเลตแบบเคลตา-มอดูเลชัน

ในปัจจุบันเคลตา-มอดูเลชัน ไม่ถูกนำมาใช้ในการสื่อสารมากนัก เพราะการสื่อสารในปัจจุบันนั้นมีความก้าวหน้าขึ้นไปมาก และเน้นถึงความถูกต้องและความแม่นยำของข้อมูล แต่กลับได้เปรียบในเรื่องของแบนด์วิธ เนื่องจากใช้แบนด์วิธต่ำกว่าการสื่อสารแบบอื่นๆ มาก และอาจจะเป็นข้อได้เปรียบ หากในอนาคตขยายตัวของระบบการสื่อสารที่มากขึ้น

ส่วนวงจรขยายกำลัง (Power Amplifier) คือ อุปกรณ์ที่ทำการส่งผ่านและขยายกำลังงานของสัญญาณที่ทางเข้าของวงจรที่มีกำลังต่ำไปยังทางออกตามที่ต้องการ ในอุดมคติแล้ววงจรขยายกำลังนั้นจะไม่มีควาสัญเสียงเกิดขึ้น ซึ่งในโครงการนี้จะพิจารณากำลังที่ใช้ในย่านความถี่เสียงเท่านั้น (Audio Power Amplifier)

โดยประกอบไปด้วยวงจรขยายสัญญาณกำลังแบบเชิงเส้น (Linear Power Amplifier) เช่นวงจรขยายแบบคลาสเอหรือคลาสบี เป็นต้น ซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพได้สูงสุดถึง 60-70% ในทางทฤษฎี ส่วนวงจรขยายแบบสวิตซ์ซิ่ง (Switching Amplifier) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าวงจรขยายสัญญาณคลาสดี (Class D-Amplifier) ซึ่งมีประสิทธิภาพได้สูงสุดถึง 100% ในทางทฤษฎีซึ่งเป็นจุดเด่นของวงจรขยายกำลังแบบคลาสดีนี้

โครงการนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วงจรเคลตา-มอดูเลชัน มาสร้างวงจรขยายกำลังงานเสียงที่มีการทำงานแบบสวิตซ์ซิ่ง ซึ่งเป็นวงจรขยายกำลังเสียงที่ใช้เทคนิคการขยายเสียงคลาสดี ซึ่งมีหลักการทำงานตามรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 การขยายกำลังงานเสียงคลาสดี

ซึ่งสัญญาณเสียงผ่านมอดูเลเตอร์ เป็นการแปลงสัญญาณอนาลอกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล ที่จุด a โดยสัญญาณดิจิทัลที่ได้ จะต้องยังมีองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณเสียงอยู่ด้วย หลังจากนั้นจะนำสัญญาณดิจิทัลมาเข้าสู่วงจรขับสัญญาณเพื่อจัดเฟสและยกระดับสัญญาณ โดยใช้ควมคุมทรานซิสเตอร์ในส่วนภาคขยายกำลัง และเมื่อนำไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter : LPF) ก็จะได้สัญญาณเสียงที่มีกำลังงานเพิ่มขึ้นกลับคืนมาที่จุด c เพื่อนำไปขับลำโพงต่อไป ซึ่งการมอดูเลตแบบเคลตา-มอดูเลชัน นั้น ยังมีข้อดีในเรื่องของภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวน และมีอัตราการสูญเสียพลังงานน้อยมาก

ส่วนอีควอไลเซอร์ (Equalizer) จะเป็นอุปกรณ์ที่จะสามารถชดเชยการสูญเสียพลังงานที่ความถี่หนึ่งได้ และยังสามารถเพิ่มพลังงานในความถี่ที่เราต้องการได้ คุณสมบัติพิเศษนั้นทำให้อีควอไลเซอร์ไม่ได้ให้ความสำคัญต่อสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นทั้งภายในและภายนอกของตัวอุปกรณ์เอง อีกทั้งช่วงความถี่ที่ใช้งานก็เป็นช่วงความถี่ที่กว้างเกิน ซึ่งไม่อาจเพียงพอกับความต้องการของผู้ใช้งาน จึงมีความจำเป็นที่ต้องเพิ่มช่วงความถี่ให้มีความละเอียดมากกว่าเดิมเพื่อให้เพียงพอกับความต้องการของผู้ใช้งาน ซึ่งในโครงการนี้เป็นการสร้างอีควอไลเซอร์แบบดิจิทัลที่มีการแบ่งช่องความถี่ออกเป็น 5 ย่านความถี่ และสามารถที่จะปรับอัตราการขยายและการลดทอนได้

บทที่ 2

ทฤษฎีหรือหลักการ

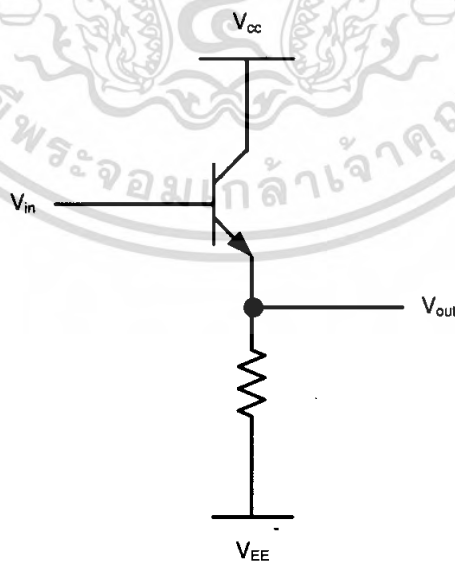
วงจรรขยายกำลังงาน (Power Amplifier) คืออุปกรณ์ที่ส่งผ่านและขยายกำลังงานของสัญญาณที่ทางขาเข้าของวงจรที่มีกำลังงานต่ำไปยังทางออกตามที่ต้องการ ซึ่งในอุดมคติแล้ววงจรรขยายกำลังงานนั้นจะไม่มี ความสูญเสียเกิดขึ้น ซึ่งในโครงการนี้ได้ทำการศึกษา ออกแบบและสร้างวงจรรขยายกำลังงานเสียงคลาสดี โดยอาศัยการมอดูเลตสัญญาณแบบเคลตา-มอดูเลชัน

2.1 วงจรรขยายกำลัง (Power Amplifier)

ในส่วนวงจรรขยายกำลังนั้นสามารถแบ่งออกเป็นคลาสได้คือวงจรรขยาย คลาส A, B, AB, C และ คลาส D

2.1.1 วงจรรขยายกำลังคลาส A

วงจรรขยาย Class A มีความเพี้ยนต่ำกว่า Class อื่นๆ โดยมีการไบอัสทรานซิสเตอร์ให้มีกระแสไหล ผ่านตลอด 360 องศา ของสัญญาณอินพุต ทำให้กระแส Collector ยังคงมีรูปร่างเป็นรูปไซน์ การไบอัสโดยที่ ให้ทรานซิสเตอร์นำกระแสแม้ว่าจะมีสัญญาณอินพุตหรือไม่มีก็ตามซึ่งเป็นผลให้มีกำลังงานสูญเสียมากขณะที่ ไม่มีสัญญาณอินพุต ทำให้มีความเพี้ยนต่ำนั้น วงจรรขยาย Class A จึงเหมาะกับสัญญาณระดับต่ำ ถ้าเพิ่มขนาด สัญญาณ ความเพี้ยนของสัญญาณก็จะเพิ่มขึ้น โดยเอาต์พุตจะถูกกลีบ (Clipping) จึงไม่ค่อยพบในการออกแบบ วงจรที่มีกำลังสูง วงจรนี้มีประสิทธิภาพต่ำ ซึ่งตามทฤษฎีแล้ว Class A จะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 25%

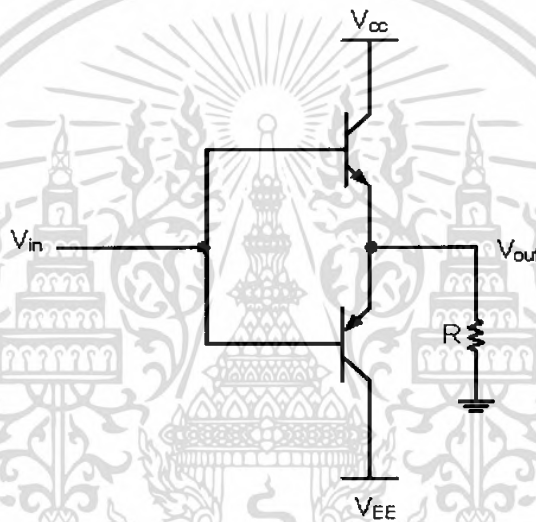


รูปที่ 2.1 ภาคขยายของ Class A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 วงจรขยายกำลังคลาส B

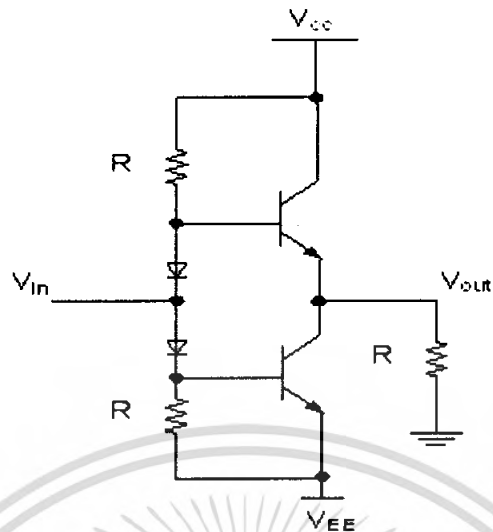
วงจรขยาย Class B นี้ ทรานซิสเตอร์นำกระแสเฉพาะบางช่วงเวลาบางส่วนของซีกใดซีกหนึ่งของสัญญาณอินพุตเท่านั้น หรือทรานซิสเตอร์จะนำกระแสในช่วง 180 องศา ของสัญญาณอินพุตและในขณะที่ไม่มีสัญญาณอินพุต จะไม่มีกระแส ซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และเนื่องจากทรานซิสเตอร์นำกระแสเพียงซีกเดียว จึงต้องใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวสลับกันทำงานตัวละ 180 องศาของสัญญาณอินพุต เรียกการทำงานแบบนี้ว่า Push-Pull พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ภาคขยายสุดท้ายของวงจรขยาย Class B คือ 78.5% ซึ่งสูงกว่า Class A มาก แต่ข้อเสียสำคัญของวงจรมันนี้ คือความเพี้ยนจุดตัดข้าม (Crossover Distortion) ซึ่งเกิดจากการหยุดนำกระแสในช่วงเวลาสั้นๆ เมื่อสัญญาณอินพุตไม่มากพอที่จะขับสัญญาณให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองทำงาน



รูปที่ 2.2 ภาคขยายของ Class B

2.1.3 วงจรขยายกำลังคลาส AB

วงจรมันเป็นการรวมข้อดีของ Class A และ Class B คือยังคงประสิทธิภาพดีของวงจรขยาย Class B และมีความเพี้ยนต่ำใกล้เคียงกับวงจรขยาย Class A โดยวงจรขยาย Class AB นี้จะใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวเหมือนกันกับ Class B แต่จะไบอัสให้ทรานซิสเตอร์ทำงานเกินกว่า 180 องศาเล็กน้อยทำให้ความเพี้ยนจุดตัดข้ามถูกกำจัดไปได้อย่างมาก



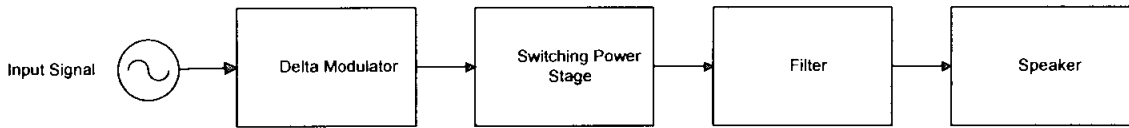
รูปที่ 2.3 ภาคขยายของ Class AB

2.1.4 วงจรขยายกำลังคลาส C

วงจรมีไบอัสให้กระแสไหลผ่านตัวทรานซิสเตอร์เฉพาะช่วงเวลาบางส่วนของซีกใดซีกหนึ่งของสัญญาณอินพุต หรือทรานซิสเตอร์จะนำกระแสในช่วงน้อยกว่า 180 องศา ของสัญญาณอินพุต ในขณะที่ไม่มีสัญญาณอินพุต จะไม่มีกระแสไหลผ่านตัวทรานซิสเตอร์ ภาคขยายชนิดนี้จะมีความเพี้ยนมากจึงไม่สามารถนำมาใช้กับสัญญาณเสียงได้ แต่มักใช้กับวงจรที่ใช้สัญญาณวิทยุ

2.1.5 วงจรขยายกำลังคลาส D

ทรานซิสเตอร์ทำงานในลักษณะของสวิตช์ซึ่ง โดยมีมุมในการนำกระแสเป็น 0 องศา คือ นำกระแสอิ่มตัว (Saturation) กับไม่นำกระแส (Cut off) ในระหว่างที่มีการสวิตช์ ทรานซิสเตอร์อาจนำกระแสข้ามผ่านวงที่เป็นเชิงเส้น (Linear region) ซึ่งกระแสที่ไหลผ่านตัวทรานซิสเตอร์จะมีลักษณะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยม (Rectangular pulse) การหลีกเลี่ยงช่วงที่เป็นเชิงเส้นนี้ เป็นพื้นฐานที่ทำให้ภาคเอาต์พุตของคลาสดี มีประสิทธิภาพสูง โดยทั่วไปแล้ว วงจรขยายคลาสดี ที่ออกแบบดีนั้นอาจมีประสิทธิภาพสูงถึง 90% บล็อกไดอะแกรมของวงจรขยายคลาสดี อย่างง่าย ๆ แสดงดังรูปที่ 2.4



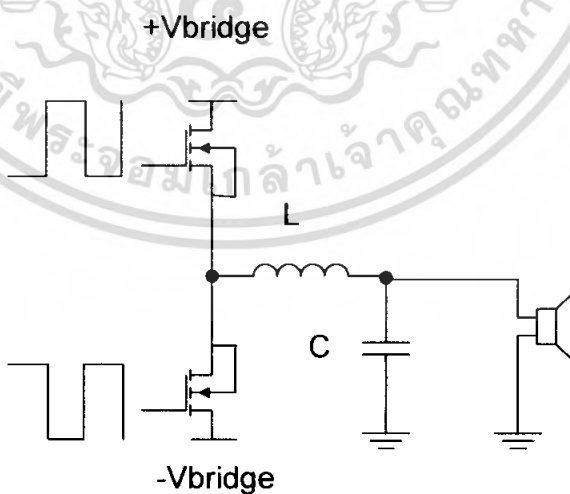
รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของวงจรขยายคลาสดี

จากรูปที่ 2.4 สัญญาณเดลตา-มอดูเลชัน ถูกส่งเข้าสู่ภาค Switching Power จะขยายกำลัง แล้ววงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะกรององค์ประกอบ Switching ความถี่สูงออกจากสัญญาณเอาต์พุต ทำให้ได้เป็นสัญญาณเสียงที่ขยายใหญ่ขึ้น

นอกจากนี้ถ้าเพิ่มลูปป้อนกลับ (Feedback Loop) อีกหนึ่งลูปหรือมากกว่าจะเป็นการลดความเพี้ยนรวมทางฮาร์โมนิกส์ (Total Harmonics Distortion : THD) ของสัญญาณเอาต์พุตอีกด้วย

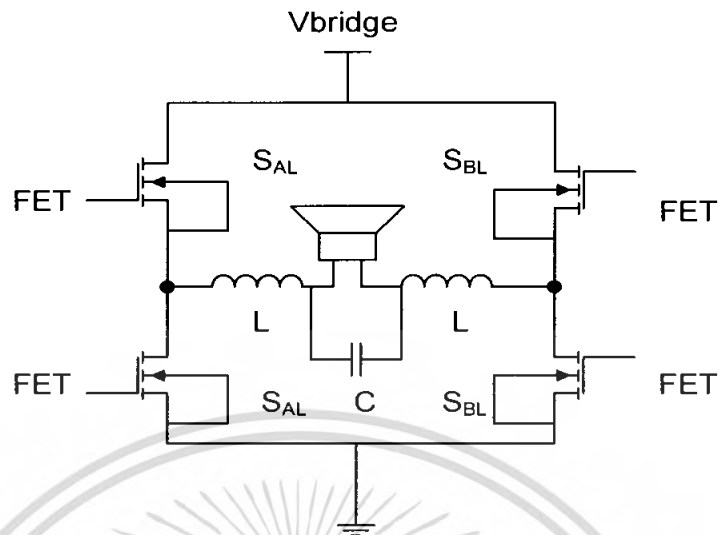
วงจรขยายกำลังคลาสดี อาศัยหลักการทำงานของวงจรเดลตา-มอดูเลชัน โดยสัญญาณอินพุตที่ได้จากวงจรเดลตา-มอดูเลชันจะถูกนำไปป้อนให้แก่วงจรสวิตช์ต่อไป หลังจากสัญญาณถูกขยายแล้วก็จะถูกนำไปป้อนผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อให้ได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีรูปร่างเช่นเดียวกับสัญญาณอินพุต แต่แตกต่างกันตรงที่ขนาดแอมพลิจูด ของสัญญาณที่ถูกขยายขึ้นไป

คุณสมบัติของวงจรขยาย Class D ขึ้นอยู่กับคุณภาพของภาค Switching Power รูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6 เป็นการแสดงการจัดรูปแบบ 2 แบบที่นิยมมากที่สุดของภาค Switching Power และโหลด โดยรูปที่ 2.5 เป็นการใช่วงจรขับเคลื่อนบริดจ์ที่มีโหลดแบบ Single-ended ส่วนในรูปที่ 2.6 แสดงวงจรขับเคลื่อนแบบ H-Bridge ที่มีโหลดแบบ Single-tied



รูปที่ 2.5 เครื่องบริดจ์ที่มีโหลดแบบ Single-ended

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



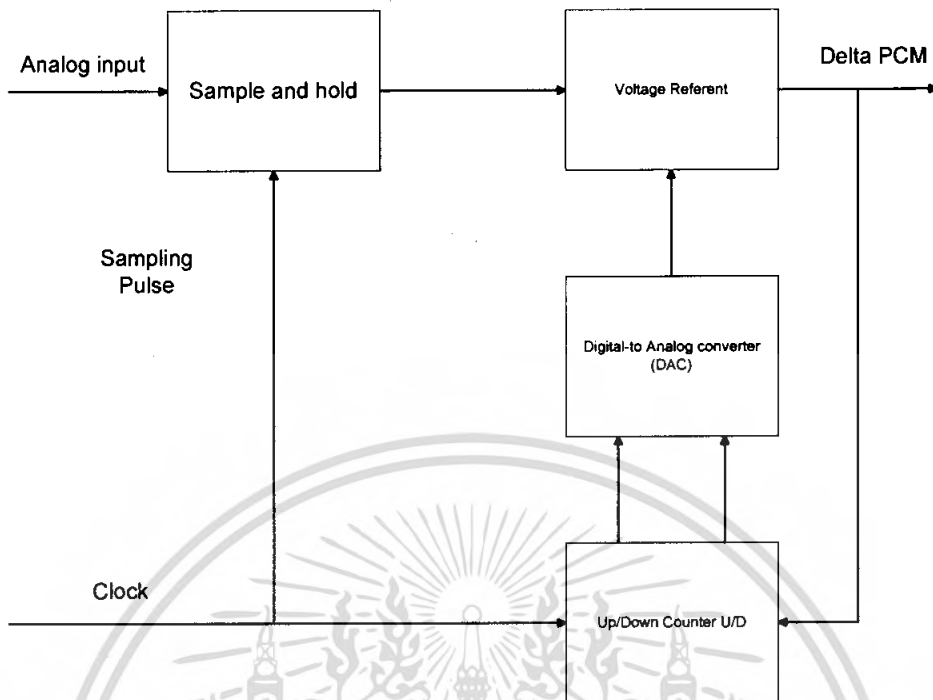
รูปที่ 2.6 วงจร H-Bridge ที่มีโหลดแบบ Bridge-tied

ข้อดีของวงจรขยายคลาสดี คือ มีประสิทธิภาพในการทำงานสูง ทำให้ประหยัดพลังงาน มีสูญเสียที่ทรานซิสเตอร์น้อย ทำให้ขนาดของแผ่นระบายความร้อน (Heat Sink) เล็กกลง น้ำหนักเบาขึ้น ซึ่งจะเหมาะสมสำหรับเครื่องที่ต้องการให้มีขนาดเล็ก และมีอายุใช้งานของแบตเตอรี่นานๆ

ข้อเสียมาจากการทำงานที่เป็นแบบสวิตซ์ซิ่ง ซึ่งจะทำให้คุณภาพเสียงยังไม่ดีเท่าที่ควร คือยังมีความเพี้ยนสูง เมื่อเทียบกับวงจรขยายกำลังแบบอื่นๆ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยใช้ความถี่ในการทำงานที่สูงขึ้น แต่ก็ทำให้ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความเร็วในการทำงานสูงและมีราคาสูงตามไปด้วย

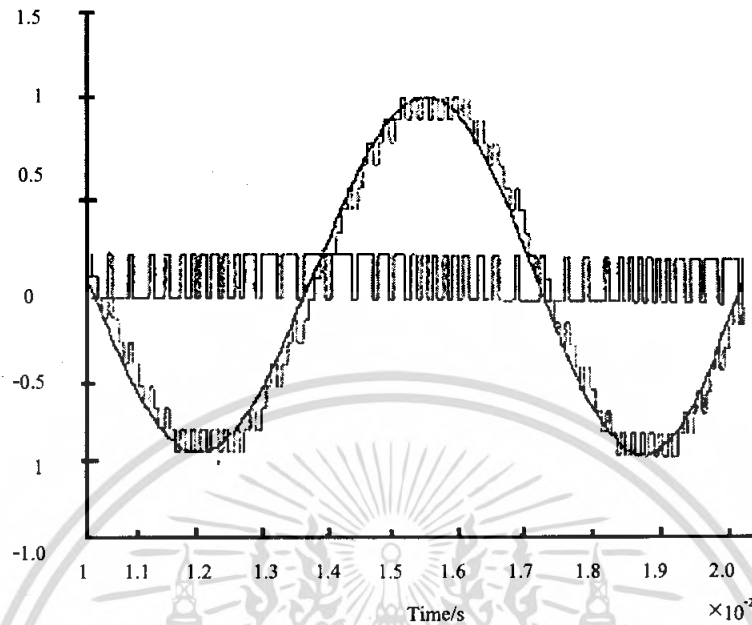
2.2 เดลตา-มอดูเลชัน (Delta Modulation : DM)

ระบบการมอดูเลตรหัสพัลส์แบบใช้ค่าแตกต่างในสัญญาณที่มีโครงสร้างซับซ้อนน้อยที่สุด การมอดูเลตในระบบนี้มีชื่อว่า การมอดูเลตแบบเดลตา (Delta Modulation) ซึ่งนิยมเรียกย่อว่า ดีเอ็ม (DM) ในระบบนี้จะทำการควอนไทซ์ค่าความแตกต่างของสัญญาณ โดยใช้รหัสที่มีความยาวเพียง 1 บิต เพื่อแสดงถึงสภาวะการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของสัญญาณ แทนที่จะใช้เพื่อแสดงค่าขนาดของระดับสัญญาณ



รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมของเคลตา-มอดูเลชัน

จากรูปที่ 2.7 เป็นบล็อกไดอะแกรมของเคลตา-มอดูเลชัน สัญญาณอนาลอกที่ป้อนให้แก่วงจรดีเอ็มจะ ถูกแซมปลิง และเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสัญญาณพีเอเอ็ม (PAM) แล้วสัญญาณพีเอเอ็ม จะถูกเปรียบเทียบกับ สัญญาณที่ได้จากวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนาลอก (DAC) ซึ่งเป็นสัญญาณในรูปโวลเตจที่เท่ากับค่า สัญญาณจากการแซมปลิงก่อนหน้านั้น ถูกเก็บไว้ที่อัปแอนคาวน์เคาน์เตอร์ (Up/Down Counter) ในรูปตัว เลขฐานสอง การที่อัปแอนคาวน์เคาน์เตอร์จะนับขึ้นหรือนับลงตามค่าสัญญาณแซมปลิงก่อนหน้านั้น ว่าจะมี ค่าน้อยกว่าหรือมากกว่ากระแสแซมปลิง อัปแอนคาวน์เคาน์เตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามค่าที่ได้จากการ เปรียบเทียบและมีสัญญาณคล็อก (Clock signal) เดียวกันกับอัตราการแซมปลิง



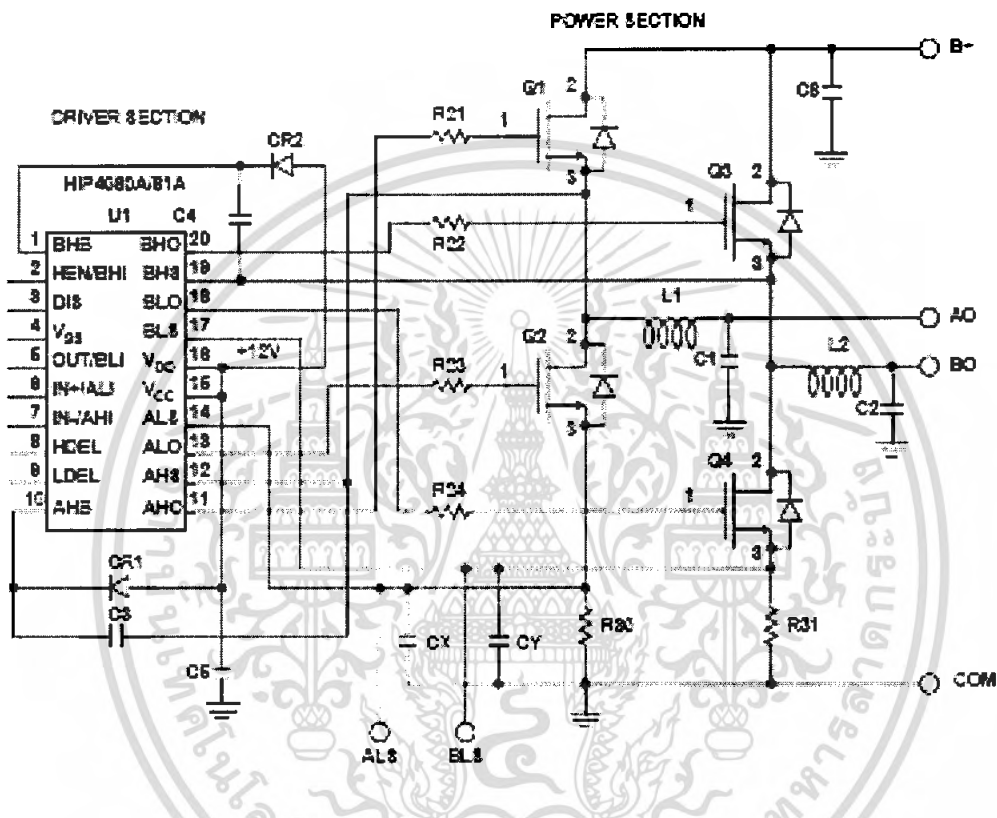
รูปที่ 2.8 การทำงานตามทฤษฎีการเข้ารหัสแบบเดลตา-มอดูเลชัน

รูปที่ 2.8 แสดงการทำงานตามทฤษฎี การเข้ารหัสแบบเดลตา-มอดูเลชัน เริ่มต้นให้ค่าอัพแอนด์ดาวน์ เคาน์เตอร์มีค่าเป็นศูนย์ และวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอกให้ค่าเอาต์พุตเป็น 0 โวลต์ด้วย เมื่อ แรมป์ลิงแรกถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณพีเอเอ็มจะถูกเทียบกับ 0 โวลต์ ค่าเอาต์พุตจากคอมพาราเตอร์เป็นลอจิก 1 อีก ถ้ามีสัญญาณคล็อก (Clock) ถัดไป ขณะนี้เอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอกจะมีโวลต์สูง เท่ากับขนาดของสเต็ป ไซส์ที่น้อยที่สุด (Minimum Step Size)

อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าของขั้นต่าง ๆ จะเท่ากับความเร็วของคล็อกที่ใช้หาค่าแรมป์ลิง อัพแอนด์ดาวน์ เคาน์เตอร์จะมีการนับขึ้น จนกระทั่งผลเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอกมีค่ามากกว่าค่า แรมป์ลิงจากสัญญาณอนาลอก หลังจากนั้นอัพแอนด์ดาวน์เคาน์เตอร์จะมีการนับขึ้น จนกระทั่งผลเอาต์พุต ของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอกมีค่ามากกว่าค่าแรมป์ลิงจากสัญญาณอนาลอก หลังจากนั้นอัพ แอนด์ดาวน์เคาน์เตอร์จะเริ่มนับลงเรื่อย ๆ จนผลเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอกมีค่า ต่ำกว่าขนาดสัญญาณแรมป์ลิง ในสภาวะที่เกิดขึ้นในทฤษฎีที่แสดงในรูปที่ 2.8 ค่าเอาต์พุตจากวงจรแปลง สัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก จะเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณอินพุตในแต่ละครั้งที่อัพแอนด์ดาวน์เคาน์เตอร์ นับขึ้น จะส่งลอจิก 1 ไปตามสายส่งทุกครั้งที่อัพแอนด์ดาวน์เคาน์เตอร์นับลง ก็จะส่งลอจิก 0 ส่งไปตามสายส่ง เช่นกัน

2.3 ภาคขับสัญญาณ

วงจรในส่วนนี้มีหน้าที่ในการควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์ ในส่วนของภาคขยายกำลังเป็นส่วนที่ถัดมาจากวงจร Delay Level Shift และ วงจร Delta Modulation เพื่อใช้ในการขับกระแสให้กับลำโพง (Load)



รูปที่ 2.9 วงจรขับสัญญาณ

2.4 วงจรกรองความถี่ (Filter)

วงจรกรองความถี่ (Filter) คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเลือกผ่านสัญญาณ โดยวงจรกรองจะยอมให้สัญญาณเฉพาะบางย่านความถี่ผ่านไปได้นั้น เราจะเรียกย่านความถี่ที่วงจรกรองยอมให้ผ่านว่า ย่านความถี่ผ่าน (Pass Band) และย่านความถี่ที่วงจรกรองจะกั้นไว้ไม่ให้ผ่านว่าย่านความถี่หยุด (Stop Band) วงจรกรองเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากในงานทางด้านวิศวกรรมหลาย ๆ ด้าน เช่น ใช้ในเครื่องขยายภาคต้น (Pre-amplification) วงจรปรับเท่า (Equalizer) และตัวปรับเสียง (Tone-Control) ของระบบเครื่องเสียง (Audio System)

- ใช้ในวงจรกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise) ที่ไม่ต้องการในระบบสื่อสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใช้ในการกำจัด ไซด์แบนด์ (Sideband) ในระบบสื่อสารแบบ ไซด์แบนด์เดี่ยว (Single Side Band)
- ใช้ในการดีมอดูเลต (Demodulate) สัญญาณ
- ใช้ในการตรวจจับ (Detect) สัญญาณที่มอดูเลตแบบดิจิทัล โดยเราเรียก วงจรกรองที่ทำหน้าที่นี้ว่า Matched Filter
- ใช้ในระบบสื่อสารมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา (Time-Division Multiplexing) และแบบแบ่งความถี่ (Frequency-Division Multiplexing)
- ใช้ในการแก้ปัญหาการทับซ้อน (Aliasing) ที่อาจเกิดขึ้นจากการชักตัวอย่าง (Sampling) สัญญาณอนาลอกในการประมวลผลแบบดิจิทัล (Digital Signal Processing)
- ใช้ในการแปลงสัญญาณที่ได้จากการชักตัวอย่าง (Sampled Signals) ไปเป็นสัญญาณอนาลอก
- ใช้ในการสังเคราะห์สัญญาณ
- ใช้ในการแก้ปัญหาการรบกวนข้ามสัญญาณ (Intersymbol Interference : ISI) ในการส่งข้อมูลดิจิทัล โดยเราเรียกวงจรกรองที่ทำหน้าที่นี้ว่า วงจรกรองส่วนผ่านข้อมูล (Data Transmission Line) และสายเคเบิล
- ใช้ในอุปกรณ์ชีวการแพทย์ (Biomedical Equipment) เช่น เยื่อประสาทหูเทียม (Artificial Cochlea)

โดยทั่วไป วงจรกรองความถี่ แบ่งออกเป็นหลายรูปแบบ เช่น

1. วงจรกรองความถี่ ชนิด อนาลอก หรือ ดิจิตอล
2. วงจรกรองความถี่ ประเภท Passive หรือ Active
3. วงจรกรองความถี่ ย่านความถี่เสียง (Audio Frequency) หรือ ย่านความถี่วิทยุ (Radio Frequency)

แต่แบ่งวงจรกรองความถี่โดยแบ่งตามลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรกรองความถี่แล้วสามารถแบ่งวงจรกรองความถี่ ออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. วงจรกรองความถี่แบบเฉื่อยงาน (Passive Frequency) เป็นวงจรกรองสัญญาณแบบต่อเนื่องที่ประกอบไปด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และขดลวดเหนี่ยวนำ โดยไม่มีอุปกรณ์ที่ใช้ในการขยาย เช่น ไอซี หรือ ทรานซิสเตอร์ รวมอยู่ในวงจร วงจรกรองประเภทนี้สามารถใช้ในการกรองสัญญาณที่มีความถี่ตั้งแต่สัญญาณไฟตรง (DC) ไปจนถึงประมาณ 300 MHz อย่างไรก็ตามเราไม่นิยมใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟในย่านความถี่ต่ำ เนื่องจากจะต้องใช้ขดลวดเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ซึ่งมีความสูญเสียมาก ดังนั้นโดยทั่วไปวงจรกรองความถี่แบบเฉื่อยงานจะถูกใช้งานตั้งแต่ย่านความถี่เสียง (Audio Frequency) ความถี่สัญญาณภาพ (Video Frequency) ไปจนถึงย่านความถี่วิทยุสูงมาก (VHF)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วงจรกรองความถี่แบบไวงาน (Active Filter) เป็นวงจรกรองสัญญาณแบบต่อเนื่องที่ใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณจำพวกทรานซิสเตอร์ หรือไอซี ในรูปของออปแอมป์ และตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุ ทำงานร่วมกัน วงจรกรองความถี่แบบไวงานที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน ได้แก่ วงจรกรอง Active RC และ วงจรกรองตัวเก็บประจุสวิทช์ (ซึ่งวงจรกรองทั้งสองแบบสามารถใช้งานย่านความถี่ไฟตรง - 500 kHz) ส่วนวงจรกรองแบบ Gm-C นั้นสามารถใช้งานในช่วงความถี่สูงกว่านี้ได้

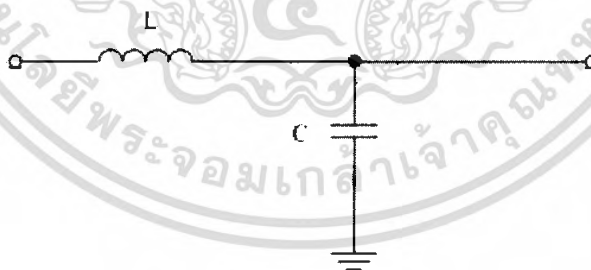
2.4.1 วงจรกรองแบบต่างๆ

วงจรกรองความถี่แบบไวงาน และแบบต่อเนื่องงาน แบ่งตามลักษณะการทำงานได้ 5 แบบ

1. Low Pass Filter
2. High Pass Filter
3. Band Pass Filter
4. Band Reject หรือ Band Stop Filter
5. All Pass Filter

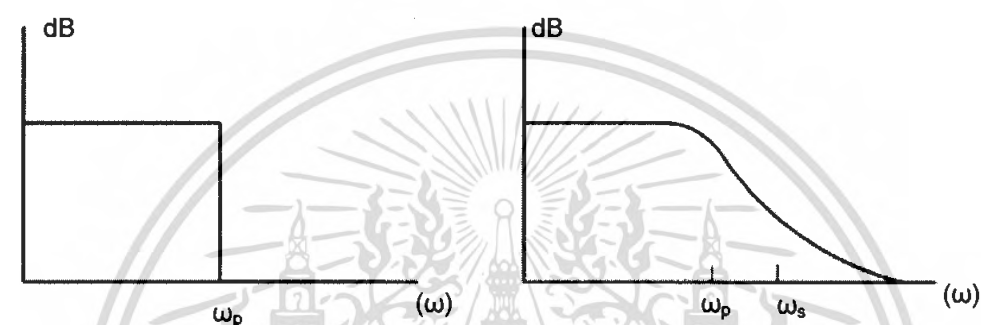
2.4.1.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)

ซึ่งในโครงงานนี้ได้ใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) ประเภทต่อเนื่องงาน เนื่องจากวงจรกรองความถี่ชนิดต่อเนื่องงานนี้ สามารถนำไปใช้งานในขอบเขตของกำลังไฟฟ้าอย่างไม่จำกัด ซึ่งอาจมีค่าสูงได้ถึง 100 kW



รูปที่ 2.10 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)

วงจรรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณความถี่ต่ำผ่านแต่จะกั้นสัญญาณความถี่สูงไว้ ดังรูปที่ 2.11 แสดงผลการตอบสนองความถี่ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านในอุดมคติ โดยนิยามเราเรียกย่านความถี่ที่วงจรรองยอมให้ผ่านว่า ย่านความถี่ผ่าน (Pass Band) หรือ แบนด์วิธ (Bandwidth) ของวงจร ส่วนย่านความถี่ที่วงจรรองไม่ยอมให้ผ่านไปเรียกว่า ย่านความถี่หยุด (Stop Band)



(a) ผลตอบสนองความถี่ต่ำผ่านในอุดมคติ

(b) ผลตอบสนองความถี่ต่ำผ่านที่ได้

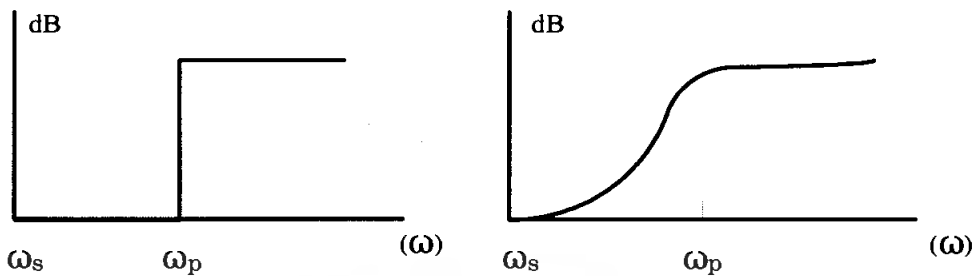
ในทางปฏิบัติ

รูปที่ 2.11 ผลตอบสนองทางขนาดของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

ในทางปฏิบัติไม่สามารถสร้างวงจรรองที่มีผลตอบสนองเป็นดังรูปที่ 2.11(a) ได้ ส่วนรูปที่ 2.11 (b) แสดงผลตอบสนองของวงจรรองที่ได้มาจากการประมาณผลตอบสนองในอุดมคติโดยนิยามแบนด์วิธใหม่คือ ย่านความถี่ที่อัตราขยายของวงจรยังคงลดลงมาจากอัตราขยายสูงสุด (สังเกตว่าค่าอัตราขยายสูงสุดสำหรับวงจรรองความถี่ต่ำผ่านอาจจะไม่ใช่อัตราขยายสัญญาณไฟตรงของวงจร) ไม่เกินค่าที่กำหนด (โดยปกติจะกำหนดให้ตกลงมาได้ไม่เกิน 3 dB) จะเห็นว่า ย่านความถี่ผ่านของวงจรจะอยู่ระหว่าง 0 ถึง ω_p และย่านความถี่หยุดของวงจรจะเป็นช่วงความถี่ที่มากกว่า ω_s ส่วนย่านความถี่ที่อยู่ระหว่าง ω_p และ ω_s นั้นเราจะเรียกว่า ย่านความถี่เปลี่ยน (Transition Band)

2.4.1.2 วงจรรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter)

วงจรรองความถี่สูงผ่านเป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณความถี่สูงผ่านแต่จะกั้นสัญญาณความถี่ต่ำไว้ รูปที่ 2.12 (a) แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองความถี่สูงผ่านในอุดมคติ ส่วนรูปที่ 2.12 (b) แสดงผลตอบสนองของวงจรรองความถี่สูงผ่านที่มีลักษณะเป็น โมโนโทนิคอย่างสมบูรณ์



(a) ผลตอบสนองทางความถี่สูงผ่านในอุดมคติ (b) ผลตอบสนองทางความถี่สูงผ่านที่ได้
ในทางปฏิบัติ

รูปที่ 2.12 ผลตอบสนองทางขนาดของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

2.4.1.3 วงจรกรองความถี่แถบผ่าน (Band Pass Filter)

วงจรกรองความถี่เป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณในช่วงความถี่ใดๆ ผ่านได้แต่จะไม่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่สูงหรือความถี่ต่ำความถี่นั้นผ่านได้ รูปที่ 2.13 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบต่างๆ โดยทั้งนี้ถ้าให้ ω_1 และ ω_2 เป็นจุดปลายของย่านความถี่ผ่านของวงจรโดย $\omega_2 > \omega_1$ เราจะพบว่าแบนด์วิธ (Bandwidth : BW) ของวงจร คือ

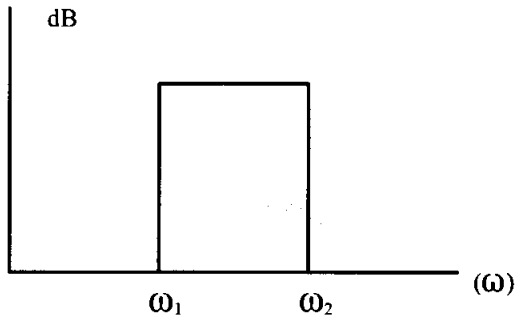
$$BW = \omega_2 - \omega_1 \quad (2.1)$$

และเราได้นิยามความถี่กึ่งกลาง (Center Frequency) : ω_0 ว่าคือ

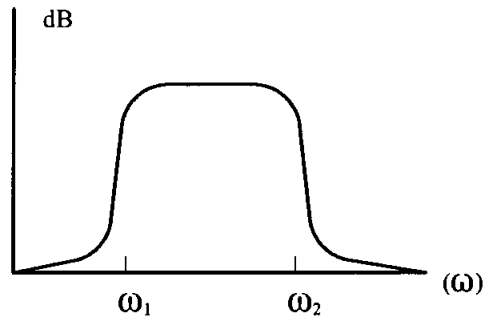
$$\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2} \quad (2.2)$$

โดยทั่วไปเราจะกำหนดให้ BW ของวงจรกรองความถี่ผ่านคือ แถบความถี่ที่สัญญาณสามารถผ่านได้โดยมีการลดทอนไม่เกิน 3 dB นั่นคือ

$$BW = BW-3 \text{ dB} \quad (2.3)$$



(a) แสดงผลตอบสนองทางความถี่แถบผ่านในอุดมคติ

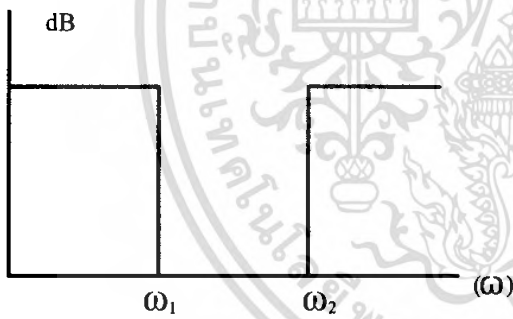


(b) แสดงผลตอบสนองทางความถี่แถบผ่านที่ได้
ในทางปฏิบัติ

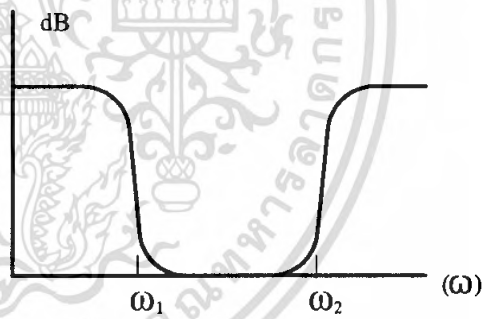
รูปที่ 2.13 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของวงจรรองแถบความถี่ผ่าน

2.4.1.4 วงจรรองความถี่หยุด (Band Stop Filter หรือ Notch Filter)

วงจรรองความถี่หยุดทำหน้าที่ตรงข้ามกับวงจรรองแถบความถี่ผ่าน กล่าวคือ วงจรรองความถี่แถบความถี่หยุดจะกั้นไม่ให้สัญญาณ ณ ช่วงความถี่ใดๆผ่านไปได้ แต่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าหรือช่วงความถี่นั้นผ่านไปได้ ดังรูปที่ 2.14



(a) ผลตอบสนองทางความถี่แถบผ่านในอุดมคติ



(b) ผลตอบสนองทางความถี่แถบผ่านที่ได้
ในทางปฏิบัติ

รูปที่ 2.14 ผลตอบสนองทางขนาดของวงจรรองแถบความถี่ผ่าน

2.4.1.5 วงจรรองความถี่ที่มีค่าเท่ากันตลอด (All Pass Filter)

วงจรรองความถี่ที่มีค่าเท่ากันตลอดทำหน้าที่ให้อัตราขยายของการตอบสนองความถี่มีค่าเท่ากันตลอดย่านความถี่ที่ผ่านไปได้ (มีความราบเรียบสม่ำเสมอตลอดย่านความถี่) และไม่มีการเกิดสัญญาณกระเพื่อมให้เห็นกัน ดังนั้น ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณที่ผ่านจากวงจรรองความถี่ที่มีลักษณะผ่านได้ตลอดย่าน จึงนับได้ว่ามีความราบเรียบของแถบ

ความถี่สูงสุดในบรรดางจรของความถี่ชนิดต่างๆ แต่วงจรกรองแบบนี้ก็มีข้อเสียคือตรงที่ช่วงของการลดทอนสัญญาณไม่ค่อยชัน (เส้นกราฟที่หลังจากผ่านจุดตัดความถี่) จึงทำให้เกิดการส่งผ่านของแถบความถี่ (Transition) ขึ้นมา ซึ่งจุดนี้เราสามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มจำนวนของอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติทางรีแอกแตนซ์เข้าไปอีกและจากคุณสมบัติต่างๆนี้เอง จึงมีการเรียกกวงจรชนิดนี้ว่า “การออกแบบในเส้นทางระดับปานกลาง”

2.5 ดิจิตอล ออดิโอ (Digital Audio)

ปัจจุบันเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทในเรื่องของเสียง และการบันทึกเสียงอย่างสูง หากหันไปมองรอบๆตัวเราเทคโนโลยีดิจิตอลออดิโอได้แทรกซึมไปเกือบทุกที่ แต่ก่อนการรักษาสัญญาณให้คงรูปอยู่เสมอไม่ว่าจะเปลี่ยนตัวกลางที่เก็บสัญญาณไปเป็นอย่างไร หรือมีระยะเดินทางไกลแค่ไหนเป็นไปได้ยาก โดยที่ข้อดีของระบบดิจิตอลที่ทำให้ระบบดิจิตอลถูกนำมาเข้ามาแทนที่ระบบอนาลอกก็คือสามารถรักษาสัญญาณให้คงที่หรือว่าสามารถเดินทางไปได้ไกลอย่างไรก็ตาม ซึ่งโดยข้อดีอีกประการหนึ่งของดิจิตอลนั้นก็คือการที่เราสามารถทำสัญญาณเสียงให้อยู่ในรูปดิจิตอลได้จะทำให้เราสามารถสร้าง และแก้ไขตัดแปลงสัญญาณนั้นได้ง่าย

2.5.1 สัญญาณเสียง

เสียงที่เราได้ยินนั้นเป็นเพราะอากาศมีการเปลี่ยนแปลงความดัน เช่น เมื่อมีการเคาะโต๊ะ ก็จะเกิดการชนกันระหว่างโมเลกุลของมือกับโมเลกุลของโต๊ะ ส่งผลทำให้โมเลกุลของโต๊ะซึ่งมีความเครียดมากกว่ามือเกิดการสั่นมากขึ้น การสั่นของโมเลกุลนี้สามารถจะลดลงได้ด้วยการถ่ายเทพลังงานให้โมเลกุลของอากาศที่วิ่งมาชนทำให้โมเลกุลอากาศมีความเร็วสูงขึ้น โดยความดันของอากาศจะขึ้นอยู่กับพลังงานเมื่อ โมเลกุลเกิดการชนกัน หลังจากนั้นจะมีการถ่ายเทพลังงานผ่านอากาศเป็นทอดๆ ทำให้เกิดเป็นคลื่นของความดันที่แผ่ออกไป เมื่อเดินทางมาถึงหูของเรา แผ่นไดอะแฟรมที่หูก็จะเปลี่ยนความดันอากาศให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าส่งไปยังสมอง ดังนั้น เราจะได้ยินเสียงได้ก็ต่อเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันบรรยากาศเปลี่ยนแปลงในเวลาหนึ่งๆ

ในขณะที่ไม่มีคลื่นเสียงความดันบรรยากาศจะคงที่ หลังจากนั้นเมื่อมีคลื่นเสียงเกิดขึ้นความดันบรรยากาศจะแกว่งรอบๆ ค่าความดันปกติ โดยถ้าหากแกว่งออกจากปกติมาก เราก็จะรับรู้ว่าเป็นเสียงดังมาก ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของความดันนี้สามารถแสดงได้ในแง่ของแอมพลิจูดและความถี่ โดยที่เราอาจจะมองอัตราการเปลี่ยนแปลงของความดันนี้ให้อยู่ในรูปของสัญญาณคลื่นไซน์ได้ แต่ในความเป็นจริงแล้ว คลื่นเสียงในธรรมชาติมีความซับซ้อนมากกว่านั้นมาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูด และความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นตลอดเวลา ซึ่งเราเรียกลักษณะรูปคลื่นเช่นนี้ว่า Waveform จะมีความซับซ้อนอย่างไรก็ตามเราก็สามารถที่จะทำการกระจายออกมาได้ในรูปของสัญญาณคลื่นไซน์นั้นๆ กลับมารวมกันก็จะได้เป็น Waveform ซึ่งจากทฤษฎีของกลศาสตร์ควอนตัมจะแสดงให้เห็นว่า Wave functions นี้ในทางกลศาสตร์ควอนตัมจะเรียกว่า Basic set แต่ในทางด้านเสียงจะเรียกว่า Timbre

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 ระบบอิกวอลไลเซอร์ (Equalizer)

อิกวอลไลเซอร์ คือ อุปกรณ์ที่ใช้วัดสัญญาณเพื่อที่จะเปลี่ยนผลตอบสนองเชิงความถี่ของสัญญาณที่ผ่านเข้ามาเพื่อชดเชยการสูญเสียความถี่บางช่วงในระบบเครื่องเสียง ระบบเครื่องเสียงเหล่านี้ ได้แก่ระบบบันทึกและเพลย์แบค ระบบเสียงสาธารณะ หรือกระทั่งระบบเสียงไฮไฟ คำว่า Equalizer มาจากความหมายว่า การต้องการสร้างสัญญาณให้เท่ากับสัญญาณต้นแบบเดิม วัตถุประสงค์ที่เราใช้งานอิกวอลไลเซอร์ แบ่งเป็น 2 แบบคือ แบบแก้ไขสัญญาณให้ถูกต้อง และแบบเพิ่มคุณภาพการทำงาน

อิกวอลไลเซอร์แบบแก้ไขสัญญาณ จะใช้ในระบบบันทึกเสียงในอุปกรณ์เสียงระบบดิจิตอล ตัวอย่างการใช้งานคือการใช้วงจรปรับแอมป์ในเทปคาสเซตทั้งตอนบันทึกและตอนเพลย์แบค ขบวนการนี้ใช้มานานแล้วซึ่งจำเป็นต้องมีเพื่อชดเชยความถี่บางช่วงที่สูญเสียในขบวนการบันทึก

ในการใช้อิกวอลไลเซอร์ในระบบเสียงภายในห้องฟังเพลง มีหน้าที่แก้ไขผลตอบสนองเชิงความถี่ให้ถูกต้อง ผลตอบสนองเชิงความถี่ในห้องฟังเพลงต่างๆ ไปจะเป็นปฏิริยาต่อกันกับตู้ลำโพง ตำแหน่งการวางลำโพง และรูปแบบสภาพเสียงภายในห้อง ในการใช้งานแบบนี้วัตถุประสงค์หลักเพื่อเป็นพลังเสียงและคุณภาพเสียงภายในห้องหรือเพื่อให้ได้ยินชัดเจน

อิกวอลไลเซอร์จึงเป็นตัวเพิ่มคุณภาพสัญญาณ อิกวอลไลเซอร์แบบนี้เป็นที่รู้จักกันทั่วไปในงานบันทึกดนตรีเพื่อใช้ในการเน้นหรือเสริมแต่งเสียงดนตรี 2 ชิ้นไปในเทรีกเดียวกันเราอาจใช้อิกวอลไลเซอร์ก่อนการบันทึกเพื่อเน้นเสียงดนตรีหนึ่งๆ ให้ดูชัดเจนยิ่งขึ้น เช่น เสียงกลอง เป็นต้น

2.6.1 ชนิดของอิกวอลไลเซอร์

โดยหลักการแล้วอิกวอลไลเซอร์ทุกชนิดล้วนทำงานในแบบเดียวกัน แต่จะประกอบไปด้วยวงจรของความถี่ต่างๆจำนวนหนึ่งเพื่อตัดทอนหรือยกระดับสัญญาณช่วงความถี่หนึ่งๆ ในแถบสเปกตรัมเสียง อิกวอลไลเซอร์ที่ใ้ใช้กันอยู่ทั่วไปมีหลายแบบ ได้แก่

2.6.1.1 กราฟฟิอิกวอลไลเซอร์

เป็นอิกวอลไลเซอร์อีกแบบหนึ่งที่นิยมใช้กันมากที่สุดนิยมใช้กันในระบบเครื่องเสียงภายในบ้านทั่วไป กราฟฟิอิกวอลไลเซอร์จะประกอบไปด้วยวงจรของความถี่ชุดหนึ่งเพื่อทำการลดทอนหรือเพิ่มขนาดสัญญาณเฉพาะช่วงความถี่กลาง ปริมาณการตัดหรือเพิ่มขึ้น จะขึ้นอยู่กับปุ่มควบคุมที่มาในรูปของสไลด์โพเทนวิโอมิเตอร์วางอยู่ด้านหน้าตำแหน่งการจัดวางพ็อดเหล่านี้ จึงปรากฏในรูปของกราฟแสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ต้องการ การแบ่งชอยย่อยแถบความถี่การควบคุมแล้วแต่ช่วงเท่าของความถี่กลาง เช่น 1/3 ออกเตฟ เป็นต้น ช่วงความถี่ต่างๆที่เรานิยมใช้จะมีมาตรฐานเป็นตัวกำหนด เราเรียกมาตรฐานนี้ว่า ISO (International Standard Organization) แสดงค่าดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงช่วงความถี่ออกเตฟตามมาตรฐานของ ISO

ลำดับตาม ISO	ความถี่กลาง (Hz)	ช่วงความถี่ 1/3 ออกเตฟ (Hz)	ช่วงความถี่ 1 ออกเตฟ (Hz)
13	20	17.8-22.4	
14	25	22.4-28.2	
15	31.5	28.2-35.5	22.4-44.7
16	40	35.5-44.7	
17	50	44.7-56.2	
18	63	56.2-70.8	44.7-89.1
19	80	70.8-89.1	
20	100	89.1-112	
21	125	112-141	89.1-178
22	160	141-178	
23	200	178-224	
24	250	224-282	178-355
25	315	282-355	
26	400	355-447	
27	500	447-562	355-708
28	630	562-708	
29	800	708-891	
30	1000	891-1120	708-1401
31	1250	1120-1410	
32	1600	1410-1780	
33	2000	1780-2240	1401-2820
34	2500	2240-2820	
35	3150	2820-3550	
36	4000	3550-4470	2820-5620
37	5000	4470-5620	
38	6300	5620-7080	
39	8000	7080-8910	5620-11200
40	10000	8910-11200	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) แสดงช่วงความถี่ออกเตฟตามมาตรฐานของ ISO

ลำดับตาม ISO	ความถี่กลาง (Hz)	ช่วงความถี่ 1/3 ออกเตฟ (Hz)	ช่วงความถี่ 1 ออกเตฟ (Hz)
41	12500	11200-14100	
42	16000	14100-17800	11200-22400
43	20000	17800-22400	

2.6.1.2 พารามetri อิกวอไลเซอร์

ในวงจรอิกวอไลเซอร์ชนิดนี้นอกจากระบบจะมีการควบคุมช่วงตัด หรือช่วงเพิ่มระดับสัญญาณในวงจรของแต่ละชุดแล้ว อิกวอไลเซอร์แบบนี้ยังมีปุ่มแยกเพื่อใช้ในการควบคุมสำหรับความถี่กลางของพิวเตอร์และขนาดของแบนด์วิธ อย่างไรก็ตามปุ่มควบคุมเพื่อลดหรือเพิ่มของพิวเตอร์เหล่านี้มักใช้เป็นปุ่มหมุนแทนแบบสไลด์ อิกวอไลเซอร์แบบนี้จึงมีการใช้งานที่ยืดหยุ่นกว่าแบบกราฟฟิคอิกวอไลเซอร์ และยังมีราคาแพงมากกว่า

2.6.1.3 พารากราฟฟิคอิกวอไลเซอร์

อิกวอไลเซอร์แบบนี้เป็นลูกผสมระหว่างอิกวอไลเซอร์แบบกราฟฟิค และแบบพารามetri กล่าวคือ ไม่เหมือนกับพารามetri อิกวอไลเซอร์ตรงที่มีปุ่มควบคุมแยกปรับค่าแบนด์วิธ ค่า Q และค่าความถี่กลางของพิวเตอร์แต่ละชุด แทนที่จะใช้เพื่อปรับแบบโรตารีก็มาใช้เพื่อปรับเลื่อนขึ้นเลื่อนลงในการควบคุมอัตราขยายของพิวเตอร์แต่ละตัวแทน ทำให้มีขอบเขตการใช้งานกว้างขวาง ในขณะที่เดียวกันจะมองเห็นว่าช่วงการปรับแต่งความถี่ได้ง่ายจากหน้าปัดเครื่อง

2.6.1.4 ดิจิตอลอิกวอไลเซอร์

เป็นการใช้ CPU มาควบคุม ปกติจะมีอินพุตและเอาต์พุตให้ทั้งแบบดิจิตอลและแบบอนาลอก ข้อดีของอิกวอไลเซอร์แบบนี้คือ ความสามารถในการเปลี่ยนโปรแกรมได้ ความถี่ต่างๆที่กำหนดสามารถดูได้จากหน่วยความจำ

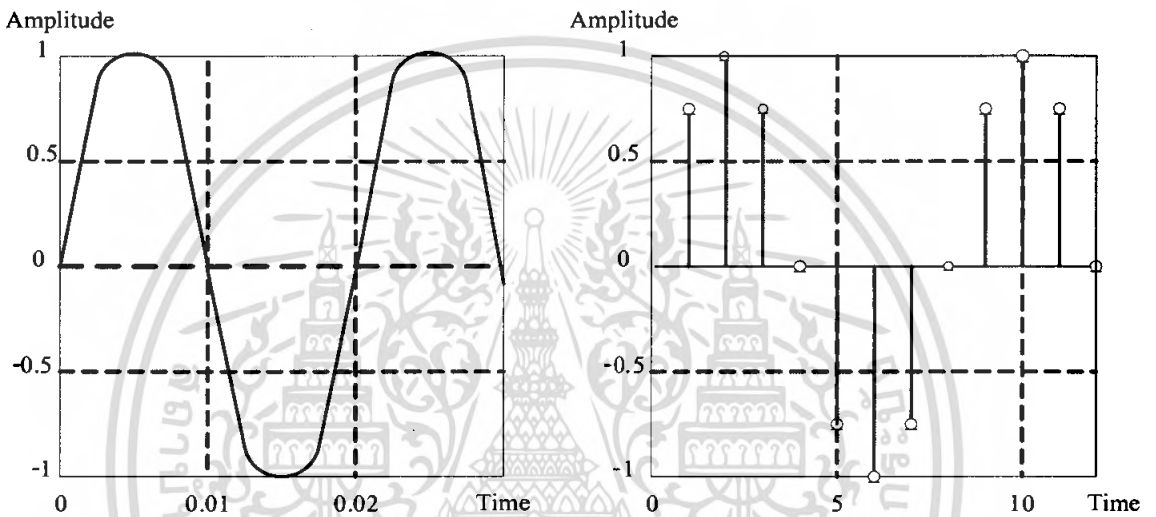
2.6.2 การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (Digital Signal Processing)

2.6.2.1 สัญญาณต่อเนื่อง กับสัญญาณไม่ต่อเนื่อง

สัญญาณต่อเนื่อง (Continuous-time Signal) เป็นสัญญาณที่มีค่าต่อเนื่องในทางเวลา ซึ่งเป็นสัญญาณที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวัน อาทิ สัญญาณเสียง สัญญาณไฟฟ้า 50 Hz โดยที่ถ้าแทนสัญญาณด้วย x และแทนเวลาด้วยสัญลักษณ์ t จะกล่าวได้ว่า x เป็นฟังก์ชันของ t หรือ x มีค่าที่เวลาใดๆ เขียนแทนสัญลักษณ์

นี้ได้ว่า $x(t)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่อง โดยสัญญาณต่อเนื่องเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สัญญาณอนาลอก (Analog Signal)

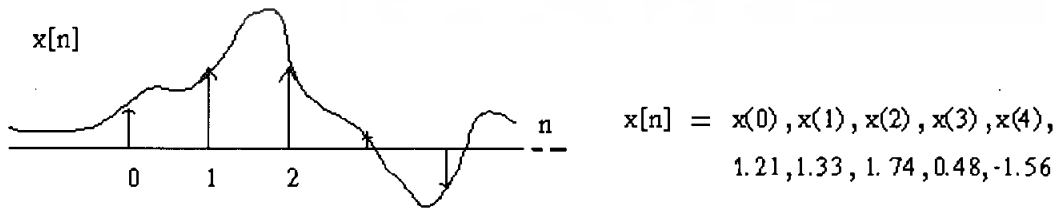
สัญญาณที่ไม่ต่อเนื่อง (Discrete-time Signal) เป็นสัญญาณที่มีค่าเพียงบางจุดของเวลา โดยทั่วไปเกิดจากการสุ่มสัญญาณต่อเนื่องด้วยคาบเวลาของการสุ่มคงที่ โดยสมมติแทน n เป็นเวลาแบบไม่ต่อเนื่องโดย n เป็นตัวแปรที่มีค่าเป็นจำนวนเต็มเท่านั้น คือ $n = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots$ และสัญญาณไม่ต่อเนื่องจะเป็นฟังก์ชันของ n ดังนั้นเขียนแทนสัญลักษณ์นี้ได้ว่า $x[n]$



รูปที่ 2.15 สัญญาณต่อเนื่องและสัญญาณไม่ต่อเนื่อง

2.6.2.2 สัญญาณดิจิทัล (Digital Signal)

ในส่วนคำว่าสัญญาณดิจิทัลนั้น ก็คือ สัญญาณไม่ต่อเนื่องที่แต่ละค่าของสัญญาณถูกแทนด้วยค่าเลขฐานสองที่มีจำนวนบิตจำกัด อยู่ในรูป 0 กับ 1



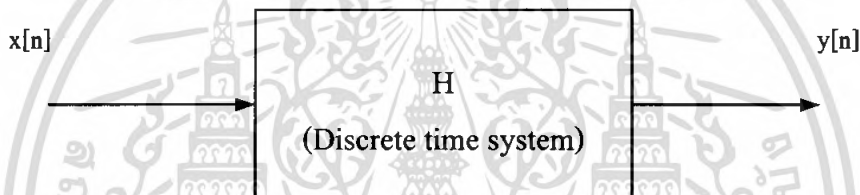
รูปที่ 2.16 สัญญาณไม่ต่อเนื่องและตัวอย่างการแทนลำดับค่าด้วยค่าดิจิทัล

ค่าของสัญญาณเหล่านี้ เมื่อนำไปใช้งานสามารถแทนได้ด้วยข้อมูลดิจิทัล เช่น 00110110, 00111000, 01100011....

2.6.2.3 ระบบและคุณสมบัติของระบบ

ระบบเวลาเชิงเต็มหน่วย (Discrete-time System) ก็คือหลักการคำนวณหรือสมการที่ใช้คำนวณหาผลที่ออกมา (Algorithm) ซึ่งอาจเป็นอุปกรณ์ทางฮาร์ดแวร์ก็ได้ พูดได้อีกอย่างคือ ระบบจะเป็นตัวปฏิบัติกับลำดับสัญญาณอินพุต $x[n]$ ที่เข้ามาแล้วให้กำเนิดสัญญาณเอาต์พุตที่ได้เป็น $y[n]$ โดยจะมีกฎของการคำนวณในตัวเองอยู่เพื่อกำหนดผลนั้นออกมา

ดังนั้นหากกำหนดให้สัญญาณอินพุต $x[n]$ และสัญญาณเอาต์พุต $y[n]$ และแทนสัญลักษณ์ของระบบด้วย H จะเขียนเป็นแผนภาพแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.17 ระบบเวลาเชิงเต็มหน่วย

ซึ่งในการประมวลผลสัญญาณ ระบบหรือ H ก็อาจเทียบได้ว่ามันก็คือ วงจรกรองความถี่ดิจิทัลนั่นเอง เช่น วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) ก็คือระบบที่สมการของการตัดแถบความถี่สูงออกอยู่ในตัวเอง มันจะให้สัญญาณเอาต์พุต โดยเกิดจากการคำนวณของสมการของมันต่อลำดับสัญญาณอินพุต ในการคำนวณโดยทั่วไปของระบบนั้นก็จะมีการกำหนดขึ้นมาเพื่อความสะดวกในการคิดพิจารณา ระบบ ข้อกำหนดที่เป็นที่นิยมนำมาใช้มากก็คือ ระบบลิเนียร์อินแวเรียน

2.7 การแปลงค่าเซต (Z-Transform)

การแปลง Z คือคณิตศาสตร์ที่ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์และสังเคราะห์ระบบเวลาเป็นช่วงๆ เช่นเดียวกับที่เราคุ้นเคยกับการแปลงลาปลาซในการวิเคราะห์และสังเคราะห์ระบบเวลาที่ต่อเนื่อง

การแปลงค่าเซตเป็นการแปลงที่กระทำกับสัญญาณไม่ต่อเนื่อง แล้วให้ผลลัพธ์เป็นฟังก์ชันของตัวแปรเชิงซ้อน คือตัวแปร Z สำหรับสัญญาณ $x(n]$ โดย การแปลงเซตของ $x(n]$ เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $X(Z)$

$$\begin{aligned} Z\{x(n)\} &= X(Z) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)z^{-n} \end{aligned} \quad (2.4)$$

และการแปลงเซตผกผัน (Inverse Z transform) มีนิยามว่า

$$x(n) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\gamma} x(z)z^{n-1} dz \quad (2.5)$$

โดย $Z = e^{sT}$ โดยทั่วไปจะให้ $T=1$ ซึ่งการแปลง Z นี้จะนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ระบบแบบไม่ต่อเนื่อง โดยสมมุติว่าระบบไม่ต่อเนื่องระบบหนึ่งมีผลตอบสนองอิมพัลส์ (Impulse response) เป็น $h(n]$ และการแปลง Z ของ $h(n]$ ได้ค่าเป็น $H(z)$ ซึ่ง $H(z)$ นี้ก็คือฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของระบบโดยมีความสัมพันธ์กับการแปลง Z ของสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออก ดังสมการ

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} \quad (2.6)$$

สมการที่ (2.4) นี้เป็นสมการความสัมพันธ์ในโดเมน Z สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการคำนวณค่าต่างๆ ของระบบ เช่น สมการผลต่างสืบเนื่อง $h(n]$, $H(z)$, $y(n]$ เมื่อกำหนด $x(n]$ โดยถ้าหากทราบค่าใดค่าหนึ่งก็สามารถที่จะใช้การแปลง Z ในการหาค่าที่เหลืออยู่ได้ทั้งหมดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทางปฏิบัติสัญญาณ $x(n]$ ที่เราจะใช้เป็นสัญญาณคาสอล (Causal signal) คือ $x[n] = 0$ เมื่อ $n < 0$ ทำให้สมการที่ (2.4) จะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง ∞ ซึ่งเรียกว่าการแปลง Z ด้านเดียวซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญบางประการของการแปลง Z ดังนี้

1. ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

$$Z\{ax(n) + by(n)\} = aX(Z) + bY(Z) \quad (2.7)$$

2. การเลื่อน (Shift or Translation)

$$Z\{z(n-k)\} = Z^{-k}X(Z) \quad (2.8)$$

3. คอนโวลูชัน (Convolution)

$$Z\{f(n)*y(n)\} = Z\{f(n)\}Z\{g(n)\} = F(Z)G(Z) \quad (2.9)$$

2.8 วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล

ความหมายของวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล คือ กระบวนการที่ไปคัดแปลงสเปกตรัมของสัญญาณให้มีสเปกตรัมให้เป็นไปตามข้อกำหนดที่ต้องการ ซึ่งอาจเป็นการเพิ่มค่าหรือลดค่าขนาดของสัญญาณในแถบความถี่ที่กำหนดให้ ซึ่งในการวิเคราะห์และสังเคราะห์วงจรนั้น ต้องใช้เครื่องมือพื้นฐานทางคณิตศาสตร์เข้าช่วย ดังนั้นเราจึงเรียกว่า วงจรกรองความถี่เชิงเลข

การที่วงจรกรองความถี่เชิงเลขมีการนำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง อาจมาจากข้อได้เปรียบหลายประการดังต่อไปนี้

1. ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่นั้น สามารถที่จะออกแบบให้มีความใกล้เคียงกับผลตอบสนองความถี่ที่กำหนดให้ หรือผลตอบสนองความถี่ที่ต้องการ ได้นอกจากนี้การออกแบบวงจรกรองความถี่ให้มียผลตอบสนองเชิงเส้นทำได้ง่าย
2. คุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ที่ออกแบบและสร้างแล้วไม่ขยับเลื่อน (Drift) ไปตามสภาพแวดล้อมหรืออุณหภูมิ หรือตามระยะเวลาการใช้งาน นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานในย่านความถี่ต่ำเป็นอย่างดี
3. การประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรกรองความถี่แบบปรับตัวได้ (Adaptive Filter) ทำได้ง่าย
4. ผู้ออกแบบสามารถออกแบบโดยคำนึงถึงความยาวของคำ (Word length) ของตัวเลขฐานสองที่ต้องการใช้ และยังสามารถออกแบบให้มียผลตอบสนองความถี่ที่ต้องการได้
5. มีความเสถียรของวงจรกรองความถี่ ความเชื่อถือได้ ราคาหรือขนาดของวงจรกรองความถี่เชิงเลข สิ่งเหล่านี้กำลังได้รับการพัฒนาและปรับปรุงและมีแนวโน้มว่าจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า

วงจรกรองความถี่แบบอนาล็อก (Analog Filter) หรือเรียกว่า วงจรกรองความถี่เชิงอนาล็อกวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลสามารถเขียนอธิบายในรูปของบล็อกไดอะแกรมได้โดยสัญญาณอินพุต ซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อกจะถูกสุ่ม (Sampled) ด้วยช่วงเวลาทีค่าคงที่ค่าหนึ่งและสัญญาณที่ถูกสุ่มนี้จะเปลี่ยนให้อยู่ในรูปฐานสองโดยการแปลงสัญญาณดิจิทัลหรือสัญญาณเชิงเลข (Analog to Digital Converter) หลังจากนั้น

เลขฐานสองที่แทนสัญญาณอนาลอกที่เข้ามาทางอินพุตจะผ่านวงจรกรองสัญญาณดิจิทัล ต่อมาค่าเอาต์พุตที่ได้จากวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลจะถูกแปลงกลับเป็นสัญญาณอนาลอกด้วยวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัล เป็นอนาลอก



รูปที่ 2.18 แผนภาพของวงจรกรองความถี่สัญญาณดิจิทัล

วงจรกรองสัญญาณดิจิทัลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะของผลตอบสนองอิมพัลส์ได้แก่

1. วงจรกรองสัญญาณความถี่ดิจิทัลแบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัดผลตอบสนองอิมพัลส์
2. วงจรกรองสัญญาณความถี่ดิจิทัลแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัดผลตอบสนองอิมพัลส์

วงจรกรองความถี่ดิจิทัลแบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัดผลตอบสนองอิมพัลส์ มักเป็นตัวกรองที่ไม่มีการป้อนกลับ เป็นวงจรที่มีโครงสร้างง่าย ๆ และมีเสถียรภาพที่ดี แต่มีข้อเสียที่จะให้วงจรกรองที่มีอันดับสูงถึงแม้จะต้องการให้มีความถี่ที่ง่าย ๆ ก็ตาม

วงจรกรองความถี่ดิจิทัลแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัดผลตอบสนองอิมพัลส์ เป็นตัวกรองความถี่ที่มีการป้อนกลับ เป็นวงจรที่ใช้อันดับที่ต่ำกว่าวงจรกรองความถี่ดิจิทัลแบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัดที่ต้องการลักษณะทางความถี่เหมือนกัน แต่การกรองจะมีความยุ่งยากกว่าและมีปัญหาเรื่องความเสถียรภาพไม่ดีนิก

2.8.1 วงจรกรองความถี่ไม่ป้อนกลับเชิงเลข (Finite Impulse Response : FIR)

ผลการตอบสนองอิมพัลส์จำกัดนั่นคือหากเราป้อนสัญญาณอิมพัลส์ให้กับวงจรนี้แล้ว สัญญาณตอบสนองจะมีค่าจำกัดโดยเอาต์พุตของระบบจะขึ้นอยู่กับสัญญาณอินพุตนั้น จึงเรียกว่าวงจรกรองความถี่ไม่ป้อนกลับ (non-recursive filter) ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

ฟังก์ชันการถ่ายโอน

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h_n z^{-n} \quad (2.10)$$

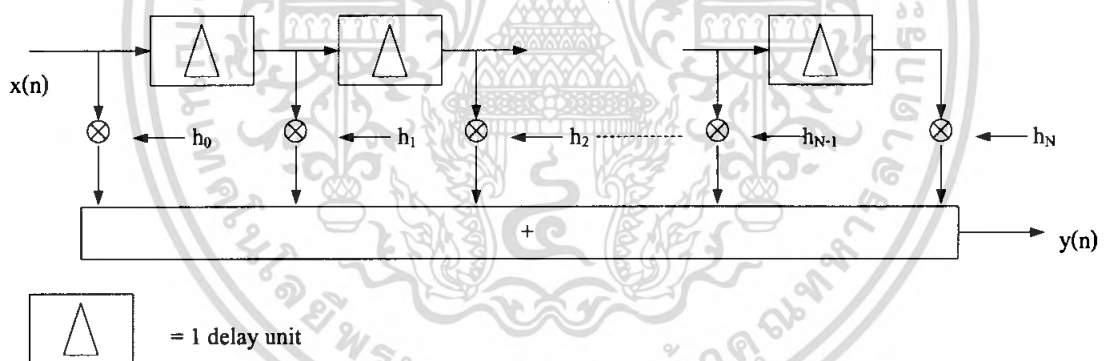
แทนค่า $z = e^{j\omega}$ จะได้ผลการตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ไม่ป้อนกลับเชิงเลขจะได้สมการดังสมการที่ (2.11)

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)e^{-j\omega n} \quad (2.11)$$

หรือในรูปสมการความต่าง คือ

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h_k x(n-k) \quad (2.12)$$

สำหรับตัวกรองแบบ FIR นั้นในการออกแบบสิ่งที่เราต้องการหา คือ ค่าของผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ หรือ $h(n)$ ของระบบ สำหรับตัวกรอง FIR ที่มีความยาว N จุด เรากล่าวว่าตัวกรองนี้มีอันดับเท่ากับ $N-1$ เหตุผลก็คือ มีการใช้สัญญาณเข้าย้อนหลังไป $N-1$ ตำแหน่ง



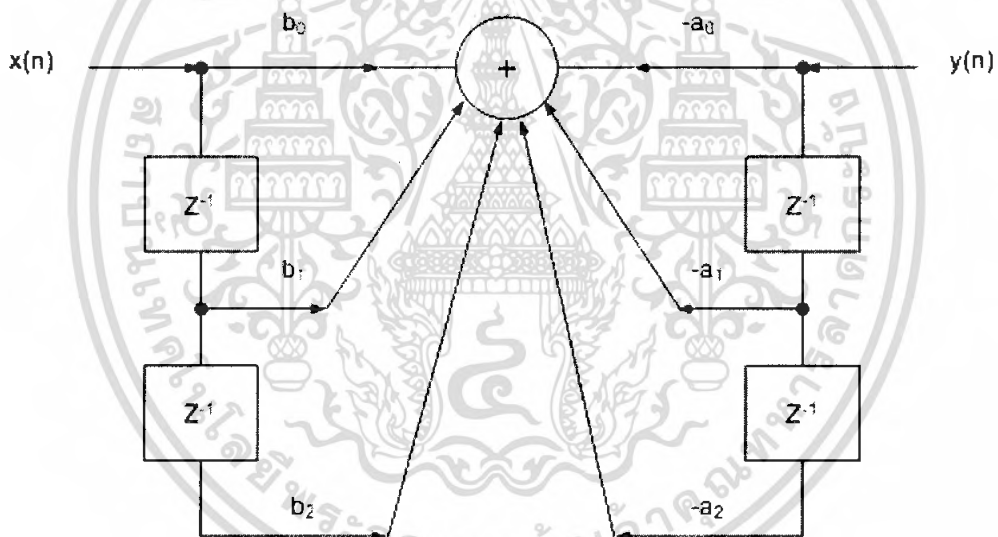
รูปที่ 2.19 วงจรกรอง FIR ที่สร้างอย่างตรงไปตรงมา

2.8.2 วงจรกรองความถี่ป้อนกลับเชิงเลข (Infinite Impulse Response : IIR)

รูปแบบของสมการ IIR ในรูปทั่วไปเมื่อทำการแปลง Z จะได้ ($a_0 = 1$)

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{m=0}^M b_m z^{-m}}{1 - \sum_{k=1}^N a_k z^{-k}} \quad (2.13)$$

ความแตกต่างที่เห็นได้อย่างชัดเจนระหว่างระบบที่ไม่มีป้อนกลับ (FIR) และระบบที่ไม่มีป้อนกลับ (IIR) คือระบบที่มีป้อนกลับมีทั้งโพล (pole) และซีโร (zero) ในขณะที่ระบบที่ไม่มีป้อนกลับมีซีโรเพียงอย่างเดียวการปรากฏโพลในระบบที่มีป้อนกลับอาจทำให้เกิดปัญหา เรื่องความเสถียรได้เพราะโพลอาจอยู่นอกวงกลม $|z|=1$

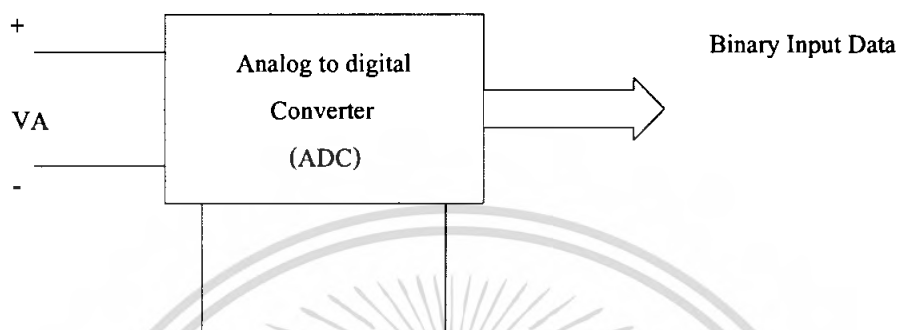


รูปที่ 2.20 IIR Filter (Bi-Quad) Second order

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 วงจรแปลงอนาลอกเป็นดิจิทัล

วงจร ADC เป็นวงจรที่ใช้ในการแปลงข้อมูลสัญญาณอนาลอกที่อยู่ในรูปของแรงดันหรือกระแส ซึ่งเป็นสัญญาณอินพุตให้เป็นสัญญาณดิจิทัลที่เป็นสัญญาณเอาต์พุต ในรูปของไบนารี



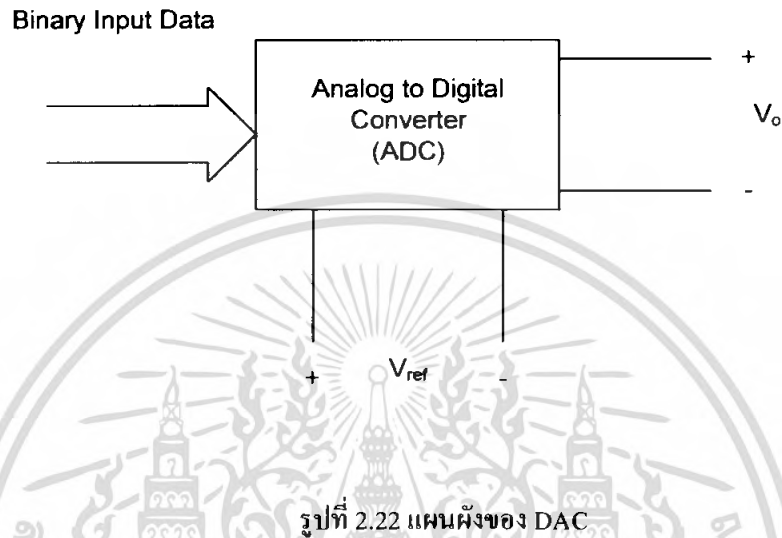
รูปที่ 2.21 แผนผังของ ADC

การทำงานพื้นฐานของวงจร ADC

วงจร ADC แบบ Successive Approximation วงจรแบบนี้ได้รับความนิยมมากในการนำมาเป็นวงจร ADC ในการแปลงข้อมูลขนาด 8 บิต ถึง 16 บิต จะมีความเร็วในการแปลงข้อมูลค่อนข้างเร็ว เนื่องจากวงจรอาศัยอัลกอริทึมในการค้นหาไบนารี (Binary Search) แทนการให้เริ่มต้นกระบวนการด้วยการเริ่มนับตั้งแต่ 0 เป็นต้นไป โดยปัจจุบันมี IC สำเร็จรูปที่เป็นวงจร ADC แบบ Successive Approximation ให้เลือกมากมาย เช่น เบอร์ ADC0804-Series ของบริษัท National Semiconductor เป็นต้น

2.10 วงจรแปลงดิจิทัลเป็นอนาล็อก (D/A Converter Circuits : DAC)

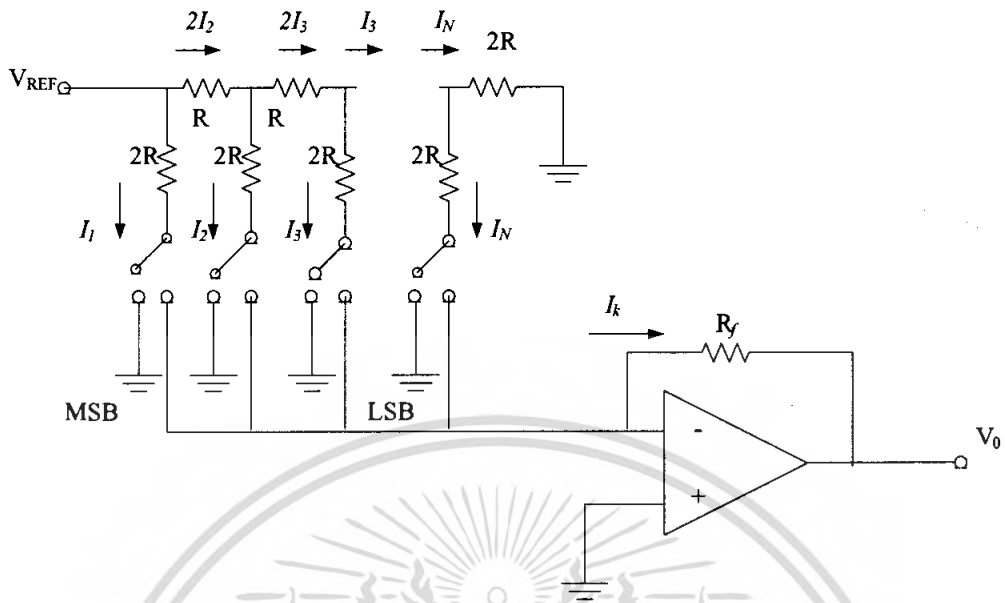
วงจร DAC เป็นวงจรที่ใช้แปลงข้อมูลดิจิทัลที่อยู่ในรูปแบบไบนารี ซึ่งเป็นสัญญาณอินพุตให้สัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณเอาต์พุตในรูปแบบแรงดันหรือกระแส



รูปที่ 2.22 แผนผังของ DAC

การทำงานพื้นฐานของวงจร DAC

วงจร ADC แบบ R-2R Ladders แสดงในรูปที่ 2.23 จากวงจรจะเห็นได้ว่าตัวต้านทานที่ใช้ในวงจรมีเพียง 2 ค่า และมีค่าที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงสามารถแก้ไขปัญหาในการสร้างตัวต้านทานให้มีความเที่ยงตรงได้ไม่ยาก อย่างไรก็ตามกระแสที่ถูกต้องออกจากแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงนั้นก็ยังคงมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าอินพุตของวงจรอยู่ สามารถแก้ไขได้โดยวงจร Bipolar R-2R Ladders และในปัจจุบันก็มี IC สำเร็จรูปเป็นวงจร DAC แบบ R-2R Ladders ให้เลือกมากมายได้แก่ AD7523/7524 (8bits) ส่วนที่เป็นวงจร DAC แบบ bipolar R-2R Ladders มีเบอร์ AD561 (10 bit) เป็นต้น



รูปที่ 2.23 วงจร DAC แบบ R-2R Ladders

เมื่อทำการวิเคราะห์วงจรก็จะเห็นได้ว่า

$$I_1 = 2I_2 = 4I_3 = \dots = 2^{N-1}I_N \quad (2.14)$$

ซึ่งจะได้

$$I_k = \frac{V_{REF}}{R} \left(\frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2^2} + \dots + \frac{b_n}{2^N} \right) \quad (2.15)$$

และ

$$V_0 = -I_k R_f = -V_{REF} \left(\frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2^2} + \dots + \frac{b_n}{2^N} \right) \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

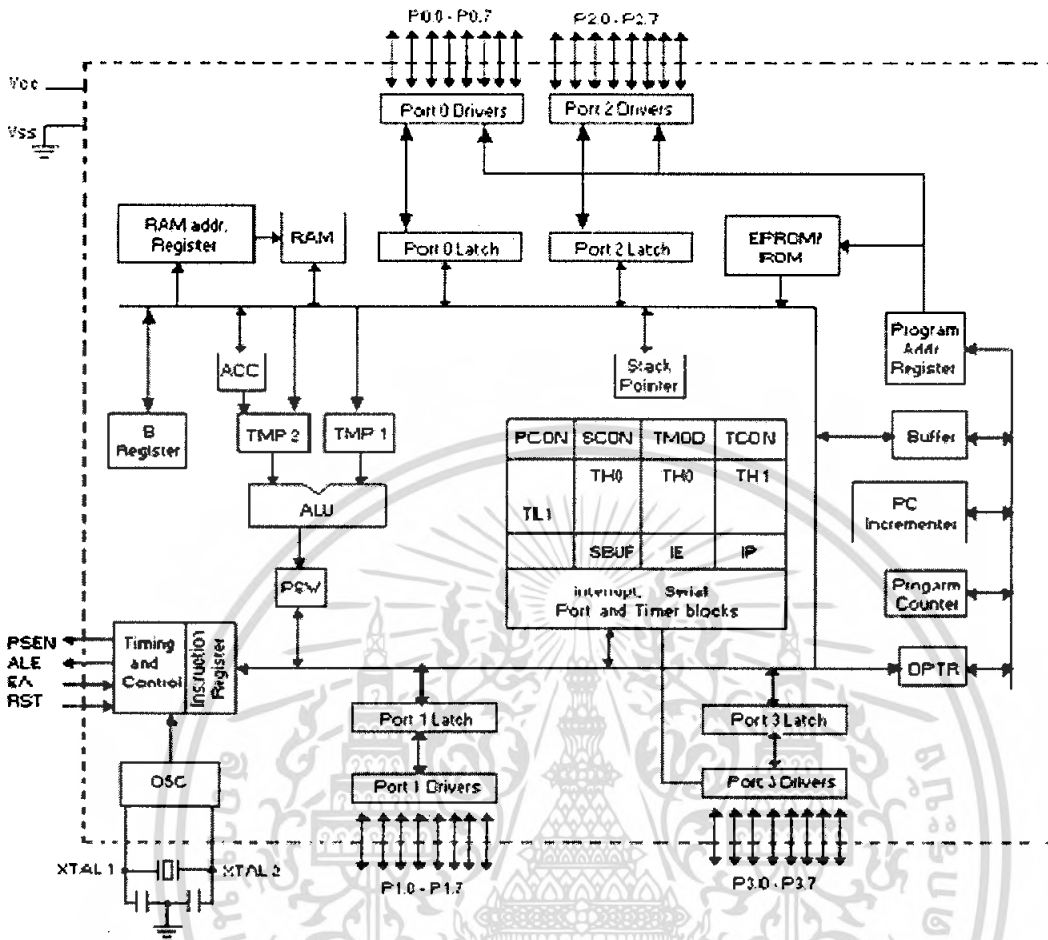
2.11 ไมโครคอนโทรลเลอร์และการติดต่อ I²C

2.11.1 MCS-51

โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล MCS-51 ถูกพัฒนาการผลิตและจัดจำหน่ายโดยบริษัท Intel ซึ่งต่อมาบริษัท Siemens, Advance Micro Devices, Fujitsu, Phillips และ Atmel ได้ซื้อลิขสิทธิ์ไปพัฒนาต่อ ไมโครคอนโทรลเลอร์นี้สามารถนำไปใช้ในงานควบคุมระบบต่างๆ มีลักษณะสมบัติดังนี้

- ตัวประมวลผล (CPU) มีขนาด 8 บิต
- มีหน่วยความจำภายใน 128 ไบต์ (RAM)
- สามารถประมวลผลข้อมูลในลักษณะบิตได้
- มีตัวจับเวลา/ตัวนับ (Timer/Counter) ขนาด 16 บิต อยู่ภายใน 2 วงจร
- ต่อขยายหน่วยความจำภายนอกโปรแกรม (External Program Memory) ได้ 64 กิโลไบต์
- ต่อขยายหน่วยความจำภายนอกข้อมูล (External Data Memory) ได้ 64 กิโลไบต์
- มีพอร์ตอินพุท/เอาต์พุต 4 พอร์ต หรือ 32 บิต
- มีพอร์ตอนุกรม 1 พอร์ต สามารถทำงานได้ทั้งแบบประสานเวลา (Synchronous) และแบบไม่ประสานเวลา (Asynchronous) มี 4 แบนกรีจิสเตอร์ (Register Bank) ไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล MCS-5 หรือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 มีโครงสร้างดังรูป 2.24



รูปที่ 2.24 แผนภาพกรอบโครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051

ปัจจุบันไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8051 ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในงานอุตสาหกรรมและในงานด้านวิจัยพัฒนา ดังนั้นจึงมีผู้ผลิตหลายบริษัทไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น มีอยู่ด้วยกันหลายเบอร์และมีคุณสมบัติแตกต่างกันดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

Device	ผู้ผลิต	Program Memory	Data Memory	Timer/ Counters	I/O Pin	Speed (MHz)	External Memory	Pin Count
8031	Intel	No	128	2	32	3.6-16	Yes	40
8051	Intel	4K ROM	128	2	32	3.6-16	Yes	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) เปรียบเทียบไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

Device	ผู้ผลิต	Program Memory	Data Memory	Timer/ Counters	I/O Pin	Speed (MHz)	External Memory	Pin Count
8751	Intel	4K EPROM	128	2	32	3.6-16	Yes	40
8032	Intel	No	256	3	32	3.6-16	Yes	40
89C1051	Atmel	1K Flash	64	1	15	0-24	No	20
89C2051	Atmel	2K Flash	128	2	15	0-24	No	20
89C51	Atmel	4K Flash	128	2	32	0-24	Yes	40
89C52	Atmel	8K Flash	256	3	32	0-24	Yes	40
89C51RB+	Philips	16K Flash	512	3	32	0-33	Yes	40
89C51RC+	Philips	32K Flash	512	3	32	0-33	Yes	40
89C51RD+	Philips	64K Flash	1024	3	32	0-33	Yes	40

(8052) T2	P1.0	1	40	Vcc
only T2EX	P1.1	2	39	P0.0 AD0
	P1.2	3	38	P0.1 AD1
	P1.3	4	37	P0.2 AD2
	P1.4	5	36	P0.3 AD3
	P1.5	6	35	P0.4 AD4
	P1.6	7	34	P0.5 AD5
	P1.7	8	33	P0.6 AD6
	RST	9	32	P0.7 AD7
RXD	P3.0	10	31	EA' Vpp
TXD	P3.1	11	30	ALE PROG'
INT0'	P3.2	12	29	PSEN'
INT1'	P3.3	13	28	P2.7 A15
T0	P3.4	14	27	P2.6 A14
T1	P3.5	15	26	P2.5 A13
WR'	P3.6	16	25	P2.4 A12
RD'	P3.7	17	24	P2.3 A11
XTAL2	18	23	P2.2 A10	
XTAL1	19	22	P2.1 A9	
Vss	20	21	P2.0 A8	

รูปที่ 2.25 การจัดวางตำแหน่งขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.2 การใช้งานขาต่างๆ MCS-51

ขา V_{cc}

ใช้ต่อกับแหล่งจ่ายไฟ (V_{cc}) โดยทั่วไป V_{cc} จะมีค่าเท่ากับ 5 โวลต์ สำหรับบางเบอร์ V_{cc} จะมีค่าอยู่ในช่วง 2.7 Volt- 5.5 Volt เช่นเบอร์ 89C51RD+ ของบริษัท Philips เป็นต้น

ขาพอร์ต 0

ทำงานได้ 2 ลักษณะ คือทำหน้าที่เป็นบัสนเลขที่อยู่/บัสของข้อมูล (Address Bus/Data Bus AD0-AD7) สำหรับหน่วยความจำภายนอก การใช้งานต้องต่อทั้ง 8 ขาของพอร์ต 0 กับตัวต้านทานค่า 10 กิโลโอห์ม ไว้กับ V_{cc} ด้วย เรียกตัวต้านทานนี้ว่า ตัวต้านทานพูลอัพ (Pull-up Resistor) หรือทำหน้าที่เป็นพอร์ตอินพุต/เอาต์พุต

ขาพอร์ต 1

ทำหน้าที่เป็นพอร์ตอินพุต/เอาต์พุต ใช้งานได้โดยไม่ต้องต่อตัวต้านทานพูลอัพภายนอก เพราะว่ามีตัวต้านทานพูลอัพอยู่ภายในอยู่แล้ว สำหรับการใช้งานพอร์ตเบอร์ 1 เป็นพอร์ตเอาต์พุตควรต่อบัฟเฟอร์ช่วยขยายกระแสด้วย

ขาพอร์ต 2

ทำงานได้ 2 ลักษณะเช่นเดียวกับพอร์ตเบอร์ 0 คือทำหน้าที่เป็นบัสนเลขที่อยู่ (Address Bus A8-A15) สำหรับหน่วยความจำภายนอกหรือทำหน้าที่เป็นพอร์ตอินพุต/เอาต์พุต สำหรับการใช้งานพอร์ต 2 เป็นพอร์ตเอาต์พุต ควรต่อบัฟเฟอร์ช่วยขยายกระแสด้วย (ไม่ต้องต่อตัวต้านทานพูลอัพ)

ขาพอร์ต 3

ทำงานได้ 2 ลักษณะคือทำหน้าที่เป็นพอร์ตเอาต์พุต/อินพุต ขณะที่ทำหน้าที่เป็นพอร์ตเอาต์พุตควรต่อบัฟเฟอร์ด้วย นอกจากนี้พอร์ต 3 ยังถูกใช้เป็นขาสัญญาณต่างๆดังต่อไปนี้

- P3.0 หรือขา RXD เป็นขาอินพุตรับข้อมูลแบบอนุกรม
- P3.1 หรือขา TXD เป็นขาเอาต์พุตส่งข้อมูลแบบอนุกรม
- P3.2 หรือขา INT0 เป็นขาอินพุตรับสัญญาณขัดจังหวะ 0 (Interrupt)
- P3.3 หรือขา INT1 เป็นขาอินพุตรับสัญญาณขัดจังหวะ 1
- P3.4 หรือขา T0 เป็นขาอินพุตรับสัญญาณสำหรับตัวจับเวลา/ตัวนับ 0
- P3.5 หรือขา T1 เป็นขาอินพุตรับสัญญาณสำหรับตัวจับเวลา/ตัวนับ 1
- P3.6 หรือขา WR เป็นขาเอาต์พุตสำหรับส่งสัญญาณเขียนข้อมูลลงหน่วยความจำข้อมูลภายนอกหรือเขียนข้อมูลไปยังพอร์ตที่ขยายเพิ่ม ซึ่งอยู่ในช่วงเลขที่อยู่หน่วยความจำ (Memory Map I/O)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- P3.7 หรือขา RD เป็นขาเอาต์พุตสำหรับส่งสัญญาณอ่านข้อมูลลงหน่วยความจำภายนอกหรืออ่านข้อมูลจากพอร์ตที่ขยายเพิ่ม ซึ่งอยู่ในช่วงเลขที่อยู่ของหน่วยความจำ (Memory Map I/O)

ขารีเซ็ต (Reset)

เป็นขาอินพุต ใช้สำหรับรีเซ็ต (Reset) ไมโครคอนโทรลเลอร์ ขณะทำการรีเซ็ตขานี้ต้องมีลอจิกเป็น “1” อย่างน้อย 2 รอบของเครื่อง (Machine Cycle)

ขา ALE (Address Latch Enable)

ALE เป็นขาเอาต์พุต ใช้แยกบัสเลขที่อยู่กับบัสข้อมูล (AD0-AD7) ของพอร์ต 0 ให้อิสระต่อกันโดยต่อขา ALE กับขาแลตช์ของไอซี 74LS373 ในขณะที่ทำงานถ้าขา ALE ส่งลอจิก “1” พอร์ต 0 จะเป็นบัสเลขที่อยู่ (A0-A7) และเมื่อขา ALE ส่งลอจิก “0” พอร์ต 0 จะเป็นบัสเลขที่อยู่ (D0-D7) (ALE : “1” Address, ALE : “0” Data)

ขา PSEN (Program Store Enable)

ขา PSEN เป็นขาเอาต์พุต จะส่งลอจิก 0 เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องการอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก โดยปกติจะต่อขา PSEN กับขา OE (Output Enable) ของหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก (EPROM)

ขา EA (External Access)

ขา EA เป็นขาอินพุต ใช้เลือกหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก (External Program Memory) หรือภายใน (Internal Program Memory) กล่าวคือถ้าป้อนลอจิกเป็น “0” เพื่อเลือกใช้หน่วยความจำโปรแกรมภายนอก หรือถ้าป้อนลอจิกเป็น “1” เพื่อเลือกใช้หน่วยความจำโปรแกรมภายใน ถ้าเป็นเบอร์ 8031/8032 ขา EA จะเป็น “0” เสมอ เพราะไม่มีหน่วยความจำโปรแกรมภายใน

ขา XTAL1 และ XTAL2

เป็นขาสัญญาณที่ใช้สร้างสัญญาณนาฬิกา โดยปกติภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 มีวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาอยู่แล้ว เพียงต่อคริสตัล (Crystal) ดังภาพที่ 2.26 ก็สามารสร้างสัญญาณนาฬิกาได้ แต่ถ้าต้องการสร้างสัญญาณนาฬิกาจากวงจรภายนอกก็สามารถทำได้โดยการป้อนสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกเข้าที่ขาสัญญาณ XTAL1 ก็ได้ส่วนขาสัญญาณ XTAL2 จะมีสัญญาณตรงข้ามกับ XTAL1 ทั้งนี้เนื่องจากที่ขา XTAL1 และ XTAL2 มีนอตเกต (Not Gate) ต่ออยู่ที่ภายในโดยที่ขา XTAL1 จะเป็นอินพุตของนอตเกต ส่วนที่ขา XTAL2 จะเป็นเอาต์พุตของนอตเกต

2.11.3.1 หน่วยความจำโปรแกรม (Program Memory)

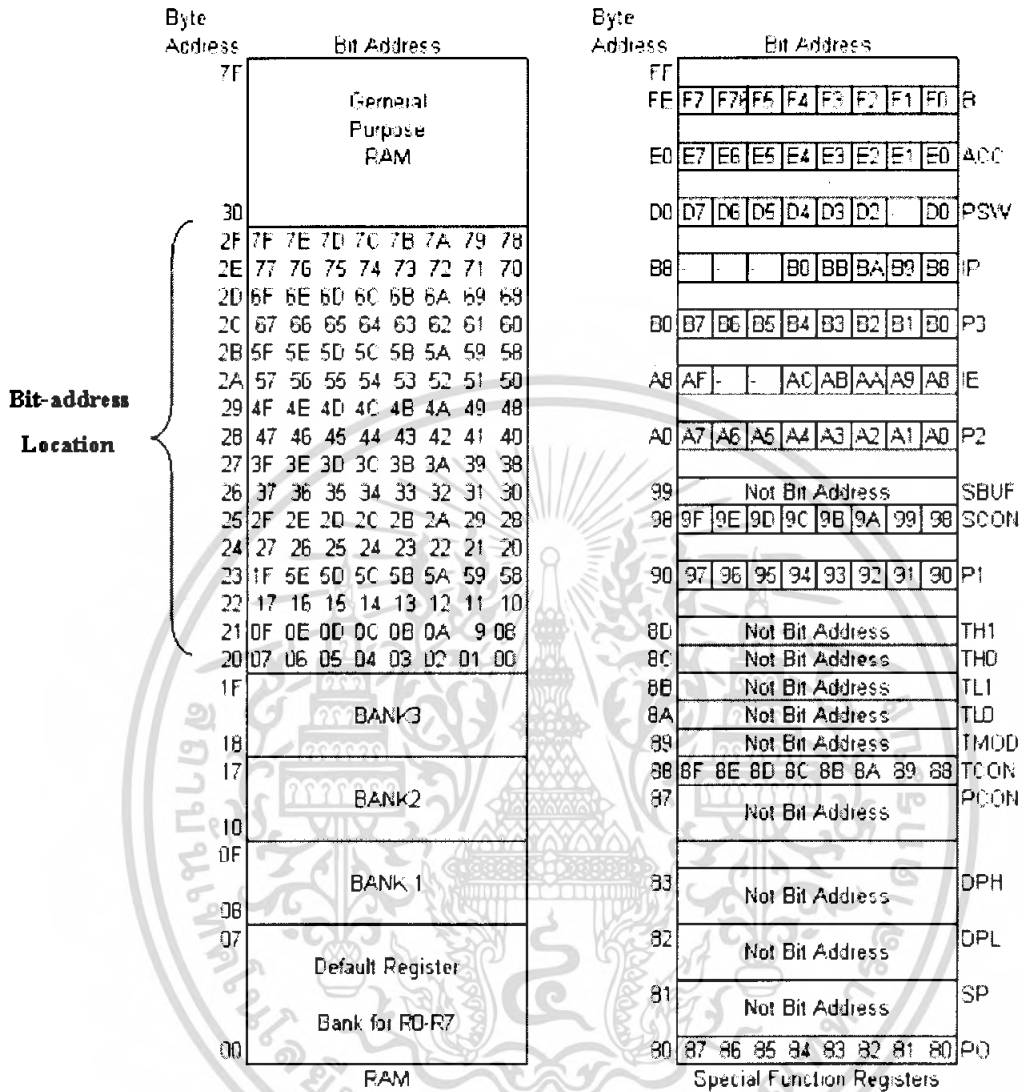
ไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 สามารถต่อหน่วยความจำโปรแกรมได้สูงสุด 64 กิโลไบต์ รวมกันทั้งภายในและภายนอก โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 จะส่งสัญญาณลอจิก 0 ออกที่ขา PSEN เพื่อติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก หน่วยความจำโปรแกรมนี้อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “Code Memory”

2.11.3.2 หน่วยความจำภายนอก (External Data Memory)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 สามารถต่อหน่วยความจำข้อมูลภายนอกได้สูงสุด 64 กิโลไบต์ ในการติดต่อกจะใช้สัญญาณ RD เพื่ออ่านและใช้สัญญาณ WR เพื่อเขียนหน่วยความจำ โดยสัญญาณทั้งสองนี้จะทำงานที่ลอจิก “0” ถ้าไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 มีการขยายพอร์ตอินพุต/เอาต์พุตเพิ่ม ซึ่งมีเลขที่อยู่ในช่วงเลขที่อยู่ของหน่วยความจำ (Memory-Map I/O) จึงต้องใช้พื้นที่บางส่วนของหน่วยความจำข้อมูลภายนอก (รูปที่ 2.27) มาใช้เป็นเลขที่อยู่ของพอร์ต

2.11.3.3 หน่วยความจำข้อมูลภายใน (Internal Data Memory)

โครงสร้างดังภาพที่ 2.28 แบนกรีจิสเตอร์อยู่ที่เลขที่อยู่ 00H-1FH แบ่งออกเป็น 4 แบนก็คือ แบนที่ 0- แบนที่ 3 โดยทั้ง 4 แบนนี้จะใช้ชื่อเหมือนกันคือ R0-R7 การใช้งานแบนกรีจิสเตอร์จะใช้งานได้ทีละแบนเท่านั้น ในการเลือกใช้แบนกรีจิสเตอร์สามารถเลือกได้ที่บิต RS0 และบิต RS1 ซึ่งอยู่ในรีจิสเตอร์ PSW ถ้าไม่มีการเลือกใดๆ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะเลือกใช้แบนที่ 0 โดยอัตโนมัติรีจิสเตอร์ R0-R7 นี้จะใช้เก็บข้อมูล แต่รีจิสเตอร์ R0 และ R1 มีคุณสมบัติพิเศษกว่ารีจิสเตอร์ตัวอื่นคือสามารถนำไปใช้เลขที่อยู่หน่วยความจำข้อมูลได้ Bit-addressable อยู่ในช่วงเลขที่อยู่ 20H-2FH เป็นกลุ่มรีจิสเตอร์ที่สามารถใช้คำสั่งในระดับบิตได้ สำหรับ General Purpose RAM อยู่ในช่วงเลขที่อยู่ 30H-7FH เป็นเลขที่อยู่ที่สามารถนำไปใช้งานทั่วไป นอกจากนี้ยังใช้พื้นที่หน่วยความจำในเลขที่อยู่นี้มาใช้เป็นพื้นที่ของตัวชี้สแตก (Stack Pointer : SP)



รูปที่ 2.28 การจัดหน่วยความจำภายในแรมไมโครคอนโทรลเลอร์

รีจิสเตอร์ฟังก์ชันเฉพาะ (Special Function Registers: SFRs)

อยู่ที่เลขที่อยู่ 80H-FFH ใช้ทำหน้าที่เฉพาะดังต่อไปนี้

- P0 (80H)** เป็นรีจิสเตอร์สำหรับขั้วเลขที่อยู่พอร์ต 0
- SP (81H)** เป็นรีจิสเตอร์สำหรับชี้หน่วยความจำสแตก (Stack)
- DPL (82H)** เป็นรีจิสเตอร์ 8 บิต ล่างของรีจิสเตอร์ DPTR

DPH (83H)	เป็นรีจิสเตอร์ 8 บิต บนของรีจิสเตอร์ DPTR การใช้รีจิสเตอร์ DPL และ DPH นั้นจะใช้ตัวเลขที่อยู่ ของหน่วยความจำทั้งภายนอกและภายใน โดยการนำรีจิสเตอร์ทั้งสองตัวนี้มาประกอบกันเป็นรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต และใช้ชื่อว่า รีจิสเตอร์ DTPL
PCON (87H)	Power Control Register ใช้หยุดการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์โดยจะหยุดจ่ายสัญญาณนาฬิกาหรือควบคุมการใช้กำลังไฟฟ้าของไมโครคอนโทรลเลอร์
TCON (88H)	Timer/Counter Control Register เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของตัวจับเวลา/ตัวนับ
TMOD (89H)	Timer/Counter Mode Control Register เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้กำหนดแบบวิธี (Mode) การทำงานของตัวจับเวลา/ตัวนับ
TL0, TH0, TL1, TH1 (8AH-8DH)	เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้เก็บค่าที่ตั้งให้กับ ตัวจับเวลา/ตัวนับ 0 และตัวจับเวลาตัวนับ 1
P1 (90H)	เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้ตัวเลขที่อยู่พอร์ต 1
SCON (98H)	Serial Port Control เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของพอร์ตอนุกรม
SBUF (99H)	Serial Port Buffer เป็นรีจิสเตอร์พักข้อมูลที่เข้า/ออกทางพอร์ตอนุกรม
P2 (A0H)	เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้ตัวเลขที่อยู่พอร์ต 2
IE (A8H)	Interrupt Enable เป็นรีจิสเตอร์ที่ต้องเซตเพื่อยอมให้มีการขัดจังหวะ
P3 (B0H)	เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้ตัวเลขที่อยู่พอร์ต 3
IP (B8H)	Interrupt Priority เป็นรีจิสเตอร์สำหรับจัดลำดับความสำคัญของสัญญาณขัดจังหวะ ในกรณีที่เกิดการขัดจังหวะซ้อนกัน
PSW (D0H)	Program Status Word เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้เก็บค่าตัวบ่งชี้ (Flag) ต่างๆ เช่น ตัวบ่งชี้การทด (Carry Flag, Auxiliary Carry Flag) ตัวบ่งชี้ศูนย์ (Zero Flag) ตัวบ่งชี้การล้น (Overflow Flag) บิตภาวะคู่คี่ (Parity Bit) นอกจากนี้ยังมีบิต RS0 และ RS1 สำหรับเลือกแบงก์รีจิสเตอร์
ACC (E0H)	Accumulator เป็นรีจิสเตอร์หลักที่ใช้ในการประมวลข้อมูล
B (F0H)	เป็นรีจิสเตอร์ใช้สำหรับการช่วยการประมวลข้อมูล

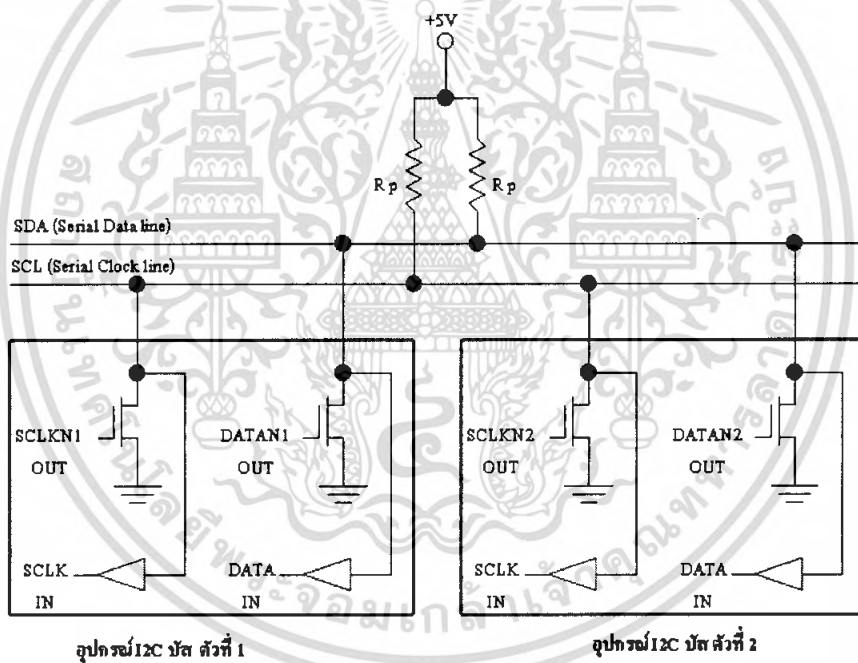
2.11.4 การติดต่อ I²C

I²C ย่อมาจาก Inter – IC Communication หมายถึงการติดต่อระหว่างไอซีโดยบัส I²C ได้รับการพัฒนาขึ้นโดยบริษัทฟิลิปส์ (Philips) ด้วยจุดมุ่งหมายหลักคือ ต้องการให้ IC หรือโมดูลติดต่อ ส่งงานและควบคุมภายใต้สายสัญญาณเพียงสองสัญญาณ คือสายข้อมูล อีกเส้นหนึ่งคือสายสัญญาณนาฬิกาที่ใช้กำหนดจังหวะการทำงาน การต่ออุปกรณ์ร่วมบนบัส I²C ทำได้ง่ายมากเพียงต่อสายข้อมูลและสายสัญญาณนาฬิกาของอุปกรณ์แต่ละตัวขนานหรือต่อพ่วงกันไป ส่วนการกำหนดแอดเดรสหรือตำแหน่งสำหรับอุปกรณ์แต่ละตัว จะ

ใช้รหัสข้อมูลและกำหนดสถานะลอจิกที่ขาแอดแตรงของอุปกรณ์แต่ละตัว สายข้อมูลบนบัส I²C มีชื่อเรียกอย่างเป็นทางการว่า สายข้อมูลอนุกรม หรือ SDA (Serial Data Line) ส่วนสายสัญญาณนาฬิกามีชื่อเรียกว่า สายสัญญาณนาฬิกาอนุกรม หรือ SCL (Serial Clock Line) ในการอธิบายต่อไปนี้จะเรียกสายสัญญาณทั้งสองว่า สาย SDA และ SCL

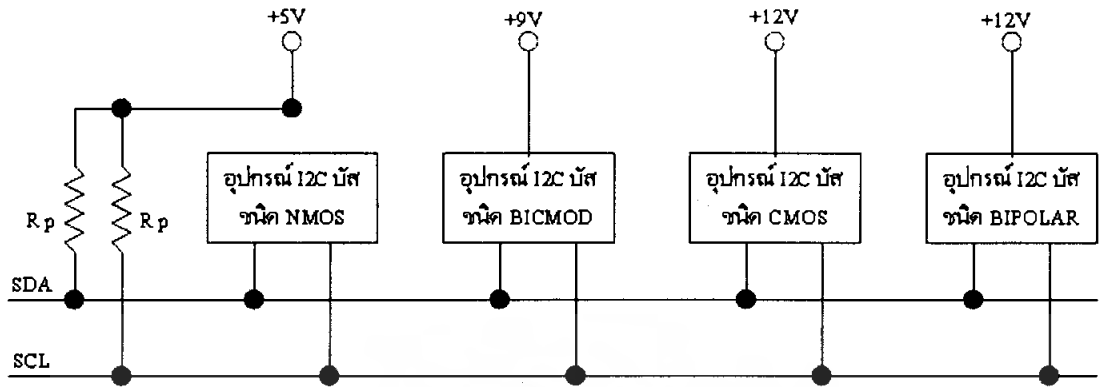
2.11.4.1 คุณสมบัติทั่วไปเกี่ยวกับ I²C

สาย SDA และ SCL เป็นสายสัญญาณ 2 ทิศทาง (Bi-directional line) ต้องมีการต่อตัวต้านทานพูลอัพกับแรงดัน +5V ไว้ตลอดเวลา เพื่อให้สายมีสถานะลอจิกสูงในขณะที่ไม่มีการติดต่อใช้งาน ทั้งยังช่วยในการป้องกัน สัญญาณรบกวนที่อาจมีเข้ามาในสายสัญญาณทั้งสอง วงจรเอาต์พุตของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่บนบัส I²C ต้องมีลักษณะเป็นวงจรทรานซิสเตอร์เปิด (Open-drain) หรือคอลเล็กเตอร์เปิด (open = collector) ดังแสดงรายละเอียด ในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 วงจรเอาต์พุตของอุปกรณ์บนระบบบัส I²C

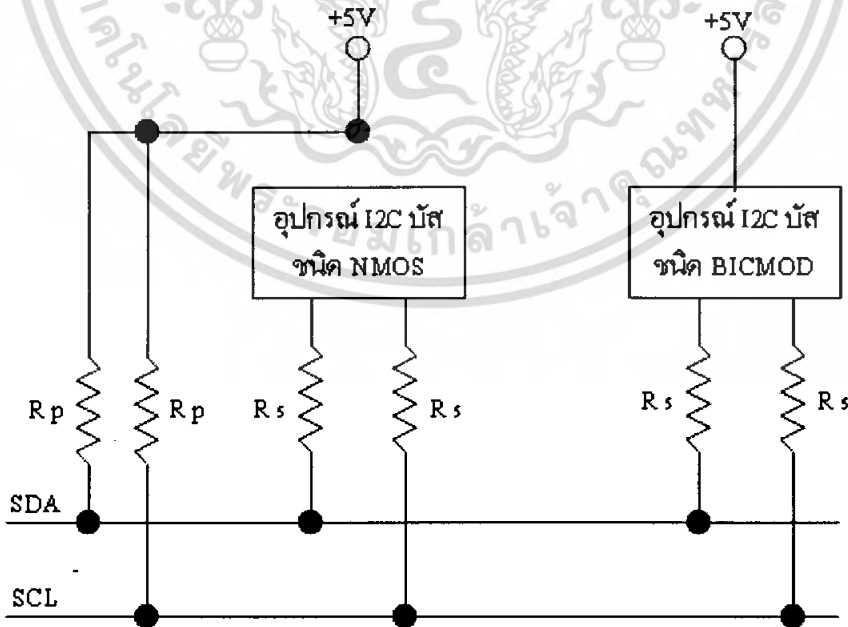
อัตราการถ่ายเทข้อมูลบนบัส I²C สูงถึง 100 kbit/sec ในโหมดปกติ (Standard Mode) และ สูงถึง 400 kbit/sec ในโหมดความเร็วสูง (Flash Mode) อุปกรณ์ที่ต่อร่วมบนบัส I²C จะต้องมีค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างสองสาย SDA และ SCL ไม่เกิน 400 pF การเข้าถึงข้อมูลในบัส I²C ใช้ข้อมูลการเข้าถึง 2 ค่า คือ 7 บิต หรือ 10



รูปที่ 2.30 การต่อพ่วงอุปกรณ์ระบบบัส I²C ที่ใช้ไฟเลี้ยงไม่เท่ากัน

ข้อเด่นอีกประการหนึ่งของบัส I²C คือ สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ ที่ใช้ไฟเลี้ยงไม่เท่ากันให้สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ โดยอุปกรณ์บนบัส I²C ตัวหนึ่งอาจใช้ไฟเลี้ยง +5V ในขณะที่อีกตัวหนึ่งใช้ไฟเลี้ยง +12V การต่อร่วมกันบนบัส I²C สามารถกระทำได้ในลักษณะเดียวกับการกรณิที่อุปกรณ์ทั้งสองใช้ไฟเลี้ยงเท่ากัน กล่าวคือ ให้ต่อสาย SDA และ SCL ของอุปกรณ์แต่ละตัวเข้าด้วยกัน และ ต้องต่อตัวต้านทานพูลอัพ (Rp) เข้ากับแรงดัน +5V ไว้ด้วยเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.30

ในกรณีที่มีแรงดันไฟกระชากขนาดใหญ่ปะปนเข้ามาในบัส I²C ที่ขา SDA และ SCL ของอุปกรณ์แต่ละตัวต้องต่อตัวต้านทานอนุกรมกับขา SDA และ SCL เรียกว่า Rs ก่อนต่อเข้าสู่บัส I²C ดังแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 การต้านทานอนุกรมกับขาสัญญาณของอุปกรณ์บนระบบบัส I²C เพื่อลดสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.4.2 หลักการของบัส I²C

การกำหนดรูปแบบของการติดต่อบนบัส หรือเรียกว่า โพรโตคอล (Protocol) เพื่อให้ผู้ใช้งานทราบว่าขณะนี้อุปกรณ์ติดต่อกันอยู่ และอุปกรณ์ตัวใดเป็นตัวรับตัวส่ง ต่อไปนี้จะอธิบายลักษณะหน้าที่และนิยามของอุปกรณ์ที่อยู่บนบัส I²C เพื่อเป็นข้อตกลงก่อนที่จะอธิบายการทำงานของระบบ I²C ต่อไป

อุปกรณ์ที่สร้างข้อมูลหรือส่งข้อมูล เรียกว่า “ตัวส่ง (Transmitter)”

อุปกรณ์ที่รับข้อมูลเรียกว่า “ตัวรับ (Receiver)” อุปกรณ์บน I²C สามารถเป็นได้ทั้งตัวรับและตัวส่ง บางอุปกรณ์ทำหน้าที่เป็นตัวรับอย่างเดียว

อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมจังหวะการติดต่อ I²C เรียกว่า “มาสเตอร์ (master)”

อุปกรณ์ที่ถูกควบคุมหรืออุปกรณ์ที่ต่อพ่วงไปบนบัส I²C เรียกว่า “สเลฟ (slave)”

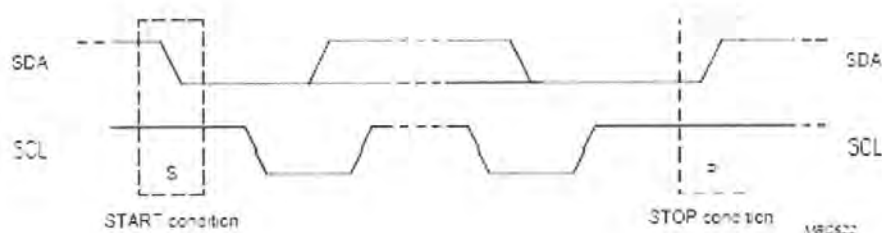
ข้อกำหนด 2 ประการสำคัญสำหรับ I²C คือ

- 1). การถ่ายทอดข้อมูลเกิดขึ้นได้เมื่อบัสว่างเท่านั้น
- 2). ในระหว่างการถ่ายทอดข้อมูล เมื่อใดก็ตามที่สาย SCL มีสถานะเป็นลอจิกสูง สายข้อมูลต้องรักษาข้อมูลไว้อย่าให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นเด็ดขาด

2.11.4.3 สถานะที่เกิดบนบัส I²C

มีด้วยกัน 5 สถานะ

1. บัสว่าง (Bus not busy) สถานะนี้เกิดขึ้นเมื่อสถานะลอจิกสูงทั้งคู่ นั่นหมายความว่าบัสการถ่ายทอดข้อมูลเริ่มขึ้นได้
2. เริ่มต้นการถ่ายข้อมูล (start data transfer) เกิดขึ้นเมื่อสาย SDA มีการเปลี่ยนแปลงระดับลอจิกจากสูงไปต่ำในขณะที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง เรียกสถานะนี้ว่า สถานะเริ่มต้น (Start)
3. หยุดการถ่ายทอดข้อมูล (stop data transfer) เกิดขึ้นเมื่อสาย SDA มีการเปลี่ยนแปลงจากลอจิกต่ำไปสูงในขณะที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง เรียกสถานะนี้ว่า สถานะหยุด (Stop)
4. การดำรงอยู่บนบัส I²C (data valid) สถานะนี้เกิดถัดจากสถานะเริ่มต้นโดยสถานะจะเกิดลอจิกขึ้นที่สาย SDA คือข้อมูลที่ต้องการถ่ายทอด เมื่อสาย SCL เป็นลอจิกสถานะสาย SDA ต้องคงที่เพื่อให้อุปกรณ์นั้นรับรู้ข้อมูล ข้อมูลอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ในขณะที่สาย SDA เป็นลอจิกต่ำ หากเกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างขณะที่สาย SCL เป็นลอจิกสูงอยู่ อุปกรณ์มาสเตอร์ที่ทำหน้าที่ควบคุมการถ่ายข้อมูลอาจแปลความหมายเป็น สถานะหยุด หรือ สถานะเริ่มได้
5. การรับรู้ข้อมูล (acknowledge) เกิดขึ้นหลังจากการที่ถ่ายทอดข้อมูลจากตัวส่งมายังตัวรับเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์โดยจะทำการส่งข้อมูลมา 1 บิต เรียกว่าบิตรับรู้ (acknowledge bit) มีสถานะเป็นลอจิกสูงหลังจากส่งข้อมูลมาครบถ้วน



รูปที่ 2.32 แสดงสถานะเริ่มต้นและสถานะหยุด



รูปที่ 2.33 ไคอะแกรมแสดงสถานะต่างๆ บนระบบบัส I²C

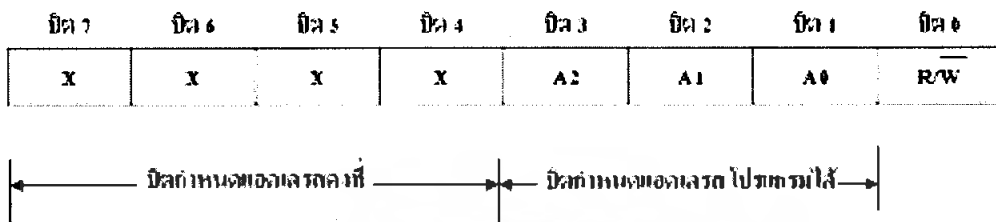
ในรูปที่ 2.33 เป็นไคอะแกรมเวลาที่แสดงถึงการเกิดสถานะต่างๆ บนบัส I²C ไม่ว่าจะเป็นสถานะบัสว่าง, เริ่มต้น, ถ่ายทอข้อมูล, รับรู้ และหยุดการถ่ายทอข้อมูล

2.11.4.4 การทำงานของบัส I²C

ก่อนที่จะเริ่มต้นการถ่ายทอข้อมูลทั้งหมดระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ที่ติดต่อกับบัสต้องมีการอ้างถึงเสียก่อน โดยการอ้างถึงอุปกรณ์บนบัส I²C นั้น จะใช้การอ้างถึงแบบ 7 บิต และ 10 บิต ในกรณีที่มิอุปกรณ์อยู่บนบัสไม่มากใช้อ้างถึงแบบ 7 บิตก็เพียงพอต่อเมื่อมีอุปกรณ์มากกว่า 127 แอดแดรส จะใช้อ้างถึงแบบ 10 บิต หลังจากติดต่ออุปกรณ์แต่ละตัวได้เรียบร้อยแล้ว ก็เริ่มการถ่ายทอข้อมูลต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น หัวใจสำคัญในอันดับแรกของการทำงานบนบัส I²C คือการอ้างถึงอุปกรณ์แต่ละตัว ต่อ ไปนี้จะอธิบายรายละเอียดของการอ้างถึงทั้ง 2 รูปแบบ



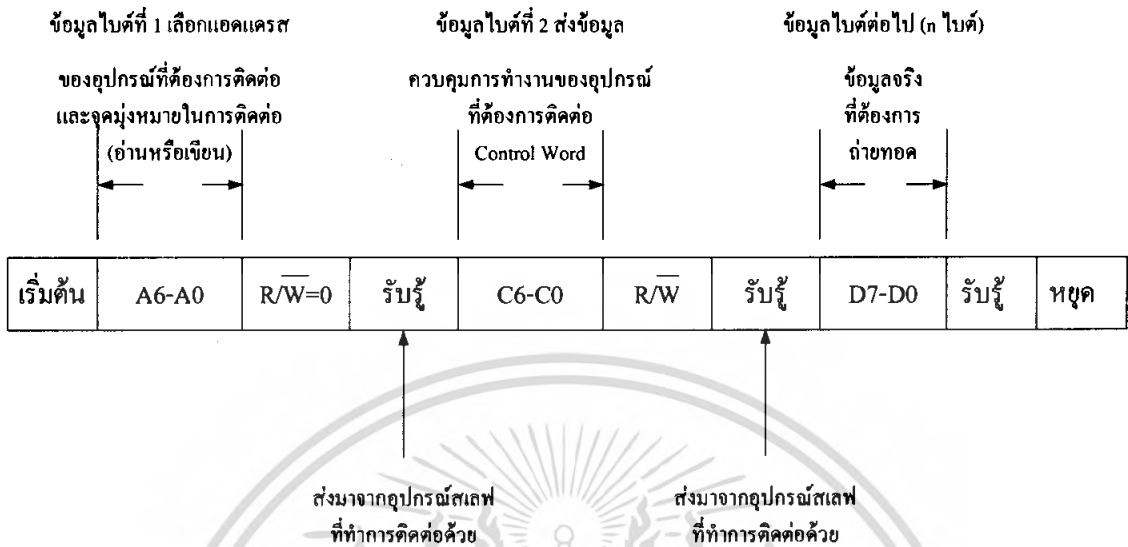
รูปที่ 2.34 รูปแบบของข้อมูลกำหนดแอดเดรสของอุปกรณ์บนระบบบัส I²C

การอ้างถึงข้อมูลแบบ 7 บิต (7-bit addressing)

ข้อมูลไบต์แรกที่เกิดขึ้นหลังสภาวะข้อมูลที่เกิดขึ้น คือข้อมูลที่ใช้อุปกรณ์ที่ต้องการติดต่อหรือข้อมูลแอดเดรส โดยมีรูปแบบแสดงในรูปที่ 2.34 ใน 7 บิตรวมทั้ง 7 บิต MSB ด้วยข้อมูลแอดเดรสของอุปกรณ์สเลฟที่ติดต่อ โดยแบ่งเป็น บิตที่กำหนดแอดเดรสคงที่ (Fixed address bit) จำนวน 4 บิตซึ่งข้อมูลนี้ อุปกรณ์แต่ละตัวจะถูกกำหนดมาจากผู้ผลิต ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้ ถัดมาอีก 3 บิตเป็นบิตกำหนดแอดเดรสที่สามารถโปรแกรมได้ (Programmable Address Bit) โดยผู้ใช้งานต้องกำหนดสถานะแอดเดรสที่สามารถโปรแกรมได้ (Programmable address bit) โดยผู้ใช้งานต้องกำหนดสถานะลอจิกให้แก่ขา A₀-A₂ ของอุปกรณ์ที่มีการเชื่อมต่อแบบบัส I²C ส่วนในบิต LSB เป็นบิตที่ใช้กำหนดการอ่านหรือเขียนข้อมูลยังอุปกรณ์ สเลฟตัว นั้นๆ หากบิต LSB เป็น “0” หมายถึงต้องการเขียนข้อมูลไปยังอุปกรณ์นั้น ถ้าเป็น “1” จะเป็นการอ่านข้อมูลจากอุปกรณ์สเลฟ

ข้อมูลในไบต์ต่อมาคือ ข้อมูลควบคุม (Control Byte) ในอุปกรณ์แต่ละตัวมีการกำหนดข้อมูลควบคุมที่แตกต่างกันไป ยกตัวอย่างไอซีชยพอร์ดมีข้อมูลควบคุมที่ใช้กำหนดว่า บิตใดเป็นอินพุต บิตใดเป็นเอาต์พุต ในขณะที่ไอซี ADC/DAC ต้องการข้อมูลควบคุม เพื่อกำหนดให้ทำงานเป็นวงจร ADC หรือ DAC เป็นต้น

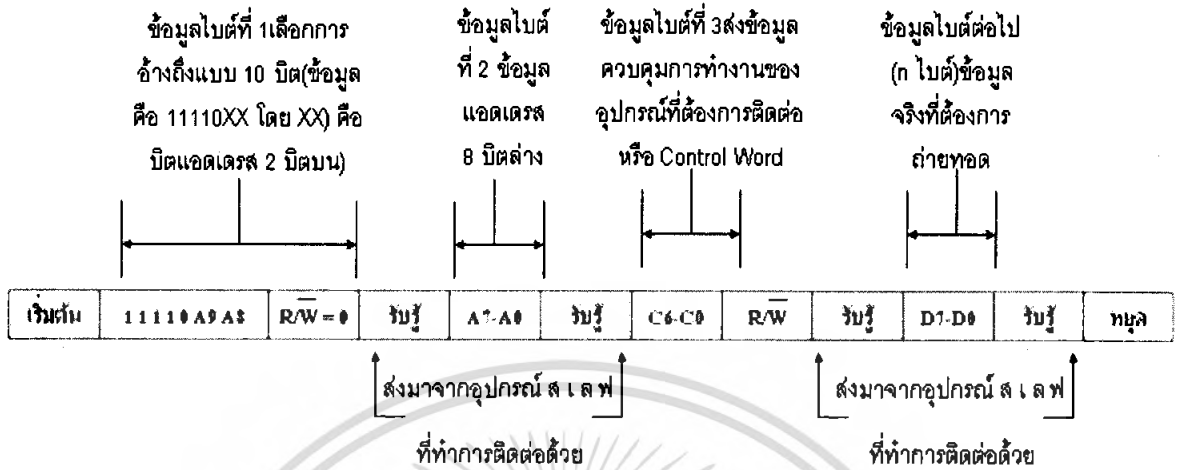
ข้อมูลในไบต์ต่อมา คือ ข้อมูลที่ทำการถ่ายทอดจริง (Data) หลังจากที่มีการถ่ายทอดข้อมูลในแต่ละไบต์ อุปกรณ์สเลฟที่ได้รับการติดต่อต้องส่งสัญญาณ รับรู้ตอบกลับมาด้วยทุกครั้ง เพื่อให้กระบวนการถ่ายทอดข้อมูลยังคงสามารถดำเนินต่อไปได้ ในรูป ที่ 2.35 แสดงรูปแบบข้อมูลอนุกรมที่เกิดขึ้นในการติดต่อบนบัส I²C ของการอ้างถึงแบบ 7 บิต



รูปที่ 2.35 รูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการอ้างถึงแบบ 7 บิต ของระบบบัส I²C

ในการอ้างถึงแบบ 10 บิต (10-bit addressing)

ในการอ้างถึงแบบนี้ ยังคงใช้รูปแบบข้อมูลอนุกรมที่เหมือนกับแบบ 7 บิต หากแต่จะมีข้อมูลเพิ่มเติมขึ้นมาเล็กน้อย โดยในข้อมูลไบต์แรกหลังจากเกิดสภาวะเริ่มต้น ต้องกำหนดให้ 5 บิต บนมีข้อมูลเป็น 11110 ส่วนอีก 2 บิต ถัดมาเป็นบิตแอดเดรส ของอุปกรณ์ที่ต้องการติดต่อ ในบิต LSB ของข้อมูลไบต์แรกยังคงเป็นการกำหนดว่า ต้องการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับอุปกรณ์สเลฟตัวที่ต้องการติดต่อด้วย ข้อมูลไบต์ต่อมาเป็นข้อมูลแอดเดรสในไบต์ที่ 2 ของอุปกรณ์ที่ต้องการติดต่อด้วย ข้อมูล ไบต์ถัดไปจึงเป็นข้อมูลควบคุม ข้อมูล หลังจากนั้นก็จะจะเป็นข้อมูลจริงที่ใช้ในการติดต่อ



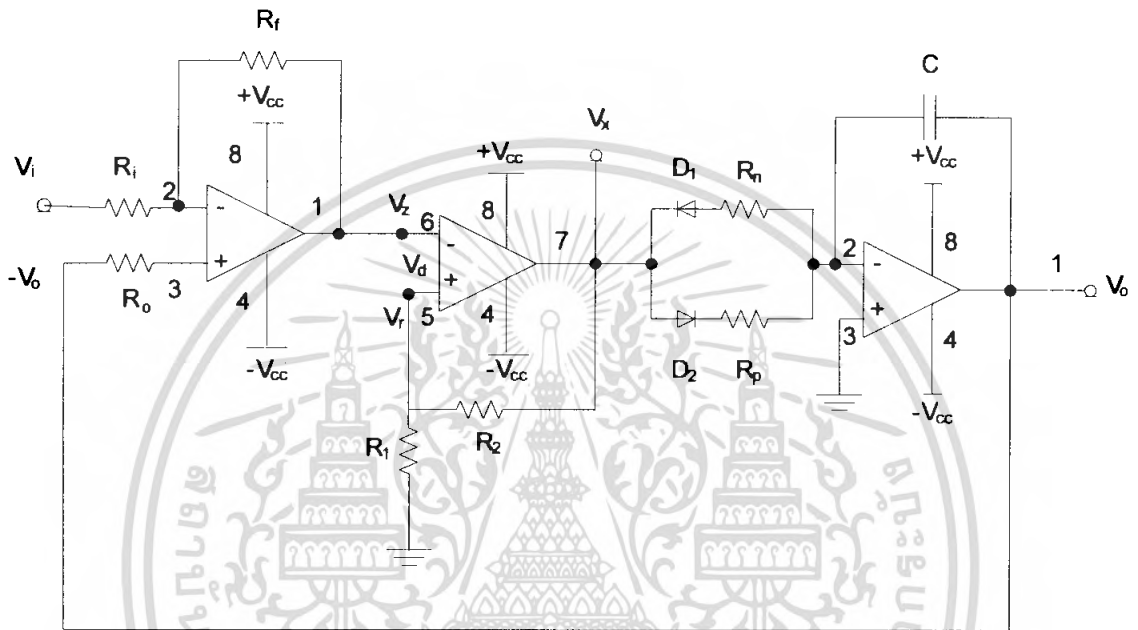
รูปที่ 2.36 รูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการอ้างถึงแบบ 10 บิต ของระบบบัส I²C

เช่นเดียวกับการอ้างถึงแบบ 7 บิต หลังจากถ่ายทอดข้อมูลครบทุกไบต์ ต้องมีสภาวะรับรู้เกิดขึ้น เพื่อให้กระบวนการถ่ายทอดข้อมูลสามารถดำเนินต่อไปได้ ในรูปที่ 2.36 แสดงรูปแบบข้อมูลอนุกรมของการอ้างถึงแบบ 10 บิต

บทที่ 3

การคำนวณและการสร้าง

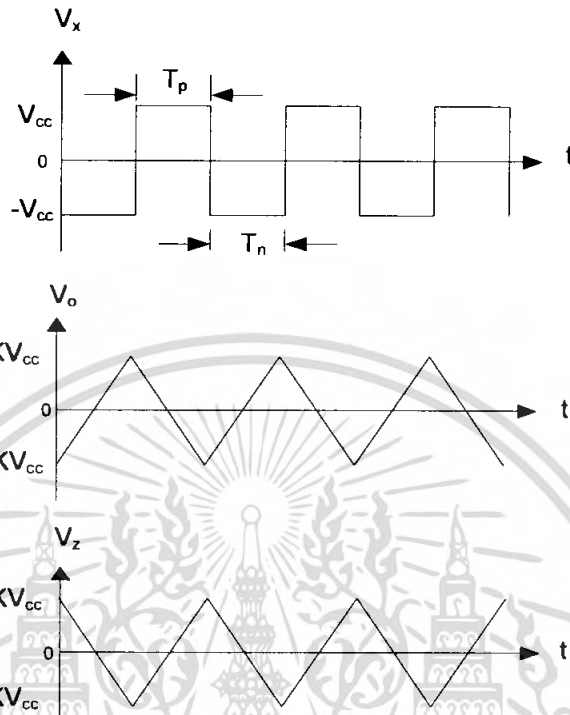
3.1 วงจรเคลตา-มอดูเลชัน (Delta Modulation)



รูปที่ 3.1 วงจรเคลตา-มอดูเลชัน

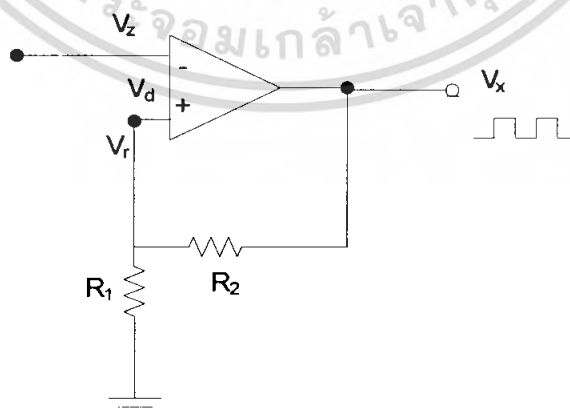
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของวงจรเราสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนระดับแรงดันในแต่ละส่วนของวงจร

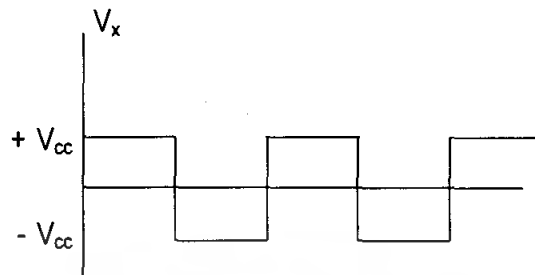
พิจารณาส่วนของวงจร Schmitttrigger comparator



รูปที่ 3.3 วงจร Schmitttrigger comparator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติ ให้ V_x มีค่าเป็นบวก จาก $V_r - V_z = V_d$ เมื่อ $V_r - V_z \geq 0$



รูปที่ 3.4 รูปสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ได้

จะได้ V_d มีค่าบวก จึงทำให้ V_x มีค่าเป็นบวก ซึ่งค่า V_x จะอิมพัลส์อยู่ที่ $+V_{cc}$ เมื่อ V_{cc} คือไฟที่ใช้เลี้ยงวงจร

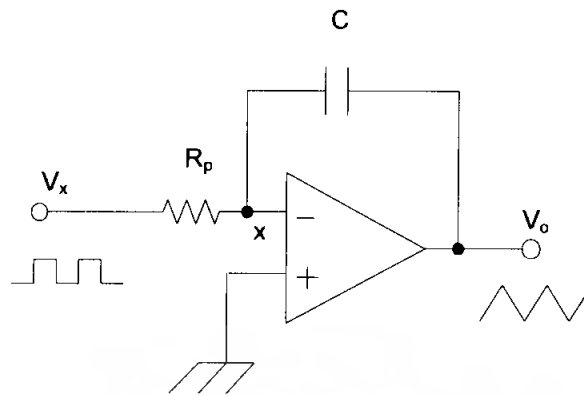
จากหลักการ Voltage Divider เราหาค่า V_r ได้เป็น

$$V_r = \frac{V_x R_1}{R_1 + R_2} \quad \text{ให้} \quad K = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

จะได้ $V_r = KV_x$

$V_x = V_{cc}$ จะได้ $V_r = KV_{cc}$

เมื่อ V_x เป็นบวกจะทำให้ ไดโอด D_2 ทำงาน มีกระแสไหลผ่าน R_p เข้าไปยังส่วนวงจรอินทิเกรเตอร์แบบกลับเฟส



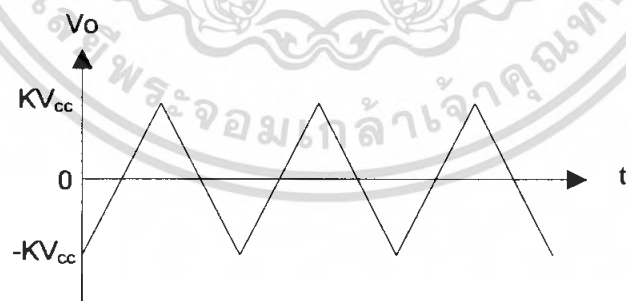
รูปที่ 3.5 วงจรอินทิเกรเตอร์

พิจารณาที่ Node x

$$i_r + i_c = 0$$

$$\frac{V_x}{R_p} + C \frac{dV_c}{dt} = 0, \quad \frac{0 - V_x}{R_p} = \frac{C(V_o - 0)}{dt}$$

$$V_o = -\frac{1}{CR_p} \int_0^{T_p} V_x dt$$



รูปที่ 3.6 กราฟสัญญาณสามเหลี่ยม

จากกราฟได้ช่วงการอินทิเกรต คือ จาก KV_{cc} ถึง $-KV_{cc}$ สำหรับ V_o และ ใช้ช่วงอินทิเกรต จาก 0 ถึง T_p ในส่วนของคาบเวลา

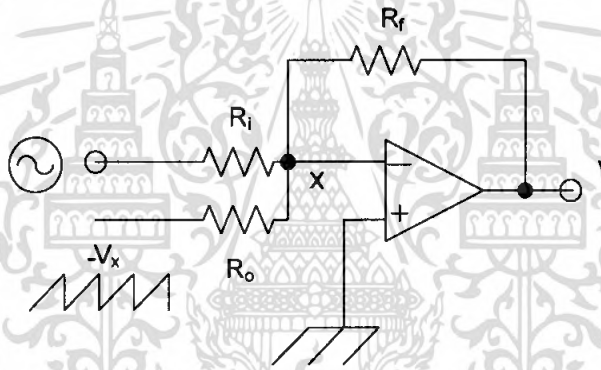
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{-KV_{cc}}{KV_{cc}} = -\frac{1}{CR_p} \int_0^{T_p} V_x dt \quad , \quad \text{เมื่อ } V_x = V_{cc}$$

$$V_o \Big|_{KV_{cc}} = -\frac{V_{cc}}{CR_p} t \Big|_0^{T_p}$$

จากการพิจารณาเมื่อ V_x มีค่าเป็น บวก ได้ช่วงคาบเวลา T_p

และเมื่อเราได้ V_o ที่ออกจากวงจรถอนทีเกรเตอร์ แล้วสัญญาณจะผ่านเข้าไปยังวงจรรขยายสัญญาณผลรวม (Voltage Summing Amplifier)



รูปที่ 3.7 วงจรรขยายสัญญาณผลรวม

พิจารณา Node x

$$i_{R_i} + i_{R_o} + i_{R_f} = 0$$

$$\frac{V_{in}}{R_i} + \frac{-V_o}{R_o} + \frac{V_z}{R_f} = 0$$

$$\frac{V_z}{R_f} = -\left(\frac{V_{in}}{R_i} + \frac{-V_o}{R_o}\right) \quad , \quad \text{ให้ } R_i=R_o=R$$

$$V_z = -\frac{R_f}{R}(V_{in} - V_o)$$

(3.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

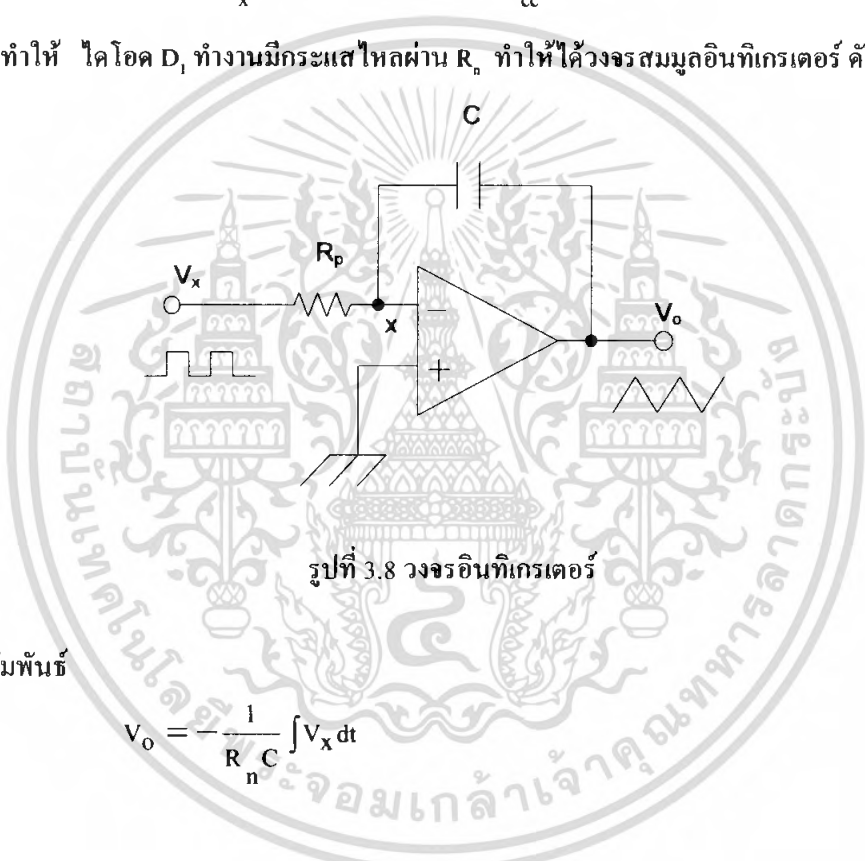
เมื่อ V_o มีค่ามากกว่า V_{in} จะได้ V_z เป็นบวก

ขณะที่ V_z มีค่าเป็นบวก จนกระทั่งถึง $+KV_{cc}$ จะทำให้ได้ค่า V_d มีค่าเป็นลบ

เมื่อ
$$K = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

เมื่อ V_d มีค่าเป็นลบ ได้ค่า V_x อิ่มตัว (saturate) ที่ $-V_{cc}$

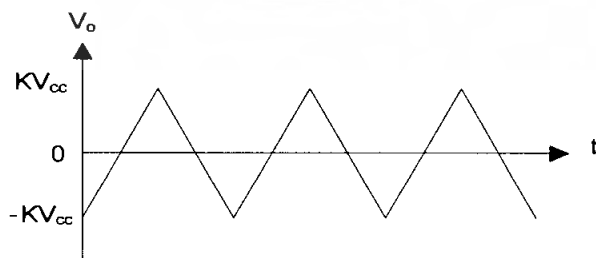
$V_x = -V_{cc}$ ทำให้ ไดโอด D_1 ทำงานมีกระแสไหลผ่าน R_n ทำให้ได้วงจรสมมูลอินทิเกรเตอร์ ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรอินทิเกรเตอร์

จากความสัมพันธ์

$$V_o = -\frac{1}{R_n C} \int V_x dt$$



รูปที่ 3.9 กราฟสัญญาณสามเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์รูปที่ 1 เราจะได้ช่วงการอินทิเกรต จาก $-KV_{cc}$ ถึง KV_{cc} สำหรับค่า V_o เมื่อพิจารณา V_x ในช่วงที่เป็น ลบ และได้ช่วงการอินทิเกรต จาก 0 ถึง T_n ในส่วนของคาบเวลา

เมื่อแทน $V_x = -V_{cc}$ ได้

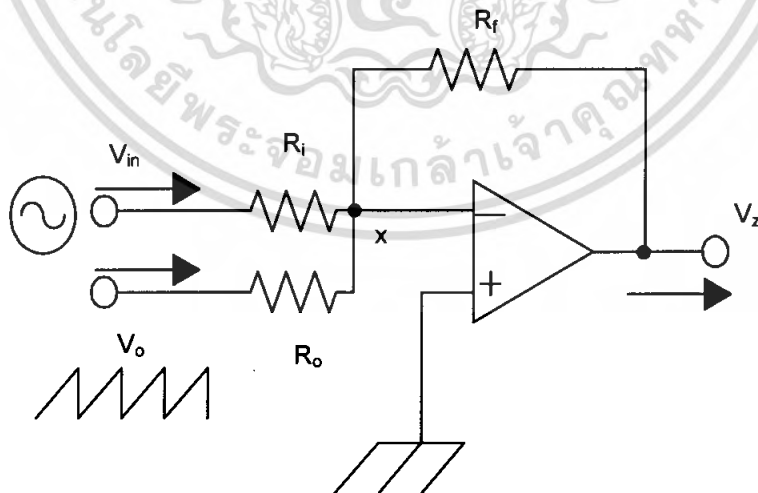
$$V_o = \frac{1}{R_n C} \int_0^{T_n} V_{cc} dt$$

$$\int_{-KV_{cc}}^{KV_{cc}} dV_o = \frac{1}{R_n C} \int_0^{T_n} V_{cc} dt$$

$$V_o \Big|_{-KV_{cc}}^{KV_{cc}} = \frac{V_{cc}}{R_n C} t \Big|_0^{T_n}$$

เมื่อให้ $V_x = -V_{cc}$ จากสมการจะได้ช่วงคาบเวลา T_n
หลังจากนั้นสัญญาณ V_o จะผ่านเข้าสู่วงจรขยายสัญญาณผลรวม (Voltage Summing Amplifier)

$$V_o = \frac{V_{cc} T_n}{R_n C}$$



รูปที่ 3.10 วงจรขยายสัญญาณผลรวม

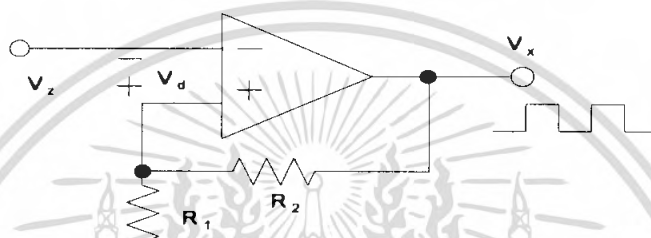
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์

$$V_z = -\frac{R_f}{R}(V_{in} + V_0) \tag{3.2}$$

เมื่อ V_0 มีค่าเป็น บวก จึงทำให้ได้ค่า V_z มีค่าเป็น ลบ

ได้ค่า V_z เป็น ลบ แล้วสัญญาณจะผ่านเข้าสู่วงจร Schmitttrigger Comparator

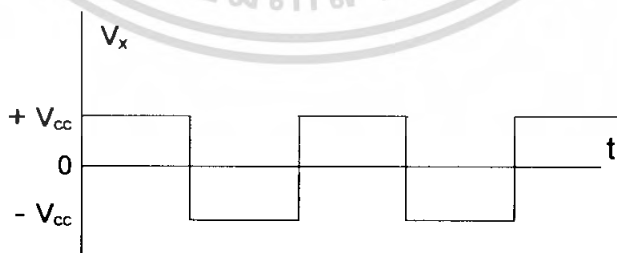


รูปที่ 3.11 วงจรSchmitttrigger comparator

ค่า V_z ที่เป็น ลบ ทำให้ได้ค่า V_d มีค่าเป็นบวก จาก $V_d = V_r - V_z$

แทนค่า V_z , $V_d = V_r - (-V_z) = V_r + V_z$

จะเห็นว่าค่า V_d ที่ได้มีค่าเป็นบวก จึงทำให้ ค่า V_x เกิดอิมพัลส์ ที่ $+V_{cc}$



รูปที่ 3.12 รูปสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ได้

สำหรับการทำงานของวงจร Delta Modulation ที่สำคัญใน 1รอบ ก็มีเพียงเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่า Duty circle ของวงจร

จาก

$$\text{Duty circle} = \frac{T_p}{T} = D$$

เมื่อ $T = T_p + T_n$

$$D = \frac{T_p}{T_p + T_n} \quad (3.3)$$

ก่อนอื่นเราจะต้องทำการหาค่า T_p กับ T_n

การหาช่วงคาบเวลา T_n

จากวงจรเราพิจารณา ส่วนของวงจรอินทิเกรเตอร์ เมื่อเราให้ $V_x = V_{cc}$ แล้วจะได้

$$V_o \Big|_{KV_{cc}} = -\frac{1}{R_p C} \int_0^{T_p} V_{cc} dt$$

และเมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณผลรวม พิจารณาค่า V_z จะขึ้นอยู่กับค่า V_o และ V_{in} โดยที่ค่า V_z จะมีค่าอยู่ระหว่าง V_{cc} กับ $-V_{cc}$ ดังนี้

$$V_z = -\frac{R_f}{R} (V_o - V_{in})$$

ให้ $\frac{R_f}{R} = 1$

ได้ $V_z = (V_o - V_{in}) \frac{-KV_{cc}}{KV_{cc}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า $V_z = KV_{cc}$ เมื่อ $V_{in} = 0$ แต่ในกรณีที่ V_{in} ไม่เท่ากับ 0 เราจะได้ $V_z = KV_{cc} - V_{in}$ แล้วนำสมการที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์กับค่า V_o ที่ออกจากวงจรถอนิเกรเตอร์ได้

$$-\left(\begin{array}{c} KV_{cc} - V_{in} \\ \int dV_o + V_{in} \\ -KV_{cc} - V_{in} \end{array} \right) = -\frac{V_{cc}}{CR_p} T_p$$

$$2KV_{cc} + V_{in} = \frac{V_{cc}}{CR_p} T_p$$

$$T_p = \frac{CR_p (2KV_{cc} + V_{in})}{V_{cc}}$$

ให้ $\frac{CR_p}{V_{cc}} = K_o$

ได้ $T_p = K_o (2KV_{cc} + V_{in})$ (3.4)

หาช่วงคาบเวลา T_n

พิจารณาให้ $V_x = -V_{cc}$ ผ่านวงจรถอนิเกรเตอร์ได้

$$V_o = \left| \begin{array}{c} KV_{cc} \\ -KV_{cc} \end{array} \right| = -\frac{(-V_{cc})}{R_n C} \int_0^{T_n} dt$$

จากวงจรถายสัญญาณผลรวม พิจารณา V_{in} ไม่เป็น 0

$$V_z = (V_o + V_{in}) \left| \begin{array}{c} KV_{cc} \\ -KV_{cc} \end{array} \right|$$

$$-\left(\begin{array}{c} -KV_{cc} - V_{in} \\ \int dV_o + V_{in} \\ KV_{cc} - V_{in} \end{array} \right) = \frac{V_{cc} T_n}{CR_n}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_p = \frac{CR_n(2KV_{cc} - V_{in})}{V_{cc}}$$

ได้ $T_n = K_o(2KV_{cc} - V_{in})$

ห1 Duty circle

$$\text{Duty circle (D)} = \frac{T_p}{T}$$

เมื่อ $T = T_p + T_n$

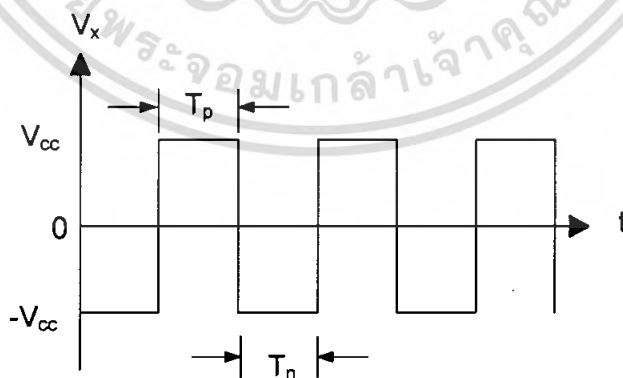
$$T = T_p + T_n = K_o(2KV_{cc} + V_{in}) + K_o(2KV_{cc} - V_{in})$$

$$T = 4K_oKV_{cc}$$

$$D = \frac{T_p}{T} = \frac{K_o(2KV_{cc} + V_{in})}{4K_oKV_{cc}} = \frac{1}{2} + \frac{V_{in}}{4KV_{cc}}$$

จากสมการความสัมพันธ์ที่ได้ทำให้รู้ว่าค่า Duty circle ของวงจรจะขึ้นกับสัญญาณ V_{in} ที่ป้อนเข้าไปเมื่อ $V_{in} = 0$

จะได้ $T_p = T_n$ แล้วจะทำให้ได้ค่า Duty circle เป็น 50%

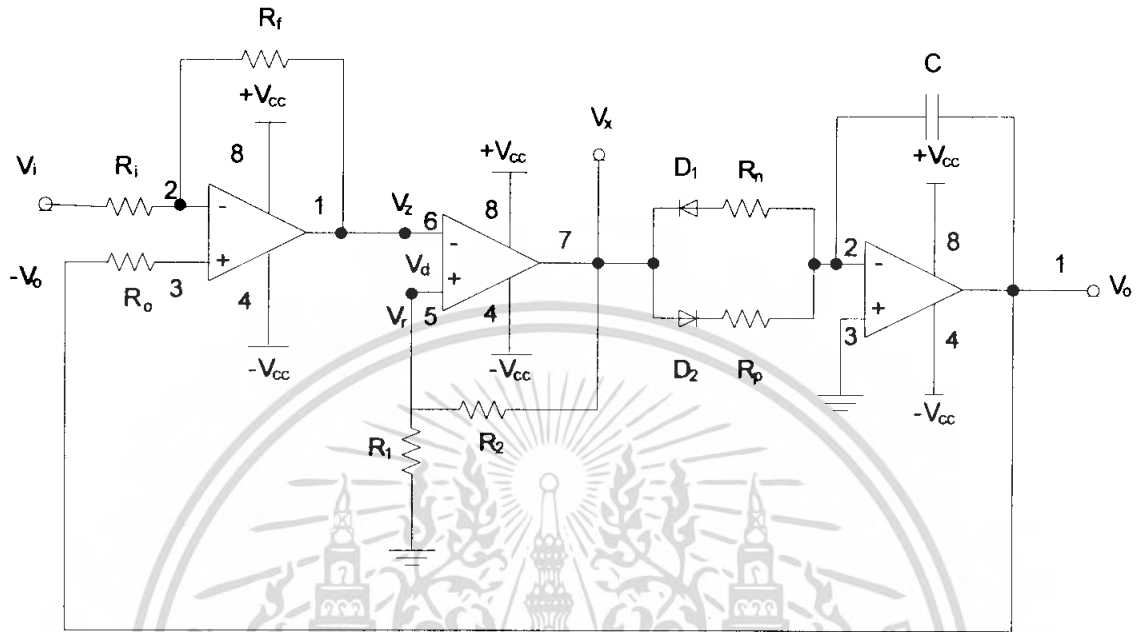


รูปที่ 3.13 กราฟแสดง Duty circle 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

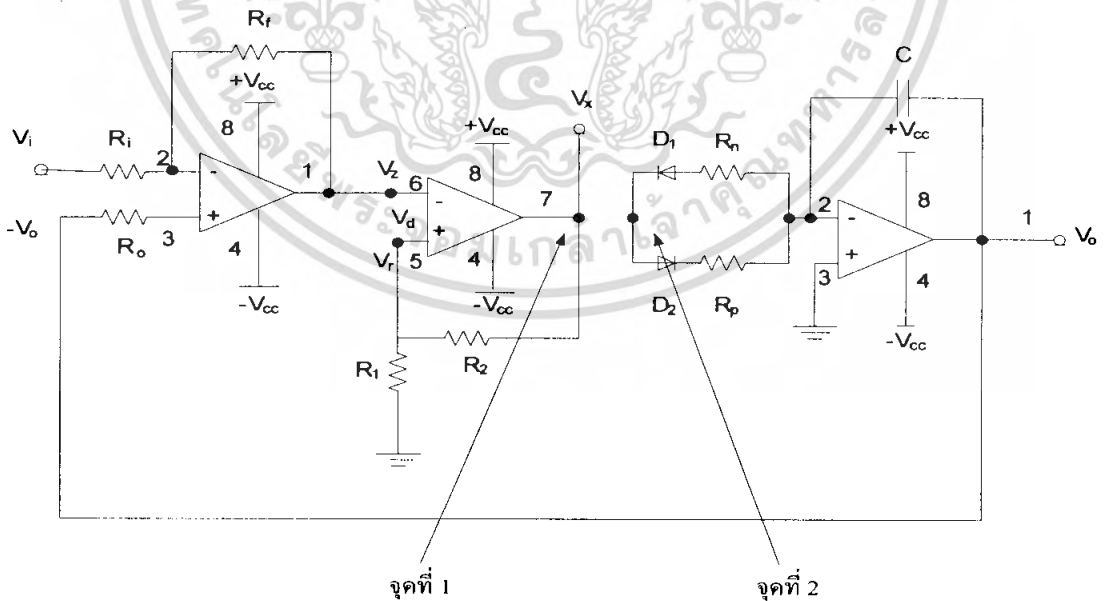
3.2 Close loop

จากวงจร Delta modulation



รูปที่ 3.14 วงจร Delta Modulation

เมื่อเรานำวงจรมาใช้เป็นวงจร Close loop ใน Delta Modulation Power Amplifier เราจะต้องทำการตัดวงจรระหว่าง วงจรขมิตริกเกอร์คอมพาราเตอร์ กับวงจรอินทิเกรเตอร์ ออกจากกัน

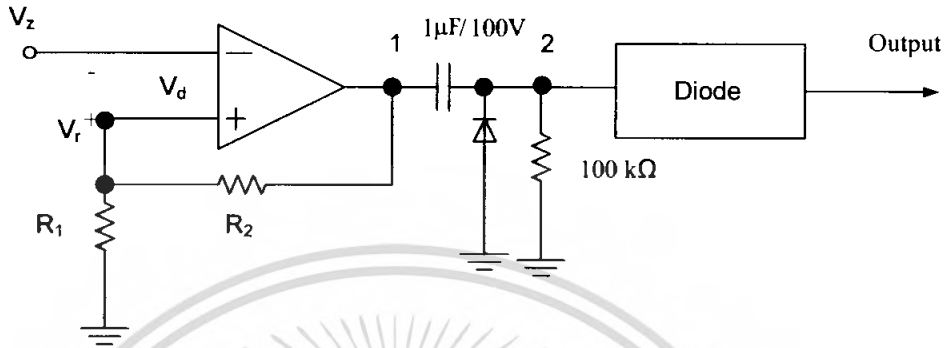


รูปที่ 3.15 วงจร Delta Modulation 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

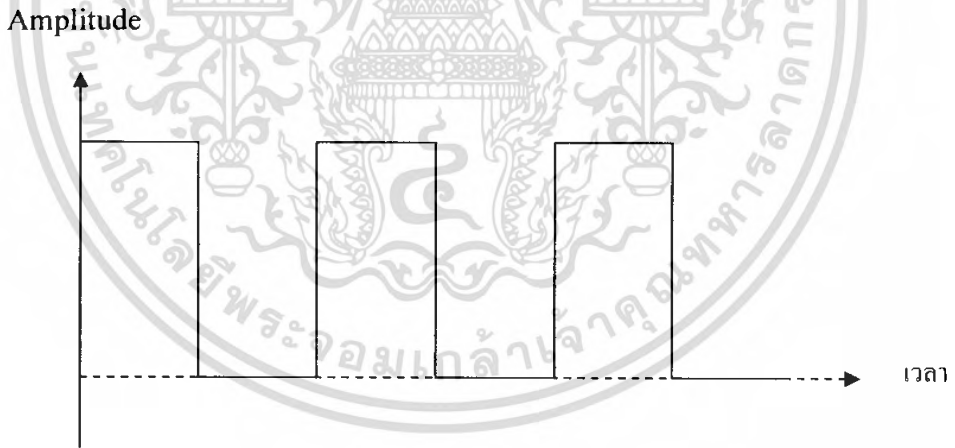
นำสัญญาณจากจุดที่ 1 (out put) ไปเข้ากับวงจรยกระดับสัญญาณเพื่อเข้าไปยังส่วนไดร์เวอร์

วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ



รูปที่ 3.16 วงจรสมิททริกเกอร์คอมพาราเตอร์ที่ต่อกับวงจรยกระดับสัญญาณ

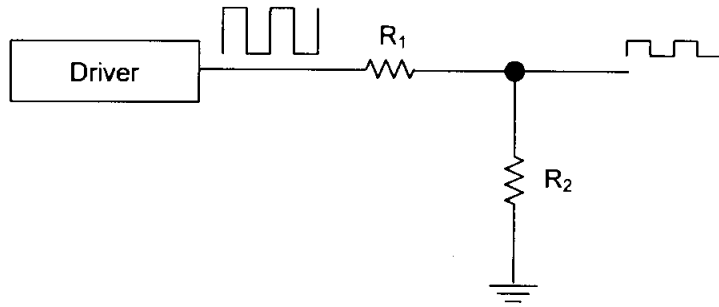
จากนั้นเราจะนำสัญญาณที่ออกจากไดร์เวอร์ ที่ยังไม่ผ่าน วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งจะมีลักษณะเป็นสัญญาณ สี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.17 รูปสัญญาณที่ออกมาจากวงจรไดร์เวอร์

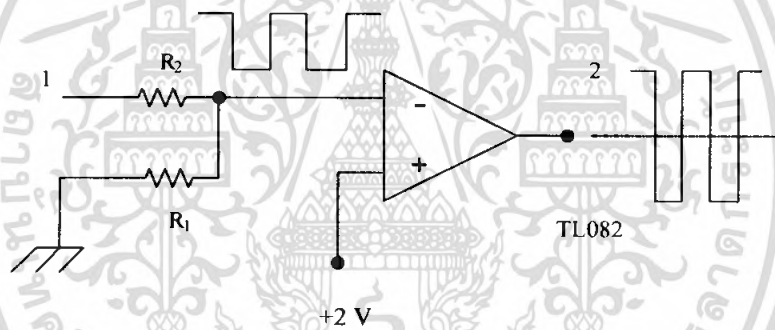
นำสัญญาณที่ออกจากส่วนไดร์เวอร์มาลดทอนขนาดของสัญญาณ เพราะสัญญาณที่ออกมานั้นจะมีขนาด จาก 0 ถึง ไฟที่ป้อนให้กับภาคขับ โดยเราจะใช้วงจรลดทอนสัญญาณลงให้เหลือขนาดของสัญญาณ ประมาณ 4 โวลต์ โดยใช้วงจร Voltage Divider

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



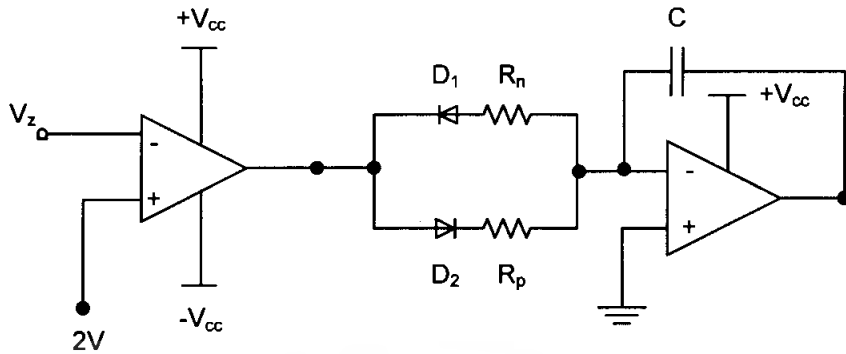
รูปที่ 3.18 รูปวงจรลดทอนสัญญาณ

หลังจากนั้นนำสัญญาณที่ถูกลดทอนผ่านเข้าวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ เพื่อให้ได้สัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีทั้งไฟบวกและไฟลบ เพราะสัญญาณที่ออกมานั้นจะ Saturate อยู่ที่ไปเลี้ยง Op-Amp



รูปที่ 3.19 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

จากนั้นเรานำสัญญาณที่ออกจากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณมาต่อเข้ากับวงจรอินทิเกรเตอร์ ของวงจร Delta Modulation ที่ถูกตัดออกไป



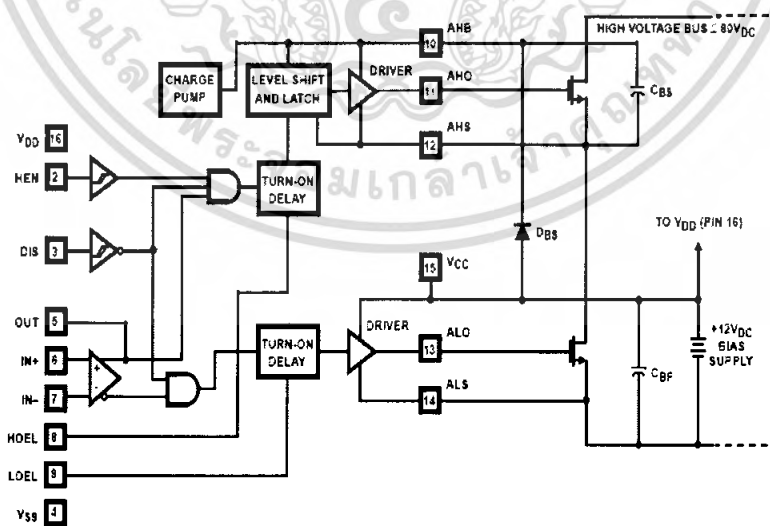
รูปที่ 3.20 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณเมื่อต่อเข้ากับวงจรอินทิเกรเตอร์

สำหรับการทำ Delta modulation Power Amplifier แบบ Close loop ก็มีหลักการที่สำคัญอยู่เพียงเท่านั้น

ส่วนไดรเวอร์ (Driver)

ใช้ IC สำเร็จรูปเบอร์ HIP4080 มาใช้ในภาครับสัญญาณโดยที่ HIP4080 จะทำหน้าที่จัดระดับของสัญญาณที่ออกมาจากส่วนวงจร Modulation เพื่อให้ในการ on-off เฟต

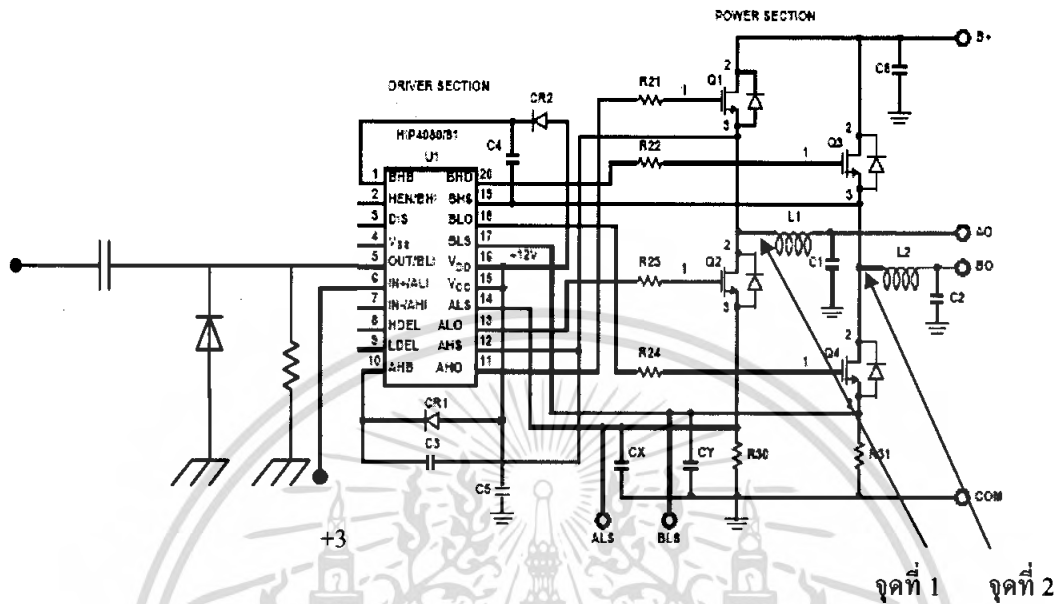
Block diagram HIP4080



รูปที่ 3.21 Block diagram HIP4080

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่ออกจากวงจรระดับสัญญาณจะเข้ามาที่ขา 6 ของ IC

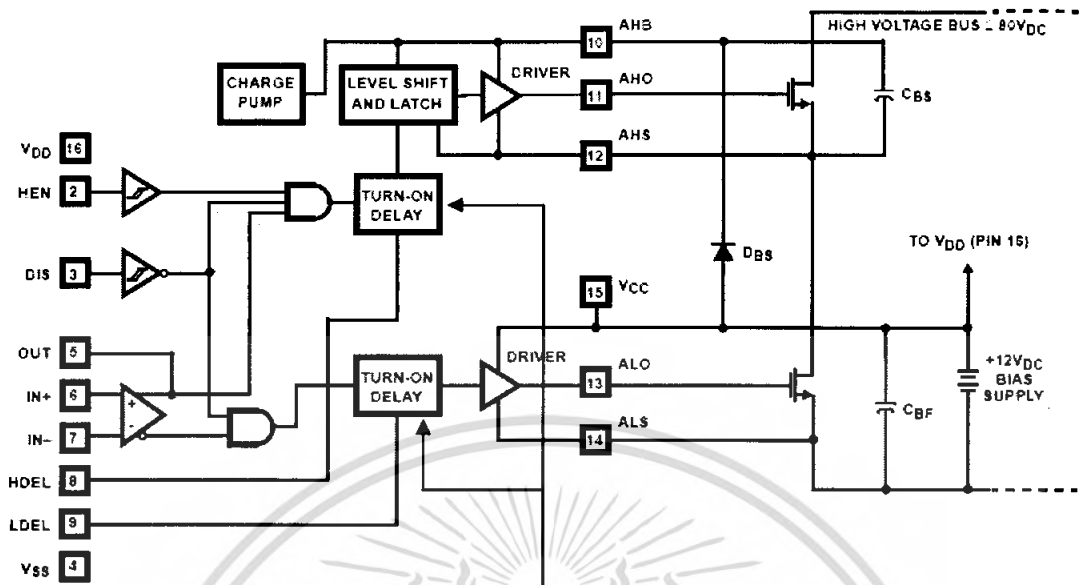


รูปที่ 3.22 การต่อสัญญาณเข้าขา 6 และขา 7

และป้อนไฟตรงขนาด +3 V เข้าไปที่ขา 7 ของ IC เพื่อใช้ปรับระดับสัญญาณเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต จากนั้นสัญญาณที่ออกจากการเปรียบเทียบก็จะเข้าไปยังวงจร ดีเลย์ เพื่อทำการหน่วงเวลาของสัญญาณ หลังจากสัญญาณถูกดีเลย์แล้วก็จะมาเข้าวงจรระดับสัญญาณ (Level Shift)

วงจร Level Shift นั้นเนื่องจากแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลนั้น ไม่สามารถทำงานได้ในช่วงลบของสัญญาณอนาลอกได้ ดังนั้นจึงมีการเพิ่มในส่วนของวงจรจัดระดับสัญญาณขึ้นก่อนที่จะป้อนให้กับวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล เป็นการแก้ไขข้อผิดพลาดของระบบพีซีเอ็ม โดยที่นำส่วนของวงจรจัดระดับสัญญาณเพิ่มเติมในระบบพีซีเอ็ม ซึ่งวงจรนี้ทำหน้าที่จัดระดับสัญญาณและยกระดับของสัญญาณให้เหมาะสมกับการทำงานของ FET ซึ่งทำหน้าที่ on - off เพื่อจ่ายกระแสไฟให้กับ Load

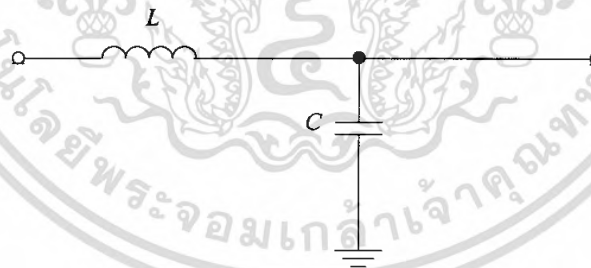
HIP4080 เป็น IC ที่ใช้ on - off เฟตให้ทำงานเป็นคู่ๆ สลับกันไป โดยจะใช้เฟตจำนวน 4 ตัว ในการทำงาน การใช้เฟตมาทำงานเป็นคู่ๆ ทำให้ได้กำลังที่จ่ายให้โหลด เพิ่มมากขึ้น โดยการทำงานในลักษณะนี้จะเรียกว่าการทำงานแบบ Full -Bridge



Block ในส่วนของ Delay

รูปที่ 3.23 สัญญาณที่ออกจากการเปรียบเทียบก็จะเข้าไปยังวงจรถีเลข

3.3 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)



รูปที่ 3.24 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

จากการคำนวณ

$$2\pi f_c = \frac{1}{\sqrt{2LC}}$$

เราต้องการ f_c (cut off) ที่ 20 kHz

เมื่อเราใช้ C ขนาด 4.47 μF มาอนุกรมกันจะได้ $C = 0.42 \mu\text{F}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าในสูตร จะได้ $L = 150 \mu\text{H}$

เมื่อนำค่าที่ได้มาต่อกับวงจรจะได้ค่าความถี่ Cut off ที่ประมาณ 20 kHz ตามตารางการวัดผล ตารางที่ 4.2

3.4 การออกแบบหาค่าไฟเลี้ยงให้กับวงจรขยายเสียง

เราต้องการออกแบบเครื่องขยายเสียงที่มีกำลังเอาต์พุตขนาด 40 วัตต์ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงก่อนเป็นลำดับแรกคือการคำนวณหาขนาดของแหล่งจ่ายไฟ

1. การหาขนาดของกระแสสูงสุด ซึ่งถ้าเลือกใช้ลำโพงขนาด 8 โอห์ม กระแสที่ไหลในทรานซิสเตอร์หาได้จาก $P=I^2R$ จะได้ $I = \sqrt{P/R} = \sqrt{40/8} = 2.24 \text{ A}$ แต่กระแสที่คำนวณได้เป็นแค่ rms ดังนั้นกระแสสูงสุด $I_m = \sqrt{2} * I = \sqrt{2} * 2.24 = 3.17 \text{ A}$

2. จำนวนแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 0.47 โอห์ม เมื่อมีกระแสขนาด 3.17 A ไหลผ่านตัวต้านทาน 0.47 โอห์ม จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมเท่ากับ $3.17 * 0.47 = 1.49 \text{ V}$

3. จำนวนแรงดันจ่ายไฟโดยประมาณ เพื่อให้ได้กำลังเอาต์พุตขนาด 40 วัตต์ จะต้องใช้แรงดันแหล่งจ่ายไฟอย่างน้อยเท่ากับ $\sqrt{16 * P_o} = \sqrt{16 * 40} = 25.3 \text{ V}$

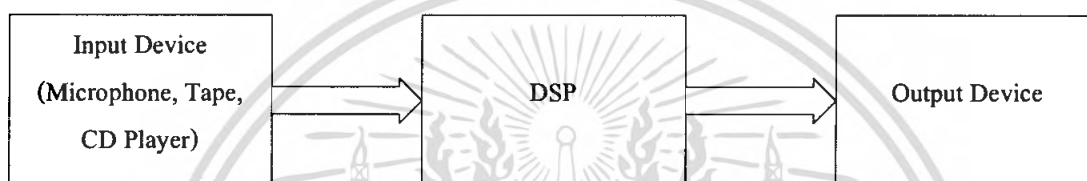
4. การเลือกทรานซิสเตอร์ในภาคเอาต์พุต ทรานซิสเตอร์ในภาคขยายสุดท้ายต้องมีคุณสมบัติ ขอมให้กระแสไฟฟ้าไหลได้มากกว่า 3.17 A และสามารถทนแรงดันได้มากกว่า 2 เท่า ของแรงดันจ่ายไฟ (เพราะว่าเมื่อทรานซิสเตอร์ตัวหนึ่งนำกระแส ทรานซิสเตอร์อีกตัวหนึ่งจะทำงานในย่านคัทออฟ ดังนั้นแรงดันที่คร่อมทรานซิสเตอร์ตัวที่คัทออฟจะเป็น $-V_c$ ข้างหนึ่งและ $+V_c$ ข้างหนึ่ง ดังนั้นจึงคร่อมทรานซิสเตอร์ตัวที่คัทออฟจะเป็น $-2V_c$) นั่นคือต้องทนแรงดันได้มากกว่า $25.3 * 2 = 50.6 \text{ V}$ นอกจากนั้นยังต้องมีค่าอัตราขยายกระแส h_{fe} สูง ค่าความถี่ทรานซิสชัน F_T สูง และมีค่าคอลเลคเตอร์คาปาซิแตนซ์ C_{ob} น้อยและแรงดันคอลเลคเตอร์กับอิมิตเตอร์เมื่อทรานซิสเตอร์นำกระแสอื่นตัว (V_{CEsat}) เท่ากับ 0.4 V

5. การคำนวณในแรงดันภาคขับ การคำนวณในภาคขับใช้วิธีเดียวกับที่คำนวณในภาคขยายสุดท้ายของการคำนวณ ให้แรงดันอิมิตเตอร์คอลเลคเตอร์กับอิมิตเตอร์เท่ากับ 0.4 V ดังแหล่งจ่ายไฟ

6. จำนวนแรงดันจ่ายไฟที่แท้จริง แรงดัน 25.3 V ที่คำนวณได้นั้นเป็นแรงดันค่าประมาณแหล่งจ่ายไฟที่แท้จริงจะต้องมีค่าจากองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ดังนั้นแรงดันที่แท้จริงทั้งหมดเท่ากับ $25.3 + 1.49 + 0.4 = 27.59 \text{ V}$ ต้องใช้อย่างน้อยเท่ากับ 27.59 V

3.5 ในส่วนของอิกวอลไลเซอร์

ในส่วนการสร้างและการออกแบบ หลักการเบื้องต้นของการทำงานของคิจิตอลอิกวอลไลเซอร์ คือการนำสัญญาณเสียงต่างๆซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อก (Analog Signal) ที่ได้จากแหล่งกำเนิดสัญญาณเสียงต่างๆ ที่เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า มาเข้าบล็อกไดอะแกรมของ DSP (Digital Signal Processing) ในบล็อกนี้จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นคิจิตอล (ADC) เพื่อประมวลผลทางสัญญาณเชิงคิจิตอลเมื่อทำการประมวลผลเรียบร้อยแล้วจะแปลงสัญญาณคิจิตอลที่ได้ทำการประมวลผลเรียบร้อยแล้วมาแปลงเป็นสัญญาณอนาล็อก (DAC) แล้วนำสัญญาณที่ทำการประมวลผลไปใช้งาน ในโครงงานนี้จะใช้ IC TAS3002 เนื่องจากเป็น IC ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประมวลผลทางสัญญาณคิจิตอล (DSP)



รูปที่ 3.25 หลักการเบื้องต้นของการออกแบบคิจิตอลอิกวอลไลเซอร์

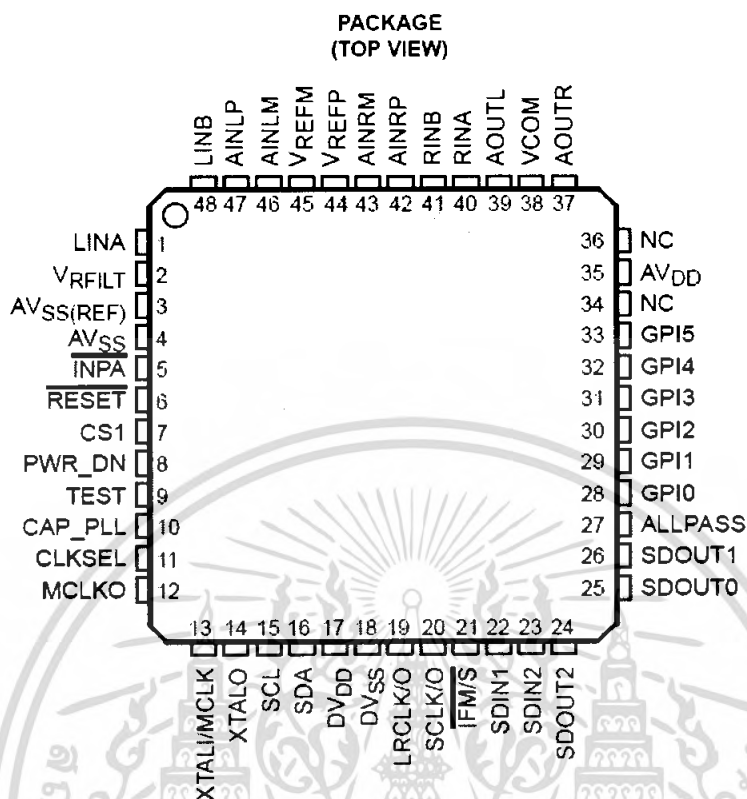
คุณสมบัติของการประมวลผลทางสัญญาณคิจิตอล (DSP) มีดังนี้

- Programmable seven-band parametric equalization
- Programmable digital volume control
- Programmable digital bass and treble control
- Programmable dynamic range compression/expansion (DRCE)
- Programmable loudness contour/dynamic bass control
- Configurable serial port for audio data
- Two input data channels that can be mixed with digital data from the analog-to-digital converter (ADC) of the codec (analog input). These channels are controlled by I²C commands.
- Three output data channels: Left and right data go through equalization; bass, treble, DRCE, and volume to SDOUT1; SDOUT2; mixes left and right data. SDOUT2 operates as a center channel or subwoofer channel or subwoofer channel. The output of ADC is available for additional processing.
- Capability to configure ADC output to one of two monaural data streams or one stereo data stream

- Capability to digital mix left and right input channel for monaural output to facilitate subwoofer Operation
- Serial I²C master/slave port that allows : Downloading of control data to the device externally from the EPROM or an I²C master. Controlling other I²C devices.
- Two I²C – selectable , single – ended analog input stereo channels
- Equalization bypass mode
- Single 3.3-V power supply
- Power down without reloading the coefficients
- Sampling rates : 32kHz , 44.1 kHz , or 48 kHz
- Master clock frequency , 256fS or 512fS
- Can have crystal input to replace MCLK. Crystal frequency is 256fS.
- Six GPI terminal for volume , bass , treble up/down control , mute , and selection of equalization filters.

3.5.1 วงจรควบคุมการทำงานของชิป TAS3002 โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในการออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของชิป TAS3002 สามารถทำได้โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ในการทำการควบคุมการทำงานแทนการควบคุมโดยอาศัย GUI (graphic user interface) ที่เป็นซอฟต์แวร์ที่ต้องการควบคุมผ่านทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งถึงแม้ว่าจะสามารถใช้ฟังก์ชันต่างๆในการควบคุมได้ง่ายกว่าการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากมีการควบคุมและการทำงานแสดงผลเป็นภาพ แต่ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็มีข้อดีที่เหนือกว่าในแง่ของต้นทุนของตัวอุปกรณ์ส่วนควบคุม และโปรแกรมที่ใช้รวมไปถึงขนาดของส่วนควบคุมที่มีขนาดเล็กกว่าการใช้คอมพิวเตอร์ ทำให้ขอบข่ายในการใช้งานมีมากขึ้น เช่นการติดตั้งใช้งานในรถยนต์ โดยในส่วนของวงจรที่ใช้ทำการควบคุมนั้นแสดงรายละเอียดเอาไว้ ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 แสดงลักษณะ โครงสร้างภายนอกและขาการใช้งานต่างๆของ TAS3002

ตารางที่ 3.1 การทำงานของขา IC TAS3002

NAME	NO	I/O	DESCRIPTION
AINLM	46	I	ADC left channel analog input (anti-alias capacitor)
AINLP	47	I	ADC left channel analog input (anti-alias capacitor)
AINRMALLPASS	43	I	ADC right channel analog input (anti-alias capacitor)
AOUTL	42	I	ADC right channel analog input (anti-alias capacitor)
AOUTR	27	I	Logic high bypasses equalization filters
AVDD	39	O	Left channel analog output
AVSS	37	O	Left channel analog output
AVSS(REF)	35	I	Analog power supply (3.3V)
CAP_PLL	4	I	Analog voltage ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) การทำงานของขา IC TAS3002

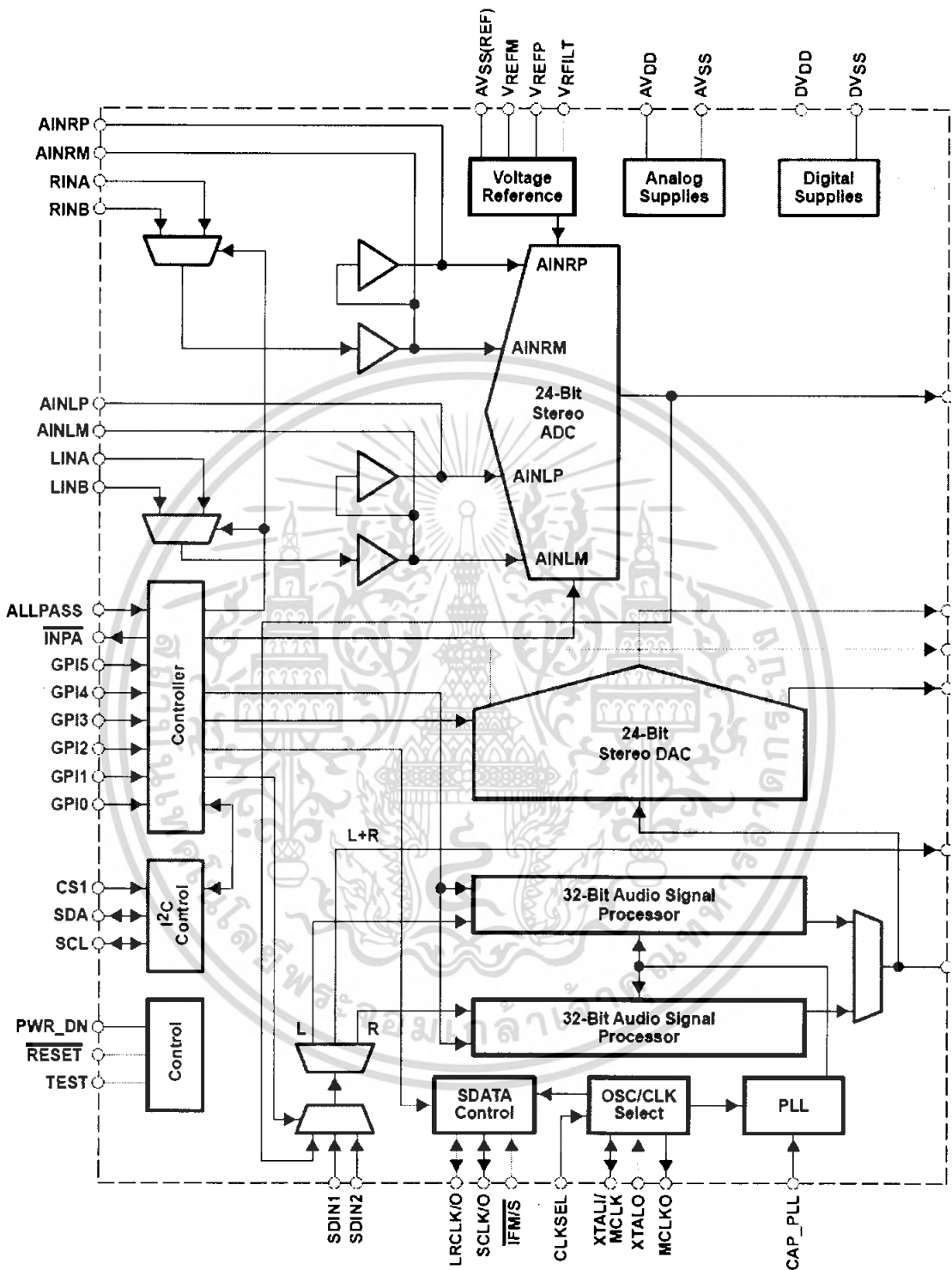
NAME	NO	I/O	DESCRIPTION
CLKSEL	11	I	Logic low selects 256fs:logic high selects 512fs MCLK
CS1	7	I	I ² C address bit A0; low = 68h, high = 6Ah
DVDD	17	I	Digital power supply (3.3V)
DVSS	18	I	Digital ground
GPI0	28	I	Switch input terminals
GPI1	29	I	Switch input terminals
GPI2	30	I	Switch input terminals
GPI3	31	I	Switch input terminals
GPI4	32	I	Switch input terminals
GPI5	33	I	Switch input terminals
IFM/S	21	I	Digital audio I/O control (low = input; high = output)
INPA	5	O	Low when analog input A is selected (will sink 4 mA)
LINA	1	I	Left channel analog input 1
LINB	48	I	Left channel analog input 2
LRCLK/O	19	I/O	Left/right clock input/output (out when IFM/S is high)
MCLKO	12	O	MCLK output for slave device
NC	34	-	No connection ; Can be used as a printed circuit board routing channel
NC	36	-	No connection ; Can be used as a printed circuit board routing channel
PWR_DN	8	I	Logic high places the TAS3002 device in power-down mode
RESET	6	I	Logic low resets the TAS3002 device to the initial state
RINA	40	I	Right channel analog input 1
RINB	41	I	Right channel analog input 2
SCL	15	I/O	I ² C clock connection
SCLK/O	20	I/O	Shift (bit) clock input (output when IFM/S is high)
SDA	16	I/O	I ² C data connection
SDIN1	22	I	Serial data input 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) การทำงานของขา IC TAS3002

NAME	NO	I/O	DESCRIPTION
SDIN2	23	I	Serial data input 2
SDOUT1	26	O	Serial data output (from internal audio processing)
SDOUT2	24	O	Serial data output (a monaural mix of left and right, before processing)
SDOUT0	25	O	Serial data output from ADC
TEST	9	I	Reserved manufacturing test terminal; connect to DVSS
VCOM	38	O	Digital-to-analog converter mid-rail supply (decouple with parallel combination of 10- μ F and 0.1 μ F capacitors)
VREFM	45	I	ADC minus voltage reference
VREFP	44	I	ADC plus voltage reference
VRFILF	2	O	Voltage reference low pass filter
XTAKI/MXLK	13	I	Crystal or external MCLK input
XTALO	14	I	Crystal input (crystal is connected between terminal 13 and 14)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างภายในของ IC TAS3002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากบล็อกไดอะแกรมโครงสร้างภายในจะเห็นว่าประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ 5 ส่วน คือ

1. พอร์ตสำหรับสัญญาณอนาล็อกอินพุต
2. พอร์ตสำหรับควบคุมการทำงานของ IC
3. พอร์ตเกี่ยวกับสัญญาณดิจิทัล อินพุต
4. พอร์ตสำหรับสัญญาณเอาต์พุต
5. ส่วนของไฟเลี้ยงต่างๆ

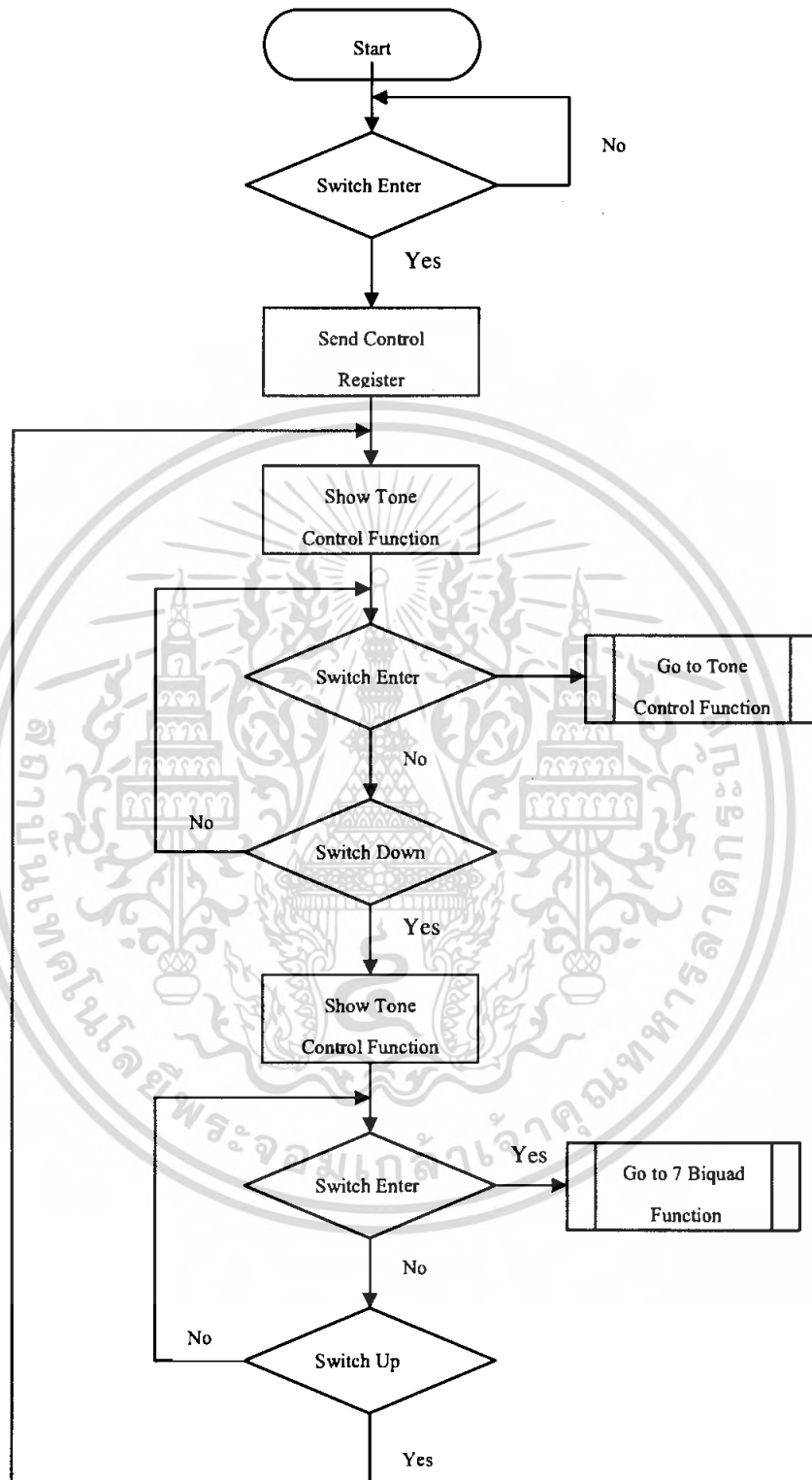
3.5.2 โปรแกรมควบคุมการทำงานของชิป TAS3002 โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

การเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อใช้การควบคุมการทำงานของ TAS3002 สามารถทำได้โดยเขียนโปรแกรมเพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งข้อมูลที่ใช้ในการควบคุมไปยังชิปผ่านทางระบบบัส I²C ซึ่งการทำการเขียนโปรแกรมที่ออกแบบบนไมโครคอนโทรลเลอร์จะใช้ภาษา C ในการเขียนโปรแกรม โดยฟังก์ชันในการทำงานจะประกอบไปด้วย 2 ฟังก์ชันหลัก คือ ในส่วนของ Tone Control และในส่วนของ Biquad Filter โดยการอธิบายการทำงานของโปรแกรมนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ เป็นส่วนของฟังก์ชัน และการทำการปรับแต่งค่าในส่วนแรก และการส่งข้อมูลที่ใช้ในการทำการควบคุมผ่านระบบบัส I²C ในส่วนหลัง

3.5.2.1 โปรแกรมส่วนเลือกฟังก์ชัน และการปรับแต่งค่า

จากโปรแกรมที่ได้ทำการออกแบบนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยโฟลว์ชาร์ทแสดงกระบวนการทำงานของโปรแกรมที่ได้ทำการเขียน โดยฟังก์ชันในการทำงานของโปรแกรมทั้งหมดนั้นประกอบไปด้วย 2 ฟังก์ชัน คือ Tone Control และ Biquad Filter ซึ่งทำการเลือกฟังก์ชันที่จะทำการปรับแต่งนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยโฟลว์ชาร์ทแสดง โปรแกรมการทำงานหลักดังรูปที่ 3.28

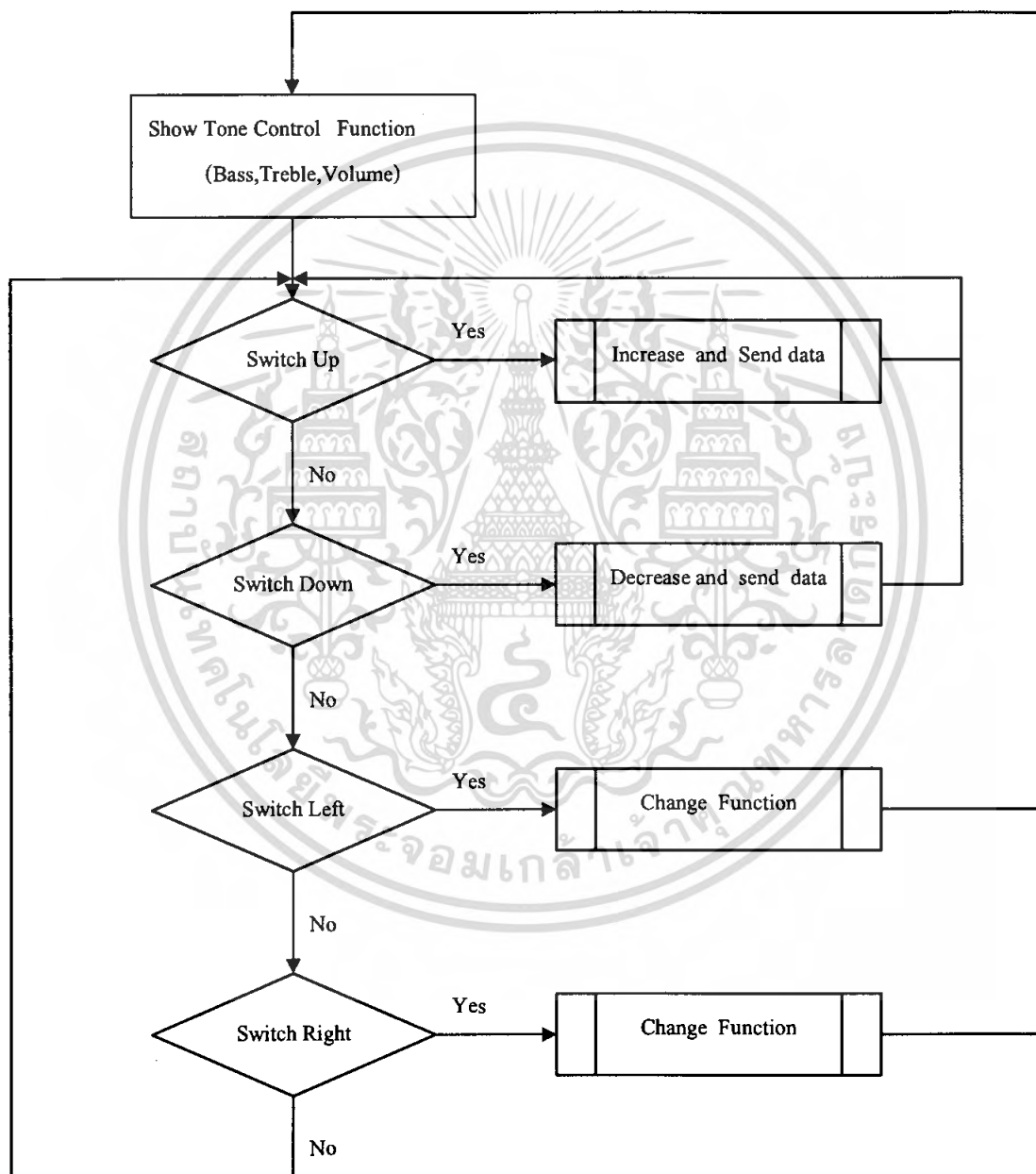
จากรูปที่ 3.28 ชิป TAS3002 จะเริ่มต้นการทำงานเมื่อกดสวิตช์ enter โดยเมื่อทำการกดสวิตช์แล้ว ข้อมูลที่ใช้ในการทำการควบคุมการทำงานของชิปจะถูกส่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านระบบบัส I²C ไปยังรีจิสเตอร์ควบคุมที่อยู่ภายในชิป ซึ่งประกอบไปด้วย Main Control Register , Main Control Register 2 และ Analog Control Register เพื่อเริ่มต้นการทำงานของชิปหลังจากนั้นจึงทำการเลือกฟังก์ชันที่ต้องการทำการปรับแต่งค่าโดยใช้สวิตช์ Up และ Down ในการทำการเลือกฟังก์ชันระหว่างฟังก์ชัน Tone Control และฟังก์ชัน Biquad Filter และใช้สวิตช์ Enter เพื่อเข้าไปทำการปรับแต่งค่าต่างๆในฟังก์ชันที่ต้องการ



รูปที่ 3.28 โฟลว์ชาร์ทอธิบายกระบวนการในการเลือกฟังก์ชันในการทำงาน

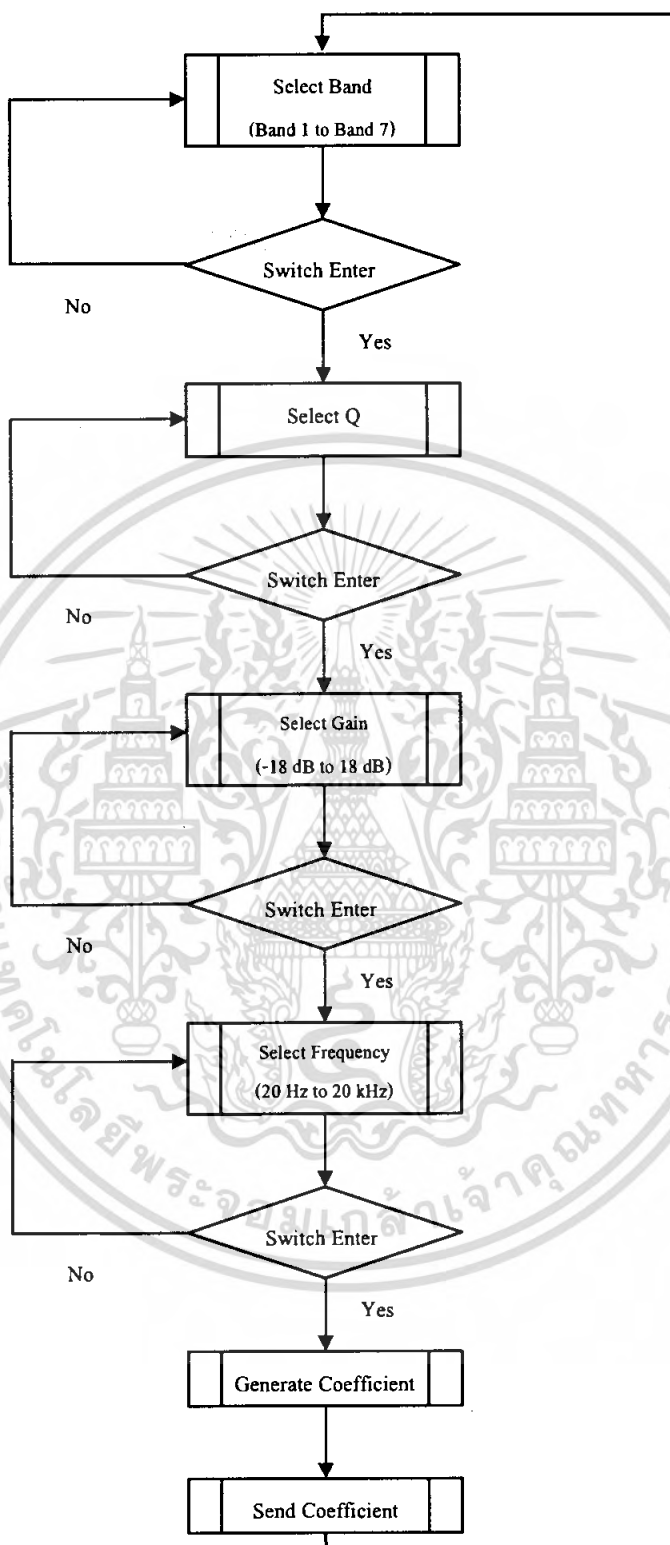
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากทำการเลือกฟังก์ชันการทำงานแล้ว จะเป็นการทำงานปรับแต่งค่าเพื่อส่งค่าที่ต้องการ ทำการปรับแต่งไปยังชิป TAS3002 โดยการทำงานในส่วนของฟังก์ชัน Tone Control นั้นสามารถอธิบายได้ด้วยโฟลว์ชาร์ตดังรูปที่ 3.29 ซึ่งเป็นโฟลว์ชาร์ตอธิบายกระบวนการทำงานในส่วนของ Tone Control และในส่วนของฟังก์ชัน Biquad Filter นั้นสามารถอธิบายได้ด้วยโฟลว์ชาร์ตดังรูปที่ 3.30 ซึ่งเป็นโฟลว์ชาร์ตอธิบายการทำงานส่วนของ Biquad Filter



รูปที่ 3.29 โฟลว์ชาร์ตอธิบายกระบวนการทำงานในส่วนของ Tone Control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30 โพลีซาร์ทอริบายกระบวนการทำงานในส่วน Biquad Filter

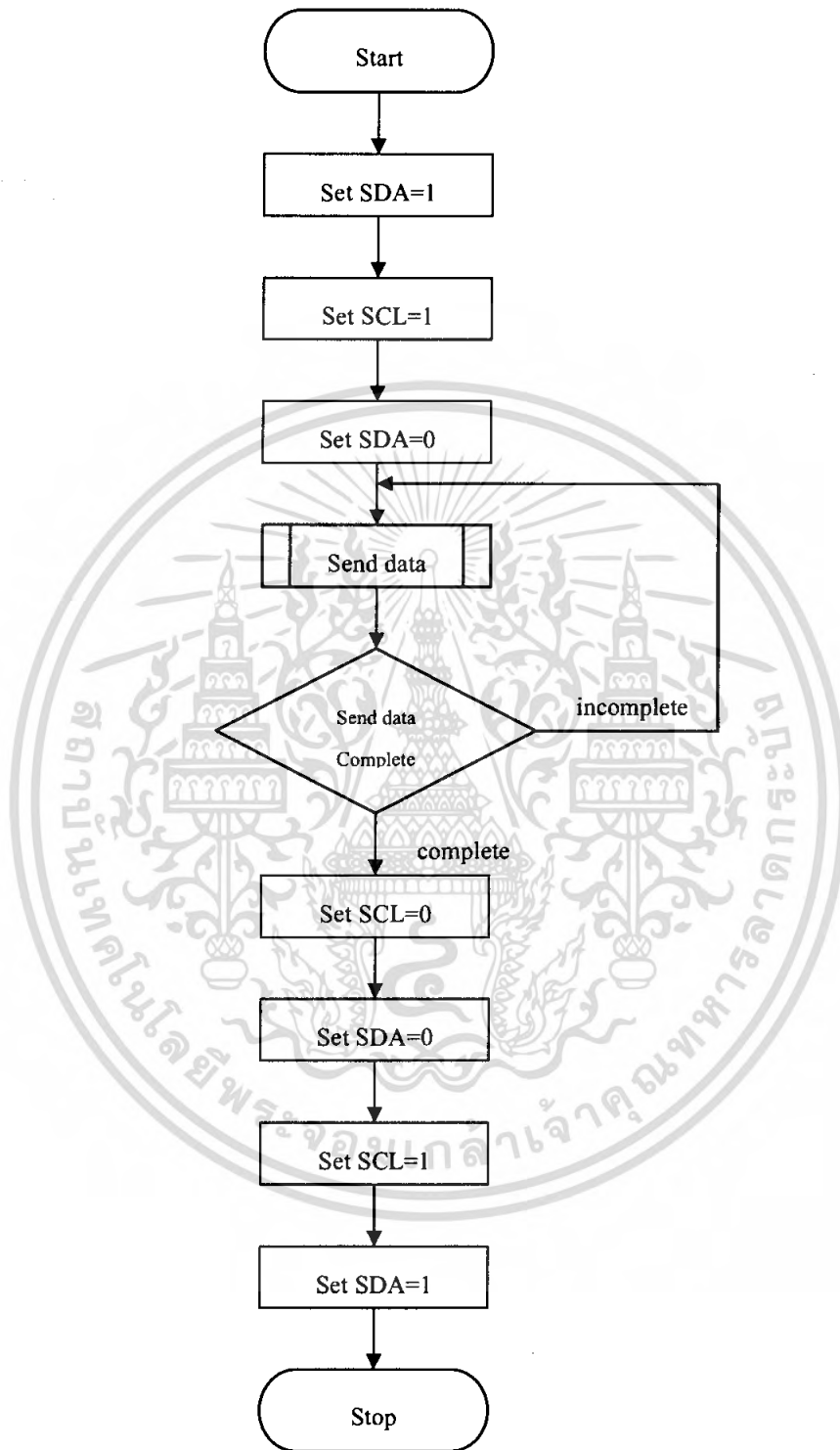
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.29 การทำการปรับแต่งในส่วนของฟังก์ชัน Tone Control จะประกอบไปด้วยฟังก์ชันย่อยในการทำการปรับแต่ง 3 ฟังก์ชันคือ bass control , treble control และ volume control ซึ่งการแสดงผลฟังก์ชันที่เลือก และค่าที่ปรับแต่งนั้นจะทำการแสดงผลผ่านจอแสดงผล LCD โดยการทำการกำหนดค่าที่ต้องการทำการปรับแต่งนั้นสามารถทำได้ผ่านสวิทช์ 4 ตัว โดยเมื่อกดสวิทช์ up โปรแกรมจะทำการเพิ่มค่าของฟังก์ชันที่เลือกเอาไว้ เมื่อกดสวิทช์ down โปรแกรมจะทำการลดค่าของฟังก์ชันที่เลือกเอาไว้ หลังจากทำการเพิ่มหรือลดค่าแล้วโปรแกรมจะทำการส่งค่าใหม่ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงผ่านออกไปทางระบบบัส I²C เพื่อส่งไปยังรีจิสเตอร์ต่างๆภายในชิป TAS3002 และเมื่อทำการกดสวิทช์ left หรือ right โปรแกรมจะทำการเปลี่ยนฟังก์ชันในการทำงานระหว่างฟังก์ชันย่อยในการทำการปรับแต่งทั้ง 3 ฟังก์ชัน

จากรูปที่ 3.30 การทำการปรับแต่งในส่วนของฟังก์ชัน Biquad Filter นั้นวงจรภายในชิป TAS3002 จะประกอบไปด้วย Biquad Filter ทั้งหมด 7 ตัว ในแต่ละแชนแนล โดยการทำงานจะเริ่มจากการเลือก Biquad Filter ตัวที่ต้องการใช้งานจากนั้นทำการเลือกค่า Q แล้วจึงเลือกระดับที่ต้องการปรับแต่ง และเลือก Corner Frequency ที่ต้องการ เมื่อได้ค่าทั้งหมดที่ต้องการทำการปรับแต่ง และ Biquad Filter ตัวที่ต้องการใช้งานแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของ Biquad Filter โดยจะประกอบไปด้วยค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมด 5 ค่า คือ a_1 , a_2 , b_0 และ b_2 จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนรูปแบบของค่าสัมประสิทธิ์ให้เป็นรูปแบบที่ใช้งาน คือ อยู่ในรูปของ 4.0 Format และทำการส่งค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดผ่านทางระบบบัส I²C ไปยังชิป TAS3002

3.5.2.2 โปรแกรมส่วนการส่งข้อมูลผ่านระบบบัส I²C

โปรแกรมในส่วนของการส่งข้อมูลจะเป็นการเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการส่งค่าผ่านทางระบบบัส I²C เพื่อทำการควบคุมการทำงานของชิป TAS3002 ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานได้โดยอาศัยโฟลว์ชาร์ทดังแสดงในรูปที่ 3.31 ซึ่งเป็นโฟลว์ชาร์ทในการอธิบายขั้นตอนในการทำการส่งข้อมูล โดยการส่งข้อมูลจะทำการเซตค่าของสาย SDA และ SCL ให้มีค่าเป็นสถานะลอจิกต่ำทั้งคู่ก่อนเพื่อเข้าสู่สภาวะบัสว่าง (Bus not busy) แล้วจึงทำการเซตค่าของ SDA ให้มีสถานะลอจิกสูงเพื่อเข้าสู่สภาวะเริ่มต้นการส่งข้อมูล (start data transfer) หลังจากนั้นจึงเริ่มต้นทำการส่งข้อมูลโดยข้อมูลที่ถูส่งออกไปจะเป็นลอจิกที่คงที่ของสาย SDA ในขณะที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูงและจะทำการส่งข้อมูลต่อไปเรื่อยๆจนกว่าข้อมูลทั้งหมดจะถูกส่งออกไป ซึ่งเมื่อข้อมูลทั้งหมดถูกส่งออกไปแล้วจะทำการเซตค่าของสาย SCL ให้มีค่าเป็นสถานะลอจิกสูง แล้วจึงทำการเซตค่าของสาย SDA ให้เป็นสถานะลอจิกสูงด้วย เพื่อเข้าสู่สภาวะหยุดการถ่ายทอดข้อมูลอันเป็นการสิ้นสุดของการทำการส่งข้อมูลผ่านระบบบัส I²C



รูปที่ 3.31 โฟลว์ชาร์ทอธิบายการส่งข้อมูลไปยังชิป TAS3002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์และนำค่าพารามิเตอร์ไปใช้งาน

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์

สมการสำหรับ Biquad , ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน คือ

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (3.5)$$

และเมื่อให้ $a_0 = 1$ แล้วจัดสมการ จะได้

$$H(z) = \frac{(b_0/a_0) + (b_2/a_0)z^{-1} + (b_2/a_0)z^{-2}}{1 + (a_1/a_0)z^{-1} + (a_2/a_0)z^{-2}} \quad (3.6)$$

$$y[n] = \{(b_0/a_0) \cdot x[n]\} + \{(b_1/a_0) \cdot x[n-1]\} + \{(b_2/a_0) \cdot x[n-2]\} - \{(a_1/a_0) \cdot y[n-1]\} - \{(a_2/a_0) \cdot y[n-2]\} \quad (3.7)$$

*หมายเหตุ a_0 ในการหาไม่ได้เท่า 1 แต่ที่ a_0 เท่ากับ 1 เพราะ a_0/a_0

ดังนั้นจะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญที่เหลือ คือ เมื่อเทียบสมการ (3.5) กับ (3.6)

$$B_0 = b_0/a_0$$

$$B_1 = b_1/a_0$$

$$B_2 = b_2/a_0$$

$$A_0 = 1$$

$$A_1 = a_1/a_0$$

$$A_2 = a_2/a_0$$

เราสามารถออกแบบ วงจรกรองความถี่ต่างๆ ได้ถ้าทราบค่า b_0, b_1, b_2, a_0, a_1 และ a_2
ค่าเริ่มต้นในการใช้หาค่าเหล่านี้คือ

$$A = \sqrt{10^{G/20}}$$

$$\omega_c = \frac{2\pi f_c}{f_s}$$

$$\omega_s = \sin \omega_c$$

$$\alpha = \frac{\omega_s}{2Q}$$

$$\beta = \sqrt{A/Q}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*ค่า $G = \text{Gain dB}$ ที่เรากำหนดในการออกแบบ

$f_c =$ ความถี่คัทออฟ หรือความถี่เซนเตอร์ แล้วแต่ในการออกแบบ

$f_s =$ ความถี่ Sampling แล้วแต่ IC แต่ละแบบ

$$Q = f_c/BW$$

เมื่อเราทราบค่านี้แล้วก็นำไปแทนในสมการของสมการกรองความถี่ที่ต้องการจะออกแบบสมการในการออกแบบวงจรกรองความถี่แต่ละแบบ

1. Low Pass Filter

- $b_0 = (1 - \omega C)/2$
- $b_1 = 1 - \omega C$
- $b_2 = (1 + \omega C)/2$
- $a_0 = 1 + \alpha$
- $a_1 = -2 \cdot \omega C$
- $a_2 = 1 - \alpha$

2. High Pass Filter

- $b_0 = (1 + \omega C)/2$
- $b_1 = -(1 + \omega C)$
- $b_2 = (1 - \omega C)/2$
- $a_0 = 1 + \alpha$
- $a_1 = -2 \cdot \omega C$
- $a_2 = 1 - \alpha$

3. Band Pass Filter

Peak gain = Q

- $b_0 = \omega S/2 = Q \cdot \alpha$
- $b_1 = 0$
- $b_2 = -\omega S/2 = -Q \cdot \alpha$
- $a_0 = 1 + \alpha$
- $a_1 = -2 \cdot \omega C$
- $a_2 = 1 - \alpha$



Constant = 0 dB Peak gain

- $b_0 = \alpha$
- $b_1 = 0$
- $b_2 = -\alpha$
- $a_0 = 1 + \alpha$
- $a_1 = -2 \cdot \omega C$
- $a_2 = 1 - \alpha$

4. Notch Filter

- $b_0 = 1$
- $b_1 = -2 \cdot \omega C$
- $b_2 = 1$
- $a_0 = 1 + \alpha$
- $a_1 = -2 \cdot \omega C$
- $a_2 = 1 - \alpha$

5. All Pass Filter

- $b_0 = 1 - \alpha$
- $b_1 = -2 \cdot \omega C$
- $b_2 = 1 + \alpha$
- $a_0 = 1 + \alpha$
- $a_1 = -2 \cdot \omega C$
- $a_2 = 1 - \alpha$

6. Peak EQ Filter

- $b_0 = 1 - (\alpha \cdot A)$
- $b_1 = -2 \cdot \omega C$
- $b_2 = 1 - (\alpha \cdot A)$
- $a_0 = 1 + (\alpha / A)$
- $a_1 = -2 \cdot \omega C$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $a_2 = 1 - (\alpha / A)$

7. Low Shelving Filter

- $b_0 = A \cdot \{(A+1) - [(A-1) \cdot \omega C] + (\beta \cdot \omega S)\}$

- $b_1 = 2 \cdot A \cdot \{(A-1) - [(A+1) \cdot \omega C]\}$

- $b_2 = A \cdot \{(A+1) - [(A-1) \cdot \omega C] - (\beta \cdot \omega S)\}$

- $a_0 = \{(A+1) - [(A-1) \cdot \omega C] + (\beta \cdot \omega S)\}$

- $a_1 = -2 \cdot \{(A-1) + [(A+1) \cdot \omega C]\}$

- $a_2 = \{(A+1) + [(A-1) \cdot \omega C] - (\beta \cdot \omega S)\}$

8. High Shelving Filter

- $b_0 = A \cdot \{(A+1) + [(A-1) \cdot \omega C] + (\beta \cdot \omega S)\}$

- $b_1 = -2 \cdot \{(A-1) + [(A+1) \cdot \omega C]\}$

- $b_2 = A \cdot \{(A+1) - [(A-1) \cdot \omega C] - (\beta \cdot \omega S)\}$

- $a_0 = \{(A-1) + [(A+1) \cdot \omega C] + (\beta \cdot \omega S)\}$

- $a_1 = 2 \cdot \{(A-1) - [(A+1) \cdot \omega C]\}$

- $a_2 = \{(A+1) - [(A-1) \cdot \omega C] - (\beta \cdot \omega S)\}$

เมื่อได้ค่า b_0, b_1, b_2, a_0, a_1 และ a_2 ก็นำค่าต่างๆใส่ในสมการที่ (3.7)

จะได้ค่าต่างเป็นฐานสิบ จากนั้นก็นำเลขฐานสิบมาทำเป็นเลขฐานสองแล้วค่อยทำเป็นเลขฐานสิบหก
เมื่อได้เลขฐานสิบหกแล้วก็แปลงกับมาเป็นเลขฐานสิบอีกครั้ง แล้วก็นำเลขฐานสิบนี้ไปใช้กับโปรแกรม

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ

(set) eq	b_0	b_1	b_2	a_1	a_2	Hz
eq1	1005CA	E00572	0FF4D9	E00572	0FFAA4	35
eq2	10081B	E007A6	0FF064	E007A6	0FF880	46
eq3	100A6B	E009E9	0FEBF0	E009E9	0FF65C	62
eq4	100F0B	E00E6A	0FE309	E00E6A	0FF215	84
eq5	101282	E011F9	0FDC5E	E011F9	0FEEEE0	110
eq6	101BBC	E01B3B	0FCA9B	E01B3B	0FE658	150
eq7	102057	E020B7	0FC1BD	E020B7	0FE215	200
eq8	103192	E032F1	0FA093	E032F1	0FD225	270
eq9	103F4F	E04419	0F8622	E04419	0FC571	370
eq10	10561B	E06104	0F5A3F	E06104	0FB05A	500
eq11	107271	E08804	0F23B4	E08804	0F9625	660
eq12	109434	E0C0EB	0EE2B5	E0C0EB	0F76EA	900
eq13	10CBE9	E11F26	0E7779	E11F26	0F4363	1.2 k
eq14	1118BF	E1B105	0DE393	E1B105	0EFC52	1.6 k
eq15	118440	E2A9AD	0D14A2	E2A9AD	0E98E2	2.2 k
eq16	11ED38	E4150F	0C4A93	E4150F	0E37CB	3 k
eq17	12B807	E6A906	0AC42D	E6A906	0D7C35	4.1 k
eq18	137A14	EA9BFA	094EA4	EA9BFA	0CC8B8	5.6 k
eq19	16108B	FA835B	04536D	FA835B	0A63F9	10.4 k
eq20	174FA3	06882F	01ED30	06882F	093CD3	14 k

eq คือ ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละแบนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองในส่วนของวงจรเคลตามอดูละชัน

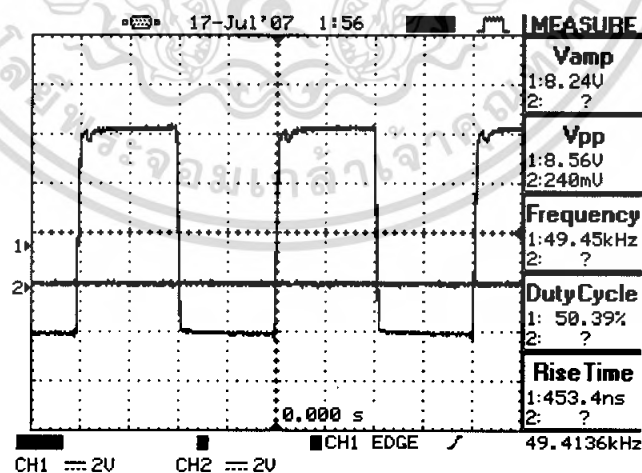
วงจรเคลตามอดูละชันเป็นวงจรที่ใช้มอดูเลตสัญญาณระหว่างข้อมูลข่าวสารกับคลื่นพาร์(Carrier) ซึ่งใช้ความแตกต่างระหว่างสัญญาณอินพุตเทียบกับสัญญาณที่ทำการทำนายไว้ ใช้เพื่อทำการเข้ารหัสแบบ 1 บิต คือ 0 กับ 1 และค่าความต่างของสัญญาณนี้จะเป็นตัวเปลี่ยนค่า Duty cycle (D) ของสัญญาณสี่เหลี่ยม ที่ออกจากวงจรเคลตามอดูละชัน ซึ่งเมื่อไม่มีสัญญาณเข้าที่อินพุตของวงจรหรือว่าสัญญาณอินพุตเท่ากับ 0 จะได้ว่า Duty cycle (D) = 50% สามารถทำการทดลองและวัดผลการทดลองได้ดังนี้

4.1.1 ทำการป้อนอินพุตและวัดอินพุตของวงจร

ทำการต่อวงจรดังรูปที่ 3.1 หน้า 46 โดยทำการป้อนอินพุตเข้าที่ V_i โดยให้สัญญาณที่ป้อนเท่ากับ 0 หรือ ให้ต่อลงกราวด์ แล้วทำการวัดสัญญาณที่วงจรมิตทริกเกอร์คอมพาราเตอร์ ที่ขา 7 ของออปแอมป์หรือที่ V_x และจะได้ผลการทดลองดังนี้

โดยที่ $R_f = 500\Omega$, $R_i = 10\Omega$, $R_o = 1k\Omega$, $R_2 = 1k\Omega$, $R_1 = 1k\Omega$, $R_n = 3k\Omega$, $R_p = 50\Omega$,
 $C = 100\text{ pF}$, $D_1 = 1N4148$, $D_2 = 1N4148$

วัดสัญญาณเอาต์พุตที่วงจรถลตามอดูละชันเทียบกับสัญญาณอินพุต เมื่อป้อนสัญญาณกราวด์ที่ Channel 2 เอาต์พุตที่ Channel 1 ได้เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีค่า Duty Cycle 50%

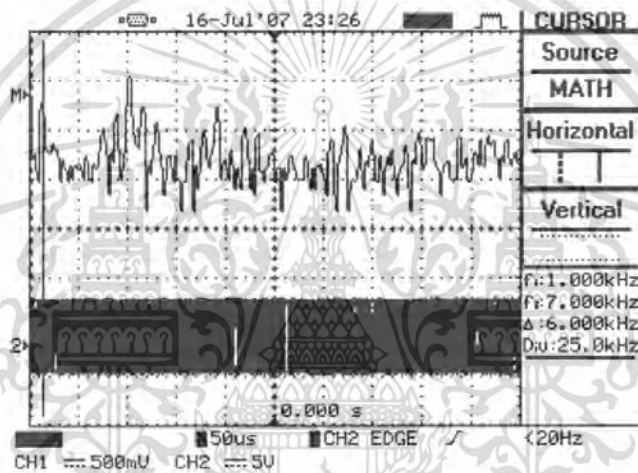


รูปที่ 4.1 สัญญาณเอาต์พุตที่วงจรถลตามอดูละชัน เมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต เมื่อป้อนสัญญาณกราวด์ที่ Channel 2

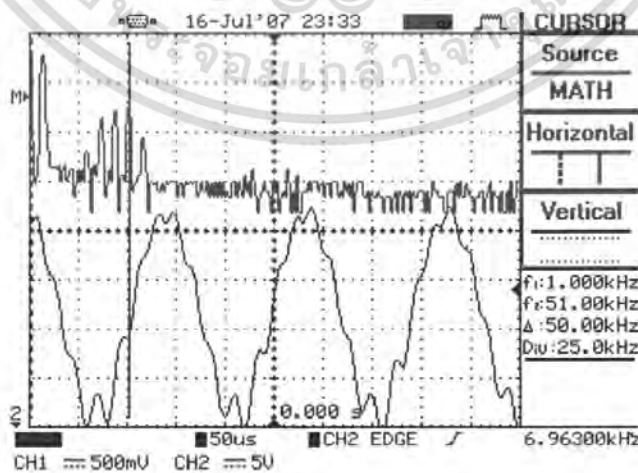
4.1.2 วัดสเปกตรัมของวงจรเดคตามอดูเลชัน

จากการมอดูเลตสัญญาณระหว่างสัญญาณข่าวสารกับคลื่นพาร์ (Carrier) เมื่อทำการวัดสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตของวงจร ความถี่ของคลื่นพาร์จะไม่เปลี่ยนตามการเปลี่ยนความถี่ของอินพุต ซึ่งสามารถทำการทดลองและวัดผลการทดลองได้ดังนี้

วัดสเปกตรัมของสัญญาณที่ออกจาก Power Amp เมื่อป้อนสัญญาณเสียงเข้าไปที่ CH2 โดยที่มีการปรับเปลี่ยนทางความถี่และแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุต จากผลการทดลองจะเห็นว่ามีการเกิดการมอดูเลตของสัญญาณเกิดขึ้นระหว่างแคเรียร์กับสัญญาณข้อมูลข่าวสาร โดยที่ความถี่ของแคเรียร์จะไม่เปลี่ยนตามความถี่และแอมพลิจูดของข่าวสารดังรูปที่ 4.3 เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.5 ที่มีการป้อนความถี่และแอมพลิจูดที่แตกต่างกัน

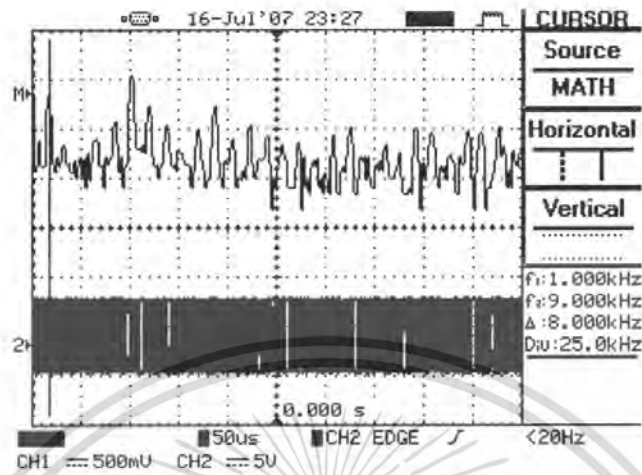


รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของสัญญาณเทียบกับสัญญาณอินพุตที่ใช้ความถี่ 6 kHz

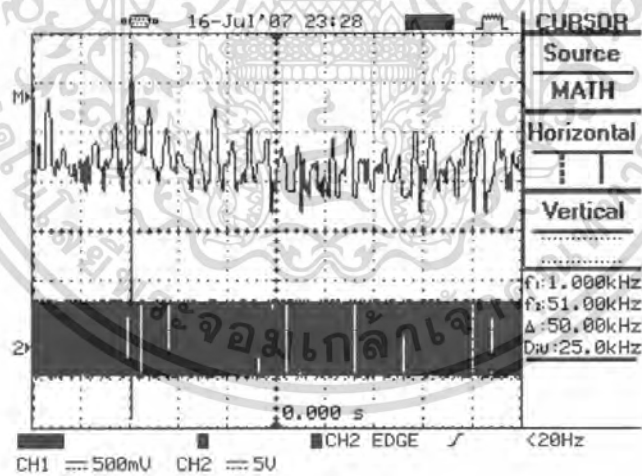


รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของแคเรียร์ที่ 50 kHz เมื่อป้อนสัญญาณ ไซน์เวฟ 6 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของสัญญาณเทียบกับสัญญาณอินพุตที่ใช้ความถี่ 8 kHz



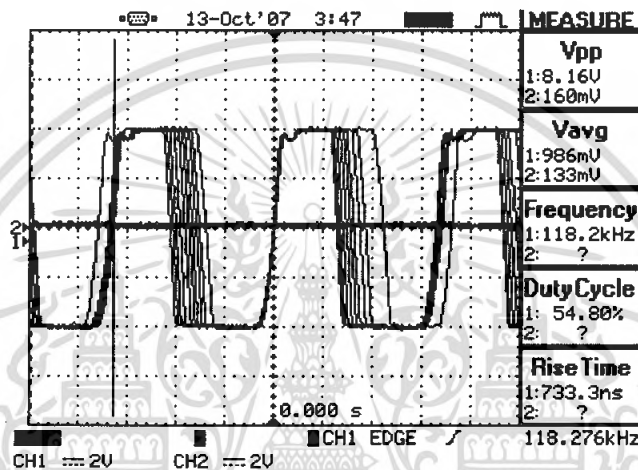
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของแคเรียร์ที่ 50 kHz เมื่อป้อนสัญญาณไซน์เวฟ 8 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 วัดการเปลี่ยนแปลงค่า Duty cycle (D)

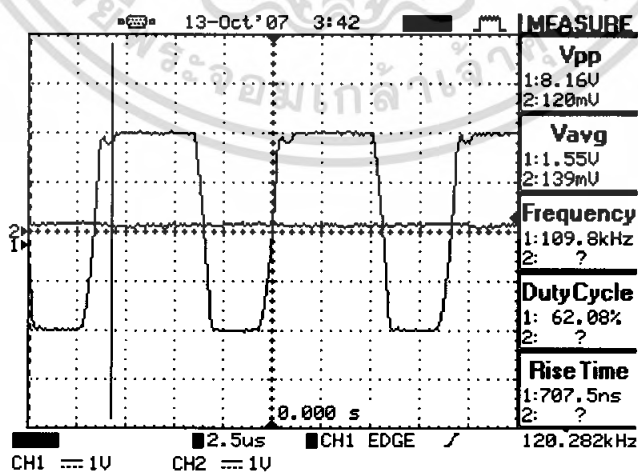
ค่า Duty cycle (D) จะเปลี่ยนแปลงตามขนาดของสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าวงจรเคลตามอดูลเลขัน โดยทำการต่อวงจรดังรูปที่ 3.1 หน้า 46 โดยทำการป้อนอินพุตเข้าที่ V_i โดยให้สัญญาณที่ป้อนมีค่าต่างๆกัน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงค่า Duty cycle (D) แล้วทำการวัดสัญญาณที่วงจรมิตริกเกอร์คอมพาราเตอร์ ที่ขา 7 ของออปแอมป์หรือที่ V_x และจะได้ผลการทดลองดังนี้

วัดสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากวงจรเคลตามอดูลเลขันที่ CH1 วัดเทียบกับสัญญาณอินพุตขนาด 160 mV แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่า Duty Cycle



รูปที่ 4.6 สัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากวงจรเคลตามอดูลเลขันวัดเทียบกับสัญญาณอินพุต

วัดสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากวงจรเคลตามอดูลเลขันที่ CH1 วัดเทียบกับสัญญาณอินพุตขนาด 120 mV แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่า Duty Cycle



รูปที่ 4.7 สัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากวงจรเคลตามอดูลเลขันวัดเทียบกับสัญญาณอินพุต (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

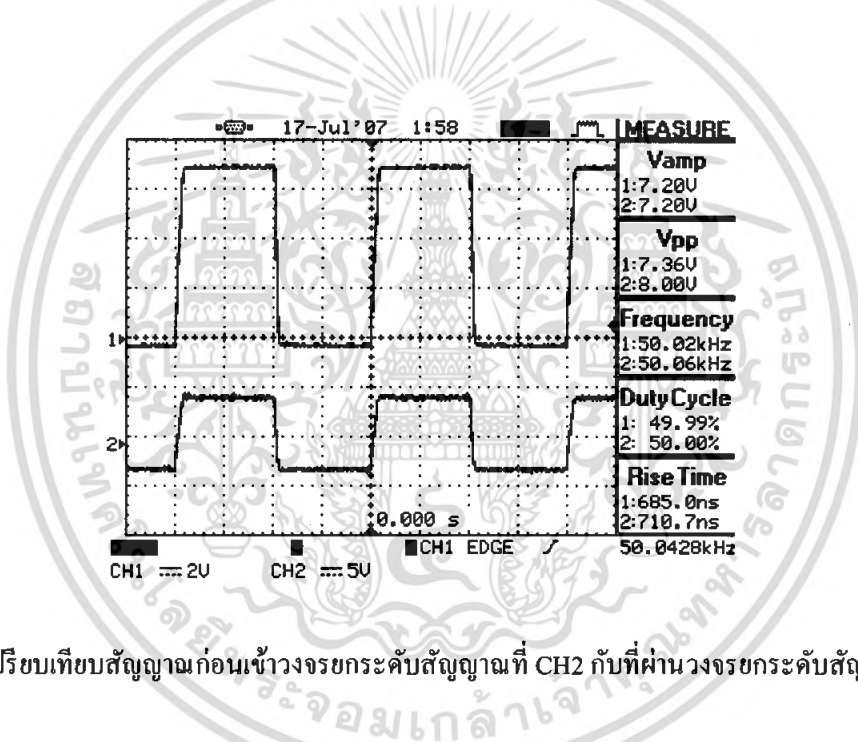
4.2 ผลการทดลองจากวงจรระดับสัญญาณ

สัญญาณที่ออกจากวงจรเคลตามอดูละนั้นจะมีขนาดของสัญญาณอยู่ที่บวกและลบของไฟเลี้ยงอปแอมป์ ดังนั้นเมื่อจะเอาสัญญาณที่ออกจากวงจรเคลตามอดูล์ชันไปเข้าวงจรไคร์เวอร์จะต้องผ่านวงจรระดับสัญญาณเพื่อให้ระดับสัญญาณที่ได้นั้นมีค่าเป็นบวก ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่ใช้ในการทำงานของไคร์เวอร์

4.2.1 นำสัญญาณไปผ่านวงจรระดับสัญญาณ

ทำการต่อวงจรตามรูป 3.16 หน้าที่ 58 โดยนำสัญญาณที่ออกจากวงจรเคลตามอดูล์ชันไปป้อนให้กับวงจรระดับสัญญาณที่จุดที่ 1 และทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่จุดที่ 2 ดังวงจร

สัญญาณที่ออกจากวงจรเคลตามอดูล์ชันผ่านเข้าสู่วงจรระดับสัญญาณ ก่อนที่จะเข้าไปส่วนของไคร์เวอร์



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบสัญญาณก่อนเข้าวงจรระดับสัญญาณที่ CH2 กับที่ผ่านวงจรระดับสัญญาณที่ CH1

4.3 ผลการทดลองในส่วนของไคร์เวอร์ (Driver)

ไคร์เวอร์ คือ ส่วนของวงจรเคลตามอดูล์ชันเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ที่ใช้ในการจ่ายกระแสหรือขับกำลังให้กับโหลด (Load) โดยที่จะทำงานตามสัญญาณที่ออกจากวงจรเคลตามอดูล์ชันที่ผ่านการขยับระดับสัญญาณแล้ว ซึ่งสามารถทำการทดลองและวัดผลการทดลองได้ดังนี้

4.3.1 ทำการป้อนสัญญาณอินพุตเข้าสู่วงจรไคร์เวอร์ ต่อวงจรตามรูปที่ 3.22 หน้าที่ 61 โดยใช้อุปกรณ์ดังนี้

$$C = 1\mu\text{F}$$

$$R = 100\text{ k}\Omega$$

$$R21=R22=R23=R24= 10\Omega\ 1\text{W}$$

$$Q1=Q2=Q3=Q4= \text{IRF640}$$

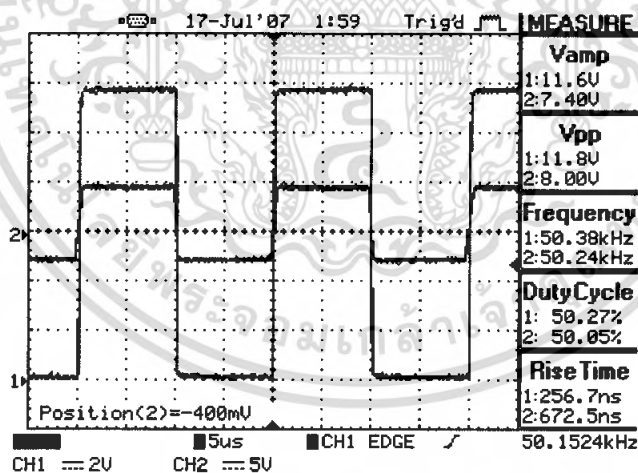
$$R30=R31= 0.1\Omega\ 5\text{W}$$

$$C4=C5= 1\mu\text{F}$$

$$\text{CR1}=\text{CR2}= \text{MUR120}$$

$$U1= \text{HIP4080}$$

เมื่อสัญญาณออกจากวงจรเคลตามอวลูเลชันผ่านวงจรถ่ายระดับสัญญาณเข้าที่ขา 6 ของไอซี HIP4080 แล้วทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ขา 5 ของไอซี ได้ผลการทดลองดังนี้
สัญญาณที่ออกจากวงจรถ่ายตามอวลูเลชันเข้าสู่วงจรเปรียบเทียบกับสัญญาณที่อยู่ใน IC HIP4080 ในส่วน
ของไคร์เวอร์

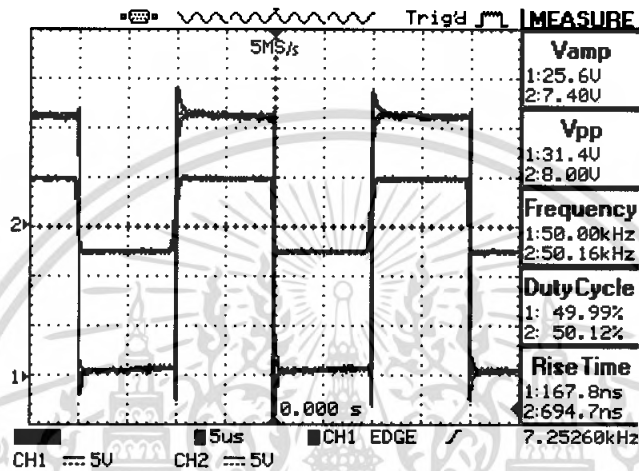


รูปที่ 4.9 สัญญาณที่ออกจากวงจรถ่ายตามอวลูเลชันที่ CH2 เข้าสู่วงจรเปรียบเทียบกับสัญญาณแล้ววัดสัญญาณที่
เปรียบเทียบกับออกมาที่ CH1

4.3.2 สัญญาณที่เข้าส่วนไดร์เวอร์และสัญญาณที่ออกจากไดร์เวอร์

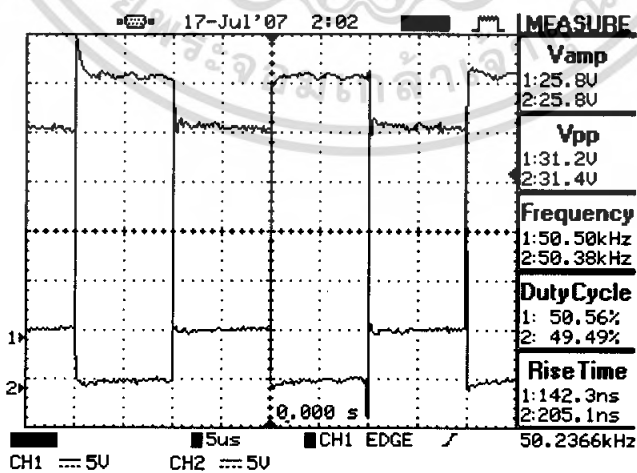
เมื่อนำสัญญาณที่ได้จากผลการทดลอง 4.3.1 ป้อนให้กับวงจร ไดร์เวอร์ แล้วทำการวัดสัญญาณที่ผ่านการทำงานของเฟดที่จุดที่ 1 ของวงจรไดร์เวอร์แล้วจะได้ผลการทดลองดังนี้

เป็นการวัดสัญญาณที่ออกจากวงจรมอดูเลชันแล้วผ่านเข้าสู่ส่วนไดร์เวอร์ แล้ววัดสัญญาณเอาต์พุตออกมาที่เฟด โดยไม่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 4.10 สัญญาณที่เข้าไดร์เวอร์ที่ CH2 เทียบกับสัญญาณที่ออกจากสัญญาณไดร์เวอร์ที่ CH1

การวัดสัญญาณที่ออกจากไดร์เวอร์แล้วทำการเปรียบเทียบกับกันระหว่าง 2 สถานะ คือทรานซิสเตอร์ On และทรานซิสเตอร์ Off ในกรณีที่เป็น Full Bridge จะเห็นได้ว่าสัญญาณจะกลับเฟสกัน 180 องศา ทำการวัดสัญญาณที่จุดที่ 1 และ จุดที่ 2 ของรูปที่ 3.22 หน้าที่ 61 เมื่อทำการทดลองเหมือนกับการทดลองที่ 4.3.2



รูปที่ 4.11 สัญญาณที่สถานะทรานซิสเตอร์ On ที่ CH1และวัดสัญญาณที่สถานะทรานซิสเตอร์ Off ที่ CH2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทำวงจรเคลตามอคูเลชันเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์แบบ Close Loop และผลการทดลอง

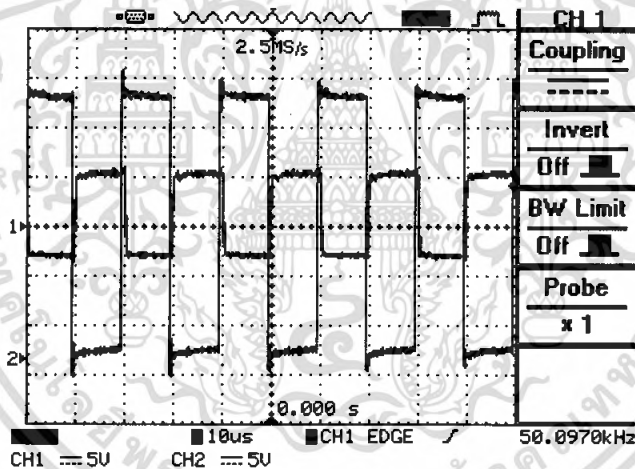
การทำวงจรเคลตามอคูเลชันเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์แบบ Close Loop เป็นการนำวงจรเคลตามอคูเลชันเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์แบบ Open Loop มาใช้ แต่การทำแบบ Close Loop นั้นจะนำสัญญาณที่ออกจากส่วนไดร์เวอร์ที่ยังไม่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ทำการลดทอนสัญญาณให้เหลือประมาณ 1V จากนั้นก็นำสัญญาณที่ได้ไปผ่านวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ ก่อนที่จะต่อเข้ากับวงจรเคลตามอคูเลชัน เพื่อให้วงจรทำงานแบบ Close Loop

4.4.1 ทำการลดทอนสัญญาณเพื่อใช้ทำ Close Loop

ต่อวงจรตามรูปที่ 3.19 หน้าที่ 59 โดยให้ค่า $R_1 = 1\text{k}\Omega$ $R_2 = 5\text{k}\Omega$ นำสัญญาณที่ได้จากการทดลอง

4.3.2 ป้อนเข้าจุดที่ 1 ของวงจร แล้วทำการวัดที่ 2 ของวงจร ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังนี้

นำสัญญาณที่ออกจากวงจรไดร์เวอร์มาทำการลดทอนสัญญาณ เพื่อนำสัญญาณที่ได้จากการลดทอนไปใช้ในการทำ Close Loop โดยใช้วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบสัญญาณก่อนเข้าวงจรลดทอนสัญญาณที่ CH2 กับสัญญาณที่ผ่านวงจรลดทอนสัญญาณที่ผ่านวงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่ CH1

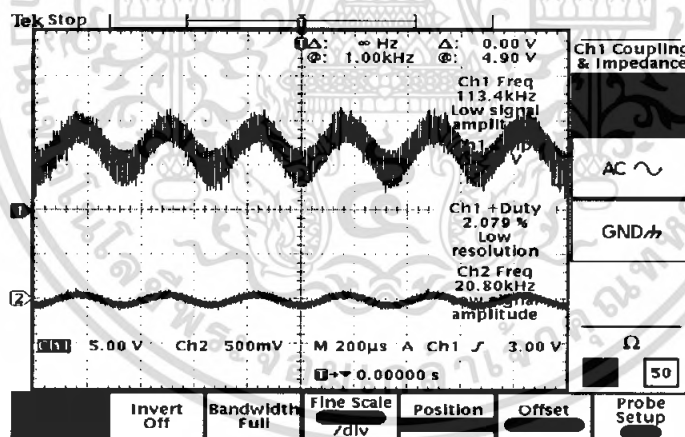
4.5 ป้อนสัญญาณอินพุตเข้าวงจรตามอวลูชันเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์แล้ววัดเอาต์พุต

เมื่อป้อนสัญญาณใดๆ เข้าสู่วงจรเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ สัญญาณนั้นจะถูกขยายจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับอัตราขยายของเพาเวอร์แอมและสัญญาณที่ออกมาจากเอาต์พุตนั้น จะต้องมิลักษณะเหมือนกับสัญญาณที่ถูกป้อนเข้าไป

4.5.1 ป้อนสัญญาณเพื่อวัดอัตราขยาย

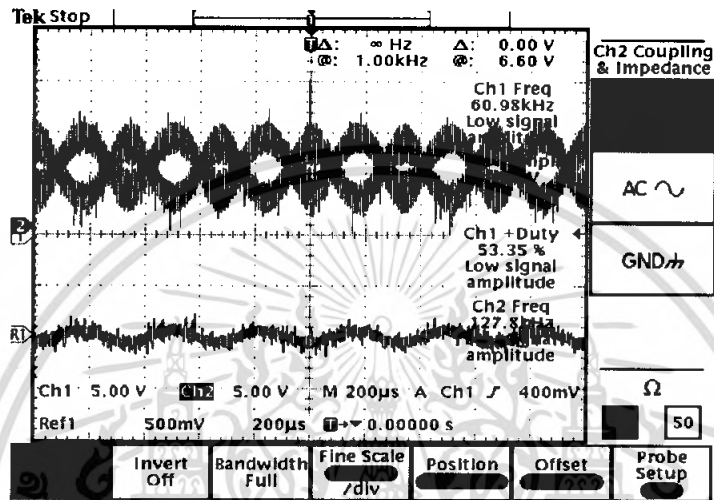
ต่อวงจรตามการทดลอง 4.4.2 เพื่อทำการทดลอง แต่จะมีการต่อสัญญาณเอาต์พุตผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน ตามรูปที่ 3.24 หน้าที่ 62 โดยใช้ค่าอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ $C = 0.42 \mu\text{F}$, $L = 150 \mu\text{H}$ เมื่อป้อนสัญญาณไซน์เวฟขนาด 200 mV ที่ความถี่ 1 kHz เข้าวงจรตามอวลูชันเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ แล้วทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตได้ดังนี้

ป้อนสัญญาณไซน์เวฟขนาด 200 mV ที่ความถี่ 1 kHz เข้าวงจรตามอวลูชันเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ที่ Ch2 แล้ววัดสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่ Ch1 ได้ขนาดของสัญญาณที่ 8 V ความถี่ 1 kHz เพราะฉะนั้นจะได้อัตราขยายประมาณ 40 เท่า



รูปที่ 4.15 สัญญาณอินพุตที่ Ch2 เทียบกับสัญญาณเอาต์พุตที่ Ch1 เมื่อผ่านวงจรขยายกำลัง

ป้อนสัญญาณไซน์แอมพลิจูด 200 mV ที่ความถี่ 1 kHz เข้าวงจรเคลตามอคูเลชันเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ที่ ChR1 แล้ววัดสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่าน Low Pass Filter ที่ Ch1 และ Ch2 ที่เป็นการทำงานแบบ Full Bridge จะได้อัตราขยายเป็น 2 เท่าของแบบ Half Bridge ได้ขนาดของสัญญาณที่ 8 V ความถี่ 1 kHz เพราะฉะนั้นจะได้อัตราขยายประมาณ 80 เท่า



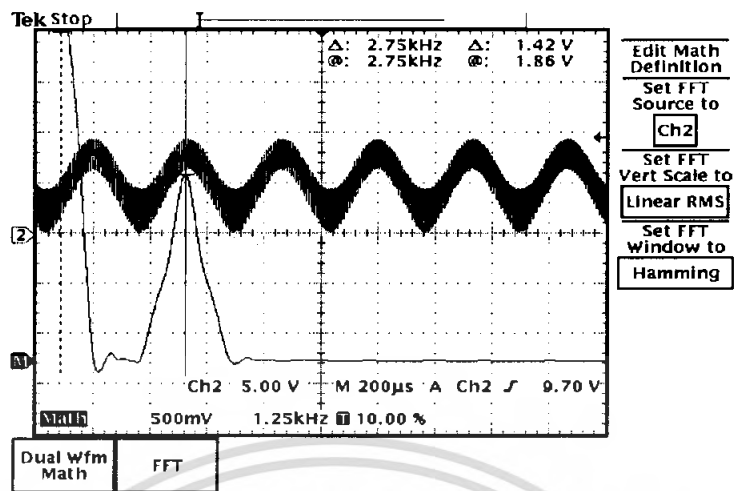
รูปที่ 4.16 สัญญาณอินพุตที่ ChR1 เทียบกับสัญญาณเอาต์พุตที่ Ch1 และ Ch2 เมื่อผ่านวงจรขยายกำลังที่เป็นแบบ Full Bridge

4.6 วัดสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตเพื่อหาค่า THD

ทำการทดลองเหมือนกับการทดลองที่ 4.5 โดยใช้สัญญาณเอาต์พุตเป็นตัวเปรียบเทียบกับสเปกตรัมที่จะวัด ซึ่งใช้สัญญาณไซน์แอมพลิจูด 2.75 kHz 30 mV

4.6.1 วัดสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตเพื่อหาค่า THD ของ Close Loop

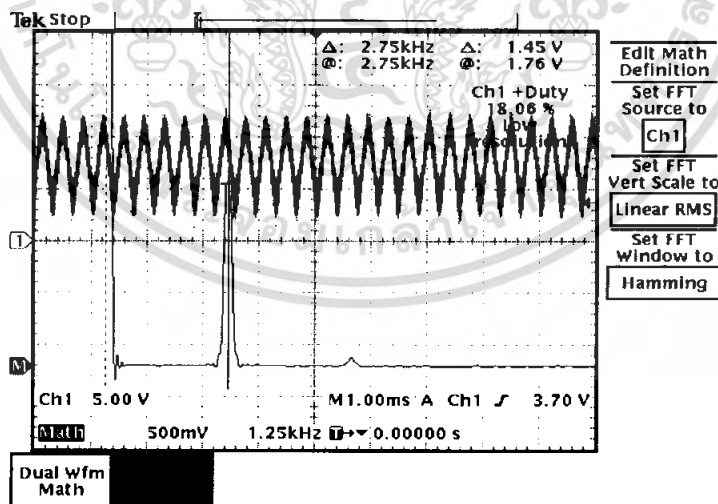
ทำการวัดสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต เพื่อที่จะทำการคำนวณหาค่า THD ที่ออกจากวงจรเคลตามอคูเลชันเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ เมื่อป้อนสัญญาณไซน์แอมพลิจูดที่ 2.75 kHz และทำการวัดสัญญาณเอาต์พุต ที่มีการทำงานแบบ Close Loop ที่ Ch2



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากวงจรจรรยาจรตามอคูเลชันเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์แบบ Close Loop

4.6.2 วัดสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตเพื่อหาค่า THD ของ Open Loop

ทำการวัดสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตเพื่อที่จะทำการคำนวณหาค่า THD ที่ออกจากวงจรจรรยาจรตามอคูเลชันเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ เมื่อป้อนสัญญาณไซน์เวฟที่ 2.75 kHz และทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตของสัญญาณที่ Ch1 ที่มีการทำงานแบบ Open Loop



รูปที่ 4.18 สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากวงจรจรรยาจรตามอคูเลชันเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์แบบ Open Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองหาค่า THDเปรียบเทียบระหว่าง Open Loop และ Close Loop

ลำดับฮาร์โมนิกที่	ความถี่(Hz)	โวลต์(Volt)(Close loop)	โวลต์(Volt)(Open loop)
1	3k	1.88	1.88
2	6k	10m	92.2m
3	9k	14m	14.4m
4	12k	11m	9.6m
5	15k	7m	10.0m
6	18k	9.2m	6.0m
7	21k	8.2m	7.4m
8	24k	6m	8.4m
9	27k	10m	6.4m
10	30k	6m	8.0m
11	33k	7m	7.8m

จากสูตรการคำนวณค่า THD

$$THD = \frac{\sum_{n=2}^{11} c_n^2}{c_1^2} \times 100\% \quad (4.1)$$

Open Loop

$$THD = \frac{(10^2 + 14^2 + 11^2 + 7^2 + 9.2^2 + 8.2^2 + 6^2 + 10^2 + 6^2 + 7^2)}{1.88^2} \times 100 \times 10^{-6}$$

$$\sum_{n=2}^{11} c_n^2 = 9.1498 \times 10^{-3} \text{ v}$$

$$c_1^2 = 3.53 \text{ v}$$

$$THD = 9.1498 \times 10^{-3} / 3.53$$

$$= 2.59 \times 10^{-3}$$

$$\text{หรือ} \quad = 2.59 \times 10^{-3} \times 100 = 0.259\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Close Loop

$$\text{THD} = \frac{(92.2^2 + 14.4^2 + 9.6^2 + 10^2 + 6^2 + 7.4^2 + 8.4^2 + 6.4^2 + 8^2 + 7.8^2)}{1.88^2} \times 100 \times 10^{-6}$$

$$\sum_{n=2}^{11} c_n^2 = 8.6 \times 10^{-4} \text{ v}$$

$$c_1^2 = 3.53 \text{ v}$$

$$\begin{aligned} \text{THD} &= 8.6 \times 10^{-4} / 3.53 \\ &= 2.43 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

หรือ $= 2.43 \times 10^{-4} \times 100 = 0.0243\%$

จะเห็นได้ว่าการทำ Close loop จะได้ค่า THD ที่น้อยกว่าแบบ Open loop เพราะฉะนั้นการทำ Close loop จึงลดอัตราการสูญเสียกำลังงานที่เกิดจากสัญญาณรบกวนได้ดีกว่า

4.7 ผลการทดลองหาค่าความถี่ Cut off ของวงจร Low Pass Filter

โดยปกติหูคนเราสามารถได้ยินเสียง 20Hz ถึงประมาณ 20 kHz ดังนั้นเราจึงหาความถี่ Cut off อยู่ที่ประมาณ 20 kHz โดยการทดลองสามารถทำได้ดังนี้

ต่อวงจรตามรูปที่ 3.30 หน้า 45 ใช้ค่า $C=0.42 \mu\text{F}$, $L=150 \mu\text{H}$ แล้วทำการป้อนสัญญาณไซน์เวฟ 100,200,300....100 kHz ขนาด 10 v-p-p เข้าอินพุตของวงจรแล้วทำการวัดขนาดของค่าเอาต์พุตที่ได้ในแต่ละความถี่ ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการหาความถี่หยุด

ครั้งที่	ความถี่ (Hz)	โวลต์ที่วัดได้ (โวลต์Vp-p)
1	100	10
2	200	10
3	300	10
4	400	10
5	500	10
6	600	10
7	700	10
8	800	10
9	900	10
10	1 k	10
11	2 k	10
12	3 k	10
13	4 k	9.92
14	5 k	9.84
15	6 k	9.76
16	7 k	9.76
17	8 k	9.52
18	9 k	9.36
19	10 k	9.20
20	11 k	8.96
21	12 k	8.72
22	13 k	8.56
23	14 k	8.24
24	15 k	8.00
25	16 k	7.76
26	17 k	7.44
27	18 k	7.12

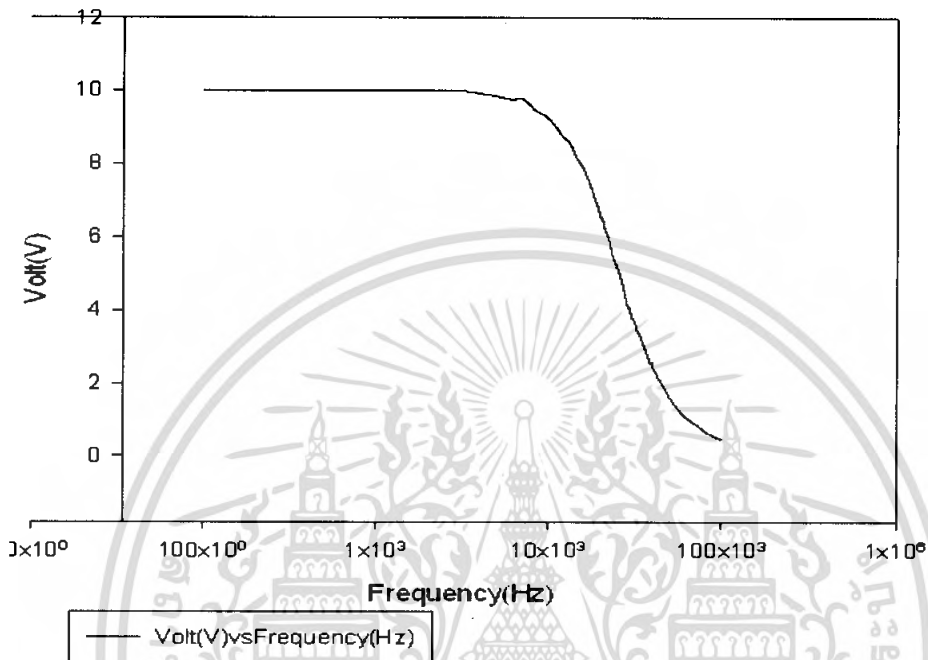
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ผลการทดลองการหาความถี่ Cut off

ครั้งที่	ความถี่ (Hz)	โวลต์ที่วัดได้ (โวลต์V _{p-p})
28	19 k	6.80
29	20 k	6.48
30	21 k	6.16
31	22 k	5.92
32	23 k	5.52
33	24 k	5.28
34	25 k	5.04
35	26 k	4.80
36	27 k	4.48
37	28 k	4.16
38	29 k	4.00
39	30 k	3.76
40	31 k	3.68
41	32 k	3.44
42	33 k	3.36
43	34 k	3.20
44	35 k	3.04
45	36 k	2.88
46	37 k	2.72
47	38 k	2.56
48	39 k	2.56
49	40 k	2.40
50	50 k	1.60
51	60 k	1.12
52	70 k	880 m
53	80 k	680 m
54	90 k	536 m
55	100 k	432 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

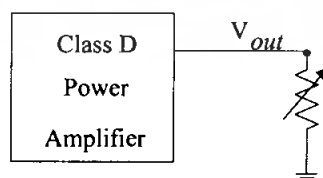
จากผลการทดลองเมื่อขนาดของอัตราขยายลดลงเท่ากับ 0.707 เท่าของค่าสูงสุด จะได้ค่าความถี่หยุดที่ได้ประมาณ 18 kHz นำค่าที่ได้มาวาดกราฟได้ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงผลการทดลองการหาค่าความถี่หยุด

Output Impedance

การวัดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์นั้น วัดได้โดยนำตัวต้านทานรับค่าได้มาต่อทางภาคเอาต์พุต แล้วปรับค่าตัวต้านทานจนกระทั่งระดับสัญญาณ ได้ลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของสัญญาณเดิม แล้ววัดหาค่าความต้านทานจากตัวต้านทานปรับค่าได้นั้น จะได้เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ออกมา



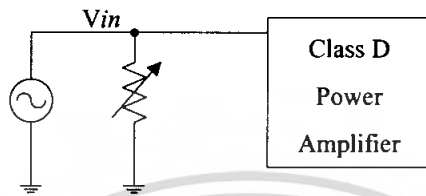
รูปที่ 4.20 ตัวอย่างแสดงการวัดค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์

ซึ่งค่าความต้านทานที่ได้หรือเอาต์พุตอิมพีแดนซ์นั้นเท่ากับ 8.6 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Input Impedance

การวัดอินพุตอิมพีแดนซ์นั้น วัดโดยนำตัวต้านทานปรับค่าได้มาต่อทางภาคอินพุต แล้วปรับค่าตัวต้านทานจนกระทั่งระดับสัญญาณได้ลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของสัญญาณเดิม แต่การวิเคราะห์หาอินพุตอิมพีแดนซ์นั้น ต้องคำนึงถึงอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณและของวงจรขยายกำลังสัญญาณคลาสดีอีกด้วย



รูปที่ 4.21 ตัวอย่างแสดงการวัดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์

ซึ่งจากการทดลองจะได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ 7k โอห์ม

กำลังงานขับ

การหากำลังงานในอุดมคติ คือ กำลังงานที่ออกมาต้องเท่ากับกำลังงานที่ป้อนเข้าไป

จากสูตร

$$P_{out} = \frac{v_{in}^2}{2R_{load}}$$

ใช้แหล่งจ่ายไฟ

30V p-p

ใช้

$$R_{load} = 8$$

โอห์ม

เพราะฉะนั้น

$$P_{out} = I_{load}^2 R_{load}$$

วัตต์

หรือเท่ากับ 39.77 วัตต์ (rms)

ในทางปฏิบัติทำการวัดกำลังจาก

$$P_{out} = I_{load}^2 R_{load} \tag{4.2}$$

I คือ กระแสที่ไหลผ่าน Load

จากการทดลองวัดกระแสได้เท่ากับ 2.44แอมแปร์

เพราะฉะนั้น $P_{out} = 2.44^2 \times 8 = 47.62$ วัตต์

หรือ เท่ากับ 33.67 วัตต์ (rms)

ประสิทธิภาพ

วัดหาประสิทธิภาพโดยนำกำลังด้านเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับกำลังงานด้านอินพุต

จาก
$$\text{Efficiency} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100 \%$$

แทนค่าตามสูตร
$$\frac{33.67}{39.77} \times 100 = 84.56\%$$

ความถี่ตอบสนอง(Frequency response)

ความถี่ตอบสนองสามารถทำการวัดและหาค่าได้โดย ป้อนสัญญาณไซน์เวฟที่มีความถี่ 1Hz ถึง 30kHz ที่แอมป์ริจูด 1 v_{p-p} ให้กับวงจรแล้ววัดสัญญาณตอบสนองที่เอาต์พุต ดังนี้

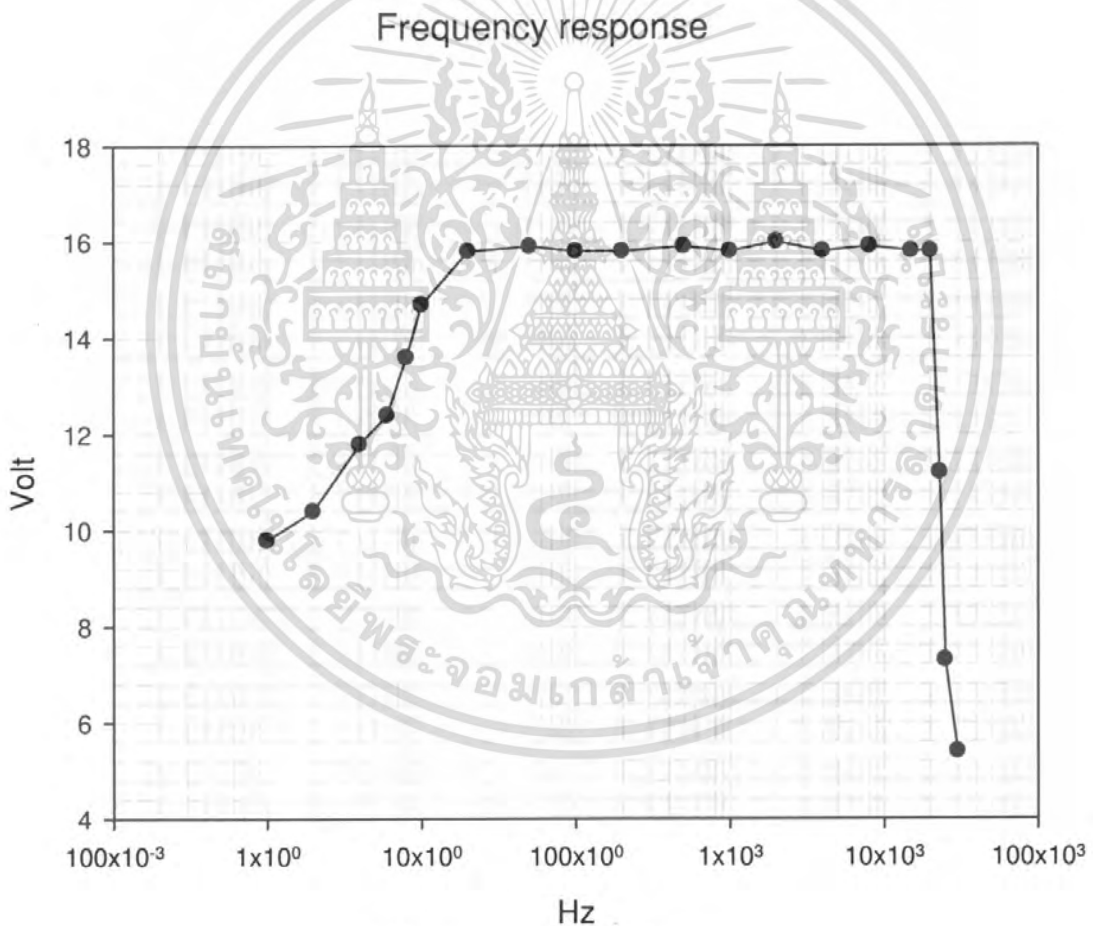
ตารางที่ 4.3 ความถี่ตอบสนอง(Frequency response)

ความถี่ที่ป้อน (Hz)	ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต v _{p-p}
1	9.8
2	10.4
4	11.8
6	12.4
8	13.6
10	14.7
20	15.8
50	15.9
100	15.8
200	15.8
500	15.9
1k	16.0
2k	16.0
4k	15.8
8k	15.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) แสดงความถี่ตอบสนอง (Frequency response)

ความถี่ที่ป้อน(Hz)	ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต V_{p-p}
15k	15.8
20k	15.8
23k	11.2
25k	7.3
30k	5.4



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความถี่ตอบสนอง

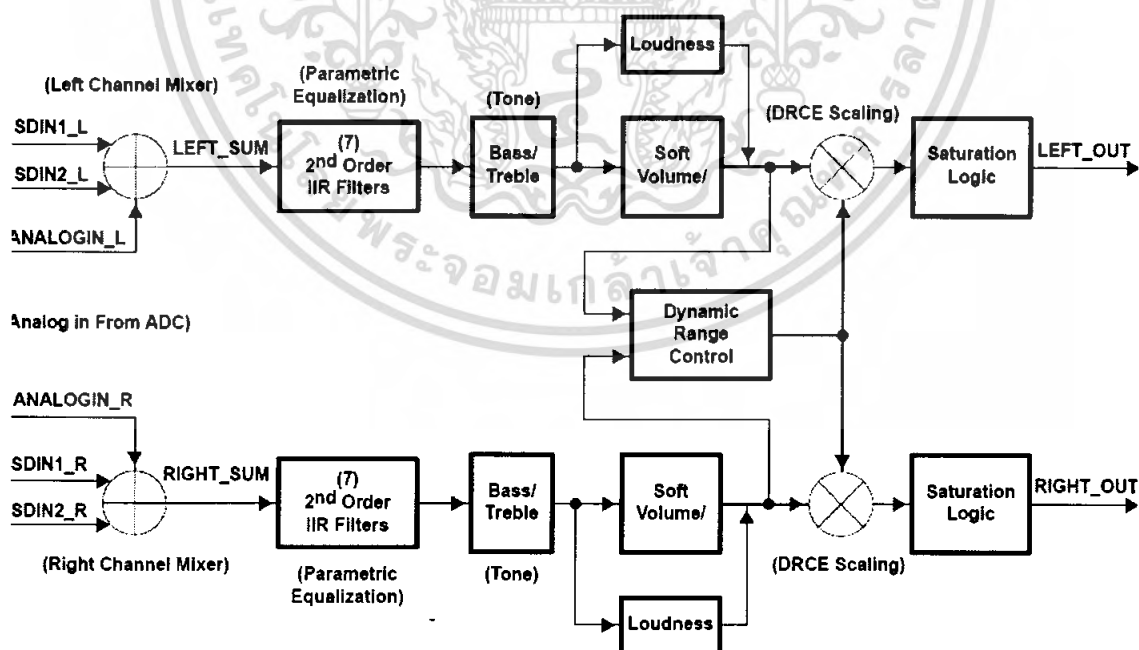
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 ผลการทดลองในส่วนของอิกวไลเซอร์

การทดลองในสถานะเริ่มต้นของ IC TAS3002 หรือในสภาวะรีเซ็ต คือ

- Clears all the RAM memory content
- Clears all the registers in the circuits
- Purges the codec
- Selects analog input A (RINA and LINA) and sets the input A active indicator (INPA) low.
- Initializes the equalization parameters to All Pass filter
- Sets the digital audio interface to I²S – 18 bit mode
- Sets the bass/treble to 0 dB
- Sets the mixer gain to 0 dB SDINI and mutes both SDIN2 and analog-in
- Sets the volume to -40 dB
- Turns off all enhancement features (DRCE, etc.)
- Reads the I²C address id 68h, the device reads its EPROM. It is possible to load the

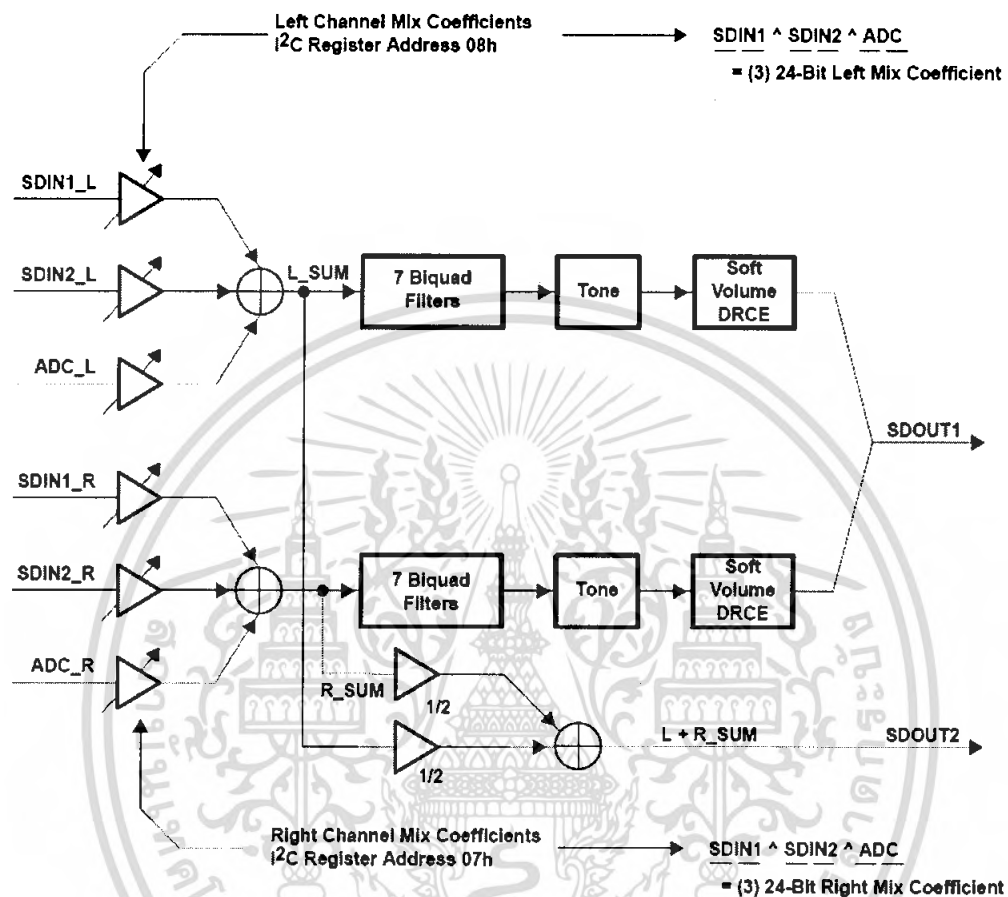
user- defined bass/treble data and break points (option). If here is on data, the device loads default bass/treble delta and break point from ROM.



รูปที่ 4.23 บล็อกไดอะแกรมในสภาวะรีเซ็ตของ IC TAS3002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8.1 การทดลองวัดสัญญาณ Volume



รูปที่ 4.24 บล็อกไดอะแกรมการทดลองการวัด Volume

การทดลองจะป้อนสัญญาณอินพุต Sine Wave ความถี่ 1 kHz 100 Vrms แล้วทำการปรับค่าพารามิเตอร์ Gain ของ Volume ตามตารางในคาต้ำชีทตั้งแต่ -55 dB ถึง +18 โดยให้อัตราการขยายของแต่ละภาคเป็น All PASS (0 dB)

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองวัดสัญญาณ Volume

Gain (dB) datasheet	Vout (Vrms)	Gain (dB)	Gain (dB) datasheet	Vout (Vrms)	Gain (dB)
-55	0.0048	-26.354	-28	0.00756	-22.411
-54	0.0052	-25.659	-27	0.00759	-22.321
-53	0.0055	-25.109	-26	0.00772	-22.234
-52	0.0056	-25.023	-25	0.00787	-22.055
-51	0.00642	-23.831	-24	0.00827	-21.609
-50	0.00615	-24.258	-23	0.0093	-20.658
-49	0.00631	-23.987	-22	0.00951	-20.413
-48	0.0061	-24.221	-21	0.0102	-19.845
-47	0.00656	-23.657	-20	0.0117	-18.623
-46	0.00651	-23.767	-19	0.0127	-17.933
-45	0.00673	-23.487	-18	0.0133	-17.556
-44	0.00606	-24.323	-17	0.0144	-16.887
-43	0.00638	-23.035	-16	0.0165	-15.645
-42	0.00632	-23.954	-15	0.018	-14.833
-41	0.00638	-23.909	-14	0.0199	-14.035
-40	0.00656	-23.624	-13	0.0224	-12.968
-39	0.00588	-24.6145	-12	0.0247	-12.198
-38	0.00633	-23.956	-11	0.0277	-11.150
-37	0.00648	-23.755	-10	0.0308	-10.244
-36	0.00672	-23.470	-9	0.0347	-9.144
-35	0.00632	-23.923	-8	0.0386	-8.267
-34	0.00645	-23.847	-7	0.0432	-7.209
-33	0.00748	-22.587	-6	0.0483	-6.312
-32	0.00667	-23.512	-5	0.0542	-5.337
-31	0.00669	-23.459	-4	0.0607	-4.365
-30	0.00678	-23.312	-3	0.0716	-2.979
-29	0.0071	-22.957	-2	0.0795	-1.989

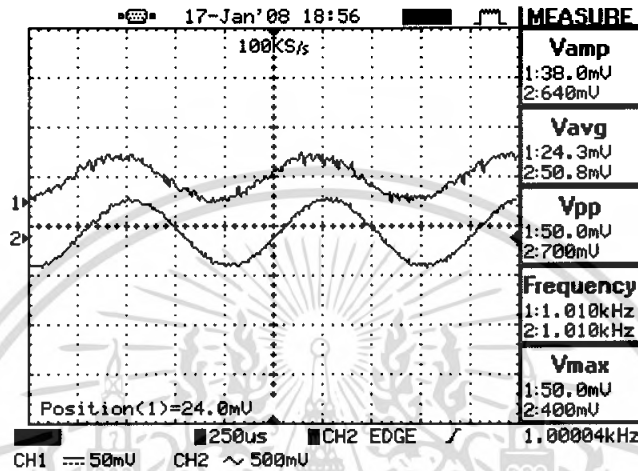
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ผลการทดลองวัดสัญญาณ Volume

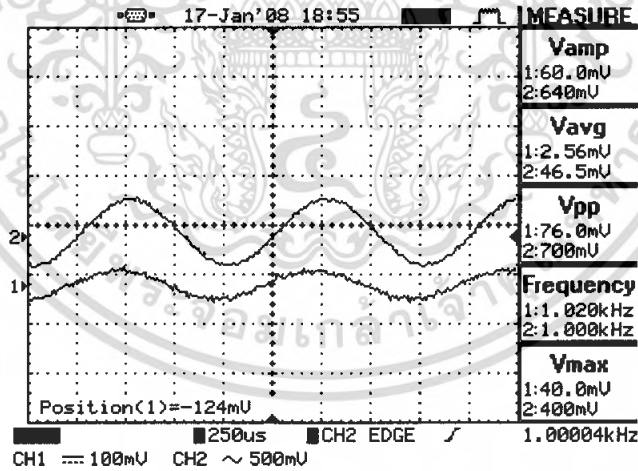
Gain (dB) datasheet	Vout (Vrms)	Gain (dB)	Gain (dB) datasheet	Vout (Vrms)	Gain (dB)
-1	0.0886	-1.047	9	0.271	8.667
0	0.0987	-0.181	10	0.305	9.688
1	0.11	0.803	11	0.342	10.689
2	0.123	1.734	12	0.383	11.612
3	0.137	2.778	13	0.429	12.646
4	0.154	3.753	14	0.481	13.675
5	0.172	4.711	15	0.539	14.612
6	0.193	5.7145	16	0.602	15.512
7	0.216	6.698	17	0.677	16.624
8	0.242	7.644	18	0.725	17.212

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองวัดอัตราการขยายของ Volume วงจรอิกควไลเซอร์โดยให้อัตราการขยายของแต่ละภาค เป็น ALL PASS แล้วทำการป้อนสัญญาณไซน์เวฟความถี่ 1 kHz ขนาด 640 mVp-p แล้วทำการปรับอัตราการขยายของวงจรตามตารางในคำดำชี้ทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ CH 1 เทียบกับสัญญาณอินพุตที่ CH2 และค่าเอาต์พุตถูกปรับไว้อยู่ที่ -15 dB



(ก) -15 dB



(ข) +10 dB

รูปที่ 4.25 ผลการทดลองวัดอัตราการขยายของ Volume วงจรอิกควไลเซอร์โดยปรับอัตราการขยายไว้ทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ CH 1 เทียบกับสัญญาณอินพุตที่ CH2 เมื่อค่าเอาต์พุตถูกปรับไว้อยู่ที่ (ก) -15 dB และ (ข) +10 dB

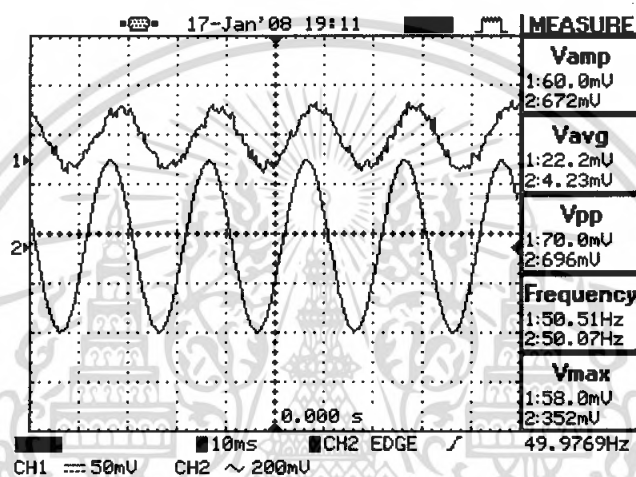
4.8.2 การวัดสัญญาณ TONE (BASS & TREBLE)

การวัดสัญญาณในเรื่องของ Tone จะหาผลการตอบสนองความถี่ของภาคโทนคอนโทรล ซึ่งประกอบไปด้วย BASS และ TREBLE ในตอนแรกจะวัดสัญญาณที่ ALL PASS (0dB) ในการวัด BASS จะปรับ Gain ไว้ที่ 10 dB แล้วปรับที่เหลือเป็น 10 dB ส่วนการวัด TREBLE จะปรับ Gain ไว้ที่ 10 dB แล้วที่เหลือเป็น 0 dB แล้วทำการป้อนสัญญาณอินพุต ที่ความถี่ที่ตั้งแต่ 1Hz จนถึง 30 kHz แล้วทำการวัดสัญญาณเอาต์พุต หาอัตรา การขยายและการตอบสนองความถี่

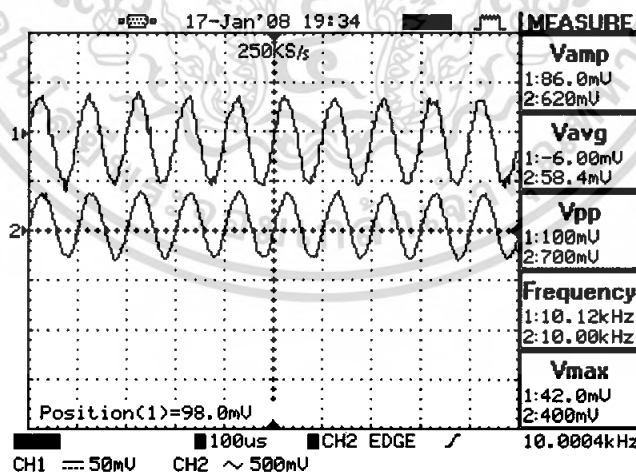
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองวัด TONE (ALL PASS 0 dB)

f(Hz)	Vout (Vrms)	Gain (dB)	f(Hz)	Vout(Vrms)	Gain (dB)
1	0.0765	-2.312	200	0.098	-0.111
2	0.0807	-1.856	300	0.1	0
3	0.0908	-0.834	400	0.0996	-0.023
4	0.0952	-0.412	500	0.0997	-0.045
5	0.0956	-0.309	600	0.0995	-0.056
6	0.0982	-0.123	700	0.0997	-0.022
7	0.0978	-0.188	1000	0.0999	-0.001
8	0.0972	-0.237	2000	0.0995	-0.045
9	0.0968	-0.298	3000	0.0998	-0.032
10	0.0986	-0.156	4000	0.0995	-0.034
20	0.1	0	5000	0.0996	-0.065
30	0.0998	-0.192	6000	0.0995	-0.066
40	0.1	0	7000	0.0992	-0.067
50	0.1	0	8000	0.0997	-0.025
60	0.0987	-0.096	9000	0.0992	-0.067
70	0.1	0	10000	0.0991	-0.070
80	0.0998	-0.021	20000	0.099	-0.081
90	0.0994	-0.045	30000	0.0227	-12.813
100	0.0979	-0.136			

ผลการวัดสัญญาณในเรื่องของ TONE จะหาผลตอบสนองความถี่ของโทนซึ่งประกอบไปด้วย BASS และ TREBLE จะทำการวัดโดยให้ ALL PASS (0dB) ในการวัดสัญญาณ BASS และ TREBLE จะปรับอัตรา การขยายของ BASS ไว้ที่ 10 dB ที่เหลือปรับไว้เป็น 0 dB แล้วป้อนสัญญาณอินพุต ที่ความถี่ตั้งแต่ 1 Hz จนถึง 30 kHz แล้วทำการวัดสัญญาณเอาต์พุต วัด TREBLE จะปรับอัตราขยายของ TREBLE ไว้ที่ 10 dB ที่เหลือปรับไว้เป็น 0 dB แล้วป้อนสัญญาณอินพุต ที่ความถี่ตั้งแต่ 1 Hz จนถึง 30 kHz แล้วทำการวัดสัญญาณ เอาต์พุตหาอัตราขยายและการ ตอบสนองความถี่ ซึ่งทำการป้อนอินพุตขนาด 50 Hz และ 10 kHz ที่ CH 2 แล้วทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ CH 1



(ก) 50 Hz



(ข) 10 kHz

รูปที่ 4.26 การวัดสัญญาณเอาต์พุตหาอัตราขยายและการตอบสนองความถี่ ซึ่งทำการป้อนอินพุต

(ก) 50 Hz ที่ CH 2 แล้วทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ CH 1 (ข) 10 kHz ที่ CH 2 แล้วทำการวัด สัญญาณเอาต์พุตที่ CH 1

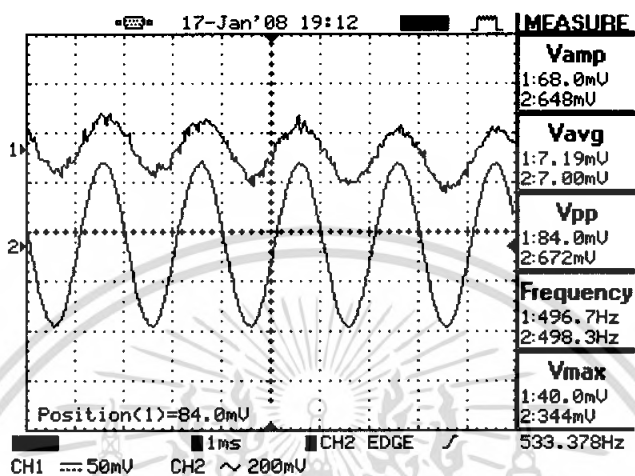
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองวัด TONE (BASS +10 dB)

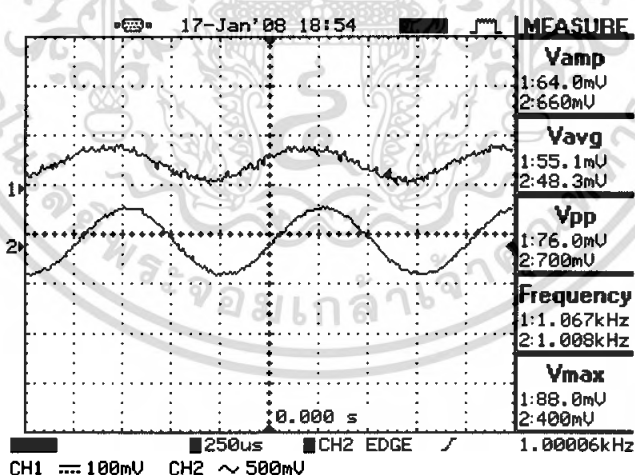
f(Hz)	Vout (Vrms)	Gain (dB)	f(Hz)	Vout(Vrms)	Gain (dB)
1	0.317	10.012	300	0.181	5.112
2	0.316	9.989	400	0.137	2.722
3	0.317	10.045	500	0.117	1.334
4	0.317	10.026	600	0.109	0.777
5	0.317	10.026	700	0.104	0.387
6	0.317	10.026	800	0.102	0.134
7	0.317	10.026	900	0.1	0
8	0.315	9.976	1000	0.0998	-0.012
9	0.317	10.024	2000	0.0995	-0.045
10	0.317	10.024	3000	0.0992	-0.078
20	0.31	9.826	4000	0.0997	-0.024
30	0.31	9.976	5000	0.1	0
40	0.306	9.778	6000	0.0994	-0.053
50	0.309	9.792	7000	0.0992	-0.0676
60	0.305	9.634	8000	0.0995	-0.071
70	0.307	9.755	9000	0.0992	-0.089
80	0.312	9.812	10000	0.0997	-0.064
90	0.308	9.733	20000	0.099	-0.098
100	0.301	9.586	30000	0.024	-12.365
200	0.254	8.092			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดสัญญาณ BASS จะปรับอัตราขยายของ BASS ไว้ที่ 10 dB ที่เหลือปรับไว้เป็น 0 dB แล้ว
ป้อนสัญญาณอินพุต ที่ความถี่ตั้งแต่ 1 Hz จนถึง 30 kHz แล้วทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ CH 2



(ก) ป้อนสัญญาณที่ 500 Hz



(ข) ป้อนสัญญาณที่ 1 kHz

รูปที่ 4.27 สัญญาณ 500 Hz และ สัญญาณ 1 kHz ของ BASS +10dB

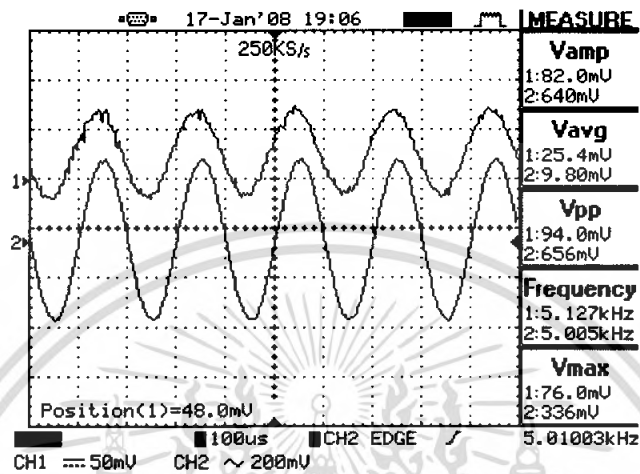
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองวัด TONE (TREBLE +10 dB)

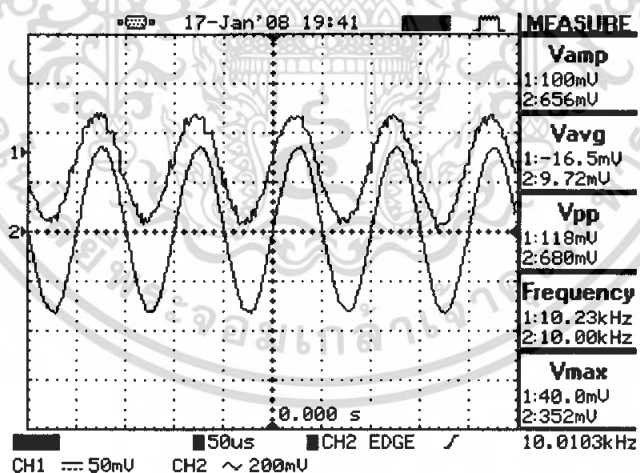
f(Hz)	Vout (Vrms)	Gain (dB)	f(Hz)	Vout(Vrms)	Gain (dB)
1	0.0734	-2.667	300	0.0998	-0.016
2	0.0915	-0.787	400	0.0998	-0.016
3	0.0945	-0.493	500	0.0995	-0.047
4	0.0957	-0.334	600	0.106	0.508
5	0.0969	-0.256	700	0.0995	-0.043
6	0.0978	-0.187	800	0.1	0
7	0.101	0.084	900	0.0998	-0.014
8	0.101	0.084	1000	0.0986	-0.153
9	0.101	0.084	2000	0.0998	-0.014
10	0.102	0.171	3000	0.107	0.587
20	0.102	0.171	4000	0.126	2.006
30	0.101	0.171	5000	0.157	3.921
40	0.101	0.171	6000	0.204	6.135
50	0.1	0	7000	0.23	7.276
60	0.101	0.165	8000	0.268	8.595
70	0.101	0.165	9000	0.279	8.935
80	0.101	0.098	10000	0.286	9.127
90	0.0978	-0.112	20000	0.305	9.697
100	0.0998	-0.014	30000	0.0261	-11.655
200	0.0999	-0.009			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดสัญญาณ TREBLEจะปรับอัตราการขยายของ TREBLE ไว้ที่ระดับ 10 dB ส่วนที่เหลือปรับไว้เป็น 0 dB แล้วป้อนสัญญาณอินพุต ที่ความถี่ตั้งแต่ 1 Hz จนถึง 30 kHz แล้วทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ CH 2



(ก) ป้อนสัญญาณที่ 5 kHz

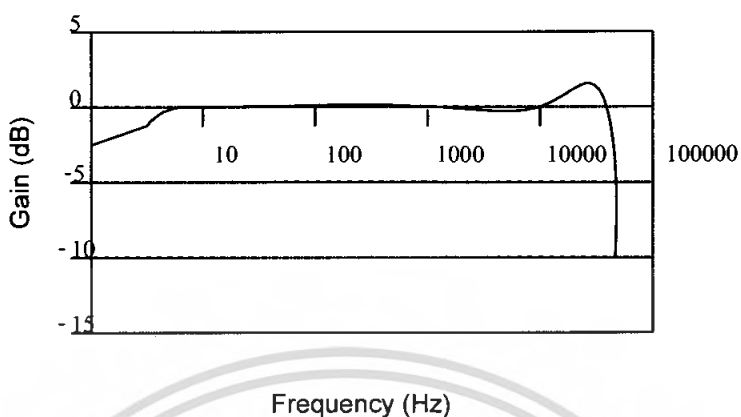


(ข) ป้อนสัญญาณที่ 10 kHz

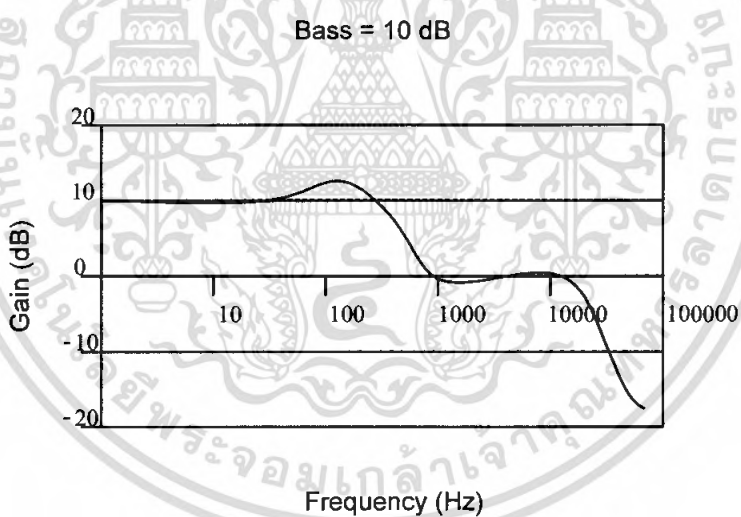
รูปที่ 4.28 สัญญาณ 5 kHz และ สัญญาณ 10 kHz ของ TREBLE ที่ระดับ 10dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

All Pass (main control)



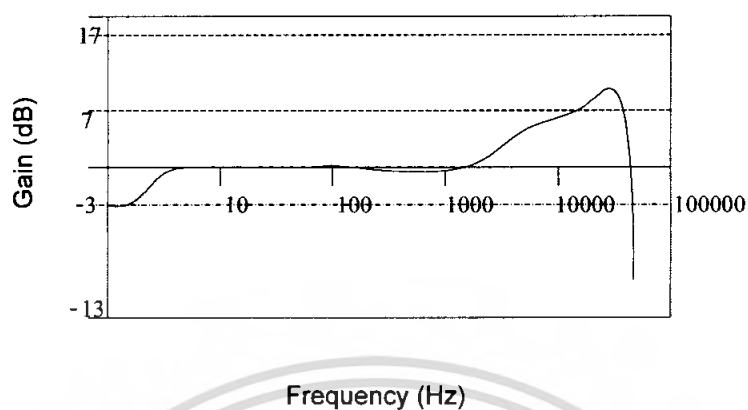
รูปที่ 4.29 ผลการทดลอง ผลตอบสนองทางความถี่ผ่าน (ALL PASS)



รูปที่ 4.30 ผลการทดลองวัด BASS Gain ที่ +10 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TREBLE = 10 dB



รูปที่ 4.31 ผลการทดลองวัด TREBLE Gain ที่ +10 dB

4.8.3 การทดลอง Biquad Filter

Biquad Filter ของ IC TAS3002 นี้มีทั้งหมด 7 ช่องซึ่งทำให้สามารถกำหนดย่านการตอบสนองความถี่ได้ทั้งหมด 7 ย่านความถี่ การกำหนดย่านความถี่จะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้คำนวณตามสมการต่างๆ ของวงจรกรองความถี่ต่างๆ ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น การกำหนดค่าพารามิเตอร์อาจได้มาจากการคำนวณตามสมการที่กล่าวไป หรือทำการป้อนเข้ากับโปรแกรม เราสามารถกำหนดค่าของการฟิลเตอร์ที่ต้องการแล้วโปรแกรมจะทำการ Generate ค่าพารามิเตอร์ต่างๆซึ่งแบ่งออกเป็นเลขฐาน 6 ส่วนค่าที่จะนำไปป้อนเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับ IC TAS3002 จะอยู่ในรูปแบบของสัมประสิทธิ์ของ a_1, a_2, b_0, b_1, b_2 จากการทดสอบได้ทำการทดสอบวงจรกรองความถี่ต่างๆ ได้ผลการทดลองดังนี้คือ

ทำการทดลองในส่วนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ได้ทำการกำหนดค่าให้ Gain = 10 dB Cut Off frequency = 1 kHz

$b_0 = 11F34H$ $b_1 = E309F7H$ $b_2 = 0C8D38H$

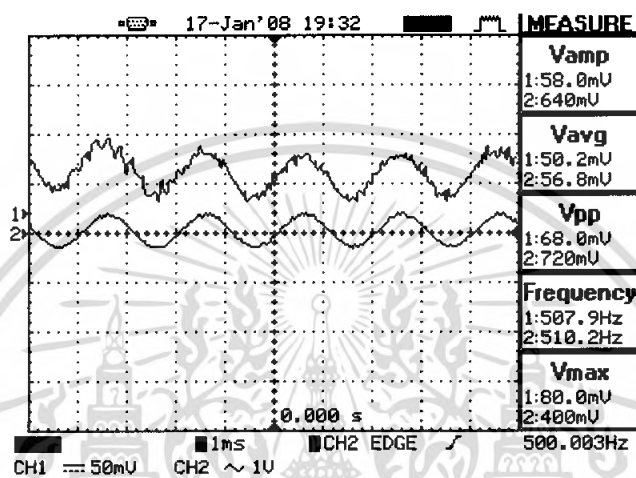
$a_1 = E2CB9CH$ $a_2 = 0D6E11H$

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

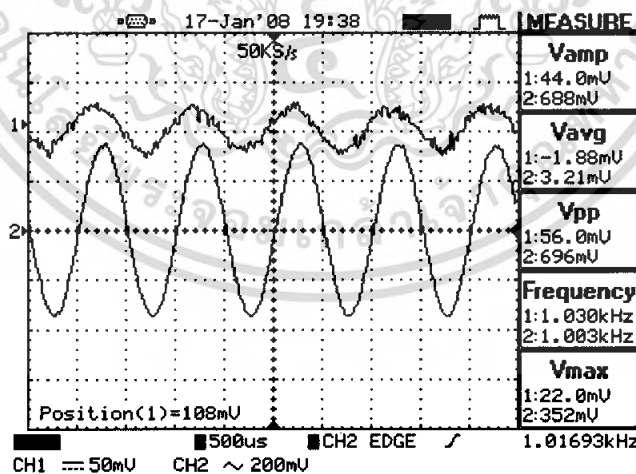
f(Hz)	Vin (Vrms)	Vout (Vrms)	Gain (dB)	f(Hz)	Vin (Vrms)	Vout (Vrms)	Gain (dB)
1	58.6	184.7	9.972	300	90	275.4	9.712
2	58.6	184.7	9.972	400	90	272.5	9.625
3	58.6	184.7	9.972	500	89.8	276.2	9.476
4	58.6	184.7	9.972	600	87.8	260.6	9.487
5	58.6	184.7	9.972	700	92.3	252.1	8.709
6	58.6	184.7	9.972	800	87.2	230.2	8.437
7	58.6	184.7	9.972	900	90.5	210	7.323
8	58.6	184.7	9.972	1000	89.8	194.6	6.757
9	58.6	184.7	9.972	2000	86.7	101	1.378
10	58.6	184.7	9.972	3000	82.6	84.14	0.187
20	77.6	243	9.9651	4000	77.7	80.12	0.237
30	83.9	260.5	9.876	5000	72.9	71.66	-0.111
40	89	273.8	9.765	6000	66.1	67.5	0.126
50	87.6	270.6	9.743	7000	64	62.12	-0.209
60	86.5	269.4	9.844	8000	57	57.33	0.054
70	91.1	276.5	9.698	9000	55.1	52.56	-0.411
80	92.1	276.4	9.546	10000	50.7	59.7	-0.134
90	93.2	275.6	9.445	20000	29.5	29.07	-0.177
100	89.4	275.3	9.729	30000	29.5	29.07	-0.189
200	89.8	276.1	9.793				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองเมื่อทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณเพื่อนำมาใช้เป็นค่ากำหนดย่านการตอบสนองความถี่ตามคุณสมบัติต่างๆของแต่ละ Biquad Filter โดยส่วนแรกจะทำเป็นส่วนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ใช้ Gain = +10 dB Cut Off frequency = 1 kHz วัดสัญญาณเอาต์พุตที่ CH1 เทียบกับสัญญาณอินพุตที่ CH2



(ก) ป้อนสัญญาณอินพุต 1 V



(ข) ป้อนสัญญาณอินพุต 200 mV

รูปที่ 4.32 ผลที่ออกจากส่วนกรองความถี่ต่ำผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการทดลองในส่วนของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

ได้ทำการกำหนดค่าให้ Gain = 10 dB Cut Off frequency = 1 kHz

$b_0 = 370A4EH$ $b_1 = A4616AH$ $b_2 = 2B6BA2H$

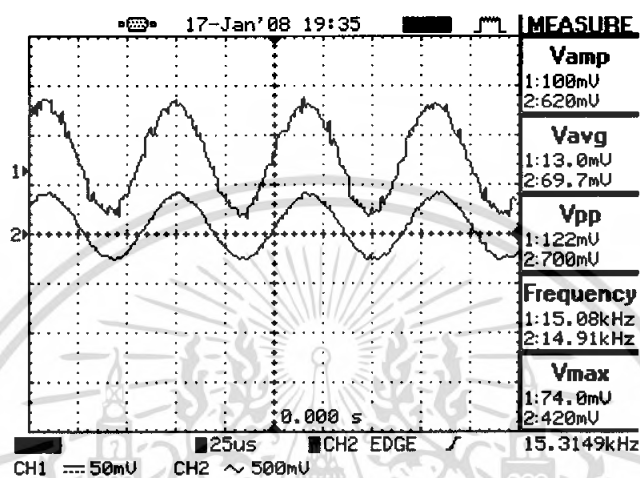
$a_1 = E31F68H$ $a_2 = 0D27F3H$

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

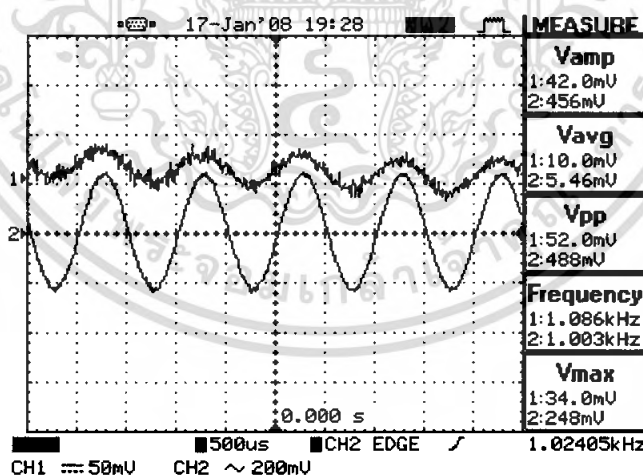
f(Hz)	Vin (Vrms)	Vout (Vrms)	Gain (dB)	f(Hz)	Vin (Vrms)	Vout (Vrms)	Gain (dB)
1	58.8	59.8	0.156	300	89.9	88.09	-0.165
2	58.8	59.8	0.156	400	90.1	95.62	0.524
3	58.8	59.8	0.156	500	89.8	105.2	1.376
4	58.8	59.8	0.156	600	88.2	120.5	2.714
5	58.8	59.8	0.156	700	91.8	133.7	3.265
6	58.8	59.8	0.156	800	87.4	155.2	4.945
7	58.8	59.8	0.156	900	90.4	178.3	5.890
8	58.8	59.8	0.156	1000	89	194.4	6.776
9	58.8	59.8	0.156	2000	86.9	258	9.458
10	58.8	59.8	0.156	3000	82.8	252.5	9.619
20	78	77.49	-0.034	4000	80.5	237.5	9.376
30	84.5	83.38	-0.167	5000	72.8	222.7	9.765
40	86.4	85.24	-0.145	6000	66.3	211.1	10.051
50	87.7	86.06	-0.167	7000	64	196.8	9.734
60	86.7	85.67	-0.102	8000	57.8	180.8	9.929
70	91.6	88.64	-0.235	9000	55.4	165.8	9.517
80	87.1	87.67	0.098	10000	51	154.6	9.654
90	90.7	88.64	-0.136	20000	30.6	87.9	9.137
100	90	87.05	-0.255	30000	30.6	87.9	9.130
200	90	88.59	-0.195				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองเมื่อทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณเพื่อนำมาใช้เป็นค่ากำหนดย่านการตอบสนองความถี่ตามคุณสมบัติต่างๆของแต่ละ Biquad Filter โดยส่วนแรกจะทำเป็นส่วนของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน ใช้ Gain = +10 dB Cut Off frequency = 1 kHz วัดสัญญาณเอาต์พุตที่ CH1 เทียบกับสัญญาณอินพุตที่ CH2



(ก) ป้อนสัญญาณอินพุต 500 mV



(ข) ป้อนสัญญาณอินพุต 200 mV

รูปที่ 4.33 ผลที่ออกจากส่วนกรองความถี่สูงผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการทดลองในส่วนของวงจรความถี่หยุด

ได้ทำการกำหนดค่าให้ Band width 1 kHz Cut Off frequency = 1 kHz

$$b_0 = 0F040CH \quad b_1 = E239AEH \quad b_2 = 0F040CH$$

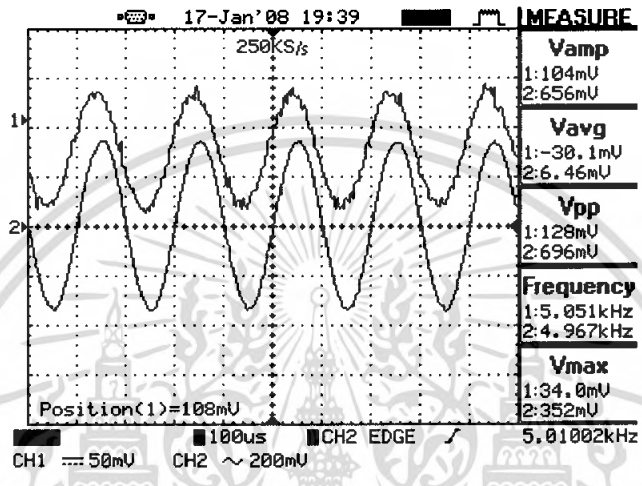
$$a_1 = E239AEH \quad a_2 = 0E0818H$$

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองวงจรความถี่หยุด

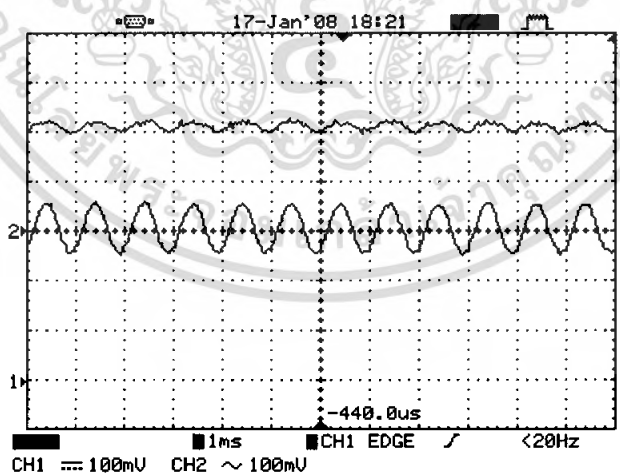
f(Hz)	Vin (Vrms)	Vout (Vrms)	Gain (dB)	f(Hz)	Vin (Vrms)	Vout (Vrms)	Gain (dB)
1	59.1	59.77	0.087	300	87.9	83.7	-0.611
2	59.1	59.77	0.087	400	89.9	79.63	-1.060
3	59.1	59.77	0.087	500	90.1	73.62	-1.705
4	59.1	59.77	0.087	600	89.6	64.4	-2.844
5	59.1	59.77	0.087	700	91.8	53.19	-4.764
6	59.1	59.77	0.087	800	87.2	38.46	-7.115
7	59.1	59.77	0.087	900	90.3	20.43	-12.934
8	59.1	59.77	0.087	1000	89.2	10.25	-18.797
9	59.1	59.77	0.087	2000	86.9	70.71	-1.788
10	59.1	59.77	0.0987	3000	82.5	75.77	-0.756
20	77.8	78.13	0.025	4000	77.9	73.83	-0.409
30	83.8	83.2	-0.067	5000	72.3	69.64	-0.344
40	86.6	86.05	-0.065	6000	67.3	65.25	-0.224
50	87.9	85.51	-0.133	7000	62.4	60.57	-0.254
60	86.6	85.75	-0.089	8000	57.4	57.44	0.007
70	91.4	88.07	-0.312	9000	55	52.62	-0.387
80	87.1	87.31	0.034	10000	50.9	49.53	-0.229
90	91	87.89	-0.308	20000	30.3	28.89	-0.415
100	89.4	87.25	-0.285	30000	0	28.89	-0.416
200	89.8	66.35	-2.605				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองเมื่อทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณเพื่อนำมาใช้เป็นค่ากำหนดย่านการตอบสนองความถี่ตามคุณสมบัติต่างๆของแต่ละ Biquad Filter โดยส่วนต่อมาจะทำเป็นส่วนของวงจร ตัดบางความถี่ (Notch Filter) ใช้ Gain = +10 dB Cut Off frequency = 1 kHz วัดสัญญาณเอาต์พุตที่ CH1 เทียบกับสัญญาณอินพุตที่ CH2



(ก) ป้อนสัญญาณอินพุต 200 mV

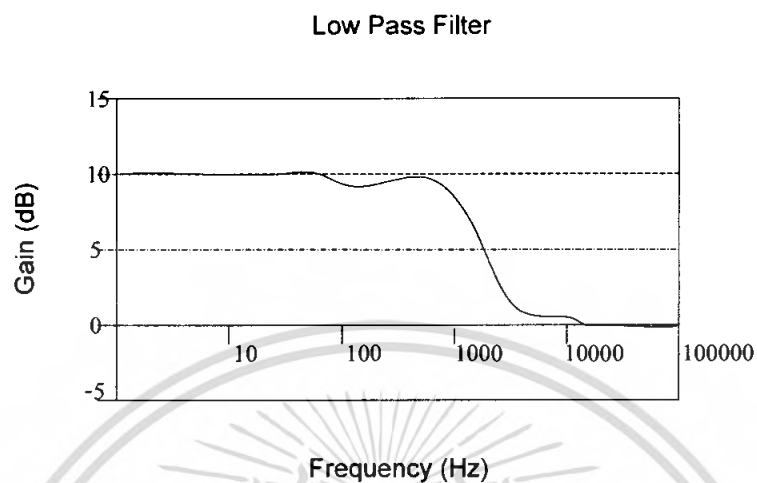


(ข) ป้อนสัญญาณอินพุต 100 mV

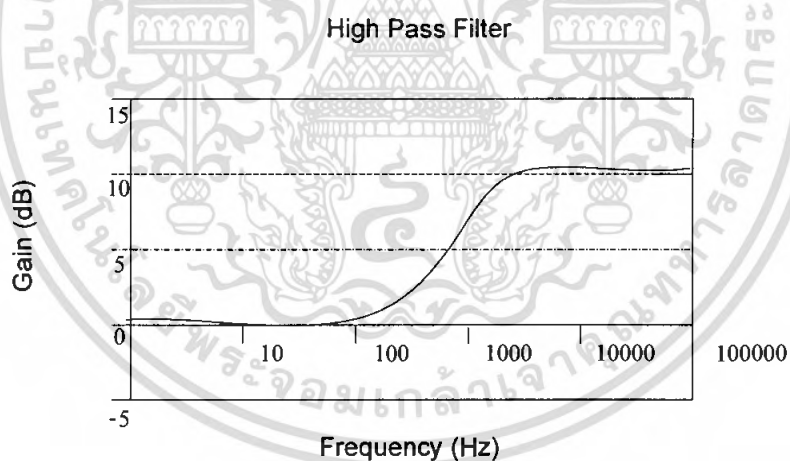
รูปที่ 4.34 ผลที่ออกจากส่วนความถี่หยุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟ

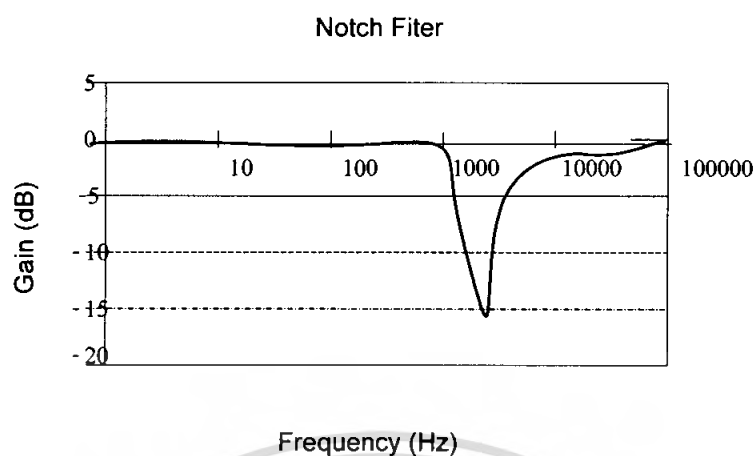


รูปที่ 4.35 กราฟจากการทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 4.36 กราฟจากการทดลองวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 กราฟจากการทดลองวงจรกรองความถี่หยุด

สามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

(set)eq	b_0	b_1	b_2	a_1	a_2	BW	f_c
eq1	10196E	E017B3	0FCF0B	E017B3	0FE879	44	50
eq2	103D05	E03973	0F8A88	E03973	0FC78E	106	120
eq3	109434	E08EE3	0EE2B5	E08EE3	0F76EA	260	290
eq4	114ED3	E156C4	077B7A	E256C4	0ECA4D	600	700
eq5	134A57	E3C1E9	09AA88	E3C1E9	0CF4E0	1.6 k	1.7 k
eq6	177623	EAC605	01A313	EAC605	91937	4.1 k	4.3 k
eq7	1CE7B0	FACEA4	F72891	FACEA4	41040	8.2 k	10 k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลอง Biquad Filter 50 Hz

f(Hz)	Vin (Vrms)	Vout (Vrms)	Gain (dB)	f(Hz)	Vin (Vrms)	Vout (Vrms)	Gain (dB)
1	58.2	58.2	0	300	90.2	96.68	0.601
2	58.2	58.2	0	400	90.3	93.06	0.265
3	58.2	58.2	0	500	90.8	91.37	0.078
4	58.2	58.2	0	600	90.8	92.23	0.107
5	58.2	58.2	0	700	92.2	90.7	-0.156
6	58.2	58.2	0	800	88	87.6	-0.045
7	58.2	58.2	0	900	91	88	-0.223
8	58.2	58.2	0	1000	90	87.6	-0.266
9	58.2	58.2	0	2000	87.6	83.4	-0.443
10	60.3	67.5	0.987	3000	83.3	79.01	-0.434
20	78	119.2	3.687	4000	78.7	74.14	-0.514
30	85	180.2	6.556	5000	74.1	69.18	-0.525
40	86.7	243.9	9.034	6000	67.5	65.38	-0.224
50	88	271.1	9.798	7000	65	60.72	-0.578
60	86.7	251.5	9.257	8000	58.1	54.81	-0.512
70	91.2	221.3	7.697	9000	55	50.49	-0.742
80	87.3	197.4	7.045	10000	50	47	-0.535
90	90.7	173.4	5.645	20000	30.6	28.4	-0.678
100	90	158.7	4.975	30000	30.6	28.4	-0.623
200	90.3	107.9	1.598				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลอง Biquad Filter 120 Hz

f(Hz)	Vin (Vrms)	Vout (Vrms)	Gain (dB)	f(Hz)	Vin (Vrms)	Vout (Vrms)	Gain (dB)
1	58.3	57.44	-0.144	300	90.6	135	3.412
2	58.3	57.44	-0.144	400	90.5	114	2.010
3	58.3	57.44	-0.144	500	90.1	105.2	1.388
4	58.3	57.44	-0.144	600	83.1	102	1.246
5	58.3	57.44	-0.144	700	92.1	98.62	0.546
6	58.3	57.44	-0.144	800	88	92.84	0.467
7	58.3	57.44	-0.144	900	91.2	92.1	0.036
8	58.3	57.44	-0.144	1000	90.1	90.93	0.068
9	58.3	57.44	-0.144	2000	87.9	84.39	-0.330
10	59.1	60	0.112	3000	83.6	79.35	-0.457
20	77.6	84.45	0.757	4000	78.4	74.1	-0.436
30	84	100.4	1.555	5000	73.3	68.93	-0.556
40	87	117	2.589	6000	67.1	65.1	-0.278
50	88	135.5	3.730	7000	65.4	60.2	-0.712
60	88.5	157.7	5.013	8000	58	55.42	-0.312
70	91.4	187.2	6.235	9000	56.1	51	-0.834
80	92.3	215	7.345	10000	51.4	47.67	-0.677
90	93.3	244	8.394	20000	31.2	27.5	-1.095
100	90	257.1	9.166	30000	31.2	27.5	-1.095
120	88.1	276.5	9.932				
200	90.2	90.2	6.424				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ผลการทดลอง Biquad Filter 290 Hz

f(Hz)	Vin (Vrms)	Vout (Vrms)	Gain (dB)	f(Hz)	Vin (Vrms)	Vout (Vrms)	Gain (dB)
1	27.5	27.42	-0.026	300	91.5	275.6	9.554
2	27.5	27.42	-0.026	400	90.4	229.5	8.056
3	27.5	27.42	-0.026	500	90.3	184.2	6.133
4	27.5	27.42	-0.026	600	90.3	156.1	4.701
5	27.5	27.42	-0.026	700	90	138.3	3.735
6	40	39.8	-0.0446	800	88.4	125.8	3.0658
7	46.2	45.35	-0.164	900	91	117.1	2.176
8	53.2	52.34	-0.112	1000	89.9	112.4	1.954
9	57.8	57.31	-0.078	2000	87.7	89.64	0.135
10	59.5	59.3	-0.067	3000	83.7	81.68	-0.223
20	78.2	79.25	0.167	4000	78.7	75.62	-0.341
30	84.3	86.38	0.267	5000	73.6	70.05	-0.456
40	87	91.38	0.434	6000	68.5	64.42	-0.597
50	87.9	95.51	0.735	7000	63.5	60.07	-0.493
60	88.8	100.3	1.035	8000	59.2	55.4	-0.517
70	89.1	105.3	1.424	9000	55.1	51.73	-0.567
80	87.7	108.2	1.833	10000	52.3	48.26	-0.634
90	91	118.4	2.243	20000	31	27.63	-0.989
100	89.8	123.8	2.798	30000	31	27.63	-0.962
200	90.4	219	7.660				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 ผลการทดลอง Biquad Filter 700 Hz

f(Hz)	Vin (Vrms)	Vout (Vrms)	Gain (dB)	f(Hz)	Vin (Vrms)	Vout (Vrms)	Gain (dB)
1	60.1	60.04	-0.007	300	90.45	139.4	3.723
2	60.1	60.04	-0.007	400	90.72	177.9	5.876
3	60.1	60.04	-0.007	500	90.4	222.6	7.859
4	60.1	60.04	-0.007	600	88.36	264.5	9.520
5	60.1	60.04	-0.007	700	92	273.4	9.461
6	60.1	60.04	-0.007	800	88.36	256.9	9.243
7	60.1	60.04	-0.007	900	91.32	237.7	8.326
8	60.1	60.04	-0.007	1000	89.96	215.3	7.578
9	60.1	60.04	-0.007	2000	87.93	112.8	2.312
10	62.42	62.21	-0.028	3000	84.11	92.37	0.857
20	78.46	77.86	-0.0698	4000	78.86	80.74	0.203
30	85	84.18	-0.087	5000	73.33	72.53	-0.064
40	87.44	86.44	-0.091	6000	68.57	65.81	-0.343
50	88.9	87.64	-0.154	7000	63.88	62.32	-0.286
60	89	89.16	0.0187	8000	60.16	56.4	-0.536
70	90.12	90.38	0.014	9000	57.05	51.88	-0.807
80	90.12	91.44	0.121	10000	52.34	47.92	-0.727
90	91.47	93.61	0.200	20000	52.34	47.92	-0.785
100	90.06	93.86	0.365	30000	52.34	47.92	-0.763
200	90.44	111.4	1.811				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 ผลการทดลอง Biquad Filter 1.7 kHz

f(Hz)	Vin (Vrms)	Vout (Vrms)	Gain (dB)	f(Hz)	Vin (Vrms)	Vout (Vrms)	Gain (dB)
1	55.96	56.21	0.039	300	90.1	99	0.821
2	55.96	56.21	0.039	400	90.27	107	1.456
3	55.96	56.21	0.0389	500	90.06	116.9	2.271
4	55.96	56.21	0.0389	600	88.9	132.1	3.412
5	55.96	56.21	0.0389	700	91.55	143.3	3.133
6	55.96	56.21	0.0389	800	88	153.6	4.898
7	55.96	56.21	0.0389	900	89.94	173.5	5.750
8	55.96	56.21	0.0389	1000	89.36	191.1	6.612
9	55.96	56.21	0.0389	2000	87.07	254.9	9.312
10	55.96	56.21	0.0389	3000	83.1	169.9	6.265
20	67.18	67.29	0.011	4000	80.74	121.2	3.575
30	84.18	83.23	-0.076	5000	73.56	100.3	2.677
40	87.88	85.87	-0.204	6000	60.25	85.8	3.070
50	88.2	86.91	-0.176	7000	64.66	74.32	1.293
60	88.53	87.3	-0.156	8000	57.86	65.55	1.080
70	89.48	87.85	-0.198	9000	55.7	58.44	0.429
80	89.34	88.41	-0.094	10000	51	53.6	0.443
90	90.21	88.62	-0.153	20000	30.5	28.41	-0.644
100	89.61	88.97	-0.066	30000	30.5	28.41	-0.644
200	90.1	92.9	0.262				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 ผลการทดลอง Biquad Filter 4.3 kHz

f(Hz)	Vin (Vrms)	Vout (Vrms)	Gain (dB)	f(Hz)	Vin (Vrms)	Vout (Vrms)	Gain (dB)
1	56.32	56.41	0.016	300	90.15	90.1	-0.001
2	56.32	56.41	0.016	400	90.21	91.38	0.112
3	56.32	56.41	0.016	500	90.15	93.27	0.287
4	56.32	56.41	0.016	600	89.07	97.83	0.835
5	56.32	56.41	0.016	700	91.53	99.77	0.767
6	56.32	56.41	0.016	800	87.94	98.92	1.020
7	56.32	56.41	0.016	900	90	103.7	1.203
8	56.32	56.41	0.016	1000	89.4	107.7	1.659
9	56.32	56.41	0.016	2000	87.44	155.2	4.957
10	56.32	56.41	0.016	3000	83.14	210.2	8.083
20	78.53	78.36	-0.016	4000	78.22	238.2	9.636
30	84.29	83.25	-0.104	5000	68.67	171.8	7.989
40	86.7	85.35	-0.127	6000	64.24	134.7	6.433
50	88.01	86.51	-0.139	7000	57.86	111	5.612
60	88.9	87.16	-0.135	8000	55.72	91.03	4.256
70	89.17	87.81	-0.139	9000	51.09	78.4	3.797
80	89.61	87.61	-0.179	10000	30.14	29.85	-0.085
90	90.02	87.58	-0.236	20000	30.14	29.85	-0.085
100	89.95	88	-0.143	30000	30.14	29.85	-0.085
200	90.2	89.01	-0.179				

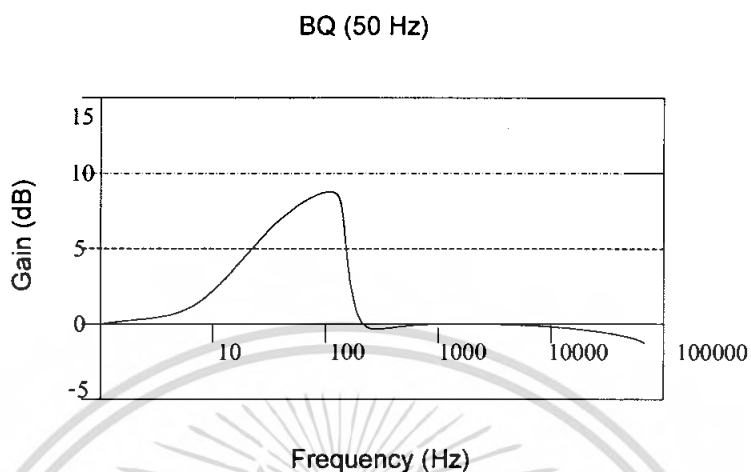
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.18 ผลการทดลอง Biquad Filter 10 kHz

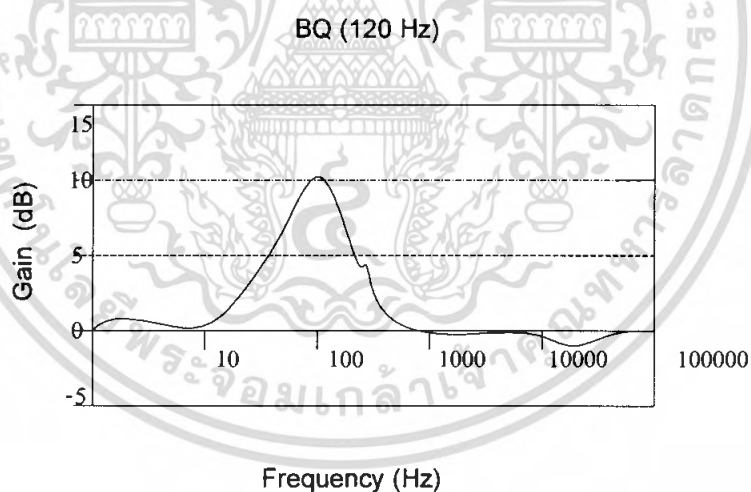
f(Hz)	Vin (Vrms)	Vout (Vrms)	Gain (dB)	f(Hz)	Vin (Vrms)	Vout (Vrms)	Gain (dB)
1	58.85	58.85	0.003	300	90.25	90.28	0.002
2	58.85	58.85	0.003	400	90.28	90.3	0.003
3	58.85	58.85	0.003	500	90.09	90.1	0.001
4	58.85	58.85	0.003	600	90.08	90.1	0.001
5	58.85	58.85	0.003	700	90.35	90.56	0.001
6	58.85	58.85	0.003	800	89.68	91.16	0.134
7	58.85	58.85	0.003	900	89.87	91.88	0.187
8	58.85	58.85	0.003	1000	90.21	91.88	0.146
9	58.85	58.85	0.003	2000	87.53	101.1	1.257
10	58.85	58.85	0.003	3000	83.1	112.9	2.669
20	78	78.1	0.011	4000	78.36	126	4.132
30	83.99	83.87	-0.032	5000	73.17	139	5.577
40	86.82	86.77	-0.005	6000	66.49	151.1	7.135
50	87.96	88.02	0.004	7000	73.79	162.7	8.176
60	88.96	89	0.003	8000	59.17	168.4	9.054
70	89.09	90.01	0.089	9000	55.17	164.5	9.309
80	87.38	87.88	0.047	10000	51.17	155.4	9.647
90	90.77	91.02	0.024	20000	30.63	38.84	2.062
100	89.66	90	0.031	30000	30.63	30.84	0.056
200	90.29	90.3	0.001				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าที่ได้จากตารางมาวาดกราฟจะได้ผลดังนี้

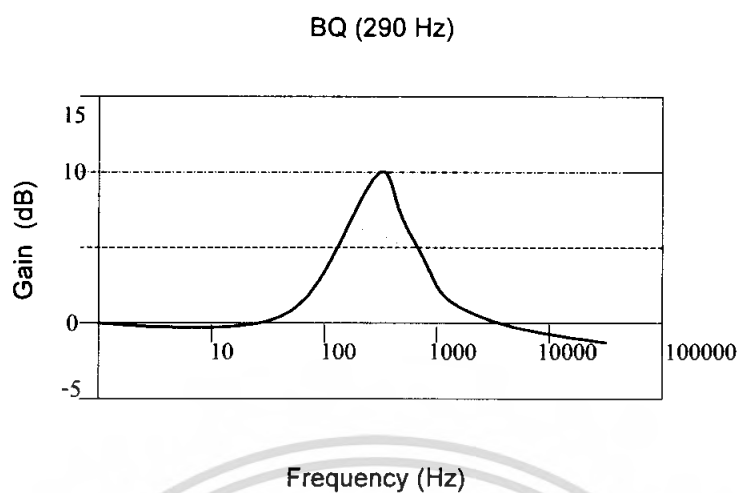


รูปที่ 4.38 กราฟจากการทดลอง Biquad Filter BW = 50 Hz

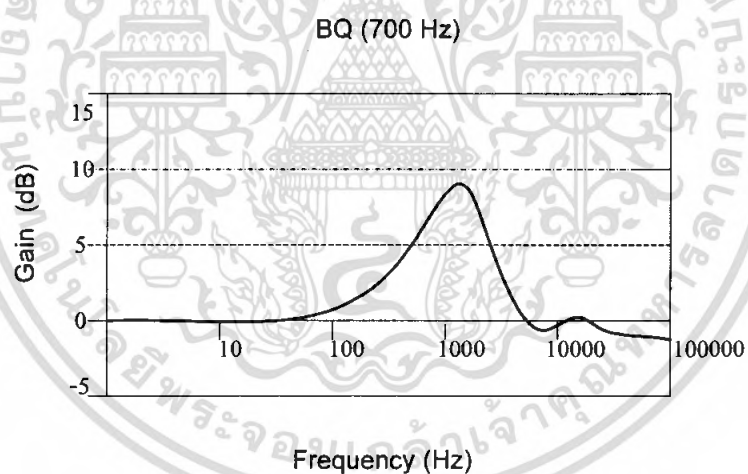


รูปที่ 4.39 กราฟจากการทดลอง Biquad Filter BW = 120 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

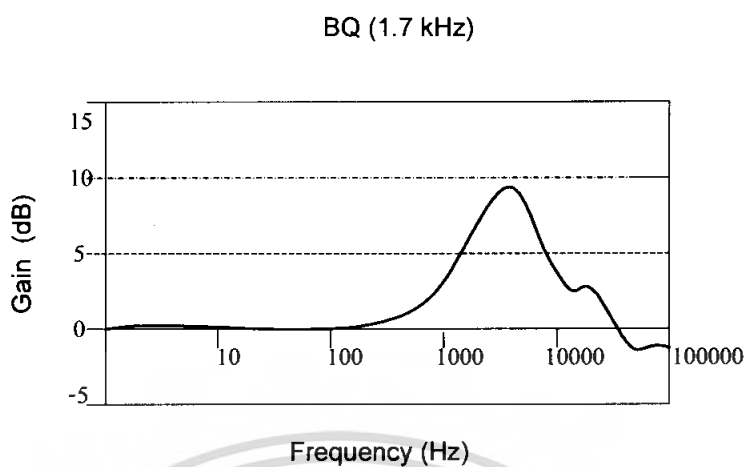


รูปที่ 4.40 กราฟจากการทดลอง Biquad Filter BW = 290 Hz

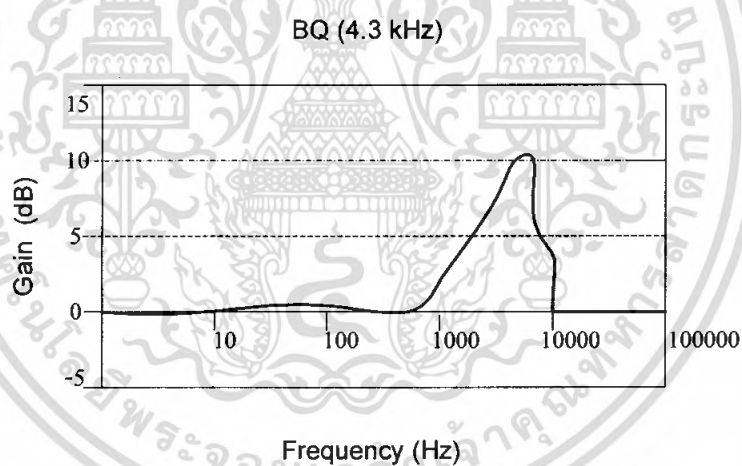


รูปที่ 4.41 กราฟจากการทดลอง Biquad Filter BW = 700 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

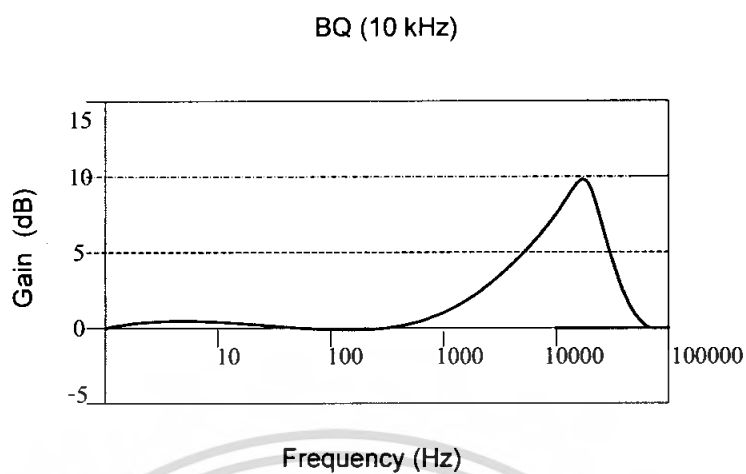


รูปที่ 4.42 กราฟจากการทดลอง Biquad Filter BW = 1.7 kHz



รูปที่ 4.43 กราฟจากการทดลอง Biquad Filter BW = 4.3 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 กราฟจากการทดลอง Biquad Filter BW = 10 kHz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 บทวิจารณ์และบทสรุป

สรุปวงจรทั้งหมดที่ได้สร้างขึ้นเพื่อเป็นวงจรขยายกำลังแบบเคลตา-มอดูเลชัน

1. วงจรเคลตา-มอดูเลชัน
2. วงจรขับสัญญาณ โดยใช้ IC สำเร็จรูป เบอร์ HIP 4080
3. วงจรเคลตามอดูเลชันเพาเวอร์แอมพลิฟายเออร์แบบ Close loop
4. วงจรขยายกำลังงานที่มีการทำงานแบบสวิตซ์ซิ่ง Full Bridge

ผลที่ได้จากโครงการนี้ เป็นการศึกษาและสร้างวงจรการทำงานของวงจรขยายกำลัง ที่มีการทำงานแบบสวิตซ์ซิ่ง โดยอาศัยการมอดูเลตสัญญาณแบบเคลตา-มอดูเลชัน โดยได้ทำการศึกษาและออกแบบวงจรตามแนวทางของทฤษฎี และทำการสร้างวงจรขยายกำลังขึ้น เมื่อใช้หม้อแปลงเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับวงจรขยายกำลังแล้วสามารถวัดค่าอินพุท เอาท์พุท ได้จริงดังนั้นเครื่องขยายกำลังงานเสียงที่สร้างขึ้นจึงสามารถทำงานได้จริงและการทำงานแบบ Close Loop จะทำให้ค่าความผิดเพี้ยน (THD) น้อยกว่าแบบ Open Loop และในส่วนภาคขยายที่เป็นสวิตซ์ซิ่งแบบ Full Bridge จะให้อัตราการขยายเป็น 2 เท่า ของแบบ Haft Bridge ซึ่งเป็นไปตามผลที่คาดว่าจะได้รับและเป็นไปตามทฤษฎี

ในส่วนของอิกวอลไลเซอร์ เราได้ทำการสร้างอิกวอลไลเซอร์แบบดิจิทัลอิกวอลไลเซอร์ที่สามารถปรับย่านความถี่ได้ถึง 7 ย่านความถี่ โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ TAS3002 ซึ่งโดยแต่ละย่านความถี่นั้นสามารถปรับเปลี่ยนได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ จึงทำให้สามารถกำหนดย่านความถี่ได้ตามความต้องการของผู้ใช้

ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำโครงการนี้คือ การออกแบบวงจรที่ซับซ้อน และเรื่องของสัญญาณรบกวนซึ่งวิธีแก้ไขต้องจัดการให้เหมาะสมกับวงจรที่ออกแบบ

นอกจากปัญหาต่างๆ ที่กล่าวมาแล้ว ปัญหาที่พบอยู่บ้างก็คือ อุปกรณ์ที่หาได้มีคุณสมบัติไม่ตรงกับค่าที่สามารถคำนวณได้ ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบวงจรใหม่เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] บัณฑิต โรจน์อารยานนท์, “หลักการไฟฟ้าสื่อสาร,” สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.
- [2] ประสิทธิ์ ประพัฒน์มงคลการ, “หลักการระบบสื่อสาร,” ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 2533
- [3] วิวัฒน์ กิรานนท์, “วิศวกรรมการสื่อสาร,” สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
- [4] สายัณต์ ชื่นอารมณ, “เจาะลึกวงจรเครื่องขยายเสียง,” สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2548.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Program

```
sbit SDA = P1^0;
```

```
sbit SCL = P1^1;
```

```
void DelayI2C(void) {  
    unsigned char i = 50;  
    while (i!=0) i--;  
}
```

```
void ClockI2C(void) {  
    DelayI2C();  
    SCL=1;  
    DelayI2C();  
    SCL=0;  
}
```

```
void StartI2C(void) {  
    if (SCL) SCL=0;  
    SDA=1;  
    SCL=1;  
    DelayI2C();  
    SDA=0;  
    DelayI2C();  
    SCL=0;  
}
```

```
void StopI2C(void) {  
    if (SCL) SCL=0;  
    SDA=0;  
    DelayI2C();  
    SCL=1;  
    DelayI2C();  
    SDA=1;  
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

bit WriteI2C(unsigned char cData) {
    unsigned char i;
    bit Ack;
    for(i=0;i<=7;i++) {
        SDA=cData & 0x80;
        ClockI2C();
        cData=cData<<1;
    }
    SDA=1;
    DelayI2C();
    SCL=1;
    DelayI2C();
    Ack=SDA;
    SCL=0;
    DelayI2C();
    return Ack;
}

void InitI2C(unsigned char I2C_Address) {
    StartI2C();
    WriteI2C(I2C_Address);
}

```

```

unsigned char ReadI2C(void) {
    unsigned char i;
    unsigned char cData=0x00;
    for(i=0;i<=7;i++) {
        DelayI2C();
        SCL=1;
        DelayI2C();
        cData=cData<<1;
        cData=cData|SDA;
        SCL=0;
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    return cData;
}
```

```
void AckI2C(void) {
    SDA=0;
    DelayI2C();
    ClockI2C();
    SDA=1;
}
```

```
void NackI2C(void) {
    SDA=1;
    DelayI2C();
    ClockI2C();
}
```

```
void WriteEeprom(unsigned int addr, unsigned char ch) {
    unsigned int i;
    //Select pages
    switch(addr/256){
        case 0 : InitI2C(0xA0);
                    break;
        case 1 : InitI2C(0xA2);
                    break;
        case 2 : InitI2C(0xA4);
                    break;
        case 3 : InitI2C(0xA6);
                    break;
        case 4 : InitI2C(0xA8);
                    break;
        case 5 : InitI2C(0xAA);
                    break;
        case 6 : InitI2C(0xAC);
                    break;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        case 7 : InitI2C(0xAE);

                                break;

    }

    //convert addr in pages

    WriteI2C(addr % 256);

    WriteI2C(ch);

    StopI2C();

    for (i=0;i<5000;i++) ;

}

```

```

unsigned char ReadEeprom(unsigned int addr) {

    unsigned char ch;

    unsigned int i;

    //Select pages

    switch(addr/256){

        case 0 : InitI2C(0xA0);

                                break;

        case 1 : InitI2C(0xA2);

                                break;

        case 2 : InitI2C(0xA4);

                                break;

        case 3 : InitI2C(0xA6);

                                break;

        case 4 : InitI2C(0xA8);

                                break;

        case 5 : InitI2C(0xAA);

                                break;

        case 6 : InitI2C(0xAC);

                                break;

        case 7 : InitI2C(0xAE);

                                break;

    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
//convert addr in pages
```

```
WriteI2C(addr % 256);
```

```
switch(addr/256){
```

```
    case 0 : InitI2C(0xA1);
```

```
                break;
```

```
    case 1 : InitI2C(0xA3);
```

```
                break;
```

```
    case 2 : InitI2C(0xA5);
```

```
                break;
```

```
    case 3 : InitI2C(0xA7);
```

```
                break;
```

```
    case 4 : InitI2C(0xA9);
```

```
                break;
```

```
    case 5 : InitI2C(0xAB);
```

```
                break;
```

```
    case 6 : InitI2C(0xAD);
```

```
                break;
```

```
    case 7 : InitI2C(0xAF);
```

```
                break;
```

```
}
```

```
ch = ReadI2C();
```

```
StopI2C();
```

```
for (i=0;i<5000;i++);
```

```
return ch;
```

```
}
```

```
#include <reg51.h>
```

```
#include "i2c_lib.h"
```

```
int TAS3002_ADDR = 0x68;
```

```
sbit led = P1^2;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void WriteByte(unsigned char addr, unsigned char ch) {
    unsigned int i;
    InitI2C(TAS3002_ADDR);
    WriteI2C(addr);
    WriteI2C(ch);
    StopI2C();
    for (i=0;i<5000;i++) ;
}

```

```

void Write3Bytes(unsigned char addr,unsigned char bg0,unsigned char bg1,unsigned char bg2) {
    unsigned int i;
    InitI2C(TAS3002_ADDR);
    WriteI2C(addr);
    WriteI2C(bg0);
    WriteI2C(bg1);
    WriteI2C(bg2);
    StopI2C();
    for (i=0;i<5000;i++) ;
}

```

```

void Volume(unsigned char vl0,unsigned char vl1,unsigned char vl2,unsigned char vr0,unsigned char
vr1,unsigned char vr2) {
    unsigned int i;
    InitI2C(TAS3002_ADDR);
    WriteI2C(0x04);
    WriteI2C(vl0);
    WriteI2C(vl1);
    WriteI2C(vl2);
    WriteI2C(vr0);
    WriteI2C(vr1);
    WriteI2C(vr2);
    StopI2C();
    for (i=0;i<5000;i++) ;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void MixerGain(unsigned char addr,unsigned char s1_0,unsigned char s1_1,unsigned char s1_2,unsigned
char s2_0,unsigned char s2_1,unsigned char s2_2,unsigned char a0,unsigned char a1,unsigned char a2){
    unsigned int i;
    InitI2C(TAS3002_ADDR);
    WriteI2C(addr);
    WriteI2C(s1_0);
    WriteI2C(s1_1);
    WriteI2C(s1_2);
    WriteI2C(s2_0);
    WriteI2C(s2_1);
    WriteI2C(s2_2);
    WriteI2C(a0);
    WriteI2C(a1);
    WriteI2C(a2);
    StopI2C();
    for (i=0;i<5000;i++);
}

```

```

void Write15Bytes(unsigned char addr,unsigned char b0_0,unsigned char b0_1,unsigned char b0_2,unsigned
char b1_0,unsigned char b1_1,unsigned char b1_2,unsigned char b2_0,unsigned char b2_1,unsigned char
b2_2,unsigned char a1_0,unsigned char a1_1,unsigned char a1_2,unsigned char a2_0,unsigned char
a2_1,unsigned char a2_2) {
    unsigned int i;
    InitI2C(TAS3002_ADDR);
    WriteI2C(addr);
    WriteI2C(b0_0);
    WriteI2C(b0_1);
    WriteI2C(b0_2);
    WriteI2C(b1_0);
    WriteI2C(b1_1);
    WriteI2C(b1_2);
    WriteI2C(b2_0);
    WriteI2C(b2_1);
    WriteI2C(b2_2);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

WriteI2C(a1_0);
WriteI2C(a1_1);
WriteI2C(a1_2);
WriteI2C(a2_0);
WriteI2C(a2_1);
WriteI2C(a2_2);
StopI2C();
for (i=0;i<5000;i++) ;
}

```

```

void WriteEEP(unsigned int addr_st,unsigned char nbyte,unsigned char *dat) {
    unsigned char i;
    for(i = 0;i < nbyte;i++)
        WriteEeprom(addr_st + i,dat[i]);
}

```

```

void delay()
{
    unsigned int i;
    for (i=0;i<50000;i++) ;
}

```

```

void main()
{

```

```

//volume

```

```

    unsigned char vol[] = {0x03,0x29,0x8B,0x03,0x29,0x8B};

```

```

    //Mixer left gain

```

```

    unsigned char MIXLG[] = {0x32,0x98,0xB0,0x10,0x00,0x00,0x1C,0x73,0xD5};

```

```

    //Mixer right gain

```

```

    unsigned char MIXRG[] = {0x32,0x98,0xB0,0x10,0x00,0x00,0x1C,0x73,0xD5};

```

```

    //DRC

```

```

    unsigned char DRC[] = {0x02,0xEF,0xEF,0x60,0x60};

```

```

    //*****Bass+treble*****

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

unsigned char BATRE[] =

```
{0x01,0x0A,0x11,0x18,0x1E,0x24,0x29,0x2E,0x33,0x37,0x3B,0x3F,0x43,0x46,0x49,0x4C,0x4F,0x52,0x55,0x58,0x5B,0x5D,0x5F,0x61,0x62,0x63,0x65,0x66,0x67,0x69,0x6A,0x6B,0x6D,0x6E,0x6F,0x71,0x72,0x73,0x74,0x75,0x76,0x77,0x78,0x79,0x7A,0x7B,0x7C,0x7D,0x7E,0x7F,0x80,0x81,0x82,0x83,0x84,0x85,0x86,0x87,0x88,0x89,0x8A,0x8B,0x8C,0x8D,0x8E,0x8F,0x90,0x91,0x92,0x93,0x94,0x95,0x96,0x01,0x01,0x04,0x08,0x13,0x1A,0x20,0x26,0x2C,0x31,0x36,0x3B,0x3F,0x43,0x47,0x4A,0x4D,0x51,0x53,0x56,0x59,0x5B,0x5D,0x60,0x62,0x63,0x65,0x67,0x68,0x69,0x6B,0x6C,0x6D,0x3F,0x70,0x71,0x72,0x73,0x74,0x75,0x76,0x77,0x78,0x79,0x7A,0x7B,0x7C,0x7D,0x7E,0x7F,0x80,0x81,0x82,0x83,0x84,0x85,0x86,0x87,0x88,0x89,0x8A,0x8B,0x8C,0x8D,0x8E,0x8F,0x90,0x91,0x92,0x93,0x94,0x95,0x96};
```

//set 0 L channel

unsigned char LB10[] =

```
{0x10,0x0F,0x0B,0xE0,0x0E,0x6A,0x0F,0xE3,0x09,0xE0,0x0E,0x6A,0x0F,0xF2,0x15};
```

unsigned char LB20[] =

```
{0x10,0x1B,0xBC,0xE0,0x1B,0x3B,0x0F,0xCA,0x9B,0xE0,0x1B,0x3B,0x0F,0xE6,0x58};
```

unsigned char LB30[] =

```
{0x10,0x56,0x1B,0xE0,0x61,0x04,0x0F,0x5A,0x3F,0xE0,0x61,0x04,0x0F,0xB0,0x5A};
```

unsigned char LB40[] =

```
{0x10,0xCB,0xE9,0xE1,0x1F,0x26,0x0E,0x77,0x79,0xE1,0x1F,0x26,0x0F,0x43,0x63};
```

unsigned char LB50[] =

```
{0x11,0xED,0x38,0xE4,0x15,0x0F,0x0C,0x4A,0x93,0xE4,0x15,0x0F,0x0E,0x37,0xCB};
```

unsigned char LB60[] =

```
{0x13,0x7A,0x14,0xEA,0x9B,0xFA,0x09,0x4E,0xA4,0xEA,0x9B,0xFA,0x0C,0xC8,0xB8};
```

unsigned char LB70[] =

```
{0x17,0x4F,0xA3,0x06,0x88,0x2F,0x01,0xED,0x30,0x06,0x88,0x2F,0x09,0x3C,0xD3};
```

//set 1 L channel

unsigned char LB11[] =

```
{0x10,0x08,0x1B,0xE0,0x07,0xA6,0x0F,0xF0,0x64,0xE0,0x07,0xA6,0x0F,0xF8,0x80};
```

unsigned char LB21[] =

```
{0x10,0x12,0x82,0xE0,0x11,0xF9,0x0F,0xDC,0x5E,0xE0,0x11,0xF9,0x0F,0xEE,0xE0};
```

unsigned char LB31[] =

```
{0x10,0x20,0x57,0xE0,0x20,0xB7,0x0F,0xC1,0xBD,0xE0,0x20,0xB7,0x0F,0xE2,0x15};
```

unsigned char LB41[] =

```
{0x10,0x3F,0x4F,0xE0,0x44,0x19,0x0F,0x86,0x22,0xE0,0x44,0x19,0x0F,0xC5,0x71};
```

```

unsigned char LB51[] =
{0x10,0x94,0x34,0xE0,0xC0,0xEB,0x0E,0xE2,0xB5,0xE0,0xC0,0xEB,0x0F,0x76,0xEA};

unsigned char LB61[] =
{0x11,0x84,0x40,0xE2,0xA9,0xAD,0x0D,0x14,0xA2,0xE2,0xA9,0xAD,0x0E,0x98,0xE2};

unsigned char LB71[] =
{0x16,0x10,0x8B,0xFA,0x83,0x5B,0x04,0x53,0x6D,0xFA,0x83,0x5B,0x0A,0x63,0xF9};

//set 2 L channel

unsigned char LB12[] =
{0x10,0x0A,0x6B,0xE0,0x09,0xE9,0x0F,0xEB,0xF0,0xE0,0x09,0xE9,0x0F,0xF6,0x5C};

unsigned char LB22[] =
{0x10,0x1B,0xBC,0xE0,0x1B,0x3B,0x0F,0xCA,0x9B,0xE0,0x1B,0x3B,0x0F,0xE6,0x58};

unsigned char LB32[] =
{0x10,0x31,0x92,0xE0,0x32,0xF1,0x0F,0xA0,0x93,0xE0,0x32,0xF1,0x0F,0xD2,0x25};

unsigned char LB42[] =
{0x10,0x72,0x71,0xE0,0x88,0x04,0x0F,0x23,0xB4,0xE0,0x88,0x04,0x0F,0x96,0x25};

unsigned char LB52[] =
{0x11,0x18,0xBF,0xE1,0xB1,0x05,0x0D,0xE3,0x93,0xE1,0xB1,0x05,0x0E,0xFC,0x52};

unsigned char LB62[] =
{0x12,0xB8,0x07,0xE6,0xA9,0x06,0x0A,0xC4,0x2D,0xE6,0xA9,0x06,0x0D,0x7C,0x35};

unsigned char LB72[] =
{0x17,0x4F,0xA3,0x06,0x88,0x2F,0x01,0xED,0x30,0x06,0x88,0x2F,0x09,0x3C,0xD3};

//set 3 L channel

unsigned char LB13[] =
{0x10,0x0F,0x0B,0xE0,0x0E,0x6A,0x0F,0xE3,0x09,0xE0,0x0E,0x6A,0x0F,0xF2,0x15};

unsigned char LB23[] =
{0x10,0x20,0x57,0xE0,0x20,0xB7,0x0F,0xC1,0xBD,0xE0,0x20,0xB7,0x0F,0xE2,0x15};

unsigned char LB33[] =
{0x10,0x56,0x1B,0xE0,0x61,0x04,0x0F,0x5A,0x3F,0xE0,0x61,0x04,0x0F,0xB0,0x5A};

unsigned char LB43[] =
{0x10,0x94,0x34,0xE0,0xC0,0xEB,0x0E,0xE2,0xB5,0xE0,0xC0,0xEB,0x0F,0x76,0xEA};

unsigned char LB53[] =
{0x11,0xED,0x38,0xE4,0x15,0x0F,0x0C,0x4A,0x93,0xE4,0x15,0x0F,0x0E,0x37,0xCB};

unsigned char LB63[] =
{0x13,0x7A,0x14,0xEA,0x9B,0xFA,0x09,0x4E,0xA4,0xEA,0x9B,0xFA,0x0C,0xC8,0xB8};

```

```

unsigned char LB73[] =
{0x16,0x10,0x8B,0xFA,0x83,0x5B,0x04,0x53,0x6D,0xFA,0x83,0x5B,0x0A,0x63,0xF9};
//set 4 L channal
unsigned char LB14[] =
{0x10,0x05,0xCA,0xE0,0x05,0x72,0x0F,0xF4,0xD9,0xE0,0x05,0x72,0x0F,0xFA,0xA4};
unsigned char LB24[] =
{0x10,0x12,0x82,0xE0,0x11,0xF9,0x0F,0xDC,0x5E,0xE0,0x11,0xF9,0x0F,0xEE,0xE0};
unsigned char LB34[] =
{0x10,0x20,0x57,0xE0,0x20,0xB7,0x0F,0xC1,0xBD,0xE0,0x20,0xB7,0x0F,0xE2,0x15};
unsigned char LB44[] =
{0x10,0x72,0x71,0xE0,0x88,0x04,0x0F,0x23,0xB4,0xE0,0x88,0x04,0x0F,0x96,0x25};
unsigned char LB54[] =
{0x10,0xCB,0xE9,0xE1,0x1F,0x26,0x0E,0x77,0x79,0xE1,0x1F,0x26,0x0F,0x43,0x63};
unsigned char LB64[] =
{0x11,0x84,0x40,0xE2,0xA9,0xAD,0x0D,0x14,0xA2,0xE2,0xA9,0xAD,0x0E,0x98,0xE2};
unsigned char LB74[] =
{0x13,0x7A,0x14,0xEA,0x9B,0xFA,0x09,0x4E,0xA4,0xEA,0x9B,0xFA,0x0C,0xC8,0xB8};

//set 0 R channal
unsigned char RB10[] =
{0x10,0x0F,0x0B,0xE0,0x0E,0x6A,0x0F,0xE3,0x09,0xE0,0x0E,0x6A,0x0F,0xF2,0x15};
unsigned char RB20[] =
{0x10,0x1B,0xBC,0xE0,0x1B,0x3B,0x0F,0xCA,0x9B,0xE0,0x1B,0x3B,0x0F,0xE6,0x58};
unsigned char RB30[] =
{0x10,0x56,0x1B,0xE0,0x61,0x04,0x0F,0x5A,0x3F,0xE0,0x61,0x04,0x0F,0xB0,0x5A};
unsigned char RB40[] =
{0x10,0xCB,0xE9,0xE1,0x1F,0x26,0x0E,0x77,0x79,0xE1,0x1F,0x26,0x0F,0x43,0x63};
unsigned char RB50[] =
{0x11,0xED,0x38,0xE4,0x15,0x0F,0x0C,0x4A,0x93,0xE4,0x15,0x0F,0x0E,0x37,0xCB};
unsigned char RB60[] =
{0x13,0x7A,0x14,0xEA,0x9B,0xFA,0x09,0x4E,0xA4,0xEA,0x9B,0xFA,0x0C,0xC8,0xB8};
unsigned char RB70[] =
{0x17,0x4F,0xA3,0x06,0x88,0x2F,0x01,0xED,0x30,0x06,0x88,0x2F,0x09,0x3C,0xD3};

```

//set 1 R channal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

unsigned char RB11[] =
{0x10,0x08,0x1B,0xE0,0x07,0xA6,0x0F,0xF0,0x64,0xE0,0x07,0xA6,0x0F,0xF8,0x80};

unsigned char RB21[] =
{0x10,0x12,0x82,0xE0,0x11,0xF9,0x0F,0xDC,0x5E,0xE0,0x11,0xF9,0x0F,0xEE,0xE0};

unsigned char RB31[] =
{0x10,0x20,0x57,0xE0,0x20,0xB7,0x0F,0xC1,0xBD,0xE0,0x20,0xB7,0x0F,0xE2,0x15};

unsigned char RB41[] =
{0x10,0x3F,0x4F,0xE0,0x44,0x19,0x0F,0x86,0x22,0xE0,0x44,0x19,0x0F,0xC5,0x71};

unsigned char RB51[] =
{0x10,0x94,0x34,0xE0,0xC0,0xEB,0x0E,0xE2,0xB5,0xE0,0xC0,0xEB,0x0F,0x76,0xEA};

unsigned char RB61[] =
{0x11,0x84,0x40,0xE2,0xA9,0xAD,0x0D,0x14,0xA2,0xE2,0xA9,0xAD,0x0E,0x98,0xE2};

unsigned char RB71[] =
{0x16,0x10,0x8B,0xFA,0x83,0x5B,0x04,0x53,0x6D,0xFA,0x83,0x5B,0x0A,0x63,0xF9};

//set 2 R channel
unsigned char RB12[] =
{0x10,0x0A,0x6B,0xE0,0x09,0xE9,0x0F,0xEB,0xF0,0xE0,0x09,0xE9,0x0F,0xF6,0x5C};

unsigned char RB22[] =
{0x10,0x1B,0xBC,0xE0,0x1B,0x3B,0x0F,0xCA,0x9B,0xE0,0x1B,0x3B,0x0F,0xE6,0x58};

unsigned char RB32[] =
{0x10,0x31,0x92,0xE0,0x32,0xF1,0x0F,0xA0,0x93,0xE0,0x32,0xF1,0x0F,0xD2,0x25};

unsigned char RB42[] =
{0x10,0x72,0x71,0xE0,0x88,0x04,0x0F,0x23,0xB4,0xE0,0x88,0x04,0x0F,0x96,0x25};

unsigned char RB52[] =
{0x11,0x18,0xBF,0xE1,0xB1,0x05,0x0D,0xE3,0x93,0xE1,0xB1,0x05,0x0E,0xFC,0x52};

unsigned char RB62[] =
{0x12,0xB8,0x07,0xE6,0xA9,0x06,0x0A,0xC4,0x2D,0xE6,0xA9,0x06,0x0D,0x7C,0x35};

unsigned char RB72[] =
{0x17,0x4F,0xA3,0x06,0x88,0x2F,0x01,0xED,0x30,0x06,0x88,0x2F,0x09,0x3C,0xD3};

//set 3 R channel
unsigned char RB13[] =
{0x10,0x0F,0x0B,0xE0,0x0E,0x6A,0x0F,0xE3,0x09,0xE0,0x0E,0x6A,0x0F,0xF2,0x15};

unsigned char RB23[] =
{0x10,0x20,0x57,0xE0,0x20,0xB7,0x0F,0xC1,0xBD,0xE0,0x20,0xB7,0x0F,0xE2,0x15};

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

unsigned char RB33[] =
{0x10,0x56,0x1B,0xE0,0x61,0x04,0x0F,0x5A,0x3F,0xE0,0x61,0x04,0x0F,0xB0,0x5A};

unsigned char RB43[] =
{0x10,0x94,0x34,0xE0,0xC0,0xEB,0x0E,0xE2,0xB5,0xE0,0xC0,0xEB,0x0F,0x76,0xEA};

unsigned char RB53[] =
{0x11,0xED,0x38,0xE4,0x15,0x0F,0x0C,0x4A,0x93,0xE4,0x15,0x0F,0x0E,0x37,0xCB};

unsigned char RB63[] =
{0x13,0x7A,0x14,0xEA,0x9B,0xFA,0x09,0x4E,0xA4,0xEA,0x9B,0xFA,0x0C,0xC8,0xB8};

unsigned char RB73[] =
{0x16,0x10,0x8B,0xFA,0x83,0x5B,0x04,0x53,0x6D,0xFA,0x83,0x5B,0x0A,0x63,0xF9};

//set 4 R channel
unsigned char RB14[] =
{0x10,0x05,0xCA,0xE0,0x05,0x72,0x0F,0xF4,0xD9,0xE0,0x05,0x72,0x0F,0xFA,0xA4};

unsigned char RB24[] =
{0x10,0x12,0x82,0xE0,0x11,0xF9,0x0F,0xDC,0x5E,0xE0,0x11,0xF9,0x0F,0xEE,0xE0};

unsigned char RB34[] =
{0x10,0x20,0x57,0xE0,0x20,0xB7,0x0F,0xC1,0xBD,0xE0,0x20,0xB7,0x0F,0xE2,0x15};

unsigned char RB44[] =
{0x10,0x72,0x71,0xE0,0x88,0x04,0x0F,0x23,0xB4,0xE0,0x88,0x04,0x0F,0x96,0x25};

unsigned char RB54[] =
{0x10,0xCB,0xE9,0xE1,0x1F,0x26,0x0E,0x77,0x79,0xE1,0x1F,0x26,0x0F,0x43,0x63};

unsigned char RB64[] =
{0x11,0x84,0x40,0xE2,0xA9,0xAD,0x0D,0x14,0xA2,0xE2,0xA9,0xAD,0x0E,0x98,0xE2};

unsigned char RB74[] =
{0x13,0x7A,0x14,0xEA,0x9B,0xFA,0x09,0x4E,0xA4,0xEA,0x9B,0xFA,0x0C,0xC8,0xB8};

unsigned char ret;

led = 1;

```

```
//Main Control Register
```

```
WriteEeprom(0x02,0x13);
```

```
//Mixer left gain
```

```
WriteEEP(0x03,9,MIXLG);
```

```
//Mixer Right gain
```

```
WriteEEP(0x0C,9,MIXRG);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//DRC
WriteEEP(0x15,5,DRC);

//Bass
WriteEeprom(0x1A,0x4F);

//Treble
WriteEeprom(0x1B,0x4D);
WriteEEP(0x1C,6,vol);

//*****Bass*****Treble*****control*****

WriteEEP(0x9A,146,BATRE);

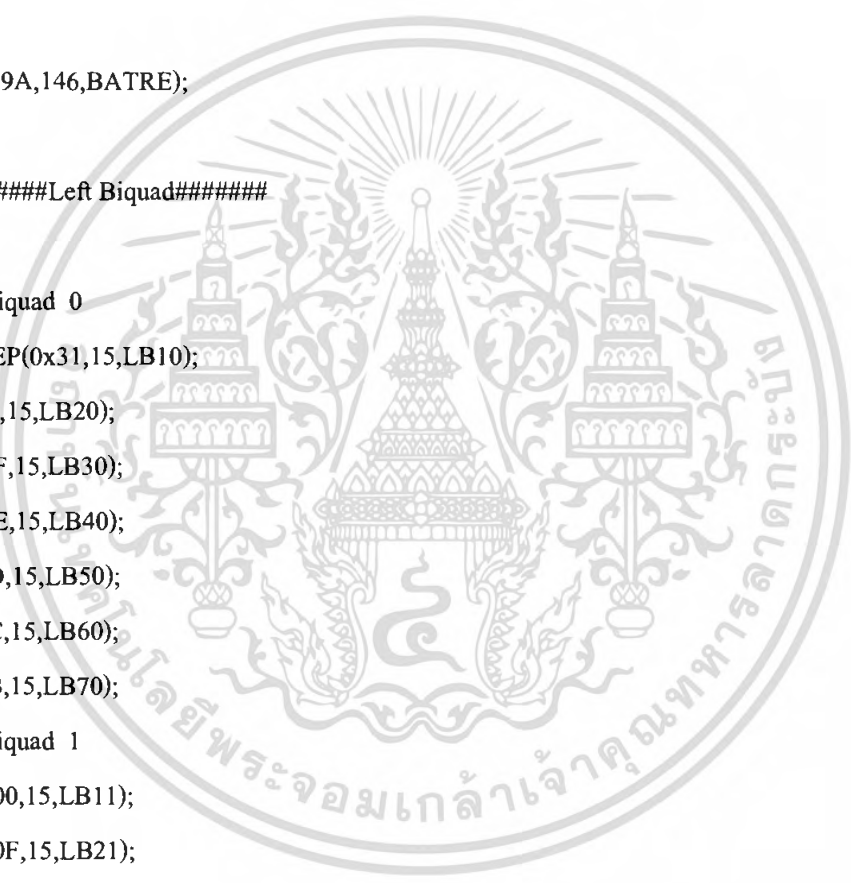
#####Left Biquad#####

//Left Biquad 0
WriteEEP(0x31,15,LB10);
WriteEEP(0x40,15,LB20);
WriteEEP(0x4F,15,LB30);
WriteEEP(0x5E,15,LB40);
WriteEEP(0x6D,15,LB50);
WriteEEP(0x7C,15,LB60);
WriteEEP(0x8B,15,LB70);

//Left Biquad 1
WriteEEP(0x200,15,LB11);
WriteEEP(0x20F,15,LB21);
WriteEEP(0x21E,15,LB31);
WriteEEP(0x22D,15,LB41);
WriteEEP(0x23C,15,LB51);
WriteEEP(0x24B,15,LB61);
WriteEEP(0x25A,15,LB71);

//Left Biquad 2
WriteEEP(0x269,15,LB12);
WriteEEP(0x278,15,LB22);
WriteEEP(0x287,15,LB32);

```



```
WriteEEP(0x296,15,LB42);
WriteEEP(0x2A5,15,LB52);
WriteEEP(0x2B4,15,LB62);
WriteEEP(0x2C3,15,LB72);
```

```
//Left Biquad 3
```

```
WriteEEP(0x2D2,15,LB13);
WriteEEP(0x2E1,15,LB23);
WriteEEP(0x2F0,15,LB33);
WriteEEP(0x2FF,15,LB43);
WriteEEP(0x30E,15,LB53);
WriteEEP(0x31D,15,LB63);
WriteEEP(0x32C,15,LB73);
```

```
//Left Biquad 4
```

```
WriteEEP(0x33B,15,LB14);
WriteEEP(0x34A,15,LB24);
WriteEEP(0x359,15,LB34);
WriteEEP(0x368,15,LB44);
WriteEEP(0x377,15,LB54);
WriteEEP(0x386,15,LB64);
WriteEEP(0x395,15,LB74);
```

```
#####Right Biquad#####
```

```
//Right Biquad 0
```

```
WriteEEP(0x3A4,15,RB10);
WriteEEP(0x3B3,15,RB20);
WriteEEP(0x3C2,15,RB30);
WriteEEP(0x3D1,15,RB40);
WriteEEP(0x3E0,15,RB50);
```

```
WriteEEP(0x3EF,15,RB60);
```

```
WriteEEP(0x3FE,15,RB70);
```

```
//Right Biquad 1
```

```
WriteEEP(0x40D,15,RB11);
WriteEEP(0x41C,15,RB21);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

WriteEEP(0x42B,15,RB31);
WriteEEP(0x43A,15,RB41);
WriteEEP(0x449,15,RB51);
WriteEEP(0x458,15,RB61);
WriteEEP(0x467,15,RB71);
    //Right Biquad 2
WriteEEP(0x476,15,RB12);
WriteEEP(0x485,15,RB22);
WriteEEP(0x494,15,RB32);
    WriteEEP(0x4A3,15,RB42);
WriteEEP(0x4B2,15,RB52);
WriteEEP(0x4C1,15,RB62);
    WriteEEP(0x4D0,15,RB72);
    //Right Biquad 3
WriteEEP(0x4DF,15,RB13);
WriteEEP(0x4EE,15,RB23);
    WriteEEP(0x4FD,15,RB33);
    WriteEEP(0x50C,15,RB43);
WriteEEP(0x51B,15,RB53);
    WriteEEP(0x52A,15,RB63);
    WriteEEP(0x539,15,RB73);
    //Right Biquad 4
    WriteEEP(0x548,15,RB14);
WriteEEP(0x557,15,RB24);
    WriteEEP(0x566,15,RB34);
    WriteEEP(0x575,15,RB44);
    WriteEEP(0x584,15,RB54);
WriteEEP(0x593,15,RB64);
    WriteEEP(0x5A2,15,RB74);
*/
ret = ReadEeprom(0x20F);
if(ret == LB21[0])
{

```

```

    while(1){

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
led = 0;
delay();
led = 1;
delay();
led = 0;
```

```
}
```

```
}
```

```
led = 0;
delay();
led = 1;
delay();
led = 0;
```

```
while(1);
```

```
}
```



Parameter for Biquad filter

```
//eq1
```

```
{0x10,0x05,0xCA,0xE0,0x05,0x72,0x0F,0xF4,0xD9,0xE0,0x05,0x72,0x0F,0xFA,0xA4}
```

```
//eq2
```

```
{0x10,0x08,0x1B,0xE0,0x07,0xA6,0x0F,0xF0,0x64,0xE0,0x07,0xA6,0x0F,0xF8,0x80}
```

```
//eq3
```

```
{0x10,0x0A,0x6B,0xE0,0x09,0xE9,0x0F,0xEB,0xF0,0xE0,0x09,0xE9,0x0F,0xF6,0x5C}
```

```
//eq4
```

```
{0x10,0x0F,0x0B,0xE0,0x0E,0x6A,0x0F,0xE3,0x09,0xE0,0x0E,0x6A,0x0F,0xF2,0x15}
```

```
//eq5
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

{0x10,0x12,0x82,0xE0,0x11,0xF9,0x0F,0xDC,0x5E,0xE0,0x11,0xF9,0x0F,0xEE,0xE0}

//eq6

{0x10,0x1B,0xBC,0xE0,0x1B,0x3B,0x0F,0xCA,0x9B,0xE0,0x1B,0x3B,0x0F,0xE6,0x58}

//eq7

{0x10,0x20,0x57,0xE0,0x20,0xB7,0x0F,0xC1,0xBD,0xE0,0x20,0xB7,0x0F,0xE2,0x15}

//eq8

{0x10,0x31,0x92,0xE0,0x32,0xF1,0x0F,0xA0,0x93,0xE0,0x32,0xF1,0x0F,0xD2,0x25}

//eq9

{0x10,0x3F,0x4F,0xE0,0x44,0x19,0x0F,0x86,0x22,0xE0,0x44,0x19,0x0F,0xC5,0x71}

//eq10

{0x10,0x56,0x1B,0xE0,0x61,0x04,0x0F,0x5A,0x3F,0xE0,0x61,0x04,0x0F,0xB0,0x5A}

//eq11

{0x10,0x72,0x71,0xE0,0x88,0x04,0x0F,0x23,0xB4,0xE0,0x88,0x04,0x0F,0x96,0x25}

//eq12

{0x10,0x94,0x34,0xE0,0xC0,0xEB,0x0E,0xE2,0xB5,0xE0,0xC0,0xEB,0x0F,0x76,0xEA}

//eq13

{0x10,0xCB,0xE9,0xE1,0x1F,0x26,0x0E,0x77,0x79,0xE1,0x1F,0x26,0x0F,0x43,0x63}

//eq14

{0x11,0x18,0xBF,0xE1,0xB1,0x05,0x0D,0xE3,0x93,0xE1,0xB1,0x05,0x0E,0xFC,0x52}

//eq15

{0x11,0x84,0x40,0xE2,0xA9,0xAD,0x0D,0x14,0xA2,0xE2,0xA9,0xAD,0x0E,0x98,0xE2}

//eq16

{0x11,0xED,0x38,0xE4,0x15,0x0F,0x0C,0x4A,0x93,0xE4,0x15,0x0F,0x0E,0x37,0xCB}

//eq17

{0x12,0xB8,0x07,0xE6,0xA9,0x06,0x0A,0xC4,0x2D,0xE6,0xA9,0x06,0x0D,0x7C,0x35}

//eq18

{0x13,0x7A,0x14,0xEA,0x9B,0xFA,0x09,0x4E,0xA4,0xEA,0x9B,0xFA,0x0C,0xC8,0xB8}

//eq19

{0x16,0x10,0x8B,0xFA,0x83,0x5B,0x04,0x53,0x6D,0xFA,0x83,0x5B,0x0A,0x63,0xF9}

//eq20

{0x17,0x4F,0xA3,0x06,0x88,0x2F,0x01,0xED,0x30,0x06,0x88,0x2F,0x09,0x3C,0xD3}



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bass and Treble table

//Bass

{0x01,0x0A,0x11,0x18,0x1E,0x24,0x29,0x2E,0x33,0x37,0x3B,0x3F,0x43,0x46,0x49}
{0x4C,0x4F,0x52,0x55,0x58,0x5B,0x5D,0x5F,0x61,0x62,0x63,0x65,0x66,0x67,0x69}
{0x6A,0x6B,0x6D,0x6E,0x6F,0x71,0x72,0x73,0x74,0x75,0x76,0x77,0x78,0x79,0x7A}
{0x7B,0x7C,0x7D,0x7E,0x7F,0x80,0x81,0x82,0x83,0x84,0x85,0x86,0x87,0x88,0x89}
{0x8A,0x8B,0x8C,0x8D,0x8E,0x8F,0x90,0x91,0x92,0x93,0x94,0x95,0x96}

//Treble

{0x01,0x01,0x04,0x08,0x13,0x1A,0x20,0x26,0x2C,0x31,0x36,0x3B,0x3F,0x43,0x47}
{0x4A,0x4D,0x51,0x53,0x56,0x59,0x5B,0x5D,0x60,0x62,0x63,0x65,0x67,0x68,0x69}
{0x6B,0x6C,0x6D,0x3F,0x70,0x71,0x72,0x73,0x74,0x75,0x76,0x77,0x78,0x79,0x7A}
{0x7B,0x7C,0x7D,0x7E,0x7F,0x80,0x81,0x82,0x83,0x84,0x85,0x86,0x87,0x88,0x89}
{0x8A,0x8B,0x8C,0x8D,0x8E,0x8F,0x90,0x91,0x92,0x93,0x94,0x95,0x96}



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้