



อีควอไลเซอร์
EQUALIZER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เลขทะเบียน.....
ไม่อาจรู้ได้จากผู้ส่งหนังสือพิมพ์ให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วัน,เดือน,ปี.....
b.....
i.....

อีควอไลเซอร์
EQUALIZER

โดย



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อีควอไลเซอร์

EQUALIZER

ผู้จัดทำ

1. นายชานนท์ ศรีน้อย 43010101

2. นายอรรถกร ฉายรัมย์ 43010853

ปรโมทย์
(รศ.ดร.ปรโมทย์ วาดเขียน)
อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีควอไลเซอร์

EQUALIZER

โดย นายชานนท์ ศรีน้อย 43010101

นายอรรถกร ฉายรัมย์ 43010853

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการสร้างอีควอไลเซอร์แบบดิจิทัลที่ช่วงความถี่ 0 – 22 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนของตัวกรองความถี่ผ่านแบบดิจิทัลที่มีทั้งหมด 10 ช่องความถี่และ ส่วนของตัวควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าของอัตราขยายในแต่ละความถี่ที่สามารถเปลี่ยนค่าได้ ตั้งแต่ที่ -20 เดซิเบล ถึง 20 เดซิเบล โดยการทำงานของอีควอไลเซอร์จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล 51 ในการประมวลผล และใช้ A/D และ D/A ในการเชื่อมโยงสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต ตามลำดับ

ABSTRACT

A 0 – 22 KHz equalizer is set up. It is composed of 10 digital band pass filters which its gain from -20 dB to 20 dB can be adjusted. The equalizer operation is processed by MCS51 microcontroller and A/D and D/A are used to be interfaced input and output signal, respectively.

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 ขอบเขตของโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 ระบบอ็ควอลไซเซอร์	3
2.2 ชนิดของอ็ควอลไซเซอร์	3
2.2.1 กราฟฟิเคอ็ควอลไซเซอร์	3
2.2.2 พารามetri กอ็ควอลไซเซอร์	5
2.2.3 พารากราฟฟิเคอ็ควอลไซเซอร์	5
2.2.4 ดิจิตอลอ็ควอลไซเซอร์	5
2.3 การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (Digital Signal Processing)	5
2.3.1 สัญญาณต่อเนื่อง กับสัญญาณไม่ต่อเนื่อง	5
2.3.2 สัญญาณดิจิตอล (Digital signal)	6
2.3.3 ระบบและคุณสมบัติของระบบ	6
2.3.3.1 ความเป็นเชิงเส้นและไม่แปรตามเวลา (Linearity and Time Invariance)	6
2.3.3.2 ความเป็นเสถียรภาพ (Stability)	7
2.3.3.3 ความเป็นเหตุกภาพ (Causality)	8
2.3.4 ทฤษฎีการสุ่มสัญญาณ (Sampling Theorem)	8
2.3.5 สมการผลต่าง (Difference Equation)	10
2.3.6 การแปลงแซด (Z-Transform)	11
2.4 ทฤษฎีพื้นฐานของวงจรกรองความถี่แบบดิจิตอล	11
2.4.1 ความหมายของวงจรกรองความถี่แบบดิจิตอล	11
2.5 การออกแบบวงจรกรองความถี่ไม่ป้อนกลับเชิงเลข	13
2.5.1 การออกแบบโดยวิธีหน้าต่าง (Window Method)	14
2.5.1.1 หน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window)	16
2.6 วงจรแปลงแอนะลอกเป็นดิจิตอล (A/D Converter Circuits : ADC)	17
2.6.1 วงจร ADC แบบ Successive approximation	17
2.7 วงจรแปลงดิจิตอลเป็นแอนะลอก (D/A Converter Circuits : DAC)	18
2.7.1 วงจร DAC แบบ R-2R Ladders	18
2.8 วงจรขยายสัญญาณ	19
2.8.1 วงจรขยายแบบกลับศักดาสัญญาณ	19
2.8.2 สัญญาณเข้ามีศักดาบวก	19

2.8.3 สัญญาณเข้ามีศักดาลบ	20
2.8.4 สัญญาณเข้าเป็นศักดาสลับ	21
2.9 วงจรบวกสัญญาณ	21
2.9.1 วงจรบวกสัญญาณแบบมีค่าอัตราขยาย	22
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	23
3.1 แผนผังการทำงานของอ็ควอลไลเซอร์	23
3.1.1 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล (A/D converter : ADC)	23
3.1.2 วงจรกรองความถี่ผ่านที่สร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์	24
3.1.3 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก (D/A converter : DAC)	25
3.1.4 วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier)	25
3.1.5 วงจรบวกสัญญาณ (Summing)	27
3.1.6 การออกแบบตัวกรองความถี่ผ่านโดยใช้วิธีหน้าต่างแบบ Kaiser	27
3.1.7 ขั้นตอนการโปรแกรมสมการกรองความถี่ผ่านแบบดิจิตอล	32
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	33
4.1 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลและวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก	33
4.2 ภาควิทยาสัญญาณ	33
4.3 ภาควรรวมสัญญาณ	40
4.4 การเขียนโปรแกรมสมการตัวกรองความถี่ลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS-51)	41
4.4.1 ตัวกรองความถี่ต่ำที่ 60 Hz	41
4.4.2 ตัวกรองความถี่ผ่านที่ 350 Hz	43
4.4.3 ตัวกรองความถี่ผ่านที่ 450 Hz	45
4.4.4 ตัวกรองความถี่ผ่านที่ 600 Hz	47
4.4.5 ตัวกรองความถี่ผ่านที่ 750 Hz	49
4.4.6 ตัวกรองความถี่ผ่านที่ 900 Hz	51
4.4.7 ตัวกรองความถี่ผ่านที่ 1 kHz	53
4.4.8 ตัวกรองความถี่ผ่านที่ 2 kHz	55
4.4.9 ตัวกรองความถี่ผ่านที่ 3 kHz	57
4.4.10 ตัวกรองความถี่ผ่านที่ 4 kHz	59
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	61
5.1 สรุปผลการทดลอง	61
5.2 ปัญหาที่พบในการทดลอง	61
5.3 แนวทางในการแก้ปัญหา	62

กิตติกรรมประกาศ

หนังสืออ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แผนภาพรวมของอิกวอไลเซอร์	1
รูปที่ 2.1 สัญญาณต่อเนื่องและสัญญาณไม่ต่อเนื่อง	5
รูปที่ 2.2 สัญญาณไม่ต่อเนื่องและตัวอย่างการแทนลำดับค่าด้วยค่าดิจิทัล	6
รูปที่ 2.3 ระบบเวลาเชิงเต็มหน่วย	6
รูปที่ 2.4 ลำดับที่มีเสถียรภาพและไม่มีเสถียรภาพ	7
รูปที่ 2.5 ความมีเหตุภาพ (Casual) และความไม่มีเหตุภาพ (non-casual)	8
รูปที่ 2.6 การสุ่มตัวอย่างสัญญาณเชิงอุปมาน	8
รูปที่ 2.7 สัญญาณสุ่มตัวอย่าง	9
รูปที่ 2.8 สเปกตรัมของสัญญาณจากการสุ่มตัวอย่าง	9
รูปที่ 2.9 แผนภาพของวงจรกรองสัญญาณดิจิทัล	12
รูปที่ 2.10 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองอุดมคติ	14
รูปที่ 2.11 ค่าต่างๆในการระบุคุณลักษณะเฉพาะของผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรอง FIR	16
รูปที่ 2.12 แผนผังของ ADC	17
รูปที่ 2.13 โครงสร้างพื้นฐานของวงจร ADC แบบ Successive approximation	17
รูปที่ 2.14 แผนผังของ DAC	18
รูปที่ 2.15 วงจร DAC แบบ R-2R Ladders	18
รูปที่ 2.16 แสดงวงจรขยายสัญญาณแบบกลับสัปดาห์สัญญาณ	19
รูปที่ 2.17 แสดงกรณีที่สัญญาณเข้ามีศักดาเป็นลบ	21
รูปที่ 2.18 แสดงวงจรขยายกลับสัปดาห์สัญญาณ เมื่อสัญญาณเข้ามีศักดกลับ	21
รูปที่ 2.19 แสดงวงจรบวกสัญญาณแบบกลับสัปดาห์	21
รูปที่ 2.20 วงจรบวกสัญญาณแบบมีค่าอัตราขยาย	22
รูปที่ 3.1 แผนผังรวมของอิกวอไลเซอร์	23
รูปที่ 3.2 วงจรแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิทัล (ADC)	24
รูปที่ 3.3 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้สร้างตัวกรองความถี่ผ่านแบบดิจิทัล	24
รูปที่ 3.4 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะลอก (D/A converter :DAC)	25
รูปที่ 3.5 วงจรขยายสัญญาณ	25
รูปที่ 3.6 วงจรขยายสัญญาณที่ได้จากการออกแบบ	26
รูปที่ 3.7 วงจรบวกสัญญาณ	27
รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองแบบอุดมคติ	27
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรม	32
รูปที่ 4.1 ผลการทดลอง ADC และ DAC เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต sine ความถี่ 1 kHz	33
รูปที่ 4.2 ผลการทดลองวงจรขยายสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณอินพุต sine ความถี่ 500Hz	34

รูปที่ 4.3	ผลการทดลองวงจรถายสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณอินพุต sine ความถี่ 500Hz	34
รูปที่ 4.4	ผลการทดลองวงจรถายสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณอินพุต sine ความถี่ 1 kHz	35
รูปที่ 4.5	ผลการทดลองวงจรถายสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณอินพุต sine ความถี่ 1 kHz	35
รูปที่ 4.6	ผลการทดลองวงจรถายสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณอินพุต sine ความถี่ 500 Hz	36
รูปที่ 4.7	ผลการทดลองวงจรถายสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณอินพุต sine ความถี่ 500 Hz	36
รูปที่ 4.8	ผลการทดลองวงจรถายสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณอินพุต sine ความถี่ 1 kHz	37
รูปที่ 4.9	ผลการทดลองวงจรถายสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณอินพุต sine ความถี่ 1 kHz	37
รูปที่ 4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอัตราขยายของวงจรถายสัญญาณ	38
รูปที่ 4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และค่า THD ของวงจรถายสัญญาณ	39
รูปที่ 4.12	สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรบวกสัญญาณที่ความถี่ 500Hz	40
รูปที่ 4.13	สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรบวกสัญญาณที่ความถี่ 1 kHz	40
รูปที่ 4.14	ผลการทดลองวงจรถองความถี่ต่ำ 60 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 60 Hz	41
รูปที่ 4.15	ผลการทดลองวงจรถองความถี่ต่ำ 60 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 300 Hz	41
รูปที่ 4.16	ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำ 60 Hz จากการเขียนโปรแกรม ใช้ MCS-51	42
รูปที่ 4.17	ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำ 60 Hz โดยใช้โปรแกรม MATLAB	42
รูปที่ 4.18	ผลการทดลองวงจรถองความถี่ผ่าน 350 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 350 Hz	43
รูปที่ 4.19	ผลการทดลองวงจรถองความถี่ผ่าน 350 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 700 Hz	43
รูปที่ 4.20	ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 350 Hz จากการเขียนโปรแกรม ใช้ MCS-51	44
รูปที่ 4.21	ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 350 Hz โดยใช้โปรแกรม MATLAB	44
รูปที่ 4.22	ผลการทดลองวงจรถองความถี่ผ่าน 450 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 450 Hz	45
รูปที่ 4.23	ผลการทดลองวงจรถองความถี่ผ่าน 450 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 700 Hz	45
รูปที่ 4.24	ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 450 Hz จากการเขียนโปรแกรม ใช้ MCS-51	46
รูปที่ 4.25	ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 450 Hz โดยใช้โปรแกรม MATLAB	46
รูปที่ 4.26	ผลการทดลองวงจรถองความถี่ผ่าน 600 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 600 Hz	47
รูปที่ 4.27	ผลการทดลองวงจรถองความถี่ผ่าน 600 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 900 Hz	47
รูปที่ 4.28	ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 600 Hz จากการเขียนโปรแกรม ใช้ MCS-51	48
รูปที่ 4.29	ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 600 Hz โดยใช้โปรแกรม MATLAB	48
รูปที่ 4.30	ผลการทดลองวงจรถองความถี่ผ่าน 750 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 750 Hz	49
รูปที่ 4.31	ผลการทดลองวงจรถองความถี่ผ่าน 750 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 1 kHz	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.32 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 750 Hz จากการเขียนโปรแกรม ใช้ MCS-51	50
รูปที่ 4.33 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 750 Hz โดยใช้โปรแกรมMATLAB	50
รูปที่ 4.34 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 900 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 900 Hz	51
รูปที่ 4.35 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 900 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 1.2 kHz	51
รูปที่ 4.36 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 900 Hz จากการเขียนโปรแกรม ใช้ MCS-51	52
รูปที่ 4.37 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำ 900 Hz โดยใช้โปรแกรมMATLAB	52
รูปที่ 4.38 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 1 kHz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 1 kHz	53
รูปที่ 4.39 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 1 kHz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 500 Hz	53
รูปที่ 4.40 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 1 kHz จากการเขียนโปรแกรม ใช้ MCS-51	54
รูปที่ 4.41 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 1 kHz โดยใช้โปรแกรมMATLAB	54
รูปที่ 4.42 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 2 kHz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 2 kHz	55
รูปที่ 4.43 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 2 kHz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 3.6 kHz	55
รูปที่ 4.44 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 2 kHz จากการเขียนโปรแกรม ใช้ MCS-51	56
รูปที่ 4.45 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 2 kHz โดยใช้โปรแกรมMATLAB	56
รูปที่ 4.46 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 3 kHz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 3 kHz	57
รูปที่ 4.47 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 3 kHz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 4.5 kHz	57
รูปที่ 4.48 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 3 kHz จากการเขียนโปรแกรม ใช้ MCS-51	58
รูปที่ 4.49 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 3 kHz โดยใช้โปรแกรมMATLAB	58
รูปที่ 4.50 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 4 kHz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 4 kHz	59
รูปที่ 4.51 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 4 kHz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 5.5 kHz	59
รูปที่ 4.52 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 4 kHz จากการเขียนโปรแกรม ใช้ MCS-51	60
รูปที่ 4.53 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 4 kHz โดยใช้โปรแกรมMATLAB	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงช่วงความถี่ออกเตฟตามมาตรฐานของ ISO	4
ตารางที่ 2.2 ผลตอบสนองอิมพัลส์ในอุดมคติของวงจรรองชนิดต่าง ๆ	15
ตารางที่ 4.1 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณ	38
ตารางที่ 4.2 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และค่า THD ของวงจรขยายสัญญาณ	39



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

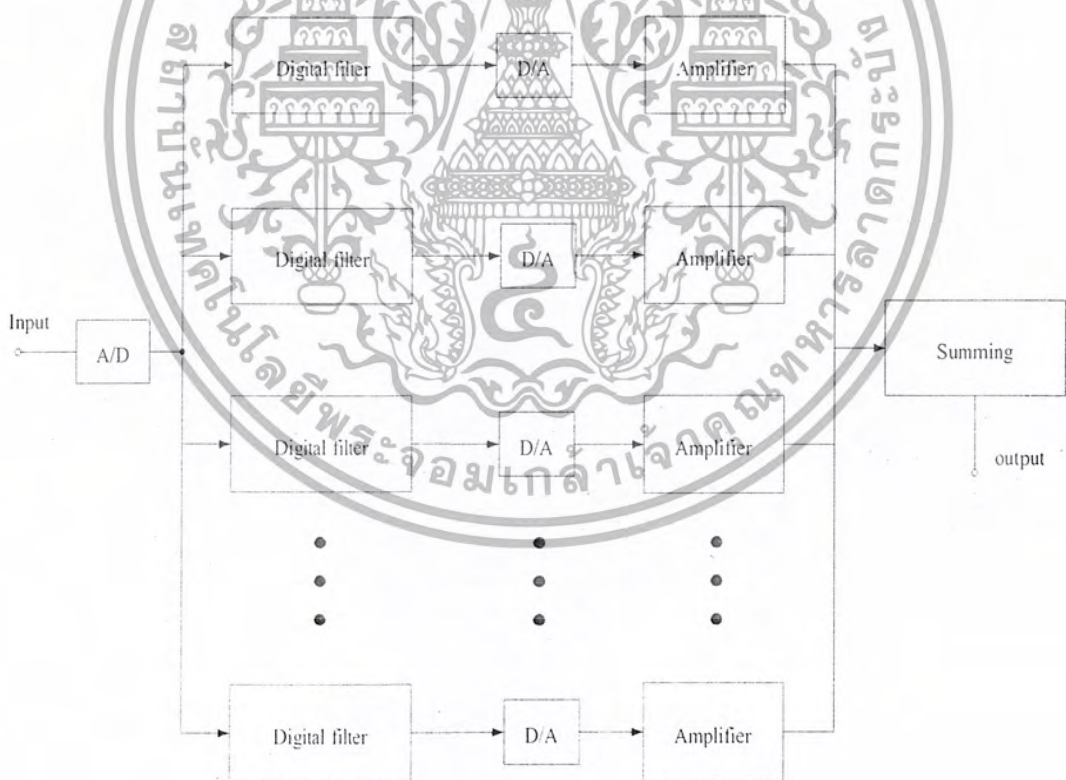
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

อีควอไลเซอร์ (Equalizer) เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายทั้งในด้านความบันเทิงและในงานอุตสาหกรรม จากคุณสมบัติพิเศษของอีควอไลเซอร์ คือ จะสามารถชดเชยการสูญเสียพลังงานที่ความถี่ใดความถี่หนึ่งได้ และยังสามารถเพิ่มพลังงานในความถี่ที่เราต้องการได้ คุณสมบัติพิเศษดังที่กล่าวมาทำให้อีควอไลเซอร์ไม่ได้ให้ความสำคัญกับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นทั้งภายในและภายนอกของตัวอุปกรณ์เอง อีกทั้งช่วงความถี่ที่ใช้งานก็เป็นช่วงความถี่ที่กว้างเกิน ซึ่งไม่อาจเพียงพอกับความต้องการของผู้ใช้งาน จึงมีความจำเป็นต้องเพิ่มช่วงความถี่ให้มีความละเอียดมากกว่าเดิมเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้งาน

ซึ่งในโครงการนี้เป็นการสร้างอีควอไลเซอร์แบบกราฟิค ที่มีการแบ่งช่องความถี่ออกเป็น 10 ช่องสัญญาณและสามารถที่จะปรับอัตราขยายและการลดทอนได้ในช่วง -20 dB ถึง 20 dB โดยแผนภาพรวมของอีควอไลเซอร์แสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แผนภาพรวมของอีควอไลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในส่วนของวงจรกรองความถี่ (Digital filter) ตามแผนภาพข้างต้นจะทำการสร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller MCS-51) ที่มีโปรแกรมสมการของตัวกรองความถี่แบบดิจิทัลลงไป มาเป็นตัวประมวลผล ซึ่งสมการของตัวกรองความถี่นี้เป็นสมการผลต่าง (difference equation) ที่ได้จากการใช้หลักการของการประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัล (Digital signal processing)

1.2 ขอบเขตของโครงการ

ในส่วนของขอบเขตของโครงการจะทำการแบ่งงานออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ

1. ส่วนของการต่อวงจรและทดลองวงจรในส่วนต่าง ๆ ตามแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 1.1

ในส่วนนี้จะทำการทดลองและเก็บผลการทดลองของวงจรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างอ็ควอลไซเซอร์ตามแผนภาพแสดงในรูปที่ 1.1 เช่น วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (A/D converter), วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (D/A converter), วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier), วงจรรวมสัญญาณ (Summing) และวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS-51) ที่ทำการโปรแกรมสมการตัวกรองความถี่แบบดิจิทัลลงไป

2. ส่วนของการศึกษาการประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัล (Digital signal processing)

ส่วนการศึกษาการประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัลนี้จะทำการศึกษาถึงการออกแบบตัวกรองความถี่แบบดิจิทัล (Digital filter) เพื่อให้ได้มาซึ่งสมการของตัวกรองความถี่ตามช่วงความถี่ต่าง ๆ ที่ออกแบบไว้สำหรับอ็ควอลไซเซอร์ แล้วนำสมการที่ได้มาโปรแกรมลงไปใน MCS-51

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ระบบอีควอไลเซอร์

อีควอไลเซอร์ คือ อุปกรณ์ที่ใช้วัดสัญญาณเพื่อที่จะเปลี่ยนผลตอบสนองเชิงความถี่ของสัญญาณที่ผ่านเข้ามาเพื่อชดเชยการสูญเสียความถี่บางช่วงในระบบเครื่องเสียง ระบบเครื่องเสียงเหล่านี้ ได้แก่ ระบบบันทึกและเพลย์แบค ระบบเสียงสาธารณะ หรือกระทั่งระบบเสียงไฮไฟท์ คำว่า Equalizer มาจากความหมายว่า การต้องการสร้างสัญญาณให้เท่ากับสัญญาณต้นแบบเดิม วัตถุประสงค์ที่เราใช้งานอีควอไลเซอร์แบ่งเป็น 2 แบบคือ แบบแก้ไขสัญญาณให้ถูกต้อง และ แบบเพิ่มคุณภาพการทำงาน

อีควอไลเซอร์แบบแก้ไขสัญญาณ จะใช้ในระบบบันทึกเสียงในอุปกรณ์เสียงระบบดิจิตอล ตัวอย่างการใช้งานคือการใช้วงจรมอนิเตอร์ในเทปคาสเซตทั้งคอนบันทิกและคอนเพลย์แบค ขบวนการนี้ใช้มานานแล้วซึ่งจำเป็นต้องมีเพื่อชดเชยความถี่บางช่วงที่สูญเสียในขบวนการบันทึก

ในการใช้อีควอไลเซอร์ในระบบเสียงภายในห้องฟังเพลงมีหน้าที่แก้ไขผลตอบสนองเชิงความถี่ให้ถูกต้อง ผลตอบสนองเชิงความถี่ในห้องฟังเพลงต่างๆไปจะเป็นปฏิกิริยาต่อกันกับตู้ลำโพง ตำแหน่งการวางลำโพง และรูปแบบสภาพทางเสียงภายในห้อง ในการใช้งานแบบนี้วัตถุประสงค์หลักเพื่อเป็นพลังเสียงและคุณภาพเสียงภายในห้องหรือเพื่อให้ได้ยินชัดเจน

อีควอไลเซอร์เพื่อเพิ่มคุณภาพสัญญาณ อีควอไลเซอร์แบบนี้เป็นที่รู้จักกันทั่วไปในงานบันทึกดนตรีเพื่อใช้ในการเน้นหรือเสริมแต่งเสียงดนตรีบางชิ้นเป็นพิเศษ เช่นในกรณีที่ต้องการบันทึกเสียงดนตรี 2 ชิ้นลงในแทร็คเดียวกันเราอาจใช้อีควอไลเซอร์ก่อนการบันทึกเพื่อกำหนดเสียงดนตรีหนึ่งๆให้ชัดเจนยิ่งขึ้น เช่น เสียงกลอง เป็นต้น

2.2 ชนิดของอีควอไลเซอร์

โดยหลักการแล้วอีควอไลเซอร์ทุกชนิดล้วนทำงานในแบบเดียวกัน แต่จะประกอบด้วยวงจรกรองความถี่ต่างๆจำนวนหนึ่งเพื่อตัดทอนหรือยกระดับสัญญาณช่วงความถี่หนึ่งในแถบสเปกตรัมเสียง อีควอไลเซอร์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมีหลายแบบ ได้แก่

2.2.1 กราฟฟิคอีควอไลเซอร์

เป็นอีควอไลเซอร์อีกแบบหนึ่งที่นิยมใช้กันมากที่สุดนิยมใช้กันในระบบเครื่องเสียงภายในบ้านทั่วไป

กราฟฟิคอีควอไลเซอร์จะประกอบด้วยวงจรกรองความถี่ชุดหนึ่งเพื่อทำการลดทอนหรือเพิ่มขนาดสัญญาณเฉพาะช่วงความถี่กลาง ปริมาณการตัดหรือเพิ่มขึ้น จะขึ้นอยู่กับปุ่มควบคุมที่มาในรูปแบบของสไลด์โพเทนชิโอเมเตอร์วางอยู่ด้านหน้าตำแหน่งการจัดวางพ็อตเหล่านี้จึงปรากฏในรูปของกราฟแสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ต้องการ การแบ่งชอยย่อยแถบความถี่การควบคุมแล้วแต่ช่วงเท่าของความถี่กลาง เช่น 1/3 ออกเตฟ เป็นต้น ช่วงความถี่ต่างๆที่เรานิยมใช้จะมีมาตรฐานเป็นตัวกำหนด เราเรียกมาตรฐานนี้ว่า ISO (International Standard Organization) แสดงค่าดังตารางต่อไปนี้

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	
41	12500	11200-14100	
42	16000	14100-17800	11200-22400
43	20000	17800-22400	

ตารางที่ 2.1 แสดงช่วงความถี่ออกเตฟตามมาตรฐานของ ISO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 พารามตริกอีควอไลเซอร์

ในวงจรอีควอไลเซอร์ชนิดนี้นอกจากจะมีการควบคุมช่วงตัดหรือช่วงเพิ่มระดับสัญญาณในวงจรกรองแต่ละชุดแล้ว อีควอไลเซอร์แบบนี้ยังมีปุ่มแยกเพื่อใช้ในการควบคุมสำหรับความถี่กลางของพีแอมป์และขนาดของแบนด์วิธ อย่างไรก็ตามการควบคุมเพิ่มลดของพีแอมป์เหล่านี้มักใช้เป็นปุ่มหมุนแทนแบบสไลด์ อีควอไลเซอร์แบบนี้จึงมีการใช้งานที่ยืดหยุ่นกว่าแบบกราฟฟิคอีควอไลเซอร์ และยังมีราคาแพงมากกว่า

2.2.3 พารากราฟฟิคอีควอไลเซอร์

อีควอไลเซอร์แบบนี้เป็นลูกผสมระหว่างอีควอไลเซอร์แบบกราฟฟิคและแบบพารามตริก กล่าวคือ ไม่เหมือนกับพารามตริกอีควอไลเซอร์ตรงที่มีปุ่มควบคุมแยกปรับค่าแบนด์วิธ ค่า Q และค่าความถี่กลางของพีแอมป์แต่ละชุด แทนที่จะใช้เพื่อปรับแบบโรตารีก็มาใช้เพื่อปรับแบบเลื่อนขึ้นลงในการควบคุมอัตราขยายของพีแอมป์แต่ละตัวแทน ทำให้มีขอบเขตการใช้งานกว้างขวาง ในขณะที่เดียวกันจะมองเห็นช่วงการปรับแต่งความถี่ได้ง่ายจากหน้าปัดเครื่อง

2.2.4 ดิจิตอลอีควอไลเซอร์

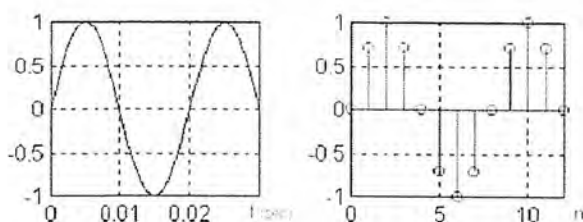
เป็นการใช้ CPU มาควบคุม ปกติจะมีอินพุตและเอาต์พุตให้ทั้งแบบดิจิตอลและแบบแอนะล็อก ข้อดีของอีควอไลเซอร์แบบนี้คือ ความสามารถในการเปลี่ยนโปรแกรมได้ ความถี่ต่างๆที่กำหนดสามารถดูได้จากหน่วยความจำ

2.3 การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (Digital Signal Processing)

2.3.1 สัญญาณต่อเนื่อง กับสัญญาณไม่ต่อเนื่อง

สัญญาณต่อเนื่อง (continuous-time signal) เป็นสัญญาณที่มีค่าต่อเนื่องในทางเวลา ซึ่งเป็นสัญญาณที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวัน อาทิ สัญญาณเสียง, สัญญาณไฟบ้าน 50 Hz โดยที่ถ้าแทนสัญญาณด้วย x และแทนเวลาด้วยสัญลักษณ์ t จะกล่าวได้ว่า x เป็นฟังก์ชันของ t หรือ x มีค่าที่เวลาใด ๆ เขียนแทนสัญลักษณ์นี้ได้ว่า $x(t)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่อง โดยสัญญาณต่อเนื่องเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สัญญาณแอนะล็อก (analog signal)

สัญญาณไม่ต่อเนื่อง (discrete-time signal) เป็นสัญญาณที่มีค่าเพียงบางจุดของเวลา โดยทั่วไปเกิดจากการสุ่มสัญญาณต่อเนื่องด้วยคาบเวลาของการสุ่มค่าที่ โดยสมมติแทน n เป็นเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง โดย n เป็นตัวแปรที่มีค่าเป็นจำนวนเต็มเท่านั้น คือ $n = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots$ และสัญญาณไม่ต่อเนื่องจะเป็นฟังก์ชันของ n ดังนั้นเขียนแทนสัญลักษณ์นี้ได้ว่า $x(n)$

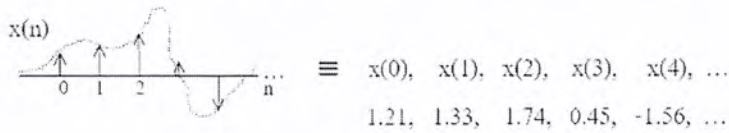


รูปที่ 2.1 สัญญาณต่อเนื่องและสัญญาณไม่ต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 สัญญาณดิจิทัล (Digital signal)

ในส่วนคำว่าสัญญาณดิจิทัลนั้น ก็คือ สัญญาณไม่ต่อเนื่องที่แต่ละค่าของสัญญาณถูกแทนด้วยค่าเลขฐานสองที่มีจำนวนบิตจำกัด อยู่ในรูป 0 กับ 1



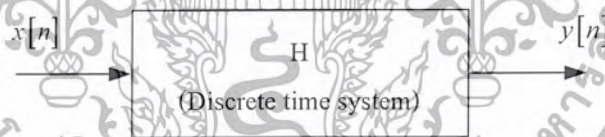
ค่าของสัญญาณเหล่านี้ เมื่อนำไปใช้งานสามารถแทนได้ด้วยข้อมูลดิจิทัล เช่น 00110110, 00111000, 01100011, ...

รูปที่ 2.2 สัญญาณไม่ต่อเนื่องและตัวอย่างการแทนลำดับค่าด้วยค่าดิจิทัล

2.3.3 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 2.3 ระบบเวลาเชิงเต็มหน่วย

ซึ่งในการประมวลผลสัญญาณ ระบบหรือ H ก็อาจเทียบได้ว่ามันก็คือ วงจรกรองความถี่ดิจิทัลนั่นเอง เช่น วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) ก็คือระบบที่สมการของการตัดแถบความถี่สูงออกอยู่ในตัวเอง มันจะให้สัญญาณเอาต์พุต โดยเกิดจากการคำนวณของสมการของมันต่อลำดับสัญญาณอินพุต ในการคำนวณโดยทั่วไปของระบบนั้นก็จะมียกข้อกำหนดขึ้นมาเพื่อความสะดวกในการคิดพิจารณา ระบบ ข้อกำหนดที่เป็นที่ยอมรับและนำมาใช้มากก็คือ ระบบลิเนียร์ไทม์อินแวเรียนซ์ ซึ่งจะได้อีกว่าถึงคุณสมบัติที่สำคัญที่ควรทราบ ดังนี้

2.3.3.1 ความเป็นเชิงเส้นและไม่แปรตามเวลา (Linearity and Time Invariance)

ระบบที่สนใจในเบื้องต้นของการประมวลผลสัญญาณ คือ ระบบแบบเชิงเส้น และไม่แปรตามเวลา โดยสมมติให้ว่าระบบแบบไม่ต่อเนื่องที่สนใจระบบหนึ่ง เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้า $x_1(n)$ ทำให้เกิด

สัญญาณที่ออกมา $y_1(n)$ และเมื่อป้อนสัญญาณขาเข้า $x_2(n)$ ทำให้เกิดสัญญาณขาออก $y_2(n)$ ใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าให้ $x(n)$ เป็นสัญญาณขาเข้าใหม่ ที่เกิดจากการคำนวณแบบเชิงเส้นระหว่าง $x_1(n)$ และ $x_2(n)$ นั่นคือ

$$x(n) = a_1 x_1(n) + a_2 x_2(n) \quad (2.1)$$

โดย a_1 และ a_2 เป็นค่าคงที่ใด ๆ ที่ไม่เท่ากับศูนย์ เรากล่าวว่าระบบนี้เป็น “ระบบเชิงเส้น” (linear system) ถ้า $x(n)$ นี้ทำให้เกิดสัญญาณขาออก คือ

$$y(n) = a_1 y_1(n) + a_2 y_2(n) \quad (2.2)$$

นั่นคือ จะต้องได้ $y(n)$ เป็นการคำนวณแบบเชิงเส้นระหว่าง $y_1(n)$ และ $y_2(n)$ โดยที่มีสัมประสิทธิ์ที่ใช้คูณ (a_1 และ a_2) ตัวเดียวกันกับสัญญาณขาเข้า

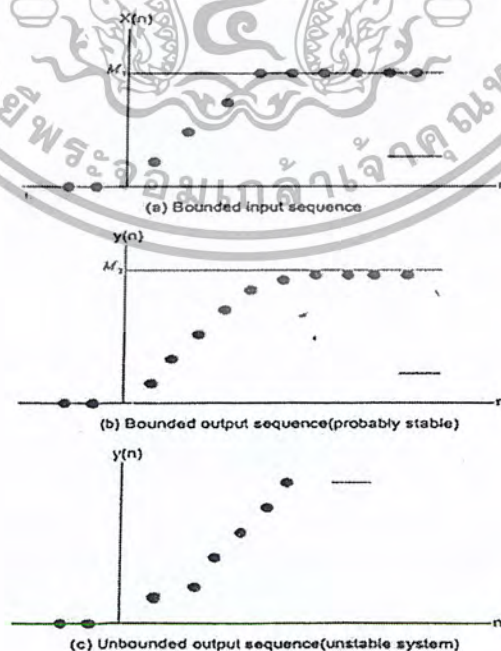
ซึ่งคุณสมบัติของระบบที่เป็นเชิงเส้นนี้เรียกอีกอย่างว่า คุณสมบัติ superposition สำหรับคุณสมบัติความ “ไม่แปรตามเวลา” ของระบบไม่ต่อเนื่องมีเงื่อนไขว่า

ถ้าสัญญาณขาเข้า $x(n)$ ทำให้เกิดสัญญาณขาออก $y(n)$ แล้ว ถ้าให้สัญญาณขาเข้าล่าช้า หรือ นำหน้าไปเท่ากับ k ลำดับ คือ กลายเป็น $x(n - k)$ ระบบจะให้สัญญาณขาออกเป็น $y(n - k)$ (ได้สัญญาณเหมือนเดิมและล่าช้าหรือนำหน้าไปเท่ากับสัญญาณขาเข้า)

ระบบไม่แปรตามเวลา (time-invariant system) บอกให้ทราบว่า การจะใส่สัญญาณขาเข้าที่เวลาใดก็ตาม จะได้สัญญาณขาออกที่เหมือนเดิมเสมอ นั่นคือ ในระบบมีค่าพารามิเตอร์ หรือสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ คงที่ ไม่แปรตามเวลา หรือแปรตามสถานะแวดล้อมใด ๆ เลย

2.3.3.2 ความมีเสถียรภาพ (Stability)

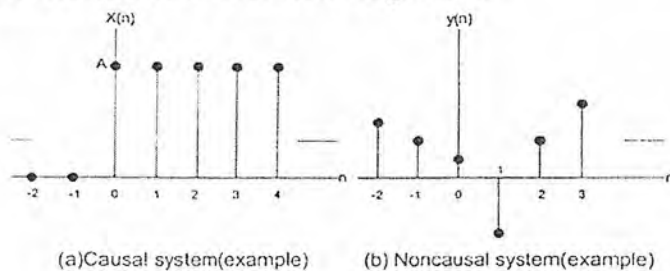
นับว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ระบบใด ๆ ควรจะต้องมีเป็นตัวบอกว่าระบบนั้น ๆ จะสามารถใช้งานได้ตลอดช่วงยาวนานเท่าใดในระบบที่เรียกได้ว่ามีคุณสมบัติของความมีเสถียรภาพ หมายความว่า เมื่อสัญญาณอินพุตมีแอมพลิจูด ที่อยู่ในช่วงที่ไม่เข้าสู่ ∞ ก็ถือได้ว่าระบบนั้นไม่เสถียรภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.4 ลำดับที่มีเสถียรภาพและไม่มีเสถียรภาพให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.3 ความเป็นเหตุกภาพ (Causality)

ระบบที่ให้ความเป็นเหตุกภาพ หมายถึง ระบบที่ให้ลำดับที่เอาต์พุตออกมาที่จุดเริ่มต้นจาก $n = 0$ ไปจนถึง ∞ เท่านั้น (ค่าที่อยู่ต่ำกว่า $n = 0$ จะต้องมีค่าเป็นศูนย์หมด)



รูปที่ 2.5 ความมีเหตุกภาพ (Casual) และความไม่มีเหตุกภาพ (non-casual)

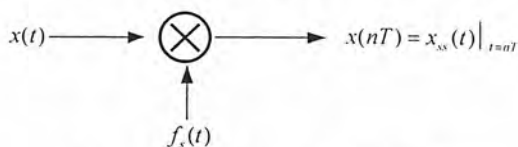
ซึ่งในปกติแล้วสัญญาณทั่วไปในทางปฏิบัติจะเป็นแบบมีเหตุกภาพเท่านั้น เอาต์พุตที่เกิดขึ้นใหม่จะมีค่าเท่ากับเอาต์พุตที่ปัจจุบันร่วมกับเอาต์พุตที่ผ่านมาเท่านั้น ส่วนระบบที่ไม่มีเหตุกภาพ จะให้ค่าทั้งที่ n อยู่ในช่วงลบและบวก นั่นคือเอาต์พุตที่เกิดขึ้นใหม่จะมีค่าเท่ากับเอาต์พุตที่ปัจจุบันร่วมกับเอาต์พุตที่ผ่านมาและเอาต์พุตของอนาคต ซึ่งในระบบแบบนี้จะทำได้ในกรณีที่ต้องทำการบันทึกลำดับสัญญาณนั้นไว้เท่านั้น นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติอื่นๆ อีกบ้าง เช่น Invertibility, memory, commutation เป็นต้น

2.3.4 ทฤษฎีการสุ่มสัญญาณ (Sampling Theorem)

การเปลี่ยนสัญญาณเชิงอุปมานไปเป็นสัญญาณเชิงเลขนั้น จำเป็นจะต้องมีการสุ่มตัวอย่าง ซึ่งความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง โดยที่ไม่ทำให้สัญญาณสูญเสียข้อมูลที่สำคัญไปนั้นต้องเป็นไปตามทฤษฎีการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Theory) ของแชนนอน (Shannon) ซึ่งกล่าวไว้ว่า ถ้าสัญญาณเชิงอุปมาน $x(t)$ ซึ่งมีแบนด์วิธเท่ากับ f_0 แล้ว จะสามารถทำการสุ่มตัวอย่างโดยสัญญาณที่ได้ไม่สูญเสียข้อมูลที่สำคัญ ก็ต่อเมื่อความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง f_s มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสองเท่าของความถี่ f_0

$$f_s \geq 2f_0$$

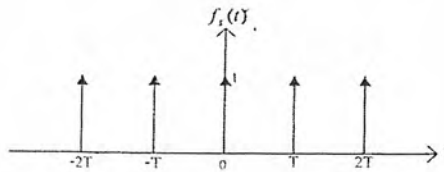
โดยทั่วไปอาจทำการสุ่มตัวอย่างด้วยความถี่ $f_{sn} = 2f_0$ พอดี ซึ่งค่าความถี่นี้เรียกว่าความถี่ไนควิสต์ (Nyquist frequency) และคาบเวลา $T_n = 1/2f_0$ นี้เรียกว่าช่วงเวลาสุ่มตัวอย่างไนควิสต์ (Nyquist interval) แต่ในทางปฏิบัติเพื่อหลีกเลี่ยงผลของปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) ที่อาจเกิดจากการสุ่มตัวอย่าง จึงมักใช้ความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง f_s มากกว่าค่าความถี่ไนควิสต์ f_{sn} ขึ้นไป ส่วนจะมีค่ามากกว่าเท่าใดนั้นขึ้นกับลักษณะงาน โดยไม่ได้มีการกำหนดค่าที่แน่นอน



รูปที่ 2.6 การสุ่มตัวอย่างสัญญาณเชิงอุปมาน

รูปที่ 2.7 แสดงการสุ่มตัวอย่างในโดเมนเวลาซึ่ง ก็คือ การคูณสัญญาณเชิงอุปมาน $x(t)$ กับลำดับของอิมพัลส์หนึ่งหน่วย $f_s(t)$ โดยที่อิมพัลส์แต่ละตัวสมมติให้มีความห่างเท่ากับ T วินาที ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยสมการ

$$f_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.7 สัญญาณสุ่มตัวอย่าง

เมื่อทำการแปลงฟูเรียร์ เพื่อทำการหาค่าสเปกตรัมความถี่ของ $f_s(t)$ จะได้

$$F_s(\omega) = \frac{2\pi}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - n\omega_s) \quad (2.4)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อพิจารณาใน โดเมนความถี่ สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณ $f_s(t)$ เป็นอิมพัลส์ที่วางตัวห่าง ๆ กัน ไปบนแกนความถี่เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.8(b) ึ่ง



(a) สเปกตรัมของสัญญาณเชิงอุปมาน
(b) สเปกตรัมของสัญญาณสุ่มตัวอย่าง $f_s(t)$
(c) สเปกตรัมของสัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่าง

ถ้าให้ $x_{ss}(t)$ เป็นสัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่าง ดังนั้น

$$x_{ss}(t) = f_s(t)x(t) \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และถ้าให้ $X(\omega)$ เป็นสเปกตรัมความถี่ของ $x(t)$ เนื่องจากโดเมนเวลาสัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างเป็นการคูณกันของสองสัญญาณ ดังนั้นในโดเมนความถี่จึงเป็นการทำคอนโวลูชัน (Convolution) ของสเปกตรัมของ $f_s(t)$ และ $x(t)$ หรือ

$$X_{ss}(\omega) = F_s(\omega) * X(\omega) \quad (2.6)$$

การคอนโวลูชันนี้แสดงเป็นแผนภาพในรูปที่ 2.8 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเห็นว่าสเปกตรัมของสัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่าง $X_{ss}(\omega)$ เป็นการนำสเปกตรัมของ $X(\omega)$ มาวางเรียงห่างเท่า ๆ กันไปตลอดบนแกนความถี่ ω ซึ่งจากรูปที่ 2.8(c) จะเห็นว่าถ้าความถี่ของสัญญาณสุ่มตัวอย่าง $f_s(t)$ มีค่าน้อยกว่าความถี่ในควิซต์จะทำให้ช่วงห่างของแต่ละกลุ่มของสเปกตรัมเข้ามาเกยทับกัน ผลนี้ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนไปของสเปกตรัมของสัญญาณเดิม ซึ่งผลนี้มีชื่อเรียกว่า ผลการเอเลียสซิง (Aliasing effect) รูปที่ 2.8 ยังแสดงให้เห็นอีกว่าผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข จะมีผลตอบสนองความถี่ที่มีลักษณะเป็นคาบ คือเริ่มซ้ำค่าเดิมที่จุดที่มีค่าความถี่เป็น $2\pi/T$ หรือ $f_s/2$ ซึ่งความถี่นี้เรียกว่าความถี่พับ ซึ่งการที่ผลตอบสนองความถี่มีลักษณะเป็นคาบก็เนื่องมาจากการสุ่มตัวอย่างสัญญาณนั่นเอง

2.3.5 สมการผลต่าง (Difference Equation)

ระบบแบบไม่ต่อเนื่อง นอกจากสามารถถูกกำหนดด้วยคัลคูลัสได้โดย $h(n)$ แล้ว ยังสามารถถูกกำหนดได้ด้วยสมการผลต่าง ซึ่งสมการผลต่างในที่นี้ คือ สมการที่บ่งบอกความสัมพันธ์ในเชิงเวลา ระหว่างสัญญาณขาเข้าของระบบ คือ $x(n)$ และสัญญาณขาออกของระบบ คือ $y(n)$ สมการผลต่างคือ สิ่งที่จะใช้สำหรับสร้างตัวประมวลผล เพราะเป็นตัวบอกว่าจะสามารถหา $y(n)$ ได้ด้วยการคำนวณอย่างไร สมการผลต่างของระบบแบบเชิงเส้นและไม่แปรตามเวลามีรูปแบบเฉพาะ ดังแสดงในสมการ 2.7

$$y(n) = a_0 y(n-1) + a_1 y(n-2) + \dots + a_N y(n-N) + b_0 x(n) + b_1 x(n-1) + \dots + b_L x(n-L) \quad (2.7)$$

หรือเขียนได้เป็น

$$y(n) = \sum_{k=1}^N a_k y(n-K) + \sum_{k=0}^L b_k x(n-K) \quad (2.8)$$

โดยที่

a_k คือสัมประสิทธิ์ของ Output

b_k คือสัมประสิทธิ์ของ Input

จากสมการที่ (2.8) เทอมทางซ้ายมือคือ Output ปัจจุบัน เทอมทางขวามือเทอมแรกคือ Output ในอดีต ส่วนเทอมทางขวามือเทอมที่ 2 คือ Input ในอดีต

ถ้าใช้ Output ในอดีตมาคำนวณหา Output ปัจจุบันเรียกว่า Recursive System

ถ้าไม่ใช่ Output ในอดีตมาคำนวณหา Output ปัจจุบันเรียกว่า Non-Recursive System

2.3.6 การแปลงแซด (Z-Transform)

การแปลงแซดเป็นการแปลงที่กระทำกับสัญญาณไม่ต่อเนื่อง แล้วให้ผลลัพธ์เป็นฟังก์ชันของตัวแปรเชิงซ้อน คือตัวแปร Z สำหรับสัญญาณ $x(n)$ ใด ๆ การแปลงแซดของ $x(n)$ เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $X(Z)$ มีนิยามว่า

$$\begin{aligned} Z\{x(n)\} &= X(z) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)z^{-n} \end{aligned} \quad (2.9)$$

และการแปลงแซดผกผัน (Inverse Z transform) มีนิยามว่า

$$Z^{-1}\{X(Z)\} = x(n) = \frac{1}{2\pi j} \int_C X(z)Z^{n-1} dz \quad (2.10)$$

โดย $Z = e^{sT}$ และโดยทั่วไปจะให้ $T=1$ ซึ่งการแปลงแซดนี้จะนำไปใช้ป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ระบบแบบไม่ต่อเนื่อง โดยสมมติว่าระบบแบบไม่ต่อเนื่องระบบหนึ่งนั้นมีผลตอบสนองอิมพัลส์ (Impulse response) เป็น $h(n)$ และการแปลงแซดของ $h(n)$ ได้ค่าเป็น $H(Z)$ ซึ่ง $H(Z)$ นี้ก็คือฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ของระบบ โดยมีความสัมพันธ์กับการแปลงแซดของสัญญาณขาเข้า และสัญญาณขาออก ดังสมการ

$$H(Z) = \frac{Y(Z)}{X(Z)} \quad (2.11)$$

สมการที่ 2.11 นี้ เป็นสมการความสัมพันธ์ในโดเมน Z สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการคำนวณค่าต่าง ๆ ของระบบ เช่น สมการผลต่างสืบเนื่อง, $h(n)$, $H(Z)$, $y(n)$ เมื่อกำหนด $x(n)$ โดยถ้าหากทราบค่าใดค่าหนึ่ง ก็สามารถที่จะใช้การแปลงแซดในการหาค่าที่เหลืออยู่ทั้งหมดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทางปฏิบัติสัญญาณ $x(n)$ ที่ให้จะเป็นสัญญาณเคอซอล (Causal signal) คือ $x(n) = 0$ เมื่อ $n < 0$ ทำให้ค่าตัวแปร n ในสมการที่ 2.9 จะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง ∞ ซึ่งเรียกขานเป็นการแปลงแซดด้านเดียว ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญบางประการของการแปลงแซด ดังนี้

1.) ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

$$Z\{ax(n) + by(n)\} = aX(Z) + bY(Z) \quad (2.12)$$

2.) การเลื่อน (Shift หรือ Translation)

$$Z\{x(n-k)\} = Z^{-k} X(Z) \quad (2.13)$$

3.) คอนโวลูชัน (Convolution)

$$Z\{f(n) * y(n)\} = Z\{f(n)\} Z\{g(n)\} = F(Z)G(Z) \quad (2.14)$$

2.4 ทฤษฎีพื้นฐานของวงจรกรองความถี่แบบดิจิตอล

2.4.1 ความหมายของวงจรกรองความถี่แบบดิจิตอล

วงจรกรองความถี่แบบดิจิตอล คือ กระบวนการที่ไปดัดแปลงสเปกตรัมของสัญญาณให้มีสเปกตรัมเป็นไปตามข้อกำหนดที่ต้องการ ซึ่งอาจเป็นการเพิ่มค่าหรือลดทอนค่าขนาดของสัญญาณใน

แถบความถี่ที่กำหนดให้ ซึ่งในการวิเคราะห์และสังเคราะห์วงจรนั้น ต้องใช้เครื่องมือพื้นฐานทางคณิตศาสตร์เข้าช่วย ดังนั้นเราจึงเรียกว่า วงจรกรองความถี่เชิงเลข

การที่วงจรกรองความถี่เชิงเลขมีการนำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง อาจมาจากข้อได้เปรียบหลายประการดังต่อไปนี้

1. ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่นั้น สามารถที่จะออกแบบให้มีความใกล้เคียงกับผลตอบสนองความถี่ที่กำหนดให้ หรือผลตอบสนองความถี่ที่ต้องการได้ นอกจากนี้การออกแบบวงจรกรองความถี่ให้มียผลตอบสนองเชิงเส้นทำได้ง่าย

2. คุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ที่ออกแบบ และสร้างแล้วจะไม่ขยับเลื่อน (Drift) ไปตามสภาพแวดล้อมหรือตามอุณหภูมิ หรือตามระยะเวลาการใช้งาน นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานในย่านความถี่ต่ำได้เป็นอย่างดี

3. การประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรกรองความถี่แบบปรับตัวได้ (Adaptive filter) ทำได้ง่าย

4. ผู้ออกแบบสามารถออกแบบโดยคำนึงถึงความยาวของคำ (Word length) ของตัวเลขฐานสองที่ต้องการใช้ และยังสามารถออกแบบให้มีผลตอบสนองความถี่ตามที่ต้องการได้

5. ในปัจจุบัน ถ้าพิจารณาในแง่ของเสถียรภาพของวงจรกรองความถี่ ความเชื่อถือได้ ราคา หรือขนาดของวงจรกรองความถี่เชิงเลข ดังเหล่านี้กำลังได้รับการพัฒนาและปรับปรุงและมีแนวโน้มว่าจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าของวงจรกรองความถี่แบบแอนะล็อก (Analog filter) หรือเรียกว่า วงจรกรองความถี่เชิงอนุมาณ

วงจรกรองสัญญาณดิจิทัลสามารถเขียนอธิบายในรูปของบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.9 โดยสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นสัญญาณแอนะล็อกจะถูกสุ่ม (Sampled) ด้วยช่วงเวลาทีค่าคงที่ค่าหนึ่ง และสัญญาณที่ถูกสุ่มนี้จะเปลี่ยนให้อยู่ในรูปเลขฐานสองโดยการแปลงสัญญาณดิจิทัลหรือสัญญาณเชิงเลข (analog to digital converter)



รูปที่ 2.9 แผนภาพของวงจรกรองสัญญาณดิจิทัล

หลังจากนั้นเลขฐานสองที่แทนสัญญาณแอนะล็อกที่เข้ามาทางอินพุตจะผ่านวงจรกรองสัญญาณดิจิทัล ต่อมาค่าเอาต์พุตที่ได้จากวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลนี้จะถูกแปลงกลับเป็นสัญญาณแอนะล็อกด้วยวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก วงจรกรองสัญญาณดิจิทัลสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของผลตอบสนองอิมพัลส์ ได้แก่

1. วงจรกรองความถี่ดิจิทัลแบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัดผลตอบสนองอิมพัลส์
2. วงจรกรองความถี่ดิจิทัลแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัดผลตอบสนองอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรองความถี่ดิจิทัลแบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัดผลตอบสนองอิมพัลส์ มักเป็นตัวกรองที่ไม่มี การป้อนกลับเป็นวงจรที่มีโครงสร้างง่าย ๆ และมีเสถียรภาพที่ดี แต่มีข้อเสียที่จะให้วงจรรองความถี่ที่มีอันดับสูงถึงแม้จะต้องการให้มีลักษณะทางความถี่ที่ง่ายก็ตาม

วงจรรองความถี่ดิจิทัลแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัดผลตอบสนองอิมพัลส์เป็นตัวกรองที่มีการป้อนกลับ เป็นวงจรที่ใช้อันดับต่ำกว่าวงจรรองแบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัดที่ความต้องการลักษณะทางความถี่เหมือนกันแต่การกรองจะยุ่งยากกว่าและมีปัญหาเรื่องความมีเสถียรภาพไม่คั่นัก

2.5 การออกแบบวงจรรองความถี่ไม่ป้อนกลับเชิงเลข

FIR ย่อมาจาก Finite Impulse Response ซึ่งแปลว่า ผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด นั่นคือหากเราป้อนสัญญาณอิมพัลส์ให้กับวงจรนี้แล้ว สัญญาณตอบสนองจะมีค่าจำกัด โดยสัญญาณเอาต์พุตของระบบจะขึ้นอยู่กับสัญญาณอินพุตนั้น จึงเรียกว่า วงจรรองความถี่ไม่ป้อนกลับ (non-recursive filter) หรือไม่ป้อนกลับเชิงเลข ซึ่งสามารถเขียนสมการ ได้ดังนี้

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} b_k x(n-k) \quad (2.15)$$

โดยที่ b_k เป็นค่าคงที่ใดๆที่แทนค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) ของวงจรรองความถี่และในทางปฏิบัติค่า k จะมีค่าคงที่ ไม่ถึงกับมีค่านับตั้งแต่ 0 ขึ้นกับอันดับของวงจรรองความถี่ N ที่ต้องการใช้ จะได้

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} b_k x(n-k) \quad (2.16)$$

และจะได้สมการคอนโวลูชัน (Convolution) เป็น

$$y(n) = \sum_{m=0}^{N-1} h(m) x(n-m) \quad (2.17)$$

เปลี่ยนค่าตัวแปร จะได้

$$y(n) = \sum_{m=n}^{n+N-1} h(n-m) x(m) \quad (2.18)$$

เมื่อ $x(n)$ เป็นอินพุต และ $h(n)$ เป็นผลตอบสนองอิมพัลส์ลำดับที่ N (length- N impulse response) เมื่อนำมาประยุกต์ใช้งานกับการแปลงแซด จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอน

$$H(Z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) z^{-n} \quad (2.19)$$

แทนค่า $z = e^{j\omega}$ จะได้ผลตอบสนองความถี่ของวงจรรองความถี่ไม่ป้อนกลับเชิงเลข

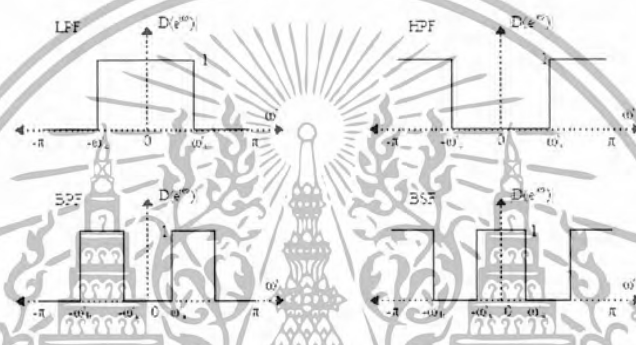
$$H(\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{-j\omega n} \quad (2.20)$$

สำหรับตัวกรองแบบ FIR นั้น ในการออกแบบสิ่งที่เราต้องการหา คือ ค่าของผลตอบสนองอิมพัลส์ หรือ $h(n)$ ของระบบ สำหรับตัวกรอง FIR ที่มี $h(n)$ ยาว N จุด เรากล่าวว่า ตัวกรองนี้มีอันดับเท่ากับ $N-1$ เหตุผลก็คือ มีการใช้สัญญาณขาเข้าในอดีตย้อนหลังไป $N-1$ ตำแหน่ง

2.5.1. การออกแบบโดยวิธีหน้าต่าง (Window Method)

ในส่วนนี้จะกล่าวถึง การหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง FIR เมื่อกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของตัวกรองมา ซึ่งคุณลักษณะเฉพาะนี้ ส่วนใหญ่จะเป็นการกำหนดลักษณะของผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ต้องการ ได้แก่ ความถี่ตัด, ความคมของตัวกรอง, การลดทอนในแถบหยุด และอื่น ๆ โดยจะทำการออกแบบโดยคำนึงถึงความถี่คutoff ω' ที่มีย่านความถี่ที่สนใจในช่วง $-\pi$ ถึง π หรือ f'

วิธีหน้าต่างเป็นวิธีพื้นฐานที่สุดวิธีหนึ่งที่จะใช้หาสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง เป็นวิธีที่ง่ายต่อการออกแบบ และสามารถใช้ออกแบบตัวกรองแบบต่าง ๆ ได้ ไม่ว่าจะเป็นแบบผ่านต่ำ (LPF), ผ่านสูง (HPF), ผ่านแถบความถี่ (BPF), หรือตัดแถบความถี่ (BSF) โดยการออกแบบจะใช้ต้นแบบจากตัวกรองอุดมคติ ซึ่งผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองอุดมคติทั้งสี่แบบ แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 โดยที่มีความถี่ตัด (cutoff frequency) เท่ากับ ω'_c สำหรับแบบผ่านต่ำ และผ่านสูง ส่วนแบบผ่านแถบความถี่ และตัดแถบความถี่มีความถี่ตัดของแถบความถี่ที่ ω'_a และ ω'_b



รูปที่ 2.10 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองอุดมคติ

สมมติให้ $d(n)$ แทนผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ และ $D(e^{j\omega'})$ แทนผลตอบสนองเชิงความถี่ สำหรับตัวกรองแบบผ่านต่ำอุดมคติ ดังในรูปที่ 2.10 โดยจะหาผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของตัวกรองอุดมคติเหล่านี้ได้โดยการแปลง IDTFT ดังนี้

$$d(n) = \text{IDTFT}\{D\} \quad (2.21)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} D(e^{j\omega'}) e^{j\omega' n} d\omega'$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega'_c}^{\omega'_c} (1) e^{j\omega' n} d\omega'$$

$$d(n) = \frac{\sin(\omega'_c n)}{\pi n}, \quad -\infty < n < \infty \quad (2.22)$$

สมการนี้มีปัญหาที่ $n=0$ เพราะจะได้ว่า $d(n)$ มีค่าเป็นเศษศูนย์ส่วนศูนย์ ซึ่งเราสามารถหาค่า $d(0)$ ได้โดยใช้ทฤษฎีบทของโลปีตัล จะได้ว่า

$$d(0) = \frac{\lim_{n \rightarrow 0} \frac{d(\sin(\omega'_c n))}{dn}}{\lim_{n \rightarrow 0} \frac{d(\pi n)}{dn}} = \frac{\omega'_c}{\pi} \quad (2.23)$$

โดยสำหรับตัวกรองแบบอื่น ๆ หา $d(n)$ ได้โดยใช้ IDTFT กระทำกับผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองนั้น ๆ ซึ่งค่าของ $d(n)$ สำหรับตัวกรองแบบต่าง ๆ ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.2 ดังนี้

ชนิดของตัวกรอง	$d(n), -\infty < n < \infty$	$d(0)$
ผ่านต่ำ (LPF)	$\frac{\sin(\omega'_c n)}{\pi n}$	$\frac{\omega'_c}{\pi}$
ผ่านสูง (HPF)	$\delta(n) - \frac{\sin(\omega'_c n)}{\pi n}$	$1 - \frac{\omega'_c}{\pi}$
ผ่านแถบความถี่ (BPF)	$\frac{\sin(\omega'_2 n) - \sin(\omega'_1 n)}{\pi n}$	$\frac{\omega'_2 - \omega'_1}{\pi}$
ตัดแถบความถี่ (BSF)	$\delta(n) - \frac{\sin(\omega'_2 n) - \sin(\omega'_1 n)}{\pi n}$	$1 - \frac{\omega'_2 - \omega'_1}{\pi}$

ตารางที่ 2.2 ผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของตัวกรองอุดมคติต่าง ๆ

จากรูปที่ 2.11 เป็นการแสดงค่าที่จะใช้กำหนดเป็นคุณลักษณะเฉพาะของวิธีหน้าต่าง ได้แก่

- **Pass-band ripple (δ_{pass})** คือ ค่าสูงสุดที่ขนาดของแถบผ่านแควงออกห่างจากค่า 1 บางครั้งวัดเป็น dB โดยใช้

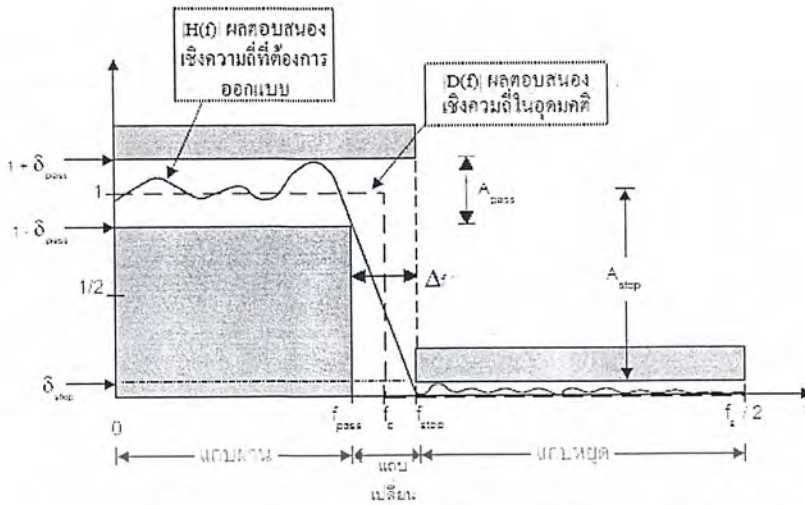
$$A_{pass} = 20 \log \frac{1 + \delta_{pass}}{1 - \delta_{pass}} \quad (dB) \quad (2.24)$$

- **Stop-band attenuation (A_{stop})** คือ จำนวนเท่าที่แถบหยุดลดลงจากค่า 1 วัดเป็น dB โดยมีความสัมพันธ์กับ Pass-band ripple คือ

$$A_{stop} = -20 \log \delta_{stop} \quad (dB) \quad (2.25)$$

- **Transition band width ($\Delta f'$)**

- **Cutoff frequency (f_c)** คือ ค่าความถี่ที่ขนาดลดลงประมาณ 0.5 หรืออยู่ที่ประมาณครึ่งหนึ่งของ $\Delta f'$ นิยามนี้ต่างจากความถี่ตัดของตัวกรองแอนะล็อก และตัวกรอง IIR ซึ่งความถี่ตัดหมายถึงความถี่ที่ลดทอนลงเท่ากับ 3 dB



รูปที่ 2.11 ค่าต่างๆ ในการระบุคุณลักษณะเฉพาะของผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรอง FIR

2.5.1.1 หน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window)

หน้าต่างไคเซอร์มีลักษณะพิเศษกว่าหน้าต่างแบบอื่น ๆ ตรงที่สามารถปรับค่า Pass-band ripple (δ_{pass}) และ Stop-band attenuation (A_{stop}) ได้ ซึ่งทำให้มีความยืดหยุ่นในการออกแบบกว่าหน้าต่างแบบอื่น ๆ ทำให้มักจะได้อันดับ (order, N) ต่ำกว่าหน้าต่างแบบอื่นที่คุณลักษณะเฉพาะเดียวกัน

กำหนด $\delta = \max(\delta_{pass}, \delta_{stop})$ = ค่า ripple ที่เล็กที่สุดระหว่างแถบผ่านกับแถบหยุด และให้ A = ค่าลดทอนของแถบหยุดซึ่งคิดจากค่าความพลັงที่เล็กที่สุดนี้ นั่นคือ

$$A_{stop} = A = -20 \log \delta \quad (\text{dB}) \quad (2.26)$$

กำหนดให้ α = shape parameter ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ A ดังนี้

$$\alpha = \begin{cases} 0 & A < 21 \\ 0.842(A-21)^{0.4} + 0.088(A-21) & 21 \leq A \leq 50 \\ 0.1102(A-8.7) & A > 50 \end{cases} \quad (2.27)$$

ค่า N ถูกกำหนดโดย $\Delta f'$ และ A และเท่ากันเดียวกับหน้าต่างแบบอื่นคือ $\Delta f'$ จะเป็นสัดส่วนกลับกับ N ดังสมการต่อไปนี้

$$N = \begin{cases} \frac{A-7.95}{14.36\Delta f'} + 1, & A > 21 \\ \frac{0.9}{\Delta f'}, & A \leq 21 \end{cases} \quad (2.28)$$

เมื่อได้ค่า N และ α เราสามารถหา $w(n)$ ได้จากตารางที่ 2.2 โดย I_0 ในตาราง คือ ฟังก์ชันเบสเซลชนิดแรกที่มีอันดับ=0 (modified Bessel function of the first kind) มีสมการว่า

$$I_0(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{(x/2)^k}{k!} \right]^2 \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อค่าต่าง ๆ ได้ครบก็สามารถนำมาหาผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ ($d(n)$) จากตารางที่ 2.2 โดยเลื่อน $d(n)$ ให้ล้าหลังลง M ตำแหน่ง โดย $M = (N-1)/2$ จะได้สัญญาณเป็น $d(n-M)$ และจากนั้นคูณเข้ากับฟังก์ชันหน้าต่างต่าง $w(n)$ แบบ Kaiser ซึ่งจะได้เป็นผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ที่มีความยาว N จุด และเป็นแบบคอซัส ดังนี้

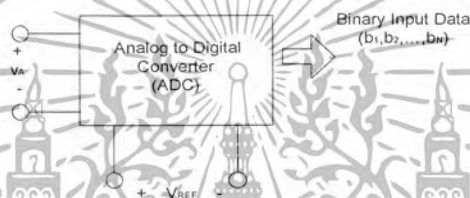
$$h(n) = d(n-M)w(n) \quad , \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.30)$$

โดยที่ฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Kaiser ($w(n)$) คือ

$$w(n) = \frac{I_0(\alpha \sqrt{1 - (n-M)^2 / M^2})}{I_0(\alpha)} \quad , \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.31)$$

2.6 วงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (A/D Converter Circuits : ADC)

วงจร ADC เป็นวงจรที่ใช้ในการแปลงข้อมูลสัญญาณแอนะล็อกที่อยู่ในรูปของแรงดันหรือกระแสซึ่งเป็นสัญญาณอินพุตให้เป็นสัญญาณดิจิทัลที่เป็นสัญญาณเอาต์พุตในรูปของไบนารี

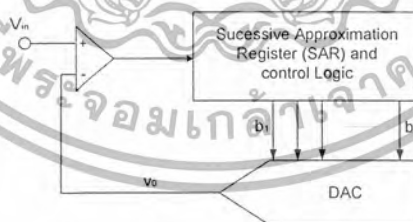


รูปที่ 2.12 แผนผังของ ADC

การทำงานพื้นฐานทั่วไปของวงจร ADC มีรูปแบบดังต่อไปนี้

2.6.1 วงจร ADC แบบ Successive approximation

โครงสร้างพื้นฐานของ ADC ชนิดนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.13 ซึ่งได้รับความนิยมมากในการนำมาทำเป็นวงจร ADC ในการแปลงข้อมูลขนาด 8 ถึง 16 บิต

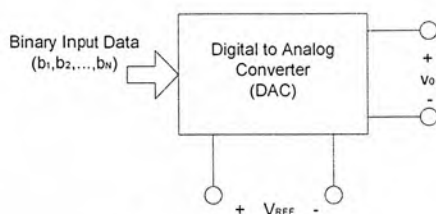


รูปที่ 2.13 โครงสร้างพื้นฐานของวงจร ADC แบบ Successive approximation

วงจร ADC แบบนี้จะมีความเร็วในการแปลงข้อมูลค่อนข้างสูงกว่าวงจร ADC แบบแรก เนื่องจากวงจรอาศัยอัลกอริทึมในการค้นหาไบนารี (binary search) แทนการให้เริ่มต้นกระบวนการด้วยการเริ่มนับตั้งแต่ 0 เป็นต้นไป โดยในปัจจุบันมี IC สำเร็จรูปที่เป็นวงจร ADC แบบ Successive approximation ให้เลือกใช้มากมาย อาทิ ADC0800 – series ของบริษัท National Semiconductor เป็นต้น

2.7 วงจรแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (D/A Converter Circuits : DAC)

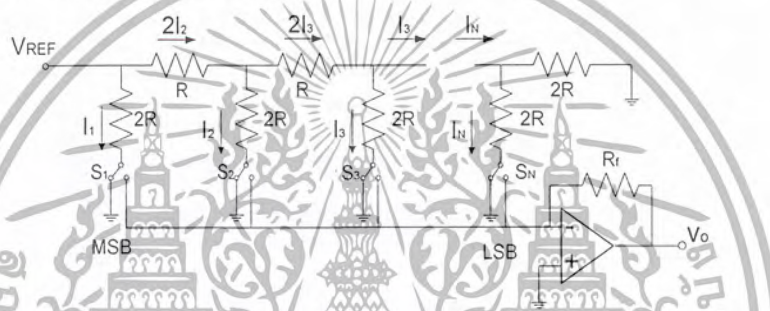
วงจร DAC เป็นวงจรที่ใช้ในการแปลงข้อมูลดิจิทัลที่อยู่ในรูปแบบไบนารีซึ่งเป็นสัญญาณอินพุตให้เป็นสัญญาณแอนะล็อกที่เป็นสัญญาณเอาต์พุตในรูปของแรงดันหรือกระแส โดยมีแผนผัง แสดงไว้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แผนผังของ DAC

การทำงานพื้นฐานของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (DAC) มีรูปแบบดังนี้

2.7.1 วงจร DAC แบบ R-2R Ladders



รูปที่ 2.15 วงจร DAC แบบ R-2R Ladders

วงจร DAC ชนิดนี้ แสดงไว้ในรูปที่ 2.15 โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ห้วงจรแล้วจะได้ดังนี้

$$I_1 = 2I_2 = 4I_3 = \dots = 2^{N-1}I_N \quad (2.32)$$

$$i_0 = \frac{V_{REF}}{R} \left(\frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2^2} + \dots + \frac{b_N}{2^N} \right) \quad (2.33)$$

$$v_0 = -i_0 R_f = -V_{REF} \left(\frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2^2} + \dots + \frac{b_N}{2^N} \right) \quad (2.34)$$

จากวงจรจะเห็นได้ว่าตัวต้านทานที่ใช้ในวงจรจะใช้ค่าเพียง 2 ค่าเท่านั้น และมีค่าที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย จึงสามารถแก้ปัญหาในการสร้างตัวต้านทานให้มีความเที่ยงตรงได้ไม่ยาก ซึ่งในปัจจุบันได้มี IC สำเร็จรูปเป็นวงจร DAC แบบ R-2R Ladders ให้เลือกใช้งานมากมายได้แก่ AD7523/7524 (8-bit), AD7530/7533/7522 (10-bit) และ AD7521/7531/7541 (12-bit) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 วงจรขยายสัญญาณ

เราจะนำออปแอมป์มาใช้เป็นวงจรขยายสัญญาณ นั่นคือ คัดคาของสัญญาณออกจากวงจรจะมีระดับสูงกว่าคัดคาของสัญญาณเข้าสู่วงจร ในการใช้ออปแอมป์เป็นวงจรขยายคัดคาสัญญาณนี้ ทุกวงจรจะมีคุณสมบัติร่วมกัน ก็คือ มีวงจรป้อนสัญญาณกลับจากจุดสัญญาณออกมายังจุดสัญญาณเข้าลบ (เครื่องหมาย -) ซึ่งเราจะเรียกลักษณะการป้อนสัญญาณกลับดังกล่าวนี้ว่า เป็นการป้อนสัญญาณกลับแบบลดระดับ (Negative feedback)

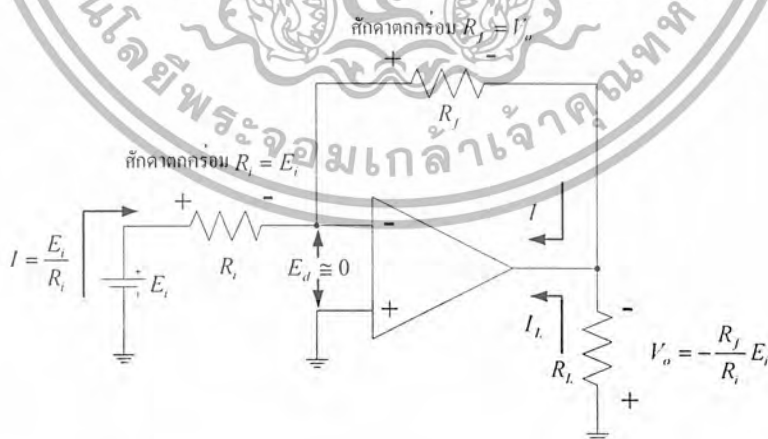
จุดประสงค์สำคัญในการใช้การป้อนสัญญาณกลับแบบลดระดับ คือคุณสมบัติของวงจรรวมจะไม่ขึ้นกับค่าขยายคัดคาสัญญาณแบบรูปเปิด (A_{OL}) ของออปแอมป์ซึ่งมีค่าสูงมาก แต่ค่าขยายสัญญาณของวงจรรวมจะขึ้นกับคุณสมบัติของวงจรป้อนสัญญาณกลับแทน ซึ่งเราจะเรียกค่าขยายคัดคาสัญญาณดังกล่าวนี้ว่า เป็นค่าขยายคัดคาสัญญาณแบบรูปปิด (A_{CL})

2.8.1 วงจรขยายแบบกลับคัดคาสัญญาณ

รูปที่ 2.16 แสดงวงจรขยายสัญญาณที่ใช้ออปแอมป์แบบแพร่หลายมากที่สุด ค่าขยายคัดคาสัญญาณวงจรปิดจะขึ้นอยู่กับความต้านทาน R_f และ R_i และวงจรจะสามารถขยายสัญญาณไปสลับ (ac) หรือ ไฟตรง (dc) ก็ได้ เพื่อทำความเข้าใจกับลักษณะการปฏิบัติการของวงจรรูปดังกล่าว เราจะสมมติว่า

1. คัดคา E_d ระหว่างขา (+) และขา (-) ของออปแอมป์มีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ทั้งนี้เพราะค่าขยายสัญญาณแบบรูปเปิดมีค่าสูงมาก
2. กระแสเข้าหรือออกจากขา (+) และขา (-) มีระดับต่ำมากจนถือได้ว่าเป็นศูนย์ ทั้งนี้เพราะว่าอิมพีแดนซ์จุดสัญญาณเข้าทั้งขา (+) และขา (-) มีค่าสูงมาก

เหตุผลที่เรียกว่าเป็นวงจรขยายแบบกลับคัดคาสัญญาณก็เพราะว่า คัดคาสัญญาณออกและเข้าจะมีเครื่องหมายต่างกัน ซึ่งในกรณีสัญญาณไฟสลับหมายถึงว่าสัญญาณออกและสัญญาณเข้าจะมีเฟสต่างกัน 180°



รูปที่ 2.16 แสดงวงจรขยายสัญญาณแบบกลับคัดคาสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 สัญญาณเข้ามีศักดาบวก

รูปที่ 2.16 สัญญาณเข้ามีศักดาเป็นบวก จ่ายเข้ากับความต้านทาน R_i ซึ่งมีอีกขาหนึ่งต่ออยู่กับขาสัญญาณเข้า (-) ของออปแอมป์ สัญญาณป้อนกลับแบบลคลำถึงจะผ่านความต้านทาน R_f ส่วนขาสัญญาณเข้า (+) ต่ออยู่กับกราวด์ และเนื่องจากเราถือว่าความแตกต่างของศักดาระหว่างขา (+) และขา (-) เป็นศูนย์ ดังนั้นเราจึงถือได้ว่าศักดาของขาสัญญาณเข้า (-) มีกราวด์ต่ออยู่ด้วย ซึ่งเราจะเรียกขาสัญญาณเข้า (-) ว่ามีระดับกราวด์เสมือน (Virtual ground) ดังนั้นศักดาที่ตกคร่อม R_i จึงเท่ากับ E_i และจากกฎของโอห์ม เราจะคำนวณหากระแส I ผ่าน R_i ได้เป็น

$$I = \frac{E_i}{R_i} \quad (2.35)$$

ความต้านทาน R_f ควรจะรวมความต้านทานจุดสัญญาณออกของวงจรจ่ายศักดาสัญญาณไว้ด้วย กระแส I ทั้งหมดจะไหลผ่าน R_f เนื่องจากว่ากระแสซึ่งถูกดึงเข้าสู่ขา (-) จะมีจำนวนน้อยมาก ควรจะสังเกตว่ากระแสผ่าน R_f จะถูกกำหนดโดย R_i และ E_i เท่านั้นไม่ขึ้นกับ R_f , V_o หรือตัวออปแอมป์ ศักดาที่ตกคร่อม R_f จะได้เท่ากับ

$$V_{Rf} = IR_f = E_i \frac{R_f}{R_i} \quad (2.36)$$

ดังที่แสดงในรูปที่ 2.16 ขาด้านหนึ่งของ R_f และ R_i ต่ออยู่เข้าด้วยกันกับขาสัญญาณออกของออปแอมป์ ซึ่งมีค่าศักดาต่างจากศักดากราวด์เท่ากับ V_o และขาอีกด้านหนึ่งของ R_f และ R_i ต่างต่ออยู่กับกราวด์ ดังนั้นระดับของ V_o จะเท่ากับ V_{Rf} จากรูปที่ 2.16 เราจะเห็นได้อีกว่าทิศทางของกระแส I จะบังคับให้ V_o มีระดับเป็นลบ นั่นคือ เมื่อสัญญาณเข้า E_i มีศักดาบวก สัญญาณออก V_o จะมีศักดาลบ ดังนั้นเราจะได้

$$V_o = -\frac{R_f}{R_i} E_i \quad (2.37)$$

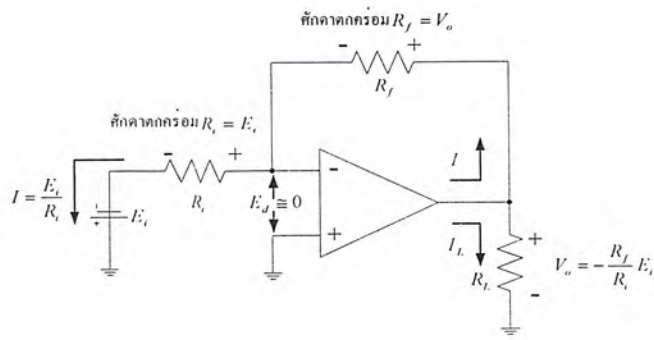
ถ้าเราให้ค่าขยายศักดาสัญญาณแบบลูปปิด เป็นอัตราส่วนของศักดาสัญญาณออกต่อศักดาสัญญาณเข้า เราจะเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$A_{cl} = \frac{V_o}{E_i} = -\frac{R_f}{R_i} \quad (2.38)$$

เครื่องหมายลบแสดงว่าศักดาสัญญาณออกได้กลับเครื่องหมายกับศักดาสัญญาณเข้า

2.8.3 สัญญาณเข้ามีศักดาลบ

รูปที่ 2.17 แสดงกรณีที่ศักดาสัญญาณเข้า (E_i) ซึ่งจ่ายเข้ากับ R_i ไปสู่ขา (-) มีศักดาเป็นลบ หลักการทั้งหลายซึ่งแสดงไว้ในหัวข้อ 2.8.2 ยังคงใช้ได้อยู่ ความแตกต่างระหว่างรูปที่ 2.16 และ 2.17 ซึ่งทิศทางของกระแส นั่นคือ เมื่อสัญญาณเข้ากลับศักดา ทิศทางของกระแสจะไหลกลับหมด ดังนั้นในกรณีดังกล่าวสัญญาณออกจะมีศักดาบวก



รูปที่ 2.17 แสดงกรณีที่มีสัญญาณเข้ามีศักดาเป็นลบ

2.8.4 สัญญาณเข้าเป็นหักคาตกลับ

รูปที่ 2.18 แสดงกรณีที่มีสัญญาณเข้ามีหักคาตกลับ ในกรณีสัญญาณเข้ามีระดับหักคาตบวก หักคาตสัญญาณออกและทิศทางของกระแสจะเหมือนกับกรณีของรูปที่ 2.16 ส่วนขณะที่ระดับหักคาตสัญญาณออกมีหักคาตลบ หักคาตสัญญาณออกและทิศทางของกระแสจะเหมือนกับในกรณีของรูปที่ 2.17 ดังนั้นสัญญาณออกจะมีเฟสแตกต่างไปจากสัญญาณเข้าเท่ากับ 180° ดังที่แสดงในภาพที่ 2.18

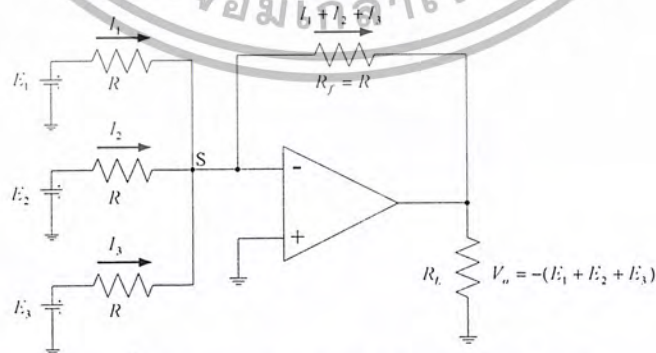


รูปที่ 2.18 แสดงวงจรขยายกลับหักคาตสัญญาณ เมื่อสัญญาณเข้ามีหักคาตกลับ

2.9 วงจรบวกสัญญาณ

วงจรในรูปที่ 2.19 หักคาตสัญญาณออก V_o จะเท่ากับผลบวกของหักคาตสัญญาณเข้า แต่มีเครื่องหมายของหักคาตตรงกันข้ามกัน นั่นคือ

$$V_o = -(E_1 + E_2 + E_3) \tag{2.39}$$



รูปที่ 2.19 แสดงวงจรบวกสัญญาณแบบกลับหักคาต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะเข้าใจลักษณะการปฏิบัติงานของวงจรได้ โดยสังเกตว่าที่จุด S ซึ่งเป็นจุดรวมสัญญาณจะมีระดับกราวด์ ดังนั้นกระแส I_1 จะถูกกำหนดโดย E_1 และ R, I_2 ถูกกำหนดโดย E_2 และ R ส่วน I_3 ก็จะถูกกำหนดโดย E_3 และ R เช่นกัน นั่นคือ

$$I_1 = \frac{E_1}{R}, I_2 = \frac{E_2}{R}, I_3 = \frac{E_3}{R} \quad (2.40)$$

เนื่องจากกระแสไหลเข้าสู่ขา (-) มีปริมาณน้อยมาก ดังนั้นเราจึงถือได้ว่า I_1 , I_2 และ I_3 ต่างจะไหลผ่าน R_f หหมด ดังนั้นศักดาตกคร่อม R_f จะเท่ากับ V_o จะเขียนได้เป็น

$$V_o = -(I_1 + I_2 + I_3)R_f \quad (2.41)$$

เมื่อแทนค่า I_1 , I_2 และ I_3 และให้ $R_f = R$ เราจะได้

$$V_o = -\left(\frac{E_1}{R} + \frac{E_2}{R} + \frac{E_3}{R}\right)R \quad (2.42)$$

$$V_o = -(E_1 + E_2 + E_3) \quad (2.43)$$

2.9.1 วงจรบวกสัญญาณแบบมีค่าอัตราขยาย

ในรูปที่ 2.20 ความต้านทานที่จุดสัญญาณเข้าทั้งสามตัวมีค่าไม่เท่ากัน แต่อย่างไรก็ตาม ศักดาที่จุดระดับกราวด์ที่ค่าอยู่ประมาณที่ศักดากราวด์ ดังนั้น กระแสสัญญาณเข้าแต่ละอันก็ยังคงถูกกำหนดด้วย E_1, E_2, E_3 และ R_1, R_2, R_3 อยู่ นั่นคือ

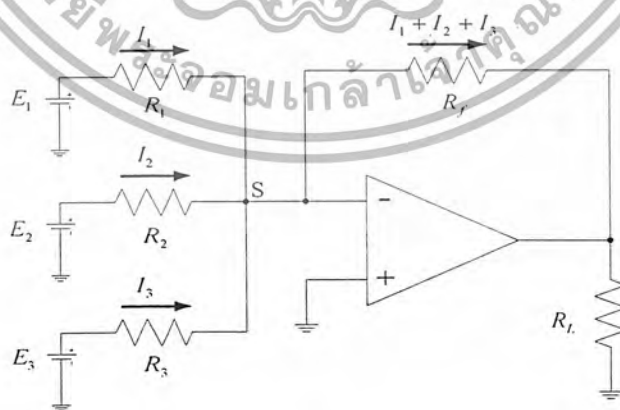
$$I_1 = \frac{E_1}{R_1}, I_2 = \frac{E_2}{R_2}, I_3 = \frac{E_3}{R_3} \quad (2.44)$$

และกระแสสัญญาณทั้งสามนี้ยังคงไหลรวมกันผ่าน R_f ยังผลให้เกิดศักดาสัญญาณออกเท่ากับ

$$V_o = -(I_1 + I_2 + I_3)R_f \quad (2.45)$$

$$V_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}E_1 + \frac{R_f}{R_2}E_2 + \frac{R_f}{R_3}E_3\right) \quad (2.46)$$

จากสมการเอาท์พุทแสดงว่า ค่าอัตราขยายสำหรับสัญญาณเข้าแต่ละสัญญาณอาจจะปรับได้อย่างเป็นอิสระแก่กัน



รูปที่ 2.20 วงจรบวกสัญญาณแบบมีค่าอัตราขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

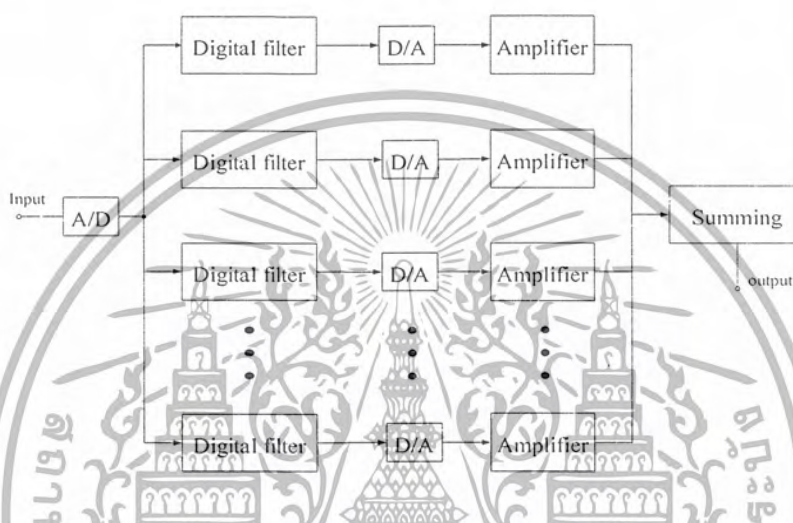
บทที่ 3

การคำนวณและการสร้าง

จากที่ได้กล่าวไปแล้วในเรื่องของทฤษฎีและหลักการ ต่อไปจะเป็นการอธิบายถึงการสร้างวงจร ส่วนต่าง ๆ ของอ็ควอไลเซอร์ ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

3.1 แผนผังการทำงานของอ็ควอไลเซอร์

แผนผังการทำงานของอ็ควอไลเซอร์ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.1



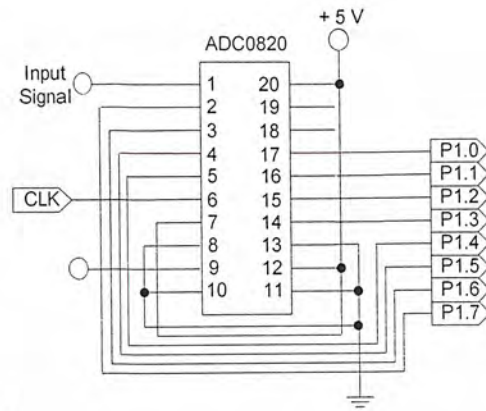
รูปที่ 3.1 แผนผังรวมของอ็ควอไลเซอร์

จากแผนผังแสดงในรูปที่ 3.1 พบว่าการสร้างอ็ควอไลเซอร์ประกอบด้วยวงจรส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

3.1.1 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (A/D converter : ADC)

ในส่วนวงจร ADC นี้จะทำการแปลงสัญญาณแอนะล็อก (เสียง) ที่เข้ามาด้านอินพุตให้เป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อส่งเข้าไปยังวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล (digital filter) ต่อไป โดยวงจรนี้ได้ใช้ IC ADC0820 (8-bit High speed A/D converter) ซึ่งเป็น ADC ชนิด Successive approximation แบบ 8 บิต ที่มีการใช้เวลาในการแปลงสัญญาณ (conversion time) 2.5 μ s

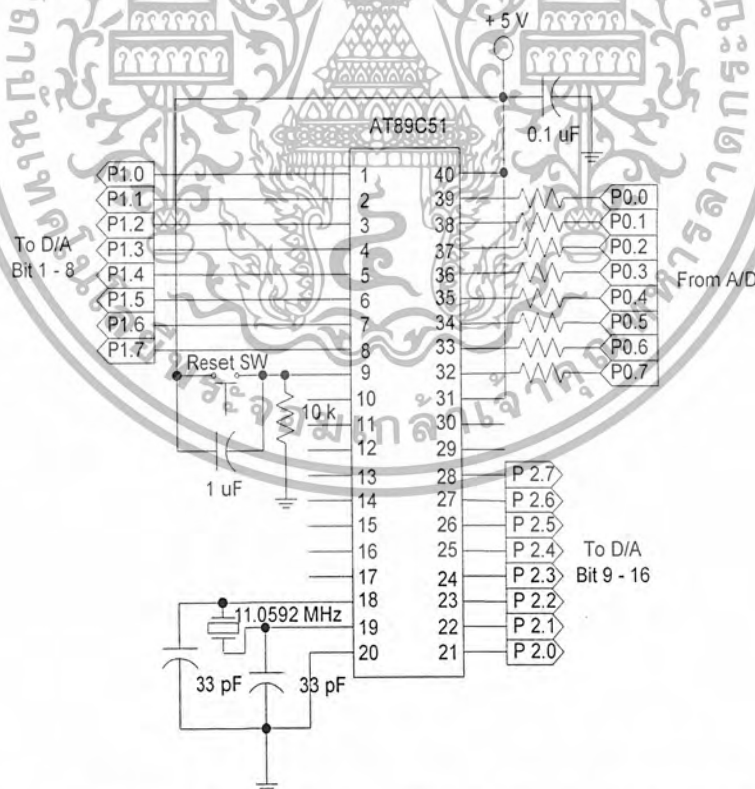
การต่อวงจร ADC นี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC)

3.1.2 วงจรกรองความถี่ผ่านที่สร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์ (Implementation of Digital filter based Microcontroller MCS-51)

วงจรที่แสดงในรูปที่ 3.3 เป็นวงจร microcontroller ที่มีการโปรแกรมสมการของตัวกรองความถี่ผ่านแบบดิจิทัลลงไป ซึ่งสมการของตัวกรองความถี่ผ่านนี้เป็นลักษณะของสมการผลต่างสืบเนื่องที่ออกแบบโดยอาศัยหลักของการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล และโปรแกรม MATLAB โดยวงจรจะรับสัญญาณ 8 บิต ที่ผ่านการแปลงมาจาก ADC เข้ามาผ่านทาง Port 0 เพื่อมาประมวลผลและส่งค่าออกผ่านทาง Port1 และ Port2 ไปยังส่วนของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (DAC) ต่อไป

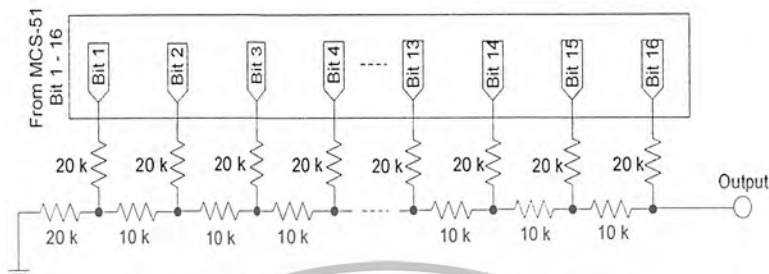


รูปที่ 3.3 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้สร้างตัวกรองความถี่ผ่านแบบดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (D/A converter : DAC)

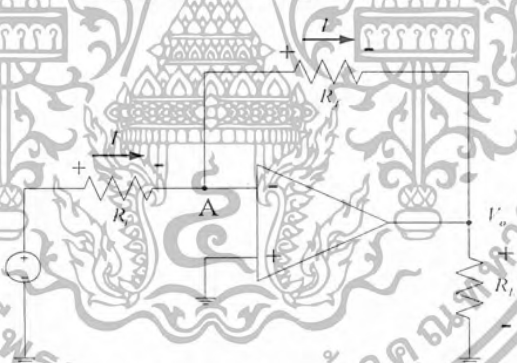
ในวงจรส่วนนี้จะทำการรับสัญญาณที่ผ่านการประมวลผลจาก microcontroller MCS-51 มาทำการแปลงสัญญาณจากดิจิทัลเป็นแอนะล็อก เพื่อสร้างสัญญาณส่งต่อไปยังวงจรภาคขยายสัญญาณ (Amplifier) ซึ่งวงจร DAC นี้ ได้ใช้วงจรแบบ R-2R Ladders ซึ่งมีลักษณะของวงจรแสดงไว้ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก (D/A converter :DAC)

3.1.4 วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier)

เมื่อสัญญาณที่ออกจากส่วนของวงจรกรองความถี่แต่ละย่านความถี่นั้นจะนำมาปรับแต่งขนาดสัญญาณเสียงด้วยวงจรขยายสัญญาณ ซึ่งในส่วนนี้ เราจะออกแบบให้วงจรสามารถปรับอัตราขยายสัญญาณได้ตั้งแต่ -20dB ถึง +20dB ซึ่งหมายความว่าสัญญาณที่เข้ามาที่ส่วนนี้เราสามารถลดทอนลงได้ถึง 10 เท่า (-20dB) และสามารถขยายขนาดสัญญาณที่เข้ามาได้ 10 เท่า (+20dB) โดยการคำนวณแสดงดังนี้



รูปที่ 3.5 วงจรขยายสัญญาณ

จากรูปที่ 3.5 พิจารณาที่ node A เป็น virtual ground โวลต์เตจที่ node A เท่ากับศูนย์ พิจารณากระแสที่ไหลผ่าน R_i

$$I = \frac{V_m - 0}{R_i} = \frac{V_m}{R_i} \tag{3.1}$$

ที่ node A

$$\frac{0 - V_o}{R_f} = I \tag{3.2}$$

$$V_o = -IR_f \tag{3.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า (3.1) ลงใน (3.3)

$$V_o = \frac{-V_m}{R_i} R_f \quad (3.4)$$

$$\frac{V_o}{V_m} = \frac{-R_f}{R_i} = G \quad (3.5)$$

เราสามารถคำนวณค่าอัตราขยายในหน่วย dB ได้ดังนี้

$$dB = 20 \log \frac{V_o}{V_m} \quad (3.6)$$

ในการออกแบบวงจรขยายเราต้องการให้มีอัตราขยาย 10 เท่าและสามารถลดทอนสัญญาณได้ 10 เท่า ดังนั้นเราจึงสมมติให้ $R_f = 100 \text{ k}\Omega$ และ $R_i = 100 \text{ k}\Omega$

อัตราขยายที่ได้

$$G = \frac{R_f}{R_i} = \frac{100k}{10k} = 10 \text{ เท่า}$$

โดยวงจขยายที่ได้จากการออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.6

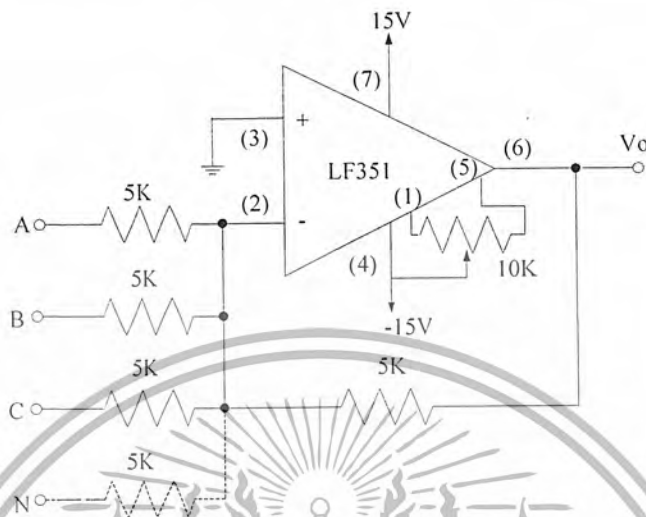


รูปที่ 3.6 วงจขยายสัญญาณที่ได้จากการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 วงจรบวกสัญญาณ (Summing)

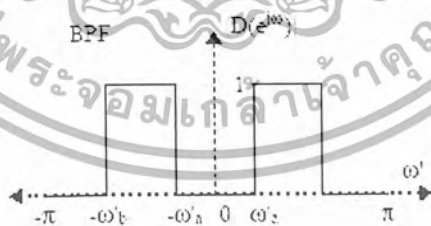
เมื่อสัญญาณที่ได้มาจากวงจรขยายสัญญาณในแต่ละย่านความถี่จะนำมาผ่านวงจรบวกสัญญาณเพื่อรวมสัญญาณในแต่ละย่านความถี่ โดยวงจรที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรบวกสัญญาณ

3.1.6 การออกแบบตัวกรองความถี่ผ่านโดยใช้วิธีหน้าต่างแบบ Kaiser

โครงการนี้มีส่วนประกอบหลักคือตัวกรองความถี่ผ่านที่ย่านต่าง ๆ 10 ย่าน คือ 60Hz, 350Hz, 450Hz, 600Hz, 750Hz, 900Hz, 1kHz, 2kHz, 3kHz และ 4kHz ซึ่งมีความจำเป็นที่ต้องทำการออกแบบเพื่อได้มาซึ่งสมการตัวกรองความถี่ที่อยู่ในรูปของสมการผลต่างสืบเนื่อง (difference equation) แล้วจึงนำสมการดังกล่าวไปทำการเขียนโปรแกรมใน MCS-51 ต่อไป ซึ่งการออกแบบตัวกรองความถี่ในแต่ละย่านนั้นจะมีวิธีคิดที่เหมือนกัน จะต่างกันในเรื่องของช่วงความถี่ผ่าน ดังนั้นจึงขอยกตัวอย่างการออกแบบตัวกรองความถี่ไว้ 1 ตัวอย่าง ที่มีความถี่ผ่านอยู่ที่ 600 Hz โดยการออกแบบแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองแบบบุดมคติ

1. ในการออกแบบตัวกรองความถี่ผ่านเราจะอาศัยต้นแบบตัวกรองแบบบุดมคติ โดยที่ตัวกรองความถี่ผ่านที่ 600 Hz จะเลือกให้มีช่วงความถี่ที่ 400Hz (f_a) ถึง 900 Hz (f_b) และมีความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง (f_s) เท่ากับ 2.8 kHz และกำหนดให้ $A_{pass} = 3$ dB และ $A_{stop} = 22$ dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สามารถหาค่า transition bandwidth ($\Delta f'$) ได้ดังนี้

$$\Delta f = \Delta f' \times f_s \quad (3.7)$$

โดย $\Delta f = 900 - 400 = 500 \quad (\text{Hz})$

ดังนั้น $\Delta f' = 0.178$

3. จากของ $A_{pass} = 3 \text{ dB}$ และ $A_{stop} = 22 \text{ dB}$ สามารถหาค่า δ_{pass} และ δ_{stop} ดังนี้

$$A_{pass} = 20 \log \frac{1 + \delta_{pass}}{1 - \delta_{pass}} \quad (3.8)$$

ดังนั้น

$$\delta_{pass} = 0.17$$

และ

$$A_{stop} = -20 \log \delta_{stop} \quad (3.9)$$

ดังนั้น

$$\delta_{stop} = 0.0794$$

ฉะนั้นจะได้ว่า

$$\delta = \min(\delta_{pass}, \delta_{stop}) = \delta_{stop}$$

จาก

$$A = -20 \log \delta = 22$$

4. เมื่อได้ค่า A สามารถหา α จากสมการ 3.10 และอันดับของตัวกรอง N จากสมการ 3.11 ได้

$$\alpha = \begin{cases} 0 & A < 21 \\ 0.842(A-21)^{0.4} + 0.088(A-21) & 21 \leq A \leq 50 \\ 0.1102(A-8.7) & A > 50 \end{cases} \quad (3.10)$$

ดังนั้น

$$\alpha = 0.842(22-21)^{0.4} + 0.088(A-21) = 0.93$$

$$N = \begin{cases} \frac{A-7.95}{14.36\Delta f'} + 1 & , A > 21 \\ \frac{0.9}{\Delta f'} & , A \leq 21 \end{cases} \quad (3.11)$$

ดังนั้น

$$N = 6.5 \quad \text{-----} \rightarrow \quad \text{เลือก } N = 7$$

$$M = \frac{(N-1)}{2} = 3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เมื่อหาค่าต่าง ๆ ได้ครบก็สามารถนำมาหาค่าฟังก์ชันหน้าต่าง $w(n)$ จาก

$$w(n) = \frac{I_0(\alpha \sqrt{1 - (n-M)^2 / M^2})}{I_0(\alpha)}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.12)$$

ดังนั้น

$$w(n) = \frac{I_0(0.93 \sqrt{1 - (n-3)^2 / 3^2})}{I_0(0.93)}, \quad n = 0, 1, \dots, 6$$

โดยที่ I_0 เป็นฟังก์ชันเบสเซลชนิดแรกที่มีอันดับ=0 (modified Bessel function of the first kind) ซึ่งเป็นเรื่องยากต่อการคำนวณด้วยมือหรือเครื่องคิดเลข ต้องใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ หรือเปิดตารางสำเร็จรูป Matlab

6. หาค่า $d(n)$ ได้จากสมการในตารางที่ 2.2 สำหรับตัวกรองความถี่ผ่าน (BPF) ซึ่งมีลักษณะดังนี้

$$d(n-M) = \frac{\sin(\omega_b(n-M)) - \sin(\omega_a(n-M))}{\pi(n-M)}$$

โดยที่

$$M = 3$$

$$\omega_a = 2\pi f_a / f_s = 0.286\pi$$

$$\omega_b = 2\pi f_b / f_s = 0.643\pi$$

และ

$$d(0) = \frac{\omega_b - \omega_a}{\pi} = \frac{0.643\pi - 0.286\pi}{\pi}$$

$$d(0) = 0.357$$

7. สามารถหาค่า $h(n)$ ได้จาก $h(n) = d(n-M)w(n)$

$$h(n) = \frac{\sin(0.643\pi(n-3)) - \sin(0.286\pi(n-3))}{\pi(n-3)} \cdot \frac{I_0(0.93 \sqrt{1 - (n-3)^2 / 3^2})}{I_0(0.93)} d(n-M), \quad n = 0, 1, 2, \dots, 6$$

8. จักรูปสมการ $h(n)$ ให้อยู่ในรูปของสมการผลต่าง(Difference equation) โดยจากการแปลง Z

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n)z^{-n}$$

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \sum_{n=0}^6 \frac{\sin(0.643\pi(n-3)) - \sin(0.286\pi(n-3))}{\pi(n-3)} \cdot \frac{I_0(0.93\sqrt{1-(n-3)^2/3^2})}{I_0(0.93)} z^{-n}$$

$$Y(z) = -0.0567X(z) - 0.2558X(z)z^{-1} + 0.0371X(z)z^{-2} + 0.3571X(z)z^{-3} \\ + 0.0371X(z)z^{-4} - 0.2558X(z)z^{-5} - 0.0567X(z)z^{-6}$$

เมื่อทำการแปลง inverse-Z จะได้สมการผลต่างสำหรับตัวกรองความถี่ผ่านที่ 600 Hz ดังต่อไปนี้

$$y(n) = -0.0567x(n) - 0.2558x(n-1) + 0.0371x(n-2) + 0.3571x(n-3) \\ + 0.0371x(n-4) - 0.2558x(n-5) - 0.0567x(n-6)$$

สำหรับสมการตัวกรองความถี่อื่น ๆ นั้นสามารถออกแบบได้จากวิธีเดียวกันกับที่แสดงไว้ข้างต้น ซึ่งสามารถสรุปสมการผลต่างสำหรับตัวกรองความถี่อื่นที่เหลือ ได้ดังนี้

- ตัวกรองความถี่ที่ 60 Hz

$$y(n) = 0.0139x(n) + 0.0139x(n+1) + 0.0139x(n-2) + 0.0139x(n-3) \\ + 0.0139x(n-4) + 0.0139x(n-5) + 0.0139x(n-6)$$

- ตัวกรองความถี่ที่ 350 Hz

$$y(n) = -0.0132x(n) + 0.0057x(n-1) + 0.0221x(n-2) + 0.0286x(n-3) \\ + 0.0221x(n-4) + 0.0057x(n-5) - 0.0132x(n-6)$$

- ตัวกรองความถี่ที่ 450 Hz

$$y(n) = -0.0330x(n) - 0.0057x(n-1) + 0.0257x(n-2) + 0.0393x(n-3) \\ + 0.0257x(n-4) - 0.0057x(n-5) - 0.0330x(n-6)$$

- ตัวกรองความถี่ที่ 750 Hz

$$y(n) = 0.0059x(n) - 0.0318x(n-1) - 0.0020x(n-2) + 0.0321x(n-3) \\ - 0.0020x(n-4) - 0.0318x(n-5) + 0.0059x(n-6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัวกรองความถี่ที่ 900 Hz

$$y(n) = 0.0419x(n) - 0.0389x(n-1) - 0.0165x(n-2) + 0.0500x(n-3) \\ - 0.0165x(n-4) - 0.0389x(n-5) + 0.0419x(n-6)$$

- ตัวกรองความถี่ที่ 1 kHz

$$y(n) = 0.0198x(n) + 0.0066x(n-1) - 0.0300x(n-2) + 0.0393x(n-3) \\ - 0.0300x(n-4) + 0.0066x(n-5) + 0.0198x(n-6)$$

- ตัวกรองความถี่ที่ 2 kHz

$$y(n) = -0.0432x(n) + 0.0014x(n-1) + 0.0459x(n-2) + 0.0643x(n-3) \\ + 0.0459x(n-4) + 0.0014x(n-5) - 0.0432x(n-6)$$

- ตัวกรองความถี่ที่ 3 kHz

$$y(n) = -0.0121x(n) - 0.0273x(n-1) + 0.0042x(n-2) + 0.0286x(n-3) \\ + 0.0042x(n-4) - 0.0273x(n-5) - 0.0121x(n-6)$$

- ตัวกรองความถี่ที่ 4 kHz

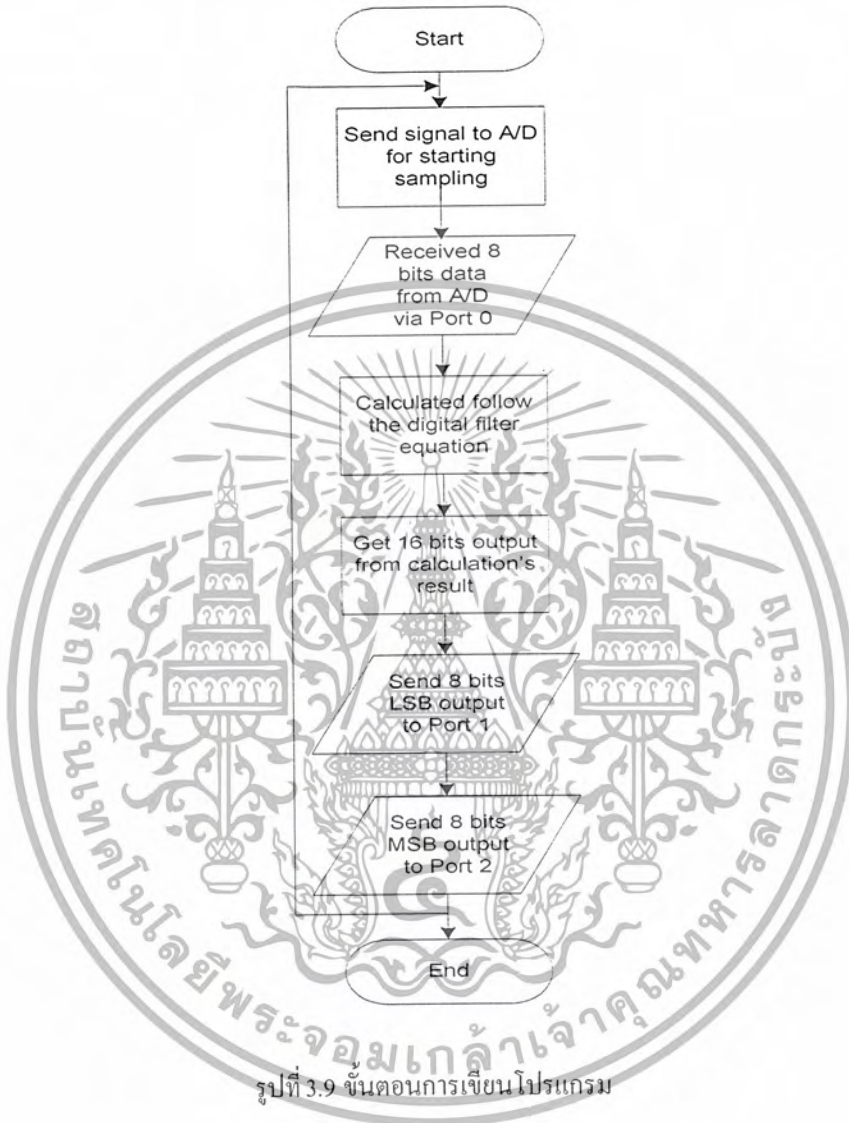
$$y(n) = 0.0179x(n) - 0.0483x(n-1) - 0.0061x(n-2) + 0.0500x(n-3) \\ - 0.0061x(n-4) - 0.0483x(n-5) + 0.0179x(n-6)$$



3.1.7 ขั้นตอนการโปรแกรมสมการตัวกรองความถี่ผ่านแบบดิจิทัล (Program's Flow Chart)

ดังรูปที่ 3.9 เป็นการแสดงส่วนของขั้นตอนการเขียนโปรแกรมตามสมการของวงจรกรองความถี่ผ่านที่เป็นลักษณะของสมการผลต่าง (Difference Equation) ที่มีสมการเป็นดังนี้

$$y(n) = a_0 * x(n) + a_1 * x(n-1) + a_2 * x(n-2) + a_3 * x(n-3) \dots + a_N * x(n-N)$$



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรม

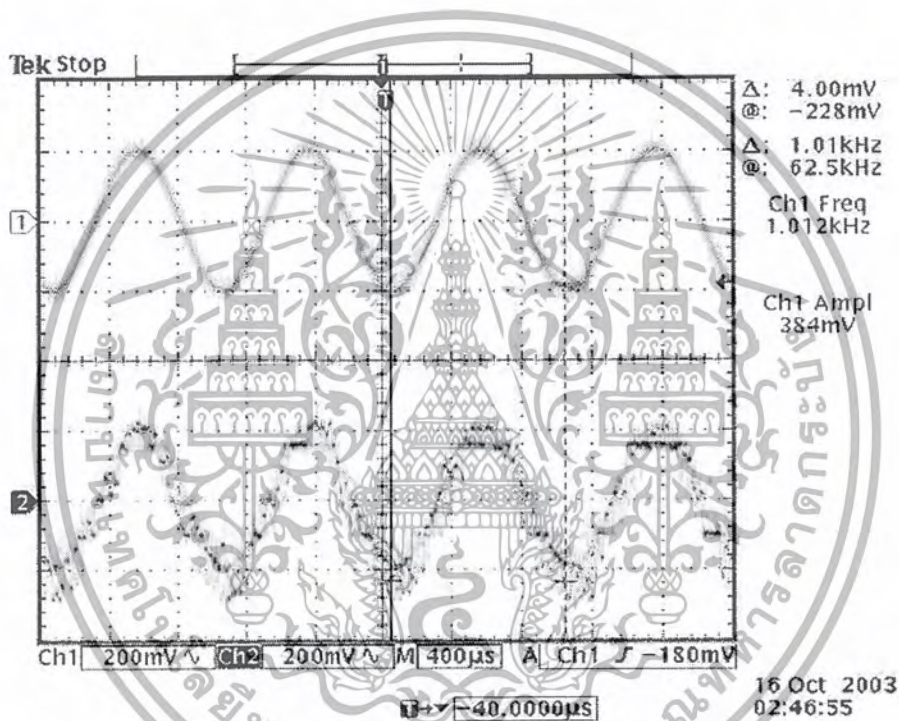
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล และวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

จากการทดลองวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ตามรูปที่ 3.2 และวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (DAC) ในรูปที่ 3.4 โดยทำการต่อวงจรทั้งสองเข้าด้วยกัน และทำการทดสอบโดยการป้อนสัญญาณอินพุต sine ความถี่ 1 kHz ที่มีการ offset สัญญาณด้วย เข้าทางอินพุตของวงจร ADC และทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ด้านขาออกของวงจร DAC ได้ผลการทดลอง ดังนี้



รูปที่ 4.1 ผลการทดลอง ADC และ DAC เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต sine ความถี่ 1 kHz

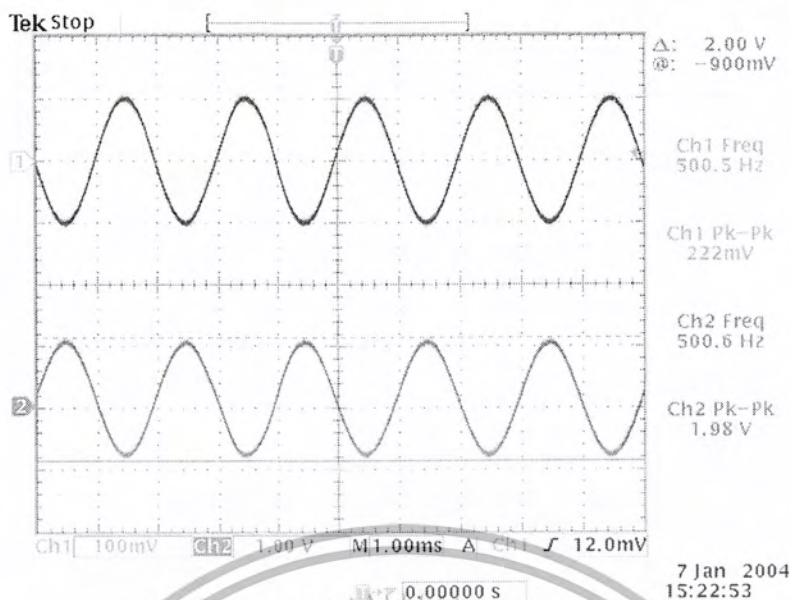
CH1 : สัญญาณอินพุต

CH2 : สัญญาณเอาต์พุตจาก DAC

4.2 ภาคขยายสัญญาณ

4.2.1 ต่อวงจรขยายสัญญาณดังรูปที่ 3.6 โดยปรับอัตราขยายของวงจรให้มีค่าอัตราขยาย +20dB และให้สัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณ sine wave ขนาด 200 mV p-p ความถี่ 500 Hz ทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ขา 6 ของไอซี LF 351 หลังจากนั้นทำการเปลี่ยนความถี่อินพุตเป็น 1 kHz ตามลำดับ ได้ผลการทดลองดังรูปต่อไปนี้

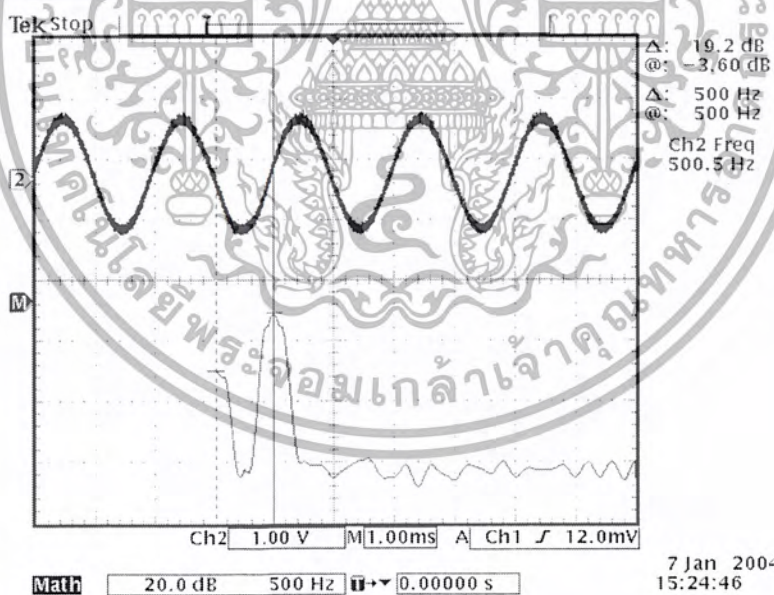
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ผลการทดลองวงจรขยายสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณอินพุต sine ความถี่ 500 Hz

CH 1 : สัญญาณอินพุต

CH 2 : สัญญาณเอาต์พุตวงจรขยายสัญญาณ

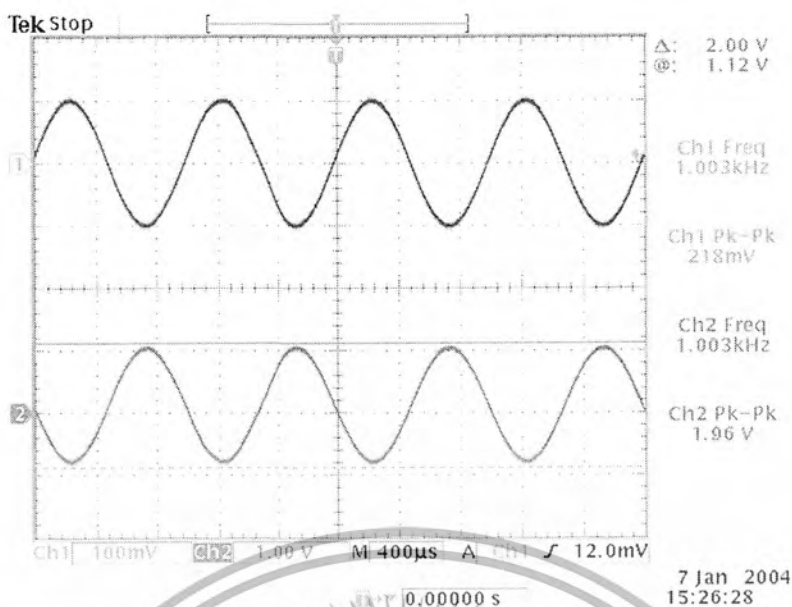


รูปที่ 4.3 ผลการทดลองวงจรขยายสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณอินพุต sine ความถี่ 500 Hz

CH 2 : สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณ

CH M : สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

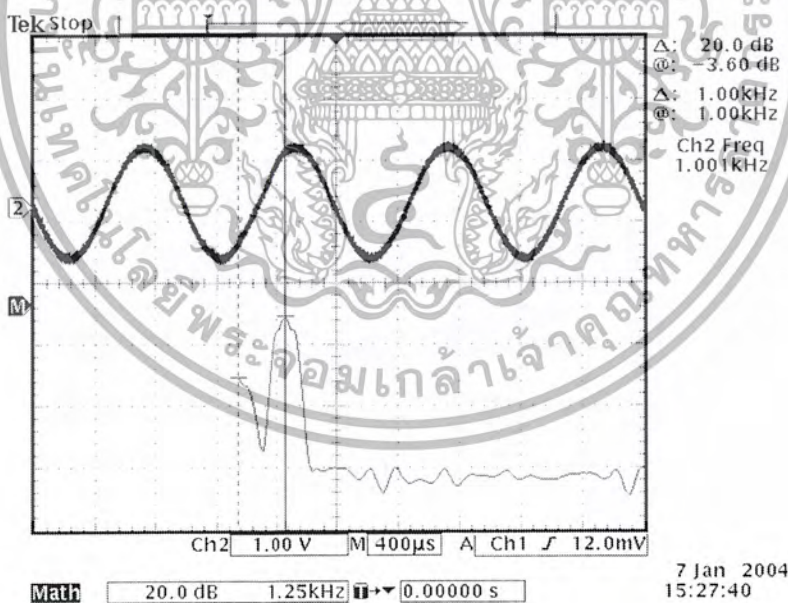
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ผลการทดลองวงจรขยายสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณอินพุต sine ความถี่ 1 kHz

CH 1 : สัญญาณอินพุต

CH 2 : สัญญาณเอาต์พุตวงจรขยายสัญญาณ



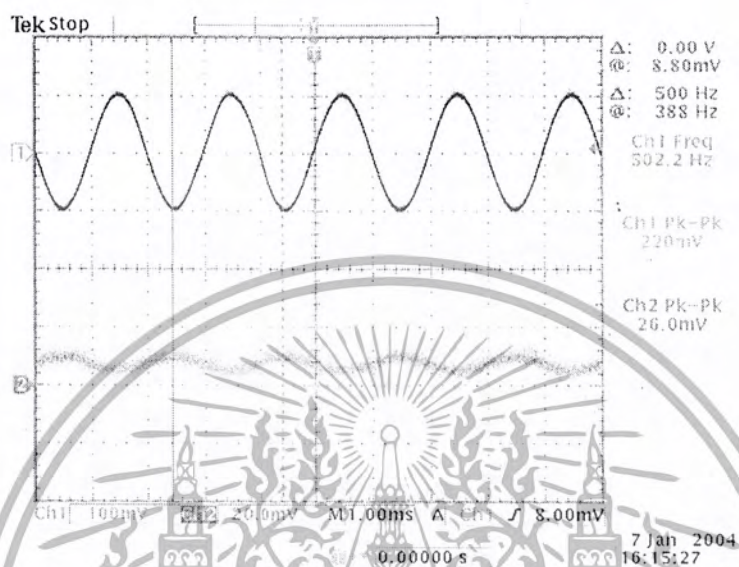
รูปที่ 4.5 ผลการทดลองวงจรขยายสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณอินพุต sine ความถี่ 1 kHz

CH 2 : สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณ

CH M : สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

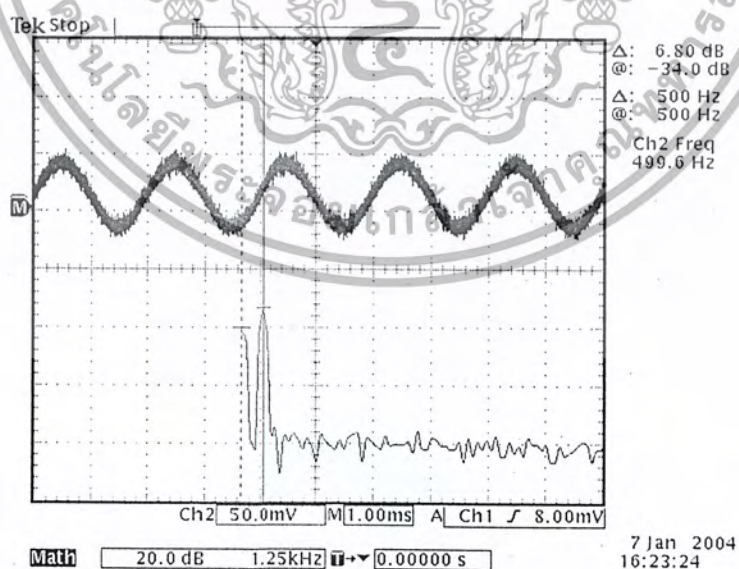
4.2.2 ต่อวงจรขยายสัญญาณดังในรูปที่ 3.6 โดยปรับอัตราขยายของวงจรให้มีค่าอัตราขยาย -20dB และให้สัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณ sine wave ขนาด 200 mV p-p ความถี่ 500 Hz ทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ขา 6 ของไอซี LF 351 หลังจากนั้นทำการเปลี่ยนความถี่อินพุตเป็น 1 kHz ตามลำดับ ได้ผลการทดลองดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 ผลการทดลองวงจรขยายสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณอินพุต sine ความถี่ 500 Hz

CH 1 : สัญญาณอินพุต

CH 2 : สัญญาณเอาต์พุตวงจรขยายสัญญาณ

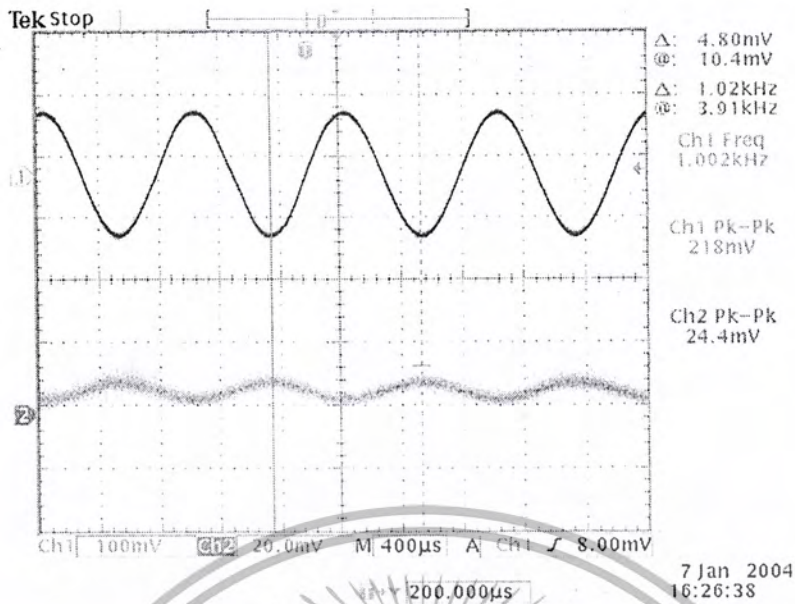


รูปที่ 4.7 ผลการทดลองวงจรขยายสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณอินพุต sine ความถี่ 500 Hz

CH 2 : สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณ

CH M : สเกลครัมของสัญญาณเอาต์พุต

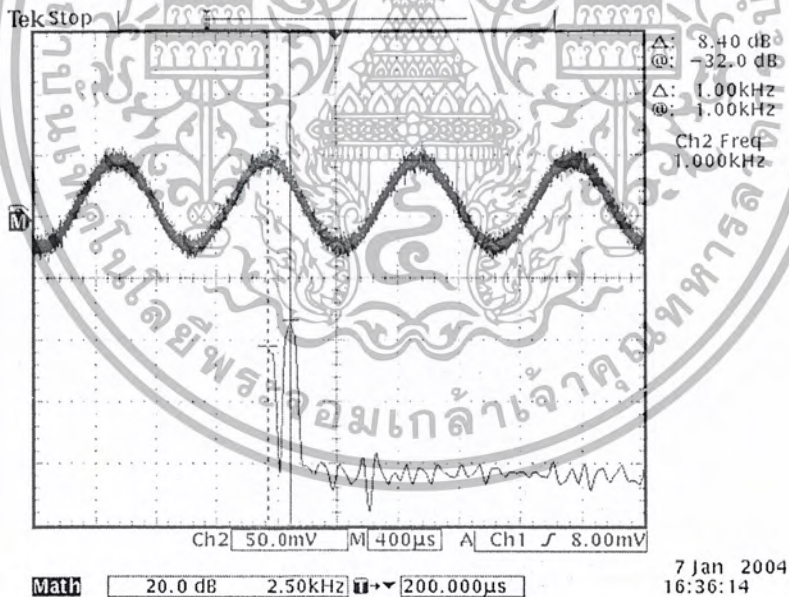
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ผลการทดลองวงจรขยายสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณอินพุต sine ความถี่ 1 kHz

CH 1 : สัญญาณอินพุต

CH 2 : สัญญาณเอาต์พุตวงจรขยายสัญญาณ



รูปที่ 4.9 ผลการทดลองวงจรขยายสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณอินพุต sine ความถี่ 1 kHz

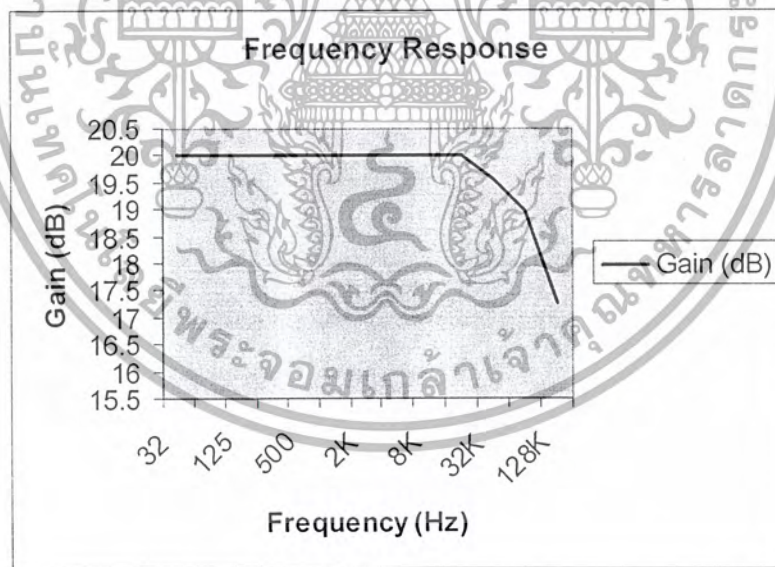
CH 2 : สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณ

CH M : สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

f (Hz)	Vin (mV)	Vout (V)	Gain (เท่า)	Gain (dB)
32	210	2.1	10	20
64	210	2.1	10	20
125	210	2.1	10	20
250	210	2.1	10	20
500	210	2.1	10	20
1K	210	2.1	10	20
2K	210	2.1	10	20
4K	210	2.1	10	20
8K	210	2.1	10	20
16K	210	2.1	10	20
32K	210	2	9.5	19.55
64K	210	1.88	8.9	18.98
128K	210	1.54	7.3	17.26

ตารางที่ 4.1 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณ

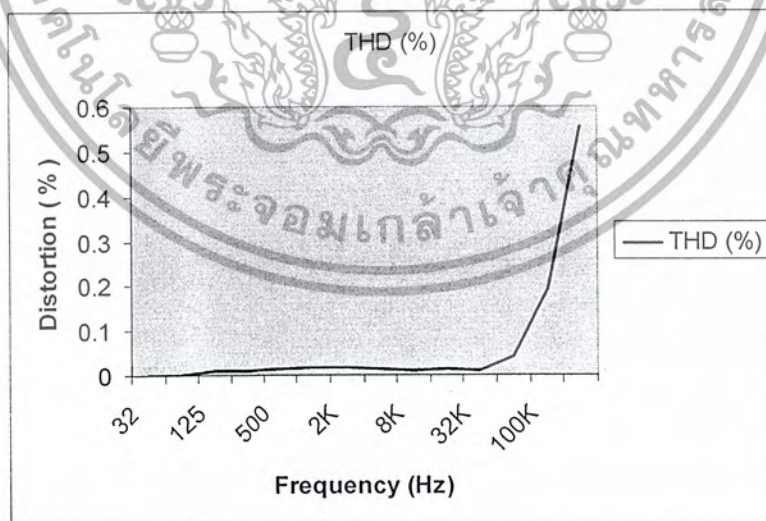


รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

f (Hz)	THD (%)
32	0
64	0
125	0.0094
250	0.0106
500	0.0138
1K	0.0189
2K	0.0166
4K	0.0156
8K	0.0108
16K	0.0128
32K	0.012
64K	0.0414
100K	0.1903
200K	0.554

ตารางที่ 4.2 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และค่าTHDของวงจรขยายสัญญาณ

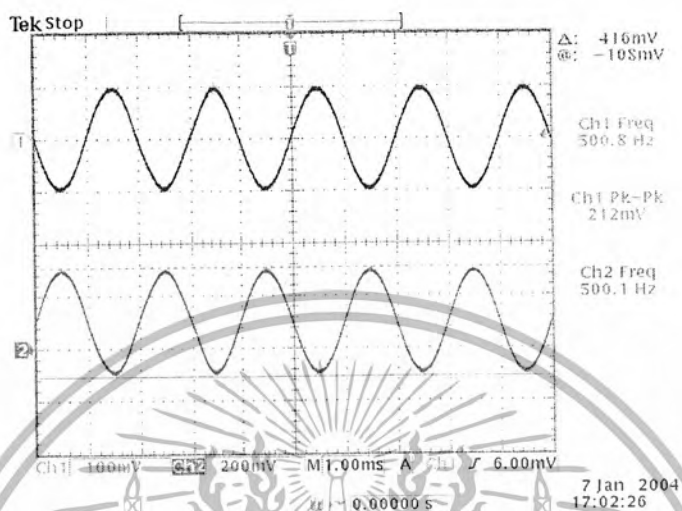


รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และค่า THD ของวงจรขยายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ภาพรวมสัญญาณ

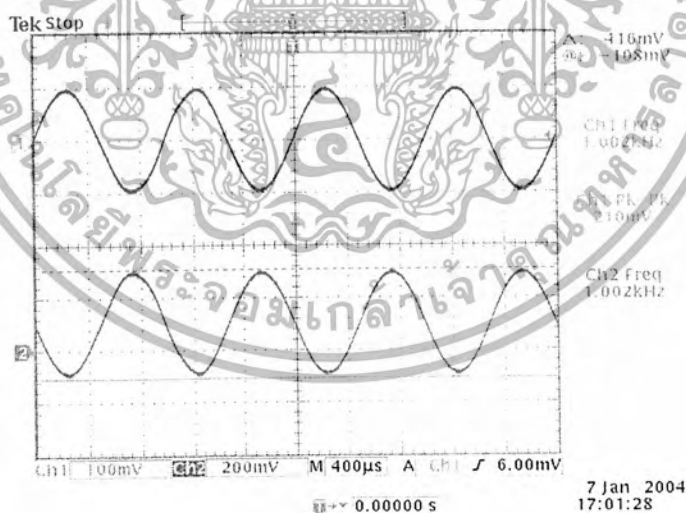
4.3.1 ทำการต่อวงจรบวกสัญญาณดังรูปที่ 3.7 โดยให้สัญญาณอินพุต1 และอินพุต2 เป็นสัญญาณ sine wave ขนาด 200 mVp-p ความถี่ 500Hz ทำการวัดเอาต์พุตของวงจร หลังจากนั้นเปลี่ยนอินพุต1และอินพุต2 เป็นสัญญาณ sine wave ขนาด 200 mVp-p ความถี่ 1kHz ตามลำดับได้ผลการทดลองดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.12 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรบวกสัญญาณที่ความถี่ 500 Hz

CH1 : สัญญาณอินพุต1และอินพุต2

CH2 : สัญญาณเอาต์พุต



รูปที่ 4.13 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรบวกสัญญาณที่ความถี่ 1 kHz

CH1 : สัญญาณอินพุต1และอินพุต2

CH2 : สัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การเขียนโปรแกรมสมการตัวกรองความถี่ในไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS-51)

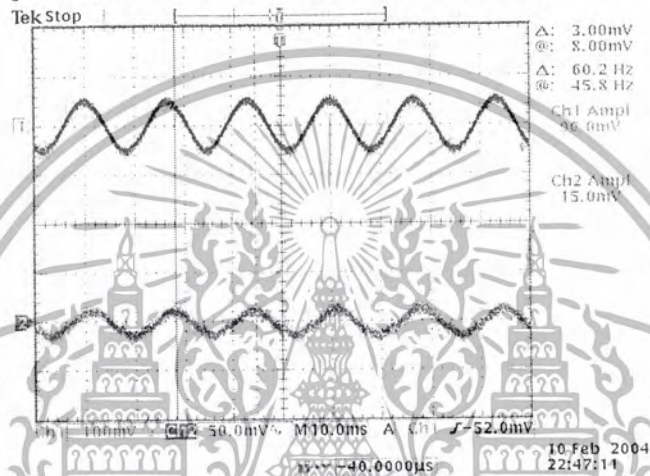
ในการทดลองส่วนนี้ได้นำสมการผลต่างสืบเนื่องของตัวกรองความถี่ในย่านต่าง ๆ ที่ต้องการโดยออกแบบมาจากการใช้โปรแกรม MATLAB มาเขียนโปรแกรมลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS-51) แล้วเก็บผลการทดลองออกมา แสดงถึงผลตอบสนองทางความถี่ของสมการตัวกรองความถี่แต่ละย่านทั้ง 10 ย่าน ดังนี้ คือ 60 Hz, 350 Hz, 450 Hz, 600 Hz, 750 Hz, 900 Hz, 1kHz, 2kHz, 3 kHz และ 4kHz

4.4.1. ตัวกรองความถี่ต่ำที่ 60 Hz

ที่ตัวกรองความถี่นี้ มีสมการผลต่างสืบเนื่องเป็นดังนี้

$$y(n) = 0.0139x(n) + 0.0139x(n-1) + 0.0139x(n-2) + 0.0139x(n-3) \\ + 0.0139x(n-4) + 0.0139x(n-5) + 0.0139x(n-6)$$

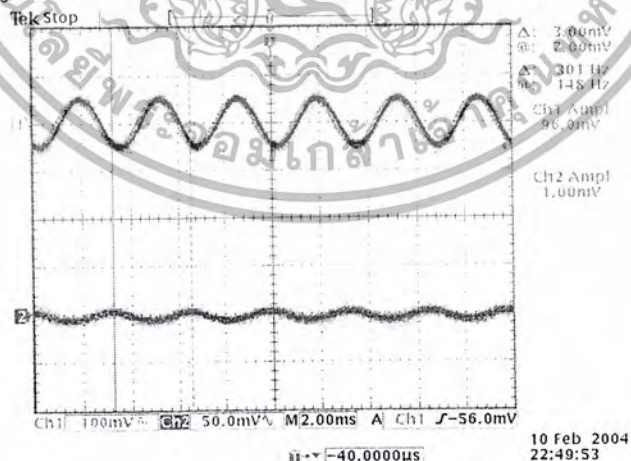
1. เมื่อป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 60 Hz เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาท์พุต



รูปที่ 4.14 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำ 60 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 60 Hz

CH1 : สัญญาณอินพุต CH2 : สัญญาณเอาท์พุต

2. เมื่อป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 300 Hz เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาท์พุต

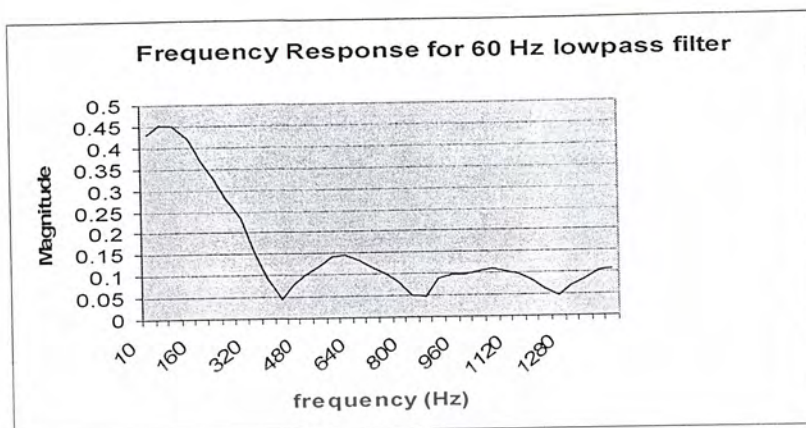


รูปที่ 4.15 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำ 60 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 300 Hz

CH1 : สัญญาณอินพุต CH2 : สัญญาณเอาท์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองได้ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำ 60 Hz นี้เป็นดังนี้



รูปที่ 4.16 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำ 60 Hz จากการเขียนโปรแกรมใช้ MCS-51



รูปที่ 4.17 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำ 60 Hz โดยใช้โปรแกรม MATLAB

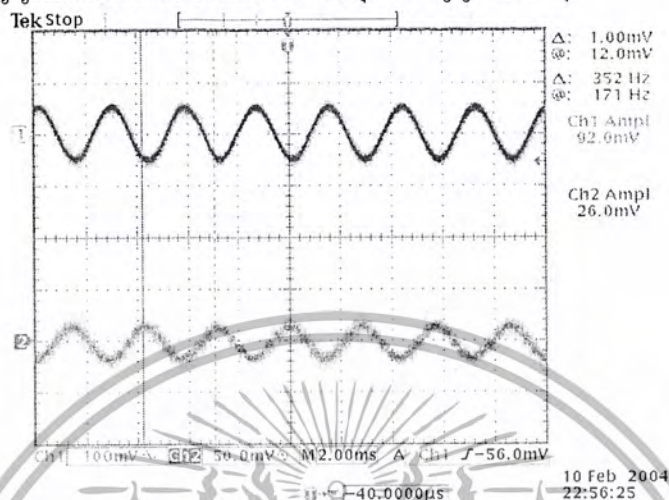
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2. ตัวกรองความถี่ผ่านที่ 350 Hz

ที่ตัวกรองความถี่นี้ มีสมการผลต่างสืบเนื่องเป็นดังนี้

$$y(n) = -0.0132x(n) + 0.0057x(n-1) + 0.0221x(n-2) + 0.0286x(n-3) \\ + 0.0221x(n-4) + 0.0057x(n-5) - 0.0132x(n-6)$$

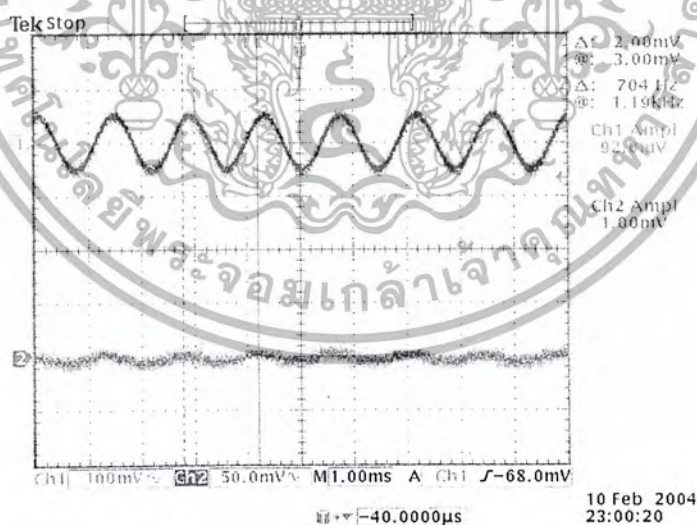
1. เมื่อป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 350 Hz เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาต์พุต



รูปที่ 4.18 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 350 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 350 Hz

CH1 : สัญญาณอินพุต CH2 : สัญญาณเอาต์พุต

2. เมื่อป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 700 Hz เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาต์พุต

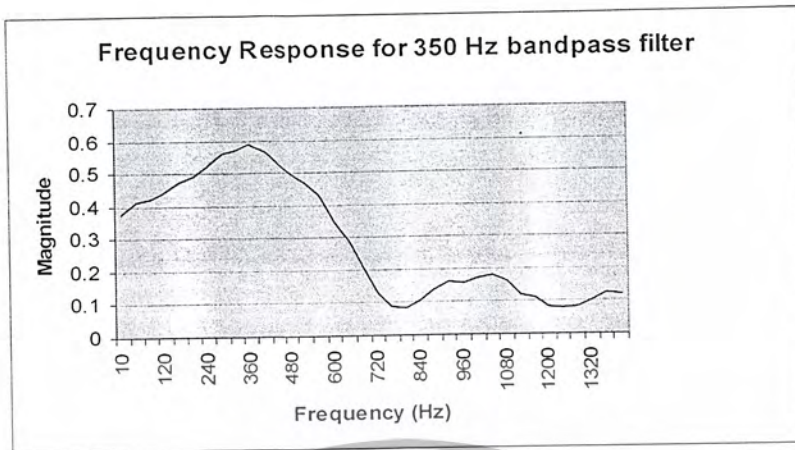


รูปที่ 4.19 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 350 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 700 Hz

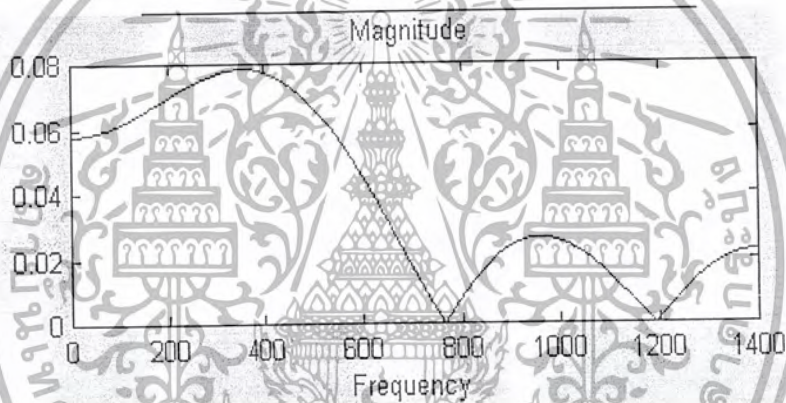
CH1 : สัญญาณอินพุต CH2 : สัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองได้ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 350 Hz เป็นดังนี้



รูปที่ 4.20 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 350 Hz จากการเขียนโปรแกรมใช้ MCS-51



รูปที่ 4.21 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 350 Hz โดยใช้โปรแกรม MATLAB

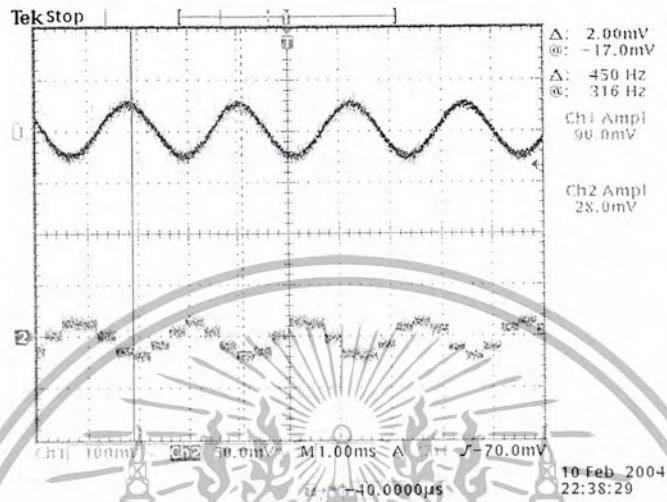
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3. ตัวกรองความถี่ผ่านที่ 450 Hz

ที่ตัวกรองความถี่นี้ มีสมการผลต่างสืบเนื่องเป็นดังนี้

$$y(n) = -0.0330x(n) - 0.0057x(n-1) + 0.0257x(n-2) + 0.0393x(n-3) \\ + 0.0257x(n-4) - 0.0057x(n-5) - 0.0330x(n-6)$$

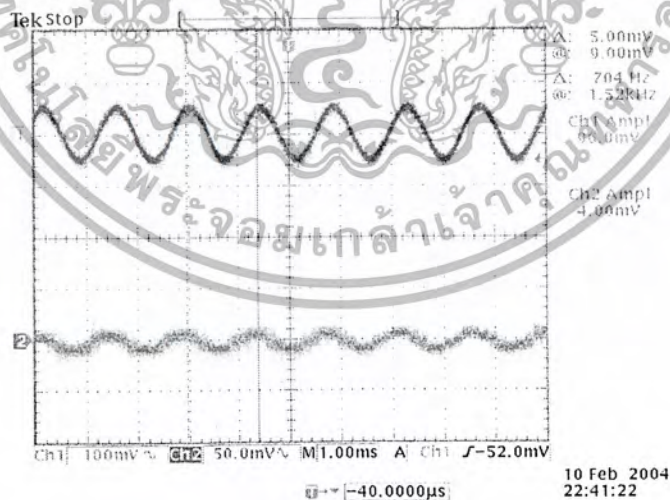
1. เมื่อป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 450 Hz เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาต์พุต



รูปที่ 4.22 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 450 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 450 Hz

CH1 : สัญญาณอินพุต CH2 : สัญญาณเอาต์พุต

2. เมื่อป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 700 Hz เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาต์พุต

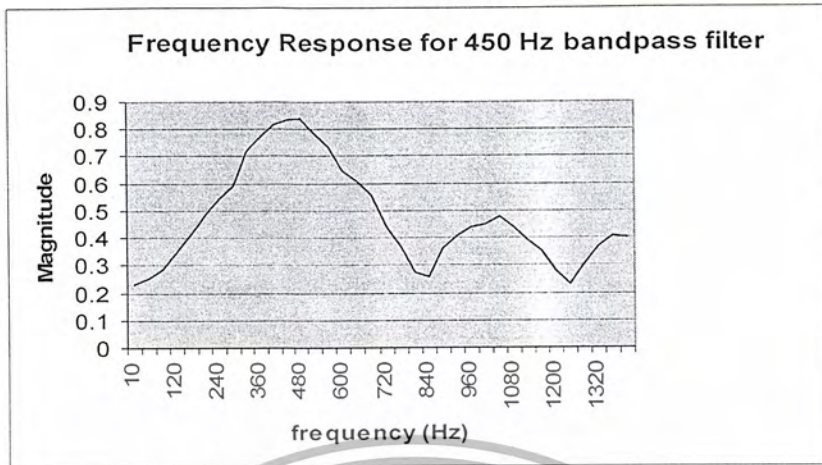


รูปที่ 4.23 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 450 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 700 Hz

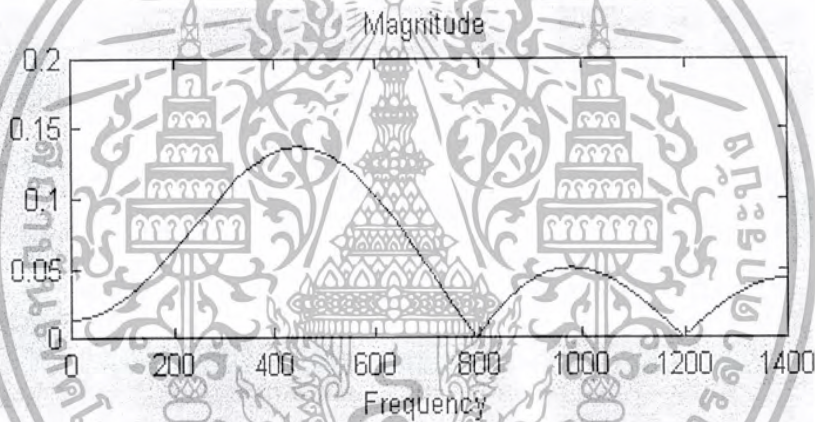
CH1 : สัญญาณอินพุต CH2 : สัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองได้ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 450 Hz เป็นดังนี้



รูปที่ 4.24 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 450 Hz จากการเขียนโปรแกรมใช้ MCS-51



รูปที่ 4.25 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 450 Hz โดยใช้โปรแกรม MATLAB

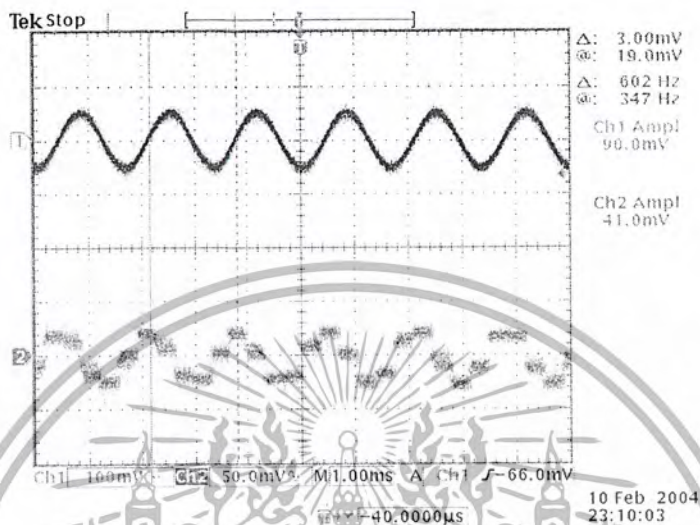
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4. ตัวกรองความถี่ผ่านที่ 600 Hz

ที่ตัวกรองความถี่นี้ มีสมการผลต่างสืบเนื่องเป็นดังนี้

$$y(n) = -0.0567x(n) - 0.2558x(n-1) + 0.0371x(n-2) + 0.3571x(n-3) \\ + 0.0371x(n-4) - 0.2558x(n-5) - 0.0567x(n-6)$$

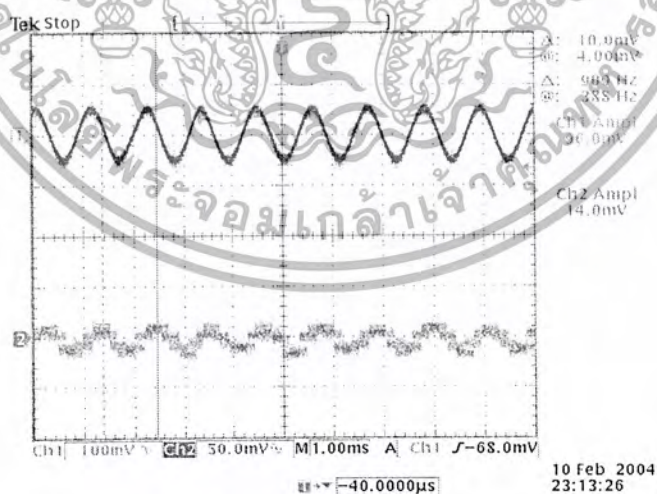
1. เมื่อป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 600 Hz เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาต์พุต



รูปที่ 4.26 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 600 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 600 Hz

CH1 : สัญญาณอินพุต CH2 : สัญญาณเอาต์พุต

2. เมื่อป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 900 Hz เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาต์พุต

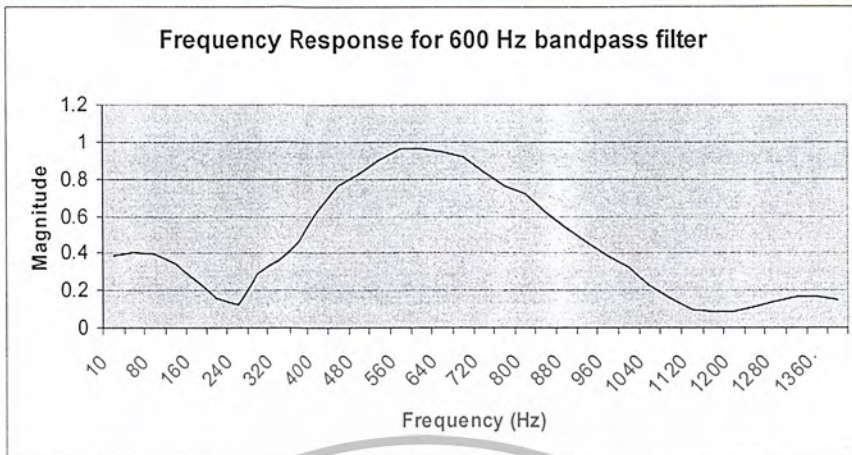


รูปที่ 4.27 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 600 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 900 Hz

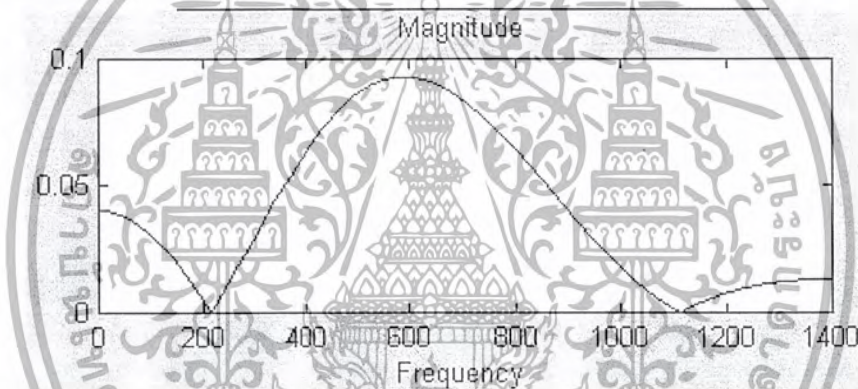
CH1 : สัญญาณอินพุต CH2 : สัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองได้ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 600 Hz เป็นดังนี้



รูปที่ 4.28 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 600 Hz จากการเขียนโปรแกรมใช้ MCS-51



รูปที่ 4.29 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 600 Hz โดยใช้โปรแกรม MATLAB

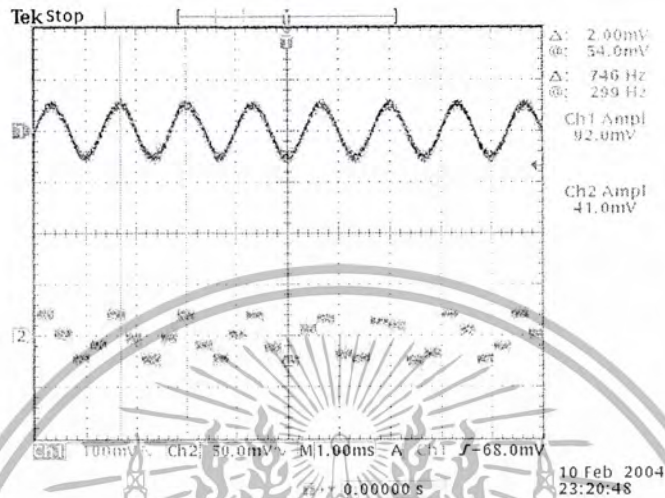
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5. ตัวกรองความถี่ผ่านที่ 750 Hz

ที่ตัวกรองความถี่นี้ มีสมการผลต่างสืบเนื่องเป็นดังนี้

$$y(n) = 0.0059x(n) - 0.0318x(n-1) - 0.0020x(n-2) + 0.0321x(n-3) - 0.0020x(n-4) - 0.0318x(n-5) + 0.0059x(n-6)$$

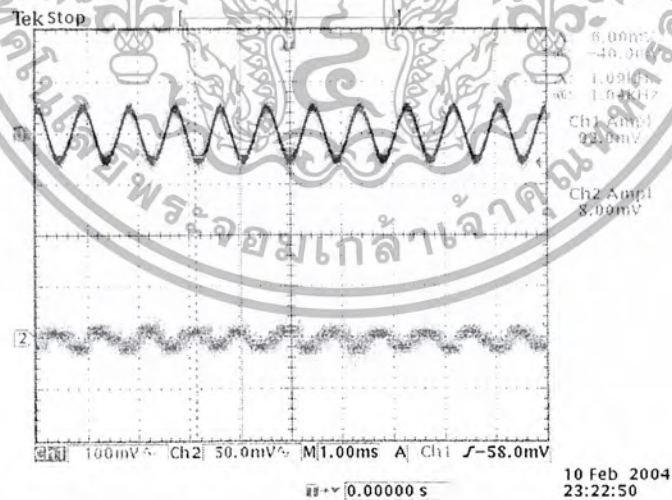
1. เมื่อป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 750 Hz เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาต์พุต



รูปที่ 4.30 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 750 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 750 Hz

CH1 : สัญญาณอินพุต CH2 : สัญญาณเอาต์พุต

2. เมื่อป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 1 kHz เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาต์พุต

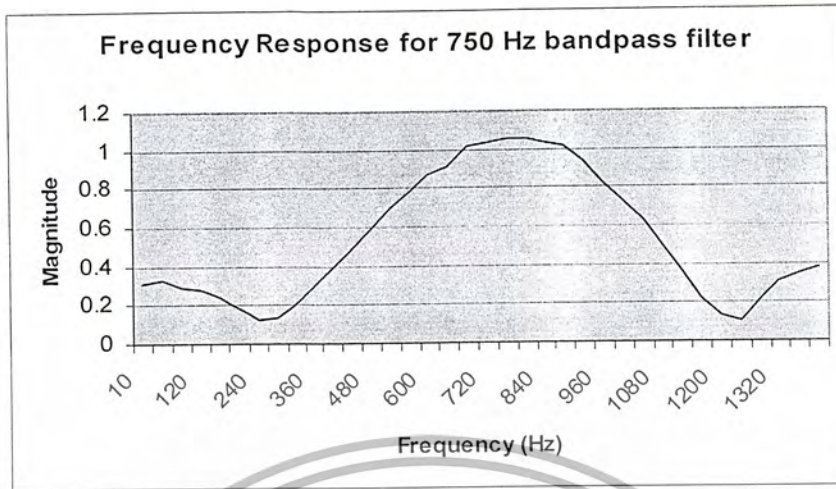


รูปที่ 4.31 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 750 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 1 kHz

CH1 : สัญญาณอินพุต CH2 : สัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองได้ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 750 Hz เป็นดังนี้



รูปที่ 4.32 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 750 Hz จากการเขียนโปรแกรมใช้ MCS-51



รูปที่ 4.33 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 750 Hz โดยใช้โปรแกรม MATLAB

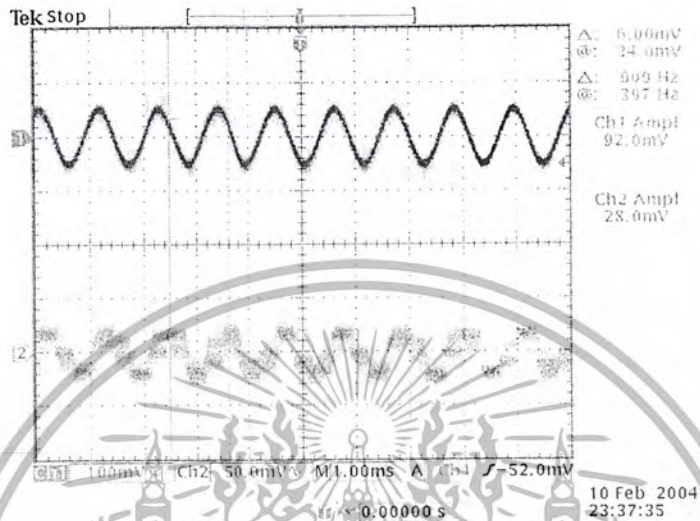
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.6. ตัวกรองความถี่ผ่านที่ 900 Hz

ที่ตัวกรองความถี่นี้ มีสมการผลต่างสืบเนื่องเป็นดังนี้

$$y(n) = 0.0419x(n) - 0.0389x(n-1) - 0.0165x(n-2) + 0.0500x(n-3) \\ - 0.0165x(n-4) - 0.0389x(n-5) + 0.0419x(n-6)$$

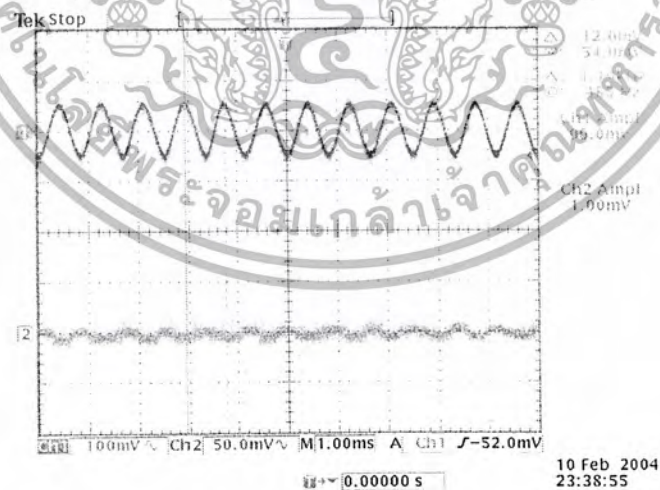
1. เมื่อป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 900 Hz เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาต์พุต



รูปที่ 4.34 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 900 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 900 Hz

CH1 : สัญญาณอินพุต CH2 : สัญญาณเอาต์พุต

2. เมื่อป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 1.2 kHz เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาต์พุต

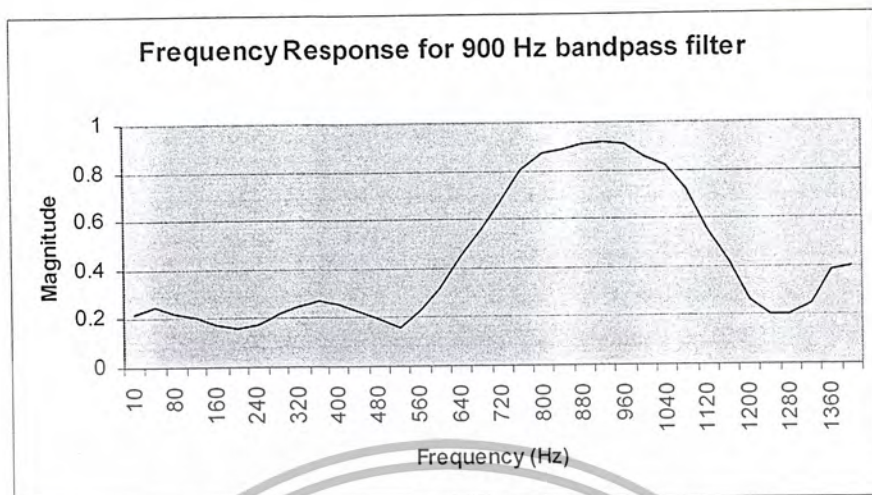


รูปที่ 4.35 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 900 Hz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 1.2 kHz

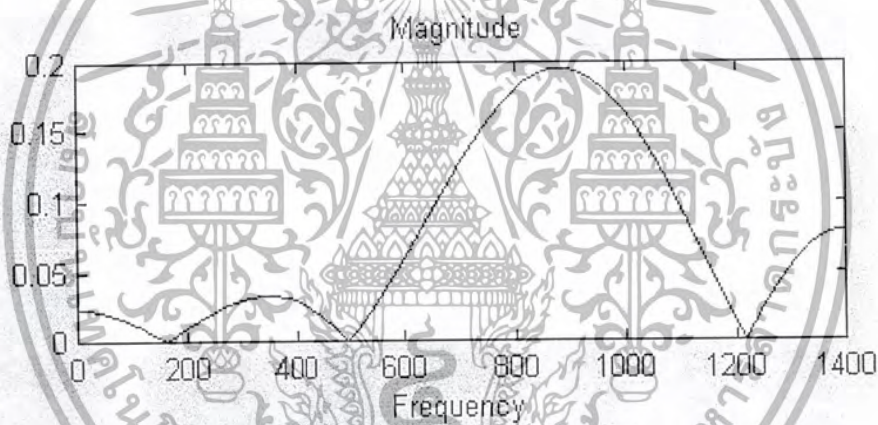
CH1 : สัญญาณอินพุต CH2 : สัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองได้ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 900 Hz เป็นดังนี้



รูปที่ 4.36 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 900 Hz จากการเขียนโปรแกรมใช้ MCS-51



รูปที่ 4.37 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 900 Hz โดยใช้โปรแกรม MATLAB

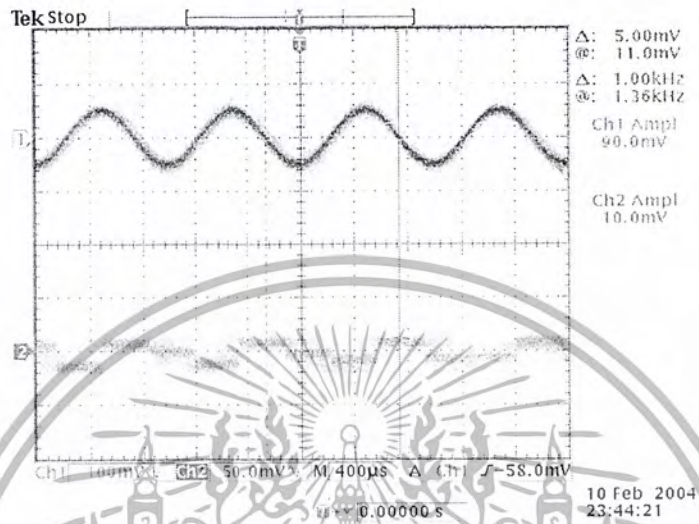
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.7. ตัวกรองความถี่ผ่านที่ 1 kHz

ที่ตัวกรองความถี่นี้ มีสมการผลต่างสืบเนื่องเป็นดังนี้

$$y(n) = 0.0198x(n) + 0.0066x(n-1) - 0.0300x(n-2) + 0.0393x(n-3) - 0.0300x(n-4) + 0.0066x(n-5) + 0.0198x(n-6)$$

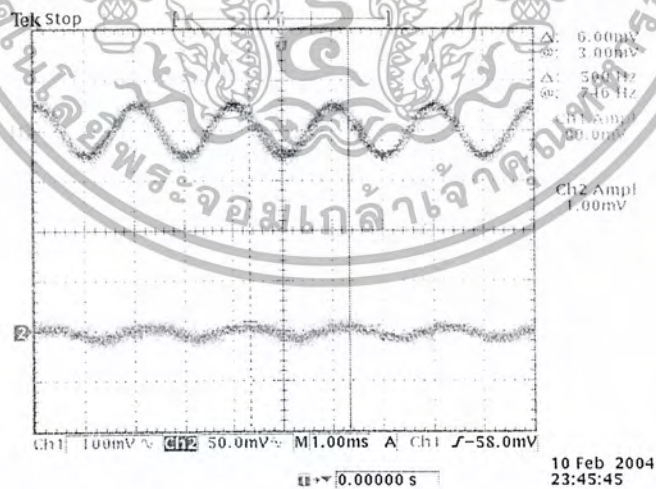
1. เมื่อป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 1 kHz เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาต์พุต



- รูปที่ 4.38 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 1 kHz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 1 kHz

CH1 : สัญญาณอินพุต CH2 : สัญญาณเอาต์พุต

2. เมื่อป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 500 Hz เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาต์พุต

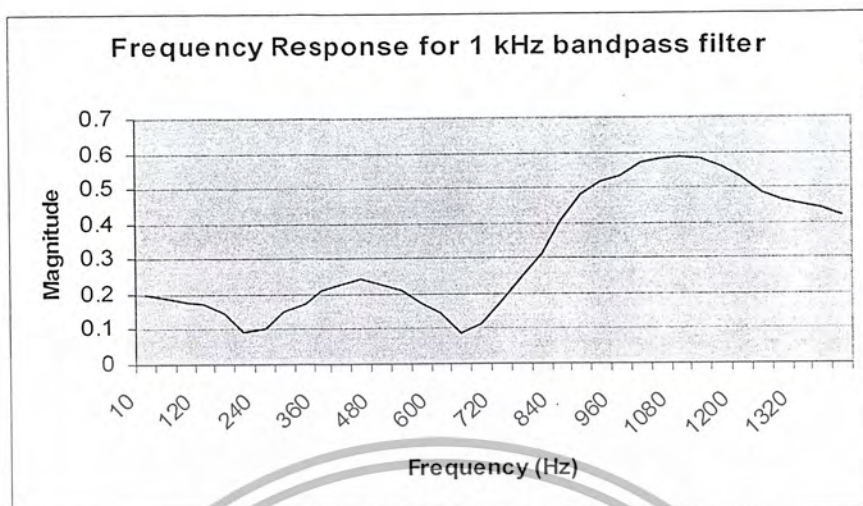


- รูปที่ 4.39 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 1 kHz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 500 Hz

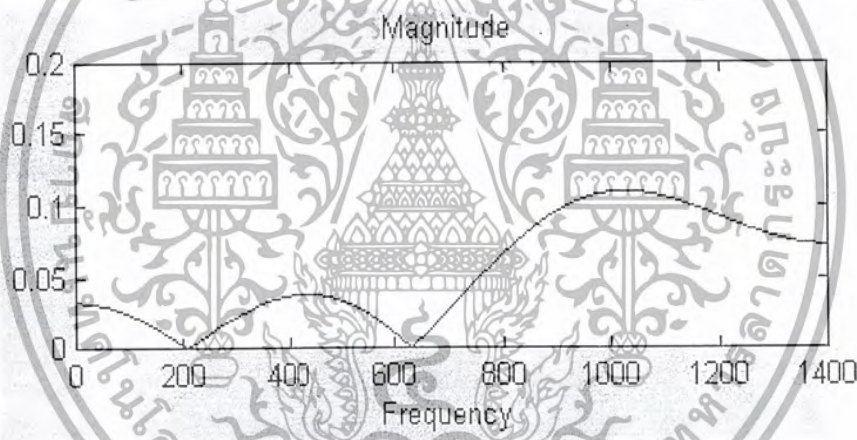
CH1 : สัญญาณอินพุต CH2 : สัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองได้ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 1 kHz เป็นดังนี้



รูปที่ 4.40 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 1 kHz จากการเขียนโปรแกรมใช้ MCS-51



รูปที่ 4.41 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 1 kHz โดยใช้โปรแกรม MATLAB

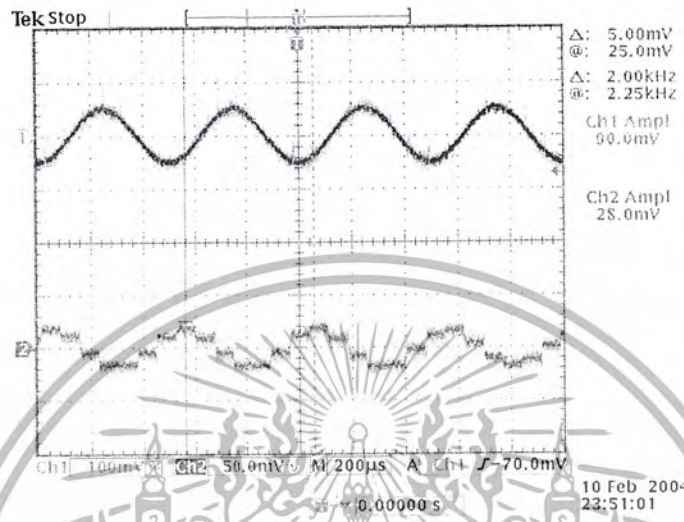
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.8. ตัวกรองความถี่ผ่านที่ 2 kHz

ที่ตัวกรองความถี่นี้ มีสมการผลต่างสืบเนื่องเป็นดังนี้

$$y(n) = -0.0432x(n) + 0.0014x(n-1) + 0.0459x(n-2) + 0.0643x(n-3) + 0.0459x(n-4) + 0.0014x(n-5) - 0.0432x(n-6)$$

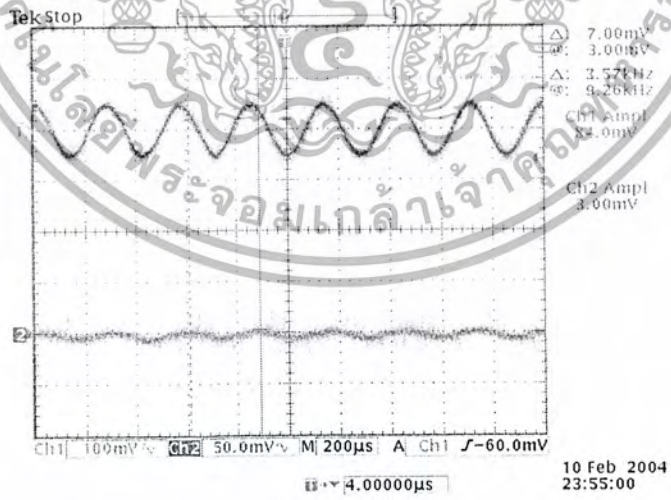
1. เมื่อป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 2 kHz เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาต์พุต



รูปที่ 4.42 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 2 kHz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 2 kHz

CH1 : สัญญาณอินพุต CH2 : สัญญาณเอาต์พุต

2. เมื่อป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 3.6 kHz เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาต์พุต

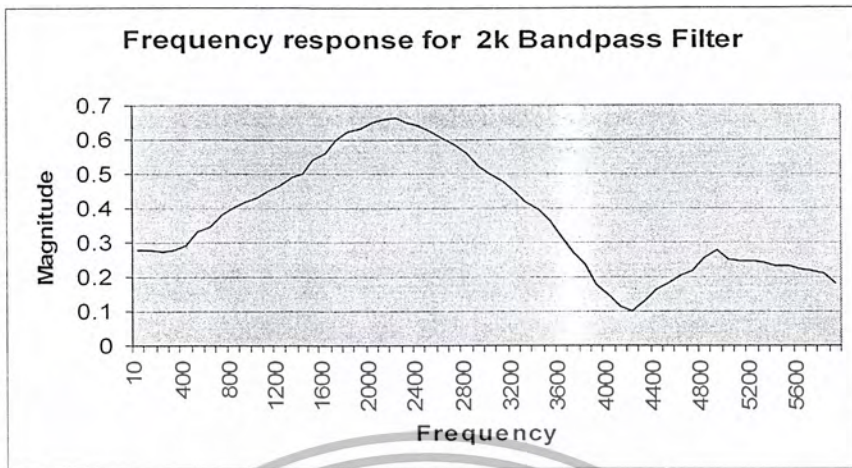


รูปที่ 4.43 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 2 kHz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 3.6 kHz

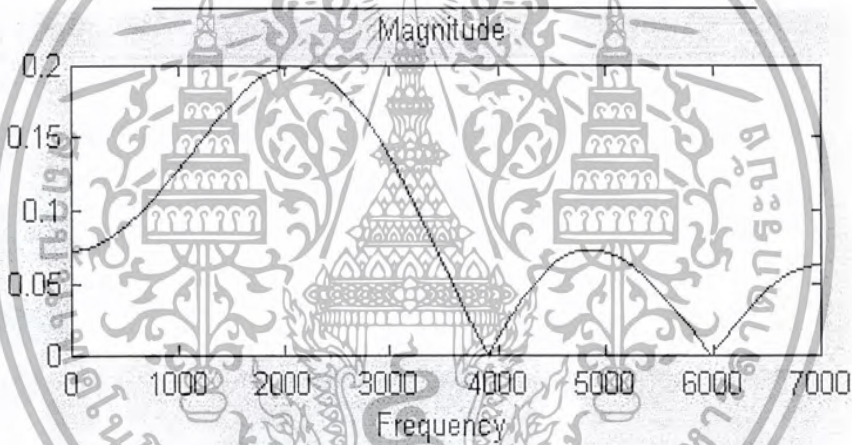
CH1 : สัญญาณอินพุต CH2 : สัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองได้ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 2 kHz เป็นดังนี้



รูปที่ 4.44 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 2 kHz จากการเขียนโปรแกรมใช้ MCS-51



รูปที่ 4.45 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 2 kHz โดยใช้โปรแกรม MATLAB

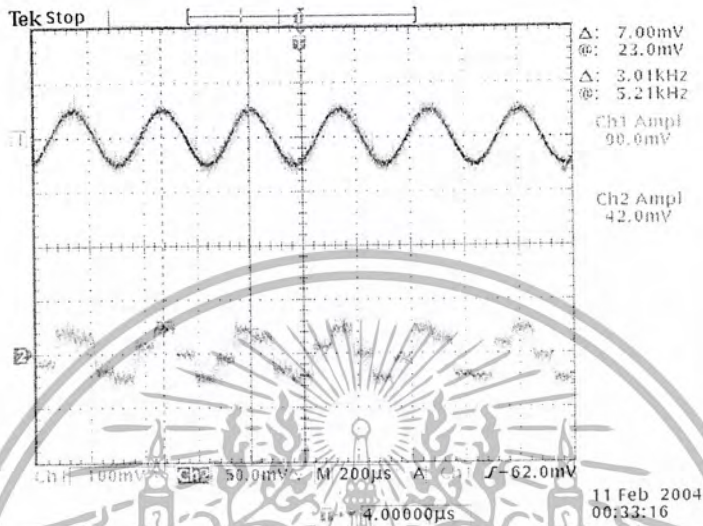
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.9. ตัวกรองความถี่ผ่านที่ 3 kHz

ที่ตัวกรองความถี่นี้ มีสมการผลต่างสืบเนื่องเป็นดังนี้

$$y(n) = -0.0121x(n) - 0.0273x(n-1) + 0.0042x(n-2) + 0.0286x(n-3) \\ + 0.0042x(n-4) - 0.0273x(n-5) - 0.0121x(n-6)$$

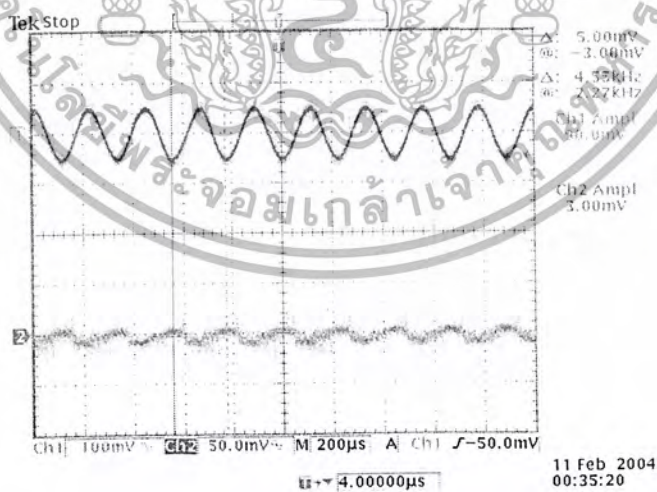
1. เมื่อป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 3 kHz เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาต์พุต



รูปที่ 4.46 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 3 kHz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 3 kHz

CH1 : สัญญาณอินพุต CH2 : สัญญาณเอาต์พุต

2. เมื่อป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 4.5 kHz เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาต์พุต

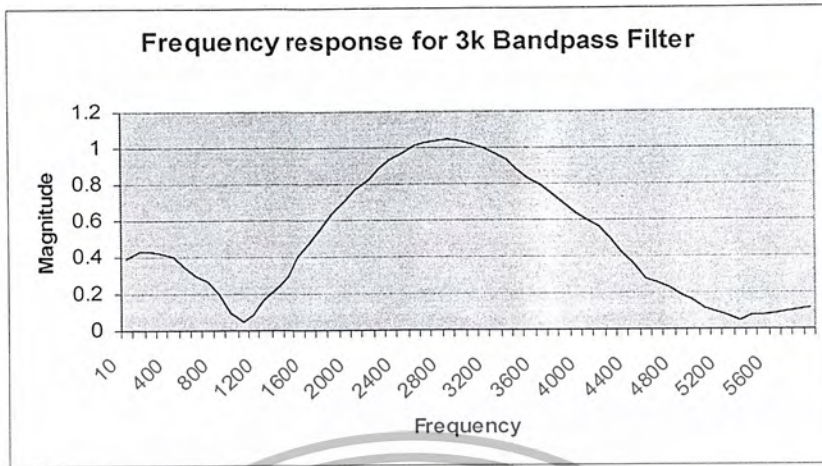


รูปที่ 4.47 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 3 kHz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 4.5 kHz

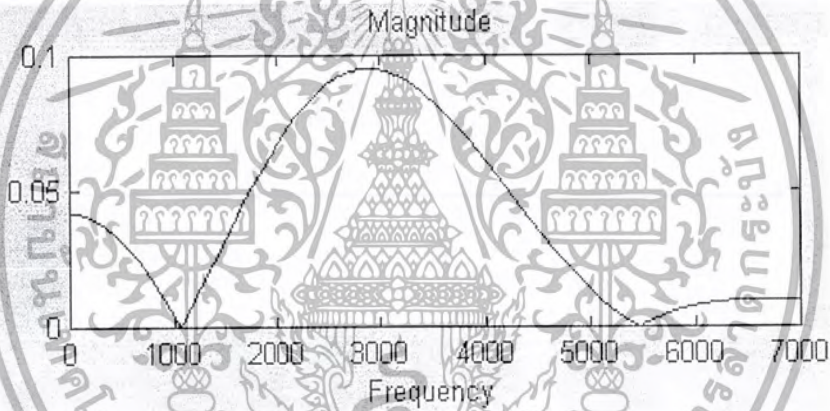
CH1 : สัญญาณอินพุต CH2 : สัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองได้ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 3 kHz เป็นดังนี้



รูปที่ 4.48 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 3 kHz จากการเขียนโปรแกรมใช้ MCS-51



รูปที่ 4.49 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 3 kHz โดยใช้โปรแกรม MATLAB

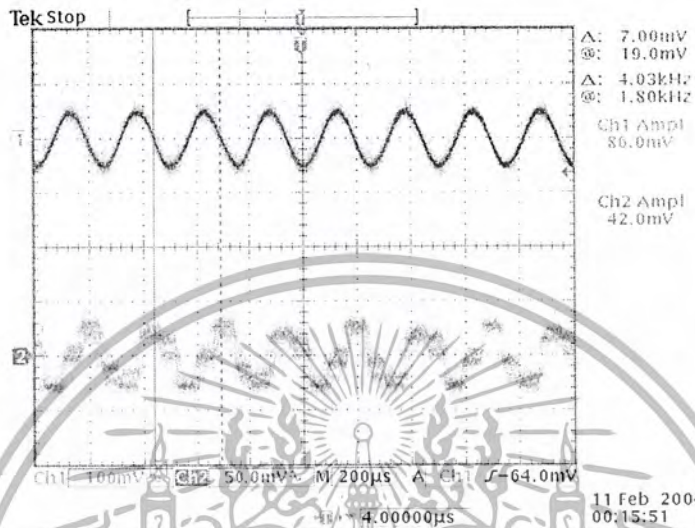
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.10. ตัวกรองความถี่ผ่านที่ 4 kHz

ที่ตัวกรองความถี่นี้ มีสมการผลต่างสืบเนื่องเป็นดังนี้

$$y(n) = 0.0179x(n) - 0.0483x(n-1) - 0.0061x(n-2) + 0.0500x(n-3) \\ - 0.0061x(n-4) - 0.0483x(n-5) + 0.0179x(n-6)$$

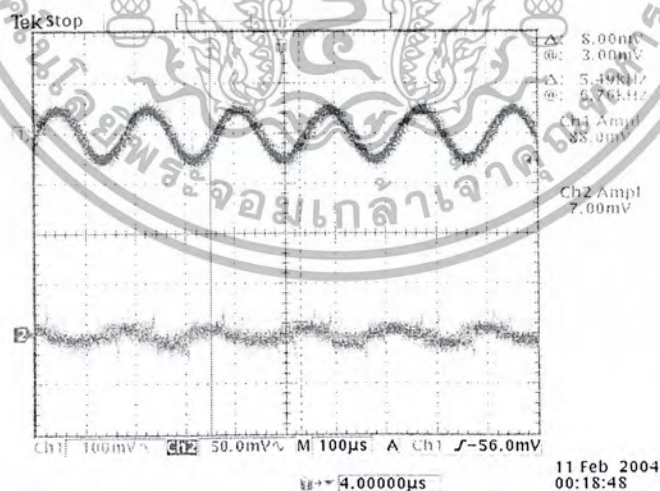
1. เมื่อป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 4 kHz เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาต์พุต



รูปที่ 4.50 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 4 kHz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 4 kHz

CH1 : สัญญาณอินพุต CH2 : สัญญาณเอาต์พุต

2. เมื่อป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 5.5 kHz เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาต์พุต

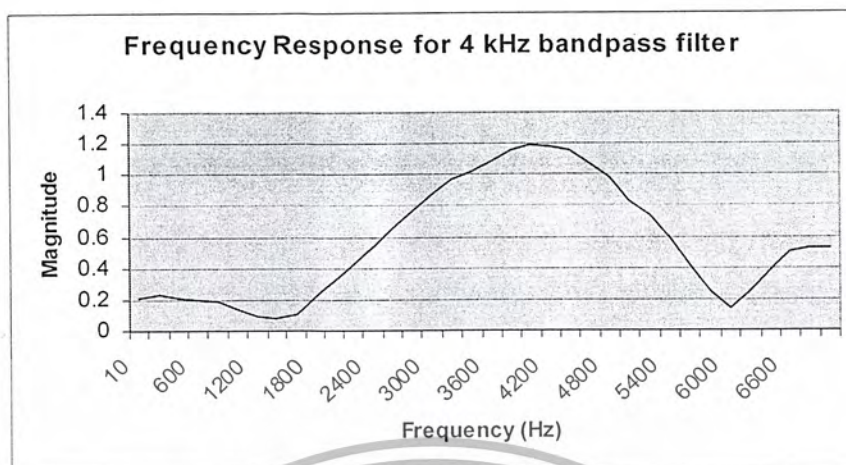


รูปที่ 4.51 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ผ่าน 4 kHz เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 5.5 kHz

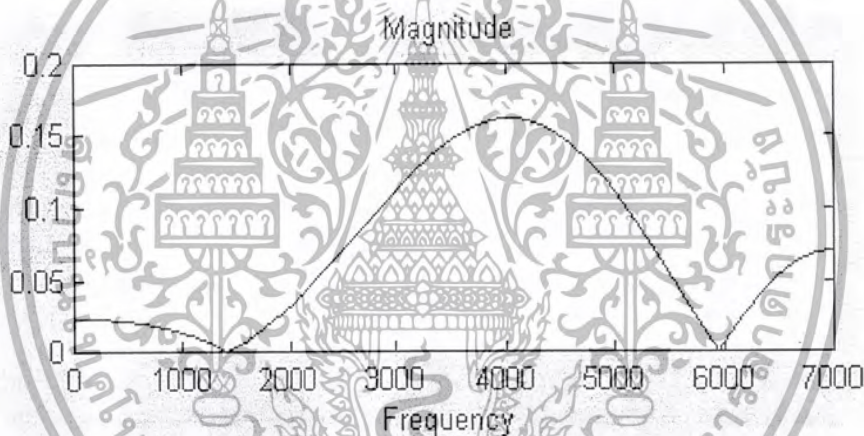
CH1 : สัญญาณอินพุต CH2 : สัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองได้ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 4 kHz เป็นดังนี้



รูปที่ 4.52 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 4 kHz จากการเขียนโปรแกรมใช้ MCS-51



รูปที่ 4.53 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน 4 kHz โดยใช้โปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากที่กล่าวไว้ในบทนำถึงโครงการนี้ที่มีการแบ่งโครงการออกเป็น 2 ส่วนนั้น ก็คือ ส่วนของการทดลองวงจรต่าง ๆ ที่ใช้ในโครงการ รวมถึงการทดลองเขียนโปรแกรมสมการตัวกรองความถี่แบบดิจิทัลในย่านต่าง ๆ ลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 และส่วนของการออกแบบตัวกรองความถี่ผ่านแบบดิจิทัลในแต่ละย่านนั้น สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

- ส่วนวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) และวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (DAC) สามารถทำงานได้ค่อนข้างดี โดยส่วน ADC มีการใช้อัตราการสุ่มที่มากกว่า ตามกฎของไนควิสต์เล็กน้อย โดยให้ผลการทดลองดังที่แสดงไว้ในบทที่ 4

- ส่วนของวงจรขยายสัญญาณ สามารถขยายสัญญาณได้ตั้งแต่ -20dB ถึง 20dB ตลอดช่วงความถี่ 20Hz ถึง 20kHz ตามที่ออกแบบไว้

- ส่วนของวงจรบวกสัญญาณ ได้ทดลองการบวกสัญญาณระหว่างสัญญาณ sine 2 ตัวที่เหมือนกันเข้าด้วยกัน พบว่าให้สัญญาณเอาท์พุทเป็นสัญญาณ sine ที่มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่านั่นเอง

- ส่วนของวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ที่มีการโปรแกรมสมการตัวกรองความถี่ผ่านแบบดิจิทัลลงไปนั้น สามารถเก็บผลการทดลอง และทำการหาผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองไว้ได้ โดยนำมาเทียบกับผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรม MATLAB พบว่ามีความใกล้เคียงกัน และตรงกับที่ออกแบบไว้

- การออกแบบตัวกรองความถี่ผ่านแบบดิจิทัล สามารถให้สมการผลต่าง (Difference equation) ที่แสดงคุณลักษณะของตัวกรองความถี่ผ่านตามที่ต้องการ ได้ทั้ง 10 ย่านความถี่

5.2 ปัญหาที่พบในการทดลอง

จากการทำการทดลอง พบว่ายังมีปัญหาบางอย่างที่ทำให้การทำงานของอีควอไลเซอร์ไม่สมบูรณ์อยู่นั้น คือ ส่วนของวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS-51) ที่มีการโปรแกรมสมการตัวกรองความถี่ผ่านแบบดิจิทัลลงไป ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ ดังนี้

- จากรูปแบบของโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS-51) มีลักษณะของการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของระบบตัวเลข ทำให้ผลการคำนวณออกมายังไม่แม่นยำที่เดียวนัก เนื่องจากความสามารถในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ของ MCS-51 มีค่อนข้างจำกัด

- เนื่องจากความเร็วที่ใช้ในการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS-51) มีค่าไม่สูงนัก ซึ่งความเร็วนี้มีความสัมพันธ์กับอัตราการสุ่มค่าสัญญาณ จึงทำให้ส่งผลต่อช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้อของอีควอไลเซอร์ในโครงการนี้ค่อนข้างแคบ

5.3 แนวทางการแก้ปัญหา

จากปัญหาที่เกิดขึ้นดังที่กล่าวในข้างต้น สามารถแก้ไขได้ โดยวิธีดังต่อไปนี้

- เลือกใช้อุปกรณ์ประมวลผลที่มีความสามารถในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ที่สูงขึ้น เพื่อทำให้เกิดความแม่นยำในการคำนวณ และเลือกอุปกรณ์ที่มีความเร็วในการประมวลผลที่มากขึ้น เพื่อส่งผลกระทบต่อช่วงความถี่ใช้งานที่จะมากขึ้นตามไปด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณพ่อคุณแม่ที่ให้ความสำคัญในการเรียนเสมอมา ขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน ที่ให้คำแนะนำในการทำงานตลอดจนช่วยติดตามตรวจสอบความเรียบร้อย
ของโครงการชิ้นนี้ ขอขอบคุณ คุณปานวิทย์ ชูระนุติ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงานและขอ
ขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงานครั้งนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

- [1] Robert D.Strum , Donald E.Kirk, “First Principles of Discrete Systems ad Ddigital Processing”,
ADDISION-WESLEY PUBLISHING COMPANY.
- [2] พรชัย ภาวรงค์ศักดิ์ , “การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบื้องต้น”
- [3] ดร.สิทธิชัย โภคย์อุดม , วัลลภ สุรพลกำธร, “วงจรรขยายสัญญาณ โอเปอร์เรชั่นแนล”
- [3] Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer ; with John R. Buck, “Discrete-time signal processing”, 2nd
edition, Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, c1999



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้