STEREO ENCODER

โดย

นางสาวอัญชลี	เสนนอก	รหัสนักศึกษา	B5304752
นางสาวเทพรัตน์	สีคำแท้	รหัสนักศึกษา	B5304851
นางสาวศรีนภา	เพชรชาลี	รหัสนักศึกษา	B5307159

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 โครงงานวิศวกรรมโทรคมนาคม

และ 438499 โครงงานวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

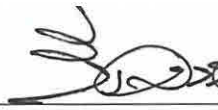
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

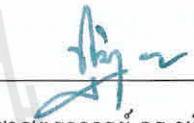
ประจำภาคการศึกษาที่ 3 ปีการศึกษา 2556

STEREO ENCODER

คณะกรรมการสอบโครงงาน



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา)
กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา พรหมมาก)
กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ธนเสฏฐ์ ทศดีกรพัฒน์)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับรายงานโครงงานฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม รายวิชา 427499 โครงงานวิศวกรรมโทรคมนาคม และรายวิชา 438499 โครงงานวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ประจำปีการศึกษา 2556

โครงงาน	STEREO ENCODER		
จัดทำโดย	นางสาวอัญชลี	เสนนอก	รหัส B5304752
	นางสาวเทพรัตน์	สีคำแท้	รหัส B5304851
	นางสาวศรีนภา	เพชรชาลี	รหัส B5307159
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา		
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม		
ภาคการศึกษาที่	3/2556		

บทคัดย่อ

(Abstract)

การส่งวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม จะมีสถานีวิทยุที่ทำการส่งคลื่นวิทยุกระจายเสียงออกไปหลายสถานี และช่วงความถี่ในการส่งสัญญาณวิทยุในประเทศไทย กำหนดการใช้งานอยู่ในช่วงตั้งแต่ 87.75 MHz – 107.75 MHz โดยมีระยะการส่งไม่เกิน 150 กิโลเมตร แต่ปัจจุบันมีการใช้อุปกรณ์ที่ไม่ได้มาตรฐานส่งผลให้ Bandwidth กว้างขึ้น ก่อให้เกิดปัญหาการกวนกันของสัญญาณ ปัญหานี้สามารถแก้ไขโดยการปรับปรุงวงจร Stereo Encoder ซึ่งมีหน้าที่เข้ารหัสสเตอริโอ มีสัญญาณ L+R (L+R Adder) เป็นสัญญาณโมโน และมีสัญญาณ L-R โดยกลับเฟสสัญญาณ R 180 องศา แล้วไปรวมกับ L ได้ L-R นำ L-R ไปผสมคลื่นการมอดูเลตแบบสมดุลย์ (Balance Modulator) กับสัญญาณคลื่นพาหะย่อย 38 kHz แบบ AM 100% โดยกำจัดคลื่นพาหะออก เอาเฉพาะ USB กับ LSB เรียกว่า สัญญาณไซด์แบนด์ L-R และมีสัญญาณ ไพลอต (Pilot Signal) ความถี่ 19 kHz เป็นความถี่ที่มีความสำคัญ ในการส่งและรับ FM Stereo Encoder ถูกส่งออกสองทาง คือส่งเข้าในวงจรรวมสัญญาณทั้งหมด และส่งเข้าวงจรทวีคูณความถี่สองเท่า เป็น 38 kHz (บางวงจรใช้วิธีผลิต 38 kHz ขึ้นมาเป็นพาหะย่อยโดยตรง แล้วหารสองเป็นไพลอต) วงจรรวมสัญญาณทั้งหมด (Adder) จะรับสัญญาณทั้งสาม คือ L+R (Mono), 19 kHz (Pilot Signal) และ ไซด์แบนด์ L-R รวมกันส่งออกเป็นสัญญาณเดียว

ดังนั้นโครงงานนี้จัดทำขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาการกวนกันของสัญญาณวิทยุระบบเอฟเอ็ม ซึ่งเกิดจากเครื่องส่งที่สร้างสัญญาณ Bandwidth ที่เกินมาตรฐาน โดยการสร้าง Stereo Encoder ที่มีมาตรฐานตรงตามทฤษฎี ซึ่งจะเน้นที่กระบวนการออกแบบวงจร เพื่อที่เมื่อนำมาประกอบกับระบบต่างๆ ของเครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็ม จะไม่ทำให้เครื่องส่งสัญญาณวิทยุเอฟเอ็มสร้างสัญญาณ Bandwidth เกินมาตรฐาน

กิตติกรรมประกาศ

(Acknowledgement)

จากการที่คณะจัดทำรายงานได้รับมอบหมายให้ทำโครงงานเรื่อง Stereo Encoder ส่งผลให้คณะจัดทำรายงานได้รับความรู้และประสบการณ์ต่างๆ เกี่ยวกับหลักการทำงานของ Stereo Encoder ออกแบบและสร้างวงจร Stereo Encoder สำหรับใช้ในการส่งวิทยุกระจายเสียงระบบ FM

บัดนี้ โครงงานดังกล่าวพร้อมทั้งรายงานได้สำเร็จลงแล้ว ทั้งนี้ด้วยความร่วมมือและสนับสนุนจากบุคคลต่างๆ ดังนี้

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน)
2. นายปัญญา หันตุลา (นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม)

ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการให้ข้อมูลและเป็นที่ปรึกษาในการทำรายงานฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนให้การดูแลและให้ความเข้าใจเกี่ยวกับพื้นฐานการออกแบบวงจร ซึ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวอัญชลี เสนนอก
นางสาวเทพรัตน์ สีคำแท้
นางสาวศรีนภา เพชรชาลี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญรูปภาพ	จ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการทำงาน	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ	3
2.2 วิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม (FM)	3
2.3 ระบบเสียงสเตอริโอ (Stereo Multiplex)	4
2.4 ทฤษฎีเบื้องต้นของออปแอมป์	8
2.5 วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)	11
2.6 การมอดูเลตแบบสมดุล (Balance Modulator)	12
2.7 Sallen-key Low Pass Filter	12
2.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์PIC เบอร์ PIC16F628A	14
บทที่ 3 การออกแบบวงจร	
3.1 บทนำ	15
3.2 องค์ประกอบและหลักการทำงานของ Stereo Multiplex	15
3.3 การออกแบบวงจร Low Pass Filter แบบ Sallen-key 15 kHz	16
3.4 การออกแบบวงจร Stop Band Filter 19 kHz	19
3.5 การออกแบบวงจร Pre-emphasis	20
3.6 วงจร Balanced Modulator	22
3.7 วงจรสร้างสัญญาณ 19 kHz	23

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.8 วงจรแปลงสัญญาณพัลส์ 19 kHz ให้เป็นสัญญาณไซน์ 19 kHz	24
3.9 การออกแบบวงจร Low Pass Filter แบบ Sallen-key 55 kHz	25
3.10 วงจรรวมของ Stereo Encoder	28
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 บทนำ	30
4.2 ผลการทดสอบวงจร Low Pass Filter	30
4.3 ผลการทดสอบวงจร Stop Band Filter 19 kHz	32
4.4 ผลการทดสอบวงจร Pre-emphasis	34
4.5 ผลการทดสอบความถี่ที่ได้จากวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์	36
4.6 ผลการทดสอบการกรองสัญญาณพัลส์ ด้วย Filter	40
4.7 ผลการทดสอบและปรับสัญญาณเอาต์พุต ของ Balance Modulator	41
4.8 ผลการทดสอบวงจร Stereo Multiplex โดยป้อนสัญญาณ Massage 1 kHz	44
4.9 ผลการทดสอบวงจร Stereo Multiplex โดยป้อนสัญญาณ Color Noise	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปผลการทดลอง	46
5.2 ปัญหาและอุปสรรค์	46
5.3 สิ่งที่ได้รับจากการทำโครงงาน	46
ภาคผนวก	47
ประวัติผู้เขียน	64
บรรณานุกรม	65

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูปภาพ

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 2.1 FM Frequency Modulation	4
รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมการกำเนิดสัญญาณ FM Stereo Multiplex	5
รูปที่ 2.3 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณ FM Stereo Multiplex	6
รูปที่ 2.4 แสดงวงจรภายในของออปแอมป์ เบอร์ 741	8
รูปที่ 2.5 แสดงรูปแบบสัญลักษณ์ของออปแอมป์	9
รูปที่ 2.6 แสดงรูปออปแอมป์ ในอุดมคติ	9
รูปที่ 2.7 แสดงการท างานที่อินพุตด้านเดียว	10
รูปที่ 2.8 แสดงการท างานที่อินพุตสองด้านแบบดิฟเฟอเรนเชียล	10
รูปที่ 2.9 แสดงการท างานที่สองอินพุตแบบคอมมอนโหมด	11
รูปที่ 2.10 วงจรขยายออปแอมป์ แบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)	11
รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมของบาลานซ์มอดูเลเตอร์	12
รูปที่ 2.12 (ก) วงจร Sallen-key Low Pass Filter (ข) ผลการตอบสนองความถี่	13
รูปที่ 2.13 ลักษณะของ Cutoff frequency	13
รูปที่ 2.14 แสดงตำแหน่งขาและรูปร่างของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F628A	14
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมวงจร Stereo Multiplex	15
รูปที่ 3.2 แสดง วงจร Low Pass Filter แบบ Sallen-key	16
รูปที่ 3.3 รูปจำลองวงจร LPF 15 kHz โดยใช้โปรแกรม Schematics	17
รูปที่ 3.4 กราฟแสดง Out put ของ LPF	18
รูปที่ 3.5 จำลองวงจร Stop Band filter 19 kHz	19
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงผล วงจร Stop Band Filter 19 kHz	20
รูปที่ 3.7 แสดง วงจร Pre-emphasis	21
รูปที่ 3.8 กราฟแสดงผลวงจร Pre-emphasis	21
รูปที่ 3.9 วงจร Balanced Modulator	22
รูปที่ 3.10 กราฟสเปคตรัมความถี่ของวงจร Balanced Modulator	22

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 3.11 วงจรสร้างสัญญาณ Pilot 19 kHz	23
รูปที่ 3.12 สัญญาณพัลส์	24
รูปที่ 3.13 วงจรแปลงสัญญาณพัลส์ 19 kHz ให้เป็นสัญญาณไซน์ 19 kHz	24
รูปที่ 3.14 กราฟสเปคตรัมความถี่ สัญญาณ Output	25
รูปที่ 3.15 แสดง วงจร Low Pass Filter แบบ Sallen-key	25
รูปที่ 3.16 รูปจำลองวงจร LPF 55 kHz โดยใช้โปรแกรม Schematics	26
รูปที่ 3.17 กราฟแสดง Out put ของ LPF	27
รูปที่ 3.18 วงจรรวม Stereo Encoder	28
รูปที่ 3.19 ลาย PCB ของวงจร	29
รูปที่ 3.20 วงจร Stereo Encoder	29
รูปที่ 4.1 วงจร Low Pass Filter 15 kHz	30
รูปที่ 4.2 กราฟแสดง Low Pass Filter 15 kHz ของการออกแบบ	31
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการทดสอบ Low Pass Filter ของสัญญาณช่องซ้าย	31
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการทดสอบ Low Pass Filter ของสัญญาณช่องขวา	32
รูปที่ 4.5 วงจร Stop Band Filter 19 kHz	33
รูปที่ 4.6 กราฟแสดง ผลวงจร Stop Band Filter 19 kHz จากโปรแกรมการจำลองผล	33
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการทดสอบวงจร Stop Band Filter 19 kHz	34
รูปที่ 4.8 วงจร Pre-emphasis	35
รูปที่ 4.9 กราฟแสดง Pre-emphasis จากการออกแบบในวงจรการจำลองผล	35
รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบวงจร Pre-emphasis	36
รูปที่ 4.11 วงจร ไมโครคอนโทรลเลอร์	37
รูปที่ 4.12 สัญญาณ 19 kHz	37
รูปที่ 4.13 สัญญาณ 38 kHz	38
รูปที่ 4.14 สัญญาณ 76 kHz	38

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 4.15 สัญญาณ 152 kHz	39
รูปที่ 4.16 สัญญาณ 304 kHz	39
รูปที่ 4.17 กรองสัญญาณด้วย Filter	40
รูปที่ 4.18 สัญญาณ 19 kHz ที่ผ่านวงจรกรองสัญญาณ	40
รูปที่ 4.19 รูปแสดง วงจร Balance Modulator	41
รูปที่ 4.20 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของสัญญาณช่องซ้าย	42
รูปที่ 4.21 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของสัญญาณช่องขวา	42
รูปที่ 4.22 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของสัญญาณ ซ้ายและขวา	43
รูปที่ 4.23 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของสัญญาณ Pilot 19 kHz	43
รูปที่ 4.24 แสดง Spectrum ที่มีสัญญาณ Pilot 19 kHz + Message 1 kHz	44
รูปที่ 4.25 ป้อนสัญญาณ Color Noise ที่วงจร Stereo Multiplex	45

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

เนื่องจากการส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงระบบ FM ในปัจจุบันมีปัจจัยที่ทำให้เกิดการรบกวนกันของสัญญาณ เช่น การใช้อุปกรณ์ในการส่งคลื่นที่ไม่ได้มาตรฐาน ทำให้คลื่นเกิดการฟุ้งกระจาย ส่งผลให้ Bandwidth ที่ส่งกว้างขึ้น เกิดการรบกวนกับสถานีข้างๆ ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขโดยปรับปรุงวงจรภายใน Stereo Encoder โดยมีวงจร Low Pass Filter ที่ Cutoff Frequency 15 kHz วงจร Pre-emphasis เพื่อลดสัญญาณรบกวนก่อนการมอดูเลต และ วงจร Low Pass Filter ที่ Cutoff Frequency 55 kHz เพื่อให้ได้สัญญาณ L+R , สัญญาณ Pilot 19 kHz และสัญญาณ L-R

ดังนั้น โครงงานนี้จึงทำการศึกษาและออกแบบวงจรต่างๆ ภายในวงจร Stereo Encoder ให้มีคุณภาพมากขึ้น โดยการสร้างวงจรที่มีมาตรฐานตรงตามทฤษฎี ซึ่งจะเน้นที่กระบวนการออกแบบวงจรเพื่อนำมาประกอบกับระบบต่างๆ ของเครื่องส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงระบบ FM จะไม่ทำให้เครื่องส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงระบบ FM สร้างสัญญาณ Bandwidth ที่เกินมาตรฐาน

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Stereo Encoder
2. เพื่อออกแบบและสร้างวงจร Stereo Encoder สำหรับใช้ในการส่งวิทยุกระจายเสียงระบบ FM

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.3 ขอบเขตการทำงาน

สามารถออกแบบวงจร Stereo Encoder เพื่อให้ได้ผลเป็นไปตามทฤษฎี

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาหลักการทำงานของ Stereo Encoder
2. ออกแบบวงจร Stereo Encoder
3. สร้างวงจร Stereo Encoder
4. ทดสอบวงจร Stereo Encoder
5. เขียนรายงานและจัดทำสื่อเพื่อเตรียมเสนอโครงงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้อุปกรณ์ Stereo Encoder สำหรับวิทยุกระจายเสียงระบบ FM
2. สามารถทำงานเป็นทีมได้
3. สามารถนำความรู้ที่ได้จากการทำชิ้นงานไปประกอบอาชีพสุจริตได้

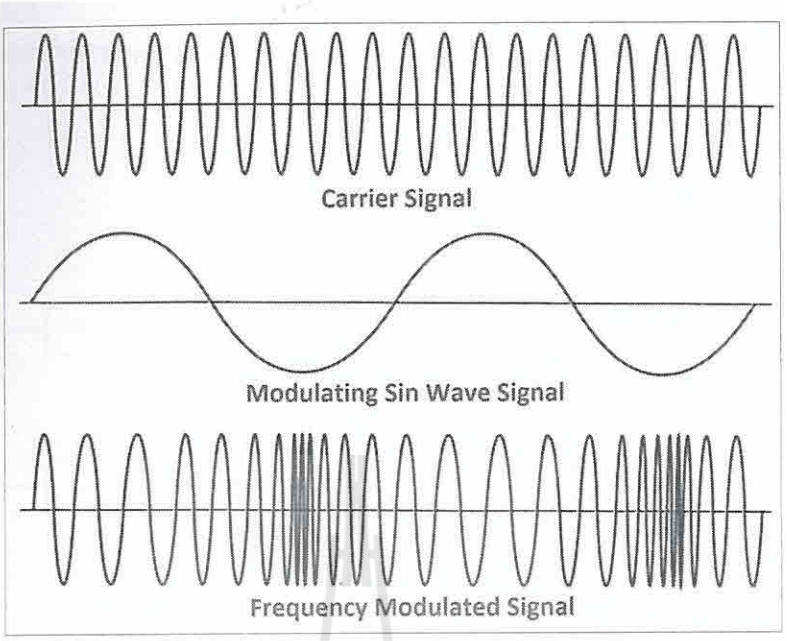
บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวิทยุกระจายเสียงระบบ FM กับหลักการทำงานของ Stereo Encoder ทฤษฎีเบื้องต้นของออปแอมป์การมอดูเลตแบบสมดุลย์ (Balance Modulator) วงจรกรองความถี่ Sallen-key Low Pass Filter และไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC เบอร์ PIC16F628A

2.2 วิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม (FM)

เป็นการผสมคลื่นทางความถี่ (Frequency Modulation) คลื่นวิทยุที่ผสมคลื่นเสียงแล้ว จะมีความถี่ไม่สม่ำเสมอเปลี่ยนแปลงไปตามคลื่นเสียง แต่ความสูงของคลื่นยังคงเดิม วิทยุ FM ส่งด้วยความถี่ 88-108 MHz ในประเทศไทยมีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม (FM) อยู่หลายสถานีซึ่งกระจายอยู่ตามจังหวัดต่างๆ ทั่วประเทศ ให้คุณภาพเสียงดีเยี่ยม ไม่เกิดสัญญาณรบกวนจากสภาพอากาศแปรปรวนแต่ส่งได้ในระยะประมาณไม่เกินประมาณ 150 กิโลเมตร ปัจจุบันนิยมส่งในแบบสเตอริโอที่เรียกว่าระบบ FM Stereo Multiplex ซึ่งเครื่องรับวิทยุสามารถแยกสัญญาณออกเป็น 2 ข้างสัญญาณสำหรับลำโพงด้านซ้ายและสัญญาณสำหรับลำโพงขวาการส่งวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟ-เอ็มสเตอริโอมัลติเพล็กซ์ (FM Stereo Multiplex) เป็นระบบที่คิดค้นหลังจากระบบกระจายเสียงอื่นๆ การส่งกระจายเสียงเกิดขึ้นหลังจากมีการส่งโทรทัศน์เสียอีกเมื่อประมาณ พ.ศ.2460 ซึ่งเป็นเวลาที่ใกล้เคียงกับที่มีการส่งกระจายเสียงระบบ AM นายอาร์มสตรองได้คิดค้นการกระจายเสียงระบบ FM ขึ้นเป็นผลสำเร็จต่อมาราว พ.ศ.2490 ได้มีผู้พยายามส่งกระจายเสียงระบบสเตอริโอในหลายประเทศมีการทดลองส่งกระจายเสียงแบบสเตอริโอ โดยใช้ความถี่ 2 ความถี่ในการส่งโดยใช้ความถี่หนึ่งส่งกระจายเสียงสัญญาณซีกขวาอีกความถี่หนึ่งมีการส่งหลายความถี่ทางผู้ฟังก็ต้องใช้เครื่องรับหลายเครื่องตามไปด้วย



รูปที่ 2.1 FM Frequency Modulation

และได้มีการคิดค้นการส่งกระจายเสียงระบบสเตอริโอ โดยใช้ความถี่เดียวในการส่งขึ้น โดยอาร์มสตรองและคณะอาจารย์ของมหาวิทยาลัยโคลัมเบียแห่งสหรัฐอเมริกาเป็นผู้เริ่มต้นที่สโมสรวิทยุสหรัฐอเมริกา (Radio Club of America) เรียกระบบนี้ว่าสเตอริโอ

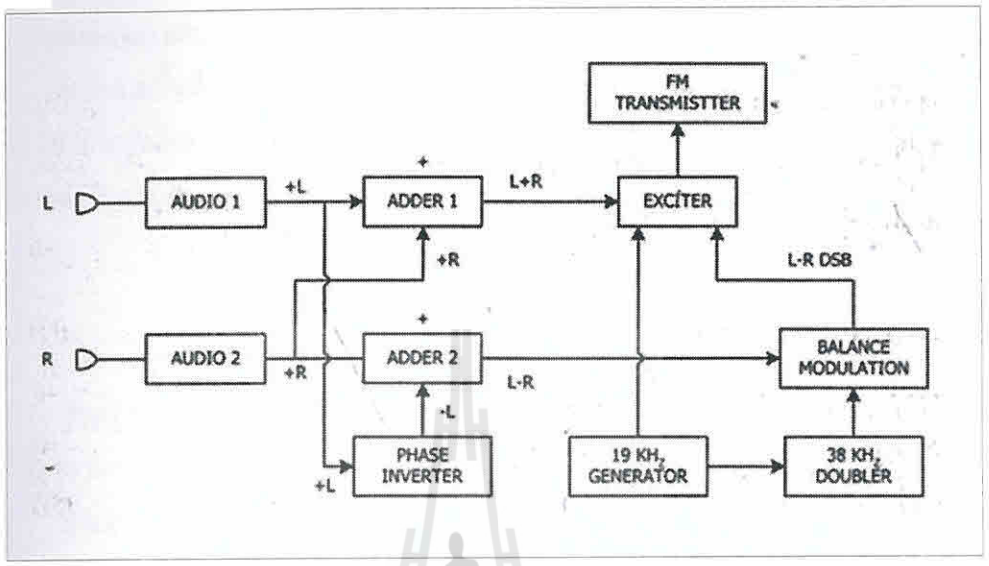
2.3 ระบบเสียงสเตอริโอ (Stereo Multiplex)

Stereo หมายถึง ระบบที่สามารถแยกทิศทางของเสียงได้ เป็นการจำลองมิติให้คล้ายกับการฟังจากของจริง เมื่อเราฟังดนตรีจากระบบสเตอริโอ 2 ทิศทาง (2 Channel) จะสามารถแยกตำแหน่งของเครื่องดนตรีได้ว่าเสียงของเครื่องดนตรีชิ้นนั้นๆ มาจากทิศทางใด

Multiplex หมายถึง การส่งสัญญาณหลายๆ สัญญาณรวมกันมา เป็นการผสมสัญญาณต่างๆ ลงบนคลื่นพาห์อันเดียวกัน แล้วส่งไป พอถึงปลายทางด้านเครื่องรับก็ใช้วิธีการแยกสัญญาณต่างๆ ออกมาตามต้องการ

ดังนั้น ระบบเสียงสเตอริโอ (Stereo Multiplex) หมายถึง การนำสัญญาณเสียงซีกซ้าย (L) และสัญญาณเสียงซีกขวา (R) มารวมกันกับคลื่นพาห์ส่งกระจายคลื่นไปยังเครื่องรับ ทางเครื่องรับจะมีขบวนการแยกเอาสัญญาณ L และ R ออกมาจากคลื่นพาห์อีกครั้ง

2.3.1 หลักการทำงานของ FM Stereo Multiplex



รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมการกำเนิดสัญญาณ FM Stereo Multiplex

ในปัจจุบันการส่งสัญญาณวิทยุในระบบ FM Stereo Multiplex ซึ่งเป็นการส่งสัญญาณแบบ 2 ทิศทาง โดยแยกการส่งสัญญาณช่องซ้าย (L) และช่องขวา (R) จะมีความแตกต่างจากการส่งสัญญาณในอดีต ที่เป็นการส่งสัญญาณเพียงช่องเดียวเท่านั้น และการทำงานของระบบ FM Stereo Multiplex จะอธิบายตามรูปที่ 2.2 มีดังนี้

เริ่มต้นจากช่องสัญญาณด้านซ้าย (L) และช่องสัญญาณด้านขวา (R) แล้วนำสัญญาณมารวมกันได้เป็นสัญญาณ (L +R) สัญญาณที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังภาคมัลติเพล็กซ์ เพื่อเตรียมรวมกับสัญญาณอื่นๆ

สัญญาณส่วนที่สองช่องสัญญาณด้านขวา (R) จะถูกส่งไปที่ภาคอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เพื่อกลับเฟสสัญญาณ (R) ไปจากเดิม 0 องศาให้เป็น 180 องศา จะได้สัญญาณ (- R) ส่งไปรวมกับสัญญาณที่มาจากภาคขยายเสียง (L) สัญญาณที่รวมกันนี้จะกลายเป็นสัญญาณ (L - R) ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังภาคการมอดูเลตแบบสมดุลย์ (Balanced Modulator) เพื่อมอดูเลตกับคลื่นพาห์ย่อย 38 kHz จะทำให้สัญญาณ (L-R) ย้ายตำแหน่งจาก 0 kHz ไปอยู่ที่ 38 kHz

คลื่นพาห์ย่อย (Subcarrier) 38 kHz นั้นได้มาจากความถี่คลื่นไซน์ 19 kHz จากภาคออสซิลเลเตอร์ซึ่งถูกส่งเข้ามาทวีคูณความถี่ขึ้นอีกสองเท่า (19 kHz x 2 = 38 kHz) ที่ภาคทวีคูณความถี่สองเท่า (Frequency Doublers) ความถี่ 38 kHz ที่ได้นี้จะถูกใช้เป็นคลื่นพาห์ย่อยเพื่อส่งไป

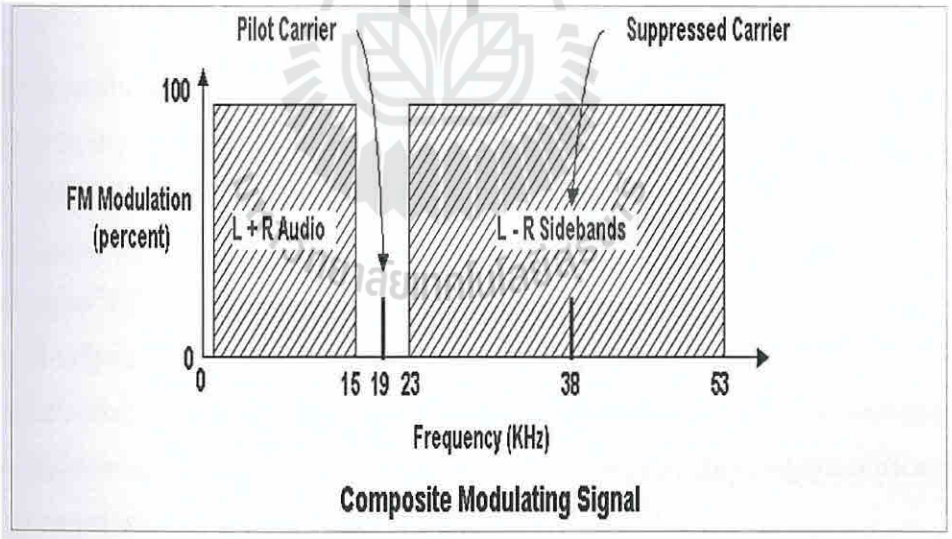
มอดูเลตกับสัญญาณเสียง (L - R) ที่ภาค Balanced Modulator เรียกสัญญาณที่มอดูเลตรวมกันระหว่างสัญญาณคลื่นพาห์ย่อย 38 kHz และสัญญาณเสียง (L - R) นี้ว่าสัญญาณคลื่นพาห์ย่อย L - R (L - R subcarrier) และสัญญาณนี้จะถูกส่งไปเพื่อมัลติเพล็กซ์รวมกันกับสัญญาณอื่นๆ

นอกจากนี้แล้วภาคออสซิลเลเตอร์ยังแยกส่งความถี่ 19 kHz สำหรับเป็นสัญญาณไพลอตโทนไปยังภาคมัลติเพล็กซ์เพื่อมัลติเพล็กซ์สัญญาณ 19 kHz รวมไปกับสัญญาณอื่นๆ อีกด้วยจะเห็นว่าที่ภาคมัลติเพล็กซ์จะเป็นที่รวมของสัญญาณต่างๆ คือ

1. สัญญาณเสียง (L + R)
2. สัญญาณ (L – R) subcarrier จากภาค Balanced Modulator
3. สัญญาณไพลอตโทน 19 kHz จากภาคออสซิลเลเตอร์

สัญญาณทั้งสามนี้สามารถมัลติเพล็กซ์รวมเข้าด้วยกันได้ โดยไม่มีการแทรกแซงสัญญาณต่อกัน เพราะแต่ละสัญญาณมีขอบเขตความถี่ที่ต่างกันนั่นเอง

สัญญาณรวมมัลติเพล็กซ์จะถูกส่งไปมอดูเลตกับคลื่นพาห์ที่ใช้ในการส่งออกอากาศในระบบ FM ในภาคส่งนี้ก็เหมือนกับเครื่องส่ง FM ธรรมดาทั่วไปที่ใช้ส่งในย่านความถี่กระจายเสียง 88 MHz - 108 MHz



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณ FM Stereo Multiplex

2.3.2 การแยกสัญญาณที่ภาครับ (Demultiplexing)

1. สัญญาณ (L + R) สัญญาณนี้เป็นผลรวมของสัญญาณเสียงซีกซ้ายและซีกขวา เป็นสัญญาณเสียงแบบโมโน ที่ต้องส่งสัญญาณนี้ไปด้วยก็เพื่อใช้สำหรับการรับรองเครื่องรับ FM ธรรมดาให้รับฟังจากสถานีที่ส่งในระบบ FM Stereo Multiplex ได้ เครื่องรับ FM ปกติจะรับเอาเฉพาะสัญญาณนี้ไปเป็นสัญญาณเสียงออกสู่ลำโพง เสียงที่ได้จะมีครบทั้งสัญญาณซีกซ้ายและขวารวมกัน ไม่มีการแยกทิศทางของเสียง และคุณภาพเสียงจะเหมือนกับการรับฟังจากสถานีวิทยุ FM ธรรมดาทั่วไป

2. สัญญาณคลื่นพาห์ย่อย (L – R) ที่ต้องเอาสัญญาณ (L – R) ไปมอดูเลตกับคลื่นพาห์ย่อย 38 kHz ก่อน ก็เพราะเราต้องการส่งสัญญาณ (L – R) รวมกันไปพร้อมๆ กับสัญญาณ (L + R) โดยไม่ต้องการให้สัญญาณทั้งสองมีการแทรกแซงกัน

เราสามารถนำเอาสัญญาณเสียง (L – R) และ (L + R) ที่ส่งไป มาแปลงสภาพให้แยกเป็นสัญญาณเสียงซีกซ้ายและขวา (L และ R) ปรากฏทางด้านเครื่องรับไว้ โดยการนำสัญญาณทั้งสองมาบวกหรือลบกันซึ่งแสดงได้ด้วยพีชคณิตดังนี้

เมื่อนำสัญญาณ (L + R) และ (L – R) มาบวกกันจะได้สัญญาณเสียงซีกซ้าย = 2L

เมื่อนำสัญญาณ (L + R) และ (L – R) มาลบกันจะได้สัญญาณเสียงซีกขวา = 2R

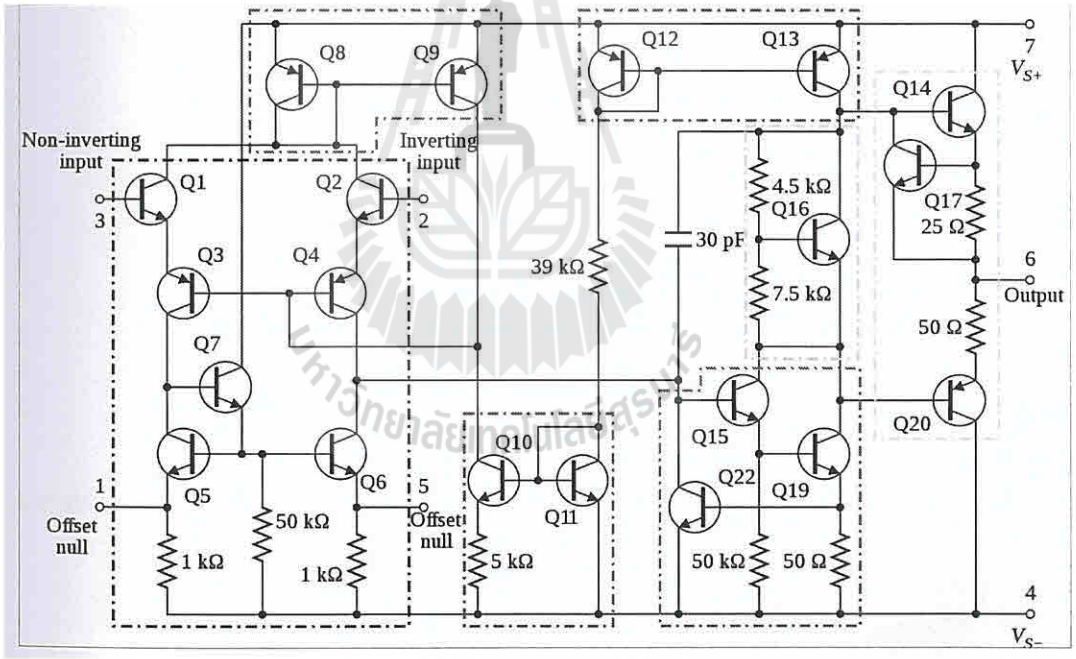
3. สัญญาณไพลอตโทน 19 kHz เนื่องจากสัญญาณเสียง (L–R) ที่ส่งมายังเครื่องรับเป็นสัญญาณเสียงที่มอดูเลตมากับคลื่นพาห์ย่อย 38 kHz ฉะนั้นในการนำมาเสริมหรือหักล้างกับสัญญาณ (L+R) ในวงจรแยกสัญญาณสเตอริโอ (วงจรถอดรหัส: Decoder) เพื่อทำให้เกิดเป็นสัญญาณเสียงซีกซ้ายและขวาขึ้นนั้น จำเป็นต้องมีสัญญาณ 38 kHz ที่มีเฟสสัมพันธ์กัน (Synchronize) กับคลื่นพาห์ย่อยที่มอดูเลตมากับสัญญาณ (L - R) เพื่อช่วยให้วงจรถอดรหัสทำงานแยกสัญญาณได้จึงต้องมีการส่งสัญญาณไพลอตโทน 19 kHz มาด้วย เพราะความถี่ 19 kHz เมื่อมาถึงเครื่องรับก็สามารถทำให้เป็นความถี่ 38 kHz ได้โดยง่าย ด้วยการใช้วงจรทวีคูณความถี่ขึ้นมาอีกสองเท่า และเนื่องจากความถี่ 19 kHz ซึ่งเป็นสัญญาณไพลอตโทนนี้เป็นต้นกำเนิดของสัญญาณคลื่นพาห์ย่อยทางด้านเครื่องส่งความถี่ 38 kHz ที่ได้จึงมีเฟสที่สัมพันธ์กับสัญญาณคลื่นพาห์ย่อย (L – R) ตลอดเวลา

2.4 ทฤษฎีเบื้องต้นของออปแอมป์

Op - A_{mp} (Operational Amplifier IC) คืออุปกรณ์ที่มีอินพุทเป็นการขยายแบบดิฟเฟอเรนเชียลและมีเอาท์พุทเดียวซึ่งมีอัตราการขยายสูง

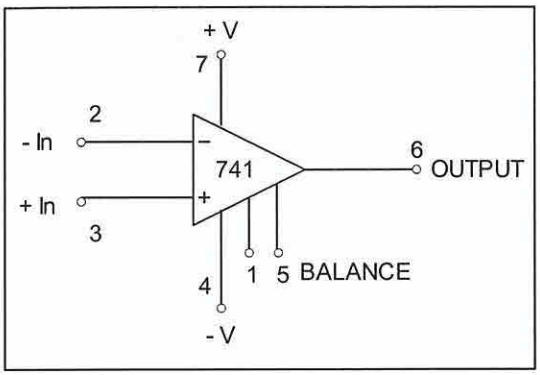
2.4.1 โครงสร้าง และสัญลักษณ์

1.โครงสร้างภายในของออปแอมป์ จะประกอบด้วยวงจรขยายความแตกต่างและวงจรขยาย ซึ่งออปแอมป์ในปัจจุบัน จะอยู่ในรูปแบบของ IC โดยได้มีการพัฒนาส่วนที่สำคัญ คือ มีการนำ FET มาแทน Bipolar Transistor โดยนำ JFET มาเป็นส่วนอินพุต ทำให้กินกระแสน้อย MOSFET มาเป็นส่วนเอ้าต์พุต ทำให้มีการทำงานได้เร็วขึ้น และใช้งานที่ความถี่สูงขึ้นกว่าเดิม สามารถสร้างออปแอมป์ 2 ตัว และ 4 ตัว ในตัวถังเดียวกัน เช่น OP amp เบอร์ 741 ประกอบด้วย ทรานซิสเตอร์ 17 ตัว ตัวต้านทาน 12 ตัว ตัวเก็บประจุ 1 ตัวและไดโอด 4 ตัว แสดงดังรูปที่ 2.6



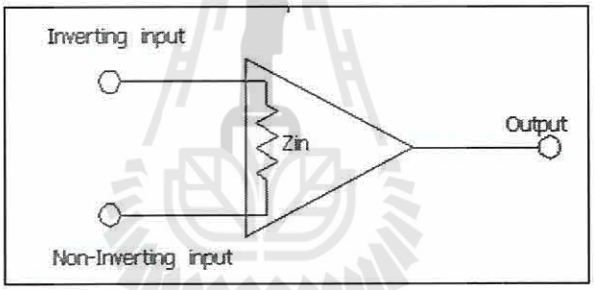
รูปที่ 2.4 แสดงวงจรภายในของออปแอมป์เบอร์ 741

2. สัญลักษณ์ จะใช้รูปสามเหลี่ยมมีขาสำหรับต่ออุปกรณ์ภายนอก ดังรูปที่ 2.5 รูปสามเหลี่ยมแสดงถึงการขยายและทิศทางการไหลของสัญญาณ ส่วนชื่อขาของออปแอมป์ได้แสดงเปรียบเทียบกับจุดต่อกับวงจรภายใน



รูปที่ 2.5 แสดงรูปแบบสัญลักษณ์ของออปแอมป์

2.4.2 คุณสมบัติของ OP-AMP



รูปที่ 2.6แสดงรูปออปแอมป์ในอุดมคติ

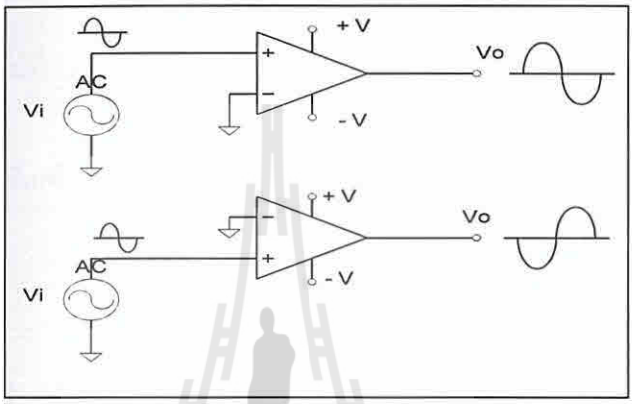
จาก Block diagramของ OP-AMP มีคุณสมบัติตามอุดมคติ (Ideal) ดังต่อไปนี้

1. มีอัตราการขยายโวลท์เตทสูงมาก (A) (Infinite voltage amplification A)
2. มีค่าอินพุทอิมพีแดนซ์สูงมาก Z_{in} (Infinite input impedance Z_{in})
3. มีค่าเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ต่ำมาก Z_{out} (Zero output (Source) impedance)
4. มีแบนวิดกว้าง (ต่อการขยาย) (Infinite bandwidth)
5. มีอัตราการขยายโวลท์เตททางด้านบวกและทางด้านลบเท่ากัน

2.4.3 การทำงานของออปแอมป์

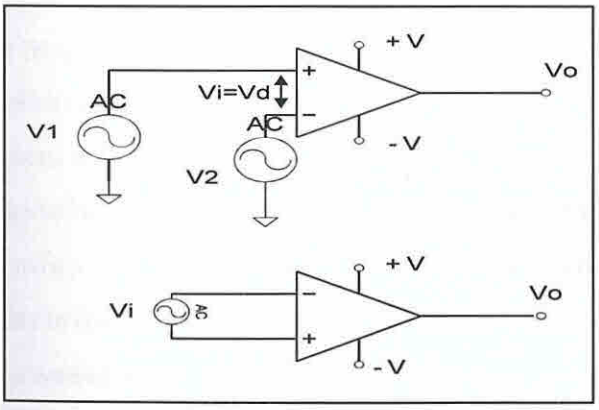
การทำงานของออปแอมป์สามารถแบ่งได้ตามลักษณะการทำงานได้ 2 ลักษณะคือ ลักษณะการทำงานที่อินพุตเดียวและการทำงานที่สองอินพุต

1. การทำงานที่อินพุตเดียว (Single Ended Input) คือการป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วใดขั้วหนึ่ง ส่วนขั้วที่เหลือต่อลงกราวด์ ดังรูปต่อไปนี้

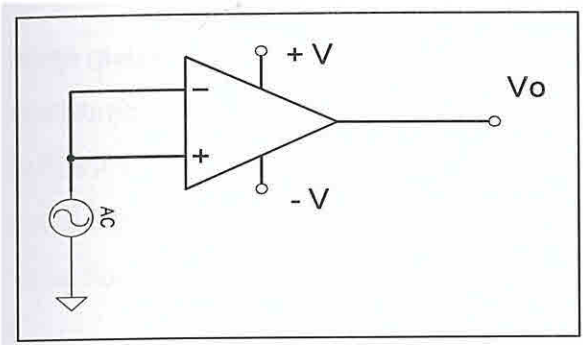


รูปที่ 2.7 แสดงการทำงานที่อินพุตด้านเดียว

2. การทำงานที่อินพุตสองด้าน (Double Ended Input) คือการป้อนสัญญาณอินพุตทั้งสองด้าน ซึ่งแบ่งออกเป็นสองแบบคือ แบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential) ที่มีการป้อนสัญญาณอินพุตสองสัญญาณที่เป็นอิสระต่อกันให้กับขั้วอินพุตทั้งสอง และแบบคอมมอนโหมด (Common Mode) ที่มีการป้อนสัญญาณอินพุตร่วมให้กับขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์ ดังรูป

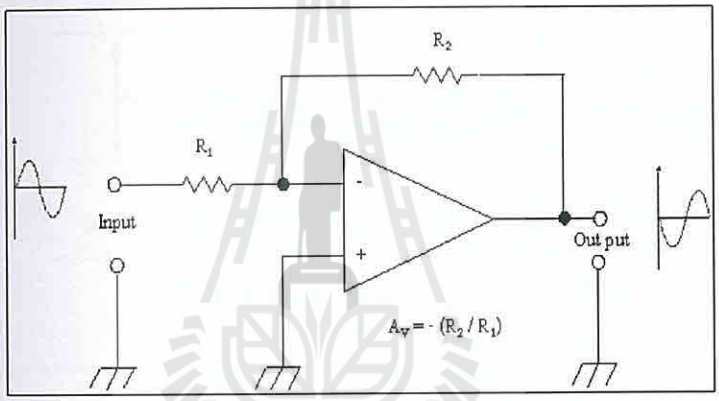


รูปที่ 2.8 แสดงการทำงานที่อินพุตสองด้านแบบดิฟเฟอเรนเชียล



รูปที่ 2.9 แสดงการทำงานที่สองอินพุตแบบคอมมอนโหมด

2.5 วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)



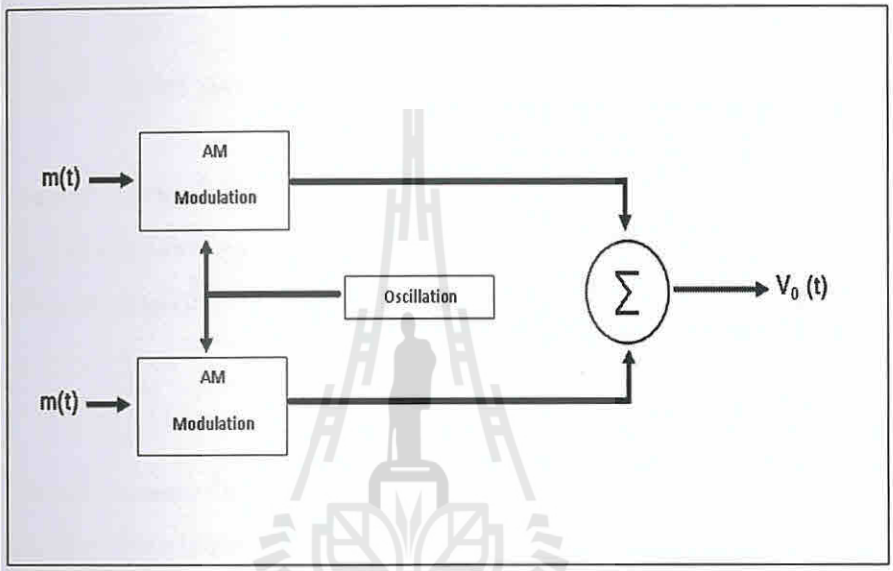
รูปที่ 2.10 วงจรขยายออปแอมป์แบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

ในวงจรขยายออปแอมป์นั้นสามารถที่จะกำหนดอัตราการขยายของวงจรได้โดยการใช้วงจรเนกาทีฟฟีดแบ็ค (Negative Feedback) เมื่อเราป้อนสัญญาณเข้าทางขากลับเฟส (ขา -) แรงดันด้านทางออกจะมีมุมเฟสต่างไปจากแรงดันทางเข้า 180 องศา ซึ่งมีลักษณะตรงข้าม สัญญาณตรงกันข้ามนี้จะถูกป้อนกลับผ่าน R_2 เข้ามายังขาอินเวอร์ติ้งอีกครั้งหนึ่ง ตรงจุดนี้จะทำให้สัญญาณเกิดการหักล้างกันอัตราการขยายก็จะลดลง ถ้าตัวต้านทานที่เป็นตัวป้อนกลับมีค่ามาก จะทำให้สัญญาณป้อนกลับมีขนาดเล็กอัตราการขยายออกจึงสูง ถ้าตัวต้านทานที่ป้อนกลับมีค่าน้อยสัญญาณป้อนกลับไปได้มากอัตราการขยายก็จะลดลง ฉะนั้นอัตราส่วนของความต้านทาน R_1 และ R_2 จะเป็นตัวกำหนดอัตราการขยายของวงจรโดยไม่ขึ้นกับอัตราการขยายของออปแอมป์ ซึ่งสามารถหาอัตราการขยายแรงดันได้จากสูตร

$$A_V = -\frac{R_2}{R_1} \quad \text{..... (2.1)}$$

2.6 การมอดูเลตแบบสมดุล (Balance Modulator)

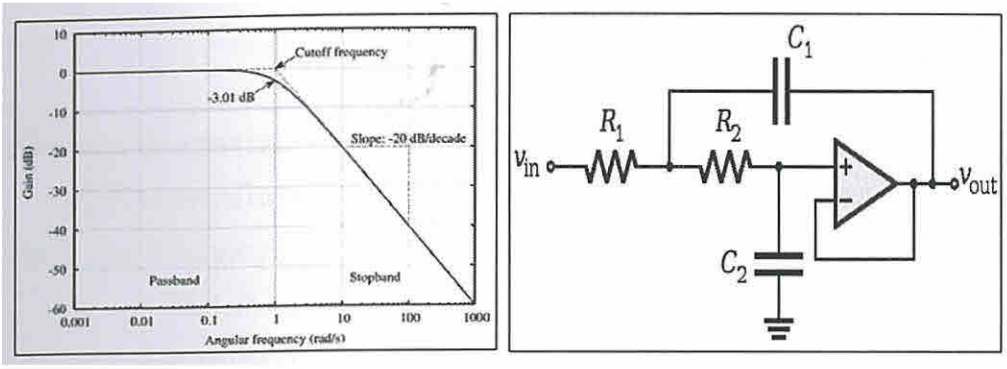
การมอดูเลตแบบสมดุล เป็นการนำวงจรมอดูเลต 2 ชุดมาประกอบกันโดยใช้คลื่นพาห์เดียวกันสัญญาณข้อมูลที่ป้อนเข้าวงจรแต่ละส่วนจะกลับเฟสกันเมื่อนำสัญญาณมาต่อรวมกันจะทำให้คลื่นพาห์หักล้างกันไปสัญญาณที่ได้จะไม่มีคลื่นพาห์เหลืออยู่ ความสามารถในการหักล้างคลื่นพาห์นี้เรียกว่า Carrier Suppression ratio คิดจากอัตราส่วนของคลื่นพาห์ที่เหลืออยู่หลังตัดกับคลื่นพาห์ก่อนการตัด



รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมของบาลานซ์มอดูเลเตอร์

2.7 Sallen-key Low Pass Filter

วงจรกรองความถี่ต่ำจะยอมให้ความถี่ผ่านได้ในช่วงตั้งแต่สัญญาณที่เป็นแรงดัน DC ไปจนถึงความถี่คัตออฟ (Cutoff Frequency) แทนด้วยเครื่องหมาย f_c ความถี่คัตออฟ คือความถี่ ณ ขณะที่อัตราขยายของวงจรมีค่าลดลงเป็น 0.707 เท่าของอัตราขยายปกติ (-3 dB) บางครั้งอาจเรียกความถี่นี้ได้ว่า ความถี่มุม (Corner Frequency) ถ้ามีความถี่ที่สูงเกิน f_c ผ่านวงจรจะลดทอนขนาดความถี่นั้นจนมีค่าน้อยมากๆ จากในรูปเส้นประแสดงถึงผลในทางอุดมคติ ส่วนเส้นทึบแสดงถึงผลของวงจรในทางความเป็นจริง ในช่วงที่ยอมให้ความถี่ผ่านได้เราเรียกว่า ช่วงผ่าน (Pass Band) และช่วงที่ไม่ยอมให้ความถี่ผ่านเรียกว่า ช่วงลดทอน (Stop band) ดังรูปภาพที่ 2.12



(ก) (ข)

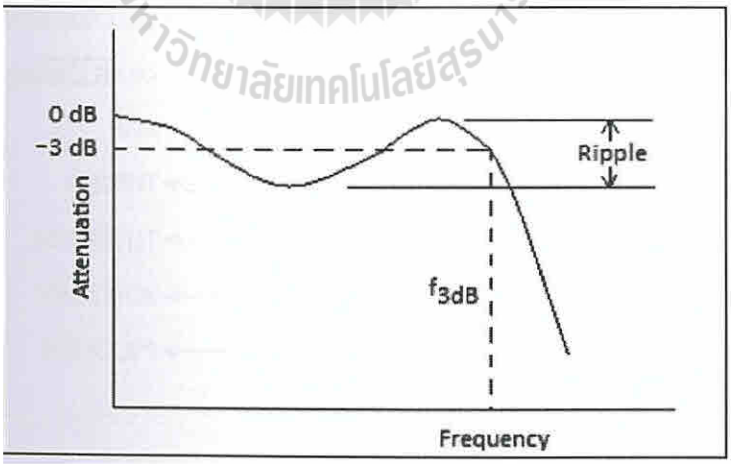
รูปที่ 2.12 (ก) วงจร Sallen-key Low Pass Filter (ข) ผลการตอบสนองความถี่

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านลำดับที่สอง สามารถสร้างได้ง่ายโดยใช้ออปแอมป์เพียงตัวเดียว ดังรูปที่ 2.5 สำหรับวงจรนี้ความถี่ตัด (Cutoff frequency, f_c) จะสามารถคำนวณหาค่า R_1, R_2, C_1 และ C_2 ได้จากสมการดังนี้

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad \text{..... (2.2)}$$

Cutoff frequency คือ ความถี่ความแรกสุดที่อยู่ในแถบตัดความถี่ซึ่งจะถูกกำหนดไว้ในช่วงการส่งผ่านที่มีค่าของการลดทอน (Attenuation) เท่ากับ -3dB การลดทอนคืออัตราการลดลงของสัญญาณมีค่าเท่ากับ $20 \log \frac{V_o}{V_i}$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

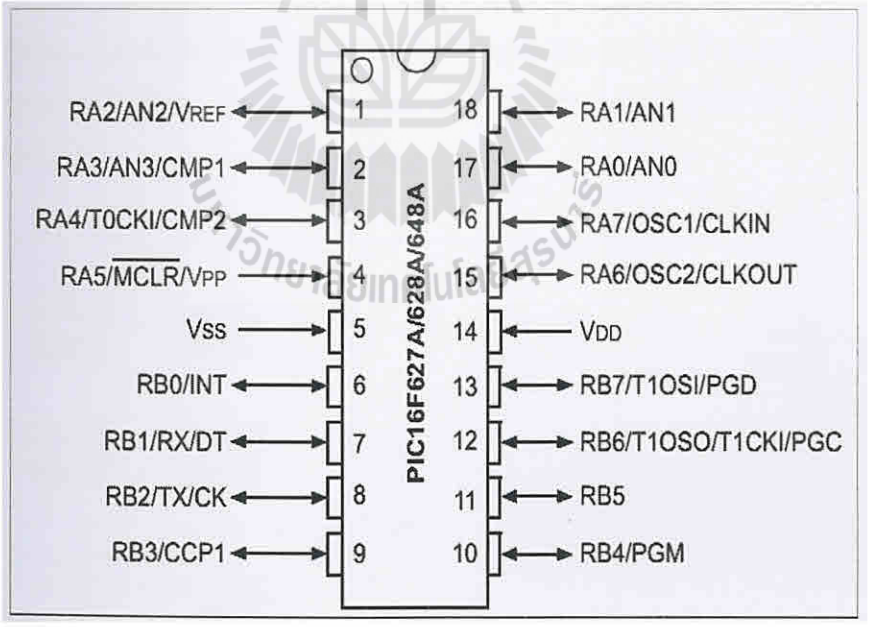


รูปที่ 2.13 ลักษณะของ Cutoff frequency

2.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์PIC เบอร์ PIC16F628A

เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ราคาไม่แพง ใช้งานง่าย โดยมีตำแหน่งขาและรูปร่างของ PIC 16F628A แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.14 และมีคุณสมบัติการทำงานดังนี้

- ใช้แรงดันในการทำงานที่ความถี่ 2.0 โวลต์ ถึง 5.5 โวลต์
- ทำงานที่ความเร็ว 0.20 MHz
- สามารถโปรแกรมได้ง่ายโดยใช้เทคนิค In-Circuit Programming
- มีระบบป้องกันการคัดลอกข้อมูล
- ขนาดเนื้อที่เก็บข้อมูล 1.75 kbyte สามารถเขียนและลบได้ 100000 ครั้ง เก็บข้อมูลได้นาน 40 ปี
- ขนาดหน่วยความจำภายในแบบ SRAM 224 byte
- ขนาดหน่วยความจำภายในแบบ EEPROM 128 byte สามารถเขียนและลบได้ 100000 ครั้ง เก็บข้อมูลได้นาน 40 ปี
- จำนวนขาที่สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้ (I/O) 16 ช่อง
- ราคาไม่สูงเหมาะกับงานที่มีขนาดไม่ใหญ่



รูปที่ 2.14 แสดงตำแหน่งขาและรูปร่างของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F628A

บทที่ 3

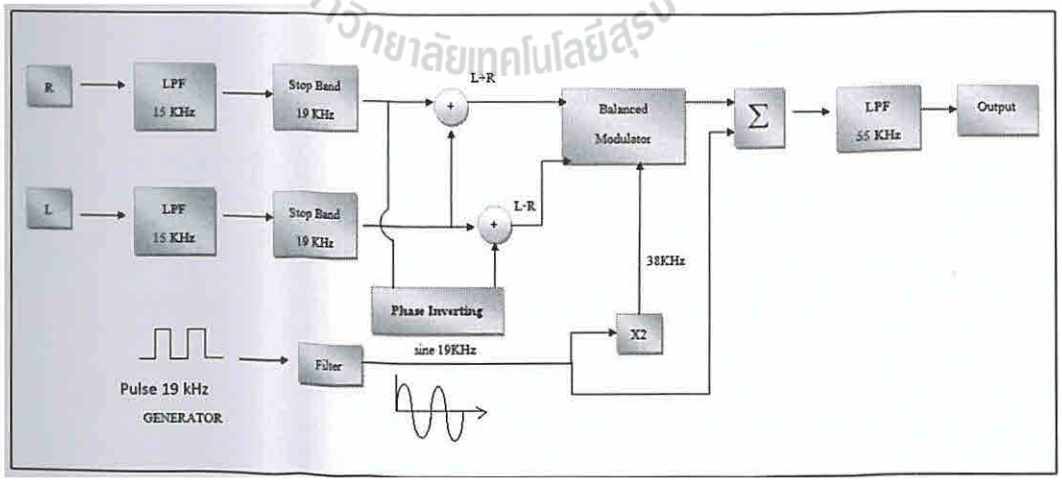
การออกแบบวงจร

3.1 บทนำ

วงจร Stereo Multiplex ประกอบด้วยส่วนสำคัญต่างๆ ได้แก่ 1. Low Pass Filter สำหรับกรองสัญญาณ 2. Phase inverter สำหรับกลับเฟสของสัญญาณ 3. Balanced Modulator เพื่อมอดูเลตสัญญาณ L-R กับคลื่นพาห์ 38 kHz และ Generator เพื่อสร้างสัญญาณ Pilot 19 kHz แก่วงจร ดังนั้นโครงงานนี้เราจึงออกแบบวงจร Stereo Multiplex ตามส่วนการทำงานต่างๆ ที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

3.2 องค์ประกอบและหลักการทำงานของ Stereo Multiplex

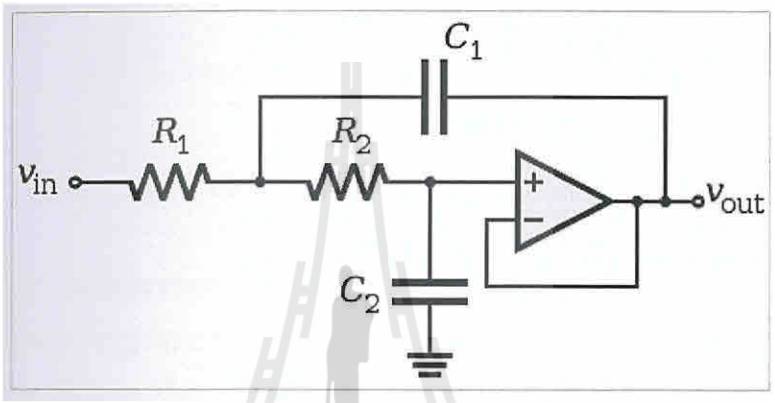
หลักการทำงานของ Stereo Multiplex จะเริ่มจากสัญญาณเสียงด้านซ้ายและขวา จะถูกส่งเข้าวงจร Low Pass Filter กรองความถี่ให้ไม่เกิน 15 kHz ก่อนที่จะเข้าวงจร Stop Band ต่อจากนั้นสัญญาณ L และ R จะไปรวมกัน ได้สัญญาณ L+R และ สัญญาณ R จะถูกส่งไปยังวงจร Phase inverter เพื่อกลับเฟส ทำให้ได้สัญญาณ L-R จากนั้น สัญญาณ L+R และ L-R จะถูกส่งไปยังวงจร Balanced Modulator และที่ภาค Generator จะสร้างสัญญาณ Pilot 19 kHz ซึ่งจะถูกนำมารวมกับทั้งสองสัญญาณก่อนส่งเข้า Low Pass Filter กรองความถี่ให้ไม่เกิน 55 kHz จึงจะได้สัญญาณ Out put ออกมา ซึ่งจะแสดงดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมวงจร Stereo Multiplex

3.3 การออกแบบวงจร Low Pass Filter แบบ Sallen-key 15 kHz

โดยทั่วไปแล้วสัญญาณ Audio ก่อนที่จะเข้าเครื่องส่งวิทยุความถี่ต้องไม่เกิน 15 kHz ซึ่งถ้าหากเกิน 15 kHz จะทำให้ความถี่ ส่วนที่เกินไปรบกวนกับสัญญาณ Pilot (19 kHz) และเมื่อ ความถี่ 19 kHz ถูกกวน เครื่องรับจะไม่สามารถรับสัญญาณ Stereo ได้ ดังนั้น เราต้องมีการออกแบบ Low Pass Filter เพื่อกรองความถี่ ก่อนมีการส่งเข้าวงจร Balanced Modulator ต่อไป โดยการออกแบบ Low Pass Filter เราจะออกแบบ เป็นแบบ Sallen-key กำหนดให้ Cutoff frequency เท่ากับ 15 kHz



รูปที่ 3.2 แสดง วงจร Low Pass Filter แบบ Sallen-key

จากรูปที่ 3.2 ในวงจรนี้เราจะออกแบบ Sallen-key ที่มี Cutoff Frequency โดยการคำนวณค่าความต้านทาน และ ค่าตัวเก็บประจุ ตามสมการที่ 3.1 ได้ดังนี้

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad \text{.....(3.1)}$$

จากการคำนวณ $$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$R_1 = 7.4\ \text{k}\Omega$

$R_2 = 7.4\ \text{k}\Omega$

$C_1 = 2\ \text{nF}$

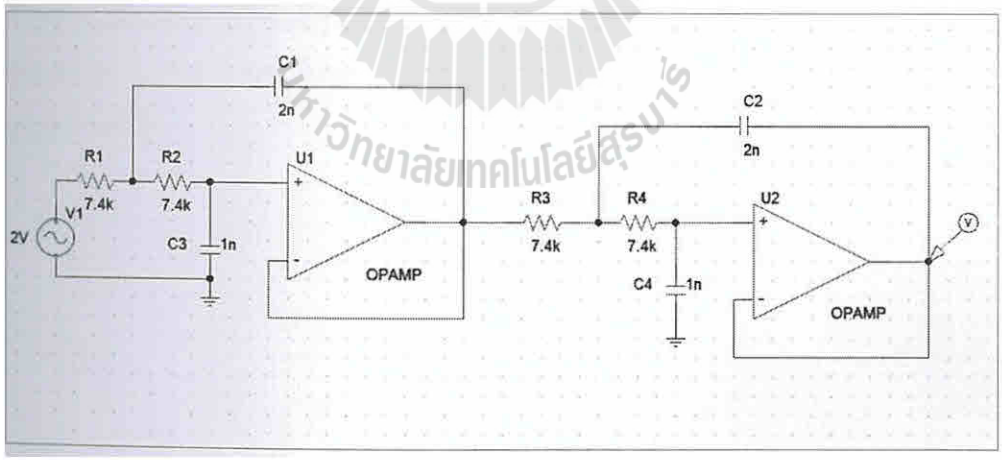
$C_2 = 1\ \text{nF}$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{(7.4\text{k}\Omega)(7.4\text{k}\Omega)(2\text{nF})(1\text{nF})}}$$

$$f_c = 15.20\ \text{kHz}$$

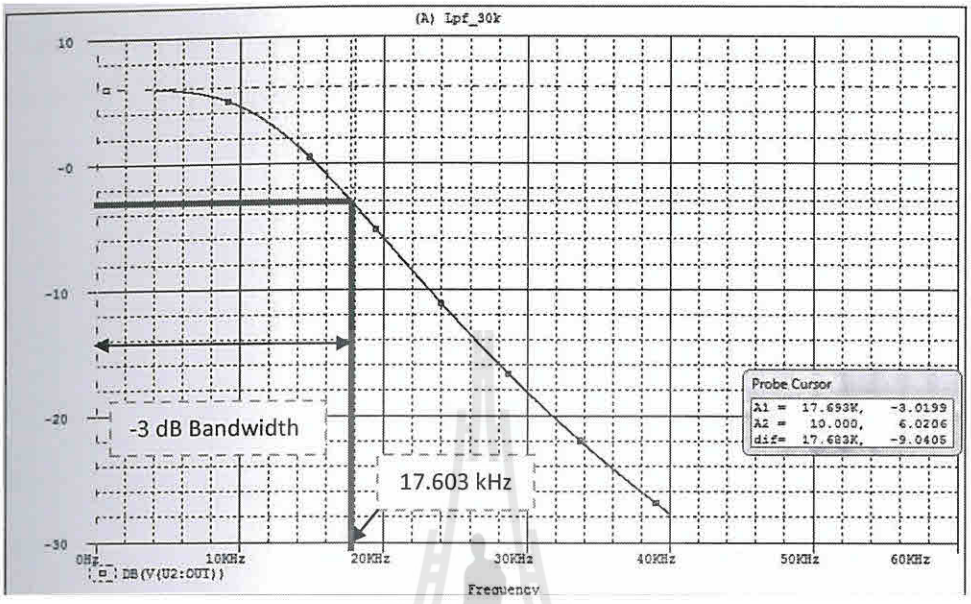
จากผลการคำนวณจากสมการที่ 3.1 จะเห็นว่าค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุจะทำให้ค่า Cutoff Frequency = 15.20 kHz ซึ่งเป็น Cutoff Frequency ที่ต้องการใช้งาน

จากการออกแบบได้ค่า R และ C ครบแล้ว เราได้นำมาจำลองการทำงาน ด้วยโปรแกรมจำลองผล โดยสามารถออกแบบโปรแกรมจำลองได้ดังนี้



รูปที่ 3.3 รูปจำลองวงจร LPF 15 kHz โดยใช้โปรแกรม Schematics

จากวงจรรูปที่ 3.3 จะทำให้ได้กราฟการตอบสนองทางความถี่ (Frequency Respond) ดังนี้



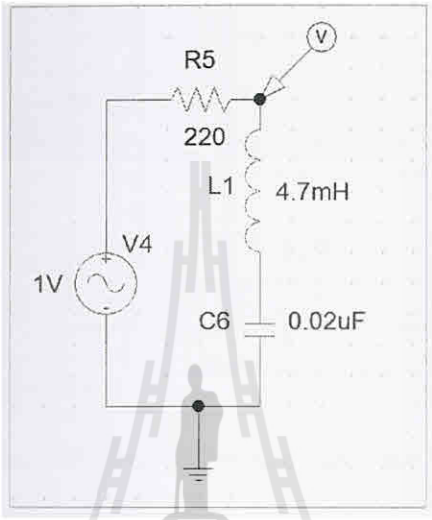
รูปที่ 3.4 กราฟแสดง Out put ของ LPF

จากกราฟ แสดงผลการออกแบบวงจร Low Pass Filter คือ ช่วงความถี่ต่ำจะสามารถส่งผ่านสัญญาณได้แต่ในช่วงความถี่สูงๆจะไม่สามารถส่งผ่านไปได้โดย Low Pass Filter นี้จะมี -3 dB Bandwidth = 17.603 kHz ซึ่งผลเป็นไปตามที่เราต้องการเพราะ Low Pass Filter จะมี Slope ช่วงปลายความถี่สูง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.4 การออกแบบวงจร Stop Band Filter 19 kHz

โดยทั่วไปแล้วสัญญาณ Audio ก่อนการ Modulater จะต้องไม่มีสัญญาณ Pilot 19 kHz ดังนั้นจึงต้องออกแบบ วงจร Stop Band เพื่อกรองสัญญาณ Pilot 19 kHz ออกไปก่อน โดยการออกแบบนี้ Cutoff Frequency เท่ากับ 19 kHz



รูปที่ 3.5 จำลองวงจร Stop Band filter 19 kHz

ความถี่ ที่ต้องการ คำนวณได้จาก $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ..... (3.2)

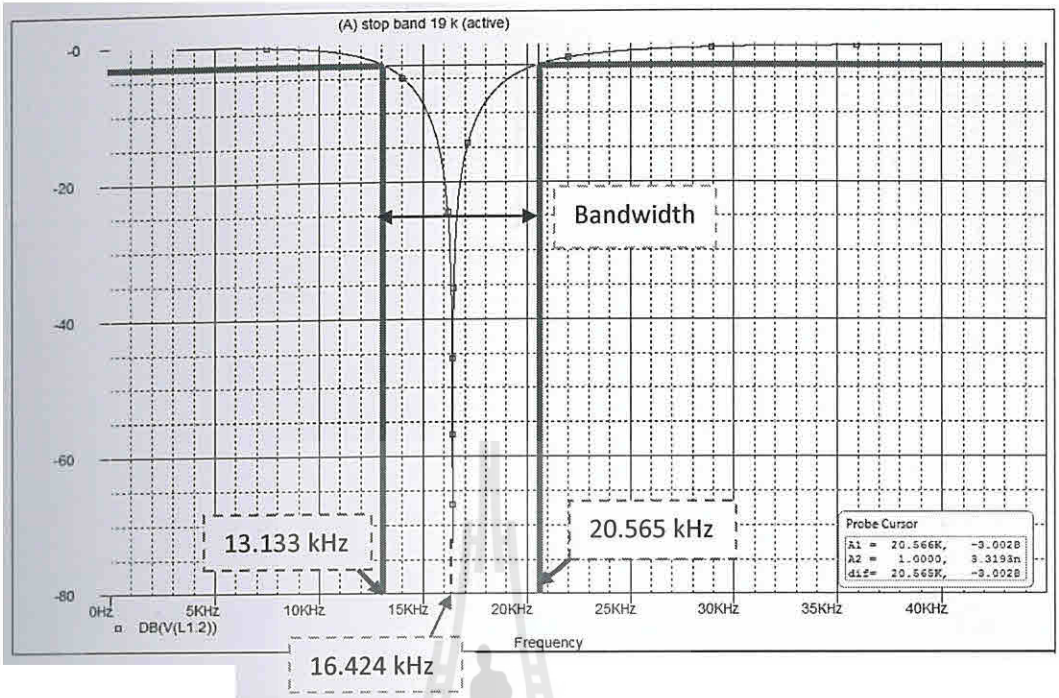
L = 4.7 mH

R = 0.02 µF

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{(4.7\text{m})(0.02\mu)}}$$

= 16.42 kHz

จากผลการคำนวณจากสมการที่ 3.2 จะเห็นว่าค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุ จะทำให้ค่า Center Frequency = 16.42 kHz ซึ่ง อยู่ในช่วงที่เหมาะสมแก่การใช้งาน

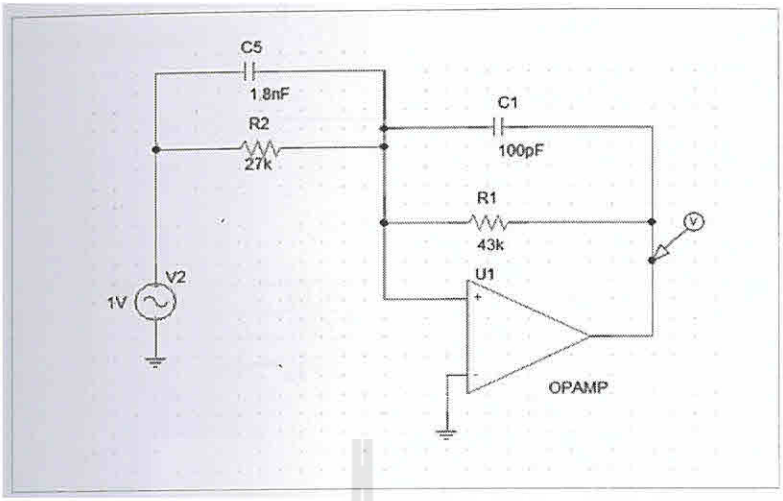


รูปที่ 3.6 กราฟแสดงผล วงจร Stop Band Filter 19 kHz

จากกราฟพิจารณาที่ -3dB Bandwidth อยู่ในช่วงถี่ 13.133 kHz – 20.565 kHz ซึ่งมี Bandwidth เท่ากับ 7.432 kHz และCenter Frequency เท่ากับ 16.424 kHz เพื่อกำจัดความถี่ Pilot 19 kHz ที่ต้องการกรองสัญญาณออกไป

3.5 การออกแบบวงจร Pre-emphasis

Pre-emphasis คือ วงจรปรับปรุงอัตราส่วนของสัญญาณเสียงต่อสัญญาณรบกวน โดยการปรับแอมพลิจูดของสัญญาณให้สูงขึ้นก่อนการมอดูเลต เพื่อทำให้อัตราส่วนของสัญญาณเสียงและสัญญาณรบกวนต่างกันมาก จึงส่งผลให้เครื่องรับรับสัญญาณเสียงได้ดีขึ้น โดยในประเทศไทยได้กำหนดมาตรฐานสำหรับการตั้งค่า Pre-emphasis ให้มีค่าเท่ากับ 50 µSec



รูปที่ 3.7 แสดง วงจร Pre-emphasis

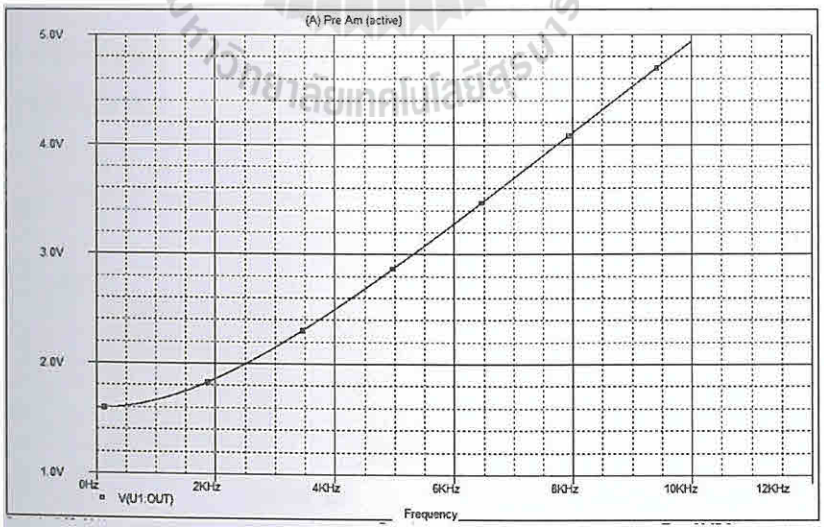
จาก Pre-emphasis = $\frac{1}{\omega}$ = RC..... (3.3)

R = 27 kΩ

C = 1.8nF

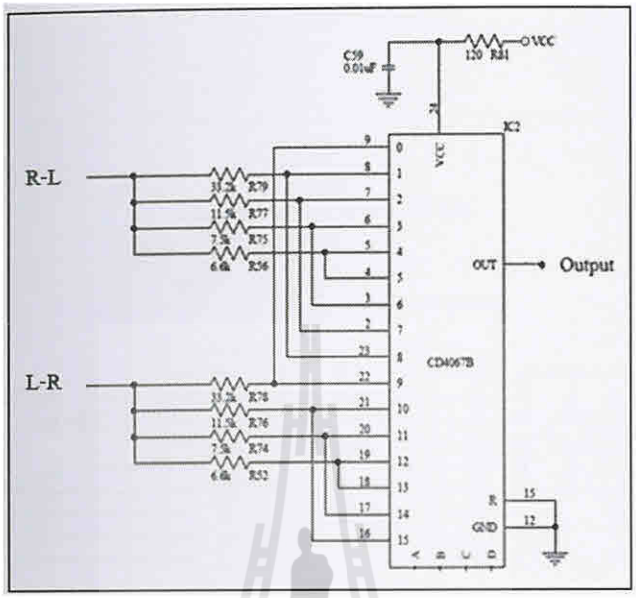
แทนค่าใน สมการที่ 3.3 จะได้ $\frac{1}{\omega}$ = (27k) (1.8n)

Pre-emphasis = 48.6 μSec



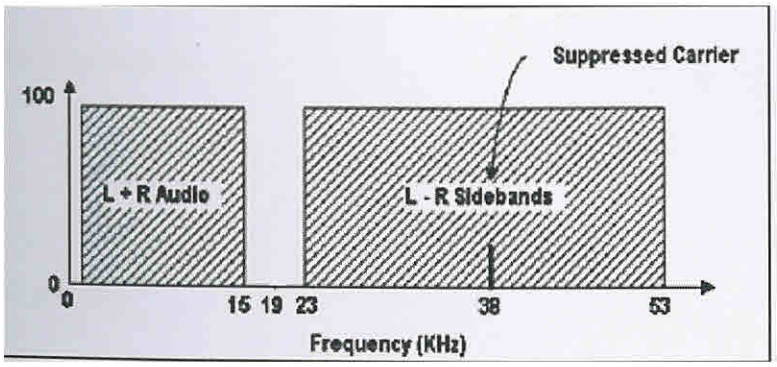
รูปที่ 3.8 กราฟแสดงผลวงจร Pre-emphasis

3.6 วงจร Balanced Modulator



รูปที่ 3.9 วงจร Balanced Modulator

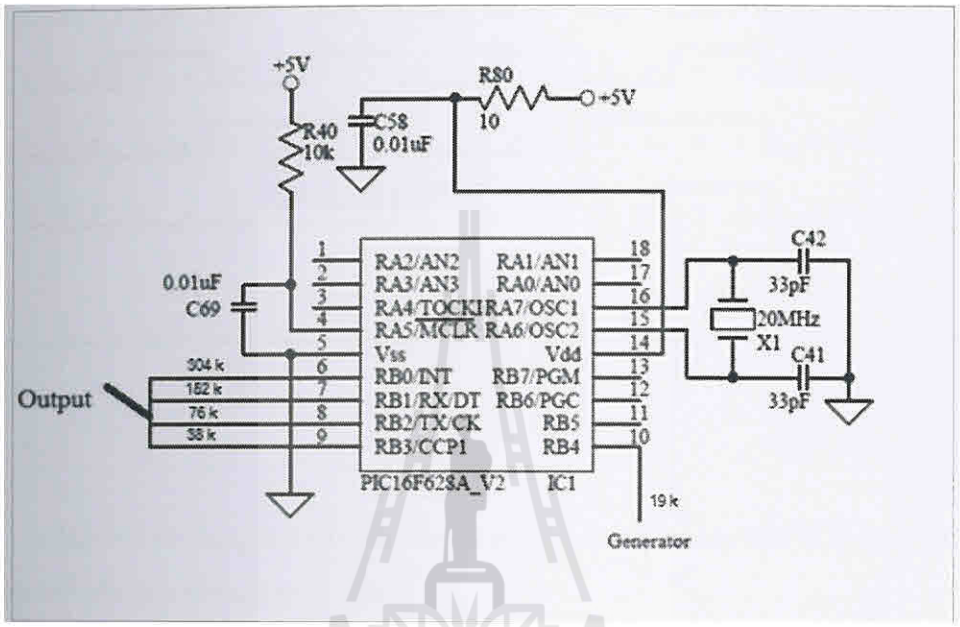
จากรูปที่ 3.9 แสดงถึงวงจร Balanced Modulator ซึ่งจะรับสัญญาณเข้ามา 2 สัญญาณ คือ สัญญาณ L-R และสัญญาณ R-L โดยมอดูเลตสัญญาณกับคลื่นพาห์ 38 kHz จะได้ไซด์แบนด์ด้านสูง (USB) หรือ (L-R) กับไซด์แบนด์ด้านต่ำ (LSB) หรือ (L+R) เรียกรวมว่าสัญญาณ 38 kHz ไซด์แบนด์ L+R หรือสัญญาณ L-R ส่งต่อสัญญาณไปวงจรรวมสัญญาณทั้งหมด ซึ่งจะได้กราฟสเปคตรัมความถี่ ของวงจร Balanced Modulator ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กราฟสเปคตรัมความถี่ของวงจร Balanced Modulator

3.7 วงจรสร้างสัญญาณ 19 kHz

วงจรสร้างสัญญาณ Pilot 19 kHz ของวงจร Stereo Multiplex ก่อนจะส่งสัญญาณต่อไปยังภาค Modulation FM



รูปที่ 3.11 วงจรสร้างสัญญาณ Pilot 19 kHz

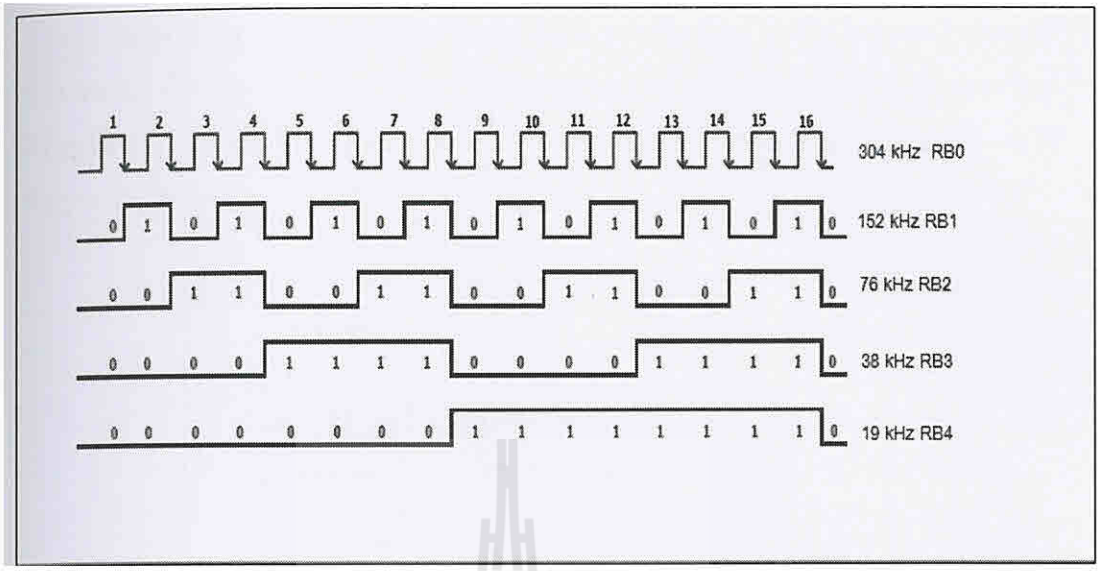
จากรูปที่ 3.11 เป็นวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ทั้งหมด 5 ความถี่ ได้แก่ 304 kHz 152 kHz 76 kHz 38 kHz และ 19 kHz ตามลำดับ โดยการสร้างสัญญาณพัลส์จะเริ่มสร้างจากความถี่ 304 kHz และใช้ความถี่หารสอง จนได้ความถี่ 19 kHz

การหาคาบเวลาในการออกแบบ

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{..... (3.4)}$$

ความถี่ 304 kHz

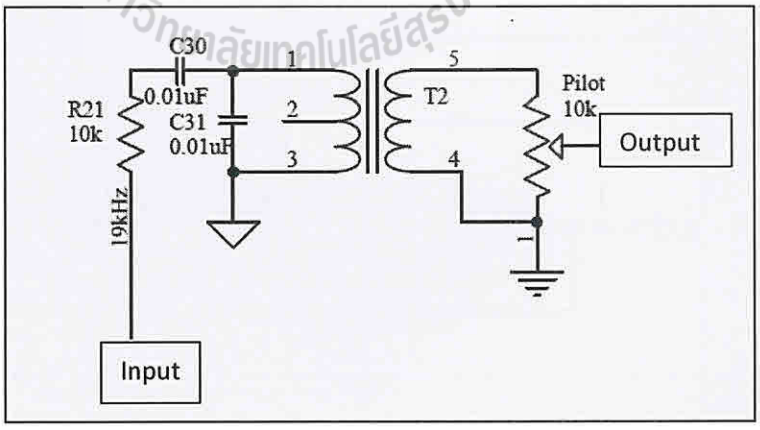
$$T = \frac{1}{304k} = 3.30\ \mu\text{Sec}$$



รูปที่ 3.12 สัญญาณพัลส์

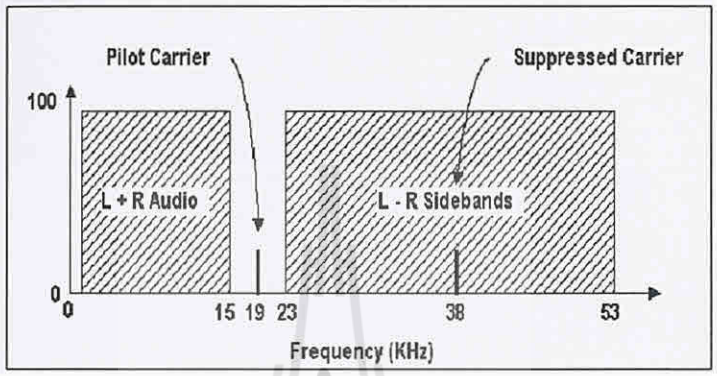
ในการสร้างสัญญาณพัลส์จะมีการหาคาบเวลาในการออกแบบ เพื่อให้ได้สัญญาณพัลส์ตามความถี่ที่ต้องการใช้งานดังรูปที่ 3.12

3.8 วงจรแปลงสัญญาณพัลส์ 19 kHz ให้เป็นสัญญาณไซน์ 19 kHz



รูปที่ 3.13 วงจรแปลงสัญญาณพัลส์ 19 kHz ให้เป็นสัญญาณไซน์ 19 kHz

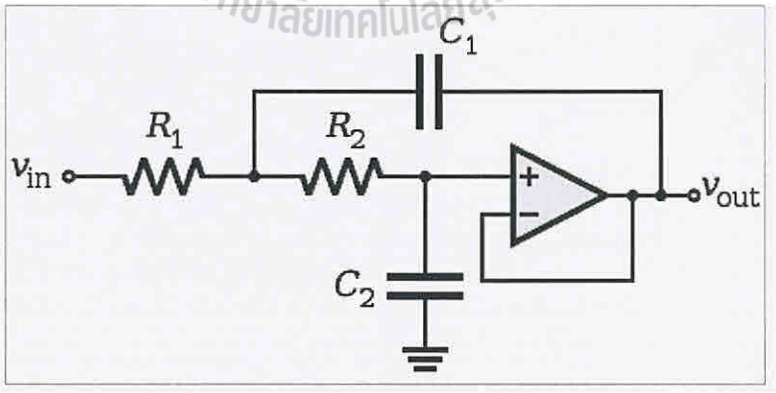
จากรูปที่ 3.13 ทำหน้าที่รับสัญญาณ Input รูปคลื่น Pulse จากไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F628A ที่ขา RB4 จากนั้นจะทำการเปลี่ยนสัญญาณพัลส์ให้เป็นสัญญาณไซน์ เพื่อลดฮาร์มอนิก ของไพรอตที่จะเกิดขึ้น และจากนั้นนำมารวมกับสัญญาณที่ได้จากวงจร Multiplex จะได้สัญญาณดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 กราฟสเปคตัมความถี่ สัญญาณ Output

3.9 การออกแบบวงจร Low Pass Filter แบบ Sallen-key 55 kHz

เมื่อสัญญาณ ออกจากวงจร Balanced Modulator จะต้องถูกส่งเข้าวงจร กรองความถี่อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งได้ออกแบบวงจรกรองความถี่ ที่มี Cutoff frequency เท่ากับ 55 kHz ซึ่งได้คำนวณคล้ายกับ Low Pass Filter แบบ Sallen-key 15 kHz สมการที่ 3.1 ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 3.15 แสดง วงจร Low Pass Filter แบบ Sallen-key

จากการคำนวณ $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$

$R_1 = 1.5\ k\Omega$

$R_2 = 1.5\ k\Omega$

$C_1 = 1.8\ nF$

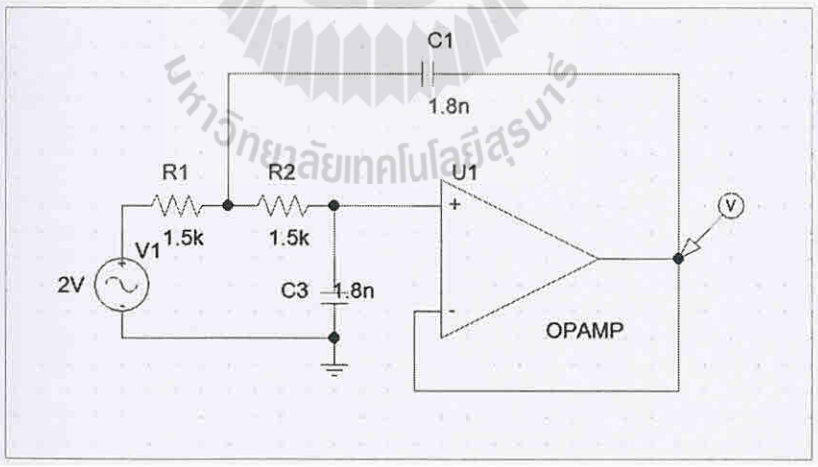
$C_2 = 1.8\ nF$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{(1.5k\Omega)(1.5k\Omega)(1.8nF)(1.8nF)}}$$

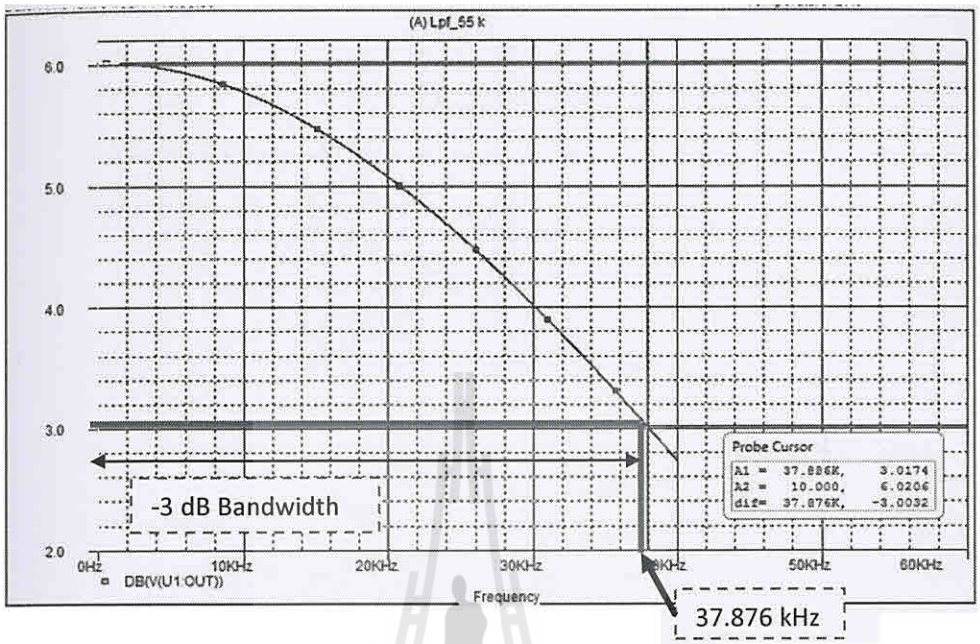
$$= 58.94\ kHz$$

จากผลการคำนวณจากสมการที่ 3.1 จะเห็นว่าค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุ จะทำให้ค่า Cutoff Frequency = 58.94 kHz ซึ่งเป็น ค่าที่เหมาะสมกับการใช้งาน

จากการออกแบบได้ค่า R และ C ครบแล้ว เราได้นำมาจำลองการทำงาน ด้วยโปรแกรมจำลองผล โดยสามารถออกแบบโปรแกรมจำลองได้ดังนี้



รูปที่ 3.16 รูปจำลองวงจร LPF 55 kHz โดยใช้โปรแกรม Schematics

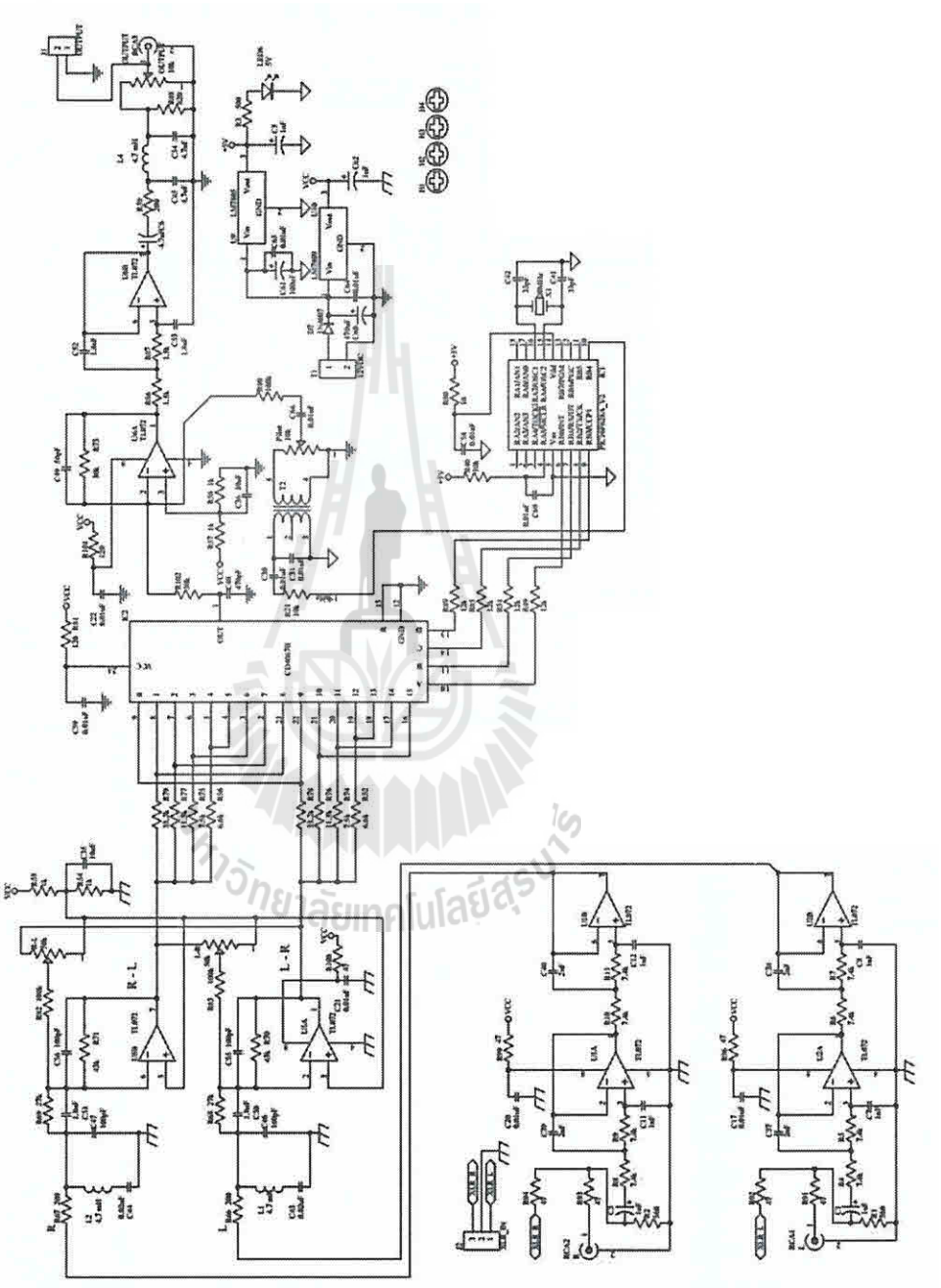


รูปที่ 3.17 กราฟแสดง Out put ของ LPF

จากกราฟ แสดงผลการออกแบบวงจร Low Pass Filter คือ ช่วงความถี่ต่ำจะสามารถส่งผ่านสัญญาณได้แต่ในช่วงความถี่สูงๆจะไม่สามารถส่งผ่านไปได้โดย Low Pass Filter นี้จะมี -3 dB Bandwidth = 37.876 kHz ซึ่งผลเป็นไปตามที่เราต้องการเพราะ Low Pass Filter จะมี Slope ช่วงปลายความถี่สูง

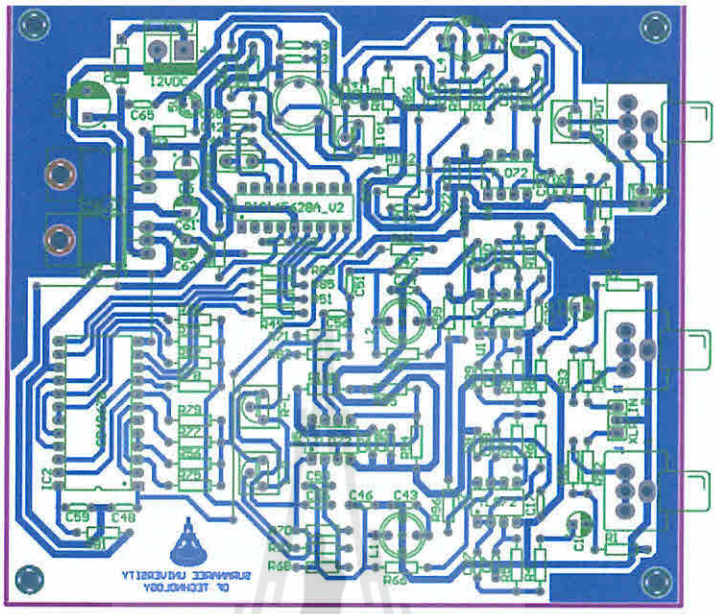
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.10 วงจรรวมของ Stereo Encoder

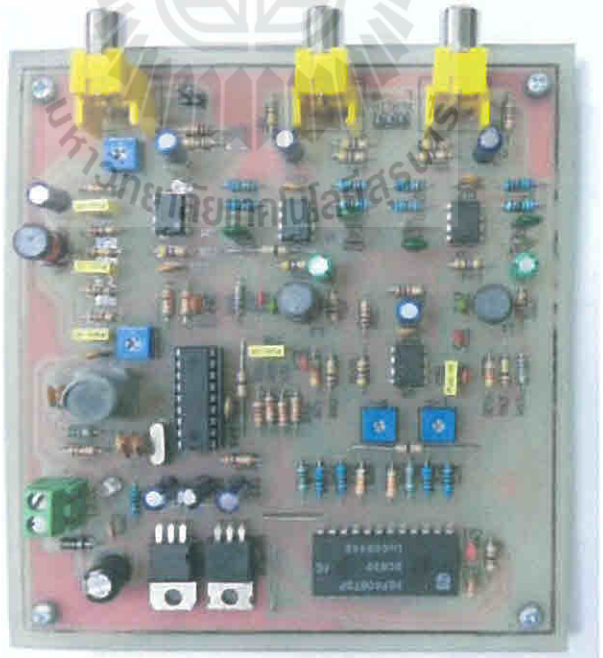


รูปที่ 3.18 วงจรรวม Stereo Encoder

ลายPCB เมื่อออกแบบด้วยวงจร Protel 99 SE



รูปที่ 3.19 ลาย PCB ของวงจร



รูปที่ 3.20 วงจร Stereo Encoder

บทที่ 4
ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

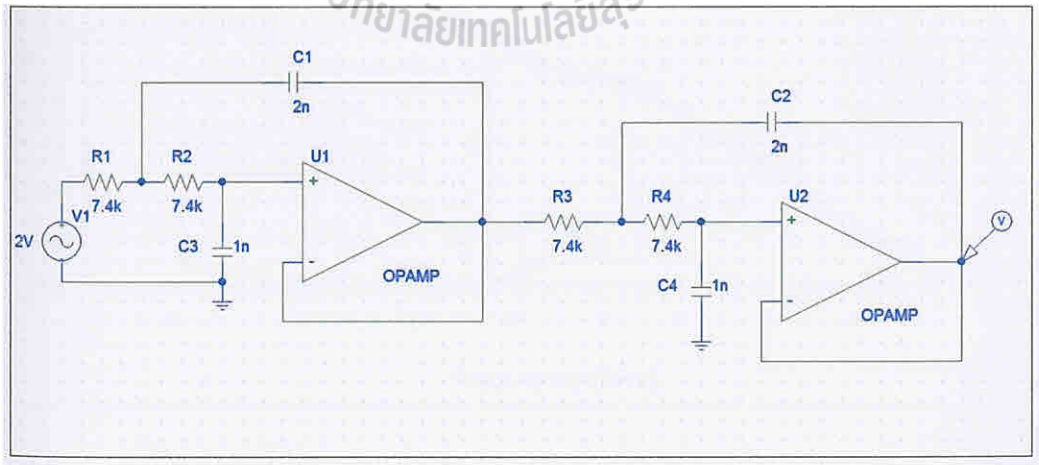
ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบวงจร Stereo Multiplex ในส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การทดสอบวงจร Low Pass Filter ที่มีความถี่ Cutoff Frequency 15 kHz สำหรับกรองสัญญาณเสียงที่ส่วนของ Input ด้านซ้าย (L) และด้านขวา (R) วงจร Stop Band Filter 19 kHz วงจร Pre-emphasis ผลการทดสอบความถี่ที่ได้จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และการทดสอบสัญญาณที่ออกจากวงจร Stereo Multiplex เพื่อดูผลทดสอบว่าตรงตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้

4.2 ผลการทดสอบวงจร Low Pass Filter

จากการออกแบบวงจร Low Pass Filter ในบทที่ 3 นั้นทำให้ได้วงจร Low Pass Filter 15 kHz ที่ใช้สำหรับกรองความถี่ต่ำในวงจร Stereo Multiplex

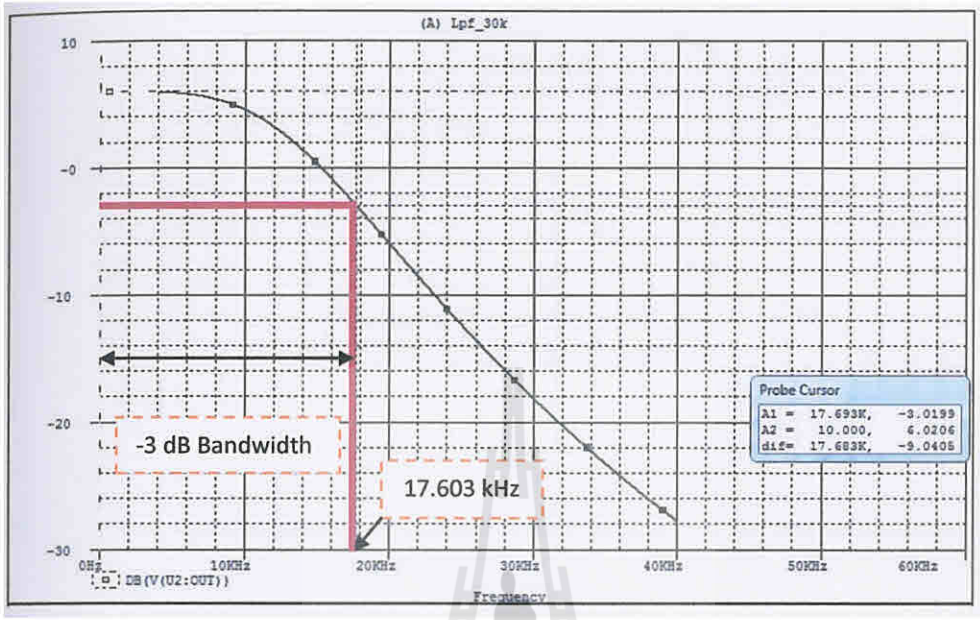
วิธีการหาความถี่ของวงจร Sallen-Key Low Pass Filter 15 kHz

1. สร้างสัญญาณ Sine ตั้งแต่ 1 kHz – 30 kHz เข้าที่ Input แรงดัน 2 V_{p-p} ของวงจร Sallen-Key Low Pass Filter 15 kHz
2. ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณ Output ในหน่วยของ V_{p-p} ที่วงจร Low Pass Filter 15 kHz
3. บันทึกผลการทดสอบและวิเคราะห์



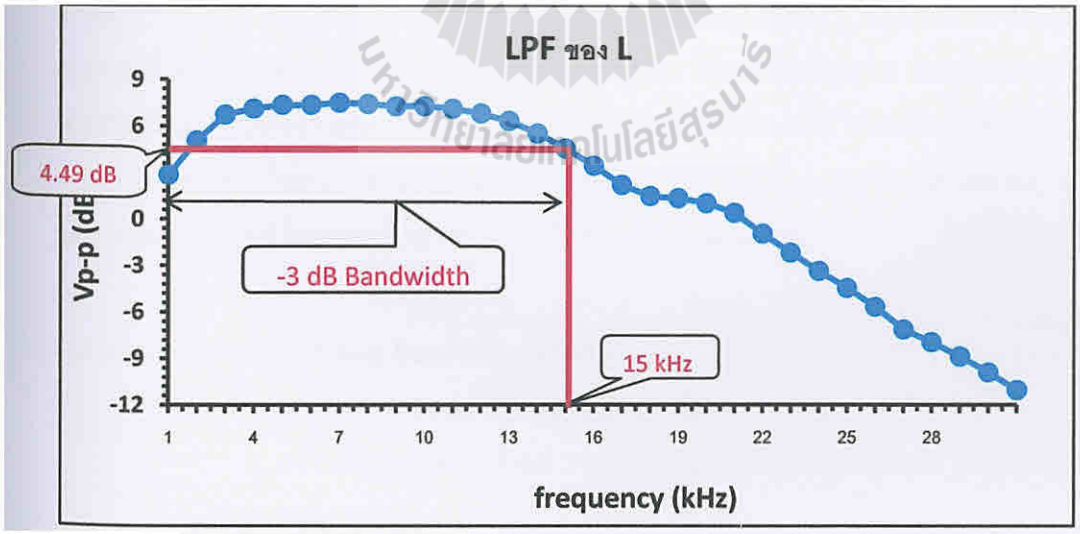
รูปที่ 4.1 วงจร Low Pass Filter 15 kHz

ผลการออกแบบในโปรแกรมจำลองผล



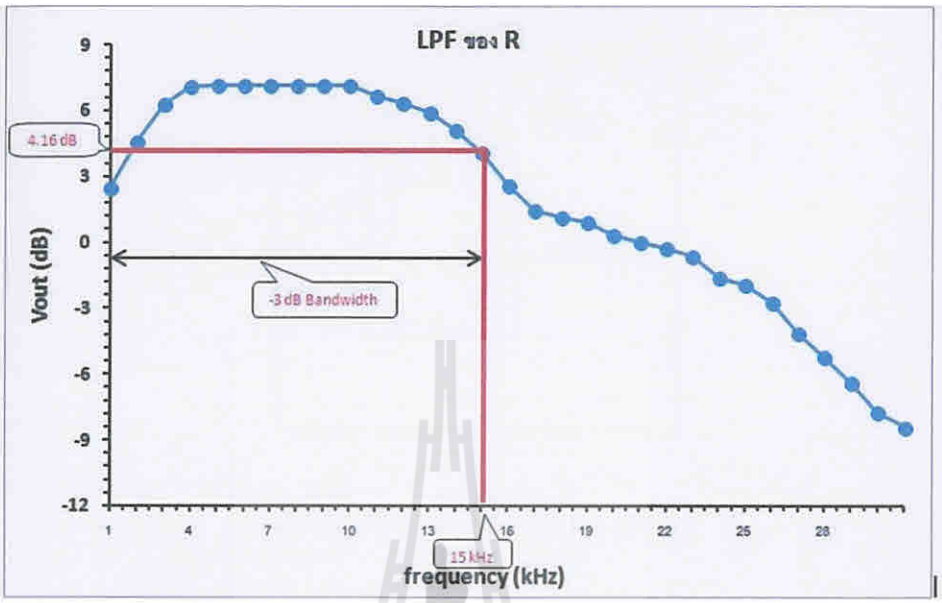
รูปที่ 4.2 กราฟแสดง Low Pass Filter 15 kHz ของการออกแบบ

4.2.1 ผลการทดสอบวงจร Low Pass Filter ของสัญญาณช่องซ้าย (L)



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการทดสอบ Low Pass Filter ของสัญญาณช่องซ้าย

4.2.2 ผลการทดสอบวงจร Low Pass Filter ของสัญญาณช่องขวา (R)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการทดสอบ Low Pass Filter ของสัญญาณช่องขวา

จากกราฟรูปที่ 4.2 เป็นผลจำลองที่ได้จากการออกแบบในโปรแกรมของวงจร Low Pass Filter 15 kHz ที่ -3dB Bandwidth จะได้ค่า Cutoff Frequency เท่ากับ 17.603 kHz แต่จากรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 เป็นผลของการทดสอบ วงจร Low Pass Filter ที่มีสัญญาณ ช่องซ้ายและช่องขวา ทดสอบโดยการป้อนอินพุตและปรับความถี่ เท่ากัน กับการออกแบบในโปรแกรมจำลองผล ซึ่งที่ -3dB Bandwidth ได้ค่า Cutoff Frequency เท่ากับ 15 kHz ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 17.35% เนื่องจากค่าอุปกรณ์ที่คลาดเคลื่อน และความไม่ชำนาญของผู้ทดสอบ

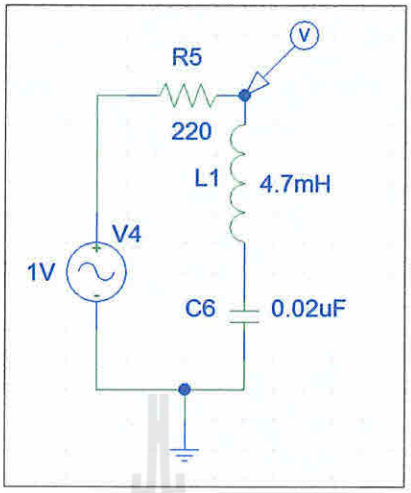
4.3 ผลการทดสอบวงจร Stop Band Filter 19 kHz

วิธีการหาความถี่ของวงจร Stop Band Filter 19 kHz

1. สร้างสัญญาณ Sine ตั้งแต่ 1 kHz – 30 kHz เข้าที่ Input แรงดัน 1 Vp-p ของวงจร Stop Band Filter 19 kHz

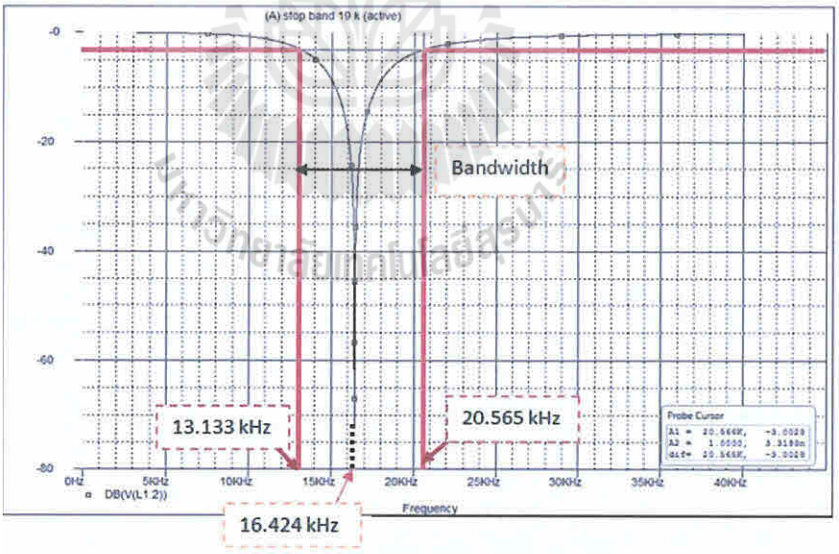
2. ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณ Output ในหน่วยของ Vp-p ที่วงจร Stop Band Filter 19 kHz

3. บันทึกผลการทดสอบและวิเคราะห์



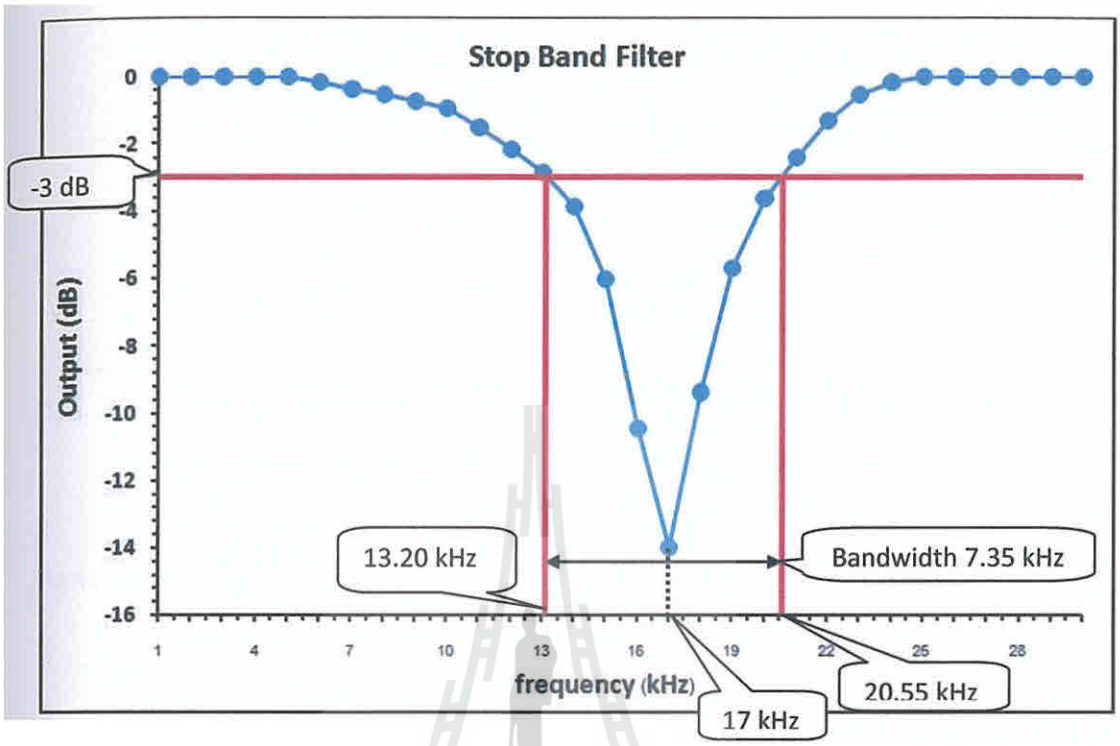
รูปที่ 4.5 วงจร Stop Band Filter 19 kHz

ผลการออกแบบในโปรแกรมจำลองผล



รูปที่ 4.6 กราฟแสดง ผลวงจร Stop Band Filter 19 kHz จากโปรแกรมการจำลองผล

จากกราฟจะเห็นว่า ช่วง Bandwidth อยู่ที่ 13.133 kHz - 20.565 kHz Bandwidth เท่ากับ 7.47 kHz และ Center Frequency เท่ากับ 16.424 kHz



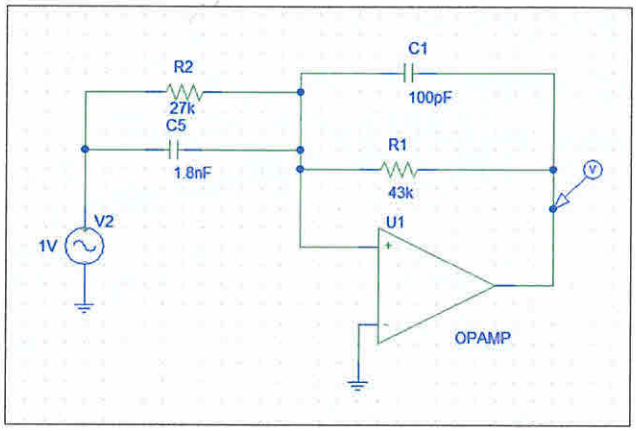
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการทดสอบวงจร Stop Band Filter 19 kHz

จากกราฟจะเห็นว่าผลการทดลองช่วง Bandwidth จะอยู่ที่ 13.20 kHz – 20.55 kHz มี Bandwidth เท่ากับ 7.35 kHz Center Frequency เท่ากับ 17 kHz ซึ่งเมื่อเทียบกับ ผลการจำลองผลโดยโปรแกรมจำลองผล มีค่าคลาดเคลื่อน เท่ากับ 1.10 % อาจเนื่องจากค่าอุปกรณ์ที่คลาดเคลื่อนและความไม่ชำนาญของผู้ทดสอบ

4.4 ผลการทดสอบวงจร Pre-emphasis

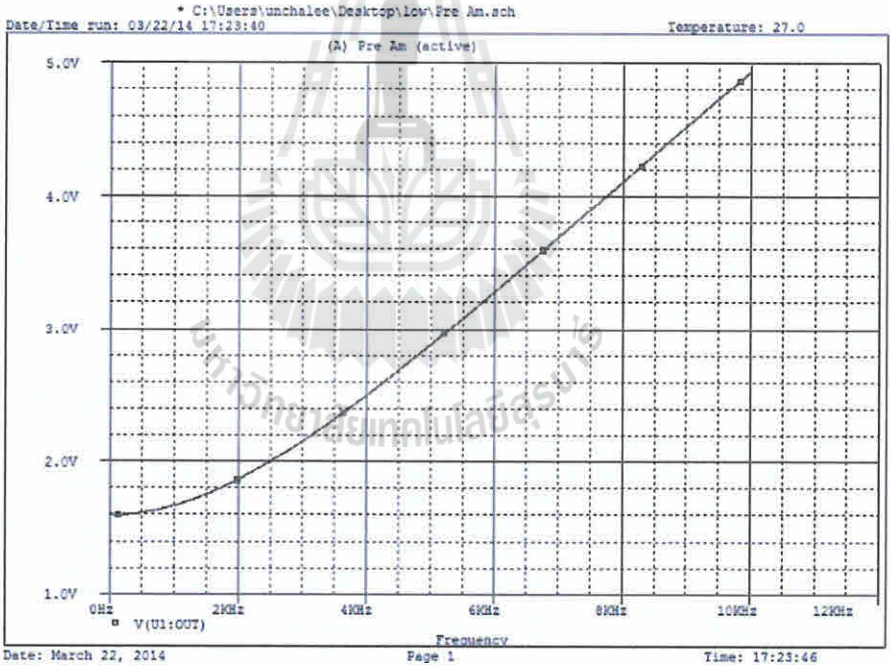
วิธีการหาความถี่ของ Pre-emphasis

1. สร้างสัญญาณ Sine ตั้งแต่ 1 kHz – 30 kHz เข้าที่ Input แรงดัน 2 V_{p-p} ของวงจร Pre-emphasis
2. ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณ Output ในหน่วยของ V_{p-p} ที่วงจร Pre-emphasis
3. บันทึกผลการทดสอบและวิเคราะห์

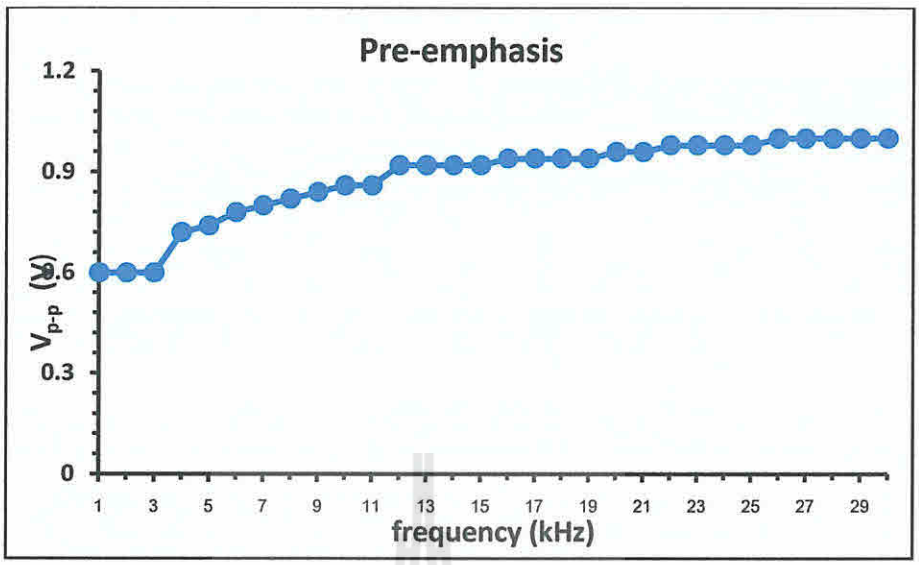


รูปที่ 4.8 วงจร Pre-emphasis

ผลการออกแบบในโปรแกรมจำลองผล



รูปที่ 4.9 กราฟแสดง Pre-emphasis จากการออกแบบในวงจรการจำลองผล



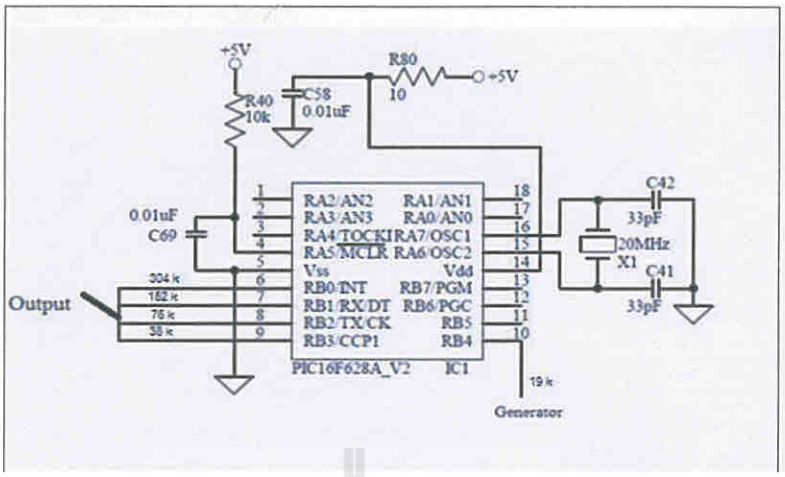
รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบวงจร Pre-emphasis

จากรูปที่ 4.9 เป็นผลการออกแบบในโปรแกรมจำลองผลของวงจร Pre-emphasis โดยป้อนอินพุต 1 V_{p-p} และปรับความถี่ตั้งแต่ 1 kHz ถึง 12 kHz จากกราฟ ที่ความถี่ตั้งแต่ 3 kHz ขึ้นไปค่าของ Amplitude จะสูงขึ้น และจากรูป 4.10 เป็นผลจากการทดสอบวงจร Pre-emphasis ซึ่งป้อนอินพุต $1V_{p-p}$ และปรับความถี่ตั้งแต่ 1 kHz ถึง 30 kHz ซึ่งจากการทดสอบ ที่ความถี่ตั้งแต่ 3 kHz ค่าของ Amplitude จะสูงขึ้น จะเห็นว่าผลการทดสอบเป็นไปตามที่ออกแบบไว้

4.5 ผลการทดสอบความถี่ที่ได้จากวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

วิธีการทดสอบวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

1. ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณ Output ของวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ขา RB0-RB4
2. บันทึกผลการทดสอบและวิเคราะห์



รูปที่ 4.11 วงจร ไมโครคอนโทรลเลอร์

จากการทดสอบวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์จะได้เอาต์พุตเป็นสัญญาณดังนี้

รูปที่ 4.12 สัญญาณ 19 kHz

จากรูป เป็นการสร้างสัญญาณ Pulse ของวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์โดยวัด Output ที่ขา RB4 วัดค่าความถี่จริงของสัญญาณ Pulse เท่ากับ 19.011 kHz มีค่าความคาดเคลื่อน เท่ากับ 0.0579%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี