15 kHz BRICK – WALL LOW PASS FILTER

โดย

นางสาวทรายขวัญ	แรงเขตรการณ์	รหัส	B5304745
นางสาวกิตติยา	ชัยยะ	รหัส	B5311194
นายอิสระ	คุณประสาท	รหัส	B5312092

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 โครงงานวิศวกรรมโทรคมนาคม

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2546

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประจำภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2556

15 kHz BRICK - WALL LOW PASS FILTER

คณะกรรมการสอบโครงงาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา)
กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน

(รองศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุฑารสกุล)
กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับรายงานโครงงานฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม รายวิชา 427499 โครงงานวิศวกรรมโทรคมนาคม ประจำปีการศึกษา 2556

หัวข้อโครงงาน	15 kHz BRICK – WALL LOW PASS FILTER			
จัดทำโดย	นางสาวทรายขวัญ	แรงเขตรการณ์	รหัส	B5304745
	นางสาวกิตติยา	ชัยยะ	รหัส	B5311194
	นายอิสระ	คุณประสาท	รหัส	B5312092
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา			
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม			
ภาคการศึกษาที่	2/2556			

บทคัดย่อ
(Abstract)

ในปัจจุบันระบบวิทยุกระจายเสียงที่ใช้งานกันโดยทั่วไป จะส่งกระจายเสียงด้วยระบบ Stereo ซึ่งองค์ประกอบหลักของการส่งกระจายเสียงด้วยระบบ Stereo คือ Stereo Multiplexing ทำหน้าที่ในการรวมสัญญาณช่องซ้ายและช่องขวาของระบบ Stereo ก่อนจะทำการมอดูเลตด้วย FM Modulator แล้วทำการส่งออกไปยังเครื่องรับวิทยุ ส่วนประกอบหลักของสัญญาณที่ได้จาก Stereo Multiplexing คือ สัญญาณ L+R สัญญาณ L-R และสัญญาณ Pilot โดยทั่วไปแล้ว สัญญาณเสียงก่อนจะนำเข้าวงจร Stereo Multiplexing จะต้องมีช่วงความถี่ไม่เกิน 15 kHz ซึ่งเป็นมาตรฐานโดยทั่วไปของเครื่องส่งวิทยุ ซึ่งหากมีการ Multiplexing สัญญาณ Audio ที่มีความถี่เกิน 15 kHz จะทำให้มีสัญญาณไปรบกวนสัญญาณ Pilot ที่ความถี่ 19 kHz ซึ่งสัญญาณ Pilot ที่ส่งออกอากาศไปพร้อมกับข่าวสาร มีความจำเป็นสำหรับเครื่องรับวิทยุในการรับสัญญาณสียงในระบบ Stereo ดังนั้นหากสัญญาณเสียงที่ป้อนให้กับเครื่องส่งวิทยุ มีความถี่เสียงเกิน 15 kHz จะทำให้เครื่องรับวิทยุไม่สามารถรับเป็นระบบ Stereo ได้ ดังนั้นในโครงงานนี้จึงได้จัดทำ Brick - wall low pass filter ที่มี Cutoff Frequency เท่ากับ 15 kHz จะเป็น Low Pass Filter ที่มีช่วง Stopband แคบกว่า Low Pass Filter ทั่วๆไป เพื่อป้องกันและแก้ปัญหาการ Multiplexing สัญญาณ Audio ที่ไปรบกวนสัญญาณ Pilot ก่อนที่จะทำการส่งสัญญาณไปยัง Stereo Multiplexing แล้วจึงส่งออกอากาศไปยังเครื่องรับวิทยุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงงานเรื่อง 15 kHz BRICK – WALL LOW PASS FILTER นี้ ได้ประสบความสำเร็จด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ในการให้คำปรึกษาในด้านต่างๆ ในระหว่างการดำเนินการจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ ทองทา (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน) และนายปัญญา หันตุลา (นักศึกษาปริญญาโทสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม) ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษารวมทั้ง ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในการทำโครงงานในครั้งนี้ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการให้ข้อมูล และเป็นที่ปรึกษาในการทำโครงงานฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนให้การดูแลและให้คำแนะนำเกี่ยวกับความรู้พื้นฐาน ในการใช้งานโปรแกรมซึ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวทรายขวัญ แรงเขตรการณ์
นางสาวกิตติยา ชัยยะ
นายอิสระ คุณประสาท

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญรูปภาพ	จ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการทำงาน	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน	
2.1 บทนำ	3
2.2 วิทยุกระจายเสียง FM Stereo Multiplex	3
2.2.1 การมัลติเพล็กซ์สัญญาณ	4
2.2.2 ความเป็นมาของระบบไพล็อตโทน (Pilot Tone System)	5
2.2.3 แนวความคิดในการส่งกระจายเสียงระบบ Stereo Multiplex	6
2.2.4 หลักการส่งกระจายเสียงระบบ FM Stereo Multiplex ในปัจจุบัน	8
2.3 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low Pass Filter)	11
2.3.1 ความถี่ Cutoff Frequency	12
2.3.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในอุดมคติ	12
2.3.3 วงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ (Active Filters)	13
2.3.4 วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ (passive filter)	14
2.3.5 Sallen - key Low Pass Filter	16
2.3.6 Buttetwort Low Pass Filter	17
2.3.7 Chebyshev Low Pass Filter	17
2.3.8 Elliptic Low Pass Filter	19
2.4 วงจร Brick – wall Low Pass Filter	14
2.5 การออกแบบวงจร Brick – wall Low Pass Filter	15

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบโครงงาน	
3.1 บทนำ	22
3.2 การออกแบบวงจร 15 kHz Brick – wall low pass filter	22
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 บทนำ	33
4.2 การทดสอบวงจร 15 kHz Brick – wall low pass fitter	33
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปผลการทดลอง	39
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	40
5.3 สิ่งที่ได้รับจากการทำโครงงาน	40
ประวัติผู้เขียน	41
ภาคผนวก	42
บรรณานุกรม	59

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูปภาพ

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงระบบ Stereo ของเครื่องขยายเสียง	6
รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมแสดงการส่งกระจายเสียงระบบ Stereo	6
รูปที่ 2.3 แนวคิดในการ Multiplex สัญญาณซ้าย-ขวาเพื่องส่งไปกับคลื่นพาห์อันเดียว	7
รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมแสดงการของเครื่องส่งกระจายเสียงในปัจจุบัน	8
รูปที่ 2.5 ระบบ FM Stereo Multiplex	11
รูปที่ 2.6 ลักษณะของ Cutoff Frequency	12
รูปที่ 2.7 วงจรกรองความถี่ต่ำในอุดมคติ	13
รูปที่ 2.8 Active Filter	13
รูปที่ 2.9 Passive Filter	14
รูปที่ 2.10 วงจร Low Pass Filter โดย L อนุกรมกับวงจร และ C ขนานกับวงจร	15
รูปที่ 2.11 T Type Low Pass Filter	15
รูปที่ 2.12 Pi Type Low Pass Filter	16
รูปที่ 2.13 ผลการตอบสนองทางความถี่ของ Sallen-key Low Pass Filter	16
รูปที่ 2.14 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของ LPF 8-th Order แบบ Butterworth	17
รูปที่ 2.15 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของ LPF 8-th Order แบบ Chebyshev Type 1	18
รูปที่ 2.16 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของ LPF 8-th Order แบบ Chebyshev Type 2	18
รูปที่ 2.17 ผลตอบสนองของ Elliptic Low Pass Filter	19
รูปที่ 2.11 การตอบสนอง Ideal brick – wall	20
รูปที่ 2.12 วงจร Passive Filter แบบ Low Pass Filter ที่ใช้ seventh-order	20
รูปที่ 3.1 วงจร Passive Filter แบบ Low Pass Filter ที่ใช้ seventh-order	22
รูปที่ 3.2 วงจร Active Filter ที่ทำการคำนวณออกแบบ	27
รูปที่ 3.3 จำลองวงจร 15 kHz Brick – wall low pass filter	29
รูปที่ 3.4 การ simulator จากโปรแกรม Schematics	29
รูปที่ 3.5 วงจรจากโปรแกรม Schematics ที่นำมาออกแบบด้วยวงจร Protel 99SE	30
รูปที่ 3.6 แสดงตำแหน่งของอุปกรณ์ในวงจรที่ออกแบบ	31
รูปที่ 3.7 ชิ้นงานที่ทำการออกแบบด้วยวงจร Protel 99SE	31
รูปที่ 3.8 แสดงวงจรชิ้นงานที่สร้างขึ้น (ด้านล่าง)	32
รูปที่ 3.8 แสดงวงจรชิ้นงานที่สร้างขึ้น (ด้านบน)	32

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ 33
รูปที่ 4.2 ลักษณะการต่อสายนำสัญญาณเพื่อทำการวัดค่า 34
รูปที่ 4.3 กราฟแสดง Cutoff Frequency 37
รูปที่ 4.4 กราฟผลตอบสนองทางความถี่ที่ย่านใช้งาน 38

ภาคผนวก

รูปที่ 1 หน้าเข้าโปรแกรมของโปรแกรม Protel 99 se 43
รูปที่ 2 การสร้าง New Design 44
รูปที่ 3 หน้าต่างการตั้งชื่อ File ชิ้นงาน 44
รูปที่ 4 เลือก Schematic Document 45
รูปที่ 5 File my_schematic.Sch 45
รูปที่ 6 หน้าต่างกำหนด Option ของ schematic 46
รูปที่ 7 การ Add library (1) 46
รูปที่ 8 การ Add library (2) 47
รูปที่ 9 อุปกรณ์Library 47
รูปที่ 10 วงจรตัวอย่าง 48
รูปที่ 11 สร้าง New Design 48
รูปที่ 12 การจัดเรียงอุปกรณ์ตามวงจรที่ออกแบบไว้ 49
รูปที่ 13 แสดงการเชื่อมต่อของวงจร 50
รูปที่ 14 เปิดไฟล์ Schematic ที่ได้ออกแบบไว้ 51
รูปที่ 15 หน้าต่างของ File Compressor.PCB 51
รูปที่ 16 การ Add library 52
รูปที่ 17 เปิดไฟล์ File Schematic ในไฟล์งานของ PCB 52
รูปที่ 18 การตรวจสอบความผิดพลาด 53
รูปที่ 19 การเลือกพื้นที่ขอบเขตของแผ่น PCB 53
รูปที่ 20 การกำหนดค่า เพื่อที่จะทำการ Rules 54
รูปที่ 21 เมื่อทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ 55
รูปที่ 22 Artwork ของ PCB เพื่อนำไปทำเป็นแผ่น PCB 55
รูปที่ 23 ชิ้นงานออกแบบด้วยโปรแกรม Protel 99SE 56
รูปที่ 24 สกรีนรูปชิ้นงานบนแผ่นใสลงที่แผ่น PCB 56
รูปที่ 25 การกัดปริ้น 57
รูปที่ 26 เจาะแผ่น PCB ตามรูขาของอุปกรณ์ 57

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 27 ลายวงจรและขาอุปกรณ์ที่บัดกรี 58
รูปที่ 28 ชิ้นงาน 58

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ตามมาตรฐานทางเทคนิคเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียง สำหรับการทดลองประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียงได้ระบุลักษณะทางเทคนิคขั้นต่ำของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียง สำหรับการทดลองประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง ซึ่งมีการใช้งานในย่านความถี่วิทยุที่ 87.75 MHz ถึง 107.75 MHz (สำหรับประเทศไทย) ในปัจจุบันระบบ FM ส่วนใหญ่เป็น Stereo ประกอบด้วยสัญญาณเสียงด้านซ้าย (L) และด้านขวา (R) การที่เครื่องส่งเพียงเครื่องเดียวสามารถส่งสัญญาณเสียงทั้งสองไปพร้อมๆกันเรียกว่าการ Multiplexing ส่วนใหญ่แล้วปัญหาที่เกิดในระบบ FM ที่เป็น Stereo จะเกิดจากการ Multiplexing สัญญาณ Audio ที่ส่งออกไปมีความถี่เกิน 15 kHz จึงทำให้ไปรบกวนสัญญาณ Pilot ที่ความถี่ 19 kHz ซึ่งทำให้ที่ภาครับไม่สามารถรับสัญญาณเสียงที่เป็น Stereo ได้ ดังนั้นโครงงานนี้จึงได้จัดทำวงจร Brick - wall low pass filter ที่มี Cutoff Frequency เท่ากับ 15 kHz ขึ้นมา เพื่อนำมาแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยวงจร Brick-wall low pass filter นี้ จะทำให้วงจร Low Pass Filter มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับวงจร Low Pass Filter ในอุดมคติ ซึ่งจะช่วยทำให้ Stopband มีขนาดแคบลงนั่นเอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและออกแบบวงจร 15 kHz Brick – wall low pass filter
2. เพื่อแก้ไขปัญหาการ Multiplexing สัญญาณ Audio ที่ไปรบกวนสัญญาณ Pilot ในระบบ FM Stereo Multiplexing

1.3 ขอบเขตงาน

1. ศึกษาลักษณะการทำงานของระบบ 15 kHz Brick – wall low pass filter
2. ออกแบบวงจร 15 kHz Brick – wall low pass filter
3. สร้างอุปกรณ์ต้นแบบและทดสอบเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ตามมาตรฐานทางเทคนิคเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงสำหรับการทดลองประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง ระบุลักษณะทางเทคนิคขั้นต่ำของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงสำหรับการทดลองประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง ซึ่งมีการใช้งานในย่านความถี่วิทยุ 87.75 MHz ถึง 107.75 MHz (สำหรับประเทศไทย) มีการมอดูเลตแบบเอฟเอ็ม (FM) ในปัจจุบันระบบ FM ส่วนใหญ่เป็น Stereo ประกอบด้วยสัญญาณเสียงด้านซ้าย (L) และด้านขวา (R) การที่เครื่องส่งเพียงเครื่องเดียวสามารถส่งทั้งสัญญาณเสียงทั้งสองไปพร้อมๆกันเรียกว่าการ Multiplexing ส่วนใหญ่แล้วปัญหาที่เกิดในระบบ FM ที่เป็น Stereo จะเกิดจากสัญญาณที่ส่งออกไปนั้นมีความถี่ที่ไปรบกวนสัญญาณ pilot ทำให้ที่ภาครับไม่สามารถรับสัญญาณเสียงที่เป็น Stereo ได้ ดังนั้นโครงงานนี้จึงได้จัดทำ low pass fitter ขึ้น เพื่อมาแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยการใช้วงจร Brick-wall low pass filter เพื่อให้ low pass filter มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับวงจร low pass filter ในอุดมคติ ซึ่งช่วยทำให้ stop band มีขนาดแคบลง โดยจะกำหนดความถี่ให้อยู่ที่ 15 kHz

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและออกแบบวงจร ของ วงจรของ 15kHz Brick – wall low pass fitter
2. เพื่อแก้ไขปัญหาการรบกวนสัญญาณ pilot ในระบบ stereo multiplexing

1.3 ขอบเขตงาน

1. ศึกษาลักษณะการทำงานของระบบ 15kHz Brick – wall low pass filter
2. ออกแบบจงจรของ 15kHz Brick – wall low pass filter
3. สร้างอุปกรณ์ต้นแบบและทดสอบเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์

1.4 ขั้นตอนการดาเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูล
2. เขียนโครงการและเสนอโครงการกับอาจารย์ที่ปรึกษา
3. ออกแบบวงจร Brick – wall low pass fitter
4. สร้างอุปกรณ์ต้นแบบและทดสอบเพื่อให้ได้ ตามวัตถุประสงค์
5. สรุปผลการทดลองและเขียนรายงาน
6. นำเสนอโครงงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถแก้ไขปัญหาการรบกวนสัญญาณ Pilot ในระบบ Stereo Multiplexing
2. สามารถนำความรู้ที่ได้มาใช้การประกอบวิชาชีพ
3. สามารถนำความรู้ทางทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ
4. สามารถทำงานเป็นทีมได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน

2.1 บทนำ

การส่งกระจายเสียงระบบ FM Stereo Multiplex เป็นระบบที่คิดค้นหลังจากระบบกระจายเสียงแบบอื่นๆ เมื่อประมาณ พ.ศ. 2460 ซึ่งเป็นเวลาที่ใกล้เคียงกับที่มีการส่งกระจายเสียงระบบ AM นายอาร์มสเตรอง (Armstrong) ได้คิดค้นการกระจายเสียงระบบ FM ขึ้นเป็นผลสำเร็จต่อมาราว พ.ศ.2490 ได้มีผู้พยายามส่งกระจายเสียงระบบ Stereo ในหลายประเทศมีการทดลองส่งกระจายเสียงแบบ Stereo โดยใช้ความถี่ 2 ความถี่ ในการส่งความถี่หนึ่งกระจายเสียงสัญญาณซีกขวา อีกความถี่หนึ่งส่งกระจายเสียงสัญญาณซีกซ้าย มีการทดลองทั้งระบบ AM และ FM แต่มีปัญหาคือเกิดความสิ้นเปลือง เพราะถ้ามีการส่งหลายความถี่ ทางฝั่งผู้รับก็ต้องใช้เครื่องรับหลายเครื่องตามไปด้วย ในประเทศไทยสถานีวิทยุทหารเรือก็เคยทดลองส่งกระจายเสียบแบบ Stereo โดยใช้ความถี่ 2 ความถี่ในระบบ AM ต่อมาได้มีการคิดค้นการส่งกระจายเสียงระบบ Stereo โดยใช้ความถี่เดียวในการส่ง โดยอาร์มสตรองและคณะอาจารย์ของมหาวิทยาลัยโคลัมเบียแห่งสหรัฐอเมริกา เป็นผู้เริ่มต้นที่สโมสรวิทยุแห่งอเมริกา (RADIO CLUB OF AMERICA) เรียกระบบนี้ว่า Stereo Multiplex ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวิทยุกระจายเสียงระบบ FM Stereo Multiplex และทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับหลักการออกแบบวงจร Low Pass Filter

2.2 วิทยุกระจายเสียง FM Stereo Multiplex

สเตอริโอ (Stereo) หมายถึง ระบบที่สามารถแยกทิศทางของเสียงได้ เมื่อเป็นการจำลองมิติให้คล้ายกับการฟังจากของจริง เมื่อเราฟังดนตรีจากระบบ Stereo ใน 2 ทิศทาง (2 Channel) จะสามารถแยกตำแหน่งของเครื่องดนตรีได้ว่าเสียงของเครื่องดนตรีชิ้นนั้นๆ มาจากทิศทางใด ด้านซ้าย ด้านขวาหรือกึ่งกลาง แต่สำหรับระบบ Stereo ใน 4 ทิศทาง (4 Channel) แล้ว เราจะได้มิติของเสียงเพิ่มขึ้นสามารถแยกตำแหน่งของทิศทางได้รอบตัว ทำให้เพิ่มรสชาติของการฟังได้มายิ่งขึ้น

มัลติเพล็กซ์ (Multiplex) หมายถึง การส่งสัญญาณหลายๆ สัญญาณ รวมกันมาเป็นการผสมสัญญาณต่างๆ ลงบนคลื่นพาห์อันเดียวกัน แล้วส่งออกไปพอถึงปลายทางด้านเครื่องรับก็ใช้วิธีการแยกสัญญาณต่างๆ ออกมาตามต้องการ เปรียบเทียบได้กับเราเอาสิ่งของหลายๆ อย่างใส่หีบห่อเดียวกันแล้วส่งไปยังปลายทาง เมื่อถึงจุดหมายเราก็แกะหีบห่อแยกเอาสิ่งของเหล่านั้นออกมาใช้งานตามความประสงค์ ฉะนั้น การส่งกระจายเสียงระบบ Stereo จึงหมายถึง การนำสัญญาณเสียงซีกซ้าย (L) และสัญญาณเสียงซีกขวา (R) Multiplex รวมกันไปกับคลื่นพาห์ส่งกระจายคลื่นไปยังเครื่องรับ ทางเครื่องรับจะมีขบวนการแยกเอาสัญญาณ L และ R ออกมาจากคลื่นพาห์อีกครั้ง

2.2.1 การ Multiplex สัญญาณแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. Time Multiplex เป็นการส่งสัญญาณต่างๆ รวมกันมาตามลำดับของเวลา เช่น การส่งสัญญาณภาพของโทรทัศน์ขาวดำธรรมดา เมื่อส่งสัญญาณไปหนึ่งเส้นก็สอดด้วยสัญญาณอื่นๆ แล้วเริ่มต้นใหม่

2. Frequency Multiplex เป็นการส่งสัญญาณต่างๆ รวมกันมาในเวลาเดียวกัน ไม่เรียงตามลำดับเวลา ในการส่งสัญญาณโทรทัศน์สี ก็ใช้การ Multiplex แบบนี้ร่วมด้วย เพราะสัญญาณสีเกาะมาพร้อมกับสัญญาณขาว-ดำ ในเวลาเดียวกันในการส่งกระจายเสียง ระบบ FM Stereo Multiplex ก็ใช้การ Multiplex แบบนี้ด้วยช่วยกัน

ตัวอย่างการพัฒนาของการส่งกระจายเสียงระบบ Stereo Multiplex

1. Stereo Sonic System ผู้คิดค้นระบบนี้ คือ วิลเลียม ฮอลสเตด (WILLIAM HALSTEAD) และเมอเรย์ ครอสบี้ (MURRAY CROSBY) ได้เริ่มทดลองเมื่อปี พ.ศ. 2491 ระบบนี้เป็นระบบในยุคแรกๆ ของการส่งกระจายเสียงแบบ Stereo Multiplex ที่ใช้ความถี่เดียวในการกระจายเสียง โดยปรับปรุงจากสถานีวิทยุกระจายเสียง FM ธรรมดาซึ่งส่งด้วยคลื่นความถี่ 97.9 MHZ ส่งสัญญาณ Stereo ด้วยการใช้คลื่นพาห์ย่อย (Subcarrier) ความถี่ 35 kHz ผสมกับการ Multiplex เข้ากับความถี่หลัก 97.9 MHz ในการส่งแบบนี้ทำให้ไม่เปลืองความถี่บนหน้าปัดของเครื่องรับวิทยุ เนื่องจากส่งด้วยความถี่หลักเพียงความถี่เดียวเท่านั้น สัญญาณคลื่นพาห์ย่อยความถี่ 35 kHz นั้น นับว่าน้อยมากถ้าเทียบกับความถี่หลัก 97.9 MHz เปรียบได้กับสัตว์หรือแมลงตัวเล็ก ๆ ที่อาศัยเกาะสัตว์ใหญ่ร่วมเดินทางไปด้วย จะสังเกตว่าเป็นความถี่เสียงที่หูมนุษย์ได้ยินเพียงเล็กน้อยเท่านั้นความถี่ 35 Hz นี้ ยังไม่จัดว่าเป็นคลื่น RF ในสเปคตรัมของคลื่นวิทยุ ความจริงแล้วจัดอยู่ในช่วงความถี่เหนือเสียงที่เรียกว่า Sonic หรือ Super Sonic เท่านั้น

ระบบ Stereo ชนิดนี้มีข้อบกพร่อง คือ ส่งได้ความถี่กว้างเพียง 8 kHz เท่านั้น เสียงที่หูมนุษย์ได้ยินเริ่มที่ 20 Hz จนถึง 20 kHz ซึ่งมีช่วงความถี่กว้างถึง 20,000 – 20 = 19,980 Hz หรือประมาณ 20 kHz นั่นเอง นับว่าสูงกว่า 8 kHz เกือบสามเท่าตัว ฉะนั้น เสียง Stereo ที่ได้จากระบบนี้จึงเป็นเสียงที่ขาดความไพเราะ ไม่มีความเป็น Hi – Fi และเนื่องจากความถี่อยู่ในช่วงที่มี Stepband แคบ เมื่อเร่งเครื่องให้เสียงดังก็จะมีเสียงกวนตามมา แต่อย่างไรก็ตามระบบนี้ก็นับว่าเป็นความก้าวหน้าขึ้นมาอีกหนึ่งขั้นคือทำให้ส่งสัญญาณ Stereo แบบ Multiplex ได้

2. Sum And Difference System เมื่อ วิลเลียม ฮอลเสตด และ เมอเรย์ ครอสบี้ ได้ร่วมกันคิดค้นระบบ Stereo Sonic ขึ้น แต่ไม่สามารถพัฒนาระบบให้ดีขึ้นได้ ทั้งสองจึงแยกกันค้นคว้าต่อ

ราวปี พ.ศ. 2501 เมอเรย์ ครอสบี้ ได้คิดค้นระบบผลบวก ผลต่างขึ้น โดยเอาสัญญาณซีกซ้ายมารวมกับสัญญาณซีกขวา เป็นสัญญาณ (L + R) เอาสัญญาณ (L + R) นี้ผสมกับคลื่นพาห์หลัก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

และได้นำเอาสัญญาณซีกซ้าย ลบสัญญาณซีกขวาเป็นสัญญาณ (L– R) เอาสัญญาณ (L – R) นี้ผสมเข้ากลับคลื่นพาห์ย่อย จากนั้นจึงนำสัญญาณคลื่นพาห์หลักที่มีสัญญาณ (L + R) มา Multiplex เข้ากับคลื่นพาห์ย่อยที่มีสัญญาณ (L – R) เข้ากันอีกที การทำเช่นนี้ทำให้ได้ช่วงความถี่ที่กว้างขึ้นถึง 15 kHz เป็นเสียง Hi-Fi ที่ใกล้เคียงกับเสียงธรรมชาติ

3. Phantodyne System หรือที่เรียกว่าระบบเงา เป็นระบบที่ วิลเลียม ฮอลสเตด แยกมาค้นคว้าด้วยตัวเอง ในระบบนี้ ฮอลสเตด ได้ใช้หลักคลื่นพาห์ย่อย 2 ความถี่ คือ 67 kHz และ 41 kHz

4. Pilot Tone Systemระบบนี้ใช้หลักการที่สำคัญ คือ ใช้ความถี่ 19 kHz มัลติเพล็กซ์เข้ากับสัญญาณคลื่นพาห์ด้วย เพื่อให้ความถี่ 19 kHz นี้ปรากฏทางด้านเครื่องรับควบคุมให้เครื่องรับทำงานตามเครื่องส่ง เราทราบกันดีแล้วว่าความถี่ 19 kHz นี้ ยังเป็นความถี่โทนเสียงอยู่ เพราะอยู่ในช่วงความถี่ 20 Hz – 20 kHz ซึ่งเป็นความถี่หูมนุษย์เราสามารถรับฟังได้

Pilot Tone System นี้ เป็นระบบ FM Stereo Multiplex ที่หลายประเทศใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ แต่อาจจะมีบางประเทศในยุโรป เช่น ประเทศรัสเซีย ที่ใช้ระบบ Polar Modulation ซึ่งเป็นระบบของตนเองโดยเฉพาะ

2.2.2 ความเป็นมาของระบบไพล็อตโทน (Pilot Tone System)

ในระยะเริ่มแรกที่สหรัฐอเมริกา ได้มีการเสนอระบบการส่งวิทยุกระจายเสียง Stereo Multiplex ถึง 19 ระบบ เพื่อให้รัฐบาลของสหรัฐอเมริกาคัดเลือกเข้าเป็นระบบของชาติ โดยได้รับความยินยอมจาก FCC. (FCC. อ่านว่า เอฟ.ซี.ซี. เป็นชื่อย่อของคณะกรรมการควบคุมการสื่อสารของสหรัฐอเมริกา ชื่อเต็ม คือ Federal Communication Commission) ในปี พ.ศ.2502 ได้มีการคัดเลือกระบบต่างๆ ลงเหลือ 6 ระบบ เพื่อพิจารณาอีกครั้งจนกระทั่งในปี พ.ศ.2504 ได้มีการยอมรับระบบของบริษัท จี อี (GE) และ Zenith Radio Corporation โดยนำทั้งสองระบบมาปรับปรุงเป็นระบบเดียวกัน เรียกว่า ระบบ Pilot Tone Signal ซึ่งทาง FCC. ได้รับรองและยอมรับเป็นระบบของสหรัฐอเมริกา (ปัจจุบันประเทศไทยใช้ระบบนี้ด้วย) ระบบวิทยุกระจายเสียง FM Stereo Multiplex มีหลายระบบแต่ที่ FCC. ได้รับคัดเลือกเอาระบบสัญญาณ Pilot Tone Signal นั้น พิจารณาจากหลักใหญ่ 2 ประการ คือ

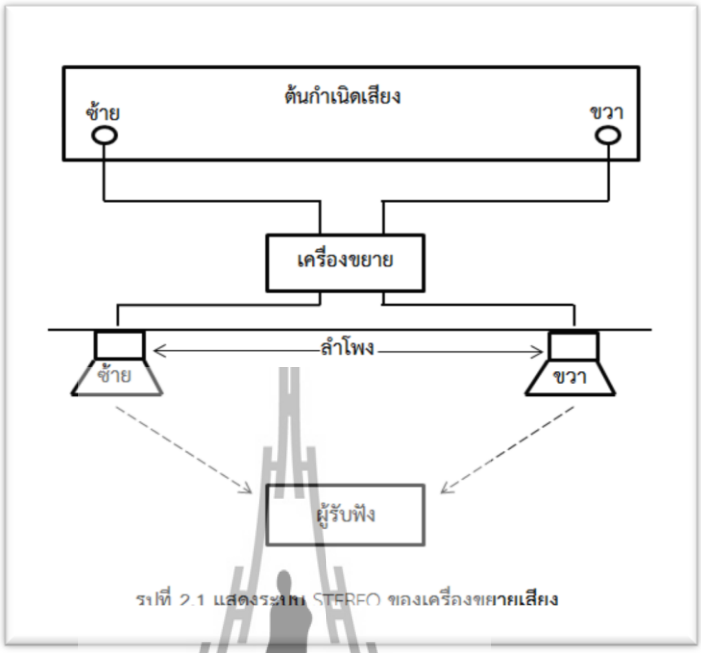
1. ระบบสัญญาณ Pilot Tone เป็นระบบประหยัด ใช้ความถี่เดียว ในการส่งกระจายเสียง

2. เป็นระบบที่เครื่องรับ FM ธรรมดา สามารถรับฟังสัญญาณได้เช่นเดิมโดยไม่ต้องดัดแปลงแก้ไข แต่อย่างใด

ตามที่กล่าวมานี้ มิได้หมายความว่า ระบบสัญญาณ Pilot โทนจะเป็นระบบที่ดีที่สุดในการส่งกระจายเสียงแบบ FM Stereo Multiplex แต่เป็นระบบที่เหมาะที่สุดของสิ่งแวดล้อมในสหรัฐอเมริกาขณะนั้น

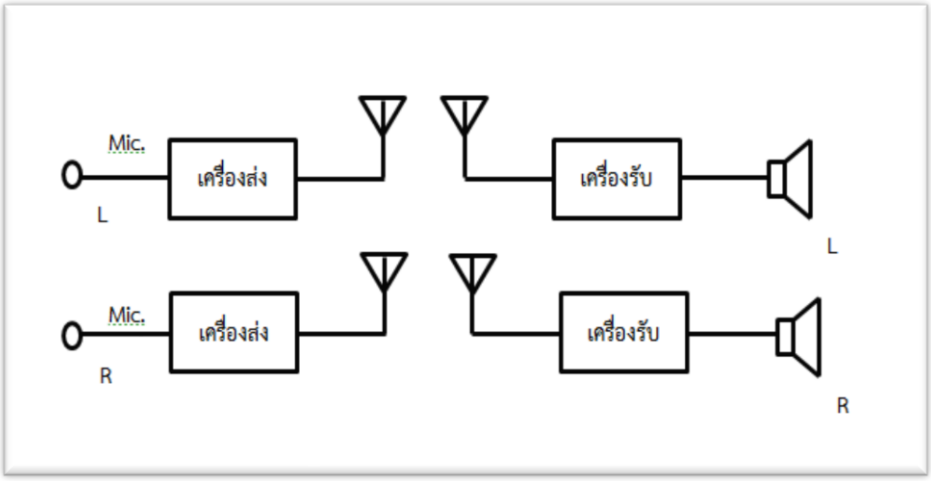
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.2.3 แนวความคิดในการส่งกระจายเสียงระบบ Stereo Multiplex



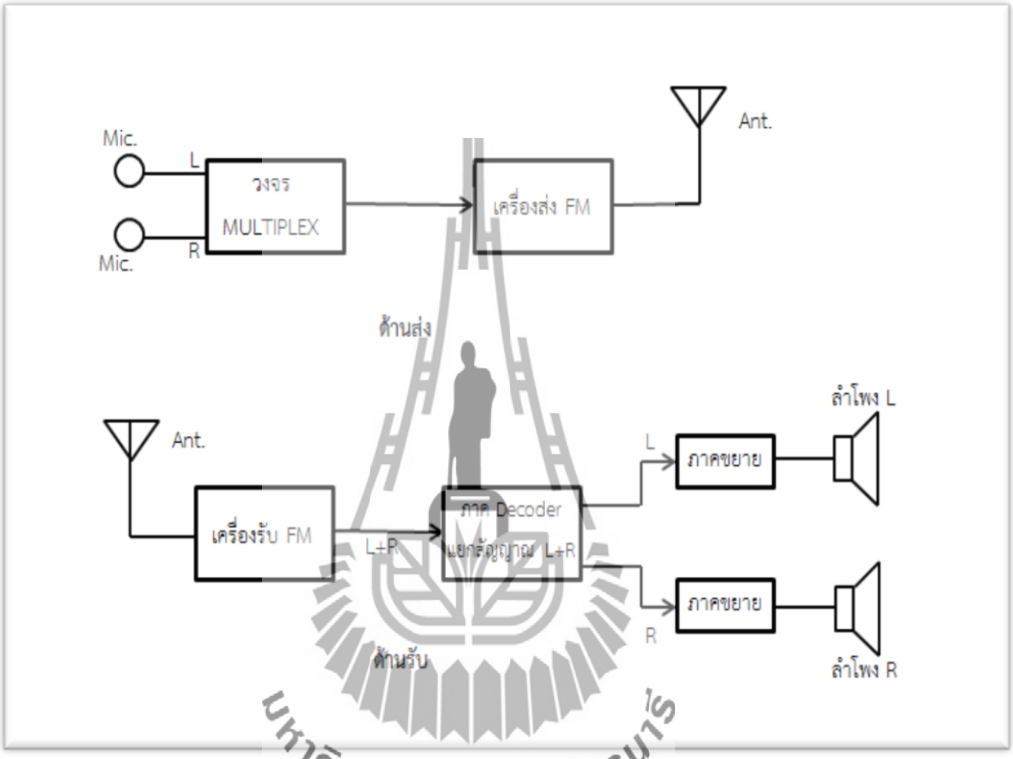
รูปที่ 2.1 แสดงระบบ Stereo ของเครื่องขยายเสียง

ในรูปที่ 2.1 แสดงระบบ Stereo ของเครื่องขยายเสียงจะเห็นว่ามีตัวรับสัญญาณเสียงอยู่ 2 ชุด คือ Mic.รับสัญญาณเสียงทางซีกซ้าย และไมรับสัญญาณเสียงทางซีกขวา สัญญาณเสียงจากไมโครโฟนทั้งสองจะถูกส่งไปยังเครื่องขยายเสียงซึ่งแยกเป็นซ้าย – ขวาด้วยเช่นกัน และในที่สุดสัญญาณจากไมซีกซ้ายจะถูกขยายออกสู่ลำโพงซ้าย สัญญาณจากไมซีกขวาจะถูกขยายออกสู่ลำโพงขวา โดยมีผู้รับฟังอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างลำโพงทั้งสองซึ่งเป็นจุดที่สามารถรับฟังเสียงที่มีความเป็น Stereo มากที่สุดหรือเป็นตำแหน่งที่ผู้ฟังสามารถแยกทิศทางของเสียงได้ดีที่สุด



รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมแสดงการส่งกระจายเสียงระบบ Stereo

ในรูปที่ 2.2 เป็นบล็อกไดอะแกรมแสดงการส่งกระจายเสียงระบบ Stereo โดยใช้เครื่องส่ง 2 ชุด ในการส่งสัญญาณซีกซ้ายและขวา ในระบบนี้ความถี่ของเครื่องส่งทั้งสองจะต้องใช้คนละความถี่ และทำนองเดียวกันทางด้านการรับก็ต้องใช้เครื่องรับสองชุด จะเห็นว่าระบบนี้เป็นระบบที่สิ้นเปลืองอุปกรณ์และสิ้นเปลืองย่านความถี่ (เพราะต้องใช้สองความถี่) การปรับเครื่องให้สมดุลก็ยุ่งยากทั้งทางเครื่องรับและเครื่องส่ง



รูปที่ 2.3 แนวคิดในการ Multiplex สัญญาณซ้าย-ขวา เพื่อส่งไปกับคลื่นพาห์อันเดียว

รูปที่ 2.3 แสดงแนวความคิดที่พัฒนาขึ้นมาอีกขั้น โดยทางเครื่องส่งจะใช้วิธีการ Multiplex สัญญาณเสียงซีกซ้ายและขวาเข้าด้วยกัน แล้วส่งเข้าไป Mod กับคลื่นพาห์ที่ใช้ในการส่งออกอากาศ โดยใช้การส่งในระบบ FM

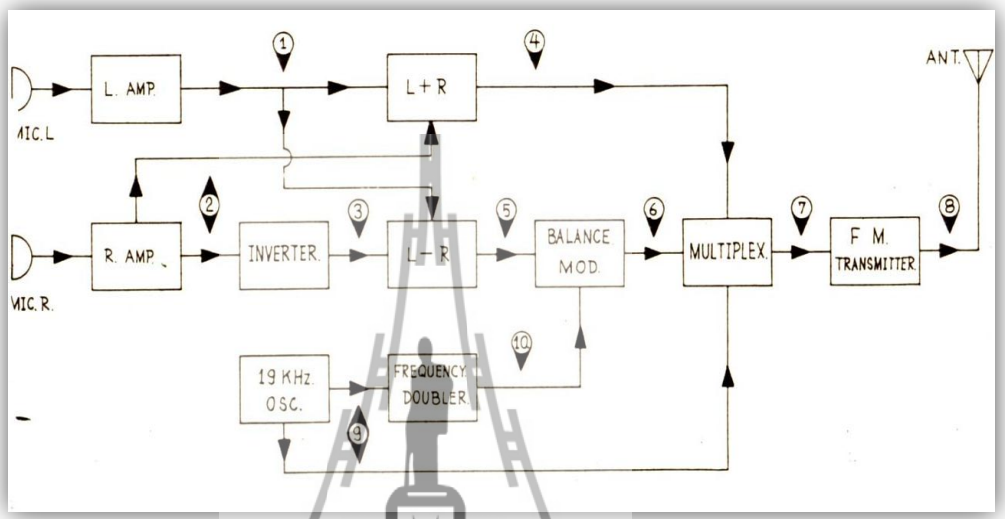
ทางด้านเครื่องส่ง ทำการ Multiplex สัญญาณเสียงซีกซ้ายและขวาแล้วส่งเข้าไป Mod กับคลื่นพาห์ที่ใช้ในการส่งออกอากาศ โดยใช้การส่งในระบบ FM

ทางด้านเครื่องรับ จะรับคลื่น FM เข้ามา แล้วทำการแยกสัญญาณซีกซ้าย (L) และขวา (R) ออกจากกัน จากนั้นก็ทำการขยายเสียงออกสู่ลำโพงซ้ายและขวา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การ Multiplex สัญญาณเสียงซีกซ้ายและขวาแล้วส่งไปกับคลื่นพาห์อันเดียวกันนั้น ต้องใช้วิธีการพิเศษที่ไม่ทำให้สัญญาณทั้งสองกวนกันได้ง่าย และการถอดแยกสัญญาณซ้าย – ขวา ทางด้านเครื่องรับจะต้องทำได้ดีโดยไม่ยุ่งยากมากนัก

2.2.4 หลักการส่งกระจายเสียงระบบ FM Stereo Multiplex ในปัจจุบัน



รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมแสดงเครื่องส่งกระจายเสียงระบบ FM Stereo Multiplex ในปัจจุบัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในรูปที่ 2.4 เป็นบล็อกไดอะแกรมที่แสดงหลักการของเครื่องส่งกระจายเสียงระบบ FM Stereo Multiplex ที่ได้รับการอนุมัติจากสถาบัน FCC. ของสหรัฐอเมริกา เป็นระบบที่ใช้กันแพร่หลายและเป็นที่ยอมรับของนานาประเทศ (ปัจจุบันประเทศไทยใช้ระบบนี้)

หลักการทำงานเริ่มต้นจากไมโครโฟนซ้าย (MIC.L) และไมโครโฟนขวา (MIC .R) จะรับสัญญาณ (L +R) (ที่ภาค L+R) สัญญาณ (L+R) ที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังภาค Multiplex เพื่อเตรียม Multiplex รวมกับสัญญาณอื่น ๆ

สัญญาณส่วนหนึ่งจากภาคขยายสัญญาณเสียง (R) จะถูกส่งไปที่ภาค Inventor ด้วย เพื่อกลับเฟสสัญญาณ (R) ไปจากเดิมอีก 180 องศากลายเป็นสัญญาณ (L- R) ส่งไปรวมกับสัญญาณที่มาจากภาคขยายเสียง (L) ที่ภาค (L – R) สัญญาณที่รวมกันนี้จะกลายเป็นสัญญาณ (L – R) ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังภาค Balance Modulator เพื่อ Modulate กับคลื่นพาห์ย่อย 38 kHz ที่เข้ามาอีกทาง

คลื่นพาห์ย่อย (Subcarrier) 38 kHz นั้นได้มาจากความถี่คลื่นซายน์ 19 kHz จากภาค ออสซิลเลเทอร์ ซึ่งถูกส่งเข้ามาทวีคูณความถี่ขึ้นอีกสองเท่า (19 kHz x 2 = 38 KHz) ที่ภาคทวีคูณความถี่สองเท่า (Frequency Doublers)

ความถี่ 38 KHz ที่ได้นี้จะถูกใช้เป็นคลื่นพาห์ย่อยเพ่อส่งไป Mod กับสัญญาณเสียง (L–R) ที่ภาคบาลานซ์มอตดูเลเทอร์

ภาคบาลานซ์มอตดูเลเตอร์ นอกจากจะทำหน้า Mod สัญญาณเสียง (L – R) เข้าทางส่วนสูงของสัญญาณคลื่นพาห์ย่อยแล้ว (Mod แบบ AM) มันยังทำหน้าที่กำจัดคลื่นพาห์ย่อยไม่ให้ไปปรากฏออกไปเป็นสัญญาณที่เอ้าท์พุทเพียงลำพังสัญญาณเดียวอีกด้วย (สัญญาณที่ Mod รวมกันแล้วเท่านั้นที่ปรากฏออกไปเป็น สัญญาณเอ้าท์พุทของภาคบาลานซ์มอตดูเลเตอร์)

เราเรียกสัญญาณที่ Mod รวมกันระหว่างสัญญาณคลื่นพาห์ย่อย 38 kHz และสัญญาณเสียง (L – R) นี้ว่าสัญญาณคลื่นพาห์ย่อย L – R (L – R Subcarrier) และสัญญาณนี้จะถูกส่งไป Multiplex เพื่อ Multiplex รวมกันไปกับสัญญาณอื่น ๆ

นอกจากนี้แล้วภาคออสซิเลเตอร์ยังแยกส่งความถี่ 19 kHz สำหรับเป็นสัญญาณ Pilot Tone ไปยังภาค Multiplex เพื่อ Multiplex สัญญาณ 19 kHz รวมไปกับสัญญาณอื่นๆ อีกด้วยจะเห็นว่าที่ภาค Multiplex จะเป็นที่รวมของสัญญาณต่าง ๆ คือ

1. สัญญาณเสียง (L + R) จากภาค L + R

สัญญาณ (L + R) สัญญาณนี้เป็นผลรวมของสัญญาณเสียงซีกซ้ายและซีกขวาเป็นสัญญาณเสียงแบบโมโน ที่ต้องส่งสัญญาณนี้ไปด้วยก็เพื่อใช้สำหรับการรับรองเครื่องรับ FM ธรรมดาให้รับฟังจากสถานีที่ส่งในระบบ Stereo Multiplex ได้ เครื่องรับ FM ธรรมดาจะรับเอาเฉพาะสัญญาณนี้ไปเป็นสัญญาณเสียงออกสู่ลำโพง เสียงที่ได้จะมีครบทั้งสัญญาณซีกซ้ายและขวารวมกัน ไม่มีการแยกทิศทางของเสียง และคุณภาพเสียงจะเหมือนกับการรับฟังจากสถานีวิทยุ FM ทั่วไป

2. สัญญาณ (L – R) ซัพแคเรียร์จากภาคบาลานซ์มอตดูเลเตอร์

สัญญาณคลื่นพาห์ย่อย (L – R) ที่ต้องเอาสัญญาณ (L – R) ไปมอตดูเลตกับคลื่นพาห์ย่อย 38 kHz ก่อน ก็เพราะเราต้องการส่งสัญญาณ (L – R) รวมกันไปพร้อม ๆ กับสัญญาณ (L + R) โดยไม่ต้องการให้สัญญาณทั้งสองมีการแทรกแซงกัน วิธีการนี้เป็นกลวิธีในการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเข้าด้วยกัน เปรียบเสมือนกับเราต้องการส่งน้ำมันใส่น้ำมันทั้งสองรวมกันไปในถังเดียวกันถ้าเราทำโดยการน้ำมันเบนซินใส่ลงไปในถังก่อน (ก็เหมือนกับเราเอาสัญญาณ (L + R) ม็อดกับคลื่นพาห์ที่ใช้ในการส่งออกอากาศ) จากนั้นจึงหาขวดที่ขนาดเล็กกว่าถังมาบรรจุน้ำมันก๊าซและปิดฝาขวดให้แน่น (ทำนองเดียวกับที่เราเอาสัญญาณ (L - R) Mod กับคลื่นพาห์ย่อย) แล้วเอาขวดน้ำมันก๊าซใส่ลงใน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ถังน้ำมันเบนซินอีกที ด้วยวิธีนี้ทำให้เราสามารถเอาน้ำมันเบนซินและน้ำมันก๊าซใส่ร่วมไปในถังเดียวกันได้โดยน้ำมันทั้งสองชนิดไม่ผสมปนกัน (เช่นเดียวกับสัญญาณ (L+R) และสัญญาณ (L – R) ซัพแคเรียร์จะไม่มีการแทรกแซงกัน) เมื่อส่งไปถึงปลายทางเพียงเรายกขวดน้ำมันก๊าซขึ้นก็สามารถแยกน้ำมันทั้งสองชนิดออกจากกันได้โดยง่าย

เราสามารถเอาสัญญาณเสียง (L – R) และ (L + R) ที่ส่งไป มาแปลงสภาพให้แยกเป็นสัญญาณเสียงซีกซ้ายและขวา (L และ R) ปรากฏทางด้านเครื่องรับไว้ โดยการนำสัญญาณทั้งสองมาบวกหรือลบกัน ซึ่งแสดงได้ด้วยพีชคณิตดังนี้

เมื่อนำสัญญาณ (L + R) และ (L – R) มาบวกกัน

L + R

L – R

จะได้สัญญาณเสียงซีกซ้าย = 2L

เมื่อนำสัญญาณ (L + R) และ (L – R) มาลบกัน

L + R

L – R

จะได้สัญญาณเสียงซีกขวา = 2 R

3. สัญญาณ Pilot Tone 19 kHz จากภาคออสซิลเลเตอร์

สัญญาณ Pilot Tone 19 kHz เนื่องจากสัญญาณเสียง (L – R) ที่ส่งมายังเครื่องรับเป็นสัญญาณเสียงที่ Mod มากับคลื่นพาห์ย่อย 38 kHz ฉะนั้น ในการนำมาเสริมหรือหักล้างกับสัญญาณ (L + R) ในวงจรแยกสัญญาณ Stereo (วงจรดีโค้ดเดอร์) เพื่อทำให้เกิดเป็นสัญญาณเสียงซีกซ้ายและขวาขึ้นนั้น จำเป็นต้องมีสัญญาณ 38 kHz ที่มีเฟสสัมพันธ์กัน (Synchronize) กับคลื่นพาห์ย่อยที่ Mod มากับสัญญาณ (L – R) เพื่อช่วยให้วงจรดีโค้ดเดอร์ทำงานแยกสัญญาณได้ จึงต้องมีการส่งสัญญาณ Pilot Tone 19 kHz มาด้วย เพราะความถี่ 19 kHz เมื่อมาถึงเครื่องรับก็สามารถทำให้เป็นความถี่ 38 kHz ได้โดยง่าย ด้วยการใช้วงจรทวีคูณความถี่ขึ้นมาอีกสองเท่า และเนื่องจากความถี่ 19 kHz ซึ่งเป็นสัญญาณ Pilot Tone นี้เป็นต้นกำเนิดของสัญญาณคลื่นพาห์ย่อยทางด้านเครื่องส่ง ความถี่ 38 kHz ที่ได้จึงมีเฟสที่สัมพันธ์กับสัญญาณคลื่นพาห์ย่อย (L – R) ตลอดเวลา

พิจารณา Side Band ของสัญญาณรวม (Composite Signal) จะได้

สัญญาณเสียง (L+R) = 15 kHz

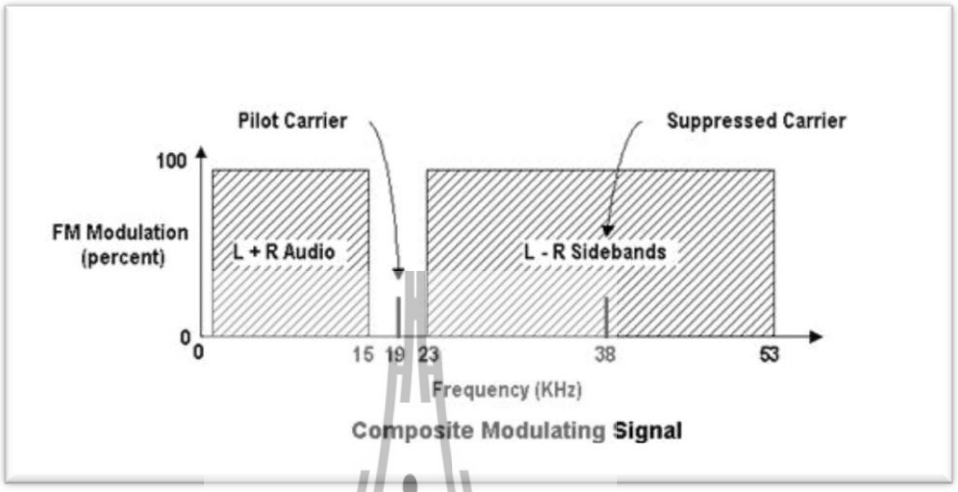
สัญญาณ Side Band ด้านต่ำ (LSB)

LSB = 38 kHz – 15 kHz = 23 kHz

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สัญญาณ Side Band ด้านสูง (USB)

USB = 38 kHz + 15 kHz = 53 kHz



รูปที่ 2.5 ระบบ FM Stereo Multiplex

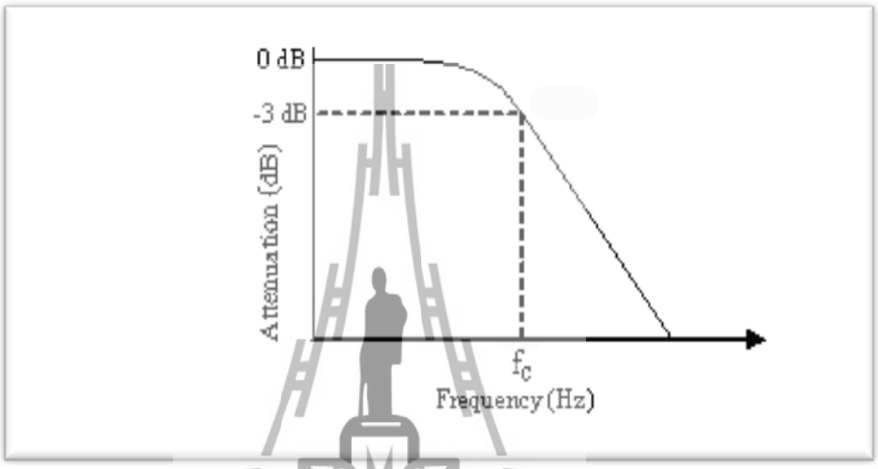
2.3 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low Pass Filter)

วงจรกรองความถี่หรือ Filter คือวงจรไฟฟ้าที่ยอมให้สัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่ใดๆ ความถี่หนึ่งหรือช่วงความถี่ใดความถี่หนึ่งเท่านั้นผ่านไปได้ ส่วนความถี่อื่นหรือช่วงความถี่อื่นๆ นอกเหนือจากที่กำหนดจะถูกลดทอนไปซึ่งจะเป็นช่วงความถี่ใดนั้นจะขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจรวงจรกรองความถี่จะมีทั้งแบบ passive และ active คำว่า passive นั้นหมายถึงวงจร Filter ที่ไม่ต้องการไฟฟ้า ไม่มีการขยาย (Unpowered Components (R,L,C)) มีแต่การลดทอนสัญญาณลง การลดทอนนี้เราจะเรียกว่า Insertion Loss ส่วนวงจรแบบ Active นั้นจะมีวงจรขยายสัญญาณอยู่ภายใน จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้า มักจะใช้กันที่ความถี่ต่ำๆ เช่น ในวงจรเครื่องขยายเสียง

วงจรแบบกรองความถี่ต่ำจะยอมให้ความถี่ผ่านได้ในช่วงตั้งแต่สัญญาณที่เป็นแรงดัน DC ไปจนถึง Cutoff Frequency (f_c) โดย Cutoff Frequency บางครั้งอาจเรียกความถี่นี้ได้ว่าความถี่มุม (Corner Frequency) ความถี่ผ่านได้เราเรียกว่า ช่วงผ่าน (Pass band) และช่วงที่ไม่ยอมให้ความถี่ผ่านเรียกว่าช่วงลดทอน (Stopband)

2.3.1 ความถี่ Cutoff Frequency

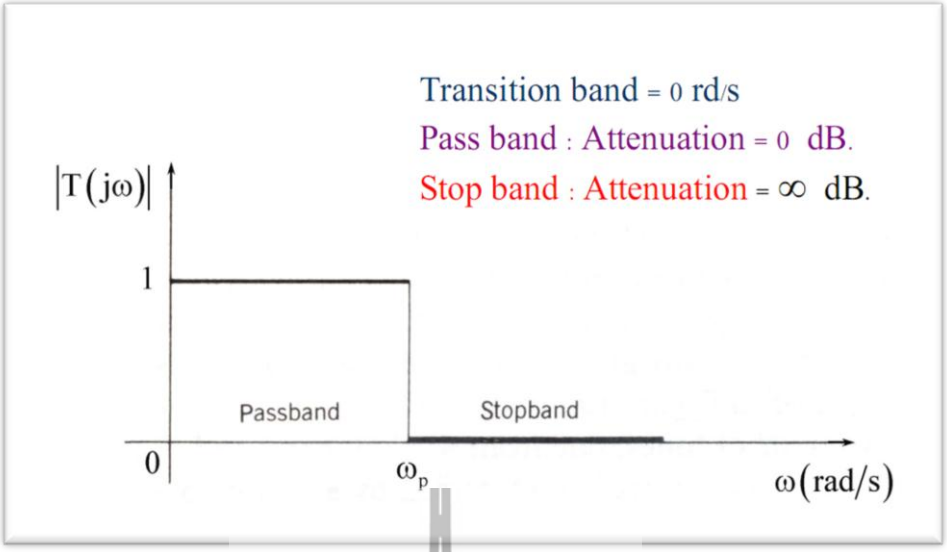
Cutoff Frequency (f_c) คือ ความถี่ที่ระบุจุดตัดของสัญญาณว่าจะให้ผ่าน หรือไม่ผ่าน ตัวอย่างเช่น ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีค่า Cutoff Frequency เท่ากับ 1,000 Hz จะยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่า 1,000 Hz ผ่านไปได้แต่จะไม่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่สูงกว่า 1,000 Hz ผ่าน Cutoff Frequency จะอยู่ที่แถบตัดความถี่ซึ่งจะถูกกำหนดไว้ในช่วงการส่งผ่านที่มีค่าของการลดทอน (Attenuation) เท่ากับ -3dB



รูปที่ 2.6 ลักษณะของ Cutoff Frequency

2.3.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในอุดมคติ

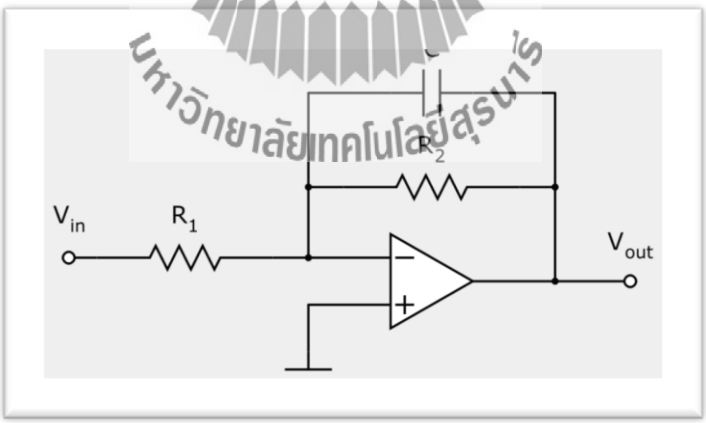
วงจรกรองความถี่ต่ำจะกันไม่ให้สัญญาณที่มีความถี่สูงกว่า Cutoff Frequency (fc) ผ่านเข้าไปในวงจรเลยหากสัญญาณมีความถี่สูงกว่า f_c เพียงเล็กน้อยก็ตาม



รูปที่ 2.7 วงจรกรองความถี่ต่ำในอุดมคติ

2.3.3 วงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ (Active Filter)

Active Filter วงจรกรองความถี่ที่สามารถทำหน้าที่เลือกความถี่ที่ต้องการหรือตัดความถี่ที่ไม่ต้องการออกก็ได้การใช้งานวงจรกรองความถี่สามารถใช้กรองสัญญาณรบกวนหรือกรองเอาสัญญาณข่าวสารออกมาจากคลื่นพาห ในระบบวิทยุดังนั้นอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในวงจรกรองความถี่จะใช้ตัวต้านทานทาน ตัวเก็บประจุร่วมกับอุปกรณ์ที่สามารถทำการขยายสัญญาณ เช่น ออปแอมป์



รูปที่ 2.8 Active Filter

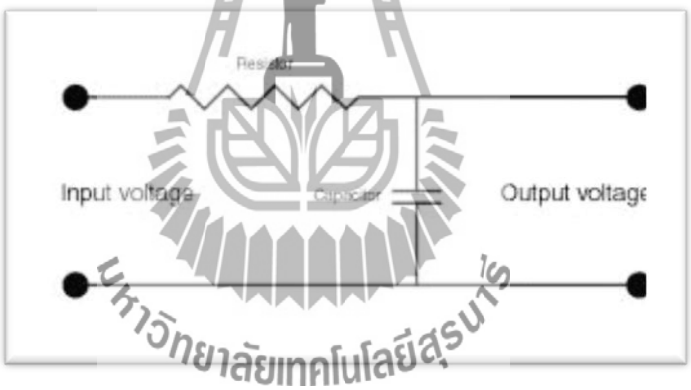
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข้อดี-ข้อเสียของ Active filter

ข้อดี	ข้อเสีย
- เล็ก, เบา	- จำกัด V, I, ความถี่ใช้งาน
- อัตราขยายสูง	- ใช้แหล่งจ่าย
- ปรับแต่งความถี่ง่าย	- มีผลจากอุปกรณ์ active เช่น offset , bias current
- คุณสมบัติใกล้เคียงอุดมคติ	
- แยกวงจรแต่ละหน่วยจากกันไม่ให้กระทบกันได้ง่าย	

2.3.4 วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ (Passive Filter)

Passive filter เป็นวงจรที่ประกอบด้วย R, L, C เท่านั้น บางครั้งไมจำเป็นต้องประกอบด้วยทั้ง 3 อุปกรณ์ ซึ่ง L จะถูกล่ะเว้นบ่อยครั้งเพราะว่า มีขนาดใหญ่และราคาแพง โดยจะเรียกชื่อวงจรตามอุปกรณ์ที่ประกอบในวงจร เช่น RC, RL, RLC



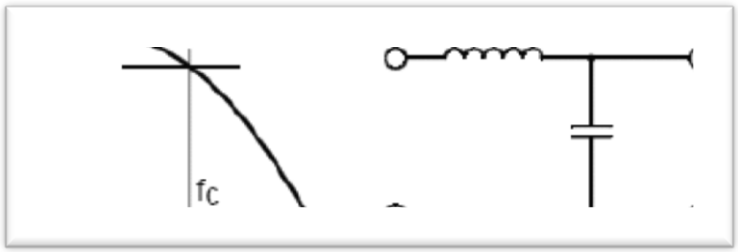
รูปที่ 2.9 Passive Filter

ข้อดี-ข้อเสียของ passive filter

ข้อดี	ข้อเสีย
- อุปกรณ์น้อยชิ้น	- มีการสูญเสียสัญญาณบางส่วนเนื่องจากไม่มีการชดเชย
- ไม่ใช้แหล่งจ่าย	- ราคาแพง ในกรณีที่ต้องการความแม่นยำสูง
- ใช้งานที่ช่วงความถี่กว้าง	- มีการปรับค่าความถี่ได้ยาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Low Pass Filter บางครั้งอาจจะเรียกว่าวงจร High - cut Filter สำหรับ ความถี่วิทยุ และ Treble cut Filter สำหรับวงจรขยายเสียง

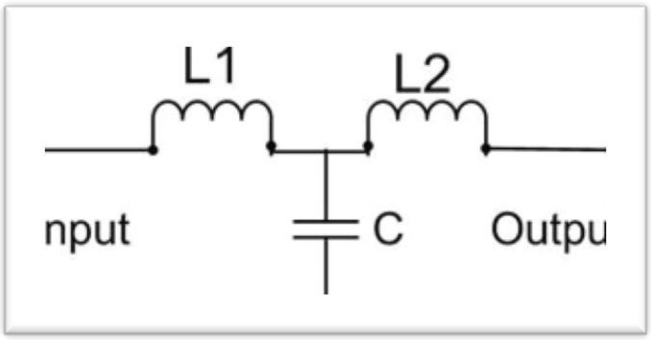


รูปที่ 2.10 วงจร Low Pass Filter โดย L อนุกรมกับวงจร และ C ขนานกับวงจร

วงจร Low Pass Filter มีลักษณะการต่อคือ ใช้ L อนุกรมกับวงจร และ C ขนานกับวงจร คุณสมบัติของวงจรก็คือ เมื่อเราป้อนความถี่ ต่ำเข้าวงจร L จะมีค่า XL ต่ำ C จะมีค่า XC สูง ทำให้ความถี่ ต่ำผ่าน L ได้สะดวก ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้มาก แต่เมื่อความถี่สูงกว่าจุดที่กำหนด ค่า XL จะมากขึ้น ค่า XC จะลดลง ทำให้ความถี่ ผ่านขดลวดได้ลดลง บางส่วนที่ผ่านไปได้ก็จะถูก C ดึงลงกราวด์ ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้น้อยมาก

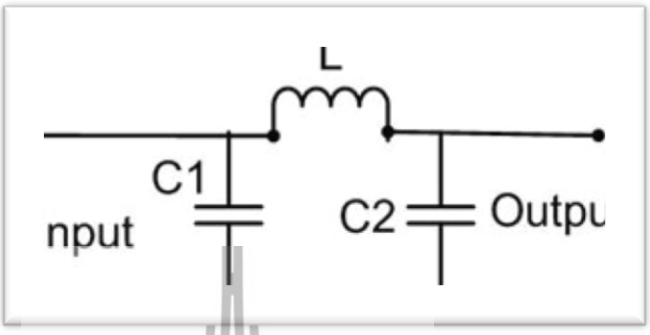
วงจร Low Pass Filter ยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

1. T Type Low Pass Filter การใช้ L หรือ C เพียงตัวเดียว ไม่สามารถกำจัดสัญญาณความถี่สูงได้หมด ตรงจุด Cut Off ทำให้ความถี่สูงผ่านไปได้ เราจึงแก้ปัญหาโดยการเพิ่ม L เข้าไปในวงจรอีกชุด เมื่อต่อแล้ว ลักษณะวงจรคล้าย ตัว T เราจึงเรียกว่า วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แบบที การกรองความถี่ ถ้าต้องการประสิทธิภาพ เราอาจจะใช้วงจรนี้หลายชุด



รูปที่ 2.11 T Type Low Pass Filter

2. Pi Type Low Pass Filter วงจรนี้จะใช้ C 2 ตัวและ L 1 ตัว ต่อกันดังรูป รูปร่างคล้ายตัว Pi (พาย) เราก็เรียกกันว่า วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แบบพาย วงจรแบบนี้จะนิยมใช้ในภาคจ่ายไฟและวงจร Regulator

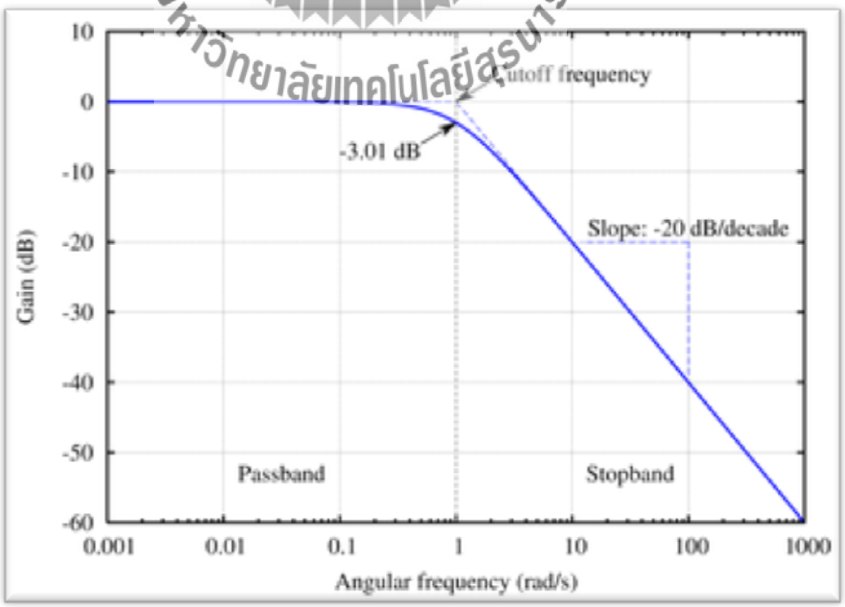


รูปที่ 2.12 Pi Type Low Pass Filter

2.3.5 Sallen - key Low Pass Filter

วงจรกรองความถี่ต่ำจะยอมให้ความถี่ผ่านได้ในช่วงตั้งแต่สัญญาณที่เป็นแรงดัน DC ไปจนถึง Cutoff Frequency ณ ขณะที่อัตราขยายของวงจรมีค่าลดลงเป็น 0.707 เท่าของอัตราขยายปกติ (-3 Bd) บางครั้งอาจเรียกความถี่นี้ได้ว่า ความถี่มุม (Corner Frequency) ถ้ามีความถี่ที่สูงเกิน fc ผ่านวงจรจะลดทอนขนาดความถี่นั้นจนมีค่าน้อยมาก

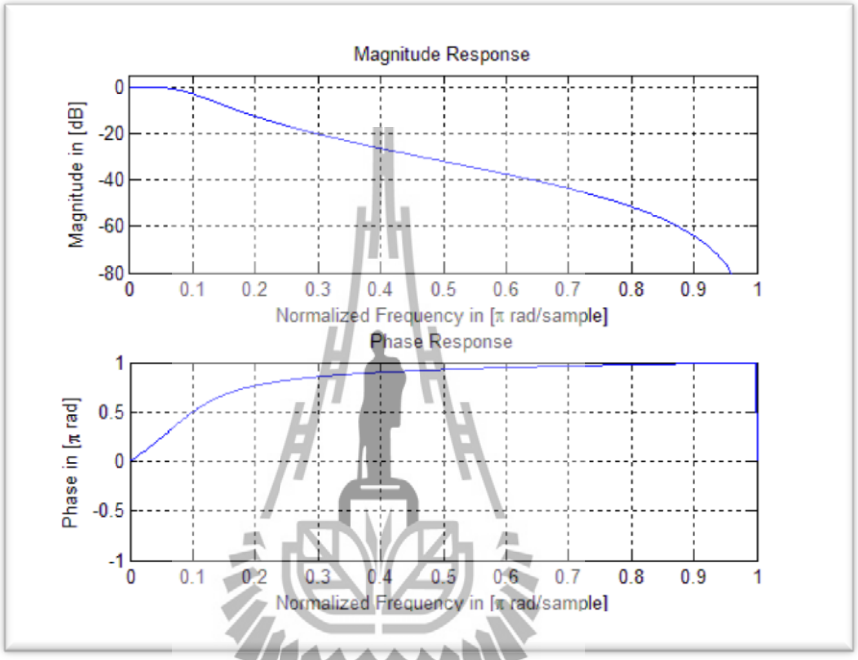
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.13 ผลการตอบสนองทางความถี่ของ Sallen-key Low Pass Filter

2.3.6 Buttetwort Low Pass Filter

ผลตอบสนองเชิงความถี่ของ Butterworth Filter จะมีลักษณะราบเรียบ และมีเฟสแบบเชิงเส้น อย่างไรก็ตามช่วงแถบความถี่จากช่วงแถบผ่าน (Pass Band) ไปสู่ช่วงแถบหยุด (Stop Band) จะมีความกว้างมาก ทำให้ต้องใช้ตัวกรองสัญญาณที่มีอันดับ (Order) สูงๆ



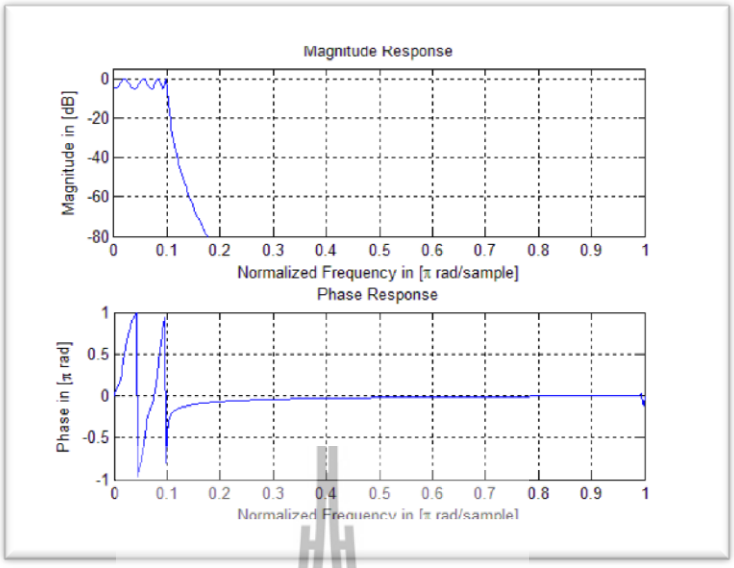
รูปที่ 2.14 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของ LPF 8-th Order แบบ Butterworth

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.3.7 Chebyshev Low Pass Filter

Chebyshev Type 1

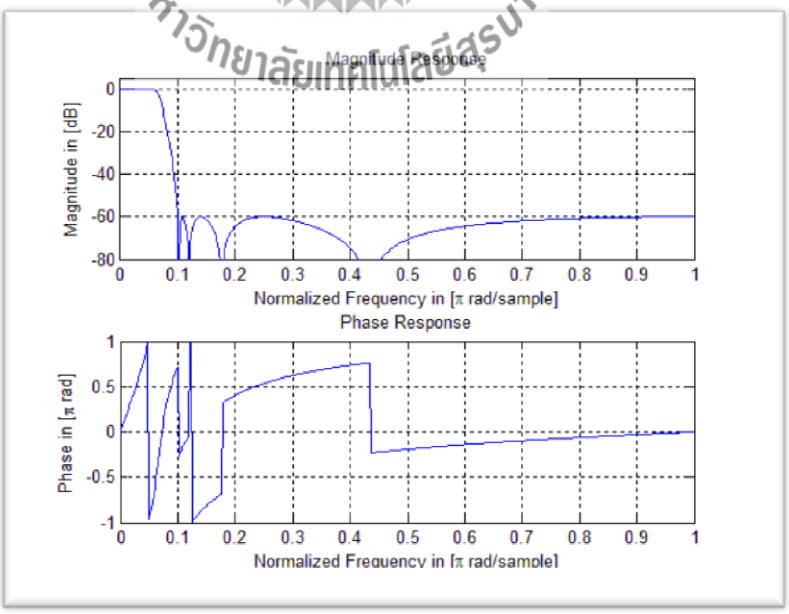
ผลตอบสนองเชิงความถี่ของ Chebyshev Type 1 จะมีช่วงแถบความถี่จากช่วงแถบผ่าน (Pass Band) ไปสู่ช่วงแถบหยุด (Stop Band) จะมีความกว้างน้อยกว่า Butterworth แต่ช่วงแถบความถี่ของช่วงแถบผ่าน (Pass Band) มีลักษณะเป็นริ้วๆ (Ripple)



รูปที่ 2.15 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของ LPF 8-th Order แบบ Chebyshev Type 1

Chebyshev Type 2

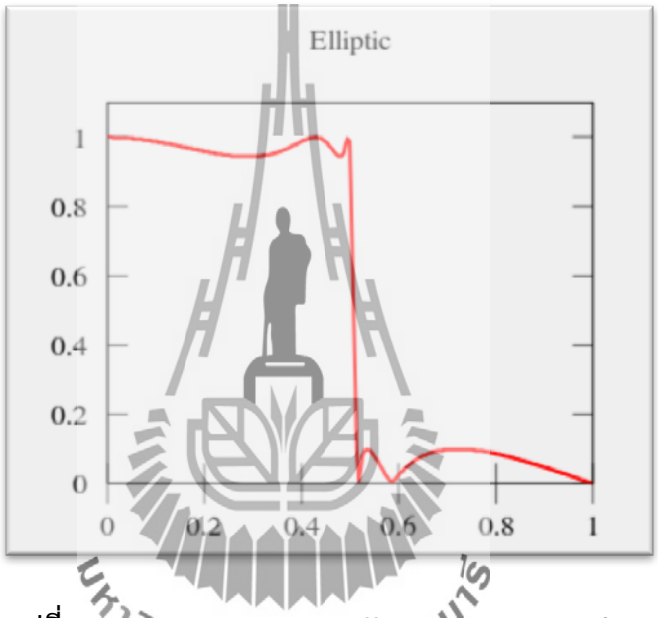
ผลตอบสนองเชิงความถี่ของ Chebyshev Type 2 จะมีช่วงแถบความถี่จากช่วงแถบผ่าน (Pass Band) ไปสู่ช่วงแถบหยุด (Stop Band) จะมีความกว้างน้อยกว่า Butterworth เช่นเดียวกับ Chebyshev Type 1 แต่ช่วงแถบความถี่ของช่วงแถบหยุด (Stop Band) มีลักษณะเป็นริ้วๆ (Ripple)



รูปที่ 2.16 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของ LPF 8-th Order แบบ Chebyshev Type 2

2.3.8 Elliptic Low Pass Filter

Elliptic Filter (เป็นที่รู้จักในชื่อ Cauer Filter) เป็นตัวกรองการประมวลผลสัญญาณ ที่มีการกระเพื่อมเสมอภาคกัน (Equiripple) ทั้งใน Pass Band และ Stopband มีการเปลี่ยนแปลง ได้เร็วขึ้นที่ Pass Band และ Stopband การกระเพื่อมของคลื่นนั้นขึ้นอยู่ที่กับเราออกแบบ Pass Band และ Stopband จะเห็นว่าในช่วง Stopband จะเป็นการกรองแบบ Butterworth Filter ส่วนในช่วง Pass Band และช่วงหลังจาก Stopband เป็นการกรองแบบ Chebyshev

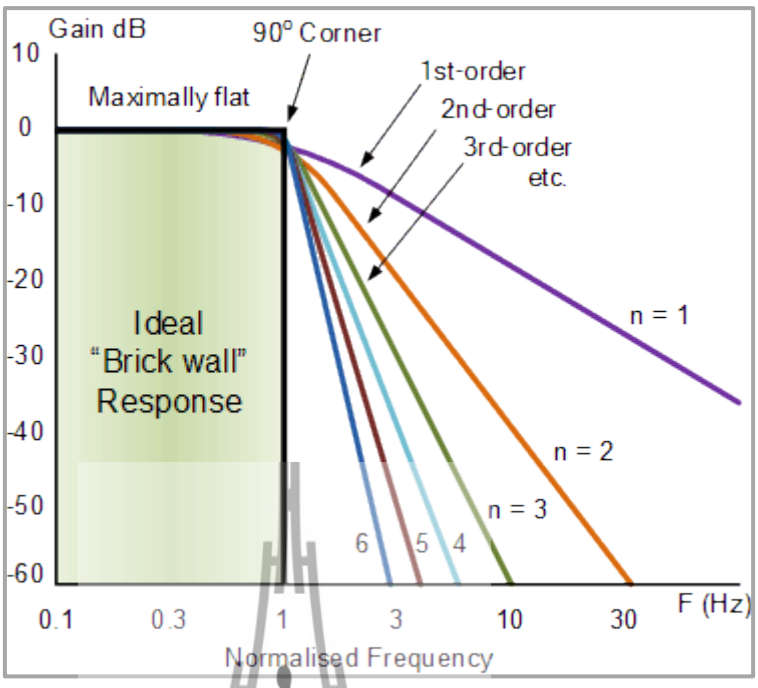


รูปที่ 2.17 ผลตอบสนองของ Elliptic Low Pass Filter

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.4 วงจร Brick – wall Low Pass Filter

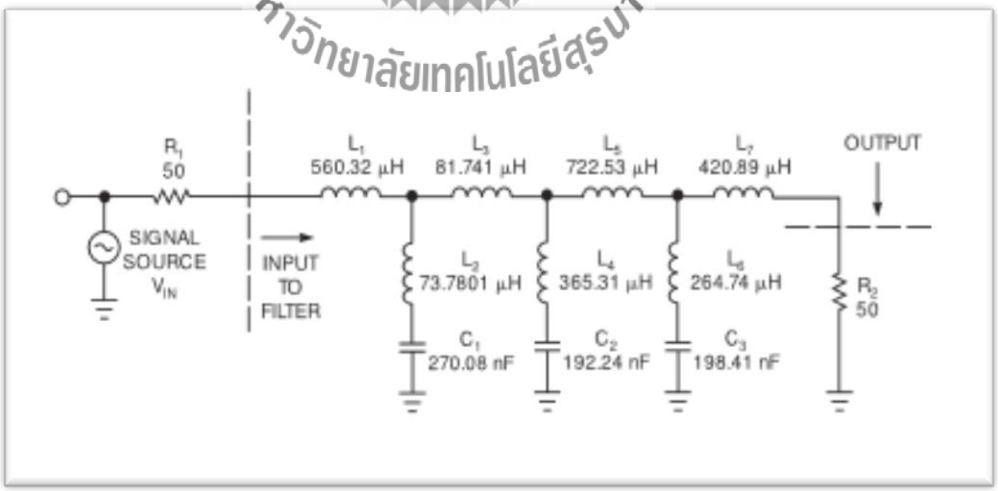
เป็นวงจรที่ใช้เสริมคุณสมบัติของ Low Pass Filter จะทำให้การกรองความถี่ของ Low Pass Filter มีความเป็นอุดมคติมากยิ่งขึ้น เช่น ในระบบ FM Stereo Multiplex วงจร Low Pass Filter ในช่องทางด้านซ้ายและขวาของเสียง Baseband ควรได้ -3 dB ตัดความถี่อย่างน้อย 15 kHz Pass Band ควรมีการกระเพื่อมของคลื่นน้อยกว่า 0.3 dB ความถี่เริ่มต้น Stopband อย่างน้อย19 kHz การลดทอน Stopband มากกว่า -50 dB และสำหรับการตอบสนองของเฟสจะเหมือนกันทั้งสอง Channels ดังนั้นจึงต้องใช้วงจร Brick – wall เพื่อช่วยในการกรองความถี่ให้มีการลดทอนของสัญญาณมากขึ้น



รูปที่ 2.11 การตอบสนองIdeal **brick – wall**

2.5 การออกแบบวงจร 15 kHz **Brick – wall low pass filter**

ขั้นตอนการออกแบบเริ่มต้นด้วยการเลือก Passive Filter ที่เหมาะสม ซึ่งก็คือ seventh-order เราจะกรองความถี่ด้วยinput และ output impedances ที่ 50 **Ω**



รูปที่ 2.12 วงจร Passive Filter แบบ Low Pass Filter ที่ใช้ seventh-order

โดย สมการ ที่ใช้ ในการคำนวณแปลงค่า L C เป็นค่า Rคือ

$$R_L = \frac{k}{s} \times Ls \quad ; s = j\omega$$

$$R_C = \frac{k}{s} \times \frac{1}{Cs} \quad ; s = j\omega$$

การคำนวณหา k จากสมการ

$$k = \frac{1}{R_1 \times C_1} \quad ; R_1 = 50\ \Omega \text{ โดย } C_1 = 2.2\ nF$$

โดยที่ C คือ ค่าตัวเก็บประจุ

L คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำ

จากวงจร Passive Filter ที่เราได้ทำการคำนวณแปลงค่า L C ให้เป็นค่า R เพื่อออกแบบวงจร Brick-wall โดย $Z_1 = Z_3 = 1/Cs$ ให้ตัวเก็บประจุ C เท่ากับ 2.2 nF และ $s = j\omega$ และทำการแทน $Z_2 = Z_5 = R$ โดยให้ตัวต้านทาน R เท่ากับ 11 kΩ สมการที่ใช้ คือ

$$Z_{in} = \frac{Z_1 Z_3 Z_5}{Z_2 Z_4}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
การออกแบบโครงงาน

3.1 บทนำ

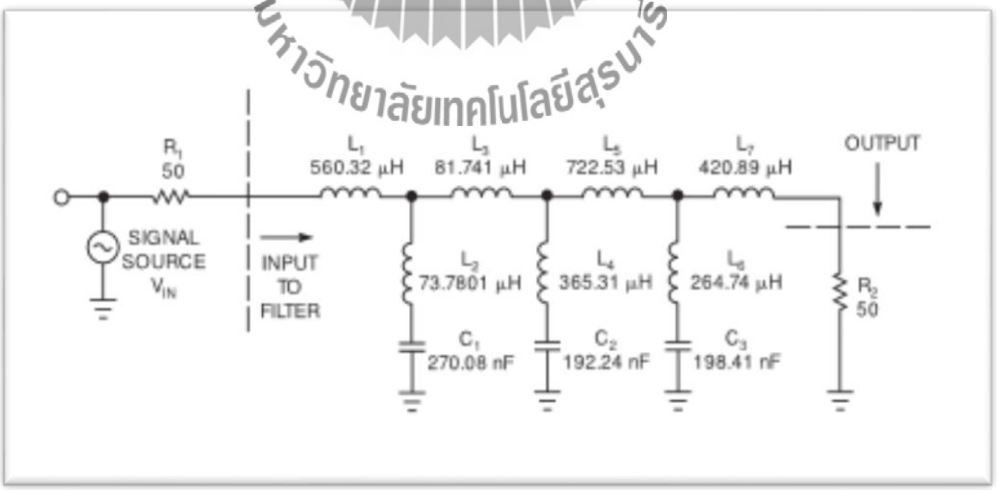
ในส่วนของบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) ที่มี Cutoff Frequency เท่ากับ 15 kHz โดยวงจร Low Pass Filter นี้จะทำการออกแบบวงจร โดยใช้วงจร Brick-wall เพื่อช่วยให้วงจร Low Pass Filter มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับวงจร Low Pass Filter ในอุดมคติ หรือจะช่วยทำให้ Stopband มีขนาดแคบลงนั่นเอง

3.2 การออกแบบวงจร 15 kHz Brick – wall low pass filter

โดยวงจรนี้เป็นวงจร Low Pass Filter ที่มี Cutoff Frequency อยู่ในบริเวณที่สูงชัน โดยแบบ Brick-wall นี้ จะเป็นการออกแบบให้ Low Pass Filter มีช่วง Stopband แคบมากขึ้นหรือทำให้ band มีความคมมากขึ้น ในระบบ FM Stereo Multiplexing แบบ Low Pass Filter จะเห็นว่าในช่องทางซ้ายและขวาของเสียง ช่วง Baseband ควรจะอยู่ที่ -3 dB และ Stopband ควรเริ่มต้นที่ความถี่อย่างน้อย 19 kHz และ Stopband ควรมีค่าการลดทอนมากกว่า -50 dB

1.เลือก Passive Filter ที่เหมาะสม ในที่นี้ใช้ seventh-order ที่กรองแบบ Elliptic โดยใช้อินพุตและเอาท์พุต อิมพีแดนซ์ที่ 50 Ω (รูปที่ 3.1)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.1 วงจร Passive Filter แบบ Low Pass Filter ที่ใช้ seventh-order

2. จากรูปที่ 3.1 เราจะใช้สมการ (3.1) และ (3.2) ในการคำนวณแปลงค่า L C เป็นค่า R

$$R_L = \frac{k}{s} \times Ls \quad \text{---------- (3.1)}$$

$$R_C = \frac{k}{s} \times \frac{1}{Cs} \quad \text{---------- (3.2)}$$

เมื่อ $s = j\omega$

$\omega = 2\pi f_c$ โดยที่ f_c คือ Cutoff Frequency ในโครงงานนี้จะต้องออกแบบวงจรที่มี cutoff frequency (f_c) เท่ากับ 15 kHz

การคำนวณหา k จากสมการ

$$k = \frac{1}{R_1 \times C_1} \quad \text{---------- (3.3)}$$

ดังนั้น $$k = \frac{1}{50 \times 2.2 \times 10^{-9}} = 9.09 \times 10^{6}$$

ในโครงงานนี้จะต้องออกแบบวงจรที่มี cutoff frequency (f_c) เท่ากับ 15 kHz โดยที่โหลดมีความต้านทานหรืออินพุตและเอาท์พุตอิมพีแดนซ์ (R_1) เท่ากับ 50 Ω ดังรูปที่ 3.1 และเลือกใช้ค่า C_1=2.2 nF

การคำนวณหาค่า R_L

ที่ L_1 = 560.32 μH

แทนค่า k , R_1 และ f_c ลงในสมการ (3.1)

$$R_{L1} = \frac{9.09 \times 10^{6}}{2\pi \times 15 \times 10^{3}} \times 560.32 \times 10^{-6} \, (2\pi \times 15 \times 10^{3})$$

R_{L1} = 5.094 kΩ ≈ 5.1 kΩ

ที่ L_2 = 73.7801 μH

แทนค่า k , R_1 และ f_c ลงในสมการ (3.1)

$$R_{L2} = \frac{9.09 \times 10^{6}}{2\pi \times 15 \times 10^{3}} \times 73.7801 \times 10^{-6} \, (2\pi \times 15 \times 10^{3})$$

R_{L2} = 670.72 Ω ≈ 670 Ω

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ที่ L_3 = 81.741 µH

แทนค่า k , R_1 และ f_c ลงในสมการ (3.1)

$$R_{L3} = \frac{9.09\text{x}10^{6}}{2\pi\text{x}15\text{x}10^{3}} \text{ x } 81.741 \text{ x}10^{-6} (2\pi\text{x}15\text{x}10^{3})$$

R_{L3} = 7.41 kΩ ≈ 7.4 kΩ

ที่ L_4 = 365.31 µH

แทนค่า k , R_1 และ f_c ลงในสมการ (3.1)

$$R_{L4} = \frac{9.09\text{x}10^{6}}{2\pi\text{x}15\text{x}10^{3}} \text{ x } 365.31 \text{ x}10^{-6} (2\pi\text{x}15\text{x}10^{3})$$

R_{L4} = 3.321 kΩ ≈ 3.3 kΩ

ที่ L_5 = 722.53 µH

แทนค่า k , R_1 และ f_c ลงในสมการ (3.1)

$$R_{L5} = \frac{9.09\text{x}10^{6}}{2\pi\text{x}15\text{x}10^{3}} \text{ x } 722.53 \text{ x}10^{-6} (2\pi\text{x}15\text{x}10^{3})$$

R_{L5} = 6.568 kΩ ≈ 6.56 kΩ

ที่ L_6 = 264.74 µH

แทนค่า k , R_1 และ f_c ลงในสมการ (3.1)

$$R_{L6} = \frac{9.09\text{x}10^{6}}{2\pi\text{x}15\text{x}10^{3}} \text{ x } 264.74 \text{ x}10^{-6} (2\pi\text{x}15\text{x}10^{3})$$

R_{L6} = 2.406 kΩ ≈ 2.4 kΩ

ที่ L_6 = 420.89 µH

แทนค่า k , R_1 และ f_c ลงในสมการ (3.1)

$$R_{L6} = \frac{9.09\text{x}10^{6}}{2\pi\text{x}15\text{x}10^{3}} \text{ x } 420.89 \text{ x}10^{-6} (2\pi\text{x}15\text{x}10^{3})$$

R_{L6} = 3.826 kΩ ≈ 3.75 kΩ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความต้านทานที่แปลงมาจากค่าความเหนี่ยวนำ

R_L	ค่าความต้านทาน (kΩ)
R_{L1}	5.1
R_{L2}	0.670
R_{L3}	7.4
R_{L4}	3.3
R_{L5}	6.56
R_{L6}	2.4
R_{L7}	3.75

การคำนวณหาค่า R_C

ที่ C_1 = 270.08 nF

แทนค่า k , R_1 และ f_c ลงในสมการ (3.2)

$$R_{C1} = \frac{9.09\times10^{6}}{2\pi\times15\times10^{3}} \times \frac{1}{2\pi\times15\times10^{3}\times270.08\times10^{-9}}$$

R_{C1} = 3.789 kΩ

ที่ C_2 = 192.24 nF

แทนค่า k , R_1 และ f_c ลงในสมการ (3.2)

$$R_{C2} = \frac{9.09\times10^{6}}{2\pi\times15\times10^{3}} \times \frac{1}{2\pi\times15\times10^{3}\times192.24\times10^{-9}}$$

R_{C2} = 5.323 kΩ

ที่ C_3= 198.41 nF

แทนค่า k , R_1 และ f_c ลงในสมการ (3.2)

$$R_{C3} = \frac{9.09\times10^{6}}{2\pi\times15\times10^{3}} \times \frac{1}{2\pi\times15\times10^{3}\times198.41\times10^{-9}}$$

R_{C3} = 5.158 kΩ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความต้านทานที่แปลงมาจากค่าตัวเก็บประจุ

R_C	ค่าความต้านทาน (kΩ)
R_{C1}	3.789
R_{C2}	5.323
R_{C3}	5.158

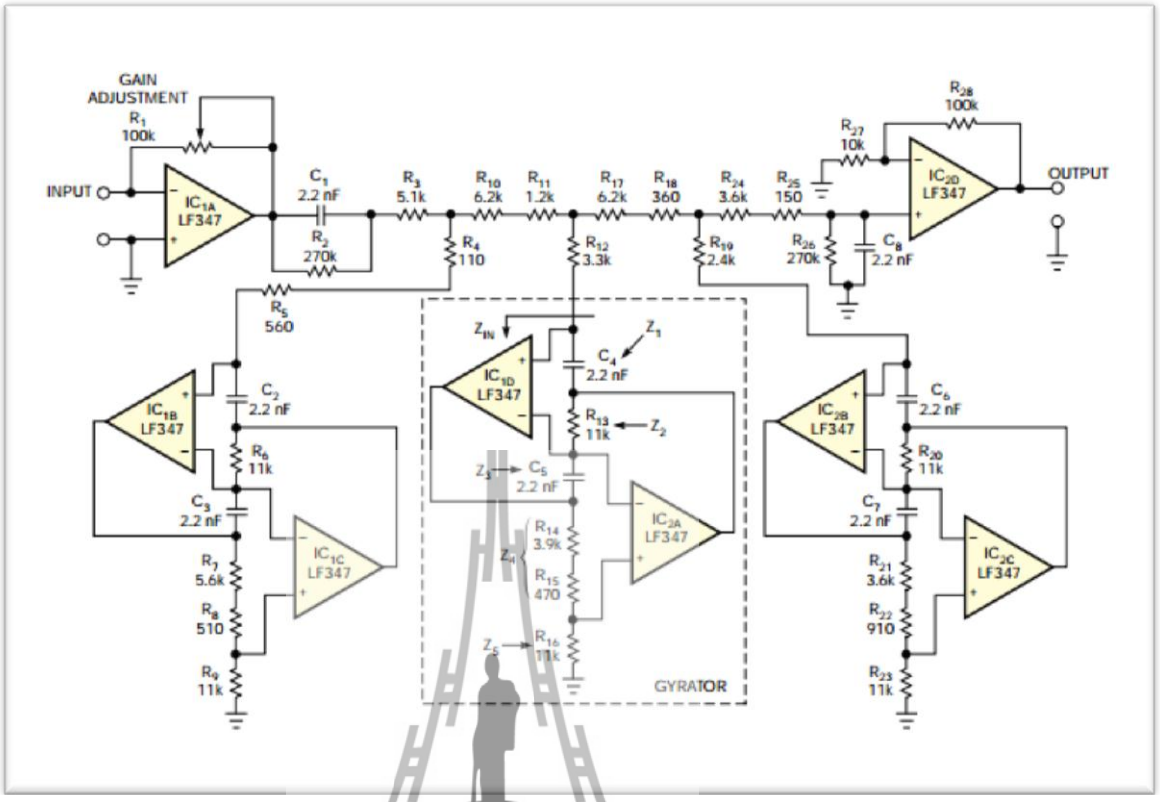
จากวงจร Passive Filter ที่เราได้ทำการคำนวณแปลงค่า L C ให้เป็นค่า R นั้น เราต้องการเพื่อจะออกแบบวงจร Brick-wall เพื่อให้ Band มีความคมมากขึ้น ซึ่งรูปแบบนี้จะอยู่ในเส้นประสี่เหลี่ยมในรูปที่ 3.2 เราเรียกรูปแบบที่อยู่ในเส้นประสี่เหลี่ยมนี้ว่าวงจร Gyrator จากทฤษฎีเราจะให้ $Z_1 = Z_3 = 1/Cs$ โดยให้ตัวเก็บประจุ C เท่ากับ 2.2 nF และ $s = j\omega$ และทำการแทน $Z_2 = Z_5 = R$โดยให้ตัวต้านทาน (R) เท่ากับ 11 kΩ จะสังเกตเห็นว่าที่ Z_4 ไม่ได้มีการกำหนดค่ามาให้ นั่นหมายความว่าการที่เราจะออกแบบวงจร Gyrator ได้นั้น เราต้องรู้ค่า Z_4 โดยเราสามารถหา Z_4 ได้จากสมการ

$$Z_{in} = \frac{Z_1 Z_3 Z_5}{Z_2 Z_4} \quad \text{---------- (3.4)}$$

จะได้สมการเพื่อหา Z_4

$$Z_4 = \frac{Z_1 Z_3 Z_5}{Z_2 Z_{in}} \quad \text{---------- (3.5)}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.2 วงจร Active Filter ที่ทำการคำ**นวณออกแบบ**

เราจะทำการเปรียบเทียบรูปที่ 3.1 และ 3.2 จะเห็นว่าในรูป 3.2 กับภายในเส้นประสีแดงของรูป 3.1 มีลักษณะวงจรเหมือนกัน หรือเป็นวงจรเดียวกัน ที่เรานำค่า L และ C ไปทำการคำนวณแปลงค่าเป็นค่า R แล้วนำค่า R_L และ R_C ที่ได้มาแทนในวงจรรูป 3.2 จากการเปรียบเทียบทั้งสองรูปจะเห็นว่าค่า R_C เท่ากับ Z_{in} เราจะนำค่า R_C มาใช้ในการออกแบบ Z_4 ในวงจร Gyrator โดยเรากำหนดให้ $Z_1 = Z_3 = 1/Cs$ โดยให้ตัวเก็บประจุ C เท่ากับ 2.2 nF และ $s = j\omega$ และทำการแทน $Z_2 = Z_5 = R$ โดยให้ตัวต้านทาน (R) เท่ากับ 11 kΩ เราจะทำการแปลงอินพุต และเอาท์พุตอิมพีแดนซ์ในรูปที่ 3.2 ให้เป็นวงจร Active Filter โดยการนำค่า R มาขนานกับ C ซึ่งจะได้ค่า R เท่ากับ 270 kΩ และค่า C เท่ากับ 2.2 nF (ตัวต้านทาน R_2 และ R_{26} ขนานกับตัวเก็บประจุ C_1 และ C_8) ดังแสดงในรูป 3.2 และค่า L กับค่า C ยังช่วยป้องกันการเกิด DC Blocking

การคำนวณหาค่า Z_4

ที่ $Z_{in1} = R_{C1} = 3.789\ k\Omega$

แทนค่า f_C, Z_1, Z_3, Z_5 และ Z_2 ลงในสมการ (3.5)

$$Z_4 = \frac{\frac{1}{jx2\pi x15x10^3x2.2x10^{-9}} x \frac{1}{jx2\pi x15x10^3x2.2x10^{-9}} x\ 11x10^3}{11x10^3x3.789x10^3}$$

$Z_4 = 6.138\ k\Omega \approx 6.110\ k\Omega$

ที่ $Z_{in2} = R_{C2} = 5.323\ k\Omega$

แทนค่า f_C, Z_1, Z_3, Z_5 และ Z_2 ลงในสมการ (3.5)

$$Z_4 = \frac{\frac{1}{jx2\pi x15x10^3x2.2x10^{-9}} x \frac{1}{jx2\pi x15x10^3x2.2x10^{-9}} x\ 11x10^3}{11x10^3x5.323\ x10^3}$$

$Z_4 = 4.369\ k\Omega \approx 4.37\ k\Omega$

ที่ $Z_{in3} = R_{C3} = 5.158\ k\Omega$

แทนค่า f_C, Z_1, Z_3, Z_5 และ Z_2 ลงในสมการ (3.5)

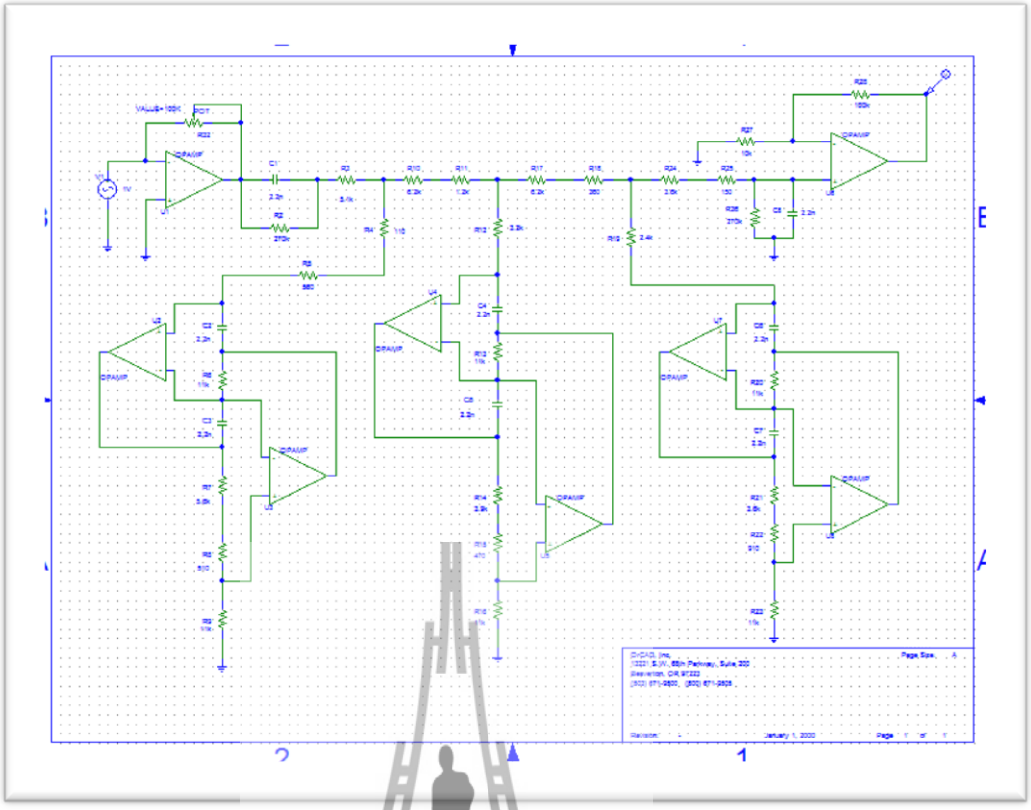
$$Z_4 = \frac{\frac{1}{jx2\pi x15x10^3x2.2x10^{-9}} x \frac{1}{jx2\pi x15x10^3x2.2x10^{-9}} x\ 11x10^3}{11x10^3x5.158\ x10^3}$$

$Z_4 = 4.509\ k\Omega \approx 4.51\ k\Omega$

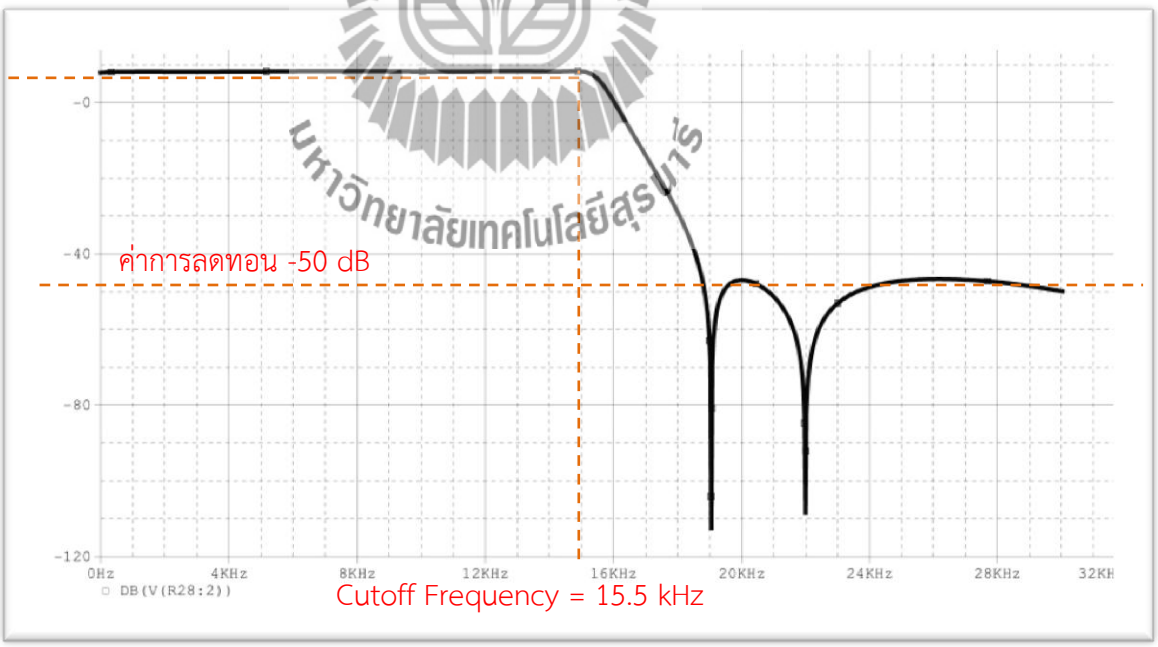
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เหตุผลที่เราต้องประมาณค่าเนื่องจากค่าความต้านทาน (R) ที่หาได้ไม่ได้มีขายตามมาตรฐาน เราจึงต้องประมาณค่าเพื่อให้ได้ค่า R ตามมาตรฐาน

จากนั้นจะทำการจำลองวงจรด้วยโปรแกรม Schematics โดยการสร้างวงจรตามรูปที่ 3.2 จะได้วงจรจำลองดังรูป 3.3 เพื่อทดสอบผลตอบสนองทางความถี่

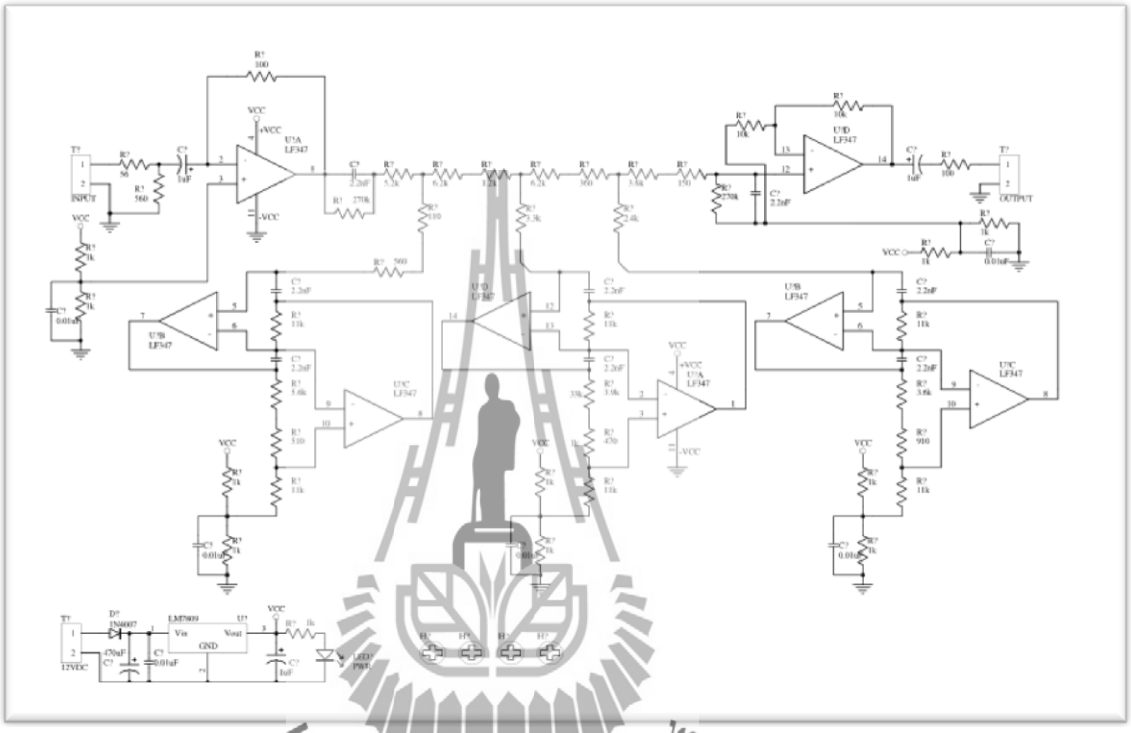


รูปที่ 3.3 จำลองวงจร 15 kHz Brick – wall low pass filter จากโปรแกรม Schematics



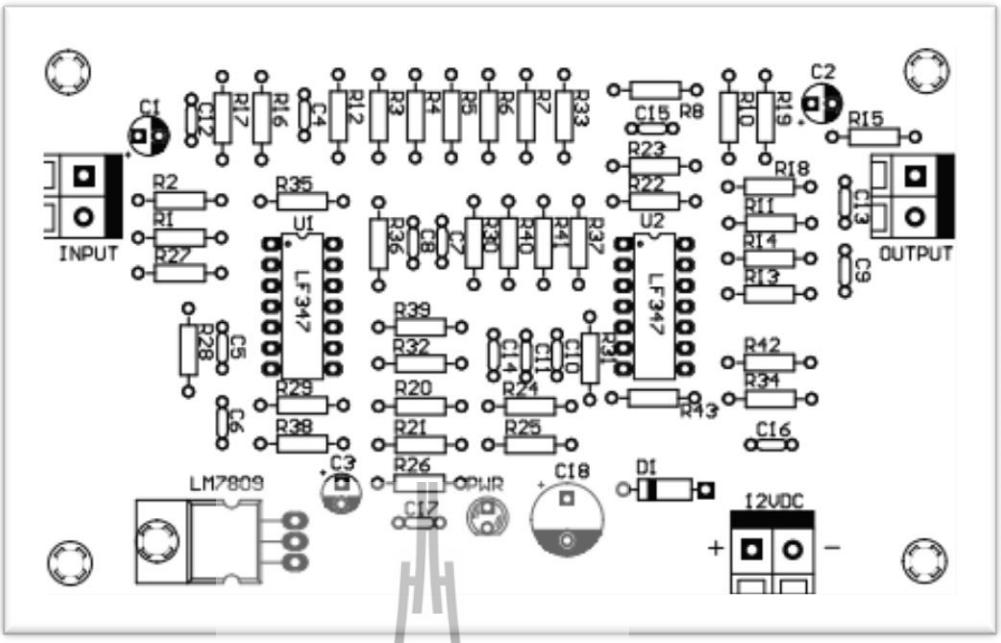
รูปที่ 3.4 การจำลองวงจร จากโปรแกรม Schematics จะได้รูปกราฟ แสดงผลตอบสนองทางความถี่

จากกราฟผลการจำลองจะเห็นว่าช่วงความถี่เกิน 15 kHz จะถูกลดทอนลงประมาณ -50 dB เมื่อเราทำการออกแบบวงจร 15 kHz Brick – wall low pass filter จากโปรแกรม Schematics นำวงจรที่ออกแบบได้ไปทำการออกแบบชิ้นงานด้วยโปรแกรม Protel 99SE จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.5

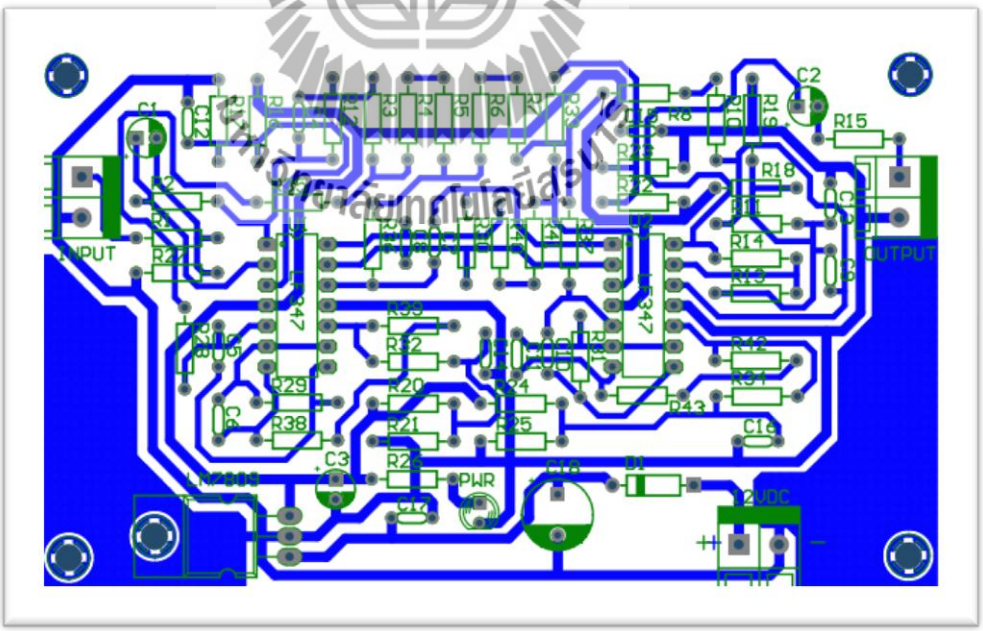


รูปที่ 3.5 วงจรจากโปรแกรม Schematics ที่นำมาออกแบบด้วยวงจร Protel 99SE

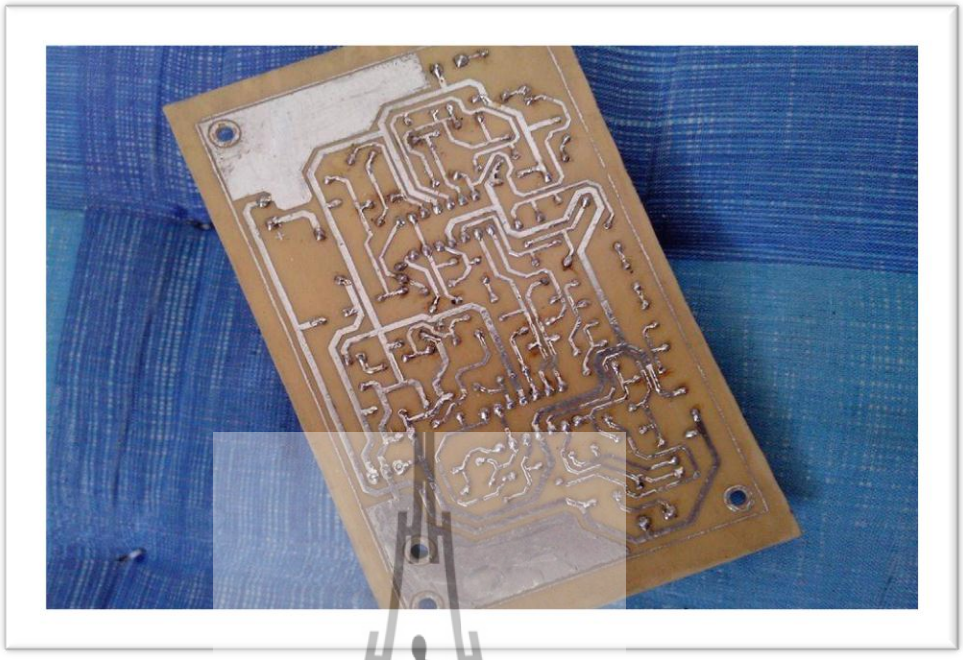
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



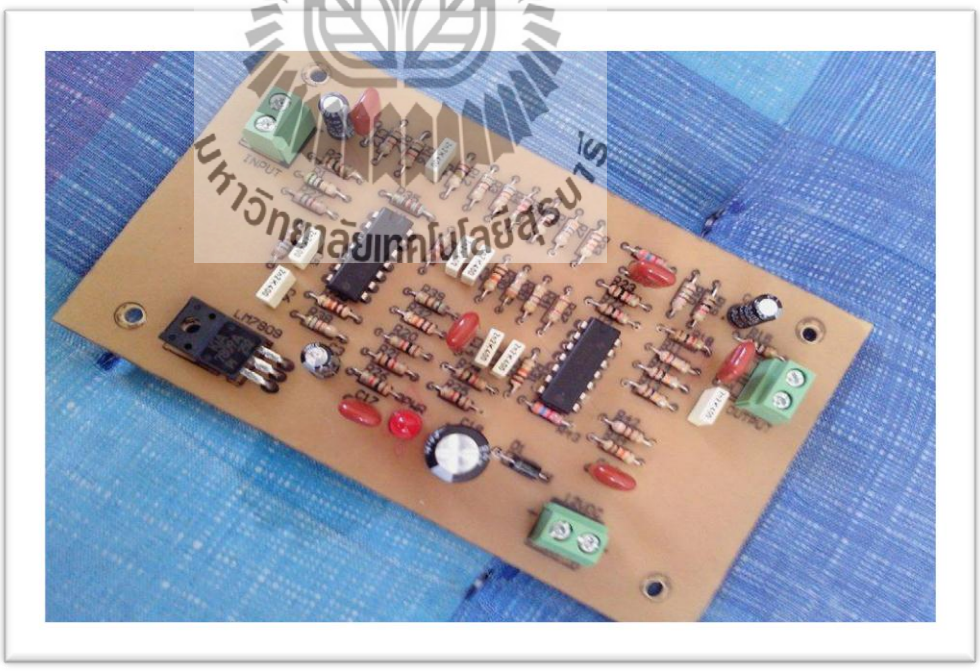
รูปที่ 3.6 แสดงตำแหน่งของอุปกรณ์ในวงจรที่ออกแบบ



รูปที่ 3.7 ชิ้นงานที่ทำการออกแบบด้วยวงจร Protel 99SE



รูปที่ 3.8 แสดงวงจรชิ้นงานที่สร้างขึ้น (ด้านล่าง)



รูปที่ 3.9 แสดงวงจรชิ้นงานที่สร้างขึ้น (ด้านบน)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

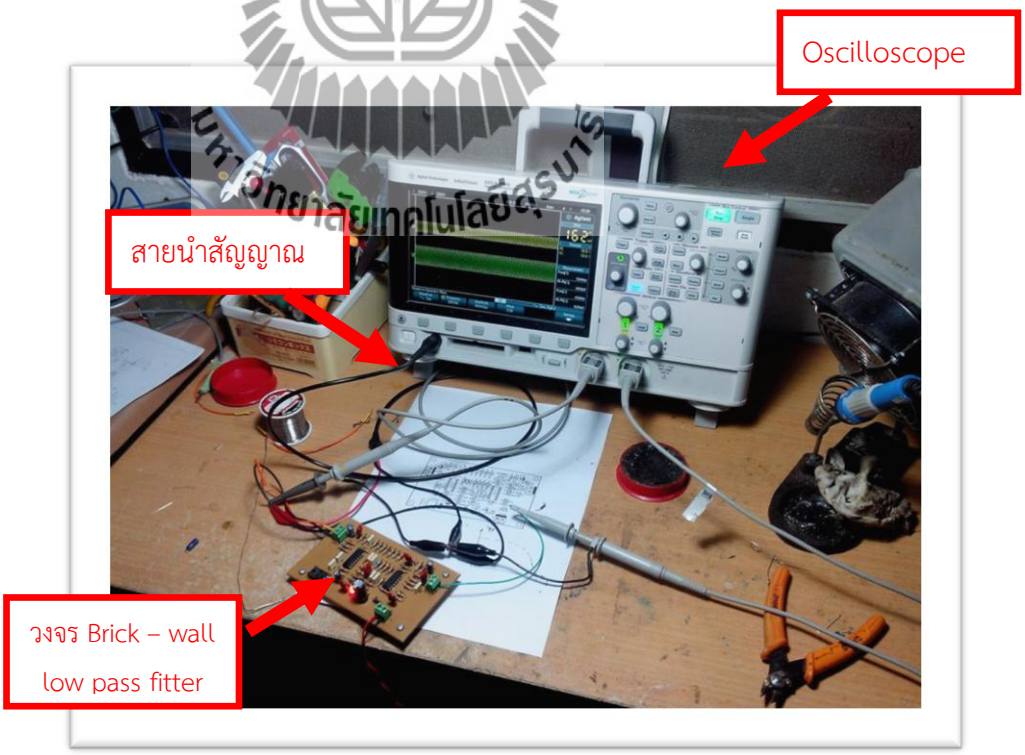
บทที่ 4
ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงการทดสอบวงจร 15 kHz Brick – wall low pass filter สำหรับกรองสัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่า 15 kHz และไม่ให้มีความถี่เกินสัญญาณ Pilot ที่ความถี่ 19 kHz เพื่อป้องกันและแก้ปัญหาการการรับสัญญาณเสียงแบบ Stereo

4.2 การทดสอบวงจร 15 kHz Brick – wall low pass filter

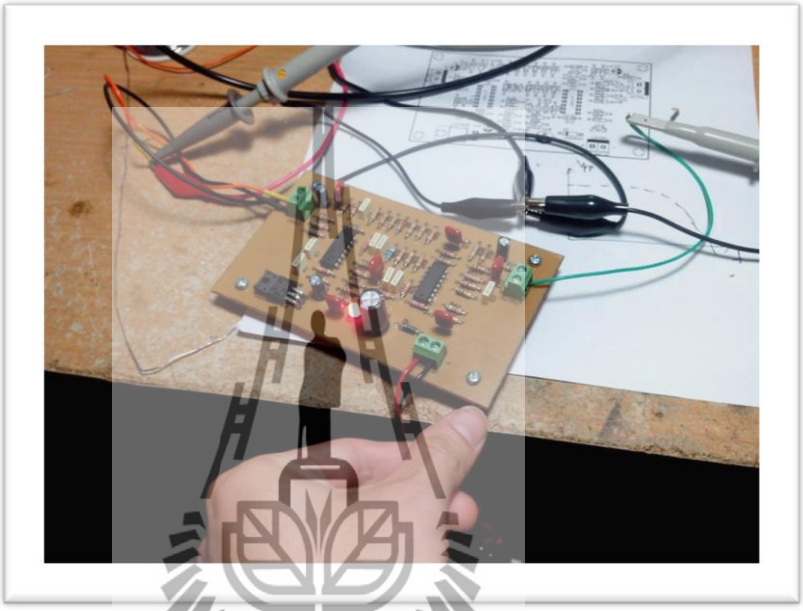
การทดสอบวงจร 15 kHz Brick – wall low pass filter ซึ่งจะมีอุปกรณ์ในการทดสอบ คือ เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ที่สามารถสร้างสัญญาณได้ตั้งแต่ 0.5 - 25 kHz มีสายนำสัญญาณและวงจร 15 kHz Brick – wall low pass filter ซึ่งจะมีลักษณะการทดสอบดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบ

1.ใช้เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) สร้างสัญญาณ 500 Hz เป็นความถี่เริ่มต้นโดยต่อสายนำสัญญาณเข้าที่เครื่อง ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) แล้วนำมาวัดสัญญาณที่วงจร 15 kHz Brick – wall low pass filter ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะการต่อสายนำสัญญาณเพื่อทำการวัดค่า

2. ต่อสายนำสัญญาณเข้าที่วงจรเข้าที่ Input ของวงจรวงจร 15 kHz Brick – wall low pass filter และ Output ของวงจรเพื่อทำการวัดค่า

3. เพิ่มความถี่ของเครื่อง Signal Generator ทีละ 500 Hz จนถึง 25 kHz

4. บันทึกค่าแอมพลิจูด (Amplitude) ของสัญญาณจากเครื่อง ออสซิลโลสโคป

ผลการทดสอบโดยการทดสอบที่ความถี่ 0.5 kHz จนถึง 25 kHz ได้ผลการทดสอบแต่ละความถี่ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 บันทึกผลการทดสอบ

Frequency (kHz)	V_{out} (mV)	Amplitude (dB)
0.5	820	-1.724
1	840	-1.541
1.5	860	-1.31
2	900	-0.092
2.5	900	-0.092
3	920	-0.724
3.5	900	-0.092
4	920	-0.724
4.5	940	-0.537
5	940	-0.537
5.5	940	-0.537
6	940	-0.537
6.5	940	-0.537
7	960	-0.534
7.5	960	-0.534
8	960	-0.534
8.5	960	-0.534
9	960	-0.534
9.5	960	-0.534
10	960	-0.534
11	960	-0.534
12	980	-0.175
13	980	-0.175
14	980	-0.175
15	980	-0.175
16	980	-13.15
17	220	-20

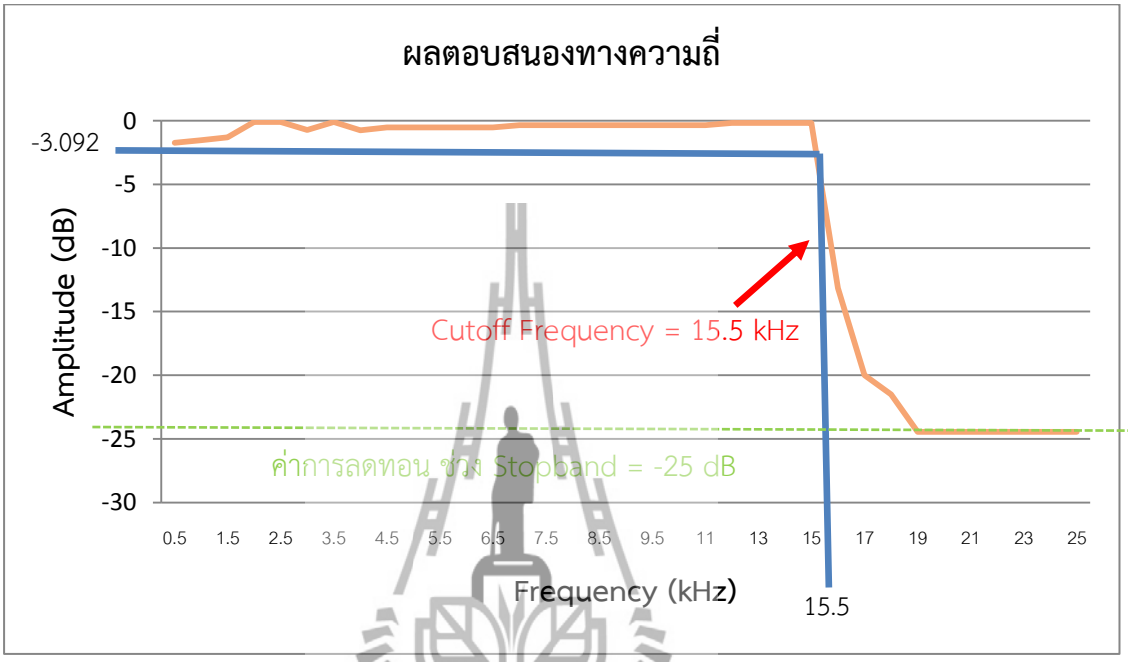
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.1 บันทึกผลการทดสอบ (ต่อ)

Frequency (kHz)	V_{out} (mV)	Amplitude (dB)
18	100	-21.94
19	80	-24.436
20	60	-24.436
21	60	-24.436
22	60	-24.436
23	60	-24.436
24	60	-24.436
25	60	-24.436

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากกราฟเป็นผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ ที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ จะได้ค่า Amplitude ของ cutoff frequency ที่ -3.092 dB ดังรูปที่ 4.4

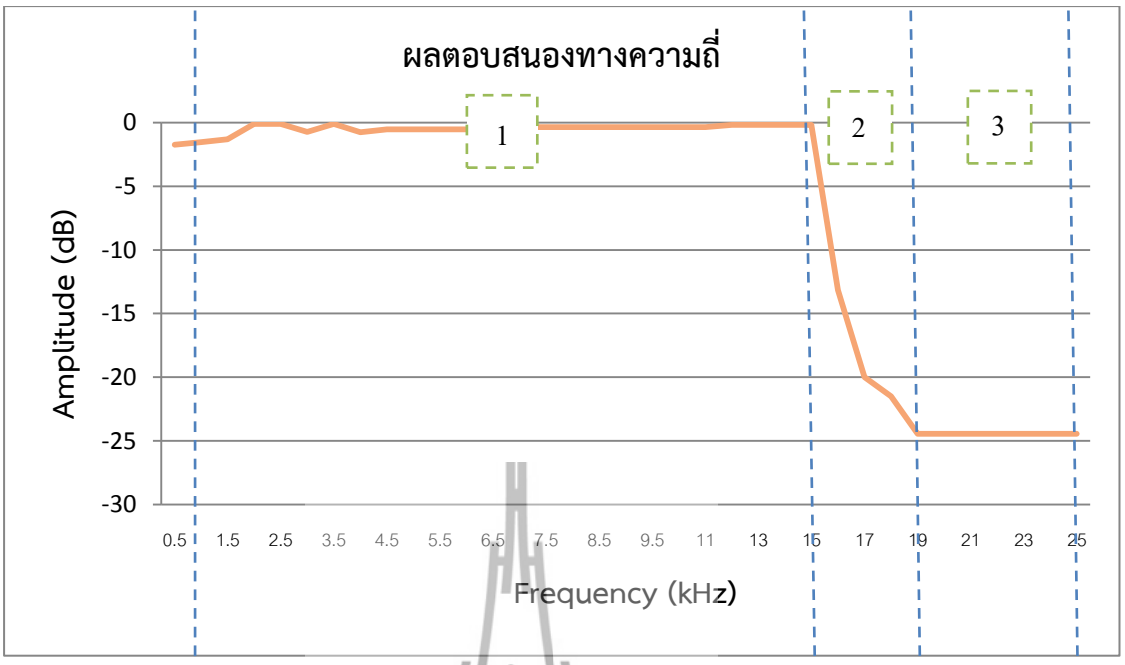


รูปที่ 4.3 กราฟแสดง Cutoff Frequency

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากกราฟรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าที่ Amplitude -3.092 dB ได้ cutoff frequency ที่ความถี่ 16.83 kHz ซึ่งจะเห็นว่าค่าในการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าในการออกแบบ โดยที่สามารถคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนได้ดังนี้

$$\text{cutoff frequency error} = \left|\frac{15.5\ \text{kHz} - 15\ \text{kHz}}{15\ \text{kHz}}\right| \times 100 = 3.33\ \%$$



รูปที่ 4.4 กราฟผลตอบสนองทางความถี่ที่ย่านใช้งาน

จากรูปที่ 4.5 ในช่วงที่ 1 ตั้งแต่ช่วง 1 kHz ถึง 15 kHz สัญญาณสามารถผ่านไปได้โดยไม่ถูกลดทอน ช่วงที่ 2 ตั้งแต่ช่วง 15 kHz ถึง 19 k Hz สัญญาณเกิดการลดทอนอย่างมากโดยจะถูกลดทอนลงไปประมาณ -25 dB ช่วงที่ 3 ตั้งแต่ช่วง 19 kHz ถึง 25 kHz เป็นช่วง stopband สัญญาณที่ได้มีค่าคงทีที่ -25 dB จะเห็นได้ว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจนถึง 15 kHz สัญญาณจะถูกลดทอนลงอย่างมากด้วยวงจร Brick – wall low pass filter ที่มีลักษณะการทำงานคล้ายวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในอุดมคติ ซึ่งจะไม่มีสัญญาณไปรบกวนสัญญาณ Pilot

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

เนื่องจากในปัจจุบันระบบ FM ส่วนใหญ่เป็น Stereo ประกอบด้วยสัญญาณเสียงด้านซ้าย (L) และด้านขวา (R) การที่เครื่องส่งเพียงเครื่องเดียวสามารถส่งสัญญาณเสียงทั้งสองไปพร้อมๆ กัน เรียกว่าการ Multiplexing ส่วนใหญ่แล้วปัญหาที่เกิดในระบบ FM ที่เป็น Stereo จะเกิดจากการ Multiplexing สัญญาณ Audio ที่ส่งออกไปมีความถี่เกิน 15 kHz จึงทำให้ไปรบกวนสัญญาณ Pilot ที่ความถี่ 19 kHz ซึ่งทำให้ที่ภาครับไม่สามารถรับสัญญาณเสียงที่เป็น Stereo ได้ เราจึงทำการออกแบบวงจร Brick-wall Low Pass Filter ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับวงจร Low Pass filter ในอุดมคติ ซึ่งช่วยทำให้ Stopband มีขนาดแคบลง โดยทำการออกแบบ และทำการจำลองผลด้วยโปรแกรม Schematics ได้ f_c ที่ 15 kHz และช่วง Stopband อยู่ที่ -50 dB จากนั้นจึงทำการสร้างและทดสอบวงจรจริง จากผลการทดสอบจะเห็นว่าช่วง Stopband มีการลดทอนตั้งแต่ความถี่ช่วง 15 kHz – 19 kHz ประมาณ -25 dB จึงทำให้สามารถแก้ปัญหาการรบกวนสัญญาณ Pilot ได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5.2 ปัญหาและอุปสรรค์

จากผลการจำลองโดยโปรแกรมกับผลตอบสนองทางความถี่ยังมีค่า error อยู่ "3.33 %" เนื่องจากค่าความต้านทาน (R) ที่คำนวณได้ไม่ใช่ค่าความต้านทาน (R) ตามมาตรฐาน ดังนั้นจึงต้องทำการประมาณค่าความต้านทาน (R) ให้ได้ค่าตามมาตรฐาน ผลที่ได้จึงเกิดความคลาดเคลื่อน

จะเห็นว่าในช่วงการลดทอน ยังมีโอกาสที่สัญญาณสามารถไปรบกวนสัญญาณ Pilot ได้ ถ้าหากสัญญาณ Audio ที่เข้ามามีสัญญาณแรงเกินไป

5.3 สิ่งที่ได้รับจากการทำโครงงาน

1. ได้วงจร 15 kHz Brick-wall low pass filter
2. ได้ความรู้เกี่ยวกับ FM stereo multiplexing
4. รู้จักวิธีการออกแบบและสร้างวงจร 15 kHz Brick-wall low pass filter
3. รู้จักการทำงานเป็นทีม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นางสาวทรายขวัญ แรงเขตรการณ์ เกิดวันที่ 6 พฤษภาคม พ.ศ. 2535 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลเขาชนกัน อำเภอแม่วงก์ จังหวัดนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเทพศาลาประชาสรรค์ อำเภอลาดยาว จังหวัดนครสวรรค์ ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นางสาวกิตติยา ชัยยะ เกิดวันที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2534 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลบ้านไร่ อำเภอลาดยาว จังหวัดนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนลาดยาววิทยาคม อำเภอลาดยาว จังหวัดนครสวรรค์ ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นายอิสระ คุณประสาท เกิดวันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2534 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลบึงสำโรง อำเภอแก้งสนามนาง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเกล็ดลิ้นวิทยา อำเภอบัวใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

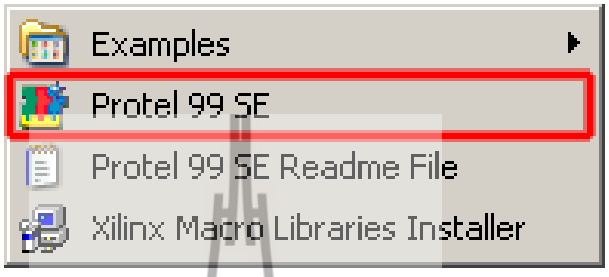
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก

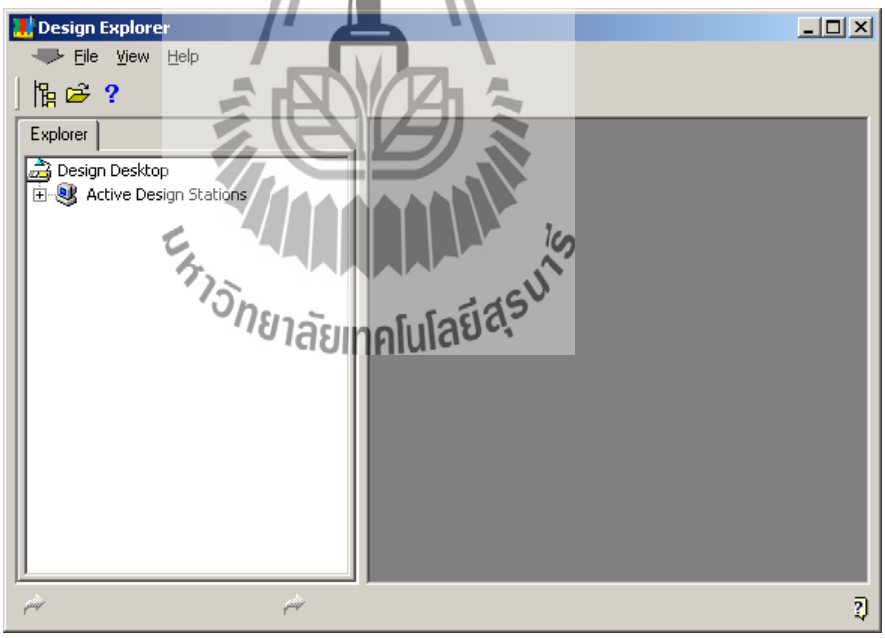
ภาคผนวก

การสร้าง New Design ของโปรแกรม Protel 99 SE

1. เรียกใช้งานโปรแกรม Protel 99 SE โดยเลือก Start -> Programs ->Protel 99 SE จะปรากฏผลลัพธ์ดังภาพต่อไปนี้



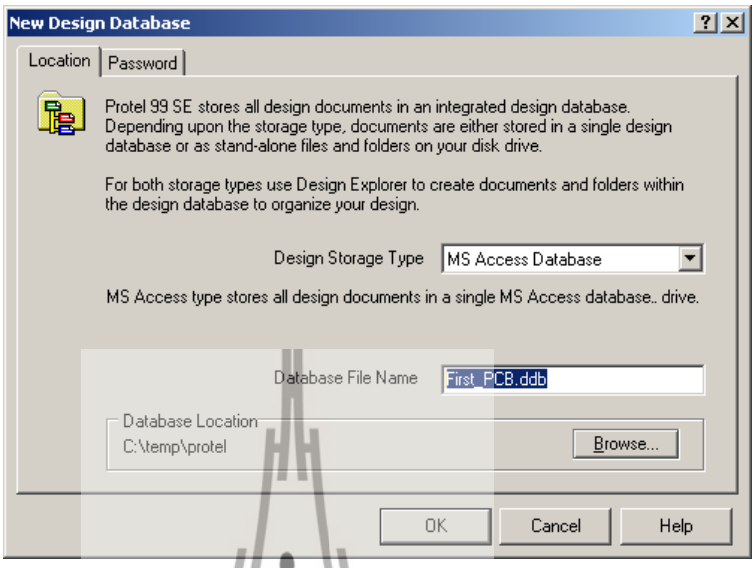
2. จะได้หน้าต่างโปรแกรม Protel99 SE ดังนี้



รูปที่ 1 หน้าเข้าโปรแกรมของโปรแกรม Protel 99 SE

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

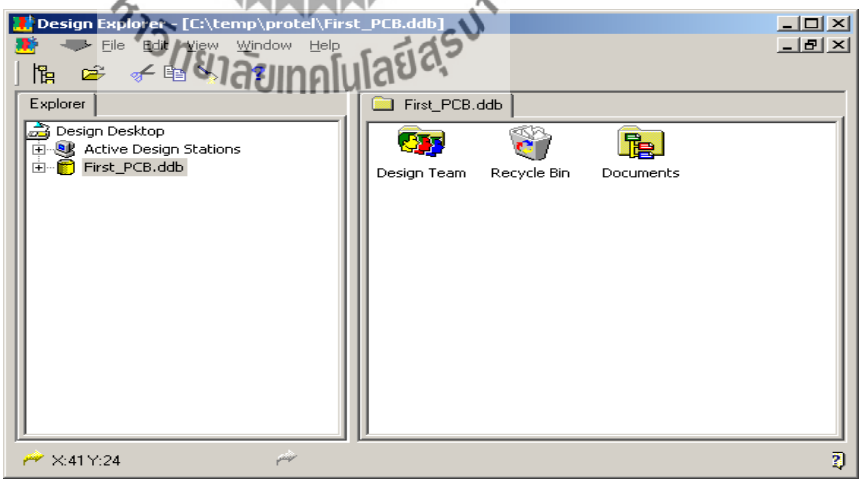
3. หลังจากนั้นทำการสร้าง New Design ใหม่ขึ้นมาโดยคลิกที่ File --> New จะได้หน้าต่างดังรูป



รูปที่ 2 การสร้าง New Design

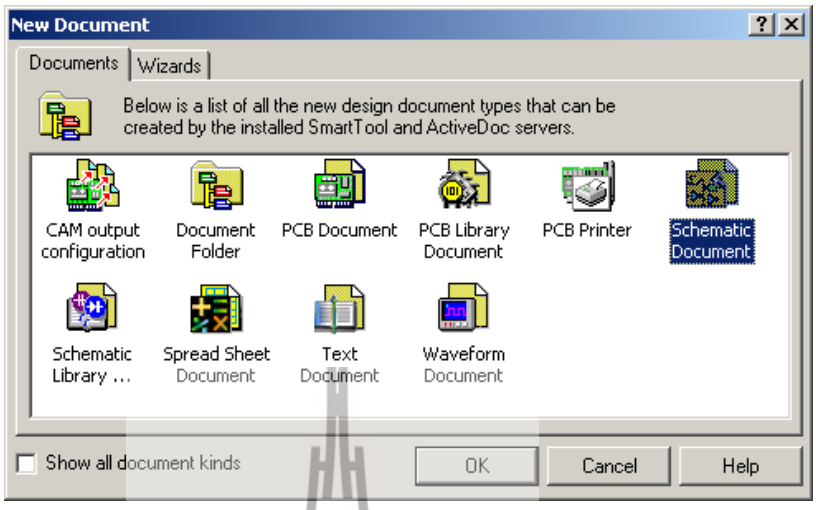
ตั้งชื่อ File และเลือก Location ที่ต้องการบันทึกข้อมูล

- ตั้งชื่อ File เป็น First_PCB.bbd
  เสร็จแล้วคลิก OK จะได้หน้าต่างดังรูป



รูปที่ 3 หน้าต่างการตั้งชื่อ File ชิ้นงาน

4. ไปที่ Folder Documents แล้วคลิกขวา เลือก NEW....

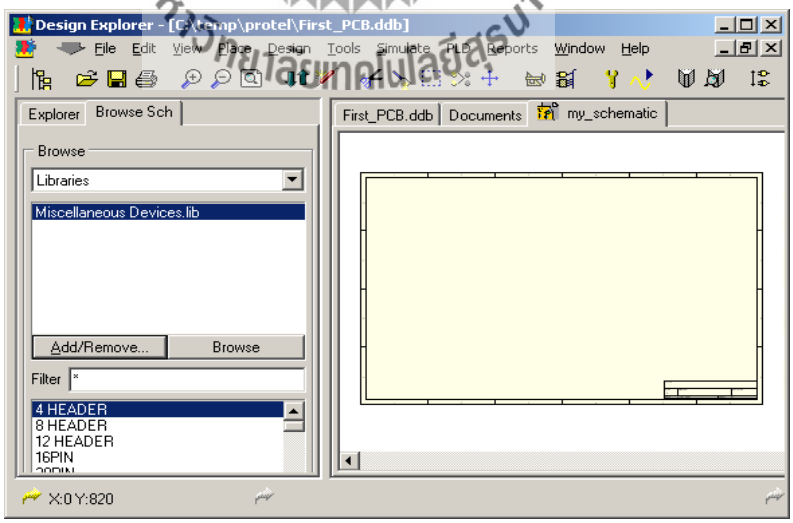


รูปที่ 4 เลือก Schematic Document

จะปรากฏหน้าต่างดังรูปเลือก Schematic Document ทำการตั้งชื่อ Schematic เป็น my schematic.Sch

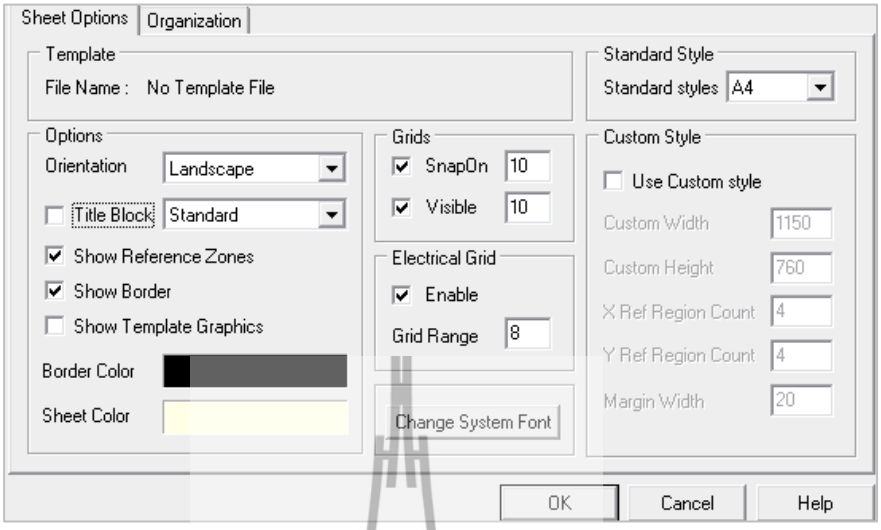
5. หลังจากนั้นให้ท่านดับเบิ้ลคลิกที่ไอคอนmy schematic

จะปรากฏหน้าต่างการทำงานดังต่อไปนี้



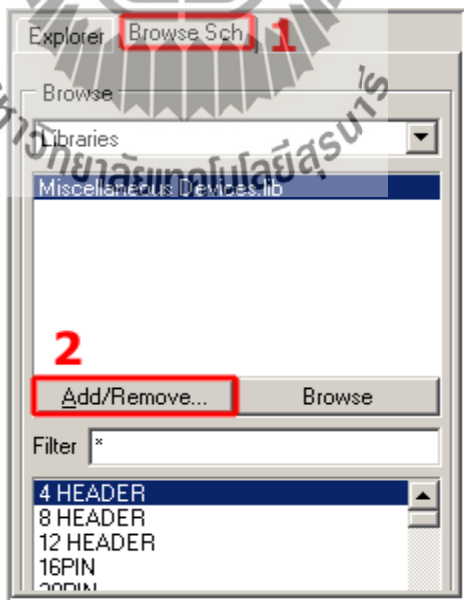
รูปที่ 5 File my_schematic.Sch

กำหนด Option ของ schematic โดยเลือกที่ Design --> Option



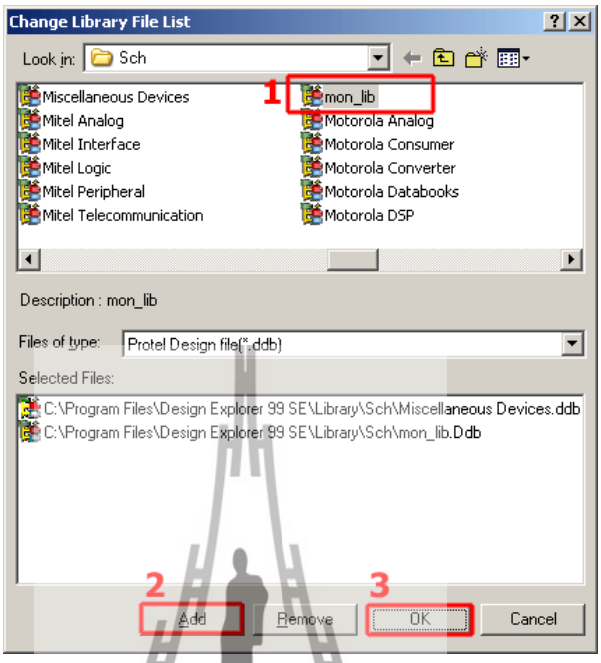
รูปที่ 6 หน้าต่างกำหนด Option ของ schematic

6. ทำการ Add library โดยการคลิกที่แท็บ Browse Sch --> คลิกที่ Add/Remove



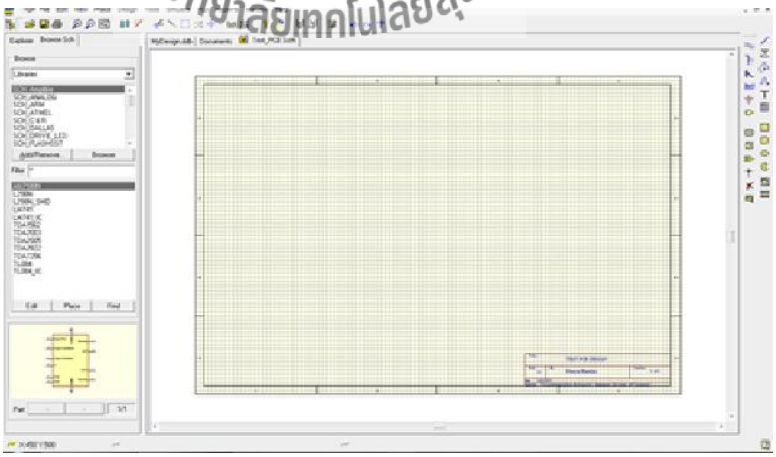
รูปที่ 7 การ Add library (1)

7. เลือกไฟล์ mon_lib.ddbจากนั้นคลิกปุ่ม Add และตามด้วยปุ่ม OK



รูปที่ 8 การ Add library (2)

8. เมื่อทำการ Add Library เรียบร้อยแล้วจะเป็นอุปกรณ์ที่อยู่ด้านซ้ายมือ ซึ่งสามารถนำมาใช้งานได้โดยการคลิก แล้วนำมาวางที่ schematic

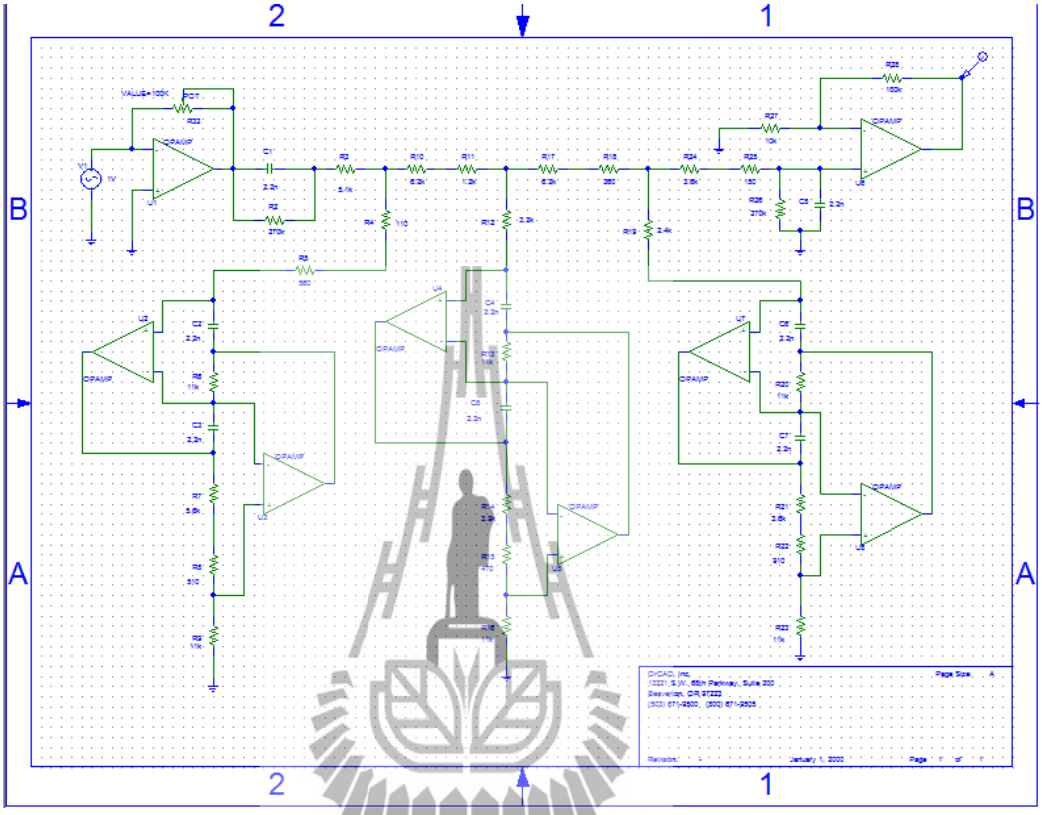


รูปที่ 9 อุปกรณ์Library

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Protel 99 SE เพื่อใช้ในการออกแบบ PCB

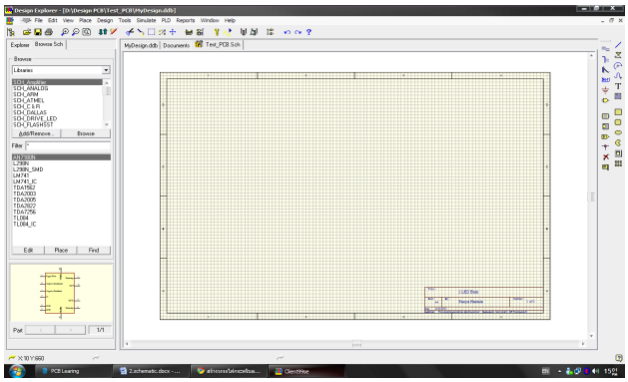
เราจะทำการวาดวงจรที่เราต้องการออกแบบใน Schematic โดยจะทำการออกแบบตามวงจรตัวอย่างดังนี้



รูปที่ 10 วงจรตัวอย่าง

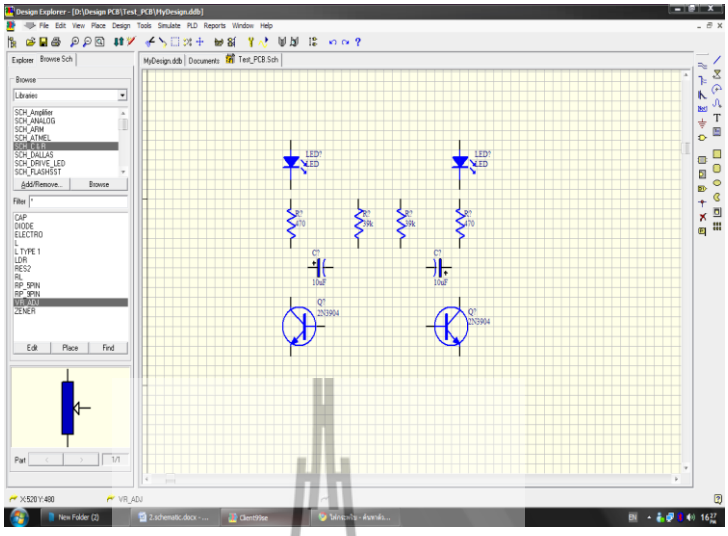
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1. สร้าง New Design ขึ้นมาตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้ว จะได้หน้าต่างดังรูป



รูปที่ 11 สร้าง New Design

2. จัดวางอุปกรณ์ตามวงจรตัวอย่าง



รูปที่ 12 การจัดเรียงอุปกรณ์ตามวงจรที่ออกแบบไว้

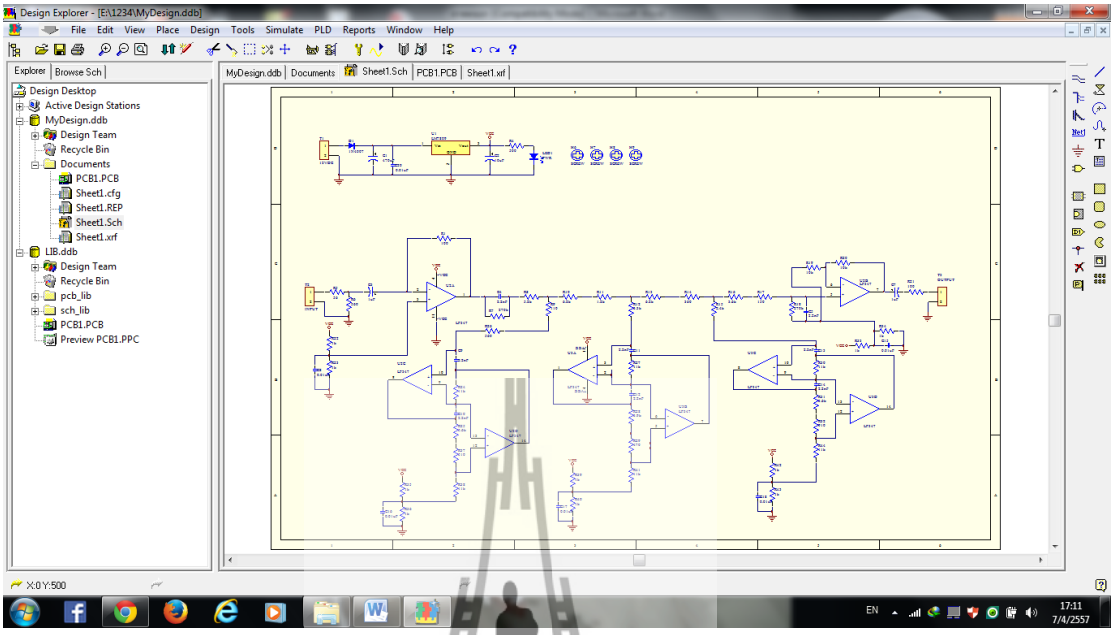
คำสั่งพื้นฐานในการใช้งาน

- Page Up (Zoom In) , Page Down (Zoom Down)
- Key X --> Flip Horizontal ,Key Y--> Flip Vertical
- Key Space Bar --> Rotate

* หมายเหตุ ใน Library ที่ต่างกัน อุปกรณ์ที่นำมาวางจะไม่เหมือนกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3. เชื่อมต่ออุปกรณ์ด้วยคำสั่ง PlaceWireโดยคลิก Place --> Wire

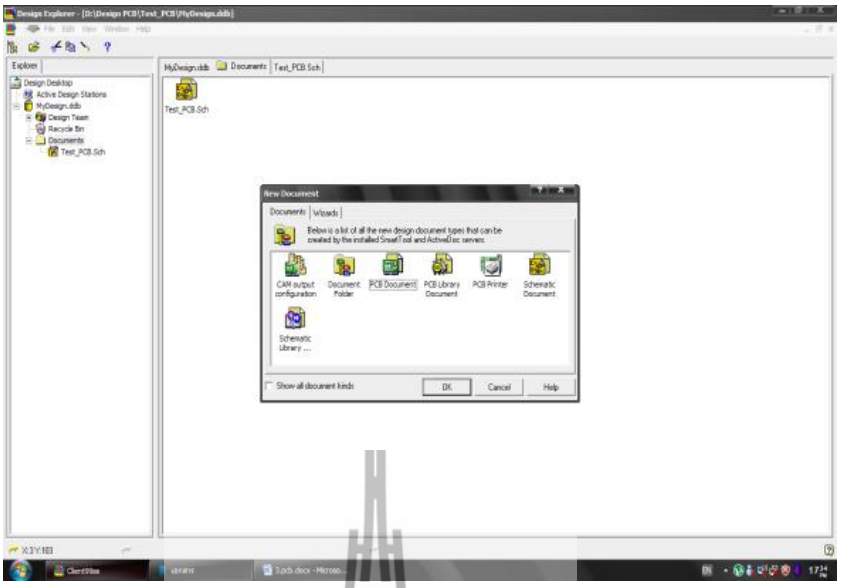


รูปที่ 13 แสดงการเชื่อมต่อของวงจร

จะเห็นได้ว่า เราได้อุปกรณ์ครบถ้วน และยังมีการตั้งชื่อของอุปกรณ์แต่ละตัวด้วย ถือว่าเป็นการเสร็จในกระบวนการ schematic แล้ว

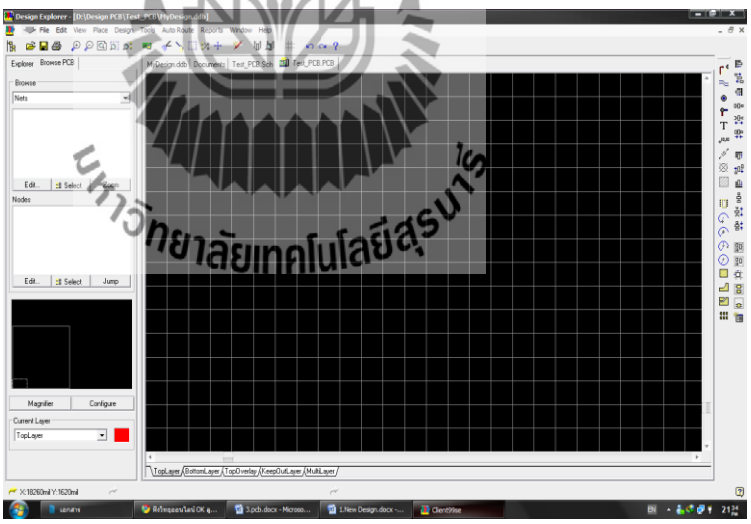
หลังจากที่ได้ออกแบบวงจรแบบ Schematic เราสามารถสร้าง Artwork ของ PCB ได้จาก Schematic ได้โดยมีขั้นตอนดังนี้

4. เปิด File ที่เราได้สร้าง Schematic จากนั้นไปที่ Folder Documents แล้วคลิกขวา เลือก NEW....เลือก PCB Documents และเปลี่ยนชื่อ File PCB เป็น Compressor.PCB



รูปที่ 14 เปิดไฟล์ Schematic ที่ได้ออกแบบไว้

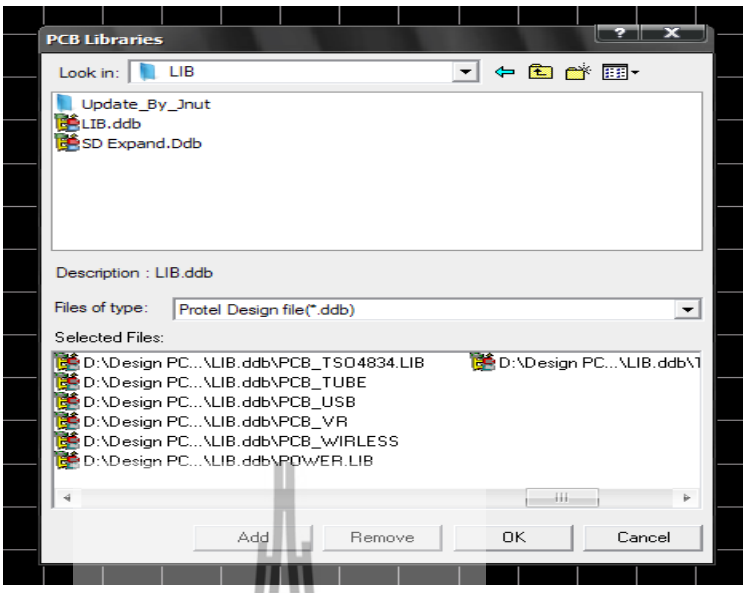
จากนั้นเปิด File Compressor.PCB ขึ้นมา จะเห็นหน้าต่างดังรูป



รูปที่ 15 หน้าต่างของ File Compressor.PCB

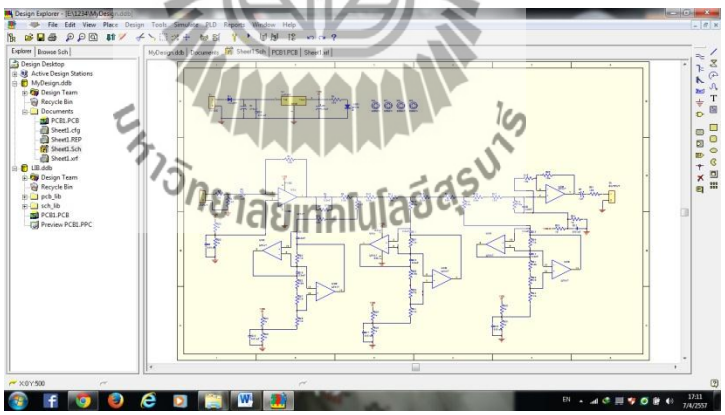
5. ทำการ Add library โดยการคลิกที่ Design --> Add/Remove Library.... และเลือก File Library ที่ต้องการ แล้วคลิกที่ Add ===>คลิก OK

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 16 การ Add library

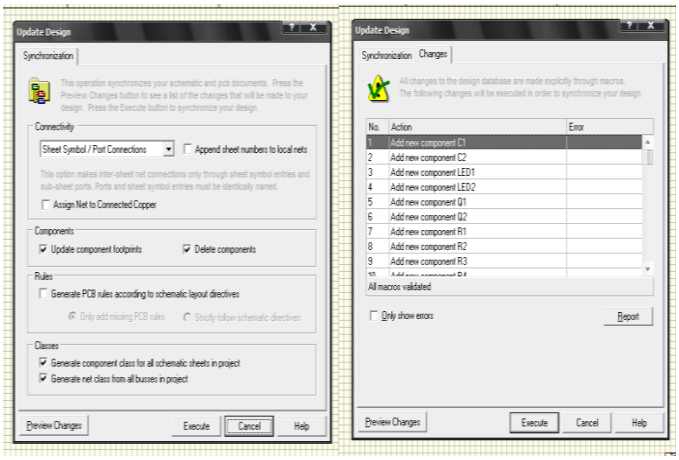
6. เมื่อทำการ Add Library เสร็จแล้ว ให้เปิด File Schematic ขึ้นมา แล้วคลิกที่ Design --> Update PCB



รูปที่ 17 เปิดไฟล์ File Schematic ในไฟล์งานของ PCB

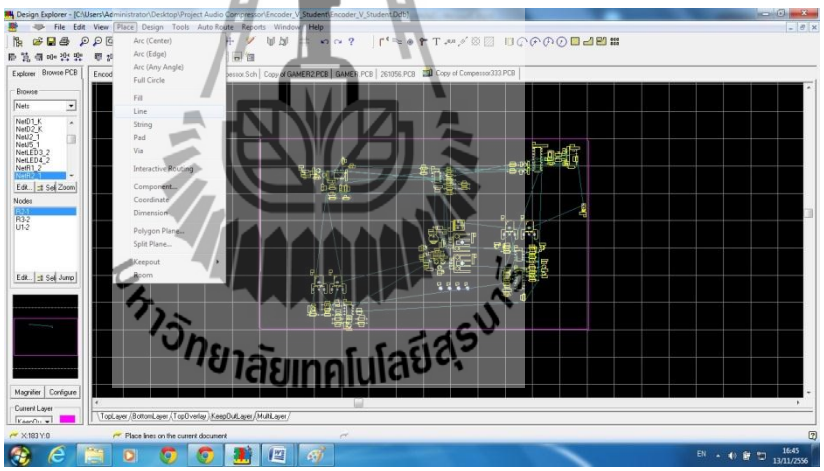
7. คลิกที่ Preview Changes (รูปด้านซ้ายมือ) เพื่อตรวจสอบความผิดพลาด หากตรวจสอบแล้วพบว่าในช่อง Error ไม่มีข้อความเตือน ให้คลิกที่ Executes แต่หากเกิดข้อผิดพลาดให้ทำการแก้ไขก่อน จนกว่าจะไม่เกิด Error

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 18 การตรวจสอบความผิดพลาด

8. เลือกพื้นที่ขอบเขตของแผ่น PCBโดยคลิกที่ KeepOutLayerด้านล่างแล้วคลิกที่คำสั่ง Place --> Line แล้วเลือกพื้นที่ของ PCB

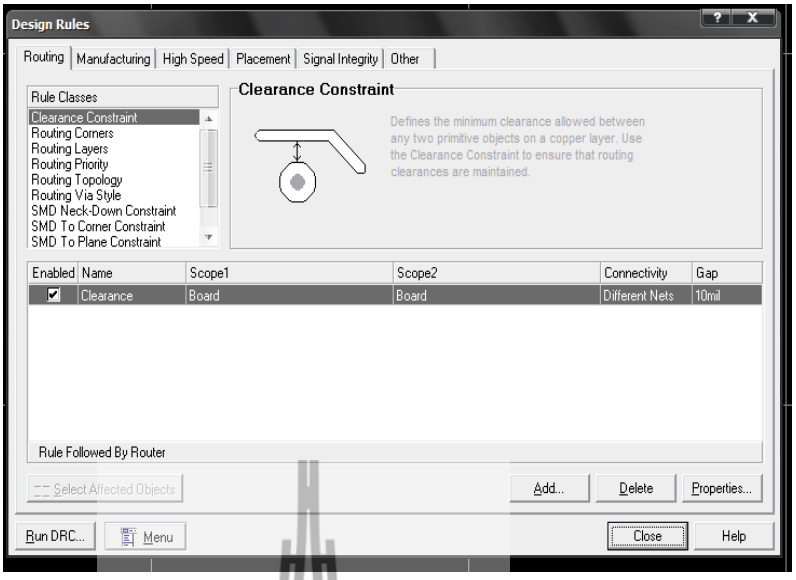


รูปที่ 19 การเลือกพื้นที่ขอบเขตของแผ่น PCB

9. จัดวางอุปกรณ์ตามต้องการ

10. ทำการกำหนดค่าต่าง ๆ โดยคลิกที่ Design --> Rules จะได้หน้าต่างดังรูป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 20 การกำหนดค่า เพื่อที่จะทำการ Rules

- **Clearance Rule** คือระยะทางของ Track กับ Padปรับค่า Minimum Clearance เป็น 20 mil
- **Routing Corners** คือลักษณะการเดินเส้นของ Track เมื่อเกิดจุดที่ต้องเลี้ยว
- **Routing Layers Rule** คือเลือก Layer ที่ต้องการ Rules เช่น หากเป็น PCB แบบ Single – Sided จะตั้งค่า Top Layer เป็น Not Used
- **Routing Topology** คือเทคนิคการ Rules
- **Width Constraint** คือกำหนดขนาดของเส้นที่ Rules

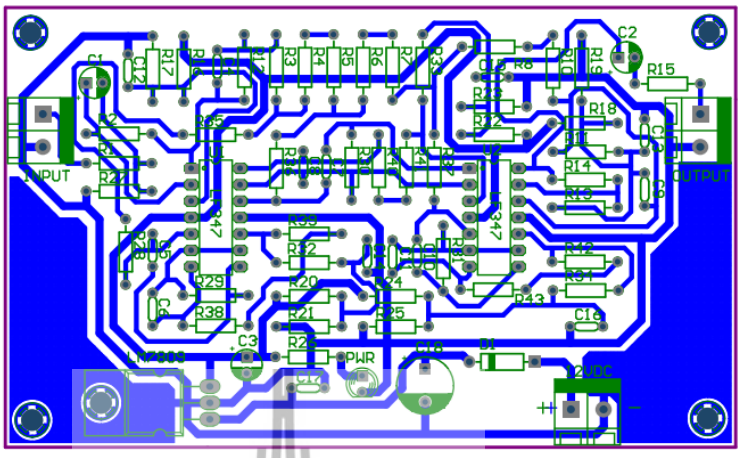
  Minimum Width คือขนาดของเส้นที่เล็กที่สุดที่สามารถ Rules ได้

  Maximum Width คือขนาดของเส้นที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถ Rules ได้

  Preferred Width คือขนาดของเส้นที่ Rules ใน PCB ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

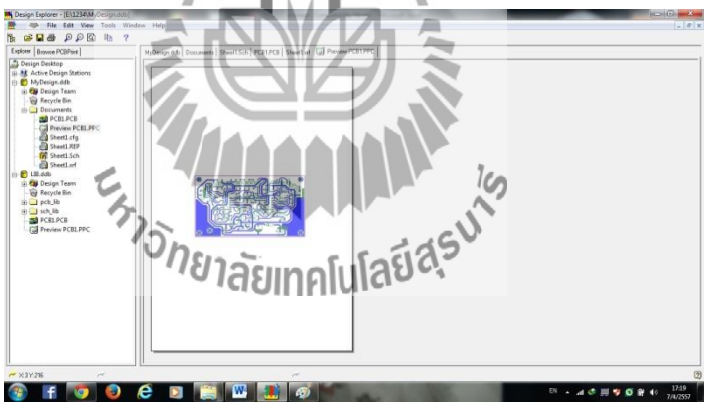
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

11. ทำการ เชื่อมต่ออุปกรณ์โดยใช้คำสั่ง Interactively route connections



รูปที่ 21 เมื่อทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์

12. หลังจากที่ได้ Artwork ของ PCB แล้วต้องทำการพิมพ์เพื่อนำไปทำเป็นแผ่น PCB ต่อไป คลิกที่ File --> print/preview จะได้ดังรูป

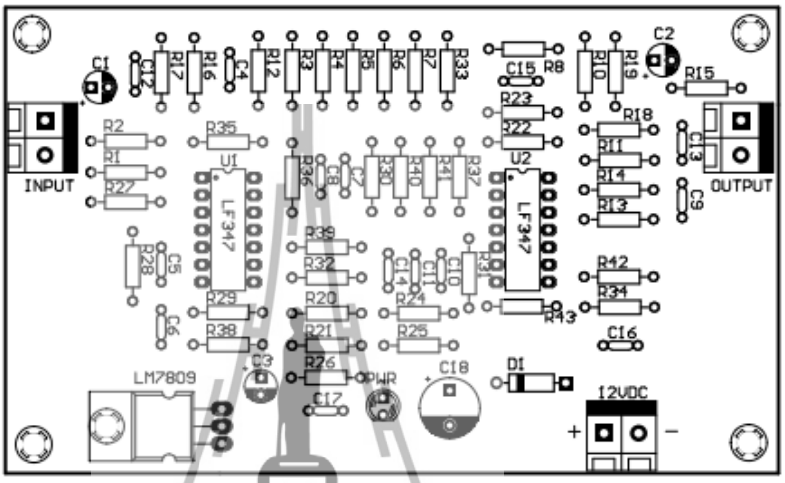


รูปที่ 22 Artwork ของ PCB เพื่อนำไปทำเป็นแผ่น PCB

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขั้นตอนการสร้างวงจรกรองผ่านความถี่

1. คำนวณแปลงค่า L และ C เป็นค่า R จากสมการที่ (3.1) และ (3.2)
2. ทำการจำลองวงจรด้วยโปรแกรม Schematics โดยการสร้างวงจรตามรูปที่ 3.2
3. จากโปรแกรม Schematics นำวงจรที่ออกแบบได้ไปทำการออกแบบชิ้นงานด้วยโปรแกรม Protel 99SE จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 26



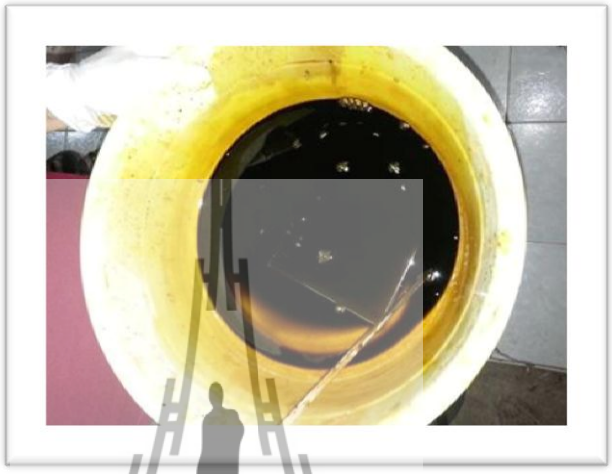
รูปที่ 23 ชิ้นงานออกแบบด้วยโปรแกรม Protel 99 SE

4. ปริ้นรูปแบบชิ้นงานใส่แผ่นใส แล้วนำไปสกรีนลงแผ่น PCB ที่เตรียมไว้

รูปที่ 24 สกรีนรูปชิ้นงานบนแผ่นใสลงที่แผ่น PCB

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5. ลอกแผ่นใสออกจะเห็นลายติดอยู่บนแผ่นทองแดง
6. นำปากกาเขียนเติมส่วนที่ไม่ชัดหรือส่วนที่ขาด
7. นำปากกาเขียนเติมส่วนที่ไม่ชัดหรือส่วนที่ขาด
8. นำไปกัดปริ้นโดยแช่ในน้ำยากัดปริ้นประมาณ 10 นาที



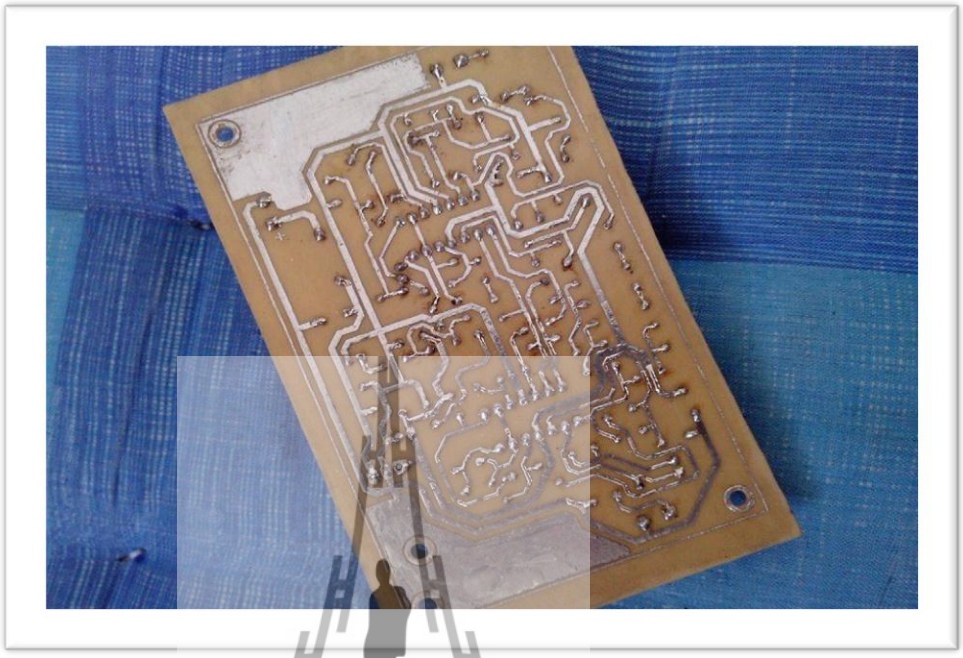
รูปที่ 25 การกัดปริ้น

9. นำแผ่น PCB ไปเจาะตามรูขาของอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบ

รูปที่ 26 เจาะแผ่น PCB ตามรูขาของอุปกรณ์

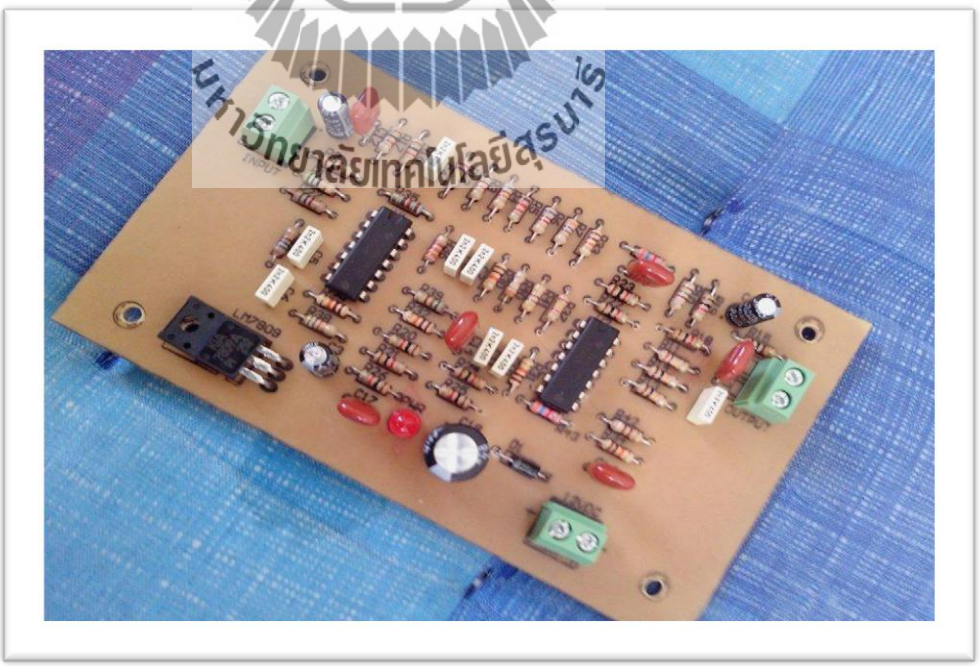
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

10. นำแผ่น PCB ที่ได้ไปเจาะรูเพื่อวางชิ้นส่วนของวงจร แล้วนำไปบัดกรีให้เรียบร้อย



รูปที่ 27 ลายวงจรและขาอุปกรณ์ที่บัดกรี

11. ชิ้นงานที่ประกอบอุปกรณ์ทุกตัวตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ 28 ชิ้นงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บรรณานุกรม

[1] **วิทยุกระจายเสียง FM STEREO MULTIPLEX** จากเว็บไซต์

http://www.l3nr.org/posts/450214

[2] **วงจรbrick – wall Low Pass Filter** จากเว็บไซต์

http://www.kmitl.ac.th/~kpteeraw/data_com/datacom_52/Filter.htm

[3] **วงจรกรองความถี่** จากเว็บไซต์

http://www.hs8jyx.com/html/filter_circuit.html