วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ 120MHz

(120 MHz Low Pass Filter)

โดย

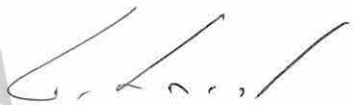
นายธราพงษ์	ตาลพันธุ์	รหัส	B5311521
นายธีรวรรธน์	อ่อนจงไกร	รหัส	B5307739
นางสาวดวงดาว	บุญสุข	รหัส	B5315475

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 โครงงานวิศวกรรมโทรคมนาคม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2546
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ประจำภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2556

120 MHz Low Pass Filter

คณะกรรมการสอบโครงงาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ ทองทา)
กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญชัย ทองโสภา)
กรรมการ

(อาจารย์ ธนเสฏฐ์ ทศดีกรพัฒน์)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับรายงานโครงงานฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม รายวิชา 427499 โครงงานวิศวกรรมโทรคมนาคม ประจำปีการศึกษา 2556

หัวข้อโครงงาน	วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ 120 MHz (120 MHz Low Pass Filter)			
จัดทำโดย	นายธราพงษ์	ตาลพันธุ์	รหัส	B5311521
	นายธีรวรรธน์	อ่อนจงไกร	รหัส	B5307739
	นางสาวดวงดาว	บุญสุข	รหัส	B5315475
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา			
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม			
ภาคการศึกษาที่	2/2556			

บทคัดย่อ
(Abstract)

ในปัจจุบันได้มีการจัดตั้งสถานีวิทยุชุมชนเพิ่มขึ้นอย่างแพร่หลาย โดยสถานีวิทยุส่วนใหญ่ใช้เครื่องส่งที่ไม่ผ่านการรับรองมาตรฐานจากคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ทำให้เกิดการแพร่แปลกปลอมของความถี่อื่นๆ ที่อยู่นอกเหนือจากแถบความถี่ที่จำเป็น (Necessary Bandwidth) เรียกปัญหาเหล่านี้ว่า การแพร่แปลกปลอม (Conducted Spurious Emission) โดยรวมไปถึงการแพร่ฮาร์มอนิก (Harmonic Emission) ส่งผลให้เกิดปัญหาการรบกวนย่านความถี่อื่นๆ โครงงานนี้จึงได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการใช้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) ซึ่งจะทำหน้าที่กรองสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ของการกระจายเสียงในระบบ FM ไม่ให้แพร่กระจายออกไปได้ เพื่อป้องกันและแก้ปัญหาการรบกวนย่านความถี่อื่นๆ ที่เกิดจากเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงที่ไม่ผ่านการรับรองมาตรฐานที่กำลังเกิดขึ้นในปัจจุบัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงงานเรื่อง 120 MHz Low Pass Filter นี้ได้ประสบความสำเร็จด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ในการให้คำปรึกษาในด้านต่างๆ ในระหว่างการดำเนินการจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ ทองทา (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน) และนายปัญญา หันตุลา (นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม) ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษา รวมทั้งข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในการทำโครงงานในครั้งนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการให้ข้อมูลและเป็นที่ปรึกษาในการทำโครงงานฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนให้การดูแลและให้คำแนะนำเกี่ยวกับความรู้พื้นฐานในการใช้งานโปรแกรมซึ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายธราพงษ์ ตาลพันธุ์
นายธีรวรรธน์ อ่อนจงไกร
นางสาวดวงดาว บุญสุข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญต่อ	ง
สารบัญภาพ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการงาน	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน	3
2.1 บทนำ	3
2.2 วิทยุกระจายเสียงระบบ FM	4
2.3 มาตรฐานทางเทคนิคเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงระบบ FM	5
2.4 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low Pass Filter)	6
2.4.1 ความถี่ Cutoff Frequency	8
2.4.2 การเกิดการกระเพื่อมในแถบความถี่ (Rippleband)	9
2.4.3 การออกแบบวงจร Low Pass Filter	9
บทที่ 3 การออกแบบโครงงาน	13
3.1 บทนำ	13
3.2 การออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low Pass Filter)	13
3.3 การออกแบบตัวเก็บประจุแบบ Rectangular Pad	17
3.4 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ	20

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลอง	23
4.1 บทนำ	23
4.2 ผลการทดสอบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ	23
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	31
5.1 สรุปผลการทดลอง	31
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	32
5.3 สิ่งที่ได้รับจากการทำโครงงาน	32
ประวัติผู้เขียน	33
ภาคผนวก	34
ภาคผนวก ก	35
ภาคผนวก ข	37
บรรณานุกรม	40

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญภาพ

รูป		หน้า
รูปที่ 2.1	ลักษณะของสัญญาณที่มีการ Modulation แบบ FM	4
รูปที่ 2.2	(a) วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำอันดับต่าง	6
รูปที่ 2.2	(b) กราฟแสดงอัตราการลดทอนแรงดันเชิงความถี่	7
รูปที่ 2.3	วงจร Low Pass Filter แบบ T Type	7
รูปที่ 2.4	Low Pass Filter แบบ Pi Type	8
รูปที่ 2.5	ลักษณะของ Cutoff Frequency	8
รูปที่ 2.6	ลักษณะการกระเพื่อมที่เกิดขึ้น	9
รูปที่ 2.7	ลักษณะการลดทอนสัญญาณแบบ Butterworth filter	10
รูปที่ 2.8	วงจรที่ใช้ในการออกแบบ Low Pass Filter	12
รูปที่ 3.1	Attenuation characteristics for Butterworth	14
รูปที่ 3.2	วงจรสมมูลของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ	14
รูปที่ 3.3	วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ	16
รูปที่ 3.4	จำลองวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ	16
รูปที่ 3.5	กราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่	17
รูปที่ 3.6	Rectangular Pad Capacitance	18
รูปที่ 3.7	จำลองวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำที่ใช้ C แบบ Rectangular Pad	19
รูปที่ 3.8	กราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่ที่ใช้ C แบบ Rectangular Pad	19
รูปที่ 3.9	แสดงการวางตัวเก็บประจุ	20
รูปที่ 3.10	Air Core Inductor	21
รูปที่ 3.11	แสดงวงจรที่สร้างขึ้น	22
รูปที่ 4.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ	23
รูปที่ 4.2	การต่อสายเพื่อทำการ caribrate	24
รูปที่ 4.3	ผลตอบสนองทางความถี่	28
รูปที่ 4.4	กราฟแสดง Cut Off Frequency	28
รูปที่ 4.5	กราฟผลตอบสนองทางความถี่ที่ย่านใช้งาน	29

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความเก็บประจุ	15
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ	16
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความกว้างและความยาวของตัวเก็บประจุ	18
ตารางที่ 3.4 แสดงค่าจำนวนรอบและความยาวของตัวเหนี่ยวนำ	22
ตารางที่ 4.1 บันทึกผลการทดสอบ	25

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่1
บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ตามมาตรฐานทางเทคนิคเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงสำหรับการทดลองประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง ระบุลักษณะทางเทคนิคขั้นต่ำของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงสำหรับการทดลองประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง ซึ่งมีการใช้งานในย่านความถี่วิทยุ 87.75 MHz ถึง 107.75 MHz (สำหรับประเทศไทย) มีการมอดูเลตแบบเอฟเอ็ม (FM) และมีช่วงห่างระหว่างคลื่นพาห์ (Carrier spacing) 250 kHz แต่ในปัจจุบันมีการจัดตั้งสถานีวิทยุชุมชนโดยใช้เครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงที่ยังไม่ได้รับรองมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียง ทำให้เกิดการแพร่แปลกปลอมของความถี่อื่นๆ ที่อยู่นอกเหนือจากแถบความถี่ที่จำเป็น (Necessary Bandwidth) เรียกปัญหาเหล่านี้ว่าการแพร่แปลกปลอม (Conducted Spurious Emission) โดยรวมไปถึงการแพร่ฮาร์มอนิก (Harmonic Emission) อาจจะก่อให้เกิดปัญหาการรบกวนย่านความถี่อื่นๆ ในโครงงานนี้จึงได้จัดทำวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) โดยออกแบบให้มี Cutoff Frequency ที่ความถี่ 120 MHz จะทำให้ความถี่ฮาร์มอนิกและความถี่แปลกปลอมอื่นๆ ที่มีความถี่สูงกว่าย่านความถี่วิทยุ FM ไม่สามารถผ่านได้ เพื่อป้องกันและแก้ปัญหาการรบกวนย่านความถี่อื่นๆ ที่เกิดจากเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงที่ไม่ได้รับรองมาตรฐานที่กำลังเกิดขึ้นในปัจจุบัน

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการแพร่แปลกปลอม (Conducted Spurious Emission)
2. เพื่อศึกษาและออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low Pass Filter)
3. เพื่อแก้ไขปัญหาและป้องกันการแพร่แปลกปลอมของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงที่ไม่ผ่านการรองรับมาตรฐาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.3 ขอบเขตงาน

สามารถออกแบบและสร้างวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำที่มี Cutoff Frequency ที่ความถี่ 120 MHz

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษา ค้นหาข้อมูล การแพร่แปลกปลอมและวิธีการแก้ปัญหา
2. เขียนโครงงานและเสนอโครงงานกับอาจารย์ที่ปรึกษา
3. ออกแบบวงจร Low Pass Filter
4. ทดสอบวงจรที่ออกแบบด้วยโปรแกรมจำลอง AWR design environment

5. สร้างวงจร Low Pass Filter ตามที่ได้ออกแบบ
6. ทดสอบวงจร Low Pass Filter ในห้องปฏิบัติการ
7. แก้ไขและปรับปรุงวงจร Low Pass Filter
8. สรุปผลการทดสอบและเขียนรายงาน
9. นำเสนอผลงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำไปแก้ไขปัญหาการแพร่แปลกปลอมในเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงที่ไม่ได้รับรองมาตรฐาน

2. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปต่อยอดเพื่อช่วยแก้ไขการแพร่แปลกปลอมในงานด้านอื่นๆ และสามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการประกอบอาชีพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน

2.1 บทนำ

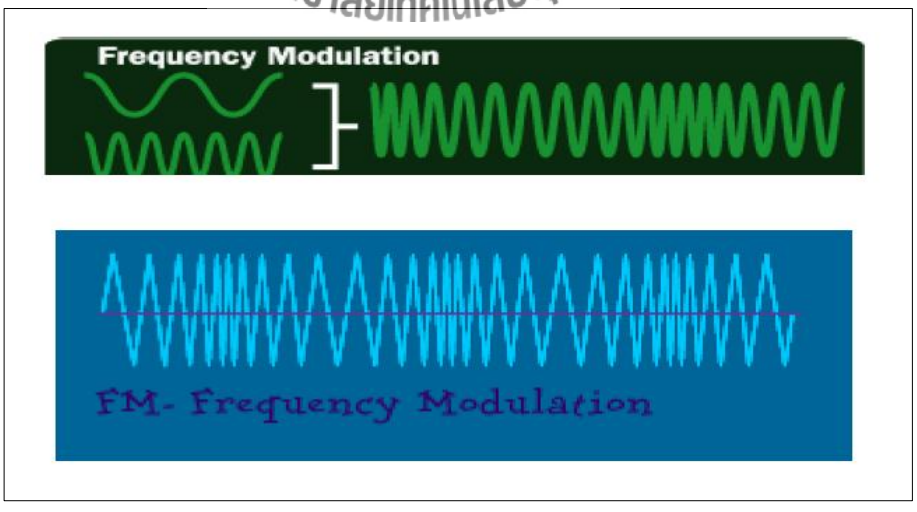
กำเนิดวิทยุของโลก มีความเป็นมาตามลำดับต่อไปนี้ พ.ศ. 2408 เจมส์ คลาก แมกซ์เวล (James Clerk Maxwell) ชาวอังกฤษค้นพบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นวิทยุพ.ศ. 2430 เฮนริช รูดอล์ฟ เฮิรตซ์ (Henrich Rudolf Hertz) ได้ค้นคว้าทดลองตามหลักการของ แมลซ์แวล ค้นพบคุณสมบัติต่างๆ ของคลื่นวิทยุพ.ศ. 2444 กูลิเอลโม มาร์โคนี (Guglielmo marconi) ชาวอิตาลีสามารถส่งคลื่นวิทยุโทรเลขข้ามมหาสมุทรแอตแลนติก ระยะทางกว่า 2,000 ไมล์ การส่งวิทยุระยะแรกเป็นการส่งวิทยุโทรเลข ยังไม่สามารถส่งสัญญาณที่เป็นเสียงพูดได้ จนกระทั้ง พ.ศ. 2449 จึงสามารถส่งสัญญาณเสียงพูดได้โดยการพัฒนาของศาตราจารย์ เรจินัลต์ เอ. เพสเสนเดน (Riginald A. Fessenden) และลีเดอฟอเรส (Lee de Forest) ชาวอเมริกันทำได้สำเร็จในปี พ.ศ. 2451 ซึ่งเป็นการส่งเสียงพูดจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับเครื่องหนึ่งในระยะไกล เรียกว่า วิทยุโทรศัพท์ (Radio Telephony) สถานีวิทยุกระจายเสียงที่ออกอากาศครั้งแรกของโลกคือ สถานี KCBS ในซานฟรานซิโก สหรัฐอเมริกา เริ่มออกอากาศรายการประจำให้คนทั่วไปรับฟังเมื่อ พ.ศ. 2453 (สุมน อยู่สิน และยงยุทธ รักษาศรี 2534 : 47-65) ประเทศไทยเริ่มรู้จักเครื่องวิทยุเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2447 เมื่อ ห้างบี.กริมม์ นำ ผู้แทนบริษัทวิทยุโทรเลข เทเลฟุงเก็น เข้ามาตั้งเครื่องรับส่งวิทยุโทรเลขทดลองในกรุงเทพฯ หลังจากนั้นทางราชการกองทัพเรือ และกองทัพบกจึงได้นำเครื่องรับส่งวิทยุโทรเลขขนาดเล็ก ๆ มาใช้ราชการในเรือรบและในงานสนาม ในปี พ.ศ. 2456 ทางราชการทหารเรือได้ตั้งสถานีวิทยุโทรเลขถาวรขึ้นที่ตำบลศาลาแดงในกรุงเทพฯสถานีหนึ่ง และที่ชายทะเล อำเภอเมือง จังหวัดสงขลาอีกแห่งหนึ่ง พระบาทสมเด็จพระมงกุฎเกล้าเจ้าอยู่หัว รัชกาลที่ 6 ได้เสด็จมาทรงเปิดสถานีวิทยุโทรเลขแห่งแรกของประเทศไทย ที่ตำบลศาลาแดง กรุงเทพฯ เมื่อวันที่ 13 มกราคม (ปลายปี)

จากปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบันได้มีการจัดตั้งสถานีวิทยุชุมชนโดยใช้เครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงที่ยังไม่ได้รับรองมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียง ทำให้เกิดการแพร่แปลกปลอมของความถี่อื่นๆ ที่อยู่นอกเหนือจากแถบความถี่ที่จำเป็น (Necessary Bandwidth) เรียกปัญหาเหล่านี้ว่า การแพร่แปลกปลอม (Conducted Spurious Emission) โดยรวมไปถึงการแพร่ฮาร์มอนิก (Harmonic Emission) อาจจะก่อให้เกิดปัญหาการรบกวนย่านความถี่อื่นๆ เช่น การติดต่อสื่อสารระหว่างนักบินและผู้ควบคุมการจราจรทางอากาศ อาจทำให้เกิดความเข้าใจผิดส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยทางการบินซึ่งอาจจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน จึงได้มีการศึกษาทฤษฎี เพื่อแก้ปัญหาการแพร่แปลกปลอม (Conducted Spurious Emission) ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับ วิทยุกระจายเสียงระบบ FM มาตราฐานของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงระบบ FM และทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับหลักการออกแบบวงจร Low Pass Filter

2.2 วิทยุกระจายเสียงระบบ FM

วิทยุกระจายเสียงระบบ FM คือ การผสมคลื่นทางความถี่ (Frequency Modulation) เป็นการเปลี่ยนแปลงคลื่นพาหะ โดยที่ความถี่ของคลื่นพาหะจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามแอมพลิจูดของสัญญาณเสียงแต่แอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นพาหะยังคงเดิม โดยตามมาตรฐาน ITU (International Telecommunication Union) กำหนดให้วิทยุกระจายเสียงระบบ FM สามารถส่งออกอากาศได้ที่ความถี่ตั้งแต่ 88.00 MHz ถึง 108.00 MHz แต่สำหรับประเทศไทยได้มีการกำหนดมาตรฐานจากสำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ให้สามารถออกอากาศได้ตั้งแต่คลื่นความถี่ 87.75 MHz ถึง 107.75 MHz ซึ่งในปัจจุบันในประเทศไทยมีการจัดตั้งสถานีวิทยุกันอย่างแพร่หลายกระจายกันอยู่ตามจังหวัดต่างๆ ทั่วประเทศ โดยข้อได้เปรียบของวิทยุกระจายเสียงระบบ FM คือ ให้คุณภาพเสียงดีเยี่ยม ไม่เกิดสัญญาณรบกวนจากสภาพอากาศแปรปรวน แต่ส่งได้ในระยะประมาณไม่เกินประมาณ 150 กิโลเมตร ปัจจุบันนิยมส่งในแบบสเตอริโอที่เรียกว่าระบบ FM Stereo Multiplex ซึ่งเครื่องรับวิทยุสามารถแยกสัญญาณออกเป็น 2 ข้างสัญญาณสำหรับลำโพงด้านซ้าย และสัญญาณสำหรับลำโพงขวา การส่งวิทยุกระจายเสียงระบบ FM Stereo Multiplex เป็นระบบที่คิดค้นหลังจากระบบกระจายเสียงอื่นๆ การส่งกระจายเสียงเกิดขึ้นหลังจากมีการส่งโทรทัศน์เสียอีก เมื่อประมาณ พ.ศ. 2460 เศษ ซึ่งเป็นเวลาที่ใกล้เคียงกับที่มีการส่งกระจายเสียงระบบ AM นายอาร์สตรองได้คิดค้นการกระจายเสียงระบบ FM ขึ้นเป็นผลสำเร็จต่อมาราว พ.ศ. 2490 เศษ ได้มีผู้พยายามส่งกระจายเสียงระบบสเตอริโอ ในหลายประเทศมีการทดลองส่งกระจายเสียงแบบสเตอริโอ โดยใช้ความถี่ 2 ความถี่ในการส่งโดยใช้ความถี่หนึ่งส่งกระจายเสียงสัญญาณซีกขวาอีกความถี่หนึ่งมีการส่งหลายความถี่ ทางผู้ฟังก็ต้องใช้เครื่องรับหลายเครื่องตามไปด้วย จึงได้มีการคิดค้นการส่งกระจายเสียงระบบสเตอริโอ โดยใช้ความถี่เดียวในการส่งขึ้น โดยอาร์มสตรองและคณะอาจารย์ของมหาวิทยาลัยโคลัมเบียแห่งสหรัฐอเมริกาเป็นผู้เริ่มต้นที่สโมสรวิทยุสหรัฐอเมริกา (Radio Club of America) เรียกระบบนี้ว่าสเตอริโอ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.1 ลักษณะของสัญญาณที่มีการ Modulation แบบ FM [1]

2.3 มาตรฐานทางเทคนิคเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงระบบ FM

ตามพระราชบัญญัติองค์กรจัดสรรคลื่นความถี่และกำกับกิจการวิทยุกระจายเสียง วิทยุโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม พ.ศ. 2543 สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) มีหน้าที่พิจารณาอนุญาตและกำกับดูแลการใช้คลื่นความถี่เพื่อกิจการวิทยุกระจายเสียงและกิจการวิทยุโทรทัศน์ และการกำหนดมาตรฐานและลักษณะพึงประสงค์ทางเทคนิคของอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียงและวิทยุโทรทัศน์เนื่องจากขณะนี้ยังไม่มีการแต่งตั้งกสทช. เพื่อทำหน้าที่ตามที่กฎหมายบัญญัติ ทำให้ไม่สามารถพิจารณาจัดสรรคลื่นความถี่ ออกใบอนุญาตประกอบกิจการ หรืออนุญาตให้ประกอบกิจการเพิ่มเติมไม่ได้ ตามบทบัญญัติมาตรา 80 ของ พ.ร.บ. ดังกล่าว เพื่อบรรเทาปัญหาการตั้งสถานีวิทยุกระจายเสียงสำหรับชุมชนเป็นการชั่วคราว คณะรัฐมนตรีได้มีมติในการประชุมวันที่ 16 สิงหาคม 2548 กำหนดกรอบกติกาทางเทคนิคและหลักเกณฑ์การตั้งสถานีวิทยุชุมชน โดยกำหนดกำลังส่งไม่เกิน 30 วัตต์ ความสูงเสาอากาศไม่เกิน 30 เมตรจากระดับพื้นดิน และรัศมีการออกอากาศไม่เกิน 15 กิโลเมตร แม้ว่ายังไม่มีการอนุญาตจัดตั้งสถานีวิทยุชุมถูกต้องตามกฎหมายอย่างเป็นทางการ แต่ปัจจุบันมีการส่งวิทยุกระจายเสียงของสถานีวิทยุชุมชนทั้งในพื้นที่เขตกรุงเทพมหานครปริมณฑลและในเขตภูมิภาคทั่วประเทศ ทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นแปลกปลอมที่ก่อให้เกิดการรบกวนต่อข่ายการสื่อสารอื่น การแพร่แปลกปลอม (Conducted Spurious Emission) หมายถึง การแพร่ที่ขั้วต่อสายอากาศที่ความถี่วิทยุใดๆ ที่อยู่นอกเหนือแถบความถี่จำเป็น (Necessary Bandwidth) และหมายความรวมถึง การแพร่ฮาร์มอนิก (Harmonic Emission) การแพร่พาราซิติก (Parasitic Emission) ผลจากการมอดูเลตระหว่างกัน (Intermediation Product) และผลจากการแปลงความถี่ (Frequency Conversion Product) แต่ไม่รวมถึงการแพร่แถบนอก (Out - of - band emission) ดังนั้นคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติได้แต่งตั้งคณะอนุกรรมการเฉพาะกิจจัดทำมาตรฐานเทคนิคสำหรับเครื่องวิทยุคมนาคม เพื่อรับผิดชอบการศึกษามาตรฐานสากลและยกร่างมาตรฐานทางเทคนิคสำหรับเครื่องส่งวิทยุคมนาคมที่เหมาะสมของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงสำหรับชุมชนย่านความถี่วิทยุ 87.75 MHz ถึง 107.75 MHz เพื่อป้องกันและลดการรบกวนที่เกิดขึ้นกับข่ายสื่อสารในกิจการวิทยุคมนาคมอื่น การแปลงความถี่ (Frequency Conversion Product) แต่ไม่รวมถึงการแพร่แถบนอก (Out – of - band emission)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<u>ขีดจำกัด</u> กำลังของการแพร่แปลกปลอม สำหรับกิจการวิทยุกระจายเสียงในระบบ FM ต้องต่ำกว่าค่ากำลังคลื่นพาห์ (Mean Power) ในขณะที่ไม่มีการมอดูเลต อย่างน้อยที่สุดตามสูตรคำนวณที่ได้กำหนด ดังนี้

46+10 log P หรือ 70 dBc, โดยให้เลือกใช้ค่าที่ต่ำกว่า

โดยที่ P หมายถึง กำลังคลื่นพาห์ที่กำหนด (มีหน่วยเป็นวัตต์)

<u>ตัวอย่าง</u> การคำนวณขีดจำกัดการแพร่แปลกปลอม

- ถ้าเครื่องส่งมีกำลังคลื่นพาห์ที่กำหนดเป็น 500 วัตต์

46 + 10log500 = 73 dBc

ดังนั้นให้เลือกใช้ขีดจำกัดที่ต่ำกว่าแทน นั่นคือ 70 dBc

นั่นคือ ให้วัดต่ำลงไป 70 dBc จากความแรงของคลื่นพาห์ จะต้องไม่มีการแพร่แปลกปลอมใดสูงกว่านี้

(500 วัตต์ คิดเป็น 27 dBW นั่นคือ จะต้องไม่มีการแพร่แปลกปลอมใดสูงกว่า - 43 dBW)

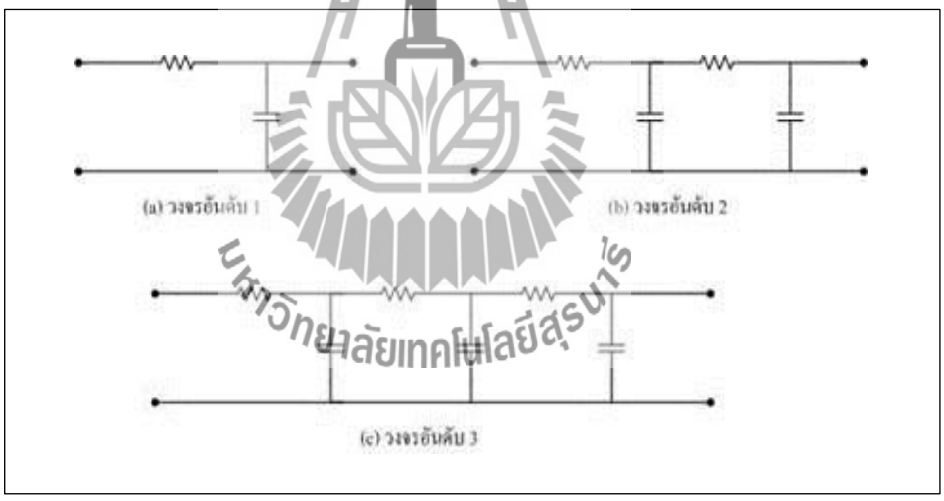
- ถ้าเครื่องส่งมีกำลังคลื่นพาห์ที่กำหนดเป็น 100 วัตต์

46 + 10log100 = 66 dBc

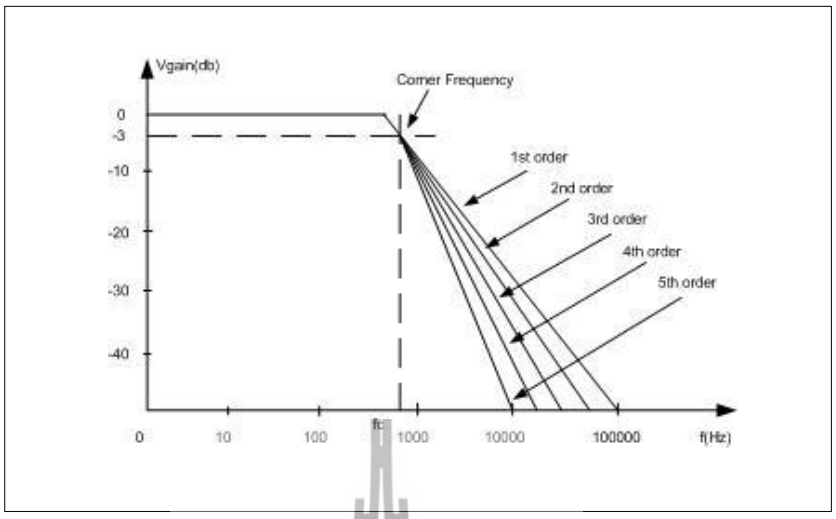
นั่นคือ ให้วัดต่ำลงไป 70 dBc จากความแรงของคลื่นพาห์ จะต้องไม่มีการแพร่แปลกปลอมใดสูงกว่านี้ (100 วัตต์ คิดเป็น 20 dBW นั่นคือ จะต้องไม่มีการแพร่แปลกปลอมใดสูงกว่า - 50 dBW)

2.4 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low Pass Filter)

วงจรแบบกรองความถี่ต่ำ จะยอมให้ความถี่ผ่านได้ในช่วงตั้งแต่สัญญาณที่เป็นแรงดัน DC ไปจนถึงความถี่คัตออฟ (Cutoff Frequency) แทนด้วยเครื่องหมาย fc โดย Cutoff Frequency คือ ความถี่ ณ ขณะที่อัตราการลดทอนของวงจรจะมีค่าลดลงเป็น 0.707 เท่าของแอมพลิจูดปกติ (-3 dB) บางครั้งอาจเรียกความถี่นี้ได้ว่า ความถี่มุม (Corner Frequency) ถ้ามีความถี่ที่สูงเกิน fc ผ่านวงจรจะลดทอนขนาดความถี่นั้นจนมีค่าน้อยมาก ๆ จากในรูปที่ 2.2 (b) เส้นทึบแสดงถึงผลตอบสนองของวงจรในทางความเป็นจริง ส่วนเส้นประแสดงถึงผลตอบสนองของวงจรในทางอุดมคติ ในช่วงที่ยอมให้ความถี่ผ่านได้เราเรียกว่า ช่วงผ่าน (Passband) และช่วงที่ไม่ยอมให้ความถี่ผ่านเรียกว่า ช่วงลดทอน (Stopband)



รูปที่ 2.2 (a) วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำอันดับต่าง [2]



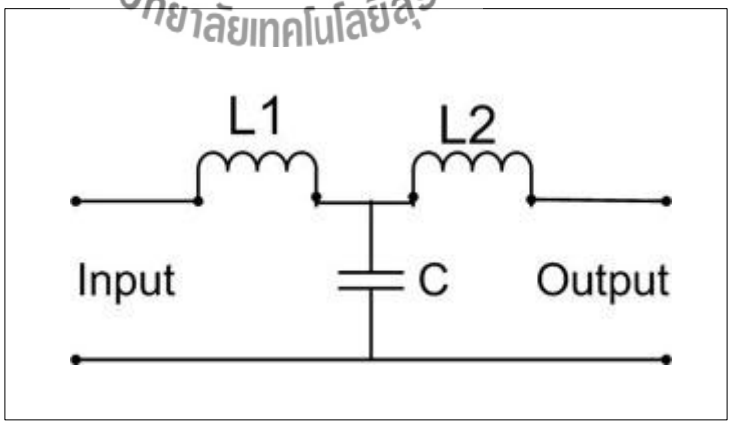
รูปที่ 2.2 (b) กราฟแสดงอัตราการลดทอนแรงดันเชิงความถี่ (dB) [2]

วงจร Low Pass Filter ยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบตามลักษณะของวงจรดังนี้

- T Type

การใช้ L หรือ C เพียงตัวเดียว ไม่สามารถกำจัดสัญญาณความถี่สูงได้หมด ตรงจุด Cutoff Frequency ทำให้ความถี่สูงผ่านไปได้ เราจึงแก้ปัญหาโดยการเพิ่ม L เข้าไปในวงจรอีกชุด เมื่อต่อแล้ว ลักษณะวงจรคล้าย ตัว T เราจึงเรียกว่า วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ แบบที (Low Pass Filter T Type) การกรองความถี่ถ้าต้องการประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น เราอาจจะใช้วงจรนี้หลายชุดทำงานร่วมกัน

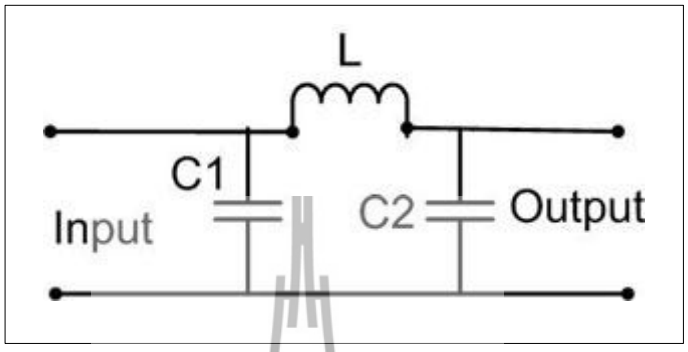
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.3 วงจร Low Pass Filter แบบ T Type [3]

- Pi Type

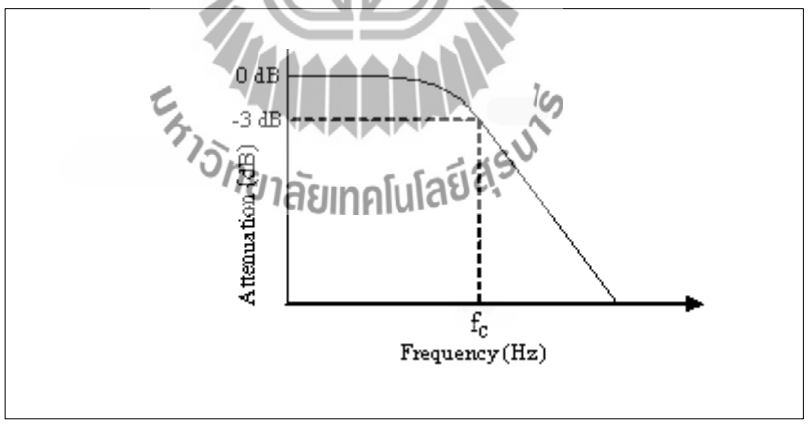
วงจรนี้จะใช้ C 2 ตัวและ L 1 ตัว ต่อกันดังรูปที่ 2.4 รูปร่างคล้ายตัว Pi (พาย) เรียกกันว่า วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ แบบพาย วงจรแบบนี้จะนิยมใช้ในภาคจ่ายไฟ และวงจร Regulator



รูปที่ 2.4 Low Pass Filter แบบ Pi Type [3]

2.4.1 ความถี่ Cutoff Frequency

Cutoff Frequency (f_c) คือ ความถี่แรกสุดที่อยู่ในแถบตัดความถี่ซึ่งจะถูกกำหนดไว้ในช่วงการส่งผ่านที่มีค่าของการลดทอน (Attenuation) เท่ากับ -3dB

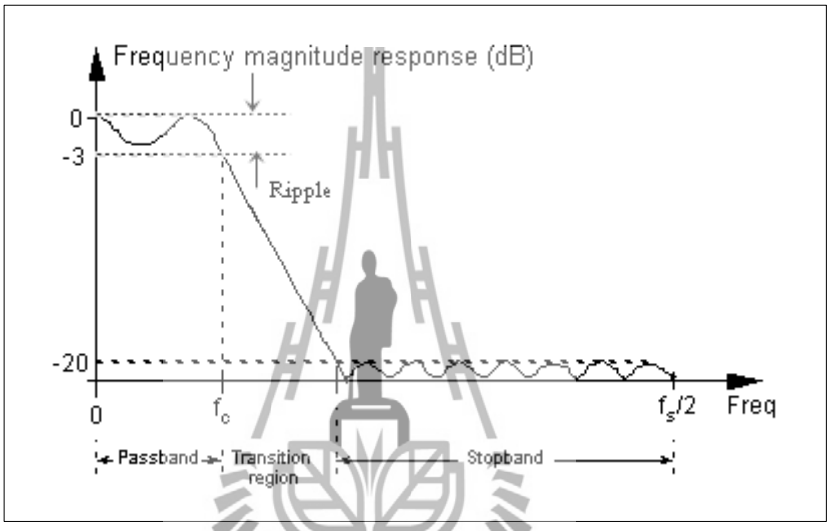


รูปที่ 2.5 ลักษณะของ Cutoff Frequency

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.4.2 การเกิดการกระเพื่อมในแถบความถี่ (Ripple Band)

สำหรับวงจรกรองความถี่ในทางอุดมคติจะต้องมีขนาดของสัญญาณเท่าๆ กันทุกความถี่ที่วงจรยอมให้ผ่าน แต่ในทางปฏิบัติการจะทำให้ที่เอาท์พุตมีขนาดเท่าๆ กันทุกความถี่ที่สามารถผ่านได้แต่อาจจะส่งผลกระทบที่ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเปลี่ยนไป ซึ่งจะทำให้ขนาดเอาท์พุตในช่วงของสัญญาณที่สามารถผ่านได้ไม่มีความคงที่โดยลักษณะเช่นนี้เราจะเรียกว่า เกิดการกระเพื่อม โดยการกระเพื่อมนี้ไม่เพียงแค่เกิดในช่วงของ Passband เท่านั้น ยังสามารถเกิดในช่วงของ Stopband ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.6 ลักษณะการกระเพื่อมที่เกิดขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.4.3 การออกแบบวงจร Low Pass Filter

ในการออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) สิ่งที่ต้องพิจารณาในการออกแบบมีดังนี้

1. ความถี่ Cutoff Frequency

Cutoff Frequency เป็นความถี่ที่ใช้ในการกำหนดช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญโดยจะสามารถหา Cutoff Frequency ได้จากค่าของการลดทอน (Attenuation) ที่มีค่าเท่ากับ -3dB ในช่วงของ Passbandสามารถคำนวณหาได้จากสมการดังนี้

$$w_c = \frac{1}{RC} = 2\pi f_c \qquad (2.1)$$

โดยที่ w_c คือ ความถี่เชิงมุม

f_c คือ ความถี่ Cutoff frequency

R คือ ความต้านทาน

C คือ ตัวเก็บประจุ

2. Frequency Ratio หรืออัตราส่วนความถี่

Frequency Ratio คือ อัตราส่วนความถี่ระหว่างความถี่ Cutoff frequency และความถี่ Stopband ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบจำนวน element ว่าต้องการระยะห่างของความถี่ Cutoff frequencyและความถี่ Stopband ใกล้เคียงกันแค่ไหนโดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

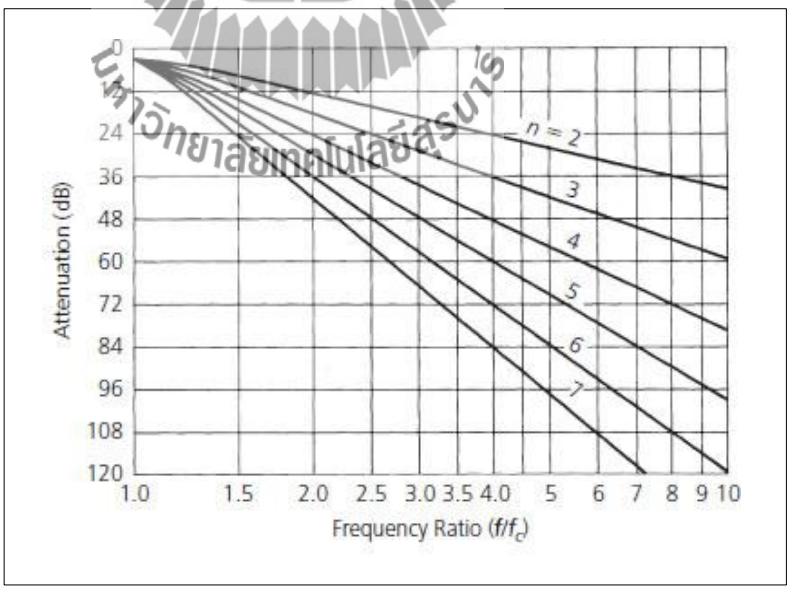
$$\text{Frequency Ratio} = \frac{f}{f_c} \qquad (2.2)$$

โดยที่ f คือ ความถี่ Stopband

f_c คือ ความถี่ Cutoff Frequency

3. Attenuation characteristics for Butterworth

เมื่อทราบค่า Frequency Ratio ที่หาจากสมการ เราจะสามารถหาค่าการลดทอน (Attenuation) ได้จากกราฟแสดงค่าการลดทอนของ Butterworth



รูปที่ 2.7 ลักษณะการลดทอนสัญญาณแบบ Butterworth filter

จากรูปที่ 2.7 จะแสดงให้เห็นว่าในแกนนอนจะแสดงค่าอัตราส่วนความถี่ และในแกนตั้ง จะแสดงค่าลดทอนของสัญญาณ จากทฤษฎีของ Butterworth จำนวนของ n จะเท่ากับจำนวนของ Elements เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบวงจร ถ้าจำนวน Elements มีค่ามากๆ จะทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้นและระบบมีประสิทธิภาพในการใช้งานดียิ่งขึ้น

4. เลือกลักษณะของวงจร

เลือกออกแบบชนิดที่เหมาะสมกับการใช้งาน ลักษณะของวงจรมี 2 แบบ คือ T TypeและPi Type

5. ออกแบบค่าความเก็บประจุและค่าความเหนี่ยวนำ

จากตารางที่ 2.1 (ภาคผนวก) จะแสดงจำนวน Element เพื่อใช้ในกาออกแบบค่าความเก็บประจุและค่าความเหนี่ยวนำ จากรูปวงจรด้านล่างเป็นรูปวงจรที่ใช้ในการออกแบบ Low Pass Filter โดยค่า Impedance ของ Source (R_S) และค่า Impedance ของ Load (R_L) มีค่าเท่ากันซึ่งจะได้ว่าอัตราส่วน $\frac{R_S}{R_L} = 1$ จะสามารถคำนวณหาค่า C และ L ได้จากสมการดังนี้

$$C = \frac{C_n}{2\pi f_c R_L} \tag{2.3}$$

และ

$$L = \frac{R_L L_n}{2\pi f_c} \tag{2.4}$$

โดยที่ C คือ ค่าตัวเก็บประจุสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณ

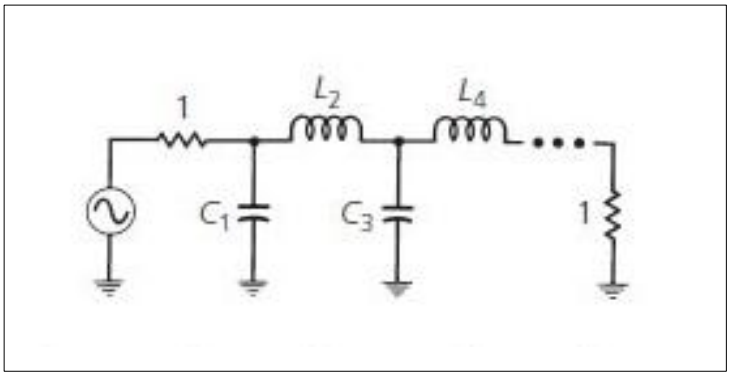
L คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณ

C_n คือ ค่าตัวเก็บตัวเก็บประจุที่ได้จากตารางที่ 2.1 ตัวที่ n

L_n คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากตารางที่ 2.1 ตัวที่ n

R คือ ตัวต้านทานที่โหลด

f_c คือ Cutoff Frequency



รูปที่ 2.8 วงจรที่ใช้ในการออกแบบ Low Pass Filterอ้างอิงจากตารางที่ 2.1

แต่ในกรณีที่จำนวน element มากกว่า 7 element ซึ่งในตารางที่ 2.1 ระบุค่า element ได้แค่ 7 element หากต้องการออกแบบให้มากกว่า 7 element สามารถคำนวณหาค่าความเก็บประจุและค่าความเหนี่ยวนำ ที่นำไปใช้งานจริงได้จากสมการ

$$Ci = \frac{1}{\pi fcZ} \sin\left(\frac{(2i-1)\pi}{2n}\right) \quad \text{เมื่อ i เป็นจำนวนเต็มคี่ 1, 3, 5, ...} \qquad (2.5)$$

$$Lj = \frac{Z}{\pi fc} \sin\left(\frac{(2j-1)\pi}{2n}\right) \quad \text{เมื่อ j เป็นจำนวนเต็มคู่ 2, 4, 6...} \qquad (2.6)$$

โดยที่ fc = Cutoff Frequency

Z = Load Impedance

N = Order number

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่3
การออกแบบโครงงาน

3.1 บทนำ

ในส่วนของบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) ที่มี Cutoff Frequency 120 MHz โดยวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำจะถูกนำไปใช้งานกับเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงที่มีกำลังส่ง 500 วัตต์ โดยทำการออกแบบและจำลองผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency Response) ด้วยโปรแกรม AWR Design Environment

3.2 การออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low Pass Filter)

การออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ สิ่งที่ต้องพิจารณาคือ Cutoff Frequency ที่ต้องการใช้งาน ซึ่งในโครงงานนี้ใช้ Cutoff Frequency ที่ 120 MHz และ Stopband Frequency ที่ 180 MHz ซึ่งการออกแบบที่ 120 MHz เพื่อต้องการให้ใช้งานในย่ายความถี่วิทยุ FM ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะในช่วงของ Pass Band ในทางปฏิบัติแล้วค่าการลดทอนจะมีการลดลงเรื่อยๆ จนถึงที่ความถี่ 120 MHz จะมีค่าลดทอนที่ -3 dB ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเราต้องการออกแบบ Low Pass Filter ที่มีอัตราการลดทอนในย่านการใช้งานไม่เกิน 0.5 dB ดังนั้นเราจึงออกแบบ Cutoff Frequency ให้มีค่าที่ความถี่ 120 MHz เพื่อลดปัญหาค่าการลดทอนที่มากเกินไป และช่วง Stopband Frequency เราออกแบบที่ 180 MHz เพื่อที่เราต้องการลดฮาร์มอนิกที่จะเกิดขึ้นในย่านของความถี่วิทยุ FM คือมีความถี่ตั้งแต่ 176 MHz ถึง 216 ดังนั้นเราจึงออกแบบช่วง Stopband Frequency ที่ความถี่ 180 MHz เพื่อที่จะลดทอนฮาร์มอนิกได้ โดยขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ ดังต่อไปนี้

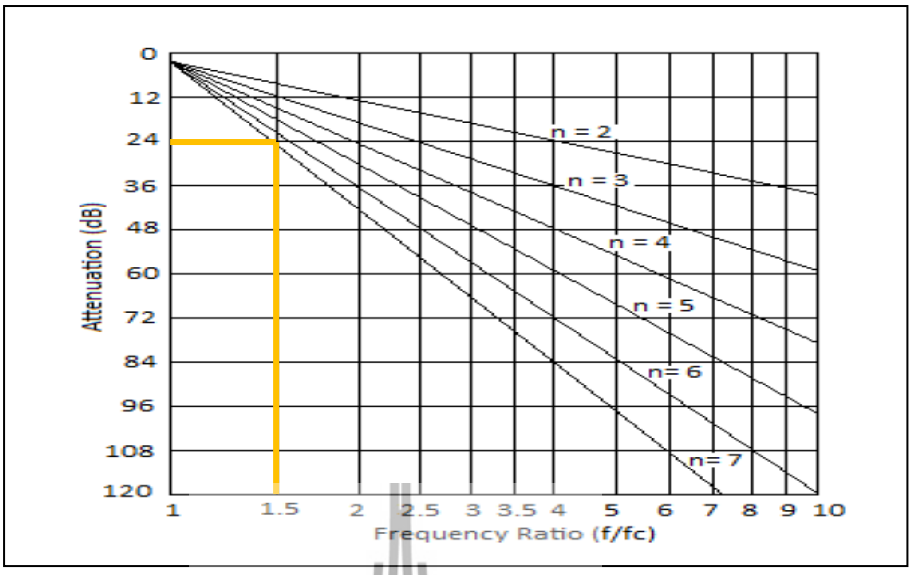
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1. ทำการออกแบบ Cutoff Frequency ที่ความถี่ 120 MHz และ Stopband Frequency ที่ความถี่ 180 MHz

2. ทำการหา Frequency Ratio จากสมการ

$$\text{Frequency Ratio} = \frac{f}{f_c} = \frac{180\ \text{MHz}}{120\ \text{MHz}} = 1.5$$

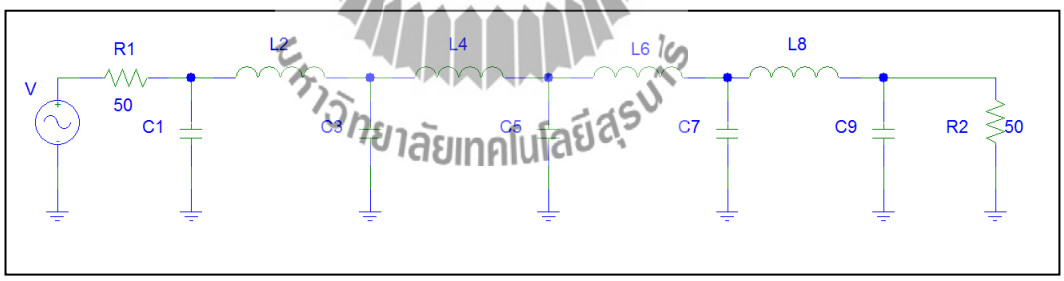
3. นำค่า Frequency Ratio ที่คำนวณได้นำมาเปรียบเทียบกับรูปที่ 3.1 เพื่อหาจำนวน element สูงสุดที่ใช้ในวงจร



รูปที่ 3.1 Attenuation characteristics for Butterworth

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นว่าที่จำนวน Element เท่ากับ 7 จะได้ค่า Attenuation เท่ากับ -24 dB ซึ่งในโครงงานนี้ต้องการค่า Attenuation ที่มีค่ามากกว่า -24 dB จึงต้องใช้จำนวน element ที่มากกว่า 7 ดังนั้นจะเลือกจำนวน element เท่ากับ 9

4. เลือกใช้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำแบบ Pi Type จะได้วงจรสมมูลของวงจรดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ

5. คำนวณหาค่า C และ L ของแต่ละ element ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$C_i = \frac{1}{\pi f_c Z} \sin\left(\frac{(2i-1)\pi}{2n}\right) \qquad \text{เมื่อ } i = 1, 3, 5, 7, 9 \qquad (3.1)$$

$$L_j = \frac{Z}{\pi f_c} \sin\left(\frac{(2j-1)\pi}{2n}\right) \qquad \text{เมื่อ } j = 2, 4, 6, 8 \qquad (3.2)$$

โดยกำหนดให้ f_c คือ Cutoff Frequency

Z คือ load impedance

n คือ order number

ในโครงงานนี้จะต้องออกแบบวงจรที่มี Cutoff Frequency (f_c) เท่ากับ 120 MHz โดยที่โหลดมีความต้านทาน (Z) เท่ากับ 50 Ω และได้ออกแบบวงจรให้มีจำนวน element (n) เท่ากับ 9

การคำนวณหาค่า C_1

แทนค่า f_c , Z และ n ลงในสมการ (3.1)

$$C_1 = \frac{1}{\pi \times 120 \times 10^6 \times 50} \sin\left(\frac{(2(1)-1)\pi}{2(9)}\right)$$

ดังนั้นจะได้ C_1 = 9.212 pF

ในทำนองเดียวกัน สามารถคำนวณหาค่า C อื่นๆ ได้ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความเก็บประจุ

C_i	ค่าความเก็บประจุ (pF)
C_1	9.212
C_3	40.64
C_5	53.05
C_7	40.64
C_9	9.212

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การคำนวณหาค่า L_2

แทนค่า f_c , Z และ n ลงในสมการ (3.2)

$$L_2 = \frac{50}{\pi \times 120 \times 10^6} \sin\left(\frac{(2(2)-1)\pi}{2(9)}\right)$$

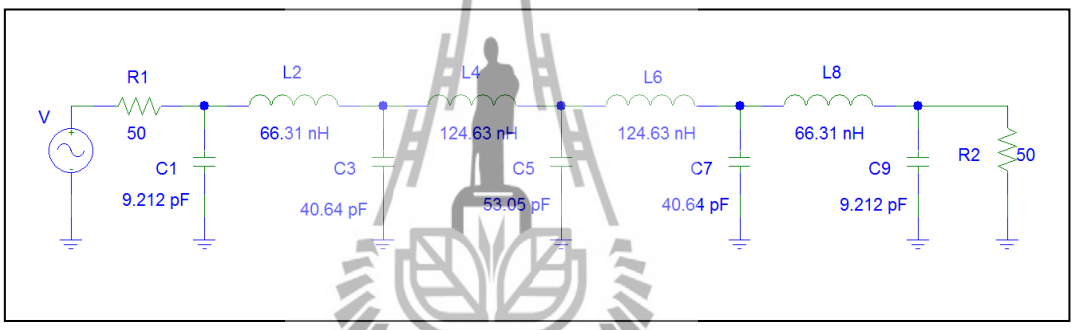
ดังนั้นจะได้ L_2 = 66.31 nH

ในทำนองเดียวกัน สามารถคำนวณหาค่า L อื่นๆ ได้ตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ

L_j	ค่าความเหนี่ยวนำ (nH)
L_2	66.31
L_4	124.63
L_6	124.63
L_8	66.31

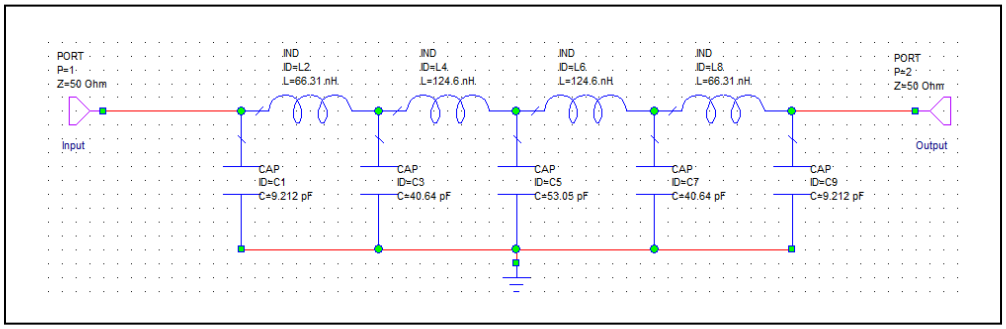
5. จากการคำนวณดังกล่าวจะได้ค่า C และ L ของแต่ละ element แล้วนำค่าที่ได้แทนลงในวงจรสมมูล จะได้รูปวงจรดังรูปที่ 3.3



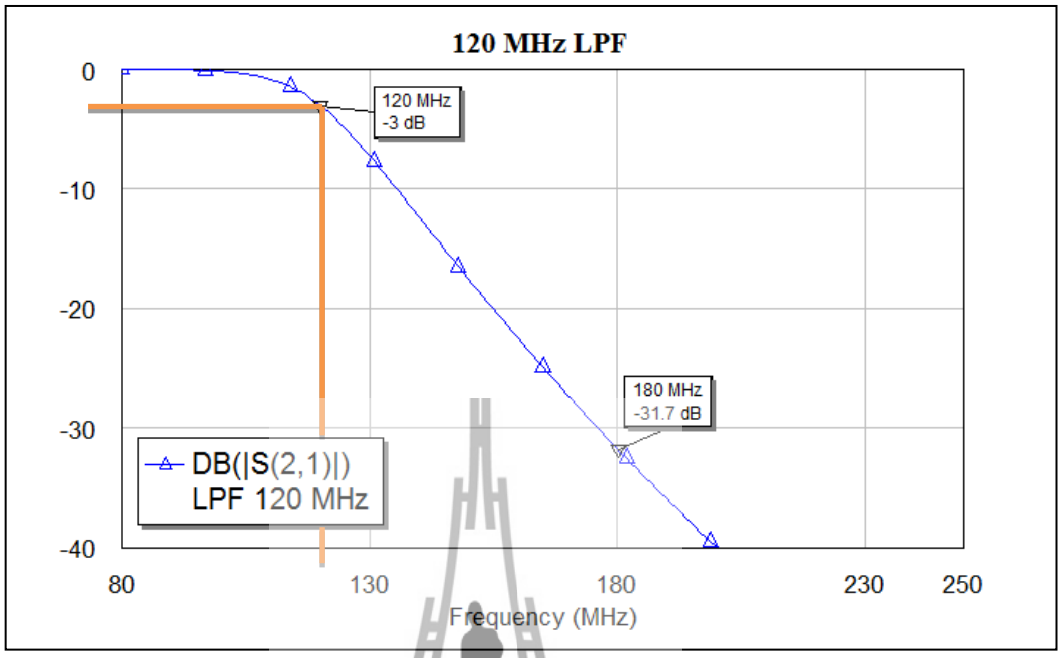
รูปที่ 3.3 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากนั้นจะทำการจำลองวงจรด้วยโปรแกรม AWR Design Environment โดยการสร้างวงจรตามรูปที่ 3.3 จะได้วงจรจำลองดังรูป 3.4 เพื่อทดสอบผลตอบสนองทางความถี่



รูปที่ 3.4 จำลองวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ ด้วยโปรแกรม AWR.



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่

จากกราฟผลการจำลองจะเห็นว่า Cutoff Frequency อยู่ที่ความถี่ 120 MHz และจะเกิดค่า Attenuation เท่ากับ -31.7 dB

3.3 การออกแบบตัวเก็บประจุแบบ Rectangular Pad

การนำวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำไปใช้งานกับเครื่องส่งที่กำลังส่งสูง จำเป็นต้องเลือกใช้วัสดุที่ทนความร้อนได้ดี ซึ่งวัสดุนั้นจะมีราคาสูงและไม่สามารถหาซื้อได้ในท้องตลาดทั่วไป ดังนั้นในโครงงานนี้จึงต้องออกแบบตัวเก็บประจุแบบ Rectangular Pad และได้เลือกใช้แผ่น Printed Circuit Board (PCB) ชนิด Epoxy (FR-4) Double Sided ที่สามารถทนแรงดันได้มากกว่าตัวเก็บประจุทั่วไปมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.6 สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$C_i = 8.8542\varepsilon_r \frac{(w-h)(l-h)}{h} + 26.40(\varepsilon_r + 1.41)\frac{(w+l)}{\ln\left(\frac{5.98h}{(0.8h+t)}\right)} \qquad (3.3)$$

โดยกำหนดให้ C_i = ค่าความเก็บประจุ (capacitance, pF)

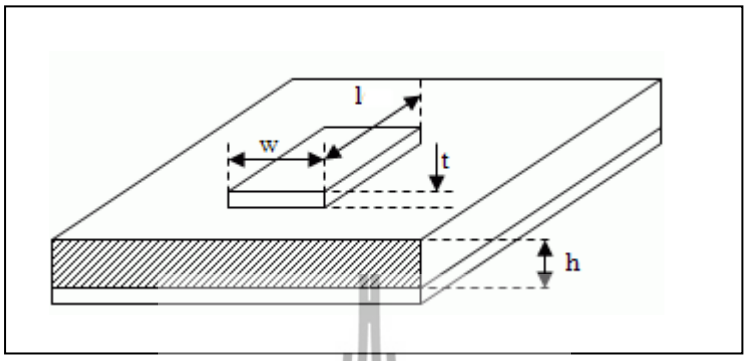
w = ความกว้างของแผ่นทองแดง (pad width, mm)

l = ความยาวของแผ่นทองแดง (pad length, mm)

h = ความสูงของไดอิเล็กตริก (height, mm)

t = ความหนาของแผ่นทองแดง (trace thickness, mm)

ε_r = ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative dielectric constant)



รูปที่ 3.6 Rectangular Pad Capacitance

แผ่น PCB ชนิด Epoxy(FR-4) Double Sided มีพารามิเตอร์ต่างๆ ดังรูปที่ 3.6 คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ε_r) ของไดอิเล็กตริกมีค่าเท่ากับ 4.5 ความสูงของไดอิเล็กตริก (h) มีค่าเท่ากับ 1.6 mm ความหนาของแผ่นทองแดง (t) ทั้งด้านบนและด้านล่างมีค่าเท่ากับ 0.035 mm ค่าความเก็บประจุจะมีค่าขึ้นอยู่กับความกว้าง (w) และความยาว (l) ของแผ่นทองแดงด้านบนและแผ่นทองแดงด้านล่างให้เป็น Ground ซึ่งในโครงงานนี้ได้ทำการกำหนดให้ความยาวของ pad มีค่าคงที่คือ 30 mm ทำให้ค่าความเก็บประจุแปรผันตรงกับความกว้างของทองแดงของ pad เพียงอย่างเดียว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การคำนวณหาค่า w ของ C_1

ในการคำนวณนั้นจะแทนค่าความเก็บประจุ C_1 = 9.212 pF และความยาวของ pad (l) = 30 mm พร้อมกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแผ่น PCB ลงในสมการที่ (3.3) ซึ่งจะสามารถคำนวณความกว้างของทองแดงของ pad (w) = 10.16 mm

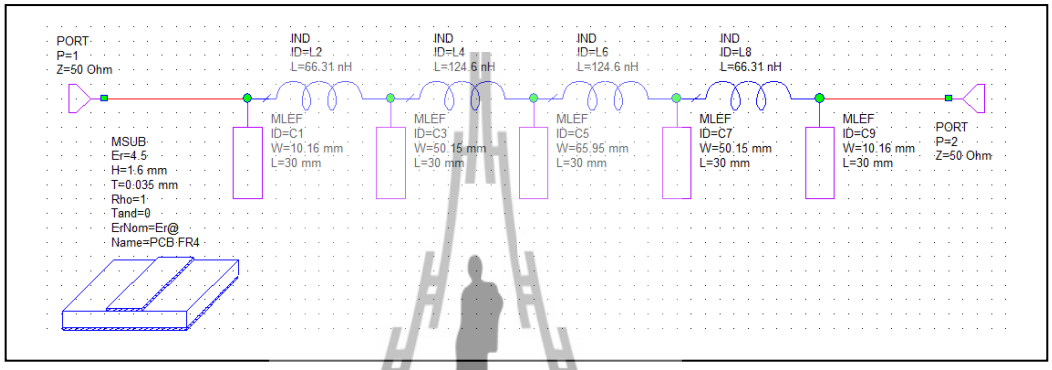
ในทำนองเดียวกัน สามารถหาค่า w ของ C ค่าต่างๆ ได้ดังตาราง

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความกว้างและความยาวของตัวเก็บประจุ

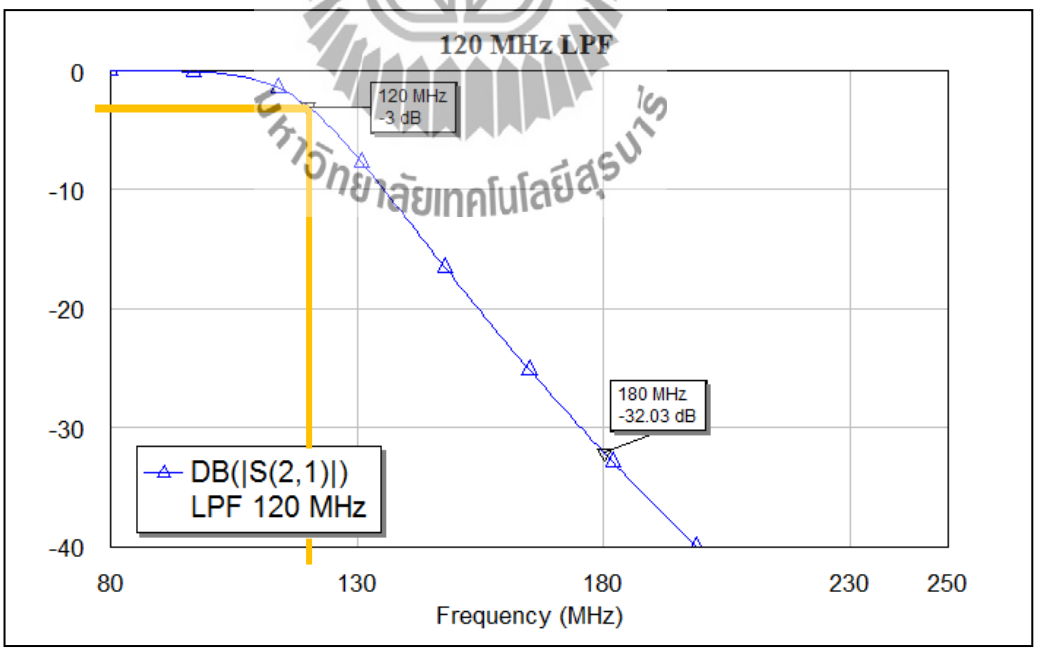
ค่าความเก็บประจุ (C_i)	ความกว้าง (mm)	ความยาว (mm)
C_1	10.16	30
C_3	50.15	30
C_5	82.71	30

C_7	50.15	30
C_9	10.16	30

เมื่อได้ค่าความกว้างและความยาวของแผ่นทองแดงแล้ว จากนั้นนำค่าที่ได้ไปทดสอบผลตอบสนองทางความถี่ด้วยโปรแกรม AWR Design Environment โดยการสร้างวงจรตามรูปที่ 3.3 แต่เปลี่ยนตัวเก็บประจุให้เป็นแบบ Rectangular Pad จะได้วงจรดังรูปที่ 3.7

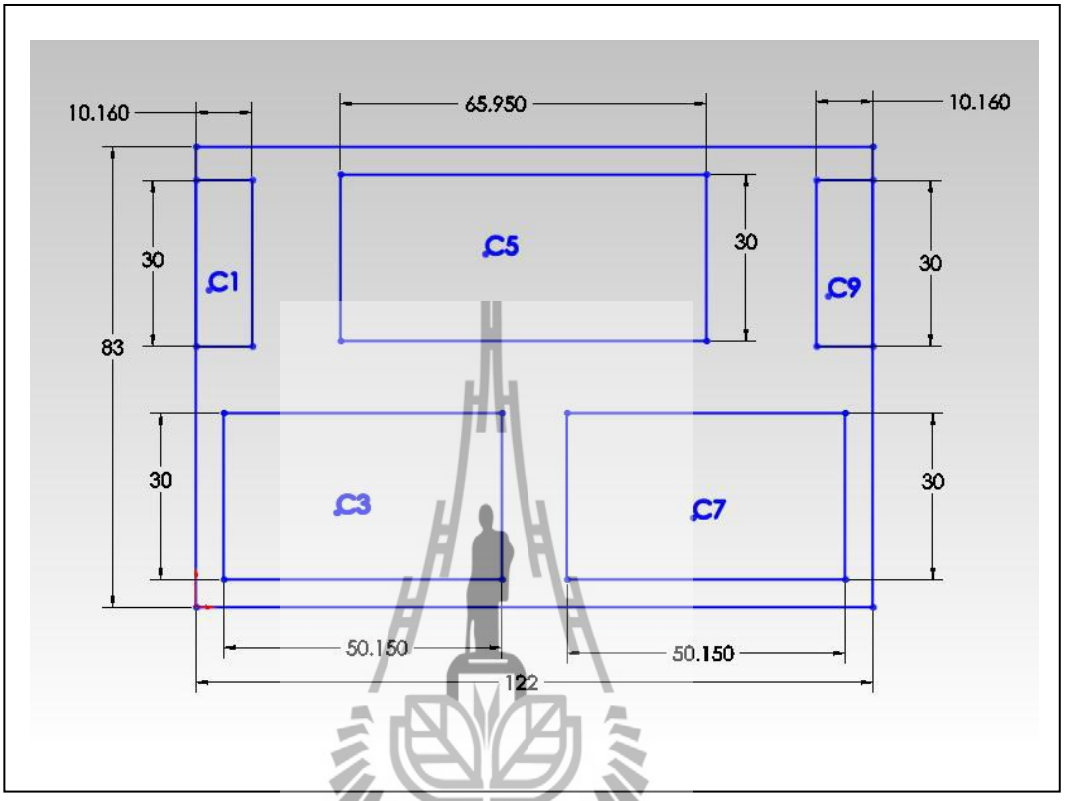


รูปที่ 3.7 จำลองวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำที่ใช้ C แบบ Rectangular Pad



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่ที่ใช้ C แบบ Rectangular Pad

จากกราฟผลการทดสอบจะเห็นว่า Cutoff Frequency อยู่ที่ 120 MHz และจะเกิดค่า Attenuation เท่ากับ -32.03 dB ซึ่งมีค่ามากกว่าวงจรที่ใช้ C แบบปกติ (รูปที่ 3.3) ดังนั้นจึงสามารถนำค่า w และ l ที่คำนวณได้ไปใช้สร้างวงจรตามขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.9 แสดงการวางตัวเก็บประจุ (หน่วย mm)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.4 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในโครงงานนี้เป็นแบบแกนอากาศ (Air Core Inductor) สิ่งจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึง คือ ขนาดของลวดทองแดงที่ทนต่อกำลังส่งสูงๆ อย่างเช่นกำลังงานไฟฟ้าที่ใช้กันในเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียง ซึ่งมีกำลังส่ง 500 วัตต์ ดังนั้นในโครงงานนี้จึงเลือกใช้ลวดทองแดงเบอร์ 14 AWG (American Wire Gauge) สามารถทนกระแสได้สูงสุด 5.9 แอมแปร์ ซึ่งเส้นลวดทองแดงมีเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter) เท่ากับ 1.62814 mm สามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ (L) ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$L = \frac{(d\times10^{-6})^2 N^2}{0.4572\times d\times10^{-6}+1.016\times Len\times10^{-6}} \qquad [3.4]$$

$$d = ID+D \qquad [3.5]$$

$$Len = DxN \qquad [3.6]$$

เมื่อกำหนดให้ L = ค่าความเหนี่ยวนำ (inductance, nH)

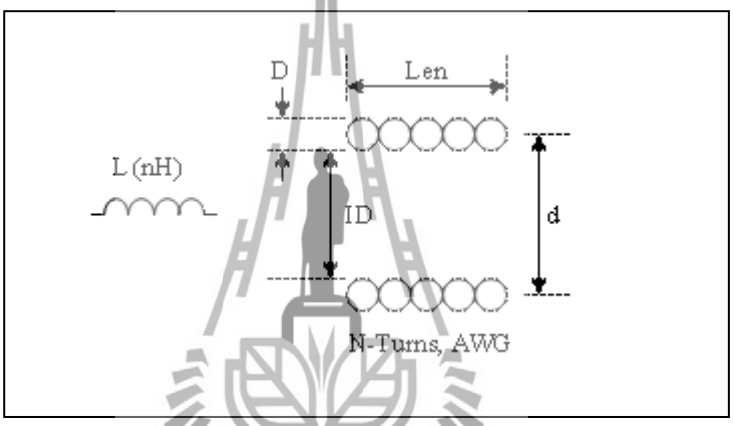
d = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวเหนี่ยวนำ (inductor diameter, mm)

N = จำนวนรอบของขดลวด (turn)

Len = ความยาวของตัวเหนี่ยวนำ (inductor length, mm)

ID = เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของตัวเหนี่ยวนำ (inner diameter, mm)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด (wire diameter, mm)



รูปที่ 3.10 Air Core Inductor

ตัวเหนี่ยวนำมีพารามิเตอร์ต่างๆ ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งในโครงงานนี้ได้เลือกวัสดุที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (ID) เท่ากับ 7 mm เพื่อใช้เป็นแกนในการพันขดลวด และเส้นลวดทองแดงที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) เท่ากับ 1.628 mm ขนาดของค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับจำนวนรอบของขดลวด ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

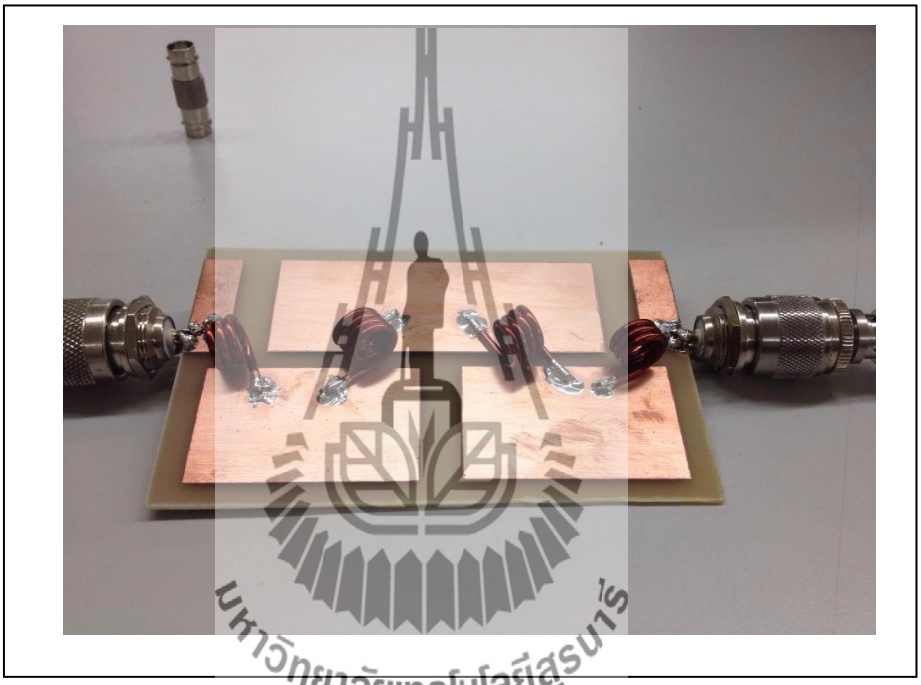
การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ L_2

ในการคำนวณสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.4 , 3.5 และ 3.6 โดยแทนค่าความเหนี่ยวนำ L_2 = 66.31 nH, ID = 7 mm และ D = 1.628 mm จะสามารถคำนวณหาค่า N ได้เท่ากับ 2.75 รอบ แล้วนำค่า N แทนลงในสมการ 3.6 จะได้ค่าความยาวตัวเหนี่ยวนำ Len = 4.48 mm

ในทำนองเดียวกัน สามารถคำนวณหาค่าจำนวนรอบ (N) ของค่าความเหนี่ยว (L) ต่างๆ ได้ดังตาราง

ตารางที่ 3.4 แสดงค่า N และ len ของตัวเหนี่ยวนำ

	N(turn)	len(mm)
L_2	2.75	4.48
L_4	4.3	7
L_6	4.3	7
L_8	2.75	4.48



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.11 แสดงวงจรที่สร้างขึ้น

บทที่ 4

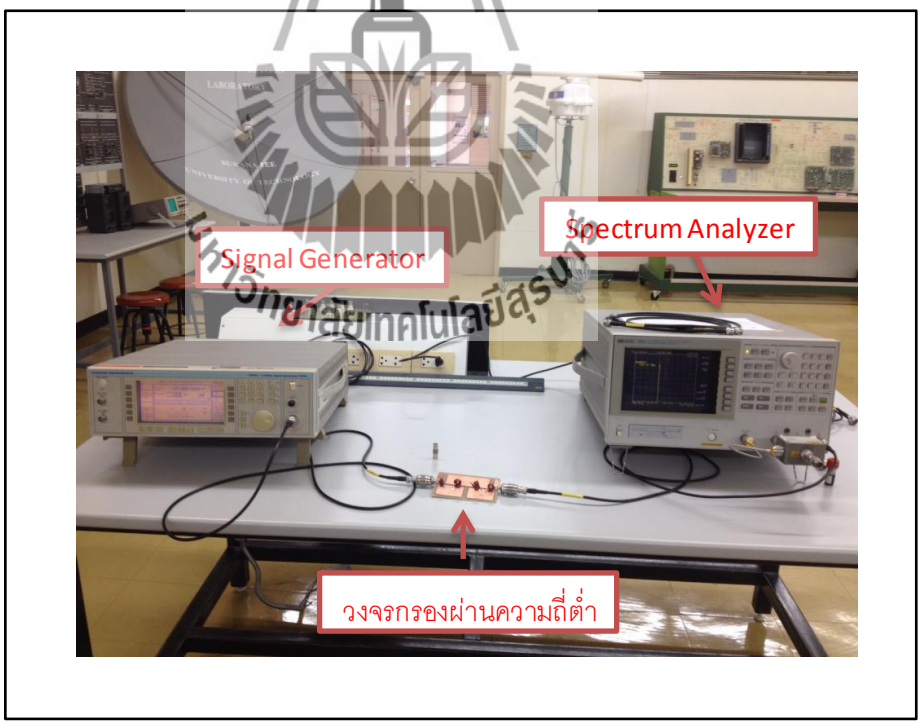
ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงการทดสอบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) ที่มี Cutoff Frequency 120 MHz สำหรับกรองสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าย่านวิทยุ FM ไม่ให้แพร่กระจายออกไปได้ เพื่อป้องกันและแก้ปัญหาการรบกวนย่านความถี่อื่นๆ

4.2 การทดสอบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ

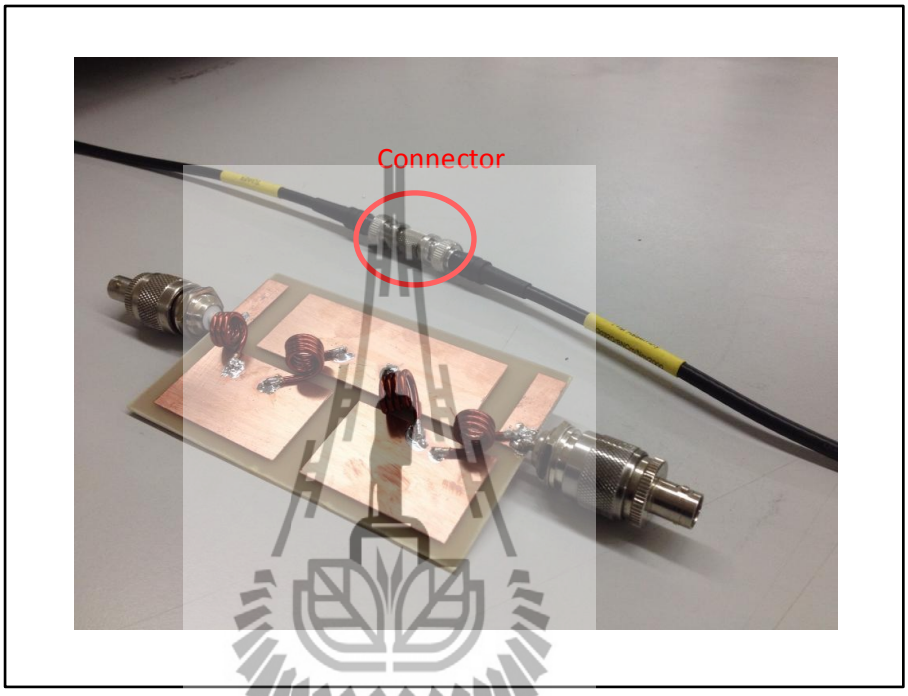
การทดสอบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ ซึ่งจะมีอุปกรณ์ในการทดสอบ คือ เครื่อง Signal Generator ที่สามารถสร้างสัญญาณได้ตั้งแต่ 80 – 250 MHz มีเครื่อง Spectrum Analizer ที่สามารถวัดความถี่ได้ตั้งแต่ 80 – 250 MHz สายนำสัญญาณและวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ ซึ่งจะมีลักษณะการทดสอบดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบ

1.ใช้เครื่อง Signal Generator สร้างสัญญาณ RF ที่ความถี่ 80 MHz เป็นความถี่เริ่มต้นโดยต่อสายนำสัญญาณเข้าที่เครื่อง Spectrum Analyzer ด้วย Connector แล้วปรับ level ที่ Signal Generator ให้ได้ 0 dBm เพื่อเป็นการ Caribrate สายนำสัญญาณดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะการต่อสายนำสัญญาณเพื่อทำการ Caribrate

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2. ต่อ Signal Generator เข้าที่ Input ของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำและ Output ของวงจรต่อที่เครื่อง Spectrum Analyzer

3. บันทึกค่าแอมพลิจูด (Amplitude) ของสัญญาณจากเครื่อง Spectrum Analyzer

4. เพิ่มความถี่ของเครื่อง Signal Generator ทีละ 1 MHz จนถึง 250 MHz แล้วทำตามข้อ 1 แล้วบันทึกค่า

ผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบที่ความถี่ 80 MHz จนถึง 250 MHz ได้ผลการทดสอบแต่ละความถี่ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 บันทึกผลการทดสอบ

Frequency (MHz)	Amplitude (dBm)
80	-0.48
81	-0.46
82	-0.47
83	-0.47
84	-0.5
85	-0.51
86	-0.53
87	-0.53
88	-0.54
89	-0.55
90	-0.55
91	-0.56
92	-0.55
93	-0.56
94	-0.59
95	-0.57
96	-0.59
97	-0.43
98	-0.6
99	-0.6
100	-0.6
101	-0.61
102	-0.53
103	-0.63
104	-0.65

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

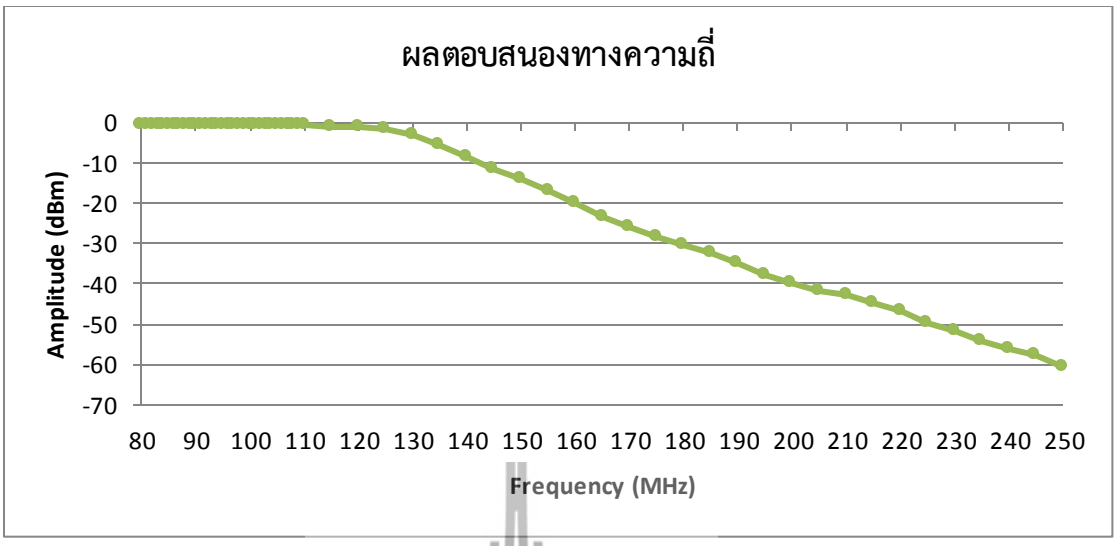
Frequency (MHz)	Amplitude (dBm)
105	-0.69
106	-0.7
107	-0.71
108	-0.73
109	-0.76
110	-0.77
115	-0.9
120	-1.19
125	-1.72
130	-3.05
135	-5.53
140	-8.58
145	-11.4
150	-14.12
155	-16.98
160	-20.2
165	-23.24
170	-25.76
175	-28.15
180	-30.22
185	-32.47
190	-35.02
195	-37.81
200	-39.9
205	-41.61
210	-42.95
215	-44.83
220	-46.75

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

Frequency (MHz)	Amplitude (dBm)
225	-49.46
230	-51.69
235	-54.18
240	-56.07
245	-57.68
250	-60.75

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ

จากกราฟเป็นผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะเห็นว่าสามารถคำนวณค่า Cutoff Frequency ได้จากสมการดังต่อไปนี้

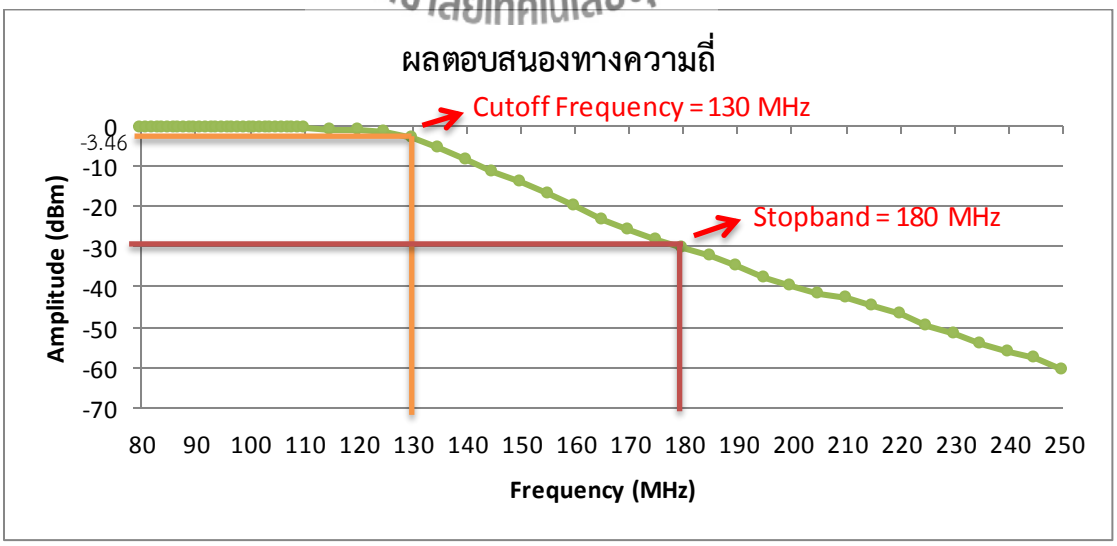
$$dBm = Amplitude_{max} - 3\ dBm$$

ค่า $Amplitude_{max}$ ที่วัดได้เท่ากับ -0.46 dBm

ดังนั้น $dBm = -0.46\ dBm - 3\ dBm$

$$dBm = -3.46\ dBm$$

จะได้ค่า Amplitude ของ Cutoff Frequency ที่ -3.46 dBm ดังรูปที่ 4.4



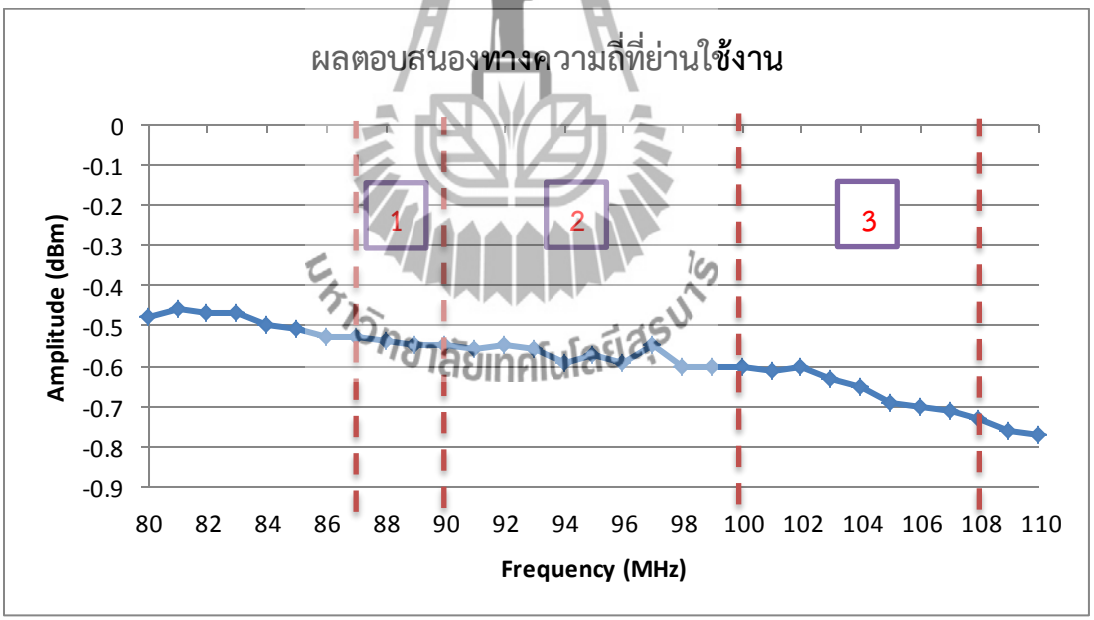
รูปที่ 4.4 กราฟแสดง Cutoff Frequency และ Stopband

จากกราฟรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าที่ Amplitude -3.46 dBm ได้ Cutoff Frequency ที่ความถี่ 130 MHz และยังสามารถคำนวณหา Stopband Frequency โดยตามที่เราได้ออกแบบไว้ คือ 180 MHz จะได้ค่า Attenuation -30 dBm ซึ่งจะเห็นว่าค่าในการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าในการออกแบบ โดยที่สามารถคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนได้ดังนี้

$$\text{Cutoff Frequency error} = \left|\frac{130\ \text{MHz} - 120\ \text{MHz}}{120\ \text{MHz}}\right| \times 100 = 8.3\ \%$$

$$\text{Attenuation error} = \left|\frac{-30\ \text{dBm} - (-28)\ \text{dBm}}{-28\ \text{dBm}}\right| \times 100 = 7.14\ \%$$

ในการใช้งานกับวิทยุกระจายเสียง จะต้องใช้งานตั้งแต่ 87.75 MHz – 107.75 MHz ดังนั้นจึงมาพิจารณาค่า Pass Band ในช่วงที่ใช้งานย่านความถี่ของวิทยุกระจายเสียงในระบบ FM ซึ่งจะแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 4.5 กราฟผลตอบสนองทางความถี่ที่ย่านใช้งานของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ

จากกราฟรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าในช่วงที่ 1 ตั้งแต่ช่วง 87 MHz จนถึง 90 MHz จะมีค่าการลดทอนเฉลี่ยโดยประมาณ -0.55 dBm มีค่าการอัตราสูญเสียต่อความถี่ -0.0067 dBm/MHz ช่วงที่ 2 ตั้งแต่ช่วง 90 MHz จนถึง 100 MHz จะมีค่าการลดทอนเฉลี่ยโดยประมาณ -0.6 dBm มีค่าการอัตราสูญเสียต่อความถี่ -0.005 dBm/MHz ช่วงที่ 3 ตั้งแต่ช่วง 100 MHz จนถึง 108 MHz จะมีค่าการลดทอนสูงมากโดยมีค่าการลดทอนสูงสุด -0.73 dBm และค่าการอัตราสูญเสียต่อความถี่ -0.016 dBm/MHz โดยจะเห็นว่าช่วงที่ 1 กับช่วงที่ 2 จะมีอัตราการสูญเสียใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายความว่าเมื่อความถี่การใช้งานเปลี่ยนไปจะทำให้เกิดการลดทอนที่น้อย แต่ในช่วงที่ 3 จะมีค่าอัตราการสูญเสียที่สูง ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นจะทำให้มีค่าอัตราการลดทอนที่ยิ่งสูงขึ้นตามไปด้วย โดยทั่วไปวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำจะมีค่าการลดทอนที่ย่านความถี่ใช้งาน -0.25 dBm ดังนั้นช่วงที่เหมาะสมกับการใช้งานคือ ช่วงตั้งแต่ 87 MHz จนถึง 100 MHz ซึ่งคิดเป็นกำลังงานสูญเสียเมื่อนำไปใช้งานกับเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงที่มีขนาด 500 วัตต์ จะทำให้สูญเสียกำลังงานไป 59.48 วัตต์ ถึง 64.52 วัตต์ แต่ในช่วงตั้งแต่ 100 MHz ขึ้นไปยิ่งที่มีความถี่สูงจะทำให้มีอัตราการสูญเสียมาก โดยเมื่อคำนวณอัตราการสูญเสียที่ 100 MHz จะได้อัตราการสูญเสีย 64.52 วัตต์ และคำนวณอัตราการสูญเสียที่ 108 MHz จะได้อัตราการสูญเสีย 77.36 วัตต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงงานเรื่อง วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ 120 MHz (120 MHz Low Pass Filter) เป็นส่วนหนึ่งในเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงของระบบ FM ซึ่งปัจจุบันมีการใช้งานวิทยุ FM อย่างแพร่หลาย ส่วนใหญ่ใช้เครื่องส่งที่ไม่ได้ตามมาตรฐานทำให้เกิดการแพร่แปลกปลอมของความถี่อื่นๆ ที่อยู่นอกเหนือจากแถบความถี่ที่จำเป็น (Necessary Bandwidth) เรียกปัญหาเหล่านี้ว่า การแพร่แปลกปลอม (Conducted Spurious Emission) ดังนั้นในโครงงานนี้ จึงศึกษาการทำงานและออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำที่มี Cutoff Frequency ที่ความถี่ 120 MHz เพื่อลดทอนความแรงของสัญญาณฮาร์มอนิก จากผลการทดสอบจะเห็นว่า ค่า Cutoff Frequency ของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำจะอยู่ที่ 130 MHz และช่วง Stopband ที่ 180 MHz จะได้ค่า Attenuation -30.22 dBm ซึ่งจะเห็นว่าจากผลการทดสอบนี้ เมื่อนำไปใช้กับเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงจะสามารถลดทอนสัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ตั้งแต่ 176 MHz จนถึง 216 MHz โดยสามารถลดทอนได้มากกว่า -30.22 dBm และพิจารณาในช่วงการใช้งานจากผลการทดสอบจะเห็นว่าอัตราการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำในโครงงานนี้ยังมีอัตราการสูญเสียที่มาก โดยเทียบกับวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำโดยทั่วๆ ไปที่จะมีค่าการลดทอนในย่านการใช้งานประมาณ -0.25 dBm แต่จากผลการทดสอบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำได้ค่าการลดทอนประมาณ -0.55 dBm ซึ่งมีค่ามากกว่าวงจรโดยทั่วๆ ไปถึง 2 เท่า และในช่วงของความถี่ตั้งแต่ 100 MHz ขึ้นไป จะทำให้มีอัตราการสูญเสียต่อความถี่เท่ากับ -0.016 dBm/MHz ซึ่งจะได้ว่าที่ความถี่ 108 MHz จะทำให้เกิดค่าอัตราการสูญเสียสูงสุด -0.73 dBm ซึ่งสาเหตุของการสูญเสียอาจจะเนื่องมาจากขนาดของ Rectangular Pad มีค่าไม่ตรงกับที่ได้ออกแบบ ค่าตัวเหนี่ยวนำซึ่งออกแบบจำนวนรอบได้เป็นเลขทศนิยม แต่ไม่สามารถพันรอบของตัวเหนี่ยวนำได้ จึงต้องสร้างตัวเหนี่ยวนำเป็นเลขจำนวนเต็มรอบ ดังนั้นถึงแม้ว่าวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำนี้จะมีอัตราการสูญเสียในย่านการใช้งานที่สูง แต่ก็สามารถลดทอนสัญญาณฮาร์มอนิกในเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงที่ยังไม่ได้มาตรฐานได้เป็นอย่างดี

5.2 ปัญหาและอุปสรรค์

1. การสร้าง Pad ของตัวเก็บประจุไม่ได้ขนาดตามที่ออกแบบ
2. การสร้างตัวเหนี่ยวนำไม่ได้ตามจำนวนรอบที่ได้ออกแบบไว้
3. เกิดค่าอัตราการลดทอนย่านความถี่ที่ใช้งานสูง เนื่องจากสภาพของอุปกรณ์ของตัววงจรและสภาพแวดล้อมมีผลเป็นอย่างยิ่ง

5.3 สิ่งที่ได้รับจากการทำโครงงาน

1. ได้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำที่สามารถนำไปลดทอนสัญญาณฮาร์มอนิก
2. ได้ความรู้เกี่ยวกับมาตรฐานทางเทคนิคของวิทยุกระจายเสียง รู้จักวิธีแก้ปัญหาสัญญาณฮาร์มอนิก รู้จักการออกแบบและการสร้างวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ รู้จักวิธีการทดสอบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ
3. รู้จักการทำงานร่วมกันเป็นทีม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

ประวัติผู้เขียน

นายธราพงษ์ ตาลพันธุ์ เกิดวันที่ 24 กันยายน พ.ศ.2534 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลธาตุเชิงชุม อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสกลราชวิทยานุกูล อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นายธีรวรรธน์ อ่อนจงไกร เกิดวันที่ 30 สิงหาคม พ.ศ.2534 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลดงมะไฟ อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนท่าใหม่ “พูลสวัสดิ์ราษฎร์นุกูล” อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นางสาวดวงดาว บุญสุข เกิดวันที่ 21 กันยายน พ.ศ.2534 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลวังน้ำเขียว อำเภอวังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสะแกราชธวัชศึกษา อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

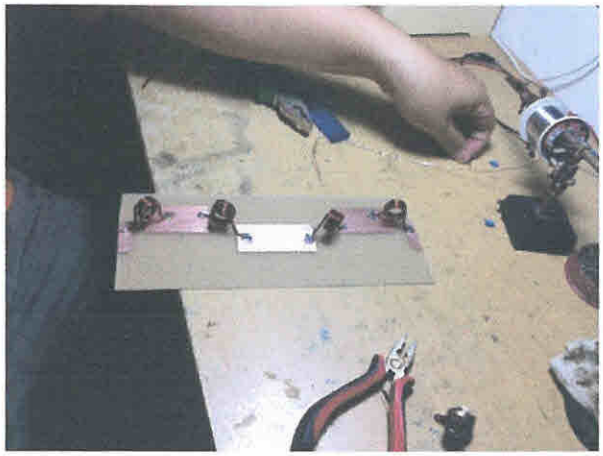
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการสร้างวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ 120 MHz

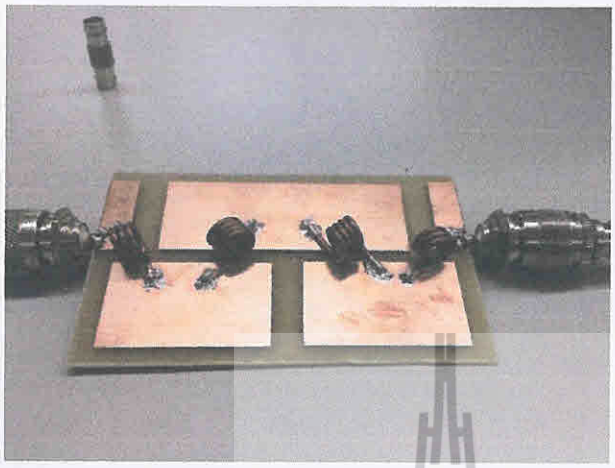
1. คำนวณค่าความยาวและความกว้างของตัวเก็บประจุแบบ Regtangular Pad จากสมการที่ 3.3
2. นำค่าที่ได้จากการคำนวณขนาดของตัวเก็บประจุแบบ Regtangular Pad มาวาดลงในโปรแกรม Corel DRAW เพื่อนำไปตัดสติกเกอร์
3. นำสติกเกอร์ที่ตัดไว้มาติดลงในแผ่น PCB ที่เตรียมไว้แล้ว
4. นำไปกัดปริ้นโดยแช่ในน้ำยากัดปริ้นประมาณ 40-50 นาที

5. ทำการพันขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้แกนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 mm
6. นำแผ่น PCB ที่แช่ในน้ำยากัดปริ้นไปลอกสติ๊กเกอร์ออก
7. นำขดลวดเหนี่ยวนำมาวางกับตัวเก็บประจุที่ได้จากการกัดปริ้นแล้วทำการบัดกรี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

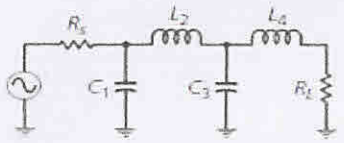
8. นำหัว Connector มาบัดกรีโดยวางหัว Connector ไว้ที่ตัวเก็บประจุแบบ Regtangular Pad ตัวที่ 1 และตัวที่ 5 โดยทั้ง 2 ตัวต่อลงกราวด์



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ข

ตารางที่ 2.1 Butterworth Low-Pass Prototype Element Values [4]

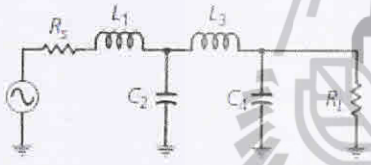


n	R_s/R_L	C_1	L_2	C_3	L_4
2	1.111	1.035	1.835		
	1.250	0.849	2.121		
	1.429	0.697	2.439		
	1.667	0.566	2.828		
	2.000	0.448	3.346		
	2.500	0.342	4.095		
	3.333	0.245	5.313		
	5.000	0.156	7.707		
	10.000	0.074	14.814		
	∞	1.414	0.707		
3	0.900	0.808	1.633	1.599	
	0.800	0.844	1.384	1.926	
	0.700	0.915	1.165	2.277	
	0.600	1.023	0.965	2.702	
	0.500	1.181	0.779	3.261	
	0.400	1.425	0.604	4.064	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

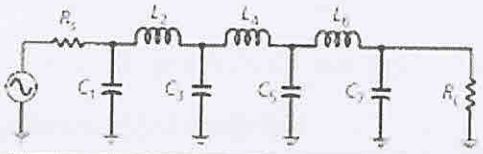
ตารางที่ 2.1 Butterworth Low-Pass Prototype Element Values (ต่อ) [4]

n	R_s/R_L	C_1	L_2	C_3	L_4
	0.300	1.838	0.440	5.363	
	0.200	2.669	0.284	7.910	
	0.100	5.167	0.138	15.455	
	∞	1.500	1.333	0.500	
4	1.111	0.466	1.592	1.744	1.469
	1.250	0.388	1.695	1.511	1.811
	1.429	0.325	1.862	1.291	2.175
	1.667	0.269	2.103	1.082	2.613
	2.000	0.218	2.452	0.883	3.187
	2.500	0.169	2.986	0.691	4.009
	3.333	0.124	3.883	0.507	5.338
	5.000	0.080	5.684	0.331	7.940
	10.000	0.039	11.094	0.162	15.642
	∞	1.531	1.577	1.082	0.383
n	R_L/R_s	L_1	C_2	L_3	C_4

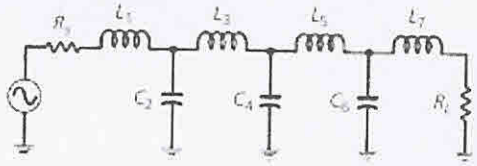


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.1 Butterworth Low-Pass Prototype Element Values (ต่อ) [4]



n	R_s/R_L	C_1	L_2	C_3	L_4	C_5	L_6	C_7
5	0.900	0.442	1.027	1.910	1.756	1.389		
	0.800	0.470	0.866	2.061	1.544	1.738		
	0.700	0.517	0.731	2.285	1.333	2.108		
	0.600	0.586	0.609	2.600	1.126	2.552		
	0.500	0.686	0.496	3.051	0.924	3.133		
	0.400	0.838	0.388	3.736	0.727	3.965		
	0.300	1.094	0.285	4.884	0.537	5.307		
	0.200	1.608	0.186	7.185	0.352	7.935		
	0.100	3.512	0.091	14.095	0.173	15.710		
	∞	1.545	1.694	1.382	0.894	0.309		
6	1.111	0.289	1.040	1.322	2.054	1.744	1.335	
	1.250	0.245	1.116	1.126	2.239	1.550	1.688	
	1.429	0.207	1.236	0.957	2.499	1.346	2.062	
	1.667	0.173	1.407	0.801	2.858	1.143	2.509	
	2.000	0.141	1.653	0.654	3.369	0.942	3.094	
	2.500	0.111	2.028	0.514	4.141	0.745	3.931	
	3.333	0.082	2.656	0.379	5.438	0.552	5.280	
	5.000	0.054	3.917	0.248	8.020	0.363	7.922	
	10.000	0.026	7.705	0.122	15.786	0.179	15.738	
	∞	1.553	1.759	1.533	1.202	0.758	0.259	
7	0.900	0.299	0.711	1.404	1.489	2.125	1.727	1.296
	0.800	0.322	0.606	1.517	1.278	2.334	1.546	1.652
	0.700	0.357	0.515	1.688	1.091	2.618	1.350	2.028
	0.600	0.408	0.432	1.928	0.917	3.005	1.150	2.477
	0.500	0.480	0.354	2.273	0.751	3.553	0.951	3.064
	0.400	0.590	0.278	2.795	0.592	4.380	0.754	3.904
	0.300	0.775	0.206	3.671	0.437	5.761	0.560	5.258
	0.200	1.145	0.135	5.427	0.287	8.526	0.369	7.908
	0.100	2.257	0.067	10.700	0.142	16.822	0.182	15.748
	∞	1.558	1.799	1.659	1.397	1.055	0.656	0.223
n	R_L/R_s	L_1	C_2	L_3	C_4	L_5	C_6	L_7



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บรรณานุกรม

[1] **ระบบของเครื่องส่งวิทยุ FM และ ระบบวิทยุกระจายเสียง** (23 พฤศจิกายน 2556) จาก เว็บไซต์ https://wiki.stjohn.ac.th/groups/poly_electronics/wiki/206dd/_FM__.html

[2] **Filter Design** (28 พฤศจิกายน 2556) จากเว็บไซต์ http://www.kmitl.ac.th/~kpteeraw/data_com/datacom_52/Filter.htm

[3] **วงจรกรองความถี่** (29 พฤศจิกายน 2556) จากเว็บไซต์ http://www.hs8jyx.com/html/filter_circuit.html

[4] **Butterworth Low-Pass Prototype Element Values** (29 พฤศจิกายน 2556) จากเว็บไซต์ http://books.google.co.th/books?id=zpTnMsiUkmwC&printsec=frontcover&dq=rf+design&hl=th&sa=X&ei=dXqqUq2IJKTBiQfuxYHQCw&ved=0CDwQ6AEwAA#v=onepage&q=rf%20design&f=false

[5] คำนวณ Rectangular Pad Capacitance (3 ธันวาคม 2556) จากเว็บไซต์ http://www.mantaro.com/resources/impedance_calculator.htm#rectangular_pad_capacitance

[6] คำนวณ เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวด (3 ธันวาคม 2556) จากหนังสือ RF CIRCUIT design ของ HRIS BOWICK WITH JOHN BLYLER AND CHERYL AJLUNI

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี