

การวิเคราะห์ฮาร์โมนิคของเสียงดนตรี
HARMONIC ANALYZER OF MUSIC



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาหรือทำซ้ำในลักษณะใดๆ ซึ่งอาจถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HARMONIC ANALYZER OF MUSIC

NATTHAWUT KHROBUDOM

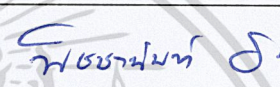

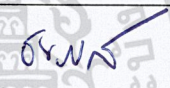
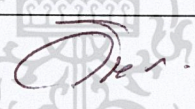


A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FUFILLMENT OF
THE REQUITEMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE

เอกสารนี้ KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันฯ
ACADEMIC YEAR 2015

หัวข้อโครงการพิเศษ การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกของเสียงดนตรี
 Harmonic Analyzer of Music
 ชื่อนักศึกษา นายณัฐวุฒิ ครบอุดม รหัสนักศึกษา 55051498
 ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
 ภาควิชา ฟิสิกส์
 ปีการศึกษา 2558
 อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.วิชาญ เตชิตธีระ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
 ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.พิชานันท์ อีเศรษฐ์โสภณ ประธานกรรมการ	
ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี กรรมการ	
อาจารย์ธนภรณ์ สีสาวฒนานนท์ กรรมการ	
รศ.วิชาญ เตชิตธีระ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ของคณะวิทยาศาสตร์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำไปทำซ้ำหรือหาและอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของเสียงดนตรี
ชื่อนักศึกษา	นายณัฐวุฒิ ครบอุดม รหัสนักศึกษา 55051498
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.)
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.วิชาญ เตชิตธีระ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีจุดประสงค์ที่จะวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของเสียงดนตรี โดยการสร้างวงจรกรองสัญญาณความถี่แถบผ่าน แล้วหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับความถี่ และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ FFT จากเครื่องสต่อเร็วจอสซิลโลสโคป

คำสำคัญ : วิเคราะห์เสียงดนตรี วงจรกรองสัญญาณความถี่แถบผ่าน อนุกรมฟูเรียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Harmonic Analyzer of Music	
Students	Mr. Natthawut Khrobudom	Student ID 55051498
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2014	
Advisor	Assoc.Prof.Wicharn Techitdheera	

Abstract

The aim of this special project is to be analyze the some harmonics of some kind of music sound. The band pass filter was built and used to show the amplitude at any harmonics with respect to the result form FFT function of storage oscilloscope.

Keywords : Analyzer of music, Band pass filter, Fourier series

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของทุกๆท่าน ขอขอบพระคุณ รศ.วิชาญ เตชิตธีระ ที่คอยให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิดและให้ความช่วยเหลือแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษและขอขอบพระคุณกรรมการสอบโครงการพิเศษ คือ ดร.พิชชานันท์ อิศเรษฐโสภณ, รศ.ดร.วราวุฒิ เภาลัดดา, ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี และอาจารย์ธนภรณ์ สิวาพัฒนานนท์ ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการสนับสนุนการทำโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณผลงานวิจัยและเอกสารอ้างอิงต่างๆ ที่ได้นำมาใช้ในการสนับสนุนการกระทำโครงการพิเศษฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอน และเป็นกำลังใจ เป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อนๆ และบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ณัฐวุฒิ ครอบอุดม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เสียง	3
2.1.1 ความดันเสียงและธรรมชาติของเสียง	3
2.1.2 ความเข้มเสียงและระดับความเข้มเสียง	4
2.1.3 คุณลักษณะของเสียง	4
2.2 อนุกรมฟูรีเยร์	5
2.3 การแปลงฟูรีเยร์	5
2.4 วงจรกรองสัญญาณ	6
2.4.1 ประเภทของวงจรกรองความถี่	6
2.4.2 วงจรกรองความถี่แถบผ่าน (Band Pass Filter)	8
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	10
3.1 ขั้นตอนการสร้างวงจรกรองสัญญาณ	10
3.1.1 วงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ (Band Pass Filter)	10
3.2 วิธีการทดลอง	11
3.2.1 จำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรมในคอมพิวเตอร์	11
3.2.2 ต่อวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่แล้วทำการทดลอง	11
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	13
4.1 ผลการทดลองการกรองสัญญาณ	13
4.2 ผลการวิเคราะห์ฟูรีเยร์โดยใช้ฟังก์ชัน FFT จากเครื่อง Oscilloscope	18
4.3 วิเคราะห์ฮาร์มอนิกของเสียงโดยใช้วงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่าน	19
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	24
5.1 สรุปผลการวิจัย	24
5.2 ข้อเสนอแนะ	24

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นที่นอกเหนือจากนี้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 ปัญหาที่พบในการทำงาน	24
อ้างอิง	25
ภาคผนวก	27
ภาคผนวก ก.	28
ภาคผนวก ข.	40



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แสดงแผนการดำเนินงานวิจัย	2
4.1 แสดงการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรที่มีความถี่ศูนย์กลางอยู่ที่ 1000 Hz	13
4.2 ตารางบันทึกค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่ผ่านวงจรกรอง และค่าแก้ไขของวงจรตามความถี่	15
4.3 ตารางวิเคราะห์คลื่นสี่เหลี่ยมโดยฟังก์ชัน FFT ของเครื่องออสซิลโลสโคป	17
4.4 ตารางวิเคราะห์คลื่นสี่เหลี่ยมโดยใช้วงจรกรองแล้ววัดด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป	17
4.5 ตารางวิเคราะห์คลื่นสี่เหลี่ยมโดยใช้วงจรกรองแล้ววัดด้วยดิจิตัลมิเตอร์	17
4.6 ตารางแสดงผลวิเคราะห์ฟูเรียร์ของเสียงขลุ่ยในแต่ละความถี่ของขลุ่ยโซปราโน	18
4.7 ตารางแสดงผลวิเคราะห์ฟูเรียร์ของเสียงขลุ่ยในแต่ละความถี่ของขลุ่ยโซปราโน(ต่อ)	19
4.8 ตารางแสดงผลวิเคราะห์ฟูเรียร์ตัวอย่างความถี่ของเสียงขลุ่ยไทย	19
4.9 ตารางแสดงผลการกรองสัญญาณในแต่ละความถี่เสียงของขลุ่ยโซปราโน	20
4.10 ตารางแสดงผลการกรองสัญญาณในแต่ละความถี่เสียงของขลุ่ยไทย	21
4.11 ตารางแสดงผลการกรองสัญญาณในแต่ละความถี่เสียงของฮาร์โมนิกา	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงการวิเคราะห์ฟูเรียร์ของคลื่นรูปสี่เหลี่ยม	1
2.1 แสดงความดันเสียงและกราฟความดันเสียง	3
2.2 วงจรกรองความถี่และการทำ งานของวงจรแต่ละชนิด	6
2.3 การตอบสนองของวงจรกรองความถี่แถบผ่าน	8
2.4 วงจรกรองความถี่แถบผ่าน (BPF)	8
3.1 วงจรกรองสัญญาณแถบความถี่วงจรถูกที่ 1	10
3.2 แสดงกล่องชุดวงจรกรองสัญญาณความถี่แถบผ่าน	11
3.3 กราฟแสดงการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรในรูป 3.1	11
3.4 ทดลองกรองสัญญาณจากคลื่นสี่เหลี่ยม	12
4.1 กราฟแสดงการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรที่มีความถี่ศูนย์กลางอยู่ที่ 1000 Hz	14
4.2 กราฟแสดงค่าแก้ไขสัมพัทธ์กับความถี่ ของวงจรถูกที่1	16
4.3 กราฟแสดงค่าแก้ไขสัมพัทธ์กับความถี่ ของวงจรถูกที่2	16
4.4 กราฟแสดงค่าแก้ไขสัมพัทธ์กับความถี่ ของวงจรถูกที่3	16
4.5 แสดงการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของคลื่นสี่เหลี่ยมเปรียบเทียบกับกันระหว่างการวัดผ่าน ฟังก์ชัน FFT กับ การวัดผ่านวงจรกรองโดยใช้ออสซิลโลสโคป และ ดิจิตัลมิเตอร์ วัด	18
4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเสียงขลุ่ยโซปราโน 546 Hz	21
4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเสียงขลุ่ยโซปราโน 610 Hz	21
4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเสียงขลุ่ยโซปราโน 671 Hz	22
4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเสียงขลุ่ยโซปราโน 710 Hz	22
4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเสียงขลุ่ยโซปราโน 800 Hz	22
4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเสียงขลุ่ยโซปราโน 879 Hz	22
4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเสียงขลุ่ยโซปราโน 996 Hz	23
4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเสียงขลุ่ยโซปราโน 1039 Hz	23
4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเสียงขลุ่ยไทย 530 Hz	23
4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเสียงฮาร์มอนิกา 531 Hz	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

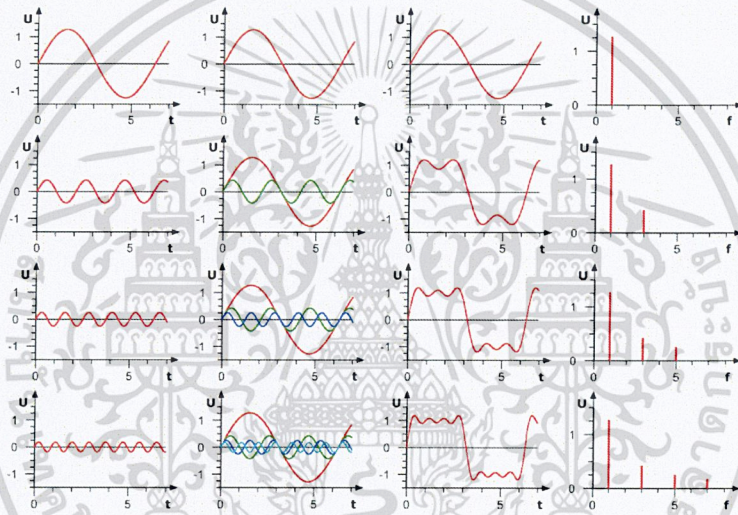
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

อนุกรมฟูรีเยร์เป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์ คิดค้นโดยนักคณิตศาสตร์ชื่อ ฌ็อง บาติสต์ โฌแซ็ฟ ฟูรีเย(Jean Baptiste Joseph Fourier พ.ศ. 2311 - 2373) ฟูรีเยได้แสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันหลายฟังก์ชันตัวแปรเดียวสามารถขยายออกเป็นอนุกรมของฟังก์ชันไซน์เชิงซ้อนของตัวแปรได้

อนุกรมฟูรีเยร์นั้นสามารถที่จะนำมาวิเคราะห์คลื่นต่างๆได้ ว่าคลื่นนั้นประกอบไปด้วยฟังก์ชันไซน์แบบใดบ้าง และเพื่อที่จะศึกษาฮาร์มอนิกของเสียงดนตรี ว่าคีย์เสียงใดๆนั้นประกอบไปด้วยความถี่ใดบ้าง



รูปที่ 1.1 แสดงการวิเคราะห์ฟูรีเยร์ของคลื่นรูปสี่เหลี่ยม

การวิเคราะห์ฟูรีเยร์เพื่อวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของเสียง สามารถใช้วงจรกรองสัญญาณแบบแถบความถี่ผ่าน (band pass filter) เพื่อสังเกตว่ามีความถี่ใดผ่านมาบ้าง โดยการปรับความถี่ที่ผ่านได้ไปเรื่อยๆ แล้วดูว่าเสียงนั้นประกอบไปด้วยความถี่ใด ทั้งนี้ในโครงการพิเศษจึงประสงค์ที่จะสร้างวงจรกรองสัญญาณแบบปรับความถี่แถบผ่านได้

1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาและสร้างวงจรกรองสัญญาณ
- 2) เพื่อศึกษาฮาร์มอนิกของเสียงดนตรี

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) สร้างวงจรกรองสัญญาณแบบปรับความถี่แถบผ่านได้ ที่กรองความถี่ในย่าน ที่มนุษย์ได้ยิน (ในโครงการนี้ $\approx 200 - 10,000$ เฮิรตซ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารนำเครื่องดนตรีมาใช้ในการทดลอง การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนในการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาการทำงานของวงจรรองสัญญาณแถบความถี่ผ่าน (band pass filter)
- 2) ออกแบบวงจรและสร้างวงจรรองสัญญาณแถบความถี่ผ่าน (band pass filter) แบบปรับความถี่ได้
- 3) นำเสียงดนตรีจากเครื่องดนตรีมาทดลองกับวงจร
- 4) สังเกตการทดลอง
- 5) วิเคราะห์และสรุปผล

ตาราง 1.1 แสดงแผนการดำเนินงานวิจัย

ปีการศึกษา	การดำเนินงาน	ระยะเวลาในการดำเนินงาน				
		ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2558	1)					
	2)					
	3)					

ปีการศึกษา	การดำเนินงาน	ระยะเวลาในการดำเนินงาน				
		ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
2558	4)					
	5)					

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) มีความรู้และเข้าใจการทำงานของวงจรรองความถี่แบบแถบผ่าน (band pass filter)
- 2) เข้าใจธรรมชาติของเสียงดนตรีว่าประกอบด้วยความถี่ใดบ้าง
- 3) สามารถนำความรู้ที่ได้จากโครงงานนี้ไปใช้ประโยชน์หรือสังเคราะห์ที่เกี่ยวกับเสียงดนตรีได้
- 4) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์คลื่นต่างๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

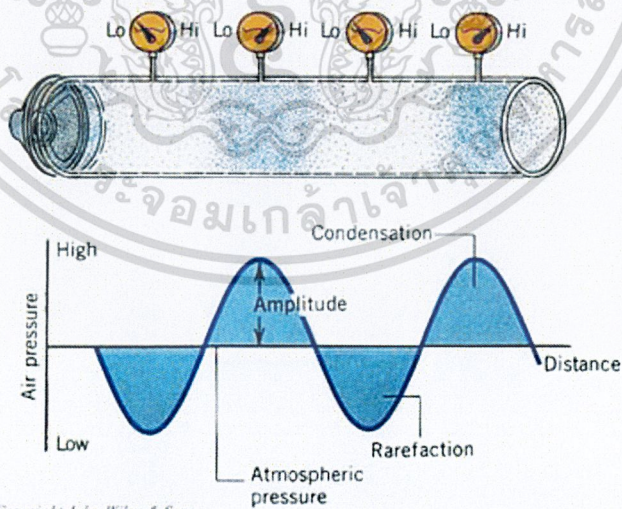
2.1 เสียง

เสียงเป็นคลื่นตามยาวชนิดหนึ่งซึ่งอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ ดังนั้นคุณสมบัติของเสียงจึงเหมือนคลื่นโดยทั่วไป ตามปกติหูคนสามารถได้ยินเสียงในช่วงความถี่ 20 เฮิรตซ์ ถึง 20,000 เฮิรตซ์ คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20,000 เฮิรตซ์นั้น เรียกว่าคลื่นเหนือเสียงหรืออัลตราโซนิก (ultrasonic) ส่วนเสียงที่มีความถี่ต่ำกว่า 20 Hz เรียกว่าคลื่นใต้เสียงหรืออินฟราโซนิก (Infrasonic)

2.1.1 ความดันเสียงและธรรมชาติของเสียง

เสียงเป็นคลื่นความดัน (Pressure Wave) จะต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านอากาศ ของแข็งหรือของเหลว แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านสุญญากาศได้

คลื่นเสียงเป็นคลื่นตามยาวเกิดจากการสั่นของวัตถุ ความถี่ของเสียงจะมีค่าเท่ากับความถี่ของแหล่งกำเนิด และในขณะที่มีการสั่น โมเลกุลของตัวกลางจะมีการถ่ายทอดพลังงานทำให้เกิดความดันอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่ง ทำให้เกิดเป็นช่วงอัด และ ช่วงขยายโดยที่ช่วงอัดคือบริเวณที่อนุภาคของตัวกลางอัดเข้าหากัน บริเวณนี้จะมีมีความดันสูงสุดโดยเทียบกับความดันที่ตำแหน่ง สมดุลของอนุภาค โดยการขจัดของอนุภาคน้อยที่สุด ส่วนช่วงขยายคือบริเวณที่อนุภาคตัวกลางแยกห่างจากกัน บริเวณนี้มีความดัน ต่ำสุดโดยเทียบกับความดันที่ตำแหน่งสมดุลของอนุภาค การขจัดของอนุภาคมากที่สุด ซึ่งสามารถเขียนเป็นกราฟได้ ดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงความดันเสียงและกราฟความดันเสียง

คลื่นของความดัน (Pressure Wave) ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นฟังก์ชันของโคไซน์ ดังนั้นสามารถเขียนสมการความดันเสียง ได้เป็น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = P_0 \cos(\omega t - kx) \quad (2.1)$$

2.1.2 ความเข้มเสียงและระดับความเข้มเสียง

ความเข้มเสียง

ในขณะที่เสียงเคลื่อนที่จะมีการถ่ายทอดพลังงานไปให้กับวัตถุที่เสียงตกกระทบ โดยอัตราการถ่ายทอดพลังงานของเสียง ต่อพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของเสียง เรียกว่าความเข้มเสียง (Sound Intensity) หรืออาจกล่าวได้ว่า ความเข้มเสียง หมายถึง กำลังของเสียงจากแหล่งกำเนิดที่ตกกระทบบนพื้นที่ 1 ตารางหน่วยในแนวตั้งฉากที่พิจารณา เนื่องจากเสียงแผ่ออกทุกทิศทาง ดังนั้นพื้นที่ที่เสียงตกกระทบ คือ $4\pi r^2$

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (2.2)$$

โดยที่ I แทนความเข้มเสียง มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร

P แทนกำลังของแหล่งกำเนิดเสียง มีหน่วยเป็นวัตต์

A แทนพื้นที่ที่เสียงตกกระทบ มีหน่วยเป็นตารางเมตร

ระดับความเข้มเสียง

เป็นตัวเลขเปรียบเทียบกับความเข้มเสียงในหน่วยเดซิเบล (dB) โดยความสัมพันธ์ ระหว่างระดับความเข้มเสียงกับความเข้มเสียง คือ

$$\beta = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2.3)$$

เมื่อ β คือ ระดับความเข้มเสียง หน่วยเป็นเดซิเบล (decibel, dB)

I_0 คือ ความเข้มเสียงต่ำสุดที่มนุษย์ได้ยิน ซึ่งมีค่า 10-12 วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) หรือ 0 เดซิเบล (dB) ที่ค่าความถี่ 1,000 เฮิรตซ์

I คือ ความเข้มเสียงที่ระยะใด ๆ (W/m^2)

2.1.3 คุณลักษณะของเสียง

คลื่นเสียง คือ คลื่นตามยาวซึ่งหูของพวกเราสามารถได้ยินเสียงได้ โดยคลื่นนี้มีความถี่ตั้งแต่ประมาณ 20 เฮิรตซ์ ถึง 20,000 เฮิรตซ์ ความถี่เสียงในช่วงนี้เรียกว่า Audio Frequency

เสียงที่พวกเราสามารถได้ยินแต่ละเสียงอาจเหมือนกันหรือแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเสียงซึ่งมีอยู่ 3 ข้อ คือ

1. ความดัง (Loudness) หมายถึง ความรู้สึกได้ยินของมวลมนุษย์ว่าดังมากดังน้อย ซึ่งเป็นปริมาณที่ไม่อาจวัดด้วยเครื่องมือใด ๆ ได้โดยตรง ความดังเพิ่มขึ้นตามความเข้มเสียง ความรู้สึกเกี่ยวกับความดังจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระดับความเข้มเสียง โดยถ้า I แทนความเข้มเสียง ความดังของเสียงจะแปรผันโดยตรงกับ $\log I$ หรืออาจกล่าวได้ว่า ความดังก็คือระดับความเข้มเสียงนั่นเอง หูของพวกเราสามารถรับเสียงที่มีความดังน้อยที่สุดคือ 0 dB และมากที่สุดคือ 120 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คุณภาพของเสียง (quality) หมายถึง คุณลักษณะของเสียงที่เราได้ยิน เมื่อเราฟังเพลงจากวงดนตรีวงหนึ่งนั้น เครื่องดนตรี ทุกชนิดจะเล่นเพลงเดียวกัน แต่เราสามารถแยกได้ว่า เสียงที่ได้ยินนั้นมาจากดนตรีประเภทใด เช่น มาจากไวโอลิน หรือเปียโน เป็นต้นการที่เราสามารถแยกลักษณะของเสียงได้นั้นเพราะว่าคลื่นเสียงทั้งสองมีคุณภาพของเสียงต่างกัน คุณภาพของเสียงนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนโอเวอร์โทนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดเสียงนั้น ๆ และแสดงออกมาเด่น จึงไพเราะต่างกัน นอกจากนี้คุณภาพของเสียงยังขึ้นกับ ความเข้มของเสียงอีกด้วย

3. ระดับเสียง (pitch) หมายถึง เสียงที่มีความยาวคลื่นและความถี่ต่างกัน โดยเสียงที่มีความถี่สูงจะมีระดับเสียงสูงส่วนเสียงที่มีความถี่ต่ำจะมีระดับเสียงต่ำ

2.2 อนุกรมฟูรีเยร์

อนุกรมฟูรีเยร์นั้นเป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หรือแยกแยะองค์ประกอบทางความถี่สำหรับฟังก์ชันต่อเนื่องที่เป็นคาบ (Continuous Periodic Function) $f(x)$ ใดๆ หาก $f(x)$ เป็นฟังก์ชันที่มีคาบเท่ากับ $2L$ และ x เป็นตัวแปรที่ต่อเนื่องแล้ว $f(x)$ จะสามารถเขียนในรูปผลรวมเชิงเส้นของไซน์ซอซายด์ที่มีความถี่ไม่ต่อเนื่องได้ดังนี้

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) + b_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)] \quad (2.4)$$

โดยที่ a_0 , a_n และ b_n คือค่าสัมประสิทธิ์ของการรวมซึ่งเป็นค่าคงที่ สามารถหาได้จาก

$$a_0 = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L f(x) dx \quad (2.5)$$

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx \quad (2.6)$$

$$b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx \quad (2.7)$$

2.3 การแปลงฟูรีเยร์ (Fourier Transform)

การแปลงฟูรีเยร์นั้นเป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางความถี่ โดยสำหรับฟังก์ชัน $f(x)$ ใดๆ หาก x เป็นตัวแปรที่ต่อเนื่อง เราจะสามารถเขียน $f(x)$ ในรูปผลรวมเชิงเส้นของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อนด้วยองค์ประกอบความถี่ที่ต่อเนื่องดังนี้

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega x} d\omega \quad (2.8)$$

โดยที่จะเรียก $F(\omega)$ ว่าเป็นผลการแปลงฟูรีเยร์ของ $f(x)$ หรือ สเปกตรัม (Spectrum) เมื่อ ω จะถูกเรียกว่าเป็นความเร็วเชิงมุมซึ่งเป็นค่าที่ต่อเนื่อง โดย $F(\omega)$ สามารถหาได้จาก

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i\omega x} dx \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

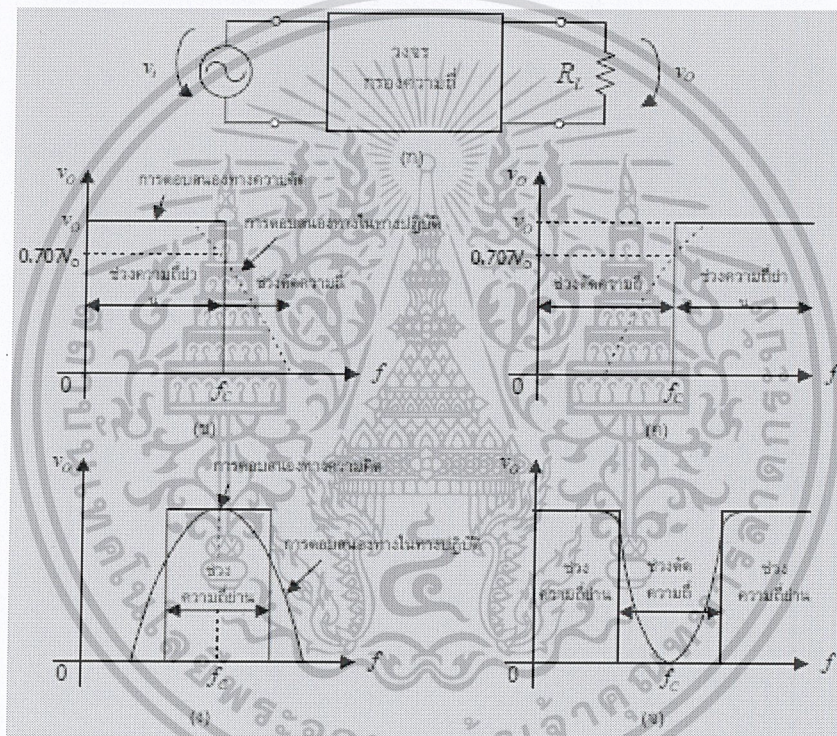
2.4 วงจรกรองสัญญาณ

2.4.1 ประเภทวงจรกรองความถี่

วงจรกรองความถี่ (Filters) สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ ๆ

1. วงจรกรองพาสซีฟ (Passive Filter) เป็นวงจรกรองความถี่ที่สร้างมาจากอุปกรณ์ 3 ตัว คือ ตัวต้านทาน (R) , ตัวเหนี่ยวนำ(L), และตัวเก็บประจุ (C) เนื่องจาก impedance ของ C และ L จะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ โดยการนำไปต่อในวงจรตามตำแหน่งที่เหมาะสม (อนุกรม/ขนาน)

2. วงจรกรองแอคทีฟ (Active Filter) เป็นวงจรกรองความถี่ที่สร้างมาจากอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น ทรานซิสเตอร์, ออปแอมป์ หรือไอซีวงจรรวมต่างๆ โดยนำมาต่อร่วมกับ ตัวต้านทาน, ตัวเหนี่ยวนำ หรือตัวเก็บประจุ ข้อดีของวงจรแบบนี้ก็คือสามารถขยายสัญญาณได้ด้วย และยังสามารถทำงานในระบบอนาล็อกหรือดิจิทัลก็ได้ด้วย



รูปที่ 2.2 วงจรกรองความถี่และการทำงานของวงจรแต่ละชนิด

- (ก) วงจรทดสอบวงจรกรองความถี่
- (ข) การทำงานของวงจร LPF
- (ค) การทำงานของวงจร HPF
- (ง) การทำงานของวงจร BPF
- (จ) การทำงานของวงจร BEF

การแบ่งประเภทของวงจรกรองความถี่ แบ่งตามการตัดความถี่ได้ดังนี้

1. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) จะตัดความถี่ที่สูงกว่าความถี่ที่กำหนดทิ้งไป

(ความถี่ที่กำหนดจะถูกเรียกว่าความถี่ตัดผ่าน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter) จะยอมให้ความถี่ที่สูงกว่าที่กำหนดทิ้งไป และจะตัดความถี่ที่กำหนดทิ้งไป
3. วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter) จะตัดความถี่ให้ผ่านไปได้ช่วงหนึ่งเริ่มจากที่กำหนด และสิ้นสุดที่กำหนด
4. วงจรหยุดแถบความถี่ผ่าน (Band Stop Filter) จะยอมให้ความถี่ที่นอกเหนือจากความถี่ที่กำหนดไว้ผ่านไปได้

จากรูปที่ 2.2 (ข) ซึ่งเป็นผลการตอบสนองความถี่ของวงจร LPF จะพบว่าในทางความคิดหรืออุดมคติ ถ้าความถี่ของอินพุตมีค่ามากกว่า ความถี่ตัดที่ต้องการ (Cut off frequency, f_c) แล้ว วงจรจะตัดสัญญาณความถี่นั้น ไม่ให้ออกไปที่เอาต์พุตเลย แต่ในทางปฏิบัติวงจรไม่สามารถตอบสนองความถี่เช่นนี้ได้ วงจรจะค่อยๆ ลดการตอบสนองความถี่ของช่วงที่ไม่ต้องการลง ส่วนผลการตอบสนองความถี่ของวงจร HPF ดัง รูปที่ 2.2 (ค) มีลักษณะตรงกันข้าม กับวงจร LPF ส่วนใน รูปที่ 2.2 (ง) เป็นผลการตอบสนองความถี่ของวงจร BPF คือ วงจรจะยอมให้ความถี่เฉพาะแถบหรือช่วงที่ต้องการเท่านั้นออกไปที่เอาต์พุต สำหรับผลของวงจร BEF ดังรูปที่ 2.2 (จ) ก็จะมีลักษณะตรงข้ามกับวงจร BPF

วงจรกรองความถี่เป็นวงจรที่สามารถทำหน้าที่เลือกความถี่ที่ต้องการหรือตัดความถี่ที่ไม่ต้องการออกก็ได้ การใช้งานวงจรกรองความถี่สามารถใช้กรองสัญญาณรบกวน หรือกรองเอาสัญญาณข่าวสารออกมาจากคลื่นพาห้ในระบบวิทยุ ดังนั้นอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในวงจรกรองความถี่ ถ้าเป็นแบบพาสซีฟจะใช้ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ส่วนในวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ จะใช้ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ร่วมกับอุปกรณ์ที่สามารถทำ การขยายสัญญาณ เช่น ออป-แอมป์ ทำให้วงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟมีข้อดีกว่าแบบพาสซีฟ คือ

ไม่มีการสูญเสียของสัญญาณเนื่องจากออป-แอมป์สามารถทำ การขยายสัญญาณเพื่อชดเชยการลดทอนของสัญญาณได้

ราคาถูก โดยเฉลี่ยแล้ววงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟจะมีราคาถูกกว่าแบบพาสซีฟ เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำ ที่ใช้ในแบบพาสซีฟมีราคาแพง และสร้างได้ยากกว่า

การปรับค่า วงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ สามารถปรับค่าความถี่ที่ต้องการได้ง่าย ภายใต้ย่านความถี่ที่กว้างกว่าที่สามารถปรับได้ในแบบพาสซีฟ

การแยกระหว่างอินพุตและเอาต์พุต เนื่องจากวงจรกรองความถี่ แบบแอคทีฟมีการใช้ออป-แอมป์ประกอบในวงจรจึงทำ ให้วงจรกรองความถี่แบบนี้มีอินพุต อินพีแดนซ์สูงและเอาต์พุต อิมพีแดนซ์ต่ำ ทำให้ไม่มีผลการรบกวนกันระหว่างแหล่งจ่ายสัญญาณอินพุตและโหลด

แต่อย่างไรก็ตาม การกรองความถี่แบบแอคทีฟก็มีข้อเสียอยู่บางประการ เมื่อเทียบกับแบบพาสซีฟ คือ

การตอบสนองความถี่ วงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ มีความสามารถในการตอบสนองความถี่ได้แคบกว่าแบบพาสซีฟเนื่องจากขีดจำกัดของออป-แอมป์ยกตัวอย่างเช่นออปแอมป์ เบอร์ 741 มีความสามารถในการตอบสนองความถี่ได้เพียง 1 MHz

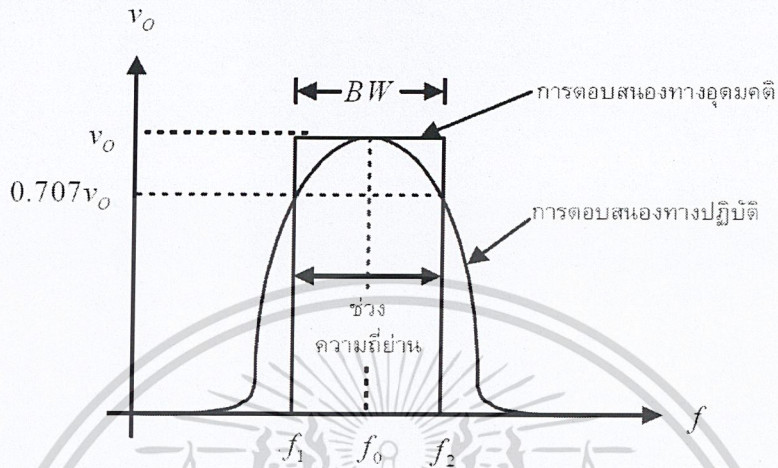
แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง เนื่องจากการใช้ออป-แอมป์ทำ ให้ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงในการทำงานในขณะที่แบบพาสซีฟไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง

ในโครงการพิเศษฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาเฉพาะวงจรกรองแถบความถี่ (Band Pass Filter) สำหรับทำการทดลองวิเคราะห์ฮาร์โมนิกของเสียง

ไม่รวมกรณีใดๆ ฟังสั้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 วงจรกรองความถี่แถบผ่าน (Band Pass Filter)

วงจรกรองแถบความถี่ เป็นวงจรที่เอาเฉพาะความถี่ช่วงที่ต้องการออกมาเท่านั้น ดังนั้นการตอบสนองความถี่ของวงจรจะเป็นดังรูป



รูปที่ 2.3 การตอบสนองของวงจรกรองความถี่แถบผ่าน

ความถี่ศูนย์กลาง (Center Frequency, f_0) ของวงจรกรองแถบความถี่สามารถกำหนดได้จากค่าอุปกรณ์ที่ต่อในวงจร

ประสิทธิภาพ (Quality factor, Q) ของวงจรนี้สามารถหาได้จาก

$$Q = \frac{f_0}{BW} \quad (2.10)$$

เมื่อ BW คือ แถบความถี่ที่ต้องการให้ผ่าน มีหน่วยเป็น Hz หาได้จาก

$$BW = f_2 - f_1 \quad (2.11)$$

และ f_0 ก็สามารถหาได้จาก

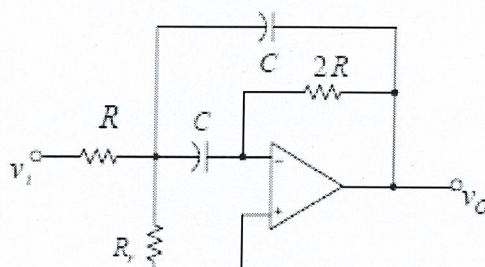
$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} \quad (2.12)$$

ดังนั้น

$$f_1 = \sqrt{\frac{BW^2}{4} + f_0^2} - \left(\frac{BW}{2}\right) \quad (2.13)$$

และ

$$f_2 = f_1 + BW \quad (2.14)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อแหล่งอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.4 วงจรกรองความถี่แถบผ่าน (BPF)

วงจรรองความถี่แถบผ่าน แสดงในรูป 2.3 วงจรนี้จะมีอัตราขยายแบบลูปปิด (A_{CL}) เท่ากับ 1 ที่ความถี่ศูนย์กลาง f_0 โดย BW สามารถหาได้จาก

$$BW = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.15)$$

และความถี่ศูนย์กลาง f_0 สามารถกำหนดได้จาก

$$f_0 = \frac{1}{2\pi C} \sqrt{\frac{R_1 + R_r}{R_1 R_2 R_r}} \quad (2.16)$$

จากสมการ (2.12) และ (2.13) จะเห็นได้ว่า เราสามารถปรับค่าความถี่ศูนย์กลางได้ โดยไม่ทำให้ค่า BW เปลี่ยน โดยการปรับที่ R_r ซึ่งสามารถหา R_r ได้จาก

$$R_r = \frac{R}{2Q^2 - 1} \quad (2.17)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

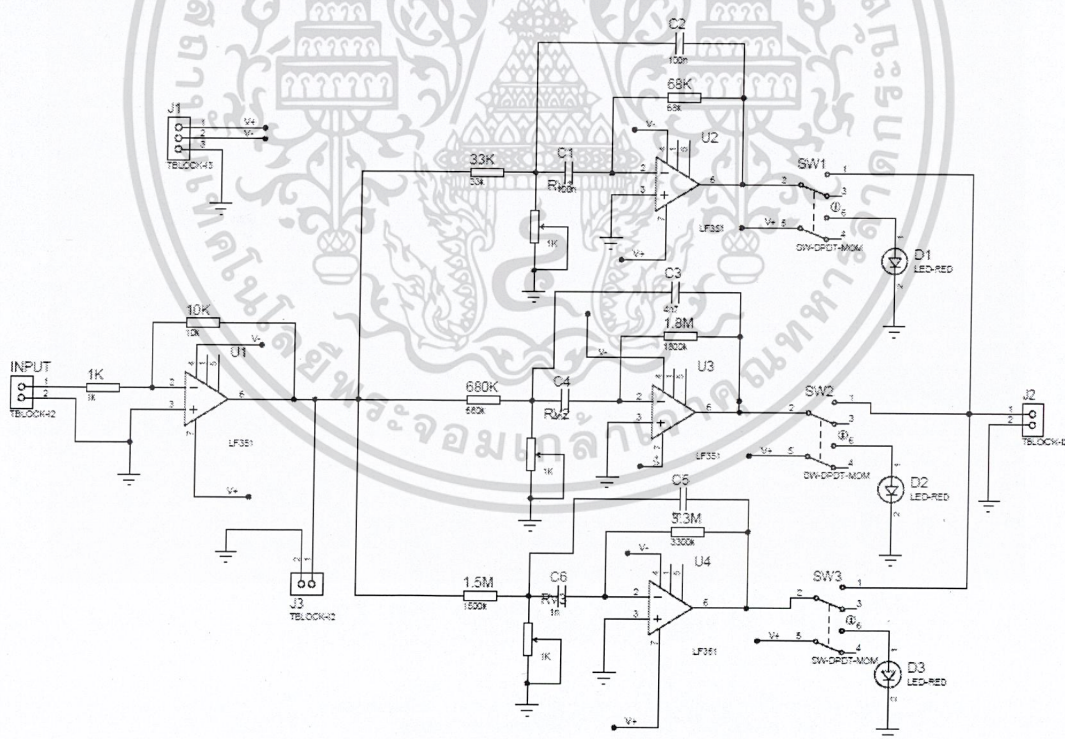
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการสร้างวงจรกรองสัญญาณ

3.1.1 วงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ (Band Pass Filter)

ในการสร้างวงจรกรองสัญญาณจะต้องคำนวณหาค่าของอุปกรณ์ที่ใช้วงจร ให้เหมาะสมกับการใช้งานโดยใช้สมการที่ 2.7-2.14 และได้ค่าของอุปกรณ์ดังนี้

- วงจรที่ 1 โดยที่ $BW = 50 \text{ Hz}$, $f_0 \approx 200 - 1000 \text{ Hz}$
 ดังนั้น $R_1 = 33 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 68 \text{ k}\Omega$, $C = 0.1 \mu\text{F}$
- วงจรที่ 2 โดยที่ $BW = 50 \text{ Hz}$, $f_0 \approx 800 - 3000 \text{ Hz}$
 ดังนั้น $R_1 = 680 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 1.8 \text{ M}\Omega$, $C = 4.7 \text{ nF}$
- วงจรที่ 3 โดยที่ $BW = 100 \text{ Hz}$, $f_0 \approx 3 \text{ kHz} - 12 \text{ kHz}$
 ดังนั้น $R_1 = 1.5 \text{ M}\Omega$, $R_2 = 3.3 \text{ M}\Omega$, $C = 0.1 \text{ nF}$



รูปที่ 3.1 วงจรกรองสัญญาณแถบความถี่วงจรที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

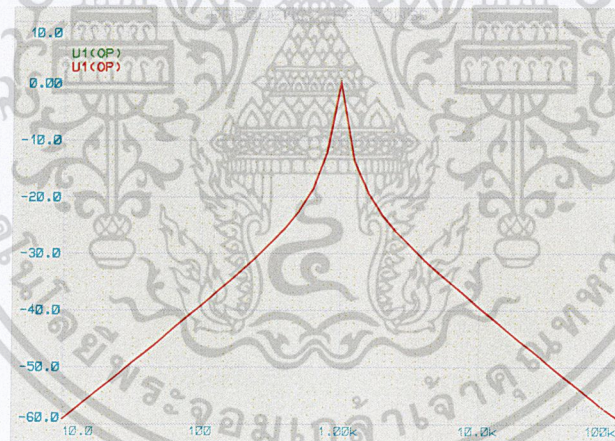


รูปที่ 3.2 แสดงกล่องชุดวงจรกรองสัญญาณความถี่แถบผ่าน

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 จำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรมในคอมพิวเตอร์

1. ต่อวงจรดังรูปที่ 3.1 แล้วทำการทดสอบวงจร ดูการตอบสนองต่อความถี่ของวงจร ดังรูปที่ 3.3

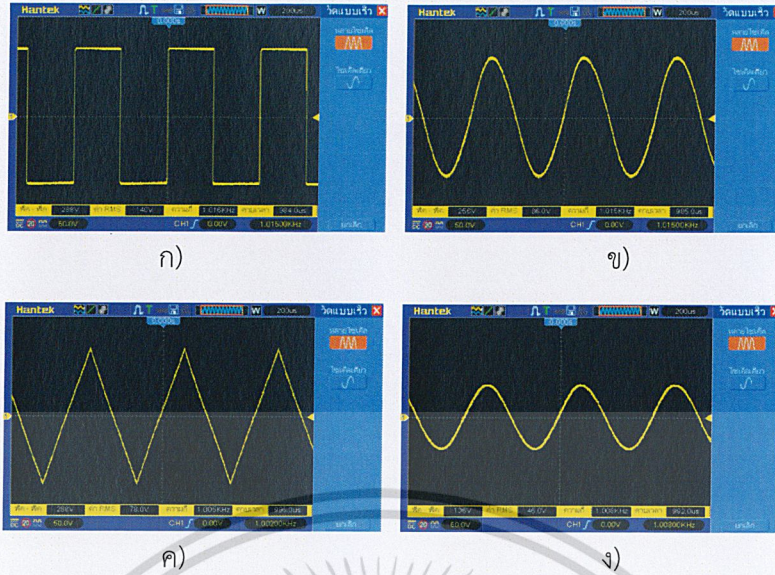


รูปที่ 3.3 กราฟแสดงการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรในรูป 3.1

3.2.2 ต่อวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่แล้วทำการทดลอง

1. ต่อสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมและรูปสามเหลี่ยม จากเครื่องกำเนิดสัญญาณตามความถี่ต่างๆ แล้วดูสัญญาณขาออกด้วยออสซิลโลสโคปว่าเป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ทดลองกรองสัญญาณจากคลื่นสี่เหลี่ยม ก) ได้สัญญาณออกมาเป็นรูปไซน์ดังรูป ข) และ กรองสัญญาณจากคลื่นรูปสามเหลี่ยม ค) ได้สัญญาณออกมาเป็นคลื่นรูปไซน์ดังรูป ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

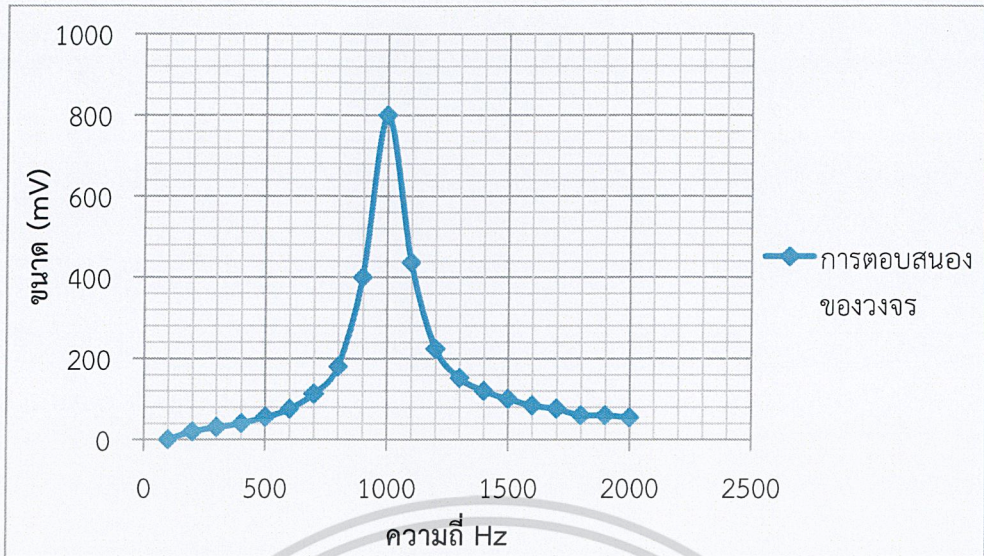
4.1 ผลการทดลองการกรองสัญญาณ

ทำการเซตอุปกรณ์ให้มีค่าความถี่ศูนย์กลาง ที่ 1000 Hz แล้วให้สัญญาณรูปไซน์ตั้งแต่ 100-2000 Hz เพื่อดูการตอบสนองต่อความถี่ของวงจร

ตารางที่ 4.1 แสดงการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรที่มีความถี่ศูนย์กลางอยู่ที่ 1000 Hz

ความถี่	ขนาด(mV)
100	0
200	20
300	30
400	40
500	55
600	75
700	112
800	180
900	400
1000	800
1100	436
1200	224
1300	152
1400	120
1500	100
1600	84
1700	76
1800	60
1900	60
2000	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรที่มีความถี่ศูนย์กลางอยู่ที่ 1000 Hz

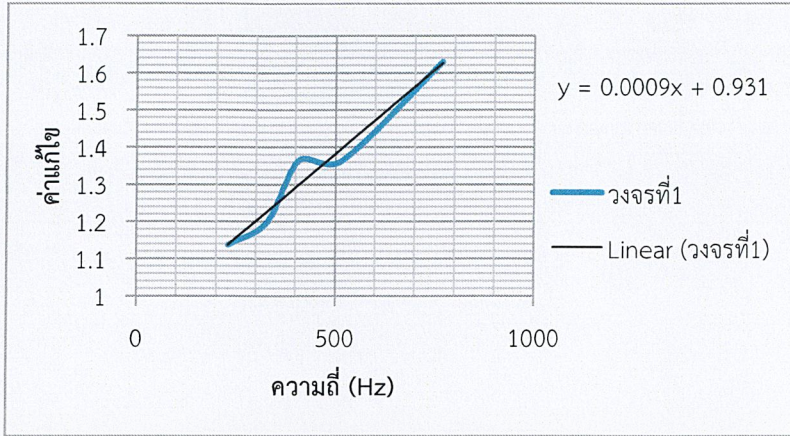
ทำการป้อนสัญญาณรูปไซน์ ในแต่ละความถี่เพื่อดูประสิทธิภาพการกรองสัญญาณในแต่ละวงจร ในที่นี้มีสามวงจรด้วยกัน และก่อนผ่านวงจรกรองทั้งสามจะมีการขยายสัญญาณก่อนโดยใช้วงจรขยายสัญญาณ (อัตราขยายประมาณ 10 เท่า) การทดลองนี้ทำเพื่อหาค่าแก้ไขความผิดพลาด เนื่องจากสัญญาณที่ผ่านวงจรกรองจะมีแรงดันที่ลดลงเมื่อความถี่ศูนย์กลางมีค่าที่มากขึ้นในแต่ละวงจร แล้วนำค่าการแก้ไขนี้ไปคูณกับค่าแรงดันขาออกที่ผ่านวงจรกรองมาแล้วเพื่อให้ได้ค่าจริงหรือมีค่าเท่ากับแรงดันของอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

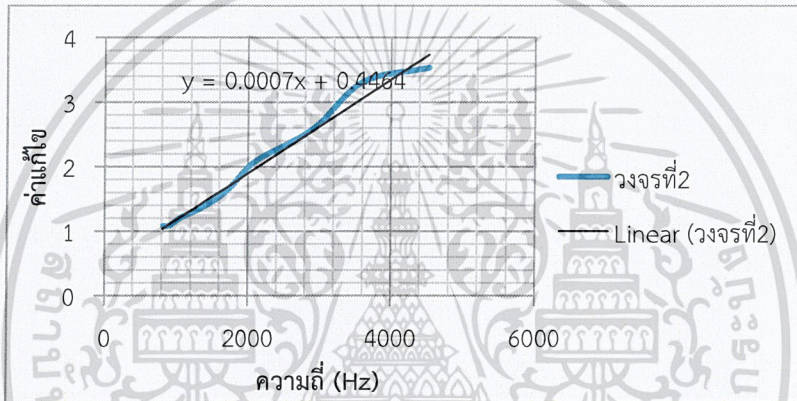
ตารางที่ 4.2 ตารางบันทึกค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่ผ่านวงจรกรอง และค่าแก้ไขของวงจรตามความถี่

	ความถี่	แรงดันที่ผ่านวงจร Vp-p (V)	ค่าแรงดันจริง Vp-p (V)	ค่าแก้ไข	ค่าแก้ไข เชิงเส้น
วงจร ที่ 1	230	1.02	1.16	1.137254902	1.138
	330	0.968	1.16	1.198347107	1.228
	410	0.85	1.16	1.364705882	1.3
	520	0.85	1.16	1.364705882	1.399
	770	0.712	1.16	1.629213483	1.624
วงจร ที่ 2	820	1.07	1.16	1.08411215	1.0204
	900	1.07	1.16	1.08411215	1.0764
	1000	1	1.16	1.16	1.1464
	1100	0.94	1.16	1.234042553	1.2164
	1300	0.872	1.16	1.330275229	1.3564
	1560	0.776	1.16	1.494845361	1.5384
	1770	0.68	1.16	1.705882353	1.6854
	2130	0.552	1.16	2.101449275	1.9374
	2920	0.448	1.16	2.589285714	2.4904
	3600	0.35	1.16	3.314285714	2.9664
4530	0.328	1.16	3.536585366	3.6174	
วงจร ที่ 3	3100	0.456	1.16	2.543859649	2.5716
	4000	0.384	1.16	3.020833333	2.9316
	5000	0.33	1.16	3.515151515	3.3316
	6000	0.28	1.16	4.142857143	3.7316
	7000	0.25	1.16	4.64	4.1316
	9000	0.23	1.16	5.043478261	4.9316
	10300	0.2	1.16	5.8	5.4516

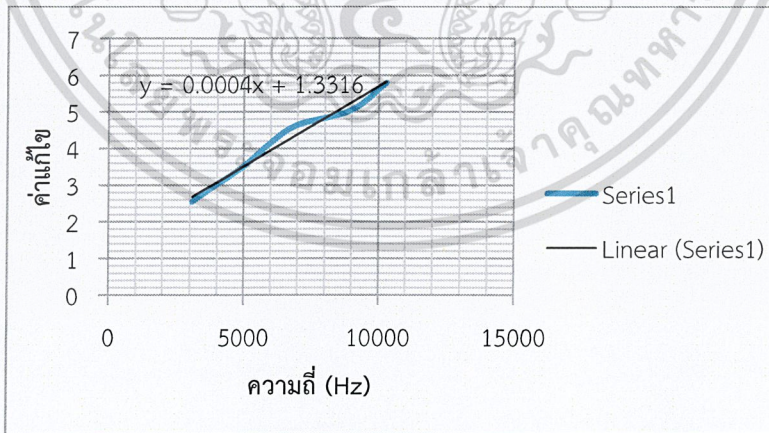
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าแก้ไขสัมพันธ์กับความถี่ ของวงจรที่1



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าแก้ไขสัมพันธ์กับความถี่ ของวงจรที่2



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าแก้ไขสัมพันธ์กับความถี่ ของวงจรที่3

ทดสอบกรองสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 200 เฮิรตซ์ ขนาดโวลต์พีค-พีค 15.4 โวลต์ แล้ววิเคราะห์ฮาร์โมนิกที่ผสมอยู่ โดยการเปรียบเทียบกับค่าที่วิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชัน FFT ของเครื่อง ออสซิลโลสโคป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ตารางวิเคราะห์คลื่นสี่เหลี่ยมโดยฟังก์ชัน FFT ของเครื่องออสซิลโลสโคป

ความถี่	ลำดับฮาร์โมนิก	ขนาด (V)	อัตราส่วนต่อฮาร์โมนิกที่ 1
200 เฮิรตซ์	1	5.6	1
	3	2	0.357143
	5	1	0.178571
	7	0.8	0.142857
	9	0.6	0.107143
	11	0.4	0.071429
	13	0.4	0.071429

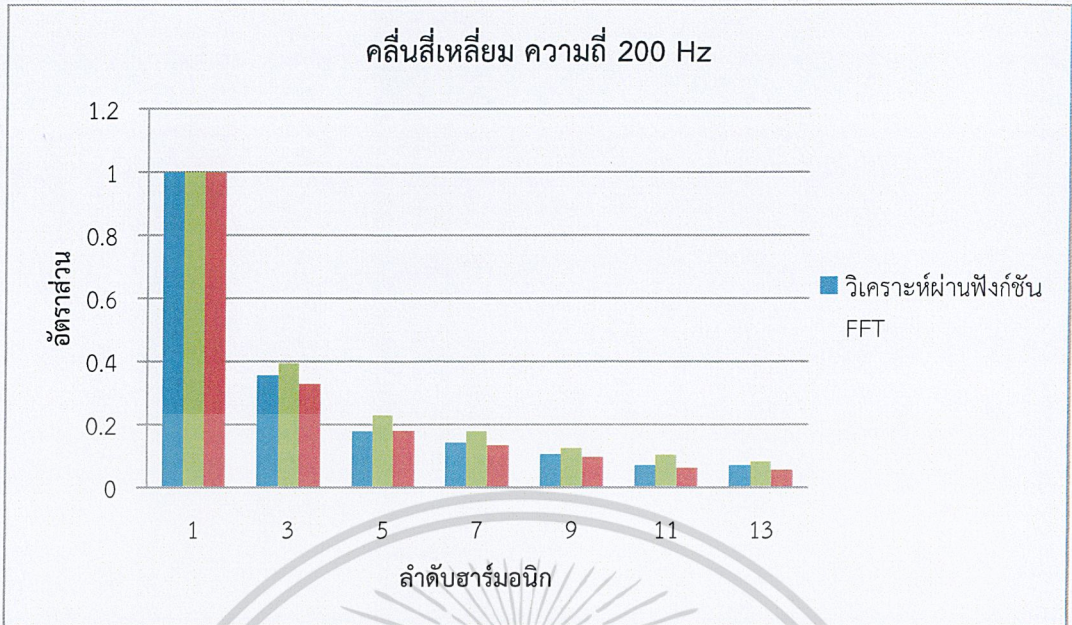
ตารางที่ 4.4 ตารางวิเคราะห์คลื่นสี่เหลี่ยมโดยใช้วงจรรองแล้ววัดด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป

ความถี่	ลำดับฮาร์โมนิก	ขนาด Vp-p (V)	วงจรรอง	ค่าแก้ไข	ขนาด Vp-p (V) ที่แก้ไขแล้ว	อัตราส่วนต่อฮาร์โมนิกที่ 1
200	1	17.2	1	1.111	19.1092	1
	3	5.12	1	1.471	7.53152	0.394131
	5	3.84	2	1.1464	4.402176	0.230369
	7	2.4	2	1.4264	3.42336	0.179147
	9	1.4	2	1.7064	2.38896	0.125016
	11	1	2	1.9864	1.9864	0.10395
	13	0.7	2	2.2664	1.58648	0.083022

ตารางที่ 4.5 ตารางวิเคราะห์คลื่นสี่เหลี่ยมโดยใช้วงจรรองแล้ววัดด้วยดิจิตอลมิเตอร์

ความถี่	ลำดับฮาร์โมนิก	ขนาด Vp-p (V)	วงจรรอง	ค่าแก้ไข	ขนาด Vp-p (V) ที่แก้ไขแล้ว	อัตราส่วนต่อฮาร์โมนิกที่ 1
200	1	5.7	1	1.111	6.3327	1
	3	1.42	1	1.471	2.08882	0.329847
	5	1	2	1.1464	1.1464	0.181029
	7	0.6	2	1.4264	0.85584	0.135146
	9	0.36	2	1.7064	0.614304	0.097005
	11	0.2	2	1.9864	0.39728	0.062735
	13	0.16	2	2.2664	0.362624	0.057262

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของคลื่นสี่เหลี่ยมเปรียบเทียบกันระหว่างการวัดผ่านฟังก์ชัน FFT กับ การวัดผ่านวงจรกรองโดยใช้ออสซิลโลสโคป และ ดิจิตัลมิเตอร์ วัด

4.2 ผลการวิเคราะห์ฟูรีเยร์โดยใช้ฟังก์ชัน FFT จากเครื่อง Oscilloscope

ทำการวิเคราะห์โดยการใส่สัญญาณเข้าไปผ่านวงจรขยายแล้วจึงวิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชัน FFT จากเครื่องออสซิลโลสโคป

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงผลวิเคราะห์ฟูรีเยร์ของเสียงขลุ่ยในแต่ละความถี่ของขลุ่ยไซปราโน

ความถี่เสียง	ความถี่องค์ประกอบ	ขนาด (V)
546	546	0.4
	1093	0.1
	1625	0.16
	2171	0.06
610	610	0.42
	1210	0.08
	1820	0.14
	2421	0.08
671	671	0.42
	1343	0.12
	2007	0.14
	2687	0.04
710	710	0.24
	1429	0.04
	2140	0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาควิชาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงผลวิเคราะห์ฟูเรียร์ของเสียงขลุ่ยในแต่ละความถี่ของขลุ่ยโซปราโน(ต่อ)

800	800	0.22
	1601	0.02
	2382	0.04
878	878	28
	1757	5.62
	2636	15.2
996	996	0.42
	1992	0.1
	2988	0.04
1039	1039	0.34
	2085	0.1
	3125	0.06
	4164	0.06

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงผลวิเคราะห์ฟูเรียร์ตัวอย่างความถี่ของเสียงขลุ่ยไทย

ความถี่เสียง	ความถี่องค์ประกอบ	ขนาด (V)
532	532	0.22
	1140	0.04
	1594	0.04
524	524.4	72
	1047	32
	1579	32
	2102	16
	2633	24
	3157	16
	3688	8.8

4.3 วิเคราะห์ฮาร์มอนิกของเสียงโดยใช้วงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่าน

การกรองสัญญาณเพื่อวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของเสียงจะใช้วงจรกรองทั้งหมด 3 วงจร ได้แก่ วงจรที่ 1 จะกรองความถี่ตั้งแต่ช่วง 230-800 Hz ,วงจรที่ 2 กรองความถี่ตั้งแต่ช่วง 800-4500 Hz และวงจรที่3 กรองความถี่ตั้งแต่ช่วง 3000-10000 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงผลการกรองสัญญาณในแต่ละความถี่เสียงของขลุ่ยโซปราโน

ความถี่เสียง	องค์ประกอบความถี่	ขนาด Vp-p (V)	วงจรที่ใช้	ค่าแก้ไขเชิงเส้นของวงจร	ค่าแก้ไขแล้ว Vp-p (V)
543 Hz	543	0.82	1	1.4197	1.164154
	1160	0.312	2	1.2584	0.3926208
	1630	0.312	2	1.5874	0.4952688
	2170	0.128	2	1.9654	0.2515712
610 Hz	610	0.752	1	1.48	1.11296
	1210	0.312	2	1.2934	0.4035408
	1835	0.312	2	1.7309	0.5400408
	2430	0.104	2	2.1474	0.2233296
675 Hz	675	0.82	1	1.5385	1.26157
	1360	0.28	2	1.3984	0.391552
	2000	0.192	2	1.8464	0.3545088
	2700	0.06	2	2.3364	0.140184
710 Hz	710	0.576	1	1.57	0.90432
	1400	0.128	2	1.4264	0.1825792
	2120	0.116	2	1.9304	0.2239264
	2850	0.04	2	2.4414	0.097656
800 Hz	800	0.84	2	1.0064	0.845376
	1600	0.06	2	1.5664	0.093984
	2430	0.116	2	2.1474	0.2490984
881 Hz	881	1.2	2	1.0631	1.27572
	1780	0.12	2	1.6924	0.203088
	2630	0.12	2	2.2874	0.274488
984 Hz	984	0.58	2	1.1352	0.658416
	1915	0.068	2	1.7869	0.1215092
	2941	0.046	2	2.5051	0.1152346
	3906	0.026	2	3.1806	0.0826956
1041 Hz	1041	1.02	2	1.1751	1.198602
	2100	0.184	2	1.9164	0.3526176
	3086	0.1	2	2.6066	0.26066
	4132	0.072	2	3.3388	0.2403936

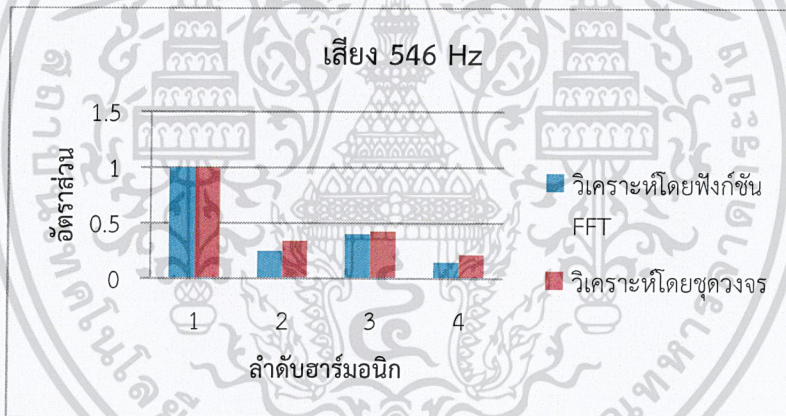
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงผลการกรองสัญญาณในแต่ละความถี่เสียงของขลุ่ยไทย

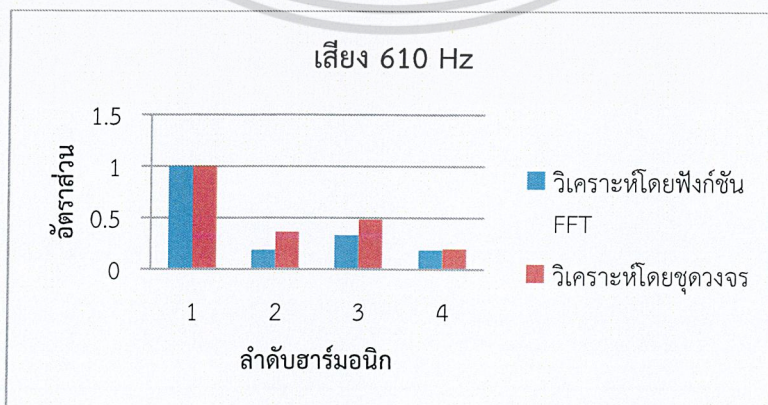
ความถี่เสียง	องค์ประกอบความถี่	ขนาด Vp-p (V)	วงจรถ่าย	ค่าแก้ไขเชิงเส้นของวงจรถ่าย	ค่าแก้ไขแล้ว Vp-p (V)
530	530	0.84	1	1.40863	1.1832492
	1016	0.152	2	1.1576	0.1759552
	1633	0.112	2	1.5895	0.178024

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงผลการกรองสัญญาณในแต่ละความถี่เสียงของซาร์โมนิกา

ความถี่เสียง	องค์ประกอบความถี่	ขนาด Vp-p (V)	วงจรถ่าย	ค่าแก้ไขเชิงเส้นของวงจรถ่าย	ค่าแก้ไขแล้ว Vp-p (V)
531	531	0.128	1	1.4089	0.1803392
	1020	0.0696	2	1.1604	0.08076384
	1567	0.036	2	1.5433	0.0555588
	2141	0.0264	2	1.9451	0.05135064

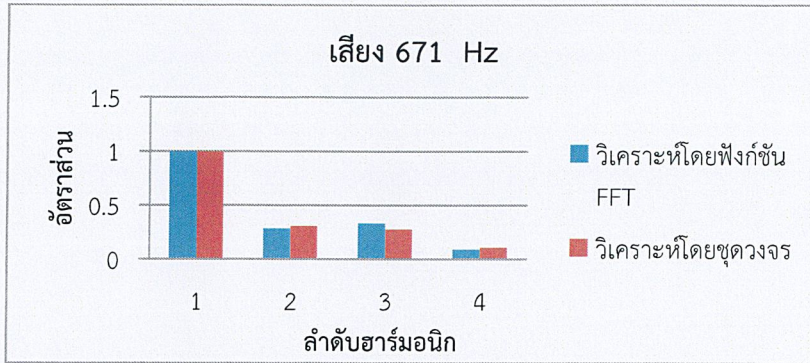


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเสียงขลุ่ยโซปราโน 546 Hz

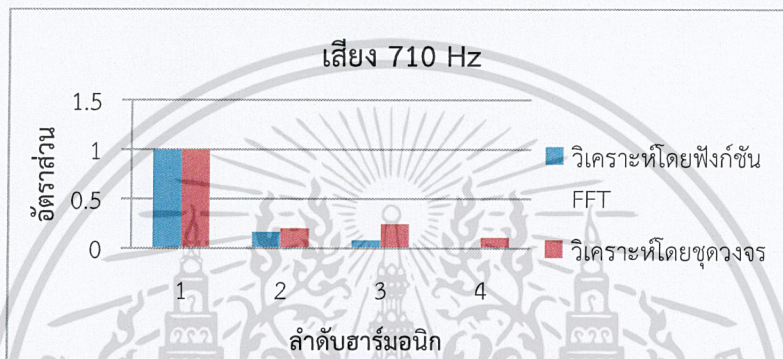


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเสียงขลุ่ยโซปราโน 610 Hz

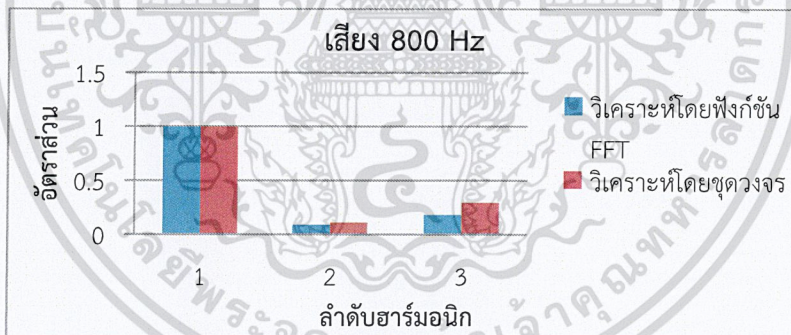
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



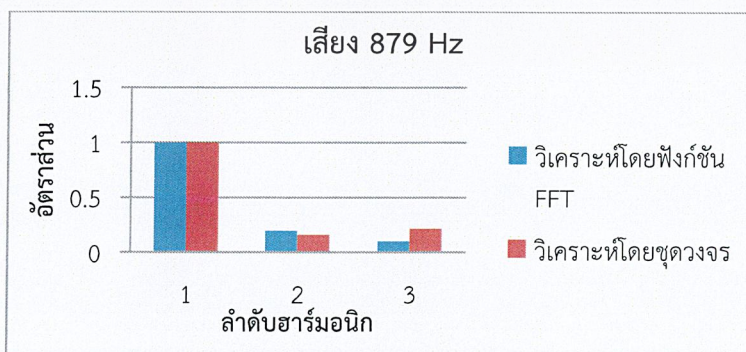
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเสียงขลุ่ยโซปราโน 671 Hz



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเสียงขลุ่ยโซปราโน 710 Hz

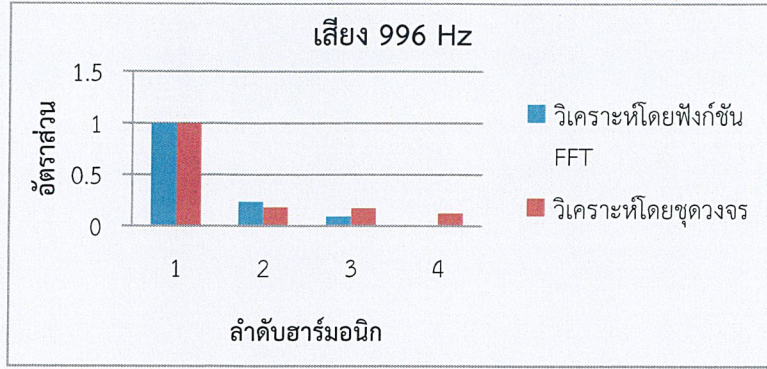


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเสียงขลุ่ยโซปราโน 800 Hz

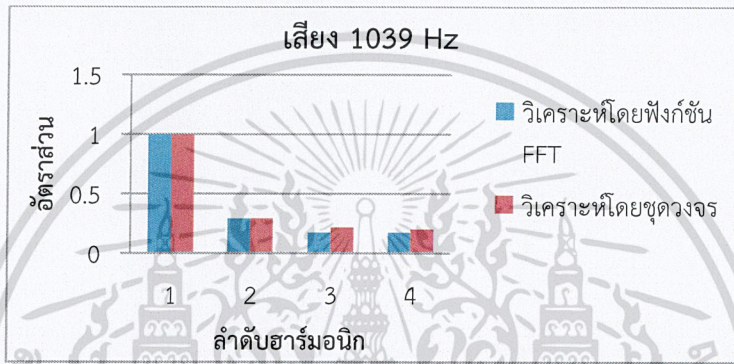


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเสียงขลุ่ยโซปราโน 879 Hz

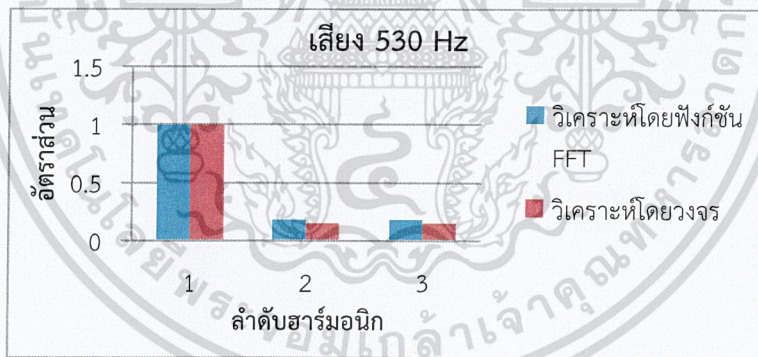
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



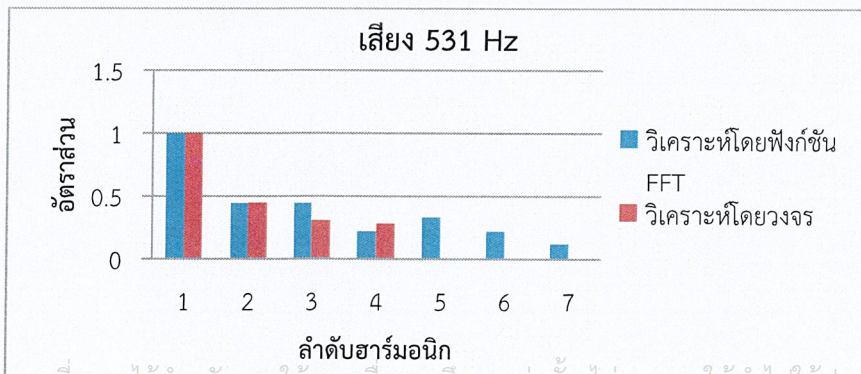
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเสียงขลุ่ยโซปราโน 996 Hz



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเสียงขลุ่ยโซปราโน 1039 Hz



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเสียงขลุ่ยไทย 530 Hz



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเสียงฮาร์โมนิก 531 Hz

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของเสียงดนตรี (เสียงขลุ่ยไซปราโน) โดยใช้ทฤษฎีของฟูเรียร์คือการแยกแยะสัญญาณคลื่นเสียงให้อยู่ในรูปคลื่นไซน์ สามารถทำได้โดยการสร้างวงจรกรองสัญญาณแบบ Band Pass Filter และทำการทดลองเทียบกับค่าอ้างอิง ค่าอ้างอิงคือค่าที่วิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชัน FFT ด้วยเครื่อง Oscilloscope ซึ่งผลที่วัดได้มีทั้งหมดสามถึงสี่ฮาร์มอนิก และเมื่อทำการเทียบกับเครื่องดนตรีชนิดอื่นๆจะเห็นว่ามีความถี่ที่ต่างกัน เนื่องจาก ความเข้มเสียงในแต่ละฮาร์มอนิกไม่เท่ากัน และบางชนิดมีจำนวนโอเวอร์โทนที่มากกว่า ทำให้เครื่องดนตรีที่ต่างชนิดกัน เสียงที่เราได้ยินจากเครื่องดนตรีชนิดนั้นๆจึงมีความแตกต่างกัน ค่าความมอดุลเลชันเฉลี่ยของการทดลอง ระหว่างค่าที่วิเคราะห์โดยฟังก์ชัน FFT โดยตรงกับค่าที่วิเคราะห์โดยวงจรและวัดค่าโดยดิจิตัลมิเตอร์ เท่ากับ 0.073647 (โดยไม่คิดเครื่องหมาย)

5.2 ข้อเสนอแนะ

1 สัญญาณเสียงมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเนื่องจากการทำให้เกิดเสียงทำโดยการเป่า ลมไม่นิ่งเสียงนั้นจึงมีความดังไม่สม่ำเสมอ ทำให้การทดลองได้ผลที่เกิดจากสัญญาณต่างกัน ดังนั้นการทดลองจึงควรทำซ้ำๆหลายๆครั้งเพื่อดูแนวโน้มหรือดูค่าเฉลี่ย

2 ในการทดลองแรงดันมีค่าลดลงตามความถี่ที่มากขึ้น(ความถี่ศูนย์กลาง)จึงควรมีค่าที่นำมาคูณเพื่อให้ได้ค่าที่ออกมามีความใกล้เคียงหรือมีขนาดเท่ากับค่าของอินพุตในแต่ละวงจรหรือทำการออกแบบให้วงจรมีกำลังขยายที่มากขึ้นกว่าเดิม

3 ควรใช้อุปกรณ์ที่เข้ากับวงจรกรองสัญญาณที่มีช่วงแบนด์วิดธ์ต่ำๆ

5.3 ปัญหาที่พบในการทำงาน

แรงดันขาออกมีค่าที่ลดลงจากเดิม ทำให้บางความถี่ที่มีแอมพลิจูดน้อยๆจะไม่สามารถกรองได้

อ้างอิง

การกระจายอนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier Series Expansion) (online). Available :

<http://personal.sut.ac.th/paramate/files/compcom/compcomm03.pdf>

การแปลงฟูรีเยร์ที่ต่อเนื่องทางเวลา. (Online). Available :

http://home.npru.ac.th/piya/Signal/file/Piya_Ch6.pdf เข้าถึงเมื่อวันที่ 2 เมษายน 2559

บริษัทซีเอ็ดดูเคชั่น. แผนกหนังสือพิเศษด้านอิเล็กทรอนิกส์. 2537. **โครงการอิเล็กทรอนิกส์สมัครเล่น 2**. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ปรียา อนุพงษ์ออาจ. (ม.ป.ป.) เสียง (Online). Available :

https://www.rsu.ac.th/science/physics/pom/physics_2/sound/sound_1.htm

เข้าถึงเมื่อวันที่ 16 มกราคม 2559

มนตรี ศิริปรัชญานันท์. (ม.ป.ป.) วงจรกรองความถี่. (Online). Available :

<http://www.te.kmutnb.ac.th/~msn/filter.pdf> เข้าถึงเมื่อวันที่ 16 มกราคม 2559

มนตรี ศิริปรัชญานันท์. (ม.ป.ป.) วงจรกรองความถี่แบบแอกทีฟเบื้องต้น. (Online). Available :

<https://docs.google.com/viewer?url=http%3A%2F%2Fwww.te.kmutnb.ac.th%2F~msn%2Ffilter.pdf> เข้าถึงเมื่อวันที่ 16 มกราคม 2559

ศรัณย์ภัทร ศรีทองอินทร์, สกุล สืบไทย และสุธิดา ประสานศักดิ์. 2557. “ชุดทดลองการวิเคราะห์ฟูรีเยร์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สนทยา นองนุช. (2558.) วงจรกรองความถี่. (Online). Available :

<http://www.elec-za.com/วงจรกรองความถี่-filter-circuit>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 เมษายน 2559

อนุกรมฟูรีเยร์. (Online). Available :

http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~tdumrong/2301312/file_sheet_2555_2nd/312ch10_2555_2nd.pdf เข้าถึงเมื่อวันที่ 17 มีนาคม 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุกรมฟูเรียร์ที่ต่อเนื่องทางเวลา. (Online). Available :

http://home.npru.ac.th/piya/Signal/file/Piya_Ch4.pdf เข้าถึงเมื่อวันที่ 2 เมษายน 2559

อนุกรมฟูเรียร์และการวิเคราะห์สัญญาณรายคาบ. (Online). Available :

http://www.ee.eng.cmu.ac.th/OnlineCourses/252341/2_1_2.html เข้าถึงเมื่อวันที่ 2 เมษายน 2559

Wayne Storr. (2559.) **Active Band Pass Filter.** (Online). Available :

http://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_7.html. เข้าถึงเมื่อวันที่ 26 มกราคม 2559



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ค่าการแก้ไขคือ ค่าจริงของสัญญาณ / ค่าที่ได้จากการกรอง

ค่าการแก้ไขเชิงเส้น คือ ค่าเส้นตรงที่ได้จาก กราฟแสดงค่าแก้ไขสัมพันธ์กับความถี่

สมการค่าการแก้ไขของวงจรที่ 1 คือ $(0.0009 * f) + 0.931$

สมการค่าการแก้ไขของวงจรที่ 2 คือ $(0.0007 * f) + 0.4464$

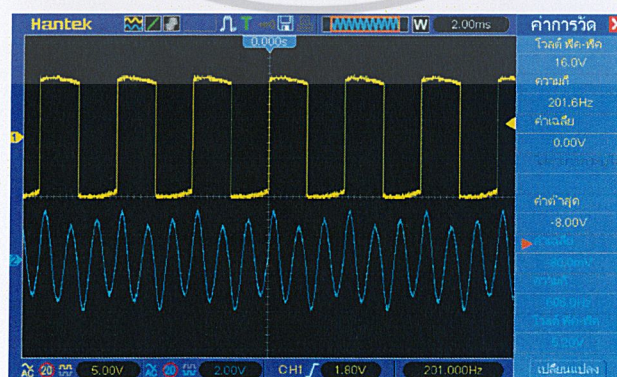
สมการค่าการแก้ไขของวงจรที่ 3 คือ $(0.0007 * f) + 0.4464$



ภาพการวิเคราะห์คลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 200 Hz โดยใช้ฟังก์ชัน FFT จากเครื่อง Oscilloscope



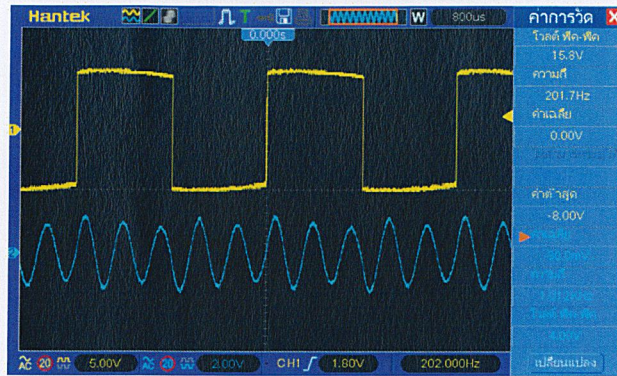
ภาพแสดงการกรองสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 200 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 200 Hz



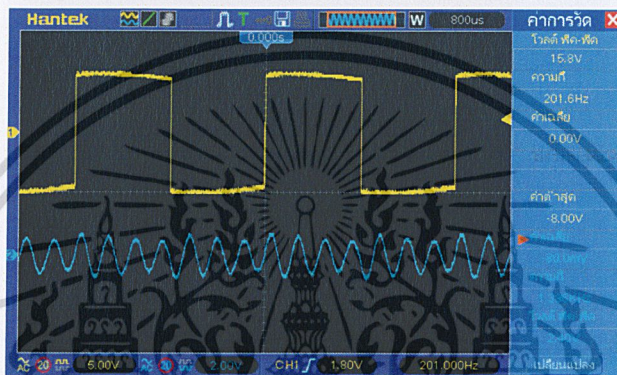
ภาพแสดงการกรองสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 200 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 600 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



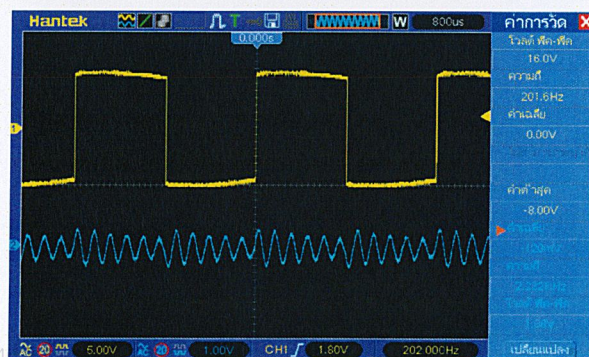
ภาพแสดงการกรองสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 200 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 1000 Hz



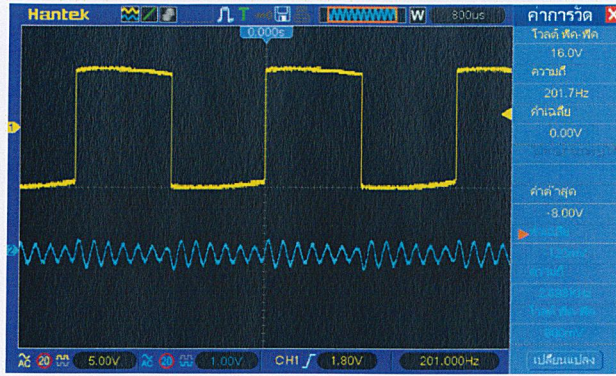
ภาพแสดงการกรองสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 200 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 1400 Hz



ภาพแสดงการกรองสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 200 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 1800 Hz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ภาพแสดงการกรองสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 200 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 2200 Hz
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



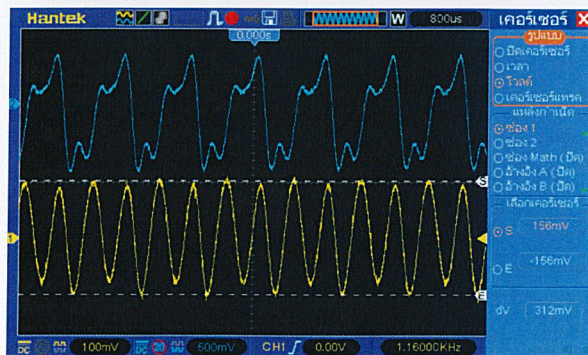
ภาพแสดงการกรองสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 200 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 2600 Hz



ภาพการวิเคราะห์ฟูเรียร์โดยใช้ฟังก์ชัน FFT จากเครื่อง Oscilloscope ที่ความถี่เสียง 546 Hz

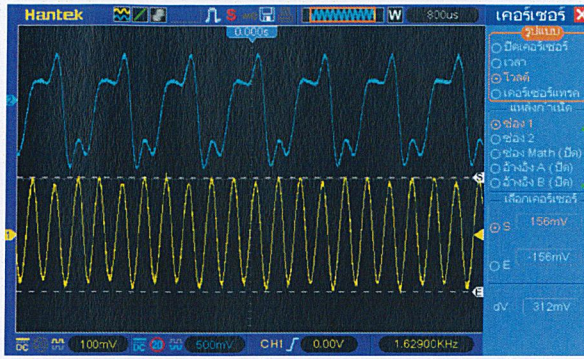


ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 543 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 543 Hz

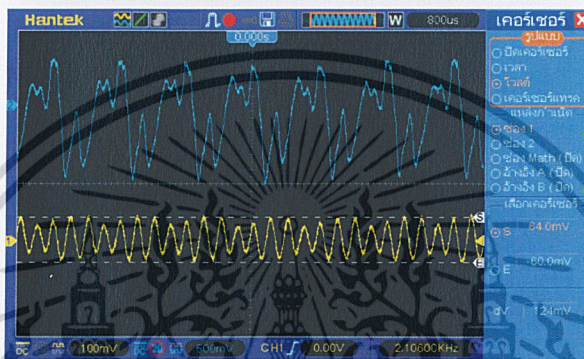


ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 543 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 1160 Hz

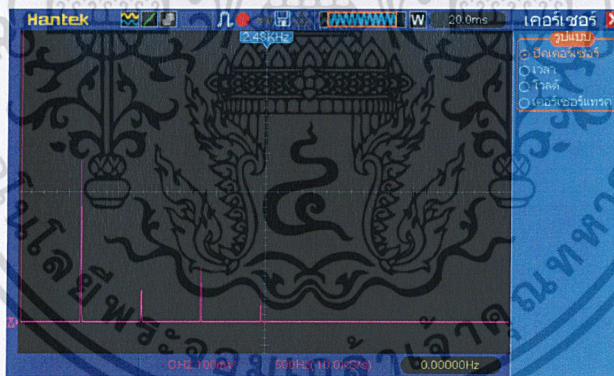
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 543 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 1630 Hz



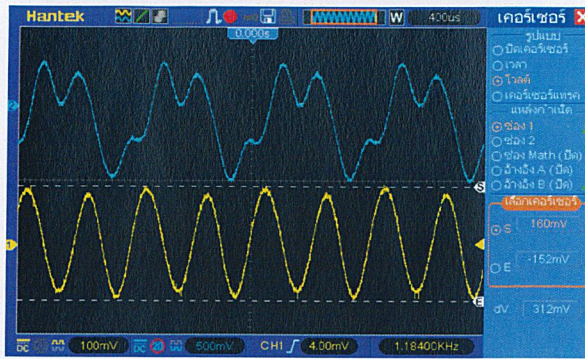
ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 543 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 2170 Hz



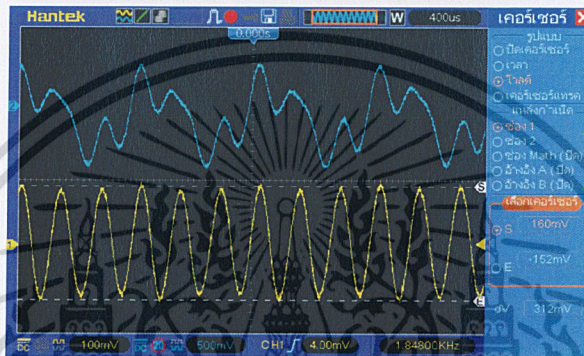
ภาพการวิเคราะห์ฟูเรียร์โดยใช้ฟังก์ชัน FFT จากเครื่อง Oscilloscope ที่ความถี่เสียง 610 Hz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารได้
ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 610 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 610Hz
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



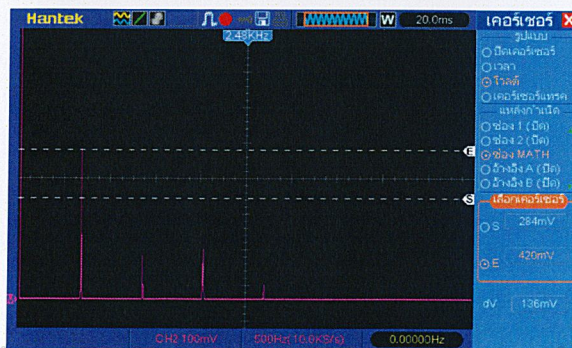
ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 610 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 1210 Hz



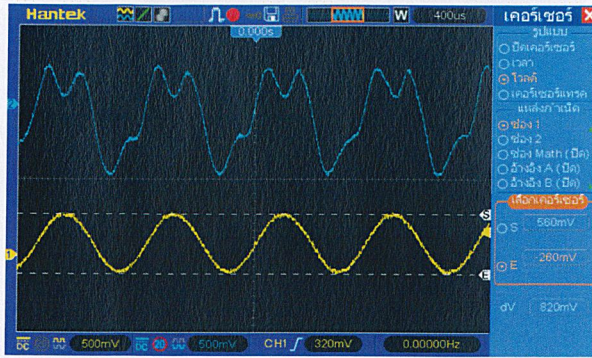
ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 610 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 1835 Hz



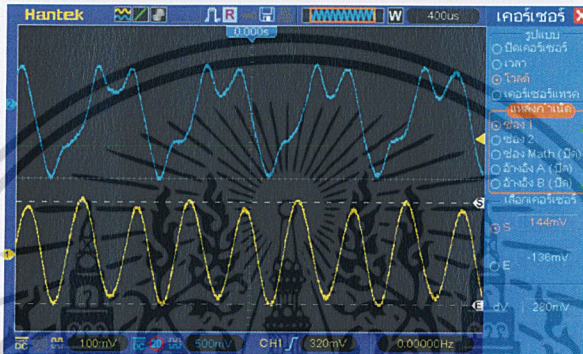
ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 610 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 2430 Hz



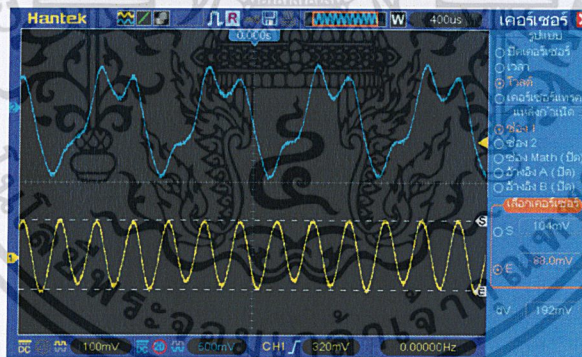
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในวงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ภาพการวิเคราะห์ฟูรีเยอร์โดยใช้ฟังก์ชัน FFT จากเครื่อง Oscilloscope ที่ความถี่เสียง 671 Hz ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 675 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 675



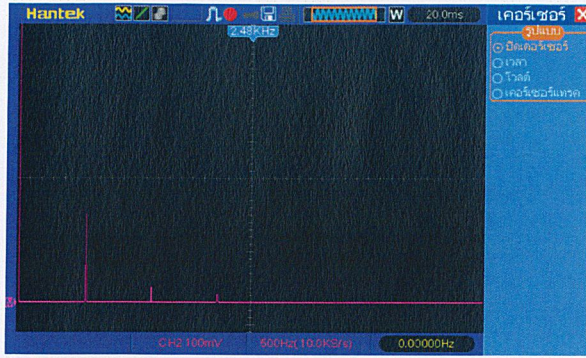
ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 675 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 1360 Hz



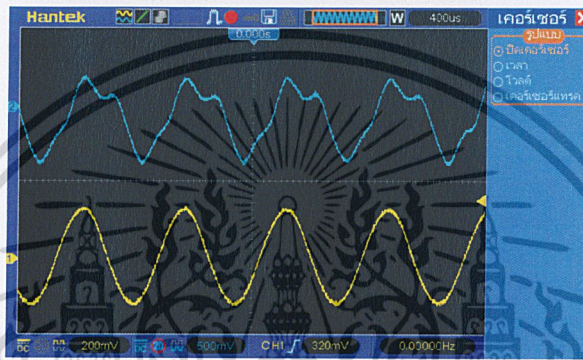
ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 675 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 2000 Hz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ภายใต้ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 675 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 2700 Hz
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



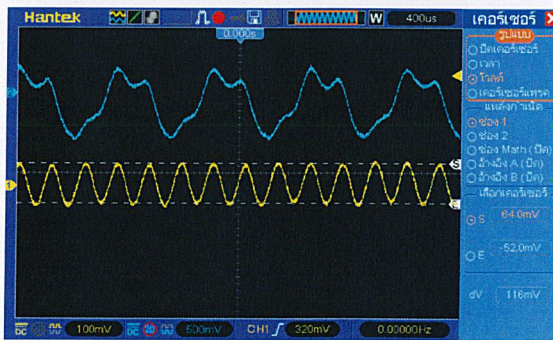
ภาพการวิเคราะห์ฟูเรียร์โดยใช้ฟังก์ชัน FFT จากเครื่อง Oscilloscope ที่ความถี่เสียง 711 Hz



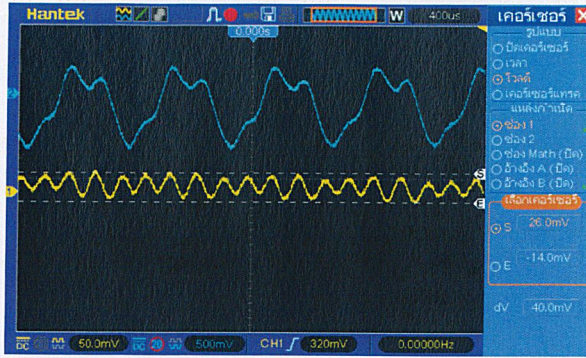
ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 710 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 710



ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 710 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 1400 Hz



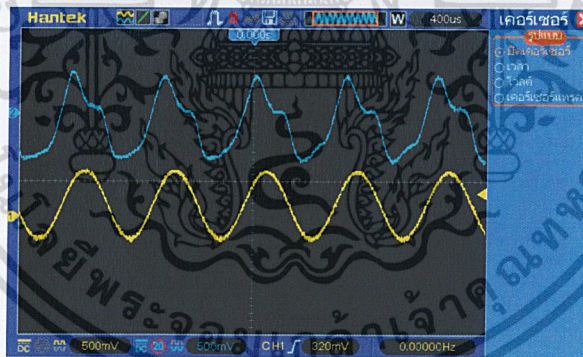
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แต่งขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ได้ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง



ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 710 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 2850 Hz



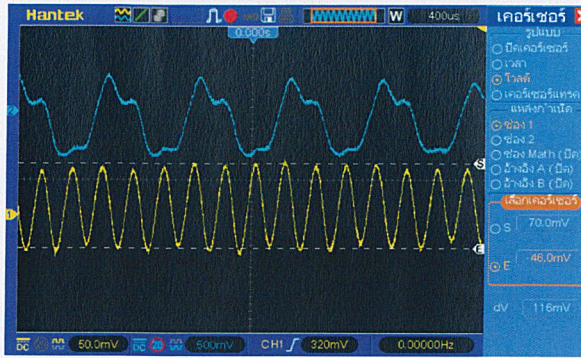
ภาพการวิเคราะห์ห้ฟูเรียร์โดยใช้ฟังก์ชัน FFT จากเครื่อง Oscilloscope ที่ความถี่เสียง 800 Hz



ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 800 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 800 Hz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 800 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 1600 Hz โปรดใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 800 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 2430 Hz



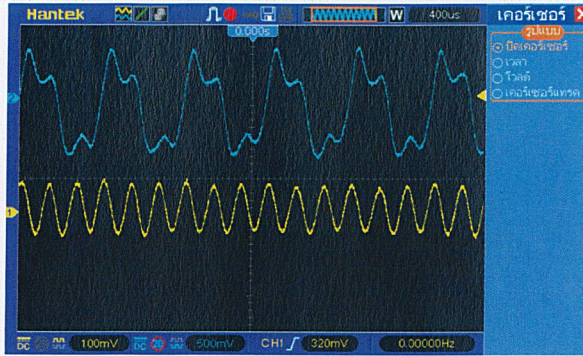
ภาพการวิเคราะห์ฟูเรียร์โดยใช้ฟังก์ชัน FFT จากเครื่อง Oscilloscope ที่ความถี่เสียง 879 Hz



ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 881 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 881 Hz



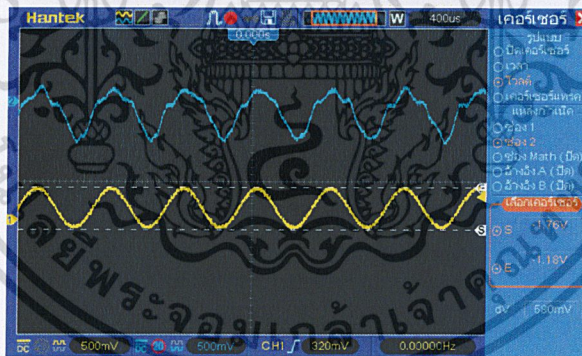
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ไปให้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



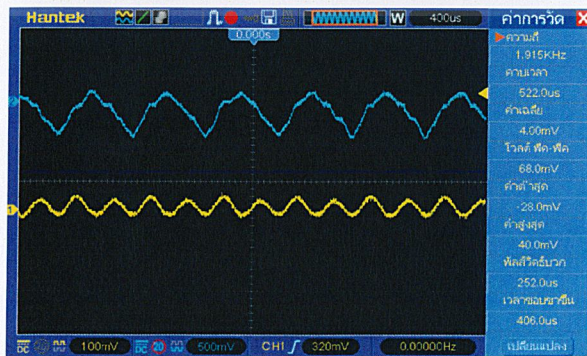
ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 881 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 2630 Hz



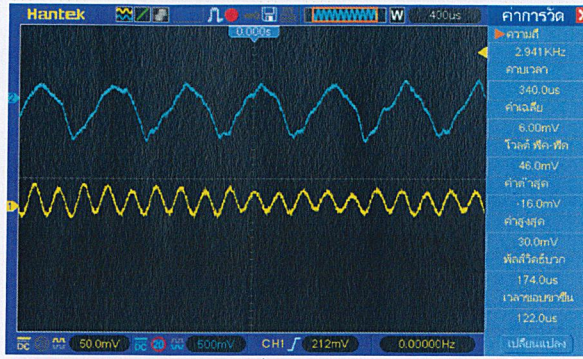
ภาพการวิเคราะห์ห้ฟูเรียร์โดยใช้ฟังก์ชัน FFT จากเครื่อง Oscilloscope ที่ความถี่เสียง 996 Hz



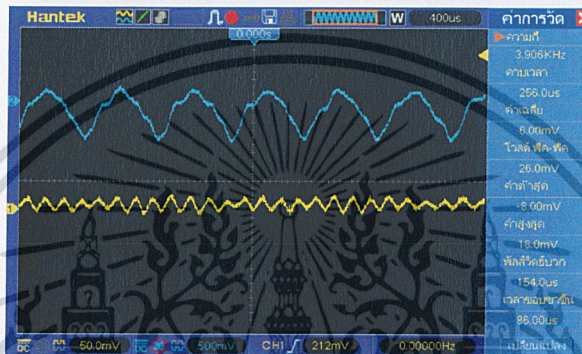
ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 984 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 984 Hz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเฉพาะกลุ่มเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 984 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 1915 Hz ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



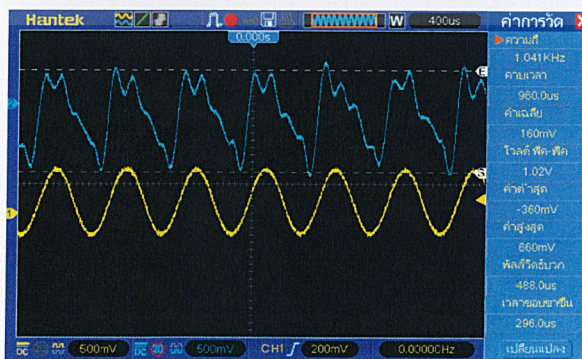
ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 984 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 2941 Hz



ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 984 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 3906 Hz

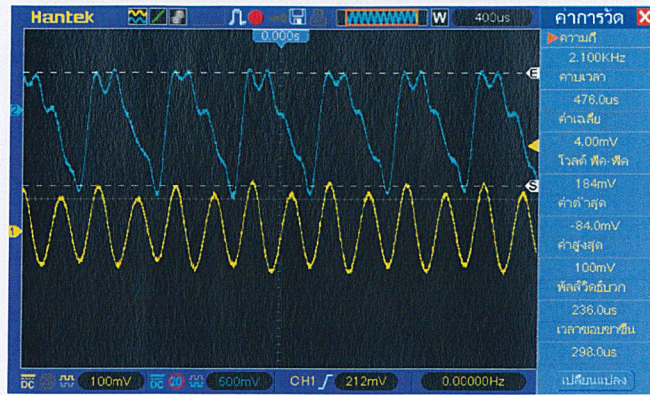


ภาพการวิเคราะห์ฟูเรียร์โดยใช้ฟังก์ชัน FFT จากเครื่อง Oscilloscope ที่ความถี่เสียง 1039 Hz



ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 1041 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 1041

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 1041 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 2100 Hz



ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 1041 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 3086 Hz



ภาพแสดงการกรองสัญญาณความถี่เสียง 1041 Hz ที่ความถี่คัตออฟ 4132 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF351 Wide Bandwidth JFET Input Operational Amplifier

General Description

The LF351 is a low cost high speed JFET input operational amplifier with an internally trimmed input offset voltage (BI-FET II™ technology). The device requires a low supply current and yet maintains a large gain bandwidth product and a fast slew rate. In addition, well matched high voltage JFET input devices provide very low input bias and offset currents. The LF351 is pin compatible with the standard LM741 and uses the same offset voltage adjustment circuitry. This feature allows designers to immediately upgrade the overall performance of existing LM741 designs.

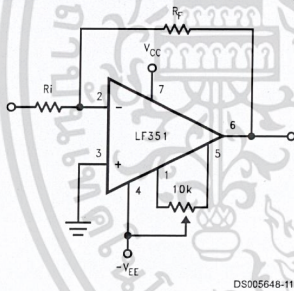
The LF351 may be used in applications such as high speed integrators, fast D/A converters, sample-and-hold circuits and many other circuits requiring low input offset voltage, low input bias current, high input impedance, high slew rate and wide bandwidth. The device has low noise and offset voltage drift, but for applications where these requirements

are critical, the LF356 is recommended. If maximum supply current is important, however, the LF351 is the better choice.

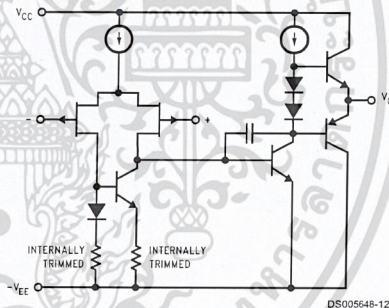
Features

- Internally trimmed offset voltage: 10 mV
- Low input bias current: 50 pA
- Low input noise voltage: $25 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Low input noise current: $0.01 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Wide gain bandwidth: 4 MHz
- High slew rate: $13 \text{ V}/\mu\text{s}$
- Low supply current: 1.8 mA
- High input impedance: $10^{12} \Omega$
- Low total harmonic distortion $A_V=10$: $<0.02\%$
 $R_L=10\text{k}, V_O=20 \text{ Vp-p}, \text{BW}=20 \text{ Hz}-20 \text{ kHz}$
- Low 1/f noise corner: 50 Hz
- Fast settling time to 0.01%: 2 μs

Typical Connection

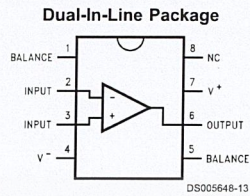


Simplified Schematic



BI-FET II™ is a trademark of National Semiconductor Corporation.

Connection Diagram



Order Number LF351M or LF351N
See NS Package Number M08A or N08E



Absolute Maximum Ratings (Note 1)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage	±18V
Power Dissipation (Notes 2, 7)	670 mW
Operating Temperature Range	0°C to +70°C
T _{j(MAX)}	115°C
Differential Input Voltage	±30V
Input Voltage Range (Note 3)	±15V
Output Short Circuit Duration	Continuous
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Lead Temp. (Soldering, 10 sec.)	
Metal Can	300°C
DIP	260°C

θ _{JA}		
N Package		120°C/W
M Package		TBD
Soldering Information		
Dual-In-Line Package		
Soldering (10 sec.)		260°C
Small Outline Package		
Vapor Phase (60 sec.)		215°C
Infrared (15 sec.)		220°C

See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.

ESD rating to be determined

DC Electrical Characteristics (Note 4)

Symbol	Parameter	Conditions	LF351			Units
			Min	Typ	Max	
V _{OS}	Input Offset Voltage	R _S = 10 kΩ, T _A = 25°C		5	10	mV
		Over Temperature			13	mV
ΔV _{OS} /ΔT	Average TC of Input Offset Voltage	R _S = 10 kΩ		10		μV/°C
I _{OS}	Input Offset Current	T _J = 25°C, (Notes 4, 5)		25	100	pA
		T _J ≤ 70°C			4	nA
I _B	Input Bias Current	T _J = 25°C, (Notes 4, 5)		50	200	pA
		T _J ≤ 70°C			8	nA
R _{IN}	Input Resistance	T _J = 25°C		10 ¹²		Ω
A _{VOL}	Large Signal Voltage Gain	V _S = ±15V, T _A = 25°C	25	100		V/mV
		V _O = ±10V, R _L = 2 kΩ Over Temperature	15			V/mV
V _O	Output Voltage Swing	V _S = ±15V, R _L = 10 kΩ	±12	±13.5		V
V _{CM}	Input Common-Mode Voltage Range	V _S = ±15V	±11	+15		V
				-12		V
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio	R _S ≤ 10 kΩ	70	100		dB
PSRR	Supply Voltage Rejection Ratio	(Note 6)	70	100		dB
I _S	Supply Current			1.8	3.4	mA

Note 1: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is functional, but do not guarantee specific performance limits.

Note 2: For operating at elevated temperature, the device must be derated based on the thermal resistance, θ_{JA}.

Note 3: Unless otherwise specified the absolute maximum negative input voltage is equal to the negative power supply voltage.

Note 4: These specifications apply for V_S = ±15V and 0°C ≤ T_A ≤ 70°C. V_{OS}, I_B and I_{OS} are measured at V_{CM} = 0.

Note 5: The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every 10°C increase in the junction temperature, T_J. Due to the limited production test time, the input bias currents measured are correlated to junction temperature. In normal operation the junction temperature rises above the ambient temperature as a result of internal power dissipation, P_D. T_J = T_A + θ_{JA} P_D where θ_{JA} is the thermal resistance from junction to ambient. Use of a heat sink is recommended if input bias current is to be kept to a minimum.

Note 6: Supply voltage rejection ratio is measured for both supply magnitudes increasing or decreasing simultaneously in accordance with common practice. From ±15V to ±5V.

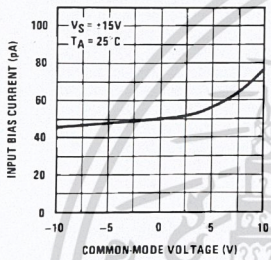
Note 7: Max. Power Dissipation is defined by the package characteristics. Operating the part near the Max. Power Dissipation may cause the part to operate outside guaranteed limits.

AC Electrical Characteristics (Note 4)

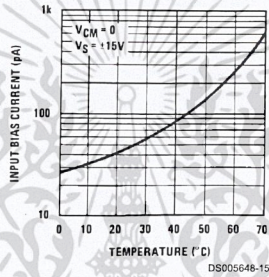
Symbol	Parameter	Conditions	LF351			Units
			Min	Typ	Max	
SR	Slew Rate	$V_S = \pm 15V, T_A = 25^\circ C$		13		V/ μs
GBW	Gain Bandwidth Product	$V_S = \pm 15V, T_A = 25^\circ C$		4		MHz
e_n	Equivalent Input Noise Voltage	$T_A = 25^\circ C, R_S = 100\Omega, f = 1000 \text{ Hz}$		25		nV/ \sqrt{Hz}
i_n	Equivalent Input Noise Current	$T_J = 25^\circ C, f = 1000 \text{ Hz}$		0.01		pA/ \sqrt{Hz}

Typical Performance Characteristics

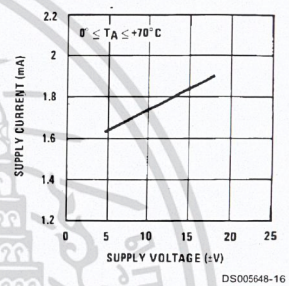
Input Bias Current



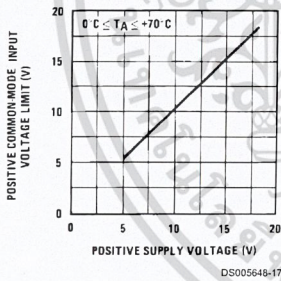
Input Bias Current



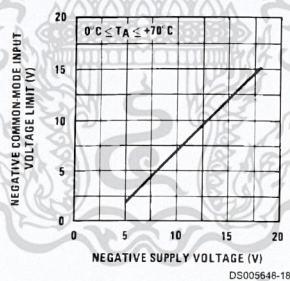
Supply Current



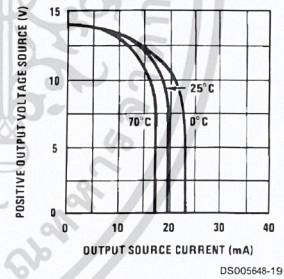
Positive Common-Mode Input Voltage Limit



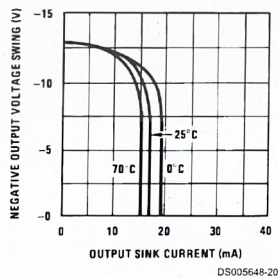
Negative Common-Mode Input Voltage Limit



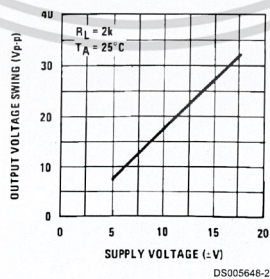
Positive Current Limit



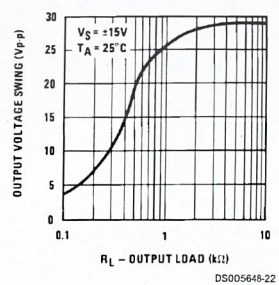
Negative Current Limit



Voltage Swing

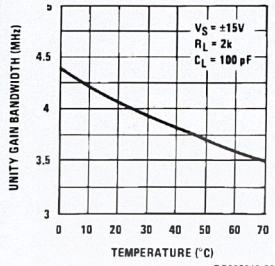


Output Voltage Swing

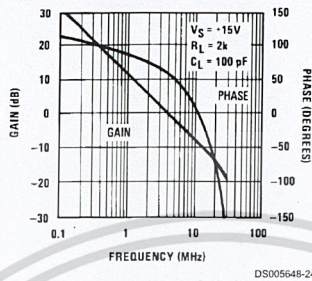


Typical Performance Characteristics (Continued)

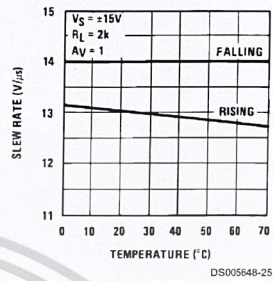
Gain Bandwidth



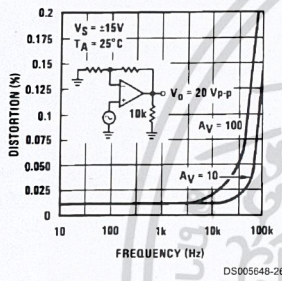
Bode Plot



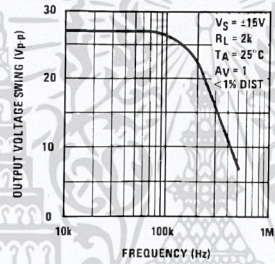
Slew Rate



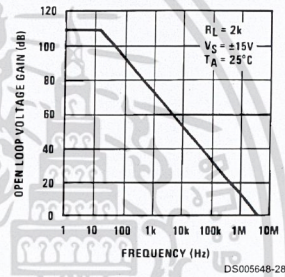
Distortion vs Frequency



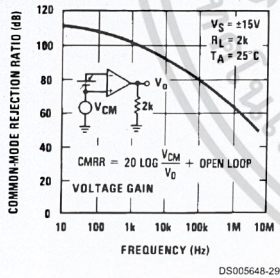
Undistorted Output Voltage Swing



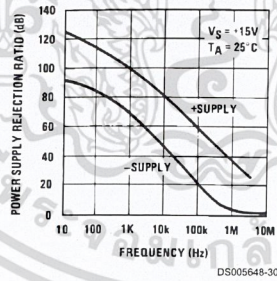
Open Loop Frequency Response



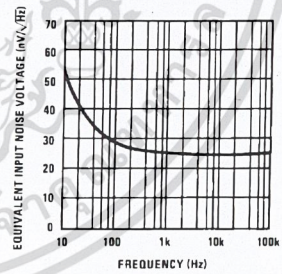
Common-Mode Rejection Ratio



Power Supply Rejection Ratio

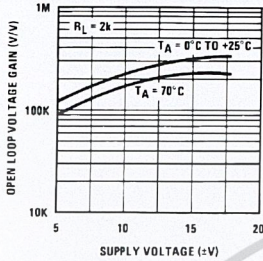


Equivalent Input Noise Voltage

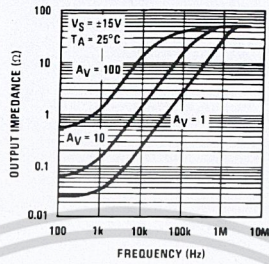


Typical Performance Characteristics (Continued)

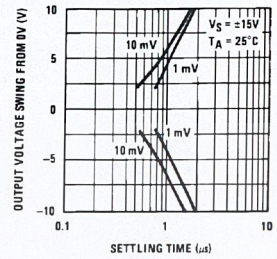
Open Loop Voltage Gain (V/V)



Output Impedance

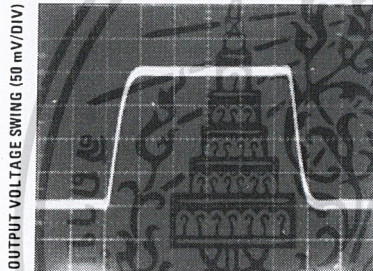


Inverter Settling Time

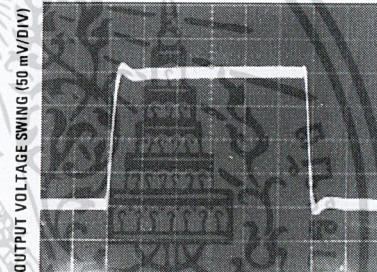


Pulse Response

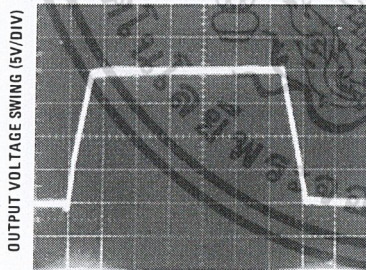
Small Signal Inverting



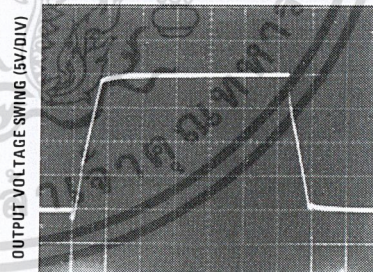
Small Signal Non-Inverting



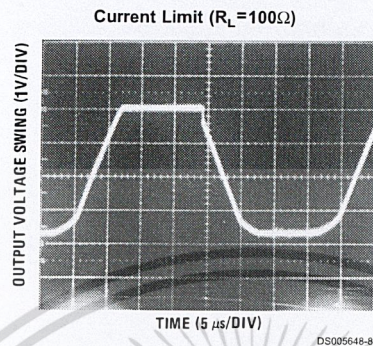
Large Signal Inverting



Large Signal Non-Inverting



Pulse Response (Continued)



Application Hints

The LF351 is an op amp with an internally trimmed input offset voltage and JFET input devices (BI-FET II™). These JFETs have large reverse breakdown voltages from gate to source and drain eliminating the need for clamps across the inputs. Therefore, large differential input voltages can easily be accommodated without a large increase in input current. The maximum differential input voltage is independent of the supply voltages. However, neither of the input voltages should be allowed to exceed the negative supply as this will cause large currents to flow which can result in a destroyed unit.

Exceeding the negative common-mode limit on either input will force the output to a high state, potentially causing a reversal of phase to the output.

Exceeding the negative common-mode limit on both inputs will force the amplifier output to a high state. In neither case does a latch occur since raising the input back within the common-mode range again puts the input stage and thus the amplifier in a normal operating mode.

Exceeding the positive common-mode limit on a single input will not change the phase of the output; however, if both inputs exceed the limit, the output of the amplifier will be forced to a high state.

The amplifier will operate with a common-mode input voltage equal to the positive supply; however, the gain bandwidth and slew rate may be decreased in this condition. When the negative common-mode voltage swings to within 3V of the negative supply, an increase in input offset voltage may occur.

The LF351 is biased by a zener reference which allows normal circuit operation on $\pm 4V$ power supplies. Supply voltages less than these may result in lower gain bandwidth and slew rate.

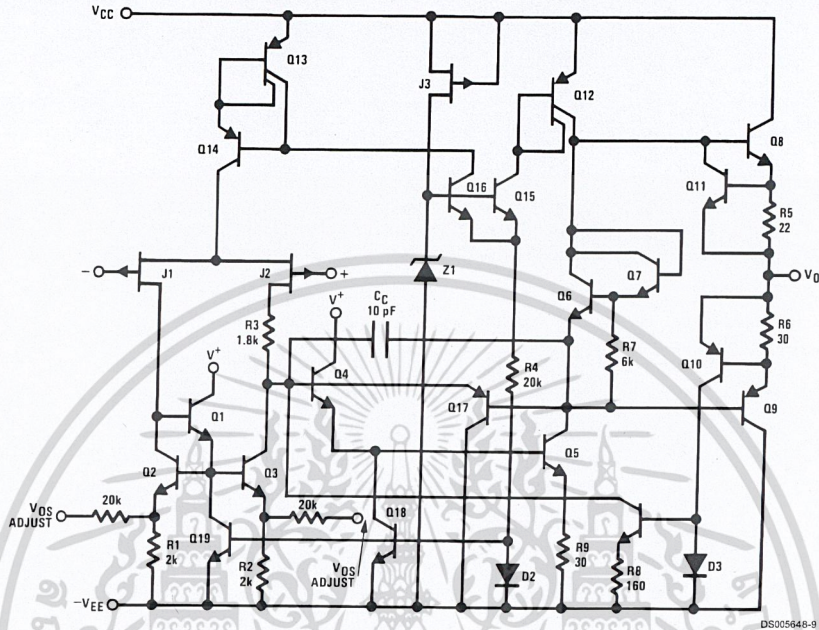
The LF351 will drive a 2 k Ω load resistance to $\pm 10V$ over the full temperature range of 0°C to +70°C. If the amplifier is forced to drive heavier load currents, however, an increase in input offset voltage may occur on the negative voltage swing and finally reach an active current limit on both positive and negative swings.

Precautions should be taken to ensure that the power supply for the integrated circuit never becomes reversed in polarity or that the unit is not inadvertently installed backwards in a socket as an unlimited current surge through the resulting forward diode within the IC could cause fusing of the internal conductors and result in a destroyed unit.

As with most amplifiers, care should be taken with lead dress, component placement and supply decoupling in order to ensure stability. For example, resistors from the output to an input should be placed with the body close to the input to minimize "pick-up" and maximize the frequency of the feedback pole by minimizing the capacitance from the input to ground.

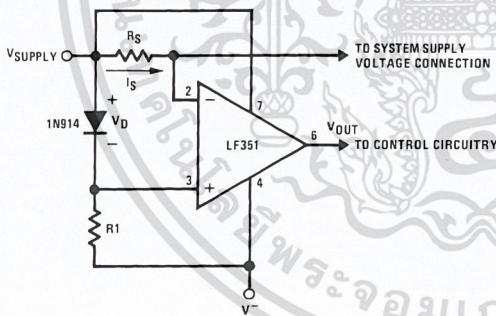
A feedback pole is created when the feedback around any amplifier is resistive. The parallel resistance and capacitance from the input of the device (usually the inverting input) to AC ground set the frequency of the pole. In many instances the frequency of this pole is much greater than the expected 3 dB frequency of the closed loop gain and consequently there is negligible effect on stability margin. However, if the feedback pole is less than approximately 6 times the expected 3 dB frequency a lead capacitor should be placed from the output to the input of the op amp. The value of the added capacitor should be such that the RC time constant of this capacitor and the resistance it parallels is greater than or equal to the original feedback pole time constant.

Detailed Schematic



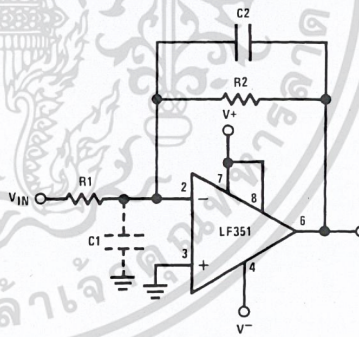
Typical Applications

Supply Current Indicator/Limiter



• V_{OUT} switches high when $R_S I_S > V_D$

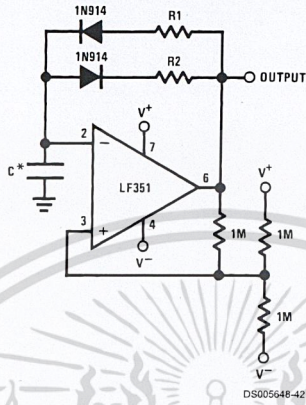
Hi- Z_{IN} Inverting Amplifier



Parasitic input capacitance $C1 \approx (3 \text{ pF for LF351 plus any additional layout capacitance})$ interacts with feedback elements and creates undesirable high frequency pole. To compensate, add $C2$ such that: $R2C2 \approx R1C1$.

Typical Applications (Continued)

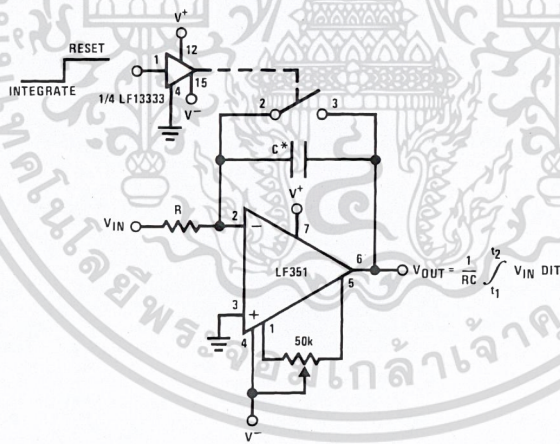
Ultra-Low (or High) Duty Cycle Pulse Generator



- $I_{\text{OUTPUT HIGH}} \approx R1C \ln \frac{4.8 - 2V_S}{4.8 - V_S}$
- $I_{\text{OUTPUT LOW}} \approx R2C \ln \frac{2V_S - 7.8}{V_S - 7.8}$

where $V_S = V^+ + |V^-|$
 *low leakage capacitor

Long Time Integrator



- *Low leakage capacitor
- 50k pot used for less sensitive V_{OS} adjust

Book
Extract
End